



MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**ÇELİK ESASLI METAL DİSKLERİN ÜZERİNE
LAZER METAL BİRİKTİRME (LMD) YÖNTEMİ İLE
KAPLANAN SÜPER ALAŞIMLARIN
YÜKSEK SICAKLIKLARDA
SÜRTÜNMESİ SONUCUNDA OLUŞAN
AŞINMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

ALPER ÖNER

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Makine Mühendisliği Programı

DANIŞMAN

Dr. Öğr. Üyesi Senai YALÇINKAYA

İstanbul, 2022



MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**ÇELİK ESASLI METAL DİSKLERİN ÜZERİNE
LAZER METAL BİRİKTİRME (LMD) YÖNTEMİ İLE
KAPLANAN SÜPERAL AŞIMLARIN
YÜKSEK SICAKLIKLARDA
SÜRTÜNMESİ SONUCUNDA OLUŞAN
AŞINMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

ALPER ÖNER
(523219003)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Makine Mühendisliği Programı

DANIŞMAN

Dr. Öğr. Üyesi Senai YALÇINKAYA

İstanbul, 2022

ÖNSÖZ

Lisansüstü tez çalışmam sürecinde, bütün bilgi birikimiyle ve tecrübesiyle bana ışık tutup, yön veren ve tez çalışmamın her aşamasında desteğini esirgemeyen, hiç yorulmadan yanımda olan tez danışmanım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Senai YALÇINKAYA hocama en derin saygılarımla teşekkür ederim.

Deneyisel uygulama çalışmalarımda kullanılan metal disklerin ve aşındırıcı uçların temin edilmesi hususunda ve disklerin farklı süper alaşımlarla lazer metal biriktirme yöntemiyle kaplanmasında bana destek veren UniqueTech Firması ve çalışanlarına çok teşekkür ediyorum. Ayrıca UniqueTech firma ortaklarından Makine Yüksek Mühendisi Sayın Osman Kırılı'ya ve firmanın danışmanı Sayın Prof. Dr. Okan Addemir'e ayrıca çok teşekkür ederim.

Deney makinesi imalatını OTİMSA A.Ş. Firmasında farklı sıcaklıklarda aşınma yapabilen Pin on Disk makinesini beraber tasarlayıp kendi tesislerinde imal edilmesinde büyük rol oynayan ve testler sırasında çıkan problemlerin çözümünde çok büyük destekleri olan Sayın Özer Toruk'a çok teşekkür ederim. Ayrıca deneyisel çalışma testlerinin uygulama çalışmalarının firma tesislerinde yapılmasına izin veren ve desteklerini benden esirgemeyen firma Genel Müdürü Yük. Mühendis Sayın Sedat Yıldız'a ve Otimsa A.Ş. firmasına ve testlerin rahatsız edici gürültüsüne katlanan tüm firma çalışanlarına çok teşekkür ederim.

Yapılan tüm deneyisel uygulamaların SEM elektron mikroskop görüntülerini elde etmeme yardım eden Bartın Üniversitesi Öğretim Görevlisi İbrahim Çalış bey'e teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca tüm öğrencilik hayatım boyunca yanımda olan ve Yüksek lisans Tez çalışmam sürecince bana her zaman maddi ve manevi destek olan aileme en derin sevgilerimle teşekkürlerimi sunarım.

Alper ÖNER

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	I
İÇİNDEKİLER.....	II
ÖZET	VI
ABSTRACT	VIII
SEMBOLLER.....	X
KISALTMALAR.....	XI
ŞEKİL LİSTESİ	XIII
TABLO LİSTESİ.....	XIX
BÖLÜM 1 – GİRİŞ, AMAÇ VE LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	1
1.1. GİRİŞ	1
1.2 Literatür	2
1.2.1 AISI 4140 çelik ile ilgili yüksek sıcaklıklarda yapılan çalışmalar.....	7
1.2.2 Metallerin üzerine çeşitli yöntemlerle kaplanan süper alaşımlar	10
BÖLÜM 2 – MALZEME VE METOD	17
2.1 Çelik ve Çelik Esaslı Metal Diskler.....	17
2.2 Lazer Eritme Biriktirme (LMD) Yöntemi	23
2.3 SÜPER ALAŞIM KAPLANMASI	28
2.3.1 Süper Alaşım.....	28
2.3.2 Süper Alaşım Türleri.....	29
2.3.3 Süper Alaşım Kaplanması.....	35
2.4 Kaplanan Süper Alaşımın Yüksek Sıcaklığa Ulaşması	38
2.5 Yüksek Sıcaklıkta Sürtünme.....	40
2.5.1 Triboloji.....	42
2.5.2 Aşınma	43
2.5.3 Aşınma çeşitleri.....	44
2.5.4 Aşınmaya karşı önlemler.....	49
2.6 Aşınma Ölçümü	51

BÖLÜM 3 – DENEYSEL UYGULAMA VE TESTLERİ.....	54
3.1 Deneysel çalışmada kullanılan Makine	54
3.2 Deneysel Çalışmada AISI 4140 Disk Kullanımı	57
3.2.1 AISI diskler Süperalaşım kaplanması	60
3.2.2 AISI 4140 diskler Stellite süperalaşım kaplanması;.....	60
3.3 Deneysel Çalışmada Kullanılan WT-20 Tungsten Pim	61
3.4 LMD - Laser Melting Deposition yöntemi ile kaplama ve Deneysel Çalışmada Kullanılan Kuka Robot Erlazer TCH-C Lazer Ünitesi	62
3.5 Deneysel çalışmada kullanılan Test Makinesinin Sıcaklık Yükseltmesi.....	64
3.5.1 Deneysel Çalışmada 800°C Test Ortamı.....	66
3.6 Deneysel Çalışmada Sürtünme İşlemi	67
3.6.1 Sürtünme Deney Aparatı	68
3.7 DENEYSEL UYGULAMA	70
3.7.1 Deneysel Çalışma 1	80
3.7.2 Deneysel Çalışma 2.....	80
3.7.3 Deneysel Çalışma 3	81
3.7.4 Deneysel Çalışma 4.....	82
3.7.5 Deneysel Çalışma 5.....	82
3.7.6 Deneysel Çalışma 6.....	83
3.7.7 Deneysel Çalışma 7.....	84
3.7.8 Deneysel Çalışma 8.....	84
3.7.9 Deneysel Çalışma 9.....	85
3.7.10 Deneysel Çalışma 10.....	86
3.7.11 Deneysel Çalışma 11	86
3.7.12 Deneysel Çalışma 12.....	87
3.7.13 Deneysel Çalışma 13	88
3.7.14 Deneysel Çalışma 14.....	88
3.7.15 Deneysel Çalışma 15.....	89
3.7.16 Deneysel Çalışma 16.....	90
3.7.17 Deneysel Çalışma 17.....	90
3.7.18 Deneysel Çalışma 18.....	91

3.8 DENEYDE KULLANILAN DİSKLERİN MALZEME ÇALIŞMALARI	92
3.8.1 AISI 4140 Kaplamasız Disklerin Malzeme Çalışması.....	92
3.8.2 Demir Süperalaşım kaplı AISI 4140 Diskin Malzeme Çalışması.....	93
3.8.3 Kobalt (Stellite) Süperalaşım kaplı AISI 4140 Diskin Malzeme Çalışması ..	94
3.9 Disklerin ve Pimlerin Ağırlık Kayıpları	96
3.10 Tel Erezyon Makinesinde SEM Mikroskop İçin Örneklerin Alınması	98
3.10.1 Kaplamasız AISI 4140 Çelik Diskin Kesilmiş Numuneleri	101
3.10.2 Demir Süperalaşım Kaplı AISI 4140 Çelik Diskin Kesilmiş Numuneleri.	101
3.10.3 Kobalt Süperalaşım Kaplı AISI 4140 Çelik Diskin Kesilmiş Numuneleri	102
3.11 Sem Mikroskobu Test Cihazı	102
3.12 Numunelerin Sem Görüntüleri.....	104
3.12.1 Deneysel Çalışma 1 (AISI 4140 Kaplamasız Çelik Disk, Oda Sıcaklığı (25°C)) Görüntüleri	104
3.12.2 Deneysel Çalışma 2 (AISI 4140 Kaplamasız Çelik Disk, 200°C) Görüntüleri	106
3.12.3 Deneysel Çalışma 3 (AISI 4140 Kaplamasız Çelik Disk, 350°C) Görüntüleri	107
3.12.4 Deneysel Çalışma 4 (AISI 4140 Kaplamasız Çelik Disk, 500°C) Görüntüleri	109
3.12.5 Deneysel Çalışma 5 (AISI 4140 Kaplamasız Çelik Disk, 650°C) Görüntüleri	110
3.12.6 Deneysel Çalışma 6 (AISI 4140 Kaplamasız Çelik Disk, 800°C) Görüntüleri	112
3.12.7 Deneysel Çalışma 7 (Demir Süperalaşımlı AISI 4140 Çelik Disk, Oda Sıcaklığı (25°C)) Görüntüleri.....	113
3.12.8 Deneysel Çalışma 8 (Demir Süperalaşımlı AISI 4140 Çelik Disk, 200°C) Görüntüleri	115
3.12.9 Deneysel Çalışma 9 (Demir Süperalaşımlı AISI 4140 Çelik Disk, 350°C) Görüntüleri	117
3.12.10 Deneysel Çalışma 10 (Demir Süperalaşımlı AISI 4140 Çelik Disk, 500°C) Görüntüleri	119
3.12.11 Deneysel Çalışma 11 (Demir Süperalaşımlı AISI 4140 Çelik Disk, 650°C) Görüntüleri	121
3.12.12 Deneysel Çalışma 12 (Demir Süperalaşımlı AISI 4140 Çelik Disk, 800°C) Görüntüleri	123

3.12.13 Deneysel Çalışma 13 (Kobalt Süperalaşımli AISI 4140 Çelik Disk, Oda Sıcaklığı (25°C)) Görüntüleri	125
3.12.14 Deneysel Çalışma 14 (Kobalt Süperalaşımli AISI 4140 Çelik Disk, 200°C) Görüntüleri	127
3.12.15 Deneysel Çalışma 15 (Kobalt Süperalaşımli AISI 4140 Çelik Disk, 350°C) Görüntüleri	129
3.12.16 Deneysel Çalışma 16 (Kobalt Süperalaşımli AISI 4140 Çelik Disk, 500°C) Görüntüleri	131
3.12.17 Deneysel Çalışma 17 (Kobalt Süperalaşımli AISI 4140 Çelik Disk, 650°C) Görüntüleri	133
3.12.18 Deneysel Çalışma 18 (Kobalt Süperalaşımli AISI 4140 Çelik Disk, 800°C) Görüntüleri	135
BÖLÜM 4 –SONUÇLAR.....	137
4.1 Değerlendirme	138
4.2 Öneriler	139
BÖLÜM 5 – KAYNAKLAR.....	140
BÖLÜM 6 – EKLER.....	157
BÖLÜM 7 – ÖZGEÇMİŞ	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.

ÖZET

Süper alaşımlar kayıpları azaltmak için özellikle zor şartlar olarak kabul edilen uzay ve havacılık, savunma sanayi, petrol çıkarma ve taşımacılık sektörü, madencilik vb sektörlerde süper alaşımların kullanımı artmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda sadece ısı değil onun tetiklediği korozyon, erozyon, yorulma, yapışma ve aşındırıcı aşınmalar önemli olmaktadır. Zor şartlarda yapılan çalışmaların zorluklarının çözümünde Nikel (Ni) ve Kobalt (Co) esaslı süper alaşımların kullanılması önemli bir yer tutmaktadır. Bunların özellikle dökümü ve döküm malzemelerinin işleme zorlukları pahalı çözümler olmaktadır. Artan kaplama teknolojileri ile birçok alanda süper alaşımlar yerine dayanıklı daha düşük alaşımlı malzemeler tercih edilmektedir. Gelişen teknoloji ile birlikte bu ürünler, döküm ve işleme maliyetlerinden dolayı ve işlenmesi zor malzemelerin üzerlerine şartları karşılayacak süper alaşımlar kaplanmaktadır.

Deneyisel çalışmada, savunma sanayinde, Otomotiv sanayinde, kalıpcılık teknolojilerinde, hareket ileten mil ve dişlilerde yaygın olarak kullanılan düşük alaşımlı ve orta karbonlu AISI4140 çeliği kullanıldı. Deney malzemesi olarak çapı 100 mm ve kalınlığı 10 mm olacak şekilde 18 adet AISI4140 çelik disk hazırlanmıştır.

Lazer Eritme Biriktirme (LMD) yöntemiyle kaplamalar yapıldı. Bunlar önce 6 adet diskin üzerine 0,7 mm kalınlığında kobalt esaslı süperalaşım kaplama yapılmıştır. 6 adet diskin üzerine 0,7 mm kalınlığında demir esaslı süper alaşım kaplanmıştır. Son olarak 6 disk AISI4140 kaplamasız olarak deneyisel uygulamada kullanılmıştır.

Aşınma konusunda gerçeğe en yakın kabul edilen ve en yaygın olarak kullanılan test yöntemi olan Disk Üzerinde Pim yöntemi seçilerek amaca uygun test cihazı tasarlanmıştır ve yapılmıştır. Bu cihaz Otimsa firmasında yüksek gürültü çıkarttığından dolayı cihaz, firmanın boş köşelerinde veya تنها köşelerinde kullanılmıştır. Yüksek ısılara çıkabilen test cihazıyla diskler oda sıcaklığı (25°C), 200°C, 300°C, 450°C, 500°C, 650°C, 800°C'lerde 50 N yük altında ortalama 10,000 mm mesafe katedecek kadar teste tabii tutulmuştur.

Yapılan testler sonucunda diskler hassas terazide tartılarak değerlendirilmiştir. Oksitlenmenin ağırlık yapması sonucu net sonuç alınamadığından dolayı disklerin SEM

mikroskobunda EDS analizleri yapılmıştır. SEM mikroskobundan her deney parçasına ait 15mm x 15mm boyutlarında numuneler kesilmiştir. Numuneler Tel Erezyon yöntemi ile elde edilmiştir.

Tel Erezyon Yöntemiyle kesim için her bir diskin kesiminin başlayacağı nokta belirlenmiş ve her diskten numune alınmıştır. Fakat Tel Erezyon yönteminde, metal kesim sırasında tel başka bir malzemeye denk gelirse tel erezyon makinesi kendini güvene almak için kesme işlemini durdurur ve bu durum kesimler sırasında çokça yaşanmıştır. Tel Erezyon yöntemiyle elde edilen numuneler SEM Mikroskobuna yerleştirilmiştir.

Sem Mikroskobunda görüntüler Bartın Üniversitesi'nde alınmıştır. Her numune için 100µm uzaklık ve 20µm uzaklık olacak şekilde ikişer görüntü alınmış ve 20 µm mesafede çizgisel analizleri yapılmıştır.

Ağırlık yorumlamaları ve analizler sonucu kobalt esaslı süper alaşım kaplamanın yüksek sıcaklıklarda diğerlerine göre daha iyi olduğu sonucu elde edilmiştir.

ABSTRACT

The use of superalloys is increasing in sectors such as space and aviation, defense industry, oil extraction and transportation sector, mining etc., which are considered to be particularly difficult conditions to reduce superalloy losses. At high temperatures, not only heat, but also corrosive, erosive, fatigue, adhesion and abrasive wear triggered by heat are important. The use of Nickel (Ni) and Cobalt (Co) based super alloys has an important place in solving the difficulties of working in difficult conditions. Especially their casting and processing difficulties of casting materials are expensive solutions. With increasing coating technologies, durable lower alloy materials are preferred instead of super alloys in many areas. Along with the developing technology, these products are coated with super alloys to meet the conditions, due to the casting and processing costs and on materials that are difficult to process.

In the experimental study, low alloy and medium carbon AISI4140 steel was used, which is widely used in the defense industry, automotive industry, molding technologies, shafts and gears that transmit motion. As test material, 18 pieces of AISI4140 steel discs with a diameter of 100 mm and a thickness of 10 mm were prepared.

Coatings were made using the Laser Melting Deposition (LMD) method. First of all, 0.7 mm thick cobalt-based superalloy coating was applied on 6 discs. Iron-based super alloy of 0.7 mm thickness is coated on 6 discs. Finally, 6 discs of AISI4140 uncoated were used in the experimental application.

Pin-on-Disc method, which is the most widely used and accepted test method in terms of wear, was chosen and a test device suitable for the purpose was designed and built. The device was used in Otimsa Company. Since this device produces high noise, the device was used in empty corners or secluded corners in the company. With a test device that can reach high temperatures, the discs were tested at room temperature (25°C), 200°C, 300°C, 450°C, 500°C, 650°C, 800°C under 50 N load to cover an average distance of 10,000 mm.

As a result of the tests, the discs were weighed on a precision scale and evaluated. EDS analyzes of the discs were made under the SEM microscope, since no clear result could

be obtained as a result of the weight of the oxidation. Samples of 15mm x 15mm dimensions of each test piece were cut for the SEM microscope. The samples were obtained by Wire Erosion method.

For cutting with Wire Erosion Method, the point where the cutting of each disc will start was determined and samples were taken from each disc. However, in the Wire Erosion method, if the wire comes across another material during metal cutting, the wire erosion machine stops the cutting process in order to secure itself, and this has happened a lot during the cuts. The samples obtained by the Wire Erosion method were placed in the SEM Microscope.

Images were taken under the Sem Microscope at Bartın University. For each sample, two images were taken at a distance of 100 μm and a distance of 20 μm , and linear analyzes were made at a distance of 20 μm . As a result of weight interpretation and analysis, it was concluded that the cobalt-based superalloy coating was better than the others at high temperatures.

SEMBOLLER

Fe: Demir

O: Oksijen

Cr: Krom

Ni: Nikel

Mo: Molibden

Co: Kobalt

Ta: Tantal

Si: Silisyum

C: Karbon

Nb: Niyobyum

V: Vanadyum

Al: Alüminyum

Ti: Titanyum

B: Bor

Zr: Zirkonyum

Se: Selenyum

Bi: Bizmut

Pb: Kurşun

KISALTMALAR

LMD: Lazer eritme biriktirme

AISI: Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü

DIN-EN: Alman Standartları-Euronorm

PVD: Fiziksel Buhar Kaplamalar

HV: Vickers Sertliği

MIG: Metal soy gaz

TIG: Tungsten soy gaz

HVOF: Yüksek Hızlı Oksijen Yakıtı

PTA: Plazma Transfer Ark

APS: Atmosferik Plazma sprey

ASTM: Amerikan Test ve Malzeme Kurumu

Nial: Nikel Alüminid

Fe₂O₃: Demir (III) oksit

WAAM: Tek ark eklemeli imalat

CW: Katmanlar arası soğuk işlenmiş

COF: Sürtünme Katsayıları

H₂SO₄: Apeks Sülfürik Asit

XRD: X-ışını toz kırınımı

NAB: Nikel alüminyum bronz

MIL: Askeri standartlaştırılmış zırh plakası

WC: Tungsten Karbür

M2: Tungsten-molibden oluşan yüksek hız çeliği

H13: Fe-Cr-Mo-V-Si bileşiğinden oluşmuş demir toz

NATO: Kuzey Atlantik Antlaşması Örgütü

GTA: Gaz Tungsten Arkı

GTAW: Gaz Tungsten Arkı kaynatma

UNS: Amerikan demir ve çelik enstitüsü

SAE: Otomotiv Mühendisleri Kurumu Standartları

GMAW: Gaz Metal Ark Kaynağı

SMAW: Korumalı Metal Ark Kaynağı

FCAW: Özlü Ark Kaynağı

SAW: Tozaltı kaynak

CVD: Kimyasal buhar birikimi

LENS: Lazerle tasarlanmış ağ şekillendirme

LMF: Lazer Metal Füzyon

LC: Lazer kaplama

CC: Konvansiyonel Döküm

DS: ii-Yönlü Katılaştırılmış Süperalaşım

SC: Tek Kristal Süperalaşım

FCC: Yüzey merkezli kübik

TCP: Geçiş kontrol protokolü

SEM: Taramalı Elektron Mikroskobu

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Türkiye’de Isıl İşlemlerde Sektörlerin Yüzde Payları-2015.	19
Şekil 2.2 Fazlara Göre Sınıflandırılmış Yüzey Kaplama Yöntemleri.	24
Şekil 2.3 Metal Lazer Eklemeli İmalat Çeşitleri (L-BAM).	25
Şekil 2.4 Lazer Eritme Biriktirme (LMD) Yöntemi Şematik Gösterimi.	26
Şekil 2.5 Hareketli Bir Lazer Eritme Biriktirme (LMD).	27
Şekil 2.6 Lazer Tamir (LC) Sisteminin Çalışma Anı Görüntüleri.	27
Şekil 2.7 Kullanım Alanlarına Göre Süper Alaşım Tüketim Oranları.	29
Şekil 2.8 Süper Alaşımların Türleri.	30
Şekil 2.9 Bir Jet Motorundaki Süper Alaşımların Bulunduğu Bölgeler.	32
Şekil 2.10 Kobalt Esaslı Süperalaşımların Kullanım Alanları.	34
Şekil 2.11 Süper Alaşımların İşlenebilirlik İndeksleri.	36
Şekil 2.12 Fren Diskinin LMD Yöntemi ile Süper Alaşım Toz Kaplaması.	37
Şekil 2.13 Nikel (Ni) ve Kobalt (Co) Esaslı Süper Alaşımların Deney Tekrarına Karşı Ağırlık Kazançları.	40
Şekil 2.14 (a) Oda Sıcaklığı ve (b) 500°C Sıcaklıkta 30N Yükte Ortalama Aşınmış Hacim (mm ³).	41
Şekil 2.15 Triboloji Sisteminin Yapısı.	42
Şekil 2.16 Endüstriyel Bir Parçanın Aşındırıcı Aşınması.	44
Şekil 2.17 Endüstriyel Makine Parçasında Adezyon (Yapışkan) Aşınması.	45
Şekil 2.18 Endüstriyel Parçada Yorulma ve Oyuk Aşınması.	46
Şekil 2.19 Sürtünme Aşınma Mekanizması.	47
Şekil 2.20 Gaz Türbin Motorunda Kompresör Kanatlarının Aşınması.	48
Şekil 2.21 Endüstriyel Yapısal Elemanlarının Korozyon ve Oksidasyon Aşınması.	49
Şekil 3.1 Deneylerde Kullanılan Aşındırma Makinesi.	54
Şekil 3.2 Deneylerde Kullanılan Disk Üzerinde Pim Makinesinin Yandan Görünüşü.	55
Şekil 3.3 Deneylerde Kullanılan Disk Üzerinde Pim Makinesinin Kontrol Paneli.	56
Şekil 3.4 (a) 50N Ağırlığın Makineye Bağlanmadan Önceki Görüntüsü ve (b) 50N Ağırlığın Makineye Bağlandıktan Sonraki Görüntüsü.	56
Şekil 3.5 Makinenin Dönen Plakası ve Isıtıcıların Çalışırken Görünüşü.	57
Şekil 3.6 Disklerin Toplu Halde Görünümü.	58

Şekil 3.7 Bir Adet Kaplamasız Diskin Fotoğrafı.	58
Şekil 3.8 Bir Adet Diskin Teknik Çizimi.	59
Şekil 3.9 Demir Süper Alaşımı Kaplanmış Diskler.	60
Şekil 3.10 Kobalt Esaslı Stellite Süper Alaşımı Kaplanmış Diskler.	61
Şekil 3.11 Deneylerde Pim Olarak Kullanılan WT-20 Tungsten Elektrotlar.	62
Şekil 3.12 Lazer Eritme Biriktirme (LMD) Makine ve Sisteminin Çalışırken Görünüşü.	63
Şekil 3.13 Lazer Eritme Biriktirme (LMD) Makinesi Kaplama İşlemi Uygularken.	64
Şekil 3.14 Deneysel Uygulamada Sıcaklığı 500°C'ye Ayarlanmış ve Ortam Isısı Olan 503°C'yi Gösteren Ekran.	65
Şekil 3.15 Deneysel Çalışmanın Test Cihazında Kullanılan Termokuplun Bağlantı Kısımları.	65
Şekil 3.16 Deneysel Çalışmada Termokupl'ın Ortam Sıcaklığını Ölçen Termokupl Ucu Görünüşü.	66
Şekil 3.17 800°C Olan Test Ortamının Kapak Aralığından Görünüşü.	67
Şekil 3.18 Tungsten Elektrot Kesilen ve Deneyde Kullanılan Tungsten Pim.	68
Şekil 3.19 Deneysel Çalışmada 800°C Kullanılmış Tungsten Pim.	68
Şekil 3.20 Deneysel Çalışmada Sürtünmenin Sürekli 50N Kuvvetle Olmasını Sağlayan Ağır Parça.	69
Şekil 3.21 Yüksek Sıcaklıkta Disk Üzerinde Pim Makinesinde Sürtünmenin Görünüşü.	70
Şekil 3.22 Deneysel Uygulamada Kullanılan Test Makinesi Deney Öncesi.	70
Şekil 3.23 Metal Disklerin Yerleştirildiği 100mm Çapındaki Diskin Görünüşü.	71
Şekil 3.24 Deneysel Çalışmada Deney Seti İçine Yerleştirilmiş ve Sabitlenmiş Deney Diski.	72
Şekil 3.25 Deneysel Uygulama Deney Seti Dengeleyici Aparatı.	72
Şekil 3.26 Deney Seti Çelik Mil ve Bağlanmış Tungsten Pim.	73
Şekil 3.27 Deney Seti Mil, Kelebek Vida ve Ağırlık Aparatı.	74
Şekil 3.28 Deney Seti Üzerinde, Terazide Bağlanmış ve Sabitlenmiş Mil.	74
Şekil 3.29 Deney Seti, Hava İki Çizginin Arasında – Terazide Denge Durumunda.	75
Şekil 3.30 Devir Ayarlama Düğmesi.	76
Şekil 3.31 Kontrol Paneli – Termostattan Sıcaklık Ayarlanması.	77

Şekil 3.32 Test Makinesi Çalıştırılmadan Önce.....	78
Şekil 3.33 Test Makinesi Çalıştırıldıktan Sonra.....	78
Şekil 3.34 1 Numaralı Deney Parçasının Deney Sonrası Görüntüsü.	80
Şekil 3.35 2 Numaralı Deney Parçalarının Deney Sonrası Görüntüsü.....	81
Şekil 3.36 3 Numaralı Deney Parçalarının Deney Sonrası Görüntüsü.....	81
Şekil 3.37 4 Numaralı Deney Parçalarının Deney Sonrası Görüntüsü.....	82
Şekil 3.38 5 Numaralı Deney Parçalarının Deney Sonrası Görüntüsü.....	83
Şekil 3.39 6 Numaralı Deney Parçalarının Deney Sonrası Görüntüsü.....	83
Şekil 3.40 7 Numaralı Deney Parçalarının Deney Sonrası Görüntüsü.....	84
Şekil 3.41 8 Numaralı Deney Parçalarının Deney Sonrası Görüntüsü.....	85
Şekil 3.42 9 Numaralı Deney Parçalarının Deney Sonrası Görüntüsü.....	85
Şekil 3.43 10 Numaralı Deney Parçalarının Deney Sonrası Görüntüsü.....	86
Şekil 3.44 11 Numaralı Deney Parçalarının Deney Sonrası Görüntüsü.....	87
Şekil 3.45 12 Numaralı Deney Parçalarının Deney Sonrası Görüntüsü.....	87
Şekil 3.46 13 Numaralı Deney Parçalarının Deney Sonrası Görüntüsü.....	88
Şekil 3.47 14 Numaralı Deney Parçalarının Deney Sonrası Görüntüsü.....	89
Şekil 3.48 15 Numaralı Deney Parçalarının Deney Sonrası Görüntüsü.....	89
Şekil 3.49 16 Numaralı Deney Parçalarının Deney Sonrası Görüntüsü.....	90
Şekil 3.50 17 Numaralı Deney Parçalarının Deney Sonrası Görüntüsü.....	91
Şekil 3.51 18 Numaralı Deney Parçalarının Deney Sonrası Görüntüsü.....	91
Şekil 3.52 AISI 4140 Kaplamasız Disklerin Sıcaklığa bağlı olarak değişen ağırlık Grafığı.....	92
Şekil 3.53 AISI Kaplamasız Diskler İçin Kullanılan Wt-20 Tungsten Pimlerin Ağırlık Grafığı.....	93
Şekil 3.54 Demir Süperalaşım Kaplı Disklerin Ağırlık Grafığı.	94
Şekil 3.55 Demir Süperalaşım Kaplı Disklerde Kullanılan WT-20 Tungsten Pim Ağırlıkları Grafığı.....	94
Şekil 3.56 Stellite Kobalt Süperalaşım Kaplı Disklerin Ağırlık Grafığı.	95
Şekil 3.57 Stellite Kobalt Süperalaşım Kaplı Disklerde kullanılan WT-20 Tungsten Pim Ağırlıkları Grafığı.....	96
Şekil 3.58 Disklerin Aşınma Sonucu Ağırlık Kayıplarının Grafığı (g).	97
Şekil 3.59 Pimlerin Aşınma Sonucu Ağırlık Kayıplarının Grafığı (mg).	98

Şekil 3.60 Tel Erezyon Kesme Makinesi.	98
Şekil 3.61 Telin Gececeği Deliği Açan Makine.	99
Şekil 3.62 Metal Disk Tel Erezyon Makinesine Bağlanmış Kesime Hazır.	100
Şekil 3.63 (a) Problemlili Kesilen ve (b) Hiç Problemsiz Kesilen Disklere Örnek.	100
Şekil 3.64 Kaplamasız 4140 Çelik Disklerden Kesilen 12 Adet Numune.	101
Şekil 3.65 Demir Süper Alaşım Kaplı Disklerden Kesilen 12 Adet Numune.	101
Şekil 3.66 Kobalt Süper Alaşım Kaplı Disklerden Kesilen 12 Adet Numune.	102
Şekil 3.67 SEM Mikroskobun Modeli ve Görüntüsü.	102
Şekil 3.68 Deneysel Çalışma 1'in (a) 100µm Uzaklıktan ve (b) 20µm Uzaklıktan Görüntüsü.	104
Şekil 3.69 Deneysel Çalışma 1'in 20µm Uzaklıktan SEM Görüntüsünün Linear Analizi.	105
Şekil 3.70 Deneysel Çalışma 2'nin (a) 100µm Uzaklıktan ve (b) 20µm Uzaklıktan Görüntüsü.	106
Şekil 3.71 Deneysel Çalışma 2'nin 20µm Uzaklıktan SEM Görüntüsünün Linear Analizi.	107
Şekil 3.72 Deneysel Çalışma 3'ün (a) 100µm Uzaklıktan ve (b) 20µm Uzaklıktan Görüntüsü.	107
Şekil 3.73 Deneysel Çalışma 3'ün 20µm Uzaklıktan SEM Görüntüsünün Linear Analizi.	108
Şekil 3.74 Deneysel Çalışma 4'ün (a) 100µm Uzaklıktan ve (b) 20µm Uzaklıktan Görüntüsü.	109
Şekil 3.75 Deneysel Çalışma 4'ün 20µm Uzaklıktan SEM Görüntüsünün Linear Analizi.	110
Şekil 3.76 Deneysel Çalışma 5'in (a) 100µm Uzaklıktan ve (b) 20µm Uzaklıktan Görüntüsü.	110
Şekil 3.77 Deneysel Çalışma 5'in 20µm Uzaklıktan SEM Görüntüsünün Linear Analizi.	111
Şekil 3.78 Deneysel Çalışma 6'nın (a) 100µm Uzaklıktan ve (b) 20µm Uzaklıktan Görüntüsü.	112
Şekil 3.79 Deneysel Çalışma 6'nın 20µm Uzaklıktan SEM Görüntüsünün Linear Analizi.	113

Şekil 3.80 Deneysel Çalışma 7'nin (a) 100µm Uzaklıktan ve (b) 20µm Uzaklıktan Görüntüsü.	113
Şekil 3.81 Deneysel Çalışma 7'nin 20µm Uzaklıktan SEM Görüntüsünün Linear Analizi.	115
Şekil 3.82 Deneysel Çalışma 8'in (a) 100µm Uzaklıktan ve (b) 20µm Uzaklıktan Görüntüsü.	115
Şekil 3.83 Deneysel Çalışma 8'in 20µm Uzaklıktan SEM Görüntüsünün Linear Analizi.	116
Şekil 3.84 Deneysel Çalışma 9'un (a) 100µm Uzaklıktan ve (b) 20µm Uzaklıktan Görüntüsü.	117
Şekil 3.85 Deneysel Çalışma 9'un 20µm Uzaklıktan SEM Görüntüsünün Linear Analizi.	118
Şekil 3.86 Deneysel Çalışma 10'un (a) 100µm Uzaklıktan ve (b) 20µm Uzaklıktan Görüntüsü.	119
Şekil 3.87 Deneysel Çalışma 10'un 20µm Uzaklıktan SEM Görüntüsünün Linear Analizi.	120
Şekil 3.88 Deneysel Çalışma 11'in (a) 100µm Uzaklıktan ve (b) 20µm Uzaklıktan Görüntüsü.	121
Şekil 3.89 Deneysel Çalışma 11'in pimin kırıldığı bölgenin bir kısmı.	121
Şekil 3.90 Deneysel Çalışma 11'in 20µm Uzaklıktan SEM Görüntüsünün Linear Analizi.	123
Şekil 3.91 Deneysel Çalışma 12'nin (a) 100µm Uzaklıktan ve (b) 20µm Uzaklıktan Görüntüsü.	123
Şekil 3.92 Deneysel Çalışma 12'nin 20µm Uzaklıktan SEM Görüntüsünün Linear Analizi.	124
Şekil 3.93 Deneysel Çalışma 13'ün (a) 100µm Uzaklıktan ve (b) 20µm Uzaklıktan Görüntüsü.	125
Şekil 3.94 Deneysel Çalışma 13'ün 20µm Uzaklıktan SEM Görüntüsünün Linear Analizi.	126
Şekil 3.95 Deneysel Çalışma 14'ün (a) 100µm Uzaklıktan ve (b) 20µm Uzaklıktan Görüntüsü.	127

Şekil 3.96 Deneysel Çalışma 14'ün 20µm Uzaklıktan SEM Görüntüsünün Linear Analizi.	128
Şekil 3.97 Deneysel Çalışma 15'in (a) 100µm Uzaklıktan ve (b) 20µm Uzaklıktan Görüntüsü.	129
Şekil 3.98 Deneysel Çalışma 15'in 20µm Uzaklıktan SEM Görüntüsünün Linear Analizi.	130
Şekil 3.99 Deneysel Çalışma 16'nın (a) 100µm Uzaklıktan ve (b) 20µm Uzaklıktan Görüntüsü.	131
Şekil 3.100 Deneysel Çalışma 16'nın 20µm Uzaklıktan SEM Görüntüsünün Linear Analizi.	132
Şekil 3.101 Deneysel Çalışma 17'nin (a) 100µm Uzaklıktan ve (b) 20µm Uzaklıktan Görüntüsü.	133
Şekil 3.102 Deneysel Çalışma 17'nin 20µm Uzaklıktan SEM Görüntüsünün Linear Analizi.	134
Şekil 3.103 Deneysel Çalışma 17'nin (a) 100µm Uzaklıktan ve (b) 20µm Uzaklıktan Görüntüsü.	135
Şekil 3.104 Deneysel Çalışma 18'in 20µm Uzaklıktan SEM Görüntüsünün Linear Analizi.	136

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1 Çeşitli Yüzey Sertleştirmelerde Elde Edilen Ortalama Sertlik Değerleri.....	19
Tablo 2.2 Deneysel Çalışmada Kullanılan AISI 4140 Çeliğin Fiziksel Özellikleri.	20
Tablo 2.3 Deneysel Çalışmada Kullanılan AISI 4140 Alaşımli Çeliğin Kimyasal Bileşimi.....	20
Tablo 2.4 Deneysel Çalışmada Kullanılan AISI 4140 Alaşımli Çeliğin Mekanik Özellikleri.	21
Tablo 2.5 AISI 4140 Alaşımli Çeliğin Termal Özellikleri.	21
Tablo 3.1 Tungsten Elektrot Pim'in Özellikleri	61
Tablo 3.2 18 Deneyin Listesi ve Nitelikleri.....	79
Tablo 3.3 AISI 4140 Kaplamasız Malzemenin Deney Sonuçları.....	92
Tablo 3.4 Demir Süper Alaşım Kaplanmış AISI 4140 Malzemenin Deney Sonuçları.	93
Tablo 3.5 Kobalt Süper Alaşım (Stellite) Kaplanmış Olan AISI 4140 Malzemenin Deney Sonuçları.....	95
Tablo 3.6 Disklerin ve Pimlerin Sıcaklıklara Göre Ağırlık Kayıpları.	97

BÖLÜM 1 – GİRİŞ, AMAÇ VE LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

1.1. GİRİŞ

Paslanmaz çeliklerin kullanılmasından sonra havacılık sektörünün de zorlaması ile süper alaşımlar diğerlerine göre özellikleri açısından çok nitelikli olan çeşitli alaşımlar geliştirilmiştir. Süper alaşımlar çelik esaslı, nikel esaslı ve kobalt esaslı olarak sınıflandırılmıştır [1-2, 91-92,102]. Zor şartlarda çalışacak metal bulunmasına bu süper alaşımlar çözüm olmuşlardır. Zor şartlar dediğimiz sıcaklığın yüksek olduğu çalışma şartları olan metallerin şekillendirilmesi, jet motorları gibi havacılıkla ilgili unsurlar, otomotivin güvenlik ve veriminin artması ile ağırlıkça azaltılıp dayanımının artması istenilen şartlar, petrolün artık çok derinlerden çıkarılabilmesi için oluşan zorluklar gibi ortamlar zor şartlar olarak kabul edilmektedir [3].

Günümüzdeki rekabet şartlarında üretim süreçlerinin iyileştirilmesinin yanı sıra aşınmadan veya kırılmadan ötürü makine duruş zamanlarının minimize edilmesi suretiyle firmalar rakiplerinden bir adım daha öne çıkmayı hedeflemektedir. Üretim kaybı, duruş, geri dönüşümü olmayan kayıplardan her yıl dünya çapında milyarlarca doları bulan zararlar meydana gelmektedir [4]. Zor şartlarda çalışması planlanan süper alaşımlar özellikle yüksek sıcaklıklarda çalışmaları planlanmışsa aşınma ve oksidasyon dirençlerini arttıracak ilave işlemlere ihtiyaç duyacaklardır. Bunların en bilineni ise yüzey işlemleri ve kaplamalardır. Çeliklerin üzerinin kaplanması çeşitli yöntemlerle yapılmaktadır. Dövme değerlerine yakın iyi sonuçlar döküm yöntemleriyle elde edilemezken toz metalürjisi ile özellikle eklemeli imalat teknikleriyle üretilen malzemelerden elde edilebilmektedir [5]. Toz metalden imalat yapan 3B yazıcıların hata payları yeni gelişmelerle son derece azalmış olup birçok yerde seri imalat da kullanılmaktadır [93]. Bu çalışmada, kaplama yöntemleri içinde uygulanabilme esnekliği, çok sağlam olması, homojen kaplanabilirliği ve avantajları çok iyi bilinen toz metalürjisi kullanan eklemeli imalat olması açısından Lazer eritme biriktirme (LMD) yöntemi tercih edilmiştir.

Deneysel çalışmada alt taşıyıcı malzeme olarak (AISI) 4140 çelik alaşımı seçilmiştir. AISI 4140 alaşımlı çelik, yüksek mukavemet ve süneklik nedeniyle savunma sanayinde namlu yapımında [6] ve birçok endüstriyel uygulamada dişliler, bıçaklar ve benzerleri için yaygın olarak kullanılan malzemelerden biridir [91]. Yüksek sıcaklık, korozyon,

oksidasyon, triboloji gibi zorlu çalışma ortamlarına maruz kaldığında, mikro çukurlaşma, sürtünme gibi ciddi mekanik arızalara neden olur. Sonuç olarak bu kritik parça diğer bileşenlerin tamamen arızalanmasına neden olarak hizmetin durmasına veya ömrüne zarar verir [7].

Yüksek sıcaklıklarda bu tip arızaların olmaması için AISI 4140 çeliğinin uygun bir kaplama ile kaplanması ele alınmıştır. Bu amaçla 10 cm çapındaki AISI 4140 çeliğin kendisi, üstüne LMD yöntemi ile kaplanmış çelik esaslı süper alaşım ve üstüne LMD yöntemiyle kaplanmış kobalt esaslı süper alaşım olacak şekilde üç çeşit malzeme kullanılmıştır. Sıcaklığa karşı aşınma dayanımlarını tespit edebilmek amacı ile bu üç çeşit malzeme ayrı ayrı oda sıcaklığı (25°C), 200°C, 300°C, 450°C, 500°C, 650°C, 800°C sıcaklıklarda amaca uygun imal edilen disk üzerinde pim cihazında test edilmişlerdir. Ağırlık kayıplarından yola çıkılarak bu 18 numunenin aşınmaları tespit edilmiştir. Bunlar değerlendirilerek kaplamasız veya kaplama cinsi ve sıcaklık etkisi değerlendirilmiştir.

Havacılık, savunma, petrol, cam ve otomotiv sanayi gibi çeşitli sanayi dallarında, muhtelif parça imalatlarında ve kalıpcılıkta kullanılan bu düşük alaşımlı çeliğin özellikle savunma ve otomotiv sanayinde yüksek sıcaklıklardaki yüzey dayanımlarının artırılmasına ihtiyaç doğmuştur. Dövme değerlerine yakın olan eklemeli imalat ve lazerle kaplama teknolojileri (LMD) kullanılarak zor şartlarda kullanılan süperalaşımların bu çeliğe kaplanarak istenilen yüzey özelliklerini elde etmek isteği ile yola çıkılmıştır.

Ne kadar başarılı olunacağı, hangi sıcaklıklarda hangi süper alaşım kullanılmalı, seçilen alt taşıyıcı çelik uygun mudur, sorularının cevabını bulmak için 1000°C'ye kadar çıkabilen bir disk üzerinde pim test makinesi yapılmıştır. Amaca uygun seçilen demir esaslı süper alaşım ile kobalt esaslı – Stellite süper alaşım taban olarak seçilen AISI 4140 çeliğine kaplanarak 800°C'ye kadar sıcaklıklarda her üçünün de test edilmesi ve hangi sıcaklıkta hangisi doğru seçim olmalıdır sorusunun cevabının bulunması amaçlanmıştır.

1.2 Literatür

Zaman içinde çeliklerden daha fazla yüksek ısıya dayanım, daha sert yüzeyler, kırılmaya, aşınma ve paslanmaya daha fazla direnç istenmesi doğrultusunda birçok yüzey işlemleri ve kaplama yöntemleri gelişmiştir. Yüzey işlemleri: karbürleme [8,114], borlama [9-12],

nitrürleme [13-14,98], plazma nitrürleme [15-18, 103], gaz nitrasyon [19-20], yüzey dövme (çelik bilye püskürtme) [21-23]. Bunlar dışında ısı ile gerçekleştirilen, indüksiyon ile sertleştirme [24-27], suni yaşlandırma ve tavlama sertleştirmesi yapılmıştır. [28].

Kriyojenik ısı işlem çoğunlukla kesici takımların aşınma direnci, tokluğunu ve takım ömrünü arttırmak için uygulanmaktadır [29]. -200°C’de ikili temperleme ile 2500 dakikalık derin kriyojenik ısı işlem süreci verilmiştir [30] . Buradan yay çeliklerinin ömrünün uzun olması açısından Kriyojenik işlem uygulanması çok önemlidir [31]. Havacılık sektöründe kullanılan Inconel 718 malzemesinin işlenmesi çok zordur. İşleme uçları kriyojenik işleme tabi tutulduğunda en az yağlama, en az kesme kuvveti, en az titreşim ve sonuç olarak en iyi malzeme kaldırmayı sağlamıştır [32] Soğuk iş takım çeliklerinin abrasif aşınma dirençlerinin de Kriyojenik işlem uygulaması sayesinde arttığı gösterilmiştir. Kriyojenik işlem sonrası yapılan temperlemenin hem sertliğe hem de aşınma direncine olumsuz etki yaptığı belirtilmiştir[33]. Takım çeliklerinin özelliklerini etkileyen en önemli faktörlerin östenitleme ve tavlama sıcaklıkları olduğu gösterilmiştir. Buna karşılık, derin kriyojenik işlemin parametreleri daha düşük bir önem düzeyi göstermiştir. 24 saate kadar bekleme süreleri için hemen hemen sabit sayılabilecek bir aşınma oranı tespit edilirken 36 saatlik daha uzun bir tutma süresinde aşınma oranı en alt seviyeye ulaşmıştır. Daha fazla tutma ile aşınma oranı tekrar artmaktadır[34].

Lazer ile sertleştirme AISI 4140 çeliğine 850°C ile 1350°C arasında değişik sıcaklıklarda lazer ile yüzey sertleştirme işlemi uygulanmıştır. 1350°C’de lazer ile gerçekleştirilen yüzey sertleştirme yapılan çeliğin aşınma hacim kaybı en düşük olmuştur [6].

Pahalı çok sert alaşımlar yerine daha ucuz alaşımların yüzeyine amaca uygun süper alaşımlar dâhil pahalı alaşımların veya onların metal matris kompozitlerinin kaplanması konusunda en kabul gören kaplama yöntemleri ile yapılan çalışmalar incelenmiştir.

Fiziksel Buhar Kaplamalar (PVD): Genellikle 1 ila 5 mikron aralığında ince bir film kaplamadır, alt tabakalara mükemmel yapışma, kaplama tipine bağlı olarak 1500 – 4500 HV (Vickers) civarında bir sertlik değerine sahiptir. Genel olarak, karbon çelikleri 250 HV civarında bir sertlik aralığına sahiptir. Nitrürlenmiş veya nikel ve krom kaplı çelikler 600 HV ila 1000 HV yüzey sertliği aralığında olduğu göz önüne alındığında PVD kaplamalar son derece sert ve dolayısıyla çok dayanıklı ve aşınmaya karşı çok dirençlidirler [35-36].

Ark kaynağı; Metalleri kaynaklamak için bir elektrik akımı kullanır. Ark kaynağı türleri, diğerleri arasında metal soy gaz (MIG) kaynağı ve tungsten soy gaz (TIG) kaynağını içerir. MIG kaynağı ve TIG kaynağı benzer bir prensipte çalışır. Kalın malzemeler için daha uygun MIG ve ince malzemeler için daha uygun TIG ile çok çeşitli metallerde kullanılabilir. Tipik kaynak malzemeleri arasında alüminyum, karbon çeliği ve paslanmaz çelik bulunur [37-38, 115].

Yüksek Hızlı Oksijen Yakıtı (HVOF) kaplama; Metalik ve sert kaplama kaplamaların üretimi için kullanılan yüksek hızlı, düşük sıcaklıkta bir püskürtme işlemidir. HVOF püskürtme, alevleri süpersonik hızlarda püskürten bir grup termal püskürtme işlemidir ve en yenilerinden biridir. HVOF süreçlerinde parçacıkların kinetik enerjisi sıcaklıktan daha önemlidir. Bu işlemler, nispeten düşük sıcaklıklarda yoğun kaplamalar üretmek için yüksek etkili enerji kullanır [39, 116] .

Plazma püskürtme; Yüksek sıcaklık, yüksek enerjili ısı kaynağı ve argon gibi inert bir püskürtme ortamı ve yüksek parçacık hızlarının bileşimi ile yüksek kaliteli bir kaplama üretir. Bu teknoloji, yüzey bozulmasını minimize ederken olağanüstü yapışma gücüne sahip kaplamayı sağlayan çok çeşitli metalik veya seramik malzemelerin püskürtülmesini sağlar [40-43, 117].

Plazma Transfer Ark kaplama (PTA); Atmosferik plazma spreyi, termal sprej adı verilen bir işlem ailesine aittir. APS'in atmosferik olması sayesinde uygulama alanlarını genişlemektedir[44-45, 118-119]. Atmosferik plazma spreji yöntemi ile de seramik kaplanabilmektedir [43].

Akımsız nikel-fosfor kaplama; Metal veya plastik gibi katı bir substratın yüzeyinde eşit bir nikel-fosfor alaşımı tabakası oluşturan kimyasal bir işlemdir [46-48, 120].

Alev püskürtme; Termal püskürtme olarak da bilinen daha geniş bir kaplama işlemleri grubunun bir parçasıdır [94-95, 121].

Difüzyon kaynak makinesi kullanımı ile NiAl alaşımı kaplanması; Bu tip kaplamalarda kaplama cinsi amaca göre seçilir. Çok yüksek sıcaklıklarda ise seramik grubu (2700°C'nin üstü erime noktasına sahip) malzemeler seçilir [49-52].

Deneysel çalışmalarda kullanılan onsekiz adet numunelerin oniki adedinin taban taşıyıcı malzemesi olan ve de altı adedinin ana malzemesini oluşturan AISI 4140 çelik malzeme ile yapılan çalışmalar;

Cam şekillendirme kalıplarında kullanılan 38CrSi çeliği ve AISI 4140 çelikleri sırasıyla 900 °C'de 30 dakika östenitlemeye, ardından tavlama, yağda su verme ve ardından 400°C'de 120 dakika temperlemeye tabii tutulmuşlardır. Her iki çeliğin sertlik ve çekme özellikleri tamamen aynı şekilde değişirken, her iki çeliğin darbe tokluğu ters yönde değişmiştir. 38CrSi çeliği kırılğan bulunurken, AISI 4140 çeliği tüm ısıtıl işlem proseslerinde mükemmel özellikler sergilemiştir [53].

Lazerle sertleştirme, parçalarda minimum bozulma ve bir kesinti olmaması dahil olmak üzere geleneksel sertleştirme işlemlerine göre avantajlar sağlar. Bu işlem ayrıca geleneksel sertleştirme işlemlerinden daha hızlıdır ve bileşenlerin belirli alanlarının seçici olarak sertleştirilmesi için kullanılabilir. Lazer izlerinin 5 mm üst üste bindirilmesiyle 2 mm'ye kadar sertlik derinlikleri elde edilmiştir [54].

Kolay elde edilebilmesi, diğerlerine göre kolay işlenebilirliği ve birçok üstün mekanik özellikleri ile savunma sanayinde de büyük kullanım yeri olan ve ayrıca tabanca, tüfek ve bazı topların namlu malzemesi olarak da kullanılan ıslah edilmiş ve yüksek sıcaklıkta temperlenmiş AISI 4140 çeliğinin, dayanıklılığının özellikle aşınma direncinin artırılması çok önemlidir. İyon nitrürleme, çeliklerin yorulma ve aşınma özelliklerini geliştirmek için kullanılan popüler bir termo-kimyasal yüzey işlemi haline geldi. İyon Nitürleme ile nitrülenmemiş çeliğe göre yorulma direncinde %50, sıvı nitrülenmiş çeliğe göre % 12 daha fazla yorulma direncinde artış elde edilmiştir [55].

Seramik parçaların toz enjeksiyon kalıplama yoluyla üretiminde bu makinenin temas yüzeylerinin aşınması sık yaşanan problemdir. Bunun üstesinden gelmek için sert, aşınma direnci yüksek ekipmanlar gerekmektedir. Bu makinelerde kullanılan çelik AISI 4140 çeliğidir. Bu çeliğin aşınma direncini arttırmak için temas yüzeyi fiziksel buhar biriktirme (PVD) ve kimyasal buhar biriktirme (CVD) yöntemleriyle sert kaplamalar ile kaplanarak aşınmadan koruması sağlanmaktadır [104].

Savunma sanayisinde kullanılan tanklarda ve diğer paletli araçlarda en önemli mekanik unsurlardan biri de yürüyen aksamlardır. Bu aksamın başlıca ana parçaları taşıyıcı tekerler ve paletlerdir. Tankların hareketi esnasında, taşıyıcı tekerler ve tekerler arasında hareket

eden palet yön çatalları birbirine sürtünerek aşınmaya maruz kalırlar. Tekrar kullanılabilmesi için onarımı, bu parçaların sık sık değiştirilmesi yerine en uygun çözüm olmaktadır. Bu gibi durumlar için Gaz Tungsten Ark Kaynağı (GTAW), Elektron Işın Kaynağı (EBW) ve Sürtünme Kaynağı (FRW) ile AISI 304 paslanmaz çelik ve AISI 4140 düşük alaşımlı çelik bağlantıların mikro yapı ve mekanik özelliklerini incelemiştir. Kaynak sonuçlarından EBW ile yapılan bağlantının, GTAW (635 Mpa) ve FRW (494 Mpa) ile yapılan bağlantıya göre en yüksek çekme dayanımına (681 MPa) sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca GTAW ile yapılan kaynaklı birleştirmenin darbe dayanımı EBW ve FRW'ye göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir [56].

Uçak iniş takımları dışısında kullanılan orta karbonlu düşük alaşımlı AISI 4140 kalite çeliğe borlama uygulanmıştır. Farklı çeliklerin yüzeyinde demir borürlerin büyümesi yüksek anizotropiye sahiptir. Borlanmış fazların anizotropisinin, kullanımdaki özelliklerin önemli bir kararsızlığını ortaya çıkardığı belirlenmiştir. Anizotropinin borür tabakalarının mekanik özellikleri üzerindeki etkisini belirlemeye yönelik tekniklerden biri, Vickers mikro girintisi ile indüklenen kırılmadır. Mevcut çalışma sırasında, Fe₂B sert kaplamaların kırılma tokluğu (KC), AISI 4140 borlanmış çeliklerin yüzeyinde incelenip değerlendirilmiştir [105].

Standart ısıt işlemlerin AISI 4140 çeliğinin abrasiv aşınma özelliği üzerine etkisinin araştırıldığı çalışmada deneyler sonunda sertleştirme ve normalizasyon ısıt işleminin AISI 4140 malzemenin sertliğini, çekme dayanımını ve aşınma direncini arttırdığı, yumuşatma tavlamaısının ise malzemenin bu değerlerini düşürdüğü tespit edilmiştir. En yüksek aşınma, yumuşatma tavı uygulanan numunede, 5N yük ve 120 numara zımpara ile 160 mm çalışma çapında, en düşük aşınma ise sertleştirilmiş numunede 2N yük ve 360 numara zımpara ile 80 mm çalışma çapında gözlenmiştir. Toplam aşınma yolu arttıkça toplam aşınma miktarı da artmıştır. Ancak birim yoldaki aşınma miktarı yol arttıkça azalmıştır [28].

Çeşitli yüzey işlemlerinin AISI 4140 çeliğinin sürtünme ve aşınma davranışı üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. AISI 4140 çeliğinin numune yüzeyleri su verme, karbonlama, borlama ve plazma transfer ark modifikasyonu ile işlendi. Her bir numune grubu diğer numune grupları ile karşılaştırılmış ve karbürleşmiş numunelerin en düşük ağırlık kayıplarını gösterdiği; bununla birlikte, PTA ile muamele edilmiş numuneler, aynı kayma

mesafesindeki diğer numune gruplarına kıyasla en düşük sürtünme katsayısını gösterdikleri gözlemlenmiştir [8].

Silah namlusu, depolanan enerjinin yardımıyla ya gazı sıkıştırarak ve itici gazları patlatarak ya da başka herhangi bir yolla her tür malzemeyi ateşleyebilen her tür ateşli silahın bel kemiğidir. Bir mermi veya mermi ateşleme işlemi sırasında namlu, içinde gerilim oluşturan birçok yük türüne maruz kalır. Çoğunluğu AISI 4140 çeliğinden imal edilmektedir. Malzemesi kadar tasarımı da çok önemlidir. Namlunun tasarımı, ağır basınç yüklerine dayanacak kadar güçlü olmalıdır. Tasarım verilerinin olmaması nedeniyle, silah namlusunun basit bir tasarımı cad yazılımı kullanılarak yapılmıştır [107].

1.2.1 AISI 4140 çelik ile ilgili yüksek sıcaklıklarda yapılan çalışmalar

Bu çalışmada AISI 4140 çeliğinin oda sıcaklığı, 100°C, 200°C, 300°C ve 450 °C sıcaklıklarda 3N, 5N, 7N ve 10 N yükler altında Pim ve Disk yöntemi ile aşınma özellikleri incelenmiştir. Sonuç olarak artan yüke bağlı olarak numunelerdeki hacim kayıpları artmıştır. Oda sıcaklığı ve 100°C gerçekleştirilen deneylerde numuneler birbirine yakın hacim kaybı değerleri verirken 200°C ve 300°C de gerçekleştirilen deneylerde yine numuneler birbirine yakın hacim kaybı değerleri vermiştir. 100°C ve 200 °C de gerçekleştirilen deneylerde delemantasyon, 300°C delemantasyona ilave olarak oksidasyon aşınması ve 450°C de aşınma mekanizması kısmen değişerek oksidasyon türünde aşınma meydana gelmiştir. Raman spektrometresi ile aşınma yüzey bölgesinde gerçekleştirilen oksit analizlerinde hematit (Fe_2O_3) tipi oksitlerin varlığı tespit edilmiştir. 300°C gerçekleştirilen deneylerde hacim kaybı oranları diğer tüm numuneler ile kıyaslandığında daha düşük çıkmıştır. En yüksek hacim kayıpları 450 mm gerçekleştirilen deneylerde elde edilmiştir [6].

Endüstride kullanılan kalıplarda kalıp hasarlarını önlemek ve aşınmaya karşı direnç kazandırmak pasta – plazma pasta yöntemi ile borlama yapmak en iyi çözümlerden biridir. Plastik ekstrüzyon kalıplarında kullanılan AISI 4140, AISI H13, AISI 420 ve EN 1.8519 çeliklerine bu yöntemle borlama yapılması ile oda sıcaklığında hepsi aynı mertebede aşınmış olup relatif aşınma hızı 1.0 olarak alınmıştır. Relatif aşınma hızı 300°C'de AISI 4140 çeliği için yaklaşık 13,5, AISI H13 çeliği yaklaşık 12,0 AISI 420

çeliği yaklaşık 28,4 ve EN 1.8519 çeliği yaklaşık 47,0 mertebelerine yükselmiştir. 500°C'de en düşük relatif aşınma hızı AISI H13 çeliğinde 20,4 olarak belirlenmiştir [9].

Deneylerde kullanılan sürtünme ve aşınma davranışının tespit edildiği Pim ve Disk yöntemi ile ilgili çalışmalar;

Yeni bir disk üzerinde pin makinesi, test numunelerinin stick-slip genlikleri üzerindeki etkilerini incelemek için farklı titreşim genliklerinde ve frekanslarında titreştirme olanağı sağlamak üzere tasarlanmış ve yapılmıştır. Makine, normal uygulanan yükü ve bağlı iş mili hızını düzenlemek için entegre bir veri toplama sistemine sahip kontrol özellikleri ve sensörlerle donatılmıştır. Bu makine, numune aparatı ve fikstürü değiştirme seçeneği ile disk üzerinde pin tipi olarak kullanılmaktadır [57].

AISI H13 sıcak iş takım çeliğinin yüzeyi, toz paket borlama yöntemi kullanılarak EKabor II tozları ile borlanmıştır. İşlem 800, 900 ve 1000 °C sıcaklıklarda 2, 4 ve 6 saatlik periyotlarla gerçekleştirilmiştir. Aşınma testleri, borlanmış ve işlenmemiş AISI H13 sıcak iş takım çeliği üzerinde oda sıcaklığında ve 500 °C'de bilyeli disk tribometre kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Borlama sıcaklığının ve borlama süresinin artması, borür tabakasının kalınlığının ve sertliğinin artmasına neden olmuştur. 800 °C'de borlama Fe₂B, Mn₂B, Cr₅B₃, fazlar oluşumu ile sonuçlanırken, 900 ve 1000 °C'de ilave olarak FeB borür fazıda meydana gelmiştir. Yüksek sıcaklık aşınma testleri sırasında mikro çatlak kaynaklı plastik deformasyon ön plana çıkmıştır ve oda sıcaklığına göre aşınma çok daha fazla olmuştur. Oda sıcaklığında aşınma testleri sırasında oksidasyon ve mikro çatlak oluşmuştur. Borlanmamış olanda her iki sıcaklıkta da aşınma daha fazla olmuş ve oksidasyon ve ciddi plastik deformasyon görülmüştür [58].

Üstün performanslı sürekli döküm kalıp bileşenleri üretmek için, bir Stellite-1 kaplamanın yüksek hızlı oksijen yakıt püskürtmesini, bir diyet lazer kullanılarak 1100 °C –1200°C'de lazer ısıtma işlemi takip etti. Lazer ısıtma koşullarının, Stellite-1 kaplama içindeki sertlik ve aşınma direnci ile birlikte makro ve mikroyapısal değişimler üzerindeki etkileri değerlendirildi. Isıl işlem sonrası, ısıtma işlem sıcaklığındaki artışla birlikte püskürtülen kaplama içindeki mikro boşlukların sayısı bir miktar azalmıştır. Püskürtülen Stellite-1 kaplamanın sertliği, 1200°C'de elde edilen 860 HV sertlik ile lazer ısıtma işlem sonrası püskürtülmüş kaplamaya (680 HV) göre arttı. Püskürtülmüş ve lazerle ısıtma işlem

görmüş numunelerin tribolojik özellikleri, disk üzerinde pimli bir tribometre ile araştırıldı. Stellite-1 kaplamanın lazer ısıtma işlemi aşınma direncini arttırdı. Bu durum, lazerle ısıtma işlemi görmüş numune için püskürtülmüş numuneye göre daha düşük bir sürtünme katsayısı ve aşınma oranı ile sonuçlanmıştır [59].

NiCr esaslı alaşım kaplamaların gözeneklilik, sertlik ve aşınma özellikleri üzerindeki farklı altlık pürüzlülüğünün önemi bu çalışmada araştırılmıştır. Kinetik püskürtme tekniği ile kaplanmış alt tabaka olarak düşük karbonlu çelik kullanılmıştır. Frezeleme, kum püskürtme ve su jeti ile kesme gibi farklı yöntemler kullanılarak farklı yüzey pürüzlülük seviyeleri elde edilmiştir. Kaplamalar, aynı kaplama parametreleri ve tekniği kullanılarak bu elde edilen farklı yüzey özelliklere sahip altlıklara kaplandı. Elde edilen kaplamalar daha sonra, kayma mesafesini sabit tutarak, 10 N, 20 N ve 30N'luk üç yük ve 0,5 m/s ve 1,5 m/s'lik iki hız için disk üzerinde pim aşınma test makinesi kullanılarak aşınma davranışı açısından araştırıldı. Altlık yüzey pürüzlülüğünün çalışılan numuneler üzerinde bir etkisi olduğu tespit edilmiştir. Kaplama çökeltmeden önce yüzeye kum püskürtme ile elde edilen kaplamanın aşınma direnci en iyi sonucu göstermiştir [60] .

Tel ark eklemeli imalat (WAAM) yöntemi kullanılarak dolgulu (AD) numune ve katmanlar arası soğuk işlenmiş (CW) numune olmak üzere iki adet paslanmaz çelik 347 numune hazırlanmıştır. Disk üzerinde pim aşınma testi sonuçları, tabakalar arası soğuk işlemin numunelerin sertliğini ve dolayısıyla aşınma direncini arttırdığını ve sürtünmelerini azalttığını göstermiştir. Sonuçlar, numunelerin sürtünme katsayısının (COF) ve aşınma oranlarının, yönlerine büyük ölçüde bağlı olmadığını göstermiştir [61].

Ni-Cr-Mo dövme alaşımı olan ve genellikle çok yönlü korozyona dayanıklı bir alaşım olarak kabul edilen Hastelloy C276, 298 K'de EN 31 paslanmaz çeliğe (sertlik 60 HRC) karşı Disk üzerinde Pim yöntemi ile kuru kayma aşınması için araştırılmıştır. 40 N yükte yapılan aşınma testinde, 10, 20, 30 N yükleme koşullarına göre aşınma oranı %300 artmıştır. Aşınmış yüzeylerin Taramalı Elektron Mikroskobu görüntüleri, delaminasyon ve yapışmanın kuru kaymada yüzeyden malzeme ayrılmasına neden olduğunu doğrulamaktadır. Ayrıca, aşınmış yüzeylerin sertlik özelliklerinin analizi, 40 N yük altında kayma aşınması işlemi sırasında yüzey sertleşmesini göstermektedir. Sülfürik asitte korozyon aşınma davranışı üzerine yapılan çalışma, endüstrilerde sıklıkla kullanılan

diğer alaşımlara kıyasla önemli ölçüde daha düşük bir korozyon hızı değeri (H_2SO_4) çözeltisinde 0.0016579 mm/y) göstermiştir [62].

Yüksek hızlı çelik iş merdanesi ile sıcak haddelemede bir sıcak şerit malzemesi arasında kurulan teması simüle etmek için yüksek sıcaklıkta bir disk üzerinde pim konfigürasyonu kullanıldı; burada pim, yüksek hızlı çelik merdanesini ve disk bir şerit çeliği temsil ediyordu. Temas halindeyken diskten gelen ısı transferi nedeniyle pim yüzeyleri oksitlenmiştir. Pim yüzeyinin aşınma mekanizmasının üç farklı aşamalarda değiştiği gözlemlenmiştir. Aşama I ve II'de, pim yüzeyindeki oksit ölçeği önemli ölçüde deforme olmuştur. Sürtünme katsayısının kararlı olduğu III aşamada, aşınma mekanizması yapışma, aşınma ve oksidasyonun karışımı şeklindedir. Yumuşak karbon çelik diskten yüksek hızlı çelik pimine oksit transferi, yüksek hızlı çelik pim yüzeyinde oluşan oksitlenmeye önemli ölçüde katkıda bulunduğu tespit edilmiştir [63].

1.2.2 Metallerin üzerine çeşitli yöntemlerle kaplanan süper alaşımlar

İşlemesi zor olabilen pahalı süper alaşımlardan parça üretmek yerine düşük karbonlu çelikler (AISI 304) üzerlerine istenilen amaca uygun süper metal (Kobalt esaslı elektrotlar) kullanılarak elektrik ark ve TİG kaynak yöntemiyle kaplama yapılmıştır. TİG yöntemi ile yapılan kaplamalarda elektrik ark kaynağıyla yapılanlara göre daha yüksek sertliğe ulaşılmıştır [64-65].

Aşındırıcı aşınma, çeşitli zemine bağlı uygulamalarda özel bir öneme sahiptir ve aşınmaya karşı yüksek dirençli malzemelere sahip takımların gerekliliği, kullanım ömrünü uzatmanın yanı sıra imalat maliyetini azaltmak için katlanarak artmıştır. Bu çalışma, esas olarak, yukarıda bahsedilen zemine bağlı uygulamalar için aşınma direncinin geliştirilmesine odaklanmaktadır. Substrat malzemesi olarak kullanılan C-45 kalite yumuşak çeliği kaplamak için elektrot şeklinde bir kaplama alaşımı (stellit 6) kullanıldı. Aşınma davranışı, kuru durumda bir Disk Üzerinde Pin testi kurulumu kullanılarak karakterize edildi. Bir optik mikroskopla kaplanmış malzemenin boyutu ile C-45 malzemesinin boyutu arasında bir ilişkim gözlemlendi ve CoCr alaşım matrisinin varlığının aşınma direncini önemli ölçüde iyileştirdiği gözlemlendi. CoCr alaşım matrisinin varlığının, malzemenin aşınma oranını azaltarak aşınma direncini arttırdığı bulunmuştur. Sonuçlar, artan kaplama kalınlığının malzemenin sertliğini arttırdığını ve kaplama ile aşınma direncinde önemli bir iyileşme olduğunu göstermektedir [110].

Colmonoy 6, Inconel 625 ve Hastelloy C276'dan oluşan nikel esaslı üç süper alaşım, AISI 310 paslanmaz çelik üzerine GTAW kaynağı kullanılarak kaplanmıştır. Yüksek sıcaklıkta oksidasyon davranışları 1050°C'de 24 saatlik 8 döngüde incelenmiştir. Yüzey sertliği sonuçları Hastelloy C276 (727 HV) ve Colmonoy 6'nın (612 HV) Inconel 625 (338 HV) ve çelik alt tabaka (217 HV) ölçülmüştür. En iyi aşınma davranışını 0,28 sürtünme katsayısıyla Hastelloy C276 vermiştir. Yüksek sıcaklık oksidasyon testinde Hastelloy C276 (0, 5mg/cm²) için minimum ağırlık kazancı hesaplanmıştır. Korozyon testi, kaplamaların imalatının, Hastelloy C276'nın sahip olduğu maksimum korozyon potansiyeli (-119/9 mV) ve minimum korozyon akımı yoğunluğu (0. 14 μ A. cm⁻²) olan AISI 310 paslanmaz çelik korozyon direncini geliştirdiğini göstermektedir. Bu üç süper alaşım içinden, yüksek sıcaklık koşullarında 310 paslanmaz çelik üzerine kaplama yapmak amacıyla Hastelloy C276 en iyi sonuçları vermesi nedeni ile en uygun seçenek olmuştur [66].

Temel malzeme olarak kobalt içeren süper alaşımlar, farklı endüstri uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Başlıca avantajları mükemmel korozyon ve aşınma direncidir. Bu çalışma için malzeme CoCrTaAlCSiY, iyi tribolojik davranış potansiyeli olan Co-esaslı süper alaşımların keşfedilmemiş bir temsilcisi olarak seçilmiştir. Bu makale, “HVOF Püskürtme ve Lazerle Remelted CoCrTaAlCSiY Kaplamaların Mikroyapısı ve Tribolojik Davranışı” adlı önceki makalenin sonuçlarını takip etmektedir. Çalışmada ayrıca, CoCrTaAlCSiY'nin HVOF püskürtmeli ve lazer sonrası işlem görmüş kaplamalarının üç durumu (püskürtme durumu ve lazerin özgül enerjisine göre değişen iki farklı lazer işlemi) sunulmaktadır. Aşınma davranışını değerlendirmek için disk üzerinde pin testi yapıldı. FCC ve HCP arasındaki faz dönüşümlerini ortaya çıkarmak için XRD analizi yapıldı. Her iki lazerle işlenmiş CoCrTaAlCSiY kaplamalar için aşınma katsayısı üzerinde olumlu bir etki kanıtlanmıştır [111].

Metal teknolojilerinde yüzey kaplama işlemleri önemli bir yere sahiptir. Yüzey kaplama operasyonlarının amacı, modifikasyon yoluyla bir yüzeyin düşük özelliklerini iyileştirmek ve geliştirmektir. Bu çalışmada, düşük karbonlu AISI 1015 çeliği, mikrolazer kaynağı ile kobalt esaslı alaşımlı Stellite 6 kaynak teli ile kaplanmıştır. Kaplama sonrası kaplanmış yüzey kesitlerinin mikro yapıları incelenmiştir. Aşınma Disk üzerinde Pim

kullanılarak belirlenmiştir. Stellite kaplama alaşımından AISI 1015 çeliğine krom ve kobalt difüzyonu, hat analizi yöntemi ve element haritalama analizleri ile incelenmiştir. Testlerden elde edilen sonuçlar, literatürde bildirilen benzer çalışmalarda yapılmış testlerle karşılaştırılarak yorumlanmış ve desteklenmiştir. Bunlar mikrolazer kaynak işlemi sonucunda ince taneli dendritik yapı oluşturulmuştur ve AISI 1015 çeliğinin mekanik özellikleri, Cr ve Co'nun difüzyonu ile iyileştirildiği gözlenmiştir [67].

Nikel esaslı süper alaşımlar, daha yüksek mekanik dayanımları nedeniyle üstün malzeme olarak kabul edilir. Bununla birlikte, sürekli kayma koşulu sırasında zayıf tribolojik özelliklere sahiptir. Bu çalışmada, nikel esaslı süper alaşım üzerine NiCrFeMoNb ve FeCrMoVC olmak üzere iki farklı alaşım tozu lazer biriktirme yöntemi ile biriktirilerek kaplanmıştır. Her iki katmanın aşınma direnci, disk üzerinde pim aşınma test cihazı ile incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, her iki lazer biriktirme yöntemiyle yapılan kaplamalarda geliştirilmiş sertlik ile homojen bir yapı gösterdiğini göstermektedir. FeCrMoVC kaplamanın aşınma direnci, NiCrFeMoNb kaplama ve temel malzeme ile karşılaştırıldığında iyileşmiştir, bu da FeCrMoVC kaplamanın tribolojik özelliklerde önemli bir rol oynadığını gösterir. Aşınma, yapışma ve tribo-oksidasyon ana aşınma mekanizması olarak tanımlandı [68].

Ni-Al bronz (NAB), gaz yakıtlı yüksek hızlı oksigaz püskürtme yoluyla Stellite-6 ile kaplanmıştır. Substrat kaplama arayüzünde Tungsten açısından zengin parçacıkların birikimini oluşturduğu görülmüştür. Bu alanlar, kaplamanın mekanik özelliklerinin geliştirilmesinde önemli bir rol oynamıştır. Kaplama sertliği, alt tabakaya göre 5 kat artmıştır. Sonuçlar, aşındırıcı aşınmanın alt tabaka için baskın mekanizma olduğunu göstermiştir. Delaminasyon, kaplamadaki baskın aşınma mekanizmasıdır. Çıplak alaşıma kıyasla kaplanmış numunenin korozyon direnci artmıştır [69].

Ayrıca parça üretiminde toz metal teknolojisinin döküm boşluğu, kristal yapı oluşması, tokluk vb. gibi nedenlerden daha iyi olduğu bilinmektedir. Dolayısı ile toz metal kullanan lazer metal biriktirme (LMD) yöntemi ile yapılan kaplamaların aynı şekilde olacağı birçok çalışmada belirtilmiştir [70]. Ayrıca bunun sonucu, Demir (Fe-), Kobalt (Co-), Titanyum (Ti-) ve Nikel (Ni-) esaslı alaşımların kendinden yağlamalı kalın kaplamalarının imalatında yaygın olarak kullanılmaktadır.

Çalışmada Lazer kaplama yöntemi ile Nikel (Ni) esaslı alaşım (Colmonoy 227-F) ve Tungsten Karbürler/Kobalt/Krom (WC/Co/Cr) kompozit kaplamalar, AISI 304 çelik altlık üzerinde kaplanmıştır Kobalt ve Nikel matrisinde WC parçacıklarının düzgün bir dağılımı gözlemlenmiştir. Sertlikliğin artması lazer kaplama işlemi sırasında sert bir faz oluşumuna bağlandı. Lazerle kaplanan tabakanın gözenekliliği çok düşük, kompozit kaplama çatlaksız ve altlık olan AISI 304 çelik ile tabakalar arasında iyi bir yapışma gerçekleşmiştir [71].

Aşınma, zorlu ortamlarda çelik için kısıtlayıcı bir faktördür ancak lazer kaplama ile azaltılabilmektedir. Yüksek güçlü doğrudan diyot lazer, yaklaşık 1,6 mm kalınlıktaki lazer kaplama için kullanılmaktadır. Hafif nadir toprak metalleri, mikrosertliği ve aşınma direncini iyileştirmek için özellikle Lantan oksit (La_2O_3) ve Seryum Oksit (CeO_2) olmak üzere alaşımlara ilave edilmektedirler. A36 çelik altlık üzerine alaşım elementleri olarak %1 ve %2 La_2O_3 ve CeO_2 içeren Ni-WC katmanları lazer ile kaplanmıştır. Nikel esaslı alaşıma (%40 Ni-%60 WC) %1 La_2O_3 veya %1 CeO_2 ilavesi ile aşınma direncinin iyileştirdiği tespit edilmiştir [72].

Lazer metal biriktirme (LMD) yoluyla biriktirilen Ni-süper alaşım kaplamaların, bileşenlerin ömrünü uzatmada ve dolayısıyla üretim ve onarım maliyetlerini düşürmede iyi performans gösterdiği bilinmektedir. Bu kaplamaların çoğu, sertliği ve tribolojik davranışında hâlihazırda iyi sonuçlar sunsa da, bazıları lazer yeniden eritme gibi biriktirme sonrası işlemlerle geliştirilebilir. Bu bağlamda, bu makale lazerle yeniden eritmenin Ni-Cr-B-Si kaplamanın kayma tribolojik davranışı üzerindeki son işlem etkilerini değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Bunun için iki koşul karşılaştırıldı: biriktirilmiş olarak Ni-Cr-B-Si kaplama ve biriktirilmiş ve yeniden eritilmiş olarak Ni-Cr-B-Si kaplama. Kaplamanın yüzeysel makro kusurlarının oluşumu, mikrosertlikleri ve disk üzerinde pin (ASTM G99) testindeki tribolojik performansları karşılaştırıldı. Sürtünme katsayısı (yük hücresi), hacim kaybı (optik interferometri), Archard'ın aşınma katsayısı ve aşınmış yüzeyler değerlendirildi. Sonuçlar, lazer yeniden eritme son işleminin soğutma çatlaklarını azaltmada, sertliği arttırmada ve sürtünme katsayısı salınımını ve hacimsel kayıp ortalamasını azaltmada etkili olduğunu göstermektedir [73].

Kobalt esaslı bir süper alaşım olan Stellite 6, Gaz tungsten ark kaynağı (GTAW) işlemi kullanılarak yumuşak çelik AISI 1020 üzerine kaplandı. Kaplamalar dört şekilde

kaplanmıştır. Tek katmanlı kaplama, çift katmanlı kaplama ve bunların yeniden eritilmesi. GTA arkının kendisi kullanılarak en üstteki katmanın yeniden eritilmesi gerçekleştirilmiştir. GTAW işlemini kullanan yeniden eritme tekniği, Stellite 6'nın üst tabakasının yeniden eritilmesinin Stellite 6 kaplamalarının mikrosertliğini iyileştirdiğini göstermiştir.

300 °C test sıcaklığında Stellite 6 kaplamalı pim için kaydedilen aşınma kaybı 34 mg olarak ölçülmüştür. Aynı pim için oda sıcaklığında yapılan testte bulunan sonuç 70 mg olmuştur. Bu sonuç yüksek sıcaklıkta %51,4 daha az aşınma kaybı olduğunu göstermiştir. 300 °C'de test edilen pimlerin yüzeyinde çeşitli oksitlerin varlığı görülmüştür, böylece düşük sürtünme direncinden ve dolayısıyla Stellite 6'nın yüksek sıcaklıkta daha iyi aşınma performansından oksidatif tabakanın sorumlu olduğu görülmüştür. Yapılan çalışmadan, GTAW prosesini kullanan çift katmanlı kaplama prosedürlerinin ve ardından Stellite 6 kaplamanın üst tabakasının yeniden eritilmesinin mikrosertliğin ve dolayısıyla yüksek sıcaklıklarda aşınma performansının artırılmasına yardımcı olabileceği sonucuna varılmıştır [74].

Lazer metal biriktirme yöntemiyle üç ayrı oranda krom içeren (%17, %20 ve % 24) Ni-Cr süper alaşımı sıcak iş çeliği olan H13'ün üzerine kaplanmıştır. 600°C de aşınma testi yapılmıştır. Farklı Cr ve Ni oranlarına sahip lazer kaplı Cr-Ni kaplamalar, metalurjik olarak alt tabaka ile birleştirilen belirgin kusurları olmayan Cr, Ni ve bunların bileşik fazlarından oluşmuştur. Bunların arasında, %20 Cr-%80 Ni kaplamanın sürtünme katsayısı en küçüktür ve daha yüksek sürtünme önleme performansı gösterir. Bunların arasında, %24 Cr-%76 Ni kaplamanın aşınma oranı, %17 Cr-%83 Ni ve %20 Cr-%80 Ni kaplamaninkinden 2-3 kat daha küçüktür ve daha iyi aşınma direnci gösterir. 600 °C'de %17 Cr-%83 Ni ve %20 Cr-%80 Ni kaplamaların aşınma mekanizması öncelikle yapışkan aşınmadır, %24 Cr-%76 Ni kaplamanınki ise oksidatif aşınmanın eşlik ettiği yapışkan aşınmadır. %24 Cr-%76 Ni kaplamanın aşınma performansı, %17 Cr-%83 Ni ve %20 Cr-%80 Ni kaplamalardan daha iyidir, bu da yüksek sıcaklıkta aşınma direncini iyileştirmenin ana bileşeninin Cr-Ni kaplamalar içeriğindeki Cr yüzdesinde artış olduğunu gösterir [75].

Termal verimlilikteki önemli gelişmeler, IV. Nesil nükleer reaktörler için daha yüksek çalışma sıcaklıklarını da beraberinde getirmiştir. Bu sıcaklıklar için önerilen Ni esaslı

alaşım C-263'ün yüksek sıcaklık sürtünmesi ve aşınma davranışı, WC-Cr₃C₂-Ni kaplamaları ile karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Atmosferik plazma spreysi (APS) ve yüksek hızlı oksî-yakıt (HVOF) işlemleriyle kaplanan WC-Cr₃C₂-Ni tozu. 400°C, 600°C ve 750°C'de yüksek sıcaklıklarda çalışabilen disk üzerinde pim yöntemi ile test edilmiştir. Kaplamasız alaşım, her sıcaklık aralığında her iki yöntemle yapılan kaplamaya kıyasla daha yüksek aşınma oranları göstermiştir. Her iki kaplamanın da 600°C'den sonra düşen aşınma oranlarından tribo-filmin gelişimi sorumludur. Sonuç olarak, 750°C'ye kadar yüksek sıcaklıkta çalışan gaz soğutmalı nükleer reaktörler için üstün aşınma direnci gösteren WC-Cr₃C₂-Ni kaplanmış C-263 Ni alaşımının daha uygun olduğu tespit edilmiştir [76].

Ostenitik paslanmaz çelikler, genellikle korozyon dirençli uygulamalar için kullanılırlar. Yüzey sertliği ve yük taşıma kapasitesinin az olmasından dolayı aşınma gibi tribolojik uygulamalarda kullanımları sınırlıdır. Yüzey özelliklerini geliştirmek için uygulanan yöntemler içinde borlamada vardır. Borlama işlemi uygulanmış AISI 420 ve 304 paslanmaz çeliklerin yüksek sıcaklık aşınma davranışları araştırılmıştır. Aşınma deneyleri oda, 300°C ve 600°C sıcaklıklarda kapalı fırın ortamına kurulmuş aşınma deneyi test düzeneğinde yapılmıştır. 304 çelik üzerinde FeB, Fe₂B, CrB, Cr₂B ve Ni₃B fazları, 420 çeliği üzerinde ise FeB, Fe₂B, CrB ve Cr₂B fazları bulunmuştur. Sıcaklığın artmasıyla borlanmış çeliklerde oksit oluşumu görülmüştür. Sıcaklığının artışı ile birlikte borlanmamış çeliklerde aşınmada oda sıcaklığına göre 7-8 kat artış görülürken, borlanmış çeliklerde bu artış 2-3 kat olarak gerçekleşmiştir [11].

Yüksek sıcaklıkta aşınma direncini artırmak için lazer kaplı NiCrBSi kaplamaya Ta eklenir. 700 °C'lik ısıtıl işlemin Tantal (Ta) takviyeli kaplama üzerindeki etkisi incelenmiştir. Tribolojik performanslar, 700 °C'ye kadar sıcaklıklarda yüksek sıcaklıklı disk üzerinde pimli tribometre üzerinde araştırıldı. Tantal (Ta) ile güçlendirilmiş kaplama esas olarak γ -Ni, TaC, Ni₃Fe, CrB, M₂₃C₆ ve Cr_{2.8}Fe_{1.2}B₄'ü içerir. Isıl işlem altında, M₂₃C₆'nın çözünmesi ve kabalaşması dışında fazların çoğu kararlı kalır. TaC parçacıkları üzerinde oluşan CrB, Cr_{2.8}Fe_{1.2}B₄'e evrilir. Isıl işlemin Ta ile güçlendirilmiş kaplamanın sertliği üzerinde çok az etkisi vardır. NiCrBSi kaplamanın aşınmış yüzeyinde herhangi bir sıcaklıkta oksit tabakası oluşturmak zordur. Aksine, 700 °C'de Ta takviyeli kaplamanın aşınmış yüzeyinde oksit tabakası oluşur. Tantal (Ta), Ta tarafından güçlendirilmiş Nikel (Ni) matrisine, yüksek termal stabiliteye sahip TaC, temiz

TaC/matris arayüzü ve kompakt oksit tabakasına atfedilen yüksek sıcaklıklarda NiCrBSi kaplamanın aşınma direncini önemli ölçüde arttırır. 600 °C'nin altındaki ana aşınma mekanizması, aşınma ve yapışma ve 700 °C'de delaminasyon, aşınma, derin çizikler ve oksidasyona geçiş yapan oksidasyondur [77].

AISI 4140 çeliğin üzerine Plazma transfer ark (PTA) kaynağı ile Stellite 12 kobalt süper alaşımı kaplanmıştır. Stellite 12 yağlanmamış çalışma koşulları altında 700 °C'ye kadar iyi bir aşınma ve oksidasyon direncine sahiptir. Stellite 12 tozu Mo, Ni tozları ve WC/W₂C, TiC ve Cr₇C₃ parçacıklar ile ayrı ayrı karıştırılmıştır ve daha sonra tek bir tabaka halinde ve sabit kaplama şartlarında PTA kaynak makinesi kullanılarak AISI 4140 çelik üzerine kaplanmıştır. Kaplamalar kuru ortamda sürtünmeli aşınma davranışı disk üzerinde pim yöntemi ile oda sıcaklığında, 300°C, 500°C ve 700°C'de incelenmiştir. Oksidasyon mekanizması, kaplamaların temel aşınma mekanizması olarak 500°C ve 700°C'de tanımlanmıştır. Cr₂O₃'ün iyi tribolojik karakteristiği uygulama sıcaklığı 500°C'den 700 °C'ye çıktığında aşınma izinin azalmasına sebep olmaktadır.

Stellite 12 kaplamalara Mo eklenmesi ile 500°C ve 700°C'de sırasıyla istenilen Cr₂O₃ ve CoMoO₄ oluşmuştur. Koruyucu ve kaygan bir doğaya sahip olan CoMoO₄ oksidi, molibden içeren Stellite 12 kaplamaların 700°C'deki aşınma kaybını önemli ölçüde azaltmıştır. Stellite 12 kaplamalara Ni'in eklenmesi, 500°C ve 700°C'de işlem gören kaplamaların aşınma kaybı üzerinde önemli bir değişime sebep olmamıştır.

Stellite 12 içerisine katılanan WC/W₂C'nin 500°C ve 700°C' deki aşınma testi sonuçları aşınma direncinin arttığını göstermiştir. Hacimce %2 ve %6 oranında TiC ekli Stellite 12+TiC 500°C'deki aşınma direncini arttırmasına karşın, Stellite 12 ve Stellite 12+hac.%10 TiC kaplamalarla yapılan incelemede kayda değer bir aşınma kaybı gözlemlenmemiştir. Hacimce %10'a kadar TiC eklenmesi Stellite 12 kaplamaların 700 °C'deki aşınma direncini azaltırken aşınma kaybı 2 katına çıkmıştır. 500°C ve 700°C'de yapılan test sonuçlarına göre, hacimce %10'a kadar eklenen Cr₇C₃ incelenen kaplamaların aşınma kaybını arttırdığı sonucuna varılmıştır. Hacimce %10 Cr₇C₃ eklenmesi ile 500°C'deki aşınma kaybı önemli ölçüde artmıştır ve Stellite 12+ Cr₇C₃ kaplamalar Stellite 12 kaplamalara göre 700°C'de daha kötü bir aşınma performansı sergilemiştir. 500°C ve 700°C aşınma deneylerinde aşınan yüzeylerde yeterli CoO ve

Cr₂O₃ oluşmaması aşınmanın bu derece yüksek olmasının ana sebebi olarak belirlenmiştir [78].

BÖLÜM 2 – MALZEME VE METOD

2.1 Çelik ve Çelik Esaslı Metal Diskler

Demir, demir cevherinden oksijen ve diğer maddelerin uzaklaştırılmasıyla yapılır. Demir, karbon, geri dönüştürülmüş çelik ve az miktarda diğer elementlerle birleştiğinde çelik olur. Çelik, %2'den az karbon ve %1'den az manganez ve az miktarda silikon, fosfor, kükürt ve oksijen içeren bir demir ve karbon alaşımıdır. Çelik tek bir ürün değildir. Pek çok farklı fiziksel, kimyasal ve çevresel özelliklere sahip 3.500'den fazla farklı çelik türü vardır. Modern çeliklerin yaklaşık %75'i son 20 yılda geliştirildi.

Çeliğin iki ana bileşeni olan demir cevheri ve karbon doğada bol miktarda bulunur. Çelik, özelliklerini kaybetmeden süresiz olarak geri dönüştürülebilir. Çeşitliliği ve bulunabilirliği, darbe veya metal yorgunluğuna karşı dayanıklılık açısından hiçbir malzeme ile boy ölçüşmeyeceğinden sanayileşmiş toplumların hayatlarının her alanında ve teknolojik gelişimine katkıda bulunan makine, alet ve otomasyonlar, inşaat ürünlerin, bina ve bayındırlık işleri, havacılık, otomotiv, evlerde kullanılan buzdolapları ve çamaşır makineleri, kargo gemileri dâhil denizlerde kullanılan araçlar, cerrahi neşterler dahil sağlık gereçlerinde ve tıbbi donanım yapımı gibi sayısız kullanım için uygun hale getirmektedir. [122].

Çelikler dört ana gruba ayrılır

1. Karbon Çelikleri

Karbon çeliği donuk, mat görünümlüdür ve korozyona karşı savunmasız olduğu bilinmektedir. Genel olarak, bunun üç alt tipi vardır: düşük (yaklaşık %0,30 karbon), orta (%0,60 karbon) ve yüksek (%1,5 karbon) karbonlu. İsmi kendisi aslında çok az miktarda başka alaşım elementleri içerdikleri gerçeğinden gelmektedir. Son derece güçlüdürler, bu yüzden genellikle bıçaklar, yüksek gerilimli teller, otomotiv parçaları ve diğer benzer nesneler yapmak için kullanılırlar.

2. Alaşımlı elikler

Nikel, bakır ve alüminyum gibi birkaç farklı metalin bir karışımı olan alaşımlı çeliktir. Bunlar daha ucuz, korozyona karşı daha dirençli olma eğilimi ve yüksek çekirdek mukavemeti ve tokluğuna sahip olabilirler. Bu alaşımlı çeliklerin gücü içerdiği elementlerin miktarına bağlıdır. Araba parçaları, boru hatları, gemi gövdeleri, ağır hizmet tipi yataklar, kam takipçileri, debriyaj sıyrıcılar, kompresör elemanları, fan milleri, ağır hizmet dişlileri, pompa milleri gibi parçalar alaşımlı çeliklerden yapılmaktadır.

3. Takım elikleri

Takım eliği, sert olması ve hem ısıya hem de çizilmeye karşı dayanıklı olmasıyla ünlüdür. Adı, eki gibi metal aletler yapmak için çok yaygın olarak kullanılmaları gerçeğinden türetilmiştir. Takım eliğinin bu kadar gelişmiş dayanıklılık ve ısı direnci özelliklerine sahip olması kobalt, molibden ve tungsten gibi metal ilaveleri ile elde edilen alaşımlardan oluşmasıdır.

4. Paslanmaz elikler

Son olarak, paslanmaz çelikler muhtemelen piyasadaki en iyi bilinen tiptir. Bu tip parlaktır ve genellikle ana alaşım elementi olan yaklaşık %10 ila %20 krom içerir. Bu birleşim ile çeliğin korozyona karşı dirençli olmasını ve çok kolay değişen şekillerde kalıplanmasını sağlar. Kolay form alabilmeleri, esnekliği ve kalitesi nedeniyle paslanmaz elik cerrahi ekipmanlarda, ev uygulamalarında, deniz araçlarında, gümüş eşyalarda bulunabilir ve hatta ticari/endüstriyel binalar için diş cephe kaplaması olarak da kullanılabilir [123].

elik, yaşam alanlarımızda mutlaka bulunan su ve oksijen ile temas ettiğinde kimyasal bir reaksiyon meydana gelir ve elik orijinal formuna - demir oksite - dönmeye başlar. Çoğu modern elik uygulamasında bu problem kaplama ile kolayca aşılır. eliğe birçok farklı kaplama malzemesi uygulanabilir. Arabaları kaplamak için boya, buzdolapları ve

diğer ev aletlerinde emaye kullanılır. Diğer durumlarda, paslanmayı önlemeye yardımcı olabilecek paslanmaz çelik yapmak için nikel ve krom gibi elementler eklenir.

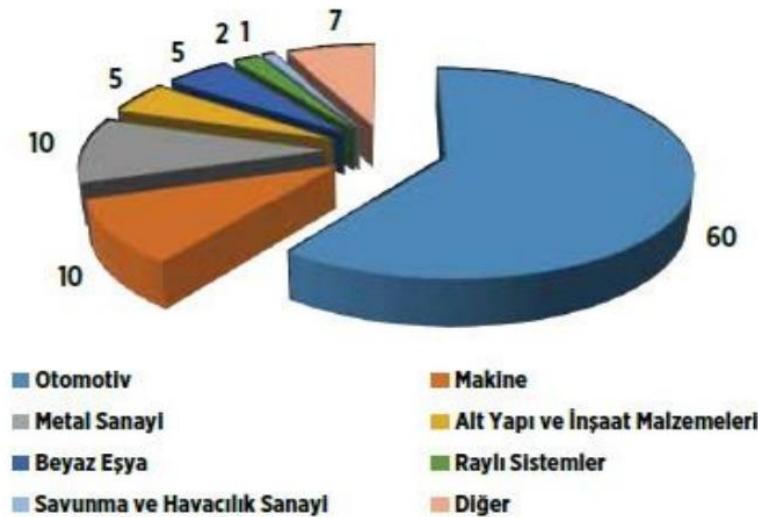
Dünya ham çelik üretimi 2020 yılında 1877,5 milyon tona (Mt) ulaşmıştır. Türkiye 35,8 milyon ton çelik üretimi ile 2020 yılında dünya sekizincisi olmuştur.

Çeliklerin yüzeylerinin dayanıklılığının artırılması için çeşitli kimyasal ve fiziksel işlemler yapılmaktadır. Bazıları ile elde edilen yüzey sertlikleri Şekil 2.1’de verilmiştir [124].

Tablo 2.1 Çeşitli Yüzey Sertleştirmelerde Elde Edilen Ortalama Sertlik Değerleri.

Malzeme	Mikrosertlik, kg/mm2
Nitrürlenmiş Yüzey	610-940
Karbürleşmiş Yüzey	700-820
Sert Krom Kaplı Yüzey	950-1100
Borlanmış AISI A2 Çeliği	1900

Diğer en önemli yüzey geliştirme işlemlerinin başında ısıtım işlemi gelmektedir. Isıtım işlemi büyük bir çoğunlukla otomotiv sektöründe kullanılmaktadır. Makine ve Metal sanayi diğer iki büyük kullanım alanıdır. Şekil 2.1’de Türkiye’de Isıtım İşlemlerinde Sektörlerin yüzde olarak 2015 yılı payları verilmiştir [125].



Şekil 2.1 Türkiye’de Isıtım İşlemlerinde Sektörlerin Yüzde Payları-2015.

Deneysel Çalışmada Kullanılan AISI 4140 Çelik Alaşımı; ISI SAE 4140,AISI 4140, (UNS 41400) - American Iron and Steel Institue (Amerikan demir ve çelik enstitüsü), UNS-Unified Numbering System (Birleşik Numaralandırma Sistemi-alaşım atama sistemi) alaşımlı çelik, genel amaçlı yüksek gerilimli çelikte yaygın olarak kullanılan krom, molibden ve mangan içeren düşük alaşımlı bir çeliktir. Sınıfına göre ısıtıl işlem yetenekleriyle iyi sertleşebilirler ancak kaynaklanabilirlik özellikleri daha düşüktür. Su verme sırasında küçük deformasyon, yüksek sürünme mukavemeti ve yüksek sıcaklıkta uzun ömürlü mukavemete sahiptir. Yorulma mukavemeti, aşınma ve darbe direnci, tokluk ve burulma mukavemeti yüksektir. AISI 4140 alaşımlı çeliğin fiziksel ve özellikleri ve kimyasal bileşimi Tablo 2.2’de ve 2.3’de verilmiştir [126].

Tablo 2.2 Deneysel Çalışmada Kullanılan AISI 4140 Çeliğin Fiziksel Özellikleri.

Özellikler	Değer Metrik Birim
Yoğunluk	7,85 g/cm ³
Erime Noktası	1416°C

Tablo 2.3 Deneysel Çalışmada Kullanılan AISI 4140 Alaşımlı Çeliğin Kimyasal Bileşimi.

Elementin İsmi, Sembolü	Elementin Alaşımdaki İçeriği (%)
Krom, Cr	0.80-1.10
Manganez, Mn	0.75-1.0
Karbon, C	0.380-0.430
Silikon, Si	0.15-0.30
Molibden, Mo	0.15-0.25
Kükürt, S	0.040
Fosfor, P	0.035
Demir, Fe	Geri Kalan - Denge

AISI 4140 Çeliğin mekanik özellikleri Tablo 2.4’te verilmiştir [126].

Tablo 2.4 Deneysel Çalışmada Kullanılan AISI 4140 Alaşımli Çeliğin Mekanik Özellikleri.

Mekanik Özellikler	Değer
Çekme mukavemeti	655 Mpa
Akma dayanımı	415 Mpa
Bulk(Sıkışma) modülü	140 Gpa
Kayma(Kesme) modülü	80 Gpa
Elastik modül	190-210 Gpa
Poisson oranı	0.27-0.30
Kopma uzaması (50 mm)	25,70%
Sertlik, Brinell	197
Sertlik, Knoop	219
Sertlik, Rockwell B	92
Sertlik, Rockwell C– Ref.	13
Sertlik, Vickers	207
100 işlenebilirlik olarak AISI 1212'ye göre İşlenebilirlik	65

Deneysel çalışmada kullanılan AISI 4140 Çeliğin termal özellikleri Tablo 2.5'te verilmiştir[126].

Tablo 2.5 AISI 4140 Alaşımli Çeliğin Termal Özellikleri.

Özellikler	Değer
Termal genleşme katsayısı (0-100°C)	12,2 $\mu\text{m}/\text{m}^\circ\text{C}$
Termal iletkenlik (100°C)	42,6 W/mK

AISI 4140 Çeliğin diğer özellikleri

İçinde bulunan elementlerin etkisi: AISI 4140 gibi düşük alaşımli çelikler, mekanik özelliklerini geliştirmek için sadece demir ve karbon dışındaki elementlere güvenir. AISI 4140'ta çeliğin mukavemetini ve sertleşebilirliğini artırmak için krom, molibden ve

manganez ilaveleri kullanılır. Krom ve molibden ilaveleri, AISI 4140'ın "kromolli" bir çelik olarak kabul edilmesinin nedenidir [127].

İşlenebilirlik: AISI 4140 alaşımlı çelik, tavlanmış durumda iyi işlenebilirliğe sahiptir. Şekillendirme: AISI 4140 alaşımlı çelik yüksek sünekliğe sahiptir. Tavlanmış durumda geleneksel teknikler kullanılarak oluşturulabilir. Sade karbon çeliklerinden daha tok olduğu için şekillendirme için daha fazla basınç veya kuvvet gerektirir.

Isıl İşlem: AISI 4140 alaşımlı çelik 845°C'de ısıtılır ve ardından yağda söndürülür. Sertleşmeden önce, 913°C'de uzun bir süre ısıtılarak ve ardından havayla soğutularak normalleştirilebilir.

Dövme: AISI 4140 alaşımlı çelik 926 ila 1205°C'de dövülür

Normalleştirme: 4140 alaşımlı çelik tipik olarak 870 °C'de normalleştirilir ve durgun havada belirli bir sıcaklıkta soğutulur.

Küreselleştirme Tavlama: 4140 alaşımlı çeliğin küreselleştirme tavlaması için, 749 °C'ye ısıtılma işlemi tabi tutulması ve ardından 6 °C /saat hızında 666 °C'ye yavaş yavaş soğutulması gerekir veya izotermal tavlama için 675 °C'ye hızlı soğutma.

Tam Tavlama: 845 °C'ye ısıtılma işlemi, 755 °C'den 14 °C/saat hızında 665 °C'ye yavaş soğutma veya 5 saat izotermal tavlama için 675 °C'ye hızlı soğutma.

Temperleme: AISI 4140 alaşımlı çeliğin temperleme sıcaklığı, normalleştirme ve yağda su verme işleminden sonra 204-649 °C arasında olabilir ve ilgili Rockwell sertliği elde edilebilir.

Kaynak yapma: AISI 4140 alaşımlı çelik, tüm geleneksel teknikler (SAW, SMAW, FCAW, GMAW, GTAW tüm yaygın ark kaynağı) kullanılarak kaynaklanabilir. Ancak çatlamayı önlemek için 170-350 °C'ye önceden ısıtılmalıdır. Isıl işlem görmüş durumda kaynak yapılırsa bu çeliğin mekanik özellikleri etkilenecektir ve kaynak sonrası ısıl işlem yapılmalıdır

Sıcak Çalışma: AISI 4140 alaşımlı çelik, 816 ila 1038°C'de sıcak işlenebilir.

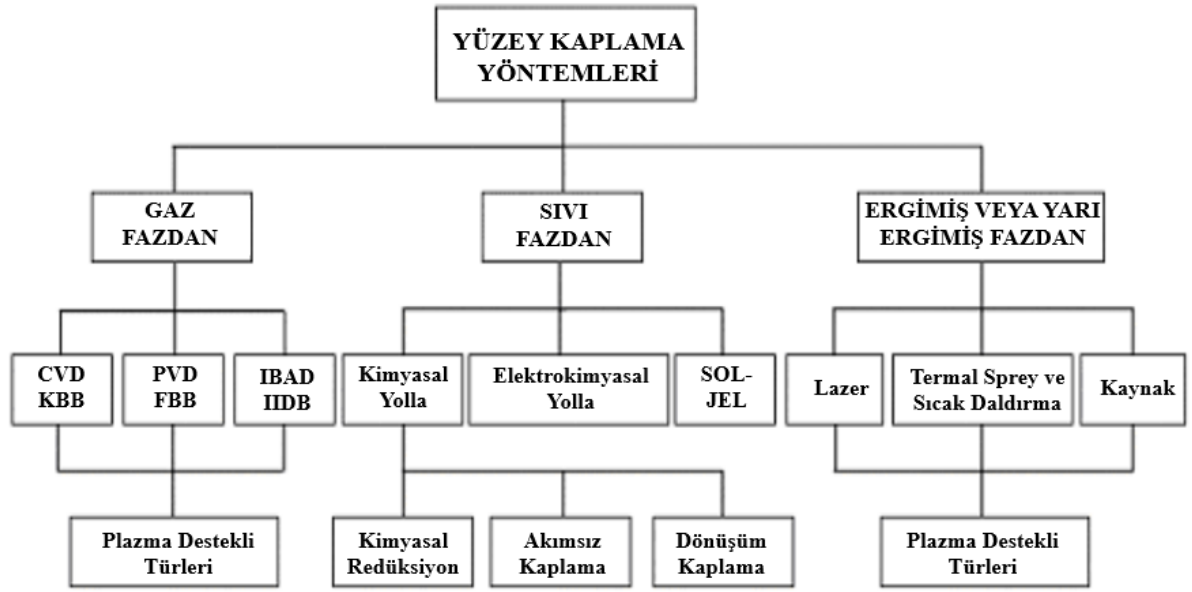
Soğuk Çalışma: AISI 4140 alaşımlı

AISI 4140 Çelik Kullanım Alanları ve yerleri;

Havacılık, petrol, gaz, savunma ve otomotiv endüstrilerinde, ince duvarlı basınçlı kaplarda, dövme dişliler ve miller (Motor milleri, pompa milleri, hidrolik miller), miller (torna milleri, freze milleri vb.), bilezikler, kelepçeler, yüksek mukavemetli civatalar, valf kapağı, vidalar, somunlar, sonsuz vidalar, pensler, burulma çubukları ve çeşitli karbonlanmış parçalar, bileşenler, adaptörler, tutucu bloklar, kalıp tabanları, ejektörler, destek ve destek araçları, fikstürler, jigler, kalıplar, kamlar, matkap bilezikleri, aks milleri, krank milleri, saplamalar, kaplinler, rayba gövdeleri, akslar, şaftlar, piston çubukları, şahmerdanlar, hidrolik makine milleri, dişliler, zincir dişlileri, dişli rafları, zincir bağlantıları, miller, alet gövdeleri, alet tutucular, bağlantı çubukları, ayna gövdeleri, pensler, konveyör pimleri ve merdaneler, itici pimler, çatallar, dişliler, kılavuz çubuklar, hidrolik mil ve parçalar, tomruk parçaları, somunlar, sıkıştırma çubukları, pinyonlar, pompa milleri, sıkıcı çubuklar, paletler, kızaklar, aşınma şeritleri veya parçaları, şekillendirme kalıpları, fren kalıpları, trim kalıpları, destekler, makine parçaları ve bileşenleri vb [126-128].

2.2 Laser Eritme Biriktirme (LMD) Yöntemi

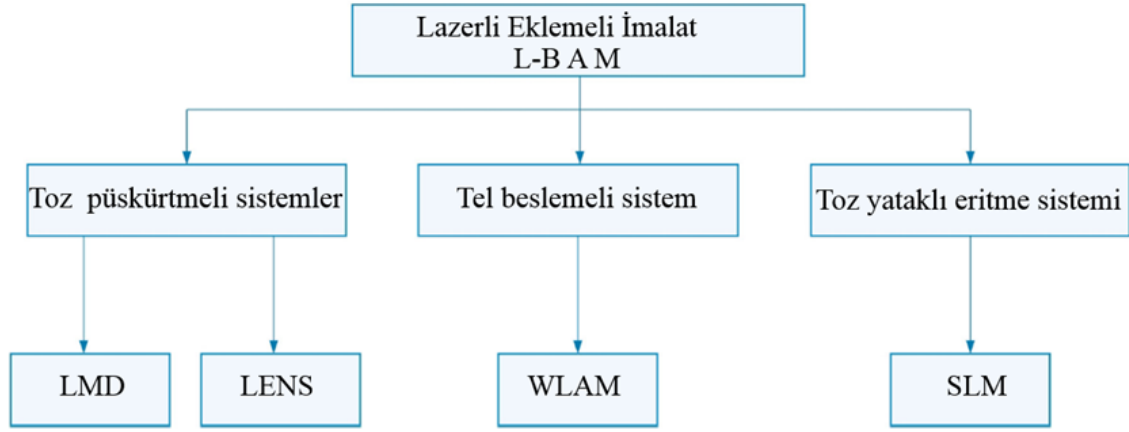
Malzemelerin yüzeylerinin mekanik ve ısı özelliklerini değiştirmek veya dekoratif açıdan çekici kılmak amacıyla, klasik ve modern teknolojilere dayanan yüzey işlemleri uygulanmaktadır. Bunlar konuya yaklaşıma göre çeşitli tiplerde olabilir. Şekil 2.2’te Kaplama yöntemlerinin fazlara göre sınıflandırılması gösterilmiştir [129].



Şekil 2.2 Fazlara Göre Sınıflandırılmış Yüzey Kaplama Yöntemleri.

Lazer ve robot teknolojilerinin endüstriye uygulamalarının ardından bunların birleşmesinden geliştirilen Eklemeli İmalatın endüstriye kazandırılması ile Lazer Metal Biriktirme (Doğrudan Metal Şekillendirme) (LMD) yöntemi ile kaplama yapmak 2010’ dan sonra da ön plana çıkmıştır. Günümüzde 8 kg/saat hızda istenilen kalınlıklarda kaplama yapılabilmektedir [130].

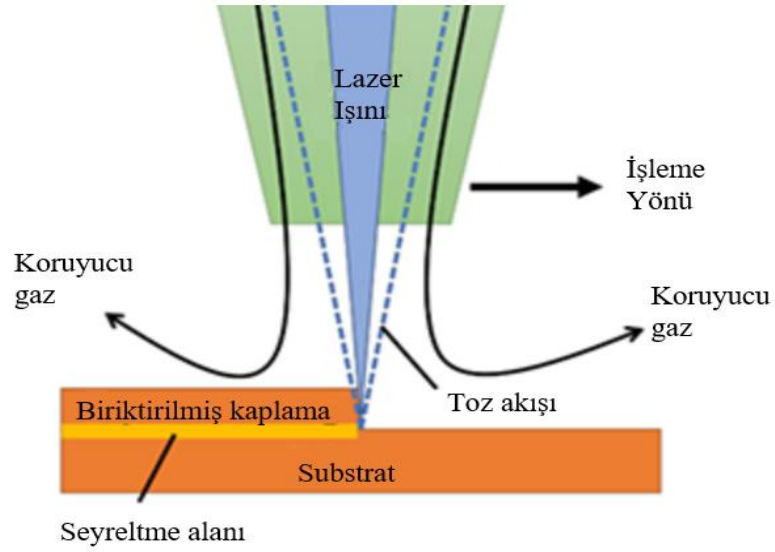
Eklemeli imalatın metal katkılı üretim süreçleri karmaşık olduğundan ve kapsamlı malzeme ve süreç bilgisi gerektirdiğinden, bir metal üreticisinin nasıl ve ne zaman eklemeli imalat kullanmasının uygun olabileceğini görmesi zor olabilir. Her şeyi anlamlandırmaya yardımcı olmak için, katmanlı üretim olan Lazer Eklemeli İmalatı ve çeşitlerini ve kullanıldığı yerleri iyi bilmek gerekir. Şekil 2.3’te Metal malzeme kullanan Lazer Eklemeli imalat çeşitleri (L-BAM) gösterilmektedir [108].



Şekil 2.3 Metal Lazer Eklemeli İmalat Çeşitleri (L-BAM).

Diğer üretim süreçleri, formları malzeme kaldırma (yani işleme), ısı (yani dövme) veya mekanik kuvvet (yani bükme) yoluyla değiştirirken, üretken veya eklemeli imalatla yapılar katman katman oluşturulur. Lazer eklemeli imalat, elektron ışını eritme ve lazer metal biriktirme, her türlü eklemeli imalat süreçleridir. Birkaç metal esaslı eklemeli üretim yöntemi olmasına rağmen, metal imalatçıları için en yaygın ve uygulanabilir olanı toz esaslı lazer katkı işlemidir: Doğrudan metal biriktirme olarak da bilinen Lazer Metal Biriktirme (LMD), Lazerle Tasarlanmış Net Şekillendirme (LENS) ve Lazer Metal Füzyon (LMF) veya 3B diğer metal baskılar. Hepsi dijital bir modelden üç boyutlu bir nesne yaratır, ancak bunu ortak olarak lazer kullanarak farklı süreçlerle başarırlar [131].

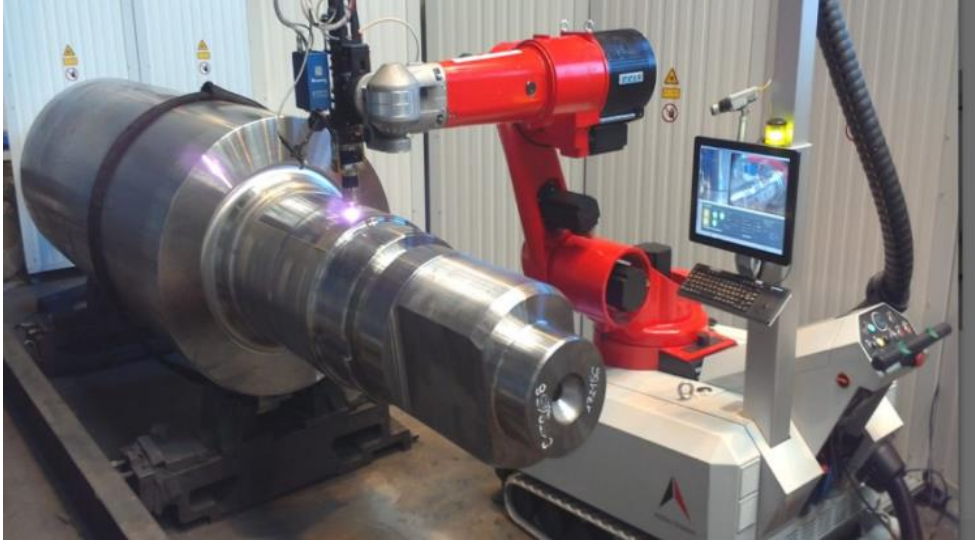
LMD'de çoğunlukla konik bir kafanın merkezinden lazer ışını toplayıcı bir lens tarafından odak merkezi eritilecek toz ve altlık metalin çok az üstüne ayarlanmış bir şekilde gönderilir. Konik kafanın ara katmanından metal tozu taşıyıcı gaz ile (çoğunlukla argon) bu eriyik havuzuna üflenmeden ve alt tabakaya kaynaşmadan önce bileşenin (altlık metalin) yüzeyinde bir eriyik havuzu oluşturur. Bu katmanlar, hem örtüşme hem de boyut açısından oldukça hassastır. Eklenen malzeme alt tabakayı yalnızca minimum düzeyde seyrelttiğinden, yüzeyde seyreltilmemiş malzeme için tek bir katmanlık birikir. Kafa bu şekilde programlandığı yönde ilerler[79]. Şekil 2.4'te Lazer eritme biriktirme (LMD) yönteminin şematik olarak gösterimi verilmiştir [79].



Şekil 2.4 Lazer Eritme Biriktirme (LMD) Yöntemi Şematik Gösterimi.

Lazer eritme biriktirme yöntemi ile kaplama sırasında oluşturulan metalurjik bağ, diğer kaplama veya kaplama yöntemlerinden önemli ölçüde daha güçlüdür. Bu sayede hem kaplama hem de tamir amaçlı (LC- Laser-Cladding) olarak yüksek aşınma direnci için kesme bıçaklarının kenarı boyunca olduğu gibi, parçayı korozyona veya aşınmaya karşı korumak veya tamir etmek için uygulanır. Metal parça üretiminde toz metal teknolojisinin döküm boşluğu oluşturmaması, düzgün kristal yapı oluşturmaması, dövmeyle yakın toklukta parça üretebilmesi gibi nedenlerden daha iyi olduğu bilinmektedir [73]. Bu gibi nedenler doğrultusunda türbin kanadı ve şaft onarımlarının yanı sıra ticari dizel motor parçaları (pistonlar, kafalar) içinde ideal uygulamalardır. Yapılar sıfırdan oluşturulabileceğinden veya mevcut bir yapıya uygulanabileceğinden, LMD parçaları stratejik olarak güçlendirmek için de kullanılabilir [131].

Lazer metal biriktirme yönteminin gelişmesi her türlü metal üzerine kaplama yapma veya tamir gerçekleştirmeleri kolay ve ekonomik hale getirmiştir. Nozül ve birçok ünitesi 6 eksenli herhangi bir robota monte edilebilir ve bu robot Şekil 2.5’ te görüleceği gibi hareketli sağlam ve güvenli bir gövde üzerine tutturulup çok büyük parçaların ayağına götürülüp onların bile lazer kaplama yöntemiyle kaplanıp tamir edilebilmesine olanak vermektedir [132] .



Şekil 2.5 Hareketli Bir Lazer Eritme Biriktirme (LMD).



Şekil 2.6 Lazer Tamir (LC) Sisteminin Çalışma Anı Görüntüleri.

Lazer eritme biriktirme yönteminde, kullanılan dolgu metalleri aynı veya farklı metalik tozlar veya toz karışımları olabilir. İşlem, 0,1 mm ila 1 mm arasındaki katman kalınlıkları ile yüksek hassasiyette malzeme uygulaması ve çoklu katmanların eklemeli olarak kaynaklanması ile sağlanır. Bu, taban malzemesinin çok az karıştırılmasıyla katmanların taban malzeme ile metalurjik bir füzyonu ile sonuçlanır. Geleneksel kaynak işlemlerine

kıyasla daha düşük enerji girişı nedeniyle, bileşenler daha az bozulma yaşar ve yapıya zarar vermemektedirler [132].

2.3 SÜPER ALAŞIM KAPLANMASI

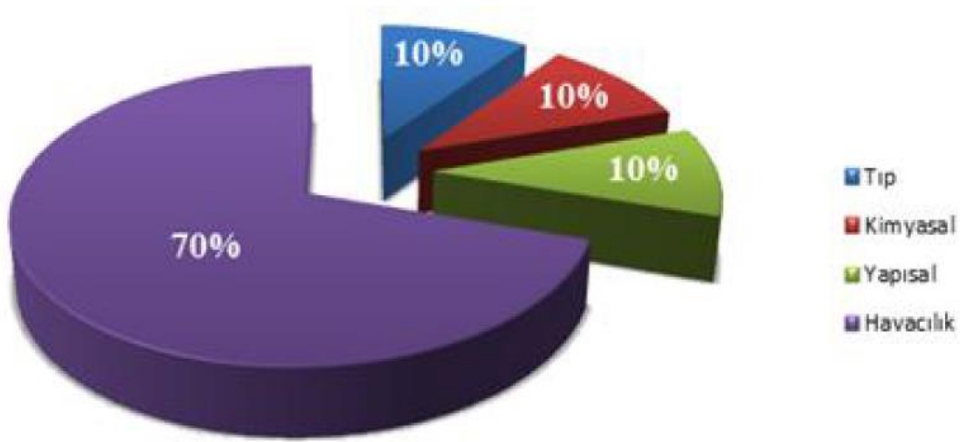
2.3.1 Süper Alaşım

Termal enerjinin mekanik veya diğler enerji biçimlerine dönüştürülmesi, yüksek sıcaklıkta daha verimlidir. Jet motorlu uçaklarda bu prensibi kullanan gaz türbini motoru, yüksek sıcaklık alaşımlarının geliştirilmesine öncülük etmiştir. Yüksek sıcaklıkta çalışacak olan malzemelerin özellikleri: Yüksek erime noktası, çok uzun süreler boyunca yapısal kararlılık, servis sıcaklıklarında mekanik özelliklerin korunması, oksidasyon ve korozyona karşı direnç, istenilen şekillerde imal edilebilmeleri şeklinde sıralanmaktadır. Bu zorlamalarla süper alaşımlar zaman içinde geliştirilmiştir [133].

Süper alaşımlar, oksitleyici ortamlara ve yüksek sıcaklıklara karşı yüksek toleransa sahip karmaşık, yüksek performanslı alaşımlardır. Başka bir ifade ile süper alaşımlar veya yüksek performanslı alaşımlar, yüksek sıcaklıklarda olağanüstü mukavemet ve yüzey kararlılığı sergileyen demir dışı alaşımlardır. Erime noktalarının yüksek bir bölümünde (Kelvin derecesi olarak ifade edilen erime noktalarının (T_m) %85'ine kadar, 0,85) güvenli bir şekilde çalışabilmeleri, temel özellikleridir. Süper alaşımlar genellikle 540 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda kullanılır, çünkü bu sıcaklıklarda sıradan çelik ve titanyum alaşımları güçlerini kaybederler, ayrıca bu sıcaklıkta çeliklerde korozyon yaygındır. Yüksek sıcaklıklarda süper alaşımlar mekanik mukavemeti, termal sürünme deformasyonuna karşı direnci, yüzey stabilitesini ve korozyon veya oksidasyona karşı direnci korur. Bazı nikel esaslı süper alaşımlar, alaşımların bileşimine bağlı olarak 1200°C'nin üzerindeki sıcaklıklara dayanabilir [134].

Günümüzde en yaygın uygulama, makul süreler boyunca ciddi şekilde oksitleyici ortamlara ve yüksek sıcaklıklara maruz kalmaya dayanması gereken uçak türbin bileşenlerindedir. Günümüzdeki uygulamalara örnekler: Uçak gaz türbinleri, Buhar

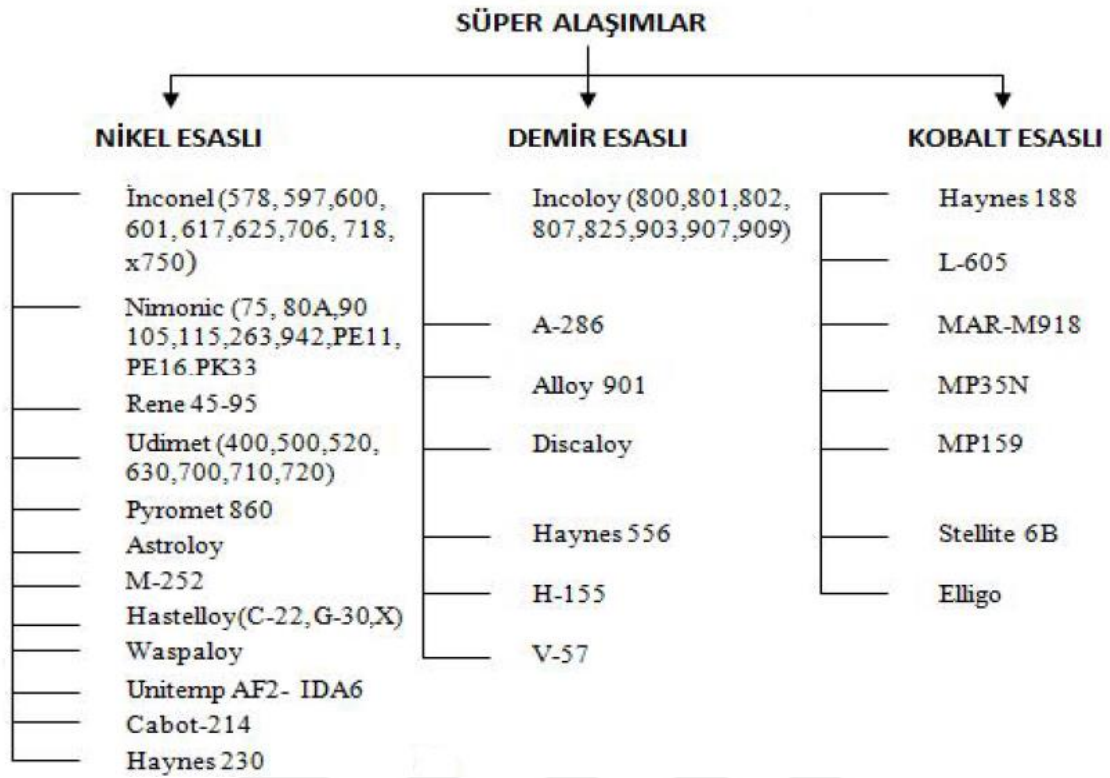
türbini santralleri, Tıbbi uygulamalar, Uzay araçları ve roket motorları, nükleer enerji santralleri, uçak gaz türbini bileşenleri, nükleer güç bileşenleri, diskler, cıvatalar, miller, kasalar, bıçaklar ve kanatlar, yakıcılar, art yakıcı, vana gövdeleri, yaylar, kanal, valfler, reaksiyon kapları, buhar türbinleri için enerji santrali bileşenleri, metal işleme ürünleri, tıbbi bileşenler, diş hekimliği bileşenleri, sıcak şekillendirme araçları ve kalıpları, otomobil bileşenleri, havacılık bileşenleri, ısıl işlem ekipmanları, türbin tahrikli şarj cihazları, egzoz valfleri, aerodinamik olarak ısıtılan deriler, roket-motor parçaları, tepsiler ve fikstürler, konveyör bantlı fırınlardır [134]. Şekil 2.7’ de kullanım alanlarına göre süper alaşım tüketim oranları verilmiştir [80].



Şekil 2.7 Kullanım Alanlarına Göre Süper Alaşım Tüketim Oranları.

2.3.2 Süper Alaşım Türleri

Süper alaşımlar olarak adlandırılan alaşımların genel anlamda üç ana kategorisi vardır. Yüksek düzeyde sıcaklık duyarsızlığına veya kararlılığına sahiptirler ve yüksek sıcaklık uygulamaları için temel malzeme olarak yaygın olarak kullanılırlar. Nikel, krom, demir ve kobalt elementleri süper alaşımların temel elementleridir. Bu metaller, termal sürünme deformasyonuna karşı mükemmel bir dirence sahiptir ve diğer havacılık yapısal malzemelerinden çok daha yüksek sıcaklıklarda sertliklerini, mukavemetlerini, tokluklarını ve boyutsal kararlılıklarını korurlar [134]. Şekil 2.8’de süper alaşımların türleri verilmiştir [81].



Şekil 2.8 Süper Alaşımların Türleri.

2.3.2.1 Nikel Esaslı Süper Alaşımlar

Nikel esaslı süper alaşımlar şu anda gelişmiş uçak motorlarının ağırlığının %50'sinden fazlasını oluşturuyor. Nikel esaslı süper alaşımlar, katı çözelti ile güçlendirilmiş alaşımları ve yaşla sertleştirilebilir alaşımları içerir. Nikel esaslı süper alaşımlar, daha önce tartışılan uygulamalarda türbin kanat ve bıçak malzemesi olarak birincil alaşım elementi olarak Kobalt (Co) veya Demir (Fe) esaslı süper alaşımlar yerine tercih edilen alaşımlardır. Nikel (Ni) esaslı süper alaşımlar için önemli olan, yüksek sıcaklıklarda yüksek mukavemet, sürünme ve korozyon direncidir. Türbin kanatlarının yönlü olarak katılaştırılmış formda veya tek kristal formda dökülmesi yaygındır. Tek kristal Nikel (Ni) süper alaşım kanatlar esas olarak türbinlerde ilk sırada kullanılır [134].

Nikel (Ni) esaslı süper alaşımlar en karmaşık, en sıcak parçalar için en yaygın olarak kullanılan ve birçok metalürji uzmanı için tüm süper alaşımların en ilginç olanıdır. Bir alaşım baz olarak nikelin (Ni) temel özellikleri, yüzey merkezli kübik (FCC) nikel

matrisinin yüksek faz kararlılığı ve çeşitli doğrudan ve dolaylı yollarla güçlendirilme yeteneğidir. Ayrıca, nikelin (Ni) yüzey kararlılığı, krom (Cr) ve/veya alüminyum (Al) ile alaşım yapılarak kolaylıkla geliştirilebilmektedir.

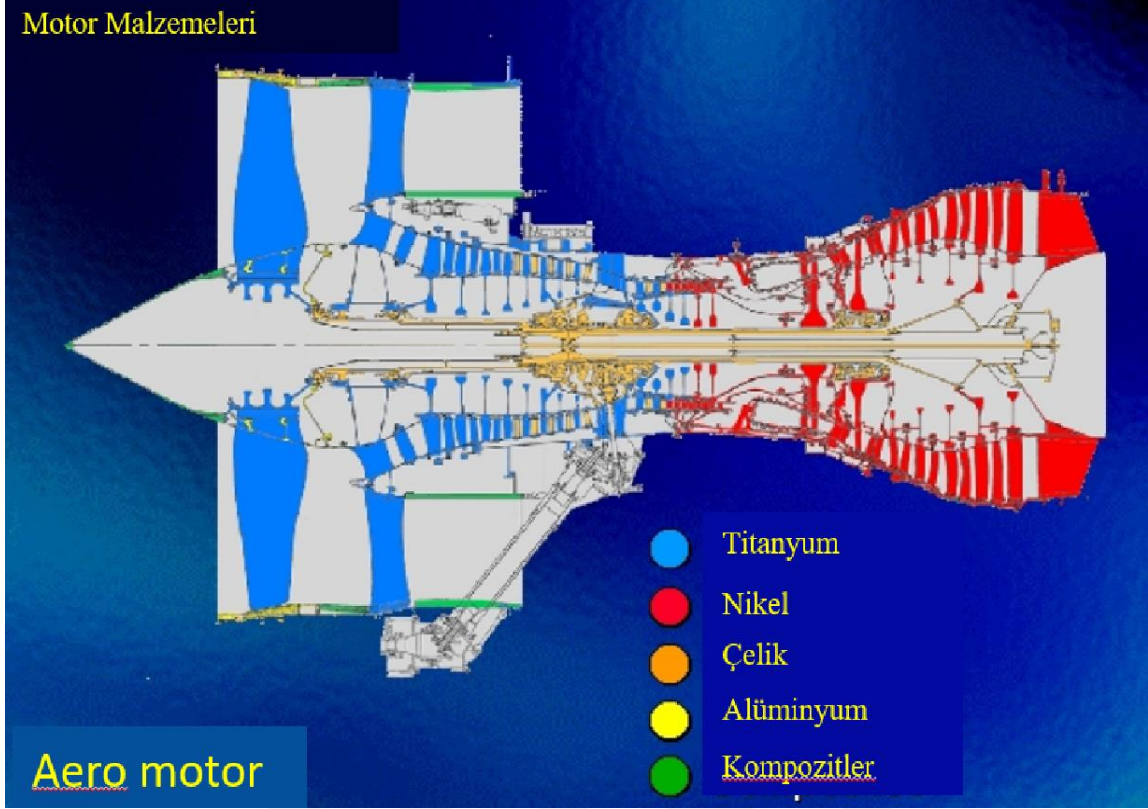
Kimyasal bileşim: Nikel (Ni) esaslı süper alaşımlar, bir düzine kadar element içerdikleri için karmaşık olarak kabul edilir. Ayrıca silisyum (Si), fosfor (P), kükürt (S), oksijen (O) ve nitrojen (N) gibi zararlı elementler uygun eritme uygulamaları ile kontrol altına alınmalıdır. Diğer eser elementler, selenyum (Se), bizmut (Bi) ve kurşun (Pb) gibi kritik kısımlarda çok küçük (ppm) seviyelerde tutulmalıdır.

Birçok dövme nikel (Ni) esaslı süper alaşım, %10 ila %20 Krom (Cr), yaklaşık %8'e kadar Alüminyum (Al) ve Titanyum (Ti) birleşimi, %5 ila %15 Kobalt (Co) ve az miktarda bor (B), zirkonyum (Zr), magnezyum (Mg) ve karbon (C) içerir. Diğer yaygın ilaveler molibden (Mo), niyobyum (Nb) ve tungsten (W) olup, bunların tümü güçlendirici çözünen maddeler ve karbür oluşturmalar olarak ikili rol oynar. Formasyon yoluyla yüzey stabilitesini geliştirmek için krom (Cr) ve alüminyum (Al) da gereklidir [135].

2.3.2.2 Demir Esaslı Süper Alaşımlar

Demir süper alaşımlar, nikel esaslı süper alaşımlarinkine benzer sürünme ve oksidasyon direnci gösterirken, üretilmesi çok daha ucuzdur. Bu grubun en önemli sınıfı, bir FCC matrisinde intermetalik bileşik çökeltme ile güçlendirilen alaşımlardır. Demir esaslı süper alaşımlar, östenitik paslanmaz çeliklerden evrimleşmiştir ve kapalı bir fcc matrisinin çoğunlukla hem katı çözelti sertleştirme hem de çökelti oluşturan elementlerle birleştirilmesi ilkesine dayanır [134].

Şekil 2.9' da bir jet motorundaki süper alaşımların bulunduğu bölgeler gösterilmiştir. Görüleceği gibi yanmanın gerçekleştiği türbünde ve çevresinde nikel esaslı, iç taşıyıcı yapıda demir esaslı süper alaşımlar ağırlıkta ve hava girişinin olduğu büyük alanlı bölgelerde de hafif olan titanyum ağırlıktadır [133].



Şekil 2.9 Bir Jet Motorundaki Süper Alaşımların Bulunduğu Bölgeler.

Östenitik matris, fcc fazını kararlı yapmak için en az %25 nikel ve demire dayalıdır. Krom gibi diğer alaşım elementleri, katı çözelti sertleştirilmesi için öncelikle östenite bölünür. Güçlendirici çökeltiler öncelikle γ' Ni_3Al , $\gamma\text{Ni}_3\text{Ti}$ ve γ'' Ni_3Nb gibi sıralı intermetaliklerdir, ancak karbürler ve karbonitrürler de mevcut olabilir. Bor ve zirkonyum gibi tane sınırlarına bölünen elementler, nikel esaslı alaşımlarda meydana gelene benzer bir işlevi yerine getirir; yani, sünme kopması koşulları altında tane sınırı kırılması bastırılır, bu da kopma ömründe önemli artışlara neden olur. Bileşim ve güçlendirme mekanizmalarına dayalı olarak çeşitli demir-nikel alaşım grupları oluşturulmuştur [135].

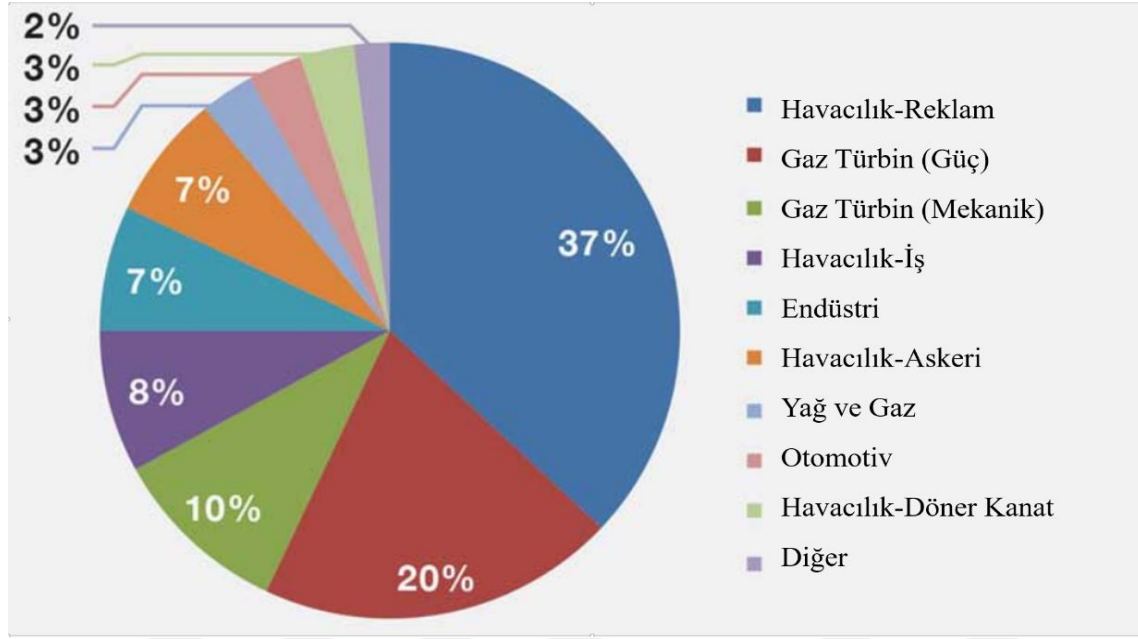
V-57 ve A-286 gibi sıralı fcc γ' ile güçlendirilen ve ağırlıkça %25 ila 35 Ni içeren alaşımlar bir alt grubu temsil eder. γ' fazı bu alaşımlarda titanyum bakımından zengindir ve aşırı yüksek bir titanyum-alüminyum oranından kaçınmak için özen gösterilmelidir, bu da fcc γ' yerine altıgen kapalı (hcp) γ (Ni_3Ti) daha az etkili bir güçlendirici ile sonuçlanır. Inconel X750 ve Incoloy 901'in örnek olduğu ikinci bir demir açısından zengin alt grup, en az %40 Ni'nin yanı sıra daha yüksek seviyelerde katı çözelti güçlendirici ve çökelti oluşturan elementler içerir [135].

Ağırlıkça %0,003 ila 0,03 oranında bor ve daha az sıklıkla küçük zirkonyum ilaveleri, gerilim kopma özelliklerini ve sıcak işlenebilirliği iyileştirmek için eklenir. Zirkonyum ayrıca MC karbür ZrC 'yi oluşturur. Başka bir MC karbür, NbC , Inconel 706 ve Inconel 718 gibi niyobyum içeren alaşımlarda bulunur. Vanadyum ayrıca, hem servis sıcaklıklarında çentik sünekliğini hem de sıcak işlenebilirliği geliştirmek için demir nikel alaşımlarına küçük miktarlarda eklenir. Manganez ve nadir toprak elementleri oksijen giderici olarak mevcut olabilir; Oksidasyon direncini arttırmak için nadir toprak elementleri de eklenmiştir. Inconel 718, tüm süper alaşımların en güçlülerinden biridir (düşük sıcaklıklarda) ve en yaygın olarak kullanılır, ancak 650 ila 815 °C aralığında hızla gücünü kaybeder. Bu muhtemelen, östenitik matriste γ " çökeltisi ile ilişkili yüksek kafes uyumsuzluğundan kaynaklanmaktadır [135].

2.3.2.3 Kobalt Esaslı Süper Alaşımlar

Kobalt esaslı süper alaşım sınıfı nispeten yenidir. Diğer süper alaşımlardan farklı olarak, kobalt esaslı alaşımlar, içinde az miktarda karbürün dağıtıldığı bir katı-çözelti ile güçlendirilmiş östenitik (FCC) matris ile karakterize edilir. Ticari olarak Ni esaslı süper alaşımlar kadar kullanılsa da, nikel esaslı alaşımlara kıyasla daha iyi kaynaklanabilirlik ve termal yorulma direncine sahiptirler. Ayrıca yüksek krom içeriklerinden dolayı yüksek sıcaklıklarda (980-1100 °C) mükemmel korozyon direncine sahiptirler[135]. Dövme kobalt esaslı alaşımlar, diğer süper alaşımların aksine, tutarlı, düzenli bir çökelti ile güçlendirilmez. Kobalt, 417 °C'nin altında hcp yapısında kristalleşir. Daha yüksek sıcaklıklarda FCC'ye dönüşür. Servis sırasında bu dönüşümü önlemek için, fcc yapısını oda sıcaklığı ve erime noktası arasında kararlı kılmak için neredeyse tüm kobalt esaslı alaşımlar nikel ile alaşımlanır. Kobalt esaslı alaşımların bir başka avantajı, reaktif metaller alüminyum ve titanyum içeren nikel esaslı ve demir-nikel esaslı alaşımlar için gereken vakumla eritmenin aksine, hava veya argon içinde eritilme kabiliyetidir. Bununla birlikte, katı çözültideki alaşım elementleri için yüksek toleransa sahip olan nikel esaslı alaşımların aksine, kobalt esaslı alaşımların istenmeyen plaka benzeri σ ve TCP fazlarını çökeltme olasılığı daha yüksektir [135].

Kobalt esaslı alaşımlar, muhtemelen bu alaşımların karakteristik özelliği olan oldukça yüksek krom içeriklerinin bir sonucu olarak, yüksek sıcaklıklarda üstün sıcak korozyon direnci gösterir. Kobalt alaşımları çoğunlukla Lityum iyon pillerinde kullanılsa da bu nedenle kobalt esaslı süper alaşımlar çoğunlukla havacılıkta kullanılır. Şekil 2.10'da kobalt esaslı süper alaşımların kullanım alanları grafik olarak gösterilmiştir [136].



Şekil 2.10 Kobalt Esaslı Süper Alaşımların Kullanım Alanları.

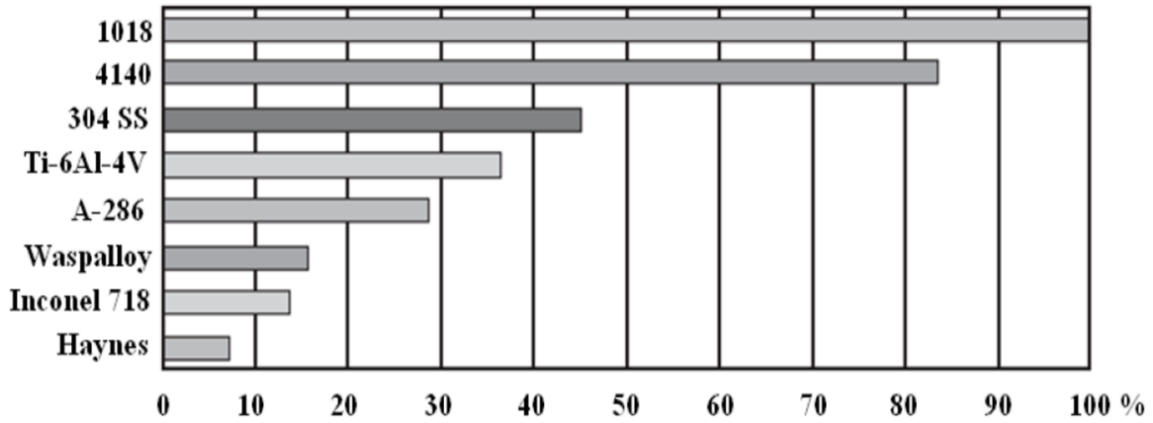
Hemen hemen tüm kobalt alaşımları, %10 veya daha fazla nikel ile alaşım yapılarak elde edilen bir fcc matrisine dayanır. Demir, manganez ve karbon ilaveleri de fcc fazını kararlı ederken, nikel ve demir ilaveleri işlenebilirliği artırır. Karşıt hcp kararlı etme eğilimi sergileyenler, esas olarak katı-çözelti güçlendirmesi için eklenen tungsten ve öncelikle oksidasyon ve sıcak korozyon direnci için eklenen krom gibi diğer yaygın alaşım elementleridir. Birkaç kobalt esaslı alaşımda ağırlıkça %5 Al ile geliştirilmiş oksidasyon ve korozyon direnci kaydedilmiştir. Tutarlı, sıralı Co_3Ti 'yi bir güçlendirme aşaması olarak çökeltmek için titanyum ilaveleri de yapılmıştır. Ne yazık ki, bu faz sadece yaklaşık 700 °C'ye kadar kararlıdır; bu, Ni-esaslı alaşımlarda γ' Ni_3Al , Ti için olduğundan çok daha düşüktür [135].

Nikel esaslı alaşımlarda olduğu gibi, kobalt alaşımlarında da çeşitli karbürler bulunmuştur. Bunlara M₂₃C₆, M₆C ve MC karbürler dahildir. Hem L-605 hem de Haynes 188'de M₆C, 3000 saat boyunca 816 ila 927 °C aralığındaki sıcaklıklara maruz kaldığında M₂₃C₆'ya dönüşür. Karbürlere ek olarak, L-605'te Co₃W, Co₂W ve Co₇W₆ gibi küçük miktarlarda intermetalik fazlar bulunmuştur. Diğer alaşımlar CoAl, Co₃Ti ve Co₂ (Ta, Nb, Ti) bileşiklerini gösterir. Bununla birlikte, bu fazların γ matrisinin güçlendirilmesine katkıda bulunması olası değildir. Aksine Co₇W₆ ve Co₂ (Ta, Nb, Ti) mekanik özelliklerin bozulmasına neden olması muhtemel TCP fazlarıdır [135].

2.3.3 Süper Alaşım Kaplanması

Zor şartlarda çalışacak metal parçaların uzun ömürlü olmaları ve maddi kayıplara yol açmamaları için bu şartlara dayanıklı metallere seçilmesi en uygun ve doğru karardır. Gerçekte, maliyeti gözetmekten, döküm ve işleme zorluklarından dolayı daha ucuz, dökümü, işlenmesi ve bulunabilirliği daha kolay olan uygun bir alaşım seçilir. Bu seçim çalışacağı sıcaklığa göre, ortamın etkilerinin yanı sıra maruz kalacağı basınç ve kuvvetlere göre dayanıklı amaca uygun çelik alaşımdan oluşur. Zor şartlarda çalışacak parça dökülür, işlenir veya eklemeli imalatla üretilir sonra üzerine çalışma şartlarına uygun süper alaşım kaplanır.

Süper alaşım çalışma ortamına göre seçilir. Burada dikkat edilmesi gereken yüksek sıcaklıkta çalışılacak bir ortama dayanacak kaplamanın nikel (Ni) esaslı olması veya nikel (Ni) kobalt (Co) süper alaşımı olması dışında altındaki çelik alaşımında yüksek ısıya dayanıklı seçilmesi gerekliliğidir. Benzer şekilde süper alaşım kaplandıktan sonra eğer bir işleme yapılacaksa seçilecek süper alaşımın mümkün olduğu kadar nikel esaslı olmamasına dikkat etmek gerekir. O şartları sağlayacak başka süper alaşım varsa onu tercih etmek lazım çünkü özellikle nikel esaslı olan süper alaşımlar başta olmak üzere işlenmesi çok zor olan metallere. Şekil 2.11'de bazı süper alaşımların işlenebilirlik indeksleri verilmiştir [112].



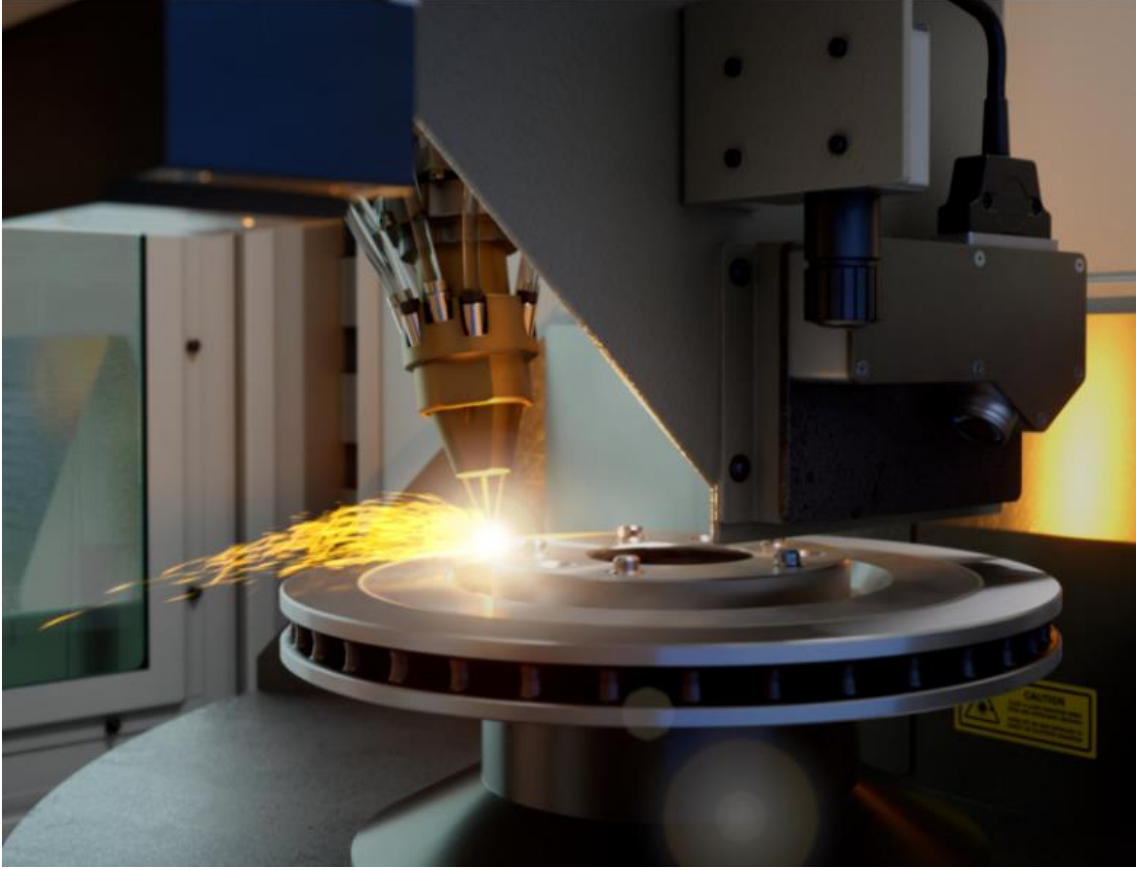
Şekil 2.11 Süper Alaşımların İşlenebilirlik İndeksleri.

Süper alaşımların kaplama malzemesi olarak kullanılması çeşitli yöntemlerle olabilmektedir. Bu yöntemlerin biri MIG (Metal İnert Gaz) kaynak yöntemidir. Jet motorlarının türbin kanatlarının arızalanması, ağırlıklı olarak, yüksek sıcaklık ve hıza atfedilen yanma odasından çıkan yanma yan ürünlerinden kaynaklanmaktadır. Bu yüksek sıcaklıktaki aşındırıcı ve aşındırıcı çalışma ortamına karşı çalışması gereken türbin kanadı gibi yüksek sıcaklık uygulamaları için kullanılacak kaplama malzemesinin nikel esaslı süper alaşım olması kaçınılmazdır. Orta karbonlu EN24 çelik malzemenin üzerine MIG kaynak yöntemi kullanılarak Inconel 625 nikel esaslı süper alaşımın kaplanması ile türbin kanadının tokluğu, yüksek korozyon ve sürünme direnci ve ısı dayanımı artırılması sağlanabilmekte ve bu işte kullanılabilmektedir [96].

Stellite 6, iyi bir aşınma ve korozyon direncine sahip olan ve bu özelliklerini yüksek sıcaklıklarda koruyan kobalt esaslı bir süper alaşımdır. Bu çalışmada, Stellite 6 telini düşük alaşımlı yüksek mukavemetli çelik (S355) ve paslanmaz çelik (AISI 420) plakalar üzerine yerleştirmek için tel ve ark eklemeli imalat kullanılmıştır. Tel eklemeli imalat prosesinin avantajları arasında yüksek biriktirme oranı, yüksek üretkenlik, yüksek malzeme kullanımı ve düşük maliyetli enerji verimliliği sayılabilir. Bununla birlikte, süper alaşım biriktirme, kaplamanın bütünlüğünü tehlikeye atmaktan kaçınmak için genellikle düşük bir seyreltme seviyesinin korunmasını gerektirir [97].

Araçların yeri geldiğinde hem çok ısınan hem çok fazla kuvvet gören hem de sürtünmenin en fazla olduğu yerler fren diskleridir. Hava alıp soğuması için ve ağırlığının fazla olmaması gibi birçok nedenden fren papuçlarının sürtündüğü yüzeyler dışında bol

boşluklu yapıları vardır. Hem pahalı hemde işlemesi ve dökümü zor olduğu için süper alaşımla üretmek yerine daha ucuz ve uygun çeliklerle üretip üzerine LMD ile süper alaşım kaplanması son yılların gelişmesidir. Şekil 2.12’de fren diskinin üzerinin LMD yöntemi ile süper alaşımla kaplanması gösterilmiştir [137].



Şekil 2.12 Fren Diskinin LMD Yöntemi ile Süper Alaşım Toz Kaplaması.

Eklemeli imalat yöntemi ile üretilen metal parçaların mekanik özelliklerinin dövme parçalarına yakın olduğu bilinmektedir. Bu nedenle kaplama yöntemleri arasında günümüzde toz metal kullanan lazer ile kaplamalar da diğerlerine göre daha iyi olduğundan kullanımları artmaktadır. Bunların içinde en yaygın kullanılanlardan biri de taşınabilir modellerinin olması ve fiyatlarının makul seviyelere düşmesi nedeni ile LMD (Laser Melting Deposition) olarak bilinen Lazer Eritme Biriktirme yöntemidir. Süper alaşım metallerden toz halinde çok kullanılanlardan biri de aşınma ve paslanma konusunda yüksek dirençli olan kobalt esaslılardır. Yüksek sıcaklıklarda bu performansını korumaktadır [106]. Lazer kaplamayı diğerlerinden farklı kılan özellikleri

saflığı, homojenliği, sertlikliği, birbirine bağlanabilmesi ve mikro yapısının daha güçlü olmasıdır. Lazer kaplamanın bir güçlü yanı da kaplama ile taşıyıcı alt metal arasındaki karışımın çok az oluşmasıdır. Seyreklik lazer kaplama tabakasının kalitesini etkileyen en önemli parametredir. Yapılan modelleme ile ağ oluşturma ve yinelemeli hesaplamaları geri yüklemeyen yüksek hesaplama verimliliğine çıkılmıştır. Yüksek tahmin doğruluğu ve hesaplama verimliliği, sunulan modelin parça bozulmasını, parça gözenekliliğini, parçanın yaşam beklentisini ve mekanik özelliklerini ve süreç parametre planlamasını daha fazla araştırmasını sağlamaktadır [82].

2.4 Kaplanan Süper Alaşımın Yüksek Sıcaklığa Ulaşması

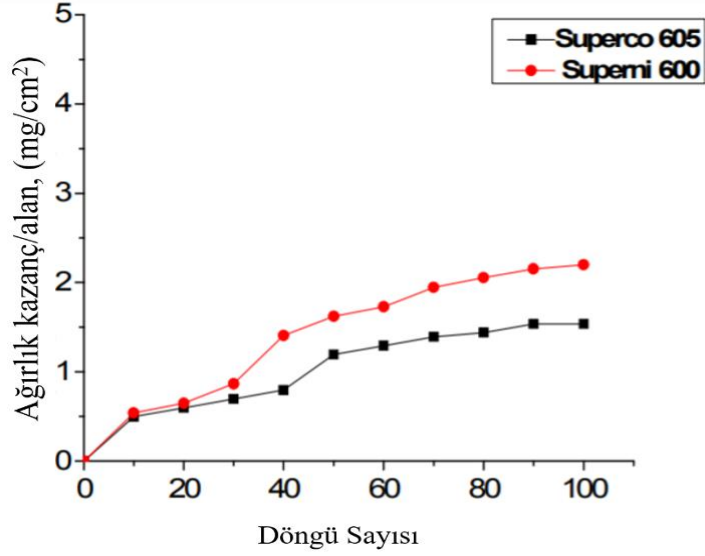
Artan sıcaklıklar metallerin fiziksel özelliklerini çok etkiledikleri için işlevlerini görmede veya işlev dışı kalmalarına yol açabilmektedir. Bu yüksek sıcaklıklarda süper alaşımların davranışları içlerindeki esas metale göre değişmektedir. Sıcaklıklar yaklaşık 540°C'nin üzerine çıktığında, sıradan çelikler ve titanyum süper alaşımları uygulamalar için yeterince güçlü değildir ve ayrıca çelik esaslılar gelişmiş korozyon saldırısından zarar görebilmektedir.

En yüksek sıcaklıklara (çoğu alaşım için yaklaşık 1204°C ila 1371°C olan erime sıcaklıklarının altında sıcaklıklara) ulaşılması gerektiğinde ve mukavemet göz önünde bulundurulduğunda, nikel esaslı süper alaşımlar tercih edilen malzemelerdir. Nikel esaslı süper alaşımları, hemen hemen piyasada bulunan diğer tüm malzemelerden daha yüksek erime noktalarında kullanmak mümkündür. Bazı durumlarda, gerçek mukavemet gereksinimlerine ve beklenen aşındırıcı saldırı tipine bağlı olarak, nikel esaslı süper alaşımlar yerine kobalt esaslı süper alaşımlar kullanılabilir. Daha düşük sıcaklıklarda ve bir uygulama için ihtiyaç duyulan mukavemet türüne bağlı olarak, demir-nikel esaslı süper alaşımlar, kobalt veya nikel esaslı süper alaşımlardan daha fazla kullanılmaktadır. Nedenlerinden biri Inconel (IN) 718 gibi demir-nikel esaslı (bazen nikel-demir esaslı olarak adlandırılır) süper alaşımlar, nikel (Ni) esaslı veya kobalt (Co) esaslı süper alaşımlardan daha ucuzdur. Bu ucuz süper alaşımın savunma sanayinde kullanımı amacı ile lazer kaplama yöntemiyle 4140 çeliğine kaplanmıştır. Yükselen sıcaklıklarda demir esaslı süper alaşım kaplanmış olanlar özellikle 300°C derecenin

üzerlerinde korozyon, oksidasyon ve aşınma performansı açısından kaplanmamışa göre çok fark yaratmıştır [109].

Süper alaşımlarda sıcaklıklarda krom (Cr) elementinin yüksek olması korozyon direncini arttırmaktadır. Nikel (Ni) esaslı süper alaşımlarda, kromu (Cr) azaltıp yerine alüminyum (Al) uygulaması oksidasyon direncini bir miktar arttırsa da korozyon direncini azaltmıştır. 649°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda oksidasyon direnci yeterli olsa da korozyon direnci yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle uçak türbinlerinde ve yaklaşık 760°C'nin üzerindeki yüksek sıcaklıklardaki uygulamalarda süper alaşımların kaplanması gerekmektedir [138]. Incoloy 800HT ve Incone 617 nikel esaslı süper alaşımlar, yüksek sıcaklıkta gaz soğutmalı reaktörler için birincil aday yapısal malzemelerdir. Soğutma sıvısındaki safsızlıklar (örn. H₂O, CH₄) tribolojik davranışı etkileyen korozyon reaksiyonlarına neden olur. Yüksek sıcaklıklarda H₂O içeren helyumda şartlandırma, karbon difüzyon Kolsterising® işlemiyle sertleştirme ve sertleştirmeden sonra şartlandırma dahil olmak üzere yüzey koşulları altında alaşımların yüksek sıcaklıkta tribolojik performansları incelenmiştir. 800HT ve 617 alaşımlarının 650°C - 900°C'de yüksek sıcaklık aşınması karakterize edilmiştir. İlk sürtünme katsayısının değeri, aşınma mekanizmasının nasıl olacağı hakkında fikir vermektedir. Sürtünme, sır gibi oksit tabakası oluşumunu sağlamış ve oksit aşınma mekanizmaları gözlemlenmiştir. Alaşımların kolsterizasyonla sertleştirilmiş olması, yüzey sertliğini arttırmıştır ve aşınma hacimlerini 5-20 kat arasında azaltmıştır. Bir "sır-oksit" oluşturan koşullandırılmış alaşımlar ihmal edilebilir düzeyde aşınma göstermiştir [83].

Nikel esaslı süper alaşım ile kobalt esaslı süper alaşım 900°C'de atmosferik ortamda bir saat ısıtılıp sonra 20 dakika havada soğumaya bırakılarak yapılan deneme yüz kere tekrarlanmak sureti ile oksidasyona uğratılmışlardır. Her bir tekrarda ağırlıkları tartılarak oksidasyondan dolayı kazanılan ağırlıklar tespit edilmiştir. Şekil 2.13'te her iki süper alaşımın tekrarlanan deneme sayısına karşı ağırlık kazançları gösterilmiştir.



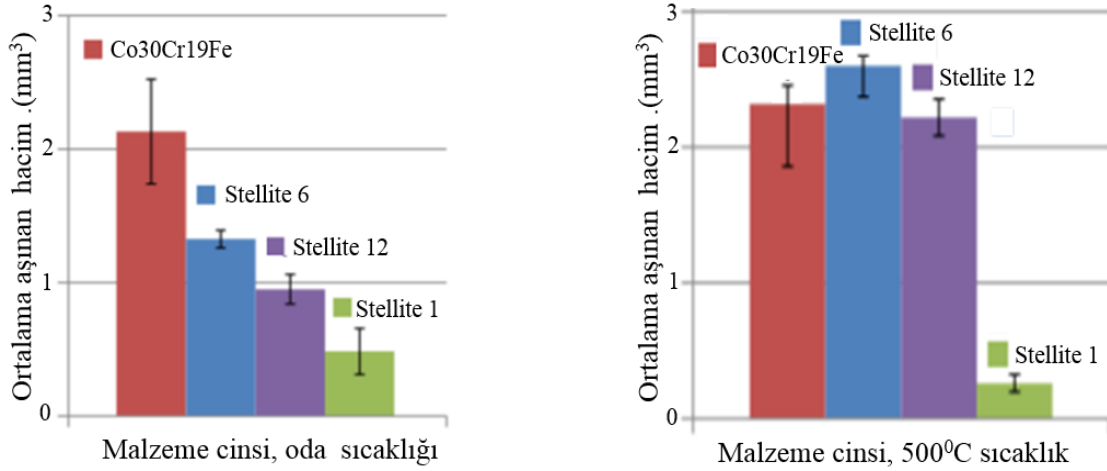
Şekil 2.13 Nikel (Ni) ve Kobalt (Co) Esaslı Süper Alaşımların Deney Tekrarına Karşı Ağırlık Kazançları.

Oksidasyon sırasında süper alaşımlar, 900°C'de yüzeyin üstünde oksit oluşumu nedeniyle renk değişiklikleri göstermişlerdir. Kobalt esaslı olanın yüzeyinde ilk tekrarlarında gümüş parlak renk gözlemlenmiştir. Ortamda bulunan metal ve oksijen arasındaki gaz katı reaksiyonu nedeniyle her ikisinde de Cr_2O_3 , Fe_2O_3 , NiO , NiCr_2O_4 oksitleri oluşmuştur. Kobalt esaslı olanda ayrıca CoO da oluşmuştur. Bu oksitlerin oluşması sonucu ağırlıklar artmıştır. Nikel esaslı olanın ağırlık artışı kobalt esaslıdan çok olmuştur. Buradan kobalt esaslı olanın oksidasyon direncinin daha yüksek olduğu ortaya çıkmıştır [86].

2.5 Yüksek Sıcaklıkta Sürtünme

Yüksek sıcaklıklardaki sürtünme ve aşınma mekanizmalarının değerlendirilmesi, oda sıcaklıklarında çalışan makine parçalarına aşınma mekanizmalarının değişebilmesi ve karmaşıklaşması nedeniyle daha zor olabilmektedir. Kobalt esaslı alaşımların yüksek sıcaklıkta kayması sırasında daha yumuşak oksit sınırlarının oluştuğu ve aşınma oranlarının azaldığı yolunda da görüşler vardır. Tipik olarak, kayma sıcaklığının bir fonksiyonu olarak aşınma oranları, doğrusal olmayan davranış sergileyebilmektedir. Son zamanlarda, yüksek sıcaklıkta metalik aşınmayı ve oksidasyonun etkilerini, onun artık oluşumundaki rolünü ve metalik aşınma sırasında mikroyapısal değişikliklere ve oksit tabakası oluşumunun doğasına bağlı olarak, aşınma oranı arttırılabilir veya azaltılabilir. Şekil

2.14'te (a) oda sıcaklığında ve (b) 500°C sıcaklıkta 30N yükte Kobalt krom demir alaşımı ile üç çeşit kobalt esaslı Stellite alaşımının ortalama aşınmış hacim kaybı (mm³) verilmektedir[84].



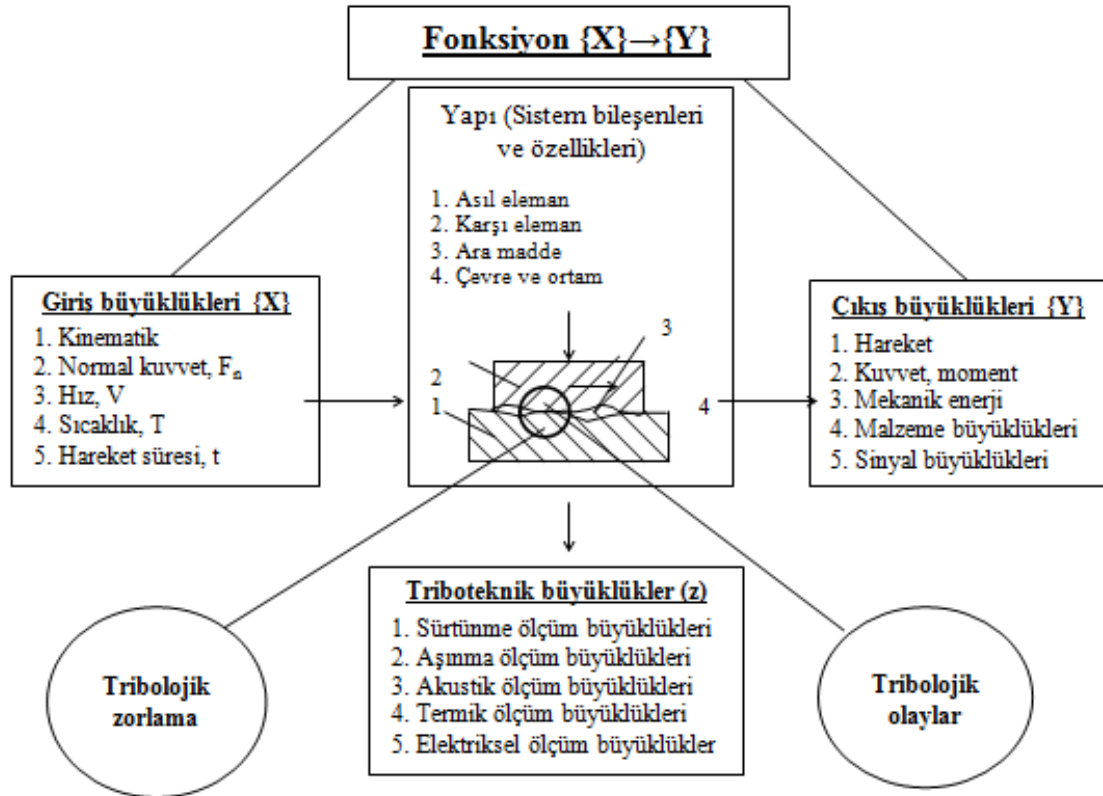
Şekil 2.14 (a) Oda Sıcaklığı ve (b) 500°C Sıcaklıkta 30N Yükte Ortalama Aşınmış Hacim (mm³).

Şekilden 2.14'te Lazer Eritme Biriktirme (LMD) yöntemi ile kaplanan bu üç Stellite arasında krom oranı en yüksek olan Stellite 1, 500°C oda sıcaklığına göre daha az aşınmıştır. Yine krom oranı yüksek olan demir alaşımı diğer iki Stellite alaşımlara göre az artış göstermiştir. Sıcaklık yükseldiğinde sürtünen iki metal arasında yumuşak, düşük ara yüzey kesme mukavemeti olan metalik oksit tabaka veya film oluşabileceğinden sürtünme ve aşınmada ciddi bir oranda azalmalar olabilmektedir. 800°C'ye kadar yapılan kayma testlerinde aşınmayı, sıkıştırmayı ve aşınma döküntülerinin sinterlenmesini azaltan oksit 'sır' yüzey tabakalarının oluşumunu yapabildiği görülmüştür. Bazı nikel alaşımlarının koruyucu bir NiO yüzeyinin oluşturması nedeniyle, aşınma hızı 650°C'de oda sıcaklığına kıyasla birkaç büyüklük sırası azalabilmektedir. Tersine, parçacık katmanları çok iyi sıkıştırılmamışsa (örneğin sinterleme yoluyla), nispeten gevşek sert parçacıklar daha kolay çıkarılır ve sıcaklıkla aşınma oranı artar. Sıcaklık arttıkça, birbirine sürtünen karşı gövdeler arasında kararlı oksit transfer tabakaları ve mekanik olarak karıştırılmış tabakalar oluşturma eğilimi, alttaki dökme alaşımın korunmasında çok önemli hale gelir. Dış ısıya ek olarak, her iki katkı da yüksek sıcaklık tribolojik davranışını ve yüzey oksit tabakaları oluşturma ve tutma yeteneğini etkileyebileceğinden, kayan temasta üretilen sürtünme ısısının dikkate alınması gerekir [84].

2.5.1 Triboloji

Her türlü sürtünme, aşınma ve yağlama sorunuyla ilgilenen bilimdir. Triboloji, göreceli hareket halindeki yüzeylerin ve bununla ilgili uygulamaların bilimi ve teknolojisidir. Yuvarlanma elemanlarını ve yağlayıcıları kullanarak sürtünmeyi azaltmak, endüstriden çok daha eskidir. Triboloji, fizik, matematik, kimya, malzeme bilimi ve mühendislik gibi birçok araştırma alanını içeren ve dolayısıyla temel ve uygulamalı bilimleri birbirine bağlayan disiplinler arası bir bilimdir [85].

Triboloji sisteminin yapısı ve aşamaları ile ilgili sınıflandırma Şekil 2.15'te şematik olarak gösterilmiştir [99].



Şekil 2.15 Triboloji Sisteminin Yapısı.

Hayati öneme sahip endüstriyel faaliyetlerin tamamında çok sayıda hareketli parça ve dolayısıyla etkileşime giren yüzeylere sahip her türlü makine ve mekanik sistemler mevcuttur. Bu tür makine ve sistemlerin sorunsuz, güvenilir ve uzun ömürlü olmaları, karşılıklı sürtünmeleri ve aşınmaları kontrol altına alınması ile mümkün olur. Bu tür etkileşimli yüzeylerin bağıl hareket halindeki sürtünmesini, aşınmasını ve yağlanmasını anlamak ve kontrol etmek için triboloji bilimini iyi bilmek gerekir [100].

2.5.2 Aşınma

Aşınma, katı yüzeylerde malzemenin hasar görmesi, ağırlık kaybına uğraması, kaldırılması veya deformasyonudur. Aşınma nedenleri abrasiv ve adhesiv olarak da adlandırılan mekanik veya korozyon olarak da adlandırılan kimyasal olabilir. Metallerin aşınması, yüzeyin ve yüzeye yakın malzemenin plastik olarak yer değiştirmesi ve aşınma kalıntısı oluşturan parçacıkların ayrılmasıyla meydana gelir. Malzeme biliminde aşınma, başka bir katının hareketiyle katı bir yüzeyden malzemenin aşınmasıdır. Aşınma sürecinin incelenmesi, triboloji teorisinin bir parçasıdır. Makine bileşenlerindeki aşınma, örneğin yorulma ve sünme gibi farklı döngülerle birlikte yüzeylerin bozulmasına neden olur ve sonunda malzeme bozulmasına veya uygulanabilirlik kaybına yol açar. Metallerin aşınması, yüzeyin ve yüzeye yakın malzemenin plastik olarak yerinden çıkması ve aşınma döküntüsü oluşturan parçacıkların ayrılmasıyla olur. Molekül boyutu milimetreden nanometreye kadar değişebilir. Bu döngü, farklı metaller, metalik olmayan katılar, akan sıvılar, katı parçacıklar veya akan gazlarda sürüklenen sıvı boncuklar ile temas yoluyla gerçekleşebilir. [101]. Aşınma ve korozyondan dolayı her yıl dünyada önemli malzeme kayıpları oluşmaktadır. Ülkelerin korozyon nedeniyle kayıpları gayrisafi milli hasıllarının %3,5-5 'i arasında değişmektedir [87]. Birçok endüstriyel uygulamalarda, özellikle yüksek statik ve dinamik yüklere maruz kalan makine parçalarının, bu yüklere dayanıklı olmasının yanında, özel çevre şartlarından da etkilenmemesi gerekir. Ancak her yönden bu çalışma koşullarına dayanıklı malzemelerin geliştirilmesi çok masraflı olmakta ve parçaların oldukça pahalı malzemelerden imal edilmesi gerekmektedir.

Ağır çevre şartlarında çalışacak gerekli dayanıklılığa sahip ana metalleri, bu şartların zararlı etkilerinden korumak için çok daha ucuz bir yöntem olan, dayanıklı ana metalin yüzeyini çevre şartlarından etkilenmeyen özelliğe sahip malzemelerle kaplama teknolojisi geliştirilmiştir. Kaplanan yüzeyler genellikle metal olmakla beraber, nadir durumlarda bazı metal olmayan yüzeylerin kaplanması da mümkündür. Tribolojik uygulamalar için, yüzey mühendisliğinin kullanılmasında iki amaç vardır. Bunlardan birisi, yüzey malzemesinin aşınma direncini arttırmak, diğeri ise yüzey malzemesinin sürtünme davranışını iyileştirmektir. Yüzeyin kimyasal bileşimi ya da mikro yapı değişimi sağlanarak istenilen mekanik özellikler sağlanabilir [87].

2.5.3 Aşınma çeşitleri

2.5.3.1 Aşındırıcı Aşınma

Bir aşındırıcının mekanik hareketi ile malzemenin aşınıp çıkarılması, aşındırıcı aşınma olarak bilinir. Şekil 2.16'da endüstriyel bir parçanın aşındırıcı aşınması verilmiştir. Aşındırıcılar, genellikle aşındırılan yüzeyden daha sert olan ve açısallık bir profile sahip olan maddelerdir.

Örnekler: temas yüzeyleri arasındaki kum parçacıkları, pistonlu kompresörlerde krank mili muylularının zarar görmesi. Aşındırıcı aşınma normalde temas türüne ve temas durumuna göre sıralanır. Temas türü, aşındırıcı aşınma yöntemini belirler. Aşındırıcı aşınmanın iki yöntemi, iki gövdeli ve üç gövdeli abrazif aşınma olarak bilinir. İki cisim aşınması, kum veya sert parçacıklar karşı yüzeydeki malzemeyi ortadan kaldırdığında meydana gelir. Temel benzerlik, bir kesme veya tırmıklama faaliyeti ile ortadan kaldırılan veya yerinden çıkarılan malzemedir. Üç cisim aşınması, parçacıklar kısıtlanmadığında ve yuvarlanmalarına ve bir yüzeyden aşağı kaymalarına izin verildiğinde meydana gelir. Temas koşulu, aşınmanın açık mı yoksa kapalı mı olacağına karar verir. Yüzeyler birbirinden bağımsız olacak şekilde yeterince söküldüğünde açık temas durumu meydana gelir. Aşındırıcı aşınmayı ve dolayısıyla malzeme çıkarma şeklini etkileyen çeşitli bileşenler vardır. Dış malzemenin ortadan kaldırıldığı yolu göstermek için az sayıda benzersiz bileşen önerilmiştir [101].

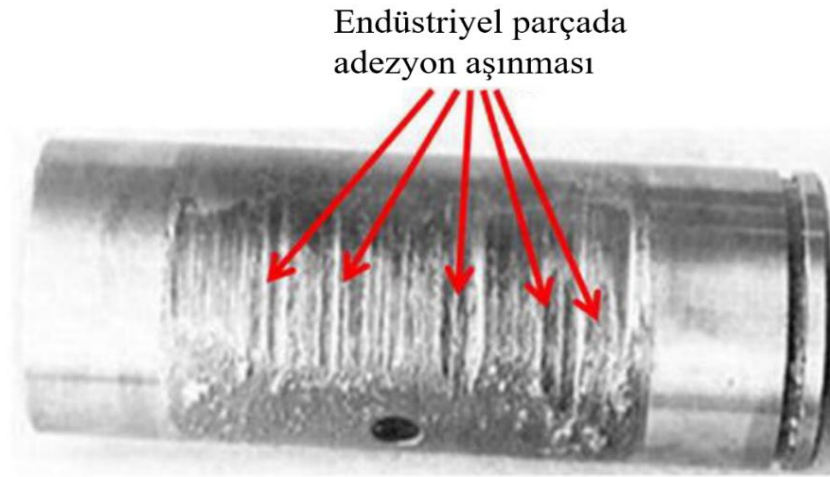


Şekil 2.16 Endüstriyel Bir Parçanın Aşındırıcı Aşınması.

2.5.3.2 Adezyon (Yapışma) Aşınması

Bir yüzey diğerinin üzerinden kaydığında, yüksek noktalar arasındaki etkileşim ara sıra aşınma döküntüsü parçacıkları üretir. Hafif yapışma, filmlerin, örneğin oksitlerin daha düşük bir oranda atılmasıdır. Şiddetli yapışma, metalik kesişmelerin yırtılması, kırılması ve sıvılaşması nedeniyle metalin boşaltılmasıdır. Şekil 2.17’de endüstriyel bir parçanın yapışma aşınması verilmiştir. Bu, yüzeylerin kazınmasına veya rahatsız edilmesine ve hatta sıkışmaya neden olur. Sürtünme teması sırasında yüzeyler arasında adeziv aşınma bulunabilir ve genellikle bir yüzeyden başlayıp diğerine aşınma döküntüsü ve malzeme karışımlarının istenmeyen yer değiştirmesine ve bağlanmasına işaret eder. İki yapışkan aşınma tipi tanınabilir.

Yapışma aşınma, bir yüzeyden diğerine aşınma döküntüsü ve malzeme aktarımı yapan göreceli hareket, “doğrudan temas” ve plastik deformasyon ile ortaya çıkar. Yapışma yükü, gerçek malzeme değişimi olsun veya olmasın, ölçülebilir bir ayrımla izole edilmiş olmalarına rağmen iki yüzeyi bir arada tutar. Genel olarak, yapışma aşınması, malzeme değişimini ilerleten iki gövde kayarken veya birbirinin içine sıkıştırıldığında meydana gelir. Bu, yüzey katmanlarının içindeki küçük parçaların plastik deformasyonu olarak tasvir edilebilir. Her yüzeyde bulunan pürüzlülük veya çok küçük odaklar (yüzey pürüzlülüğü), çoğunlukla atomlar arasındaki katı yapışma kuvveti nedeniyle oksit bölümlerinin nasıl çekilip bir sonraki yüzeye eklendiğinin ciddiyetini etkiler [101].

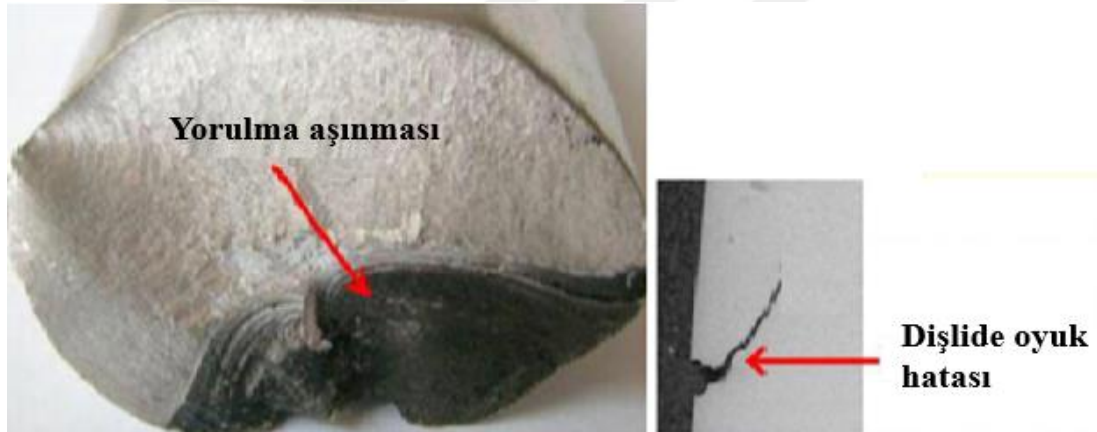


Şekil 2.17 Endüstriyel Makine Parçasında Adezyon (Yapışkan) Aşınması.

2.5.3.3 Yorulma Aşınması

Yüzeyler, dalgalı yüklere maruz kaldıklarında yorularak aşınabilirler. Yüksek yüzey gerilimleri, çatlakların malzemeye yayılmasına neden olur ve bu çatlaklardan iki veya daha fazlası bir araya geldiğinde büyük gevşek parçacıklar oluşur. Termal Yüzey Yorulması, temas eden iki bileşenin temasının neden olduğu ısınma yoluyla, yüzeyin çatlamasına ve küçük malzeme parçalarının kaybolmasına neden olan yüksek tekrarlayan gerilimler oluştuğunda meydana gelir. Yüzey yorgunluğu, bir malzemenin dışının, bir tür geniş malzeme yıpranması olan döngüsel istifleme ile zayıflatıldığı bir döngüdür. Şekil 2.18 Endüstriyel bir parçada yorulma ve oyuk aşınması verilmiştir.

Yorulma aşınması, aşınma parçacıkları yüzeysel düzeyde mikro çatlakların döngüsel bölünmüş gelişimi ile sınırlandığında gelişir. Bu mikro çatlaklar ya sıg yarıklar ya da yüzey altı kırılmalarıdır [101].

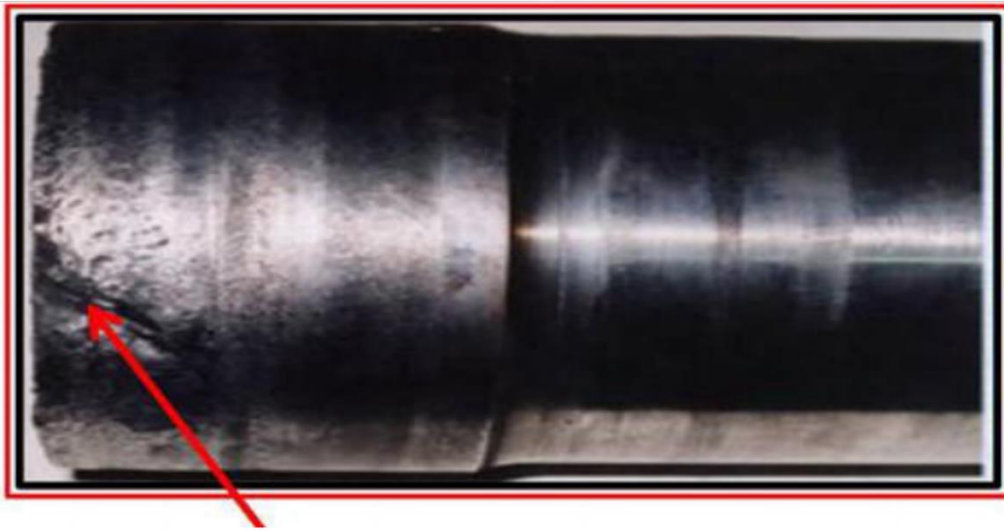


Şekil 2.18 Endüstriyel Parçada Yorulma ve Oyuk Aşınması.

2.5.3.4 Sürtünme Aşınması

Temas eden yüzeyler arasındaki döngüsel hareket, her tür sürtünme aşınmasında temel bileşendir. İki yüzeyin etkileşimini gerektiren ve küçük salınım genliğine maruz kalan bir kombinasyon işlemidir. Yüzeylerin malzeme özelliklerine göre, yapıştırıcı, iki gövdeli aşınma ve/veya katı parçacıklar aşınma kalıntıları oluşturabilir. Aşınma tanecikleri ayrılır ve ufalanır (ezilir) ve aşınma mekanizması, işlenerek sertleşen döküntü yüzeylerden metal çıkarmaya başladığında, üç gövdeli aşınmaya dönüşür. Şekil 2.19’da sürtünme aşınma mekanizması verilmiştir.

Sürtünme aşınması, aşağıdaki olay sırasının bir sonucu olarak ortaya çıkar: Normal yük pürüzlerin yapışmasına neden olur ve teğetsel salınım hareketi pürüzleri tıraş eder ve biriken aşınma kalıntılarını üretir. Geriye kalan (daha sert) pürüzler sonunda pürüzsüz yüzeyler üzerinde etki ederek bunların plastik deformasyona uğramasına, boşluklar oluşturmalarına, çatlakların yayılmasına ve yine yüzeylerin çöküntü alanlarında toplanan parçacık tabakalarını kesmesine neden olur. Parçacıklar yüzeyler arasındaki boşluğu doldurmak için yeterince biriktiğinde, aşınma aşınması takip eder ve aşınma bölgesi yanal olarak uzanır. Yapışma, katmanlara ayrılma ve aşınma aşınması sürdükçe, aşınma artıkları artık birincil bölgede tutulamaz ve çevredeki vadilere doğru akar. Maksimum gerilme merkezde olduğu için geometri kavisli hale gelir, mikropitler oluşur ve bunlar daha büyük ve daha derin çukurlarda birleşir. Son olarak, teğetsel hareketin yer değiştirmesine bağlı olarak, bir veya her iki yüzeyde solucan izleri gibi çukurlar veya büyük çatlaklar oluşabilir [101].



Sürtünme Aşınması

Şekil 2.19 Sürtünme Aşınma Mekanizması.

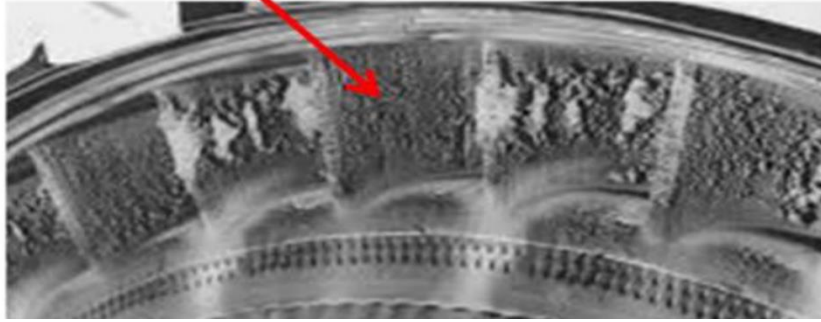
2.5.3.5 Eroziyon Aşınma

Eroziyon aşınma, bir kum akışı veya çöken buhar kabarcıkları tarafından çarpışan katı parçacıklar içeren bir sıvı ile temas halindeki nispi hareket nedeniyle katı bir yüzeyden malzeme kaybıdır. Şekil 2.20 Gaz türbin motorunda kompresör kanatlarının aşınması verilmiştir. Eroziyon aşınma, taneciklerin sertlik, çarpma hızı, şekil ve çarpma açısı gibi

malzeme özelliklerine yakından bağlıdır. Yaygın bir örnek, bulamaçların borular ve pompalama ekipmanı boyunca hareketiyle ilişkili erozif aşınmadır. Erozif aşınma, şaşırtıcı derecede kısa bir kayma hareketi olarak karakterize edilebilir ve kısa bir zaman aralığı içinde gerçekleştirilir.

Erozif aşınma, katı veya sıvı parçacıklarının yüzeye çarpmasıyla meydana gelir. Etkileyen parçacıklar, yeniden şekillendirilmiş deformasyon ve kesme mekanizmaları yoluyla malzemeyi yüzeyden istikrarlı bir şekilde ortadan kaldırır. Endüstride oldukça deneyimli bir sistemdir. Geçiş ölçüsü düşünüldüğünde, huni çerçeveleri, kaba parçacıkların hareket ettirilmesi gerektiğinde aşınmaya meyillidir. Eroziv aşınmanın hızı çeşitli unsurlara bağlıdır. Parçacıkların malzeme nitelikleri, örneğin şekli, sertliği, çarpma hızı ve çarpma kenarı, parçalanmış yüzeyin özelliklerinin yanı sıra temel faktörlerdir. Çarpışma noktası en önemli faktörlerden biridir. Sünek malzemeler için, en büyük aşınma oranı kabaca 30° çarpma açısında keşfedilirken, gevrek malzemeler için en aşırı aşınma oranı çarpma açısı yüzeye dik olduğunda ortaya çıkar [101].

Katı parçacık erozyon aşınması ile aşınmış gaz türbini kanat yüzeyi



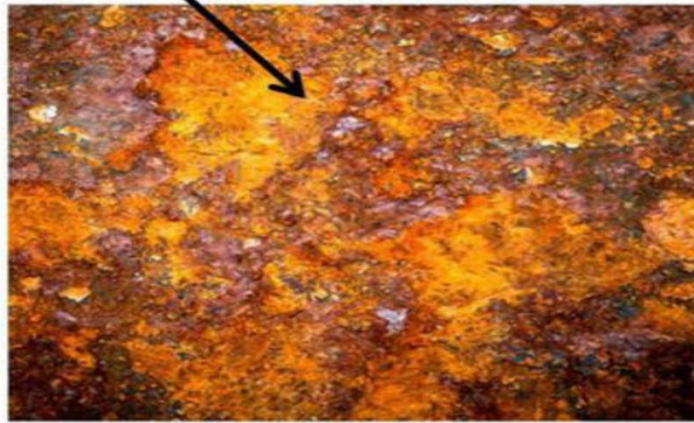
Şekil 2.20 Gaz Türbin Motorunda Kompresör Kanatlarının Aşınması.

2.5.3.6 Korozyif ve Oksidasyon Aşınması

Korozyon ve oksidasyon aşınması hem yağlı hem de kuru kontaklarda meydana gelir. Asıl sebep, aşınmış yüzey ile aşındırıcı ortam arasındaki kimyasal reaksiyonlardır. Tribolojik gerilimlerin ve tüketimin sinerjistik faaliyetinin neden olduğu aşınmaya da aynı şekilde tribokorozyon denir. Korozyif aşınmaya kimyasal aşınma denir. Korozyif aşınma, durumu içinde bir malzeme yüzeyine bir saldırıdır. Korozyif aşınma, belirli bir

tepki için mevcut koşul türüne bağlı olarak ıslak veya kuru olabilir. Genel olarak, ıslak erozyon, örneğin suda, içinde bazı parçalanmış türlerle birlikte, asidik bir durum ve yüzey üzerinde tepki oluşturan bir yanıtta meydana gelir. Kuru erozyon, ağırlıklı olarak kuru gazların, örneğin karakteristik hava ve nitrojen vb. mevcudiyeti tarafından engellenir. Doğa, korozyon aşınmasında muazzam bir işlev üstlendiğinden, malzeme seçimi esastır ve bir segmenti planlamadan önce konsantrasyon olmalıdır. Erozyon aşınmasında, korozyon ve aşınma iki serbest araçtır; gösteriler bağımsız olarak gerçekleşirse, durum her ikisinin birleştirilmiş etkisinden daha temel olabilir. Yüzeysel düzeyde yağ varlığında, tüketim tüm yüzey boyunca aynı olacaktır. Kıymetli taş malzemelerin sınırlarının iç malzeme yerine tüketime karşı savunmasız olması durumunda, taneler arası erozyon olarak bilinir. Parçacıkların malzeme yüzeylerine çarpmasıyla meydana gelen çukurlaşma, yüzeylerde yüzeysel düzeyde algılanması zor olan çukurlar ve açıklıklar oluşturur. Yeraltı korozyonu, esasen bileşenlerin etkisiz hale getirilmiş ortamla tepkisi nedeniyle, aşındırıcı malzemenin altında bulunan bağlantısız parçacıklardır [101]. Şekil 2.21’de Endüstriyel yapısal elemanlarının korozi ve oksidasyon aşınması verilmiştir.

Korozyon ve oksidasyon
nedeniyle yüzey hasarı



Şekil 2.21 Endüstriyel Yapısal Elemanlarının Korozi ve Oksidasyon Aşınması.

2.5.4 Aşınmaya karşı önlemler

Son yılların literatür taramasından aşınmaya karşı alınan önlemlere hususunda yapılan çalışmalar incelendiğinde; Yüksek kromlu beyaz dökme demirler genel olarak iyi aşınma direnci ve tokluk özellikleri gösterirler. Bu nedenle geniş bir kullanım alanına sahiptirler.

Cevher kırıcıları, öğütücü değirmen bilyeleri, çeşitli astarlar, tarım alet ve makineleri, pistonlar ve dişlileri, çeşitli konveyörler, greyder bıçakları, pompalar, diskler, tuğla kalıpları, segmanlar ve çubuklar, madencilik ve mineral sanayi gibi yüksek aşınma direnci gerektiren yerlerde yüksek alaşımlı beyaz dökme demirler kullanılır. Mükemmel aşınma dirençleri esas olarak katılaşma mikro yapılarından kaynaklanmaktadır. Katılaşmaları sırasında, yüksek seviyelerde krom (%16-32), heterojen bir östenitik/martensitik dendritik yapıdaki birincil karbürlerle ilişkili olabilen veya olmayabilen ötektik M7C3-karbürlerin yüksek hacimli bir fraksiyonunun oluşumuna yol açar. Genel olarak, yaygın beyaz yüksek kromlu dökme demirde, molibden içeriği, perlitik dönüşümü önlemek için ağırlıkça %3'ten (ağırlıkça) azdır. Ağırlıkça %3'ten fazla miktarlarda molibden eklenmesiyle, yüksek sıcaklıktaki aşınma direncini büyük ölçüde arttıran yeni karbürlerin (M2C, M6C) oluştuğu ve büyük karbürlerin aşınma direncine önemli etkisi olduğu tespit edilmiştir [88].

Diğer bir yöntemde yüzeyde yüksek sertliklere ulaşılabilen Niyobyum karbür gibi kaplamalar yapmaktır. AISI 1040 çeliğine paket yöntemiyle termoreaktif difüzyon işlemi sırasıyla 800, 900 ve 1000 °C sıcaklıklarda 1-4 saat süreyle gerçekleştirilmiştir. Kaplama proses süresi ve sıcaklığına bağlı olarak altlık üzerinde oluşan niyobyum karbür tabakasının kalınlığı 3.4 ± 0.5 ile 12 ± 2 µm arasında değişmektedir. Çelik numune üzerindeki niyobyum karbür tabakaların sertliği 1792 HV'dir. Kaplamasız ve kaplamalı AISI 1040 çeliği için AISI D2 çeliğine karşı kuru aşınma testleri, disk üzerinde pim konfigürasyonunda ve 0,5, 1, 2 ve 5 m/s kayma hızı aralığında ve 15 N ve 30 N yük altında gerçekleştirilmiştir. Kaplamalı çelik için spesifik aşınma oranları yapılan test parametrelerine göre 20 – 100 kat arasında az çıkmıştır [89].

Yüksek kromlu beyaz dökme demirin aşındırıcı aşınma direncini arttırmak için yaklaşık 40-60 µm boyutunda FeTi, B2O3, Al ve FeW parçacıkları stokiometrik oranda karıştırılmış ve 1.200 °C'de sinterlenmiştir. Sinterlenmiş parçacıklar, erime sıcaklığının 50°C üzerinde erimiş yüksek kromlu beyaz dökme demire ağırlıkça %5 olarak ilave edilmiş ve 1.000 rpm'de karıştırılmıştır. Numuneler üç grupta incelenmiştir: (1) Al-FeTi-B2O3 parçacıklarından sinterlenmiş parçacıklar tarafından aşıl原因 yüksek Cr'li beyaz dökme demir; (2) Al-FeTi, B2O3 ve FeW parçacıklarından türetilen sinterlenmiş parçacıklar tarafından aşıl原因 yüksek Cr'li beyaz dökme demir ve (3) daha sonra homojenize edilen ikinci grubun numuneleri. Seramik parçacıkların mikrosertliği 2.800-

3.400 HV10 olarak ölçülmüştür. Yüksek kromlu beyaz dökme demirin aşındırıcı aşınma direnci üzerine sinterlenmiş parçacıkların hacim oranının etkisi belirlenmiştir. Partikül aşılamanın bir sonucu olarak kompozitlerin aşınma direnci ve sertliği önemli ölçüde iyileşmiştir. Homojenleştirme ısıl işleminin aşınmış numunelere uygulanması, homojen olarak dağılmış parçacıklara sahip bir mikro yapı üretmişlerdir [90].

2.6 Aşınma Ölçümü

Sürtünme hareketli parçalar arasında meydana gelir ve genellikle otomobillerdeki güç aktarma organları gibi çalışma sırasında birbiriyle temas eden parçalarda analiz edilir. Sürtünme katsayısı: Temas yüzeyinin sürtünme kuvveti üzerindeki etkisini gösteren bir değerdir. Herhangi bir birimi yoktur ve μ (mu) ile gösterilir. Dinamik sürtünme katsayısı ve statik sürtünme katsayısı olarak sınıflandırılan değer, nesneye ve yüzey işlemine bağlı olarak değişir. Sürtünme bu parçalarda ısı oluşumuna ve aşınmaya neden olur. Sürtünmeden kaynaklanan ısı üretimi ve aşınma, çoğu mekanik sistem arızasından sorumludur ve bu tür arızalardan kaynaklanan ekonomik kayıplar küçük değildir. Bu kayıpları azaltmak için, parça malzemelerini ve özelliklerini değerlendirmek için tribolojik testler yapılır. Bir sürtünme testi, bir aşınma direnci testi ile birlikte sürtünme özelliklerini ölçer ve sonuç genellikle sürtünme katsayısı kullanılarak hesaplanır. Öte yandan aşınma testi, sürtünmeden kaynaklanan koşullarda meydana gelen değişiklikleri ölçer ve etkileşen yüzeylerdeki deformasyon, çizik ve girintilerden sonuç elde edilir. Sürtünme katsayısını ölçmenin birkaç yolu vardır: sürtünme kuvvetini bir gösterge ile ölçerek, tahrik eden motorun yük gücünü ölçerek ve dönüştürerek, sürtünme ile titreşim sönümleme davranışından hesaplayarak ve eğimli bir yüzeye yerleştirilen bir nesnenin kaymaya başladığı açıya dayalı olarak maksimum statik sürtünme kuvveti hesaplanarak. Bu testler sadece aşınma ve sürtünmeyi değil aynı zamanda yağlayıcıların etkinliğini ve bozulmasını da kontrol eder [139].

Sürtünme, malzemelerin bozulmasına neden olan baskın faktör olduğunda, aşınma ve aşınma testi, malzemeleri veya kaplamaları karşılaştırmak için malzemeler hakkında veriler elde edilmesini sağlamaktadır ve sürtünen veya sürtünecek malzemelerin kullanım ömürlerinin tahmin edilmesine yardımcı olabilir. Bu özellik kestirimci bakımın en temel girdilerinden biridir. Aşınma testi, katı malzemelerin aşındırıcı direncini test etmek için kullanılır. Metaller, kompozitler, seramikler ve kalın (kaynak kaplamaları ve termal

sprey) kaplamalar gibi malzemeler bu yöntemlerle test edilebilir. Aşınma testinin amacı, malzemeleri belirli bir dizi koşul altında çizilme aşınmasına karşı dirençlerine göre tekrarlanabilir bir şekilde sıralayacak verileri üretmektir.

Aşınma test yöntemlerinin kullanılanlardan önemlileri: Pim aşınması (ASTM G132), iki pim numunesi kullanılarak gerçekleştirilir; konu materyali ve bir referans materyali. Düz bir yüzey üzerine monte edilen ve bu yüzey tarafından desteklenen aşındırıcı bir yüzeye dik olarak bir pim yerleştirilir. Pim aşınma test makinesi, aşındırıcı yüzey ile pim yüzeyi arasında nispi hareketle aşınmayı sağlamaktadır.

Düşen kum aşınması (ASTM D968), organik kaplamaların düşen kuma karşı direncini belirlemek için kullanılır. Kaplamalar tipik olarak testten önce cam veya metal gibi düz bir sert yüzeye uygulanmaktadır.

RCA aşınması (ASTM F2357), bir Norman Takım Makinesi kullanılarak gerçekleştirilir. Basılı membran anahtarlarıdaki mürekkepler ve kaplamalar, en yaygın olarak insan parmağı olmak üzere tekrarlanan aşındırıcı kuvvetlerden etkilenir. Görünür aşınmaya katkıda bulunan diğer koşullar arasında temizlik, silme, ovalama, nakliye, depolama ve kaza sonucu oluşan hasar yer almaktadır.

Disk üzerinde pim aşınması (ASTM G99, ASTM G133 ve ASTM F732), aşınma oranları ve sürtünme kuvveti katsayıları dahil olmak üzere çeşitli özellikleri belirlemek için iki malzemenin aşındırılmasını içerir - bir malzeme bir pime, diğeri bir diske işlenir - . Disk üzerinde pim, "gerçek yaşam" aşınma koşullarını daha doğru bir şekilde simüle etmek için yüksek sıcaklıklarda veya batık ortamlarda gerçekleştirilebilir [140].

Malzemenin sürtünme ve aşınma davranışı tespit etmek için çeşitli standartlar kabul edilmiştir. Pim üzeri disk sürtünme aşınma test makinesi için genellikle ASTM G99 ve DIN 50324 standartları kullanılmaktadır. Bu standartlara göre aşınma "kullanılan malzemelerin başka malzemeler ile (katı, sıvı veya gaz) teması neticesinde mekanik etkilerin yüzeyden küçük parçacıklar ayırması sonucu meydana gelen ve istenmeyen yüzey bozulması" olarak belirtilmiştir. Fren diskleri ile balata ilişkisinde sürtünmenin artırılması istenirken motor ve yürüyen aksamalarda tam tersine sürtünmenin azaltılması parça ömrü ve enerjiyi boşa harcamamak için istenmez. Bu konularda ihtiyaç duyulan sürtünme ve aşınma ile ilgili çeşitli testler için özellikle ASTM standartlar geliştirmiştir [122].

Aşınma testlerinin yapılmasının birkaç farklı nedeni vardır. Bunlar:

1. Malzemelerin aşınmasında meydana gelen mekanizmalar hakkında temel bilgileri edinmek. Bu çalışmalar normalde laboratuvarda basit test sistemleri ile yapılmaktadır.
2. Malzeme performansını karakterize etmek ve malzeme yapısındaki değişikliklerin aşınma ve sürtünmeyi nasıl etkileyebileceğini belirlemek. Bu çalışmalar normalde laboratuvarda basit test sistemleri ile yapılmaktadır.
3. Gerçek makine bileşenleri için malzeme seçimine bir kılavuz olarak hizmet içi koşulları simüle etmeyi amaçlayan basit laboratuvar testleri kullanarak malzemelerin aşınma performansını karşılaştırmak.
4. Bileşenlerin montajlarının yeni bileşen geliştirmede tezgâhta test edildiği bileşen denemeleri yapmak.
5. Yeni bileşenlerin (veya yeni malzemelerden bileşenlerin) amaçlanan nihai uygulamada gerçek hayattaki uygulamadan daha iyi kontrollü koşullarda test edildiği prototip testi yapmak.
6. Gerçek yaşam durumlarında sahadaki olası performansı belirlemek.
7. Makine arızasının nedenini belirlemek için sorun gidermek

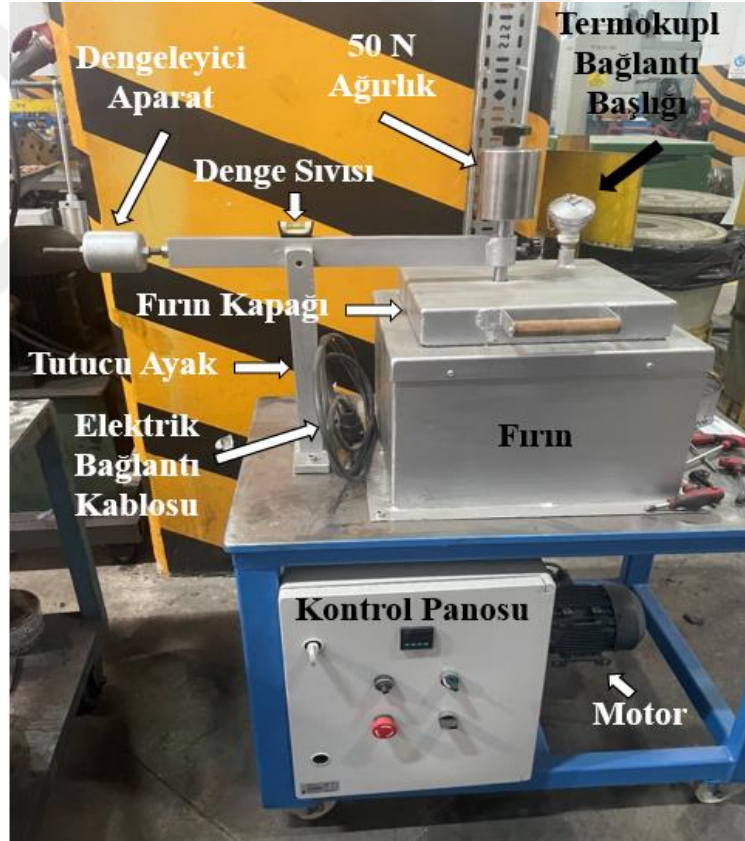
Literatürde farklı test yöntemlerinin listelenme sıklığı incelendiğinde, disk üzerinde pim ve pistonlu testler gibi kayma aşınma testleri açık farkla en sık alıntılanan testler olmuştur.

Yüksek sıcaklıktaki aşınma mekanizması oksidatif aşınma olarak yorumlanmaktadır. Oksitlerin üzerindeki çatlaklardan dolayı, delaminasyona yatkın oldukları ve bu şekilde koptukları gözlemlenmiştir. Yüksek sıcaklıkta yapılan testlerde oksitlenme gözle görülebilmektedir. Oda sıcaklığında oksitlenmenin oldukça az olduğu görülmektedir. Stellite 6 numunelerinde Stellite 12 numunelerine göre daha az katmer parçalı deformasyonlar (flaking) olduğu, Stellite 6'da daha az plastik deformasyon, Stellite 12'de daha çok plastik deformasyon olduğu şeklinde açıklanabilmektedir. Parçalar üzerinde krom oksit ve kobalt oksitler oluşmuştur ve demir oksit belirlenmiştir. Demir oksitlerin test sırasında kullanılan çelik toptan kaynaklandığı anlaşılmıştır [113].

BÖLÜM 3 – DENEYSEL UYGULAMA VE TESTLERİ

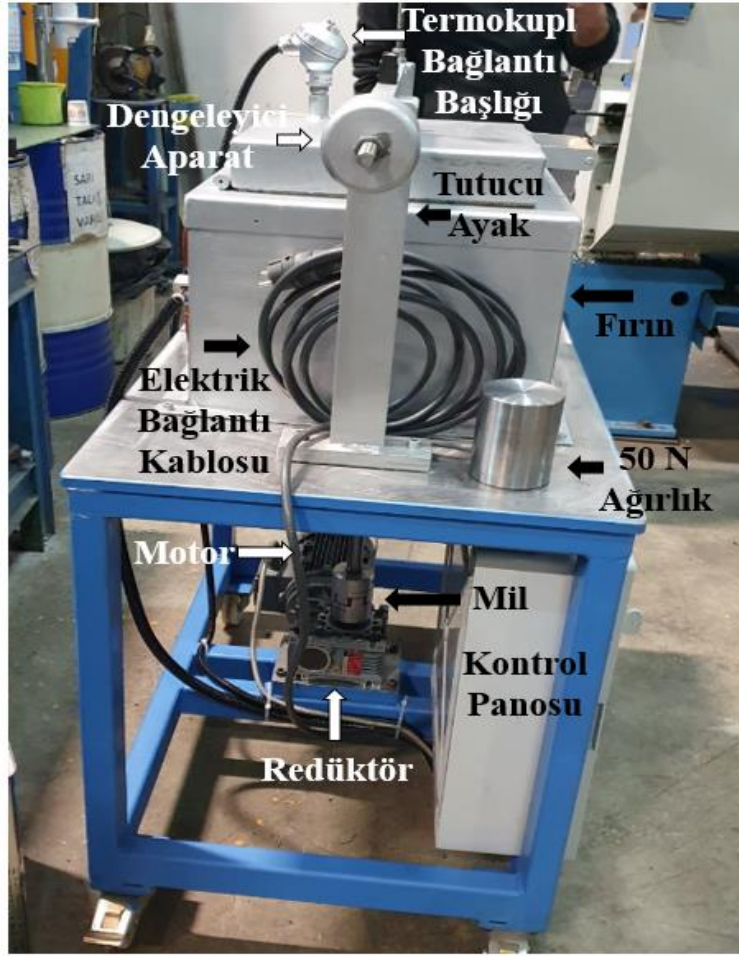
3.1 Deneysel çalışmada kullanılan Makine

Deneyde kullanılan “ Disk üzerinde Pim” (Pin On Disk) makinesi deney uygulamaları için Otimsa firmasında tasarlanmıştır ve üretilmiştir. Deney ve makinesinin tasarımı dünyada en çok kabul görmüş standartlardan olan ASTM G 99 – 95a (Reapproved 2000) standartı (Eklerde verilmiştir) esas alınarak yapılmıştır. Yüksek sıcaklıklarda testler yapılacağı için ısıtma sistemi ve makinenin detay tasarımı daha önce aynı yöntemi kullanan, sıcak aşındırma uygulaması yapılmış bir disk üzerinde pim makine örneğinden faydalanılarak destek aldığımız firma ile birlikte tasarımı tamamlanmıştır. Şekil 3,1’de Disk üzerinde Pim aşındırma makinesinin fotoğrafı gösterilmiştir.



Şekil 3.1 Deneylerde Kullanılan Aşındırma Makinesi.

Makinenin motor ve redüktör grubunun daha iyi görülebilmesi için Şekil 3.2’de yandan görünüşünün fotoğrafı gösterilmiştir.



Şekil 3.2 Deneylerde Kullanılan Disk Üzerinde Pim Makinesinin Yandan Görünüşü.

Deneyde kullanılan makine 0°C ila 1000°C arası sıcaklığa Şekil 3,3’ de gösterilen kontrol panosundaki termostattan ayarlanmaktadır. Şekilde görüleceği gibi termostat 450°C’ye ayarlanmış, şu andaki sıcaklık 35°C’de, ısıtmaya devam edecektir. Termostatın hassasiyeti artan sıcaklığa göre artı eksi 10°C civarındadır. Göstergesi sayısal olduğu için deneylerin sıcaklıklarının ayarlanması hiç problem olmamıştır.



Şekil 3.3 Deneylerde Kullanılan Disk Üzerinde Pim Makinesinin Kontrol Paneli.

Makinenin devir ayarı Şekil 3.3 gösterilen ayar düğmesi ile 30 d/dak ile 600 d/dak arasına ayar yapabilmektedir. Tüm deneyler sabit 130 d/dak hız ile yapılmıştır. Deneylerde pime 50 Newton baskı kuvvetini veren ağırlık Şekil 3.4’ te gösterilmiştir. Tüm deneyler 50N baskı altında yapılmıştır.



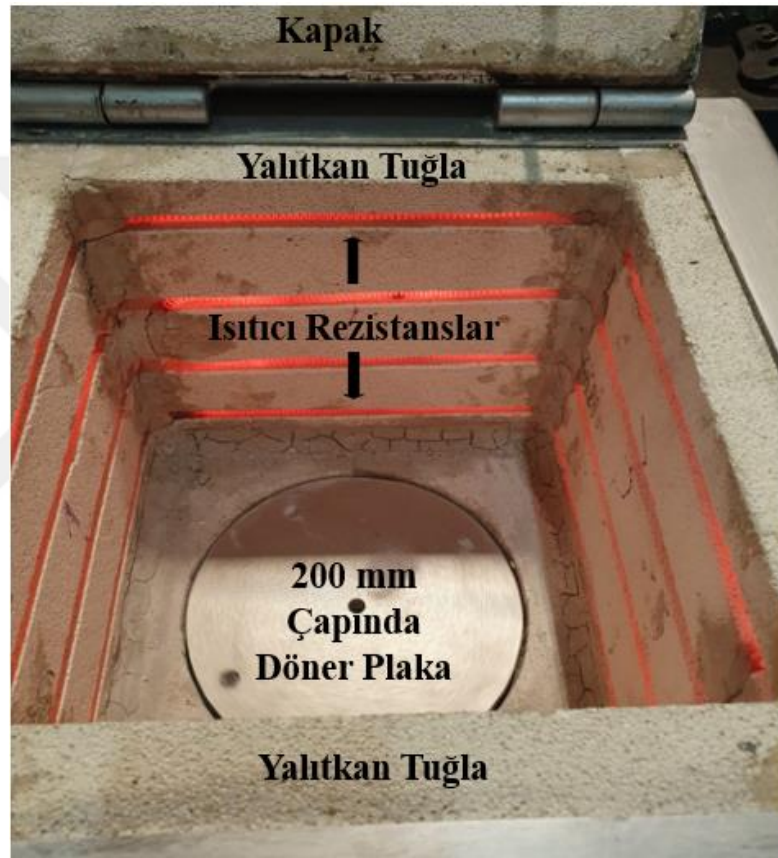
(a)

(b)

Şekil 3.4 (a) 50N Ağırlığın Makineye Bağlanmadan Önceki Görüntüsü ve (b) 50N Ağırlığın Makineye Bağlandıktan Sonraki Görüntüsü.

Deneysel çalışmada tasarımı yapılan makine; motor bloğu, redüktör, fırın, termokupl, mil, döner plaka, pim tutucu, terazi, dengeleyici ağırlık ve pimi basan ağırlıktan oluşmaktadır.

800°C de yapılan deneysel uygulamalarda, motorun ısıya dayanması sonucu motora denk gelecek şekilde 8 atm hava püskürten tabanca sabitlenmiştir ve yüksek sıcaklık deneylerine uygun olması için bu şekilde devam edilmiştir. Makinenin döner plakası ve ısıtıcıların çalışması Şekil 3.5 te gösterilmiştir.



Şekil 3.5 Makinenin Döner Plakası ve Isıtıcıların Çalışırken Görünüşü.

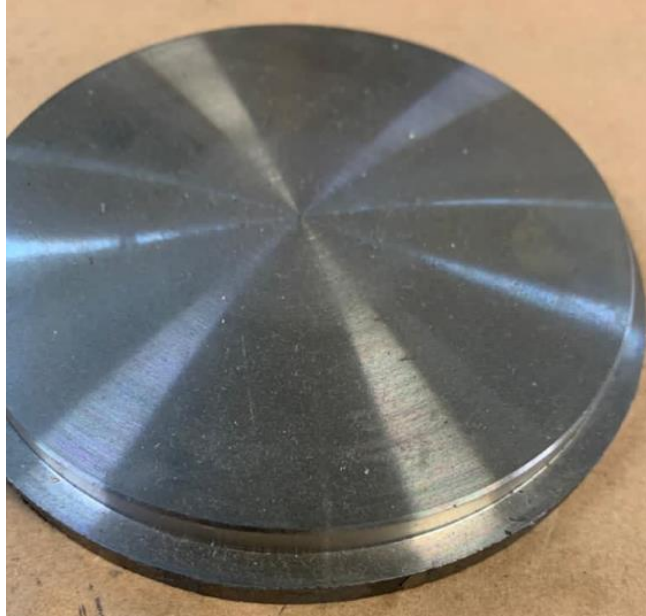
3.2 Deneysel Çalışmada AISI 4140 Disk Kullanımı

Deneylerde kullanılacak AISI 4140 diskler 100mm çapındaki silindirik kütükten 12'şer mm olarak kesilip taşlanmıştır. Şekil 3.6'da deneyde kullanılan AISI 4140 diskler toplu halde gösterilmiştir.

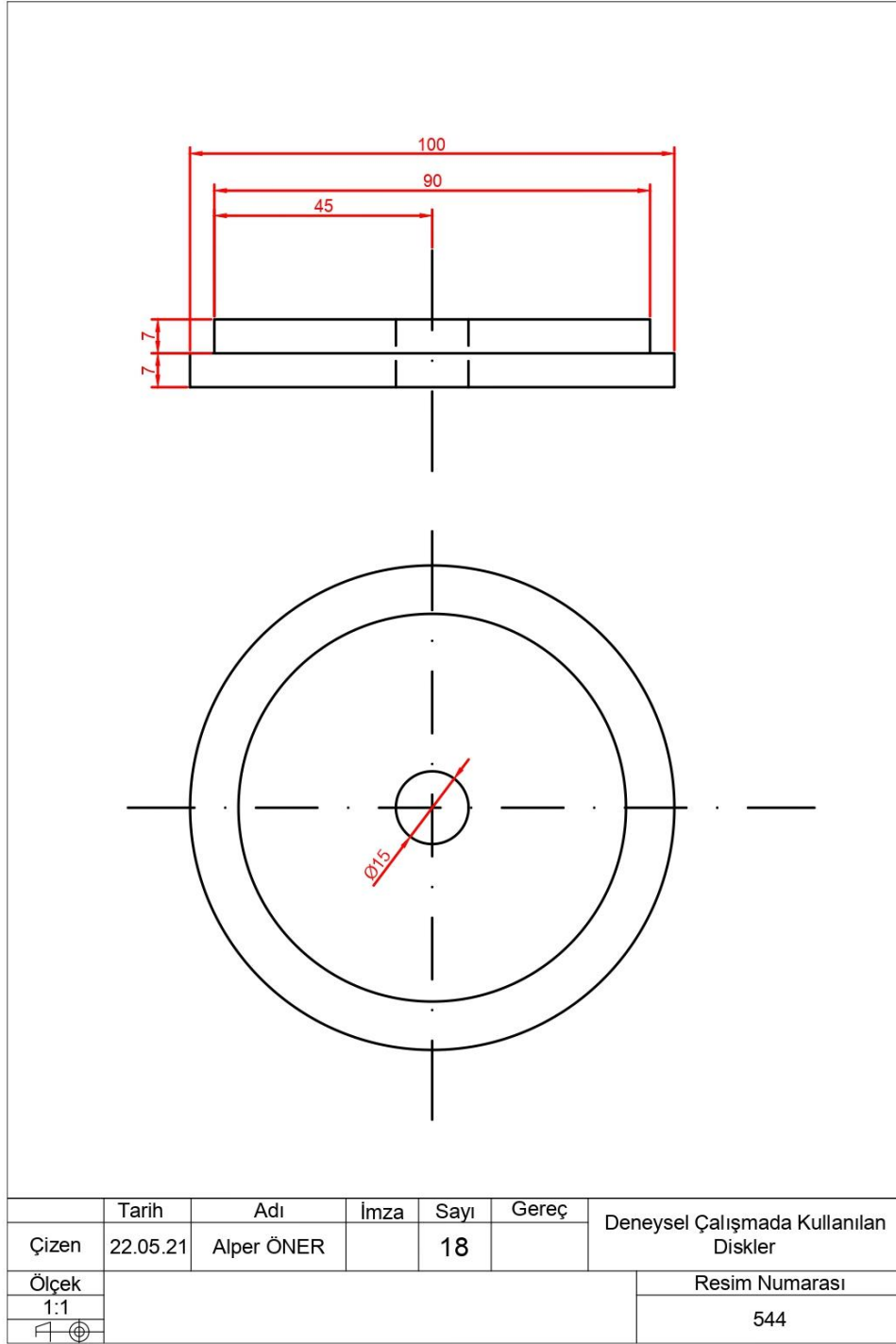


Şekil 3.6 Disklerin Toplu Halde Görünümü.

Deneysel çalışma için hazırlanan AISI 4140 çelik disklerden 18 adedi alınıp kenarları tornada 5 mm eninde 6 mm derinliğinde işlenmek sureti ile kenar oluşturulmuştur. Şekil 3.7’de deneysel çalışmada kullanılan AISI 4140 disk gösterilmiştir. Şekil 3.8’de diskin teknik çizimi gösterilmiştir.



Şekil 3.7 Bir Adet Kaplamasız Diskin Fotoğrafı.



Şekil 3.8 Bir Adet Diskin Teknik Çizimi.

3.2.1 AISI disklere Süperalaşım kaplanması

Bu disklerden altı adedi alınarak 3mm hatveli birbirine geçmeli olarak taşlandıktan sonra 0,7 mm kalacak şekilde yüksek oranlarda nikel ve krom içeren demir süper alaşımı tozu kullanılarak lazer eritme biriktirme yöntemiyle kaplanmıştır. Sonra taşlanmaya gönderilmek üzere kenara konmuştur. Şekil 3.9’da Demir süper alaşım kaplanmış diskler görülmektedir.



Şekil 3.9 Demir Süper Alaşımı Kaplanmış Diskler.

3.2.2 AISI 4140 disklere Stellite süperalaşım kaplanması;

En son olarak bu disklerden altı adet alınarak 3mm hatveli birbirine geçmeli olarak taşlandıktan sonra 0,7 mm kalacak şekilde Stellite kobalt süper alaşımı tozu kullanılarak lazer eritme biriktirme yöntemiyle kaplanmıştır. Şekil 3,9’da kobalt süper alaşım kaplanmış diskler görülmektedir.



Şekil 3.10 Kobalt Esaslı Stellite Süper Alaşımı Kaplanmış Diskler.

Sonra bu kobalt (Co) süper alaşımı kaplanmış altı disk ve önceden demir süper alaşımı kaplanmış altı diskle beraber taşlanmaya gönderilmiştir.

3.3 Deneysel Çalışmada Kullanılan WT-20 Tungsten Pim

Deneyde kullanılan pimler EN 26848 standartında 4mm çapında WT20 Tungsten Elektrottur. Pim'in kimyasal yapısı ve fiziksel özellikleri Tablo 3.1'de gösterilmiştir

Tablo 3.1 Tungsten Elektrot Pim'in Özellikleri

Tanımlama		Kimyasal Yapısı		Fiziksel Özellikler			Uç Rengi
ISO 6848	AWS A5.12	Oksit ilavesi %	Tungsten %	Erime Noktası °C	Kaynama Noktası °C	Özgül Ağırlık gr/cm ³	
WT-20	EWTh-2	1,7 - 2,2	≥ 97,3	~ 3400	~ 5900	19,3	Kırmızı

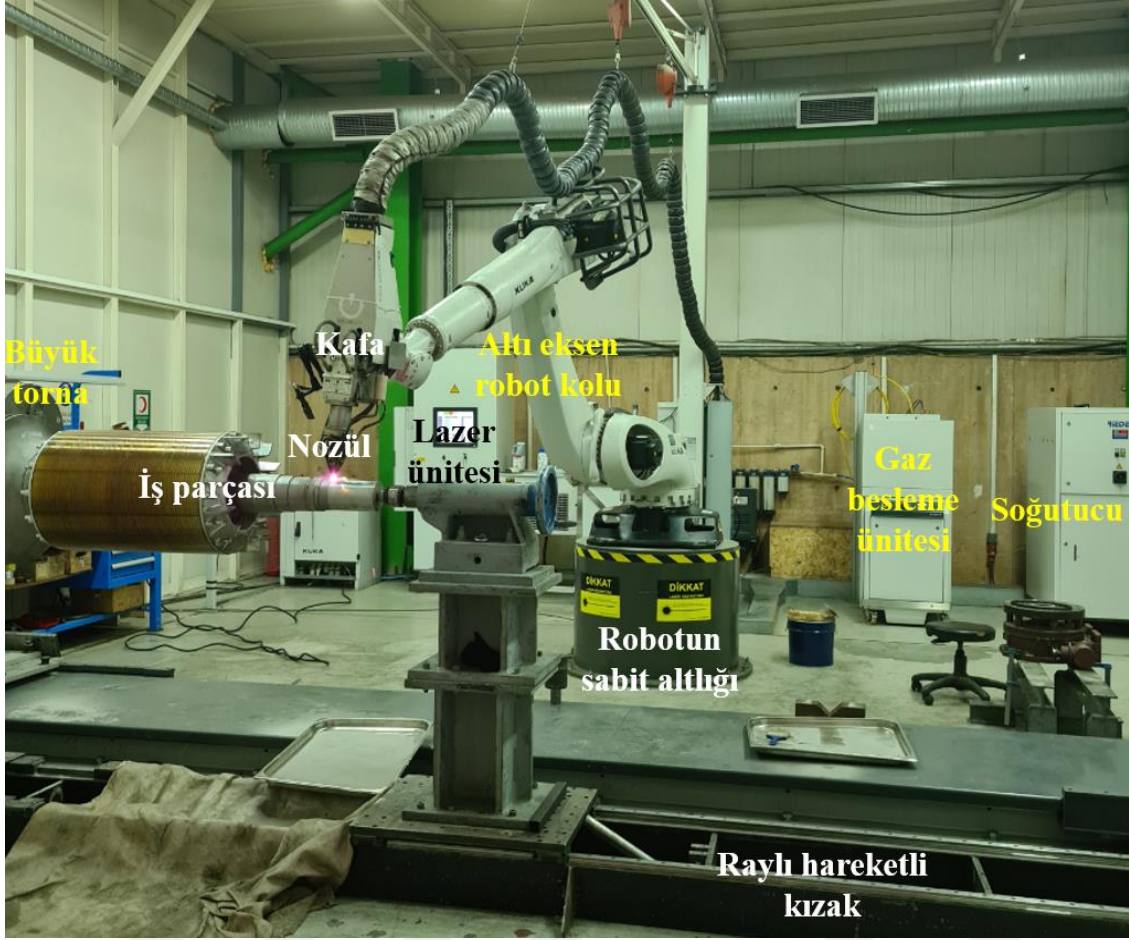
Tungsten elektrotlar pim olarak kullanılmadan önce boyları 55-60 mm arasında kesilip çok hassas terazide tartıldıktan sonra kullanılmıştır. Şekil 3.10'da deneysel çalışmada kullanılan WT-20 Tungsten Elektrot pimler gösterilmiştir.



Şekil 3.11 Deneylerde Pim Olarak Kullanılan WT-20 Tungsten Elektrotlar.

3.4 LMD - Laser Melting Deposition yöntemi ile kaplama ve Deneysel Çalışmada Kullanılan Kuka Robot Erlazer TCH-C Lazer Ünitesi

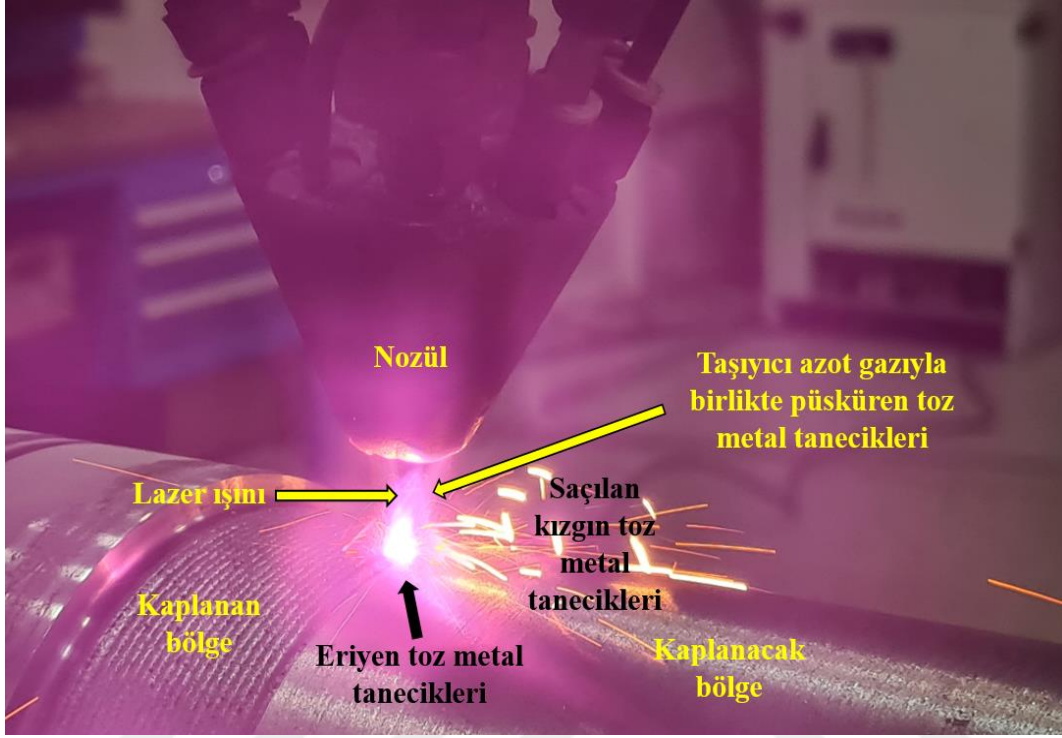
Deneylerde kullanılan Lazer Eritme Biriktirme yöntemi ile çalışan, lazer kaplama ve lazer sertleştirme yapabilen altı eksenli Kuka robota bağlı Erlazer TCH-C lazer ünitesinden ulaşmaktadır. Ayrıca yardımcı üniteler olarak kaplanacak, tamir olacak veya sertleştirilecek nesneleri bağlayabilmek, döndürebilmek ve çeşitli hareket ve çevirmeleri yaptırabilmek için yerde ray sistemi, torna sistemi, inert gaz besleme sistemi, metal tozları şartlandırma ve besleme sistemi gibi birçok sistemde mevcuttur. Şekil 3.12'de lazer eritme biriktirme (LMD) sisteminin çalışma hali gösterilmiştir.



Şekil 3.12 Lazer Eritme Biriktirme (LMD) Makine ve Sisteminin Çalışırken Görünüşü.

Sistemin çalışması: Erlaser Hard-Clad kafa noktaya belli bir çapta (5-60 mm) yansıtılır. Bulunan yeri tam ısıtmaya başladığında ortamı oksijensiz bırakacak inert gaz aynı zamanda da kaplanacak toz metali de taşıyarak ortama püskürtülür. Metal tozları yüzeye çarptığı anda yüzeyi ısıtmakta olan lazerin etkisiyle eriyerek birikmeye başlarlar (biriktirme yeteneği 0,2 mm ila 2 mm arasındadır.) buradaki ilerleme zamanı ve püskürtülen toz miktarı ile kaplama kalınlığı püskürtme ucu çapı ve püskürtme açısı ve yakınlığı ile de çapı belirlenir. Bu bölümde Kuka robotun çalışma sınırları 3 m çapındadır. Bu ölçülerde geniş olduğu için bir oda içine hem çevre emniyeti açısından hem de sistemi çevreden koruma açısından bina içinde ayrı bir bölüm yapılarak korumaya alınmıştır. Deneylerde inert gaz olarak Argon kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan demir esaslı ve kobalt esaslı Stellite süper alaşımlar dahil firmada kullanılan metal tozların tamamı yurt dışından temin edilmektedir. Deneylerde kullanılan diskleri rahatlıkla üretebildiği gibi

esnek bir sistemi olduğu için otomotiv, savunma sanayinden kalıpcılığa kadar her alanda hizmet vermektedir. Deneyde kullanılan LMD sisteminin lazer ile kaplama yapılırken yakın fotoğrafı Şekil 3.13'te verilmiştir. Ayrıca eklere videosu eklenmiştir.



Şekil 3.13 Lazer Eritme Biriktirme (LMD) Makinesi Kaplama İşlemi Uygularken.

3.5 Deneysel çalışmada kullanılan Test Makinesinin Sıcaklık Yükseltmesi

Test cihazının sıcaklığını ayarlayan ve değerin görüldüğü ekran cihazın çalıştırıldığı bölgede bulunan termostattır. Şekil 3.14'te görüldüğü gibi ekranda iki sıcaklık değeri mevcuttur. Üst değer ortam sıcaklığını alt değer istenen ortam sıcaklık değerini göstermektedir. İstenen sıcaklık ekrana monte edilmiş düğmelerle ayarlanmaktadır. Sıcaklık yükselmeye devam ederken sıcaklık, ısıtmak için kullanılan veya ortamın, yüzeyin veya ölçülen herhangi bir bölgenin sıcaklığını ölçmek için kullanılan bir parçanın sıcaklığı istenen değeri geçebilmektedir. Bu da bölüm 3.1 de belirtildiği gibi aç kapa prensibiyle ve alt - üst sınır değerlerinde çalışan termostanın toleransına bağlıdır. Bu tolerans değerleri de çalışan sıcaklığa göre değişmektedir. Şekil 3.14' te görüldüğü gibi 503°C değeri buna bir örnektir. 500°C'de en fazla 505°C ye yükselmiştir. En düşük

497°C ye soğumuştur. Şekil 3.14'te 500°C'ye ayarlanmış değerin 503°C'ye çıktığı an gösterilmektedir.



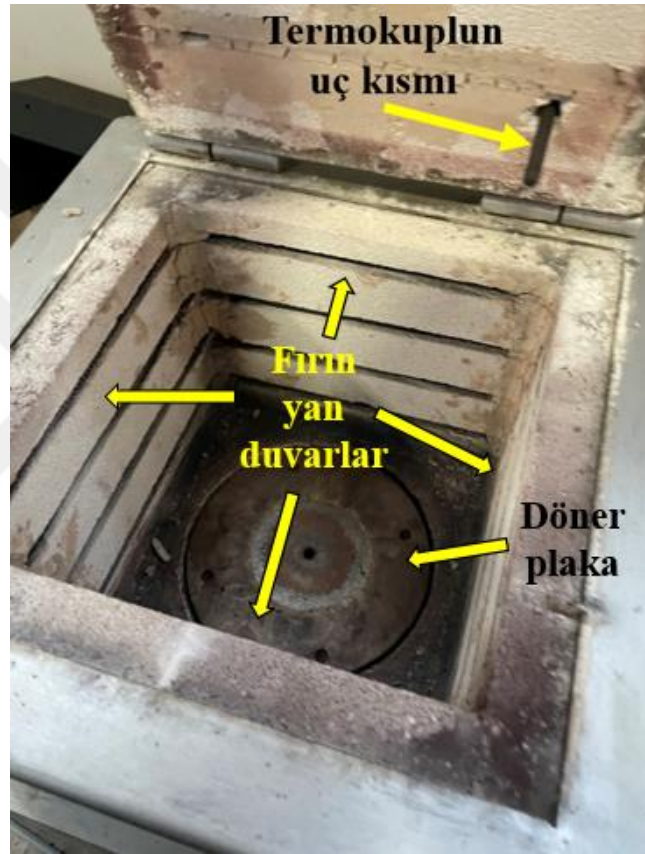
Şekil 3.14 DeneySEL Uygulamada Sıcaklığı 500°C'ye Ayarlanmış ve Ortam Isısı Olan 503°C'yi Gösteren Ekran.

DeneySEL çalışma esnasında, test cihazında ortamın belirlenen sıcaklık değerlerine (200°C-800°C) çıkması ve deney süresince istenen değerde olması istenmektedir. Uygulama çalışmasında sıcaklığın uygun değerlerde çalıştığı gözlenmiştir. Şekil 3.15'te deneySEL çalışma test cihazında kullanılan Termokupl bağlı durumda gösterilmiştir.



Şekil 3.15 DeneySEL Çalışmanın Test Cihazında Kullanılan Termokuplun Bağlantı Kısımları.

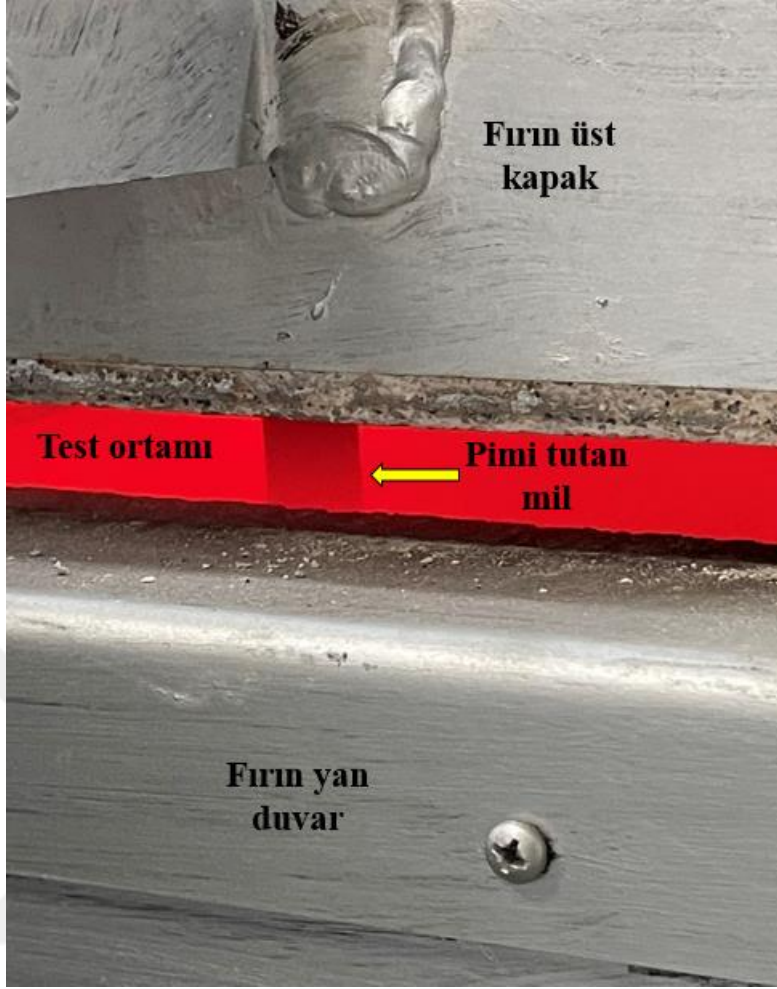
Deneyisel çalışmada, test cihazında ortamın belirlenen sıcaklık değerlerinde çalışmasını sağlayan termostat sıcaklık ölçüm değerlerini test ortamında ucu bulunan kalibresi önceden yapılmış ASL-TKS-150-8 R1/2 tipi 0 °C - 1000°C sınırları arasında çalışabilen paslanmaz çelik termokupl ile sağlanmıştır. Termokupl makineye ölçüm ucu test ortamında olacak şekilde yerleştirilmiştir. Şekil 3.16’da termokuplun test ortamındaki ortam sıcaklığını ölçen ve makine içine sarkıtılan Termokupl ucu gösterilmiştir.



Şekil 3.16 Deneyisel Çalışmada Termokupl'ın Ortam Sıcaklığını Ölçen Termokupl Ucu Görünüşü.

3.5.1 Deneyisel Çalışmada 800°C Test Ortamı

Deneylerde, özellikle 800°C de yapılan deneylerde ortamın yüksek sıcaklığa belirgin bir şekilde ısıtılmış olduğu görülmektedir. 800°C gibi yüksek bir sıcaklık değeri test ortamını kırmızı renge çevirmektedir. Bu durumun 7 saat boyunca sürekli etki etmesi altında pimin 50N kuvvetle sürtünmesi testteki disk malzemesi ve kaplama için zor şartları oluşturmuştur. Bu sıcaklıkta Şekil 3.17’de verilen görüntü incelendiğinde gölge gibi gözüken mil hariç kızılıktan neredeyse hiçbir şey görülememektedir.



Şekil 3.17 800°C Olan Test Ortamının Kapak Aralığından Görünüşü.

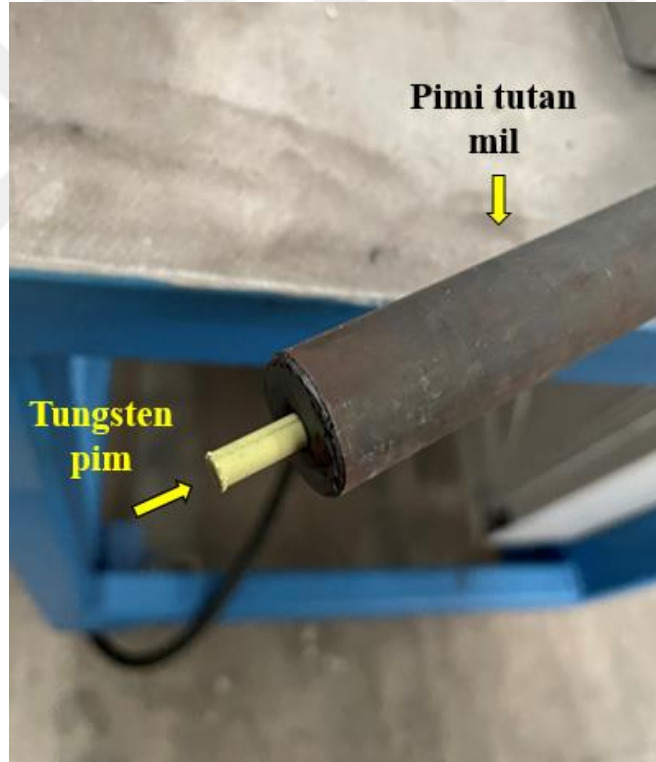
3.6 Deneysel Çalışmada Sürtünme İşlemi

Sürtünme genel olarak makinelerde de, parçalarda da etki eden bir kuvvet türü olduğu için deneylerde de tercih edilen bir yöntemdir. Uygulama çalışmasında sürtünme ile parçalara kaplanmış malzemelerin deneyleri yapılmıştır. Uygulama çalışmasında kullanılan disk üzerinde pim sisteminde disk olan parça dönmektedir ve parçaya yukarıdan sürtünme yaratacak pim 50N kuvvetle temas etmektedir. Bu her iki parçada ısıyı arttırılabilen bir ısıtıcı resistanslarla çevrili bir nevi fırın gibi ortamda bulunmaktadır. Diski çeviren sistem fırın gibi olan kapalı bölümün dışında da olsa yüksek ısıya dayanıklı olarak seçilmiştir. Sürtünecek pimin malzemesi yüksek sıcaklığa dayanabildiği için tungsten seçilmiştir ve her deneyde tungsten pim olarak kullanılmıştır. Şekil 3.18’de deneysel çalışmada kullanılmış olan tungsten pimin görüntüsü verilmiştir.



Şekil 3.18 Tungsten Eletrottan Kesilen ve Deneyde Kullanılan Tungsten Pim.

Tungsten, yüksek sıcaklığa dayanabilme özelliğine sahip olsa da yüksek sıcaklıklarda çeşitli oksitlenme ve diğer nedenlerden renginde değişim olmuştur. Şekil 3.19’da yüksek sıcaklıkta yapılan bir deneysel uygulamadan sonra tungsten pimin görünüşü gösterilmiştir.

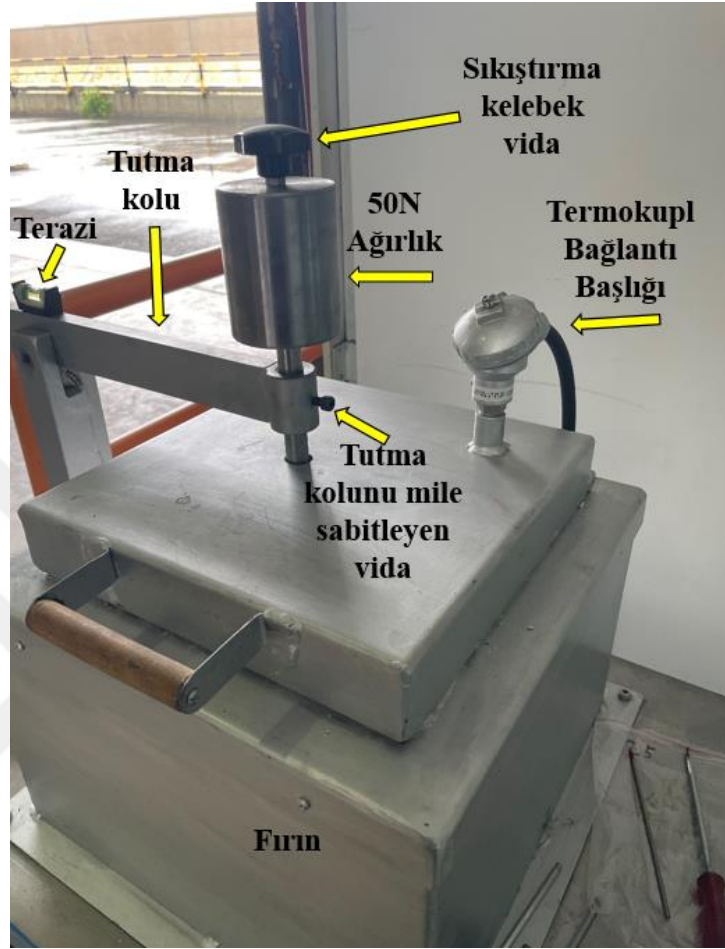


Şekil 3.19 Deneysel Çalışmada 800°C Kullanılmış Tungsten Pim.

3.6.1 Sürtünme Deney Aparatı

Deneysel çalışmada, pimin diske temas etmesi ve sürtünmenin sağlanması için pimin bağlı olduğu çelik milin üst tarafına taşıyıcı kol mil ve pimle beraber dengeye alındıktan sonra sabitlenmektedir. Sonra üzerlerine 50N baskı kuvveti verecek olan ağırlık takılıp

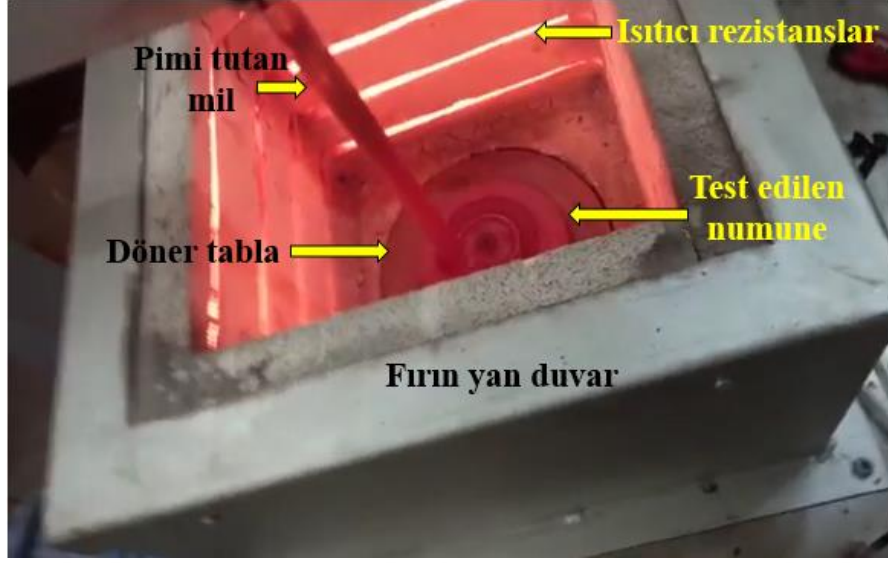
sıkıştırılmaktadır. Şekil 3.20’de deneysel çalışmada kullanılan ağırlık ve sıkıştırma keleşbeği gösterilmiştir.



Şekil 3.20 Deneysel Çalışmada Sürtünmenin Sürekli 50N Kuvvetle Olmasını Sağlayan Ağır Parça.

Yüksek sıcaklıklarda pimin diske sürekli 50N kuvvetle temas etmesini sağlamak için pimi tutan çelik milin kola kuvvetle sabitlenmesi vida yardımı ile yapılmış ve kapağa sıkışmaması için, genleşmeler dikkate alınarak gerekli boşluk bırakılmıştır.

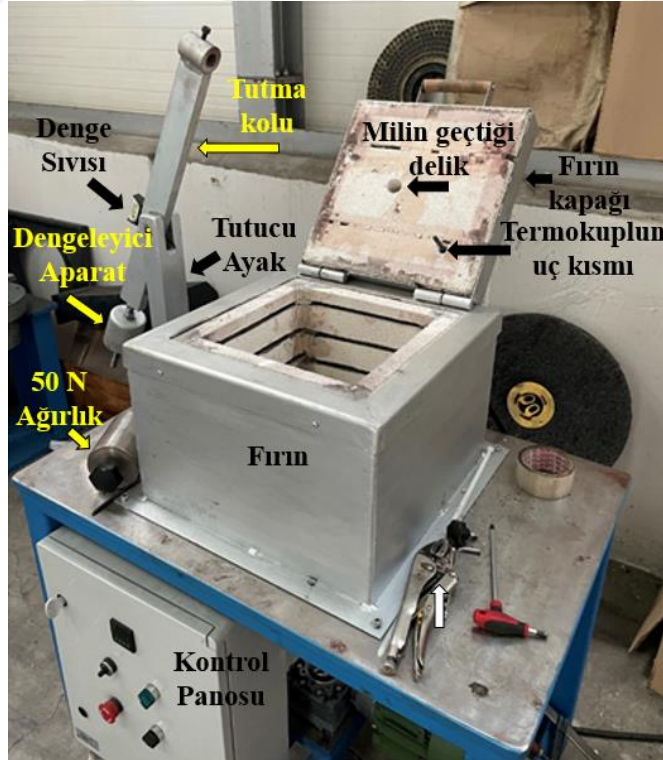
Deneysel çalışmada, 800°C sıcaklıkta test tamamlandıktan sonra çelik çubuk sökölüp kapak açılıp çelik çubuk tekrar takılıp vida ile sıkıştırılarak yüksek sıcaklıkta aşınmanın görüntüleri çekilmiş ve uygulama çalışması tamamlanmıştır. Deneysel çalışmanın uygulanmasında görüntü alınırken fırının üstünün yaklaşık 600°C civarında diskin sıcaklığı ise 650-700°C civarında bulunduğu varsayılmıştır. Disk hala şekilde de görölceği gibi kıvıl renktedir. Şekil 3.21’de deneylerde yüksek sıcaklıkta disk üzerinde pim makinesinde 7 saat deney sonunda oluşan sürtünme gösterilmiştir.



Şekil 3.21 Yüksek Sıcaklıkta Disk Üzerinde Pim Makinesinde Sürtünmenin Görünüşü.

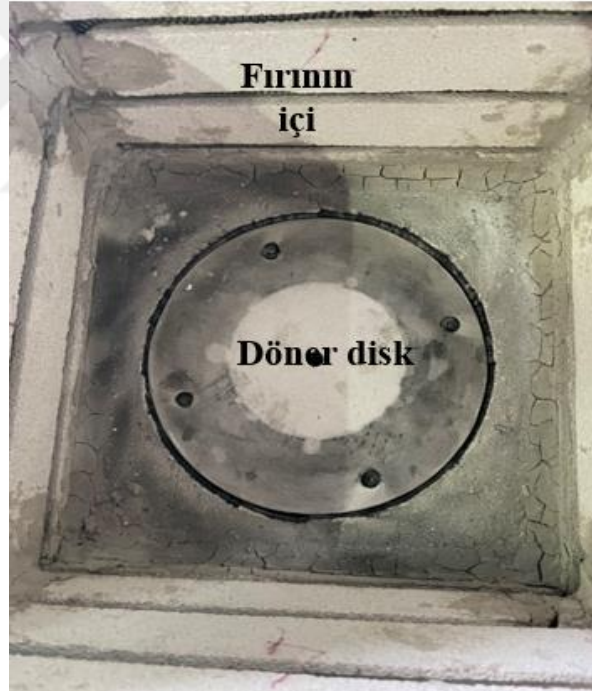
3.7 DENEYSEL UYGULAMA

Deneyisel uygulamada 18 adet Disk UNİQUTECH firmasında hazırlandı, 18 adet Pim atölye ortamında hazırlandı ve birçok aşamadan geçirilerek tamamlandı. Şekil 3.22’de deney uygulamasında kullanılan test cihazının deney öncesi durumu gösterilmiştir.



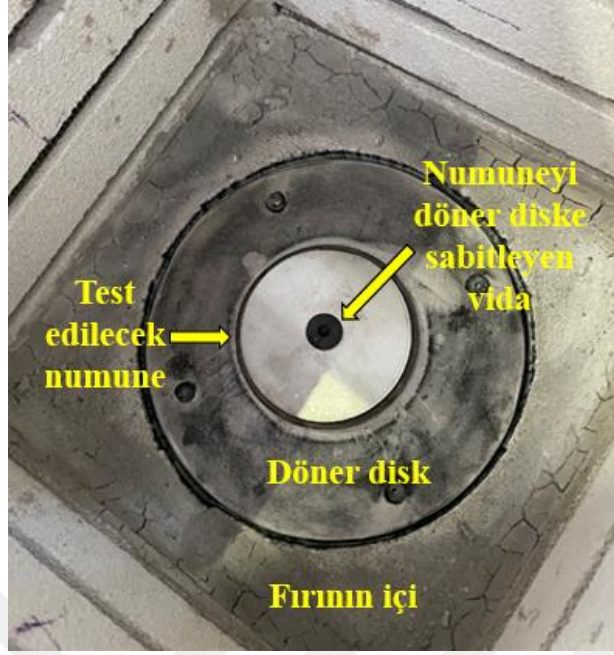
Şekil 3.22 Deneyisel Uygulamada Kullanılan Test Makinesi Deney Öncesi.

Deneyden önce 18 adet disk ve 18 adet pim numaralandırılarak plastik şeffaf torbalara konmuş karışıklık olmaması için dolaba konmuşlardır. Her deneyi yapılacak olan disk ve pim dolaptan alınıp makinenin başına getirilmiştir . Deney düzeneği hazırlanırken ilk adım Şekil 3.20’de verilen disk üzerinde pim test cihazının Şekil 3.23’ de verilen resimde gözüken içindeki 200 mm çapındaki döner diskin merkezindeki vida yerinden deney diskinin düzeneğe yerleştirilmesi ve vida ile diskin iyice sıkılmasıdır. Diskin iyi sıkılmaması deneyde aşınma izinin geniş bir çember oluşturması ve aşınmanın net ölçülememesi problemine yol açmaktadır. Bu sabitleme oda sıcaklığında yapıldığı için yeterli gözükse de yüksek sıcaklıklarda genişmeden dolayı gevşediği görülmüştür. Bu problem nedeniyle üç test tekrarlanmıştır. Diskin iyi sıkılamaması daha önemlisi iş kazasına neden olabilir. Deneysel uygulama çalışmasında kullanılan makinenin içerisine metal disklerin yerleştirildiği 100 mm çapında disk Şekil 3.23’te gösterilmiştir.



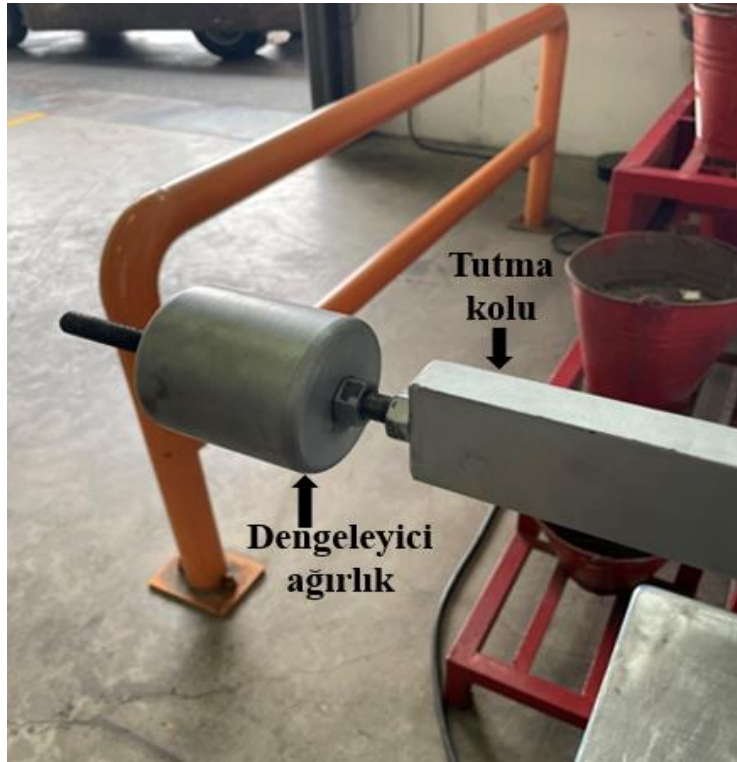
Şekil 3.23 Metal Disklerin Yerleştirildiği 100mm Çapındaki Diskin Görünüşü.

Deneysel uygulamada bütün diskler 8mm’lik alyen uçlu vida ile çok iyi bir şekilde sıkılarak sabitlenmiş olmalıdır. Şekil 3.24’te Deneysel uygulamada makine içerisinde vida ile disklerin sabitlenmiş görüntüsü gösterilmiştir.



Şekil 3.24 Deneyisel Çalışmada Deney Seti İçine Yerleştirilmiş ve Sabitlenmiş Deney Diski.

Deney disk bağlandıktan sonra dengeleyici ağırlığın bağlı olduğu kol, denge sıvısına bakılarak dengeleyicinin ileri veya geri hareketi ile dengeye getirilmiştir. Şekil 3.25'te deney setinde dengeleyici aparatın görünüşü gösterilmiştir.



Şekil 3.25 Deneyisel Uygulama Deney Seti Dengeleyici Aparatı.

Sistemde kullanılan mil ve mile bağlanan ağırlık aynı olduğu için dengeleyicinin her deneyde tekrarlanması gerekmemiştir. Sadece küçük oynatmalarla denge sağlanmıştır. Dengeleyici, dengeyi gösteren sıvıya göre ayarlanmaktadır.

Deneyde, dengeleyiciyi önce yerleştirmek ve denge sıvısındaki boşluğu dengeleyiciye yakın tutmak, mil ve ağırlık bağlandığında parçada hasara veya çiziciye neden olmaması açısından tercih edilmiştir.

Dengeleyici ayarlandıktan sonra, tungsten aşındırıcı uc mile bağlanmıştır. Hemen sonrasında da basma kuvveti yaratacak ağırlık mile bağlanmıştır. Ağırlığın önce bağlanma nedeni de parçada herhangi bir çizik oluşmamasıdır. Şekil 3.26’da deneysel uygulamada çelik mil ve mile vida ile bağlanmış tungsten pimin görüntüsü verilmiştir.



Şekil 3.26 Deney Seti Çelik Mil ve Bağlanmış Tungsten Pim.

Sürtünmeyi sağlayacak pimin bağlı olduğu çelik mil ve mil üstüne ağırlık sağlayacak parçanın kelebek vida bağlanması işlemi yapılmıştır. Bu iki parçanın toplam ağırlığı 5kg olarak ölçülmüştür ve deney setine uygundur. Şekil 3.27’de deney seti Mil-Kelebek vida ve ağırlık aparatının bağlandığı set gösterilmiştir.



Şekil 3.27 Deney Seti Mil, Kelebek Vida ve Ağırlık Aparatı.

Pim ve ağırlık çelik mile bağlandıktan sonra mil, terazi kolundan ve fırın kapağındaki delikten geçirilip yavaşça parçanın üzerine doğru indirilmiştir. Bu şekilde mil, sistem üzerinde teraziye bağlanarak sabitlenmiş olacaktır. Şekil 3.28’ de deneysel uygulamada teraziye bağlanmış ve sabit olarak hazırlanmış mil durumu gösterilmiştir.



Şekil 3.28 Deney Seti Üzerinde, Teraziye Bağlanmış ve Sabitlenmiş Mil.

Deney seti: Pimin parçaya temas ettiğinde denge gösterici sıvı kontrol edilmiştir. Sıvının içindeki hava iki çizginin arasına denk gelmişse mil, vida ile yandan sıkıca sabitlenmektedir. Şekil 3.29’da deney seti terazinin denge konumu gösterilmiştir.



Şekil 3.29 Deney Seti, Hava İki Çizginin Arasında – Terazi Denge Durumunda.

Denge tamamen sağlandıktan sonra makinenin devirinin ayarlanmasına başlanmıştır. ASTM G 99 – 95a (Reapproved 2000)E1 Standartına göre Disk üzerinde Pim deneyinin yapılacağı devirlerin en yavaş olanı 60 d/dak yakınında olan 130 d/dak seçilmiş ve Şekil 3.30’da gösterilen devir ayarlama düğmesi ve devir ayarlanmış ve fiili olarak kontrolü yapılmıştır. Burada yüksek sıcaklıklara çıkılacağı için devir yavaş olana göre seçilmiştir, yüksek devirlerde pim ve diskin sürtünmeden dolayı çok ısınmasından kaçınılmıştır. Tüm deneyler aynı devir ile yapılacağından diğer bir deyişle sabit devirde yapılacağından diğer deneylerde devir düğmesi kullanılarak devir ayarlama gerekmemiştir.



Şekil 3.30 Devir Ayarlama Düğmesi.

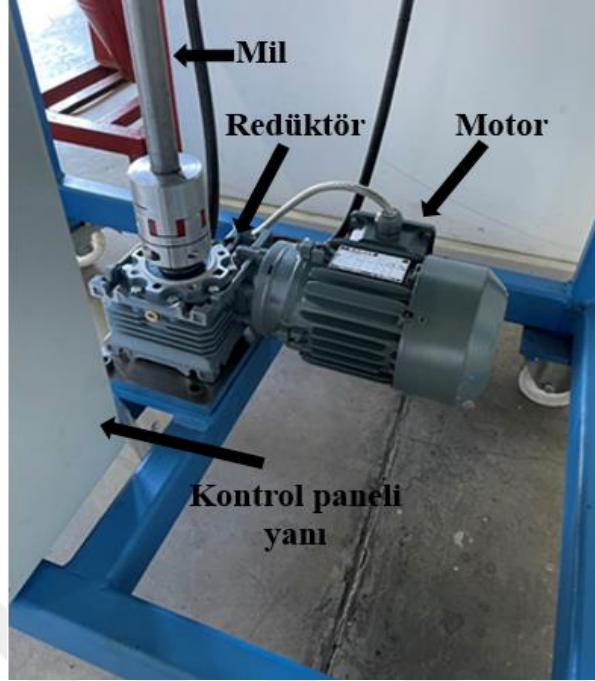
Devir ayarlandıktan sonra sıcaklık istenilen değere Şekil 3.31’de gösterilen panonun üstündeki sıcaklık rakamlarının olduğu termostatin altındaki dört adet siyah tuşlar vasıtası ile ayarlanmıştır. Sonra Şekil 3.31’de gösterilen (ışığı yanmakta olan) yeşil düğme çevrilerek ısıtıcılara elektrik verilmiştir. İstenen sıcaklığın yüksekliğine bağlı olarak deney ortamı ısınana kadar deney başlatılmamıştır. Deneysel çalışmada en yüksek sıcaklık 800°C olduğundan dolayı bu sıcaklıkta ortamın ısınması 30 dakika sürmüştür. Deneylerin daha sağlıklı olması için tüm deneyler belirlendikleri sıcaklıklarda 30 dakika bekletilmiştir ve sonra işlemleri başlatılmıştır.

Termostatin yapısı gereği sıcaklık değeri ilk ısınma sürecinde ayarlanmış sıcaklığı tolerans dahilinde geçebilmektedir. Sonra kapa – aç çalışmaya başlatınca aç-kapa sınırları düşmektedir. Bu nedenle deneylerde ilk çıkılan sıcaklığın düşmesi beklenmiş ve sıcaklık belirlenen sıcaklığa çok yakın toleranslarda çalışmaya başladıktan sonra deneyler başlatılmıştır. Deneysel uygulamada ilk değer olan 359°C’den sonra termostat 350°C’de 345 – 355°C arasında çalışmıştır. Şekil 3.31’de kontrol paneli – termostattan sıcaklık ayarlanması gösterilmiştir.



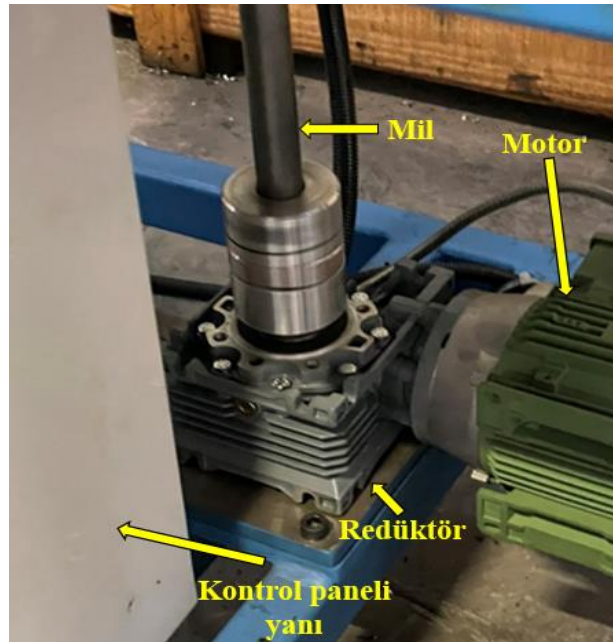
Şekil 3.31 Kontrol Paneli – Termostattan Sıcaklık Ayarlanması.

Sıcaklık ayarından sonra yarım saat test ortamının bu sıcaklığa gelmesi beklendikten sonra Şekil 3.31'deki panoda gösterilen sağ alttaki siyah düğmenin çevirilmesiyle deney başlatılmıştır. Şekil 3.32'de deney başlamadan önce motor ve redüktörün görünüşü verilmiştir. Motor dönmediği için redüktör ile mil arasındaki bağlantıların üzerinde kesikli olarak kırmızı bölgeler görülmektedir. Motorun hareketi ile redüktörün hareketi mile taşıyıp onun da hareketi döner tablaya taşınması ile birlikte pimin disk üzerinde sürtünme hareketi başlamış olmaktadır.



Şekil 3.32 Test Makinesi Çalıştırılmadan Önce.

Şekil 3.33'te deney başladıktan sonra motor ve redüktörün görünüşü verilmiştir. Bu resimde redüktör ile mil arasındaki bağlantıların üzerinde kesikli olarak bulunan kırmızı bölgeler artık görülememektedir. Her bir deney sonunda disk ve pim onda bir mg hassasiyetindeki terazilerde tartılarak ağırlıkları tespit edilip plastik torbalarına konup dolaba kaldırılmışlardır.



Şekil 3.33 Test Makinesi Çalıştırıldıktan Sonra.

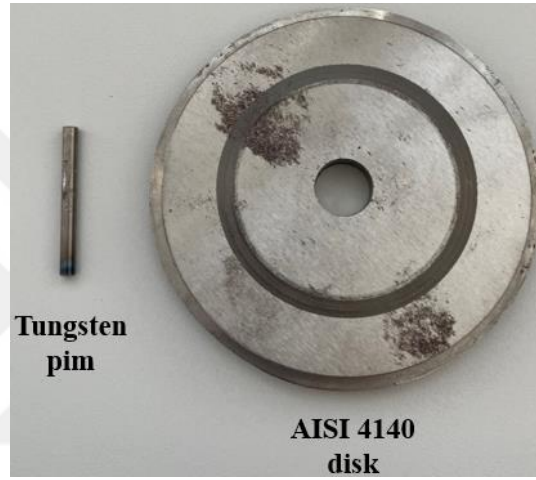
Taban taşıyıcı malzemenin AISI 4140 çelik olması ve tüm deneylerde sabit ve ortak olan parametreler; dönme hızı 130 d/dak, yük 50N ve her bir deneyin süresi 7 saattir. Deney numarası 7-11 ve Deney numarası 14-17 olan deneyler için tungsten pimler 3 eşit parçaya bölünmüştür. Deney 11 de 3 eşit parçaya bölünmüş pimlerden biri kırıldıktan sonraki deneylerde (Deney 1-6, Deney 12, Deney 13 ve Deney 18) pimler 4 eşit parçaya bölünmüştür ve deneyler 4 parçaya bölünmüş pimlerle yapılmıştır. Deneylerde kullanılan disklerin listesi deney numaraları ve disk kodları ve nitelikleri Tablo 3,2’de verilmiştir.

Tablo 3.2 18 Deneyin Listesi ve Nitelikleri.

Parça No.	Süperalaşım Kaplama Malzemesi	Sıcaklık (°C)
1	Kaplama Yok AISI 4140	Oda sıcaklığı-25
2	Kaplama Yok AISI 4140	200
3	Kaplama Yok AISI 4140	350
4	Kaplama Yok AISI 4140	500
5	Kaplama Yok AISI 4140	650
6	Kaplama Yok AISI 4140	800
7	Demir Esaslı Süperalaşım	Oda sıcaklığı-25
8	Demir Esaslı Süperalaşım	200
9	Demir Esaslı Süperalaşım	350
10	Demir Esaslı Süperalaşım	500
11	Demir Esaslı Süperalaşım	650
12	Demir Esaslı Süperalaşım	800
13	Kobalt Esaslı-Stellite Süperalaşım	Oda sıcaklığı-25
14	Kobalt Esaslı-Stellite Süperalaşım	200
15	Kobalt Esaslı-Stellite Süperalaşım	350
16	Kobalt Esaslı-Stellite Süperalaşım	500
17	Kobalt Esaslı-Stellite Süperalaşım	650
18	Kobalt Esaslı-Stellite Süperalaşım	800

3.7.1 Deneysel Çalışma 1

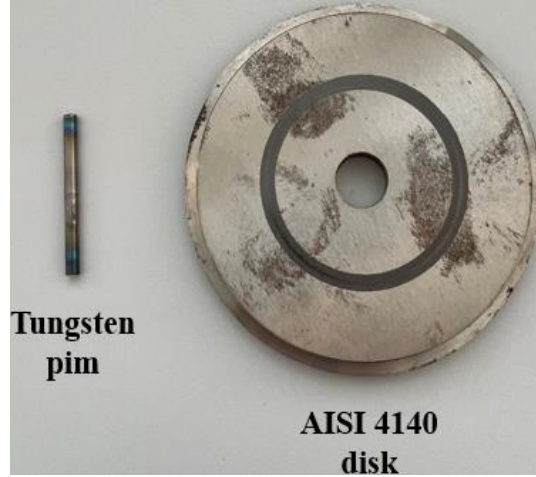
Uygulama Çalışmasında 1 Numaralı deney AISI 4140 çelikten oluşan diskle oda sıcaklığında (Ortam sıcaklığı 25°C) yapılmıştır. Deney süresi olan 7 saatin sonunda çok az aşınma gözlenmiştir. Pimin çalıştığı yer dışında renginde herhangi bir değişim yoktur. Tungstende bir aşınma, çapak ve bir renk değişimi gözlenmemiştir. Parçada pimin çalıştığı bölge Şekil 3.34'te görüldüğü gibi görülmekte ama derinlik görülmemektedir. Deney sonrası diskin aşınan yüzeyi ve deneyde kullanılan pimin Şekil 3.34'te gösterilmiştir.



Şekil 3.34 1 Numaralı Deney Parçasının Deney Sonrası Görüntüsü.

3.7.2 Deneysel Çalışma 2

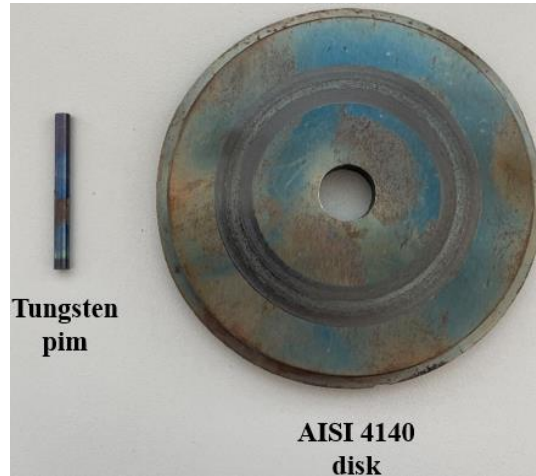
Uygulama Çalışmasında 2 Numaralı deney AISI 4140 çelikten oluşan diskle 200°C yapılmıştır. Deney süresi olan 7 saatin sonunda çok az aşınma gözlenmiştir. Pimin çalıştığı yer dışında renginde herhangi bir değişim olmadığı gözlemlenmiştir. Tungstende hissedilmesi zor bir aşınma görülmüş, çapak ve bir renk değişimi gözlenmemiştir. Parçada pimin çalıştığı bölge Şekil 3.35'te görüldüğü gibi görülmekte ama derinlik görülmemektedir. Deney sonrası diskin aşınan yüzeyi ve deneyde kullanılan pim Şekil 3.35'te gösterilmiştir.



Şekil 3.35 2 Numaralı Deney Parçalarının Deney Sonrası Görüntüsü.

3.7.3 DeneySEL Çalışma 3

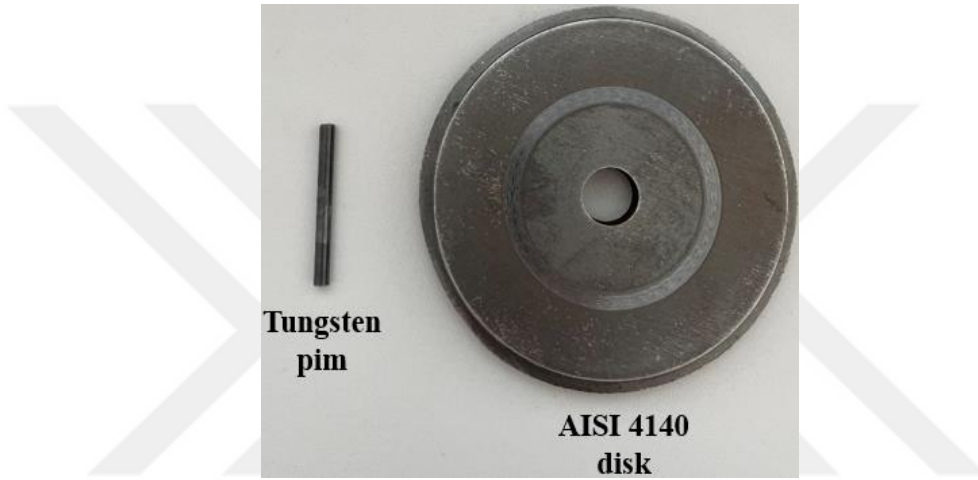
Uygulama Çalışmasında 3 Numaralı deney AISI 4140 çelikten oluşan diskle 350°C yapılmıştır. Deney süresi olan 7 saatin sonunda deney sırasında çelik milin titreşmesi sonucu 2 şerit oluşmuştur çok az aşınma gözlenmiştir. Tungstende sürtünen yüzeyde zayıf bir çapak oluşmuş ve çok zayıf bir aşınma görülmüştür. Isıdan dolayı rengi mavileşmiştir. Diskte pimin çalıştığı bölge dışında bir mavi renk görülmektedir. Ayrıca bir oksitlenme eğilimi görülmüştür. 2 şerit halinde olan aşınmada derinlik görülmemektedir. Deney sonrası diskin aşınan yüzeyi ve deneyde kullanılan pim Şekil 3.36’da gösterilmiştir.



Şekil 3.36 3 Numaralı Deney Parçalarının Deney Sonrası Görüntüsü.

3.7.4 Deneysel Çalışma 4

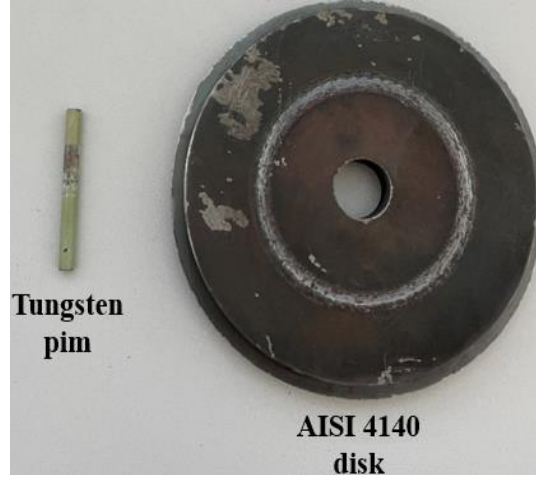
Uygulama Çalışmasında 4 Numaralı deney AISI 4140 çelikten oluşan diskle 500°C yapılmıştır. Deney süresi olan 7 saatin sonunda diskte bariz olmayan bir aşınma gözükmemektedir. Tungstende sürtünen yüzde zayıf bir çapak oluşmuş ve çok zayıf bir aşınma görülmüştür. Isıdan dolayı her ikisinin de rengi daha koyu gri olarak çıkmıştır. Diskte ayrıca zayıf yüzelsel bir oksitlenme eğilimi görülmüştür. Deney sonrası diskin aşınan yüzeyi ve deneyde kullanılan pim Şekil 3.37’ de gösterilmiştir.



Şekil 3.37 4 Numaralı Deney Parçalarının Deney Sonrası Görüntüsü.

3.7.5 Deneysel Çalışma 5

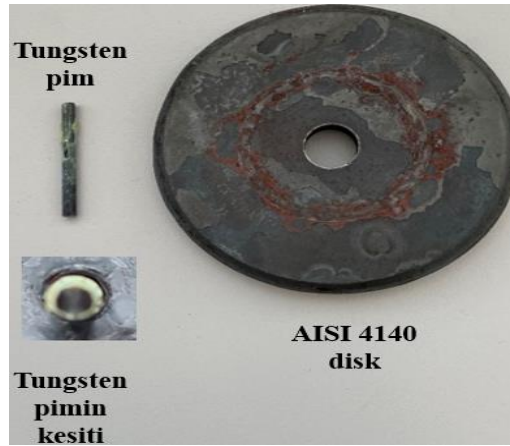
Uygulama Çalışmasında 5 Numaralı deney AISI 4140 çelikten oluşan diskle 650°C yapılmıştır. Deney süresi olan 7 saatin sonunda diskte bariz olmayan bir aşınma gözükmemektedir. Tungsten pimin çevresinde yüksek ısıdan oluşan sarı renkli tabaka oluşmuştur. Ancak pimde zayıf bir aşınma görülmüştür. Yüksek ısıdan dolayı diskin rengi daha koyulaşıp siyaha yaklaşmıştır. Diskte ayrıca yüzelsel, ince bir tabaka oluşturacak düzeyde bir oksitlenme görülmüştür. Oksitlenmeden dolayı aşınma çok zayıf olmuştur. Oksitlenme, diskin yüzeyini çok kötü görünümlü kabuklu bir hale getirirken aşınma direncine pek etki etmemiş gözükmemektedir. Deney sonrası diskin aşınan yüzeyi ve deneyde kullanılan pim Şekil 3.38’de gösterilmiştir.



Şekil 3.38 5 Numaralı Deney Parçalarının Deney Sonrası Görüntüsü.

3.7.6 Deneyisel Çalışma 6

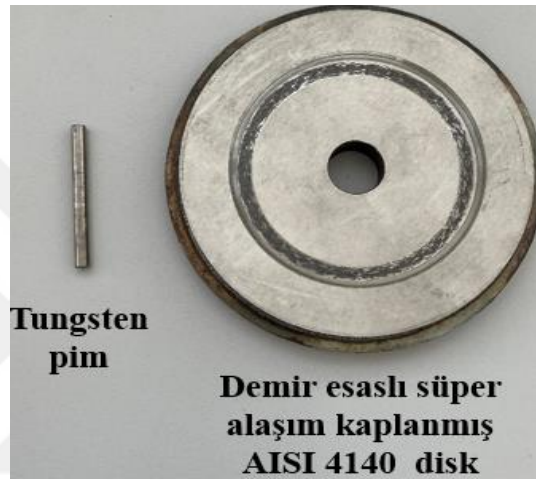
Uygulama Çalışmasında 6 Numaralı deney AISI 4140 çelikten oluşan diskle 800°C yapılmıştır. Deney süresi olan 7 saatin sonunda diskteki en büyük değişiklik tüm açık yüzeylerin kabuklaşarak oksitlenmesi oldu. Bu kabuklar her bir ellemede yerlerinden koparak dökülmüşlerdir. Aşınma direnci yüksek olan oksitlenme nedeni ile yapışma tipi az bir aşınma olmuştur. Bu yüksek sıcaklıkta tungsten pim çok kalın sarı renkli bir kabuk bağlamıştır. Kabuğun uçtan görünüşü Şekil 3.39’ da verilmiştir. Çok zayıf olan bu sarı kabuk pimi çıkarırken dökülmüştür. Bu sıcaklıkta pimi sabitleyen vida da çelik mile yapışmıştır ve matkapla delik açılarak pim çıkarılmıştır. Pimde ve diskte zayıf bir aşınma görülmüştür. Deney sonrası diskin aşınan yüzeyi ve deneyde kullanılan pimin iki görüntüsü Şekil 3.39’ da gösterilmiştir.



Şekil 3.39 6 Numaralı Deney Parçalarının Deney Sonrası Görüntüsü.

3.7.7 Deneysel Çalışma 7

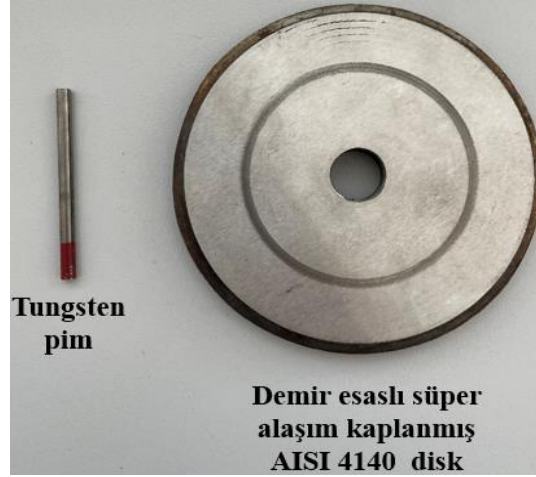
Uygulama Çalışmasında 7 numaralı deney, üzerine 0,7 mm kalınlığında demir esaslı süper alaşım kaplanan AISI 4140 çeliğinden oluşan diskle oda sıcaklığında (Ortam sıcaklığı 27°C) yapılmıştır. Deney süresi olan 7 saatin sonunda çelik milin titreşmesi sonucu 2 çizgi oluştuğu görülmüştür. Diskte ve pimde renk farkı görülmemiştir. Aşınmada çok az bir derinlik gözükmemektedir. Pim izleri görülmektedir. Deney sonrası diskin aşınan yüzeyi ve deneyde kullanılan pim Şekil 3.40' ta gösterilmiştir.



Şekil 3.40 7 Numaralı Deney Parçalarının Deney Sonrası Görüntüsü.

3.7.8 Deneysel Çalışma 8

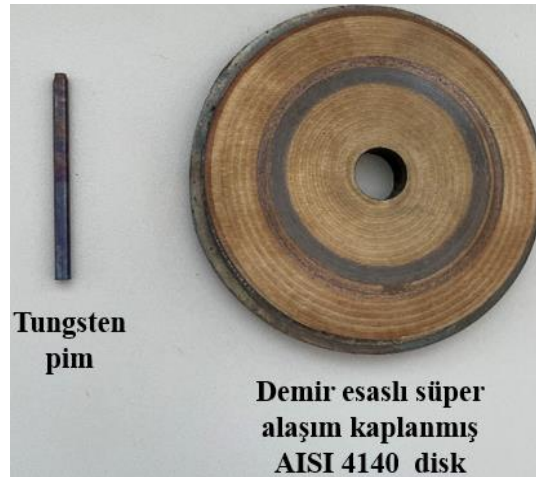
Uygulama Çalışmasında 8 numaralı deney, üzerine 0,7 mm kalınlığında demir esaslı süper alaşım kaplanan AISI 4140 çeliğinden oluşan diskle 200°C'de yapılmıştır. Deney süresi olan 7 saatin sonunda her ikisinde bir renk değişimi görülmemiştir. Pimde bir aşınma gözlenmemiştir. Diskte sadece pim izleri görülmektedir. Deney sonrası diskin aşınan yüzeyi ve deneyde kullanılan pim Şekil 3.41'de gösterilmiştir.



şekil 3.41 8 Numaralı Deney Parçalarının Deney Sonrası Görüntüsü.

3.7.9 Deneyisel Çalışma 9

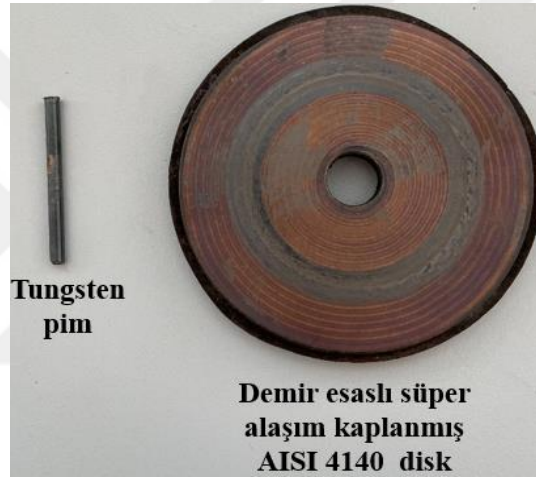
Uygulama Çalışmasında 9 numaralı deney, üzerine 0,7 mm kalınlığında demir esashl süper alaşım kaplanan AISI 4140 çeliğinden oluşan diskle 350°C’de yapılmıştır. Deney süresi olan 7 saatin sonunda her ikisinde bir renk değişimi görölmüştür. Pimde bir mavileşme çok az bir aşınma gözlemlenmiştir. Diskte koyu sarımsı bir renk oluşmuştur. Diskte çok hafif olan aşınma izlerinin yanı sıra lazer kaplamanın hatve izleri de görölmektedir. Deney sonrası diskin aşınan yüzeyi ve deneyde kullanılan pim şekil 3.42’ de gösterilmiştir.



şekil 3.42 9 Numaralı Deney Parçalarının Deney Sonrası Görüntüsü.

3.7.10 Deneysel Çalışma 10

Uygulama Çalışmasında 10 numaralı deney, üzerine 0,7 mm kalınlığında demir esaslı süper alaşım kaplanan AISI 4140 çeliğinden oluşan diskle 500°C’de yapılmıştır. Deney süresi olan 7 saatin sonunda pimde bir mavileşme çok az bir aşınma gözlemlenmiştir. Diskin rengi sarımsı, kızılımsı kahverengiye dönmüş. Çelik milin titremesinden dolayı diskte aşınma izi geniş oluşmuştur. Bir bölgede yapışma aşınmasına benzer iz görülmektedir. Aşınma izlerinin yanı sıra lazer kaplamanın hatve izleri de çok net görülmektedir. Deney sonrası diskten aşınan yüzeyi ve deneyde kullanılan pim Şekil 3.43’te gösterilmiştir.



Şekil 3.43 10 Numaralı Deney Parçalarının Deney Sonrası Görüntüsü.

3.7.11 Deneysel Çalışma 11

Uygulama Çalışmasında 11 numaralı deney, üzerine 0,7 mm kalınlığında demir esaslı süper alaşım kaplanan AISI 4140 çeliğinden oluşan diskle 650°C’de yapılmıştır. Deney süresi içinde pim çelik milin dibinden kırılmıştır pimin sürtünen yüzeyi diske temas edecek şekilde tekrar çelik mile vidalanmıştır. Aralıklı devam edilen deneyin sonunda ne diskte ne de pimde bir renk değişikliği olmamıştır. Aşınma yapışma aşınmasına benzemektedir. Aşınma izinden merkeze doğru olan iz pimin kırıldığı andaki izlerdir. Bu sıcaklıkta lazer kaplamanında hatve izleri gözükmemiştir. Deney sonrası diskten aşınan yüzeyi ve deneyde kullanılan pim Şekil 3.44’te gösterilmiştir.



Şekil 3.44 11 Numaralı Deney Parçalarının Deney Sonrası Görüntüsü.

3.7.12 DeneySEL Çalışma 12

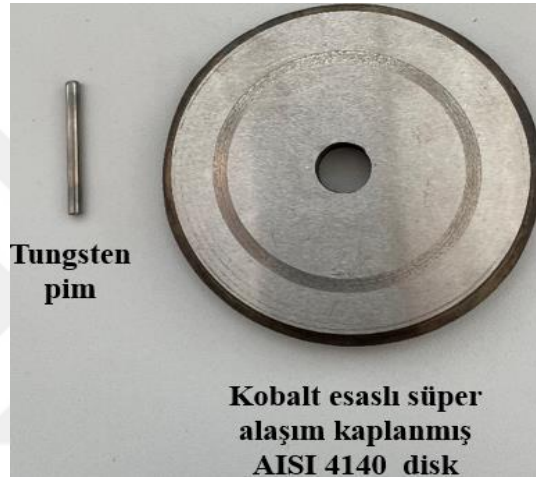
Uygulama Çalışmasında 12 numaralı deney, üzerine 0,7 mm kalınlığında demir esaslı süper alaşım kaplanan AISI 4140 çeliğinden oluşan diskle 800°C’de yapılmıştır. Deney süresi olan 7 saatin sonunda pimde sarı bir ince tabaka az bir aşınma gözlemlenmiştir. Diskte ciddi bir şekilde koyu grileşme görülmüştür. Aşınma bölgesinin rengi de dış renge benzemektedir ve aşınma gözle farkedilmektedir. Deney sonrası diskin aşınan yüzeyi ve deneyde kullanılan pim Şekil 3.45’ te gösterilmiştir.



Şekil 3.45 12 Numaralı Deney Parçalarının Deney Sonrası Görüntüsü.

3.7.13 Deneysel Çalışma 13

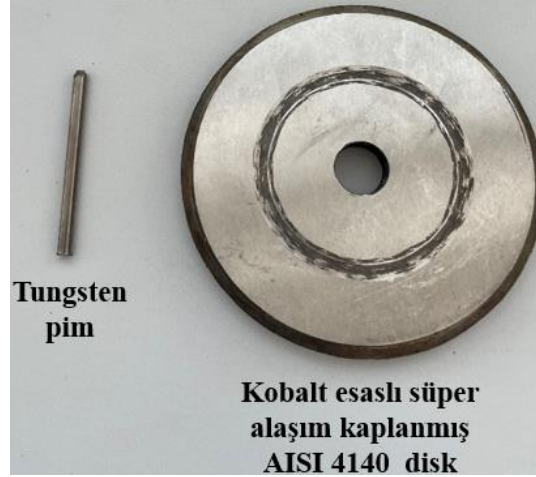
Uygulama Çalışmasında 13 numaralı deney, üzerine 0,7 mm kalınlığında kobalt esaslı Stellite süper alaşım kaplanan AISI 4140 çeliğinden oluşan diskle oda sıcaklığında (Ortam sıcaklığı 30°C) yapılmıştır. Deney süresi olan 7 saatin sonunda çok çok az aşınma gözlenmiştir. Pimin çalıştığı yerin belirginleşmesi dışında her ikisinin de renklerinde herhangi bir değişim yoktur. Tungstende bir aşınma ve çapak diskte pimin çalıştığı bölge Şekil 3.46’da görüldüğü gibi görülmekte ama derinlik görülmemektedir. Deney sonrası diskin aşınan yüzeyi ve deneyde kullanılan pim Şekil 3.46’da gösterilmiştir.



Şekil 3.46 13 Numaralı Deney Parçalarının Deney Sonrası Görüntüsü.

3.7.14 Deneysel Çalışma 14

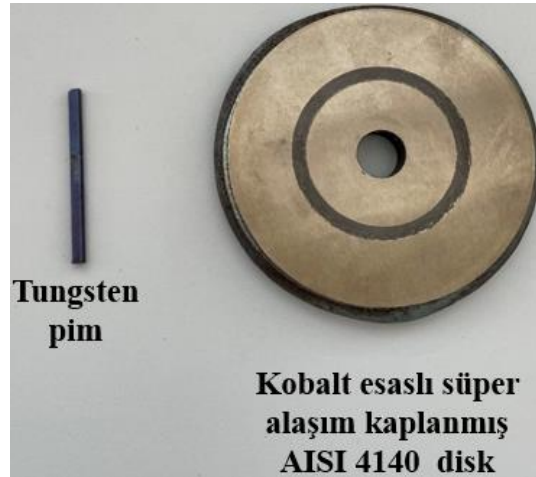
Uygulama Çalışmasında 14 numaralı deney, üzerine 0,7 mm kalınlığında kobalt esaslı Stellite süper alaşım kaplanan AISI 4140 çeliğinden oluşan diskle 200°C’de yapılmıştır. Deney süresi olan 7 saatin sonunda diskte ve pimde renk farkı görülmemiştir. Tungsten pimde sürtünen uçta bir çapak oluşmuştur. Diskteki aşınmada renkte koyulaşma ve hafif derinlik gözükmemektedir. Deney sonrası diskin aşınan yüzeyi ve deneyde kullanılan pim Şekil 3.47’ de gösterilmiştir.



Şekil 3.47 14 Numaralı Deney Parçalarının Deney Sonrası Görüntüsü.

3.7.15 Deneyisel Çalışma 15

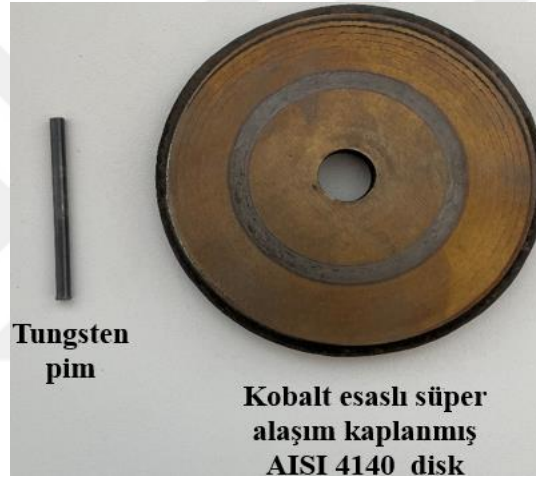
Uygulama Çalışmasında 15 numaralı deney, üzerine 0,7 mm kalınlığında kobalt esaslı Stellite süper alaşım kaplanan AISI 4140 çeliğinden oluşan diskle 350°C’de yapılmıştır. Deney süresi olan 7 saatin sonunda pimin renginde bir mavileşme görülmüştür. Tungsten pimde sürtünen uçta aşınma sonucu az bir çapak oluşmuştur. Diskin rengi tozlaşmış gibi açık gri olmuştur. Diskteki aşınmada renkte koyulaşma ve az bir derinlik gözükmemektedir. Diskin aşınan yüzeyi ve deneyde kullanılan pim Şekil 3.48’ de gösterilmiştir.



Şekil 3.48 15 Numaralı Deney Parçalarının Deney Sonrası Görüntüsü.

3.7.16 Deneysel Çalışma 16

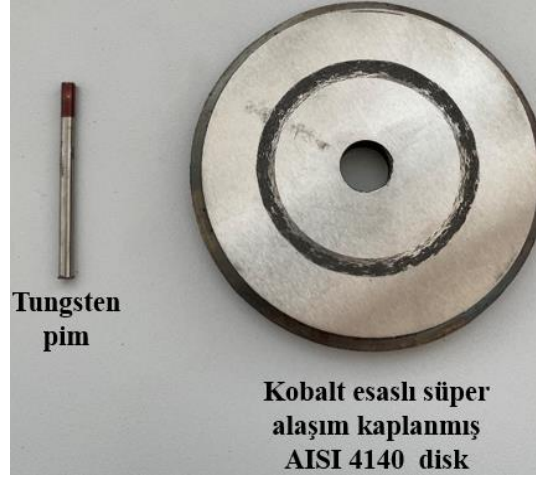
Uygulama Çalışmasında 16 numaralı deney, üzerine 0,7 mm kalınlığında kobalt esaslı Stellite süper alaşım kaplanan AISI 4140 çeliğinden oluşan diskle 500°C’de yapılmıştır. Deney süresi olan 7 saatin sonunda pimin renginde koyu griye yaklaşan bir lacivert renk görülmüştür. Tungsten pimde sürtünen uçta aşınma nedeni ile az bir çapak oluşmuştur. Diskin rengi parlak altın gibi kobalt sarısı olmuştur. Diskte lazer kaplamanın hatve izleri de görülebilmektedir. Diskteki aşınmada renkte az yerde noktasal siyahlıklar olan bir grileşme ve az bir derinlik gözükmektedir. Deney sonrası diskın aşınan yüzeyi ve deneyde kullanılan pim Şekil 3.49’ da gösterilmiştir.



Şekil 3.49 16 Numaralı Deney Parçalarının Deney Sonrası Görüntüsü.

3.7.17 Deneysel Çalışma 17

Uygulama Çalışmasında 17 numaralı deney, üzerine 0,7 mm kalınlığında kobalt esaslı Stellite süper alaşım kaplanan AISI 4140 çeliğinden oluşan diskle 650°C’de yapılmıştır. Deney süresi olan 7 saatin sonunda diskte ve pimde renk farkı görülmemiştir. Tungsten pimde sürtünen uçta bir milimetrelik bir çapak oluşmuştur. Diskteki aşınmada renkte koyulaşma ve bir derinlik gözükmektedir. Aşınma yer yer yapışma aşınmasına benzemektedir. Deney sonrası diskın aşınan yüzeyi ve deneyde kullanılan pim Şekil 3.50’ de gösterilmiştir.



Şekil 3.50 17 Numaralı Deney Parçalarının Deney Sonrası Görüntüsü.

3.7.18 Deneyisel Çalışma 18

Uygulama Çalışmasında 18 numaralı deney, üzerine 0,7 mm kalınlığında kobalt esaslı Stellite süper alaşım kaplanan AISI 4140 çeliğinden oluşan diskle 800°C’de yapılmıştır. Deney süresi olan 7 saatin sonunda pimde sarı bir tabaka oluşmuş ve az bir aşınma gözlemlenmiştir. Diskin rengi parlak sarı rengin izleriyle birlikte koyu sarı – gri bir renk almıştır. Diskte lazer kaplamanın hatve izleri yer yer görülebilmektedir. Diskteki aşınma izinde renkte az bir kahverengi ile birlikte siyah – gri renk görülmüştür. Aşınma gözle görülür derecede derin olmuştur. Deney sonrası diskten aşınan yüzeyi ve deneyde kullanılan pim Şekil 3.51’ de gösterilmiştir.



Şekil 3.51 18 Numaralı Deney Parçalarının Deney Sonrası Görüntüsü.

3.8 DENEYDE KULLANILAN DİSKLERİN MALZEME ÇALIŞMALARI

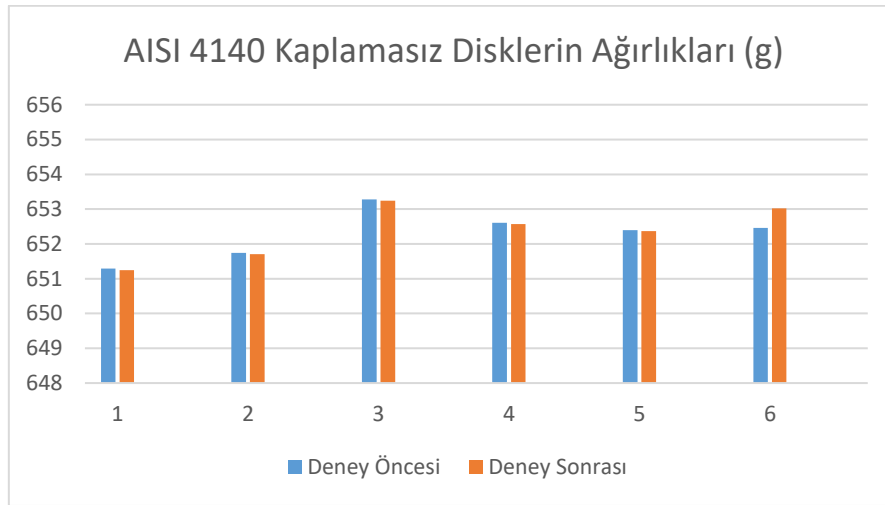
3.8.1 AISI 4140 Kaplamasız Disklerin Malzeme Çalışması

Deneysel çalışmada elde edilen veriler değerlendirilmiş, disklerin ve pimlerin deney öncesi ve deney sonrası ölçülen ağırlıkları deney sıcaklık ve kaplama durumuna göre deney numara sırası ile tablolar halinde sunulmuştur. Kaplamasız olan AISI 4140 çeliğinin deney sonuçları Tablo 3.3’ te gösterilmiştir.

Tablo 3.3 AISI 4140 Kaplamasız Malzemenin Deney Sonuçları.

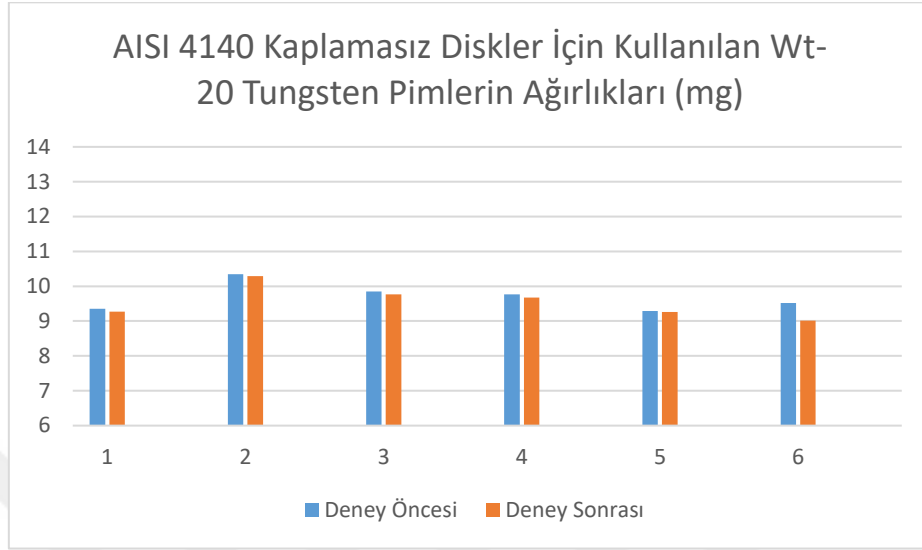
Deney Nu	Deney Sıcaklığı (°C)	Disk Ağırlığı (g)		Pim ağırlığı (mg)	
		Deney Öncesi	Deney Sonrası	Deney Öncesi	Deney Sonrası
1	25	651,291	651,245	9,357	9,269
2	200	651,737	651,703	10,34217	10,2887
3	350	653,276	653,244	9,84591	9,765
4	500	652,608	652,567	9,77097	9,675
5	650	652,393	652,371	9,29305	9,25942
6	800	652,455	653,018	9,517	9,01423

Deneysel çalışmada tablo değerleri incelendiğinde Deney 6’da 800°C de diskin ağırlaştığı görüldü. Diskte sıcaklığın etkisi ile oksitlenme oluştu. Düşük sıcaklıkta Deney 1 de aşınmanın daha çok olduğu anlaşılmaktadır. Kaplamasız olan AISI 4140 çeliğinin sıcaklığa bağlı olarak elde edilen deney sonuçları Grafiği Şekil 3.52’ de gösterilmiştir.



Şekil 3.52 AISI 4140 Kaplamasız Disklerin Sıcaklığa bağlı olarak değişen ağırlık Grafiği.

Deneyde kullanılan pimleri ağırlıkları en yüksek çıkan 2 Nolu çalışmadır. Çalışma Şekil 3.53’ te gösterilmiştir.



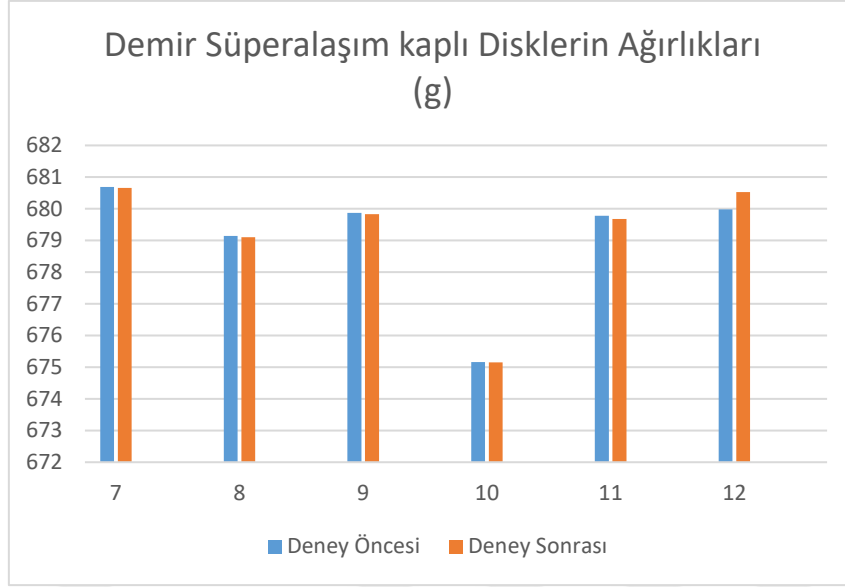
Şekil 3.53 AISI Kaplamasız Diskler İçin Kullanılan Wt-20 Tungsten Pimlerin Ağırlık Grafiği.

3.8.2 Demir Süper Alaşım kaplı AISI 4140 Diskin Malzeme Çalışması

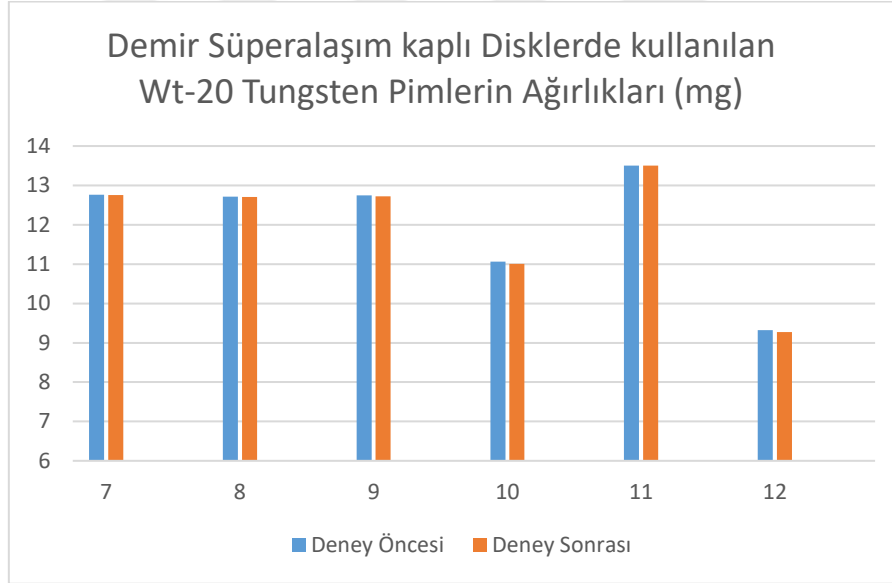
Demir süper alaşım kaplanmış olan AISI 4140 çelik disklerin ve tungsten pimlerin, test numarasına ve test sıcaklıklarına göre, deney öncesi ve deney sonrası tartım sonuçları Tablo 3.4’te verilmiştir. Demir Süper alaşım kaplanmış olan AISI çelik disklerin ağırlık grafiği Şekil 3.54’ te , demir süper alaşım kaplı disklerin deneyinde kullanılan pimlerin ağırlıkları da Şekil 3.55’ de verilmiştir.

Tablo 3.4 Demir Süper Alaşım Kaplanmış AISI 4140 Malzemenin Deney Sonuçları.

Deney Nu	Deney Sıcaklığı (°C)	Disk Ağırlığı (g)		Pim ağırlığı (mg)	
		Deney Öncesi	Deney Sonrası	Deney Öncesi	Deney Sonrası
7	25	680,686	680,655	12,762	12,7536
8	200	679,14	679,107	12,71406	12,7071
9	350	679,872	679,833	12,74888	12,72384
10	500	675,157	675,146	11,0664	11,00708
11	650	679,783	679,679	13,50328	13,50278
12	800	679,977	680,525	9,31761	9,27661



Şekil 3.54 Demir Süper Alaşım Kaplı Disklerin Ağırlık Grafiği.



Şekil 3.55 Demir Süper Alaşım Kaplı Disklerde Kullanılan WT-20 Tungsten Pim Ağırlıkları Grafiği.

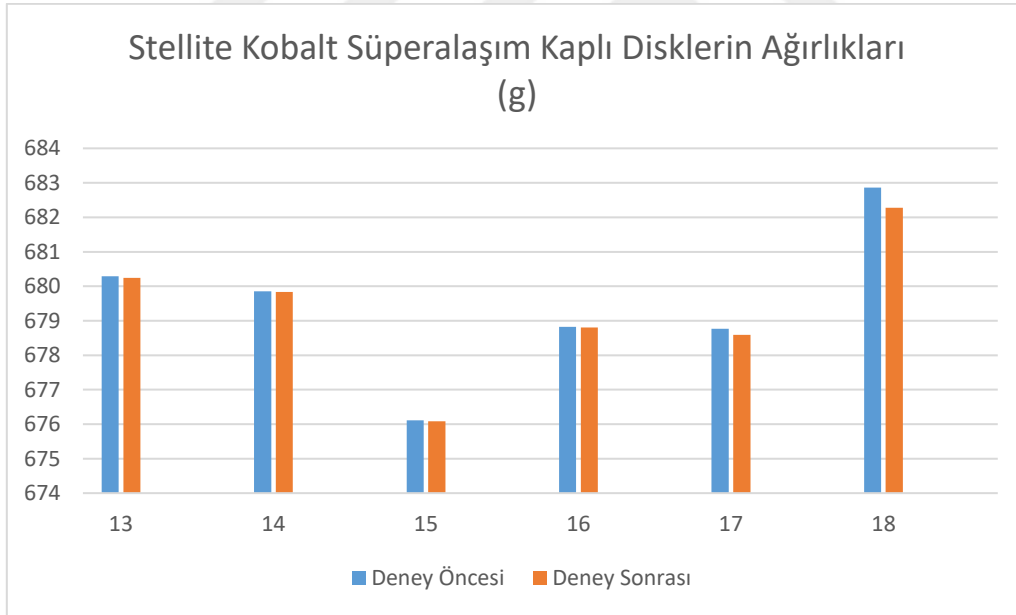
3.8.3 Kobalt (Stellite) Süper Alaşım kaplı AISI 4140 Diskin Malzeme Çalışması

Kobalt süper alaşım (Stellite) kaplanmış olan AISI 4140 çelik disklerin ve tungsten pimlerin, test numarasına ve test sıcaklıklarına göre, deney öncesi ve deney sonrası tartım sonuçları aşağıda Tablo 3.5'te verilmiştir. Kobalt (Stellite) Süper alaşım kaplanmış olan

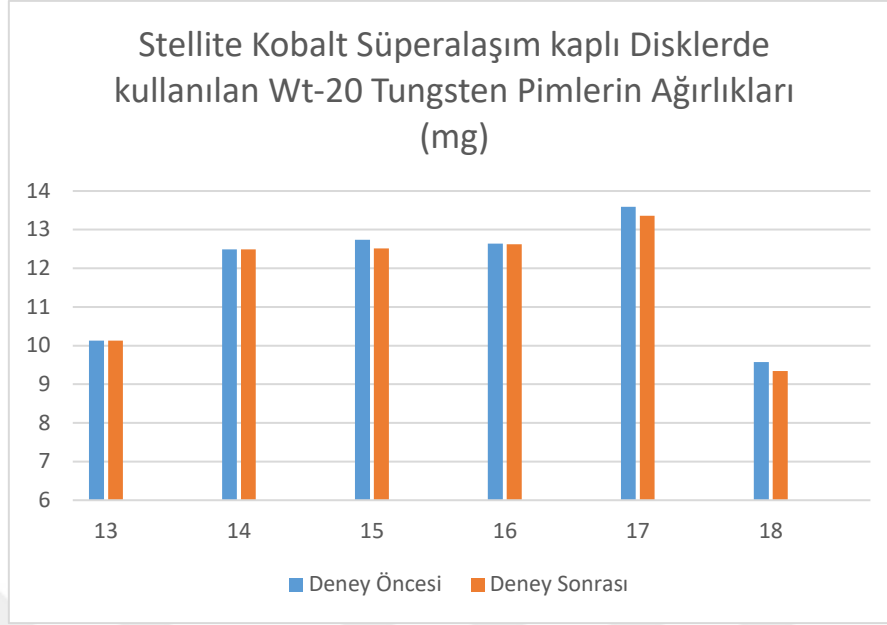
AISI 4140 çelik disklerin ağırlık grafiği Şekil 3.56 da, tungsten pimlerin ağırlık grafiği Şekil 3.57 de gösterilmiştir.

Tablo 3.5 Kobalt Süper Alaşım (Stellite) Kaplanmış Olan AISI 4140 Malzemenin Deney Sonuçları.

Deney Nu	Deney Sıcaklığı (°C)	Disk Ağırlığı (g)		Pim ağırlığı (mg)	
		Deney Öncesi	Deney Sonrası	Deney Öncesi	Deney Sonrası
13	25	680,293	680,248	10,1328	10,12895
14	200	679,857	679,836	12,49255	12,48853
15	350	676,11	676,082	12,73701	12,51055
16	500	678,821	678,801	12,63603	12,6235
17	650	678,764	678,587	13,5919	13,3603
18	800	682,862	682,278	9,57455	9,34283



Şekil 3.56 Stellite Kobalt Süper Alaşım Kaplı Disklerin Ağırlık Grafiği.



Şekil 3.57 Stellite Kobalt Süper Alaşım Kaplı Disklerde kullanılan WT-20 Tungsten Pim Ağırlıkları Grafiği.

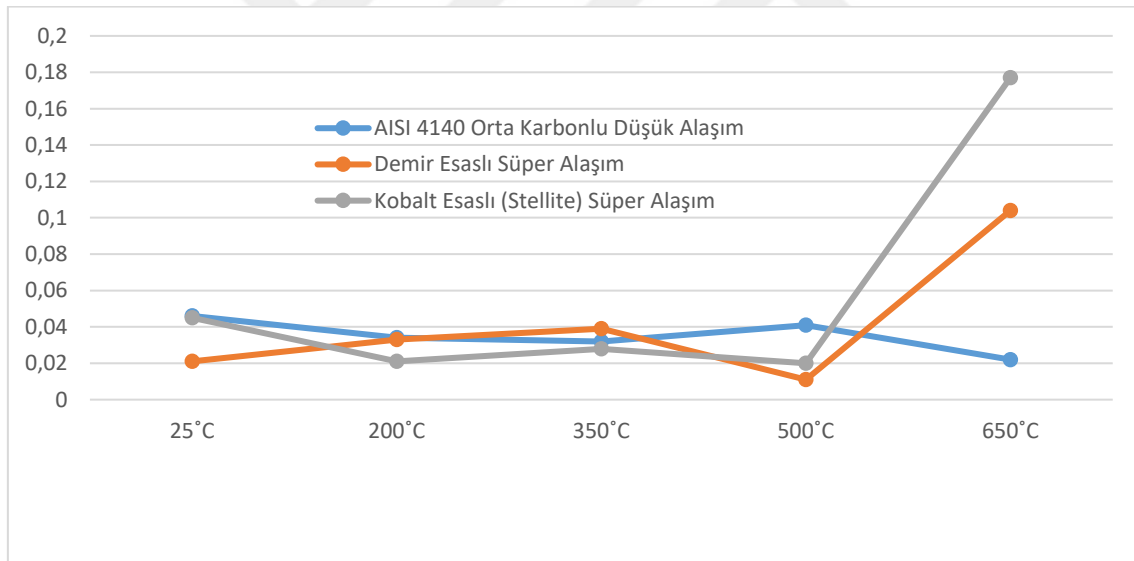
3.9 Disklerin ve Pimlerin Ağırlık Kayıpları

800°C AISI 4140 ve demir esaslı süper alaşım kaplamanın yapıldığı testlerde oksitlenmeden dolayı oluşan ağırlık kazancı aşınmanın kaybını kapatıp diskin ilk ağırlığından daha ağır olmasına neden olmuştur. Bunun sonucu ağırlık kaybı negatif olup grafikleri bozduğu için Tablo 3.6’ da verilen 800°C’deki sonuçlar, oluşturulan ağırlık kayıpları grafiğine AISI 4140 çelik ve her iki kaplama için de alınmamıştır. Oda sıcaklığı, 500°C, 650°C ve 800°C’lerde demir esaslı süper alaşımın ağırlık kaybı kobalt esaslı süper alaşıma göre yarı yarıya yakın daha düşüktür. AISI4140 çelik 650°C ve 800°C’lerde aşırı oksitlenmesinden dolayı kullanıma uygun değildir. Disklerin ve pimlerin ağırlık kayıpları deney numaraları ve sıcaklıklara göre kaplama tipleri Tablo 3.6’da verilmiştir.

Tablo 3.6 Disklerin ve Pimlerin Sıcaklıklara Göre Ağırlık Kayıpları.

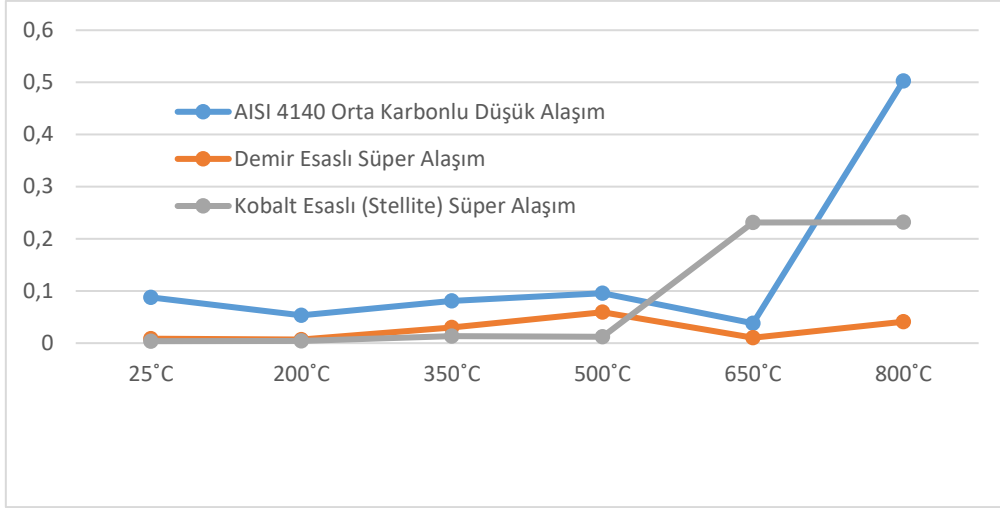
Sıcaklık (°C)	Disklerin Ağırlık Kayıpları (g)			Pimlerin Ağırlık Kayıpları (mg)		
	AISI 4140 Düşük Alaşımli Çelik	Demir Esaslı Süper Alaşım Kaplama	Kobalt Esaslı Süper Alaşım Kaplama	AISI 4140 Düşük Alaşımli Çelik	Demir Esaslı Süper Alaşım Kaplama	Kobalt Esaslı Süper Alaşım Kaplama
25	0,046	0,021	0,045	0,088	0,0084	0,00385
200	0,034	0,033	0,021	0,05347	0,00696	0,00402
350	0,032	0,039	0,028	0,08091	0,03011	0,01317
500	0,041	0,011	0,02	0,088	0,037	0,01253
650	0,022	0,104	0,177	0,263	0,093	0,2316
800	-0,563	-0,548	0,584	0,255	0,103	0,2312

Grafiklerde en çok ağırlık kayıpları Kobalt Süper alaşım kaplı diskte olduğu ölçülmüştür. Şekil 3.58’de disklerin aşınma sonucu ağırlık kayıplarının grafiği her bir çeşit disk için gösterilmiştir.



Şekil 3.58 Disklerin Aşınma Sonucu Ağırlık Kayıplarının Grafiği (g).

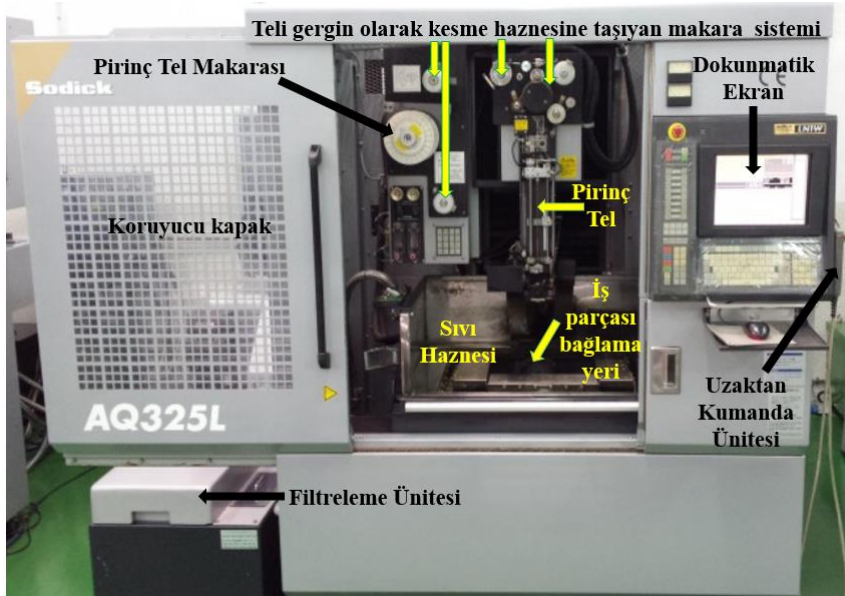
Şekil 3.59’da Pimlerin aşınma sonucu ağırlık kayıplarının grafiği her bir çeşit disk için verilmiştir.



Şekil 3.59 Pimlerin Aşınma Sonucu Ağırlık Kayıplarının Grafiği (mg).

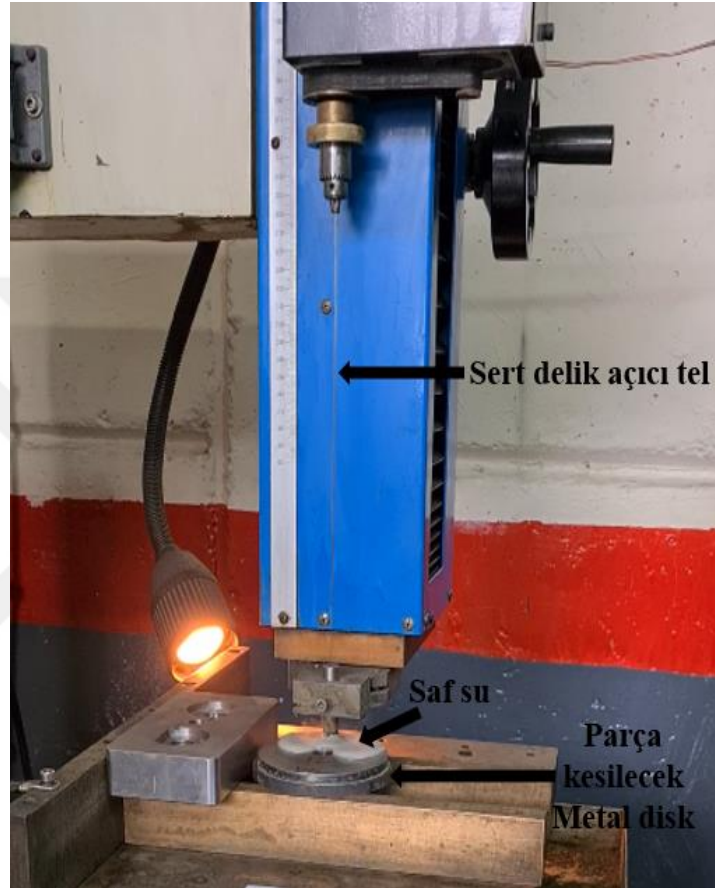
3.10 Tel Erezyon Makinesinde SEM Mikroskop İçin Örneklerin Alınması

Taramalı elektron mikroskopunun inceleme tablasının küçük olması ve 350-400 gram ağırlık taşıyamadığı için deney parçalarının kesilmesi zorunluluğu doğmuştur. Elektron mikroskopunun tablasına bir seferde altı adet örnek yerleştirebilme imkânından faydalanmak için iş parçalarının aşınma çizgilerini içine alacak şekilde her birinin iki bölgesinden 15 mm x 15 mm kesitinde örnekler alınması gerekmiştir. Bu örneklerin disklerden kesilerek alınması için tel erezyon makinesinden faydalanılmıştır. Bu iş için Şekil 3.60'ta verilen 2003 model Sodick AQ325L tel erezyon makinesi kullanılmıştır.



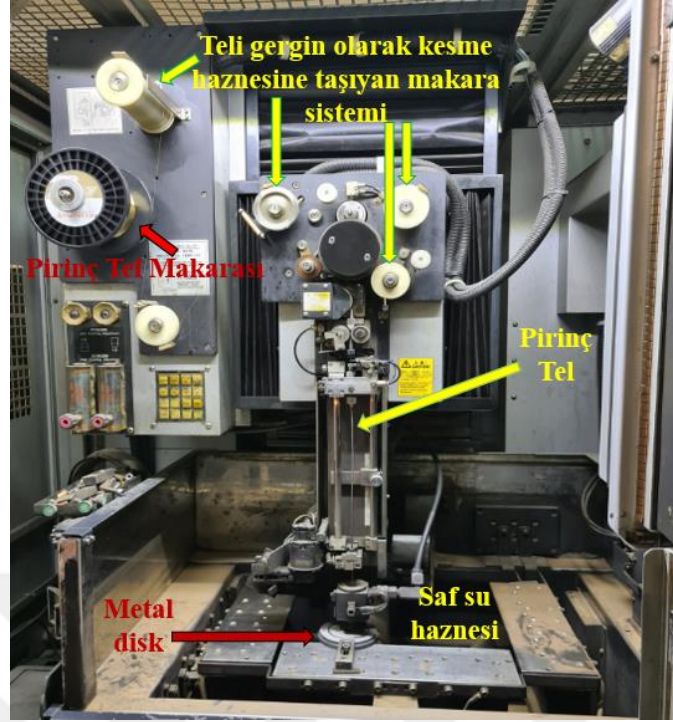
Şekil 3.60 Tel Erezyon Kesme Makinesi.

Tel erezyon makinesinde bir iş parçasını kesebilmek için kesici olan pirinç telin önce iç parçasının kesilecek bölgeye yakın bir yerden geçip kesme işlemine başlayabilmesi için bit delik delmek gerekmektedir. Bu işlem ayrı bir makinede yine elektrik enerjisi gücü ile sert bir telin iş parçasından parçacık kopartarak ilerlemesi ile delik açılana kadar devam etmesi ile yapılmaktadır. Şekil 3.61’de bu makinenin fotoğrafı verilmiştir.



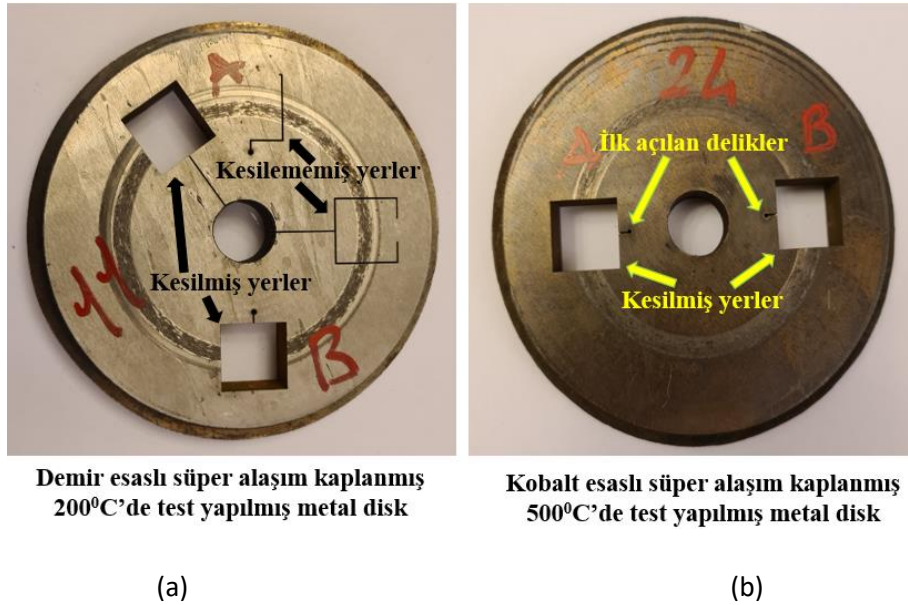
Şekil 3.61 Telin Geçeceği Deliği Açan Makine.

Metal diskler sırası ile tel erezyon makinesine Şekil 3.62’de olduğu gibi bağlandıktan sonra saf su haznesine makinenin saflaştırma ünitesi tarafından saflaştırılmış su resimde belirtilen havuza ön kapağı kapatıldıktan sonra doldurulmuş ve sonra kesme işlemleri yapılmıştır. Saf su makinedeki depoya çekildikten sonra ön kapak açılıp yeni metal disk bağlanmıştır. Bu şekilde 18 metal diskten 36 adet 15X15mm örnekler kesilerek alınmıştır.



Şekil 3.62 Metal Disk Tel Erezyon Makinesine Bağlanmış Kesime Hazır.

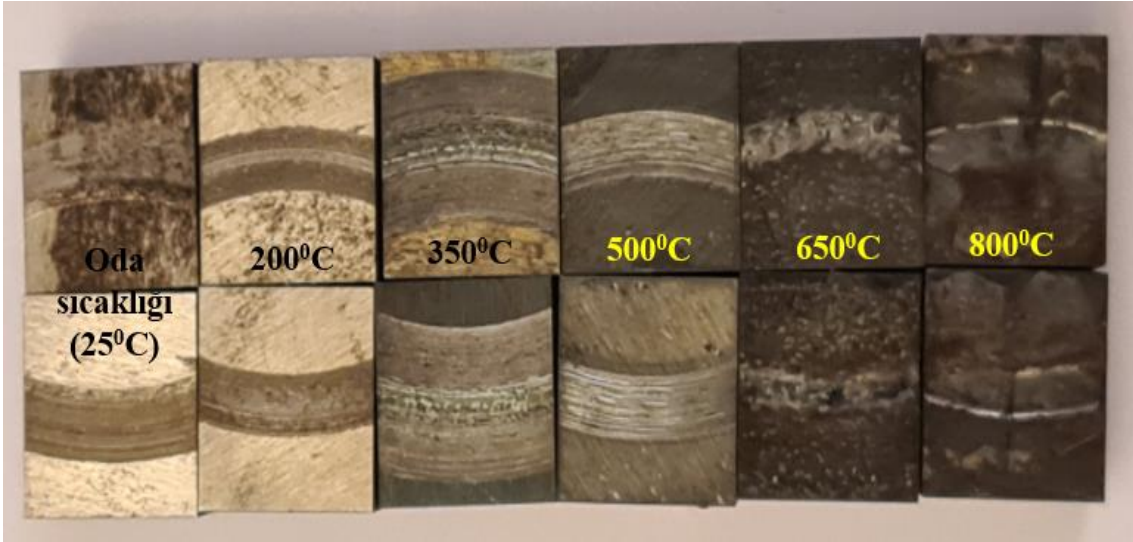
Kesme işlemi sırasında özellikle demir esaslı süper alaşım kaplanmış olan diskler devamlı tel eazyonun telini kopararak problem çıkarmışlardır. Böyle durumlarda diskin ayrı bir yerinden örnek alınmaya çalışılmıştır. Şekil 3.63'te en problem çıkaran ile hiç problem çıkarmayan kobalt esaslı süper alaşım kaplanmış disklerin fotoğrafları verilmiştir.



Şekil 3.63 (a) Problemlili Kesilen ve (b) Hiç Problemsiz Kesilen Disklere Örnek.

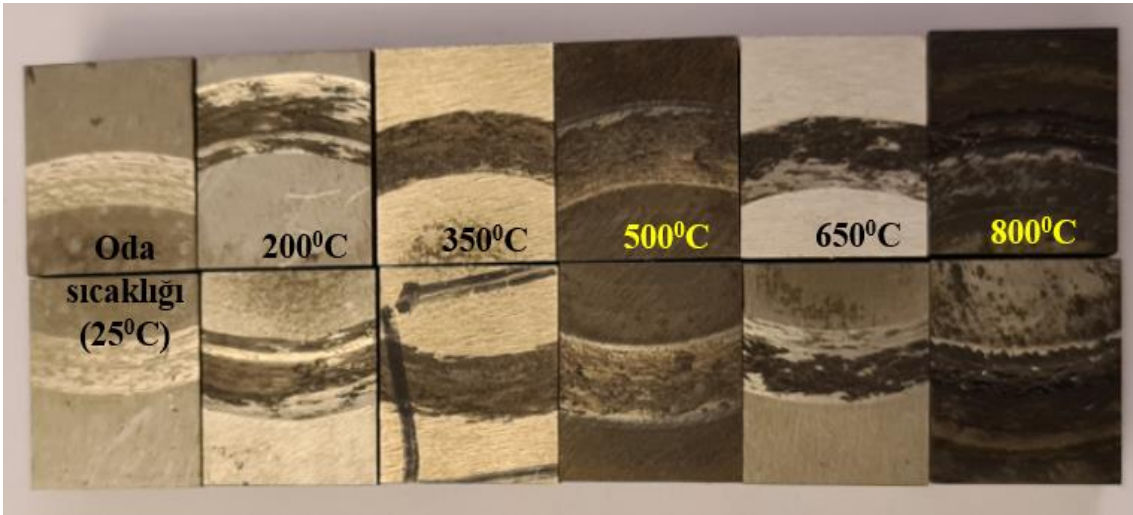
Tel erezyonda kesimi sağlanan 12 adet kaplamasız örneklerin fotoğrafları Şekil 3.64'te, 12 adet demir esaslı süper alaşım kaplanmış örneklerin fotoğrafları Şekil 3.65'te ve son olarak kobalt esaslı süper alaşım kaplanmış 12 adet örneklerin fotoğrafları Şekil 3.66'da verilmiştir.

3.10.1 Kaplamasız AISI 4140 Çelik Diskin Kesilmiş Numuneleri



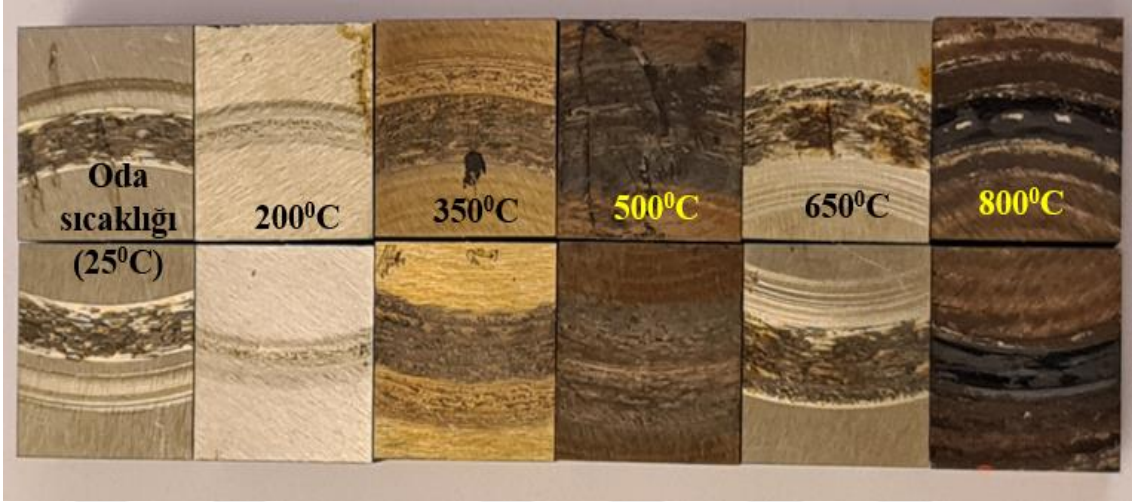
Şekil 3.64 Kaplamasız 4140 Çelik Disklerden Kesilen 12 Adet Numune.

3.10.2 Demir Süperalaşım Kaplı AISI 4140 Çelik Diskin Kesilmiş Numuneleri



Şekil 3.65 Demir Süper Alaşım Kaplı Disklerden Kesilen 12 Adet Numune.

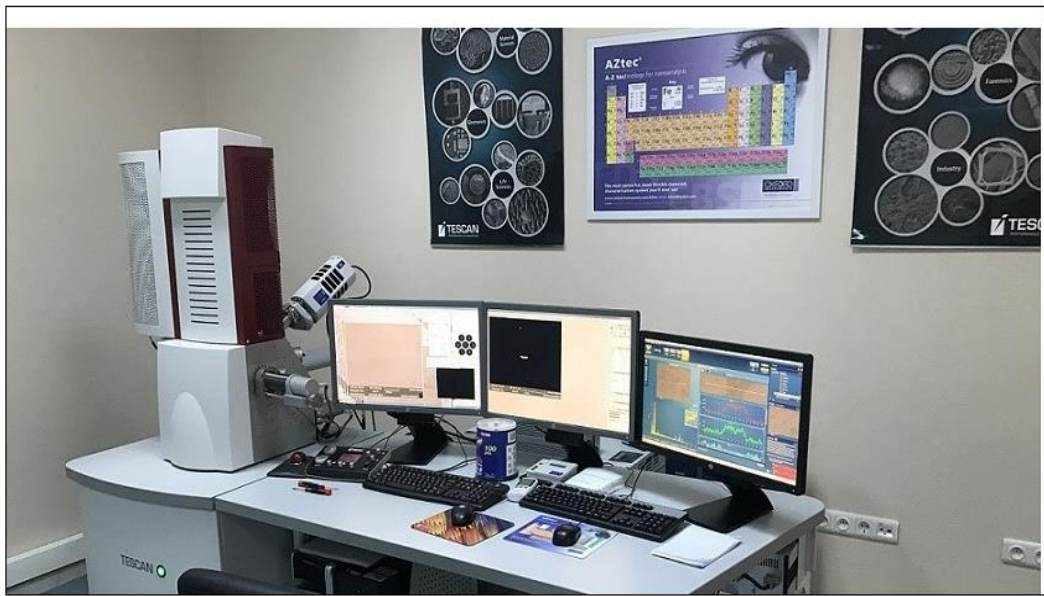
3.10.3 Kobalt Süper Alaşım Kaplı AISI 4140 Çelik Diskin Kesilmiş Numuneleri



Şekil 3.66 Kobalt Süper Alaşım Kaplı Disklerden Kesilen 12 Adet Numune.

3.11 Sem Mikroskobu Test Cihazı

Deneyde kullanılan disklerin tel erozyon kesimleri tamamlandıktan sonra tüm numunelerin Sem mikroskobunda görüntüleri alınmıştır. Deneyde Tescan marka MAIA3 XMU SEM (taramalı elektron mikroskop) kullanılmıştır.



Şekil 3.67 SEM Mikroskobun Modeli ve Görüntüsü.

Cihazın Elektron Optik verileri: Elektron Tabancası Yüksek Parlaklıklı Schottky Emiter (FEG), Çözünürlüğü

Standart modda (In-Beam, SE): 15kV'da 1,0 nm; 1 kV'da 1,8 nm; 500 V'da 2.5 nm

Beam Deceleration modda: 1kV'da 1,4 nm; 200V'da 2,2 nm

STEM modunda: 30 kV'da 0,8 nm

In-Beam BSE modunda: 15 kV'da 2,0 nm, Düşük Vakum Modu: BSE: 30 kV da 2,0 nm

Yaklaştırma değeri 30 kV da 4x-1000000x'tir. Maksimum görüş alanı WDanalytical 5 mm iken 4,3 mm, WD 30 mm iken 7,7 mm'dir. Hızlandırma voltajı: 200 V-30 kV'dır. BDT ile 50 V a kadar inilebilir. Prob akımı 2 pA-200 nA'dır.

Elektron optiklerin çalışma modları: Resolution: Ultra yüksek çözünürlük modu

Depth: Odak derinliğini arttırmak için kolonu optimize eder. Field: Bozulmamış büyük bir görüş alanı sağlar. Düşük vakum modunda yalnızca Resolution ve Depth modu kullanılır.

Tarama özellikleri: Tarama hızı Piksel başına 20ns-10ms aralıklarla ya da devamlı Nokta, Hat taraması

Tarama özellikleri: Tarama penceresi ile şekil, büyüklük ve pozisyon devamlı ayarlanabilir. Dinamik odaklanma, Görüntü döndürme, kaydırma, eğdirme telafisi

Vakum Sistemi: Çember Vakumu yüksek vakum modunda $<9 \times 10^{-3}$ Paskal'dan az, düşük vakum modunda 7-500 Pa, tabanca vakumu 3×10^{-7} Paskal'dan az, Numune değişiminden sonra vakuma alma süresi 3,5 dakikadan az.

Çember Özellikleri: Çember iç boyutu 285mm genişlik, 340 mm derinlik, kapak boyutu 285mm genişlik, 320 mm derinlik ve cihazın numune kapasitesi 7'dir.

Numune Tutucunun Özellikleri: Türü Bilgisayar kontrollü, tamamen motorizedir. Hareket Kabiliyeti: X eksen =130mm (-50mm den +80mm ye), Y eksen=130mm (-65mm den +65mm ye), Z eksen=90mm, Dönme açısı 360° devamlı, eğilme açısı -30° dan +90° a kadar. Maksimum Numune Yüksekliği: 89,5 mm (BDT döner tutucu), 106 mm (Döner tutucu), 135 mm (Döner tutucu olmaksızın)

Dedektörler: SE:İkincil elektron dedektörü, Everhart-Thornley tipi (YAG kristal)

BSE: Geri saçılma dedektörü, sintilatör tipi, (YAG kristal), yüksek hassasiyetli, atom numarası çözünürlüğü 0,1

In-Beam BSE Dedektörü: Düşük çalışma mesafelerinde görüntü almak için kolon içerisine yerleştirilmiş sintilatör tabanlı geri saçılma dedektörü

In-Beam SE Detektörü: Yüksek çözünürlük ve düşük çalışma mesafesi için kolon içine monte edilmiş ikincil elektron dedektörü

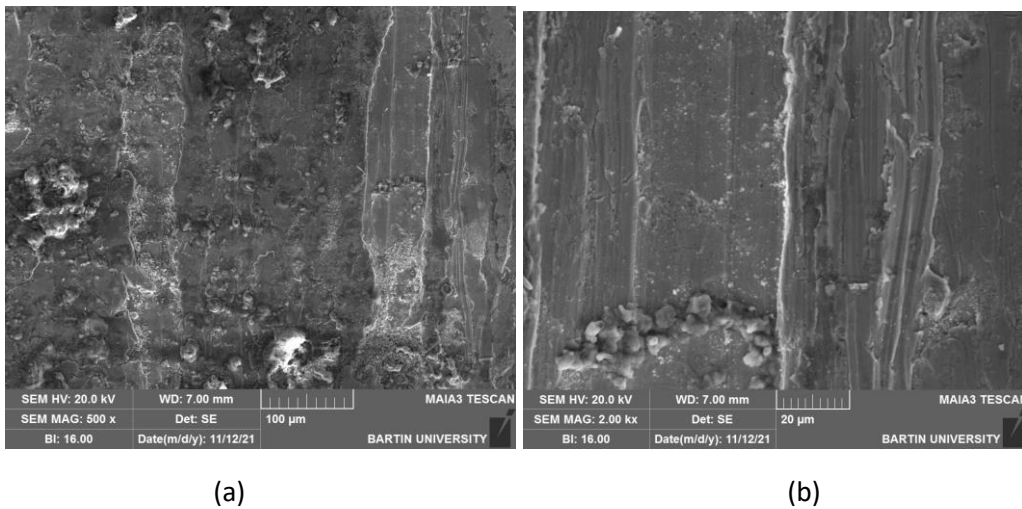
STEM Dedektörü: Taramalı geçirim elektron mikroskop dedektörü, Bright Field ve Dark Field görüntüleme

EDS: Oxford, Xmax 50 , **EBS:** Oxford, Nordlys

3.12 Numunelerin Sem Görüntüleri

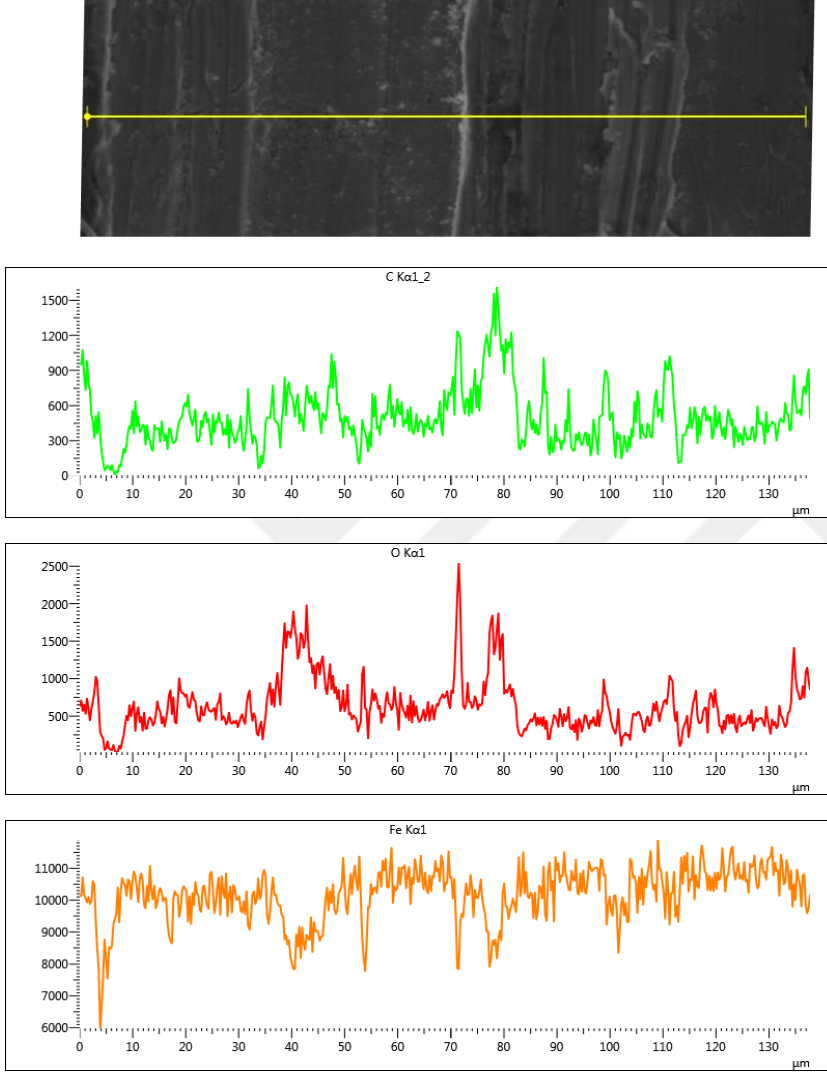
Her diskten 2 adet numune alınmıştır. Alınan numuneler A ve B şeklinde gruplandırılmıştır. Numuneler SEM mikroskobuna 6'lı grup halinde yerleştirilmiştir. Her numunede 100µm uzaklık ve 20µm uzaklıktan aşınan bölgeye ait görüntü bulunmaktadır. Her numuneye ait aşınan 20µm uzaklıktan görüntülerin çizgisel analiz ile içinde bulunan malzeme grafikleri çıkartılmıştır. Sem görüntülerinde aranan hedef Tungsten (aşındırıcı malzeme) miktarı az olan değerlerdir.

3.12.1 Deneysel Çalışma 1 (AISI 4140 Kaplamasız Çelik Disk, Oda Sıcaklığı (25°C)) Görüntüleri



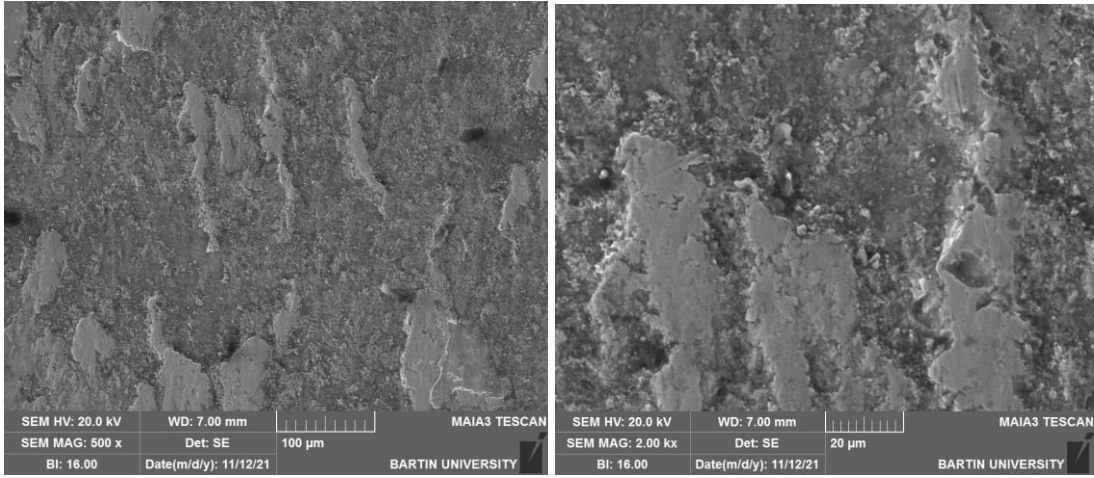
Şekil 3.68 Deneysel Çalışma 1'in (a) 100µm Uzaklıktan ve (b) 20µm Uzaklıktan Görüntüsü.

İlk deneysel çalışmanın malzeme grafiğinde özellikle 70 μm ve 80 μm mesafe aralığında karbon ve oksijen değerlerinin yüksek, demir değerinin düştüğü gözlenmektedir. Miktarı daha az olarak aynı durum 40 μm -50 μm aralığında da gözlenmektedir. Bu aralıklarda karbon ve oksijen elementleri bileşik oluşturmuştur.



Şekil 3.69 Deneysel Çalışma 1'in 20 μm Uzaklıktan SEM Görüntüsünün Linear Analizi.

3.12.2 Deneysel Çalışma 2 (AISI 4140 Kaplamasız Çelik Disk, 200°C) Görüntüleri

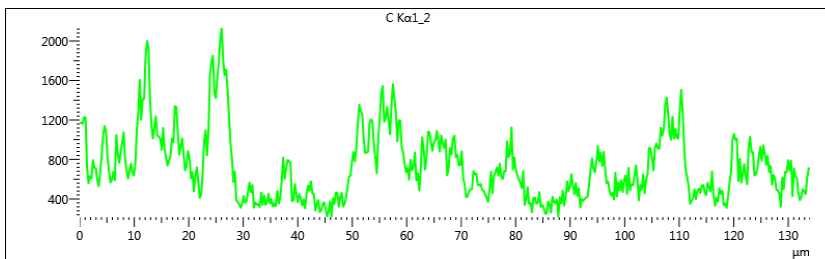
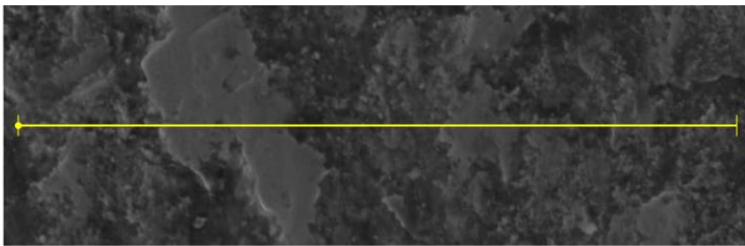


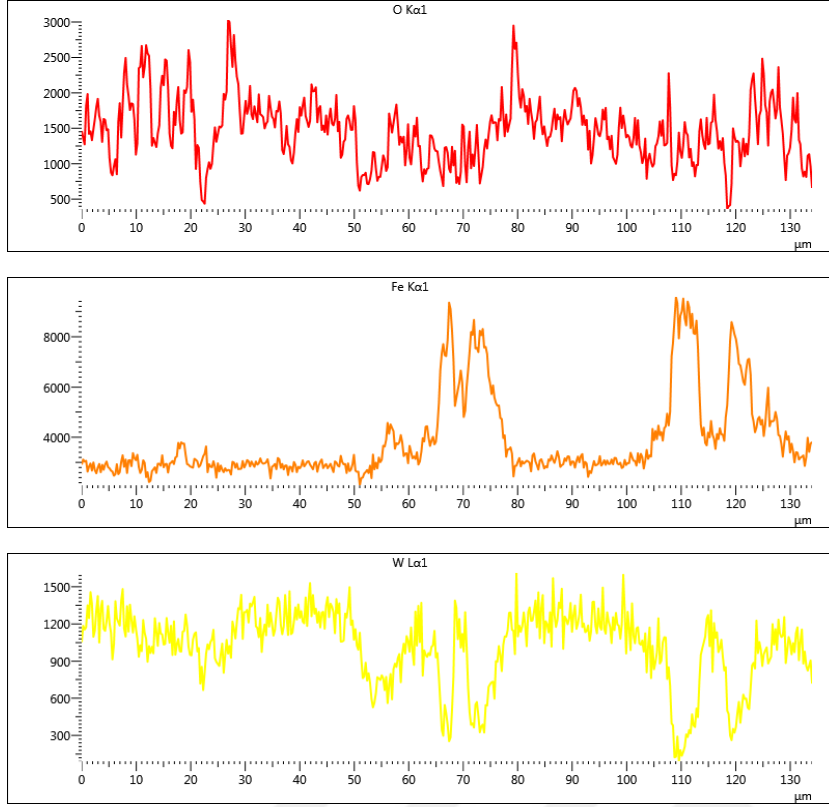
(a)

(b)

Şekil 3.70 Deneysel Çalışma 2'nin (a) 100µm Uzaklıktan ve (b) 20µm Uzaklıktan Görüntüsü.

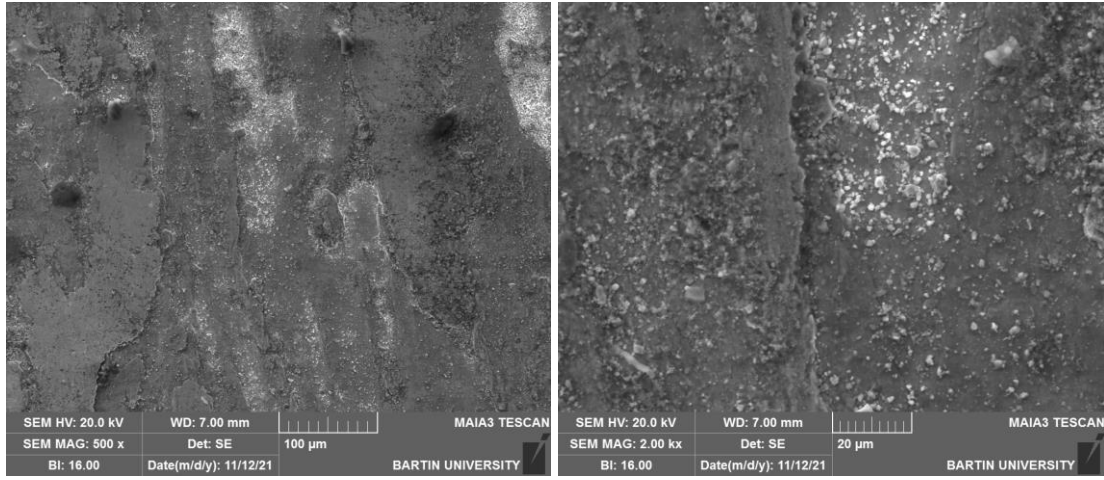
2. Deneysel Çalışmada karbon ve oksijen elementlerinin benzer özellikler gösterdiği gözlenmiştir. 25-30 µm aralığında hem karbon hem oksijen miktarı yoğun olarak görülmüştür. 67-69 µm ve 71-75 µm aralığında demir miktarının yüksek, aynı değerlerde tungsten miktarının düşük olduğu gözlenmiştir. 81 µm mesafesinde demir hariç her elementin yüksek olduğu, özellikle oksijenin diğer elementlere göre daha büyük bir oranla arttığı gözlenmiştir. 110 µm mesafede demirin yüksek, tungsten miktarının düşük olduğu görülmektedir. 119 µm mesafede ise 81 µm mesafeye göre tam tersi durum oluşmuştur.





Şekil 3.71 Deneyisel Çalışma 2’nin 20μm Uzaklıktan SEM Görüntüsünün Linear Analizi.

3.12.3 Deneyisel Çalışma 3 (AISI 4140 Kaplamasız Çelik Disk, 350°C) Görüntüleri



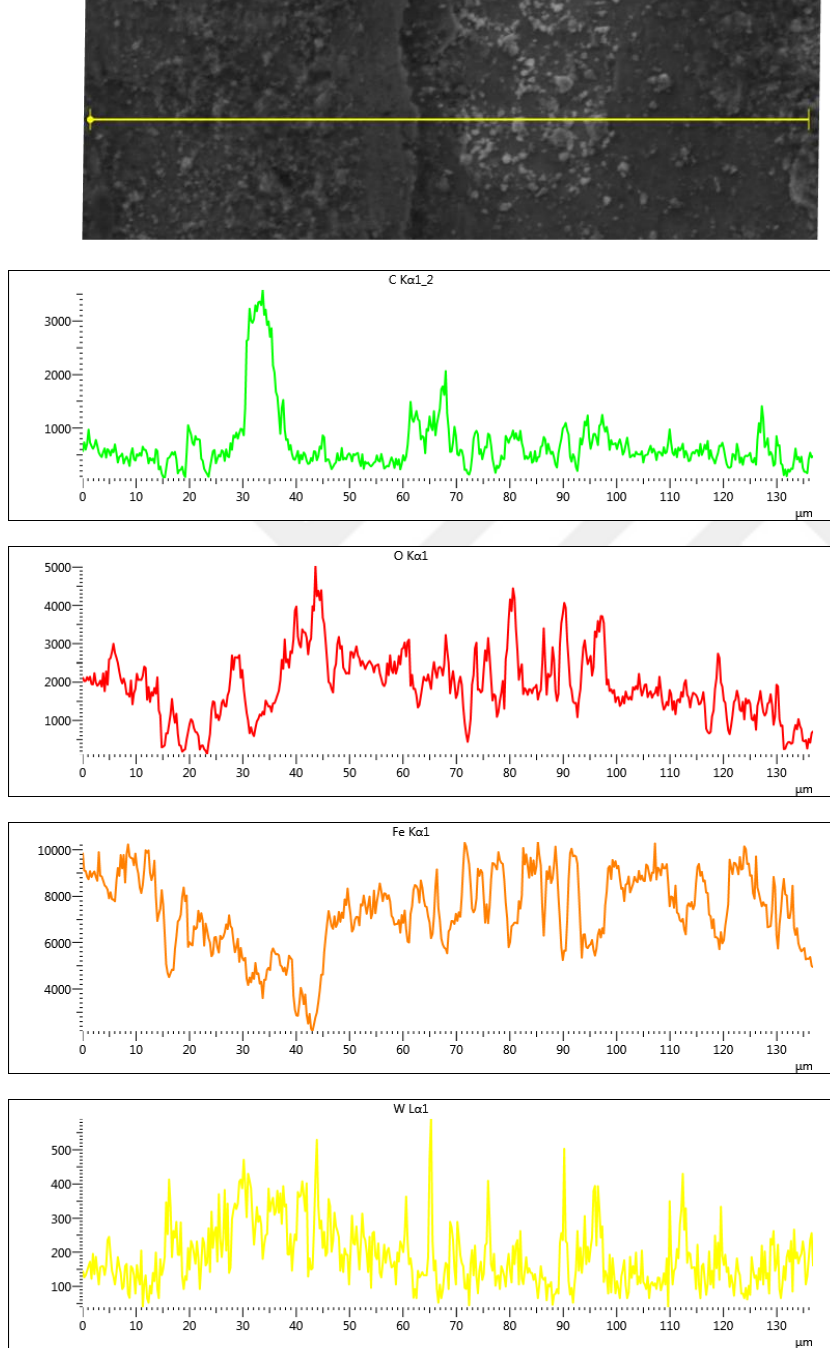
(a)

(b)

Şekil 3.72 Deneyisel Çalışma 3’ün (a) 100μm Uzaklıktan ve (b) 20μm Uzaklıktan Görüntüsü.

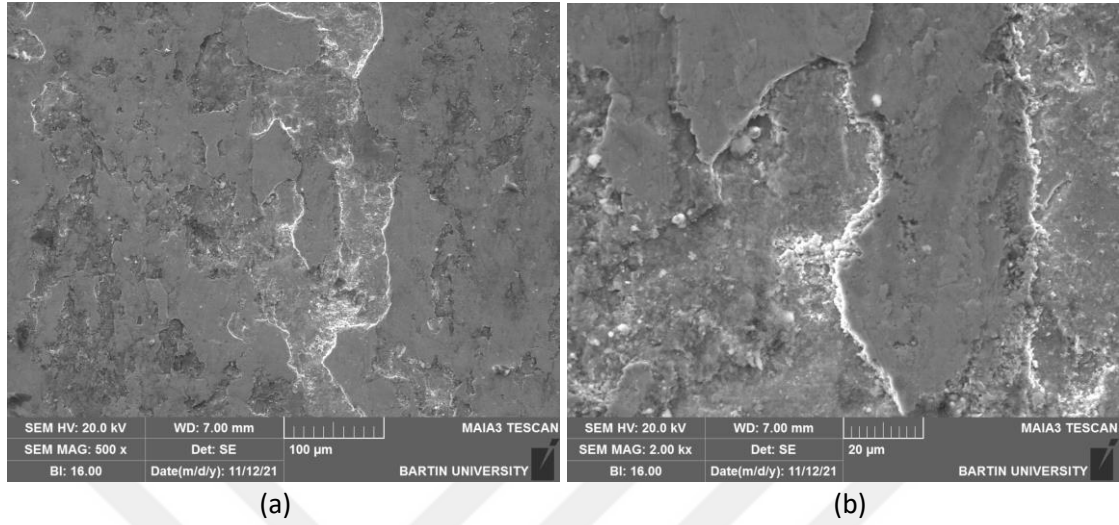
Deneyisel Çalışma 3’te 16-18 μm mesafede demir miktarının azaldığı, karbon miktarının, oksijen miktarının ve tungsten miktarının arttığı görülmektedir. 31 μm-36 μm arası yoğun

miktarda karbon gözlenmiştir. 44 μm mesafede tungsten ve oksijen miktarının yüksek olduğu gözlenmiştir. 66 μm mesafede şekildeki kat oluşmuş gibi görünen çizginin demir olduğu anlaşılmaktadır. 74 μm -98 μm arasında bulunan beyaz yapıların karbon, oksijen ve tungsten olduğu, kalan koyu yerlerin demir olduğu anlaşılmaktadır.



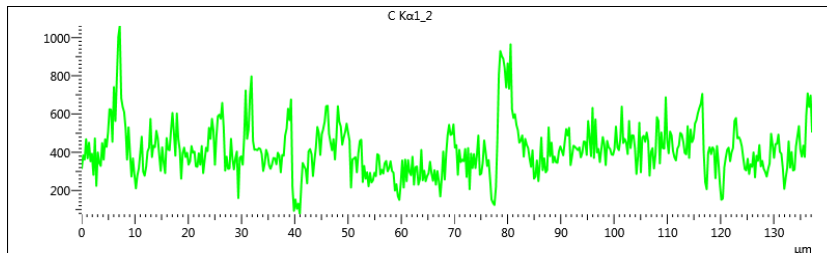
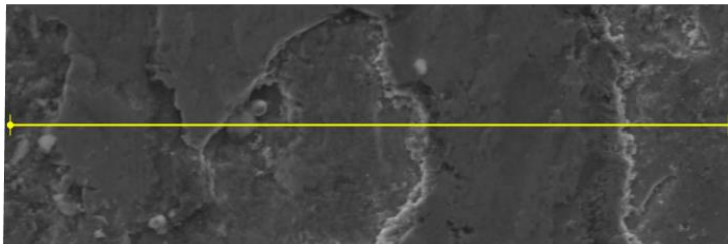
Şekil 3.73 Deneysel Çalışma 3'ün 20 μm Uzaklıktan SEM Görüntüsünün Linear Analizi.

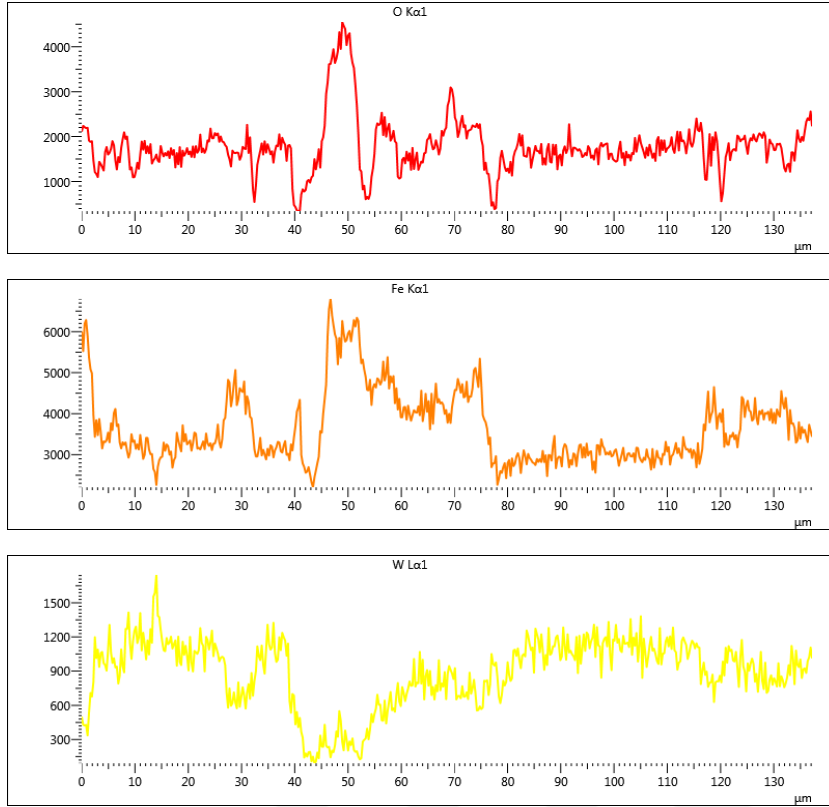
3.12.4 Deneysel Çalışma 4 (AISI 4140 Kaplamasız Çelik Disk, 500°C) Görüntüleri



Şekil 3.74 Deneysel Çalışma 4'ün (a) 100µm Uzaklıktan ve (b) 20µm Uzaklıktan Görüntüsü.

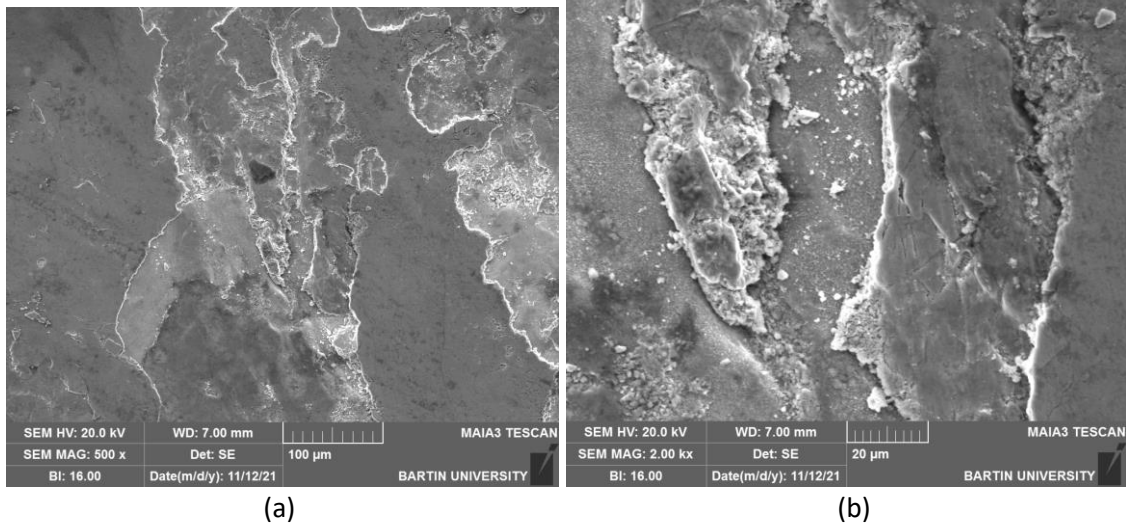
Deneysel Çalışma 4'te 1µm mesafede yoğun miktarda demir, 7µm mesafede ise yoğun miktarda karbon görülmüştür. 30µm mesafede demir artmış, tungsten azalmıştır. 47µm-50µm mesafede demir ile oksijenin yüksek değere çıktığı görülmektedir. O bölgede görünen yapı demirin oksitlenmesi olarak görülmektedir. 79µm mesafede yoğun miktarda karbon ve düşük miktarda oksijen ve demir görülmüştür. Görünen katlı yapının karbon yoğunluklu olduğu anlaşılmaktadır.





Şekil 3.75 Deneysel Çalışma 4'ün 20μm Uzaklıktan SEM Görüntüsünün Linear Analizi.

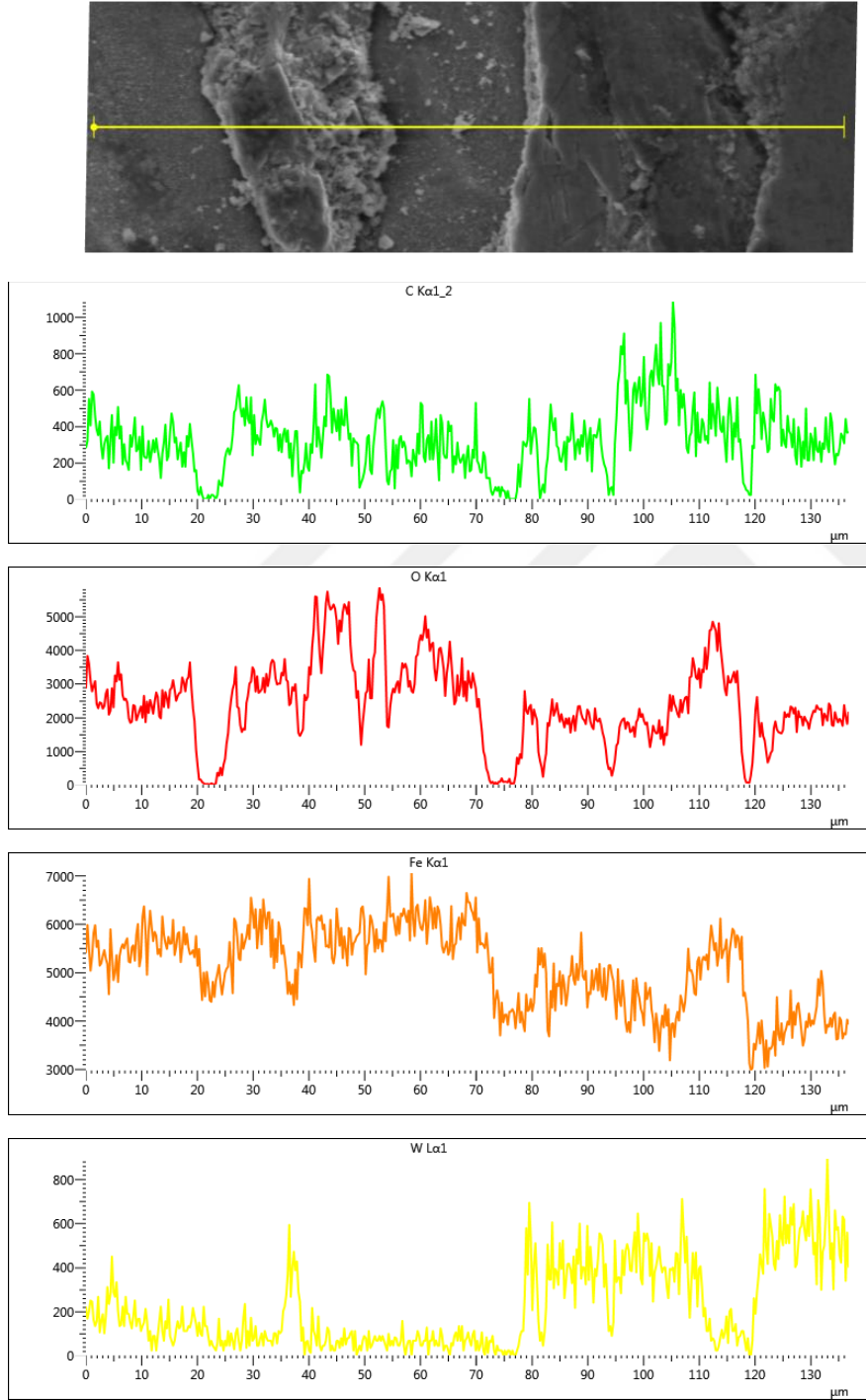
3.12.5 Deneysel Çalışma 5 (AISI 4140 Kaplamasız Çelik Disk, 650°C) Görüntüleri



Şekil 3.76 Deneysel Çalışma 5'in (a) 100μm Uzaklıktan ve (b) 20μm Uzaklıktan Görüntüsü.

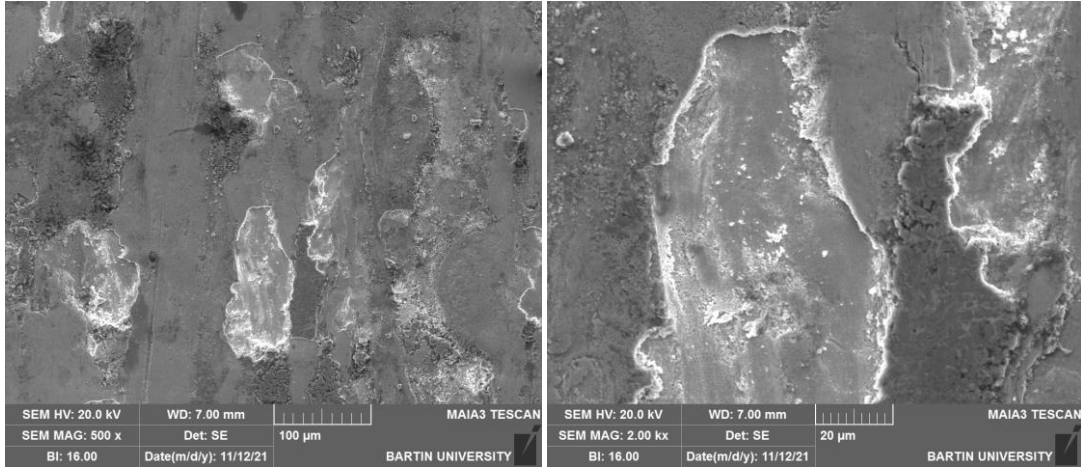
Deneysel çalışma 5'te 21-24μm mesafede tüm elementlerin yoğun miktarda düştüğü gözlenmiştir. Aynı düşüş 72-75μm aralığında ve 118μm değerinde de görülmektedir.

Daha az olacak şekilde düşüşler 50 μ m, 82-83 μ m ve 94 μ m mesafelerinde de görülmüştür. Bu düşüşler demirin diğer elementlere göre daha çok olduğunu göstermektedir. 27 μ m ve 80,84 μ m mesafede kat kat görünen açık renkli çizgilerin çoğunluğu karbon ağırlıklı yapı olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 3.77 Deneysel Çalışma 5'in 20 μ m Uzaklıktan SEM Görüntüsünün Linear Analizi.

3.12.6 Deneysel Çalışma 6 (AISI 4140 Kaplamasız Çelik Disk, 800°C) Görüntüleri

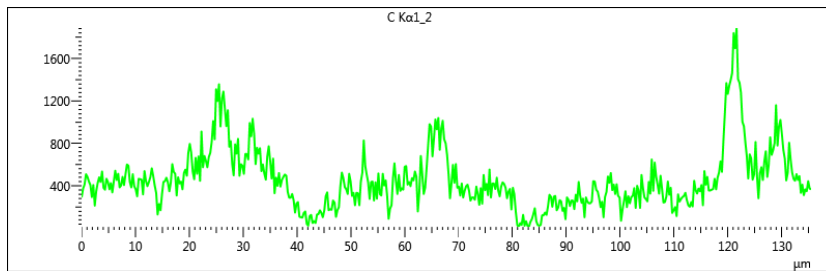
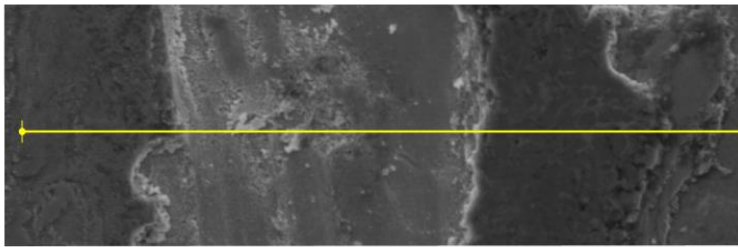


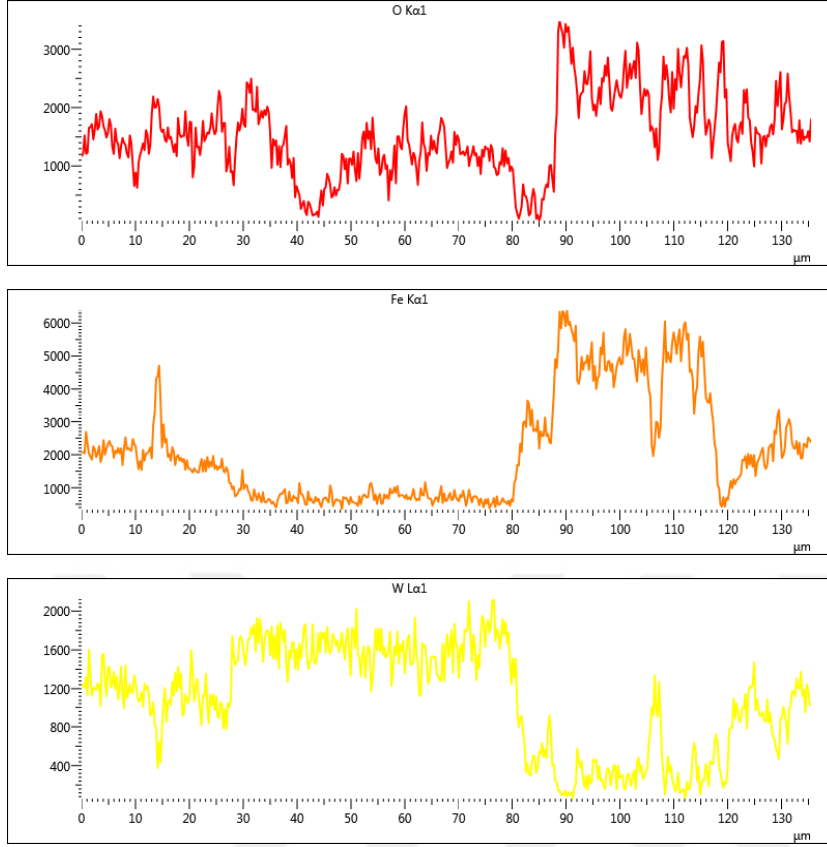
(a)

(b)

Şekil 3.78 Deneysel Çalışma 6'nın (a) 100µm Uzaklıktan ve (b) 20µm Uzaklıktan Görüntüsü.

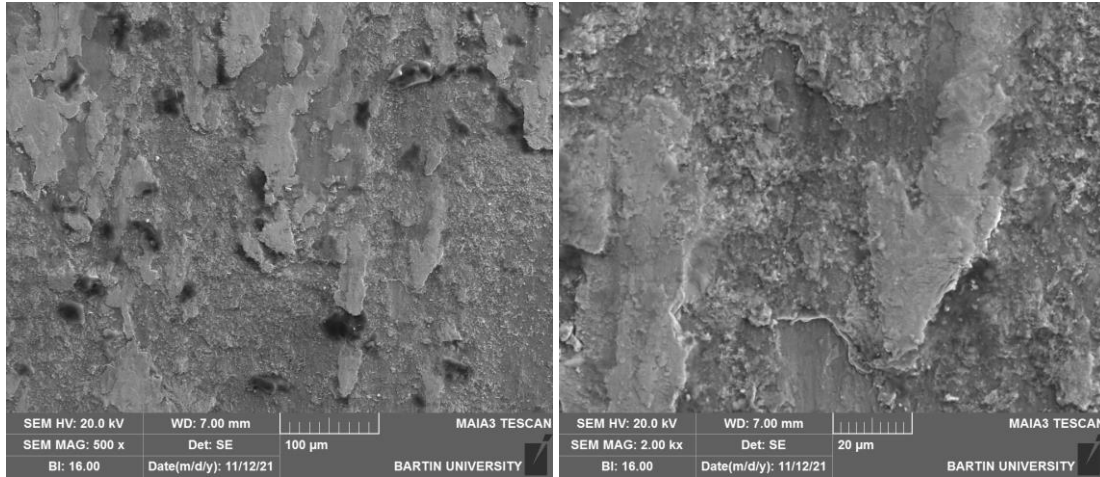
Deneysel Çalışma 6'da 15µm mesafede anlık demir artışı görülmüştür. 65-70µm aralığında bir miktar karbon ve oksijen artışı vardır. 90-92µm mesafede demirin oksijenle bileşik yaptığı görülmektedir. 90-118µm mesafe arasında demir ve oksijenin genel olarak yüksek olduğu görülmektedir. 120-125µm mesafe arasında karbon oksijenle bileşik yapmaya eğilimlidir. Şekilde görünen açık renkli bölgenin Tungsten olduğu, 85-120 µm arası koyu bölgenin demir ve oksijen yoğunluklu bölge olduğu görülmektedir. Demirin oksitlendiği anlaşılmaktadır.





Şekil 3.79 Deneysel Çalışma 6'nın 20μm Uzaklıktan SEM Görüntüsünün Linear Analizi.

3.12.7 Deneysel Çalışma 7 (Demir Süperalaşımli AISI 4140 Çelik Disk, Oda Sıcaklığı (25°C)) Görüntüleri

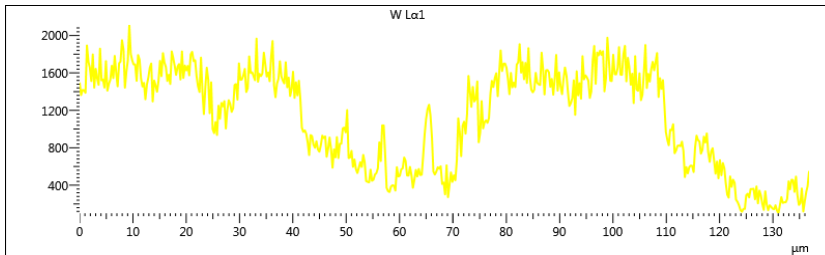
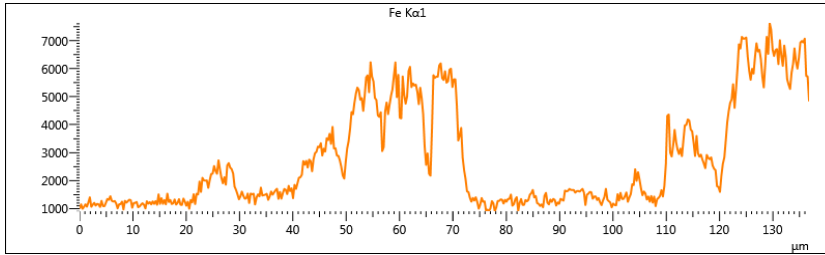
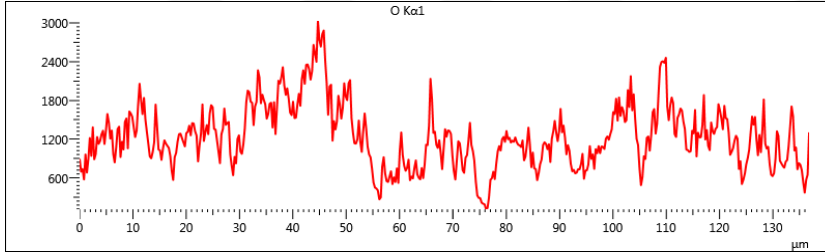
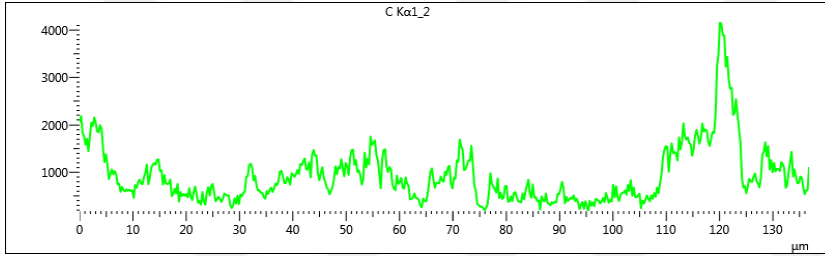
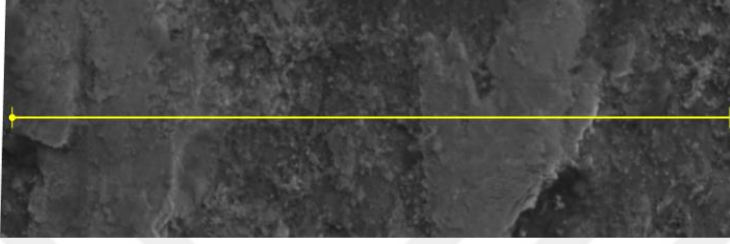


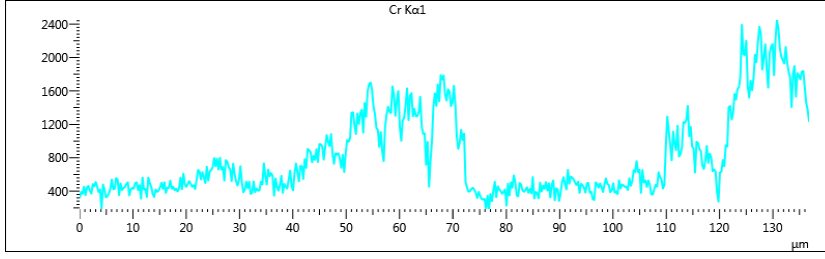
(a)

(b)

Şekil 3.80 Deneysel Çalışma 7'nin (a) 100μm Uzaklıktan ve (b) 20μm Uzaklıktan Görüntüsü.

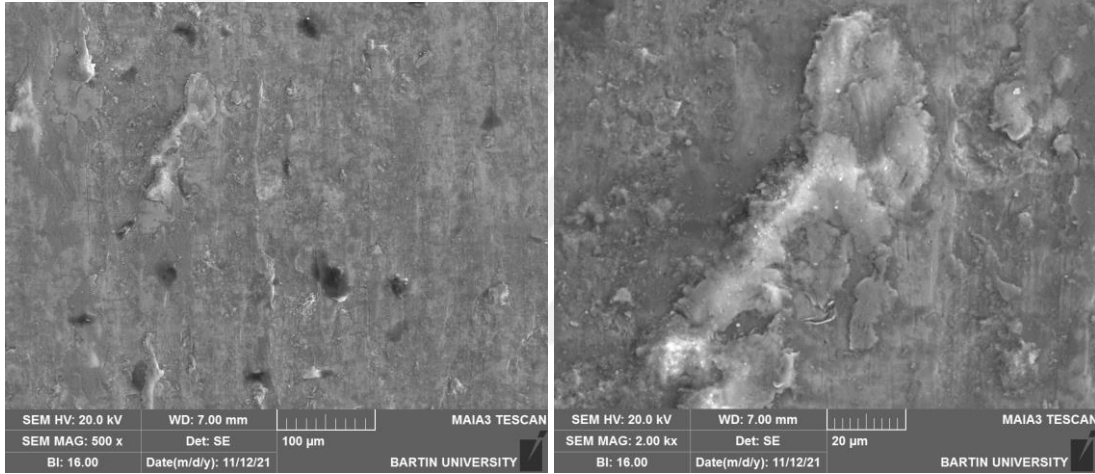
25-27 μm mesafede demir ve krom oranında artış görülmüştür. 53-72 μm mesafede (56 ve 66 μm noktaları hariç) demir ve krom yoğun oranda bulunmaktadır. 110 μm mesafede tungsten hariç tüm elementlerin daha yoğun olduğu görülmüştür. 120 μm mesafede yoğun miktarda karbon görülmüştür. 125-135 μm mesafede demir ve krom yoğun miktarda bulunmaktadır. 53-72 μm ve 125-135 μm mesafede görünen parçacıklı alanda demirin ve kromun yoğun olduğu görülmektedir.





Şekil 3.81 Deneysel Çalışma 7'nin 20µm Uzaklıktan SEM Görüntüsünün Linear Analizi.

3.12.8 Deneysel Çalışma 8 (Demir Süperalaşımli AISI 4140 Çelik Disk, 200°C) Görüntüleri

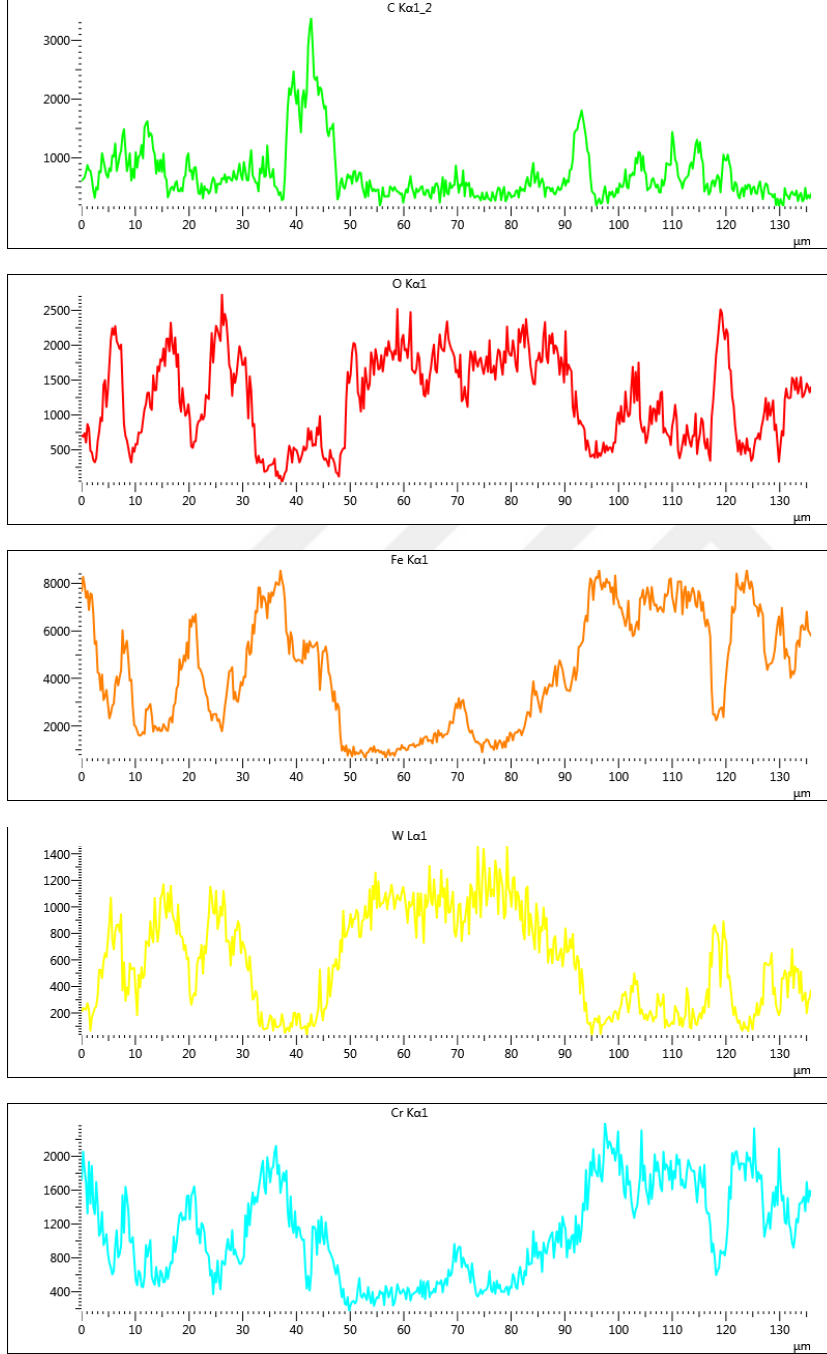
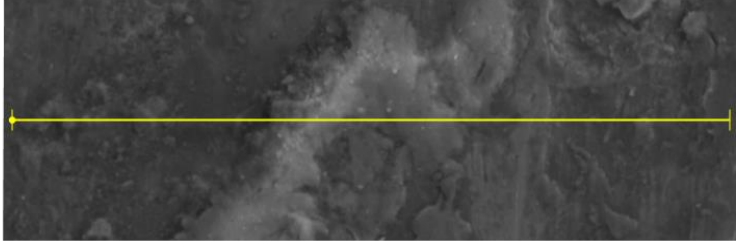


(a)

(b)

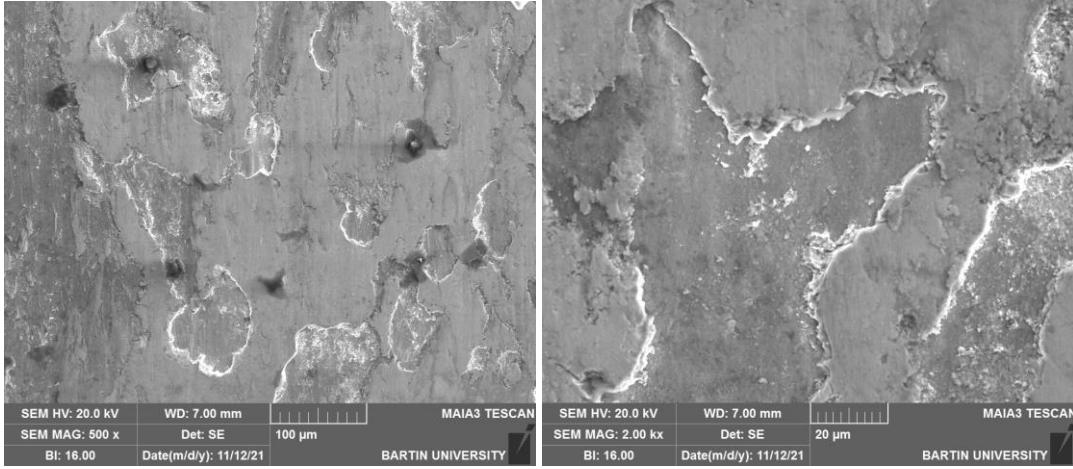
Şekil 3.82 Deneysel Çalışma 8'in (a) 100µm Uzaklıktan ve (b) 20µm Uzaklıktan Görüntüsü.

9 µm noktası, 22 µm noktası ve 30-40 µm mesafede demir ve krom yoğun, tungsten ve oksijenin az olduğu görülmüştür. 30-40 µm mesafede görünen düz hattın demir ve kromun yoğun olduğu yer olarak görülmektedir. 40-45 µm aralığında karbonun miktarca yüksek olduğu, karbonun zirvede olduğu anda oksijen ve tungsteninde zirvede olduğu görülmüştür. 50-90 µm mesafede oksijen ve tungsten tabaka oluşturmuştur. 95-115 µm mesafede demir ve krom yoğun miktarda bulunmaktadır. 120 µm noktasında karbon, oksijen ve tungstende artış, demir ve kromda azalma görülmüştür.



Şekil 3.83 Deneysel Çalışma 8'in 20μm Uzaklıktan SEM Görüntüsünün Linear Analizi.

3.12.9 Deneysel Çalışma 9 (Demir Süperalaşımli AISI 4140 Çelik Disk, 350°C) Görüntüleri

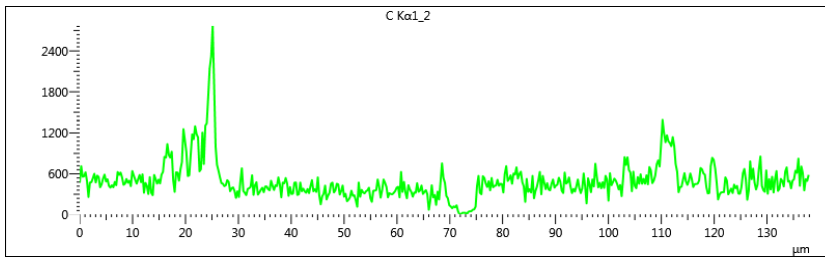
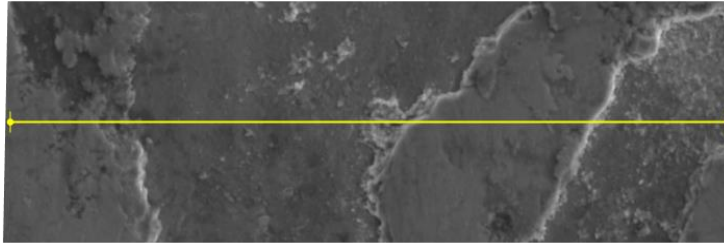


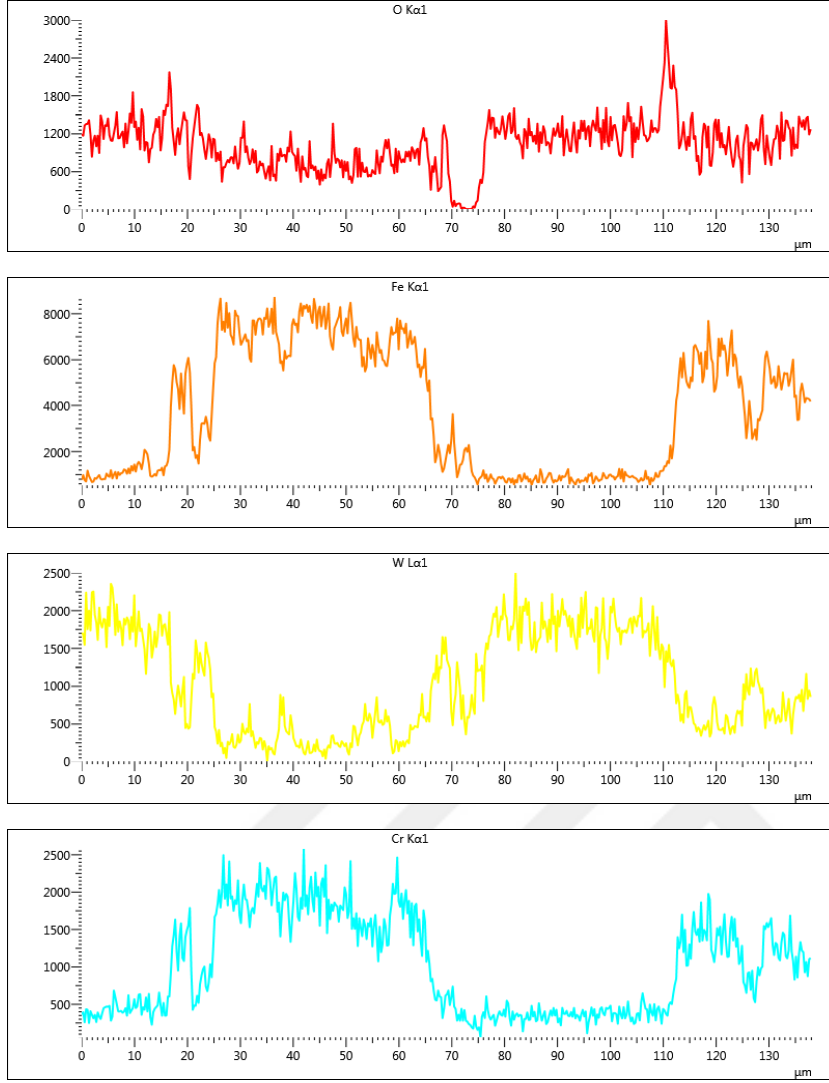
(a)

(b)

Şekil 3.84 Deneysel Çalışma 9'un (a) 100µm Uzaklıktan ve (b) 20µm Uzaklıktan Görüntüsü.

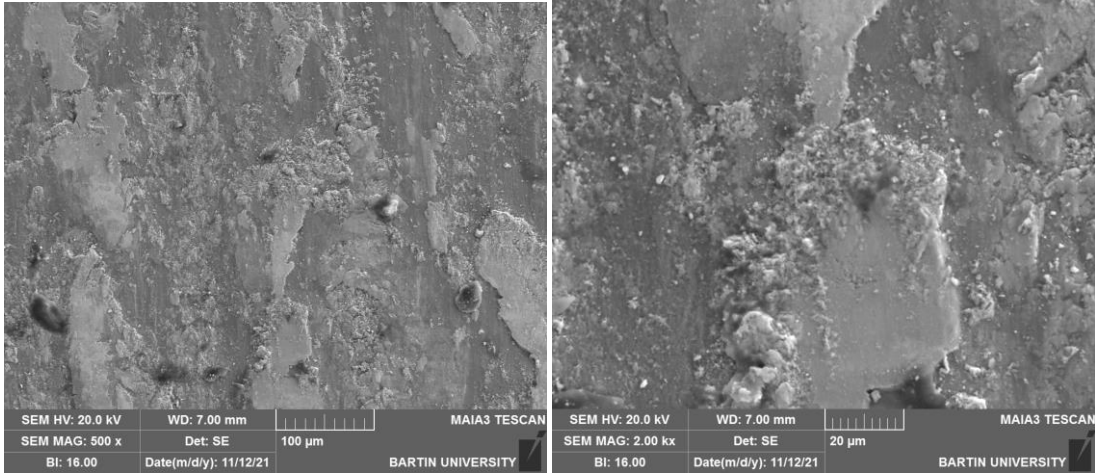
20 µm mesafede karbon, demir ve krom miktarı daha fazla, oksijen ve tungsten miktarı daha az görülmüştür. 25-65 µm mesafede, krom ile demir yoğun olarak bulunmaktadır. 70-75 µm mesafede, demir hariç tüm elementlerin azaldığı görülmektedir. 110 µm mesafede karbon ile oksijen yoğun olarak görülmüştür. 115-125 µm mesafede, krom ile demir yoğun olarak görülmüştür.





Şekil 3.85 Deneysel Çalışma 9'un 20μm Uzaklıktan SEM Görüntüsünün Linear Analizi.

3.12.10 Deneysel Çalışma 10 (Demir Süperalaşımli AISI 4140 Çelik Disk, 500°C) Görüntüleri

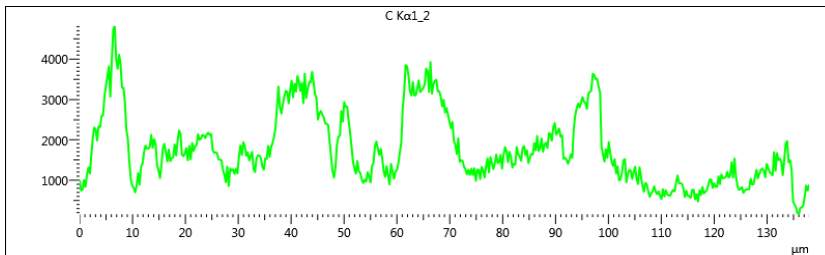
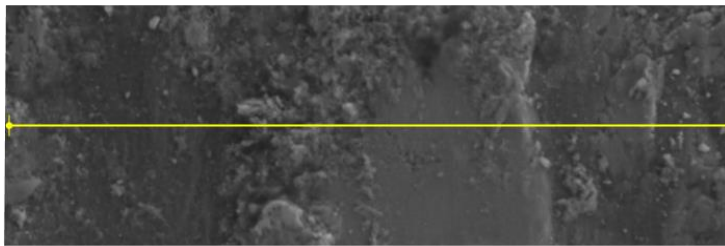


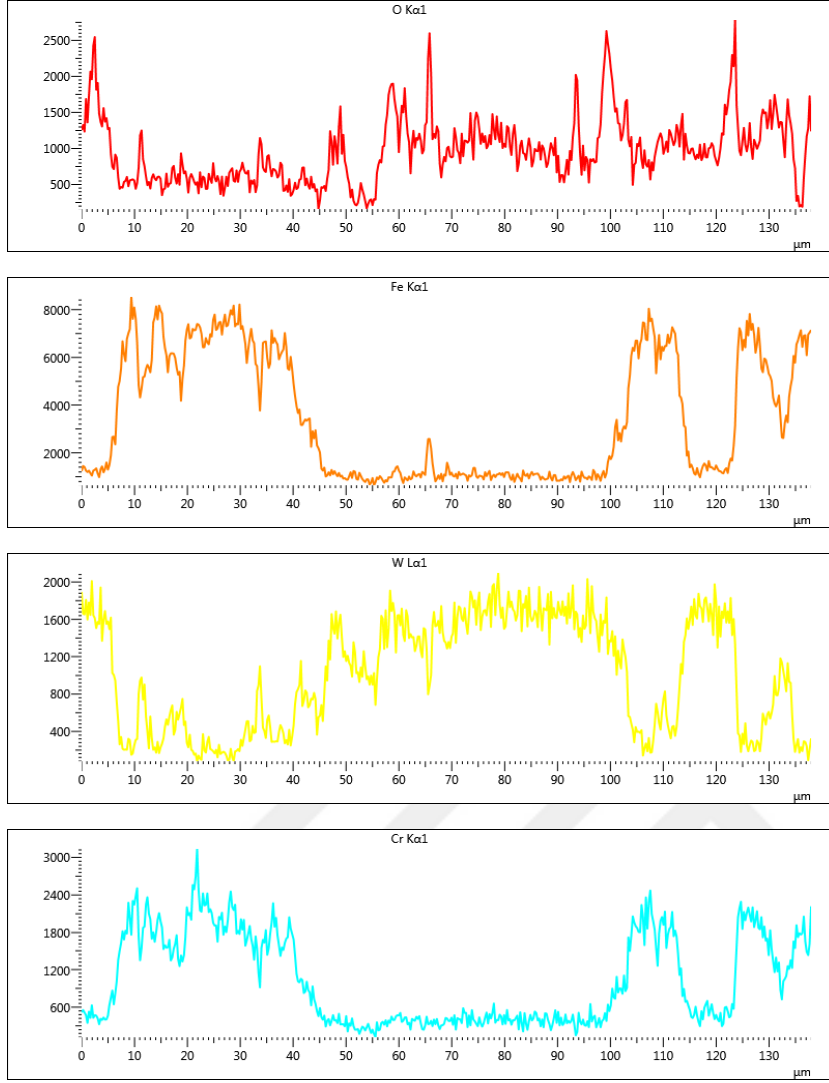
(a)

(b)

Şekil 3.86 Deneysel Çalışma 10'un (a) 100µm Uzaklıktan ve (b) 20µm Uzaklıktan Görüntüsü.

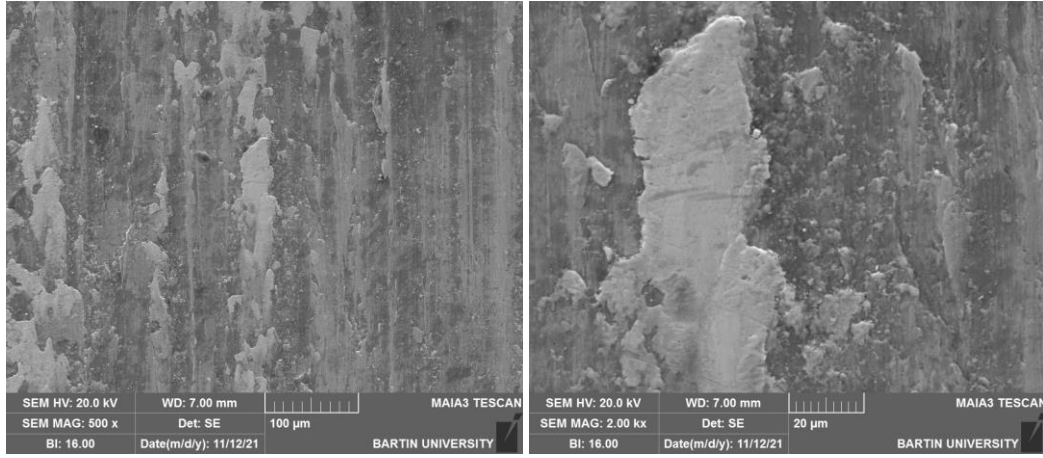
10 µm mesafede demir ve krom yüksek, karbon ve oksijen düşük çıkmıştır. 21 µm mesafede yoğun miktarda krom görülmüştür. 34 µm mesafede tungstenin oksitlendiği görülmüştür. 40-45 µm mesafede diğer elementlerin inişli çıkışlı olmasına karşın karbon hep benzer değerde kalmıştır. 50 µm mesafede karbon, oksijen ve tungstende fazlalık görülmüştür. 66 µm mesafede karbon, oksijen ve demirde artış görülmüştür. 110 µm mesafede, 125-130 µm mesafede ve 136 µm mesafede demir ve krom yoğun olarak görülmüştür. 124 µm mesafede tungsten hariç tüm elementlerde artış görülmüştür.





Şekil 3.87 Deneysel Çalışma 10'un 20μm Uzaklıktan SEM Görüntüsünün Linear Analizi.

3.12.11 Deneysel Çalışma 11 (Demir Süperalaşımli AISI 4140 Çelik Disk, 650°C) Görüntüleri

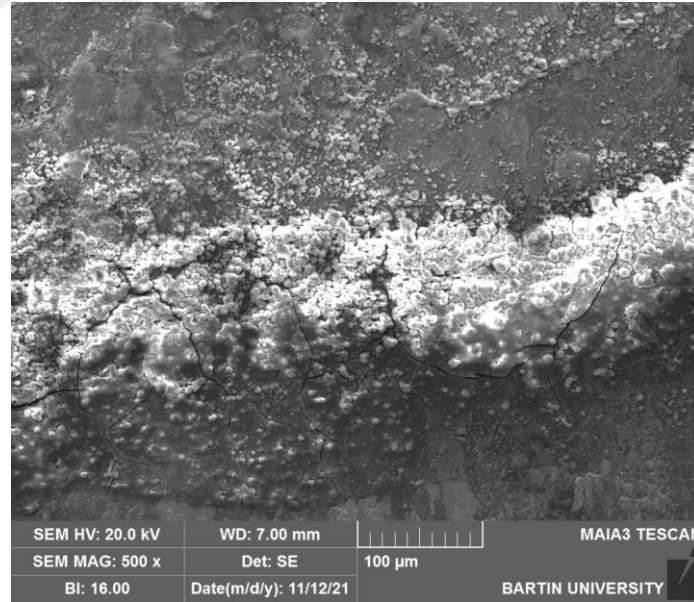


(a)

(b)

Şekil 3.88 Deneysel Çalışma 11'in (a) 100µm Uzaklıktan ve (b) 20µm Uzaklıktan Görüntüsü.

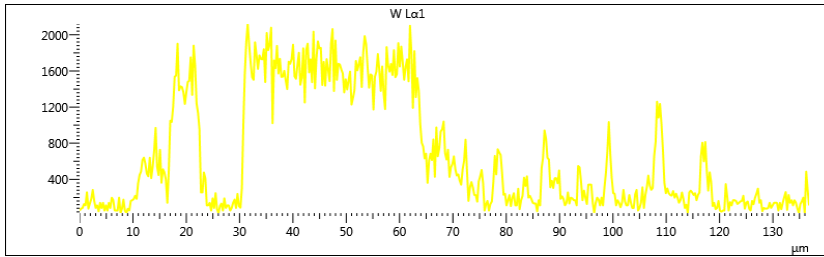
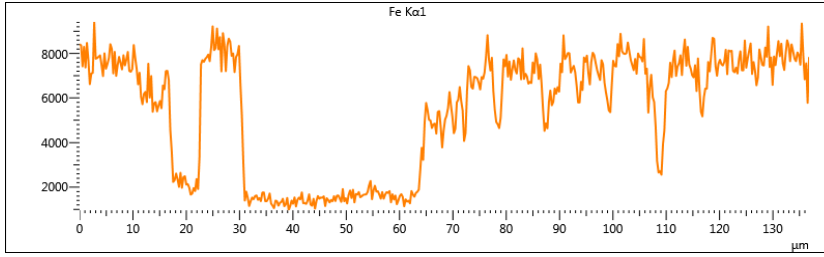
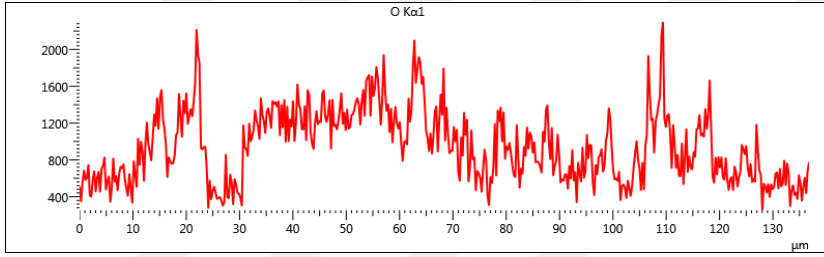
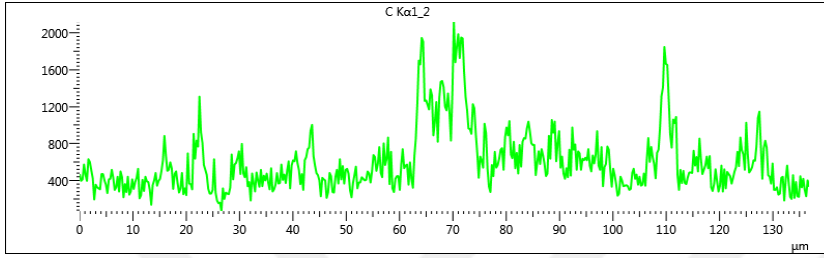
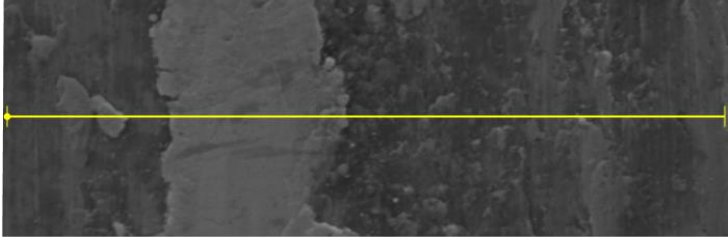
11. Deneysel Çalışmada, pimin kırıldığı bölge sem mikroskopunda bulunmuştur ve görüntüsü verilmiştir. Şekil 3.89'da görünen beyaz tabakanın tamamı Tungsten olarak tespit edilmiştir.

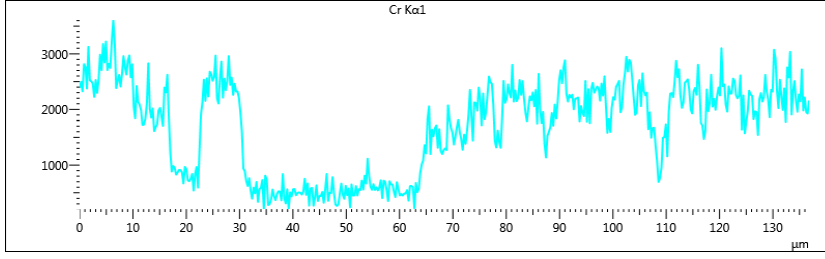


Şekil 3.89 Deneysel Çalışma 11'in pimin kırıldığı bölgenin bir kısmı.

Deneysel çalışmada önemli olan aşınan disk olduğu için, aşındırıcı tungstenin yoğun olduğu bölgenin fazladan grafiği çıkartılmamıştır. 25-30 µm mesafede demir ve krom miktarı yüksek çıkmıştır. 30-60 µm mesafede görünen düz tabaka tungstenin ve oksijenin

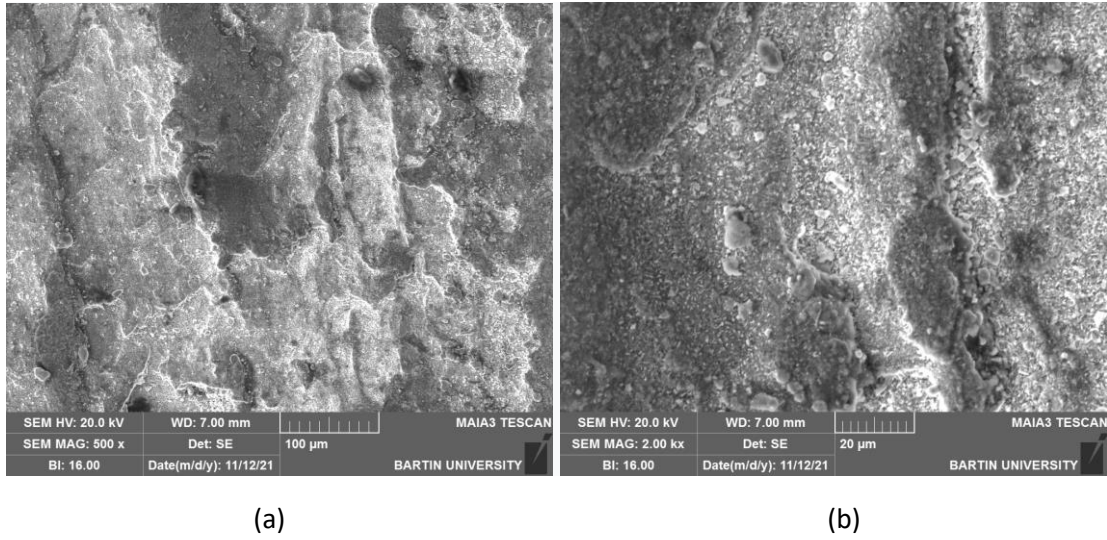
yoğun olduğu alandır. 110 μm mesafede karbon, oksijen ve tungsten miktarının yüksek, demir ile krom miktarının düşük olduğu çıkmıştır.





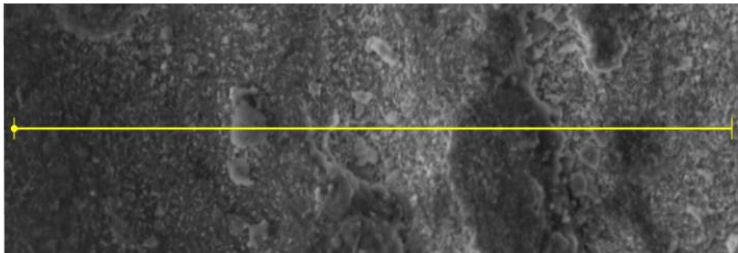
Şekil 3.90 Deneysel Çalışma 11'in 20μm Uzaklıktan SEM Görüntüsünün Linear Analizi.

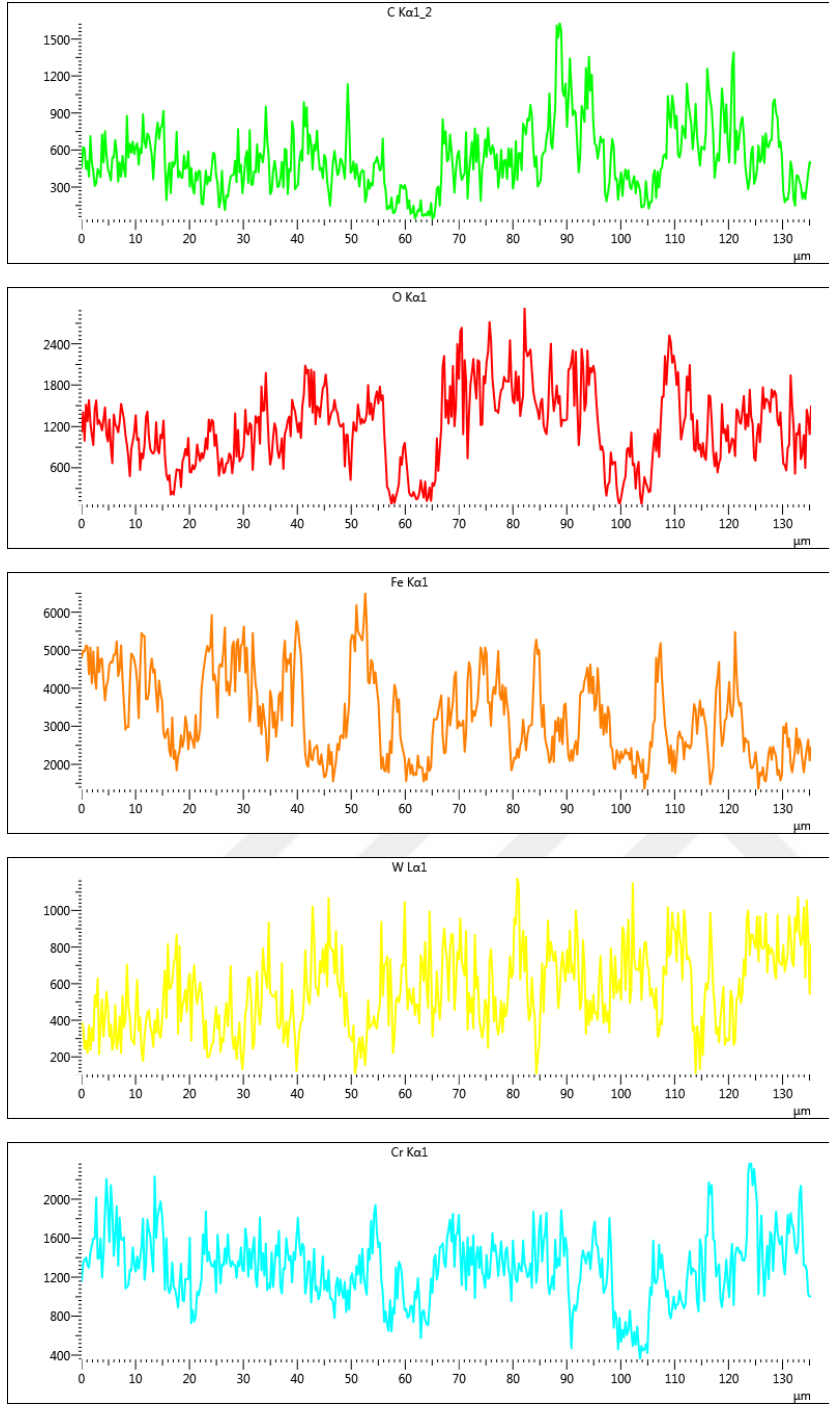
3.12.12 Deneysel Çalışma 12 (Demir Süperalaşımli AISI 4140 Çelik Disk, 800°C) Görüntüleri



Şekil 3.91 Deneysel Çalışma 12'nin (a) 100μm Uzaklıktan ve (b) 20μm Uzaklıktan Görüntüsü.

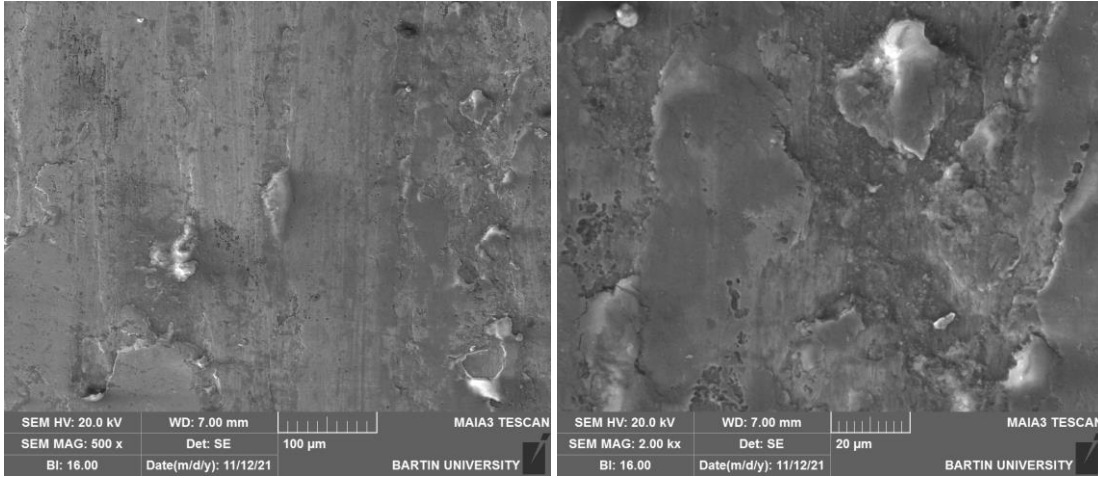
Deneysel Çalışma 12'nin görüntüsü diğer görüntülere göre farklı çıkmıştır. Diğer sonuçlara göre daha düzensiz dağılımlar görülmektedir. 0-8 μm arası mesafede görünen koyu kısmın çoğunluğu demirdir. 40 μm'de görünen parçacık tungsten ve oksijendir. 65-80 μm arasında tüm elementlerin karışık olarak bulunmaktadır. 84 μm mesafede demir ve krom yoğun olarak bulunmaktadır. 100-110 μm mesafede görünen kırıklı yapı aşındırıcı Tungstenin görüntüsüdür.





Şekil 3.92 Deneysel Çalışma 12'nin 20μm Uzaklıktan SEM Görüntüsünün Linear Analizi.

3.12.13 Deneysel Çalışma 13 (Kobalt Süperalaşımli AISI 4140 Çelik Disk, Oda Sıcaklığı (25°C)) Görüntüleri

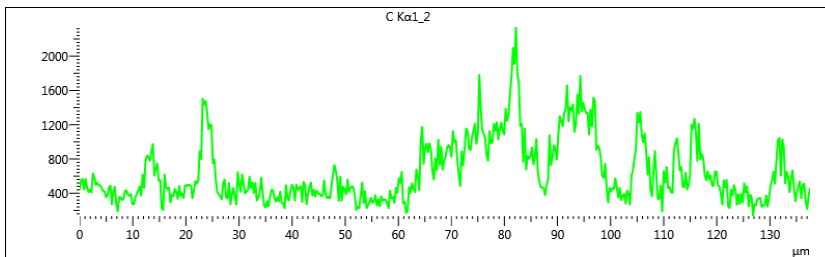
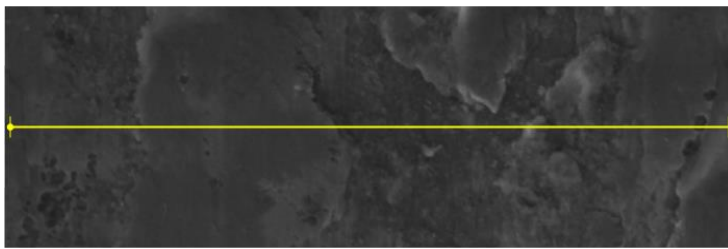


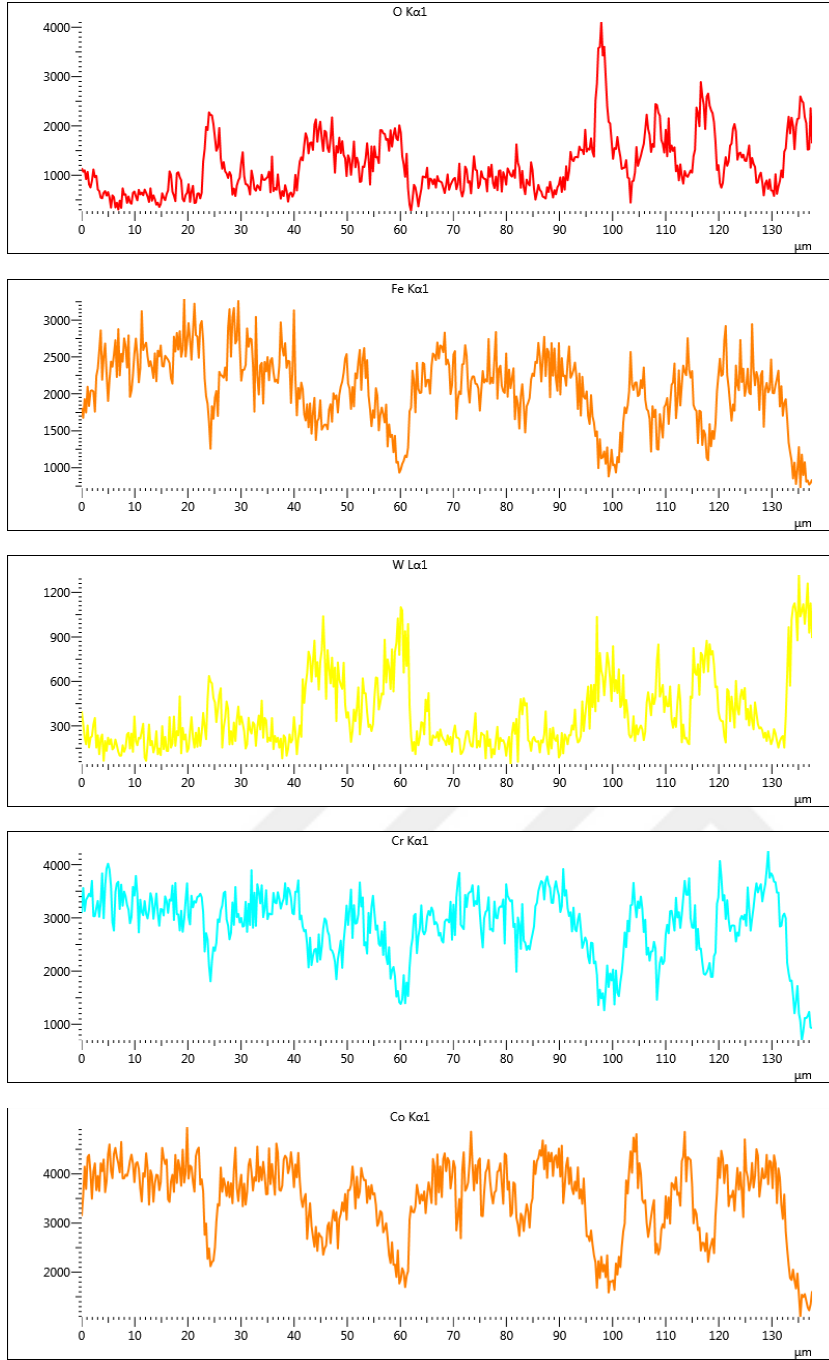
(a)

(b)

Şekil 3.93 Deneysel Çalışma 13'ün (a) 100µm Uzaklıktan ve (b) 20µm Uzaklıktan Görüntüsü.

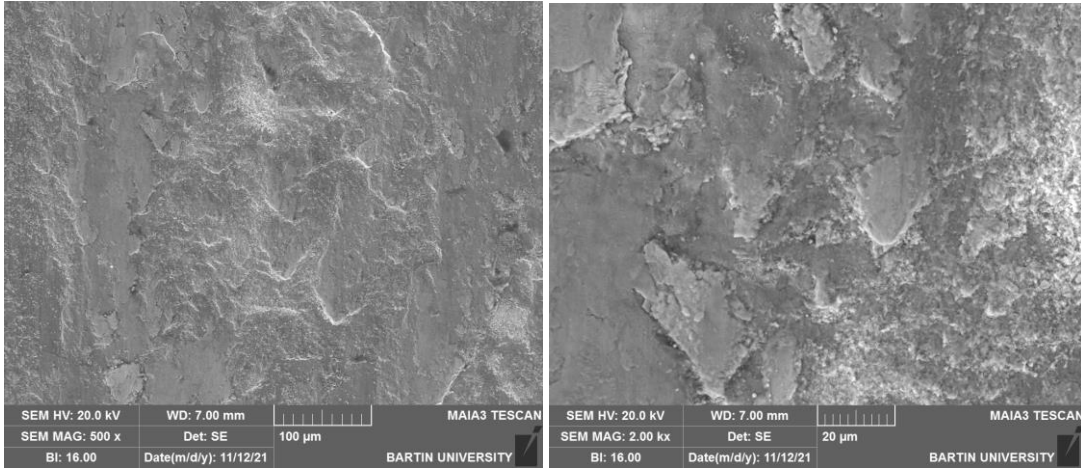
25-40 µm arasında bulunan düzlemsel yapı demir, kobalt ve krom yoğunluklu olarak, 40-50 µm arasında bulunan düzlemsel yapının ise tungsten ve oksijen olduğu görülmektedir. 50-55 µm bulunan düzlemsel yapının devamı yine demir, kobalt ve krom yoğunluklu olarak görülmüştür. 81 µm mesafede karbon ve oksijenin yükseldiği görülmüştür. Bileşik oluşturdıkları anlaşılmaktadır. 98 µm mesafede beyaz renkli yapının oksitlenmiş tungsten olduğu görülmektedir. 104 µm mesafede koyu yapının karbon, demir, kobalt ve krom olduğu görülmektedir.





Şekil 3.94 Deneysel Çalışma 13'ün 20μm Uzaklıktan SEM Görüntüsünün Linear Analizi.

3.12.14 Deneysel Çalışma 14 (Kobalt Süperalaşımli AISI 4140 Çelik Disk, 200°C) Görüntüleri

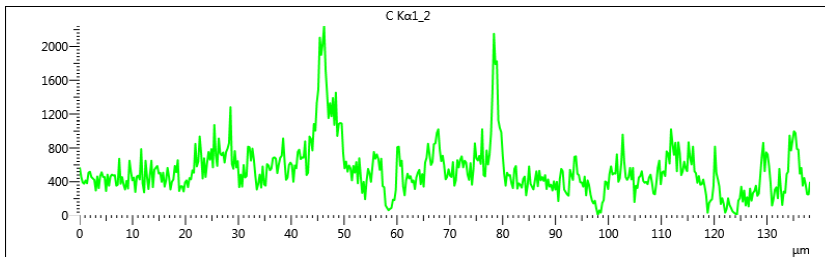
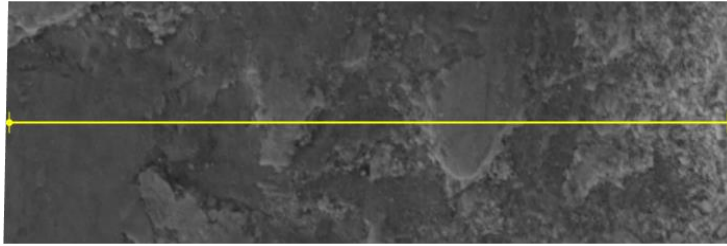


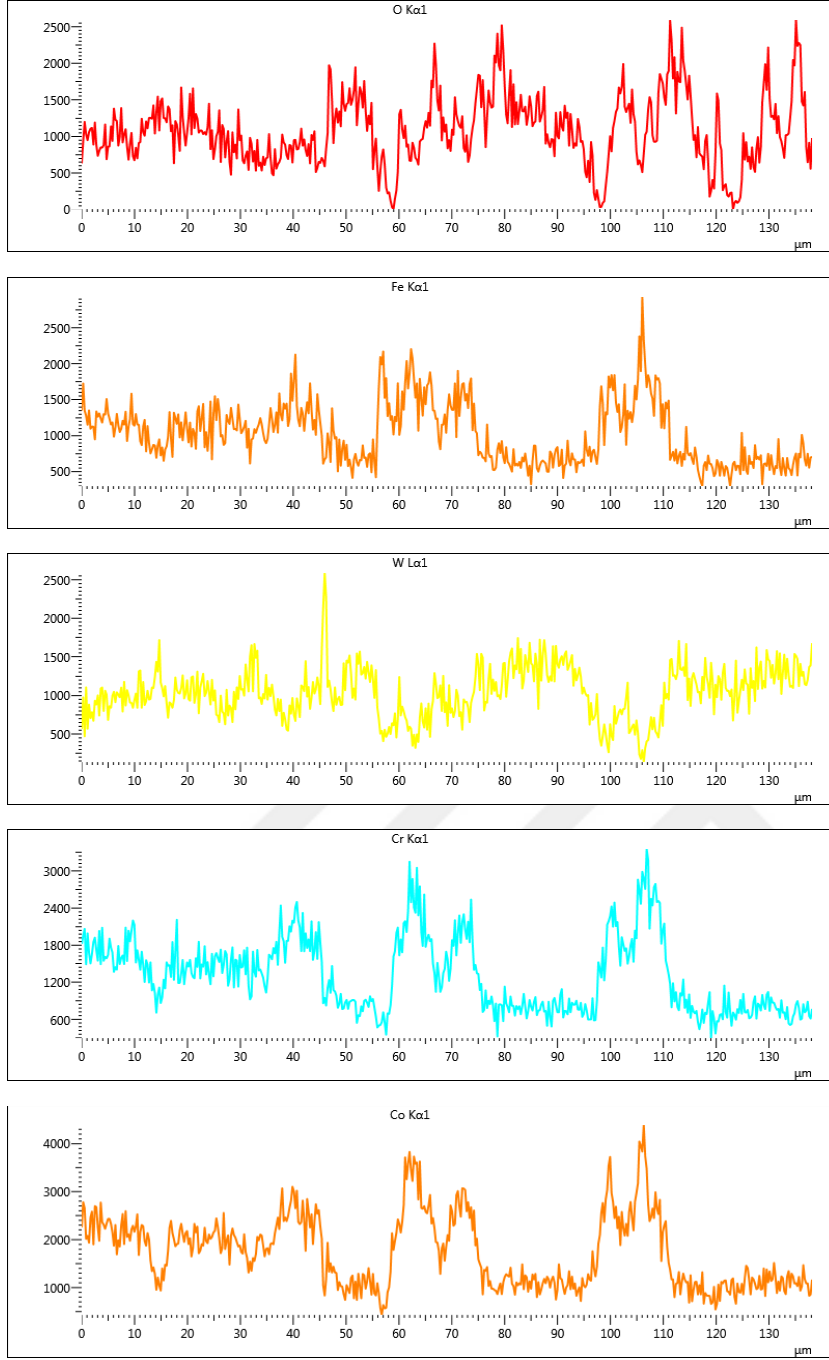
(a)

(b)

Şekil 3.95 Deneysel Çalışma 14'ün (a) 100µm Uzaklıktan ve (b) 20µm Uzaklıktan Görüntüsü.

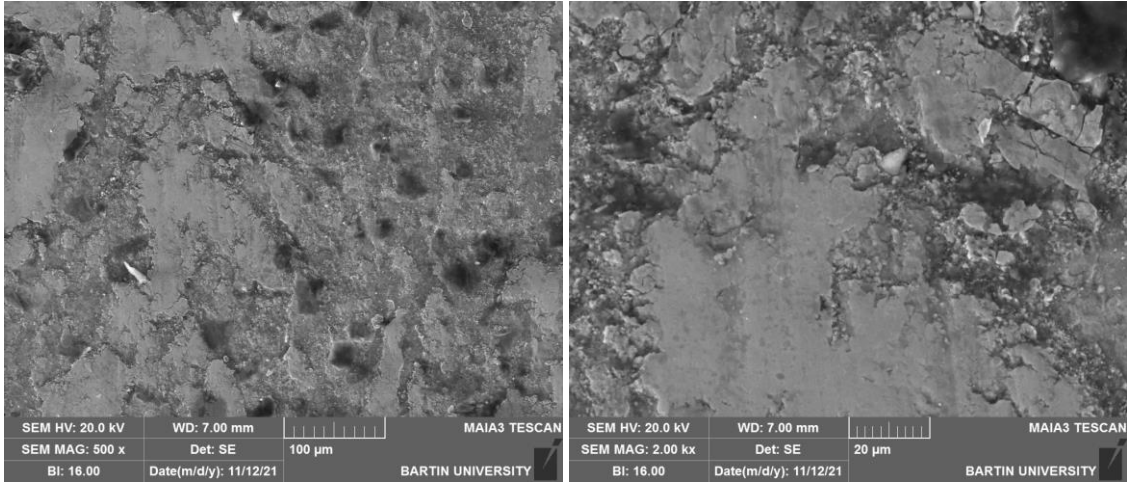
0-30 µm mesafe arasında 14 µm noktası hariç elementler dengeli orandadır. 14 µm mesafede demir, kobalt ve krom az çıkmıştır. 46 µm mesafede yoğun miktarda karbon ve tungsten görülmüştür. 80 µm mesafede yoğun miktarda karbon ve oksijen görülmüştür. 56 ve 80 µm arasında bulunan koyu bölge çoğunlukla demir, kobalt ve kromun yoğun olduğu yerdir. 110 µm mesafeden sonra kalan parçalı yapı aşındırıcı tungstene aittir.





Şekil 3.96 Deneysel Çalışma 14'ün 20μm Uzaklıktan SEM Görüntüsünün Linear Analizi.

3.12.15 Deneysel Çalışma 15 (Kobalt Süperalaşımli AISI 4140 Çelik Disk, 350°C) Görüntüleri

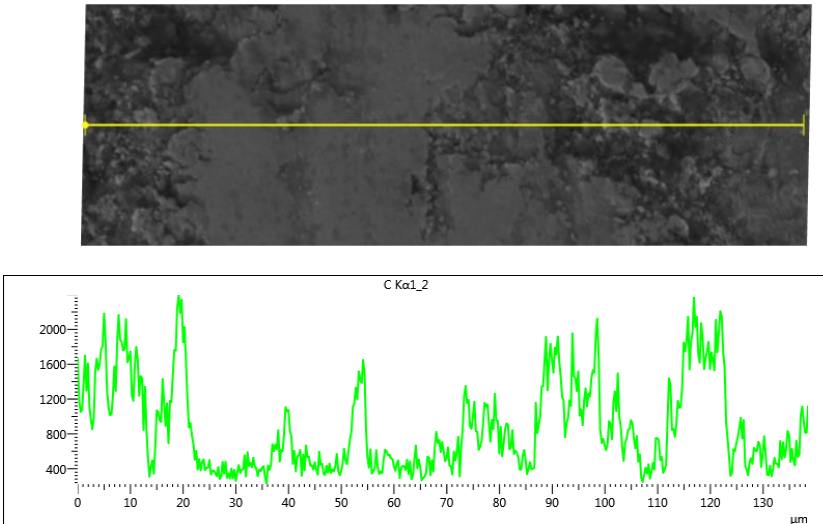


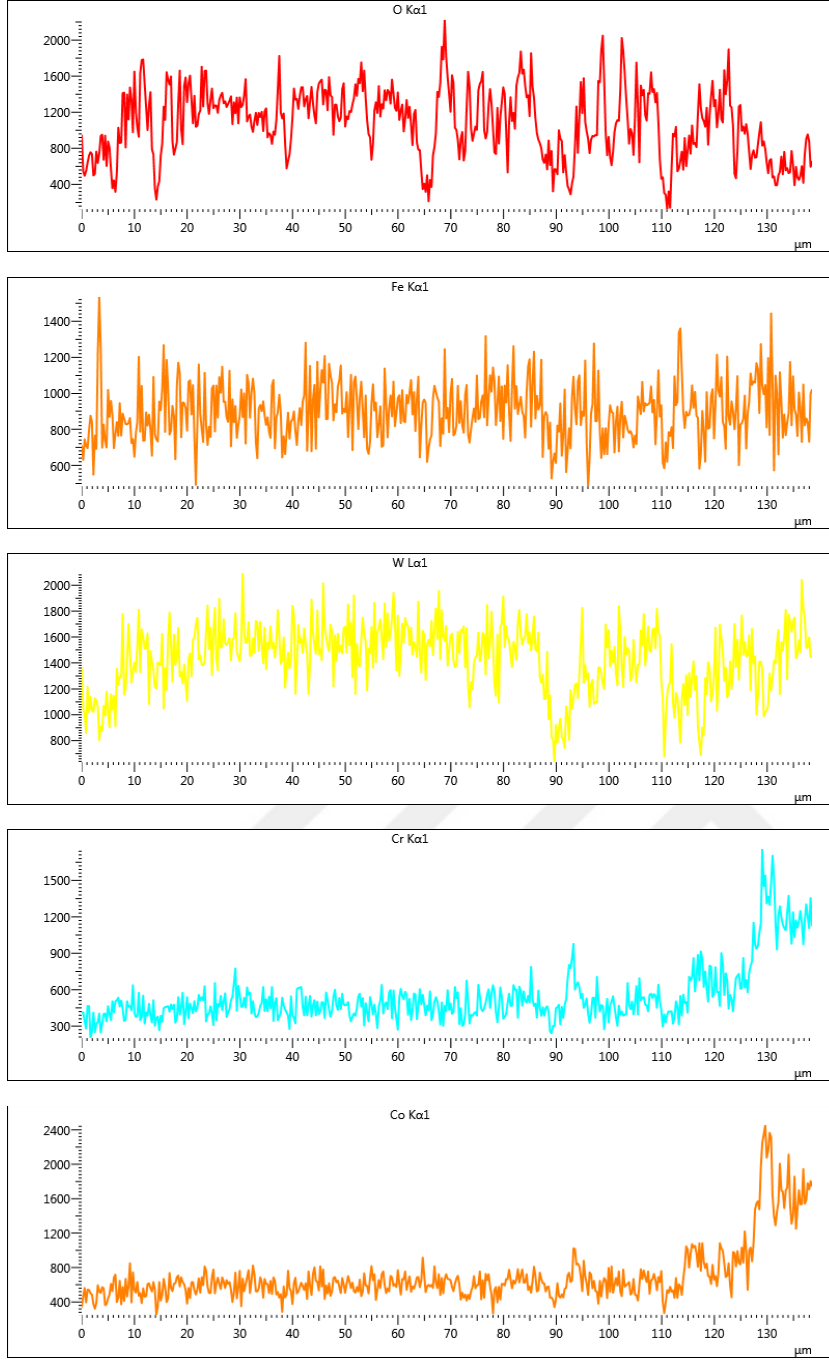
(a)

(b)

Şekil 3.97 Deneysel Çalışma 15'in (a) 100µm Uzaklıktan ve (b) 20µm Uzaklıktan Görüntüsü.

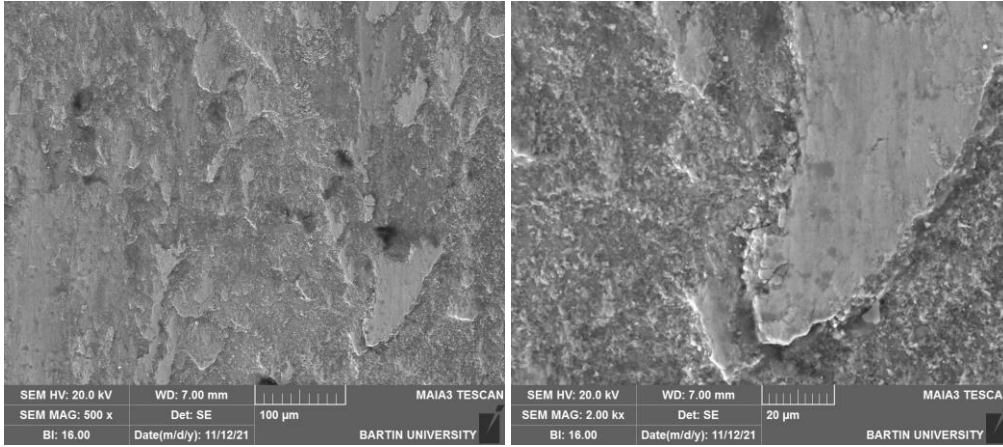
0-10 mesafe arasında çoğunlukla karbon ve demir görülmektedir. 14 µm mesafede tungsten hariç tüm elementlerde düşüş görülmüştür. 20-65 µm mesafe arasında düzlemsel bir yapı görülmektedir. 40 µm mesafe hariç elementler inişli çıkışlı benzer oranlarda dağılım göstermişlerdir. 40 µm noktasında karbon ve tungsten oranında artış görülmüştür. Küçük bir yapı oluşturmuş gibi bir görüntüye sahipler. 129-131 µm mesafede özellikle yoğun miktarda krom ve kobalt görülmüştür.





Şekil 3.98 Deneysel Çalışma 15’in 20μm Uzaklıktan SEM Görüntüsünün Linear Analizi.

3.12.16 Deneysel Çalışma 16 (Kobalt Süperalaşımli AISI 4140 Çelik Disk, 500°C) Görüntüleri

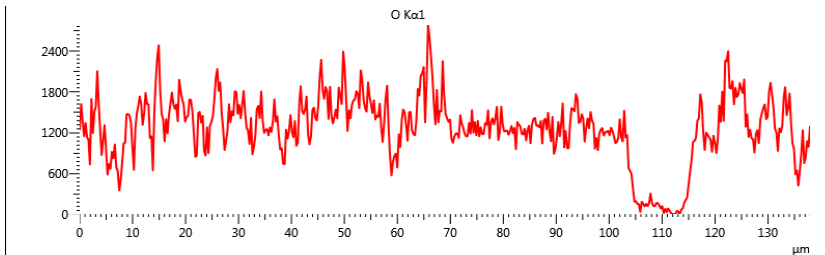
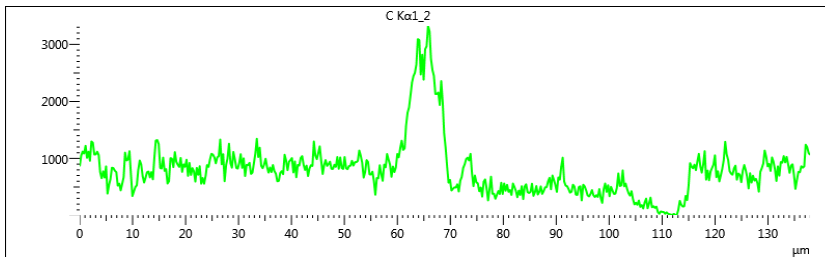
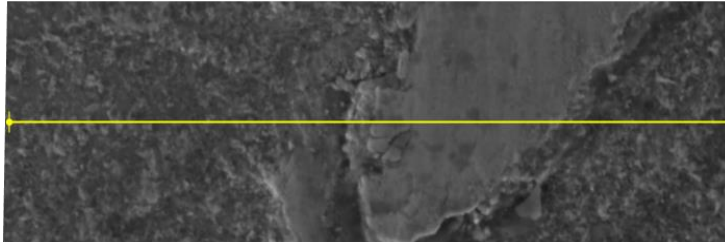


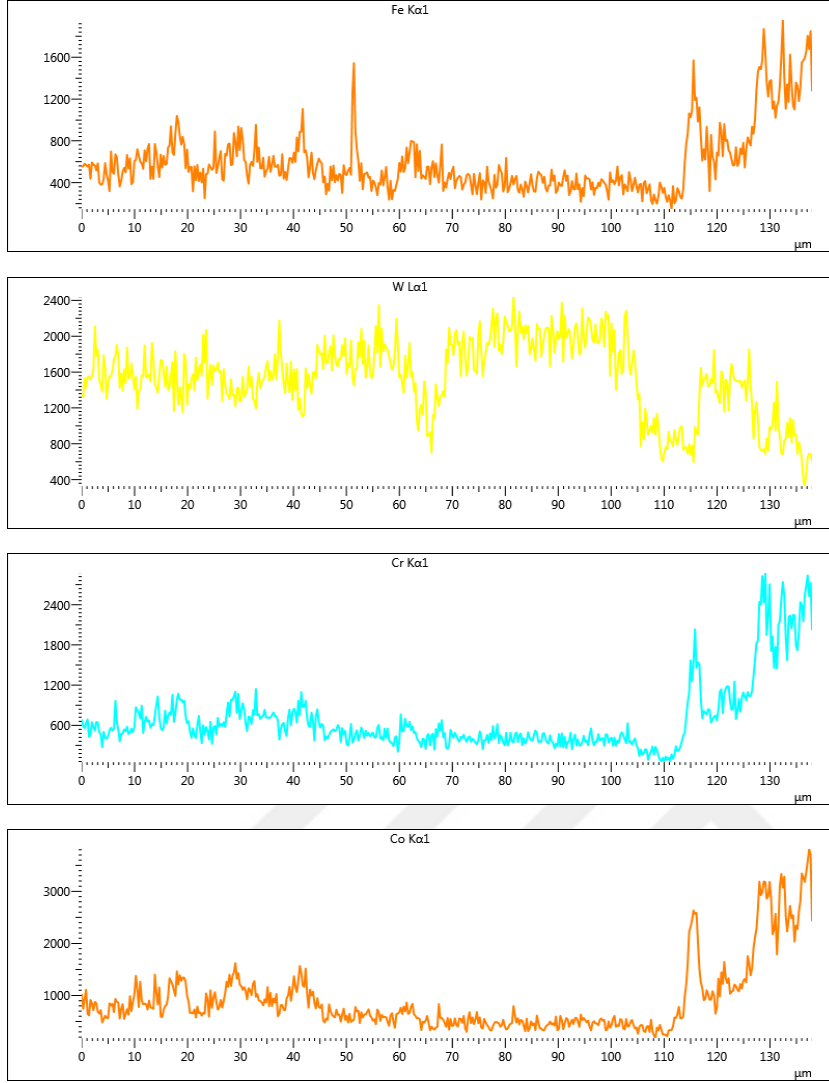
(a)

(b)

Şekil 3.99 Deneysel Çalışma 16'nın (a) 100µm Uzaklıktan ve (b) 20µm Uzaklıktan Görüntüsü.

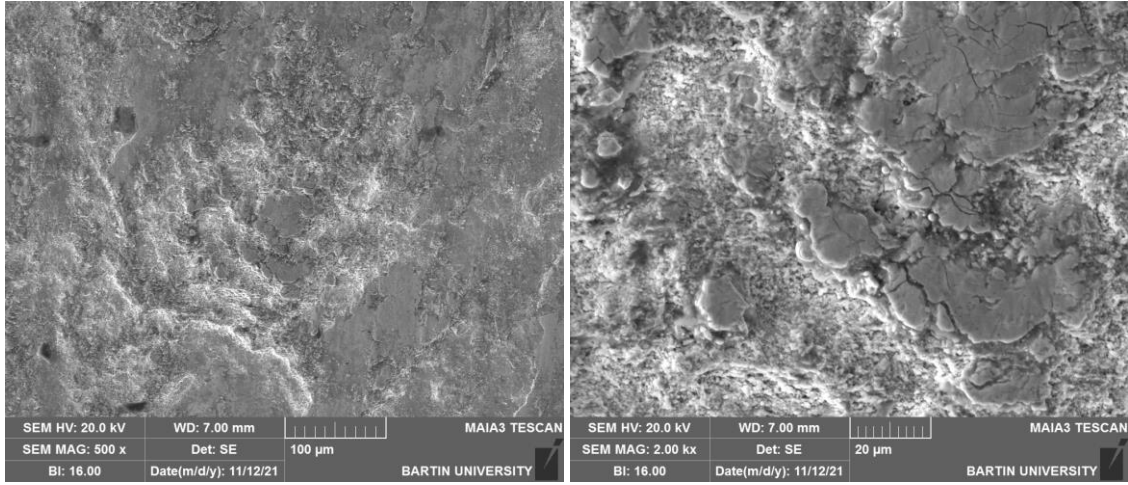
Şekilde görünen düzlemsel bölge (70-105 µm) aşındırıcı tungstenin bulunduğu bölgedir. 70 µm mesafe öncesinde bulunan katlı yapı karbon ve oksijenin yoğun olduğu bir yapıdır. 52 µm mesafede demir ve oksijenin arttığı görülmüştür. Geriye kalan alanlarda bulunan kırıklı yapılarda elementler benzer özellikler göstermiştir.





Şekil 3.100 Deneysel Çalışma 16'nın 20μm Uzaklıktan SEM Görüntüsünün Linear Analizi.

3.12.17 Deneysel Çalışma 17 (Kobalt Süperalaşımli AISI 4140 Çelik Disk, 650°C) Görüntüleri

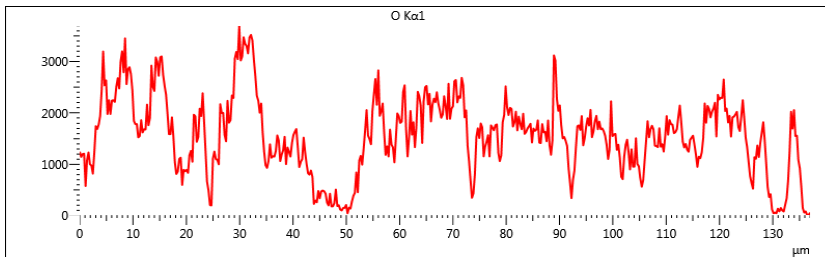
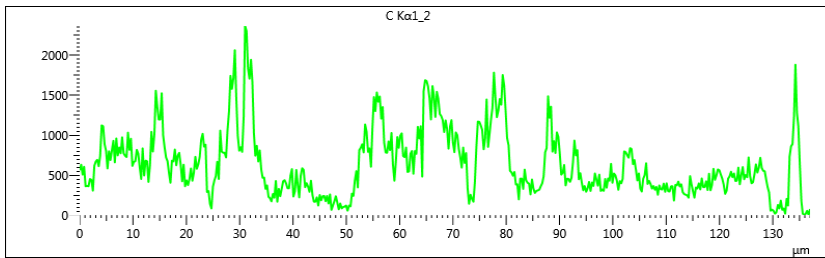
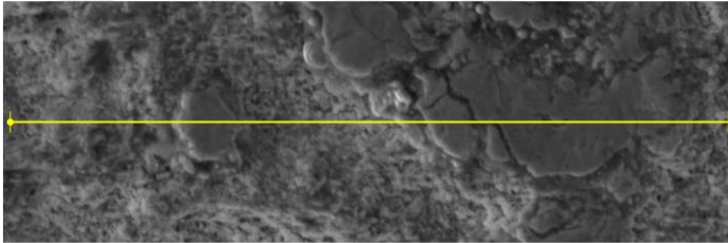


(a)

(b)

Şekil 3.101 Deneysel Çalışma 17'nin (a) 100µm Uzaklıktan ve (b) 20µm Uzaklıktan Görüntüsü.

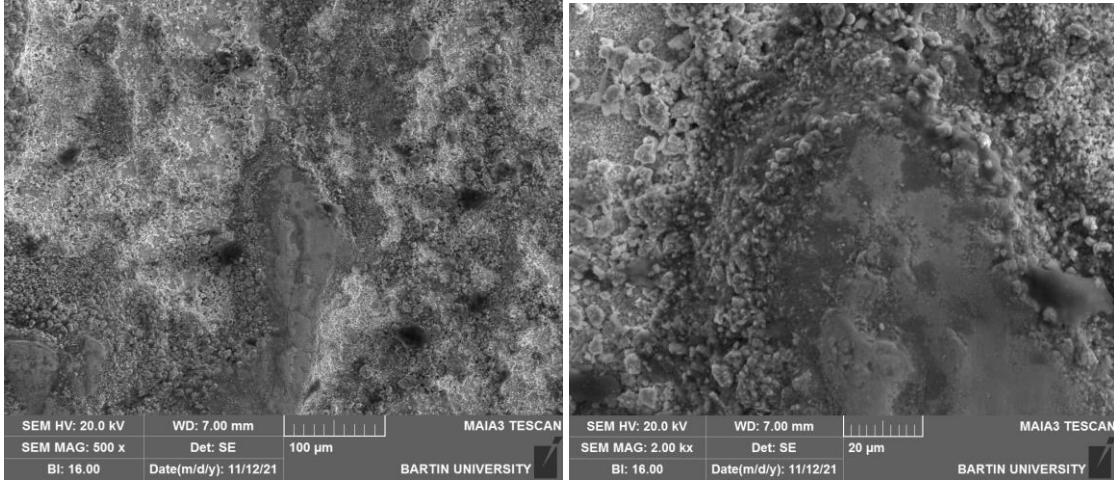
15 µm mesafesi, 28-32 µm mesafelerde karbon ve oksijende artış, diğer elementlerde ise azalma görülmüştür. 75 µm mesafede demir ve karbonun keskin bir artış yaptığı görülmektedir.





Şekil 3.102 Deneysel Çalışma 17'nin 20μm Uzaklıktan SEM Görüntüsünün Linear Analizi.

3.12.18 Deneysel Çalışma 18 (Kobalt Süperalaşımli AISI 4140 Çelik Disk, 800°C) Görüntüleri

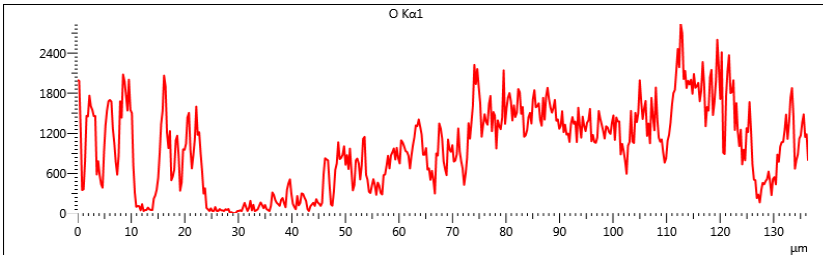
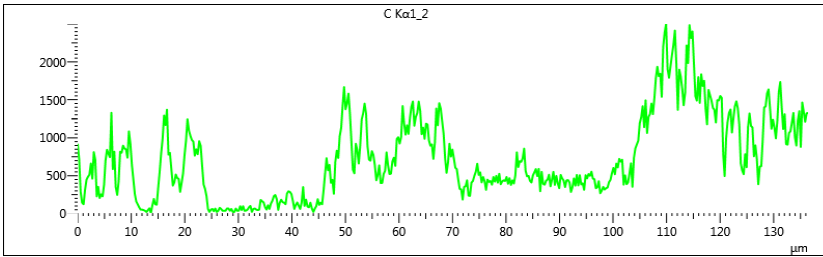


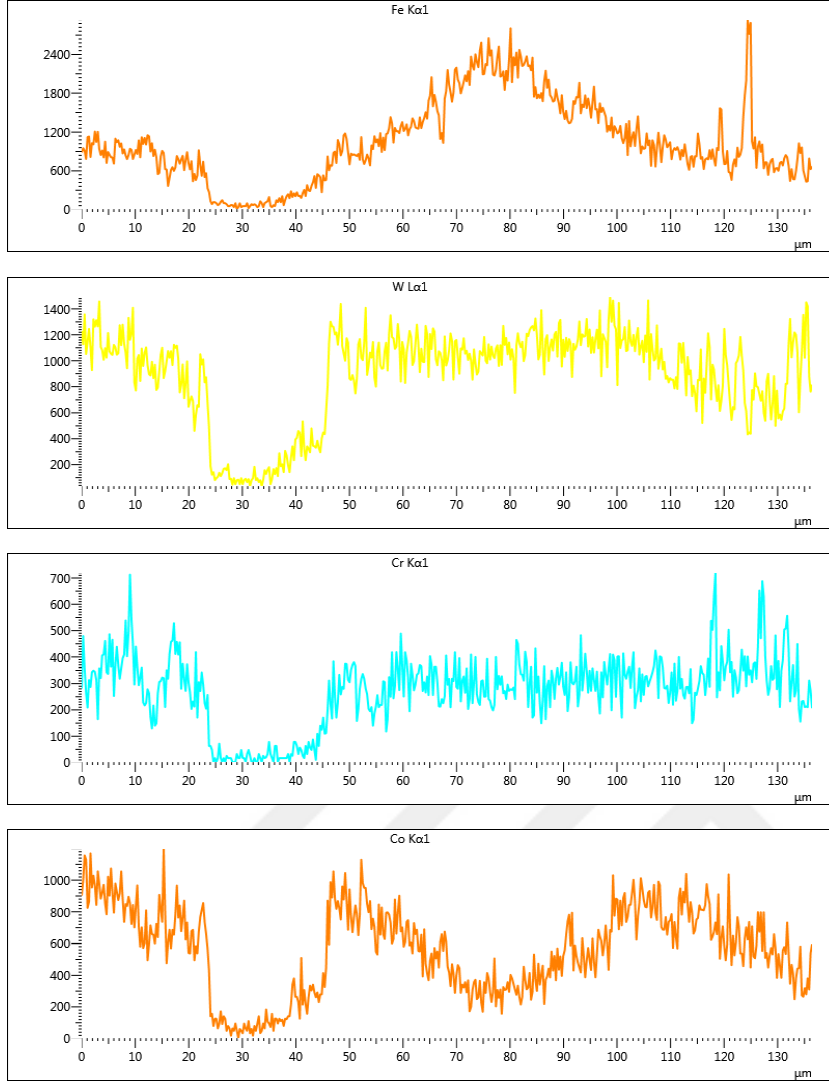
(a)

(b)

Şekil 3.103 Deneysel Çalışma 17'nin (a) 100µm Uzaklıktan ve (b) 20µm Uzaklıktan Görüntüsü.

800°C deneyde grafiklerde diğer 800°C deneylerde olduğu gibi düzensizlik yüksek oranda görülmektedir. 70-105 µm arasında görünen düzlemsel yapıda oksijen, demir, tungsten ve krom benzer özellik göstermiştir. 124 µm mesafede demir büyük oranda artış göstermiştir. Demir ile beraber oksijen de artmıştır.





Şekil 3.104 Deneysel Çalışma 18'in 20µm Uzaklıktan SEM Görüntüsünün Linear Analizi.

Deneysel çalışma sonucunda Grafikler incelendiğinde Oksijen miktarını gösteren tüm grafiklerde Miktar olarak en az olan kobalt kaplı süper alaşımlı disk olduğu ölçülmüştür.

BÖLÜM 4 –SONUÇLAR

Çelik esaslı metal diskler üzerine Lazer Metal Biriktirme (LMD) yöntemi ile AISI 4140 çelik malzeme üzerine kaplanmış 6 tane Kobalt esaslı (Stellite) süper alaşım, 6 tane demir esaslı süper alaşım ve 6 tane yaygın olarak kullanılan AISI4140 çeliğinin yüksek sıcaklıklardaki aşınma performanslarına bakılmıştır. Deneylerde daha uygun şartları oluşturmak için 50N yük, tungsten pim, 130 d/dak hız, 7 saatlik bir test süresi ve 800°C'ye kadar sıcaklık seçilmiştir.

Deneylerde kaplanan süper alaşımların “Pin on Disk” cihazında çeşitli sıcaklıklarda sürtünme deneyleri yapıldı. Yapılan deneylerde oda sıcaklığında en iyi malzemenin demir süper alaşımı, 200 ve 350°C'de kobalt esaslı süper alaşım, 500 ve 650°C'de tekrar demir süper alaşım ve 800°C de en iyi malzeme kobalt süper alaşım olarak tespit edilmiştir. 650°C'ye kadar 350°C ve 500°C'lerde hem demir esaslı hem de kobalt esaslı süper alaşım kaplamalar sıcaklığın etkisi ile renklerinde bozulma, hem de lazer kaplama hatve izlerinin gözükmesi oluşmuştur. 650°C'de her iki kaplamanın da yüzeyi pırl pırl ve hiçbir renk bozulması olmamıştır. Sadece sürtünme ve aşınma izi gözükmemektedir. Bu görünüş aşınmaya yansımamış her ikisinde de aşınma bir önceki sıcaklık değerlerine göre çok artmıştır.

800°C'de ise her ikisi içinde renkler bozulmuştur. Kobalt kaplamanın rengi daha az bozulmuş ama aşınma derin bir kanal gibi çok olmuştur. Bir önceki sıcaklık olan 650°C'nin yaklaşık 3 katı olmuştur. Demir esaslı kaplamalı olanda aşınma çok daha az oluşmuştur.

AISI 4140 düşük alaşımlı çelik malzeme 800°C'de kalın kabuklar oluşturduğu ve bu kabukların en küçük zorlamada koptuğu ve ayrıldığı görülmüştür. Kabuk şeklindeki oksitlenmenin ağırlığı arttırdığı bu nedenle aşınmayı gizlediği düşünülmektedir. 800°C'deki kabuklaşma şeklindeki oksitlenme ağırlığı aşınmaya rağmen deney öncesi seviyenin de üstüne çıkarmıştır. Sadece ağırlık tespiti ile yüksek sıcaklıklarda sürtünme ve aşınma sonuçlarına ulaşmak oksidasyon ve korozyondan dolayı mümkün olmadığı netleşmiştir.

İki çeşit süper alaşım kaplamanın yüksek sıcaklıklardaki performanslarına bakarak savunma sanayi ve havacılık sanayindeki kullanım yerleri ile ilgili fikir elde etmek için

bu deneyler tamamlanmıştır. Sürtünme ve aşınma konusunda gerçeğe en yakın sonuçların alınabildiği disk üzerinde pim deney yönteminin beklenen sonuçların alındığı kabul edilmiştir. Fakat daha iyi sonuçların alınabilmesi için SEM mikroskobunda disklerin görüntüsünün alınmasına karar verilmiştir.

AISI 4140 çelikte karbon değerinin azaldığını, oksijen değerinin arttığını, demirin fazla görüldüğü sıcaklıklarda tungstenin az görüldüğü tespit edilmiştir.

Demir esaslı süper alaşımların içinde krom da bulunduğundan 5. Değer olarak kromun da grafiği eklenmiştir. Sonuçlara bakıldığında krom demir ile benzer özellikler göstermiştir. Demir süper alaşımında bulunan oksijen miktarının, AISI 4140 çelikten az olduğu görülmüştür.

Grafiklerde en çok ağırlık kayıpları Kobalt Super alaşım kaplı diskte olduğu ölçülmüştür. Şekil 3.58’de disklerin aşınma sonucu ağırlık kayıplarının grafiği her bir çeşit disk için gösterilmiştir.

Kobalt esaslı Süper alaşımda krom ile beraber kobaltta bulunduğundan 6 değere sahiptir ve grafiklere göre, oksijen oranının demir süper alaşımına göre daha da az olduğu görülmüştür.

Oksijen miktarları göz önünde bulunduğu oksitlenme en az kobalt bazlı Süper alaşımda görülmüştür. Tüm sonuçlar değerlendirildiğinde kobalt bazlı süper alaşımın özellikle yüksek sıcaklıkta en iyi kaplama olduğu görülmüştür.

4.1 Değerlendirme

Burada bulunan AISI 4140 düşük alaşımlı çelik malzemenin sürtünme esaslı aşınma performansının 200°C ve 300°C’lerde oda sıcaklığından daha iyi çıkması aşınma tipinin delemantasyon tipine uyması ve daha yüksek sıcaklıklarda oksidasyon tipine dönmesi ile kötleşmesi literatürde yapılan çalışmalarda da mevcuttur [78].

500°C’ın üzerinde AISI 4140 çeliklerin kaplamasız kullanılması oksitlenmeden dolayı ve oluşan oksitin tabaka tabaka dökülmesinden dolayı kaplamasız veya yüzey işlemsiz olarak kullanımı uygun bulunmamaktadır.

Demir esaslı AISI 4140 elik ve kaplamada kullanılan süper alaşımın 800°C’deki oksitlenme sonucunda aşınmadan gelen ağırlık kayıplarına rağmen oluşan ağırlık kazançları literatürde yapılan bu tip çalışmalar ile paralellik göstermiştir[86].

Hem demir esaslı süper alaşımın hem de kobalt esaslı süper alaşımın 650°C’de beyaz metalik renkli olmaları hem de ısıdan etkilenmemeleri ve korozyona gösterdikleri direnç içlerindeki krom [10,116] ve nikel [100] elementlerinden kaynaklanmaktadır. Bu alışmada 650°C için bulunan sonuç da literatür ile paralellik göstermektedir. Nikel 650°C’de koruyucu NiO oluşurmaktadır. Yüksek krom içeriği yüksek sıcaklıklarda mkemmek korozyon direnci oluşurmaktadır.

Özellikle 800°C’de yapılan deneylerin SEM mikroskop görüntülerinde malzemelerin içinde bulunan elementlerin daha düzensiz davranış sergilediği grlmştir.

4.2 neriler

Tezin deneysel çalışma kısmındaki aşınma deneyleri farklı parametrelerle yapılabilir.

BÖLÜM 5 – KAYNAKLAR

MAKALELER

- [1] Guo, J.: “The current situation of application and development of superalloys in the fields of energy industry”, *Acta Metall Sin*, 46-5 (2010) 513-527. DOI: [10.3724/SP.J.1037.2009.00860](https://doi.org/10.3724/SP.J.1037.2009.00860)
- [2] Kale, A.; Khanna, N.: “A Review on Cryogenic Machining of Super Alloys Used in Aerospace Industry”, *Procedia Manufacturing*, 7 (2017) 191-197. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2016.12.047>
- [3] Rahman, N.; Matthews, D. T. A.; Rooij, M.; Khorasani, A. M.; Gibson, I.; Cordova, L.; Römer, G_W.; “An Overview: Laser-Based Additive Manufacturing for High Temperature Tribology”, *Frontiers in Mechanical Engineering*, 5 (2019) 16. <https://doi.org/10.3389/fmech.2019.00016>.
- [4] Holmberg, K.; Erdemir, A.: “Influence of tribology on global energy consumption, costs and emissions”, *Friction*, 5 3 (2017) 263–284. <https://doi.org/10.1007/s40544-017-0183-5>
- [5] Bilgin, M. S.; Erdem, A.; Dilber, E.; Ersoy, İ.: “Comparison of fracture resistance between cast, Cad/Cam milling, and direct metal laser sintering metal post Systems”, *Journal of Prosthodontic Research*, 60 (1) (2016) 23–28. DOI: [10.1016/j.jpor.2015.08.001](https://doi.org/10.1016/j.jpor.2015.08.001)
- [6] Koçyiğit, F.; Yıldız, F.; Gök, S. M.; Çay, V.: "Dry-sliding wear behavior of AISI 4140 barrel steel at elevated temperatures" *Materials Testing*, 62 (2) (2020) 189-195. <https://doi.org/10.3139/120.111469>
- [7] Li, J. C., Lee, .H.: “Gear fatigue crack prognosis using embedded model, gear dynamic model and fracture mechanics”, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 19 (4) (2005) 836-846, DOI: [10.1016/j.ymssp.2004.06.007](https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2004.06.007)
- [8] Ulutan, M.; Çelik, O. N.; Gasan, H.; Er, U.: “ Effect of Different Surface Treatment Methods on the Friction and Wear Behavior of AISI 4140 Steel”, *Journal of Materials Science & Technology*, 26 3 (2010) 251-257, ISSN 1005-0302, [https://doi.org/10.1016/S1005-0302\(10\)60042-4](https://doi.org/10.1016/S1005-0302(10)60042-4).

- [9] Motallebzadeh, A.; Dilektaşlı, E.; Baydoğan M.; Atar, E.; Cimenoglu, H.: “Evaluation of the effect of boride layer structure on the high temperature wear behavior of borided steels”, *Wear*, 328–329, 15 (2015) 110-114. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2015.01.029>
- [10] Gök, M.S.; Karakaya, C.; Kavlak, İ.; Çakmak, M.; Erdoğan A.: “Borlanmış X38CrMoV5-3 Sıcak İş Takım Çeliğinin Yüksek Sıcaklık Kuru Kayma Davranışlarının İncelenmesi”, *Bartın Üniversitesi Mühendislik ve Teknoloji Bilimleri Dergisi* 4 2 (2016), 42-49.
- [11] Parthasarathi, N.; Borah, U.; Albert, S.: “Effect of temperature on sliding wear of AISI 316 L(N) stainless steel – Analysis of measured wear and surface roughness of wear tracks”, *Materials & Design*, 51 (2013) 676-682. [DOI:10.1016/j.matdes.2013.04.050](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.04.050)
- [12] Yılmaz, S.S.; Ünlü, B.S.; Varol, R.: “Borlama ve bilyalı dövmenin bémir esaslı toz metal malzemelerde aşınma ve mikro yapı özelliklerine etkisi”, *C.B.Ü. Fen bil. dergisi* 1–8, (2008).
- [13] Akhtar, S. S.; Arif, A. F. M.; Yilbas, B. S.: “Evaluation of gas nitriding process with in-process variation of nitriding potential for AISI H13 tool steel”, *Int J Adv Manuf Technol*, 47 (2010) 687–698. <https://doi.org/10.1007/s00170-009-2215-4>
- [14] Mindivan, F.; Mindivan, H.: “Comparisons of wear performance of hardened Inconel 600 by different nitriding processes”, *Procedia Engineering*, 68 (2013) 730-735. DOI:[10.1016/j.proeng.2013.12.246](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.12.246)
- [15] Akbari, A.; Mohammadzadeh, R.; Templier, C; Riviere, J.P.: “Effect of the initial microstructure on the plasma nitriding behavior of AISI M2 high speed steel”, *Surface&Coatings Technology* 204 (2010) 4114-4120. DOI:[10.1016/j.surfcoat.2010.05.042](https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2010.05.042)
- [16] Espallargas, N.; Mischler, S.: “Dry wear and tribocorrosion mechanisms of pulsed plasma nitrided Ni–Cr alloy”. *Wear*, 270 (2011) 464-471. DOI:[10.1016/j.wear.2010.12.008](https://doi.org/10.1016/j.wear.2010.12.008)
- [17] Mindivan, F.; Mindivan, H.: “Surface properties and tribocorrosion behaviour of a thermal sprayed martensitic stainless steel coating after pulsed plasma nitriding process”.

Journal Advances in Materials and Processing Technologies, 2 (4) **(2016)** 514- 526.
<https://doi.org/10.1080/2374068X.2016.1247232>

[18] Molinari, A.; Straffelini, G.; Tesi, B.; Bacci, T.; Pradelli, G.: “Effects of load and sliding speed on the tribological behaviour of Ti6Al4V plasma nitrided different temperatures”, *Wear*, 203–204 **(1997)** 447-454. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(96\)07419-4](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(96)07419-4)

[19] Limodin, N.; Verreman, Y.: “Fatigue strength improvement of a 4140 steel by gas nitriding: Influence of notch severity”. *Materials Science and Engineering: A*, Elsevier, 2006, 435-436, pp.460- 467. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.07.034>.

[20] Kutschmann, P.; Lindner, T.; Börner, K.; Reese, U.; Lampke, T.: “Effect of adjusted gas nitriding parameters on microstructure and wear resistance of HVOFsprayed AISI 316L coatings”, *Materials*, 12 **(2019)** 1-9.

[21] Kulkarni V. V.; Kulkarni L. V.: “Effect of Shot Velocity on Residual Stresses in Shot Peening”, *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 3, **(2014)** 1284-1287.

[22] Chamanfar A.; Monajati H.; Rosenbaum A.; Jahazi M.; Bonakdar A.; Morin E.: “Microstructure and Mechanical Properties Of Surface And Subsurface Layers İn Broached And Shot-Peened Inconel 718 Gas Turbine Disc Fir Trees”, *Materials Characterization*, 132 **(2017)** 53-68.

[23] Klotz T.; Delbergue D.; Bocher P.; Levesque M.; Brochu M.: “Surface Characteristics And Fatigue Behavior of Shot Peened Inconel 718”, *International Journal of Fatigue*, 110, **(2018)** 10-21.

[24] Haimbaugh, R. E.: “Theory of Heating by Induction”, *Practical Induction Heat Treating*, *ASM International*, **(2001)** 5-10.

[25] Koroğlu, S.; Sazak, B. S.: “Mutfak Uygulamaları İçin Yarım Köprü Seri Rezonans İntertörlü İndüksiyon Isıtma Sistemi Tasarımı”, *Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 8 (2), 167, **(2002)** 85

- [26] Suarez Antola, R.; Suarez Bagnasco, D.; “A Tool for Load Modeling in Induction Hardening Equipment Driven by Power Semiconductor Systems”, *INIS-UY-88*, Vol 38 (36), **(2006)** 1-5.
- [27] Kohli, A.; and Singh, H.; “Optimization of processing parameters in induction hardening using response surface methodology”, *Sadhana*, Vol 36 (2), **(2011)** 141-152.,
- [28] Totik, Y.; Sadeler, R.; Altun, H.; Gavgali, M.:“ The effects of induction hardening on wear properties of AISI 4140 steel in dry sliding conditions”, *Materials & Design*, 24, (1) **(2003)** 25-30. [https://doi.org/10.1016/S0261-3069\(02\)00099-7](https://doi.org/10.1016/S0261-3069(02)00099-7)
- [29] Kumar, S.; Khedkar, N. K.; Jagtap, B.; Singh, T. P.: “ The effects of cryogenic treatment on cutting tools”. In IOP Conference Series: Materials Science and engineering 225 (1) (2017) 012104.
- [30] Candane, N.; Alagumurthib, K. P.: "Effect of Deep Cryogenic Treatment on AISI T42 High Speed Steel", *International Journal Of Current Engineering And Technology*, 3 4 **(2013)** 1164–1170
- [31] ZHI, C.; YUAN, G.; XIAN-GUO, Y.; HONG, G.; YAO, H.; HAI-DONG, Z.; MIN-NA, Z.: “Enhanced Axial Tension-tension Fatigue Resistance of a 51CrV4 Spring Steel by Cryogenic Treatment”, *Rev. Chim.*, 72(4), **(2021)** 138-151. <https://doi.org/10.37358/RC.21.4.8463>
- [32] Deshpande, Y.V.; Andhare, A.B.; Padole, P.M.: “Experimental results on the performance of cryogenic treatment of tool and minimum quantity lubrication for machinability improvement in the turning of Inconel 718”. *J Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.* 40, 6 **(2018)**. <https://doi.org/10.1007/s40430-017-0920-8>
- [33] Wale, A. D.; Wakchaure, V. D.: “Effect of cryogenic treatment on mechanical properties of cold work tool steels”, *International Journal of Modern Engineering Research (IJMER)*, 3 (1) **(2013)** 149-154
- [34] Oppenkowski, A.; Weber, S.; Theisena, W.: “ Evaluation of factors influencing deep cryogenic treatment that affect the properties of tool steels”, *Journal of Materials*

Processing Technology, 210 (14) (2010) 1949-1955.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.07.007>

[35] Kumaresan, G.; Bharathiraja, G.; Anbuezhayan, G.; Ashwin, S.; Nantha K. P.: “Investigation on wear properties of super alloys using thermal barrier coating method”, *Materials Today: Proceedings*, 46 9, (2021) 4326-4330, ISSN 2214-7853, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.03.203>.

[36] Baracaldo, R.R.; Benito, A.; Puchi-Cabrerad, E.S.; Staia, M.H.: “High temperature wear resistance of (TiAl)N PVD coating on untreated and gas nitrided AISI H13 steel with different heat treatment”, *Wear*, 262 3–4 (2007) 380-389
<https://doi.org/10.1016/j.wear.2006.06.010>

[37] Dye D.; Hunziker O.; Roberts S. M.; Reed R. C.: “Modeling of The Mechanical Effects Induced By The Tungsten Inert-Gas Welding of The IN718 Superalloy”, *Metallurgical and Materials Transactions*, 7 (32) (2001) 1713–1725.

[38] Kamburov, V.; Dimitrova, R.; Kandeve, M.: “Introduction of Nickel Coated Silicon Carbide Particles in Aluminum Metal Matrix Hardfaced by MIG/TIG Processes on Precoated Flux Layer”, *Tribology in Industry*, 40 (1) (2018) 73-80.

[39] Ghadami, F.; Aghdam, A.S.R.; Ghadami, S.: “Abrasive wear behavior of nano-ceria modified NiCoCrAlY coatings deposited by the high-velocity oxy-fuel process”, *Materials Research Express*, 6, 12, (2019), [DOI:10.1088/2053-1591/ab63f4](https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab63f4)

[40] Dong, XY., Luo, XT., Zhang, SL. Li, C-J.: “A Novel Strategy for Depositing Dense Self-fluxing Alloy Coatings with Sufficiently Bonded Splats by One-Step Atmospheric Plasma Spraying”. *J Therm Spray Tech* 29, (2020)173–184.
<https://doi.org/10.1007/s11666-019-00943-4>

[41] Davis, D.; Singh, S.; Chakradhar, R.P.S.; Srivastava, M.: “Tribo–Mechanical Properties of HVOF-Sprayed NiMoAl-Cr₂AlC Composite Coatings”. *J Therm Spray Tech* 29, (2020) 1763–1783. <https://doi.org/10.1007/s11666-020-01069-8>

[42] Bülbül, F.: “Sert ve yumuşak kaplamalar”, *Ordu Üniv. Bil. Tek. Derg.*, 4 2 (2014) 32-41. http://btd.odu.edu.tr/files/Ferhat_Bulbul_Makale_4_son_.pdf

- [43] Nakamichi, M.; Takabatake, T.; Kawamura, H.: “Material design of ceramic coating by plasma spray method”, *Fusion Engineering and Design*, 41, (1–4) (1998) 143-147. [https://doi.org/10.1016/S0920-3796\(98\)00245-2](https://doi.org/10.1016/S0920-3796(98)00245-2)
- [44] Yung, D.; Zikin, A.; Hussainova, I.; Danninger, H.; Badisch, E.; Gavrilovic, A.: “Tribological performances of ZrC-Ni and TiC-Ni cermet reinforced PTA hardfacings at elevated temperatures”, *Surface and Coatings Technology*, 309, (2017) 497-505. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.11.099>
- [45] Wang, L.; Wang, Y.; Sun, X.G.; He, J.Q.; Pan, Z.Y.; Zhou, Y.; Wu, P.L.: “Influence of pores on the thermal insulation behavior of thermal barrier coatings prepared by atmospheric plasma spray”, *Materials & Design*, 32 (1) (2011) 36-47. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.06.040>
- [46] Hamada, A.S.; Sahu, P.; Porter, D.A.: “Indentation property and corrosion resistance of electroless nickel–phosphorus coatings deposited on austenitic high-Mn TWIP steel”, *Applied Surface Science*, 356 (2015) 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.07.153>
- [47] Yu, Q.; Zhou, T.; He, Y.; Liu, P.; Wang, X.; Yan, J.: “Effects of relative tool sharpness on surface generation mechanism of precision turning of electroless nickel-phosphorus coating”. *J Mech Sci Technol* 35 (2021) 3113–3121 <https://doi.org/10.1007/s12206-021-0633-x>
- [48] Erdemir, F.; Güler, O.; Çanakçı, A.: “Electroless nickel-phosphorus coated expanded graphite paper: Binder-free, ultra-thin, and low-cost electrodes for high-performance supercapacitors”, *Journal of Energy Storage*, 44 (A) (2021) 103364. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103364>
- [49] Berns, H.; Koch, S.: “Influence of abrasive particles on wear mechanism and wear resistance in sliding abrasion tests at elevated temperatures”, *Wear*, 233–235 (1999) 424-430. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(99\)00209-4](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(99)00209-4)
- [50] Oskay, C.; Rudolphi, M.; Affeldt, E.E.; Schütze, M.; Galetza, M.C.: “Evolution of microstructure and mechanical properties of NiAl-Diffusion coatings after thermocyclic exposure”, *Intermetallics*, 89 (2017) 22-31. <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2017.05.012>.

- [51] Luo, Q.; Wu, Z.; Qin, Z.; Liu, L.; Hu, W.: “Surface modification of nickel-aluminum bronze alloy with gradient Ni-Cu solid solution coating via thermal diffusion”, *Surface and Coatings Technology*, 309 (2017) 106-113. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.11.013>
- [52] Cao, G.H.; Zhang, Z.; Lia, X.; Skrotzki, W.; Müller, E.; Schneider, R.; Gerthsend, D.: “A combinatorial approach to study the phase constitution of the Ni-Al-Pt system”, *Acta Materialia*, 207 (2021) 116703. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2021.116703>
- [53] Hafeez, M.A.; Farooq, A.; “Effect of heat treatments on the mechanical and electrochemical corrosion behavior of 38crsi and AISI 4140 steels”. *Metallogr. Microstruct. Anal.* 8 (2019) 479–487. <https://doi.org/10.1007/s13632-019-00556-x>
- [54] Lakhkar, R. S.; Shin, Y. C.; Krane, M.J.M.: “Predictive modeling of multi-track laser hardening of AISI 4140 steel”, *Materials Science and Engineering: A*, 480 (1–2) (2008) 209-217. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2007.07.054>
- [55] Genel, K.; Demirkol, M.; Çapa, M.: “Effect of ion nitriding on fatigue behaviour of AISI 4140 steel”, *Materials Science and Engineering: A*, 279, (1–2) (2000) 207-216. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(99\)00689-9](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(99)00689-9)
- [56] Arivazhagan, A.; Singh, S.; Prakash, S.; Reddy, G.M.: “Investigation on AISI 304 austenitic stainless steel to AISI 4140 low alloy steel dissimilar joints by gas tungsten arc, electron beam and friction welding”, *Materials & Design*, 32, (5) (2011) 3036-3050. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.01.037>
- [57] Abdo, J.; Zaier, R.: “A Novel Pin-on-Disk Machine for Stick-Slip Measurements”, *Materials and Manufacturing Processes*, 27 (7) (2012) 751-755. <https://doi.org/10.1080/10426914.2011.648702>
- [58] Gök, M.S.; Küçük, Y.; Erdoğan, A.; Öge, M.; Kanca, E.; Gönen, A.: “Dry sliding wear behavior of borided hot-work tool steel at elevated temperatures”, *Surface and Coatings Technology*, 328, (2017) 54-62. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.08.008>
- [59] Park, C K.; Lee, J. H.; Kang, N. H.; Chun E. J.: “Correlation between Microstructure and Tribological Properties of Laser Surface Heat-Treated Stellite Coatings”, *Coatings*, 10 5 (2020) 433; <https://doi.org/10.3390/coatings10050433>

- [60] Padmini, B.V.; Niranjan, H.B.; Kumar, R.; Padmavathi, G.; Nagabhushana, N.; Mohan, N.: “Influence of substrate roughness on the wear behaviour of kinetic spray coating”, *Materials Today: Proceedings*, 27 3 (2020) 2498-2502. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.09.225>.
- [61] Parvaresh, B.; Salehan, R.; Miresmaeili, R.: “ Investigating Isotropy of Mechanical and Wear Properties in As-Deposited and Inter-Layer Cold Worked Specimens Manufactured by Wire Arc Additive Manufacturing”. *Metals and Materials International*, 27 (2021) 92–105. <https://doi.org/10.1007/s12540-020-00793-8>
- [62] Dansana, B.; Mahapatra, T. R.; Sahu, P.; Sahu, S. K.: “Tribological and electrochemical corrosion performance analysis of Hastelloy C276 under different loading conditions”, *Materials Today: Proceedings*, 24 2, (2020) 1434-1441. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.462>.
- [63] Zhu, H.; Zhu, Q.; Tieu, A.K.; Kosasih, B.; Kong, C.: “A simulation of wear behaviour of high-speed steel hot rolls by means of high temperature pin-on-disc tests”, *Wear*, 302 (1–2) (2013) 1310-1318. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2012.11.032>
- [64] Yaz, M.; Çelik, H.: “ Co esaslı süper alaşımlar ile kaplanan düşük karbonlu çeliklerin mikroyapı incelemeleri ”, *Fırat Üniversitesi Doğu Araştırmaları Dergisi* 4 2 (2006) 42-48
- [65] Çömez, E.; Çelik H.: “Kobalt Esaslı Elektrotlarla Kaplanan Malzemelerin İç Yapı ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi”. *F. Ü. Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 16 4 (2004) 633-641
- [66] Faghani G.: “Evaluation of Wear, Oxidation and Corrosion Behaviors of Nickel-Based Superalloy Coatings Fabricated by GTAW Method”, *Iranian journal of surface science and engineering*, 45 (2020) 1-13.
- [67] Apay, S.; Gulenc, B.: “Wear properties of AISI 1015 steel coated with Stellite 6 by microlaser welding”, *Materials & Design*, 55 (2014) 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.09.056>
- [68] Jeyaprakash, N.; Yang, C.H.: “Comparative study of NiCrFeMoNb/FeCrMoVC laser cladding process on nickel-based superalloy”, *Materials and Manufacturing Processes*, 35:12 2020 1383-1391. [DOI: 10.1080/10426914.2020.1779933](https://doi.org/10.1080/10426914.2020.1779933)

- [69] Mousavi, S.E.; Naghshehkesh, N.; Amirnejad, M.; Shammakhi, H.; Sonboli, A.: "Wear and Corrosion Properties of Stellite-6 Coating Fabricated by HVOF on Nickel–Aluminium Bronze Substrate". *Metals and Materials International* (2020). <https://doi.org/10.1007/s12540-020-00697-7>
- [70] Gabriel, T.; Rommel, D.; Scherm, F.; Gorywoda, M.; Glatze, U.: " Laser Cladding of Ultra-Thin Nickel-Based Superalloy Sheets", *Materials* 10 (2017) 279 [doi:10.3390/ma10030279](https://doi.org/10.3390/ma10030279)
- [71] Angelastro, A.; Campanelli, S. L. ; Casalino, G.; Ludovico, A. D.: "Optimization of Ni-Based WC/Co/Cr Composite Coatings Produced by Multilayer Laser Cladding", *Advances in Materials Science and Engineering*, 2013 7 (2013) <https://doi.org/10.1155/2013/615464>
- [72] Mohammed, S.; Balu, P.; Ahmed, A.; Zhang, Z.; Kovacevic, R.: "Improvement of Wear Resistance of the Nickel Based Alloy Mixed with Rare Earth Elements by High Power Direct Diode Laser Cladding". *Lasers Manuf. Mater. Process.* 6, (2019). 173–188 <https://doi.org/10.1007/s40516-019-00087-x>
- [73] Sá de Sousa, J. M.; Silva, R. G. N.; Pereira, A. de S.; Pereira, P.; Amaral, C.; Pereira, M.: "Effect of Laser Remelting on Tribological Performance of Ni-Cr-B-Si Coatings Deposited by Laser Metal Deposition", *Technical Papers, Soldag. insp.* 25, (2020) <https://doi.org/10.1590/0104-9224/SI25.15>
- [74] Prakash, A.; Shahi, A. S.; Parvaresh, B.; Salehan, R.; Miresmaeili, R.; " Investigations on high temperature wear and metallurgical characteristics of Stellite 6 GTA (Gas Tungsten Arc) weld claddings ". *Mater. Res. Express*, 7 2 (2020) 026509. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab6e2b>
- [75] Li, J.; Kong, D.: "Micro-Structures and High-Temperature Friction-Wear Performances of Laser Cladded Cr–Ni Coatings", *Materials*, 11 (2018) 137. [doi:10.3390/ma11010137](https://doi.org/10.3390/ma11010137)
- [76] Bhosale, D. G.; Rathod, W. S.; Ghorpade, U. S.; Rukhande, S. W.: " Nickel alloy C-263 protection by WCCr3C2Ni coatings against high-temperature wear in nuclear applications", *Surfaces and Interfaces*, 21 (2020) 100689 <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2020.100689>

- [77] Yu, T.; Chen, J.; Wen, Y.; Deng, Q.: “High temperature phase stability and wear behavior of laser clad Ta reinforced NiCrBSi coating”, *Applied Surface Science*, 547 (2021) 149171 <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2021.149171>
- [78] Dilawary, S. A. A.; Motallebzadeh, A.; Afzal, M.; Atar, E.; Cimenoglu, H.: “Laser surface melting of 10 wt% Mo alloyed hardfacing Stellite 12 plasma transferred arc deposits: Structural evolution and high temperature wear performance”, *Optics & Laser Technology*, 101 (2018) 404-412. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2017.11.038>
- [79] Mahmood, M. A.; Bănică, A.; Ristoscu, C.; Becherescu, N.; Mihăilescu, I. N.: “Laser Coatings via State-of-the-Art Additive Manufacturing: A Review”, *Coatings* 2021, 11(3), 296; <https://doi.org/10.3390/coatings11030296>
- [80] Ezugwu, E. O.; Bonney, J.; Yamane, Y.: “An overview of the machinability of aeroengine alloy”, *Journal of Materials Processing Technology*, 134 2 (2003) 233-253. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)01042-7](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)01042-7)
- [81] Choudhury, I. A.; El-Baradie, M. A.: “Machinability of nickel-base super alloys: a general review”, *Journal of Materials Processing Technology*, 77 (1–3) (1998) 278-284. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(97\)00429-9](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(97)00429-9)
- [82] Mahmood, M.A.; Popescu, A.C.; Hapenciuc, C.L.; Ristoscu, C.; Visan, A.I.; Oane, M.; Mihailescu, I. N.: “Estimation of clad geometry and corresponding residual stress distribution in laser melting deposition: analytical modeling and experimental correlations”. *Int J Adv Manuf Technol* 111, 77–91 (2020). <https://doi.org/10.1007/s00170-020-06047-6>
- [83] Pauly, V.; Kern, J.; Clark, M.; Grierson, D. S.; Sridharan, K.: “Wear Performance of Incoloy 800HT and Inconel 617 in Various Surface Conditions for High-Temperature Gas-Cooled Reactor Components.” *Tribology International*, 154 (2020) 106715. [doi:10.1016/j.triboint.2020.106715](https://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106715)
- [84] Falqueto, L.; Butkus, D.J.; Biasoli de Mello, J. D.; Bozzi, A. C.; Scandian, C.: “Sliding wear of cobalt-based alloys used in rolling seamless tubes”, *Wear* 376-377 (2017) 1739-1746, [DOI:10.1016/j.wear.2017.01.009](https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.01.009)

- [85] Ciulli, E.: “Tribology and industry: from the origins to 4.0”, *Frontiers in Mechanical Engineering*, 03 September **2019** | <https://doi.org/10.3389/fmech.2019.00055>
- [86] Mudgal, D.; Singh, S.; Prakash, S.: “High temperature cyclic oxidation behavior of ni and co based superalloys”, *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering* 11 03 (**2012**) 211-219, [DOI:10.4236/jmmce.2012.113017](https://doi.org/10.4236/jmmce.2012.113017)
- [87] Özel, C.; Akgün, G.; Gürgenc, T.: "Microstructure, wear and friction behavior of AISI 1045 steel surfaces coated with mechanically alloyed Fe₁₆Mo₂C_{0.25}Mn/Al₂O₃-3TiO₂ powders", *Materials Testing*, 59 (10) (**2017**) 921-928. <https://doi.org/10.3139/120.111089>
- [88] C.Scandian, C.; Boher, C.; Mello, J.D.B.; Rézaï-Aria, F.: “Effect of molybdenum and chromium contents in sliding wear of high-chromium white cast iron: The relationship between microstructure and wear”, *Wear*, 267 (1–4) (**2009**) 401-408. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2008.12.095>
- [89] Sen, U.: “Wear properties of niobium carbide coatings performed by pack method on AISI 1040 steel”, *Thin Solid Films*, 483 (1–2) (**2005**) 152-157. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2005.01.008>
- [90] Yılmaz, S.O.: “Wear behavior of TiB₂ inoculated 20Cr–3Mo–4C high chromium white cast irons”, *J Mater Sci* , 42 (**2007**) 6769–6778. <https://doi.org/10.1007/s10853-006-1430-8>

KİTAPLAR

- [91] Çelik S.: “Superalloys for industry application”, IntechOpen Limited London U.K.(**2018**) <http://dx.doi.org/10.5772/65570>
- [92] Reed, R.C.: “The superalloys: fundamentals and applications”. Cambridge University Press, Cambridge, (**2008**) ISBN-13 978-0-521 85904-2, ISBN-10 978-0-521 85904-2
- [93] Öner, A.; Yalçınkaya S.: "3B yazıcılar ve 3B metal yazıcılarda baskı hatalarının incelenmesi" Mühendislik alanında teknolojik gelişmeler, Prof.Dr.Hülya Kalaycıoğlu,

Dr.Öğr.Üyesi Senai Yalçinkaya, Editör, *Güven Plus Grup A.Ş. Yayınları İstanbul: (2020)* 45/2020, , 329-367,

[94] Espallargas N.: “1 - Introduction to thermal spray coatings”, *Future Development of Thermal Spray Coatings*, Types, Designs, Manufacture and Applications, Ed. Espallargas N., (2015) 1-13. <https://doi.org/10.1016/B978-0-85709-769-9.00001-4>

[95] Dorfman, M. R.: “Chapter 22 - Thermal Spray Coatings”, *Handbook of Environmental Degradation of Materials* (Third Edition), Ed. Kutz, M., (2018) 469-488. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-52472-8.00023-X>

[96] Karuppuswamy P.; Bhagyanathan C.; Sathish S.; Elangovan D.: “ Hardfacing of Ni-Based Alloys on Medium Carbon Steel to Improve Turbine Blade Properties.” In: *Materials, Design, and Manufacturing for Sustainable Environment.*; Mohan, S.; Shankar S.; Rajeshkumar G.(Eds); Lecture Notes in Mechanical Engineering Series. ,Springer, Singapore. (2021), 515-523. https://doi.org/10.1007/978-981-15-9809-8_38

[97] Lin, Z.; Ya, W., Subramanian, V.V.; Goulas, C.; Castri, B. D.; Hermans, M. J. M.; Pathiraj, B.: “Deposition of Stellite 6 alloy on steel substrates using wire and arc additive Manufacturing”. *Int J Adv Manuf Technol*, 111 (2020) 411–426 <https://doi.org/10.1007/s00170-020-06116-w>

[98] Mittemeijer, E.J. “Fundamentals of nitriding and nitrocarburizing”, *ASM Handbook*, Volume 4 A, Steel Heat Treating Fundamentals and Processes, (2013) 619- 646.

[99] Czichos, H.; Habig, K.: “Tribologie Handbuch-Reibung und Verschleiss. Germany”. : *Materials, Science and Engineering technology*, Wiley online library, January (1993) <https://doi.org/10.1002/mawe.19930240109>

[100] Jost H P (ed.): “Lubrication (Tribology)—A report on the present position and industry’s needs”. *Department of Education and Science*, H. M. Stationary Office, London, UK, (1966).

[101] Swain, B.; Bhuyan, S.; Behera, R.; Mohapatra, S. S.; Behera, A.: “Wear: A Serious Problem in Industry”, *Intech Open Book Series*, 12 December (2020), [DOI: 10.5772/intechopen.94211](https://doi.org/10.5772/intechopen.94211).

BİLDİRİLER

- [102] Kracke, A.; Allvac, A.: “Superalloys, the most successful alloy system of modern times-past, present and future”, *7th International Symposium on superalloy 718 and derivatives*, TMS (The Minerals, Metals & Materials) Organisation, **(2010)**. https://www.tms.org/Superalloys/10.7449/2010/Superalloys_2010_13_50.pdf
- [103] Mindivan, H.: “Investigating tribological characteristics of HVOF sprayed AISI 316 stainless steel coating by pulsed plasma nitriding”. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 295 **(2018)** 1-7.
- [104] Panahi, A. K.; Khoshkish, H.; Saraji, M. R.: “Wear Resistance of Hard Coatings in Powder Injection Molding (PIM)”, *ASME 2010 10th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis*, July 12–14, **(2010)**, Istanbul, Turkey. Vol. 1, ESDA2010-24590, 485-488, ISBN: 978-0-7918-4915-6 , <https://doi.org/10.1115/ESDA2010-24590>
- [105] Campos-Silva, I.; López-Perrusquia, N.; Hernández-Sánchez, E.; Ortiz-Domínguez, M.; Bravo-Bárcenas, D.; Martínez-Trinidad, J.: “Anisotropy of boride layers: effect on the mechanical properties of AISI 4140 borided steels”. *In Defect and Diffusion Forum* 297–301 **(2010)** 142–147. Trans Tech Publications, Ltd. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/ddf.297-301.142>
- [106] Öner, A.; Yalçinkaya, S.: “Increasing the surface properties of the widely used 4140 steel by coating with co-based superalloy by laser melting deposition method”, *6th international congress on engineering and technology management, İstanbul, Türkiye*, 20 – 21 Kasım **(2021)**, cilt.6, ss.599
- [107] Dixit, V.; Singh, I.; Rajora, V.: “Design and analysis of a gun barrel chamber”, *3rd National Conference on Advancements in Simulation & Experimental Techniques in Mechanical Engineering (NCASEme-2016)*, Punjab, India, **(2016)** 258-263
- [108] Yalçinkaya, S.; Öner, A.: “ Çelik alaşımların yüzeylerinin lazer metal biriktirme (LMD) yöntemi ile süper alaşımlarla kaplanması ve arttırılan aşınma dirençlerinin incelenmesi”, *4.Uluslararası Mühendislik Ve Teknoloji Yönetimi Kongresi*, İstanbul, Türkiye, **(2020)** 98-109, Güven Plus Grup A.Ş. Yayınları: E-ISBN: 978-605-7594-56-3
- [109] Yalçinkaya S., Öner A. “Increasing the wear properties against high temperature by coating the iron-based superalloy to 4140 steel by laser melting deposition method”

6th international congress on engineering and technology management, İstanbul, Türkiye, 20 – 21 Kasım (2021), cilt.6, ss.659

[110] Kumar, L. R.; Antony, J.M.; Kumaran, D.; Lokeshwaran G.; Srinivasan, P.S.: “ An experimental investigation on wear characteristics of C-45 grade steel overlay with stellite”. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Volume 988, 012039, *International Conference on Recent Developments in Material Science and Applications (ICRDMSA 2020)* Chennai, India, 25 – 26 September (2020)

[111] Glanc, A.; Houdková Šimůnková, Š.; Jansa, Z.; Vostřák, M.: “ Microstructure, tribological behaviour and xrd analysis of hvof sprayed and laser remelted cocrtaalsiy” coatings. In: *Metal 2020 - 29th International Conference on Metallurgy and Materials*. TANGER Ltd. Ostrava, Czechia, (2020) 655-660. <http://hdl.handle.net/11025/43129>

[112] Öner, A.; Yalçinkaya, S.: “ Çelik yüzeylerine lazer kaplama (LC) yöntemi ile süper alaşımlar kaplanması ve aşınma/ korozyon dirençlerinin incelenmesi”, *4.Uluslararası Mühendislik Ve Teknoloji Yönetimi Kongresi*, İstanbul, Türkiye, (2020)110-120, Güven Plus Grup A.Ş. Yayınları: E-ISBN: 978-605-7594-56-3

[113] Gee, M. G.; Owen-Jones, S.: “Wear testing methods and their relevance to industrial wear problems ”, *National Physical Laboratory Repert CMMT (A)92* , ISSN 1361-4061 Centre for Materials Measurement and Technology, National Physical Laboratory, Queens Road, Teddington, Middlesex, TW11 0LW (1997).

İNTERNET KAYNAKLARI

[114] Metlab, “Carburizing”, <https://www.metlabheattreat.com/carburizing.html>, E.T. : 22.06.2021.

[115] Shirsat, A.; “ MIG vs TIG Welding”, Technox, Y.T. 01.04.2020, <https://www.technoxmachine.com/blog/mig-vs-tig-welding/>, E.T. : 03.07.2021.

[116] Sulzer, “Increased wear resistance for larger parts: High velocity oxygen fuel spraying HVOF”, 2021, <https://www.sulzer.com/en/shared/services/high-velocity-oxygen-fuel-spraying-hvof>, E.T. : 05.07.2021.

- [117] BodyCote, “Plazma püskürtme - Yüzey teknolojisi”. **2019**,
<https://www.bodycote.com/tr/hizmetler/yuzey-teknolojisi/plazma-puskurtme/>,
E.T.:05.07.2021.
- [118] Commercald-The Welding DGroup, “ The PTA process - Plasma Transferred Arc”, <https://www.commercald.com/the-pta-process-plasma-transferred-arc.htm>,
E.T.:05.07.2021.
- [119] Tocalo, “ Atmospheric Plasma Spraying (APS)”,
<https://www.tocalo.co.jp/english/technical/aps.html>, E.T.:08.07.2021.
- [120] Wikipedia, “Electroless nickel-phosphorus plating”, Last Edit:03.06.**2021**,
https://en.wikipedia.org/wiki/Electroless_nickel-phosphorus_plating, E.T.:08.07.2021
- [121] Bodycote, “ Alev Püskürtme”, 2019,
<https://www.bodycote.com/tr/hizmetler/yuzey-teknolojisi/alev-puskurtme/>,
E.T.:08.07.2021.
- [122] Alacero, “What is steel”, <https://www.alacero.org/en/page/el-acero/what-is-steel>,
E.T. 05.08.2021.
- [123] World Steel Association, “World Steel in Figures”,
<https://www.worldsteel.org/steel-by-topic/statistics/World-Steel-in-Figures.html>, E.T.
05.08.2021.
- [124] Bayça, S. U.; Şahin, S.: “ Borlama”,
http://www1.mmo.org.tr/resimler/dosya_ekler/1ae36ecb9b3eee6_ek.pdf?dergi=62#:~:text=Borlama%3B%20termokimyasal%20bir%20y%C3%BCzey%20sertle%C5%9Firme,seramik%20%C3%B6zellikleri%20de%20g%C3%B6steren%20bile%C5%9Fiklerdir,
E.T. : 23.06.2021.
- [125] TMMOB Makine Mühendisleri Odası, “ Alaşım elementlerinin çeliğe etkisi”,
https://www.mmo.org.tr/sites/default/files/statik_sayfa_ekleri/ISIL%20%C4%B0%C5%9EELEM_18.06.2019.pdf , E.T. : 04.06.2021.
- [126] Azo Materials, “ AISI 4140 Alloy Steel (UNS G41400) ”, Y.T. 18.12.**2019**,
<https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6769>, E.T. 06.08.2021.

- [127] Metal Super Markets, “Grade Guide: AISI 4140 Steel”, Y.T. 19.06.2018, <https://www.metalsupermarkets.com/grade-guide-4140-steel/>, E.T. 06.08.2021.
- [128] The World Material, “SAE AISI 4140 Steel Properties, Material Heat Treatment, Rockwell Hardness”, <https://www.theworldmaterial.com/astm-sae-aisi-4140-steel/>, E.T. 06.08.2021.
- [129] Art Metalurji, “Yüzey Kaplama Teknikleri”, 2019, <https://www.artmetalurji.com/yuezey-kaplama-teknikleri.html>, E.T. : 03.07.2021.
- [130] Hognas, “Deposition techniques—Laser Cladding” , <https://www.hognas.com/en/powder-technologies/surface-coating/laser-cladding/> E.T. : 06.08.2021.
- [131] Bricating MetalWorking, “Additive Manufacturing: Making Sense of Laser Metal Deposition and 3D Printing”, <https://www.fabricatingandmetalworking.com/2016/07/additive-manufacturing-making-sense-laser-metal-deposition-3d-printing/>, E.T.: 09.07.2021.
- [132] Alotech, “Laser cladding by powder (deposit welding)”, <https://www.alotec.de/en/technology/laser-cladding-by-powder/>, E.T.: 09.07.2021.
- [133] “Lecture – 4, Superalloys” , IGCAR. Indira Gandhi Centre for Atomic Research, <http://www.igcar.gov.in/igc2004/121FILE.pdf>, E.T.: 12.07.2021.
- [134] Materials, “Types of Superalloys – Definition”, 2021, <https://material-properties.org/types-of-superalloys-definition/>, E.T.: 12.07.2021.
- [135] Superalloys, <http://www.materialrulz.weebly.com/uploads/7/9/5/1/795167/superalloys.pdf>, E.T.12.07.2021
- [136] CobaltBlue, “Overview of cobalt demand and superalloys”, 2016, <https://www.cobaltblueholdings.com/cobalt/>, E.T.: 12.07.2021.
- [137] Lahr, J.: “We are developing a comprehensive solution for coating brake disks”, Emag Technolies. Y.T.: 23.08.2021. <https://www.emag.com/blog/en/elc-450-lmd/>, E.T.15.08.2021

- [138] ASM international, “Superalloys for high temperatures—a Primer”, Superalloys – A technical guide. Y.T.: 2002. <https://www.asminternational.org/documents/10192/1849770/ACFAAD4.pdf/35831243-7132-4243-91a1-705e67b1cf4b>, E.T.: 18.08.2021.
- [139] Keyence, “Chemical and Materials Industries, Friction, Wear, and Abrasion Tests and Analysis”, Y.T. 2021, <https://www.keyence.com/ss/products/microscope/vhx-casestudy/chemistry/wear-test.jsp>, E.T.: 22.08.2021.
- [140] Element: Accreditations and approvals portals, “ Materials testing: Abrasion & Wear Testing”, Y.T. 2021, <https://www.element.com/materials-testing-services/abrasion-and-wear-testing>, E.T.: 22.08.2021.

BÖLÜM 6 – EKLER

Ek-1. Tez için kullanılan Makine ve Cihazlar



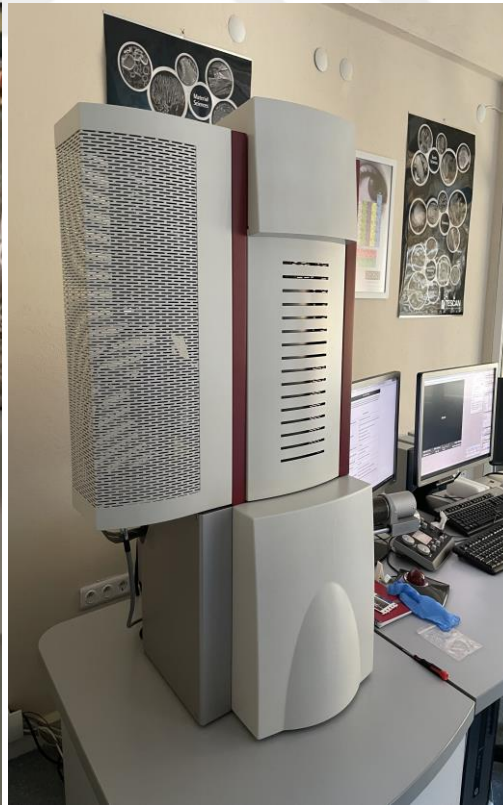
LMD Makinesi Görüntüsü



Pin on Disk Cihazı Görüntüsü



Tel Erezyon Makinesi Görüntüsü



Sem Test Cihazı Görüntüsü