



T.C.

BARTIN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ALÜMİNYUMLANMIŞ INCONEL 601 SÜPERALAŞIMLARIN
YÜKSEK SICAKLIK AŞINMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

ŞEVKET AK

DANIŞMAN

DR. ÖĞR. ÜYESİ MECİT ÖGE

BARTIN-2024



T.C.

**BARTIN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**ALÜMİNYUMLANMIŞ İNCONEL 601 SÜPERALAŞIMININ YÜKSEK
SICAKLIK AŞINMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Şevket AK

JÜRİ ÜYELERİ

Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Mecit ÖGE

Üye : Dr. Öğr. Üyesi İbrahim KARADEMİR

Üye : Doç. Dr. Kadir Mert DÖLEKER

BARTIN-2024

BEYANNAME

Bartın Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre Dr. Öğr. Üyesi Mecit ÖGE danışmanlığında hazırlamış olduğum “ALÜMİNYUMLANMIŞ INCONEL 601 SÜPERALAŞIMININ YÜKSEK SICAKLIK AŞINMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ” başlıklı yüksek lisans tezimin bilimsel etik değerlere ve kurallara uygun, özgün bir çalışma olduğunu, aksinin tespit edilmesi halinde her türlü yasal yaptırımını kabul edeceğimi beyan ederim.

28.08.2024

Şevket AK

ÖN SÖZ

“ALÜMİNYUMLANMIŞ INCONEL 601 SÜPERALAŞIMININ YÜKSEK SICAKLIK AŞINMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ” adlı bu çalışma, Bartın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans Tezi olarak hazırlanmıştır.

Yüksek Lisans tezimin bilimsel danışmanlığını üstlenen, konunun belirlenmesi, çalışmanın hazırlanması, laboratuvar ve tez hazırlama süreçleri boyunca yardımlarını esirgemeyen, ilgi, alaka, bilgi ve tecrübeleriyle her zaman destekçim olan Dr. Öğr. Üyesi Mecit ÖGE’ ye sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışmanın, ileride bu konuda yapılacak olan çalışmalara ışık tutması ve ilgilenenlere yol gösterici olmasını dilerim.

Son olarak, hayatımın tüm aşamalarında maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen eşim, Öğr. Gör. Kübra SAYANER AK’a ve lisansüstü eğitim sürecimde aramıza katılan, tezimle birlikte büyüyen biricik kızımız Raziye Sare AK’a sonsuz şükranlarımı sunarım.

Şevket AK

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ALÜMİNYUMLANMIŞ İNCONEL 601 SÜPERALAŞIMININ YÜKSEK SICAKLIK AŞINMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

Şevket AK

Bartın Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Mecit ÖGE

Bartın-2024, sayfa: 71

Nikel esaslı süper alaşımların korozyif ortamlara karşı dirençlerinin yanı sıra, yüksek sıcaklık ortamlarında nispi hareket halindeki bileşenler için makul düzeyde aşınma direnci göstermeleri de gerekmektedir. Bu çalışmada, Inconel-601 süper alaşımı numune yüzeyleri 4 saatlik işlem süresi boyunca 700°C'de paket alüminyumlama ısıl işlemine tabi tutulmuştur. Üretilen numunelerdeki mikro yapısal değişimler taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile değerlendirilmiş ve işlem görmüş yüzeylerin faz yapıları X-ışını difraktometrisi (XRD) ile incelenmiştir. Termokimyasal yüzey sertleştirme üretilen numunelerin yüksek sıcaklık tribolojik performansına etkisi Pin On Disk aşınma cihazı üzerinde oda sıcaklığında ve 400°C'de sırasıyla 7N ve 15N yükler altında gerçekleştirilmiştir. Numune kesitlerinde mikro sertlik ve nano sertlik ölçümleri de yapılmıştır. Yüksek sıcaklık aşınma testleri, termokimyasal yüzey sertleştirme özgül aşınma oranlarını oda sıcaklığında- 7 N, oda sıcaklığında- 15 N, 400°C- 7 N ve 400°C- 15 N altında sırasıyla yaklaşık %39, %38, %49 ve %51 oranında azalttığını göstermiştir. Isıl işlem, numunelerin mikro sertliğini ve nano sertliğini sırasıyla yaklaşık %382 ve %394 oranında artırmıştır. Aşınma performansı ve sertlik değerlerindeki artış, esas olarak ısıl işlem sonrası sert alüminid fazlarının oluşumuna atfedilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Alüminyumlama, aşınma, Inconel 601, mikro-sertlik, nano-sertlik, sürtünme

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

INVESTIGATION OF HIGH TEMPERATURE WEAR BEHAVIOR OF ALUMINIZED INCONEL 601 SUPPERALLOY

Şevket AK

Bartın University

Graduate School

Department of Mechanical Engineering

Thesis Advisor: Assist. Prof. Dr. Mecit ÖGE

Bartın-2024, pp: 71

Apart from their resistance to corrosive environments, nickel-based superalloys are also required to exhibit moderate wear resistance for components in relative motion in high temperature environments. In this study, Inconel-601 superalloy sample surfaces were subjected to package-aluminizing heat treatment at 700°C for a 4-hour treatment period. The microstructural changes in the produced samples were evaluated by scanning electron microscopy (SEM) and the phase structures of the treated surfaces were investigated by X-ray diffractometry (XRD). The effect of thermochemical surface hardening on the high temperature tribological performance of the produced samples was carried out on the Pin On Disk wear device under 7N and 15N loads at room temperature and 400°C respectively. Microhardness and nanohardness measurements were also made on the sample sections. High temperature wear tests showed that thermochemical surface hardening reduced the specific wear rates by about 39%, 38%, 49% and 51% under room temperature- 7 N, room temperature- 15 N, 400°C- 7 N and 400°C- 15 N, respectively. Heat treatment increased the microhardness and nanohardness of the samples by about 382% and 394%, respectively. The increase in wear performance and hardness values is mainly attributed to the formation of hard aluminide phases after heat treatment.

Keywords: Aluminizing, friction, micro-hardness, nano-hardness, Inconel 601, wear,

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY	Error! Bookmark not defined.
BEYANNAME	ii
ÖN SÖZ	ivi
ÖZET.....	iv
ABSTRACT	vi
İÇİNDEKİLER	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
TABLolar DİZİNİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. TRİBOMETRİK SİSTEM.....	3
3. AŞINMA.....	5
3.1. Aşınmanın Tanımlanması.....	5
3.1.1. Zamanla Gelişen Aşınma	6
3.1.2. Aniden Meydana Gelen Aşınma	7
3.2. Aşınmanın Oluşması İçin Gerekli Şartlar	7
3.3. Aşınmaya Etki Eden Faktörler	8
3.3.1. Ana Malzemeye Bağlı Faktörler	9
3.3.1.1. Malzeme Cinsi.....	9
3.3.1.2. Malzeme Seçimi	9
3.3.1.3. Yüzey Pürüzlülük Durumu	9
3.3.1.4. Malzemenin Mikro Yapısı	9
3.3.1.5. Yüzey Sertliği	10
3.3.1.6. Elastiklik Modülü	11
3.3.1.7. Deformasyon Özelliği.....	11
3.3.2. Karşı Malzemeye Bağlı Faktörler.....	12
3.3.3. Çevreye Bağlı Faktörler	12
3.3.3.1. Nem.....	12
3.3.3.2. Atmosfer	12
3.3.3.3. Sıcaklık.....	12
3.4. Aşınma Çeşitleri.....	12

3.4.1. Abrasiv Aşınma	12
3.4.2. Adheziv Aşınma.....	16
3.4.3. Yorulma Aşınması.....	18
3.4.4. Korozyon Aşınması	20
3.5 Aşınmanın Ölçülmesi.....	21
3.5.1. Ağırlık Farkı Metodu	23
3.5.2. İz Değişim Metodu	23
3.5.3. Kalınlık Farkı Metodu	22
3.5.4. Radyoizotop Metodu	23
4. SÜPER ALAŞIMLAR VE KULLANIM ALANLARI	24
4.1. Giriş.	24
4.2. Süper Alaşımların Tarihsel Gelişimi.....	25
4.3. Süper Alaşımların Sınıflandırılması	26
4.4.1. Demir Esaslı Süper Alaşımlar.....	29
4.4.2. Kobalt Esaslı Süper Alaşımlar	30
4.4.3. Nikel Esaslı Süper Alaşımlar	32
4.4.3.1. Inconel 601 Süper Alaşımlar	37
4.5. Süper Alaşımların Uygulama Alanları	38
4.6. Süper Alaşımların Üretim Yöntemleri.....	40
4.6.1. Döküm ve Dövme Yöntemi ile Üretilenler.....	40
4.6.2. Toz Metalurjisi ile Üretilmiş Süper Alaşımlar	41
5. YÜZEY ALÜMİNYUMLAMA	42
6. ALÜMİNYUMLANMIŞ SÜPERALAŞIM YÜZEYLERİ ÜZERİNE YAPILAN ÇALIŞMALAR	46
7. MATERYAL VE METOT	47
7.1. Numune Hazırlama	47
7.2. Karakterizasyon	49
7.3. Tribolojik Testler.....	50
8. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	51
8.1. Alüminid tabakasının mikroyapısal karakterizasyonu.....	51
8.2. Mikro Sertlik Ölçüm Sonuçları	53
8.3. Sürtünme ve Aşınma Davranışı	54
9. SONUÇLAR.....	64

KAYNAKLAR	65
ÖZGEÇMİŞ	71

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil No	Sayfa No
2.1: Tribolojik sistemin gösterimi	3
2.2: Tribolojik sisteme ait karakteristikler ve parametreler	4
3.1: Aşınma-zaman ilişkisi.....	6
3.2: Bağlı aşınma dirençlerinin karbon miktarına göre değişimi	10
3.3: Kütleli sertliğin abrasiv aşınma direncine etkisi	10
3.4: Elastisite modülü-bağlı aşınma direnci arasındaki ilişki.....	11
3.5: Abrasyon (çizilme) aşınması	13
3.6: Abrasiv aşınma mekanizmasını gösteren şematik diyagram.....	13
3.7: Mikro sürünme aşınma mekanizması	15
3.8: Mikro kesilme aşınma mekanizması.....	15
3.9: Mikro çatlama aşınma mekanizması.....	15
3.10: Adhezyon aşınması	16
3.11: Pitting çukurcuk oluşumu.....	18
3.12: Kayan ve yuvarlanan hareket sonucu yorulmaya bağlı çatlak	19
3.13: Yorulma aşınmasına sonucu yüzeylerde oluşan hasarlar	19
3.14: Korozif aşınma mekanizmasını gösteren örnek şema	21
4.1: Süper alaşımların 1940'tan itibaren sürünme dayanımının gelişimi	26
4.2: Süper alaşımların sınıflandırılması	277
4.3: XWB Turbo-fan motorunun bileşenleri ve malzemeleri	333
4.4: 100 µm seramik üst kaplama kalınlığına sahip numunedeki altılık malzemeye ait optik mikroyapı görüntüleri.....	388
4.5: Uçak motoru parçaları şematik gösterimi	399
4.6: Uçak gaz türbin parçaları: Türbin diski (a), Türbin kanatçıkları (b)	39
4.7: Geleneksel eş eksenli taneler (a), sütunsal taneler (b), tek kristal (c).....	411
7.1: Deneysel sürece ait akış şeması.....	488
7.2: Paket alüminyumlama işleminin şematik gösterimi	499
7.3: Aşınma aparatları ve tribolojik ölçümler	50
8.1: 700°C'de 4 saat sonra oluşan nikel alüminid tabakasının SEM ve EDS analizi	51
8.2: 700 °C'de 4 saat sonra oluşan nikel alüminid kaplamaların XRD desenleri	52

8.3: Alüminize numuneye ait Vickers (HV0.25) girintilerinin mikroskop altında görüntüsü.....	533
8.4: 7N ve 15N yükleme koşulları altında alüminize edilmemiş ve 4h-alüminize edilmiş numunelerin oda sıcaklığı ve 400°C ortam sıcaklığında sürtünme katsayısı (COF) grafikleri.....	555
8.5: Düşük (a), Yüksek büyütme SEM mikrografları (b), çizgi EDS analizi (c), haritalama EDS analizi (d), kesitsel 2D profil (e), oda sıcaklığında ve 15N yük altında işlenmemiş numunenin 3D profil görüntüsü (f).....	577
8.6: Düşük (a), yüksek büyütme SEM mikrografları (b), çizgi EDS analizi (c), haritalama EDS analizi (d), kesitsel 2D profil (e), 400°C ve 15N yük altında işlenmemiş numunenin 3D profil görüntüsü (f)	599
8.7: Düşük (a), yüksek büyütme SEM mikrografları (b), çizgi EDS analizi (c), haritalama EDS analizi (d), kesitsel 2D profil (e), oda sıcaklığında 15N yük altında 4h-alüminize edilen numunenin 3D profil görüntüsü (f).....	61
8.8: Düşük (a), yüksek büyütme SEM mikrografları (b), çizgi EDS analizi (c), haritalama EDS analizi (d), kesitsel 2D profil (e), 400°C'de ve 15 N yük altında 4h-alüminize numunenin 3D profil görüntüsü (f)	633

TABLULAR DİZİNİ

Tablo	Sayfa
No	No
3.1: Aşınmaya etki eden faktörler.....	8
3.2: Abrasiv aşınmada etkili olan faktörler	14
3.3: Malzeme özelliklerinin adezif aşınmaya etkisi	18
4.1: Süper alaşımlarda gözlenen bileşenler	288
4.2: Nikel esaslı süper alaşımların kimyasal bileşenleri	333
4.3: Süper alaşımlar üzerinde elementlerin etkisi.....	366
4.4: Süper alaşımların temel kullanım alanları.....	399
4.5: Tabakaların üretim usulleri ve kullanım yerleri	433
7.1: Inconel 601 süper alaşımına ait kütleli % bileşimi.....	477
7.2: Kuru kayma aşınma testi parametreleri.....	50
8.1: Numuneye ait sertlik karakteristikleri ve alüminid katmanın sertlik özellikleri	544
8.2: Aluminize edilmemiş ve edilmiş numunelerinin spesifik aşınma oranları	566

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Al	: Alüminyum
C	: Döküm
Co	: Kobalt
Cr	: Krom
Cu	: Bakır
Fe	: Demir
Mn	: Mangan
Mo	: Molibden
N	: Newton
Nb	: Niyobyum
Si	: Silisyum
Ta	: Tantal
Ti	: Titanyum
W	: Dövme
γ'	: Gama fazı
δ	: Delta fazı
μm	: Mikrometre

KISALTMALAR

ABD	: Amerika Birleşik Devleti
AISI	: Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü
COF	: Sürtünme Katsayısı
CVD	: Kimyasal Buhar Biriktirme
GPa	: Gigapascal
HV	: Vickers Sertlik Birimi
Hz	: Hertz
PM	: Toz Metalurjisi
PVD	: Fiziksel Buhar Biriktirme
SEM	: Elektron Mikroskobu
XRD	: X Işını Difraksiyon Spektroskopisi

YMK : Yüzey Merkezli Kübik

1. GİRİŞ

Yüksek sıcaklıklara dayanıklı malzemelere olan talep doğrultusunda geliştirilen süper alaşımlar üç gruba ayrılmaktadır: demir bazlı süper alaşımlar, nikel esaslı süper alaşımlar ve kobalt esaslı süper alaşımlar (Akande vd., 2021; Kassner vd., 2008). Bu alaşımlar arasında en yaygın kullanılan grup, yüksek sıcaklıklarda yüksek mukavemet ve korozyon direncini (Sommitsch vd., 2012; Mali vd., 2017) yüksek sürünme direnci ve akma mukavemetiyle (Mostafaei vd., 2022) birleştiren çökelmeyle güçlendirilmiş nikel esaslı süper alaşımlardır. Nikel esaslı süper alaşımlar havacılık ve enerji üretim endüstrilerinde kullanım için geniş uygulama alanı bulmuştur (Mali vd., 2017; Cheng vd., 2024; Mohr vd., 2020). Nikel esaslı süper alaşımların yüzey özelliklerini daha da artırmak için, bu malzemelerin yüzeylerinde koruyucu bir difüzyon tabakası oluşturmak üzere, alüminyum, bor, titanyum vb. gibi elementlerin alt tabakaya difüzyonunu içeren termo-kimyasal yüzey işlemleri sıklıkla uygulanmaktadır. Nikel esaslı süper alaşımlar, alaşımların çeşitli özellikleri üzerinde termokimyasal ısıl işlemlerin etkisini araştıran çeşitli çalışmaların konusu olmuştur (Kopec, 2024; Hong vd., 2024).

Lindner vd. (2021), Inconel 718 alaşımı üzerinde lazer kaplama yoluyla ilk kaplama adımını oluşturmuş ve ardından borlama yoluyla yüzeyde ikinci bir işlemle yüzey sertleştirme işlemi gerçekleştirmiştir. Diğer bir çalışmada, Inconel 800'ün tribolojik davranışı, alaşımın AISI 52100 çeliğe sürtünmesi ve grafitin katı yağlayıcı olarak görev yapmasıyla hem kuru hem de yağlanmış koşullar altında bir Pin on Disc test düzeneği kullanılarak incelenmiş ve sonuçlar, sürtünme katsayısının ve spesifik aşınma oranının yağlanmış durumda kuru duruma kıyasla daha düşük olduğunu ve 0,576 m/s kayma hızı ile pozitif bir korelasyon ortaya çıkardığını göstermiştir (Debbarma, 2021). Inconel 617 ve Stellite 6 alaşımları üzerinde yüksek sıcaklıkta aşınma testleri yapılarak elde edilen sonuçlar X32CrMoV33 sıcak iş takım çeliği ile karşılaştırılmıştır (Biro1, 2010). Borlanmış Inconel 718 kaplamanın sertliği, biriktirilmiş Inconel 718 kaplamanın yaklaşık dört katına çıkarak aşınma direncini önemli ölçüde artırdığı gözlemlenmiştir (Kayalı vd., 2022).

Günen ve Kanca (2017), borlanmış Inconel 625 süper alaşımının mikro yapısını ve mekanik özelliklerini incelemiştir. Numuneler üzerinde oda sıcaklığında %25 ağırlıkça SiC bulamacında 5N, 7,5N ve 10 N yükleri altında AISI 52100 çeliğine karşı mikro aşınma

testleri gerçekleştirilmiştir. Mikro yapısal analiz, çok fazlı bir borür tabakasının ve bir silisit tabakasının oluşumunu ortaya koymuştur. Borür tabakası sertliği ve kalınlık değerlerinin sırasıyla 1175–2432 HV0.1 ve 6,61–92,03 µm arasında değiştiği belirlenmiştir.

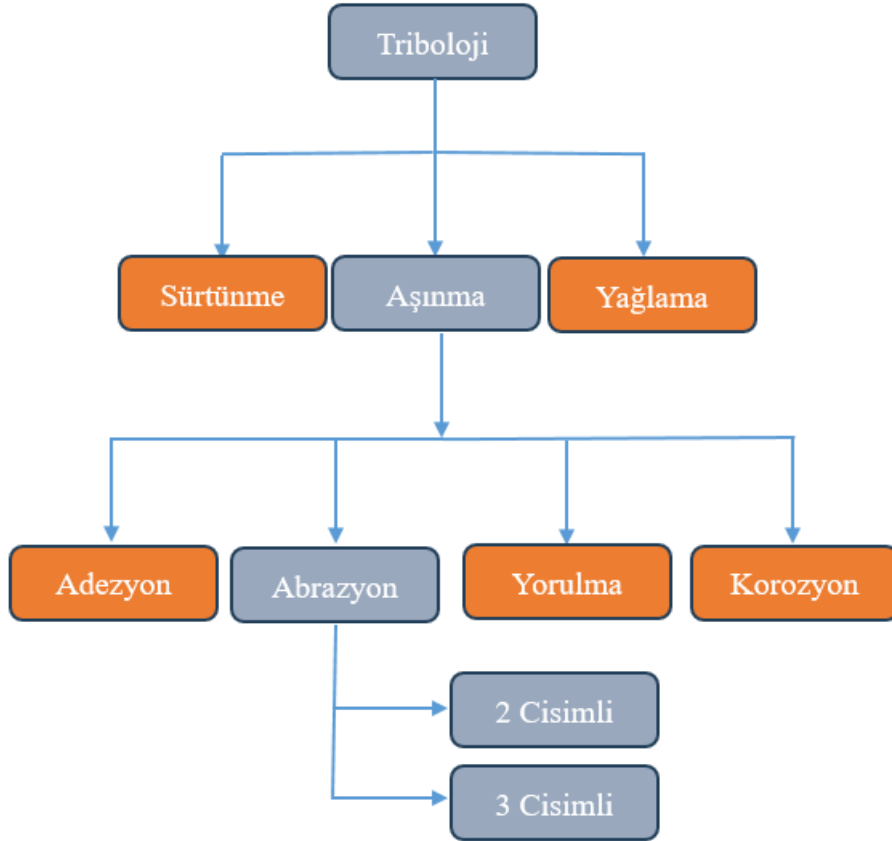
Bölükbaşı vd. (2023), paket alüminyumlamaya tabi tutulan katkı maddesiyle üretilen Inconel-625'in oksidasyon direncini değerlendirmiş ve ısıl işlemin bu alaşımların oksidasyon direncini iyileştirdiğini bildirmiştir.

Nikel esaslı süper alaşım alt tabakalarının termokimyasal ısıl işlemlerle termokimyasal yüzey sertleştirilmesi üzerine çok sayıda çalışma olmasına rağmen, paket alüminyumlamaya tabi tutulan Inconel-601 sınıfı süper alaşımların yüksek sıcaklık aşınma performansının araştırılması üzerine herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır. Yüksek sıcaklıklarda oksidasyona karşı direnç ihtiyacının yanı sıra, nispi harekete maruz kalan havacılık endüstrisi bileşenleri orta ve yüksek sıcaklıklarda da aşınmaya karşı direnç sağlamalıdır. Bu çalışmada ısıl işlem görmemiş ve 700°C'de 4 saatlik paket alüminyumlamaya tabi tutulan Inconel 601 süper alaşım numunelerinin mikro yapıları, sertlik değerleri ve yüksek sıcaklık aşınma mekanizmaları incelenmiştir. Bu alışma, paket alüminyumlama işlemine tabi tutulmuş Inconel 601 numunelerinin yüksek sıcaklık aşınma mekanizmalarını araştıran literatürdeki ilk çalışmadır.

2. TRİBOMETRİK SİSTEM

Sürtünme bilimi olarak adlandırılan triboloji, antik Yunan dilinde sürtünme olarak ifade edilen tribos ve bilim dili olarak adlandırılan logos kelimelerinin birleşimi ile oluşan bir kavramdır (Kaleli, 2015). Tribolojik arayüzlerdeki etkileşimler oldukça karmaşıktır ve bunları anlamak için katı mekaniği, fizik, termodinamik, kimya, yağlama, uygulamalı matematik, akışkanlar mekaniği, ısı transferi, malzeme bilimi, reoloji, makine tasarımı gibi çeşitli disiplinler hakkında bilgi sahibi olmak gerekir (Kaleli, 2015). Bu nedenle tribolojinin multidisipliner bir bilim dalı olduğu söylenebilir.

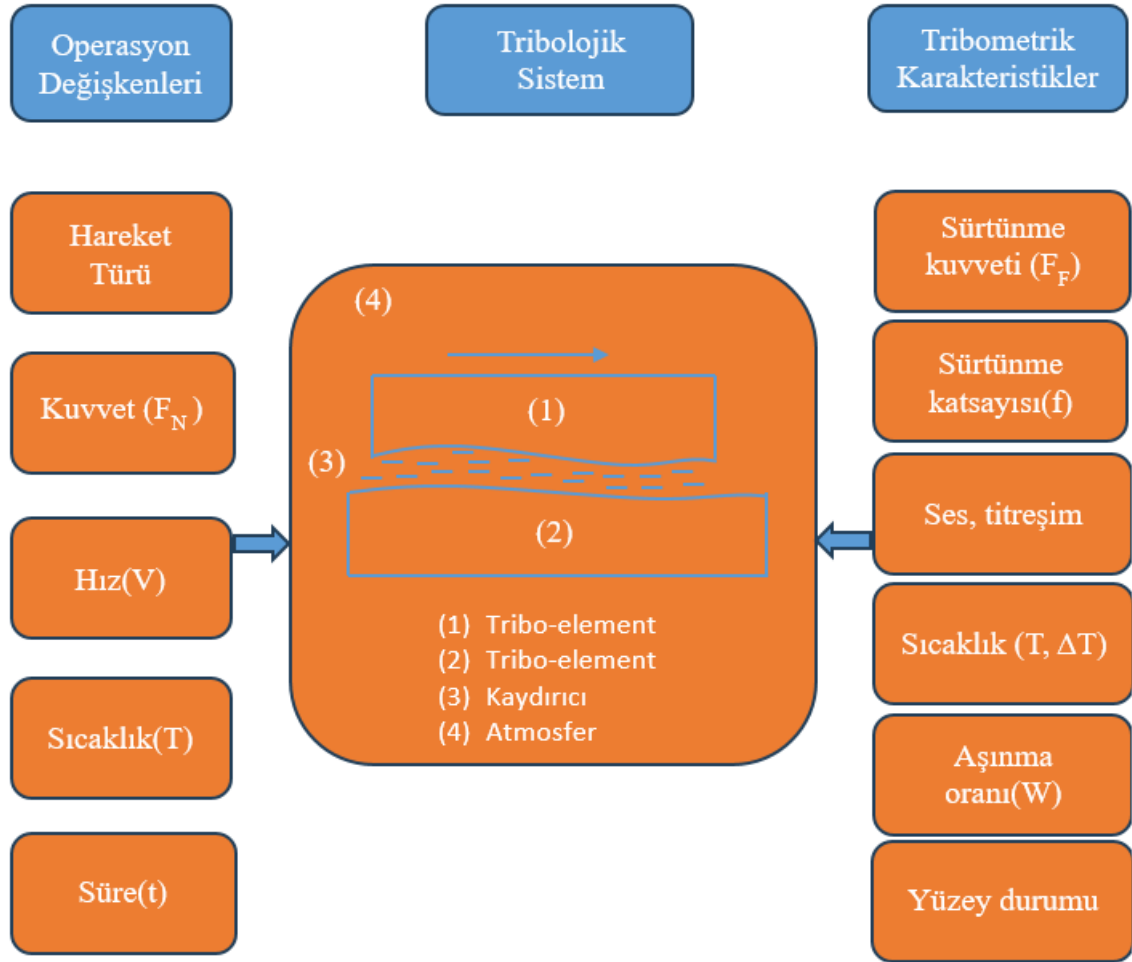
Triboloji ile ilgili bilimsel çalışmalar, Peter Jost'un makinelerdeki sürtünme ve aşınmayla ilgili sorunları kontrol etmek için yağlamanın doğru uygulanmasıyla devasa ekonomik faydalar elde edilebileceğini bildirmesiyle başlamıştır (Shah vd., 2021). Triboloji; Yağlama, aşınma, sürtünme ve bunlarla bağlantılı olayları inceleyen bilim alanıdır (Akkurt, 1986). Aşağıda tribolojik sistem türleri bağlamında bir şekil yardımı ile açıklanmıştır.



Şekil 2.1: Tribolojik sistemin gösterimi

Tribolojik sistem aşınma, sürtünme ve yağlama olarak adlandırılan 3 bileşenden oluşmaktadır. Abrazyon, yorulma, korozyon ve adezyon olmak üzere tribolojik yüzeylerde 4 farklı şekilde aşınma gerçekleşmektedir. Aşınma ve sürtünme tribolojik sistemin çözümlenmesi için detaylıca araştırılması gereken kavramlardır.

Birbiri ile temas eden hareketli mekanik parçaların temas yüzeylerinde sıcaklık artışı ve sürtünme kuvvetinin sonucunda enerji kaybı ortaya çıkmaktadır. Yağlama bu enerji kaybını azaltmak için alınması gereken aksiyonların başında gelmektedir. Bir tribolojik sistemin şematik gösterim Şekil 2.2’de verilmiştir.



Şekil 1.2: Tribolojik sisteme ait karakteristikler ve parametreler

Tribolojik sistem temel olarak sürtünme olayı sırasında yüzeysel olarak aşınmaya uğraması beklenen esas malzemenin ve esas malzeme ile aşınma oluşturması beklenen karşıt malzemenin oluşmasıdır.

3. AŞINMA

Bu bölümde aşınmanın tanımlanması, aşınma çeşitleri, aşınmanın oluşması için gerekli şartlar, aşınmaya etki eden faktörler ve aşınma ölçüm metotları incelenecektir.

3.1. Aşınmanın Tanımlanması

Aşınma genel anlamda birbirlerine göre izafi açıdan hareket halinde olan cisimlerin sürtünmesi sonucu cisimlerin yüzeylerinde oluşan malzeme ve kütle kaybıdır. DIN 50320'de arzu edilmeyen şekilde küçük parçacıkların mekanik nedenlerle malzeme yüzeylerinden ayrılması sonucu oluşan değişiklik, aşınma olarak tanımlanmıştır. Mikroskobik boyutta incelendiğinde aşınma, sürtünmeden dolayı yüzeydeki pürüzlerin kırıldığı ve yüzeyler arasındaki bazı noktalarda atomsal mertebede soğuk kaynak oluştuğu ve sonrasında sürtünmenin devam etmesi sonucu bu kaynakların kırılarak ayrıldığı düşünülmektedir.

Kesin bir aşınma tanımı yapmak zor olmakla birlikte aşınmayı tanımlayabilecek birkaç tanım şu şekilde yapılabilir:

- Basınç altında izafi hareket eden cisimlerde yüzeylerden kopan parçacıklar nedeniyle malzeme yüzeyinde oluşan bozulmadır.
- Mekanik etki altındaki yüzeyde meydana gelen malzeme kaybıdır.
- Katı cismin yüzeyinde tribolojik zorlamalar sonucu sürekli olarak oluşan malzeme kaybıdır.
- Temas yüzeylerinde kimyasal ve fiziksel değişiklikler sonucu meydana gelen yıpranmalardır.

Aşınma ilk kez Mısır ve Sümer uygarlıklarında inceleme konusu olmuş olup daha sonraki süreçlerde aşınmanın mekanizmaları G. Amontons (1663-1705) ve Leonardo Da Vinci (1452-1519) ve tarafından ortaya atılmıştır. Aşınma; madencilik, makine, tarım gibi farklı sektörlerde kullanılmakta olan malzeme ömürlerini azaltarak ekonomik kayıplara sebebiyet vermektedir (Erdem, 2006). ABD'de yapılan bir incelemede malzemelerde farklı türde aşınmalar neticesinde yüzeylerdeki kayıpların ülkelere ait yıllık brüt hasılanın %6-7'sini oluşturduğu tespit edilmiştir (Gök, 2001).

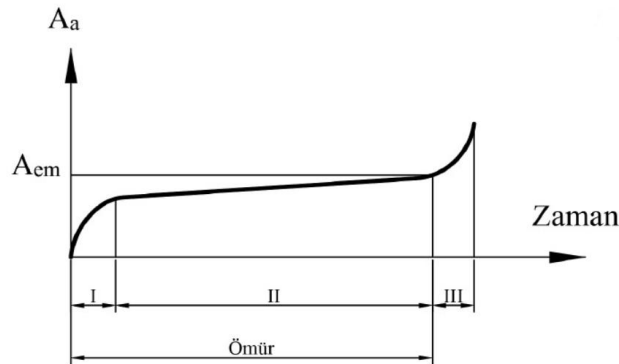
Moore ise aşınmayı; gaz, sıvı ve katı maddelerin, kullanılan malzemelerin yüzeylerine temas etmesi sonucunda malzemenin yüzeyinden mikro parçacıkların kopması sonucu ortaya çıkan yüzey bozulması olarak tanımlamıştır (Bhushan, 2000).

Malzeme yüzeylerinde aşınma sonucu yüzeylerin ilk şekilleri kaybolmaktadır, yüzeylerdeki parçacıklar arasında boşluklar oluşmakta ve istenilen fonksiyonellik sağlanamamaktadır. Yüzeylerden talaş kaldırma, taşlama, parlatma gibi mekanik işlemler aşınma olarak adlandırılmamaktadır. Bunun sebebi ise bu işlemler istenilerek ve kontrollü koşullara gerçekleştirilmektedir. Aynı şekilde elektriksel, termal, fiziksel ve kimyasal etkilerle parça yüzeylerinde oluşan eskitme ve yüzeyden kırılarak büyük parçacıkların ayrılması işlemi de aşınma olarak değerlendirilmemektedir (Owsalou, 2012).

Biçimi ve ortaya çıkma hızları değerlendirildiğinde aşınma, aniden meydana gelen ve zamanla gelişen aşınma olmak üzere iki farklı şekilde tanımlanmaktadır. Şekil 3'te gösterildiği gibi aşınma-zaman diyagramında makine elemanının ömrü, müsaade edilen aşınma sınırı (A_{em}) atanarak tespit edilebilmektedir (Owsalou, 2012).

3.1.1. Zamanla Gelişen Aşınma

Bu aşınma türünde aşınma üç aşamada gerçekleşir ve makine elemanı normal çalışma ömrünü tamamlar. Zamanla gelişen aşınma türünün kademeleri aşağıda verilmiştir.



Şekil 3.1: Aşınma-zaman ilişkisi

1. aşama (Rodaj Safhası); birlikte çalışacak parçaların birbirine alışma safhası olan ilk an aşınma safhası olarak da isimlendirilir. Dişli ve yatak gibi makine elemanlarına ait kayma

sistemlerinde önemli etkiye sahiptir. Malzeme ömründe az bir zaman teşkil etmesine rağmen aşınma oranı nispeten yüksektir. Bu safhadaki aşınma sonraki aşınma süreçlerini büyük ölçüde etkilediği için rodajlamanın iyi yapılması ve kısa sürede gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bu nedenlerden dolayı bu safha için özel yağlar kullanılmaktadır.

2. aşama; kararlı durum aşınma safhası olarak da adlandırılır. Malzemenin çalışma ömründe büyük etkiye sahiptir. Aşınma oranları ve sürtünme kuvvetleri bu devrede ölçülmektedir.

3. aşama; yıkıcı aşınma safhası olarak adlandırılır. Bu aşamada aşınma hızındaki artış ile çok yüksek aşınma oranları oluşur ve malzeme yüzeylerinde ağır hasarlar meydana gelmektedir (Owsalou, 2012; Boynueyri, 2019).

3.1.2. Aniden Meydana Gelen Aşınma

Temas eden yüzeylerin çok hızlı bozulduğu ve öncesinde herhangi bir aşınmanın gözlemlenmediği aşınma türüdür. Bazı ani meydana gelen aşınma durumlarında parçalar çalışamaz hale gelir ve birbirlerine kilitlenir. Bu tip aşınma genellikle yetersiz yağlama ve yanlış malzeme seçimleri nedeniyle oluşmaktadır (Owsalou, 2012; Boynueyri, 2019).

3.2. Aşınmanın Oluşması İçin Gerekli Şartlar

Malzeme yüzeylerinde oluşan kopma ve yıpranmaların aşınma olarak kabul edilebilmesi aşağıdaki kriterlerin oluşmasına bağlıdır. Bu kriterler;

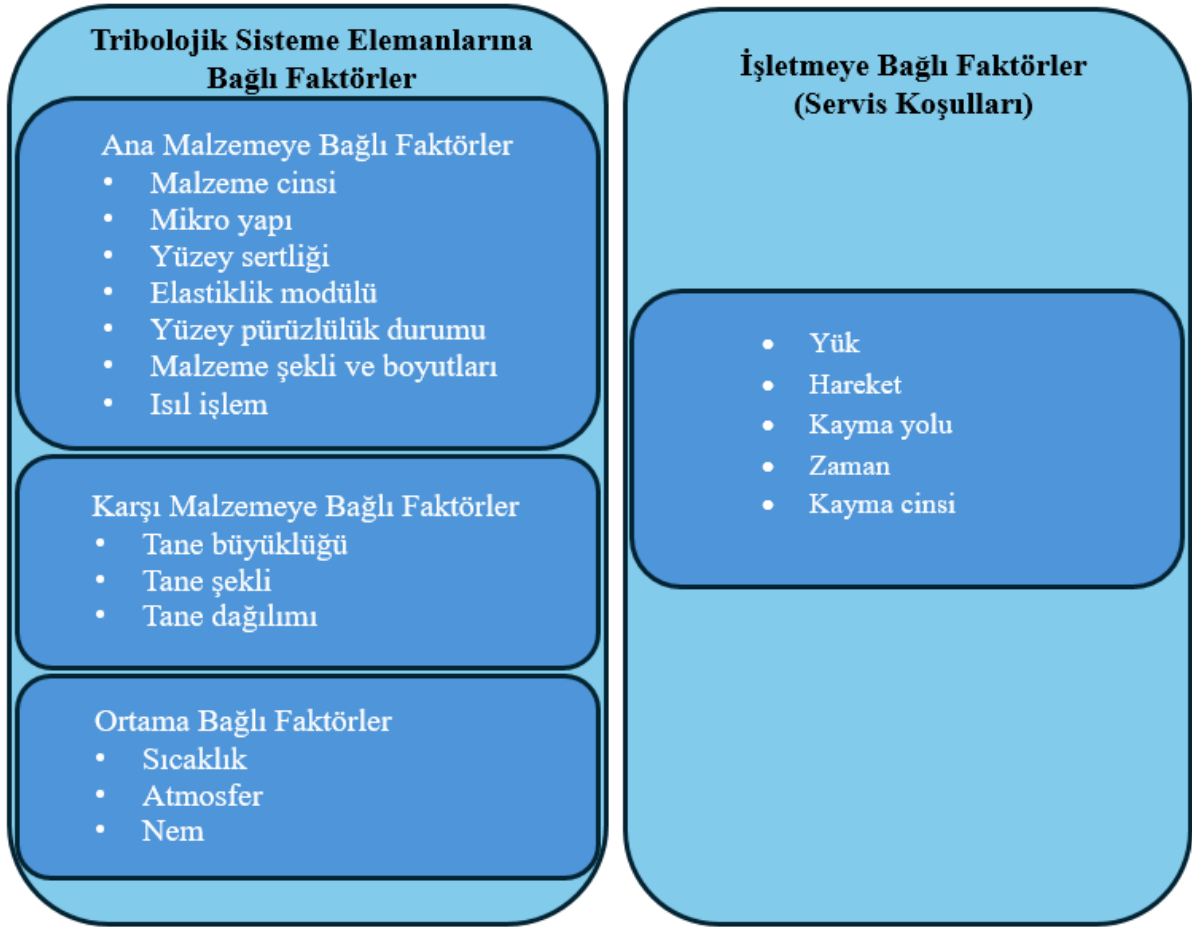


Yukardaki kriterleri sağlamayan bir yüzeydeki değişim veya yıpranma aşınma olarak değerlendirilmemelidir (Gök, 2001).

Temas halindeki yüzeylerde oluşan malzeme kaybı, insanoğlunun mekanik problemlerinin başında gelmektedir. Mevcut mekanik enerjinin %30'luk kısmının aşınma ve sürtünme kaynaklı kayıplara harcandığı düşünülürse aşınmanın önemi daha iyi anlaşılabilir. Günümüz sanayisinde sert ve aynı zamanda yüksek toklukta, sürtünme ve aşınmanın minimum seviyede oluşacağı malzemelere ihtiyaç duyulmaktadır. Sanayi koşullarında yüksek aşınma direncine sahip malzeme üretmek ekonomik açıdan elverişli değildir. Bu duruma en iyi çözüm ise mikro yapıya ve servis şartlarına uygun malzeme seçimi olacaktır (Boynueyri, 2019).

3.3. Aşınmaya Etki Eden Faktörler

Tribolojik sistem elemanlarına bağlı etkenler ve işletmeye bağlı etkenler olmak üzere iki ana başlık altında değerlendirilmektedir. Bu faktörler Tablo 3.1'de verilmiştir.



Tablo 2.1: Aşınmaya Etki Eden Faktörler (URL-3, 2024)

3.3.1. Ana Malzemeye Bağlı Faktörler

Aşınmanın önlenmesi amacıyla malzeme seçimi sırasında dikkat edilmesi gereken faktörlerdir.

3.3.1.1. Malzeme Cinsi

Malzemelerin mekanik özellikleri farklı çalışma koşullarında aşınmayı etkileyen bir faktördür. Malzemeler, bazı işletme koşullarında yüksek aşınma direnci gösterirken bazı ortam koşullarında da düşük aşınma direnci gösterebilirler. Bu nedenlerden dolayı malzeme cinsi işletme şartları ve aşınma mekanizması dikkate alınarak seçilmelidir.

Sürtünmeye maruz kalan ortamlarda malzeme seçiminde özgül yük, malzemenin elastisite modülü ve mukavemet özellikleri dikkate alınması gereken özelliklere örnek olarak verilebilir (Oğuz, 1993).

3.3.1.2. Malzeme Seçimi

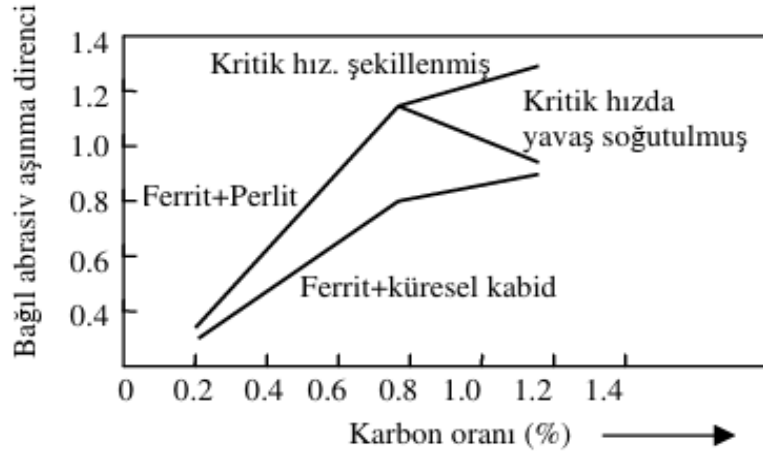
Temas halinde çalışan malzemelere ait aşınma dayanımlarının arttırılması, bu malzemelere ait çalışma ortamları ve mekanik özelliklerinin iyi değerlendirilmesine bağlıdır (Keskin, 2012). Aşınma dayanımlarının arttırılması için birbirleri ile temas halinde çalışan parçaların malzemeleri farklı seçilmelidir.

3.3.1.3. Yüzey Pürüzlülük Durumu

Yüzey pürüzlülüğü aşınma direncine en fazla etki eden faktörlerden biridir. Kaba işlenmiş bir malzemede sürtünme yüzeyi azalmakta ve dolayısı ile yüzeydeki pürüze gelen yük artmakta ve bu da aşınmanın artmasına sebep olmaktadır.

3.3.1.4. Malzemenin Mikro Yapısı

Bir malzemenin mekanik özellikleri üzerinde mikro yapıdaki tanecik boyutu ve faz durumları önemli etkiye sahiptir. Örneğin tanecikli perlitik yapının aşınma direnci lamel perlitik yapıya göre daha azdır.

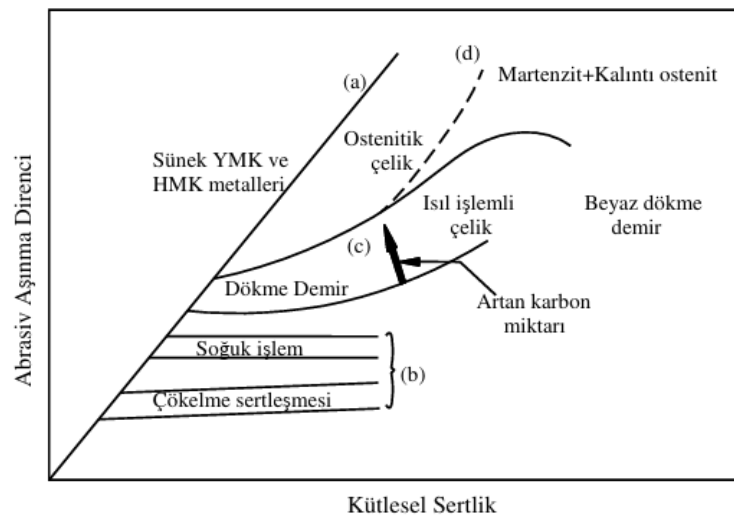


Şekil 3.2: Bağlı aşınma direncinin karbon miktarına göre değişimi (Büyükkelleci, 2008)

Çeliklerde tavllanmış durumda aşınma direnci sementit miktarının artmasıyla artar. Bir diğer örnek olarak da düşük alaşımlı çeliklerin aşınma dirençleri bağımsız karbon miktarının artmasıyla doğru orantılıdır. Şekil 3.2’de çeliklerin karbon miktarları ve aşınma dirençlerine ait değişim verilmiştir.

3.3.1.5. Yüzey Sertliği

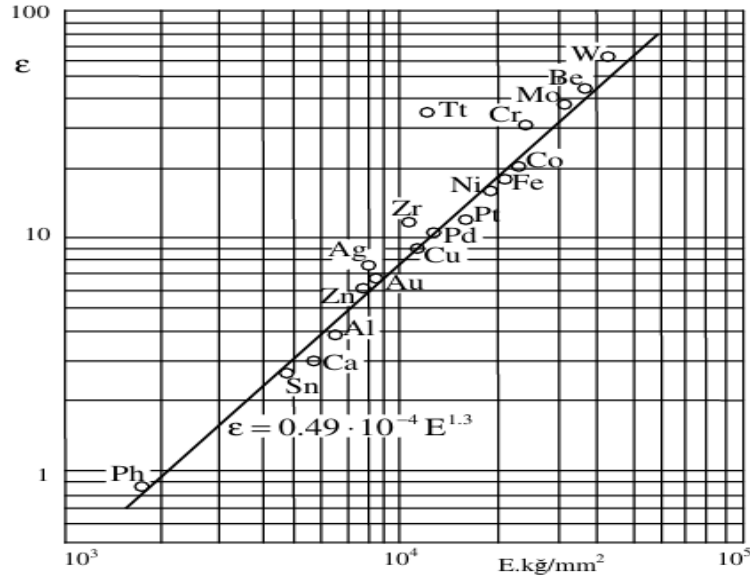
Abrasiv aşınma direncinin sertlikle doğru orantılı olduğu kabul edilmektedir. (Muratoğlu, 1997). Kütleli sertlik, Şekil 3’te görüldüğü gibi malzemelerin abrasiv aşınma direncini önemli ölçüde etkilemektedir.



Şekil 1.3: Kütleli sertliğin abrasiv aşınma direncine etkisi (Büyükkelleci, 2008)

3.3.1.6. Elastiklik Modülü

Elastiklik modülleri ve aşınma dirençleri arasındaki ilişki malzemenin elastiklik özelliği ile açıklanabilir (Keleştimur, 1989). Saf metaller için aşınma direnci elastiklik modülüne bağlı olup ısı işlem görmüş çelikler için bu durum geçerli değildir.



Şekil 3.4: Elastisite modülü-Bağlı aşınma direnci arasındaki ilişki (Keleştimur, 1989)

3.3.1.7. Deformasyon Özelliği

Abraziv aşınmaya maruz kalan malzemelerde soğuk sertleşme kabiliyeti önemli bir faktördür. Aynı ürüne ait farklı sertlikteki malzemelerde yumuşak malzemenin aşınmasının az olduğu görülür. Malzemelere ait aşınma direnci soğuk şekil verme işleminin sertliği etkilemesi nedeniyle değişkenlik göstermektedir. Soğuk şekil verme ile sertleştirilen malzemelerde aşınma direnci fark edilir derecede gelişmektedir.

Malzemelerin mekanik özellikleri, soğuk şekil verme sırasında oluşan pekleşmeden etkilenmektedir. Malzeme yüzeylerinde pekleşmeye aşınma sırasında oluşan soğuk deformasyon neden olmaktadır (Keleştimur, 1989).

3.3.2. Karşı Malzemeye Bağlı Faktörler

Aşındırılacak yüzeye ait malzeme yapısı, aşındıran yüzeye ait malzeme yapısı kadar önemlidir.

3.3.3. Çevreye Bağlı Faktörler

Aşınma sistemini etkileyen faktörlerden bir diğeri de çevresel etkenlerdir. Çevresel etkiler malzemenin aşınma direncini, hızını ve türünü etkileyebilmektedir. Bu etkenler; nem, atmosfer ve sıcaklık olarak ifade edilmektedir. Aşağıda kısaca bu faktörlere yer verilmiştir.

3.3.3.1. Nem

Yüksek nemli ortamlarda sürtünme katsayısının azalması sonucu aşınma miktarında da azalma meydana gelmektedir (Erdoğan, 2012).

3.3.3.2. Atmosfer

Vakumlu ortamda yüzeyde bulunan oksit tabakalarının kaldırılması oksitlenen bölgenin adhezyon aşınmasına neden olmaktadır (Erdoğan, 2012).

3.3.3.3. Sıcaklık

Yüksek sıcaklıklar, malzemelerin termal genişmesine neden olabilir ve bu da aşınma direncini azaltabilir. Ayrıca, yüksek sıcaklıklarda yağlama maddeleri veya diğer aşınma önleyici maddeler de daha hızlı bozulabilir.

3.4. Aşınma Çeşitleri

Aşınma genel anlamda abrasiv aşınma, adhesiv aşınma, yorulma aşınması ve korozyon aşınması olarak incelenmektedir.

3.4.1. Abrasiv Aşınma

Sistemde hızlı bir hasara neden olan çizilme veya yırtılma aşınması olarak da tanımlanmaktadır. Aşınması fark edilemeyen makine parçaları işlevini gerçekleştiremez

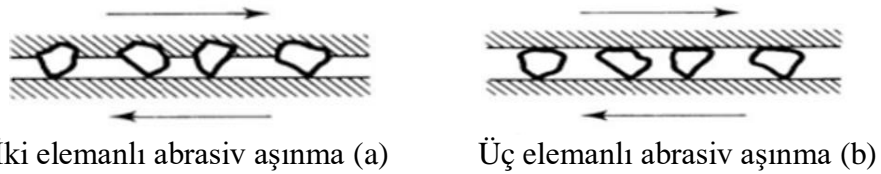
hale gelebilir. Genellikle pulluk, iş makineleri, kırıcı aletler gibi makine elemanlarında sıklıklar görülen bir aşınma türüdür.

Abrasiv aşınma, iki elemanlı ve üç elemanlı olarak iki farklı şekilde meydana gelir. Uygulanan kuvvet ve basınç etkisiyle iki cisimden daha sert olan cismin yüzeyinde bulunan pürüzler yardımı ile yumuşak olan cisimden mikro ölçekte talaş kaldırması olayına iki elemanlı abrasiv aşınma denir. İki elemanlı abrasiv aşınma türü malzemeler arasındaki sertlik farkının bir sonucu olarak oluşmaktadır.



Şekil 3.5: Abrazyon (çizilme) aşınması (URL-1, 2024)

İki yüzey arasına sıkıştırılmış ve bu yüzeylerden birini veya her ikisini aynı anda aşındıracak şekilde bu yüzeylerden daha sert bir üçüncü cismin bulunduğu aşınma olayına ise üç elemanlı abrasiv aşınma denir.



Şekil 3.2: Abrasiv aşınma mekanizması şematik diyagram (Hutching, 1992)

Genellikle metal/metal malzeme yüzeylerinde aşınma, iki elemanlı abrasiv olarak başlar ve yumuşak yüzeylerden kaldırılan talaşlar aracılığı ile üç elemanlı abrasiv aşınma olarak devam eder. Motor'da oluşan atık ürünlerin neden olduğu aşınma abrasiv aşınmaya örnek olarak verilebilir. Endüstriyel ekipmanlarda malzeme kayıplarının birincil nedenlerinden

biri abrasiv aşınmadır (Varol, 2016). Aynı şekilde imalat sırasında oluşan talaşlar ve dökümden kalan kumlar bu aşınma türüne örnek olarak verilebilir.

Abrasiv aşınmayı engellemek için yüzey sertleştirme uygulaması, sürtünme halindeki makinaların periyodik olarak temizlenmesi, daha sert alaşımlar kullanılması ve malzeme yüzeyini sert bir tabaka ile kaplamak önerilebilir. Aşağıdaki tabloda abrasiv aşınmada etkili olan faktörler verilmiştir.

Abrasivin Özellikleri	Etkileşim Koşulları	Aşındırılan Malzemenin Özellikleri
Konsantrasyon	Nemlilik	Korozyon direnci
Sertlik	Kayma	Süneklik
Akma gerilmesi	Sıcaklık	Akma gerilmesi
Partikül şekli	Hız	Mikro yapı
Kırılma özellikleri	Darbe	Kırılma tokluğu
Partikül büyüklüğü	Kuvvet	İşleme sertleşmesi
		Tokluk
		Sertlik
		Elastik modülü

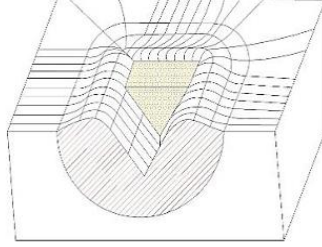
Tablo 3.2: Abrasiv aşınmada etkili olan faktörler

Aşındırılan ve aşınan malzemelerin mekanik özellikleri yanında korozyon ve oksitlenme gibi çevre şartlarının da oldukça önem taşıdığı yukarıdaki tablodan anlaşılmaktadır.

Khruschov ve Babichev, aşındırıcı taneler ve temas yüzeyleri üzerinde yaptıkları incelemelerde yumuşak yüzeylerde oluşan çiziklere plastik şekil değiştirmelerin sebep olduğunu ve bu yumuşak yüzeylerden mikro boyutta talaşların kaldırıldığını tespit etmişlerdir (Çetin, 2005).

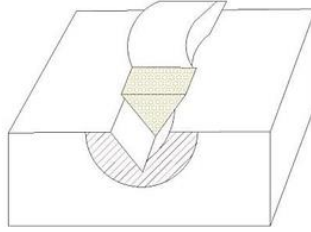
Malzeme yüzeylerine ait özelliklere bağlı olarak aşındırılan ve aşındırıcı yüzeylerde oluşan aşınma mekanizmaları aşağıda özetlenmiştir. Sürülme aşınması, malzemenin abrasiv partikül tarafından aşındırılması olarak tanımlanmaktadır. Yüzeyden direkt olarak malzeme koparılmaz.

Sürtünme sırasında öncelikle malzeme yüzeyinde sırtlar oluşur, sonra bu sırtlar malzeme yüzeyinden ikincil bir partikül aracılığı ile koparılır. Bu durum aşağıdaki şekilde görülmektedir.



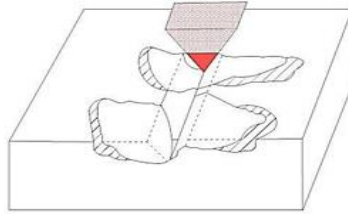
Şekil 3.7: Mikro sürünme aşınma mekanizması

Kesilme aşınması, talaş kaldırma işlemine benzer şekilde yüzeyden malzemeler aşınma atıkları şeklinde atılmaktadır.



Şekil 3.8: Mikro kesilme aşınma mekanizması

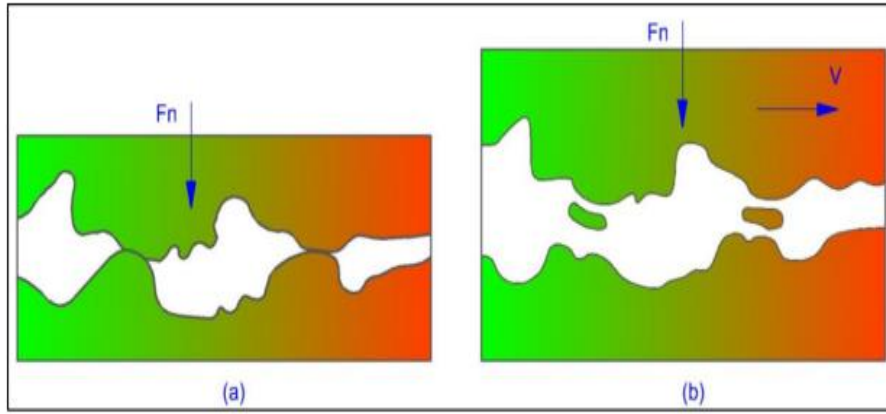
Bölgesel kırılmaların meydana geldiği aşınma şekli parçalanma aşınması olarak adlandırılmaktadır. Bu kırılmalar, malzeme kaybını arttıracak şekilde bölgesel olarak yayılabilirler.



Şekil 3.9: Mikro çatlama aşınma mekanizması

3.4.2. Adheziv Aşınma

Bir diğer adı yapışma aşınması olan adhesiyon aşınması en yaygın olarak görülen aşınma türüdür. Birbiri ile temas halinde olan iki metalik yüzeylerde yüksek basınç ve sıcaklık etkisi nedeniyle kaynama meydana gelir. Metalik yüzeylerin birbirleri ile izafi hareketi esnasında metal yüzeylerden kaynaklar kopar. Kopma şeklinde oluşan bu aşınma türüne adhesiv aşınma denir. Bu tür aşınmaya ait karakteristik bir örnek olarak motor yataklarının sarması verilebilir. Adhesiv aşınma formları mühendislikte yapışma aşınması, yenme aşınması ve kaynaklaşma aşınması şeklinde de tanımlanabilmektedir.



Şekil 3.3: Adhezyon aşınması (Varol, 2016)

Adhezyon aşınma uygulamada çok yüksek yük ve hızlarda oluşan bir aşınma türü olmasına rağmen düşük hızlarda da meydana gelebilmektedir.

Adhesiv aşınma görülen mekanizmalarda tamir edilmesi ve sökülüp takılması daha kolay olan malzemelerin daha yumuşak olması tercih sebebidir. Örneğin ana dişliye göre daha yumuşak olan pinyon dişliler verilebilir (Büyükkelleci, 2008).

Temas alanlarının çok küçük olduğu yüzeylerde temas noktalarında yüksek basınçlar gözlemlenir (Şafak, 2008). Düşük temas alanlarındaki bu yüksek basınç, metal yüzeyler arasında mikro kaynamalara neden olmaktadır. Temas noktalarındaki gerilme, yüzey pürüzlerinin akma sınırını aştığında plastik deformasyona, yüzeylerde çizilmelere ve yüzeylerin sıvanıp kaynaklaşmalarına neden olmaktadır (Demiral, 2006).

Yüksek basınçlara ek olarak, temas noktalarında kaynak bağlarının oluşumuna yüksek sıcaklık artışları da neden olmaktadır. Kaynak bağlarının oluştuğu yüzeylerin temizliği oluşan bağ kuvveti ile doğru orantılıdır. Malzeme yüzeyleri arasında yağlayıcı maddelerin ve rutubetin varlığı bağ kuvvetini ve sonuç olarak da aşınmayı azaltmaktadır (Karaoğlu, 2006).

Adhezyon aşınmasının önlenmesi için;

- Kalay veya demir-bronza dayanabilen yatak malzemeleri gibi malzeme seçiminde biri sert diğeri yumuşak olacak şekilde farklı sertliklerde malzemeler seçilebilir.
- Bu tür aşınmada yağlama işlemi büyük önem taşımaktadır.

Yapılan deneylerde elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Benzer malzeme çiftleri veya kolay alaşım yapma özellikleri olan malzemeler arasında adezif aşınma görülebilir.
- Aşınma, normal kuvvete ve yüzeyler arasındaki izafi hıza bağlıdır.
- Yüzeyler arasında sertlik farklılıkları olması durumunda kaynak bağlarının kopması yumuşak malzemelerde gerçekleşmektedir.
- Nem veya oksitten oluşan tabaka aşınmayı etkilemektedir.
- Kaynak birleşmelerinin tamamında oluşmamaktadır.

Kaynak noktalarında aşınan bölge k_a ile gösterilirse, aşınmaya maruz kalan bölge hacmi; (Bhushan, 2000)

$$V_a = k_a \cdot A_h \cdot L \quad (\text{Eşitlik 1})$$

V_a : Aşınan malzemenin hacmi

k_a : Kaynak birleşim noktalarının aşınmaya katılan kısmı

A_h : Yükü taşıyan alan

L : Kayma mesafesi

Metallere ait adezif aşınma uygulamalarında k_a değeri 10^{-7} ile 10^{-2} arasındadır.

Aşağıdaki tabloda malzeme özelliklerine göre bu özelliklerin adesif aşınmaya etkileri tabloda ifade edilmiştir. Örneğin yüksek sertlikteki malzemelerde adesif aşınma oranı yüksektir.

Malzeme Özellikleri	Adesif Aşınma
Küçük atom yarıçapı	Az
Yüksek ergime noktası	Çok
Yüksek elastiklik modülü	Az
Hegzagonal kristal yapı	Çok
Oksitli yüzey	Çok
Kübik kristal yapı	Çok
Yüksek yeniden kristalleşme sıcaklığı	Çok
Yüksek sertlik	Çok
Yüksek deformasyon sertleşmesi	Çok

Tablo 3.3: Malzeme özelliklerinin adezif aşınmaya etkisi

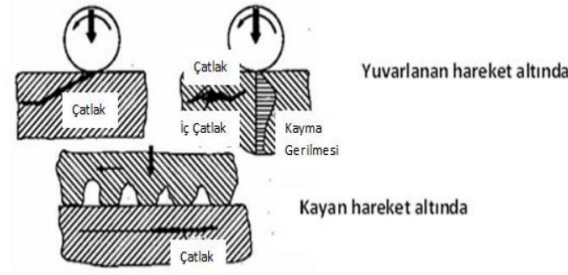
3.4.3. Yorulma Aşınması

Makine parçalarında titreşim veya tekrarlanan yük zamanla yorulma meydana getirmektedir. Değişken ve sürekli yükler altındaki yüzeylerde yorulma çatlakları oluşur. Bu çatlakların zamanla büyümesi, malzeme yüzeylerinden parçaların kopmasına ve sonrasında temas yüzeylerinde küçük çukurcukların meydana gelmesine neden olmaktadır. Yorulma aşınması genellikle yuvarlanma hareketi yapan dişli çarklar, kam mekanizmaları, rulmanlar gibi makine elemanlarının yüzeylerinde meydana gelir. Yorulma aşınmasının hızı abrasif aşınmaya göre daha düşüktür. Bir dişli çarka ait çukur oluşumu şekil 3.11’de gösterilmiştir.

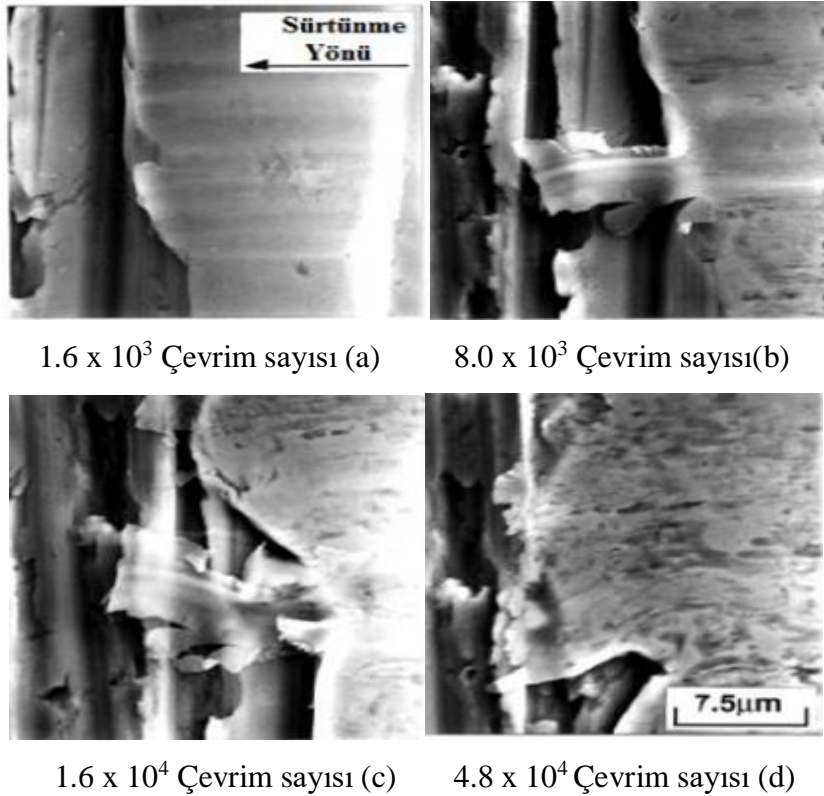


Şekil 3.11: Pitting çukurcuk oluşumu (URL-1, 2024)

Yorulma aşınması iki türlü şekilde meydana gelmektedir. Yüzeyde oluşan çukurların çok küçük ve yüzeye yayılmadığı aşınma şekline basit yorulma aşınması denir. Bu tür aşınmalar makine elemanının çalışmasını engellememektedir. Çukurcukların zamanla büyüyerek aşındığı aşınma türüne ise tahrip edici yorulma aşınması denir. Bu tür aşınma malzemelerin fonksiyonelliğine doğrudan etki ederler ve malzemeleri çalışamaz hale getirirler (Akkurt, 1986).



Şekil 3.12: Kayan ve yuvarlanan hareket sonucu yorulmaya bağlı çatlak (Akagaki, 1987)



Şekil 3.13: Yorulma aşınmasına sonucu yüzeylerde oluşan hasarlar (Owsalou, 2012)

Temas yüzeylerinin küçük olması nedeniyle oluşan hertz basıncı nedeniyle sürtünen yüzeyde kayma gerilmesi oluşmaktadır. Malzeme yüzeylerinde aşırı yorulmadan dolayı kayma gerilmesinin yüksek olduğu alanlarda dislokasyon ve plastik deformasyonlara bağlı olarak çukurcuklar meydana gelmektedir (Budinski, 1988). Yüzey alanlarındaki gerilmeler ve zorlanmalar nedeniyle küçük çukurcuklar zamanla büyümektedir. Bu çukurcukların büyümesine yüzeyler arasında bulunan yağın da etkisi bulunmaktadır. Yağın yüksek basınç etkisi ile yüzeyde bulunan çukurlara girmesi bu çukurların zamanla büyümesine neden olmaktadır.

Yorulma aşınmalarının azaltılması için;

- Yük derecesi düşürülebilir.
- Yüksek basma ve kayma mukavemetine sahip ürünler tercih edilebilir.
- Yüzey gerilmelerin homojen şekilde dağıtan malzeme kullanılabilir.
- Yorulma aşınması görülen yüzeylere sertleştirme işlemi uygulanabilir.

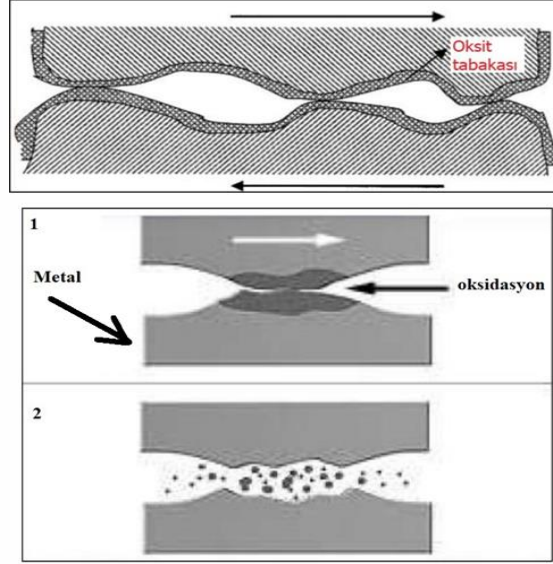
3.4.4. Korozyon Aşınması

Metal ve alaşımları buldukları ortam ile elektrokimyasal ve kimyasal olarak etkileşime girerek farklı bileşikler oluşturur. Bu bileşiklerin yüzeyden kopması sonucu oluşan aşınmaya korozyon aşınması adı verilir. Korozyon aşınma diğer aşınma türleri ile oluşabileceği gibi kendi başına da meydana gelebilir.

Korozyon aşınma korozyon bir ortamda oluşan kayma aşınmasının bir sonucudur. Birbirine temas eden yüzeyler arasında korozyon ürünleri korozyon aşınmayı yavaşlatan bir film tabakası oluşturur fakat bu film tabakası zamanla kayma işlemi tarafından kaldırılır ve aşınma devam eder.

Olumsuz çevre koşulları bu tip aşınmaya çok büyük etkilere sahiptir. Aşınma hızı korozyon aşınması sonucu oluşan artık ürünlerin etkisi ile artabilmektedir. Aşınma oranı 3 cisimli abrasiv aşınma nedeniyle artar ve sonuç olarak yüzeyler arasındaki oksit tabakası aşındırılır (Owsalou, 2012).

Korozif aşınmayı önlemek amacıyla koruyucu kaplama uygulama ve oksijenle reaksiyona girmeyecek malzemeler kullanılabilir (Bağcı, 2005). Şekil 3.14’de korozif ortama ait mekanizma gösterilmiştir.



Şekil 3.14: Korozif aşınma mekanizmasını gösteren örnek şema (URL-3, 2018)

3.5 Aşınmanın Ölçülmesi

Birbirleriyle temas halinde bulunan makine elemanlarının sürtünme ve aşınma davranışlarının belirlenmesi amacıyla yapılan testler, tasarım açısından oldukça önemlidir. Tribolojik mekanizmalarda çok fazla parametrenin bulunması ve bunların çevre şartlarına aşırı duyarlı olması, test sistemi seçimini ve tasarımını zorlaştırmaktadır. Sistem üzerinde meydana gelen aşınmayı ölçmek amacıyla ağırlık farkı metodu, kalınlık farkı metodu, iz değişim metodu, radyoizotop metodu gibi yöntemler geliştirilmiştir.

3.5.1. Ağırlık Farkı Metodu

Yaygın olarak kullanılan aşınma ölçüm metodudur. Malzemeler kimyasal bir terazide tartılarak aşınma miktarı bulunur. Malzemelerin temiz olması ve üzerlerinde tortu kalmaması bu yöntem için dikkat edilmesi gereken hususlardır. Bu metotta ağırlık farkları hassasiyeti 10^{-3} ya da 10^{-4} gram gibi duyarlı terazilerde ölçülmektedir (Karaoğlu, 2006). Ağırlık farkı metodunun en büyük dezavantajı numune yerinde ölçümler

gerçekleştirilememektedir. Bu nedenle numunenin yerinden çıkarılarak ölçüm yapılması gerekmektedir. (Urun, 2008)

Ağırlık farkı metodu ile makine elemanlarında gerçekleşen aşınma oranı aşağıdaki formül ile belirlenebilmektedir.

$$W_a = \Delta G / (d \cdot M \cdot S) \text{ (mm}^3 / \text{Nm)}, \text{ (Ulutan, 2007)} \quad (\text{Eşitlik 2})$$

W_a : Aşınma oranı (mm³ / Nm),

ΔG : Ağırlık kaybı (mg),

M : Yükleme ağırlığı (N),

S : Aşınma yolu (m),

D : Cismin yoğunluğu (gr/cm³),

Aşınma oranının (W_a) tersi aşınma direnci (W_r) olarak gösterilir.

$$W_r = 1 / W_a \text{ (Nm/mm}^3\text{)} \quad (\text{Eşitlik 3})$$

3.5.2. İz Değişim Metodu

Bu metotta genellikle Brinell ve Vickers sertlik ölçme uçları aracılığıyla malzeme yüzeyinde plastik deformasyon sonucu belirli geometride bir şekil oluşturulur ve deney boyunca iz boyutuna ait değişimler takip edilmektedir.

$$H = h_{bef} - h_{aft} = (d_{bef} - d_{aft}) \times \text{tg } \Theta / 2 \quad (\text{Eşitlik 4})$$

H : Aşınma derinliği,

h_{bef} : İzin aşınma öncesi derinliği,

h_{aft} : İzin aşınma sonrası derinliği,

d_{bef} : İzin aşınma öncesi genişliği,

d_{aft} : İzin aşınma sonrası genişliği,

Θ : İzin yatayla yaptığı meyil açısı.

3.5.3. Kalınlık Farkı Metodu

Aşınma miktarı, aşınma sonrasında oluşan boyut ile başlangıç değerleri karşılaştırılarak elde edilir. Kalınlık farkı olarak adlandırılan bu değer referans alınarak birim hacimdeki aşınma değeri hesaplanır. Ölçümler $\pm 1 \mu\text{m}$ duyarlılıkta ölçü aletleri ile gerçekleştirilmektedir (Urun, 2008).

3.5.4. Radyoizotop Metodu

Bu metotta sürtünme yüzey bölgesi atom bombardımanı ile radyoaktif hale getirilir (Kosel vd., 1978). Bu yöntemin en büyük avantajı çalışma şartlarını değiştirmeden büyük hassasiyet ile ölçüm yapılabilmesidir. Dezavantaj olarak ise yöntemin kullanımının yüksek maliyetler gerektirmesi verilebilir.

4. SÜPER ALAŞIMLAR VE KULLANIM ALANLARI

Bu bölümde süper alaşımların tanımlanması, süper alaşımların tarihsel gelişimi, süper alaşımların sınıflandırılması, uygulama alanları, üretim yöntemleri ve Inconel 601 süper alaşımların tanımlanması, kullanım alanları ve özellikleri incelenecektir.

4.1. Giriş

Süper alaşımlar olarak adlandırılan yüksek performanslı alaşımlar, 650°C üzerindeki sıcaklıklarda uzun süreli çalışabilen ve dayanımlarını uzun süre muhafaza edebilmelerinden dolayı zorlu çalışma koşulları için kullanılan malzemelerdir. Süper alaşımlar yüksek sıcaklıklarda iyi derecede kopma dayanımı, korozyon direnci ve oksidasyon direncine sahiptirler (Bhattacharya vd., 1983).

Tungsten, alüminyum, titanyum, molibden, niyobyum gibi elementleri içeren önemli alaşımlar geliştirilmiştir. Inconel 601 de bunlar arasında yaygın olarak kullanılan nikel esaslı alaşımlardandır. Inconel alaşımlar birçok farklı bileşim ve mekanik özellikleri içinde barındıran Ni-Cr bazlı malzemelerdir. Bu alaşımlarda korozyon ve oksidasyon direnci yüksek sıcaklıklarda krom aracılığı ile sağlanır. Bu sebeple Ni-Cr alaşımları, paslanmaz çelikler ve süper alaşımlar kifayeti seviyede krom elementi içerirler. Inconel alaşımlara genellikle korozyon ve mekanik direnci arttırmak amacıyla Al, Ti, Nb, Co, Cu ve W eklenmektedir (Thomas vd., 2006).

Çok yüksek sıcaklıklara maruz kalan malzemelerde refrakter malzeme olarak vanadyum, niyobyum, tantalyum, krom, molibden ve tungsten'e gereksinim vardır. Refrakter malzemeler düşük oksidasyon direncine sahip olmaları nedeniyle genellikle oksidasyon direnci gerektirmeyen uygulamalarda tercih edilmektedir. Seramik malzemeler ise konstrüktif uygulamalar için yeterli tokluğa sahip değildirler. Süper alaşımlar, Seramik malzemelerin düşük tokluk özelliklerini, refrakter malzemelerin ise düşük oksidasyon direncini ve düşük mukavemet özelliklerini geliştirmek amacıyla üretilmiş yüksek performans gösteren malzemelerdir (Bhattacharya vd., 1983; Thomas vd., 2006). Çeliklerle karşılaştırıldığında süper alaşımlarda yüksek mukavemet/ağırlık oranı elde edilmektedir. Bu nedenle çok daha az işleme özellikleri mevcuttur. Süper alaşımlar mekanik gerilimin yüksek olduğu uygulamalarda yüksek mukavemet gösterirler.

Literatüre göre süper alaşımlar, işlenmesi zor malzemeler olarak belirtilmektedir. Süper alaşımların işlenmeye ve korozyona karşı yüksek mukavemet göstermelerinin nedeni Ni, Co, Ti ve Cr gibi malzemelerin kızıl sertliklerini arttıran alaşım elementleri ihtiva etmeleridir. Örneğin Nikel esaslı alaşımlar sert karbür yapıları nedeniyle östenitli yapılarının çabucak sertleşmesi sonucu kesici uçların hızlıca aşınmasına yol açmaktadırlar (İnanır, 2012). Yüksek sıcaklıklarda büyük taneli ve multi kristalli yapıya sahip döküm yöntemi ile üretilen süper alaşımların dayanımı, ince taneli dövme yöntemi kullanılarak üretilen süper alaşımlara oranla daha fazladır.

Süper alaşımların zor işlenmesi aşağıdaki nedenlere dayandırılmaktadır (Dudsinzki vd., 2004; Patel vd., 2015; Ezugwu, 2004);

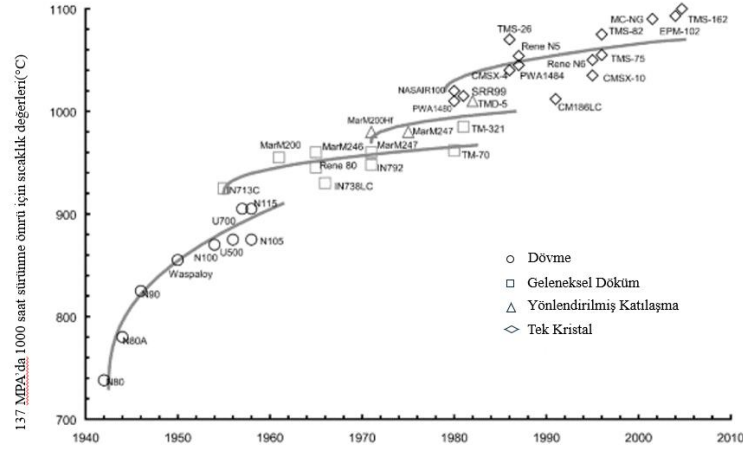
- Yüksek deformasyon hızı ve yüksek deformasyon sertleşmesi gösteren YMK yapıya sahip olmaları
- Yüksek sıcaklık mukavemeti ve korunan sertlik nedeniyle kesici takım ucunda aşınmaların oluşması
- Yüksek kesme kuvvetleri nedeniyle oluşan titreşim sonucu işleme sonrası kötüleşen yüzey kalitesine sahip olmaları
- Düşük ısı iletkenlik nedeniyle yüzeyde kimyasal aşınmanın oluşması
- İşleme sırasında kesici uca alaşım yapışması

4.2. Süper Alaşımların Tarihsel Gelişimi

1900'lü yılların başlarında ilk defa kullanılmalarına rağmen 1940'lı yılların başında Süper alaşım terimi ilk kez Nikel esaslı süper alaşım olan Wapaloyve ve kobalt esaslı süper alaşım olan Vitalyum (Co- 27Cr- 5.5Mo- 0.25C) için kullanılmaya başlanmıştır (Bhattacharya vd., 1983).

Süper alaşımlar ikinci dünya savaşı sonrası turbo-kompresörlerde ve uçak türbin motorlarında kullanılmak üzere geliştirilmeye başlanmıştır. 60 yılı aşkın süredir, kara ve hava araçlarında uygun maliyetli ürünler olarak kullanılmaktadır. Üretim yöntemleri ve kimyasal kompozisyon optimizasyonları ile bu malzemelerin gelişimi günümüze kadar devam ettirilmiştir.

Al- ve Ti ilaveli Nikron alaşımların patentleri 1920’li yıllarda alınmasına rağmen, yüksek sıcaklık dayanımlı uçak motorları taleplerini karşılamak için kobalt esaslı (Haynes, Stellite 31) süper alaşımların benimsenmesi ile süper alaşım endüstrisi oluşturulmaya başlanmıştır. Amerika’da Co esaslı ilk süper alaşım döküm yöntemi ile üretilmiştir. Şekil 4.1’de süper alaşımların tarihsel gelişimi verilmiştir.

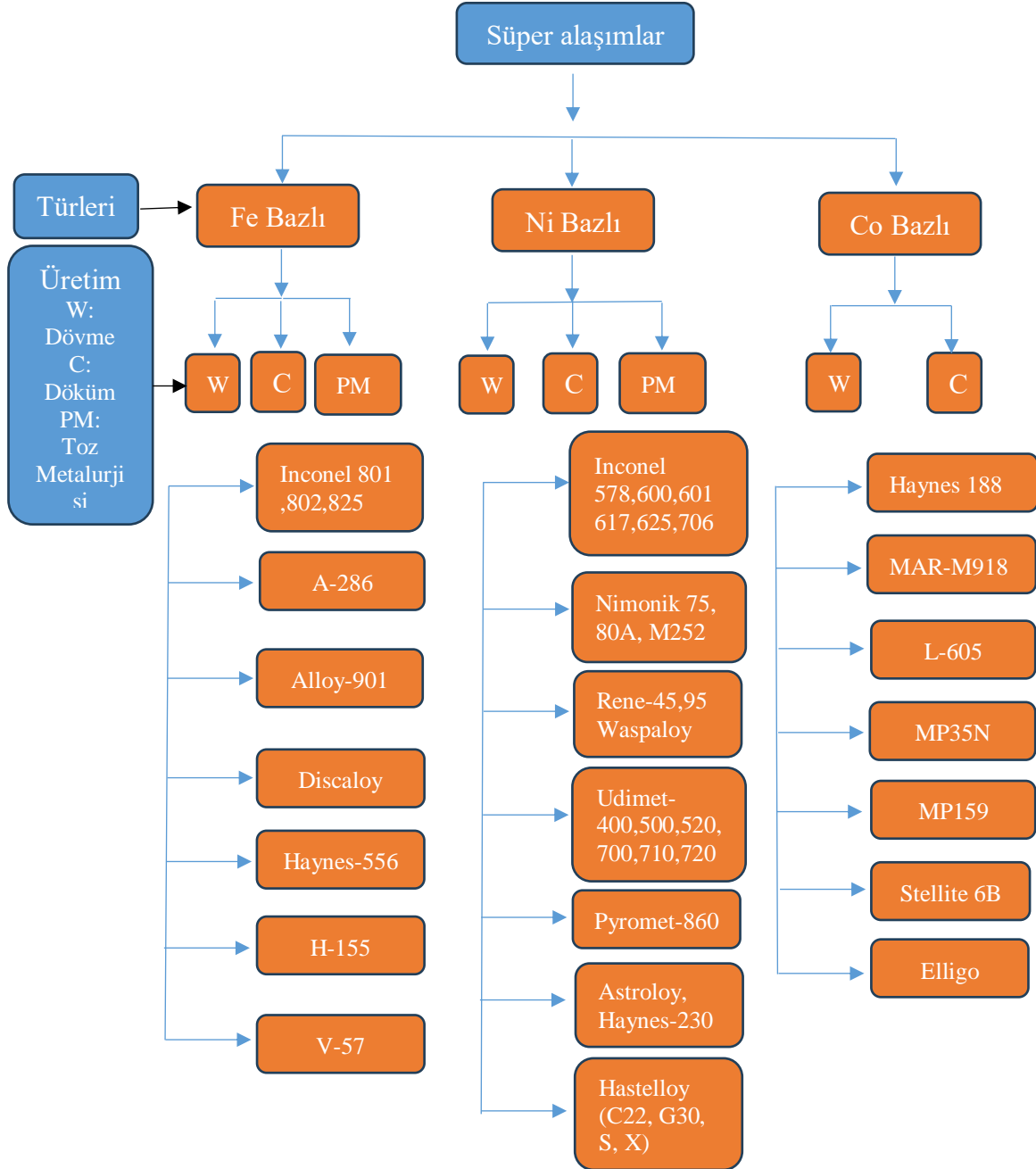


Şekil 4.1: Süper alaşımların 1940’tan itibaren sürünme dayanımının gelişimi (Reed, 2006)

4.3. Süper Alaşımların Sınıflandırılması

Süper alaşımlar, demir esaslı, nikel esaslı ve kobalt esaslı olmak üzere 3 ana gruba ayrılmaktadır (Ezugwu, 2004; Helmi, 2016; Thellaputta vd., 2017). Ayrıca süper alaşımlar üretim yöntemlerine göre de döküm, dövme ve toz metalürjisi olmak üzere 3 ana gruba ayırmak mümkündür. Kimyasal yapılarında Fe, Ni, Co, Cr gibi VIII B grubu elementleri içeren süper alaşımlar az miktarda Mo, Ta, Nb, Ti, Al ve W elementlerine ait farklı kombinasyonlar içerebilmektedir. İstenilen özelliklerin farklı elementlerin eklenmesi ile sağlandığı süper alaşımlarda bileşen türüne göre yapı da değişmektedir. Tablo 7.2’de süper alaşımlara ait bileşenler verilmiştir.

Şekil 4.2’de süper alaşımlar türlerine ve üretim metotlarına göre sınıflandırılmıştır. Süper alaşımlar demir bazlı, nikel bazlı ve kobalt bazlı olmak üzere 3 ana başlıkta incelenmekte olup demir ve nikel bazlı süper alaşımlar dövme, döküm ve toz metalurjisi yöntemleri ile üretilmekte olup kobalt bazlı süper alaşımlar yalnızca dövme ve döküm yöntemleri ile üretilmektedir.



Şekil 4.2: Süper alaşımların sınıflandırılması (Ezugwu, 2004)

Aşağıda tabloda süper alaşımlarda gözlemlenen bileşenler ve bu bileşenlere ait kristal yapılar verilmiştir.

Faz	Kristal Yapı	Formül	Açıklamalar
γ'	KYM	Ni_3Al $Ni_3(Al,Ti)$	Birçok nikel ve nikel-demir esaslı süperalaşım içinde belli başlı mukavemetlendirme fazıdır. Östenit matris içinde kristal kafesleri küçüktür.
η	HSP	Ni_3Ti	Tüm süper alaşımların yüksek titanyum/alüminyum oranlarına uzun süre maruz kalmasından sonra oluşur.
γ''	BCT	Ni_3Nb	Inconel 718 içinde ana mukavemetlendirme fazıdır. Kararlı fazdır.
$Ni_3Nb(\delta)$	Ortorombik	Ni_3Nb	Aşırı yaşlanan Inconel 718 içinde gözlemlenir. 815 ve 980°C arasında şekillendiğinde iğnemsî bir görüntüye sahiptir.
MC	Kübik	TiC, NbC	Titanyum karbür nitrojen, zirkonyum ve molibden içinde çözülebilirliğe sahiptir. Bileşimi farklıdır, küresel olarak görülür.
$M_{23}C_6$	KYM	$Cr_{23}C_6$ $(Cr,Fe,W,Mo)_{23}C_6$	Çökelme şekli önemli olup, film, levha lamelli ve hücrel olarak çökebilir. Genellikle tane sınırlarında şekillenir.
M_6C	KYM	$Fe_3Mo_3C,$ Fe_3W_3C, Fe_4W_2C	Gelişigüzel dağılım gösteren karbürlerdir. Pembemsi görünebilirler.
M_7C	Hegzagonal	Cr_7C_3	Genellikle intergranul şeklinde görülür. 1000°C sıcaklığın üstünde bir sıcaklığa maruz kaldıktan sonra Nimonic 80A gibi alaşımlarda görülür.

Tablo 4.1: Süper alaşımlarda gözlenen bileşenler (Bradley, 1989)

M_3M_2	Tetragonal	Ta_3B_2, V_3B_2 Mo_2FeB_2	Yaklaşık %0.03 ve daha fazla B'lu Fe-Ni ve Ni esaslı alaşımlarda gözlemlenir. Boridler karbürlere benzer.
MN	Kübik	TiN, (Ti,Nb,Zr)N	Nitridler, Ti, Nb ve ZR içeren alaşımlarda görülür. Ergime sıcaklığının altındaki sıcaklıklarda erimezler. Parlatıldıklarında kolayca tanınırlar. Sarı renten turuncuya kadar farklı renkleri mevcuttur.
μ	Rombohedral	Co_7W_6 $(Fe,Co)_7(Mo,W)_6$	Genellikle yüksek oranda molibden ve Tungsten içeren alaşımlarda görülür. Kaba, düzensiz widmanstend plakalar şeklindedir ve yüksek sıcaklıklarda şekillenir.
Laves	Hegzagonal	$Fe_2Nb,$ Fe_2Ti, Fe_2Mo Co_2Ta, Co_2Ti	Fe ve Co esaslı süper alaşımlar içinde çok yaygındır. Genellikle şekillenen düzensiz küreler olarak görülüp yüksek sıcaklıklarda plakalar halindedir.
δ	Tetragonal	$FeCr, FeCrMo,$ $CrFeMoNi,$ $CrCo,$	En çok Fe ve Co esaslı süper alaşımlar içinde bir miktarda Ni esaslı süper alaşımlarda görülür. Şekilleri düzensiz kürelerdir. 540°C-980°C arasındaki sıcaklıklarda uzun süre bekletildikten sonra şekillenir.

Tablo 4.1: (devam ediyor)

4.4.1. Demir Esaslı Süper Alaşımlar

Östenitik çelikten geliştirilen Fe-Ni bazlı alaşım olarak tasarlanan alaşımlardır. Esas alaşım elementi olarak demir, ek olarak Krom, Ni, Molibden ya da Tungsten içermektedir. Yüksek tokluk ve süneklik gerektiren türbin diskleri ve dövme rotorları gibi uygulamalarda kullanılırlar. Diğer alaşım türlerine kıyasla daha fazla oranda demir bulduklarları için maliyetleri daha düşüktür. Tüm alaşım gruplarında en düşük yüksek sıcaklık mukavemetine sahip oldukları için işlenmesi en kolay olan malzemelerdir. Genellikle 29-67 % Fe, 22%'ye kadar Cr ve 9-44%Ni elementlerinden oluşmaktadır. Incoloy, Ascology, A-286 gibi endüstriyel isimlere sahip alaşımlar bu grubun içinde bulunmaktadır.

Genellikle $Ni_3(Al,Ti)$ γ' , η (Ni_3Ti) ve γ'' (Ni_3Nb) tipinde intermetalik çökeltilere sahiptirler. Paslanmaz çeliklere göre farklı Ni-Krom oranları ve mukavemetlendirme mekanizmalarına sahiptirler. Demir esaslı süper alaşımlar %20 den daha fazla Ni içerirken (%25-35) paslanmaz çelikler %12-25 Cr ve %0-20 Ni içermektedirler. Demir-Nikel alaşım grupları kimyasal kompozisyon ve sertleşme mekanizmalarına bağlı olarak farklı alt gruplardan oluşmaktadır. Ağırlıkça %25-35 aralığında nikel içeren ilk grup V-57 ve A-286 demir esaslı süper alaşımlardır. Titanyum/Alüminyum oranı yüksek olması bu grup alaşımlar için istenmeyen bir durumdur (Metals Handbook, 1990)

Ağırlıkça %40 oranında Ni içeren ve yüksek miktarda katı eriyik sertleştirici ve çökelti içeren Pyromet 860 ve Incoloy 901 gibi alaşımlar ikinci grup demir-Nikel esaslı süper alaşımlardır. Üçüncü grup alaşımlar intermetalik çökelti sonucu sertleştirme sağlanamayan ve yüksek sıcaklık korozyon etkilerine karşı mükemmel direnç gösteren N-155 ve Haynes-556 gibi alaşımlardır. Diğer grup ise 650°C sıcaklıkta ısıl genleşme ve yüksek dayanım gösteren Incoloy 903, 907, 909, Pyromet CTX-1 ve Pyromet CTX-3 alaşımlarıdır.

4.4.2. Kobalt Esaslı Süper Alaşımlar

Yüksek miktarlarda Tungsten, Krom, Nikel ve düşük miktarlarda Demir, Niobiyum, Molibden gibi metaller içeren ana elementi Kobalt olan süper alaşımlardır. İçerdikleri karbür fazlarından faydalanarak katı çözeltileri güçlendirdikleri için diğer süper alaşım gruplarına nazaran çok daha fazla karbon ihtiva etmektedirler. İçerdikleri homojen dağılımlı karbürler mukavemeti arttırmaktadır. İçerdikleri karbürler M_6C , M_7C_3 ve $M_{23}C_6$ 'dır.

Kobalt esaslı süper alaşımlar ağırlıkça 35-67% Co, 19-30% Cr ve 35%'e kadar Ni içermektedir. Ana elementlerinin kobalt olması nedeniyle yüksek erime sıcaklıklarına sahiptirler. Bu tür alaşımların temel kullanım nedeni yüksek termal yorulma ve korozyon direncine sahip olmalarıdır.

Kobalt esaslı süper alaşımların mekanik dayanımı Ni esaslı süper alaşımlara oranla daha düşüktür. Bu tür alaşımlar döküm veya dövme formunda kullanılabilirler. Yüksek kesme sıcaklıkları altındaki kesme dayanımları nedeniyle işlenmeleri sırasında özen gösterilmesi gerekmektedir. Kullanım alanlarına örnek olarak gaz türbin motoru kanatları ve sabit bileşenleri verilebilir. (Geddes vd., 2010)

Ni bazlı süper alaşımlara göre iyi derecede kaynaklanabilirlik ve yüksek ısı yorulma direncine sahiptirler. Kristalli döküm yöntemi ile üretilen kobalt esaslı süper alaşımlar yüksek ergime sıcaklıklarında dolayısı 2000°C (2274°K) üzerindeki uygulamalarda nikel esaslı süper alaşımlara göre daha fazla mukavemet göstermektedir (İnanır, 2012).

Kobalt esaslı süper alaşımlar üç gruba ayrılır.

- 650C ve 1150C aralığında kullanılan Haynes 188, UMCo-50 ve S816 alaşımları
- 650C de kullanılan MP-35N ve MP-159 alaşımları
- Aşınma direncine sahip Stellite6B alaşımları

Yumuşatma ve ısı işlem sırasında genellikle bütün kobalt esaslı süper alaşımlar KYM kristal yapıya sahiptir. Fakat MP-35N ve MP-159 alaşımlarda hegzagonal yapı miktarı termomekanik işlemler sırasında arttırılır. Stellite 6B ve Haynes 25 alaşımları kısmen sıkı paket hegzagonal yapıya dönüşebilir. Haynes 25 gaz türbinlerinin yüksek sıcaklığa maruz kalan kısımlarında, nükleer reaktör parçalarında ve cerrahi implantlarda kullanılmaktadır.

Kobalt esaslı süper alaşımların hiçbiri tamamen katı-eriyik alaşımı değildir. Bunun nedeni genellikle çoğunun ikincil karbür fazları ya da intermetalik bileşik çökeltileri ihtiva etmesidir. Bu durum bu tür alaşımlarda yaşlanmaya ve aynı zamanda 25°C' de süneklik kaybolmasına da neden olur (Çay ve Ozan, 2005).

Katı eriyik ihtiva eden kobalt alaşımlarının geliştirilen son türü Stellite 6'dır. Genellikle buhar türbinlerinde kullanılan bu alaşım türü önemli miktarda krom içermesi nedeniyle (%30) yüksek sıcaklık uygulamalarında yüksek oksidasyon mukavemetli ve en kuvvetli ve en sünek olanıdır.

Demir-Nikel ve Nikel alaşımları vakum altında eritmeye ihtiyaç duyarken kobalt esaslı alaşımların eritme işlemi argon ve hava ortamında yapılabilmektedir. σ , Laves ve TSP fazların çökmesi kobalt esaslı alaşımlarda mekanik özellikleri etkileyen ve istenmeyen bir durumdur. Kobalt esaslı süper alaşımların yüksek sürünme ve kırılma mukavemetleri, içeriğinde bulunan karbon etkisi ile sağlanmaktadır. Bu nedenle yapı içerisinde bulunan

karbon miktarı, çekme ve kırılma mukavemetleri ve sürünme özellikleri düşünüldüğünde göz ardı edilemeyecek öneme sahiptir (İnanır, 2012).

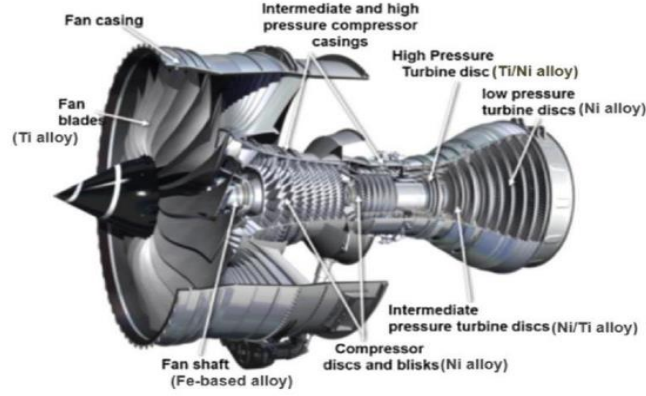
Dövme kobalt alaşımların yapısında en az %10 Ni içeren YMK yapılu matris ve demir, mangan, karbondan oluşan yüzey merkezli kübik yapı bulunmaktadır. Yapı içindeki Ni ve Demir işlenebilirliği iyileştirmektedir. Tungsten eriyik sertleştirici, Krom ise oksidasyon ve korozyon direnci sağlamak amacıyla ilave edilir.

Karbür çökeltilerin ve YMK östenitik matrisin mukavemeti ile döküm esaslı kobalt alaşımlar karakterize edilir. Döküm kobalt esaslı alaşımların kullanım alanlarına türbin kanatları, türbin bıçakları ve uçak gaz türbin motorları örnek olarak verilebilir. Dövme kobalt alaşımları daha çok gaz türbinleri yanma odalarında kullanılmaktadır.

4.4.3. Nikel Esaslı Süper Alaşımlar

Ana elementleri nikel olup ağırlıkça %30 ve 70 Ni ve %30 üstü Cr içeren alaşımlardır. Inconeller, Hastolloy, Nimonicler gibi alaşımlarda demir az miktarda bulunurken Incoloy 901 ve Incoloy 706 gibi alaşımlar da ise %35 civarında bulunmaktadır. Titanyum, molibden, tungsten, alüminyum gibi elementler korozyon mukavemetini arttırmak amacıyla nikel esaslı süper alaşımlara eklenebilmektedir. Nikel esaslı alaşımların mukavemeti ikincil faz intermetalik çökelti ve katı eriyik tarafından arttırılmaktadır. Intermetalik metal olarak Al, Ti ve Niobiyum kullanılmaktadır. 650°C ve üzerindeki sıcaklıklarda nikel esaslı alaşımların mekanik dayanımı paslanmaz çeliklerden daha yüksektir.

Inconel gibi katı-eriyik alaşımlar yüksek oksidasyon-korozyon ve mukavemet dirençleri nedeniyle ısı işlem teçhizatları ve fırın ekipmanlarında kullanılmaktadırlar. Yüksek bir ergime sıcaklığına (1453 °C) ve YMK yapıya sahip olması Nikel'in uçak motor parçalarında kullanılmasının ana sebebidir (Thellaputta vd., 2017). Nikel esaslı alaşımlar süper alaşımlar arasında en çok kullanılan alaşım türü olmakla birlikte işlenmesi çok zor bir malzemedir. Bu tür malzemelerin en yüksek termal direnç ve mukavemete sahip olmaları birçok zorlu uygulamada optimum malzeme olarak kabul edilmelerine olanak sağlar. Bu zorlu koşullara örnek olarak türbin diskleri ve türbin kanatları gösterilebilir. Nikel esaslı süper alaşımlar üstün özellikleri sayesinde özellikle havacılık sektöründe tercih edilen bir malzemedir. Şekil 4.3'te turbo-fan motorunda kullanılan bileşenler ve malzemelere ait detaylar verilmiştir.



Şekil 4.3: XWB Turbo-fan motorunun bileşenleri ve malzemeleri (M'saoubi vd., 2015)

Ayrıca bu süper alaşımlar, nükleer reaktörler, uzay araçları, denizaltılar petrokimya ekipmanları, roket motorları gibi yüksek sıcaklık gerektiren uygulamalarda da kullanılmaktadır. Ancak literatürde Nikel esaslı süper alaşımlar düşük ısı iletkenlikleri, kesici takım ile kimyasal reaksiyona girebilme, yüksek kayma mukavemeti ve sert karbür yapıları nedeniyle işlenmesi zor malzemeler olarak kabul edilmektedir. Sonuç olarak işlenme sırasında yüksek maliyetler, düşük yüzey kalitesi, kesici takım ömründe kısaltmalar gibi istenmeyen durumlar oluşabilmektedir.

Alaşım Adı	Ni	Cr	Co	Mo	W	Ta	Cb	Al	Ti	C	B	Zr
Inconel 718	53	18	0,2 3	3,0 4	-	0,00 5	0,23	0,5	0, 09	0,04	0,04	-
713C	74	12	-	4,2	-	-	2,0	0,8	-	0,12	0,01	0,1
713 LC	75	12	-	4,5	-	-	2	0,6	-	0,05	0,01	0,1
B-1900	64	8	10	6	-	4	-	1	-	0,1	0,01	0,1
Fort	60	6	10	1	8	6	2	2	-	0,13	0,01	0,06
IN-100	60	10	15	3	-	-	-	4,7	-	0,18	0,01	0,06
IN-162	73	10	-	4	2	2	1	1	-	0,12	0,02	0,1
IN-731	67	9,5	10	2,5	-	-	-	4,6	-	0,18	0,01	0,06
IN-738	61	16	8,5	1,7	2	1,7	0,9	3,4	-	0,18	0,01	0,1

Tablo 4.2: Nikel esaslı süper alaşımların kimyasal bileşenleri (Ezugwu, 2004)

IN-792	61	12,4	9	1,9	3	3,9	-	4,5	-	0,12	0,02	0,1
M22	71	5,7	-	2	1	3	-	-	-	0,13	-	0,6
MAR-M200	60	9	10	-	1	-	1	2	-	0,15	0,15	0,05
MAR-M246	60	9	10	2,5	1	1,5	-	1,5	-	0,15	0,15	0,05
MAR-M421	61	15,8	9,5	2	3	-	2	1,8	-	0,15	0,15	0,05
MAR-M432	50	15,5	20	-	3	2	2	4,3	-	0,15	0,15	0,05
NX188 (DS)	74	-	-	18	-	-	-	-	-	0,04	-	-
Rene'77	58	14,6	15	4,2	-	-	-	3,3	-	0,07	0,01	0,04
Rene'80	60	14	9,5	4	4	-	-	5	-	0,17	0,01	0,03
Rene'100	60	9,5	15	3	-	-	-	4,2	-	0,18	0,014	0,06
SEL	51	15	22	4,5	-	-	-	2,4	-	0,08	0,015	-
SEL-15	58	11	14,5	6,5	1	-	0,5	2,5	-	0,07	0,015	-
TAZ-8A	68	6	-	4	4	8	2,5	-	-	0,12	0,004	1
UDIMET 500	52	18	19	-	-	-	-	3	-	0,07	0,007	0,05

Tablo 4.2: (devam ediyor)

Süper alaşımların kompozisyonları ile kullanım alanları aşağıda özetlenmiştir (White, 1986);

- Inconel 600 (76Ni-15Cr-8Fe): Nükleer reaktörlerde yapı malzemesi olarak kullanımı dışında kimya sektöründe ısıtıcılarda ve yoğunlaştırucularda kullanılır.

- Nimonik Alaşım 75 (80/20 nikel-krom alaşımı): Yapısındaki titanyum ve karbon etkisi ile gaz türbinleri ve ısıl işlem ekipmanlarında kullanılır.
- İnconel 601: Düşük nikel oranına sahip bir alaşımdır (%61). Yapısındaki silikon ve alüminyum, yüksek oksidasyon ve nitrasyon direnci kazandırmaktadır. Enerji santralleri ve kimya sektöründe kullanılmaktadır.
- Inconel X750: Basınçlı kaplar, kesici takım imalatı ve uçaklarda yapı malzemesi olarak kullanılmaktadır.
- İnconel 718 (55Ni-21 Cr-5Nb-3Mo): Yapısında bulunan niyobyum kaynak sırasında deformasyonları önlemek için kullanılır. Kriyojenik tanklarda, yanma odalarında, gaz türbinlerinde kullanılmaktadır.
- Waspaloy (60Ni-19Cr-4Mo-3Ti-1.3Al): Jet motorlarında kullanılmaktadır.
- Nimonik 90 (Ni 54% en az, Cr 18-21%, Co 15-21%, Ti 2-3%, Al 1-2%): Türbin kanatları, dövme parçalarında kullanılmaktadır.

Yaygın olarak kullanılan bu alaşımların temel özellikleri ise;

- Yüksek çalışma sıcaklıklarına sebebiyet verecek düşük termal iletkenlik.
- Yüksek çalışma sertliği gerektiren işleme gerilmesi
- Yüksek sertlik.

Bu özellikleri nedeniyle nikel esaslı süper alaşımlar kesici takımların fazlaca aşınmasına ve yüksek sıcaklıklara sebep olmaktadır.

Nikel esaslı alaşımların işlenmesini zorlaştıran temel sebepler ise;

- Yüksek sıcaklık dayanımı,
- İş sertliği sonucu oluşan takım aşınması,
- İşleme sırasında oluşan sert ve sürekli talaşlar nedeniyle takım yüzeyinde deformasyonlar oluşması,
- Düşük termal iletkenlik nedeniyle takım yüzeyinde sıcaklığın yükselmesi sonucu kesici takımda yüksek radial gradient oluşumu (White, 1986; Richards vd., 1989).

Verilen bilgiler ışığında Nikel alaşımlarda dikkat çeken hususlar ise; takım ömrünün kısa oluşu ve işlemeye karşı hassas bir yüzey kalitesine sahip olmalarıdır.

Element Etkileri	Fe bazlı	Co Bazlı	Ni Bazlı
Katı-Eriyik mukavemetlendiriciler	Cr,Mo	Nb, Cr, Mo Ni, W, Ta	Co, Cr, Mo Fe, W, Ta
Yüzey merkezli kübik matris stabilize ediciler	C, Ni, Co	Ni	Co
Karbür şekilleri; MC tipi	Ti	Ni	W, Ta, Ti, Mo
M ₇ C ₃ tipi	--	Cr	Nb
M ₂₃ C ₆ tipi	Cr	Cr	Cr
M ₆ C tipi	Mo	Mo, W	Cr, Mo, W
Karbonitritler; M(CN) tipi	C, N	C, N	C, N
Karbürlerin genel çökeltileri	P	--	--
γ' Ni ₃ (Al,Ti)	Al, Ni, Ti	--	Al, Ti
Hegzagonal η (Ni ₃ Ti) dönüşüm geciktiriciler	Al, Zr	--	-
γ'' nün çözücü sıcaklığını yükselticiler	--	--	Co
γ'' nün çözücü sıcaklığını düşürücüler	--	--	Cr
Serleşme çökelticiler ve/veya intermetalikler	Al, Ti, Nb	Al, Mo,W, Ta	Al, T, Nb
Oksidasyon direnci	Cr	Al, Cr, Ta	Al, Cr, Ta
Sıcak korozyon direnci geliştiriciler	La, Y	La, Y, Th	La, Th
Sülfidasyon direnci	Cr	Cr	Cr
Tane sınırı morfolojisi değişkenleri tarafından sürünme kopma özelliklerini arttırıcılar	B	B, Zr	B, Zr

Tablo 4.3: Süper alaşımlar üzerinde elementlerin etkisi (Bradley, 1989)

Ara-sıcaklı sünekliğini geliştiriciler	--	--	Hf
Tane sınırı segregasyonuna neden olucular	--	--	B, C, Zr

Tablo 4.3: (devam ediyor)

4.4.3.1. Inconel 601 Süper Alaşımlar

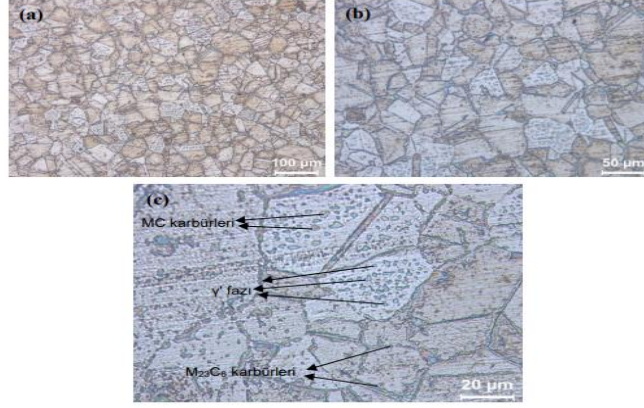
Nikel-krom-demir alaşımı olan Inconel 601 oksidasyon, korozyon ve ısıya karşı yüksek dayanım gerektiren çalışma koşulları için geliştirilen ve içeriğinde yüksek Cr ve Fe içeriğine sahip malzemelerdir. Oksidasyon direnci yüksek olan Inconel 601 süper alaşımı %58,0-63.0 aralığında Ni, %21,0-25.0 Cr ve % 1.0-1.7 aralığında Al içermektedir (Davis, 2000; Meetham vd., 2000).

İşleme, kaynaklanma ve kolay şekillendirilebilme özelliklerine sahip olan alaşım, bileşimi yüksek kararlılıkta YMK katı çözeltidir. Inconel 601 süper alaşımlar gaz-tungsten ark kaynağı, korumalı metal ark kaynağı ve tozaltı ark kaynağı gibi geleneksel yöntemlerle kaynaklanabilirler. Yapısındaki alüminyum oksidasyon direnci, krom ise aşınmaya karşı dayanım ve yüksek sıcaklık dayanımları sağlamaktadır.

Bu özellikleri nedeniyle Inconel 601 alaşımları; ısıtım işlem, gaz türbin motorları, enerji yönetimi, havacılık, kimyasal işleme gibi uygulamalarda yaygın olarak kullanılırlar. Inconel 601 süper alaşımların fırın ve ısıtım işlem ekipmanlarında yaygın olarak kullanılmasının nedeni bu tür çalışma ortamlarında yüksek dayanım ve yüksek oksidasyon&korozyon direncine sahip malzemelere ihtiyaç duyulmasıdır. Intermetalik fazların olmadığı bu tür alaşımların içeriğinde bulunan alüminyum, krom ve nikel elementleri 1200°C gibi yüksek sıcaklıklarda oksidasyona karşı yüksek dayanım sağlamaktadır.

Katı-eriyik süper alaşım olan Inconel 601, tavlama temperlenmesi ve tavlama sıcaklığında kullanılır. Bu malzemeler için en yüksek süneklik ve yorulma dayanımı 870-980°C'lik düşük tavlama sıcaklığında sağlanırken optimumu yorulma direnci 1120°C -1200°C'lik yüksek sıcaklık tavlamasında sağlanmaktadır.

Inconel 601 süper alaşım matrisi, γ' fazı tarafından mukavemetlendirilen γ fazı tarafından oluşmaktadır. Ana mukavemetlendirme fazı γ' olan, küresel ve kübik şekillerde gözlemlenen matris $Ni_3(Al, Ti)$ bileşimine sahiptir. Şekil 4.4'de Inconel 601 γ matris fazı içinde γ' fazı gözlenmektedir.



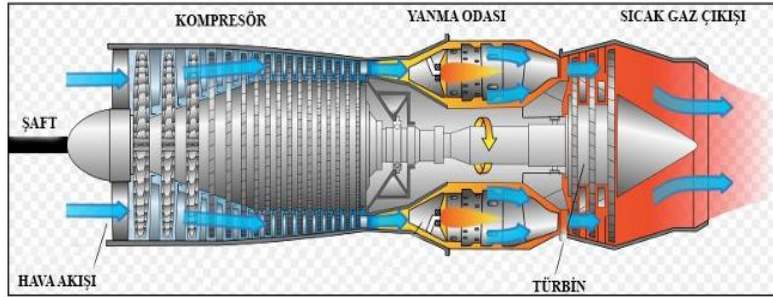
Şekil 4.4: 100 µm seramik üst kaplama kalınlıklı numune mikroyapı görüntüleri

4.5. Süper Alaşımların Uygulama Alanları

Metal ve metal alaşımlarına kıyasla yüksek mukavemetleri, yüksek yorulma ve sürünme dayanımları, yüksek elastiklik modülleri ve en önemlisi de bu özelliklerini yüksek sıcaklıklarda bile sürdürebilen süper alaşımların kullanımı son yıllarda artış göstermektedir. Gaz türbini veya turbo fan motorlarının en sıcak bölgeleri gibi yüksek mukavemet, korozyona ve oksidasyona karşı direnç ve yüksek derecede sürünme direnci gerektiren uygulamalarda nikel esaslı alaşımlar kullanılmaktadır. Süper alaşımlar büyük bir kısmını havacılık ve uzay sanayisinin oluşturduğu yüksek sıcaklık içeren uygulamalarda kullanılmaktadır. Süper alaşımların kullanım alanlarına dair bazı örnekler Tablo 4.4'de verilmiştir (Donachi vd., 2002).

Uçak ve Endüstriyel Gaz Türbinleri <ul style="list-style-type: none"> • Diskler • Civatalar, Vanalar • Şaftlar, Yanma odaları • Muhafaza Kapları • Pervane Kanatçıkları 	Kimyasal ve Petrokimya Sanayisi <ul style="list-style-type: none"> • Civatalar • Valfler • Reaksiyon Kapları • Borular • Pompalar
Motorlar <ul style="list-style-type: none"> • Turbo yükleyiciler, Eksoz valfleri • Isıtma elemanları 	Gaz Türbini Santralleri <ul style="list-style-type: none"> • Civatalar, Pervane kanatçıkları • Gaz ısıtıcıların bacaları
Uzay Araçları <ul style="list-style-type: none"> • Aerodinamik araç zırhları • Roket motor parçaları 	Tıbbi Uygulamalar <ul style="list-style-type: none"> • Dişçilik • Protez ekipmanları
Isıl İşlem Ekipmanları <ul style="list-style-type: none"> • Tepsiler • Karıştırıcılar • Konveyör bantları 	Nükleer Güç Sistemleri <ul style="list-style-type: none"> • Hareket mekanizmaları için kontrol çubukları • Akış valfleri

Tablo 4.4: Süper alaşımların temel kullanım alanları



Şekil 4.5: Uçak motoru parçaları şematik gösterimi



(a)



(b)

Şekil 4.6: Uçak gaz türbin parçaları: Turbin diski (a), Turbin kanatçıkları (b)

4.6. Süper Alaşımın Üretim Yöntemleri

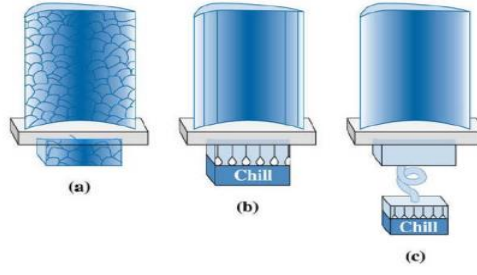
Gelişmiş malzeme teknolojileri aracılığıyla ergime sıcaklıklarına yakın sıcaklıklarda Süper alaşımlar kullanılabilir hale getirilmiştir. Fakat mevcut teknolojileri daha iyi hale getirerek süper alaşımların kullanım alanlarını genişletecek üretim metotları üzerinde çalışılmaktadır. Günümüz teknolojisinde süper alaşımlar döküm, dövme ve toz metalurjisi ile üretilebilmektedirler.

4.6.1. Döküm ve Dövme Yöntemi ile Üretilenler

Bu yöntem ile üretilen süper alaşımların dayanımı yüksek sıcaklıklarda dövme ile üretilen süper alaşımlara göre daha fazladır. Yüksek sıcaklık mukavemet göstermesi istenen nikel esaslı alaşımlar için γ' fazının dayanımı arttırımı yapılır. Nikel esaslı süper alaşımların işlenebilirlik özellikleri bu alaşımlara % 1-1.5 oranında hafniyum ilavesi ile arttırılmaktadır. Yüksek gerilim ve sıcaklık altında çalışan türbin bıçaklarında γ' ile güçlendirilen nikel esaslı süper alaşımlar kullanılmaktadır.

Döküm yöntemi ile üretilen malzemelerin yüksek sıcaklık dirençleri ve termal yorulmaları, kristallere boyuna şekil verilmesi ve kontrollü tane büyümesi sonucu doğrusal yönde katılaşma işlemi ile sağlanmaktadır. Türbin kanatlarına ait çalışma ortamındaki sıcaklık artışı, malzemeyi soğutma ihtiyacı gerektirmektedir. Bu nedenlerden dolayı soğutma kanallı türbin kanatları tasarlanmaktadır. Kalıp seçimi döküm ile üretilen parçalarda büyük önem taşımaktadır.

Döküm öncesinde yönlendirilmiş katılaşma yapılan kalıplarda kalıbın alaşım ergime sıcaklığına yakın sıcaklıklara ısıtılması gerekmektedir. Her iki tür katılaşma metodunda karmaşık şekilli, yüksek yüzey hassasiyeti ve kalitesi istenen hassas döküm kalıpları kullanılmaktadır. Bu işlem sayesinde malzeme yüzeylerinde ek işlem gereksinimleri minimuma indirilmektedir.



Şekil 4.7: Geleneksel eş eksenli taneler (a), sütunsal taneler (b), tek kristal (c)

Tane büyüklüğü kıyaslaması yapıldığında dövme ile üretilen süper alaşımlar döküm yöntemi ile üretilen süper alaşımlara oranla sıcak şekillendirme yapılması nedeniyle daha incedir.

Dövme süper alaşımlar döküm süper alaşımlara kıyasla 25°C' den 540°C arası sıcaklıklarda daha iyi işlenebilirlik ve mukavemet sağlarlar. Bu nedenlerden dolayı dinamik kırılma dayanımı istenen, düşük ve orta sıcaklıklardaki uygulamalarda dövme süper alaşımlar tercih sebebidir (Erdoğan vd., 2005).

4.6.2. Toz Metalurjisi ile Üretilmiş Süper Alaşımlar

Metalurjik olarak istikrarlı yapı olanağı sunduğu için toz metalurjisi ile üretim yöntemi uçak motor ekipmanlarında tercih edilen üretim metodudur. Toz metalurjisi ile üretim yöntemi, alaşım tozlarına ön alaşımlama yapabilme ve en iyi saflıkta ve yüksek hassasiyette malzeme üretebilme avantajı sağlamaktadır. Nikel esaslı süper alaşımlardaki segregasyonlar toz metalurjisi üretim yöntemi ile engellenebilmektedir.

5. YÜZEY ALÜMİNYUMLAMA

1960'lı yıllardan itibaren kullanılmakta olan paket alüminyumlama, ısıya dayanıklı süper alaşımlardan yapılmış türbin elemanlarını yüksek sıcaklıklardaki çalışma ortamlarından kaynaklanan oksitlenme ve korozyona karşı korumak için kullanılan en eski yöntemlerden biridir (Yavorska vd., 2008). Alüminyum kaplama; elektro kaplama, termal sprey, kimyasal buhar biriktirme (CVD), kutu sementasyon, sıcak daldırılmalı paket alüminyumlama gibi çeşitli yöntemlerle yapılabilmektedir (Cheng vd., 2010). Modern türbin kanatlarında oksitleyici gazlara karşı korozyon direncini arttırmak amacıyla koruyucu katman olarak difüzyon alüminid gazlar kullanılmaktadır.

Termokimyasal kaplama yöntemlerinden olan ve yüzeye ayrı bir tabaka şeklinde alüminyum biriktirilerek yapılan kaplama işlemi paket alüminyumlama olarak adlandırılmaktadır. Kutu sementasyon işlemleri ile yapılan paket alüminyumlama işleminin uygulama amacı aşınma, yorulma ve korozyona karşı direnci arttırmaktır. Difüzyon paket alüminyumlama yöntemi ile gerçekleştirilen kutu sementasyon işlemi motor parçalarına ait kaplama yöntemlerinde gerekli kriterleri karşılamasına rağmen ekolojik kriterleri sağlayamamaktadır.

CVD yöntemi faz bileşimi ve derinliği ile nikel, kobalt ve demir esaslı alaşımların alüminyum kaplanmasına olanak sağlamaktadır (Cheng vd., 2010; Pomeroy, 2015).

Hafifliği, yüksek mukavemeti ve sünekliği, düşük maliyeti ve işleme kolaylığı nedeniyle alüminyum birçok araştırmacı tarafından Ni-Cu alaşımı üzerinde test edilen kaplama bileşimleri arasında en uygun bileşenlerden biri olarak kabul edilmektedir (Samvatsar, 2022). Aşağıda tablo 4.5'te kaplama tabakalarına ait üretim metodları ve altlık ürün bilgileri verilmiştir.

Metot	Difuze Edilen	Uygulanan Madde				Kaplama Sıcaklığı(°C)	Altlık Ürün						Sertlik	Uygulama Alanı
		Toz	Toz Banyosu	Atomik %	Plazma		Düşük Alaşım	Cr Çeliği	Cr+Ni Çeliği	Süperalaşım	Dökme	Ti Malzeme		
Karbürleme	C	x	x	x	x	850 - 950	x	x					700 - 1000	Aşınma
Nitrürleme	N	x	x	x	x	500 - 600	x	x				x	700 - 1500	Aşınma Sürtünme
Karbonitrüleme	C + N		x	x	x	500 - 900	x	x					700 - 1500	Aşınma Sürtünme
Borlama	B	x	x	x	x	800 -1050	x	x	x	x			1500 - 2500	Aşınma Oksidasyon Korozyon
Silisyumlama	Si	x		x	x	950 -1000	X	x					-	Aşınma Oksidasyon Korozyon
Alüminyumlama	Al	x				750 -1200	x	x		x			200 - 1200	Aşınma Oksidasyon Korozyon
Kromlama	Cr	x				900 -1100	x	x		x			1400 - 2000	Aşınma Korozyon Oksidasyon
Çinko difüzyon	Zn	x				400 - 450	x					x	300 - 400	Aşınma Korozyon Oksidasyon

Tablo 4.5: Tabakaların üretim usulleri ve kullanım yerleri (Yıldırım, 2016)

Yüzey kaplama işlemlerinde karbonitrürlemede katı eriyik oluşurken, borlama ve nitrürlemede yeni bileşik oluşumu söz konusudur. Bununla beraber paket alüminyumlama ve kromlamada da bileşik oluşumu görülmektedir.

Monel400 alaşımında 2, 4 ve 6 saatlik süreler boyunca 600°C'de inert dolgu olarak Al₂O₃, alüminyum kaynağı olarak Al tozu ve aktivatör olarak alüminyum kullanılarak kutu sementasyon ile paket alüminyumlama işlemi yapılmış olup kaplamanın mikro yapısı SEM, EDS; faz analizleri de XRD ile incelenmiştir. SEM analizleri kaplamanın homojen dağıldığını ve kaplama ile matris arasında yapışmanın uygun olduğu aynı zamanda yüzeyden matrise doğru kaplama kalınlığının 4 µm ile 10 µm arasında değiştiği gözlemlenmiştir. Sonuç olarak artan sıcaklık ve işlem süresi ile sertlik değerlerinde de artış gözlemlenmiştir.

Yine aynı şekilde Cr, Mo, Fe ve W gibi ana alaşım elementlerini içeren Hastolloy C276 süper alaşımına paket alüminyumlama yöntemi ile düşük sıcaklıklarda alüminid kaplanması gerçekleştirilmiştir. 2, 4 ve 6 saat süresince 600°C Sıcaklıkta paket alüminyumlama işlemi sonucunda Ni-Al esaslı kaplama tabakası artan süre ile doğru orantılı olarak 11 µm den 29 µm'ye yükseldiği gözlemlenmiştir. Alaşımında 250 HV olan sertlik değerinin ise kaplama işlemi sonrası 780 HV değerine ulaşmıştır.

Kutu sementasyon işlemi ile paket alüminyumlama yapılmadan önce kaplanacak altlık malzeme yüzeyi temizlenir. Sementasyon işlemi sırasında AlCl, AlCl₂, AlCl₃ ve Al₂Cl₆ gibi metal halojenür buhar oluşumu aktivatörlerin metal tozları ile reaksiyona girmesi sonucu oluşur ve bu ortam ile aktif bir gaz ortamı oluşturulmaktadır. Bu gaz ortamında metal halojenürler tarafından taşınan alüminyum altlık malzeme ile katı hal difüzyonuna girer ve sonuçta oksidasyona dirençli bir tabaka oluşmaktadır (Yener, 2018).

Paket içeriği olarak Ni-Al, Fe-Al, Cr-Al veya Ti-Al gibi ikili alüminyum toz karışımları süper alaşımların düşük aktiviteli paket alüminyumlama işlemlerinde tercih edilmektedir. Buhar basınçları düşük olan bu alüminyum halojenürleri nedeniyle 1000°C-1050°C aralığında yüksek sıcaklıklara çıkılması gerekmektedir. Kaplamanın eş zamanlı yüksek sıcaklıkta büyümesi katı hal difüzyonunun baskın hız kontrollü olması ile sağlanmaktadır. Metal halojenürlerin oluşumu, kaplama esnasına alüminyumun taşınması ve aktivatörlerin ayrışmasını gösteren kimyasal reaksiyonlar aşağıda verilmiştir.



Termal spreyleme eriyik veya yarı eriyik halde bir altlık üzerine metalik veya metalik olmayan malzemelerin biriktirilmesi işlemidir. Bu işlem sonucu oluşan kaplama aşınma, yüksek sıcaklık ve korozyona karşı direnç sağlamaktadır. Bir enerji kaynağı yardımı ile ısıtılan ve eriyik/yarı eriyik forma dönüştürülen kaplama malzemesi yüzeyinde bulunan partiküller hızlandırılarak altılık numune yüzeyine bağlanır.

Fiziksel buhar biriktirme yönteminde ise vakum altında malzemelerin buharlaştırılarak atomların yüzeyden kopartılması ve kaplanacak olan numune yüzeyine atomsal olarak biriktirilmesi işlemidir. Bu yöntem ile iletken, yarı iletken ve yalıtkan malzemeler, vakum altında kararlı halde olan altlık malzemeler üzerine kaplama yapılabilir.

6. ALÜMİNYUMLANMIŞ SÜPERALAŞIM YÜZEYLERİ ÜZERİNE YAPILAN ÇALIŞMALAR

Literatür araştırmalarına göre yapılan çalışmalar genellikle oksidasyon&korozyon direnci üzerine gerçekleştirilmiş olup alüminyumlanmış Inconel 601 süper alaşım yüzeylerine ait yüksek sıcaklık aşınma davranışı ile ilgili bir çalışmaya rastlanılmamıştır.

7. MATERYAL VE METOT

Bu bölümde aşınma testlerinin gerçekleştirilmesi için Inconel 601 süper alaşımına ait numunelerin hazırlama süreci, numuneler üzerine yapılan aşınma testlerinde kullanılacak ekipmanlar ve aşınma test parametreleri incelenecektir.

7.1. Numune Hazırlama

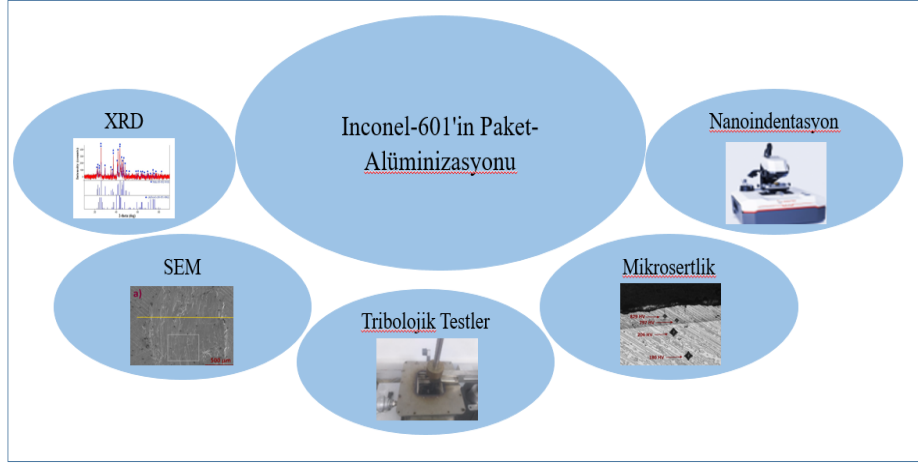
Paket alüminyumlama, bir malzemenin yüzeyine alüminyum kaplama uygulanması işlemi olarak adlandırılır. Paket alüminyumlama işlemi bir yüzey mühendisliği işlemidir. Alüminyum kaplama malzemenin yüzeyinde koruyucu bir tabaka oluşturur. Bu işlem tipik olarak oksidasyon ve korozyona karşı direnci arttırmak için gerçekleştirilmektedir. Inconel 601, kimyasal bileşimi %59 (Ni), %22,68 (Cr), %15,74 (Fe), %0,41 (Mn), %0,33 (Si), %0,03 (Cu), %0,038 % (C) ve kalan oranlardaki malzemelerinde altlık olarak kullanıldığı nikel esaslı bir süper alaşımdır. Ancak daha yüksek performans için yüzeyine paket alüminyumlama işlemi de uygulanabilmektedir.

Numune	Ni	Cr	Fe	C	Mn	Si	S	Cu
Inconel 601	59.00	22.68	15.74	0.038	0.41	0.33	0.015	0.03

Tablo 7.1: Inconel 601 süper alaşımına ait kütleli % bileşimi (URL-2, 2024)

Bu çalışmada kullanılan altlık malzemesi, kimyasal bileşimleri Tablo 7.1'de ayrıntılı olarak açıklanan Ni bazlı Inconel 601 numunelerinden hazırlanmıştır. Numuneler, hassas bir kesme aleti kullanılarak titizlikle 30×30×5 mm³ boyutlarına kesilmiştir. Paket alüminyumlama ısıl işleminden önce numune yüzeyleri, 0,25 µm'den daha düşük bir yüzey pürüzlülüğü (Ra) elde etmek için 1200 gritlik SiC kağıtları kullanılarak taşlanmıştır. Daha sonra tüm numuneler asetonla ultrasonik temizliğe tabi tutularak temiz, kirletici madde içermeyen bir yüzey sağlamak için 15 dakika saf su ile yıkanmıştır.

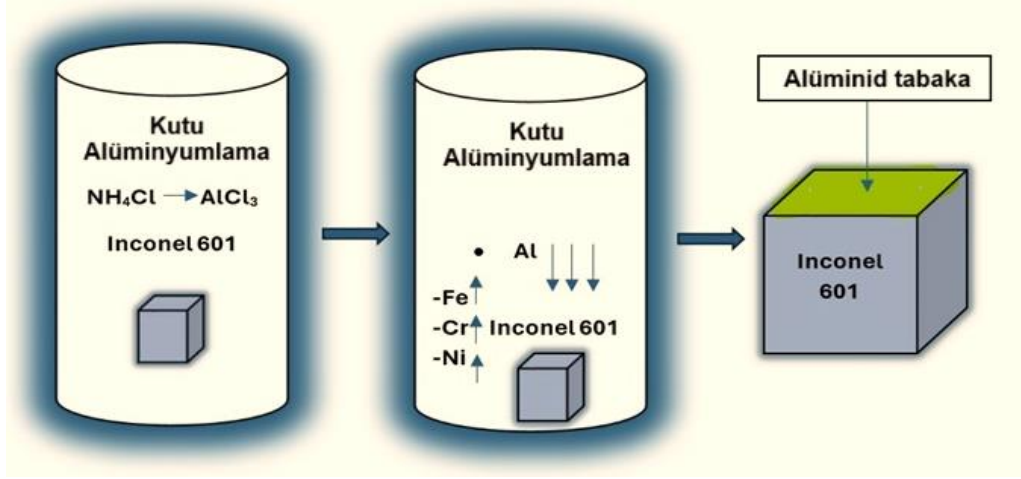
Bu çalışmada Inconel 601 yüzeyinde 700°C'de 4 saat süreyle alüminyum tabaka oluşturulmuş olup deney bölümünde kaplanan malzeme tribolojik ve sertlik özellikleri açısından incelenmiştir. Deneysel çalışmalarını temsil eden bir iş akış diyagramı Şekil 7.1'de gösterilmektedir.



Şekil 7.1: Deneysel sürece ait akış şeması

Süper alaşımların alüminyumlanması ilgili önceki çalışmalara dayanarak (Khalid vd., 2002; Döleker vd.,2021), paket alüminyumlama prosesi için toz paketi seçimi, alüminyum katkısı için ağırlıkça %35 saf metalik Al tozu (25 µm), klorür gazı oluşturucu bir aktivatör olarak ağırlıkça %5 NH₄Cl (25 µm) ve oksidasyonu ve sinterlenmeyi önlemek için ağırlıkça %60 Al₂O₃ (25 µm) tozlardan oluşturulmuştur (Gürol vd., 2023). Toz paket alüminyumlama prosesinde numunelerin temizlenmiş yüzeyleri AISI 304 paslanmaz çelikten yapılmış pota merkezine konumlandırılmıştır. Bu potalar sıkıca kapatılmış silindirik ağızlardan oluşmakta ve numunelerin her tarafı en az 10 mm tozla çevrelenmiştir. İlgili literatüre bağlı olarak Inconel alaşımlarına uygulanan paket alüminyumlama işlemlerinde etkili olduğu kanıtlanmış olan 700 °C'de 4 saatlik paket alüminyumlama parametresi bu çalışma için seçilmiştir (Erdoğan vd., 2021; Döleker vd., 2021).

Paket alüminyumlama işleminin tamamlanmasının ardından mühürlü potalar atmosfer kontrollü fırından çıkarılarak açık hava ortamında soğutulmuştur ve sonrasında numune yüzeylerinde kalan toz, ince hassas bir fırça kullanılarak titizlikle temizlenmiştir. Inconel 601'in paket alüminyumlama işleminin şematik bir gösterimi Şekil 7.2'de gösterilmektedir.



Şekil 7.2: Paket alüminyumlama işleminin şematik gösterimi

Termokimyasal ısıl işlemin ardından alüminize numuneler üzerinde karmaşık mikroyapısal ayrıntıları ortaya çıkarmak için; soğuk montaj, taşlama (240–2500 SiC zımpara ile), cilalama (1 ve 0,25 μm elmas pasta ile), dağlama (eşit karışım hacimlerinde H_3PO_4 , H_2SO_4 ve HNO_3 ile) metalografik işlemler gerçekleştirilmiştir (Makuch vd., 2014).

7.2. Karakterizasyon

Mikroyapı analizleri Nikon MA/100 marka ve model optik mikroskop ve enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDS) ile donatılmış taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Aşınan yüzeylerin SEM analizleri için 5 kV çalışma voltajında Tescan (MAIA3 XMU – Çek Cumhuriyeti) marka taramalı elektron mikroskobu kullanılmıştır. Yüzeyde oluşturulan nikel-alüminid kaplamaların XRD desenleri, Cu Ka radyasyonuna ($\lambda = 0,154 \text{ nm}$), 0,0525211 tarama adımı boyutuna ve 0 ila 90° arasında değişen 2θ açlarına sahip bilgisayar kontrollü bir Rigaku Smart Lab™ kullanılarak belirlenmiştir. Mikro sertlik ölçümleri, test parametreleri olarak 250 g yük (HV0.25) ve 15 saniyelik bekleme süresi kullanılarak Qness (Q10-Avusturya) marka mikro sertlik test cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Test sonuçları, her numune için beş adet mikrosertlik ölçümünün ortalaması alınarak elde edilmiştir. Nano sertlik ve elastik modül ölçümleri, Anton Paar HIT 300 nanoindentasyon (Avusturya) test cihazı üzerinde gerçekleştirilmiştir.

7.3. Tribolojik Testler

Bu çalışmada kullanılan Pin on Disk aşınma test düzeneği Şekil 7.3'te gösterilmektedir. Aşınma testleri, Tablo 7.2'de gösterilen kuru kayma aşınma testi parametrelerini kullanarak 7N ve 15N yükler ile oda sıcaklığında ve yüksek sıcaklıkta hem döner hem de ileri geri aşınma testlerini gerçekleştirebilen Turkyus Marka Pin-on-Disk test cihazı (Türkiye) ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 7.3: Aşınma aparatları ve tribolojik ölçümler

Aşındırıcı top malzemesi	WC
Aşındırıcı top sertliği	19 Gpa
Aşındırıcı top elastik modülü	630 Gpa
Aşındırıcı top çapı	6 mm
Test sıcaklığı	Oda sıcaklığı, 500°C
Test yükü	7 N, 15 N
Parça çapı	8 mm
Mil hızı	400 rev/min
Aşındırıcı top kayma hızı	0.17 m/s
Aşındırıcı top kayma mesafesi	300 m
Test ekipmanı veri toplama oranı	2 Hz

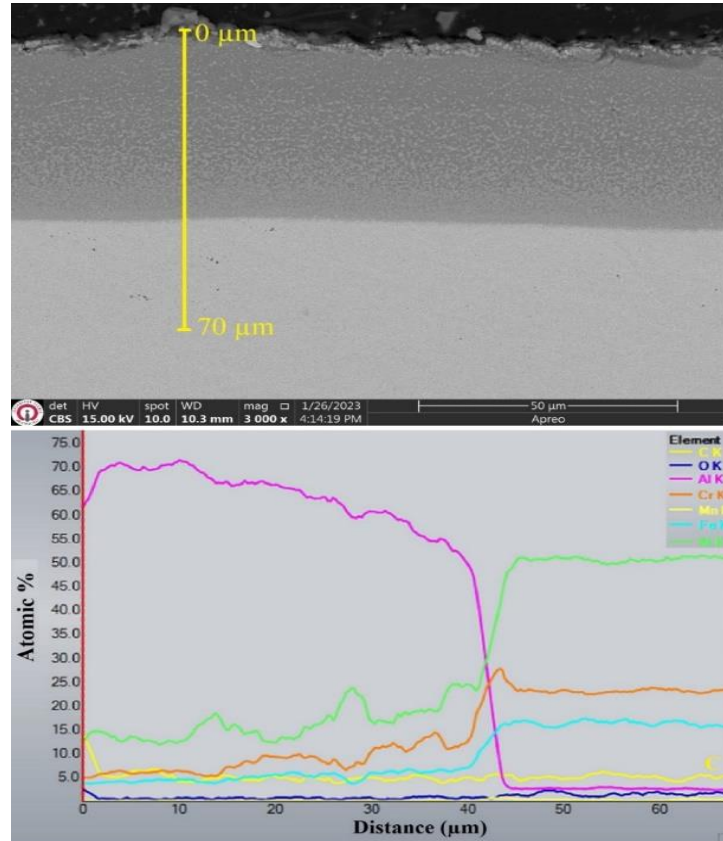
Tablo 7.2: Kuru kayma aşınma testi parametreleri

8. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde test sonuçlarına dayanarak alüminyumlanmış Inconel 601 süper alaşıma ait alüminid tabakaya ait mikro yapısal karakteristikler incelenerek alüminid tabaka üzerindeki mikro sertlik ölçüm sonuçları değerlendirilecektir. Son olarak sırasıyla oda sıcaklığında 7N, oda sıcaklığında 15N, 400°C’de 7N ve 400°C’de 15N yük altında alüminyumlanmış Inconel 601 süper alaşım numunesinin aşınma davranışları incelenecektir.

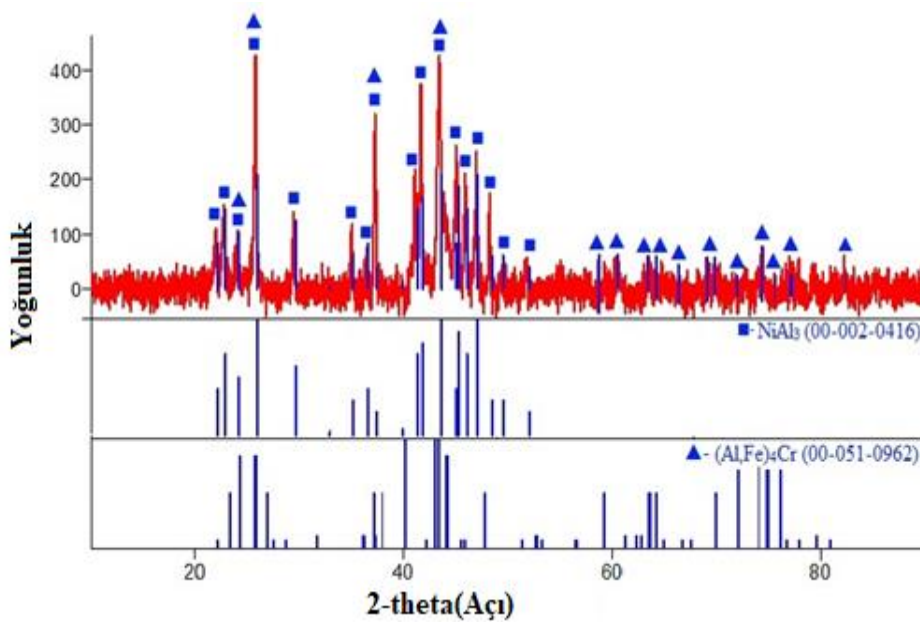
8.1. Alüminid tabakasının mikroyapısal karakterizasyonu

Şekil 8.1 incelendiğinde Inconel 601 alaşım yüzeyinde Al içeriği %70 ile %50 arasında değişen ve kalınlığı $42,5 \pm 1,0 \mu\text{m}$ olan bir alüminid tabakasının olduğu görülmektedir. Oluşturulan kaplama tabakasının bileşiminde çatlak, gözeneklilik gibi istenmeyen özellikler görülmemiştir. Al içeriğinin kaplama tabakası yüzeyinden iç kısma doğru giderek azaldığı gözlemlenmiştir. Bunun nedeni ortamda bulunan nikel ve diğer elementlerin yoğunluklarının iç yüzeye doğru artması sonucu Al difüzyonunun azalmasıdır.



Şekil 8.1: 700°C'de 4 saat sonra oluşan nikel alüminid tabakasının SEM ve EDS analizi

Kaplama katmanından alınan EDS çizgi analizinde görüldüğü üzere alüminid kaplama katmanında Inconel 601'in kimyasal bileşimi ile uyumlu Ni, Cr, Fe ve C elementlerinin varlığı tespit edilmiştir. Ek olarak oksijenin (O) yokluğu, kaplama işlemleri sırasında herhangi bir oksidasyon meydana gelmediğini göstermektedir. C içeriği %0,15 olmasına rağmen bunun SEM incelemeleri için numunelerin montajında kullanılan bakalitten gelen C'dan kaynaklandığı düşünülmektedir. Kaplama tabakası kalınlığı ve morfolojisi ile ilgili elde edilen bilgiler, süper alaşımlar üzerine yapılan literatür çalışmaları ile tutarlıdır (Khalid vd., 2002; Döleker vd., 2021).



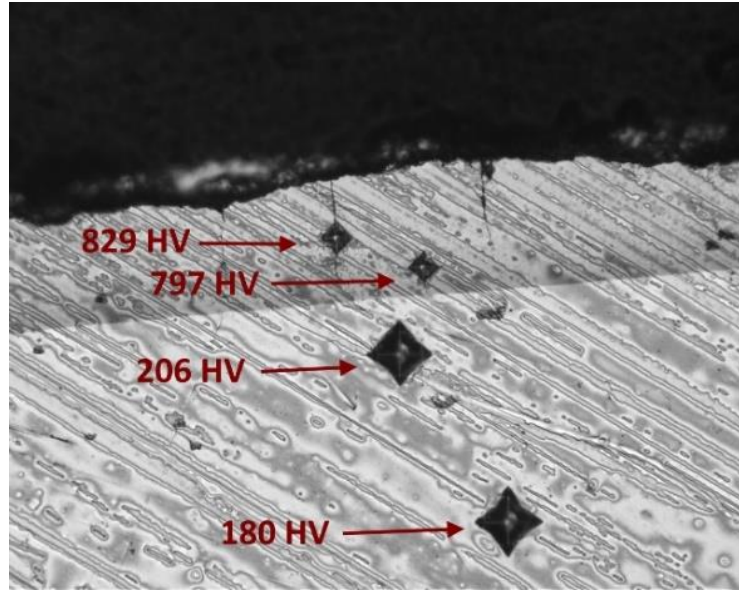
Şekil 8.2: 700 °C'de 4 saat sonra oluşan nikel alüminid kaplamaların XRD desenleri

Kaplamaların faz yapılarının belirlenmesi amacıyla elde edilen XRD desenleri Şekil 8.2'de gösterilmektedir. Şekilde görüldüğü üzere alüminid katmanının kırınım pikleri, paket alüminyumlanmış inconel 601 ve Al toz paket eklenmesine bağlı olarak NiAl₃ (ICDD kart No. 00-002-0416) ve (Al,Fe)₄Cr (ICDD kart No. 00-051-0962) çok kristalli bir yapıya sahiptir. NiAl₃ fazı göz önüne alındığında, Ni-Al faz diyagramına (Okamoto vd., 2001) göre açıklanan dört kararlı fazdan birinin (NiAl₃, Ni₂Al₃, NiAl ve Ni₃Al) beklendiği şekilde baskın faz olarak ortaya çıktığı görülmektedir. Dört faz arasında NiAl₃ fazı 854°C ile en düşük yüksek sıcaklık kararlılığına sahip olmasına rağmen, yüksek sıcaklık oksidasyon ortamlarında, alüminid tabakasının bir kısmı yüzeyde Al₂O₃ tabakası oluşturabilirken, diğer kısmı içeriye doğru difüze olarak daha kalın bir alüminid kaplama tabakası oluşturabilmektedir. Bu olgu, yüksek sıcaklığa maruz kalma durumunda bir avantaj

sağlayabilir. Nitekim Bölükbaşı vd., (2023) çalışmalarının 1000°C'de 50 saatlik oksidasyon testinden sonra başlangıçta 30 µm olan alüminid kaplama katmanının 68 µm'a yükseldiğini bildirmişlerdir. Ek olarak Inconel 625 alaşımının oksidasyon direncinin 2,65 ile 6,63 arasında bir faktörle arttığını belirtmişlerdir (Bölükbaşı vd., 2023).

8.2. Mikro Sertlik Ölçüm Sonuçları

Şekil 8.3, alüminize edilmiş bir Inconel 601 numunesi üzerindeki Vickers sertlik girintilerini gösteren bir optik mikroskop görüntüsünü göstermektedir. Numune 700°C'de 4 saat boyunca paket alüminyumlama işlemine tabi tutulmuştur. Görüntüde, her biri ilgili Vickers sertlik değerleriyle (HV0,25) işaretlenmiş çeşitli sertlik girintileri bulunmaktadır. 829 HV ve 797 HV sertlik değerlerine sahip bölge, paket alüminyumlama işlemi nedeniyle önemli ölçüde sertleşmeye uğrayan alüminize katmana karşılık gelmektedir. 206 HV0.25'e karşılık gelen bölge, sertleştirilmiş alüminize yüzey ile ana malzeme arasındaki geçiş bölgesidir. 180 HV0.25 değeriyle gösterilen Inconel 601'in temel malzemesi, paket alüminyumlama etkisi olmadan alaşımın doğal sertliğini göstermektedir.



Şekil 8.3: Alüminize numuneye ait Vickers (HV0.25) girintilerinin mikroskop görüntüsü

Tablo 8.1, Paket alüminyumlama işleminin Inconel 601'in mekanik özelliklerini derinden etkilediğini açıkça göstermektedir. Alüminize edilmiş numune, işlenmemiş numuneyle

karşılaştırıldığında önemli ölçüde daha yüksek mikro sertlik, nano sertlik ve elastiklik modülü sergilemektedir.

Numune	Alüminyum katman kalınlığı (μm)	Ortalama mikro sertlik ($\text{HV}_{0.25}$)	Ortalama nano sertlik (GPa)	Elastisite modülü (Nanoindentation-GPa)
İşlem görmemiş	-	213 ± 17	5.2 ± 0.55	207.5 ± 7.3
700°C-4h alüminize	42.5 ± 1.0	813 ± 65	20.5 ± 2.4	1025.61 ± 176

Tablo 8.1: Numuneye ait sertlik karakteristikleri ve alüminid katmanın sertlik özellikleri

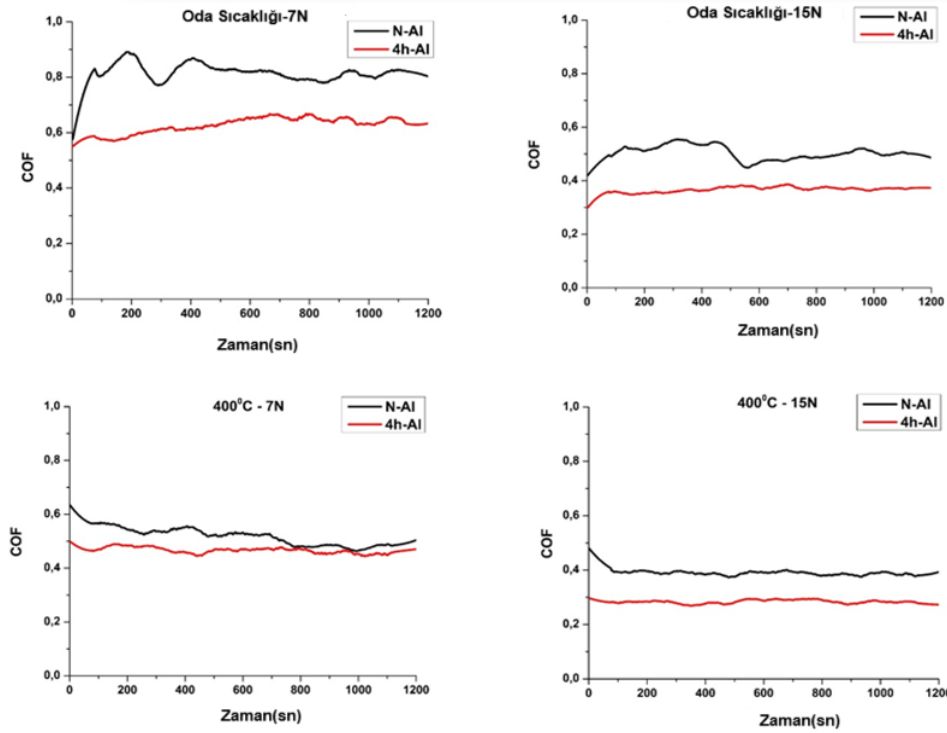
İşlem sırasında alüminid tabakasının oluşması, koruyucu, sert ve rijit bir tabaka olarak aşınma direncinin ve genel mekanik performansın geliştirilmesine katkıda bulunmaktadır. Sonuç olarak, alüminize Inconel 601 yüzeyi, yüksek dayanıklılık ve mekanik aşınmaya karşı direnç gerektiren uygulamalar için işlenmemiş alaşım yüzeyine kıyasla önemli ölçüde daha sağlamdır.

8.3. Sürtünme ve Aşınma Davranışı

Şekil 8.4, değişen yük ve ortam sıcaklığı koşulları altında işlem görmemiş ve 4h boyunca alüminize edilmiş numunelerin sürtünme katsayısına ait değerlerin değişimini göstermektedir. Yük ve sıcaklık koşulları için iki çift parametre kullanıldığından, koşullar sırasıyla düşük (7N, oda sıcaklığı) ve yüksek (15N, 400°C) yük ve sıcaklık koşulları olarak tanımlanabilir. COF eğrilerinin gösterdiği üzere, işlenmemiş Inconel 601 numune yüzeyleri ile karşılaştırıldığında paket alüminyumlama prosesine ait COF'un azaldığı görülmektedir. Yüzey işleminin etkisinin yanı sıra, artan yük ve sıcaklık koşulları da sürtünme katsayısı değerlerinin düşmesine neden olmuştur. Sürtünme ve aşınma, birçok faktörle ilişkili karmaşık olgular olmasına rağmen, paket alüminyumlama işleminden sonra COF'nin azalması esas olarak, işlenmemiş Inconel 601 yapısına kıyasla daha sert alüminid fazlarının oluşması nedeniyle numune yüzeyinin artan sertliğine atfedilebilir. Tablo 14'te verilen mekanik özelliklerin gösterdiği gibi alüminid tabakası, Inconel 601 matrisine kıyasla 4 kata kadar daha yüksek mikro ve nano sertlik ve ayrıca yüksek elastik modülü değerleri

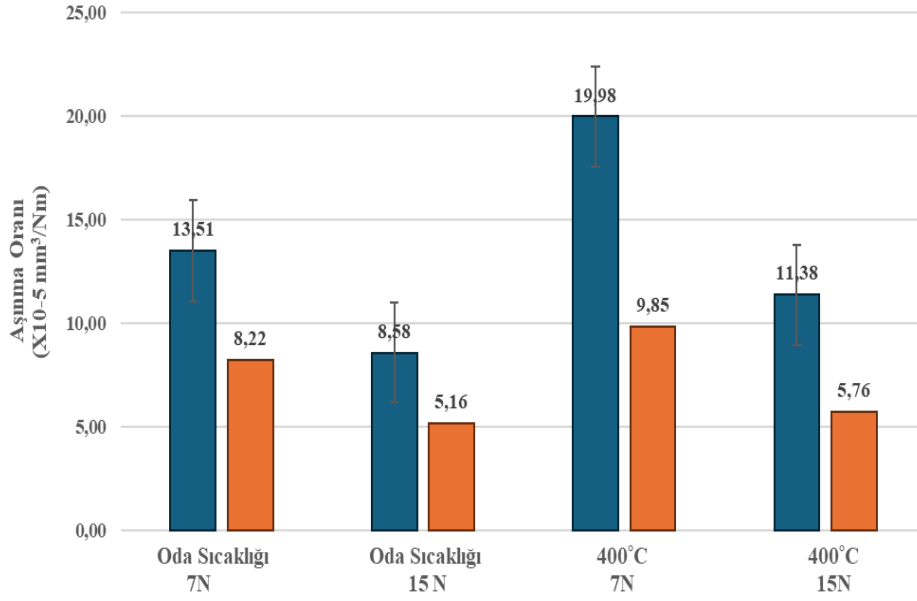
sergilemektedir. Şekil 8.4'de ayrıca pürüzlerle aşındırıcı bilye arasındaki ilk etkileşimin meydana geldiği ilk alıştırma aşamalarında, COF eğrileri hem işlenmiş hem de işlenmemiş numuneler için oda sıcaklığında bir başlangıç artışı ve yüksek sıcaklıkta bir başlangıç düşüşü göstermesi dikkat çekicidir. Ek olarak 400°C-7N yüke ait ölçüm sonuçlarını gösteren COF grafiğinde dikkat edileceği üzere alüminize edilmemiş ve 4 saat boyunca alüminize edilen numuneye ait COF eğrilerinin birbirine yakın olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, paket alüminyumlama işlemi sırasında homojen bir kaplama dağılımının elde edilememesine atfedilmektedir. Archard'ın aşınma modeli, gerçek temas alanı ile sertlik arasında ters bir ilişki olduğunu öne sürmektedir (Öge vd., 2023; Aghababaei vd., 2021).

Yüksek sıcaklıkta oksidasyon nedeniyle pürüzlerin malzeme yüzeyi için daha sert olması gerektiği göz önüne alındığında, pürüzlerin kopmaya karşı direnci yüksek sıcaklıkta daha yüksek olacaktır, dolayısıyla rodajlama aşamasında COF'un başlangıçta düşmesi söz konusudur. Termokimyasal yüzey işleminin sürtünme ve aşınma performansına etkisi, sertliğin artması nedeniyle tüm yükleme ve sıcaklık koşullarında daha düşük COF değerleri ile kendini göstermektedir (Şekil 8.1).



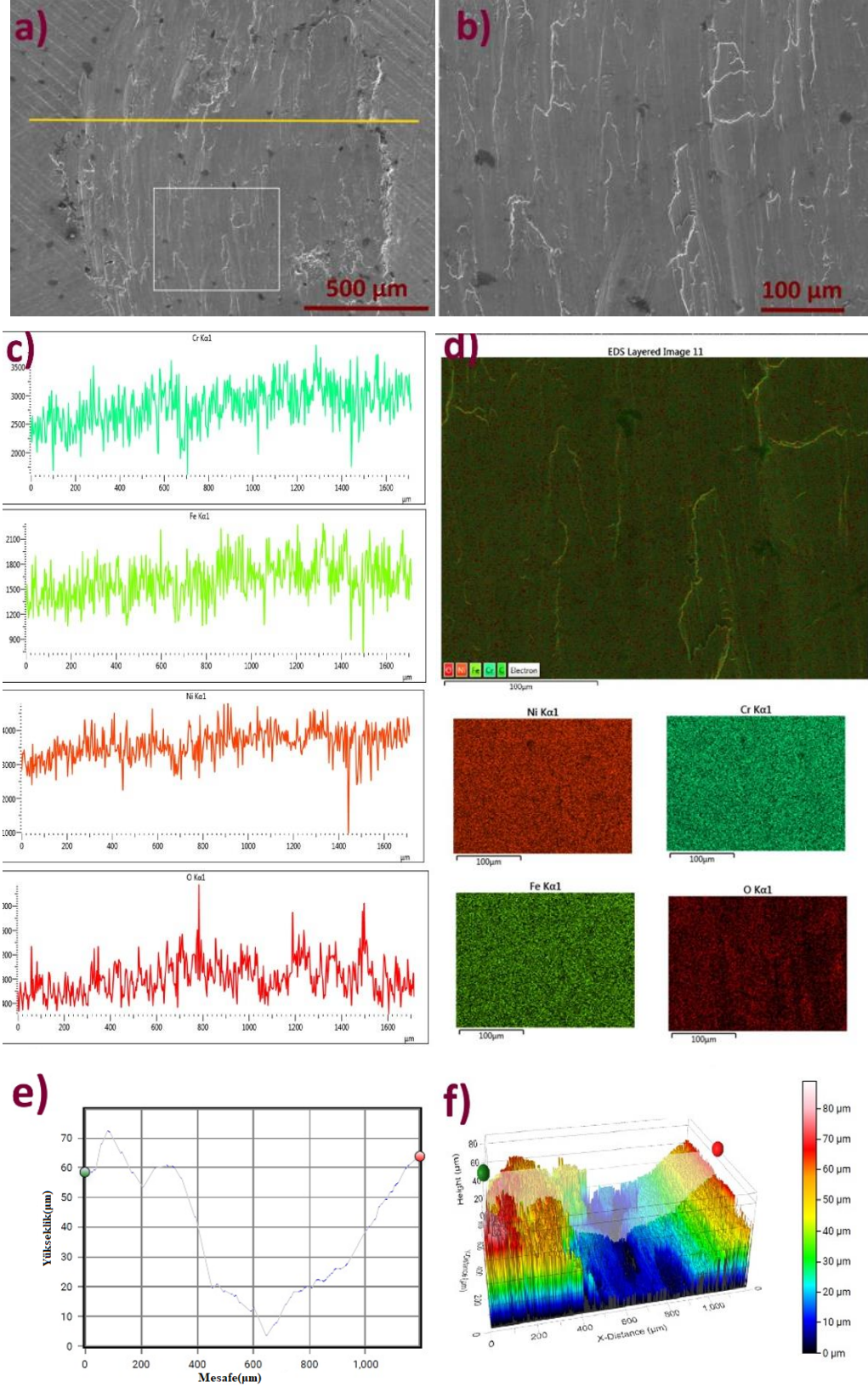
Şekil 8.4: 7N ve 15N yükleme koşulları altında alüminize edilmemiş ve 4h-alüminize edilmiş numunelerin oda sıcaklığı ve 400°C ortam sıcaklığında sürtünme katsayısı (COF) grafikleri

Şekil 8.4, değişen yükler ve sıcaklık koşulları altında test edilen alüminize edilmemiş ve 4 saatlik alüminize edilmiş Inconel 601 numunelerinin spesifik aşınma oranlarını göstermektedir. Aşınma oranları oda sıcaklığında ve 400°C'de, 7N ve 15N uygulanan yükler altında ölçülmüştür. Veriler, Inconel-601'in alüminize edilmesinin hem oda sıcaklığı hem de yüksek sıcaklık koşulları altında aşınma direncini önemli ölçüde arttırdığını göstermektedir. Bu gelişme, uygulanan çeşitli yüklerde (7N ve 15N) ve test sıcaklıklarında belirgindir.



Tablo 8.2: Alüminize edilmemiş ve edilmiş numunelerinin spesifik aşınma oranları

Paket alüminyumlama işleminin etkisi yüksek sıcaklıklarda daha belirgindir; bu durum, alüminize edilen katmanın yüksek sıcaklıktaki ortamlarda aşınmaya karşı gelişmiş koruma sağladığı anlamına gelmektedir. Buna göre termokimyasal yüzey sertleştirme işleminin, oda sıcaklığı -7N, oda sıcaklığı -15N, 400°C-7N ve 400°C-15N altında spesifik aşınma oranlarını sırasıyla %39, %38, %49 ve %51 azalttığı görülmektedir (Tablo 8.2). Bu sonuç esas olarak alüminid katmanının işlenmemiş Inconel 601 ile karşılaştırıldığında daha yüksek sertliği sebep olduğunu göstermektedir.



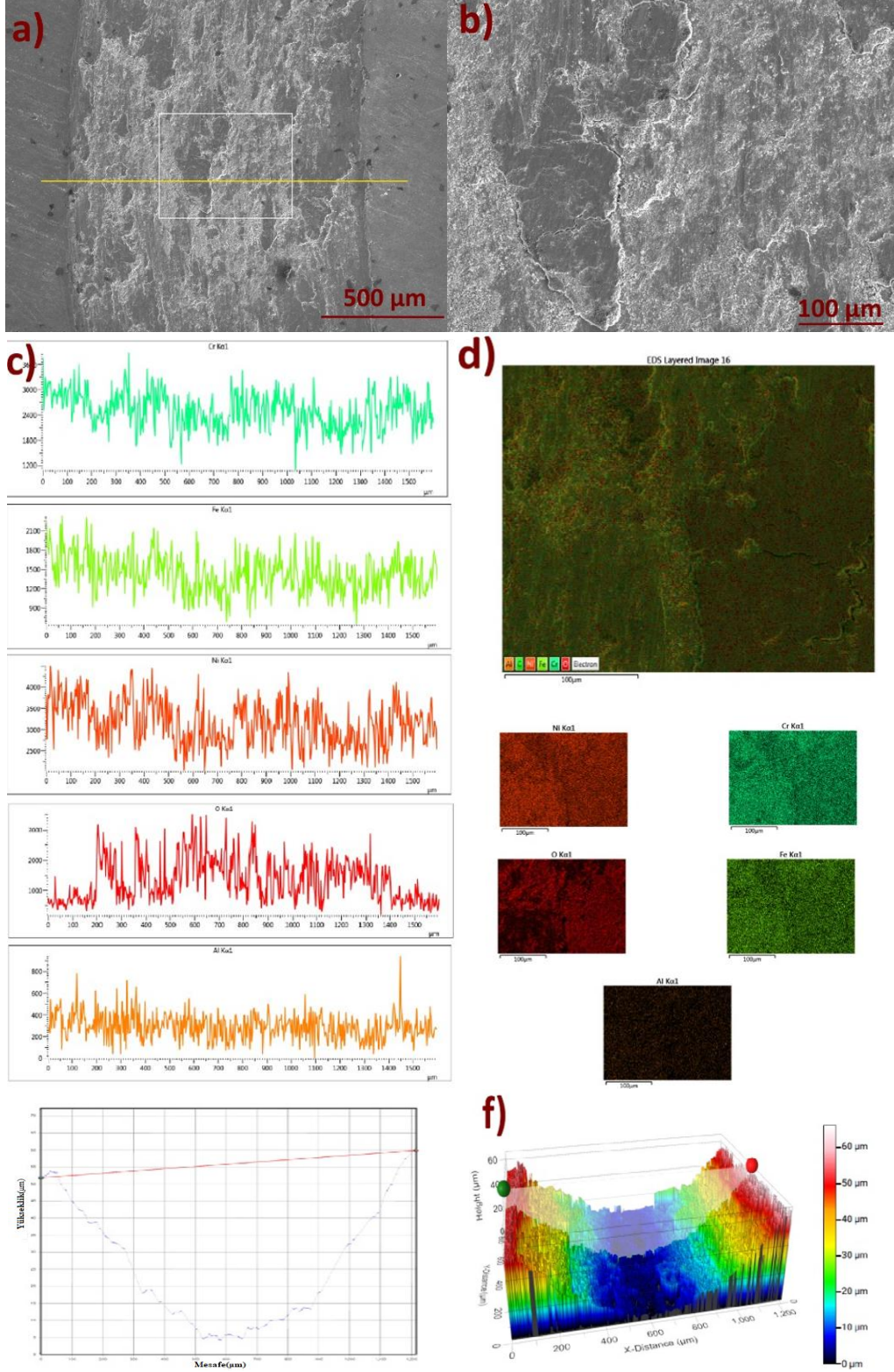
Şekil 8.5: Düşük (a), yüksek büyütme SEM mikrografları (b), çizgi EDS analizi (c), haritalama EDS analizi (d), kesitsel 2D profil (e), oda sıcaklığında ve 15N yük altında işlenmemiş numunenin 3D profil görüntüsü (f)

Şekil 8.5'te 15N yük altında oda sıcaklığında kuru kayma aşınma testine tabi tutulan alüminize edilmemiş Inconel 601 yüzeyinin SEM, EDS ve profilometre analiz sonuçları gösterilmektedir. Aşınmış yüzey incelendiğinde, diğer aşınmış yüzeylerden (Şekil 8.6-Şekil 8.8) farklılaştığı ve açık tonların bulunmaması ile bu yüzeylerde aşınma sırasında oluşan yorulma çatlaklarının önemli ölçüde daha düşük düzeyde olduğu görülmektedir.

Yorulma çatlaklarının düşük olması, yüzeyde dağılmış koyu renkli lekelerle tanımlanabilen, sinterlenmiş bir oksit tabakasının sınırlı derecede oluşmasına yol açmıştır. Yüksek büyütme bir diğer görüntüde daha belirgin olan paralel kanallar (Şekil 8.5b), üçüncü taraf görevi gören oksitlenmiş ve kopmuş aşınma kalıntılarının göreceli hareketinden kaynaklanan hafif aşınmanın göstergesidir.

Çatlak oluşumlarıyla ifade edilen yorulma aşınması belirtileri, yüzeyde yüksek yük ve yüksek temas basıncı değerlerinden kaynaklanan, yüzeydeki topraklarla ifade edilen plastik deformasyon belirtileriyle karakterize edilmektedir. Şekil 8.5c ve Şekil 8.5d'deki EDS ve haritalama sonuçları, yüzeyin esas olarak alaşım elementlerinden oluştuğunu ve oda sıcaklığı koşullarında yüksek yüke rağmen WC aşındırıcı toptan herhangi bir malzeme aktarımının belirgin olmadığını göstermektedir.

2D ve 3D profil görüntüleri (sırasıyla Şekil 8.5e ve Şekil 8.5f), aşınma kalıntılarının üçüncü taraf etkisine bağlı olarak kaba bir aşınma profilini gösterir ve bu profilin boyutu, işlenmemiş yapının daha düşük sertliği ile ilişkilendirilmektedir.



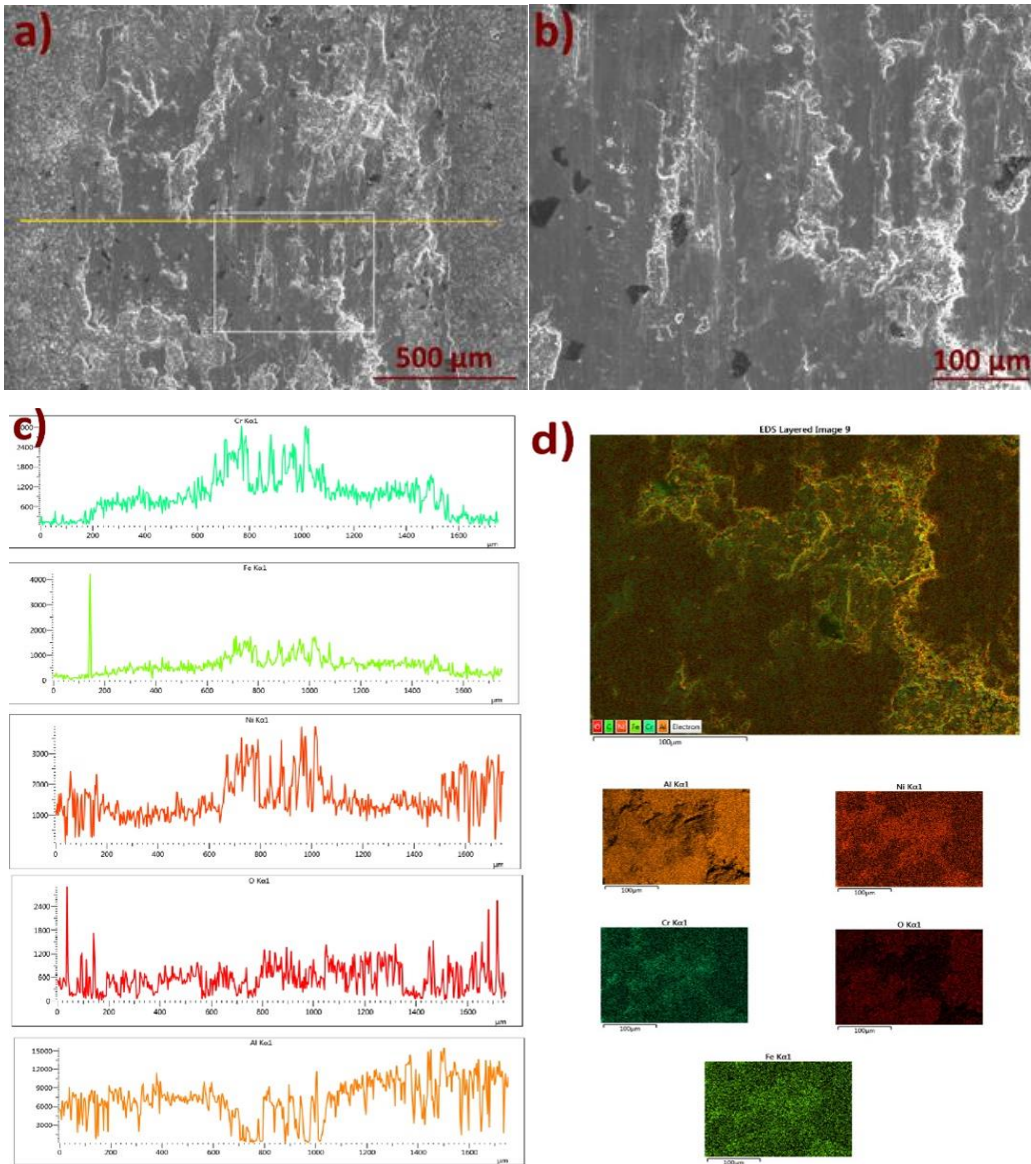
Şekil 8.6: Düşük (a), yüksek büyütme SEM mikrografları (b), çizgi EDS analizi(c) haritalama EDS analizi (d), kesitsel 2D profil (e), 400°C ve 15N yük altında işlenmemiş numunenin 3D profil görüntüsü (f)

Şekil 8.6, 400°C test sıcaklığında 15N yük altında kuru kayma aşınma testine tabi tutulan alüminize edilmemiş Inconel 601 yüzeyinin SEM, EDS ve profilometre analiz sonuçlarını göstermektedir. Aşınmış yüzeyin SEM görüntülerinden de anlaşılacağı üzere, 400°C'de aşınmış yüzey, aynı yük altında oda sıcaklığında aşınmış yüzeyden, yüksek sıcaklıkla birlikte yüksek yük koşullarının sonucu olarak yüzey yapısında yorulma çatlakları ve aşınma kalıntılarının daha belirgin olduğu açık tonlarla ayırt edilebilmektedir. Yorulma çatlaklarının varlığı ayrıca Şekil 8.6c ve Şekil 8.6d'de gösterilen çizgi ve haritalama EDS analizleriyle de gösterilmektedir. Bu yorulma çatlaklarına ait parçacıklar, daha düşük COF (Şekil 8.3) ve aşınma oranı değerlerinin (Şekil 8.4) yanı sıra daha düzgün 2D ve 3D aşınma profillerine (Şekil 8.6e ve 8.6f) yol açan sıkıştırılmış ve sinterlenmiş bir oksit tabakasının oluşumuna katkıda bulunmuştur.

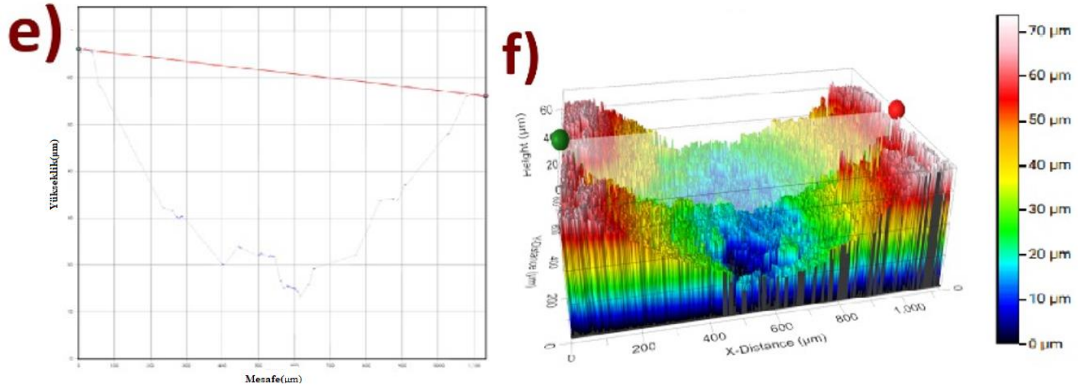
EDS haritalama analizinde (Şekil 8.6d), yorulma çatlaklarına maruz kalan bölgeler alaşım elementleriyle örtüşmemektedir; bu da, aşınma süreci sırasında tüm alaşım elementlerinin yorulma çatlama maruz kalmadığını göstermektedir. Inconel 601'in yüksek sıcaklık altındaki yüzey topografyası, yüksek sıcaklıklar altındaki termal kararlılığına rağmen, malzeme yüzeyinin yüksek mekanik yük ve sinterlenmiş oksit tabakasının önemli ölçüde aşınmaya uğradığını göstermektedir.

Şekil 8.7, oda sıcaklığında 15N yük altında kuru kayma aşınma testine tabi tutulan 4h-alüminize edilmiş Inconel 601 yüzeyinin SEM, EDS ve profilometri analiz sonuçlarını göstermektedir. Yüzeyin düşük ve yüksek büyütme SEM görüntüleri (Şekil 8.7a ve 8.7b) incelendiğinde, açık tonlarla ifade edilen yorulma çatlakları boyutlarının, oda sıcaklığında işlem görmemiş numuneye göre daha yüksek olduğu (Şekil 8.5) ve yüksek sıcaklıkta işlenmemiş numuneninkinden daha düşük olduğu görülmektedir. Buna göre, termokimyasal ısıl işlem prosesinin daha düşük düzeyde yorulmaya yol açtığı sonucu çıkarılabilir ve bu sonuç, alt katmanda bulunan Inconel 601 yapısına kıyasla alüminid katmanının daha yüksek termal kararlılığa sahip olduğu şeklinde yorumlanabilir. Ayrıca yüzey, kopmuş aşınma kalıntılarının daha az olduğu ve daha fazla plastik deformasyon belirtisiyle dekore edilmiş Şekil 8.6'ya kıyasla düşük şiddetli bir yüzey topografisiyle karakterize edilmiştir. Bu, alüminid tabakasının, işlenmemiş Inconel 601 yapısına göre daha düşük yorulma çatlaklarına sahip olduğu şeklinde yorumlanabilir. Bununla birlikte, yüzey ayrıca, yüksek normal yük ve temas basıncının yanı sıra tribo çifti arasındaki termal olarak etkinleştirilen

yapıştırıcı ve aşındırıcıya ait aşınma belirtileriyle birlikte lokal hasar belirtileriyle de karakterize edilmiştir (Öge vd., 2023; Semenov, A.P., 2008). 2D ve 3D aşınma profillerinin (Şekil 8.7e ve 8.7f), Şekil 8.3'de gösterilen COF eğrileri ile tutarlı olduğu görülmektedir. Çizgi ve haritalama EDS sonuçları (Şekil 8.7c ve 8.7d), alaşım elementi tepe noktalarının (Fe, Cr ve Ni) en yüksek temas basıncının meydana geldiği temas bölgesinin merkezinde daha yüksek olduğunu göstermektedir (Kim vd., 2007). Bu sonuç, aşındırıcı bilyenin alüminize edilmemiş bölgeye ulaşmak için yeterince derine nüfuz etmiş olmasına bağlanabilir.



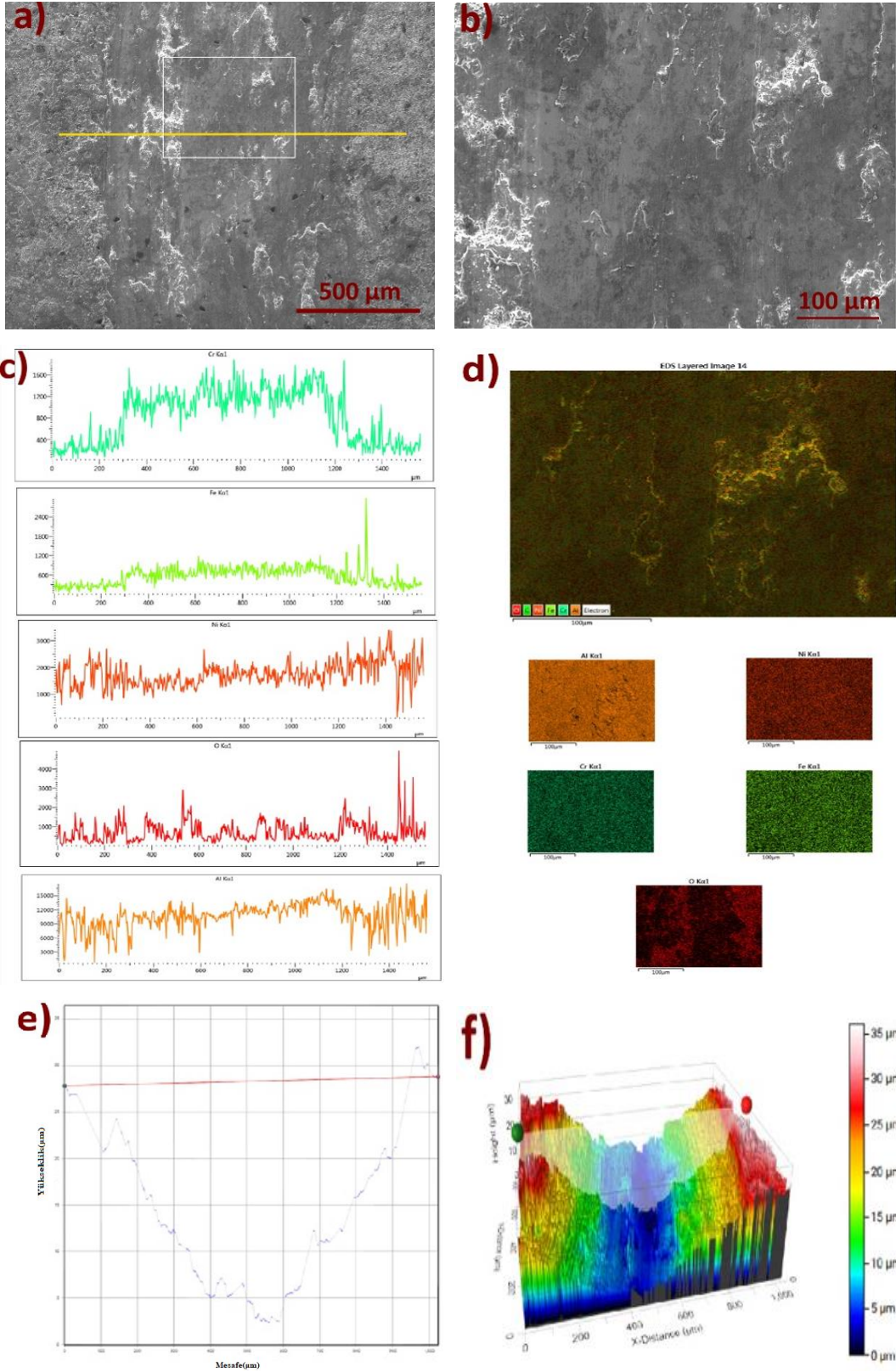
Şekil 8.74: Düşük (a), yüksek büyütme SEM mikrografları (b), çizgi EDS analizi (c), haritalama EDS analizi (d), kesitsel 2D profil (e), oda sıcaklığında 15N yük altında 4h-alüminize edilen numunenin 3D profil görüntüsü (f)



Şekil 8.75: (devam ediyor)

Şekil 8.8: 400°C test sıcaklığında 15N yük altında kuru kayma aşınma testine tabi tutulan 4h-alüminize edilmiş Inconel 601 yüzeyinin SEM, EDS ve profilometre analiz sonuçlarını göstermektedir. SEM görüntülerinden gözlemlendiği üzere, yüzeydeki yorulma çatlaklarının boyutunu belirten açık tonların miktarı, oda sıcaklığında aşındırılan alüminize numuneninkinden daha azdır (Şekil 8.7), bu da alüminidin daha düşük yorulma aşınma derecesi ile ilişkilendirilmektedir.

Alüminid tabakasının aşınmaya karşı bariyer görevi görmesi nedeniyle kaplamaya ait katman, işlem görmemiş Inconel-601 yapısına kıyasla daha fazla zarar görmektedir (Qiao vd., 2021). Yüzeyde sinterlenmiş oksit tabakasının daha az miktarda oluşması nedeniyle, işlem görmemiş yüzeye kıyasla daha düşük bir aşınma direnci beklenmesine rağmen, alüminize numune daha yüksek sürtünme ve aşınma performansı sergilemektedir (sırasıyla Şekil 8.5 ve 8.6), bu da esas olarak alüminid tabakasının işlem görmemiş numune yüzeyine kıyasla daha yüksek mikro ve nano sertlik değerleri ile ilişkilendirilmektedir (Tablo 7.1). EDS çizgi sonuçları analiz edildiğinde (Şekil 8.8c), yalnızca Cr piklerinin iz merkezine doğru daha belirgin olduğu, diğer alaşım element piklerinin ise stabil kaldığı görülmektedir. Bu sonuç, bilyenin alüminize edilmemiş bölgeye ulaşmak için yeterince derine nüfuz ettiğini ve alüminid tabakanın aşındırıldığını göstermektedir. Şekil 8.8'de görülen dağınık yüzey morfolojisi de oksit tabakasının kopması ve yeniden oluşmasıyla belirginleşen termal yorgunluğun da belli bir ölçüde gözlemlendiğini göstermektedir; ancak bu durum, yüksek sıcaklık altında aşınmış işlem görmemiş yüzey numunesine göre daha düşük bir düzeydedir (Şekil 8.7).



Şekil 8.8: Düşük (a), yüksek büyütme SEM mikrografları (b), çizgi EDS Analizi (c), haritalama EDS analizi (d), kesitsel 2D profil (e), 400°C'de ve 15 N yük altında 4h-alüminize numunenin 3D profil görüntüsü (f)

9. SONUÇLAR

Bu çalışma, paket alüminyumlama işleminin Inconel 601 yüzeylerinin mikro yapısı, mikro sertliği ve nano sertliği ile yüksek sıcaklıkta aşınma performansı üzerindeki etkisini araştırmaktadır. Paket alüminyumlama işlemi 700°C'de 4 saatlik işlem süresi boyunca gerçekleştirilmiş olup deneysel verilere dayanarak aşağıdaki sonuçlara varılmıştır:

- XRD desenleri, gelişmiş yüksek sıcaklık performansı için istenen faz yapılarıyla hizalanan sert $NiAl_3$ ve $(Al, Fe)_4Cr$ fazlarının varlığını doğrulamıştır.
- Termokimyasal yüzey sertleştirme, numunelerin mikro sertliğini ve nano sertliğini sırasıyla yaklaşık %382 ve %394 oranında artırmıştır. Aşınma performansının ve sertlik değerlerinin artması esas olarak sert fazların oluşumuna bağlanmaktadır.
- Paket alüminyumlama işlemi numunelerin sürtünme özelliklerini ve aşınma direncini önemli ölçüde iyileştirerek onları yüksek yük ve yüksek sıcaklık uygulamaları için daha uygun hale getirmiştir.
- Termokimyasal yüzey sertleştirme, spesifik aşınma oranlarını oda sıcaklığı- 7N yük, oda sıcaklığı- 15N yük, 400°C- 7N yük ve 400°C- 15 N yük koşullarında sırasıyla yaklaşık %39, %38, %49 ve %51 oranında azaltmıştır. Bu iyileşme yüzeyde sert fazların oluşumu sonucu ortaya çıkmaktadır.

Bu çalışma, Inconel 601 üzerinde paket alüminyumlama ısıl işlemlerinin faydaları hakkında fikir vererek nikel esaslı süper alaşımlar için yüzey mühendisliği işlemlerinin daha fazla araştırılması ve optimizasyonunun önünü açmaktadır. Bununla birlikte değişen paket alüminyumlama parametrelerinin mikroyapısal ve mekanik özellikler üzerindeki etkisinin araştırılması, paket alüminyumlama prosesinin belirli endüstriyel uygulamalar için optimize edilmesine ilişkin daha derin bilgiler sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

- Akande, I.G., Oluwole, O.O., Fayomi, O.S.I. ve Odunlami, O.A. (2021). Overview of mechanical, microstructural, oxidation properties and high-temperature applications of superalloys. *materialstoday:Proceeding*, 43(2): 2222–2231.
- Aghababaei, R. ve Zhao, K. (2021). Micromechanics of material detachment during adhesive wear: A numerical assessment of Archard's wear model. *Wear*. 476: 203739.
- Akkurt, M. (1986). *Makina Elemanları Cilt-2*. İstanbul: Birsen Yayınevi, 418.
- Akagaki, T. ve Kato, K. (1987). Plastic flow process of surface layers in flow wear under boundary lubricated conditions. *Wear*, 117(2): 179-196.
- Bağcı, M. (2005). CuZn10 Pirinç Malzemede Kayma Hızının Aşınmaya Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Konya, 46s.
- Bhattacharya, S.K., Javaid, A., Lewis, M.H., ve Walbank, J. (1983). Wear Mechanisms of Sialon Ceramic Tools when Machining Nickel-Based Material. *Metals Technology*, 10(1): 482-483.
- Bhushan, B. (2000). *Modern Tribology Handbook, Two Volume Set*. United States Of America: CRC Yayınevi.
- Birol, Y. (2010). High temperature sliding wear behaviour of Inconel 617 and Stellite 6 alloys. *Wear*. 269(9): 664–67.
- Bradley, E.F. (1989). *Microstructure in Superalloys A Technical Guide*. American Society for Metals International, 439 s.
- Boynueyri, D. (2019). PVD Yöntemi ile İnce Kaplanmış Kesici Takımların Mikro Ölçekli Aşınma Testi ile Aşınma Dayanımının Belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Bartın Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Bartın, 10s.
- Bölükbaşı, Ö.S., Serindağ, T., Gürol, U., Günen, A. ve Çam, G. (2023). Improving oxidation resistance of wire arc additive manufactured Inconel 625 Ni-based superalloy by pack aluminizing. *CIRP Journal of Manufacturing Science Technology*. 46:89–97.
- Budinski, K.G. (1988). *Surface Engineering For Wear Resistance*, New jersey.
- Büyükkelleci, Ü. (2008). Yeni Bir Aşınma Test Cihazı Tasarımı ve Bazı Metallerin Aşınma Davranışlarının Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji Eğitimi Anabilim Dalı, Elazığ, 6s.

- Cheng, X., Xu, J., Yang, Z., Guo, Q., Li, C., Zhou, J., Chen, S., Liu, S. ve Ma, Z. (2024). A novel nickel-based superalloy with excellent high temperature performance designed for laser additive manufacturing. *Materials Science and Engineering:A*, 911:146926.
- Cheng, W.J. ve Wang, C. J. (2010). Observation of high-temperature phase transformation in the, Si-modified aluminide coating on mild steel using EBSD. *Materials Characterizations*, 61(4):467–473.
- Çay, V.V. ve Ozan, Ş. (2005). Süper alaşımlar ve uygulama alanları. *Fırat Üniversitesi Doğu Araştırmaları Dergisi*, 3(2): 178 – 188.
- Çetin, M. (2005). Öztemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Aşınma Davranışlarının Geliştirilmesi. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metal Eğitimi, Ankara, 78-100s.
- Davis, J.R. (2000). *Nickel, Cobalt, and Their Alloys*. ASM International.
- Debbarma, D. (2021). The study of wear behaviour of the inconel 800 material in dry and solid lubricated condition. *Materials Today Proceeding*. 46(19): 6191–6195.
- Demiral, M. ve Yaşar, M. (2006). Cu-Al-Fe alaşımlarının aşınma davranışlarının incelenmesi. *Teknoloji Dergisi*, 9 (1): 17-26.
- Donachie, M. J. ve Donachie, S. J. (2002). *Superalloys a technical guide*. ASM International.
- Döleker, K.M., Erdogan, A., Yener, T., Karaoglanlı, A.C., Uzun, O., Gök, M.S. ve Zeytin, S. (2021). Enhancing the wear and oxidation behaviors of the Inconel 718 by low temperature aluminizing. *Surface and Coating Technology*. 412:127069.
- Dudzinski, D., Devillez, A., Moufki, A., Larrouquere, D., Zerrouki, V. ve Vigneau, J. (2004). A review of developments towards dry and high speed machining of Inconel 718 alloy. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 44(4): 439-456.
- Erdem, S. (2006). Yüksek Karbon İçeriğine Sahip, Yüksek Kromlu, Manganlı ve Alaşımsız Düşük Karbonlu Çeliklerin Aşınma Davranışlarının Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji Anabilim Dalı, Elazığ, 65s.
- Erdoğan, A. (2012). Ferrokrom Cürufunun Mikro Ölçekli Abrasyon Testi ile Aşındırma Özelliklerinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Bartın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Bartın, 83s.
- Erdogan, A., Yener, T., Döleker, K.M., Korkmaz, M.E. ve Gök, M.S. (2021). Low-temperature aluminizing influence on degradation of nimonic 80A surface: Microstructure, wear and high temperature oxidation behaviors. *Surfaces and Interfaces*, 25:101240

- Erdoğan, M., Çakmakkaya, M. ve Erol A. (2005). Katkı Elementlerinin süper alaşımlara etkileri. *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi, 41-46.
- Ezugwu, E.O. (2004). High speed machining of aero-engine alloys. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 26(1)
- Geddes, B., Leon, H. ve Huang, X. (2010). *Superalloys: Alloying and Performance*. ASM International.
- Gök, M. S. (2001). Taneleri İnceltilmiş Mangan Islah Çeliğinin Aşınma Davranışlarının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji Eğitimi Anabilim Dalı, Elazığ, 125s.
- Gürol, U., Altınay, Y., Günen, A., Bölükbaşı, Ö.S., Koçak, M. ve Çam, G. (2023). Effect of powder-pack aluminizing on microstructure and oxidation resistance of wire arc additively manufactured stainless steels. *Surface and Coating Technology*. 468: 129742.
- Günen, A. ve Kanca, E. (2017). Microstructure and mechanical properties of borided inconel 625 superalloy. *Matéria (Rio de Janeiro)*, 22(2): e11829.
- Helmi, A. Y. (2016). *Machining of stainless steels and super alloys: traditional and nontraditional techniques*. John Wiley & Sons.
- Hong, Z., Li, Y., Liu, B. ve Jia, X. (2024). Effects of aluminised-coating on microstructure and properties of Ni–Co-base superalloys. *Surface Engineering*. 40(1): 34–44.
- Huchings, I. M. (1992). *Tribology: friction and wear of engineering materials*. CRC Press: Boca Raton.
- İnanır, Z. (2012). Yüksek Çalışma Sıcaklıklarının Inconel 718 Alaşımının Yapısal ve Mekanik Özellikleri Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İleri Teknoloji Anabilim Dalı, İstanbul, 95 s.
- Kaleli, H. (2015). Design of modern universal tribometer with rotating and reciprocating movement. *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, 33(1): 78-84.
- Karaoğlu, Y. (2006). Bir aşınma test cihazının tasarımı ve imalatı. Yüksek lisans tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 94s.
- Kayalı, Y., Kanca, E. ve Günen, A. (2022). Effect of boronizing on microstructure, high-temperature wear and corrosion behavior of additive manufactured Inconel 718. *Materials Characterization*, 191:112155.

- Kassner, M.E. ve Tiley, J.S. (2008). γ/γ' Nickel-based superalloys. *Fundamentals of Creep in Metals and Alloys*, 247–259.
- Keleştimur, H. (1989). Makine Yapı Çeliklerinin Abrasiv Aşınma Direncine Yüzey Sertliğinin Etkisi ve Diğer Mekanik Özelliklerle İlişkisinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 18s.
- Keskin, İ. (2012). Yüksek Mekanizmalarında Aşınma ve Elastohidrodinamik Yağlama. Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 15-26s.
- Khalid, F.A., Hussain, N. ve Qureshi, A.H. (2002). Microstructural study on oxidation of aluminized coating on inconel 625. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 11(2):211-214.
- Kim, S.H., Asay, D.B. ve Dugger, M.T. (2007). Nanotribology and MEMS. *Nano Today*, 2(5):22–29.
- Kopec, M. (2024). Recent advances in the deposition of aluminide coatings on nickel-based superalloys: a synthetic review (2019–2023). *Coatings*, 14(630):1-15.
- Kosel, T.H., Fiore, N.F. ve Coype, J. P. (1978). Corrosion-Erosion behavior of materials. Metalurgical Society of ASM 1990. Missouri, U.S.A.
- Lindner, T., Günen, A., Töberling, G., Vogt, S., Karakas, M.S., Löbel, M. ve Lampke, T. (2021). Boriding of laser-clad Inconel 718 coatings for enhanced wear resistance. *Applied Sciences*, 11(4):11935.
- Makuch, N., Kulka, M. (2014). Microstructural characterization and some mechanical properties of gas-borided Inconel 600-alloy. *Applied Surface Science*, 314:1007–1018.
- Mali, H.S. ve Unune, D.R. (2017). Machinability of Nickel-Based Superalloys: An Overview. *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*.
- Meetham G.W. ve Voorde M.H. (2000). Materials for High Temperature Engineering Applications. *Applied Mechanics Reviews*, 54(5):68-82.
- Mohr, M., Wunderlich, R., Dong, Y., Furrer, D. ve Fecht, H.J. (2020). Thermophysical Properties of Advanced Ni-Based Superalloys in the Liquid State Measured on Board the International Space Station. *Advance Engineering Material*, 22(4):2070016.
- Mostafaei, A., Zhao, C., He, Y., Reza Ghiaasiaan, S., Shi, B., Shao, S., Shamsaei, N., Wu, Z., Kouraytem, N., Sun, T., Pauza, J., Gordon, J. V., Webler, B., Parab, N.D., Asherloo, M., Guo, Q., Chen, L. ve Rollett, A.D. (2022). Defects and anomalies in powder bed fusion metal additive manufacturing. *Current Opinion in Solid State and Material Science*, 26:100974.

- Muratoğlu, M. (1997). SiC Katkılı 2124 Alüminyum Kompoziti ve Yaşlandırılmış Kompozitin Aşınma Davranışlarının Araştırılması. Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji Eğitimi Ana Bilim Dalı, Elazığ, 47s.
- M'Saoubi, R., Axinte, D., Soo, S. L., Nobel, C., Attia, H. ve Kappmeyer, G. (2015). High performance cutting of advanced aerospace alloys and composite materials. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 64(2): 557–580.
- Oğuz, B. (1993). Aşınma sorunları ve dolgu kaynakları. İstanbul: *Oerlikon Yayınları*, 1-7
- Okamoto, H., Schlesinger, M.E. ve Mueller, E.M. (2016). *ASM Handbook: Alloy Phase Diagrams, Volume 3*. ASM International.
- Owsalou, R. G. (2012). Aşınmaya Maruz Parçaların Aşınma Dayanımlarının Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Bölümü, Konstrüksiyon İmalat Anabilim Dalı, İzmir, 109s.
- Öge, M., Küçük, Y., Öge, T.Ö., Günen, A., Kanca, Y. ve Gök, M.S. (2023). Effect of boriding on high temperature tribological behavior of CoCrMo alloy. *Tribology International*. 187:108697.
- Patel, M.R.R. ve Ranjan, M.A. (2015). Advanced Techniques in Machining of Aerospace Superalloys: A review. *International Journal of Advance Research in Engineering, Science & Technology*, 2(5), 149-154.
- Pomeroy M.J. (2015). Coatings for gas turbine materials and long term stability issues. *Materials and Design*, 26(3):223–231.
- Reed. R. C. (2006). *The Superalloys: Fundamentals and Applications*. Cambridge University Press.
- Richards, N. ve Aspinwall, D. (1989). Use of ceramic tools for machining nickel-based alloys. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 29(4):575-588.
- Samvatsar, K. ve Rao, V. (2022). Feasibility study for the development of Al-Si based coating on Ni-Cu alloy (UNS N04400). *Materials Today: Proceedings*, 64(1): 395–401.
- Semenov, A.P. (2008). Tribological properties of high-melting oxides and nonmetallic compounds at elevated temperatures. *Journal of Friction and Wear*. 29(5):392–404.
- Shah, K.S., Shukla, A, Patel, N.S. (2021). Analysis of friction and wear as a system response using indigenously fabricated tribometer. *Tribology in Industry*, 43(3): 442-451.
- Sommitsch, C., Radis, R., Krumphals, A., Stockinger, M. ve Huber, D. (2012). Microstructure control in processing nickel, titanium and other special alloys. *Microstructure Evolution in Metal Forming Processes*. 337–383.

- Şafak, H. E. (2008). Yüzeyi PVD Yöntemiyle Kaplanmış Metallerde Tribolojik Özelliklerin Belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, İzmir, 135 s.
- Thellaputta, G.R., Bose, P.S.C. ve Rao, C.S.P. (2017). Machinability of Nickel Based Superalloys: A Review. *Materials Today: Proceedings*, 4 (2): 3712-3721.
- Thomas, A., El-Wahabi, M., Cabrera, J.M. ve Prado, J.M. (2006). High temperature deformation of Inconel 718. *Journal of materials processing technology*, 177(1-3): 469-472.
- Ulutan, M. (2007). AISI 1040 Çeliğinin Yüzey Sertleştirme İşlemleri Ve Kaplama Yöntemleri Sonrası Mekanik Davranışının Araştırılması. Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir Osman Gazi Üniversitesi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Eskişehir, 79 s.
- URL-1 (2024). <https://tr.wikipedia.org/wiki/Triboloji>, 21.10.2024, 00:15
- URL-2 (2024). <https://bircelik.com>, 18.07.2024,17:34
- URL-3 (2024). <https://avys.omu.edu.tr>, 07.04.2024, 23:42
- Urun, R. (2008). Sürtünme ve aşınma test cihazı tasarımı ve imalatı. Yüksek Lisans Tezi, Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa, 85 s.
- Varol, T. (2016). Aşınma deneyi. Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Laboratuvar Föyü, Trabzon.
- Yavorska, M., Poręba, M. ve Sieniawski, J. (2008). Development of microstructure of aluminate layer on base superalloys in the low-activity CVD process. *Material Engineering*, 6:749–752.
- Yener, T. (2018). Low temperature aluminising of Fe-Cr-Ni super alloy by pack cementation. *Vacuum*, 162(6): 114–120.
- Yıldırım, Y.B. (2016). Termoreaktif Difüzyon (TRD) Yöntemiyle Ferro Titanium Kaplanan Orta Karbonlu Çeliğin Mikroyapı Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 7s.
- Qiao, Y., Chen, T. ve Guo, X. (2021). Diffusion barrier effect of Al₂O₃ layer at the interface between Mo-Si-B coating and Nb-Si based alloy. *Corrosion Communications*. 4: 45–56.
- White, C. H. (1986). Nickel Base Alloys. *The development of gas turbine materials*, 89-119.