

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ÖSTEMPERLENMİŞ GRİ DÖKME DEMİRİN YÜKSEK SICAKLIK
AŞINMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ali Ulaş MALCIOĞLU

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Malzeme Mühendisliği Programı

MAYIS 2015

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ÖSTEMPERLENMİŞ GRİ DÖKME DEMİRİN YÜKSEK SICAKLIK
AŞINMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Ali Ulaş MALCIOĞLU
(506131437)**

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Malzeme Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Murat BAYDOĞAN

MAYIS 2015

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 506131437 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Ali Ulaş MALCIOĞLU**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı **“ÖSTEMPERLENMİŞ GRİ DÖKME DEMİRİN YÜKSEK SICAKLIK AŞINMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ”** başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Murat BAYDOĞAN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Hüseyin ÇİMENÖĞLU**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Erdem ATAR
Gebze Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **04 Mayıs 2015**
Savunma Tarihi : **21 Mayıs 2015**

ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim süresince bana destek olan, bilgi ve tecrübesiyle bana yol gösteren değerli danışman hocam Doç. Dr. Murat BAYDOĞAN'a teşekkürü bir borç bilirim.

Deneysel çalışmalarım sırasında bana yardımcı olan ve desteklerini esirgemeyen Araş. Gör. Yakup YÜREKTÜRK'e ve Araş. Gör. Faiz MUHAFFEL'e teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca tez çalışmamda bana yardımcı olan Kimya Müh. Tuğçe İNAN ve Makine Müh. Hilmi PAKSOY'a teşekkür ederim.

Mayıs 2015

Ali Ulaş MALCIOĞLU
Metalurji ve Malzeme Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER	vii
KISALTMALAR	ix
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xi
ŞEKİL LİSTESİ.....	xiii
SEMBOL LİSTESİ	xv
ÖZET.....	xvii
SUMMARY	xix
1. GİRİŞ	1
2. DÖKME DEMİRLER	3
2.1 Tanımı ve Sınıflandırılması.....	3
3. GRİ DÖKME DEMİR.....	7
3.1 Giriş	7
3.2 Katılma Sırasında Grafitleşme	7
3.3 Alaşım Elementleri.....	8
3.4 Mekanik Özellikler ve Sınıflandırma	9
4. ÖSTEMPERLENMİŞ GRİ DÖKME DEMİR.....	11
4.1 Östemperleme Isıl İşlemi	12
4.2 Isıl İşlem Aşamalarının Etkisi	12
4.2.1 Östenitleme sıcaklığı ve süresi.....	12
4.2.2 Östemperleme sıcaklığı ve süresi.....	14
5. AŞINMA	19
5.1 Aşınmayı Etkileyen Faktörler	19
5.2 Aşınma Mekanizmaları	20
4.2.1 Adhesif aşınma.....	22
4.2.1 Abrasif aşınma	23
6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	25
6.1 Deneyisel Numuneler	25
6.2 Östemperleme Isıl İşlemleri	25
6.3 Metalografik İncelemeler	26
6.4 XRD Analizleri	27
6.5 Sertlik Deneyleri	27
6.6 Aşınma Deneyleri.....	27
7. DENEYSEL SONUÇLAR.....	29
7.1 Mikroyapı İnceleme Sonuçları	29
7.1.1 Optik mikroskop inceleme sonuçları	29
7.2 XRD Analiz Sonuçları	36
7.3 Sertlik Sonuçları	38
7.4 Aşınma Deneyi Sonuçları.....	42
7.4.1 Oda sıcaklığı aşınma deneyi sonuçları.....	42
7.4.2 Yüksek sıcaklık aşınma deneyi sonuçları	48

7.5 Oda Sıcaklığı ileYüksek Sıcaklık Aşınma Deneylerinin Karşılaştırılması	54
8. GENEL SONUÇLAR	57
KAYNAKLAR.....	59
EKLER.....	63
ÖZGEÇMİŞ	73

KISALTMALAR

PGDD	: Perlitik Gri Dökme Demir
BDD	: Beyaz Dökme Demir
KGDD	: KüreselGrafitli Dökme Demir
TDD	: Temper Dökme Demir
ÇD	: Çelik Döküm
ASTM	: Amerika Malzeme ve Test Standartları Kurumu
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
ÖGDD	: Östemperlenmiş Gri Dökme Demir

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Dökme demirlerin ticari isim, mikroyapı ve kırılma görünümüne göre sınıflandırılması.	5
Çizelge 2.2 : Dökme demirlerin kimyasal kompozisyonları	5
Çizelge 2.3 : Küresel grafitli dökme demir, gri dökme demir, temper dökme demir, beyaz dökme demir ve çelik döküm arasındaki çeşitli özelliklerin karşılatırılması	6
Çizelge 3.1 : Gri dökme demirlerin ASTM 48 sınıfına göre mekanik özellikleri.....	10
Çizelge 5.1 : Aşınma ile aşınma yüzeyi arasındaki bağ	21
Çizelge 6.1 : Deneysel çalışmalarda kullanılan perlitik gri dökme demirin kimyasal bileşimi (%ağ.).	25
Çizelge 7.1 : Oda sıcaklığı ve yüksek sıcaklık aşınma sonuçları verileri.....	55

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 3.1 :	ASTM ve AFS gri dökme demirde grafit lamel tipleri.....	7
Şekil 3.2 :	Demir-karbon faz diyagramı.....	8
Şekil 4.1 :	Östenitleme sıcaklığının östenit hacim oranına etkisi.....	13
Şekil 4.2 :	(a) Üst ösferritik ve (b) alt ösferritik yapının östemperleme süresiyle beraber mikroyapıda oluşan değişimin şematik gösterimi.	14
Şekil 4.3 :	Östemperlenmiş küresel grafitli dökme demirin çeşitli östemperleme sıcaklık ve zaman koşullarındaki C_{γ} - X_{γ} değişimi.	16
Şekil 4.4 :	Östemperleme sıcaklık değişiminin mekanik özelliklere etkisi.....	17
Şekil 5.1 :	Adhesif aşınmanın şematik gösterimi	22
Şekil 5.2 :	(a) Abrasif aşınma mekanizmasının oluşumu ve (b) Abrasif aşınmanın kesme veya kazıma ile oluşması.....	24
Şekil 7.1 :	PGDD optik mikroyapı fotoğrafı	29
Şekil 7.2 :	250°C'de östemperlenen numunelerin optik mikroyapı fotoğrafları.....	31
Şekil 7.3 :	300°C'de östemperlenen numunelerin optik mikroyapı fotoğrafları.....	32
Şekil 7.4 :	350 °C'de östemperlenen numunelerin optik mikroyapı fotoğrafları.....	33
Şekil 7.5 :	400 °C'de östemperlenen numunelerin optik mikroyapı fotoğrafları.....	34
Şekil 7.6 :	a) 250°C'de 120 dakika östemperlenmiş alt ösferritik yapı ile b) 400°C'de 120 dakika östemperlenmiş üst ösferritik yapının optik mikroyapı fotoğrafları.....	35
Şekil 7.7 :	250°C, 300°C, 350°C ve 400°C'de östemperlenmiş numunelerin XRD sonuçları.....	36
Şekil 7.8 :	Kalıntı östenit hacim oranının östemperleme sıcaklığı ve süresine bağlı olarak değişimi	37
Şekil 7.9 :	Kalıntı östenit karbon oranının östemperleme sıcaklığı ve süresine bağlı olarak değişimi	38
Şekil 7.10 :	Matris toplam karbon oranının östemperleme sıcaklığı ve süresine bağlı olarak değişimi	38
Şekil 7.11 :	Östemperleme süresine bağlı olarak sertlik değişimi.	39
Şekil 7.12 :	Östemperleme süresine bağlı olarak mikrosertlik değişimi.....	40
Şekil 7.13 :	Östemperleme sıcaklığı ve süresine bağlı olarak makrosertlik ile mikrosertlik değişimi.	41
Şekil 7.14 :	Östemperleme sıcaklığına bağlı olarak sertlik ile kalıntı östenit değişimi	41
Şekil 7.15 :	İncelenen numunelerin oda sıcaklığında aşınma sonucu aşınma hızının östemperleme sıcaklık ve süresine göre değişimi.	42
Şekil 7.16 :	İncelenen numunelerin oda sıcaklığında aşınma sonucunda relatif aşınma direncinin östemperleme sıcaklığı ve süresine göre değişimi. ...	43
Şekil 7.17 :	Oda sıcaklığında aşınma deneyi sonucunda sürtünme katsayısının kayma mesafesine göre değişimi.	44
Şekil 7.18 :	Oda sıcaklığında aşınma deneyi sonucu sürtünme katsayısı değişimi. ..	45
Şekil 7.19 :	Oda sıcaklığında aşınan döküm halindeki numunenin SEM görüntüsü. 46	

Şekil 7.20 :	Oda sıcaklığında aşınan 250°C'de a) 5 dakika ve b) 120 dakika östemperlenmiş numunelerin SEM görüntüleri.	46
Şekil 7.21 :	Oda sıcaklığında aşınan 300°C'de a) 5 dakika ve b) 120 dakika östemperlenmiş numunelerin SEM görüntüleri.	47
Şekil 7.22 :	Oda sıcaklığında aşınan 350°C'de a) 5 dakika ve b) 120 dakika östemperlenmiş numunelerin SEM görüntüleri.	47
Şekil 7.23 :	Oda sıcaklığında aşınan 400°C'de a) 5 dakika ve b) 120 dakika östemperlenmiş numunelerin SEM görüntüleri.	47
Şekil 7.24 :	Aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü.	48
Şekil 7.25 :	İncelenen numunelerin yüksek sıcaklıkta aşınma sonucu aşınma hızının östemperleme sıcaklık ve süresine göre değişimi.	48
Şekil 7.26 :	İncelenen numunelerin yüksek sıcaklıkta aşınma sonucunda relatif aşınma direncinin östemperleme sıcaklığı ve süresine göre değişimi. ...	50
Şekil 7.27 :	Yüksek sıcaklıkta aşınma deneyi sonucu sürtünme katsayısının kayma mesafesine göre değişimi.	51
Şekil 7.28 :	Yüksek sıcaklıkta aşınma deneyi sonucu sürtünme katsayısı değişimi. ..	51
Şekil 7.29 :	Döküm halindeki numunenin yüksek sıcaklık SEM görüntüsü.....	52
Şekil 7.30 :	250°C'de a) 5 dakika ve b) 120 dakika östemperlenmiş numunelerin yüksek sıcaklıkta aşınma SEM görüntüleri.....	52
Şekil 7.31 :	300°C'de a) 5 dakika ve b) 120 dakika östemperlenmiş numunelerin yüksek sıcaklıkta aşınma SEM görüntüleri.....	53
Şekil 7.32 :	350°C'de a) 5 dakika ve b) 120 dakika östemperlenmiş numunelerin yüksek sıcaklıkta aşınma SEM görüntüleri.....	53
Şekil 7.33 :	400°C'de a) 5 dakika ve b) 120 dakika östemperlenmiş numunelerin yüksek sıcaklıkta aşınma SEM görüntüleri.....	53
Şekil 7.34 :	a) 250°C 5 dakika b) 250°C 120 dakika c) Döküm halindeki numunelerin kesitten aşınma izinin görünümü.	54
Şekil A.1 :	Östemperlenmiş gri dökme demirlerin optik mikroyapı fotoğrafları	64
Şekil B.1 :	Östemperlenmiş numunelerin oda sıcaklığı aşınma deneylerinde elde edilen aşınma izlerinin profili aşınma izlerinin profil analizi	66
Şekil B.2 :	Östemperlenmiş numunelerin yüksek sıcaklık aşınma deneylerinde elde edilen aşınma izlerinin profili aşınma izlerinin profil analizi	67
Şekil B.3 :	Döküm halindeki numunelerin aşınma izlerinin profili.....	68
Şekil C.1 :	Östemperlenmiş numunelerin oda sıcaklığı aşınma deneylerinde zamana bağlı sürtünme katsayısı değişimi.....	69
Şekil C.2 :	Östemperlenmiş numunelerin yüksek sıcaklık aşınma deneylerinde zamana bağlı sürtünme katsayısı değişimi.....	70
Şekil D.1 :	Östemperlenmiş numunelerin oda sıcaklığı aşınma deneylerinde elde edilen aşınma izlerinin optik mikroyapı fotoğrafları	71
Şekil D.2 :	Östemperlenmiş numunelerin yüksek sıcaklık aşınma deneylerinde elde edilen aşınma izlerinin optik mikroyapı fotoğrafları.....	72

SEMBOL LİSTESİ

μm	: Mikrometre
HV	: Vickers sertlik
HB	: Brinell sertlik
γ	: Östenit
α	: Ferrit
Ceş	: Karbon eşdeğeri
γ_{yk}	: Yüksek karbonlu östenit
C_{γ}^0	: Matris fazındaki teorik toplam karbon oranı
C_{γ}	: Östemperleme sonrası östenitin karbon oranı
X_{γ}	: Kalıntı östenit hacim oranı
$X_{\gamma} C_{\gamma}$	: Matris fazındaki toplam karbon oranı
T_{γ}	: Östenitleme sıcaklığı

ÖSTEMPERLENMİŞ GRİ DÖKME DEMİRİN YÜKSEK SICAKLIK AŞINMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

ÖZET

Gri dökme demirler; demir-karbon-silisyum alaşımı olmakla beraber, ötektik sıcaklık noktasında östenitin katı eriyik halinde ihtiva edebileceğinden fazla karbonu olan alaşımlardır. Yapılarındaki bu fazla karbon, grafit lamelleri halinde çökelmektedir. Gri dökme demirlerin mekanik özelliklerini iyileştirmek amacıyla östemperleme işlemi yapılmaktadır. Gri dökme demirlerde östemperleme işleminin amacı; ösferritik bir yapı oluşturarak sertlik, mukavemet ve aşınma direncini yükseltmektir.

Östemperlenmiş gri dökme demirler; östemperleme işlemi sonrasında yüksek mukavemet, yüksek aşınma direnci, sönüm kabiliyeti gösteren beyritik mikroyapıya sahip dökme demir grubudur.

Bu çalışmada perlitik gri dökme demirin, 900°C östenitleme işleminin ardından 250°C, 300°C, 350°C ve 400°C olmak üzere dört farklı sıcaklıkta östemperleme işlemine tabi tutulmuş, her östemperleme sıcaklığında numuneler; 5 dakika, 20 dakika, 40 dakika, 60 dakika ve 120 dakika olmak üzere 5 farklı östemperleme süresi sonrası havada soğutulmuşlardır. Östemperleme işlemi sonrası mikroyapısal incelemeler gerçekleştirilmiş, 250°C ve 300°C östemperleme sonrası alt ösferritik yapı görülürken, 350°C ve 400°C östemperlenmiş numunelerde ise üst ösferritik yapılar görülmüştür.

Östemperleme işlemi sonucunda, mikroyapının östemperleme sıcaklığı ve süresine bağlı olarak değişen oranlarda beyritik ferrit ve kalıntı östenitten oluştuğu belirlenmiş ve oluşan bu yapı ösferrit olarak adlandırılmıştır. Östemperlenmiş gri dökme demir numunelerinin ve ısıl işlem görmemiş döküm halindeki numunenin mekanik özelliklerini incelemek amacıyla, sertlik ve aşınma deneyleri yapılmıştır. İncelemeler süresince; östemperleme işleminin Brinell sertlik cihazıyla yapılan makrosertlik sonucunda sertliğinin arttığı görülmüştür. Bununla birlikte mikrosertlik ölçümlerinde matrisin sertliği de ölçülmüş ve ısıl işlemsiz numuneye göre farklı östemperleme sıcaklığı ve sürelerinde östemperlenen numunelerin mikrosertliğinin de arttığı görülmüştür.

Östemperlenmiş gri dökme demirler; ball-on test metoduyla oda sıcaklığında ve 200°C yüksek sıcaklıkta aşınma testine tabi tutulmuş, oda sıcaklığında yapılan aşınma testi sonucu aşınma direnci 3 ile 5 kat arasında artış gösterirken , yüksek sıcaklıkta yapılan testlerde ise östemperlenmiş numuneler döküm halindeki numuneye göre aşınma direncinde iyileşme görülmüş ancak yüksek sıcaklıkta farklı östemperleme koşullarında elde edilen aşınma deneyi sonuçları, oda sıcaklığında yapılan test sonuçlarına göre daha geniş aralıklarda farklılık göstermiştir. 250°C 5 dakika süresince östemperlenen numunenin yüksek sıcaklıkta aşınma direnci döküm halindeki numuneye göre yaklaşık 20 kat artarken, 400°C 120 dakika süresince östemperlenen numunede ise 2 kat kadar aşınma direnci artmıştır.

INVESTIGATION OF WEAR BEHAVIOUR OF AUSTEMPERED GRAY CAST IRON AT ELEVATED TEMPERATURE

SUMMARY

The term "cast iron" identifies a large family of ferrous alloys. Cast irons propose a wide selections of strength and other engineering applications and it has many manufacturing and engineering advantages compared to cast steel such as better wear resistance, vibration damping and less manufacturing costs.

Gray cast irons are the most used of the general purpose engineering irons. The name comes from the characteristic gray colour of the metal on a fractured surface. Gray cast irons are used in automotive industry such as clutch plates, brake discs and flywheels due to lower cost and superior combination of properties like thermal conductivity, good vibration damping properties with good wear resistance and mechanical properties. The high damping capacity of gray cast iron is one of the most precious qualities of this material and damping capacity of gray cast iron is greater than other cast irons. Besides pearlitic gray cast iron is preferred because of it's high young modulus and good wear resistance rather than ferritic gray cast iron.

Cast iron's mechanical properties change depending on metallographic structure. For example ferrite is low carbon alpha-phase. Also ferrite's tensile strength is low. Next to that pearlite is consists of ferrite and sementite. Although pearlite possesses higher hardness rather than ferrite, ductility is low. Cementite is known as eutectoid carbide and also cementite is the brittle intermetallic compound of iron and carbon.

Gray cast iron's mechanical and physical properties are also influenced by some factors and these properties are controlled by the shape, amount and distribution of lamellar graphite flakes. There are some lamellar types which are accepted from ASTM and AFS standards. In gray cast irons, uniformly distributed A type lamellars are generally preferred. B type lamellars are unsufficient for high strength. C type lamellars have good at thermal shock resistance. D type lamellars show low wear resistance. And E type lamellars are found in low carbon hypoeutectic compositions.

Alloying elements are so essential for determine gray cast iron's mechanical properties. In this regard chromium increases oxidation resistance. Molibden has an important role in quenching. Besides copper increases corrosion resistance.

Many attempts were made for to increase the strength properties in gray cast iron such as alloying. Although gain in strength, production cost increased undesirebly. Austempering heat treatment proposes increase in strength for a relatively small cost. Besides, the many useful applications of austempered ductile iron for improving mechanical properties, suggested a study on austempered gray iron.

The aim of the present study is to investigate dry sliding wear behaviour of austempered gray cast iron at room and elevated temperatures. For investigating optimal wear behaviour, different variation of austempering temperatures and times are used. Besides as-cast gray cast iron's microstructure consists of pearlite.

A traditional austempering heat treatment is started with austenitising the matrix between 850 to 930°C than holding in a salt bath above M_s temperature between 230 to 430°C for enough time followed by cooling in air for attain the ausferritic microstructure. In this study as-cast pearlitic gray cast irons were austenized at 900°C for 60 minutes and subsequently austempered for 5, 20, 40, 60, and 120 minutes at 250°C, 300°C, 350°C and 400°C. Microstructural characterizations were carried out by optical microscopy researches.

Austenitizing temperature and time have significant effect on austempered gray iron's mechanical properties. Austenitizing temperature controls austenite's carbon content. With austenite's carbon content, austenite's hardenability and stability can change. If austenitizing temperature reduces, structure becomes more stable and less martensite occurs. Besides that in austenitizing kinetic, perlite content in matrix structure is so important parameter. With increasing of perlite content, austenitizing kinetic accelerates.

Austempering temperature and time have effect on mechanical properties and wear resistance. Austempering takes place in 2 stages. In first stage, ausferritic transformation begins and austenite decomposes to ferrite and high carbon austenite. In short austempering times carbon content is insufficient to stable retained austenite so during cooling to room temperature martensite take places. But when austempering time increases austenite enriches with carbon and ausferrite structure becomes stable. In high austempered temperatures such as 350 and 400°C ferrite aciculars nucleation rate slow down, and retained austenite in matrix increases because of the carbon enrichment in austenite. Nevertheless, in long austempering times such as 3 hours retained austenite starts to decrease because high carbon austenite decomposes to ferrite and carbide. So results showed that retained austenite changes with different austempering conditions and it effects mechanical properties. After all if austempering time extensions; although impact resistance and ductility increase, hardness decreases. Also increasing austempering time, decreases martensite content.

As a result of austempering, it is concluded that microstructure is comprised of bainitic ferrit and retained austenite which changes according to the temperature and time of the austempering. Besides chemical composition is so essential for austempering. Silicon has a significant role in the improvement of the ausferritic matrix in grey iron. Silicon reduces the carbon solubility in austenite and accelerates carbon diffusion. Next to that sulfur generates strong carbon diffusion barrier and slows down carbon diffusion between lamellar graphite and grey cast iron matrix. Besides that, this structure which consists retained austenite and bainitic ferrite is called as ausferrite. After austempering in 250°C and 300°C lower ausferrite structure is seen, while in 350°C and 400°C upper ausferrite structure is seen. Lower ausferrite structure is acicular but upper ausferrite structure is feathery and coarse.

The hardness of pearlitic gray iron, increased with austempering process. Brinell hardness performed due to investigating the hardness behaviour. Besides Vickers microhardness is done for researching hardness in the matrix of the samples. With increasing austempering temperature and time, hardness started to decrease. In austempered microstructure; austenite is soft phase so while austempering time proceeds retained austenite increases and consequently hardness decreases. Brinell hardness and Vickers microhardness give information about microstructural transformations. The highest Brinell and Vickers hardness were measured in 250°C

austempered along 5 minutes and the lowest hardness were measured in 400°C austempered along 120 minutes. After all, Vickers microhardness show that in short austempered times microhardness is so high because of the presence of martensite in matrix phase.

Wear is the loss of material with material transfer between of surfaces. Wear happens in some criterions such as mechanic effects and friction. Besides there are 4 main wear mechanisms. These are abrasion, adhesion, erosion and surface wear. Abrasion wear happens because hard particles forced against throughout the solid surface. Although metallic particles can cause abrasion, unmetallic particles mostly cause this problem. For preventing abrasive wear there are some surface treatments such as; case hardening, wear plates, and weld hardfacing coatings. Next to that, adhesive wear occur from transference of material between of surfaces during frictional contact under loadings. For preventing adhesive wear there are some recommendations. For example lubrication reduces wear. Also avoiding sliding similar materials can prevent wear. Also there are some parameteres which effects wear. One of these paramaters are based on the materials, such as material crystal structure, modulus of elasticity and surface roughness. And also environment effects such as temperature, atmosphere and moisture.

The wear tests were carried out using ball-on-disc type apparatus under dry sliding conditions in room temperature and 250°C high temperature. Results show that in room temperature, wear resistance increased between 3 and 5 times after austempering heat treatment according to as-cast sample. Besides friction coefficient values decreased after austempering. In 250°C, wear resistance increased between 2 and 20 times in different austempering conditions. According to high temperature results, the highest wear resistance were measured in 250°C austempered along 5 minutes and the lowest wear resistance were measured in 400°C austempered along 120 minutes. Results show that increasing austempering temperature and time are so essential for wear resistance behaviour. Especially in 250°C austempered samples show high wear resistance because of high hardness and low retained austenite. On the other hand in 400°C along 120 minutes austemperd sample, hardness is low and retained austenite is high. In this regard wear resistance decreases.

1. GİRİŞ

Dökme demirler; iyi akışkanlık, ergitme işlemlerinin ucuzluğu ile kolaylığı, düşük ergime sıcaklığı, iyi işlenebilirliği, titreşim söndürme özelliğinin oldukça iyi olması, aşınmaya ve korozyona dayanıklı olması gibi birçok özelliği bulunmaktadır. Dökme demirlerin bu üstün özellikleri, onları birçok yapısal uygulamalarda ve otomotiv sanayinde yaygın olarak kullanılmasını sağlamaktadır [1,2].

Esas olarak demir-karbon-silisyum alaşımı olan gri dökme demirler, ötektik sıcaklık noktasında östenitin katı eriyik halinde ihtiva edebileceğinden fazla karbonu olan alaşımlar olup bileşimdeki fazla karbon grafit lamelleri halinde çökelmektedirler. Gri dökme demirlerin çok geniş aralıklarda değişiklik gösteren mukavemet, sertlik, aşınma direnci, korozyon direnci, titreşim söndürme ve işlenebilirlik gibi önemli özellikleri bulunmaktadır [3].

Günümüzde gri dökme demirler; otomotiv endüstrisi ve makine parçalarında kullanılmaktadır. Bunun yanında gri dökme demirlerin titreşim sönümleme kabiliyeti ve ısı iletkenliği gibi üstün özellikleri olmasına karşın aşınma dirençleri öteki dökme demirlere kıyasla daha düşüktür. Bundan dolayı gri dökme demirlerin mekanik özelliklerini iyileştirmek amacıyla östemperleme işlemi yapılmaktadır [1,4].

Dökme demirlerin mekanik özellikleri metallografik yapıya bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Perlitin yüksek mukavemet ve aşınmaya karşı da nispeten dayanıklı olmasından dolayı yüksek mukavemetli dökme demirler, yapı itibarıyla perlitik dökme demirlerdir [1,5].

Gri dökme demirlerde östemperleme işleminin amacı; ösferrit yapı oluşturarak sertlik, mukavemet ve aşınma direncini yükseltmektir. Ösferritik yapı, östemperleme ısı ı işlemi olarak adlandırılan beynit başlangıç sıcaklığının altındaki sıcaklık aralığında, östenitin izotermal dönüşümüyle meydana gelen yapıdır. Östemperleme sıcaklığı ve süresinin, gri dökme demirlerin mekanik özellikleri üzerinde önemli bir etkisi bulunmaktadır. Bu bağlamda yüksek östenitleme sıcaklığı ile düşük östemperleme sıcaklığı yüksek sertliği teşvik ederken, düşük östenitleme sıcaklığı ile

yüksek östemperleme sıcaklığı ise sünekliğe teşvik etmektedir. Mekanik özelliklerin optimum seviyede olabilmesi için östemperleme süresinin doğru seçilmesi gerekmektedir [1,6,7].

Bu çalışmada perlitik gri dökme demirlerin, farklı sıcaklık ve zamanlarda yapılan östemperleme işleminin mikroyapıda yarattığı etkiler incelenerek, östemperleme işleminin oda sıcaklığı ve yüksek sıcaklıktaki aşınma davranışının analiz edilmesi amaçlanmaktadır.

2. DÖKME DEMİRLER

2.1 Tanımı ve Sınıflandırılması

Dökme demir terimi çeliklerde olduğu gibi geniş bir demir esaslı alaşım ailesini belirtmektedir. Dökme demirler; ötektik ile katılaşan demir karbon temelli alaşımlardır. Dökme demirlere gereksinim duyulmasının başlıca sebepleri; yararlı bir mühendislik malzemesi olması ve bunun yanında ucuz üretilmesidir. Öte yandan oldukça geniş bir aralıkta değişiklik gösteren, sertlik, mukavemet, aşınma direnci ve diğer özelliklere sahip olması, malzemenin devamlılığına ve kullanım sahasının genişliğine neden olmaktadır [3,8].

Yüksek karbon ve silisyum içerikleri dökme demirleri mükemmel döküm alaşımları yapmaktadır. Kolayca eriyebilirler ve sıvı halde oldukça akışkandır. Bunun yanı sıra döküldüklerinde pürüzlü kaplama tabakası oluşturmazlar [1].

Dökme demirlerin yapısında bulunan karbon, fosfor ve silisyum gibi elementlerin miktarları; sıvılaşma ve katılaşma sıcaklıkları ile ötektik bileşimi değiştireceğinden dolayı dökme demirlerin bu durumdan mekanik özellikleri etkilenmektedir. Bundan dolayı bu etkiyi karbon eş değeri ($C_{eş}$) olarak tanımlanmış olan parametre yardımıyla hesaplanabilmektedir [9].

$$C_{eş} = \%C + \% \frac{\%Si + \%P}{3} \quad (2.1)$$

Formül yardımı ile alaşımın ötektik, ötektik üstü yada altı kompozisyonunda olup olmadığı bulunmaktadır. Karbon eş değerinin %4.25'den fazla olması ötektik üstü, az olması ötektik altı, %4.25 olması ise dökümün ötektik bileşime sahip olduğunu göstermektedir [9,10].

Dökme demirlerin mekanik özellikleri metallografik yapıya bağlı olarak değişmektedir. En önemli yapı bileşen ve türleri aşağıda verilmektedir :

Grafit : Dökme demirlerde bulunan grafitin şekil ve boyut dağılımının; özellikler üzerinde önemli etkisi bulunmaktadır. Gri dökme demirde grafit lamelleri; katılaşma neticesinde oluşmaktadır ve süneklik özelliğinin olmayışı lamel grafitlerin yapıda

bulunmasından ötürüdür. Ancak küresel grafitli dökme demirdeki küre şeklindeki lameller süneklik bakımından gri dökme demire kıyasla o kadar kötü etki yapmamaktadır.

Sementit : Sementit sert ve kırılgan yapıda olmakla birlikte serbest hal haricinde ledeburit ve perlit içinde bulunmaktadır. Bu yapısından ötürü malzemenin kırılgan ve sert olmasına neden olacağından, işleme sırasında zorluklara sebep olur.

Ferrit : Dökme demirlerde ferrit bileşimi içerisindeki silisyumu içeren faz olmakla beraber silisyum ferriti sertleştirir ve bunun sonucunda mukavemet yükselmektedir. Ferrit serbest halde veya sementit ile beraber ötektoid yapısı içerisinde mutlaka bulunmaktadır.

Perlit : Ferrit ve sementit tabakalarından oluşan iki faz karışımıdır. Perlitik gri dökme demirlerde yaklaşık olarak %0.5-0.9 arasında değişen karbon bulunmaktadır. Öte yandan birleşik karbonun düşük yüzdede olması çoğunlukla serbest ferritin bulunduğu göstermektedir. Perlitin yüksek mukavemet ve aşınmaya karşı da nispeten dayanıklı olmasından ötürü yüksek mukavemetli dökme demirler, yapı itibarıyla perlitik dökme demirlerdir.

Steadit : Bilhassa gri dökme demirde, mevcut haldeki fosfor düşük ergime dereceli bir demir-demir fosfür ötekiği olan steadit şeklinde bulunmaktadır. Demirin kırılganlığını arttırmaktadır.

Östenit : Katılaşma sırasında perlit, ferrit yada ikisinin karışımı halinde olan katı eriyik olarak tarif edilebilmektedir. Dökme demirlerde, oda sıcaklığında bulunabilmesi için yüksek alaşım elementi mevcudiyeti gereklidir [1,8].

Dökme demirler mikroyapısal özellikler bakımından çeşitli sınıflandırılmalara ayrılmışlardır. Bunlardan en mühimleri grafit şekli ve matris yapısına göre yapılan sınıflandırmadır. Yapıda bulunan grafitler; lamel, küresel yada temperlenmiş halde bulunabilirler. Çizelge 2.1'de dökme demirlerin ticari adı, mikroyapısı ve matris yapısına ait sınıflandırılması verilmiştir [11].

Çizelge 2.1 : Dökme demirlerin ticari isim, mikroyapı ve kırılma görünümüne göre sınıflandırılması [11].

Ticari İsmi	Karbonca ZenginFaz	Matris	Kırılma Görünümü
Gri	Lamel grafit	Perlit	Gri
Sünek	Küresel grafitl	Ferrit, perlit, östenit	Gümüş-gri
Beyaz	Sementit	Perlit, martensit	Beyaz
Temper	Temperlenmiş grafit	Ferrit, perlit	Gümüş-gri

Çizelge 2.2’de ise gri, küresel,temper ve beyaz dökme demirlerin kimyasal kompozisyonlarına ait alt ve üst sınır değerler verilmiştir.

Çizelge 2.2 : Dökme Demirlerin Kimyasal Kompozisyonları [11].

Element	Gri Dökme Demir, %	Beyaz Dökme Demir, %	Temper Dökme Demir, %	Küresel Grafitli Dökme Demir, %
Karbon	2.5-4.0	1.8-3.6	2.00-2.60	3.0-4.0
Silisyum	1.0-3.0	0.5-1.9	1.10-1.60	1.8-4.0
Manganez	0.25-1.0	0.25-0.80	0.20-1.00	0.10-1.00
Sülfür	0.02-0.25	0.06-0.20	0.04-0.18	0.03 maks.
Fosfor	0.05-1.0	0.06-1.18	0.18 maks	0.10 maks

Çizelge 2.3’de bazı dökme demir türlerine ve çelik döküme ait çeşitli özelliklerin mukayesesi verilmiştir [11]. Burada gri dökme demirin titreşim söndürme kabiliyeti, üretim maliyeti, yüzey sertleştirme, dökülebilirlik ve işlenebilirlik gibi avantajlarının olduğu görülmektedir.

Çizelge 2.3 : Küresel Grafitli Dökme Demir (KGDD); Gri Dökme Demir (GDD); Temper Dökme Demir (TDD); Beyaz Dökme Demir (BDD) ve Çelik Döküm (ÇD) arasındaki çeşitli özelliklerin karşılaştırılması [12].

Özellik	KGDD	GDD	BDD	TDD	ÇD
Dökülebilirlik	1	1	3	2	4
İşlenebilirlik	2	1	-	2	3
Güvenilirlik	1	5	4	3	2
Titreşim Söndürme	2	1	4	2	4
Yüzey Sertleştirme	1	1	-	1	3
Elastisite Modülü	1	3	-	2	1
Aşınma Direnci	3	5	-	3	1
Darbe Direnci	2	3	1	4	5
Korozyon Direnci	1	1	2	2	4
Sertlik / Ağırlık Oranı	1	5	-	4	3
Üretim Maliyeti	2	1	1	3	4

1=En İyi; 5=En Kötü

3. GRİ DÖKME DEMİR

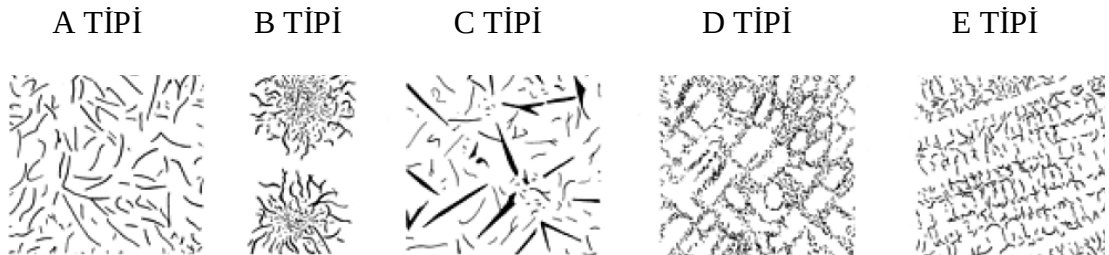
3.1 Giriş

Esasen demir-karbon-silisyum alaşımı olan gri dökme demirler, ötektik sıcaklık noktasında östenitin katı eriyik halinde ihtiva edebileceğinden fazla karbonu olan alaşımlar olup bileşimdeki fazla karbon grafit lamelleri halinde çökelmektedirler. Gri dökme demirlerde genel olarak %1.7 ile 4.5 arasında karbon ve %1 ile 3 arasında silisyum bulunmaktadır [2,8].

3.2 Katılaşma Sırasında Grafitleşme

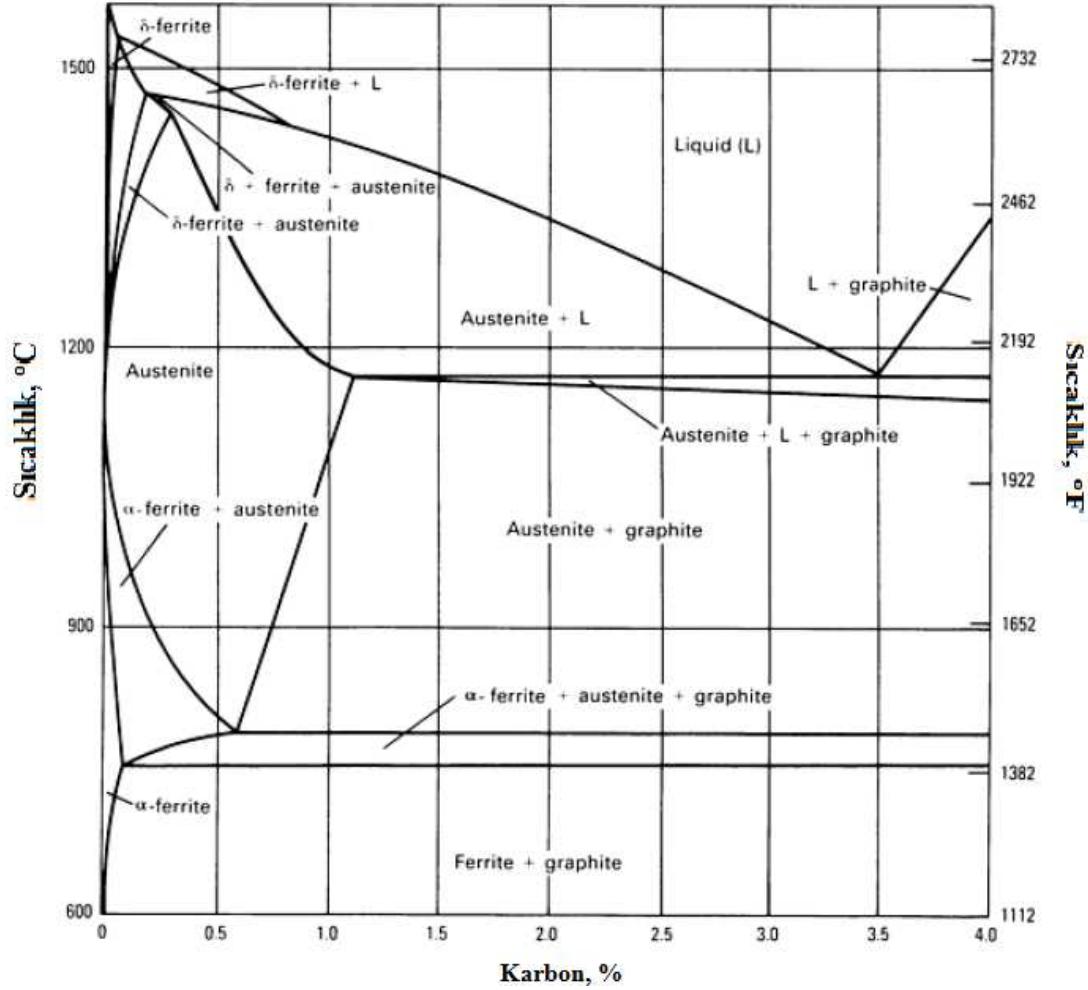
Gri dökme demirlerde grafitlerin şekli boyutu ve dağılımı katılaşma sırasında oluşmaktadır. Bu nedenle grafit tip ve boyutları arasında farklılıklar meydana gelmektedir. Sözü edilen farklılıklar ASTM ile AFS tarafından kabul görmüş standartlarla belirlenmektedir.

Şekil 3.1’de gri dökme demirlerin ASTM ve AFS standartlarında kabul edilmiş lamel tipleri gösterilmektedir. Gri dökme demir yapısında genellikle geliş güzel yönelenip üniform dağılmış A tip lameller tercih edilmektedir. B tip lameller yüksek mukavemet için yetersiz olup ferrit matriksi içersinde gelişigüzel yönlemiştir. C tip grafitler termal şoka dayanımlıdır ve hiperötektik bileşimde meydana gelmektedirler. D tipi grafitler düşük aşınma direnci ve düşük mukavemet özelliği gösterip yüksek silisyum içerenlerde ve hızlı soğuma şartlarında oluşmaktadır. D tipi grafitler katılaşma sırasında aşırı soğuma sebebiyle oluşmaktadır. E tipi grafitler ise C%’si düşük hipoötektik bileşimlerde bulunmaktadır [8].



Şekil 3.1 : ASTM ve AFS gri dökme demirde grafit lamel tipleri [8].

Şeki 3.2'de gösterilen demir-karbon faz diyagramında östenit, katı hal dönüşümü ile beraber metalin sıcaklık ve bileşimine bağlı olarak ferrit+perlit+grafit yada ferrit+perlite dönüşebilmektedir. Bununla birlikte sementit, ferrit ve sementite de ayrışabilir.



Şekil 3.2 : Demir-karbon faz diyagramı [8].

3.3 Alaşım Elementleri

Krom : Gri dökme demire %0.15 ile % 0.75 arasında krom ilave edildiğinde perlitik bir mikroyapı elde edilmektedir. Bileşik karbon oranı %0.06'dan yüksek olursa perlitik yapının sertliği ve mukavemeti daha yüksek olmaktadır. Yapıda mukavemeti arttırmasının yanı sıra krom ilavesi ile oksidasyon direncide yükselmektedir.

Molibden : Östenitin perlit yada beynite dönüşümünde katkıda bulunmasının yanı sıra sertleştirmede de önemli rol oynamaktadır.

Nikel : Ferrit fazında eriyip fazı sertleştirmesine neden olmasının yanı sıra orta derecede bir grafitleştiricidir. Eğer yüksek oranda kullanılırsa yapı martensitik yada östenitik olmaktadır.

Bakır : Orta derecede grafitleştirici olup ferrit içinde erir ve korozyon direncini arttırmaktadır [3].

3.4 Mekanik Özellikler ve Sınıflandırma

Yüksek basma mukavemeti, gri dökme demirlerin en önemli özelliklerinden biri olmakla birlikte basma kuvveti çekme kuvvetinin 3 ile 5 katı kadardır.

Burulma mukavemeti çekmedeki gerilimin 1.2 ile 1.4 katı kadar olup çekmede Elastik modül mikroyapıya bağlı olarak 0.8×10^4 ile 1.5×10^4 arasında değişmektedir.

Gri dökme demirlerin sürtünme ve aşınma direnci oldukça yüksek olup dişliler, silindir gömlekleri piston halkaları gibi uygulamalarda kullanılmaktadır [3].

Titreşim, makine aksamalarında tatmin etmeyen işleme sebep olmaktadır. Gri dökme demirlerin bu açıdan sönüm kapasiteleri benzersizdir. Sönüm kapasitesi kimyasal bileşimi ile mikroyapıya göre değişiklik göstermektedir. Fosfor içeriği sönüm kapasitesiyle ters orantılıdır. Fosfor içeriği arttıkça sönüm kapasitesi azalmaktadır.

Isıl işlem uygulamaları sönüm kapasitesinde dikkate değer bir etki göstermektedir. Martensitik yapı sönümü geliştirmektedir. Gri dökme demirlerin bu açılardan titreşim söndürme kabiliyeti özelliği çeliklere göre daha fazla olmasından dolayı özellikle titreşimin bir çalışma karakteristiği olduğu iç yanmalı motorlarda kullanılışları işleme bir bakıma yumuşaklık kazandırmaktadır [3,13].

Gri dökme demirlerin ASTM 48 (ABD) standardına göre çekme kuvveti, basma kuvveti, burulma dayanımı, ters eğilme yorulması ve Brinell cinsinden sertlik özellikleri Çizelge 3.1'de gösterilmektedir.

Çizelge 3.1 : Gri dökme demirlerin ASTM 48 sınıfına göre mekanik özellikleri [11].

ASTM A48 (sınıfı)	Çekme Mukavemeti		Burulma Dayanımı		Basma Dayanımı		Ters Eğilme Yorulması Limiti		Sertlik, HB
	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	
20	152	22	179	26	572	83	69	10	156
25	179	26	220	32	669	97	79	11.5	174
30	214	31	276	40	752	109	97	14	210
35	252	36.5	334	48.5	855	124	10	16	212
40	293	42.5	393	57	965	140	128	18.5	235
50	362	52.5	503	73	1130	164	148	21.5	262
60	431	62.5	610	88.5	1293	187.5	169	24.5	302

4. ÖSTEMPERLENMİŞ GRİ DÖKME DEMİR

Geçmişte gri dökme demirlerin dayanımını arttırmak için birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalar genelde alaşımlamaya yönelik gerçekleşmiştir. Ancak dayanımdaki yükselişe rağmen, üretim maliyetinde oluşan artıştan dolayı tam anlamıyla istenen sonuca ulaşamamıştır. Östemperleme işlemi ile üretim maliyeti düşük olarak; mukavemet ve sönümlemede artış amaçlanmaktadır. Östemperlenmiş küresel grafitli dökme demir ile ilgili bir çok çalışma bulunmaktadır. Ancak gri dökme demir ve küresel dökme demirin östemperlenebilirlikleri arası birçok farklılık bulunmaktadır. Bu farklılıklar iki dökme demirin kimyasal kompozisyonu ve katılaşması ile ilgilidir.

Silisyumun ösferrit matrisin gelişiminde önemli bir rolü bulunmaktadır. Silisyum beynitik karbürü önleyip uzatmaktadır. Bu doğrultuda östenitteki karbon çözünürlüğü düşmekte, östenitteki karbon difüzyonunu hızlandırmakta ve üst kritik sıcaklığı yükseltmektedir. Sonuç olarak östemperleme reaksiyonunun tamamlanması için gerekli olan süreyi etkilemektedir. Gri dökme demirde silisyum içeriği küresel grafitli dökme demire göre daha yüksektir ve bundan dolayı daha az östemperleme süresine gereksinim duyulmaktadır.

Sülfür içeriği gri dökme demirin daha yüksektir. Sülfür matris-grafit arayüzünde ayrılır ve güçlü bir karbon difüzyon bariyeri oluşturur. Bu olayda matris ile grafit yaprakları arası karbon difüzyonu yavaşlamaktadır. Küresel grafitli dökme demirde; gri dökme demirin aksine segregе olmuş sülfürden dolayı katılaşma sonrası soğuma sırasında matrinden grafit nodüllerine çok fazla karbon difüzyonu gerçekleşmektedir. Gri dökme demirlerde östenitleme süresi; yüksek sülfür içeriğine bağlı olarak daha uzun sürmektedir [14].

4.1 Östempirleme Isıl İşlemi

Östenitleme ısııl işlemleri östenitleme ve östempirleme olmak üzere 2 aşamadan oluşmaktadır. 1. Aşama olan östenitleme işleminde malzeme 850-950°C aralığında bir sıcaklıkta ısıtılıp 60-120 dakika arası bekletilir. Bu aşamada yapı östenitik olur.

2. Aşamada ise malzeme östempirleme için tuz banyosuna 250-450°C aralığında daldırılır ve belirli bir bekleme süresinin ardından havada soğutulur. Dikkat edilmesi gereken; perlitik dönüşümü engelleyebilmek için malzemenin hızlı bir şekilde tuz banyosuna daldırılması gerektiridir. Malzeme morfolojisi; östempirleme sıcaklığı ve süresine göre değişim göstermektedir [7,15,16].

4.2 Isıl İşlem Aşamalarının Etkisi

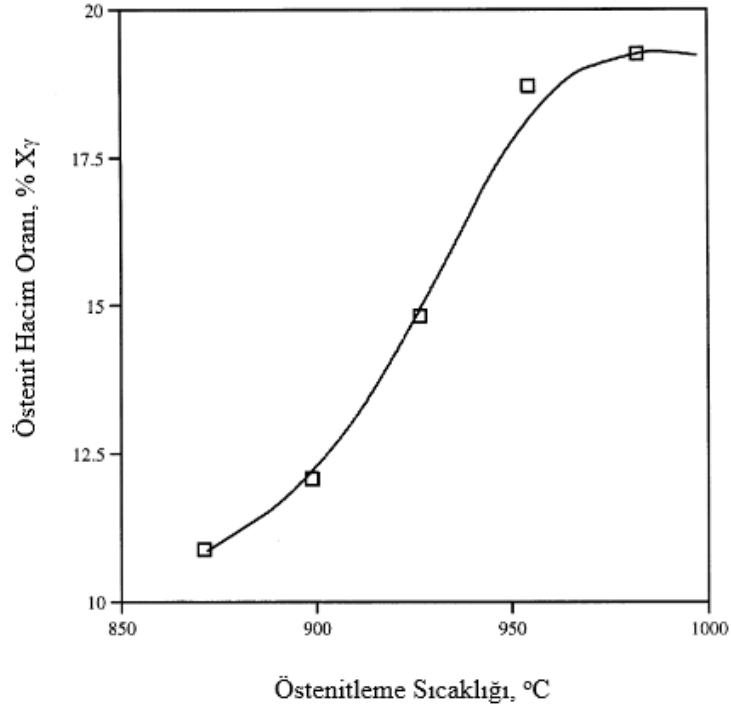
4.2.1 Östenitleme sıcaklığı ve süresi

Östenitleme sıcaklığı ve süresinin malzemenin mekanik özellikleri üzerinde önemli bir etkisi bulunmaktadır. Östempirleme prosesinin ilk aşamasında malzeme 850-950°C arasında östenitleme işlemine tabi tutulur. Östenitleme sıcaklığı malzemenin östenitin karbon içeriğini kontrol etmektedir [17]. Östenitin karbon içeriği ile östenitin serleşebilirliği ve kararlılığı değişmektedir. Östenitleme işlemi uzun süre gerçekleştirilirse östenitin karbon içeriğinin artmasına karşın yapıda kabalaşma meydana gelmektedir. Östenitin yüksek karbon içeriği östenitin sertleşebilirliğini ve kararlılığını arttırmaktadır ancak bununla birlikte reaksiyon hızının düşmesine de sebebiyet verir.

Östenitleme sıcaklığı düşürülürse yapı daha kararlı hale gelmesinin yanında yapıda daha az martensit oluşmaktadır. Östenitleme sıcaklığı arttığında östenitleme kinetiğinde hızlanma yaşanmakta ve östenit içerisindeki karbonun çözünabilirliği ve Şekil 4.1’de görüldüğü gibi östenit hacim oranı artmaktadır. Öte yandan östenitleme sıcaklığının artması Şekil 4.2’de görülen işlem aralığını daraltır ve östenizasyondan sonra gerçekleşecek östempirleme süresini normal gerekli olandan daha kısa hale getirir [17-19].

Östenitleme kinetiğindeki en önemli parametre döküm matris yapısındaki perlit içeriğidir. Perlit içeriğinin arttıkça östenitleme kinetiği hızlanır ve öte yandan perlit

miktarının yüksek olması, düşük östenitleme sıcaklığı için bir problem oluşturmaz. Alaşım elementi eklemekte C değeri üzerindeki etkisi oldukça azdır [7,19].



Şekil 4.1: Östenitleme sıcaklığının östenit hacim oranına etkisi [17].

Östenitleme süresini artması östemperleme kinetiklerini geciktirir ve bunun sonucunda ösferrit üründe kabalaşma meydana gelir [20].

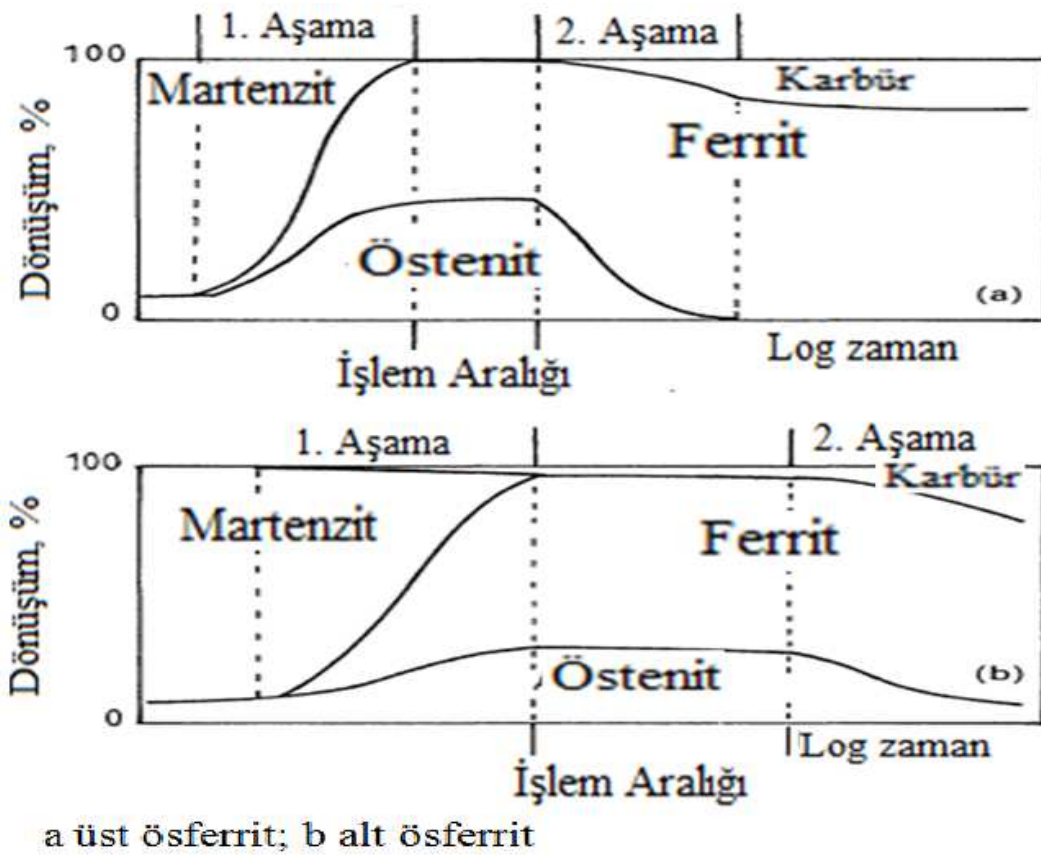
Östenit içerisindeki karbon çözünürlüğünü alaşım elementleri de etkilemektedir. Östenitteki C çözünürlüğü aşağıdaki bağıntıyla ifade edilir [7]:

$$C_{\gamma}^{\circ} = \frac{T_{\gamma}}{420} - 0.17(\%Si) - 0.95 \quad (4.1)$$

Yukarıda, T_{γ} östenitleme sıcaklığı olarak verilmiş olup birimi °C'dir.

4.2.2 Östempirleme sıcaklığı ve süresi

Mekanik özellikler açısından östenitleme sıcaklığının yarattığı etkinin östempirleme sıcaklığı ve süresine bağlı olarak belirlenmesinden dolayı, östempirleme sıcaklığı ve süresi, östenitleme sıcaklığı ve süresine göre daha fazla önem teşkil etmektedir [21]. Östempirleme sıcaklığı ve süresinin, malzemenin alaşım içeriği ve östenitleme şartlarına bağlı olduğu bilinmekle beraber, mekanik özellikler ve aşınma direnci üzerinde etkisi oldukça önem arz etmektedir. Tuz banyosunda izotermal bekleme esnasında östempirleme işlemi genellikle iki aşamada meydana gelmektedir ve Şekil 4.2'de gösterilmektedir [7,22].



Şekil 4.2 : (a) Üst ösferritik ve (b) alt ösferritik yapının östempirleme süresiyle beraber mikroyapıda oluşan değişimin şematik gösterimi [7,22].

Östempirleme sıcaklığı; mikroyapının ve mekanik özelliklerinin saptanması açısından oldukça önem arz etmektedir. 250-400°C arası gerçekleştirilen östempirleme işleminde 330°C altında alt ösferrit yapısı görülürken 330°C üstünde ise üst ösferrit yapısı görülmektedir. Alt ösferrit yapısında aşınmaya karşı dirençli bir yapı görülürken, üst ösferrit yapısında ise süneklik ve tokluk alt ösferrit yapısına göre daha yüksektir [7,9,18,19,21]. Östempirleme sıcaklığı, alt ve üst ösferritik yapıların

meydana gelmesini etkilemesinin haricinde, I. ve II. aşama reaksiyonlarının oluşum hızına da tesir etmektedir. I .aşama; ferritin östenit tane sınırlarında çekirdekleşmesi esnasında, içerisinde bulunan karbonu dışarı difüzyon ile atarak östeniti zenginleştirmektedir. I. aşama sonucu oluşan yüksek karbonlu östenit (γ_{yk}), oda sıcaklığına soğutma esnasında kararlıdır. Reaksiyon esnasında ferrit plakalarından karbonun difüzyonu zorlaşıp ferrit plakalarının büyümesi durur ve bununla birlikte ösferrit olarak adlandırılan dubleks ferrit-östenit matris elde edilir.Bu olayda optimum özelliklerin elde edildiği yapı meydana gelmektedir. I. aşama reaksiyonunun hızını tayin etmede östenitlenmiş karbon oranı (C_{γ}^0) ile östemperlenmiş matriksin karbon oranı (C_{γ}^{maks}) arası fark oldukça önem arz etmektedir. C_{γ}^0 değeri östenitleme sıcaklığı ile C_{γ}^{maks} değeri östemperleme sıcaklığı ile kontrol edilmekle beraber östenitleme sıcaklığı arttığında C_{γ}^0 artarken bunun yanında östemperleme sıcaklığı artırıldığında C_{γ}^{maks} azalmaktadır [9].

II. aşama sırasında yüksek karbonlu östenit; östemperleme süresi 120 dakika üzerinde maksimum değerine ulaşmakta ve beynitik ferrit ve karbüre ayrışmaktadır. Bununla beraber östemperleme sıcaklığı azaldıkça karbür oluşumu için daha uzun bir östemperleme süresi gereklidir.

Fazlar kuralına göre [9]:

$$X_{\gamma} = \frac{(C_{\gamma}^0 - C_{\gamma})}{(C_{\gamma}^{maks} - C_{\gamma})} \quad (4.2)$$

olmaktadır. Burada

X_{γ} , Östenitin hacim oranı (%)

C_{γ}^0 , Östenitlenmiş matriksin karbon oranı (%)

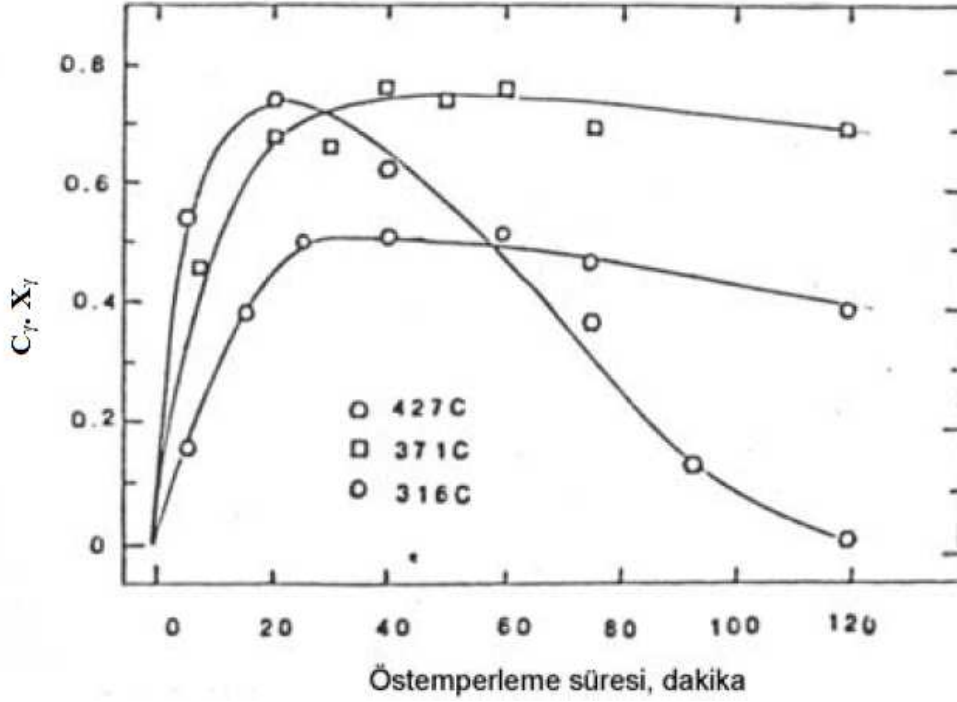
C_{α} , Ferritin karbon oranı (%)

C_{γ}^{maks} , Östemperlenmiş matriksin karbon oranı

C_{γ} , İşlemin herhangi bir anındaki östenitlenmiş matriksin karbon oranı (%)

Östemperleme sıcaklığı yükseldiğinde C_{γ}^{maks} azalmasına rağmen X_{γ} değeri artar yani yüksek östemperleme sıcaklıklarında östenitin hacim oranı artmaktadır. $C_{\gamma} \cdot X_{\gamma}$, çarpımı matrisin C oranını vermekle beraber, bu değer C_{γ}^0 değerine eşit olmaktadır. Östemperleme işlemi esnasında karbonun bir kısmı yapıda karbür yada ferrit faz yapısında aşırı doymuş halde ise $C_{\gamma} \cdot X_{\gamma} < C_{\gamma}^0$ şeklindedir [22].

Şekil 4.3'de küresel grafitli dökme demir, 316°C'de östemperlendikten sonra $C_\gamma \cdot X_\gamma$ çarpımı 0.5 değerinde kalırken, 371°C ve 427°C'de östemperlenmesinin ardından $C_\gamma \cdot X_\gamma$ çarpımının yaklaşık 0.8 değerine ulaştığı görülmüşse böylece 371 ve 427°C'de çok az karbür oluştuğu yada hiç oluşmadığı belirlenmektedir.

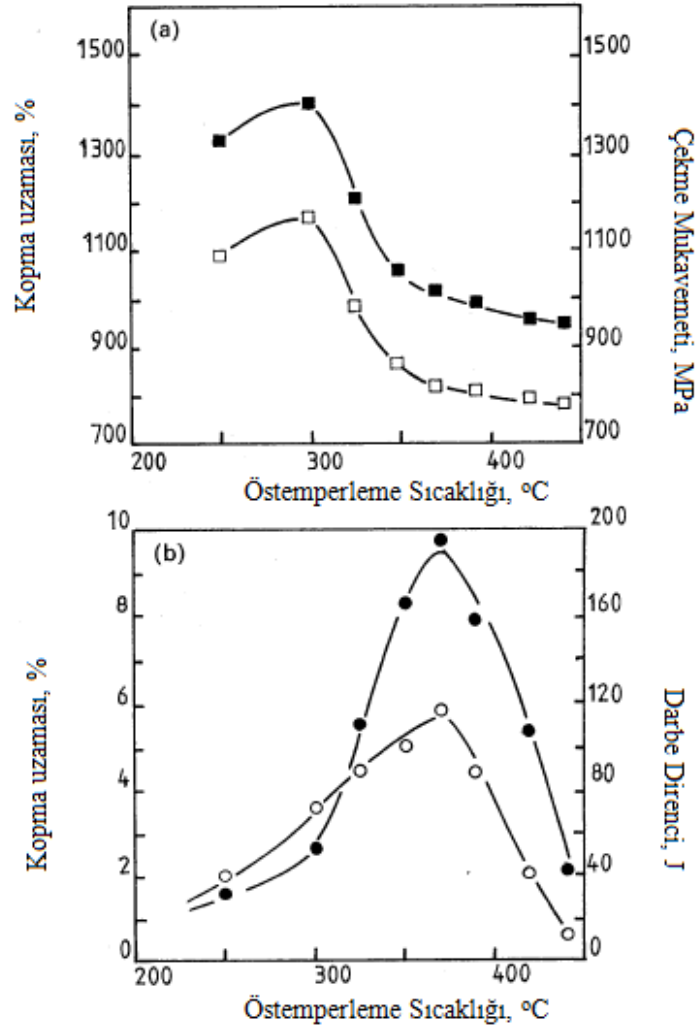


Şekil 4.3 : Östemperlenmiş küresel grafitli dökme demirin çeşitli östemperleme sıcaklık ve zaman koşullarındaki $C_\gamma \cdot X_\gamma$ değişimi.

Östemperleme süresi de sıcaklığı kadar yüksek önem taşımaktadır. Östemperleme süresi artarsa, sertlik düşmesine karşın dayanım, darbe direnci ve süneklik artmaktadır. Süre kısa tutulursa martensit oluşumuyla beraber mekanik özelliklerde düşmektedir. Martensit; östemperleme işlemi sonrası havada soğutma sırasında dönüşmeyen düşük karbonlu östenitten meydana gelmektedir. Östemperleme işlemi arttığında yapıda bulunan martensit miktarı azalmaktadır [20]. Östemperleme zamanının kısa olduğu koşullarda, dönüşmemiş östenit içeriği düşük karbon miktarı nedeniyle havada soğuma sırasında martensite dönüşmeden kalmaktadır. Östemperleme süresi daha fazla arttığı zaman yüksek karbonlu östenit, beynitik ferrit ve karbüre ayrışmaktadır. Sonuç olarak, östemperleme süresi arttığı zaman martensit miktarı azalmasına karşın kalınit östenit ve beynitik ferrit miktarları artmaktadır [22].

Yüksek östemperleme sıcaklıklarında işlem aralığı kapalı iken, mukavemet neredeyse sabit kalmasına rağmen tokluk ise düşmeye başlar ama yine yüksek

sıcaklıklarda II.aşama reaksiyonu için itici gücün artması sonucu mukavemette bir miktar düşme yaşanır [7,18,19]. Şekil 4.4’de östemperleme sıcaklığı değişiminin, mekanik özelliklerde yarattığı değişim görülmektedir. Östemperleme sıcaklığı belli bir sıcaklığa kadar arttıkça kopma uzaması, çekme mukavemeti ve darbe direnci artmakta ancak belirli bir sıcaklıktan sonar mekanik özelliklerde düşme gözükmemektedir. Bu nedenle östemperleme sıcaklığı, optimum mekanik özellikler için önem arz etmektedir.



Şekil 4.4 : Östemperleme sıcaklık değişiminin mekanik özelliklere etkisi [19].

Östempirleme işleminde, parametrelerin yanı sıra kritik çap aşağıda görülen formül yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$D_c = 124C_{\gamma} + 27(\%Si) + 22(\%Mn) + 16(\%Ni) + 25(\%Mo) - 1.68 \times 10^{-4} T_A^2 + 120(\%Cu)(\%Ni) + 62(\%Cu)(\%Mn) + 88(\%Ni)(\%Mo) + 11(\%Mn)(\%Cu) + 127(\%Mn)(\%Mo) - 20(\%Mo)(\%Ni) - 137 \quad (4.4)$$

5. AŞINMA

Aşınmada; birbiriyle temasta olan katı malzeme yüzeylerinin, oksit filmler ve sınır yağlayıcılar ile korunmalarına karşın, mekanik etkenler ile malzeme kayıpları ortaya çıkıp, yapıda performansı sınırlayıcı şekilde değişiklikler olabilmekte ve katı-katı teması meydana gelebilmektedir. Bu temas, aşınmaya sebebiyet vermektedir. Başka bir tanımla aşınma yüzeyler arası malzeme transferi ile meydana gelen malzeme kaybıdır [23,24].

Malzemelerde meydana gelen hasarın aşınma sayılabilmesi için aşağıda belirtilmiş olan kriterlerin meydana gelmesi gerekmektedir [20]:

- i- Mekanik etki olması
- ii- Sürtünmenin bulunması
- iii- Yavaş ancak sürekli gerçekleşmesi
- iv- Malzeme yüzeyinde değişiklik oluşturması
- v- İstenmeyen bir durum olması

5.1 Aşınmayı Etkileyen Faktörler

Aşınmayı etkileyen çeşitli parametreler değişik şekillerde sınıflandırılmaktadır. Bu faktörler, aşağıdaki gibi 4 farklı grup halinde verilmektedir [25]:

1. Ana malzemeye bağlı faktörler;
 - Malzemenin kristal yapısı, malzemenin sertliği, elastisite modülü, deformasyon davranışı, yüzey pürüzlülüğü ve malzeme boyutu
2. Karşı malzemeye bağlı etkenler ile aşındırıcının etkisi
 - Aşındırıcının tane şekli ile tane dağılımı
3. Ortamın Etkisi
 - Sıcaklık, nem ve atmosfer
4. Servis koşulları
 - Basınç, hız ve kayma yolu

5.2 Aşınma Mekanizmaları

Aşınma, hareketli makine parçalarının performanslarını azaltıp bu parçaların bozulmasına sebebiyet vermesinden ötürü önemli bi problemdir ve ekonomik açıdan aşınmanın sebep olduğu kayıplar oldukça büyük olmaktadır.

4 ana aşınma mekanizması vardır. Bunlar; abrasif aşınma, adhesif aşınma, yorulma aşınması ve korozyon aşınmasıdır. Aşınma ile aşınma yüzeyleri arası bağ Çizelge 5.1'de verilmiştir [26].

Aşınmayı etkileyen birçok etken bulunmaktadır. Bir sistem içerisinde irdelenmesi gereken aşınma için, aşınmayı oluşturan etkenleri değerlendirirken bileşik etkiler göz ardı edilmemelidir. Temas içerisinde bulunan 2 katı yüzeyden malzeme kaybı 3 farklı şekilde gerçekleşebilir. Bunlar yüzeyde fiziksel anlamda ayrılan malzemeler, bölgesel çözünmeler ve kimyasal erimelerdir [27].

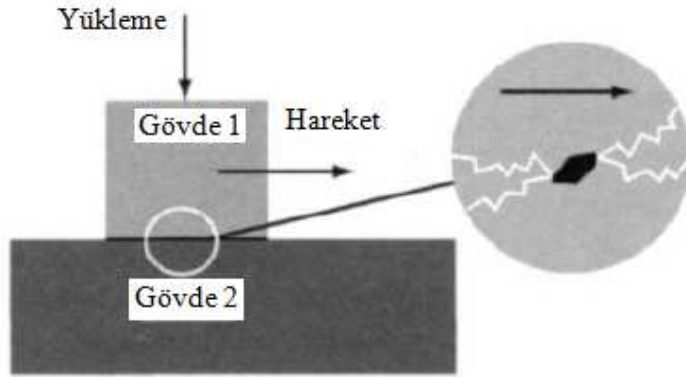
Çizelge 5.1 : Aşınma ile aşınma yüzeyi arasındaki bağ [26].

Aşınma Türleri	Yüzey	Aşınma Partikülleri
Abrasif (iki gövdeli)	- Yüzey sertliği -Paralel yivler	- Mikro kırıntılar
Abrasif (üç gövdeli)	- Gelişi güzel yüzey -Çentikler -Plastik deformasyon	-Tabaka halinde ayrılma -Malzemenin şiddetli plastik deformasyona uğraması
Adhesif	- Transfer -Plastik deformasyon	-Normal boyut (10 µm ve daha fazla)
Aşındırıcı	-Renklendirilmiş film yüzeyi -Homojen olmayan görünüm	-İnce talaş, kimyasal reaksiyon sonucu üretim
Kırılma aşınması	-At nalı kırıklar	-Büyük, köşeli yada kırık partiküller
Delaminasyon	-Yüzeye paralel çatlaklar - İnce tabakalar -Plastik deformasyon	-Levha partikülleri
Kemirme	-Çeşitli derinlikte yüzeyde -Çatlak başlangıcı	- İlişkinin dışında oluşan küme
Erozyon	-Rastgele görünüm -Etki izleri, Paralel yivler -Plastik Deformasyon	- Mikrokırılma
Kavitasyon	-Boşluklar -Çöküntü bölgesinde oluşan hatalar	- Mikro ince tabakalar

5.2.1 Adhesif aşınma

Yapışma aşınması olarak ta bilinmekte olan adhesif aşınma en yaygın görülen aşınma türü olmakla beraber katı malzemenin diğer yüzey üzerinde kayması yada basınç uygulamasıyla oluşur. Başka bir tanımlama ise, kaymakta olan iki yüzey içerisinde abrasifler olmaksızın nispeten yüksek hareket ile partiküllerin uzaklaşmasıyla oluşmaktadır. Aşınma kayma ile oluştuğundan yapışık bölgeler dağınık haldedir ve bu büyük aralık da aşınma hızının bir neticesidir [28-30].

Aşınmanın şematik gösterimi Şekil 5.1’de verilmektedir [31]. Kuru kayma şartlarında yapılan deneylerde aşınma kaybının; yük ve kayma mesafesi ile doğru orantılı olduğu belirtilirken, aşınan yüzeyin sertliğinin ise ters orantılı olduğu görülmüştür. Aşınma hızı ile test süresinin de aşınma kaybını önemli bir şekilde etkilediği anlaşılmıştır [26].



Şekil 5.1: Adhesif aşınmanın şematik gösterimi [31].

Adhesif aşınmanın önlenmesi için çeşitli tedbirler mevcuttur. Bunlardan ilki yağlamadır. İyi bir yağlama yapılmasıyla yüzeyler arası sürtünme azaltılıp oluşan ısı sistemden uzaklaştırılabilir. Pratik olarak uygulanması sınırlı olan bir uygulama da birbirleri içerisinde çözünmeyen metaller kullanmaktır. Bu sayede adhesif aşınmaya meydana getiren mikro-kaynak prosesinin oluşumu engellenerek aşınmanın oluşması ortadan kaldırılabilir. Metal-metal temasını önlemekte alınan tedbirlerden biridir. Temas engellemek amacıyla metal yüzeylerinde kimyasal filmler oluşturulur ve bu da aşınmayı engeller. Pratikte en çok kullanılan yöntem ise düz yüzeyler kullanmaktır. Eğer birbirleriyle etkileşen yüzeylerde soğuk kaynaşmaya sebebiyet verecek halde kaşılaşacak çıkıntılar yok ise adhesif aşınma meydana gelmeyecektir. Yağlayıcı ilavesiyle de yüzeyler, birbirleri üzerinde temas olmaksızın kayarlar [26].

5.2.2 Abrasif aşınma

Abrasif aşınma iki yüzeyden birinin oldukça sert ve yüzeyininin de pürüzlü olduğu durumlarda meydana gelen bir aşınma türüdür. Bu aşınma mekanizmasında yüzeyden malzeme kaybı çok hızlı gelişmektedir [20,32].

Abrasif aşınma iki elemanlı ve üç elemanlı olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. İki elemanlı abrasif aşınma; sürtünen elemanların doğrudan birbirleriyle etkileşimi sonucu oluşurken, üç elemanlı abrasif aşınmada ise ana malzeme ve karşı malzeme arasında serbest bir ara malzeme olabileceği gibi, aşınma neticesinde yüzeylerden kopan parçacıkların birer ara malzeme gibi davranarak üçüncü eleman olarak yer almaları mümkündür [26].

Abrasif aşınmayı etkileyen iki temel faktör bulunmaktadır. Bunlar birincisi, metal yüzeyi ile aşındırıcı partikül arasındaki sertlik farklılığı olmakla beraber ikincisi ise teması oluşturan basıncın büyüklüğüdür.

Abrasif aşınma türleri üç ana gruba ayrılmaktadırlar. Bunlar [20,32];

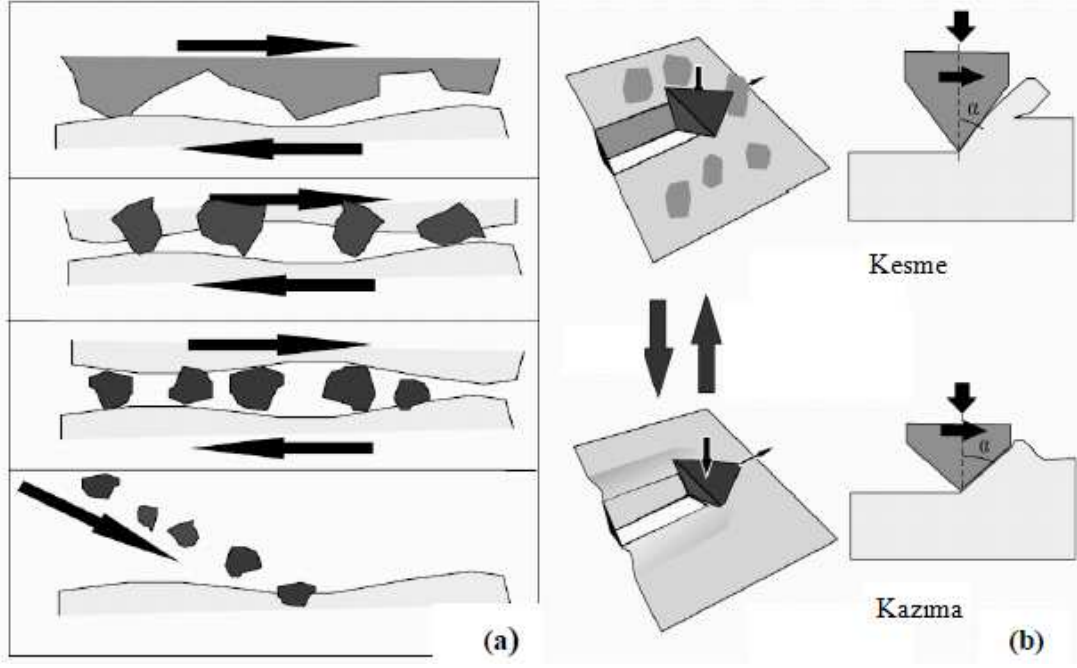
i- Oymalı sürtünme aşınması

ii- Öğütmeli sürtünme aşınması

iii- Erozyon

Tekrar belirtmek gerekirse, abrasif aşınma malzemede istenmeyen bir durumdur ancak talaşlı imalatta torna takımlarını bilemek, kayaları delmek yada pirinçten yapılmı süs eşyalarını parlatmak gibi işlemler için de önem arz etmektedir [23].

Şekil 5.2'de abrasif aşınma mekanizması ile abrasif aşınmanın kesme yada kazıma ile meydana gelmesi şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 5.2 : (a) Abrasif aşınma mekanizmasının oluşumu ve (b) Abrasif aşınmanın kesme veya kazıma ile oluşması [20].

6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada perlitik gri dökme demir; farklı sıcaklık ve zaman aralıklarında uygulanan östemperleme ısıtılmasının mikroyapıya ve mekanik özelliklere etkileri araştırılmıştır. Farklı sıcaklık ve zaman parametrelerindeki östemperleme ısıtılmasının aşınma direncini etkisini incelemek amacıyla, döküm halindeki ve östemperlenmiş numuneler oda sıcaklığında ve 200°C'de aşınma deneyine tabi tutulmuştur.

6.1 Deneysel Numuneler

Östemperleme ve sonrasında aşınma deneyleri için hazırlanmış olan perlitik gri dökme demir numuneleri 15 mm çapında olmakla beraber 6 mm kalınlığındadır.

Deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere, gri dökme demir malzemelerin spektral analiz yöntemiyle yapılan kimyasal analiz sonuçları Çizelge 6.1'de gösterilmektedir

Çizelge 6.1 : Deneysel çalışmalarda kullanılan perlitik gri dökme demirin kimyasal bileşimi (%ağ.).

Kimyasal Bileşim (%ağ.)				
C	Si	Mn	P	S
3.15	1.1	0.8	0.23	0.07

6.2 Östemperleme Isıl İşlemleri

Östemperleme ısıtılma işlemi 2 aşamalı bir işlem olmakla beraber, perlitik gri dökme demir öncelikli olarak 900°C'de 60 dakika süre ile östenitlenmiştir. Östenitleme fırını olarak KERR marka elektrikli fırını kullanılmıştır. Sıcaklık, fırının kendi kontrol sistemine ilave olarak Testo marka termokupl ile ölçülmüştür. Deney numunelerinin, oksidasyonu ve dekarbürizasyonunu engellemek amacıyla numuneler, östenitleme işlemine başlamadan önce dökme demir talaşına gömüldükten sonra östenitleme fırınına konulmuştur.

Östenitleme işleminin ardından numuneler hızlıca östemperleme için tuz banyosuna aktarılmıştır. Tuz banyosu, Nabertherm marka bir fırın içerisine paslanmaz çelik bir

pota konulmuş ve pota içerisine AS135 olarak bilinmekte olan ısıtıl işlem tuzu ilave edilmiştir. Östemperleme işlemi için 250°C, 300°C, 350°C ve 400°C olmak üzere 4 farklı östemperleme sıcaklığı seçilmiş ve her sıcaklıkta numuneler; 5,20,40,60 ve 120 dakika olmak üzere 5 farklı sürede östemperlenmiştir. Östemperleme işlemi sonrası tuz banyosundan çıkarılan numuneler havada oda sıcaklığına kadar soğumaya bırakılmıştır.

6.3 Metalografik Çalışmalar

Metalografik inceleme için, döküm halindeki ve ısıtıl işlem uygulanmış numuneler, farklı östemperleme sıcaklık ve zaman koşulları ile aşınma deneylerinin incelenmesi ve gerekli fotoğrafların çekilmesi suretiyle yapılmıştır.

Mikroyapının kantitatif özellikleri için gri dökme demir numunelerinden Leica DM750M optik mikroskobu yardımı ile 5 farklı mikroyapı bölgesinden 100 büyütmede görüntüleri alınmış Clemex Görüntü Analiz yazılımı ile mikroyapının kantitatif metalografisi (grafit hacim oranı ve ortalama grafit boyu) yapılmıştır. Bu bağlamda döküm halindeki gri dökme demirin grafit hacim oranı % 10.4 ve ortalama grafit boyu 227µm olarak bulunmuştur.

Numuneler sırasıyla 400, 600, 800, 1000, 1200 ve 2500 mesh zımpara kademelerinden numune yüzeyinde çizik olmayacak şekilde geçirilmiştir. Zımparalama sonrasında numuneler, 3 µm'lik elmas pasta ve ardından 3 µm'lik alumina ile parlatılmıştır. Alkol ile temizlenen numuneler %3 Nital ile dağlanmıştır. Dağlama sonrasında hızlı bir şekilde suyla yıkanıp havada kurutulduktan sonra mikroyapı incelemelerine Leica DM750M marka optik mikroskobunda analiz edilmek üzere hazır hale getirilmiştir.

6.4 XRD Analizleri

X-Ray difraksiyon analizleri; kalıntı östenit hacim oranı ve kalıntı östenitteki C oranının tayini amacıyla GBC MMA X-ray diffraktomesinde MoK α radyasyonunda 25°-45° arası 0.05° adım boyunda ve 0.5°/dk tarama hızında yapılmıştır. Kalıntı östenit hacim oranının belirlenmesinde, hmk ferrit fazına ait (200) ve (211) düzlemlerine ait pikler ile ymk östenit fazına ait (220) ve (311) düzlemlerine ait pikler kullanılmıştır. Östenit piklerinin doğru ölçülmesi için açısız konum, östenit latis parametresinin ölçümüne aşağıda verilen kalıntı östenitteki C içeriği (ağ-%) ile izin vermektedir.

$$C_{\gamma}=(a_{\gamma}-3.548)/0.044 \quad (6.1)$$

Kalıntı östenit hacim oranı ise; aşağıda gösterilmiş olan doğrudan karşılaştırma metoduyla belirlenmiştir.

$$V_{\gamma} = \frac{(I_{\gamma}/R_{\gamma})}{\left(\frac{I_{\gamma}}{R_{\gamma}}\right) + (I_{\alpha}/R_{\alpha})} \quad (6.2)$$

Formulde sözü geçen I, östenit ve ferritin tümleşik yeğinliğinin difraksiyon piki; R teorik şiddet; V ise kalıntı östenitin hacim oranıdır.

6.5 Sertlik Deneyleri

Makro Sertlik ölçümleri için ASTM E10-12 standardına uygun olarak, Zwick Derinlik Duyarlı Universal Sertlik Cihazı kullanılarak 187.5 kg yük altında 2.5 mm (D) tungsten bilya ile yapılmıştır (F/D²). Değerler numunelerin düzlemsel yüzeylerinden alınmış her numuneden beşer adet Brinell sertlik değerleri alınarak, elde edilen sonuçların aritmetik ortalaması hesaplanmıştır.

Mikro sertlik için Tukon 1102 marka sertlik cihazında 200 gr yük altında matris yapıların sertlik ölçümleri yapılmıştır. Her numuneden 5 veri alınmış ve bunların aritmetik ortalaması rapor edilmiştir.

6.6 Aşınma Deneyleri

Aşınma deneyleri CSM marka ball-on-disk deney cihazında, oda sıcaklığı ile 200°C yüksek sıcaklıkta yapılmıştır. Deney sırasında aşındırıcı bilya, numune üzerinde 4

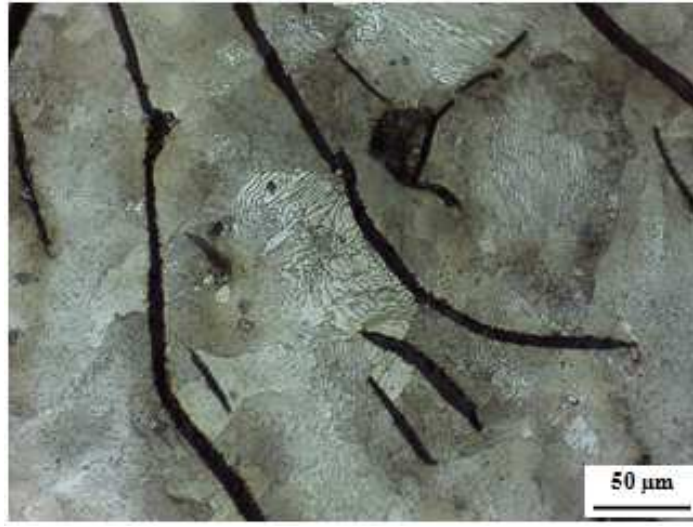
mm çapında daire oluşturacak şekilde periyodik olarak hareket etmektedir. Deneylerde aşındırıcı bilya olarak 6 mm çapında Al_2O_3 kullanılmış olup deneyler; 3 N yük altında, 0.03 m/s aşınma hızında ve 200 m kayma mesafesinde gerçekleştirilmiştir. Deney esnasında sürtünme kuvveti kaydedilmiş ve uygulanan dikey yüke (3N) bölünerek sürtünme katsayısı hesap edilmiştir.

Numunelerin aşınma direncini hesaplamak için, deney esnasında oluşmuş olan aşınma izinin derinliği ve genişliği, Veeco Dektak 6M model yüzey profilometresi aracılığıyla belirlenmiş ve aşınma hızı hesaplanmıştır.

7. DENEYSEL SONUÇLAR

7.1 Mikroyapı İnceleme Sonuçları

Çalışmada gri dökme demir kullanılmış olup Şekil 7.1'de görüldüğü üzere yapının perlitik olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 7.1 : PGDD optik mikroyapı fotoğrafı.

Perlitik gri dökme demirlere, mekanik özelliklerini incelemek üzere östemperleme işlemi yapılmıştır. ÖGDD 900°C'de 60 dakika östenitlendikten sonra 250°C, 300°C, 350°C ve 400°C'de 5, 20 40 60 ve 120 dakika suretiyle östemperlenmiştir.

7.1.1 Optik mikroskop inceleme sonuçları

Farklı sıcaklık ve zamanlarda östemperlenen numunelerin optik mikroyapı fotoğrafları, 250°C, 300°C, 350°C ve 400°C östemperleme sıcaklıklarında ayrı ayrı olarak Şekil 7.2-7.5'de ve daha düşük büyütmedeki görüntüleri Şekil A.1'de görülmektedir. Östemperleme işlemi sonucu oluşan mikroyapıların, beynitik ferrit, kalıntı östenit ve lamel grafitlerden oluştuğu görülmekle beraber, mikroyapının morfoloji ve dağılımı, östemperleme işlemindeki sıcaklık ve zamana bağlı olarak değişim göstermektedir. Östemperleme işleminde Şekil 7.2-7.5'den de anlaşıldığı üzere 250°C ve 300°C derecede alt ösferritik yapı görülmektedir. Östemperleme

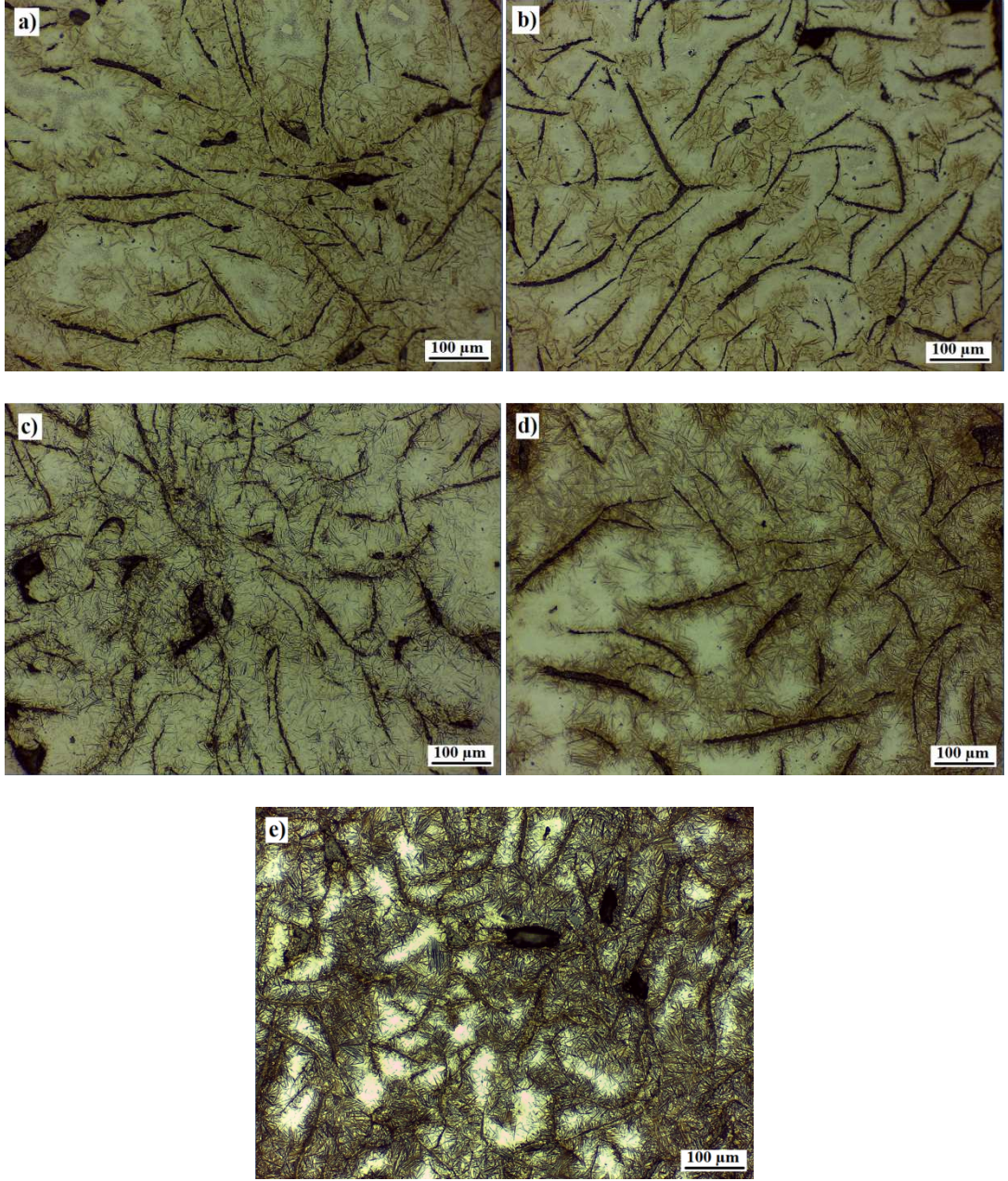
sıcaklığı 350°C ve 400°C'ye çıkartıldığında ösferrit morfolojisinde değişim oluşmakta ve alt ösferrit üst ösferrite dönüşmektedir. Alt ösferrit ince ve iğnesel görünümlü iken üst ösferrit kaba ve tüylü görünümündedir.

Yapılan çalışmalarda, östemperlenmiş mikroyapının açık renkli kısımlarının kalıntı östenitten meydana geldiğini koyu renklerin iğnesel ferrit ve grafit lamellerinin östenit içirisinde dağılmış olduğunu görülmüştür. Östemperleme sıcaklığının artmasıyla beraber morfolojide değişim görülmekte, östenitin ver ferritin kalınlaştığı fark edilmektedir. Östemperleme sıcaklığı artmasıyla birlikte ferritin hacim yüzdesi düşmekte ve buna bağlı olarak kalıntı östenitin hacim yüzdesi artmaktadır. Östemperleme sıcaklığı artmasıyla beraber Şekil 7.7'dende görüleceği üzere östenitin karbon yüzdesi de buna bağlı olarak artmaktadır [18,19,22].

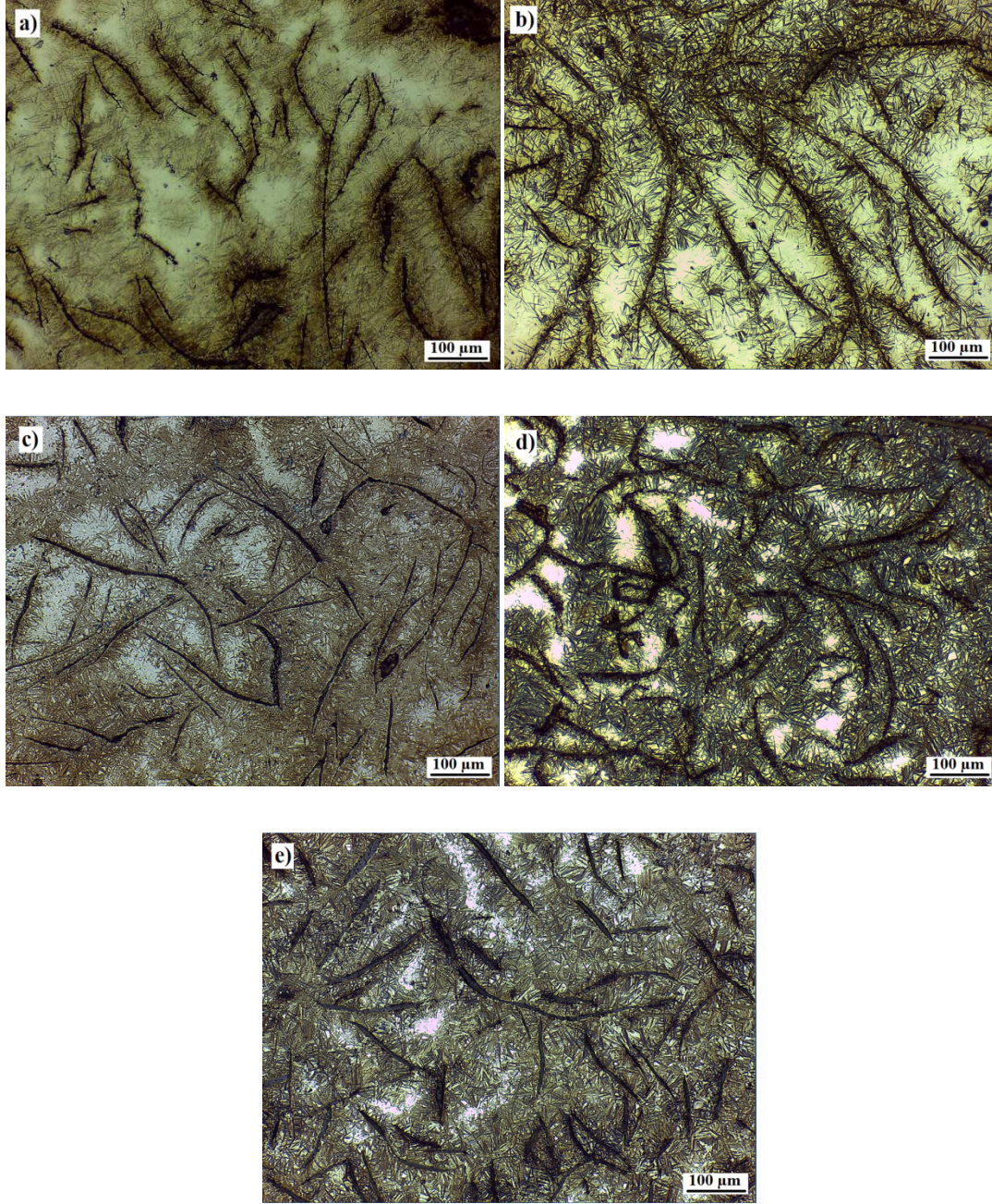
Putatunda ve diğerleri [33] yapmış olduğu çalışmada, östemperleme sıcaklığının yükselmesiyle beraber ösferritik yapının kalınlaştığı, ferritin hacim yüzdesinin düşüp buna bağlı olarak östenitin hacim oranının arttığı farkedilmiştir. Sıcaklığın artmasıyla beraber östenitin karbon yüzdesi de artmaktadır. Östemperleme işlemi ilerledikçe ferrit iğneleri büyür ve dolayısıyla kalıntı östenit karbon absorblamaya devam eder.

Eric ve diğerleri [34] yapmış olduğu çalışmada, kalıntı östenit hacim oranının mekanik özellikler için önemli olduğunu gözlemlemiştir. Kısa östemperleme sürelerinde karbonca zenginleşmemiş östenit oda sıcaklığına soğutma sırasında martensite dönüşürken, iki saatlik östemperleme sonrası yapıda martensite rastlanmamış ve ösferritik yapı görülmüştür.

Darwish ve Elliot [7] yaptığı çalışmada, Şekil 4.3'de gösterilmiş olan östemperlemenin I. ve II. kademeleri ile işlem aralığında meydana gelen mikroyapısal dönüşümler şeması neticesinde östemperleme süresi arttıkça kalıntı östenit artmış ve bunun yanında sertlikte azalma meydana gelmiştir. Ancak süre artmaya devam ederken II. aşamaya ulaşılmış, bunun sonucunda yüksek karbonlu östenit karbür ve ferrite ayrılmış ve buna bağlı olarak kalıntı östenit azalmaya başlayıp sertlik artmıştır.

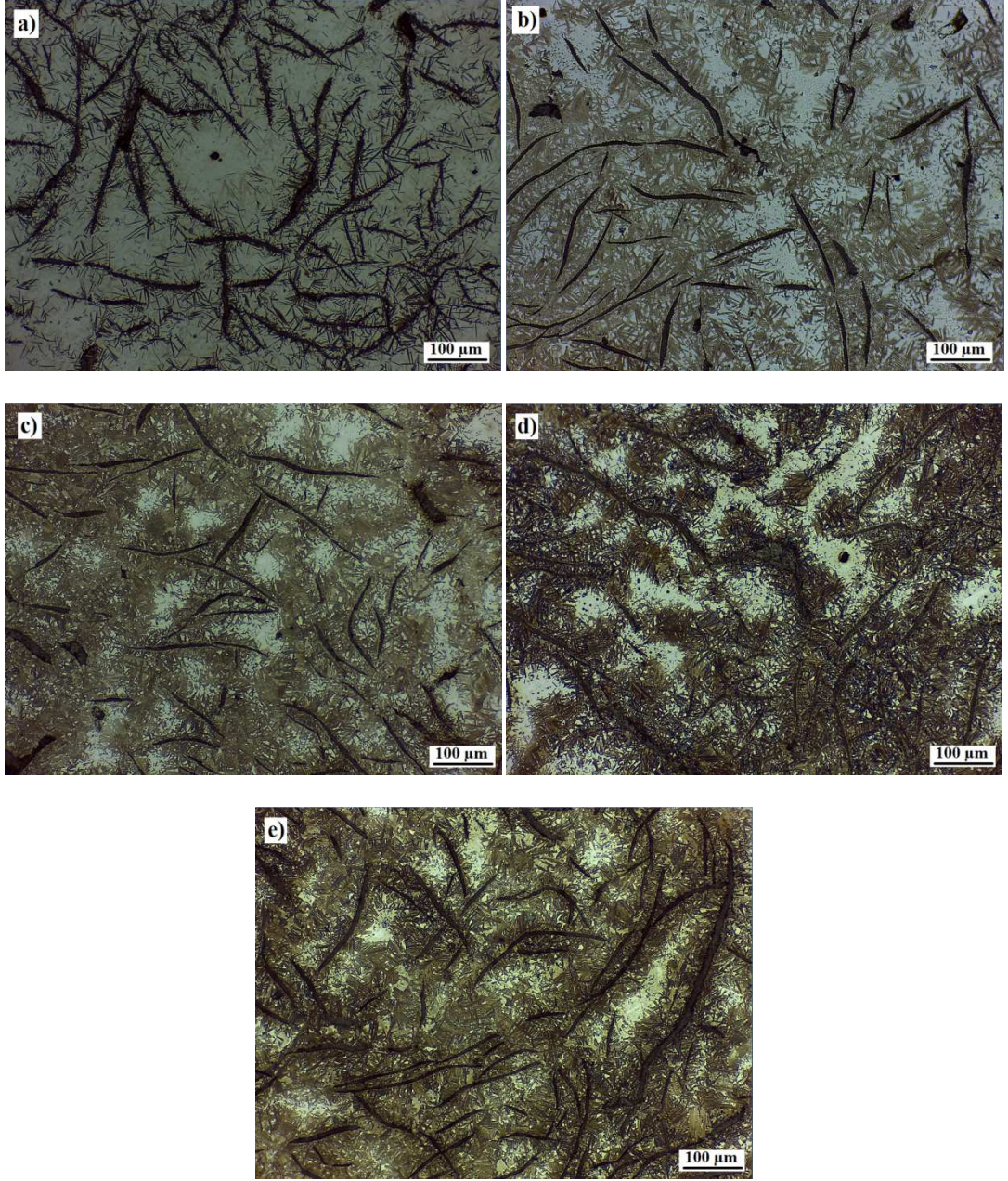


Şekil 7.2 : 250°C'de östemperlenen numunelerin optik mikroyapı fotoğrafları.
(a) 5 dk, (b) 20 dk, (c) 40 dk, (d) 60 dk, (e) 120 dk.

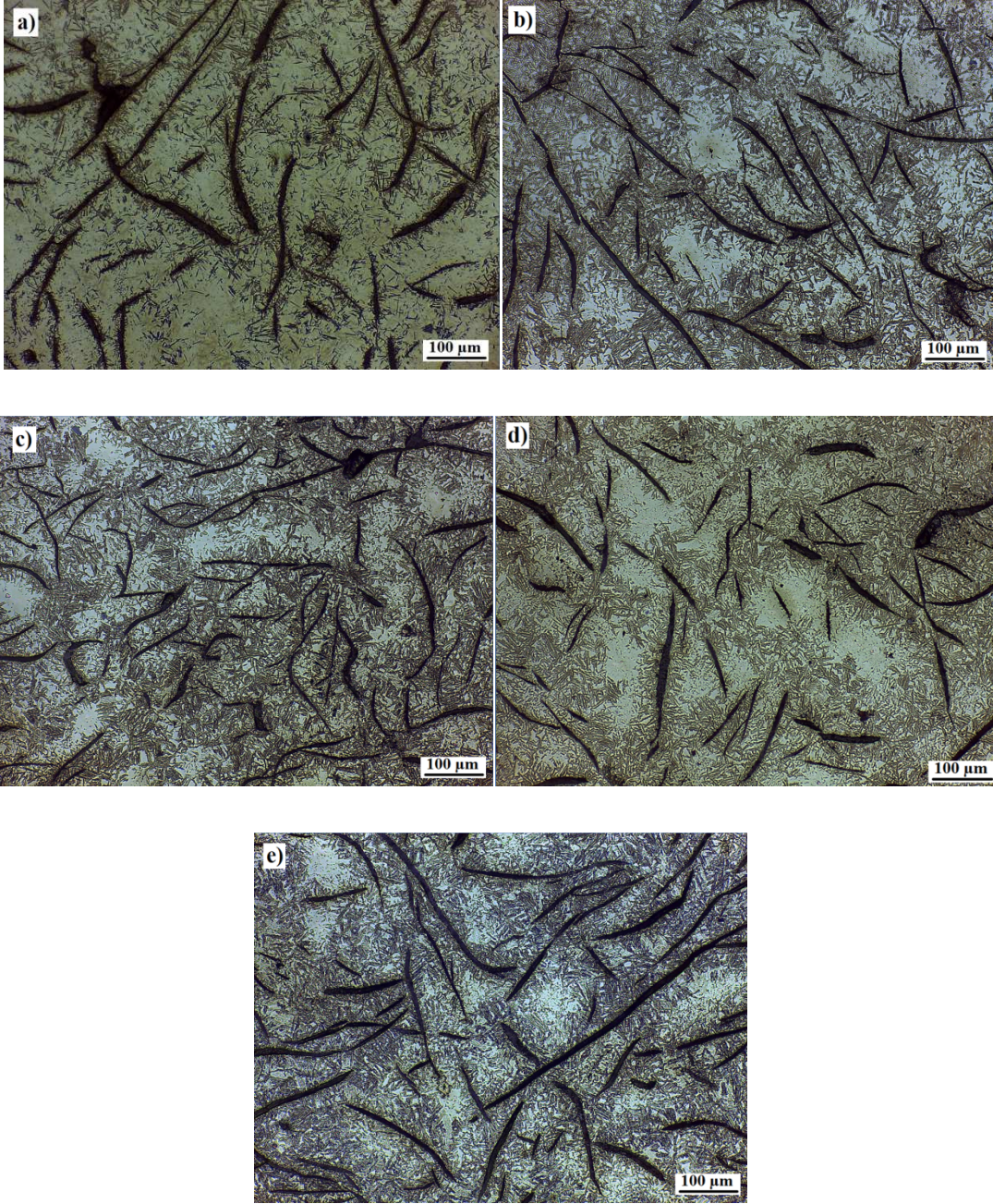


Şekil 7.3 : 300°C'de östemperlenen numunelerin optik mikroyapı fotoğrafları.
(a) 5 dk, (b) 20 dk, (c) 40 dk, (d) 60 dk, (e) 120 dk.

350 ve 400°C'lerde uygulanan östemperleme işlemi ile matrikste üst ösferritik yapı oluştuğu ve ferrit iğnelerinin kaba olduğu incelenmiştir. Her sıcaklıkta östemperleme süresinin artmasıyla beraber yapıda bulunan beynit iğnelerinin daha çok sıklaştığı görülmektedir. Yüksek östemperleme sıcaklıklarında karbonun difüzyon hızı oldukça yüksektir ve bununla birlikte ferrit iğnelerinin büyüme hızıda yüksektir.

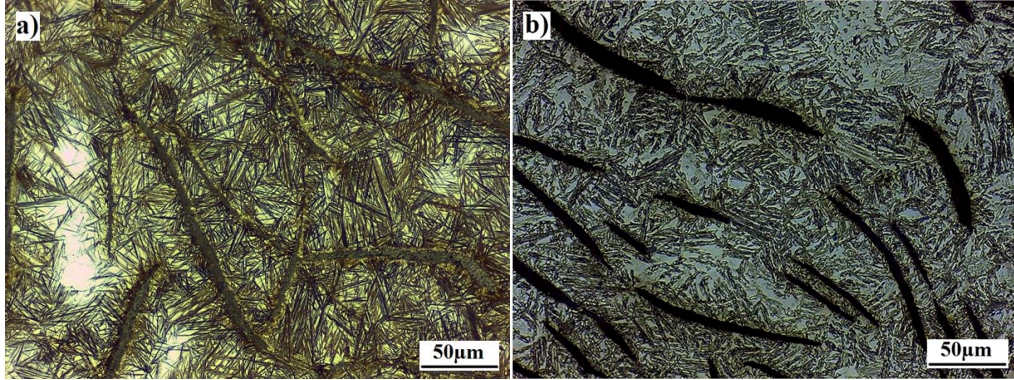


Şekil 7.4 : 350 °C'de östemperlenen numunelerin optik mikroyapı fotoğrafları.
(a) 5 dk, (b) 20 dk, (c) 40 dk, (d) 60 dk, (e) 120 dk.



Şekil 7.5 : 400 °C'de östemperlenen numunelerin optik mikroyapı fotoğrafları.
(a) 5 dk, (b) 20 dk, (c) 40 dk, (d) 60 dk, (e) 120 dk.

Şeki 7.6'da 250°C'de 120 dakika östemperleme sonucu oluşan alt ösferritik yapı ile 400°C'de 120 dakika östemperleme sonucu oluşan üst ösferritik yapı görülmektedir. 250 ve 300 °C'de uygulanan östemperleme işlemi ile matrikste alt ösferritik yapı oluştuğu bununla beraber ferrit iğnelerinin grafit lamelleri çevresinde çekirdeklemeye başladıkları ve ötektik hücre sınırlarında da dönüşmemiş östenitin kaldığı görülmektedir.



Şekil 7.6 : a) 250°C'de 120 dakika östemperlenmiş alt ösferritik yapı ile b) 400°C'de 120 dakika östemperlenmiş üst ösferritik yapının optik mikroyapı fotoğrafları.

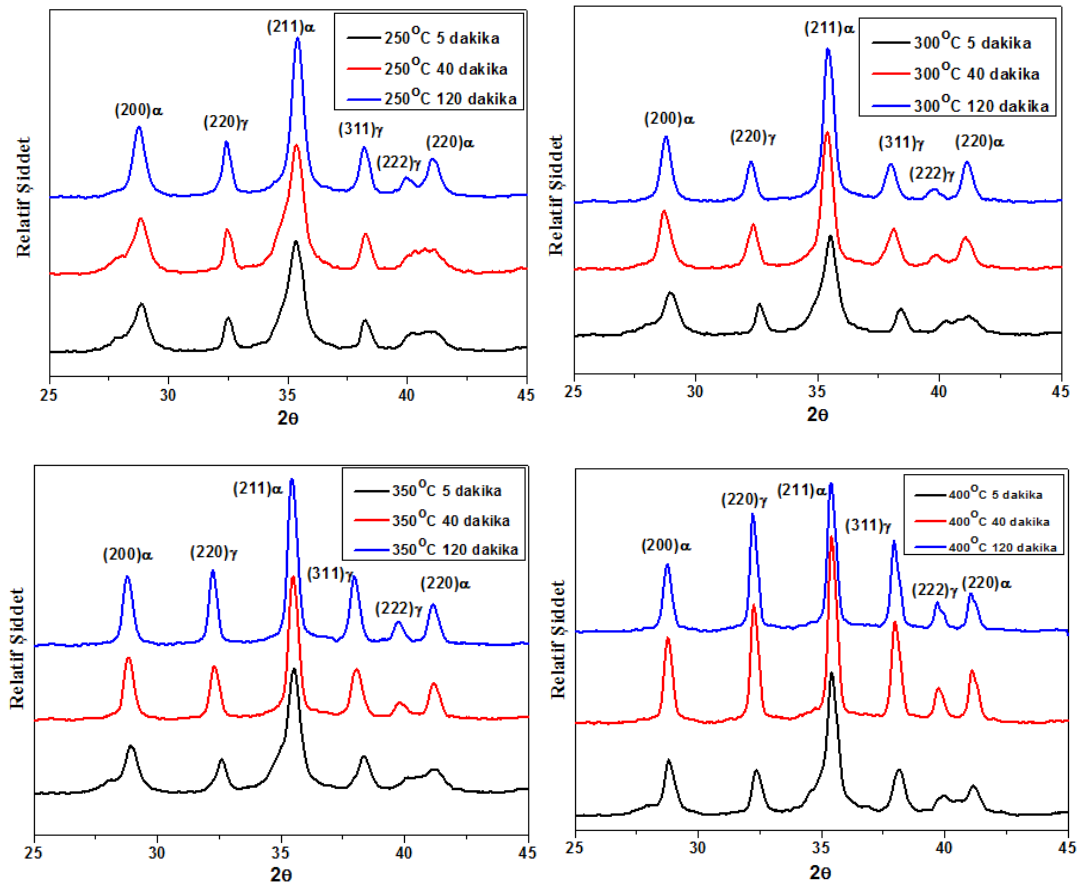
Çalışmalarda östemperleme süresinin artmasıyla beraber kalıntı östenitin karbonca zenginleştiği bilinmektedir [15,35]. Östemperleme süresi arttıkça kalıntı östenit içeriği artış eğilimindedir. Östemperleme sıcaklık ve süresi arttıkça kalıntı östenit içeriği artmaktadır. Dolayısıyla yapılan östemperleme işleminde,



dönüşümünün gerçekleştiği ancak yüksek karbonlu kalıntı östenitin (γ_{yk}), deneylerde incelenen östemperleme sürelerinde ferrit ve karbüre dönüşmediği anlaşılmaktadır. Veriler kalıntı östenit miktarlarının östemperleme sıcaklığı ve zaman bağlı değişim gösterdiğine işaret etmektedir [9].

7.2 XRD Analiz Sonuçları

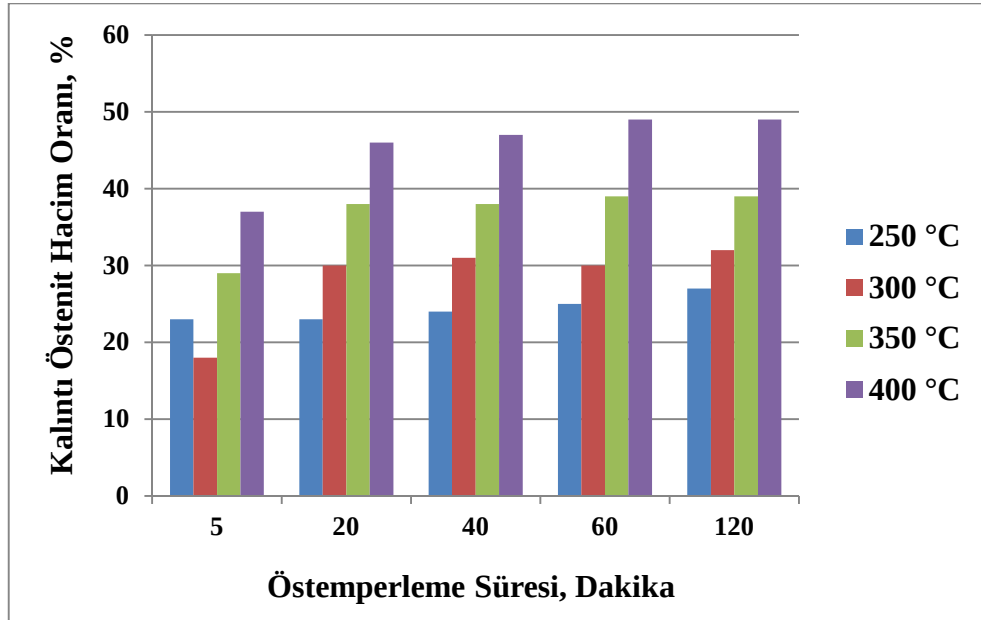
Östempereleme işlemine tabi tutulmuş numunelerin XRD analizleri Şekil 7.7’de verilmektedir. Analiz sonucunda numunelerin kalıntı östenit hacim oranları ölçülmüş ve oluşan bu piklerin oluştuğu açı, östempereleme sıcaklığı ve süresine göre farklılık göstermiştir. Şekil 7.7’den de anlaşıldığı üzere östempereleme sıcaklığı ve süresi arttıkça piklerin şiddeti artmaktadır. Kısa östempereleme sürelerinde kararsız halde olan $(222)\gamma$ ve $(220)\alpha$ pikleri, sürenin artmasıyla beraber ayrı birer pik oluşturmaktadır. İncelemeler esnasında yapıda karbür pikine rastlanmamıştır.



Şekil 7.7 : 250°C, 300°C, 350°C ve 400°C’de östemperelemiş numunelerin XRD sonuçları.

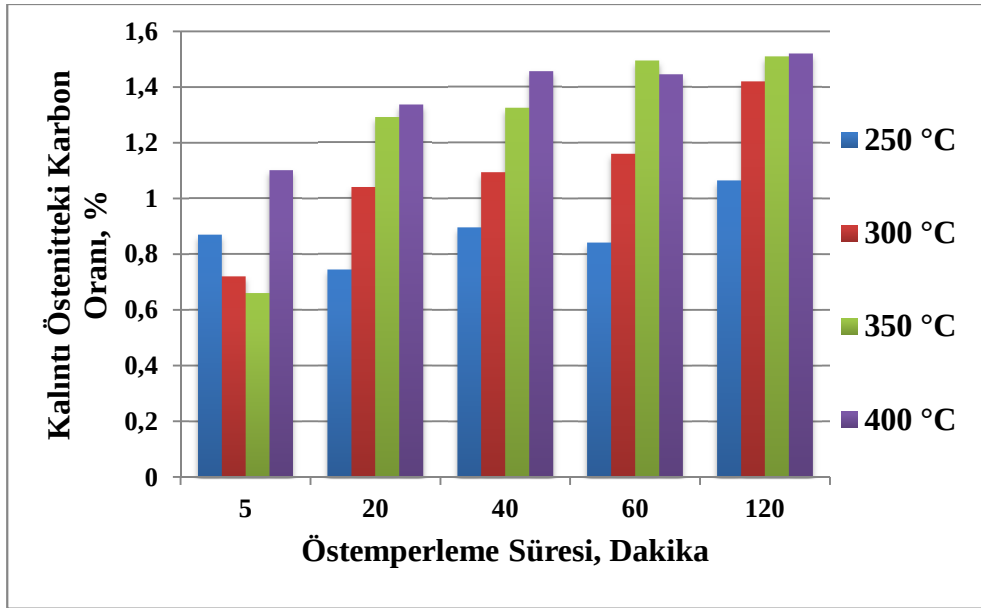
XRD sonuçları ile direkt kıyaslama metodu ile kalıntı östenit hacim oranları bulunmuş ve Şekil 7.8’de kalıntı östenit hacim oranının östempereleme sıcaklığı ve süresine göre değişimi verilmiştir. Düşük östempereleme sürelerinde östenit karbonca zenginleşmediğinden dolayı oda sıcaklığına soğutma sırasında martensit oluşmaktadır. Östempereleme süresi arttıkça, Şekil 7.9’da gösterildiği gibi östenit karbonca zenginleşecek ve oda sıcaklığına soğutma sırasında yapıda martensit

oluşmayacak kadar kararlı bir hal alacaktır. Şekil 7.8'de nihai yapının beynitik ferrit ve yüksek karbonlu kalıntı östenitin meydana gelen ösferrit yapıdaki östemperlenmiş gri dökme demirde, en yüksek kalıntı östenit miktarları her sıcaklık değeri için 120 dakika östemperleme süresinde bulunmuştur. Çetin ve Gül [36] yaptıkları çalışmada, yüksek östemperleme sıcaklığında (400°C), östenit daha az aşırı soğumaya uğramakta, ferrit iğnelerinin çekirdeklenme hızı da bu doğrultuda düşmektedir. Bunun sonucunda ferrit hacim oranı azalmak ve kalıntı östenit oranı daha düşük sıcaklıklarda östemperlemeye göre oldukça artmaktadır. Östemperleme sıcaklığı arttıkça karbonun difüzyon hızı ve buna bağlı olarak ferrit iğnelerinin büyüme hızı yükselmektedir.

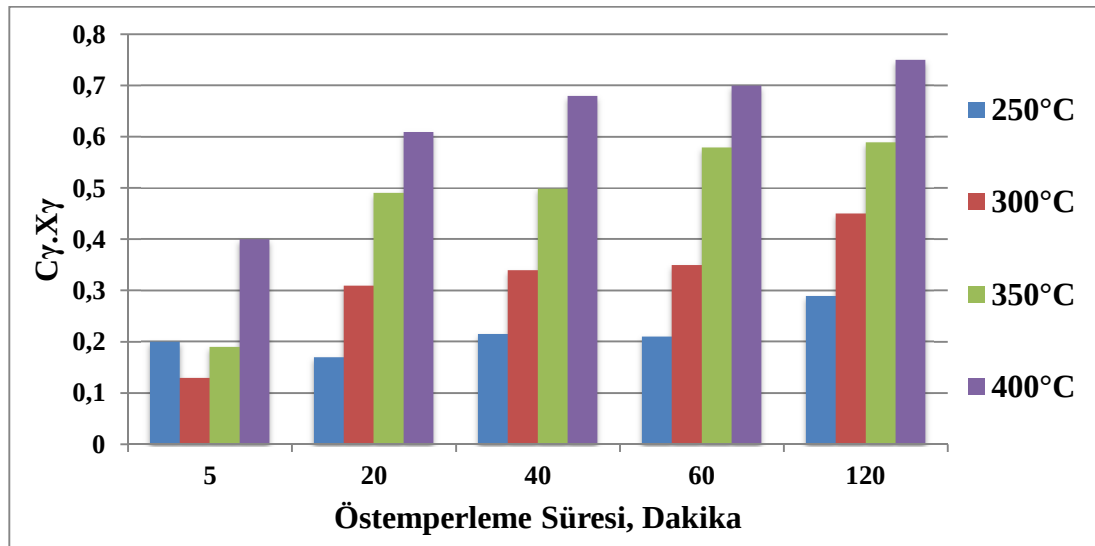


Şekil 7.8 : Kalıntı östenit hacim oranının östemperleme sıcaklığı ve süresine bağlı olarak değişimi.

$X_{\gamma} \cdot C_{\gamma}$ çarpımı matristeki toplam karbon oranını vermekle beraber Şekil 7.10'da gösterilmektedir ve bu değer, C_{γ}^0 değerine eşit olmalıdır. Östemperleme işlemi sonucunda karbonun bir kısmı yapıda karbür ve ferrit fazına ayrılmış ise bu durumda $X_{\gamma} \cdot C_{\gamma} < C_{\gamma}^0$ olacaktır. Şekil 7.9'da östemperlenmiş gri dökme demirin 350 ve 400°C'de östemperlenmesinde $X_{\gamma} \cdot C_{\gamma}$ çarpımının yaklaşık 0.75 değerine eriştiği ancak 250 ve 300°C'lerde bu çarpımın daha düşük olduğu görülmüştür.



Şekil 7.9 : Kalıntı östenit karbon oranının östempirleme sıcaklığı ve süresine bağlı olarak değişimi.



Şekil 7.10 : Matris toplam karbon oranının östempirleme sıcaklığı ve süresine bağlı olarak değişimi.

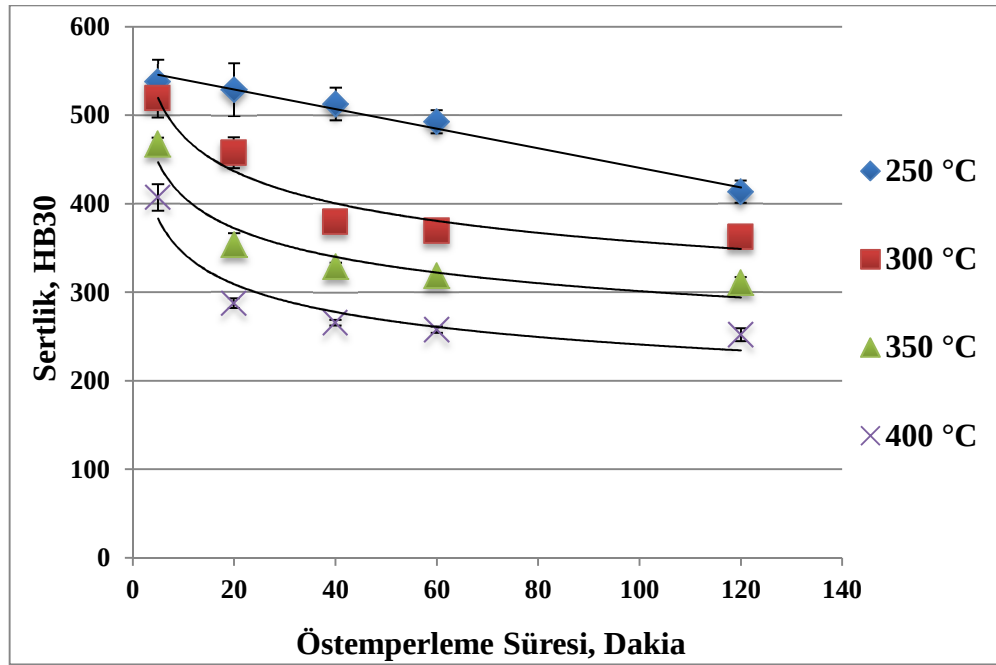
7.3 Sertlik Sonuçları

Östempirleme uygulanmış perlitik gri dökme demirlerin Brinell sertlik sonuçları Şekil 7.10'da görülmektedir.

Döküm halindeki perlitik gri dökme demirin Brinell sertliği 212 HB30 olmakla beraber döküm halindeki GDD için bulunmuş olan sertlik standart değerlerle uyum halindedir. Şekil 7.11'den de görüldüğü gibi östempirleme işlemi ile birlikte

izotermal işlem esnasında meydana gelen mikroyapısal dönüşüm sonucunda sertlikte yükseliş söz konusudur. En yüksek sertlik 250°C'de 5 dakika östempirlenen numunede 537 HB30 olarak bulunurken en düşük sertlik ise 400°C'de 120 dakika östempirlenen numunede 252 HB30 olarak elde edilmiştir. Östempirleme süresinin artmasıyla beraber sertlikte azalma görülmesinin yanında östempirleme sıcaklığının yükselmesi, sertliğin düşüşünü hızlandırmıştır.

Östempirleme işlemiyle sertliğin yükselmesi, izotermal işlem esnasında oluşan mikroyapısal dönüşümün bir neticesidir. 250 ve 300°C'de oluşan alt ösferritik yapının sertliği, 350 ve 400°C'de oluşan üst ösferritik yapıdaki sertliğe oranla daha yüksek olarak elde edilmiştir.



Şekil 7.11 : Östempirleme süresine bağlı olarak sertlik değişimi.

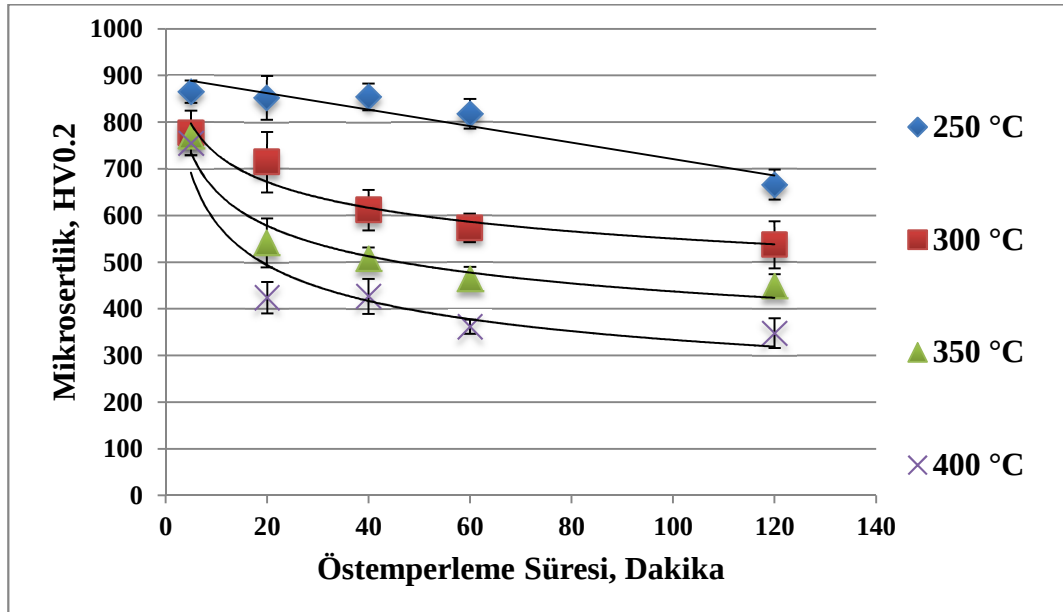
Östempirlenmiş uygulanmış numunelere mikrosertlik ölçümleride uygulanmıştır ve Şekil 11'de gösterilmiştir. Ölçümler matris üzerinden, makrosertlik sertlik değerleri ile karşılaştırma yapmak ve beyritik ferrit fazının haricinde öteki mikroyapısal oluşumların etkisinin incelenmesi amacıyla yapılmaktadır. Döküm halindeki numunenin mikrosertliği 311 HV0.2 olarak ölçülmüş olup en yüksek sertlik 250°C 5 dakikada 865 HV0.2 olarak ve en düşük sertlik ise 400°C'de 120 dakikada 348 HV0.2 olarak bulunmuştur. Özellikle kısa östempirleme sürelerinde sertliğin yüksek olmasının sebebi yapıda var olan karbonca doymamış östenitin oda sıcaklığına soğutulduğunda martensite dönüşmesinden dolayıdır.

Eric ve diğeri [34] yaptıkları çalışmalarda uzun östempereleme sürelerinde östenitin yüzdesinin azaldığı ve 6 saat östempereleme süresinden sonra az miktarlarda kalıntı östenitni bulunduğı gözlemlenmiştir.

Yüksek östempereleme sıcaklıklarda karbonun difüzyon hızı oldukça yüksektir. Buna bağılı olarak ferrit iğnelerinin büyüme hızı da fazladır.

Numunelerde östempereleme süresine bağılı olarak sertlik azalmaktadır. Bunun nedeni östemperelemenin 1. aşamasında (0-30 dk) yapıda var olan östenitin oda sıcaklığına soğutulduğunda martensite dönüşmesidir [7-8]. Numunelerde sertliğin belli bir zamandan sonra artmaması 2. aşamadaki yüksek karbonlu östenitten karbürün çökelmediğine bağlanmaktadır.

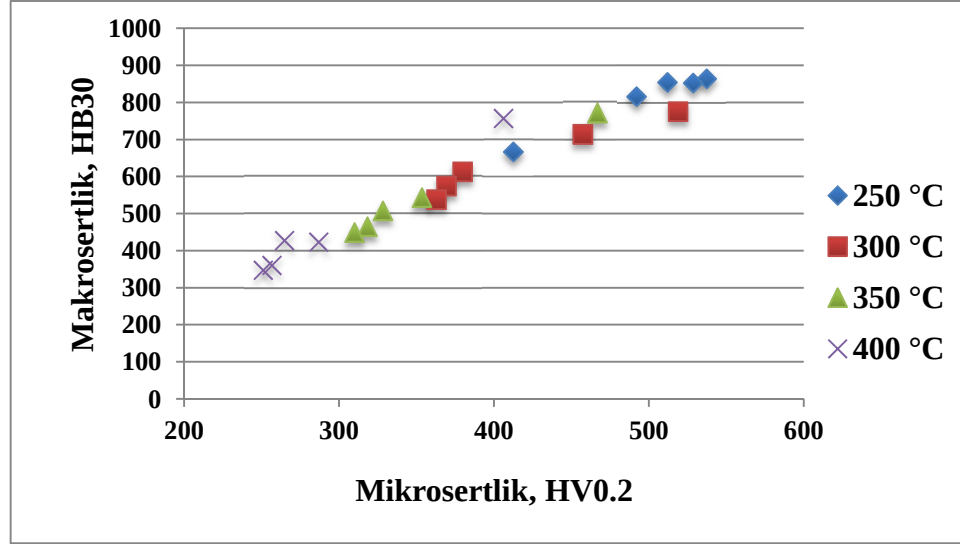
Şekil 7.12'den görüldüğü üzere kısa östempereleme sürelerinde yüksek mikrosertlik değeri ölçülmüş ve bunun yanında mikrosertlik, östempereleme sıcaklığının ve zamanının yükselmesiyle beraber düşmektedir. Kısa östempereleme sürelerinde mikrosertliğin yüksek olmasının sebebi, karbonca zenginleşmemiş östenitin oda sıcaklığına soğutma soğutulurken martensite dönüşmesinden kaynaklanmaktadır.



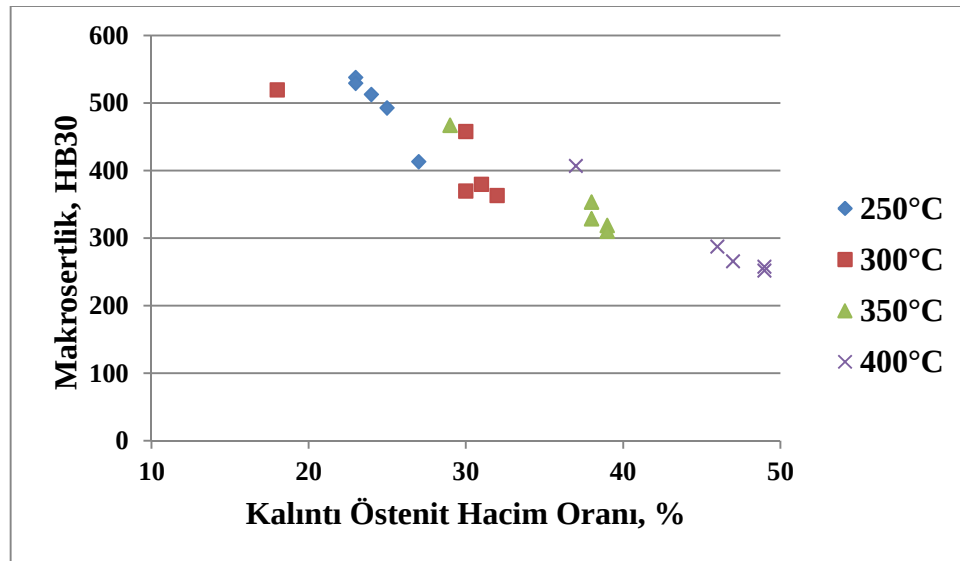
Şekil 7.12 : Östempereleme süresine bağılı olarak mikrosertlik değişimi.

Östempereleme sıcaklık ve süresine bağılı olarak makro ve mikrosertlik değişimi Şekil 7.13'de verilmiştir, makro ve mikrosertliğin lineer olarak değiştiği görülmüştür. Bununla birlikte ösferritik dönüşümü dışında martensitik dönüşüm gibi mikroyapısal değişimler gözlemlenmiştir. Yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar ışığında şekil

7.14'den de görüleceği üzere sertlik azaldıkça kalıntı östenit artmaktadır. Bu sonuç, östempereleme sıcaklığı ve süresi arttıkça mikroyapısal değişimler sonucu ortaya çıkmaktadır.



Şekil 7.13 : Östempereleme sıcaklığı ve süresine bağlı olarak makrosertlik ile mikrosertlik değişimi.



Şekil 7.14 : Östempereleme sıcaklığına bağlı olarak sertlik ile kalıntı östenit değişimi.

Östempereleme süresinin mukavemet ve sertlik değerlerindeki değişimde önemli bir etkisi bulunmaktadır. Östempereleme süresi az olduğunda, yüksek karbonlu östenit karbonca zenginleşemediğinden ötürü, östempereleme işlemi sonunda oda sıcaklığına soğutma esnasında martensite dönüşecek, martensit te kısa östempereleme sürelerinde gevrek kırılmadan ötürü mukavemetin düşük olmasına neden olacaktır.

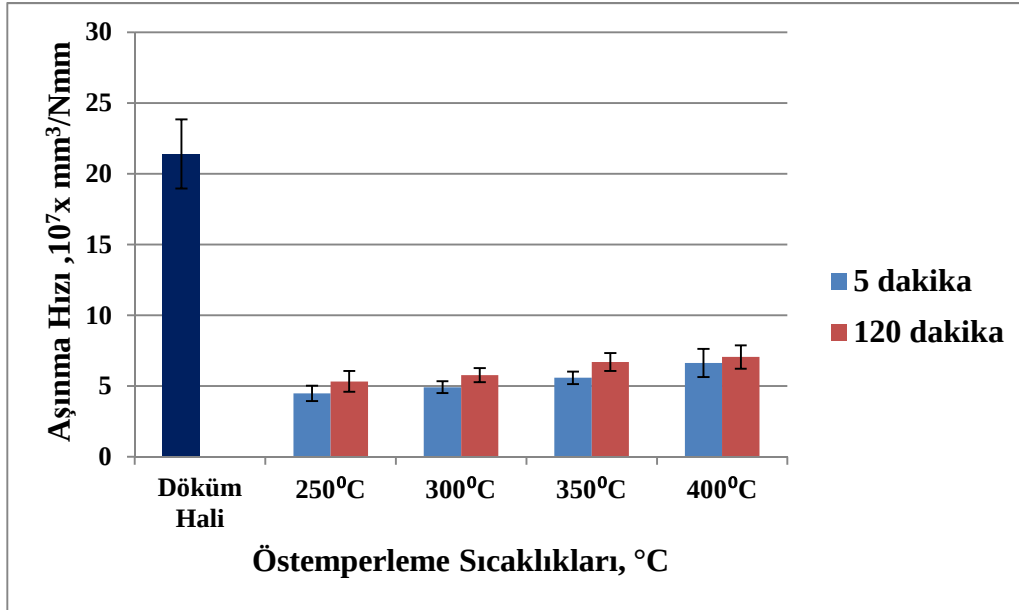
Östempereleme süresi arttıkça östenit karbonca zenginleşecek ve oda sıcaklığına soğutma sırasında kararlı bir hal alacaktır [22].

Han ve diğerlerinin [37] yaptıkları çalışmada östempereleme sıcaklığı ve süresinin sertliğe etkisi üzerinde durulmuştur. Çalışmada 275, 300 325 ve 375 °C olmak üzere 4 farklı östempereleme sıcaklığı ve 10 dakika, 60 dakika ile 120 dakika olmak üzere 3 farklı zaman parametresi belirlenmiş ve ölçümler neticesinde en yüksek sertliğin 275°C 10 dakikada olduğu görülmüştür. Çalışmada sıcaklık ve zaman arttıkça sertlikte azalma meydana gelmiştir.

7.4 Aşınma Deneyi Sonuçları

7.4.1 Oda sıcaklığı aşınma deneyi sonuçları

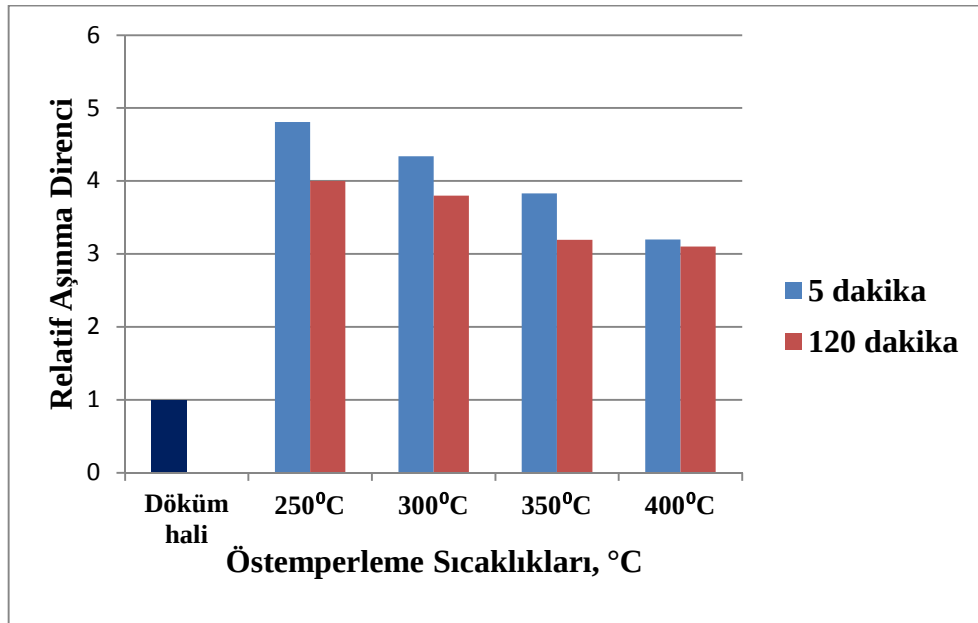
Döküm hali ile östempereleme uygulanmış numunelerin, oda sıcaklığındaki aşınma alanının östempereleme sıcaklığı ve süresine bağlı değişimi Şekil 7.15'de gösterilmiştir.



Şekil 7.15 : İncelenen numunelerin oda sıcaklığında aşınma sonucu aşınma hızının östempereleme sıcaklık ve süresine göre değişimi.

Şekil 7.15'de östemperelenmiş gri dökme demirin aşınma hızının, döküm halindeki gri dökme demirin aşınma hızına göre çok daha az olduğu görülmektedir. Yani östempereleme işlemiyle beraber gri dökme demirin aşınma direnci artmıştır. Bununla birlikte 250 ve 300°C'de östemperelenmiş numunelerdeki aşınma direncinin 350 ve 400°C'deki numunelerdeki aşınma direncine kıyasla daha yüksek olduğu

görülmektedir. Bunun sebebi mikroyapısal dönüşüm ile alakalıdır. Düşük sıcaklıklarda oluşan alt ösferritik yapının üst ösferritik yapıya göre daha yüksek aşınma direncine sahip olduğu bilinmektedir. Öte yandan döküm halindeki gri dökme demirin aşınma direnciyle, çeşitli sıcaklık ve zaman aralıklarındaki östemperlenmiş gri dökme demirin aşınma direncini kıyaslamalı olarak göstermek amacı ile numunelerin relatif aşınma direnci hesaplanmıştır. Şekil B.1’de numunelerin aşınma izi profilleri verilmekle birlikte, döküm halindeki numunenin aşınma derinliği ve genişliği dikkate alınmakla beraber östemperlenmiş numunelerde aşınma alanının azaldığı ve buna bağlı olarak aşınma direncinin arttığı görülmektedir. 250°C ve 300°C’de östemperlenmiş alt ösferritik yapının hakim olduğu numunelerin aşınma alanı, 350°C ve 400°C’de östemperlenmiş numunelere kıyasla daha az olmasına rağmen aşınma izi genişliği ve derinliği bakımından çok önemli bir fark görülmemektedir. En yüksek aşınma direncinin görüldüğü 250°C’de 5 dakika östemperlenen numune ile en düşük aşınma direncinin görüldüğü 400°C’de 120 dakika östemperlenen numune arasında aşınma derinliği açısından 0,5 μm fark bulunduğu gözlemlenmiştir. Şekil 7.16’dan görüleceği gibi döküm halindeki numunenin relatif aşınma direnci 1 olarak kabul edilmiş ve östemperleme uygulanmış diğer numunelerin relatif aşınma direnci döküm halindeki numuneyle kıyaslanmıştır. Buna göre östemperleme işlemiyle, döküm halindeki gri dökme demirin relatif aşınma direnci yaklaşık 5 kat artmıştır.

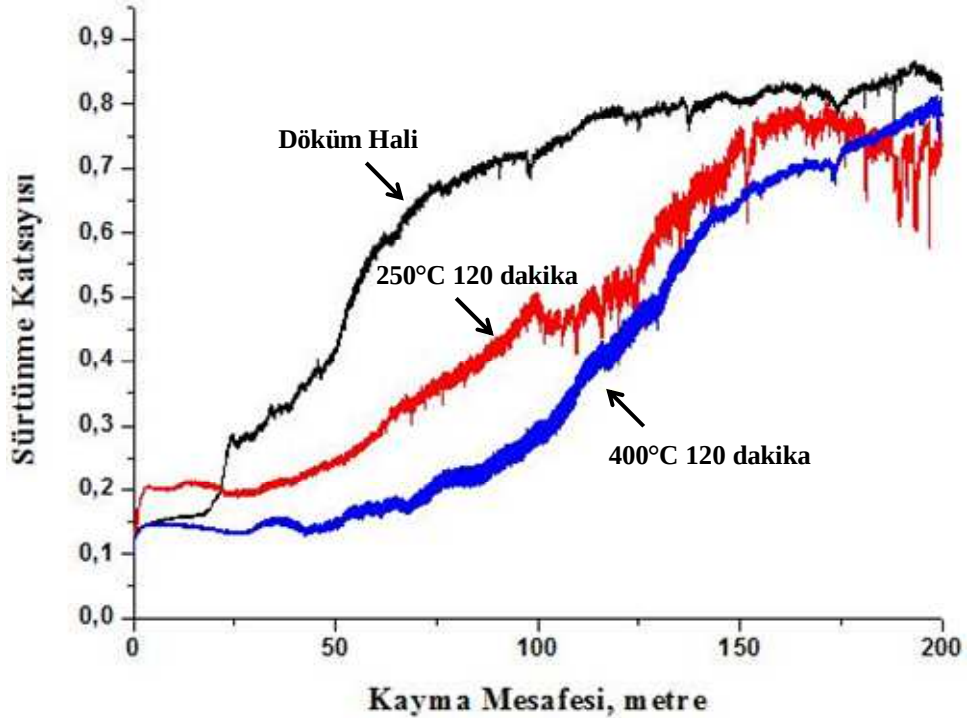


Şekil 7.16 : İncelenen numunelerin oda sıcaklığında aşınma sonucunda relatif aşınma direncinin östemperleme sıcaklığı ve süresine göre değişimi.

Balachandran ve diğ erleri [38] yaptığı çalışmada gri dökme demire östemperleme, temperleme ve su verme gibi farklı ısıl işlemler uygulanmış ve aşınma direncindeki en iyi gelişimin östemperleme işlemi ile ulaşıldığı görülmüştür. Sürtünme katsayıları da bu bağlamda incelenmiş ve en düşük sürtünme katsayılarına östemperleme koşullarında rastlanmıştır. Öte yandan sürtünme katsayılarının, sıcaklığa bağlı olarak sertlikteki değişime göre etkilendiği görülmüştür.

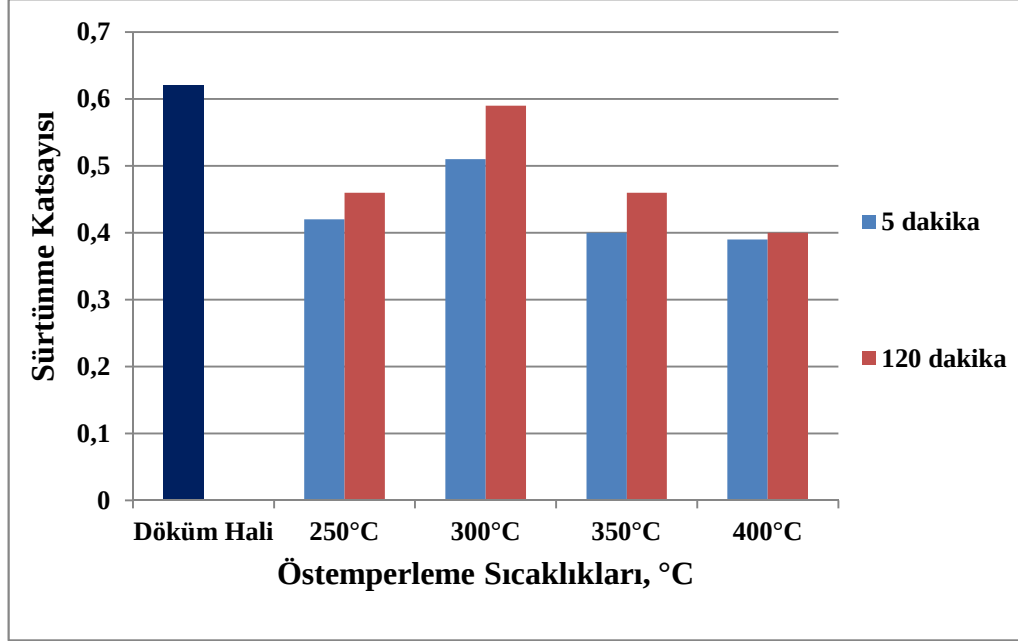
Perez ve diğ erleri [39] yaptığı çalışmada kısa süren östemperleme sürelerinde aşınma direncinin yüksek olduğu ve sürenin artmasıyla beraber aşınma direncinde azalma olduğunu gözlemlemişlerdir. Düşük östemperleme zaman aralıklarında mikroyapıda martensite rastlanmış ancak süre arttıkça martensitin artık oluşmadığı görülmüştür. Bu bağlamda yapıda bulunan martensitin aşınma direncini arttırdığı gözlemlenmiştir.

Oda sıcaklığında gerçekleştirilmiş olan aşınma testi neticesinde elde edilmiş olan sürtünme katsayılarının kayma mesafesine göre değişimi Şekil 7.17'de ve Şekil C.1'de verilmektedir. Döküm halindeki numune zamana bağlı olarak sürtünme katsayısı hızlı bir şekilde artarken, östemperlenmiş numunelerde ise bu eğilim daha düşüktür.



Şekil 7.17 : Oda sıcaklığında aşınma deneyi sonucunda sürtünme katsayısının kayma mesafesine göre değişimi.

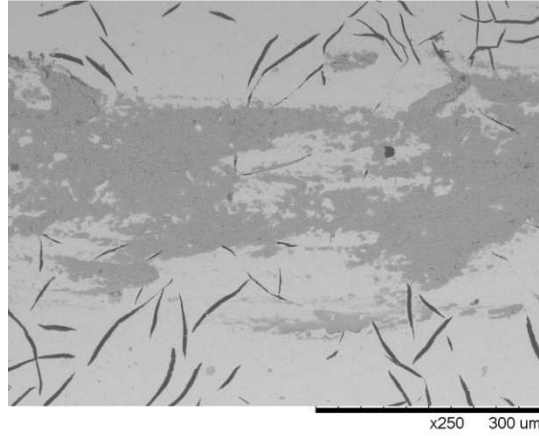
Şekil 7.18’de döküm halindeki numunenin sürtünme katsayısı 0.62 olmasına rağmen östemperleme işlemi neticesinde numunelerin sürtünme katsayılarında azalma söz konusu olmuştur. Oda sıcaklığında yapılan deney sonucu, östemperlenmiş numunelerin sürtünme katsayıları değerlerinin birbirlerinden çok farklı olmadığı görülmektedir.



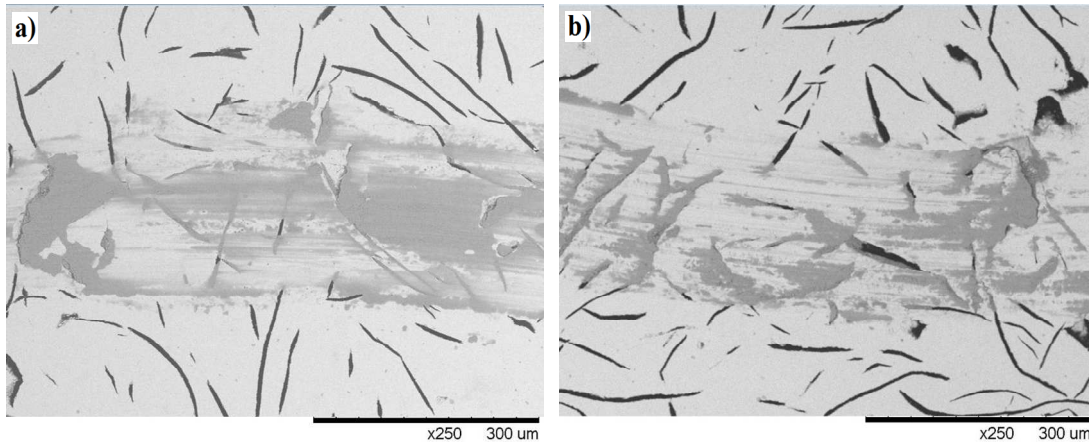
Şekil 7.18 : Oda sıcaklığında aşınma deneyi sonucu sürtünme katsayısı değişimi.

Oda sıcaklığında yapılan aşınma testi sonucu oluşan aşınma izlerinin SEM’de çekilmiş görüntüleri Şekil 7.19-7.23’de verilmektedir. SEM analizlerinde, atom ağırlığına göre görüntü alınmaktadır. Demirin atom ağırlığı yüksek olduğundan dolayı matris parlak gözükmekte, bunun yanında lamel grafitler atom ağırlığı düşük karbondan oluştuğu için koyu olarak gözükmektedir. Aşınma izlerinde gri olarak gözlenen bölgelerin ise oksit bölgeleri olduğu düşünülmektedir. Şekillerden anlaşıldığı üzere, aşınma yüzeyleri incelenen ÖGDD numunelerinin aşınma kayıpları, östemperleme sıcaklığının artmasıyla beraber artmaktadır Şekil 7.24’den de görüldüğü gibi aşınma izi içerisinde yer alan lamel grafitlerde, aşınma neticesinde yapışma olduğu ve üstünün örtüldüğü görülmektedir. Numunelerin östemperleme sonrası aşınma yüzeylerinde döküm halindeki numuneye göre daha az deformasyon oluşmakta ve bununla birlikte aşınma partikülleri aşınma yüzeyine yapışmaktadır. Aşınma izlerinin optik mikroskop görüntüleri de Şekil D.1’de verilmektedir. Optik mikroyapı görüntülerinden östemperleme sıcaklığı ve süresi arttıkça aşınma direncinin azalmasına bağlı olarak aşınma izi genişliğinin arttığı gözlenmektedir.

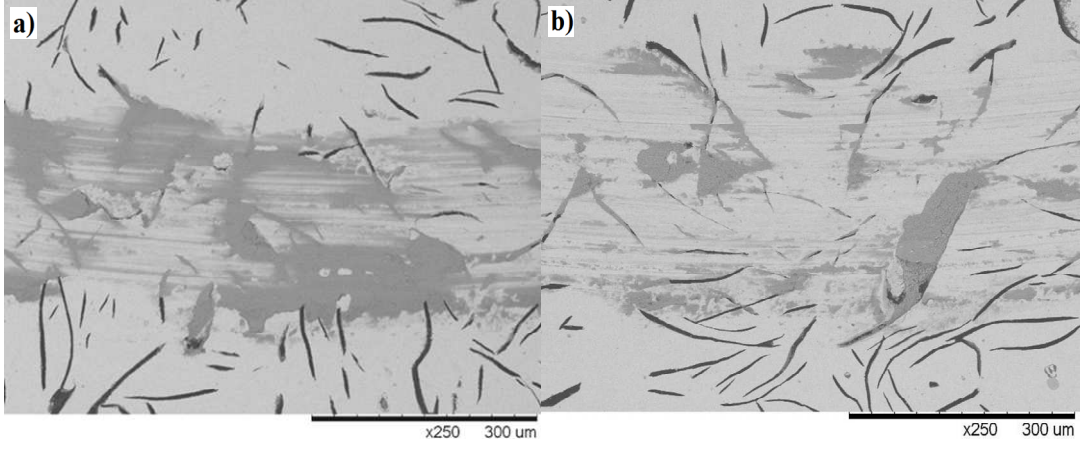
Vadiraj ve diğerkleri [4] yaptıkları çalışmada yapı itibari ile perlitik olan gri dökme demir ve alaşımlarına östemperleme işlemi uygulamış, sürtünme katsayıları incelendiğinde östemperlenmiş numunelerin sürtünme katsayılarının, ısıt işlemsiz numunelere kıyasla düştüğü görülmüştür. Bununla birlikte aşınma direncini 7 ile 15 kat arasında arttığı aşınma oranının ise alaşım elementlerine bağlı olarak değiştiği gözlemlenmiştir.



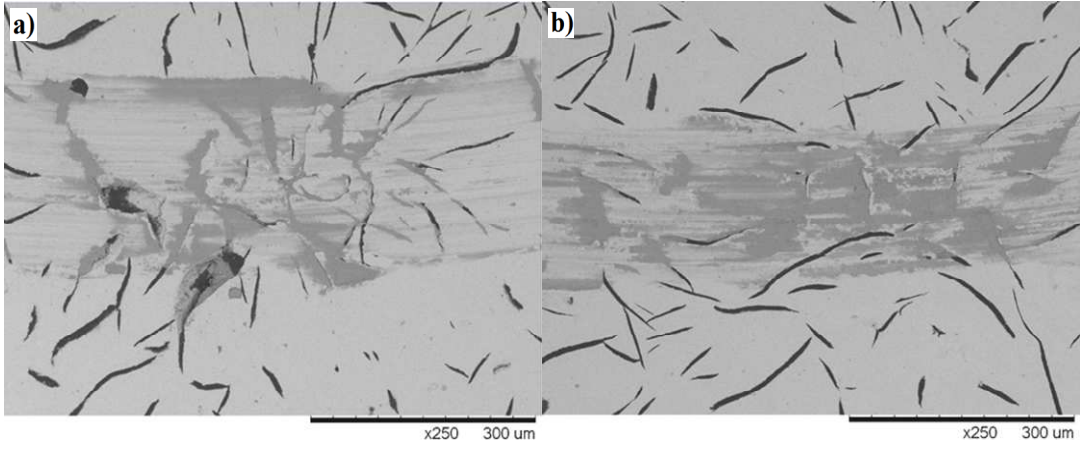
Şekil 7.19 : Oda sıcaklığında aşınan döküm halindeki numunenin SEM görüntüsü



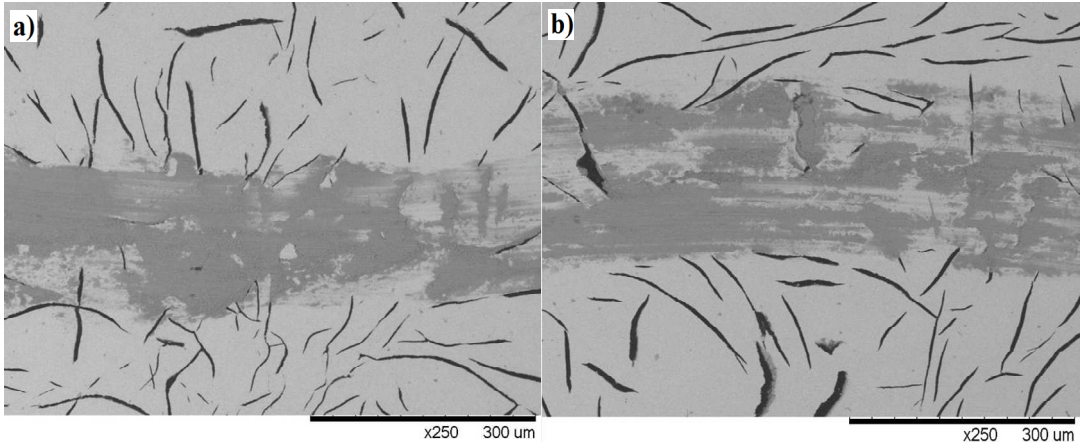
Şekil 7.20 : Oda sıcaklığında aşınan 250°C'de a) 5 dakika ve b) 120 dakika östemperlenmiş numunelerin SEM görüntüleri.



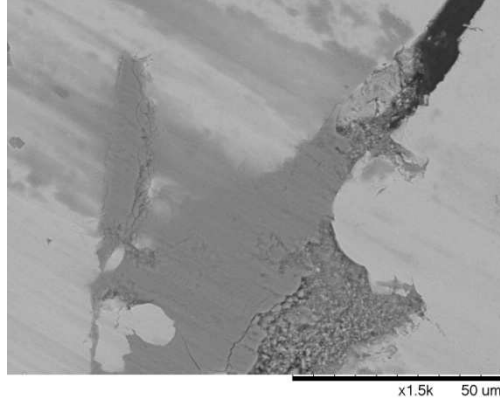
Şekil 7.21 : Oda sıcaklığında aşınan 300°C'de a) 5 dakika ve b) 120 dakika östemperlenmiş numunelerin SEM görüntüleri.



Şekil 7.22 : Oda sıcaklığında aşınan 350°C'de a) 5 dakika ve b) 120 dakika östemperlenmiş numunelerin SEM görüntüleri.



Şekil 7.23 : Oda sıcaklığında aşınan 400°C'de a) 5 dakika ve b) 120 dakika östemperlenmiş numunelerin SEM görüntüleri.

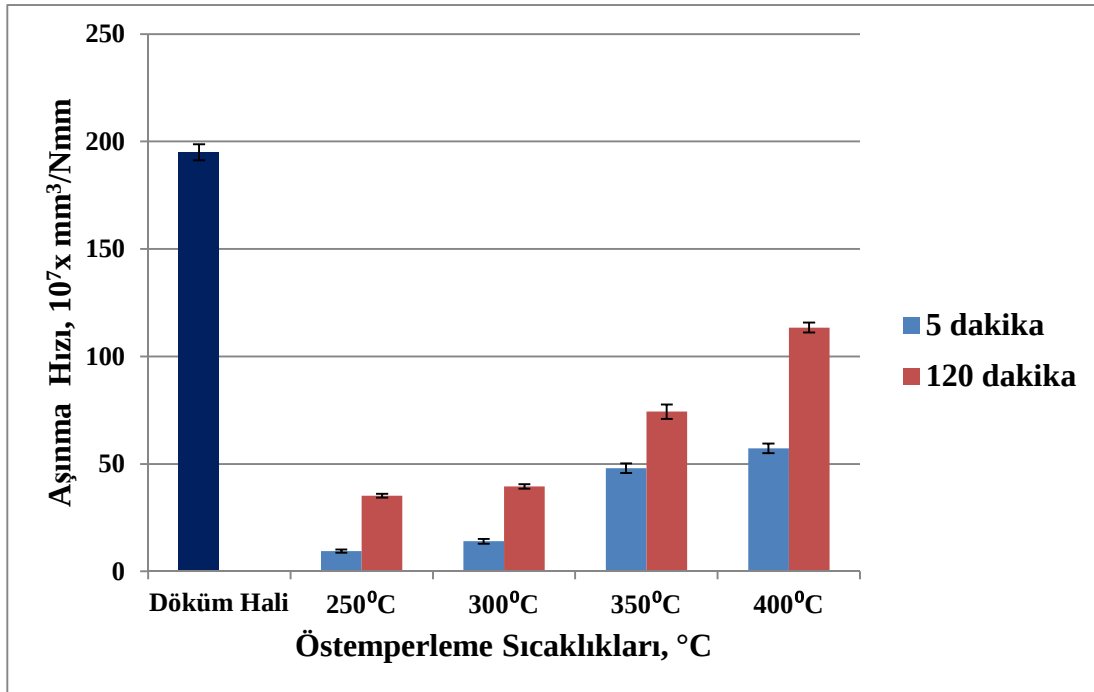


Şekil 7.24 : Aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü.

7.4.2 Yüksek sıcaklık aşınma deneyi sonuçları

Döküm halindeki ve östemperlenmiş gri dökme demirlerin oda sıcaklığında aşınma yapılmasının yanı sıra 200°C'de yüksek sıcaklık aşınması yapılmıştır. Döküm halindeki gri dökme demirin oda sıcaklığındaki ve yüksek sıcaklıktaki aşınma direnci karşılaştırılmak istenirse, 200°C'de aşınma direnci yaklaşık 8 kat azalmaktadır.

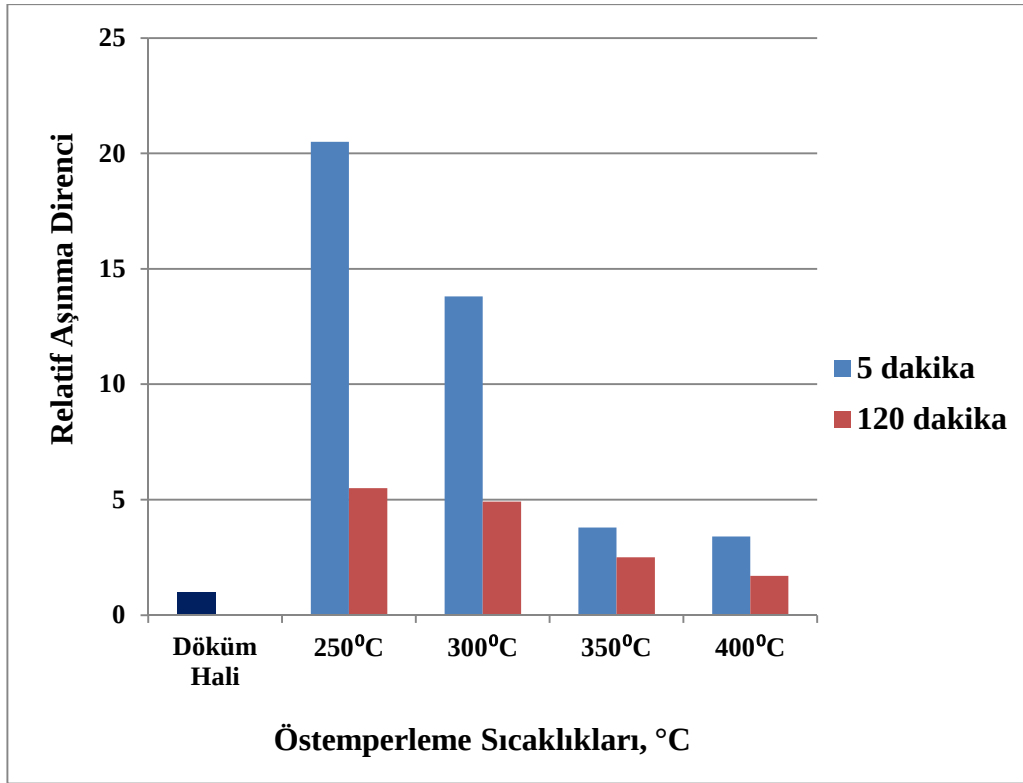
Döküm hali ile östemperleme uygulanmış numunelerin, 200°C yüksek sıcaklıktaki aşınma oranının östemperleme sıcaklığı ve süresine bağlı değişimi Şekil 7.25'de gösterilmiştir.



Şekil 7.25 : İncelenen numunelerin yüksek sıcaklıkta aşınma sonucu aşınma hızının östemperleme sıcaklık ve süresine göre değişimi.

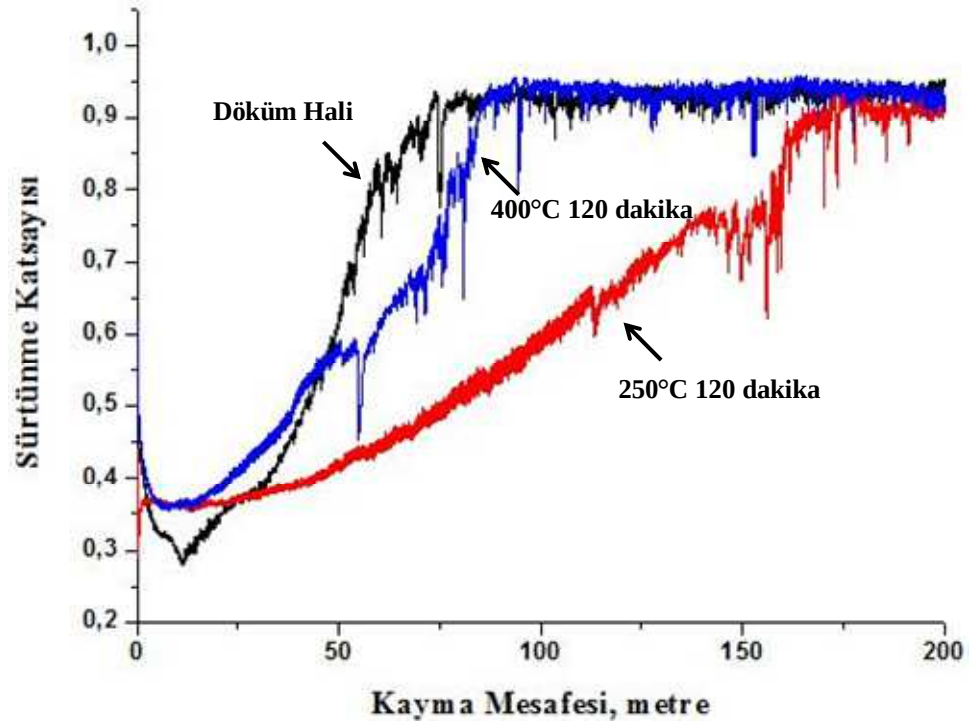
Şekil 7.25'den görüldüğü üzere 200°C'de yapılan aşınma deneyinde aşınma direnci, oda sıcaklığında yapılan deneye göre azalmaktadır ve östemperleme yapılan numuneler, döküm halindeki numuneye göre yüksek sıcaklıkta aşınma direnci bakımından iyileşme göstermektedir. Östemperleme sıcaklığı ve süresi arttıkça ÖGDD'in aşınma direnci azalmıştır. Yüksek sıcaklıkta elde edilen sonuçlar, oda sıcaklığında yapılan aşınma direnci sonuçlarına göre paralellik göstermekte ancak östemperleme sıcaklığı ve süresi arttıkça numuneler arası aşınma hızı farkı çok daha belirgindir. Şekil B.2 ve Şekil B.3'de numunelerin aşınma izlerinin profilleri verilmektedir. Östemperleme sıcaklığı ve süresi arttıkça aşınma izi derinliği ve genişliğinin arttığı görülmektedir. Döküm halindeki numunede aşınma izinin derinliği 13µm ölçülmesine karşın, 250°C'de 5 dakika östemperlenen numunede 2 µm aşınma derinliği oluşmuş 400°C'de 120 dakika östemperlenen numunede ise derinlik 9 µm'ye çıkmıştır. Bunun yanında oda sıcaklığında aşınma sonuçlarını incelemek üzere yapıldığı gibi aynı şekilde, döküm halindeki gri dökme demirin aşınma direnciyle, çeşitli sıcaklık ve zaman aralıklarındaki östemperlenmiş gri dökme demirin aşınma direncini kıyaslamalı olarak göstermek amacı ile numunelerin relatif aşınma direnci hesaplanmıştır.

Şekil 7.26'dan inceleneceği üzere yüksek sıcaklıkta yapılan aşınma için döküm halindeki numunenin aşınma direnci 1 olarak kabul edilmiş ve bu maksatla östemperleme uygulanmış diğer numunelerin aşınma direnci döküm halindeki numuneyle kıyaslanmıştır. En yüksek aşınma direnci 250°C'de 5 dakikada östemperlenen da elde edilmiş ve aşınma direnci yaklaşık 20 kat artmaktadır. Sıcaklık arttıkça aşınma direnci azalmış buna bağlı olarak en düşük aşınma direnci 400°C'de 120 dakikada elde edilmiş ancak aşınma direnci döküm halindeki numuneye göre yaklaşık olarak 2 kat artmaktadır.



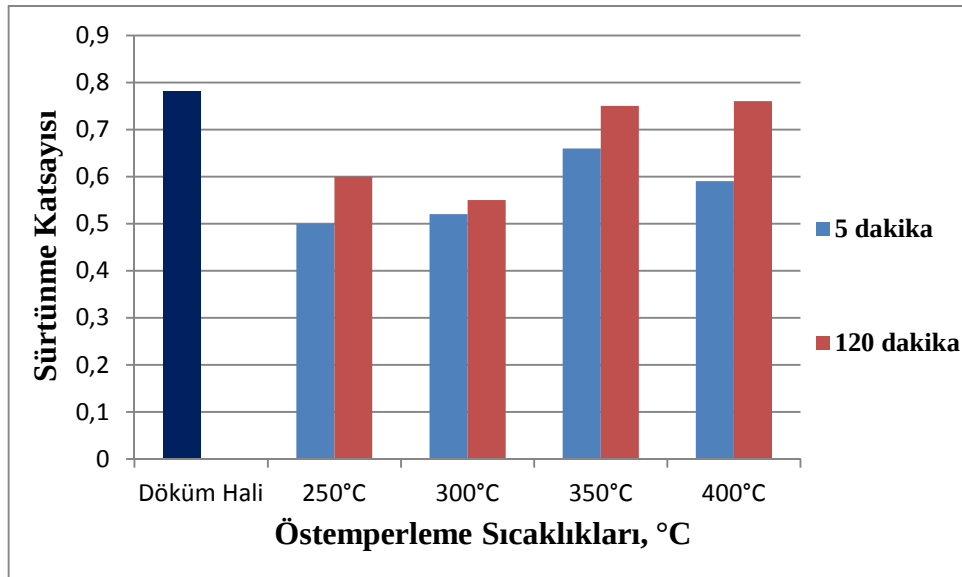
Şekil 7.26 : İncelenen numunelerin yüksek sıcaklıkta aşınma sonucunda relatif aşınma direncinin östempirleme sıcaklığı ve süresine göre değişimi.

Yüksek sıcaklıkta yapılan aşınma deneyi sonucunda sürtünme katsayılarının kayma mesafesine göre değişimi Şekil 7.27 ve Şekil C.2’de verilmektedir. Kayma mesafesine bağlı olarak, döküm halindeki numunenin sürtünme katsayısının oldukça yükseldiği belirlenmektedir. Döküm halindeki numunenin sürtünme katsayısının yüksekliği ve bu doğrultuda aşınma hızının da yüksek olması sonucunda aşınma direnci östempirlenmiş numunelere göre oldukça azdır. Bununla birlikte özellikle 250°C ve 300°C’de östempirlenmiş numunelerin zaman içerisinde artış eğiliminin az olduğu görülmektedir. 350°C ve 400°C’de östempirlenmiş numunelerin sürtünme katsayısının kayma mesafesine göre değişimi, döküm halindeki numuneden az olmasına karşın, 250°C ve 300°C’de östempirlenmiş numunelere göre yüksek olduğu belirlenmektedir.



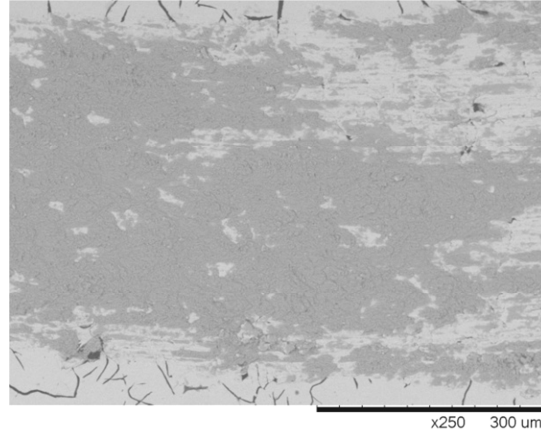
Şekil 7.27 : Yüksek sıcaklıkta aşınma deneyi sonucu sürtünme katsayısının kayma mesafesine göre değişimi.

Yüksek sıcaklıkta yapılan aşınma deneyi sonucu elde edilen sürtünme katsayıları Şekil 7.28'de verilmekte ve sürtünme katsayıları değerleri oda sıcaklığındaki değerlere göre artış göstermektedir. Döküm halindeki numune 0.78 gibi bir değere sahipken östempereleme sonrası sürtünme katsayılarında düşüş yaşanmaktadır.

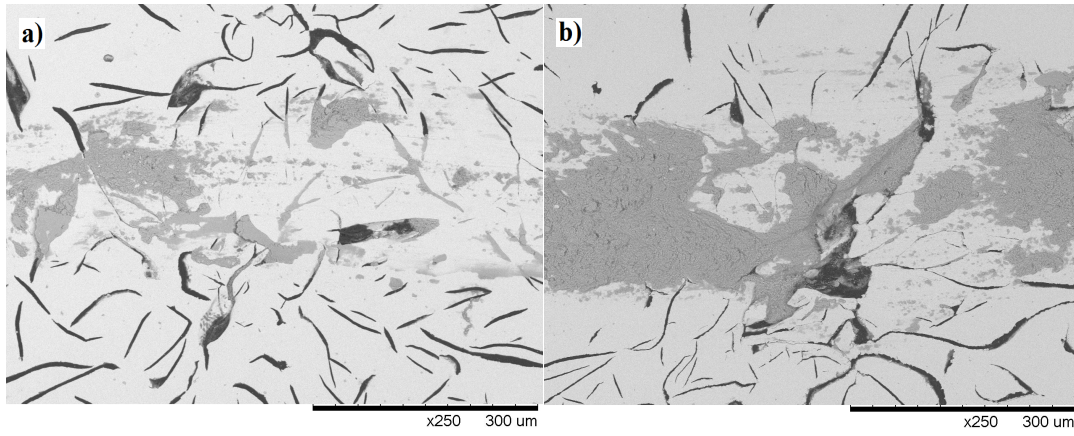


Şekil 7.28 : Yüksek sıcaklıkta aşınma deneyi sonucu sürtünme katsayısı değişimi.

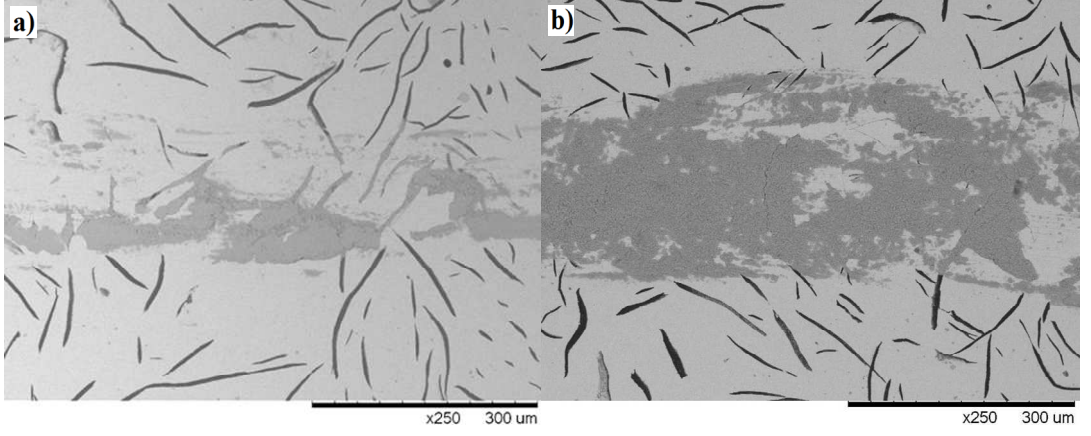
Şekil 7.29-7.33'de yüksek sıcaklıkta yapılan aşınma testi sonucu oluşan aşınma izlerinin SEM'de çekilmiş görüntüleri verilmektedir. Görüntülerden anlaşıldığı üzere izler oda sıcaklığında yapılan aşınma deneyi ile benzerlik göstermektedir. Ancak sıcaklığın yükselmesi ile birlikte özellikle döküm halindeki numunenin aşınma izi oldukça dikkat çekicidir. Östemperleme işlemi ile birlikte aşınma izlerinde azalma söz konusudur.



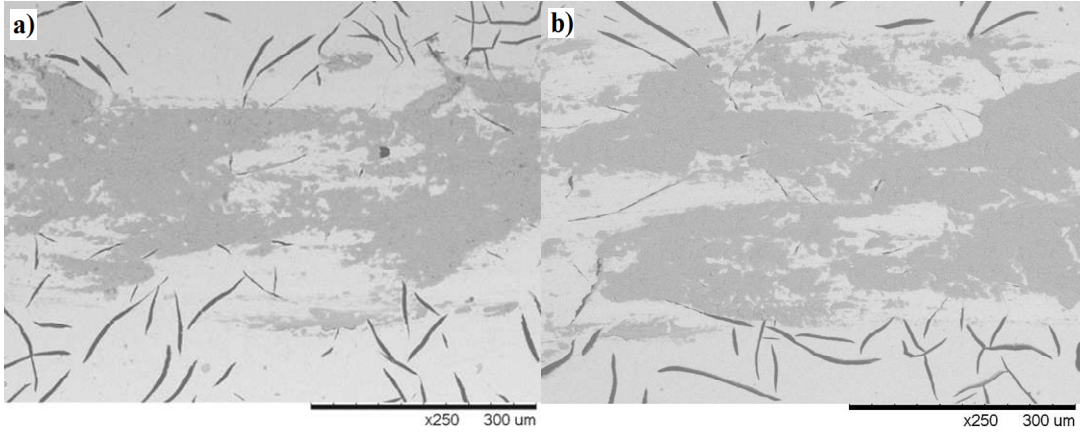
Şekil 7.29: Döküm halindeki numunenin yüksek sıcaklık SEM görüntüsü



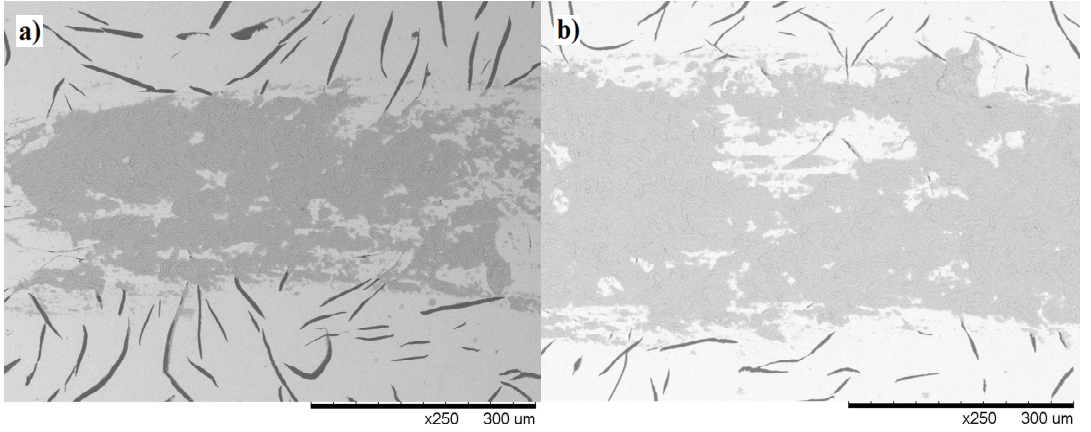
Şekil 7.30 : 250°C'de a) 5 dakika ve b) 120 dakika östemperlenmiş numunelerin yüksek sıcaklıkta aşınma SEM görüntüleri.



Şekil 7.31 : 300°C'de a) 5 dakika ve b) 120 dakika östemperlenmiş numunelerin yüksek sıcaklıkta aşınma SEM görüntüleri.



Şekil 7.32 : 350°C'de a) 5 dakika ve b) 120 dakika östemperlenmiş numunelerin yüksek sıcaklıkta aşınma SEM görüntüleri.

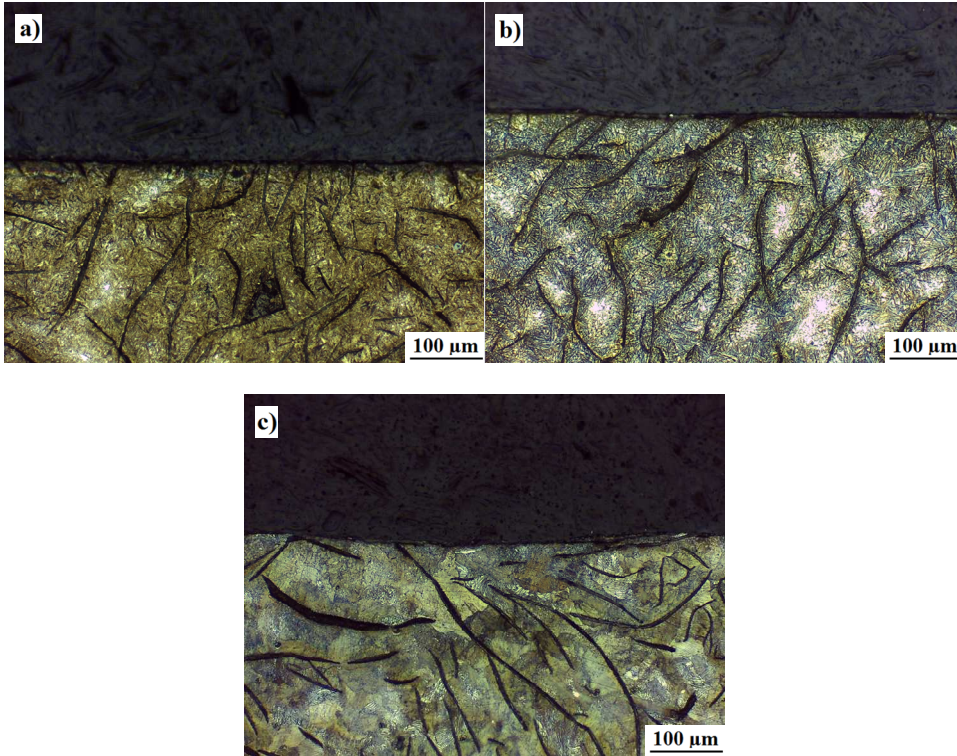


Şekil 7.33 : 400°C'de a) 5 dakika ve b) 120 dakika östemperlenmiş numunelerin yüksek sıcaklıkta aşınma SEM görüntüleri.

Yüksek sıcaklıkta aşınma sonucu aşınma izlerinin optik mikroyapı fotoğrafları Şekil D.2'de verilmektedir. Oda sıcaklığında yapılan aşınma testinden farklı olarak 5

dakika östemperlenen numuneler ile 120 dakika östemperlenen numuneler arası aşınma izi genişlik farkı oldukça fazladır.

Östemperlenmiş numuneler ile döküm halindeki numunenin, aşınma yüzeyindeki morfolojik değişimleri incelemek maksadı ile numuneler kesilip metalografik olarak hazırlanıp, %3 Nital ile dağlandıktan sonra aşınma izlerinin kesidinden optik mikroyapı fotoğrafları çekilmiştir. Şekil 7.34'den anlaşıldığı üzere aşınma kesitinde martensitik dönüşüm gibi morfolojik bir değişime rastlanmamıştır.



Şekil 7.34 : a) 250°C 5 dakika b) 250°C 120 dakika c) Döküm halindeki numunelerin kesitten aşınma izinin görünümü.

7.4 Oda Sıcaklığı ile Yüksek Sıcaklık Aşınma Deneylerinin Karşılaştırılması

Oda sıcaklığında ve 200°C’de yapılan aşınma deneyleri sonucu elde edilen değerler Çizelge 7.1’de gösterilmiştir. Döküm halindeki numune oda sıcaklığında ve 200°C’de aşınma deneylerine tabi tutulmuş ve yüksek sıcaklığa çıkıldığında aşınma direnci oda sıcaklığına göre 9 kat azalmıştır. Östemperleme işlemi ile birlikte östemperlenmiş numunelerin aşınma hızı azalmış ve buna bağlı olarak aşınma direnci yükselmiştir. Aşınma direnci, oda sıcaklığında ve yüksek sıcaklıkta östemperleme süresi arttıkça azalmaktadır. Oda sıcaklığında östemperlenmiş

numunelerin relatif aşınma direnci 3 ile 5 kat arasında artarken, yüksek sıcaklıkta östemperlenmiş numunelerin relatif aşınma direnci 2 ile 20 kat artmaktadır.

Çizelge 7.1 : Oda sıcaklığı ve yüksek sıcaklık aşınma sonuçları verileri

		Aşınma hızı, ($10^7 \text{ xmm}^3/\text{Nmm}$) (Oda Sıcaklığı)	Relatif Aşınma Direnci*	Aşınma hızı, ($10^7 \text{ xmm}^3/\text{Nmm}$) (200°C)	Relatif Aşınma Direnci*
Döküm halindeki gri dökme demir numune					
		21.4	1	195	1
Östemperlenmiş gri dökme demir numuneler					
250°C	5 dk	4.48	4.81	9.46	20.5
	120 dk	5.33	4	35.2	5.5
300°C	5 dk	4.92	4.34	14	13.8
	120 dk	5.77	3.8	39.5	4.92
350°C	5 dk	5.58	3.83	48	3.8
	120 dk	6.7	3.195	74.3	2.5
400°C	5 dk	6.63	3.2	57.2	3.4
	120 dk	7.05	3.1	113.4	1.7

*Döküm halindeki gri dökme demirin, oda sıcaklığı ve 200°C sıcaklıktaki aşınma hızı, diğer numunelerin aşınma hızına bölünerek hesaplanmıştır.

7. GENEL SONUÇLAR

Gri dökme demirin, 900°C'de 60 dakika östenitleme sonrası 250, 300, 350, 400°C'de 5, 20, 40, 60 ve 120 dakika östemperlenmesi sonrasında aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir :

- 1) Döküm halindeki GDD'nin mikroyapısı, perlitik gri dökme demirin karakteristiklerini taşımaktadır. Östemperleme işlemi ile birlikte, ösferritik bir yapı elde edilmektedir. 250 ve 300°C'de nispeten ince ve iğnesel görünümlü alt ösferrit yapı görülürken 350 ve 400°C'de ise kaba ve tüylü görünümlü üst ösferrit yapısı görülmektedir.
- 2) Östemperleme işlemi ile birlikte makrosertlik ve mikrosertlik değerleri, döküm halindeki GDD'ye göre önemli ölçüde artmaktadır. En yüksek sertlik 250°C'de 5 dakika süreyle östemperlenen numunede, en düşük sertlik ise, 400°C'de 120 dakika östemperlenen numunede elde edilmektedir. Östemperleme sıcaklığı ve süresi arttıkça gerek makrosertlik gerekse de mikrosertlikte azalma meydana gelmekte, ancak tüm östemperleme koşullarında döküm haline göre daha yüksek sertlik değerleri elde edilmektedir.
- 3) Ösferritik yapının bir bileşeni olan kalıntı östenit hacim oranı, östemperleme sıcaklığı ve süresi arttıkça artmaktadır.
- 4) Östemperleme işlemi ile gri dökme demirin oda sıcaklığı aşınma direnci, döküm haline göre, östemperleme koşullarına bağlı olarak 3 ile 5 kat arasında artmaktadır. Östemperleme sıcaklığının artmasıyla beraber alt ösferrit yapının üst ösferrit yapıya dönüşümüne bağlı olarak aşınma direncinde azalma meydana gelmektedir. En iyi aşınma direnci 250°C 5 dakika östemperlenen numunede elde edilirken, en düşük aşınma direnci ise 400°C 120 dakika östemperlenen numunede elde edilmektedir.
- 5) Döküm halindeki gri dökme demirin yüksek sıcaklık aşınma direnci, oda sıcaklığına göre yaklaşık 9 kat azalmaktadır. 200°C sıcaklıkta yapılan aşınma deneylerinde, en yüksek aşınma direnci, 250°C'de 5 dakika süreyle östemperlenen numunede elde edilmekte ve bu numunede aşınma direnci döküm haline göre yaklaşık 20 kat artmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] **Walton, C.F.** (1971). Gray And Ductile Iron Castings Handbook: Including data on gray, ductile, white and high alloy irons.
- [2] **ASM Handbook**, (1997). Fatigue and Fracture, Vol 19, *ASM International*, Materials Park, Ohio, USA.
- [3] **Çavuşoğlu, E.N.** (1992). Döküm Teknolojisi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 282-299.
- [4] **Vadiraj, A., Balachandran, G., Kamaraj, M., Gopalakrishna, B., Rao K.** (2010). Studies on mechanical and wear properties of alloyed hypereutectic gray castirons in the as-cast pearlitic and austempered conditions, *Material and Design*, 31, 951-955.
- [5] **Collini L., Nicoletto G., Kone R.** (2007). Microstructure and mechanical properties of pearlitic gray cast iron, *Materials Science and Engineering A*, 488, 529–539.
- [6] **Ferry, M., Xu, W.** (2004). Microstructural and crystallographic features of ausferrite in as-cast gray iron, *Materials Characterization* 53, 43-49.
- [7] **Darwish, N., Elliot, R.** (1993). Austempering of Low Manganese Ductile Irons, Part 1 Processing Window, *Materials Science and Technology*, 9, 572-585.
- [8] **ASM Handbook**, (2008). Casting, Vol.15, Formerly Tenth Edition, *ASM International*, Materials Park, Ohio, USA.
- [9] **Baydoğan, M.** (1996). GGG 60 Sınıfı Küresel Grafitli Dökme Demirde Östemperleme Isıl İşleminin Çekme, Yorulma ve Aşınma Özelliklerine Etkisi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [10] **Yılmaz, F.** (1985). Alaşımlar, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 169-172.
- [11] **ASM Metals Handbook**, (1990). Properties and selection: irons, steels and high performance alloys, Vol.1, Tenth Edition, *ASM International*, Materials Park, Ohio, USA.
- [12] **Elliot, R.** (1988). Cast Iron Technology, Butterworth & Co. Ltd., London.
- [13] **Grech, M., Young, J.M.** (1990). Effect of austenitising temperature on tensile properties of Cu-Ni austempered ductile iron, *Materials Science and Technology*, 6, 415-421.
- [14] **Kovacs, B.V., Keough, J.R.** (1993). Physical properties and application of austempered gray iron, *AFS Transaction*, 101, 283-291.
- [15] **ASM Handbook**, (1990). Heat Treating, Vol 4, Tenth Edition, *ASM International*.

- [16] **Ghang, C.H., Shih, T.S.** (1994). Study on Isothermal Transformation of Austempered Ductile Iron, *AFS Transactions*, 119, 557.
- [17] **Putatunda, S.K., Gadicherla, P.K.** (1999). Influence of austenitizing temperature on fracture toughness of a low manganese austempered ductile iron (ADI) with ferritic as-cast structure, *Materials Science and Engineering A*, 268, 15–31.
- [18] **Darwish, N., Elliott, R.** (1993). Austempering of Low Manganese Ductile Irons, Part 2 Variation of Mechanical Properties With Heat Treatment Conditions, *Materials Science and Technology*, 9, 586-602.
- [19] **Darwish, N., Elliott, R.** (1993). Austempering of Low Manganese Ductile Irons, Part 3 Influence of Austenitizing Temperature, *Materials Science and Technology*, 9, 882-889.
- [20] **Çetin, M.** (2005). Östemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Aşınma Davranışlarının Geliştirilmesi, *Doktora Tezi*, Gazi Üniversitesi, Ankara.
- [21] **Rundman, K.B., Klug, R.C.** (1982). An X-ray and metallographic study of an austempered ductile cast iron, *AFS Transactions*, 82-115, 499–508.
- [22] **Özel, A.** (1994). GGG 40-80 sınıfı küresel grafitli dökme demirlerde östemperleme ısı işleminin darbe direnci ve darbe geçiş sıcaklığına etkisinin incelenmesi, *Doktora Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [23] **Çimenoglu, H., Kayalı, E.,S.** (1991). Malzemelerin yapısı ve mekanik davranışları, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- [24] **Kurt, H.** (2004). Alaşımsız dökme demirlerin aşınma özelliği, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [25] **Kato, K.** (2000). Wear in relation to friction- a review, *Wear*, 241, 151-157.
- [26] **Davis, J.R.** (2001). Surface Engineering for Corrosion and Wear Resistance, *ASM International*.
- [27] **Kayalı, E.S.** (1997). Hasar analizi seminer notları, *TMMOB Metalurji Mühendisleri Odası*, Bölüm 5,82-102.
- [28] **Qureshi, F.S. and Sheikh, A.K.** (1997). A probabilistic characterization of adhesive wear of metals, *IEEE Transactions on Reliability*, 46, 38-44.
- [29] **Babilius, A., Ambroza, P.** (2003). Effect of temperature and sliding speed on the adhesive wear, *Materials Science*, 9, 347-350.
- [30] **Çelik, H.** (1991). Kaynak Edilebilen Kobalt ve Demir Esaslı Alaşımların Yüksek Sıcaklıktaki Aşınma Davranışları, *Doktora Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [31] **Colagelo, V.J., Heiser, F.A.** (1974). Analysis of Metallurgical Failures, John Wiley and Sons, New York, USA.
- [32] **Metals Handbook**, (1986). Failure Analysis and Prevention, Eighth Edition, Vol.10, *ASM International*, Materials Park, Ohio, USA.
- [33] **Putatunda, K.S., Kesani, S., Tackett, R., Lawes, G.** (2006). Development of Austenite Free ADI, *Material Science and Engineering A*, 435-436, 112-122.

- [34] Erić, O., Rajnović, D., Zec, S., Sidjanin, L., Jovanović, T.M. (2006). Microstructure and Fracture of Alloyed Austempered Ductile Iron, *Materials Characterization*, 57, 211-217.
- [35] Aranzabal, J., Gutierrez, I., Urcola, J. (1994). Influence of heat treatments on microstructure of austempered ductile iron, *Materials Science and Technology*, 10, 263-274.
- [36] Çetin, M., Gül, F. (2006). Östemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demirin Abrasiv Aşınma Davranışına Östemperleme İşleminde Soğutmanın Etkisi, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 21-2, 359-366.
- [37] Han, J.M., Zou, Q., Barber, G., Nasir, T., Northwood, D., Sun, C., Seaton, P. (2012). Study of the effects of austempering temperature and time on scuffing behavior of austempered Ni–Mo–Cu ductile iron, *Wear*, 290–291, 99–105.
- [38] Balachandran, G., Vadiraj, A., Kamaraj, M., Kazuya, E. (2007). Mechanical and wear behavior of alloyed gray cast iron in the quenched and tempered and austempered conditions, *Materials and Design*, 32, 4042–4049.
- [39] Pérez, M., Cisneros, M., Lopez, H. (2006). Wear resistance of Cu–Ni–Mo austempered ductile iron, *Wear*, 260, 879–885.

EKLER

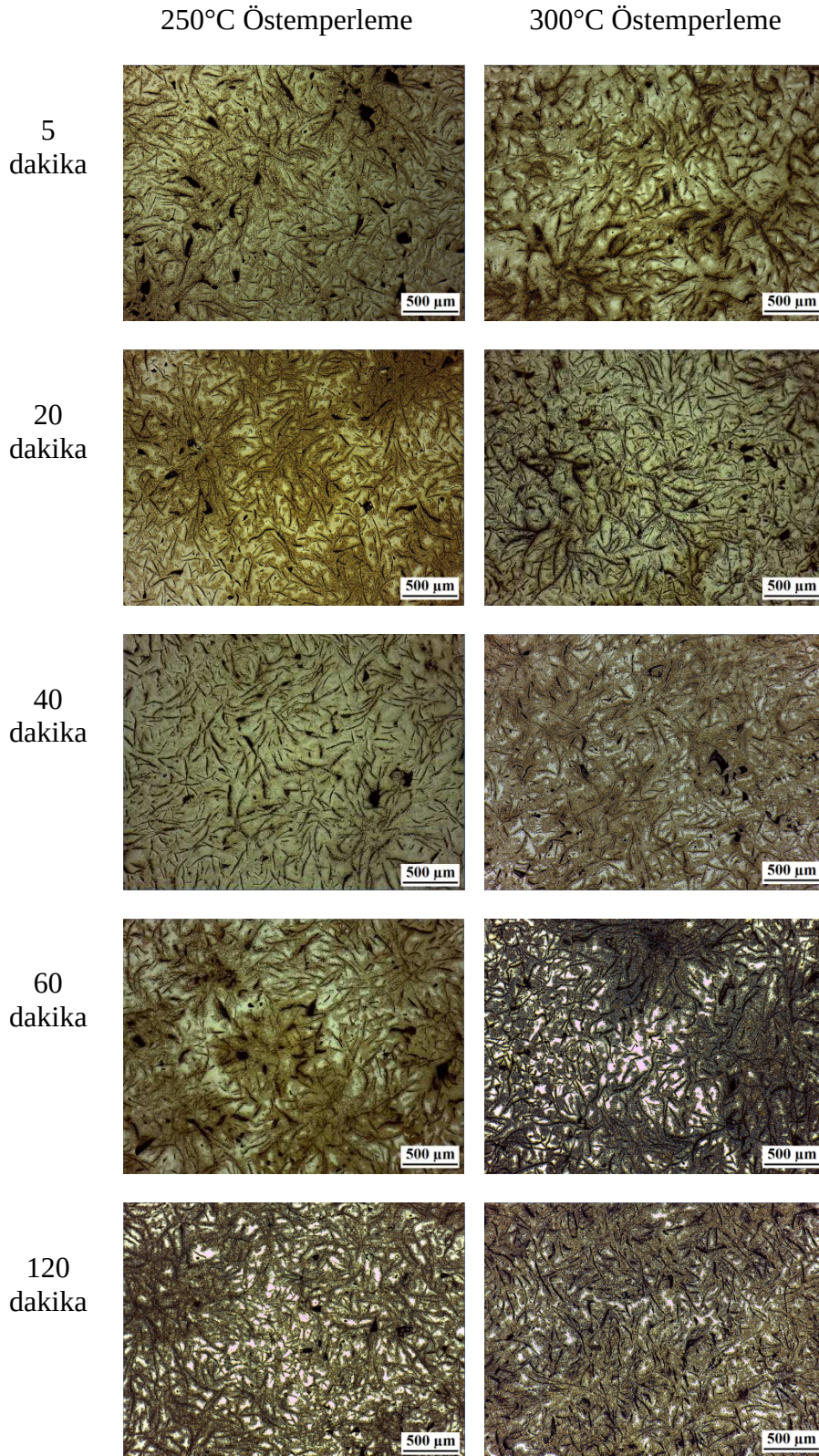
Ek A: Östemperlenmiş gri dökme demirlerin optik mikroyapı fotoğrafları.

Ek B: Östemperlenmiş numunelerin oda sıcaklığı ve yüksek sıcaklık aşınma deneylerinde elde edilen aşınma izlerinin profili.

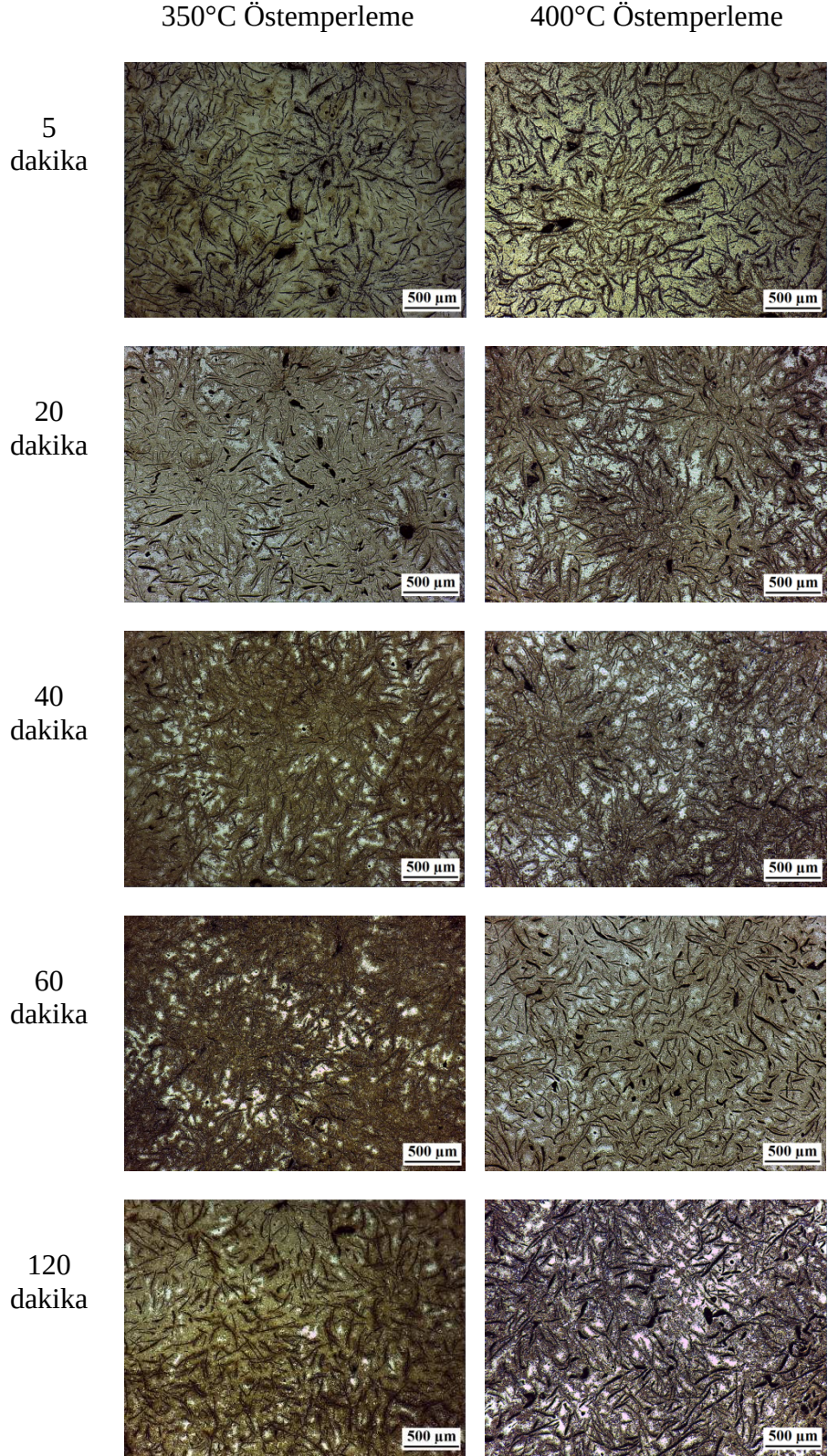
Ek C: Östemperlenmiş numunelerin oda sıcaklığı ve yüksek sıcaklık aşınma deneylerinde zamana bağlı sürtünme katsayısı değişimi.

Ek D: Östemperlenmiş numunelerin oda sıcaklığı ve yüksek sıcaklık aşınma deneylerinde elde edilen aşınma izlerinin optik mikroyapı fotoğrafları.

EK A

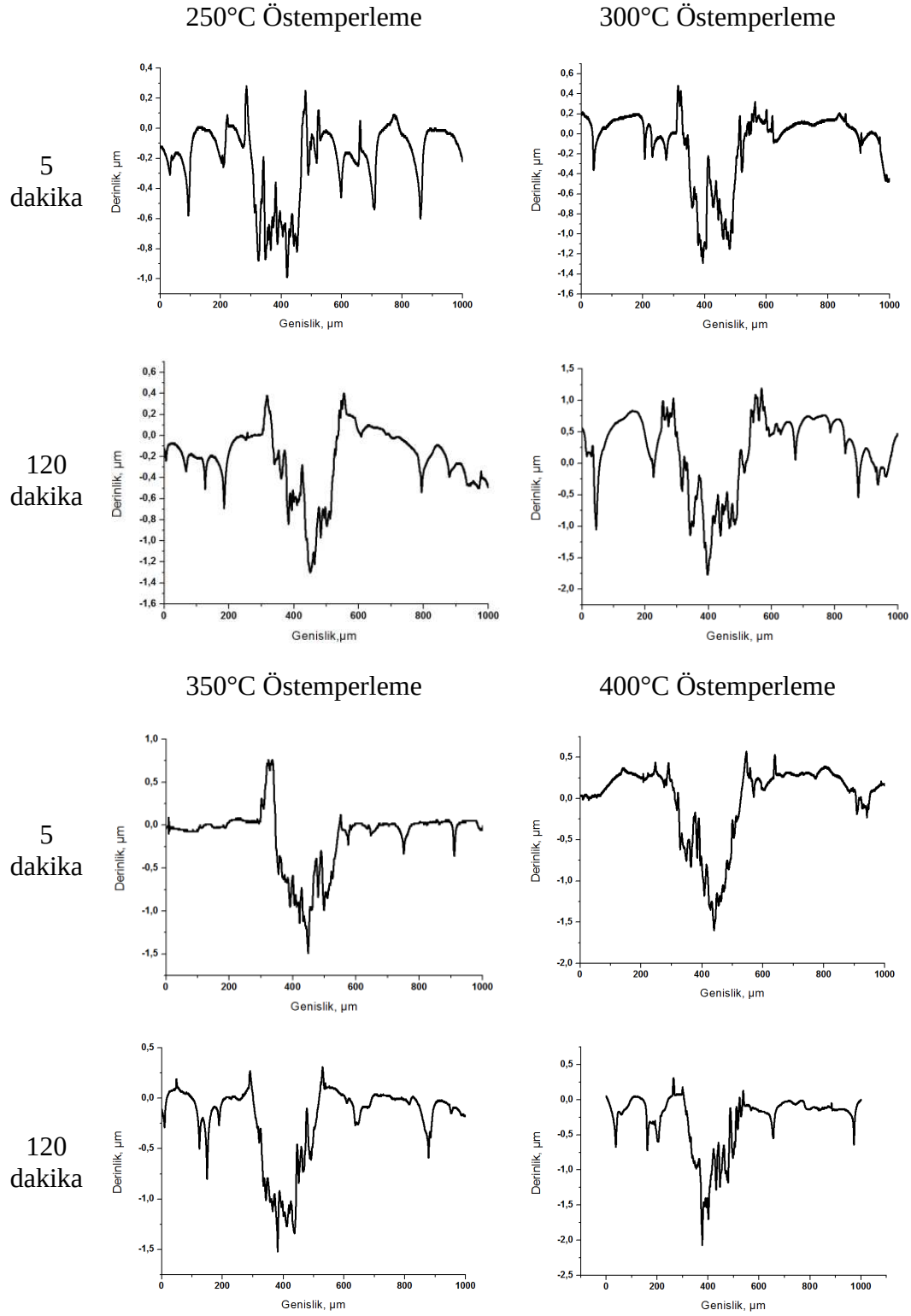


Şekil A.1 : Östemperlenmiş gri dökme demirlerin optik mikroyapı fotoğrafları.

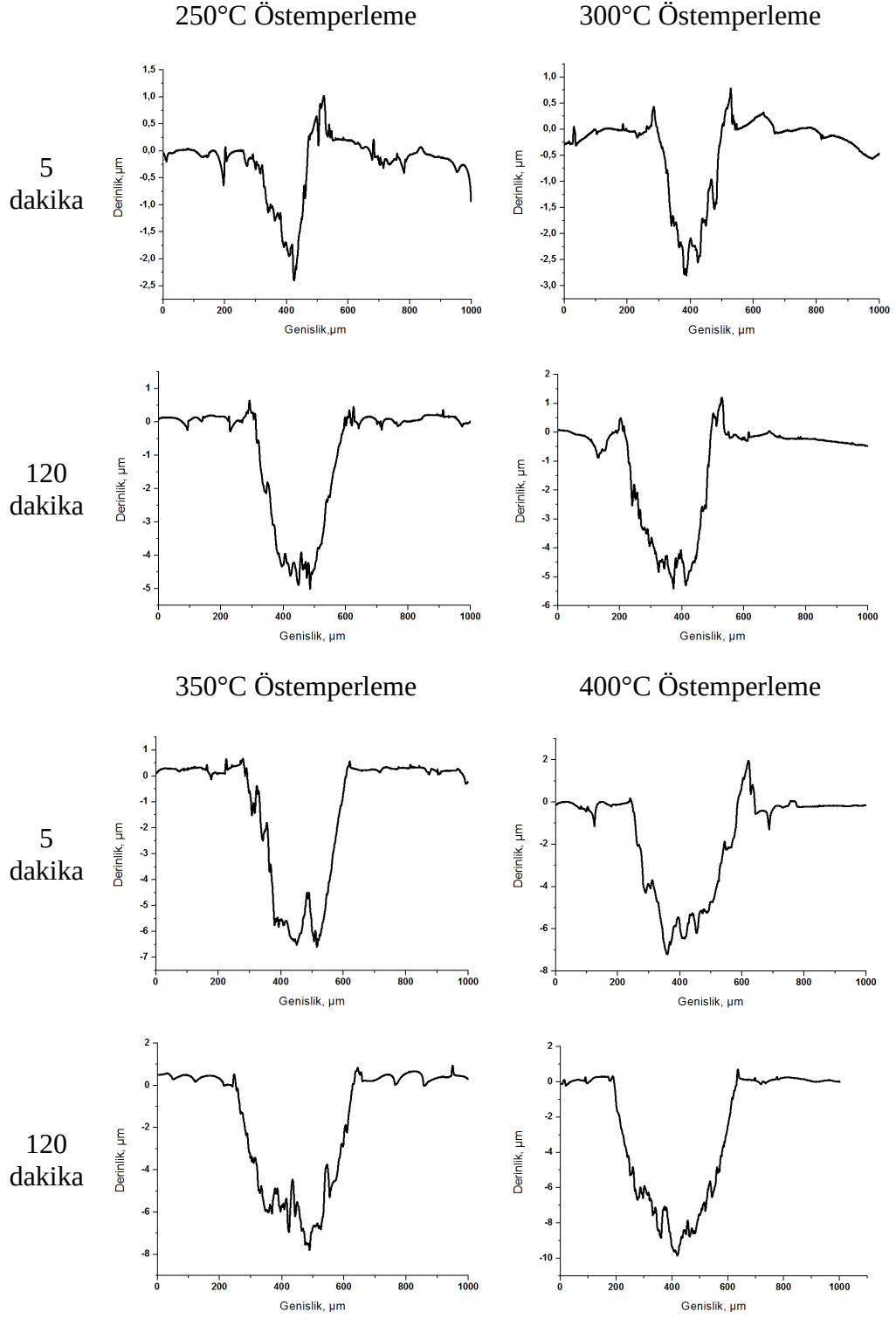


Şekil A.1 (devam) : Östemperlenmiş gri dökme demirlerin optik mikroyapı fotoğrafları.

EK B



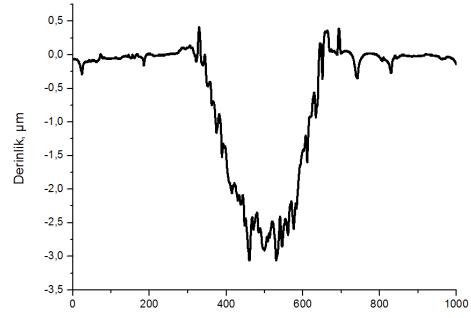
Şekil B.1 : Östempirlenmiş numunelerin oda sıcaklığı aşınma deneylerinde elde edilen aşınma izlerinin profili.



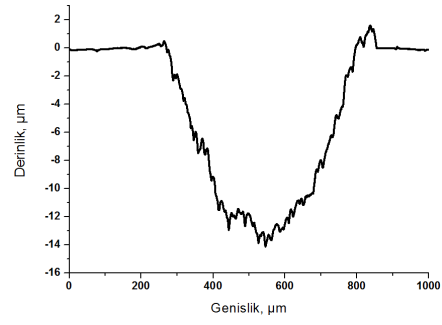
Şekil B.2 : Östemperelemiş numunelerin yüksek sıcaklık aşınma deneylerinde elde edilen aşınma izlerinin profili.

Döküm Hali

Oda Sıcaklığı



Yüksek Sıcaklık

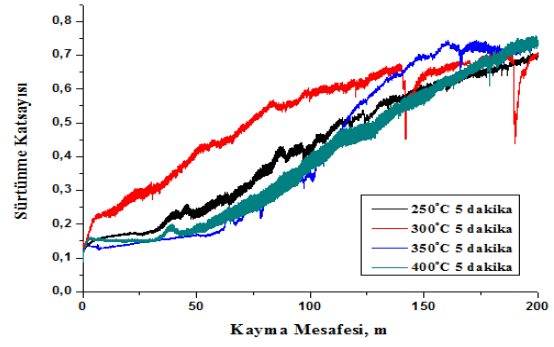


Şekil B.3 : Döküm halindeki numunelerin aşınma izlerinin profili.

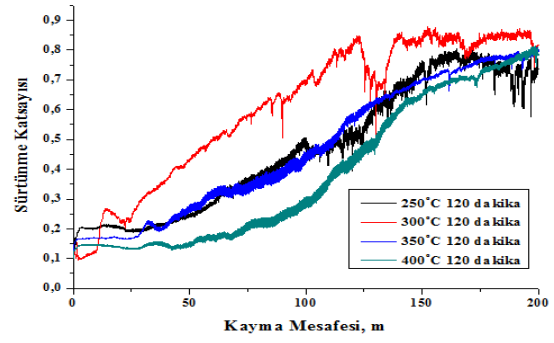
EK C

Oda Sıcaklığında Aşınma

5 dk Östempereleme



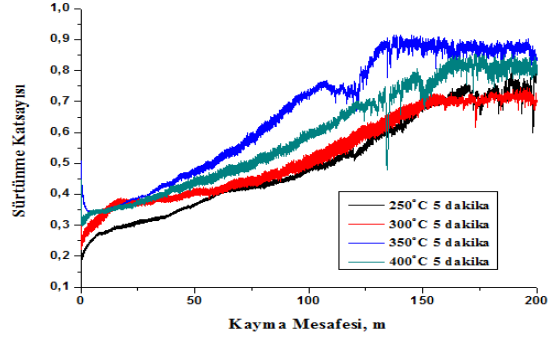
120 dk Östempereleme



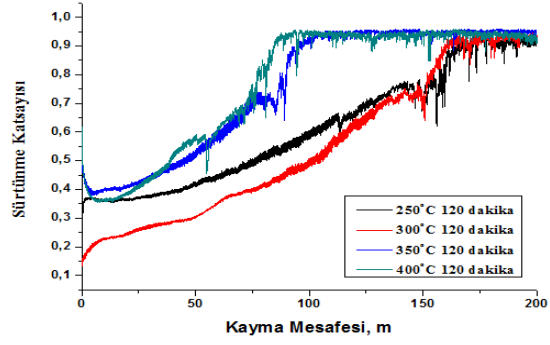
Şekil C.1 : Östemperelemiş numunelerin oda sıcaklığı aşınma deneylerinde zamana bağlı sürtünme katsayısı değişimi.

200°C'de Aşınma

5 dk Östempereleme

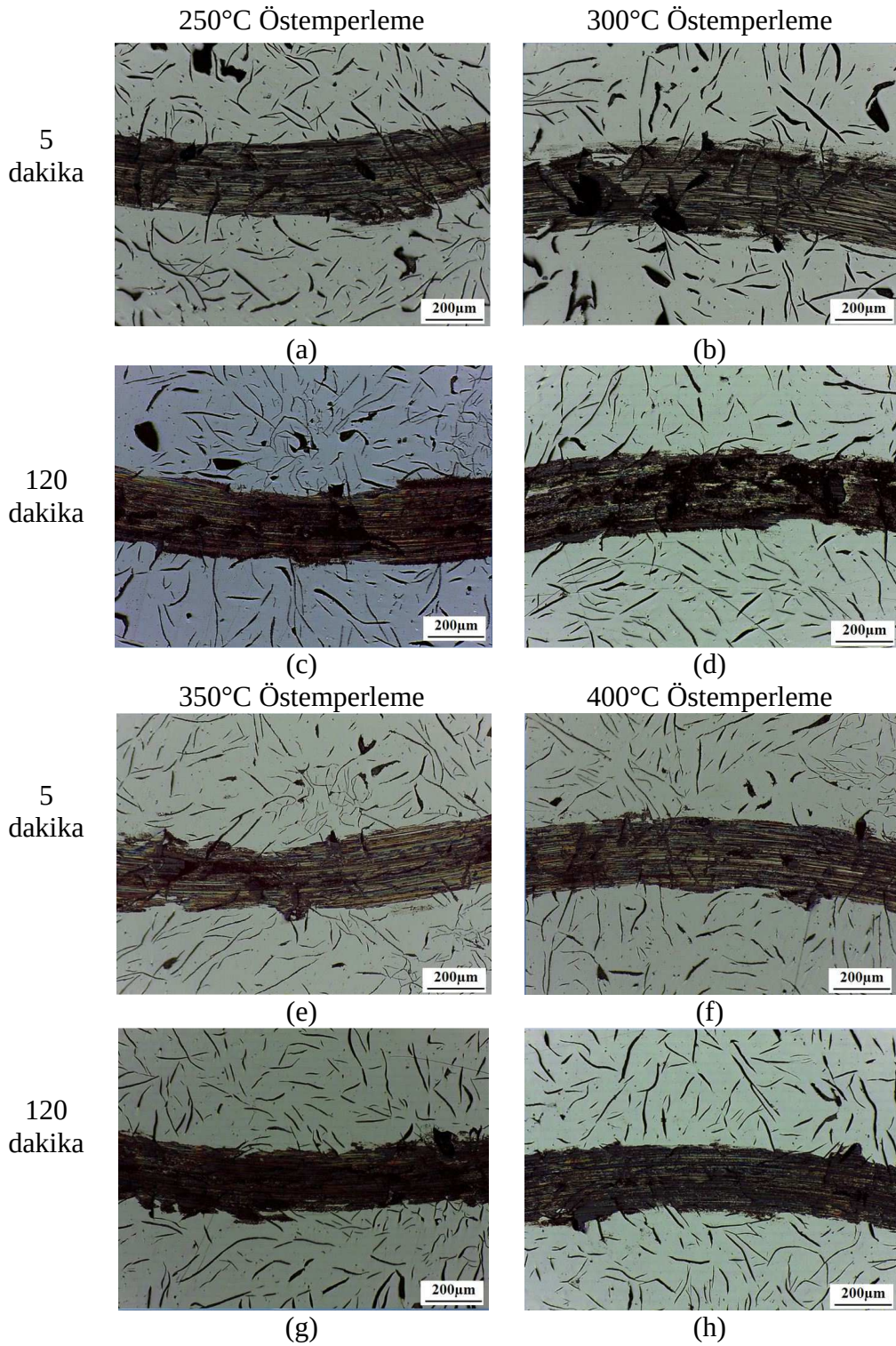


120 dk Östempereleme

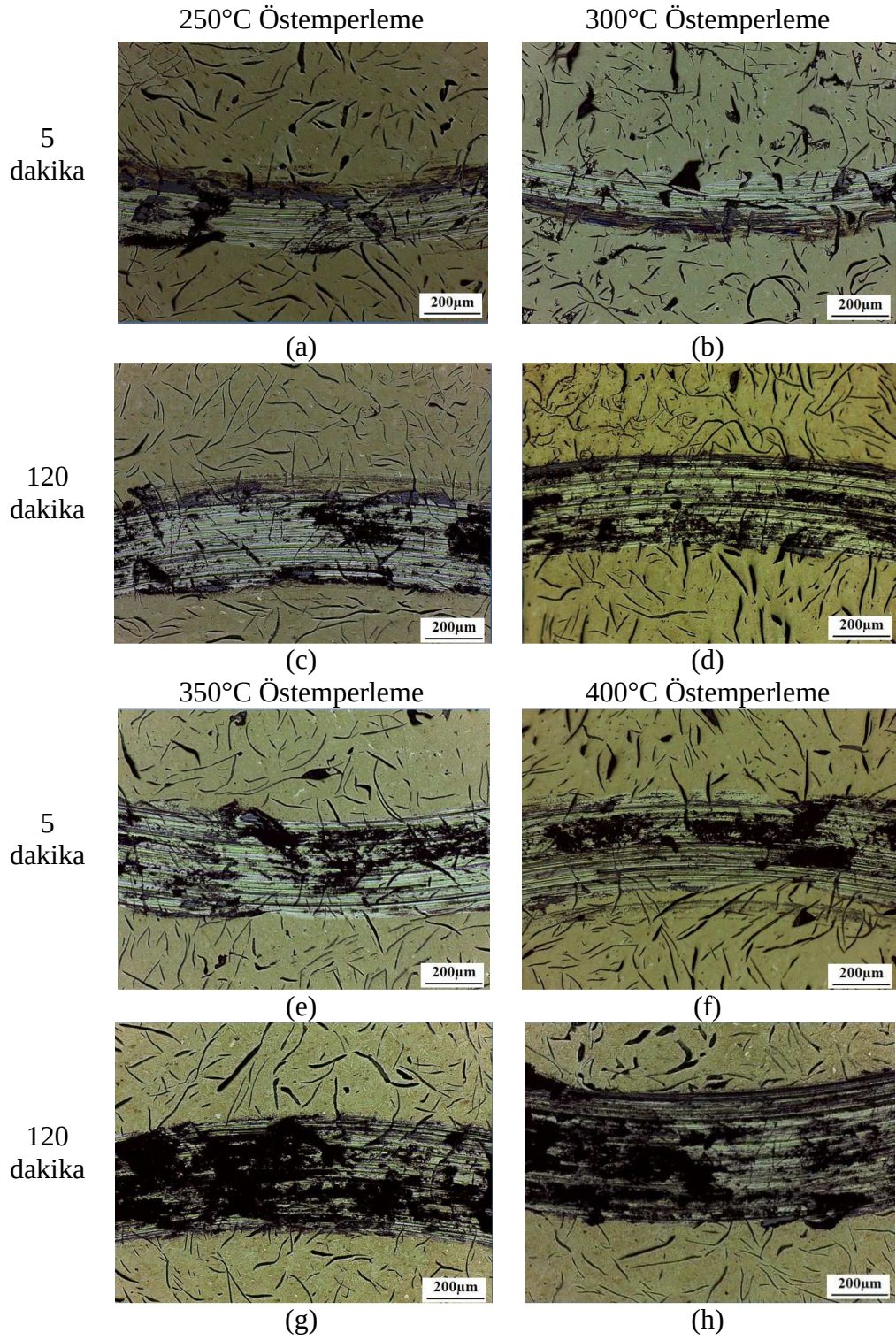


Şekil C.2 : Östemperelemiş numunelerin yüksek sıcaklık aşınma deneylerinde zamana bağlı sürtünme katsayısı değişimi.

EK D

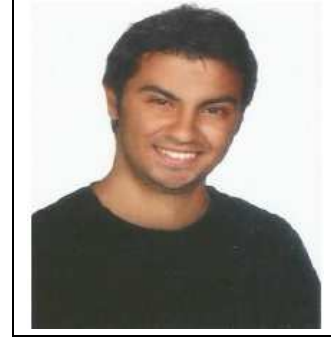


Şekil D.1 : Östemperlenmiş numunelerin oda sıcaklığı aşınma deneylerinde elde edilen aşınma izlerinin optik mikroyapı fotoğrafları.



Şekil D.2 : Östemperelemiş numunelerin yüksek sıcaklık aşınma deneylerinde elde edilen aşınma izlerinin optik mikroyapı fotoğrafları.

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad : Ali Ulaş Malcıoğlu
Doğum Yeri ve Tarihi : İstanbul / 19.09.1990
Adres : Barış Mah. Melodi Apt. No:9/47 Beylikdüzü
E-Posta : ali_ulas90@hotmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2009-2014, Yıldız Teknik Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği
- **Yükseklisans** : 2014- 2015, İstanbul Teknik Üniversitesi, Malzeme Mühendisliği