

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**SICAK PRESLEMELİ SİNERLEME YÖNTEMİ
KULLANILARAK CU-TİB2 KOMPOZİT İLE KAPLANMIŞ
ELEKTRİK KONTAK MALZEMESİNİN YÜZEY
ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

Faruk Velat ADAK

Yüksek Lisans Tezi

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Makina Mühendisliği Teknolojileri Programı

Konstrüksiyon ve İmalat Bilim Dalı

KASIM 2022

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı
Makina Mühendisliği Teknolojileri Programı

Yüksek Lisans Tezi

**SICAK PRESLEMELİ SİNERLEME YÖNTEMİ KULLANILARAK
CU-TİB2 KOMPOZİT İLE KAPLANMIŞ ELEKTRİK KONTAK
MALZEMESİNİN YÜZEY ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

Tez Yazarı
Faruk Velat ADAK

Danışman
Prof. Dr. Çetin ÖZAY

KASIM 2022
ELAZIĞ

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı
Makina Mühendisliği Teknolojileri Programı

Yüksek Lisans Tezi

Başlığı:	Sıcak Preslemeli Sinterleme Yöntemi Kullanılarak Cu-TiB ₂ Kompozit ile Kaplanmış Elektrik Kontak Malzemesinin Yüzey Özelliklerinin Araştırılması
Yazarı:	Faruk Velat ADAK
İlk Teslim Tarihi:	25.10.2022
Savunma Tarihi:	25.11.2022

TEZ ONAYI

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına göre hazırlanan bu tez aşağıda imzaları bulunan jüri üyeleri tarafından değerlendirilmiş ve akademik dinleyicilere açık yapılan savunma sonucunda OYBİRLİĞİ ile kabul edilmiştir.

Danışman:	Prof. Dr. Çetin ÖZAY Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi	<i>İmza</i> Onayladım
Başkan:	Prof. Dr. Ali Kaya GÜR Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi	Onayladım
Üye:	Dr. Öğr. Üyesi Hasan BALLIKAYA İnönü Üniversitesi OSB MYO	Onayladım

Bu tez, Enstitü Yönetim Kurulunun/...../20..... tarihli toplantısında tescillenmiştir.

İmza

Prof. Dr. Burhan ERGEN
Enstitü Müdürü

BEYAN

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım “Sıcak Preslemeli Sinterleme Yöntemi Kullanılarak Cu-TiB₂ Kompozit ile Kaplanmış Elektrik Kontak Malzemesinin Yüzey Özelliklerinin Araştırılması” Başlıklı Yüksek Lisans Tezimin içindeki bütün bilgilerin doğru olduğunu, bilgilerin üretilmesi ve sunulmasında bilimsel etik kurallarına uygun davrandığımı, kullandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi, maddi ve manevi desteği olan tüm kurum/kuruluş ve kişileri belirttiğimi, burada sunduğum veri ve bilgileri unvan almak amacıyla daha önce hiçbir şekilde kullanmadığımı beyan ederim.

25.11.2022

Faruk Velat ADAK



ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimi süresince şahsıma göstermiş olduğu her türlü ilgi ve destekten ötürü değerli tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Çetin ÖZAY' a, Tez çalışmalarım süresince tecrübelerinden ve bilgilerinden faydalandığım, beni kendi öğrencilerinden ayırmayan kıymetli hocalarım Sayın Prof. Dr. Ali Kaya GÜR' e, Doç. Dr. Soner BUYTOZ' a, Dr. Öğr. Üyesi Hasan BALLIKAYA' a ve maddi ve manevi desteğini hiçbir zaman eksik etmeyip yanımda olan aileme gönülden teşekkür ederim.

Bu tez çalışması, Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (FÜBAP) tarafından **TEKF.21.13** protokol numaralı proje ile desteklenmiştir.

Faruk Velat ADAK

ELAZIĞ, 2022



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	iv
İÇİNDEKİLER	v
ÖZET	vii
ABSTRACT	viii
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
TABLolar LİSTESİ	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR	xii
1. GİRİŞ	1
2. KOMPOZİT MALZEMELER.....	3
2.1. Matris Malzemesine Göre Kompozit Malzemeler.....	3
2.1.1. Metal Matrisli Kompozit Malzemeler	4
2.1.2. Polimer Matrisli Kompozit Malzemeler	4
2.1.3. Seramik Matrisli Kompozit Malzemeler	5
2.2. Takviye Fazının Türüne Göre Kompozitler.....	5
2.2.1. Parçacık Takviyeli Kompozitler.....	5
2.2.2. Fiber Takviyeli Kompozitler	6
2.2.3. Tabakalı Kompozitler.....	7
3. ELEKTRİK KONTAK MALZEMELERİ	8
3.1. Elektrik Kontak Malzemelerinin Özellikleri	9
3.1.1. Bakır	9
3.1.2. Alüminyum	11
3.2. Elektrik Kontaklar İçin Kaplama.....	12
3.3. Kompozit Kontak Malzemeler	12
4. TOZ METALURJİSİ	14
4.1. Toz Metalurjisinin Endüstrideki Yeri	14
4.1.1. Türkiye’de Toz Metalürjisi	15
4.2. Metal Tozlarının Üretimi.....	16
4.3. Tozların Karıştırılması.....	16
4.4. Tozların Preslenmesi	17
4.4.1. Tek Yönlü Presleme	17
4.4.2. Çift Yönlü Presleme	18
4.5. Sinterleme.....	19
4.5.1. Katı Hal Sinterleme.....	20
4.5.2. Sıvı Hal Sinterleme	21
4.6. Sıcak Presleme.....	22
4.7. Toz Metalurjisinin Yaygın Kullanım Alanları ve Örnekleri.....	23
4.7.1. Talaşlı İmalat Gerektirmeyen Makine Parçaları.....	24
4.7.2. Elektrik Kontakları	25
4.7.3. Mekanik Filtreler.....	25
4.7.4. Debriyaj ve Fren Balataları	26
4.8. Toz Metalurjisi Yöntemi ile Üretilen Parçaların Analizi.....	26
4.8.1. TM Parçalarının Mekanik Özellikleri	26

4.8.2. TM Parçalarının Sertlik Özellikleri	27
4.8.3. TM Parçalarının Mikroyapısal Özellikleri	27
4.8.4. Yüzey ile İlgili Özellikler.....	27
5. YÜZEY KAPLAMA YÖNTEMLERİ	28
5.1. Kimyasal Buhar Biriktirme (CVD)	29
5.1.1. Direkt Buharlaştırma Tekniği.....	30
5.1.2. Reaktif Buharlaştırma Tekniği	30
5.1.3. Aktive Edilmiş Reaktif Buharlaştırma Tekniği	31
5.2. Sıçratma Yöntemi	31
5.2.1. Planar Diode Sıçratma Tekniği	32
5.2.2. Triyot Sıçratma Tekniği	33
5.2.3. Manyetik Sıçratma Tekniği	34
5.2.4. Reaktif Sıçratma Tekniği.....	35
5.3. Sıcak Preslemeli Sinterleme Yöntemi ile Kaplamada Uygulama Esasları	35
6. MATERYAL VE METOT	37
7. BULGULAR VE TARTIŞMA	40
7.1. Cu Alt Tabakanın Kaplanması Toz Karışımında TiB_2 'nin Etkisi	40
7.1.1. XRD Analizi.....	40
7.1.2. Mikro Yapı	41
7.1.3. Makro Sertlik ve Aşınma Direnci	45
7.2. Cu Alt Tabakanın Kaplanması Sinterleme Sıcaklığının Etkisi	52
7.2.1. XRD Analizi.....	52
7.2.2. Mikro Yapı.....	53
7.2.3. Makro Sertlik ve Aşınma Direnci	56
8. SONUÇLAR.....	62
KAYNAKLAR	63
ÖZGEÇMİŞ	

ÖZET

Sıcak Preslemeli Sinterleme Yöntemi Kullanılarak Cu-TiB₂ Kompozit ile Kaplanmış Elektrik Kontak Malzemesinin Yüzey Özelliklerinin Araştırılması

Faruk Velat ADAK

Yüksek Lisans Tezi

FIRAT ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı
Makina Mühendisliği Teknolojileri Programı
Kasım 2022, Sayfa: xiii + 67

Bu çalışmada Cu alt tabaka malzemesi sıcak preslemeli sinterleme yöntemi kullanılarak Cu-TiB₂ tozlarıyla kaplanmıştır. Uygulanan kaplama yönteminde kaplama tabakasını oluşturan kompozit malzemelerin takviye oranı ve sinterleme sıcaklığının etkilerine bağlı olarak mekanik ve mikroyapı özellikleri araştırılmıştır. Kaplama işleminde Cu matris tozları içerisine hacimsel olarak %0, %5, %12,5, %20 ve %25 oranlarında TiB₂ tozu ilave edilerek 3D mekanik karıştırıcı ile karıştırılmıştır. Karıştırma işleminde karıştırma hızı 350 rpm, karıştırma süresi 25 dakika ve bilye/toz oranı 15:1 olarak belirlenmiştir. Farklı oranlarda karıştırılan tozlar Ar (argon) gazı atmosferinde çelik bir kalıp içerisinde 900, 950 ve 1050 °C ‘ de sinterleme işlemine tabi tutulmuştur. Sinterleme sonrası üretilen numuneler Ar atmosferinde 110 MPa basınç altında tek yönlü olarak sıkıştırılmıştır. Üretim parametrelerinin numunelerin fiziksel ve mekanik özellikler üzerine etkilerini belirlemek amacıyla kaplama tabakası ve enine kesit mikroyapısı OM ve SEM görüntüleri, XRD ve EDS analizleri alınmıştır. Ayrıca, kaplama tabakası makro sertlik ve lineer ileri geri aşınma testlerine tabi tutulmuştur.

Elde edilen sonuçlara göre Cu altlık malzemesi sıcak preslemeli sinterleme yöntemi ile kaplandığında, Cu ve TiB₂ tozlarının homojen bir şekilde karıştığı, OM ve SEM görüntülerinde iyi bir bağ oluşturduğu görülmüştür. Cu-TiB₂ kaplama tabakasında TiB₂ hacim oranı arttıkça kaplama yüzeyinin makro sertliğinin arttığı ve aşınma kaybının azaldığı tespit edilmiştir. Kaplama işleminde kullanılan sinterleme sıcaklığının artmasıyla, numunelerin mikro yapılarında tozlar arasındaki boşlukların azaldığı ve küçüldüğü, bunun da makro sertlikte bir artışa ve aşınma kütle kaybında bir azalmaya yol açtığı tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Toz Metalürjisi, Sıcak Preslemeli Sinterleme, Yüzey Kaplama, Aşınma

ABSTRACT

Investigation of Surface Properties of Electrical Contact Material Coated with Cu-TiB₂ Composite by Using Hot Pressed Sintering Method

Faruk Velat ADAK

Master's Thesis

FIRAT UNIVERSITY

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Mechanical Engineering Technologies

November 2022, Pages: xiii + 67

In this study, Cu substrate material was coated with Cu-TiB₂ powders using hot pressing sintering method. In the applied coating method, the mechanical and microstructural properties of the composite materials forming the coating layer were investigated depending on the effects of reinforcement ratio and sintering temperature. In the coating process, 0%, 5%, 12.5%, 20% and 25% TiB₂ powder by volume was added into the Cu matrix powders and mixed with a 3D mechanical mixer. In the mixing process, the mixing speed was determined as 350 rpm, the mixing time was 25 minutes and the ball/powder ratio was determined as 15:1. The powders mixed at different ratios were subjected to sintering process at 900 °C, 950 °C and 1050 °C in a steel mold in an argon gas atmosphere. The samples produced after sintering were compressed unidirectionally under 110 MPa pressure in an argon atmosphere. In order to determine the effects of production parameters on the physical and mechanical properties of the samples, OM and SEM images of the coating layer and cross-section microstructure, XRD and EDS analyzes were taken. In addition, the coating layer was subjected to macrohardness and linear back and forth wear tests.

According to the results obtained, when the Cu substrate material was coated with the hot pressing sintering method, it was observed that the Cu and TiB₂ powders mixed homogeneously and formed a good bond in the OM and SEM images. It was determined that the macrohardness of the coating surface increased and the wear loss decreased as the TiB₂ volume ratio increased in the Cu-TiB₂ coating layer. It was determined that with the increase of the sintering temperature used in the coating process, the spaces between the powders in the microstructure of the samples decreased and became smaller, resulting in an increase in macrohardness and a decrease in wear mass loss.

Keywords: Powder Metallurgy, Hot press Sintering, Surface Coating, Wear

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1. Kompozit malzemelerin takviye malzemesine göre sınıflandırılması.....	3
Şekil 2.2. Metal matrisli kompozit üretiminde endüstriyel firmalar tarafından kullanılan takviye	4
Şekil 2.3. Takviye fazının türüne göre kompozit malzemeler	5
Şekil 2.4. Parçacık takviyeli kompozitin bünyesinde oluşan ara yüzey ve ara fazlar.....	6
Şekil 2.5. Fiber takviyeli kompozit	6
Şekil 2.6. Tabakalı kompozit malzeme	7
Şekil 3.1. Elektrik kontak parçaları	9
Şekil 3.2. Bakırın kullanım alanları ve oranları.....	10
Şekil 3.3. Kompozit kontak malzemesi	13
Şekil 4.1. Toz metalurjisi aşamaları	14
Şekil 4.2. T/M ile üretilen malzemelerin pazar payı.....	15
Şekil 4.3. Bir araba içindeki TM parçaların dağılımı	16
Şekil 4.4. Tek hareketli presleme kalıbı	18
Şekil 4.5. Tek yönlü preslemede yoğunluk dağılımı	18
Şekil 4.6. Çift yönlü presleme kalıbı	19
Şekil 4.7. Katı hal sinterlemesinin üç adımı	20
Şekil 4.8. Sinterleme esnasında noktasal bağ oluşumu, boyun, gözenek ve tane sınırlarının gösterimi.....	21
Şekil 4.9. Sıvı faz sinterlemesinin aşamalarının gösterimi	22
Şekil 4.10. Sıcak kalıp presleme.....	23
Şekil 4.11. Toz metalurjisi ile üretilmiş bazı parçalar	24
Şekil 4.12. T/M ile üretilmiş kapı pencere kilit parçaları	24
Şekil 4.13. Elektrik kontakları	25
Şekil 4.14. Gözenekli metaller ve filtreler.....	25
Şekil 4.15. Fren balatası	26
Şekil 5.1. Buhar biriktirme teknikleri.....	29
Şekil 5.2. Kimyasal buhar biriktirme mekanizması.....	30
Şekil 5.3. Doğrudan buhar biriktirme sisteminin basit tasarımı	30
Şekil 5.4. Aktive edilmiş reaktif buharlaştırma tekniği	31
Şekil 5.5. Sıçratma yönteminin şematik gösterimi	32
Şekil 5.6. Sıçratma mekanizması.....	32
Şekil 5.7. Planar diode sıçratma tekniği	33

Şekil 5.8. Triyot sıçratma sistemi	34
Şekil 5.9. Manyetik sıçratma işlemi	35
Şekil 6.1. Kaplama işlemi akış diyagramı	38
Şekil 6.2. Kaplama işlemi.....	39
Şekil 7.1. N1 ve N3 nolu numunelerin XRD spektrogramları.....	40
Şekil 7.2. TiB ₂ oranının etkisi için üretilen N1 N2 N3 ve N4 numunelerinin optik mikro yapı görüntüleri	41
Şekil 7.3. TiB ₂ oranının etkisi için üretilen N5 numunesinin optik mikro yapı görüntüsü	42
Şekil 7.4. N1 N2 N3 ve N4 Numunelerinin enine kesit yüzey mikroyapı SEM görüntüleri	43
Şekil 7.5. N5 Numunesinin enine kesit yüzey mikroyapı SEM görüntüsü.....	44
Şekil 7.6. N1 numunesinin enine kesit yüzey mikroyapı SEM görüntüsü ve EDS analizleri	44
Şekil 7.7. N4 numunesinin enine kesit yüzey mikroyapı SEM görüntüsü ve EDS analizleri	45
Şekil 7.8. TiB ₂ hacim oranına göre makro sertlik ve aşınma kütle kayıpları.....	46
Şekil 7.9. N1 N2 Numunelerin TiB ₂ hacim oranına göre aşınma sonrası SEM görüntüleri ve EDS analizleri	47
Şekil 7.10. N3 ve N4 Numunelerinin TiB ₂ hacim oranına göre aşınma Sonrası SEM görüntüleri ve EDS analizleri	48
Şekil 7.11. N5 Numunesinin TiB ₂ hacim oranına göre aşınma Sonrası SEM görüntüsü ve EDS analizi	49
Şekil 7.12. N1 Numunesinin aşınmasında oluşan sürtünme katsayıları	50
Şekil 7.13. N2 Numunesinin aşınmasında oluşan sürtünme katsayıları	50
Şekil 7.14. N3 Numunesinin aşınmasında oluşan sürtünme katsayıları	51
Şekil 7.15. N4 Numunesinin aşınmasında oluşan sürtünme katsayıları	51
Şekil 7.16. N5 Numunesinin aşınmasında oluşan sürtünme katsayıları	52
Şekil 7.17. N1 N2 ve N3 Nolu numunelerin XRD spektrogramları	53
Şekil 7.18. Sinterleme sıcaklığının etkisi için üretilen numunelerinin optik mikro yapı görüntüleri	54
Şekil 7.19. Numunelerinin enine kesit yüzey mikro yapı SEM görüntüleri	55
Şekil 7.20. N1 kaplama yüzeyi mikro yapı SEM görüntüleri ve EDS analizleri.....	56
Şekil 7.21. N3 kaplama yüzeyi mikro yapı SEM görüntüleri ve EDS analizleri.....	56
Şekil 7.22. Sinterleme sıcaklığının makro sertlik ve aşınmada kütle kayıpları üzerindeki etkisi.....	57
Şekil 7.23. N1 ve N2 numunelerin sinterleme sıcaklığına göre aşınma sonrası SEM görüntüleri ve EDS analizleri	58
Şekil 7.24. N3 numunesinin sinterleme sıcaklığına göre aşınma sonrası SEM görüntüleri ve EDS analizleri	59
Şekil 7.25. N1 numunesinin aşınmasında oluşan sürtünme katsayıları	60
Şekil 7.26. N2 numunesinin aşınmasında oluşan sürtünme katsayıları	60
Şekil 7.27. N3 numunesinin aşınmasında oluşan sürtünme katsayıları	61

TABLÖLAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 6.1. Cu altlık malzemesinin TiB_2 ile kaplanma işlemi parametreleri.....	38



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

Al	: Alüminyum
SiC	: Silisyum Karbür
Al ₂ O ₃	: Alüminyum Oksit
TiC	: Titanyum Karbür
Mg	: Magnezyum
Ti	: Titanyum
Ni	: Nikel
Ag	: Gümüş
Co	: Kobalt
W	: Wolfram
HCl	: Hidroklorik Asit
Cu	: Bakır
TiB ₂	: Titanyum Diborür
FeCl ₃	: Demir-3 Klorür

Kısaltmalar

SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
EDS	: Enerji Dispersiv Spektrum
TM	: Toz Metalürjisi
PVD	: Fiziksel Buhar Biriktirme
CVD	: Kimyasal Buhar Biriktirme
HSS	: Yüksek Hız Çeliği
BMS	: Brinell Sertlik Ölçüm Cihazı
CMS	: Anton Paar Instrument Tribometer
ASTM	: Amerika Test ve Malzeme Standartları
XRD	: X-Işını Kırınım Yöntemi
OM	: Optik Mikroskop
HRH	: Makro Sertlik

1. GİRİŞ

Bakır ve bakır alaşımları, üretim ve tüketim açısından demir/çelik ve alüminyumdan sonra en büyük üçüncü geleneksel metal grubudur. Tarih boyunca insanlar bakırın çeşitli özelliklerinden yararlanmışlardır. Bu özellikler; [1] kolay şekillendirilebilirlik, orta mukavemet, dekoratif renkler, korozyona dayanıklılık, yüksek ısı iletkenliği ve yüksek elektrik iletkenliğidir. Saf bakırın yüksek elektriksel ve termal iletkenliği olmasına rağmen, çekme mukavemeti, akış ve sertlik gibi mekanik özellikleri zayıftır. Bu bakımdan yüksek mukavemetli ve sert bakır malzemeler elde etmek çok önemlidir. Malzemelerin kullanım ömürlerinin ve yüzeylerinin iyileştirilmesi amacı ile farklı ısıl işlemler ve yüzey kaplama yöntemleri uygulanmaktadır. Bu işlemlerin asıl amacı; malzemelerin kullanım amaçları doğrultusunda mekanik, kimyasal ve tribolojik özelliklerini iyileştirmektir. Gerekli yüzey kalitesinin elde edilmemesi halinde malzemenin kullanım ömrü kısalmakta ve pek çok malzeme yok yere sarf edilmektedir. Özellikle bu kayıplar birbiri ile sürtünmeli halde çalışan makina elemanlarının aşınma ve bunun neticesi olarak da hasara uğramasıyla inanılmaz büyüklükte mali kayıplar ortaya çıkmaktadır. Bakırın düşük mekanik özellikler sergilemesi neticesinde bu özellikleri iyileştirme ihtiyacı oluşturmuştur. Bakırın mekanik özelliklerini ve aşınma direncini iyileştirmede genellikle iki yöntem kullanılmaktadır. Birincisi yaşlanma sertleşmesi, ikincisi ise sert fazların bakır içerisine karıştırılması ile birlikte kompozit malzemelerin üretilmesidir. [2]. Kompozitlerde takviye elemanlarının kullanılması, yumuşak bir yapı içinde sert bir faz oluşturarak hem aşınmayı hem de tokluğu iyileştirir. Aşınma direnci, matrisin ve takviye elemanının sertliği ve kırılma tokluğunun yanı sıra sert parçacıkların miktarına, boyutuna ve dağılımına bağlıdır. Kompozit malzemelerin üretimi sıvı metal presesi veya toz metalürji prosesi ile yapılmaktadır. Geleneksel ergitme prosesleri ve döküm işlemleri, ıslana birliliğin zayıf olması nedeniyle erimiş bakır ve seramik partiküller arasında düzgün bir dağılım sağlayamaz. Ayrıca yoğunluk farkı eriyik içinde karışmanın bozulmasına neden olur. Toz metalurjisi prosesleri, çok yönlülük, malzeme ekonomisi, karmaşık şekilli parçaların üretimi, mikroyapısal ve kimyasal homojenlik gibi özelliklerinden dolayı ileri malzeme üretiminde giderek daha önemli hale gelmektedir.

Toz metalurjisi prosesleri bu nedenle bakır matris partikül takviyeli kompozitlerin üretimi için uygun bir yöntem olarak kabul edilmektedir.

Mekanik sistemlerde, aşınma ve sürtünme değerleri oldukça önemli bir araştırma alanıdır. Aşınma ve sürtünme genellikle malzeme yüzeylerinde meydana gelir. Bu nedenle yüzey kaplama yöntemleri, kritik mekanik sistemlerini aşınma ve yıpranmadan korumanın ve sürtünme yüzeyleri arasındaki sürtünmeyi azaltmanın en iyi yoludur [3]. Malzeme yüzeylerinin iyileştirilmesinde plazma püskürtme [4], [5], mikro ark oksidasyonu [6], [7], lazer [8], [9], reaktif magnetron

püskürtme [10], [11], ark kaynağı [12], [13] ve çok nadir olarak da metal matrisli kompozitler sıcak preslemeli sinterleme yöntemi ile altlık plakaların yüzeyinin kaplandığı belirlenmiştir [14], [15].

Malzemeleri metal matrisli kompozitler ile kaplamak, kaplamadaki çeşitli özelliklerin birleştirilmesine ve birçok mekanik, termal ve elektriksel özelliklerin iyileştirilmesine olanak tanır. Matris malzemesi seçiminde ağırlıklı olarak hafif metaller kullanılır. Matris malzemesi olarak Al, Ni, Cu gibi metal alaşımları kullanılmaktadır. Alüminyum ve alaşımları daha fazla kullanılmakla birlikte bakır ve alaşımlarının kullanımı gün geçtikçe artmaktadır [16]. Kullanım yerine bağlı olarak metal matrisli kompozitlerde takviye elemanlarından beklenen temel özellikler; yüksek modül ve mukavemet, düşük yoğunluk, matris ile kimyasal uyumluluk, üretim kolaylığı ve yüksek sıcaklık dayanımıdır. Metal matrisli kompozitlerde sertlik ve aşınma direnci yüksek olan B_4C , Al_2O_3 , SiC, TiB_2 , ve WC yaygın olarak kullanılan takviye elemanlarıdır [17], [18]. İyi tribolojik özelliklere sahip olan titanyum diborür (TiB_2), teknik uygulamalarda malzemelerin aşınma ömrünü uzatmak için kullanılan takviye elemanıdır. Özellikle yüksek erime noktası, mükemmel elektriksel ve ısı iletkenliği, yüksek sertliği, yüksek aşınma direnci ve yüksek sıcaklıklardaki kimyasal kararlılığı birçok araştırmacının ilgisini çekmiş ve onları bu alanda araştırma yapmaya yönlendirmiştir.

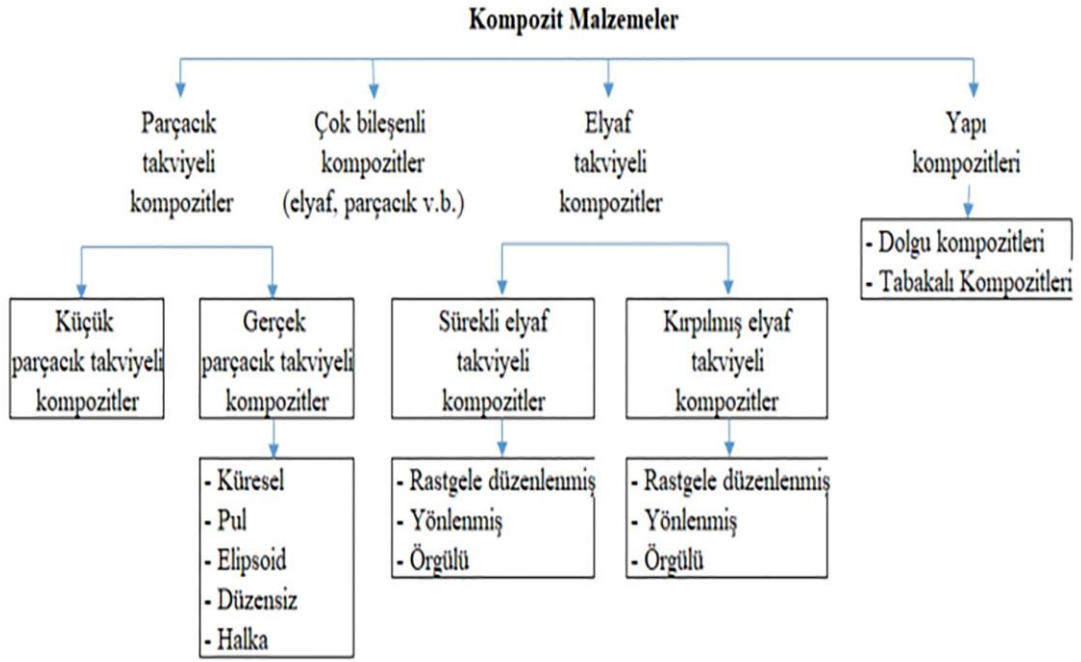
Son zamanlarda Cu plakalar üzerine birçok yüzey iyileştirme işlemleri yapılmasına rağmen; sıcak preslemeli sinterleme yöntemi ile kaplama işleminin uygulanması yok denecek kadar azdır. Bu çalışmada saf Cu alt tabaka malzemesi sıcak preslemeli sinterleme yöntemi kullanılarak Cu- TiB_2 tozları ile kaplanmıştır. Uygulanan kaplama işlemi sonrasında kaplama tabakasında TiB_2 hacim oranı ve sinterleme sıcaklığının mikroyapı, makro sertlik ve aşınma direnci üzerindeki etkileri incelendi. Çalışma sonunda elde edilen veriler toplanarak genel bir değerlendirme yapıldı.

2. KOMPOZİT MALZEMELER

İnsanoğlu, teknolojiadaki gelişmelerle birlikte ihtiyaçlarının karşılanabilmesi için birden çok mekanik özelliğe sahip yeni malzemelere gereksinim duymuştur. Kompozit malzemeler bu gereksinim ile birlikte ortaya çıkan ve öneminin oldukça fazla olduğu malzemelerdir.

En az iki farklı malzeme makro boyutlarda birleştirilerek sahip olduğu benzer veya farklı özelliklerinden daha üstün özelliklere sahip yeni bir malzemeye dönüşür. Oluşan bu malzemeler kompozit malzemeler olarak adlandırılır. Kompozit malzemelerin en ayırt edici özellikleri, düşük yoğunlukları ve yüksek mukavemetleridir.

Kompozit malzemelerin yapısal ve fonksiyonel özelliklerine göre çeşitli sınıflandırmaları yapılabilmektedir (Şekil 2.1). Bununla birlikte, en iyi bilinen sınıflandırma, matris malzemesi ve takviye geometrisine dayanmaktadır.



Şekil 2.1. Kompozit malzemelerin takviye malzemesine göre sınıflandırılması [19]

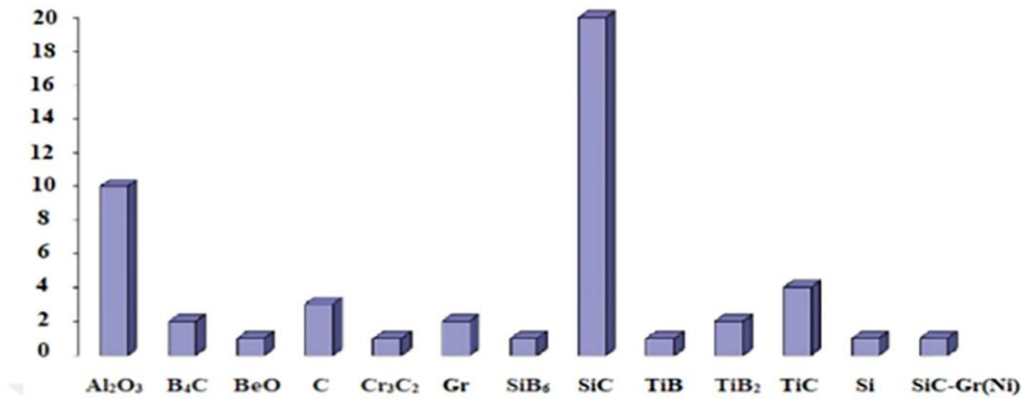
2.1. Matris Malzemesine Göre Kompozit Malzemeler

Matris malzemesine göre kompozit malzemeler kompozitin imalat yöntemine, mekanik özelliklerine ve fonksiyonel özelliklerine göre değişiklik göstermekle birlikte metal matrisli, polimer matrisli ve seramik matrisli kompozitler olmak üzere üç gruba ayrılmaktadır.

2.1.1. Metal Matrisli Kompozit Malzemeler

İyi süneklik ve tokluğa sahip metaller ile yüksek mukavemet ve yüksek elastik modülüne sahip seramik malzemelerin birleştirilmesiyle oluşan malzemeler metal matrisli kompozit malzemeler olarak adlandırılır [20].

Hafif metaller ve alaşımları düşük yoğunlukları, yüksek toklukları ve iyi mekanik özellikleri nedeniyle metal matrisli kompozitlerde en çok tercih edilen temel malzemelerdir. Düşük yoğunlukları ve iyi mekanik özellikleri sebebiyle hafifliğin çok önemli olduğu uygulamalar bu malzemeleri tercih edilen seçim haline getirir. Bu matris malzemelere Al, Ti, Mg, Cu, Fe, Co, Mo ve Ni gibi metaller ve alaşımlar örnek gösterilebilir [21]. Al_2O_3 , SiC, Gr, Br, TiB_2 , TiC, WC, W ve C gibi seramik malzemeler ise malzemeye yüksek elastik modül, yüksek çekme mukavemeti, yüksek ergime sıcaklığı ve düşük yoğunluk gibi özellikler kazandırdıkları için MMK malzemelerde tercih edilen takviye elemanlarıdır [22]. Şekil 2.2’de takviye malzemelerinin kullanım oranları verilmiştir.



Şekil 2.2. Metal matrisli kompozit üretiminde endüstriyel firmalar tarafından kullanılan takviye malzemelerinin kullanım oranları [23]

2.1.2. Polimer Matrisli Kompozit Malzemeler

En yaygın olarak kullanılan matris malzemeleri polimerik malzemelerdir. Polimer esaslı kompozitlerin yaygın olarak kullanılmasındaki önemli etkenler üretiminin kolay ve diğer kompozitlere göre daha düşük maliyetli olmasıdır. Genelde polimerlerin mekanik özellikleri birçok yapısal amaç için yetersizdir. Özellikle mukavemet ve sertlikleri metal ve seramiklere göre düşüktür. Bu zorluklar, diğer malzemelerin polimerlerle güçlendirilmesiyle aşılr. Polimer matrisli kompozitlerin işlenmesi yüksek basınç ve yüksek sıcaklık gerektirmez. Ayrıca polimer matrisli kompozitlerin üretimi için gerekli ekipmanlar daha basittir. Bu nedenle polimer matrisli kompozitler hızla gelişerek kısa sürede yapısal uygulamalar için popüler hale gelmiştir.

2.1.3. Seramik Matrisli Kompozit Malzemeler

Seramik malzemeler genellikle yüksek elastik modüllere, yüksek sertlik, iyi kimyasal direnç ve özellikleri yüksek sıcaklıklarda muhafaza etme kabiliyeti sergilerler. Bu nedenle havacılık endüstrisinde sıklıkla kullanılırlar. Seramik matrisli kompozitler, bir seramik matrisin içine gömülmüş seramik elyaflardan oluşur ve böylece seramik elyaf takviyeli seramik bir kompozit oluşturur. Matris ve lifler herhangi bir seramik malzemeden oluşabilir, bu sayede karbon ve karbon lifleri de seramik bir malzeme olarak kabul edilebilir. Seramik matrisli kompozitlerin mukavemeti yoktur, ancak kırılma tokluğunun gerekli olduğu yerlerde kullanılır.

2.2. Takviye Fazının Türüne Göre Kompozitler

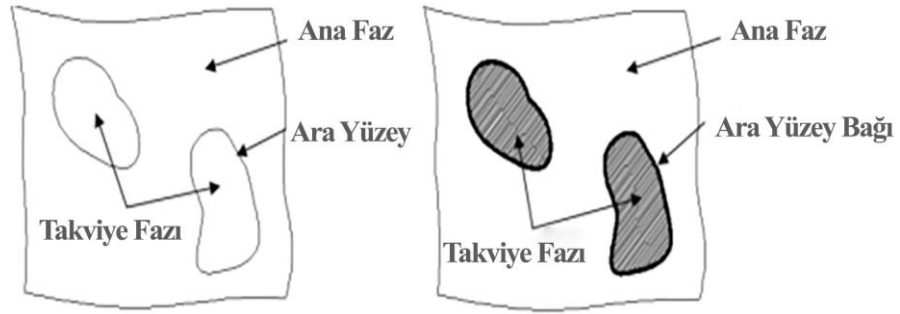


Şekil 2.3. Takviye fazının türüne göre kompozit malzemeler [24]

Şekil 2.3 takviye fazına göre kompozitlerin sınıflandırmaktadır. Bir kompozit malzemede ikincil faz olan takviye malzemesi matris içinde dağılarak kompozit malzemeye istenilen özellikleri verir. Takviye fazının temel işlevi kompozit malzemeye mukavemet ve sertlik kazandırmaktır. Ayrıca elektriksel ve termal iletkenlik, aşınma direnci ve kontrollü termal genleşme sağlayabilir [25].

2.2.1. Parçacık Takviyeli Kompozitler

Adından da anlaşılacağı gibi, takviye parçacık niteliğindedir. Bu parçacıklar küresel, kübik, dörtgen, trombosit veya diğer düzenli - düzensiz şekillerde olabilir. Parçacık takviyeli kompozitler, daha yumuşak bir matrisle çevrili sert parçacıklara sahiptir. Bu kompozitlerdeki parçacıklar, dispersiyonla güçlendirilmiş kompozitlerden daha büyüktür. Hacim oranı %5 ila %40 olan bir mikrondan daha büyük çapta dağılmış parçacıklar ile karakterize edilir. Genel olarak, parçacıklar kırılma direncini iyileştirmede çok etkili değildir, ancak kompozitin sertliğini sınırlı bir ölçüde artırırlar. Parçacıklar, matris malzemelerinin özelliklerini iyileştirmek için yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Şekil 2.4. parçacık takviyeli kompozitlerde oluşan fazları göstermektedir.

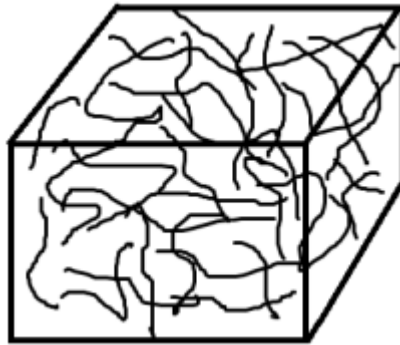


Şekil 2.4. Parçacık takviyeli kompozitin bünyesinde oluşan ara yüzey ve ara fazlar [26]

Parçacık takviyeli kompozitler büyük parçacıklar ya da dispersiyonla güçlendirilmiş kompozitler olarak iki alt bölümden oluşurlar. Bu iki kategori, kompoziti oluşturmak için kullanılan güçlendirme mekanizması ile ayırt edilmektedir. Parçacık-matris ilişkileri atomik veya moleküler düzeyde tartışılmadığında, "büyük parçacık" terimi kullanılır. Bu kategorideki kompozitlerin çoğu, matris malzemesinden daha sert partikül fazlardan oluşur. Güçlendirici parçacıklar, her parçacığın komşuluğunda matris fazının hareketini engeller [27].

2.2.2. Fiber Takviyeli Kompozitler

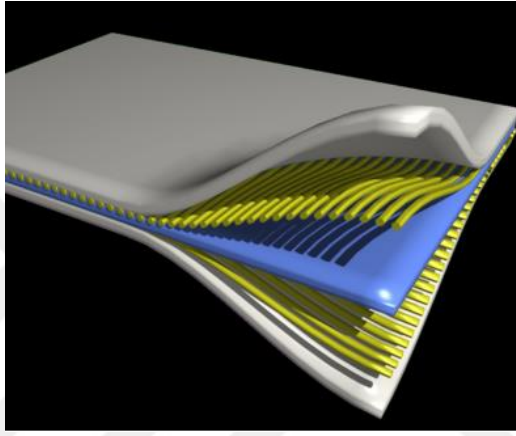
Fiber takviyeli kompozit malzemeler, normalde kısa lif takviyeli malzemeler ve sürekli lif takviyeli malzemeler olarak adlandırılan iki ana kategoriye ayrılır. Sürekli takviyeli malzemeler genellikle katmanlı veya lamine bir yapı oluşturur (Şekil 2.5.). Dokunmuş ve sürekli elyaf stilleri tipik olarak, verilen matris ile önceden aşılınmış olarak çeşitli formlarda mevcuttur. Öte yandan, kısa elyaf takviyeli kompozitler, sürekli elyaflarla ulaşılabilen benzer sertlik seviyeleri sağlarken aynı zamanda karmaşık şekiller halinde kalıplanabilir.



Şekil 2.5. Fiber takviyeli kompozit [28]

2.2.3. Tabakalı Kompozitler

Katmanlı kompozit malzemeler, farklı özelliklere sahip katmanların üst üste veya yan yana birleştirilmesiyle oluşturulur (Şekil 2.6). Kompoziti bir arada tutan katmanların özelliklerine bağlı olarak aşınmaya ve korozyona dayanıklı malzemeler üretilebilir. Katmanlar, farklı tür ve şekillerde takviyeler içeren kompozitlerin yanı sıra farklı malzemelerden oluşabilir. Kullanım amacına göre farklı şekillerde tasarlanabilen lamine kompozit malzemeler askeri teçhizat ve hafif zırhlarda kullanılmaktadır [29].



Şekil 2.6. Tabakalı kompozit malzeme [30]

3. ELEKTRİK KONTAK MALZEMELERİ

Elektrik kontağı, elektrik devresinin sürekliliğini sağlayan elektrikli/elektronik cihazların akım taşıyan elemanları ile ara yüzü içeren birim arasındaki arayüz olarak tanımlanır. Temas halinde olan ve çoğunlukla katı maddelerden yapılmış akım taşıyan elemanlara temas elemanları veya temas parçaları denir. Pozitif ve negatif devre klemenslerine bağlanan kontak elemanlarına sırasıyla anot ve katot adı verilir [31].

Elektrik kontağı, tüm elektrikli ve mikro elektronik cihazların ayrılmaz bir parçası olduğu için mühendislik ve bilimin birçok alanında önemli bir bileşendir. Elektriksel, termal ve mekanik yönler dahil olmak üzere çeşitli çoklu fiziksel olayları içerirler. Akım birbirine temas eden iki bileşenden akarken, temas bölgesindeki malzemeler mekanik yükler altında deforme olur. Temas eden metallerin mikro sertliği de uygulanan elektrik potansiyelinden etkilenir. Akım ve temas yüklerinin yanı sıra, elektrik kontakları genellikle mekanik titreşime maruz kalır ve bu da malzeme yüzeylerinde ciddi aşınma hasarına neden olur [32].

Elektrik kontakları, yüzey geometrisine, kinematiğine, tasarım ve teknoloji özelliklerine, mevcut yüke, uygulamaya ve diğer araçlara göre sınıflandırılabilir. Genel olarak elektrik kontakları iki üzere iki temel kategoriye ayrılır. Şekil 3.1’ de kontak kinematiği, işlevsellik ve tasarım özelliklerine göre elektrik kontaklarının en genel sınıflandırmasını ifade eder.

Elektrik kontakların arızalanması, şehir içi enerji kazaları, telefon sistemi arızaları ve hatta uçak kontrolünün kaybı gibi her türlü trajik sonuçlara yol açabilir. Buna göre, elektrik teması için tercih edilen malzemelerin, yüksek termal ve elektrik iletkenliği, yüksek sertlik, oksitlere, kükürt ve diğer bileşiklere karşı yüksek reaksiyon direnci ve yüksek erime sıcaklıkları gibi özelliklere sahip olması istenir [33]. Fakat hiçbir malzeme tek başına bu özelliklerin tümüne sahip olmadığı için, her bir uygulamayı güvenlik, bulunabilirlik, uzun ömür ve maliyet gibi değişkenlere göre belirlemek için farklı özelliklere sahip malzemeleri bir araya getirmek gerekir. Bu durumda, bakır (Cu) bazlı kompozit kontak malzemeleri, elektrik endüstrisindeki çoğu kontak uygulaması için tercih edilen malzemedir [34].



Şekil 3.1. Elektrik kontak parçaları [35]

3.1. Elektrik Kontak Malzemelerinin Özellikleri

Elektrik kontak malzemeleri, yüksek elektriksel ve termal iletkenliğe sahip olmalıdır. Elektrik iletkenliği yüksek malzemeler elektrik akımını daha iyi iletirken, malzemeyi akım kaynaklı ısınmaya karşı daha dirençli hale getirir. Isı iletkenliği yüksek malzemeler, akımın geçişi sırasında oluşabilecek lokalize ısının daha kolay difüzyonunu sağlayarak olası lokal ark oluşumunu da önleyebilir. Bu özelliklere ek olarak, elektrik kontak malzemesinin bazı mekanik özelliklerinin de iyi olması gerekir. Bu özelliklerin gerekliliği, çalışma sırasında oluşabilecek aşınma gibi mekanik etkilere karşı koyabilmektir.

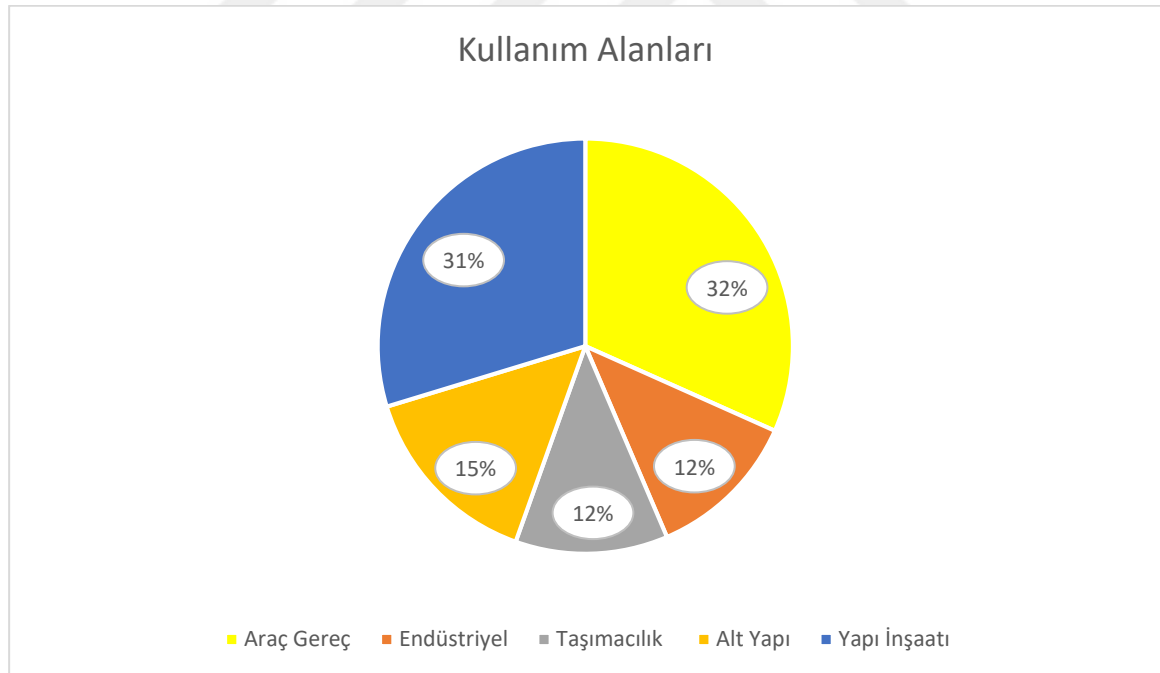
Katı metalik iletkenlerin pratik uygulaması, elektrik, termal, kimyasal, mekanik ve tribolojik özellikler gibi iletken malzemelerin çeşitli özelliklerinin ayrıntılı bilgisini gerektirir. Bunun nedeni, hizmette katı iletkenlerin çevresel etkilerin yanı sıra farklı mekanik ve termal streslere maruz kalmasıdır. Elektrik kontakları için kullanılan metalik malzemeler geniş bir alana yayılmıştır. Listelenen malzemeler arasında, bakır, alüminyum ve alaşımları en yaygın olarak ağır akım kontaklarında kullanılırken, soy metaller ve alaşımları düşük akımlı kontaklarda kullanılır.

3.1.1. Bakır

Taş Devri'nin sonunda, insanoğlu bakırın nasıl verimli bir şekilde işleneceğini biliyordu. O zamanlar insanlar bakırı soğukta döverek bileşenin yapısını sertleştirdiler. Belirli aletlerin işlenmesi (iş aleti, av silahı vb.), taşın işlenmesinden önemli ölçüde daha kolay ve hızlı olduğu için, avlanma ve arazi yönetimi bu şekilde daha verimli hale geldi. Bakır cevherinin çığır açması, insanların bakır cevherini termal indirgeme ve ardından bakırın eritilmesiyle soğuk dövmeden bile daha iyi

işlenebileceğini keşfettiklerinde meydana geldi. Bu eşsiz keşif, yeni bir teknik alanın metalürjinin ortaya çıkmasına işaret etti.

Elektrik endüstrisinde kullanılan bakır veya alaşımları için temel gereksinim, minimum kirlilik, kalıntı ve zararlı gaz içermeyen yüksek saflıktır. Bu tür gereksinimler, saflığı %99,9 ila %99,999 arasında değişen iletken bakır tarafından karşılanır. Ham bakır rafine edilerek saflaştırılmasıyla üretilir. Bakır alaşımları, katkı elementine göre iki temel gruba ayrılır. Bunlardan birincisi bronz (bakır alaşımları ve çinko hariç herhangi bir element) ikincisi ise pirinç (bakır ve çinko alaşımları). Bakır alaşımları olan bronz ve pirinç, hemen hemen endüstrinin tüm alanlarında kullanımı oldukça yaygındır. Bakırın mükemmel elektrik iletkenliği nedeniyle elektrik endüstrisinde kullanımı kaçınılmazdır. Ayrıca inşaatta gaz, su ve iklimlendirme dağıtımı olarak, mimaride oluk, çatı iç mekanlarda, sağlık hizmetlerinde, güneş panellerinde, cep telefonlarında, otomotiv endüstrisinde veya gıda endüstrisinde, alkollü içecekler için kazanlar ve geleneksel gıda hazırlama için kaplar gibi çatı kaplama veya yardımcı ürünler. Kalay, çinko ve kurşun alaşımları, bakır dökümhane alaşımlarının en büyük payını oluşturur ve bunu alüminyum, krom veya kadmiyum içeren daha gelişmiş alaşımlar izler [36]. Şekil 3.2’ de bakırın kullanım alanları verilmiştir.



Şekil 3.2. Bakırın kullanım alanları ve oranları [37]

Bakırın kullanılmasının temel nedeni, özellikle gümüşten sonra en yüksek elektrik iletkenliğine sahip olmasıdır. Bu özelliğinin dışında yüksek ısı iletkenliği, yüksek korozyon direnci, dekoratif renk, orta mukavemet ve şekillendirme kolaylığı bakırın diğer önemli özellikleri olarak gösterilebilir [38].

Gümüşe göre daha ucuz ve işlenmesinin daha kolay olması bakır ve alaşımlarının elektrik kontak malzemesi olarak kullanımını artırmıştır. Ancak gümüşten daha zayıf mekanik özelliklere sahip olması, bakırın elektriksel temas malzemesi olarak kullanımını sınırlar. Bu nedenle, bakırın mekanik özelliklerini iyileştirmeye yönelik araştırmalara ilgi artmaktadır. Bakırın mekanik özelliklerini iyileştirmek için malzeme sertleştirme ve yüzey özelliği iyileştirme teknikleri kullanılmaktadır. Yaşlandırma ve dispersiyon yöntemi ile sertleştirme genellikle bakırın mekanik özelliklerini iyileştirmek için kullanılır. Ancak bu durum çökelmiş fazın büyümesine ve yetersiz malzeme mukavemetine neden olabilir.

3.1.2. Alüminyum

Son yıllarda, alüminyum bir dizi ekonomik ve mühendislik nedenleriyle giderek artan bir şekilde kullanılmaktadır. Hafifliği, nispeten iyi elektriksel ve termal özellikleri, bulunabilirliği ve makul maliyeti nedeniyle alüminyum, elektrik sistemlerindeki birçok iletken uygulaması için bakıra uygun bir alternatif olarak kabul edilmektedir. Bununla birlikte, bakırın yerine alüminyumun ikame edilmesinde, özdirenç, mekanik mukavemet ve yoğunluktaki farklılıkları dikkate alınmalıdır. Aynı direnç ve uzunluk için, bir alüminyum iletken, eşdeğer bir bakır iletkeninkinden %60 daha büyük bir kesit alanına sahip olmalıdır, oysa alüminyum iletkenin ağırlığı bakır iletkeninkinin %48'idir. Alüminyumun akım taşıma kapasitesi bakırın %80'i kadardır [31].

Alüminyum, nispeten yüksek termal ve elektrik iletkenliğine sahip sünek bir metaldir. Bakırdan daha yumuşaktır ve ince folyolara sarılabilir. Ancak, düşük mekanik mukavemeti nedeniyle alüminyum çok ince teller halinde çekilemez.

Genel olarak konuşursak, alüminyum ve alaşımlarının uygulanmasının üç ana kategorisi vardır. Bunlar havai iletim hatları ve yer altı kabloları, bobin sargısı (mıknatıs teli) ve bara iletkenleridir. Havai iletim hatları için kullanılan alüminyum alaşımı genellikle %0,8 Mg veya %0,5 MgSi içerir ve nispeten iyi bir elektrik iletkenliği ile birlikte yüksek bir mukavemete sahiptir. Ancak bu alaşımın mekanik mukavemeti her zaman yeterli olmayabilir; örneğin, havai hatlardaki uzun açıklıklar için, hattın çekirdeğinin çelik tellerden oluştuğu kompozit yapı iletkenleri kullanılır.

İletken malzeme olarak alüminyumun daha geniş kullanımını engelleyen en önemli dezavantajlardan biri, gerçekten güvenilir ve ekonomik bir sonlandırma yönteminin olmamasıdır. Bu sorunun üstesinden gelmek için kaynaklama, kaplama, ultrasonik birleştirme, plazma püskürtme, cıvatalama, sıkıştırma ve lehimleme gibi birçok yöntem benimsenmiştir, ancak bunların çoğu nispeten pahalıdır ve daha fazla operatör bakımı gerektirir.

3.2. Elektrik Kontaklar İçin Kaplama

Şu anda elektronik ve elektrik endüstrileri, elektrik kontak uygulamaları için koruyucu ve aşınmaya dayanıklı kaplamaların kullanımında amansız bir artış yaşıyor. Bu tür eğilimler, yalnızca maliyet-fayda talepleri tarafından değil, aynı zamanda kaplamalar tarafından sunulan, örneğin: korozyon ve aşınma koruması, difüzyon bariyerleri, iletken devre elemanları, dielektrik yüzeyler üzerinde pasif cihazların üretimi ve diğerleri gibi birçok faydalı fonksiyon tarafından yönlendirilir. Büyük ölçüde, farklı cihaz ve sistemlerin temas kalitesi, yüzey katmanlarının elektriksel ve mekanik özellikleri tarafından kontrol edilir. Kaplama malzemesi özelliklerine, temas çalışma koşullarına ve amaçlanan işlevlere bağlı olarak, temas eden yüzeyler üzerine bırakılan malzemenin kalınlığı 0,1-0,3 ila 20-30 mm arasında ve bazen 100 mm'ye kadar değişir [31].

Kaplamanın performansını ve elektrik bağlantısının ayrılmaz bir parçası olma yeteneğini belirleyen birkaç kritik özellik vardır. Ürünün kimyasal bileşimi performansında önemli bir rol oynar, ancak uygulama parametreleri de aynı derecede önemlidir. Kaplama performansında oynadıkları kritik rolü anlamak için en önemli parametrelerin gözden geçirilmesi gerekir. Bir elektrik bağlantısının performansı temel olarak kirlenme, oksidasyon, yeniden oksidasyon, sülfür oluşumu, korozyon vb. gibi yüzeyde meydana gelen olaylar tarafından kontrol edilir. Yüzeyde bu kirleticilerin varlığı temas direncini artırır ve bağlantı güvenilirliğine zarar verir. Bu nedenle, güvenilir bağlantılar arayışında temas yüzeyinin stabilitesini ve bütünlüğünü korumak birinci derecede önemlidir.

3.3. Kompozit Kontak Malzemeler

Elektrik kontak malzemeleri, düşük akımlı cihazlardan güçlü ağır akım cihazlarına kadar tüm cihaz yelpazesinde çalışma gereksinimlerini karşılamak için bir dizi özellik arar. Aşınma, erozyon ve sürtünme prosedürleri, elektrik ve termal iletkenlik, sertlik, korozyon direnci, termal difüzyon, arkın karakteristik parametreleri, erime sıcaklığı, ısı direnci ve diğer bazı özellikler gibi malzemelerin kimyasal ve fiziksel özellikleriyle ilişkilidir. Bu özelliklerin birleştirilmesini saf bir malzemede gerçekleştirmek imkansızdır ve bir alaşımda elde edilmesi zordur. Kompozitler, özellikle bu tür uygulamalarda gerekli olan global özelliklere sahip kontaklar oluşturan en iyi malzemelerdir. Bu kompozitler, devre kesiciler ve ark kontakları, ağır akım kesme kontakları, sabit ve kayan kontaklar gibi diğer güç anahtarlama cihazları için yaygın olarak kullanılmaktadır. Genellikle bu tip kompozitlerde metal veya metal alaşımlı matris, intermetalik bileşik, oksit, karbür veya nitrid malzemeleri olarak kullanılabilir. Kompozit üretiminde genellikle toz metalurjisi yöntemi kullanılır. Şekil 3.3' de kompozit kontak malzemesi görülmektedir.

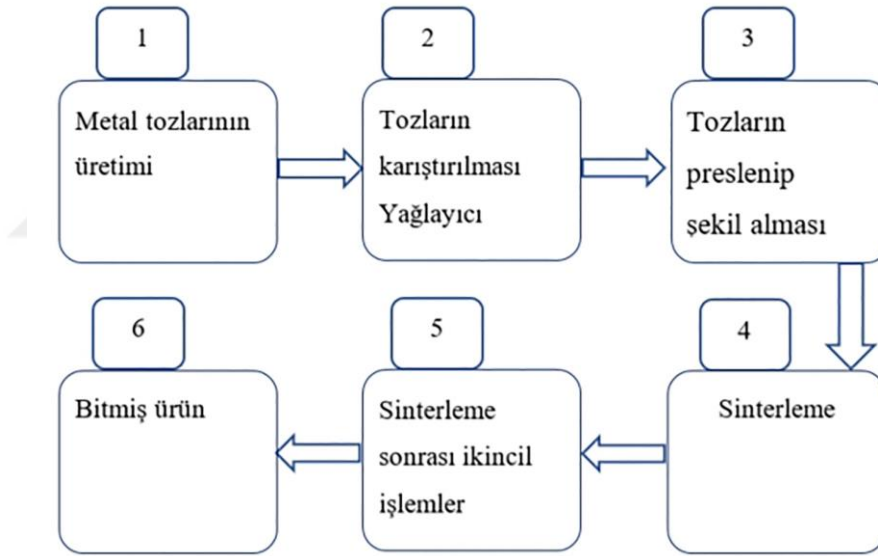


Şekil 3.3. Kompozit kontak malzemesi [39]

4. TOZ METALURJİSİ

Günümüzün gelişen endüstrisinde talaşlı imalat yapmadan tek adımda yüksek performans ve kaliteye sahip parçalar üretmek önemlidir. Belirli bir parçanın mekanik özellikleri ve fizikokimyasal özellikleri, çalışma koşullarında iyi ve tekrarlanabilir üretim sürekliliğinin sağlanmasında önemli bir rol oynamaktadır. Toz metalurjisi (TM) prosesi kullanılarak parça üretimi, geleneksel üretim teknikleri (döküm, plastik kalıplama) kullanılarak parça üretimine iyi bir alternatif olup, bu konuda endüstriyel anlamda belirli uygulama alanlarına hizmet etmektedir [40].

Bu üretim yöntemi temel olarak elde edilen toz, tozun sıkıştırılması (preslenmesi) ve ardından sinterleme ile termal bağlama adımlarından oluşur [41]. Şekil 4.1 toz metalurjisinin aşamalarını göstermektedir.



Şekil 4.1. Toz metalurjisi aşamaları [41]

4.1. Toz Metalurjisinin Endüstrideki Yeri

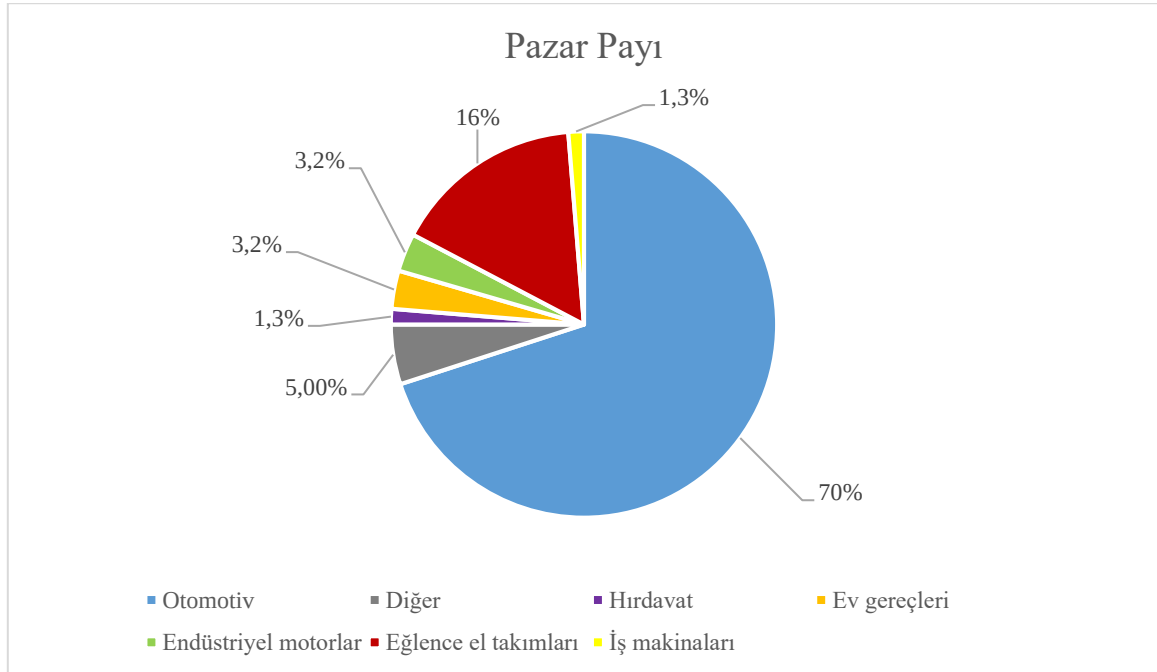
Metal tozlarının endüstride yaygın olarak kullanılması ve bu kullanım için toz özelliklerinin önemi, metal tozu üretim yöntemlerinin hızla gelişmesine yol açmıştır. Metal tozu üretim aşamasında pratik ve teorik derinlemesine çalışmalar yapılmaktadır. Ağır hizmet ortamlarında kullanılan dövme malzemeler yerine TM ile elde edilmiş eş yoğunluklu gözeneksiz malzemelerin kullanılması üretim alanına yeni boyutlar kazandırılmıştır [42].

4.1.1. Türkiye’de Toz Metalürjisi

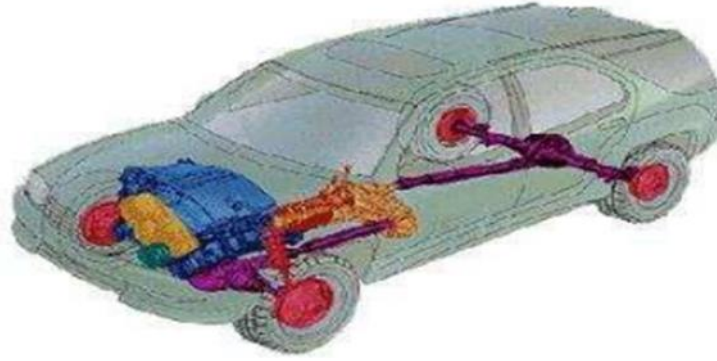
1960’lı yılların sonlarına doğru Türkiye’de toz metalürjisi ile ilgili faaliyetlere başlanıldığı bilinmektedir. Akademik olarak ise ilk çalışma 1982 yılında Mustafa Eti Uygur tarafından yayınlanmıştır. Türkiye’de toz metalürjisinin ana pazar payını otomotiv ve kesici takımlar sektörleri oluşturmaktadır. Türkiye’de toz metalürjisi üzerine çalışmakta olan fabrika sayısı her gün artmaktadır. Akademik olarak ise toz metalürjisi üzerine araştırma grubu bulunan öncü üniversiteler aşağıda belirtilmiştir [43].

- 1- Fırat Üniversitesi
- 2- Orta Doğu Teknik Üniversitesi
- 3- İstanbul Teknik Üniversitesi
- 4- Kocaeli Üniversitesi
- 5- TOBB Üniversitesi
- 6- Karadeniz Teknik Üniversitesi
- 7- Dumlupınar Üniversitesi
- 8- Marmara Üniversitesi
- 9- Yıldız Teknik Üniversitesi

Şekil 4.2 ve 4.3 toz metalürjisiyle üretilen malzemelerin kullanım alanlarını ve örneklerini göstermektedir.



Şekil 4.2. T/M ile üretilen malzemelerin pazar payı [44]



Şekil 4.3. Bir araba içindeki TM parçaların dağılımı [44]

4.2. Metal Tozlarının Üretimi

Metal tozları, toz metalürjisi yöntemi ile yapılan üretimin en temel malzemesidir. Doğada kullanıma hazır halde bulunmayan bu tozların üretim biçimi bitmiş ürünün özelliklerini büyük oranda etkilemektedir. Her zaman üretilecek ürünün en iyi özelliklerinde olması istenir. Bu sebeple istenen bitmiş ürünü üretmek için gereken ilk şey proses şartlarına uygun metal tozu üretimidir. Metal toz üretim metotları yeni toz karışımı, maliyet, etkin performans ve kalite gibi gereksinimlere yanıt verebilmek için devamlı gelişmektedir.

Toz üretim teknikleri başlıca dört kategoride incelenebilir. Bunlar; mekanik, kimyasal, elektrolitik ve atomizasyon teknikleridir [45]. Uygun metal toz üretim tekniğinin seçimi; üretim miktarı, toz özellikleri, malzemenin fiziksel ve kimyasal özelliklerine bağlıdır [46].

4.3. Tozların Karıştırılması

Bu aşamada preslemeyi kolaylaştırmak amacıyla, metal toz ve yağlayıcı homojen olarak karıştırılmaktadır. Yağlayıcının temel amacı, toz taneleriyle takım yüzeyleri ve kalıp duvarları arasındaki sürtünmeyi azaltmak, tozların sıkıştırma sırasında kolay kaymalarını sağlamaktır [47].

Toz metalürjisi yöntemi ile üretilen parçalarda genellikle toz karışımları kullanıldığından, tozların kompaktlama yapılmadan önce etkin bir şekilde karıştırılması gereklidir. Karıştırma işleminin amacı toz parçacıklarının homojen hale getirmektir. Toz parçacıklarının homojen olarak karışmalarından sonra üretilen parçanın performansı yükselmektedir.

Karıştırılan tozlar, sinterlemeden sonra boşluk oluşturabilecek herhangi bir yabancı maddenin veya yağlayıcı birikintisinin, tozun içine girmemesi için korunmalıdır. Toz karışımları preslenmeden önce iki önemli özelliği olan; akma hızı ve görünür yoğunluğu kontrol edilmelidir.

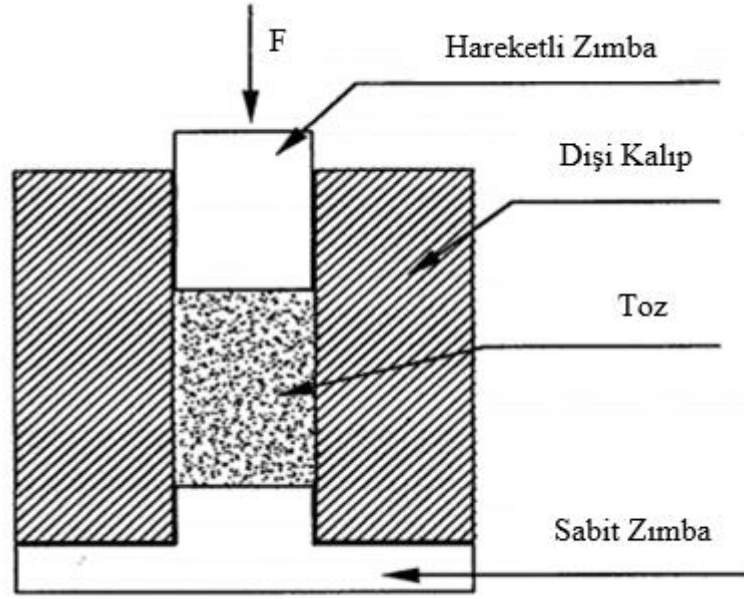
4.4. Tozların Preslenmesi

Tozların sıkıştırılması, dışarıdan oldukça kolay görünmesine rağmen çok değişkenli karmaşık bir uygulamadır. Sıkıştırma başladığı anda kalıp iç yüzeyinde meydana gelen sürtünme, diğer meydana gelen bütün kuvvetlerden daha büyüktür. Ancak bu kuvvet kalıbın merkezine doğru ilerledikçe azalır. Toz ile kalıp yüzeyi arasındaki sürtünme sebebiyle şekillendirme enerjisinde büyük kayıplar oluşur. Bunun beraberinde birbiriyle temas eden tanecikler arasında, toz ile zımbalar arasında ve zımbalar ile kalıp yüzeyi arasında sürtünmeler oluşur. Ayrıca kalıptan çıkarma esnasında parça ile kalıp iç yüzeyi arasındaki sürtünme de önemlidir. Parçaların karmaşıklık durumuna göre farklı presleme teknikleri kullanılır.

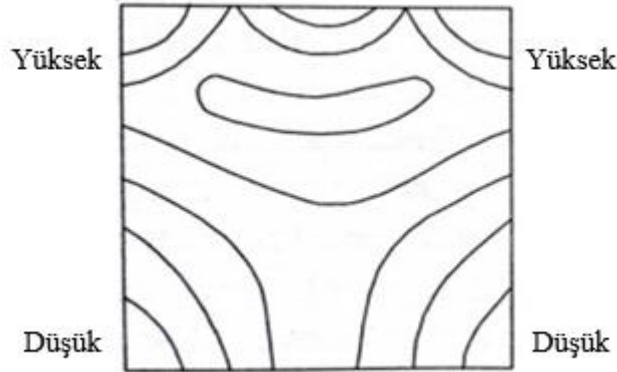
Presleme işlemini genel çerçevede incelediğimizde soğuk ve sıcak presleme şeklinde iki ana gruba ayırabiliriz. Soğuk presleme proseslerinde, preslemenin ardından sıcaklık uygulanırken, sıcak presleme prosesinde sıcaklık ve basınç aynı anda uygulanır. Soğuk veya sıcak izostatik presleme yöntemleri, rijit kalıplar vasıtasıyla presleme yöntemine göre üründe iyi mekanik özellikler sağlamak ve ölçü hassasiyeti bakımından oldukça üstündür. Bahsi geçen presleme yöntemlerinde, toz kütleleri üstüne uygulanan basınç aynı oranda dağıldığı için düşük basınçta bile yüksek yaş yoğunluk ve yüksek yaş mukavemet değerleri elde edilebilir. Çekme mukavemeti ve yorulma dayanımı gibi mekanik özellikleri üstün olan sıcak izostatik presleme yöntemi ile üretilen malzemeler diğer tekniklerle kıyaslandığında öndedir [48].

4.4.1. Tek Yönlü Presleme

Tek yönlü presleme işlemi alışlagelmiş toz sıkıştırma yöntemlerinde uygulanmaktadır. Toz karışımının kalıba boşaltıldıktan sonra hareketli üst baskı plakası vasıtası ile yukardan aşağıya basınç uygulanır (Şekil4.4). Hareketsiz olan alt pistonun kullanım amacı parçayı kalıptan ayırabilmektir. Parçanın kalıptan ayrılmasını basitleştirmek amacıyla kalıp duvarları yağlanır. Tek yönlü presleme işleminde uygulanmakta olan basma kuvveti arttırılırsa sıkışan malzemenin yoğunluk miktarı da yükseliş gösterir (Şekil 4.5).



Şekil 4.4. Tek hareketli presleme kalıbı [49]



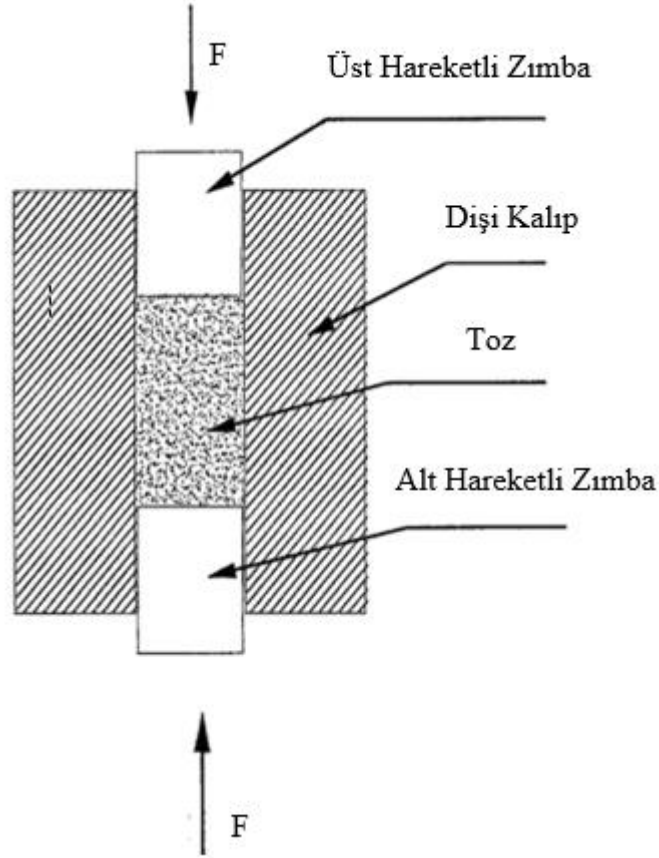
Şekil 4.5. Tek yönlü preslemede yoğunluk dağılımı [50]

4.4.2. Çift Yönlü Presleme

Kalıpta birbirine zıt yönde olan alt ve üst zimba tarafından basınç uygulanarak sıkıştırma yapılır (Şekil 4.6). Zimbalar farklı veya eşit miktarda hareket ve basınç uygulayabilir. Hem bir homojen yoğunluk elde edilememekle birlikte, tek yönlü preslemeye göre daha homojendir. Parçacıklar, zimbalar ve toz parçacıkları arasındaki sürtünmeyle kalıp yüzeyi arasındaki sürtünme nedeniyle yoğunluk dağılımı önemli bir fark yaratabilir. Yağlayıcı vasıtası ile sürtünmeyi düşürmek ya da uygun sıkıştırma metotları kullanılarak bu farklılık gösteren özellikler azaltılmaya çalışılır.

Çift yönlü presleme çift yönde hareket eden özel bir tip pres gerektirir. Toz metalürjisinde kullanılan özel presler, önceden belirlenmiş miktarda tozun tam olarak yerleştirilmesi, ardından

sıkıştırılması ve preslenmiş tozun atılması için uygun olacaktır. Bu nedenle preslerin doldurma ve çıkış konumları olmalı ve ikisi otomatik olarak birbirini takip etmelidir [49].



Şekil 4.6. Çift yönlü presleme kalıbı [49]

4.5. Sinterleme

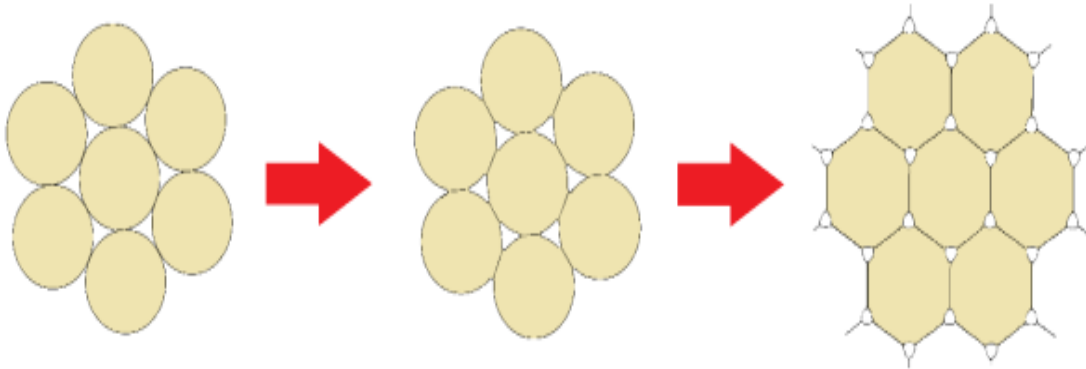
Sinterleme prosesi, preslenmiş toz partiküllerine mukavemet kazandırmak amacı ile kontrollü bir atmosferde yüksek sıcaklıklarda uygulanmakta olan pişirme prosesi olarak ifade edilir. Tozların kalıp içerisinde sıkıştırılarak şekillendirilmesi neticesinde oluşan parçada meydana gelen mekanik bağlar, sinterleme tekniği vasıtası ile metalik bağlara dönüştürülerek parçanın mukavemetli olması sağlanır. Parçaların mukavemet oranı, sinterleme tekniğinden önce ve sonra önemli ölçüde değişmektedir. Sinterleme prosesi, tek bileşene sahip olan sistemlerde metalin mutlak ergime sıcaklığının altındaki bir sıcaklıkta yapılırken; birden çok bileşene sahip olan sistemlerde önemli ölçüde ergime sıcaklığı en düşük olan bileşenlerin ergime sıcaklığının altında yapılır.

Isıl işlem olarak da bilinen sinterleme, sıkıştırılan toz kütleini üstün özelliklere sahip mukavemetli bir malzemeye dönüştürmektedir. Sinterleme, üretilcek parçaya son şeklini ve birçok yeni özelliği kazandırmaktadır. Sinterlemenin ana nedeni, sertlik, mukavemet, yorulma ömrü,

elektriksel iletkenlik, termal genleşme, manyetik doyumluk ve korozyon direnci gibi endüstrinin en önemli bileşen özelliklerini geliştirmektedir [51].

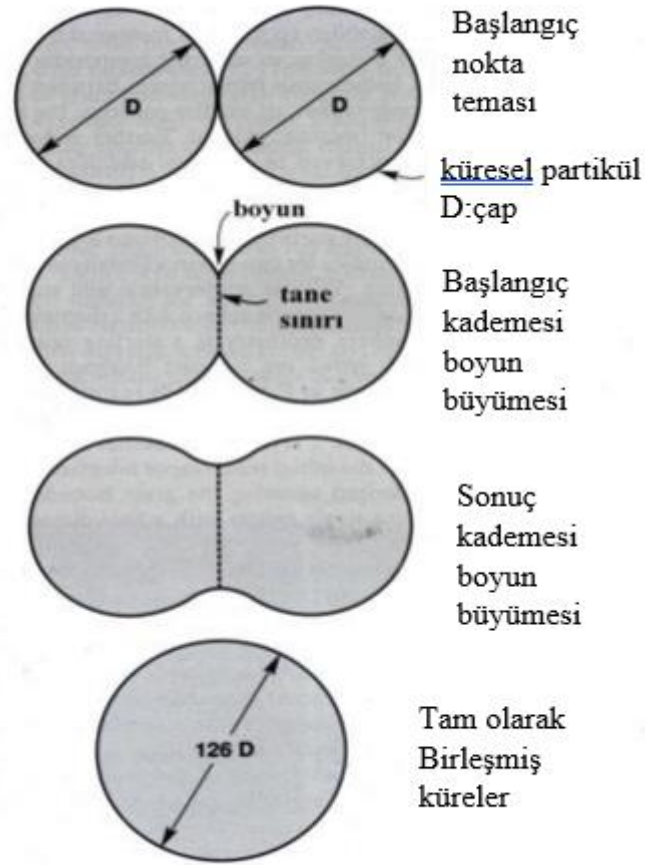
4.5.1. Katı Hal Sinterleme

Katı hal sinterleme, katı faz sıcaklıklarında katı partiküller arasında meydana gelen bir yoğunlaştırma işlemidir ve boyun konstrüksiyonu difüzyon ile meydana gelir. Şekil 4.7, partiküller arasındaki ilk temas, boyun büyümesi ve yoğunlaştırma olan partiküller arasındaki sinterlemenin üç adımını göstermektedir [52].



Şekil 4.7. Katı hal sinterlemesinin üç adımı [52]

Katı faz sinterleme, difüzyon ilkesine dayanır. Sinterleme için gerekli olan itme kuvveti, toz parçacıklarının yüzeyi ile boyun bölgesi arasındaki kimyasal potansiyel veya serbest enerji farkı tarafından üretilir. Şekil 4.8 difüzyonun neden olduğu değişiklikleri göstermektedir.



Şekil 4.8. Sinterleme esnasında noktasal bağ oluşumu, boyun, gözenek ve tane sınırlarının gösterimi [53]

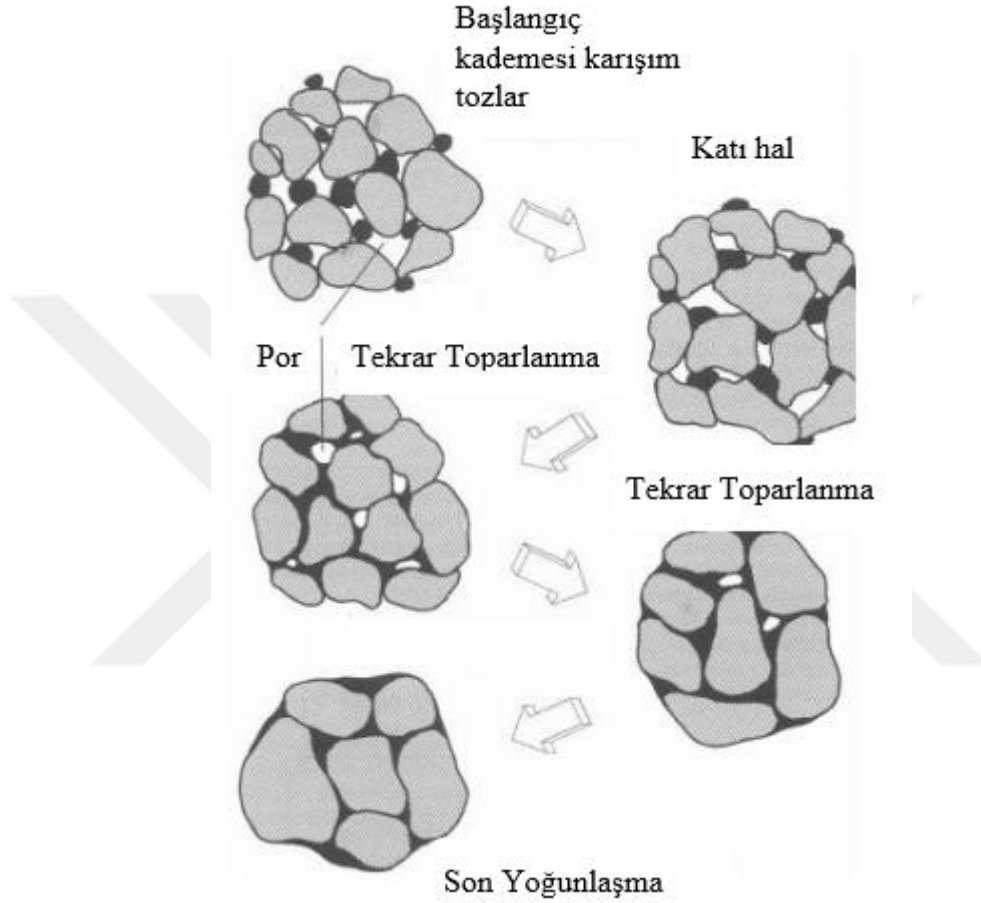
4.5.2. Sıvı Hal Sinterleme

Sıvı faz sinterleme, reaksiyonların sıvı faz tarafından hızlandırıldığı bir sinterleme işlemidir. Kılcal kuvvetler, sinterlenen gövdede bir büzülme olarak çalışır ve eriyik içinde sert madde parçacıklarının kapsamlı çözünme reaksiyonları vardır. Yeterli miktarda sıvı bağlayıcıya sahip olmak bu nedenle metal matrisli kompozitlerde hızlı bir sinterleme oranı için faydalıdır.

Sıvı faz sinterlemenin prensibi, sinterleme sırasında sistemde bir sıvı faz oluşturarak yoğunluğu arttırmaktır. Sıvı faz sinterleme, iki veya daha fazla farklı tozu eşit şekilde karıştırır. Sinterlemenin ısıtma aşaması sırasında, toz, daha düşük bir erime sıcaklığına sahip sıvı bir faza dönüşür. Sıvı faz sinterlemede, sinterlemenin gerçekleşmesi için gereken itici güç, yüzeyin termodinamik eğriliğidir. Yüzey gerilimi, partiküller arasında kimyasal potansiyel enerji, çözünürlük ve buhar basıncında farklılıklara neden olur. Bu farklılıklar sinterleme için itici güçtür. Dinamik itici güç, difüzyon sürecini harekete geçiren bir sıcaklık artışıdır.

Sıvı faz sinterleme; partikül yeniden organizasyonu, çözünme, çökeltme ve nihai gözenek giderme veya nihai yoğunlaşma, adımların ortaya çıkmasıyla gerçekleşir. Başarılı sıvı faz

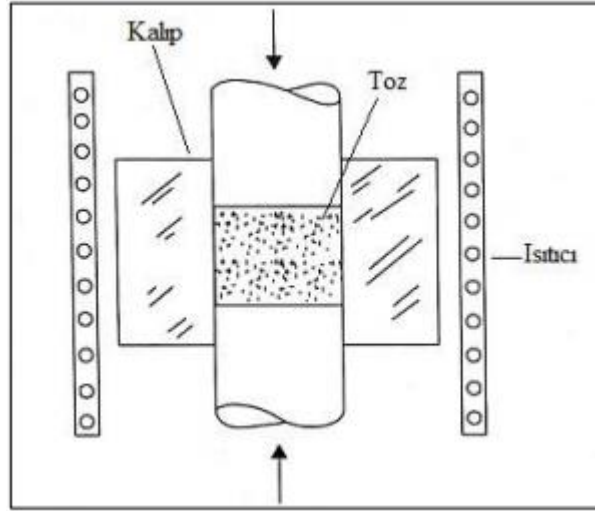
sinterlemesi için katı fazın düşük yüzey enerjili bir sıvı ile yeterince ıslatılması gerekir. Sıvı partiküller arasındaki kohezyon kuvveti, sıvı katı partiküller arasındaki yapışma kuvvetinden daha büyük olduğu için sıvı, katıyı yeterince ıslatamaz. Şekil 4.9 sıvı faz sinterleme aşamalarını göstermektedir.



Şekil 4.9. Sıvı faz sinterlemesinin aşamalarının gösterimi [54]

4.6. Sıcak Presleme

Sıcak pres, kalıba boşaltılmış metal tozların yüksek sıcaklıkta basıncın dışardan uygulanması ile şekillendirilmesidir. Endüstri alanında oldukça yaygın bir biçimde kullanılmaktadır. Bu işlem, aynı anda sıkıştırma ve sinterleme olmak üzere iki ayrı işlemi içerir. Sıcak pres, imal edilecek parça şeklindeki kalıplara toz malzemenin boşaltılması, belli olan sıcaklık değerine kadar ısıtılması, bu sıcaklık altında basınç uygulanması ve soğuma aşamalarından oluşur (Şekil 4.10). Sıcak presleme proseslerinde kalıp seçimi son derece önemlidir. Kalıp plastik deformasyona uğramaksızın uygulanmakta olan basınç ve sıcaklığa karşı mukavemetli olmalıdır. Kalıp ile toz malzemenin tepkimeye girmemesi gerekli olduğu için sıcak pres kalıpları genelde molibden, tungsten, kalıp çeliği, sementit karbürler veya grafitten yapılır.



Şekil 4.10. Sıcak kalıp presleme [50]

Geleneksel soğuk pres yöntemleriyle karşılaştırıldığında, sıcak pres teknikleri daha az kuvvet, daha az zaman (genellikle 10-15 dakika) ve daha düşük sıcaklık gerektirir. Ayrıca bu teknik, soğuk presleme-sinterleme işlemlerine kıyasla daha yüksek yoğunluklara ulaşır.

4.7. Toz Metalurjisinin Yaygın Kullanım Alanları ve Örnekleri

Gelişmiş mekanik performans, artan mikroyapı kontrolü, düşük malzeme kaybı ve daha düşük üretim maliyeti nedeniyle, modern toz metalürjisi üretim yöntemi alışılmış metal işleme yöntemlerinden daha fazla tercih edilir hale gelmiştir. Toz metalurjisinin uygulama alanları oldukça geniştir. Tungsten lamba filamentleri, dişçilik, dişli çarklar, kendinden yağlamalı yataklar, elektrik kontaktları, nükleer gaz yakıt elemanları, ortopedik gereçler, ofis makinaları parçaları, yüksek sıcaklık filtreleri, uçak fren balataları ve jet motor parçaları gibi birçok alan toz metalürjisinin kullanım alanlarına örnek olarak gösterilebilir. Toz metalürjisi ile imalatı en çok yapan sektör ise otomotiv sektörü olarak gösterilebilir. Yukarıda belirtilen endüstriyel ve alışılmış uygulamaların beraberinde, son 20 yılda laboratuvarlarda ya da pilot ölçekli uygulamalar ve bu uygulamalar için geliştirilen etkin performans malzemeleri de vardır. Doğrusu toz metalürjisi çok disiplinli bir yöntem olduğundan malzeme ve üretim şekli beraber değerlendirilir.

Çelik esaslı sinterlenmiş parçalar %86 ile en büyük pazar payına sahipken, bakır ve bakır esaslı sinterlenmiş parçalar toplam %11 pazar payına sahip olup, onu %0,6 ile alüminyum takip etmektedir. Şekil 4.11 ve 4.12 T/M ile üretilmiş parçaların görselleri görülmektedir.



Şekil 4.11. Toz metalurjisi ile üretilmiş bazı parçalar [55]

4.7.1. Talaşlı İmalat Gerektirmeyen Makine Parçaları

Bu tip makine elemanları çoğu zaman otomotiv sanayiinde kullanılmaktadır. Bu parçalar tozun sıkıştırılıp sinterlenmesiyle direk olarak son şekillerine getirilmektedir. Yakıt pompa elemanları, araba kapısı parçaları, amortisör pistonu, kapı pencere kilit parçası vs. gibi parçalar bu gruba dahil edilmektedir.



Şekil 4.12. T/M ile üretilmiş kapı pencere kilit parçaları [56]

4.7.2. Elektrik Kontakları

Son derece iletken olan bakır, gümüş, tungsten, molibden ve nikel tozu ile karıştırılır, preslenir ve sinterlenir. Elde edilen malzeme elektrik kontaklarında ve elektronik elektrik direnç kaynağında kullanılır. Şekil 4.13’ de gösterildiği gibi farklı şekil ve boyutlarda üretilirler.



Şekil 4.13. Elektrik kontakları [57]

4.7.3. Mekanik Filtreler

Toz metal filtreler, seramik filtreler göre darbelere karşı daha dayanıklı oldukları ve suya ve sıcaklığa karşı daha az duyarlı oldukları için tercih edilmektedir (Şekil 4.14). Genellikle sıcak gazları filtrelemek için kullanılırlar. Sıkıştırılmış gaz endüstrisinde alev geciktirici olarak, uçak hava giriş kanallarında buzlanmayı önlemek için ve silah endüstrisinde susturucu olarak kullanılırlar.



Şekil 4.14. Gözenekli metallere ve filtreler [44]

4.7.4. Debriyaj ve Fren Balataları

Toz metalurjisi üretim teknolojisinin ana avantajlarından biri, farklı veya karışmayan malzemeleri toz halinde birleştirme yeteneğidir. Metal tozlar ve sürtünmeyi arttırıcı reçineler ve katkı maddelerinin bu yöntemle sıkıştırılabilmesi, Şekil 4.15'te görülen balataların ve debriyajların üretimini de mümkün kılmıştır.



Şekil 4.15. Fren balatası [58]

4.8. Toz Metalurjisi Yöntemi ile Üretilen Parçaların Analizi

4.8.1. TM Parçalarının Mekanik Özellikleri

Mekanik özelliklerin hesaplanmasında kullanılacak olan standart yöntemleri tanımak ve bu deneylerden ortaya çıkan sonuçlar farklı parametrelere bağlı şekilde değerlendirilmelidir. Bir malzemenin statik ölçüdeki yüklere karşı olan mukavemeti basma ve çekme tekniğiyle belirlenir. Statik deneyler vasıtası ile plastik şekil değiştirmelere karşı dayanıklılık hakkında bilgi elde edilebilir. Darbe deneyi malzemenin darbe etkisindeki zorlanmalara karşı oluşturmuş olduğu mukavemetin belirlenmesi amacıyla yapılır. Bu deneyler çeşitli sıcaklıklar altında yapılarak parçanın gevrek-sünek geçiş sıcaklıklarının hesaplanması sağlanır. Parçaların yüksek sıcaklık altındaki özelliklerini gözlemlemek için sürünme deneyleri yapılır.

4.8.2. TM Parçalarının Sertlik Özellikleri

TM ile üretilen parçaların sertlik ölçümü genellikle Brinell Sertlik Ölçme yöntemi ile tespit edilebilmektedir. Ergimeyle oluşmuş metallerde sertlik ile çekme mukavemeti arasında doğrusal ilişki TM ile üretilen parçalarda görülmemektedir. TM parçaları gözenekli bir yapıda olmaları sebebiyle sertlik değerinin ölçümünde ölçüm noktasının yeri oldukça önemlidir. Eğer ölçüm noktası gözenek üstünde ya da yakınında olursa büyük iz oluşacağı için sertlik değerinde yanlış sonuç elde edilir.

4.8.3. TM Parçalarının Mikroyapısal Özellikleri

Toz metalurjisi parçalarının mikro yapısı, alaşımlama tekniklerine ve üretim süreçlerine bağlıdır. Ortaya çıkan mikro yapı, mevcut kimyasal bileşime ve faza bağlı olarak tek tip veya tek tip olmayabilir. Homojen veya heterojen üst yapının yorulmayı nasıl etkilediği konusunda bir fikir birliği yoktur. Alaşımlama teknikleri, toz metal parçaların mikro yapısı ve gözenek morfolojisi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir.

4.8.4. Yüzey ile İlgili Özellikler

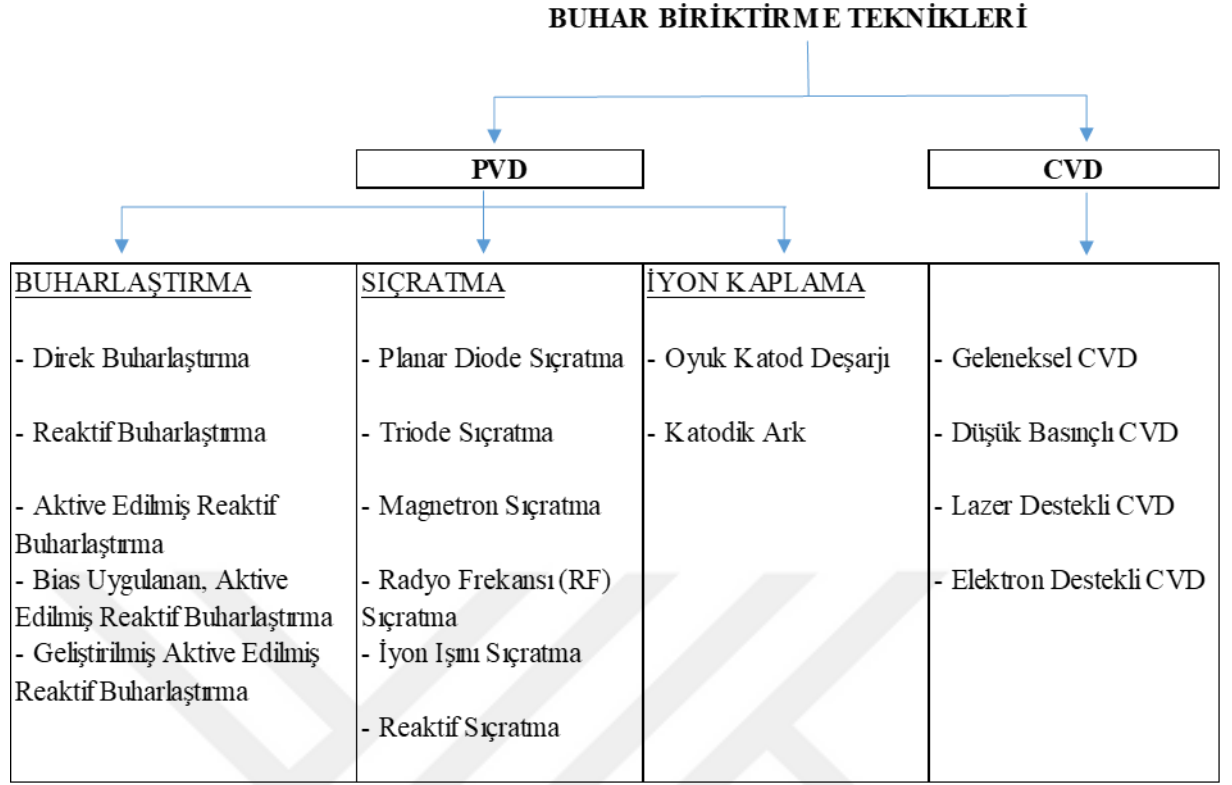
Oksitlenme ve korozyon gibi olaylar malzemenin yüzey ile alakalı fonksiyonları arasında yer alır. Toz metalurjisi yöntemi ile üretilen malzemelerin yapısında bulunan gözeneklilik oranının fazla olması halinde gözeneklerde oluşan ve devamında biriken akışkan nedeniyle korozyon daha hızlı ortaya çıkar. Uygun sinterleme şartlarında üretilen malzemelerin çevre direnci yüksek derecede olduğu gözlemlenmiştir.

5. YÜZEY KAPLAMA YÖNTEMLERİ

Malzemelerin yüzey işlevlerini değiştirmek, onlara yeni teknik özellikler kazandırmak ve onları dekoratif olarak çekici hale getirmek uzun zamandır bir insan hedefi olmuştur. Hâlihazırda malzeme yüzey modifikasyon işlemi, "yüzey malzemesi ile taban malzemesi tasarımlarını birlikte işleyebilen ve her ikisinin tek başına sağlayamayacağı pratik işlevleri sağlayan bir işlem" olarak tanımlanmaktadır. Özellikle 1990'lı yıllardan itibaren yüzey mühendisliği daha önemli hale gelmiştir. Yüzey işlemlerinin önemi hala hem klasik hem de modern tekniklere dayanmaktadır ve giderek daha fazla önem kazanmaktadır [59].

Yüzey işlemleri, dökme olmayan temel malzemelere özellikler kazandırarak, daha uygun maliyetli ve üretilmesi kolay malzemelerin yalnızca yüzeylerini değiştirerek yapılan işlemlerdir. Kaplama işleminde iki parametre esas alınır. Bu parametreler, kaplama kalınlığı ve uygulama sıcaklığıdır. Kaplamanın kalınlık durumuna göre uygulanmakta olan kaplamalar ince film ve kalın film kaplamalar olmak üzere ikiye ayrılmaktadır (Şekil 5.1).

İnce film kaplamalar Fiziksel buhar biriktirme (PVD) ve kimyasal buhar biriktirme (CVD) olmak üzere iki ana işlemle kaplanır. İki işlem arasındaki temel fark, PVD' de kaplama malzemesinin fiziksel olarak buharlaşması, CVD' de ise bir dizi kimyasal reaksiyonla yapılmasıdır. Bunlardan PVD ince filmlerin kaplanması çeşitli avantajlarıyla daha önde gelen ve gelişime açık olan tekniktir [60].

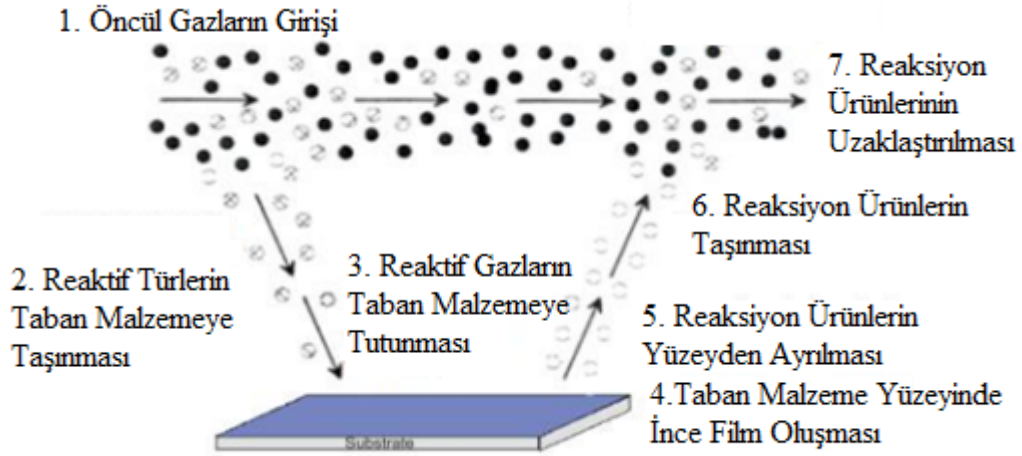


Şekil 5.1. Buhar biriktirme teknikleri [61]

5.1. Kimyasal Buhar Biriktirme (CVD)

Bu işlemde kaplanacak malzeme sıvı veya katı fazda radyasyon, girdap akımları, elektron şokları, lazerler veya arklar kullanılarak buharlaştırılır. Sistem vakum altında olduğundan buharlaşan atomlar kaplanacak parçaya doğru enerjilerini kaybetmeden ilerleyebilirler ve parça üstünde önce çekirdek oluşumu daha sonra çekirdeğin gelişimi biçiminde birikirler. Buhar fazındaki kaplanacak malzeme atomları düşük enerjiye sahiptir, bu sebeple daha az yapışma ve yoğunluk gösteren film elde edilir.

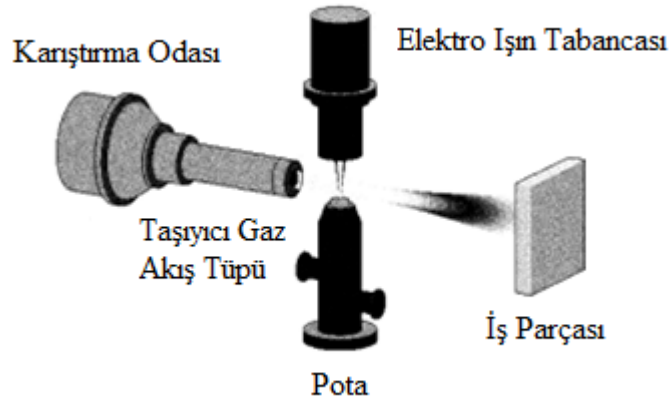
Reaktif bir gaz kullanılarak çok daha karmaşık bir kaplama yapısı elde edilebilir. Buharlaştırma ile kaplama işlemi; doğrudan buharlaştırma, aktif buharlaştırma, reaktif buharlaştırma ve aktif reaktif buharlaştırma olarak sınıflandırılabilir. Şekil 5.2 CVD aşamalarını göstermektedir.



Şekil 5.2. Kimyasal buhar biriktirme mekanizması [62]

5.1.1. Direkt Buharlaştırma Tekniği

Doğrudan buharlaştırma en temel ve en basit kaplama tekniğidir. Yüksek güç yoğunluğuna sahip ısıtıcı yardımı ile buharlaştırılmak istenen malzeme buharlaştırılır. Buharlaşan malzeme atomları kaplanacak malzemede birikir. Birikim, kullanılan ısı kaynağının çıkışına ve buhar kaynağından kaplanacak malzemeye olan mesafeye bağlıdır. Şekil 5.3' te basit olarak tasarımı gösterilmiştir.



Şekil 5.3. Doğrudan buhar biriktirme sisteminin basit tasarımı [63]

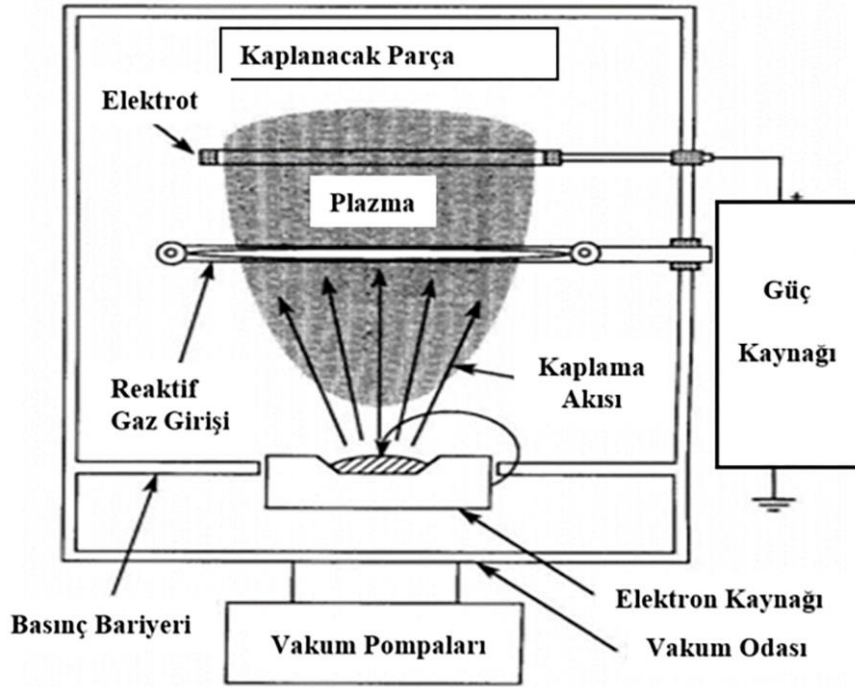
5.1.2. Reaktif Buharlaştırma Tekniği

Bu teknik mevcut kaplama yapılacak ortamdaki reaktif gaz veya gazların kullanılması neticesinde “Direkt Buharlaştırma Tekniği” ile aynı üretim yöntemine sahiptir. Basıncın etkisine bağlı olarak kaplama yapılacak malzeme yüzeyine atomların yaptığı taşınım süresi çok azdır.

Malzeme yüzeyi ile Reaktif Gaz'ın tepkimeye girmesi neticesinde kaplama gerçekleşmektedir. Birikme hızının düşük olması bu yöntemi dezavantajlı olarak kılmaktadır [64].

5.1.3. Aktive Edilmiş Reaktif Buharlaştırma Tekniği

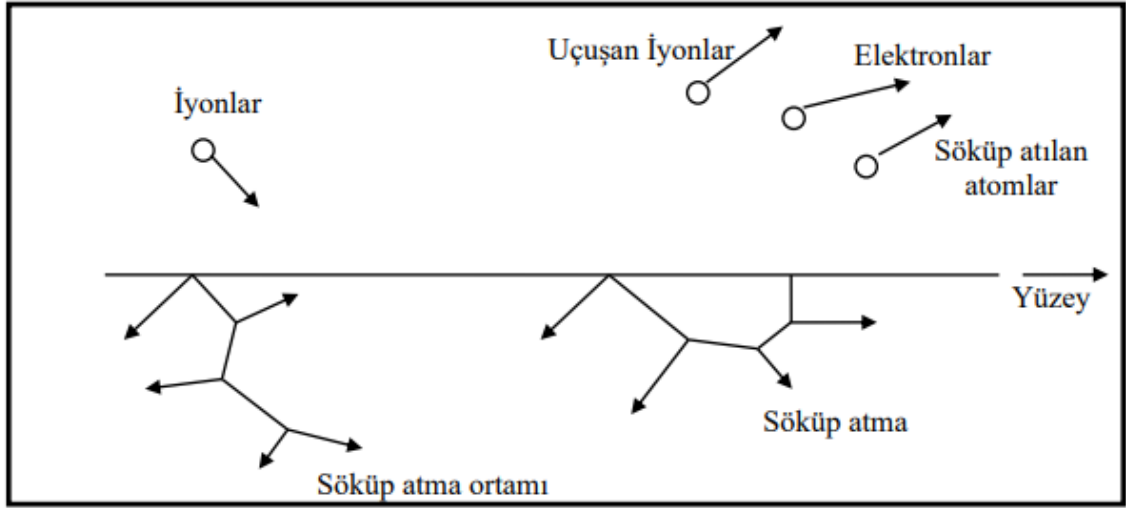
Bu teknikte basınç reaktif buharlaştırma sistemine göre daha yüksektir (Şekil 5.4). Parçaya yakın bölgeye konmuş olan (+) veya A.C. potansiyelli elektrot ile plazma oluşumu sağlanır. Bu yöntemde reaktif gaz ile kaplanacak malzeme atomları arasındaki reaksiyon, parça yüzeyine ulaşmadan gerçekleşir [64].



Şekil 5.4. Aktive edilmiş reaktif buharlaştırma tekniği [64]

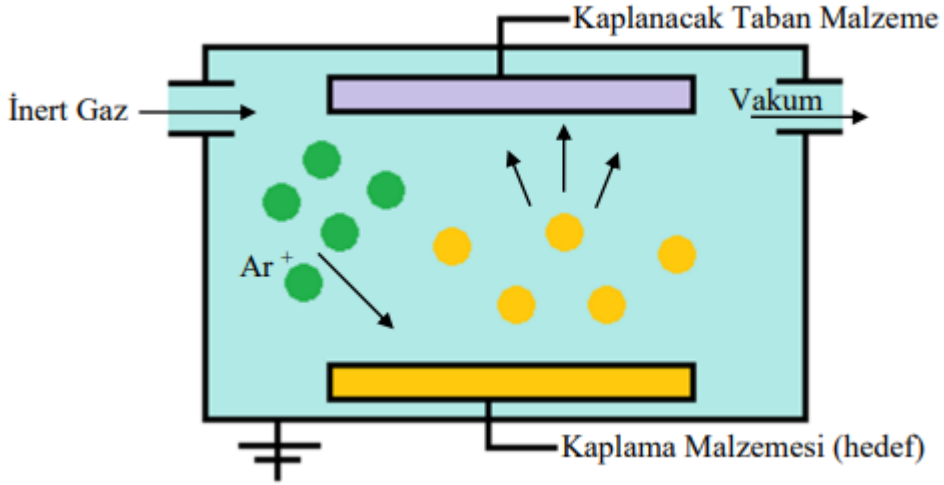
5.2. Sıçratma Yöntemi

Sıçratma tekniğinde, buhar fazının elde edileceği hedef malzeme, pozitif gaz iyonları ile bombardımana tutularak, hedef malzeme yüzeyinden atom ya da atom grupları kopartılır, Hedef malzeme yüzeyinden kopartılan atom ya da atom grupları, oluşan plazma içerisinde buhar fazına geçerler. Buhar fazının, alt malzeme yüzeyinde biriktirilmesi sonucunda sıçratma ile buhar fazının elde edildiği PVD kaplama gerçekleştirilmiş olur. Şekil 5.5 ve 5.6 da sıçratma yönteminin aşamaları görülmektedir.



Şekil 5.5. Sıçratma yönteminin şematik gösterimi [65]

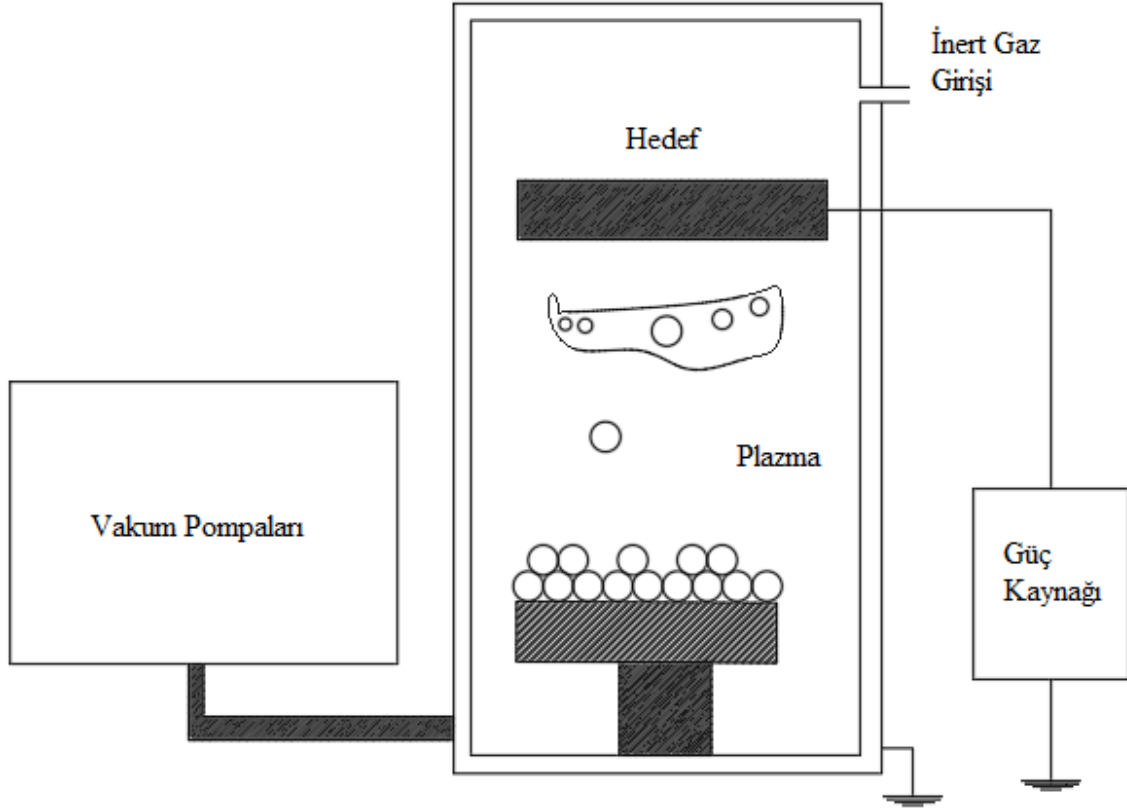
Sıçratma tekniğinin en önemli dezavantajı sıçratma amacı ile kullanılacak olan enerjinin %1'inin sıçratma işlemini gerçekleştirmesidir. Bunu engellemek için iyonların hedefe çarpma açısı 70° den düşük tutulur. Sıçratma yöntemleri Planar Diode, Triode, Magnetron ve Reaktif Sıçratma Teknikleri olarak sınıflandırılmıştır.



Şekil 5.6. Sıçratma mekanizması [66]

5.2.1. Planar Diode Sıçratma Tekniği

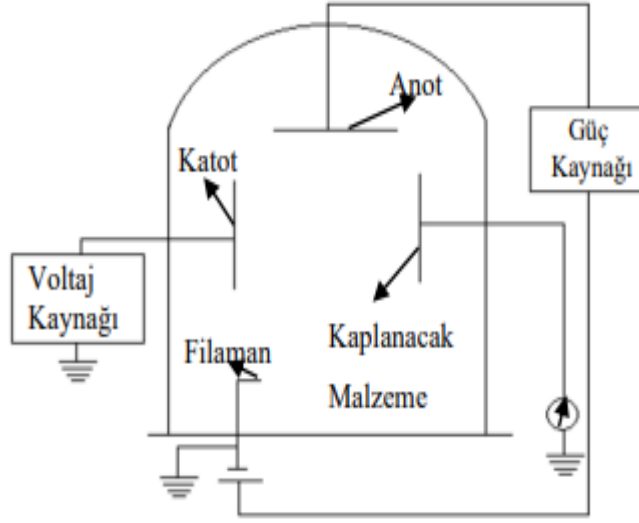
Bu yöntemde kullanılacak olan hedef düz yüzeylidir ve hedef ile vakum odası arasına 1-5 kV'lık bir potansiyel uygulanmaktadır. Kaplama hızı diğer yöntemlere nazaran oldukça düşüktür. İnce kompleks kaplamalar ve küçük boyutlu laboratuvar tipi uygulamalar için idealdir. Bu yöntemin uygulanmasının en büyük avantajı çok kolay bir sistem olmasıdır. Şekil 5.7 planar diode sıçratma tekniği mekanizmasını göstermektedir.



Şekil 5.7. Planar diode sıçratma tekniği [64]

5.2.2. Triyot Sıçratma Tekniği

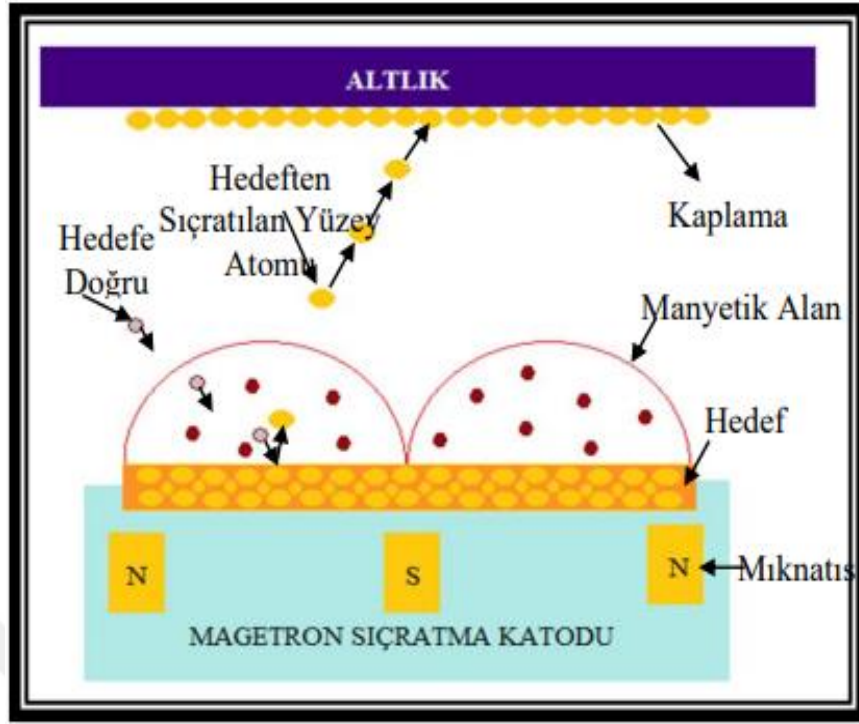
Triyot sıçratma yönteminde ise, diyot sıçratma sisteminden farklı olarak anot ve katot arasına elektron yayan bir flaman ve elektron toplayıcı ilave edilmiştir (Şekil 5.8). Bu sayede plazmanın iyon akım yoğunluğu artırılmış başka bir deyişle plazma empedansı düşmüştür. Bu sayede sistemdeki elektron miktarı ile doğru orantılı olan uygulama potansiyeli de düşürülebilmıştır. Bu düzeneğin bir diğer avantajı da uygulama potansiyelinin düşürülmesi sayesinde kaplamadaki radyasyondan kaynaklanan hasarlar azaltılmıştır [67].



Şekil 5.8. Triyot sıçratma sistemi [68]

5.2.3. Manyetik Sıçratma Tekniği

Manyetik alanda püskürtme, fiziksel buhar biriktirme işlemi ile ince filmleri kaplamak için en yaygın kullanılan yöntemlerden biridir. Bu yöntemin ilk kullanılmaya başlandığı yıllarda elde edilen kaplamaların fonksiyonları istenildiği gibi olmasa da, bugüne dek yapılmış olan çeşitli gelişmeler sayesinde istenen özellikte metal, alaşım, seramik, yalıtkan malzemelerden tek ve yüksek katlı kaplamalar yapmak ve büyük yüzey alanına sahip parçaların kaplanmasında eş biçimli bir kaplama elde etmek olanaklı hale gelmiştir. Şekil 5.9 manyetik sıçratma tekniğinin aşamalarını göstermektedir.



Şekil 5.9. Manyetik sıçratma işlemi [69]

5.2.4. Reaktif Sıçratma Tekniği

Reaktif püskürtme, öncelikle bir yüzey kaplama işlemi olarak kabul edilmez. Diğer püskürtme tekniklerinde kaplanacak malzeme bileşenlerinden en az birinin gaz halinde ortama bırakılması işlemine reaktif püskürtme denir [64].

Atmosfere salınan reaktif gaz ile kaplanacak malzeme arasındaki reaksiyon, hedef malzemenin yüzeyinde gerçekleşir ve ardından bu bileşiğin saçılması gerçekleşir. Reaksiyon kaplanacak parçanın yüzeyinde de meydana gelir.

5.3. Sıcak Preslemeli Sinterleme Yöntemi ile Kaplamada Uygulama Esasları

Bu yöntem alışıla gelmiş diğer kaplama yöntemlerine göre son zamanlarda dikkat çekmektedir. Diğer yöntemlere göre istenilen kalınlıkta tabaka elde etmek bu yöntem için oldukça kolaydır. 3-4 mm kalınlıkta altlık malzemelerinin kaplanması mümkündür. Bu durum sıcak preslemeli sinterleme yolu ile yapılan kaplama tekniğinin, alt malzeme yüzeyinde koruyucu ve katman kalınlığının ayarlanabilir bir yöntem olduğunu ortaya çıkarmaktadır.

Öncelikle kaplama katmanını oluşturacak toz karışımları hazırlanır. Ardından kaplama yapılacak yüzey zımpara kâğıdında üzerindeki oksit tabakasının ve artık malzemelerin giderilmesi için mekanik olarak temizlenir. Tozlar belirlenen oranlarda hassas terazide tartılır ve özel olarak

hazırlanmış 3B mikser karıştırıcı içerisinde belirlenen devir ve sürede karıştırılır. Daha sonra sinterleme sıcaklığına kadar ısıtılıp presleme işlemi uygulanır. Bu işlem kül fırınları ya da indüksiyonla yapılabilmektedir.

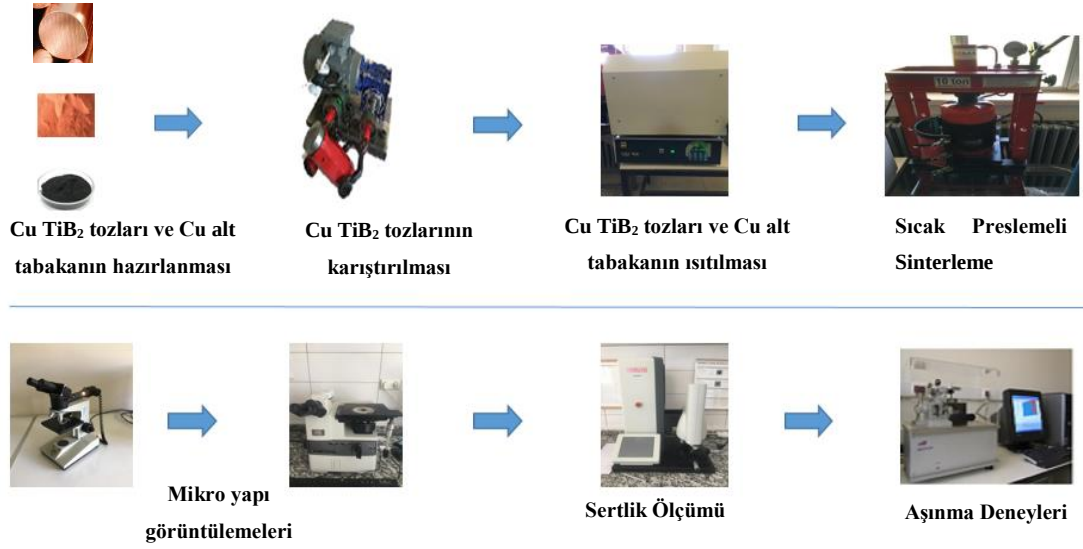
Sıcak preslemeli sinterleme yöntemi ile kaplama işleminde oluşan kaplama katmanı ve kaplama katmanı ile alt malzemenin ara yüzey mikroyapı özellikleri, kaplama katmanının makro ve mikro sertliği ve aşınma dirençleri olumlu yönde etkilenmektedir.



6. MATERYAL VE METOT

Bu çalışmada, sıcak preslemeli sinterleme yöntemi kullanılarak saf bakır alt tabaka malzemesi Cu- TiB₂ tozları ile kaplanmıştır. Kaplanmış malzemenin mikro yapı, makro sertlik ve ileri-geri lineer aşınma davranışları incelenmiştir. İncelemelerde kaplama tabakasında kullanılan takviye toz oranının ve sinterleme sıcaklığının etkileri olmak üzere iki grupta araştırılmıştır. Alt tabaka malzemesi olarak kullanılan bakır, yüksek elektriksel ve termal iletkenlikleri, düşük maliyeti ve imalat kolaylığı nedeniyle endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, nispeten düşük sertlik, düşük mukavemet ve zayıf aşınma direnci, özellikleri uygulamalarını sınırlamaktadır [70, [71], [72], [73]. Deneysel çalışmalarda saf bakır alt tabaka malzemesi Ø12 çapında çubuk halindeki malzemeden 5 mm kalınlığında kesilmiştir. Kaplama yapılacak yüzeyindeki oksit tabakasının ve artık malzemelerin giderilmesi için 800 mesh SiC zımpara kâğıdında mekanik olarak temizlenmiştir.

Kaplama tabakasında Cu ve TiB₂ tozları kullanılmıştır. Cu tozu < 63 µm %99.7 saflık ve TiB₂ tozu ise 2-6 µm % 99 saflık özelliklerine sahiptir. Tozlar belirlenen oranlarda hassas terazide tartılmıştır. Bir kap içerisine 10 ve 5 mm çapındaki bilyeler 1:1 oranında ve bilye toz oranı 15:1 olacak şekilde birlikte konulmuştur. Özel olarak hazırlanmış turbula mikser 3 eksenli karıştırıcı içerisinde 350 rpm devrinde 25 dakika sürede karıştırılmıştır. Cu alaşımının TiB₂ ile kaplanması işleminin akış diyagramı Şekil 6.1 verilmiştir. Numunelerin hazırlanmasında kullanılan kaplama işlem parametreleri Tablo 6.1’de verilmiştir.



Şekil 6.1. Kaplama işlemi akış diyagramı

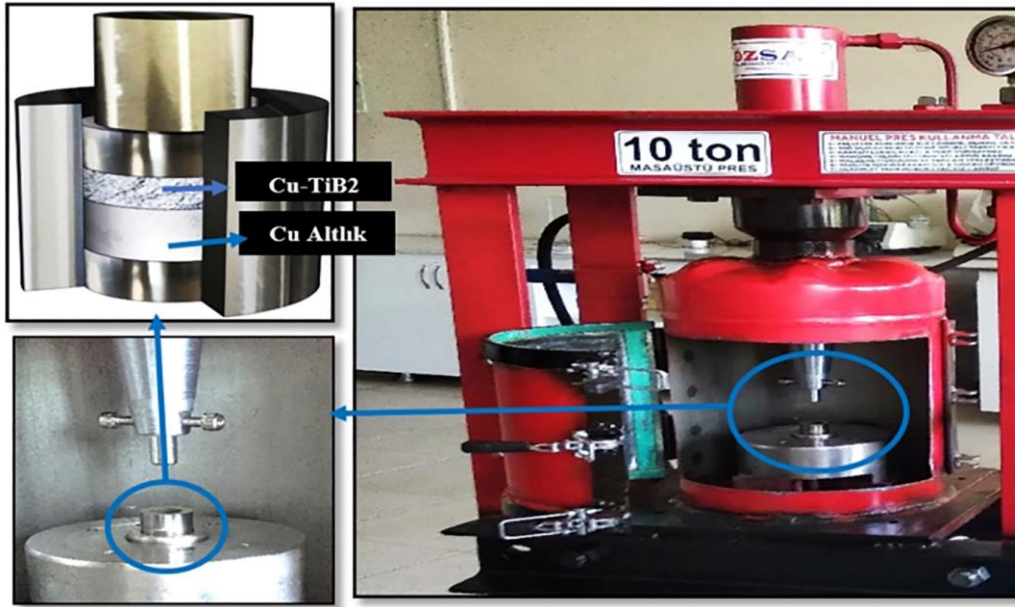
Tablo 6. 1. Cu altlık malzemesini TiB₂ ile kaplama işlemi parametreleri

Üretim parametreleri	N1	N2	N3	N4	N5
1.Grup					
TiB ₂ partikül takviye oranı % vol	0	5	12,5	20	25
Presleme basıncı MPa	110	110	110	110	110
Sinterleme Sıcaklığı °C	950	950	950	950	950
Koruyucu gaz	%99 Argon gazı				
Üretim parametreleri	N1	N2	N3		
2. Grup					
TiB ₂ partikül takviye oranı % vol	12,5	12,5	12,5		
Presleme basıncı MPa	110	110	110		
Sinterleme Sıcaklığı °C	900	950	1050		
Koruyucu gaz	%99 Argon gazı				

Cu alt tabakanın kaplanması tozların preslenme aşaması için hazırlanmış olan dişi kalıp içerisine önce Ø12X5 mm edatlarındaki HSS plaka yerleştirilmiştir. Üzerine Cu substrate temizlenmiş yüzeyi üste gelecek şekilde yerleştirilip hazırlanmış olan toz karışımı dişi kalıp içerisine konulduktan sonra yine HSS plaka konulmuştur. Dişi kalıp argon gazı ortamında çalışan Nüve Mf 120 fırın içerisinde farklı sıcaklıklarda ısıtılıp 25 dakika bekletilmiştir. Isınmış olan numune özel olarak tasarlanmış Ar gazı ortamında kapalı haznesi olan presleme tezgâhında belirlenen basınç altında preslenip 5 dakika basınç altında bekletilerek kendiliğinden soğuması

sağlanmıştır. Cu altlık malzemesinin Cu-TiB₂ ile kaplanması işleminin yapıldığı ünite Şekil 6.2 verilmiştir. Mikroyapı incelemeleri ve aşınma testleri için aynı numuneden iki adet üretilmiştir.

Kaplama katmanı, ara yüzey ve alt tabakanın mikro yapı incelemeleri için numune hassas kesim cihazında kesilmiştir. Parçalardan birincisi XRD incelemeleri için kaplama yüzeyi 1000 mesh SiC zımpara kâğıdı ile mekanik olarak temizlenip alkol ile yıkanıp kurutulmuştur. XRD, 20-90° tarama aralığında, 0,005° adım aralığı ve Cu_{Kα} radiation ($\lambda = 0.15406 \text{ Å}$) şartlarında Rigaku Miniflex 600 difraktometre yardımı ile gerçekleştirilmiştir. İkinci parçanın kesit yüzeyi ise mikroyapı incelemeleri için 400, 600, 800, 1000 ve 1200 mesh zımpara kâğıdı ile mekanik olarak yüzey çiziklerinden arındırılmıştır. Daha sonra 1 µm elmas pasta kullanılarak yüzeyi parlatılıp alkol ile temizlenip kurutulmuştur. Parlatılan numuneler (30ml HCl + 10ml FeCl₃ + 120ml Su) bakır dağlayıcı çözeltisi ile yaklaşık 15 saniye dağlandıktan sonra yüzey morfolojisi incelendi. Mikro yapı incelemeleri Clemex Software programlı Nikon Eclipse MA200 marka cihazda optik ve Tescan Mira3 cihazda SEM görüntüleri alınıp, EDS analizleri yapılmıştır. Numunelerin kaplama yüzeyinden BMS sertlik ölçme cihazda 1/10” çelik bilye kullanılarak 15 kgf ön yükleme toplam 62,5 kgf uygulanarak makro sertlikleri alınmıştır. Numunelerin kaplama yüzeyleri, aşınma deneyi için temizlendi ve kurutuldu. Lineer ileri geri aşınma testleri, disk üzerinde bilyeli mekanizma kullanılarak CSM / Anton Paar Enstrüman Tribometre cihazında ASTM G133 standartları altında gerçekleştirilmiştir. Bu testler malzeme koşullarına karşı 3 N kuvvet, 250 m kayma mesafesi ve ASTM A276 altında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6.2. Kaplama işlemi

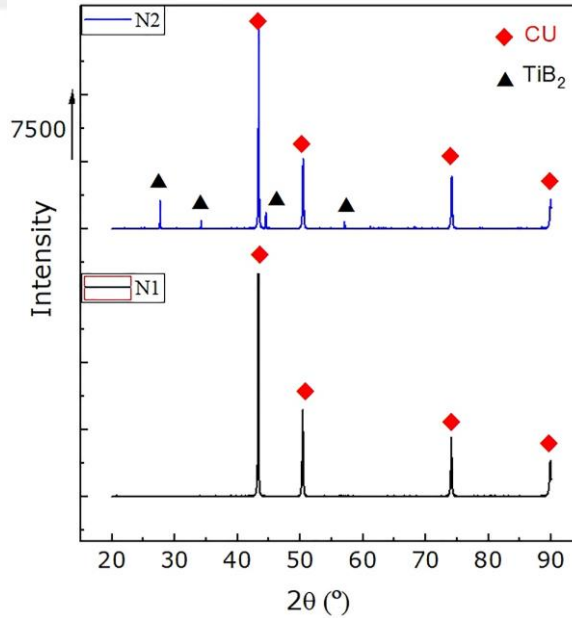
7. BULGULAR VE TARTIŞMA

Cu alt tabakanın sıcak preslemeli sinterleme yöntemi kullanılarak Cu- tozları ile kaplanmasında değerlendirmeleri iki başlık altında değerlendirilmiştir. Bunlar; toz karışım oranında TiB_2 'nin etkisi ve sinterleme sıcaklığının etkileridir.

7.1. Cu Alt Tabakanın Kaplanmasında Toz Karışımında TiB_2 'nin Etkisi

7.1.1. XRD Analizi

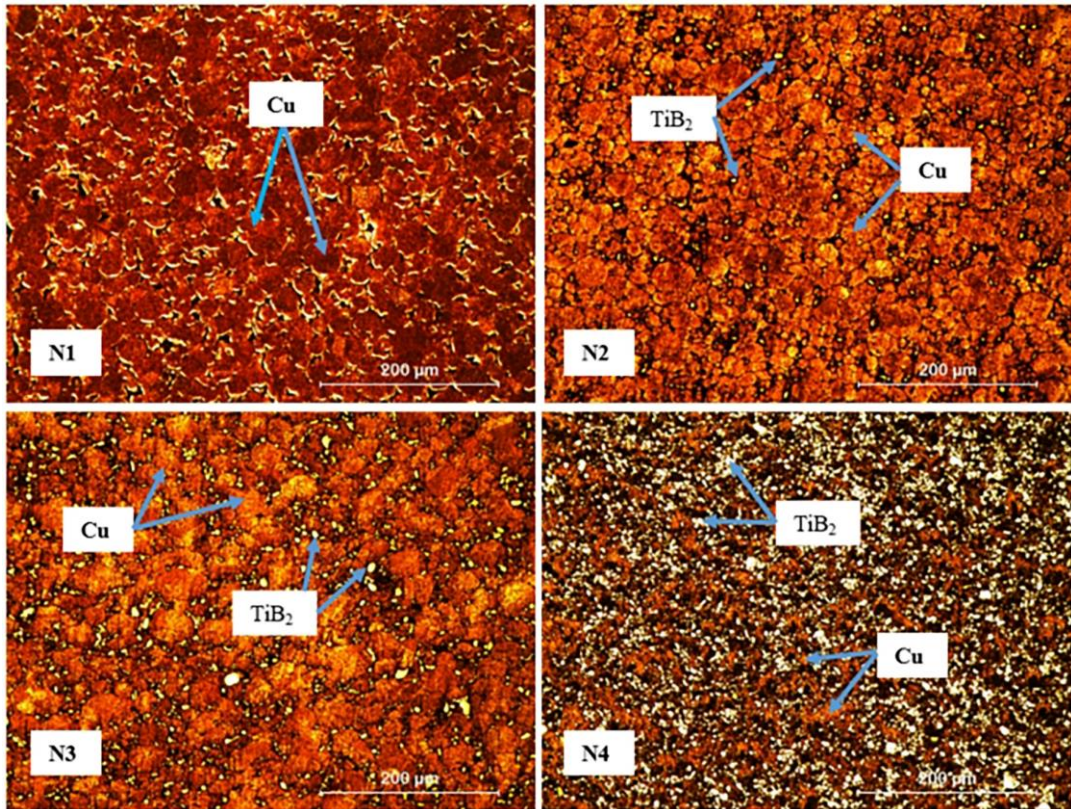
Şekil 7.1' de N1 ve N3 numunelerin XRD analiz sonuçları görülmektedir. XRD analizleri kaplama tabakası yüzeyinden alınmıştır. N1 numunesi saf bakır tozu içerdiği için XRD analizlerinde sadece Cu fazlarını içermektedir. XRD pikleri literatürden indislenmiştir [74], [75]. N3 numunesinde Cu fazının yanı sıra TiB_2 fazları içermektedir. Cu' nun tepe noktaları açık bir şekilde görülürken, TiB_2 'nin ve reaksiyon ürünlerinin tepe noktaları daha az belirgindir. Bunun sebebi TiB_2 'nin düşük kırılma kabiliyetinden ve reaksiyon ürünlerinin daha az faz içeriğinden kaynaklanmaktadır [76]. XRD analizlerinde literatüre uygun olarak Cu fazının 43.6, 50.8 ve 74.4 pik verdiği görülmektedir [77]. Ayrıca TiB_2 piklerinin ise 27.5, 34.4, 44.4 ve 56.9 2θ değerlerinde pik verdiği görülmektedir [78].



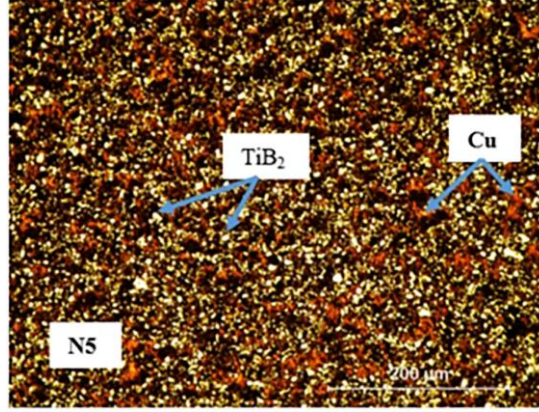
Şekil 7.1. N1 ve N3 nolu numunelerin XRD spektrogramları

7.1.2. Mikro Yapı

Şekil 7.2 ve 7.3’de sıcak preslemeli sinterleme yöntemi kullanılarak Cu-TiB₂ tozları ile kaplanmamış saf bakır alt tabakanın kaplama tabakasının mikro yapı görüntüleri verilmiştir. Şekil 7.2’de kaplama tabakasının optik fotoğrafları incelendiğinde Cu ve TiB₂ tozlarının iyi bir şekilde karıştığı ve mekanik karışma sonucu TiB₂ partiküllerinin Cu matris içerisinde homojen bir dağılım görülmektedir. Şekil 7.2 ve 7.3’de N1, saf Cu ile kaplanmış yapıyı ve N2-N5’de ise kaplama tabakasını oluşturan Cu matris ile takviye elemanı olarak kullanılan TiB₂ partiküllerin yapı içerisinde homojen olarak dağıldığı ve topaklaşmanın olmadığı görülmektedir. Şekil 7.2 ve 7.3’de N2-N5 sırası ile %5, %12,5, %20 ve %25 oranında TiB₂ partikül takviyesi katılmış Cu matrisli kaplama tabakasının mikroyapıları görülmektedir. N1 numunesinde kullanılan sıcak preslemeli sinterleme yöntemi sonucu Cu tanelerinin mekanik bir bağ ile bağlandığı ve taneler arasındaki boşlukların çok az olduğu görülmektedir. N2-N5 numunelerinde ise TiB₂ takviye partiküllerinin oranına bağlı olarak mikro yapılarında farklılık görüldüğü, TiB₂ partiküllerinin kaba Cu tane sınırları arasına yerleştikleri görülmektedir.

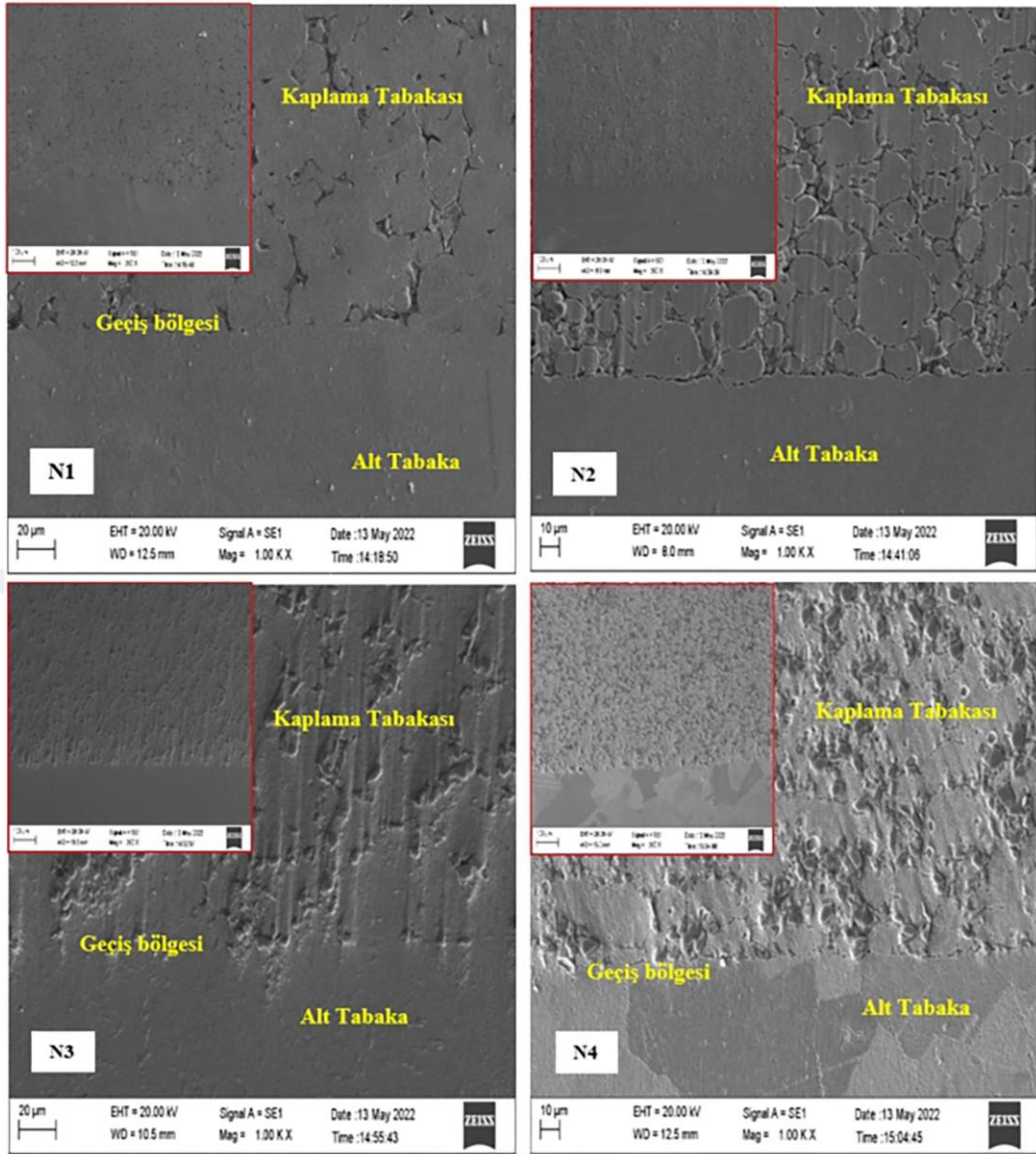


Şekil 7.2. TiB₂ oranının etkisi için üretilen N1 N2 N3 ve N4 numunelerinin optik mikro yapı görüntüleri

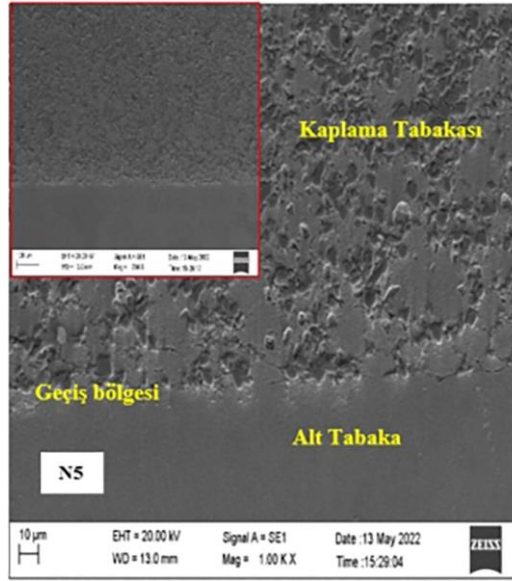


Şekil 7.3. TiB₂ oranının etkisi için üretilen N5 numunesinin optik mikro yapı görüntüsü

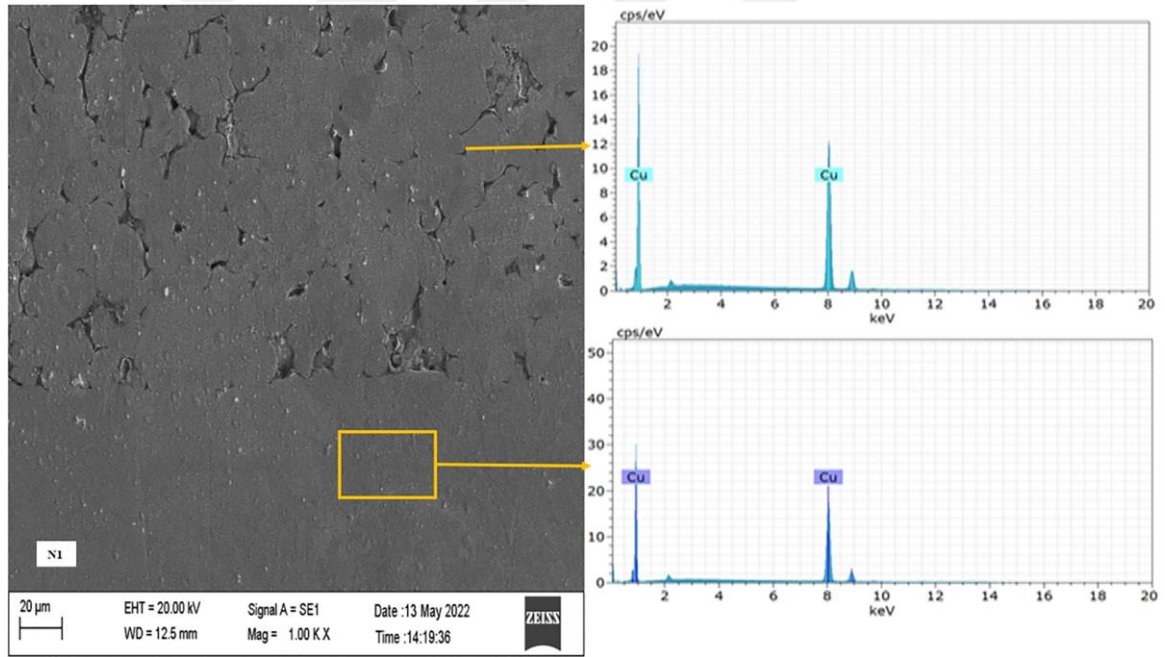
Şekil 7.4 ve 7.5’ te Cu-TiB₂ ile kaplanmış numunelerin enine kesitinden alınan kaplama tabakasının ara yüzeyleri verilmiştir. Şekil 7.4’ te N1 numunesinin kaplama tabakası saf Cu tozlarından oluşmaktadır. Saf Cu alt tabaka ile kaplama arasında belirli bir bölgenin iyi bir ıslatma özelliği ile metalürjik bağ oluşturduğu, gözenek ve çatlakların olmadığı görülmektedir. N2, N3, N4 ve N5 nolu numunelerinin kaplama tabakasında TiB₂ oranı sırası ile %5, %12,5, %20 ve %25 hacim oranında bulunduğu görülmektedir. Bu örneklerde, TiB₂ parçacıklarının Cu matrisi içinde topaklanma olmaksızın ve alt-tabaka ile kaplama tabakası arasında bir difüzyon bölgesi ile muntazam bir şekilde dağıldığı görülebilir. Şekil 7.6 ve 7.7’de gösterilen N1 ve N4 numunelerinin EDS analizleri de alt tabakadan kaplama tabakasına difüzyonun bu bölgede gerçekleştiğini göstermektedir. N2 ve N3 numunelerinin kaplama bölgesinden alınan Cu matrisinin TiB₂ takviye partiküllerini çevrelediği ve boşluk içermediği görülebilir.



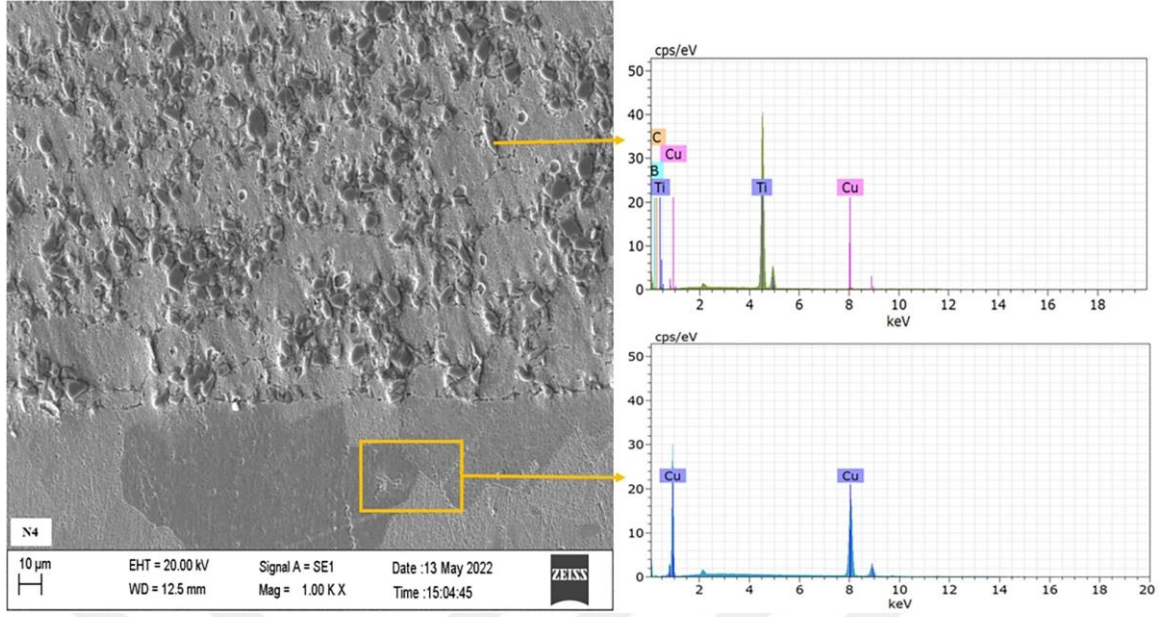
Şekil 7.4. N1 N2 N3 ve N4 Numunelerinin enine kesit yüzey mikroyapı SEM görüntüleri



Şekil 7.5. N5 Numunesinin enine kesit yüzey mikroyapı SEM görüntüsü



Şekil 7.6. N1 numunesinin enine kesit yüzey mikroyapı SEM görüntüsü ve EDS analizleri

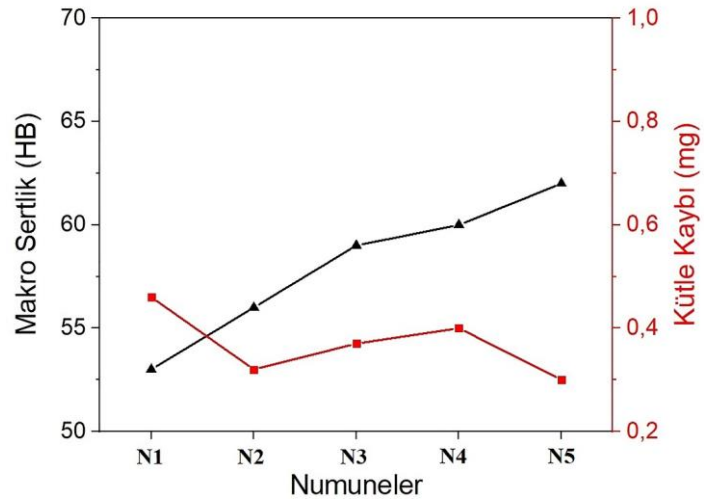


Şekil 7.7. N4 numunesinin enine kesit yüzey mikroyapı SEM görüntüsü ve EDS analizleri

7.1.3. Makro Sertlik ve Aşınma Direnci

Malzeme yüzeyindeki koruyucu tabakayı araştırmak için sertlik değeri oldukça önemlidir. Kaplama sertliği malzemenin aşınma direncini etkilediğinden, numunelerin kaplamasından makroskopik sertlik HB ve aşınmaya bağlı kütle kaybı ölçümleri elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 7,8'de gösterilmiştir. Bu sonuçların incelenmesi, kaplama tabakasının TiB_2 içeriğinin artırılmasının sertlik değerini arttırdığını ve kütle kaybını azalttığını ortaya koymaktadır.

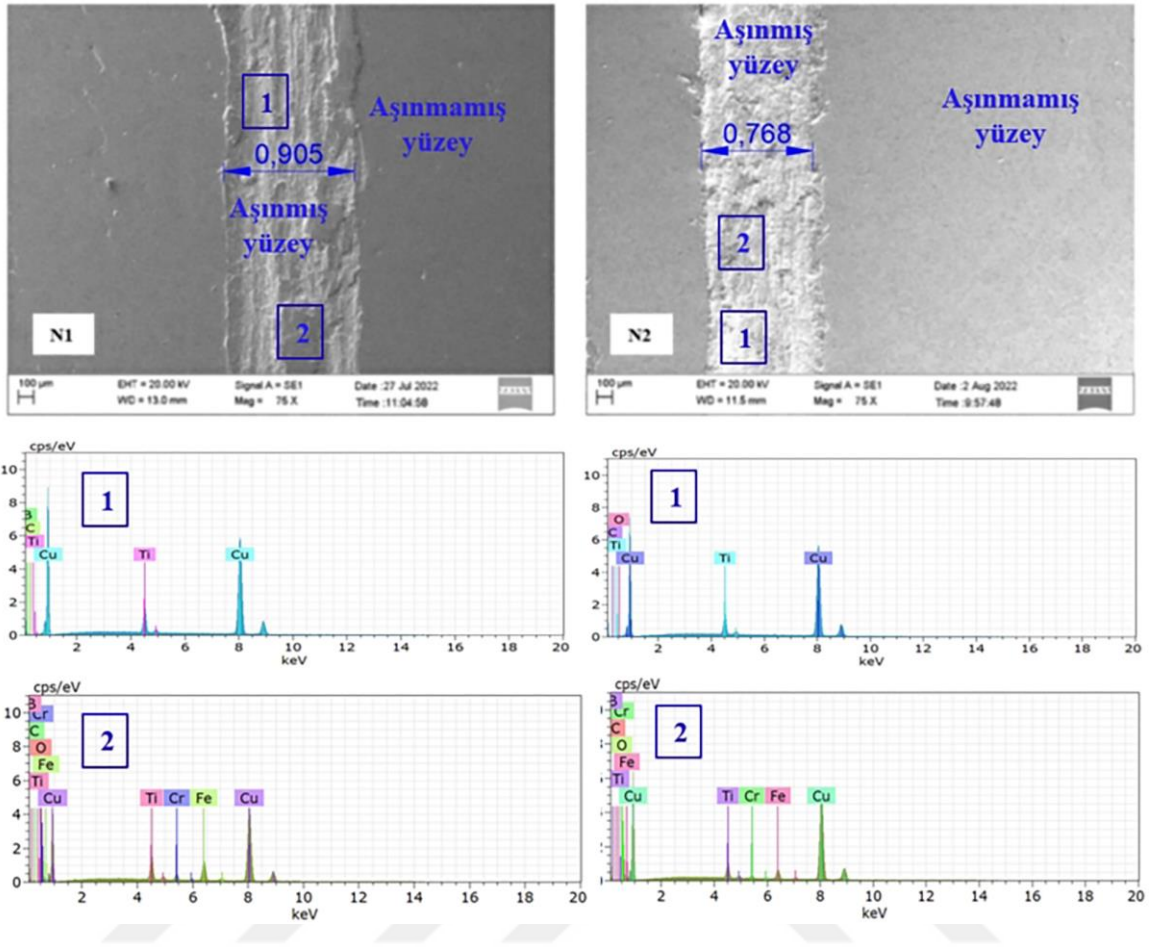
Şekil 7.8' de elde edilen sonuçlar incelendikten sonra, saf Cu tozu ile kaplanmış N1 numunesinin makro sertliğinin düşük ve kütle kaybının yüksek olduğu tespit edildi. Sert partiküller olarak bilinen TiB_2 'deki artış, aşınma direncini arttırmış ve aşınmış yüzeyde azalan temas alanı nedeniyle kütle kaybını azaltmıştır. N3 ve N4 numunelerinin TiB_2 oranının ve makro sertliğinin N2' den fazla olmasına karşılık, aşınma işlemi sırasında birikintilerden kaynaklanan aşınma mekanizması nedeniyle N2 numunesinin daha fazla kütle kaybettiği görülmektedir.



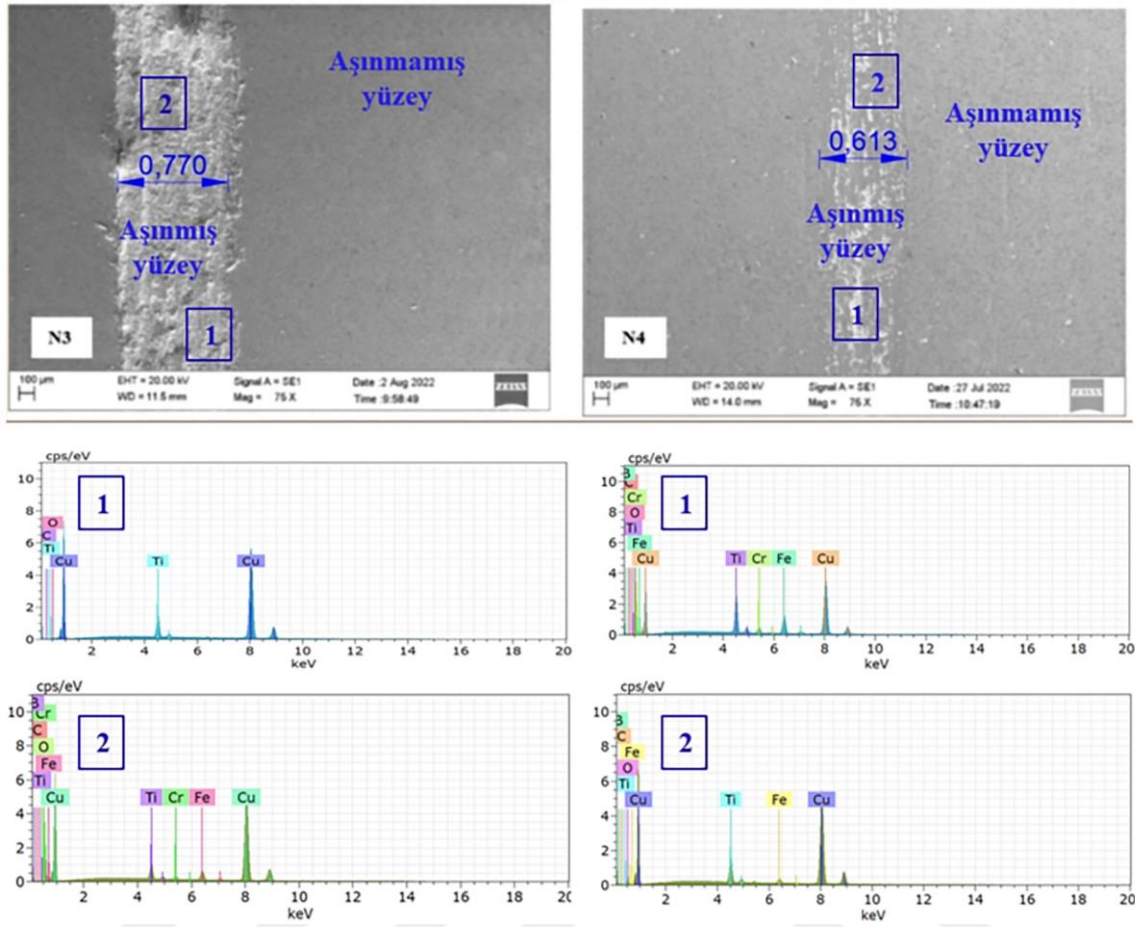
Şekil 7.8. TiB₂ hacim oranına göre makro sertlik ve aşınma kütle kayıpları

Şekil 7.9, 7.10 ve 7.11, aşınma izlerini incelemek için TiB₂'den zengin ve TiB₂'den fakir bölgelerden oluşan Cu- TiB₂ kompozitlerinin mikroyapı görüntülerini göstermektedir. N1-N5 test numunelerinden mikroyapı görüntüleri alınmıştır. Mikroyapı görüntülerinde, aşınma izlerinin TiB₂'ce az olduğu numunelerde daha derin, TiB₂'ce fazla olduğu numunelerde ise aşınma izlerinin daha sık olduğu görülebilir. En sık izlerin %25 TiB₂ takviyesi içeren N5 numunesinde olduğu, en yüksek aşınma derinliğinin ise TiB₂ yapılarının olmadığı N1 numunesinde olduğu görülebilir [79].

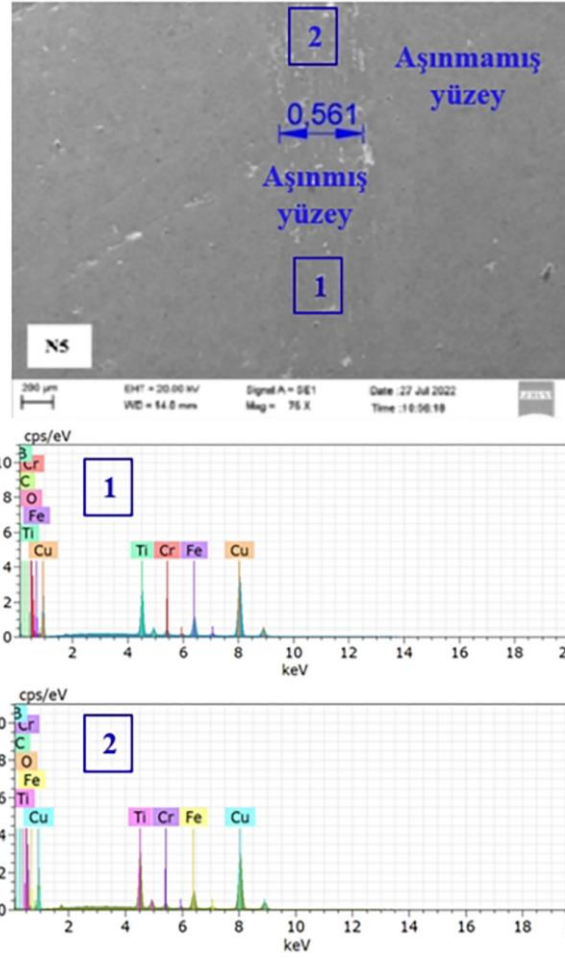
Matrise TiB₂ eklenmesinin aşınma kaybını azalttığı görülebilir. Bunun olası bir nedeni, matristeki TiB₂ parçacıklarının sertlikte bir artışa neden olması, aşındırıcı parçacıkların aşınma yüzeyine nüfuz etmesini ve aşınma kayıplarını azaltmasıdır. TiB₂ takviyeli kompozitlerin aşınma davranışı üzerine yapılan birçok çalışma, TiB₂ parçacıklarının eklenmesinin kompozitlerin aşınma özelliklerini iyileştirdiğini ve kompozitlerin sertlik değerini arttırdığını göstermiştir [80], [81].



Şekil 7.9. N1 N2 Numunelerin TiB_2 hacim oranına göre aşınma sonrası SEM görüntüleri ve EDS analizleri



Şekil 7.10. N3 ve N4 Numunelerinin TiB_2 hacim oranına göre aşınma Sonrası SEM görüntüleri ve EDS analizleri

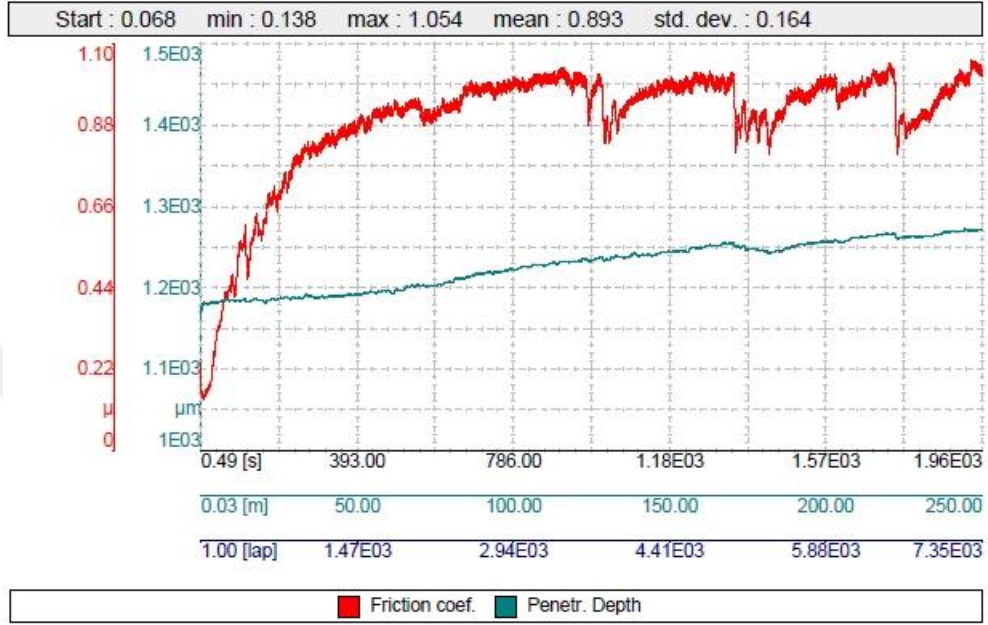


Şekil 7.11. N5 Numunesinin TiB_2 hacim oranına göre aşınma Sonrası SEM görüntüsü ve EDS analizi

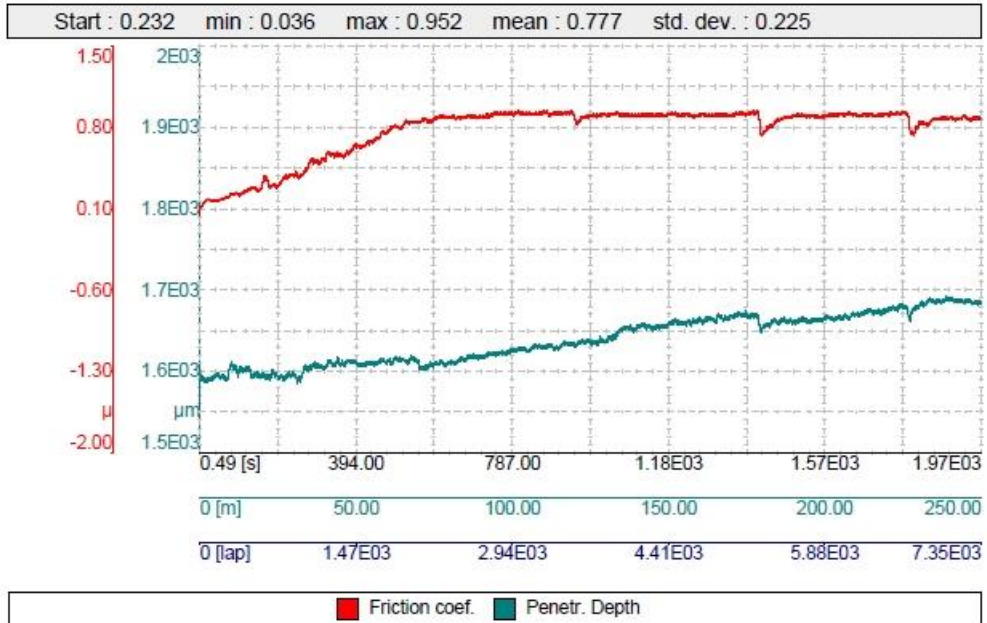
Şekil 7.12-7.16' de numunelerin aşınma esnasında kayma mesafesine bağlı sürtünme katsayılarının zaman (sn), uzunluk (m) ve tur sayısına bağlı değişimleri görülmektedir. Malzemenin aşınma ve sürtünme değerlerinin belirlenmesinde sürtünme katsayısı oldukça önemli bir etkindir [82]. Grafikler incelendiğinde aşınmalarda sürtünme katsayı eğrileri başlangıçta en yüksek değere ulaşmaya kadar hızla artmış, daha sonra kademeli düşüşe geçerek kararlı bir sürtünme rejimi göstermiştir. N1 numunesinde sürtünme katsayı eğrilerinin en düşük 0.12 değerinden en yüksek değer olan 1 değerine geldiği kayma mesafesine bağlı olarak dalgalanmaların olduğu görülmektedir. N2, N3 ve N4 'de diğer numunelere göre sürtünme katsayılarında daha kararlı dalgalanmalar oluşmaktadır.

İlk durumda N5'in zamanla değiştiği, stabilize olduğu ve sürtünme katsayılarının 1 ila 0.12 arasında değiştiği görülebilir. Numunenin yüksek değişkenliği, yüzey tabakasının lokal olarak kırılması veya aşınma sırasında oluşan döküntülerin birikmesi ve uzaklaştırılması ile ilgilidir [83]. Aşınmış yüzeyde kir biriktiğinde sürtünme katsayısı artar ve yüzeyden uzaklaştıkça azalır.

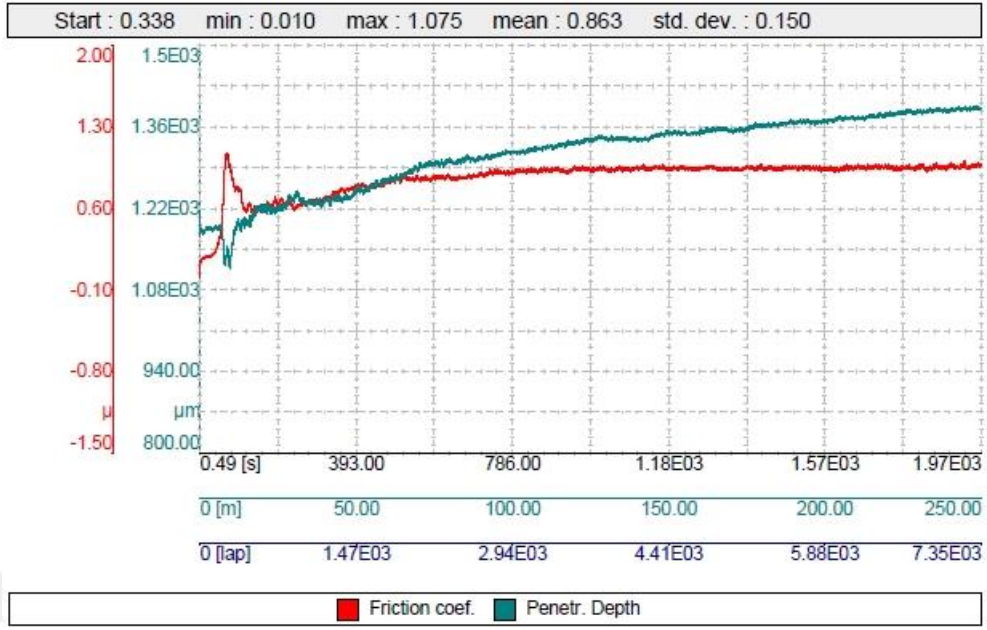
Katsayılarıdaki küçük bir değişiklik, oksijende veya küçük tortularda olası bir azalmayı gösterir [84].



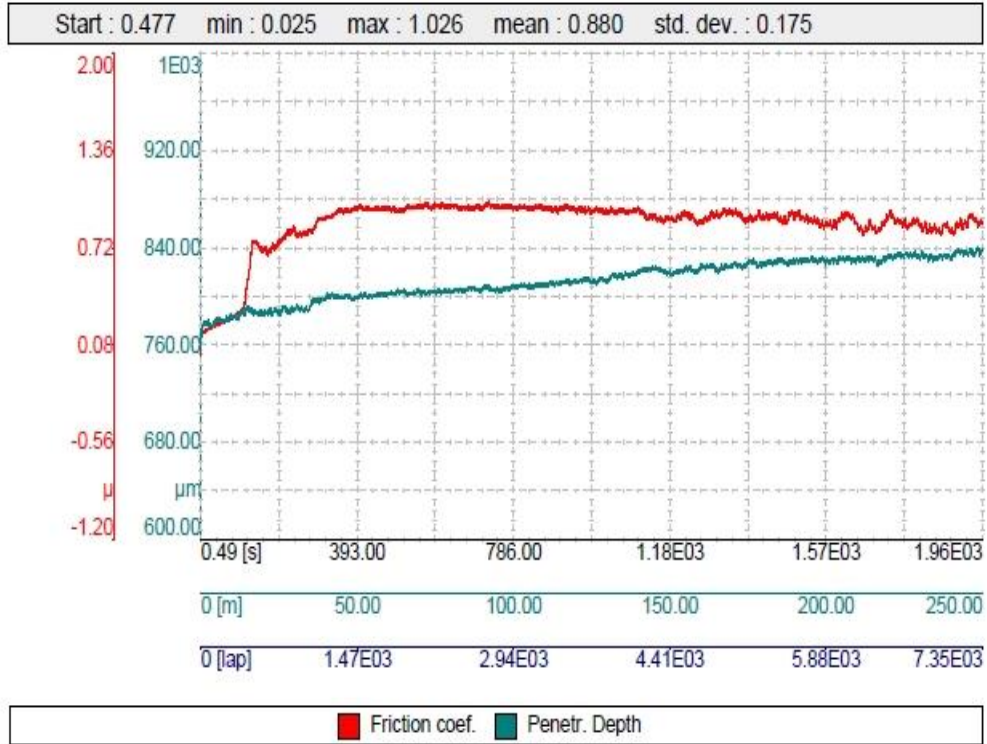
Şekil 7.12. N1 Numunesinin aşınmasında oluşan sürtünme katsayıları



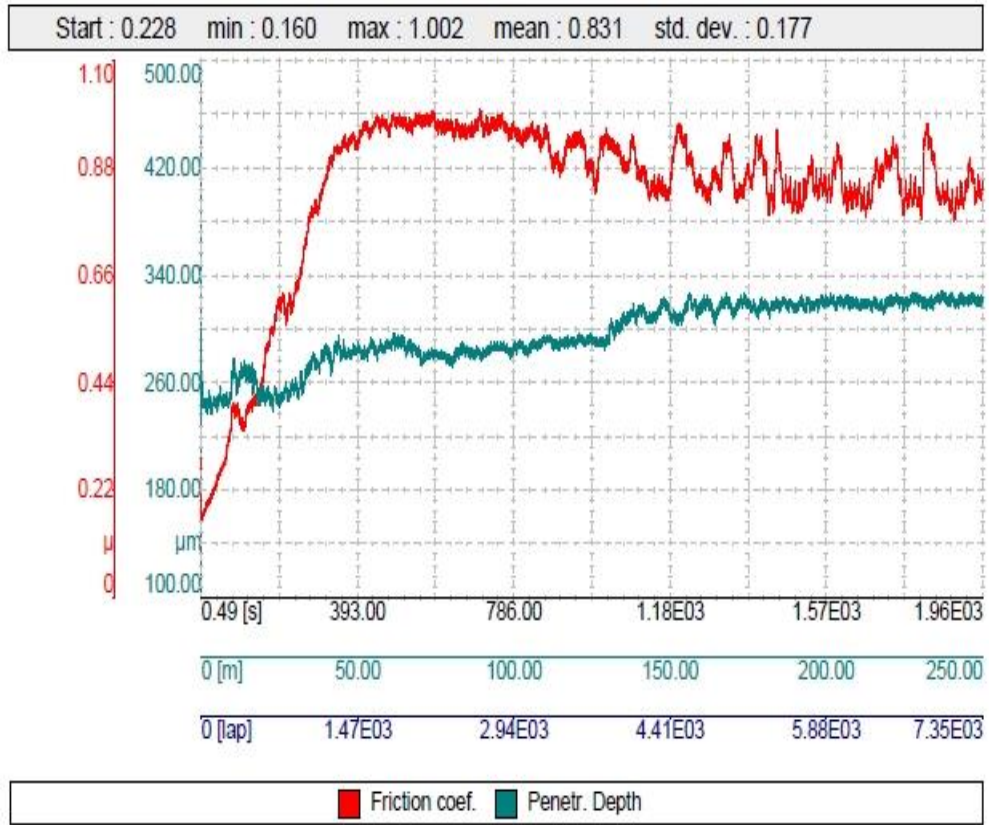
Şekil 7.13. N2 Numunesinin aşınmasında oluşan sürtünme katsayıları



Şekil 7.14. N3 Numunesinin aşınmasında oluşan sürtünme katsayıları



Şekil 7.15. N4 Numunesinin aşınmasında oluşan sürtünme katsayıları

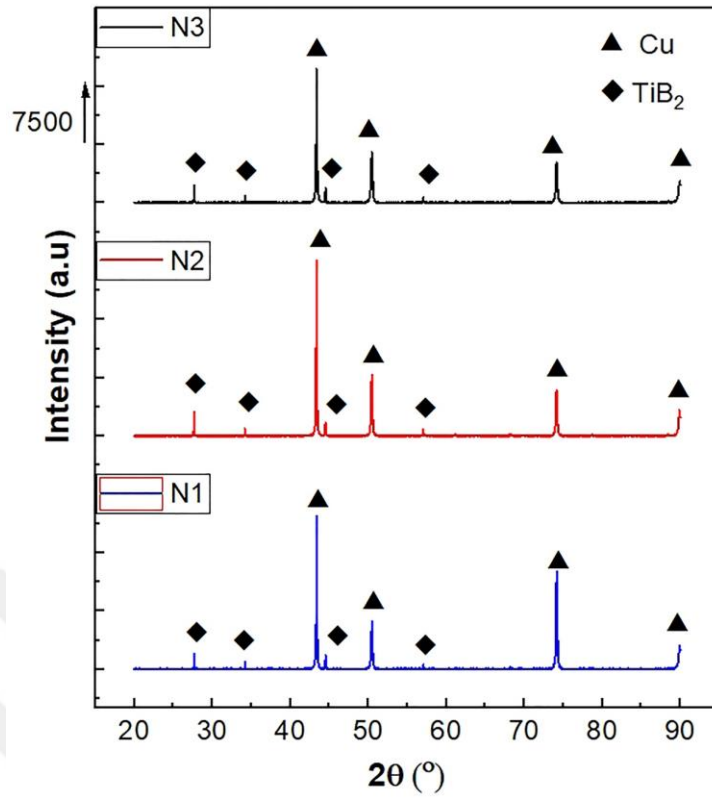


Şekil 7.16. N5 Numunesinin aşınmasında oluşan sürtünme katsayıları

7.2. Cu Alt Tabakanın Kaplanması Sinterleme Sıcaklığının Etkisi

7.2.1. XRD Analizi

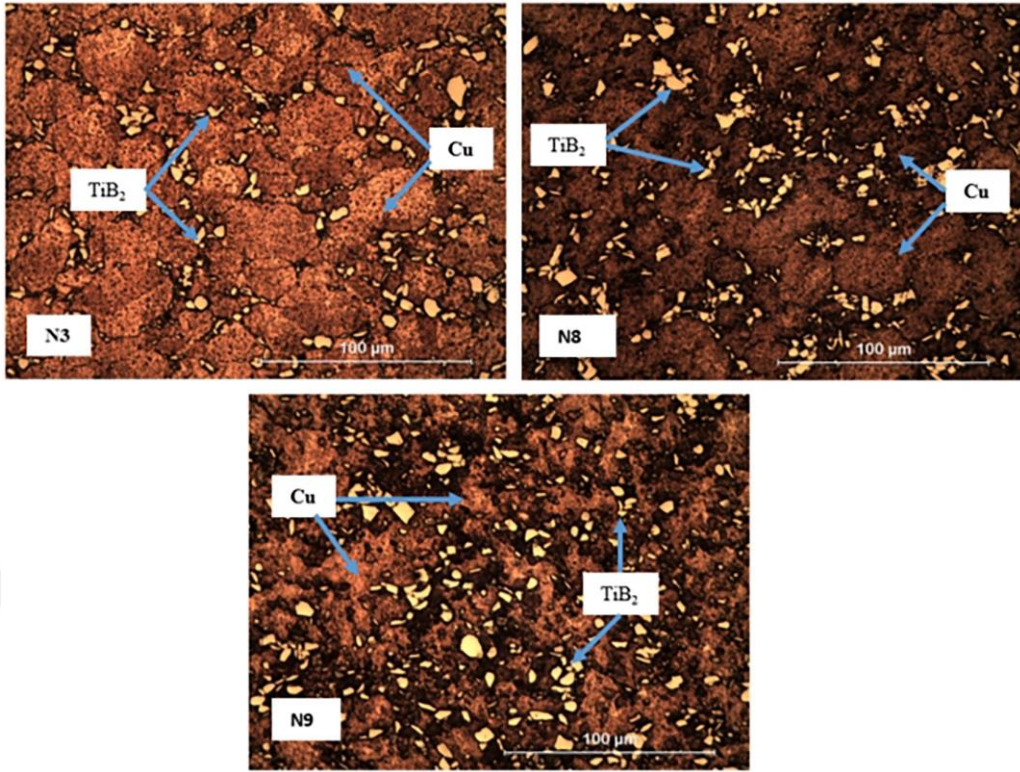
Cu alt tabakasının Cu-TiB₂ tozları ile kaplanmasında elde edilen kaplama tabakasında bulunan fazların belirlenmesi için kaplama katmanının yüzeyinden XRD analizleri yapılmıştır. XRD analizleri, presleme basıncının ve takviye oranlarının sabit olup sinterleme sıcaklıklarının değişiklik gösterdiği numunelerden alındı. Şekil 7.17’ de N1, N2 ve N3 numunelerinin XRD grafikleri verildi. XRD analizi kaplama tabakasını oluşturan TiB₂ ve Cu fazlarını içermektedir. Cu faz pikleri belirgin bir şekilde görülürken, TiB₂’nin pikleri belirgin değildir. Bunun sebebi TiB₂ fazının yapı içerisinde az olmasından kaynaklanabilir. Kplama katmanını oluşturan Cu ana matrisi pikleri 38, 45, 65 ve 78° de görüldü. TiB₂ takviye partiküllerinin piklerine ise 23, 35°’de belirlendi.



Şekil 7.17. N1 N2 ve N3 Nolu numunelerin XRD spektrogramları

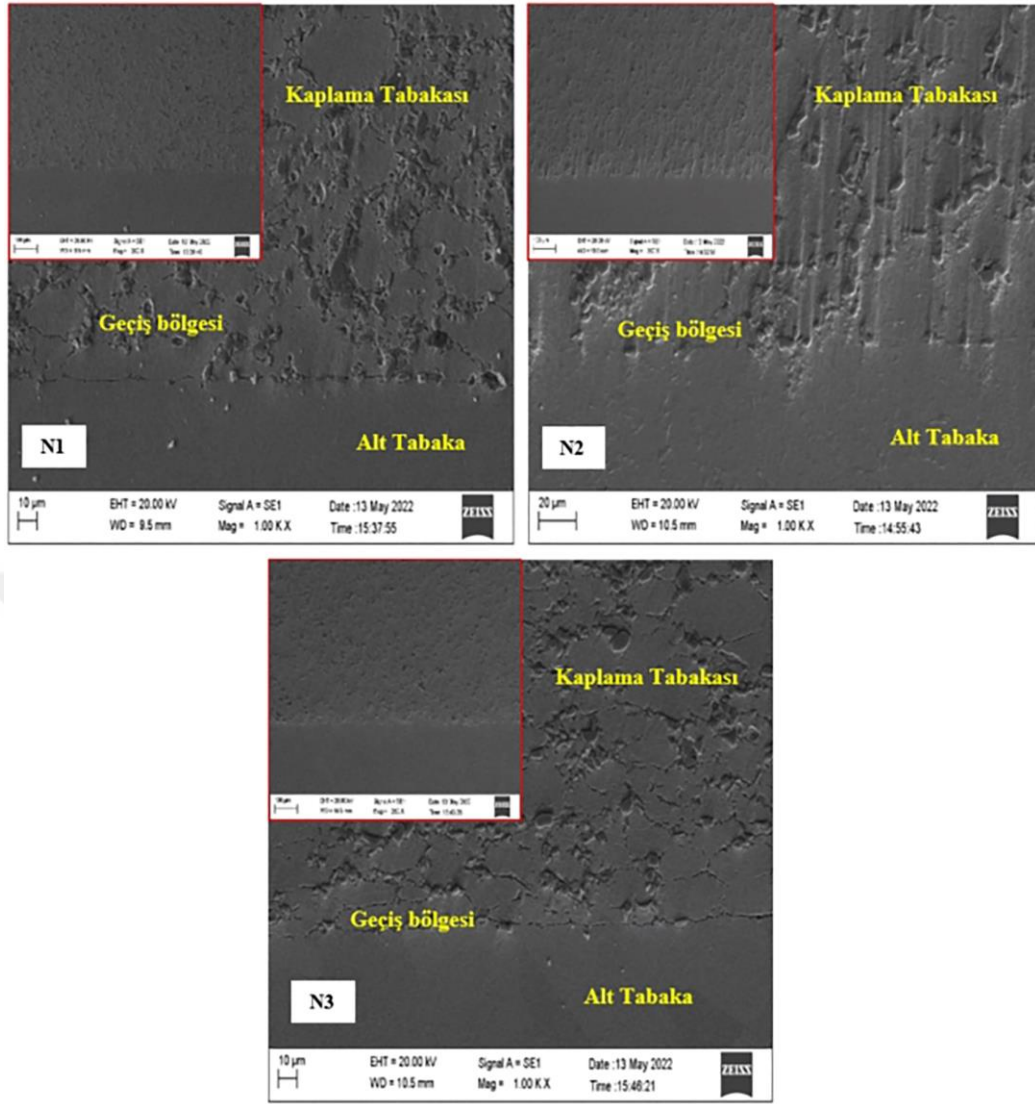
7.2.2. Mikro Yapı

Şekil 7.18’de kaplama tabakasının optik resimleri incelendiğinde Cu ve TiB_2 tozlarının iyi bir şekilde karıştığı ve mekanik karışma sonucu TiB_2 partiküllerinin Cu matris içerisinde homojen bir dağılım görülmektedir. Cu matris ile takviye elemanı olarak kullanılan TiB_2 partiküllerin yapı içerisinde homojen olarak dağıldığı ve topaklaşmanın olmadığı görülmektedir. Şekil 7.18’de N1-N3 sırası ile 900, 950 ve 1050 °C sıcaklıklarında 25 dakika sinterlenmiş TiB_2 partikül takviyesi katılmış Cu matrisli kaplama tabakasının mikroyapıları görülmektedir. Numunelerde kullanılan sıcak preslemeli sinterleme yöntemi sonucu Cu tanelerinin mekanik bir bağ ile bağlandığı ve taneler arasındaki boşlukların çok az olduğu görülmektedir. Sinterleme sıcaklığının değişimine bağlı olarak mikro yapılarında farklılık görüldüğü, TiB_2 partiküllerinin kaba Cu tane sınırları arasına yerleştikleri görülmektedir. Sinterleme sıcaklığının artması ile taneler arasındaki boşlukların küçüldüğü ve küreselleştiği görüldü.



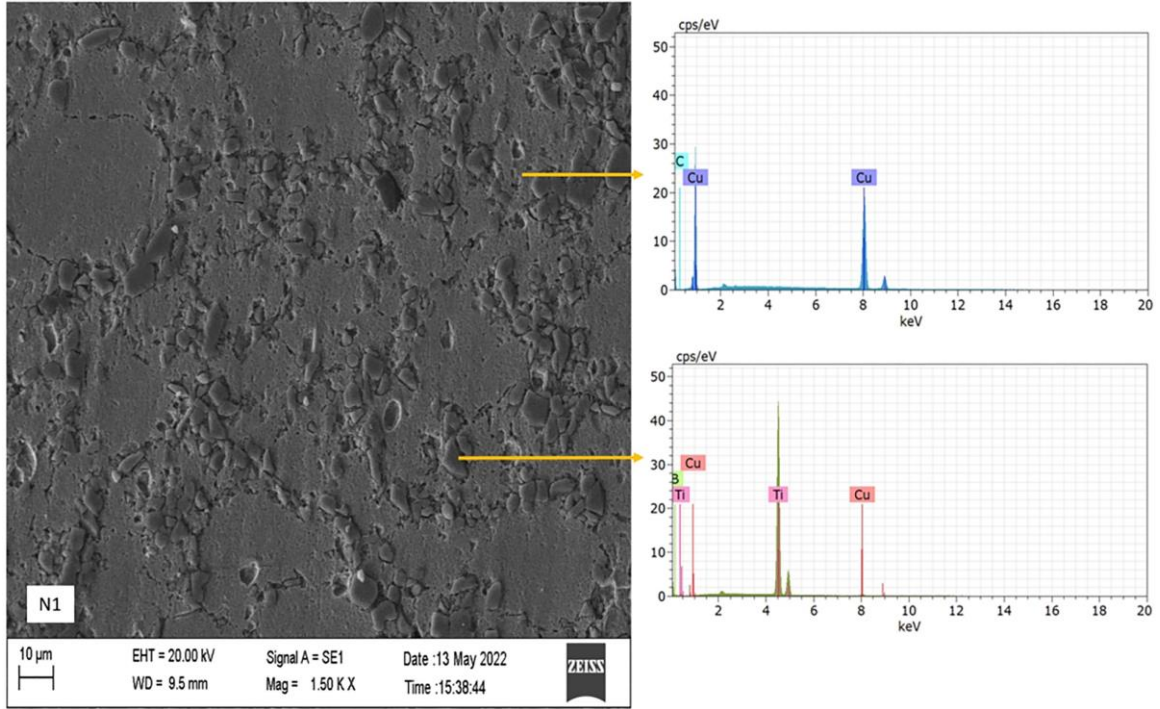
Şekil 7.18. Sinterleme sıcaklığının etkisi için üretilen numunelerinin optik mikro yapı görüntüleri

Şekil 7.19, 7.20 ve 7.21'de farklı sıcaklıklarda sinterlenmiş N1, N2 ve N3 numunelerin SEM ve EDS analiz sonuçları verilmiştir. Numuneler teorik olarak 3 mm kaplama tabaka kalınlığı olacak şekilde sırasıyla 900, 950 ve 1050 °C sıcak preslemeli sinterleme yöntemi ile hazırlandı. Şekli 7.19'da SEM görüntülerinde numunelerin kaplama katmanı kalınlığının ve kaplama katmanı ile alt tabaka arasındaki birleşmesinin belirlenmesi için 1000X büyültme gerçekleştirildi. N1, N2 ve N3 numunelerinde Cu alt tabaka yüzeyleri Cu-12,5% TiB₂ kompozit tabaka ile kaplandı. 900 °C sıcaklıkta yapılan sinterleme işleminde matris ile partikül ara yüzeylerinde mikro boşlukların oluştuğu görülmüştür. 950 °C sıcaklıkta yapılan sinterleme işleminde ise matris ile partikül ara yüzeylerinde oluşan mikro boşlukların azaldığı ve bazı partikül ile matris arasında birleşmelerin olduğu tespit edilmiştir. Sinterleme sıcaklığının 1050 °C'ye çıkarılması, partikül ile matris ara yüzeyinde oluşan mikro boşlukların daha da azalmasına ve partikül/matris ara yüzey geçişlerinin arttırmasına neden olmuştur.

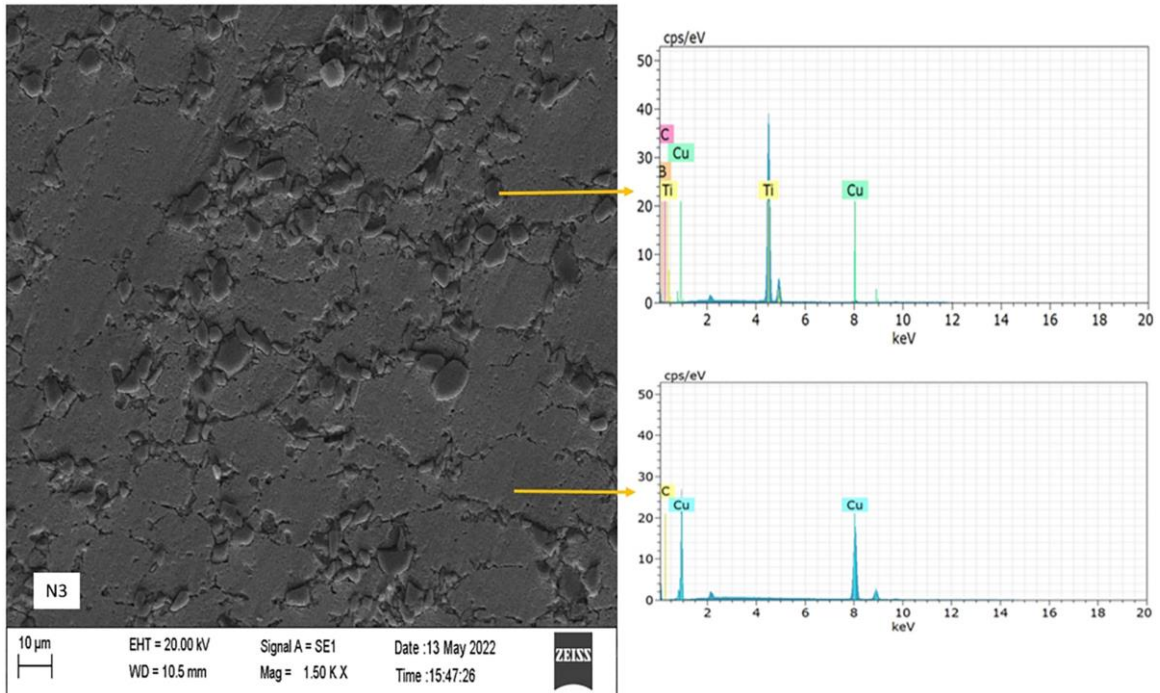


Şekil 7.19. Numunelerinin enine kesit yüzey mikro yapı SEM görüntüleri

Şekilde 7.20 ve 7.21 de N1 ve N3 numunelerinde Cu taneleri arasında iyi bir bağlanma olduğu, aralarındaki boşlukların çok az ve küçük olduğu, TiB_2 partiküllerinin Cu matris içerisinde homojen dağıldığı ve Cu matrisi ile TiB_2 partikülleri arasındaki boşlukların görülmeyecek kadar çok küçük olduğu görülmektedir. EDS analizlerinde ise Cu, Ti, B ve C elementlerinin olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 7.20. N1 kaplama yüzeyi mikro yapı SEM görüntüleri ve EDS analizleri

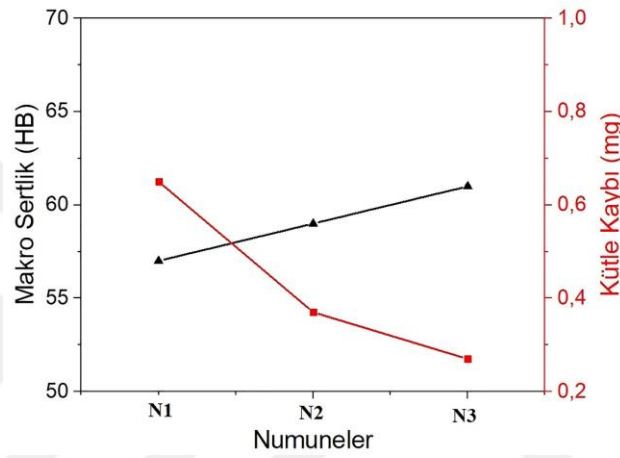


Şekil 7.21. N3 kaplama yüzeyi mikro yapı SEM görüntüleri ve EDS analizleri

7.2.3. Makro Sertlik ve Aşınma Direnci

Yüzeyde sert bir koruma tabakası sağlayarak malzeme yüzeyinin sertliğini artırmak mümkündür. Kaplama tabakasının sertliğinin artırılması, malzemenin aşınma direncini

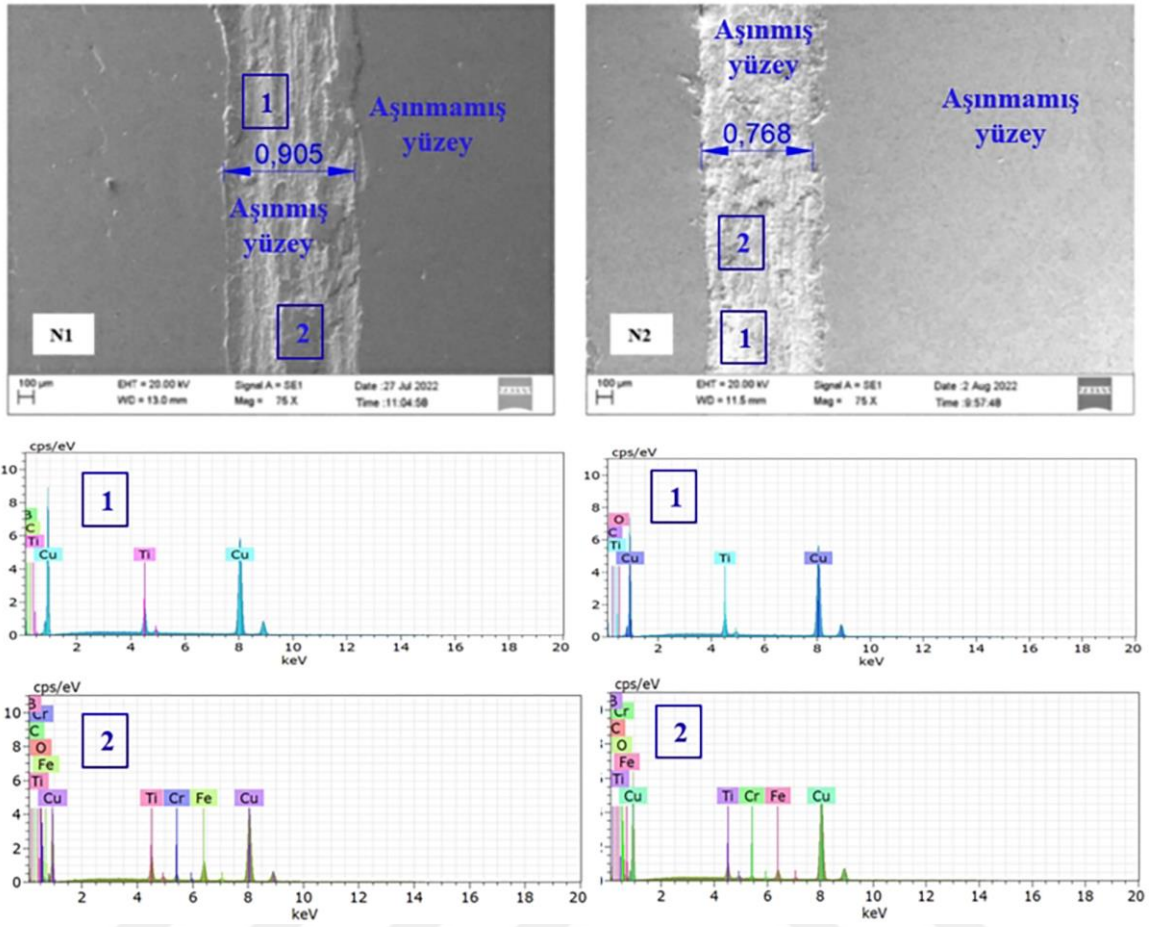
artıracaktır. Şekil 7.22, numunenin kaplama tabakasının enine kesitinde aşınmaya bağlı makro sertlik ve kütle kaybı değerlerini göstermektedir. %12,5 TiB₂ takviyeli N1,N2 ve N3 numunelerinin 900 °C’de yapılan sinterleme sıcaklığında ortalama sertlik değeri yaklaşık 57 HB, 950 °C’deki yaklaşık ortalama sertlik değeri 59 HB iken 1050 °C’deki yaklaşık ortalama sertlik değeri 62 HB olduğu tespit edilmiştir. Sinterleme sıcaklığının artırılması, partiküller arasındaki mesafeyi azaltır, partiküller arasındaki bağları güçlendirir ve sertlik gibi mekanik özellikleri iyileştirir. Numunenin artan makro sertliği nedeniyle kütle kaybı azaldı. Ek olarak, TiB₂ partikülleri ayrıca makro sertliği arttırdı ve kütle kaybını azalttı.



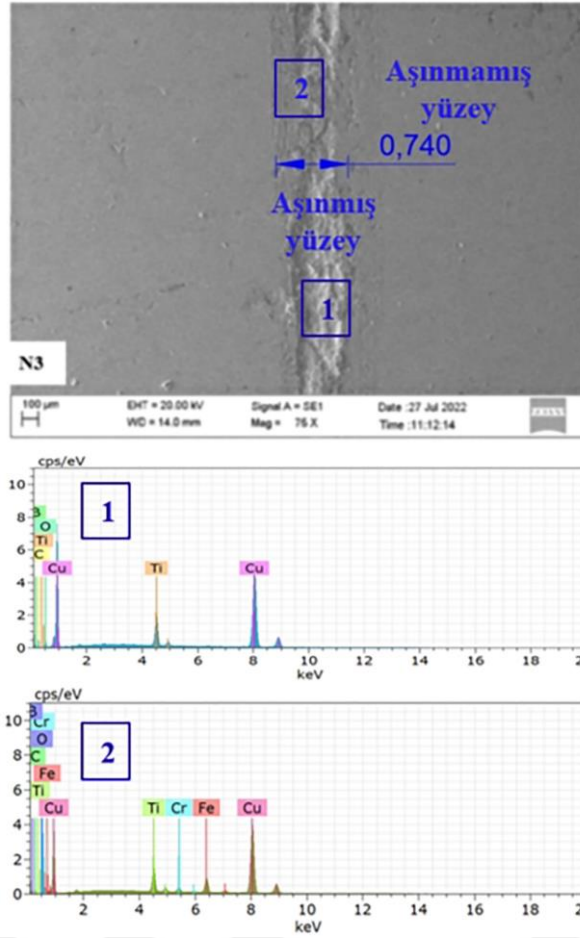
Şekil 7.22. Sinterleme sıcaklığının makro sertlik ve aşınmada kütle kayıpları üzerindeki etkisi

Şekil 7.23 ve 7.24 doğrusal ileri geri aşınmanın bir sonucu olarak numunelerin SEM görüntülerini göstermektedir. Görüntülerin incelenmesi, tüm numunelerde pul pul dökülme aşınması ve oksidasyon bölgelerinin mevcut olduğunu ortaya koymaktadır. EDS analizleri bunu doğrulamaktadır. Şekil 7.24'e baktığımızda sinterleme sıcaklığı arttıkça gözeneklerin azaldığını ve küçüldüğünü görebiliriz. 1050°C sinterleme sıcaklığında üretilen N3 numunesinin en düşük kütle kaybına sahip olduğu görülmektedir.

Sinterleme sıcaklığının artırılması, partiküller arası mesafeyi azalttı ve boşlukların küçülmesini sağladı. Boşluk boyutu, kütle kaybının belirlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Boşluklar çatlaklar oluşturur. Bu parçacıklar arasındaki boşluğu azaltmak, bağlanmayı güçlendirmekte ve yoğunluğu arttırmaktadır. Buna bağlı olarak malzemenin sertliğini artırır ve kütle kaybı azalır.



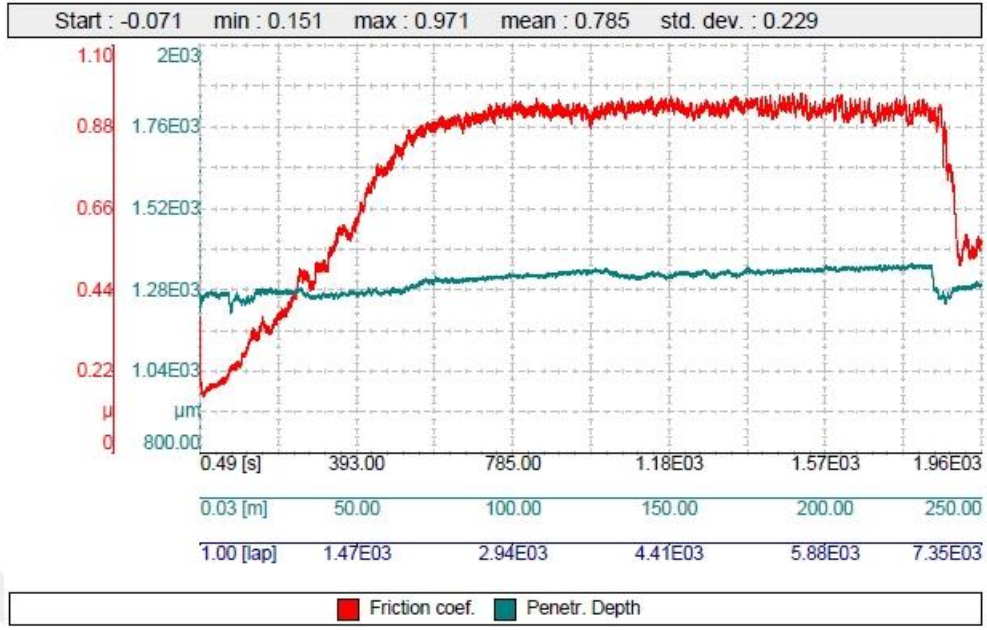
Şekil 7.23. N1 ve N2 numunelerin sinterleme sıcaklığına göre aşınma sonrası SEM görüntüleri ve EDS analizleri



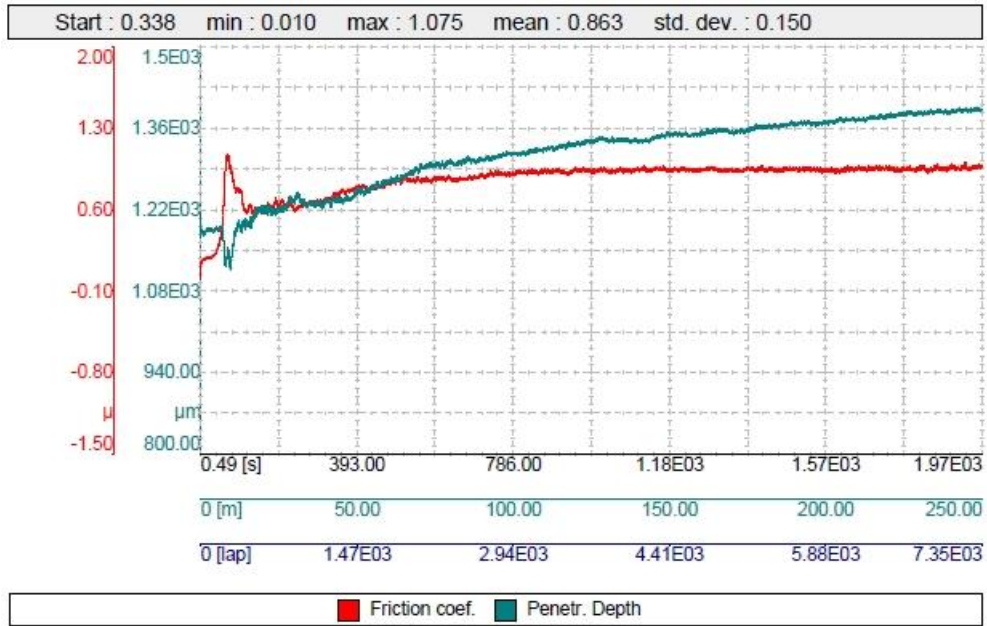
Şekil 7.24. N3 numunesinin sinterleme sıcaklığına göre aşınma sonrası SEM görüntüleri ve EDS analizleri

Sürtünme kuvveti, kayma mesafesinin bir fonksiyonu olarak ölçüldü ve bunlardan sürtünme katsayısı hesaplandı. Bu sürtünme katsayılarının kayma mesafesinin bir fonksiyonu olarak değişimi Şekil 7.25, 7.26 ve 7.27 de gösterilmektedir. Doğrusal ileri geri aşınma sırasındaki sürtünme katsayısı, malzemelerin aşınma davranışı hakkında önemli bilgiler sağlar. Tüm numunelerin doğrusal ileri geri aşınması, sürtünme katsayısının başlangıçta hızlı bir şekilde arttığını, daha sonra artan kayma mesafesi ile azaldığını ve stabilize olduğunu göstermektedir. N1 ve N3 numunelerinin sürtünme katsayılarının kayma mesafesinin başlangıcında kararsız olduğu ve kayma mesafesi arttıkça sabitlendiği görülmektedir.

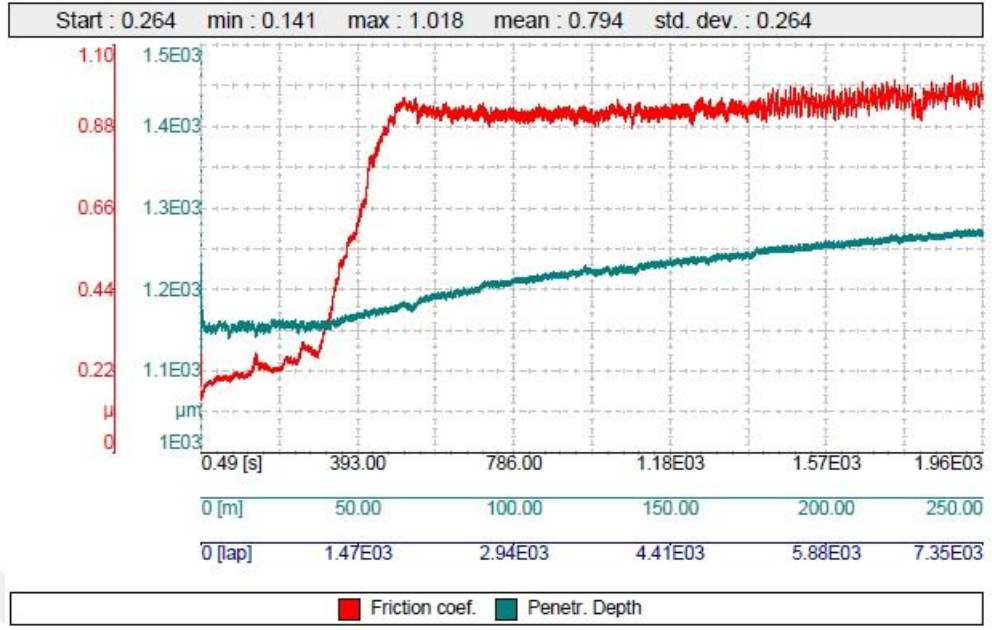
N2 numunesi için sürtünme katsayısının küçük değişkenliği, aşınma sırasında kararlı partikül kırılmasına neden olan küçük ve ince taneler arası boşluklardan kaynaklanmaktadır.



Şekil 7.25. N1 numunesinin aşınmasında oluşan sürtünme katsayıları



Şekil 7.26. N2 numunesinin aşınmasında oluşan sürtünme katsayıları



Şekil 7.27. N3 numunesinin aşınmasında oluşan sürtünme katsayıları

8. SONUÇLAR

Bu çalışmada, elektrik kontak malzemesi olarak kullanılan Cu alt tabaka malzemesi sıcak preslemeli sinterleme yöntemi kullanılarak Cu-TiB₂ ile kaplanmıştır. Kaplama işlemlerinde Cu-TiB₂ toz karış oranlarının ve sinterleme sıcaklığının kaplama tabakasının mikro yapısı, makro sertliği ve aşınma davranışları üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

Yapılan inceleme ve araştırmalar sonucunda; TiB₂ takviye partiküllerinin Cu matris içerisinde homojen olarak dağıldığı topaklaşmanın olmadığı görüldü. İncelenen numunelerde kaplama tabakası ile alt malzeme tabakası ara kesitinde iyi bir birleşmenin olduğu tespit edildi. TiB₂ oranının artması ile kaplama tabakası makro sertliğinin arttığı, en yüksek sertlik ve en düşük aşınma kütle kaybının toz karışım oranı Cu-%25 TiB₂ olan numunede belirlendi. Ayrıca sinterleme sıcaklığının artması ile kaplama tabakasında bulunan toz taneleri arasındaki boşlukların azaldığı ve mekanik bağlanmanın arttığı belirlendi. Farklı sinterleme sıcaklıklarında yapılan deneylerde sinterleme sıcaklığının artması ile makro sertliğin arttığı ve aşınma kütle kaybının azaldığı tespit edildi.

KAYNAKLAR

- [1] Altınsoy, İ., Alümina Takviyeli Bakır Kompozitlerin Üretimi ve Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 2009.
- [2] Akhtar, F., Askari, S. J., Shah, K. A., Du, X., Guo, S., Microstructure, mechanical properties, electrical conductivity and wear behavior of high volume TiC reinforced Cu-matrix composites. *Materials characterization*, 60(4): 327-336, 2009.
- [3] URL-1, Özkan, D., *Meccanica* 53: 2861, 2018. <https://doi.org/10.1007/s11012-018-0863-x>.
- [4] H. Ni, J. Zhang, S. Lv, X. Wang, Y. Zhu, and T. Gu, "Preparation and performance optimization of original aluminum ash coating based on plasma spraying," *Coatings*, vol. 9, no. 11, 2019, doi: 10.3390/coatings9110770.
- [5] T. Laha, Y. Chen, D. Lahiri, and A. Agarwal, "Tensile properties of carbon nanotube reinforced aluminum nanocomposite fabricated by plasma spray forming," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 40, no. 5, pp. 589–594, 2009, doi: 10.1016/j.compositesa.2009.02.007.
- [6] J. Li, H. Cai, X. Xue, and B. Jiang, "The outward-inward growth behavior of microarc oxidation coatings in phosphate and silicate solution," *Mater. Lett.*, vol. 64, no. 19, pp. 2102–2104, 2010, doi: 10.1016/j.matlet.2010.06.053.
- [7] L. Wen, Y. Wang, Y. Zhou, L. Guo, and J. H. Ouyang, "Microstructure and corrosion resistance of modified 2024 Al alloy using surface mechanical attrition treatment combined with microarc oxidation process," *Corros. Sci.*, vol. 53, no. 1, pp. 473–480, 2011, doi: 10.1016/j.corsci.2010.09.061.
- [8] K. Feng et al., "Improved high-temperature hardness and wear resistance of Inconel 625 coatings fabricated by laser cladding," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 243, pp. 82–91, 2017, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2016.12.001.
- [9] D. Zhang et al., "Effect of in-situ synthesis of multilayer graphene on the microstructure and tribological performance of laser clad Ni-based coatings," *Appl. Surf. Sci.*, vol. 495, no. April, p. 143581, 2019, doi: 10.1016/j.apsusc.2019.143581.
- [10] T. Guo, C. Kong, X. Li, P. Guo, Z. Wang, and A. Wang, "Microstructure and mechanical properties of Ti/Al co-doped DLC films: Dependence on sputtering current, source gas, and substrate bias," *Appl. Surf. Sci.*, vol. 410, pp. 51–59, 2017, doi: 10.1016/j.apsusc.2017.02.254.
- [11] S. Zhou, L. Wang, and Q. Xue, "Controlling friction and wear of nc-WC/a-C(Al) nanocomposite coating by lubricant/additive synergies," *Surf. Coatings Technol.*, vol. 206, no. 10, pp. 2698–2705, 2012, doi: 10.1016/j.surfcoat.2011.11.031.
- [12] S. Buytoz, A. Orhan, A. K. Gur, and U. Caligulu, "Microstructural Development of Fe-Cr-C and B4C Powder Alloy Coating on Stainless Steel by Plasma-Transferred Arc Weld Surfacing," *Arab. J. Sci. Eng.*, vol. 38, no. 8, pp. 2197–2204, 2013, doi: 10.1007/s13369-013-0599-9.
- [13] L. Zong, N. Guo, R. Li, and H. Yu, "Effect of B content on microstructure and wear resistance of Fe-3Ti-4C Hardfacing alloys produced by Plasma-Transferred Arc Welding," *Coatings*, vol. 9, no. 4, 2019, doi: 10.3390/coatings9040215.
- [14] C. Shang et al., "CoCrFeNi(W1 – xMox) high-entropy alloy coatings with excellent mechanical properties and corrosion resistance prepared by mechanical alloying and hot pressing sintering," *Mater. Des.*, vol. 117, pp. 193–202, 2017, doi: 10.1016/j.matdes.2016.12.076.
- [15] W. Ge et al., "Characterization and properties of CuZrAlTiNi high entropy alloy coating obtained by mechanical alloying and vacuum hot pressing sintering," *Adv. Powder Technol.*, vol. 28, no. 10, pp. 2556–2563, 2017, doi: 10.1016/j.appt.2017.07.006.

- [16] Ulutaş A., Bor Takviyeli Bakır Kompozitin Toz Metalurjisi Yöntemi İle Üretimi Ve Mekanik-Elektriksel Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 2014.
- [17] Long F, Guo X, Song K, Jia S, Yakubov V, Li S, et al. Synergistic strengthening effect of carbon nanotubes (CNTs) and titanium diboride (TiB₂) microparticles on mechanical properties of copper matrix composites. *J Mater Res Technol*, 9(4):7989-8000, 2020.
- [18] Mittal P, Paswan MK, Sadasivuni KK, Gupta P., Structural, wear and thermal behaviour of Cu-Al₂O₃-graphite hybrid metal matrix composites. *Proc Inst Mech Eng L*, 234(8):1154-64, 2020.
- [19] Çanakçı, A., "AA2024 Matrisli B4C Parçacık Takviyeli Kompozitlerin Vorteks Yöntemiyle Üretimi ve Özelliklerinin İncelenmesi", Doktora Tezi, KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon,(2006).
- [20] Corbin, S. F. and Wilkinson, D. S., The influence of particle distribution on the mechanical response of a particulate metal matrix composite. *Acta Metallurgica et Materialia*, 42(4), 1311-1318, 1994.
- [21] Ibrahim, I. A., Mohamed, F. A., ve Lavernia, E. J., Particulate reinforced metal matrix composites-a review. *Journal of Materials Science*, 26(5), 1137-1156, 1991.
- [22] Deniz, M. E., Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri Ve Isıl İşleme Presleme Tekniğini Kullanarak Kompozit Malzeme Üretecek Bir Düzenliğin Tasarım Ve İmalatı, Yüksek Lisans Tezi, Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Mühendisliği Anabilim Dalı, Şanlıurfa, 2005.
- [23] Kalemtaş, A., Metal matrisli kompozitlere genel bir bakış. *Putech&Composites*, 22, 18- 30, 2014.
- [24] Chawla, K. K., Metal matrix composites. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 1-100, 2006.
- [25] Miracle, D. B., Donaldson, S. L., Introduction to Composites. In: A. S. M. Handbook Volume 21: Composites (Miracle, D. B., Donaldson, S. L. Eds.), ASM International, pp. 1, Ohio, 2001.
- [26] Nazik, C., Alüminyum Matrisli B4C Parçacık Takviyeli Kompozitlerin Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretimi ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Konya, 2013
- [27] Callister, W. D., Materials Science and Engineering, An Introduction. York, PA: John Wiley & Sons, Inc., 2007.
- [28] Ünal, O., Kompozit Malzemelerin Özellikleri ve Sınıflandırılması, 2007.
- [29] Vinson, J. R. and Sierakowski, R. L., The behavior of structures composed of composite materials. London: Springer Science & Business Media, 1-13, 2012.
- [30] URL-2, <https://malzemebilimi.net/kompozit-malzeme-cesitleri.html>
- [31] Braunovic, M., Konchits, V., K., Mayshkin, V., "Electrical Contacts Fundamentals", Applications And Technology. Taylor & Francis Group, LLC, 2006.
- [32] I. H. Sung, J. W. Kim, H. J. Noh, and H. Jang, "Effect of displacement and humidity on contact resistance of copper electrical contacts," *Tribology International*, vol. 95, pp. 256-261, 2016.
- [33] Pandey, A., Verma, P. ve Pandey, O.P., Comparison of Properties of Silver-Tin Oxide Electrical Contact Materials Through Different Processing Routes. *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences*, 15, 236-240, 2008.
- [34] Bıyık, S., Arslan, F. ve Aydın, M., Arc-Erosion Behavior of Boric Oxide-Reinforced SilverBased Electrical Contact Materials Produced by Mechanical Alloying. *Journal of Electronic Materials*, 44, (1), 457-466, 2015.
- [35] URL-3, "Welding Rivet | Electrical Contact | Zonfa". Retrieved May 07, 2018, from <http://micro-screw.com/1-4-welding-rivet-electrical-contact.html>.
- [36] Němec, Milan a Jaroslav Provazník. Slévárenské slitiny neželezných kovů. V Praze: České vysoké učení technické, 137 s. ISBN 978-80-01-04116-1, 2008
- [37] World Copper Factbook, International Copper Study Group, 2015.

- [38] Efe, G. F. Ç., SiC Takviyeli İletken Bakır Kompozitlerin Geliştirilmesi, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 2010.
- [39] URL-4, Welding Rivet | Electrical Contact | ZONFA". Retrieved May 07, 2018, from <http://micro-screw.com/1-4-welding-rivet-electrical-contact.html>.
- [40] P.R. Roberts, "Metals Handbook", Vol. 7, Powder Metallurgy, Coordinator E. Klar, Ninth Edition, ASM, Metals Park, OH, 1984.
- [41] Kurt, A.O., Toz üretim yöntemleri ve sinterleme, Sakarya Üniv., Müh. Fak., Metalürji ve malzeme bölümü ders notları, 1- 25s, Sakarya, 2004.
- [42] Sorahi, M., Toz Metalurjisi, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, İstanbul
- [43] Yamanoglu, R., Toz Metalurjisi Ders Notları, Bölüm 2, Kocaeli Üniversitesi, 1988.
- [44] Sarıtaş S., Toz Metalurjisi, Makine Mühendisleri El Kitabı, C.1, 2.Baskı, Ankara, 1994.
- [45] German, R.M., Powder metalurgy science. MPIF, 278. 133-136s, USA, 1984.
- [46] ASM Metals Handbook, Powder metal technologies and applications volume 7. ASM International, 1145-1146s. USA, 1998.
- [47] Hale, R., Powder metallurgy process and applications, AE 510 research project, University of Kansas, Lawrence, 82s. U.S.A, 2003.
- [48] Alpugan, Z., "T/M'de Presleme Tekniği ve Nükleer Yakıt (UO₂) Üretimine Uygulanması", Marmara Bilimsel ve Endüstriyel Araştırma Enstitüsü, TÜBİTAK, 1981.
- [49] Özay, Ç., Toz Metalurjisi Yöntemi ile Üretilen Cu-C-Al₂SiO₅ Kompozitinin Abrasiv Aşınma Dayanımının Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Elâzığ, 2004.
- [50] Angelo, P. C. and Subramanian, R., Powder Metallurgy Science, Tecnology and Applications. New Delhi: Prentice Hall of India, 1-172, 2008.
- [51] Erdal, L., Baryum Hegza Ferritin Sıvı Faz Sinterlemesi ve Mikroyapı İncelemeleri, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstriyel Teknoloji Eğitimi, 2006.
- [52] Pan J, Cocks A., A numerical technique for the analysis of coupled surface and grainboundary diffusion. Acta metallurgica et materialia. 1995;43:1395-406.
- [53] Carter B. C., Norton M. G. Ceramic Materials, Springer, New York, USA, 2007.
- [54] Uysal, G., Determination of Liquid Phase Content and Composition on the Densification Behaviour of Silicon Carbide, Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi Malzeme Bilimi ve Mühendisliği, Eskişehir, 2013.
- [55] URL-5, <https://sintek.net/urun/mekanik-parcalar>
- [56] URL-6, <https://sintek.net/urun/kapi-pencere-ve-kilit-parcalari>
- [57] URL-7, <http://elkokontak.com/service/kontak-uretimi>
- [58] Uygur, M., E., Balata Üretim Teknoloji, 1. Ulusal Toz Metalurjisi Konferansı, s.485, Gazi Üniversitesi, Ankara, 1996.
- [59] Ürgen, M., Haziran "Modern Yüzey İşlem Teknolojileri ve Türkiye'deki Gelişmeler", 9 th Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi, s (333-350), 1997.
- [60] Çalışkan, M., Katodik Ark Yöntemiyle ZrN ve Zr/ZrN Kaplamaların Biriktirilmesi. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 2008.
- [61] Öztürk, A., Manyetik sıçratma tekniği ile üretilmiş Mo₂N ve Nanokompozit Mo-N-Cu kaplamaların kazımalı aşınma davranışlarının karşılaştırılması, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, İ.T.Ü.
- [62] Zou, C. W., Wang, H. J., Li, M., Yu, Y. F., Liu, C. S., Guo, L. P., & Fu, D. J., Characterization and properties of TiN-containing amorphous Ti-Si-N nanocomposite coatings prepared by arc assisted middle frequency magnetron sputtering. Vacuum 84(6): 817–822, 2010.

- [63] Groves, J. F., Directed Vapour Deposition, Doctor of Philosophy Thesis, The Faculty of the School of Engineering and Applied Science University of Virginia, Charlottesville, U.S.A., 12- 125, 1998.
- [64] Bunshatta R.F., “High rate physical vapour deposition processes”, Agard Lecture Series No: 106, Material Coating Techniques, Hardford House, London, s (21-26), 1980.
- [65] Okay, F., PVD yöntemi ile kaplı östemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerin adhesiv aşınma davranışlarının incelenmesi. (Yayımlanmış yüksek lisans tezi), Gazi Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 185 s, 2006.
- [66] Şafak, H. E., Yüzeyi PVD yöntemiyle kaplanmış metallerde tribolojik özelliklerin belirlenmesi. (Yayımlanmış yüksek lisans tezi), Ege Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 135 s, 2008.
- [67] Eryılmaz, O.L., “ZrN-ZrBN Çok katlı Kaplamaların Korozyon Davranışı”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniv. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul , Türkiye, 1996
- [68] Sönmezoğlu, S., Koç, M. ve Akın, S., İnce film üretim teknikleri. Erciyes Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 28 (5), 389-401, 2012.
- [69] Çalışkan, H., Kurbanoglu, C. ve Çolak, O., Yüksek güç darbeli magnetron sıçratma ile kaplama üretimi ve kesici takımlar üzerinde uygulamalar. Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi, 7(4), 57-71, 2010.
- [70] Wear resistance of WC particle reinforced copper matrix composites and the effect of porosity Mater Sci Eng A, 418, pp. 137-145, 2006.
- [71] S.C. Tjong, K.C. Lau Tribological behaviour of SiC particle-reinforced copper matrix composites Mater Lett, 43, pp. 274-280, 2000.
- [72] Close S.C. Tjong, K.C. Lau Abrasive wear behavior of TiB2 particle-reinforced copper matrix composites Mater Sci Eng A, 282, pp. 183-186, 2000.
- [73] N. Zarrinfar, A.R. Kennedy, P.H. Shipway Reactive synthesis of Cu–TiCx master-alloys for the production of the copper-based composites Scr Mater, 50, pp. 949-952, 2004.
- [74] Microstructure and properties of Cu/TiB2 wear resistance composite coating on H13 steel prepared by in-situ laser cladding
- [75] Cold spraying of in situ produced TiB2–Cu nanocomposite powders], [Dry sliding wear behavior of in situ Cu–TiB2 nanocomposites against medium carbon steel
- [76] Compression properties and abrasive wear behavior of high volume fraction TiCx–TiB2/Cu composites fabricated by combustion synthesis and hot press consolidation
- [77] X-Ray Diffraction Studies of Copper Nanopowder T. Theivasanthi (1) and M. Alagar (2)
- [78] URL-8,<https://www.govinfo.gov/content/pkg/GOVPUB-C13-57c84b9c5b7a65e944d8d4cb38c093a4/pdf/GOVPUB-C13-57c84b9c5b7a65e944d8d4cb38c093a4.pdf>
- [79] Savaş, Ö. & Demirok, Ö.F., Fonksiyonel Derecelendirilmiş TiB2/Al Kompozitlerin Abrasif Aşınma Davranışları Üzerine Deneysel Bir Çalışma. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, (17), 972-981, 2019.
- [80] Kumar, S., Sarma, V. S., & Murty, B. S., Influence of in situ formed TiB2 particles on the abrasive wear behaviour of Al-4Cu alloy. Materials Science and Engineering A, 465(1–2), 160–164. doi:10.1016/j.msea.2007.02.117, 2007.
- [81] Kumar, S., Chakraborty, M., Subramanya Sarma, V., & Murty, B. S., Tensile and wear behaviour of in situ Al-7Si/TiB2 particulate composites. Wear, 265(1–2), 134–142. doi:10.1016/j.wear.2007.09.007, 2008.
- [82] J. Zhou, J. Xu, S. Huang, Z. Hu, X. Meng, and X. Feng, “Effect of laser surface melting with alternating magnetic field on wear and corrosion resistance of magnesium alloy,” Surf. Coatings Technol., vol. 309, pp. 212–219, 2017, doi: 10.1016/j.surfcoat.2016.11.077.
- [83] T. Courtney, Mechanical Behavior of Materials. 1990.

- [84] J. M. Wu, S. J. Lin, J. W. Yeh, S. K. Chen, Y. S. Huang, and H. C. Chen, “Adhesive wear behavior of $\text{Al}_x\text{CoCrCuFeNi}$ high-entropy alloys as a function of aluminum content,” *Wear*, vol. 261, no. 5–6, pp. 513–519, 2006, doi: 10.1016/j.wear.2005.12.008.



