

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**GGG40 KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRİN MİKROYAPI
VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNE ÖSTEMPERLEME VE
İNDÜKSİYONLA YÜZEY SERTLEŞTİRME İŞLEMİNİN ETKİSİ**

Uğur GENÇSOY
(122130110)

Yüksek Lisans Tezi
Anabilim Dalı: Metalürji ve Malzeme Mühendisliği
Programı: Üretim Metalurjisi
Danışman: Doç. Dr. Uğur ÇALIGÜLÜ

ARALIK – 2016

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**GCG40 KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRİN MİKROYAPI VE MEKANİK
ÖZELLİKLERİNE ÖSTEMPERLEME VE İNDÜKSİYONLA YÜZEY
SERTLEŞTİRME İŞLEMİNİN ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Uğur GENÇSOY

(122130110)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 28.11.2016

Tezin Savunulduğu Tarih: 15.12.2016

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Uğur ÇALIGÜLÜ
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Sermin OZAN
Doç. Dr. Melik ÇETİN



ARALIK - 2016

ÖNSÖZ

Bu çalışma sürecinde benden yardımlarını hiç eksik etmeyen değerli danışman hocam Sayın Doç. Dr. Uğur ÇALIGÜLÜ' ne, bana bilgi ve fikirlerinden istifade ettiren Sayın Doç. Dr. Melik ÇETİN hocama ve Sayın Arş. Görevlisi Nida KATI'ya manevi desteklerini eksik etmeyen Babam Sayın Muammer GENÇSOY ve değerli Eşim Sayın Handan GÜNER GENÇSOY'a sonsuz teşekkürlerimi ve şükranlarımı bir borç bilirim. Ayrıca bu tezin oluşturulmasında TEKF.16.06 nolu proje kapsamında maddi imkânları sağlayan Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (FÜBAP) Birimi ve çalışanlarına teşekkürlerimi sunarım.

Uğur GENÇSOY

Elazığ-2016

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ÖZET	VI
SUMMARY	VII
ŞEKİLLER LİSTESİ	IX
TABLolar LİSTESİ	XIII
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	XIIIV
1. GİRİŞ	1
2. KONUNUN LİTERATÜRDEKİ YERİ.....	3
3. KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRLER.....	14
3.1. KGDD'lerin Genel Kimya İçeriği	16
3.2. KGDD'lerin Sınıflandırılması	17
3.2.1. Mikro yapıya göre.....	17
3.2.2. Standartlara göre KGDD'ler	18
3.3. Mekanik Özellikler	19
3.4. Fiziksel Özellikler.....	21
3.5. Küresel Grafitli Dökme Demirlerde Alaşım Elementlerinin Etkisi	22
4. UYGULANAN ISIL İŞLEMLER.....	26
4.1. Tam Tavlama	26
4.2. Normalleştirme	27
4.3. Gerilim Giderme	28
4.4. Su Verme ve Temperleme	28
4.5. Östemperleme Isıl İşlemi	30
4.6. Östenitleme	30
4.6.1. İzotermal Bekleme(Östemperleme).....	31
4.7. Östemperleme dönüşüm aşamaları	31
4.7.1. I.Asama: ($\gamma_0 \rightarrow \alpha b + \gamma_{yk}$).....	31
4.7.2. II.Aşama: ($\gamma_{yk} \rightarrow \alpha b + \text{karbür}$).....	34
4.8. İndüksiyonla Yüzey Sertleştirme Isıl İşlemi.....	34
4.8.1. İndüksiyonla Isıtma Mekanizması.....	35
4.8.2. Nüfuz Derinliği.....	36

4.8.3.	İndüksiyonla Yüzey Sertleştirme.....	37
4.8.4.	İndüksiyonla Sertleştirme İşleminin Avantajları ve Dezavantajları	38
4.8.4.1.	Avantajları	38
4.8.4.2.	Dezavantajları	39
5.	MEKANİK TESTLER.....	40
5.1.	Yorulma	40
5.2.	Aşınma.....	41
5.2.1.	Aşınmayı Etkileyen Faktörler.....	46
5.2.2.	Aşınma Mekanizmaları.....	46
5.2.2.1.	Adhesif Aşınma	48
5.2.2.1.1.	Adhesif aşınmanın önlenmesi	52
5.2.2.1.2.	Yağlama.....	52
5.2.2.1.3.	Birbirleri İçerisinde Çözünmeyen Metaller Kullanmak	52
5.2.2.1.4.	Düz Yüzeyler Kullanmak	52
5.2.2.1.5.	Metal-metal Temasını Önlemek	53
5.2.2.2.	Abrasif Aşınma.....	53
5.2.2.3.	Yorulma aşınması	55
5.2.2.4.	Korozif aşınma.....	55
5.2.3.	Aşınmayı ölçme yöntemleri	56
5.2.3.1.	Ağırlık farkı yöntemi	58
5.2.3.2.	Kalınlık Farkı Yöntemi	59
5.2.3.3.	İz Değişimi Yöntemi.....	59
5.2.3.4.	Radyoizotop yöntemi	60
5.3.	Çekme Deneyi	60
5.3.1.	Nominal ve gerçek çekme diyagramı	62
5.3.2.	Gerçek Gerilme-Gerçek Şekil Değiştirme Eğrileri İçin Yaklaşık Denklemler	63
5.4.	Basma Deneyi.....	65
5.5.	Sertlik Deneyleri	67
5.5.1.	Sertlik Deneylerinden Gerçek Gerilme Gerçek Birim Şekil Değişimi Eğrisi Tayini	68
5.5.2.	Vickers indentasyon yöntemi	71
5.6.	Mikro sertlik Ölçme Deneyi	74

5.7.	Derin Çekme Deneyi	75
5.8.	Sürünme Deneyi	75
5.9.	Eğme Deneyi	756
6.	DENEYSEL ÇALIŞMALAR	76
6.1.	Çalışmanın Amacı	76
6.2.	Deneylerde Kullanılan Malzeme ve Özellikleri	76
6.3.	Deney Numunelerinin Hazırlanması	77
6.4.	Isıl İşlemler	78
6.4.1.	Östenitleme	78
6.4.2.	Östemperleme	78
6.4.3.	İndüksiyonla Yüzey Sertleştirme	80
6.4.	Metalografik İnceleme	79
6.5.	Sertlik Deneyi	80
6.6.	Aşınma Deneyi	81
6.7.	Çekme Deneyi	82
7.	DENEY SONUÇLARI	84
7.1.	Metalografik İnceleme Sonuçları	84
7.1.1.	Döküm durumu KGDD numuneler (GGG40)	84
7.1.2.	Östemperlenmiş küresel grafitli dökme demir numuneler	84
7.1.3.	İndüksiyonla Yüzey Sertleştirme Isıl İşlemi Yapılmış Numunelerin Mikroyapı İncelemeleri	89
7.2.	Mikro Sertlik Deney Sonuçları	89
7.3.	Aşınma yüzeylerinin incelenmesi	91
7.4.	Çekme deneyi ve sonuçları	97
7.5.	EDS Analiz Sonuçları	101
7.5.1.	Numunelerin aşınma yüzeylerinin EDS Analiz Sonuçları	102
7.5.2.	Numunelerin kırık yüzeylerinin EDS Analiz Sonuçları	106
8.	GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER	110
8.1.	Genel Sonuçlar	110
8.2.	Öneriler	112
	KAYNAKLAR	113
	ÖZGEÇMİŞ	123

ÖZET

Bu çalışmada, GGG40 küresel grafitli dökme demirlere (KGDD) östemperleme ve indüksiyonla yüzey sertleştirme ısıl işleminin; mikroyapıya, sertliğe, aşınma davranışına ve çekme dayanımına olan etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla; GGG40 KGDD numuneler 900 °C’de 90 dakika östenitleme yapılmıştır. Daha sonra 320 °C ve 380 °C sıcaklıklarda 120 dak östemperleme uygulanmıştır, böylece alt ve üst beynit/ösferrit morfolojisinin etkisini araştırılmıştır. Ayrıca GGG40 KGDD numunelere indüksiyonla yüzey sertleştirme ısıl işlemi yapılmıştır.

GGG40 KGDD numunelere ısıl işlemler sonrası meydana gelen yapısal değişimlerini belirlemek için, geleneksel parlatma yöntemi ile temizlenip parlatıldıktan sonra; Optik Mikroskop, SEM, EDS ve X-ray analizleri yapılmıştır. Ayrıca malzemelerin yüzeyinden Vickers sertlik skalası kullanılarak (HV) mikrosertlik ölçümleri yapılmıştır. Isıl işlem görmüş ve ısıl işlem görmemiş GGG40 KGDD numunelerin çekme dayanımlarını belirlemek amacıyla, TS 287 EN 895 standardına uygun olarak 1mm/dk çekme hızında, 50000 N yük altında çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Numunelerin kırık yüzey morfolojisi SEM-EDS ve X-ray analizleri ile incelenmiştir. Aşınma deneyleri; 10, 20, 30 N yük uygulanarak, 8 m ve 15 m yol mesafesi kullanılarak 320 ve 800 mesh zımparayla düşey dönel hareket sergileyen aşınma deney makinasında yapılmıştır. Numunelerin aşınma yüzeyleri SEM mikroskobuyla incelenirken, malzemelerdeki aşınma kaybı değerleri ölçülmüştür. Deney numunelerinin aşınma dayanımlarının artmasının nedeninin; mikro yapıda bulunan küresel grafitlerin yağlayıcı etkisi göstermesinden ve indüksiyonla yüzey sertleştirme ısıl işleminin yüzey sertliğini arttırmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Sertlik değerleri; östemperleme sıcaklığının artmasıyla artmıştır.

Bu çalışmanın birinci bölümünde konuya giriş yapılmıştır. İkinci bölümde güncel çalışmanın literatürdeki yeri ve öneminden bahsedilmiştir. Üçüncü bölümde küresel grafitli dökme demirlerden bahsedilmiştir. Dördüncü bölümde ısıl işlemler hakkında genel bilgi verilmiştir. Beşinci bölümde mekanik testler anlatılmıştır. Altıncı bölümde deneysel çalışma ile ilgili genel bilgi verilmiştir. Yedinci bölümde deney sonuçları ve değerlendirmeler yapılmıştır. Sekizinci bölümde genel sonuçlar ve öneri anlatılmıştır.

Anahtar Kelime: Östemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demir (ÖKGDD), İndüksiyon Yüzey Sertleştirme, Mikroyapı, Sertlik, Abrasif Aşınma.

SUMMARY

THE EFFECT OF AUSTEMPERING AND INDUCTION SURFACE HARDENING PROCESSING ON THE MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF DUCTILE CAST IRON GGG40

In this study, effects of induction surface hardening heat treatment on microstructure, hardness, wear behavior, and tensile strength of austempered ductile cast irons GGG40 (DCI) were investigated. For this purpose, it was determined that austenitizing temperature was 900 °C and austenitizing time was 90 minutes for GGG40 (DCI) samples. By applying austempering temperature as 320 °C and 380 °C in two individual parameters, it was kept in salt bath for 120 minutes in order to see the effect of upper and lower bainite/ausferrite morphology. Induction surface hardening heat treatment was performed to austempered ductile cast iron.

In order to determine structural changes occurring in ductile cast irons GGG40 (DCI) after heat treatment, Optical Microscopy, SEM, EDS, and X-ray analyses were carried out after they were cleaned and polished by using traditional polishing method. Microhardness measurements were also taken from the surface of materials by using Vickers hardness scale (HV). Tensile tests were carried out at 1mm/min of tensile speed under 50000 N of load in accordance with TS 287 EN 895 standard in order to determine tensile strengths of heat treated and non-heat treated ductile cast iron GGG40 (DCI) samples. Fracture surface morphology of the samples was examined by SEM-EDS and X-ray analyses. Wear tests were carried out in wear test device displaying vertical pivoted motion with 320 and 800 mesh abrasive by applying 10, 20, 30 N load and using 8 m and 15 m road distance. Values of abrasion loss in materials were measured while examining wear surfaces of the samples with SEM microscope. The reason behind why abrasion resistance of experimental samples increased was thought that nodular graphites found in microstructure had lubrication effect and induction surface hardening heat treatment increased surface hardness. Hardness values increased as austempering temperature increased.

In the first section of this study, the subject was introduced. In the second section, place and importance of the present study in the literature were mentioned. In the third section, general information about ductile cast iron were given. In the fourth section, general information about heat treatments were given. The fifth section presented general

information on mechanical tests. The sixth section mentioned the experimental study. In the seventh section, the information about experimental study and evaluation were given. The eighth section included results, discussion, and suggestions.

Keywords: Austempered Ductile Cast Iron (ADI), Induction Surface Hardening Microstructure, Hardness, Abrasive Wear.



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Küresel grafit etrafında martenzit ya da ösferrit elde etmek ve ferrit matris oluşturmak için uygulanan ısıtma işlem çevrimleri	4
Şekil 2.2. Küresel grafit etrafında martenzit ya da ösferrit ve ferrit matris oluşturmak için uygulanan ısıtma işlem çevrimleri.....	4
Şekil 2.3 ASTM standart küresel grafitli dökme demir ve ÇFMKGDD'lerin çekme dayanımı ve toplam % uzama miktarının karşılaştırılması.	5
Şekil 2.4. Kobayashi ve arkadaşları elde ettikleri çekme dayanımı - %uzama sonuçları	8
Şekil 2.5. Östenitleme sıcaklığına bağlı olarak ferrit hacim oranındaki değişim.....	9
Şekil 2.6. Alaşım elementleri ve östempereleme sıcaklığının östempereleme dönüşüm aşamaları üzerine etkisi; a) alaşımsız KGDD, b) yüksek östempereleme sıcaklığında östemperelenen alaşımsız KGDD, c) yüksek östempereleme sıcaklığında östemperelenen alaşımlı KGDD	10
Şekil 2.7. Östempereleme süresine bağlı olarak; a) % uzama ve b)darbe enerjisinin değişimi	10
Şekil 2.8. Östempereleme süresine bağlı olarak martenzit hacim oranının değişimi	11
Şekil 2.9. Martenzit hacim oranına bağlı olarak mekanik özelliklerin değişimi.....	12
Şekil 3.1. Farklı derecelerde küreselleşmiş küresel grafitli dökme demirlerin parlatılmış haldeki optik mikroskop fotoğrafları. (a) %99 küreselleşmiş (b) %80 küreselleşmiş (c) %50 küreselleşmiş [01]	15
Şekil 3.2. Temperlenmiş küresel grafitli dökme demir yapıları: (a) tam temperlenmiş ferritik yapı kısmen (x100), (b) kısmen temperlenmiş perlitik ve ferritik yapı (x100), (c) normalize perlitik yapı (x500) [01].....	16
Şekil 3.3 Döküm durumu mikro yapıları: a) Ferritik KGDD b) Perlitik KGDD (Dağlama: %2 Nital, X350).....	19
Şekil 3.4 KGDD' lerde çekme dayanımı - %uzama ilişkisi	20
Şekil 3.5 Kesit kalınlığına bağlı olarak küresel grafitli dökme demirlerin mekanik özellikleri	21
Şekil 3.6 Alaşım elementlerinin KGDD'lerde grafit ve karbür oluşturuıcı etkileri	22
Şekil 3.7 Maurer diyagramı.....	23
Şekil 3.8 Küresel grafitli dökme demirler için tipik karbon ve silisyum aralıkları.....	24

Şekil 3.9 Alaşım elementlerinin kararlı (Fe-G) ve kararsız ötektik sıcaklıklar üzerindeki etkisi.....	25
Şekil 4.1 KGDD'lere uygulanan ısıt işlemler; a) tam tavlama, b) normalleştirme, c) Gerilim giderme.....	27
Şekil 4.2 Su verme sonrası temperleme sıcaklık ve süresinin mekanik özellikler üzerine etkisi a) değişik temperleme sıcaklık ve sürelerinin sertlik üzerine etkisi b) değişik temperleme sıcaklıklarının akma ve çekme dayanımı üzerine etkisi	29
Şekil 4.3. Östempereleme ısıt işleminin şematik gösterimi	30
Şekil 4.4 I. Aşamada östenitten beynitik ferritik ve yüksek karbonlu östenit (ösferrit) oluşumunun şematik gösterimi	32
Şekil 4.5 Östempereleme süresine bağı olarak fazların miktarlarındaki değişim.....	33
Şekil 4.6 Östempereleme süresine bağı olarak yüksek karbonlu östenit (kararlı östenit) ve ferritin miktarlarının değişiminin şematik gösterimi	33
Şekil 4.7 İş parçası çevresindeki akım taşıyan bir bobinin oluşturduğu manyetik alan ile ısı oluşumu	35
Şekil 4.8 Dalma derinliğinin üstel olarak azalması.....	37
Şekil 4.9 İndüksiyonla yüzey sertleştirme işleminin şematik gösterimi	38
Şekil 5.1 Wöhler yorulma testi.....	40
Şekil 5.2 Bir malzemenin yorulma eğrileri	41
Şekil 5.3 90N yük altında ve farklı kayma kızlarında östemperelemenmiş farklı dökme demir numunelerini sürtünme katsayıları (G1 ile D1 perlitik gri dökme demir, G3 ise demiryollarından temin edilen işlemsiz demiryolu fren pabucu dur) [17,58]..	42
Şekil 5.4 Kayma süresi ile sürtünme katsayısı arasındaki değişimi (a) Döküm durumu KGDD ve (b) ÖKGDD	42
Şekil 5.5 Aşınmanın tanımlanması ve kendi aralarındaki karşılıklı ilişkinin şematik gösterimi	44
Şekil 5.6 Bir tribolojik sistemin şematik gösterimi.....	45
Şekil 5.7 Adhesif aşınmanın meydana gelişini şematik olarak gösterimi	50
Şekil 5.8 Abrasif aşınma a) Mekanizmanın oluşumu ve b) Abrasif aşınmanın kesme veya kazıma ile gerçekleşmesi	54
Şekil 5.9 ÖKGDD malzemenin abrasif aşınma direncinin sertleştirilmiş ve temperlenmiş çelik ve KGDD ile karşılaştırılması.....	54

Şekil 5.10	Yorulma aşınmasının şematik gösterimi.....	55
Şekil 5.11	Korozif aşınma mekanizması.....	56
Şekil 5.12	Çekme deney numunesi.....	60
Şekil 5.13	Gerçek ve mühendislik çekme diyagramları.....	62
Şekil 5.14	Ludwig denklemine göre ve $n=1$ halinde akma sınırı σ_0 olan bir malzemenin gerçek çekme diyagramı	63
Şekil 5.15	$\sigma = \sigma_0 + K\epsilon^n$ ($n<1$)	64
Şekil 5.16	$\sigma = K\epsilon^n$ ($n<1$) ,elastik davranış göstermeyen ve akma sınırı belirgin olmayan malzeme	64
Şekil 5.17	Basma deneyinde birim şekil değişimlerinin ölçülebilmesi için işaretlemenin yapılması.....	65
Şekil 5.18	Bir silindirik koordinat sistemi ve basmaya uğramış numunede meydana gelen çatlağın görünümü	65
Şekil 5.19	İndentasyon yönteminde kuvvet – iz derinliği eğrileri	69
Şekil 5.20	Küresel indentasyon yöntemi şematiği	70
Şekil 5.21	Vickers indentasyon yöntemi şematiği	71
Şekil 5.22	Yükleme-yük boşaltma ve batma derinliği(yer değiştirme) eğrileri	72
Şekil 5.23	Vickers indentasyonu derinlik parametreleri şematiği.....	72
Şekil 6.1	GGG40 deney numunesinin makro resmi.....	77
Şekil 6.2	Östempereleme ısıtma işlemi yapıldığı tuz banyosu	78
Şekil 6.4	(A) Optik mikroskobu (B) SEM mikroskobu	80
Şekil 6.5	EMCOTEST DuraScan marka mikrosertlik cihazı.....	81
Şekil 6.6	Mikrosertlik ölçümlerinin yapıldığı bölgelerin şematik gösterimi	81
Şekil 6.7	Aşınma deney cihazı şematik gösterimi.....	82
Şekil 6.8	SHIMADZU AG-X 50 KN Çekme Deney cihazı.....	82
Şekil 6.9	Çekme işlemine tabi tutulan deney numunesi.....	83
Şekil 6.10	TS138 EN çekme deneyi standardına uygun numune ölçüsü	83
Şekil 7.1	Döküm durumunda KGDD (GGG40) numunelerinin mikro yapıları (A) ve (B) Perlitik KGDD (Dağlama: %2 Nital X200).....	84
Şekil 7.2	900 °C de östenitlenen 320 °C de 120 dk östemperelenen numuneler (Dağlama: %2 Nital X50).....	85
Şekil 7.3	900 °C de östenitlenen 320 °C de 120 dk östemperelenen numuneler (Dağlama: %2 Nital X200).....	86

Şekil 7.4 900 °C de östenitlenen 380 °C de 120 dk östempirlenen numuneler (Dağlama: %2 Nital X50)	87
Şekil 7.5 900 °C de östenitlenen 380 °C de 120 dk östempirlenen numuneler (Dağlama: %2 Nital X200)	88
Şekil 7.6 İndüksiyon numuneleri (Dağlama: %2 Nital X50)	89
Şekil 7.7 320 ve 800 Mesh zımpara üzerinde 8 ve 15 metre yol kullanılarak 10N, 20N, 30N yük altında aşındırılan döküm durumundaki KGDD numunelerinin aşınma SEM görüntüleri.....	92
Şekil 7.8 320 ve 800 Mesh zımpara üzerinde 8 ve 15 metre yol kullanılarak 10N, 20N, 30N yük altında aşındırılan ÖKGDD 120DK 320 °C ÖSTEMPERLEME numunelerinin aşınma SEM görüntüleri	93
Şekil 7.9 320 ve 800 Mesh zımpara üzerinde 8 ve 15 metre yol kullanılarak 10N, 20N, 30N yük altında aşındırılan ÖKGDD 120DK 380 °C ÖSTEMPERLEME numunelerinin aşınma SEM görüntüleri	94
Şekil 7.10 320 ve 800 Mesh zımpara üzerinde 8 ve 15 metre yol kullanılarak 10N, 20N, 30N yük altında aşındırılan İNDÜKSİYON numunelerinin aşınma SEM görüntüleri .	95
Şekil 7.11 ÖKGDD 120DK 320 °C Östempirlene numunelerinin çekme testi grafikleri	98
Şekil 7.12 ÖKGDD 120DK 380 °C Östempirlene numunelerinin çekme testi grafikleri	99
Şekil 7.13 İndüksiyon ile yüzey sertleştirme işlemi görmüş numunelerinin çekme testi grafikleri	100
Şekil 7.14 ÖKGDD 120DK 320 °C Östempirlene numunesinin aşınma yüzeyi EDS analiz grafiği.	102
Şekil 7.15 ÖKGDD 120DK 380 °C Östempirlene numunesinin aşınma yüzeyi EDS analiz grafiği.	103
Şekil 7.16 İndüksiyon numunesinin aşınma yüzeyi EDS analiz grafiği.	104
Şekil 7.17 Döküm durumundaki KGDD numunesinin aşınma yüzeyi EDS analiz grafiği. ...	105
Şekil 7.18 ÖKGDD 120DK 320 °C Östempirlene numunesinin kırık yüzeyi EDS analiz grafiği.	106
Şekil 7.19 ÖKGDD 120DK 320 °C Östempirlene numunesinin kırık yüzeyi EDS analiz grafiği.	107
Şekil 7.20 İndüksiyon numunesinin kırık yüzeyi EDS analiz grafiği.	108
Şekil 7.21 Döküm durumundaki KGDD numunesinin kırık yüzeyi EDS analiz grafiği.	109

TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1. Farklı mikro yapılara sahip KGDD'lerin mekanik özellikleri	7
Tablo 2.2. Yüksek kromlu bir KGDD ile beynit+martenzit oluşan mikro yapıya sahip bir KGDD'nin sertlik ve darbe dayanım karşılaştırması.....	13
Tablo 2.3. Beynit + Martenzit mikro yapıya sahip KGDD ile aşınmaya dirençli dökme demirin aşınma özelliklerinin karşılaştırılması.....	13
Tablo 3.1. İkinci elementlerin grafit yapısına etkileri	15
Tablo 3.2. Sfero dökme demirlerin ana yapılarına göre sertlik değerleri	16
Tablo 3.3. Küresel grafitli dökme demirlerin genel kimyasal içeriği	17
Tablo 3.4. ISO 1083'e göre KGDD'lerin standartları	17
Tablo 3.5. ASTM A-536'ya göre KGDD'lerin standartları	178
Tablo 3.6. TSE 526'ya göre KGDD'lerin standartları.....	179
Tablo 4.1. KGDD'lere en çok uygulanan ısıt işlemler ve amaçları.....	26
Tablo 4.2. Su verme ve normalleştirme ısıt işlemleri uygulanmış KGDD'e ait çekme özellikleri	29
Tablo 4.3. Frekansın damla derinliğine etkisi.....	37
Tablo 5.1. Aşınma ve aşınma yüzeyleri arasındaki ilişki	47
Tablo 5.2. Malzeme özelliklerinin adhesif aşınmaya etkisi.....	50
Tablo 5.3. En çok kullanılan iki Rocwell sertlik yönteminin özellikleri	68
Tablo 6.1 GGG40 Küresel Grafitli Dökme Demirin Standart Kimyasal Kompozisyonu ..	76
Tablo 6.2 GGG40 Küresel Grafitli Dökme Demir Fiziksel özellikleri	76
Tablo 6.3 GGG40 Küresel Grafitli Dökme Demir Mekanik Özellikleri	77
Tablo 6.4 GGG40 Küresel Grafitli Dökme Demir Eşdeğer standartlar.....	77
Tablo 7.1 Numunelerden alınan Sertlik değerleri ve Toplam ortalama sertlik değerleri ...	90
Tablo 7.2 Numunelerin 10,20 ve 30 N yük altında aşınma kayıpları	96
Tablo 7.3 Çekme numunelerinin çekme dayanım sonuçları.....	97

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
C	Karbon
Fe	Demir
Mn	Mangan
Si	Silisyum
Cr	Krom
Cu	Bakır
°C	Santigrat derece
dk	Dakika
Fe ₃ C	Sementit
g	Gram
mm	Milimetre
MPa	Megapascal
sn	Saniye
α	Ferit
α_b	Beynitik Ferit
γ	Östenit
γ_0	Tavlama sıcaklığındaki östenit (Orijinal östenit)

Kısaltmalar	Açıklamalar
KGDD	Küresel Grafitli Dökme Demir
ÖKGDD	Östemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demir
ÇFMKGDD	Çift Fazlı Matris Yapıya Sahip Küresel Grafitli Dökme Demir
DDD	Döküm Durumu Dökme Demir
Hv	Vickers Sertlik Değeri
HB	Brinell sertlik değeri
N	Newton
Y.K.Ö	Yüksek karbonlu östenit
K.Ö.	Kalıntı östenit

1. GİRİŞ

Küresel grafitli dökme demirler (KGDD), çeliğin mekanik özelliklerine ve dökme demirin üretim özelliklerine sahip bir malzeme grubu olarak tanımlanmıştır. KGDD'ler, gri dökme demirlerden yaklaşık iki kat daha fazla mukavemete sahip olup, çeliğe göre çok daha kolayca dökülebilmektedir. Üstelik üretimindeki büyük maliyet avantajı, kullanım alanını hem çelik hem de diğer dökme demirlere göre her geçen gün biraz daha genişletmiştir.

Dökme demir alanındaki ilk gelişme, aşılama işleminde başarıya ulaşılarak, gri dökme demir sınıfının, daha sonraki gelişme ise magnezyum ve seryum işlemlerinde başarı sağlanarak küresel grafitli dökme demir sınıfının kazanılmış olmasıdır. Günümüzde küresel grafitli dökme demirler özellikle otomotiv endüstrisinde başarıyla kullanılmaktadır. Küresel grafitli dökme demir teknolojisinin gelişmesine bağlı olarak, KGDD'in mekanik özelliklerini daha da geliştirmenin yolları aranmıştır. Ancak, yapılan çalışmalarda, grafitte küreselden başka bir morfoloji kazandırmanın imkânsız olduğunun anlaşılması, araştırmacıları mekanik özellikleri, matriksin modifikasyonu yoluyla geliştirmek için çalışmaya itmiştir [1,2].

Bu çalışmalara bağlı olarak, östemperleme ısıl işleminin küresel grafitli dökme demirlere uygulanmasıyla dökme demire bey nitik bir mikro yapı kazandırılarak "Östemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demirler" (ÖKGDD) geliştirilmiştir. Östemperleme işlemine bağlı olarak, küresel grafitli dökme demirlerin mukavemet, süneklik, tokluk ve aşınma direnci gibi mekanik özelliklerinde önemli artışların elde edilebileceği belirtilebilir.

ÖKDD'lerin östemperleme sürecinde meydana gelen mikro yapısal dönüşümleri, yapıları yanında alaşım elementlerinden kaynaklanan segregasyon sorunları, dökümün kesit kalınlığı gibi mekanik özelliklerini etkileyen faktörler ve pratikteki uygulama alanları hakkında da bugüne kadar pek çok makale yazılmıştır. Ancak yine de, alaşım elementlerinin mekanik özelliklere etkilere başta olmak üzere, daha henüz açıklığa kavuşmamış pek çok noktalar vardır ve bu konu üzerindeki çalışmalar hızla sürmektedir [1,3]. Genel olarak bir malzemenin performansı, kütle ve yüzeysel özelliğine bağlıdır. Malzemenin yüzey özelliğindeki herhangi bir değişim, malzeme fonksiyonlarını büyük ölçüde etkilemektedir.

Son yıllarda malzeme yüzey özelliklerinin rolü, birçok çalışmanın konusunu oluşturmuştur. Yüzey enerjisi, yüzey gerilmesi, yüzeyin aktivitesi ve yüzeye ilgili

problemler bilimsel alanda büyük önem kazanmıştır. Metal ve alaşımlarının kütsel ve yüzey özellikleri arasındaki ilişki uzun yıllardan beri araştırılmaktadır [1,2].

Yüzey işlemleri; malzemelerin sertlik, sünelik, yorulma, aşınma, korozyon, ısısal ve darbesel şok gibi mekanik ve tribolojik özelliklerinin bir veya birkaçını geliştirmek ve üretim maliyetini düşürmek amacıyla uygulanmaktadır. Bu özellikler arasında, parçanın aşınma ve korozyona karşı direncinin artırılması önem açısından ilk sırada yer almakta ve sanayide uygulanan işlemlerin büyük çoğunluğunun amacını teşkil etmektedir. Aşınma ve korozyon, dünyada her yıl önemli maddi kayıplara neden olmaktadır. Bu nedenle, son yıllarda yaygın olarak çalışılan başlıca konular arasında üretilen parçaların çevre şartlarında bozulmasını önleyecek yüzey sertleştirme yöntemlerinin malzeme üzerindeki etkilerinin gerçekleştirilmesi üzerine olmuştur. Bu nedenle indüksiyon ile yüzey sertleştirme yöntemi büyük ilgi görmektedir [1,4].

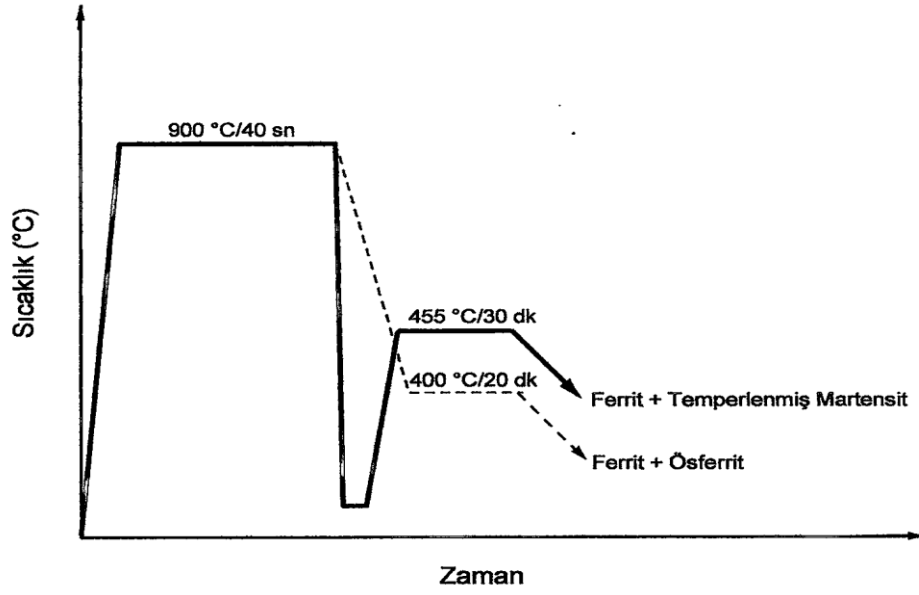
Bu çalışmada; GGG40 KGDD numunelere östemperleme ısısal işlemi ve indüksiyon yüzey sertleştirme işlemi yapılarak elde edilecek sonuçların mikro yapıya, mekanik özelliklere ve aşınma davranışına etkisi incelenecektir.

2. KONUNUN LİTERATÜRDEKİ YERİ

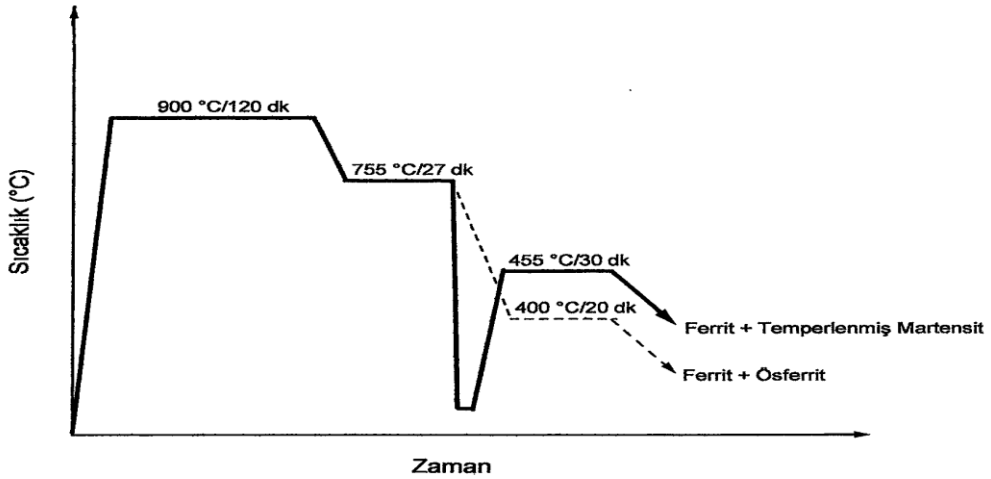
Küresel grafitli dökme demir (KGDD), birbirinden bağımsız “British Cast Iron Research Association” (BCIRA) ve “International Nickel Company” (INCO) tarafından geliştirilmiş ve ilk defa Amerikan Dökümcüler Cemiyetinin 1948’deki yıllık toplantısında döküm endüstrisi için yeni bir malzeme olarak tanıtılmıştır [05].

Bu tip dökme demir için “sphero”, “nodüler” ve “küresel grafitli” adları kullanılmıştır; yurdumuzda kabul edilen daha çok “Küresel Grafitli Dökme Demir” tabiridir. BCIRA yöntemi esas olarak, gri dökme demirle aynı bileşimde olan hiperötektik dökme demirlere ergimiş halde, cerium (Ce) ilavesinden ibarettir. Cerium’un büyük kısmı, bileşimdeki S’ü gidermekte ve geri kalan yaklaşık %0.02 Ce ise grafitlerin lamel yerine küre şeklini almalarını sağlamaktadır. INCO yönteminde ise hipoötektik ve hiperötektik dökme demirlere benzer olarak magnezyum ilavesi yapılmaktadır. Bu yöntemlerin ilk tanıtılmasından sonra bugün hemen her yerde uygulanan magnezyum yöntemi daha ekonomik oluşu nedeniyle tercih edilmiştir.

KGDD, çeliğinkine benzer bir matris içinde dağılmış küre şekilli grafitlerden oluşan bir yapıya sahiptir. Yapı açısından gri dökme demirden yegâne ayrıcalığı grafitlerin şekilleridir. Küresel grafitli dökme demirin mekanik özellikleri grafit şekli ve büyük ölçüde matriks yapısı tarafından etkilenmektedir. Çift fazlı matris (ötektoid ferrit + ösferrit veya martenzit) yapıya sahip küresel grafitli dökme demirler ile ilgili literatürde oldukça sınırlı sayıda araştırma bulunmaktadır. Bu araştırmalardan birincisi 1986 yılında Voigt ve arkadaşları yapmıştır. Voigt ve arkadaşları çalışmaların % 3.60 C, % 2.20 Si, % 0.3 Mn, % 0.7 Ni ve % 0.2Mo içeren KGDD’de kısmi östenitleme ile martenzit elde etmek için su verme işlemi ösferrit elde etmek için östemperleme işlemi uygulanmıştır. Küresel grafit etrafında ferrit matriste martenzit ya da ösferrit elde etmek için uyguladıkları ısıtma işlemi Şekil 2.1 de küresel grafit etrafında martenzit ya da ösferrit ve ferritik matris elde etmek için uygulandıkları ısıtma işlem çevrimi Şekil 2.2 de gösterilmiştir [06,07].



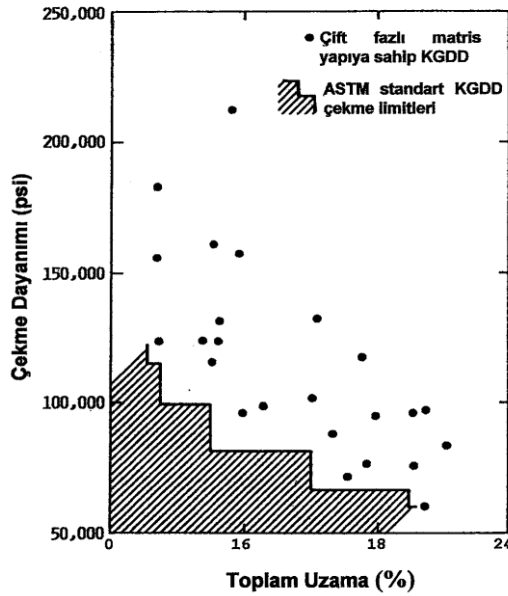
Şekil 2.1. Küresel grafit etrafında martenzit ya da ösferit elde etmek ve ferrit matris oluşturmak için uygulanan ısı işlem çevrimleri [06,07]



Şekil 2.2. Küresel grafit etrafında martenzit ya da ösferit ve ferrit matris oluşturmak için uygulanan ısı işlem çevrimleri [06,07]

Voigt ve arkadaşlarının çalışmalarında üretilen Çift Fazlı Matris Yapıya Sahip Küresel Grafitli Dökme Demirlerde (ÇFMKGDD) ve ASTM standart KGDD'lerin çekme dayanımı-toplam % uzama ilişkileri Şekil 2.3 de gösterilmektedir. Mikro yapısındaki ferritle birlikte martenzit ya da ösferit içeren Çift Fazlı Matris Yapıya Sahip Küresel Grafitli Dökme Demirler (ÇFMKGDD) geleneksel ısı işlem görmüş KGDD'lere kıyasla daha yüksek toplam uzanmaya sergilemektedir. Voigt ve arkadaşları kırılma yüzeyi incelemelerinde grafitin etrafında birincil ferrit oluştuğunda mikro çatlağın keskinliği

giderdiğini ve mikro çatlağı yavaşlattığını, grafitin etrafında martenzit ya da ösferit oluştuğunda mikro çatlak başlangıcının daha zor olduğu, yani küresel grafitli dökme demirde ikincil fazlar (ösferit ya da martenzit) çatlak başlangıcına karşı bir direnç oluşturarak kırılmayı geciktirdiğini bildirmişlerdir [06,07].



Şekil 2.3 ASTM standart küresel grafitli dökme demir ve ÇFMKGDD'lerin çekme dayanımı ve toplam % uzama miktarının karşılaştırılması.

Sugiyama ve arkadaşları yaptıkları bir çalışmada, dökülmüş haldeki mikro yapısı %60 ferrit + %40 perlitten oluşan küresel grafitli dökme demiri değişik kritik sıcaklıklarda (800 °C, 815 °C, 830 °C ve 840 °C) kısmi östenitleyip daha sonra östemperlemişlerdir. Bu sıcaklıklarda kısmi östenitleme sonrası sırayla % 20, % 40, % 80 ve %90 hacim oranlarında ösferit elde etmişlerdir. Artan ösferit hacim oranı ile akma ve çekme dayanımı artarken sünekliğin azaldığını tespit etmişlerdir. Çift Fazlı Matris Yapıya Sahip Küresel Grafitli Dökme Demirlerde (ÇFMKGDD) ikincil fazın (ösferit, martenzit vb.) hacim oranı kontrolünü ilk olarak Sugiyama ve arkadaşları gerçekleştirmiştir [08].

Rashidi ve arkadaşlarının yaptıkları bir çalışmada, kritik sıcaklıklar arasında kısmi östenitleme süresi 400 saniyeye kadar arttırılmasıyla akma ve çekme dayanımının arttığını tespit etmişlerdir. Öte yandan 600 saniyeye kadar olan kısmi östenitleme süreleri darbe dayanımı düşürmüştür. Rashidi ve arkadaşları bunu tamamlanamamış östenitlemeye atfetmişlerdir. Daha iyi mekanik özellikler daha yüksek östenitleme sıcaklığı seçilmesi ile sağlanabilmektedir. ÇFMKGDD'ler ile normalleştirilmiş, su verilmiş + temperlenmiş ve

östemperlenmiş koşullardaki KGDD karşılaştırıldığında ÇFMKGDD'ler her zaman daha yüksek süneklik sergilemişlerdir [09].

Yine Rashidi ve arkadaşları % 3,56 C, % 1,94 Si, % 0,28 Mn, % 1,33 Ni, % 0,29Mo ve % 0,0125 S içeren küresel grafitli dökme demiri kullanarak yaptıkları bir diğer çalışmada temperleme sıcaklık ve sürelerinin ÇFMKGDD'ler üzerine etkilerini incelemek amacıyla numuneler 950 °C sıcaklıkta 2 saat tavlamanın ardından 760 °C sıcaklıkta 5 saat bekleme ve ardından fırında soğutma işlemi yapmışlardır. Son olarak numuneleri 900 °C sıcaklıkta 480 saniye gibi kısa bir süre tavlama suretiyle kısmi östenitleme sağlamışlar ve daha sonra ılık suda vermişlerdir. Bu numunelerden bir kısmına değişik sıcaklıklarda (300 °C, 400 °C, 450 °C, 500 °C ve 600 °C) 1 saat temperleme işlemi uygulamışlardır. 500 °C temperleme sıcaklığında ise 30, 90, 120, 150 ve 180 dakika temperleme işlemi yapmışlardır. Rashidi ve arkadaşlarının deneysel çalışmaları sonucunda, 400-500 °C temperleme sıcaklıklarında ve bu sıcaklık aralığında, darbe dayanımı ve % uzama değerleri birden artarken çekme ve akma dayanımında neredeyse hiçbir değişiklik olmadığını belirtmişlerdir. Çalışmalarda artan temperleme sıcaklığıyla akma ve çekme dayanımları azalmıştır. 500 °C temperleme sıcaklığında 90 dakikaya kadar darbe dayanımı artmış, daha uzun temperleme sürelerinde ise azalmıştır. Yine 500 °C temperleme sıcaklığında 120 dakikaya kadar % uzama artarken, 120 dakikada sonra azalmış, akma ve çekme dayanımları ise artmıştır [10].

He ve arkadaşları yaptıkları çalışmalarda % 3,4 C, %3,09 Si, % 0,035 Mg içeren KGDD'e hızlı tavlama ve su verme ile küresel grafit etrafında halka şeklinde martenzit ve ferrit matriste de martenzit elde etmişlerdir. Bu ısıl işlem sonucunda 1180 MPa çekme dayanımı ile birlikte % 8 uzama ve %1,2 kesit alanı daralması sonuçlarını elde etmişlerdir. Küresel grafitli çevresindeki halka şeklindeki martenzitin mikro çatlaklar çekirdeklenmesini ve ilerlemesini geciktirdiğini ve yavaşlattığını kaydetmişlerdir. Yine küresel grafitli etrafındaki halka şeklindeki martenzitin küresel grafit-martenzit ara yüzeyindeki çatlak çekirdeklenmesini geciktirdiği ve ara yüzeyde çatlak ilerlemesini engellediğini kaydetmişlerdir. İki fazın (ferrit + martenzit) kombinasyonu çatlak ilerlemesine karşı bir direnç oluşturmaktadır [11].

Hafız yaptığı çalışmalarda % 3,52 C, % 2,54 Si, % 0,008 Mn, % 0,0033 Cr, %0,008 Ni, % 0,009 Mo, % 0,018 Cu, % 0,04 Mg, %0,001 Pb % 0,007 S, % 0,007 P kimyasal bileşimini sahip KGDD'de küresel grafit etrafında kabuk (halka) şeklinde değişik mikro yapılar (martenzit ve ösferrit) elde etmek amacıyla numuneleri 600 °C sıcaklıkta 15 dakika tavlamanın ardından çok hızlı bir ısıtma ile 910 °C sıcaklıkta ısıtılmış ve bu sıcaklıkta 1,5

dakika beklemenin ardından martenzit üretmek için buzlu suda soğutma, ösferit elde etmek için aynı sıcaklıkta tavlamanın ardından 360 °C sıcaklığındaki buz banyosuna soğutma ve bu sıcaklıkta 90 dakika östemperleme yapmıştır. Hafızın elde ettiği çekme deneyi sonuçları Tablo 2.1’de özetlemektedir [12].

Tablo 2.1. Farklı mikro yapılara sahip KGDD’lerin mekanik özellikleri

Malzeme	Akma dayanımı (MPa)	Çekme dayanımı (MPa)	Kopma dayanımı (MPa)	Pekleşme oranı (MPa)	Toplam uzama (%)
Döküldüğü gibi	297	409	396	1,38	19,1
Ösferit kabuk	341	535	520	1,57	17,9
Martenzitik kabuk	598	713	705	1,19	4,9

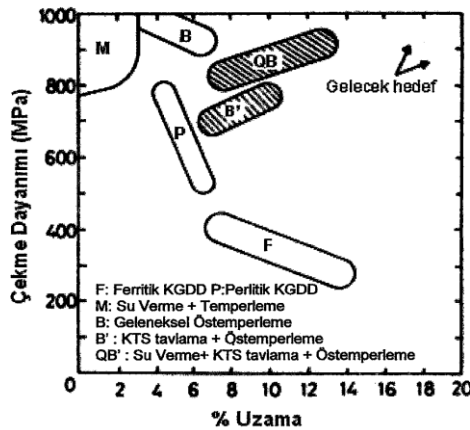
Tablo 2.1’de görüldüğü üzere küresel grafitin etrafındaki kabuğun (halkanın) ösferit olduğu durumda toplam uzamada neredeyse hiç taviz vermeden akma dayanımında yaklaşık %15 çekme dayanımında ise % 31 iyileşme sağlamıştır. Küresel grafit etrafındaki halkanın martenzit olduğu durumda ise % uzamadan % 74 taviz verilirken akma dayanımında yaklaşık % 100 çekme dayanımı da ise % 74 iyileşme sağlamıştır.

Hafız ÇFMKGDD’lerin çekme kırılma davranışı incelemelerinde tamamen ferritik matrise sahip küresel grafitli dökme demirde ve ösferitik kabuk tarafından kuşatılmış küresel grafiklerde küresel grafit çevresi oldukça sünmüş ve grafit çevresinde boşluklar gözlerken küresel grafit çevresindeki kabuk martenzit olduğu durumda küresel grafit çevresinde az miktarda hatta hiç boşluk oluşumuna rastlanmamıştır. Küresel grafit etrafındaki kabuğun ösferit olduğu durumda numuneler sünek kırılma sergilerken martenzit olduğu durumda kırılma bir kırılma davranışı sergilediğini belirtmiştir.

Kobayashi ve arkadaşları yaptıkları çalışmalarda farklı kimyasal kompozisyonlardaki küresel grafitli dökme demirlerde ÇFMKGDD üretmek için bir grup numuneleri kritik sıcaklıklar arasında tavlayıp östemperlenmişler (B’) diğer bir grup numunelere de ilk önce tamamen östenitleme sonrası su verme + kritik sıcaklıklar arasında tavlayıp östemperleme (QB’) ısıl işlemleri uygulamışlardır. Deneysel çalışmalar sonucu QB’ ısıl işlemleri uygulanmış numunelerin kırılma tokluğu genel geleneksel östemperlenmiş numunelerden daha fazla çıkmıştır. En yüksek kırılma tokluğunu QB’ ısıl işlemi uygulanmış

numuneler sağlamıştır. QB' ısıt işlemleri uygulanmış küresel grafitli dökme demirlerdeki bu yüksek tokluk şu sebeplere bağlanmıştır. Birincisi; su verme ısıt işlemleri sonucunda inceltirilmiş östenit morfolojisi ikincisi; $\alpha+\gamma+G$ sıcaklık aralığında tavlama esnasında östenit fazı östenit yapıcı (Ni ve Mn) elementlerin difüzyonu sonucu kararlı hale gelmesi, üçüncüsü; birincil ferrit (α) fazının tokluğu zaten oldukça iyi olmasıdır. QB' ısıt işlemleri çatlak başlama direncini B' ısıt işlemleri ise çatlak ilerleme direncini artırmaktadır [13].

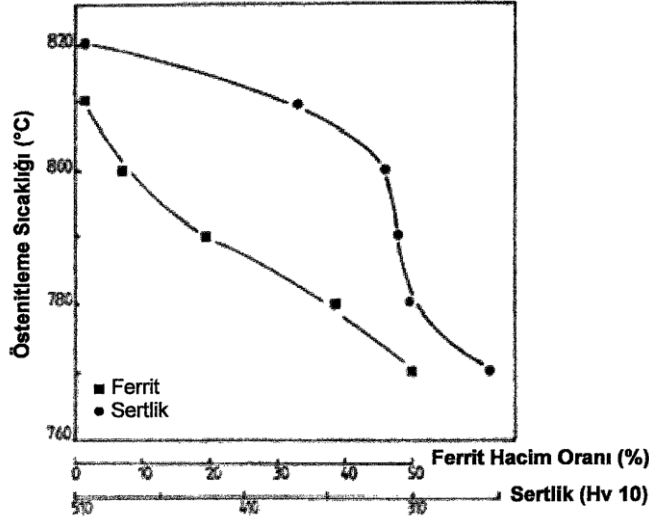
Yine Kobayashi ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, QB' ısıt işlemleri uygulamak için yapılan su verme sonrası ikincil kısmi östenitleme (kritik sıcaklıklar arasında) esnasında (Fe, Cr, Mn)₃ C olarak karakterize edilen ince karbürler çökmektedir. Tekrar östenitleme sonrası oluşan bu karbürler martenzitik matristen çökmektedir. $\alpha+\gamma+G$ sıcaklık aralığında bekleme zamanının artırılmasıyla ince karbür partiküllerinin sayısı azalmakta ve tokluk biraz artmaktadır. Bekleme zamanının artırılmasıyla ferritik tanelerde irileşme meydana gelmektedir. Bu da tokluğu biraz artırmaktadır. Bekleme süresinin artmasıyla karbürlerin bozulması sonucu tokluk ve süneklik artarken uzun tavlama süreleri nispeten kararlı karbürlerin ötektik hücre sınırları etrafında bozulması için gereklidir. Kobayashi'ye göre Ni ilavesi grafit nodülleri etrafında mikro segregasyon etkisi yapmaktadır. Dolayısıyla $\alpha+\gamma+G$ sıcaklık aralığında tavlama esnasında burada tercihli östenitleme meydana gelmektedir. $\alpha+\gamma+G$ ısıt işlemleri sonucu dayanımda % 20-30 düşüş olurken toklukta iki kat yâda da fazla iyileşmeler elde edilmiştir. Kobayashi ve arkadaşlarının elde ettikleri çekme dayanımı-%uzama sonuçları Şekil 2.4 de görülmektedir [14].



Şekil 2.4. Kobayashi ve arkadaşları elde ettikleri çekme dayanımı - %uzama sonuçları

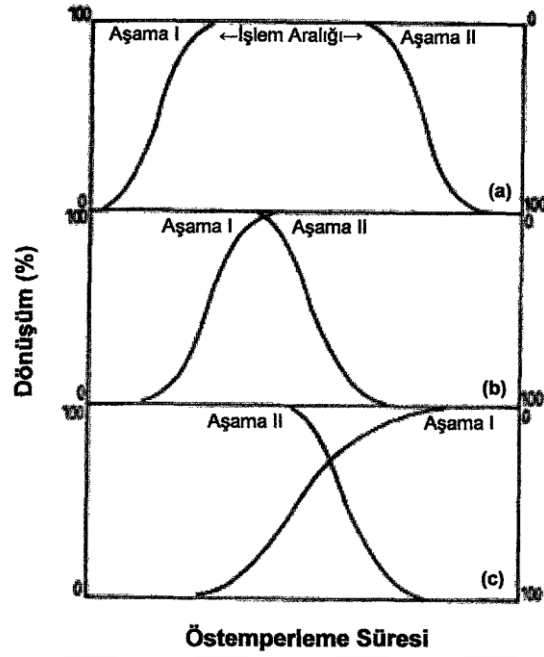
Kazerooni ve arkadaşları % 3,39 C, % 2,56 Si, % 0,37 Mn, % 0,25 Mo, % 0,29 Cu ve % 0,04 Mg içeren perlitik KGDD'i kullanarak yaptıkları bir çalışmada östempereleme ve mekanik özellikler üzerine etkisini incelemişlerdir. Bu çalışmada numuneler 800 °C, 840 °C, 870 °C 920 °C ve 950 °C'lerde 2 saat östenitlemenin ardından 375 °C'de

östemperlenmiştir. Östenitleme sıcaklığına bağlı olarak ferrit hacim oranında ki değişim Şekil 2.5’de gösterilmiştir [15].



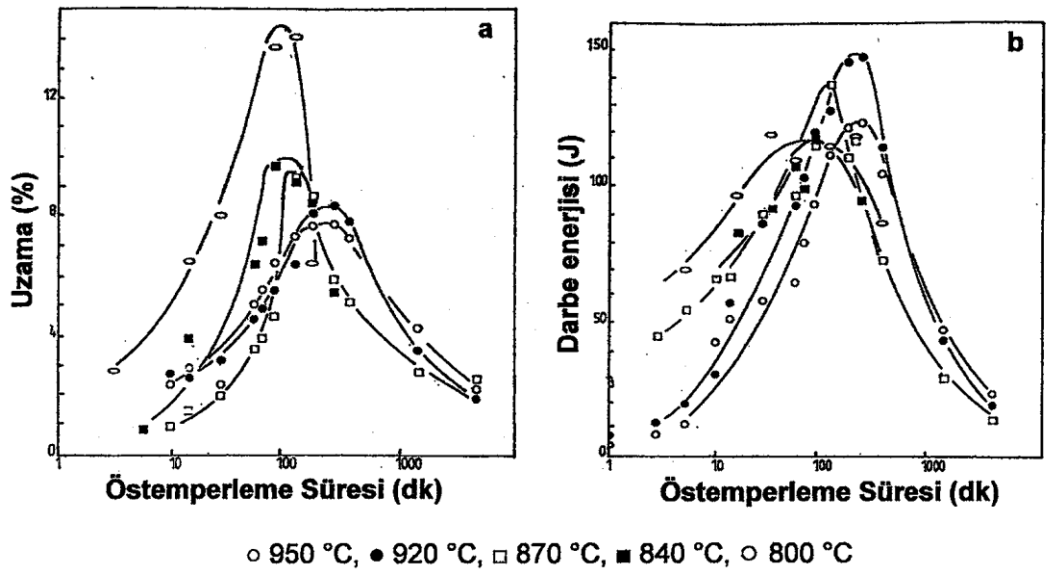
Şekil 2.5. Östenitleme sıcaklığına bağlı olarak ferrit hacim oranındaki değişim.

Ayrıca östenitleme sıcaklığını düşürülmesi ile I.aşama reaksiyonu hızlanmakta ve işlem aralığı açılmaktadır. Artan östenitleme sıcaklığı ile işlem aralığı kapanmaktadır. Östenitleme sıcaklığının düşürülmesi ile östenit C içeriği azaltmaktadır. Bu ise I.aşama reaksiyonunu hızlandırmakta ancak sertleşe bilirliği azalmaktadır. Ayrıca düşük karbonlu östenit oda sıcaklığına soğutulduğunda martenzite dönüşmektedir. Yüksek östemperleme sıcaklığı II.aşama reaksiyonunu hızlandırmakta işlem aralığını kapatmaktadır. Ancak alaşım elementlerinin ilavesi özellikle I.ve II. aşama reaksiyonlarını geciktirmektedir. Bu durum Şekil 2.6’da gösterilmektedir [15].



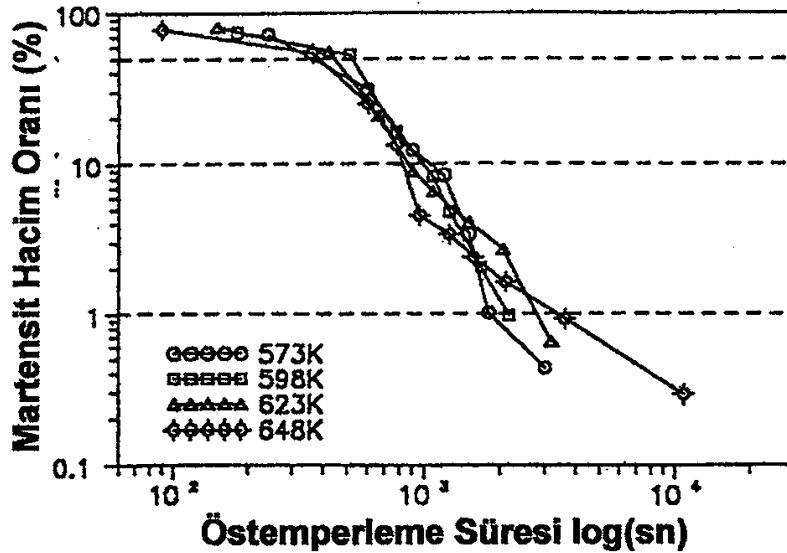
Şekil 2.6. Alaşım elementleri ve östemperleme sıcaklığının östemperleme dönüşüm aşamaları üzerine etkisi; a) alaşımsız KGDD, b) yüksek östemperleme sıcaklığında östemperlenen alaşımsız KGDD, c) yüksek östemperleme sıcaklığında östemperlenen alaşımlı KGDD

En yüksek uzama ve darbe enerjisini düşük östenitleme sıcaklıkları ve kısa süreli (80-130) dakika östemperleme ısıl işlemi sonucunda elde etmişlerdir. Düşük östenitleme sıcaklıkları sonucu elde edilen birincil ferrit fazı dayanımı düşünürken sünekliği oldukça iyileştirmekte ancak darbe dayanımını bir miktar artırmaktadır. östemperleme süresi ile yüzde uzama darbe enerjisi arasındaki ilişki Şekil 2.7 de gösterilmiştir [15].



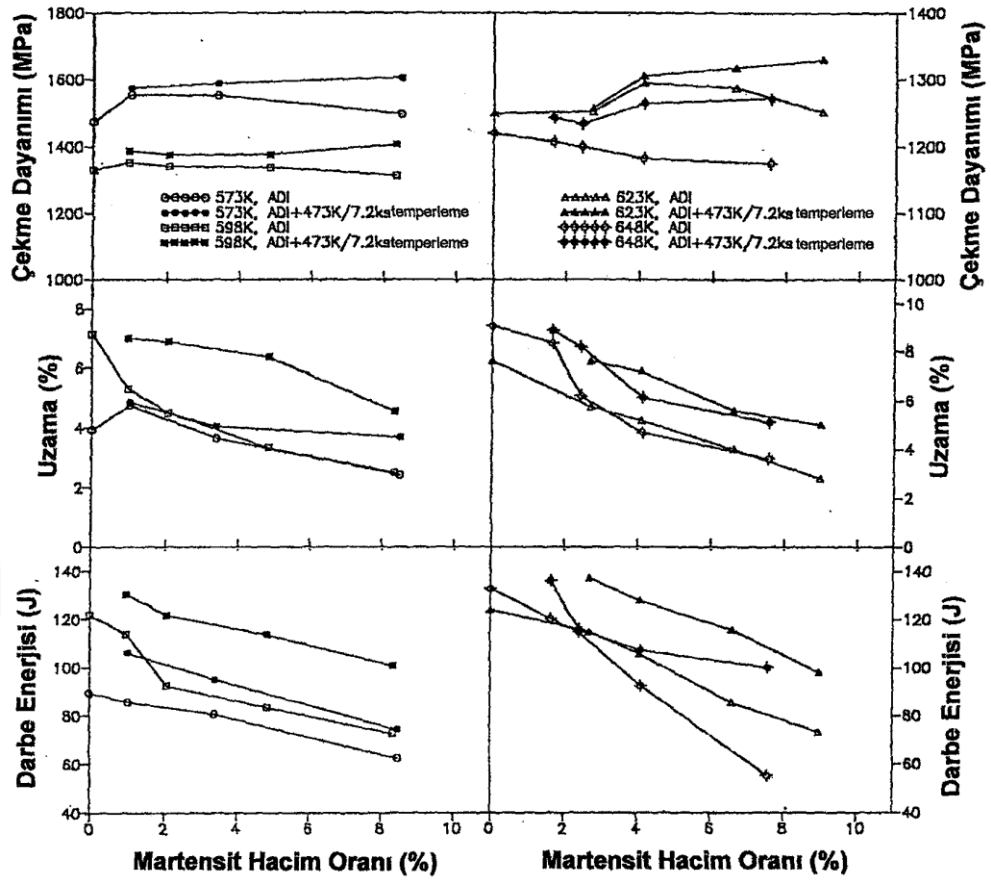
Şekil 2.7. Östemperleme süresine bağlı olarak; a) % uzama ve b) darbe enerjisinin değişimi

Wen ve arkadaşları %3,52 C, % 2,63 Si, % 0,18 Mn, % 0,77 Cu, % 0,52 Ni, % 0,037 Mg kimyasal kompozisyonuna sahip perlitik küresel grafitli dökme demiri kullanarak yaptıkları çalışmalarla de ÇFMKGDD üretmek için numuneler 900 °C de 60 dakika östenitlemenin ardından değişik sıcaklıklardaki (300 °C, 325 °C, 350 °C, 375 °C) tuz banyolarında 510 saniye süre ile östemperlenmiş ve suda su verilerek oda sıcaklığına soğutulmuşlardır. Daha sonra 200 °C de 120 dakika temperleme yapmak suretiyle mikro yapıda ösferrit + temperlenmiş martenzit elde etmişlerdir. Yalnız burada yapıda birincil ferrite rastlanmamıştır. östemperleme esnasında henüz I.aşama ($\gamma \rightarrow \alpha_b + \gamma_{yk}$) tamamlanmadan su verildiği için mikro yapıdaki reaksiyona girmemiş östenit martenzite dönüşmüştür. Dolayısıyla mikro yapı ösferrit + martenzitten meydana gelmiştir. 540 saniye östemperlemenin ardından martenzit hacim oranı hızla azalmakta ve hacim oranı % 50'nin altına düşmektedir. Bu durum Şekil 2.8' de gösterilmektedir [16].



Şekil 2.8. Östemperleme süresine bağlı olarak martenzit hacim oranının değişimi

Östemperleme süresi arttıkça martenzit hacim oranının artması ve ösferrit miktarını artması nedeniyle mekanik özellikler artmıştır. Ancak ilerleyen östemperleme süresi sonucunda mekanik özellikler azalmıştır. İlerleyen östemperleme süreleri sonucu mekanik özelliklerdeki azalmanın nedeni ikinci aşama esnasında karbür oluşumu ve yüksek karbonlu östenit (γ_{yk}) miktarının azalmasıdır. Martenzit hacim oranının (MHO) östemperleme süresi (I. aşamada) ile miktarı kontrol edilebilmektedir. Martenzit hacim oranı arttıkça çekme dayanımı artarken darbe dayanımı ve %uzama değerleri azalmıştır. MHO ile mekanik özellikler arasındaki ilişkiler Şekil 2.9 da gösterilmektedir.



Şekil 2.9. Martenzit hacim oranına bağlı olarak mekanik özelliklerin değişimi

Östempereleme sıcaklığı arttıkça martenzit hacim oranı artmıştır. Bunun nedeni yüksek östempereleme sıcaklıklarında itici gücün azalması sonucu I. aşama reaksiyonu uzun sürmektedir. Dolayısıyla mikro yapıda (I. Aşamada) daha fazla reaksiyona girmemiş östenit vardır. Bu ısıl işlem yönetimi ile optimum ÖKGDD özellikleri daha kısa sürede elde edilebilmektedir [16].

Zhou ve arkadaşları yaptıkları bir çalışmada %3,2-3,8 C, %2,5-3,0 Si, % 2,5-3,0 Mn, %0.06 S ve % 0,06 P kimyasal kompozisyona sahip ferritik KGDD’de kontrollü bir ısıl işlem uygulayarak KGDD beynit + martenzitik yapı elde etmişlerdir (Tablo 2.2). Bu kontrollü ısıl işlem üç aşamayı içermektedir. Birinci da tamamen östenitlemenin ardından spre y su verme ile 300°C’ ye kadar inilmiş ve böylece perlitik dönüşüm engellenmiştir. İkinci aşamada numuneler ısısını koruyarak bir yere alınmış ve burada 2 saatte 200 °C soğutulmuştur. Son olarak numuneler ısı koruyucu setten alınmış ve martenzitik dönüşümün gerçekleşmesi için havada soğutulmuştur. Son olarak mikro yapıda beynit + martenzit + % 8-10 hacim oranında kalıntı östenit elde edilmiştir [17].

Tablo 2.2. Yüksek kromlu bir KGDD ile beynit+martenzit oluşan mikro yapıya sahip bir KGDD'nin sertlik ve darbe dayanım karşılaştırması [17].

Malzeme	Sertlik(HRc)	Darbe Dayanımı (J)
Yüksek Cr'lu bir KGDD	54-62	3-8
Beynit+Martenzit içeren KGDD	53-55	15-20

Tablodan da görüleceği üzere sertlikten çok az bir kayıp verilirken tokluk 1-1,5 kat arttırılmıştır. Dolayısıyla sertlik ve tokluğun optimum kombinasyonu sağlanmıştır. Bu mükemmel sertlik ve tokluk kombinasyonu: 1- inceltilmiş tane yapısına 2- beynit+martenzitin varlığına ve 3- kalıntı östenitin varlığına atfedilmektedir. Beynit + martenzit içeren KGDD'nin aşınma direnci yüksek kromlu bir dökme demirle karşılaştırılabilir ve Mn 13 hadfield çeliğinin iki katıdır (Tablo 2.3) [17].

Tablo 2.3. Beynit + Martenzit mikro yapıya sahip KGDD ile aşınmaya dirençli dökme demirin aşınma özelliklerinin karşılaştırılması [17].

Malzeme	Sertlik (HRc)	Aşınma dayanımı (dk)	Ağırlık kaybı (g)
2,5 Cr-1,6 V-Ti dökme demir	50	120	0,707
Mn13 çelik döküm	213(HB)	120	1,172
Beynit+Martenzit içeren KGDD	51,5	120	0,643

3. KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRLER

Gelişen teknolojiye paralel olarak yeni ve özellikleri daha iyi mühendislik malzemelerine olan ihtiyaç artmakta malzeme özelliklerinin iyileştirilmesi ile de endüstriyel ürünlerin performansı iyileşmektedir. Bu mühendislik malzemelerinde biri olan KGDD'ler birbirinden bağımsız olarak British Cast Iron Research Association (BCRIA) ve International Nikel Company (INCO) tarafından geliştirilmiş ve ilk defa 1948 yılında Amerikan Dökümcüler Cemiyetinin toplantısında döküm endüstrisi için yeni bir malzeme olarak tanıtılmıştır [05,18].

1951'den itibaren küresel grafitli dökme demirlerin ticari olarak üretilmiş ve kullanılmaya başlanmıştır [05,19].

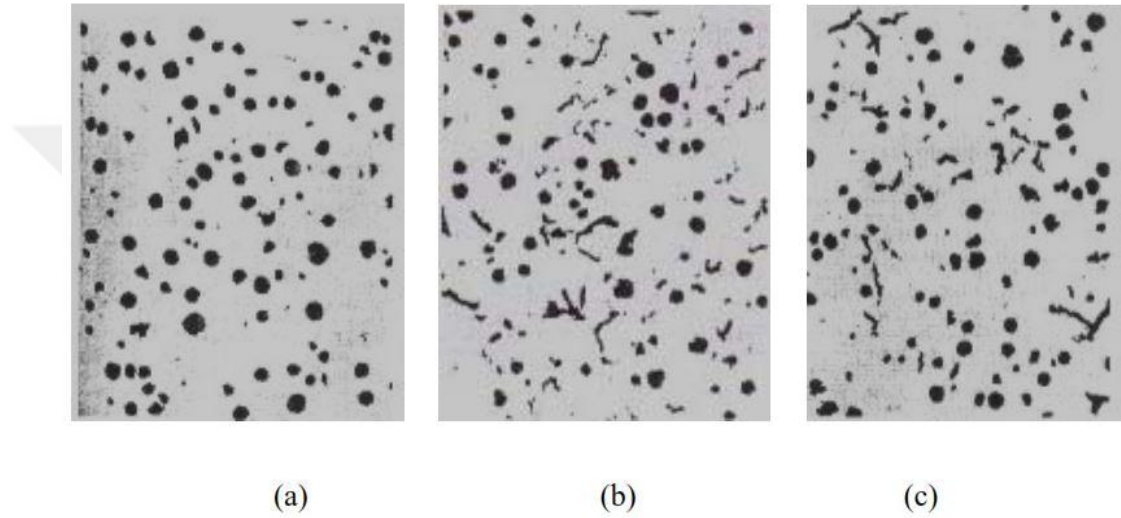
BCIRA yöntemi esas itibariyle gri dökme demirlerle aynı birleşimde olan ötektik üstü demirlere ergimiş halde seryum (Ce) ilavesinden ibarettir. Ce'un büyük bir kısmı bileşimindeki kükürtlü gidermekte ve geri kalan seryum ise grafiklerin lamel yerine küre şeklini almalarını sağlamaktadır. INCO yönetiminde ise ötektik altı ve ötektik üstü dökme demirlere, benzer şekilde magnezyum ilavesi yapılmasıyla grafiklerin küre şeklini alması sağlanır. Bu yöntemin ilk tanıtılmasından sonra ekonomik olması nedeniyle döküm sanayinde magnezyumla küreselleştirme yöntemi yaygın olarak kullanılmaktadır [05,20].

Küresel grafit partikülleri ferit perlit veya ferit perlit matris içerisinde küre şeklinde dağılmış durumdadır yapıda grafiklerin lamel yerine küre şeklinde bulunması gri dökme demir den farklı olarak malzeme yüksek süneklik ve dayanım kazandırmaktadır yüksek dayanım ve süneklik çoğu uygulamalarda küresel grafitli dökme demirin avantajlı hale getirmektedir. Bunun yanı sıra KGDD'lerin ısıtılma işlemi uygulanarak da döküm durumundaki sahip oldukları özellikleri daha fazla da iyileştirilebilir [05,21,22].

KGDD'lerin mekanik özelliklerini geliştirmek için ısıtılma işlemler normalleştirme su verme temperleme östemperleme uygulamasına rağmen en yüksek tokluk ve dayanım kombinasyonu östemperleme ısıtılma işlemi ile sağlanmıştır [06].

KGDD'ler sfero, nodüler ya da sünek dökme demir olarak da bilinir. Gri dökme demirlerden tek farkı içindeki grafitin küresel biçimde olmasıdır grafiklerin küresel biçimde olması sfero dökme demirlere daha fazla tokluk ve daha iyi mekanik özellikler sağlar. Toplam karbon miktarı gri dökme demirlerle aynıdır. Yukarıda da bahsedildiği gibi katılaşma sırasında grafiklerin küresel biçimde oluşmasını sağlayan dökümünden önce potaya ilave edilen Mg ya da Ce elementlerdir. Bu elementlerin kükürde karşı ilgileri çok

fazla olduğundan, küreselleştirme işleminin iyi bir şekilde yapılabilmesi için eriyik metalin kükürt oranının % 0.015 in altında olması gerekir. Alaşım elementlerinden çil oluşumu ve matris yapısında etki edenler birincil alaşım elementi olarak, grafit yapısı ve küreselleşmeye etki eden elementler ise ikincil alaşım elementleri olarak adlandırılır. Tablo 3.1 de ikincil elementler ve grafit şekline olan etkileri verilmiştir. Küreleşme biçimindeki alaşım elementi miktarına göre farklılıklar göstererek belirli oranlarda oluşabilir. Şekil 3.1 de farklı derecelerde küreselleşme gösteren dökme demir yapıları gösterilmiştir [01].



Şekil 3.1: Farklı derecelerde küreselleşmiş küresel grafitli dökme demirlerin parlatılmış haldeki optik mikroskop fotoğrafları. (a) %99 küreselleşmiş (b) %80 küreselleşmiş (c) %50 küreselleşmiş [01]

Döküm malzemenin yapısındaki ferrit ve perlit miktarları, malzemenin kimyasal bileşimi ile soğuma hızına bağlıdır. En fazla %10 perlit içerenler, ferritik küresel grafitli dökme demir olarak adlandırılır. Küresel grafitli dökme demirler uygulanan ısı işlemlere göre yapıları ferritik, perlitik veya martensitik olabilir [01].

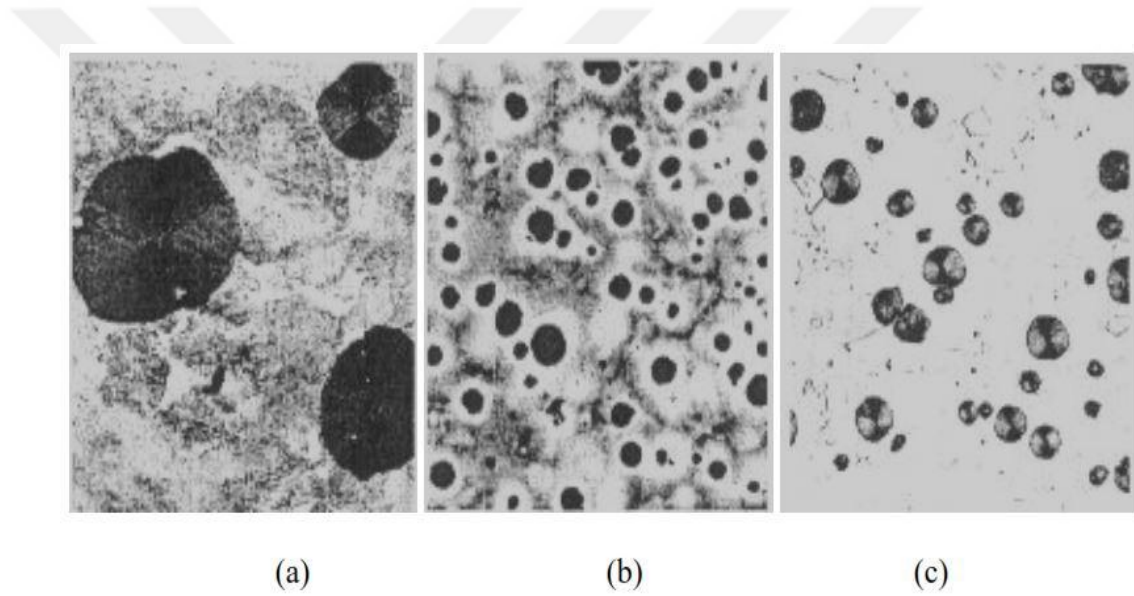
Tablo 3.1. İkinci elementlerin grafit yapısına etkileri [01]

Element Sınıfı	Element
Küreselleştirici	Magnezyum, kalsiyum, nadir toprak metalleri(seryum, lantanyum vb.), yitriyum
Küreselleşmeye Etkisiz	Demir, Karbon, Alaşım Elementleri
Küreselleşmeyi Azaltıcı	Alüminyum, Titanyum, Arsenik, Bizmut, Telür, Kurşun, Kükürt, Antimon

KGDD'ler ana yapılarına göre Tablo 3.2 de verilen sertlik değerlerine erişebilirler Oluşan yapılara ait mikro yapı fotoğrafları Şekil 3.2 de gösterilmiştir.

Tablo 3.2. Sfero dökme demirlerin ana yapılarına göre sertlik değerleri [01]

Ana Yapı	Sertlik, HB
Ferritik	130
Ferritik (alaşımli)	210
Perlitik	200
Perlitik (alaşımli)	275
Martenzitik	320
Östenitik	130-160



Şekil 3.2. Temperlenmiş küresel grafitli dökme demir yapıları: (a) tam temperlenmiş ferritik yapı kısmen (x100), (b) kısmen temperlenmiş perlitik ve ferritik yapı (x100), (c) normalize perlitik yapı (x500) [01]

3.1. KGDD'lerin Genel Kimya İçeriği

KGDD'lerin kimyasal içeriğinde yer alan elementlerin minimum ve maksimum bulunması gereken değerler (Tablo 3.3).

Tablo 3.3. Küresel grafitli dökme demirlerin genel kimyasal içeriği [23].

Karbon (C)	Silisyum (Si)	Mangan (Mn)	Fosfor (P)	Kükürt (S)	Magnezyum (Mg)
3,00 – 4,00	2,00 – 3,00	0,1 – 0,9	0,10 (max)	0,02 (max)	0,030 - 0,080

3.2. KGDD’lerin Sınıflandırılması

3.2.1. Mikro yapıya göre

Döküm şartlarında matris mikro yapısı ferritik, perlitik ya da her ikisinin karışımından meydana gelebilir, bu alaşımın kompozisyonuna ve kesit kalınlığına bağlıdır [24-28,06].

KGDD’ler mikro yapılarına göre Tablo 3.4 deki gibi sınıflandırılmış ve standardize edilmişlerdir.

Tablo 3.4. ISO 1083’e göre KGDD’lerin standartları [29]

Sınıflama	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama (%)	Sertlik (HB)	Matris Yapısı
800-2	480	800	2	248-352	Perlitik
700-2	420	700	2	229-302	Perlitik
600-3	370	600	3	192-269	Perlitik+Ferritik
500-7	320	500	7	170-241	Ferritik+Perlitik
400-12	250	400	12	<201	Ferritik
370-17	230	370	17	<179	Ferritik

C(%3-4) döküm esnasında akıcılığı ve çekme karakteristiklerini etkiler [24]. Si (%2,5-2,75) karbonun östenitte çözünebilirliğini azaltır ve grafit yapıcı olarak bilinir [25]. Si ferritte katı eriyik mukavemetlenmesini meydana getirir ve ferritin sertliğini artırır. Aşırı miktarda ki Si ferritik KGDD’in darbe dayanımını düşürür.

Bunun için ağırlıkça miktarı %2,75’in altında tutulmaktadır. Mn karbür yapıcı ve östenit kararlaştırıcıdır [24,25].

Ayrıca Mn ötektik hücre sınırlarında segregasyona neden olmakta, dayanımı artırırken süneklik ve işlenebilirliği azaltmaktadır [24]. Mn karbonun östenitte çözünmebilirliğini artırır ve perlit oluşumunu teşvik eder [25,28]. Ni, Cu, Mo ve perlit yapıcıdır [24,25,28]. Bu elementlerden Ni ve Mo sertleşmebilirliği artırırken Cu dayanımını, tokluğunu ve işlenebilirliğini geliştirir. Mo yüksek sıcaklıklarda yapıyı kararlı hale getirir, özelliklerin korunmasına yardımcı olur ve hücre sınırlarında dengeli karbürler oluşturarak segregasyona neden olur [24].

Cr'da perlit oluşumunu teşvik edicidir. V ise sertleşmebilirliği artırdığı gibi hafif perlit yapıcıdır. Cr ve V güçlü karbür yapıcı elementlerdir. Dolayısıyla belirli bir sınırın altında tutulmalıdır. Sn (%0,04-0,1) ve Sb(<%0,03) mükemmel perlit oluşumunu teşvik edicidir [24].

3.2.2. Standartlara göre KGDD'ler

Küresel grafitli dökme demirlerin standartlarına bakıldığında daha çok çekme özelliklerine ve sertliklerine göre standardize edildikleri görülür (Tablo 3.5, 3.6) [06].

Tablo 3.5. ASTM A-536'ya göre KGDD'lerin standartları [29]

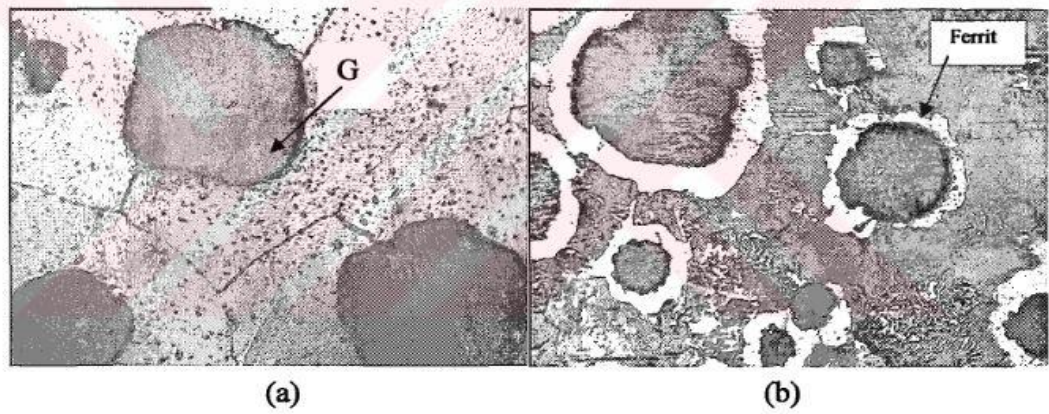
Sınıflama	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama (%)
60-40-18	276	414	18
60-42-10	290	414	10
65-45-12	310	448	12
70-50-05	345	485	05
80-55-06	379	552	06
80-60-03	414	552	03
100-70-03	483	690	03
120-90-02	621	827	02

Tablo 3.6. TSE 526'ya göre KGDD'lerin standartları [30]

Sınıflama	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama (%)	Sertlik (HB)	Matris Yapısı
DDK40	28	42	12	140-201	Daha çok Ferritik
DDK50	35	50	7	170-241	Ferritik+Perlitik
DDK60	40	60	3	192-269	Perlitik+Ferritik
DDK70	45	70	2	229-302	Daha çok Perlitik
DDK80	50	80	2	248-352	Perlitik
DDK35.3	22	35	22	-	Ferritik
DDK40,3	25	40	18	-	Ferritik

3.3. Mekanik Özellikler

KGDD'lerin mikro yapısı ferritik perlitik veya her iki farklı karışımından olmaktadır. Şekil 3.3 a ferritik matris içerisinde küresel grafitler, Şekil 3.3 b de ise perlitik matris içerisinde grafit kürelerinin etrafına bilezik şeklinde geçmiş ferritten oluşan yapı KGDD karakteristik özelliğini sergilemektedir. Aşılama işlemiyle; yüksek küre miktarı veya küre sayısı, katılaşma sırasında oluşacak kimyasal segregasyon ve bileşenlerin yapısal olarak homojenliği kontrol edilir böylece yüksek kalitede KGDD elde edilmesi sağlanır [05,31].



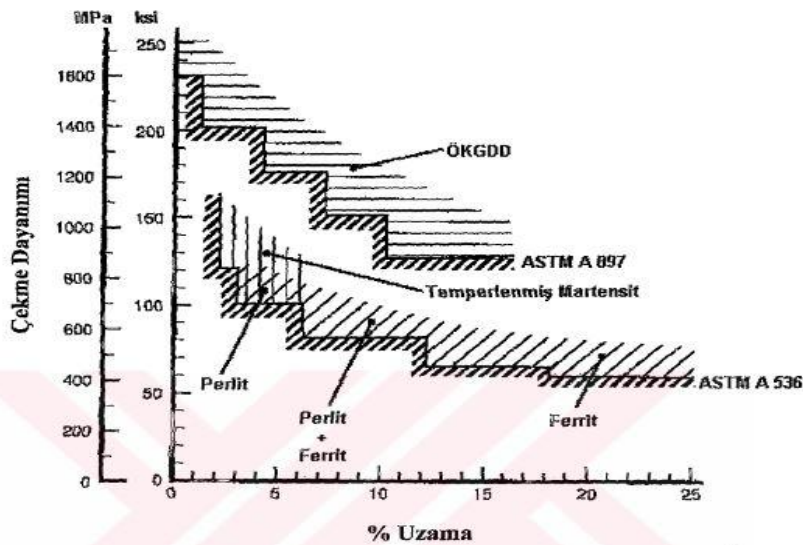
Şekil 3.3 Döküm durumu mikro yapıları: a) Ferritik KGDD b) Perlitik KGDD (Dağlama: %2 Nital, X350) [05]

KGDD malzeme yapısı içerisinde grafit kürelerinin şekli küresel olmalıdır. Küre şekli küresellikten uzaklaştıkça düzensizlik artmakta, düzensiz partiküller ise gerilimi artırma rolü üstlenmektedir. Gerilimin oluşmaması veya yüksek küre sayısının elde edilmesi için dökümlerde en düşük %80 küreselleşme sağlanmalıdır. Genel yaklaşım olarak, uygun grafit karakteristiğini de üretilen dökümler ve mekanik özellikleri matris mikro yapısıyla kontrol edilir. Döküm şartlarında, alaşımsız dökümlerin özellikleri, ferritik/perlitik oranıyla kontrol edilir. Bununla birlikte matris yapısı alaşım elementi ilavesi yapılmak suretiyle ve/veya ısıl işlemle değiştirilerek arzu edilen özellikler elde edilebilir. Dökme demir ailesinin yeni bir sınıfı olan küresel grafitli dökme demirler diğer dökme demirler ile karşılaştırıldığında mekanik özellikler yönünden daha iyidir [05].

KGDD'ler dökülmüş halde %2-18 süneklikle beraber 580-827 MPa çekme dayanımına sahip olabilmektedirler. KGDD'lerin mekanik özelliklerini kimyasal kompozisyonları, matris yapıları ve kesit kalınlıkları etkilemektedir [06,24-28,32].

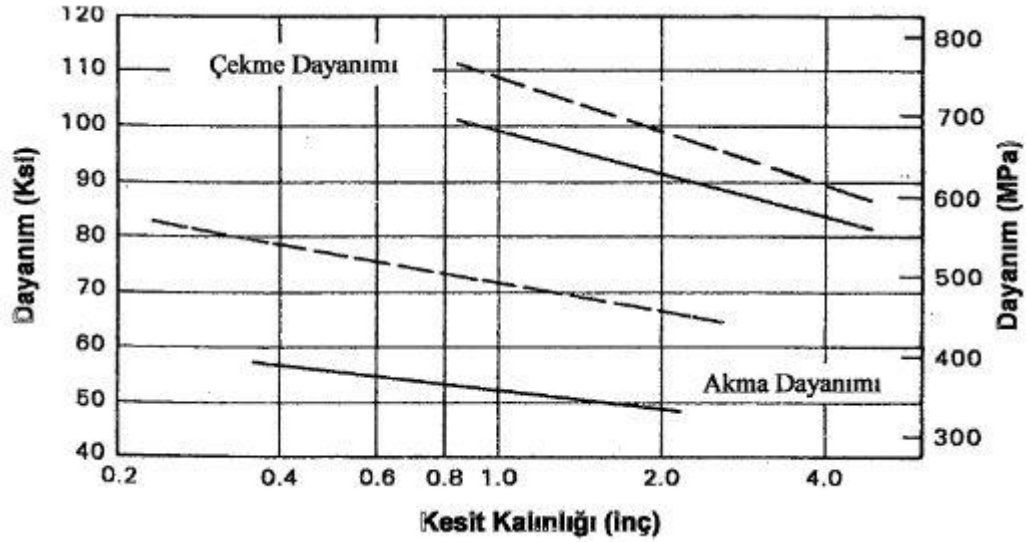
Daha iyi mekanik özellikler küreselleşmenin artırılması, daha küçük küre ve tane boyutu ve düşük toplam karbon içeriği ile sağlanabilir [26]. Küçük ve çok sayıdaki küreler çekme dayanımını artırır [05,24].

Diğer mühendislik malzemelerinde olduğu gibi çekme dayanımı arttıkça süneklik azalmaktadır. Şekil 3.4 alaşım elementlerinin içeriğine bağlı olarak perlit miktarı arttıkça çekme dayanımı artarken % uzama azalmaktadır. En yüksek % uzamayı dökülmüş koşullardaki ferritik matrisli KGDD'ler sergilerken en iyi dayanım süneklik kombinasyonunu ÖKGDD'ler göstermektedir [06].



Şekil 3.4 KGDD'lerde çekme dayanımı - %uzama ilişkisi [21]

Kesit kalınlığına bağılı olarak KGDD'lerin mekanik özellikleri değişmektedir. Şekil 3.5 de görüldüğü gibi kesit kalınlığı azaldıkça akma ve çekme dayanımı artmaktadır. Bu sonuç kesit farklılığından dolayı oluşan Si içeriği farkından kaynaklanmaktadır [33].



Şekil 3.5 Kesit kalınlığına bağılı olarak küresel grafitli dökme demirlerin mekanik özellikleri [22]

3.4. Fiziksel Özellikler

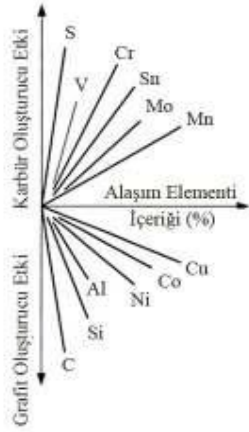
KGDD'lerin en belirgin fiziksel özelliği çeliklere göre yoğunluklarının daha düşük olmasıdır. Oda sıcaklığında birçok KGDD'in yoğunluğu 7.1 gr/cm^3 tür. Yoğunluğun bu derece düşük olması yüksek C içeriğine ve mikro boşluk etkisi meydana getiren küresel grafitlere bağlanmaktadır. Düşük C'lu perlitik küresel grafitli dökme demirin yoğunluğu 7.4 gr/cm^3 yüksek C'lu ferritik KGDD'in yoğunluğu 6.8 gr/cm^3 tür [34].

KGDD'lerin ergime noktası Si ve C içeriğine bağılı olarak değişmektedir. Alaşımsız ve düşük alaşımlı KGDD'lerin ergime sıcaklığı $1120-1160^\circ\text{C}$ iken östenitik yüksek nikelli dökme demirlerin 1230°C lerdedir. Karbon eşdeğerliği ötektik noktaya yaklaştıkça daha dar ergime aralıkları meydana gelmektedir [24,25].

KGDD'lerin ısı iletkenlikleri gri dökme demirlerden daha düşüktür. KGDD'ler gri dökme demirlere göre daha yüksek elektrik iletkenliğine ve daha düşük ısı iletkenlikleri sahiptir [24].

3.5. Küresel Grafitli Dökme Demirlerde Alaşım Elementlerinin Etkisi

KGDD’lerde kimyasal kompozisyonun karbon segragasyonunu önemli derecede etkilediği bilinmektedir. Alaşım elementleri genellikle karbür ve grafit oluşturunca olarak ikiye ayrılır. Bu elementler Şekil 3.6’da gösterilmiştir.



Şekil 3.6 Alaşım elementlerinin KGDD’lerde grafit ve karbür oluşturunca etkileri [28,33,35].

KGDD’lerde Si ve C, oluşacak yapıyı belirlemede büyük bir etkiye sahiptir. Sadeliğinden dolayı endüstride Maurer diyagramı kullanılmaktadır (Şekil 3.7).

Bu diyagrama göre;

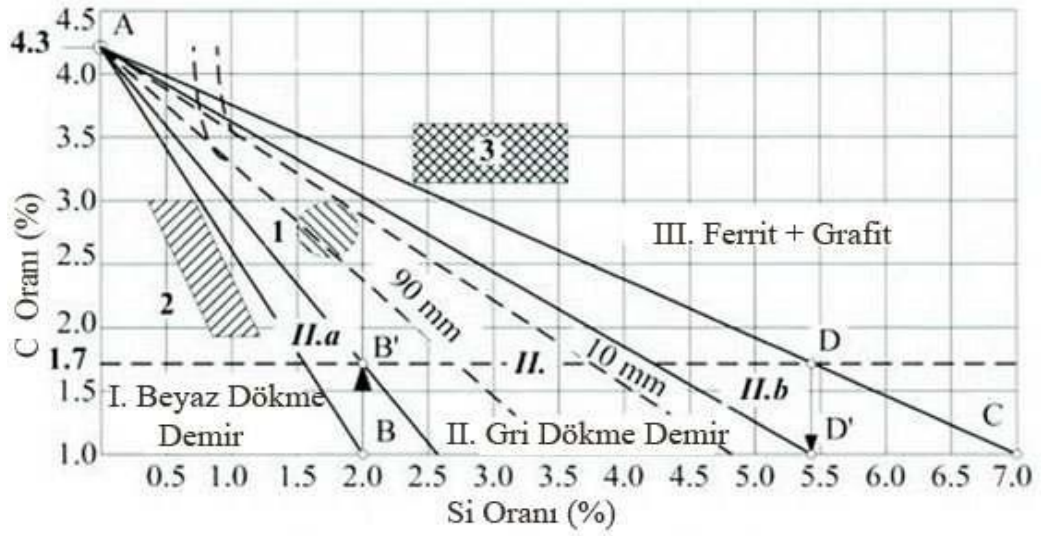
I.Bölge: Beyaz dökme demir.

II.a.Bölge: Beyaz ve gri dökme demir karışımı bir yapı (Perlit + Sementit + Grafit)

II.Bölge: İdeal gri dökme demir(Perlit + Grafit)

II.b.Bölge:Gri dökme demir (Perlit + Ferrit + Grafit)

III.Bölge:Gri Dökme Demir (Ferrit+Grafite)



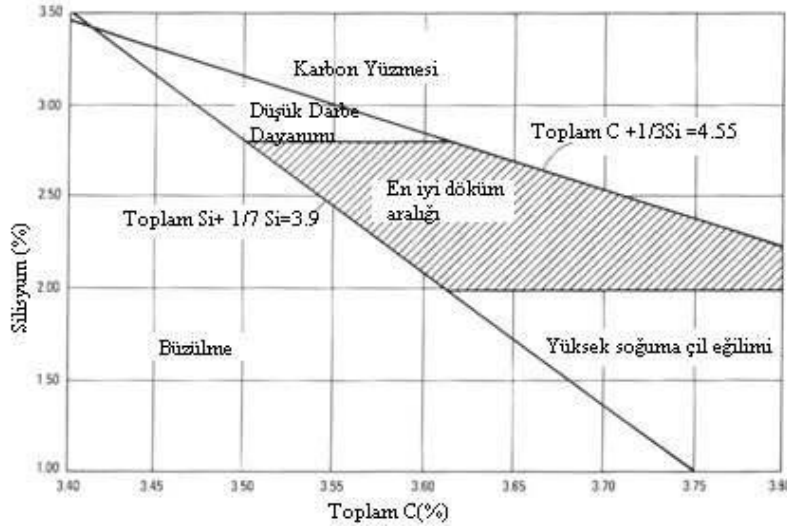
Şekil 3.7 Maurer diyagramı [24,35]

Karbon

Grafit küre sayısı karbon yüzdesine doğrudan bağlıdır. Karbon oranındaki artış ayrıca akışkanlık ve besleme özelliklerini de iyileştirerek dökülebilirlik kabiliyetini artırır. Karbon eşdeğerinin 4,3'den büyük değerleri grafit kürelerinin oluşumu ve büyümesini teşvik eder (Şekil 3.8) [35].

Silisyum

Silisyum miktarı karbon eşdeğerini etkilediği için grafitleşme ve karbon segregasyonu üzerinde önemli rol oynar. Silisyum, karbon aktivitesini yükseltmekte ve grafitin ayrışmasını kuvvetlendirmektedir. Silisyum, ötektoid dönüşümde oluşan ferritin oranını ve sertliğini artırarak dökme demir mukavemetinde bir artış meydana getirmektedir. Silisyum daha çok ferrosilisyum olarak, işlem sonunda sıvı metale ilave edildiğinde grafit küreleri için çekirdekleştirici görevi görür ve grafit sayısının kontrolü açısından etkili olur [33,35].



Şekil 3.8 Küresel grafitli dökme demirler için tipik karbon ve silisyum aralıkları [33,35]

Magnezyum

Küresel grafitli dökme demirlerde Mg perlit oluşturunca olarak davranır. Dayanımın artmasına sebep olurken işlenebilirlik ve sünekliği düşürür. Ayrıca tane sınırlarında segragasyonu artırır [35].

Kükürt

Kükürt miktarının artması küreleştirici amaçlı ilave edilen FeSiMg miktarını artırıcı etki yapar. Mn/S oranı ferritleşme eğilimini etkiler ve MnS grafit oluşumunda çekirdek görevi görür [35].

Mangan

Kuvvetli bir perlit oluşturunca alaşım elementidir. Mangan, kükürdün kötü etkisini dengeleyebilmek için kullanılır. Eğer yapıda mangan bulunmaz ise tane sınırında istenmeyen demir-sülfür ötektiği oluşur ve bu ötektik yaklaşık 985 °C de ergir. Kükürt miktarı mangan ile dengelenirse mangan sülfür tane içerisinde dağılmış halde bulunur. Mangan segragasyonu soğuma hızı ne kadar yavaş ise o kadar çok olur [35-39].

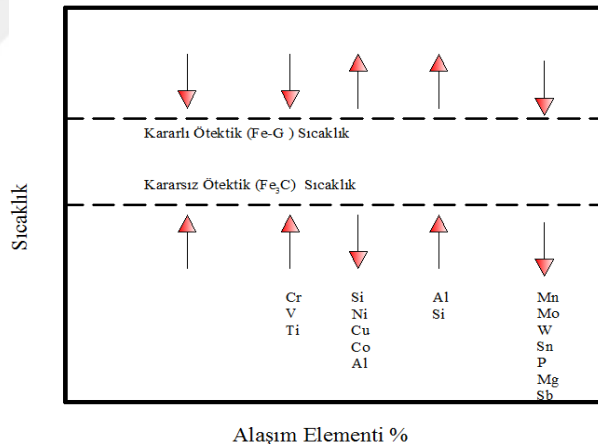
Krom

En kuvvetli karbür oluşturu elementlerden birisidir. % Cr miktarı ferritik KGDD üretiminde % 0,03'un altında olmalıdır. Perlitik türlerin üretiminde ise diğer karbür oluşturu elementlerin oranına bağı olarak yaklaşık % 0,06'ya kadar bulunabilir [35-37].

Seryum

Seryum, eser elementlerin küresel grafitin oluşmasına engel olan etkilerini ortadan kaldırmak ve aşılama yardım etmek için ilave edilmektedir. Ce miktarının %0,003-0,01 aralığında tutulması yeterli olmaktadır. Eser elementlerin miktarının çok düşük olduğu dökümlerde Ce, grafitlerin küresellik derecesinde bozulmaya neden olduğu için dezavantajlı olmaktadır [35,40,41].

Grafit oluşturu elementlerin kararlı ve kararsız ötektik sıcaklar üzerinde ötektik Sıcaklığı hem arttırıcı hem de azaltıcı etkisi vardır (Şekil 3.9). Karbür oluşturu elementler ise kararlı sıcaklığı düşürürken kararsız sıcaklığın artmasına sebep olurlar. Mo ve Mn gibi bazı alaşım elementlerinin etkisi aynı yöndedir ve çil oluşum üzerindeki etkileri oldukça azdır [33,35,42].



Şekil 3.9 Alaşım elementlerinin kararlı (Fe-G) ve kararsız ötektik sıcaklıklar üzerindeki etkisi [33,35]

4. UYGULANAN ISIL İŞLEMLER

KGDD'lerin matris mikro yapısı ısıtılma işlemle kontrol edilerek istenilen mekanik özellikler kolayca elde edilebilir [24-28].

Tablo 4.1. KGDD'lere en çok uygulanan ısıtılma işlemleri ve amaçları [26].

ISIL İŞLEMLER	
Gerilim giderme	Bir düşük sıcaklık ısıtılma işlemidir. Dökümden sonra iç gerilimleri azaltmak ya da gidermek için uygulanır.
Tavlama	Sünekliği ve tokluğu geliştirmek, sertliği düşürmek ve karbürleri gidermek için uygulanır.
Normalleştirme	Biraz süneklikle beraber dayanımı iyileştirmek için uygulanır.
Sertleştirme ve temperleme	Sertliği yada dayanımı arttırmak için uygulanır.
Östemperleme	Yüksek dayanımla beraber biraz süneklik elde etmek ve aşınma direncini geliştirmek için uygulanır.
Yüzey sertleştirme	İndüksiyon akımıyla, alevle ya da lazerle istenen yerlerin bölgesel olarak aşınma direncini geliştirmek ve sert bir yüzey elde etmek için uygulanır.

Bu ısıtılma işlemlerden normalleştirme, sertleştirme ve östemperleme ısıtılma işlemleri östenitlemeyi ve daha sonra kontrollü bir soğutma yada izotermal bekleme gerektirir, veya her ikisinin kombinasyonu olabilir.

Genellikle KGDD'lere en çok uygulanan ısıtılma işlemleri; tavlama, normalleştirme, normalleştirme + temperleme, su verme + temperleme ve östemperlemedir [05,26].

4.1. Tam Tavlama

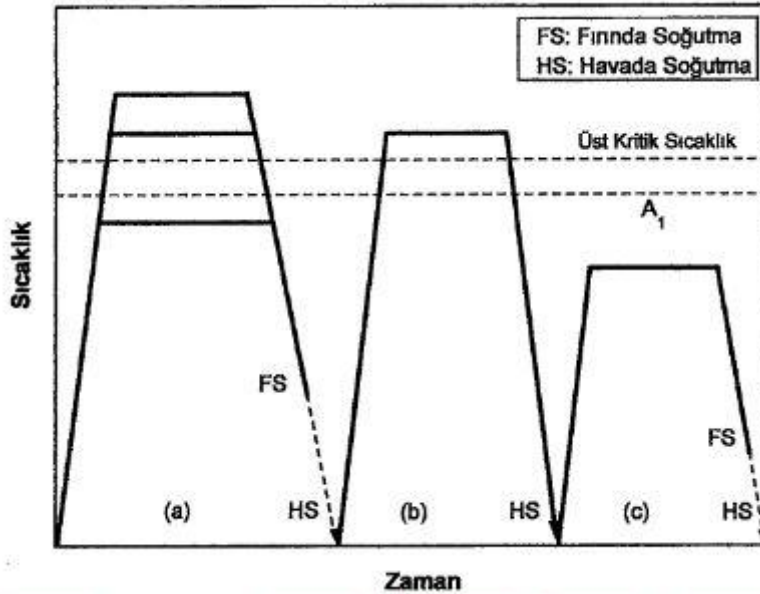
Maksimum süneklik, iyi işlenebilirlik arzu edildiğinde ve yüksek dayanım gerekmedikçe, KGDD'lere tam tavlama ısıtılma işlemi uygulanır. Tam tavlama ısıtılma işlemi sonrası mikro yapı ferrite çevrilmiş olur ve matristeki aşırı C mevcut küresel grafitler üzerine biriktirilir [26,28].

Pratikte tavsiye edilen tavlama işlemi alaşım içeriğine ve ötektik karbür içeriğine bağlı olarak Şekil 4.1'de gösterildiği gibi şu şekillerde yapılır [26].

Alaşım % 2-3 Si içeren ötektik karbür içermeyen KGDD'ler; malzeme 870-900 °C arasında her inç kalınlık için 1 saat tavllanır ve fırında 55°C/saat soğutma hızında 345°C kadar soğutulur, Daha sonra hava da soğumaya bırakılır.

Karbür içeren KGDD'ler; malzeme 900-925 °C arasında minimum 2 saat tavlansak karbürler çözündürülür. Daha kalın kesitler için daha fazla tavlansak 110 °C/saat soğutma hızında 700 °C'ye fırında soğutulur, 700°C' de 2 saat beklenerek 55 °C/saat soğutmak hızında 345°C soğutulur, Daha sonra hava da soğumaya bırakılır.

Alt kritik sıcaklık tavlaması; KGDD 705-720 °C arasında her inç kalınlık için 1 saat tavlamanın ardından 55°C/saat soğutma hızında 345°C'ye kadar fırında soğutulur. Daha sonra hava da soğumaya bırakılır.



Şekil 4.1 KGDD'lere uygulanan ısı işlemler; a) tam tavlama, b) normalleştirme, c) Gerilim giderme [32].

4.2. Normalleştirme

Östenitleme sonrası havada soğutma normalleştirme olarak bilinir ve ince perlitik yapıyı oluşturur, KGDD 870-940 °C arasında her inç kalınlık için 1 saat tavlamanın ardından havada soğumaya bırakılır, Alaşım içeriğine bağlı olarak daha uzun östenitleme süreleri seçilebilir [25]. Normalleştirme sonrası 700-900 MPa dayanım elde edilir [28].

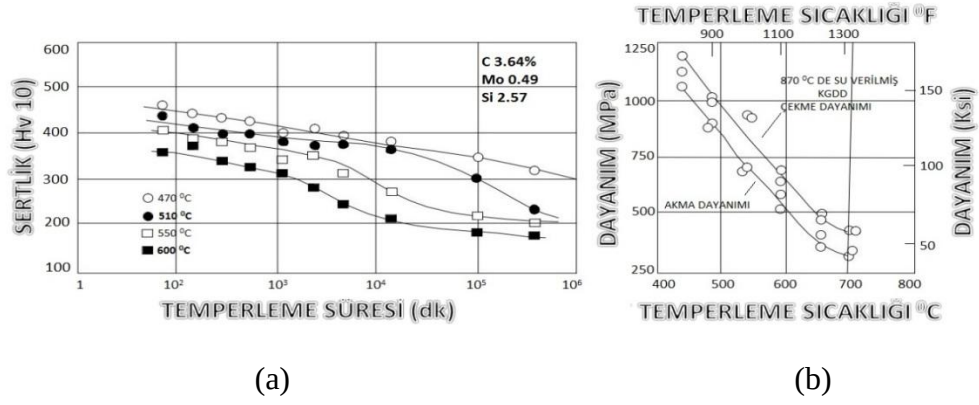
İstenilen sertliği sağlamak ve kalıntı gerilimleri uzaklaştırmak için normalleştirme sonrası temperleme yapılabilir. Temperleme 500-625°C aralığında her inç kalınlık için 1 saat yapılabilir. Östenitleme sıcaklığı artırılırsa artan C içeriği sonucu dayanım artar süneklik azalır.

4.3. Gerilim Giderme

Gerilim giderme, mikro yapı da herhangi bir değişim yapmadan döküm ve işleme sonrası kalıntı gerilimleri uzaklaştırmak için 500-600 °C arasında her inç kalınlık için 1saat tavlamanın ardından 50 °C/saat soğutma hızında 200 °C'ye kadar fırında soğutulur. Daha sonra oda sıcaklığına kadar havada soğutulabilir. Gerilim giderme dökülmüş halde perlitik KGDD'lere uygundur [25].

4.4. Su Verme ve Temperleme

100 MPa'dan daha fazla bir dayanım istenildiği zaman 815-925 °C arasında tavlamanın ardından yağda su verilir [18,25]. Gerilmelerin ve su verme çatlaklarının en aza indirilmesi için yağ tercih edilir. Karmaşık şekilli dökümlerde çatlakların önlenmesi için 80-100°C'ye ısıtılmış yağ banyosu kullanılabilir. Su verme sonrası çok yüksek bir sertlik (55-57 HRC) ve dayanım elde edilirken süneklik yok denecek kadar azdır. Bunun için KGDD 400-600 °C sıcakları arasında arzu edilen sertlik ve sünekliği sağlamak için temperlenir [24,26]. KGDD'lerin temperlenmesi iki aşamadan meydana gelir. Birinci aşama çeliklerde olduğu gibi, karbür yok edilmesidir. İkinci asama, uzun temperleme sürelerinde karbürlerden ikincil grafitlerin oluşması ve büyümesidir [9,14]. İkincil grafitleşme mekanik özelliklerde büyük bir düşüşe neden olmaktadır. Bu durum Şekil 4.2'de gösterilmektedir.



Şekil 4.2 Su verme sonrası temperleme sıcaklık ve süresinin mekanik özellikler üzerine etkisi a) değişik temperleme sıcaklık ve sürelerinin sertlik üzerine etkisi b) değişik temperleme sıcaklıklarının akma ve çekme dayanımı üzerine etkisi [26].

İkincil grafitleşme genellikle yüksek temperleme sıcaklıklarında meydana gelir, ve dökme demire küçük miktarlarda Mo ilavesi ile ikincil grafitleşme sorunu elimine edilir [43].

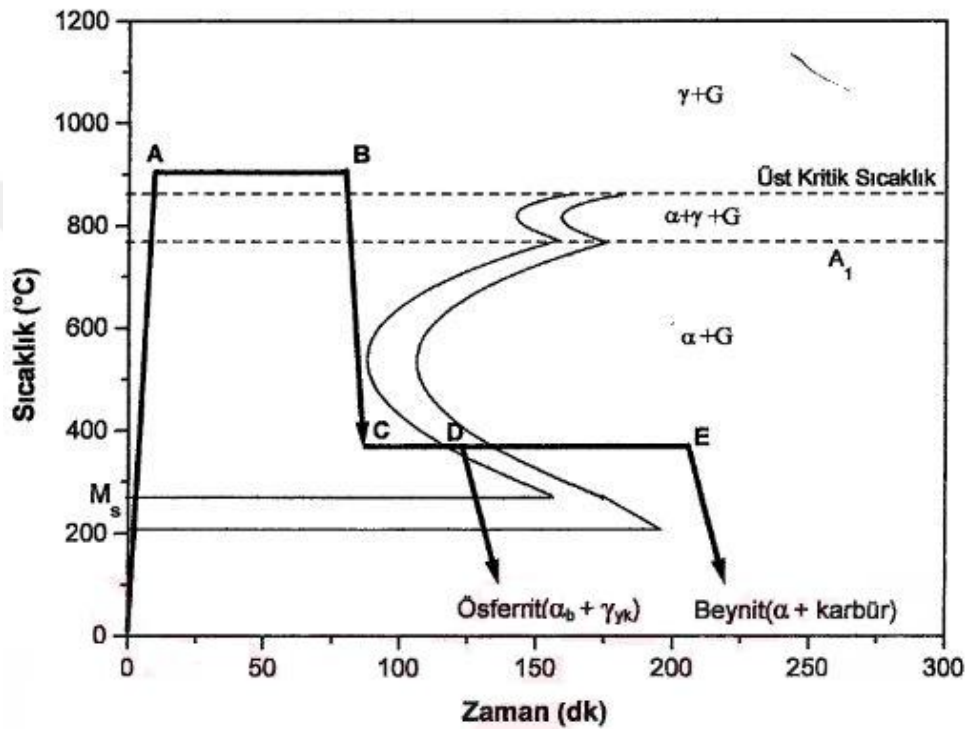
Hayrynen ve arkadaşlarının [44] yaptıkları diğer bir çalışmada %3,65C, %2,67 Si, %0,25Mn, %0,032 P, %0,085S, %0,02Cr, >%0,005Ti, %0,05Sn, %0,051 Mg, %0,02Ni, %0,06Cu, kimyasal bileşime sahip perlitik KGDD’i sertleştirmek için 900°C sıcaklıkta iki saat tavlama 65°C’de yağda su verme işlemi uygulamışlardır. Daha sonra 504°C sıcakta üç saat süreyle temperleme yapmışlardır, Normalleştirme yapmak içinde 900°C’de iki saat tavlama ve havada soğutma işlemi uygulamışlardır. Su verme ve normalleştirme ısı işlemi yaptıkları KGDD’in çekme özelliklerini incelemişlerdir. Çekme özellikleri Tablo4.2’de özetlenmiştir. Çizelgeden de görüldüğü gibi en yüksek akma ve çekme dayanımı su verme ısı işlemi ile elde edilirken süneklik oldukça düşmüştür.

Tablo 4.2 Su verme ve normalleştirme ısı işlemleri uygulanmış KGDD’e ait çekme özellikleri [44]

Çekme Özellikleri	Döküldüğü gibi	Normalleştirilmiş	Su verilmiş ve Temperlenmiş
Çekme dayanımı (MPa)	751,6	990,1	1159,7
Akma Dayanımı (MPa)	446	597,8	968
%Uzama	8,0	6,0	4,0
Sertlik (HB)	236	275	378

4.5. Östemperleme Isıl İşlemi

Östemperleme ısıt işlemleri Şekil 4.3’de görüldüğü gibi 3 aşamada yapılmaktadır. Bu aşamalar: 1- Malzeme 850°C-950°C aralığında 1-2 saat süre ile östenitlenir. (A-B). 2- Perlit burnunu kesmeyecek (perlit oluşumunu engelleyecek hızda) şekilde hızla soğutma (B-C). 3- Östemperleme için 250°C-450°C sıcaklık aralığından 1-4 saat izotermal bekleme (C-E) [27].



Şekil 4.3. Östemperleme ısıl işleminin şematik gösterimi [45].

4.6. Östenitleme

Östenitleme genellikle 850°C-950°C sıcaklığı aralığında 1-2 saat süre ile yapılmaktadır. Çeliklerin tersine, dökme demirlerde östenitleme sıcaklık ve süresi oldukça önemlidir. Östenitleme sıcaklığını matris C içeriği belirler. Aynı zamanda homojen bir östenitik yapı için östenitleme süresinin de önemli olduğu bilinmektedir [28].

4.6.1. İzotermal Bekleme(Östempereleme)

Östempereleme genellikle 250°C-450°C aralığında 1-4 saat süre ile yapılmaktadır. Östempereleme sıcaklığı beynit morfolojisini etkilemektedir. 330°C'nin altındaki sıcaklıklarda alt beynit baskın morfolojisidir. Bu yapının oluşumu östempereleme zamanı ve dökme demir kimyasal kompozisyonundan bağımsızdır. Bununla birlikte, düşük östempereleme sıcaklarında C difüzyonu ferritin C ile aşırı doymasına neden olur ve ferritte ε-karbur çökelir. Üst beynit ise 330 °C'nin üzerindeki östempereleme sıcaklıklarında baskın morfolojidir. Yüksek östempereleme sıcaklarında serbest enerji değişimi küçük olmasına rağmen C difüzyonu hızlıdır. Bu ferrit çıtalarının büyümesi sırasında C'nun östenitte paylaşılmasına izin verir [28].

4.7. Östempereleme dönüşüm aşamaları

Östempereleme esnasında östenitin dönüşümü bazı araştırmacılara göre iki aşamada gerçekleşmektedir [22,45-48]. Bu aşamalar;

- I. Aşama: γ_0 (östenit) $\rightarrow \alpha_b$ (beynitik ferrit) + γ_{yk} (yüksek karbonlu östenit) + [Ösferrit]
- II. Aşama: γ_{yk} (yüksek karbonlu östenit) $\rightarrow \alpha$ (ferrit) + karbür

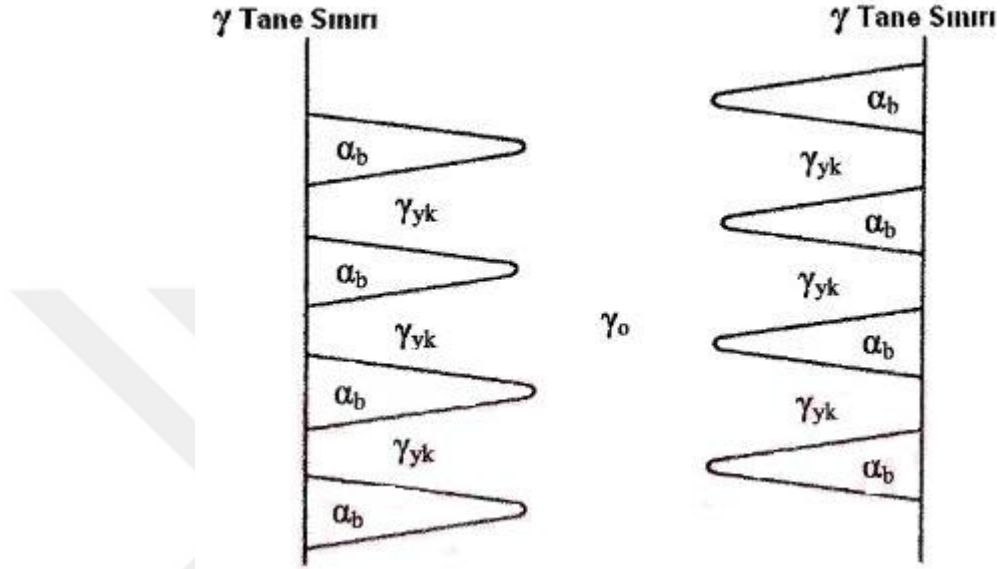
Bazı araştırmacılar ise tempereleme esnasında östenitin dönüşümünün üç aşamada gerçekleştiğini belirtmektedir [28,32,49-51].

- I. Aşama: γ_0 (östenit) $\rightarrow \alpha_b$ (beynitik ferrit) + γ_{yk} (yüksek karbonlu östenit) + γ_d (dönüşmemiş östenit)
- II. Aşama: α_b (beynitik ferrit) + γ_{yk} (yüksek karbonlu östenit) [Ösferrit]
- III. Aşama: γ_{yk} (yüksek karbonlu östenit) $\rightarrow \alpha$ (ferrit) + karbür

4.7.1. I. Aşama: ($\gamma_0 \rightarrow \alpha_b + \gamma_{yk}$)

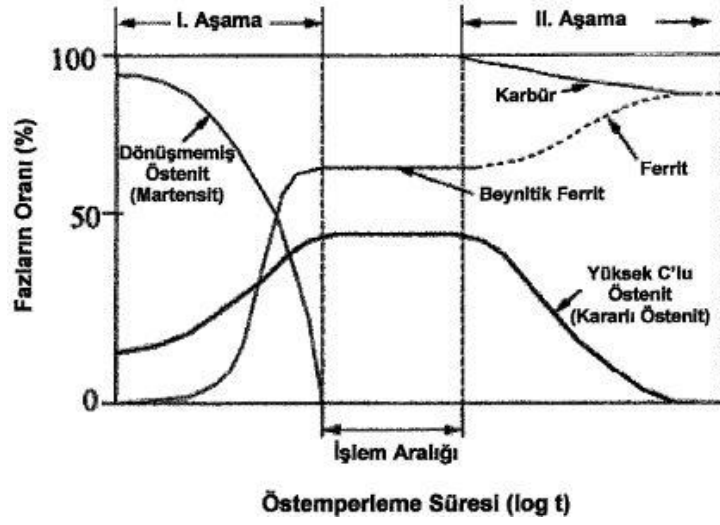
Bu aşamada östenit, beynitik ferrite ve yüksek karbonlu östenite dönüşür. Dökme demirlerde yüksek Si içeriğinden dolayı izotermal bekleme esnasında östenit çeliklerin tersine direk beynitik ferrit + karbüre dönmez, bunun yerine beynitik ferrit + yüksek karbonlu östenite (kararlı östenite) dönüşür [28,32]. Şekil 4.4'te gösterildiği gibi ilk önce östenit tane sınırından beynitik ferrit çekirdeklenir ve orijinal östenite (γ_0) doğru büyür. Ferriteki karbon atomları östenite difüze olarak östenitin karbon içeriğini artırır. Sonuçta

mikro yapı beynitik ferrit + yüksek karbonlu östenit diye adlandırılan "ösferrit"ten meydana gelir. Eğer orijinal östenitin tamamen ösferrite dönüşümü beklemeden (kısa östemperleme sürelerinde) malzeme oda sıcaklığına soğutulursa orijinal östenit yetersiz karbon içeriğinden dolayı ösferrite dönüşemeyecek ve martensite dönüşecektir.

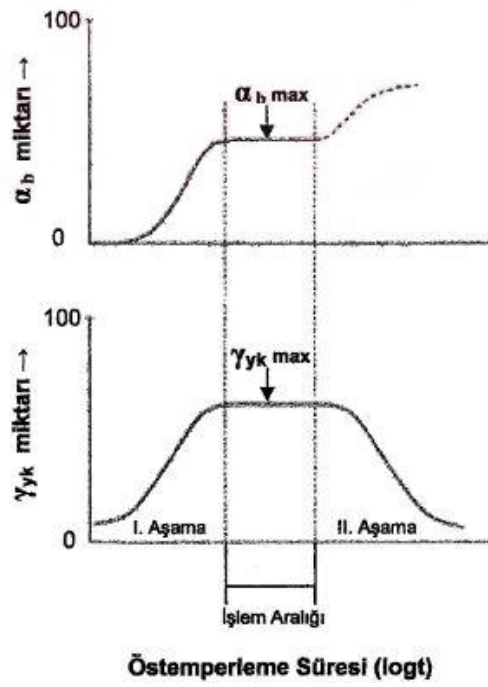


Şekil 4.4 I. Aşamada östenitten beynitik ferritik ve yüksek karbonlu östenit (ösferrit) oluşumunun şematik gösterimi [46].

I.aşamada mikro yapıda dönüşmemiş östenit (martensit) kalmadığı kabul edilmektedir. I.aşamada ilerleyen östemperleme süresi ile dönüşmemiş östenit (martensit) miktarı hızla azalmaktayken yüksek karbonlu östenit (kararlı östenit) ve beynitik ferrit miktarı artmaktadır (Şekil 4.5 ve Şekil 4.6). Yapıda hiç dönüşmemiş östenit (martensit) kalmadığı ve beynitik + yüksek karbonlu östenitin (ösferritin) en yüksek olduğu östemperleme süre aralığına "işlem aralığı" denilmektedir [26,28,32]. Bu aralıkta optimum mekanik özellikler sağlanmaktadır. Dönüşmemiş östenitin (martensitin) miktarını östenitleme sıcaklık ve süresi östemperleme sıcaklık ve süresi ve alaşım elementleri gibi faktörler etkilemektedir.



Şekil 4.5 Östemperleme süresine bağlı olarak fazların miktarlarındaki değişim [52].



Şekil 4.6 Östemperleme süresine bağlı olarak yüksek karbonlu östenit (kararlı östenit) ve ferritin miktarlarının değişiminin şematik gösterimi [53].

4.7.2. II. Aşama: ($\gamma_{yk} \rightarrow \alpha b + \text{karbür}$)

Bu aşamada yüksek karbonlu östenit (karalı östenit) ferrite ve karbüre dönüşmektedir. Uzun östempereleme süreleriyle difüzyona zaman verilmesi sonucu yüksek karbonlu östenitteki C atomları karbüre dönüşmekte ve karbon içeriği azalan östenit, ferrite bozulmaktadır. Böylece östempereleme süresi ilerledikçe yüksek karbonlu östenit miktarı azalırken ferrit ve karbür miktarı artmaktadır (Şekil4.4 ve Şekil4.5). Bu aşamada karbür oluşumu nedeni ile süneklik ve tokluk oldukça düşmektedir [28,32,45-53].

4.8. İndüksiyonla Yüzey Sertleştirme Isıl İşlemi

İndüksiyonla ısıtma, elektriksel kondüktörlerin oluşturduğu manyetik alan içerisine yerleştirilmiş metalik malzemelerde indüklenen akım ile ısı oluşturulmasıdır. Kondüktör ile malzeme arasında fiziksel temas bulunmamaktadır. Malzemede akımın indüklenmesi Faraday prensibine dayanmaktadır.

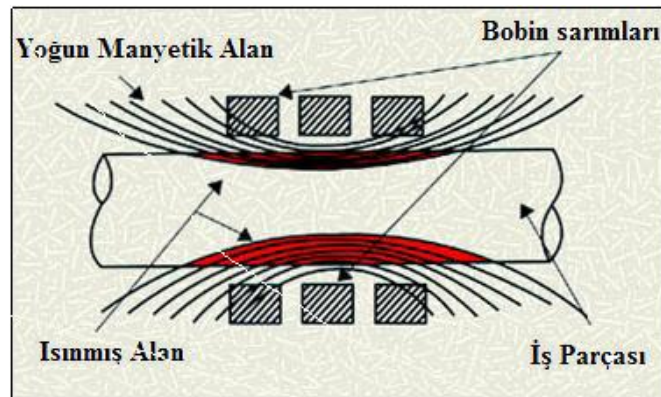
Elektromanyetik indüksiyon prensibi Michael Faraday'ın 1800'lü yıllardaki keşfiyle başladı [54]. Daha sonra endüksiyon ocakları ile ilgili ilk patent 1897'de İngiltere'de Ferranti tarafından alındı. Ticari anlamda ilk uygulamalar 1900 yılında İsveç'te ve 1906 yılında Almanya'da kurulan çelik ergitme ocakları yapısıyla gerçekleştirilmiştir. 20.yy'ın başlarında İsviçre'de, İtalya'da ve Fransa'da orta frekans bölgesinde eritme işlemleri için indüksiyon fırınları önerilmiştir ve bununla beraber reaktif gücün meydana getirdiği kompanzasyon sorununu giderebilmek için kondansatörlerin kullanılması gerekliliği ortaya çıkmıştır. 1916 yılında Dr.Northrup endüstri kullanımı için orta frekansta çalışan fırınları geliştirmiştir. Fakat şebeke frekansından daha yüksek bir frekans ile çalışmada en büyük sorun uygun boyutta kompanzasyon kondansatörlerinin bulunamayışının yarattığı sorunlar olmuştur. Kâğıt kondansatör üretimi ile bu sorun da çözümlenmiş ve şebeke frekansının üzerinde çalışma imkanları sağlanmıştır. İlk orta frekans ergitme ocağı 1927 yılında heffielde'da Electric Furnace Company (EFCO) tarafından gerçekleşmiş ve bundan sonra bu fırınların sayısı artmaya başlamıştır. Bu tarihten sonra paslanmaz çelik üretimi, metallerin işlenmesi ve özel alaşım hazırlanmasında kullanımı yaygınlaşmaya başlamıştır. İkinci dünya savaşından sonra otomotiv endüstrisinin gelişimi elektro manyetik endüksiyon ile ısıl işlemin önemini arttırmış, daha değişik uygulamaları için çalışmalar hızlandırılmış ve yüzey sertleştirme işlemleri için radyo frekansında ısıtıcılar geliştirilmiştir. Bu yöntemde nüfuziyet

derinliği kontrol edilebilirliği, kayıpların diğer sistemlere göre az oluğu, seri üretim için uygulama kolaylıkları, yüzey sertleştirme işlemlerinde elektromanyetik indüksiyon ile ısıtma yönteminin kullanımını yaygınlaştırmıştır [54-56].

İndüksiyon ısıtıcılarının ilk kullanılmaya başlandığı dönemlerde ilk yatırım maliyetlerinin diğer sistemlere göre yüksek olduğu bir gerçektir. Özellikle orta frekans ısıtıcılar (motor-alternatör grupları) hem ilk yatırım, hem de periyodik bakım giderleri açısından pahalı bir sistem oluşturmaktadır. 1966 yılından itibaren yarıiletken güç sistemlerinin geliştirilmesi ile endüksiyon ergitmede yeni bir devir başladı. Bu devrede son zamanlarda kaydedilen en önemli gelişme değişen frekanslı endüksiyon ocakları olmuştur. Yarıiletken teknolojinin gelişimi ile bu ekonomi sorunu önemini kaybetmiş ve bu alandaki çalışmaları günümüzde oldukça yaygınlaşmasını sağlamıştır [54-57].

4.8.1. İndüksiyonla Isıtma Mekanizması

İndüksiyonla ısıtma, parçanın yüzeyinde oluşan alternatif manyetik alanın eddy akımlarını ve histerezis kayıplarını parçada indüklemesiyle ısı oluşturan bir yöntemdir. Alternatif manyetik alan, iş parçası etrafını çevreleyen veya iş parçasına paralel olarak tutulan, üzerinden alternatif akım geçen indüksiyon bobini tarafından oluşturulur [54]. şekil 4.7 de gösterildiği gibi manyetik alan içerisine yerleştirilmiş iş parçasındaki ısı oluşumu.



şekil 4.7 İş parçası çevresindeki akım taşıyan bir bobinin oluşturduğu manyetik alan ile ısı oluşumu [58].

Bobinlerin yüksek frekanslı alternatif akım geçirilerek, yüksek frekanslı bir manyetik alan oluşturulur. Manyetik alan, iş parçası içinde eddy akımları ile histerezis akımları oluşturur. Oluşan yüksek frekanslı akımlar, iş parçası üzerinde hareket ederler. İş parçası bu

akımlara karşı gösterdiği direnç nedeniyle ısınma sağlanır ve böylece iş parçasının iç kısmı ısıtılmadan yüzeyi ısıtılır [59].

4.8.2. Nüfuz Derinliği

İş parçası üzerinde oluşturulan eddy akımlarının iş parçasının yüzeyinden itibaren ulaşabileceği derinliğe kadar olan kısma dalma etkisi denir. İş parçasının merkezine doğru gidildikçe eddy akımının etkisi azalmaktadır. İndüksiyonla ısıtmada önemli bir büyüklük olarak malzemenin cinsine, kalınlığına ve amaca göre uygun frekansın belirlenmesini sağlayan nüfuz derinliği, akım yoğunluğu (e^{-1}) değerine bağlı olarak değişen manyetik alanın büyüklüğüdür ve aşağıdaki formülle ifade edilir [60].

$$\delta = 503. \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r \cdot f}} \quad 4.1$$

Burada;

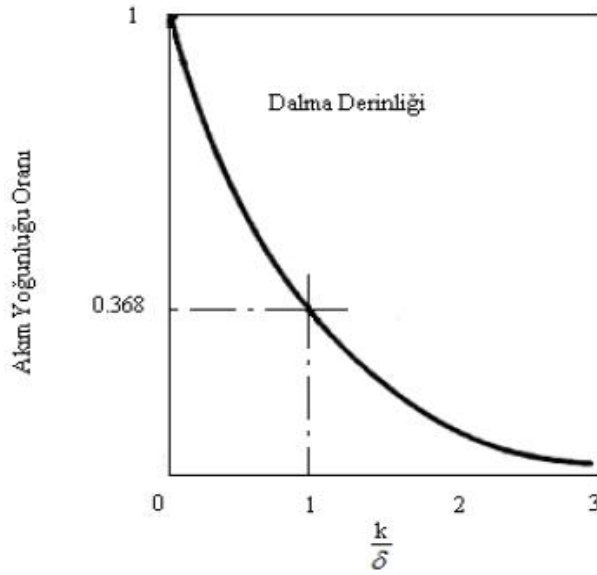
δ : Nüfuz derinliği (mm)

ρ : Özgül direnç ($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$)

f : Frekans (Hz)

μ_r : Bağlı manyetik geçirgenlik (A/m)

Eşitlikten görüleceği gibi frekansın artması deri kalınlığını azaltır. Dolayısıyla akım parçanın en dış yüzeyinde dağılır [31,39]. Dalma derinliğinin malzemenin ρ ve μ katsayılarına bağlıdır. Bu sabit katsayılar sıcaklığı değiştirir. Buna bağlı olarakta iş parçasında istenilen derinliği elde etmek için bu değerler göz önünde bulundurulması gereken en önemli etkenlerdendir [61].



Şekil 4.8 Dalma derinliğinin üstel olarak azalması

Şekil 4.8 de görüleceği üzere k iş parçasının kalınlığıdır. Dolayısıyla iş parçasının dışında akım yoğunluğu maksimumdur. İş parçasının merkezine doğru inildikçe etkisi azaldığı görülmektedir [61].

Formül 4.1’de görüldüğü gibi damla derinliğine frekansın etkisi büyüktür. Genelde seçilen frekans; 10.000 – 500.000 Hz değerleri arasında değişir. Tablo 4.3’de frekansın damla derinliğine etkisi verilmiştir [59].

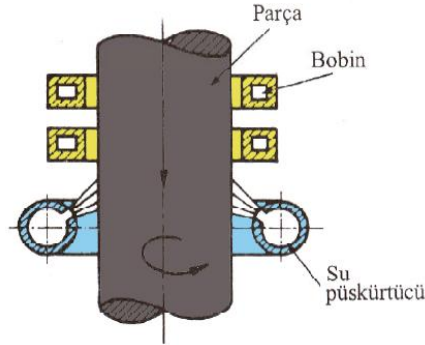
Tablo 4.3. Frekansın damla derinliğine etkisi [59]

Frekans (Hz)	Elektrik enerjisinin Girme derinliği (mm)	Sertleşme derinliği mm
1.000	1,50	4,60-8,90
3.000	0,90	3,80-5,10
10.000	0,50	2,50-3,80
120.000	0,15	1,50-2,50
500.000	0,08	1,0-2,0
1.000.000	0,05	0,25-0,75

4.8.3. İndüksiyonla Yüzey Sertleştirme

İndüksiyon yüzey sertleştirme parçanın tamamında sertlik istenmediği durumlarda kullanılan alternatif bir ısıtma işlemi türüdür. İndüksiyonla yüzey sertleştirme işlemi, şekil 4.9

da görüleceği gibi iş parçasının yüzeyini hızlı bir şekilde östenitik şartlara ısıtma ve sert martensitik katman dönüşmesi için ani soğutma yapılan bir işlemdir.



Şekil 4.9 İndüksiyonla yüzey sertleştirme işleminin şematik gösterimi

Soğutma ortamı olarak su veya yoğunluğu ayarlanmış yağ kullanılır. Bu sayede parçaların istenen bölgeleri sertleştirilirken diğer bölgeler ise yumuşak kalır. Suda sertleştirme ısıtılmış çelik parçanın soğutulmasında en yüksek soğuma hızı parça ve su arasındaki sıcaklık farkının en yüksek olduğu durumda değil, bu aradaki farkın 350 ila 400°C olduğunda görülür. Suda görülen bu durum yağ gibi diğer sıvılarda da 400°C geçerlidir. Su ile sertleştirme yağ ile sertleştirmeye göre üç kat daha fazla iyi sertleştirir. Suda sertleştirme endüstride kullanılan en etkili ve en yaygın sistemdir, çünkü ekonomik ve kolaydır. Yağda sertleştirme yağın soğutma gücü suyun 1/3'ü kadardır. Suda ve yağda soğutmanın yanı sıra nadiren de olsa havada da soğutma yapılır [62]. İndüksiyonla yüzey sertleştirme işlemi genellikle otomotiv sektöründe, dişli çark, krank mili, şaft gibi malzemelerin yüzeyinin sertleştirilmesinde kullanılır. Ayrıca düşük karbonlu çeliklerin ve dökme demirlerin mekanik özelliklerini istenilen duruma getirdiği için bu yöntem terci edilmektedir [63].

4.8.4. İndüksiyonla Sertleştirme İşleminin Avantajları ve Dezavantajları

4.8.4.1. Avantajları

1. İndüksiyonla yüzey sertleştirmede, malzemenin ısınma süresi çok düşük olduğundan çevrenin ısınması çok azdır.
2. Bu yöntem ile parça kısa sürede ısındığından etrafa gaz yayılmaz ve daha temiz çevre sağlanır.
3. Küçük tesislerde bile kullanılabilir,

4. Sürekli bir üretim (seri üretim) için kullanılmaya çok uygundur,
5. Alevle sertleştirmeye oranla daha yüksek ısıl girdisi sağlanır,
6. Elektrik ortamında otomatik kontrol sayesinde ısıtma daha iyi ayarlanır,
7. Parçaların seri imalatında zaman ayarı, elektriksel olarak yüzeye tatbik edilen sıcaklığın ve nüfuz derinliğinin otomatik olarak ayarlanması oldukça kolaydır [59,63].

4.8.4.2. Dezavantajları

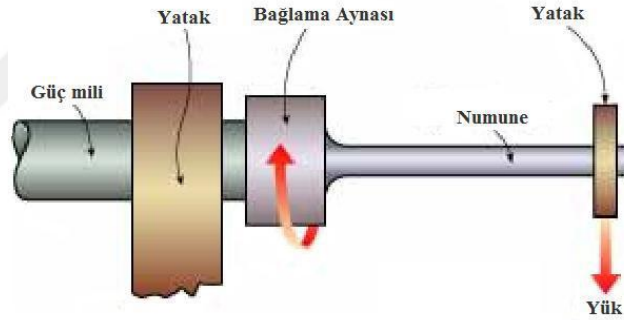
1. En önemli dezavantajı elektrik üretim ve ayarlama aletleri olan tesis oldukça masraflıdır.
2. Sargıların imal edilmesi ve geliştirilmesi oldukça pahalıdır,
3. Komplike sargıların gerektiği durumlarda ve bunun yanında parça sayısı da çok az ise sertleştirme maliyeti çok artar,
4. Bu yöntem malzeme seçimine sınırlama getirmesi de iyi olmayan yönlerindendir,
5. Düşük karbon miktarlı parçalarda diğer yöntemle ulaşabilen sertlik değerlerine ulaşamaz, yüksek karbonlu çeliklerde ise çatlama tehlikesi meydana çıkar,
6. Keskin kenar ve köşeli parçaların bu bölgelerinde aşırı ısınmalar meydana geleceği için güçlükler oluşur [59,63].

5. MEKANİK TESTLER

5.1. Yorulma

Makine parçaları ve yapı elemanları kullanılırken tekrarlanan yüklere maruz kalırlar. Bu da malzemede değişen gerilmelere sebep olur. Bu değişen gerilme altında çalışan metalik parçalarda, gerilmeler parçanın statik dayanımından küçük olmasına rağmen belirli bir tekrarlama sayısı sonunda metal yüzeyinde bir çatlama ve bu çatlama sonucunda metalde kopma meydana gelir. Bu olaya yorulma adı verilir [64].

Yorulma üzerine yıllarca birçok araştırma yapılmıştır. İlk olarak Alman August Wöhler 1850'lerde demiryolunun sistematik yorulma araştırmasını yapmış ve geliştirmiştir. Wöhler demir yolu aksları üzerinde ve küçük oranlarda eğilme, burulma ve radyal olarak yinelenen yükler üzerinde çalışmış ve buradan elde ettiği verilerle S-N diyagramlarıyla yorumlamıştır [64,65].



Şekil 5.1 Wöhler yorulma testi

Şekil 5.1'de görüldüğü gibi numune bağlandıktan sonra numune üzerine uygulanan yük ile numune üzerinde çekme ve basma gerilmeleri oluşur. Numunenin dönmesiyle birlikte bu gerilmelerin yeri de değişecektir. Böylece numunenin orta noktasında çekme-basma kuvvetleri oluşacaktır. Buradaki gerilme malzemeye uygulanan kuvvete göre değişecektir. Uygulanan yükün miktarına bağlı olarak etki eden gerilim;

$$\sigma = 10,18 \times \frac{F.l}{d^3} \text{ bağıntısı ile hesaplanır.} \quad (5.1)$$

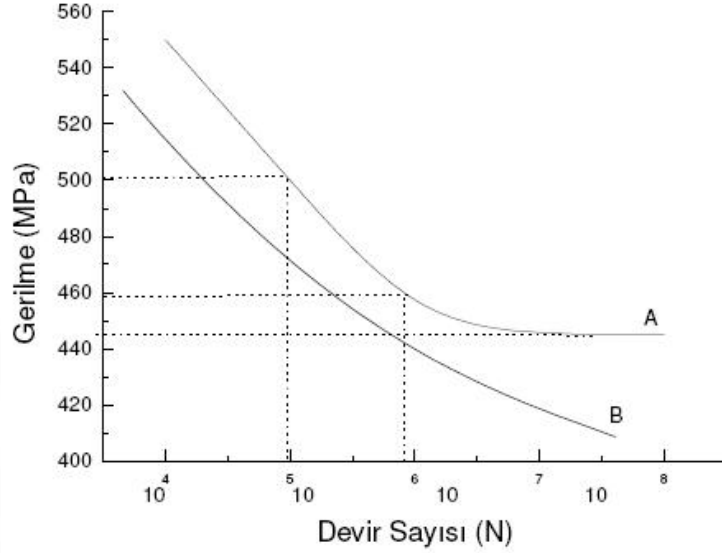
Burada;

F: Numuneye uygulanan kuvvet (N/mm²)

L: Moment kolu (mm)

d: Numunenin çapı (mm) göstermektedir.

Bir dizi yapılan deneyler sonunda elde edilen veriler Şekil 5.2'deki gibi devir sayıları ile uygulanan kuvvet arasındaki ilişki gösterilir.

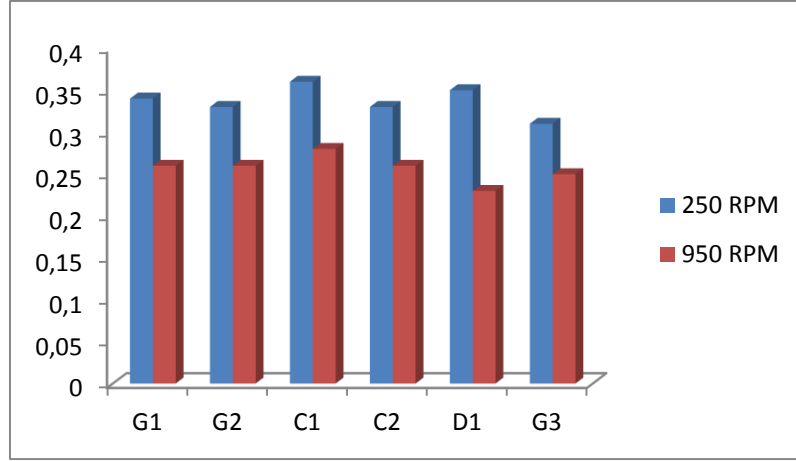


Şekil 5.2 Bir malzemenin yorulma eğrileri [65]

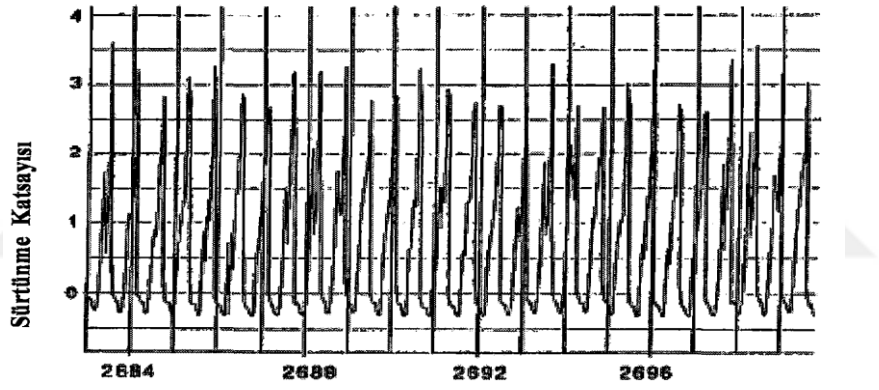
Burada A malzemesinin yorulma dayanımının 445MPa olduğu görülmektedir. Bu malzeme 445MPa yük altında uzun süre çalışabilir. B malzemesi ise 405MPa civarlarındaki yüklere dayanmaktadır. Bu yüklerin üzerine çıkıldığı zaman malzemelerde kırılma meydana gelmektedir [65]. Özellikle metalik malzemeli yapıların çökmesinde en önemli faktör yorulma olayıdır. Bu tür hasarlar polimer ve seramik malzemelerde de meydana gelebilir.

5.2. Aşınma

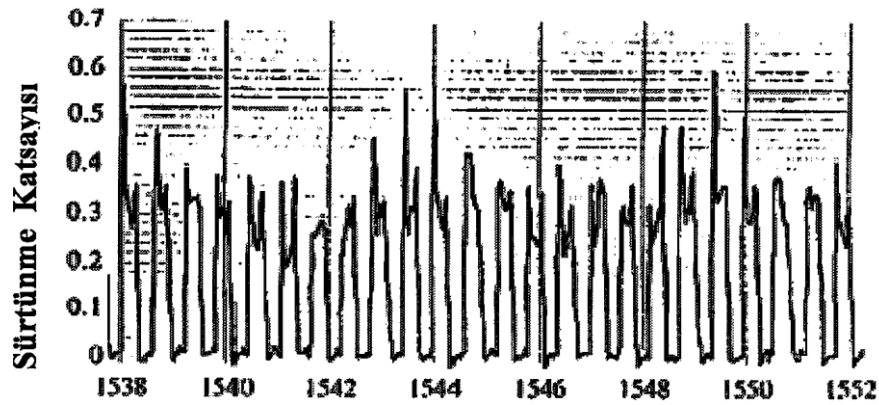
Birbiri ile temasta olan malzeme yüzeyleri oksit filmleri yağlayıcılar ile kuran salar bile, mekanik yüklemeler altında oksit tabakasının veya yağlamanın bozulması iki yüzeyin birbirine doğrudan temasına sebebiyet verebilir. Bu temas malzemenin çalışma şartlarındaki ömrünü ve performansını sınırlayan aşınmaya sebep olur. Aşınma bir yüzeyden diğer yüzeye malzeme transferi veya aşınma parçacıklarının oluşumu sonunda ortaya çıkan malzeme kaybıdır [5].



Şekil 5.3 90N yük altında ve farklı kayma kızlarında östemperlenmiş farklı dökme demir numunelerini sürtünme katsayıları (G1 ile D1 perlitik gri dökme demir, G3 ise demiryollarından temin edilen işlemsiz demiryolu fren pabucu dur) [5,66]



(a) Süre, Dakika



(b) Süre, Dakika

Şekil 5.4 Kayma süresi ile sürtünme katsayısı arasındaki değişimi (a) Döküm durumu KGDD ve (b) ÖKGDD [5,67]

Bir katı yüzeyden malzemenin ayrılması, ergime, kimyasal çözünme veya fiziksel kuvvetler nedeniyle yüzeyden atomların ayrılması, korozyon bir ortamda mekanik ve kimyasal etkenlerin kombine etkisinden kaynaklanabilmektedir [5,68].

ASTM standartlarına göre aşınma, birbirine göre nispi hareket yapan yüzeyler arasında katı yüzeylerin tahribata uğraması sonucu malzeme kaybı olarak tanımlanmaktadır [5,69]. Aşınma, genellikle temas eden yüzeylerden mekanik etkilerle malzeme kaybı olarak tanımlanır. DIN 50320 ve ASTM G40-93 standartlarına göre aşınma “kullanılan malzemelerin başka malzemelerle (katı, sıvı, gaz) teması neticesinde mekanik etkenlerle yüzeyden küçük parçacıkların ayrılması sonucu meydana gelen istenilmeyen yüzey bozulması” şeklinde tanımlanmaktadır. Katı cisimlerin yüzeyleri oksitlerle ya da yağlayıcılarla kaplılar bile, oksit filminin mekanik yük altında parçalanır ve yağlayıcının koruyucu etkisinin zayıf olduğu yerlerde yer yer katı-katı teması olur. Bu temaslar ise aşınmaya neden olmaktadır [5,70-77]. Aşınmanın tanımlanması ve kendi aralarındaki karşılıklı ilişkinin şeması Şekil 5.5’te gösterilmiştir [78].

Malzemelerde meydana gelen yıpranma olayının aşınma sayılabilmesi için belirtilen kriterlerin oluşması gerekmektedir:

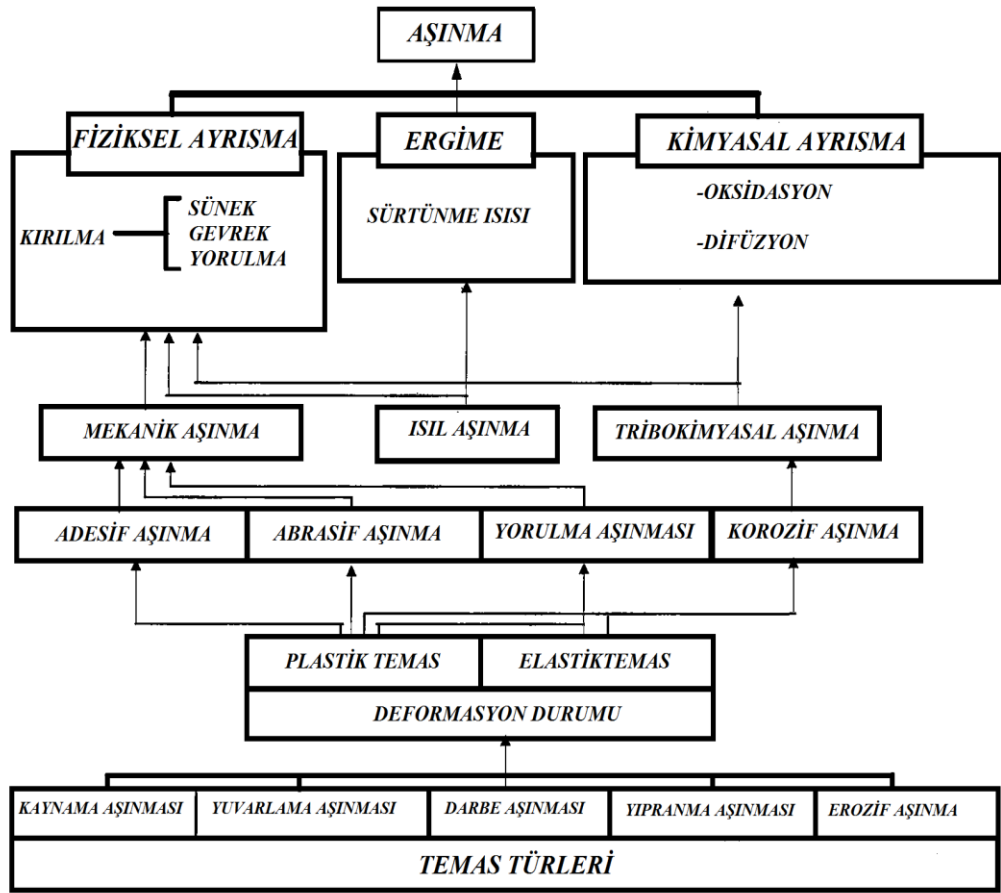
- 1-) mekanik bir etkinin olması,
- 2-) sürtünmenin olması,
- 3-) yavaş yavaş fakat sürekli olması,
- 4-) malzeme yüzeyinde değişiklik meydana getirmesi,
- 5-) istenmediği halde meydana gelmesi.

Bir malzeme aşınma miktarını etkileyen parametreler; sıcaklık, temas alanı, sürtünen yüzeylerin fiziksel veya kimyasal durumu (pürüzsüzlük durumu oksit tabakası gibi etkenler), malzemenin kristal yapısı ve mekanik özellikleri (sertlik gibi) yüzeyde bir yağ tabakasının bulunup bulunmaması ve aşınmayı önleyici ilavelerin bulunmamasıdır [67].

Aşınma iyi belirleyen sebepler; kazıma, çarpma gibi eskilerden dolayı dislokasyonların oluşması veya dislokasyon hareketi ile plastik deformasyon, kırılma, faz dönüşümleri ve kimyasal reaksiyonlar sebebiyle yüzeylerin fiziksel ve kimyasal değişimlere uğraması ve atomik ölçekte temas yüzeylerinden birbirlerine elektron transferi sebebiyle meydana gelen yapışmalıdır [5,68].

Aşınma oluşumunda, kullanılan malzemenin sertliği etkili olmaktadır. Genellikle metallerin sertliği arttığında aşınma miktarı azalır [5,68]. Başka bir ifadeyle sertliği yüksek olan malzemeler sertliği düşük olan malzemelere göre daha az aşınır. Malzemenin

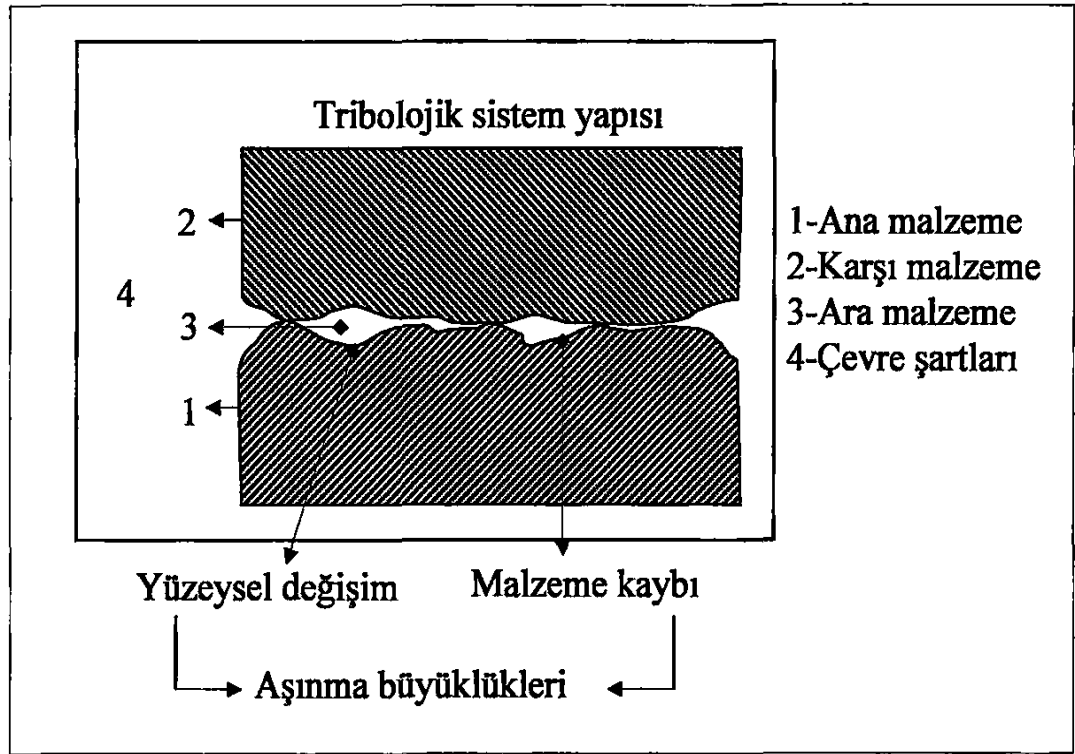
yapısından kaynaklanan aşınma olaylarında deney yapılan ortamın etkisinin de dikkate alınması gerekir. Sürtünmeden veya çevre şartlarından kaynaklanan sıcaklık aşınmayı ve etkileyen en önemli parametrelerden birisidir. Sıcaklığın artması ile birlikte malzemede oluşan kayıplarda oldukça büyük artışlar meydana gelmektedir. Yüksek sıcaklıklarda malzemenin mikro yapısı ve sertliği değişime uğrayacağından oluşacak aşınma da değişime uğrayacaktır.



Şekil 5.5 Aşınmanın tanımlanması ve kendi aralarındaki karşılıklı ilişkisinin şematik gösterimi [5,78]

Aşınmayı analiz ederken, aşınmayı etkileyen parametrelerin birleşik etkileri dikkate alınmalıdır. Yani aşınma, bir sistem içerisinde değerlendirilmelidir. Temas halinde bulunan iki katı yüzeyde, malzeme kaybı üç şekilde gerçekleşebilir. Bunlar bölgesel erimeler, kimyasal çözünme ve yüzeyden fiziksel anlamda oluşan ayrılma. Uygulamada aşınma kapsamına, daha çok yücelen fiziksel anlamda ayrılan malzemenin sebep olduğu hasarlar dâhil edilmektedir [5,79].

Bir aşınma sisteminde; ana malzeme (aşınan), karşı malzeme (aşındıran) ara malzeme ve yük, hareket (çevre şartları) temel unsurlar olarak sayılabilir. Bütün bu unsurların oluşturduğu sistem, teknikte “tribolojik sistem” olarak adlandırılır ve Şekil 5.6 da böyle bir sistem şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 5.6 Bir tribolojik sistemin şematik gösterimi [5,80]

Bu temas sonucunda oluşan sürtünme, malzemenin çalışma şartlarındaki ömrünü veya performansını sınırlayan aşınmaya sebep olur. Bu hassas uygun yağlanma, filtreleme, uygun malzeme seçimi ve uygun tasarım gibi faktörlerle en aza indirilebilir, ancak tamamen önlenemez.

Aşınma, çeşitli yönleri ile korozyona benzer. Bu iki hasar türü de zamanla kendiliğinden gelişir, her ikisinin de oluşumu önceden bir derecede bilinebilir, her ikisinin de çeşitli türleri vardır. Aşınma da korozyon gibi bir yüzey olayı olduğundan, yüzeyi etkileyen her değişken aşınma davranışını da etkiler. Aşınma, temelde bir yüzey hasarıdır. Aşınma hasarları kapsamına giren yüzeyden malzeme kaybı, kırılma, talaş oluşumu, yorulma, kimyasal çözünme ve difüzyon yoluyla gerçekleşebilir.

Aşınma olayında, meydana gelen hasarı değerlendirmek oldukça önemlidir. Yüzeylerde oluşan hasar türleri ve her bir hasarı önlemek amacıyla kullanılacak koruma yöntemi, uygulamadan uygulamaya farklılık gösterir. İstenmeden meydana gelen aşınma olayı, çeşitli makine ve teçhizat kullanımı sırasında çok büyük ekonomik kayıplara (enerji, işgücü, malzeme vs.) neden olmaktadır. Örneğin ABD'de de 1978 yılı itibari ile işleme maliyeti 70milyar dolar/yıl ve takım maliyeti ise 900 milyar dolar/yıl gibi çok yüksek değerlere ulaşmıştır [5,80].

5.2.1. Aşınmayı Etkileyen Faktörler

Aşınma karmaşık bileşenler bütünlüğüdür ve bu parametreleri hepsinin etkisi farklı olmaktadır. Bu nedenle bu parametrelerin birbirinden bağımsız olarak dikkate alınması aşınmayı değerlendirmede objektif bir yaklaşım olmamaktadır. Aşınmayı etkileyen parametreler sınıflandırılırken tribolojik sistem bütünlüğü içerisinde yapılması daha objektif bir yaklaşım olur. Bu faktörler, aşağıdaki gibi dört gruba ayrılmaktadır:

- 1-) Ana malzemeye bağlı faktörler; malzemenin kristal yapısı, malzemenin sertliği, elastikiyet modülü, deformasyon davranışı, yüzey pürüzsüzlüğü, malzemenin boyutu,
- 2-) Karşı malzemeye bağlı faktörler ve aşındırıcının etkisi; aşındırıcının tane büyüklüğü (tane şekli, tane dağılımı),
- 3-) Ortamın etkisi; sıcaklık, nem, atmosfer
- 4-) Servis şartları; basınç, hız ve kayma mesafesi

5.2.2. Aşınma Mekanizmaları

Aşınma hareketli makine parçalarının ömürlerini, performanslarını azaltan ve bu parçaların bozulmasına neden olan çok önemli bir faktördür. Bu sebeple, ekonomik açıdan aşınmanın neden olduğu kayıplar ve hasarla oldukça fazla olmaktadır.

Aşınmanın meydana gelmesi ve sürekliliği için parametrelerin tribolojik sistem içerisinde yaptığı kimyasal ve fiziksel etkilerin iletilmesine göre aşınma mekanizmaları aşağıda açıklanmıştır. Tribosistemi, daha çok dinamik parametreler, malzeme parametreleri ve atmosferik parametreler belirlemektedir. 4 tane ana ve önemli aşınma mekanizması vardır. Bunlar adhesif aşınma, abrasif aşınma, yorulma aşınması, korozyon aşınma, olarak sınıflandırılır [5,78]. Aşınma ve aşınma yüzeyleri arasındaki ilişki Tablo 5.1 de verilmiştir.

Tablo 5.1 Aşınma ve aşınma yüzeyleri arasındaki ilişki [5]

Aşınma türleri	Yüzey	Aşınma Partükülleri
Adhesif	Transfer	Normal boyut (10µm ve daha fazla)
	Plastik deformasyon	
Abrasif(İki gövdeli)	Yüzey sertliği	Mikro kırıntılar
	Paralel yivler	
Aşındırıcı	Renklendirilmiş film yüzeyi	İnce talaş, kimyasal reaksiyon
	Homojen olmayan görünüm	sonucu üretim
Delaminasyon-aşırı yorgunluk	Yüzeye paralel çatlaklar	Levha partikülleri
	İnce tabakalar	Çok ince
	Plastik deformasyon	
Kırılma aşınması	At nalı kırılma, yüzeye dik	Büyük partiküller
		Köşeli partiküller
		Kırık partiküller
Kemirme	Bir halka veya ayrılmış biçimde aşınma grafiği	İlişkinin dışındaki küme
	Çeşitli derinlikte yüzeydeki çatlak başlangıcı	
Erozyon	Rasgele görünüm	Mikro kırılma
	Etki izleri, paralel yivler	
	Plastik deformasyon	
Kavitasyon	Boşluklar	Mikro ince tabakalar ve ölçüler
	Çöküntü bölgesindeki hatalar	

5.2.2.1. Adhesif Aşınma

Aşınma birim zamanda veya birim kayma mesafesinde ağırlık ve hacim kaybı olarak nitelendirilebilir. Adhesif aşınma, en yaygın şekilde oluşan bir aşınma türüdür ve katıl malzemenin diğer yüzey üzerinde kayması veya basınç uygulaması ile oluşur. [5,81,82] Diğer bir tanımlama ise, iki yüzey içerisinde abrasifler olmaksızın nispi yüksek hareketle partiküllerin uzaklaşmasıyla meydana gelir. Temas yüzeyleri içerisinde kaymayla aşınma oluştuğunda yapışan bölgeler dağınık şekildedir. Bu çok büyük aralık da aşınma hızının sonucudur [5,83]. Sürtünme ve aşınma tribosistemi oluşturur. Sürtünme katsayısı ve aşınma tribosistem içerisinde temas durumunda tanımlanan parametrelerdir ve bu parametreler temas durumundaki cisimlerin malzeme sabiti değildir. Tribo-element olarak kullanılan birçok metal alaşım vardır. Bunlar Cu, Al, Sn, Zn demir ile veya diğer metallerle alaşımlandırılmıştır. Bu alaşımlar genel olarak iki veya daha fazladır ve bu fazlardan bir tanesi sert faz diğeri ise yumuşaktır [5,84].

İki yüzeyin yüklenecek belirli bir kayma hızında birbirine göre nispi hareketinde adhesif aşınma oranı ile malzeme özellikleri, yük ve kayma hızı arasında ilişkinin belirlenmesinde yaygın olarak Archard eşitliği kullanılır [5,81,82]. Metal adhesif aşınma oranı yüzey üzerinde oksit tabakasının oluşmasına bağlı olarak sıcaklığın düşmesiyle yükselir. Bu fenomen oksidatif aşınma olarak bilinir ve Jian tarafından geliştirilmiş bir modeldir. Aşınma ürünlerinden büyük partikülleri kırılarak küçük partiküller oluşur, bunlar oksitlenir, sinterlenir ve aşınma yüzeyini kaplarlar. Yüksek hızlarda aşınma oranı, sıcaklığın yükselmesiyle oksit tabakası oluşur ve adhesif aşınmadan oksidatif aşınmaya geçiş meydana gelir buna bağlı olarak da aşınma oranı azalır [84]. Triboloji, malzemenin aşınmasında, en az anlaşılan fakat en önemli branştır. Bununla birlikte malzemelerin aşınma direnci basit bir malzeme özelliği değildir, ancak tüm malzemeleri ve sistem içerisindeki bileşenleri kapsar [86-88].

Tasarımcıların ve mühendislerin aşınma dirençli malzeme seçiminde mikro yapı ve mikro yapının aşınma direnci üzerine etkisini çok iyi bilmesi önemlidir [87]. Kayma aşınması sırasında sürtünmeyle oluşan ısı, normal yük ve teğetsel yükün oluşturduğu gerilim alanı sonucu mikro yapı da ve yüzey tabakası özelliklerinde değişime sebep olmaktadır [89]. Temas halinde kayan yüzeylerin arasındaki sıcaklığını ve gerilimin ölçümü oldukça zordur. Kayma sırasında oluşan dinamik değişimler aşınma mekanizmalarındaki değişimler de oldukça aydınlatıcı bilgi vermelidir. Malzemenin aşınma direnci için malzemenin orijinal

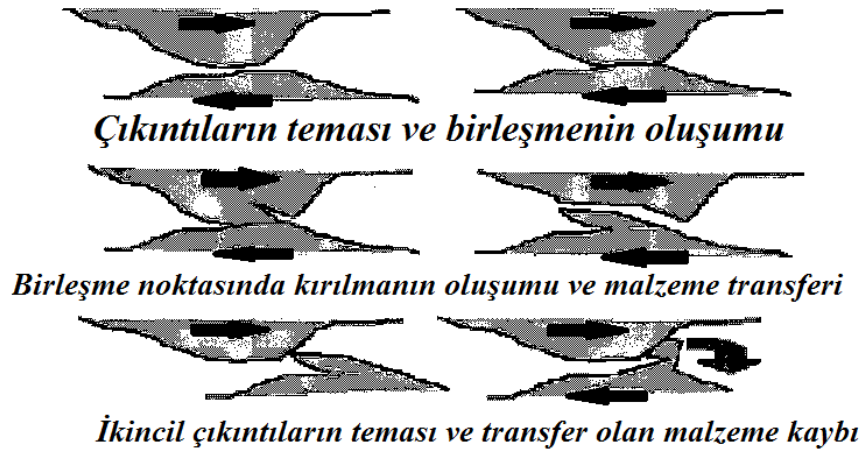
yapısı ve özelliklerinin bir kriter olmayacağı bunun yanı sıra özgül aşınma şartları altında dinamik değişkenlerin etkilerinin her bir malzeme için göz önüne alınması gerektiği bilinmektedir [87,89,90]. Diğer bir çalışmada ise yüzey tabakası içerisindeki mikro yapısal değişimler ve aşınma direnci arasındaki ilişki olduğu konusunda araştırmacılar hemfikirdirler Tribolojistlerin çoğu malzemenin sürtünme ve aşınma karakteristiğinin bir sistem ile belirlenebileceğini belirtmişlerdir, bunun yanında malzeme ve sistem değişkenleri arasında karşılıklı ilişki çoğu zaman unutulur. Çünkü sürtünme ve aşınma dinamik prosestir, bu proses sırasında malzemenin yüzey tabakalarında yapılı ve özellikler oluşur, bu yapıların ve özelliklerin aşınma üzerindeki etkileri oldukça önemlidir. Dinamik mikro yapısal değişimler ve aşınma davranışı arasındaki ilişkiyi anlatabilmek için sürtünme ve aşınma sırasında oluşan yapılar ve özelliklerin çok iyi anlaşılması gerekmektedir [87,89,91].

Adhesif aşınma, bir metal yüzeyinin bir başka metal yüzeyindeki bağlı hareket sırasında, birbirlerine yapışmış yüzeydeki çıkıntıların kırılması sonucu ortaya çıkar. Uygulamada adhesif aşınma özellikle metaller arasındaki kayma sürtünmesi nedeniyle meydana gelir ve aşınma parçacıkları yumuşak olan metalden kopar. Eğer ik metal aynı sertlikte ise aşınma her iki yüzeyde de oluşur. Malzemeler arasındaki yağlamanın mükemmel olması, adhesif aşınmayı azaltmaktadır. Yüzeye etki eden yükün azaltılmasıyla da adhesif aşınma azalır. Malzemenin sertliğinin artırılması da adhesif aşınmayı azaltmaktadır. Adhesif aşınmanın yüzeye etkileyen normal yüke, kayma mesafesine ve aşınan malzemenin yüzey sertliğine bağlı olduğu ifade edilmektedir. Malzeme özelliklerinin adhesif aşınmaya etkileri Tablo 5.2 de verilmiştir.

İki ayrı metal yüzey basınç altında Şekil 5.7’de olduğu gibi bir araya getirildiği zaman, iki ayrı yüzeyde bulunan karşılıklı çıkıntılar gerek sürtünme neticesinde oluşan ani ısı, gerekse soğuk yapışma etkisi nedeniyle birbirleriyle bağ yaparlar. Meydana gelen bu bağ, birleşen çıkıntıların diğer bölgelerdeki bağ yapısından daha güçlü olabilir. Yüzeylerin birbirlerine karşı olarak yaptığı hareketinin devam etmesiyle birleşen iki çıkıntı, bağ kuvvetinin en zayıf olduğu noktadan kopar. Bu kopma kaynak noktasında meydana geldiği zaman, bir yüzeyden diğer yüzeye malzeme transferi meydana gelir. Bu prosesin çalışma şartlarında birçok kez tekrarlanmasıyla, adhesif aşınma kendisini hissettirecek boyutlara ulaşır.

Tablo 5.2 Malzeme özelliklerinin adhesif aşınmaya etkisi [05,80]

Özellik		Adhesif aşınma
Oksitli yüzey		AZ
Kristal yapı	Kübik	AZ
	Hegzagonal	ÇOK
Yüksek deformasyon sertleşmesi üstü		ÇOK
Yüksek sertlik		AZ
Yüksek elastisite modülü		AZ
Yüksek ergime noktası		AZ
Yüksek yeniden kristalleşme sıcaklığı		AZ
Küçük atom çapı		AZ



Şekil 5.7 Adhesif aşınmanın meydana gelişini şematik olarak gösterimi [05]

İki çıkıntının buluşması ve oluşumu, b) Bağı koparak bir yüzeyden diğerine malzeme transferinin oluşumu ve c) Uzamış olan çıkıntının diğer yüzeydeki çıkıntı ile etkileşimi sonucunda yüzeyde kırıntı oluşumu [05,92].

Adhesif aşınma, özellikle birbiriyle kayma sürtünmesi yapan malzeme çiftinde meydana gelen yapışma olayının bir sonucudur. Birbiri üzerinde kayan iki yüzeyin, ancak küçük bir kısmı temas halindedir ve bu küçük temas hücrelerindeki gerilmeler çok küçük yüklemelerde dahi akma dayanımı değerine ulaşırlar ve geçerler. Böylece, moleküler

yapışma kuvvetleri etkisini gösterir. Bu nedenle bir parçadan diğerine malzeme geçişi, soğuk yapışma ve küçük parçacıkların kesilmesi ile meydana gelir.

İki yüzeyin temas sonucu aşınma meydana gelir, yağlamalı ve kuru kayma aşınması olarak iki türdür. Bununla birlikte aşınma mekanizmaları ortam şartları dışında aynıdır. Yağlamalı şartlarda bazı yüzeylerde temas oluşur veya adhesif aşınma meydana gelir. Bununla birlikte, yalamalı şartlarda yağ içerisindeki sert partiküller nedeniyle abrasif aşınma da meydana gelebilir. Yüzey teması başlangıcında düz yüzeyler nedeniyle mükemmeldir. Her bir yüzeyde çıkıntılar oluşur, bu çıkıntılar mikroskobik büyüklüktedir. Yüzey basıncı oldukça makul ise ve basınç uygulandığında toplam bölge içerisindeki basınç oldukça yüksek değerlere ulaştığı takdirde, her bir yüzey üzerindeki çıkıntılar deformasyona uğrayarak tema sağlanır. Birim gerilim malzemenin akma noktasını kolayca geçebilir, çıkıntılar deforme olur ve çalışma sertleşmesi meydana gelir ve bu nedenle temas sağlanır. Gerilim oldukça fazladır bu da bölgesel olarak metallerin ısınmasıyla yumuşama noktasına ulaşır. Oksidasyon meydana gelir veya yüzeylerde bölgesel yapışma sonucu kasma oluşur.

Kuru kayma şartlarında yapılan adhesif aşınma deneylerinde aşınma kaybının; deney yükü ve kayma mesafesiyle doğru orantılı ve aşınan yüzeyin sertliği ile ters orantılı olduğu belirtilmektedir. Bunlara ilaveten aşınma hızı ve test süresi de etkili olmaktadır. Aşınma ile malzeme kaybı, kayma mesafesi ile orantılıdır. Normal yük ile aşınma kaybı arasında belirli bir orantı olmamasına rağmen çoğu aşınma sisteminde aşınma hızı/kayıp yük ile doğrusal olarak değişir.

Birbirlerine göre farklı metalürjik, mekanik, kimyasal ve topografik özelliğe sahip iki metal yüzeyinin birbirleri üzerinde kayması, oldukça karmaşık bir sistemdir. Bu sisteme yağlayıcıların da ilave edilmesiyle, sistem daha da karmaşık bir hal alır. İyi bir yağlamanın amacı, temas eden yüzeylerin tamamen ayrılmasını sağlamak olmalıdır. Bu sayede, sürtünme sebebiyle meydana gelen ısı oluşumu azaltılarak, sıcaklıkla aktif hale gelen kimyasal ve fiziksel değişkenler önlenebilir. Adhesif aşınma 25 üzerinde değişik şekillerde görülmekle birlikte bunların tamamının ölçülmesi zor veya imkânsızdır. Bu nedenle genel olarak uygulanabilir bir eşitlik yoktur ve birbirine benzeyen/benzetilen deneyler yapılır. Örneğin çelikler için bazı gözlemler şöyledir:

- Yük arttığında aşınma oranı azalır, temel sıcaklığı artar ve bu nedenle östenit oluşur,
- Aşınma debrisleri oksitlerin karışımından meydana gelir,
- Sertlik arttığında aşınma oranı azalır, çünkü sertliğin yükselmesi sert aşınma geçişini azaltmaktadır,

- Bu geçiş bölgesini asal gaz genişletmektedir, bu bölgede oksijen azalmaktadır,
- Yumuşak aşınma rejiminde eğer oksitler kimyasal olarak uzaklaştırılabilirse ilk aşınma oldukça yüksektir [05].

5.2.2.1.1. Adhesif aşınmanın önlenmesi

Adhesif aşınmayı önlemek için aşağıdaki tedbirler alınır [01]

5.2.2.1.2. Yağlama

Adhesif aşınma, sıcaklığın bölgesel olarak arttığı bölgelerde meydana geldiğinden iyi bir yağlamanın yapılmasıyla hem yüzeyler arasındaki sürtünme azaltılabilir, hem de oluşan ısı sistemden uzaklaştırılır. Neticede de, mikro-kaynak bölgelerinin oluşumu engellenmiş olur [05].

5.2.2.1.3. Birbirleri İçerisinde Çözünmeyen Metaller Kullanmak

Birbirleri içerisinde çözünmeyen iki metalin bir arada kullanılmasıyla, adhesif aşınmayı meydana getiren mikro kaynak prosesinin oluşumunun engellemesi neticesinde, adhesif aşınmanın meydana gelişi tamamen ortadan kaldırılabilir. Fakat bu yöntemin uygulanması pratikte çok sınırlıdır [05].

5.2.2.1.4. Düz Yüzeyler Kullanmak

Birbirleriyle etkileşen yüzeylerde soğuk kaynaşmayı meydana getirecek şekilde karşılaşılabilecek çıkıntılar yok ise, adhesif aşınma meydana gelmeyecektir. Bu düz yüzeyler arasında yağlayıcılarında ilave edilmesiyle, yüzeyler birbirleri üzerinde temassız olarak kayarlar. Bu yöntem pratikte en çok kullanılan yöntemdir [05].

5.2.2.1.5. Metal-metal Temasını Önlemek

Adhesif aşınmayı meydana getiren metal-metal temasını engellemek amacıyla metal yüzeylerindeki kimyasal filmler oluşturmak aşınmayı engeller. Adhesif aşınma yüzeye etkileyen normal yük, kayma mesafesi ve aşınan malzemenin yüzey sertliğiyle orantılıdır [05].

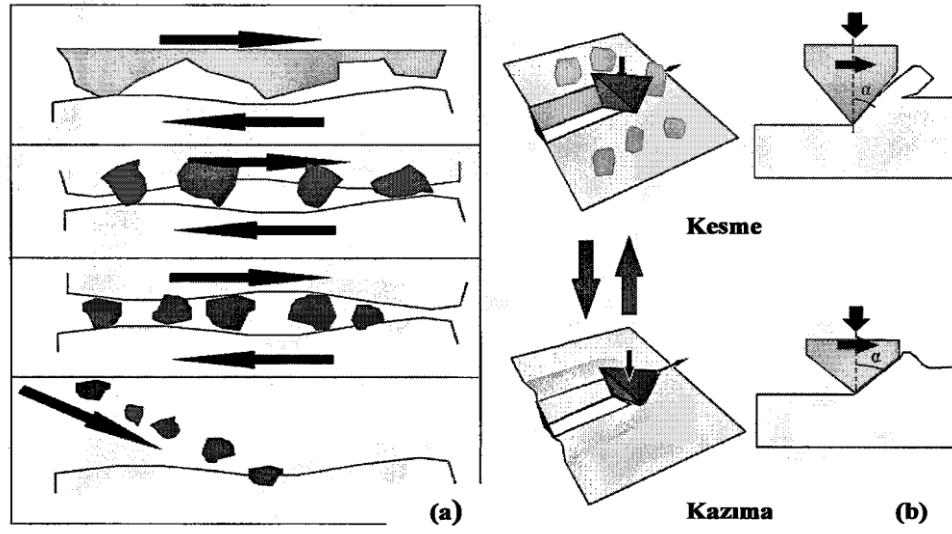
5.2.2.2. Abrasif Aşınma

Yırtılma veya çizilme aşınması olarak da isimlendirilen abrasif aşınma, sistemde hızlı hasara neden olan çok önemli bir aşınma türüdür. Abrasif aşınma en genel olarak, malzeme yüzeylerinin kendisinden daha sert olan partiküllerle basınç altında etkileşmesiyle, sert partiküllerin malzeme yüzeylerinden parçalar koparması şeklinde tanımlanabilir. Bu tip aşınmada sert ve keskin partiküller, malzeme yüzeyinde mikron boyutlu talaş kaldırma etkileri gösterirler. Bu aşınma, iki elemanlı ve üç elemanlı olmak üzere ikiye ayrılır [05].

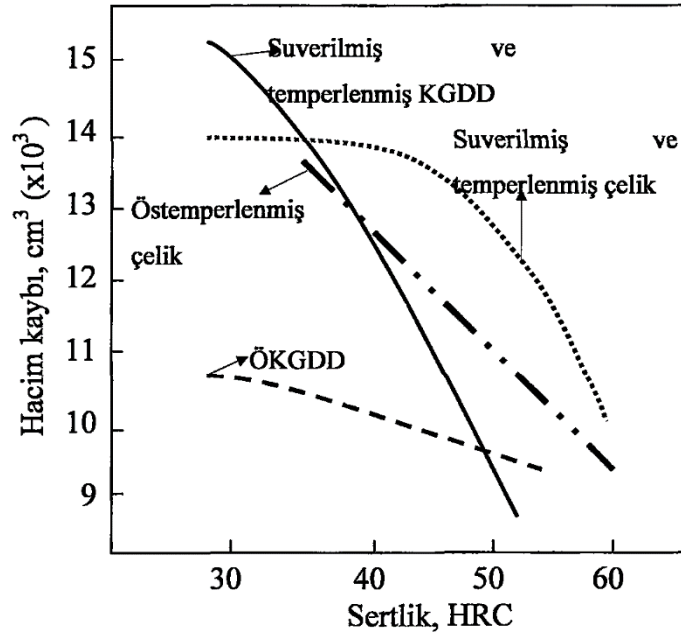
İki elemanlı abrasif aşınma, sürtünen elemanların doğrudan birbirleriyle etkileşimleri sonucu meydana gelir. Üç elemanlı abrasif aşınma da ise ana ve karşı malzeme arasında serbest ara malzeme olması söz konusu olabileceği gibi, aşınma sonucu yüzeylerden ayrılan parçacıkların birer ara malzeme gibi davranmaları ve üçüncü eleman olarak görev yapmaları mümkündür.

Metal-metal sürtünmelerinde aşınma iki gövdeli abrasif veya adhesif olarak başlayıp, üç elemanlı abrasif olarak devam eder. Bu durumda, araya giren toz, mineral taneleri, çizilme sonucu serbest hale geçen Micro talaşlar ve parçalanmış oksit parçacıkları üçüncü elemanı (ara malzemeyi) oluşturabilir. Serbest hale geçen mikro talaş parçacıkları, genellikle ana malzemeden daha sert olduklarından dolayı aşınmayı hızlandırır. Şekil 5.8 de ise abrasif aşınma mekanizması ve abrasif aşınmanın kesme ve kazıma ile oluşumu şematik olarak gösterilmiştir.

Abrasif aşınmayı etkileyen iki temel faktör, aşındırıcı partikül ile metal yüzeyi arasındaki sertlik farklılığı ve teması meydana getiren basıncın büyüklüğüdür. Abrasif aşınma hızı, malzeme yüzeyine etki eden normal yük azaltılarak düşürülebilir. Böylece parçacıkların yüzeye daha az batması ve çapak kaldırılması açısından daha az iz bırakması sağlanır. ÖKGDD malzemenin abrasif aşınma direncinin sertleştirilmiş ve temperlenmiş çelik ve KGDD ile karşılaştırılması Şekil 5.9 de gösterilmiştir [05].



Şekil 5.8 Abrasif aşınma a) Mekanizmanın oluşumu ve b) Abrasif aşınmanın kesme veya kazıma ile gerçekleşmesi [05,92].



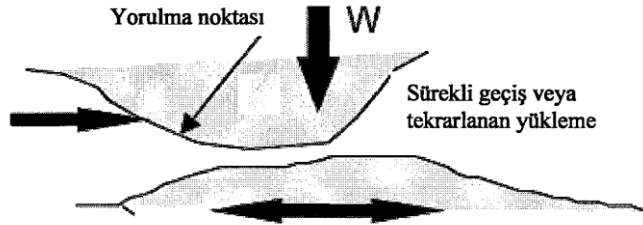
Şekil 5.9 ÖKGDD malzemenin abrasif aşınma direncinin sertleştirilmiş ve temperlenmiş çelik ve KGDD ile karşılaştırılması [05,93].

5.2.2.3. Yorulma aşınması

Yorulma aşınması, sürtünme sırasında oluşan gerilimlerin kırılmaya neden olduğu aşılmalıdır. Sünnet malzemelerde yüzeysel kırılma aşınması veya delaminasyon meydana gelir. Sürtünmenin olduğu bölgelerde plakalar oluşur. Gevrek malzemelerde kırılmalar, yüksek çekme gerilimlerinin oluşturduğu bölgelerde meydana gelir. Değişken, tekrarlı yüklemeler sonucunda meydana gelir.

Triboloji zorlamalar genel olarak yüzeyde görülen, büyüklüğü zaman ve konuma göre değişen mekanik gerilmeler sonucu meydana geldiklerinden, yorulma aşınması birçok aşınma prosesinde görülür. Neticede malzeme yüzeyinde çatlaklar oluşur; bu ise, yüzeyden parçacıkların ayrılması, çukur ve oyukların meydana gelmesine sebep olur (Şekil 5.10).

Maksimum kayma gerilmelerinin bulunduğu yerde, plastik deformasyon ve iç dislokasyon olaylarına bağlı olarak çok küçük boşluklar meydana gelir. Bu boşlukların zamanla yüzeye doğru ilerleyerek büyümesi, yüzeyde küçük çukurların ortaya çıkmasına sebep olur. Bu tür aşınma daha çok dişli çarklarda, rulmanlı yataklarda ve yuvarlanma hareketi yapan mekanizmaların yüzeylerinde görülür [05].



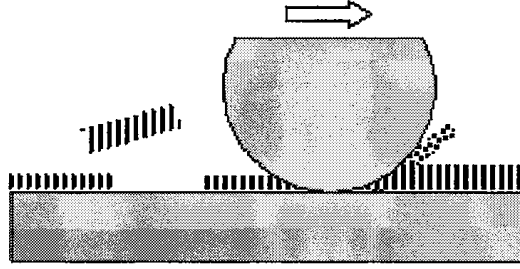
Şekil 5.10 Yorulma aşınmasının şematik gösterimi [01].

5.2.2.4. Korozyif aşınma

Daha önce açıklanan aşınma mekanizmalarında aşınma oluşumu, birbirleri ile temas halindeki yüzeylerde karşılıklı etkileşime bağlı olarak meydana gelen plastik deformasyon sonucunda gerçekleşirken, korozyif aşınmada ise; çalışma ortamı ile parçaların yüzeyleri arasındaki etkileşim önemli rol oynamaktadır [05,79]. Korozyif aşınma iki aşamadan meydana gelir (Şekil 5.11).

1-) Temas halindeki yüzeyler ortamla reaksiyona girerler ve yüzeyde reaksiyon ürünlerinden oluşan bir tabaka meydana gelir.

2-) Müteakiben temas noktasında çatlak oluşur veya abrasif etkilerden dolayı reaksiyon tabakası hasara uğrar.



Şekil 5.11 Korozi aşınma mekanizması [05,78]

Tribo-oksidasyon aşınması adı verilen korozi aşınma durumunda, ana malzeme ile karşı malzeme arasındaki tribolojik zorlamalardan dolayı meydana gelen kimyasal reaksiyon etkindir. Malzeme yüzeylerinin hava ile reaksiyona girerek oluşturduğu yüzey tabakaları (oksit tabakası) aşınmayı azaltmasına rağmen bu yüz tabakalarının tribo-oksidasyon sonucu özelliklerin değişmesi aşınmayı hızlandırmaktadır.

Yağ gibi kimyasal maddeler bulunan ortamda çalışan makine parçalarının yüzeylerinde oluşan tabakaların bir kısmının tribolojik zorlamalarla kırılması ve aşındırıcı parçacıklar oluşturması aşınmayı artırır. Tribo-oksidasyon aşınması, özellikle metalik malzeme yüzeylerinde görülür, Neticede malzeme yüzeyinde çatlaklar oluşur; bu ise yüzeyden parçacıkların ayrılması, çukur ve oyukların meydana gelmesine sebep olur [05].

5.2.3. Aşınmayı ölçme yöntemleri

Malzeme kaybı olarak tamamlanan aşınmanın ölçümü, temas eden parçalardan birinde veya her ikisindeki hacim veya ağırlık kaybı esas alınarak yapılır, Aşınmaya maruz kalmış malzemelerdeki fark ya da farklar incelenir [05,79,80]. Aşınma, doğrudan veya dolaylı ölçümlerle verilebilir. Aşınma en yaygın olarak aşınma hızı (dw/dt) olarak ifade edilir.

$$W_a = \frac{dw}{dt} = \frac{\Delta m}{s.A.\rho} \quad [5.1]$$

Burada;

Δm : Ağırlık kaybı (gr),

s : Kayma mesafesi (mm),

A : Temas alanı (mm²),

ρ : Aşınan malzemenin yoğunluğu (gr/mm³) dur.

Diğer taraftan bir malzemedan aşınarak kaybedilen hacim miktarının (ΔV);

$$\Delta V = k.W.s \text{ (mm}^3\text{)} \quad [5.2]$$

Şeklindeki bir bağlantı ile ifade edilebileceği belirtilmiştir.

Burada;

ΔV : Hacim kaybı (mm³)

k : Aşınma katsayısı

W : Yük(kg)

S : Kayma mesafesi (mm) dir.

Bu bağıntı, kuru veya yağlı kayma durumlarındaki hafif aşınma ve kuru kayma durumundaki şiddetli aşınma için geçerlidir.

Aşınma deney yöntemlerini, genel olarak iki grupta toplamak mümkündür:

a) Yağlamalı veya yağlamasız bir ortamda ana ve karşı malzemenin adhesif (metal- metal) aşınma değerlerinin ölçüldüğü deneyler.

b) Katı, sıvı veya gaz halindeki maddelerin etkisi altında yalnız karşı malzemenin aşınma değerinin ölçüldüğü deneylerdir.

Endüstride kullanılan alet ve makinalarda aranılan özelliklerin bir tanesi de bunların, kullanım ömürleridir. Makine parçalarının çabuk aşınması makinenin ömrünü kısaltarak maliyetini artırdığı gibi, onarım için geçen süre de üretimini önemli ölçüde aksamasına neden olmaktadır. Bu sebepten dolayı, makine imalatında aşınmaya maruz kalabilecek yerlerde aşınma direnci yüksek malzemeler kullanılmalıdır. Bu malzemelerin tespiti için de birçok laboratuvar deneylerinin yapılması gerekir[05].

Mühendislik malzemelerinin aşınma davranışlarının incelenmesi amacıyla çok sayıda deneysel yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemlerin en yaygın olarak kullanılan sınıflandırılma şekli ise aşağıdaki gibidir:

Kayma düzlemlerinin simetrik olarak düzenlendiği yöntemler (örneğin halka üzerinde halka)

Kayma sisteminin asimetrik olarak düzenlendiği yöntemler (Örneğin disk üzerinde pim)

5.2.3.1. Ağırlık farkı yöntemi

Ekonomik olması ve ölçülen büyüklüğün, alet duyarlılık kapasitesi dahilinde bulunması sebebiyle en çok kullanılan yöntemdir. Deney numunelerinin her ölçümü için numunenin yerinden çıkarılıp ölçme yapılması, yani numune yerindeyken üzerinden ölçme yapılamaması bu yöntemin dezavantajıdır. Ağırlık kaybı ölçülmesinde 10^{-3} veya 10^{-4} gr hassasiyetindeki oldukça duyarlı bir terazi kullanılır.

Aşınma miktarı gram veya miligram cinsinden ifade edilirse, metre veya kilometre olarak tespit edilen sürtünme yoluna göre, birim sürtünme yoluna karşı gelen ağırlık kaybı miktarı (gr/km), (mg/m) ile ifade edilir. Ağırlık kaybı birim alan için hesaplanacaksa (gr/cm^2) gibi bir birim kullanılır. Ağırlık kaybı hacimsel aşınma miktarı olarak belirtilmek istendiğinde, yine ağırlık kaybından hareketle kullanılan malzemenin yoğunluğu ve deney numunesi üzerine etki eden yükleme ağırlığı hesaba ilave edilerek, birim yol ve birim yükleme ağırlığına karşılık gelen hacim kaybından gidilerek de bulunabilir [05,80,81]. Bu tanımlamalar göre, en çok kullanılan ağırlık farkı ölçme metodunda kullanılan bağlantı aşağıdaki gibidir:

$$W_a = \frac{\Delta m}{M.s.\rho} \quad [5.3]$$

Burada;

W_a : Aşınma oranı ($\text{mm}^3/\text{N.m}$)

Δm : Ağırlık kaybı (gr),

M : Uygulanan ağırlık (N),

s : Aşınma yolu (m),

ρ : Yoğunluk (gr/cm^3) olarak verilmiştir,

Aşınma oranı W_a tersi ise aşınma direnci W_r gösterilmiştir.

$$W_r = 1/W_a (\text{N.m/mm}^3) \quad [5.4]$$

Başka bir bağlantı olarak da, bir km kayma yoluna karşılık gelen yükseklik kaybı bağlantısı vardır ki; genellikle iki elemanlı abrasif aşınmanın hesaplanmasında kullanılır:

$$V_s = \frac{10^4 \Delta G}{F.d.s} (\mu m/km) \quad [5.5]$$

Burada;

V_a : 1 km aşınma yoluna karşılık gelen yükseklik kaybı (μm),

ΔG : Ağırlık kaybı (gr),

F: Aşınma yüzeyi (cm^2)

d: Yoğunluk (gr/cm^3),

s: Kayma yolu (km) olarak alınır. Deney malzemesi yükseklik kaybının, karşılaştırılma malzemesi (Örneğin Fe37 çeliği) yükseklik kaybına oranı, aşınma orantı katsayısını W_s verir.

$$W_s = V_s (\text{deney numunesi}) / V_s (\text{Fe 37}) \quad [5.6]$$

Bu orantı katsayısının tersi değeri ise, bağıl aşınma direnci (R) tanımlanır

$$R = 1 / W_s \quad [5.7]$$

Üç gövdeli abrasif aşınmada ise, genellikle DIN 50320’de verilen boyutsuz aşınma oranı formülü yaygın olarak kullanılır [05,79,80].

5.2.3.2. Kalınlık Farkı Yöntemi

Aşınma sırasında oluşacak boyut değişikliğinin ölçülmesi, başlangıç değeriyle karşılaştırılması yoluyla elde edilir. Kalınlık farkı olarak tespit edilen bu değerden hareketle, hacimsel kayıp değeri ve birim hacimdeki aşınma miktarı hesaplanır. Kalınlık hassas ölçme aparatları yardımı ile $\pm \mu m$ duyarlılıkta ölçülmelidir [05,79,80].

5.2.3.3. İz Değişimi Yöntemi

Sürtünme yüzeyinde, plastik deformasyon yoluyla geometrisi belirli bir iz oluşturur. Deney boyunca bu izin karakteristik bir boyutunun (çapının) değişimi ölçülür. Uygulamalarda iz bırakıcı olarak en çok kullanılan alet Vickers veya Brinell sertlik ölçme ucudur. Elmas piramit veya bilyenin bıraktığı iz boyutlarındaki değişim, mikroskop yardımıyla ölçülerek belirlenir [05,79,80].

5.2.3.4. Radyoizotop yöntemi

Sürtünme yüzey bölgesinin proton, nötron veya yüklü α parçacıklarıyla bombardıman edilerek radyoaktif hale getirilmesi esasına dayanır. Aşınmanın büyük hassasiyetlerle ölçülebilmesi ve sistem içerisinde çalışma şartlarının değiştirmeden ölçü alınabilmesi avantajı yönleridir. Fakat ekonomik olmaması nedeni ile ancak özel amaçlarla kullanılır. Diğer taraftan, bir malzemeden aşınarak kaybedilen hacim miktarının aşağıdaki bağıntı ile ifade edilebileceği belirtilmiştir. (ΔV);

$$\Delta V = k \cdot W \cdot s \text{ (mm}^2\text{)} \quad [5.8]$$

Burada;

ΔV : Hacim kaybı (mm³),

k : Aşınma katsayısı,

W : Yük (kg),

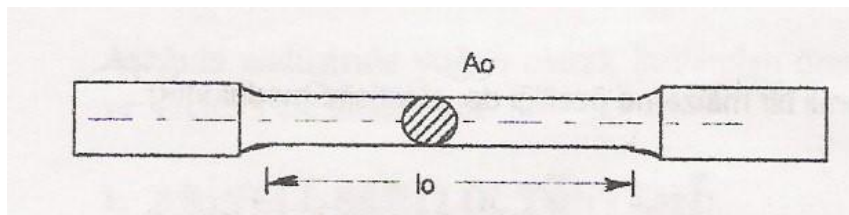
s : Kayma mesafesi (mm)

Bu bağlantı, kuru veya yağlı kayma durumlarındaki hafif aşınma ve de kuru kayma durumunda şiddetli aşınma için geçerlidir [05,79,80].

5.3. Çekme Deneyi

Çekme deneyi malzemelerin statik(darbesiz) yük altındaki mukavemet özelliklerini belirlemek amacıyla uygulanan, mühendislik açısından çok önemli bir mekanik deneydir. Deney sonucu bulunan malzeme özellikleri mühendislik hesaplamalarında doğrudan kullanılır [94,95,96].

Çekme deneyi için önce test edilecek malzemeden standartlara uygun bir çekme numunesi hazırlanır [TS 138 EN10002-1][25]. Şekil5.12’de örneği görülen silindirik çubuk biçimindeki numunede l_0 ve A_0 değerleri deney açısından önemli boyutlardır.



Şekil 5.12 Çekme deney numunesi [94,97]

Hazırlanan numune iki ucundan özel çekme test cihazının çenelerine bağlanıp, gittikçe artan bir yükü kopuncaya kadar çekilir. Bu esnada uygulanan P yükü ile buna karşı malzemenin l_0 boyunda gösterdiği uzama miktarı(Δl) ölçülür [94,96].

Deney çubuğunun çekme kuvvetine dik doğrultudaki kesit yüzeyi başlangıçta A_0 , deney sırasında P kuvvetinin uygulandığı anda ise A ile gösterilirse, nominal gerilme(veya mühendislik gerilmesi),

$$\sigma_n = \frac{P}{A_0} \quad [5.9]$$

gerçek gerilme,

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad [5.10]$$

olarak tanımlanır. Başlangıç ölçü boyu l_0 , deneyin herhangi bir anında uygulanan P yükünün etkisi ile l değerini alırsa, çekme doğrultusunda birim şekil değişimi

$$e = \frac{l-l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \text{ olur.} \quad [5.11]$$

Birim şekil değişimi, yukarıdaki ifadeden de görülebileceği gibi, l_0 başlangıç ölçü boyuna bağlı olarak hesaplanmaktadır. Deney sırasında ise ölçü sürekli olarak değişmektedir. Örneğin ölçü boyu çekme deneyinin herhangi bir anında l iken, dl gibi sonsuz küçük bir uzama sonunda birim şekil değişimindeki artış dl/l olacaktır. Bu bakımdan, l_0 başlangıç ölçü boyu l değerini alıncaya kadar meydana gelen toplam birim şekil değişimi

$$\varepsilon = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln \frac{l}{l_0} \quad [5.12]$$

ε , logaritmik veya gerçek şekil değiştirme olarak da anılır.

Denklem 5.11 de

$$\frac{l}{l_0} = (1 + e) \quad [5.13]$$

yazılarak denklem 5.12' e taşınırsa

$$\varepsilon = \ln(1 + e) \text{ bulunur.} \quad [5.14]$$

$$A_0 \cdot l_0 = A \cdot l \quad [5.15]$$

Şeklinde ifade edilir. Buradan

$$A = A_0 \frac{l_0}{l} \quad [5.16]$$

yazılarak denklem 5.10' ye taşınırsa

$$\sigma = \frac{P}{A_0} \cdot \frac{l}{l_0} \quad [5.17]$$

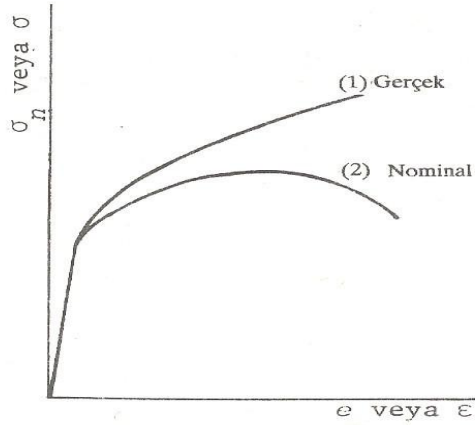
Buradan da;

$$\sigma = \sigma_n (1 + e) \quad [5.18]$$

elde edilir. Küçük e değerleri, yani elastik şekil değişimi için $\ln = (1 + e) \approx e$ alınabileceğinden $\varepsilon \cong e$ kabul edilir. e 'nin büyük değerleri için ε ve e arasındaki fark hızla açılır [94,95].

5.3.1. Nominal ve gerçek çekme diyagramı

Deney sonucu ölçülen yük (F) ve uzama (Δl) değerlerinden yararlanarak F - Δl diyagramı elde edilir. Bu diyagrama çekme diyagramı denir. Çekme deneyi sırasında değişen F kuvvetinin herhangi bir andaki değeri, deney parçasının A_0 başlangıç kesatine değil de o andaki en dar kesite (A) bölünürse gerçek gerilme bulunur. Gerçek çekme diyagramı, mühendislik çekme diyagramı gibi bir maksimumdan geçmez. Şekil 5.13'de görüldüğü gibi kopma noktasına kadar sürekli artar. Böylece malzemenin büzülme de dahil olmak üzere plastik şekil verme sırasında sertleştiği anlaşılmaktadır. Buna şekil değiştirme sertleşmesi veya pekleşme denir [94,95].



Şekil 5.13 Gerçek ve mühendislik çekme diyagramları [94,95]

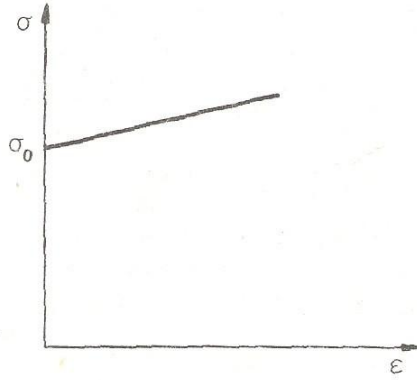
Gerçek çekme eğrisinin eğimi (pikleşme hızı veya pikleşme derecesi) gerçek gerilme değerine eşit olduğu anda çekme kuvveti de (veya nominal gerilme) maksimum değerini alır.

5.3.2. Gerçek Gerilme-Gerçek Şekil Değiştirme Eğrileri İçin Yaklaşık Denklemler

Deneysel olarak elde edilen gerçek gerilme-gerçek şekil değiştirme eğrilerine çok uyan bazı ampirik denklemler geliştirilmiştir. Bunlardan biri Ludwig tarafından sabit sıcaklık ve sabit şekil değiştirme hızında;

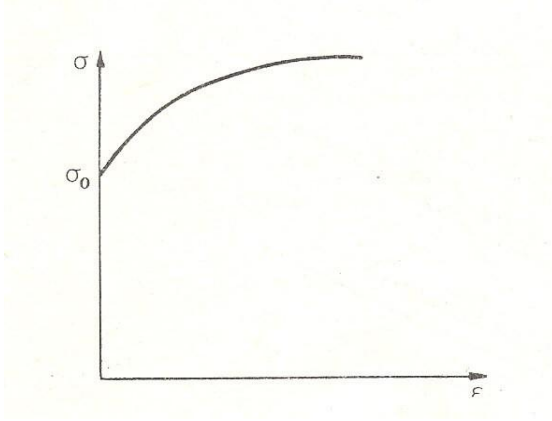
$\sigma = \sigma_0 + K\varepsilon^n$ şeklinde ifade edilmiştir. Burada σ_0 , akma sınırı, K ve n ise malzemeye özgü sabitlerdir ($n < 1$).

- a) $n=1$ hali (Şekil 5.14) :Bu halde, gerçek gerilme gerçek şekil değiştirme ile $\sigma = \sigma_0 + K\varepsilon$ bağıntısına göre değişir. Böyle bir malzemeye çekme deneyi uygulanması halinde, çekme gerilmesi σ_0 akma sınırına erişinceye kadar şekil değişimi görülmez; çekme gerilmesinin akma sınırına erişmesi ile birlikte plastik şekil değişimi başlar. Plastik alanda gerilme ile şekil değiştirme arasında doğrusal bir bağıntı vardır, yani pekleşme lineerdir. Ayrıca şekil değişiminin elastik bileşeni plastik bileşen yanında ihmal edilmektedir [94,95].



Şekil 5.14 Ludwig denklemine göre ve $n=1$ halinde akma sınırı σ_0 olan bir malzemenin gerçek çekme diyagramı [87,88].

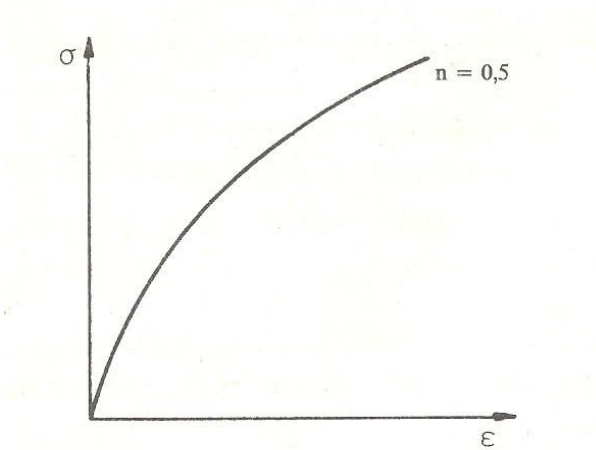
- b) $n < 1$ hali (Şekil 5.15) : Bu halde de şekil değişiminin elastik bileşeni plastik bileşen yanında ihmal edilmektedir.



Şekil 5.15 $\sigma = \sigma_0 + K\epsilon^n$ ($n < 1$) [94,95]

Akma sınırından (σ_0) sonra plastik şekil değişimi nedeniyle malzeme pekleşmekte fakat σ ve ϵ arasında doğrusal bir bağıntı bulunmamaktadır (Pekleşme lineer değil).

- c) $n < 1$, $\sigma_0 = 0$ hali (Şekil 5.16): Bu halde $\sigma = K\epsilon^n$ olmaktadır. Bu tür bir malzeme, yüklemenin başlangıcından itibaren elastik davranış göstermez ve akma sınırı belirgin değildir.

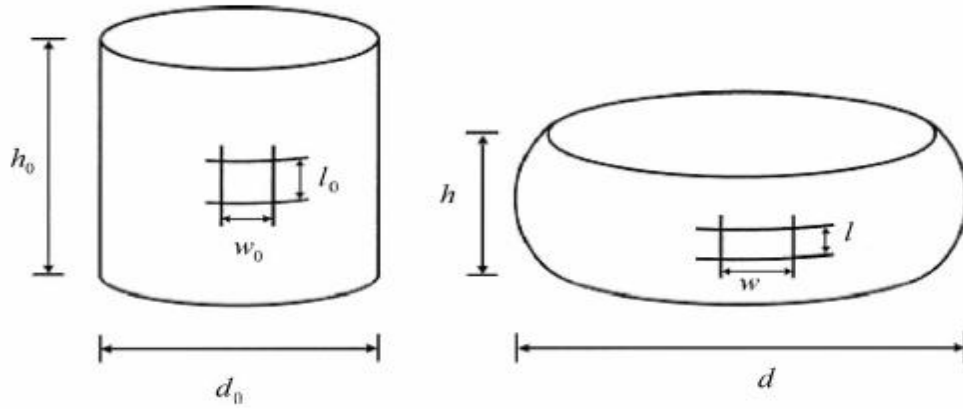


Şekil 5.16 $\sigma = K\epsilon^n$ ($n < 1$), elastik davranış göstermeyen ve akma sınırı belirgin olmayan malzeme [94,95].

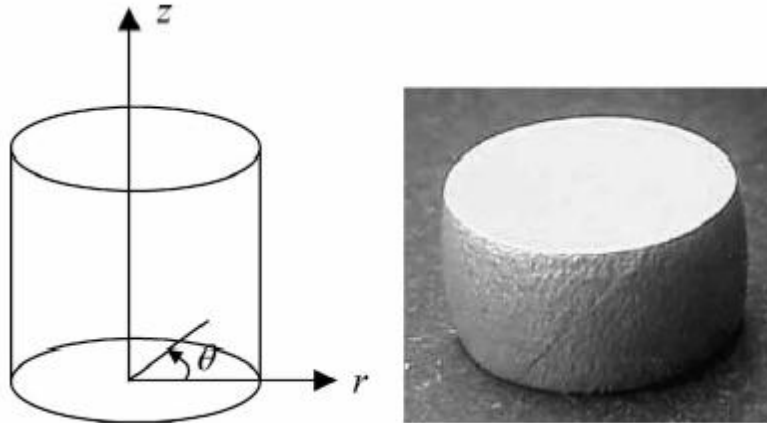
5.4. Basma Deneyi

Basma deneyi, çekme deneyinin tersi olarak kabul edilebilir. Basma kuvvetinin etkin olduğu uygulamalarda kullanılan gevrek malzemelerin mukavemet değerleri genelde basma deneyi ile belirlenir. Bu nedenle, basma deneyinde elde edilen sonuçlar gevrek malzemelerle yapılan tasarımda doğrudan kullanılabilirler. Basma deneyinde, genelde silindirik veya daire kesitli örnekler kullanılır [98,99].

Kopma uzaması ve kopma büzülmesi değerleri hemen hemen sıfır olan gevrek malzemelerin sünekliği çekme deneyi ile ölçülemez. Bu tür malzemelerin sünekliği basma deneyi ile ölçülür. Basma deneyinde çok küçük boyuttaki örnekler bile deneye tabi tutulabilir [85,98]



Şekil 5.17 Basma deneyinde birim şekil değişimlerinin ölçülebilmesi için işaretlemenin yapılması [98,99]



Şekil 5.18 Bir silindirik koordinat sistemi ve basmaya uğramış numunedeki meydana gelen çatlağın görünümü [98,99]

Basma deneyinin en belirgin sakıncaları sürtünmenin varlığı, şekil değişimi ilerledikçe kesitin artması sonucunda yükün de artması ve deneylerin sabit birim şekil değiştirme hızında gerçekleşmesi için özel araç ve gereçlerin gerekmesidir. Özellikle kuvvet ve sünelik değerleri basma deneylerindeki sürtünme koşulları ile kayda değer miktarda farklılık göstermektedir. Bundan dolayı, malzemelerin mekanik özelliklerinin tayininde sürtünme koşullarından bağımsız olan çekme deneyleri tercih edilmektedir. Bununla beraber, basma deneyleri endüstriyel şekillendirme proseslerine benzerliği ve sürtünme koşullarının etkisini incelemek için yaygın olarak kullanılmaktadır [98].

Basma deneylerinde, h_0 yüksekliğinde ve D_0 çapındaki silindirik deney numunelerine basma kuvveti uygulanır. Basma sırasında h ve çap D değerleri ölçülür. Herhangi bir andaki gerçek gerilme ve gerçek birim şekil değişimi;

$$\sigma = F / A \quad [5.19]$$

$$\varepsilon = \ln (h / h_0) \quad [5.20]$$

şeklinde hesaplanır.

Basma numunelerinde, üniform bir gerilme durumu elde edilmesi gayesiyle yuvarlak kesitli numuneler tercih edilir. Fakat kare veya dikdörtgen kesitli numuneler de kullanılabilir. Basma numunelerinde önemli olan bir özellik, numunenin çapı (d_0) ile yüksekliği (h_0) arasındaki orandır. Bu oranın (h_0/d_0) çok büyük olması numunenin deney sırasında bükülmesine ve gerilmelerin numune üzerinde homojen olarak dağılmamasına sebep olur, dolayısıyla yanlış sonuçlar elde edilir. Bu sebeple pratikte üst limit olarak (h_0/d_0) ≤ 10 oranı tavsiye edilir. Basma numunesinin yüksekliğinin çapa göre çok kısa olması da istenmez, alt limit olarak (h_0/d_0) $\geq 1,5$ oranı tavsiye edilir. Numune boyutlarının (h_0/d_0) $< 1,5$ olması durumunda, numune ile numunenin basıldığı plakalar arasındaki sürtünme, deney sonuçlarını etkileyecek değerlere yükselir. Genel olarak, basma numunelerinde (h_0/d_0) ≥ 2 oranı en fazla kullanılan orandır. Bununla beraber, farklı malzemeler için farklı (h_0/d_0) oranı kullanılmaktadır. Metalik malzemeler için basma numunelerinde genellikle $h_0/d_0=2$ oranı kullanılır [98].

Metalik malzemelerin gerçek çekme ve basma diyagramlarında gerçek gerilme değerleri birbirine eşittir. Hâlbuki mühendislik çekme ve basma diyagramlarında, plastik

bölgedeki mühendislik basma gerilmeleri değerleri mühendislik çekme gerilmeleri değerlerinden daha fazladır [98].

Basmada malzemenin deformasyon kabiliyeti veya sünekliği, % şekil değişimi ile tayin edilir. Basmada malzemenin sünekliği, genel olarak numune yüzeyinde ilk görülebilir çatlağın teşekkül ettiği deformasyon miktarı olarak tarif edilir. Basma deneyi ile metalik malzemelerin sünekliğinin tayinindeki zorluk, uygulanan gerilmenin numune üzerinde genellikle üniform olmamasından ileri gelir. Deney cihazındaki basma plakaları ile numune arasındaki sürtünme kuvvetlerinin tesiri ile numunede fıçılama olur. Fıçılama olduğunda numunedeki deformasyon homojen değildir [98].

Fıçılama, numune ile basma plakaları arasındaki sürtünmeyi azaltmak için seçilecek uygun yağlayıcılarla minimuma indirilebilir. Oda sıcaklığındaki basma deneylerinde teflon, yüksek sıcaklıktaki basma deneylerinde cam uygun yağlayıcılar olarak kullanılabilir [98,100]. Şekillendirilebilirlik çalışmaları için malzemenin düşük kuvvetlerle ve hasara uğramadan fazla şekil değiştirmesi dövme kabiliyetinin iyi olduğunu gösterir [98,101].

5.5. Sertlik Deneyleri

Malzemenin batıcı uca karşı gösterdiği direnme kabiliyetine sertlik denilir endüstride geniş uygulama alanı bulmasının nedeni, çok uzun süreli araştırma vetecrübe yerine daha kısa zaman alan ve ucuz deneylerle sonuca ulaşılmasıdır. Deneyesnasında parçayı tahrip etmemesi diğer bir tercih nedenidir [94,96].

Yoğun olarak kullanılan sertlik yöntemleri Brinell, Vickers ve Rocwell yöntemleridir. Brinell yönteminde belli çaptaki bilya malzeme yüzeyine belli bir Pyükü uygulanarak bastırılır. Deneyde uygulanan yükün meydana gelen izin alanına bölünmesiyle Brinell sertlik değeri bulunur. En fazla kullanılan bilya çapları 0,625;1,25; 2,5; 5 ve 10 mm'dir [94,96].

$$BSD = \frac{P}{Y} = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \text{ (kgf/mm}^2\text{)} \quad [5.21]$$

Bu formülde

P: deney yükü

Y: izin(küre) alanı

D: bilya çapı

D: izin çapı

Vickers deneylerinde baskı elemanı olarak tepe açısı 136° olan elmas kare piramit kullanılır. P yükü ile malzemeye bastırılan piramit ucun bıraktığı dörtgen izinköşegenleri ölçülerek hesaplanan ortalama köşegen uzunluğu formülde yerine konarak Vickers sertlik değeri bulunur. Vickers sertliği yüke bağlı değildir. Ölçme hatalarını azaltmak ve heterojen yapılarda ortalama değer elde edebilmek için yükü ve dolayısıyla izi büyötmek faydalıdır. Yöük 1-120 kgf arasında değışebilir [94,96].

$$VS = 1,8544 \frac{P}{d^2} \quad [5.22]$$

P=Baskı yükü(kgf), d=ortalama köşegen uzunluğu(mm)

Rocwell sertlik ölçme yöntemlerinde ise yük malzemeye iki kademedey uygulanmakta ve ucun malzeme üzerinde meydana getirdiğı kalıcı izin derinliğimalzeme sertliğini ifade eden büyüklük olmaktadır. Sertliği ölçölecek malzemenincinsine uygun olarak Tablo 5.3’ deki yöntemlerinden biri seçilir [94,96].

Tablo 5.3. En çok kullanılan iki Rocwell sertlik yönteminin özellikleri[94,96]

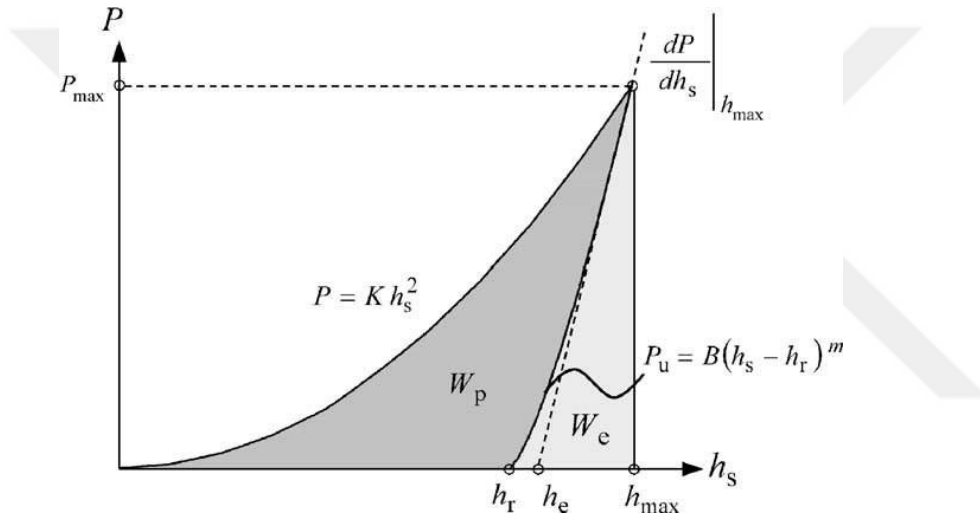
	Rocwell B	Rocwell C
Baskı ucu	Ø1/16’’ sert çelik bilya	120° tepe açılı elmas Konik uç
Uygulanan yük	10 kg ön yük+90 kg ana yük	10 kg ön yük +140 kg ana yük
Formöl	HRB=130-e/0,002	HRB=100-e/0,002
Malzeme grubu	Yumuşak çelikler Alüminyum alaşımları Bakır alaşımları Temper dökme demir	Çelikler Titanyum alaşımları

Formöllerde kullanılan e ucun batma derinliğidir.

5.5.1. Sertlik Deneylerinden Gerçek Gerilme Gerçek Birim Şekil Değişimi Eğrisi Tayini

Klasik sertlik belirleme metotlarındaki ucun numune üzerinde bıraktığı izin optik yollar ile ölçölmesindeki zorluk nedeniyle son yıllarda uygulanan kuvvet ile ucun

numune üzerinde bıraktığı izin derinliğinin ölçülmesi esasına dayanan ölçüm metotları geliştirilmiştir. Sertlik ölçüm cihazlarındaki gelişmeler ve malzemelerin mekanik özelliklerini belirlemede küçük boyutlarda malzeme ihtiyacı ile birlikte geliştirilen yeni metotlarla sertlik uygulamalarından temas derinliği ile mekanik özelliklere ulaşmak mümkün olmuştur. Derinlik duyarlı indentasyon (depth sensing indentation) sürekli-kayıtlı indentasyon (continuous-recording indentation), mikro indentasyon (microindentation), nanoindentasyon (nanoindentation) gibi farklı isimlerle anılan bu metotlarda kuvvetin numuneye uygulanması ve kuvvetin sıfırlanması ile elde edilen Şekil 5.19’de verilen kapalı kuvvet-iz derinliği (P-h) grafiklerinden yararlanılır [94,102,103].



Şekil 5.19 İndentasyon yönteminde kuvvet – iz derinliği eğrileri [94,102]

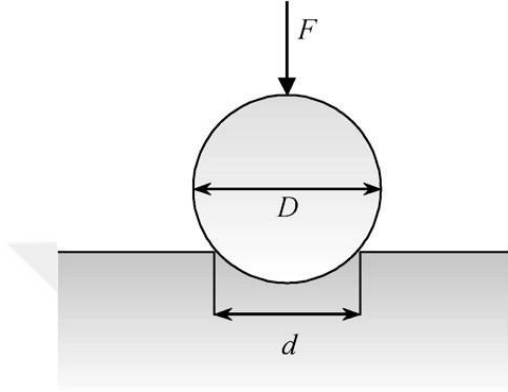
Bu grafikler indentasyon yöntemlerinde kuvvetin uygulanmaya başlanmasıyla birlikte eş zamanlı olarak batıcı ucun malzeme üzerinde bıraktığı izin derinliğinin kaydedilmesiyle elde edilir. Elde edilen grafikler ve bu konuda geliştirilen ampirik formüller yardımıyla malzemelere ait mekanik özellikler elde edilebilmektedir.

Son yıllarda indentasyon ekipmanlarının oldukça geliştirilmesiyle, özellikle küresel batıcı uçlu indentasyon uygulamalarında küçük boyuttaki numuneler ile gerilme-birim şekil değişimi eğrileri elde edilmektedir.

Özellikle sivri batıcı uçlu indentasyonlarda ise, batıcı ucun geometrisi, faz dönüşümü, mikro çatlak etkileri ve artık gerilme etkileri ile bu eğrilere ulaşmak çoğu zaman mümkün olmamıştır [104-106].

Küresel indentasyon yöntemi (Spherical indentation technique)

Küresel indentasyon yönteminin temel prensibi küresel bir batıcı ucun aynı test numunesi üzerinde aynı noktaya birden fazla yük uygulanması ve yük boşaltılması esasına dayanır. Şekil 5.20’de küresel indentasyon testinin şematik resmi görülmektedir. Bu işlem yükleme-yük boşaltma-tekrar yükleme sırasıyla tekrarlanır[107-112].



Şekil 5.20 Küresel indentasyon yöntemi şematiği [87]

Elastik bölge, batıcı ucun hemen altında plastik bölgeyi çevreler. Plastik bölge ve indentasyon baskısı, indentasyon yükü arttıkça artar. Birim şekil değişimi bölgesi Tabor tarafından temsili birim şekil değişimi(ϵ_f) olarak gösterilerek d ve D’nin fonksiyonu olarak verilir [107-111,113,114].

$$\epsilon_f = \beta(d/D) \quad [5.23]$$

Burada

D: batıcı uç(bilye) çapı ve

D: indentasyon(iz) çapıdır.

Tabor’un ampirik bilgileri analiz etmesiyle ϵ_f ‘nin lineer olarak d/D oranı ile değiştiğini ve lineerlik katsayısının(β) 0,2 olduğunu bulmasından sonra, gerçek plastik birim şekil değişimini(ϵ_p) şu şekilde göstermiştir.

$$\epsilon_p = 0,2(d_p/D), \quad [5.24]$$

Burada d_p , plastik indentasyon çapıdır [107-111,113,114].

Tabor, çalışmalarında gerilme ve ortalama basınç arasında lineer bir ilişki bulmuştur. Ortalama basınç birim temas alanına uygulanan kuvvet olarak tanımlanır

$$P_m = a\sigma_e \quad [5.25]$$

$$P_m = \frac{F}{\pi d^2/4} \quad [5.26]$$

Burada, kısıtlama faktörü olarak adlandırılan bir sabittir ve çelikler için yaklaşık olarak 3 değerini alır. Çeşitli malzemeler için 2,6 ile 3,4 değerleri arasında değişir [110,115].

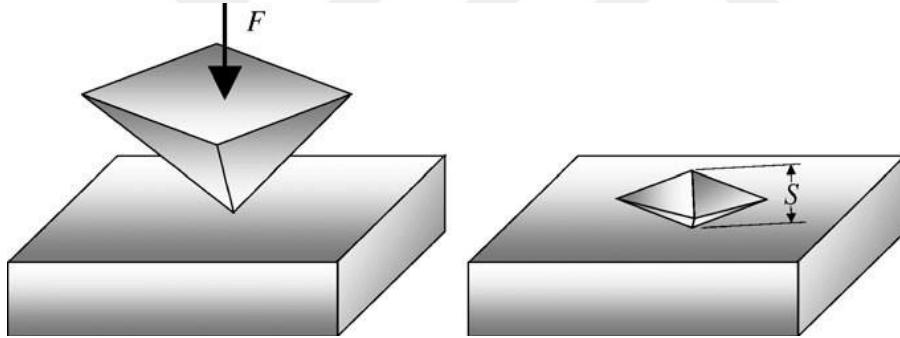
Denklem 5.25 ve 5.26' dan;

$$\sigma_m = \frac{4F}{\pi d^2 a} \text{ bulunur.} \quad [5.27]$$

Denklem 5.24 ve denklem 5.27'den bulunan temsili gerilme ve temsili birim şekil değişimi eğrilerinin denklem formüllerinden faydalanarak birtakım katsayıların bulunmasıyla gerçek gerilme-gerçek birim şekil değişimi eğrilerine geçiş yapılır[113,114].

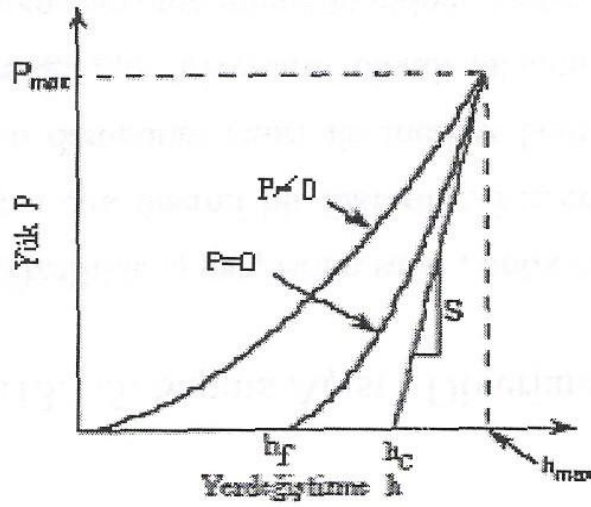
5.5.2. Vickers indentasyon yöntemi

Son yıllarda geliştirilen metotlarla Vickers indentasyon yöntemi uygulamalarıyla kuvvet batma derinliği eğrilerinin elde edilmesi ile birtakım mekanik özelliklere ulaşmak mümkün olmuştur. Yöntemin şematik resmi Şekil 5.21'de verilmiştir.



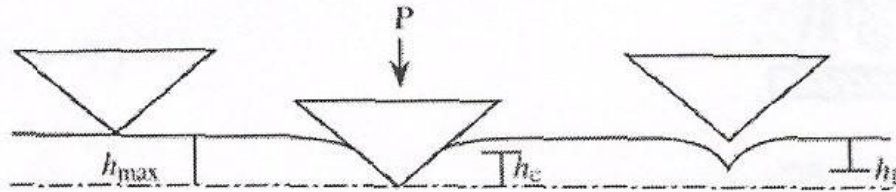
Şekil 5.21 Vickers indentasyon yöntemi şematığı [110]

Oliver-Pharr tarafından geliştirilen metotta kuvvetin numuneye uygulanması ve sıfırlanması ile elde edilen Şekil 5.22'da verilen kapalı (P-h) grafiklerinden elastisite modülü ve sertlik tayini yapılabilmektedir [104,116,117,118].



Şekil 5.22 Yükleme-yük boşaltma ve batma derinliği(yer değiştirme) eğrileri (82,92)

Bu grafikteki önemli parametreler şekil 5.23’de de verilerek, maksimum kuvvet(P_{max}), maksimum batma derinliği (h_{max}), yük sıfırlama sonrası derinlik(h_f), maksimum yükteki numune ve uç arasındaki temas derinliği(h_c) ve yük sıfırlamaeğrisinin başlangıç kısmının(%30 luk kısım) eğimidir. ($S=dP/dh$) [117].



Şekil 5.23 Vickers indentasyonu derinlik parametreleri şematığı [94,103]

Bu parametreler ışığında elastisite modülü hesaplamasında Oliverr-Pharr tarafından geliştirilen formüller şunlardır

$$h_c = h_{max} - \varepsilon \frac{P_{max}}{S} \quad [5.28]$$

Bu ifadede ε değeri geometri sabiti olup, Vickers uçlar için 0,75, Konik uçlar için 0,72 değerini alır. [117]

Buradan hareketle indirgenmiş elastisite modülü ;

$$E_r = \frac{\sqrt{\pi}}{2} * \frac{S}{\sqrt{A_c}} \quad [5.29]$$

formülü ile hesaplanır. ($A_c = 26,43h_c^2$)

$$\text{Malzemeye ait elastisite modülü ise; } \frac{1}{E_r} = \frac{1-\nu^2}{E} + \frac{1-\nu_0^2}{E_0} \quad [5.30]$$

denklemleri ile hesaplanır

Burada; E_r indirgenmiş elastisite modülü, ν ve E malzemeye ait, ν_0 ve E_0 ise batıcı uca ait poisson oranı ve elastisite modülüdür. Değerler yerine konularak malzemenin elastisite modülü belirlenir [117].

Vickers indentasyon yöntemi ile gerçek gerilm-gerçek birim şekil değişimi eğrilerini tayin etmek üzerine yapılmış birçok araştırma da bulunmaktadır. Tabor tarafından yapılan çalışmalarda akış geriliminin lineer olarak ortalama basınçla ilişkili olduğu belirtilmektedir [110].

$$P_m = c' \sigma_e \quad [5.31]$$

c' , sabit katsayıdır. σ_e 'ye denk gelen temsili birim şekil değişimi, ϵ_e sabittir ve yük ile sertlikten bağımsızdır. Tabor bu değeri 0,08 olarak hesaplamıştır. c' değeri ise 3,2 olarak verilmiştir.

Bu konuda yapılan çalışmalarda sonlu elemanlar yöntemleri ile birçok farklı model kullanılarak çeşitli yaklaşımlar yapılmıştır. Tekkaya yaptığı sonlu eleman analizinde c katsayısı için 2,475 ve plastik birim şekil değişimi için 0,112 olarak birkabul yapmıştır. Larsson sonlu elemanlar yöntemi ile Vickers indentasyonu üzerinde yaptığı çalışmada Tabor'un çalışmasının sadece tam plastik rejimde geçerli olduğunu savunarak $c=2.6$ ve $\epsilon_e=0,15$ olarak bulmuştur [110].

Yapılan bu çalışmada gerçek gerilme-gerçek birim şekil değişimi eğrilerinin Vickers indentasyon yöntemi ile tayin edilebilmesi için farklı bir yaklaşım sunulmaktadır. Bu yaklaşımda gerçek birim şekil değişimi için;

$$\epsilon = \ln \frac{h_0}{h_0-h} \quad [5.32]$$

Formülü uygulanmaktadır. Bu formülde; h =yük uygulama esnasındaki indentasyon derinliği, h_0 =sabit olup, Vickers uygulamaları için $40\mu\text{m}$ olarak önerilmektedir.

Gerçek birim şekil değişimi değerlerine karşılık gelen gerçek gerilme değerleri için birtakım bağıntılar geliştirilmiştir. Bunun için öncelikle indentasyon deneylerinden elde edilen $P-h$ grafiklerinden elde edilen kuvvet ve iz derinliği verilerinden faydalanılır.

$$\sigma = \frac{F}{A'} \quad [5.33]$$

bağıntısında,

F =İndentasyon yükü,

A' =İndentasyon yük değerlerine karşılık gelmesi gereken temas alanları,

σ = Çekme deneylerinden elde edilen gerçek gerilme değeridir.

Bu temas alanları, çekme deneyleri ile aynı birim şekil değişimi değerine karşılık gelen indentasyon deneylerindeki yüklerde aynı gerilme değerini verecek alanlardır.

Denklem 5.33'den bulunan A' değerleri denklem 5.34'de kullanılarak h' değerleribulunur.

$$A'=24.5*(h')^2 \quad [5.34]$$

h' =iz derinliğinin(h) bir fonksiyonu olup $h'=B.h+C$ şeklinde ifade edilir. B ve C malzemelere özgü sabitlerdir.

Buradan elde edilen h' değerleri ile indentasyon deneylerinden elde edilen gerçek h değerleri arasındaki ilişki bir grafikte temsil edilerek bu iki değer arasında bir bağlantı çıkarılır.

Böylelikle deneylerden elde edilen gerçek h değerleri, her malzeme için ayrı bir formülle düzeltilmiş h' değerlerine dönüştürülür ve buradan

$$A=24.5*(B.h+C)^2 \quad [5.35]$$

Deney verilerindeki her h değeri için kullanılacak olan düzeltilmiş temas alanları bulunur. Her indentasyon yükünün bu yüke denk gelen düzeltilmiş temas alanına bölünmesi ile indentasyon deneylerinden gerçek gerilme değerleri tayin edilir.

$$\sigma = \frac{F_{indentasyon}}{A} \quad [5.36]$$

Bu yaklaşımla tayin edilen gerçek gerilme-gerçek birim şekil değişimi eğrileri $\varepsilon=0,05$ değerinin üstünde yüksek hassasiyette sonuçlar vermektedir. Düşük gerçekbirim şekil değişimi değerlerindeki tutarsızlık batıcı uç geometrisinin karmaşıklığı, malzeme özellikleri ve elastik deformasyonun mevcut cihazlarla yeterli hassasiyette ölçülememesine dayandırılabilir.

5.6. Mikro sertlik Ölçme Deneyi

Bu yöntem özellikle çok küçük parçaların sertliklerini yüzeyleri işlem görmüş malzemelerin çok ince sac malzemelerin veya mikro yapıdaki bir fazın sertliğini ölçmek için kullanılır. Mikro sertlik ölçme cihazları aynı zamanda bir optik mikroskop içerir. Şayet mikro yapının sertliğini ölçecek ise yüzeyin metalografik manada temizlenmesi parlatılması

ve mikro yapının görülebilmesi için dağlanması gerekir. Yüzey temizliği önemlidir. Mikro sertlikte iki uç kullanılır. Kullanılan uça göre isimlendirilir. Bunlar Vickers ucu ve tepe açısı $172^{\circ} 30'$ olan Knoop ucudur. Yükler ise 25 gr ile 10 kg arasında değişir. Uygun yükün seçimi denemelerle izin kolaylıkla ölçüle bilmesine bağlıdır [118].

5.7. Derin Çekme Deneyi

İnce levhaların işlenmiş parçalar haline getirilmelerinde, sac levha şekillendirme yöntemlerinden faydalanılır. Bu yöntemler, teknikte derin çekme yöntemleri olarak bilinirler. Erichsen derin çekme ve silindirik sac levhadan tas çekme yöntemleri olarak iki grupta toplamak mümkündür [118].

5.8. Sürünme Deneyi

Statik yük altında plastik şekil değiştirme olayına sürünme denir. Sürekli statik yükleme dayanımı, belirli bir sıcaklıkta sürünmenin başladığı, ancak bir süre sonra durduğu ve üzerine çıkıldığında kopmanın ortaya çıktığı mukavemet değeridir. Bu değer, çok yavaş uygulanan deney süreleri ile bile tam olarak belirlenemez. Bundan dolayı teknikte bu büyüklüğün yerine sürünme dayanımı ve sürünme sınırı değerlerinin belirlenmesi üzerinde durulmuştur. Sürünme deneyi, etkime süresinin dayanım özelliklerine önemli derecede etkili olduğu sıcaklıklarda, malzemelere statik zorlamalar uygulanarak yapılır [118,119].

5.9. Eğme Deneyi

Her iki işlem bir birinin benzeri olup TS 205'deki tanımlara göre, eğme iki desteğe serbest olarak oturtulan düz veya yuvarlak numunelerin yön değiştirmeksizin ortasına bir eğme kuvveti uygulandığında oluşan şekil değiştirmedir. Katlama ise benzer şekilde numunelerin iki kolunun bir birine paralel oluşuncaya kadar eğme kuvveti uygulanmasıdır. Bu deneyler özellikle eğerek katlayarak şekillendirilen sac gibi malzemelerin dayanımlarını belirlemek için yapılır. Bunun yanı sıra kaynaklı bağlantıların dayanımları ve yüzey kaplama işlemlerinin kalitesini belirlemek için uygulanır [118].

6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

6.1. Çalışmanın Amacı

KGDD'lerin diğer dökme demirlere göre geniş mukavemet aralığı, aşınma direnci, yorulma direnci, tokluk ve süneklik özellikleri vardır. Çalışmanın amacı; bu özellikler dikkate alınarak önce östenitleme, sonra östempereleme ısı işlemi ve daha sonra yapılan indüksiyon yüzey sertleştirme işleminin KGDD'lerin mikroyapısal ve mekanik özelliklerine etkilerini incelemektir. Deneyler sonucunda numunelerin mikro yapıları incelenmiş; aşınma ve çekme testleri sonrasında mikrosertlik analizleri yapılmıştır. Alınan sonuçlara göre yapılan indüksiyon yüzey sertleştirme işleminin KGDD'lerin mikroyapısal ve mekanik özelliklerini iyileştirdiği görülmüştür.

6.2. Deneylerde Kullanılan Malzeme ve Özellikleri

Deneylerde kullanılan (GGG40) KGDD numunelerin kimyasal bileşimi, fiziksel, mekanik özellikleri ve eş değer standartları aşağıda verilmiştir (Tablo 6.1, 6.2, 6.3, 6.4).

Tablo 6.1 GGG40 Küresel Grafitli Dökme Demirin Standart Kimyasal Kompozisyonu

%	C	Si	Mn	S	P
GGG40 STANDART	3,4-3,85	2,3-3,1	0,1-0,3	0,2 max	0,1 max
GGG40 DENEY NUMUNESİ	3,550	2,457	0,159	0,014	0,028

Tablo 6.2 GGG40 Küresel Grafitli Dökme Demir Fiziksel özellikleri

Özgül ağırlık	7,2g/m ³
Tipik mikro yapı	En az %80 Ferrit
Elektrik iletkenliği	20-100 °C -36,5 watt / m °C
Termal genleşme katsayısı	20-100 °C -11,10 - 6 / m °C

Tablo 6.3 GGG40 Küresel Grafitli Dökme Demir Mekanik Özellikleri

Çekme Mukavemeti	400 N/mm ²
Akma Mukavemeti	250 N/mm ²
Sertlik Değeri	160-190 HB
Elastik Modülü	165 N/mm ²
Yorulma Mukavemeti	220 N/mm ²

Tablo 6.4 GGG40 Küresel Grafitli Dökme Demir Eşdeğer standartlar

TURKEY -TSE TS 526	EU - EN 1563	JAPAN - JIS G 5502	GERMANY -DIN 1693
DDK-40.3	GJS-400-18LT	FCD 400-18L	GGG-40.3

6.3. Deney Numunelerinin Hazırlanması

İşlem öncesi ticari olarak dökümü gerçekleştirilmiş 30 mm çapında 120 mm uzunluğundaki dökme demir numuneler CNC torna tezgâhında işlenerek; TS 138 EN çekme deneyi standardına uygun olarak, 10 mm çapında ve 100 mm uzunluğunda KGDD numuneler hazırlanmıştır (Şekil 6.1).



Şekil 6.1 GGG40 deney numunesinin makro resmi

Deneylerde kullanılacak numuneler 4 grupta incelenmiştir. Bu gruplar;

1. Döküm durumundaki küresel grafitli dökme demir GGG40 (Isıl işlem görmemiş),
2. 900 °C östenitlenip 120 dk 380 °C östemperleme işlemi uygulanan parçalar,
3. 900 °C östenitlenip 120 dk 320 °C östemperleme işlemi uygulanan parçalar,
4. İndüksiyon ısıl işlemini uygulanmış parçalar.

6.4. Isıl İşlemler

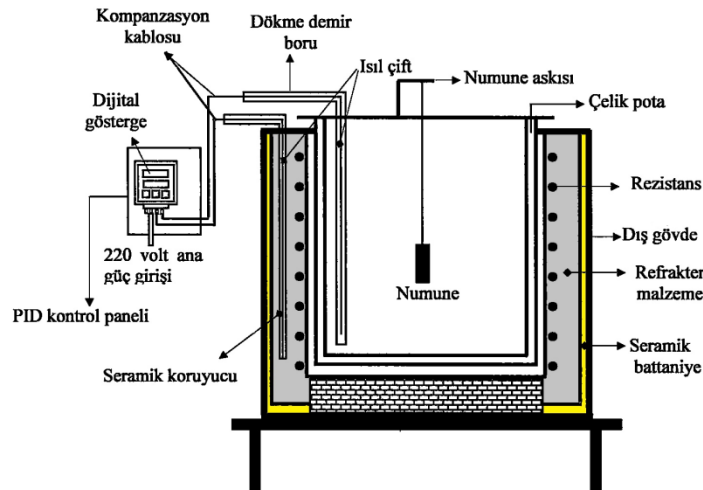
Östempereleme ısıl işlemi; östenitleme sonrası östempereleme olmak üzere iki aşamadan oluşmaktadır.

6.4.1. Östenitleme

Östempereleme ısıl işlemi için 5kW gücünde 220V ve 25A, PID kontrol sistemli ± 1 hassasiyetle çalışan atmosfer kontrolü olmayan elektrik direnç fırını kullanılmıştır. Isıl işlemlerde K tipi (Cr-CrAl) ısıl çift kullanılmıştır. Numuneler numune tavaasına konulmuş sonra termokupul telleri numune yüzeyine tememas edecek şekilde yerleştirilmiştir. Numuneler, bütün deney boyunca fırın içerisinde sıcaklık ölçümleri yapılmış yere yerleştirilerek gerçekleştirilmiştir. Deney 900 °C de gerçekleştirilmiştir.

6.4.2. Östempereleme

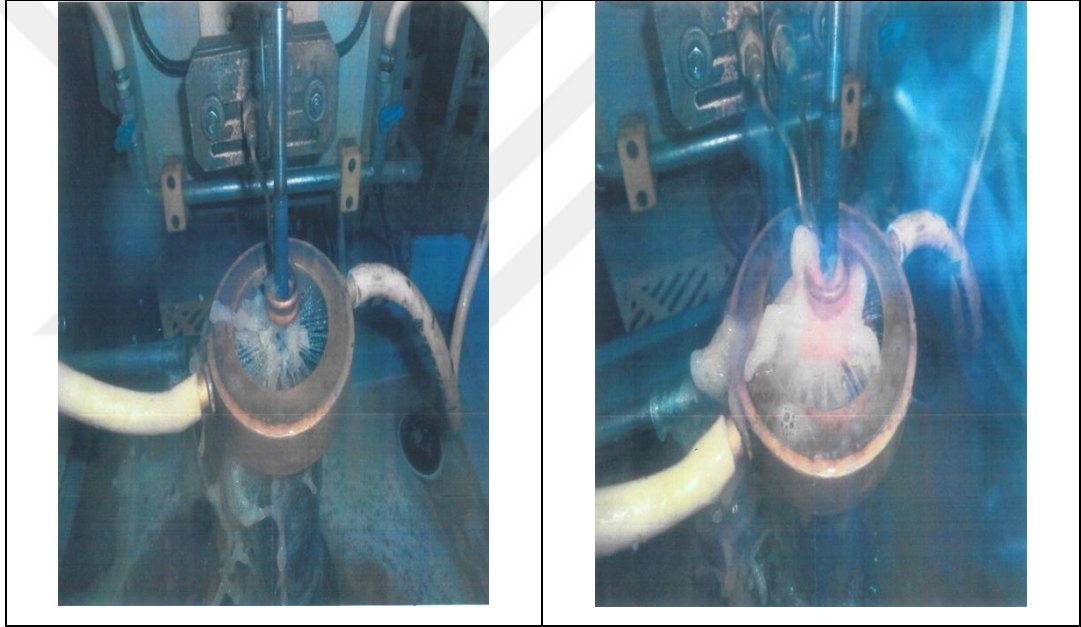
Östempereleme ısıl işleminde izotermal bekleme sağlamak için 50 % KNO_3 + 50 % NaNO_3 karışıma sahip tuz banyosu kullanılmıştır. Tuz banyosu olarak 5kW gücünde 220V ve 25A, PID kontrol sistemli ± 1 hassasiyetle çalışan tuz banyosu kullanılmıştır. Tuz banyosunun şematik gösterimi şekil 6.2 de belirtildiği gibidir.



Şekil 6.2 Östempereleme ısıl işlemi yapıldığı tuz banyosu(17)

6.4.3. İndüksiyonla Yüzey Sertleştirme

Döküm durumundaki KGDD deney numunelerini, indüksiyon bobinleri içerisinde geçirerek yüzeyden merkeze doğru homojen olarak hızlı bir şekilde ısıtılabilir ve ısıtılabilir elde edilmiştir. İndüksiyondan çıkan parça yüzeylerine su püskürtülerek parça yüzeyinden 1mm derinliğinde martensitik yapı oluşturulmuştur. Bu operasyonla, hedeflenen yüzeyden 1 mm derinliğe kadar martensitik yapının oluşumu sağlanmıştır. (soğutma sıvısı olarak su kullanılmıştır.) İndüksiyon işleminin şematik gösterimi şekil 6.3 de gösterildiği gibidir. Deney numuneleri termo indüksiyon firmasında 50kW indüksiyon makinesi ile 900 °C de 0.90dk ilerleme hızında gerçekleştirilmiştir.

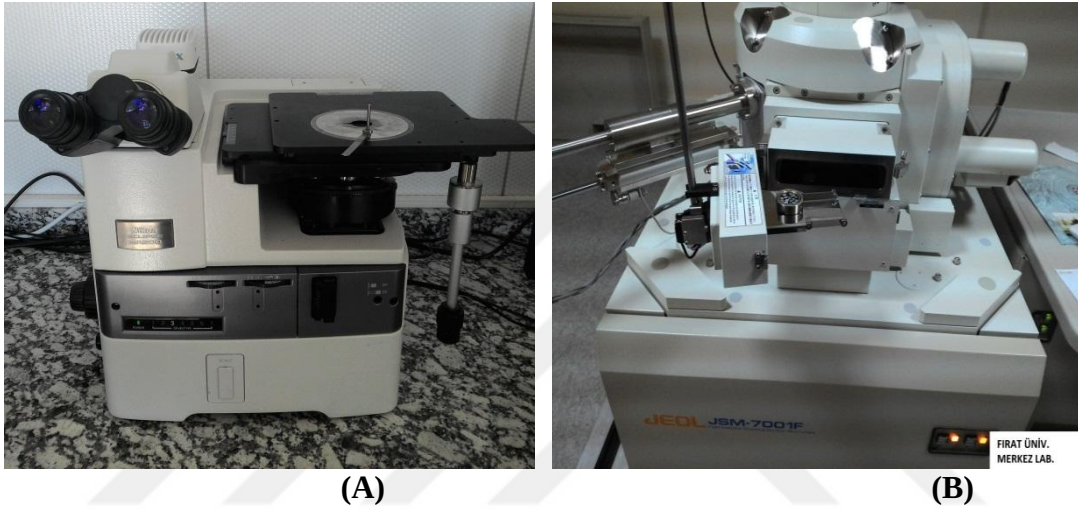


Şekil 6.3 Deney numunelerinin indüksiyonla yüzey sertleştirilmesi

6.4. Metalografik İnceleme

Isıl işlem ve yüzey sertleştirme işlemi uygulanan küresel grafitli dökme demirler ve işlem görmemiş küresel grafitli dökme demir numuneler sırasıyla mikro yapılarını incelemek için 10X10 mm ölçülerinde kesilerek metalografik incelemeler yapılmıştır. Geleneksel temizleme ve parlatma yöntemi kullanılmış olup, sırasıyla 80, 120, 240, 500, 800 ve 1000 mesh zımpara ile zımparalandıktan sonra 3 µm'lık elmas pasta ile parlatılarak dağlamaya hazır hale getirilmiştir. Dağlama işlemi için % 2 Nital kullanılarak 2 sn süre ile dağlama yapılmıştır.

Hazırlık işlemi tamamlanan numunelerin mikro yapılarını görüntülemek amacıyla her bir numune optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu ile inceleme yapılmıştır. Optik mikroskop analizleri için; Fırat Üniversitesi Metalürji ve Malzeme Müh. Laboratuvarında bulunan Nikon MA2000 optik mikroskobu ve malzemenin kimyasal içeriklerini ile EDS analizlerini tespit etmek için de Fırat üniversitesi, Merkez Araştırma Laboratuvarında bulunan JEOL marka JSM-7001F analiz test cihazı kullanılmıştır (Şekil 6.4).



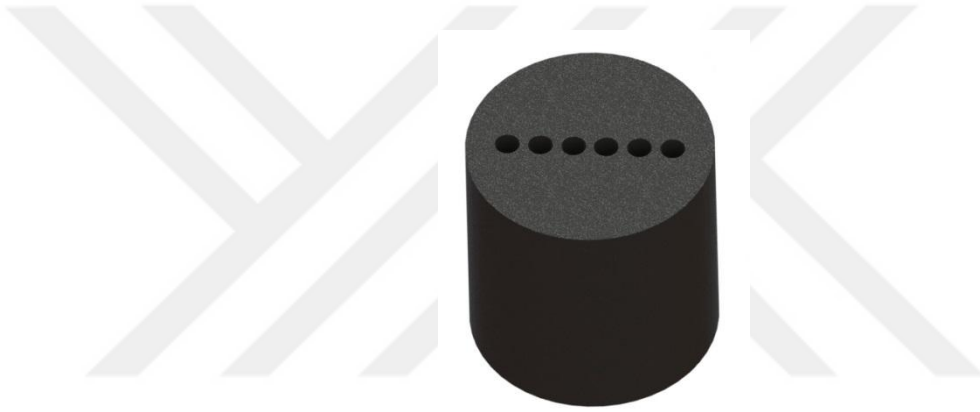
Şekil 6.4 (A) Optik mikroskobu (B) SEM mikroskobu

6.5. Sertlik Deneyi

Deney numunelerinin mikrosertliklerinin incelenmesi için döküm durumundaki KGDD numuneleriyle birlikte önce östenitlenmiş, sonra östemperlenmiş numuneler ve indüksiyon ile yüzey sertleştirilmiş numunelerin eşit aralıklarla metalografik işleme tabi tutulmuş bölgelerinden 6 adet sertlik değeri alınarak ortalama mikro sertlik sonucu elde edilmiştir. Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalürji ve Malzeme Mühendisliği bölümü laboratuvarlarında bulunan EMCOTEST DuraScan marka mikrosertlik cihazı ile 50 gr yük uygulanarak, numunelerin tam orta ekseninden 1,3 mm aralıklarla ve 10 sn'lik yükleme hızında gerçekleştirilmiştir. Mikrosertlik ölçümünün gerçekleştirildiği cihaz Şekil 6.5'de gösterilmiştir. Ölçümlerde 136° tabanı kare olan piramit uç kullanılmıştır. Mikrosertlik ölçümlerinin yapıldığı bölgeler Şekil 6.6'da gösterilmiştir.



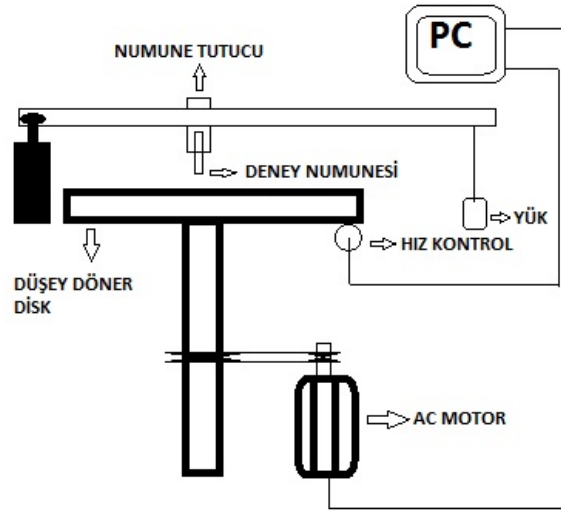
Şekil 6.5 EMCOTEST DuraScan marka mikrosertlik cihazı



Şekil 6.6 Mikrosertlik ölçümlerinin yapıldığı bölgelerin şematik gösterimi

6.6. Aşınma Deneyi

Aşınma deneyi deney numunesinin dönen bir disk üzerine sürtünmesiyle gerçekleştirilmektedir. Aşınma deneyi 3kW gücünde AC motorlu Simens marka aşınma cihazında aşınma deneyine tabi tutulmuştur (Şekil 6.7). Aşınma cihazı düşey dönel harekete sahip sertleştirilmiş tablaya sahiptir. Aşınma deneyinde numune üzerine etkiyen yük ve diskin dönme hızı kolaylıkla ayarlana bilinmektedir. Deneyler, oda sıcaklığında 1m/s sabit kayma hızında 10, 20, 30 N yük altında 15 ve 8 m kayma mesafesinde gerçekleştirilmiştir. Her bir numune için 2 ölçüm yapılmıştır. Aşınma deneyinde 320 ve 800 Mesh SiC zımpara kullanılmıştır. Aşınma deneyi yapılmadan hassasiyeti 0.0001 gr elektronik tartı ile tartılıp her numune aşınma işlemine tabi tutulduktan sonra alkol ile temizlenip tekrar tartılmıştır. Aşınma kayıpları kayıt altına alınmıştır.



Şekil 6.7 Aşınma deney cihazı şematik gösterimi

6.7. Çekme Deneyi

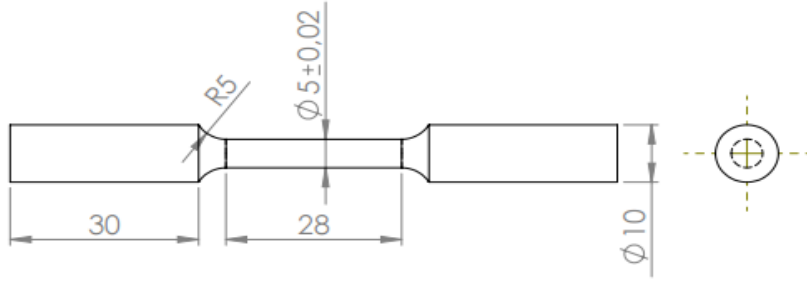
Döküm durumundaki KGDD numuneleriyle diğer ısıtılma işlemi uygulanan deney numunelerinin çekme mukavemetlerini kıyaslamak için yüzey sertleştirme ve ısıtılmanın çekme mukavemetine etkilerini görmek amacıyla deney numuneleri Fırat üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalürji ve Malzeme bölümü Laboratuvarında SHIMADZU AG-X 50 KN marka çekme cihazı ile 50.000 N yük altında ve 1mm/dk çekme hızında standartlara uygun olarak yapılmıştır (Şekil 6.8, 6.9, 6.10).



Şekil 6.8 SHIMADZU AG-X 50 KN Çekme Deney cihazı



Şekil 6.9 Çekme işlemine tabi tutulan deney numunesi



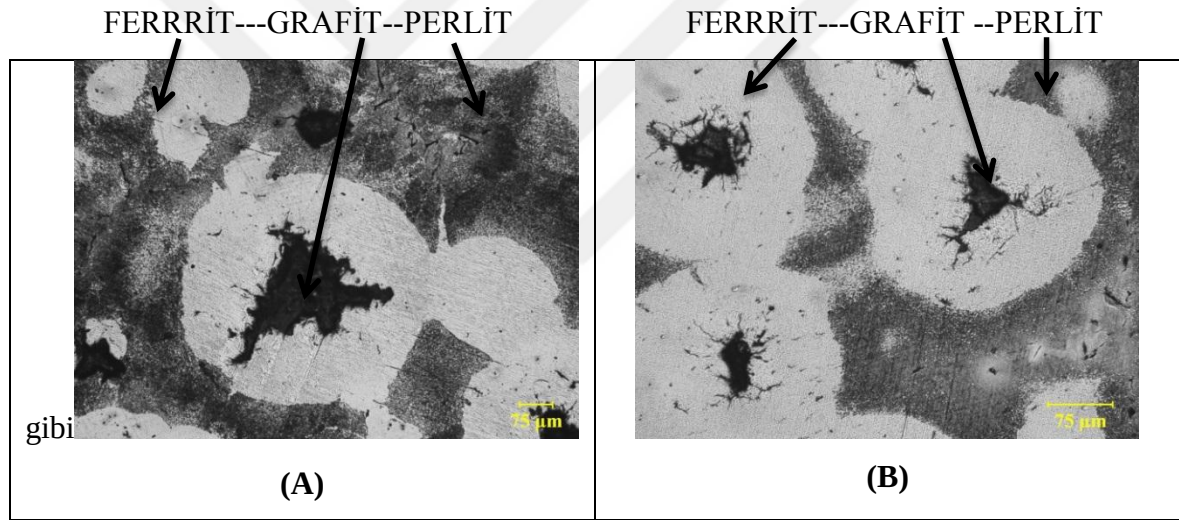
Şekil 6.10 TS138 EN çekme deneyi standardına uygun numune ölçüsü

7. DENEY SONUÇLARI

7.1. Metalografik İnceleme Sonuçları

7.1.1. Döküm durumu KGDD numuneler (GGG40)

Bu deneyde kullanılan KGDD numuneleri Ferrit + Perlit matrisli mikro yapıları aşağıda Şekil 7.1’de verilmiştir. Aşağıdaki resimlerde de görüldüğü gibi malzemenin içyapısının da Grafit etrafında Ferrit olduğu gözlemlenmektedir. Bu ferrit halkalarının yanı sıra diğer kısımlarda ise perlit oluşumuna rastlandığı tipik “dana gözü” yapısından oluştuğu görülmektedir.

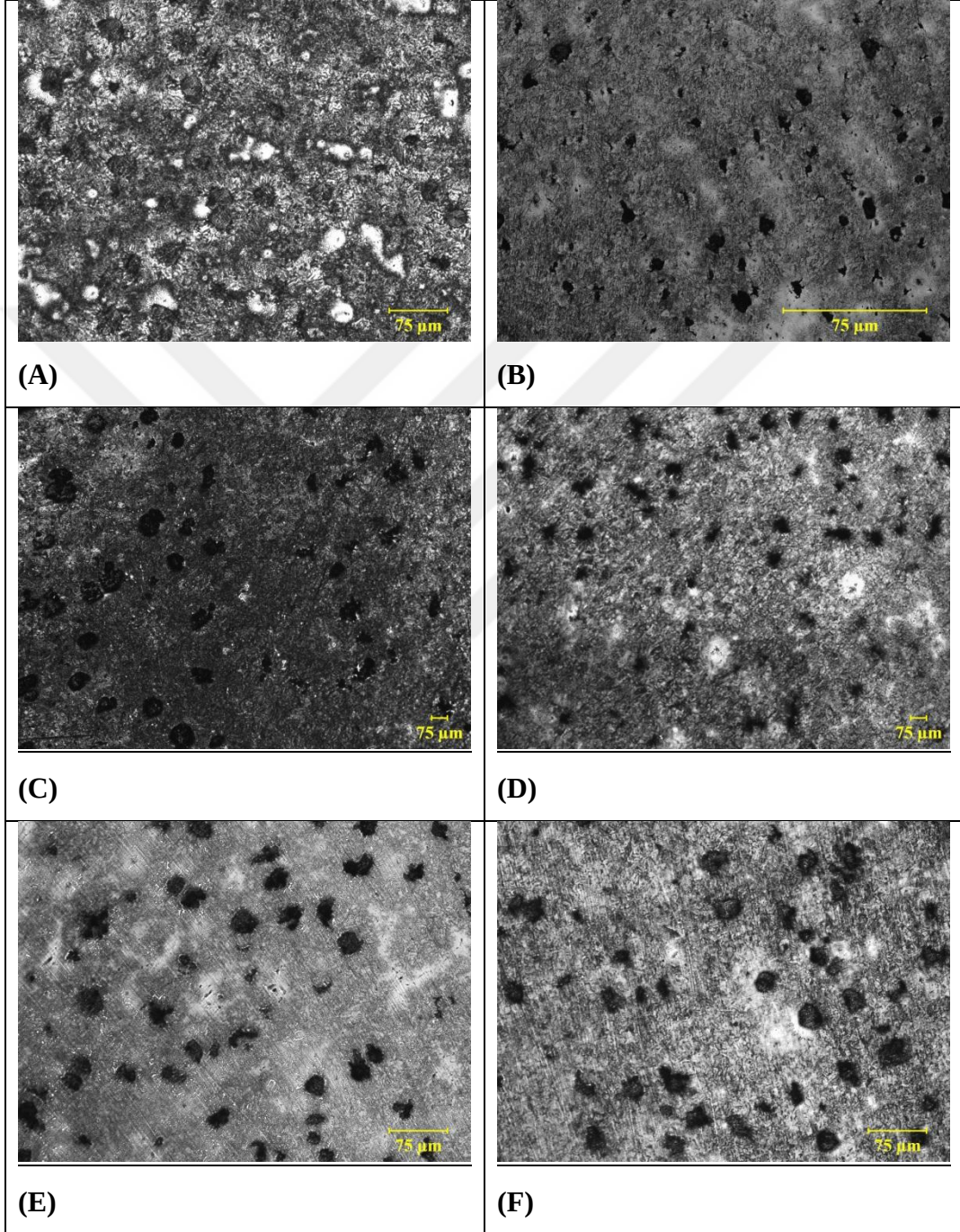


Şekil 7.1 Döküm durumunda KGDD (GGG40) numunelerinin mikro yapıları (A) ve (B) Perlitik KGDD (Dağlama: %2 Nital X200)

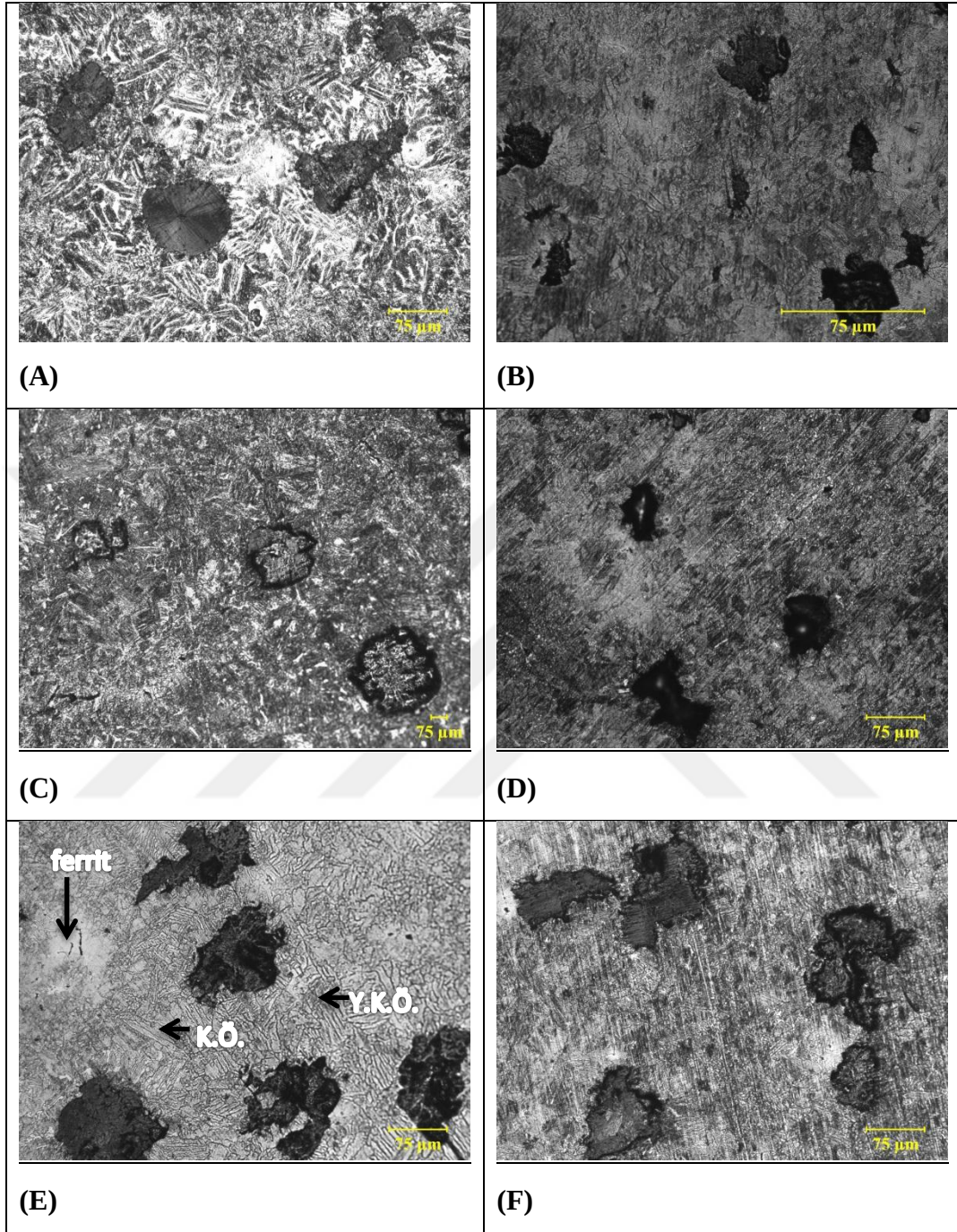
7.1.2. Östemperlenmiş küresel grafitli dökme demir numuneler

Mikro yapısı ferrit+Perlit olan KGDD numuneler; 900 °C de 90dk östenitleme ve 320 °C 120 dk östemperleme işlemine tabi tutulmuş ve östemperleme prosesinin bu numunelerin sertlik, aşınma davranışı ve mikro yapıya etkileri gözlenmiştir. Bu numuneler, östemperleme sıcaklıkları sebebiyle iki gruba ayrılarak optik mikroskop altında incelenmiştir. Östemperleme ısı işlemi sonucu yukarıda belirtilen Şekil 7.2 ve Şekil 7.3’de verilen mikro yapı fotoğraflarındaki numuneler 320 °C de 120 dk östemperlenmiştir. Bu numunelerde

matrisin ferrit, yüksek karbonlu östenitten (Y.K.Ö) ve kalıntı östenitten (K.Ö.) meydana geldiği gözlemlenmiştir. Bu numunelerde 120 dk östemperelemenin etkisi ile mikro yapıda ösferrit iğneleri belirgin olarak görülmektedir [05]



Şekil 7.2 900 °C de östenitlenen 320 °C de 120 dk östemperelenen numuneler (Dağlama: %2 Nital X50)

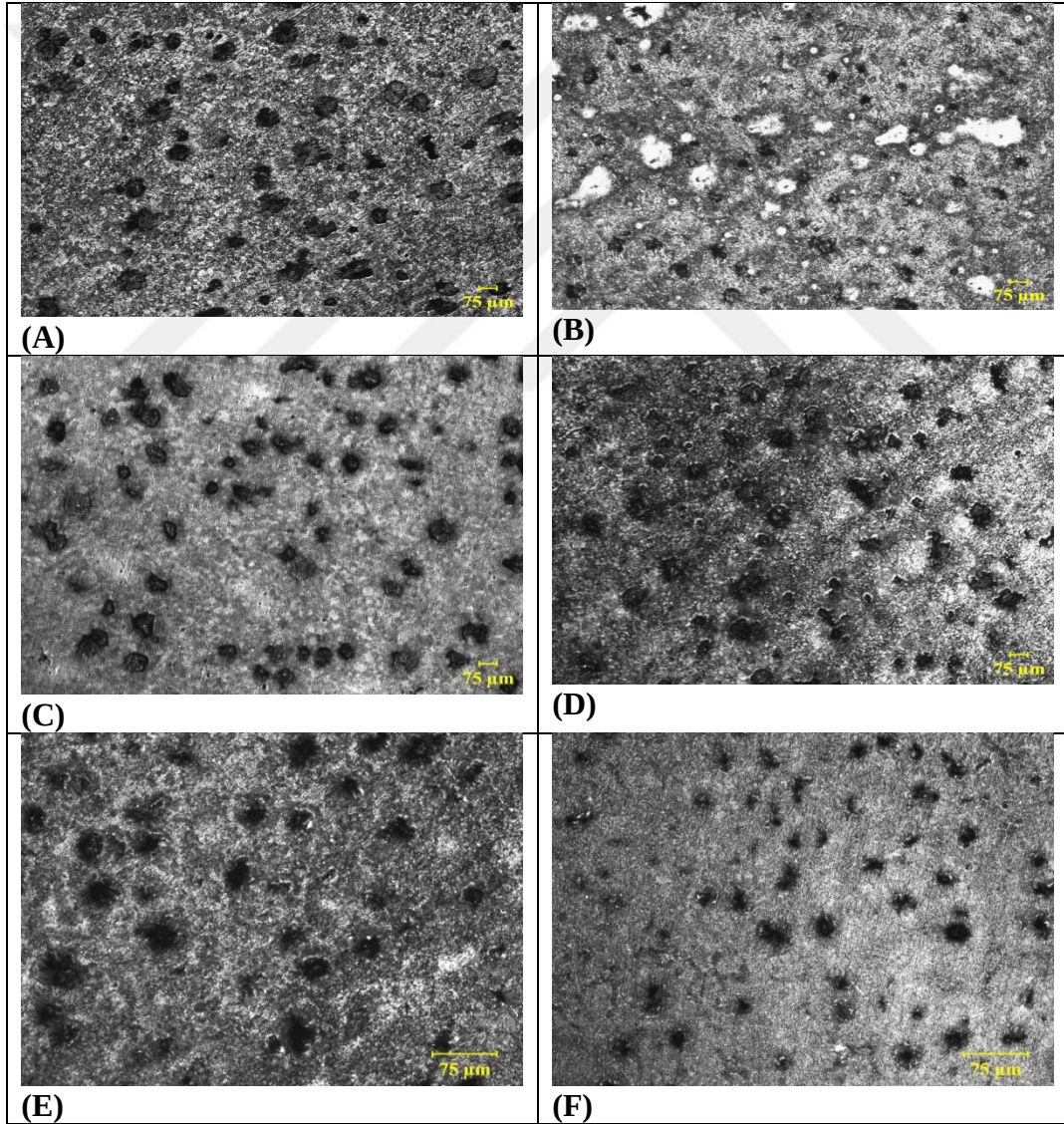


Şekil 7.3 900 °C de östenitlenen 320 °C de 120 dk östemperlenen numuneler (Dağlama: %2 Nital X200)

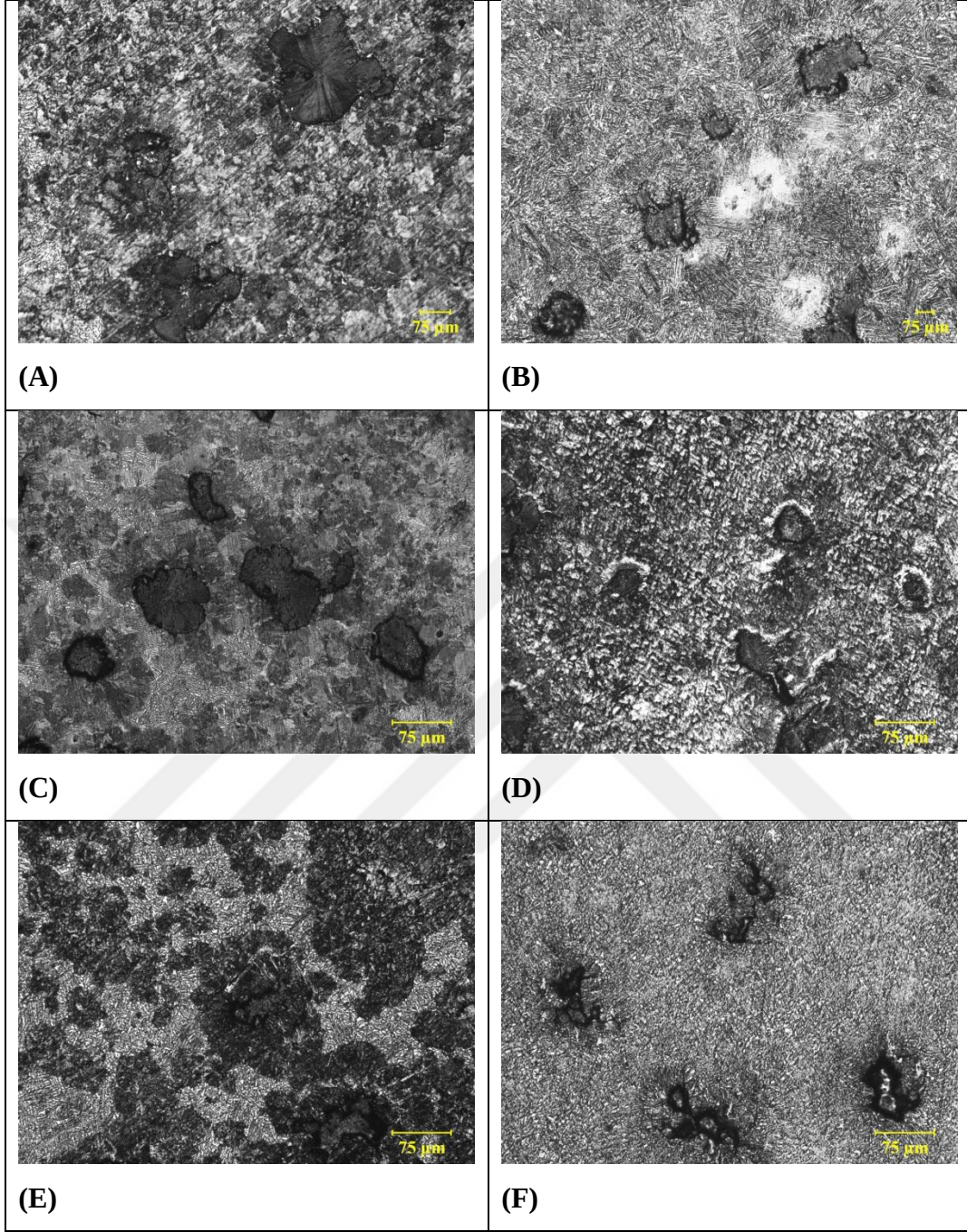
Östemperleme ısı işlemi sonucunda aşağıda belirtilen Şekil 7.4 ve Şekil 7.5 de mikro yapı fotoğrafları verilen numuneler; 380 °C de 120 dk östemperlenmiştir. Bu numunelerin östemperleme sıcaklığının artmasına bağlı olarak ferrit ve yüksek karbonlu östenitin kabalaşması gözlenmiş ve kalıntı östenitin azaldığı tespit edilmiştir. Östemperleme sıcaklığının düşük olmasından dolayı yapı içerisinde küresel grafitlerin etrafına iğnemi

ferritlerin çekirdeklendiği görülmüştür, buda yapıdaki östenitin daha çok soğumaya uğratıldığı ve bu alt soğuma büyüklüğünden dolayı iğnemi yapıların ortaya çıktı belirlenmiştir [05].

Yüksek östempereleme sıcaklığında ferrit ve yüksek karbonlu östenit iğnelerinin daha kaba hale geldiği ve üst ösferrit yapısının oluştuğu görülmektedir. Bu yapıda oluşan ferrit miktarı azalmakta, bu durumun östempereleme sıcaklığının yüksek olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Alt soğuma noktasında ösferrit oluşumu azalması ve ferrit çekirdekleşmesinin artmasından dolayı ferrit miktarı artmakta, hacim oranısı azalmaktadır. Östempereleme sıcaklığı arttıkça bu orantı tam tersine dönmektedir [05].



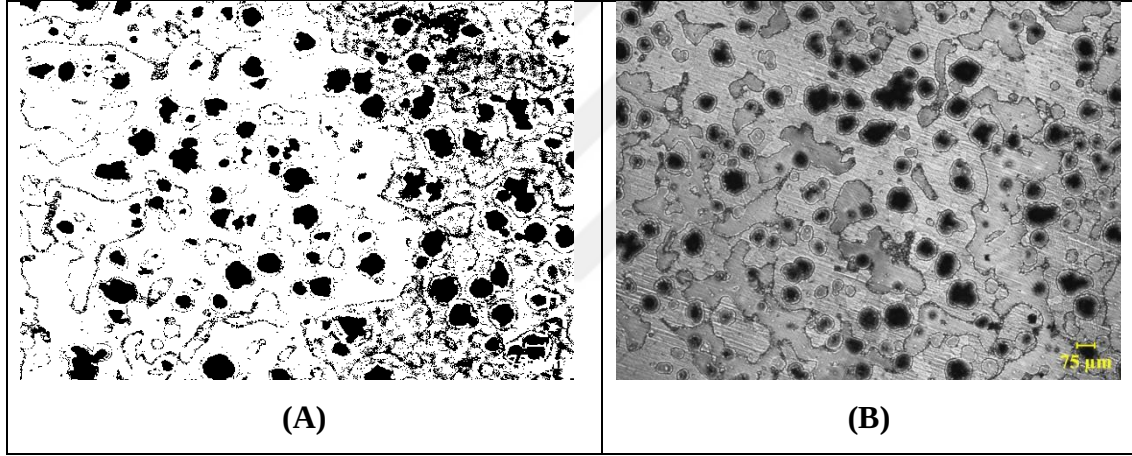
(Şekil 7.4) 900 °C de östenitlenen 380 °C de 120 dk östemperelenen numuneler (Dağlama: %2 Nital X50)



(Şekil 7.5) 900 °C de östenitlenen 380 °C de 120 dk östemperlenen numuneler (Dağlama: %2 Nital X200)

7.1.3. İndüksiyonla Yüzey Sertleştirme Isıl İşlemi Yapılmış Numunelerin Mikroyapı İncelemeleri

İndüksiyon numunesine ait mikroyapı fotoğrafı Şekil 7.6(A)'da belirtildiği gibidir. Resimde de görüldüğü gibi; indüksiyona uğrayan bölge ile içyapı arasında farklılık gözle görülür biçimde ortadadır. Resmin sol tarafı indüksiyona uğramış kısım da ısının etkisi ile martenzitik yapı oluşmuş ve dış kabuk kısmında sertliğin artmasına sebebiyet vermiştir. Diğer bölgede bir değişiklik gözlenmemekte ve yapı ferrit+ perlit içermektedir. Buradan da görülmektedir ki bu yapının iç kısmında sünek, dış kısmında ise sert bir yapı elde edilmiştir. İndüksiyon numunesinin iç yapı fotoğrafları Şekil 7.6(B)'da gösterilmiştir [44].



Şekil 7.6 İndüksiyon numuneleri (Dağlama: %2 Nital X50)

7.2. Mikro Sertlik Deney Sonuçları

Bu deneyde döküm durumundaki KGDD ile östemperlenmiş KGDD ve indüksiyon işlemine tabi tutulmuş numunelerin sertlik sonuçları Tablo 7.1 de verilmiştir. Sertlik birimi VICKERS (HV) dir. Tabloda verilen sonuçlara göre döküm durumundaki KGDD numunelerinin toplam ortalama sertlik değeri 195,73 HV, ÖKGDD 120dk 320 °C Östemperleme numunelerinin toplam ortalama sertlik değeri 457,47 HV, ÖKGDD 120DK 380 °C östemperleme numunelerinin toplam ortalama sertlik değeri 473,69 HV, İndüksiyon numunelerinin toplam ortalama sertlik değeri 282,57 HV olarak tespit edilmiştir. Elden edilen bu verilere göre ÖKGDD 320 °C östemperleme numunesinin sertliği, döküm durumundaki KGDD göre %233,72

artmıştır. ÖKGDD 380 °C östemperleme numunesinin sertliği, döküm durumundaki KGDD göre %242,01 artarken, indüksiyon numunesinin sertliği, döküm durumundaki KGDD göre %144,36 artmıştır. İndüksiyon numunelerinin sertlik değerleri, hem kabuğa yakın bölgelerden hem de iç bölgelerden alınarak oluşturulmuştur. Buradan da görülmektedir ki; kabuktaki sertleşmenin etkisiyle malzemenin ortalama sertlik değeri artmaktadır.

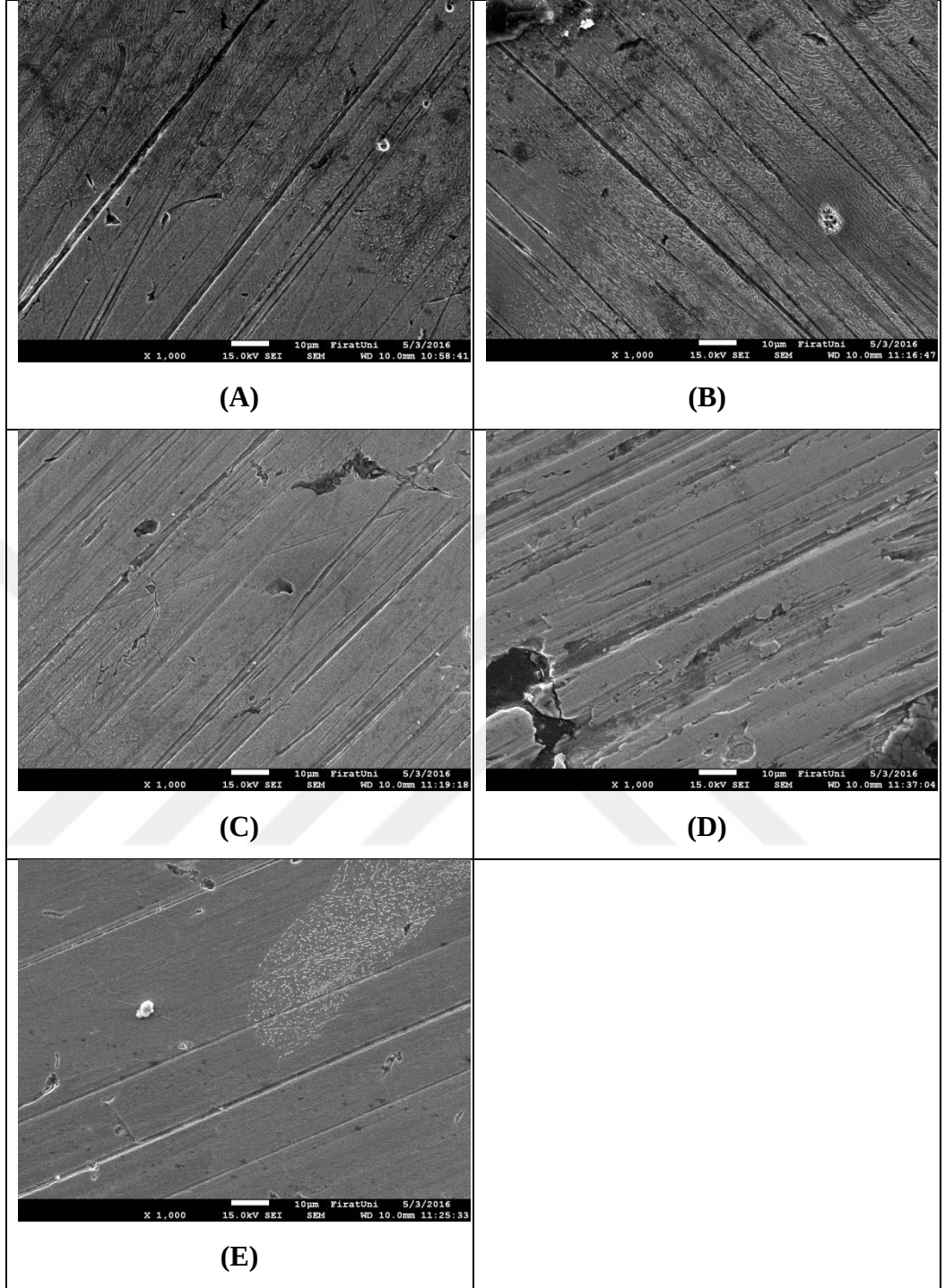
Tablo 7.1 Numunelerden alınan Sertlik değerleri ve Toplam ortalama sertlik değerleri

NUMUNE ADLARI	ÖLÇÜM SIRALAMASI VE SERTLİK DEĞERLERİ						ORTAMA SERTLİK
	1	2	3	4	5	6	
DÖKÜM DURUMU KGDD (1)	186	189	199	197	202	194	194,50
DÖKÜM DURUMU KGDD (2)	208	178	255	239	243	197	220,00
DÖKÜM DURUMU KGDD (3)	222	173	209	200	238	234	212,67
DÖKÜM DURUMU KGDD (4)	186	229	160	125	182	194	179,33
DÖKÜM DURUMU KGDD (5)	155	113	222	197	178	168	172,17
ÖKGDD 120DK 320 °C ÖSTEMPERLEME (1)	415	423	407	402	431	390	411,33
ÖKGDD 120DK 320 °C ÖSTEMPERLEME (2)	531	502	508	506	471	496	502,33
ÖKGDD 120DK 320 °C ÖSTEMPERLEME (3)	548	477	517	465	576	496	513,17
ÖKGDD 120DK 320 °C ÖSTEMPERLEME (4)	548	522	410	421	447	440	464,67
ÖKGDD 120DK 320 °C ÖSTEMPERLEME (5)	467	310	411	431	426	361	401,00
ÖKGDD 120DK 320 °C ÖSTEMPERLEME (6)	458	520	465	426	440	405	452,33
ÖKGDD 120DK 380 °C ÖSTEMPERLEME (1)	454	467	489	454	426	496	464,33
ÖKGDD 120DK 380 °C ÖSTEMPERLEME (2)	458	376	445	426	451	426	430,33
ÖKGDD 120DK 380 °C ÖSTEMPERLEME (3)	467	419	419	469	447	369	431,67
ÖKGDD 120DK 380 °C ÖSTEMPERLEME (4)	548	496	517	456	489	443	491,50
ÖKGDD 120DK 380 °C ÖSTEMPERLEME (5)	511	536	529	526	508	485	515,83
ÖKGDD 120DK 380 °C ÖSTEMPERLEME (6)	586	584	491	426	524	440	508,50
İNDÜKSİYON(1)	258	255	260	260	264	276	262,17
İNDÜKSİYON(2)	277	248	255	348	269	286	280,50
İNDÜKSİYON(3)	290	269	288	277	281	323	288,00
İNDÜKSİYON(4)	303	274	306	289	289	279	290,00
İNDÜKSİYON(5)	284	300	276	300	306	287	292,17

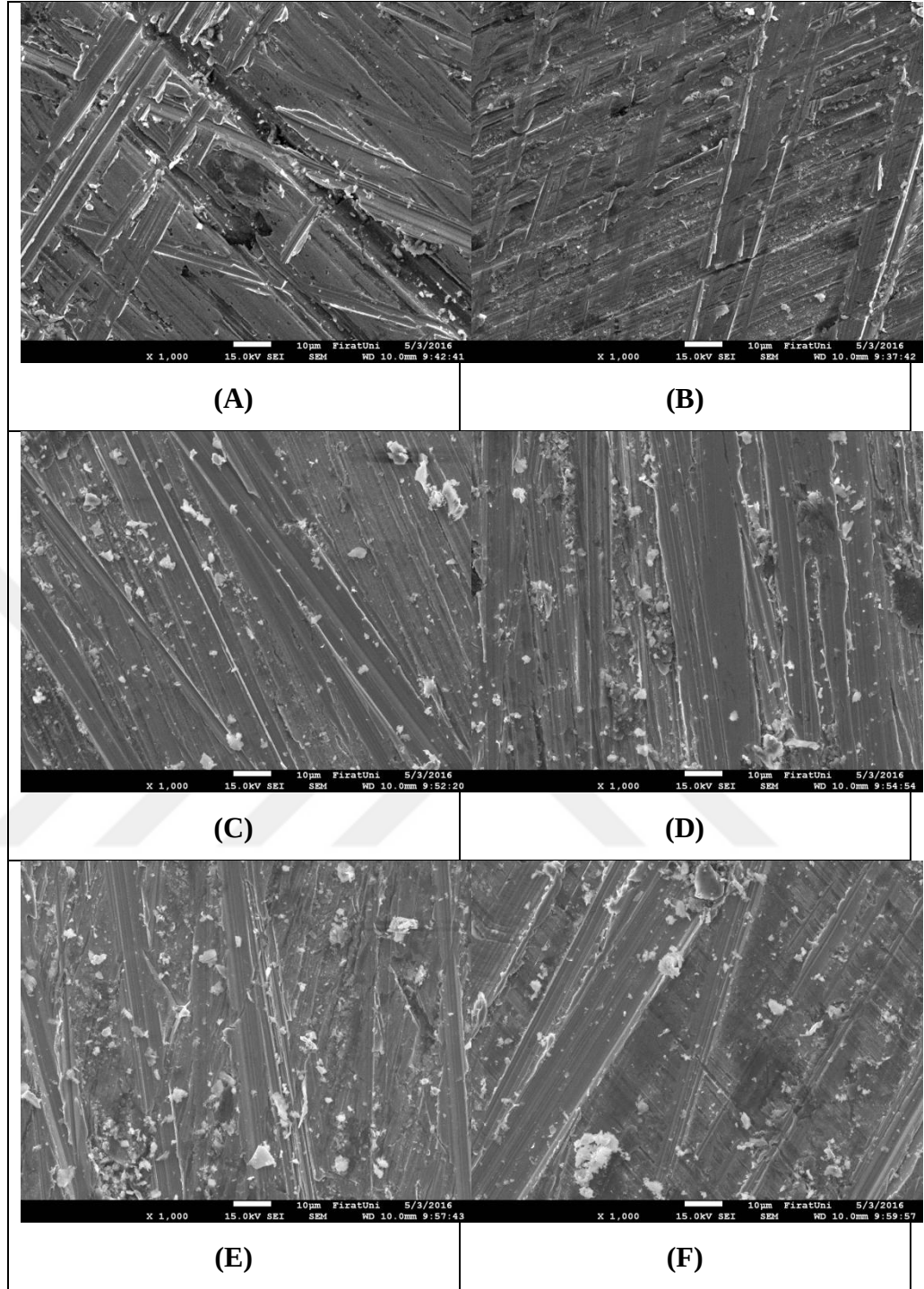
7.3. Aşınma yüzeylerinin incelenmesi

Aşınma deneyine tabi tutulan numunelerin SEM görüntüleri resimlerde verilmiştir. SEM görüntülerinden görüldüğü gibi; döküm durumundaki malzemelerin aşırı deformasyona uğradığı resimlerde görülmektedir. Döküm durumundaki KGDD ve ÖKGDD aşınma deneyi sonuçları aşağıdaki tabloda verilmiştir. Döküm durumundaki KGDD malzemenin sürtünme katsayısı 10N yük altında 0,021-0,029 g aralığında, 20N yük altında 0,021-0,028 g aralığında ve 30N yük altında 0,029-0,031 g aralığında kütle kaybı tespit edilmiştir. ÖKGDD numunesi 120DK 320 °C östemperleme aşınma deneyine tabi tutulmuş ve sürtünme katsayısı 10N yük altında 0,013-0,016 g aralığında, 20N yük altında 0,013-0,027g aralığında ve 30N yük altında 0,011-0,012 g aralığında kütle kaybı tespit edilmiştir. ÖKGDD numunesi 120DK 380 °C östemperleme aşınma deneyine tabi tutulmuş ve sürtünme katsayısı 10N yük altında 0,007-0,011 g aralığında, 20N yük altında 0,002-0,015g aralığında ve 30N yük altında 0,08-0,010 g aralığında kütle kaybı tespit edilmiştir (Tablo 7.2). Sonuç olarak; östenitleme sonrası östemperleme ve indüksiyonla yüzey sertleştirme ısı işlemlerinin KGDD numunelerinin aşınma dirençlerini arttırdığı tespit edilmiştir (Şekil 7.7 – Şekil 7.10).

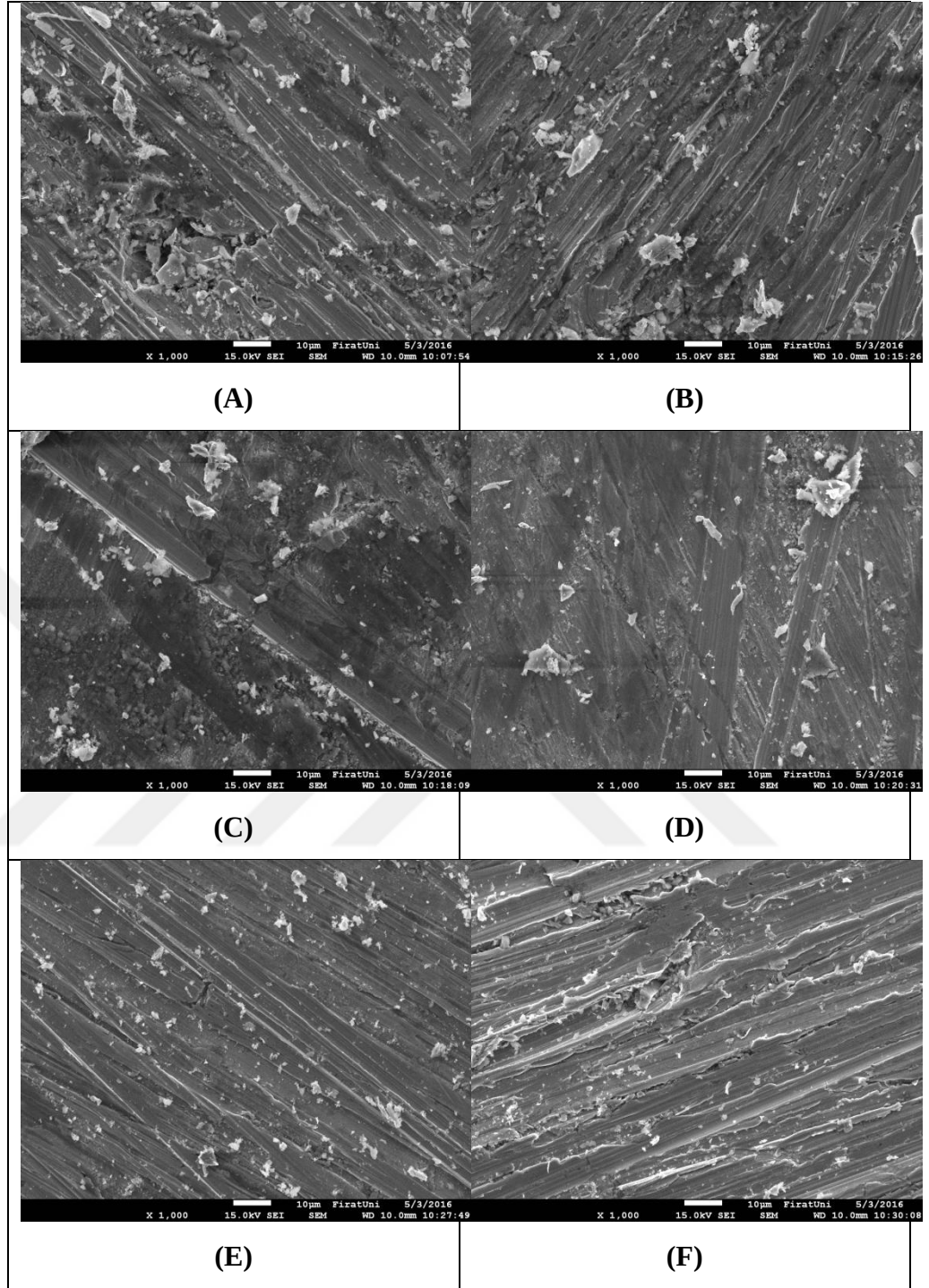
Aşınma yüzeyleri incelendiğinde yüzeylerde mikro çatlak, mikro yarık, mikro oluk mekanizmaları oluşumu test yükünün artmasına bağlı olarak arttığı gözlemlenmiştir (Şekil 7.7 – Şekil 7.10). Aşınma yüzeyleri incelendiğinde ‘‘ploughing’’ aşınma mekanizması karakteristiği taşıdığı ve aşındırıcı zımpara boyutu arttıkça aşınma yüzeylerinde kabalaştığı görülmüştür (Şekil 7.7 – Şekil 7.10).



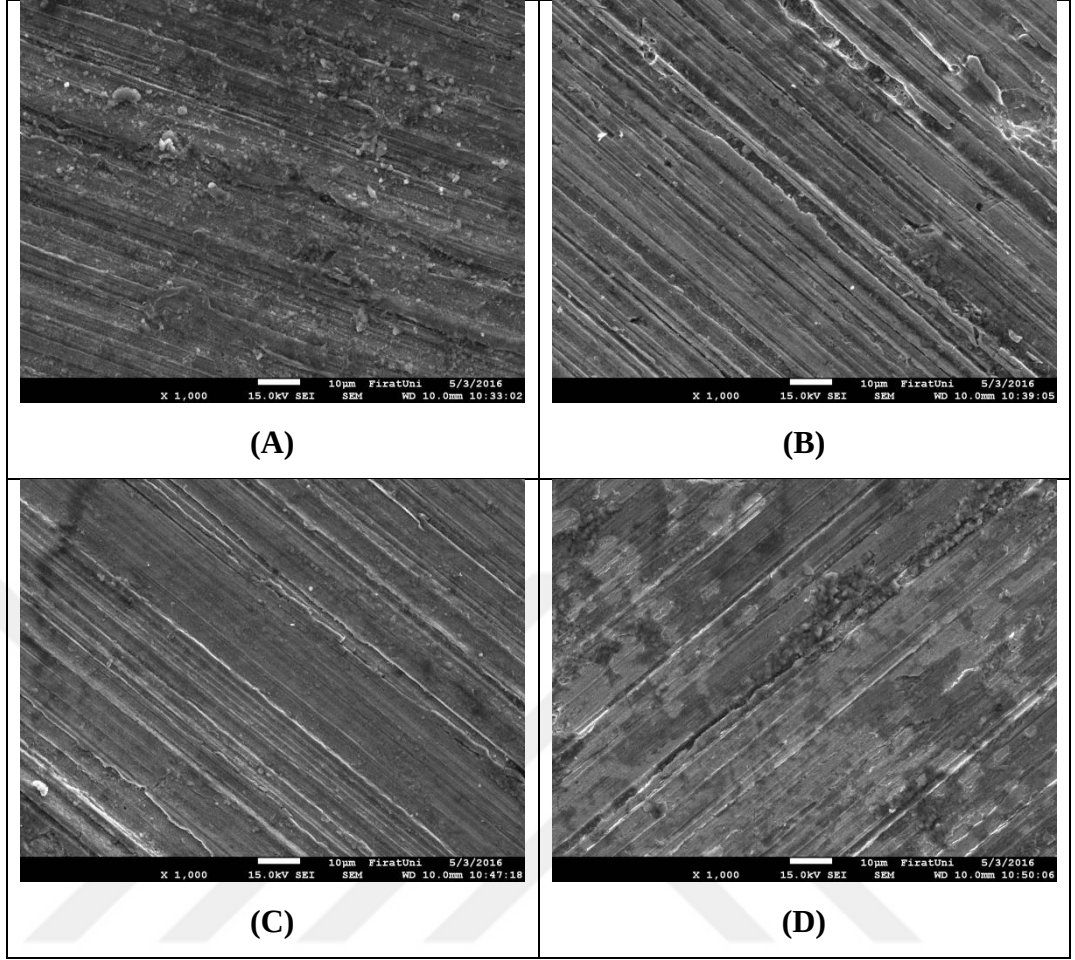
Şekil 7.7 320 ve 800 Mesh zımpara üzerinde 8 ve 15 metre yol kullanılarak 10N, 20N, 30N yük altında aşındırılan döküm durumundaki KGDD numunelerinin aşınma SEM görüntüleri



Şekil 7.8 320 ve 800 Mesh zımpara üzerinde 8 ve 15 metre yol kullanılarak 10N, 20N, 30N yük altında aşındırılan ÖKGDD 120DK 320 °C ÖSTEMPERLEME numunelerinin aşınma SEM görüntüleri



Şekil 7.9 320 ve 800 Mesh zımpara üzerinde 8 ve 15 metre yol kullanılarak 10N, 20N, 30N yük altında aşındırılan ÖKGDD 120DK 380 °C ÖSTEMPERLEME numunelerinin aşınma SEM görüntüleri



Şekil 7.10 320 ve 800 Mesh zımpara üzerinde 8 ve 15 metre yol kullanılarak 10N, 20N, 30N yük altında aşındırılan İNDÜKSİYON numunelerinin aşınma SEM görüntüleri

Tablo 7.2 Numunelerin 10,20 ve 30 N yük altında aşınma kayıpları

DENEY PARÇA NUMARALARINA GÖRE AŞINMA SONUÇLARI						
	1 NOLU PARÇA 10N 320 ZIMPARA	2 NOLU PARÇA 10N 800 ZIMPARA	3 NOLU PARÇA 20N 320 ZIMPARA	4 NOLU PARÇA 20N 800 ZIMPARA	5 NOLU PARÇA 30N 320 ZIMPARA	6 NOLU PARÇA 10N 800 ZIMPARA
DÖKÜM DURUMUNDAKİ NUMUNELER İLK ÖLÇÜM	20,497	20,047	20,051	20,458	19,917	-
DÖKÜM DURUMUNDAKİ NUMUNELER 1. ZIMPARALAMA	20,473	20,026	20,03	20,431	19,888	-
DÖKÜM DURUMUNDAKİ NUMUNELER 2. ZIMPARALAMA	20,444	20,002	20,003	20,403	19,957	-
ÖKGDD 120DK 320 °C ÖSTEMPERLEME İLK ÖLÇÜM	20,211	20,356	20,14	20,065	20,366	20,824
ÖKGDD 120DK 320 °C ÖSTEMPERLEME 1. ZIMPARALAMA	20,194	20,33	20,113	20,042	20,354	20,808
ÖKGDD 120DK 320 °C ÖSTEMPERLEME 2. ZIMPARALAMA	20,181	20,316	20,1	20,028	20,343	20,79
ÖKGDD 120DK 380 °C ÖSTEMPERLEME İLK ÖLÇÜM	21,484	21,461	20,37	20,467	20,361	20,822
ÖKGDD 120DK 380 °C ÖSTEMPERLEME 1. ZIMPARALAMA	21,477	21,454	20,368	20,452	20,353	20,81
ÖKGDD 120DK 380 °C ÖSTEMPERLEME 2. ZIMPARALAMA	21,47	21,443	20,357	20,444	20,343	20,79
İNDÜKSİYON İLK ÖLÇÜM	18,558	18,298	18,569	17,628	-	-
İNDÜKSİYON 1. ZIMPARALAMA	18,553	18,293	18,555	17,625	-	-
İNDÜKSİYON 2. MESH	18,545	18,292	18,546	17,621	-	-

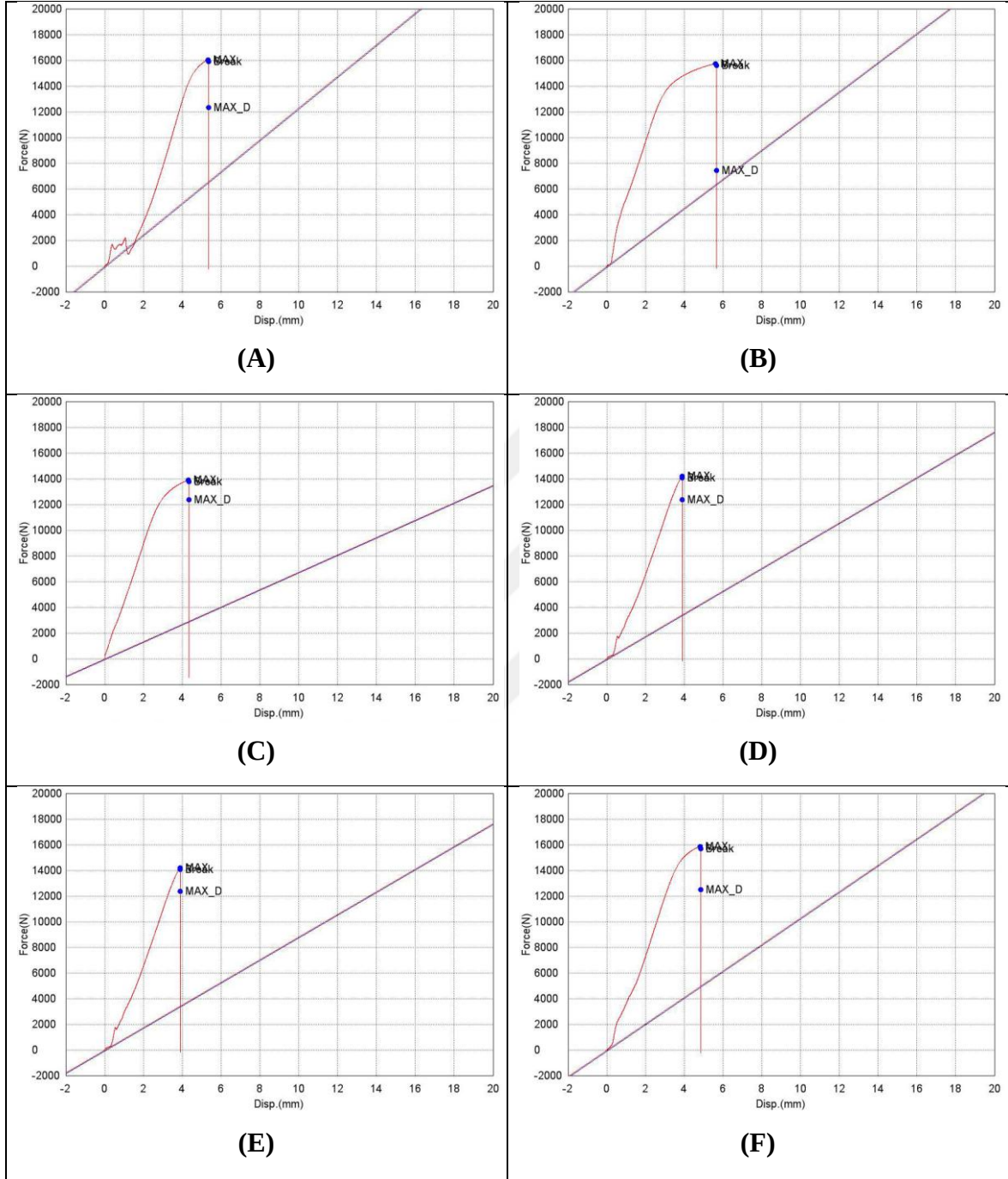
7.4. Çekme deneyi ve sonuçları

Döküm durumundaki GGG40 Küresel grafitli dökme demirin çekme mukavemeti 400N/mm^2 dir. Isıl işleme tabi tutulmuş diğer malzemelerin çekme mukavemeti aşağıdaki tabloda belirtilmiştir. Tabloda da görüldüğü gibi ısıl işlemin etkisi ile çekme dayanımı artış göstermektedir(Tablo7.3). İndüksiyon ile yüzey sertleştirme işlemine tabi tutulan numunenin çekme dayanımı % 29 artmış, östenitleme 120DK 320 °C Östemperleme işlemine tabi tutulan numunenin çekme dayanımı % 97 artarken, östenitleme 120DK 380 °C Östemperleme işlemine tabi tutulan numunenin çekme dayanımı ise % 119 artmıştır. Elde edilen sonuçlarda 380 °C östemperleme sıcaklığının en verimli sonuçları ortaya koyduğu gözlemlenmektedir.

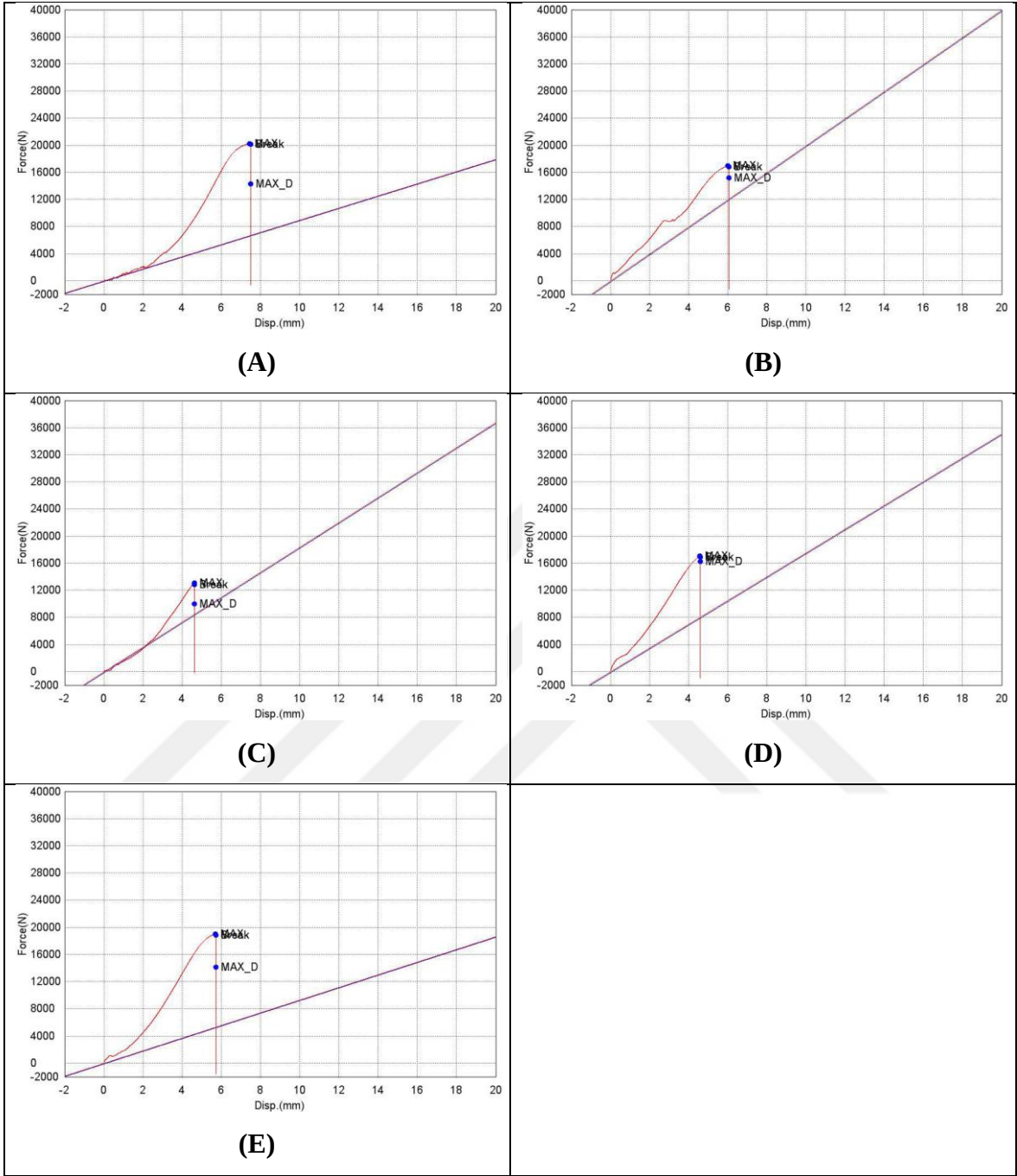
Tablo 7.3 Çekme numunelerinin çekme dayanım sonuçları

NUMUNE ADLARI	ÇEKME DAYANIMI (N/mm ²)	ORTALAMA ÇEKME DAYANIMI (N/mm ²)
ÖKGDD 120DK 320 °C ÖSTEMPERLEME (1)	816,248	790,742
ÖKGDD 120DK 320 °C ÖSTEMPERLEME (2)	800,722	
ÖKGDD 120DK 320 °C ÖSTEMPERLEME (3)	707,028	
ÖKGDD 120DK 320 °C ÖSTEMPERLEME (4)	721,777	
ÖKGDD 120DK 320 °C ÖSTEMPERLEME (5)	891,266	
ÖKGDD 120DK 320 °C ÖSTEMPERLEME (6)	807,408	
ÖKGDD 120DK 380 °C ÖSTEMPERLEME (1)	1031,210	879,046
ÖKGDD 120DK 380 °C ÖSTEMPERLEME (2)	863,977	
ÖKGDD 120DK 380 °C ÖSTEMPERLEME (3)	663,871	
ÖKGDD 120DK 380 °C ÖSTEMPERLEME (4)	869,194	
ÖKGDD 120DK 380 °C ÖSTEMPERLEME (5)	966,978	
İNDÜKSİYON(1)	465,137	516,251
İNDÜKSİYON(2)	494,379	
İNDÜKSİYON(3)	583,391	
İNDÜKSİYON(4)	500,284	
İNDÜKSİYON(5)	538,062	

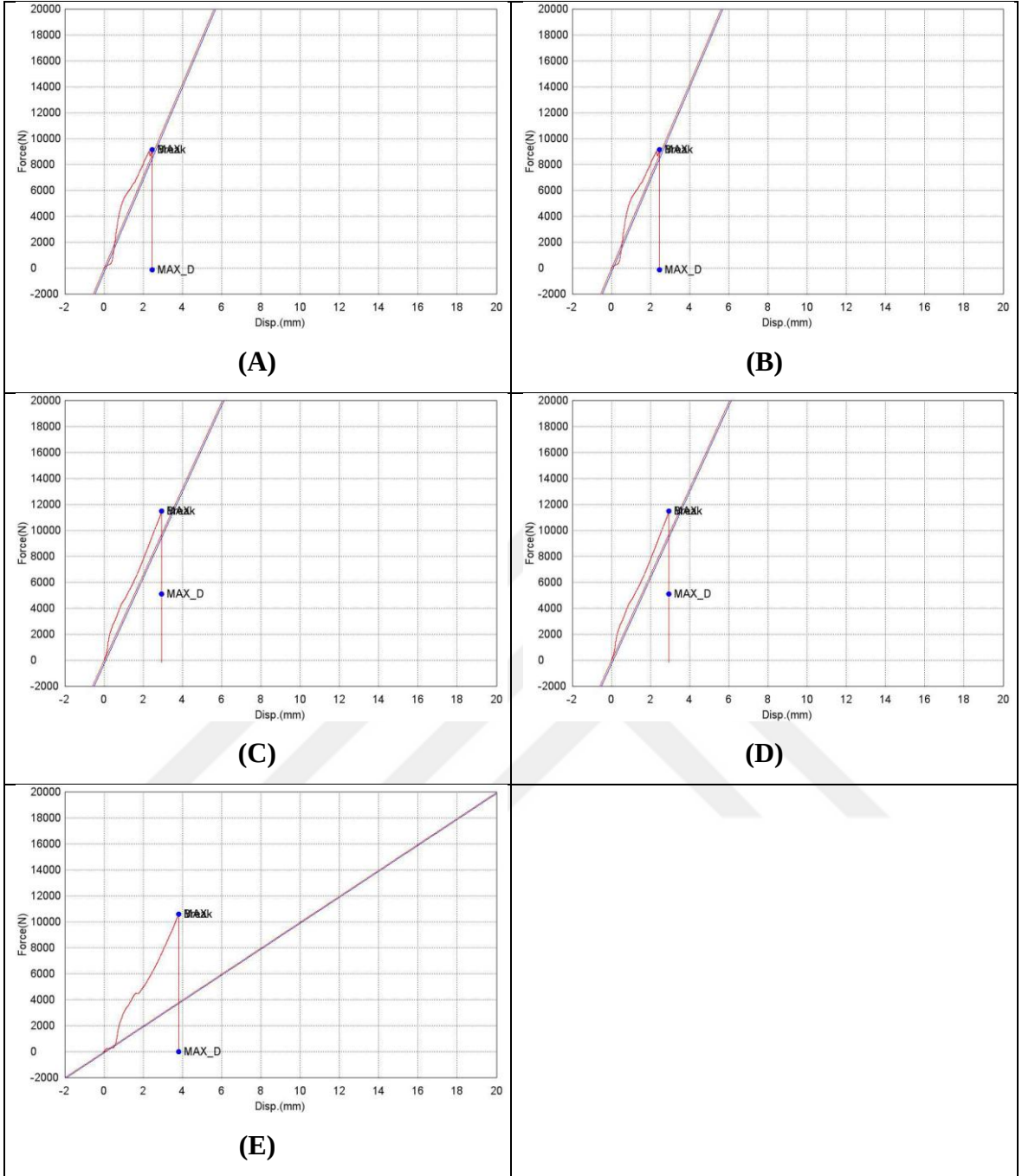
Deney numunelerinin çekme grafikleri aşağıda Şekil 7.11, Şekil7.12ve Şekil7.13de verilmiştir.



Şekil 7.11 ÖKGDD 120DK 320 °C Östemperleme numunelerinin çekme testi grafikleri



Şekil 7.12 ÖKGDD 120DK 380 °C Östempirme numunelerinin çekme testi grafikleri



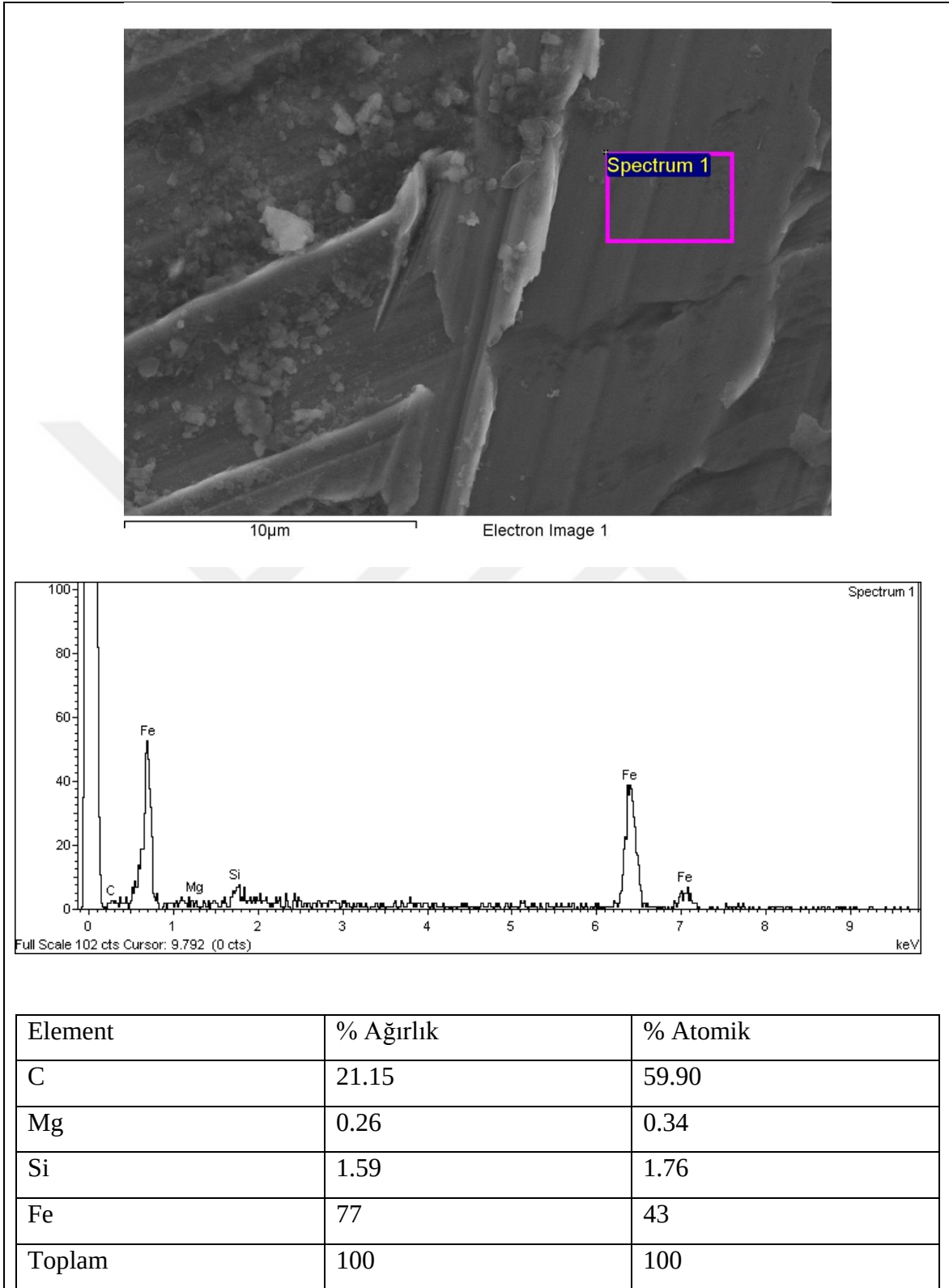
Şekil 7.13 İndüksiyon ile yüzey sertleştirme işlemi görmüş numunelerinin çekme testi grafikleri

7.5. EDS Analiz Sonuçları

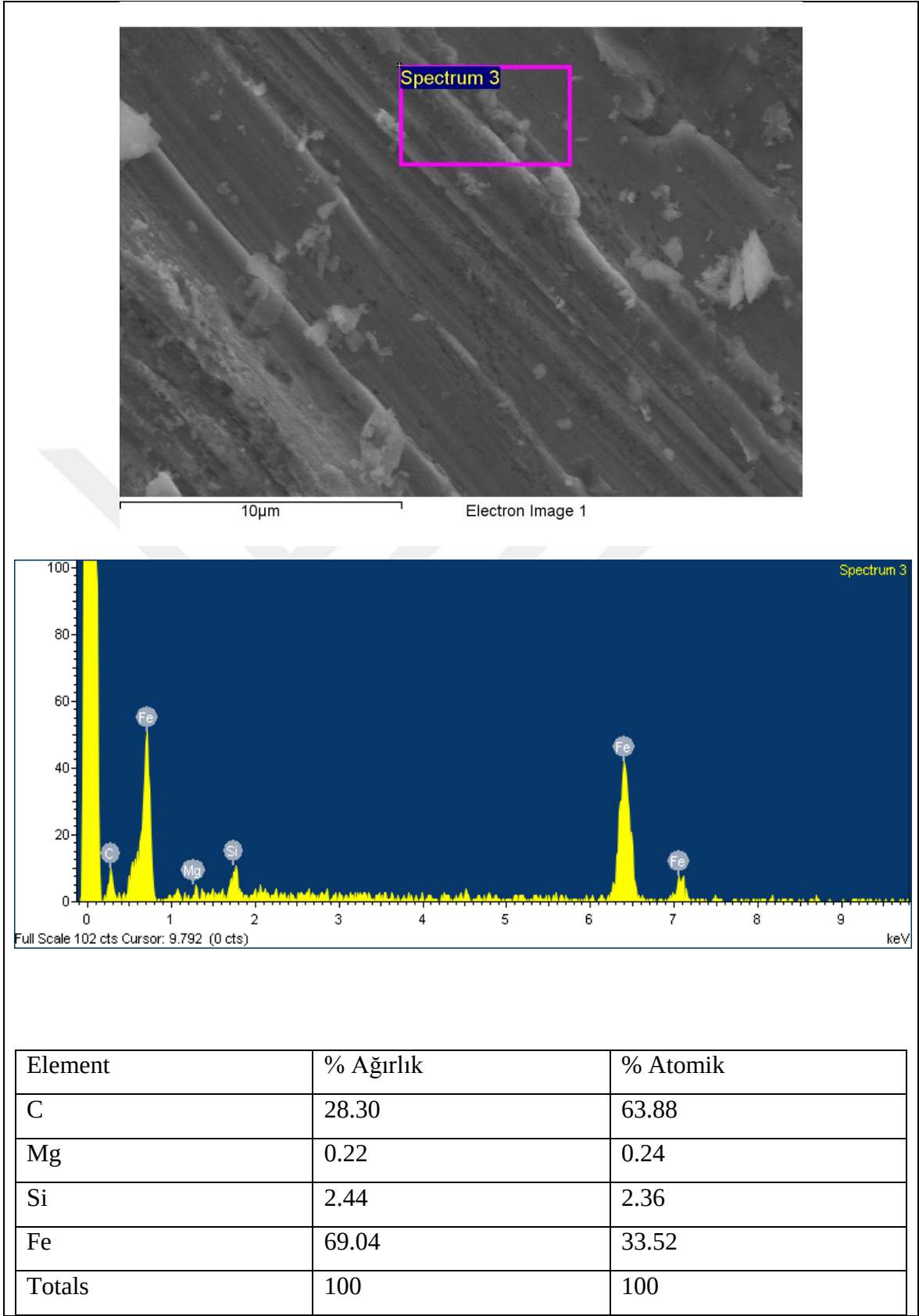
Aşağıda işlem görmemiş döküm durumundaki KGDD numunesinin ve ısıtıl işlem görmüş numunelerin EDS sonuçları verilmiştir. Sonuçlardan da görüldüğü gibi aşınma işlemi sonrasında C elementinin bir arayer elementi olması nedeniyle malzeme yüzeyinde difüzyona uğrayarak yağlama etkisi gösterdiği görülmektedir. Ayrıca EDS analiz sonuçlarından deneylerde kullanılan malzemenin KGDD olduğu alaşım elementleri %'lerinden tespit edilmiştir (Şekil 7.14-7.21).



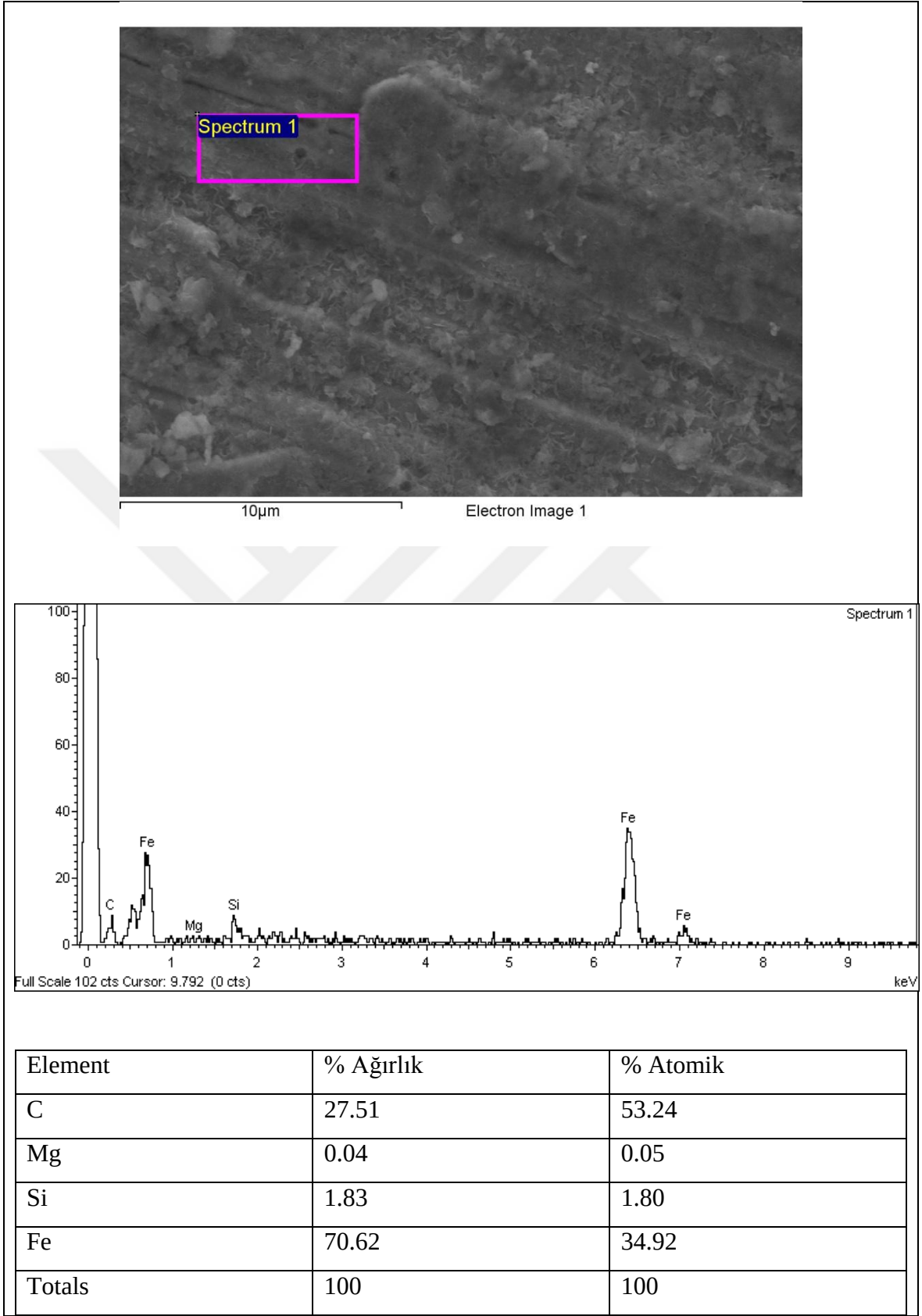
7.5.1. Numunelerin aşınma yüzeylerinin EDS Analiz Sonuçları



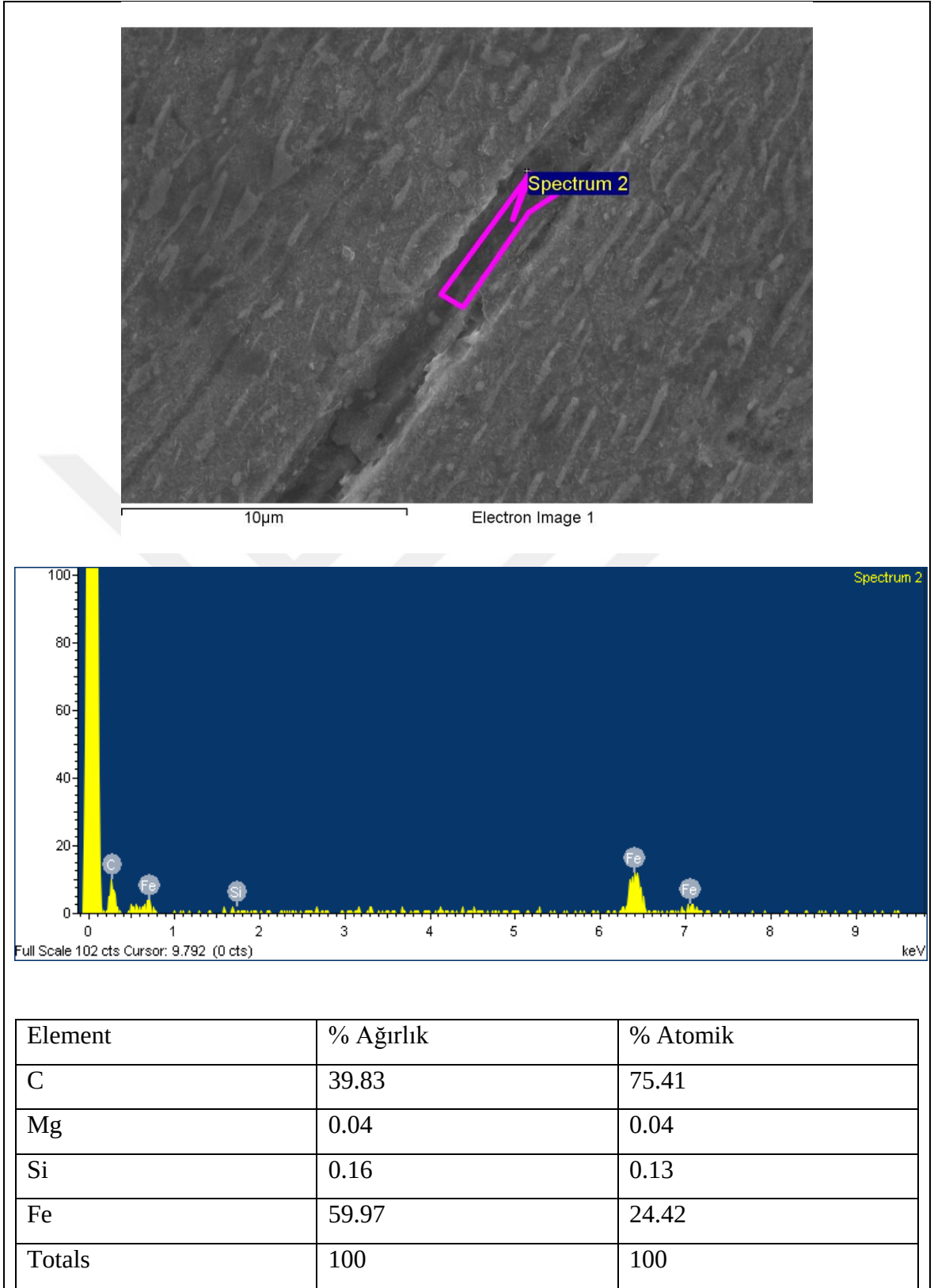
Şekil 7.14 ÖKGDD 120DK 320 °C Östempirleme numunesinin aşınma yüzeyi EDS analiz grafiği.



Şekil 7.15 ÖKGDD 120DK 380 °C Östempirleme numunesinin aşınma yüzeyi EDS analiz grafiği.

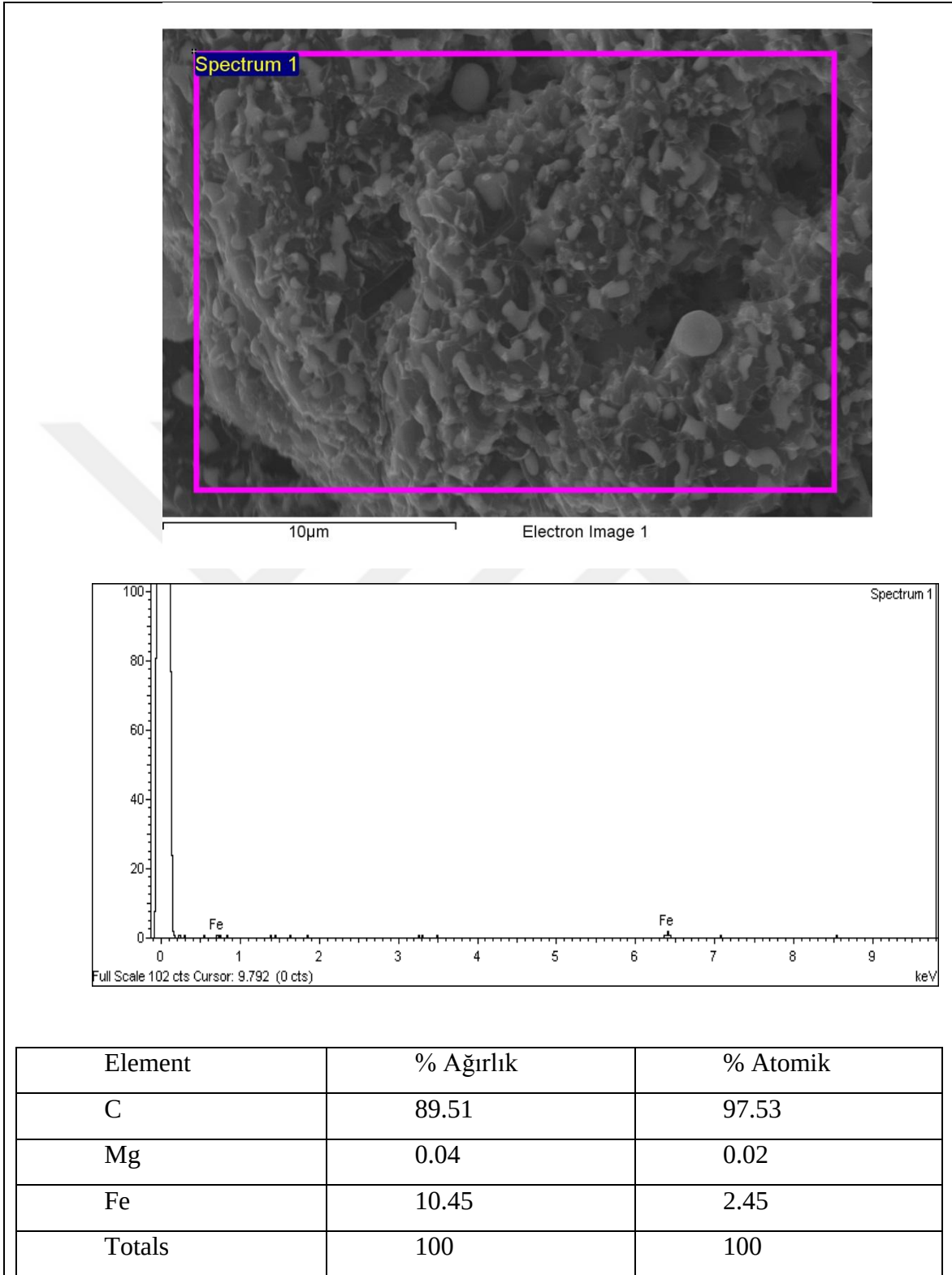


Şekil 7.16 İndüksiyon numunesinin aşınma yüzeyi EDS analiz grafiği.

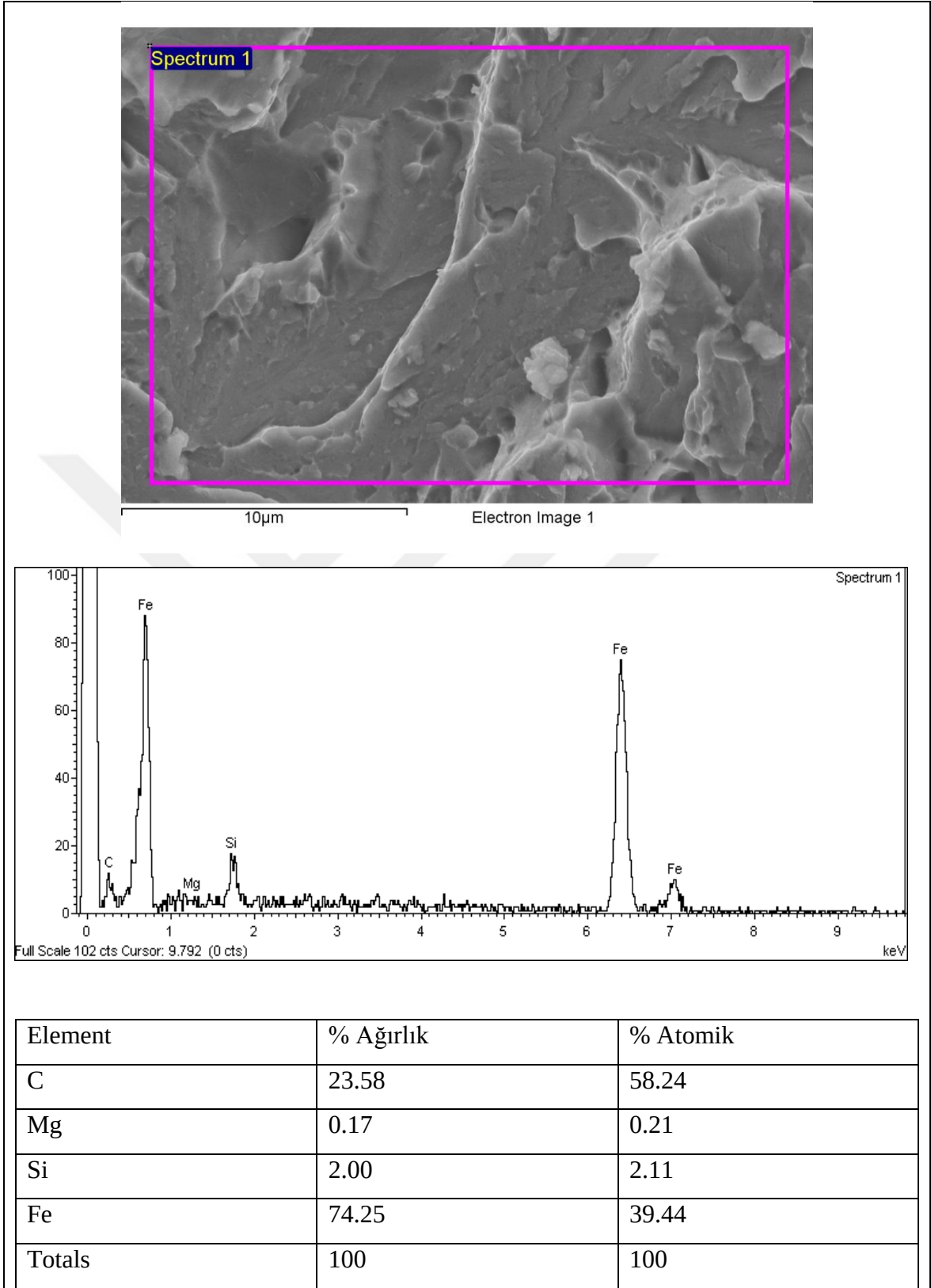


Şekil 7.17 Döküm durumundaki KGDD numunesinin aşınma yüzeyi EDS analiz grafiği.

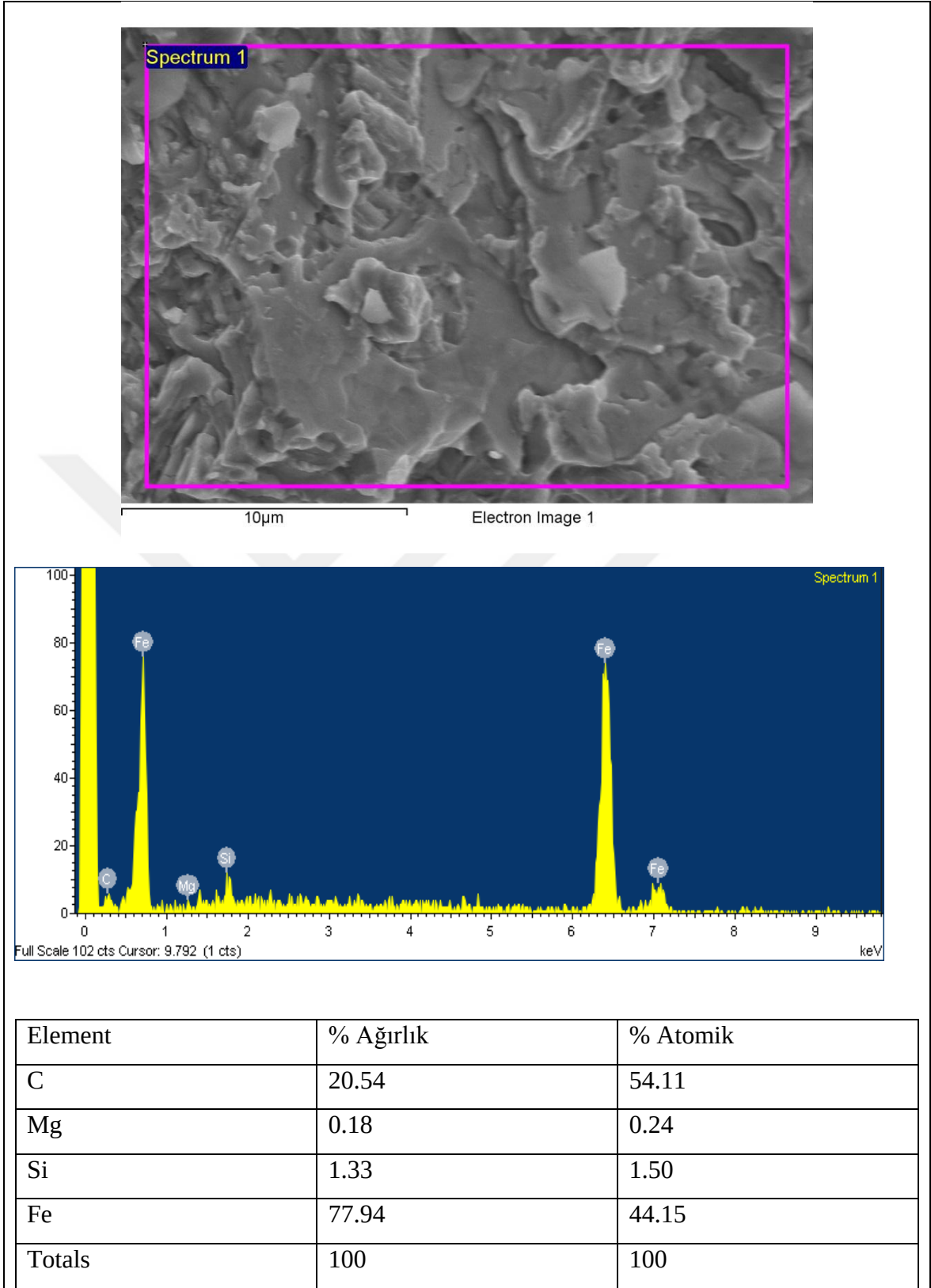
7.5.2. Numunelerin kırık yüzeylerinin EDS Analiz Sonuçları



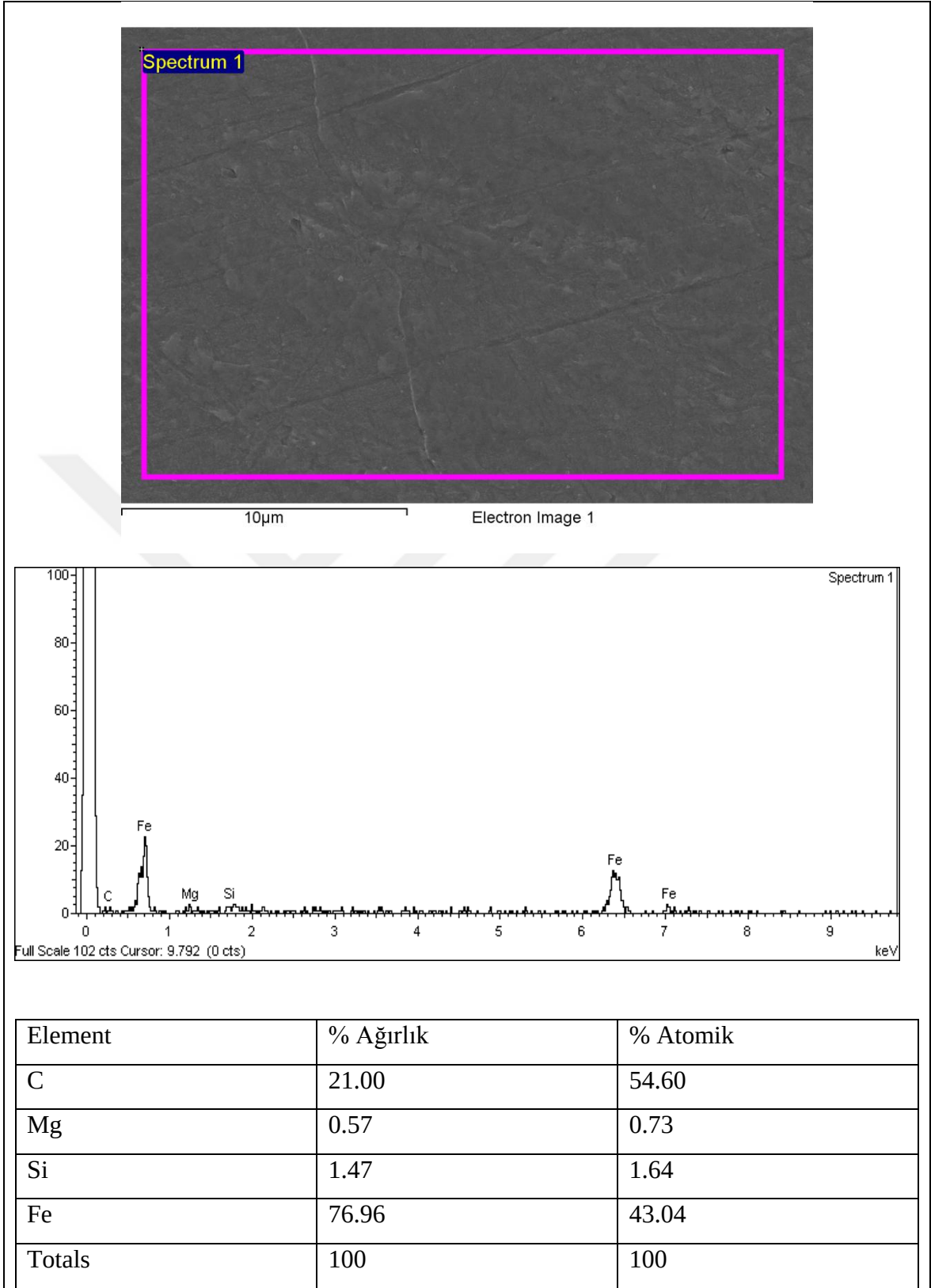
Şekil 7.18 ÖKGDD 120DK 320 °C Östempereleme numunesinin kırık yüzeyi EDS analiz grafiği.



Şekil 7.19 ÖKGDD 120DK 320 °C Östemperleme numunesinin kırık yüzeyi EDS analiz grafiği.



Şekil 7.20 İndüksiyon numunesinin kırık yüzeyi EDS analiz grafiği.



Şekil 7.21 Döküm durumundaki KGDD numunesinin kırık yüzeyi EDS analiz grafiği.

8. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER

8.1. Genel Sonuçlar

900 °C’de östenitlenen ve daha sonra 320 ve 380 °C’de 120 dk östemperleme işlemi yapılan döküm durumundaki ferrit + perlit fazında KGDD malzemelerin mikro yapı incelemesi, sertlik deneyleri, aşınma deneyleri, çekme deneyi ve sertlik deneylerinden aşağıdaki sonuçlar çıkarılmıştır.

- 1) 320 °C’de östemperlenen numunelerde matrisin ferrit, yüksek karbonlu östenitten (Y.K.Ö) ve kalıntı östenitten (K.Ö.) meydana geldiği gözlemlenmiştir.
- 2) Östemperleme sıcaklığı 380 °C’ye çıkarıldığında ferrit ve yüksek karbonlu östenitin kabalaşması gözlenmiş ve kalıntı östenitin azaldığı tespit edilmiştir. Östemperleme sıcaklığının düşük olmasından dolayı yapı içerisinde küresel grafitlerin etrafına iğnemsî ferritlerin çekirdeklendiği görülmüştür.
- 3) 380 °C’de östemperlenen numuneler de ferrit miktarı azalmakta, bu durumun östemperleme sıcaklığının yüksek olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Alt soğuma noktasında ösferrit oluşumu azalması ve ferrit çekirdekleşmesinin artmasından dolayı ferrit miktarı artmakta, hacim oranısı azalmaktadır. Östemperleme sıcaklığı arttıkça bu orantı tam tersine dönmektedir.
- 4) İndüksiyon numunelerinde ısıнын etkisi ile martenzitik yapı oluşmuş ve dış kabuk kısmında sertliğin artmasına sebebiyet vermiştir.
- 5) Deney numunelerinden alınan sertlik sonuçları değerlendirildiğinde sertlik östemperleme süresi artmasına bağlı olarak artış göstermektedir. ÖKGDD 320 °C östemperleme numunesinin sertliği, döküm durumundaki KGDD göre % 233,72 artmıştır. ÖKGDD 380 °C östemperleme numunesinin sertliği döküm durumundaki KGDD göre % 242,01 artmıştır.
- 6) İndüksiyon ile yüzey sertleştirilmesi işlemine tabi tutulmuş numunelerin sertlik ortalamasının artması yüzeye yakın bölgelerden sertlik ölçümü yapılmasından dolayıdır. İndüksiyon numunesinin sertliği döküm durumundaki KGDD göre % 144,36 artmıştır.

- 7) Deney numunelerin aşınma kayıplarının östemperleme sıcaklığının artmasıyla azaldığı gözlemlenmektedir. Uygulanan bütün yüklerde östemperleme sıcaklığının artmasıyla aşınma kaybının azaldığı gözlemlenmiştir.
- 8) İndüksiyon ile yüzey sertleştirme işlemine tabi tutulmuş numunelerin özellikle yüzeye yakın yerlerde aşınma kaybının az olduğu gözlemlenmiştir.
- 9) Kuru kayma şartları altında döküm durumundaki deney numunelerinde aşınma; yüzey adhesyonu ve plastik deformasyon şeklinde görülmektedir.
- 10) Döküm durumundaki KGDD malzemenin sürtünme katsayısı 10N yük altında 0,021-0,029 g aralığında, 20N yük altında 0,021-0,028 g aralığında ve 30N yük altında 0,029-0,031 g aralığında kütle kaybı tespit edilmiştir.
- 11) ÖKGDD numunesi 120 dk 320 °C östemperleme aşınma deneyine tabi tutulmuş ve sürtünme katsayısı 10N yük altında 0,013-0,016 g aralığında, 20N yük altında 0,013-0,027g aralığında ve 30N yük altında 0,011-0,012 g aralığında kütle kaybı tespit edilmiştir.
- 12) ÖKGDD numunesi 120 dk 380 °C östemperleme aşınma deneyine tabi tutulmuş ve sürtünme katsayısı 10N yük altında 0,007-0,011 g aralığında, 20N yük altında 0,002-0,015g aralığında ve 30N yük altında 0,08-0,010 g aralığında kütle kaybı tespit edilmiştir.
- 13) Sonuç olarak; östenitleme sonrası östemperleme ve indüksiyonla yüzey sertleştirme ısı işlemlerinin KGDD numunelerinin aşınma dirençlerini arttırdığı tespit edilmiştir.
- 14) Isıl işlemin etkisi ile çekme dayanımı artış göstermektedir. İndüksiyon ile yüzey sertleştirme işlemine tabi tutulan numunenin çekme dayanımı % 29 artmış, östenitleme sonrası 120 dk 320 °C Östemperleme işlemine tabi tutulan numunenin çekme dayanımı % 97 artarken, östenitleme sonrası 120 dk 380 °C Östemperleme işlemine tabi tutulan numunenin çekme dayanımı ise % 119 artmıştır. Elde edilen sonuçlarda 380 °C östemperleme sıcaklığının en verimli sonuçları ortaya koyduğu gözlemlenmektedir.

8.2. Öneriler

- Farklı yüzey sertleştirilme ısııl işlemleri uygulanarak, GGG40 dökme demirlerdeki mikroyapısal ve mekanik değışiklikler incelenebilir.
- İndüksiyonla yüzey sertleştirilme ısııl işlemleri uygulanan numunelerin korozyon dayanımı, yorulma dayanımı, basma dayanımı, darbe dayanımı incelenebilir.
- ÖKGDD malzemenin aşınma ve mekanik özelliklerini daha da iyileştirmek amacıyla kademeli östemperleme (stepped austempering) ısııl işlemi yapılabilir.
- Kademeli östemperlemenin mekanik özelliklere, mikro ve makro yapıya etkileri incelenebilir.



KAYNAKLAR

1. **Akroy, İ.**, “Küresel grafitli dökme demirlere uygulanan yüzey işlemlerinin aşınma direncine etkisinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü (2007)
2. **ASM Handbook**, Casting, Vol. 15, Formerly Tenth Edition, ASM Int.
3. **Ghang, C. H. Shih, T.S.**, Study on Isothermal Transformation of Austempered Ductile Iron, AFS Transactions, Vol. 119, (1994).
4. **Hocking, M. G., Vasantasree, V., Sidky, P. S.**, Metallic and Ceramic Coatings, John Wiley & Sons Inc., Newyork, pp.1, (1989).
5. **Çetin, M.**, “Östemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerin aşınma davranışlarının geliştirilmesi”, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü (2005)
6. **Kılıçlı, V.**, “Küresel grafitli dökme demirlerde kısmi östenitleme ve östemplleme ısı işleminin mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, (2004)
7. **Voigt, R.C., Eldoky, L.M., Chiou, H.S.**, “Fracture of ductile cast irons with dual matrix structure”, A.F.S, 94:645-656(1989).
8. **Sugiyama, Y., Katsutoshi, A., Matsuoka, S.**, “Improvement of static strength and fatigue crack propagation resistance in ductile cast iron by austempering from ($\alpha+\gamma$) phase region” Journal of the society of Materials science, 40:675-681 (1991).
9. **Rashidi, A.M., Moshrefi-Torbati, M.**, “Dual matrix structure (DMS) ductile cast iron: The effect of heat treating variables on the mechanical properties”, International Journal of Cast Metals Research, 13:293-297 (2001).
10. **Rashidi, A.M., Moshrefi-Torbati, M.**, “Effect of tempering conditions on the mechanical properties of ductile cast iron with dual matrix structure (DMS)”, Materials Letters, 45:203-207 (2000).
11. **He, Z.R., Lin, G.X., Ji, S.**, “Deformation and fracture behaviour of cast iron with optimized microstructure”, Materials Characterization, 38:251-258 (1997).
12. **Hafiz, M.**, “Tensile properties and fracture of ferritic SG-iron having different shell structure”, Zeitschrift Fur Metallkunde, 11:1258-1261 (2001).

13. **Kobayashi T., Yamamoto H.**, “Development of high toughness in austempered type ductile cast iron and evaluation of its properties”, Metallurgical and Materials Transactions A, 19A:319-327 (1988).
14. **Kobayashi T., Yamamoto S.**, “Effect of holding time in the ($\alpha+\gamma$) temperature range on toughness of specially austempered ductile iron ”, Metallurgical and Materials Transactions A, 27A:1961-1971 (1988).
15. **Kazerooni, R., Nazarboland, A., Elliot, R.**, “Use of austenitising temperature in control of austempering of aMn-Mo-Cu alloyed ductile iron”, Materials Science and Technology, 13:1007-1015 (1996).
16. **Wen, D.C., Lei, T.S.**, “The mechanical properties of a low alloyed austempered ductile iron in upper ausferrite region” I.S.I.J. International, 39:493-500 (2000).
17. **Zhou, R. Jiang, Y., Lu, D., Zhou, R., Li, Z.**, “Development and characterization of a wear resistant bainite/martensite ductile iron by combination of alloying and a controlled cooling heat treatment” Wear, 250:529-534 (2001).
18. **Morrogh, H.**, “Production of nodular graphite structures in gray cast irons” AFS Transactions, 56, 72-90 (1948)
19. **Walton, C.F.**, “Ductile iron: Gray and ductile iron castings handbook”, Gray and ductile iron foundry’s Society inc., Cleveland, 238-271(1971)
20. **Çetin, M.**, “Karabük pikinden küresel grafitli dökme demir üretiminde etkili parametreler”, Y.Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü (1998)
21. **Goodrich, G.M.**, “Metalurgy of cast irons”, Iron castings engineering handbook, AFS, Printed in the United States of America, (2003)
22. **Karsay, S.I.**, ductile iron, Production practices, American Foundrymen’s Society, Inc, USA, 24-77 (1985)
23. **Karaman, S.**, “Küresel Grafitli Dökme Demirlerin (Ggg40, Ggg50, Ggg60, Ggg70) Üretim Sürecinin Ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü (2011)
24. **Jenkins, L.R., Forrest, R.D.**, "Ductile iron", Properties and selections: irons, steels and high performance alloys, 1st ", A.S.M. Metals Handbook, Ohio, 33-55 (1990).
25. **Hughes, I.C.H.**, "Ductile iron", Casting, 15th, A.S.M. Metals Handbook, Ohio, 647-666 (1988)

26. **Walton, C.F.**, "Introduction to the heat treating of cast irons", Heat treating, 4th, A.S.M. Metals Handbook, 682-692 (1991)
27. **Karsay, S.I.**, "Ductile iron production and practices", A.F.S., USA, 133-141(1979)
28. **Elliot, R.**, "Cast iron technology", Butterworlths&Co., London, 136-150 (1988)
29. **ASTM A-536 standard**, "Standard specificati on for ductile iron castings", ASTM,1-17 (1999)
30. **TS 526 EN 1563 standardı**, "Dökümler- Küresel grafitli dökme demirler", TSE,1-19 (2000)
31. **Trudel, a., and Gagne, M.**, "effect of composition anh heat treatment parameters on the characteristics of austempered ductile irons", Canadian metallurgical Quarterly, 36,901-907, (1997)
32. **Elliot, R.**, "Cast irons", Constitution and properties of steels, 7th, ed. Pickering F.B., Materials Science and Technology, Weinheim, 692-737 (1992)
33. **Walton C.F.**, "Mechanical properties of ductile iron", Iron casting handbook, Iron Casting Society, (1981)
34. **Rauch, A.H.**, "Physical and Corrosion Properties", Source book on ductile iron, A.S.M., Ohio, 333-372 (1977)
35. **Ovalı, İ.**, "Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Yüzeyinde Çil Oluşumu Ve Östemperleme Isıl İşleminin Mikro Yapı Ve Mekanik Özellikler Üzerine Etkisi", Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü (2012)
36. **Wallace, J.F.**, "Effects of Minor Elements on The Structure of Cast Iron" Trans. AFS, 363 (1975)
37. **Merchant, H.D.**, "Solidification of Cast Iron –A Review of Literature", in Recent Research on Cast Iron , H.D., Merchant, Ed., Gordon and Breach, (1968)
38. **Rickert, A., and Engler, S.**, "Solidification Morphology of cast Iron" in The Physical Metallurgy of Cast Iron, H.Fredriksson and M. Hillert, Ed., Proceedings of the Materials Research Society, North Holland, (1985)
39. **Millis, K.D.**, "Spheroidal graphite cast iron –its development and future" Source book on ductile iron, A.S.M., Ohio, 34-42 (1977)
40. **Lux, B., Mollard, F., and Minkoff, I.**, "On the Formation of Envelopes Around Graphite in Cast Iron", in The Metallurgy of Cast Iron, Georgi Publishing,371-385 (1975)

41. **Minkoff, I., and Lux, B.,** “Graphite Growth From Metallic Solution”, in The Metallurgy of Cast Iron, Georgi Publishing, 473(1975)
42. **Akça, C.,** “Östemperlenmiş küresel grafitli dökme demirde alaşım elementlerinin östenit-martenzit dönüşümüne etkisi”, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,15-40 (2005)
43. **Oktay, E.,**”Östemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerde indüksiyonla yüzey sertleştirme işleminin mekanik özellikler üzerine etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, (2011)
44. **Hayrynen, K.L., Keough, J.R, Kovacs, B.V.,** "Determination of mechanical properties in various ductile irons after subjecting them to long term elevated temperatures",DIS Project No:28 Final Report, North Olmsted., Ohio, 1-56: (1999)
45. **Kovacs, B.V.,**"On the terminology and structure of ADf', A.F.S. Transactions, 102:417-420 (1994).
46. **Janowak, J.F., Gundlach, R.B.,**"Development of a ductile iron for commercial austempering", A.F.S.Transactions, 91:377-388 (1983).
47. **Moore, D.J., Rouns, T.N., Rundman, K.B.,** "Effect of manganese on structure and properties of austempered ductile iron: A process window concept", A.F.S. Transactions, 94:255-264(1986).
48. **Moore, D.J., Rouns, T.N., Rundman, K.B.,** "The relationship between microstructure and tensile properties in austempered ductile irons", A.F.S. Transactions, 95:765-774 (1987).
49. **Darwish, N., Elliot, R,** "Austempering of low manganese ductile irons Part1Processing window", Materials Science and Technology, 9:572-585 (1993).
50. **Darwish, N., Elliot, R,** "Austempering of low manganese ductile irons Part 3 variation of mechanical properties with heat treatment conditions", Materials Science and Technology, 9:882-889 (1993).
51. **Hamid Ali, A.S., Uzlov, K.I. Darwish, N., Elliot, R,** "Austempering of low manganese ductile irons Part 4 Relationship between mechanical properties and microstructure", Materials Science and Technology, 10:34-40 (1994).

52. **Yescas, M.A., Bhadeshia, H.K.D.H., MacKay, D.J.,** "Estimation of the amount of retained austenite in austempered ductile irons using neural networks", *Materials Science and Engineering A*, A311: 162-173 (2001).
53. **Yescas, M.A., Bhadeshia; H.K.D.H.,** "Model for the maximum fraction of retained austenite in austempered ductile cast iron", *Materials Science and Engineering A*, A333:60-66 (2002)
54. **Sert, Ş.,** "İndüksiyon Isıl Yükleme İle Bir Çatlak Etrafında Oluşan Gerilmelerin Modellenmesi", *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2008).
55. **Cora, A.,Eroğlu, Y.S.,**"Endüksiyonlu Isıtma ve Endüksiyon Fırınlarının Tasarımı" *Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği 8. Ulusal Kongresi*, 723-726 (1999).
56. **Egan, L.R., Furlani, E.P.,** "A Computer Simulation of An Induction Heating System", *IEEE Transactions on Magnetism*, 27:4343-4354 (1991).
57. **Yıldırım, G., Gülgün, R.,** "Güç Elektroniğinin Endüksiyonla Isıtmada Kullanılması", *Bursa II. Elektromekanik Sempozyumu*, 69-75 (1988).
58. **Durukan, İ.,** "Effect of Induction Heating Parameters on Forging Billet Temperature", *A Thesis Submitted to The Graduate School of Natural and Applied Sciences of Middle east Technical University*, 8- 10 (2007).
59. **Savaşkan, T.,** "Malzeme Bilgisi ve Muayenesi",*Karadeniz Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü*, Beta Basım, 210-211 (1999).
60. **Mohan, N., Undeland, T.M., and Robbins, W.P.,** *Power Electronics Converters, Applications and Design* , 2nd ed. John Wiley, (1995).
61. **Sazak B.S.,** "Design of A 500 W Resonant Induction Heater", *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 5:871-878 (1999).
62. **Zakharov, B.** "Heat Treatment of Metals", *University Press of Pasific*, 10-175 (2002).
63. **Demirci, A.H.,** "Mühendislik Malzemeleri Önemli Endüstriyel Malzemeler ve Isıl İşlemleri", *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi*, 77-78 (2004).
64. **Dowling, N, E.,** "Engineering Methods For Deformation, Fracture, and Fatigue", *Virginia Polytechnic Instituteand State University*, 391-413, (2007).

65. **Davies, D., J.,** Oelmann, L., A., "The Structure, Properties and Heat Treatment of Metals", Pitmen Books Limited, 48-51 (1983).
66. **Ghaderi, A.R, Ahmadabadi, M.A., Ghasemi, H.M.,** "Effect of graphite morphologies on tribological behavior of austempered cast iron", *Wear*, 255, 410-416 (2003).
67. **Zimba, J., Samandi, M., Yu, D., Chandra,TY., Navara, E., Simbi, D.J.,** "Un- lubricated sliding wear performance of unalloyed austempered ductile iron,under high contact stresess", *Materials & Desing*, 25(5),431-438 (2004).
68. **Stachowiak, G.W., and Batchelor, A.W.,** "Adhesion and aghesive wear", *Engineering Tribology*, Butterworth-Heinemann, USA, Chapter 12, 533-553 (2001)
69. **Blau, P.J.,** "Fifty years of research on the wear of metals", *Tribology International*, 30(5), 321-331 (1997).
70. **Eyre, T.S.,**"Friction and wear of cast iron", *ASM Handbook*, ASM International, vol 18, 695-701 (1992).
71. **Annual books of ASTM standarts,** "Section 3, metals test methods and analytical procedures, volume 03,02, wear anda erosion; metalcorrosier", *ASTM*, (1989).
72. **Colangelo, V.J., Heiser, F.A.,** "Analysis of metallurgical failures", Second edition, John Wiley&Sons,Inc., New York, 205-221 (1987).
73. **ASM Commite,** "Friction, lubrication and wear technology", *ASM Handbook*, ASM International, vol 18, 184-263 (1992).
74. **Czichos, H.,** "Basic tribological parameters", *ASMHHandbook*, ASMInternational, 18, 473-488 (1992).
75. **ASM Commite,** "Failure analysis and prevention", *Metals Handbook*, 8th Edition, USA, 134-153 (1975).
76. **ASM Commite,** Failure analysis and prevention wear failures, *Metals Handbook*, Ninth Edition, Vol 11,USA, 145-162 (1986).
77. **Czichos,H.,** Presentation of friction and wear data, *ASM Handbook*, ASM International, 18, 489-492 (1992).
78. **Kato, K., and Adachi,K.,**" Wear mechanisms", *Modern Tribolody Handbook*, vol. Editor; Bharat Bhushan, CRN Press, America, Chapter 7, 273-299 (2001).

79. **Kayalı, E.S.**, “Hasar analizi seminer notları”, Bölüm 5, TMMOB Metalurji Mühendisleri Odası, İstanbul, 82-102 (1997).
80. **Yılmaz, F.**, “Sürtünme ve aşınma”, 9. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi, İstanbul, Türkiye, 229-247 (1997).
81. **Qureshi, F.S. and Sheikh, A.K.**, “A probabilistic characterization of adhesive wear of metals”, *IEEE Transactions on Reliability*, 46(1), 38-44 (1997).
82. **Dumovic, R.**, Repair maintenance procedures for heavy machinery components, *Welding Innovation*, XX(I), 1-5 (2003).
83. **Babilius, A., Ambroza, P.**, "Effect of temperature and sliding speed on the adhesive wear", *Materials Science(MEGZIAGOTYRA)*, 347-350 (2003).
84. **Eklberg, A.**, "Wear-Some notes", Department of Solid Mechanics, Chalmers University of Technology, 1-22 (1997).
85. **Wang, Y., Lei, T., and Liu, J.**, “Tribo-metallographic behavior of high steels in dry sliding I. Wear Mechanisms and their transition”, *Wear*, 231, 1-11 (1999).
86. **Wang, Y., Lei, T., and Liu, J.**, “Tribo-metallographic behavior of high steels in dry sliding II. Microstructure and wear”, *Wear*, 231, 12-19 (1999).
87. **Wang, Y., Lei, T., and Liu, J.**, “Tribo-metallographic behavior of high steels in dry sliding III. Dynamic microstructural changes and wear”, *Wear*, 231, 20-37 (1999).
88. **Holinski, R.**, "Fundamentals of dry friction and some practical examples", *Industrial Lubrication and Tribology*, 53(2), 61-65 (2001).
89. **Yoon, E-S., Kong, H., Kwon, O-K., Oh, J-E.**, Evaluation of frictional characteristics for a pin-on-disk apparatus with different dynamic parameters, *Wear*, 203-204, 341-349 (1997).
90. **Benabdallah, H.S., Boness, J.**, Tribological behaviour and acoustic emissions of alumina, silicon nitride and SAE52100 under dry sliding, *Journal of Materials Science*, 34, 4995-5004 (1999).
91. **Goto, H., and Amamoto, Y.**, "Effect of varying load on wear resistance of carbon steel under unlubricated conditions", *Wear*, 254, 1256-1266 (2003).
92. **Roberts, S.**, “Wear”, *Surface Engineering*, 1-23 (2002).

93. **Tan, Y-H., Yu, S-I., Doong, J-L., Hwang, J-R.,** “Abrasive wear property of bainitic nodular cast iron in laser processing”, Journal of Materials Science, 25, 4133-4139 (1993).
94. **Sezer,Ö.,**”Çekme deneyi ve sertlik deneyleri ile gerçek gerilme tayini”, Yüksek lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2007
95. **Çapan, L.,** “Metallere plastik şekil verme”, Çağlayan basımevi, 15-28, İstanbul, (1999)
96. **T.C. Kocaeli Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Makine Laboratuvarı-1** Deneyleri, Kocaeli, Ekim
97. **TS138 EN 10002-1** Metalik malzemeler, Çekme deneyi, Bölüm1, Ortam sıcaklığında deney metodu
98. **Akın,E.,**”Çentikli çekme deneyinin sonlu eleman yöntemi ile incelenmesi”, Yüksek lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2006
99. **Bao, B., Wierzbicki, T.,** “On the cut-off value of negative triaxiality for fracture”, Engineering Fracture Mechanics 72 1049–1069, Massachusetts Avenue, Cambridge, MA 02139, USA, 2005.
100. **Kayalı, E. S., Ensari, C., Dikeç, F.,** “Metalik Malzemelerin Mekanik Deneyleri”, İstanbul Teknik Üniversitesi, Kimya-Metalurji Fakültesi, 1996.
101. **Savaşkan, T.,** “Malzeme Bilgisi ve Muayenesi”, Derya Kitabevi, 1999.
102. **Pharr, G.M.,** Instrumented Indentation Testing, University of Tennessee and Oak Ridge National Laboratory
103. **Şahin, O., Uzun, O., Kölemen, U., Uçar, N.,** “Enerji metodu ile sertlik hesaplamaları üzerine matematiksel bir model”, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 2005
104. **Casals, O., Alcalá, J.,** The duality in mechanical property extractions from Vickers and Berkovich instrumented indentation experiments., Acta Materialia, 2005
105. **Cheng, Y.T., Cheng, C.M.,** Can stress-strain relationships be obtained from indentation curves using conical and pyramidal indenters?, Journal of Materials Research, Vol14, No9, 1999
106. **Cheng, Y.T., Cheng, C.M.,** What is indentation hardness?, Surface & Coatings Technology, 2000

107. **Nayebi, A., El Abdi, R., Bartier, O., Mauvoisin, G.,** New procedure to determine steel mechanical parameters from the spherical indentation technique, *Mechanics of Materials*, 2002
108. **Das G., Ghosh Sabita, Ghosh Sukomal,** Structure-property correlation of EN steel and evaluation of mechanical properties through BIT, NDT&E International, 2006
109. **Das, G., Ghosh, S., Sahay, S.K.,** Use of ball indentation technique to determine the change of tensile properties of SS316L steel due to cold rolling, *Materials Letters*, 2005
110. **Sonmez, F.,Demir, A.,**Analytical relations between hardness and strain for cold formed parts, *Journal of Materials Processing Technology*, 2007
111. **Talbot K., Tomlinson, W.J.,** On the relation between hardness and flow curve of metals, *Journal of Materials Science* , 1968
112. **Demir, A., Sonmez, F.O.,** Prediction of Brinell Hardness distrubution in cold formed parts, *Journal of Engineering Materials and Technology*, 2004
113. **Demirkol, M.,** Thesis, A study on the relationship between the hardness and the tensile properties of metals., Bogazici University,Faculty of Mechanical Engineering ,İstanbul, June 1979
114. **Demirkol, M., Kısakürek, S.E.,** On the relations between ball indentation hardness measurements and the tensile flow behaviour of some ferrous and nonferrous metals, *Materials Science and Engineering*, 1983
115. **Ahn, J.H., Jeon, E., Choi, Y., Lee, Y.H., Kwon, D.,** Derivation of tensile properties of thin films using nanoindentation technique, *Current Applied Physics*, 2002
116. **Bucaille, J.L., Stauss,S., Felder, E.,** Determination of plastic properties of metals by instrumented indentation using different sharp indenters, *Acta Materialia*, 2003
117. **Kimmari, E., Kommel, L,** Application of the continuous indentation test method for the characterization of mechanical properties of B₄C/Al composites, *Proc. Estonian Acad. Sci. Eng.*, 2006
118. **Shinora, K.,** Relationship between work-hardening exponent and load dependence of Vickers hardness in copper, *Journal of Materials Science*,1993

119. **Çalgölü, U.**, “AISI 304–430 paslanmaz–AISI 1010 çelik çiftlerinin lazer yöntemi ile kaynağında birleşme özelliklerinin incelenmesi”, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü (2009)
120. **Yıldırım, M. M., Pakdil, M., Doğantan, Z. S. ve Çakan, A.**, “Metalik Malzemelerde Mekanik ve Tahribatsız Muayene Yöntemler”, Mustafa Kemal Üniversitesi Yayınları, Yayın No: 6, 1-122 2001



ÖZGEÇMİŞ

Uğur GENÇSOY 1990 Kayseri/Melikgazi doğumludur. Yahya Kemal Beyatlı ve Kadir Has okullarında ilköğrenimini, Halil İlik Eml. Lisesinde orta öğrenimini tamamladı. 2008 yılında lisans programına Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi, Metal Eğitimi Bölümü, Metal öğretmenliği programında başlamıştır ve 2012 yılda mezun olmuştur. 2012 yılından beri özel sektörde çelik konstrüksiyon ve endüstriyel metal kalıpcılık alanlarında çalışmaktadır. Halen Fırat Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans eğitimine devam etmektedir. Uğur Gençsoy evlidir.

