



T.C

BARTIN ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

4140 ÇELİĞİNİN MEKANİK AŞINMA ÖZELLİKLERİNE LAZERLE YÜZEY
SERTLEŞTİRME İŞLEMİNİN ETKİSİNİN İNCELENMESİ

HAZIRLAYAN

ESRA GÜNER

DANIŞMAN

DOÇ. DR. MÜKREMİN YILMAZ

BARTIN-2019



T.C.

**BARTIN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**4140 ÇELİĞİNİN MEKANİK AŞINMA ÖZELLİKLERİNE LAZERLE YÜZEY
SERTLEŞTİRME İŞLEMİNİN ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HAZIRLAYAN

ESRA GÜNER

JÜRİ ÜYELERİ

Danışman : Doç. Dr. Mükremin YILMAZ - Bartın Üniversitesi
Üye : Prof. Dr. Mustafa Sabri GÖK - Bartın Üniversitesi
Üye : Doç. Dr. Okan ÜNAL - Karabük Üniversitesi

BARTIN-2019



KABUL VE ONAY

Esra GÜNER tarafından hazırlanan “4140 ÇELİĞİNİN MEKANİK AŞINMA ÖZELLİKLERİNE LAZERLE YÜZEY SERTLEŞTİRME İŞLEMİNİN ETKİSİNİN İNCELENMESİ” başlıklı bu çalışma, 28/08/2019 tarihinde yapılan savunma sınavı sonucunda oy birliği ile başarılı bulunarak jürimiz tarafından Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Doç. Dr. Mükremin YILMAZ (Danışman)

Üye : Prof. Dr. Mustafa Sabri GÖK

Üye : Doç. Dr. Okan ÜNAL

Bu tezin kabulü Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun/...../2019 tarih ve 20...../.....-..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Hatice Selma ÇELİKİYAY

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

BEYANNAME

Bartın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre Doç. Dr. Mükremin YILMAZ danışmanlığında hazırlamış olduğum “4140 ÇELİĞİNİN MEKANİK AŞINMA ÖZELLİKLERİNE LAZERLE YÜZEY SERTLEŞTİRME İŞLEMİNİN ETKİSİNİN 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.

28/08/2019

Esra GÜNER

ÖNSÖZ

“4140 ÇELİĞİNİN MEKANİK AŞINMA ÖZELLİKLERİNE LAZERLE YÜZEY SERTLEŞTİRME İŞLEMİNİN ETKİSİNİN İNCELENMESİ” adlı bu çalışma, Bartın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans Tezi olarak hazırlanmıştır.

Yüksek Lisans tezinin bilimsel danışmanlığını üstlenen, sayın Doç. Dr. Mükremin YILMAZ’a ve ikinci eş danışmanım olan sayın Doç. Dr. Khangardash ASGAROV’a konunun belirlenmesinde ve çalışmanın hazırlanması ve laboratuvar ve tez çalışmalarım esnasında yakın ilgi ve desteğini gördüğüm, sayın Prof. Dr. Mustafa Sabri GÖK’ e teşekkür ederim.

Laboratuvar ve tez çalışmalarım esnasında yanımda bulunan ve destek sağlayan Arş. Gör. Dr. Azmi ERDOĞAN’a teşekkür ederim.

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

Esra GÜNER

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

4140 ÇELİĞİNİN MEKANİK AŞINMA ÖZELLİKLERİNE LAZERLE YÜZEY SERTLEŞTİRME İŞLEMİNİN ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Esra GÜNER

Bartın Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Mükremin YILMAZ

Bartın-2019, sayfa: 85

Bu çalışmada AISI 4140 çeliğinden üretilmiş ve lazerle yüzey sertleştirme işlemine tabi tutulduktan sonraki farklı sertlik değerlerine sahip numunelerin oda sıcaklığında kuru kayma aşınma davranışı incelenmiştir. Deneyler oda sıcaklığında 5N ve 10N yükler altında 40x40x10 mm boyutunda hazırlanan numuneler üzerinde Pin On Disk aşınma cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Teste tabi tutulan numunelerin hacim kayıplarının belirlenmesinde 3D optik mikroskobundan (profilometre) faydalanılmıştır. Numunelerin aşınma yüzeylerinin morfolojisini belirleyebilmek için SEM (Scanning Elektron Microscopy) faydalanılmıştır. Sonuç olarak Artan yüke bağlı olarak numunelerdeki hacim kayıpları artmıştır. 1350 °C’de yüzey sertleştirme işlemine tabi tutulan numunede gerçekleştirilen deneylerde hacim kaybı oranları diğer numuneler ile kıyaslandığında daha düşük çıkmıştır. En yüksek hacim kayıpları yüzey sertleştirme işlemi uygulanmamış numunede gerçekleştirilen deneylerde elde edilmiştir. Kuru-kayma işlemine tabi tutulan numunelerin yüzeylerinde tribolojik katman oluşmuştur. Ayrıca gerçekleştirilen deneylerde 5N ve 10N yüklerde yorulma aşınma mekanizması görülmüştür. Yine 10N yük altında uygulanan deneylerde yorulma aşınması yanında oksidasyon aşınma mekanizması da görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: AISI 4140; Kuru kayma aşınması; lazerle yüzey sertleştirme.

Bilim kodu: 604.01.01

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF LASER SURFACE HARDENING PROCESS ON THE MECHANICAL WEAR PROPERTIES OF 4140 STEEL

Esra GÜNER

Bartın University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Metallurgical and Materials Engineering

Thesis Advisor: Assoc. Prof. Mükremin YILMAZ

Bartın-2019, pp: 85

In this study, dry shear wear behavior of samples produced from AISI 4140 steel with different hardness values after laser surface hardening process was investigated. The experiments were carried out on samples prepared at 40x40x10 mm size under 5N and 10N loads at room temperature with Pin On Disc abrasion device. 3D optical microscopy (profilometer) was used to determine the volume losses of the samples. SEM (Scanning Electron Microscopy) was used to determine the morphology of the wear surfaces of the samples. As a result, the volume losses in the samples increased due to the increased load. In the experiments carried out in the sample subjected to surface hardening at 1350 ° C, the volume loss rates were lower compared to the other samples. The highest volume losses were obtained in the experiments performed on the sample without surface hardening. Tribological layer formed on the surfaces of the samples subjected to dry-shear process. In addition, fatigue wear mechanism was observed in 5N and 10N loads. In addition, fatigue wear and oxidation wear mechanism were also observed in the experiments carried out under 10N load.

Keywords: AISI 4140; Dry slip wear; laser surface hardening.

Science Code: 604.01.01

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL VE ONAY	ii
BEYANNAME.....	iii
ÖNSÖZ.....	iv
ÖZET	v
ABSTRACT	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
TABLolar DİZİNİ.....	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xv
BÖLÜM 1 GİRİŞ	1
1.1 Aşınma	1
1.1.1 Aşınma Türleri	2
1.1.1.1 Adhesiv Aşınma	2
1.1.1.2 Abrasiv Aşınma	3
1.1.1.3 Yorulma Aşınması.....	4
1.1.1.4 Koroziyel Aşınma	4
1.1.1.5 Erozyon Aşınması	5
1.1.2 Aşınma Kaybı Ölçüm Yöntemleri.....	6
1.1.2.1 Ağırlık Farkı Metodu.....	6
1.1.2.2 Kalınlık Farkı Metodu	6
1.1.2.3 İz Değişim Metodu	6
1.1.2.4 Kayma Aşınması	7
1.2 Isıl İşlem	8

1.2.1 Çeliklerde Tavlama İşlemi	9
1.2.2 1.Tür Tavlama İşlemleri.....	9
1.2.2.1 Homojenleştirme Tavı	9
1.2.2.2 Tane İrileştirme Tavlaması.....	10
1.2.2.3 Gerilim Giderme Tavlaması	11
1.2.2.4 Rekristalizasyon (Yeniden Kristalleşme) Tavlaması	11
1.2.3 2. Tür Tavlama İşlemleri.....	13
1.2.3.1 Normalizasyon Tavı	13
1.2.3.2 Yumuşatma Tavı	14
1.2.3.3 Küreselleştirme Tavı.....	15
1.2.4 Yüzey Sertleştirme Yöntemleri.....	15
1.2.4.1 Malzemenin Kimyasal Yapısını Değiştirmeden Yapılan Yüzey Sertleştirme Yöntemleri.....	16
1.2.4.2 Malzemenin Kimyasal Yapısını Değiştirerek Yapılan Yüzey Sertleştirme Yöntemleri.....	18
1.3 Çeliğin Tanımı ve Çelik Üretim Yöntemleri	20
1.3.1 Çelik Yapıları	22
1.3.1.1 Ferrit	23
1.3.1.2 Östenit.....	23
1.3.1.3 Sementit	24
1.3.1.4 Perlit	25
1.3.1.5 Beynit	25
1.3.1.6 Martenzit.....	26
1.3.2 Çeliklerin Sınıflandırılması	27
1.3.2.1 Alaşımız Çelikler (Sade Karbonlu Çelikler).....	27
1.3.2.2 Alaşımızlı Çelikler	29
1.4 Çeliklerde Sertleştirme	34
1.5 Lazer	34

1.5.1 Lazer Türleri.....	36
1.5.1.1 Katı Lazerler	36
1.5.1.2 Gaz Lazerleri	37
1.5.1.3 Boyar Madde Lazerleri.....	38
1.5.1.4 Serbest Elektronlu Lazerler	39
1.5.1.5 Yarı İletken Lazerler (Diyot Lazerler).....	40
1.5.2 Endüstriyel Lazer Türleri	41
1.5.2.1 Nd:YAG Lazeri	41
1.5.2.2 CO ₂ Lazeri	43
1.5.3 Lazer Işının Özellikleri.....	44
1.5.4 Lazer Işını İle Yüzey Sertleştirme.....	44
1.5.4.1 Lazer Işını İle Sertleştirme İşlemi	45
BÖLÜM 2 LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	49
BÖLÜM 3 MATERYAL VE YÖNTEM	54
3.1 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM- Scanning Elektron Microscopy).....	54
3.2 Noktasal Analiz Çalışmaları (EDS- Energy Dispersive Spectroscopy)	54
3.3 X- 3D Optik Profilometre İncelemeleri	54
3.4 Sertlik Deneyleri	55
3.5 Kuru-Kayma Aşınma Deneyleri	55
BÖLÜM 4 BULGULAR VE TARTIŞMA	57
4.1 Sürtünme Katsayısı Ölçüm Analizi	57
4.2 Kaplama Kalınlıkları ve Sertlik Değerleri	63
4.3 Hacim Kaybı Analizi	66

BÖLÜM 5 SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	78
5.1 Genel Sonuçlar.....	78
5.2 Öneriler.....	79
KAYNAKLAR.....	80
ÖZGEÇMİŞ.....	84



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil No	Sayfa No
1.1: Aşınma eğrileri.....	1
1.2: Adhesiv aşınma.	3
1.3: Abrasiv aşınma.....	3
1.4: Yorulma (pitting) aşınması; (a) temas yüzeyinde oluşan Hertz basınçları, (b) yüzeyin aşınma sonrası görüntüsü	4
1.5: Korozif aşınma.	5
1.6: Erozyon aşınma türleri.	5
1.7: Normal yük ve kayma hızının metallerdeki kayma aşınması prosesine etkisi.....	7
1.8: Isıl işlemde sıcaklık-zaman diyagramı.	8
1.9: Tavlama fırını.....	9
1.10: Homojenleştirme tavı ısı işlem diyagramı.	10
1.11: Tane irileştirme tavlama ısı işlem diyagramı.	10
1.12: Gerilim giderme tavlama ısı işlem diyagramı.	11
1.13: Soğuk işlem öncesi ve sonrası malzemenin kristal tane yapısı.....	12
1.14: Yeniden kristalleşme tavlama sırasında kristal yapısındaki değişim	12
1.15: Normalizasyon tavı ısı işlem diyagramı.....	13
1.16: Alaşimsız çeliklere uygulanan normalizasyon, yumuşatma ve küreselleştirme işlemleri için tavlama sıcaklıkları.....	14
1.17: Alevle yüzey sertleştirme prensibi.	16
1.18: Demir-karbon denge diyagramı	23
1.19: Ferrit fazının yapısı	23
1.20: Östenit fazın mikroyapısı	24
1.21: Perlit fazının mikro yapısında tane sınırlarındaki sementit fazı (beyaz bölgeler)....	24
1.22: Perlit fazının mikroyapısı	25
1.23: Beynit fazının mikroyapısı	26
1.24: Martenzit fazının mikroyapıları. (a) çıta martenzit yapısı, (b) tabakalı martenzit yapısı.....	27
1.25: Basitleştirilmiş lazer sistemi.....	35
1.26: Lazer ışın oluşumunun şematik gösterimi.....	36

1.27: Boyar madde lazer sistemi.	38
1.28: Serbest elektron lazerinin çalışma sistemi.	39
1.29: (a) P-N jonksiyonu, (b) Boşluk bölgesinin oluşması.	40
1.30: Yarı iletken (diyot) lazer	41
1.31: Neodyum YAG lazerinin yapısı. (1)Flaş lamba, (2) Flaş lamba için yansıtıcı, (3) Etkin lazer malzemesi, (4) Yansıtma özelliğine sahip yarı geçirgen aynalar.....	42
1.32: Lazer ışını ile sertleşme prensibi.....	46
1.33: Lazer sertleştirme sonucu numune yapısının östenit fazdan martenzit faza dönüşümü.	48
3.1: 3D profil metre ile kesit yüzeyi görüntüsü.....	56
4.1: 850 °C’de yüzey sertleştirme işlemi uygulanmış 4140 çeliğinin farklı yük ve sabit kayma hızında ((a) 5N-3 d/dk, (b) 10N-0,15 m/s) ve zaman (sn) altında uygulanmış sürtünme katsayısı grafikleri.	57
4.2: 1000 °C’de yüzey sertleştirme işlemi uygulanmış 4140 çeliğinin farklı yük ve sabit kayma hızında ((a) 5N-0,15 m/s, (b) 10N-0,15 m/s) ve zaman (sn) altında uygulanmış sürtünme katsayısı grafikleri.....	58
4.3: 1050 °C’de yüzey sertleştirme işlemi uygulanmış 4140 çeliğinin farklı yük ve sabit kayma hızında ((a) 5N-0,15 m/s, (b) 10N-0,15 m/s) ve zaman (sn) altında uygulanmış sürtünme katsayısı grafikleri.....	59
4.4: 1150 °C’de yüzey sertleştirme işlemi uygulanmış 4140 çeliğinin farklı yük ve sabit kayma hızında ((a) 5N-0,15 m/s, (b) 10N-0,15 m/s) ve zaman (sn) altında uygulanmış sürtünme katsayısı grafikleri.....	60
4.5: 1350 °C’de yüzey sertleştirme işlemi uygulanmış 4140 çeliğinin farklı yük ve sabit kayma hızında ((a) 5N-0,15 m/s, (b) 10N-0,15 m/s) ve zaman (sn) altında uygulanmış sürtünme katsayısı grafikleri.....	61
4.6: Yüzey sertleştirme işlemi uygulanmamış 4140 çeliğinin farklı yük ve sabit kayma hızında ((a) 5N-0,15 m/s, (b) 10N-0,15 m/s) ve zaman (sn) altında uygulanmış sürtünme katsayısı grafikleri.	62
4.7: 850 °C’de işleme tabi tutulmuş numunenin kaplama kalınlığı.	63
4.8: 1000 °C’de işleme tabi tutulmuş numunenin kaplama kalınlığı.	63
4.9: 1050 °C’de işleme tabi tutulmuş numunenin kaplama kalınlığı.	64
4.10: 1150 °C’de işleme tabi tutulmuş numunenin kaplama kalınlığı.	64
4.11: 1350 °C’de işleme tabi tutulmuş numunenin kaplama kalınlığı.	64
4.12: AISI 4140 çeliğinin farklı sıcaklıklardaki sertlik grafiği.	65

4.13: AISI 4140 çeliğinin işlemsiz ve farklı sıcaklıklardaki lazer ile yüzey sertleştirme sonrası farklı yükler altında (5N-10N) ve 0,15 m/s kayma hızında uygulanan deney sonucundaki hacim kayıpları grafiği.	66
4.14: 850 °C’de işleme tabi tutulmuş 4140 çeliğinin 5N’luk yük altında ve 0,15 m/s kayma hızında kuru kayma aşınma işlemine tabi tutulduktan sonra 500x ve 2.00 kx’deki SEM fotoğrafları verilmiştir.	67
4.15: 850 °C işleme tabi tutulmuş 4140 çeliğinin 5N ve 10N yüklerin altında ve 0,15 m/s kayma hızında kuru kayma aşınma işlemine tabi tutulduktan sonraki EDS analizi sonuçları..	70
4.16: 850 °C’de işleme tabi tutulmuş 4140 çeliğinin 10N’luk yük altında ve 0,15 m/s kayma hızında kuru kayma aşınma işlemine tabi tutulduktan sonra 500x ve 2.00 kx’deki SEM fotoğrafları verilmiştir.	70
4.17: 1000 °C’de işleme tabi tutulmuş 4140 çeliğinin 5N’luk yük altında ve 0,15 m/s kayma hızında kuru kayma aşınma işlemine tabi tutulduktan sonra 500x ve 2.00 kx’deki SEM fotoğrafları verilmiştir.	71
4.18: 1000 °C’de işleme tabi tutulmuş 4140 çeliğinin 10N’luk yük altında ve 3 m/s kayma hızında kuru kayma aşınma işlemine tabi tutulduktan sonra 500x ve 2.00 kx’deki SEM fotoğrafları verilmiştir.	72
4.19: 1000 °C’de 10N yük ve 0,15 m/s kayma hızında uygulanan numunenin EDS analiz sonuçları.	73
4.20: 1050 °C’de işleme tabi tutulmuş 4140 çeliğinin 5N (a) ve 10N (a) yüklerin altında ve 0,15 m/s kayma hızında kuru kayma aşınma işlemine tabi tutulduktan sonra 500x’deki SEM fotoğrafları verilmiştir.	74
4.21: 1150 °C’de işleme tabi tutulmuş 4140 çeliğinin 5N ve 10N yük altında ve 3 m/s kayma hızında kuru kayma aşınma işlemine tabi tutulduktan sonra 500x’deki SEM fotoğrafları.	75
4.22: 1350 °C’de yüzey sertleştirme işlemine tabi tutulmuş 4140 çeliğinin 5N ve 10N’luk yükler altında ve 0,15 m/s kayma hızında kuru kayma aşınma işlemine tabi tutulduktan sonra (a) 5N- 200x, (b) 10N-200x, (c) 5N-2.00 kx, (d)10N-1.50 kx deki SEM fotoğrafları.	76
4.23: Yüzey sertleştirme işlemine tabi tutulmamış 4140 çeliğinin 5N (a) ve 10N (b) luk yükler altında ve 0,15 m/s kayma hızında kuru kayma aşınma işlemine tabi tutulduktan sonra 500 x deki SEM fotoğrafları.	77

TABLolar DİZİNİ

Tablo	Sayfa
No	No
1.1: Ham demir ve çeliğın kimyasal kompozisyonları.....	21
1.2: Düşük alaşımlı krom-molibdenli çeliklerin kimyasal kompozisyonları.	30
1.3: AISI 4140 çeliğının kimyasal kompozisyonu.	31
1.4: AISI 4140 çeliğının ısıı işlem özellikleri.	32
1.5: AISI 4140 çeliğının mekanik özellikleri.	32
1.6: AISI 4140 çeliğının elektriksel özelliğı.	32
1.7: AISI 4140 çeliğının ısıı işlem özellikleri.	33
1.8: AISI 4140 çeliğının dönüşüm kritik sıcaklıkları.	33
3.1: AISI 4140 çeliğının kimyasal kompozisyonları.....	54
4.1: Lazer ile yüzey sertleştirme işleminin sonrası AISI 4140 çeliğının lazer torcunun 4 mm/s ilerleme hızında farklı sıcaklık parametrelerinde işlem görmüş numunelere ait sertlik değerleri verilmiştir.	65

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A_{c1}	: Ötektoid reaksiyon sıcaklığı
A_{c3}	: Üst kritik sıcaklık
A_{cm}	: Alt kritik sıcaklık
d	: Yoğunluk
Fe_3C	: Sementit
F_n	: Uygulanan normal kuvvet
$f\rho$: Darbe frekansı
m	: metre
mm	: milimetre
M_s	: Martenzit başlangıç sıcaklığı
N	: Newton
\overline{PL}	: Ortalama lazer gücü
$P\rho$: Darbe gücü
S	: Aşınma mesafesi
sn	: saniye
$t\rho_\alpha$: Darbe süresi
W_s	: Özgül aşınma miktarı
$^\circ C$: Santigrad derece
$3D$: 3 Dimension
μ	: mikro
α	: Alfa
γ	: Gama
Δv	: Hacimsel malzeme kaybı
Δm	: Ağırlık kaybı

KISALTMALAR

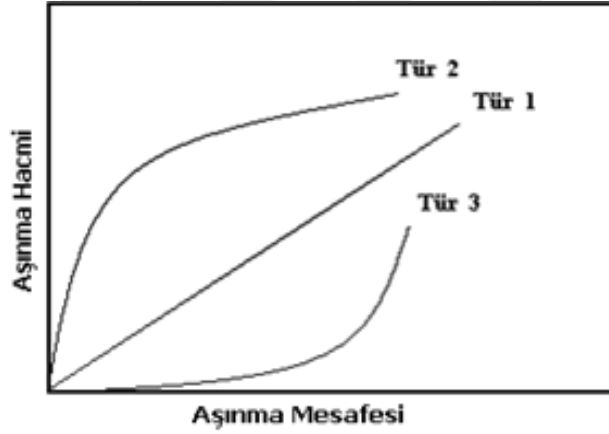
AISI	: American iron and steel institute
CO ₂	: Karbondioksit
dk	: dakika
EDS	: Energy Dispersive Spectroscopy
GPa	: Giga paskal
GaAs	: Galyum arsenik
GaP _x As _{1-x}	: Galyum fosfor arsenik
HB	: Brinell sertliği
HMK	: Hacim merkezli kübik
KCN	: Potasyum siyanür
KT	: Kompozit tabaka
MKG	: Mekanik karışım gösteren tabaka
NaCN	: Sodyum siyanür
SEM	: Scanning Elektron Microscopy
SEL	: Serbest elektron lazeri
TT	: Transfer tabaka
YAG	: Yttrium Alüminyum Garnet
YMK	: Yüzey merkezli kübik

BÖLÜM 1

GİRİŞ

1.1 Aşınma

Aşınma, temas eden yüzeylerden mekanik etkiler sebebiyle mikro parçacıkların ayrılması sonucunda malzeme toleranslarının bozulması ve parçaların fonksiyonlarını yerine getirememesi olayıdır. Aşınma olayı genellikle; hareket aktarım elemanı olarak kullanılan millerde, kaymalı ve rulmanlı yataklarda, fren balatalarında, motor pistonu ve silindirlere, dişlilerde ve türbin kanatlarında görülmektedir. Aşınma şiddeti, aşınma yüzey pürüzlülüğü ve aşınma parçacık şekli meydana gelebilecek aşınma hakkında bizlere bilgi vermektedir.



Şekil 1.1: Aşınma eğrileri (Yıldız ve Gür, 2006).

Yukarıdaki şekilde aşınma şiddeti eğrileri gösterilmektedir. 1. Tür, bütün işlemin başından sonuna kadar sabit bir aşınma oranını göstermektedir. 2. Tür, başlangıçtakinden yüksek bir aşınma oranından düşük bir orandaki sabit aşınmaya kadar olan geçişi göstermektedir. Aşınmanın bu tipi, metallerde oldukça sık gözlenir. 3. Tür, bu şekilde bir çatlama kırıklığı meydana getirmekle, başlangıçtaki aşınmanın düşük oranın yüksek bir orandaki aşınmaya, daha kötü bir geçişini göstermektedir.

Aşınma önceden gerekli önlemlerin alınabileceği bir hasar tipidir. Temasta olan yüzeylere yağlayıcı kullanmak, yüzey sertleştirme işlemlerinin uygulanması veya yüzeyde oksit tabakası oluşturarak aşınma sonucu meydana gelebilecek hasarlar önlenir. Aşınmayı,

malzemenin kristal yapısı, yüzey şekli ve boyutu, elastik modülü, yüzey sertliği, yüzey kalitesi, ortam sıcaklığı, nem miktarı, ortam basıncı, uygulanan kuvvetin büyüklüğü, şekli (statik, dinamik vb.) ve süresi gibi faktörler etkilemektedir (Yıldız ve Gür, 2006).

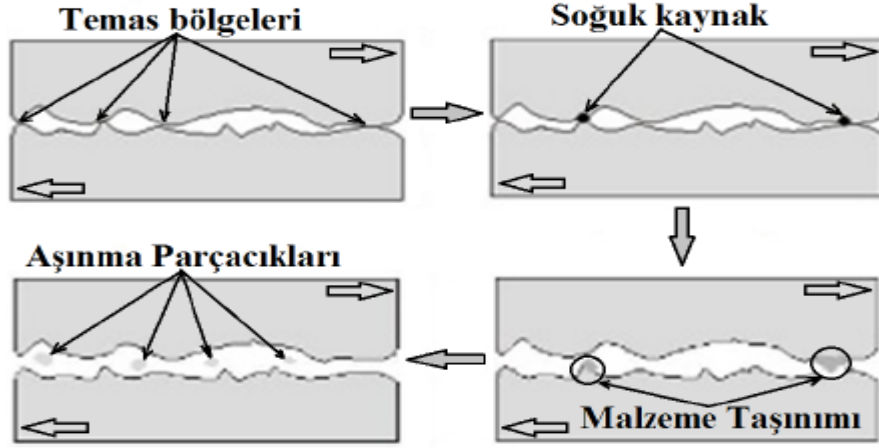
1.1.1 Aşınma Türleri

Aşınma bir malzeme özelliği değildir, bu bir sistem karşılığıdır. Aşınma, dinamik parametrelerin, çevresel parametrelerin ve malzeme parametrelerinin meydana getirdiği bir sürtünme sistemi içerisinde oluşur ve genellikle sürtünmeden dolayı ısınma ile hızlanır. Temel prensip katı malzemenin yüzeyden kopmasıdır. Bunlara bağlı olarak 5 tip aşınma mekanizması vardır. Bu mekanizmalar;

- Adhesiv Aşınma,
- Abrasiv Aşınma,
- Yorulma Aşınması,
- Korozif Aşınma,
- Erozyon Aşınmasıdır.

1.1.1.1 Adhesiv Aşınma

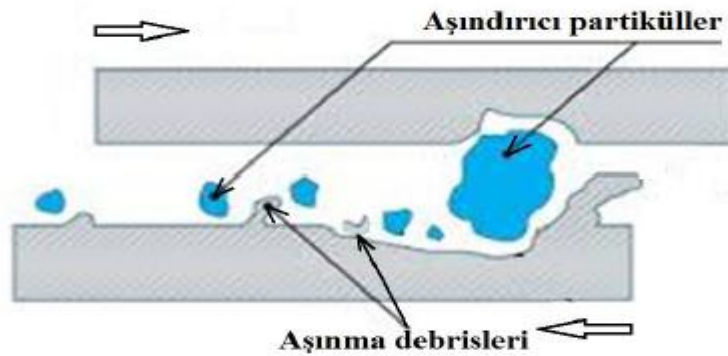
Adhesiv aşınma, birbirleriyle kayma sürtünmesi yapan yüzeylerde soğuk kaynak ya da bölgesel bağlanmalar sonucu bir yüzeyden diğerine malzeme transferi ve daha sonra kayma hareketi sonucunda malzeme kaybı şeklinde gerçekleşmektedir. Temas bölgeleri içindeki bu geniş deformasyon, bir çatlamanın başlamasına ve gerilmeyle çatlamanın kırılma şeklinde meydana gelmesine dolayısıyla kopmalar gerçekleşir ve malzeme kaybına neden olur. Bunların sonucunda meydana gelen aşınma türü de adhesiv aşınma olarak adlandırılır. Adhesiv aşınmaya karşı yüzey sertleştirme işlemleri ve yağlayıcı kullanımı önerilmektedir (Varol, 2016).



Şekil 1.2: Adhesiv aşınma (Varol, 2016).

1.1.1.2 Abrasiv Aşınma

Abrasiv aşınma, sert partiküllerinin veya sert çıkıntılarının katı bir yüzey boyunca hareket etmesi ve karşı koyulmasından dolayı oluşur. Diğer bir ifadeyle malzeme yüzeylerinin kendisinden daha sert olan parçacıklarla basınç altında etkileşmesi ile sert parçacıkların malzeme yüzeylerinden parçacık kaldırılması şeklinde tanımlanabilir. Kırılma tokluğu yüksek olan yumuşak metaller ve seramikler kayma esnasında sert parçacıklar tarafından plastik akışa uğratılır. Kırılma tokluğu düşük olan gevrek malzemelerde, yüzey pürüzlülüğü kırılması ile madde kaybına uğrarlar (Varol, 2016).

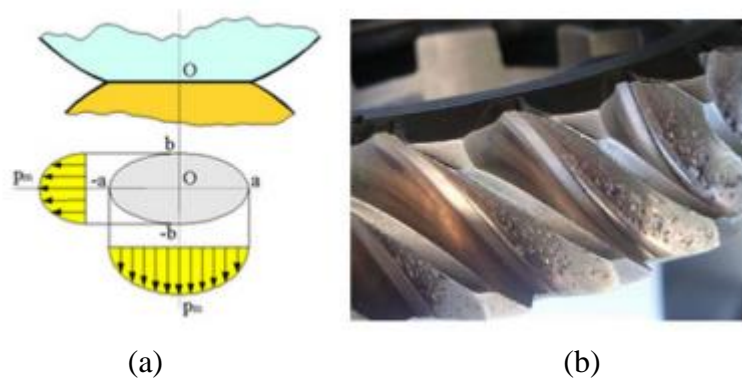


Şekil 1.3: Abrasiv aşınma (Varol, 2016).

1.1.1.3 Yorulma Aşınması

Adhesiv ve abrasiv aşınmada sürekli bir temas mevcut iken, çevrimsel bir temasın söz konusu olduğu durumlarda, farklı bir aşınma mekanizması ortaya çıkmaktadır. Bu tür çevrimsel temaslar sonucu oluşan aşınma türüne yorulma aşınması adı verilmektedir. Yorulma aşınması, dişli çarklar, rulmanlı yataklar ve kam mekanizmaları gibi birbirleriyle sürekli temas halinde olan yüzeylerde yaygın olarak görülen bir aşınma türüdür.

Bu tür çevrimsel temaslarda çevrim sayısı yüksek ise, yüksek çevrimli yorulma aşınması, çevrim sayısı düşük ise düşük çevrimli yorulma aşınmasının oluşması beklenmektedir. Dönen yapı elemanları için genellikle parçalar arasında elastik bir temas söz konusudur. Temas noktasında, ana aşınma mekanizması yüksek çevrimli yorulma aşınmasıdır. Temas altında ortaya çıkan gerilme, malzemenin akma dayanımından yüksek olmamasına rağmen, temas eden noktalardaki, boşluk, tane sınırı ve inklüzyonlar nedeniyle yerel olarak akma dayanımından yüksek gerilmeler oluşabilmektedir. Böyle durumlarda, düşük çevrimli yorulma aşınması meydana gelebilmektedir (Varol, 2016).

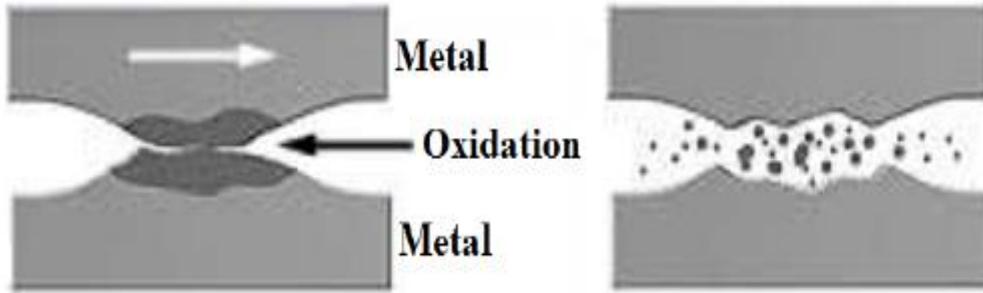


Şekil 1.4: Yorulma (pitting) aşınması; (a) temas yüzeyinde oluşan Hertz basınçları, (b) yüzeyin aşınma sonrası görüntüsü (Bağcı, 2010).

1.1.1.4 Korozi Aşınma

Korozi aşınma, kayma aşınmasının korozi ortamda meydana gelmesiyle oluşur. Havada en baskın korozi oksijendir. Bu sebeple, havadaki kimyasal aşınma genellikle oksidatif aşınma olarak adlandırılır. Korozyonun kimyasal ürünleri (örneğin oksitler), korozyonu yavaşlatan yüzeyde film oluşturur ve bu yüzey filminin oluşturduğu kimyasal reaksiyonlar yüzey

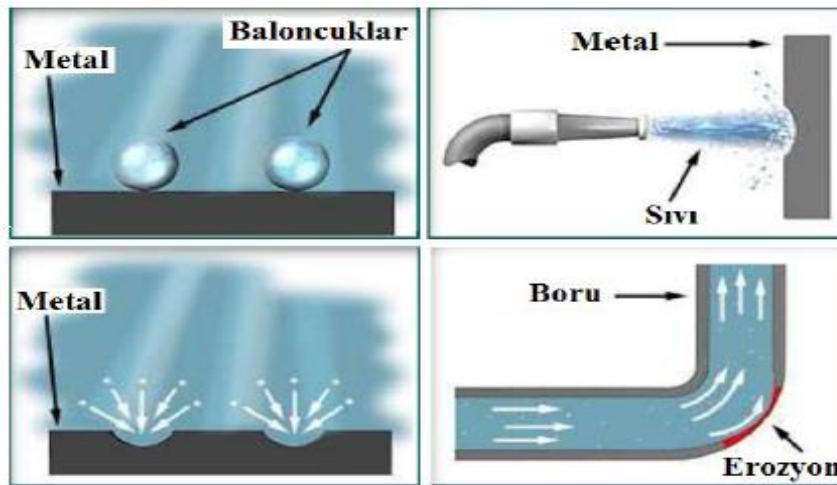
aşınmasını engelleyebilir. Fakat oluşan yüzey filmi kırılğan ve ara yüzey bağı zayıf ise, sürtünme esnasında filmler çatlayarak yüzeyden ayrılır ve aşınma hızı artar (Varol, 2016).



Şekil 1.5: Korozif aşınma (Varol, 2016).

1.1.1.5 Erozyon Aşınması

Erozyon aşınması, akışkan içerisinde bulunan aşındırıcı partiküller, yüksek hızla hareket eden sıvı damlacıkları ve yüksek hızdaki gaz kabarcıkları tarafından oluşturulan bir aşınma türüdür. Sıvılar ve gazlar akış esnasında temas halinde oldukları parçanın sınır yüzeylerine çarpma etkisi yaparak yüzeyden parçacıklar koparılır ve girdaplar etkisiyle dalgalı yüzey meydana getirirler. Böylece aşınma daha da hızlanır. Erozyon aşınması, gaz türbin bıçakları, pompa pervaneleri, boru ve tüplerin dirsek kısımlarında görülmektedir. Erozyon aşınması, diğerlerinden farklı olarak malzemenin dayanımına bağlı olmayabilir. Erozyon aşınması, partikülün çarpma açısı, çarpma hızı ve partikül boyutu gibi birçok parametreye bağlıdır (Varol, 2016).



Şekil 1.6: Erozyon aşınma türleri (Varol, 2016).

1.1.2 Aşınma Kaybı Ölçüm Yöntemleri

1.1.2.1 Ağırlık Farkı Metodu

Ekonomik olması sebebiyle en çok kullanılan yöntemdir. Deney numunelerinin her ölçümü için numunenin yerinden çıkartılıp ölçüm yapılması, yani numune yerindeyken üzerinden ölçü alınamaması bu yöntemi dezavantajıdır. Ağırlık veya aşınma kaybının ölçülmesi 10^{-3} - 10^{-4} gram hassasiyete sahip terazilerle ölçülmektedir. Aşınma miktarı gram veya miligram cinsinden ifade edilirse, metre veya kilometre olarak tespit edilen sürtünme yoluna göre, birim sürtünme yoluna karşılık gelen ağırlık kaybı miktarı, (gr/km), (mg/m) ile ifade edilebilir. Ağırlık kaybı birim alan için hesap edilecekse, (gr/cm^2) gibi bir birim kullanılabilir.

$$W_s = \Delta m / d F_n S = \Delta v / F_n S \quad (1)$$

Burada; W_s : Özgül aşınma miktarı (mm^3/Nm), Δm : Ağırlık kaybı (mg), d : yoğunluk (mgr/mm^3), Δv : Hacimsel malzeme kaybı, F_n : Uygulanan normal kuvvet (N) ve S : Aşınma mesafesi (m)'ni ifade etmektedir (Varol, 2016).

1.1.2.2 Kalınlık Farkı Metodu

Bu yöntemde aşınma miktarı, aşınma sonucunda meydana gelen boyut değişikliğinin ölçülmesi ve ilk değerler ile karşılaştırılması suretiyle belirlenmektedir. Elde edilen kalınlık farkı değerleri kullanılarak hacimsel kayıp değeri ve dolayısıyla birim hacimdeki aşınma miktarı bulunabilir. Bu yöntemde ölçüm hassasiyetini arttırmak için hassas kalınlık ölçü aletleri (+1 μm duyarlılıkta) ile ölçüm yapılmalıdır (Varol, 2016).

1.1.2.3 İz Değişim Metodu

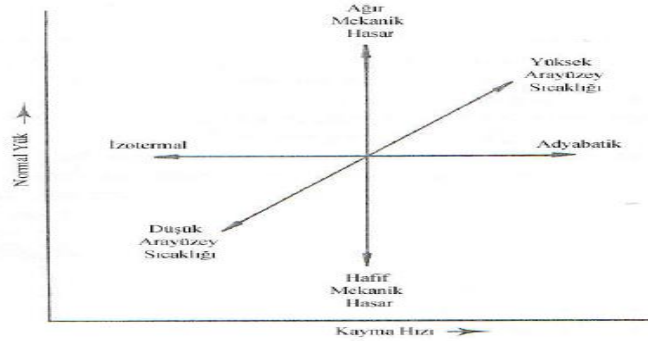
Sürtünme yüzeyinde plastik deformasyon metodu ile geometrisi belirli bir iz oluşturulur. Deney boyunca bu izin karakteristik bir boyutunun (çapının) değişimi ölçülür. Uygulamada iz bırakıcı olarak en çok kullanılan alet Vickers veya Brinell sertlik ölçme ucudur. Elmas

Piramit veya bilyanın bıraktığı iz boyutlarındaki değişme mikroskop vasıtasıyla ölçülerek belirlenir (Varol, 2016).

1.1.2.4 Kayma Aşınması

Kayma aşınması genellikle yüzeyde bir yağlayıcı kullanılarak yapılan bir aşınma türüdür. Ancak kayma aşınması yağlayıcı kullanılarak veya yağlayıcı kullanmadan (yağlamasız) yapılabilmektedir. Mühendislikte birçok uygulamada yağlayıcı kullanmadan atmosferik koşullarda kayma aşınması işlemi yapılabilmektedir. Bu kayma aşınma türüne de kuru kayma aşınması denir.

Metalik malzemelerde kuru kayma (yağlamasız) aşınması, yük, devir ve uygulanan kayma süresine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Uygulanan yükün, devirin ve sürenin artırılması durumunda yüzeyde daha fazla mekanik hasar oluşmaktadır. Mekanizmalardaki önemli kontrol faktörleri mekanik gerilmeler, sıcaklık ve oksidasyon durumudur. Kayma aşınmasının karmaşıklığı bu üç faktörün etkisinden kaynaklanmaktadır (Bağcı, 2005).



Şekil 1.7: Normal yük ve kayma hızının metallerdeki kayma aşınması prosesine etkisi (Bağcı, 2005).

Yük ve devir ara yüzey sıcaklığına etki etmektedir. Kayma hızının düşük olması iki yüzey arasındaki sıcaklık iletiminin daha hızlı olmasına neden olur. Sıcaklık iletiminin fazla olması da ara yüzey sıcaklığının düşmesine neden olur. Dolayısıyla kayma prosesi izotermal olur. Kayma hızının yüksek olması durumunda ise, iki yüzey arasındaki sıcaklığın daha yavaş ve sınırlı iletilmesine neden olur. Buna bağlı olarakta proses adyabatik olur.

Metallerin kayma aşınması prosesinin yorulma aşınması prosesine benzetilmesine rağmen bu yaklaşımın geçerliliği tam olarak kanıtlanamamıştır. Çünkü aşınmadaki çatlak, yorulma

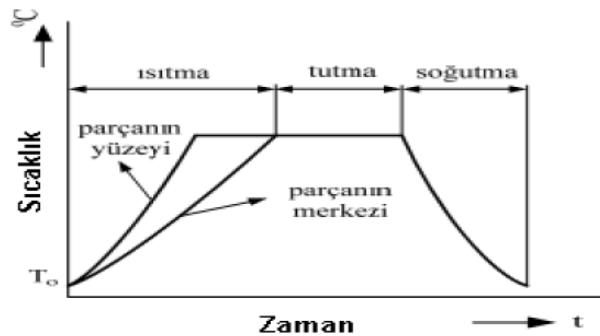
verileri elde etmek için kullanılan çatlaktan daha kısadır veya yüzey malzemesi yorulma testlerinde kullanılan malzemenin tamamından daha farklıdır (Bağcı, 2005).

1.2 Isıl İşlem

Isıl işlem, katı haldeki metal ve alaşımlara istenilen özellikleri kazandırmak için uygulanan ısıtma-soğutma işlemlerinin tümüne verilen addır. Çeliklere uygulanan ısıl işlemin amacı;

- Karbon miktarını artırarak yapıdaki sertlik ve mukavemeti arttırmak,
- Yapıdaki düzensizlikleri gidererek daha homojen bir yapı (mikro segregasyon) elde etmek,
- Kimyasal bileşimi değiştirmek,
- Tane boyutunu küçültmek,
- Kristal kafes yapısını değiştirmek,
- Talaş kaldırma işlemini iyileştirmek,
- Sert olan malzemeyi yumuşatma,
- Isıya ve korozyona karşı dayanımı arttırmak,
- Soğuk şekillendirme sonrasında yapıda meydana gelen segregasyonların giderilmesi,
- Kimyasal maddelere ve dış etkenlere karşı dayanımı arttırmaktır.

Çeliklerin iç yapısında meydana gelen dönüşümler, çeliklerin fiziksel ve mekanik özelliklerini büyük ölçüde etkiler. Çeliklere uygulanan ısıl işlemler genellikle iki ana grupta toplanır. Bunlar tavlama ve sertleştirmedir (Kesti, 2009).



Şekil 1.8: Isıl işlemde sıcaklık-zaman diyagramı (Kesti, 2009).

Her ısıl işlemde belirli aşamalar bulunmaktadır. Bunlar belirli bir sıcaklığa kadar ısıtma, bu sıcaklıkta tutma ve sonrasında istenilen yapının elde edilmesi için soğutma işlemidir.

1.2.1 Çeliklerde Tavlama İşlemi

Çeliklerde soğuk ve sıcak işlem sonrası yapıda meydana gelen segregasyonları ve sertleştirme sonrası oluşan gerilim ve çarpılmaları gidermek için tavlama işlemi uygulanmaktadır. Tavlama işlemi de kendi arasında ikiye ayrılmaktadır. Bunlar 1.tür tavlama (homojenleştirme, tane irileştirme, gerilim giderme, rekristalizasyon) ve 2 tür tavlama (normalizasyon, yumuşatma, küreselleştirme) işlemleridir. Tavlama işlemi genellikle tav fırını denilen fırınlarda yapılmaktadır.

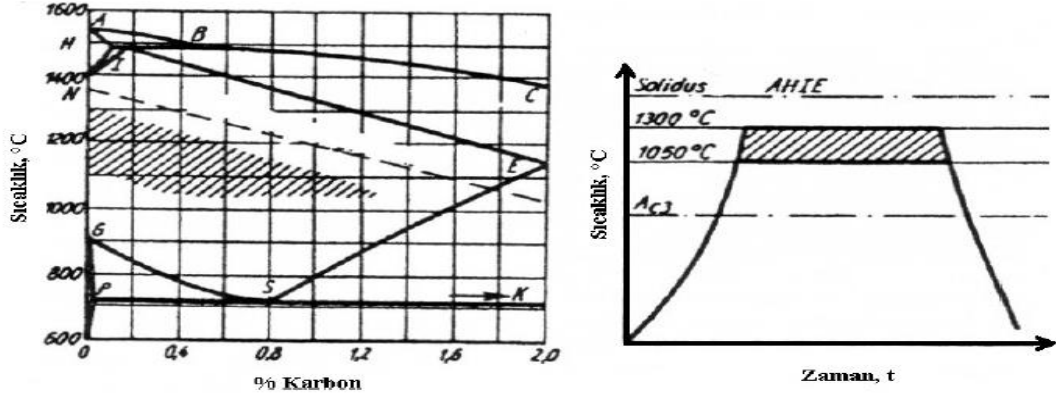


Şekil 1.9: Tavlama fırını.

1.2.2 1.Tür Tavlama İşlemleri

1.2.2.1 Homojenleştirme Tavı

Homojenleştirme tavı, çeliklerin içerisinde çözünen bileşiklerin neticesinde iç yapıda oluşabilecek kimyasal bileşim farklılıklarını gidermek amacıyla uygulanan bir tavlama işlemidir.

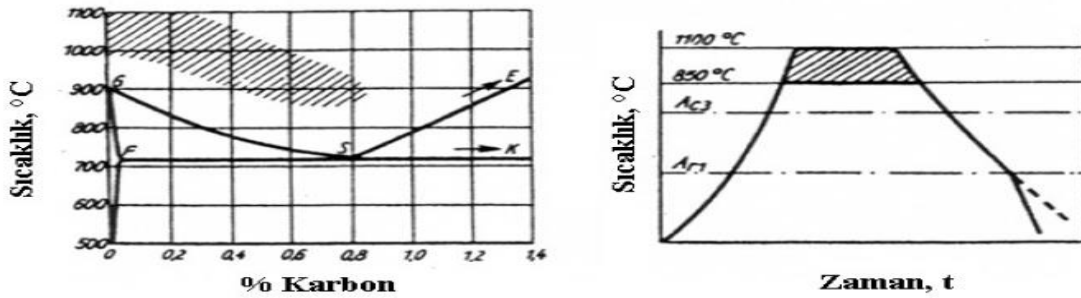


Şekil 1.10: Homojenleştirme tavı ısıl işlem diyagramı (Kesti, 2009).

Çeliklerin iç yapısındaki mikro segregasyonların giderilmesi için malzemenin içerisindeki karbon oranına bağlı olarak 1000 °C ile 1300 °C arasında yaklaşık 50 saat boyunca tavlama işlemi gerçekleştirilir. Artan sıcaklık tane sınırlarını ve tane sayısını azalttığından tane irileşmesine neden olur. Bu yüzden genellikle homojenleştirme tavı işleminin sonrasında tane boyutunu küçültmek için parçaya normalizasyon işlemi uygulanır. Malzeme içerisinde çözünebilen bileşikler tane sınırlarından tane içlerine doğru yayılır. Malzeme içerisinde çözünemeyen bileşikler ise (karbürler, oksitler, nitrürler) küresel bir biçim alırlar. Böylelikle çeliklerde istenilen özelliklerin iyileştirilmesi sağlanır (Kesti, 2009; Güleç ve Aran, 1995).

1.2.2.2 Tane İrileştirme Tavlaması

Tane irileştirme tavlaması, düşük karbonlu (%0,3 veya daha az karbon içeren) çeliklerde yumuşatma ve talaşlı şekillendirme özelliklerini arttırmak amacıyla uygulanan işlemdir.



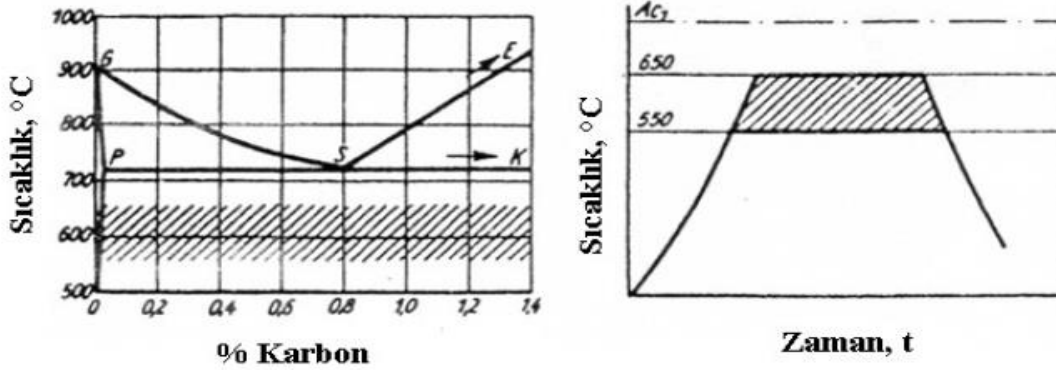
Şekil 1.11: Tane irileştirme tavlaması ısıl işlem diyagramı (Kesti, 2009).

Tavlama işlemi östenitleştirme bölgesinde 950° C ile 1100 °C arasında ısıtılır ve alt dönüşüm noktası olan Ac₁ sıcaklığına kadar yavaşça soğutulur. Bu işlem sonucunda iri tane yapısına sahip olan bir çelik elde edilir (Kesti, 2009; Güleç ve Aran, 1995).

1.2.2.3 Gerilim Giderme Tavlaması

Döküm, kaynak, sertleştirme, soğuk şekillendirme, eğme, tornalama, frezeleme gibi işlemlerde ve dönüşüm olayları sonucunda parça yapısında gerilimler meydana gelir. Oluşan bu gerilmeler sertliğin bölgesel olarak dağılmasına neden olur. Bunların sonucunda da parçada çarpımalara ve en sonunda çatlamalara sebep olur. Söz konusu olan bu gerilmelerin ortadan kaldırılması için de gerilim giderme tavlaması işlemi uygulanır.

Çeliklerde gerilim giderme tavlaması, faz dönüşüm sıcaklığına çıkmadan yani yapıda dönüşüm gerçekleştirilmeden 550° C ile 650° C sıcaklıkları arasında 1-2 saat tutularak yapılmaktadır. Ancak soğutma işleminin yavaşça yapılması gerekmektedir aksi takdirde gerilimler yeniden oluşabilir (Kesti, 2009; Güleç ve Aran, 1995).

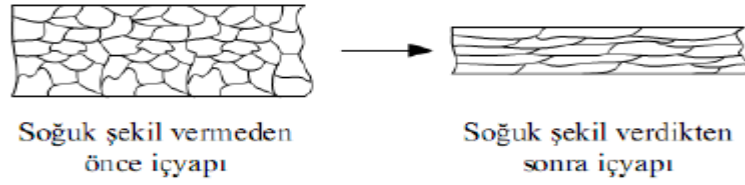


Şekil 1.12: Gerilim giderme tavlaması ısıl işlem diyagramı (Kesti, 2009).

1.2.2.4 Rekrizalizasyon (Yeniden Kristalleşme) Tavlaması

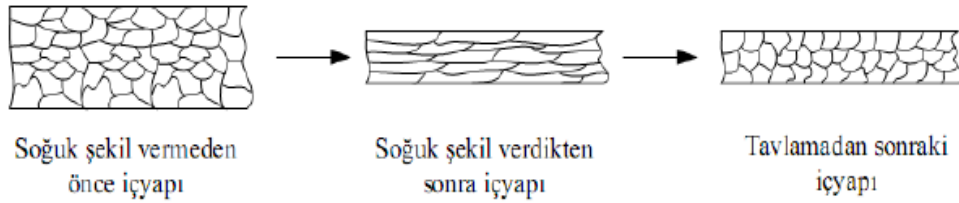
Malzemede soğuk şekillendirme işlemi sonrası dislokasyon yoğunluğu, dayanım ve sertlikte artış meydana gelirken süneklik ve şekil alma kabiliyetlerinde azalma meydana gelmektedir. Bunların sonucunda da malzeme gevrek davranış göstereceğinden yapıda çatlama ve devamında da kırılmalar gözlenebilir. Ayrıca soğuk şekillendirme işlemi görmüş

malzemenin kristal tane yapısı bozulur ve tanelerdeki uzama şekil değiştirme yönüne doğru olur.



Şekil 1.13: Soğuk işlem öncesi ve sonrası malzemenin kristal tane yapısı (Kesti, 2009).

Malzemede meydana gelebilecek bu hasarı önlemek için malzemeyi gevrek davranıştan sünek davranışa dönüştürmek gerekir. Bu dönüşüm de yeniden kristalleşme tavlaması ile yapılmaktadır. Tavlama işlemi herhangi bir yapı dönüşümü olmaksızın 500 °C'nin üzerindeki bir sıcaklıkta genellikle 600-700 °C'de yapılmaktadır. Yapılan tavlama işlemi ile içyapı yeniden kristalleşir ve oluşan taneler uzamış tanelerin yerini alır. Böylece dislokasyon yoğunluğu azaltılarak malzemeye süneklik kabiliyeti tekrar kazandırılır.



Şekil 1.14: Yeniden kristalleşme tavlaması sırasında kristal yapısındaki değişim (Kesti, 2009).

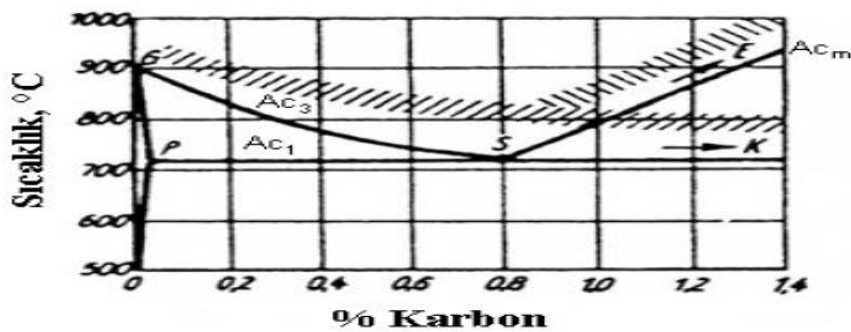
Yeniden kristalleşme işlemine proses değişkenleri ve malzeme değişkenleri etki etmektedir. Yeniden kristalleşmeye etki eden proses değişkenleri; deformasyon oranı, sıcaklığı ve hızı ve tavlama sıcaklığı ve süresidir. Malzeme değişkenleri ise; alaşım elementi oranı ve cinsi, alaşım elementlerinin dağılımı, başlangıç tane boyutudur (Kesti, 2009; Güleç ve Aran, 1995).

1.2.3 2. Tür Tavlama İşlemleri

1.2.3.1 Normalizasyon Tavı

Soğuk şekillendirme, sıcak haddeleme, döküm, çelik ile kaynak edilerek üretilen iş parçalarında tane büyümesi meydana gelir. İri taneli çelik yapısının şekil değişimi meydana gelmeden kopmaya karşı eğilimi vardır. Bu nedenle daha küçük taneli ve üniform (homojen) bir iç yapı ve mekanik özellikleri iyileştirmek için normalizasyon tavı işlemi uygulanmaktadır.

Normalizasyon tavı işleminde ötektoid altı çeliklerde A_{c3} , ötektoid üstü çeliklerde ise A_{cm} dönüşüm sıcaklıklarının 40-50 °C üzerindeki sıcaklıklarda ısıtılır. Bu sıcaklıklarda iç yapı tamamen dönüşüme uğrayana kadar bekletilir. Ancak normalizasyon tavı işleminde ısıtma işlemi yüksek hızda yapılmamalıdır. Düzensiz ısıl genleşme nedeni ile çatlak oluşuma neden olur. Bu sebeple ısıtma işlemleri için tav fırınları kullanılmaktadır. Dönüşüm işlemi gerçekleştikten sonra parça hızlı soğutma ile basınçlı ya da basınçsız hava ortamında soğutulur. Normalizasyon tavı sonrası ince taneli ferritik ve perlitik bir iç yapı elde edilir. İnce taneli ferrit ve perlit bir iç yapının oluşturulmasının nedeni, ferrit kristalleri yumuşak, perlit kristalleri ise serttir. Bu durumda parçada kırılmaya neden olur. Normalizasyon tavı işlemi uygulanarak hem ferrit kristalleri hem de perlit kristalleri tek bir yapı içerisinde bulundurulur (Kesti, 2009; Güleç ve Aran, 1995).



Şekil 1.15: Normalizasyon tavı ısıl işlem diyagramı (Kesti, 2009).

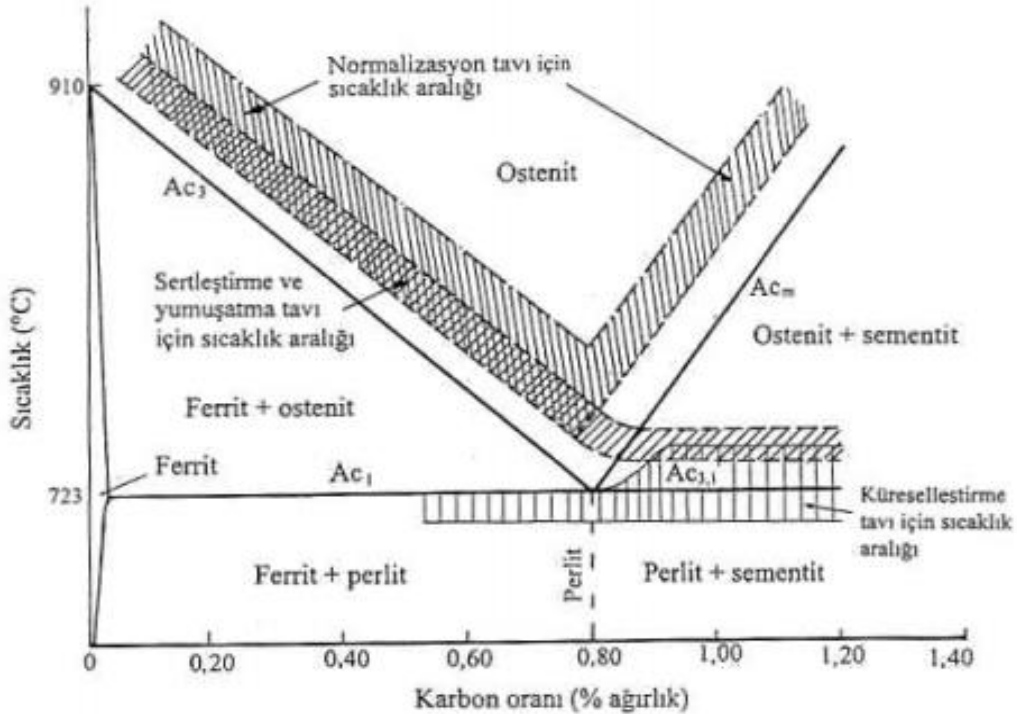
Normalizasyon tavı işleminin yapılma amaçları:

- Daha ince taneli bir yapı oluşturmak ve homojen bir iç yapı elde etmek,
- Çeliklerin mekanik özelliklerini iyileştirmek,

- Yumuşatma tavlama uygulanmış çeliklerin sertlik ve mukavemetini arttırmak,
- Ötektoid üstü çeliklerin tane sınırlarındaki karbür ağını dağıtmak için uygulanmaktadır.

1.2.3.2 Yumuşatma Tavlama

Yumuşatma tavlama, genel anlamda sertleştirme işleminin dışında malzemenin iç yapısında değişimlere neden olarak malzemenin sertliğini azaltmak, talaşlı imalat işlemini kolaylaştırmak ve döküm parçalarındaki iç gerilmenin giderilmesini sağlamaktadır. Yumuşatma tavlama, karbon oranı %0,4 ya da daha fazla karbon ihtiva eden çeliklere uygulanmaktadır. Bu işlem ötektoid altı çeliklerde Ac_3 sıcaklık çizgisi, ötektoid üstü çeliklerde ise Ac_1 sıcaklık çizgisi üzerindeki belirli sıcaklıklara kadar ısıtılmasıyla gerçekleştirilir. Isıtılma işleminde malzemenin iç yapısı östenit fazına dönüştürülür. Dönüşüm işlemi gerçekleştikten sonra malzeme çok yavaş bir şekilde fırın içinde soğutulmalıdır. Yumuşatma tavlama işlemi ile malzemenin tane boyutu küçültür ve ayrıca elektrik ve manyetik özellikleri iyileştirilir (Kesti, 2009; Güleç ve Aran, 1995).



Şekil 1.16: Alaşımız çeliklere uygulanan normalizasyon, yumuşatma ve küreselleştirme işlemleri için tavlama sıcaklıkları.

1.2.3.3 Küreselleştirme Tavı

Küreselleştirme tavı %0,5'ten daha çok karbon ihtiva eden çeliklere uygulanmaktadır. İşlemin amacı, talaşlı imalat, haddeleme, bükme ve eğme gibi işlemler öncesinde çeliklere sünek bir hal kazandırmaktır. Küreselleştirme tavında çelikler A_{c1} sıcaklık çizgisinin üzerindeki bir sıcaklıkta uzun süre tutularak iç yapı östenit faza dönüştürülür. Dönüşüm işlemi tamamlandıktan sonra yavaş ve kontrollü bir şekilde soğutularak karbürlerin küresel şekle dönüştürülmesi sağlanır. Ayrıca ötektoid üstü çeliklerin iç yapısında bulunan sert ve gevrek sementit tanelerinin işlemeyi zorlaştırır. İşlemeyi kolaylaştırmak ve sünek bir yapı elde etmek amacıyla da küreselleştirme tavı uygulanmaktadır.

Küreselleştirme tavında yapılan yüksek sıcaklıktaki tavlama neticesinde çeliğin içerisinde perlitik yapı ile sementit ağı dağılarak parçalanır. Bunun sonucunda yapı içerisinde ferritik bir yapı ve küresel forma dönüştürülmüş karbürler bulunur (Kesti, 2009; Güleç ve Aran, 1995).

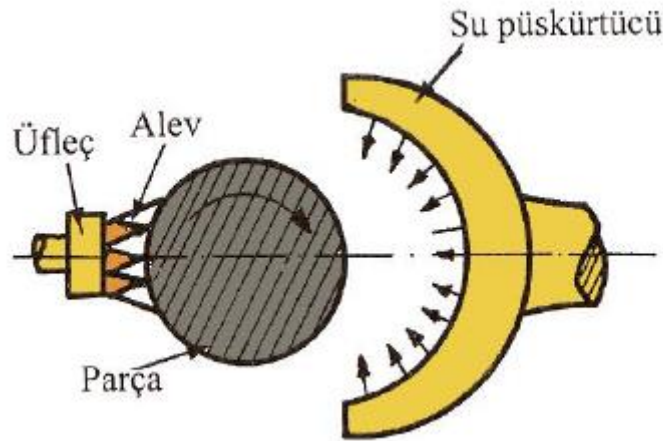
1.2.4 Yüzey Sertleştirme Yöntemleri

Yüzey sertleştirme işlemleri, yüzeyde sert ve aşınmaya dayanıklı, iç yapı da ise yumuşak ve tok özelliklerin istendiği, değişken ve darbeli zorlanmalara karşı dayanıklı parçalar elde etmek için uygulanan ısı işlemlerdir. Çeliklere uygulanan yüzey sertleştirme işlemleri sementasyon, Nitrürasyon, alevle yüzey sertleştirme ve endüksiyon akımı ile yüzey sertleştirme olmak üzere dört gruba ayrılmaktadır. Bu işlemler de kendi içerisinde gruplara ayrılır. Bunlar, malzemenin kimyasal yapısını değiştirmeden yapılan yüzey sertleştirme işlemleri (alevle ve endüksiyon akımı ile yüzey sertleştirme) ve malzemenin kimyasal yapısını değiştirerek yapılan yüzey sertleştirme işlemleridir (sementasyon ve Nitrürasyon). Ayrıca yüzey sertleştirme işlemleri karbon oranları düşük olan çeliklere uygulanmaktadır (Kesti, 2009; Güleç ve Aran, 1995).

1.2.4.1 Malzemenin Kimyasal Yapısını Değiştirmeden Yapılan Yüzey Sertleştirme Yöntemleri

Alevle Yüzey Sertleştirme İşlemi

Alevle yüzey sertleştirme işlemi %0,4-0,8 arasında karbon ihtiva eden çeliklere uygulanmaktadır. Alevle yüzey sertleştirme işleminde oksijen-yanıcı gaz kullanılır. Bu yöntemde kullanılan oksijen-yanıcı gaz sayesinde kısa sürede yüksek sıcaklığa çıkılmaktadır. Yanıcı gaz olarak genellikle asetilen veya hava gazı kullanılır. Bunların yanında likit petrol gazı, doğal gaz, propan veya metan da kullanılmaktadır. Bu yöntemde yapılan işlem yakıcı gaz olan oksijen ile yanıcı gazlardan biri kullanılarak oluşturulan yaklaşık 3000 °C 'deki alev bir üfleç yardımı ile malzeme yüzeyine tatbik edilerek ısıtılması sağlanır. Östenitleme sıcaklığına getirilen malzeme su, tuz çözeltisi veya hava kullanılarak soğutulur. Sertleştirilen tabakanın derinliği 1-6 mm arasında değişmektedir (Güleç ve Aran, 1995).



Şekil 1.17: Alevle yüzey sertleştirme prensibi.

Alevle yüzey sertleştirme işleminde uygulanan ısıtma ve soğutma işlemleri malzemenin boyutuna ve kimyasal yapısına göre farklılıklar gösterebilir.

Alevle yüzey sertleştirmede malzemenin ince veya kalın kesitli olmasına bağlı olarak alev ayarı yapılmalıdır. İnce kesitli parçalara uygulanacak alev, kalın kesitli parçalara uygulanacak alevle göre daha az olmalıdır. Sertleşme derinliği, üfleç alevine ve parçanın kalınlığına bağlı olarak değişir. Uygulanan üfleç alevine göre parça kalınlığı düşükse ısıtılan malzemenin çekirdeğinde ısınma meydana gelebileceğinden sertleşme derinliği daha büyük

olur. Bunların dışında alevin ilerleme hızı da çok önemlidir. Sertleştirme yapılacak bir iş parçası için hazırlanan alev gereğinden daha hızlı bir şekilde yüzeye tatbik edilirse malzeme yüzeyinde normal ısınma (tavlama) oluşmayacağından soğutma esnasında istenilen sertleşmenin oluşması mümkün olmayabilir. Eğer malzemeye uygulanan alevin ilerleme hızı, malzeme kalınlığına göre gereğinden çok düşük olursa malzemenin iç yapısında doğrudan ısınma olacaktır. Soğutma esnasında bu iç yapılarda da sertleşme meydana gelir. Halbuki alevle yüzey sertleştirmedeki amaç, malzeme iç yapısının aynı özellikte tutulup sadece yüzeyinin sertleştirilmesidir (Güleç ve Aran, 1995).

Endüksiyon Akımı ile Yüzey Sertleştirme İşlemi

Endüksiyon akımı ile yüzey sertleştirme işlemi, elektrik akımı kullanılarak parçanın ani olarak ısıtılması ve soğutulması sonucunda parçanın kimyasal yapısında herhangi bir değişim olmaksızın parça yüzeyine uygulanan işlemdir.

Endüksiyon akımı ile yüzey sertleştirme işleminde yüksek frekanslı alternatif akımın geçeceği ve parçanın yüzeyini sıkıca saran bir bobin kullanılmaktadır. Bu bobin sayesinde manyetik bir alan elde edilir. Oluşan yüksek frekanslı akımlar metalin yüzeyinde hareket eder. Metalin bu akımlara karşı gösterdiği direnç nedeniyle parça yüzeyi ısınır. Yüzey ısıtma için gerekli olan alternatif akımın frekans aralığı 1.000 – 500.000 Hz arasındadır.

Endüksiyon akımı ile yüzey sertleştirme işleminde yüzey ısıtma işlemi gerçekleştirildikten sonra ani soğutma işlemi yapılarak parça soğutulur. Soğutma işlemi genellikle su kullanılmakla birlikte yağda kullanılabilir. Ayrıca işlem süresinin kısa olması çatlama, çarpılma ve tane büyümesi gibi durumlara engel olmaktadır.

Endüksiyon akımı ile yüzey sertleştirme işlemi, 0,35 ile 0,60 oranında karbon ihtiva eden orta karbonlu çeliklere uygulanmaktadır. Uzun miller, dişliler, kamalar vb. parçaların yüzeyleri bu yöntem ile sertleştirilebilmektedir (Güleç ve Aran, 1995).

1.2.4.2 Malzemenin Kimyasal Yapısını Değiştirerek Yapılan Yüzey Sertleştirme Yöntemleri

Sementasyon (Karbonlama)

Sementasyon işlemi düşük karbonlu çeliklerden üretilmiş parçalara uygulanmaktadır. Sementasyon diğer bir adıyla karbonlama olarak bilinen bu işlem genellikle %0,2'den daha az karbon içeren çeliklere uygulanmaktadır. %0,2 ve altında karbon içeren çelikler sertleştirilemezler bu nedenle öncelikle karbon oranının arttırılması amaçlanır ardından yüzey uygun ortamda sertleştirilir.

Sementasyon işleminde, parça yüzeyine karbon emdirilerek karbon oranının arttırılması sağlanmaktadır. Karbonun emdirilebilmesi için Ac_3 sıcaklık çizgisinin üzerindeki sıcaklıklara ısıtılarak ($850^{\circ}C - 980^{\circ}C$) östenit kafes içerisinde karbonun çözünmesi sağlanır. Yüzeydeki karbon oranı arttırılırken dikkat edilmesi gereken nokta ise, sürekli sementit ağının oluşmasını engellemektir. Bunun içinde yüzeye emdirilen karbon oranı %0,8'in altında tutulmaktadır.

Sementasyon işleminde yüzey sertleştirme işlemi için katı sementasyon, sıvı sementasyon ve gaz sementasyon yöntemlerinden faydalanılmaktadır. Yüzeyin karbonca zenginleştirilebilmesi için katı ortamdan; odun kömürü, meşe kömürü, kok kömürü, linyit kömürü, kemik kömürü, boynuz talaşı ile gaz ortamdan; etan gazı, metan gazı, hava gazı, asetilen ile sıvı ortamdan; sodyum siyanür, sodyum klorür, sodyum karbonat, potasyum siyanür ve kalsiyum siyanür ortamları kullanılmaktadır.

- ❖ Katı sementasyon işleminde; iş parçalarına karbon emdirilmesi krom ve nikelden yapılmış ve içerisine hava almayan kapalı kutular içinde $900^{\circ}C$ ile $950^{\circ}C$ 'de uzun bir süre tavllanır. Bu karbon emdirilme işlemi sırasında karbürleyici olarak genellikle odun kömürü kullanılmaktadır. Ancak odun kömürünün ısı iletimi düşük olduğu için tavlama işlemi uzun sürer. Buna bağlı olarak tane büyümesi görülmektedir. Bu tane büyümesini engellemek amacıyla karbon emdirilmesi işlemi bittikten sonra tekrar tavlama işlemi yapılmaktadır. Gaz oluşumunu kolaylaştırmak içinde baryum oksit, baryum karbonat ve kalsiyum karbonat gibi aktivasyon maddeleri kullanılmaktadır. Tavlama işlemi bittikten sonra parça kutu içerisinde soğumaya bırakılır. Parça soğutulduktan sonra ise sertleştirme işlemi gerçekleştirilir.

- ❖ Sıvı sementasyon işleminde; iş parçalarına karbon emdirilmesi için sodyum siyanür (NaCN) ve potasyum siyanür (KCN) içeren tuz banyoları kullanılmaktadır. Fırın içerisine konulan sodyum siyanür ve potasyum siyanür tuzları ergiyik hale getirilerek bir tuz banyosu oluşturulur. Tuz banyosu içerisindeki iş parçasının, sodyum siyanür ve potasyum siyanürün 850°C - 950°C 'de reaksiyona girmesi sonucu parçalanarak yüzeyine karbon emdirilir. Ayrıca tuz banyosu içerisinde karbonun iş parçası yüzeyine daha çabuk emdirilmesini sağlamak amacıyla baryum klorür veya stronsiyum klorür gibi aktivasyon maddeleri kullanılmaktadır. Katı sementasyon işleminde kullanılan karbürleyiciye göre, tuz banyosunun ısı iletimi daha fazla olduğu için işlem süresi daha kısadır. Buna bağlı olarak çarpılma ve tane büyümesi ihtimali azalmaktadır. Yöntemin dezavantajı tuzlar zehirli olduğu için kuru tutulmalıdır. Sıvı sementasyon işleminde yapılan karbon emdirme işleminden sonra sertleşme işlemi yapılmadan önce 300°C - 600°C 'de ön tavlama işlemi gerçekleştirilir. Ön tavlama işleminin yapılmasının amacı, tuz banyosu içinde ısıtma sırasında sıcaklık değişiminin hızlı olmasından dolayı parçada gerilme oluşmasını önlemek veya azaltmaktır.
- ❖ Gaz sementasyon işleminde; iş parçalarına karbonca zenginleştirilme işlemi yapılması için katı sementasyon yönteminde olduğu gibi hava almayan kutular (fırınlara) içerisinde 850°C - 950°C 'de karbon verici gaz karışımları kullanılmaktadır. Karbon verici gaz ortamları; doğal gaz, propan, metan gazı, etan gazı, hava gazıdır. Bu gaz ortamlarından yaygın olarak kullanılan metan gazıdır. Metan gazı yüksek sıcaklıklarda parçalanarak demire karbon verir. Metan gazının parçalanmasını kolaylaştırmak ve karbonu, karbon monoksit (CO) haline dönüştürmek için gazla birlikte havada kullanılır. Bu işlem 1000°C 'deki jeneratörlerde yapılır. Gaz jeneratörden geçtiğinde metan (CH_4) gazının yanında az oranda karbon monoksit (CO) ve hidrojen (H_2) içerir. Sonuç olarak iş parçasını karbonca zenginleştirmek için gaz karışımları ve ısı aracılığı ile tavladıktan sonra kendi halinde su veya yağ kullanılmadan soğutulmaya bırakılmaktadır. Ardından karbon oranı arttırılmış olan iş parçası tekrar tavlانیp soğutulularak sertleştirilmesi sağlanır.

Nitrürasyon (Nitrürleme)

Nitrürasyon işlemi azotun çelik yüzeyine difüzyonu sonucunda yapılan bir yüzey sertleştirme yöntemidir. Nitrürasyon işlemi alüminyum, krom, vanadyum, molibden, titanyum gibi nitrür oluşturacak elementleri içeren çeliklere (düşük alaşımlı çelikler, sıcak iş takım çelikleri, takım çelikleri) uygulanır.

Nitrürasyon işlemi öncesinde sertleştirilecek olan parçanın yüzeyi temizlenmeli yüzeyde toz bulunmamalıdır. Parçaya uygulanacak olan bütün mekanik işlemlerin yapılmalıdır. Parça hazırlık evresi bittikten sonra 480°C - 550 °C'deki fırın içerisinde amonyak gazı ortamında veya yine aynı sıcaklık aralığındaki tuz banyolarında uzun bir süre bekletilerek yüzeyde aşınmaya dayanıklı sert bir tabaka oluşturulur. Bu işlemde sertleştirilmesi istenmeyen bölgeler ise kalay tabakası kullanılarak kapatılmalıdır.

Nitrürasyon işleminde amonyak verilen sıcaklık değerleri arasında azot ve hidrojene ayrışır. Bu ayrışma sonucu açığa çıkan azot çelik yüzeyine difüzyon ile yayılır.



Difüzyon işlemi gerçekleştikten yüzeyde aşınma ve korozyona dayanıklı çok sert bir nitrür tabakası oluşturulmuş olur. Nitrürasyon işleminin en önemli avantajı işlem sonunda parçanın tavlansız olarak yüzey sertleştirilmesine ihtiyaç duyulmamasıdır. Çünkü Nitrürasyon işlemi sonucunda elde edilen sertlik yeterlidir. Bu işlemin dezavantajı ise uygulanma süresinin uzun olmasıdır. Örneğin; 0,35 mm nitrür tabakası elde etmek için parçayı fırında ve amonyak gazı içinde yaklaşık 20 saat kadar bekletmek gerekir.

1.3 Çeliğin Tanımı ve Çelik Üretim Yöntemleri

Çelik, ham demirin çeşitli işlemler ile arındırılması sonucunda kimyasal yapısında maksimum %2 oranında karbon, %1 oranında mangan, %0,5 oranında silisyum ve %0,05'ten daha az oranda kükürt ve fosfor içeren bir demir-karbon alaşımıdır. Ancak çeliğin kimyasal yapısındaki yüksek orandaki karbon miktarı ve yüksek orandaki diğer elementler çeliğin mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkileyerek daha dayanıksız ve kırılabilir yapar. Bu olumsuzlukları ortadan kaldırmak amacıyla çeliğe krom, molibden, kobalt, nikel,

tungsten, vanadyum gibi alaşım elementleri üretim aşamasında eklenerek mekanik özellikleri iyileştirilir (Kesti, 2009).

Tablo 3.1: Ham demir ve çeliğin kimyasal kompozisyonları (Kesti, 2009).

Elementler	%C	%Si	%Mn	%P	%S
Ham Demir	3,60	0,40	0,60	1,90	0,05
Çelik	0,17	0,20	0,20	0,3	0,3

Çelikleri sahip oldukları özelliklere göre sınıflandırmak mümkündür. Bu sınıflandırma aşağıdaki gibi yapılabilmektedir. Bunlar;

- Bileşimlerine göre çelikler;
 - Yüksek alaşımlı çelikler,
 - Sade karbonlu çelikler,
 - Düşük ve orta alaşımlı çeliklerdir.
- Ana katkı maddesine göre çelikler;
 - Vanadyumlu çelikler,
 - Kromlu çelikler,
 - Karbonlu çelikler,
 - Manganlı çelikler,
 - Nikel çelikler,
 - Krom-nikel çelikler,
 - Tungstenli çeliklerdir.
- Kullanım alanlarına göre çelikler;
 - Paslanmaz çelikler,
 - Yay çelikleri,
 - Takım çelikleri,
 - Yapı çelikleri,
 - Soğuk ve sıcak iş çelikleri,
 - Yüksek hız çelikleridir.

- Fiziksel ve kimyasal özelliklerine göre çelikler;
 - Korozyona dayanıklı çelikler,
 - Isıya dayanıklı çelikler,
 - Manyetik çelikler,
 - Paslanmaz çeliklerdir.

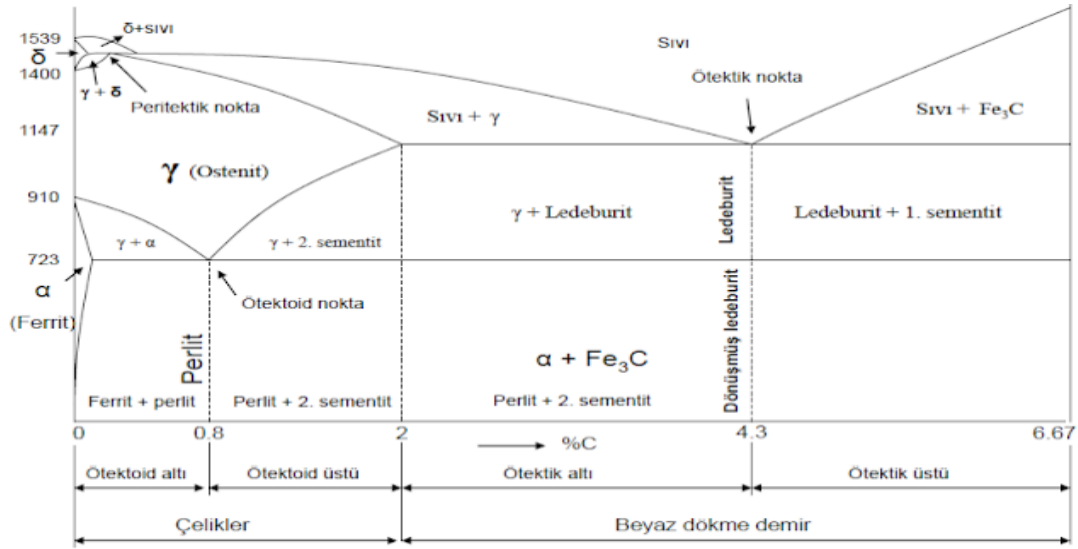
- Üretim metotlarına göre çelikler;
 - Oksijenli konverter çelik üretimi,
 - Bessemer-Thomas çelik üretim yöntemi,
 - Simens-Martin çelik üretim yöntemleri,
 - Pota içerisinde çelik üretimi,
 - Elektrik ark- elektrik endüksiyon çelik üretim yöntemi,
 - Vakum çelik üretim yöntemidir.

- Metalografik yapılarına göre çelikler;
 - Beynitik çelikler,
 - Martenzitik çelikler,
 - Ferritik çelikler,
 - Perlitik çelikler,
 - Östenit çelikler,
 - Ferritik-perlitik çelikler,
 - Ledeburit çeliklerdir.

- Sertleştirme ortamlarına göre çelikler,
 - Su çeliği,
 - Yağ çeliği,
 - Hava çeliğidir.

1.3.1 Çelik Yapıları

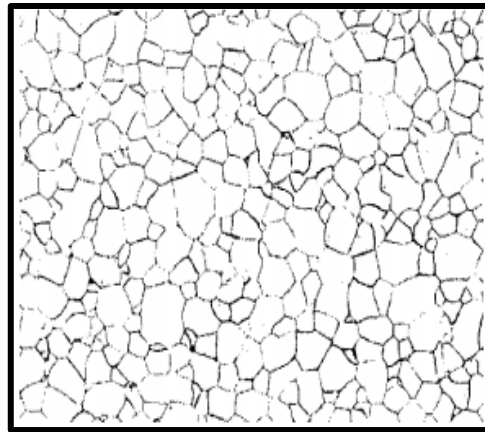
Çelikler kimyasal yapılarındaki karbon miktarına ve sıcaklıklara göre ferrit, perlit, östenit, sementit, martenzit, ledeburit, beynit fazlarını oluşturmaktadır.



Şekil 1.18: Demir-karbon denge diyagramı.

1.3.1.1 Ferrit

Ferrit fazı, karbonun α demir içerisinde çözünmesi sonucu oluşan hacim merkezli kübik (HMK) yapıya sahip bir katı eriyiktir. Oda sıcaklığında ferrit fazının çözebileceği karbon oranı % 0,006'dır. 723 °C sıcaklıkta ise ferrit fazının çözebileceği maksimum karbon oranı %0,025'tir. Ferrit fazı sünek özellik gösterir ve sertleştirilemezler (Toptop, 2011).

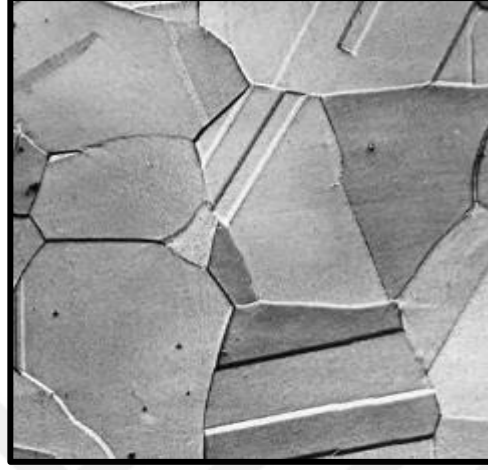


Şekil 1.19: Ferrit fazının yapısı (Toptop, 2011).

1.3.1.2 Östenit

Östenit fazı, karbonun γ demiri içerisinde çözünmesi sonucu meydana gelen yüzey merkezli kübik (YMK) yapıya sahip katı eriyiktir. 723 °C sıcaklıkta östenit fazının çözebileceği

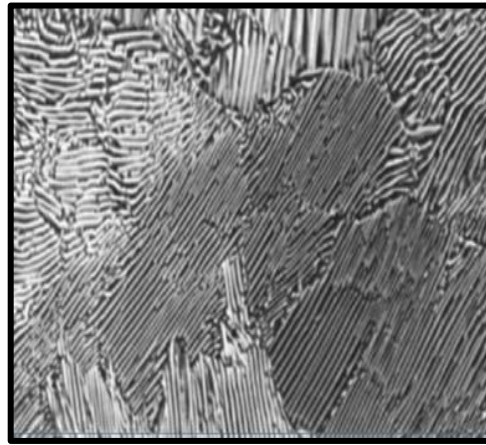
karbon oranı %0,8'dir. Ötektik dönüşümün meydana geldiği 1147 °C sıcaklıkta ise maksimum % 2,06'dır. Östenit fazın yüksek süneklilik ve şekillendirilebilirlik gibi özellikleri vardır. Ayrıca östenit fazın yavaş veya hızlı soğutulmasına göre birçok mikroyapı oluşmaktadır (Toptop, 2011).



Şekil 1.20: Östenit fazın mikroyapısı (Toptop, 2011).

1.3.1.3 Sementit

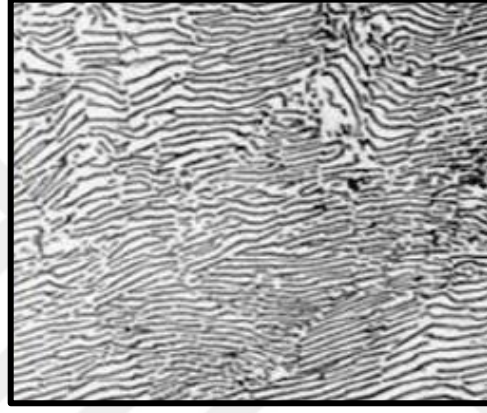
Sementit fazı içerisinde %6,67 oranın karbon içeren ortorombik kristal yapısına sahip intermetalik bir fazdır.. Diğer bir adıyla demir karbür (Fe_3C) olarak bilinen sementit fazı demir-karbon denge diyagramının en sert fazıdır. Sementit fazı düşük çekme mukavemetine sahip olup, sert ve kırılkan özellik gösterir (Toptop, 2011).



Şekil 1.21: Perlit fazının mikro yapısında tane sınırlarındaki sementit fazı (beyaz bölgeler) (Toptop, 2011).

1.3.1.4 Perlit

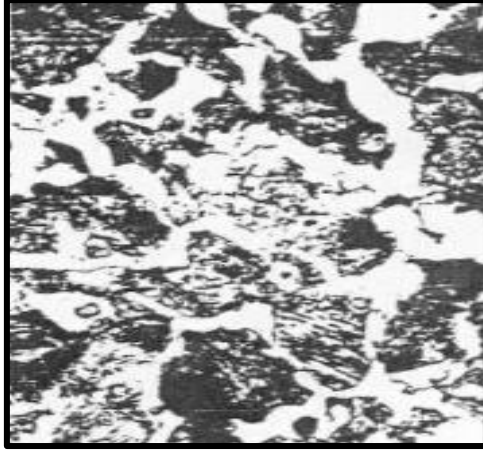
Östenit fazın ötektoid dönüşüm (723°C) sonrası yavaş soğutulması ile ferrit ve sementit içeren bir mikroyapıya dönüşümü sonucunda oluşan faza perlit adı verilmektedir. Perlit fazının oluşumunda ilk önce sementit fazı oluşur ardından azalan karbon oranıyla birlikte ferrit fazı oluşmaktadır. Östenit fazdan soğutulma işlemi ile perlit faza dönüşüm başladığında karbon atomları tane sınırlarına doğru hareket eder ve tane sınırlarındaki demir atomlarıyla birleşerek sementit fazını oluştururlar. Oluşan lamelli sementit ve ferrit fazı ile perlit fazı oluşmaktadır (Toptop, 2011).



Şekil 1.22: Perlit fazının mikroyapısı (Toptop, 2011).

1.3.1.5 Beynit

Östenit fazın izotermal dönüşümü sonucunda meydana gelen yapıya beynit fazı adı verilmektedir. Perlit fazındaki gibi ferrit ve sementit fazından meydana gelmektedir. Ancak beynit fazı lamelli olmayan ferrit ve sementit fazından oluşmaktadır. Beynit fazı, perlit fazının oluşum sıcaklığının altındaki bir sıcaklıkta meydana gelir. Buna bağlı olarak beynit fazının oluşumu iki farklı teori ile açıklanabilmektedir. Birinci teori, östenit fazından soğutulması sonucunda meydana gelen çekirdeklenmiş ferrit ve küresel sementit fazı beynit fazını oluşturmaktadır. Bu üst beynit olarak adlandırılır. İkinci teori, ikizlenme ve kayma mekanizmaları sonucunda aşırı doymuş ferrit kristalleri içeren beynit fazını oluşturur. Martenzit dönüşüm sıcaklığının hemen üzerindeki bir sıcaklık olduğu için alt beynit olarak adlandırılır (Toptop, 2011).



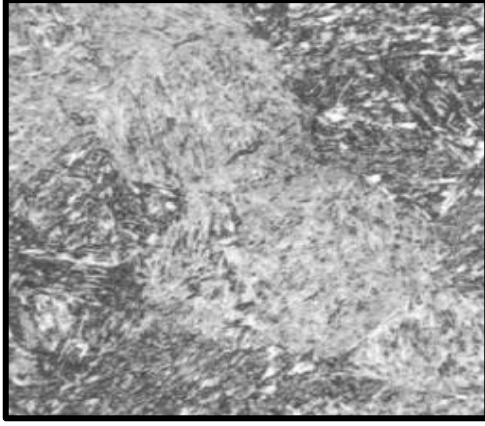
Şekil 1.23: Beynit fazının mikroyapısı (Toptop, 2011).

1.3.1.6 Martenzit

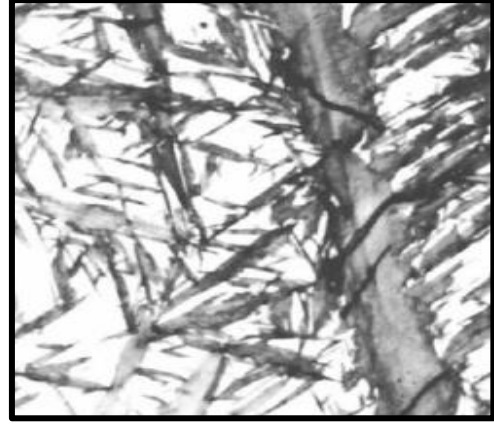
Martenzit fazı ikizlenme ve kayma mekanizmaları ile oluşturulan aşırı doymuş bir fazdır. Martenzit fazının oluşumu östenit fazdan hızlı soğutma ile olur. Martenzit fazının dönüşümü, (Ms) martenzit başlama sıcaklığında başlar, (Mf) martenzit bitiş sıcaklığı ile sonlanır.

Malzemenin içerdiği karbon miktarına bağlı olarak martenzit dönüşüm sıcaklıkları da değişmektedir. Karbon miktarının artışına bağlı olarak Ms ve Mf sıcaklıkları düşer. %0,6'dan daha fazla karbon içeren çeliklerin Mf sıcaklığı 0°C'nin altına düşmektedir. Buna bağlı olarakta %0,6'dan daha fazla karbon içeren çeliklerin hızlı soğutulması esnasında martenzit fazın yanında östenit fazda oluşmaktadır.

Martenzit fazının yapısı karbon oranına bağlı olarak çita ve tabakalı martenzit olarak ikiye ayrılır. %0,6 oranında karbon içeren martenzit yapısı çita martenzit, %0,6- %1 oranında karbon içeren martenzit yapısı çita ve tabakalı martenzit, %1'den daha fazla karbon içeren martenzit yapısı ise tabakalı martenzit yapısını içermektedir (Toptop, 2011).



(a)



(b)

Şekil 1.24: Martenzit fazının mikroyapıları. (a) çita martenzit yapısı, (b) tabakalı martenzit yapısı (Toptop, 2011).

1.3.2 Çeliklerin Sınıflandırılması

1.3.2.1 Alaşımız Çelikler (Sade Karbonlu Çelikler)

Alaşımız çelikler kimyasal yapılarında az miktarda silisyum, mangan, kükürt, oksijen, azot içeren bir demir karbon alaşımıdır. Alaşımız çelikler günümüz demir çelik endüstrisinde ucuz maliyetli olması ve kolay şekillendirilebilme özelliğinden kaynaklı yaygın olarak kullanılmaktadır.

Alaşımız çeliklerin mekanik özellikleri içerdikleri karbon oranına göre değişiklik göstermektedir. Korozyon dirençleri düşüktür. Sertleşme kabiliyetleri azdır ve bu yüzden sertleştirme işlemi uygulandığında malzemede çatlama, kırılma ve çarpımalara neden olur. Sertleştirme işlemi, alevle yüzey sertleştirme ve indüksiyonla yüzey sertleştirme işlemi uygulanarak yapılabilmektedir. Artan karbon miktarına bağlı olarak sertlik, akma dayanımı, çekme dayanımı, aşınma direnci gibi mekanik özellikleri artarken, süneklik ve darbe direnci gibi özellikler azalmaktadır. Alaşımız çelikler içerdikleri karbon miktarına göre 3 gruba ayrılır. Bunlar; düşük karbonlu çelikler, orta karbonlu çelikler ve yüksek karbonlu çeliklerdir (Kesti, 2009).

Düşük Karbonlu Çelikler

Düşük karbonlu çelikler %0,05- %0,3 arasında karbon içermektedirler. Düşük mukavemet ve sertlik özelliği gösterdiğinden sünektirler ve kolayca şekillendirilebilirler. Bu mekanik özellikleri nedeniyle yumuşak çelikler olarakta adlandırılmaktadır. Isıl işlem uygulanarak sertleştirilemezler ancak karbürleme (sementasyon), nitrürlenme (nitürasyon) gibi yüzey sertleştirme yöntemleri ile sertleştirilebilirler. Düşük karbonlu çelikler cıvata, somun, imalat ve yapı çeliklerinde vb. kullanılmaktadır (Kesti, 2009).

Orta Karbonlu Çelikler

Orta karbonlu çelikler %0,3- %0,8 arasında karbon içermektedir. Orta karbonlu çeliklerin en büyük özelliği ısıl işlem ile sertleştirilebilmeleridir. Sünek özellik gösterir. Ancak sertleştirilme işlemi uygulandıktan sonra darbeye ve aşınmaya karşı dirençli hale gelir. Kimyasal içeriğindeki karbon miktarından kaynaklı şekillendirme ve işlenebilme özellikleri düşük karbonlu çeliklere göre düşüktür. Cıvata, somun, dişli çark, transmisyon mili, dingil, manivela kolu, krank mili, ray yapımında kullanılmaktadır (Kesti, 2009).

Yüksek Karbonlu Çelikler

Yüksek karbonlu çelikler %0,8- %1,7 arasında karbon içermektedir. Düşük süneklik gösterirler. Isıl işlem ile sertleştirilebildiği için yüksek sertlik ve mukavemet gösterirler. Şekillendirme, işlenebilme kabiliyetleri düşük ve orta karbonlu çeliğe göre düşüktür. Yüksek karbon içermesinden dolayı kaynaklanabilme kabiliyeti düşüktür. Talaş kaldırma işlemi uygulanabilmesi için yumuşatma tavı işlemi gerçekleştirilir. Mil, shaft, cıvata, somun, spiral ve yaprak yaylar, makaslar, kesici basit takımlar, zımba, kepçe dişlisi, greyder bıçağı, yüksek mukavemetli makine parçaları, ege, keser, ağaç testeresi vb. yapımında kullanılmaktadır (Kesti, 2009).

1.3.2.2 Alaşımli Çelikler

Alaşımşız (sade karbonlu) çeliklere alaşım elementlerinin ilavesi sonucunda elde edilen çeliklere alaşımli çelikler adı verilir. Alaşımli çeliklerin üretilmesi sonucunda alaşımşız (sade karbonlu) çeliklerin olumsuz mekanik özellikleri giderilerek çeliklere daha yaygın bir kullanım alanı sağlanmıştır. Çeliklere ilave edilen alaşım alaşım elementlerinin faydaları aşağıda sıralanmıştır.

- Kalın kesitli parçaların tamamen sertleştirilmesine olanak sağlamaktadır,
- Alaşımşız (sade karbonlu) çeliklerde parça boyunca tamamen martenzit yapı elde etmek amacıyla hızlı soğutma işlemi yapılmaktadır. Bu hızlı soğutma işlemi sonucunda da parçada çatlama ve çarpılma meydana gelebilmektedir. Alaşımli çeliklerde ise herhangi bir çarpılma ve çatlama oluşmaksızın martenzitik yapı elde edilebilmektedir,
- Çeliklere ilave edilen alaşım elementleriyle çeliklerin darbe dayanımları arttırılmaktadır,
- Alaşım elementlerinin ilave edilmesi ile oksidasyon direnci düşük olan çeliklerin oksidasyon dayanımı arttırılmaktadır,
- Çeliklere ilave edilen bazı alaşım elementleri ile çeliklerin yorulma davranışı ve aşınma direncinde artma görülmektedir.

Alaşımli çelikler, alaşımşız (sade karbonlu) çeliklerin kullanılmayacağı yüksek mukavemet ve yüksek sertlik istenilen durumlarda kullanılmaktadır. Bu durumdan kaynaklı alaşımşız çeliklere krom, nikel, molibden, tungsten, mangan, kurşun, kobalt, bakır, vanadyum, silisyum gibi alaşım elementleri ilave edilerek alaşımli çelikler üretilmektedir. Karbon, krom, molibden, nikel çeliklerde sertleşebilirliği arttırmaktadır.

Düşük alaşımli çeliklerde, alaşım elementleri ferrit ve östenit fazları içerisinde yüksek oranda çözündükleri için ısıtılma işlemi gerek duyulmaksızın iyi seviyede çözelti sertleşmesi sağlanmaktadır. Düşük alaşımli çeliklerde beynit oluşumu kolay gerçekleştiğinden kaynaklanabilme kabiliyeti de artmaktadır. Düşük alaşımli çelikler, cıvata, yaylarda, krank millerinde, basınç kaplarında vb. yaygın olarak kullanılmaktadır (Kesti, 2009).

Düşük Alaşım Krom- Molibdenli (Cr-Mo) Çelikler

Kimyasal yapılarında % 0,38-% 0,43 oranında karbon, % 0,15- %0,25 oranında molibden, % 0,05- % 1,1 oranında alaşım elementi ihtiva eden çeliklere düşük alaşım krom-molibdenli çelikler adı verilmektedir. Alaşım elementlerinin oranları farklı olduğu için her bir alaşım elementinin çeliğe olan fiziksel ve kimyasal etkisi farklı olmaktadır. Düşük alaşım krom molibdenli çelikler AISI standartlarına göre, 41XX ile gösterilirler.

Tablo 3.1: Düşük alaşım krom-molibdenli çeliklerin kimyasal kompozisyonları (Kesti, 2009).

AISI- SAE	BİRLEŞİM ARALIĞI (%)							
	C	Mn	P (max.)	S (max.)	Si	Cr	Ni	Mo
1340	0,38-0,43	1,60-1,90	0,035	0,040	0,15- 0,30			
3140	0,38-0,43	0,70-0,90	0,040	0,040	0,20- 0,35	0,55- 0,75	1,10- 1,40	
4037	0,35-0,40	0,70-0,90	0,035	0,040	0,15- 0,30	0,20- 0,30		
4042	0,4-0,45	0,70-0,90	0,035	0,040	0,15- 0,30	0,20- 0,30		
4130	0,28-0,33	0,40-0,60	0,035	0,040	0,15- 0,30	0,80- 1,10		0,15-0,25
4140	0,38-0,43	0,75-1,00	0,035	0,040	0,15- 0,30	0,80- 1,10		0,15-0,25
4150	0,48-0,53	0,75-1,00	0,035	0,040	0,15- 0,30	0,80- 1,10		0,15-0,25
4320	0,17-0,22	0,45-0,65	0,035	0,040	0,15- 0,30	0,40- 0,60	1,65- 2,00	0,20-0,30
4340	0,38-0,43	0,60-0,80	0,035	0,040	0,15- 0,30	0,70- 0,90	1,65- 2,00	0,20-0,30

Krom, korozyon ve oksidasyon direnci sağlar. Çeliklerde sertleşebilme kabiliyetini artırır. Çeliğin kimyasal yapısındaki krom miktarı %12'nin üzerinde olan çeliklerde korozyon ve oksidasyon direncini artırır. Çeliğin kimyasal yapısındaki krom miktarı %17'nin üzerinde ise yüksek sıcaklıklara karşı dayanıklı olmalarını sağlamaktadır. Çeliğin kimyasal yapısındaki krom miktarı %25'in üzerinde ise yüzeyde bir oksit tabakası oluşturur ve çeliğe parlak bir görüntü verir.

Molibden, karbür oluşturu bir elementtir. Tane büyümesini önler ve sertleşebilme kabiliyetini artırır. Yüksek sıcaklıklarda çalışılmasına olanak sağlar. Meneviş gevrekliğini giderir. Meneviş sıcaklığından yavaş soğumadan kaynaklı bazı tane sınırlarında karbür çökmesi meydana gelebilir, bu da kırılabilirliğe neden olur. Molibden bu olumsuz etkiyi ortadan kaldırır. Ayrıca molibden çeliklerin aşınma direncini de yükseltmektedir (Kesti, 2009).

AISI 4140 Çelikleri

AISI 4140 çeliği düşük alaşıma sahip bir çelik olan bir krom-molibden çeliğidir. Günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır. AISI 4140 çeliği, orta karbonlu çelik, alaşımlı çelik, düşük alaşımlı yapı çeliği ve dövme kalite çeliği olarakta adlandırılmaktadır.

AISI 4140 çelikleri Krank mili, krank kolları, aks mili ve kovan gibi sünekliliği yüksek olan parçalarda, otomobil ve uçak yapımında, dişli ve çark yapımında, takım tezgahlarında, civata, somun vb. parçalarda kullanılır (Kesti, 2009).

Tablo 2.3: AISI 4140 çeliğinin kimyasal kompozisyonu (Kesti, 2009).

ELEMENT	% AĞIRLIK
C	0.38-0.45
Mn	0.75-1.00
P	0.035 (max)
S	0.04 (max)
Si	0.15-0.30
Cr	0.80-1.10
Mo	0.15-0.25

Tablo 3.3: AISI 4140 çeliğinin ısı işleme özellikleri (Kesti, 2009).

Özellikler		Koşullar	
		T (°C)	İşlem
Isıl genişleme ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	12.3	20-100	Yağda sertleştirilmiş, 600°C de temperlenmiş
Isıl iletkenlik (W/m-K)	42.7	100	
Özgül ısı (J/kg-K)	473	150-200	

Tablo 3.4: AISI 4140 çeliğinin mekanik özellikleri (Kesti, 2009).

Özellikler		Koşullar	
		T (°C)	İşlem
Yoğunluk ($\times 1000 \text{ kg/m}^3$)	7.7-8.03	25	
Poisson Oranı	0.27-0.30	25	
Elastisite Modülü (GPa)	190-210	25	
Çekme Dayanımı (Mpa)	655.0	25	815°C'de tavllanmış
Akma Dayanımı (Mpa)	417.1		
% Uzama	25.7		
% Kesit Daralması	56.9		
Sertlik (HB)	197	25	815°C'de tavllanmış
Darbe Dayanımı (J)	54.5	25	815°C'de tavllanmış

Tablo 3.5: AISI 4140 çeliğinin elektriksel özelliği (Kesti, 2009).

Özellikler		Koşullar	
		Değer	T (°C)
Elektrik Direnci ($10^{-9} \Omega \cdot \text{m}$)	12,3	222	20

Tablo 3.6: AISI 4140 çeliğinin ısıtma işlem özellikleri (Kesti, 2009).

Özellikler	Koşullar	
	Sıcaklık (°C)	Soğutma
Sıcak Şekil Verme	850-1050 °C	
Normalizasyon	840-880 °C	
Yumuşak Tavlama	680-720 °C	
Sertleştirme	820-860 °C	Su
	820-860 °C	Yağ

Tablo 3.7: AISI 4140 çeliğinin dönüşüm kritik sıcaklıkları (Kesti, 2009).

Element	Mf	Ms	Ar1	Ac1	Ar3	Ac3
Sıcaklık (°C)	260 °C	343 °C	680 °C	732 °C	743 °C	804 °C

AISI 4140 çeliği, diğer düşük alaşımlı krom-molibdenli çeliklerle karşılaştırıldığında sertleşebilme özelliği orta düzeydedir ancak tokluk ve dayanım gibi özellikleri diğer çeliklere göre daha iyidir. Temperleme ve sertleştirme ısıtma işlemlerine elverişlidir. AISI 4140 çelikleri yüksek düzeyde karbon içermesinden kaynaklı daha iyi sertleşir ve buna bağlı olarak mukavemeti artar. Ayrıca AISI 4140 çeliklerinin 1650 MPa'a kadar çekme dayanımı elde edilebilir. Ancak bu çeliklerde yüksek dayanım istenildiğinde ısıtma işlemi uygulandıktan sonra hidrojen gevrekliği meydana gelebilir. Bu durumu önlemek amacıyla AISI 4140 çeliklerine 190 °C'de 2 ile 4 saat arasında ısıtma işlemi uygulanır. Isıtma işlemi sonucunda elde edilen parçalar 540 °C'ye kadar sürtünme dirençlerini korurlar. AISI 4140 çeliklerinden elde edilen parçalar 1100-1200 °C'de kolaylıkla şekillendirilebilirler ancak sıcak şekillendirme işlemi yapıldıktan sonra parçalar yavaş bir şekilde soğutulmalıdır. Soğuk şekillendirme ile parçalar %62 oranında şekillendirilebilirler. AISI 4140 çeliğinden imal edilen parçaların ısıtma işlemine tabi tutulduktan sonra kaynaklanabilme kabiliyeti artmaktadır (Kesti, 2009).

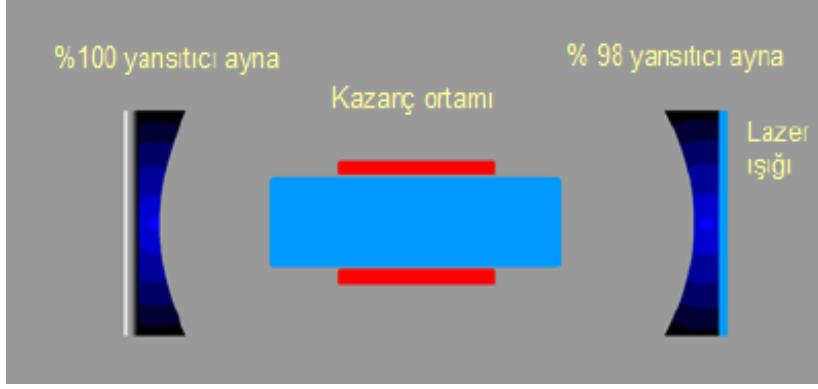
1.4 Çeliklerde Sertleştirme

Malzemenin mekanik özelliklerini iyileştirmek ve istenilen mekanik özellikleri elde etmek amacıyla sertleştirme işlemi uygulanmaktadır. Çeliğin sertleştirilmesinde karbon önemli derecede etkin rol oynamaktadır. Çelik malzemelerin faz dönüşümünün meydana geleceği östenit sahasından oda sıcaklığına ani bir şekilde soğutulması (su verme, yağ ve hava ortamında) ile γ - kafesinde çözülmüş olan karbonun yayınması önlenip, kafes içinde kalması sağlanır. Bu durumda yapı da gerilim artışına neden olur. Gerilim artışı da malzemenin sertliğinin büyük ölçüde artmasına neden olur. Bu işlemin gerçekleşmesi için çeliğin kimyasal bileşimi, karbon miktarı, soğutma ortamının türü ve özellikleri etkin parametrelerdir. Örneğin; %0,3'ten daha az karbon içeren alaşımsız çelikler sertleştirilemez. Çünkü çelik kristal kafes gerilimini arttıracak kadar karbon içermemektedir. %0,3 ve daha fazla karbon içeren alaşımsız çelikler de ise sertlik sağlanabilmektedir (Karaaslan, 2009).

Artan soğuma hızı ile dönüşüm noktası ötelenmektedir. Ancak bu öteleme önceden belirlenmiş bir noktaya göre olacağından soğuma hızı da buna göre belirlenir. Bu hıza malzeme biliminde kritik soğuma hızı denilmektedir. Yapının tamamen martenzit yapıya dönüşmesi için minimum bir soğuma hızı olması gerekmektedir. Eğer bu soğuma hızı maksimum soğuma hızına ulaşırsa sertlik gerilimi oluşur ve östenit perlitte dönüşür.

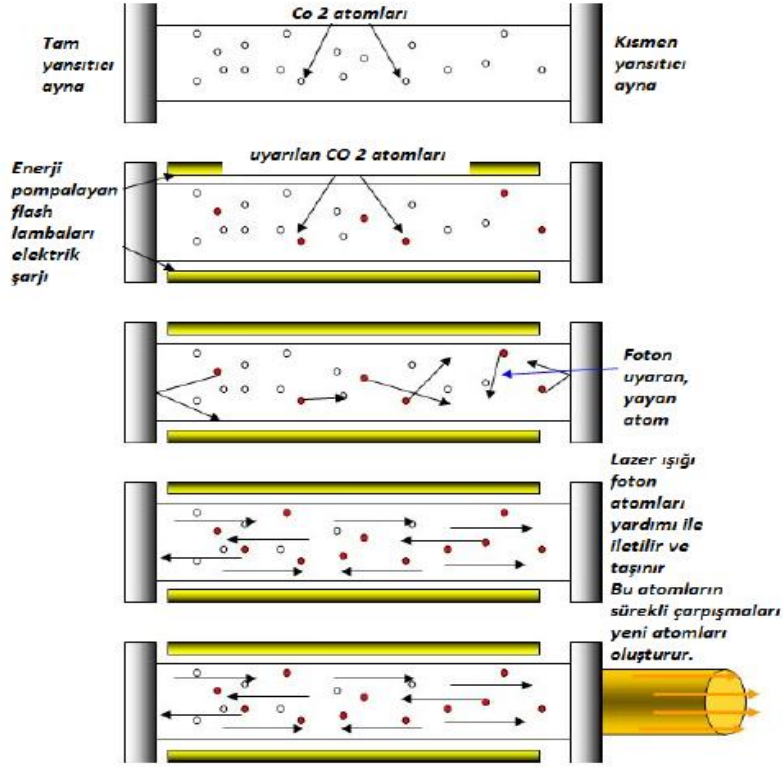
1.5 Lazer

Lazer sözcüğü Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation sözcüklerinin baş harflerinden oluşmaktadır. Lazer ışını, atomların, iyonların ve moleküllerin yüksek enerji konumundan düşük enerji konumuna geçmesi sonucunda oluşmaktadır. Bir atom, bir fotonu soğurduğunda uyarılmış hale gelir. Bu uyarılma hali foton enerjisinin, bulunduğu enerji konumu ile yükseleceği enerji konumu arasındaki farka eşit olması halinde meydana gelir.



Şekil 1.25: Basitleştirilmiş lazer sistemi (İloğlu, 2010).

Lazer ışınlarını üretilmesinde radyasyon emisyonunu sağlamak için aktif ortamlardan (katı, sıvı, gaz) ve enerji kaynağından faydalanılmaktadır. Elektron hareketini hızlandırmak için ise fiber-optik iletken ve rezonans aynalar kullanılmaktadır. Optik bakımdan saydam, bir tarafında tam yansıtıcı ayna (tam sırlı), diğer tarafında ise kısmen yansıtıcı ayna (yarı sırlı) olmak üzere iki ayna bulunan bir tüp bulunmaktadır. Bu tüpün içi gaz, sıvı ve katı bir madde ile doldurulur. Dış ortamdan ışık vererek, elektrik akımı geçirerek veya kimyasal bir yolla elde edilen enerji, ortamdaki atomlara ulaşır. Atomlardan bazıları bu enerjiyi emerek absorbe ederler. Atomların yaptığı fazla enerji emilimi atomları kararsız hale getirir ve foton çarpması sonucu uyarılmış hale geçen kararsız atom, emilimini yaptığı fazla enerjiyi foton saçılımı yaparak verir. Ayrıca fotonlar, uyarılmış kararsız hale geçen atomlarda olduğu gibi diğer fotonların da saçılımını sağlar. Saçılım sonucunda uçlara ulaşan fotonlar, aynalardan yansıtılarak geri dönerler ve bu durum sürekli olarak devam eder. Uyarılma sonucu ortamdaki fotonlar sürekli olarak artar ve atomların neredeyse hepsinin foton yaymaya başlaması ile birlikte kuvvetlenen ışık, yarı sırlı uçtan dışarı çıkar. Bu ışık lazer ışını olarak adlandırılır (İloğlu, 2010).



Şekil 1.26: Lazer ışın oluşumunun şematik gösterimi (İloğlu, 2010).

1.5.1 Lazer Türleri

1.5.1.1 Katı Lazerler

1960 yılında kullanılan ilk gereç yakuttur. % 0,05 oranında üç değerli krom iyonları (Cr^{+3}) içeren, saydam bir alüminyum oksit (Al_2O_3) kristalidir. Cr iyonları enerji düzeylerinin konumu nedeni ile işgal edilme sayısının tersine çevrilmesini mümkün kılar. Uygulamada yapay yakutlardan hazırlanmış çubuklar kullanılmaktadır. Yayınım dalga boyu kızıl bölgede 694,3 nm'dir. Başlıboş çalışmada yakut lazeri 30-40 kW, darbeleri çalışmada ise 30- 40 MW güç sağlar (Karaaslan, 2009).

Neodimli cam, yakut lazerlerinden birkaç yıl sonra bulunmuştur. Burada neodim iyonları ile (Nd^{+3}) katkılanmış amorf (biçimsiz) bir malzeme (cam) söz konusudur. Bu, 1060 nm'de (yakın kızılötesi) yayınım yapan düzeyli bir malzemedir. Neodimli cam lazerleri yalnızca darbeleri olarak çalışmaktadırlar. Bunların birbirinden oldukça farklı iki türü vardır;

- Askeri uzaklık ölçümünde kullanılan küçük lazerler ve plazmaları,

- Çekirdek kaynaşmalarını incelemede kullanılan yüksek güçlü lazerler,

YAG (Yttrium Alüminyum Garnet) neodime katkılanmış ve aynı dalga boyu üzerinden yayınım yapan bir itriyum ve alüminyum grenasıdır. Bu cihaz sürekli ya da darbeli çalışmaya olanak sağlar (Karaaslan, 2009).

1.5.1.2 Gaz Lazerleri

Bu tür lazerlerde etkin ortam çoğu kez bir gaz karışımından oluşur. Karışımdaki bileşenlerden biri, uyarımını çarpışmalarla diğerine aktarır. En yaygın olanları, güçleri zayıf (miliwatt düzeyinde) olmakla birlikte, helyum-neon lazerleridir. Bu lazerlerde yayınım çizgilerini veren neon gazıdır. En çok kullanılan dalga boyu, kızıl bölgede 632,8 nm'dir.

İyon lazerleri, etkin malzemesi iyonlaştırılmış bir gaz olan gaz lazeridir. En yaygın olanı argon lazeridir. Argon atomları, bir elektrik boşalmasının elektronları ile çarpışarak iyonlaşır. Bu lazer ile çok sayıda tayf çizgisi elde edilir (mavi yeşil bölgede 488 nm, 496,5 nm ve 514,4 nm). Yayınan güç yüksek olup onlarca watt değerindedir.

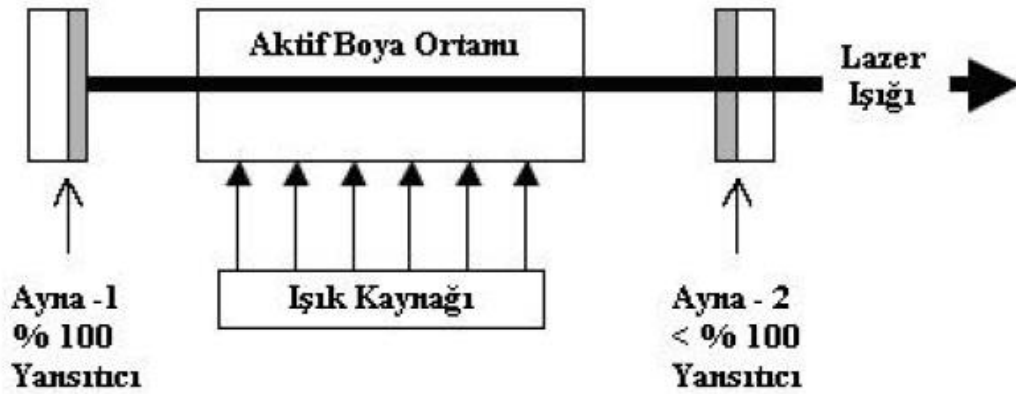
Karbondioksit (CO₂) lazerinde, CO₂ moleküllerinin temel elektron durumundaki titreşim-dönme geçişlerinden yararlanır. Gaz karışımı CO₂, azot (N₂) ve helyumdan oluşur. Uyarma, azot moleküllerinden karbondioksit moleküllerine aktarılır. Sürekli yada darbeli olabilen yayınım kızılaltı bölgede (10,6 µm veya 9,6 µm) yapılır. Karbondioksit lazerlerinin %10 ile %15 arasında değişen yüksek bir verimi vardır. Maksimum güç sürekli çalışmada 400 kW'tır (Karaaslan, 2009).

HF/DF kimyasal lazerlerde lazer yayınımının gerçekleşmesinde, titreşim yönünden uyarılmış HF ya da DF moleküllerini üretmek için flor atomunun hidrojen üzerindeki tepkimesinden yararlanır. En güçlü lazerlerde flor atomu, F₂ molekülünün özel bir odada hidrojenle yanması ile elde edilir. Yayınım dalga boyları HF lazeri için 2,7 µm, DF lazeri için ise 3,8 µm'dir (Karaaslan, 2009).

Helyum-Kadmiyum gibi en yaygın olan metal buharlı lazerlerde ise etkin ortam, buhar halindeki kadmiyumdur. 100 miliwatta kadar olan güçlerde 441,6 ve 325 nm'lik dalga boyları ile sürekli çalışma sağlanabilir (Karaaslan, 2009). İyot lazerlerinde etkin ortam olarak iyot kullanılmakta ve cam lazerin dalga boyuna yakın 1315 nm'lik bir dalga boyu üzerinden yayınım gerçekleştirilmektedir (Karaaslan, 2009).

1.5.1.3 Boyar Madde Lazerleri

Boya lazerlerinde, lazer ışığını üreten aktif ortam olarak floresans yapan organik (sıvı haldeki organik çözeltiler) boyarmadde çözeltileri (örneğin; flor- alüminyum ftalosiyanın) kullanılır. En kuvvetli floresan boyalar oksazol, ksanten, polimetin, akridin-akridindion, antrasen ve kumarindir. Bu çözelti içerisindeki boya molekülleri, dar çizgi genişlikli bir lazerle uyarılarak geniş spektrumlu bir lazer ışınması elde edilir. Kullanılan bu boya molekülleri arasında gerçekleşen floresans geçişler boya lazerlerinin çalışma prensibini oluşturur. Kullanılacak olan boyanın geniş bir floresans spektrumuna sahip olması elde edilecek olan lazer ışınma dalga boyunun ayarlanabilmesine imkân vermektedir. Ayrıca boya lazerlerinde lazer ışığının dalga boyunun kullanılan boya çözeltisine göre değişmesi bu özel maddelere ayrı bir özellik kazandırmaktadır. Bugün boya lazerlerinin daha çok kullanım alanı bulmasının sebeplerinden en başta geleni bu özelliğidir



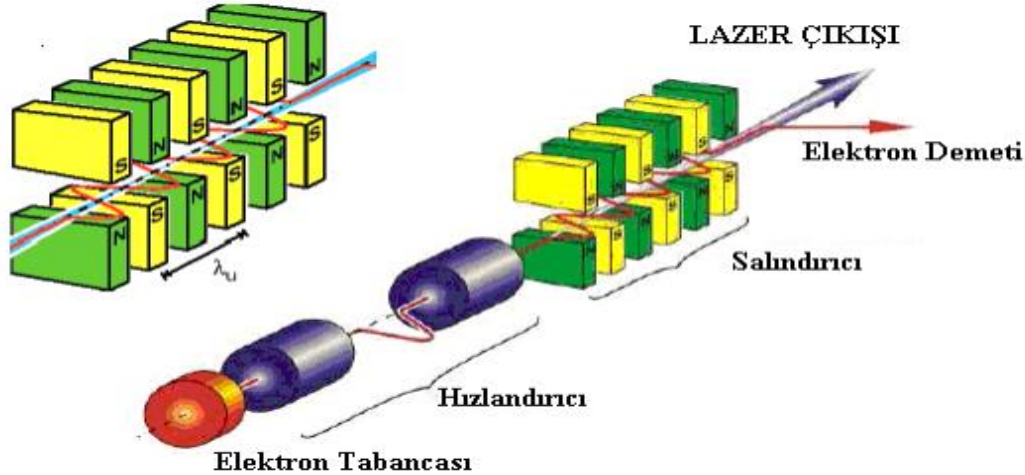
Şekil 1.27: Boyar madde lazer sistemi (Kaya, 2007).

Boyarmadde lazerlerinden elde edilecek dalga boyunun ayarlanması için, yukarıdaki şekilde gösterilen geçirgen olmayan ayna yerine, yansıtımlı optik ağ veya Littrow tipi prizma içeren bir monokromatör yerleştirilerek, lazer ortamına sadece dar bir bant genişliği yansıtılır. Dalga boyu değeri prizma veya optik ağ çevrilerek değiştirilebilir. Böylece geniş floresans aralığından ince ayar ile seçilen çok dar bandın dalga boyu için uyarılma sağlanır ve böylece diğer floresans bölgelerinde uyarılmış emisyon oluşmaz. İstenilen dalga boyu seçilerek daraltılmış bir lazer ışınması elde edilmiş olur (Kaya, 2007).

1.5.1.4 Serbest Elektronlu Lazerler

Rölativistik hızlarda serbest olarak hareket eden elektronların magnetik alan ile etkileşmesi sırasında elektronlar bir lazer aktif ortamı gibi davranarak lazer ışınımı oluştururlar. Bu şekilde oluşan lazerlere, Serbest Elektron Lazerleri (SEL) denir.

Serbest elektron lazeri (SEL), rölativistik hızdaki elektron demetinin, kutupları arasında sinüsel bir magnetik alan oluşturan salındırıcı magnetten geçerken kinetik enerjisinin bir kısmını lazer alana bırakarak, yüksek parlaklık değerine sahip tek dalga boylu (monokromatik) ışınım oluşumudur. Fiziksel olarak SEL'in en önemli elemanları elektron kaynağı (tabancası), paketleyici, elektron hızlandırıcısı, salındırıcı ve optik kavitedir. Kaynaktan çıkan elektronlar, elektron hızlandırıcı yardımıyla rölativistik hızlara çıkarılırlar. Hızlandırıcıdan geçiş sırasında elektronların sahip olduğu enerji 510keV'den daha büyük değere ulaştığında rölativistik hızlara erişmiş olurlar.



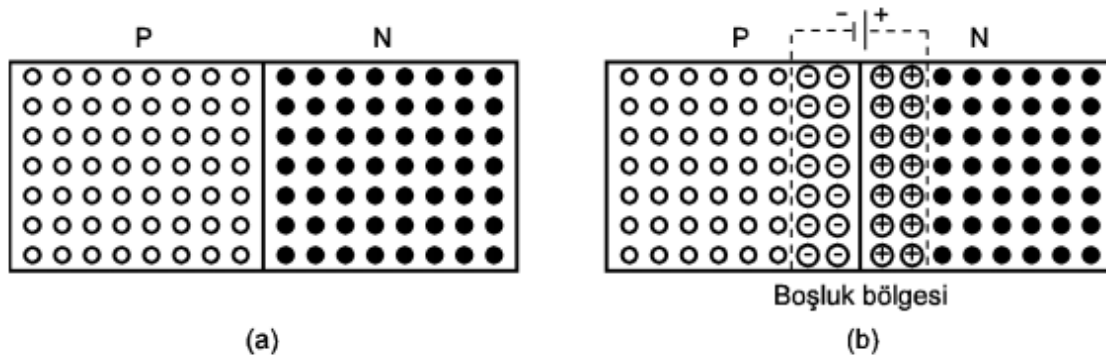
Şekil 1.28: Serbest elektron lazerinin çalışma sistemi (Gezgin, 2009).

Rölativistik hızlara ulaşan elektronlar salındırıcıya gönderilir. Salındırıcılar, elektron demetinin sinüsel hareket yapmasını sağlamak için zıt kutuplu magnetlerden oluşur. Salındırıcı içerisindeki magnetlerin özelliği, ana eksen boyunca eşli magnetler dizisi olmasıdır. Her biri zıt kutuplu olarak karşılıklı dizilir ve g gap aralığı ile birbirlerinden ayrılırlar. Salındırıcının en önemli faktörü magnetik alandır. Magnetik alan, salındırıcı boyunca titreşim yapan sinüzoidal dalga halinde hareket eder. Dolayısıyla bu magnetik alan, salındırıcı içerisinde geçen elektronun hareketini de titreşimli şekilde getirir. Salındırıcı alan

ve elektromanyetik dalganın varyasyonları birleşerek hareket ettirici dalga olarak adlandırılan atmaları oluştururlar. Elektronlar ile bu atmalar arasındaki etkileşim, SEL'deki uyarılmış ışımaya sebep olur (Gezgin, 2009).

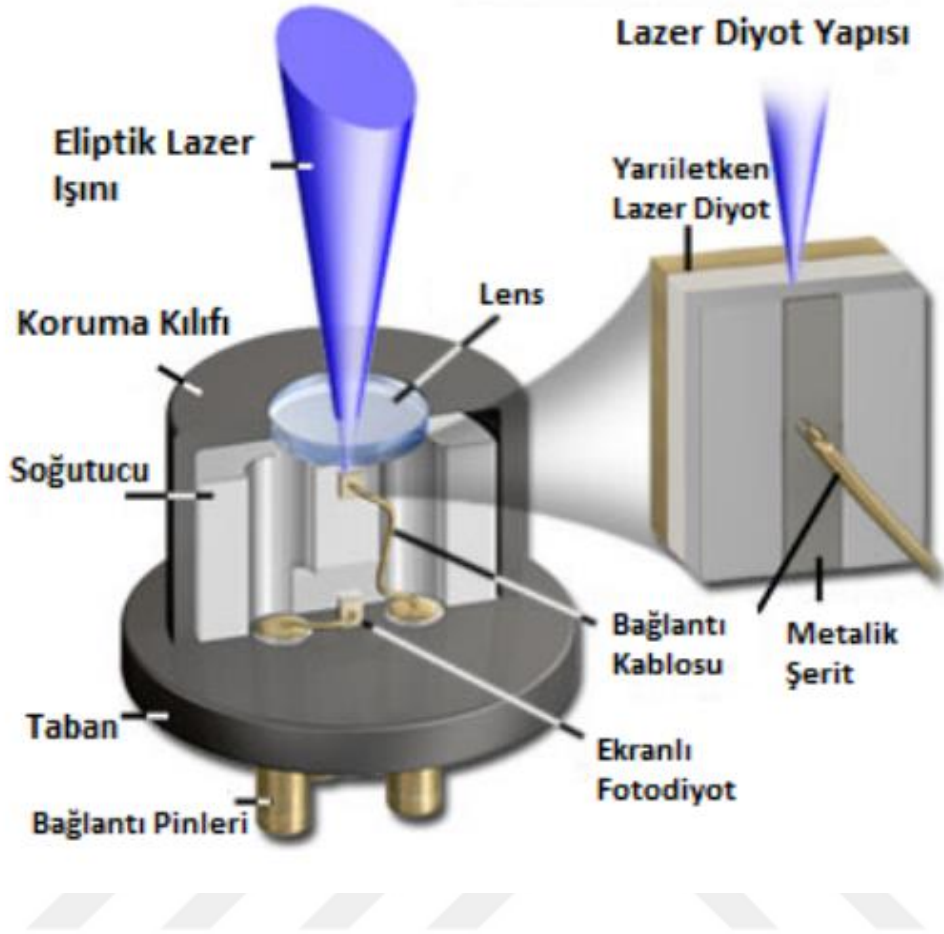
1.5.1.5 Yarı İletken Lazerler (Diyot Lazerler)

Yarı iletken bir lazer ışık kaynağıdır. Yarı iletken malzemelerde N tipi ve P tipi malzemeler tek bir kristal yapı içerisinde bir araya getirilerek P-N jonksiyonu oluşturulur. P-N jonksiyonu ile de yarı iletken lazerler için gerekli olan foton enerjisi sağlanmış olur. P-N jonksiyonun oluşabilmesi için, N tipi malzemedeki atomlar elektronlarını kaybederken P tipi malzemedeki atomlar elektronlarını alır. Bunun sebebi difüzyon akımıdır. Difüzyon akımı, elektron yoğunluğunu çok olduğu yerden az olan yere doğru oluşan yayılmadır. Bu meydana gelen difüzyon akımının sonucunda P-N jonksiyonu yakınında çok sayıda pozitif ve negatif yüklü iyonlar oluşmuş olur. Lazerin çalışması için iletim ve valans bantlarındaki elektron konsantrasyonu, $10^{18}/\text{cm}^3$ civarında olmalıdır.



Şekil 1.29: (a) P-N jonksiyonu, (b) Boşluk bölgesinin oluşması.

Yarıiletken lazerler, galyum arsenik (GaAs) ya da galyum fosfor arsenik ($\text{GaP}_x\text{As}_{1-x}$) kristalinden meydana getirilmiş P-N jonksiyonu ile yapılmıştır. P-N jonksiyonun birleştiği yüzey yakut lazerdeki ayna görevini yapar ve birleşim yüzeyinde foton yayılımı meydana gelmesi için P bölgesine (+) gerilim, N bölgesine de (-) gerilim verilmesi gerekir. Böylelikle enerji kaybı oluşur ve foton yayılımı sağlanır. Oluşan foton yayılımı tekrar elektronlara çarparak daha fazla foton üretilmesine neden olur. Foton yayılımı yeterli seviyeye geldiğinde de lazer ışını meydana gelir.



Şekil 1.30: Yarı iletken (diyot) lazer.

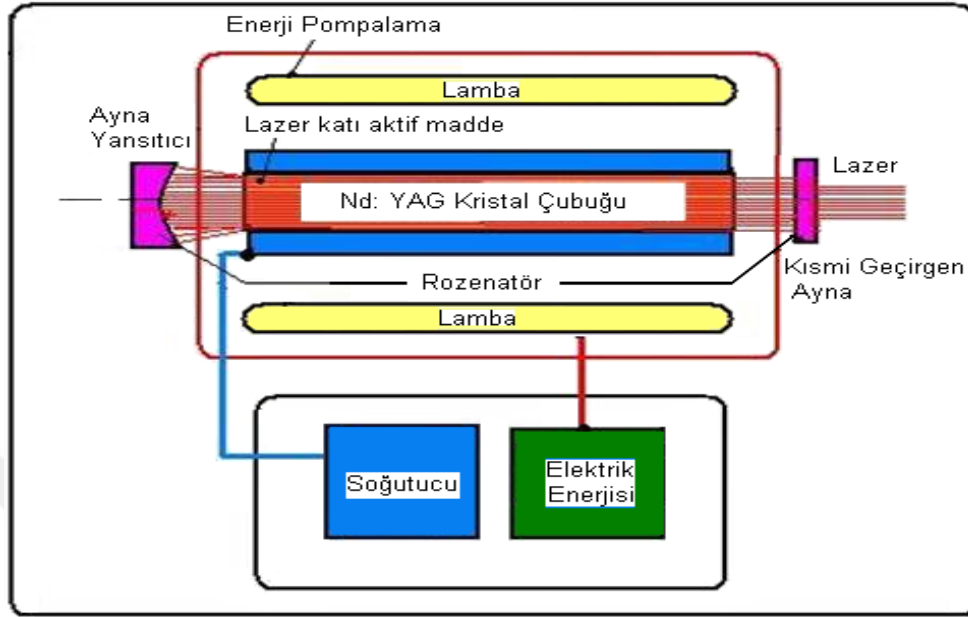
1.5.2 Endüstriyel Lazer Türleri

Endüstriyel lazerler, gaz lazerleri ve katı lazerler olmak üzere iki bölüme ayrılır. Kaynak, kesme, ısıl işlem, markalama gibi işlemlerde kullanılan lazer türleri, katı hal lazeri olan Nd:YAG lazeri ve gaz lazerlerinden olan CO₂ lazeridir.

1.5.2.1 Nd:YAG Lazeri

Katı hal lazeri olan Yttrium-Alüminyum-Granat (YAG) lazerinde, etkin lazer iyonları Y⁺³ ve Nd⁺³ lazer ortamında %0,5 ve %3 oranında bulunmaktadır. Bu lazer türünde impuls lazer üretmek için flaş lamba kullanılır. Sürekli lazer üretmek için ise ark lambası ile uyarım

yapılmaktadır. Neodyum YAG lazerinin dalga boyu 1064 nm'dir. Güç aralığı ise 1,2 kW ile sınırlandırılmıştır.



Şekil 1.31: Neodyum YAG lazerinin şematik gösterimi (İloğlu, 2010).

Nd:YAG Lazerinde Çalışma Türleri

Neodyum YAG lazeri için işletme türleri, sürekli dalga, darbeli çalışma, Q-anahtar çalışma şekilleridir. Sürekli dalga çalışma şeklinde, ark lambaları kullanılarak uyarım gerçekleştirilirken, darbeli çalışma şeklinde flaş lamba kullanılmaktadır. Darbeli Nd:YAG lazerinin ortalama lazer gücü, darbe gücü, darbe süresi ve darbe frekansına göre değişmektedir (Karaaslan, 2009).

$$\overline{PL} = P\rho \cdot t\rho \cdot f\rho \quad (3)$$

$$\text{Darbe gücü} = P\rho = 10 \text{ kW}$$

$$\text{Darbe süresi} = t\rho_\alpha = 0,3 \text{ ms}$$

$$\text{Darbe frekansı} = f\rho = 222 \text{ Hz}$$

$$\text{Ortalama lazer gücü} = \overline{PL} = 6 \text{ kW} \cdot 0,3 \text{ ms} \cdot 222 \text{ Hz} = 400 \text{ W}$$

Q-anahtar çalışma türü markalama işleminde kullanılmaktadır. Çok kısa lazer darbeleri ve yüksek güç yoğunluğu ile malzeme yüzeyinde buharlaşma gerçekleşmektedir.

1.5.2.2 CO₂ Lazeri

CO₂ lazeri yüksek güç üretebildiği için endüstriyel lazer olarak adlandırılabilir. CO₂ lazerinde uyarılma, N₂ molekülü ve elektronların çarpışmasıyla gerçekleşir. N₂ molekülleri uyarılma işlemini sağlamanın yanında, enerji depolama işlemine de katkı sağlamaktadır.

CO₂ molekülleri etkin lazer ortamında üç şekilde hareket eder. Bunlar; simetrik titreşim, eğme titreşimi ve asimetric titreşim olarak adlandırılır.

10,6 µm dalga boyuna sahip CO₂ lazer ışını, CO₂ moleküllerinin asimetric titreşim ve simetrik titreşim yaptığı seviye arasında meydana gelir. Dalga boyundan da anlaşılacağı gibi bu işlem kızılötesi bölgede yani görünmez ışın ile gerçekleştirilir. Ancak lazer işlemi sonrasında ortaya çıkan yüksek ısı basınçtan kaynaklı etkin lazer malzemesinin soğutulması gerekmektedir (Karaaslan, 2009).

CO₂ Lazerinde Çalışma Türleri

CO₂ lazeri ile malzeme işleminde doğru akım (DC) veya yüksek frekans (HF) ile çalıştırılırlar. Doğru akım lazerleri, lazer gücünü maksimum gücün %10'una kadar düşürebilmekte, yüksek frekans lazerleri ise maksimum gücün %70'ine kadar düşürebilmektedir.

CO₂ lazer cihazında işletme türüne bağlı olarak lazer ışın kaynağının uyarılması gerçekleşmektedir. Bu çalışma türleri; sürekli dalga, darbeli çalışma, yüksek frekans çalışma şekilleridir.

Sürekli dalga çalışma şeklinde, sabit enerji iletimi altında sürekli ışın üretebilir. Lazer gücü doğru akım ile %10-%100 aralığında olmalıdır. Yüksek frekans uyarımında ise lazer güç aralığı %70-%100 arasında olmalıdır. Darbeli çalışma şeklinde, darbe ve durma zamanı olmak üzere iki bileşen bulunur. Bu parametrelerden darbe frekansı ve ortalama lazer gücü oluşur (Karaaslan, 2009).

$$\text{Darbe zamanı} = t\rho_{\alpha} = 0,5 \text{ ms}$$

$$\text{Durma zamanı} = t\rho_b = 1,5 \text{ ms}$$

$$\text{Darbe frekansı} = f\rho = \frac{1}{t\rho_\alpha + t\rho_b} = 500 \text{ Hz}$$

$$\text{Ortalama lazer gücü} = \overline{PL} = \frac{1}{t\rho_\alpha + t\rho_b} * \%100 = \%25$$

1.5.3 Lazer Işının Özellikleri

Lazer ışınları tek bir dalga boyundan oluştuğu için sadece bir renge sahiptirler. Genellikle kızılötesi alanda bulduklarından insan gözü ile ayırt edilememektedir. Ayrıca lazer ışınları materyal üzerinde çok küçük çaplarda odaklanabilmektedirler (Örneğin; 0,1 mm gibi).

Lazer ışınlarının bir başka önemli özelliği olan koherent (uyumluluk), farklı ışık dalgalarının ışın içinde aynı yön ve aynı fazda olmasını ve buna bağlı olarak paralel dalgalardan oluşmasını sağlamaktadır. Bu özellik ile saçılma en aza indirilir. Lazer ışınları farklı enerji dağılımları göstermektedir. Bunlar noktasal ve düzlemsel olabilir. Enerji dağılımı noktasal ise kaynak, kesme ve delme işlemlerine, düzlemsel ise sertleştirme, lehimleme vb. işlemlere uygundur.

1.5.4 Lazer Işını İle Yüzey Sertleştirme

Malzemelerde sertliğin, dayanımın, tokluğun vb. özelliklerin değiştirilmesi ve iyileştirilmesi amacı ile malzemelere katı fazda uygulanan işlemler ısı işlemler olarak adlandırılır. Soğutarak sertleştirme, çökelme sertleştirme, alevle sertleştirme, daldırma sertleştirme gibi ısı yöntemleri veya sementasyon, nitrasyon, nitrokarbürizasyon, borlama, kromlama, alüminyumlama gibi yüzey özelliklerini değiştirmek amacıyla gerçekleştirilen ısı işlemleri bugün endüstride uygulanan yöntemlerdir.

Geleneksel olarak yapılan ısı işlemleri ile lazer ışını ile yapılan sertleştirme işlemleri karşılaştırıldığında, daha kaliteli yüzey, daha hızlı bir işlem, daha dar toleranslar ve prosesin kontrolünün daha kolay sağlanması gibi üstünlükler, lazer ışını ile sağlanmaktadır (Karaaslan, 2009).

Metalik malzemelere uygulanan bu işlemlerden lazer ışını ile malzemenin yüzeyinden belli bir derinliğe kadar uygulanan yöntemler aşağıdaki gibidir (Karaaslan, 2009);

- Faz dönüşümü ile malzeme yüzeyinin özelliklerini değiştirmek;
 - Martenzitik dönüşüm sertleştirilmesi,
 - Ergitme,
 - Camsı yapı oluşturma (amorf yapıda bir tabaka oluşturma),
 - Şok sertleştirme (mekanik doku değişimi)dir.

- Yüzeyde malzeme yapısını değiştirmesi;
 - Alaşımlama,
 - Kaplama,
 - Dağılımla (dispersiyon) sertleştirilmediir.

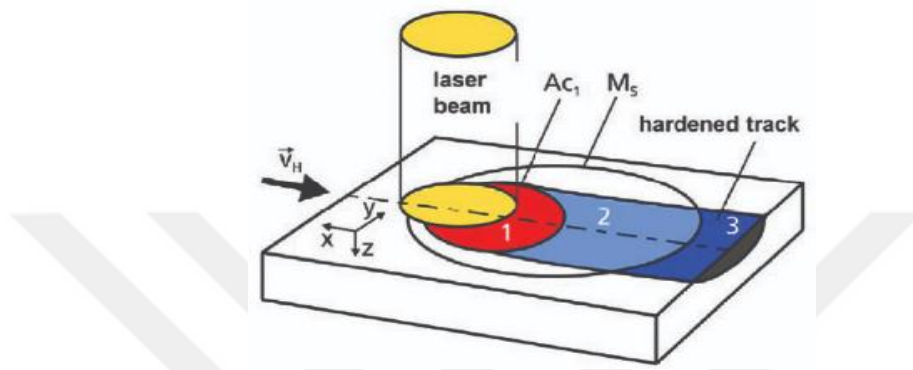
1.5.4.1 Lazer Işını İle Sertleştirme İşlemi

Lazer ışını ile sertleştirmede gerçekleşen fiziksel metalurji olayları, genel olarak geleneksel martenzitik doku eldesi ile sertleştirmedeki olaylar benzerdir ancak lazer sertleştirme için bir malzemenin uygunluğu, önemli derecede malzemenin dokusu ile belirlenmektedir. Karbonun çok kısa sürede çözünebilmesi ve birkaç µm boyutundaki gerekli yayılım yolunu katedebilmesi için, malzemenin ince taneli bir dokuya sahip olması şarttır. Bu nedenle yüksek ferrit içerikli çelikler lazer sertleştirme işlemine uygun değildir (Karaaslan, 2009). Lazer ile yüzey sertleştirme işlemi dökme demirlere ve en az %0,3 ya da daha fazla karbon içeren çeliklere uygulanabilir.

Lazer ile yüzey sertleştirme işleminde, östenitleştirme sıcaklığının üzerine çıkılarak karbonun östenit kristalinde çözünmesi sağlanır. Burada karbonun yayılma hızını mümkün olduğunca arttırmak için mümkün olan yüksek dönüşüm sıcaklığı seçilir. Bu amaçla lazer ışını ile sertleştirmede, yaklaşık olarak neredeyse ergime sıcaklığının hemen altında kalan bir sıcaklığa kadar çıkılmaktadır (Karaaslan, 2009). Proseste işlenen malzemenin yüzeyine lazer demetinin çarpmasıyla oluşan ısı kullanılır. Açığa çıkan ısı malzeme yüzeyinde ısı tesiri altındaki bölgenin östenitlenmesini sağlar. Etrafındaki malzeme etkin bir soğutucu gibi davranır ve materyali martenzit başlangıç sıcaklığının altındaki bir sıcaklığa hızla soğutulur. Bu nedenle soğutma işleminde su veya yağ gibi soğutma ortamlarına ihtiyaç duyulmaz (Karaaslan, 2009). Malzeme yüzeyi sertleştirilirse aşınma direnci artar çünkü yüzeyde yoğun ve homojen bir yapı oluşur.

Lazer ile yüzey sertleştirme işleminin iki önemli avantajı vardır. Bunlar:

- Girdi enerjisi çok fazla olmadığından minimum parça bozulması meydana gelir. Ayrıca söndürme ortamı bulunmamaktadır ve yüksek sertlik elde edilebilmektedir.
- Malzeme yüzeyi, lazer işlemi ile sertleştirildikten sonra pürüzsüzdür. Bu yüzden proses sonrası başka bir işleme ihtiyaç duyulmaz.



Şekil 1.32: Lazer ışını ile sertleşme prensibi (URL-2, 2013).

Lazer sertleştirmenin üstün olan başka bir teknik yönü ise, sadece istenilen doğrultuda ve sınırlı bir bölgede işlem yapmaya elverişli olması, yani seçilmiş bölge sertleştirilmesi yapmaya uygunluğu ile sertleştirilmesi istenmeyen bölgelerde işlem sonrası herhangi bir yapı ve sertlik değişimi görülmemektedir.

Lazer sertleştirme için gerekli güç yoğunluğu değeri 103 – 104 W/cm² aralığındadır. Güç yoğunluğu Lazer ışının modu ile belirlenmektedir. Işınlanmış yüzeyin ısınması ve sonrasında kendiliğinden soğuması ile oluşan sertleşmiş kesitin şekli ve boyutları işlem parametresine bağlı olarak değişmektedir (Karaaslan, 2009).

Lazer ile yüzey sertleştirmedeki etkin parametreler, lazer gücü, işlem hızı, ışının şekli, güç yoğunluğu, etki süresi, soğurulma derecesi, enerji çekme ve sıcaklık dağılımıdır. Lazer gücü ile ışının şekli, soğurulma derecesi ve etki süresini etkiler. Soğurulma derecesi ve etki süresi, sıcaklık dağılımını etkilemektedir. İşlem hızı ise dalga boyuna ve lazer tipine bağlı olarak değişiklik gösterir (Tani, 2010).

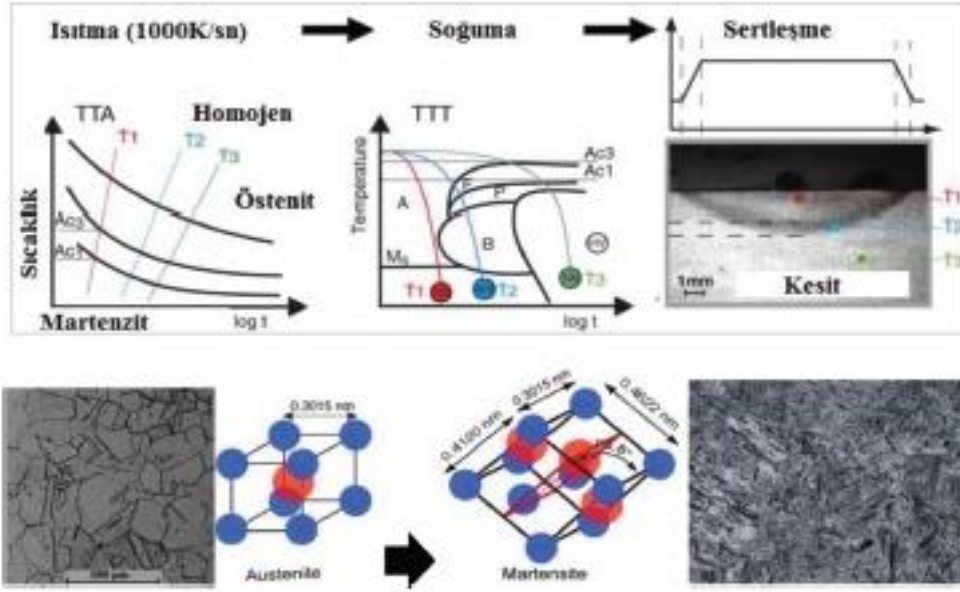
Soğurulma derecesi, malzeme yüzeyine göre değişiklik göstermektedir. İstenmeyen bir yüzey pürüzlülüğü ışını istenmeyecek şekilde yansıtır. Alüminyum, bakır ve gümüş gibi ışığı

yansıtma özelliği olan malzemeler ise bir ayna etkisi yapmaktadır. Ayrıca yüzeye düşen lazer ışınının açısı 28° 'den küçük olmamalıdır. Aksi halde soğurulma meydana gelmez. Soğurulma derecesi, metal olmayan bir tabaka ile yüzey kaplanarak artırılabilir. Bununla birlikte soğurulma derecesi dalga boyu, malzeme ve yüzey sıcaklığına da bağlıdır (Karaaslan, 2009).

Lazer sertleştirme istenen soğurma değerine iki farklı yöntem ile ulaşılabilmektedir.

- Yüzeyin sıcaklığı öylesine yükselir ki, yüzeyde renk değişimi gözlemlenir ve metal parlaklığı azalır. Alüminyum ve titanyum gibi, ışığı yansıtma özelliği yüksek olan malzemelerde yüzey, bu işlem sırasında aniden oksitlenir ve böylece soğurma derecesi çok kuvvetli olarak artar. Kaplanmış yüzeylerde de gelen ışının yansımaları yaklaşık olarak %50 oranında azaltılmaktadır. Ancak yüzeydeki kaplama topografyası düzgün değilse, yansıma miktarının artması ile soğurma değerinin düşmesi görülmektedir.
- Genellikle metal olmayan bir tabakanın yüzeye uygulanması ile soğurma etkisi oldukça artırılabilir. Örneğin ince plakalar, genellikle fosfat tabaka ile örtülerek, ışının soğurulma derecesi yükseltilebilmektedir. Bu yöntemde kullanılan her soğurma tabakası, kolayca yüzeyden uzaklaşma özelliğine sahip olmalıdır. Doğal olarak soğurma derecesini arttırmak amacıyla kullanılan bu tabakaların insan sağlığına zararlı olmaması gerekmektedir (Karaaslan, 2009).

Yukarıda anlatılan tüm bu parametreler birbirleriyle güçlü bir şekilde ilişkilidir, çünkü bunlar nihai sertleşme sonuçlarını etkiler ve böylece proses modellemesi, proses optimizasyonunda iyi bir dengeyi temsil eder (Tani, 2010).



Şekil 1.33: Lazer sertleştirme sonucu numune yapısının östenit fazdan martenzit faza dönüşümü (URL-1, 2018).

BÖLÜM 2

LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Tani, vd. (2010) tarafından yapılan bu çalışmada martensitik paslanmaz çelik oyuk parçaların lazer ile yüzey sertleştirilmesi adlı bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada içi boş silindirik martensitik paslanmaz çelik (AISI 420) bileşene lazer ile yüzey sertleştirme işlemi uygulanmıştır. İş parçası boyutları değiştirilmeden sadece işlem parametrelerinden çevresel hız değiştirilerek işlem uygulanmıştır. Bu işlemlerin sonucunda da önceden sayısal olarak tahmin edilen sonuçların teyit edilmesine olanak sağlamıştır.

Nguyen ve Yang (2015) tarafından yapılan bu çalışmada lazer ile yüzey sertleştirme sırasında yüzey emiciliğini belirlemek için sıralı yöntem adlı bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışma lazerle yüzey sertleştirme sürecinde yüzey absorptivitesini belirlemek için etkili bir algoritma sunmaktadır. Tek boyutlu geçici iletken ısı transfer modeli, NaOH işlemi, grafit işlemi, parlatma işlemi de dahil olmak üzere çeşitli yüzey koşullarında lazer yüzey sertleşmesini taklit etmek için benimsenmiştir. Ters çözüm, bir sonlu elemanlar farkı yöntemi kullanılarak türetilmiş kapalı formlu bir ifade olarak gösterilmiştir. Bu yöntemin özelliği, ters problem için doğrusal olmayan bir formülasyonun gerekli olmamasıdır. Bilinmeyen değerler için önceden seçilmiş fonksiyonel form gerekmemektedir. Algoritmada hassasiyet analizi ve başlangıç değeri gerekmez. Wang ve diğerleri tarafından verilen deneysel sıcaklık verileri, önerilen yöntemin uygulanabilirliğini göstermek için kullanılmıştır. Sonuçlar, önerilen yöntemin lazerle yüzey sertleştirme işlemi sırasında yüzey absorptivitesini doğru bir şekilde tahmin edebildiğini göstermiştir.

Zeisig vd. (2017) tarafından yapılan bu çalışmada yüksek performanslı takım çelikleri için yeni bir FeCrMoVC lazer kaplama alaşımının mikroyapı ve abrasiv aşınma davranışı adlı bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışma atımlı bir Nd: YAG lazer sistemi kullanarak yeni bir Fe85Cr4Mo8V2C1 (ağırlıkça%) lazer kaplama tel malzemesinin yüksek performanslı bir takım çeliğine (1.2379, X155CrMo12-1) başarıyla uygulanmasını göstermektedir. Kaynak işlemi sırasında yüksek soğutma hızları ve uygun lazer parametreleri nedeniyle, martensit,

östenit ve VC-ve Mo₂C-tipi karbürlerden oluşan ince, homojen bir mikro yapı oluşmuştur. Fazların bu kombinasyonu, özel morfolojisi ve dağılımı, alt katman malzemesine ve geleneksel olarak uygulanan kaplama alaşımına kıyasla, sertliği ve aşınma direnci arttırılmış çatlaksız yoğun kaplamalar ile sonuçlanır. Özetle, yeni FeCrMoVC alaşımı ile lazer kaplaması, yüksek performanslı karbon açısından zengin çelik araçların tamir kaynağı ve sert dolgu işlemi için yüksek bir potansiyel göstermektedir.

Soriano vd. (2010) tarafından yapılan bu çalışmada östemperlenmiş sünek dökme demir kalitelerinin lazerle yüzey sertleşmesinin mikroyapı, sertlik ve artık gerilmelere etkisi adlı bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada Farklı östemperleme işlemleri görmüş iki östemperlenmiş sfero dökme demir kalitesinin lazerle yüzey sertleştirme prosesinin incelenmesi gerçekleştirilmiştir. Sertleştirme silindirik numunelerde kızılötesi sürekli dalga Nd: YAG lazer ile gerçekleştirilmiştir. Lazer ile sertleştirilmiş numunelerin mikroyapıları optik mikroskop kullanılarak incelenip mikrosertlik profilleri ölçülmüş ve yüzey ve radyal kalıntı gerilmeler bir X-ışını difraktometresi ile çalışılmıştır. Her iki materyal için de benzer sonuçlar elde edildiği görülmüştür. İşlem görmüş bölgede kalıntı östenit yapısına sahip kaba bir martenzit bulunmuştur; bu sayede 650HV ila 800HV arasında mikro sertlikte 0.6mm ila 1mm arasında aşınmaya dirençli etkili bir katman elde edilmiştir. Sıkıştırılmış alanda, sıkıştırılmış kalıntı gerilmeler, gözlenen mikro sertlik ve mikroyapısal farklılıklarla uyumlu bulunmuştur. Elde edilen sonuçlarla, östemperlenmiş sünek demirlerin mekanik özelliklerini iyileştirmek için lazerle yüzey sertleştirmenin uygun bir yöntem olduğu belirlenmiştir.

Liverani vd. (2016) tarafından yapılan bu çalışmada kompleks orta karbonlu çelik bileşenlerin lazerle yüzey sertleştirilmesi için bir kalıntı gerilme modeli adlı bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada rastgele geometriye sahip mekanik bileşenlerin lazerle yüzey işlemini takiben kalıntı gerilmelerin değerlendirilmesi için sayısal bir model sunulmuştur. Önceki sıcaklık ve mikroyapısal modellerden sonra, gerilme değerlendirmesi, termal genleşmeden kaynaklanan deformasyon, elastik ve plastik deformasyon ve mikroyapısal değişiklikler dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. 930 nm dalga boyu ve 34 mm x 2 mm dikdörtgen spotlu 3,3 kW diyot lazer, AISI 9810 çelik kam üzerinde ısıl işlem deneyleri yapmak için kullanılmış, çevresel ve eksenel yüzey gerilmelerini belirlemek için lazere maruz bırakılmadan önce ve sonra gerçekleştirilen x-ışını difraksiyon ölçümleri

gerçekleştirilmiştir. Model doğruluğu, hesaplanan gerilmeleri ölçülen değerlerle karşılaştırarak gerçekleştirilir. Olay lazer akıcılığının ve tarama hızının sertleştirilmiş derinliğe ve kalıntı gerilme durumuna olan etkisi daha sonra aynı bileşen için sayısal olarak araştırılmıştır. Daha yüksek lazer akıcılığı veya sabit akışta maruz kalma hızında bir artışın sertleşmiş derinlikte bir artışa ve basınç dayanma gerilmelerinde bir azalmaya neden olduğu bulunmuştur.

Lee vd. (2009) tarafından yapılan bu çalışmada AISI H13 takım çeliğinin lazerle yüzey sertleştirilmesi adlı bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada AISI H13 takım çeliğinin yüzey sertliğini ve aşınma özelliklerini, katı bir çözelti sertleştirilmesi ve mikroyapıların ısınması için 200 W'lık bir fiber lazer kullanılarak artırılması yoluyla iyileştirmeye yönelik çalışmalar yapılmıştır. Lazerle eritilen bölgenin sertliği araştırılmıştır. Isı girişinin lazer ergime bölgesi üzerindeki etkisini belirlemek için, tarama koşulları kontrol edilmiştir. Sonuçlar, alınan AISI H13 takım çeliğinin sertliğinin yaklaşık olarak HV 240 olduğunu ve lazer ile yüzey sertleştirme işleminden sonraki sertliğin HV 480-510 civarında olduğunu göstermektedir. Uygulanan ısı girişindeki artış ile de sertleşme derinliği ve genişliğinin arttığı gözlenmiştir.

Adel (2014) tarafından yapılan bu çalışmada lazer yüzey sertleştirme işlemiyle CK45 çelik alaşımının kuru kayma özelliğinin geliştirilmesi adlı bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmada lazer yüzey sertleştirme işlemi, Nd: cam lazer kullanılarak Ck45 çelik silindirik çubuk numunelerine uygulanmıştır. Lazer yüzey sertleştirme işlemi parametreleri üç enerji (0.25 J, 0.51 J ve 0.64 J) ve lazer ışını boyutlarının sayısını içermektedir. İncelemeden sonra erime, Ck45 çelik alaşımı için 0.64 J'ye eşit veya daha yüksek bir lazer enerjisiyle gerçekleşirken, lazer yüzey eritme işlemi bu değer altıda gerçekleşmez ve 0.25 J'nin altıda belirgin bir etki gözlenmemiştir. Ck45 çelik numunelerinde, mikroyapının fazlarını belirlemek için X-ışını kırınımı tekniği kullanılmıştır. Ayrıca lazerle yüzey sertleştirme işleminden sonraki yapısal ve mekanik özellikler, özellikle sertlik ve aşınma direnci incelenmiştir. Sertlik değerinin en yüksek enerjide (0.64 J) önemli ölçüde arttığı ve lazerle yüzey sertleştirme işleminden sonra kuru kayma aşınma direncinde yüksek olduğu bulunmuştur.

Guarino vd. (2017) tarafından yapılan bu araştırmada, AISI 1040 çelik bileşenlerin yorulma ömrünü artırmak için yüksek güçlü bir diyot lazeri uygulanmıştır. Lazer ışınımı ile çelik yüzey arasındaki etkileşim incelenmiştir ve lazer tedavisinin etkinliği, yorulma testi ile

analiz edilmiştir. İlk olarak takip eden lazer operasyonel parametrelerinin her birinin önemi değerlendirilmiştir: güç, tarama hızı, odaklanma ve geçiş sayısı. İkinci olarak, lazer işleminin etkilerini ve lazer çalışma parametrelerinin bileşenlerin yorulma dayanımı üzerindeki etkilerini araştırmak için eğilme ve yorulma testleri yapılmıştır. Wohlercurves, deneysel sonuçların analizinden tespit edilen, lazer işleminin ışınlanmış bileşenlerin yorulma ömrünü önemli ölçüde arttırabileceğini ve böylece bu yöntemin endüstriyel uygulamalar için uygun olduğunu ortaya koymuştur.

Syed vd. (2017) tarafından yapılan bu çalışmada, lazer yüzey sertleştirme için bir C-Mn düşük karbonlu otomotiv çelik sac kullanılmıştır. Çelik sac, derinliği (250–300 µm), kalınlığı boyunca tabakalı kompozit yapı oluşturmak için yüksek güçlü diyet lazer kullanılarak yüzey sertleştirildi. Mikro yapısı işlenmiş katmanlı çelik levha, optik mikroskopi, taramalı elektron mikroskobu, X ışını kırınımı gibi farklı karakterizasyon teknikleri ile değerlendirilmiştir. İşlem yüzeyindeki martensit, beynit ve önceki ferrit gibi sert fazların oluşumu nedeniyle önemli ölçüde (baz sertliğine göre % 133-145 artış) EBSD tekniği kullanılarak sertlik iyileştirildi. Gerilme özelliği tabaklanmış çelik sac da değerlendirilmiş ve her iki akma dayanımı (YS) için önemli iyileştirmeler sağladığı bulunmuştur (% 25-40) ve kompozit bir katmanın sandviç etkisinden dolayı nihai çekme dayanımı (UTS) (% 20) kuralına bağlı olarak bir güçlendirme mekanizması ile gerçekleştirilen sertleştirilmiş tabaka oluşturulmuştur. Buna uygun olarak, Young katmanlı çelik sac modülünü, gerilme-şekil değiştirme diyagramının ultrasonik test sonuçları ile de uyumlu olduğu bulunmuştur. Ek olarak, Standart XRD kullanılarak ölçülen sertleştirilmiş tabakanın ve işlenmemiş bölgenin kristalografik dokulama etkileri, Young Modulus ve r-bar değerleri üzerindeki etkilerini tekrar doğrulamıştır.

Kustov vd. (2017) tarafından yapılan bu çalışmada zamana bağlı gerilimin evrimi, ortaya çıkan artık gerilmelerin yanı sıra, lazer yüzey nokta sertleşmesi ile indüklenen ısı işlem görebilen düşük alaşımlı çelik AISI 4140'ın mikro yapısının mikroyapısı, senkrotron X-ışını kırınımı yoluyla sistematik olarak incelenmiştir. Hızlı X-ışını kırınımı gerilme analizleri için ölçüm ve değerlendirme yaklaşımı uygulanarak senkrotron giriş çizgisi, DESY, Hamburg ve PDIFF @ ANKA, Karlsruhe'de 100 ms'ye kadar zamana sahip bir yerde gerilme

analizi yapılmıştır. Lazer yüzeyinde, yaklaşık olarak spot büyüklüğü olan bir optik çalışan bir homojenizasyon kullanarak sertleştirme uygulanmıştır. $8 \times 8 \text{ mm}^2$ maksimum $T_{A, \max}$ 1150 °C sıcaklıkta ve 1000 K /s ısıtma /soğutma sıcaklığı oranlarına sahip zamana bağlı kırınım verileri, artık gerilme oluşumu için farklı kökenleri analiz etmek amacıyla, işlenmiş bölgenin içindeki ve dışındaki çeşitli ölçüm pozisyonları için toplanmıştır. Yerinde yapılan testler, X-ışını artık gerilme analizleri ve lazer sertleştirme işleminden sonra mikro yapının mikroskopik incelemeleriyle desteklenmiştir. Sonuçlar martensitik dönüşümlü bölgenin (işlem bölgesi) içinde radyal ve maddi olmayan doğrultuda homojen basınçlı artık gerilmelerin üretildiğini göstermektedir. Yerinde difraksiyon deneylerinin verileri, bu sıkıştırıcı artık gerilmelerin (i) lokal basınç elasto-plastik şekil değiştirmeleri ve (ii) lokal faza özgü transformasyon suşları nedeniyle geliştiğini ortaya koymaktadır. Proses alanının dışında, sıkıştırma artık gerilmeleri oldukça yüksek homojen olmayan gerilme artık gerilmeleri ile dengelenir. Yerinde tespit edilen kırınım verileri sayesinde, bu gerilme artıkları gerilmelerinin, (i) işlem bölgesi dışındaki su verme etkilerinin, (ii) lokalelasto-plastik deformasyonların ve (iii) yakındaki işlem bölgesinde faz dönüşümlerinin etkisinin üst üste binmesinde kökenlerine sahip oldukları kanıtlanmıştır.

BÖLÜM 3

MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada kimyasal bileşimi (Tablo 8.1’de) olan AISI 4140 çeliğinin lazer ile yüzey sertleştirme işlemi uygulanmamış numune, 850 °C, 1000 °C, 1050 °C, 1150 °C ve 1350°C’ler deki kuru kayma aşınma davranışları incelenmiştir.

Tablo 8.1: AISI 4140 çeliğinin kimyasal kompozisyonları (Kesti, 2009).

ELEMENT	% AĞIRLIK
C	0,38-0,45
Mn	0,75-1,00
P	0,035 (maks)
S	0,04 (maks)
Si	0,15-0,30
Cr	0,80-1,10
Mo	0,15-0,25

3.1 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM- Scanning Elektron Microscopy)

Kuru-kayma aşınma deney testine tabi tutulan numunelerin aşınma yüzeylerinden fotoğraflar alınarak, numune yüzeyinde meydana gelen aşınma tipinin tespit edilmesinde faydalanılmıştır.

3.2 Noktasal Analiz Çalışmaları (EDS- Energy Dispersive Spectroscopy)

SEM mikroskobunun bir ünitesini oluşturan EDS modülü ile numunelerin ihtiyaç duyulan noktalarından noktasal, bölgesel ve çizgisel analizleri yapılmıştır.

3.3 X- 3D Optik Profilometre İncelemeleri

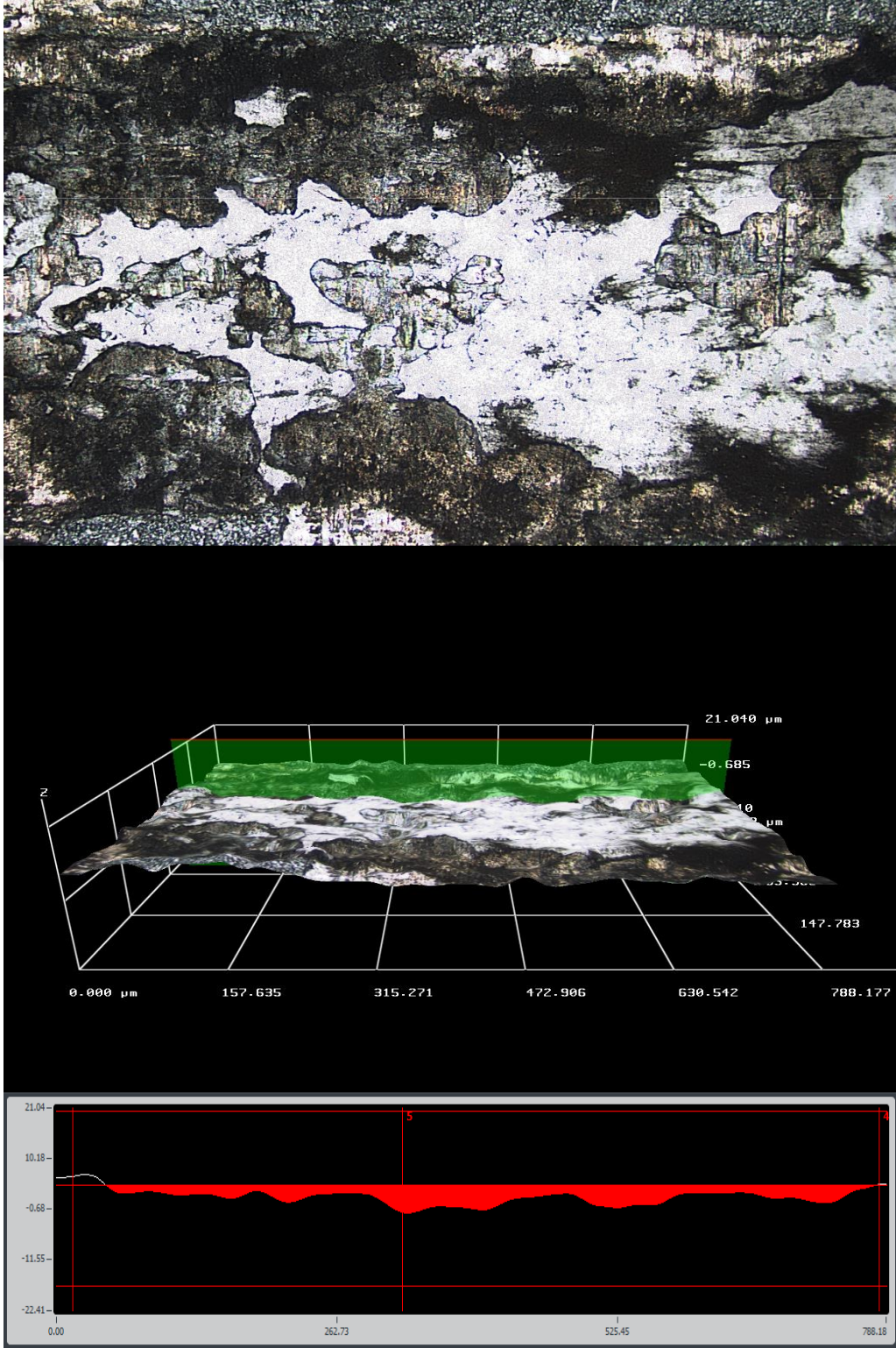
Numunelerin aşınma hacim kayıplarının belirlenmesinde ve yüzey profillerinin tespit edilmesinde kullanılmıştır.

3.4 Sertlik Deneyleri

Deney numunelerinin sertlikleri Qness marka mikro sertlik cihazında 50 g yük ve 1 g/sn yükleme hızı kullanılarak alınmıştır.

3.5 Kuru-Kayma Aşınma Deneyleri

Kuru-kayma aşınma testleri lazer ile yüzey sertleştirme işlemlerine tabi tutulmayan numune, 850 °C, 1000 °C, 1050 °C, 1150 °C ve 1350 °C sıcaklıklarında lazer ile yüzey sertleştirme işlemleri uygulanan numuneler 6 mm çapında wolframkarbür bilye kullanılarak Ball-on-disk tribometre cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Testlerde kullanılan sert karbür bilye sertlikleri 19 GPa'dır. AISI 4140 çeliğinden hazırlanmış olan 40mmx40mm ebatında ve 10mm kalınlığındaki numuneler deney cihazının döner tablasına yerleştirilerek sabitlenmiştir. Aşınma testleri 0,15 m/s kayma hızında, 5N ve 10N'luk yükler altında gerçekleştirilmiştir. Deneylerden doğru ve geçerli sonuçlar alabilmek için geçerliliğini arttırabilmek için her bir deney 3 defa gerçekleştirilerek ortalama değer alınmıştır. Yapılan aşındırma testlerinden sonra Aşındırma işleminden sonra numunelerin hacim kayıplarını belirlemek için aşınma izinin oluşunun kesit görünüşünde 3D profilometre ile kesit yüzeyinin görüntüleri (Şekil 3.1) alınmıştır. Aşındırıcı bilyenin numune üzerinde meydana getirdiği dairesel kesitli iz üzerinden 90 derecelik açılarla toplamda 4 bölgenin kesit yüzeyi alınarak bunların ortalama değeri hacim kaybı hesabında kullanılmıştır.

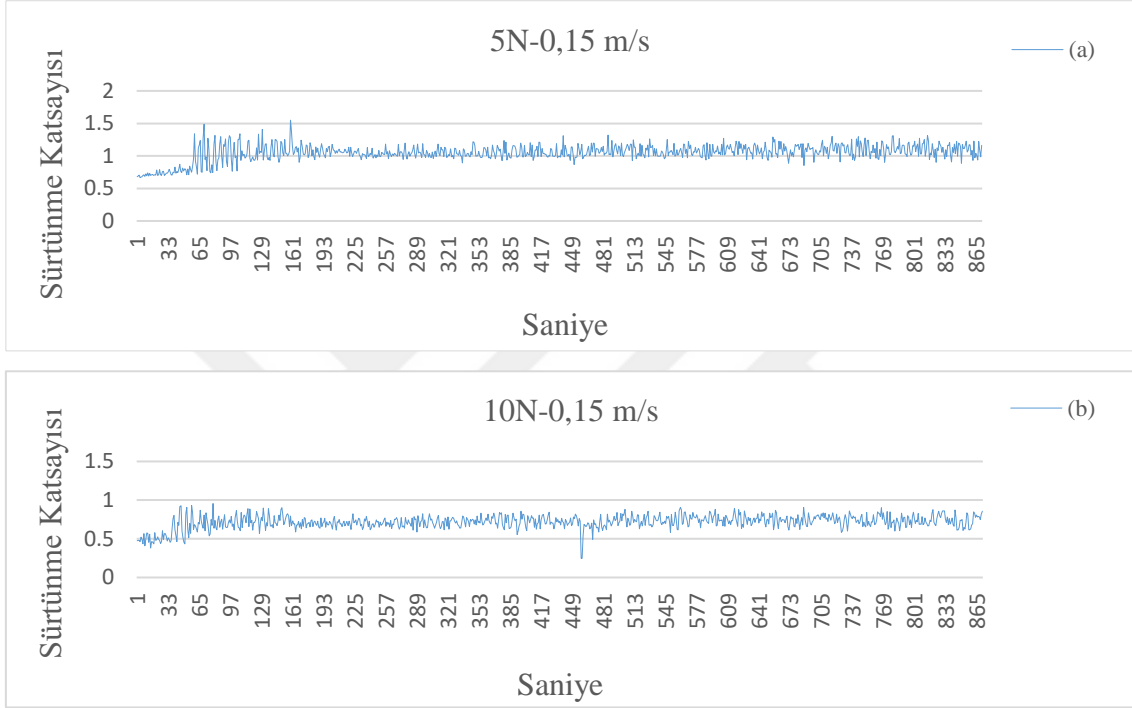


Şekil 3.1: 3D profilometre ile kesit yüzeyi görüntüsü.

BÖLÜM 4

BULGULAR VE TARTIŞMA

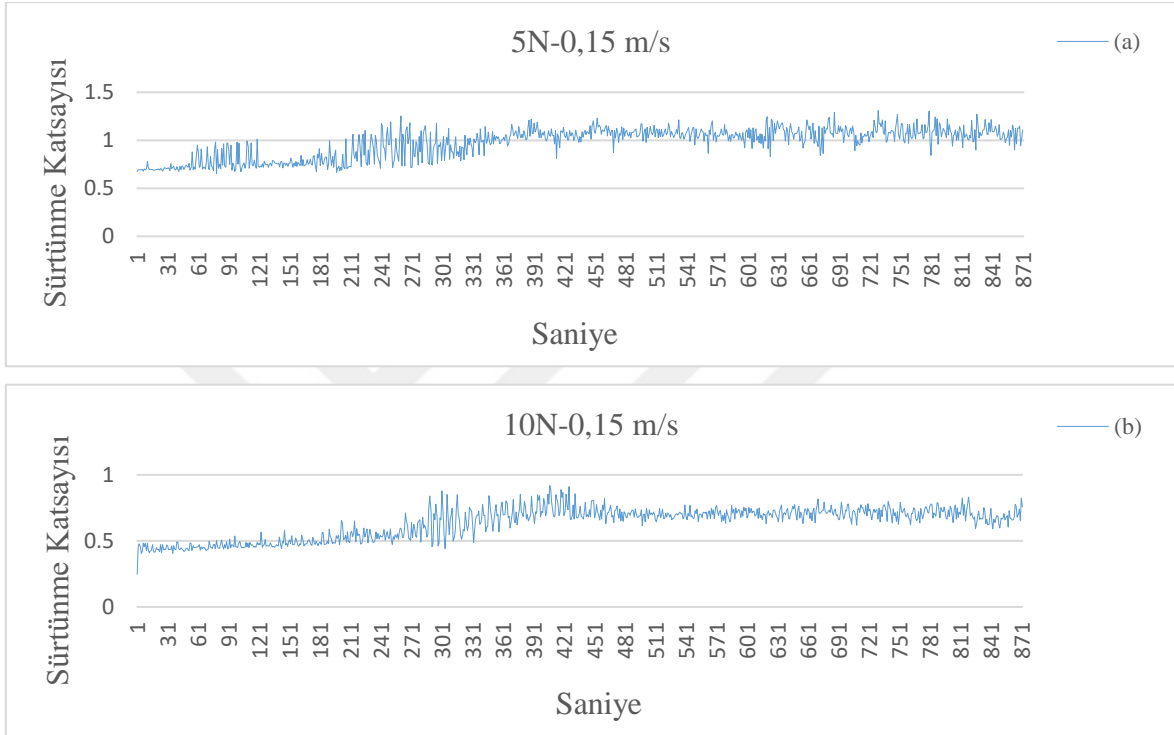
4.1 Sürtünme Katsayısı Ölçüm Analizi



Şekil 4.1: 850 °C’de yüzey sertleştirme işlemi uygulanmış 4140 çeliğinin farklı yük ve sabit kayma hızında ((a) 5N-0,15 m/s, (b) 10N-0,15 m/s) ve zaman (sn) altında uygulanmış sürtünme katsayısı grafikleri.

Şekil 4.1’de 5N ve 10N’luk yükler altında ve 0,15 kayma hızında kuru kayma aşınma işlemine tabi tutulan numunelerin sürtünme katsayısı grafikleri verilmiştir. 0,15 kayma hızında ve 5N’luk yük uygulanan deneyde ilk 60 saniyelik zaman diliminde sürtünme katsayısının arttığı gözlemlenmiştir. 60-160 saniye arasında piklerde dalgalanmalar görülmektedir. Bunun nedeni malzeme yüzeyinde meydana gelen dökülmelerdir. 160. saniyeden sonra sürtünme katsayısı stabil olarak devam etmiştir. Bunun nedeni yüzeydeki deformasyonun stabil olarak devam etmesidir. 0,15 kayma hızında 10N’luk yük uygulanan

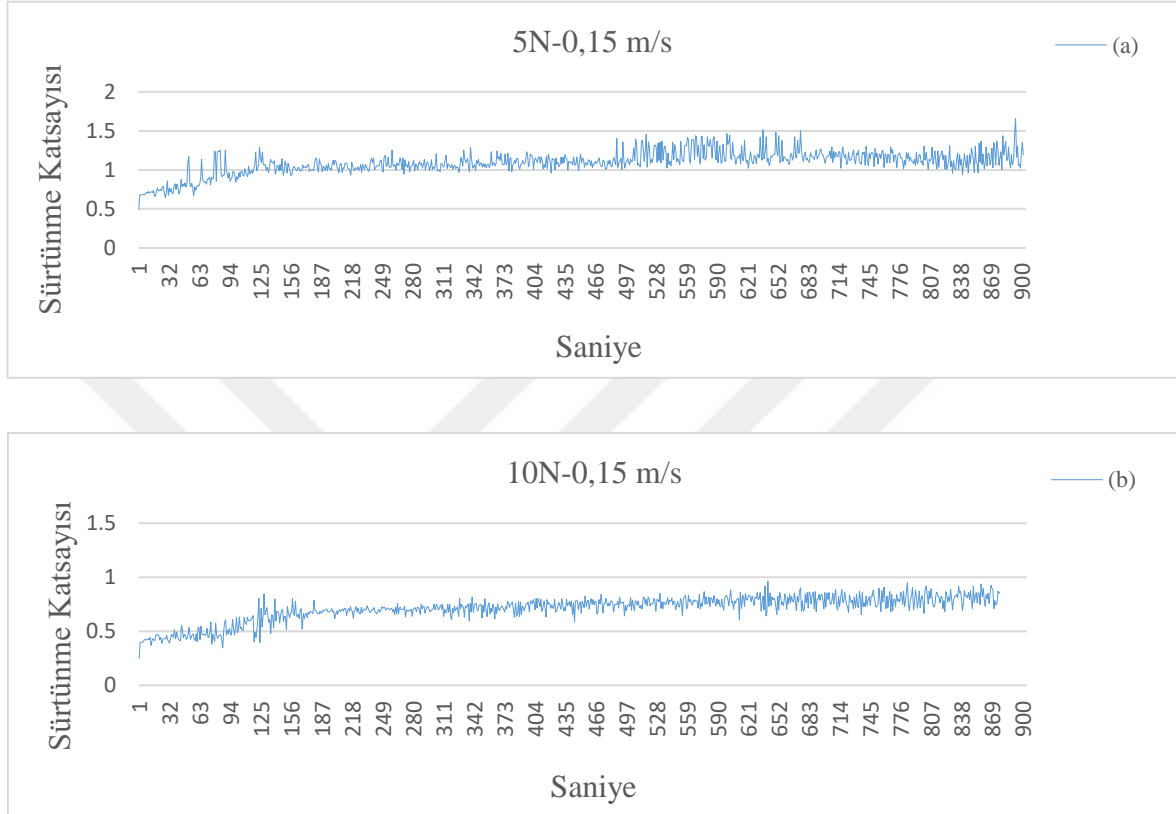
deneyde ilk 50 saniyelik zaman diliminde sürtünme katsayısında bir artış gözlemlenmiştir. 50. saniyeden sonraki zaman dilimlerinde sürtünme katsayısı stabil bir şekilde devam etmektedir. Bütün grafikler incelendiğinde 0,15 kayma hızında 10N'luk yük uygulanan numunenin 0,15 kayma hızında ve 5N'luk yük uygulanan numuneye göre sürtünme katsayısının daha düşük olduğu görülür.



Şekil 4.2: 1000 °C’de yüzey sertleştirme işlemi uygulanmış 4140 çeliğinin farklı yük ve sabit kayma hızında ((a) 5N-0,15 m/s, (b) 10N-0,15 m/s) ve zaman (sn) altında uygulanmış sürtünme katsayısı grafikleri.

Şekil 4.2’de 5N ve 10N’luk yükler altında ve 0,15 m/s kayma hızında kuru kayma aşınma işlemine tabi tutulan numunelerin sürtünme katsayısı grafikleri verilmiştir. 0,15 kayma hızında 5N’luk yük uygulanan deneyde ilk 339 saniyelik zaman diliminde sürtünme katsayısında artış gözlemlenmiştir. 339. saniyeden sonra 1 sürtünme katsayısı ile stabil olarak devam etmiştir. Ancak sürtünme katsayısının ilk 339 saniyede artış gösterirken piklerde bazı saniye aralıklarında dalgalanmalar meydana gelmiştir. Bu dalgalanmalarda aşınma olduğu esnasında yapıda dökülmeler meydana gelmiştir. 0,15 kayma hızında 10N’luk yük uygulanan deneyde ilk 424 saniyelik zaman diliminde 0,6 puanlık bir artışla

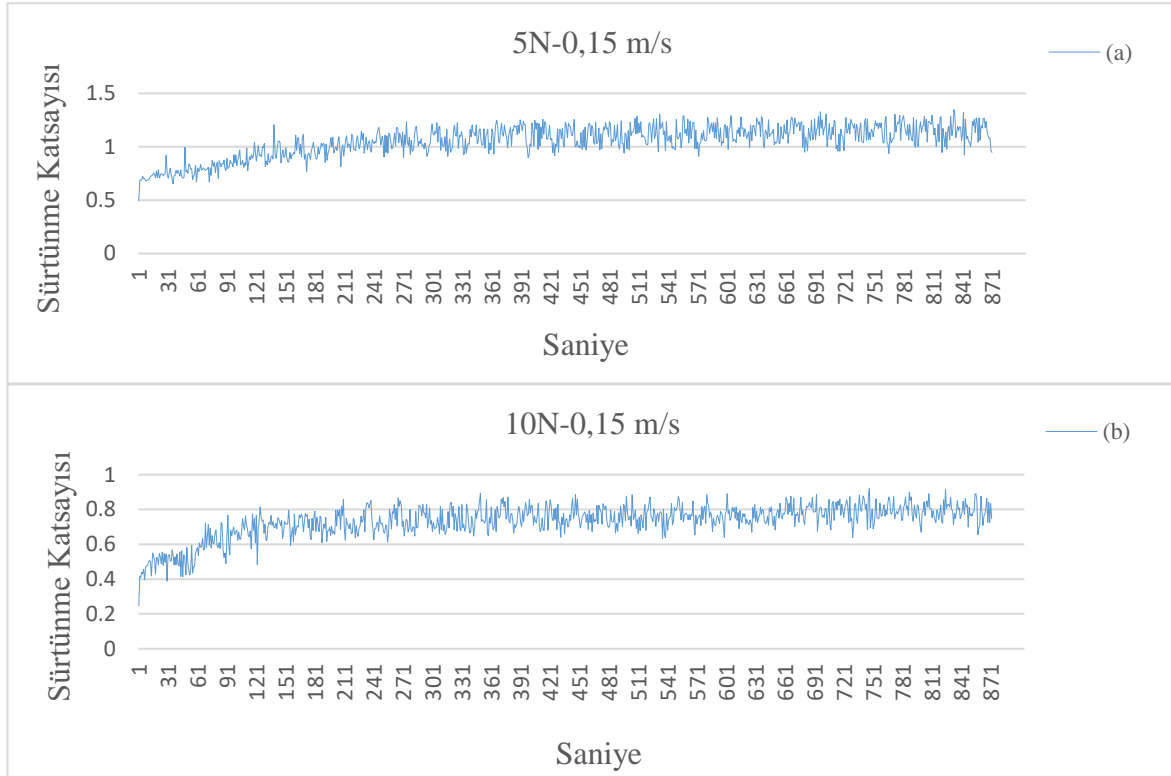
0,8 sürtünme katsayısına ulaşmıştır. 424. saniye ile 482. saniyelik zaman diliminde ise 0,2 puanlık bir düşüş ile 0,6 sürtünme katsayısı ile devam etmiştir 850 °C ile kıyaslandığında sürtünme katsayısı değerleri daha düşüktür.



Şekil 4.3: 1050 °C’de yüzey sertleştirme işlemi uygulanmış 4140 çeliğinin farklı yük ve sabit kayma hızında ((a) 5N-0,15 m/s, (b) 10N-0,15 m/s) ve zaman (sn) altında uygulanmış sürtünme katsayısı grafikleri.

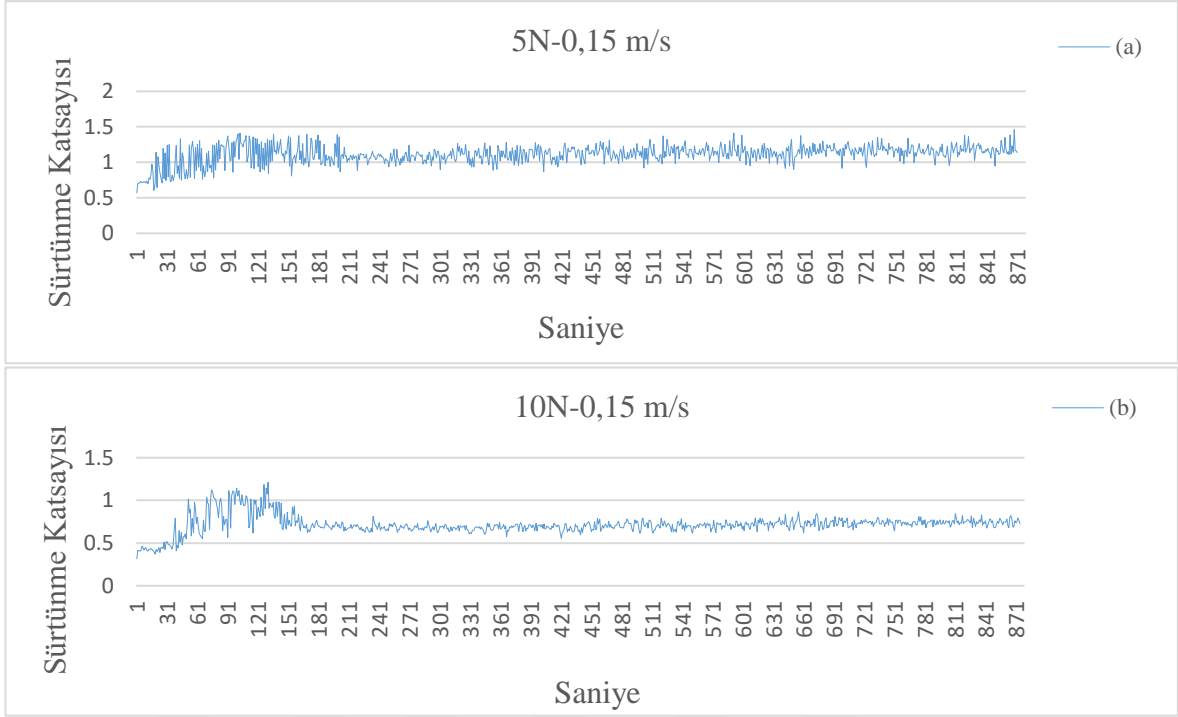
Şekil 4.3’de 5N ve 10N’luk yükler altında ve 0,15 m/s kayma hızında kuru kayma aşınma işlemine tabi tutulan numunelerin sürtünme katsayısı grafikleri verilmiştir. 0,15 m/s kayma hızında 5N’luk yük uygulanan deneyde ilk 125 saniyelik zaman diliminde 0,6 puanlık bir artış ile sürtünme katsayısının 1,1 olduğu gözlemlenmiştir. 125. saniye sonrasındaki zaman diliminde sürtünme katsayısı stabil olarak devam etmiştir. 0,15 m/s kayma hızında 10N’luk yük uygulanan deneyde ilk 161 saniyelik zaman diliminde 0,4 puanlık bir artışla sürtünme katsayısı 0,6 olduğu gözlemlenmiştir. 161. saniye sonrasındaki zaman dilimlerinde 0,1

puanlık bir artış ile sürtünme katsayısının 0,7 olarak stabil bir şekilde devam ettiği gözlemlenmiştir.



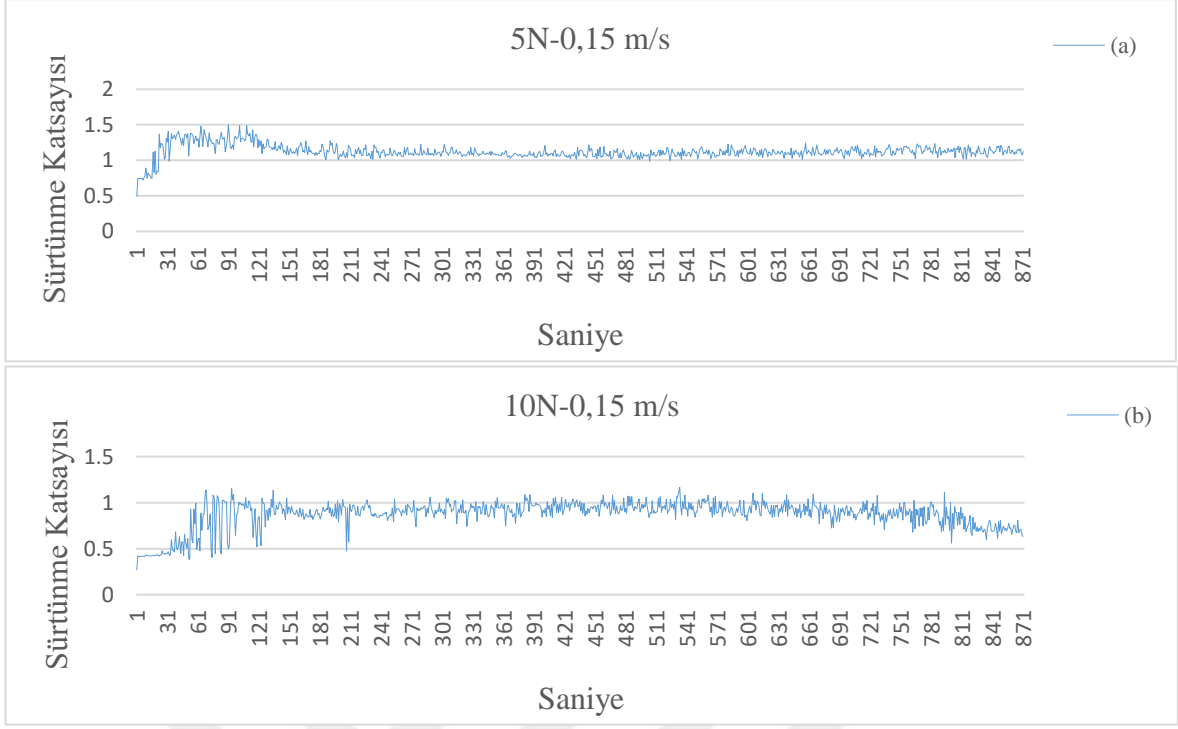
Şekil 4.4: 1150 °C’de yüzey sertleştirme işlemi uygulanmış 4140 çeliğinin farklı yük ve sabit kayma hızında ((a) 5N-0,15 m/s, (b) 10N-0,15 m/s) ve zaman (sn) altında uygulanmış sürtünme katsayısı grafikleri

Şekil 4.4’te 5N ve 10N’luk yükler altında ve 0,15 m/s kayma hızında kuru kayma aşınma işlemine tabi tutulan numunelerin sürtünme katsayısı grafikleri verilmiştir. 0,15 kayma hızında 5N’luk yük uygulanan deneyde ilk 164 saniyelik zaman diliminde 0,58 puanlık bir artışla sürtünme katsayısının 1,08 olduğu gözlemlenmiştir. 164. saniyeden sonraki zaman dilimlerinde sürtünme katsayısı stabil olarak devam etmiştir. 0,15 m/s kayma hızında 10N’luk yük uygulanan deneyde ilk 127 saniyelik zaman diliminde 0,5 puanlık artış ile sürtünme katsayısının 0,7 olduğu gözlemlenmiştir. 127. saniyelik zaman diliminden sonra ise sürtünme katsayısı stabil olarak devam etmiştir.



Şekil 4.5: 1350 °C’de yüzey sertleştirme işlemi uygulanmış 4140 çeliğinin farklı yük ve sabit kayma hızında ((a) 5N-0,15 m/s, (b) 10N-0,15 m/s) ve zaman (sn) altında uygulanmış sürtünme katsayısı grafikleri.

Şekil 4.5’te 5N ve 10N’luk yükler altında ve 0,15 m/s kayma hızında kuru kayma aşınma işlemine tabi tutulan numunelerin sürtünme katsayısı grafikleri verilmiştir. 0,15 m/s kayma hızında 5 N’luk yük uygulanan deneyde ilk 105 saniyelik zaman diliminde 0,8 puanlık artış ile sürtünme katsayısının 1,3 olduğu gözlemlenmiştir. 105. saniyeden sonraki zaman dilimlerinde 0,1 puanlık düşüş ile sürtünme katsayısının 1,2 olarak stabil bir şekilde devam ettiği gözlemlenmiştir. 0,15 m/s kayma hızında 10N’luk yük uygulanan deneyde ilk 130 saniyelik zaman diliminde sürtünme katsayısında ani olarak bir artış gözlemlenmiştir. 0,8 puanlık bir artış ile sürtünme katsayısının 1,1 olduğu görülmektedir. 130-172 saniyelik zaman dilimleri arasında 0,5 puanlık bir düşüş ile sürtünme katsayısının 0,6 olduğu gözlemlenmiştir. 172. saniyeden sonraki zaman dilimlerinde sürtünme katsayısı 0,6 olarak stabil bir şekilde devam etmektedir.

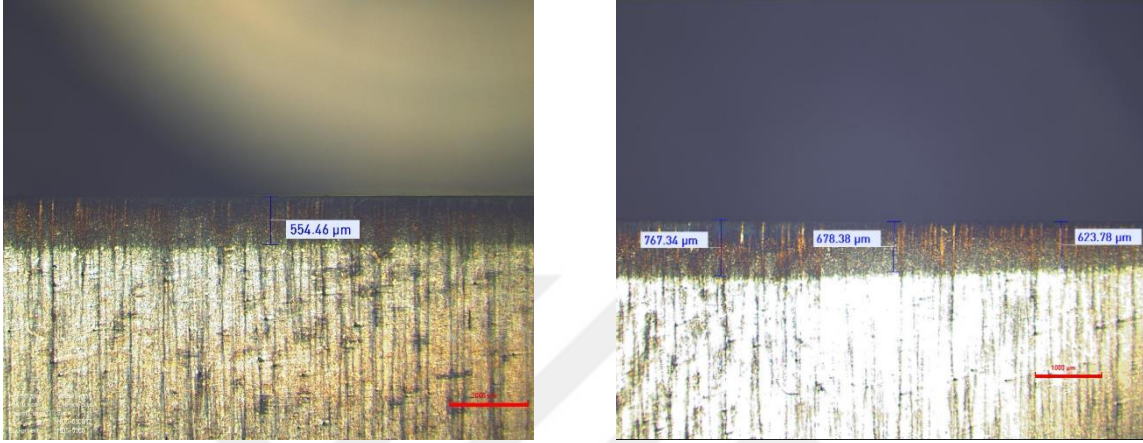


Şekil 4.6: Yüzey sertleştirme işlemi uygulanmamış 4140 çeliğinin farklı yük ve sabit kayma hızında ((a) 5N-0,15 m/s, (b) 10N-0,15 m/s) ve zaman (sn) altında uygulanmış sürtünme katsayısı grafikleri.

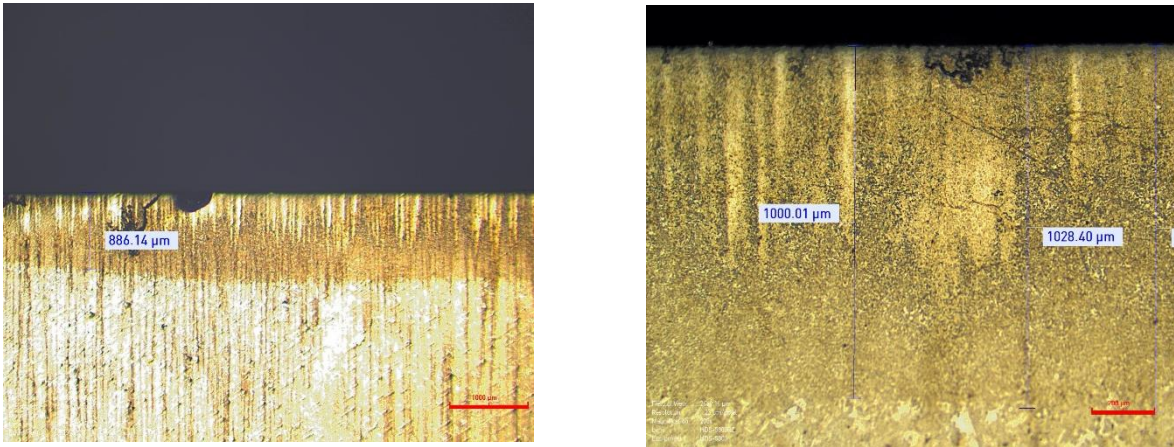
Şekil 4.6'da 5N ve 10N'luk yükler altında ve 0,15 m/s kayma hızında kuru kayma aşınma işlemine tabi tutulan numunelerin sürtünme katsayısı grafikleri verilmiştir. 0,15 m/s kayma hızında 5N'luk yük uygulanan deneyde ilk 44 saniyelik zaman diliminde sürtünme katsayısında ani bir artış olduğu gözlemlenmiştir. 0,8 puanlık bir artış ile sürtünme katsayısının 1,3 olduğu görülmektedir. 44-120 saniyelik zaman dilimi arasında sürtünme katsayısının stabil olarak devam ettiği görülmektedir. 120-205 saniyelik zaman dilimleri arasında ise 0,3 puanlık bir düşüşle sürtünme katsayısının 1 olduğu görülmektedir. 205. saniyeden sonraki zaman dilimlerinde ise sürtünme katsayısının stabil olarak devam ettiği gözlemlenmiştir. 0,15 m/s kayma hızında 10N'luk yük uygulanan deneyde ilk 70 saniyelik zaman diliminde 0,8 puanlık artış ile sürtünme katsayısının 1 olduğu görülmektedir. 70-670 saniyelik zaman dilimleri arasında 0,1 düşüş ile sürtünme katsayısının 0,9 olduğu ve 670. saniyeye kadar stabil olarak devam ettiği görülmektedir. 670. saniyeden sonraki zaman dilimlerinde ise 0,3 puanlık bir düşüş ile sürtünme katsayısının 0,6 olduğu görülmektedir.

4.2 Kaplama Kalınlıkları ve Sertlik Değerleri

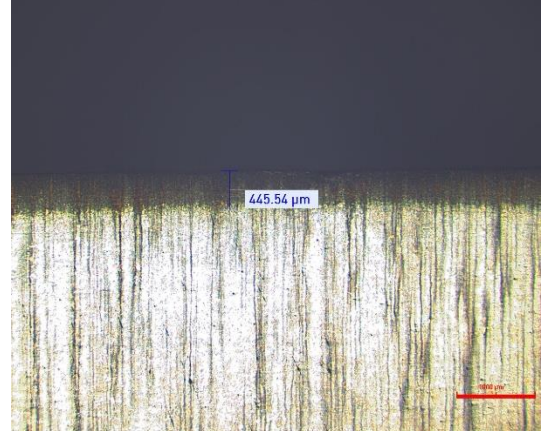
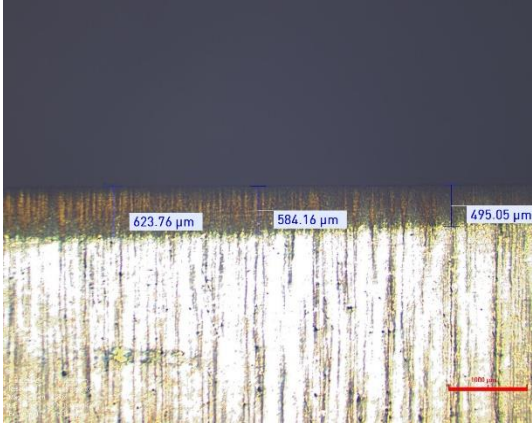
AISI 4140 eliğinin lazer ile yüzey sertleştirme işlemine tabi tutulduktan sonra farklı sıcaklıklardaki derinlikleri lmlmştr. Bu derinlik ölümleri de aşağıdaki şekillerde gösterilmektedir.



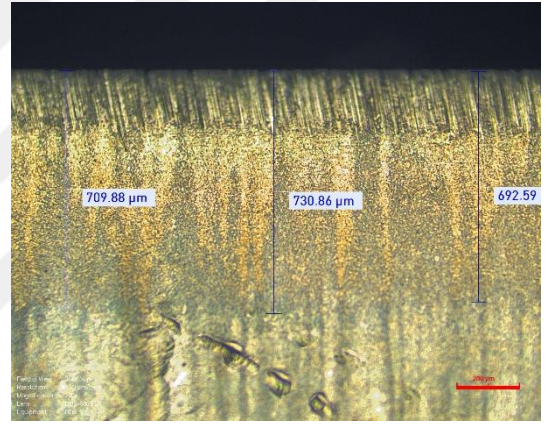
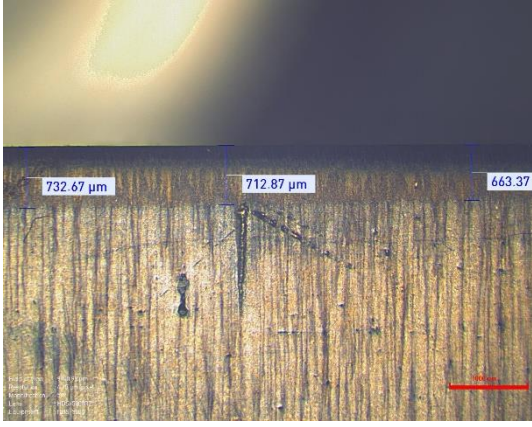
şekil 4.7: 850 °C’de işleme tabi tutulmuş numunenin kaplama kalınlığı.



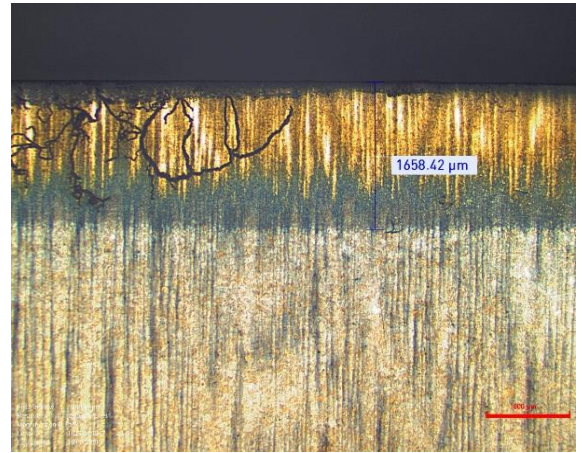
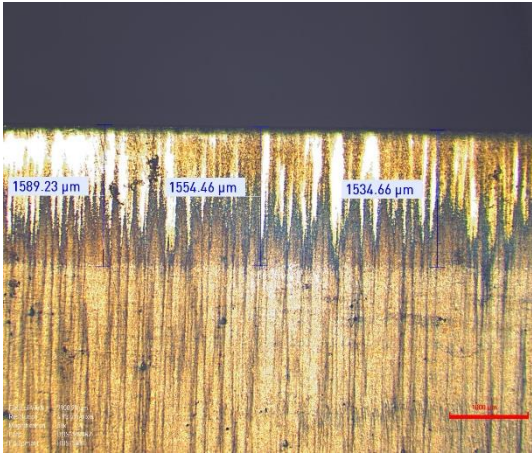
şekil 4.8: 1000 °C’de işleme tabi tutulmuş numunenin kaplama kalınlığı.



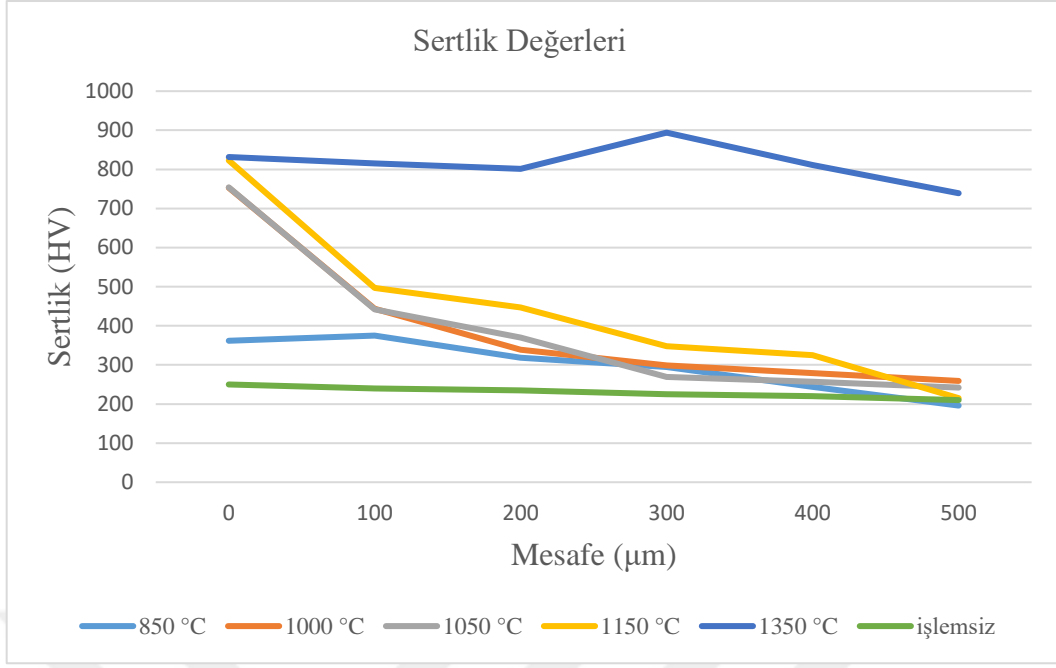
Şekil 4.9: 1050 °C'de işleme tabi tutulmuş numunenin kaplama kalınlığı.



Şekil 4.10: 1150 °C'de işleme tabi tutulmuş numunenin kaplama kalınlığı.



Şekil 4.11: 1350 °C'de işleme tabi tutulmuş numunenin kaplama kalınlığı.



Şekil 4.12: AISI 4140 çeliğinin farklı sıcaklıklardaki sertlik grafiği.

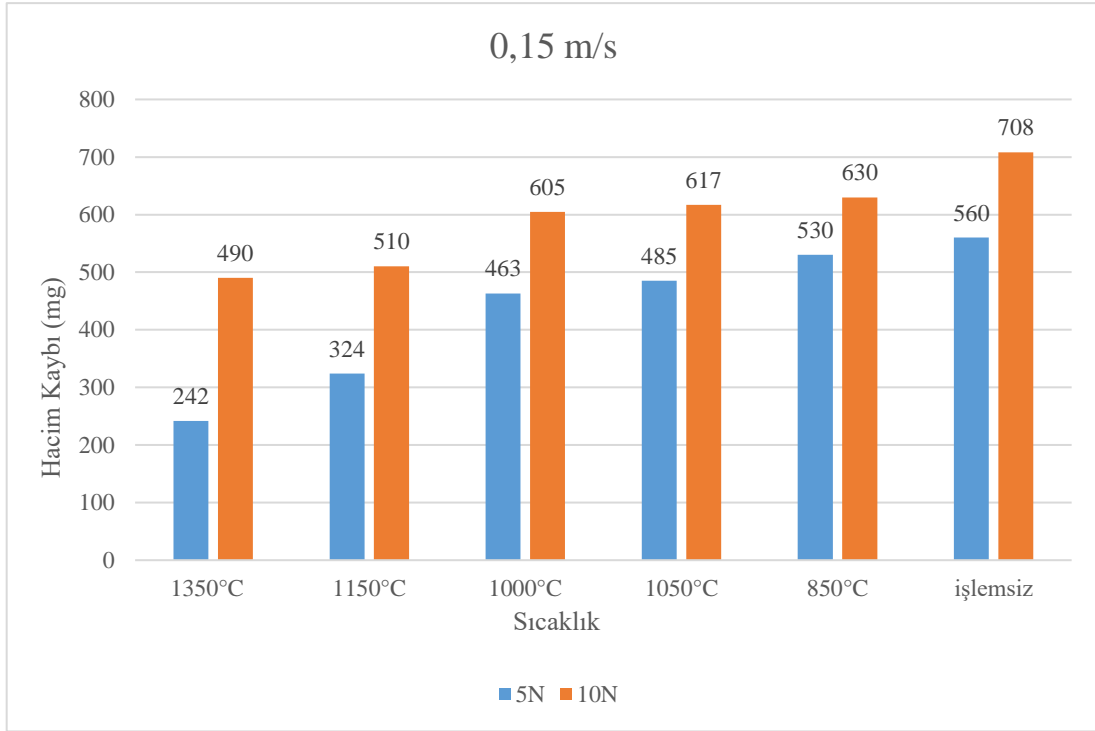
Tablo 9.1: Lazer ile yüzey sertleştirme işlemi sonrası AISI 4140 çeliğinin lazer torcunun 4 mm/s ilerleme hızında farklı sıcaklık parametrelerinde işlem görmüş numunelere ait sertlik değerleri verilmiştir.

Sıcaklık	Sertlik
850 °C	375 HV
1000 °C	753 HV
1050 °C	754 HV
1150 °C	823 HV
1350 °C	832 HV
Lazer ile yüzey sertleştirme işlemi uygulanmamış numune	250 HV

Numunelerin sertlik değerleri incelendiğinde 850°C lazer sıcaklığında gerçekleştirilen işlemlerde yüzey sertliğinin 375 HV, 1000°C’de gerçekleştirilen işlemlerde yüzey sertliğinin 753 HV, 1050°C’de gerçekleştirilen işlemlerde yüzey sertliğinin 754 HV olduğu ve 1350-1150°C’lerde gerçekleştirilen işlemlerde ise en yüksek yüzey sertlik derecesine ulaşıldığı

görülmüştür. Buradan yola çıkarak en iyi sertleştirme sıcaklık parametrelerinin 1350°C ve 1150°C'ler olduğu söylenebilir. Yine kaplama kalınlıklarına bakıldığında en yüksek kaplama kalınlığı 1350 °C'de daha fazla olduğu görülmüştür.

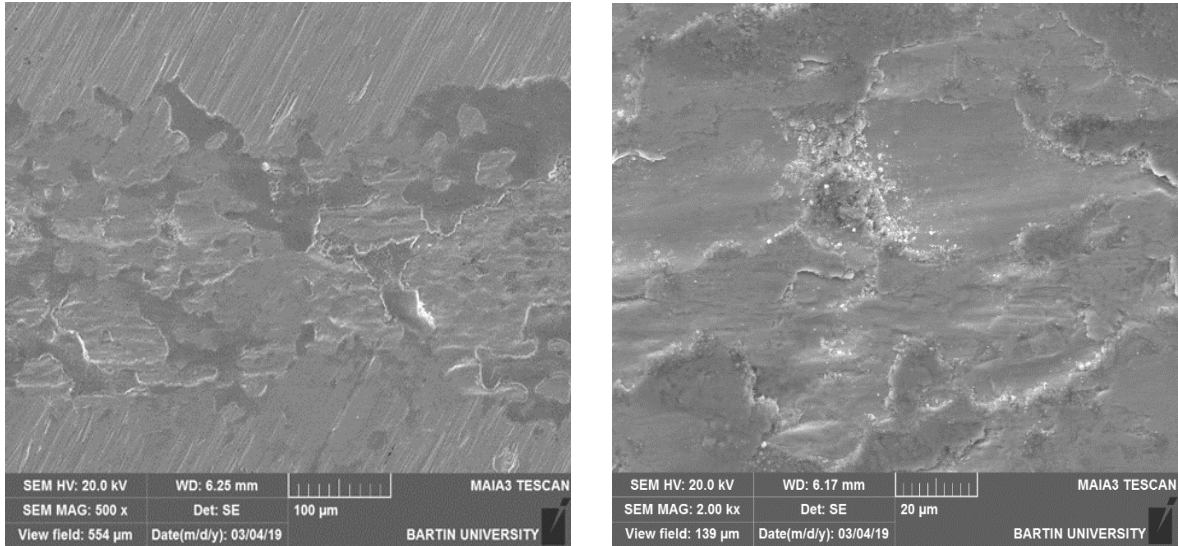
4.3 Hacim Kaybı Analizi



Şekil 4.13: AISI 4140 çeliğinin işlemsiz ve farklı sıcaklıklardaki lazer ile yüzey sertleştirme sonrası farklı yükler altında (5N-10N) ve 0,15 m/s kayma hızında uygulanan deney sonucundaki hacim kayıpları grafiği.

Şekil 4.13'te numunelerin hacim kayıp değerleri incelendiğinde öncelikle artan yüklerle birlikte numunelerdeki hacim kayıpları artmıştır. Artan yüklerle birlikte aşındırıcı olarak görev yapan bilyanın üzerine gelen baskı kuvvetleri artacaktır. Artan bu kuvvet bilyanın karşı yüzeye daha fazla nüfuz etmesine sebebiyet verecektir. Buna bağlı olarak bilya önünde bulunan ve bilyaya karşı direnç gösteren malzeme oranı artacağı için numunelerdeki hacim kaybı da artış gösterecektir. Adhesiv veya kuru kayma aşınmasında birçok parametre etkili olmaktadır. Bunların bir kısmı malzemenin kendisine bağlı özellikler bir kısmı malzemeye

sonradan kazandırılmış özellikler, karşı malzemeye bağlı özellikler ve deney şartları olarak kısaca özetlenebilir. Numunelerin aşınma dirençlerinin artmasında en önemli parametrelerden biriside numune hacim veya yüzey sertlikleridir. Ancak malzemelerin dış yüzeylerinin sert, iç yüzeylerinin ise daha yumuşak ve tok bir yapıda olması istenir ki gevrek kırılmaya uğramasınlar. Yine sertleştirilmiş tabaka ile bunu destekleyen alt tabakanın geçiş yüzeylerinin homojen bir yapıya sahip olması ve homojen bir geçiş sağlaması önem arz etmektedir. Yoksa iki farklı fazın özellikleri de birbirinden farklı olacağı için malzemenin hasara uğraması daha çabuk olur. Benzer durum bu çalışmada görülmüştür. Şöyle ki genellikle yüzeyi daha sert olan malzemenin aşınma direncinin de daha yüksek olması beklenir. Ancak bu çalışmada yüksek sertlik ile aşınma direnci arasında doğru bir orantı görülmemiştir. Bu da daha öncede belirtildiği gibi numunelerin sadece sertliğine bakılarak aşınma dirençlerinin yüksek olacağı sonucuna varılamayacağını diğer parametrelerinde göz önünde bulundurulmasını desteklemektedir. Yapılan çalışmada en yüksek hacim kaybı işlemsiz numunede görülürken en düşük hacim kayıpları özellikle düşük yüklerde 1150 °C ve 1350 °C’de işlem görmüş yani yüzey sertliği yüksek olan numunelerde elde edilmiştir. Yine bu iki numunenin farklı yüklerinde hacim kaybı değerleri arasında bariz bir fark görülmezken, sertlikleri en düşük olan 850 °C ve 1000 °C’lerde işlem gören numunelerde bu fark daha fazla görülmektedir.



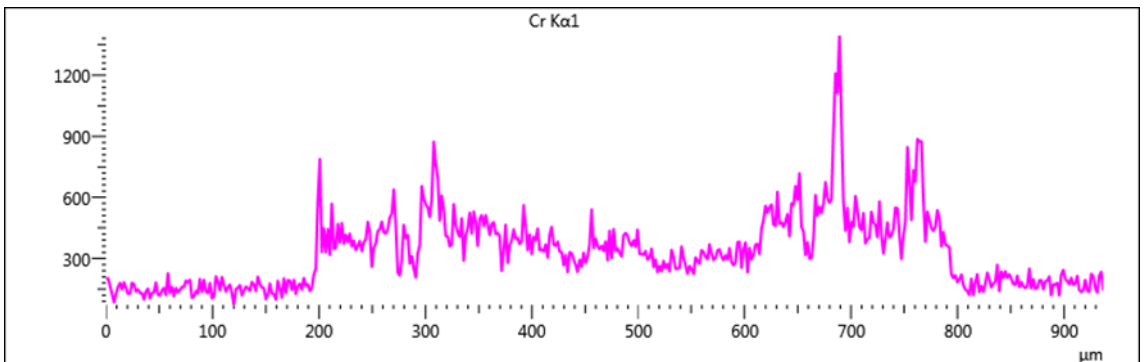
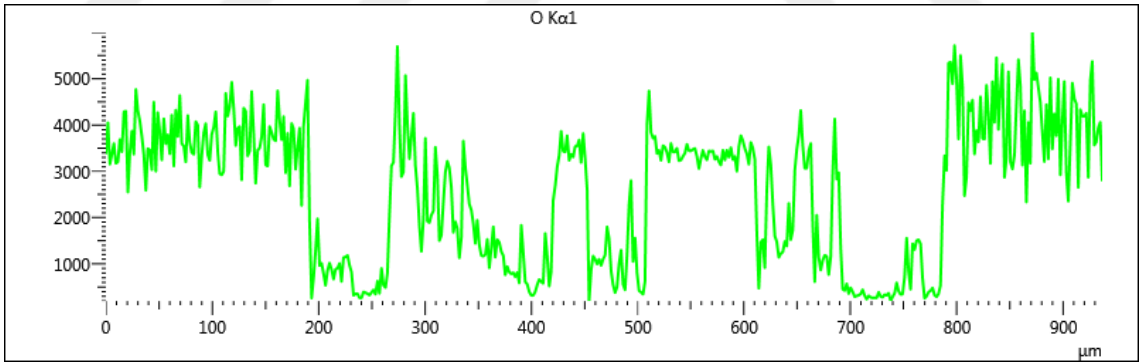
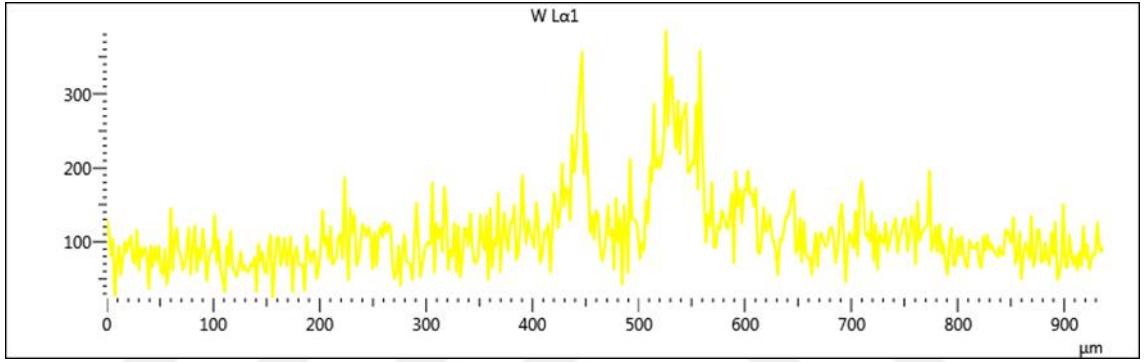
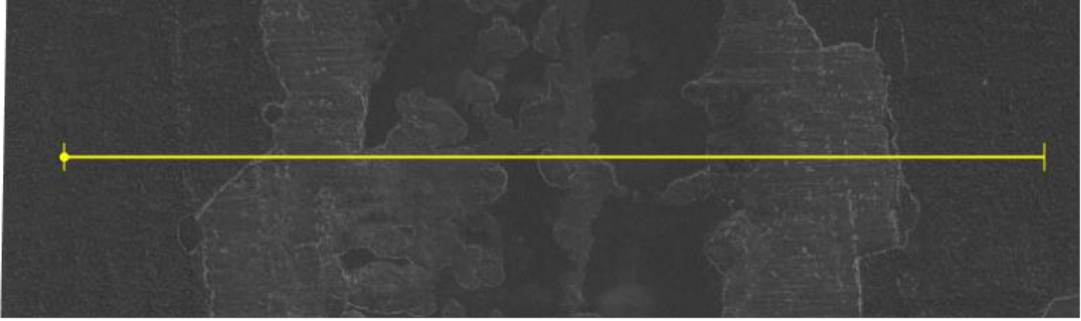
Şekil 4.14: 850 °C’de işleme tabi tutulmuş 4140 çeliğinin 5N’luk yük altında ve 0,15 m/s kayma hızında kuru kayma aşınma işlemine tabi tutulduktan sonra 500x ve 2.00 kx’ deki SEM fotoğrafları verilmiştir.

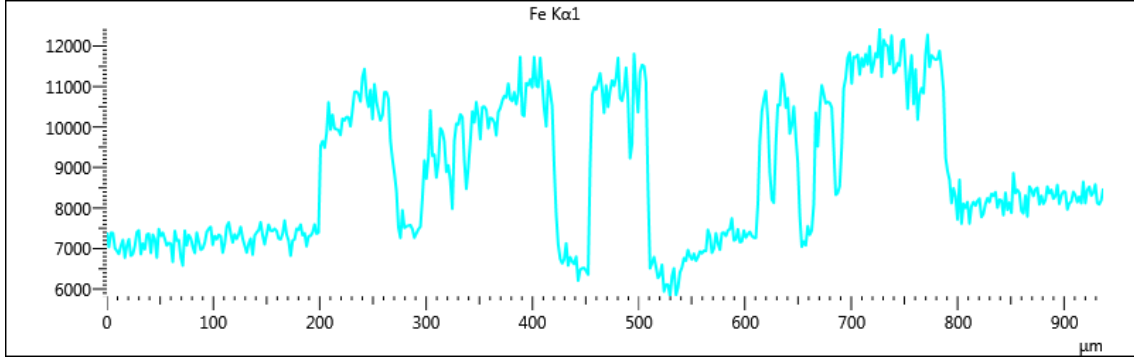
Şekil 4.14'te 850 °C'de işleme tutulmuş numunenin 5N yük ve 0,15 m/s kayma hızında kuru kayma aşınma testine tabi tutulduktan sonraki SEM aşınma iz fotoğrafları 500x ve 2.00 kx büyütmede verilmiştir. 500x deki görüntüde aşınma izi yolunda gri ve siyah olarak iki farklı kontrast dikkat çekmektedir. Bu kontrast farklarının sebeplerini daha iyi anlayabilmek için numune üzerinde yapılan çizgisel EDS sonuçları şekil 9.15'te verilmiştir. Burada daha koyu bölgelerin oksijence daha zengin dolayısıyla glazed layer veya sır tabakası olarak bilinen oksitlenmiş yüzey olduğu anlaşılmaktadır. Gri tabakanın ise ferritçe ve çeliğin kimyasal bileşiminde bulunan krom elementince zengin olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca aşındırıcı bilyadan kopan bazı partiküllerin yine oksitçe zengin tabakaya yapıştığı EDS analiz sonuçlarından anlaşılmaktadır. Birçok araştırmacı özellikle yüksek sıcaklıklarda kuru kayma aşınma sistemlerinde bu tabakanın varlığından bahsetmişlerdir Pauschitz vd., (2003). Aşındırma işleminde parametrelere bağlı olarak bu tabakanın yapısının değişeceğini bildirmişlerdir. Glazed tabakasının şekillenmesinde tribolojik şartların önemli rol oynadığını belirtmişlerdir. Glazed tabakası, sürtünme katsayısının değişmesinde ve numunenin aşınma direncinin artmasında rol üstlenir. Glazed tabakası numunenin kimyasal bileşimine, mekanik özelliklerine, hasar mekanizmalarına (yorulma, gevrek kırılma, korozyon, sürünme, aşınma vb.), parçanın boyut ve şekline göre farklılıklar göstermektedir. . Bu tabaka aşınma çiftlerinin aşınanı olan yüzeyde dört farklı durumda bulunabilir.

- 1- Birincisi glazed tabakasının şekillenmediği tabakadır.
- 2- İkincisi transfer tabakası (TT) tabakasıdır. Bu iki tabaka oda sıcaklığı şartlarında oluşur.
- 3- Üçüncüsü mekanik karışım gösteren tabaka (MKG) tabakadır.
- 4- Dördüncüsü ise kompozit tabaka (KT) dir.

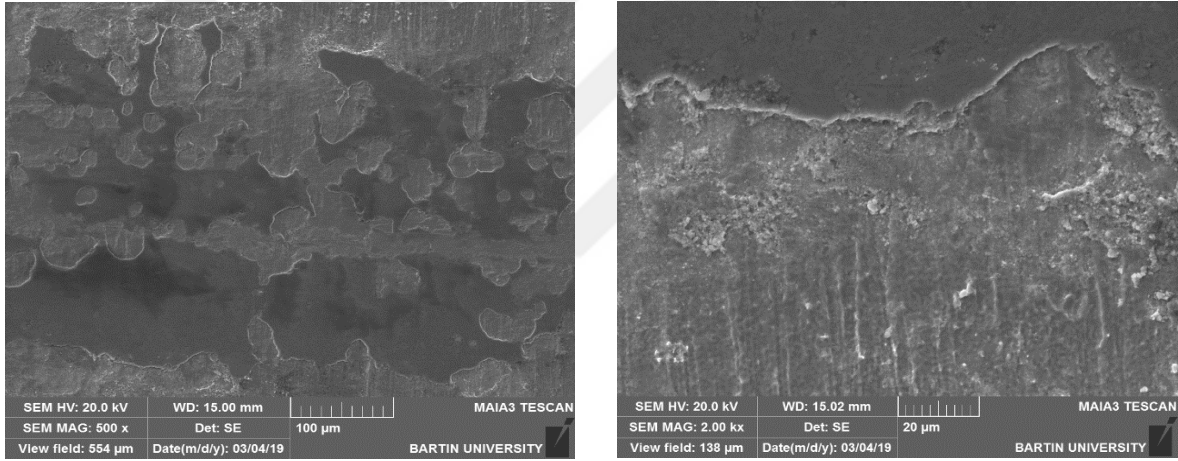
Yüksek sıcaklıklarda çalışan malzemelerin yüzeylerinde glazed tabakası adı verilen ince bir tabaka oluşmaktadır. Glazed tabakası parça yüzeyinde sıcaklığında etkisiyle transfer tabakası (TT), mekanik karışım gösteren tabaka (MKG) ve kompozit tabakası (KT) şeklinde meydana gelmektedir. Bunlar içerisinde KT tabakası yüzeyden çabuk çözünen ve yüzeyden hemen ayrılan bir tabakadır. Sıcaklığın artmasıyla yüzeyde ince ve daha kuvvetli tutunan bir tabaka haline gelir. Kompozit tabaka, artan yükün uyguladığı basma kuvveti neticesinde

meydana gelen aşınmanın azalmasında etkin rol oynamaktadır. KT tabakası artan yüke bağlı olarak alt yüzeye olan adhezyonunu artırır. Bunun sonucunda kompakt bir hale gelir.





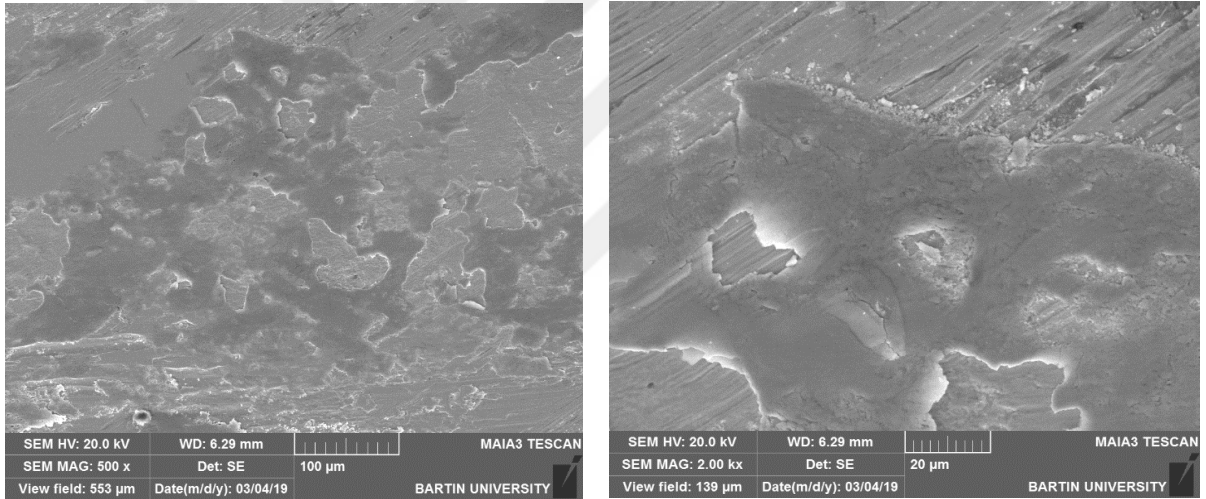
Şekil 4.15: 850 °C işleme tabi tutulmuş 4140 çeliğinin 5N ve 10N yüklerin altında ve 0,15 m/s kayma hızında kuru kayma aşınma işlemine tabi tutulduktan sonraki EDS analizi sonuçları.



Şekil 4.16: 850 °C’de işleme tabi tutulmuş 4140 çeliğinin 10N’luk yük altında ve 0,15 m/s kayma hızında kuru kayma aşınma işlemine tabi tutulduktan sonra 500x ve 2.00 kx’ deki SEM fotoğrafları verilmiştir.

Şekil 4.16’da 850 °C’de işleme tutulmuş numunenin 5N yük ve 0,15 m/s kayma hızında kuru kayma aşınma testine tabi tutulduktan sonraki SEM aşınma iz fotoğrafları 500x ve 2.00 kx büyütmede verilmiştir. Benzer şekilde 850 °C’de işleme tabi tutulduktan sonra 10N yük ve 0,15 m/s kayma hızında kuru kayma işlemine tabi tutulan numunenin yüzeyinde sır tabakası oluşmuştur. Ancak sır tabakasının daha yoğun bir şekilde yüzeyde oluştuğu, oluşan bu sır tabakasının sonrasında plakalar halinde yüzeyden döküldüğü SEM fotoğraflarından

görülmektedir. Özellikle 2.00 kx de verilen görüntüde sır tabakası ile bu sır tabakası döküldükten sonra meydana çıkan alt yüzey görüntüsü daha belirgin görülmektedir. Ancak 5N ve 10N yükler altında numunelerde meydana gelen hacim kayıpları incelenecek olursa 10N yük altında gerçekleştirilen aşınma deneylerinde numunenin daha fazla hacim kaybına uğradığı Şekil 4.16'da görülmektedir. Bunun sebebinin öncelikle artan yük ile birlikte aşındırıcı bilyanın daha fazla yüzeye batmasına bağlamak mümkündür. Diğer bir yaklaşım ise artan yük ile birlikte numune yüzeyinde oluşan sır tabakasının daha hızlı bir şekilde oluşarak yine yükün etkisiyle daha hızlı bir şekilde yüzeyden kopmasına bağlanabilir. Diğer numunelerle kıyaslandığında en yüksek hacim kaybı bu numunede görülmüştür. Çünkü numunenin sertleştirilme kesit yüzeyinden alınan en düşük sertlik değeri ve en düşük kaplama kalınlığı bu numunede görülmüştür.

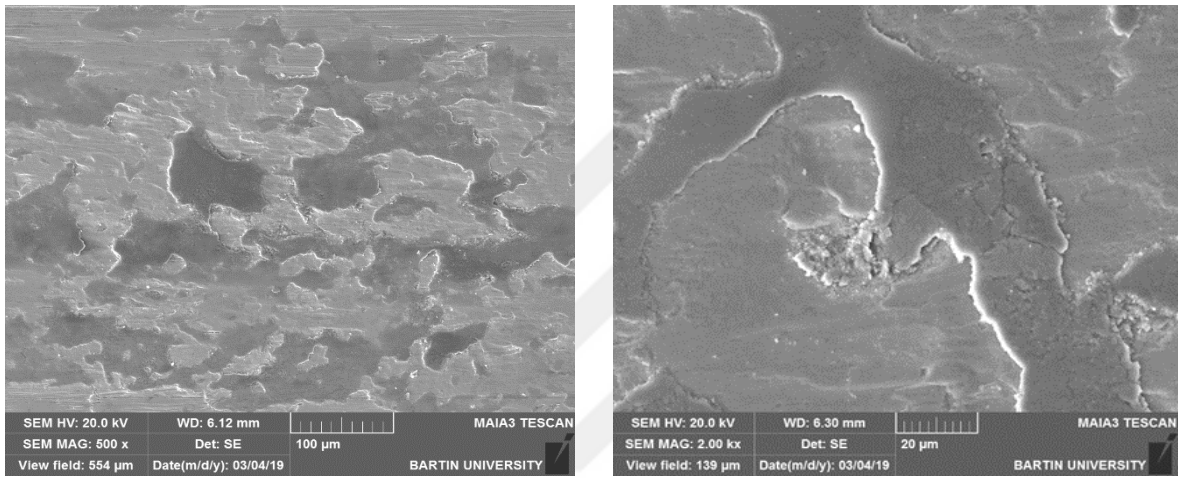


Şekil 4.17: 1000 °C'de işleme tabi tutulmuş 4140 çeliğinin 5N'luk yük altında ve 0,15 m/s kayma hızında kuru kayma aşınma işlemine tabi tutulduktan sonra 500x ve 2.00 kx' deki SEM fotoğrafları verilmiştir.

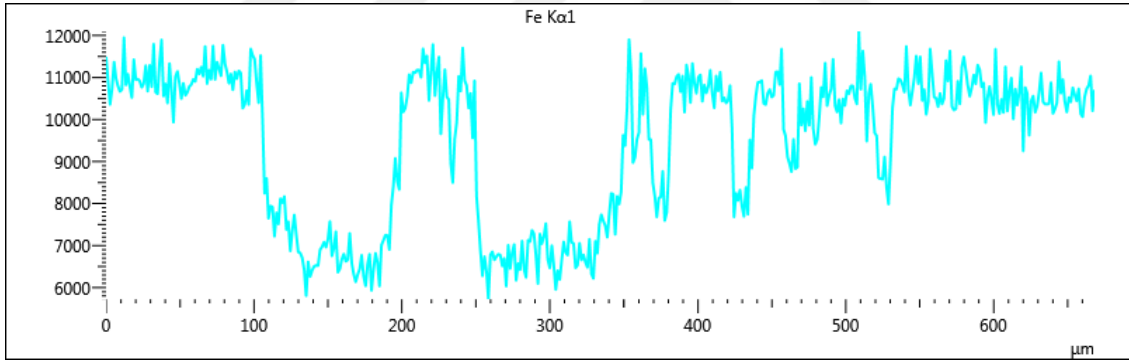
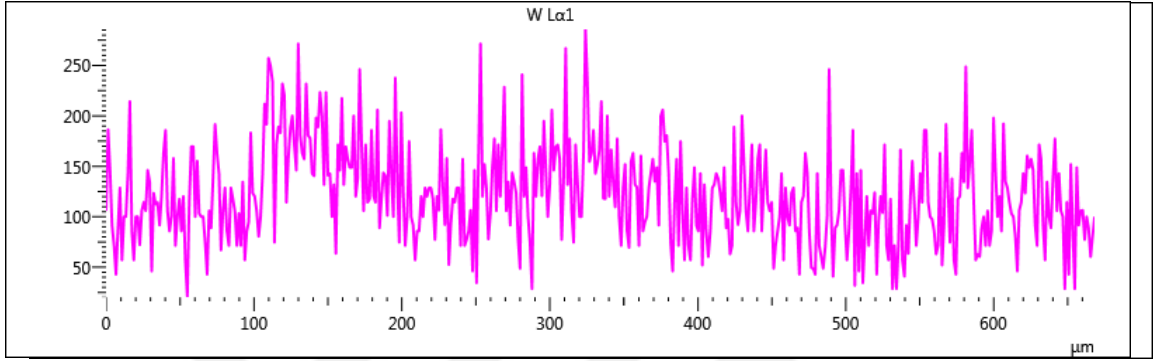
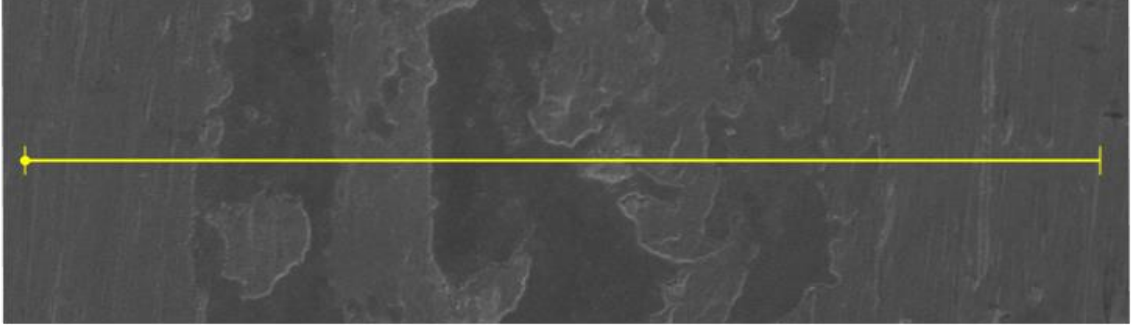
Şekil 4.17'de 1000 °C'de işleme tutulmuş numunenin 5N yük ve 0,15 m/s kayma hızında kuru kayma aşınma testine tabi tutulduktan sonraki SEM aşınma iz fotoğrafları 500x ve 2.00 kx büyütmede verilmiştir. Resim üzerinden oluşan sır tabakası yine görülmektedir. Yine sır tabakasının dökülerek numuneyi hasara uğrattığı anlaşılmaktadır.

10N daki duruma bakıldığında (Şekil 4.18) aşınma yüzeyinde sır tabakası ile sır tabakasının döküldüğü kısmın oran olarak birbirine yaklaştığı ve yine Şekil 4.18’de verilen EDS analizinde koyu bölgelerin oksitçe zengin tabakalar olduğu yine bu tabakaların üzerinde aşındırıcı bilyadan gelen volfram elementinin varlığı tespit edilmiştir.

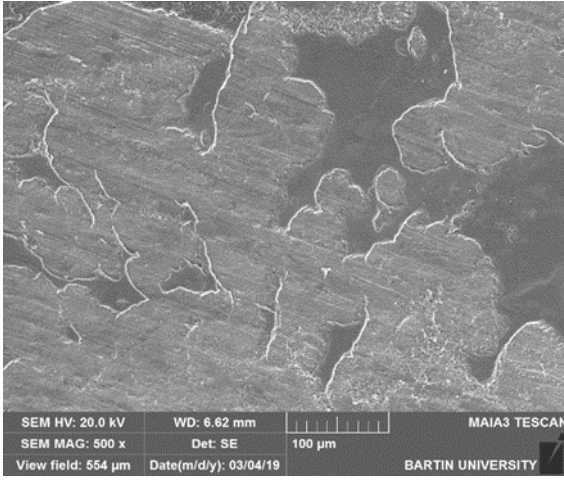
1000 °C’de işleme tabi tutulmuş olan numune ile 850 °C’de işleme tabi tutulan numunenin hacim kayıp değerleri karşılaştırıldığında 1000 °C’deki numunede daha düşük hacim kaybı yaşandığı görülmüştür. Bunun nedeni sertleştirme işlemi sonrası oluşan yüzey sertliği ile açıklanabilmektedir.



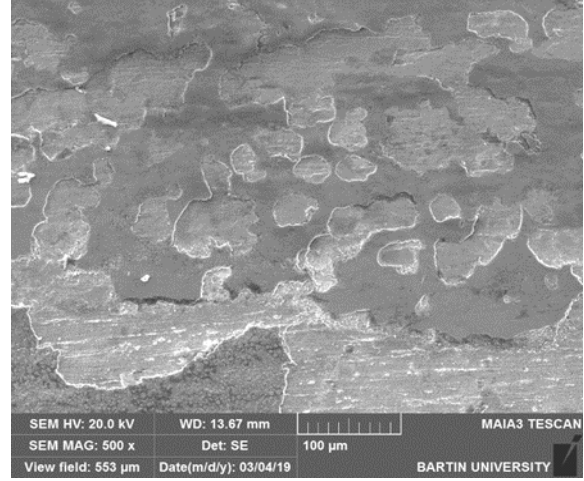
Şekil 4.18: 1000 °C’de işleme tabi tutulmuş 4140 çeliğinin 10N’luk yük altında ve 0,15 m/s kayma hızında kuru kayma aşınma işlemine tabi tutulduktan sonra 500x ve 2.00 kx’ deki SEM fotoğrafları verilmiştir.



Şekil 4.19: 1000 °C’de 10N yük ve 0,15 m/s kayma hızında uygulanan numunenin EDS analiz sonuçları.



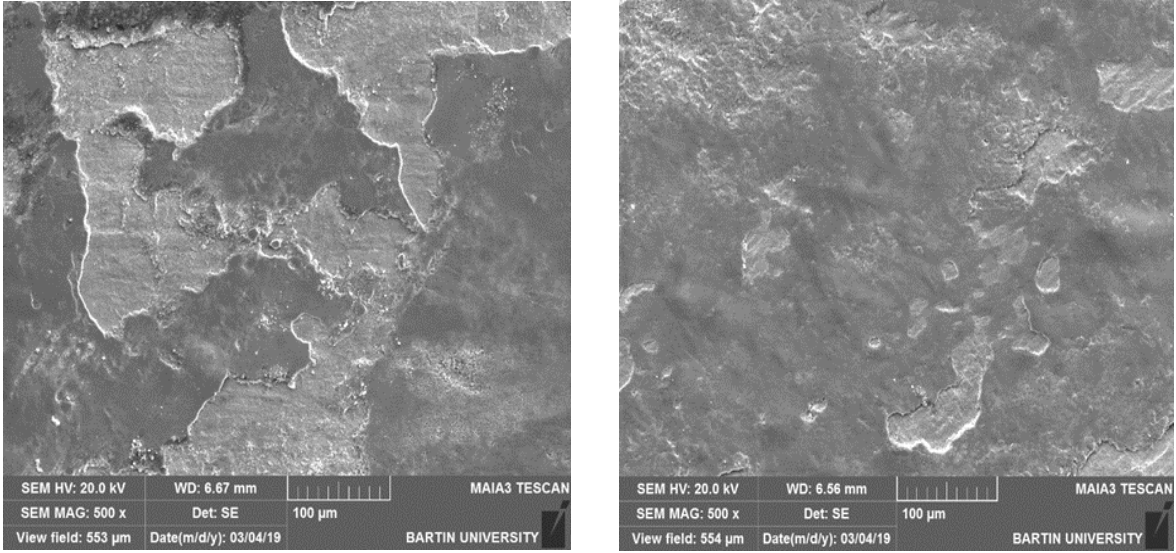
(a)



(b)

Şekil 4.20: 1050 °C’de işleme tabi tutulmuş 4140 çeliğinin 5N (a) ve 10N (a) yüklerin altında ve 0,15 m/s kayma hızında kuru kayma aşınma işlemine tabi tutulduktan sonra 500x’deki SEM fotoğrafları verilmiştir.

Şekil 4.20’de 1050 °C’de işleme tutulan numunenin 850 °C’de işleme tutulan numune ile hacim kayıpları karşılaştırıldığında bu numunede daha düşük hacim kaybı yaşandığı görülürken 1000 °C ile karşılaştırıldığında daha fazla hacim kaybı meydana geldiği görülmüştür. Bu numunenin sertlik değeri 1000 °C’deki numuneden yüksek olmasına rağmen hacim kayıplarının yüksek olması malzeme yüzeyinde oluşan sır tabakasının hızlı bir şekilde oluşarak yine hızlı bir şekilde plakalar halinde dökülmesiyle ilişkilendirilebilir. Bu numunenin 10N altında gerçekleştirilen aşınma deneyleri sonucunda numune yüzeyinden alınan EDS analizi yüzeyde oksit tabakasının düzgün dağıldığını ve Ferritin daha geniş bir alana yayıldığını göstermektedir. SEM fotoğrafına bakıldığında bu yumuşak bölgenin aşınma yönünde ekstrüze olduğu görülmektedir.

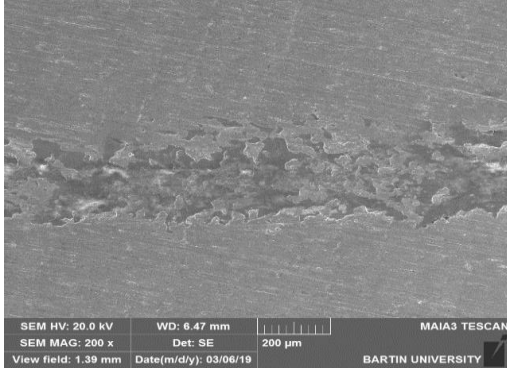


(a)

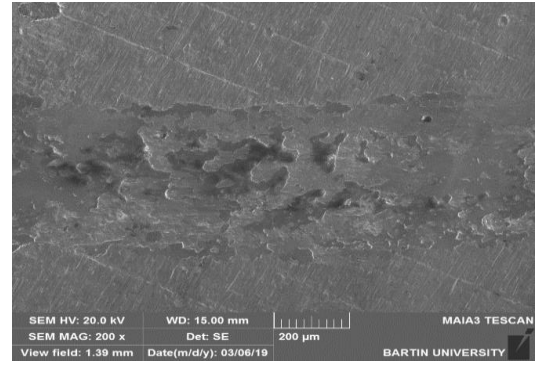
(b)

Şekil 4.21: 1150 °C’de işleme tabi tutulmuş 4140 çeliğinin 5N ve 10N yük altında ve 0,15 m/s kayma hızında kuru kayma aşınma işlemine tabi tutulduktan sonra 500x’deki SEM fotoğrafları.

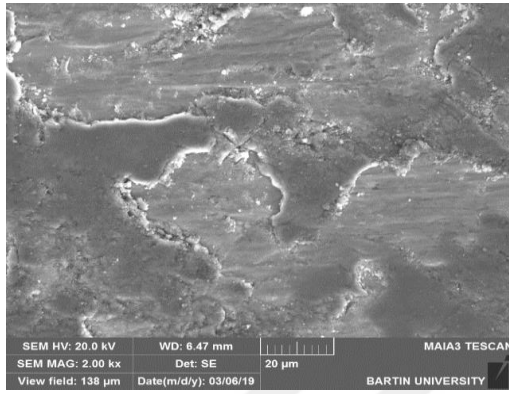
Şekil 4.21’de 1150 °C’de işleme tutulmuş numunenin 5N yük ve 10N yük altında 0,15 m/s kayma hızında kuru kayma aşınma testine tabi tutulduktan sonraki SEM aşınma iz fotoğrafları 500x büyütmede verilmiştir. 1150 °C’de işleme tabi tutulan numunede 850 °C, 1000 °C ve 1050 °C’deki sıcaklıklara göre daha düşük hacim kaybı olduğu görülmüştür. Bunun nedeni lazer yüzey sertleştirme sonrası yüzey sertlik değerinin diğer numunelere kıyasla daha yüksek olmasıyla ve yüzeyde oluşan sır tabakasının kaplama kalınlığı ile ilişkilendirilebilir. 5N ve 10N’luk yük uygulanan deneyler karşılaştırıldığında, 10N’luk yük uygulanan deneyde oksit tabakasının daha fazla oluştuğu görülmektedir. Yine 10N’luk yük uygulanan deneyde bu oksit tabakasına bağlı oluşan sır tabakasının kaplama kalınlığı 5N’luk yük uygulanan deneye göre daha fazladır ve oluşan bu sır tabakasının kalınlığına bağlı olarak 5N’luk yük uygulanan deneyde sır tabakasının yüzeyde tutunamayıp çözünmesinden kaynaklı olarak tabakalar halinde yüzeyden ayrıldığı görülmektedir.



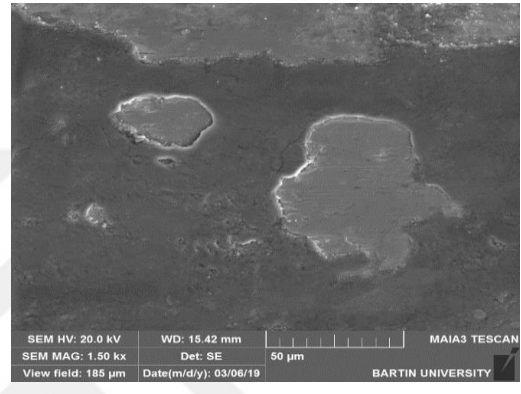
(a)



(b)



(c)



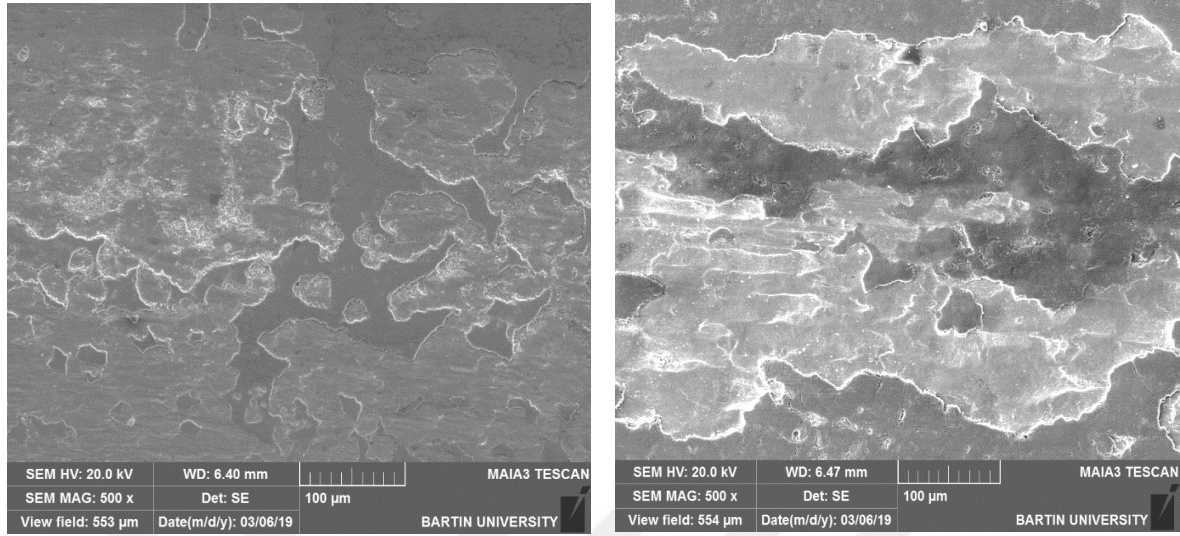
(d)

Şekil 4.22: 1350 °C’de yüzey sertleştirme işlemine tabi tutulmuş 4140 çeliğinin 5N ve 10N’luk yükler altında ve 0,15 m/s kayma hızında kuru kayma aşınma işlemine tabi tutulduktan sonra (a) 5N- 200x, (b) 10N-200x, (c) 5N-2.00 kx, (d)10N-1.50 kx deki SEM fotoğrafları.

Şekil 4.22’de 1350 °C’de işleme tutulmuş numunenin 5N yük ve 10N yük altında 0,15 m/s kayma hızında kuru kayma aşınma testine tabi tutulduktan sonraki SEM aşınma iz fotoğrafları 5N-200x, 10N-200x, 10N-1.50 kx ve 5N-2.00 kx büyütmede verilmiştir.

850 °C, 1000°C, 1050 °C ve 1150 °C’deki numuneler içerisinde en yüksek sertliğe sahiptir. Aşınma performansı olarak değerlendirildiğinde 5N’luk yük altında diğer numunelere göre daha düşük bir hacim kaybına uğradığı anlaşılmaktadır. Bunu numunenin yüzey sertliği ile ve sertleştirme sonunda meydana gelen tabakanın kalınlığı ile ilişkilendirmek mümkündür. Çünkü en yüksek sertlik derecesi ve en geniş kaplama kalınlığı bu numunede görülmüştür. Numunelerin 200x, 2.00 kx ve 1.50 kx büyütmedeki SEM aşınma izi fotoğrafları incelendiğinde yüzeyde kalın ve yoğun bir sır tabakasının varlığı görülmektedir. 10N yük

altında işleme tutulan numunenin sır tabakası ise hem daha koyu hem de daha yoğun bir şekilde meydana gelmiştir.



Şekil 4.23: Yüzeysel sertleştirme işlemine tabi tutulmamış 4140 çeliğinin 5N (a) ve 10N (b) luk yükler altında ve 0,15 m/s kayma hızında kuru kayma aşınma işlemine tabi tutulduktan sonra 500 x deki SEM fotoğrafları.

Şekil 4.23'te yüzeysel sertleştirme işlemi yapılmamış numunenin 5N yük ve 10N yük altında 0,15 m/s kayma hızında kuru kayma aşınma testine tabi tutulduktan sonraki SEM aşınma iz fotoğrafları 500x büyütmede verilmiştir. Kuru kayma aşınma testine tabi tutulan işlemsiz numunenin diğer numunelere kıyasla sertlik değeri düşük olmasından dolayı daha yumuşak bir yüzeye sahiptir ve buna bağlı olarak hacim kaybı miktarı da diğer numunelerden daha fazladır. Ayrıca yüzey EDS analizi yapıldığında koyu renkli bölgeler oksijence zengin olmakla birlikte açık renkli bölgeler ferritçe zengindir. 5N'luk yük uygulanan deneydeki oksit tabakasının 10N'luk yük uygulanan deneydeki oksit tabakasından daha fazla olduğu görülmektedir. Yine oksit tabakasının oluşturduğu glazed layer adı verilen sır tabakasını oluşturmasından kaynaklı yüzeyde koruyucu bir kaplama oluşturmaktadır. Oluşan bu sır tabakası ile birlikte 5N ve 10N'luk yük uygulanan deneyler karşılaştırıldığında düşük yüklerde sır tabakasının daha kararlı kaldığı görülmektedir. 10N'luk yük uygulanan deneyde ise artan yükün karşı yüzeyde oluşturduğu basma ve kesme gerilmelerine bağlı olarak sır tabakası tabakalar halinde yüzeyden ayrılarak alt yüzeye geçilmiştir.

BÖLÜM 5

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1 Genel Sonuçlar

Bu çalışmada AISI 4140 çeliğinin lazer ile yüzey sertleştirme işlemi sonrası aşınma davranışları incelenmiştir. Deneylelerde lazer ile sertleştirme işlemine tabi tutulmayan numune ve 850 °C, 1000 °C, 1050 °C, 1150 °C ve 1350 °C’de yüzey sertleştirme işlemi uygulanan numuneler kullanılmıştır. Lazer torcunun ilerleme hızı 4 mm/s’dir. Numunelere uygulanan yüzey sertleştirme işlemi sonrasında 5N ve 10N yükler altında 0,15 m/s kayma hızı kuru ortamda gerçekleştirilen aşınma testi sonucunda numunelerin farklı sıcaklıklarda yapılan sertleştirme işlemi sonrası aşınma üzerindeki etkileri araştırılarak aşağıdaki sonuçlar bulunmuştur.

1. Artan yüke bağlı olarak numunelerdeki hacim kayıpları artmıştır.
2. Artan yüzey sertlik değerlerinin aşınma üzerinde etkili olduğu ancak bunun doğru bir orantı şeklinde olmadığı sonucuna varılmıştır. Lazer işlemine tabi tutulmayan numune ve 850 °C gerçekleştirilen deneylerde numuneler birbirine yakın hacim kaybı değerleri verirken yine 1000 °C ve 1050 °C de gerçekleştirilen deneylerde yine numuneler birbirine yakın hacim kaybı değerleri vermiştir.
3. 1350 °C gerçekleştirilen deneylerde hacim kaybı oranları diğer tüm numuneler ile kıyaslandığında daha düşük çıkmıştır.
4. En yüksek hacim kayıpları işlemsiz numunede gerçekleştirilen deneylerde elde edilmiştir.
5. Kuru-kayma işlemine tabi tutulan numunelerin yüzeylerinde sır tabakası oluşmuştur.

6. Sertliğin değişmesi aşınma mekanizmasının değişmesine sebep olmuştur.
7. Tüm numunelerde gerçekleştirilen deneylerde uygulanan tüm yüklerde yorulma aşınma mekanizması olmuştur.
8. 10N'luk yük altında gerçekleştirilen deneylerde yorulma aşınmasına ilave olarak oksidasyon aşınması meydana gelmiştir ve numunelerin yüzeyinde wolfram elementinin varlığına rastlanmıştır.
9. Lazer ile sertleştirme işlemine tabi tutulmayan numunede gerçekleştirilen deneylerde aşınma mekanizması kısmen değişerek oksidasyon türüne dönuşmüştür.

5.2 Öneriler

Bu tez kapsamında elde edilen verilere göre gelecek çalışmalar için öneriler aşağıda maddeler halinde verilmiştir;

1. Sertliğe bağlı aşınma davranışları incelenen AISI 4140 eliğinin farklı yüzey sertleştirme işlemlerine tabi tutularak, yüzey sertleştirme işlemleri ile malzemenin aşınma davranışına olan etkisi araştırılabilir.
2. Lazer parametrelerinde değişiklik yapılabilir.
3. Malzemenin oda sıcaklığında değil de daha yüksek sıcaklıklardaki aşınma davranışları incelenebilir.

KAYNAKLAR

- Adel, K. M. (2014). Enhancement of Dry Sliding Wear Characteristics of CK45 Steel Alloy by Laser Surface Hardening Processing. *Procedia Materials Science*, 6: 1639 – 1643.
- Ashby, M. F. ve Easterling, K.E. (1984). The Transformation Hardening of Steel Surfaces by Laser Beam. *I. Hypoeutectoid Steels. Acta Metallurgica*, 32(11): 1935–1948.
- Ashby, M. ve Easterling, K. (1984). The transformation hardening of steel surfaces by laser beams—I. *hypo-eutectoid steels, Acta Metall*, 32 (11): 1935–1937 (1939–1948).
- Bachmann, F. Industrial application of high power diode lasersin materials Processing. *Appl Surf Sci*, 2003;208–209:p125.
- Bailey, N., Tan, W. ve Shin, Y. (2009). Predictive modeling and experimental results for residual stresses in laser hardening of AISI 4140 steel by a high power diode laser. *Surf. Coat. Technol*, 203 (14): 2003–2012.
- Bağcı, M. (2005). CuZn10 Pirinç Malzemede Kayma Hızının Aşınmaya Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, T.C. Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Konya, 94 s.
- Bağcı, M. (2010). Cam Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemelerin Erozyon Aşınma Davranışının İncelenmesi. Doktora Tezi, T.C. Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Konya, 167 s.
- Chen, H.T. ve Wu, X.Y. (2006). Estimation of surface absorptivity in laser surface heating process with experimental data, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 39 (6) :1141.
- Choi, S. D., Cheong, S. H., Yang S. C. ve Kim, J. G. (2007) SKD11 surface heat treatment characteristics by high power diode laser. *Proceeding of KSMTE 2007 Autumn Annual Meeting*, 2007:380-385.
- Ehlers, B., Herfurth, H. ve Heinemann, S. (1998). Surface hardening with high power diode lasers, in Proceedings of the ICALEO. *Section-G*, pp. 75–84.
- Galantucci, L. M. ve Tricarico, L. (1999). An Experimental and Numerical Study on the Influence of not Uniform Beam Energy Distribution in Laser Steel Hardening. *Annals of the CIRP* 48(7):155–158.
- Gezgin, S. Y. (2009). Serbest Elektron Lazeri Parametrelerinin Belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, T.C. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, Isparta, 88 s.
- Guarino, S., Barletta, M. ve Afilal, A. (2017). High Power Diode Laser (HPDL) surface hardening of low carbonsteel: Fatigue life improvement analysis. *Journal of Manufacturing Processes*, 28: 266–271.

- Grum, J. ve Sturm, R. (1997). Laser surface melt-hardening of gray and nodular irons, *Appl. Surf. Sci.*, 109–110: 128–132.
- Han, Y. H. (2006). Laser beam quality and process efficiency. *Proceeding of Korea Society of Laser Processing 2006 Spring Annual Meeting*, 2006: 48-50.
- İloğlu, M. E. (2010). Farklı Özelliklerdeki Çelik Malzemelerin Lazer İle Kesilmesinde Elde Edilen Kesme Aralığının Karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstriyel Teknoloji Eğitimi, Ankara, 150 s.
- Boyraz, İ. ve Yıldız, A. (2016). Lazer Çeşitleri ve Yüksek Yoğunluklu Lazer Kullanımı. *J CONTEMP MED*, 6 (Case Reports): 104-109.
- Karasan, A. (2009), *Laser İle Malzeme işlemleri*. Birinci basım, Literatür Yayıncılık, Dağıtım, Pazarlama, Sanayi ve Ticaret LTD. ŞTİ., Şefik Matbaası, İstanbul, 295 s.
- Kaya, M. (2007). Akridindion Türü Organik Boyarmadde Lazerlerinin Sentezi Ve Bunların Uygulanabilirliğinin Araştırılması. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 155 s.
- Kesti, E. (2009). Ç - 4140 Çeliğinin, Mikro Yapı Ve Mekanik Özelliklerine Su Verme Ortamının Etkilerinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Konya, 99s.
- Komanduri, R. ve Hou, Z. (2004). Thermal analysis of laser surface transformation hardening optimization of process parameters. *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 44 (9): 991–1008.
- Kustov, V., Gibmeier, J. ve Wanner, A. (2017). Spatially resolved temporal stress evolution during laser surface spothardening of steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 239: 326–335.
- Lakhkar, R. S., Shin, Y. C. ve Krane, M. J. M. (2008). Predictive Modeling of Multi-track Laser Hardening of AISI 4140 Steel. *Materials Science and Engineering, A* 480:209–217.
- Lawrence, J., Pou, J. ve Toyserkani, E. (2010). Advances in Laser Materials Processing Technology. *Research and Application Woodhead Publishing Series in Welding and Other Joining Technologies*.
- Lee, J. H., Jang, J. H., Joo B. D., Son Y. M. ve Moon, Y. H. (2009). Laser surface hardening of AISI H13 tool steel. School of Mechanical Engineering, Pusan National University, Busan, 609-735, Korea Received 18 June 2008; accepted 10 March 2009. *Transactions on Nonferrous Metals Society of China*, 19: 917-920.
- Li L. (2000). Advances and characteristics of high-power diodelaser materials processing. *Opt Lasers Eng.*, 34:p231.

- Liverani, E., Adrian, H.A., Lutey, A. A., Fortunato, A. ve Tomesani, L. (2016). A complete residual stress model for laser surface hardening of complex medium carbon steel components. *Surface & Coatings Technology*, 302: 100–106.
- Lusquiñosa, F., Condea, J. C., Bonssb, S., Riveiroa, A., Quinteroa, F. ve ComesañaaR, et al. (2007). Theoretical and experimental analysis of high power diode laser(HPDL) hardening of AISI 1045 steel. *Appl Surf Sci*, 254(4):948–54.
- Nguyen, Q. ve Yang, C. (2015). A sequential method to determine the surface absorptivity in the process of laser surface hardening. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 95 (2016) 224–229.
- Ohmura, E. ve Inoue, K. (1989). Computer Simulation on Structural Changes of Hypoeutectoid Steel in Laser Transformation Hardening Process. *JSME International Journal*, 32: 45–53.
- Pantelis, D. I., Bouyiouria, E., Kouloumbib, N., Vassilioub, P. ve Koutsomichalisc, A. (2002). Wear and corrosion resistance of laser surface hardened structural steel. *Surf. Coat. Technol.*, 161 (2002) 125–134.
- Putatunda, S. K., Nambiar, M. ve Clark, N. (1997). Influence of laser hardening on mechanical properties of a low alloy steel, *Surf. Eng.* 13: 407–414.
- Ricciardi, G., Cantello, M. ve Micheletti, G. F. (1982). Technological Applications of the Laser Beam in Heat Treatments. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 31(1):125–130.
- Roy, A. ve Manna, I. (2001). Laser surface engineering to improve wear resistance of austempered ductile iron. *Mater. Sci. Eng., A* 297 (1–2): 85–93.
- Saydam, A. (2015). Çeşitli Lazer Parametrelerinin Silikon Malzeme Delme Sürecine Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Mekatronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı Mekatronik Mühendisliği Programı, İstanbul, 57 s.
- Selvan, J. S., Subramanian, K. ve Nath, A. K. (1999). Effect of laser surface hardening on En18 (AISI 5135) steel. *J. Mater. Process. Technol.* 91: 29–36.
- Soriano, C., Leunda, J., Lambarri, J., Navas, G. V. ve Sanz, C. (2010). Effect of laser surface hardening on the microstructure, hardness and residual stresses of austempered ductile iron grades. *Applied Surface Science*, 257 (2011) 7101–7106.
- Steen, W. M. ve Mazumder, J. (1991). Laser Material Processing. *Springer, London*,
- Syed, B., Shariff, S. M., Padmanabham, G., Lenka, S., Bhattacharya, B. ve Kundu S. (2017). Influence of laser surface hardened layer on mechanical properties of reengineered low carbon steel sheet. *Materials Science & Engineering, A* 685: 168–177.
- Güleç, Ş. ve Aran, A. (1995). Malzeme Bilgisi Cilt II. 2.basım (çeviri), İTÜ Makine Fakültesi, İstanbul, 174 s.

- Tani, G., Fortunato, A., Ascari, A. ve Campana G. (2010). Laser surface hardening of martensitic stainless steel hollow parts. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 59: 207–210.
- Toptop, G. O. (2011). Yüksek Hız Takım Çeliklerinde Uygulanan Isıl İşlemler Ve Elde Edilen Özellikler Arasındaki İlişkilerin Fiziksel Metalurjik Yönden İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, T.C. Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Malzeme Anabilim Dalı, İstanbul, 116 s.
- URL-1 (2018), <http://www.turkchem.net/lazer-isini-ile-yuzey-sertlestirme-uygulamalari>, Lazer Işını İle Yüzey Sertleştirme Uygulamaları, (08.06.2018).
- URL-2 (2013), <https://kalipdunyasi.com.tr/tr/arsiv/2013/62/kalip-ve-makine-parcalarinin-sertlestirilmesinde-yuksek-guclu-diyot-lazer>, Makine ve Kalıp Parçalarının Sertleştirilmesinde Yüksek Güçlü Diyot Lazer.
- Varol, T. (2016). Aşınma deneyi. Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji Ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Laboratuvar Föyü, Trabzon, 9 s.
- Wang, S.-H., Chen, J.-Y., ve Xue, L. (2006). A study of the abrasive wear behaviour of laser-clad tool steel coatings, *Surf. Coat. Tech.*, 200: 3446–3458.
- Yáñez, A., Álvarez, J., López, A., Nicolás, G., Pérez, J., Ramil, A. ve Saavedra, E. (2002). Modelling of temperature evolution on metals during laser hardening process. *Appl. Surf. Sci.*, 186 (1–4): 611–616.
- Yıldız, T. ve Gür, A. K. (2006). Aşınma Sistemleri. Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi, Metal Eğitimi Bölümü, Elazığ, 6 s.
- Zeisig, J., Schadlich, N., Giebeler, L., Sander, J., Eckert, J., Kuhni, U. ve Hufenbach, J. (2017). Microstructure and abrasive wear behavior of a novel FeCrMoVC laser cladding alloy for high-performance tool steels. *Wear*, 382–383: 107–112.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : Esra GÜNER
Doğum Yeri ve Tarihi : Devrek /26.01.1994

Eğitim Durumu

Lisans Öğrenimi : Bartın Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği
Yüksek Lisans Öğrenimi : Bartın Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği
Bildiği Yabancı Diller : İngilizce
Bilimsel Faaliyet/Yayımlar : Tufal Takviyeli Polimer Matrisli Kompozitin Kuru-
Kayma Aşınma Davranışları

Aldığı Ödüller :

İş Deneyimi

Stajlar : 07.2014 – 08.2014
Türkiye Vagon Sanayi A.Ş., Merkez, SAKARYA
Pozisyon: Üretim Stajı

Stajlar : 07/2015 – 08/2015
Döksan Isıl İşlem, Organize Sanayi Bölgesi, ANKARA
Pozisyon: Genel İşletme ve Organizasyon Stajı

Projeler ve Kurs Belgeleri : English Language Certificate- 2018, Liderlik ve İşletme Yöneticiliği-2017, Yönetim ve Organizasyon-2017, Ehliyet

Çalıştığı Kurumlar :

İletişim

E-Posta Adresi : esraguner.67@hotmail.com

Tarih : 28/08/2019 (Tez Savunma Tarihi)