



T.C.

BARTIN ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**LAZER İLE YÜZEY İŞLEMİNİN SFERO DÖKME DEMİRLERİN
AŞINMA DAVRANIŞINA ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

MUHAMMET EMİN TOPCU

DANIŞMAN

DOÇ. DR. YILMAZ KÜÇÜK

BARTIN-2023



T.C.

BARTIN ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**LAZER İLE YÜZEY İŞLEMİNİN SFERO DÖKME DEMİRLERİN AŞINMA
DAVRANIŞINA ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Muhammet Emin TOPCU

BARTIN-2023

BEYANNAME

Bartın Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre Doç. Dr. Yılmaz KÜÇÜK danışmanlığında hazırlamış olduğum “LAZER İLE YÜZEY İŞLEMİNİN SFERO DÖKME DEMİRLERİN AŞINMA DAVRANIŞINA ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI” 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.

03.02.2023

Muhammet Emin TOPCU

ÖNSÖZ

Lisans ve yüksek lisans öğrenimim sırasında ve bu yüksek lisans tezinin bilimsel danışmanlığını üstlenen, konunun belirlenmesi ve hazırlanması sırasında yardımını ve fedakârlığını esirgemeyen, desteğini her zaman yanımda hissettiğim hocam Doç. Dr. Yılmaz KÜÇÜK' e ve aşınma deneylerinde destek olan Arş. Gör. Dr. Emre ALTAŞ hocama teşekkür ederim.

Ayrıca bu günlere gelmemde bana ışık tutan ve her zaman yanımda olarak maddi ve manevi desteğini esirgemeyen başta eşim Burcu TUNÇ TOPCU' ya, annem İnci DEMİR' e, babam Hüseyin TOPCU' ya ve ablam Elif KURT' a sonsuz şükranlarımı sunarım.

Numunelerin üretilmesinde desteğini esirgemeyen Ekstrametal Döküm Genel Müdürü Sn. Şükrü ATILGAN' a, Dökümhaneler Müdürü Sn. Ayhan COMART' a, tüm Ekstrametal Döküm çalışanlarına ve Miltaş - Rukosen Lazer' e teşekkür ederim.

Bu lisansüstü tezinde proje kapsamında finansal desteğinden dolayı Bartın Üniversitesi PTO genel koordinatörlüğü ve BAP Koordinasyon Birimi'nde emeği geçen tüm personele teşekkür ederim.

Muhammet Emin TOPCU

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

LAZER İLE YÜZEY İŞLEMİNİN SFERO DÖKME DEMİRLERİN AŞINMA DAVRANIŞINA ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Muhammet Emin TOPCU

Bartın Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Yılmaz KÜÇÜK

Bartın-2023, sayfa: 68

Bu çalışmada, lazer yüzey işleminin (LST) ferritik GJS 400-18 ve perlitik GJS 700-2 sfero dökme demirlerin kuru kayma aşınma davranışı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Çalışma kapsamında, numune yüzeylerine iki farklı lazer gücü (1450 W ve 1600 W) ve iki farklı lazer tarama hızı (2 mm/s ve 4 mm/s) kullanılarak gerçekleştirilen LST işlemleri sonrasında oluşan mikro yapılar incelenmiş ve yüzey sertlik değerleri ölçülmüştür. Daha sonra, LST'nin sfero dökme demirlerin aşınma davranışı üzerindeki etkisini incelemek için iki farklı yük (5N, 10N) altında ve üç farklı kayma hızında (10 mm/s, 20 mm/s ve 30 mm/s) kuru kayma aşınma testleri yapılmıştır. Aşınma testleri sonrasında numunelerin aşınma davranışları COF grafikleri, hacim kaybı değerleri, spesifik aşınma oranları ve aşınma mekanizmaları açısından karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. 1600 W lazer gücü ve 2 mm/s lazer tarama hızı kullanılarak yapılan LST işlemlerinden sonra, GJS 400-18 ve GJS 700-2 numuneleri için ölçülen en yüksek sertlik değerlerinin sırasıyla, 924 HV_{0.2} (LST öncesi 216 HV_{0.2}) ve 1054 HV_{0.2} (LST öncesi 244 HV_{0.2}) olduğu belirlenmiştir. Sonuç olarak 431-LST_{ed} ve 731-LST_{ed} kodlu numuneler için hacim kaybı değerlerinin işlem görmemiş numunelere göre sırasıyla yaklaşık % 26.6 ve % 30.7 oranında azaltılabildiği tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kuru kayma aşınma, lazer yüzey sertleştirme, LST, sfero dökme demir

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF LASER SURFACE TREATMENT ON WEAR BEHAVIOR OF DUCTILE CAST IRONS

Muhammet Emin TOPCU

Bartın University

Graduate School

Department of Mechanical Engineering

Thesis Advisor: Assoc. Prof. Dr. Yılmaz KÜÇÜK

Bartın-2023, pp: 68

In this study, the effect of laser surface treatment (LST) on the dry sliding wear behavior of the ferritic GJS 400-18 and the pearlitic GJS 700-2 ductile cast irons was investigated. Within the scope of the study, the microstructures of laser-treated zones were examined after the LST processes to the sample's surfaces using two different laser powers (1450 W and 1600 W) at two different laser scanning speeds (2 mm/s and 4 mm/s), and the surface hardness values were measured. Then, dry sliding wear tests were carried out under two different loads (5N, 10N) and at three different sliding speeds (10 mm/s, 20 mm/s, and 30 mm/s) to examine the effect of LST on the wear behavior of the test samples. After the wear tests, the wear behavior of the samples was evaluated comparatively in terms of COF graphs, volume loss values, specific wear rates, and wear mechanisms. After LST treatments using 1600 W laser power and 2 mm/s laser scanning speed, the highest hardness values measured for the GJS 400-18 and GJS 700-2 samples were determined to be 924 HV_{0.2} (216 HV_{0.2} before LST), and 1054 HV_{0.2} (244 HV_{0.2} before LST), respectively. As a result, it was determined that the volume loss values for the 431-LST_{ed} and 731-LST_{ed} coded samples could be reduced by approximately 26.6% and 30.7%, respectively, compared to the untreated samples.

Keywords: Dry sliding wear, ductile cast iron, laser surface hardening, LST

İÇİNDEKİLER

BEYANNAME	ii
ÖNSÖZ	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
TABLolar DİZİNİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ	1
1.1 Dökme Demirler	3
1.1.1 Dökme Demirlerin Sınıflandırılması	5
1.1.2 Sfero Dökme Demirler	6
1.1.3 Sfero Dökme Demirlerin Mekanik Özellikleri ve İşlenebilirliği	8
1.1.4 Sfero Dökme Demirlerin Kullanım Alanları	11
1.2 Aşınma	11
1.2.1 Aşınma Türleri	12
1.2.1.1 Adhesiv Aşınma	12
1.2.1.2 Abrasif Aşınma	13
1.2.1.3 Erozyon Aşınması	14
1.2.1.4 Korozyon aşınması	15
1.2.2 Aşınmayı Etkileyen Faktörler	16
1.2.2.1 Malzeme Seçimi	16
1.2.2.2 Pürüzlülük	16
1.2.2.3 Sertlik	16
1.2.2.4 Yüzey İşlemleri	17
1.2.2.5 Yağlama	17
1.2.2.6 Temas Geometrisi	17
1.2.2.7 Çevre	17
1.2.3 Aşınmayı Azaltıcı Önleyici İşlemler	17
1.3 Lazer ile Yüzey Sertleştirme İşlemleri	18
1.3.2 Lazer Yüzey Sertleştirme Uygulanması	24

1.3.2.1 Lazer Yüzey Sertleştirme Parametreleri	24
1.3.2.2 Lazer Dönüşüm Sertleştirme.....	26
1.3.3 Lazer Yüzey Sertleştirme Uygulama Alanları	28
2. LİTERATÜR ÖZETİ.....	29
3. MATERYAL VE METOT	32
3.1 Numune Hazırlama ve Malzeme Karakterizasyonu	32
3.2 Lazer Yüzey İşleme (LST)	38
3.3 Kuru Kayma Aşınma Testleri	40
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	43
4.1 LST İşleminin Sertliğe Etkisi.....	44
4.2 LST İşleminin Mikro Yapıya Etkisi.....	46
4.3 LST İşleminin Aşınma Davranışına Etkisi.....	50
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	61
KAYNAKLAR.....	63

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil	Sayfa
No	No
1.1: Sfero dökme demir mikro yapı örneği (sağdaki mikroyapı %4 Nital ile dağlanmış)	6
1.2: Adhesiv aşınma oluşumu şematik gösterimi	13
1.3: Sıkışmış veya serbest uçuşan aşındırıcıların neden olduğu aşındırıcı aşınma	14
1.4: Yüksek sıcaklıkta çeşitli erozyon mekanizmalarının şematik gösterimi; (a) metal erozyonu; (b) oksit erozyonu; (c) oksidasyondan etkilenen erozyon; (d) oksidasyon kontrollü erozyon	15
1.5: Lazerle sertleştirme ilkesi	21
1.6: Lazerle sertleştirme gösterimi	24
1.7: Çeşitli malzemeler için dalga boyunun bir fonksiyonu olarak yansıma	26
1.8: Lazerle sertleştirilmiş En18 çeliğinin derinlik yönü boyunca sertlik profili	27
3.1: EN-GJS-400-18 analizli numunenin mikro yapı görüntüsü dağlanmamış (a), dağlanmış (b)	35
3.2: EN-GJS-500-7 analizli numunenin mikro yapı görüntüsü dağlanmamış (a), dağlanmış (b)	36
3.3: EN-GJS-600-3 analizli numunenin mikro yapı görüntüsü dağlanmamış (a), dağlanmış (b)	36
3.4: EN-GJS-700-2 analizli numunenin mikro yapı görüntüsü dağlanmamış (a), dağlanmış (b)	36
3.5: Lazer işlemine ait şematik gösterim	39
3.6: Ball-on-flat tribometre cihazı	40
3.7: 3B profilometre yazılımı ile aşınmış iz profilinden alanın belirlenmesi	42
4.1: Lazer işlemi öncesi ve sonrasında sfero dökme demir numunelere ait XRD analizi	44
4.2: LST sonrası numunelerin enine kesitleri boyunca alınan sertlik değerleri	44
4.3: Lazer sonrası sfero dökme demir numune kesitlerinin optik mikroskop ve SEM görüntüleri (lazer yoğunluğu: 6,28 J/mm ³)	47
4.4: LST işlemi sonrası sertleştirilmiş ve geçiş bölgelerinin büyütülmüş SEM kesit görüntüleri (lazer yoğunluğu: 6,28 J/mm ³) a) GJS 400-18 b) GJS 700-2	48
4.5: 731-LSTed numunesinin lazerle sertleştirilmiş kesitinden alınan EBSD analizi	49
4.6: Lazer işlemi öncesi ve sonrası sfero dökme demir numunelere ait hesaplanan	

hacim kaybı ve aşınma oranı değerleri (Kayma hızı: 30 mm/s)	50
4.7: LST ile sertleştirilmiş numunelerin farklı kayma hızlarında gerçekleştirilen aşınma testleri sonrası elde edilen iz profil derinliği ve genişliğinin değişimi	52
4.8: Lazer işleminin GJS 400 test numunesinin aşınmış yüzeyi üzerindeki etkisi	54
4.9: GJS 400-18 ve GJS 700-2 numunelerinin lazer işlemi öncesi ve sonrasında farklı yükler altında alınan COF grafikleri (Kayma hızı: 30 mm/s)	55
4.10: Aşınma testi sonrası lazer uygulanmamış GJS 400 numunesinin EDS çizgi tarama analizi (Yük: 5N, Kayma hızı: 30 mm/s, Test süresi: 30 dak.)	56
4.11: Lazer uygulanmamış (GJS 400) ve lazer uygulanmış (431-LSTed) numunelerin aşınmış yüzey SEM görüntüleri a) Lazer uygulanmamış, yük:5N, b) 431-LSTed, yük: 5N, c) Lazer uygulanmamış, yük:10N, d) 431-LSTed, yük: 10N.....	57
4.12: Lazer işleminin GJS 700 test numunesinin aşınmış yüzeyi üzerindeki etkisi	59
4.13: Lazer uygulanmamış (GJS 700) ve lazer uygulanmış (731-LSTed) numunelerin aşınmış yüzey SEM görüntüleri	60

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo	Sayfa
No	No
1.1: Küresel grafitli dökme demirlerin TSE standardına göre sınıflandırılması	6
1.2: DIN 1563 standardı - Brinell sertliği için kılavuz değerleri	10
1.3: Başlıca endüstriyel lazer türlerinin verimliliği	23
3.1: Test numunelerinin kimyasal kompozisyonları (% ağı.).....	32
3.2: Döküm sonrası sfero dökme demir numunelerin mikroyapılarındaki faz.....	33
3.3: Numunelerin yaş kalıp kumu karakteristiği	34
3.4: Numunelerin ocak ve potadan alınan kimyasal analiz değerleri.....	34
3.5: Döküm sıcaklıkları	34
3.6: Numunelerin mikro yapı özellikleri	37
3.7: Yüzey pürüzlülüğü değerleri.....	37
3.8: Lazer işlem parametreleri.....	39
3.9: Aşınma test parametreleri.....	41

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

J	: Joule
μm	: mikron, mikrometre
mm^3	: milimetreküp
W	: Watt

KISALTMALAR

Ce	: Seryum elementi
DSC	: Diferansiyel taramalı kalorimetri
EBSD	: Elektron geri-saçılım difraksiyonu
HV	: Vickers sertlik değeri
HPDL	: Yüksek yoğunluklu diyot lazer
KGDD	: Küresel grafitli dökme demir
LST	: Lazer yüzey işlemi
LST _{ed}	: Lazer yüzey işlemi uygulanan numune
Mg	: Magnezyum elementi
Nd:YAG	: NeoDimyum katkılı Yitrium Alüminyum Garnet
PAO-4	: Polialfaolefin
TSE	: Türk Standardları Enstitüsü

1. GİRİŞ

Otomobillerde kullanılan şaftlar, akslar, motorlar ve dişlilerin üretiminde ve genel endüstriyel makinalarda dökme demirler sıklıkla kullanılmaktadır (Chakrabarty, 2018; Aliakbari vd., 2022). İşlenebilirliklerinin ve mekanik özelliklerinin iyi olması ve diğer alaşımlar ile karşılaştırıldığında daha düşük maliyetlerinin olması nedeniyle dökme demirler endüstride büyük oranda tercih edilmektedir. Dökme demirler arasında sfero dökme demirler küresel grafit içermektedirler ve bu yönüyle lamel şeklinde grafit içeren gri dökme demirden farklı özellikler sergilemektedirler. Küresel grafit, benzer kompozisyondaki gri dökme demirden daha yüksek dayanım, tokluk ve süneklik elde edilmesini sağlamaktadır. Sfero dökme demirlerin performansı üzerinde sahip oldukları matrisin mikroyapısı etkilidir. Ferritik matris işlenebilirliği iyileştirmekte fakat sertliği ve aşınma direncini düşürmektedir. Perlitik matris ise daha iyi mekanik dayanım elde edilmesini sağlamasına rağmen işlenebilirliği azaltmaktadır (Davis, 1996; Ceschini vd., 2016).

Dökme demirden üretilen mekanik elemanlar genellikle sürtünme hareketi ile birlikte yüksek yüklere maruz kalmaktadır. Bu yüzden uzun servis süresi ve iyi performans için yüksek aşınma direnci kritik öneme sahiptir. Bu amaçla, ısıtılma işlem ve yüzey sertleştirme işlemleri bu elemanların aşınma direncini iyileştirmek için kullanılmaktadır (Wang vd., 2020). Konvansiyonel ısıtılma işlemde genellikle iş parçasının tamamen faz dönüşümü meydana gelmektedir ve bu durum parçanın faydalı yığın özelliklerinde değişime yol açmaktadır (Catalán vd., 2022). Bu kapsamda, lazer yüzey işlemi (LST) dökme demirlerin faydalı ömrünü artırmak için yeni bir teknik olarak ortaya çıkmıştır. Bu teknik, bir lazer ışınından gelen ısı girdisinin malzemenin yüzeyinde sıcaklığı artırdığı ve sonrasında malzemenin kalanına hızlı bir şekilde iletildiği hassas, temiz ve hızlı bir termal işlemdir. Bu teknik ile yüzeye yakın mikro yapıda hızlı bir dönüşüm meydana gelmekte ve böylece iş parçasının genelinde minimum seviyede çarpılma meydana gelmektedir. LST lazer yüzey ertirme ve lazer yüzey sertleştirme tekniklerini kapsamaktadır (Catalán vd., 2022).

Lazer sertleştirme işleminde, malzemenin orijinal yapısını stabil olmayan östenite dönüştürmek için dökme demirlerin üst yüzey tabakası kritik dönüşüm (östenizasyon veya ergime sıcaklığı) noktasının üzerine ısıtılmaktadır. Daha sonra, östenitleşmiş tabaka çevresindeki soğuk altlık ve hava ile birlikte yüksek bir soğuma hızıyla soğutulmaktadır.

Yüksek soğuma hızının etkisiyle lazer bölgesinde sert martenzit fazı oluşumu gerçekleşmekte ve böylece oldukça yüksek sertliğe ve aşınma direncine sahip yüzeyler elde edilebilmektedir (Wang vd., 2020). Lazer yüzey işleminde sertleşme derinliğinin kolay kontrol edilmesi, bu tekniğin küçük ve geometrik olarak karmaşık parçalar üzerinde kullanılmasını sağlamaktadır (Tani vd., 2010; Tesker ve Tesker, 2014; Wang vd., 2020).

Ghaini vd. (2020) GGG-60 sfero dökme demiri sertleştirmek için 600 W gücünde fiber lazer kullanmışlardır. Karbürlerin çözündüğü fakat grafit nodüllerinin çözünmediği optimum yüzey özelliklerini elde etmek için lazer güç yoğunluğu ve tarama hızının önemli olduğunu belirtmişlerdir. Lazer izlerinin birbirlerine yakınlığının mikro yapı ve sertlik üzerine etkisi incelendiklerinde, lazer izleri birbirlerinin üzerine daha çok bindiğinde daha uniform bir yüzey mikroyapı ve sertlik elde edildiğini bulmuşlardır.

Xu ve Liu (2010) sfero dökme demir üzerinde çeşitli proses parametrelerinde lazer sertleştirme işlemi uygulamışlar ve malzemenin mikro sertlik ve aşınma davranışını incelemişlerdir. Araştırmacılar, sertleşen tabakaların yüksek aşınma direncine sahip olduğunu ve araç kalıplarında kullanım için uygun olduğunu bildirmişlerdir.

Papaphilippou vd. (1996), ferro-perlitik sfero dökme demirin mikro yapısını değiştirmek için CO₂ lazer yüzey sertleştirme işlemi uygulamışlardır. Araştırmacılar, malzemenin yüzey sertliği arttığını, aşınma testleri sonucunda, oksidasyon aşınmasının meydana geldiğini, lazer ile sertleştirilmiş yüzeylerin aşınma direncinin arttığını ve abrazyon ve plastik deformasyona karşı daha iyi direnç gösterdiğini rapor etmişlerdir. Yazarlar, deney parametrelerindeki (normal yük, kayma hızı ve nem) değişimin dökme demirin aşınmasını etkilemediğini bildirmişlerdir.

Molian ve Baldwin (1986), ASTM sınıf-40 gri ve 80-55-06 sfero dökme demirlerin kayma aşınması davranışları üzerinde lazer yüzey sertleştirme işleminin etkisini incelemişlerdir. Çalışmalarında, malzeme yüzeylerini taramak ve farklı derinliklerde sertleşmiş ve temperlenmiş tabakalar elde etmek için 1.2 kW, sürekli dalga, CO₂ gaz lazer kullanmışlardır. İşlem sonrasında, kayma aşınmasına karşı önemli ölçüde direnç elde etmişlerdir. Aşınma bölgesinde oksidasyon aşınmasının meydana geldiğini ve bunun lazer uygulanan derinlik ile birlikte arttığını bildirmişlerdir.

Xia vd. (2002) lazer yöntemi ile sertleştirilmiş sfero dökme demirin çelik üzerinde kayması durumunda tribolojik davranışını ve çeşitli ilaveler içeren sıvı parafinin, lazer ile sertleştirilmiş sfero dökme demirin aşınma direnci üzerine etkisini incelemişlerdir. Araştırmacılar, lazer sertleştirme işleminin, sfero dökme demirin yüzey sertliği ve aşınma direncini artırmak için efektif bir metot olduğunu bildirmişlerdir. Molibden dialkaliditiofosfat (MoDTP) ve çinko dialkaliditiofosfat (ZDDP)'nin lazer işlemi görmüş sfero dökme demirin yük taşıma kapasitesini artırmak için en etkili katkılar olduğunu bulmuşlardır.

Ceschini vd. (2016) GJS 400 sfero dökme demirin mikro yapısı ve kuru kayma aşınma davranışı üzerinde lazer enerji yoğunluğunun etkisini incelemişlerdir. Lazer yüzey sertleştirme işleminin, GJS 400'ün aşınma direncini iyileştirdiğini fakat sürtünme katsayısını artmasına neden olduğunu belirtmişlerdir. En iyi aşınma performansının, düşük enerji yoğunluğu uygulanan dökme demirlerde, düşük yüzey sertliği ve yüksek tokluk sayesinde elde edildiğini rapor etmişlerdir.

Lazer yüzey sertleştirme parametrelerinin farklı dökme demir malzemelerin mikroyapı ve aşınma davranışı üzerine etkisi üzerine literatürde çalışmalar olmasına rağmen ferritik ve perlitik sfero dökme demirlerin aşınma davranışlarının kapsamlı olarak değerlendirildiği ve karşılaştırıldığı bir çalışma bulunmamaktadır. Bu yüzden bu çalışmada, endüstride sıklıkla kullanılan, farklı mikro yapılara sahip ferritik (GJS 400-18) ve perlitik (GJS 700-2) sfero dökme demirin kuru kayma aşınma davranışı üzerinde lazer yüzey işleminin etkisi incelenmiştir. Farklı deney parametrelerinde testler gerçekleştirilerek mikroyapı ve tribolojik özellikleri karşılaştırılmıştır.

1.1 Dökme Demirler

Dökme demirler Fe-C denge diyagramında %2 den %6,67 ye kadar olan kısımda gösterilmektedir. Fakat yüksek karbon oranı kırılganlığa neden olduğu için %4,4'e kadar karbon ile %3,5'e kadar silisyum içeren bir Fe-C-Si alaşımı olarak tanımlanmaktadır.

Termodinamikte dökme demirler, metastabil (yarı-kararlı) olarak Fe-Fe₃C (demir-sementit) veya stabil (kararlı) olarak Fe-C (demir-grafit) katılaşma sistemine sahiptir. Bu sistemlerin oluşumunda başta bileşimi, soğuma hızı ve ergitme prosesi önemlidir. Mikro yapıda karbon

ve demir harici bulunan elementlerden silisyum, bakır, nikel, fosfor vb. alaşım elementleri katılaşmayı yavaşlatarak kararlı Fe-C sisteminin oluşmasını sağlar. Mangan, vanadyum, wolfram, niyobyum, molibden, krom, titanyum vb. elementler ise ince kesitli yapılarda katılaşmayı hızlandırır ve yarı-kararlı Fe-Fe₃C sisteminin oluşumuna yardımcı olur (Yüksel ve Meran, 2021; Çelik, 2001).

Kimyasal bileşim bunun yanında, sıvı metalin çekirdekleşme kabiliyeti ile beraber dökme demirin grafitleşme kabiliyetinin de oluşmasını sağlar. Yüksek grafitli dökme demirler yüksek karbon içeren yapıya sahip olurken, düşük grafitli dökme demirler Fe₃C (Sementit) içeren bir yapıya sahip olurlar (Çelik 2001).

Dökme demirlerde malzeme yapısını, tipini ve özelliklerini etkileyen faktörler; malzemenin kimyasal analizi, uygulanan ısı işlem ve malzemenin soğuma hızıdır.

Dökme demirdeki karbon, silisyum, fosfor vb. alaşım elementleri malzemenin mekanik özelliklerini değiştirmektedir. Bu değişime neden olan özelliklerin başında ergime-katılaşma sıcaklığı ve ötektik bileşimi gelmektedir. Bu değişimin etkisi “Karbon Eşdeğeri (CE)” ile hesaplanır (Eş.1).

$$C_{eş} = \%C + \frac{(\%Si + \%P)}{3}$$

(1)

Alman dökümcüler ise karbon eşdeğerini farklı bir formülle hesaplamaktadır. Bu formül doyunluk derecesi (SC) olarak ifade edilir (Eş.2) (Aslani, 1989)

$$SC = \%C_{top}/4,3 - \frac{1}{3}(\%Si + \%P)$$

(2)

Bu kavramlara göre, ötektik bir demir alaşımının karbon eşdeğeri 4.3 olması gerekirken, doyunluk derecesi formülünden hesaplandığında ise 1.0 sonucuna ulaşması gerekmektedir (Aslani, 1989).

Bir yapının ötektik yapıya ne kadar yakın olduğu, o bileşimin karbon eşdeğerliliği ile belirlenir. %4.3 karbon eşdeğerliliğine sahip olan dökme demirde ötektik yapı görülür. Bir dökme demirin ötektik altı veya üstü yapıya sahip olması, karbon eşdeğerliliğinin %4.3’ten küçük ya da büyük olmasına göre tanımlanır.

Dökme demirlerde yapı ve malzeme özelliklerini tanımlayan önemli kriter karbon eşdeğeridir. Dökme demirlerde bulunan karbon ve silisyum oranı, döküm karakteristiğini, özelliklerini, katılaşma sıcaklığı aralığını belirlemede önemli rol oynar. Bunun yanında, karbon ve silisyum oranları farklı olmasına rağmen, aynı karbon eşdeğerine sahip dökme demirlerde vardır. Bu tür dökme demirlerin döküm özellikleri aynı değildir. Örneğin, katılaşma sırasında görülen çekintiyi önlemede Karbon, karbon eşdeğerine göre iki kat fazla etkilidir. İnce kesitlerin katılaşmasını önlemede ise Silisyum etkilidir (Çelik, 2001).

1.1.1 Dökme Demirlerin Sınıflandırılması

Dökme demirler metalografik yapılarına, mekanik özelliklerine, grafitin miktarına ve şekline göre sınıflandırılır.

- Küresel grafitli dökme demir (KGDD) (NCI-DI)
- Gri (Lamel grafitli) dökme demir (GCI)
- Beyaz dökme demir
- Temper dökme demir
- Diğer dökme demirler
 - Çil Uygulanmış Dökme Demirler
 - Benekli (Mottled) Dökme Demirler
 - Vermiküler (kompakt grafitli) dökme demir (CGI)
 - Yüksek Alaşımlı Dökme Demirler

Ayrıca, genel sınıflandırmadan farklı olarak her bir dökme demirin sergilediği mekanik özelliklere göre ayrı bir sınıflandırma standardı da mevcuttur. KGDD' lerde grafitin küresel şekilleri nedeniyle, mekanik özellikler ana fazın yapısına bağlıdır. Bu sınıflandırma DIN EN 1563:2012-03 Küresel Grafitli Dökme Demirler ve TS EN 1563:2018 Dökümler - Küresel grafitli dökme demirler standardında belirlenmiştir.

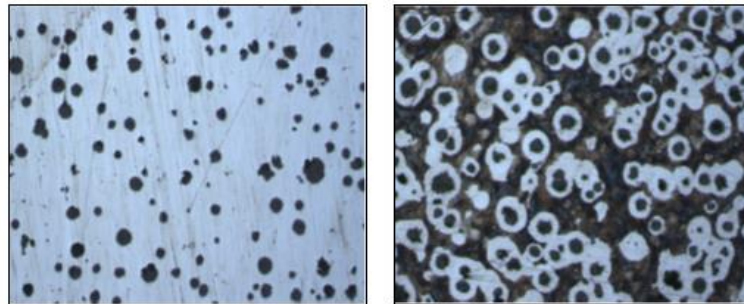
Tablo 1.1: Küresel grafitli dökme demirlerin TSE standardına göre sınıflandırılması (TS 526)

Kısa Gösterilişi	Çekme Dayanımı, kgf/mm ²	0.2 Akma Sınırı, kgf/mm ²	Kopma uzaması, %	Brinell Sertliği (BSD) kgf/mm ²	Mikroyapı
DDK 40	42	28	12	140-201	Daha çok ferritik
DDK 50	50	35	7	170-241	Ferrit + Perlit
DDK 60	60	40	3	192-269	Perlit+Ferrit
DDK 70	70	45	2	229-302	Daha Çok Perlitik
DDK 80	80	50	2	248-352	Perlitik
DDK 35.3	35	22	22	-	Ferritik
DDK 40.3	40	25	18	-	Ferritik
NOT: Darbeli çalışması öngörülen tiplerdir.					

1.1.2 Sfero Dökme Demirler

Küresel grafitli dökme demirler aynı zamanda; duktıl, sfero ve nodüler olarak da adlandırılmaktadır. Küresel grafit yapısına sahip olan bu dökme demirlerin içeriğinde karbon % 3.4 – 3.9 oranında, silisyum ise % 1,8 – 3,1 oranında bulunmaktadır. Üretimi ve mekanik özellikleri bakımından diğer dökme demirlere göre daha çok kullanım alanına sahiptir.

Bu tür dökme demirler gri dökme demirlerle aynı kimyasal bileşime sahip olmasına rağmen aralarında bulunan fark, grafit yapılarının lamel değil küre şeklinde olmasıdır. Karbonun lamelden küre haline dönüşmesini sağlamak için sıvı metale, döküm öncesinde aşılama işlemi uygulanır. Ergimiş sıvı metale Ce veya Mg ilave edilmesi grafitin lamel yapıdan küresel yapıya geçişini sağlamaktadır. Grafit yapısı küre olan dökme demirler, lamel grafitli yapıya sahip dökme demirlere göre daha sünek ve mukavemetlidir.



Şekil 1.1: Sfero dökme demir mikro yapı örneği (sağdaki mikroyapı %4 Nital ile dağlanmış)

Gri dökme demirlerde bulunan grafitler lamel şeklinde ve keskin köşeye sahiptir. Malzeme gerilim yüklemesine maruz kaldığında grafitlerin keskin köşelerinde gerilim artışı (çentik etkisi) oluşur. Gerilim artışı köşe bölgelerinde çatlak oluşumunu başlatır. Küresel grafitlerde keskin köşe olmadığından bu tür bir olay meydana gelmemektedir. KGDD' ler gri dökme demirlere göre benzer yapıda olmasına rağmen daha mukavemetli ve tokluğu yüksektir. Aynı zamandan KGDD, diğer dökme demirlere göre yüksek mukavemetin yanı sıra iyi dökülebilirlik, yüksek akışkanlık ve düşük ergime sıcaklığına da sahiptir. İstenilen mekanik özellikler için ısıtıl işlem de uygulanabilmektedir.

KGDD' ler üretim çeşitleri olarak 6 gruba ayrılabilir. Bunlar;

a) Ferritik KGDD: Mikroyapıda görülen yüksek Ferrit matrisi KGDD lerde yüksek süneklik ve darbeye karşı direnç sağlar. Yüksek darbe direnci, yüksek manyetik geçirgenlik, düşük histeresis kayıplara, iyi termal iletkenlik, iyi işlenebilirlik ve bazı ortamlarda iyi korozyon aşınması direnci özelliklerine sahiptir (Kırcalı, 2006).

b) Ferritik – Perlitik KGDD: Bu tür dökme demirler yaygın kullanım alanına sahiptir ve çoğunlukla doğrudan döküm yoluyla elde edilir. Hem ferrit hem de perlitten oluşan grafitler mikroyapıda dağılmış olarak görülmektedir. Bu dökme demirler ferritik KGDD ve perlitik KGDD özelliklerine de sahip olmasıyla birlikte, iyi işlenebilirliğe ve düşük maliyete de sahiptir (Kırcalı, 2006).

c) Perlitik KGDD: Perlit matrisindeki grafitler dökme demire, yüksek mukavemet, iyi aşınma direnci, süneklik ve darbe direnci sağlar. Martenzitik, östenitik ve östemperli KGDD' ler de mühendislik ihtiyaçlarına cevap verebilir fakat yüksek maliyetlidir (Kırcalı, 2006).

d) Martenzitik Küresel Grafitli Dökme Demir: Martenzitik KGDD döküm esnasında sert ve kırılgan olması nedeniyle tercih edilmemektedir. Bu tür KGDD' de perlit oluşumunu önlemek için su verme ile temperleme işlemi veya ihtiyaç kadar alaşım elementi ilavesi yapılır. Düşük süneklik ve tokluğa ayrıca yüksek aşınma direnci ve mukavemete sahip olması için ısıtıl işlem uygulanarak temperlenmiş martenzit yapı elde edilir (Kırcalı, 2006).

e) Beynitik Küresel Grafitli Dökme Demir: Isıl işlem veya alaşımlama uygulanarak elde edilen, sert ve aşınma direnci yüksek bir dökme demir türüdür (Kırcalı, 2006).

f) Östenitik Küresel Grafitli Dökme Demir: KGDD' ler arasında çekme mukavemeti en düşük olan türdür. Alaşımlama sonucu Östenitik matris elde edilen KGDD, yüksek manyetik özelliklere, yüksek oksidasyon ve korozyon direncine, yüksek sıcaklıklarda boyutsal değişimin kararlı olmasına ve yüksek mukavemet elde edilmesini sağlar. Matris yapısında östenit ve az miktarda perlit bulunur (Kırcalı, 2006).

g) Östemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demir (OKGDD / ADI) : KGDD türlerine en son katılan türdür. Bu KGDD' lere özel bir östemperleme ısı işlemi uygulanır. Düşük maliyet, talaşlı işlenebilirlik, yüksek dayanım/ağırlık oranı, tasarım esnekliği, tokluk, yorulma dayanımlarına ve aşınma direncine sahip olan türdür. KGDD' lere östemperleme ısı işlemi uygulanarak ADI elde edilebilir (Kırcalı, 2006).

Yüksek sıcaklıkta uygulanan (östenitleme) ve düşük sıcaklıkta uygulanan (östemperleme) iki aşamadan oluşan ısı işlem sürecidir. Bunun sonucunda oluşan malzemeye östemperlenmiş küresel grafitli dökme demir (OKGDD) olarak adlandırılır. (Yamuk ve Aslantaş, 2018).

1.1.3 Sfero Dökme Demirlerin Mekanik Özellikleri ve İşlenebilirliği

Oldukça çeşitli sektörlerde kendine yer bulan KGDD' ler, çelik ile dökme demirlerin birçok iyi özelliğini (ekonomiklik, iyi işlenebilirlik vb.) yapısında bulundurması nedeniyle kullanımı diğer dökme demir türlerine göre sektörde yaygınlaşmıştır. Bu türün öne çıkan özellikleri iyi aşınma direnci ve yüksek mukavemete sahip olmasıdır (Yavuz, 2006).

Küresel grafitli dökme demirler;

- * Çeliklere kıyasla yoğunluğu % 10 daha düşüktür,
- * KGDD' den imal edilen dişliler, çeliklere göre daha sessiz çalışmaktadır,
- * Grafit yapısı % 40 sönümlemeyi artırmaktadır,
- * KGDD' lerin çentik duyarlılığı çeliklere göre daha azdır. Bu nedenle çeliklerdeki gibi hassas yüzey işlemleri yapılması gerekmemektedir,
- * Çeliklerden daha düşük maliyettedir,

* Küresel grafitli dökme demirler döküm sonrası işleme yapılmadan da kullanılabilir. Örneğin dişliler vb.

* İşlenebilirliği yüksek olan KGDD' ler takım maliyetleri açısından tavlanmış çelikten daha az takım sarfiyatı olmaktadır,

* Küresel grafitli dökme demirler, yapısındaki serbest grafitler nedeniyle çeliklere kıyasla daha düşük sürtünme ve daha az aşınma hızına sahiptir,

Ortalama olarak küre sayısının 200 - 250 adet/mm² olması tercih edilir.

Grafit boyutları dökülen parçanın kesit kalınlığına ve yapıdaki küre sayısına bağlı olarak değişmektedir. İnce kesitlerde küre sayısı fazla iken küre boyutları daha düşüktür. Küre sayısı ve yapıdaki düzenli dağılımı metalürjik açıdan kalitenin göstergesidir. %8-10 arasında yapıda grafit bulunması istenir. Karbrlar ise, stenitik KGDD' ler haricinde istenmez (Akça, 2005).

Dökme demirlerin sertlikleri çoğunlukla HB (Brinell Hardness) skalasından ölçülür. Sertlik sonucu dökme demirlerin işlenebilirliğinin bir göstergesidir. Sertlik arttıķa işlenebilirlik azalır. Yapı içerisinde karbür bulunan dökme demirler, karbür bulunmayan perlitik dökme demirlere göre sertlik değerleri aynı olsa bile daha zor işlenmektedir. Fakat sünek malzemelerde de kesici takıma talaş yapışması veya yığma kenar oluşumu gözlenir.

Dökme demirlerde yapılan çalışmada döküm sırasında Magnezyum (Mg) aşılamanın mikro yapıdaki küreselliğin ölçütünün, karbon eşdeğerliliğinin hipotektik olması (C<%4,3), birim küre sayısının ve mikro yapı ile mikro sertliğin uyumunun işlenebilirlikteki en önemli faktörler olduğu ve aksi durumda sık takım değişikliğinin gerektiği görülmüştür.

Küresel Grafitli dökme demirlerin 320-900 N/mm² aralığında çekme dayanımına göre de sınıflandırılır (DIN 1563:2012-03 Dökümler - Küresel grafitli dökme demirler standardı) ve Brinell skalasına göre sertlik aralıkları şu aralıktadır;

Tablo 1.2: DIN 1563 standardı - Brinell sertliği için kılavuz değerleri

Malzeme Tanımı		Brinell sertlik aralığı, HBW, İlgili duvar kalınlığı t	
Sembol	Numara	$t \leq 60 \text{ mm}$	$60 \text{ mm} < t \leq 200 \text{ mm}$
EN-GJS-350-22	5.3102	160'tan az	160'tan az
EN-GJS-400-18	5.3105	130 – 175 ^a	130 – 175 ^a
EN-GJS-400-15	5.3106	135 – 180 ^a	135- 180 ^a
EN-GJS-450-18	5.3108	170 - 200	160 - 190
EN-GJS-450-10	5.3107	160 – 210 ^a	160 – 210 ^a
EN-GJS-500-14	5.3109	185 - 215	170 - 200
EN-GJS-500-7	5.3200	170 – 230 ^a	150 – 230 ^a
EN-GJS-600-10	5.3110	200 - 230	190 – 220
EN-GJS-600-3	5.3201	190 – 270 ^a	180 – 270 ^a
EN-GJS-700-2	5.3300	225 – 305 ^a	210 – 305 ^a
EN-GJS-800-2	5.3301	245 – 335 ^a	240 – 335 ^a
EN-GJS-900-2	5.3302	270 – 360 ^a	
Not 1. En düşük sertlik, bir ferritik matris ve düşük silisyum içeriği ile elde edilir. Perlit miktarı veya artan silisyum içeriği ile sertlik artar. Not 2. Ötektik karbürler sertliği artırır ancak normalde istenmezler ve sadece küçük miktarlarda bulunmaları muhtemeldir.			
^a : Üretici ve alıcı arasındaki anlaşma ile daha dar bir sertlik aralığı kabul edilebilir; 30 ila 40 Brinell sertlik birimi arasında bir tolerans aralığı genel olarak kabul edilebilir. Bu sertlik aralığı, ferritik-perlitik matris yapısına sahip kaliteler için daha geniş olabilir.			

Genel olarak Sermet, Seramik (Si₃N₄-Silisyum Nitrür içerikli veya kaplamalı), Karbür, CBN, pCBN takımlar kullanılmaktadır. Sinterlenmiş karbür veya Tungsten karbür alaşımlı karbür takımlar kullanılır. 180-240 HB sertlik aralığında pCBN takım kullanılan çalışmalar mevcuttur. Küresel grafitli dökme demirlerin işlenebilirliği, diğer dökme demirlere göre daha düşük olduğu kabul edilmektedir. Kesme sıvısı olarak; kuru veya mineral yağlardan bor yağı tercih edilir. Örneğin; yüksek hızda Silikon Nitrat Seramik takımla kuru işleme yapılabilmektedir. Kesme kuvvetleri 870-1650 N/mm² aralığında ve kesme hızları 125-225 m/dk kabul edilebilir.

KGDD' ler de kesit kalınlıklarının mekanik özellikler üzerinde doğrudan bir etkisi yoktur. Fakat ince kesitlerde hızlı soğuma nedeniyle, tane boyutunda ve matris yapısının türünü belirlemede önemlidir. Küçük grafit küresine ve perlitik bir yapısı olan KGDD, yüksek mukavemete ve daha düşük sünekliğe sahiptir. Ferritik bir matrisi olan KGDD' ler süneklik açısından daha iyidir. Soğuma hızının çok kalın kesitlerde düşük olması nedeniyle, yapıda segregasyonlara neden olacağından hem KGDD' lerin mekanik özelliklerini hem de östemperleme ısı işleminin sonucu oluşacak yapı özelliklerini olumsuz etkiler (Schissler ve Saverna, 1985).

1.1.4 Sfero Dökme Demirlerin Kullanım Alanları

Madencilik ve metalürji sektöründe kırıcı gövdeler, sıcak hadde merdaneleri; makine imalat sektöründe, hidrolik presler, silindirler, dişliler, klapeler, gövdeler; tarım makinelerinde, traktör parçaları, yağ karterleri, pedallar, transmisyon kutuları; inşaat sektöründe, yağmur suyu ızgaraları ve bakım rögarı kapama elemanları, vinç parçaları, karıştırıcılar, yol ve inşaat makineleri parçaları; kimya sektöründe; valfler, pompalar, plastik karıştırıcılar, otomotiv sektöründe; diferansiyel dişli kutuları, otomotiv parçaları; güç gerektiren makine ekipmanlarında kompresör gövde ve kafaları, brülör gövdeleri, ısıya dayanıklı fırın parçaları gibi istenilen mekanik özelliklerine göre kullanım alanları mevcuttur.

1.2 Aşınma

Aşınmanın genel tanımı, birbirine temas eden ve birbirine göre izafi hareket yapan cisimlerden sürtünme etkisiyle oluşan malzeme ve kütle kaybıdır.

Alman DIN 50320 standardına göre ise aşınma, “kullanılan malzemelerin başka malzemelerle (katı, sıvı veya gaz) teması sonucu mekanik etkenlerle yüzeyden küçük parçacıkların ayrılmasıyla meydana gelen ve istenmeyen yüzey hasarlarıdır.” olarak tanımlanmaktadır (Sevim, 1998).

Aşınmanın düşük düzeyde olması birçok özelliği etkilemektedir. Malzeme varyasyon masrafları, serviste oluşan kayıp zamanları, doğal kaynaklara ve insan sağlığını etkileyen zararlar vb. örnekler verilebilir (Terkeşli, 2017).

Aşınmalar bir tribosistem (triboloji) sisteminde incelenmektedir. Tribolojinin kelime kökeni Latince sürtünme anlamındaki “tribos” ile bilim kelimesinin bir araya gelmesiyle oluşur (Terkeşli, 2017).

Triboloji genel olarak sürtünme, yağlama ve aşınma konularını inceleyen bir bilim dalıdır.

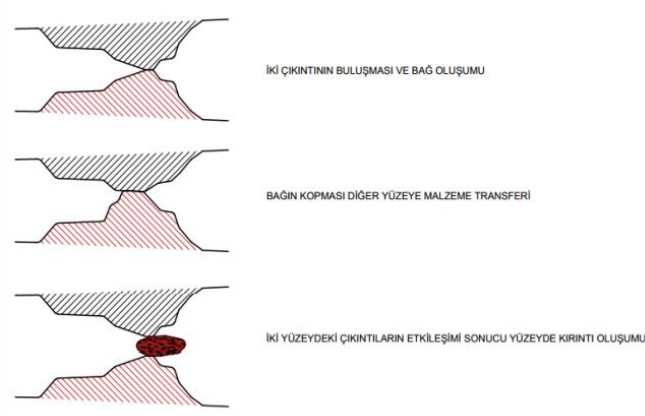
1.2.1 Aşınma Türleri

1.2.1.1 Adhesiv Aşınma

Bu aşınma türü aşınmalar arasında en çok rastlanılan türdür. Adhesiv aşınmada sıcaklığın yükselmesi ve yüksek basınca neden olan birbirine temas eden iki metal yüzeyinin kaynaması sonucu oluşur. Oluşan kaynamanın yüzeyden kopmasıyla adhesiv aşınma oluşur. Bu aşınma çoğunlukla katı halde bulunan malzemelerde meydana gelir. Malzemelerin birbirine uyguladığı basma gerilmesi ve kaymasıyla adhesiv aşınma ortaya çıkar. Böylece oluşan kalıcı deformasyon ile birlikte malzeme kaybı meydana gelir. Kayma ile adhesiv aşınma arasında kesin bir ayırım yapılamadığı için genellikle birbirine karıştırılmaktadır (Terkeşli, 2017).

Birbirine temas eden malzemelerin yüzey atomları arasında oluşan çekme kuvveti yapışma eğilimini ortaya çıkartır. İki ayrı yüzey normal veya teğetsel olarak, kuvvet ile beraber birbirinden ayrılmasıyla birlikte iki yüzey arasında çekim oluşur. Bu çekim ile beraber malzeme normal yüzeyden uzaklaşır ve adhesiv aşınma bu sayede meydana gelir. Kristal kafes yapısına sahip olan yapılarda çoğunlukla adhesiv aşınma görülmektedir. Birbirine yakın kristal kafese sahip metalik malzemeler de, sürtünme ve hareket nedeni ile sıcaklık oluşur. Bu sıcaklığın artması ile beraber kaynama daha rahat gerçekleşir. Birbiri ile temas eden metalik malzemeler herhangi bir kuvvete maruz kaldığında, yüzeylerinde bir gerilme oluşur. Bu gerilmeler nedeni ile plastik deformasyon meydana gelir (Terkeşli, 2017).

Malzeme sürtünme sırasında kaynak bağları yüzeyin temas ettiği kısımlardan kırılırsa malzeme kaybı oluşmaz ancak kırılma temas eden bölgenin uzağında ise kırılan kısım yumuşak yüzeyden sert yüzeye doğru hareket eder. Şekil 1.2’de adhesiv aşınma oluşumu şematik olarak gösterilmiştir (Terkeşli, 2017).



Şekil 1.2: Adhesiv aşınma oluşumu şematik gösterimi (Terkeşli, 2017)

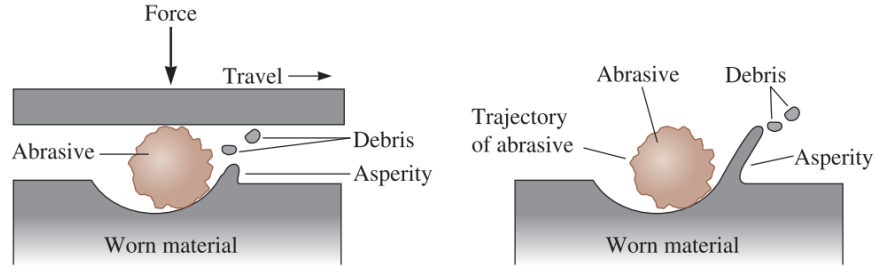
1.2.1.2 Abrasif Aşınma

Abrasif aşınma aynı zamanda çizilme ve yırtılma aşınması olarak da bilinir. Bu aşınma hızlı bir hasar meydana getiren türdür. Bu aşınma türünde basınç altında malzeme kendinden daha sert bir parçacık ile temas eder ve sert olan parçacık yumuşak olan malzeme yüzeyinde mikron boyutlu parça koparır. İki ve üç elemanlı olarak ikiye ayrılır:

İki malzemenin birbiri ile sürtünmesi sonucu oluşan aşınma iki elemanlı abrasif aşınma olarak tanımlanır. Sürtünen iki malzeme arasına bir ara malzeme ilave olarak aşınma gerçekleşiyor ise üç elemanlı abrasif aşınma olarak tanımlanır. Üç elemanlı aşınma sonucunda yüzeyden ayrılan parçalar ara malzeme olarak görev yapabilirler. Aralarında oluşan toz, mikro talaşlar vb. örnek olarak verilebilir. Mikro talaşlar sertliklerinin ana malzemeye göre daha fazla olmasından kaynaklı aşınmayı hızlandır. (Çetin, 2005)

Malzeme, sert parçacıklarla temas ederek bir yüzeyden kaldırıldığında, abrasif aşınma meydana gelir. Parçacıklar üçüncü bir malzemenin yüzeyinde bulunabilir ya da iki yüzey arasında gevşek parçacıklar olarak da bulunabilir. Bu tür aşınma, aşındırıcı malzemeleri işlemek için kullanılan pulluklar, sıyırıcı bıçaklar, kırıcılar ve öğütücüler gibi makinelerde yaygın olarak görülür ve ayrıca, makinenin hareketli parçalarına istemeden sert parçacıklar girdiğinde de meydana gelebilir. Abrasif aşınma, malzemeyi kasıtlı olarak çıkarmak için taşlama işlemlerinde de kullanılır. Birçok otomotiv uygulamasında (örneğin amortisörler, dişliler, pistonlar ve silindirler), aşındırma aşınması davranışı önemli bir husustur. (Askeland vd., 2010)

Sıkışmış veya serbest uçuşan aşındırıcıların neden olduğu abrasif aşınma, malzemede oluklar oluşturarak birikintilere dönüşebilecek pürüzler biriktirir. Bu olay Şekil 1.3'te görsel olarak gösterilmiştir.



Şekil 1.3: Sıkışmış veya serbest uçuşan aşındırıcıların neden olduğu aşındırıcı aşınma (Askeland vd., 2010)

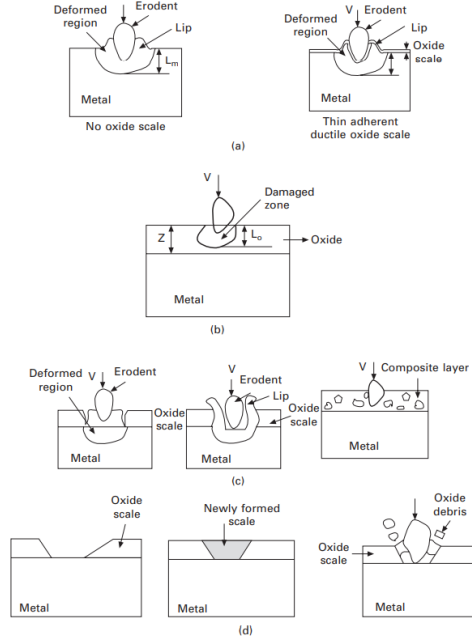
Yüksek sertliğe, iyi tokluğa ve yüksek sıcaklık dayanımına sahip malzemeler, abrasif aşınmaya karşı en dirençli malzemelerdir. Abrasif aşınma uygulamaları için kullanılan tipik malzemeler arasında su verilmiş ve temperlenmiş çelikler, karbonlu veya yüzeyi sertleştirilmiş çelikler, “stellite” gibi kobalt-krom alaşımları, tungsten karbür sermetler dahil kompozit malzemeler, beyaz dökme demirler ve kaynakla üretilen sert yüzeyler örnek gösterilebilir. (Askeland vd., 2010)

1.2.1.3 Erozyon Aşınması

Bu aşınma tipi iki malzemenin birbiri ile sürtünme veya aşınma oluşması sonucu meydana gelen kimyasal reaksiyondur. Malzeme yüzeyinde hava ile etkileşmesi sonucu oksitler oluşur. Oluşan bu oksitler erozyon aşınması nedeniyle aşınmayı hızlandırır. Metal malzemelerde çoğunlukla bu aşınma türü gözlenmektedir (Demir, 2012).

Erozyon aşınması, gevrek kırılma ve plastik deformasyon olması nedeni ile abrasif aşınmaya benzetilebilir. Erozyon aşınmasının yapısını etkileyen faktörler; aşındırıcı malzeme şekli, uygulanan darbe, aşındırıcı malzeme tokluğu vb. olarak sıralanabilir (Bhustan, 1996).

Şekil 1.4'te yüksek sıcaklıkta çeşitli erozyon mekanizmalarının şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 1.4: Yüksek sıcaklıkta çeşitli erozyon mekanizmalarının şematik gösterimi; (a) metal erozyonu; (b) oksit erozyonu; (c) oksidasyondan etkilenen erozyon; (d) oksidasyon kontrollü erozyon (Roy, 2008)

Katı parçacık erozyonu, önemli bir hızla hareket eden parçacıkların etkisinden kaynaklanan malzeme kaybı olarak tanımlanır. Katı parçacık erozyonu; sıvı darbeli erozyon, bulamaçlı erozyon, kavitasyon erozyonu vb. gibi diğer erozyon biçimlerinden mekanik olarak farklıdır. Yüksek sıcaklıklarda katı parçacık erozyonu nedeniyle birçok mühendislik bileşeni bozulur. Yüksek sıcaklıkta metallerin ve alaşımların katı parçacık erozyonu, erozyon ve oksidasyon arasındaki etkileşimin doğası tarafından yönetilir. Bu da oksit ölçeğinin kalınlığı, esnekliği, morfolojisi, yapışma özellikleri ve sertliği ile belirlenir. (Roy, 2008)

1.2.1.4 Korozyon aşınması

Metal yüzeyler çevre ile kimyasal, elektrokimyasal olarak bir etkileşim oluşturması sonucunda farklı bileşikler oluşur. Oluşan bu bileşikler ana malzemedan kopar ve korozyon aşınması meydana gelir (Owsalou, 2012).

Oksitlenme, nitrürleme, sülfürleme, karbürleme, metal tozlaşması vb. şekilde ortam ve sıcaklığa bağlı olarak korozyon aşınması oluşabilir (Kobrick, 2010).

1.2.2 Aşınmayı Etkileyen Faktörler

1.2.2.1 Malzeme Seçimi

Kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri, çalışma ortamı kullanılan parçaların aşınma dayanımlarını arttırabilmek için iyi seçilmelidir (Keskin, 2012).

Malzeme seçiminde dikkat edilmesi gereken özelliklere örnek olarak; özgül yük (nominal basınç), malzemenin elastik özellikleri (elastisite modülü), malzemenin mukavemet nitelikleri gösterilebilir (Oğuz, 1993).

1.2.2.2 Pürüzlülük

Yüzey pürüzlülüğü malzemelerin aşınma dayanımlarını en çok etkileyen etkenlerden biridir. Pürüz olan yüzeyler temas eden ilk bölgeler olması nedeni ile adhezyon kuvvetlerini arttırmaktadır (Keskin, 2012).

Malzemelerin yüzey şekilleri aşınma dirençlerini etkilemektedir. (Oğuz, 1993). Yüzeyde pürüzlerin fazla olması sürtünme kuvvetini arttırmaktadır. Sürtünme kuvvetinin artması daha fazla plastik deformasyona sebep olabilir ve aşınma derinliğini arttırabilir (Uçurum vd., 2021).

1.2.2.3 Sertlik

Malzemelerde sertliğin artması, diğer faktörler aynı kalmak koşulu ile aşınmayı azaltır. Aşınma direncini arttırmak için malzeme yüzeylerine alaşımlama veya ısıtılma işlemle sertleştirme yapılmalıdır (Keskin, 2012).

Uçurum vd. (2021) yaptıkları çalışmada, yüzey pürüzlülüğü en düşük olan yüzeylerde mikro sertliklerin yüksek, aşınma miktarının az olduğunu, yüzey pürüzlülüğü en yüksek olan yüzeylerde mikro sertliklerin düşük, aşınma miktarının fazla olduğunu belirlemiştir.

1.2.2.4 Yüzey İşlemleri

Malzemede aşınma miktarını azaltmak için birbiri ile temas eden iki malzemenin sürtünme katsayısı ve malzemelerin tutunabilmesi azaltılmalıdır. Bunu sağlamak için malzeme yüzeyinde kimyasal, elektrokimyasal ya da termokimyasal tabakalar oluşturulmalıdır (Keskin, 2012).

1.2.2.5 Yağlama

Aşınmayı azaltmak için en çok kullanılan yöntem yağlamadır. Yağlama yöntemi ekonomiktir. İki metalin birbiri ile sürtünmesi yerine sıvı-metal sürtünmesi meydana getirir. Yağlayıcıların yüksek sıcaklıkta yağlama özelliklerini kaybetmemesi gerekmektedir (Keskin, 2012).

1.2.2.6 Temas Geometrisi

Aşınma miktarını birbiri ile temas eden malzemelerin temas ettiği bölgenin geometrisi etkilemektedir. İki malzeme arasında temas sonucu oluşan parçacıkların aşınmayı azaltmak için temas bölgesinden uzaklaştırılması gerekmektedir (Keskin, 2012).

1.2.2.7 Çevre

Aşınma miktarı çevre faktörüne de bağlıdır. Çevrede bulunan bağıl nem ve oksijen aşınma miktarlarında değişime neden olur. Bağıl nem azaldıkça aşınma artarken, çevrede bulunan oksijen miktarı arttığında koruyucu tabaka oluşturarak aşınmayı azaltır. Oksijen bulunan ortamda soy gaz varsa oksit miktarı az olacağından adezyon aşınması meydana gelebilir (Keskin, 2012).

Aşınmayı etkileyen bir diğer faktör ise zaman faktörüdür.

1.2.3 Aşınmayı Azaltıcı Önleyici İşlemler

1. Aşınmaya dirençli malzeme seçilirken, parçanın hangi ortamda çalıştığı ve bu ortamda olan aşınmanın tipi ve şiddeti kontrol edilmelidir.
2. Parça tasarımı aşınma en az olacak şekilde yapılmalıdır.

3. Aşındırıcı ile temas eden yüzeyler ya da tüm yüzeyler, asıl malzemeden daha üst özelliklere sahip ve mevcut olan aşınma tipine dirençli malzeme ile kaplanmalıdır.
4. Parçanın aşınan yüzeylerinin aşınmaya karşı daha dayanıklı malzemeden üretilmesi parçanın tamamının dayanıklı malzemeden üretilmesine nazaran maliyeti azaltmada yararı olacaktır.
5. Aşınmanın azaltılması için parçada üretim hatası gözlenmemelidir (cüruf, fazla yüzey pürüzlülüğü, çatlak vb.).
6. Parça dayanabileceği limitlerin dışında kullanılmamalıdır (yüksek basınç, yüksek hız vb.).
7. Yağ ile çalışılan ortamlarda, sıcaklık değeri yağların viskozitesini etkilediğinden viskozitesi yüksek ve basınca dayanımı fazla olan yağların kullanılması erken aşınmanın önüne geçebilir.
8. Seçilecek olan soğutucu, parçanın kullanılacağı ortama göre belirlenmelidir.
9. Soğutucu ve yağlayıcılar filtreleme işleminden geçirilmelidir. Bu sayede aşındırıcı malzemelerin yeniden sisteme gelmesi engellenebilir.
10. Yağlayıcılar için kontrol planı yapılmalı ve belirlenen aralıklarda yağ miktarları yenilenmelidir.
11. Birbiri ile temas edecek malzemeler uygun olarak seçilmelidir. Korozyon aşınması olan malzemelerde, korozyon olan bölgelerin temizlikleri yapılırsa malzemenin kullanım ömrü artacaktır (Sarıkaya, 2007).

1.3 Lazer ile Yüzey Sertleştirme İşlemleri

Malzemelerde istenilen özellikleri elde etmek için yüzeylerde farklı değişiklikler uygulanabilir. Bu değişimi sağlayan yöntemlerden biri de lazer ile yüzey sertleştirmedir. Lazer işlemleri ile beraber yüzeylerde kimyasal ve fiziksel değişiklikler meydana gelir ve istenilen özellikler sağlanır (Köse, 2016).

Lazer işlemleri en çok metal işleme sektöründe kullanılmaktadır. İşlemesi zor olan parçalar için uygun imalat yöntemi ve mikro işleme gibi farklı uygulamalar sağlar. Lazerler maliyetlerinin düşük olması nedeni ile malzemelerin ısıl işleminde, kesilmesinde, kaynaklanmasında tercih edilen yöntemler arasındadır. Darbeli lazer uygulamasında ısınma ile beraber sıcaklığın yükselmesi malzemenin optik, termal ve mekanik özelliklerine bağlı olarak değişebilir. Ayrıca bu ısıtma plazma, buharlaşma ve erime oluşmasına neden olabilir (Koç, 2004).

Lazerle indüklenen yüzey sertleştirme, yüzey eritmeyle (laser surface melting-LSM) veya eritmeden (laser surface hardening- LSH) elde edilebilir. Dönüşüm sertleştirmesinde yüzey, erime noktasının altındaki bir sıcaklığa ısıtılır. Hızlı soğumada lazerle işlenmiş katman genellikle grafit içeren martenzitik matris geliştirir. Lazer, elektron ışını ve plazma arkı gibi konsantre enerji akılarını kullanan yüzey eritme genellikle ferrit, sementit, martensit ve östenitten oluşan mikro yapı üretir. (Abboud vd., 2007)

Lazer sertleştirme modifikasyonu, sert ve dirençli yüzey tabakaları elde etmek için kullanılan bir tekniktir. Lazer yüzey sertleştirmenin, sertleştirilmiş bölgede basınç gerilimleri oluşturarak aşınma dayanımını ve diğer mekanik özellikleri geliştirir. Bu genellikle ostenit fazından martensit oluşumu ile hacim genişlemesinin bir sonucudur. (Roy, 2001)

Tribolojik sistemlerde aşınmayı ortadan kaldırmak için tüm yüzeyin aşınmaya dayanıklı bir tabaka ile kaplanması gerekli değildir. Uygulamaya bağlı olarak, aşınmaya maruz kalan yük taşıyan bölgeleri bölgesel olarak sertleştirmek yeterlidir. Bu tür alanlar, tamamen veya kısmen bir lazerle uygun şekilde sertleştirilebilir. Yüksek güçlü lazer kaynaklarının etkili kullanımıyla, mikro yapıda sertleşebilirlik elde edilebilir. (Babu, 2011)

Metalik malzemelerde aşınma miktarının azaltılmasını sağlayan yöntemlerden biri lazer ile yüzeyin sertleştirilmesidir. Lazer işlemi aynı zamanda malzemenin mekanik ve metalürjik özelliklerini değiştirilmesi için önemli rol oynar. Yüzeylerde ısı işlem yaparak en uygun özelliklerin sağlanmasında birçok yöntem kullanılır. Bu yöntemler arasında en bilinenleri lazer, ark, elektron demeti vb. yöntemlerdir. Lazer yöntemi düşük çarpılma ve üretilebilirliğinin fazla olmasından kaynaklı çoğu uygulamada tercih edilmektedir. Yüzeylerde lazer yöntemi çelik malzemelerde aşınma miktarını azaltmaktadır (Türedi, 2012).

Lazer elektron demeti ile Yüzey Modifikasyonu, yüksek enerji oluşturması ve bu oluşan enerjiden kaynaklı elde edilen yüksek ısı nedeni ile yüzey işlemlerinde kullanılır. Kullanılan işlemler arasında kesme, yüzey ergitme, kaynak, bölgesel yüzey sertleştirme işlemleri bulunmaktadır. En çok kullanılan işlem bölgesel yüzey sertleştirmedir. Bu işlem lazer ile yüzeyde ısı işlem gören kısımların soğutma suyu kullanılmadan kendi halinde soğuması ile yapılır. Sertleştirme yapılan yüzeyde meydana gelen homojen yapı malzemenin korozyon ve aşınma dirençlerini arttırmaktadır (Yeşilçubuk, 2010).

Yüzey sertleştirmenin, yüksek aşınma direncini (yüksek yüzey sertliği ile indüklenen) sert bir alt tabaka ile birleştirmek için en etkili yöntemlerden biri olduğu bilinmektedir. KGDD, alev, plazma nitrürleme, indüksiyon veya lazer modifikasyonu ile yüzey sertleşmesine kolayca yanıt verir. Lazer süreçleri çerçevesinde, Lazer Yüzey Modifikasyonu, güç ışını (P), tarama hızı (v) ve / veya enerji yoğunluğu (P/vd^2) gibi işlem parametrelerine bağlı olarak mikroyapısal modifikasyonları indükler; (d: spot çapı). KGDD' in lazer yüzey işlemi ile indüklenen mikroyapısal modifikasyonlar bir dizi makaleye konu olmuş olsa da, özellikle ferritik KGDD için sürtünme ve aşınma davranışları üzerindeki etkisine ilişkin nispeten az veri mevcuttur. (Ceschini vd., 2016)

Lazer demeti ile yüzey sertleştirme işleminin iki önemli faydası vardır. İlk faydası enerji miktarının fazla olmamasından kaynaklı deformasyonun az gerçekleşmesi, ikinci fayda ise sertleştirme işlemi sonrası malzeme yüzey pürüzlülüğünün az olmasıdır (Yeşilçubuk, 2010).

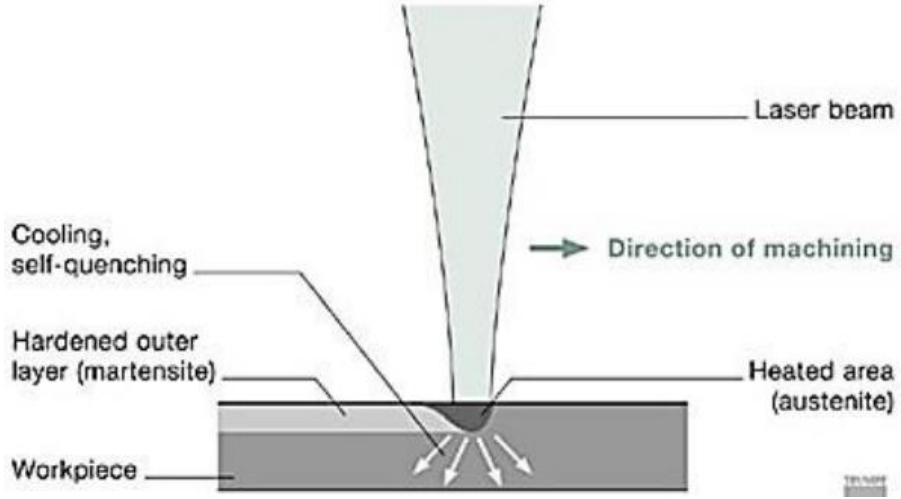
Lazer yüzey sertleştirme (LSH) işlemi sırasında erime olmadan bir faz değişimi gerçekleşir. Lazer yüzey sertleştirme sayesinde yüzeyin aşınma, dayanım, yorulma ve yağlama özellikleri iyileştirilebilir, ancak yüzeyin bazı özellikleri sünelik ve tokluk gibi arzu edilen kütesel özelliklerden etkilenmeden kalabilir (Mali, 2017)

Lazer ışını yüzeye ışınlanarak malzemenin lokal olarak ısınmasını sağlar ve ostenit oluşumu meydana gelir. Bundan sonra malzeme çok hızlı bir şekilde su vermeye başlar ve mikro yapı martenzite dönüşür. Lazer yüzey sertleştirme yöntemi alevle sertleştirme, indüksiyonla sertleştirme, nitrürleme, karbonitrürleme gibi diğer geleneksel sertleştirme yöntemleriyle karşılaştırıldığında bazı avantajlara sahiptir (Nöbet, 2019).

Malzemelerin yüzeyine lazer ısı işlem uygulamak için üç önemli kriter vardır;

- * İstenilen sertleşebilir bölge östenizasyon sıcaklığına ulaşmış olmalıdır.
- * Malzeme, ısıtma ve soğutma döngüsü arasında alt tabaka östenizasyon sıcaklığında karbon difüzyonu için beklenmelidir.
- * Öz difüzyon hızı ile kritik soğutma hızı için yeterli kütle olmalıdır (Makarov vd.,1989)

Lazerle sertleştirme ilkesi Şekil 1.5' da gösterilmiştir.



Şekil 1.5: Lazerle sertleştirme ilkesi (Trumpf GmbH & Co.KG)

Lazer yüzey sertleştirme, diğer geleneksel yüzey sertleştirme yöntemlerine göre bazı avantajlara sahiptir. Bu avantajlar şu şekilde sıralanabilir;

- * Aşırı ısınan yüzey tabakasının kendi kendini söndürmesi nedeniyle sertleşmiş bir yüzey tabakası oluşur.
- * Bu tip yüzey sertleştirme çok temiz bir işlemdir. Bu işlemden sonra iş parçalarını temizlemeye ve yıkamaya gerek yoktur. Bu nedenle söndürme işlemi, herhangi bir ajan olmadan kendi kendine söndürmeye dayanır.
- * Enerji girişi, değişen lazer kaynağı gücü, farklı odaklara sahip odaklama lensleri, farklı odak dışılık dereceleri, farklı hareket hızları ile değiştirilebilir.
- * Lazer yüzey sertleştirme, iş parçalarının veya küçük deliklerin karmaşık geometrisi için uygundur.
- * Isıl işlem sonrasında küçük deformasyonlar ve boyutsal değişimler gözlemlenebilir.
- * Taşlama ile iş parçasının son işlemesine gerek yoktur (Grum, 2013)

Lazer dönüşümlü yüzey sertleştirme veya lazer sertleştirme, bileşenlerin yüzey bölgelerinde aşınmaya dayanıklı yüzeyler üretmenin en iyi yöntemlerindendir. Yüzeyi eritmek yerine

ısıtmak için bileşen boyunca şekillendirilmiş bir lazer ışını ile iş parçası taranır. Yaklaşık 1200°C'lik bir sıcaklık artışı idealdir. Yüzeyin alt tabakası olan ana malzeme, verimli bir ısı emici görevi görerek hızlı soğumaya neden olur. Yüzeyin sertlik, dayanıklılık, aşınma, yorulma ve yağlama özellikleri geliştirilebilirken, tokluk ve süneklik gibi arzu edilen ana malzemenin özellikleri etkilenmeden kalır. Demirli alaşımlar lazerle sertleştirme için özellikle uygundur. (Proses, bir termal döngü tarafından bir sertleştirme fazı değişikliğinin indüklendiği diğer malzemeler için de kullanılabilir.) 1990'ların ortalarına kadar, yalnızca CO₂ lazerleri yüzey sertleştirme için gereken güç yoğunluğunu sağlayabiliyordu. Ardından, metal yüzeyler tarafından daha kolay emilen ışınlar üreten, proses verimliliğinde iyileşmeler sağlayan ve uygulama kapsamının artmasına neden olan yüksek güçlü Nd:YAG ve (birkaç yıl sonra) yüksek güçlü diyot lazer kullanıma sunuldu. Lazerle sertleştirmenin temel amacı, mümkün olan en yüksek verim ile öngörülen bir derinliğe kadar gerekli sertliğe sahip bir yüzey üretmektir. (Ion, C.J., 2005)

Malzemeler, CO₂ lazer kaynağı için lazer ışını absorpsiyonunu arttırmak için kaplamaya ihtiyaç duyar. Bu lazer türünden sonra Nd:YAG lazer flaş ışıklı ve diyot pompalı alternatif bir lazer kaynağı olabilir. Nd:YAG lazerin en büyük avantajı lazer ışınının dalga boyudur. Dalga boyu CO₂ lazere göre daha düşüktür. Bu, optik fiber aracılığıyla enerji verimliliği açısından bir avantajdır. Nd:YAG lazer üç kalıplı işleme uygun, robot entegrasyonu ile kullanılan yüksek güçlü lazerdir. Yüksek güçlü diyot lazer ile yüksek kilowatt güçlerde çalışan en iyi sonucu lazer üretimini geliştirdi. Dalga boyu yaklaşık 8 µm'dir. Karmaşık geometrili lazer yüzey sertleştirme (LSH) işlemi için robot entegrasyonu ile kullanılabilir. (Nöbet, 2019)

CO₂ lazer tipi olmadan, bu iki kaynağın lazer ışını absorpsiyonunu artırmak için herhangi bir kaplamaya ihtiyacı yoktur. Dolayısıyla bu özellik enerji tasarrufunun artmasını sağlar. Bu iki tip lazer, CO₂ lazer tipine göre daha kolay kullanımlı ve daha düşük maliyetlidir. (Trafford, 1983; Abboud vd., 2017)

Popüler lazer türlerinden biri de CO₂ lazerdir. Yüksek yoğunluklu CO₂ lazerin 1970'den beri birçok endüstriyel uygulamada başarılı olduğu kanıtlanmıştır. Lazer işleme prosesleri için, CO₂ lazerin malzeme yüzeyinde emici olması gerekir. Bu nedenle emici, lazer ışınının soğurma miktarını artırır (Grum, 2007)

Nd –YAG lazer, CO₂' ye göre nispeten düşük güce ve 0,2-16 µm arası etkinlik dalga boyuna sahiptir. Ayrıca, bu tip lazer kaynağı, CO₂ ile karşılaştırıldığında daha küçük odak noktası çapına ve çok daha yüksek soğurma özelliğine sahiptir.

Yüksek güçlü diyot lazer malzeme yüzeyi ile etkileşime girdiğinde lazer ışınının bir kısmı malzeme tarafından emilir ve lazer ışınının bir kısmı dalga boyuna göre malzeme yüzeyinden yansır. Lazer ışınının benzersiz özellikleri, yüksek yoğunluk, tutarlılık, yüksek yönlü doğa, monokrom, aşınma davranışı, sertlik, yorulma ömrü vb. gibi malzemelerin bazı özelliklerini geliştirir. Malzemelerin optik absorpsiyonu serbest elektronlarla kontrol edilir (Chichkov, 1996)

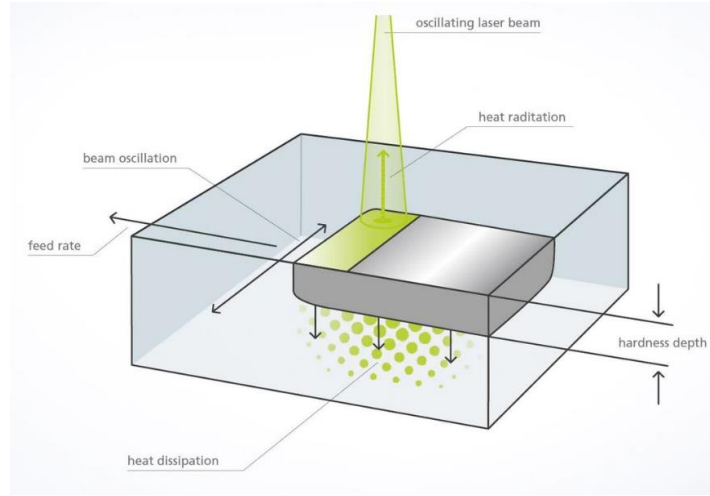
Enerji, çarpışmalar yardımıyla kafes fononlar aracılığıyla iletilir. Işık titreşimsel ve elektronik olarak emilir. Bu olay enerjinin atomların yanında yayılmasına neden olur ve bu şekilde enerji ısınmaya dönüşür. Fonon absorpsiyonu arttığında, maddenin ısınması artar, bu nedenle enerji miktarı artar. Lazer ışınının etkileşim süresi, lazer ışınının güç yoğunluğuna, malzemelerin termofiziksel özelliklerine vb. bağlıdır (Abbound, 2017).

Bir lazerin dalga boyu λ , daha düşük bir enerji seviyesine [$E = hc/\lambda$, burada h Planck sabitidir ($6,626 \times 10^{-34}$ Js) ve c , ışık hızı (3×10^8 m s⁻¹)]. Genel olarak kuantum durumları, uzun dalga boylu lazerler için moleküler titreşim seviyelerine, görünür lazer radyasyonu için elektron yörünge seviyelerine ve ultraviyole lazerler ile iyonizasyon etkilerini gösterir. Malzeme işleme için CO₂, Nd:YAG ve fiber lazerler popüler sistemlerdir. Excimer ve diyot lazerler de hızla gelişen lazer türleridir. Malzeme işleme için piyasada bulunan lazerlerin performans özellikleri Tablo 1.3'te verilmektedir. (Steen, 2010)

Tablo 1.3: Başlıca endüstriyel lazer türlerinin verimliliği (Steen, 2010)

Lazer Tipi	Dalga Boyu (µm)	Kuantum Verimi (%)	Darbe Verimi (%)
CO ₂	10.6	45	12
CO	5.4	100	19
Nd:YAG	1.06	40	4
Nd:Glass	1.06	40	2
Diode-pumped YAG	1.06	40	8-12
Diode GaAs	0.75-0.87	~80	50
Diode GaP	0.54	~80	50
Excimer KrF	0.248	~80	0.5-2

Lazerle yüzey işlemleri şematik gösterimi Şekil 1.6’da gösterilmiştir.



Şekil 1.6: Lazerle sertleştirme gösterimi (Trumpf GmbH & Co. KG)

1.3.2 Lazer Yüzey Sertleştirme Uygulanması

1.3.2.1 Lazer Yüzey Sertleştirme Parametreleri

Lazer yüzey ısı işleminin parametreleri, ısı ve kütle kriterleri ile kontrol edilir. Güç yoğunluğu, lazer ışını çapı gibi bazı bağımsız parametrelerden etkilenir. Hız, lazer ışını ve alt tabaka yüzeyinden etkilenir. Diğer parametreler, lazer ışınının termofiziksel özelliklerini ve soğuruculuğunu etkileyen malzeme tipine göre değişir.

Bağımlı değişkenler sertlik, sertlik derinliği, ısıdan etkilenen bölge geometrisi ve ısı işlem görmüş bölge metalürjik özellikleridir (Kennedy, 2004).

Çelik yüzeyinin özellikleri ve sıcaklık, güç yoğunluğuna ve lazer ışınının hareket hızına bağlıdır (Li vd., 2014; Totten vd., 2004).

Lazer ışını çapı ve yoğunluk dağılımı

Özel yoğunluk dağılımı, lazer ışınının nasıl davranacağını belirleyen ana parametredir. Örneğin, işlem sırasında farklı lazer gücü ve farklı çapta iki farklı lazer ışını oluşabilir. Lazer ışını gauss veya gauss olmayan profil özelliği nedeniyle malzeme yüzeyinde farklı lazer işareti görülebilir.

Gauss profili, merkez mesafesine göre değişen lazer ışını yoğunluğu olarak tanımlanır. Malzeme lazer ışınının merkezinde ise, lazer ışın yoğunluk dağılımı maksimum değere sahiptir. Malzeme ile lazer ışını arasındaki mesafe artarsa, lazer ışını yoğunluk dağılımı azalır (Kennedy, 2004).

Teorik olarak, lazer ışını davranışı beklenebilir, ancak üretim parametreleri bu sürece dahil edildiğinde farklı davranışlara sahip olabilir. Bu parametreler mercek toleransları, aynalar vb. sayılabilir (Abbound, 2017).

Seyir hızı

Seyir hızı, etkileşim süresini belirler. Seyir hızı, sertlik derinliği ile ters orantılıdır. Değişkenler maksimum değere sahipse, seyir hızı artırılmalıdır. Bu nedenle, malzeme üzerinde reaksiyon başlayana kadar sertlik derinliği azalmaya başlar. Seyir hızı, sertlik derinliği ve sertlik değerlerinin belirlenmesinde çok önemli bir parametredir. Seyir hızı seçimi çok düşük olduğunda malzeme yüzeyinde erime başlar ve sertlik değeri düşmeye başlar (Kennedy, 2004).

Emicilik

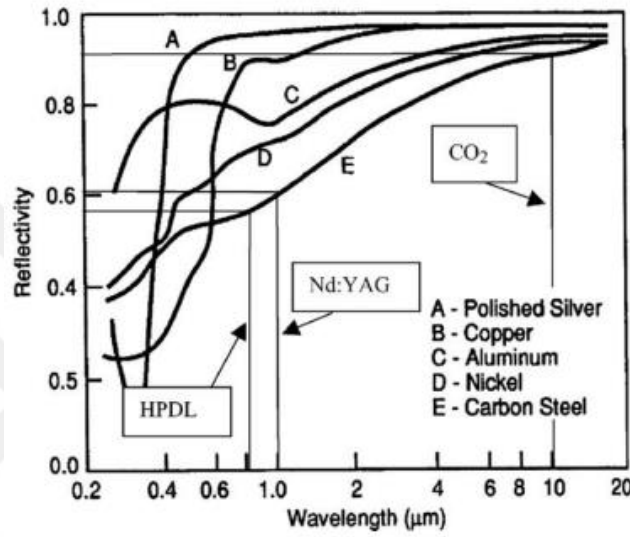
Işık enerjisinin soğurulması ısı transferine bağlıdır.

Yaklaşık 16 mikrometre dalga boyuna sahip CO₂ lazerin soğurma özelliği CO₂ lazerin dalga boyunun yüksek olması nedeniyle yaklaşık 1,06 mikrometre dalga boyuna sahip Nd-YAG lazere göre daha düşüktür.

Emiciliği arttırmak için kaplama teknolojisi kullanılmaktadır. Sodyum ve potasyum silikat kaplamaların soğurma miktarının artmasında önemli bir etken olduğu bilinmektedir. Kaplama kalınlığı, kaplama malzemesi tane boyutu, kaplama yapışma miktarı, emiciliğin kalitesini etkiler. Bu kaplama teknolojisi CO₂ lazer için geçerlidir. Daha kısa dalga boyu ve daha kaliteli öz emicilik miktarı nedeniyle Nd-YAG lazere gerek yoktur. Soğurma miktarı, dalga boyuna ve geliş açısına bağlıdır (Abbound, 2017).

Malzemelerin termofiziksel özellikleri

Termal yayılma, malzemelerin önemli bir termofiziksel özelliğidir. Termal yayılma "a", burada $a = \frac{1}{4}K/rc$ (burada K, termal iletkenlik, r yoğunluk ve c ısı kapasitesidir). Malzemelerin termofiziksel özelliği, termal enerjiyi kabul etme ve iletme süresini etkiler. Ayrıca, bu faktör tüm kararsız hal ısı akışı süreçleri için geçerlidir. Şekil 1.7' te çeşitli malzemelerde, çeşitli lazer uygulamaları için dalga boyunun bir fonksiyonu olarak yansıma eğrisi verilmiştir (Kennedy, 2004).



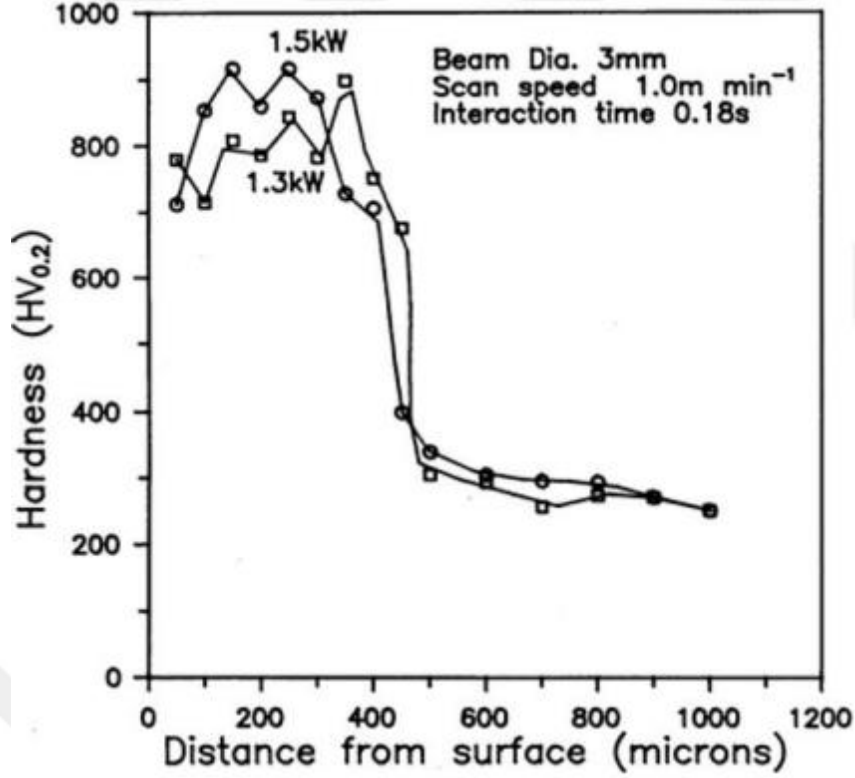
Şekil 1.7: Çeşitli malzemeler için dalga boyunun bir fonksiyonu olarak yansıma (Kennedy, 2004)

1.3.2.2 Lazer Dönüşüm Sertleştirme

Lazer yüzey sertleştirme işlemi yeterli karbon oranına sahip tüm malzemelere uygulanabilir. Artan karbon oranı, çeliğin sertleşme tepkisini artırmada olumlu yönde etkiye sahiptir, ancak sade karbon çeliği (%0,2 C) çok yüksek soğuma hızında sertleşecektir. Sertleşebilirlik oranı, perlit varlığı ve sementit lameller arasındaki mesafe ile kontrol edilir (Abbound, 2017).

Mikro yapı ve sertlik iyileştirme

Sertlik derinliği ve mikro yapı, lazer güç yoğunluğu ve lazer hızı ile değişir. Sertleşmiş bölge, malzeme yüzeyindeki ince martensit tabakasından, martensit tabakasının altında karışık mikro yapıdan ve temperlenmiş beynitten meydana gelir.



Şekil 1.8: Lazerle sertleştirilmiş En18 çeliğinin derinlik yönü boyunca sertlik profili (Hua vd., 2009)

Şekil 1.8, farklı lazer gücüne sahip EN18 çeliği için sertlik profilini göstermektedir. Artan lazer gücü, malzemenin yüzeyindeki sertlik derinliğinin değişmesine neden olur (Pashby vd., 2003).

Lazerle sertleştirmenin dezavantajı, çok geçişli lazerle sertleştirme işleminde ortaya çıkar. Lazer uygulanan bölgeler arasında sertlik değerleri azalır. Homojen dağılım sağlayan ışın entegratörü ile lazer sertleştirmenin dezavantajı azaltılabilir (Hwang, 2002).

Aşınma iyileştirmesi

Aşınmayı önlemek için malzemenin tüm yerlerini sertleştirmeye gerek yoktur. Tribolojik sistem farklıdır. Aşınma iyileştirmesi sadece malzemenin çalışma bölgesi için gereklidir (Nöbet, 2019)

Yorulma iyileştirmesi

Lazer ısıtılmasından sonra çelik ve dökme demirler yorulma iyileştirmesi açısından daha iyi olabilir (Nöbet, 2019).

1.3.3 Lazer Yüzey Sertleştirme Uygulama Alanları

Lazer yüzey sertleştirmenin endüstriyel uygulamalarına örnek;

- Segmanlar,
- Sac metal kalıpları

Sertleşmiş tabaka piston segmanlarının yüzeyinde oluşur. Bu katman, aşınma direnci ve yüksek hizmet ömrü sağlar. Piston segmanı direnç yöntemleri, krom kaplama veya molibden püskürtme ve yeni teknik lazer sertleştirme ile karşılaştırıldığında, piston segmanının lazerle sertleştirilmesinin ekonomik fiyat, kirlilik olmaması, enerji tasarrufu vb. birçok avantajı vardır (Chauxuan, 1983).



2. LİTERATÜR ÖZETİ

Chen vd. (2005) yaptıkları çalışmada, perlit-ferrit dengeli matrise sahip sfero dökme demir yüzeyine 500 W güçte darbeli Nd:YAG lazer ile modifikasyon katmanı oluşturarak; odak düzleminde 5×5 iki boyutlu bir dizi dağılımı üreten kendi kendine tasarlanmış kırınımlı optik eleman (DOE) ile donatılmış Nd: YAG lazer ışını altında üretilmiştir. Yüzey boyunca tabakanın mikroyapısı ve tabaka derinliğinin yönü, açık bir gradyan dağılımına sahip olduğundan, tabakanın iki boyutlu mikro sertlik haritasını değiştirmiştir. Sonuç, yeni modifikasyon katmanının mükemmel mukavemet ve tokluk kombinasyonuna sahip olduğu belirlendi.

Ceschini vd. (2016) yaptığı çalışmada, ENGJS400-12 KGDD malzemeye, iki seviyeli lazer enerji yoğunluğu kullanan lazer yüzey işlemi gerçekleştirmiştir. Mikro yapı ve kuru kayma aşınma davranışı üzerindeki etki incelenmiştir. ENGJS400, daha yüksek ve daha düşük yüzey sertliği değerlerine yol açan 750 W ve 1000 W iki farklı güç ile $7,20 \text{ J/mm}^3$ ve $3,20 \text{ J/mm}^3$ enerji yoğunluğu ile karakterize edilen işleme koşulları altında lazer yüzey işlemine (LST) tabi tutulmuştur. Maksimum 1000 W güce sahip çok modlu bir lazer Nd: YAG kullanılmış ve numuneler ($80 \times 8 \times 40 \text{ mm}^3$) CNC kontrollü bir çalışma tezgahı üzerine yerleştirilmiştir. İşlem yapılan bölgenin boyutunu artırmak için, lazer ışınının odak noktası, 5 mm'lik bir nokta çapı elde etmek üzere odak dışı bırakıldı; her örnekte üç paralel iz (üst üste% 30) gerçekleştirildi. Gaz koruyucu kullanılmadı. LST, GJS400' ün aşınma direncini artırırken sürtünme katsayısında bir artışa neden oldu. En iyi performans, daha düşük enerji yoğunluğunda işlenen dökme demirde gözlemlendi, bu da daha düşük yüzey sertliğine ve buna bağlı olarak üstün tokluğa yol açtı. İşlem görmemiş dökme demirler arasında $7,2 \text{ J/mm}^3$ enerji yoğunluğu GJS400-12 en iyi tribolojik davranışı gösterdi.

Han vd. (2020) Lazer yüzey sertleştirme işleminin üretilen mikro yapılar üzerindeki etkisini ve aşınma davranışlarını açıklayan bir çalışmalarında; KGDD numuneleri sırasıyla 232, 288 ve 398°C olmak üzere üç farklı östemperleme sıcaklığında östemperlenmiştir. Daha sonra her numuneye 1,5, 3, 4 mm boşluklarla lazer yüzey sertleştirme işlemi uygulanmıştır. Aşınma testi yer değiştirme mesafesi 10 mm idi. 75HRC sertliğe sahip, 4 mm çaplı bir bilye ile çalışıldı. Numuneler tamamen PAO-4 baz yağına daldırılmış haldeyken, 50 dakika boyunca 400 N normal yük ve 2 Hz ileri geri hareket hızı uygulandı. Her test koşulu için üç test yapıldı. COF verileri UMT3 makinesi tarafından otomatik olarak kaydedildi ve

numunelerin aşınma kaybı 3D profilometre kullanılarak ölçüldü, aşınmış yüzeyi analiz etmek için SEM kullanıldı. LST sonrası üretilen mikro yapılar üzerindeki etkisini ve farklı sıcaklıklarda östemperlenen ADI numunelerinin aşınma davranışı incelendi. Östemperlenmiş sfero döküm numuneler üzerinde farklı lazer boşlukları da incelenmiştir. Östemperleme işleminden sonra tüm numunelerde iğne benzeri beynit gözlenmiştir. LST sonrası ADI numunelerinde ledeburit, martensit, temperlenmiş beynit veya beynit gözlenmiştir. Orijinal iğne benzeri mikro yapılar sadece 4 mm lazer boşluklu ADI'de gözlemlendi, ancak 1.5 mm veya 3 mm lazer boşluklu ADI'de gözlemlenmedi. Bunun nedeni, 4 mm lazer aralığının orta kısmının lazer ısısından etkilenen bölgenin ötesinde olmasıdır. Düşük boşluk mesafeleri, daha düşük sertlik üretti; bunun nedeni, küçük boşluklara sahip iki bitişik lazer yolunun ısıdan etkilenen bölgelerin örtüşmesidir. Bu nedenle, daha küçük boşluklu numuneler için temperlenmiş beynit, daha büyük boşluklu numunelere göre daha yüksek temperleme sıcaklıklarına tabi tutulmuştur.

Ghaini vd. (2020) yaptıkları çalışmada, GGG-60 dökme demiri sertleştirmek için 600 W fiber lazer kullanılmıştır. Optimum yüzey özelliklerini elde etmek için, lazer güç yoğunluğu ve hareket hızı kombinasyonunun, karbürleri çözecek, ancak grafit nodüllerini çözecek kadar yüksek olmayacak şekilde ayarlanması gerektiği bulunmuştur. Sertleştirilmiş bir izin, komşu bir lazer izi tarafından hem tavlama hem de yeniden sertleştirme açısından ikinci bir termal döngüye tepkisi, örtüşmenin arttırılmasıyla daha düzgün bir yüzey mikro yapısının ve sertliğinin elde edildiğini göstermiştir. Ayrıca, diferansiyel taramalı kalorimetri (DSC) analizi kullanılarak, GGG-60 dökme demir için güç kaynağı olarak fiber lazer tarafından maksimum sertleşme oranı %15,3 olarak bulunmuştur. Odak mesafesi 10 mm odak, dalga boyu 1080 nm, optik verimlilik %78, M2 faktörü 1,4'ten fazlaydı. 25 L/dk akış hızında eş eksenli modda argon gazı hem ısıtılan yüzeyin korunması hem de lazer sisteminin optik parçalarının korunması için kullanılmıştır. Mikro yapılar, 2 N yük altında Vickers mikro girinti sertlik ölçümleri ile desteklenen optik mikroskopi ve taramalı elektron mikroskobu ile araştırıldı. 2000 taşlama sayısına kadar taşlama işlemi uygulanmış ve parlatıcı olarak polisaj tuvali ve 3 µm Al₂O₃ tozu kullanılarak geleneksel yöntemlerde parlatma uygulanmıştır. Mikro yapıların aşındırılması için nital solüsyon uygulandı. 500 W fiber lazer ile GGG-60 sfero dökme demirin yüzey dönüşüm sertleştirmesi, etki derinliği 0,80 mm ve genişliği 4,3 mm olmak üzere 1020 Hv sertliğe ulaştı. 500 W fiber lazerli GGG-60 dökme demir için maksimum termal verim %15,3 değerine ulaştı. Lazer izlerinin %50 örtüşmesi ile elde edilen sertlik homojenliği, %20 örtüşme ile elde edilenden daha iyiydi. Bunun nedeni,

yeniden östenitleştirmenin ve ardından yeniden sertleştirmenin veya temperlemenin hepsinin daha homojen bir mikro yapı ile sonuçlanmasıdır.

3. MATERYAL VE METOT

Proje çalışmasında öncelikle 4 farklı kalitedeki küresel (sfero) grafitli dökme demir malzemeler (ENGJS400-18, ENGJS500-7, ENGJS600-3, ENGJS700-2) belirlenen ölçülerde döküm yoluyla üretimi gerçekleştirilmiştir. Dökülen numuneler talaşlı imalat ile istenen ölçülere getirildikten sonra taşlama işlemi yapılarak yüzey paralelliği sağlanmıştır. Yüzey pürüzlülüğü ve sertlik ölçümleri yapılarak lazer işlemi öncesi hazırlıklar tamamlanmıştır. Daha sonra numuneler lazer ile yüzey işleme işlemlerine tabi tutulmuştur. Lazerle yüzey işleminde her bir numune sınıfı için 3 farklı lazer gücü ve 3 farklı tarama hızı uygulanmıştır (1300 W, 1450W, 1600W güç ve 2mm/s, 3mm/s, 4mm/s ilerleme). Belirlenen lazer gücü ve lazer tarama hızı değerleri literatürde kullanılan değerler baz alınarak seçilmiştir. Lazer işlemleri sonrasında numunelerin mikroyapı ve sertlik kontrolleri yapılmıştır. Ancak, yapılan sertlik ölçümlerinde 1300 W ve 1450W lazer gücünde 4 mm/s lazer tarama hızında yapılan LST işlemlerinden elde edilen sertlik değerlerinin oldukça düşük olduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle çalışmanın aşınma deneyleri için seçilen lazer uygulanmış (LST_{ed}) numunelerinin 431-LST_{ed} ve 731-LST_{ed} olmasının uygunluğuna karar verilmiş olup aşınma deneyleri bu numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir.

3.1 Numune Hazırlama ve Malzeme Karakterizasyonu

EN-GJS-400-18 ve EN-GJS-700-2 sfero dökme demir numuneler 50x40x30 mm ölçülerinde kesildikten sonra yüzeyleri frezelenerek birbirine paralel hale getirilmiştir. Daha sonra yapılan taşlama işleminin ardından yüzey pürüzlülüğü ortalama Ra=0.8 µm olarak ölçülmüştür (Mitutoyo SJ-210). Numunelerin kimyasal kompozisyonları Tablo 3.1’de, mikro yapıda yer alan fazlara ilişkin veriler ise Tablo 3.2’de verilmiştir.

Tablo 3.1: Test numunelerinin kimyasal kompozisyonları (% ağırlık)

Malzeme	C	Si	Mn	P	S	Mg	Cr	Cu	Fe
GJS 400-18	3,52	2,52	0,182	0,021	0,011	0,044	0,034	0,091	Bal.
GJS 700-2	3,62	1,97	0,233	0,022	0,016	0,055	0,253	0,895	Bal.

Tablo 3.2: Döküm sonrası sfero dökme demir numunelerin mikroyapılarındaki faz

Malzeme	Grafit (%)	Perlit (%)	Ferrit (%)
GJS400-18	6,75	15,53	77,72
GJS700-2	10,65	89,13	0,22

Tablo 3.2 incelendiğinde GJS 400-18 dökme demir numunesinin ferritik yapıya, GJS 700-2 numunesinin ise perlitik yapıya sahip olduğu anlaşılmaktadır. Perlit ise sementit ve α -ferrit fazlarının lameller halinde diziliminden oluşan özel bir faz olarak bilinmektedir. Sert sementit fazı yapıya sertlik ve dayanımını artırıcı etki yaparken sünek ferrit fazı tokluğu artırıcı etkiye sahiptir. Sfero dökme demirlerin birçok makine parçasında tercih edilmesinin temelinde ise yüksek dayanım ve tokluk özelliklerinin birlikte yer alması yatmaktadır.

Lazer uygulaması sonrasında enine kesitte ortaya çıkan mikro yapının ve lazer etki derinliğinin incelenmesi amacıyla öncelikle geleneksel metalografi teknikleri uygulanmıştır (320 ve 1200 grit zımparalar kullanılarak zımparalandıktan sonra 3 μ m partikül boyutlu elmas solüsyon ile parlatılmıştır). Daha sonra yüzeyleri 10 s boyunca %4 nital (96 mL etanol, 4 mL nitrik asit) ile dağlanan numuneler optik mikroskop (OM, Huvitz HDS 5800, Republic of Korea) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM, TESCAN-MAIA3, Czech Republic) altında incelenmiştir. Lazer uygulanmış (LST_{ed}) numunelerin sertlik ölçümleri enine kesit boyunca 100 μ m aralıklarla toplam 1200 μ m derinliğe kadar gerçekleştirilmiştir. LST_{ed} numunede oluşan fazlar X-ışını difraktometrisi (XRD, Rigaku D/Max-2200VPC, Japan) kullanılarak 2 θ taraması 10-90° aralığında ve Cu K α ışınımı ($\lambda_{Cu}=0.154$ nm) ile tespit edilmiştir.

Tablo 3.3’de belirtilen değerlerdeki yaş kalıp kumu %98 yanmış eski kum, %1 yeni silis kumu (60-65 afs), %0.7 bentonit ve %0.3 kömür tozu kullanılarak hazırlanmıştır. Numune modeli “Sinto” marka “HWS” model yaş kum kalıplama hattında her kimyasal analizden dokuzar adet olacak şekilde toplamda 36 adet kalıplanmıştır.

Tablo 3.3: Numunelerin yaş kalıp kumu karakteristiği

Analiz	Nem(%) (100 gr kumdaki su miktarı)	Basma Mukavemeti (N/cm ² *100)	Kesme Mukavemeti (N/cm ² *100)	Yanal Basma Mukavemeti (N/cm ² *100)	Kompaktabilite (mm)	Gaz Geçirgenliği (cm ² / sn)	Aktif Kıl(%)
EN GJS 400-18	3,9	1700	450	320	39	140	7,06
EN GJS 500-7	3,8	1530	395	280	40	140	7,42
EN GJS 600-3	3,9	1650	420	310	35	140	7,24
EN GJS 700-2	3,9	1580	400	310	39	140	7,42

EN-GJS-400-18, EN-GJS500-7, EN-GJS-600-3 ve EN-GJS-700-2 malzemelerindeki dökme demir numuneleri EGES marka indüksiyon ocağında ergitilmiştir. İndüksiyon ocağından potaya aktarılan ergitilmiş sıvı metale tel formundaki FeSiMg ilave edilmiştir. Tretman potasına aktarım yapılırken %0.4 oranında Barinoc aşısı ilave edilerek küresel grafitli dökme demir analizleri elde edilmiştir. Potadan ve ergitme ocağından alınan spektro numuneleri “OBLF” marka “RS1000” model spektrometrede kimyasal ölçümleri yapılmıştır. Kimyasal analiz değerleri Tablo 3.4’de gösterilmiştir.

Tablo 3.4: Numunelerin ocak ve potadan alınan kimyasal analiz değerleri

Analiz	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Mg	%Cr	%Cu	%Barinoc
EN GJS 400-18(Ocak)	3,72	1,98	0,181	0,021	0,021	0,001	0,031	0,094	-
EN GJS 400-18(Pota)	3,52	2,52	0,182	0,021	0,011	0,044	0,034	0,091	0,4
EN GJS 500-7(Ocak)	3,83	1,78	0,211	0,021	0,019	0,001	0,033	0,304	-
EN GJS 500-7(Pota)	3,68	2,22	0,208	0,019	0,017	0,051	0,03	0,319	0,4
EN GJS 600-3(Ocak)	3,81	2,04	0,214	0,021	0,014	0,001	0,034	0,481	-
EN GJS 600-3(Pota)	3,62	2,51	0,229	0,018	0,009	0,043	0,04	0,482	0,4
EN GJS 700-2(Ocak)	3,8	1,55	0,235	0,024	0,019	0,001	0,253	0,944	-
EN GJS 700-2(Pota)	3,62	1,97	0,233	0,022	0,016	0,055	0,253	0,895	0,4

Elde edilen sıvı metal malzemelerin Tablo 3.5’te belirtilen sıcaklıklarda kum kalıba ve mikroyapı kum bloğuna dökümü gerçekleştirilmiştir.

Tablo 3.5: Döküm sıcaklıkları

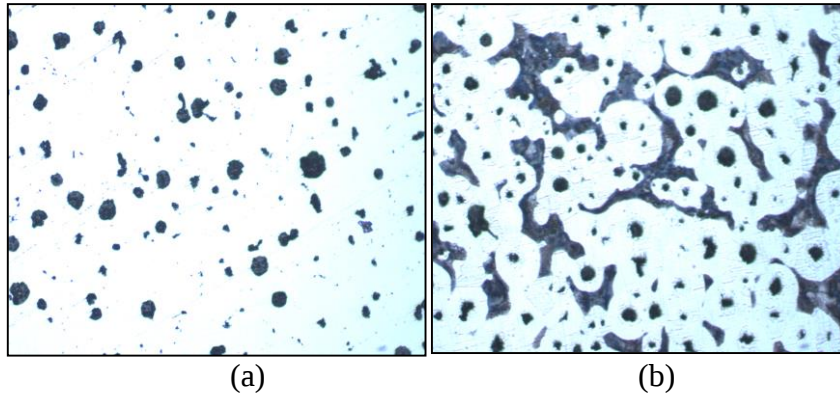
Analiz	Ocaktan Çıkış Sıcaklığı (°C)	Döküm Başlangıç Sıcaklığı (°C)
EN-GJS-400-18	1504	1398
EN-GJS-500-7	1518	1408
EN-GJS-600-3	1498	1396
EN-GJS-700-2	1500	1401

Yaş kum kalıpları içerisinde 4 saat bekletilerek soğutulan numuneler çelik bilyeli kumlama yöntemiyle yüzeyde kalan kum ve çaptan arındırılmıştır.

Ergitilmiş sıvı metalden alınan mikro yapı bloğu “Metkon” marka disk zımpara makinesine bağlanan, “Metkon” marka P-180 ve P-600 grit zımpara üzerine “Metkon” marka 3µ Diapat-M elmas suyu püskürtülerek metalürjik zımparalama ile yüzeyinden talaş kaldırılarak parlatılmıştır. Parlatılan mikroyapı numuneleri “Nikon” marka “Eclipse MA100” model mikroskopta incelenmiştir.

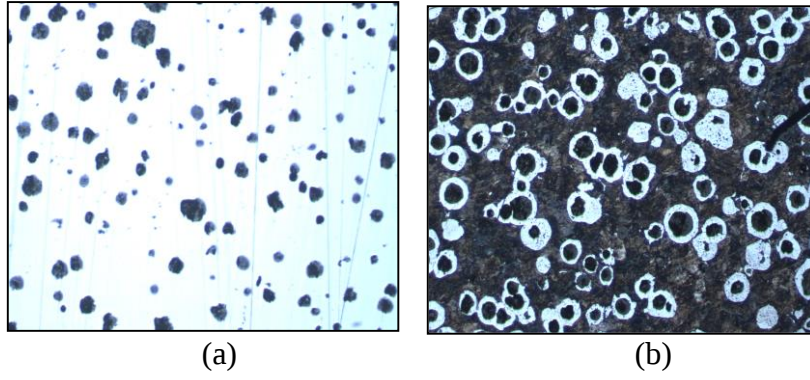
Dağlanmış mikroyapı görüntüsü elde etmek için, parlatılan numune yüzeyinde %100 etanol püskürtülerek mikro boyuttaki talaşlardan temizlenmiştir. % 4 oranında % 1.325-1.350 g/cm³ yoğunluğa sahip “Birpa” marka Nitrik Asit ile % 96 oranındaki “Bidolu Kimya” marka etanol karışım kabında karıştırılmıştır. Elde edilen karışım (%4 Nital) parlatılan mikro yapı numune yüzeyine damlatıp 5 sn beklenerek dağlandı. 5 saniyenin sonunda %100 etanol ile yıkanmıştır. Dağlanan mikro yapı numuneleri “Nikon” marka “Eclipse MA100” model mikroskopta incelenmiştir.

EN-GJS-400-18 analizli dağlanmamış mikro yapı görüntüsü Şekil 3.1(a), analizli dağlanmış mikro yapı görüntüsü Şekil 3.1 (b)’de gösterilmiştir.



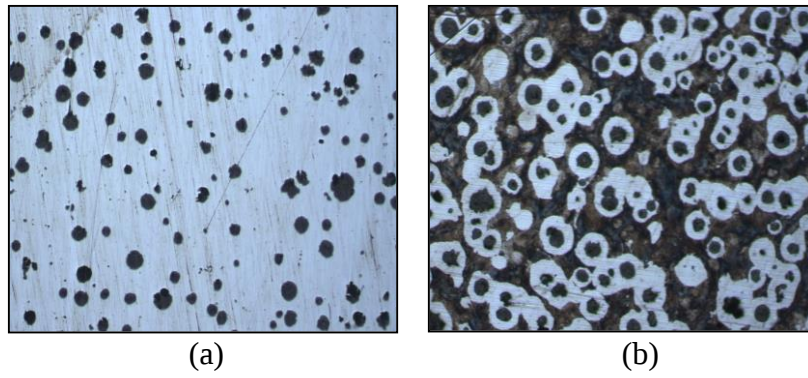
Şekil 3.1: EN-GJS-400-18 analizli numunenin mikro yapı görüntüsü dağlanmamış (a), dağlanmış (b)

EN-GJS-500-7 analizli dağlanmamış mikro yapı görüntüsü Şekil 3.2(a), analizli dağlanmış mikro yapı görüntüsü Şekil 3.2 (b)’de gösterilmiştir.



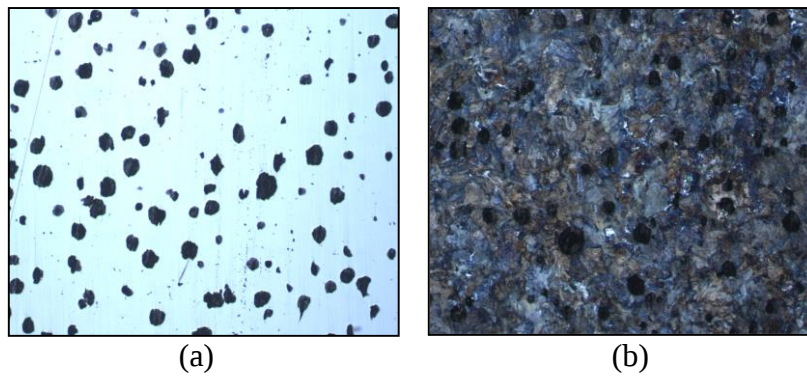
Şekil 3.2: EN-GJS-500-7 analizli numunenin mikro yapı görüntüsü dağlanmamış (a), dağlanmış (b)

EN-GJS-600-3 analizli dağlanmamış mikro yapı görüntüsü Şekil 3.3(a), analizli dağlanmış mikro yapı görüntüsü Şekil 3.3 (b)'de gösterilmiştir.



Şekil 3.3: EN-GJS-600-3 analizli numunenin mikro yapı görüntüsü dağlanmamış (a), dağlanmış (b)

EN-GJS-700-2 analizli dağlanmamış mikro yapı görüntüsü Şekil 3.4 (a), analizli dağlanmış mikro yapı görüntüsü Şekil 3.4 (b)'de gösterilmiştir.



Şekil 3.4: EN-GJS-700-2 analizli numunenin mikro yapı görüntüsü dağlanmamış (a), dağlanmış (b)

Hazırlanan dört farklı kimyasal analizdeki küresel grafitli dökme demir numunelerin ferrit, perlit, grafit oranları mm² 'de bulunan küre sayısı Tablo 3.6'de gösterilmiştir.

Tablo 3.6: Numunelerin mikro yapı özellikleri

Analiz	Grafit Oranı (%)	Perlit Oranı (%)	Ferrit Oranı (%)	Küre Sayısı (1/mm ²)
ENGJS400-18	6,75	15,53	77,72	268
ENGJS500-7	9,41	66,88	23,71	275
ENGJS600-3	11,32	57,2	31,48	345
ENGJS700-2	10,65	89,13	0,22	302

35 mm yüksekliğe sahip 36 adet dökme demir numuneler “Victor” marka “V Center” model dik işleme tezgahında talaş kaldırılarak 30.5 mm yüksekliğine azaltılmıştır. Hazırlanan numuneler universal hassas taşlama tezgahında 0.5 mm talaş kaldırılarak 30.0 mm yüksekliğinde ve yüzeyler arası paralellik ± 0.005 mm toleransında sağlanmıştır. Elde edilen numunelerin yüzey pürüzlülüğü λ_c (0,8x4- 0,5mm/s) standardında “Mitutoyo” marka “SJ-210” model yüzey pürüzlülük ölçüm cihazında ölçülmüştür. Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri Tablo 3.7’de gösterilmiştir.

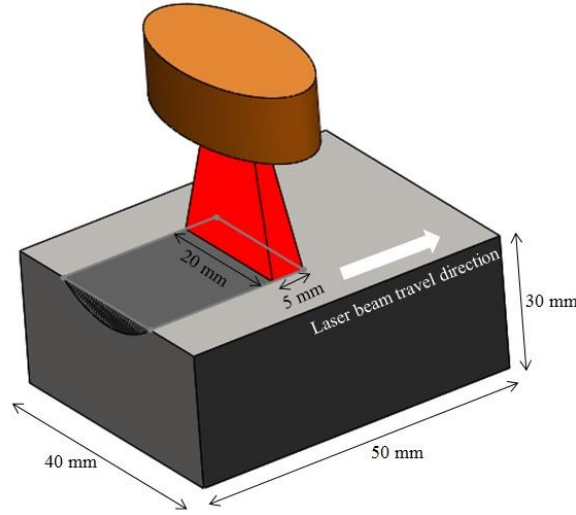
Tablo 3.7: (devam ediyor) Yüzey pürüzlülüğü değerleri

NUMUNE KODU	Ra (μm)	Rq (μm)	Rz (μm)
411	0,974	1,217	6,593
412	0,765	0,959	4,743
413	0,854	1,105	5,675
421	0,691	0,88	4,521
422	0,895	1,104	5,84
423	0,6	0,792	4,356
431.	0,582	0,74	3,867
432	0,888	1,152	6,03
433	0,799	1,001	5,448
511	0,791	1,004	4,922
512	0,816	1,049	5,779
513	0,843	0,104	5,039
521	0,807	1,01	5,043
522	0,864	1,175	6,166
523	0,831	1,042	5,278
531	0,83	1,042	5,242
532	0,793	1,002	5,195
533	0,755	0,933	4,716
611	0,921	1,167	6,24
612	0,945	1,172	5,719
613	0,793	1,046	6,022
621	0,996	1,247	6,229
622	0,871	1,073	5,38
623	0,9	1,135	6,29
631	0,924	1,166	5,984

632	0,906	1,154	5,815
633	0,762	0,945	4,772
711	0,908	1,115	5,378
712	0,842	1,024	4,7
713	0,792	1,075	6,075
721	0,87	1,119	6,551
722	0,806	1,038	5,334
723	0,97	1,101	6,125
731	0,844	1,076	5,628
732	0,877	1,154	5,971
733	0,801	1,054	5,745

3.2 Lazer Yüzey İşleme (LST)

Bu çalışmada gerçekleştirilen LST işlemi için diyot lazer kullanılmıştır (Laserline, LDF-3000-100, Germany). Lazerin numune yüzeyine olan odak mesafe uzaklığı 195 mm' dir. Şekil 3.5'te uygulanan lazer işleme ait şematik bir diyagram gösterilmiştir. Literatürde lazer yüzey işlemlerinde çoğunlukla dar alanda 1-5 mm spot çapına sahip lazer ışını kullanılırken (Ceschini vd.,2016; Ghaini vd.,2020; Mavi ve Korkut, 2020; Türedi, 2012), 9-16 mm arasında değişen spot çaplarındaki lazer ışının (Fernández vd., 2012) kullanıldığı daha geniş etki alanına sahip uygulamalar da gerçekleştirilmiştir. Lazer yüzey işlemlerinde spot çapına bağlı olarak değişen overlap yüzdeleri ile çok sıralı olarak yüzey taranmaktadır. Ancak bu durumda lazerle sağlanan enerji girdisinin etkisiyle yüzeydeki ergime veya mikro yapıda oluşan faz değişimini takip eden hızlı soğuma sonucunda malzeme içyapısında artık gerilmeler meydana gelmektedir. Söz konusu artık gerilmeler lazer işlemi ile elde edilen sertlikteki artıştan ödün vermeksizin gerilim giderme tavlama işlemine tabi tutulmadığı durumlarda ise uygulanan dış yüklerle birlikte içyapıda çatlak oluşumu ve kalıcı hasar oluşumu kaçınılmaz olacaktır. Bu nedenle bu çalışmada lazer uygulanan yüzeyde istenen mikroyapı değişikliği ve sertlik artışını sağlayabilecek lazer yoğunluğunu ($5-6 \text{ J/mm}^3$) 100 mm^2 (20×5) gibi nispeten oldukça geniş etki alanına uygulamak suretiyle artık gerilme ve distorsiyonların minimum seviyeye indirilmesi amaçlanmıştır.



Şekil 3.5: Lazer işleme ait şematik gösterim

Tablo 3.8’de uygulanan lazer gücü ve tarama hızı parametreleri ile bunlara karşılık elen lazer yoğunluğu değerleri verilmiştir. Numune kodlama işlemi malzeme sınıfına ek olarak sırasıyla lazer gücü ve lazer tarama hızının seviyelerine göre yapılmıştır. Örneğin, 423 kodundaki 4, GJS 400-18 sınıfı dökme demir numuneyi, 2 ise 1450 W lazer gücü uygulandığını ve son olarak 3 rakamı 4 mm/s lazer tarama hızının kullanıldığını temsil etmektedir.

Tablo 3.8: Lazer işlem parametreleri

Malzeme	Lazer gücü (W)	Lazer tarama hızı (mm/s)	Lazer enerji yoğunluğu (J/mm ³)	Numune kodu*
GJS 400-18 ⁴	1450 ^{2♣}	2 ^{1♠}	5,69	421
		4 ^{3♠}	2,85	423
	1600 ^{3♣}	2	6,28	431
		4	3,14	433
GJS 700-2 ⁷	1450	2	5,69	721
		4	2,85	723
	1600	2	6,28	731
		4	3,14	733

NOT: Sol taraftaki ilk sayı numunenin malzemesini, diğerleri ise sırasıyla lazer gücünü (♣) ve lazer tarama hızını (♠) göstermektedir.

Hazırlanan dört farklı kimyasal analize sahip küresel grafitli dökme demir numuneler “Laserline” marka “LDF-3000-100” model diyet lazer makinesinde numune yüzeyine 195 mm yükseklikte, 20x5 mm alana sahip odak noktasından, her kimyasal analiz çeşidi için üç

farklı lazer gücünde (W) ve üç farklı lazer ilerlemesinde (mm/s) lazer yüzey işlemine tabii tutulmuştur.

Enerji yoğunluğu (J/mm^3) Eşitlik 3’de gösterilen formülle hesaplanmıştır.

$$\text{Enerji Yoğunluğu } \left(\frac{J}{mm^3} \right) = \frac{P \cdot \pi}{4 \cdot V \cdot A} \quad (3)$$

P: Lazer gücü (W)

V: İlerleme (mm/s)

A: Lazer odak aynası alanı

Numune üst yüzeyi olan lazer yüzey işlemi uygulanan bölgeden ve lazer uygulanmamış alt yüzeyden Vickers yüzey sertlik ölçümü yapılmıştır.

3.3 Kuru Kayma Aşınma Testleri

Lazer işlemi sonrası elde edilen LST_{ed} yüzeylerin aşınma direnci ve aşınma mekanizmalarını belirlemek için oda sıcaklığında kuru kayma aşınma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ball-on-flat aşınma testleri ileri-geri doğrusal hareket modunda ve ASTM G133-05 standardına uygun olarak yapılmıştır. Şekil 3.6’da kullanılan tribometre cihazına (Turkyus, Türkiye) ait bir görüntü verilmiştir.



Şekil 3.6: Ball-on-flat tribometre cihazı

Her bir test kombinasyonu üç kez tekrar edilmiş olup test süresince ölçülen COF değerleri cihaz yazılımı tarafından otomatik olarak kaydedilmiştir. Uygulanan aşınma test parametreleri Tablo 3.9’da verilmiştir.

Tablo 3.9: Aşınma test parametreleri

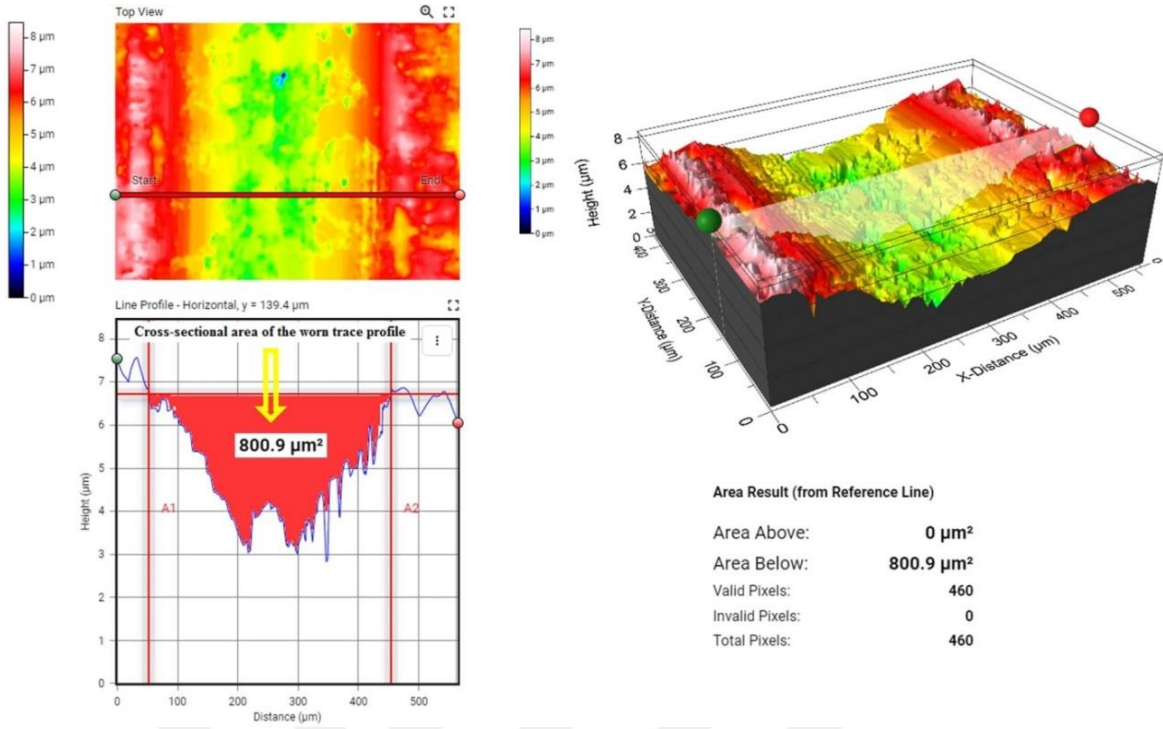
Aşındırıcı Bilye Özelliği	Yük (N)	Kayma Hızı (mm/s)	Test Süresi (dk)
WC Ø6mm	5	10	30
	10	20	
		30	

Aşınma testlerinden sonra elde edilen aşınma izi görüntüleri bir 3D profilometre cihazında (Filmetrics, Profilim 3D, USA) incelenmiştir. 3D profilometre cihaz yazılımı ile iz görüntüsü üzerindeki en az 5 farklı yerden (referans çizgisi) hesaplanan iz profil alanlarının aritmetik ortalaması alınarak aşınma izi alanı belirlendikten sonra (Şekil 3.7) aşağıdaki formüller kullanılarak hacim kaybı ve spesifik aşınma oranı değerleri hesaplanmıştır.

$$V = L.A \quad (4)$$

$$K = \frac{V}{F.S} \quad (5)$$

Burada Eşitlik 4’ te verilen V-hacim kaybı (mm³), L-iz boyu (mm) ve A-iz ortalama kesit alanını temsil etmektedir. Eşitlik 5’te verilen K-spesifik aşınma oranı (mm³/N.m), F-yük (N) ve S-kayma mesafesi (m) dir.



Şekil 3.7: 3B profilometre yazılımı ile aşınmış iz profilinden alanın belirlenmesi

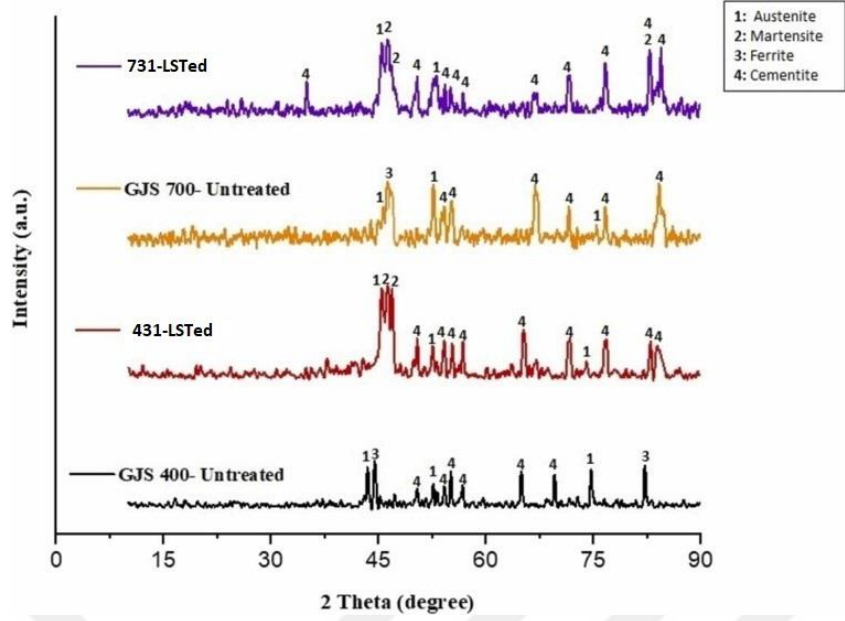
Lazer yüzey işleme uygulanan numune yüzeylerinde 5N ve 10N yük altında 10 mm/s, 20 mm/s ve 30 mm/s kayma hızlarında kuru kayma aşınma direnci ölçümü yapıldı. Lazer yüzey işleme uygulanmayan numune yüzeylerinde 5N ve 10N yük altında 30 mm/s kayma hızında kuru kayma aşınma direnci ölçümü yapıldı. Ölçümler “Turkyus” marka pin on disk cihazında yapıldı. “Esit data logger” bilgisayar programında veriler kaydedildi.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Lazer işlemi sonrası elde edilen penetrasyon derinliğinin (kasa derinliği), uygulanan lazer gücü ve tarama hızı ile doğru orantılı olduğu bilinmektedir. Ayrıca, uygulanan güç ne kadar yüksek olursa, belirli bir tarama hızında kasa derinliği o kadar büyük olur. Öte yandan, tarama hızı ne kadar yüksek olursa, lazer-madde etkileşimi için karşılık gelen etkileşim süresi o kadar küçük olur ve dolayısıyla ilgili kasa derinliği değeri o kadar düşük olur (Roy ve Manna, 2001).

Literatürde dökme demirler için uygulanan lazer parametrelerine göre lazer işlemi sonrası enine kesit derinliği boyunca 4 ayrı bölge olduğu bildirilmiştir (Grum ve Šturm, 1996; Fernández vd., 2012; Ceschini vd., 2016), erime bölgesi (A); geçiş bölgesi (B); sertleştirilmiş bölge (C); temel malzeme (D). Ferrit yapılı dökme demirler için lazer işlemi uygulanmasıyla ferritik matriks homojen olmayan östenite dönüşmektedir. Lazer ışını geçişi sonrası hızlı soğuma etkisiyle lokal olarak ledeburitik yapı oluşmaktadır. Perlitik yapılı dökme demirlerde ise ergime ile yüksek karbon içeriğine sahip östenit yapı hızlı soğuma sonrası çoğunlukla sert martenzit ve ledeburit fazlarına dönüşmektedir.

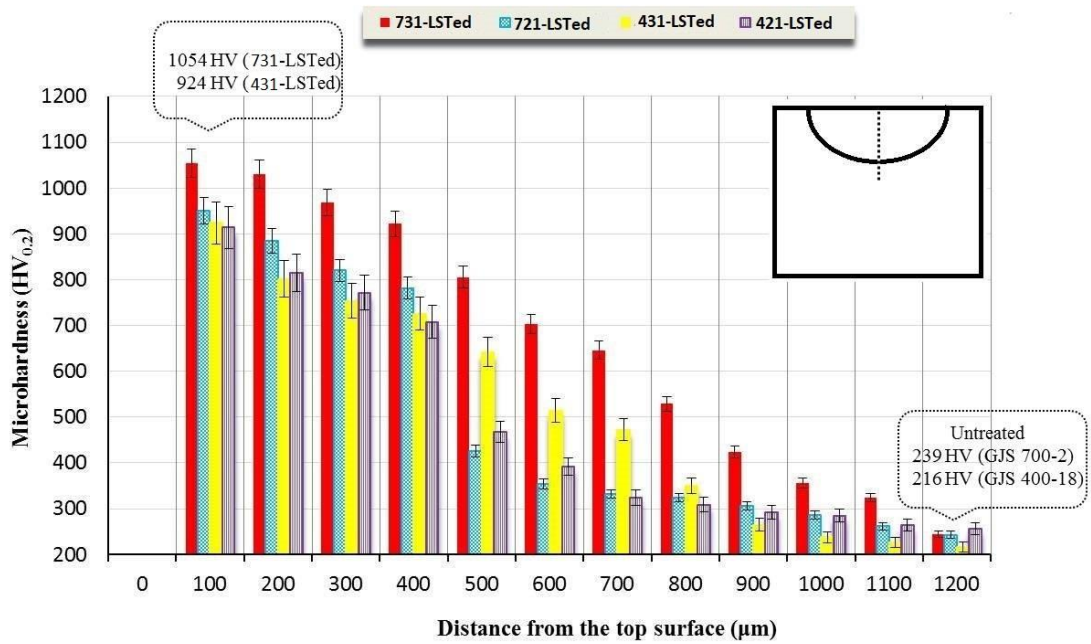
Lazer işlemi sonrası mikro yapıda oluşan fazlar ise başta yüzey sertliği olmak üzere aşınma davranışını doğrudan etkilemektedir. Bu çalışmada uygulanan lazerle yüzey işlemi sonrası içyapıdaki fazlar ve sertlik değerlerinin değişimi ile aşınma davranışına etkilerinin değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Buna göre uygulanan lazer işlemi öncesi ve sonrasında alınan XRD analizi sonuçları Şekil 4.1’ de verilmiştir. Şekil 4.1 incelendiğinde, lazer işlemi öncesinde GJS 400 numunesinin ferrit ve sementit ten oluşan ferrit-perlit yapıya sahip olduğu görülmektedir. GJS-700 numunesi ise ferrit ve sementit fazlarının ağırlıklı olduğu perlitik yapıyla uyumlu pikler vermiştir. Uygulanan lazer işlemi (LST_{ed}) sonrası XRD patternlerine gelince, 431 kodlu lazer uygulanmış numunede sementit fazının varlığı belirginleşirken lazer enerji girdisi ile ani ısınma ve hızlı soğumanın etkisiyle martenzit fazının da oluştuğu tespit edilmiştir. 731 numunesinde ise sementit ve martenzit fazlarının öne çıktığı ve bunun yanı sıra kalıntı östenit fazının da yapıda yer aldığı anlaşılmaktadır.



Şekil 4.1: Lazer işleminin öncesi ve sonrasında sfero dökme demir numunelere ait XRD analizi

4.1 LST İşleminin Sertliğe Etkisi

Şekil 4.2’te LST işlemi sonrasında lazer uygulanan yüzeyden itibaren kesit derinliği boyunca ölçülen (anlaşılır ve sade olması bakımından) sadece en yüksek sertlik değerlerinin elde edildiği ölçümler verilmiştir.



Şekil 4.2: LST sonrası numunelerin enine kesitleri boyunca alınan sertlik değerleri

Şekil 4.2 incelendiğinde en yüksek sertlik değerinin 1600 W lazer gücü ve 2 mm/s tarama hızının kullanıldığı 731-LST_{ed} kodlu numunede ölçüldüğü ve sertliğin yüzeyden 100 µm derinliğe kadar yaklaşık 1054 HV olduğu belirlenmiştir. Lazer gücünün 1450 W a düşürülmesi ile birlikte 2 mm/s tarama hızında (721-LST_{ed} kodlu numune) ise yaklaşık 950 HV olarak ölçülmüştür. Lazer tarama gücünün 4 mm/s ye çıkarılması ile birlikte ise sertlik değerlerinin dramatik şekilde 450 HV civarına düştüğü görülmektedir. Yüksek perlit içeriğine sahip GJS 700 sfero dökme demir malzemenin lazer ile sertleştirme işleminde elde edilen sertlik değeri ve sertleştirilmiş katman derinliğini belirlemede lazer gücü ve tarama hızının doğrudan oldukça büyük bir etkiye sahip olduğu anlaşılmaktadır. GJS 400 numunesi için de benzer şekilde en yüksek lazer gücü ve en düşük tarama hızında (431-LST_{ed} kodlu numune) lazer işlemi sonrasında ölçülen en yüksek sertlik değerinin 924 HV olduğu tespit edilmiştir. Bu değer GJS-400 ün perlit yüzdesinin GJS-700 e göre 5 kat daha düşük düşük olmasıyla açıklanabilir. Lazer tarama hızının 4 mm/s ye çıkması ile bu değer 424 HV ye düşmüştür. Diğer bir ifadeyle lazer tarama hızının 4 mm/s olarak uygulanması hem GJS-400 hem de GJS 700 numunelerin sertliklerinin yaklaşık %50 daha az ve birbirine yakın değerlere düşmesine neden olmuştur. GJS 400 numunesinde 1450 W lazer gücü ile 2 mm/s tarama hızında (421- LST_{ed}) işlem sonrası ölçülen en yüksek sertlik değeri, 1600 W lazer gücü ile elde edilen sertlik değerine oldukça yakın olup 914 HV tir. Buradan düşük perlit içerikli GJS-400 numunesinde lazer gücünün sertlik değeri üzerindeki etkisinin GJS-700 numunesine göre önemli oranda daha düşük olduğunu söylemek mümkündür. Lazer tarama hızının GJS 700 de olduğu gibi GJS 400 numunesinin maksimum sertlik değeri üzerinde de oldukça etkili ve belirleyici olduğu anlaşılmaktadır.

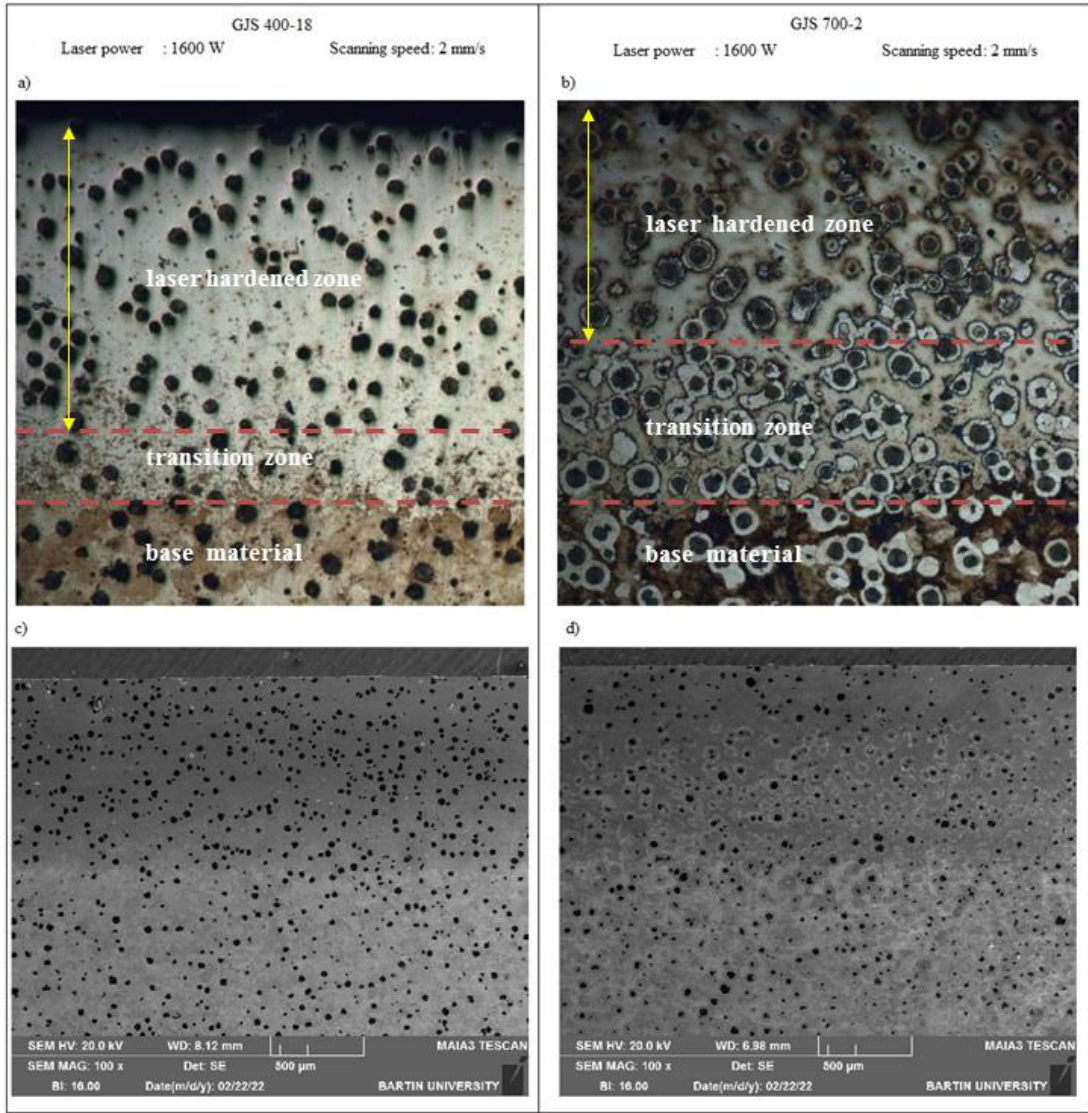
Diğer taraftan sertlik değerinin kesit derinliği boyunca değişimi incelendiğinde ise, 731 de enine kesitte 500-600 µm derinliğe kadar yaklaşık 700 HV ve üzerinde sertlik değerinin korunduğu görülmektedir. Bu bakımdan GJS 400 numunesinde en yüksek sertlik veren lazer uygulamasında dahi bu söz konusu 700 HV sertlik değeri ancak 400 µm derinliğe kadar mümkün olabilmektedir. GJS 700 numunesinin lazer işlemi ile 1000 HV sertliğin üzerine çıkabilmesi mikro yapısında yer alan oldukça yüksek orandaki (89.13%) perlit fazının termal dönüşümle martenzit ve ledeburite dönüşmesidir. Lazer tarama hızının elde edilen sertlik değerlerinde kritik şekilde etkisi olduğu anlaşılmaktadır. Şöyle ki, 733 numaralı numunede 731 e göre değişen tek parametre lazer tarama hızının 2 mm/s den 4 mm/s ye çıkmasıdır. Tarama hızının 4 mm/s ye çıkması ile birlikte ilerleme doğrultusunda overlap oranı %100 den %20 ye düşmektedir ve bunun sonucunda da lazer yoğunluğu 6,28 J/mm³ ten 3,14 J/mm³

değerine düşmektedir. Lazer yoğunluğunda gerçekleşen bu %50 oranındaki düşüş ise yüzeyden itibaren enine kesitte 500 μm derinliğe kadar ortalama 400 HV değerine diğer bir deyişle yaklaşık 2,5 kat gibi dramatik bir düşüşe neden olmuştur.

GJS 400 numunesi için lazer sonrası ölçülen sertlik değerleri incelendiğinde, en yüksek 924 HV değerinin 431-LST_{ed} numunesinden elde edildiği ve 731-LST_{ed} numunesi değerlerine paralel bir seyir izleyerek 400 μm derinliğe kadar yaklaşık 700 HV ve üzerinde sertliğin muhafaza edildiği görülmüştür. GJS 700 ile GJS 400 numunelerinin aynı lazer parametreleri kullanılarak gerçekleştirilen lazer yüzey işlemleri sonucu sertlik değerleri arasındaki farkın temel nedeni olarak yapıdaki perlit oran farkı olduğu düşünülmektedir. GJS 400 numunesi için lazer tarama hızının etkisi GJS 700 numunesininki ile benzer olduğu görülmüştür.

4.2 LST İşleminin Mikro Yapıya Etkisi

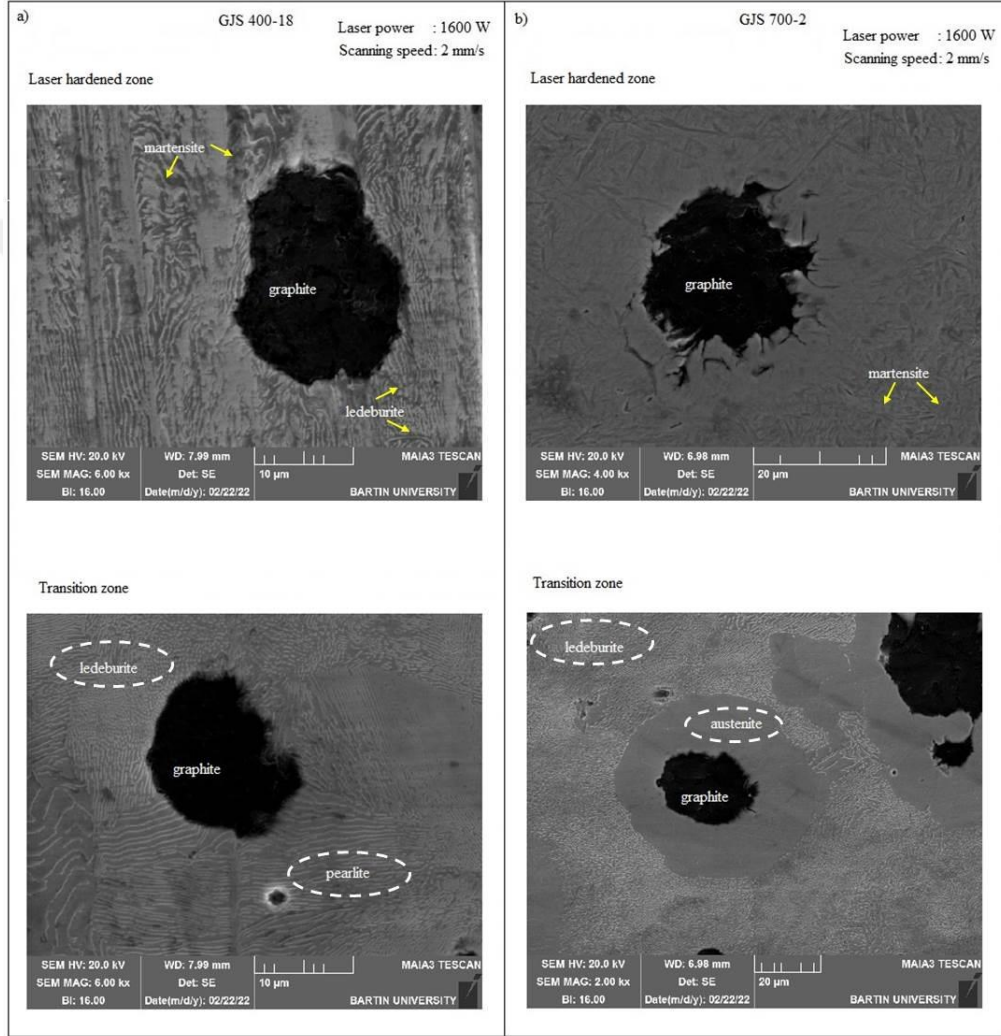
Lazerle sertleştirme sırasında, lazer kaynaklı ısıtma ile malzemenin östenitleme sıcaklığının üzerine ısıtılması, mikro yapıda bulunan perlit/ferrit fazlarını östenite dönüştürür. Bunu takiben gerçekleşen yüksek hızlı soğuma neticesinde östenit martensite dönüşür. Tek termal döngüde, sıcaklık alanı, gerilim/gerilme durumu ve mikro yapının tümü birbirine güçlü bir şekilde bağlıdır (Bailey vd., 2009; Lu vd., 2021). Yapılan sertlik ölçümleri neticesinde, düşük lazer gücü ve yüksek tarama hızı uygulanması sonucu ölçülen sertlik değerlerinin oldukça sınırlı oranda artışa neden olduğu görülmüştür. Bu nedenle bu çalışmada en yüksek sertlik artışını sağlayan lazer parametreleri (1600 W lazer gücü ve 2 mm/s lazer tarama hızı) ile diğer bir deyişle yüksek lazer enerji yoğunluğu (6,28 J/mm³) kullanılarak elde edilen mikroyapılar incelenecektir. Şekil 4.3’de 431-LST_{ed} ve 731-LST_{ed} kodlu numunelere ait optik mikroskop (OM) ve karşılık gelen SEM kesit görüntüleri verilmiştir. Buna göre lazer etki derinliği 431 numunesi için yaklaşık 1030 μm iken 731 numunesi için yaklaşık 1060 μm olup birbirine oldukça yakın olduğu görülmüştür. Lazer gücü ve tarama hızının yaklaşık aynı etki derinliğine sahip olmasına rağmen mikro yapıdaki farklılık dikkat çekici düzeydedir. Bu durumun temelde her iki numunenin mikro yapısındaki perlit oranlarının farklılığından kaynaklandığı söylenebilir.



Şekil 4.3: Lazer sonrası sfero dökme demir numune kesitlerinin optik mikroskop ve SEM görüntüleri (lazer yoğunluğu: $6,28 \text{ J/mm}^3$)

Şekil 4.3’de de açıkça görüldüğü gibi lazer etki derinliğinde yüzeyden itibaren derinlik boyunca üç ana bölge oluşmaktadır, lazerle sertleştirilmiş bölge, geçiş bölgesi ve temel malzeme. Bu durum literatürde belirtilen çalışmalarla uyumludur (Grum ve Šturm, 1996; Fernández vd., 2012). Bu çalışmada ise erime bölgesinin oluşmadığı gözlenmiştir. Bu durum yaklaşık 5 kat daha geniş lazer uygulama alanı ve odak dışı lazer mesafesiyle ilgili olduğu düşünülmektedir. Erime bölgesi grafit nodüllerinin yok edildiği veya difüzyon yoluyla çapının ve sayısının azalmasıyla dikkati çekmektedir (Chen vd., 2005). Bu durum yüzeyin tokluğunu azaltıcı etkiye neden olduğundan erime bölgesi oluşumu yerine doğrudan sertleşme bölgesi oluşumunun lazer işlemi yapılan yüzey için avantaj sağladığı söylenebilir.

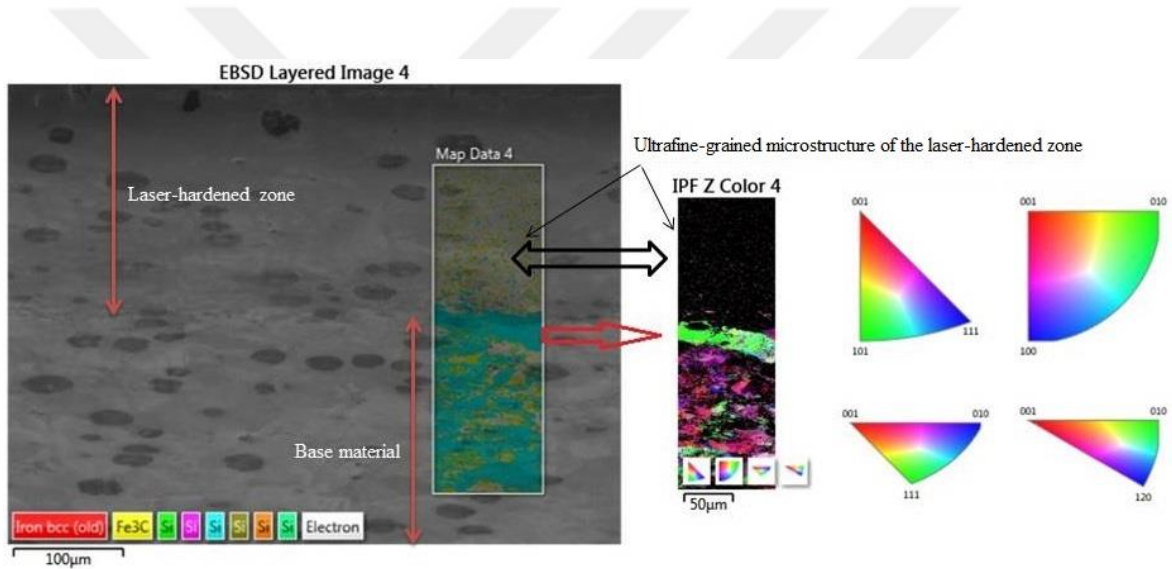
Lazer işlemleri yapılan yüzeyin mikro yapısında oluşan fazlar ve özellikleri incelendiğinde 431-LST_{ed} numunesinin lazer hardened zone derinliği oldukça fazla olup nispeten dar bir geçiş bölgesi sonrası temel malzemeye geçişin olduğu gözlenmiştir (Şekil 4.3 a). Şekil 4.3 c ve Şekil 4.3 d’de verilen SEM mikrograflarının üst yüzeye yakın lazer hardened zone bölgesi ile transition zone bölgelerine ait büyütülmüş SEM görüntüleri sırasıyla Şekil 4.4 (a) ve Şekil 4.4 (b)’de verilmiştir.



Şekil 4.4: LST işlemi sonrası sertleştirilmiş ve geçiş bölgelerinin büyütülmüş SEM kesit görüntüleri (lazer yoğunluğu: 6,28 J/mm³) a) GJS 400-18 b) GJS 700-2

Şekil 4.4’e göre GJS 400-18 numunesi için 431-LST_{ed} kodlu yani 1600 W lazer gücü ve 2 mm/s tarama hızı ile gerçekleştirilen lazer yüzey işlemi sonrası sertleştirilmiş bölgenin martenzit ve ledeburit fazlarına ek olarak az miktarda kalıntı östenitten oluştuğu gözlenmiştir. Aynı numunenin geçiş bölgesi mikro yapısı ise ağırlıklı olarak ledeburit ve perlitten oluşmaktadır. Elde edilen sertlik artışı değerleri mikro yapıdaki fazlarla uyumludur.

731-LST_{ed} kodlu numuneye ait sertleştirilmiş bölge de ise tamamen martenzit yapının bulunduğu, geçiş bölgesinin ise grafit nodülünü çevreleyen östenit kabuğunun dışında ağırlıklı olarak ledeburit fazının varlığı dikkati çekmektedir. Ayrıca lazer işlemi sonrasında kesit derinliği boyunca yüksek enerji girdisinin ardından yüksek soğuma hızı etkisiyle lazer etki bölgesinde oluşan martenzit yapının ultra ince tane boyutuna sahip olduğu Şekil 4.5’de verilen EBSD analizinde açıkça görülmektedir. Bu durumu şu şekilde açıklamak mümkündür: oldukça kısa süreli maruz kalınan lazer ısı girdisi nedeniyle GJS 700 numunesinin yüksek perlit içeriğindeki karbürün çözülmesi için yeterli süre yoktur ve ardından gerçekleşen yüksek soğuma hızı nedeni ile ultra ince taneli bir lazerle sertleştirilmiş bölge yapısı oluşmuştur (Nasiri vd., 2021).



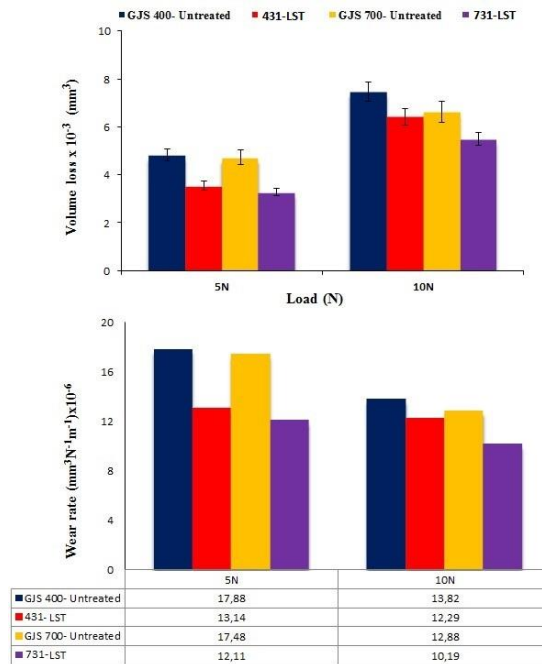
Şekil 4.5: 731-LST_{ed} numunesinin lazerle sertleştirilmiş kesitinden alınan EBSD analizi

Lazer sonrası mikroyapıda oluşan fazlar base material kompozisyonu ile uyumludur. Şöyle ki, Tablo 3.9’da verildiği gibi, GJS 400-18 ağırlıklı olarak ferritik içyapıya sahip iken GJS 700-2 sfero dökme demir malzemenin lazer işlemi öncesi yapısı oldukça yüksek oranda perlit içermektedir. GJS 700-2 numunesi için ifade edilecek olursa, lazer etkisiyle yüksek ısı girdisi sonucu yüksek perlit içeriğine sahip içyapı hızlı bir dönüşüme uğramakta ve hızlı soğuma etkisiyle sertleştirilmiş bölgede oldukça yüksek sertliğe sahip martenzit oluşmaktadır. Geniş bir geçiş bölgesi derinliğine sahip içyapının ise ağırlıklı olarak östenit-ementit fazlarından ibaret olan ledeburitten oluştuğu gözlenmiştir. Geçiş bölgesinde grafiti çevreleyen östenit kabuğun oluşması ise şu şekilde açıklanabilir (Chen vd., 2005): grafitin özgül ısı kapasitesi östenitinkinden daha fazla olduğu için lazerle ısıtma işlemi esnasında

grafitte büyük miktarda ısı birikmektedir ve bu durumun grafit çevresinde yavaş soğuma hızına neden olduğu bilinmektedir. GJS 700-2 dökme demirde yüksek perlit oranına ek olarak grafitten difüze olan C ile birlikte artan C oranı ile grafit çevresinin ergime sıcaklığı düşecektir (Roy ve Manna, 2001). Bunun sonucunda da kolayca ergiyerek karbonca zengin östenit oluşumu desteklenir. Grafit çevresinde düşük ısı iletim hızı sonucunda ledeburit oluşumu için gerekli kinetik koşullar sağlanamaz ve grafit çevresi östenit bir kabuk ile çevrelenir.

4.3 LST İşleminin Aşınma Davranışına Etkisi

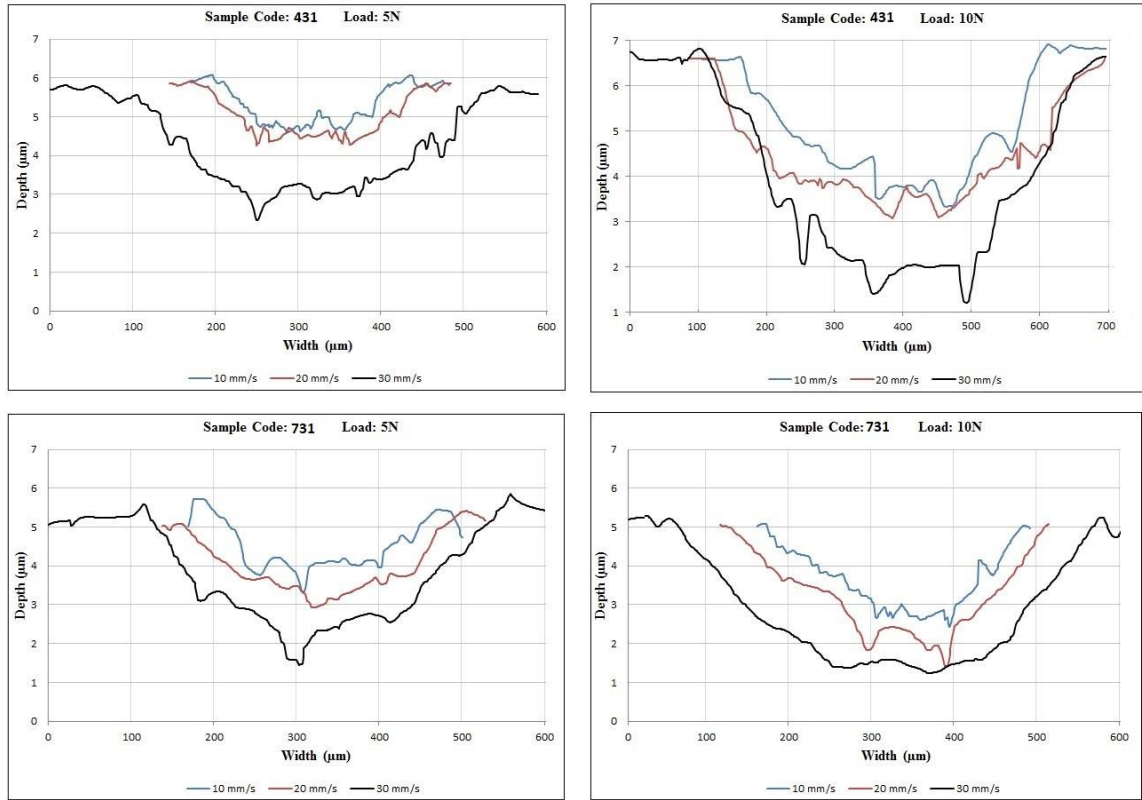
Lazerle yüzey sertleştirme işleminin aşınma davranışına etkisi kullanılan aşınma test parametrelerine göre değerlendirilmiştir. Buna göre aşınma davranışının değerlendirilmesinde en belirleyici faktörlerin başında yük gelmektedir. Bu çalışmada 5N ve 10N yükler altında kuru kayma aşınma testlerinden elde edilen aşınma izlerinin gerek SEM görüntüleri ve gerekse hesaplanan aşınma oranlarına göre değerlendirme yapılmıştır. Buna ek olarak 3 ayrı kayma hızı (10 mm/s, 20 mm/s ve 30 mm/s) kullanılarak hızın aşınma davranışı üzerindeki etkisi belirlenmiştir. Şekil 4.6’da lazer uygulanmamış (400-18 ve 700-2) ve lazer uygulanmış 431-LST_{ed} ve 731-LST_{ed} kodlu numunelere ait hacim kaybı ve aşınma oranı grafikleri verilmiştir.



Şekil 4.6: Lazer işlemi öncesi ve sonrası sfero dökme demir numunelere ait hesaplanan hacim kaybı ve aşınma oranı değerleri (Kayma hızı: 30 mm/s)

Şekil 4.6 incelendiğinde, lazer işlemi öncesinde 5N yük altında GJS 400 ve GJS 700 numunelerinin aşınma hacim kaybı değerlerinin sırasıyla $4.82 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$ ve $4.72 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$ ile birbirine oldukça yakın değerlerde olduğu görülmektedir. Bu durumu düşük yük altında, GJS 400 numunesinin nispeten yüksek ferrit içeriğinden dolayı yüksek tokluğa sahip olmasının aşınma hacim kaybı değerinin üzerinde azaltıcı etkisi olduğu şeklinde açıklamak mümkündür. Ancak 10N yük değerinde ise söz konusu fark artmış ve daha yüksek sertliğe sahip GJS 700 numunesinde daha düşük hacim kaybı meydana gelmiştir.

Uygulanan lazer işlemi sonrasında 5N yük altında gerçekleştirilen aşınma testlerinden hesaplanan hacim kaybı değerleri ise 431-LST_{ed} ve 731-LST_{ed} numuneleri için sırasıyla $3.54 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$ ve $3.27 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$ dir. Buradan lazer işlemi ile sağlanan sertlik artışının bir sonucu olarak numunelerin aşınma hacim kaybı değerlerinin sırasıyla yaklaşık olarak %26.6 ve %30.7 oranında azaldığı tespit edilmiştir. 10N yükte elde edilen hacimsel aşınma kaybı değerleri ise 431-LST_{ed} ve 731-LST_{ed} kodlu numuneler için sırasıyla $6.63 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$ ve $5.5 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$ olarak hesaplanmıştır. 431-LST_{ed} numunesinin artan yüke göre spesifik aşınma oranı değerinde önemli bir farkın oluşmadığı ve sadece %1.5 lik bir düşüş meydana geldiği anlaşılmaktadır. Bu durum yük bağılı olarak hacim kaybının doğru orantılı artmadığına işaret etmektedir. Ancak bu durum 731 numunesi için daha belirgindir ve spesifik aşınma oranı değerleri 5N ve 10N yükler için sırasıyla $12.11 \times 10^{-6} \text{ mm}^3 \text{N}^{-1} \text{m}^{-1}$ ve $10.19 \times 10^{-3} \text{ mm}^3 \text{N}^{-1} \text{m}^{-1}$ olarak hesaplanmıştır. Diğer bir deyişle artan yükle birlikte spesifik aşınma oranı değeri yaklaşık olarak %15.9 azalmıştır. Yüksek perlit içeriğine sahip GJS 700 numunesinin lazer işlemi sonrası sertliği daha yüksek olduğu için artan yük ile birlikte hacim kaybındaki artış daha düşük kalmıştır ki burada karşı gövde topunun aşınmasının da katkısı vardır.



Şekil 4.7: LST ile sertleştirilmiş numunelerin farklı kayma hızlarında gerçekleştirilen aşınma testleri sonrası elde edilen iz profil derinliği ve genişliğinin değişimi

Şekil 4.7 da farklı yük ve kayma hızlarında elde edilen aşınma iz profil derinliği ve genişliklerinin değişimi gösterilmektedir. Buna göre, genel olarak her iki kodlu numune için de geçerli olmak üzere her bir yükte elde edilen aşınma iz profilinde artan kayma hızına göre hem derinlik hem de genişlik bakımından artış görülmektedir. Bilindiği üzere, kayma hızının artmasıyla birlikte deformasyon hızı da artacaktır. Böylece, temas bölgesindeki flaş sıcaklıkların da yükselmesi sonucu daha yüksek oranda aşınmayla sonuçlandığını söylemek mümkündür. Beklendiği gibi düşük yük ve kayma hızında profil derinliği ve genişliği tam tersi duruma göre dikkati çekecek derecede düşük çıkmıştır. 431-LST_{ed} kodlu numune için 5N yükte 10 mm/s ile 20 mm/s kayma hızlarında elde edilen profil derinliği ve genişliğinin birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Buradan hareketle, 431-LST_{ed} numunesinin mikro yapısında 731-LST_{ed} numunesine oranla daha fazla yer alan, sert ve gevrek martenzite göre daha tok özellikli ledeburit ve kalıntı östenitin aşınma hacim kaybındaki artışı dengeleyici bir etkisi olduğu söylenebilir. Ancak kayma hızının 30 mm/s ye yükselmesiyle birlikte profil genişliği ve derinliğinin yaklaşık 2 kat arttığı saptanmıştır. 5N yükte 731-LST_{ed} kodlu numuneden alınan iz profilinin 10 mm/s 20 mm/s ve 30 mm/s kayma hızlarındaki aşınma izi profil derinlik ve genişliklerinin 431-LST_{ed} numunesininkine

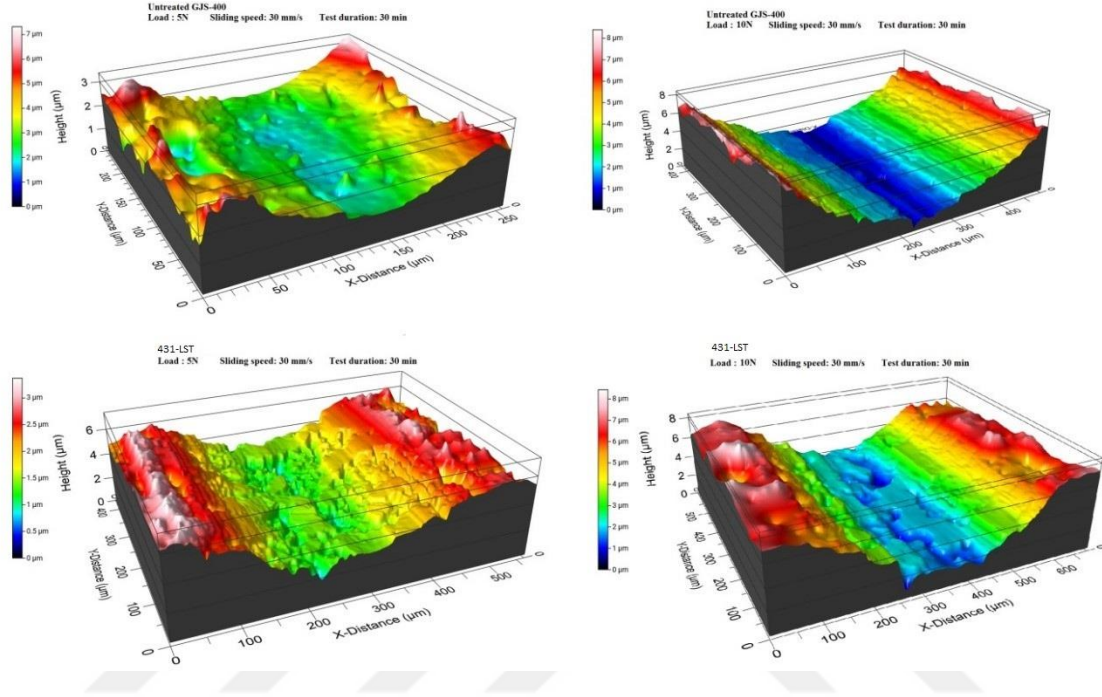
oldukça yakın olduğu anlaşılmaktadır. Dolayısıyla, 431-LST_{ed} ve 731-LST_{ed} numunelerinin mikroyapı ve lazer işlemi ile elde edilen sertleştirilmiş yüzeyleri için düşük yük ve kayma hızlarında aşınma kaybı değerlerinde önemli bir farklılık meydana gelmediği söylenebilir.

Bu sonuç aynı zamanda Şekil 4.6’da verilen aşınma hacim kaybı değerleriyle de uyumludur. Ancak 10N yükte 431-LST_{ed} ve 731-LST_{ed} numuneleri için her bir kayma hızında elde edilen aşınma izi profillerinde ise açık şekilde farklılık olduğu dikkati çekmektedir. Şöyle ki, 431-LST_{ed} numunesine ait 10 mm/s kayma hızında alınan iz profil derinliği yaklaşık 3 µm ve genişlik ise yaklaşık 430 µm iken aynı şartlarda 731-LST_{ed} numunesinden elde edilen iz profili değerleri ise sırasıyla yaklaşık olarak 2 µm ve 320 µm dir. Görüldüğü üzere lazer öncesi yüksek perlit içeriğine sahip GJS 700 in lazer işlemi sonrasında yüzeydeki martenzit miktarının daha fazla oranda olması önemli sertlik artışına neden olduğu için artan yüklerle birlikte artan yüksek temas basıncına karşı gösterdiği aşınma direnci de 431-LST_{ed} numunesine kıyasla daha yüksek olmuştur. 10N yük için iz profilinde dikkati çeken bir diğer husus ise 431-LST_{ed} numunesinde artan kayma hızıyla birlikte profil genişliğinde önemli bir fark oluşmazken daha çok profil derinliğinin artmış olmasıdır. Şöyle ki, 431-LST_{ed} numunesinde artan kayma hızları için iz profil derinliği sırasıyla yaklaşık olarak 3 µm, 3,7 ve 4,7 µm dir. 731 numunesinde ise 5N yükteki artan kayma hızına göre oluşan iz profilinin 10N yükte de benzer şekilde bir değişiklik göstermektedir. 731-LST_{ed} numunesinin 20 mm/s kayma hızında alınan iz profil derinliği 3 µm’ ye ulaşırken genişliği ise 400 µm ye yaklaşmaktadır. Kayma hızının 30 mm/s değerinde alınan iz profil ölçüleri incelendiğinde ise derinliğin 3,5 µm civarında olduğu ve iz profil genişliğinin yaklaşık 520 µm değerine ulaştığı görülmüştür. Aynı yük ve kayma hızı için 431-LST_{ed} numunesinden alınan iz genişliği ise yaklaşık 600 µm dir.

Bir diğer husus ise lazer işleminin sonunda sertliği artan yüzeyin aşınmış iz profili ile lazer öncesi aynı test parametreleri kullanılarak elde edilen iz profillerinin karşılaştırmalı değerlendirilmesidir. Bu amaçla, lazer işlemi uygulanmamış GJS 400 numunenin 5N ve 10N yükler altında, 30 mm/s kayma hızında, 30 dakika boyunca kuru kayma testine tabi tutularak elde edilen izin 3D profilometre görüntüleri ile aynı deney şartlarında 431-LST_{ed} numunesinin aşınmış yüzey görüntüleri karşılaştırılmıştır (Şekil 4.8).

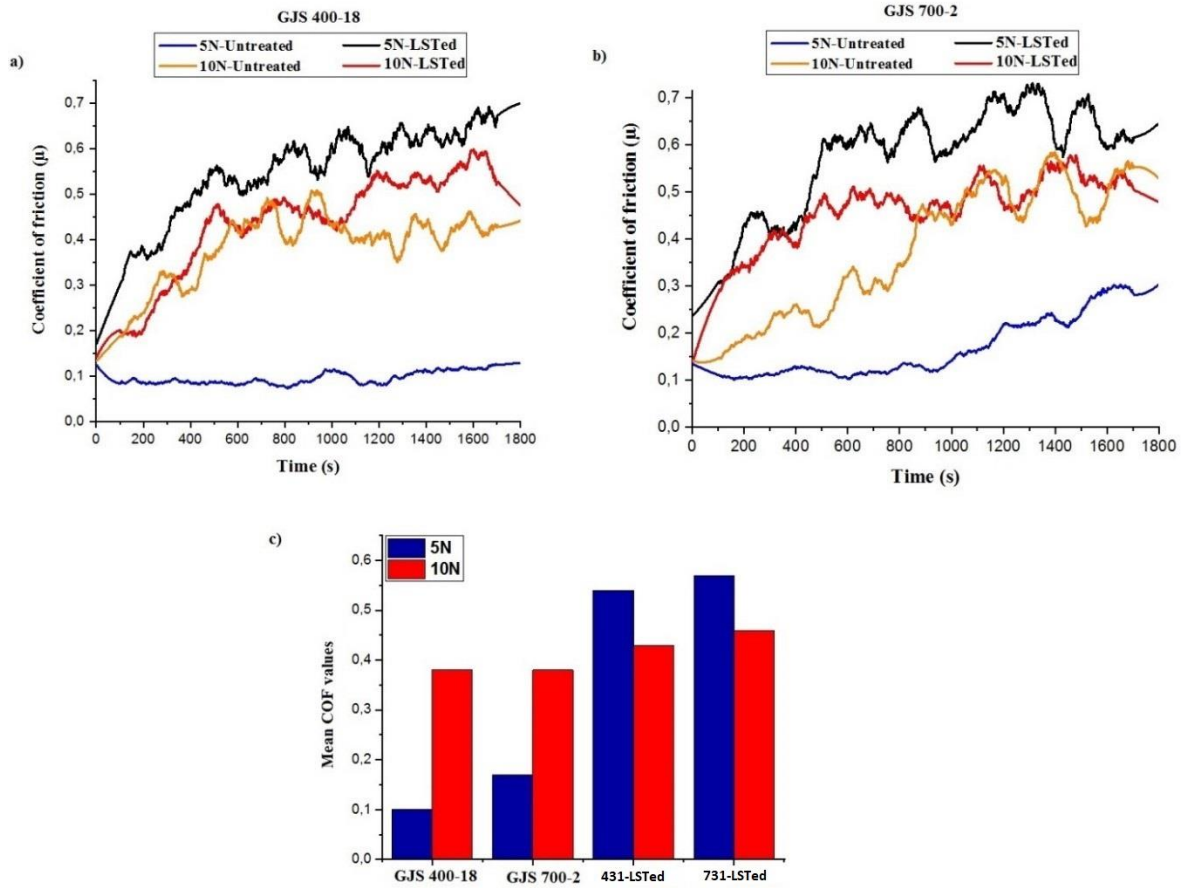
Şekil 4.8’de görüldüğü üzere, lazer uygulanmamış numunenin 5N yükte alınan aşınmış yüzey görüntüsünde adezyona bağlı aşınmanın tipik görüntüsüne sahip yer yer düzensiz

çıkıntılar mevcut iken, 10N yükte ise abrazyon etkisi ile oluşmuş ploughing ve grooving tipi aşınma izlerinin belirgin olduğu, daha net sınır ve profil ölçüsüne sahip bir iz görüntüsü ortaya çıkmıştır.



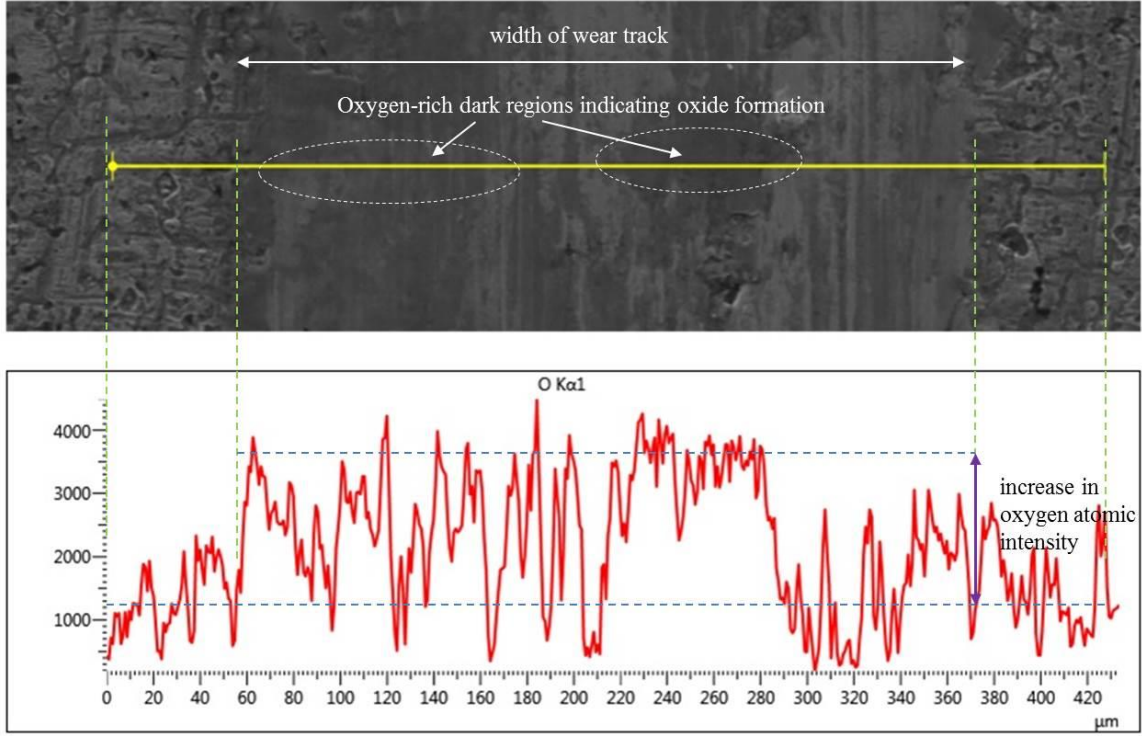
Şekil 4.8: Lazer işleminin GJS 400 test numunesinin aşınmış yüzeyi üzerindeki etkisi

Lazer işlemi sonrasında ise 5N yük altında sertleştirilmiş yüzeye ait pürüzlerinin düzleştirilmesiyle oluşmuş bir aşınma izi dikkati çekmektedir. 10N yükte de benzer bir aşınmış yüzey görüntüsüne ek olarak izin derinleşmesiyle düzleşmiş net bir iz profilinin ortaya çıktığı görülmektedir. Lazer uygulanmamış ve lazer uygulanmış yüzeyler arasındaki temel farklılığın lazer işlemi uygulanmamış numunenin aşınmış iz yüzeyinde 5N yükte tipik adheziv aşınma ve plastik deformasyon görülürken, 10N yükte ise grooving ve ploughing tipi aşınmanın baskın olduğu anlaşılmaktadır. Lazerle yüzey sertleştirme işlemi sonrası sertlik artışının etkisiyle, iz profilinden de açıkça görüldüğü üzere, iz tepelerinin truncating şeklinde düzleştiği gözlenmiştir. Bu profillerin ortaya çıkması süresince kaydedilen COF grafiklerinin incelenmesi de yerinde olacaktır.



Şekil 4.9: GJS 400-18 ve GJS 700-2 numunelerinin lazer işlemi öncesi ve sonrasında farklı yükler altında alınan COF grafikleri (Kayma hızı: 30 mm/s)

Şekil 4.9 (a) incelendiğinde, lazer işlemi görmemiş GJS 400-18 numunesi için COF değeri 5N yük altında tüm test süresince ortalama 0.1 gibi oldukça düşük bir değer iken, yükün 10N a yükselmesiyle birlikte ilk 10 dakika süresince artarak ortalama 0.4 değerine ulaştığı ve test sonuna kadar bu değerinde dalgalı bir seyir izlediği görülmektedir. Benzer durum GJS 700-2 numunesi için de geçerlidir. 5N yük altında ilk 15 dakika süresince 0.1 seviyesinde seyreden COF değerlerinin kalan sürede artarak yaklaşık 0.25 değerine kadar yükseldiği görülmektedir (Şekil 4.9b). Bu durum daha yüksek perlit oranına sahip sert GJS 700-2 numune yüzeyinin zamanla aşınma sonucu daha pürüzlü hale gelmesiyle açıklanabilir. 10N yükte GJS 700-2 numunesinde GJS-400-18 dekine oldukça yakın COF değerleri elde edildiği görülmektedir (Şekil 4.9c).



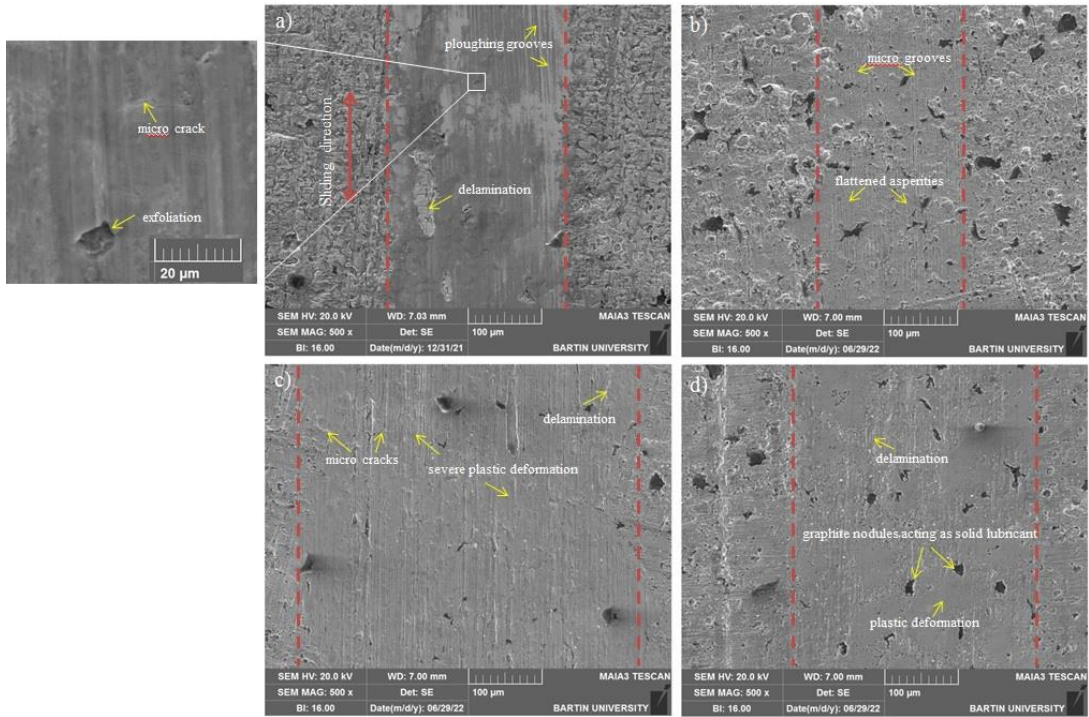
Şekil 4.10: Aşınma testi sonrası lazer uygulanmamış GJS 400 numunesinin EDS çizgi tarama analizi (Yük: 5N, Kayma hızı: 30 mm/s, Test süresi: 30 dak.)

Sürtünme sırasında ortaya çıkan sürtünme ısısı, kayma yüzeyinde oksidasyona neden olan temas sıcaklığını artırır ve bu işleme oksidatif aşınma mekanizması denir (Babu vd., 2013).

5N yükte oldukça düşük COF değeri elde edilmesi her iki numunenin yüzeyinde oluşan oksit katmanının yağlayıcı etkisinden kaynaklandığı düşünülmektedir (Şekil 4.10). Şekil 4.10’ da verilen EDS analizinde yer alan çizgi boyunca aşınmış yüzeydeki oksijen miktarının iz genişliği dışındaki bölgeye göre açıkça daha yüksek olduğu görülmektedir.

Buna ek olarak, lazer uygulanmamış yüzeyin lazer uygulanmış yüzeye kıyasla daha düşük aşınma dayanımı ve daha yüksek sünekliğe sahip olduğunu söylemek zor değildir. Böylece özellikle düşük yükler altında pürüzlülüğü ortadan kaldırmaya yeterli sınırlı bir derinlik için oluşan temas alanının kolay plastik deforme edilebilir olması sonucu düşük COF değerleri elde edilebilmiştir. Artan yük ile birlikte normal yük bileşenine bağlı olarak iz profilinin derinliği ve genişliği artmıştır. Böylece temas yüzey alanının artması ile artan abrazyon ve adeziv aşınmaya bağlı teğetsel yük artarak COF değerinin artmasına neden olmuştur (Chen vd., 2005).

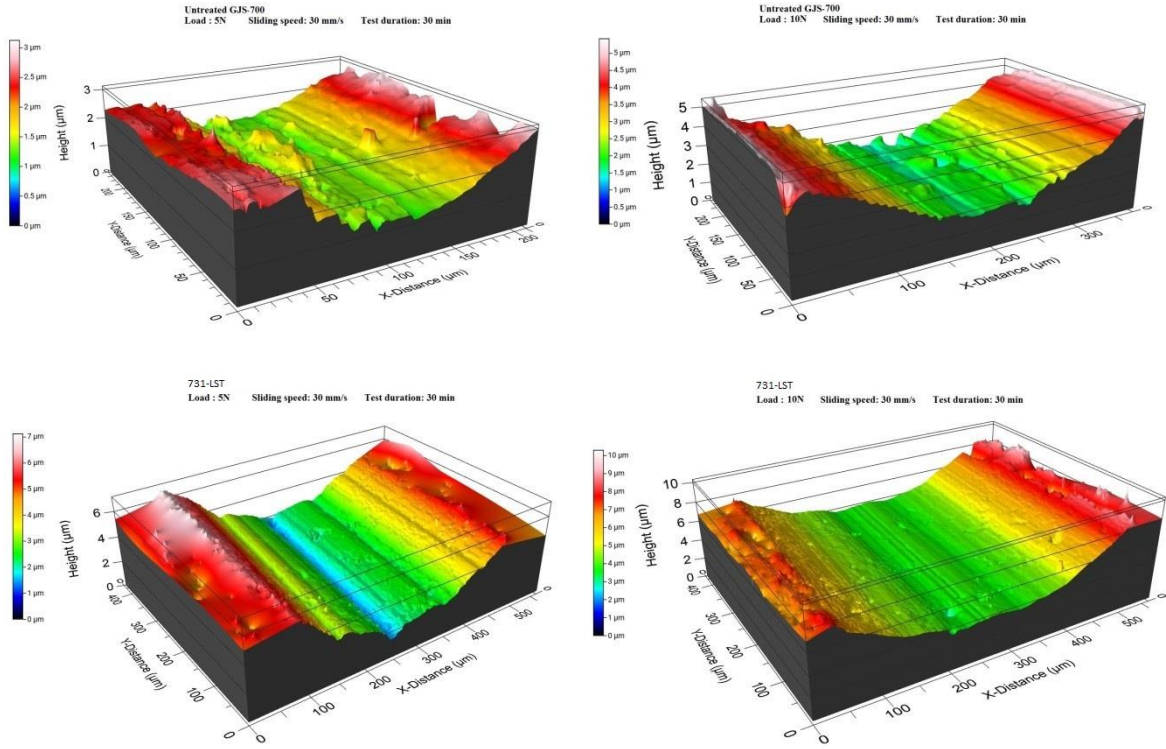
Lazer işlemi sonrası 5N yük altında 431-LST_{ed} ve 731-LST_{ed} numunelerine ait COF grafiklerinin ilk 10 dakika boyunca sürekli artış göstererek sırasıyla 0.55 ve 0.6 değerlerine yükseldiği ve geri kalan 20 dakika boyunca dalgalı bir seyir izleyerek sırasıyla ortalama 0.6 ve 0.65 seviyelerinde değerler kaydedildiği gözlenmiştir. Bu artışın temel nedeninin lazer işlemi ile birlikte artan yüzey pürüzlülüğüne ek olarak sertleşmiş yüzeyde plastik deformasyon etkisiyle smooth bir temas yüzeyinin kolayca oluşmaması olduğu söylenebilir. Ayrıca, sert temas yüzeyi çıkıntılarının kesilerek ayrılması sonucu abrasif etkinin artmasının COF değerini artırarak dalgalı seyrine neden olması da muhtemeldir. Lazer uygulanmış yüzeyin COF grafiğinde lazer uygulanmamış yüzeyinkine nazaran dikkat çekici bir farklılık görülmektedir. Lazer uygulanmış 431-LST_{ed} ve 731-LST_{ed} numunelerine ait COF değerlerinin artan yük ile (10N) birlikte azaldığı görülmektedir (Şekil 4.9 c). Bu durumu, 10N yükü meydana gelen daha yüksek temas basıncının etkisiyle genişleyen temas alanında temas edilen yağlayıcı etkiye sahip grafit nodülü sayısının artmış olmasıyla açıklamak mümkündür (Prasad, 2009). Diğer taraftan, artan yükün etkisiyle temas bölgesinde meydana gelen flaş sıcaklığın daha yüksek olması plastik deformasyonun etkisiyle daha smooth bir aşınmış yüzey oluşumuna ve bunun sonucunda da teğetsel yükün azalmasına yol açmış olabilir (Hutchings, 1992).



Şekil 4.11: Lazer uygulanmamış (GJS 400) ve lazer uygulanmış (431-LST_{ed}) numunelerin aşınmış yüzey SEM görüntüleri a) Lazer uygulanmamış, yük:5N, b) 431-LST_{ed}, yük: 5N, c) Lazer uygulanmamış, yük:10N, d) 431-LST_{ed}, yük: 10N

Şekil 4.11’te lazer işlemi uygulanmamış GJS-400 ve lazer uygulanmış 431-LST_{ed} numunelerinin 5N ve 10N yükler altında 30 mm/s kayma hızında 30 dk boyunca kuru kayma aşınma testleri sonrasında aşınmış yüzey SEM mikrografları verilmiştir. Şekil 4.11a’da lazer uygulanmamış GJS 400 numunenin 5N yük altında oluşan aşınma izi görülmektedir. İz üzerinde abrasif aşınmanın baskın unsurları olan ploughing kanallarının yanı sıra delaminasyon ve mikro çatlakların varlığı dikkati çekmektedir. Delaminasyon tip aşınmada malzeme yüzeyinin aşınma etkisiyle ayrıldığı kabul edilmektedir (Zhang,2001).

Delaminasyon aşınması, plastik deformasyon ile birlikte çatlakların oluşumu ve çatlak ilerlemesi sonucu meydana gelir (Soleimani ve Moavenian, 2017). Ayrıca exfoliation oluşumunun görülmesi delaminasyonu destekleyici bir mekanizma olarak değerlendirilebilir. Şekil 4.11b’de ise 431-LST_{ed} kodlu numunenin iz genişliğinin daraldığı dikkati çekmektedir. Buna ek olarak mikro kanallar (mikro çizikler) ile uçları aşınma sonucu düzleştirilmiş sert pürüzler gözlenmiştir. Yükün 10N a çıkması ile lazer uygulanmamış numunenin iz genişliğinin daha çok arttığı (bkz. Şekil 4.11c) ve şiddetli plastik deformasyon ile birlikte mikro çatlak oluşumu ve delaminasyonun baskın aşınma mekanizmaları olarak ortaya çıktığı görülmektedir. Şekil 4.11d’ de 431-LST_{ed} numunesinin 10N yük altında oluşturulan aşınma iz yüzeyinde grafit nodüllerinin aşınmaya maruz kalmayan yüzeylerdeki boyutlarıyla kıyaslandığında daha küçüldüğünü böylece katı yağlayıcı görevi gördüğünü söylemek mümkündür. Bu durum Şekil 4.9’da görülen COF değeri düşüşünü de destekler mahiyette olup, buna ek olarak sertleşen yüzeyin sınırlı plastik deformasyonu ile oldukça smooth bir yüzey oluşmuş olması da teğetsel yükü azaltıcı benzer bir sonucu meydana getirmiş olabilir.

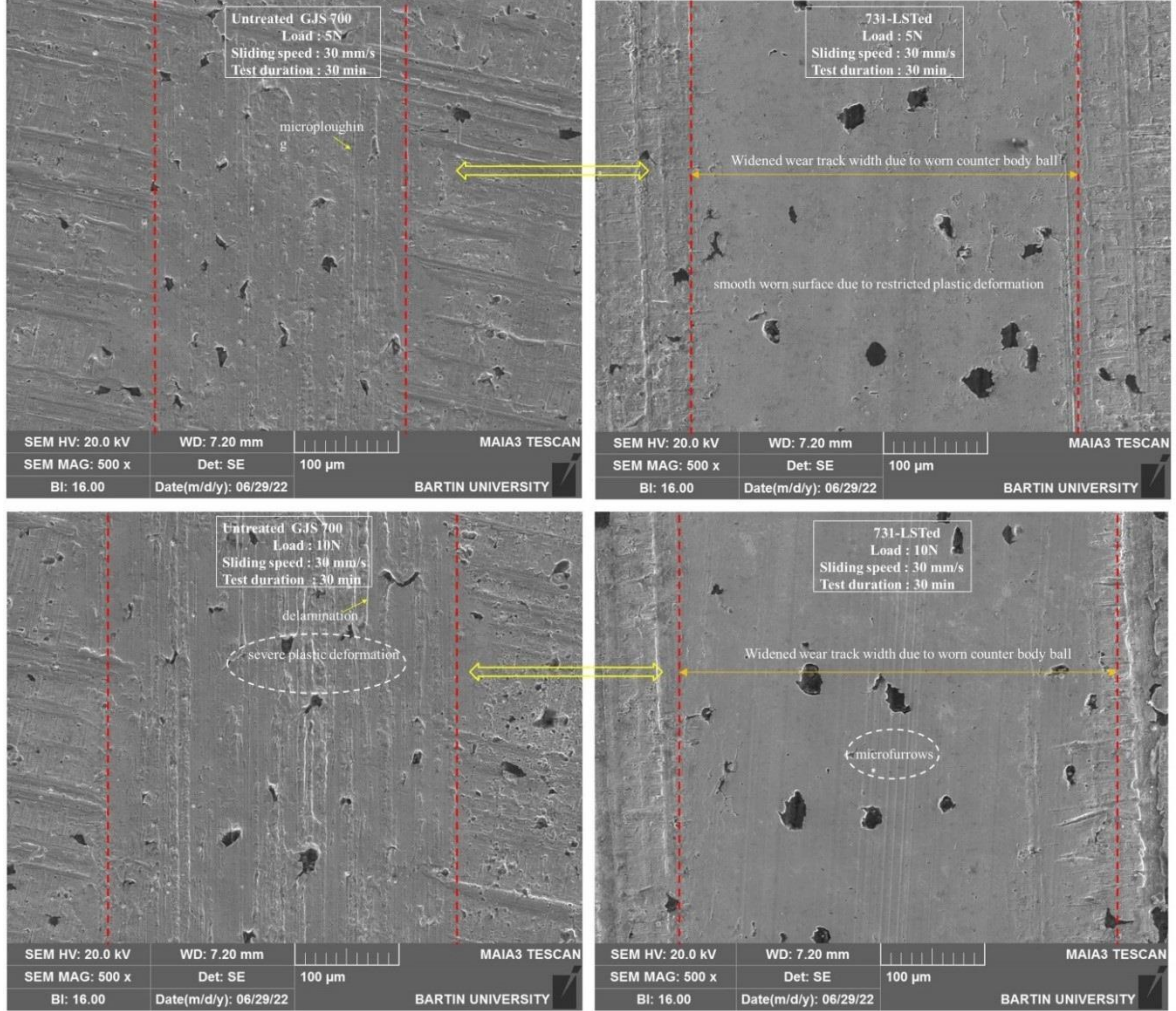


Şekil 4.12: Lazer işleminin GJS 700 test numunesinin aşınmış yüzeyi üzerindeki etkisi

Şekil 4.12 incelendiğinde en dikkat çekici hususun lazer uygulanmış numunelerin daha smooth bir aşınmış yüzey sergilemiş olmasıdır. Bu durumun lazer uygulaması sonucu önemli ölçüde yüksek sertliğe sahip numunelerin abrasif aşınmaya karşı daha yüksek direnç sergilediklerinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Bununla birlikte lazer uygulanmış ve lazer uygulanmamış numunelerin her ikisi için de geçerli olmak üzere artan yük ile birlikte iz genişliğinin ve derinliğinin arttığı görülmektedir.

Şekil 4.13' te ise lazer uygulanmamış (GJS 700) ve lazer uygulanmış (731-LST_{ed}) numunelerin 5N ve 10N yükler altında gerçekleştirilen aşınma testleri sonrası elde edilen aşınma izi yüzey SEM mikrografları verilmiştir. Şekil 4.13'te verilen mikrografta Şekil 4.11'de verilen 431-LST_{ed} numunesine ait aşınmış iz görüntülerinden farklı olarak dikkati çeken husus, 731-LST_{ed} numunesinin sertliğinde meydana gelen önemli artışın etkisiyle karşı gövde topunun da aşınmasının bir sonucu olarak izin genişlemiş olmasıdır. Lazer uygulanmamış numunelerde gözlemlenen baskın aşınma mekanizmaları şiddetli plastik deformasyon ve delaminasyon iken, LST_{ed} numunelerde ise karşı gövde topunun da aşınması sonucu sınırlı bir plastik deformasyon oranına bağlı olarak smooth yüzeyler elde edilmiştir.

Buna ek olarak 10N yük altında temas basıncının maksimum olduğu orta bölgede microfurrow oluşumu dikkati çekmiştir. Microfurrow oluşumunun özellikle sert aşındırıcı karşı gövde bilyasından kopan wear debrislerin abraziv ploughing etkisiyle oluşmuş olabileceği düşünülmektedir.



Şekil 4.13: Lazer uygulanmamış (GJS 700) ve lazer uygulanmış (731-LSTed) numunelerin aşınmış yüzey SEM görüntüleri

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada ferritik GJS 400-18 ve perlitik GJS 700-2 sfero dökme demir numunelere yüzey sertleştirme amacıyla farklı lazer gücü ve tarama hızlarında lazer yüzey işlemi (LST) uygulanmıştır. LST işleminin numunelerin kuru kayma aşınma davranışına etkisi incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Özellikle 1600W lazer gücü ve 2 mm/s tarama hızı kullanılarak uygulanan LST işlemleri sonrasında 431-LST_{ed} ve 731-LST_{ed} numunelerinin sertliklerinin sırasıyla 924HV0.2 (4.28 kat) ve 1054HV0.2 (4.32 kat) değerlerine yükseldiği tespit edilmiştir.
- Lazer uygulanan 731-LST_{ed} numunelerin yüzey mikro yapısındaki baskın faz martenzit iken bunun yanı sıra kalıntı östenite rastlanılmıştır. 431-LST_{ed} numunelerde ise ledeburit (östenit+sementit) e ek olarak martenzit fazları tespit edilmiştir.
- 5N yük altında gerçekleştirilen aşınma testlerinden hesaplanan hacim kaybı değerleri ise 431-LST_{ed} ve 731-LST_{ed} kodlu numuneler için sırasıyla $3.54 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$ ve $3.27 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$ ’dür. Buradan lazer işlemi ile sağlanan sertlik artışının bir sonucu olarak numunelerin aşınma hacim kaybı değerlerinin sırasıyla yaklaşık olarak %26.6 ve %30.7 oranında azaldığı tespit edilmiştir. Artan yük ile birlikte hacim kaybı değerlerinin de arttığı görülmüştür. Ancak, spesifik aşınma değerlerinde azalma saptanmış olup, bu durum hacim kaybının yük ile doğru orantılı olarak artmadığını ve bununla birlikte karşı gövde topunun da aşınmasıyla ilişkili olduğu tespit edilmiştir.
- Lazer işlemi uygulanmamış GJS 400-18 ve GJS-700 numunelerinin 5N yük altında kaydedilen COF değerleri ortalama olarak sırasıyla 0.1 ve 0.16 iken, 10N yük altında ise artarak ortalama 0.4 değerine yükselmiştir.
- Lazer uygulanmış 431-LST_{ed} ve 731-LST_{ed} numunelerine ait COF değerlerinin her iki yük değerinde de birbirine yakın olduğu ve artan yük ile (10N) birlikte azaldığı tespit edilmiştir.
- Lazer uygulanmamış GJS 400-18 numune yüzeyinde 5N yük altında oluşan aşınma

izi üzerinde abraziv aşınmanın baskın unsurları olan ploughing kanallarının yanısıra delaminasyon ve mikro çatlaklar gözlenmiştir. 5N yükte, 431-LST_{ed} kodlu lazer uygulanan numunenin iz genişliğinin daraldığı ve mikro kanallar (mikro çizikler) oluştuğu görülmüştür. Yükün 10N a çıkması ile lazer uygulanmamış numunenin iz genişliğinin daha çok arttığı (bkz. Şekil.4.9c) ve şiddetli plastik deformasyon ile birlikte mikro çatlak oluşumu ve delaminasyonun baskın aşınma mekanizmaları olarak ortaya çıktığı tespit edilmiştir.

- Lazer uygulanmamış GJS 700-2 numunesinde 5N yük altında oluşan baskın aşınma mekanizmaları şiddetli plastik deformasyon ve delaminasyon iken, LST_{ed} numunelerde ise karşı gövde topunun da aşınması sonucu iz genişliği artmış ve smooth yüzeyler elde edilmiştir. Buna ek olarak 10N yük altında temas basıncının maksimum olduğu orta bölgede microfurrow oluşumu dikkati çekmiştir.

Lazer ile yüzey eritme (laser surface melting-LSM) işleminin ferritik ve perlitik sfero dökme demir malzemelerin mikroyapısı ve aşınma davranışı üzerindeki etkilerini belirlemek için daha yüksek lazer enerji yoğunluğu kullanılarak LST işlemlerinin yapılması endüstriyel uygulamalar için faydalı bilgiler sağlayabilir.

KAYNAKLAR

- Abboud, J.H., Benyounis, K.Y., Olabi, A.G. ve Hashmi, M.S.J. (2007). Laser surface treatments of iron-based substrates for automotive application. *Journal of Materials Processing Technology*, 182 (1-3): 427-431.
- Abboud, J.H., Benyounis, K.Y., Julifkar, H. ve Hashmi, M.S.J. (2017). Material Response With High Power Laser in Surface Treatment of Ferrous Alloys. *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*, s.1-12.
- Akça, C. (2005). Östemperlenmiş küresel grafitli dökme demirde alaşım elementlerinin östenit-martenzit dönüşümüne etkisi, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 95 s.
- Aliakbari, K., Nejad, R. M., Mamaghani, T.A., ve Asiabarakı, H.R. (2022). Failure analysis of ductile iron crankshaft in compact pickup truck diesel engine. *Structures*, 36: 482-492.
- Askeland, D. R., Fulay, P. P. Ve Wright, W.J. (2010). The science and engineering of materials. Cengage learning, USA, s. 879-881.
- Aslani, H. (1989). Alaşım Elementlerinin Gri Dökme Demir Mikroyapısı Ve Mekanik Özelliklerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 166 s.
- Babu, P.D. ve Buvanashakaran, G. (2011). Laser surface hardening: a review. *Int. J. Surface Science and Engineering*, 5: 131-151.
- Babu, P.D., Buvanashakaran, G. ve Balasubramanian, K.R. (2013). Dry sliding wear of laser hardened low alloy steel at room and elevated temperatures. *Proc IMechE Part J: J Engineering Tribology* 227(10)(2013) 1138–1149.
- 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. *Surface and Coatings Technology*, 203(14): 2003-2012.
- Bhushan, B. (1996). Wear mechanisms. *Tribology and Mechanics of Magnetic Storage Devices*, Springer-Verlag, New York, Inc., 412-546.
- Catalán, N., Ramos-Moore, E., Boccardo, A. ve Celentano, D. (2022). Surface laser treatment of cast irons: a review. *Metals*, 12: 562.
- Ceschini, L., Campana, G., Pagano, N., ve Angelini, V. (2016). Effect of laser surface treatment on the dry sliding behaviour of the ENGJS400-12 ductile cast iron. *Tribology International* 104: 342–351.
- Chauxuan, D. (1983). Laser Heat treatment of piston rings. *Z. Werkstofftech*, 14, 81-85.
- Chakrabarty, I. (2018). Alloy cast irons and their engineering applications. in: *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*. Elsevier, 1-25.

Chen, Y., Gan, C.H., Wang, L.X. ve Yu, G. (2005). Laser surface modified ductile iron by pulsed Nd:YAG laser beam with two-dimensional array distribution. *Applied Surface Science*, 245: 316–321.

Chichkov, B.N., Momma, C., Nolte, S., Alvensleben, F. ve Tünnermann, A. (1996). Femtosecond, picosecond and nanosecond laser ablation of solids. *Applied Physics A Materials Science Process*, 63, 109-115.

Çelik, Ö. (2001). Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Aşınma Davranışları, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 115 s.

Çetin, M. (2005). Östemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Aşınma Davranışlarının Geliştirilmesi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metal Eğitimi, Ankara, 102-103s.

Davis, J. (1996). *Cast Irons: ASM Specialty Handbook*. ASM International: Materials Park, OH, USA, s. 54-79.

Demir, A. (2012). Farklı Çelik Yorulma Aşınmasında Malzeme Sertliğinin Aşınma Üzerine Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Edirne, 110s.

DIN, Deutsches Institut für Normung e.V. Founding – Spheroidal graphite cast irons of DIN EN 1563:2012-03, Berlin, 50 s.

Fernández-Vicente, A., Pellizzari, M. ve Arias, J.L. (2012). Feasibility of laser surface treatment of pearlitic and bainitic ductile irons for hot rolls. *Journal of Materials Processing Technology*, 212(5): 989-1002.

Ghaini, F.M., Ameri, M.H., ve Torkomany, M.J. (2020). Surface transformation hardening of ductile cast iron by a 600w fiber laser. *Optik*, 203: 163758-163785.

Grum, J. Ve Šturm, R. (1996). Microstructure analysis of nodular iron 400-12 after laser surface melt hardening. *Materials Characterization*, 37(2-3): 81-88.

Grum, J. (2007). Comparison of different techniques of laser surface hardening. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 24(1), 17-25.

Grum, J. (2013). Laser surface hardening. *Encyclopedia of Tribology*, SpringerReference, 1948-1962.

Han, X., Zhang, Z., Pan, Y., Berber, G.C., ve Yang, H. (2020). Sliding wear behavior of laser surface hardened austempered ductile iron. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(6): 14609- 14618.

Hua, M., SeDao., Shao, T. M. ve Tam, H. Y. (2009). Surface modification of DF-2 tool steel under the scan of a YAG laser in continuously moving mode. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(10), 4689- 4697.

Hutchings, I. M. ve Shipway, P. (1992). *Tribology: friction and wear of engineering*

materials. 273 s.

Hwang, J.-H., Lee, Y.-S., Kim, D.-Y. ve Youn, J.-G. (2002). Laser surface hardening of gray cast iron used for piston ring. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 11:(3), 294-300.

Ion, C. J. (2005), *Laser Processing of Engineering Materials, Principles. Procedure and Industrial Application*, s. 221-249.

Jin, X. Ve Zhang, J. (2001). A complementary principle of elastic bodies of arbitrary geometry in rolling contact. *Computers & Structures*, 79 (29-30): 2635-2644.

Kayalı, Y. (2006), Bortemperlenmiş küresel grafitli dökme demirin mekanik özellikleri ve aşınma davranışının araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon, 102 s.

Kennedy, E., Byrne, G. ve Collins, D.N. (2004). A review of the use of high power diode lasers in surface hardening. *Journal of Materials Processing Technology*, 155–156, 1855–1860.

Keskin, İ. (2012). Yürek Mekanizmalarında Aşınma Ve Elastohidrodinamik Yağlama. Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 125 s.

Kılınç, B. (2009). GGG 50 Sınıfı Dökme Demire Bakır İlavesinin Mekanik Özelliklere Etkisi. İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 71 s.

Kırcalı, K. K. (2006). Farklı Matris Yapılara Sahip Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Mekanik Ve İşlenebilirlik Özelliklerinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, 96 s.

Kobrick, R.L. (2010). Characterization and Measurement Standardization of Lunar Dust Abrasion For Space Craft Design And Operations, A Thesis Submitted Other To The Faculty Of The Graduate School Of The University Of Colorado In Partial. Colorado, 188 s.

Köse, C. (2016). Lazer ile Yüzey Modifikasyon Uygulanan AISI 2205 Paslanmaz Çeliğin Yüzey Özelliklerinin İncelenmesi. Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 16: 67-73.

Li, R., Jin, Y., Li, Z. ve Qi, K. (2014). A Comparative Study of High-Power Diode Laser and CO2 Laser Surface Hardening of AISI 1045 Steel. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 23(9): 3085-3091.

Lu, Y., Ehle, L. C., Richter, S. Ve Radel, T. (2021). Influence of multi-pass laser hardening of normalized AISI 4140 on the grain size. *Surface and Coatings Technology*, 421: 127434.

Makarov, A.V., Korshunov, L.G. ve Chernenko (1989). Structure et résistance à l'usure de l'acier cimenté 20KhN3A soumis à un traitement par faisceau d'électrons et à un traitement au laser. *Fizika metallovi metallovedenie*, 68(1): 126–132.

Mali, P. ve Deore, H. (2017), A review on laser surface hardening for AISI H13 tool steel. International Conference on Ideas, Impact and Innovation in Mechanical Engineering, 5(6): 1561-1571.

Mavi, A. ve Korkut, İ. (2010). Vermiküler grafitli dökme demirlerin işlenmesinde kesme parametrelerinin kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğüne etkisinin regresyon analizi ile modellenmesi. Journal of Polytechnic, 13(4): 281-286.

Molian, P.A. ve Baldwin, M. (1986). Wear behavior of laser surface-hardened gray and ductile cast irons: part 1—sliding wear, Journal of Tribology, 108(3): 326-333.

Moore, M. A., (1974). The relationship between the abrasive wear resistance, hardness and microstructure of ferritic materials. Wear, 28(1): 59-68.

Nasiri, Z., Ghaemifar, S., Naghizadeh, M. ve Mirzadeh, H. (2021). Thermal Mechanisms of Grain Refinement in Steels: A Review. Metals and Materials International, 27(7) : 2078-2094.

Nöbet, E. (2019). Effect Of Laser Surface Hardening Parameters On Impact Sliding Wear Behavior Of A Hot Work Tool Steel. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 89 s.

Oğuz, B. (1993). Aşınma Sorunları Ve Dolgu Kaynakları. Oerlikon Yayınları, İstanbul, s. 736.

Okay, F. (2006). PVD Yöntemi İle Tin Kaplı Östemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Adhesiv Aşınma Davranışlarının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 166 s.

Owsalou, R. G. (2012). Aşınmaya Maruz Parçaların Aşınma Dayanımlarının Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konstrüksiyon İmalat Anabilim Dalı, İzmir, 97 s.

Papaphilippou, C., Vardavoulas, M. ve Jeandin, M. (1996). Effects of CO₂ laser surface hardening in the unlubricated wear of ductile cast iron against alumina. Journal of Tribology, 118(4): 748-752.

Pashby, I.R., Barnes, S. ve Bryden, B.G. (2003). Surface hardening of steel using a high power diode laser. Journal of Materials Processing Technology 139, 585–588.

Prasad, P. K. (2009). Sliding wear behaviour of a cast iron as affected by test environment and applied load. Industrial Lubrication and Tribology, 61(3): 161-172.

Roy, A. ve Manna, I. (2001). Laser surface engineering to improve wear resistance of austempered ductile iron. Materials Science and Engineering: A, 297(1-2): 85-93.

Roy, M. (2008). Developments in High Temperature Corrosion and Protection of Materials. Woodhead Publishing Series in Metals and Surface Engineering, 117-163.

- Sarıkaya, Ö. (2007). Aşınmaya Karşı Yüzey Mühendisliği Yöntemleri. Sakarya, 322 s.
- Schissler, J.M. ve Saverna, J. (1985). The Effect Of Segregation On The Formation Of Austempered Ductile Iron, American Society for Metals, Journal of Heat Treating, 4(2): 167-176.
- Sevim, İ. (1998). Çeliklerin Abrasiv Aşınmasında Aşındırıcı Tane Büyüklüğünün Aşınma Direncine Etkisi. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 170 s.
- Soleimani, H. Ve Moavenian, M. (2017). Tribological Aspects of Wheel–Rail Contact: A Review of Wear Mechanisms and Effective Factors on Rolling Contact Fatigue. Urban Rail Transit 3(4): 227–237.
- Steen, W.M. ve Mazumder, J. (2010). Laser Material Processing. Springer, London, 558 s.
- Tan, E. (2005). Dökme Demirden İmal Edilen Hadde Merdanelerinin Aşınma Davranışına Bakır Katkı Oranının Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli, 114 s.
- Tani G., Fortunato, A., Ascari, A. ve Campana, G. (2010). Laser surface hardening of martensitic stainless steel hollow parts. CIRP Annals, 59: 207-210.
- Terkeşli, M.H. (2017). Aps Yöntemi İle Üretilen WC ve Mo Kaplamaların Aşınma Davranışlarının İncelenmesi, Bartın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Bartın, 74 s.
- Tesker, E.I. ve Tesker, S.E. (2014). Surface laser treatment of gears. Russian Engineering Research, 34: 285-289.
- Totten, G.E., Funatani, K. ve Xie, L. (2004). Handbook of Metallurgical Process Design: Laser Surface Hardening. Marcel Dekker, INC. New York, 984 s.
- Trafford, D. N. H., Bell, T., Megaw, J. H. P. C. ve Bransden, A. S. (1983). Laser treatment of grey iron, Metals Technology, 10(1): 69-77.
- Türedi, E. (2012). Lazer ile yüzey modifikasyonu ve yüzey özelliklerinin geliştirilmesi. MakinaTek, 11: 90-94.
- Uçurum, M., Güneşsu, E., Şirin, T.B. ve Kaynak, Y. (2021). Farklı kesme parametreleriyle işlenmiş 316LVM paslanmaz çelik malzemesinin talaşlı imalat-yüzey bütünlüğü-aşınma direnci arasındaki ilişkinin incelenmesi. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 27(4) : 449-457.
- Vértesy, G., Uchimoto, T. ve Takagi, T. (2017). Graphite structure and magnetic parameters of flake graphite cast iron. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 442: 397-402.
- Wang, B., Pan, Y., Liu, Y., Lyu, N., Barber, G.C., Wang, R., Cui, W., Qiu, F. ve Hu, M. (2020). Effects of quench-tempering and laser hardening treatment on wear resistance of gray cast iron. Journal of Materials Research and Technology, 9(4): 8163-8171.

Xia, Y-q., Liu, W-m. ve Xue, Q-j. (2002). Friction and wear behavior of nodular cast iron modified by a laser micro-precision treatment sliding against steel under the lubrication of liquid paraffin containing various additives, *Wear*, 253: 752-758.

Xu, Y. ve Liu, J. (2010). Laser surface hardening of ductile cast iron for vehicle die. *SPIE*, 7843.

Yamuk, N. ve Aslantaş, K. (2018). Küresel grafitli dökme demir malzemesinde östemperleme işleminin mekanik dayanım ve yorulma çatlak ilerleme davranışına etkisinin araştırılması. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 33(1) : 199-209.

Yavuz, K. (2006). GGG-70 Sınıfı Küresel Grafitli Dökme Demir Kam Millerinin İşlenebilirliğinin Deneysel Olarak Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 101 s.

Yeşilçubuk, S. A. (2010). Enjeksiyon kalıplarında kullanılan sıcak iş takım çeliklerinin yüzey özelliklerinin geliştirilmesi. *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul 162 s.

Yüksel, M. ve Meran, C. (2021). Malzeme Bilgisi, TMMOB Makina Mühendisleri Odası, Ankara, 574 s.