



**ÖN ISIL İŞLEMLERİN ÖSTEMPERLENMİŞ KÜRESEL GRAFİTLİ  
DÖKME DEMİRİN AŞINMA DAVRANIŞI ÜZERİNE ETKİSİ**

**Barbaros ŞENSES**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TEMMUZ 2021**

## ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu bildirir, aksi bir duruma aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim

Barbaros ŞENSES

01/07/2021

# ÖN ISIL İŞLEMLERİN ÖSTEMPERLENMİŞ KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRİN AŞINMA DAVRANIŞI ÜZERİNE ETKİSİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Barbaros ŞENSES

GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Temmuz 2021

## ÖZET

Bu çalışmada, östemperleme öncesi yapılan ısıt işlemlerin östemperlenmiş küresel grafitli dökme demirin (ÖKGDD) mikro yapı, mekanik özellikleri ve aşınma davranışı üzerine etkisi incelenmiştir. EN-GJS-600-3 sınıf düşük alaşımlı perlitik küresel grafitli dökme demir (KGDD) numunelerin hepsi ön ısıt işlem olarak 900 °C'de 60 dakika östenitlenmiştir. Ardından normalizasyon ısıt işlemi için havada soğutulmuş, tam tavlama ısıt işlemi için fırında soğutulmuş ve östemperleme ısıt işlemi için 365 °C'deki tuz banyosunda 120 dakika süreyle bekletilmiş numuneler ayrı ayrı elde edilmiştir. Yapılan ön ısıt işlemler sonrası numunelerin hepsi sadece östemperlenmiştir. Bu işlemde tüm numuneler yeniden 900 °C'de 60 dakika östenitlemenin ardından 365°C'deki tuz banyosunda 120 dakika süreyle östemperlenmiştir. Numunelerin mikro yapı değişimleri optik mikroskop ve tarama elektron mikroskobunda (SEM) incelenmiştir. Östemperlenmiş numunelerin X-ışını kırınımı (XRD) ile kalıntı östenit miktarları belirlenmiştir. Mekanik özelliklerin belirlenmesi amacıyla sertlik ve çekme deneyleri yapılmıştır. ASTM G99-17 standardında uygun olarak pin on disc yöntemiyle aşınma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Aşınmış yüzeyler SEM ile incelenerek aşınma davranışları belirlenmiştir. Çift östemperleme ısıt işlemiyle (DADI) en ince taneli mikro yapı elde edilmiştir. En yüksek sertlik, akma ve çekme dayanımı DADI'da elde edilmiştir. Bu değerler sırasıyla 348 HV, 801,6 MPa ve 1094,5 MPa olarak ölçülmüştür. Normalize edilmiş + östemperlenmiş numune (NADI) ve DADI çok yakın mekanik özellik değerleri elde edilmiştir. NADI için çekme dayanımı 1089,1 MPa iken DADI'da 1094,5 MPa, toplam uzama NADI için %8,7 iken DADI'da % 8,4 ve sertlik değeri NADI'da 326 HV iken DADI'da bu değer 348 HV olarak ölçülmüştür. Tam tavllanmış + östemperlenmiş numunede (FADI) akma ve çekme dayanımında gelişme gözlemlenmemiştir. En yüksek toplam uzama değeri FADI'da % 11,8 olarak ölçülmüştür. En az ağırlık kaybı 0,6 mg ile DADI'da elde edilmiştir. Aynı zamanda bu numune  $\mu = 0,356$  ile en düşük ortalama sürtünme katsayısına sahiptir. Buna karşın en yüksek ağırlık kaybı  $\mu = 0,697$  ile en yüksek ortalama sürtünme katsayısına sahip FADI'da 2,9 mg olarak elde edilmiştir.

Bilim Kodu : 91529  
Anahtar Kelimeler : Östemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demir, Ön Isıl İşlem, Aşınma.  
Sayfa Adedi : 129  
Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Volkan KILIÇLI

# EFFECT OF PRE-HEAT TREATMENTS ON WEAR BEHAVIOUR OF AUSTEMPERED DUCTILE IRON

(M. Sc. Thesis)

Barbaros ŞENSES

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

July 2021

## ABSTRACT

In this study, the effects of heat treatments before austempering on the microstructure, mechanical properties and wear behavior of austempered ductile iron (ADI) were investigated. All of the EN-GJS-600-3 class low alloy pearlitic ductile cast iron (DI) samples were austenitized for 60 minutes at 900 °C as a pre-heat treatment. Then, the samples, which were cooled in air for normalization heat treatment, cooled in the furnace for full annealing heat treatment, and kept in a salt bath at 365 °C for 120 minutes for austempering heat treatment, were obtained separately. After the pre-heat treatments, all of the samples were only austempered. In this process, all samples were austenitized again at 900 °C for 60 minutes and then austempered in a salt bath at 365°C for 120 minutes. Microstructure changes of the samples were examined under optical microscope and scanning electron microscope (SEM). Residual austenite amounts were determined by X-ray diffraction (XRD) of the austempered samples. In order to determine the mechanical properties, hardness and tensile tests were carried out. Wear tests were carried out with pin on disc method in accordance with ASTM G99-17 standard. Worn surfaces were examined by SEM and their wear behavior was determined. The finest grained microstructure was obtained by double austempering heat treatment (DADI). The highest hardness, yield and tensile strength were obtained in DADI. These values were measured as 348 HV, 801.6 MPa and 1094.5 MPa, respectively. Normalized + austempered sample (NADI) and DADI presented very close mechanical property values. While the tensile strength for NADI is 1089.1 MPa, it is 1094.5 MPa for DADI, the total elongation is 8.7% for NADI, 8.4% for DADI, and the hardness value is 326 HV for NADI, while this value is 348 HV for DADI. measured. No improvement in yield and tensile strength was observed in the fully annealed + austempered specimen (FADI). The highest total elongation value was measured as 11.8% in FADI. The least weight loss was obtained in DADI with 0.6 mg. At the same time, this sample has the lowest average friction coefficient with  $\mu = 0.356$ . On the other hand, the highest weight loss with  $\mu = 0.697$  was obtained in FADI, which has the highest average friction coefficient, as 2.9 mg.

Science Code : 91529  
Key Words : Austempered Ductile Iron, Pre-Heat Treatment, Wear.  
Page Number : 129  
Supervisor : Assist. Prof. Dr. Volkan KILIÇLI

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmam boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren, engin bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Volkan KILIÇLI'ya teşekkür eder, saygılarımı sunarım.

Deneyisel çalışmalarım esnasında Isıl işlem, Mekanik testler ve Metalografi laboratuvarlarının altyapısından faydalandığım Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölüm Başkanlığı'na ve çalışmalarım boyunca katkılarından dolayı Öğr. Gör. Ömer ŞAHİN'e teşekkürlerimi sunarım.

Deneyde kullanılacak malzemeleri tornada işleyen Muharrem Usta'ya ve ısıtma işlem uygulanmasında yardımlarını esirgemeyen DÖKSAN firması ve değerli çalışanlarına teşekkür ederim.

Çalışmalarım süresince bana her türlü kolaylığı sağlayan mensubu olduğum YETSAN ISI DÖNÜŞÜM SİSTEMLERİ A.Ş.'ye teşekkür ederim.

Bu süreçte yanımda olan ve beni motive eden değerli arkadaşlarım Muhammed AYAZ, Hakan TAŞ ve Ömer TEKELİ'ye teşekkür ederim.

Akademik faaliyetlerimi her zaman destekleyen canım aileme teşekkürü borç bilirim.

Bu araştırmayı 07/2020-19 kodlu projeye destekleyen Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimine teşekkür ederim

## İÇİNDEKİLER

|                                                                                      | Sayfa |
|--------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| ÖZET .....                                                                           | iv    |
| ABSTRACT.....                                                                        | v     |
| TEŞEKKÜR .....                                                                       | vi    |
| İÇİNDEKİLER .....                                                                    | vii   |
| ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....                                                            | ix    |
| ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....                                                              | x     |
| RESİMLERİN LİSTESİ .....                                                             | xv    |
| SİMGELER VE KISALTMALAR.....                                                         | xvi   |
| 1. GİRİŞ.....                                                                        | 1     |
| 2. ÖSTEMPERLENMİŞ KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRLER...                                 | 5     |
| 2.1. Östemperleme Isıl İşlemi .....                                                  | 6     |
| 2.1.1. Tek adımlı östemperleme süreci .....                                          | 7     |
| 2.1.2. İki adımlı östemperleme süreci .....                                          | 9     |
| 2.2. Östemperleme Isıl İşleminde Dönüşüm Kinetiği .....                              | 14    |
| 2.2.1. I. Aşama dönüşümü ( $\gamma_0 \rightarrow \alpha b + \gamma_{yk}$ ) .....     | 14    |
| 2.2.2. II. Aşama dönüşümü ( $\gamma_{yk} \rightarrow \alpha + \text{karbür}$ ) ..... | 16    |
| 2.3. Mikro Yapı.....                                                                 | 17    |
| 2.4. ÖKGDD'lerin Mikro Yapı ve Mekanik Özelliklerini Etkileyen Faktörler .....       | 17    |
| 2.4.1. Östenitleme sıcaklık ve süresinin etkisi .....                                | 18    |
| 2.4.2. Östemperleme sıcaklık ve süresinin etkisi .....                               | 19    |
| 2.4.3. Alaşım elementlerinin etkisi .....                                            | 24    |
| 2.5. Mekanik Özellikler.....                                                         | 31    |
| 3. ÖSTEMPERLENMİŞ KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRİN AŞINMA DAVRANIŞI .....              | 35    |

|                                                                | <b>Sayfa</b> |
|----------------------------------------------------------------|--------------|
| <b>4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR .....</b>                            | <b>83</b>    |
| 4.1. Malzeme.....                                              | 83           |
| 4.2. Isıl İşlemler .....                                       | 84           |
| 4.2.1. Ön ısıt işlemler .....                                  | 84           |
| 4.2.2. Östempereleme ısıt işlemleri .....                      | 86           |
| 4.3. Mikro Yapı Karakterizasyon Çalışmaları .....              | 87           |
| 4.3.1. Metalografik hazırlık .....                             | 87           |
| 4.3.2. Mikro Yapı görüntüleme .....                            | 87           |
| 4.3.3. XRD analizi.....                                        | 88           |
| 4.4. Mekanik Deneyler .....                                    | 89           |
| 4.5. Aşınma Deneyi .....                                       | 91           |
| <b>5. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....</b>                   | <b>95</b>    |
| 5.1. Mikro Yapı İncelemeleri .....                             | 95           |
| 5.2. XRD Analizi ve Kalıntı Östenit Hacim Oranı Sonuçları..... | 97           |
| 5.3. Çekme ve Sertlik Deneyi Sonuçları .....                   | 101          |
| 5.4. Aşınma Deneyi Sonuçları .....                             | 104          |
| 5.5. Aşınmış Yüzeylerin Değerlendirilmesi .....                | 106          |
| <b>6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....</b>                            | <b>113</b>   |
| <b>KAYNAKLAR .....</b>                                         | <b>115</b>   |
| <b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>                                          | <b>131</b>   |

## ÇİZELGELERİN LİSTESİ

| Çizelge                                                                                                                                                                                                  | Sayfa |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Çizelge 2.1. ASTM A897/897M-16 standardına göre ÖKGDD'lerin sınıfları .....                                                                                                                              | 6     |
| Çizelge 2.2. 2.2. TS EN 1564:2001 standardına göre ÖKGDD'lerin sınıfları .....                                                                                                                           | 6     |
| Çizelge 2.3. ÖKGDD'lere ilave edilen diğer alaşım elementleri ve üst sınırları.....                                                                                                                      | 30    |
| Çizelge 3.1. Farklı matris ve farklı plaka kalınlığı ile elde edilen nispi aşınma dayanımı değerleri (E) .....                                                                                           | 43    |
| Çizelge 3.2. ÖKGDD'lerin östemperleme süresine göre ağırlık kaybı .....                                                                                                                                  | 49    |
| Çizelge 3.3. Karşılaştırmalı aşınma testi sonuçları.....                                                                                                                                                 | 82    |
| Çizelge 4.1. Deneysel çalışmalarda kullanılan KGDD'in kimyasal bileşimi (% ağırlıkça).....                                                                                                               | 83    |
| Çizelge 4.2. Numunelere uygulanan ısıt işlemler ve kodları .....                                                                                                                                         | 87    |
| Çizelge 4.3. Pin on disc aşınma deney parametreleri .....                                                                                                                                                | 92    |
| Çizelge 5.1. Numunelerin XRD analiziyle hesaplanmış karbonca zengin kalıntı östenit hacim oranı (V <sub>yk</sub> ), östenitin içerdği karbon miktarı (C <sub>y</sub> ) ve plaka kalınlık değerleri ..... | 98    |
| Çizelge 5.2. Numunelerin çekme ve sertlik deneyi sonuçları.....                                                                                                                                          | 101   |

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

| Şekil                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | Sayfa |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Şekil 2.1. Östenitleme ve östemperleme adımlarının faz dönüşüm eğrilerinde izlenmesi .....                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 7     |
| Şekil 2.2. Ösferritik yapının dönüşümü. a) Ferrit plakalarının çekirdekleşmesi, b) ösferritik mikro yapı ve c) – e) asiküler ferritin büyümesi ve karbonca doymuş östenitin oluşumu .....                                                                                                                                                                                            | 8     |
| Şekil 2.3. Tek adımlı izotermal ısı işleminin gösterimi.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 9     |
| Şekil 2.4. Çift adımlı izotermal ısı işlem prosesi (a) artan ikinci östemperleme sıcaklığı, (b) sabit ikinci östemperleme sıcaklığı.....                                                                                                                                                                                                                                             | 10    |
| Şekil 2.5. Tek adımlı ÖKGDD ve Çift adımlı ÖKGDD'nin ferritik plakalarının karşılaştırılması.....                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 11    |
| Şekil 2.6. a) Tek adımlı ÖKGDD ve çift adımlı ÖKGDD'nin kararlı östenit içeriği, b) tek adımlı östemperlemenin kurgusu, (c) çift adımlı östemperlemenin kurgusu.....                                                                                                                                                                                                                 | 12    |
| Şekil 2.7. Östemperleme ısı işleminin şematik gösterimi.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 13    |
| Şekil 2.8. I. Aşamada östenitten beynitik ferrit ve karbonca zengin östenit (ösferrit) oluşumunun şematik gösterimi .....                                                                                                                                                                                                                                                            | 15    |
| Şekil 2.9. Östemperleme süresine bağlı olarak fazların miktarlarındaki değişim .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 15    |
| Şekil 2.10. ÖKGDD'nin tipik mikro yapısı (900 °C'de 90 dakika östenitlenmiş, 365 °C'de 60 dakika östemperlenmiş).....                                                                                                                                                                                                                                                                | 17    |
| Şekil 2.11. Fe-C-%2Si faz diyagramında östemperleme esnasında serbest enerji değişimi.....                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 19    |
| Şekil 2.12. Östemperleme sıcaklığının artması ile ösferritin mikro yapısal evrimi (östenitleme sıcaklığı 910 °C, tutma süresi 90 dakika) a) östemperleme sıcaklığı 350 °C, tutma süresi 90 dakika, b) östemperleme sıcaklığı 370 °C, tutma süresi 90 dakika, c) östemperleme sıcaklığı 390 °C, tutma süresi 90 dakika, d) östemperleme sıcaklığı 410 °C, tutma süresi 90 dakika..... | 20    |
| Şekil 2.13. Östemperleme süresine bağlı olarak % uzamanın değişimi ve östemperleme esnasındaki dönüşüm aşamalarının gösterimi .....                                                                                                                                                                                                                                                  | 21    |
| Şekil 2.14. Östemperleme süresine bağlı olarak mekanik özelliklerin değişimi a) Çekme Dayanımı, b) Darbe Enerjisi, c) % Uzama .....                                                                                                                                                                                                                                                  | 22    |

| Şekil                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | Sayfa |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Şekil 2.15. Östenitleme sıcaklığı ve östemperleme süresinde bağlı olarak;<br>a) dönüşmemiş östenit (martenzit), b) östenit karbon içeriği, c) karbonca<br>zengin östenit (kararlı östenit) miktarlarının değişimi.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 22    |
| Şekil 2.16. Östemperleme sıcaklığına bağlı olarak; a) sertlik, karbon içerği, toplam<br>karbon içeriği ve östenit içeriğinin, b) çekme dayanımı, akma dayanımı<br>ve % uzamanın değişimi .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 23    |
| Şekil 2.17. KGDD’de ötektik katılaşma bölgesinde elementlerin konsantrasyon<br>değişimi.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 25    |
| Şekil 2.18. KGDD’lerde çekme dayanımı - % uzama ilişkisi .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 32    |
| Şekil 3.1. Darbe ve aşınma testinde östenitleme sıcaklığının optimum östemperleme<br>zamanı ve sertlik üzerine etkisi (GAO: Görece Aşınma Oranı) .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 36    |
| Şekil 3.2. a) Kuru kayma deneyinde malzemelerin aşınma oranları; 1) alüminyum<br>bronz, 2) kurşun-kalay bronz, 3) Perlitik KGDD 100-70-03 sınıfı,<br>4) KGDD (%4,0 Si), 5) KGDD (%4,7 Si), 6) KGDD (%4,0 Si, %0,4 P),<br>7) Nitrürlenmiş KGDD, 8) KGDD ( % 0,7 Mo), 9) ÖKGDD 175/25/4<br>sınıfı, 10) Su verilmiş KGDD b) Aşındırıcı aşınma deneyinde malzemelerin<br>aşınma oranları; 1) Su verilip tavllanmış orta karbonlu 1050 çeliği,<br>2) Alaşımsız beyaz (kır) dökme demir, 3) Gri dökme demir (%0,8Cr,<br>% 3Ni), 4) Beyaz (kır) dökme demir (%12 Cr), 5) Su verilip tavllanmış<br>KGDD, 6) ÖKGDD 200/155/1 sınıfı, 7) Alaşımsız 4340 çeliği..... | 37    |
| Şekil 3.3. Düşük nodül sayısına sahip numunelerin Ağırlık kaybı - Kayma süresi<br>grafığı, $v = 0,6 \text{ m s}^{-1}$ , KGDD’nin yoğunluğu $\rho = 7,1 \text{ g / cm}^3$ ; a) $F = 200 \text{ N}$ ,<br>b) $F = 300 \text{ N}$ .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 39    |
| Şekil 3.4. a) Kayma mesafesinin bir fonksiyonu olarak aşınma oranı, b) Uygulanan<br>normal yükün bir fonksiyonu olarak aşınma oranı .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 40    |
| Şekil 3.5. Nispi aşınma direnci (RAR) östemperleme sıcaklığı ile farklı yüklerde<br>değişimi.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 41    |
| Şekil 3.6. Kayma mesafesinin bir fonksiyonunu olarak Lancaster aşınma faktörü $K'$ ’nin<br>( $\text{mm}^3 \text{ N}^{-1} \text{ m}^{-1}$ ) östemperleme sıcaklığı uygulanan yük ile değişimi<br>hız $1,00 \text{ m s}^{-1}$ ; a) $f = 15,82 \text{ N}$ b) $f = 22,84 \text{ N}$ .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 42    |
| Şekil 3.7. Özgül aşınma oranının farklı yüklerde ve östemperleme sıcaklığı ile<br>değişimi.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 44    |
| Şekil 3.8. Aşınma hacmi ( $\text{mm}^3$ ) a) $315 \text{ }^\circ\text{C}$ ’de östemperleme, b) $370 \text{ }^\circ\text{C}$ ’de<br>östemperleme .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 45    |

| Şekil                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | Sayfa |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Şekil 3.9. Farklı ısı işlemlerin ve uygulanan yükün aşınma kaynaklı ağırlık kayıpları karşılaştırmaları a) 795 °C’de ara kritik östemperlenmiş çift matrisli ÖKGDD ile döküm hali, b) 815 °C’de ara kritik östemperlenmiş çift matrisli ÖKGDD ile döküm hali, c) 900 °C’de geleneksel östemperlenmiş ÖKGDD ile döküm hali ..... | 47    |
| Şekil 3.10. Aşınma oranına östemperleme sıcaklığının, sertliğin, östenit içeriğinin etkisi.....                                                                                                                                                                                                                                 | 50    |
| Şekil 3.11. Uygulanan yükün bir fonksiyonu olarak ağırlık kaybı; a) 795 °C’de östenitleme, b) 815 °C’de östenitleme, c) 900 °C’de östenitleme .....                                                                                                                                                                             | 52    |
| Şekil 3.12. Kayma hızının bir fonksiyonun olarak; a) aşınma oranı, b) sürtünme katsayısı, c) yüzey sıcaklığı .....                                                                                                                                                                                                              | 53    |
| Şekil 3.13. Uygulanan yükün fonksiyonu olarak ortalama hacimsel aşınma oranı a) metal matrisli kompozit örnekleri için, b) sünek demir örnekleri için .....                                                                                                                                                                     | 54    |
| Şekil 3.14. KGDD ve ÖKGDD’lerin ağırlık kayıpları .....                                                                                                                                                                                                                                                                         | 55    |
| Şekil 3.15. Kuru ortamda kayma sonucu elde edilen sürtünme katsayısı ve aşınma oranı değerleri .....                                                                                                                                                                                                                            | 56    |
| Şekil 3.16. ÖKGDD ve B-ÖKGDD örneklerinin aşınma faktörleri.....                                                                                                                                                                                                                                                                | 57    |
| Şekil 3.17. Numunelerin karşılaştırmalı aşınma dayanımı .....                                                                                                                                                                                                                                                                   | 58    |
| Şekil 3.18. Östemperleme süresinin bir fonksiyonu olarak özgül aşınma oranı ve sertlik, a) 25 N, b) 50 N .....                                                                                                                                                                                                                  | 60    |
| Şekil 3.19. Değişen östemperleme sıcaklığı ve süresi ile birlikte elde edilen aşınma kaynaklı ağırlık kaybı; a) 1 saat, b) 2 saat, c) 3 saat, d) 4 saat.....                                                                                                                                                                    | 61    |
| Şekil 3.20. ÖKGDD’nin mikro yapısı; a) biriktirme öncesi, b) 150 dakika biriktrime sonrası .....                                                                                                                                                                                                                                | 62    |
| Şekil 3.21. Farklı yükler altında aşınma oranları a) 0,5 kg, b) 1,3 kg, c) 2 kg .....                                                                                                                                                                                                                                           | 64    |
| Şekil 3.22. Aşınma çiftlerinin aşınma oranları .....                                                                                                                                                                                                                                                                            | 65    |
| Şekil 3.23. Farklı ısı işlemler sonucu elde edilen sertlik değerleri.....                                                                                                                                                                                                                                                       | 66    |
| Şekil 3.24. Aşınma zamanı ve uygulanan yük arasındaki ilişki .....                                                                                                                                                                                                                                                              | 67    |
| Şekil 3.25. Mikro yapı görüntüleri %2 Nital dağılayıcı ile elde edilen 280 °C’de östemperlenmiş; a) ÖKGDD, b) karbürlü ÖKGDD .....                                                                                                                                                                                              | 68    |

| Şekil                                                                                                                                                                           | Sayfa |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Şekil 3.26. Nb alaşımlı ÖKGDD numunelerinin İşlem A ve İşlem B ısıtma işlem parametrelerine göre mg cinsinden ağırlık kaybı.....                                                | 69    |
| Şekil 3.27. Kayma mesafesinin bir fonksiyonu olarak sürtünme katsayısının değişimi a) döküm hali, b) östemperlenmiş malzemeler .....                                            | 70    |
| Şekil 3.28. Farklı nitrürleme parametreleri için ağırlık kaybı; a) t = 120 dakika iken farklı nitrürleme sıcaklıkları, b) T = 640 °C’de farklı nitrürleme süreleri...           | 71    |
| Şekil 3.29. ÖKGDD numunelerinin farklı yükler altında aşınma oranları .....                                                                                                     | 72    |
| Şekil 3.30. Kuru aşınma dayanımı değerleri a) Döküm hali örnekleri için, b) Östemperlenmiş örnekler için.....                                                                   | 74    |
| Şekil 3.31. Aşınma süresinin ağırlık kaybına farklı östemperleme sıcaklıkları altındaki etkisi, a) geleneksel tek adımlı östemperleme, b) çift adımlı östemperleme .....        | 75    |
| Şekil 3.32. Farklı yükler altında karbürli ÖKGDD’nin ağırlık kaybı.....                                                                                                         | 76    |
| Şekil 3.33. Yükleme kapasitesi ve dayanıklılık ilişkisi, a) aşınma çifti ÖKGDD MoNiCa/20MnCr5G çeliği, b) aşınma çifti 20MnCr5G çeliği/20MnCr5G çeliği.....                     | 77    |
| Şekil 3.34. Farklı konsantrasyon içeriklerinde su verilen ÖKGDD öğütücü bilyelerin ağırlık kaybı .....                                                                          | 78    |
| Şekil 3.35. Aşınmış ÖKGDD mikroskop görüntüleri, a) Ni ilavesiz, b) ağırlıkça %0,22 Ni, c) ağırlıkça %0,34 Ni, Pin 31 HRC .....                                                 | 79    |
| Şekil 3.36. ÖKGDD’nin östemperleme sıcaklığıyla birlikte farklı yükler altında sertlik ve aşınma oranının değişimi .....                                                        | 80    |
| Şekil 3.37. Ağırlık kaybına a) yükün etkisi, b) zamanın etkisi, c) ısıtma işlemin etkisi .....                                                                                  | 81    |
| Şekil 4.1. Deneysel çalışmalarda kullanılan Y blok KGDD parça ve çekme numunelerinin alındığı bölgeler .....                                                                    | 83    |
| Şekil 4.2. Uygulanan ön ısıtma işlemlerin zaman-sıcak diyagramında şematik olarak gösterimi; a) Östemperleme, b) Normalizasyon, c) Tam Tavlama.....                             | 85    |
| Şekil 4.3. Östemperleme ısıtma işlem planı .....                                                                                                                                | 86    |
| Şekil 5.1. Numunelerin XRD analiz desenleri; ADI: Östemperlenmiş, DADI: Çift östemperlenmiş, NADI: Normalize Edilmiş + Östemperlenmiş ve FADI: Tam tavlama + Östemperleme. .... | 97    |

| Şekil                                                                                                                                                                                             | Sayfa |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Şekil 5.2. Tek östemperlenmiş numunede (ADI) karbonca zengin kalıntı östenit ( $\gamma_{yk}$ ) ve asiküler ferrit ( $\alpha_a$ ) plaka kalınlığı ölçüm sonuçları ....                             | 99    |
| Şekil 5.3. Tam tavlama ısı işlemi sonrası stemperlenmiş numunede (FADI) karbonca zengin kalıntı östenit ( $\gamma_{yk}$ ) ve asiküler ferrit ( $\alpha_a$ ) plaka kalınlığı ölçüm sonuçları ..... | 99    |
| Şekil 5.4. Normalleştirme ısı işlemi sonrası östemperlenmiş numunede (NADI) karbonca zengin kalıntı östenit ( $\gamma_{yk}$ ) ve asiküler ferrit ( $\alpha_a$ ) plaka kalınlığı ölçüm sonuçları   | 100   |
| Şekil 5.5. Çift östemperlenmiş numunede (DADI) karbonca zengin kalıntı östenit ( $\gamma_{yk}$ ) ve asiküler ferrit ( $\alpha_a$ ) plaka kalınlığı ölçüm sonuçları.....                           | 100   |
| Şekil 5.6. Numunelerin akma ve çekme dayanımı değerlerinin karşılaştırılması.....                                                                                                                 | 102   |
| Şekil 5.7. Numunelerin toplam % uzama değerlerinin karşılaştırılması .....                                                                                                                        | 102   |
| Şekil 5.8. Numunelerin sertlik değerlerinin karşılaştırılması .....                                                                                                                               | 103   |
| Şekil 5.9. Numunelerin kayma mesafesiyle ortalama sürtünme katsayısının değişimi ..                                                                                                               | 104   |
| Şekil 5.10. Östemperlenmiş numunelerin aşınmayla ağırlık kayıplarının karşılaştırılması (30 N yük ve 1000 m kayma mesafesi).....                                                                  | 105   |
| Şekil 5.11. Östemperlenmiş numunelerin aşınmayla ağırlık kayıplarının karşılaştırılması (30 N yük ve 1000 m kayma mesafesi).....                                                                  | 106   |

## RESİMLERİN LİSTESİ

| Resim                                                                                                                                                                                                                                                         | Sayfa |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Resim 4.1. Isıl işlemlerde kullanılan Heraeus marka ısıtım fırını .....                                                                                                                                                                                       | 84    |
| Resim 4.2. Östempereleme ısıtım işlemlerinde kullanılan Protherm marka tuz banyosu....                                                                                                                                                                        | 86    |
| Resim 4.3. Çalışmalarda kullanılan XRD cihazı .....                                                                                                                                                                                                           | 88    |
| Resim 4.4. Çekme deneylerinde kullanılan Instron 3369 üniversal test cihazı .....                                                                                                                                                                             | 90    |
| Resim 4.5. Sertlik deneylerinde kullanılan Emcotest Duravision 200 model sertlik ölçme cihazı .....                                                                                                                                                           | 90    |
| Resim 4.6. Sartorius marka hassas terazi .....                                                                                                                                                                                                                | 91    |
| Resim 4.7. Aşınma deneylerinde kullanılan UTS20 tribometre .....                                                                                                                                                                                              | 92    |
| Resim 4.8. Aşınma deneylerinde kullanılan a) pim numunesinin teknik resmi, b) pim numunesi ve c) karşılık aşınma diski.....                                                                                                                                   | 93    |
| Resim 5.1. Numunelerin ön ısıtım işlemlere göre değişen optik mikro yapıları;<br>a) Dökülmüş halde, b) Tam Tavlama, c) Normalize Edilmiş ve d) Östempereleme (F: Ferrit), (G: Grafit), (Ö: Ösferrit), (P: Perlit) .....                                       | 95    |
| Resim 5.2. Numunelerin ön ısıtım işlem+östempereleme sonrası SEM mikro yapıları;<br>a) FADI: Tam Tavlama + Östempereleme, b) NADI: Normalize Edilmiş + Östemperelemiş, c) ADI: Östemperelemiş ve d) DADI: Çift Östemperelemiş, (G: Grafit), (Ö: Östenit)..... | 96    |
| Resim 5. 3. (a-d) Östemperelemiş numunenin (ADI) SEM görüntüsü (Büyütme X1000) .....                                                                                                                                                                          | 108   |
| Resim 5.4. (a-c) Tam Tavlama + Östemperelemiş (FADI) numunenin SEM görüntüsü (Büyütme X1000).....                                                                                                                                                             | 109   |
| Resim 5.5. (a-c) Normalize Edilmiş + Östemperelemiş (NADI) numunenin SEM görüntüsü (Büyütme X1000).....                                                                                                                                                       | 110   |
| Resim 5.6. (a-c) Çift Östemperelemiş numunenin (DADI) SEM görüntüsü (Büyütme X1000) .....                                                                                                                                                                     | 111   |

## SİMGELER VE KISALTMALAR

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

### Simgeler

### Açıklamalar

|               |                         |
|---------------|-------------------------|
| $\mu\text{m}$ | Mikrometre              |
| ml            | Mililitre               |
| $\text{m}^3$  | Metreküp                |
| t             | Süre                    |
| s             | Saniye                  |
| g             | Gram                    |
| $\alpha$      | Ferit                   |
| $\alpha_b$    | Beynitik ferit          |
| $\gamma$      | Östenit                 |
| $\gamma_{yk}$ | Yüksek karbonlu östenit |
| ppm           | Milyonda bir birim      |
| rpm           | Dakikadaki devir sayısı |
| $\mu$         | Sürtünme kuvveti        |
| kgf           | Kilogram kuvvet         |

### Kısaltmalar

### Açıklamalar

|       |                                             |
|-------|---------------------------------------------|
| AC    | Döküm Hali                                  |
| ADI   | Östemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demir |
| DADI  | Çift Östemperlenmiş KGDD                    |
| FADI  | Tam Tavlanmış + Östemperlenmiş KGDD         |
| KGDD  | Küresel Grafitli Dökme Demir                |
| NADI  | Normalize Edilmiş + Östemperlenmiş KGDD     |
| ÖKGDD | Östemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demir |

## 1. GİRİŞ

Endüstriyel alaşımlar arasında dökme demir, en ekonomik fiyata en çeşitli mekanik özellikler sunar. Endüstrinin daha yüksek mukavemet ve sünekliğe sahip malzemelere ulaşma ihtiyacı, bu dökme demirlerin yapısını değiştirmek için kapsamlı araştırmaların başlamasına yol açtı. Makine, ekipman ve araçların (otomobiller, kamyonlar, traktörler, vb.) bileşenlerini oluşturmak için kullanılan modern malzemeler, yüksek sertliğe ek olarak, iyi bir tokluğa ve yüksek bir yorulma mukavemetine, ayrıca sürtünmeye karşı daha tatmin edici bir dirence sahip olmalıdır [1].

Küresel grafitli dökme demir (KGDD), sünek demir veya sfero demir olarak da bilinen dökme demir grubunun bir parçasıdır. Doğal kompozit bir malzemedir. Küresel grafitli dökme demir adı, grafitin küresel yapısından türetilmiştir ve malzemeye mukavemet ve süneklik vermek için bir çatlak önleyici olarak kullanılabilir. KGDD'ler temel olarak ferrit, perlit, ferrit-perlitik, martenzit ve östenit gibi matris fazlarının doğasına göre sınıflandırılır. Bunlar arasında, ferritik KGDD daha yüksek süneklik ve tokluğa sahipken, perlitik KGDD iyi aşınma direncine, orta sünekliğe, daha yüksek mukavemete ve darbe direncine sahiptir. Östemperlenmiş küresel grafitli dökme demir (ÖKGDD) izotermal ısıtma işlemiyle üretilen bir küresel grafitli dökme demir çeşididir. ÖKGDD, perlitik sfero döküm demirden neredeyse iki kat daha güçlüdür ve ayrıca yüksek toplam uzama ve tokluğunu muhafaza eder [2].

ÖKGDD'ler otomotiv endüstrisinde, kam milleri, krank milleri ve dişlilerin üretiminde yaygın olarak uygulanmaktadır. Bu bileşenler sıklıkla bağli hareket ve harici yük ile yüzey temasına maruz kalır. Bu nedenle, uzun hizmet ömrü ile sorunsuz çalışmayı sağlamak için ÖKGDD'nin olağanüstü aşınma direncine gereksinim duyulmuştur. Mevcut ÖKGDD uygulamalarındaki tribolojik sorunları çözmek ve ÖKGDD'yi gelecekteki tasarımlara uygun şekilde kullanmak için aşınma davranışını iyi anlamak gerekir [3]. ÖKGDD'ler, çok sert çeliklerin aşınma direncine eşit olan çok yüksek kuru kayma aşınma direncine sahiptir [1].

Üstün mekanik ve tribolojik özellikleri nedeniyle ÖKGDD'ler özellikle otomotiv parçalarının üretiminde ekonomik ve vazgeçilemez parçalar arasında yer almıştır [4-10].

Araştırmacılar, ÖKGDD'lerin mekanik ve tribolojik özelliklerini geliştirmek amacıyla;

- Alaşım elementi ilave etme [1, 11-37]
- Östenitleme sıcaklık ve süresi [17, 38-47]
- Östempereleme sıcaklık ve süresi [14, 45, 48-69]

etkileri üzerine araştırmalar yapılmıştır. Bu araştırmalarda optimum alaşım elementi ilave etme ve miktarının belirlenmesi, en iyi mekanik özellikleri sağlayan östenitleme sıcaklık ve süresi, en iyi mekanik özellikleri sağlayan östempereleme sıcaklık ve süresi bildirilmektedir [3]. Başlangıç matris mikro yapısının ÖKGDD'lerin mikro yapı ve mekanik özellikleri üzerine sınırlı sayıda araştırma bulunmaktadır [34, 70-72]. Ancak şimdiye kadar, başlangıç matris mikro yapısının veya ön ısıt işlemlerin ÖKGDD'lerin tribolojik özellikleri üzerine herhangi bir araştırmaya rastlanmamıştır. Bu nedenle, bu çalışmada, östempereleme öncesi yapılan ısıt işlemlerin (tam tavlama, normalizasyon ve östempereleme) ÖKGDD'nin mikro yapı ve mekanik özellikler ve aşınma davranışı üzerine etkisi incelenmiştir. EN-GJS-600-3 sınıf düşük alaşımlı perlitik KGDD numunelerin hepsi ön ısıt işlem olarak 900 °C'de 60 dakika östenitlenmiştir. Ardından normalizasyon için havada soğutulmuş, tam tavlama için fırında soğutulmuş ve östempereleme için 365 °C'deki tuz banyosunda 120 dakika süreyle bekletilmiştiş numuneler ayrı ayrı elde edilmiştir. Ön ısıt işlemler sonrası numunelerin hepsi östemperelelenmiştir. Bu ısıt işlem için tüm numuneler tekrardan 900 °C'de 60 dakikalık bir östenitlemenin ardından 365 °C'deki tuz banyosunda 120 dakika süreyle östemperelelenmiştir. Numunelerin mikro yapı değişimleri optik mikroskop ve tarama elektron mikroskopunda (SEM) incelenmiştir. Östemperelelenmiş numunelerin X-ışınları kırınımı (XRD) ile kalıntı östenit miktarları belirlenmiştir. Mekanik özelliklerin belirlenmesi amacıyla sertlik ve çekme deneyleri yapılmıştır. Östemperelelenmiş numuneler ASTM G99 standardında uygun olarak pin on disc yöntemiyle aşınma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Aşınmış yüzeyler SEM ile incelenerek aşınma davranışları belirlenmiştir.

Bu tez çalışması 6 bölümden oluşmaktadır. Giriş bölümünden sonra 2. Bölümde ÖKGDD'lerin mikro yapısı ve mekanik özellikleri ile bunlara etkiyen ısıt işlem sıcaklıkları ve alaşım elementlerinin etkileri incelenmiştir. 3. bölümde ise ÖKGDD'nin aşınma davranışı üzerine yapılan literatür çalışmaları özetlenmiştir. 4. bölümde yapılan deneysel çalışmalar hakkında bilgi verilmiş ve 5. bölümde ise bu çalışmalara sonucunda elde edilen

bulgular literatürde var olan bilgiler ile karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. 6.bölümde ise çalışma çıktıları özetlenmiştir





## 2. ÖSTEMPERLENMİŞ KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRLER

1950 yıllarının başlarında KGDD'nin ortaya çıkması dökme demir teknolojisindeki en önemli olaylardan bir tanesidir. Birbirinden bağımsız olarak, Ameriak Birleşik Devletleri (ABD) 'nde INCO (magnezyum işlemi temelli) ve İngiltere'deki BCIRA (seryum işlemi temelli) döküm yapısında karbonun küresel olarak kontrollü çökeltildiği teknikler geliştirmişlerdir. Bu, karbonun birçoğunun grafitin yapraksı halde bulunduğu geleneksel kır (gri) dökme demirlerle kıyaslandığında dayanımda, toklukta ve süneklikte önemli ölçüde artışa neden olmuştur [73]. 1970'li yılların ortalarına kadar ÖKGDD'nin endüstriyel uygulamaları adına ciddi sayılabilecek bir katkı olmamıştır. Finlandiya'da Kymi Kymmene Metall ve ABD'de General Motors dişlilerin üretiminde dövülmüş çelik yerine kullanılmasıyla ÖKGDD'lerin potansiyelini göstermiştir [5]. 1980'li yıllar boyunca KGDD'lerde östemperleme ısıl işleminin etkileri üzerine daha yoğun çalışmalar yapılmıştır [4, 12, 14, 74-86].

ÖKGDD'ler, endüstriyel alanda giderek daha yaygın olarak kullanılan ve diğer dökme demir sınıflarında bulunmayan mükemmel mukavemet, tokluk, aşınma direnci, korozyon direnci ve şok emilimi özelliklerine sahip olduğu bildirilmektedir. Küresel grafitli dökme demirlerin önemli özellikleri, ağırlıklı olarak asiküler ferrit (veya beynitik ferrit olarak adlandırılmaktadır) ve yüksek karbonlu östenit içeren mikro yapısı ile tanımlanır. Bu tür çok fazlı mikro yapı, beynitik ferrit ve karbürden oluştuğu çelikten farklı olduğu için ösferrit olarak adlandırılır. Belirli bir süneklik seviyesi için, ösferritin benzersiz mikro yapısı nedeniyle ÖKGDD'nin çekme dayanımı KGDD'nin iki katı olduğu bildirilmiştir [87]. ÖKGDD izotermal ısıl işlem prosesi ile üretilen bir grafit dökme demir çeşididir. Yüksek mukavemet, iyi tokluk ve mükemmel işlenebilirlik gibi olağanüstü mekanik özellikler nedeniyle geleneksel çelik dökümlere ve dövmelelere ve hatta alüminyuma bir alternatif olduğu bildirilmektedir [3].

ÖKGDD'ler standartları incelendiğinde çok yüksek akma ve çekme dayanımı değerleri ile birlikte gerekli süneklik özellikleriyle standardize edildikleri görülür Çizelge 2.1 ve Çizelge 2.2'den görülebilir.

Çizelge 2.1. ASTM A897/897M-16 standardına göre ÖKGDD'lerin sınıfları [88]

| SI birimleri                                | Sınıf 1<br>900/650/09 | Sınıf 2<br>1050/750/07 | Sınıf 3<br>1200/850/04 | Sınıf 4<br>1400/1100/02 | Sınıf 5<br>1600/1300/01 |
|---------------------------------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Çekme Dayanımı,<br>(MPa), en az             | 900                   | 1050                   | 1200                   | 1400                    | 1600                    |
| Akma Dayanımı,<br>(MPa), en az              | 650                   | 750                    | 850                    | 1100                    | 1300                    |
| 50 mm'de Uzama,<br>(%), en az               | 9                     | 7                      | 4                      | 2                       | 1                       |
| Tipik Sertlik,<br>(HBW), kg/mm <sup>2</sup> | 269-341               | 302-375                | 341-444                | 388-477                 | 402-512                 |

Çizelge 2.2. TS EN 1564:2001 standardına göre ÖKGDD'lerin sınıfları [89]

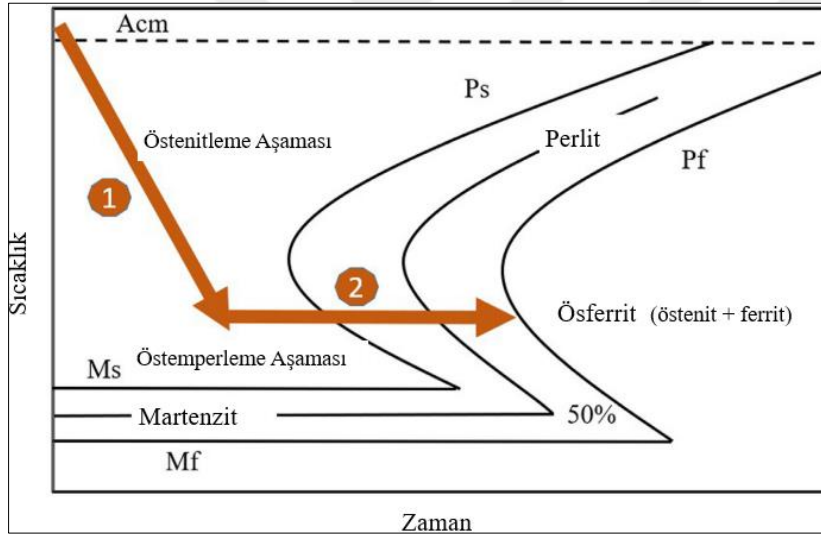
| Malzeme Gösterimi                                                                                                                                                               |        | Duvar<br>Kalınlığı <sup>a</sup><br><br>t,<br><br>(mm) | Akma<br>Dayanımı<br>Rp0,2<br>(MPa)<br>En az | Çekme<br>Dayanımı,<br>Rm,<br>(MPa)<br>En az | Uzama<br>A,<br><br>(%)<br>En az                     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|-------------------------------------------------------|---------------------------------------------|---------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| Sembol                                                                                                                                                                          | Numara |                                                       |                                             |                                             |                                                     |
| EN-GJS-800-10                                                                                                                                                                   | 5.3400 | $t \leq 30$                                           | 500                                         | 800                                         | 10                                                  |
| EN-GJS-800-10-RT                                                                                                                                                                | 5.3401 | $30 < t \leq 60$<br>$60 < t \leq 100$                 |                                             | 750<br>720                                  | 6<br>5                                              |
| EN-GJS-800-8                                                                                                                                                                    | 5.3402 | $t \leq 30$<br>$30 < t \leq 60$<br>$60 < t \leq 100$  | 600                                         | 900<br>850<br>820                           | 8<br>5<br>4                                         |
| EN-GJS-1050-5                                                                                                                                                                   | 5.3403 | $t \leq 30$<br>$30 < t \leq 60$<br>$60 < t \leq 100$  | 700                                         | 1050<br>1000<br>970                         | 6<br>4<br>3                                         |
| EN-GJS-1200-3                                                                                                                                                                   | 5.3404 | $t \leq 30$<br>$30 < t \leq 60$<br>$60 < t \leq 100$  | 850                                         | 1200<br>1170<br>1140                        | 3<br>2<br>1                                         |
| EN-GJS-1400-1                                                                                                                                                                   | 5.3405 | $t \leq 30$<br>$30 < t \leq 60$<br>$60 < t \leq 100$  | 1100                                        | 1400                                        | 1<br>Üretici ve<br>aracı arasında<br>anlaşılacaktır |
| Not İlgili et kalınlığı, ısıtıl işlem parametreleri ve alaşımın ilgili duvar kalınlığına bağlı olarak ayarlanması koşuluyla minimum% 0,2 dayanım mukavemetini etkilememektedir. |        |                                                       |                                             |                                             |                                                     |
| a 100 mm'den fazla ilgili duvar kalınlığı için, imalatçı ve alıcı, döküm numunenin tipi ve boyutu ile elde edilecek minimum değerler üzerinde anlaşmalıdır.                     |        |                                                       |                                             |                                             |                                                     |

## 2.1. Östempereleme Isıl İşlemi

Isıl işlem, küresel grafitli dökme demirde ideal ösferrit mikro yapısını elde etmenin anahtarı olarak . ÖKGDD üretmek için geleneksel östempereleme [76], kademeli östempereleme [3] ve arakritik östenitleme sıcaklıklarından östempereleme [34, 46, 47, 72, 90-106] üzerine birçok araştırma vardır. Östempereleme, esas olarak KGDD'de ösferritik yapı oluşturan bir ısıtıl işlem sürecidir ve bu işlemin amacı dayanım, darbe tokluğu ve aşınma direnci gibi özellikleri iyileştirmektir [1].

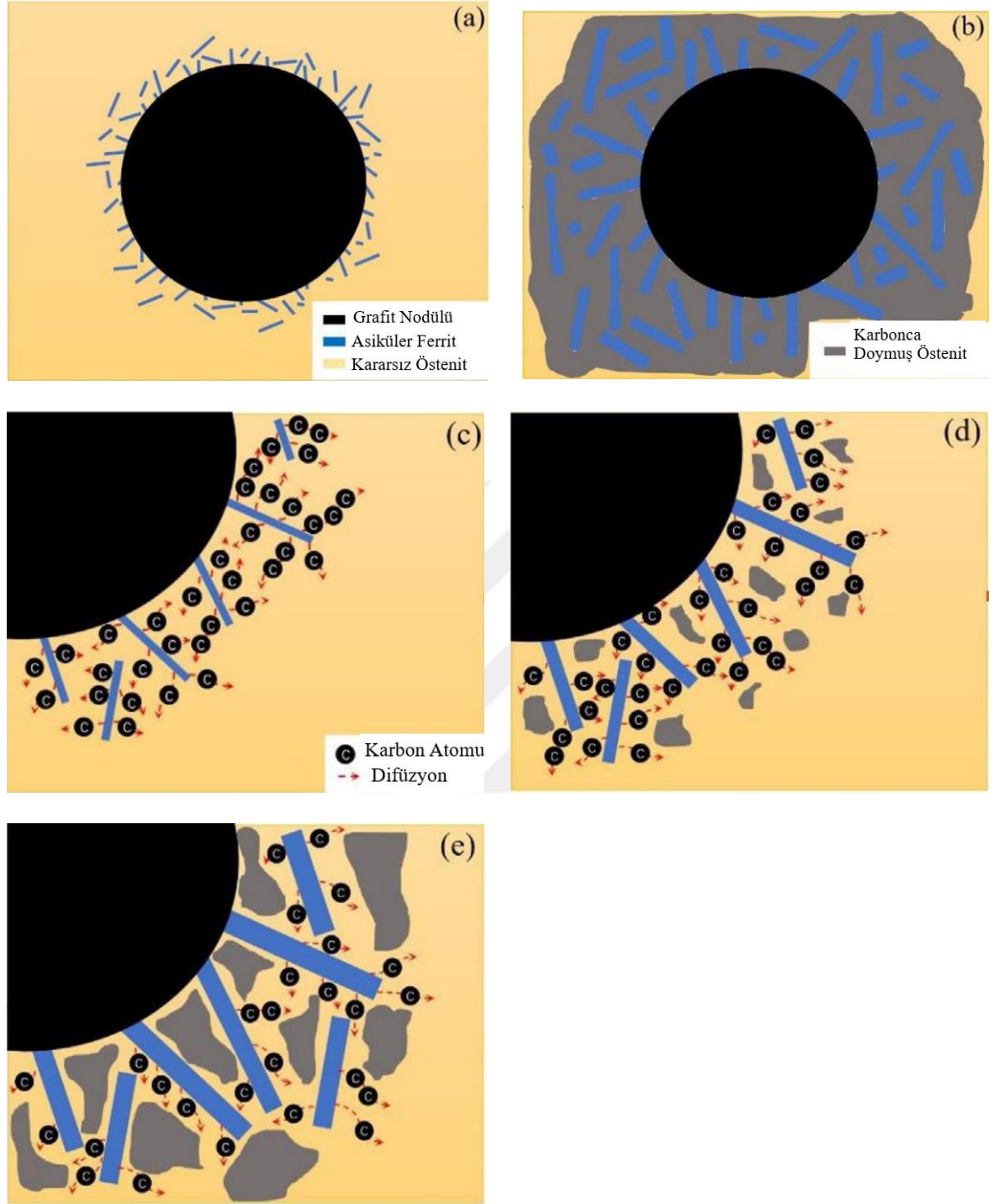
### 2.1.1. Tek adımlı östempereleme süreci

ÖKGDD üretiminde en yaygın kullanılan ve geleneksel olan yöntemdir. Bu izotermal ısıtım işlem porsesi  $A_{cm}$  sıcaklığı veya östenit dönüşüm sıcaklığı üzerindeki östenitleme işlemi ile başlatılır. Herhangi bir kaba tane içermeyen tamamen östenit bir yapı elde etmek için gereken uygun östenitleme sıcaklığı ve östenitleme süresi, oldukça kuvvetli bir biçimde özgül kimyasal kompozisyona, kesit boyutuna ve orijinal KGDD'nin sertleşebilirliğine bağlıdır. Bu esnada alaşım elementleri yapıda eşit bir şekilde dağılmalı ve bazı karbon atomları grafit nodüllerinden, onları çevreleyen östenit içine ayrışmalıdır. Östemperelemede, östenitlenmiş KGDD çok hızlı bir biçimde önceden ısıtılmış bir izotermal fırına alınır ve perlit oluşum sıcaklığı ile martenzit oluşum sıcaklığı arasındaki düşük bir sıcaklıkta su verilir ve burada belirli bir süre tutulur (Şekil 2.1.) [3].



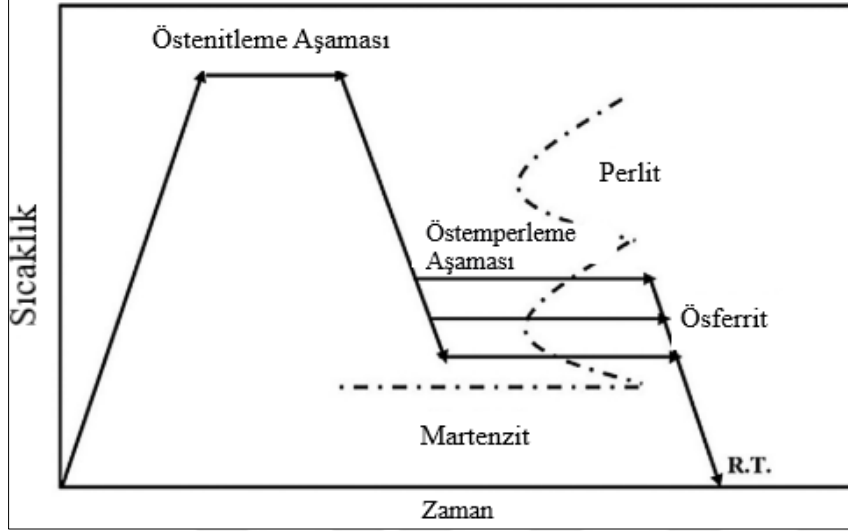
Şekil 2.1. Östenitleme ve östempereleme adımlarının faz dönüşüm eğrilerinde izlenmesi [3]

Bu izotermal işlem sırasında ufak asiküler ferrit yüksek potansiyel enerjisinden dolayı grafit nodüllerinin etrafında çekirdeklenme eğilimindedir (Şekil 2.2.a). Daha sonra ferrit plakaları büyür ve karbon atomlarının difüzyonu gerçekleştiğinden karbonca doymuş östenit oluşur. (Şekil 2.2. c-e arası). Sonunda ideal ÖKGDD mikro yapısı asiküler ferrit ve karbonca doymuş östenit yapısı meydana gelir ki bu yapı ösferrit olarak adlandırılır (Şekil 2.2.b) [3].



Şekil 2.2. Ösferritik yapının dönüşümü. (a) Ferrit plakalarının çekirdeklenmesi, (b) ösferritik mikro yapı ve (c) – (e) asiküler ferritin büyümesi ve karbonca doymuş östenitin oluşumu [3]

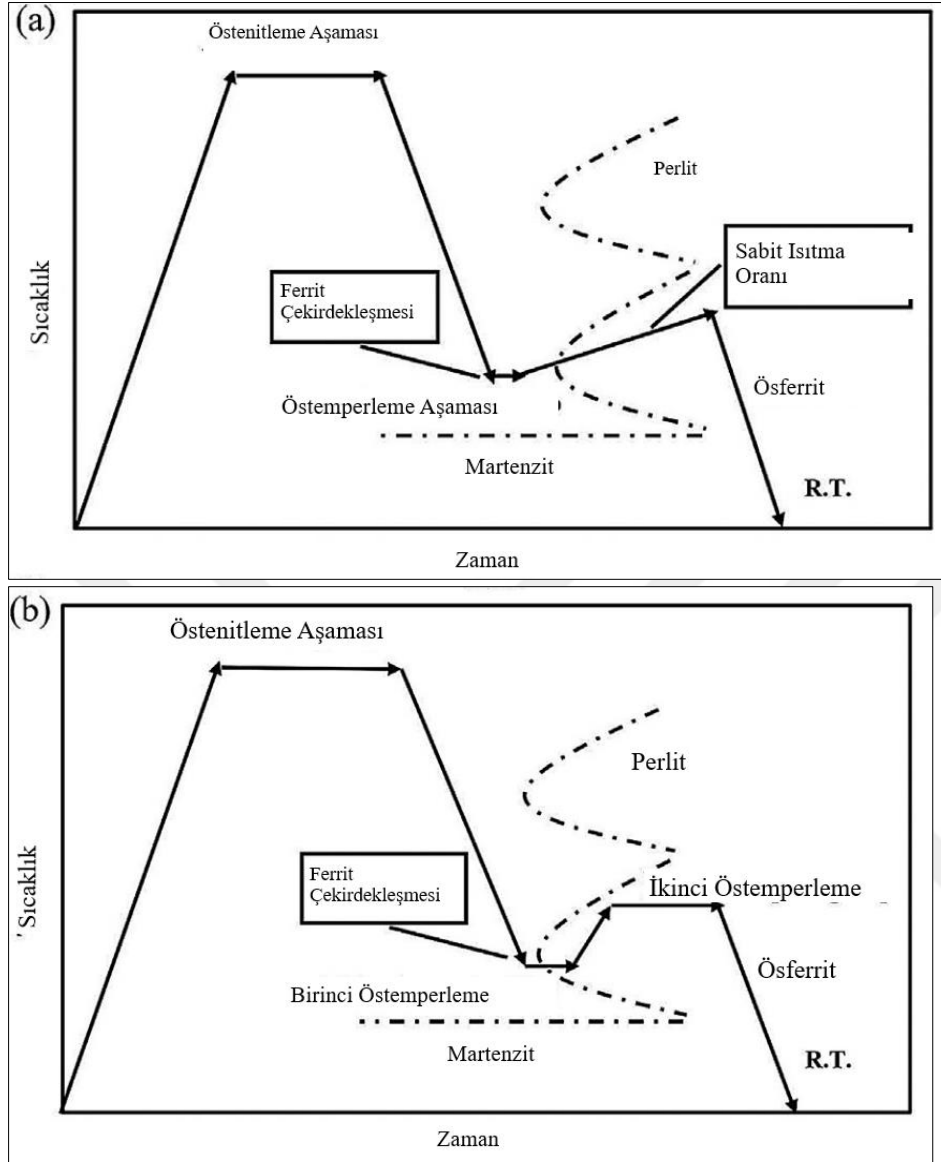
Tek aşamalı ÖKGDD üretim işleminin şematik gösterimi Şekil 2.3’de gösterildiği gibi olmaktadır.



Şekil 2.3. Tek adımlı izotermal ısıl işleminin gösterimi [3]

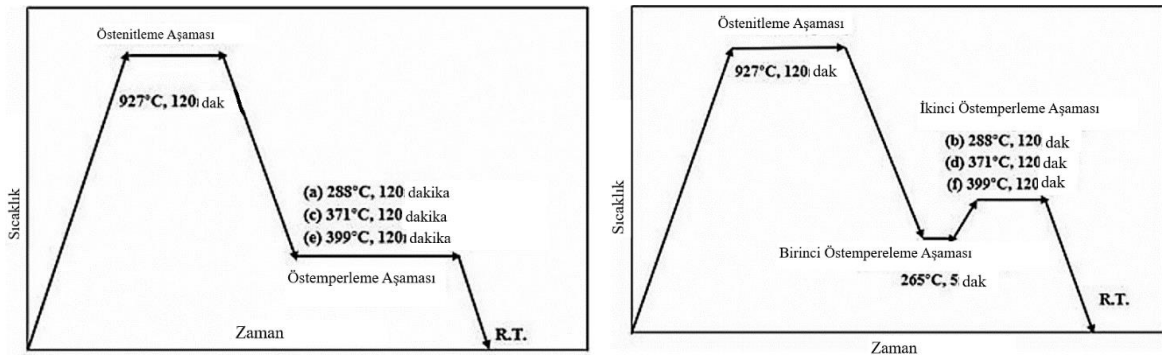
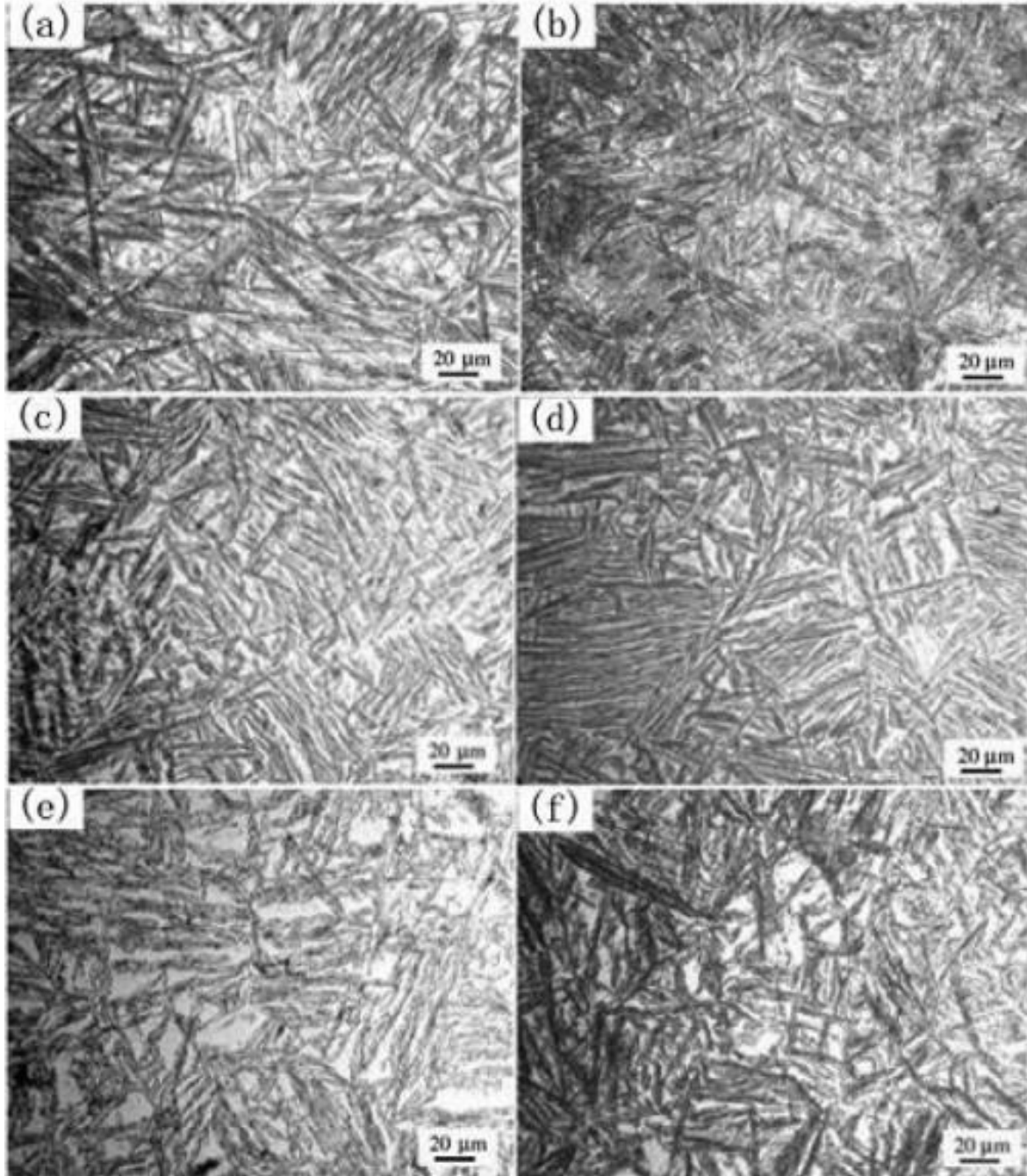
### 2.1.2. İki adımlı östempereleme süreci

ÖKGDD’nin mekanik özellikleri karbonca doymuş östenitin hacimsel oranı, kararlı östenitteki karbon içeriği ve asiküler ferritin yapısı ile belirlenmektedir [107, 108]. ÖKGDD’nin mekanik özelliklerini geliştirmek için, iki adımlı östempereleme prosesi ince iğnemsli ferrit ve daha fazla kararlı östenit elde etmek amacıyla geliştirilmiştir [109-119]. Çünkü ferritin çekirdekleşme oranı derin soğuma ile kontrol edilmektedir. Daha yüksek derin soğuma koşullarında, yüksek enerji yerlerinde daha fazla ferrit plakası çekirdekleşecektir. Bu işlemde tamamen östenitlenmiş KGDD’ye, ferritik plakaların çekirdekleşmesi için düşük östempereleme sıcaklığında su verilir. Ardından östempereleme sıcaklığı sabit bir ısıtma oranıyla artırılır veya daha yüksek östempereleme sıcaklığına sahip önceden ısıtılmış fırına ferritik plakaların büyümesi ve karbonun östenite difüzyonunu kolaylaştırmak için aktarılır. Şekil 2.4’te çift adımlı ÖKGDD üretiminin şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 2.4. Çift adımlı izotermal ısıtım işlem prosesi (a) artan ikinci östempirleme sıcaklığı (b) sabit ikinci östempirleme sıcaklığı [3]

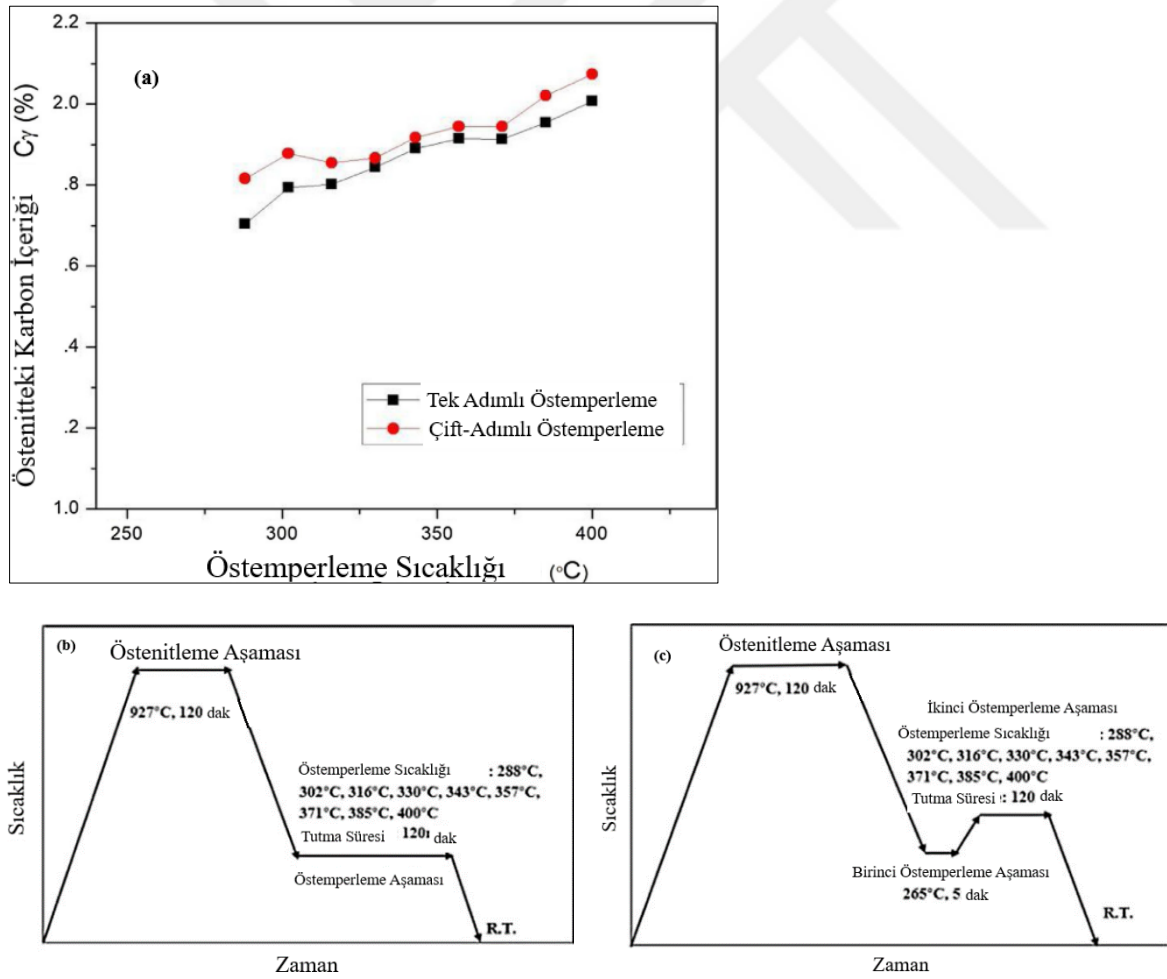
Şekil 2.5'te gösterildiği üzere tek adımlı ÖKGDD ile karşılaştırıldığında, çift adımlı ÖKGDD'nin ferritik plakaları daha incedir. Çift adımlı proseste ilk östempirleme sıcaklığı düştüğünde yapıda değişimler olmaktadır. Ferritik plakaların inceliği büyümeden ziyade çekirdeklemeye daha duyarlıdır [117].



Şekil 2.5. Tek adımlı ÖKGDD ve Çift adımlı ÖKGDD'nin ferritik plakalarının karşılaştırılması [117]

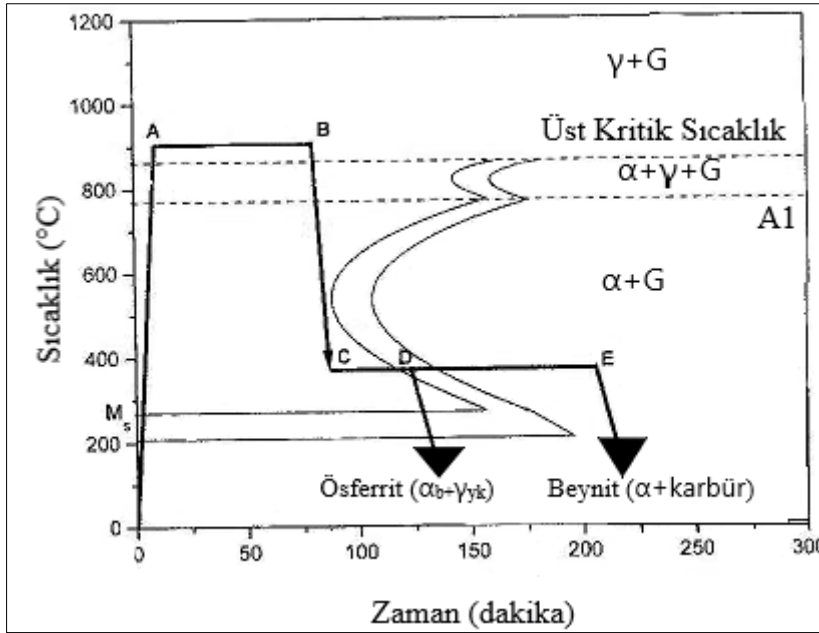
Çift adımlı ÖKGDD mekanik özellikleri bakımından ele alındığında ise sertlik, akma dayanımı ve çekme dayanımı değerleri, artan östempereleme ile birlikte artmaktadır [119, 120]. Bu, matristeki karbon atomlarının yüksek difüzyon oranları sonucu oluşan karbonca doymuş östenitten dolayıdır. Geleneksel yöntemle üretilen ÖKGDD ile kıyaslandığında daha yüksek mikro sertlik ve çekme dayanımı değerleri benzer östempereleme sıcaklık ve bekletme süreleri için elde edilir [112, 114, 118].

Şekil 2.6'da görüldüğü üzere XRD analizi sonucu çift adımlı ÖKGDD'nin kararlı östenitin karbon içeriği tek adımlı ÖKGDD'den daha yüksektir. Bir başka deyişle ösferritik yapının oluşmasıyla birlikte ilk aşama daha erken tamamlanır. Bu durumda, karbonla doyurulmuş östenit, çift adımlı ÖKGDD matrisinde beynitik yapıya ayrılmış olabilirken, tek adımlı ÖKGDD östenitindeki karbon içeriği hala artmaktadır.



Şekil 2.6. (a) Tek adımlı ÖKGDD ve çift adımlı ÖKGDD'nin kararlı östenit içeriği, (b) tek adımlı östemperelemenin kurgusu, (c) çift adımlı östemperelemenin kurgusu [117]

Östempereleme ısııl işleml Şekil 2.7’de görüldüğü üzere 3 aşamada gerçekleştirilmektedir. Bunlardan birincisi; malzeme 850 - 950 °C aralığında 1-2 saat süre ile östenitleme işlemine tabi tutulur (A-B arası). İkinci olarak perlit burnunu kesmeden (perlit oluşturmada) hızlı soğutma uygulanır (B-C arası). Üçüncü ve son adımda ise östempereleme ısııl işleml için 250 - 450 °C sıcaklık aralığında 1-4 saat izotermal bekletme (C-E arası) [121].



Şekil 2.7. Östempereleme ısııl işlemlinin şematik gösterimi [122]

C-D-E hattı boyunca yapılan izotermal bekletme östempereleme ısııl işlemlini ihtiva etmektedir. 250 - 450 °C sıcaklıklarında ve 1 – 4 saat sürenin kullanıldığı bir işlemdir. Bu sıcaklık değeri oluşacak beynitin morfolojik özelliklerini belirlemektedir. 330 °C altındaki sıcaklıklarda alt beynit oluşumu öne çıkarken 330 °C üzerindeki sıcaklıklarda üst beynit oluşumu öne çıkmaktadır. Düşük östempereleme sıcaklıklarında C difüzyonu matristeki ferritin C ile aşırı doymasına ve ferrit içerisinde ε-karbür çökmesine sebep olur. Yüksek östempereleme sıcaklıklarında serbest enerji değişimi küçük olmasına rağmen C difüzyonu hızlıdır. Bu da ferrit lamellerinin büyümesi sırasında C’nin östenitte paylaşılmasına izin verir [82].

## 2.2. Östempirleme Isıl İşleminde Dönüşüm Kinetiği

Östempirleme ısı işleminde esnasında östenitin dönüşümü bir takım araştırmacılara göre iki aşamalı olarak meydana gelmektedir [12, 76, 81, 123, 124]. Bunlar;

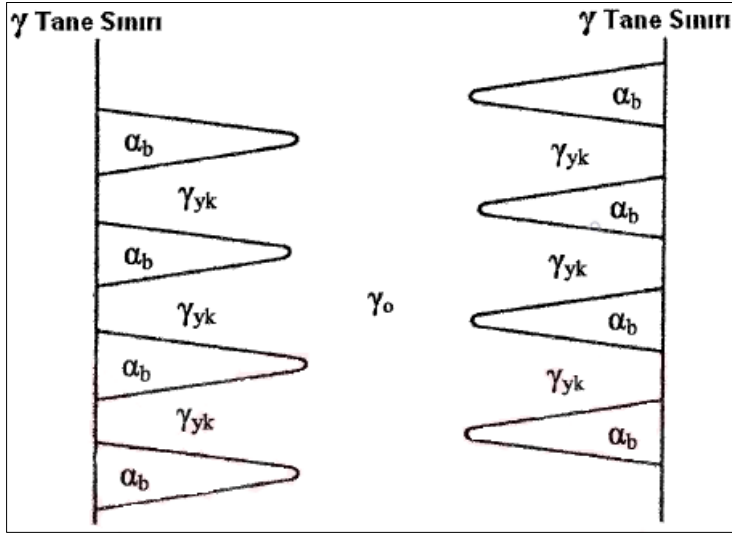
- I. Aşama:  $\gamma_0$  (östenit)  $\rightarrow \alpha_b$  (beynitik ferrit) +  $\gamma_{yk}$  (yüksek karbonlu östenit) (Ösferrit)
- II. Aşama:  $\gamma_{yk}$  (yüksek karbonlu östenit)  $\rightarrow \alpha$  (ferrit) + karbür

Östempirleme ısı işleminde esnasında östenitin dönüşümü bir takım araştırmacılara göre de üç aşamalı olarak meydana gelmektedir [82, 125-128]. Bunlar;

- I. Aşama:  $\gamma_0$  (östenit)  $\rightarrow \alpha_b$  (beynitik ferrit) +  $\gamma_{yk}$  (yüksek karbonlu östenit) +  $\gamma_d$  (dönüşmemiş östenit)
- II. Aşama:  $\alpha_b$  (beynitik ferrit) +  $\gamma_{yk}$  (yüksek karbonlu östenit)
- III. Aşama:  $\gamma_{yk}$  (yüksek karbonlu östenit)  $\rightarrow \alpha$  (ferrit) + karbür

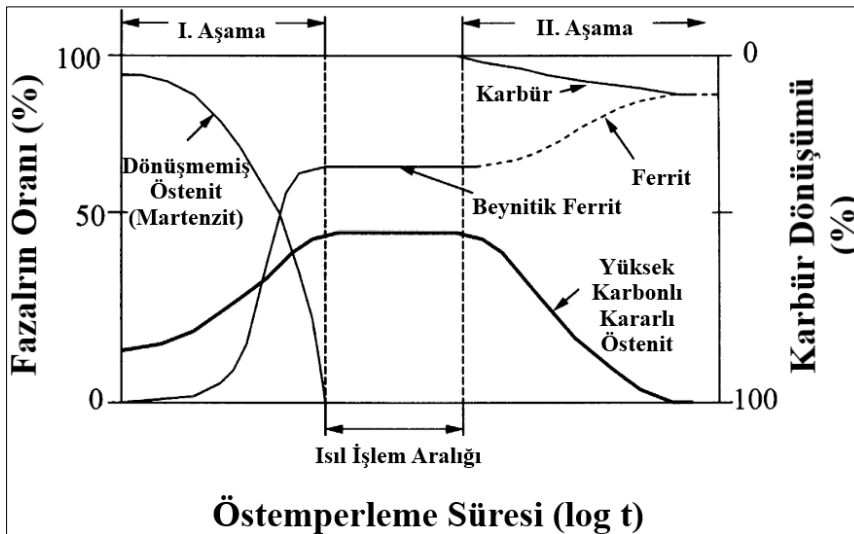
### 2.2.1. I. Aşama dönüşümü ( $\gamma_0 \rightarrow \alpha_b + \gamma_{yk}$ )

Östenitin beynitik ferrit ve karbonca zengin östenite dönüşümü bu aşamda gerçekleşir. Çeliklerde gerçekleşen dönüşümün aksine dökme demirler yüksek oranda Si içerdiğinden dolayı izotermal bekleme esnasında östenit direkt olarak beynitik ferrit + karbüre dönüşmek yerine beynitik ferrit + karbonca zengin östenite dönüşür ki bu östenit kararlı östenittir. Şekilde gösterildiği üzere östenit tane sınırlarında ilk olarak beynitik ferrit çekirdeklenir ve ardından orijinal östenite ( $\gamma_0$ ) doğru büyüme gerçekleştirir (Şekil 2.8). Ferrit içerisindeki karbon atomları östenite difüzyon olur ve östenitin karbon konsantrasyonunu artırır. Nihayetinde ferrit + yüksek karbonlu östenit mikro yapısı “ösferrit” olarak adlandırılır. Orijinal östenitin tamamen ösferrite dönüşümü beklenmeden malzeme oda sıcaklığına soğutulursa orijinal östenit yetersiz karbon içeriğinden dolayı ösferrite dönüşemeyerek martenzit oluşturur [12, 14, 16, 17, 19-22, 43, 56, 57, 76, 77, 81, 82, 122, 125-130].



Şekil 2.8. I. Aşamada östenitten beynitik ferrit ve karbonca zengin östenit (ösferrit) oluşumunun şematik gösterimi [76]

Bu aşamanın sonunda mikro yapıda dönüşmemiş ösferrit (martenzit) kalmadığı kabul edilmektedir. Östempereleme süresi arttıkça dönüşmemiş ösferrit (martenzit) miktarı azalırken karbonca zengin östenit (kararlı östenit) ve beynitik miktarları artmaktadır. “İşlem aralığı” terimi yapıda dönüşmemiş östenitin (martenzit) kalmadığı ve beynitik ferrit + karbonca zengin östenitin (ösferrit) en yüksek olduğu östempereleme süre aralığına verilen isimdir. Östenitleme sıcaklık ve süresi, östempereleme sıcaklık ve süresi, alaşım elementlerinin etkisi gibi faktörler bu dönüşmemiş östenit (martenzit) miktarını belirlemede önemli rol oynamaktadırlar (Şekil 2.9) [12, 14, 16, 19-22, 43, 56, 57, 77, 81, 82, 123, 125-130].



Şekil 2.9. Östempereleme süresine bağlı olarak fazların miktarlarındaki değişim [130]

### 2.2.2. II. Aşama dönüşümü ( $\gamma_{yk} \rightarrow \alpha + \text{karbür}$ )

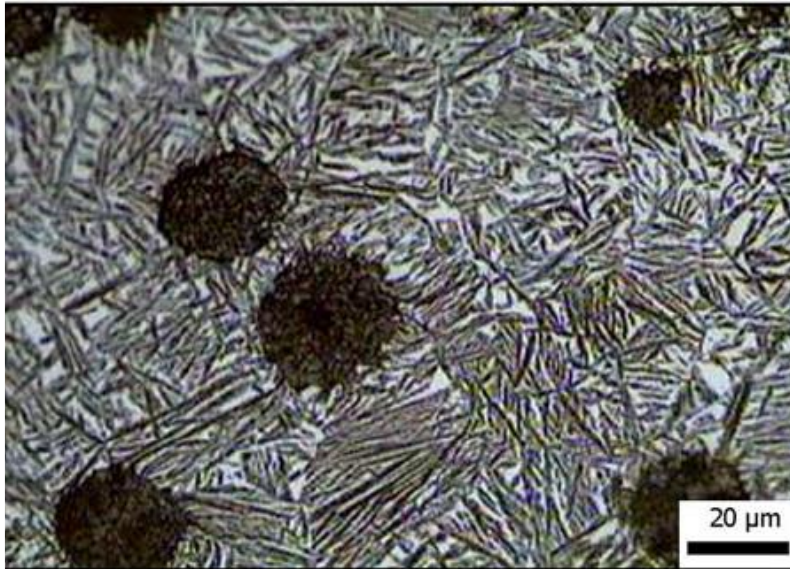
Karbonca zengin östenitin (kararlı östenit) ferrite ve karbüre dönüştüğü aşamadır. Östemperleme süresinin artmasıyla difüzyon işlemi için harcanan süre de artacağından karbonca zengin östenitteki C atomları karbüre dönüşür ve karbon içeriği azalan ösferrit yapısı ferrite doğru bozunmaktadır. Östemperleme süresi arttıkça karbonca zengin östneit miktarı azalır ve ferrit ve karbür miktarı artar. Karbür oluşumu tokluk ve süneklik üzerinde olumsuz etkisi de olmaktadır [12, 16, 17, 19-22, 43, 56, 76, 77, 81, 82, 85, 123-131].

Beynitik bölgede östenitin izotermal dönüşümü iki aşamaya ayrılabilir. İlk aşamada, östenit asiküler ferrit ve yüksek karbonlu östenite ayrışır. İlk aşamada reaksiyon sırasında düşük C içerikli östenit, oda sıcaklığına soğutulduğunda martenzite dönüşür. İkinci aşama sırasında, yüksek karbonlu aşırı doymuş östenit ayrıca beynitik ferrit ve karbürlere ayrışır. Aşama I reaksiyonundan gelen martenzit ve aşama II reaksiyonundan gelen karbür, süneklik ve tokluğa zararlıdır. Sonuç olarak, östemperlenmiş demirin istenen mikro yapısı, ferrit ve yüksek karbonlu östenittir, bu yapı genellikle ösferrit olarak adlandırılır. Bu istenen ösferrit mikro yapısı, aşama I sonu ile aşama II reaksiyonlarının başlangıcı arasındaki östemperleme zaman aralığında elde edilir. Bu istenen ösferrit mikro yapısına sahip demir, en uygun mekanik özellikleri gösterir. Tüm östemperlenmiş numunelerde, östenitleme ve östemperleme sıcaklıkları sabitken östemperleme süresi arttıkça nihai çekme dayanımında % 0,2 artma kaydedilmiştir. Östemperlenmiş numunelerden iyi özellikler 90 dakika ve 120 dakika sürelerde östemperleme ısı işlemi uygulananlarda elde edilmiştir. Beynitik bölgede (aşama I) östenitin izotermal dönüşümü sırasında kısa östemperleme sürelerinde bu özelliklerin düşük değerleri, genellikle östemperleme sıcaklığından oda sıcaklığına soğutma sırasında düşük karbonlu, reaksiyona girmemiş östenit alanlarında oluşan martenzit ile ilişkili kırılganlığa bağlanmaktadır. Bu martenzit, hücreler arası sınırdaki sürekli yollarda oluşur. Kısa östemperleme sürelerinde düşük sünekliğe bir başka katkı, termal olarak kararlı ancak mekanik olarak kararsız olan herhangi bir östenitten olabilir. Deformasyon sırasında bu alanlar martenzite dönüşebilir. Östemperleme süresinin arttırılması, daha sünek ösferritik yapının sert martenzitin yerini almasına neden olmuştur. Sonuç olarak, tüm östemperleme ısı işlemi uygulanmış numunelerde sertlik azalmıştır. Kısa östemperleme sürelerindeki (aşama I) yüksek sertlik değerleri, sert martenzit fazının varlığına bağlanabilir. Östemperleme ısı işlemi uygulanmış numunelerdeki sertliğin sadece östemperleme süresine değil, aynı zamanda

ösferritin hacimsel oranı veya proötektoid (ötektoid öncesi) ferritin hacimsel oranına da bağlı olduğu bildirilmektedir. Sabit östemperleme süresinde sertlik değeri, artan ösferrit hacimsel oranı ile veya azalan yumuşak pro-ötektoid ferritin hacimsel oranı ile artmıştır [92].

### 2.3. Mikro Yapı

ÖKGDD'lerin matris mikro yapısı Şekil 2.10'da gösterildiği üzere, ösferritten oluşmakta olup bu yapı, asiküler ferrit ve karbonca zengin kalıntı östenit karşımından oluşmaktadır [3]. Kalıntı östenit ve ferrit miktarları ve kalıntı östenitin karbon konsantrasyonu gibi ÖKGDD'nin mekanik ve tribolojik özelliklerini doğrudan etkilemektedir [132].



Şekil 2.10. ÖKGDD'nin tipik mikro yapısı (900 °C'de 90 dakika östenitlenmiş, 365 °C'de 60 dakika östemperlenmiş) [26]

### 2.4. ÖKGDD'lerin Mikro Yapı ve Mekanik Özelliklerini Etkileyen Faktörler

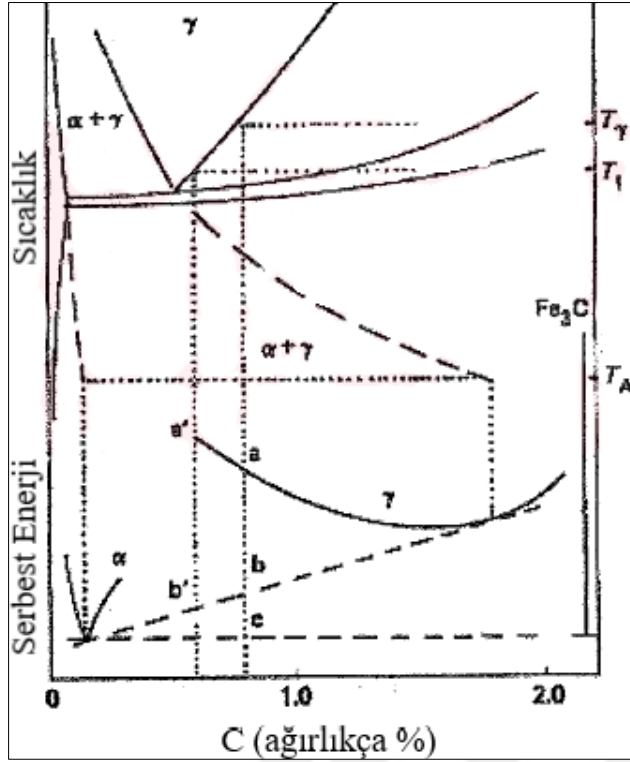
ÖKGDD'lerin mekanik özelliklerini matris mikro yapıları doğrudan etkilemektedir [3]. Özellikle ösferritik yapıdaki karbonca zengin kalıntı östenitin miktarı ve içerdiği karbon miktarı mekanik özellikler üzerinde çok önemli bir etkiye sahiptir [133]. Ösferritik yapıdaki karbonca zengin kalıntı östenitin miktarı ve içerdiği karbon miktarı ise KGDD'in içerdiği alaşım elementleri, östenitleme sıcaklık ve süresi, östemperleme sıcaklık ve süresi gibi parametreler ile kontrol edilebilmektedir.

### 2.4.1. Östenitleme sıcaklık ve süresinin etkisi

KGDD’lerde östenitleme sıcaklık ve süresi çeliklerin aksine çok önemlidir. Çünkü östenitleme ısı işlemi östenitin C içeriğini belirlemektedir [3]. KGDD’in içerdiği alaşım elementleri östenitleme sıcaklık ve süresindeki değişimi etkilemektedir [3]. Östenitleme sıcaklığının ( $T_\gamma$ ) artması östenitin içerdiği C oranını artırır. Eş. 2.1’deki ampirik (deneysel) formül bu ilişkiyi ifade etmektedir [77].

$$\% C_\gamma = (T_\gamma / 420) - 0,17 \text{ Si} - 0,95 \quad (2.1)$$

Ötektik olarak katılaştan dökme demirler için ergiyik dağılımı üniform değildir. Yani etkin bir ergiyik segregasyonu vardır. Karbon atomlarının bölgesel eriyebilirliği değişebilir ve bu değişen karbon atomu kinetikleri karbonun difüzyonunu artırır [82]. Östenitleme süresi bu aşamada önemli hale gelir. Çünkü malzemenin matrisinde C homojenliği oluşması için yeterli süre verilmelidir. Bu süre perlitik dökme demirde ferritik dökme demirdekenden daha kısadır. Bir başka deyişle ferritik demirin matrisinde C homojenliği sağlanabilmesi için gereken difüzyon mesafesi artmaktadır. Düşük östenitleme sıcaklıkları I. aşama dönüşümünün başlangıç hızını artırır ve zamanı kısaltır. Bu etki Şekil 2.11’de serbest enerji - kompozisyon diyagramının incelenmesi ile anlaşılabilir. Yüksek östenitleme sıcaklığı olan  $T_\gamma$ ’nin düşük östenitleme sıcaklığı olan  $T_1$ ’e düşmesi östenit içerisindeki karbon içeriğini azaltıp ve II. aşama dönüşümü için büyük bir itici güç ( $a' - b'$ ) oluşturur. Bu, I. aşama dönüşümündeki ferritin çekirdeklenmesini artırırken aynı zamanda başlangıç dönüşüm hızını artırır ve büyük bir karbon gradyanı meydana getirir. Bu gradyan ise C atomlarının difüzyonuna devam etmesine sebep olur ve ferrit plakalarının büyümesini hızlandırır. Düşük östemperleme sıcaklıklarında bu etki daha belirgindir. Malzemenin matrisindeki C içeriği düşen östenitleme sıcaklıkları ile birlikte düşmektedir. Bu da dayanımı azaltırken daha sünek bir yapının oluşmasını sağlamaktadır [82].



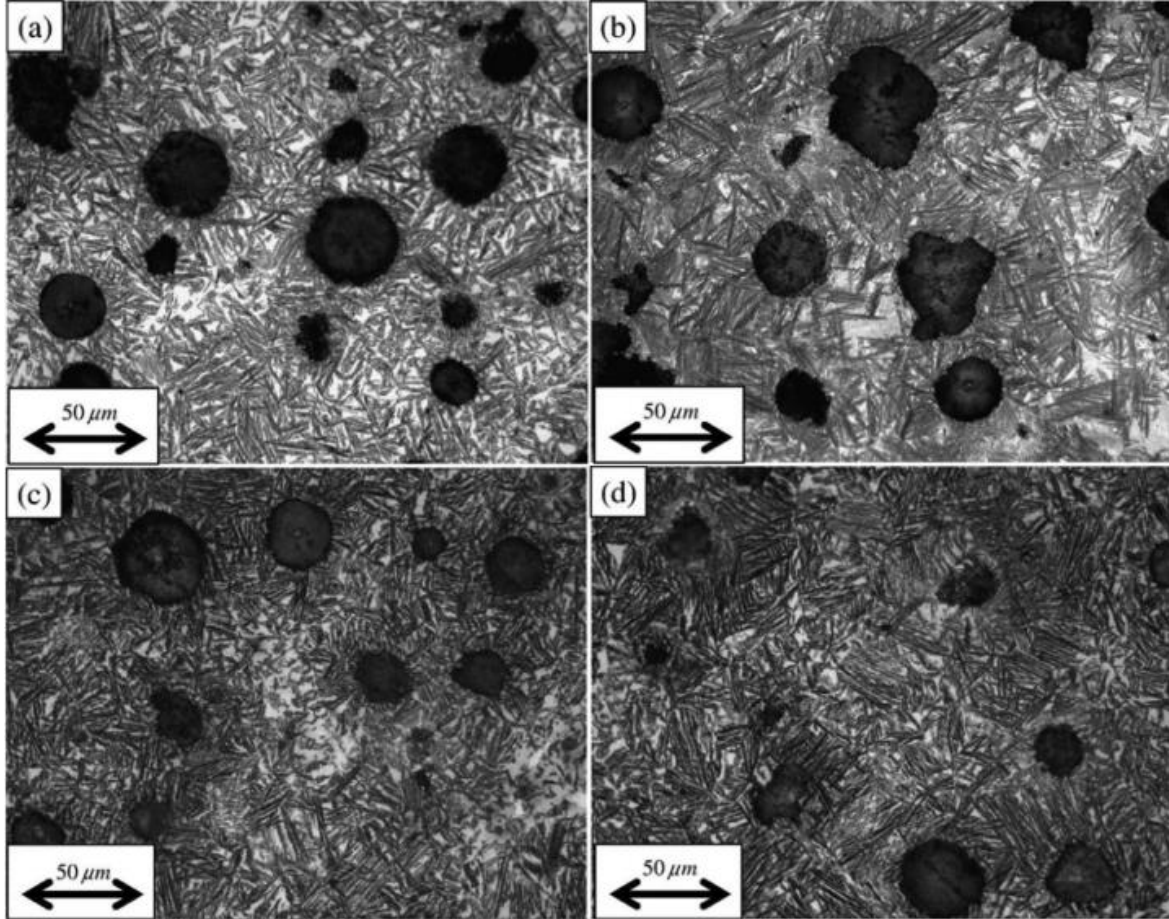
Şekil 2.11. Fe-C-%2Si faz diyagramında östempereleme esnasında serbest enerji değişimi [82]

KGDD'ler Fe-C faz diyagramının ( $\gamma$  + grafit) bölgesinde östenitlenirler. Belirlenmiş östenitleme sıcaklığındaki östenitin içerisindeki karbon içeriği, östenit içerisindeki karbonun maksimum çözünübilirliğinden ileri gelmektedir. Östenitleme sıcaklığı ile birlikte östenit içerisindeki karbonun artan içeriği ösferrit oluşumunu geciktirir [134]. Östenitleme sıcaklığı maksimum süneklığe ulaşmak için yalnızca östempereleme sıcaklık ve zamanını etkilemez. Aynı zamanda sünekliliğin seviyesini, darbe tokluğunu ve işlem penceresinin boyutunu önemli derecede etkiler [3]. Çünkü östenitleme sıcaklığı dönüşüm öncesi östenit fazının karbon içeriğini belirler. Ve akabindeki östempereleme ısı işlemi de kararlı hale gelmiş östenitin karbon içeriğini belirler [58].

#### 2.4.2. Östempereleme sıcaklık ve süresinin etkisi

ÖKGDD'ler ile ilgili çalışmaların büyük çoğunluğunda östempereleme sıcaklık ve süresinin mikro yapı ve mekanik özellikler üzerine etkisi araştırılmıştır [14, 45, 48-69]. Asiküler ferritin morfolojisi, stabil östenitin hacimsel oranı ve östenitin karbon içeriği östempereleme sıcaklık ve süresine bağlıdır. Aynı zamanda ÖKGDD'nin son mikro yapı özellikleri bu parametreler ile etkili bir biçimde kontrol edilmektedir. [48-55, 135].

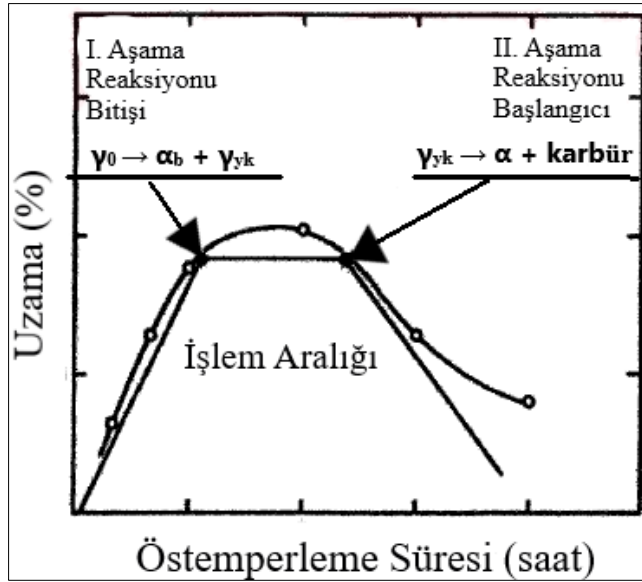
Düşük östempereleme sıcaklığı ve düşük tutma sürelerinde iğnemsî ferrit plakalaları elde edilirken, östempereleme sıcaklığı ya da süresinin artırılmasıyla kabalaşır ve tüysü ferrit halini alır. Bu kristal yapıdan daha fazla karbon atomunun yüksek oranda dışarı difüzyon olmasının sonucudur (Şekil 2.12).



Şekil 2.12. Östempereleme sıcaklığının artması ile ösferritin mikro yapısal evrimi (östenitleme sıcaklığı 910 °C, tutma süresi 90 dakika) (a) östempereleme sıcaklığı 350 °C, tutma süresi 90 dakika, (b) östempereleme sıcaklığı 370 °C, tutma süresi 90 dakika, (c) östempereleme sıcaklığı 390 °C, tutma süresi 90 dakika, (d) östempereleme sıcaklığı 410 °C, tutma süresi 90 dakika [66]

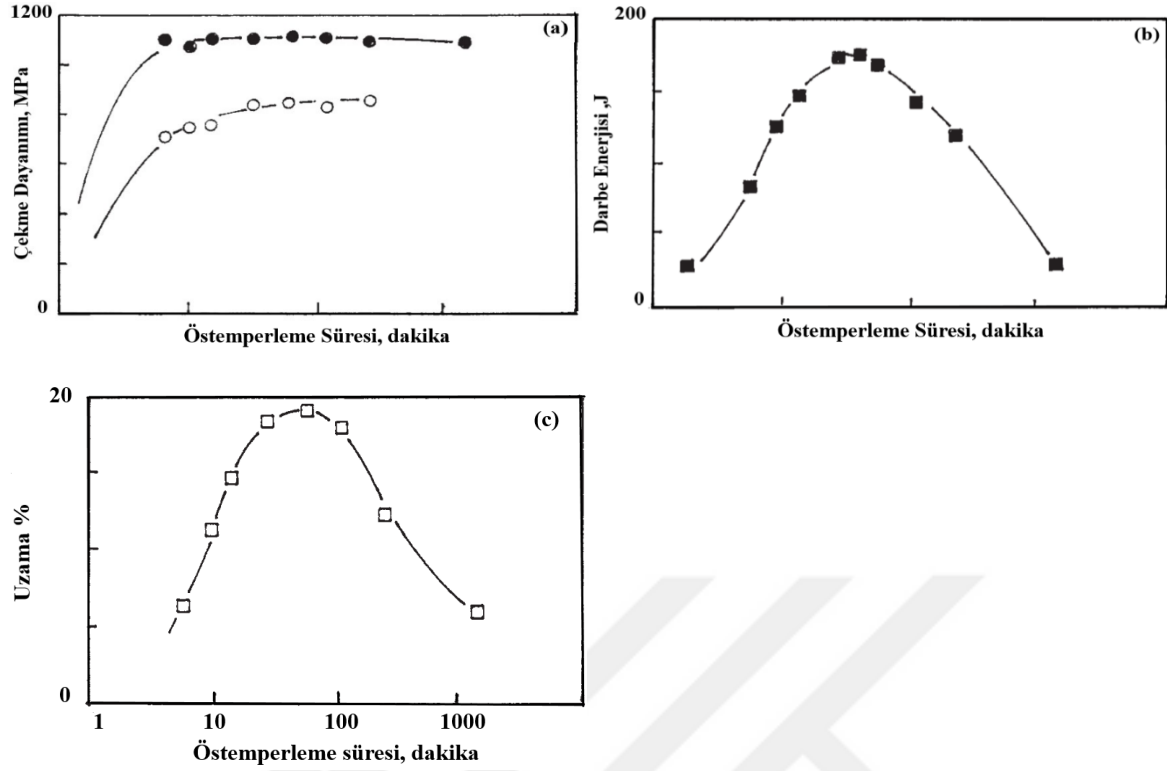
Ferrit plakalarının morfolojisinin değiştirilmesinin yanında ÖKGDD'nin mekanik özellikleri de değiştirilebilir. Artan östempereleme sıcaklığı veya artan tutma süresiyle birlikte tek adımlı östempereleme ısıl işlemiyle üretilmiş ÖKGDD'nin sertlik ve çekme dayanımı düşer, süneklik artar. Bu, daha kararsız östenitin izotermal ısıl işlem sırasında yüksek karbon içerikli asiküler ferrit ve östenite dönüşmesi ve nihai ÖKGDD matrisinde daha az martenzit oluşması şeklinde yorumlanabilir [48, 50].

Östempereleme süresi kısa tutulursa I. aşamada (Şekil 2.7 C-D arası ve Şekil 2.13) östenit karbonca zenginleşir (yaklaşık %2 C). Yapı kararlı hale gelemeden önce oda sıcaklığına soğutma yapılırsa östenitin büyük bir kısmı yetersiz karbon içeriğinden dolayı martenzite dönüşür. Bu işlem, sertliği yüksek ancak süneklik ve tokluğu düşük bir malzeme oluşmasına sebep olacaktır. Uzun östempereleme sürelerinde ise (Şekil 2.7 D-E arası ve Şekil 2.13) östenit ferrit ve karbür dönüşür. Bu da malzemenin tokluğunu ve sünekliğini tekrar düşürür. Şekilde gösterildiği üzere “işlem aralığı” terimi, yapı tamamen ösferritik iken (I. aşama bitip II. aşama dönüşümünün başlangıcı) optimum mekanik özellikler sağladığı yeri tanımlamaktadır (Şekil 2.13) [12, 17, 19-22, 62, 75, 76, 82, 125-128].

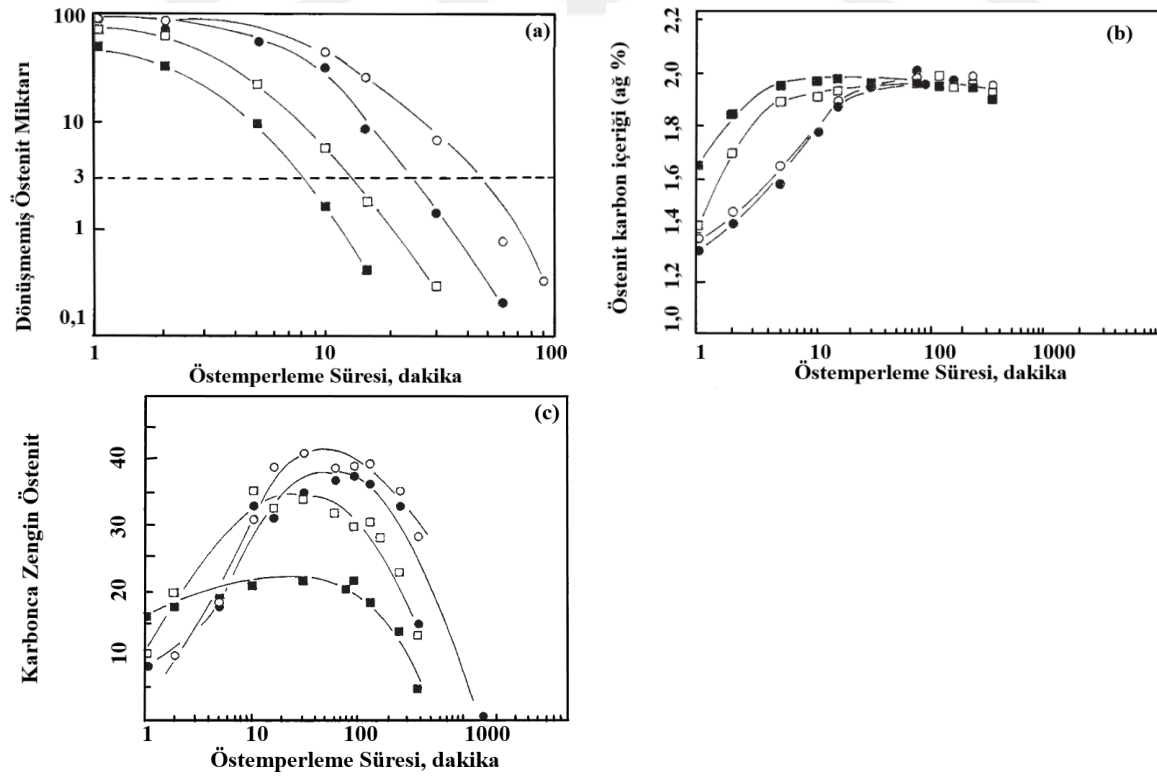


Şekil 2.13. Östempereleme süresine bağlı olarak % uzamanın değişimi ve östempereleme esnasındaki dönüşüm aşamalarının gösterimi [76]

Östempereleme süresinin artmasıyla, I. aşama dönüşümde süneklik, tokluk ve dayanım artarken II. aşama dönüşümüne geçişin yapılmasıyla birlikte süneklik ve tokluk düşer, dayanım ise bir miktar artar [19]. Bu durum Şekil 2.14'te gösterilmiştir. Bunun nedeni, beynitik ferrit + yüksek karbonlu östneit (kararlı östenit) miktarının I. aşamada ilerleyen östempereleme süresi ile birlikte artmasıdır. Karbür çökmesinin gerçekleştiği II. aşamada ise süneklik ve tokluk düşerken sertlik ve dayanım bir miktar artar (Şekil 2.15) [20].

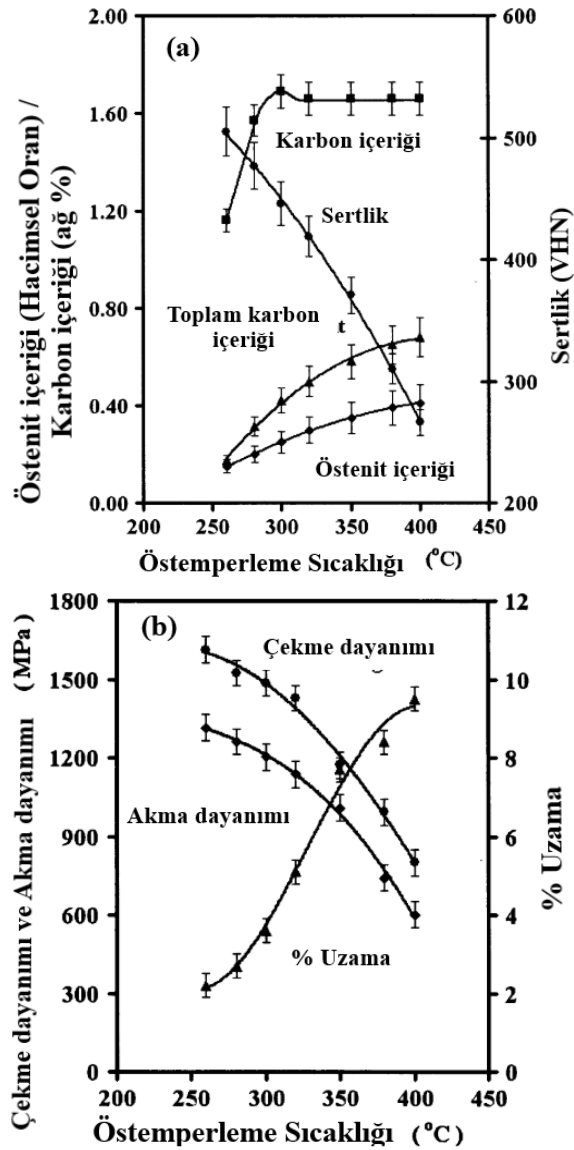


Şekil 2.14. Östemperleme süresine bağlı olarak mekanik özelliklerin değişimi a) Çekme Dayanımı, b) Darbe Enerjisi, c) % Uzama [19]



Şekil 2.15. Östenitleme sıcaklığı ve östemperleme süresine bağlı olarak; a) dönüşmemiş östenit (martenzit), b) östenit karbon içeriği, c) karbonca zengin östenit (kararlı östenit) miktarlarının değişimi [20]

Yüksek östempereleme sıcaklıkları sonucunda oluşan ösferritn (beynitik ferrit + kararlı östenit) morfolojisi kabadır [3]. Ama oluşan kararlı östenit miktarı düşük östempereleme sıcaklıkları sonucunda elde edilene göre daha fazladır. Bu da dayanım ve sertliği düşürürken süneklik ve tokluğu artırmaktadır. Bu olayın şematik gösterimi Şekil 16'da gösterilmektedir. Düşük östempereleme sıcaklıkları sonucunda oluşan ösferrit (beynitik ferrit + kararlı östenit) ile birlikte yapıda düşük oranda kararlı östenit de bulunmaktadır. Bu da yüksek dayanım ve sertlik sağlarken düşük süneklik sunmaktadır [135].



Şekil 2.16. Östempereleme sıcaklığına bağlı olarak; a) sertlik, karbon içeriği, toplam karbon içeriği ve östenit içeriğinin, b) çekme dayanımı, akma dayanımı ve % uzamanın değişimi [135]

Kinalır (1997), 900 °C'deki östenitlemeyi takiben 275 °C, 350 °C ve 425 °C'de östemperleme ısı işlemi uygulanmış numuneleri incelemiştir . Östemperleme sıcaklığı arttıkça çekme dayanımında ve sertlikte azalmayla beraber darbe tokluğunda bir artış olduğunu bildirmektedir. Östemperleme sıcaklıklarında uzun süre bekletilen numunelerin ikincil reaksiyon sonucunda kırılğanlık kazanarak toklukların düşüş yaşandığı bildirilmektedir. Yüksek östemperleme sıcaklıklarında oluşan beynit, ferrit ve karalı hale gelmiş östenitten meydana gelmektedir. Bu östenitin malzemeye yüksek tokluk değerini verdiği bildirilmektedir [58].

Coşkun (1999), östemperleme parameterlerinin ÖKGDD'nin mekanik özellikler üzerine etkisini araştırmıştır. İki farklı döküm numuneler için östemperleme sıcaklığı ve süresi değişkenler olarak belirlenmiştir. 900 °C'deki 1 saat östenitleme sonrası, 350 °C (60 dakika, 120 dakika, 180 dakika, 240 dakika), 375 °C (60 dakika, 90 dakika, 120 dakika, 180 dakika), 400 °C (15 dakika, 30 dakika, 45 dakika, 60 dakika) ve 425 °C (5 dakika, 15 dakika, 30 dakika, 45 dakika) sıcaklıklarında östemperlenmiştir. Artan östemperleme sıcaklığı ile çekme dayanımında düşüş belirlenmiştir. Yüksek karbolu kalıntı östenit, ÖKGDD'nin darbe tokluğunu artıran en önemli bileşen olduğu bildirilmektedir [59].

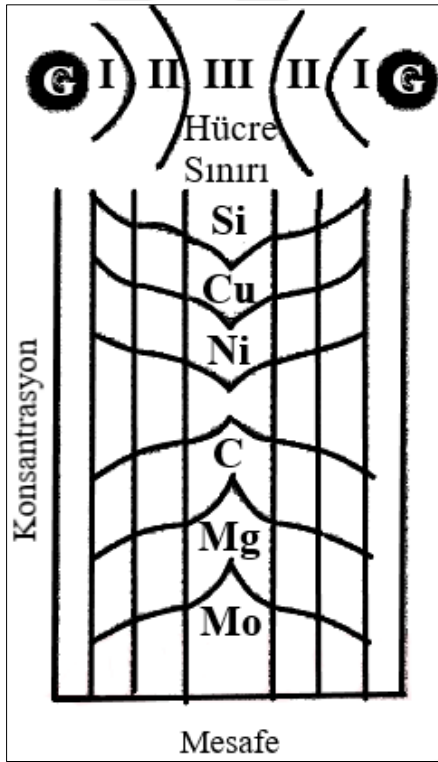
Keleş (2001), KGDD'in östemperleme ısı işlem parametrelerinin mekanik özellikler üzerine etkisini çalışmıştır. 850 °C ve 950 °C sıcaklıklarında 1'er saat östenitlemenin ardından numuneler 375 °C ve 450 °C sıcaklıklarında 10 dakikadan 2 saate değişen sürelerde tuz banyosunda östemperlenmiştir. ÖKGDD'nin artan östenitleme sıcaklığı ile dayanım ve sertlik düşerken darbe tokluğunun arttığı belirlenmiştir. Aynı sonuçlar östemperleme sıcaklığının artması ile de elde edilmiştir. Östemperleme zamanının dayanıma etkisinin olmadığı veya çok az olduğu, bununla birlikte artan östemperleme süresiyle tokluğun artarken sertliğin düştüğünü bildirmektedir [63].

#### **2.4.3. Alaşım elementlerinin etkisi**

KGDD'lerde üretim esnasında ilave edilen magnezyum içeriğindeki artış, küresel grafitli dökme demirin grafit nodüllenmesini artırmaktadır. Si ve Cr matriste perlit oluşumunu baskılar ve ve ferrit oluşumuna sebep olmaktadır. [2]. Diğer dökme demirler gibi KGDD'ler de ötektik katılaşma sergilediği için matrsite alaşım elementlerinin segregasyonu meydana gelmektedir. Grafit ile ötektik hücre sınırı arasında alaşım

elementlerinin konsantrasyonu Şekil 2.17’de görüldüğü gibi değişmektedir [78, 79]. Şekil 2.17’de gösterilen I, II ve III ile belirtilen bölgeler şu şekilde yorumlanmaktadır

- I no’lu bölge; grafit çevresini ifade eder. Bu bölgede Si, Ni ve Cu konsantrasyonu yüksektir ve segregasyonu burada oluşturur. Mn konsantrasyonu ise yok denecek kadar azdır [136].
- II no’lu bölge; alaşım elementlerinin tamamının konsantrasyonu farklılık göstermektedir [136].
- III no’lu bölge; ötektik hücre sınırındır. Bu bölgede Si ve Cu konsantrasyonu düşüktür. Fakat Mn, Mo, Cr ve P açısından oldukça zengindir [136].



Şekil 2.17. KGDD’de ötektik katılaşma bölgesinde elementlerin konsantrasyon değişimi [79]

### Karbon ( C )

Ticari küresel grafitli dökme demirde karbon oranı % 3-4 arasında değişir, ancak arzu edilen karbon genellikle daha dar limitler içindedir. Grafit kürelerin sayısı, karbon yüzdesine doğrudan bağlıdır, bir başka deyimle karbon yüzdesi arttıkça grafit küre sayısı da artar, karbon oranındaki artış ayrıca akışkanlık ve beslenme özelliklerini de iyileştirerek

dökülebilirlik kabiliyetini artırır. Karbon, ötektik hücre sınırlarında yüksek olması nedeniyle tavlama esnasında östenit, ötektik hücre sınırından tercihli östenitlenir [79].

### Mangan ( Mn )

Ötektik hücre sınırlarındaki yüksek Mn varlığı östenitin burada tercihli çekirdeklenmesini sağlar [136]. KGDD'lerin sertleşebilirliğini iyileştirir. %0,25'ten büyük olduğu zaman I. aşama dönüşümünü önemli ölçüde geciktirir [16]. Östenit kararlaştırıcı bir element olması nedeni ile ötektik hücre sınırında östemperleme esnasında östenit varlığını korur ve karbonca zengin östenit + beynitik ferrit (ösferit) oluşumunu geciktirir ayrıca östenitin bu hücre sınırlarında tercihli çekirdeklenmesini sağlar. Bu durumda östemperleme esnasında yapıda kalan östenit oda sıcaklığına soğutulduğunda martenzite dönüşür [3]. Bu ise mekanik özellikleri düşürmektedir. Yani, östenitten ösferrite dönüşümü geciktirir ve işlem aralığı adı verilen aralığın kapanmasını sağlayarak oda sıcaklığında dönüşmemiş östenit miktarının artmasına neden olmaktadır [12, 82].

### Silisyum ( Si )

Küresel grafitli dökme demirde, silisyum miktarı karbür oluşumunu geciktirdiği için en az ağırlıkça % 2 oranında olması gerekir [136]. Silisyum miktarı karbon eşdeğerliğini etkilediği için grafitleşme ve karbon segregasyonu üzerinde de önemli rol oynar. Ferrit kararlaştırıcı bir element olması nedeniyle ferrit içinde çözünmesi dayanımının ve sertliğinin artmasına ve sünekliğinin düşmesine yol açar [137]. Si yüksek karbonlu östenitin karbon içeriğini artırır [129, 138]. Eş. 2.2'deki ampirik formülden görüleceği üzere artma ile I. aşama dönüşümünün hızı artar ve II. aşama dönüşümünü geciktirir. Ötektoid dönüşümde oluşan ferrit'in oranını ve sertliğini arttırarak dökme demir mukavemetinde de bir artış meydana getirir, silisyum daha çok ferrosilisyum olarak, işlem sonunda sıvı metale ilave edildiğine (aşılama) grafit küre sayısının kontrolü açısından daha etkin olur [82].

Voigt ve Loper (1984) östemperleme sıcaklığı ve silisyum içeriğinin fonksiyonu olarak östenitteki karbon içeriğinin arasındaki ilişkiyi Eş. 2.2'de tarif etmişlerdir [77]. Burada  $T_A$ : Karbonun östeninteleme sıcaklığıdır.

$$\% C\gamma = (T_A / 420) - 0,17 (\%Si) - 0,95 \quad (2.2)$$

Alaşım elementlerinin (bilhassa Si) Fe-C denge diyagramına etkisi yüzünden östenitin karbon içeriği hem östemperleme sıcaklığının hem de kompozisyonun bir fonksiyonudur. Artan silisyum miktarı karbonun östenitte maksimum çözünebilirliğini etkili bir biçimde düşürür [58].

Yüksek silisyum (%2' den büyük) içeren sünek demirlerde östenit ayrışmasının iki ayrı reaksiyonda meydana gelmesine neden olur. Östenitleme sıcaklığını artırır ve östemperleme süresince ferritin çekirdekleşmesini hızlandırır. Yani, östenitleme sıcaklığını ve östemperleme reaksiyonunun oranını etkiler. Karbon çözünürlüğünü düşürür ve östenitte karbonun difüzyonunu hızlandırır. Bütün bunlar tam östenitleme için gereken süreyi azaltır [59].

Silisyumun perlitik KGDD'ye eklenmesi mikro yapıda ferrit oranını artırır ve dolayısıyla dayanımı düşürür [139]. Buna karşın ferritik demire Si eklenmesiyle ferritin katı çözelti sertleşmesini etkileyerek dayanımı artırır. Si aynı zamanda ısıtıl işlem çevriminde hem östenitlemeyi hem de östemperlemeyi etkiler. Si östenitleme sıcaklığını řu üç mekanizma ile azaltır: 1) karbon çözünürlüğünü azaltır (yani östenitte bulunan karbonun doyma miktarı), 2) karbon difüzyonunu hızlandırarak ve 3) östenitleme sıcaklığını artırarak. Östenitleme sıcaklığındaki artış östemperleme ısıtıl işlemi esnasında hızlı ferrit çekirdekleşmesine neden olur. Bir başka deyişle östenitleme sıcaklığını ve östemperleme reaksiyonunun oranını etkiler. Bütün bunlar tam östenitleme ısıtıl işlemi için gereken süreyi azaltır. %3,7'den fazla eklenmesi beynit yapısında proötektoid (ötektoid öncesi) ferrit adaları oluşmasına sebep olur. Yüksek Si oranı yapıda martenzit oluşumunu sınırlandırır ve diğer elementlerin hücre sınırlarında segregasyona uğramasını azaltır. Daha yüksek Si beynitik yapıda gevrekleşmeye sebebiyet verir ki bu etki Mg içeriğinin artışı ile kısmen etkisizleştirilir. Düşük Mg içeren ÖKGDD'lerde Si içeriğinin artması çekme dayanımında azalmaya sebebiyet verir. Bununlar birlikte akma dayanımında ve süneklikteki etkisi karmaşıktır. %2,15'ten %2,54'e kadar olan oranlarda her iki özellikte de gelişme görülürken %3,7'ye varan eklentilerde Si bu özelliklerde %2,15 eklentili hallerinde ölçülenlerden daha düşük değerler elde edilmesine neden olmuştur. Bunun olması artan Si oranıyla birlikte C'nin difüzon oranının azalmasıyla ilgilidir [11].

### Kükürt ( S )

Küresel grafitli dökme demirde kükürtün en önemli etkisi grafitleri küreleştirmek amacıyla ilave edilen Mg miktarını artırmaktır [3]. Dökme demirde magnezyum ilavesinden önceki kükürt oranı ergitmedeki uygulamanın ve sarj bileşiminin fonksiyonu olarak değişiklik gösterir. Magnezyum ilavesinden sonraki kükürt oranı yaklaşık %0.015 civarındadır [3].

### Fosfor ( P )

Gri dökme demirde olduğu gibi, küresel grafitli dökme demirde fosfor ‘steadit’ olarak bilinen çok kırılgan bileşiğin oluşumuna yol açar [3]. Fosfor, malzeme tokluk ve sünekliğini kötü yönde etkilediği için, genellikle %0.05 maksimum değerinde sınırlandırılır [3].

### Bakır ( Cu )

Küresel grafitlere difüzyon halinde olan C atomlarının geçişlerini güçleştirir ve bu C atomlarının östenit içerisinde kalmasını sağlar [16, 85]. ÖKGDD’nin çekme ve yorulma özelliklerini iyileştirirler. %1.5 üzerindeki Cu ilavesi ve östemperleme sıcaklığı 300 °C - 400 °C arasında olan KGDD’lerin sertliği ve çekme dayanımının artması üzerinde etkisi azdır. Nikel’in yarattığı etki gibi II. dönüşüm aşamasındaki karbür oluşumunu geciktirir. Dönüşmemiş östenit (martenzit) miktarını etkilemez. Bu, yorulma dayanımı ve kırılma tokluğu özellikleri üzerinde bir miktar iyileşmeye yardımcı olur [75, 82].

Bakır ÖKGDD’lere eklenen ucuz sertleştiricidir. Mo, Mn ve Ni ile karşılaştırıldığında en düşük etkiye sahiptir [59]. Metal-grafit arayüzünde karbonun difüzyonuna bir bariyer oluşturur ve karbonun matris ve yumrular taşınımını yavaşlatır. Bu bariyer östent in karbonca zenginleşmesini geciktirir. Östenitleme süresini perlit oluşumuna sebep olarak azaltırken östenitleme sıcaklığını düşürür.

Yaşar (1994), sünek demirde bakırın ve östemperleme işlemi parametrelerinin darbe tokluğu ve sertliği üzerine etkisini çalışmıştır. Farklı oranda Cu içerecek (ağırlıkça %0,19, %0,47, %0,62, %1,19, %1,62) şekilde elde edilen numuneler 850 °C’de 1 saat gri dökme demir talaşına gömülerek östenitlenmiş sonrasında ise 300 °C ve 400 °C sıcaklık aralığında

30 dakika, 60 dakika, 90 dakika ve 120 dakika arasında tuz banyosunda östemperleme ısı işlemi uygulanmıştır. 400 °C’de östemperlenmiş numunelerin yapılarında beynitik ferrit ve kabul edilebilir seviyede östenit tespit edilmiştir. Artan östemperleme sonucunda kalıntı östenitin ferrit ve karbüre dönüştüğü ve darbe direncinde azalma olduğu belirlenmiştir. Östemperleme süresi uzadığında kalıntı östenit miktarı artarken sertlik azalmış, darbe tokluğu ise çok az değişmiş veya hiç değişmemiştir. Östemperleme süresi arttıkça beynit miktarı ve beynitik ferrit plakalarının uzunluğu artmıştır. Aynı östemperleme sürelerinde östemperleme sıcaklığı arttıkça darbe enerjisini artar. Elde edilen en yüksek sertlik değeri 53 HRC ile %1,62 Cu içeren 300 °C’de 90 dakika östemperlenmiş numunede elde edilirken en düşük sertlik değeri 27 HRC ile %0,19 Cu içeren 400 °C’de 30 dakika östemperlenmiş numunede elde edilmiştir. Sertlik değeri östemperleme sıcaklığının artması ile azalmıştır. Sertlik değeri üzerinde östemperleme sıcaklığının östemperleme süresinden daha etkili olduğu bildirilmektedir [15].

Şeniz (1998), ÖKGDD’de vanadayum (V) ile bakır (Cu) etkisini çalışmıştır. 900 °C’de östenitlenen numuneler daha sonra 300 °C’de östemperlenmişlerdir. Bu östemperleme işlemi mikro yapının numunelerde oldukça ince beynitik ferrit plakaları ve bir miktar kalıntı östenit içermesine sebep olmuştur [140]. Bakır ÖKGDD’lerde yüksek dayanım elde etmekte kullanılan en önemli elementlerden birisidir [13]. Diğer eklenen elementler gibi Cu da ÖKGDD’nin mikro yapısını ve mekanik özelliklerini etkiler. Perlitik dönüşümün başlangıcını geciktirirken sertlik artırıcı etkiye sahiptir. Cu ilavesi dönüşüm sıcaklığında ferrit (yüksek sıcaklık) oluşumunu azaltır. Ferritik demirin dayanımı mikro yapıdaki perlite içeriğini artıran Cu eklenmesiyle artırılabilir. Ayrıca Cu östenit kararlaştırıcıdır ve ferrit dönüşümünü azaltır [139]. Bakır, katılaşma sırasında östenit-grafit arayüzünde yoğunlaşan ve grafit yumruları üzerine karbon göçü için bariyer oluşturan, dökme demirlerde nispeten güçlü bir perlit destekleyicisidir. Böylece östenitin karbon içeriği olağan dışı olarak yüksektir ki bu da serbest ferrit oluşumuna engel olur. Cu denge ötektik sıcaklığını artırır, katı faza ayrıştır. Cu östenitleme zamanını artıran tek sertleştirici elementtir. İkinci aşama beynitik dönüşümünü yavaşlatır böylece daha geniş bir işlem penceresi sunar. Yani süneklik ve darbe mukavemetinin değişmeden kaldığı artırılmış östemperleme süresi aralığı oluşturur. Perlitin sayısını artıran, perlit lamellerini incelten, ferritin katı çözelti sertleşmesine neden olan, orta seviye ve düşük dönüşüm sıcaklıklarında sertleşebilirliği artırıcı etkileriyle Cu sünek dökme demirlerde sertleştirici olarak kullanılmaktadır. Cu

çekme ve akma dayanımı artırırken uzamada düşmeye sebep olur. V ve Cu'nun döküm halindeki numunelerde perlit oluşum yatkınlığını artırdığı bildirilmektedir [140].

### Nikel ( Ni )

Matristen küresel grafitlere karbon geçişini güçleştirerek östenitleme sıcaklığında östenitin karbon içeriğini artırır. Ni içeriğinin %1'i geçtiği durumlarda özellikle 350 °C' nin altındaki östempereleme sıcaklıklarında çekme dayanımı ve sertliğin düştüğü araştırmacılar tarafından rapor edilmiştir. Ayrıca II. dönüşüm aşamasındaki karbür oluşumunu geciktirici etkiye sahiptir [75, 82].

Nikel ısıtıl işlem döngüsünde çok az bir etkiye sahiptir [59]. Östenitleme sıcaklığını düşürür ve bu sırada karbonun östenit içerisinde difüzyonu ve karbonun çözünürlüğünü etkilemez. Ösferritik ve beynitik reaksiyonların başlangıcını az miktarda geciktirir.

### Diğer elementler

Karbür oluşumunu mangan gibi hatta ondan daha kuvvetli teşvik eden elementler Vanadyum, Bor, Telluryum ve Molibdendir [3]. Bu elementlerin tavsiye edilen maksimum oranları Çizelge 2.3'te verilmektedir.

Çizelge 2.3. ÖKGDD'lere ilave edilen diğer alaşım elementleri ve üst sınırları [3]

| Element | Üst Sınır (ağırlıkça %) |
|---------|-------------------------|
| Cr      | %0.05                   |
| V       | %0.03                   |
| B       | %0.003                  |
| Te      | %0.003                  |
| Mo      | %0.01 – 0.3             |

Ancak Çizelge 2.3.'te belirtilen bu değerler döküm parçasının kesitini göz önüne alınmayan ortalama değerlerdir. Belirtilen elementlere ilaveten nikel, bakır ilaveleri ile de daha tok, daha mukavemetli, yüksek sıcaklığa ve korozyona direnci daha yüksek alaşımlar elde edilir.

Molibdenin ilavesi Mn gibi I. aşama dönüşümünü geciktirir. Bu da matriste oda sıcaklığında dönüşmemiş östenit (martenzit) varlığına sebebiyet verir. Segregasyon ve karbür oluşumunu teşvik ettiği için sınır değerlere dikkat edilmelidir [17, 19-22, 82].

Molibden sıklıkla ÖKGDD'ye sertleştirici olarak eklenir. Silisyum gibi östenitleme sıcaklığını artırır. Hücre sınırlarında segregasyona uğrar ve molibdenin eklentisi %0,3 olarak sınırlandırılmıştır. En önemli rolü, östemperleme reaksiyonu sırasında beynitik karbür oluşumunu engellemektir [59].

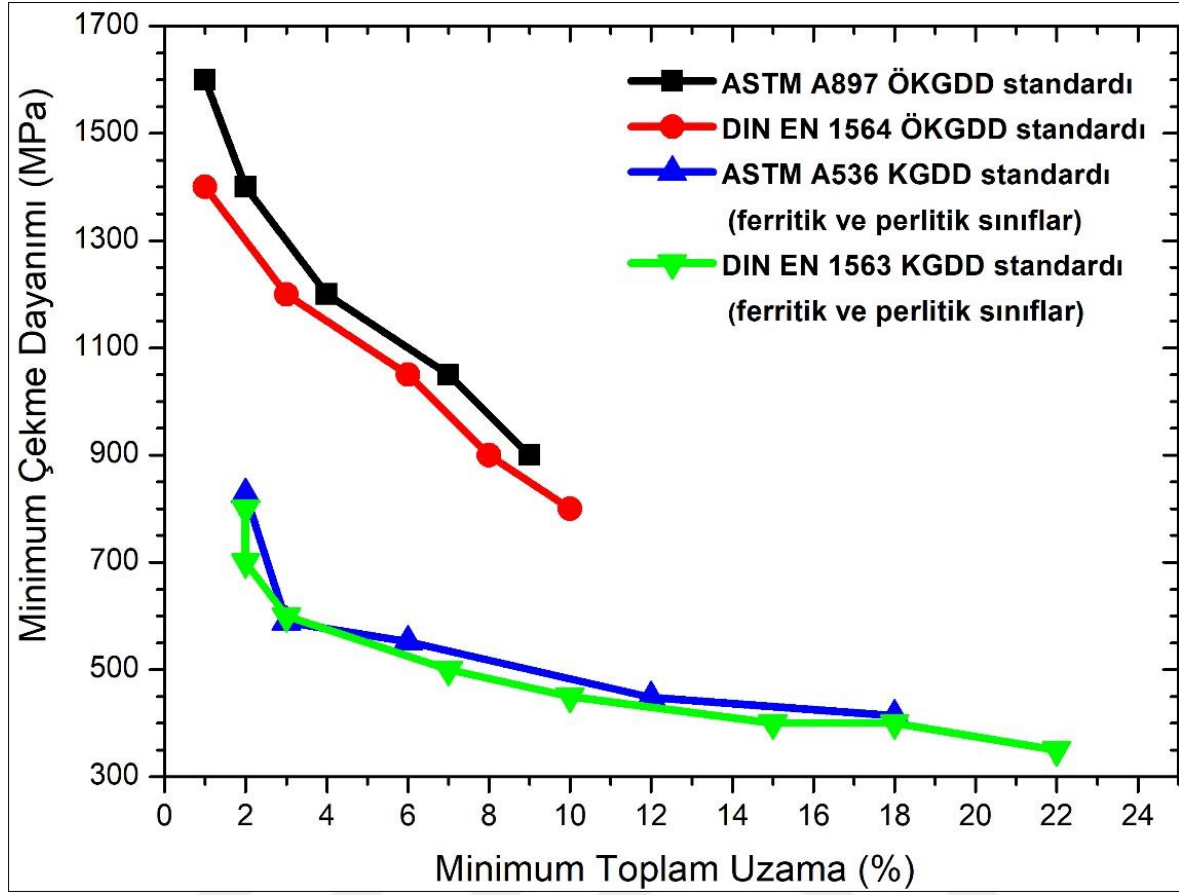
Vanadyum yüksek dayanımlı sünek demirlerde tane inceltici olarak kullanılmasının mekanik özellikleri yararlı olmasıyla bilinen önemli bir elementtir [141]. Aynı zamanda V, KGDD'lerde ötektik karbür veya çil oluşumunu teşvik etmesinden ötürü istenmeyen de bir elementtir. Yine de bu ötektik karbür sünek demirin ısıtılma işlemiyle giderilebilir. Vanadyum'a izin verilerek yüksek dayanımlı düşük alaşımlı çeliklerdeki mekanizmaya benzer şekilde dayanım ve süneklikte artış ihtimali barındırır [141]. Çilleşme eğilimi düşüktür ve bakırın çok düşük oranlarının eklenmesiyle giderilebilir. Gerilme özelliklerindeki gelişme, diğer çoğu alaşım ilavesi ile elde edilebilecek olandan daha büyükken, uzama ve darbe özellikleri üzerindeki etkiler, diğer alaşım ilaveleri tarafından üretilenden önemli ölçüde daha azdır [141]. V'nin eklenmesi dökme demirlerde neredeyse tamamen vanadyum karbür oluşumları ile sonuçlanır. Bu karbürler: ötektik karbürün ince ve kaba hali ile çökelmiş karbürün küçük parçacıklarıdır. Vanadyum içeriğindeki artış önemli ölçüde tane incelticidir. V eklenmesiyle elde edilen perlit tavlama ile giderilebilir [142].

## 2.5. Mekanik Özellikler

KGDD'lerin mekanik özelliklerini kimyasal kompozisyonları, matris mikro yapıları ve kesit kalınlıkları etkilemektedir. Daha iyi mekanik özellikler küreselleşmenin arttırılması, daha küçük küre ve tane boyutu ve düşük karbon içeriği ile sağlanabilir. Küçük ve çok sayıdaki küreler çekme dayanımını arttırır. Diğer mühendislik malzemelerinde olduğu gibi çekme dayanımı arttıkça süneklik azalmaktadır. Alaşım elementlerinin içeriğine bağlı olarak perlit miktarı arttıkça çekme dayanımı artarken yüzde uzama azalmaktadır [3].

KGDD'ler, dökülmüş halde %2-22 süneklikle beraber 330-800 MPa çekme dayanımına sahip olabilmektedir. En yüksek yüzde uzamayı dökülmüş koşullardaki ferritik matrisli KGDD'ler sergilerken en iyi dayanımını perlitik matrisli KGDD'ler sergilemektedir. KGDD'lerde en yüksek dayanım-süneklik kombinasyonunu ÖKGDD'ler göstermektedir (Şekil 2.18). Standartlarda belirtilen ÖKGDD'ler %1-10 süneklikle beraber 800-1600 MPa çekme dayanımı sergileyebilmektedirler.

ÖKGDD'ler yüksek mukavemet, iyi tokluk ve mükemmel işlenebilirlik gibi olağanüstü mekanik özellikler nedeniyle geleneksel çelik dökümlere ve dövmele ve hatta alüminyuma bir alternatiftir. ÖKGDD'ler; geleneksel dökme demirler, çelik dökümler, çelik dövme parçalar, alüminyum ve hatta titanyum alaşımları ile karşılaştırıldığında onlarla rekabet edebilecek mekanik özelliklere sahiptir. ÖKGDD'nin akma mukavemeti, süneklikte kabul edilebilir bozunmalarla döküm sünek demirden en az iki kat daha yüksek ve dövme alüminyumdan üç kat daha yüksek olabildiği bildirilmektedir Sertleştirilmiş çeliklerde elde edilen maksimum akma dayanımı ve uzama ÖKGDD'den daha yüksek olsa da, ÖKGDD'in birim başına ağırlığının akma dayanımı, matris içindeki grafit nodüllerinin varlığı nedeniyle çeliklerden daha düşük olduğu açıktır. Ayrıca, ÖKGDD'nin akma dayanımının birimi başına maliyeti, çelik dökümlerin sadece %20'si kadardır ve çelik dövme ve ısıtma işlemi görmüş çeliklerle hemen hemen aynıdır. Ek olarak, titanyum alaşımları kabul edilebilir akma mukavemeti altında östemperlenmiş küresel dökme demirden daha geniş uzama aralığına sahiptir, ancak titanyum alaşımlarının üretim maliyetinin yüksek olduğu ve endüstrilerde yaygın olarak kullanılamayan zayıf kalıplanabilirliğin olduğu iyi bilinmektedir. [3].



Şekil 2.18. KGDD’lerde çekme dayanımı - % uzama ilişkisi [88, 143-145]

Guesser, Lopes ve Bernardini (2020), başlangıç mikro yapılarının kritik östenitleme sıcaklık aralığından östemperleme ısı işlemi uygulanmış, ferrit + ösferrit matris yapısındaki ÖKGDD’lerin mikro yapı ve mekanik özellikleri üzerine etkisini araştırmışlardır. Farklı başlangıç mikro yapısı olarak ferrit, perlit, ferrit + perlit, martenzit ve östenit mikro yapılarıdır. Numuneleri 795 °C’de kritik sıcaklık aralığında sırasıyla 2 saat 6 saat ve 12 saat östenitlemiş ardından 350 °C’de 2 saat östemperlemişlerdir. Seçilmiş östenitleme sıcaklığında 12 saat sonunda, seçilen tüm farklı başlangıç mikro yapıları için numunelerin hepsinin son mikro yapıda %30 ferrit (%70 ösferrit) oluşturduğunu belirtmişlerdir. Mekanik özellikler ferrit ve ösferritin dağılımı ve inceltmesine bağlıdır. Başlangıç mikro yapıları olan ferrit, perlit ve perlit + ferrit için östenitin homojen bir dağılımı meydana gelmemiştir. Martenzit ve ösferrit başlangıç mikro yapıları için karbon eşitçe dağıtılmış ve hemen çözünmüştür. Östenitin ve ferritin bu homojen dağılımı ile en iyi dayanım ve süneklik kombinasyonu elde edilmiştir. Ferritin dağılımı, interkritik ÖKGDD’de ferritik ve perlitik küresel grafitli dökme demirlere kıyasla tamamen farklıdır. Öte yandan, düşük östenitleme sıcaklığı östemperleme için bazı zorluklar ortaya

çıkarmaktadır. Bu sıcaklıklarda karbürlerin perlitten çözülmesi yavaş bir süreçtir ve grafit yumrularından karbon difüzyonu esas olarak tane sınırları boyunca gerçekleşir [72].

Araştırmalar [34, 70-72], östempereleme öncesi ilk mikro yapının nihai mikro yapıyı ve mekanik özellikleri etkileyebileceğini göstermektedir. Ferrit açısından zengin ilk mikro yapılar, grafit yumrularının yakınında geniş ferrit alanlarına yol açar. Asiküler başlangıç mikro yapıları, çok ince bir östenit ve ferritin dağılı ile asiküler ferrit oluşumuna yol açar. Başlangıç mikro yapısı olarak martenzit ise arakritik östneitleme sıcaklıkları süresince uzamada azalmaya sebebiyet veren bir ikincil grafit oluşumuna neden olmaktadır. Perlitin başlangıç mikro yapı olduğu durumlarda, başlıca alaşımlı dökme demirlerde, hücre sınırlarında perlitten küreselleşmiş karbürler kritik sıcaklıklarda 2 saatten fazla yapıda kalabilir. Ösferrit başlangıç mikro yapısına sahip numuneler, çok ince bir ferrit ve östenit dağılımı oluşturduğu için en iyi mekanik özelliklerine sahip olduğu bildirilmektedir [72].

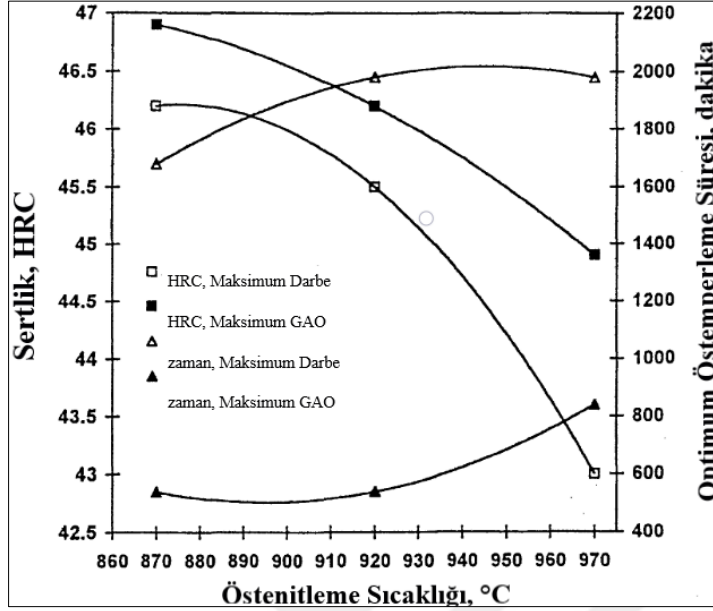
### 3. ÖSTEMPERLENMİŞ KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRİN AŞINMA DAVRANIŞI

ÖKGDD'lerin aşınma davranışını ve tribolojik özellikleriyle ilgili çok sayıda araştırma bulunmaktadır [1-3, 18, 25-29, 31, 32, 35-37, 68, 70, 72, 87, 92, 95, 104, 132, 135, 146-176] . ÖKGDD'ler dökme demirler içerisinde beyaz dökme demirlerden sonra en yüksek aşınma direncine sahip dökme demir grubudur [146, 161].

Otomotiv endüstrisinde 1970' lerden beri ticari kamyonlarda ÖKGDD, eksantrik milleri, krank milleri ve dişlilerin üretiminde bazı geleneksel çelik veya alüminyumdan yapılmış parçaların yerine yaygın olarak uygulanmaktadır [5]. Bu bileşenler sıklıkla bağlı hareket ve harici yük ile yüzey temasına maruz kalır. Bu nedenle, mevcut ÖKGDD uygulamalarındaki tribolojik sorunları çözmek ve gelecekteki tasarımlara uygun şekilde kullanmak için bu malzemenin aşınma davranışını anlamak gerekir. Laboratuvar deneylerinde ÖKGDD'nin aşınma performansını incelemek için normal olarak standartta tanımlı pin on disc (pin on disc) [177] ve blok-on-ring (halka üzerinde blok) [178] test donanımları yaygın olarak kullanılmaktadır [3].

Owhadi, Hedjazi ve Davami (1998), Östenitleme süresinin ve östemperleme sıcaklığının, 270 °C'de östemperleme sonrası 1,5 Mn içeren ÖKGDD'nin aşınma davranışını incelemişlerdir. FeSi, FeMn ve yüksek saflıkta grafit kullanılarak ergime gerçekleştirilmiştir. Küreselleştirme için FeSiMgRE + Bi (RE: Toprak elementleri) kullanılmıştır. Elde edilen malzemenin kimyasal kompozisyonu ağırlıkça sırasıyla %3,3 C, %2,95 Si, %1,52 Mn, % < 0,03 P, % < 0,01 S, %0,1 Cr, %0,004 Bi, %0,012 Ce, %0,04 Mg ve kalan Fe içermektedir. Tüm numuneler 980 °C'de 1440 dakika homojenizasyon işlemi görmüştür. Ardından 700 °C'de CaCO<sub>3</sub> – NaCl tuz banyosunda 15 dakika ön ısıtılan numuneler 970, 920 ve 870 °C'de 120 dakika östenitlenmiş ve 270 °C'de NaNO<sub>3</sub> – NaNO<sub>2</sub> tuz banyosunda östemperlenip havada soğutulmuşlardır. Aşınma testinde silindirik olarak 80 mm yüksekliğinde 10 mm çapında işlenen numuneler aşındırıcı malzemeye (kuartz, 3-5 mm) 450 devir / dakika hızda 2800 dakika süreyle maruz kalmıştır. Deney sonuçları referans malzeme olarak 49 HRC sertliğe sahip düşük alaşımlı su verilip tavlanmış çelik ile mukayese edilmiştir. Kısa östemperleme sürelerinde aşınma direnci çeliğinkinden düşüktür ancak artan östemperleme sıcaklığı ile birlikte aşınma direnci kademeli olarak artıp ve maksimum değerine ulaştığı bildirilmektedir (Şekil 3.1). Sonuç olarak darbe direncinin

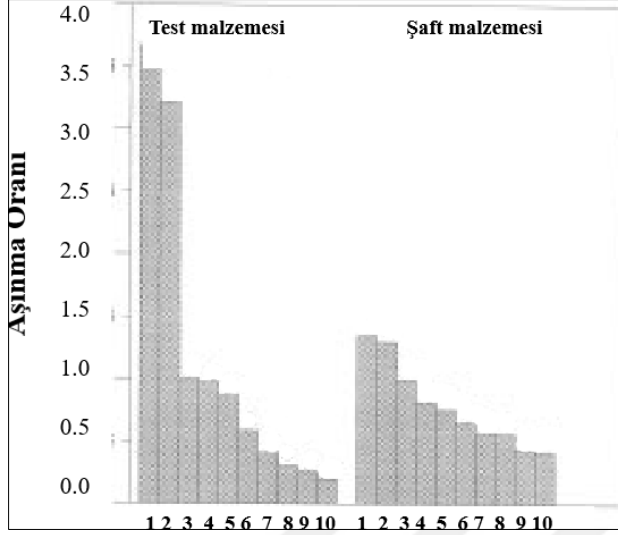
dönüşmemiş östenit hacminden olumsuz etkilendiği ancak bu parametrenin yüksek manganlı ÖKGDD'nin aşınma direncini arttırdığı bildirilmektedir [18].



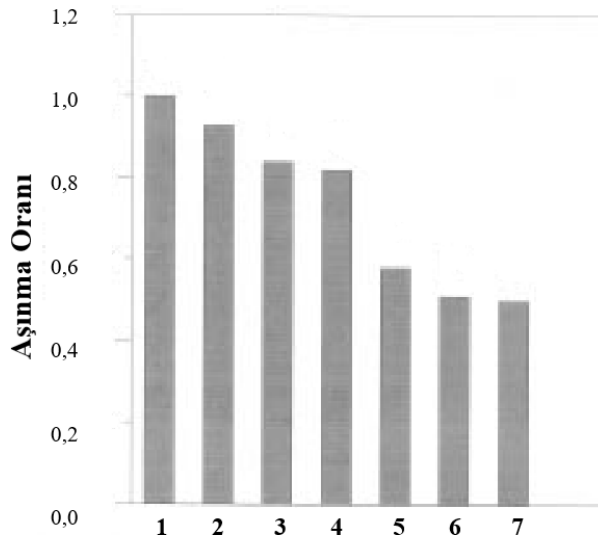
Şekil 3.1. Darbe ve aşınma testinde östenitleme sıcaklığının optimum östempereleme zamanı ve sertlik üzerine etkisi (GAO: Görece Aşınma Oranı) [18]

Lerner ve Kingsbury (1998), ÖKGDD'nin aşınma dayanımını incelemişlerdir. İki aşınma daransı incelemişlerdir: yapışkan (sürtünmeli) kuru kayma ve aşındırıcı aşınma. Dönen kuru kayma testlerinde, temel malzemenin (sabit bir blok) aşınma davranışı, karşı yüzey (çelik şaft) aşınmasıyla ilişkili olarak dikkate alınmıştır. Bu test esnasında test malzemesi 7,5 MPa yük ile karşı malzeme olan ve 0,31 m/s hızla dönen çelik şafta (30 mm çapında, 10 mm genişliğinde ve 48-52 HRC sertliğinde 1045 çeliği) 2 saat süreyle temas etmiştir. Aşındırıcı aşınma deneyinde ise aşınmayı artırmak ve daha fazla yerel gerilim etkisi oluşturmak için numuneler 30° açıyla tutulmuştur. Test süresince numuneler 1000 devir / dakika ile içinde yaklaşık tane boyutu 2 mm alümina kum olan ortamda yaklaşık 15 saat döndürülmüştür. Kuru kayma aşınma modunda, ÖKGDD aşınma direnci perlitik KGDD 100-70-03 sınıfından yaklaşık dört kat, kurşunlu kalay bronzdan 12 kat ve alüminyum bronzdan yaklaşık 14 kat daha büyük olduğu bildirilmiştir. Yalnızca tamamen martenzitik bir matris ile su verilmiş KGDD, ÖKGDD' den biraz daha fazla aşınma direnci sergilediği bildirilmiştir. ÖKGDD ve su verilmiş KGDD'ye karşı çalışan çelik şaftların aşınmasında önemli bir fark gözlenmediği bildirilmiştir (Şekil 3.2.a). Aşındırıcı aşınma testlerinde, ÖKGDD, AISI 4340 çeliğine eşdeğer, sertleştirilmiş ve temperlenmiş AISI 1050 karbon çeliğinden neredeyse iki kat daha az ve de beyaz ve alaşımlı dökme demirlerden önemli

ölçüde daha yüksek aşınma direnci sergilediği bildirilmiştir. ÖKGDD'nin mükemmel aşınma direncinin, aşınma testleri sırasında yüzey tabakasında meydana gelen yüksek karbonlu östenitin martenzite gerilim kaynaklı dönüşümüne bağlanabileceği bildirilmektedir (Şekil 3.2.b) [146].

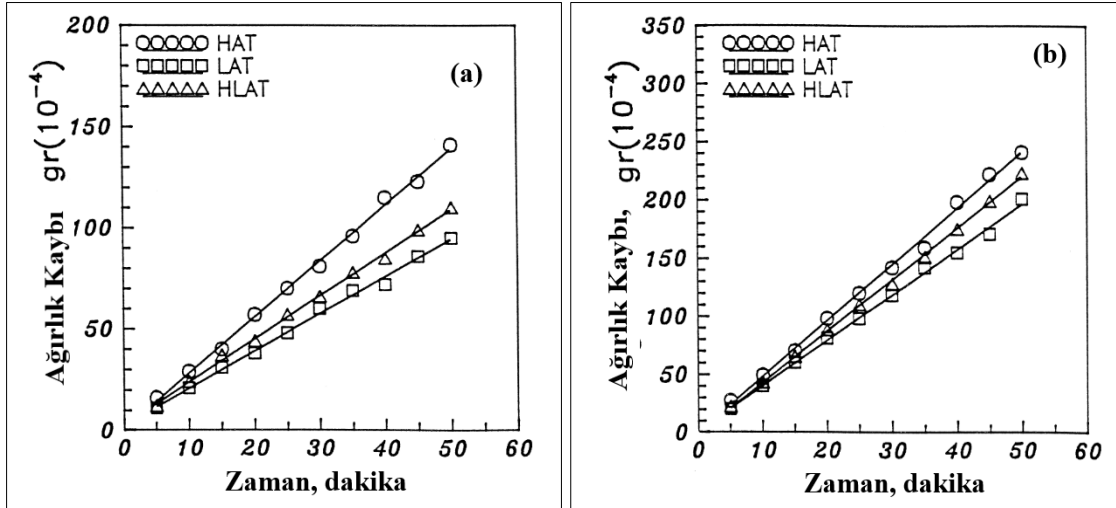


Şekil 3.2.a. Kuru kayma deneyinde malzemelerin aşınma oranları; 1) alüminyum bronz, 2) kurşun-kalay bronz, 3) Perlitik KGDD 100-70-03 sınıfı, 4) KGDD (%4,0 Si), 5) KGDD (%4,7 Si), 6) KGDD (%4,0 Si, %0,4 P), 7) Nitrürlenmiş KGDD, 8) KGDD ( %0,7 Mo), 9) ÖKGDD 175/25/4 sınıfı, 10) Su verilmiş KGDD [146]



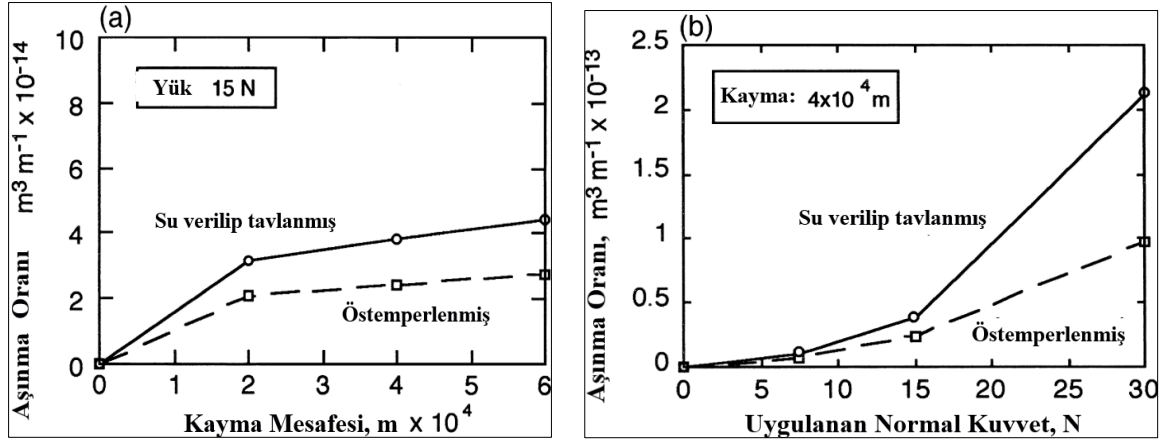
Şekil 3.2.b. Aşındırıcı aşınma deneyinde malzemelerin aşınma oranları; 1) Su verilip tavllanmış orta karbonlu 1050 çeliği, 2) Alaşımsız beyaz (kır) dökme demir, 3) Gri dökme demir (%0,8 Cr, %3 Ni), 4) Beyaz (kır) dökme demir (% 12 Cr), 5) Su verilip tavllanmış KGDD, 6) ÖKGDD 200/155/1 sınıfı, 7) Alaşımsız 4340 çeliği [146]

Ahmadabadi, Ghasemi ve Osia(1999), ardışık östemperlemenin ÖKGDD'nin aşınma davranışı üzerine etkisini araştırmışlardır. Ağırlıkça %0,75 Mn içeren KGDD'nin farklı seviyelerde nodül sayısına sahip örnekleri geleneksel östemperleme ısı işlemi ve ardışık olarak 315 °C ve 375 °C sıcaklıklarında östemperlenmiştir. Kullanılan malzemenin kompozisyonu sırasıyla ağırlıkça %3,5 C, %2,73 Si, %0,75 Mn, %0,05 Cr, %0,18 Cu , %0,04 Mg ve kalan Fe içermektedir. Y-blok olarak sandviç metoduyla döküm işlemi gerçekleştirilmiştir. %5,5 MgFeSi alaşımı küreselleştirme için eklenirken %75 FeSi aşılama için eklenmiştir. Numuneler 900 °C'de 90 dakika östenitlemenin ardından 375 °C'de (HAT), 315 °C'de (LAT) tuz banyosunda östemperlenmiş ve buzlu su da su verilmiştir. Ardışık östemperleme ısı işlemi için (HLAT) numuneler önce 375 °C'de östemperlenmiş ardından 315 °C'de farklı periyotlarda östemperlenmiştir. Aşınma testi için pin-on-ring metodu seçilmiştir. Kayma aşınma testleri, kuru atmosferik koşullar altında 0,6 ve 1,28 m s<sup>-1</sup> hızlarında ve 100 N, 200 N ve 300 N normal yüklerde bir yüzeyi sertleştirilmiş takım çeliği halkasına sürtünen test malzemeleri ile gerçekleştirilmiştir. 315 °C'de östemperlenen numunelerin (LAT, düşük östemperleme sıcaklığı) en yüksek aşınma direncini gösterirken, 375 °C'de östemperlenmiş numunelerin (HAT, yüksek östemperleme sıcaklığı) en düşük değeri gösterdiği bulunmuştur. Mekanik özelliklerin iyileştirilmesine ek olarak, HAT numunelerine yaklaşık olarak eşdeğer sertlikte, ardışık östemperleme işlemi (HLAT, yüksek-düşük östemperleme sıcaklığı) ile güçlendirilmiş numuneler, HAT numunelerine göre daha yüksek aşınma direnci gösterdiği bildirilmektedir (Şekil 3.3.a ve Şekil 3.3.b). HLAT numunelerinin mekanik özelliklerini ve aşınma direncini artıran ana faktörler, dubleks yapı, üst ve alt beynit ile birlikte tutulan östenitin daha yüksek karbon içeriği ve dönüşmemiş östenit hacminin azalmasının olabileceği bildirilmektedir. Uzun katılaşma süresine sahip örneklerin, kısa katılaşma süresine sahip örneklerden daha düşük aşınma oranına sahip olduğunu, bunun da nodül sayısının azalması ve alaşım elementlerinin daha ağır segregasyonunun etkisi ile gerçekleştiğini bildirmektedirler [147].



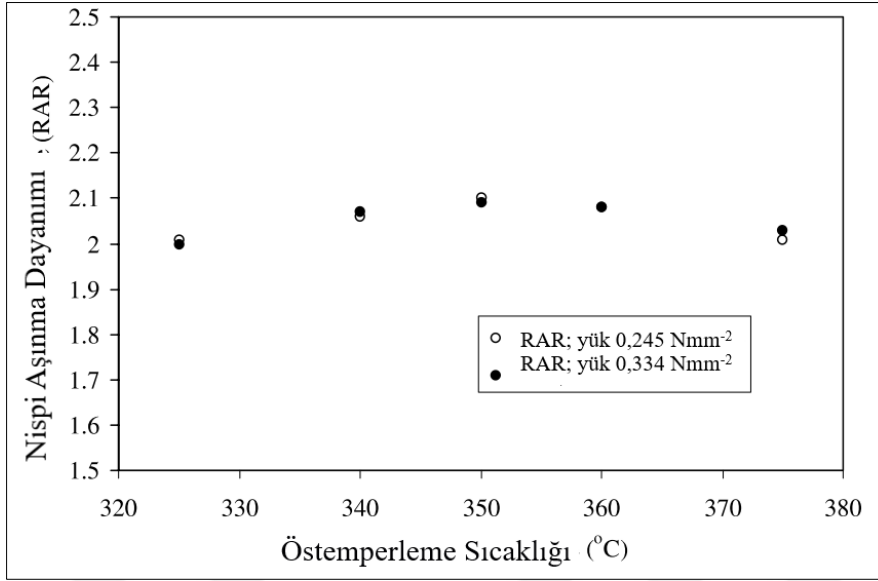
Şekil 3.3. Düşük nodül sayısına sahip numunelerin Ağırlık kaybı - Kayma süresi grafiği,  $v = 0,6 \text{ m s}^{-1}$ , KGDD'nin yoğunluğu  $\rho = 7,1 \text{ g / cm}^3$ ; a)  $F = 200 \text{ N}$ , b)  $F = 300 \text{ N}$  [147]

Haseeb, Islam ve Bepari (2000), aynı sertlik değerine sahip su verilip tavlanmış ve östemperlenmiş KGDD'nin tribolojik davranışını incelemişlerdir. Çalışmada kullanılan sünek demirin kompozisyonunda ağırlıkça sırasıyla %3,6 C, %2,5 Si, %0,6 Mn, %0,01 S, %0,02 P ve kalan Fe bulunmaktadır. 860 °C'de 2 saat östenitlemenin ardından kurşun içeren banyoda 350 C'de 2 saat östemperlenmiş ve ardından havada soğutulmuştur. Aşınma testi için pin on disc metodu seçilmiş ve sünek demir numuneleri pim olarak 8 mm çapında ve 6,5 mm uzunluğunda işlenmiştir. Dönen disk olarak sertleştirilmiş orta karbonlu çelik kullanılmıştır (%0,5 C, %0,7 Mn, %0,2 Si). Aşınma testleri, 1.18 m s-1 doğrusal hızda, 3 ila 9 saat arasında süreyle gerçekleştirilmiştir. Sırasıyla 7,5–30 N ve  $2 \times 10^4 - 6 \times 10^4$  m aralığında uygulanan yük ve kayma mesafesi kullanılmıştır. Test öncesi ve sonrası numunler tartılmıştır. Tüm test koşullarında, ÖKGDD'nin, her ikisi de aynı kimyasal bileşime ve matris sertliğine sahip olmasına rağmen, su verilip ve tavlanmış KGDD'den daha iyi bir aşınma direnci sergilediği gözlenmiştir (Şekil 3.4.a ve Şekil 3.4.b). Aşınma izi altındaki mikrosertlik ölçümü, aşınma işlemi sırasında ÖKGDD'nin sertliğinin arttığını, su verilip ve tavlanmış KGDD'nin sertliğinin azaldığını bildirmişlerdir. Aşınmış yüzeylerin metalografik incelemesi ve aşınma kalıntısı üzerine yapılan X-ışını araştırması, oksidatif aşınmanın ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ve  $\text{FeO}$  buluntuları) her iki örnekte de etkili olduğu bildirilmektedir [148].



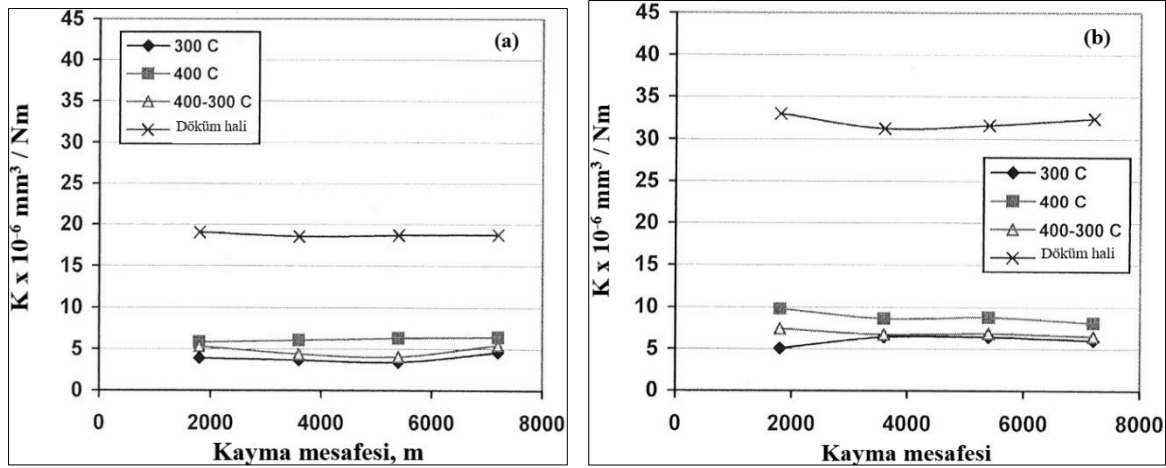
Şekil 3.4. a) Kayma mesafesinin bir fonksiyonu olarak aşınma oranı, b) Uygulanan normal yükün bir fonksiyonu olarak aşınma oranı [148]

Zimba, Simbi ve Navara (2003), ÖKGDD'yi toprak kazma vb. işlerde kullanılan aletlerin esas işlemi gerçekleştiren bileşenlerinde kullanılmak üzere alternatif bir malzeme olarak incelemişlerdir. Elde edilen veriler, hali hazırda bahsi geçen uygulamalarda kullanılmakta olan su verilip tavllanmış çelik malzemesi ile karşılaştırılmıştır. Ferritik KGDD (SGI 420/12) kullanılmıştır. Kimyasal kompozisyonu sırasıyla ağırlıkça %3,44 C, %2,61 Si, %0,16 Mn, %0,01 S, %0,024 P, %0,03 Ni, %0,04 Cr, %0,052 Mg, eser miktarda Mo ve kalan Fe' dir. Karşılaştırılacak çelik malzeme için ise EN 24 seçilmiştir. KGDD numuneleri ÖKGDD eldesi için 900 °C'de 60 dakika tuz banyosu içinde östenitlenmiştir. Ardından bir başka tuz banyosu içerisinde 50 dakika süreyle 325, 340, 350, 360 ve 375 °C sıcaklıklarında östemperlenmiştir. Aşındırıcı aşınma testleri için seçilen EN 24 çeliği numuneleri ise 850 °C'de 45 dakika östenitlenmiş ve ardından yağda su verilmiştir. Daha sonra 250 (T1), 350 (T2), ve 450 °C (T3) sıcaklıklarında tavlansmıştır. Aşınma testleri 300 µm parçacık boyutuna sahip alümina ortamında 0,288 ms⁻¹ hızla, 0,25 ve 0,33 Nmm⁻² sıkıştırma kuvveti 4,2 m kayma mesafesiyle uygulanmıştır. Test öncesi ve sonrası numuneler tartılmıştır. 0,25 N mm⁻²' lik bir yük kullanıldığında, 315 HV başlangıç sertliği ile 375 °C'de östemperlenmiş ÖKGDD'nin nispi aşınma direnci (RAR) 2.01 iken, 635 HV sertlikteki su verilip tavllanmış çeliğinki 2.02 olarak ölçülmüştür. Düşük başlangıç sertliğine rağmen ÖKGDD tarafından sergilenen iyi aşınma direnci, aşınma sırasında yüzeydeki kalıntı östenitin martenzite dönüşümüne bağlandığı bildirilmektedir (Şekil 3.5). Bu olgunun aynı zamanda, XRD çalışması ile doğrulandığı bildirilmektedir [151].



Şekil. 3.5. Nispi aşınma direnci (RAR) östempereleme sıcaklığı ile farklı yüklerde değişimi [151]

Bosnjak, Verlinden ve Radulovic (2003), düşük alaşımlı ÖKGDD'nin kuru kayma aşınmasını incelemişlerdir. %50 pik demir % 50 düşük manganlı çelik hurdasından elde edilen ergiyik %1,8 magnezyum ferrosilisyum alaşımı ile sandviç tenkiğiyle işlem görmüştür. Daha sonra ergiyik %0,67 FeSi (%75 Si) ile aşılanmıştır. Elde edilen KGDD ağırlıkça %3,2 C, %2,67 Si, %0,07 Mn, %0,023 P, %0,003 S, %0,12 Cr, %0,8 Ni, %0,25 Mo, %0,02 Cu ve kalan Fe içerir. Bu KGDD öncelikle 900 °C'de 120 dakika tuz banyosunda östenitlenmiştir. Ardından tek ve iki aşamalı işlemde 300 ve 400 °C'de 120 dakika nitrür tuz banyosunda östemperelelenmiştir. Kayma aşınma testleri, 0,6, 0,7 ve 1,0 m.s<sup>-1</sup> hızlarında dönen sertleştirilmiş çelik (55 HRC) yüzeyine kuru atmosferik koşullar altında sürtünen bir pin on disc aparatı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Uygulanan yük 15,82 N ve 22,84 N iken deney süresi 30, 60, 90 ve 120 dakika seçilmiştir. Deney öncesi ve sonrası aşınan pimlerin ağırlık ölçümleri yapılmıştır. İki aşamalı östemperelelenmiş numunelerin, 400 °C östemperelelenmiş numunelerden daha yüksek ve neredeyse 300 °C östemperelelenmiş numunelerinki kadar yüksek aşınma direnci sergiledikleri bulunmuştur. İki aşamalı işlem, çift fazlı bir yapı ile sonuçlanmıştır: karbür oluşumu içermeyen üst ve alt beynitik ferrit. Bu yapı, mekanik özelliklerin iyileştirilmesinden ve iyi aşınma direncinden sorumlu olduğu bildirilmiştir (Şekil 3.6.a ve Şekil 3.6.b) [150].



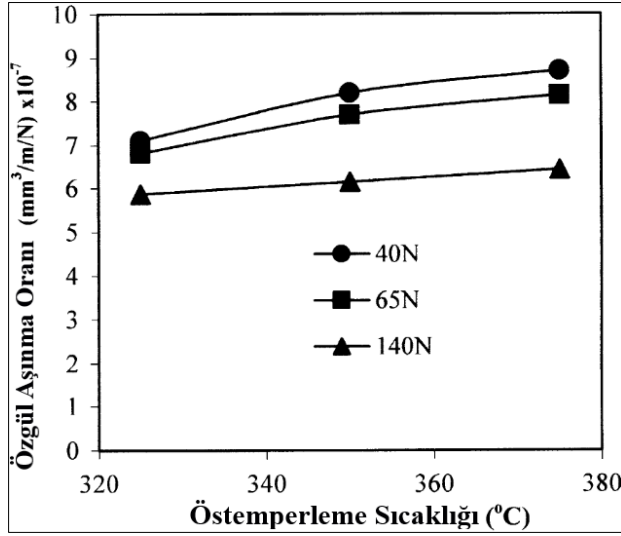
Şekil 3.6. Kayma mesafesinin bir fonksiyonu olarak Lancaster aşınma faktörü  $K$ 'nin ( $\text{mm}^3 \text{N}^{-1} \text{m}^{-1}$ ) östempereleme sıcaklığı uygulanan yük ile değişimi hız  $1,00 \text{ m s}^{-1}$ ;  
a)  $f = 15,82 \text{ N}$  b)  $f = 22,84 \text{ N}$  [150]

Dommarco, Sousa ve Sikora (2004), Farklı matris mikro yapısında yüksek miktarda nodüle sahip KGDD'lerin aşındırıcı aşınma dayanımını araştırmışlardır. Karbon eş değeri 4,63 olan C1 malzemesi ile karbon eş değeri 4,77 olan iki farklı malzeme kullanılmıştır. Kalınlığı 1,5 ile 25 mm arasında değişen, nodül sayıları 250 ile 2000 nodül /  $\text{mm}^2$  arasında değişen farklı KGDD test numuneleri kullanılmıştır. Matrisleri tamamen martenzitik (suda su verme ve  $250 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de temperleme,  $910 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de 120 dakika östempereleme), ferritik (ferritleştirme ısıl işlemi,  $910 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de 180 dakika östempereleme, fırında soğutma), perlitik (nomalleştirme ısıl işlemi,  $910 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de 120 dakika östempereleme, havada soğutma) ve ösferritik (östempereleme ısıl işlemi,  $900 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de 180 dakika östempereleme,  $280 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de tuz banyosunda soğutma) mikro yapılara ayarlamak için aşınma testleri numuneleri ısıl işleme tabi tutulmuştur. Aşınma direnci, ASTM G 65 standardına göre değerlendirilmiştir. Sonuç olarak, tüm durumlarda, nodül sayısı arttığında aşınma direncinin, toplam aşınma oranını artıran, aşınmaya maruz kalan toplam nodül çevre miktarındaki artışın bir sonucu olarak, azaldığını bildirmektedirler (Çizelge 3.1) [152].

Çizelge 3.1. Farklı matris ve farklı plaka kalınlığı ile elde edilen nispi aşınma dayanımını değerleri (E) [152]

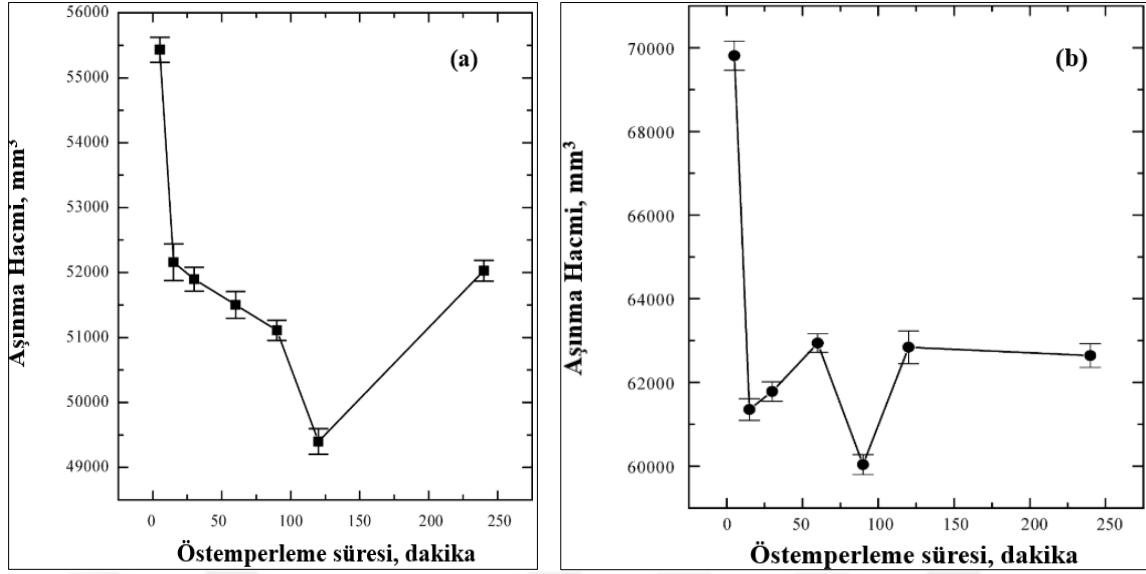
|                | Plaka Kalınlığı (mm)  |      |      |      |                       |
|----------------|-----------------------|------|------|------|-----------------------|
| C1 Malzemesi   | 1,5                   | 2    | 3    | 4    | 13                    |
| Feritik C1     | değerlendirilmemiştir | 0,71 | 1    | 0,87 | değerlendirilmemiştir |
| Perlitik C1    | 1,54                  | 1,58 | 1,77 | 1,83 | 2,22                  |
| Martenzitik C1 | 2,17                  | 2,31 | 2,37 | 2,71 | 2,46                  |
| Ösferritik C1  | 2,32                  | 2,40 | 2,87 | 2,90 | 2,74                  |
|                | Plaka Kalınlığı (mm)  |      |      |      |                       |
| C2 Malzemesi   | 2                     | 3    | 9    | 13   | 25                    |
| Feritik C2     | 0,72                  | 0,96 | 1,16 | 1,23 | 1,30                  |
| Ösferritik C2  | 2,33                  | 2,40 | 2,51 | 2,51 | 2,62                  |

Zimba ve diğerleri (2004), alaşımsız ÖKGDD'nin kuru kayma aşınma davranışını yüksek temas gerilimi altında incelemiştir. Çalışmada kullanılan KGDD'nin kompozisyonu sırasıyla ağırlıkça %3,5 C, %2,6 Si, %0,21 Mn, %0,024 P, %0,01 S, %0,058 Mg ve kalan Fe içermektedir. ÖKGDD eldesi için 900 °C'de 60 dakika sodyumklorür tuz banyosunda östenitlemenin ardından %50 NaNO<sub>2</sub> - %50 NaNO<sub>3</sub> tuz banyosunda 325, 350 ve 375 °C'de 55 dakika süreyle östempelenmiştir. Aşınma testi için salınlı kayma test metodu seçilmiş ve tüm numunelere uygulanmıştır. 6 mm çapında ve 800 HV sertliğe sahip bilyeler hareket eden obje olarak numuneler üzerine temas ettirilmiştir. Doğrusal hızı 0,05 ms<sup>-1</sup> olan ve kullanılan normal yükün 40 N ile 140 N arasında değiştiği test 1000 m kayma mesafesinde kuru kayma ortamında gerçekleştirilmiştir. Numuneler test öncesi ve sonrası tartılmıştır. Elde edilen sonuçlarda, 325–375 °C sıcaklık aralığında östempelenmenin aşınma özellikleri önemli ölçüde iyileştirdiğini gösterdiği bildirilmiştir (Şekil 3.7). Sürtünme katsayısının 10 kat azaldığı ve aşınma direnci birkaç kat arttığı bildirilmiştir. Aşınma izleriyle ilgili optik, taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve enerji dağıtıcı spektroskopi (EDS) sonuçları, ÖKGDD'nin kuru kayma aşınmasında malzeme ayrılmasının, yani plastik akma ve oksidasyondan sorumlu iki ana aşınma mekanizmasının olduğu bildirilmiştir [153].



Şekil 3.7. Özgöl aşınma oranının farklı yüklerde ve östemperleme sıcaklığı ile değişimi [153]

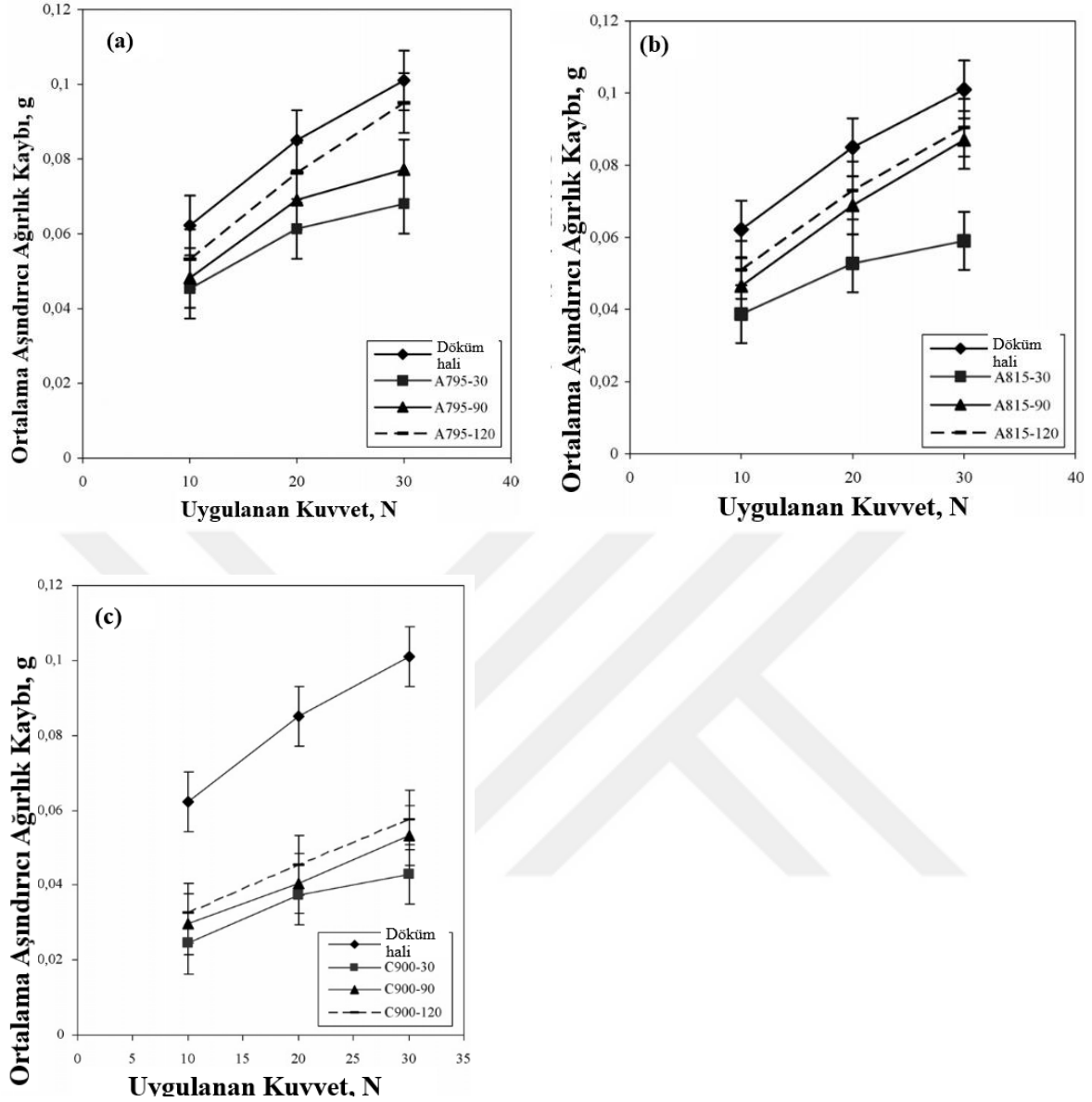
Perez, Cisneros, ve Lopez (2006), Cu-Ni-Mo ile alaşımlanmış ÖKGDD örneklerinin aşınma dayanımını çalışmışlardır. %0,66 Cu, %1,02 Ni ve %0,26 Mo ile alaşımlanmış KGDD malzemesi,  $870 \pm 5$  °C'de 2 saat östenitlendikten sonra 315 ve 370 °C'de 5, 15, 30, 60, 90, 120 ve 240 dakika boyunca östemperlenmiş ve ardından aşınma mukavemeti açısından test edilmiştir. Bu amaçla bir halka üzerinde blok aşınma test metodu kullanılmıştır. Aşınma numuneleri, 45 N'lik bir yük ve 2,40 m / s bir yer değiştirme hızı altında test edildi. Aşınma toplam hacimdeki kayıp ile ölçülmüştür. Deneysel sonuç, ÖKGDD'nin aşınma özelliklerinin mikro yapıdan büyük ölçüde etkilendiğini gösterdiği bildirilmiştir. Özellikle, ferrit ve ince bir karbür dispersiyonu ile birlikte yüksek karbon kalıntı östenitin nispeten yüksek hacimli bir fraksiyonunun gelişimini destekleyecek kadar uzunlukta olan, sırasıyla 90 ve 120 dakika 370 ve 315 °C'de östemperlenmiş numunelerde optimum aşınma özellikleri elde edildiği bildirilmiştir (Şekil 3.8.a ve Şekil 3.8.b). Aşınma testinden sonra, aşınma numuneleri üzerindeki taramalı elektron mikroskobu (SEM) gözlemleri ile incelenmesi sonucu baskın olan aşınma mekanizmasının yüzey altı çatlak oluşumu ve nihai aşınma parçacığı kalıntılarının giderilmesi ile ilişkili katmanlara ayrılma olduğu bildirilmektedir. [25]



Şekil 3.8. Aşınma hacmi (mm<sup>3</sup>); a) 315 °C’de östempereleme, b) 370 °C’de östempereleme [25]

Şahin, Erdoğan ve Kılıçlı (2007), çift matris fazlı yapıya sahip ÖKGDD’lerin aşınma davranışını incelemişlerdir. Çalışmada alaşımsız sünek demir kullanılmıştır. İçeriğinde sırasıyla ağırlıkça %3,42 C, %2,63 Si, %0,318 Mn, %0,019 P, %0,009 S, %0,0471 Mg ve kalanı Fe bulunmaktadır. Bu numuneler ara kritik östenitleme sıcaklığında (795 °C ve 815 °C) iki fazlı bölgede ( $\alpha + \gamma$ ) 20 dakika işlem görmüş ardından ise 365 °C’de tuz banyosunda (%50 KNO<sub>3</sub> + %50 NaNO<sub>3</sub>) farklı sürelerde (30 dakika, 60 dakika ve 90 dakika) gerçekleşen östempereleme ısıl işlemine tabi tutulmuşlardır. Bazı numunelere ise karşılaştırma yapılabilmek adına geleneksel olarak östempereleme ısıl işlemi uygulanmıştır. Östemperelemiş numunelerde çekme dayanımı ve sertlik artan östempereleme süresiyle azalırken uzama önemli ölçüde artmıştır. Aşınma deneyi farklı yükler altında (10 N, 20 N ve 30N) yağlayıcı olmadan, 0,6 ms<sup>-1</sup> hızda yapılmıştır. Aşınma testi için sünek demirin döküm hali, geleneksel östemperelemiş ÖKGDD ve ÖKGDD’nin çift matrisli yapısı farklı yükler altında karşılaştırılmıştır. ÖKGDD’nin çift fazlı yapısının döküm haline oranla daha iyi bir aşınma dayanımı sergilediği bildirilmektedir. Östemperelenen numuneler arasında en düşük ağırlık kaybı, tamamen ösferritik yapısına sahip olan geleneksel olarak östempereleme ısıl işlemi uygulanmış örneklerde gözlenirken, en yüksek ağırlık kaybı, çift matris yapıları örneklerin en düşük ösferrit hacim oranlarına sahip örneklerinde elde edilmiştir. Ayrıca, test edilen tüm örneklerde ösferrit hacim oranının artması ve östempereleme süresinin azalmasıyla aşınma direnci arttığı bildirilmektedir. Aşındırıcı ağırlık kaybı, yumuşak bir ferrit matris nedeniyle döküm hali için keskin bir şekilde

artmıştır. Bununla birlikte, artan yük ile 795 °C ara kritik sıcaklığında östenitleme ısıtma işlemi uygulanıp ardından 30 dakika östemperlenmiş ÖKGDD'nin çift fazlı yapısının ağırlık kaybında bir azalma eğilimi gözlemlenmiştir. Bu, bu numunedeki daha düşük ösferritin hacimsel oranının etkisinden kaynaklanma ihtimali bildirilmiştir. Bu numune için uygulanan diğer östemperleme süreleri için artan süre ve artan yük ile beraber aşınmadan kaynaklı ortalama ağırlık kaybında bir doğrusal ilişki bildirilmiştir. Artan östemperleme süresiyle ağırlık kaybının arttığı bildirilmiştir. 815 °C ara kritik sıcaklığında östenitleme ısıtma işlemi uygulanıp ardından 30 dakika östemperlenmiş ÖKGDD'nin çift fazlı yapısının ağırlık kaybında bir azalma eğilimi görülmüştür. Bu aşınma değeri görülen en düşük değeri olarak bildirilmektedir. Bu değeri aynı grup numune için 90 dakika östemperlenmiş numune göstermiştir. Artan östemperleme süresi, artan yük ile beraber ortalama aşınma oranında bir artış belirlenmiştir. Öte yandan, 900 °C'de östemperlenmiş numuneler arasında, 30 dakika östemperlenmiş numunesi en iyi aşınma direncini sergilemiştir. Geleneksel östemperleme ısıtma işlemi numuneleri diğerlerinden daha iyi aşınma göstermiştir. Östemperlenmiş tüm numunelerde aşındırıcı ağırlık kaybı, östemperleme süresinin artmasıyla artmıştır. Aşındırıcı ağırlık kaybı, döküm hali ve ÖKGDD numuneleri için uygulanan yüklerle yaklaşık olarak doğrusal olarak artmıştır. En yüksek ağırlık kaybı, en düşük sertliğe sahip bir ferritik matris nedeniyle döküm numunede gözlemlendiği bildirilmektedir (Şekil 3.9.a, Şekil 3.9.b ve Şekil 3.9.c) [92].



Şekil 3.9. Farklı ısı işlemlerin ve uygulanan yükün aşınma kaynaklı ağırlık kayıpları karşılaştırmaları a) 795 °C'de ara kritik östemperlenmiş çift matrisli ÖKGDD ile döküm hali, b) 815 °C'de ara kritik östemperlenmiş çift matrisli ÖKGDD ile döküm hali, c) 900 °C'de geleneksel östemperlenmiş ÖKGDD ile döküm hali [92]

Şahin ve Dırak (2007), ÖKGDD'nin farklı koşullar altındaki aşındırıcı aşınma davranışını incelemiştir. Hangi tasarım parametrelerinin kalite karakteristiğini önemli ölçüde etkilediğini bulmak için ortogonal dizi ve varyans analizi kullanmışlardır. %6–7 Mg içeren ferrosilisyum içeren demir ergiyiği 1450 °C'de hazırlanmıştır. Demir içeriği sırasıyla ağırlıkça %2,63 C, %0,318 Si, %0,031 Mn, %0,0423 Cr, %0,0471 Ni, Mg ve geri kalanı Fe'dir. Numunelerin bir kısmı, 795 °C ve 815 °C ara kritik sıcaklıklarında 20 dakika tavlansmıştır. Ardından 365 °C'deki %50 KNO<sub>3</sub> + %50 NaNO<sub>3</sub> tuz banyosuna farklı

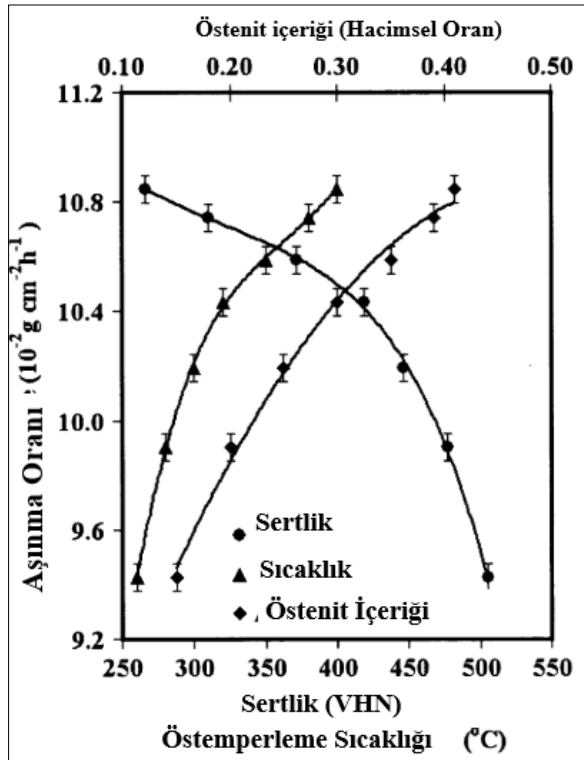
sürelerde (60 dakika ve 180 dakika) östemperleyerek ferrit matris içinde değişen oranlarda östenit fazı içeren çift fazlı yapı elde etmek için hızlıca alınmıştır. Aşınma deneyi için pin-on-disc metodu belirlenmiştir. Aşınma boyunca numunelerin (6,4 mm çapında, 6 mm boyunda) hepsi yeni aşındırıcı kağıt (120 aşındırıcı tane boyutlu SiC) ile temas etmiştir. Test sonrası ise numuneler tartılmıştır. Test süresince kullanılan kayma hızı parametresi 0,6 m/s iken uygulanan yükler 10 N, 20 N ve 30N'dir. Kayma mesafesinin her iki malzeme türü için de en etkili faktör olduğu bulunmuştur. Geleneksel östemperlenmiş örnekler, daha iyi performans göstermiştir. Bu sonucun, numunelerin neredeyse tamamen ösferritik olan mikro yapısından ileri geldiği bildirilmiştir. İkinci en iyi sonuç 850 °C'de ara kritik tavlama sıcaklığında tavllanmış ve 60 dakika östemperlenmiş numuneden elde edilmiştir. Bu, östemperleme süresine bağlı olarak gerçekleşen östenit kararlılığına atfedilmektedir. Bununla birlikte, artan yük ile 795 °C'de ara kritik sıcaklıkta tavllanmış ve ardından 60 dakika östemperlenmiş çift matrisli yapının ağırlık kaybında bir azalma eğilimi vardır (Çizelge 3.2). Bunun, numunenin daha düşük ösferrit hacim oranı etkisinden kaynaklanıyor olması ihtimali bildirilmektedir. Yük arttıkça ağırlık kaybı açık bir şekilde artmıştır çünkü temas yüzeyinin gerçek alanı yük arttıkça artmıştır. Ayrıca kayma mesafesi arttıkça ağırlık kaybı da artmıştır. Östemperleme süresinin artması daha sünek ösferritik yapının sert martenzitin yerini almasına neden olmuştur. Aşınma direnci, beyitik küresel dökme demirin aşındırıcı aşınması için östenitleştirme sıcaklığının artmasıyla artmıştır. Yüksek karbür hacmi, kısmen soğutulmuş sünek demirin aşınma direnci için karbür içermeyen döküm halindeki dökme sünek demire kıyasla aşınma direncini artırdığı bildirilmektedir. Kayma mesafesinin ÖKGDD numunesinin aşındırıcı aşınması üzerinde daha etkili olduğu, bu etkiyi sırasıyla uygulanan yük ve malzeme tipi (ÖKGDD türü için sırasıyla 180 dakika östemperleme ısıt işlemi ve 60 dakika östemperleme ısıt işlemi) takip ettiği bildirilmektedir [154].

Çizelge 3.2. ÖKGDD'lerin östemperleme süresine göre ağırlık kaybı [154]

| 160 dakika östemperlenmiş ÖKGDD |                                        |                                  |                                  |                         |                         |                             |
|---------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------------|
| Örnekler                        | Isıl İşlem                             | Uygulanan Yük                    | Kayma Mesafesi                   | Aşınma Değerleri        |                         |                             |
|                                 | A1: 795-60<br>A2: 815-60<br>A3: 900-60 | B1: 10 N<br>B2: 20 N<br>B3: 30 N | C1: 30 m<br>C2: 60 m<br>C3: 90 m | Ağırlık kaybı $W_1$ (g) | Ağırlık kaybı $W_2$ (g) | Ağırlık kaybı $W_{ort}$ (g) |
| 1                               | A1                                     | B1                               | C1                               | 0,0437                  | 0,0442                  | 0,0439                      |
| 2                               | A1                                     | B2                               | C2                               | 0,097                   | 0,0982                  | 0,0976                      |
| 3                               | A1                                     | B3                               | C3                               | 0,0160                  | 0,0163                  | 0,0161                      |
| 4                               | A2                                     | B1                               | C3                               | 0,0773                  | 0,0782                  | 0,0777                      |
| 5                               | A2                                     | B2                               | C1                               | 0,0483                  | 0,0491                  | 0,0487                      |
| 6                               | A2                                     | B3                               | C2                               | 0,0959                  | 0,0970                  | 0,0964                      |
| 7                               | A3                                     | B1                               | C2                               | 0,0402                  | 0,0411                  | 0,0406                      |
| 8                               | A3                                     | B2                               | C3                               | 0,0654                  | 0,0659                  | 0,0656                      |
| 9                               | A3                                     | B3                               | C1                               | 0,0344                  | 0,0346                  | 0,0345                      |
| 180 dakika östemperlenmiş ÖKGDD |                                        |                                  |                                  |                         |                         |                             |
| Örnekler                        | Isıl İşlem                             | Uygulanan Yük                    | Kayma Mesafesi                   | Aşınma Değerleri        |                         |                             |
|                                 | A1: 795-60<br>A2: 815-60<br>A3: 900-60 | B1: 10 N<br>B2: 20 N<br>B3: 30 N | C1: 30 m<br>C2: 60 m<br>C3: 90 m | Ağırlık kaybı $W_1$ (g) | Ağırlık kaybı $W_2$ (g) | Ağırlık kaybı $W_{ort}$ (g) |
| 1                               | A1                                     | B1                               | C1                               | 0,0322                  | 0,0320                  | 0,0321                      |
| 2                               | A1                                     | B2                               | C2                               | 0,0761                  | 0,0758                  | 0,0759                      |
| 3                               | A1                                     | B3                               | C3                               | 0,1196                  | 0,1182                  | 0,1189                      |
| 4                               | A2                                     | B1                               | C3                               | 0,0797                  | 0,0792                  | 0,0794                      |
| 5                               | A2                                     | B2                               | C1                               | 0,0477                  | 0,0474                  | 0,0475                      |
| 6                               | A2                                     | B3                               | C2                               | 0,0972                  | 0,0968                  | 0,0970                      |
| 7                               | A3                                     | B1                               | C2                               | 0,0480                  | 0,0476                  | 0,0478                      |
| 8                               | A3                                     | B2                               | C3                               | 0,0558                  | 0,0553                  | 0,0555                      |
| 9                               | A3                                     | B3                               | C1                               | 0,0402                  | 0,0397                  | 0,0399                      |

Kumari ve Rao (2009), östemperleme süresinin mikro yapı ve aşınma davranışı üzerine etkisini incelemişlerdir. Bu doğrultuda sünek demir numuneleri ilk olarak 900 °C'de 30 dakika östenitlemenin ardından farklı sıcaklıklarda (260 °C, 280 °C, 300 °C, 320 °C, 350 °C, 380 °C, 400 °C) 2 saat östemperlemişlerdir. Bu sıcaklıkların seçilmesindeki amaç, ince öferrit mikro yapısından kaba ösferrit yapısına kadar olan aralığı kapsamaktır. Aşınma testi, 289 m  $\text{dak}^{-1}$  hızla dönen diskin olduğu pin on disc metodu ile kuru kayma ortamında gerçekleştirilmiştir. Deney sonucunda kaba ösferrit mikro yapısı ince ösferrit yapısından daha yüksek aşınma oranı sergilemiştir. 260 °C'de östemperlenmiş numunenin aşınma direnci en düşük olurken artan östemperleme sıcaklığı ile birlikte aşınma oranı da arttığı bildirilmektedir (Şekil 3.10). Bu, östenitin hacim oranının artmasından kaynaklanan sertlikteki azalmadan kaynaklanmakta olduğu bildirilmiştir. Aşınma oranının azalan sertlik ve artan östenit hacim oranı ile birlikte arttığı bildirilmektedir. Östemperleme sıcaklığı artsa ve sertlik azalsa bile mikro yapı ile ilgili özelliklerin (morfolojisi, östneit içeriği ve östenitin karbon içeriği gibi) aşınma oranını düşürmede kritik bir rol oynadığı belirtilmiştir.

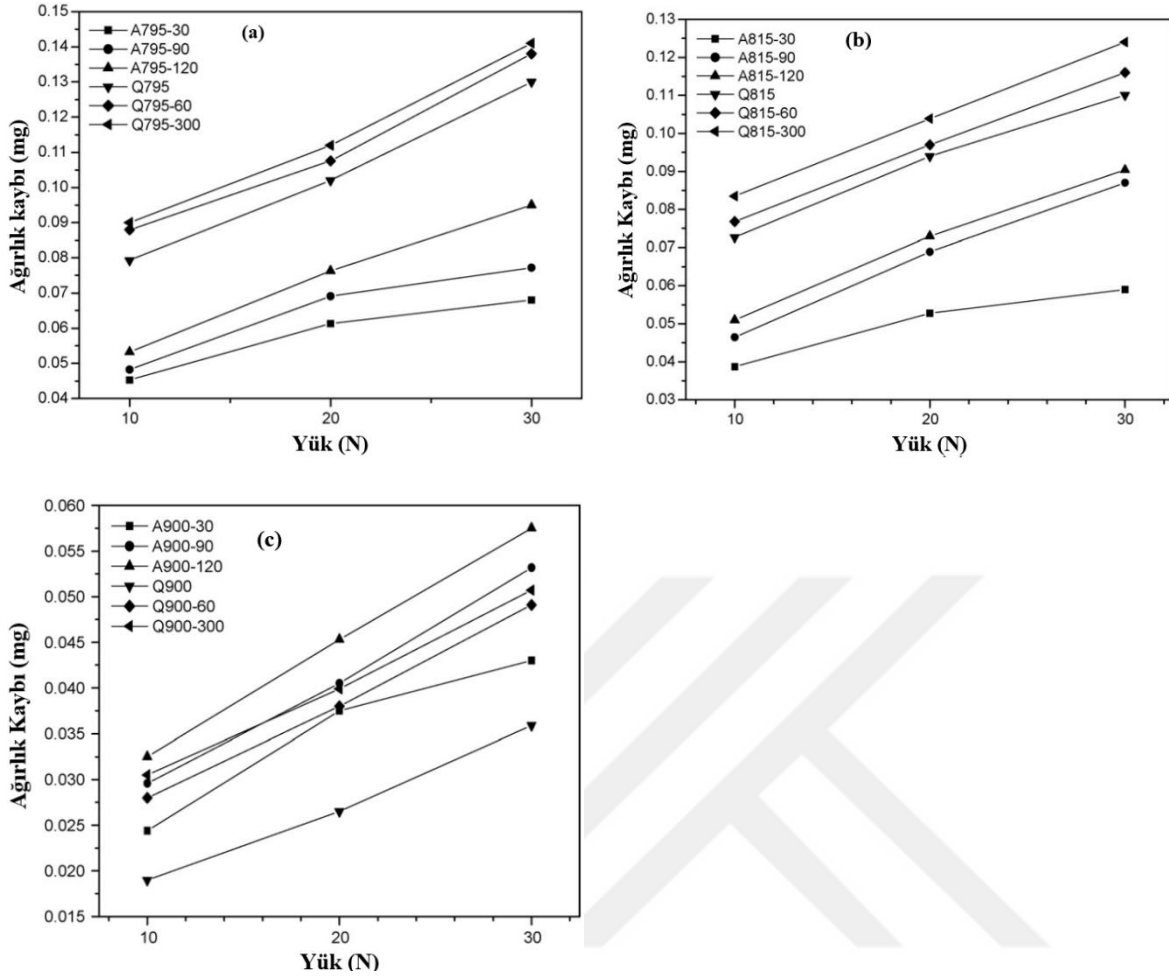
Yüksek sıcaklıklarda östemperlenen östenitin büyük bir miktarı stres kaynaklı martenzit dönüşümüyle artan aşınma direncinde önemli bir etmen olduğu belirtilmektedir. Aşınan yüzeylerin elektron tarama mikroskobu ile karakterizasyonu sonucu aşınmanın yapışma ve katman ayrılması ile meydana geldiği belirlenmiştir. Aşınma oranının akma dayanımına, östenit miktarına ve bu östenitin içerdiği karbon miktarına bağlı olduğu bildirilmektedir [135].



Şekil 3.10. Aşınma oranına östemperleme sıcaklığının, sertliğin, östenit içeriğinin etkisi [135]

Şahin, Kılıçlı, Özer ve Erdoğan (2010), farklı çift matrisli yapıya sahip ÖKGDD'lerin aşınma davranışlarını incelemişlerdir. KGDD eldesi için ergiyik demire % 6-7 Mg içeren ferrosilisyum alaşım 1450 C'de ilave edilmiştir. Aşılama için % 75 ferrosilisyum alaşım kullanılmıştır ve Y-bloğa döküm gerçekleştirilmiştir. Elde edilen malzemenin kimyasal kompozisyonu sırasıyla ağırlıkça %3,50 C, %2,63 Si, %0,318 Mn, %0,019 P, %0,009 S, %0,0471 Mg ve kalanı Fe'dir. ÖKGDD eldesi için KGDD numuneleri çift fazlı bölgede ( $\alpha + \gamma$ ) 795 °C ve 815 °C sıcaklıklarda 20 dakika östenitlenmiş ardından tuz banyosunda (%50 KNO<sub>3</sub> + %50 NaNO<sub>3</sub>) 365 °C'de 30, 90 ve 120 dakika östemperlenmiştir. Bazı örnekler aynı ara ktirik östenitleme sıcaklıklarında 100 °C sıcaklıkta yağda su verilmiş ve 550 °C'de 60 ve 300 dakika tavlansmıştır. Bazı örnekler ise karşılaştırma yapmak adına

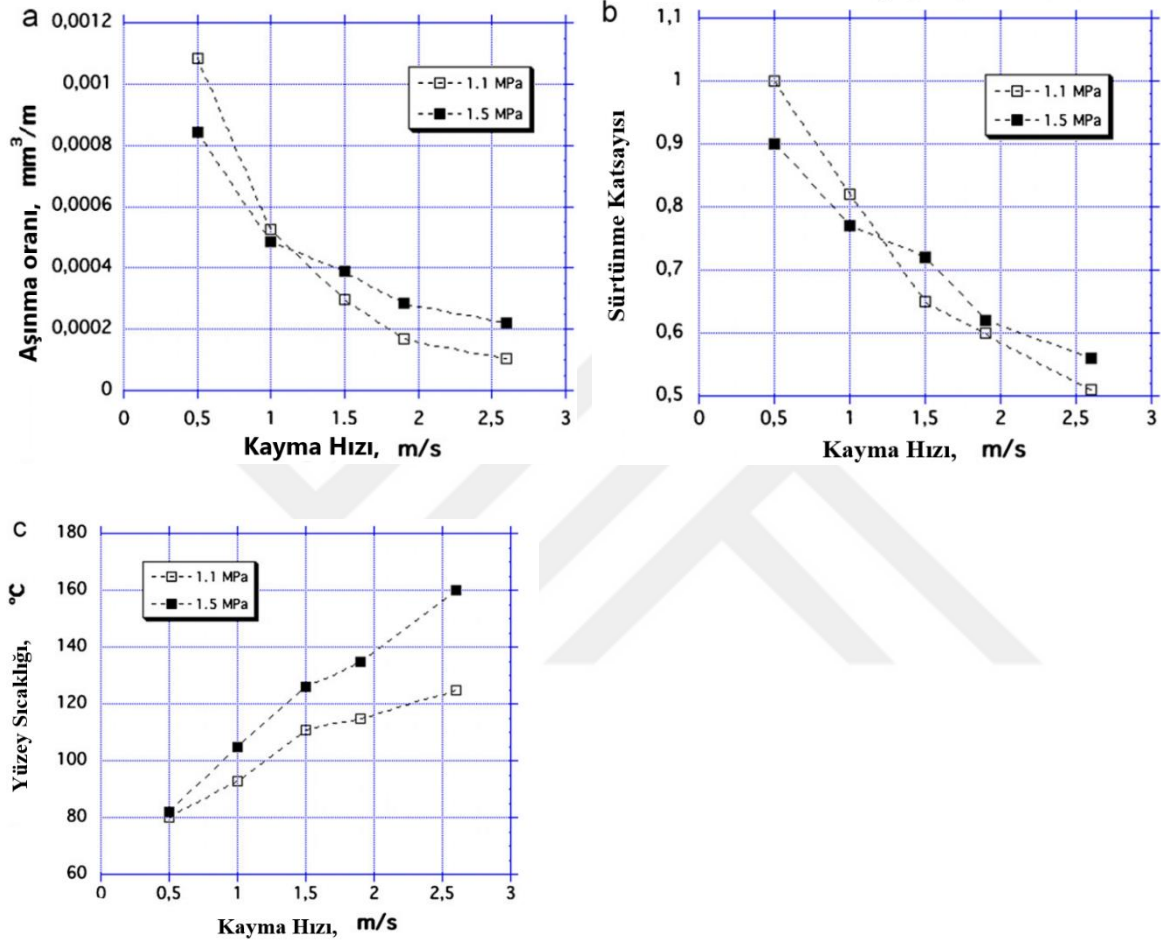
geleneksel olarak östemperlenmiş veya 900 °C’de su verilmiştir. Aşınma testi için pin on disc metodu seçilmiştir. Numuneler 6 mm çapında ve 6 mm uzunluğunda hazırlanmıştır. Aşındırıcı olarak 12 mm kalınlığında ve 160 mm çapında, aşındırıcı tane boyutu 800 olan SiC zımpara kağıdı kullanılmıştır. 10,20 ve 30 N yüklerinde, kayma hızının 1 m / s olduğu durumda deney gerçekleştirilmiştir. Deney öncesi ve sonrası numuneler tartılmıştır. Aşındırıcı aşınmada test edilen her iki malzemenin aşınma kaybının uygulanan yük ile orantılı olduğu gösterilmiştir. Östemperlenmiş tüm numunelerde (A serisi), östemperleme süresi arttıkça aşındırıcı ağırlık kaybının arttığı bildirilmektedir. Bununla birlikte, artan yük ile 30 ve 90 dakika için güçlendirilmiş çift matris yapısına sahip 795 °C’de östemperlenmiş numunenin ağırlık kaybında azalma eğilimi olduğu bildirilmiştir. Su verilmiş örnekleri (Q serisi) durumunda olduğu gibi, uygulanan yükteki bir artış temas gerilimini artırabileceğinden, aşındırıcı ağırlık kaybı yük ile az çok doğrusal olarak arttığı bildirilmiştir. Q serisi numuneleri arasında en yüksek ağırlık kaybı, düşük martenzit hacim fraksiyonu nedeniyle Q795-300, Q815-300 numuneleri için elde edildiği, ancak en düşük ağırlık kaybının en yüksek martenzit hacim fraksiyonu nedeniyle Q900 numunesinde gözlemlendiği bildirilmiştir (Bkz Şekil 3.11a, Şekil 3.11.b, Şekil 3.11.c). Aşınma yüzeyleri üzerinden SEM ile yapılan enine kesit incelemesi, A795 numunesi için Q795 numunesine göre daha pürüzsüz bir yüzeyin gözlemlendiğini bildirilmektedir. Bununla birlikte, A900-120 numunesinde Q900 numunesine göre daha pürüzlü bir yüzey gözlemlendiği bildirilmektedir [95].



Şekil 3.11. Uygulanan yükün bir fonksiyonu olarak ağırlık kaybı; a) 795 °C’de östenitleme, b) 815 °C’de östenitleme, c) 900 °C’de östenitleme [95]

Straffelini, Pellizzari ve Maines (2011), ÖKGDD’nin oksitleyici aşınmasında kayma hızının ve uygulanan basıncın etkisini (50 N, 100 N, 500 N) araştırmışlardır. Deney metodu olarak pin on disc metodunu seçmişlerdir. Seçilen ÖKGDD örnekler farklı matris sertliğine ve kabaca aynı garift içeriğine sahip olduğu bildirilmiştir. Aşınma oranları, kararlı durum sürtünme katsayısı ve temas yüzeylerinin sıcaklıkları ölçülmüş, aktif olan aşınma mekanizması aşınan yüzeylerin karakterizasyon çalışmalarıyla araştırılmıştır. Düşük kayma hızlarında (0,5 – 1 m/s) artan kayma hızıyla birlikte aşınma oranı ve sürtünme katsayısının azaldığı bulunmuştur. Yüksek kayma hızlarında (1,5 – 2,6 m/s) artan kayma hızıyla birlikte artan yüklerle birlikte aşınma oranının ve sürtünme katsayısının azaldığı bulunmuştur (Şekil 3.12.a, Şekil 3.12.b ve Şekil 3.12.c). Bu, kayma esnasında kritik bir sıcaklığa ulaşılmasıyla elde edilen beyaz bir yüzey katmanının oluşmasıyla açıklanmıştır. Ayrıca, karşılaştırma yapmak için, yaygın olarak kullanılan nitrürlenmiş bir çelik de araştırılmıştır. Çünkü nitrürlenmiş çelikler genellikle yuvarlanma-kayma koşulları

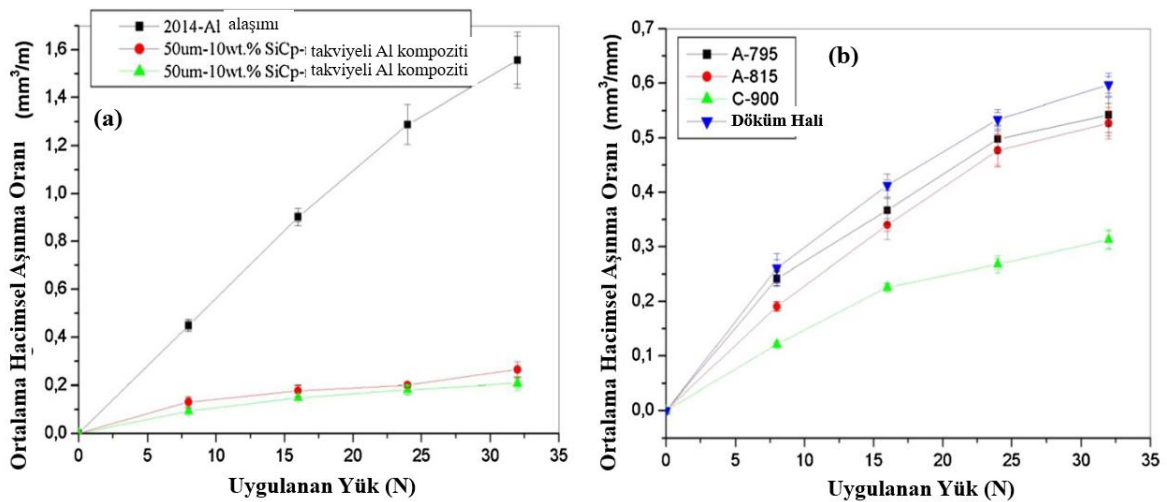
ile karakterize edilen mühendislik uygulamalarında kullanılırlar. ÖKGDD 1050-Ox'in (840 °C – 870 °C östnetilenmiş, 370 °C – 390 °C östemperlenmiş, yüzeyinde oksit tabakası bulunan) aşınma numuneleri, yüzeylerinde bir Fe-oksit tabakasının varlığı ile karakterize edildiği bildirilmektedir [157].



Şekil 3.12. Kayma hızının bir fonksiyonun olarak; a) aşınma oranı, b) sürtünme katsayısı, c) yüzey sıcaklığı [157]

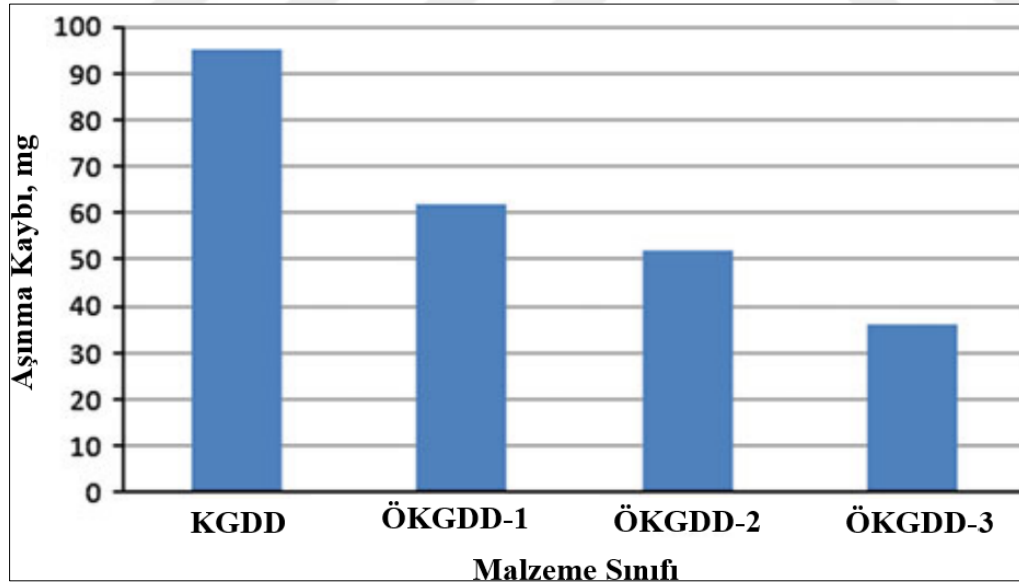
Şahin ve Kılıçlı (2011), metal matrisli kompozit olan SiCp/Al alaşımı ile ösferritik sünek demirin aşındırıcı aşınma davranışı üzerine bir çalışma yapmışlardır. Bu amaçla metal matrisli bu alaşım sıvı metalürjik yollarla elde edilmiştir. 50 µm büyüklüğünde olan ve ağırlıkça %20 SiCp takviyesi içeren metal matrisli kompozit elde etmek için 2014 Al alaşımı matris olarak kullanılmıştır. Matris alaşımının içeriğinde sırasıyla ağırlıkça %0,8 Si, %4,2 Cu, %0,7 Mn, %0,6 Mg ve geri kalan Al'dir. Deneyin bir diğer bileşeni olan ÖKGDD'ler için ise Y-bloğa dökümü yapılan sünek demir ağırlıkça %3,42 C, %2,63 Si, %0,318 Mn, %0,031 Cr, %0,0423 Ni, %0,0471 Mg ve kalan Fe içermektedir. 795 °C ve 815 °C alt ve üst arakritik sıcaklıklarında 20 dakika süreyle tavlanmıştır. Bu numunelere ek

olarak bir grup numune de geleneksel östemperleme ısı işlemine (900 °C’de 90 dakika östenitlemeyi takiben 365 °C’de 60 dakika östemperleme) tabi tutulmuştur. Aşınma testi için pin-on-disc metodu seçilmiş ve uygulanan yüke bağlı olarak ağırlık kaybı hesaplanmıştır. Deneyde 12 mm kalınlığında 160 mm çapında çeliğe aşındırıcı tane boyutu 180 olan zımpara kağıdı (70  $\mu\text{m}$ ’ye karşılık gelmektedir) yerleştirilmiştir. 0,8  $\text{ms}^{-1}$  sabit kayma hızı ve 48 m kayma mesafesinde, 8 N ile 32 N arasında değişen değişik yüklerde deney gerçekleştirilmiştir. Araştırma göstermiştir ki kompozitin aşınma oranı artan SiCp içeriği ile birlikte azalmış, artan yük ile birlikte ise artmıştır (Şekil 3.13.a). Metal matrisli kompozitin aşınma değerinin karşılaştırılan diğer KGDD ve ÖKGDD malzemelerinden daha iyi olduğu bildirilmektedir. Tüm numuneler için artan yük ile birlikte aşınma oranının doğrusal olarak arttığı belirlenmiştir. Sünek demir numuneleri içinde geleneksel östemperlenmiş olanların aşınma oranının daha düşük değere sahip olduğu belirlenmiştir (Şekil 3.13.b). Genel olarak ağırlıkça %20 SiC parçacık ilaveli Al alaşımının karşılaştırılan diğer tüm malzeme türlerinden daha iyi aşınma direncine sahip olduğu bildirilmektedir. Ayrıca, SEM incelemesi, kalıntı parçacıklarının yeniden bağlanmasıyla birlikte birkaç aşınma kraterinin kompozit için baskın olduğunu, ancak daha düşük yüklerde test edildiğinde parçalanmış kalıntı parçacıklarının metal matrisli kompozitler için daha baskın olduğunu göstermiştir. Yapışma, uflanma ve aşındırıcı aşınma alaşımındaki aşınmadan sorumlu mekanizmalar olduğu, ancak aşındırıcı aşınmanın geleneksel olarak tam östenitlenip ardından östemperlenmiş numuneler için en etkili mekanizma olduğu bildirilmektedir [26].



Şekil 3.13. Uygulanan yükün fonksiyonu olarak ortalama hacimsel aşınma oranı a) metal matrisli kompozit örnekleri için, b) sünek demir örnekleri için [26]

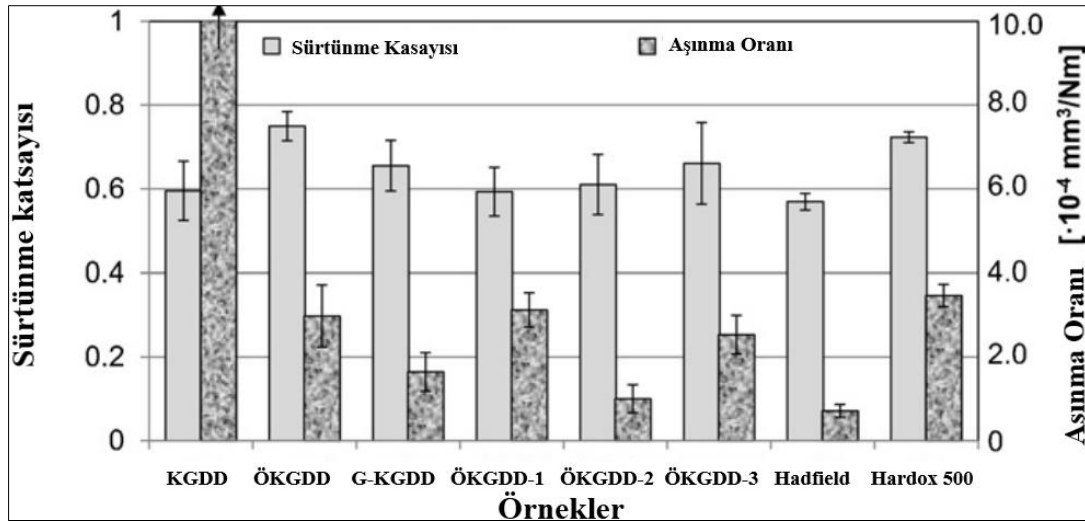
U. Batra, N. Batra ve Sharma (2012), Bakır alaşımlı ÖKGDD'nin aşınma performansını incelemişlerdir. KGDD numuneleri 900 °C'de 60 dakika östenitlenmiş ve ardından 60 dakika süreyle, 270 °C'de (ÖKGDD-1), 330 °C'de (ÖKGDD-2), ve 380 °C'de (ÖKGDD-3) östempelenmiştir. Aşınma testleri, 2,4 m/s doğrusal hızda pin on disc yöntemi kullanılarak kuru kayma koşulları altında gerçekleştirilmiştir. Normal yük 45 N, kayma mesafesi  $1.7 \times 10^4$  m seçilmiştir. Daha yüksek östempereleme sıcaklığında elde edilen ÖKGDD, stres kaynaklı martenzitik dönüşüm ve östenitin gerinim sertleşmesi yoluyla aşınma direncinde iyileşmeye katkıda bulunan büyük miktarlarda östenite sahip olduğu bildirilmektedir (Şekil 3.14). Aşınma oranının %0,2 dayanım gücüne, sünekliğe, östenit içeriğine ve karbon içeriğine bağlı olduğu bulunmuştur. Aşınmış yüzeyler ve aşınma artıklarının doğası üzerine yapılan çalışmada, ÖKGDD'lerdeki ince ösferrit yapının oksidasyonel aşınmaya maruz kaldığını, ancak kaba ösferrit yapının da yapışma, delaminasyon ve hafif aşınmaya maruz kaldığını bildirmektedirler. Kullanılan KGDD malzemesinin kimyasal kompozisyonu sırasıyla ağırlıkça %3,48, %2,028 Si, %0,22 Mn, %0,05 Cr, %0,016 Ni, %0,6 Cu, %0,04 Mg, %0,04 Ti, %0,033 Mo, %0,0079 Sn, %0,012 V, %0,02 Al ve kalan Fe olduğu bildirilmiştir. [27]



Şekil 3.14. KGDD ve ÖKGDD'lerin ağırlık kayıpları [27]

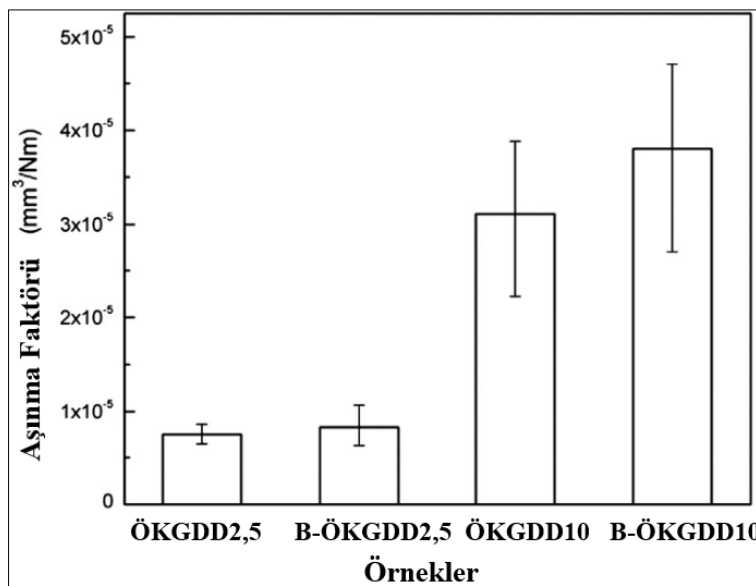
Podgornik ve diğerleri (2012), KGDD'nin aşınma dayanımının yerel yüzey güçlendirmeleriyle artırılmasını araştırmışlardır. Araştırmada kullanılan KGDD'nin kimyasal kompozisyonunu sırasıyla ağırlıkça %3,7-3,9 C, %2,7-2,8 Si, %0,12-0,16 Mn, %0,03 Mg içerdiği bildirilmiştir. OPTICA adı verilen yerel takviyelerle (alaşım

malzemeleri) aşınma direncini geliştirme yöntemi kullanıldığı bildirilmiştir. Alaşım malzemesi olarak da Cr içeren çeliklerin (ağırlıkça %17-20 Cr, %8 Ni, ve düşük miktarlarda Si ve Mn) kullanıldığı bildirilmektedir. Yerel takviyelerle güçlendirilmiş KGDD numunelerine farklı parametrelerde 900 °C’de 60 dakika östenitlemenin ardından 260 °C’de (ÖKGDD-3), 300 °C’de (ÖKGDD-1) ve 350 °C’de (ÖKGDD-2) 75 dakika östemperleme ısı işlemi prosedürleri uygulanmıştır. Aşınma deneyleri salınımlı kayma hareketine sahip deney düzeneğinde gerçekleştirilmiştir. Sertleştirilmiş 100Cr6 çeliği hareketli iken KGDD numuneleri sabittir. Deney oda sıcaklığında, kuru kayma ortamında, %34 g / l tuzlu suda, 0,1 m/s kayma hızında gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.15). Kuru kayma ortamında 50 N yük 100 m boyunca uygulanmış, tuzlu su kayma ortamında ise 200 N yük 700 m boyunca uygulanmıştır. Mevcut araştırmanın sonuçları, sünek demirin tribolojik özelliklerinin yerel yüzey güçlendirmesi ile büyük ölçüde geliştirilebileceğini bildirmektedirler. Karbürlerin oluşumu yoluyla, eklentilerin etrafında sert bir geçiş veya fonksiyonel gradyan bölgesi oluştuğu, bu daha sonra yükü taşıdığı ve KGDD’nin aşınma direncini geliştirirken aynı zamanda düşük sürtünmeyi koruduğu bildirilmektedir. Bununla birlikte, güçlendirilmiş KGDD’nin aşınma direncinin, uygun östemperleme işlemi kullanılarak daha da geliştirilebileceği bildirilmektedir. 350 °C’de östemperleme yapılırsa, KGDD’nin aşınma direncinin karşılaştırılabilir değerlere gelebileceğini veya referans Hadfield kalite çelikten daha iyi hale geleceğini bildirmektedirler [158].



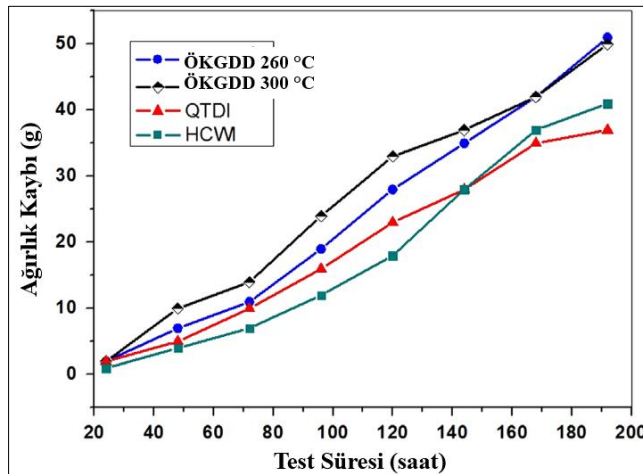
Şekil 3.15. Kuru ortamda kayma sonucu elde edilen sürtünme katsayısı ve aşınma oranı değerleri [158]

Zammit, Abela, Wagner, Mhaede ve Grech (2013), bir yüzey işlemi olan bilyeli parçacık püskürtme işlemi görmüş Cu-Ni ÖKGDD'nin aşınma davranışını incelemişlerdir. Numuneler  $900 \pm 2$  °C'de östenitlemenin ardından  $360 \pm 5$  C'de tuz banyosunda 1 saat bekletilmiştir ve sonrasında havada soğutulmuştur. Aşınma testi için pin on disc metodu seçilmiştir. Bu testte disk 61 HRC sertliğe, 900 mm çapa sahip D2 takım çeliğidir. Bu çelik ön ısıtmayı müteakip, 1025 C'de östenitlenmiş, 5 bar basınç nitrojen kullanılarak su verilmiştir. Daha sonra ise 190 C'de 3 saat tavlanmıştır. Bir diğer deney bileşeni olan pim ise ÖKGDD numuneleridir. Yüzey işlemi için Almen yoğunluğu 0,38 mmA olan, %100 kapsama ile 90 açıda 90 mm uzaktan atış yapılarak gerçekleştirilmiştir. Pimlerin yüzey pürüzlülüğü  $3,7 \mu\text{m}$  olarak ölçülmüştür. Aşınma testleri kuru kayma durumunda ÖKGDD ve bilyeli parçacık püskürtme işlemi görmüş ÖKGDD'nin (B-ÖKGDD) aşınma değerleri karşılaştırılmıştır. Deney parametreleri olarak kayma mesafesinin 3,6 km, kayma hızının 4 m/s, kayma yarıçapının 26 mm olarak 2,5 MPa ve 10 MPa iki farklı basınç değerinde gerçekleştirilmiştir. Aşınma öncesi ve sonrası disk ve pimler tartılmıştır. Aşınmış ÖKGDD'lerin sertliklerinde gerinim sertleşmesi ve sürtünmede oluşan ısıdan kaynaklı, düşük yüklerde %19 artış bildirilirken, yüksek yüklerde %73 artış bildirilmektedir. Ana aşınma mekanizmasının aşınmış yüzeylerde kırmızımsı kahverengi bir tabakanın görüldüğü hafif oksidatif aşınma olduğu bildirilmektedir. Aşınma faktörlerinin ve sürtünme katsayısının hesaplamaları sonucunda bilyeli parçacık püskürtmenin aşınma dayanımını arttırmadığı bildirilmektedir (Şekil 3.16) [160].



Şekil 3.16. ÖKGDD ve B-ÖKGDD örneklerinin aşınma faktörleri [160]

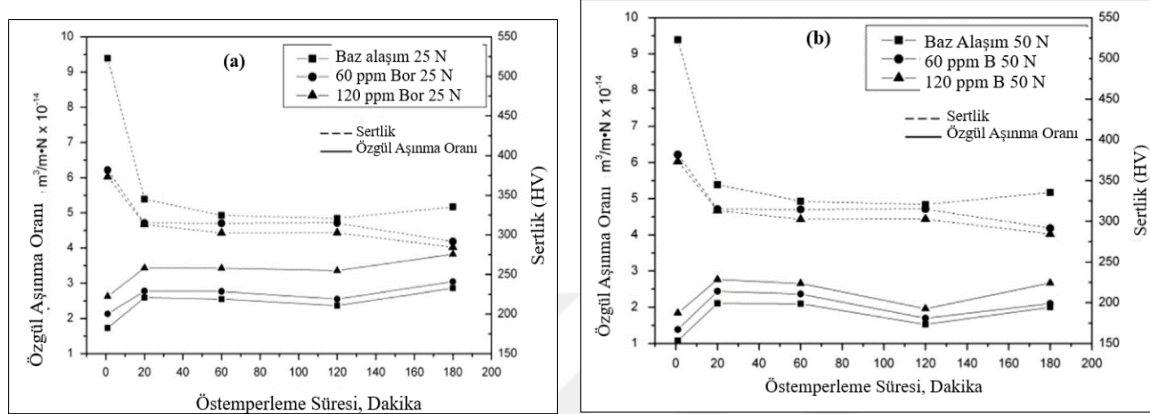
Cardoso, Israel, ve Strohaecker(2014), ÖKGDD ile kır dökme demirin aşınma direncini araştırmıştır. Dönen bir cihaz üzerine yerleştirilen numunelere kum aşındırıcı olarak tatbik edilmiştir. Kullanılan ÖKGDD'ler (ösferritik matris) 260 °C ve 300 °C de östemperlenmiştir. Aynı zamanda karşılaştırmada kullanılan diğer malzemeler ise yüksek kromlu ve karbürlü beyaz dökme demir (martenzitik matris) ve su verilip ardından tavllanmış olan sünek dökme demirdir (temperlenmiş martenzit matris) olarak bildirilmiştir. Sünek dökme demir ve ÖKGDD %92 pik demir ve %8 çelik hurdası ile indüksiyon fırınında üretilmişlerdir. Küreselleştirme işlemi için ağırlıkça %1,5 FeSiMg (%46 Si ve %6,2 Mg), aşılama için ise ağırlıkça %0,5 FeSi75 kullanılmıştır. Ergime sıcaklığı 1540 °C'dir. Su verilmiş ve tavllanmış sünek demirde ise % 0,25 FeMo (%60 Mo) kullanılmıştır. ÖKGDD, 450 °C'de 2 saat ön ısıtma işlemi uygulanmış, 900 °C'de 2 saat östenitlenmiş ve devamında 260 °C ve 300 °C'de östemperlenmiştir. Su verilmiş ve tavllanmış sünek dökme demir ise 450 °C'de 2 saat ön ısıtma işlemi uygulanmış, 900 °C'de 2 saat östenitlenmiş, su verilmiş ve 200 °C'de 2 saat tavlanaştırılmıştır. Yüksek kromlu ve karbitli kır dökme demir ise 900 °C'de östenitlenmiş ve 480 °C'de su verilmiş ve tavlanaştırılmıştır. Başlangıç aşındırıcı elemanının %50 kum ve %50 çakıldan meydana geldiği bildirilmiştir. Numuneler 24 saat arayla her yeni aşındırıcı eleman eklenmeden önce tartılmıştır. Deneyde yüksek kromlu krabür içeren kır dökme demir aşınma testinde iyi bir sonuç vermiştir. 300 °C'de östemperlenen ÖKGDD ise bir miktar daha az performans göstermiştir. Aşındırıcı malzemeye uzun süre maruz kaldıktan sonra 300 °C'deki ÖKGDD numunesi daha az ağırlık kaybı göstermiştir (Şekil 3.17). Bunun sebebi de kalıntı östenitin martenzite olan deformasyon altındaki dönüşümünün sabit olması olarak bildirilmiştir [161].



Şekil 3.17. Numunelerin karşılaştırmalı aşınma dayanımı [161]

Bedolla-Jacuinde, Guerra, Rainforth, Mejia ve Maldonado (2015), bor (B) elementi ile mikro alaşımlanmış ÖKGDD'de kayma aşınması davranışını incelemiştir. Pin on ring test metoduyla yapılan aşınma testi sonucunda elde edilen ana sonuç olarak östemperleme ısı işlemi sırasında östenitin ösferrite dönüşümünü hızlandırdığı bildirilmiştir. Bunun da B ilavesiyle ÖKGDD içinde azalan kalıntı östenit fazına sebep olduğu belirlenmiştir. Fe-Sİ-6 % Mg alaşımı ile küreselleştirme için eklenirken % 0,2 Ca-Si aşılama için döküme ilave edilmiştir. Değişen miktarda (60 ppm ve 120 ppm) B ilaveleri de eriyik dökülmeden hemen önce gerçekleştirilmiştir. Östenitleme ısı işlemi 900 °C'de 40 dakika süreyle yapılırken, östemperleme ısı işlemi 350 °C'de tuz banyosu içerisinde (%50 KNO<sub>3</sub> - %50 NaNO<sub>3</sub>) 1 dakika, 20 dakika, 60 dakika, 120 dakika ve 180 dakika süreyle yapılmıştır. Aşınma testleri, 10 mm çapında ve 20 mm yüksekliğinde silindirik numuneler kullanılarak, 60 mm'lik sertleştirilmiş M2 çeliğe karşı 0,8 m / s'lik bir hızda 15 km bir mesafe boyunca kayan bir halka üzerinde pin on ring test metodu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Uygulanan yükler 25 N ve 50 N'dir. Özgül aşınma oranı ve sürtünme katsayısının her ikisi de yük kaynaklı oluşan kalın oksit tabakası ile düşmüştür ve B ilavesiyle sertliğin düşmesi sebebiyle çok az arttığı bildirilmiştir. Uzun östemperleme sürelerinde, baz alaşım ve 60 ppm B ekli alaşım için sürtünme katsayısı ve özgül aşınma oranlarında büyük bir fark bildirilmemektedir. Tüm örnekler için martenzitin azaldığı 20 dakikalık östemperleme süresiyle arttığı, ösferritik yapının varlığı sebebiyle de işlem aralığında ise çok az arttığı bildirilmektedir (Şekil 3.18.a ve Şekil 3.18.b). Kısa östemperleme süreleri için, daha düşük aşınma üreten daha yüksek sertlik değerleri elde edilmiştir ve gözlenen ana aşınma mekanizması oksidasyondur. Öte yandan, daha uzun östemperleme süreleri için sertlik azalmış, ancak süneklik iyileştirilmiştir (daha fazla ösferrit, daha az martenzit). Yükün artması ile aşınmış yüzey altında daha yüksek bir deformasyon gözlenmiş ve aşınma biraz artmıştır. Bor ilavelerinin karbon difüzyonunu artırdığı ve ösferrit dönüşümünü hızlandırarak daha homojen bir mikro yapıyı teşvik ettiği görülmüştür. Bundan dolayı, daha yüksek bir süneklik ancak daha düşük sertlik değerleri elde edilmiş, bu da aşınma davranışını değiştirmiştir. Baz alaşımın daha yüksek sertlik değerleri, düşük sürtünme katsayısı ve daha düşük aşınma ile ilgilidir. Öte yandan, bor ilaveli demirler baz alaşımdan daha yumuşaktır, ancak yağlayıcı görevi gören daha yüksek hacimdeki grafit ve daha ince matris, mekanik özelliklerin iyi bir dengesini sağlayarak aşınma direnci sağlamaya katkıda bulunduğu bildirilmiştir. 50 N yük uygulanmış baz alaşımın aşınmış yüzeyi incelendiğinde oksit tabakasıyla kaplandığı görülmüştür. Aşınma deneyi süresince malzeme kaybı oksidasyondan kaynaklanır ki aşınma kalıntılarında oksit parçaları belirlenmiştir. XRD

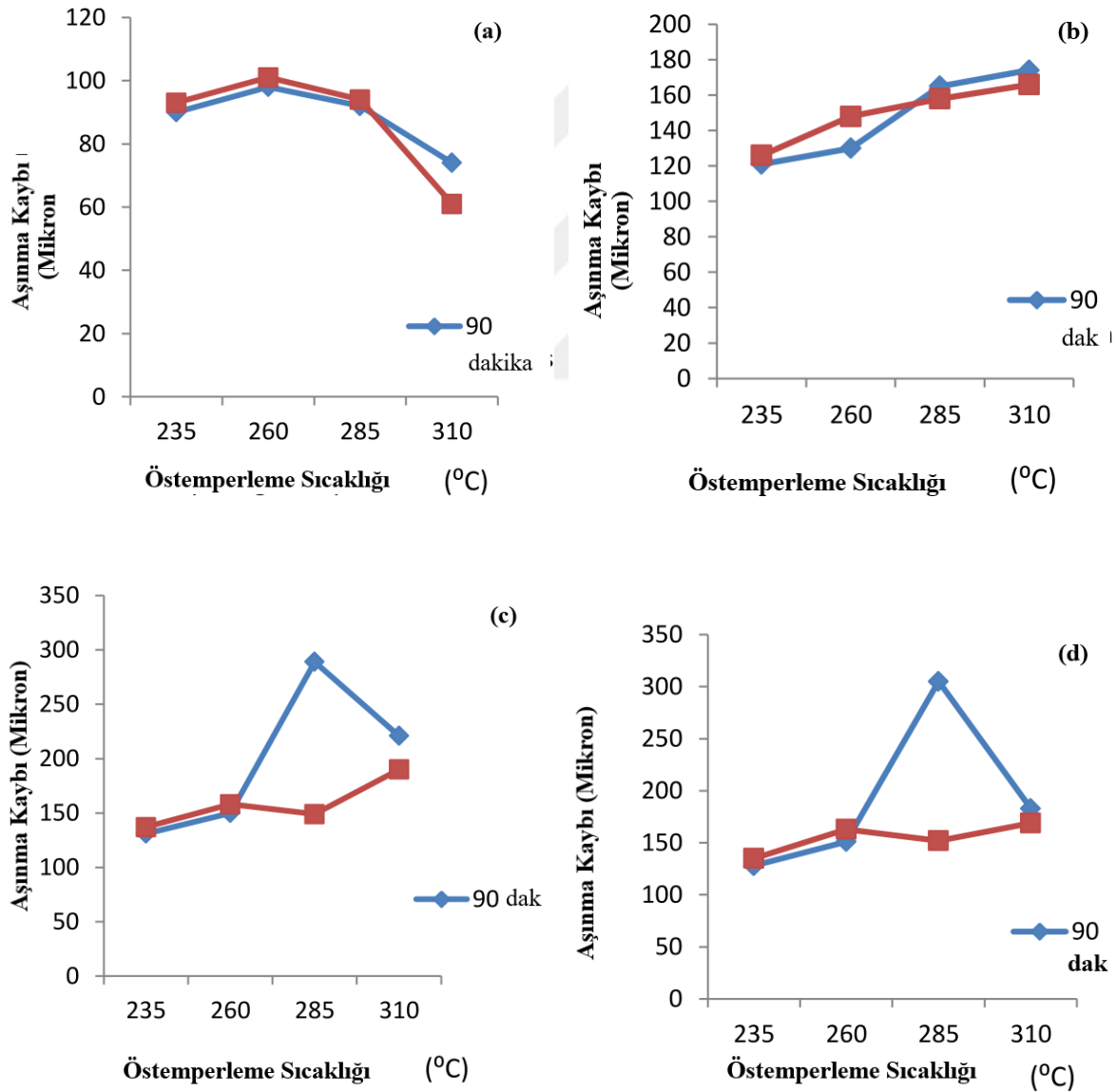
yöntemiyle incelenen bu yapıların manyettit ve hematitten meydana geldiği görülmüştür. Sürtünme katsayısı artan yük ile beraber azaldığı belirlenmiştir. Bu düşmenin sebebi temel aşınma mekanizmasının oksidasyon aşınma olması sebebiyle kalınlaşan oksit tabakası olduğu bildirilmektedir [163].



Şekil 3.18. Östempirleme süresinin bir fonksiyonu olarak özgül aşınma oranı ve sertlik, a) 25 N, b) 50 N [163]

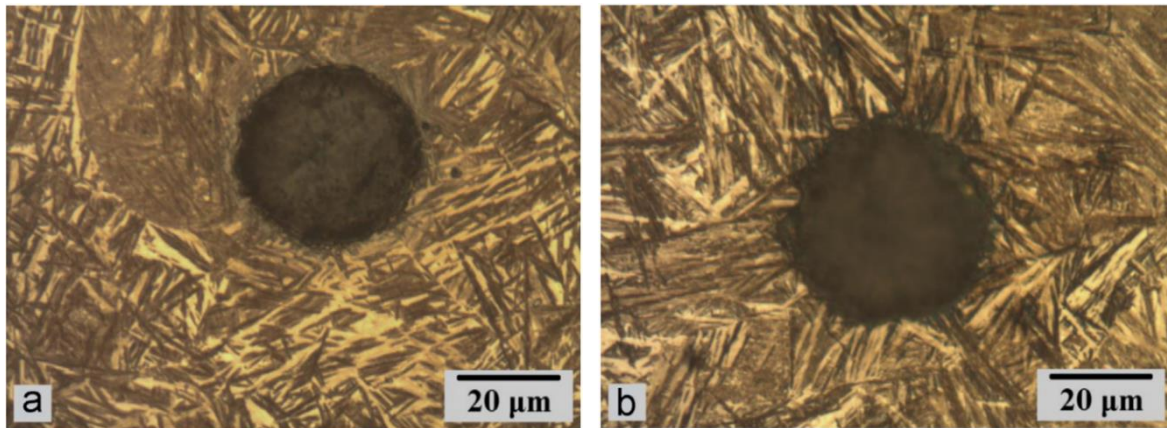
Sharma (2015), östempirleme ve sıcaklığın ÖKGD’de aşınma karakteristiği üzerine çalışmıştır. Bu kapsamda tüm sünek demir numuneleri 900 °C’de 120 dakika östenitlemiş, 90 ve 120 dakika olarak iki farklı sürede farklı sıcaklıklarda (235 °C, 260 °C, 285 °C, 310 °C’de östempirleme ısı işlemine tabi tutmuşlardır. Pin on disc test metodu ile aşınma deneyleri yapılmıştır. Bu deney 4 saat süreyle 40 N yük ve 120 elek gözü boyutunda alümina aşındırıcı diski kullanılarak yapılmıştır. Çalışma göstermiştir ki artan östempirleme sıcaklığı ile ÖKGD’de bulunan beynit ve martenzit varlığı artmış bu da yapının kabalaşmasına sebep olur. Aşınmadan kaynaklı ağırlık kaybı 90 ve 120 dakikada östempirlenmiş bütün numunelerde ilk saat için benzer olduğu bildirilmiştir. 235 °C ve 260 °C ye geçişte artarken 285 °C’ye geçişte çok az düşmüş ve sıcaklık 310 C’ye çıktığında ise aşınma oranı daha hızlı olduğu bildirilmiştir. 1 ve 2 saat arasında, 235 °C ve 260 °C sürede 90 dakika östempirlenmiş numunelerde 120 dakikada östempirlenenlere kıyasla aşınma oranının düşük olduğu bildirilmektedir. Ama artan sıcaklıklarda her iki östempirleme süresi için de bu değerin korunduğu bildirilmiştir. Aşınmanın 3 ve 4 saatlik dilimlerinde 235 °C ve 260 °C’de 90 dakika ve 120 dakika östempirlenmiş numunelerde aşınma kaybı korunurken, 285 °C’ye çıkan sıcaklıkta 90 dakika östempirlenmiş numunede oldukça şiddetli fakat 120 dakikada östempirlenmiş numunede çok az bir değişim olduğu bildirilmiştir. Ve sıcaklık 310 °C’ye çıktığında aşınma oranı her iki östempirleme süresi

için de biraz arttığı belirlenmiştir. Sonuç olarak, zaman periyodu uzadıkça aşınma kaybının arttığı, ancak başlangıçta hızlı olduğu ve bir süre sonra normal olarak arttığı bildirilmektedir. 285°C, 90 dakikalık östemperlenmiş numunedeki anormalliğin ise yapının östenitleştirme işlemi sırasında şiddetli bir dekarbürizasyona uğramış olmasından kaynaklandığı bildirilmektedir (Şekil 3.19). Östenitleştirme sırasında numunenin karbonlama yatağının dışında kalması ve bu numunenin aşınma direncinde azalmaya katkıda bulunan karbon kaybına neden olması oldukça muhtemel olduğu bildirilmiştir. Artan östemperleme sıcaklığı ile ÖKGDD'nin aşınma dayanımının azaldığı bildirilmektedir [164].



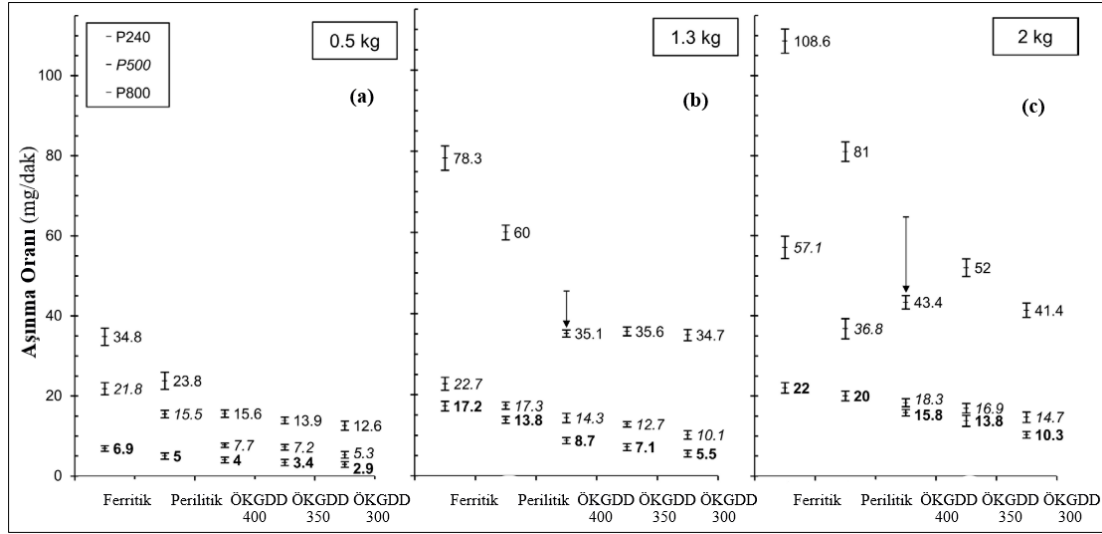
Şekil 3.19. Değişen östemperleme sıcaklığı ve süresi ile birlikte elde edilen aşınma kaynaklı ağırlık kaybı; a) 1 saat, b) 2 saat, c) 3 saat, d) 4 saat [164]

Colombo, Echeverria, Dommarco ve Massone (2016), ÖKGDD’de TiN kaplama kalınlığının hadde yorulma dayanımına etkisini araştırmışlardır. Kullanılan malzemenin kimyasal kompozisyonunda sırasıyla ağırlıkça %3,35 C, %2,87 Si, %0,13 Mn, %0,015 S, 0,032 P, %0,043 Mg, %0,76 Cu, %0,57 Ni ve kalan Fe olduğu bildirilmiştir. 65 mm çapta 8 mm kalınlıktaki numuneler 910 °C’de 120 dakika östenitlenmiş, ardından tuz banyosunda 280 °C’de 90 dakika östemperlenmiştir. Kaplamalar fiziksel buhar biriktirme (PVD) yöntemiyle elde edilmiştir. Kaplanmış örneğin mikro yapısının kaplanmamış olana benzer olduğu görülmüştür; grafit yumrularının yanı sıra hem asiküler ferritten hem de yüksek karbon içerikli östenitten oluştuğu bildirilmiştir. Bu nedenle, kaplama işlemlerinin ÖKGDD örneklerinin mikro yapısını bozmadığı bildirilmiştir. (Şekil 3.20.a ve Şekil 3.20.b). Kaplama süreleri, 0,7 µm (30 dakika), 1,4 µm (60 dakika) ve 2,1 (150 dakika) µm’lik nominal kalınlıklar elde etmek için ayarlanmıştır. Yorulma testlerinde SKF 51107 (SAE 52100 çeliği 6 mm çapta) eksenel bilyelli rulman karşıt parça olarak kullanılmıştır. 1650 devir/dak hız ile 1400 MPa temas basıncı  $1,04 \times 10^6$  çevrim/saat uygulanarak hidroilik yağ varlığında (100 cSt kinematik viskoziteli, 40 °C sıcaklıkta, 15 C’deki yoğunluğu 0,891 kg/l) gerçekleştirilmiştir. Numunelerin haddelenmiş yüzeyleri SEM kullanılarak incelenmiştir. Kaplama kalınlığı arttıkça, analiz edilen aralık dahilinde, kaplanmış numunelerin aritmetik ortalama pürüzlülüğü biraz artarken, yatak alanı daha önemli ölçüde azaldığı bildirilmektedir. Kaplama kalınlığı arttıkça hadde yorulma dayanımı azalır. 0,7 mm kaplama kalınlığında artış gözlemlenmiş, daha kalın kaplamalarda durumum kötüleştiği bildirilmiştir [29].



Şekil 3.20. ÖKGDD’nin mikro yapısı; a) biriktirme öncesi, b) 150 dakika biriktirme sonrası [29]

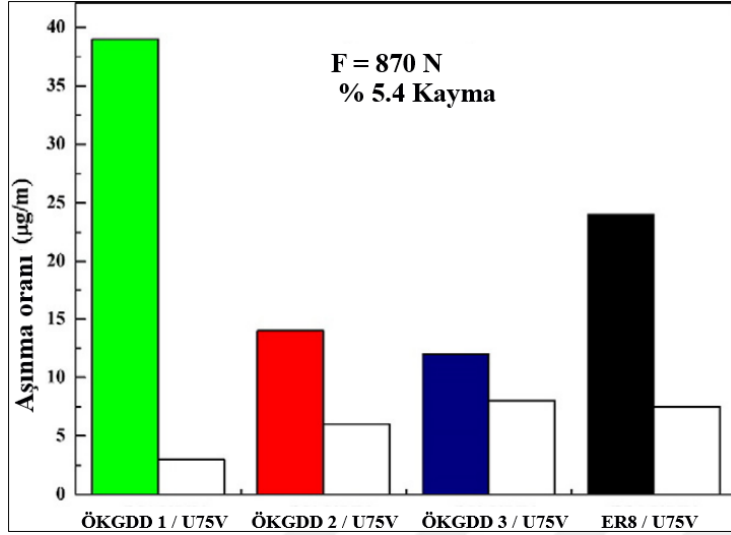
Balos ve diğeri (2016), farklı kalıntı östenit içeriklerinin ÖKGDD'nin aşınma davranışına etkisini incelemişlerdir. Bunun için iki sünük demir başlangıç malzemesi olarak seçilmiştir. Küreselleştirme işlemi için sandviç yöntemi seçilmiştir. Küresel grafit eldesi için baz demir eklenmiştir (ağırlıkça %5 Mg içeren ağırlıkça %2,2 FeSiMg5). Sonrasında aşılama için ağırlıkça %75 Si içeren FeSi eklenmiştir. Olası segregasyonu önlemek adına Y-blokların en altından numuneler alınmıştır. Alaşımsız numunelerden ÖKGDD elde edilmiştir. Bunun için 900 °C'de 2 saat argon koruyucu atmosferinde östenitlemeyi, %50 NaNO<sub>3</sub> - %50 KNO<sub>3</sub> tuz banyosunda 300 °C, 350 °C ve 400 °C'de 1 saat süreyle süratli bir su verme işlemleri sırasıyla uygulanmıştır. Aşınma testi için pin on disc metodu seçilmiştir. SiC aşındırıcı kağıtları (P240, P500 ve P800 aşındırıcı tane boyutlarında) kullanılmıştır. Numuneler, oda sıcaklığındaki suyun 10 ml/dak ile sisteme aktığı, döndürücü milin hızının 250 dak<sup>-1</sup>, numunelerin merkezden uzaklığı 70 mm olacak şekilde, 0,5 kg, 1,3 kg ve 2 kg yüklerine 30 saniye boyunca maruz kalmış ve ağırlık kayıpları test öncesi ve sonrası için hesaplanmıştır. Yük ve zımpara kağıdına bakılmaksızın en yüksek aşınma oranı ferritik sünük dökme demir ile elde edilmiştir. Sebebi sertliğinin düşük olmasındandır. Ferritik dökme demiri perlitik dökme demir izler. Uygulanan tüm aşındırıcı tanecik boyutlarının (P240, P500, P800), östemperleme sıcaklığı 400'den 300 °C'ye düştüğü için aşınma oranında sabit bir düşüşe neden olduğu görülmüştür. Benzer bir eğilim, daha yüksek yükler (1,3 ve 2 kg) ve daha ince taneli aşındırıcı tane boyutu (P500, P800) uygulandığında ortaya çıkmıştır. Bununla birlikte, daha büyük tane boyutunda (P240) ve daha yüksek yükte (1.3 ve 2 kg), 400 °C'de östemperlenen numunelerin aşınma oranı, 350 °C'de östemperlenen numunelere göre daha düşüktür ve 300 °C'de östemperlenmiş numunelerinkine benzer olduğu bildirilmektedir. Bu değerler Şekil 3.21'den görülebilir. Bu olay ince filmde stres kaynaklı kalıntı östenitin martenzit fazına dönüşmesi olgusuyla açıklanmıştır. Aşındırıcı tane boyutu daha büyükse ve yük daha yüksekse yerel basınç daha yüksek olduğu ve bunun kalıntı östenit fazını martenzit fazına dönüştüreceği bildirilmiştir [165].



Şekil 3.21. Farklı yükler altında aşınma oranları a) 0,5 kg, b) 1,3 kg, c) 2 kg [165]

Zhang ve diğerleri (2016), demir yolu tekeri malzemesi olarak ÖKGDD'nin kullanımının aşınma ve sürtünme davranışını araştırmışlardır. Kullanılan ÖKGDD'ler için üç farklı dayanım seviyesi seçilmiş ve bir çeşit ray çeliği ile teker çeliği eşleştirilmiş, rolling-sliding aşınma testi uygulanmıştır. Aşınma testi düzeneğinde üst disk (U75V ray çeliği) için 180 tur/dakika parametresi belirlenirken alt disk (ER8 tren tekeri çeliği) için 200 tur/dakika parametresi seçilmiştir. Kayma hızı 0,0209 m/s, uygulanan yük 870 N, sıcaklık 10 °C ve nem % 5'dir. Bütün numuneler 100.000 çevrimde test edilmişlerdir. Sonuçlarda, matris sertliğinin artmasıyla birlikte artan sürtünme katsayısı nedeniyle aşınma oranının azaldığı bildirilmektedir. Ara yüzeydeki sertlik artışının deformasyon sertleşmesi (pekleşme) ve kalıntı östenitin gerilim nedenli martenzit fazına dönüşümünden olduğu bildirilmektedir. Numuneler 900 °C ve 910 °C sıcaklıklarda 110 dakika, 120 dakika ve 150 dakika östenitlemenin ardından 380 °C de 60 dakika, 340 °C'de 60 dakika ve 300 °C'de 120 dakika östempelenmiştir. Bütün ısı işlemler neticesinde beyitik ferrit ve kalıntı östenitin birlikte olduğu faz karışımı elde etmişlerdir. Temel aşınma mekanizması katman ayrılması olduğu, ki bunun da matrisin sertliğinin artmasıyla iyi huylu hale geldiği bildirilmektedir. 340 °C'de 60 dakika östempelenmiş ÖKGDD kabul edilebilir sürtünme ve aşınma davranışı gösterirken aynı zamanda görece olarak daha üstün mekanik özellikler sergilediği bildirilmiştir. En yumuşak matrise sahip olan 910 °C'de 120 dakika östenitlenip 380 °C'e 60 dakika östempelenmiş numune (ÖKGDD 1), en düşük aşınma direnci anlamına gelen en yüksek aşınma oranını vermiştir. Öte yandan, en sert matrise sahip 910 °C'de 150 dakika östenitlenip 300 °C'de 120 dakika östempelenen numune (ÖKGDD 3), en yüksek aşınma direncini yani en düşük aşınma oranını vermiştir. 900 °C'de 110 dakika

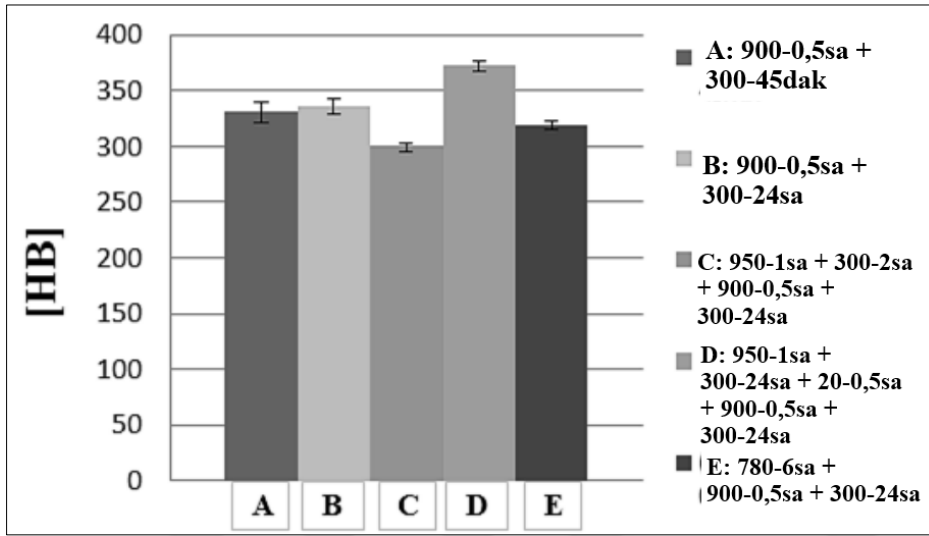
östemperlenip 340 °C’de 60 dakika östemperlenen numunenin (ÖKGDD 2) aşınma oranı diğer ikisi arasında olduğu ve 910 °C’de 150 dakika östenitlenip 300 °C’de 120 dakika östemperlenen numuneye çok daha yakın durduğu, bunun da nispeten iyi bir aşınma direncine işaret ettiği bildirilmektedir (Şekil 3.22) [166] .



Şekil 3.22. Aşınma çiftlerinin aşınma oranları [166]

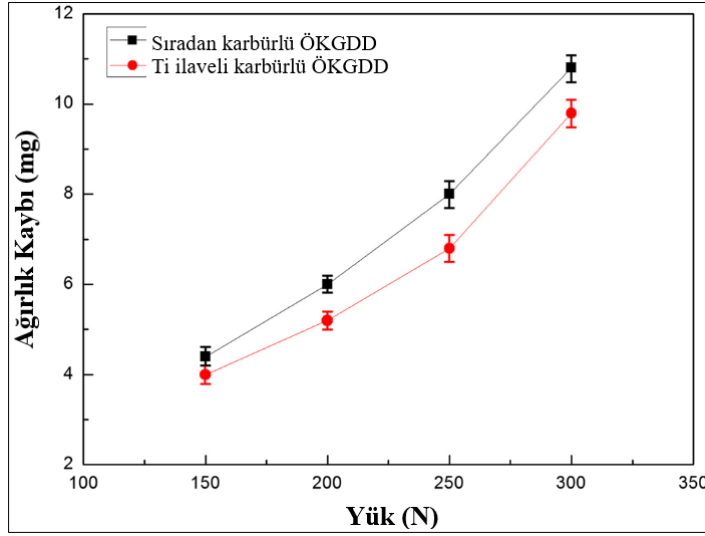
Nawrocki, Lukasik, ve Myszka (2018), ön ısıt işlemlerin ÖKGDD’nin mekanik özellikleri üzerine etkisini araştırmışlardır. Bu çalışmada Cu ve Mo elementlerinin artırılmış oranları kullanılmıştır. Kullanılan sünek demir malzemesi perlitik yapıdadır ve ağırlıkça %3,4 C, %2,8 Si, %0,28 Mn, %0,035 P, %0,035 S, %0,02 Ni, %0,055 Mg, %0,72 Cu, %0,27 Mo içermektedir. NiCuMg17 kullanılarak küreselleştirme işlemi uygulanmış ve sandviç metoduyla üretilmiştir. Dilatometrik çalışma ile Ac1 (780,5 °C) ve Ac3 (883,2 °C) sıcaklıkları belirlenmiştir. 5 farklı numune için 5 farklı ısıt işlem prosedürü uygulanmıştır. Değişkenleri, ön ısıt işlemlerin zaman ve sıcaklık parametreleri olarak belirlemişlerdir. İki numune geleneksel östemrpeleme ısıt işlemine tabi tutulmuştur. Her iki numune öncelikle 900 °C’de 30 dakika östenitlenmiş, ardından biri 300 °C’de 45 dakika östemperlenirken diğeri ve 300 °C ‘de 24 saat östemperlenmiştir. Diğer üç numune için östemperleme ısıt işlemi aşaması için değerler sabit tutulmuştur (900 °C’de 30 dakika östenitleme + 300 °C’de 24 saat östemperleme). Bu örneklere uygulanan ön ısıt işlemler farklılık gösterdiği bildirilmiştir. Deney sonucunda, çift östemperlenmiş numunede tane büyümesinin önemli ölçüde olduğu ve bunun gerilme dayanımı ile uzamayı düşürdüğü mekanik testler ile karakterize edildiği bildirilmektedir. Çift östemperlenmiş numune için darbe dayanımı en düşük değerlerden biri elde etmişlerdir. Isıt işlemin oda sıcaklığına inerek, ilk izotermal

tutmadan sonra yapılması, beynitik ferrit plakaların parçalanmasıyla sonuçlandığı bildirilmektedir. Numunenin en yüksek sertlik, gerilme mukavemeti ve uzama değerlerine sahip olduğu bildirilmiştir (Şekil 3.23). Kısa ve uzun geleneksel ısıtma işleminden sonra elde edilen yapının morfolojisi, izotermal bekletilmiş sünek demirinkiyle benzer olduğu bildirilmiştir. Ayrıca bu numuneler en iyi çekme ve uzama değerlerini elde edildiği bildirilmektedir [70].



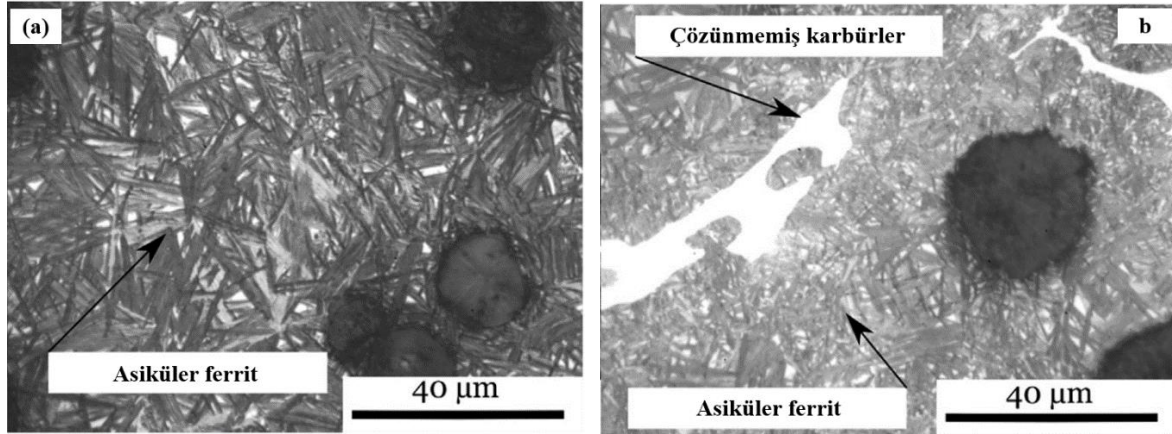
Şekil 3.23. Farklı ısıtma işlemleri sonucu elde edilen sertlik değerleri [70]

Yang ve diğerleri (2019), Ti modifikasyonun karbürli ÖKGDD'lerin mikro yapı ve özelliklerine etkisini araştırmışlardır. Kullanılan karbürli ÖKGDD'nin kimyasal bileşiminde ağırlıkça %3,72 C, %2,77 Si %0,51 Mn, %0,99 Cr, %0,011 S, %0,024 P ve kalan Fe içerdiği bildirilmiştir. %0,1 Ti ilavesiyle TiC parçacıkları oluşmuştur ve bu karbürler matris içinde uniform dağılmıştır. Grafit nodüllerinin maksimum çapı azalmıştır. 350 °C'de su verme ısıtma işleminden sonra Ti içeren karbürli ÖKGDD'nin sıradan karbürli ÖKGDD'den 3,5 kat daha yüksek HRC değerine sahip olduğu belirtilmektedir. Aşınma testi halka üzerinde blok yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. GCr15 çeliği 200 devir / dakika ile dönerek aşındırıcı görevi görmüştür. Test öncesi ve sonrası ağırlık kaybı hesaplanmıştır. 300 N yükte elde edilen ağırlık kaybının sıradan karbürli ÖKGDD'den % 14,8 daha az olduğu bildirilmektedir (Şekil 3.24) [31].



Şekil 3.24. Aşınma zamanı ve uygulanan yük arasındaki ilişki [31]

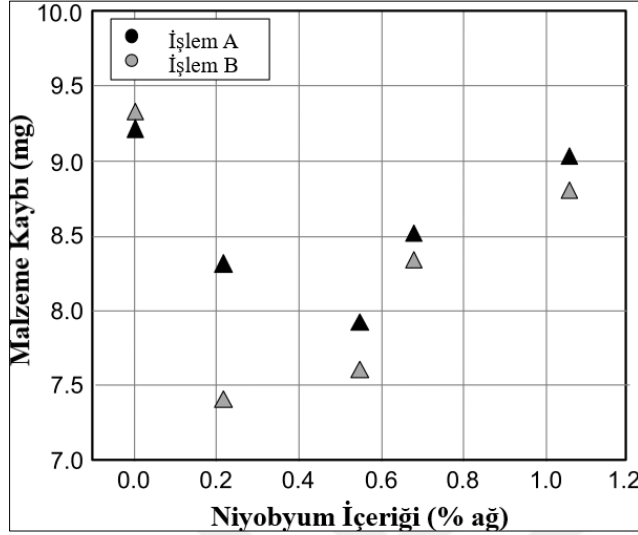
Pedro ve Dommarco (2019), karbürlü ÖKGDD'lerin haddelme temas yorulma davranışını (RCF) incelemişlerdir. İki farklı ısıtma işlem parametresiyle elde edilmiş ÖKGDD kullanılmıştır. Kullanılan KGDD ve Karbürlü KGDD'nin kimyasal içeriğinde sıralı ikili olacak şekilde başlıca bulunan elementler ağırlıkça %3,43 – 3,66 C, %2,68 – 3,01 Si, %0,5 - 0,42 Mn ve diğer elementler ile birlikte kalan Fe içerdiği bildirilmiştir. FeSi ve FeSiMg aşılama ve küreselleştirme için kullanılmıştır. Daha sonra 62 mm çapta ve 10 mm kalınlıkta işlenen numuneler östenitleme işlemine 910 °C'de 120 dakika tabi tutulmuşlardır. Daha sonra östempereleme ısıtma işlemi için KGDD numuneleri 280 °C'de karbürlü KGDD numuneleri ise 360 °C'de tuz banyosunda 90 dakika işlem görmüşler ve oda sıcaklığına havada soğutulmuşlardır. Yorulma testleri farklı temas koşullarında (yük, pürüzlülük, kayganlaştırıcı ve hız) gerçekleştirilmiştir. Testte kullanılan karşılık eleman olan bilyeleri 51107 olarak seçmişlerdir. Karbürlü ÖKGDD'lerin mikro yapısındaki küresellik ve nodüllerin boyutu benzer olduğu fakat karbonun karbür yapısına dahil olması sebebiyle nodül sayısı daha az olduğu bildirilmektedir (Şekil 3.25.a ve Şekil 3.25.b). Benzer sertlik değerlerinde Karbürlü ÖKGDD daha yüksek bir dayanım gösterdiği bildirilmiştir. Yüzeyde veya yüzeye yakın yerlerde bulunan nodüllerin çatlak çekirdeklenme yerleri olduğu, graf içeriğinin karbürler ile değiştirildiğinde yük taşıma kapasitesinin ve de haddelme / yuvarlanma temas yorulmasının ÖKGDD'den fazla olduğu bildirilmektedir [173].



Şekil 3.25. Mikro yapı görünüşleri %2 Nital dağlayıcı ile elde edilen 280 °C’de östemperlenmiş; a) ÖKGDD, b) karbürli ÖKGDD [173]

Chen ve diğerleri (2019), ÖKGDD’de Nb ile alaşımlamanın tokluk ve aşınma dayanımına etkisini araştırmışlardır. Kullanılan ÖKGDD’lerin kompozisyonunda sırasıyla ağırlıkça %3,56 - 3,69 C, %2,34 – 2,63 Si, %1,90 – 2,13 Mn, %0,30 - 0,31 Mo, %0,52 – 0,54 Cu, %0,21 – 1,06 Nb, %0,04 – 0,05 P, %0,014 – 0,019 S kalan Fe olduğu bildirilmiştir. Karbon eşdeğeri (CE) ise 4,44 – 4,53 arasında değişen değerler almıştır. İki farklı östemperleme sıcaklığı farklı mikro yapı eldesi için seçilmiştir. Numuneler ilk olarak (İşlem A) 900 °C’de 3 saat östenitlemenin ardından havada soğutulmuş ardından 300 °C’de 1,5 saat izotermal bekletilmiştir ve ardından oda sıcaklığında su verilmiştir. İkinci olarak (İşlem B) havada soğutma işlemi 450 °C’de kesintiye uğratılmış ve malzemeler taş yününe sarılmıştır. Bu, düşük soğuma oranlarında sürekli soğuma sağlamıştır. Aşınma testi halka üzerinde blok metodu ile kuru kayma ortamında gerçekleştirilmiştir. Blok malzemesi olarak ÖKGDD numuneleri seçilirken halka malzemesi olarak 40 mm çapında 10 mm uzunluğunda 50 HRC sertliğe sahip ısıtıl işlem görmüş alaşımlı çelik kullanılmıştır. Test, 80 N’da 200 devir/dak hızda gerçekleştirilmiştir. Deney öncesi ve sonrası ağırlık ölçümü yapılmıştır. Şekil 3.26’da görüleceği üzere Nb içeriğinin %0,55 değerine doğru artmasıyla ağırlık kaybında önemli bir azalma gözlemlenmiştir. %0,68 niyobyum ilaveli numuneler, ağırlık kaybında ani bir artış gözlemlenmiştir. Ağırlık kaybındaki büyüme % 1.06 Nb içeren malzeme için devam etmiş ve Nb içermeyen malzemeden çok az daha iyi bir performans gösterdiği bildirilmiştir. En iyi performans, İşlem B’ye göre %0.21 Nb içeren malzeme için gözlemlenmiştir. Bu numunenin ne en yüksek sertliğe ne de en iyi tokluğa sahip olduğu, ancak en yüksek beynit payını içerdiği bildirilmektedir. Malzemedeki NbC partiküllerinin miktarını basitçe arttırmanın aşınma direncini arttırması gerektiği varsayımının mevcut sonuçlarla çeliştiği belirtilmektedir. Ağırlıkça %0.21 ve %0.55 Nb

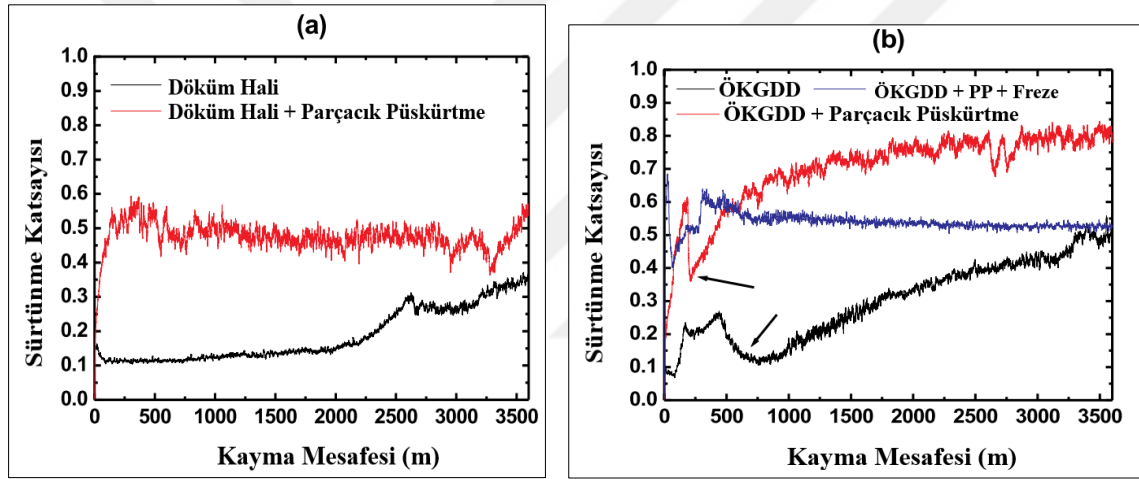
içeren alaşımlar, bu aralıktaki en düşük sürtünme değerlerini gösterdiği bildirilmektedir [170].



Şekil 3.26. Nb alaşımlı ÖKGDD numunelerinin İşlem A ve İşlem B ısıtılma işlem parametrelerine göre mg cinsinden ağırlık kaybı [170]

Silva, Carneiro, Coelho, Pinto ve Brito (2019), parçacık püskürtme ile sertleştirme yönteminin ÖKGDD ve dökme demirin kalıntı gerilim ve tribolojik davranışı (kuru kayma aşınması) üzerine etkisini araştırmışlardır. Kullanılan KGDD'nin kimyasal kompozisyonu yapısı sırasıyla ağırlıkça %2,60 C, %2,50 Si, %0,34 Mn, %0,07 P, %0,04 S, %0,04 Cu, %0,04 Cr, %0,04 Mo ve kalan Fe içerdiği bildirilmiştir. Ferritik sünek demir 900 °C'de 60 dakika östenitlemenin ardından östemperleme ısıtılma işlemi için 320 °C'de 5 dakika, 10 dakika, 15 dakika ve 60 dakika farklı östenit içeriklerinin eldesi için seçilmiştir ve 60 dakikada östemperlenen numune ile diğer aşamalara devam edilmiştir. Ardından dökme demir ve ÖKGDD numunelerine parçacık püskürtme sertleştirme işlemi uygulanmıştır. Ball on disc metodu ile aşınma testi uygulanmıştır. Parametreler toplam kayma mesafesi 3600 m olan 17 mm yarıçaplı ve 0,2932 m / s kayma hızına sahip 15 N'luk bir uygulanan yük olarak seçilmiştir. Kullanılan karşı bilye ise 6,35 mm çapında ve 2,009 g başlangıç kütlesi olan sert metal (WC) bir küredir. Metal püskürtme yönteminde Almen metodunun kullanıldığı testte, sertlikleri 44 HRC ve 55 HRC olan AISI 1070 çeliğinin 75 x 19 x 1 mm boyutlarındaki parçaları kullanılmıştır. İşlem 18 A Almen yoğunluğunda 30 saniye %100 örtü ile uygulanmıştır. 0.6 mm çapında, 60 HRC sertlikteki küresel S230 dereceli bilyeler kullanılmıştır. Sırasıyla döküm hali, döküm hali + parçacık püskürtme, ÖKGDD, ÖKGDD + Parçacık Püskürtme ve ÖKGDD + Parçacık Püskürtme + Frezeleme sonucunda elde

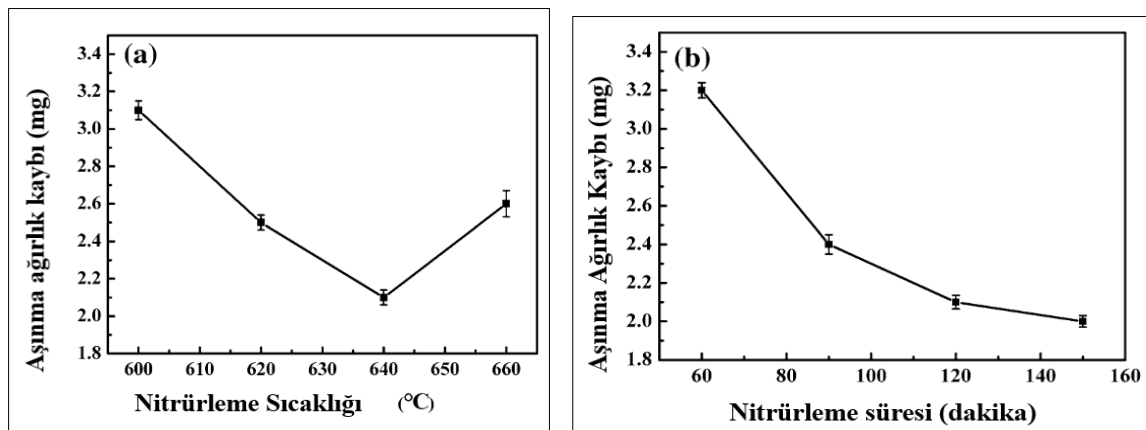
edilen malzemelerin kütle kaybı;  $0,8 \pm 0,2$ ,  $25,2 \pm 0,4$ ,  $8,4 \pm 2,7$ ,  $12,9 \pm 6,2$  ve  $3,1 \pm 0,1$  mg olarak bildirilmiştir. Parçacık püskürtme sertleştirmesinden sonra östemperlenmiş numunelerin yüzeylerinde gerinim kaynaklı martenzit oluşumu ile artmış sertlik değeri elde edilirken aşınma direncinde yüzey sertliğinin artması sebebiyle düşüş görülmüştür. Parçacık püskürtürerek yüzeyleri sertleştirilmiş numunelerin yüzeylerinden 20  $\mu\text{m}$  alınırsa, sertleşmiş yüzeyin kalınlığının azaltılabileceği ve bunun da aşınma direncini artırabileceği bildirilmektedir. Pürüzlü yüzey tabakasını kontrollü frezeleme ile gidererek ( $\sim 20 \mu\text{m}$ ), sertlikteki artışın neden olduğu aşınma direnci üzerindeki olumlu etkileri koruduğu bulunmuştur. Şekil 3.27’ de döküm hali (Şekil 3.27.a) ve ÖKGDD’ler (Şekil 3.27.b) için kayma mesafesiyle sürtünme katsayısı arasındaki ilişki verilmiştir [174].



Şekil 3.27. Kayma mesafesinin bir fonksiyonu olarak sürtünme katsayısının değişimi  
a) döküm hali, b) östemperlenmiş malzemeler [174]

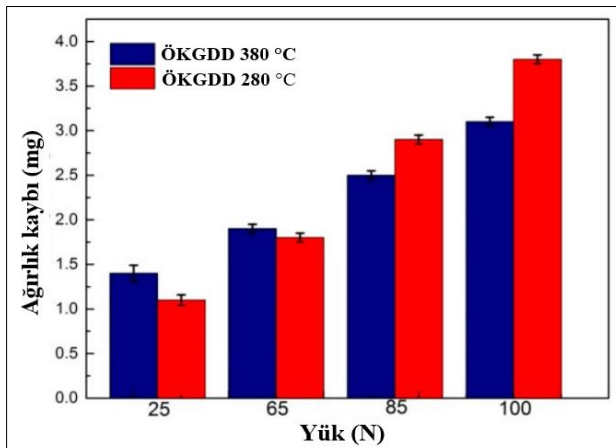
Liu, Sun, Zhang ve Du (2019), QPQ (Su verme – Parlatma – Su verme) nitrürleme parametrelerinin perlitik sünek demirin özelliklerine etkisini araştırmışlardır. Kullanılan perlitik sünek demirin kimyasal kompozisyonu sırasıyla ağırlıkça %3,69 C, %2,55 Si, %0,503 Mn, %0,014 S, %0,022 P, %0,037 Mg, %0,359 Cu, %0,028 Al ve kalan Fe içerdiği bildirilmektedir. Nitrürleme sıcaklık (Şekil 3.28.a) ve zamanı (Şekil 3.28.b) temel olarak incelenmiştir. Sonuçlar göstermiştir ki oksit tabakasının ana fazları  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  ve  $\text{Li}_2\text{Fe}_3\text{O}_4$  iken bileşen katmanının ana fazları  $\text{Fe}_3\text{N}$  ve  $\text{Fe}_4\text{N}$  olmuştur. Nitrürleme sıcaklığının artmasıyla mikro sertlik ve aşınma dayanımı önce artmış daha sonra azalmıştır. Mikro sertlik ve aşınma dayanımı nitrürlemenin artan sürerlerinde artmaya devam ettiği bildirilmiştir. 640 °C’de 120 dakika süreyle nitrürlenmiş alaşımın korozyon dayanımı nispeten iyi olduğu bildirilmiştir. Yüzey oranında %40 perlit içeren ve ikinci seviye grafit

barıdıran numuneler kullanılmıştır. Çekme dayanımı 620 MPa, %0,2 akma dayanımı 375 MPa ve sertlik değeri 220 HB olarak hesaplanmıştır. QPQ işlemi öncesinde ayna görünümü elde edilinceye kadar parlatılmış ve ultrasonik olarak temizlenmiştir. Önce 380 °C' ye 15 dakika havada ön ısıtılan numuneler daha sonra nitrür-karbürleme işlemi için QPQ tuz banyosuna (sırasıyla %38 C(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>, %13 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, %22 K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, %6 NaCl, %10 KCl, %1 Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>, %2 K<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>, %7 Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, %1 Ce(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> x H<sub>2</sub>O) alınmıştır. Tuz banyosunda 600 °C, 620 °C, 640 °C ve 660 °C'de 60 dakika, 90 dakika, 120 dakika ve 150 dakika bekletilmişlerdir. Daha sonra numuneler 360 °C'de 40 dakika ön oksidasyon işlemine tabi tutulmuş ve ılık suda oda sıcaklığına soğutulmuşlardır. Ardından parlatılan numuneler tekrar son oksidasyon işlemi için 360 °C'de 20 dakika bekletilmiş ve ılık suda da sıcaklığına soğutulmuşlardır. Aşınma testi ball on disc metodu ile yapılmıştır. 120 rpm ile dönen 42CrMo çeliğinin numune yüzeyinde 20 dakika teması sağlanmıştır. Ağırlık kaybı hesabı yapılmıştır. En düşük aşınmadan kaynaklı ağırlık kaybı değeri 640 °C'de nitrürleme yapılan numunelerde görülürken bu değer artan nitritleme sıcaklığı ile bereber önce düştüğü bildirilmiştir. 640 °C'den 660 °C'ye olan nitrürleme sıcaklıklarında ise ağırlık kaybı artmıştır. Nitrürleme sıcaklığı arttıkça, reaktif nitrojen atomlarının birlikte geçirgenlik kanalı genişlediği bildirilmiştir. Bileşik tabakanın kalınlığı ve yoğunluğu kademeli olarak artarak aşınma direncinin artmasına neden olduğu bildirilmiştir. Nitrürleme sıcaklığı 660 °C'ye ulaştığında, matris yapısının kusur sayılarının arttığı ve bunun da daha düşük aşınma direncine yol açtığı bildirilmiştir. Nitrürleme süresinin uzamasıyla, aşınma ağırlık kaybı sürekli olarak 3,2 mg'dan 2,0 mg'a düştüğü bildirilmiştir. Nitrürleme sıcaklığı 640 °C'de 150 dakika olduğunda en az ağırlık kaybı elde edildiği bildirilmektedir [172].



Şekil 3.28. Farklı nitrürleme parametreleri için ağırlık kaybı; a)  $t = 120$  dakika iken farklı nitrürleme sıcaklıkları, b)  $T = 640$  °C'de farklı nitrürleme süreleri [172]

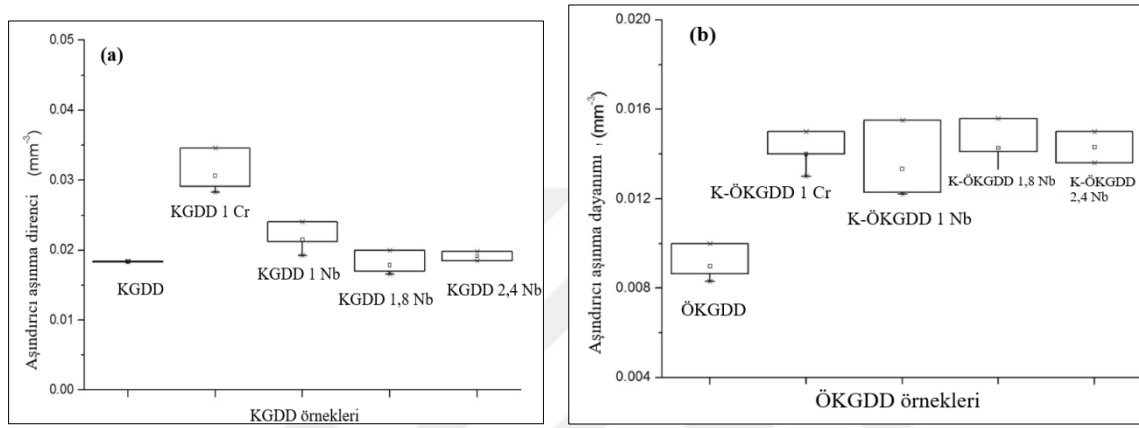
Wen ve diğerkleri (2019), ÖKGDD'deki beynitin aşınma ve sürtünme davranışlarındaki rolünü araştırmışlardır. 930 °C'de 1 saat östenitlenmiş numunelere 380 °C ve 280 °C'de 2 saat tuz banyosunda (%55 NaNO<sub>2</sub> + %45 KNO<sub>3</sub>) izotermal su verilmiştir. Östemperleme sıcaklığının artmasıyla iğnemsî (asiküler) yapıdan plaka gibi (tüysü) yapıya evrim bulunmaktadır. Aşınma deneyi için ball on block metodu seçilmiştir ve kayma tipi kuru kayma olarak belirlenmiştir. Deney, 25 N, 65 N, 85 N ve 100 N olarak farklı yükler altında 3600 saniye süre ve kayma frekansı 5 Hz ve 18000 kez salınım parametreleriyle gerçekleştirilmiştir. Kullanılan bilye 5 mm çapında zirkonyadan, alt blok ÖKGDD'den yapılmıştır. ÖKGDD içerisindeki kalıntı östenitin hacimsel oranı artan östenitleme sıcaklığı ile azaldığı bildirilmektedir. Alt beynit yapılı ÖKGDD daha iyi aşınma dayanımına sebebiyet veren daha yüksek sertliğe sahip olduğu belirlenmiştir. 100 N altında aşınmada üst beynitin mikro sertliğindeki artış mühim seviyede olduğu saptanmıştır. Sonuç olarak üst beynit daha üstün sürtünme ve aşınma davranışı sergilediği bildirilmiştir. Ayrıca ÖKGDD'deki aşınma formunun, 25 N'den 100 N'ye artan aşınma yükü durumunda aşındırıcı aşınmadan, yorulma sebepli katman ayrılmasına dönüştüğü aşınan yüzeylerin incelenmesiyle görülmüştür. Aşınma yükü 25 N ve 65 N olduğunda, 380 °C'de östemperlenmiş numunede daha yüksek bir aşınma oranı ortaya çıkarmıştır, bunun da daha düşük aşınma direnci anlamına geldiği bildirilmiştir. Bununla birlikte, aşınma yükü 65 N'yi aştığında, 280 °C'de östemperlenmiş numunede daha yüksek aşınma oranını ortaya çıkarmıştır, bunun da daha düşük direnç anlamına geldiği belirlenmiştir. Şekil 3.29 aşınma direncinin nispi değerinin, aşınma yükünün artmasıyla değiştiğini göstermektedir. ÖKGDD'lerin aşınma mekanizmasının, az miktarda oksidasyon aşınmasının eşlik ettiği esas olarak aşındırıcı aşınma olduğu bildirilmektedir [176].



Şekil 3.29. ÖKGDD numunelerinin farklı yükler altında aşınma oranları [176]

Souza ve diğerleri (2019), niyobyum ilaveli ÖKGDD'nin aşınma davranışını araştırmışlardır. Yeni tip karbürlü ÖKGDD (K-ÖKGDD), niyobyum (Nb) elementinin eklenmesiyle elde etmişlerdir. Karbürlerin katılaşmanın başlangıcında oluştuğu ve demirin katı matrisinde bir kere oluştuktan sonra kalıcı oldukları bildirilmektedir. Ötektik karbürler içeren karbürlü ÖKGDD'lerin mikro yapısı krom, molibden veya titanyum gibi karbür kararlaştırıcı elementlerin ilavesiyle elde edildiği bildirilmiştir. Bu karbürler  $M_3C$  tipinde olduğu belirtilmiştir. Böylesi sert fazların (1100 HV) varlığı sünek demirin aşınma direncini artırdığı belirtilmektedir. Kullanılan sünek demirin kompozisyonu sırasıyla ağırlıkça %3,40 – 3,60 C, %2,80 – 2,90 Si, %0,64 – 0,65 Cu, %0,20 – 0,23 Mo, maksimum %0,14 Mn, %0,05 – 0,07 Mg ve kalan Fe içerdiği bildirilmiştir. %1,0, %1,8 ve %2,4 Nb ilaveli sünek demirlerin aşınma davranışı hem döküm hali için hem de östempereleme ısı işleme koşulları için gerçekleştirilmiştir. Numuneler 900 °C'de 1 saat östenitlemenin ardından 310 °C'de 110 dakika tuz banyosunda östemperlenmişlerdir. ASTM G65 metoduna göre aşınma testleri gerçekleştirilmiştir. Kuru kum, 50/70 elek boyutuna sahip yuvarlatılmış kuvars kum olduğu belirtilmiştir. Kumun nemi ağırlıkça %0,5'e kadar kontrol edilmiştir. Kuru kuvars kumunun açısallık katsayısı (kum yuvarlaklığının bir ölçüsü) 1,44, yoğunluğu yaklaşık 1,6 g / cm<sup>3</sup> ve 300 ile 400 g / dak arasında beslenmiştir. Döküm hali için Nb ilavesinin aşınma direncine bir etkisinin olmadığı, %1 Cr içeren numunede ise dikkate değer bir aşınma dayanımı artışı sağladığı bildirilmektedir. Östemperlenmiş numunelerde ise, karbidik ÖKGDD'nin Nb ilaveli örneği ÖKGDD'den daha yüksek aşınma dayanımı sergilediği bildirilmektedir. Ağırlıkça %1,8 Nb ilaveli örneklerde optimum aşınma değerleri elde edilmiştir ve Cr ilaveli karbürlü ÖKGDD'nin yerini alabileceği hususunda umut vadeden sonuçlara ulaşılmıştır. Karbürlü ÖKGDD'nin Nb ilaveli örneklerinin mekanik özellikleri alaşımsız ÖKGDD ile karşılaştırılabilir ve aşınma dayanımları Cr ilaveli karbürlü ÖKGDD'lerden daha yüksek olduğu belirtilmiştir (Şekil 3.30.a). Döküm halinin Cr ilaveli örnekleri için en iyi aşınma sonuçları elde edilmiştir. Sonuçlar %1 Cr ilaveli karbürlü ÖKGDD ve karbürsüz hali ile karşılaştırılmıştır. Döküm hali için Nb ilavesi aşınma da azalmaya sebebiyet vermediği bildirilmektedir. Çünkü her iki malzeme de aşındırıcı aşınmada benzer değerler vermiştir (Şekil 3.30.b). Karbürlerin hacimsel oranının bu aşınma direnci ile alakası olduğu bildirilmektedir. Nb ilaveli sünek demirin aşınma sonucu ise ilave yapılmamış sünek demirin sonuçlarıyla oldukça benzer olduğu bildirilmiştir. Temel aşınma mekanizmasının, yumuşak bir matrisin varlığından dolayı oyuklanma olduğu belirlenmiştir. Buna göre, niyobyum içeren örneklerde krater benzeri oyuklaşma görülmüştür. Bu, niyobyumun

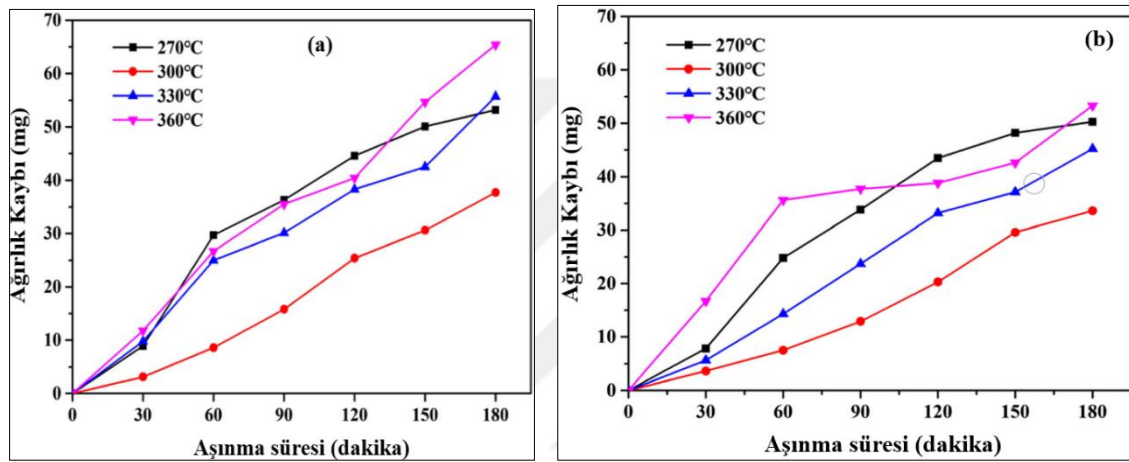
varlığının çatlakların yayılmasına katkıda bulunduğunu ve aşınma direncini azalttığını göstermiştir. Ağırlıkça %1,0 Cr ilaveli sünek demir oldukça iyi bir aşındırıcı aşınma direci sergilemiştir. Nb ilaveli ÖKGDD, ÖKGDD'den daha yüksek kuru kum aşındırıcı aşınma dayanımı sergilemiştir. Karbür parçacıklarının hacim oranı ne kadar yüksekse, özellikle ısıtım işlem görmüş durumda, malzemenin kuru kum aşındırıcı aşınma direnci o kadar yüksek olduğu bildirilmektedir [175].



Şekil 3.30. Kuru aşınma dayanımı değerleri a) Döküm hali örnekleri için, b) Östempirlenmiş örnekler için [175]

Nan, Fu, Yang, Lin ve Guo (2020), Cu ilaveli karbürli ÖKGDD'lerin mikro yapı değişimini ve aşınma davranışını incelemişlerdir. Kullanılan malzemenin kimyasal bileşiminde sırasıyla ağırlıkça %1,12 Cr, %0,43 Mn, %3,76 C, %2,76 Si, %0,027 RE, %0,042 Mg, %1,12 Cu ve kalan Fe olduğu bildirilmiştir. Östenitleme sıcaklığı tüm aşamalar için 940 °C'de 100 dakika olarak belirlenmiştir. İlk grup numuneler geleneksel östempirleme adı altında tek adımla östempirlenmiştir. Östempirleme süresi 120 dakika ve östempirleme sıcaklıkları 270 °C, 300 °C 330 °C, 360 °C'dir. İkinci grup numuneler östenitlemenin ardından tuz banyosunda 260 °C'de 5 dakika su verilmiş ardından 270 °C, 300 °C 330 °C, 360 °C sıcaklıklarında 120 dakika östempirlenmiş ve en sonunda da oda sıcaklığına havada soğutulmuşlardır. Artan östempirleme sıcaklığı ile asiküler ferrit miktarı azalmış, kalıntı östenitin hacim oranı ve karbon içeriği kademeli olarak arttığı, sertlik ve dayanım azaldığı, darbe tokluğu ve korozyon dayanımının arttığı belirtilmiştir. Aşınma deneyi 294 N yük altında ağırlık kaybı ve aşınma süresi arasındaki ilişkiyi açıklamak için gerçekleştirilmiştir. Aşınma süresinin artmasıyla her iki yöntemle elde edilen numunelerde ağırlık kaybı belirli oranlarda artmıştır. Şekil 3.31.a ve Şekil 3.31.b'den her iki yöntem sonucu elde edilen numunelerde 300 °C' deki eğrinin eğiminin, aşınma

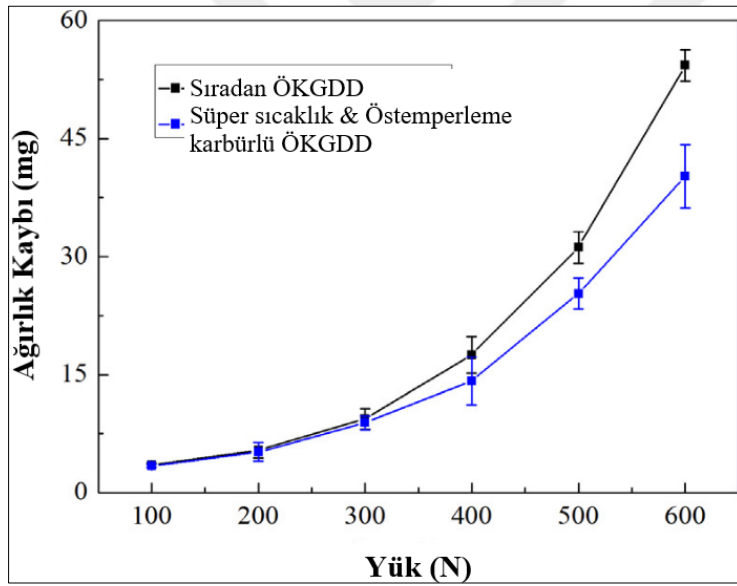
süresinin uzamasıyla azaldığı açıkça görülmektedir, bu da aşınma hızının belirli bir oranda yavaşlama eğiliminde olduğunu gösterdiği belirlenmiştir. Bunun sebebinin daha ince ferrit ve uygun miktarda kalıntı östenit içermesi olduğu bildirilmektedir. Aşınma deneyindeki sonuçlar neticesinde östempereleme sıcaklığı 300 °C'ye geçtiğinde aşınma dayanımının iyileştiği bildirilmektedir. Geleneksel olarak tek adımlı östemperelemiş numuneyle kıyaslandığında iki adımlı östempereleme prosesi ile elde edilen Cu içeren karbürü ÖKGDD'nin aşınma dayanımını önemli ölçüde (% 16'dan fazla) arttığı bildirilmektedir [35].



Şekil 3.31. Aşınma süresinin ağırlık kaybına farklı östempereleme sıcaklıkları altındaki etkisi; a) geleneksel tek adımlı östempereleme, b) çift adımlı östempereleme [35]

Yang, Fu, Li, Liu, ve Zhao (2020), FeC ve süper ince ösferrit içeren karbürü ÖKGDD'lerin mikro yapı ve özelliklerini araştırmışlardır. Bunun için süper yüksek sıcaklıkta ön işlem ve östempereleme ısı işlemi uygulanmıştır. Çalışmada kullanılan erigiye FeSi75 (ağırlıkça %75 Si) aşıl原因 olarak katılırken FeSiMg6Re2 (6 Mg – 2 Re – ağırlıkça %40 Si) küreselleştirici olarak ilave edilmiştir. Y-bloğa yapılan döküm sonucunda elde edilen KGDD'nin kimyasal bileşiminde sırasıyla ağırlıkça %3,72 C, %2,77 Si, %0,51 Mn, %0,99 Cr tespit edilmiştir. Sonrasında 880 °C' de 120 dakika süresince ısıtılmıştır ve ardından ağırlıkça %50 KNO<sub>3</sub> + %50 NaNO<sub>3</sub> içeren tuz banyosunda 300 °C' de 120 dakika su verilmiş ve ardından da havada soğutulmuştur. Bu işlem geleneksel östempereleme olarak adlandırılmıştır. Süper yüksek sıcaklık işleminde ise numune 1100 °C' de 10 dakika ısıtılmış sonrasında 720 °C, 760 °C, 800 °C, 840 °C ve 880 °C sıcaklıklarında fırında izotermal olarak 120 dakika soğutulmuştur. Sonrasında ise 300 °C' de 120 dakika tuz banyosunda su verme işlemi uygulanmıştır. Ağsı yapıdaki ötektik

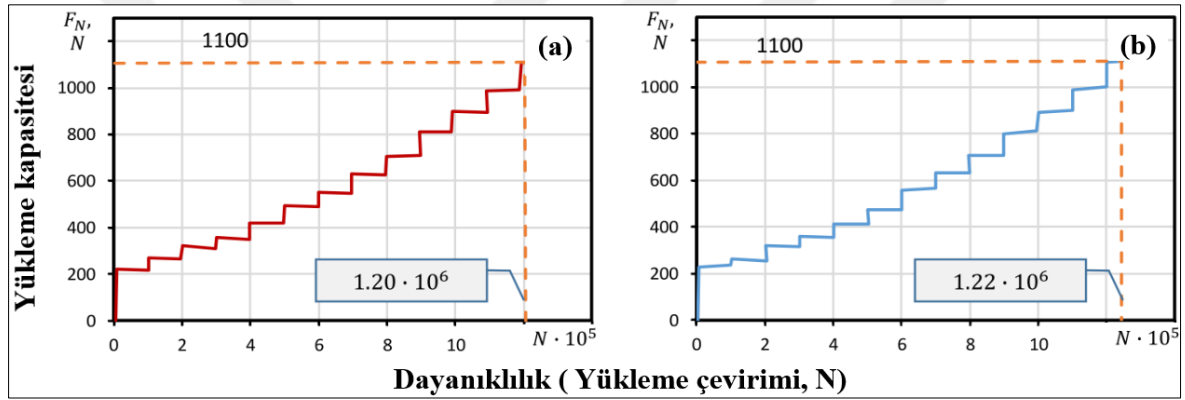
karbürlerin süper sıcaklıktaki ön işlemden sonra azaldığı bildirilmiştir. Ön işlemde artan aşırı soğuma nedeniyle perlitin katmanlarının aralığı 300 nm'den 100 nm'ye düştüğü bildirilmiştir. Bu şekilde çok ince perlit yapısına sahip sünek demir yeniden ısıtıldığında önceki östenit taneleri içinde Fe<sub>3</sub>C parçacıkları kaldığı bildirilmiştir. Aşınma testi blok on ring test metodu ile gerçekleştirilmiştir. GCr15 çeliği ( 60 ± 2 HRC) aşındırıcı halka olarak kullanılırken 120 dakikalık test süresince dönme hızı 200 devir / dakika olarak belirlenmiştir. Test esnasında uygulanan yükler ise 100 N, 200 N, 300 N, 400 N, 500 N ve 600 N olarak seçilmiştir. Deney öncesi ve sonrasında ağırlık ölçümleri yapılmıştır. Bu işlemler sonucunda elde edilen karbürülü ÖKGDD'nin geleneksel karbürülü ÖKGDD'den sertlik değerinden ödün vermeden %120 daha yüksek darbe tokluğuna ve yüksek aşınma yükü altında mükemmel aşınma direncine sahip olduğu bildirilmiştir (Bkz. Şekil 3.32) [36].



Şekil 3.32. Farklı yükler altında karbürülü ÖKGDD'nin ağırlık kaybı [36]

Bendikiene ve diğerleri (2020), ray tekeri sistemlerinde yeni yapısal malzeme olarak MoNiCa ÖKGDD'nin tribo-yorulma davranışını incelemişlerdir. Dökme demirin dökülebilirliğini ve çeliğin tokluğunu bir arada bulunduran, bilimde ve endüstride ekonomik faydaları ve farklı alanlarda kullanma potansiyeli ile dikkatleri üzerine çeken MoNiCa ÖKGDD'nin yeni bir yapısal malzeme olduğu belirtilmiştir. Çalışmada kullanılan MoNiCa malzemesi sırasıyla ağırlıkça %3,5-3,7 C, %2,5-2,8 Si, %0,2-0,3 Mn, %0,02-0,06 Cr, %0,4-0,6 Mo, %0,5-0,6 Ni, %1,1-1,3 Cu, %0,03-0,07 Mg, %0,01-0,12 Ti ve kalan Fe içerdiği bildirilmiştir. 890 °C' de 30 dakika östenitlemenin ardından tuz

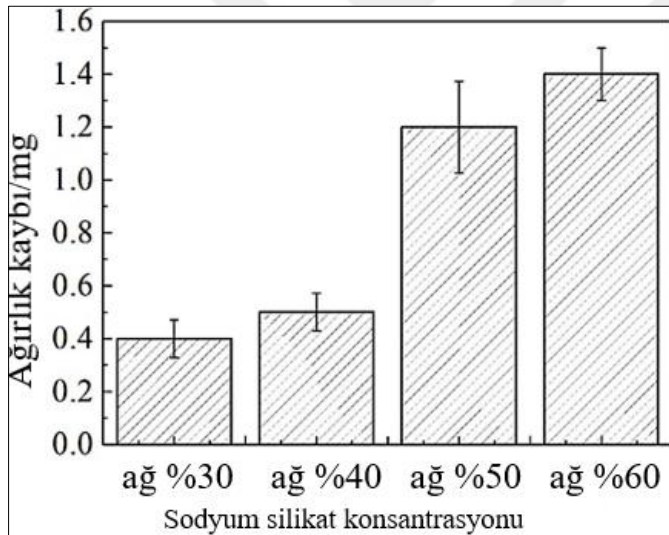
banyosunda 5 saat su verme işlemi ve ardından 270 °C, 300 °C ve 330 °C’ de östemperlenmiş ve ve havada su verilmiştir. Aşma testi için dönen bir tertibat oluşturulmuştur (SI-O3 M makinesi). Tüm deneyler 3000 min<sup>-1</sup> frekansta ve 10<sup>5</sup> çevrim uzunluğunda gerçekleştirilmiştir. Burada dönen numuneler MoNiCa, geleneksel ÖKGDD-1050 ve 20MnCr5G çeliği iken bu dönen numunelere temas eden karşı malzeme ise sabit olarak 20MnCr5G çeliği olarak belirlenmiştir. MoNiCa yüksek yorulma dayanımı da göstermiştir MoNiCa, tokluğun biraz azalmasıyla birlikte aşındırıcı aşınma direncinde bir artış sağlamıştır (Şekil 3.33.a ve Şekil 3.33.b). Böyle bir sonuç, testler sırasında düşük karbon içeriğine sahip kalıntı östenitin martenzite dönüşmesi nedeniyle, yüzeye yakın ve yüzeyde mikro sertliğin arttığını bildirmektedirler [32].



Şekil 3.33. Yükleme kapasitesi ve dayanıklılık ilişkisi, a) aşınma çifti ÖKGDD MoNiCa / 20MnCr5G çeliği, b) aşınma çifti 20MnCr5G çeliği / 20MnCr5G çeliği [32]

Zhou ve diğerleri (2020), eksik su verme ortamı olarak farklı sodyum silikat ( $\text{Na}_2\text{O}:\text{SiO}_2$ ) konsantrasyonlarının (ağırlıkça %30, ağırlıkça %40, ağırlıkça %50 ve ağırlıkça %60) ÖKGDD’nin mikro yapısı ve özellikleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Kullanılan ÖKGDD bilyelerde ağırlıkça %3,6 C, %2,92 Si, %2,4 Mn, % < 0,04 P, % < 0,025 S, %0,04 – 0,05 Mg ve % Fe kalan içerdiği bildirilmiştir. ÖKGDD öğütme bilyelerini 900 °C’ de 2 saat östenitlemişlerdir. Daha sonra bir sodyum silikat çözeltisi içinde 40 °C’ de 100 saniye boyunca östemperlemişlerdir (östemperlemenin ilk aşaması – tamamlanmamış). Daha sonra 240 °C’ ye (martenzit dönüşüm sıcaklığının üzeri) 1saat izotermal ısıtmışlardır (östemperlemenin ikinci aşaması). Daha sonra da havada soğutma ile işlemi tamamlamışlardır. Geleneksel işlemle karşılaştırıldığında, çift matris fazlı sünek demirin iki aşamalı östemperleme işlemi düşük östemperleme sıcaklığına sahip olduğu bilirlmiş ve mikro yapısının, düşük enerji tüketimi özelliklerine sahip, yüksek tokluk ve sertliğe sahip

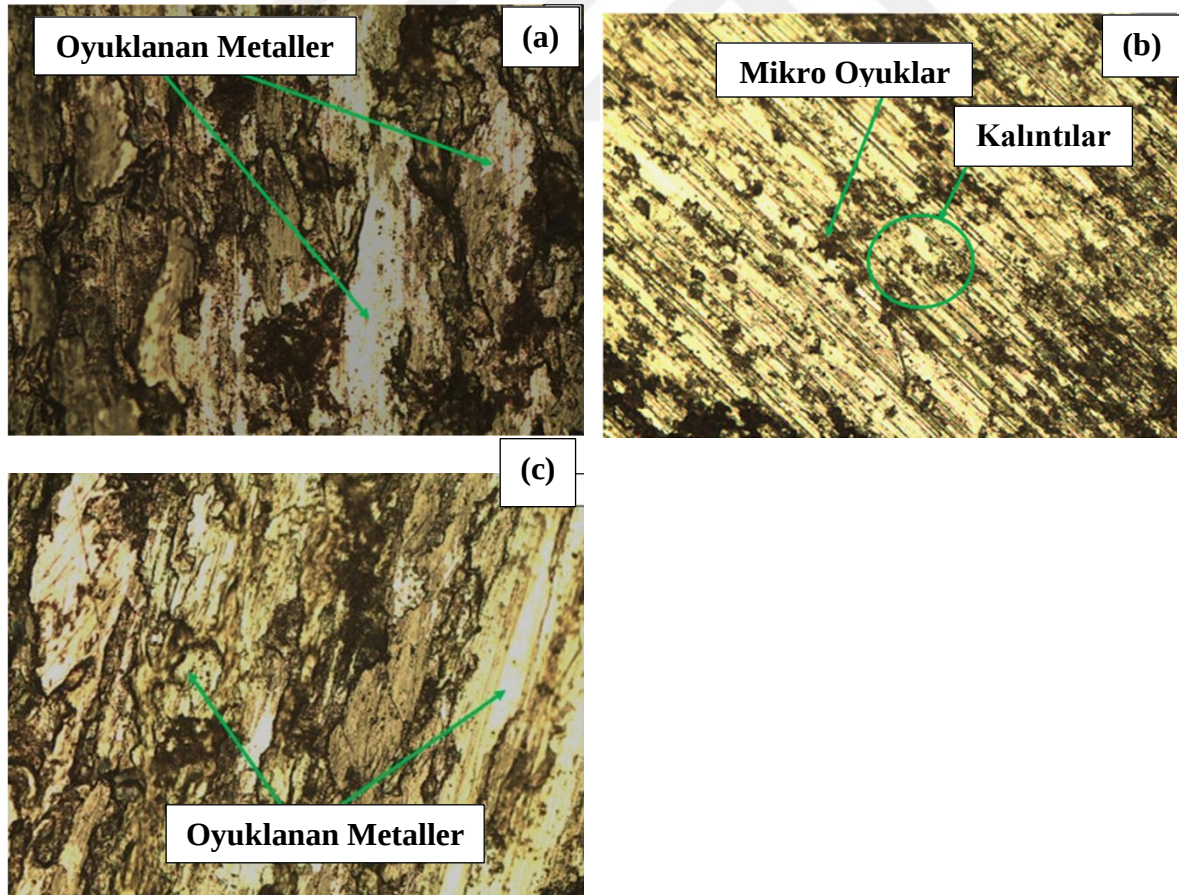
karma bir ösferit ve martenzit matrisi olduğu belirlenmiştir. Aşınma deneyi için ball on disc metodu seçmişlerdir ve oda sıcaklığında kayganlaştırıcı kullanılmadan yapılmıştır. Test için seçilen bilye WC-8Co, 2 mm çapında olup aşınma deneyi prosedürü 20 N'luk sabit yük, 15,05 m/mm sabit kayma hızı ve 20 dakika test süresinde gerçekleştirilmiştir. SEM ve EDS analizleri ile aşınmış yüzeyler incelenmiştir. Şekil 3.34'de görüldüğü üzere ağırlıkça %30 ve %40 çözeltilerde işlem gören numunelerde en iyi aşınma dayanımları elde edildiği bildirilmiştir. Aşınmış yüzeylerin SEM ile incelenmesiyle sodyum silikat konsantrasyonu ağırlıkça % 40 olan numuneler için, olukların sayısı minimum değere ulaşarak numunenin ana aşınma formunun aşındırıcı aşınma olmadığını göstermişlerdir. Ağırlıkça %30 ve %40 çözeltilerde işlem gören numunelerde ana mekanizma yapışkan aşınma olduğu belirlenmiştir. Ayrıca bu çalışma, çevre dostu olan ve tuz banyosu östemperleme işleminin yerini alacak yeni bir yöntem geliştirdiği bildirilmektedir [87].



Şekil 3.34. Farklı konsantrasyon içeriklerinde su verilen ÖKGDD öğütücü bilyelerin ağırlık kaybı [87]

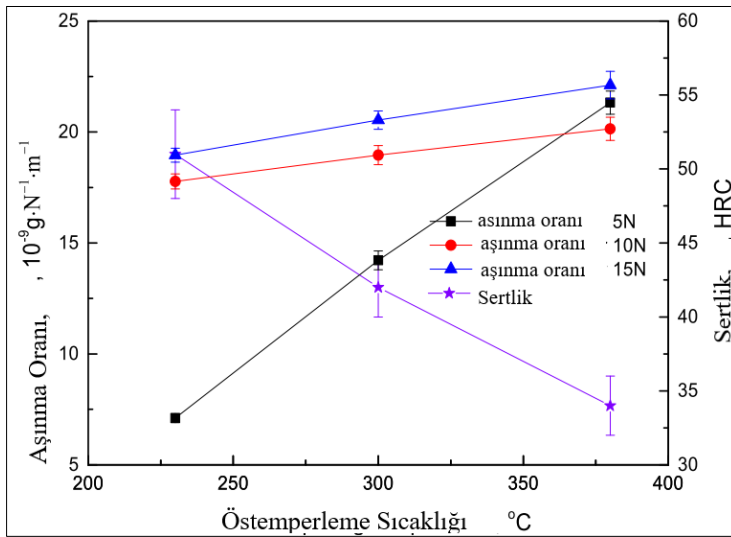
Ramkumar ve Rajendran (2020), yaptıkları çalışmada ÖKGDD'nin yorulma dayanımı, darbe dayanımı ve tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Bazı numunelere Ni ilavesi farklı oranlarda ( ağırlıkça %0,22, ağırlıkça %0,34) yapılmıştır. Bu amaçla 927 °C sıcaklıkta 2 saat östenitlemenin ardından numuneler 240 °C ile 400 °C aralığındaki sıcaklıklarda tuz banyosunda 2 saat östemperlenmiştir. Son olarak da havada soğutma uygulanmıştır. Aşınma deneyi için pin on disc metodu seçilmiş ve deneyler kuru kayma ortamında çeşitli yük (50 N, 60 N, 70 N) ve hızlarda (1,57 m/s, 2,67 m/s, 3,76 m/s), 60 mm yarıçapa sahip yolda 1800 m mesafede yapılmıştır. Deneyde kullanılan diskler ÖKGDD'nin bu

bahsedilen 3 alaşımdır. Pin malzemesi olarak ise 62 HRC ve 31 HRC sertlik değerlerinde çelik kullanılmıştır. Aşınma dayanımı ve sürtünme katsayısının, artan yük ve kayma hızıyla birlikte arttığı bildirilmektedir. Hızdaki artışın temas yüzeyindeki sıcaklığı artırdığı ve numunelerin yüzey özelliklerini değiştirdiği bildirilmektedir. Aynı zamanda yüksek yüzey sıcaklıklarının oksidasyon oranını artırarak aşınma mekanizmasını daha makul bir aşınmaya dönüştürdüğü bildirilmiştir. Her numune için aşınma oranının artan kayma hızı ve yük ile birlikte arttığı fakat değişen kompozisyon ile (döküm hali ve %0,34 Ni ilaveli) bu oranın azaldığı bildirilmektedir. En yüksek ağırlık kaybı, en düşük sertliğe sahip bir ferritik matris nedeniyle döküm numunede gözlenmiştir. Aşınan yüzeylerin incelendiğinde (Bkz. Şekil 3.35) ağırlıkça %0,22 Ni ilaveli numunenin (Bkz. Şekil 3.35.b) 31 HRC pin ile testinden sonraki görüntülenmesinde döküm halinden (Şekil 3.35.a) oldukça farklı olduğu belirlenmiştir. Ni ilavesiyle sertlik artığından yapışma aşınmasının tespit edilmediği bildirilmiştir. Optimum aşınma oranında (ağırlıkça % 0,22 Ni) daha az çatlak ve çizikler gözlemlendiği bildirilmektedir [1].



Şekil 3.35. Aşınmış ÖKGDD'lerin mikroskop görüntüleri, a) Ni ilavesiz, b) ağırlıkça %0,22 Ni, c) ağırlıkça %0,34 Ni, Pin 31 HRC [1]

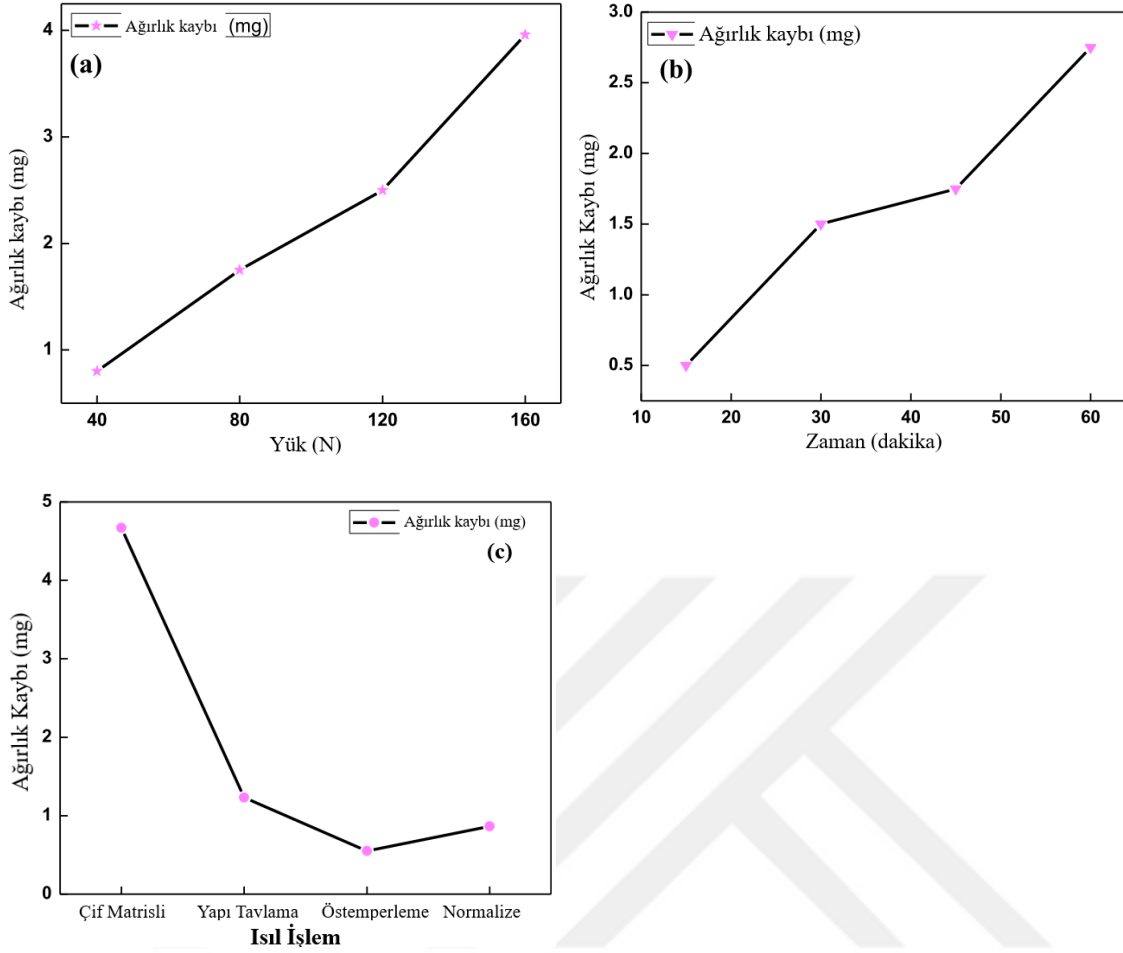
Du ve diğerleri (2020), Farklı östempereleme sıcaklıkları için ÖKGDD'nin aşınma davranışını incelemişlerdir. Kullanılan KGDD'nin kimyasal kompozisyonu sırasıyla ağırlıkça %3,62 C, %2,56 Si,  $\leq$  %0,20 Mn, %0,001 S, %0,0032 P, %0,004 Mg, %0,035 RE ve kalanın Fe olarak bildirilmiştir. 900 °C'de 60 dakika östenitlemenin ardından %50 NaNO<sub>3</sub> ve %50 NaNO<sub>2</sub> içeren tuz banyosunda 230 °C, 300 °C ve 380 °C'de 40 dakika su verilerek ÖKGDD elde edilmiştir. Aşınma deneyi için pin on disc metodu seçilmiş pim olarak numune disk olarak çelik (No. 45 çeliği 55 HRC sertliğinde) kullanılmıştır. Dönme oranı 0,5 m/s, yük 5 N, 10 N ve 15 N, süre 60 dakika olarak belirlenen deney parametreleri uygulanmıştır. Deney öncesi ve sonrası ağırlık ölçümü yapılmıştır. Östempereleme sıcaklığının artmasıyla birlikte, sürtünme katsayısının düşük yükte (5 N) çok az değişirken, yüksek yüklerde (10 N ve 15 N) azaldığı belirlenmiştir. Aşınma oranının düşük yükte (5 N) artarken, yüksek yüklerde (10 N ve 15 N) çok az değiştiği bildirilmiştir (Şekil 3.36). Bu aşınma davranışı, sertlik ve sürtünme katsayısının birleşik etkilerine atfedildiği belirtilmiştir. Ek olarak, yapışkan ve aşındırıcı aşınma, kuru kayma aşınma koşulu altında küresel grafitli dökme demir için ana hata mekanizmalar olduğu belirlenmiştir. Küresel grafitin kendi kendine yağlama özelliği ve karbonla doymuş östenit tarafından sağlanan deformasyon sertleşmesi etkisi nedeniyle ÖKGDD'nin aşınmaya karşı üstün bir direnç gösterdiği bildirilmiştir [132].



Şekil 3.36. ÖKGDD'nin östempereleme sıcaklığıyla birlikte farklı yükler altında sertlik ve aşınma oranının değişimi [132]

Bramaramba ve Sen (2020), farklı seviyedeki ferritik KGDD'lerin ısıtım işlem koşulları ve kayarak aşınma karakteristikleri üzerine optimizasyon çalışması yapmışlardır. Ferritik

sınıftaki KGDD numunelerini farklı ısıtma işlem süreçlerine (tavlama, normalleştirme, östemperleme ve çift matris yapısı) farklı zaman ve sıcaklıklarda maruz bırakmışlardır. Çift fazlı yapı hariç diğer tüm numuneler tek fazlı yapı olan östenit fazına 1000 °C'ye ısıtılmış ve 90 dakika tutulmuştur. Çift fazlı yapı elde etmek için numuneler 800 °C'ye çıkarılmış ve 2 dakika tutulmuştur. Soğutma işlemi ise iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada ötektoit sıcaklık olan 723 °C'ye soğutulup burada 5 saat 30 dakika ferritin kararlı olması ve perlitin oluşumunun önlenmesi için beklenmiştir. İkinci aşamada ise fırında oda sıcaklığına soğutulmuşlardır. Havada soğutma normalizasyon ısıtma işlemi için uygulanmıştır. Çift fazlı matris ısıtma işlemi süresince soğutucu ortam görevi gören mineral yağında su verilmiştir. Östemperleme işleminde numunelerin 500 °C'ye soğutulup 240 dakika tutulduğu %50 KNO<sub>3</sub> + %50 NaNO<sub>3</sub> çözeltisi tuz banyosu soğutma ortamı olarak kullanılmıştır. Taguchi optimizasyon tekniği ile (L<sub>16</sub>; 4 faktör 4 seviye) farklı porseslerin (yük, zaman, ısıtma işlem ve seviye) etkilerini değerlendirmede kullanmışlardır. İstatistiksel değişken analizi (ANOVA ) metodu ile de bu değişkenlerin etki oranı hesaplanmış ve ısıtma işlemin etkisinin %54,76 ile en önemli değişken olduğunu bildirmişlerdir. Aşınma deneyi için ball on plate tekniği kullanılmış ve uygulanan yükler 40 N, 80 N, 120 N ve 160 N olarak belirlenirken süreler ise 15 dakika 30 dakika, 45 dakika ve 60 dakika olarak belirlenmiştir. Aşınma öncesi ve sonrası numunelerin ağırlık ölçümleri yapılmıştır. Uygulanan ısıtma işlemlerinden biri olan östemperlemenin sonucunda elde edilen numunelerin aşınma direncinin çift matrisli yapıda elde edilen en düşük aşınma direncinden daha üstün olduğunu bildirmektedirler (Şekil 3.37.a, Şekil 3.37.b ve Şekil 3.37.c). Aşınan yüzeylerde demir oksit ve silisyum oksit kalıntılarının varlığı X-ray spektroskopisi yardımıyla tespit edilmiştir [2].



Şekil 3.37. Ağırlık kaybına a) yükün etkisi, b) zamanın etkisi, c) ısıtılmanın etkisi [2]

Adebayo ve diğerleri (2021), ağırlıkça %2,29 alüminyum alaşımlı KGDD'de östempereleme ısıtılmasının aşınma davranışı üzerine etkisini incelenmişlerdir. Aşınma testleri ball on disc metodu ve pin on disc metodu ile gerçekleştirilmiştir. Östempereleme sonucunda ise östemperelemiş numunelerin östemperelenmemiş numunelerden daha fazla aşınmaya dirençli olduğunu bulmuşlardır. Aynı zamanda iki adımlı östempereleme ısıtılma işlemi uygulanan numunelerin (260 °C'de 5 dakika + 400 °C'de 90 dakika) tek aşamalı östemperelemiş numunelerden ( 400 °C'de 90 dakika) biraz daha fazla sürtünme katsayısına sahip oldukları belirlenmiştir (Çizelge 3.3) [37].

Çizelge 3.3. Karşılaştırmalı aşınma testi sonuçları [37]

| Örnekler                 | Ağırlık kaybı (g) | Sürtünme kuvveti, $\mu$ |
|--------------------------|-------------------|-------------------------|
| Döküm hali (M4)          | 0,055             | 0,180                   |
| Tek östempereleme (A25)  | 0,075             | 0,161                   |
| Çift östempereleme (B25) | 0,051             | 0,186                   |

## 4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

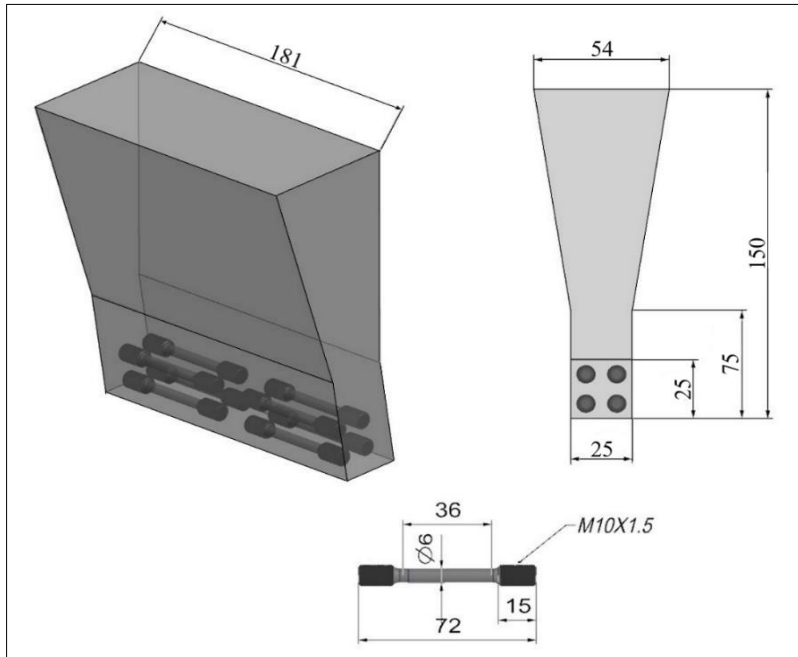
### 4.1. Malzeme

Deneysel çalışmalarda Çizelge 4.1’de kimyasal kompozisyonu verilen EN GJS-600-3 perlitik KGDD kullanılmıştır.

Çizelge 4.1. Deneysel çalışmalarda kullanılan KGDD’in kimyasal bileşimi (% ağırlıkça)

| C     | Si    | Mn    | P     | S     | Mg    | Cr    |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 3,685 | 2,493 | 0,305 | 0,025 | 0,012 | 0,045 | 0,021 |
| Ni    | Cu    | Al    | Ti    | V     | Co    | Fe    |
| 0,015 | 0,524 | 0,005 | 0,012 | 0,005 | 0,018 | Kalan |

KGDD Y blok parçalar, ticari bir dökümhanede orta frekanslı bir indüksiyon fırınında üretilmiştir. 500 kg’lık bir dökme demir eriyiği 1450 °C’de %6–7 Mg içeren ferrosilikon alaşımı ilave edilerek için tandış-pota yöntemiyle KGDD elde edilmiştir. Nihai aşılama, %75 ferrosilikon alaşımıyla gerçekleştirilmiştir. 1400 °C ila 1450 °C arasındaki sıcaklıktaki eriyik, ASTM A536’ya göre hazırlanan Y blok kum kalıplarına dökülmüştür (Şekil 4.1) [143].



Şekil 4.1. Deneysel çalışmalarda kullanılan Y blok KGDD parça ve çekme numunelerinin alındığı bölgeler

## 4.2. Isıl İşlemler

Numunelere uygulanan ısı işlemleri iki aşamada ele alınmıştır. Bunlar; ön ısı işlemleri ve östemplendirme ısı işlemidir. Tüm numuneler hem ön ısı işlem aşamasında hem de ikinci aşamadaki östemplendirme ısı işlemi aşamasında östenitlenmiştir. Östenitleme işlemlerinde kullanılan fırın Heraeus marka olup rezistanslı, maksimum 1150 °C'ye kadar tavlamanın yapılabildiği atmosfer kontrolü olmayan bir fırındır. Östenitleme işlemi 900 °C'de 60 dakika süreyle gerçekleştirilmiştir. Atmosfer kontrolsüz ısı işlemi nedeniyle numunelerin yüzeyinde oluşan dekarburizasyon tabakası çekme numunelerinin üretimini esnasında tornalama suretiyle talaş kaldırılarak yüzeyden uzaklaştırılmıştır.

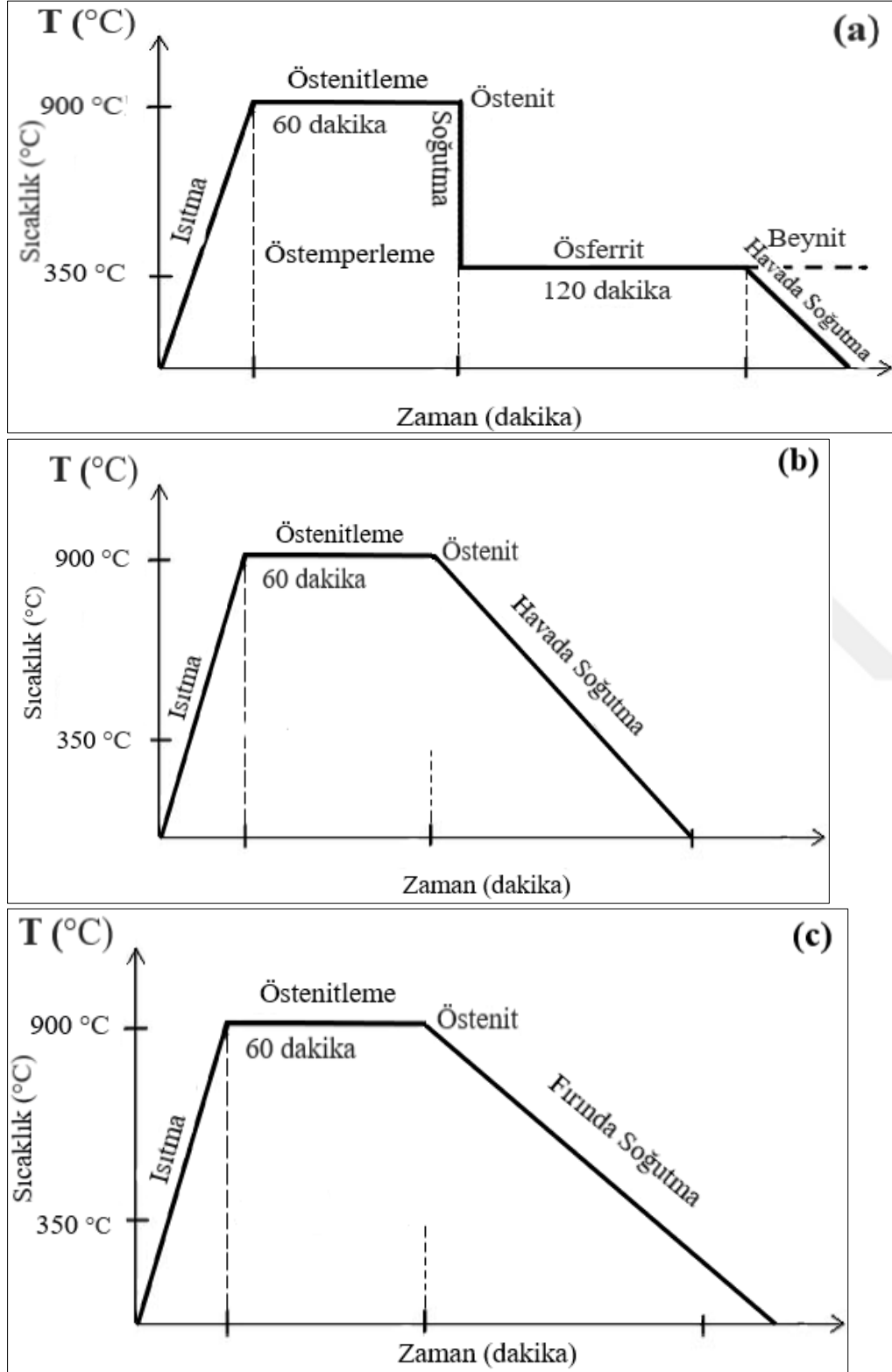


Resim 4.1. Isıl işlemlerde kullanılan Heraeus marka ısı işlem fırını

### 4.2.1. Ön ısı işlemleri

Uygulanan ön ısı işlemlerinin işlemlerin zaman-sıcaklık diyagramında şematik olarak gösterimi Şekil 4.2.a, Şekil 4.2.b, Şekil 4.2.c'de verilmiştir. Farklı ilk matris mikro yapıları elde etmek için, KGDD numuneleri, 900 °C'de 60 dk östenitleme sonrası; normalizasyon için hava ile soğutulmuştur (Şekil 4.2.b), tam tavlama için fırında soğutulmuştur (Şekil

4.2.c) ve östemperleme için tuz banyosunda 375 °C'de 120 dakika bekletilmiştir (Şekil 4.2.a).



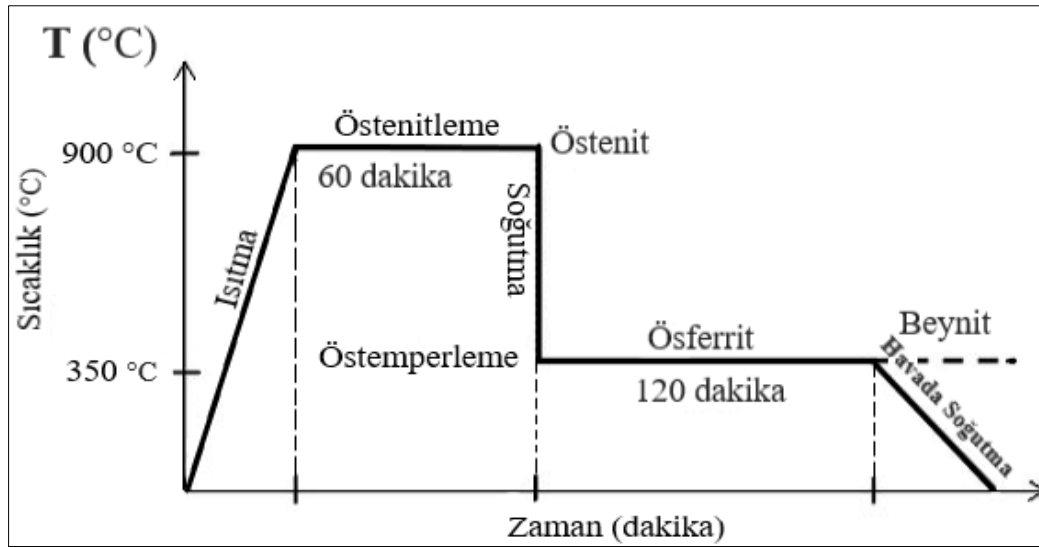
Şekil 4.2. Uygulanan ön ısııl işlemlerin zaman-sıcak diyagramında şematik olarak gösterimi; a) Östemperleme, b) Normalizasyon, c) Tam Tavlama

#### 4.2.2. Östempereleme ısıl işlemi

Ön ısıl işlem uygulanmış numuneler yeniden 900 °C’de 60 dakika östenitlenmiş, ardından 375 °C’deki %50 NaNO<sub>3</sub> + %50 KNO<sub>3</sub> karışımından oluşan tuz banyosunda 120 dakika bekletilerek östemperelelenmiştir (Resim 4.2).



Resim 4.2. Östempereleme ısıl işlemlerinde kullanılan Protherm marka tuz banyosu



Şekil 4.3. Östempereleme ısıl işlem planı

### Numune kodlaması

Ön ısıt işlemler ve östemperleme ısıt işlemleri sonrası elde edilen numuneler Çizelge 4.2’de gösterildiği üzere kodlanmıştır.

Çizelge 4.2. Numunelere uygulanan ısıt işlemler ve kodları

| Numuneye uygulanan ısıt işlem prosesi | Numune kodu |
|---------------------------------------|-------------|
| Dökülmüş Halde                        | AC          |
| Östemperlenmiş                        | ADI         |
| Tam Tavlama + Östemperlenmiş          | FADI        |
| Normalize Edilmiş + Östemperlenmiş    | NADI        |
| Çift Östemperlenmiş                   | DADI        |

### **4.3. Mikro Yapı Karakterizasyon Çalışmaları**

#### **4.3.1. Metalografik hazırlık**

Isıt işlem uygulanan numuneler standart metalografik yöntemlerle (zımparalama + polisaj) metalografik inceleme için hazırlanmıştır. Zımparalama sırasıyla 240, 400, 800 ve 1200 kum zımparalar kullanılarak yapılmıştır. Parlatmalar sırasıyla 6 µm, 3 µm ve 1 µm elmas süspansiyonlar kullanılarak yapılmıştır. Mikro yapıların açığa çıkarılması için dağlayıcı olarak % 2 Nital (2 ml HNO<sub>3</sub> + 98 ml CH<sub>3</sub>OH) çözeltisi kullanılmıştır.

#### **4.3.2. Mikro Yapı görüntüleme**

Metalografik hazırlığı yapılmış numunelerin mikro yapıları Leica DFC 320 dijital kamera bağlantılı Leica DMI5000M optik mikroskop ve Jeol 6060 LV tarama elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. SEM numuneler 20 kV gerilimde ve 10 mm çalışma aralığı mesafesinde incelenmiştir. Ösferritik yapıyı oluşturan asiküler ferrit( $\alpha_a$ ) ve karbonca zengin östenitin ( $\gamma_{yk}$ ) plaka kalınlıkları SEM’de elde edilen mikro yapı resimlerinden çizgisel kesişme yöntemiyle hesaplanmıştır [179].

#### 4.3.3. XRD analizi

Ön ısıt işlemlerin ÖKGDD'lerde gözlenen karbonca zengin kalıntı östenit ( $\gamma_{yk}$ ) faz hacim oranı X-ışını kırınım (XRD) analiziyle belirlenmiştir. XRD desenleri Bruker D8 Advance XRD cihazı kullanılarak (Resim 4.3) elde edilmiştir.



Resim 4.3. Çalışmalarda kullanılan XRD cihazı

X-ışını kaynağı olarak monokromatik Cu  $K\alpha$  ışını ( $\lambda = 0.15406$  nm) kullanılarak 40 kV ve 40mA'da XRD desenleri elde edilmiştir. Numuneler  $2\theta$  40-85° aralığında 0,05 tarama hızında taranmıştır. Yüksek karbonlu östenit faz hacim oranının hesaplanmasında (200), (220) östenit ve (200), (211) ferrit piklerinin altında kalanların toplamı kullanılmıştır. Kalıntı östenit hesaplamalarda ASTM E975-13'te belirtilen Eş. 4.1 kullanılmıştır [180].

$$V_{\gamma} = \frac{0.5 \left[ \frac{I_{\gamma(200)}}{R_{\gamma(200)}} + \frac{I_{\gamma(220)}}{R_{\gamma(220)}} \right]}{0.5 \left[ \frac{I_{\alpha(200)}}{R_{\alpha(200)}} + \frac{I_{\alpha(211)}}{R_{\alpha(211)}} \right] + 0.5 \left[ \frac{I_{\gamma(200)}}{R_{\gamma(200)}} + \frac{I_{\gamma(220)}}{R_{\gamma(220)}} \right]} \quad (4.1)$$

Burada  $I$ ; ilgili pikin altında kalan alanı ve  $R$  her pik için ayrı hesaplanan bir değerdir.  $R$  değeri aşağıda belirtilen Eş. 4.2 kullanılarak hesaplanmıştır [180].

$$R = \left(\frac{1}{v^2}\right) [|F|^2 p(LP)] (e^{-2M}) \quad (4.2)$$

Burada;  $v$ : kristal kafes hacmi,  $|F|$ : kristal yapı faktörü,  $LP$ : Lorent-Polarizasyon faktörü  $(1 + \cos^2 2\theta) / (\sin^2 \theta \cos \theta)$ ,  $p$ : ilgili  $hkl$  indisinin çarpım faktörü,  $e^{-2M}$ : sıcaklık faktörüdür.

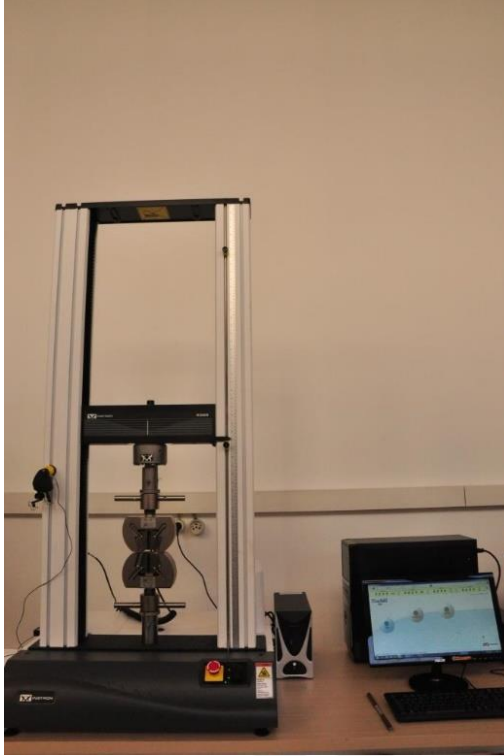
Östenit karbon içeriği Roberts formülü [181] olarak bilinen ve Eş. 4.3'te verilen formül kullanılarak hesaplanmıştır.

$$C_{\gamma} = \frac{a - 0,3548}{0,0044} \quad (4.3)$$

Burada  $C_{\gamma}$ ; östenitin içerdiği karbon miktarı(ağırlıkça %) ve  $a$ ; östenitin kafes parametresidir. Östenitin kafes parametresi  $a$ , Bragg kanunuyla düzlemler arası mesafe ( $d$ ) değerinden hesaplanmıştır.

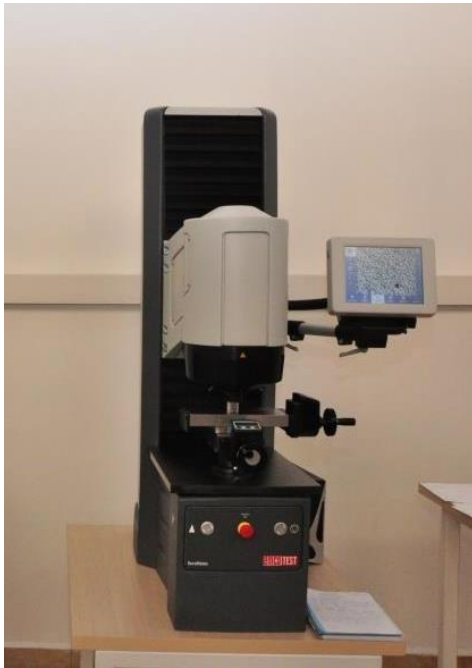
#### 4.4. Mekanik Deneyler

Ön ısıtım işlem uygulanmış ve östemperlenmiş numunelerin mekanik özelliklerini belirlemek için çekme ve sertlik testleri yapılmıştır. Çekme testleri  $6,67 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  sabit gerinme hızında 50 kN yükleme kapasiteli Instron 3369 universal test cihazı kullanılarak (Resim 4.4) oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir [182]. Gerinme ölçümü için 25 mm'lik ilk ölçü uzunluğuna ayarlanmış bir ekstensometre kullanılmıştır. Her ısıtım işlem koşulu için toplam üç çekme numunesi test edilmiş ve ortalama değerler sunulmuştur.



Resim 4.4. Çekme deneylerinde kullanılan Instron 3369 üniversal test cihazı

Sertlik testleri, Vickers 30 kgf sertlik yöntemi ile Emcotest Duravision 200 üniversal sertlik test cihazında (Resim 4.5) yapılmıştır. Bir numunenin sertliğinin belirlenmesi için 5 farklı bölgeden sertlik ölçümleri yapılmış ve ortalama değerler sunulmuştur.



Resim 4.5. Sertlik deneylerinde kullanılan Emcotest Duravision 200 model sertlik ölçme cihazı

#### 4.5. Aşınma Deneyi

Aşınma deneyleri ASTM G99-17 [177] standardına uygun olarak Resim 4.6’da verilen UTS 20 tribometre cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Numuneler Şekil 4.7.a’da gösterildiği gibi tornamalayla  $\varnothing$  6 mm pim şeklinde hazırlanmıştır. Karşı aşındırıcı yüzey olarak  $\varnothing$  80 mm çapında sertleştirilmiş SAE 52100 çelik disk kullanılmıştır (Şekil 4.7.c).

Pim aşınma numuneleri aşınma deneyi öncesi ve sonrası alkol ile temizlenip kurutularak 0.1 mg ölçüm hassasiyetine sahip Resim 4.6’daki Sartorius marka hassas terazide ölçülerek ağırlık kayıpları belirlenmiştir.



Resim 4.6. Sartorius marka hassas terazi

#### Deney parametreleri

Aşınma deneyleri, 10 N, 20 N ve 30 N sabit yük altında, 318 devir/dak hızla döndürülerek toplam 1000 m mesafe boyunca hareket ettirilmiştir (Çizelge 4.3). Anlamlı veriler 30 N’da elde edilmiştir. Bu yöntemin avantajının, (a) yüzey koşullarının homojenliğini, (b) aşınma kalıntısının giderilmesini, (c) aşınma ölçümünün kolaylığını ve numune imalatının kolay olmasını sağlamak olduğu belirtilmiştir [92].

Çizelge 4.3. Pin on disc aşınma deney parametreleri

|                              |                                                            |
|------------------------------|------------------------------------------------------------|
| Test edilen numune           | Ø 6 mm pim                                                 |
| Aşındırıcı malzeme           | AISI 52100 (DIN 100Cr6) çeliği<br>(Sertlik= 60 HRC~700 HV) |
| Aşındırıcı malzeme boyutları | Ø 80 mm çapında 12 mm kalınlığında disk                    |
| Yük                          | 30N                                                        |
| Kayma koşulları              | Kuru                                                       |
| Kayma mesafesi               | 1000 m                                                     |
| Kayma çapı                   | 60 mm                                                      |
| Kayma hızı                   | 1,0 m/s                                                    |
| Dönme hızı                   | 318 dev/dak                                                |

Aşınma deneyleri sonrası numunelerin aşınma hızı Eş. 4.4'te verilen eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır.

$$W (mg/N.m) = \frac{M (mg)}{F (N). D(m)} \quad (4.4)$$

Burada; W; aşınma hızı (mm<sup>3</sup>/Nm), M; ağırlık kaybı (mg), F; yük(N), D; toplam kayma mesafesi (m) olarak verilmiştir.

#### Aşınma cihazı

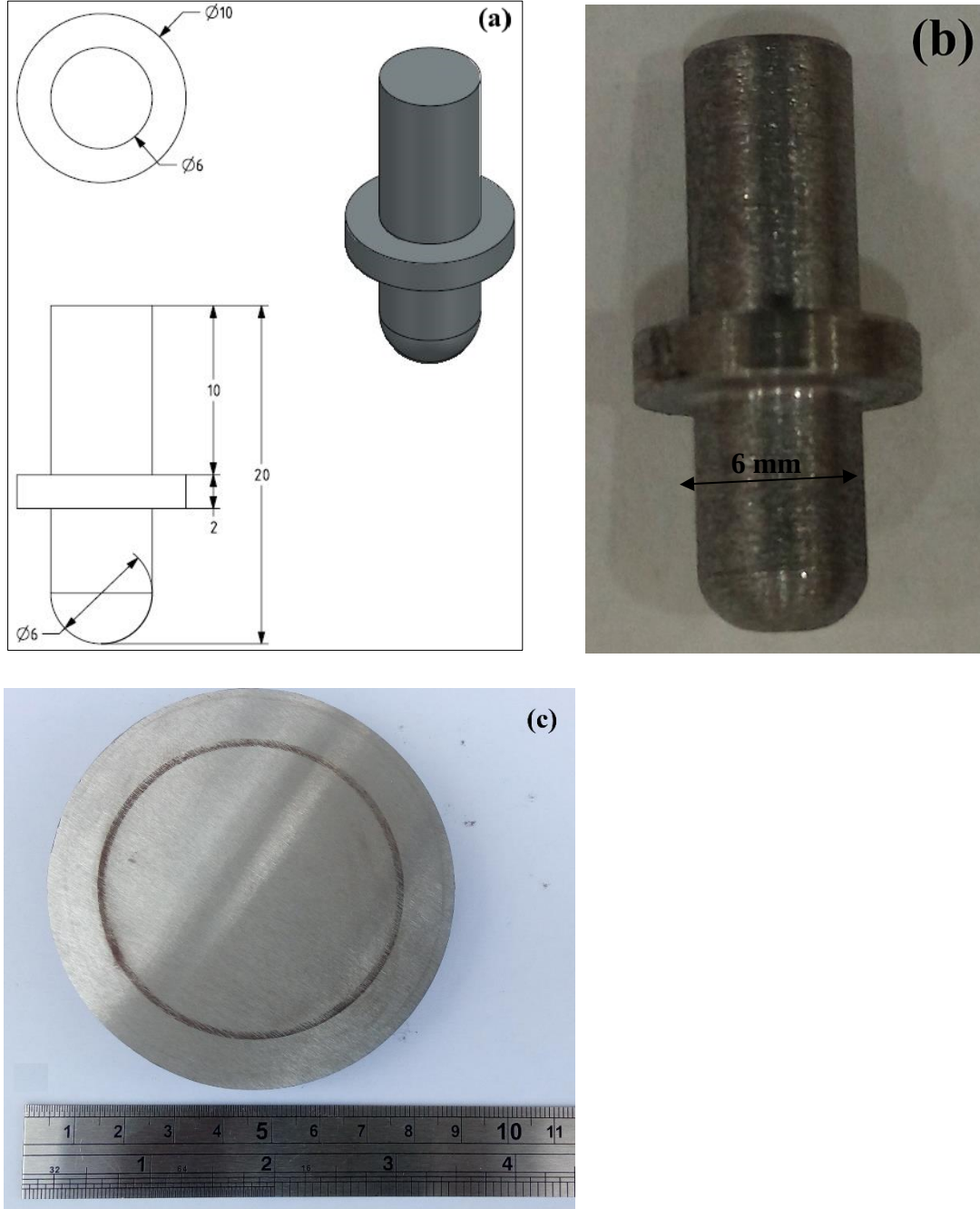
Aşınma deneyinde UTS20 tribometre cihazı kullanılmış ve deney tertibatı Resim 4.6'da görüldüğü üzere hazırlanmıştır.



Resim 4.7. Aşınma deneylerinde kullanılan UTS20 tribometre

### Aşınma numunesi ve disk

Resim 4.7’de aşınma deneylerinde kullanılan aşınma pimi ve karşılık aşınma diskini verilmiştir.



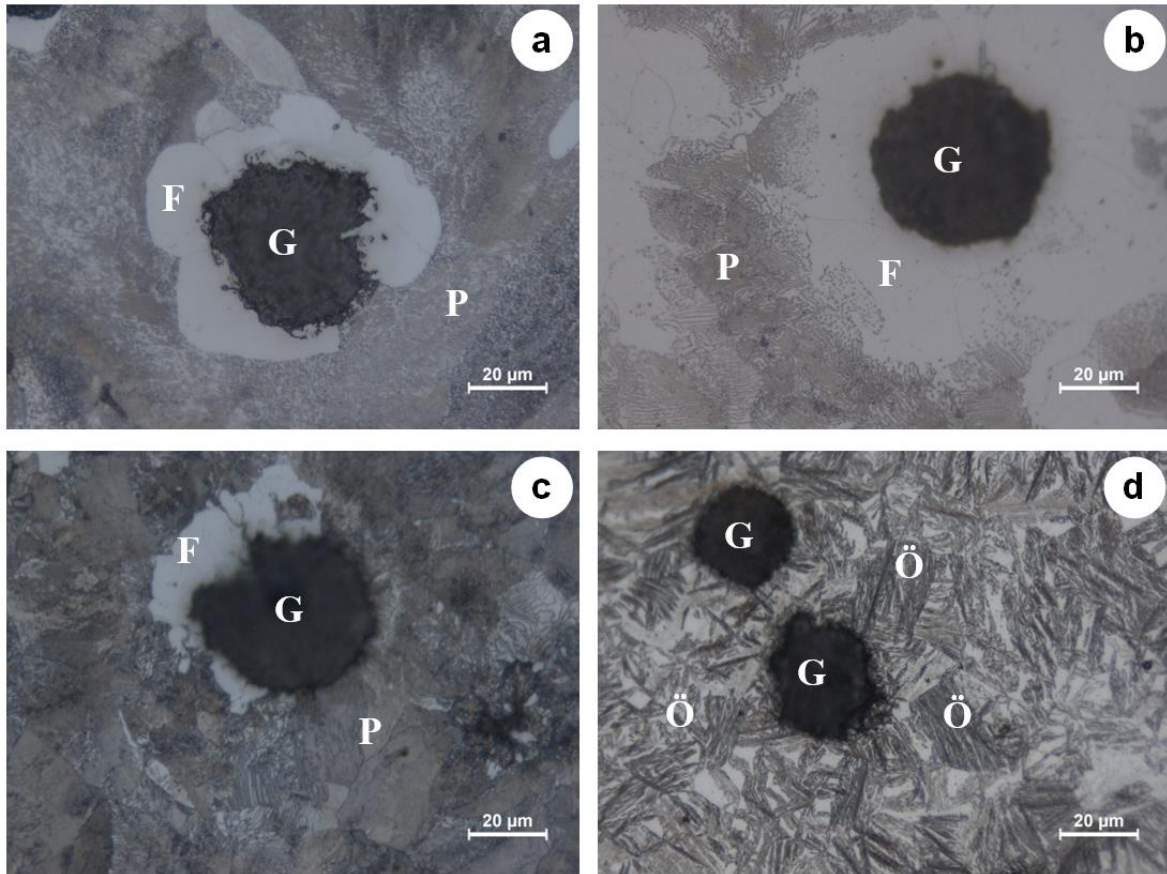
Resim 4.8. Aşınma deneylerinde kullanılan a) pim numunesinin teknik resimi, b) pim numunesi ve c) karşılık aşınma diskini



## 5. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

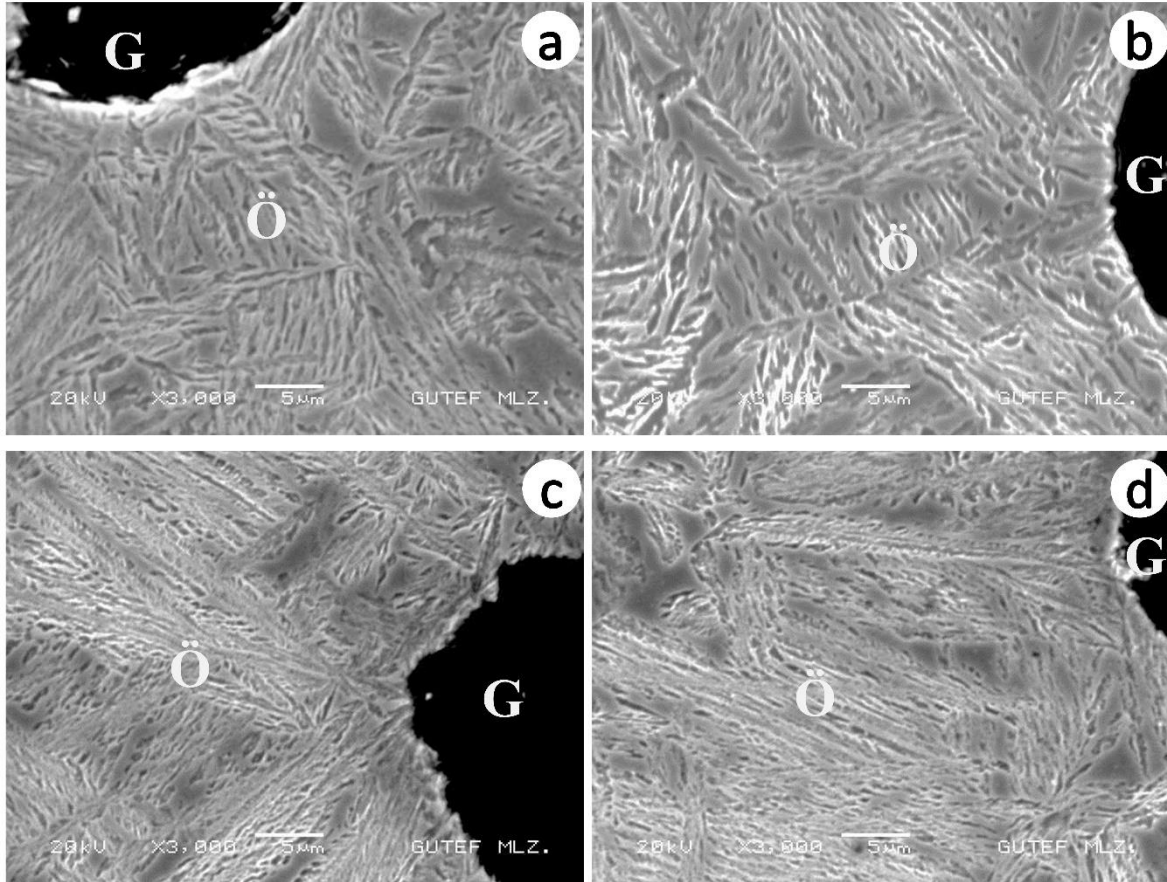
### 5.1. Mikro Yapı İncelemeleri

Ön ısıtıl işlem uygulanmış KGDD numunelerin optik mikro yapıları Resim 5.1’de verilmiştir. Ferritik + perlitik matris döküm halinde (Resim 5.1.a), tamamen tavlanmış numunede (Resim 5.1.b) ve normalize edilmiş numunede (Resim 5.2.c) gözlemlenmiştir. Ötektoid öncesi ferrit bu numunelerde aynı değildir. Dahası perlitin morfolojisi farklıdır. Kaba ve ince perlitik matris tam tavlanmış numunede (Resim 5.1.b) ve normalize edilmiş numunede (Resim 5.1.c) gözlemlenmiştir. Ayrıca tamamen ösferritik matris östemperlenmiş numunede gözlemlenmiştir (Resim 5.1.d) [71].



Resim 5.1. Numunelerin ön ısıtıl işlemlere göre değişen optik mikro yapıları; a) Dökülmüş halde, b) Tam Tavlama, c) Normalize edilmiş ve d) Östemperleme (F: Ferrit), (G: Grafit), (Ö: Ösferrit), (P: Perlit)

Ön ısıt işlem uygulanmış, ardından östemperlenmiş numunelerin SEM mikro yapıları Resim 5.2’de verilmiştir. Ösferritik yapı beynitik ferrit ( $\alpha_b$ ) ve stabilize olmuş yüksek karbonlu östenitin ( $\gamma_{YK}$ ) bir kombinasyonudur [133]. Östemperleme sonrası tipik martenzitsiz ösferrit yapısı tüm numunelerde gözlemlenmiştir. En ince taneli mikro yapı çift östemperlenmiş numuede gözlemlenmiştir (Resim 5.2.d) [71].



Resim 5.2. Numunelerin ön ısıt işlem+östemperleme sonrası SEM mikro yapıları; a) FADI: Tam Tavlama + Östemperleme, b) NADI: Normalize Edilmiş + Östemperlenmiş, c) ADI: Östemperlenmiş ve d) DADI: Çift Östemperlenmiş, (G: Grafit), (Ö: Östenit)

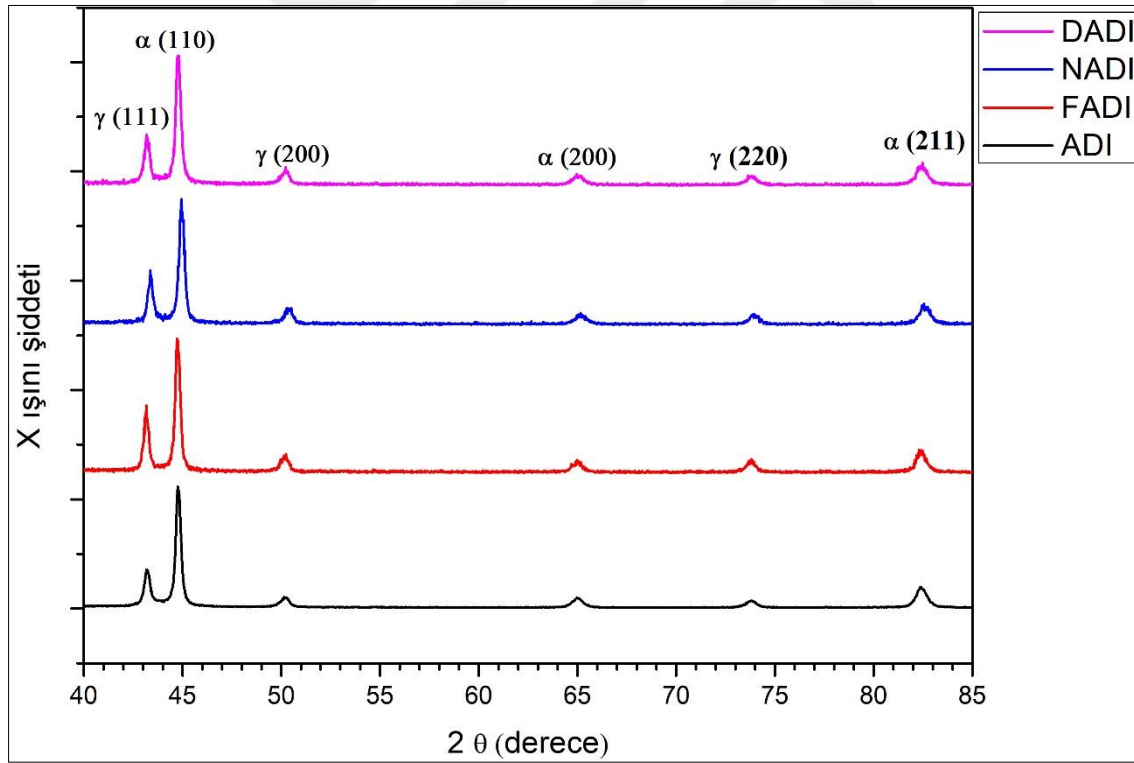
ÖKGDD’nin mekanik ve aşınma özelliklerini etkileyen önemli mikro yapısal bileşenlerin, stabilize edilmiş östenit içeriği (yüksek karbonlu östenitin hacim oranı), stabilize edilmiş östenitin karbon içeriği ve ferritin morfolojisi (beynitik ferrit) ve yüksek karbonlu östenit ( $\gamma_{YK}$ ) iyi bir şekilde anlaşılmıştır [3, 183].

ÖKGDD düşük sıcaklıklarda östemperlendiği zaman (260 °C gibi), daha ince ferrit ve östenite sahip olmakta bu da yüksek akma dayanımı ve çekme dayanımına sebep olurken

sünekliği azaltmaktadır [67, 69, 85]. Bir diğer yandan ÖKGDD yüksek sıcaklıklarda östemperlenirse (371 °C gibi) daha kaba ve tüysü ferrit ve östenite sahip olur. Bu da akma dayanımı ve çekme dayanımını düşürür fakat yüksek süneklik sağlar [3, 69].

## 5.2. XRD Analizi ve Kalıntı Östenit Hacim Oranı Sonuçları

ÖKGDD’lerde karbonca zengin kalıntı östenit hacim oranı ( $\gamma_{yk}$ ) mikro yapı, mekanik özellikler ve aşınma direnci doğrudan etkilemektedir [133, 165, 181]. Bu yüzden kalıntı östenit miktarının belirlenmesi çok önem arz etmektedir. Ön ısıtıl işlem uygulanmış ve östemperlenmiş KGDD numunelerin XRD desenleri Şekil 5.1’de verilmiştir. XRD desenlerinde (111), (200), (220) östenit pikleri belirgin olarak gözlenmektedir. Ancak (111) östenit piki ile (110) ferrit piki komşu pikler olduğundan karıştırılabileceğinden kalıntı östenit hesaplamalarında (111) östenit piki kullanılmamaktadır [180].



Şekil 5.1. Numunelerin XRD analiz desenleri; ADI: Östemperlenmiş, DADI: Çift östemperlenmiş, NADI: Normalize Edilmiş + östemperlenmiş ve FADI: Tam tavlama+ östemperleme.

Karbonca zengin kalıntı östenit hacim oranı ve östenit karbon içeriği hesaplamaları (200) ve (220) östenit pikleri kullanılarak gerçekleştirilmiş olup sonuçlar Çizelge 5.1’de

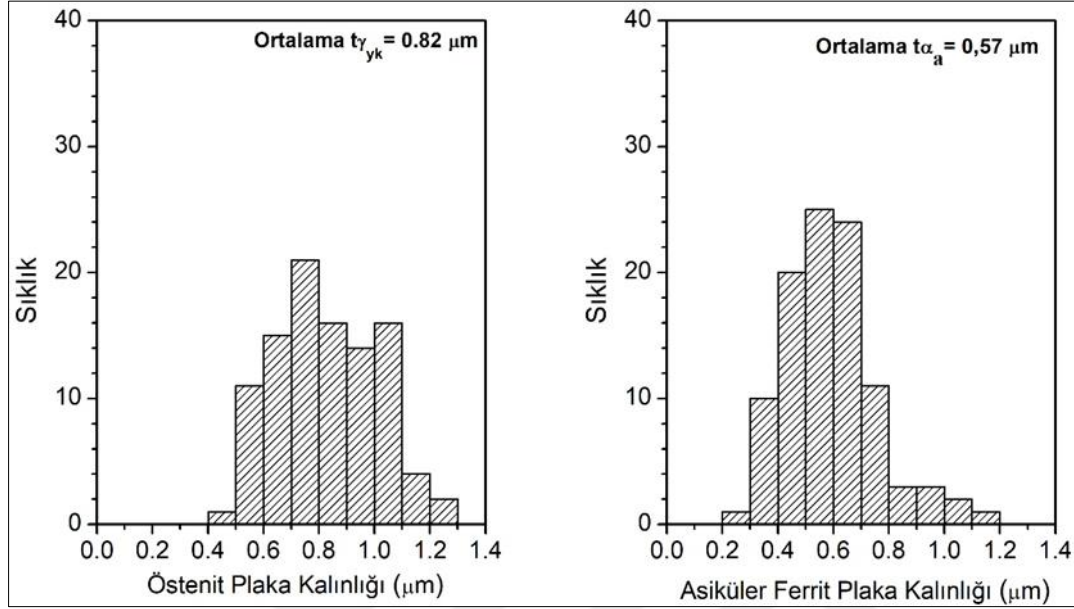
gösterilmektedir. Çizelgeden görülebileceği üzere en yüksek karbonca zengin kalıntı östenit hacim oranı % 36.6 ile ( $\gamma_{yk}$ ) çift östemperlenmiş numunede (DADI) elde edilmiştir. Çift östemperlemede östemperleme öncesi başlangıç mikro yapının ösferritik yapı olması nedeniyle östemperleme sonucu daha ince taneli ösferritik yapı elde edilmiştir. Bunun nedeni östemperlenmiş yapının yeniden östenitlenmesi sırasında daha küçük taneli ilk östenit taneleri oluşumu nedeniyle östemperleme sonucu daha ince taneli ösferritik yapı elde edilmiştir. Guesser ve diğerleri (2020), ösferritik başlangıç mikro yapısının yeniden östenitlemesi ve östemperlenmesi sonucu üretilen ÖKGDD’de mikro yapıda östenit ve ferritin daha homojen bir karışıma ve daha ince bir mikro yapı oluşumuna neden olduğunu bildirmektedir. Ayrıca bu şekilde üretilen bir ÖKGDD’de karbonun daha homojen dağıldığı tespit edilmiştir [72].

Çizelge 5.1. Numunelerin XRD analiziyle hesaplanmış karbonca zengin kalıntı östenit hacim oranı ( $V_{yk}$ ), östenitin içerdiği karbon miktarı ( $C_{yk}$ ) ve plaka kalınlık değerleri

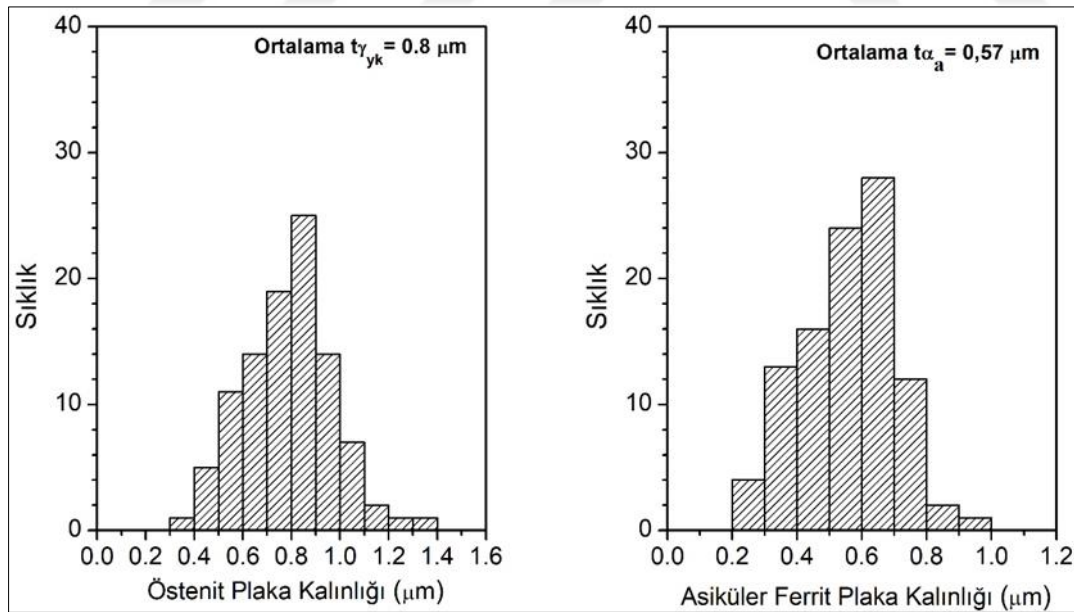
| Numune adı                                   | Östenit<br>Hacim Oranı,<br>$V_{yk}$<br>(%) | Östenit<br>Karbon<br>İçeriği,<br>$C_{yk}$<br>(ağırlıkça %) | Östenit<br>Plaka<br>Kalınlığı,<br>$t_{yk}$<br>( $\mu\text{m}$ ) | Asiküler<br>Ferrit Plaka<br>Kalınlığı,<br>$t\alpha_a$<br>( $\mu\text{m}$ ) |
|----------------------------------------------|--------------------------------------------|------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| Östemperlenmiş (ADI)                         | 32,3                                       | 1,6                                                        | $0,82 \pm 0,03$                                                 | $0,57 \pm 0,03$                                                            |
| Tam Tavlama + Östemperlenmiş (FADI)          | 33,8                                       | 1,65                                                       | $0,8 \pm 0,02$                                                  | $0,57 \pm 0,02$                                                            |
| Normalize Edilmiş + Östemperlenmiş<br>(NADI) | 35,3                                       | 1,8                                                        | $0,62 \pm 0,04$                                                 | $0,44 \pm 0,04$                                                            |
| Çift Östemperlenmiş (DADI)                   | 36,6                                       | 1,91                                                       | $0,57 \pm 0,05$                                                 | $0,38 \pm 0,05$                                                            |

Östemperleme ısı işlemleri sonrası karbonca zengin karbonca zengin kalıntı östenit ( $\gamma_{yk}$ ) ve asiküler ferrit ( $\alpha_a$ ) plaka kalınlığı ölçüm sonuçları Şekil 5.2 - Şekil 5.5’te verilmiştir. En ince karbonca zengin karbonca zengin kalıntı östenit ( $\gamma_{yk}$ ) ve asiküler ferrit ( $\alpha_a$ ) plaka kalınlıkları Şekil 5.5.’te görülebileceği üzere çift östemperlenmiş (DADI) numunede elde edilmiştir. Bu değerler sırasıyla ortalama olarak 0,57 ve 0,38 olarak hesaplanmıştır. Benzer şekilde Guesser ve diğerleri (2020), ösferritik başlangıç mikro yapısından yeniden östenitleme ve östemperlenmeyle üretilen ÖKGDD’in mikro yapısının incelendiğini bildirmektedir [72]. Şekil 5.2 ve Şekil 5.3.’te görülebileceği üzere tek östemperleme (ADI) ile tam tavlama sonrası östemperlenmiş numunelerde (FADI) birbirine yakın plaka kalınlıkları elde edilmiştir. ADI’da bu değerler sırasıyla ortalama olarak 0,82 ve 0,57 iken, FADI’da ortalama olarak 0,8 ve 0,57’dir. Buna karşın normalizasyon sonrası östemperlenmiş numunelerde (NADI) tek östemperleme (ADI) ve tam tavlama sonrası

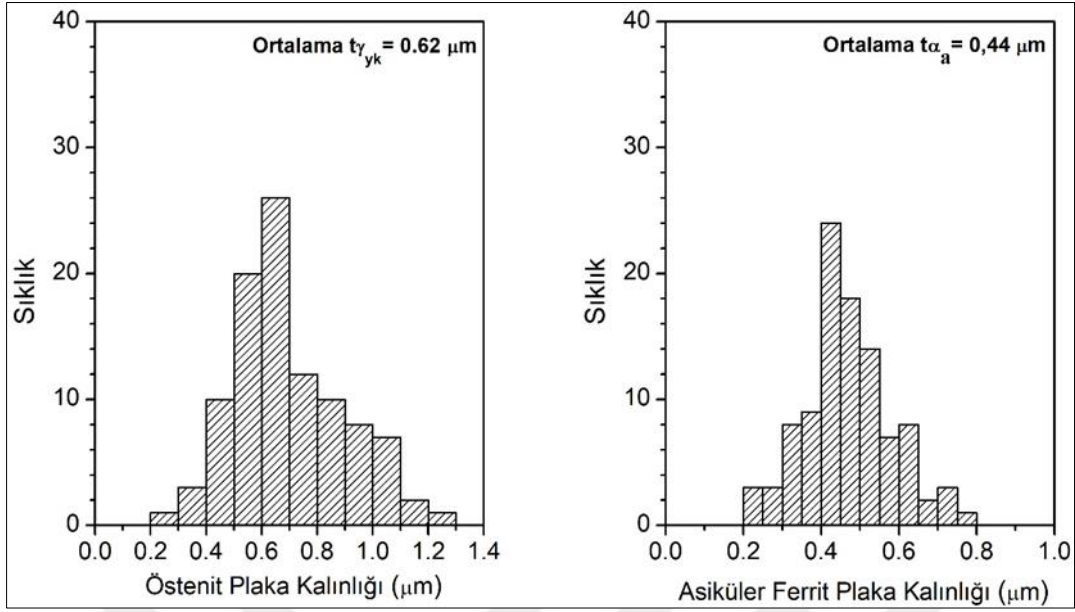
östemperlenmiş numunelere (FADI) göre daha ince plaka kalınlıkları elde edilmiştir. Bu değerler sırasıyla ortalama olarak 0,62 ve 0,44' olarak hesaplanmıştır. (Şekil 5.4).



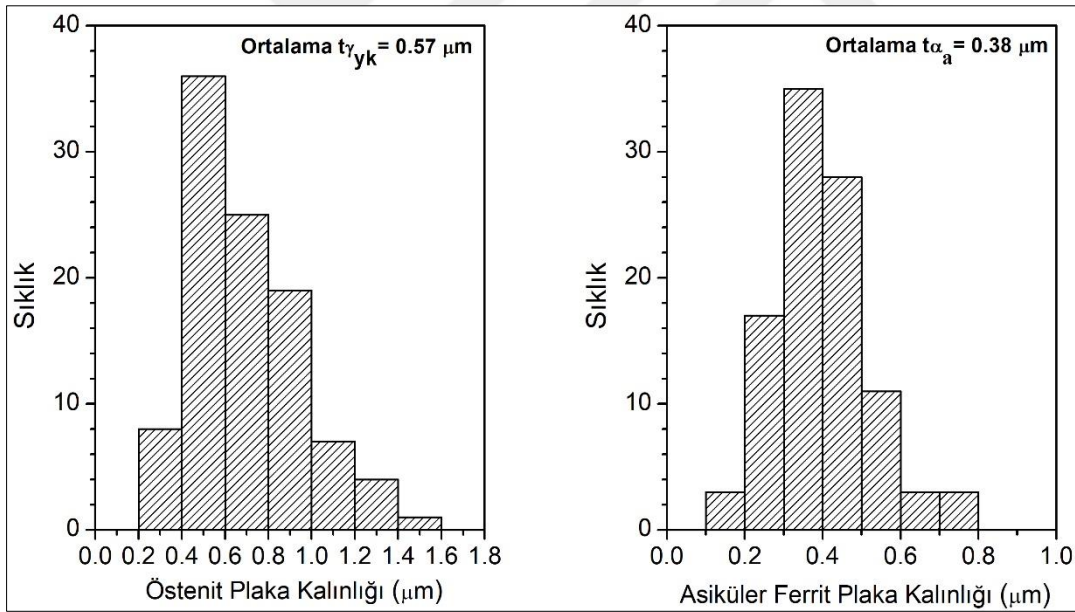
Şekil 5.2. Tek östemperlenmiş numunede (ADI) karbonca zengin karbonca zengin kalıntı östenit ( $\gamma_{yk}$ ) ve asiküler ferrit ( $\alpha_a$ ) plaka kalınlığı ölçüm sonuçları



Şekil 5.3. Tam tavlama ısı işlemi sonrası stemperlenmiş numunede (FADI) karbonca zengin kalıntı östenit ( $\gamma_{yk}$ ) ve asiküler ferrit ( $\alpha_a$ ) plaka kalınlığı ölçüm sonuçları



Şekil 5.4. Normalleştirme ısı işlemi sonrası östemperlenmiş numune (NADI) karbonca zengin kalıntı östenit ( $\gamma_{yk}$ ) ve asiküler ferrit ( $\alpha_a$ ) plaka kalınlığı ölçüm sonuçları



Şekil 5.5. Çift östemperlenmiş numune (DADI) karbonca zengin kalıntı östenit ( $\gamma_{yk}$ ) ve asiküler ferrit ( $\alpha_a$ ) plaka kalınlığı ölçüm sonuçları

### 5.3. Çekme ve Sertlik Deneyi Sonuçları

Ön ısıtım işlem uygulanmış ve östemperlenmiş numunelerin çekme ve sertlik deneyi sonuçları Çizelge 5.2’de verilmiştir. Şekil 5.6’dan görülebileceği üzere östemperlenmiş numunenin (ADI) mekanik özellikleri, dökülmüş numuneden çok daha yüksektir. Akma dayanımı 377.3 MPa’dan 713,9 MPa’ya çıkmıştır. Çekme dayanımı 645,8 MPa’dan 1029,6 MPa’ya çıkmıştır. Çift östemperlenmiş (DADI) numuneler, test edilen numuneler arasında 348 HV ile en yüksek sertlik değerini ve 1094,5 MPa ile de en yüksek çekme mukavemetini sergilediği gözlemlenmiştir (Şekil 5.6 ve Şekil 5.8). Bu, en iyi ösferritik matris mikro yapısına atfedilmiştir.. Beynitik ferrit ve stabilize yüksek karbonlu östenitin ince karışımları, ÖKGDD’lerde üstün mekanik özellikler sağlamaktadır [56, 133]. Geleneksel olarak östemperlenmiş (ADI) 1029 MPa ile ve tam tavlama + östemperlenmiş (FADI) numune 1026 MPa ile benzer çekme mukavemeti sergilemiştir.

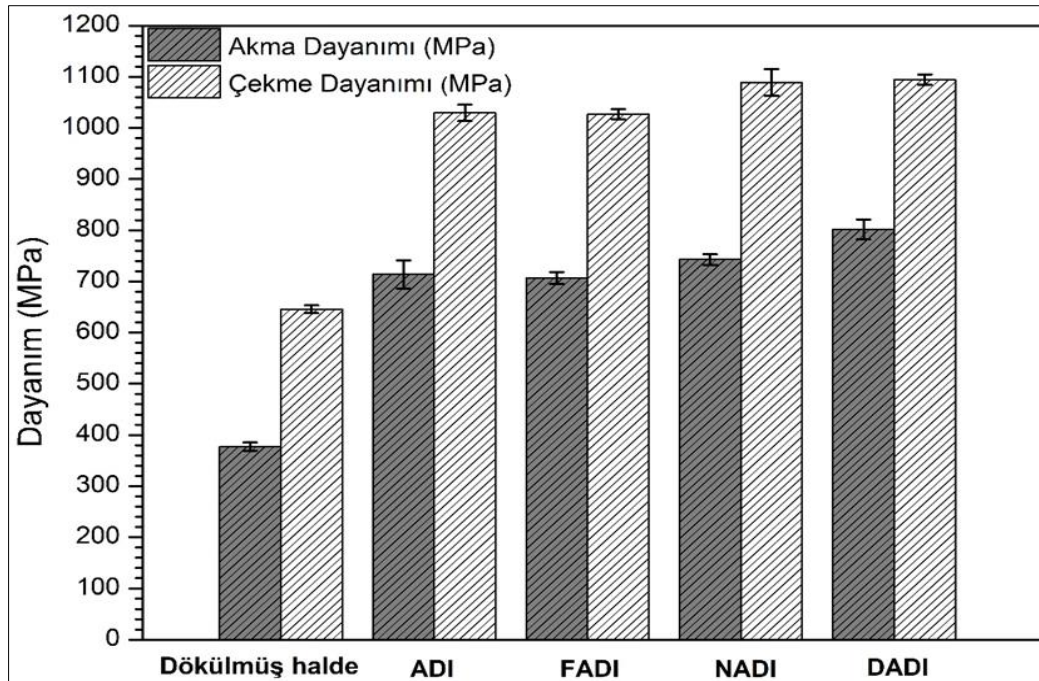
Çizelge 5.2. Numunelerin çekme ve sertlik deneyi sonuçları

| Numune adı                                | Akma Dayanımı (MPa) | Çekme Dayanımı (MPa) | Toplam Uzama (%) | Sertlik (HV 30kgf) |
|-------------------------------------------|---------------------|----------------------|------------------|--------------------|
| Dökülmüş Halde                            | 377,3 ± 8           | 645,8 ± 7.5          | 8,8 ± 0,2        | 230 ± 4,9          |
| Östemperlenmiş (ADI)                      | 713,9 ± 27,5        | 1029,6 ± 16          | 7,7 ± 1,1        | 310 ± 6,9          |
| Tam Tavlama + Östemperlenmiş (FADI)       | 706,5 ± 11,9        | 1026,9 ± 10          | 11,8 ± 1,4       | 303 ± 9,7          |
| Normalize Edilmiş + Östemperlenmiş (NADI) | 742,9 ± 10,2        | 1089,1 ± 25,7        | 8,7 ± 1,2        | 326 ± 3,6          |
| Çift Östemperlenmiş (DADI)                | 801,6 ± 19,5        | 1094,5 ± 10,1        | 8,4 ± 0,6        | 348 ± 11,8         |

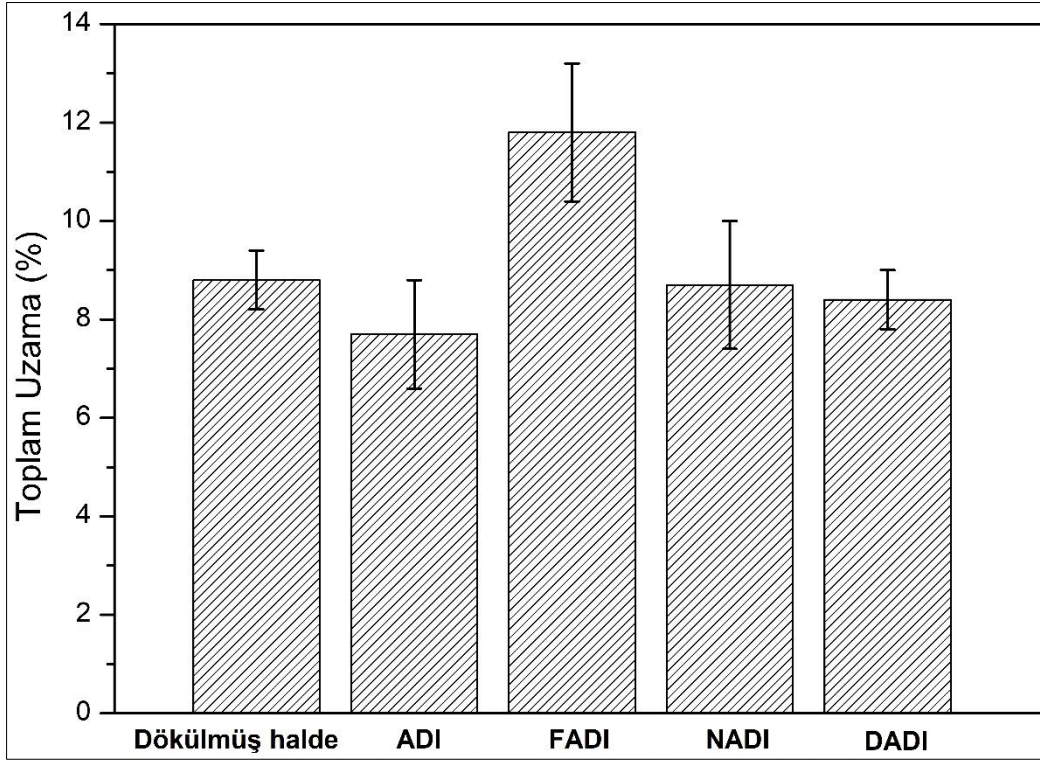
Guesser ve diğerleri (2020), ösferritik başlangıç mikro yapısının yeniden östenitlemesi ve östemperlenmesi sonucu üretilen ÖKGDD’de mikro yapıda östenit ve ferritin daha homojen bir karışıma neden olduğunu bunun da yüksek mukavemet ve süneklik kombinasyonu sağladığını bildirmektedir. Diğer bir deyişle, östemperleme öncesi ilk mikro yapının ösferrit olduğu çift östemperlenmiş KGDD’in çok ince bir asiküler ferrit ve karbonca zengin kalıntı östenit dağılımı nedeniyle en iyi mekanik özellikler sergilediği tespit edilmiştir. Buna karşın martenzitik başlangıç mikro yapısının yeniden östenitlemesi ve östemperlenmesi sonucu üretilen ÖKGDD’de mikro yapıda ikincil grafitleşme gözlemlendiği bildirilmektedir. Bunun sonucu olarak toplam uzama ve tokluk değerlerinin önemli ölçüde düştüğü tespit edilmiştir [72].

Sünek dökme demirin aşınma direnci, her biri bazı sınırlamalar ve dezavantajlar içeren farklı ısıtım işlem prosedürleri ve yüzey mühendisliği teknikleriyle artırılabilir. Aşınma hızı, akma dayanımına, östenit içeriğine ve karbon içeriğine bağlı olduğu belirtilmiştir. Aşınma, katı halde temas halinde olan, hafif ve şiddetli aşınma olarak tanımlanan bir veya her iki yüzeyden katı metalin uzaklaştırılması işlemi olarak tanımlanmıştır [1]

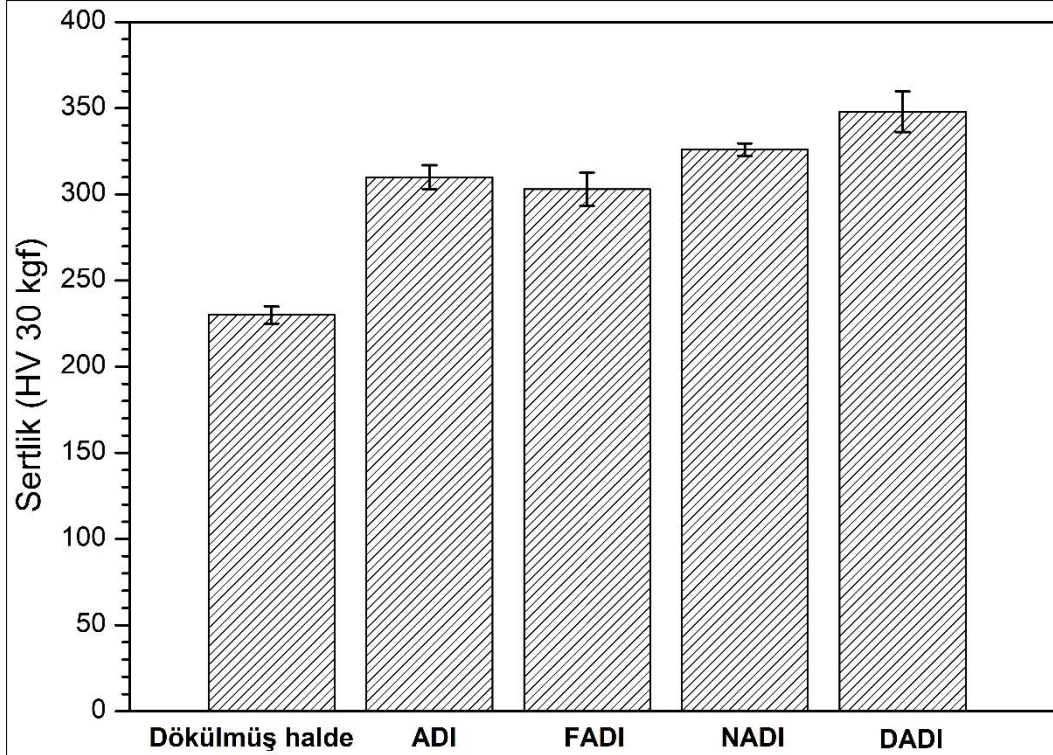
ÖKGDD'nin mekanik özelliklerinin beynitik ferritin inceliğine, yüksek karbonlu östenit miktarına ve karbon içeriğine bağlı olduğu bulunmuştur [3, 69]. Bu nedenle, çok ince beynitik ferrit ve yüksek karbonlu östenit ile çok yüksek östenit karbon içeriği üretmek mümkünse ÖKGDD'nin mekanik özelliklerini optimize etmek mümkün olabilir [93]. Araştırmacılar, beynitik ferrit ve yüksek karbonlu östenitin artırılmasıyla ÖKGDD'nin aşınma ve mekanik özelliklerini geliştirmek için iki aşamalı bir östempereleme işlemi önermişlerdir [3, 87, 130]. Ancak çok ince beynitik ferrit ve yüksek karbonlu östenit karışımları elde etmek için başlangıç matris mikro yapısının iyileştirilmesinin etkili bir yol olduğu gözlenmiştir. Şekil 5.7'de test edilen numunelerin yüzde uzama değerlerinin karşılaştırılması verilmiştir. En fazla topma uzama %11,8 ile tam tavllanmış ve östemperelenmiş (FADI)'da elde edilirken en düşük değer %7,7 ile geleneksel östemperelenmiş (ADI) numunede elde edilmiştir.



Şekil 5.6. Numunelerin akma ve çekme dayanımı değerlerinin karşılaştırılması



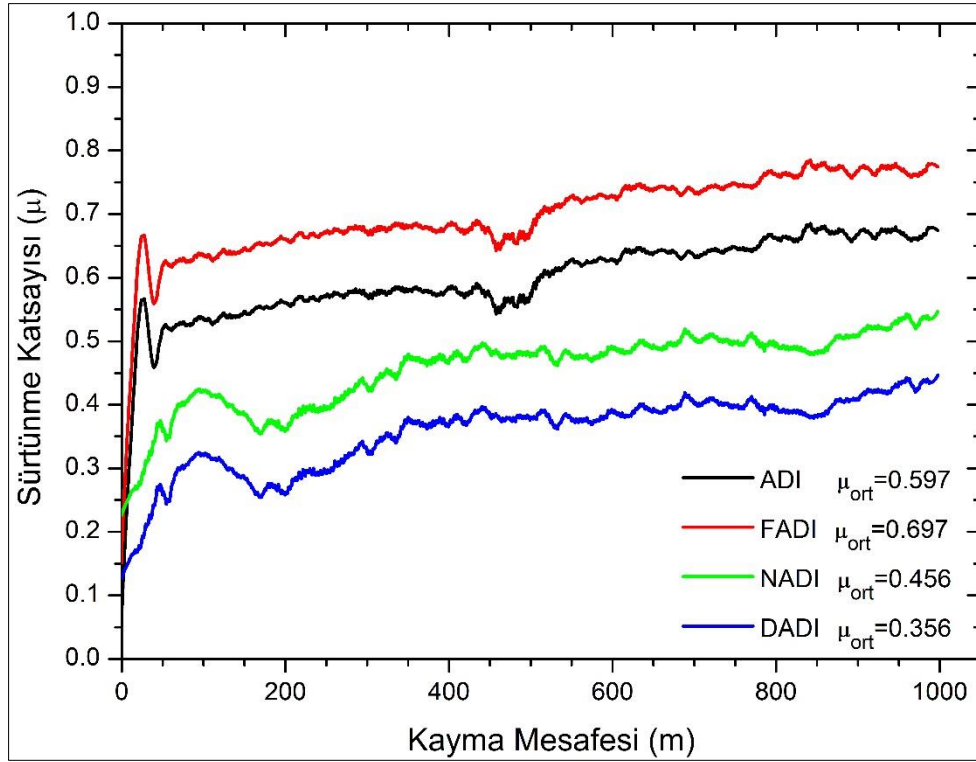
Şekil 5.7. Numunelerin toplam % uzama değerlerinin karşılaştırılması



Şekil 5.8. Numunelerin sertlik değerlerinin karşılaştırılması

#### 5.4. Aşınma Deneyi Sonuçları

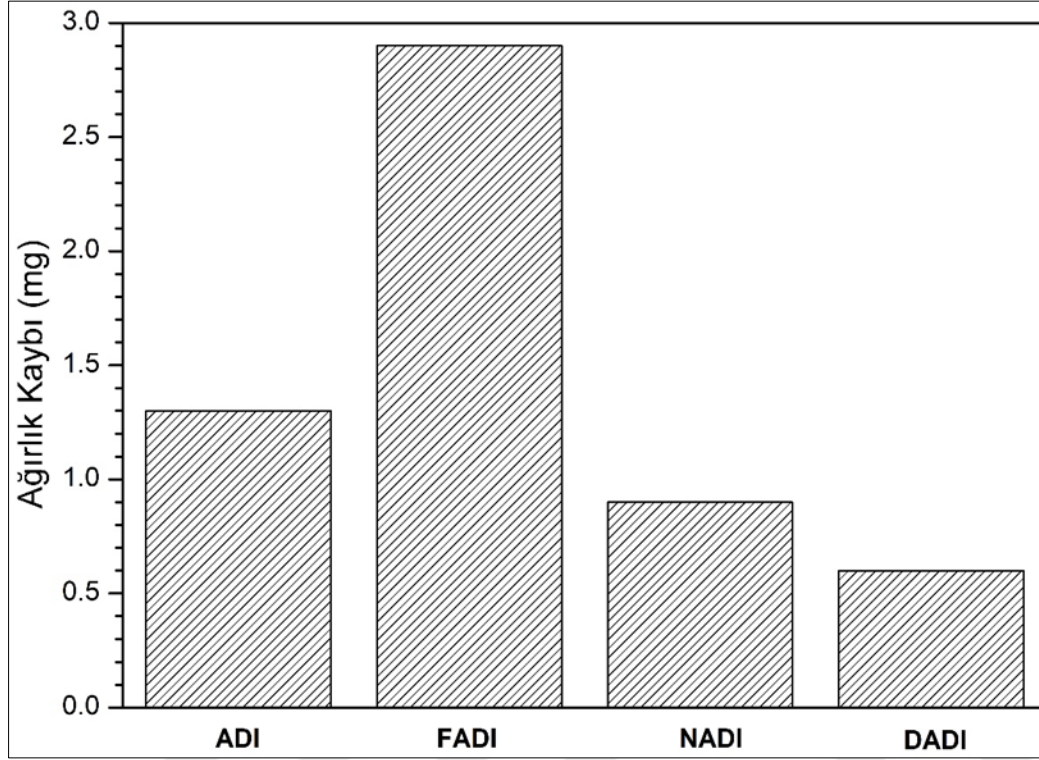
Numunelerin kayma mesafesiyle sürtünme katsayısının değişimi Şekil 5.9’da verilmiştir. Şekilden görülebileceği üzere en yüksek ortalama sürtünme katsayısı ( $\mu = 0,697$ ) tam tavlama + östemperleme yapılmış numunede (FADI) elde edilmiştir. Buna karşın en düşük ortalama sürtünme katsayısı ( $\mu = 0,356$ ) çift östemperleme yapılmış numunede (DADI) elde edilmiştir. Bu durum numunelerin sertlik değerleriyle açıklanabilir. Bilindiği üzere metalik malzemelerde sertlik değeri arttıkça ortalama sürtünme katsayısı azalmaktadır [3, 104, 156, 166].



Şekil 5.9. Numunelerin kayma mesafesiyle ortalama sürtünme katsayısının değişimi

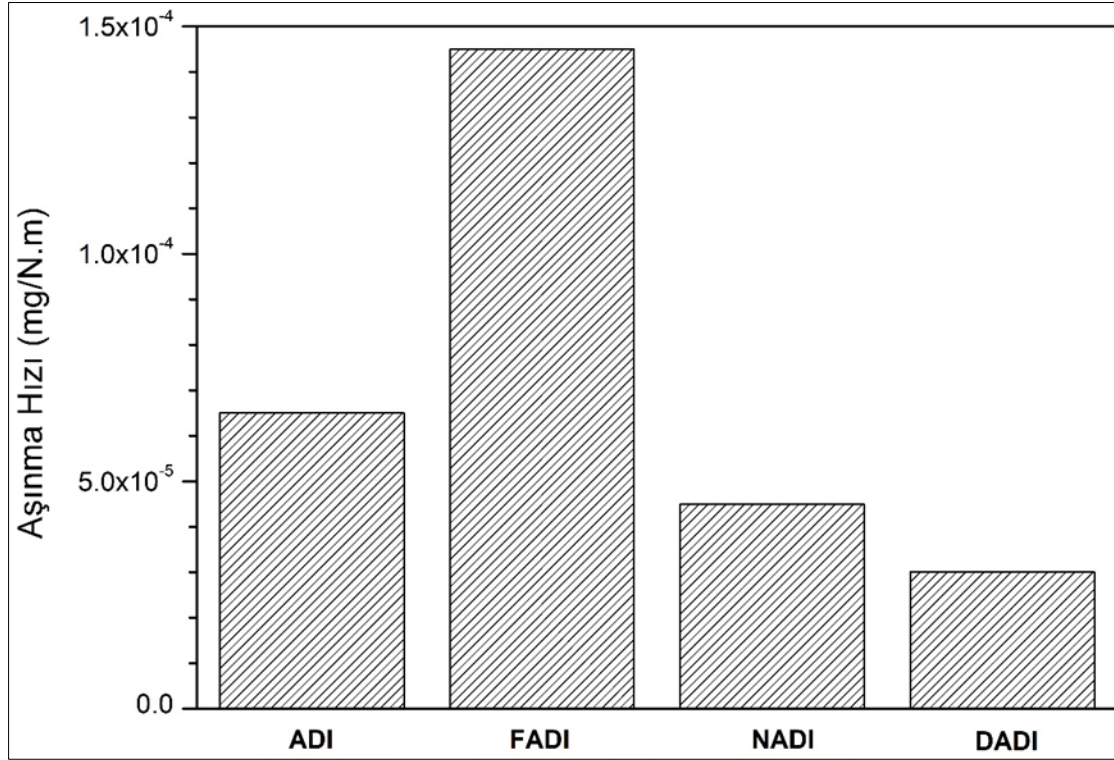
Numunelerin sabit aşınma koşullarında aşınmayla ağırlık kayıplarının karşılaştırılması Şekil 5.10’da verilmiştir. Bilindiği üzere ortalama sürtünme katsayısı aşınmayla ağırlık kaybını doğrudan etkilemektedir. Ortalama sürtünme katsayısı artması aşınmayla ağırlık kaybının artmasına yol açmaktadır [3, 26, 135, 146, 154, 157, 159, 161, 166]. En düşük aşınmayla ağırlık kaybı 0,6 mg ile en düşük ortalama sürtünme katsayısına sahip çift östemperleme yapılmış numunede (DADI) elde edilmiştir. Buna karşın en yüksek ağırlık

kaybı ise 2,9 mg ile en yüksek ortalama sürtünme katsayısına sahip tam tavlama + östemperleme ısıl işlemi yapılmış numunede (FADI) elde edilmiştir.



Şekil 5.10. Östemperlenmiş numunelerin aşınmayla ağırlık kayıplarının karşılaştırılması (30 N yük ve 1000 m kayma mesafesi)

Östemperlenmiş numunelerin aşınma hızlarının karşılaştırılması Şekil 5.11’de verilmiştir. Ön ısıl işlemin aşınma özellikleri üzerine etkisini araştırmak amacıyla aşınma deney parametreleri (aşındırıcı disk, yük ve mesafe) sabit tutulmuştur. Bu yüzden aşınma hızları değerleri, aşınmayla ağırlık kaybı değeriyle benzerlik göstermektedir. Şekil 5.11’den görülebileceği üzere en düşük aşınma hızı çift östemperleme yapılmış numunede (DADI) elde edilmiştir. Buna karşın en yüksek aşınma hızı ise tam tavlama+östemperleme ısıl işlemi yapılmış numunede (FADI) elde edilmiştir (Şekil 5.11).



Şekil 5.11. Östemperlenmiş numunelerin aşınma hızlarının karşılaştırılması (30 N yük ve 1000 m kayma mesafesi)

### 5.5. Aşınmış Yüzeylerin Değerlendirilmesi

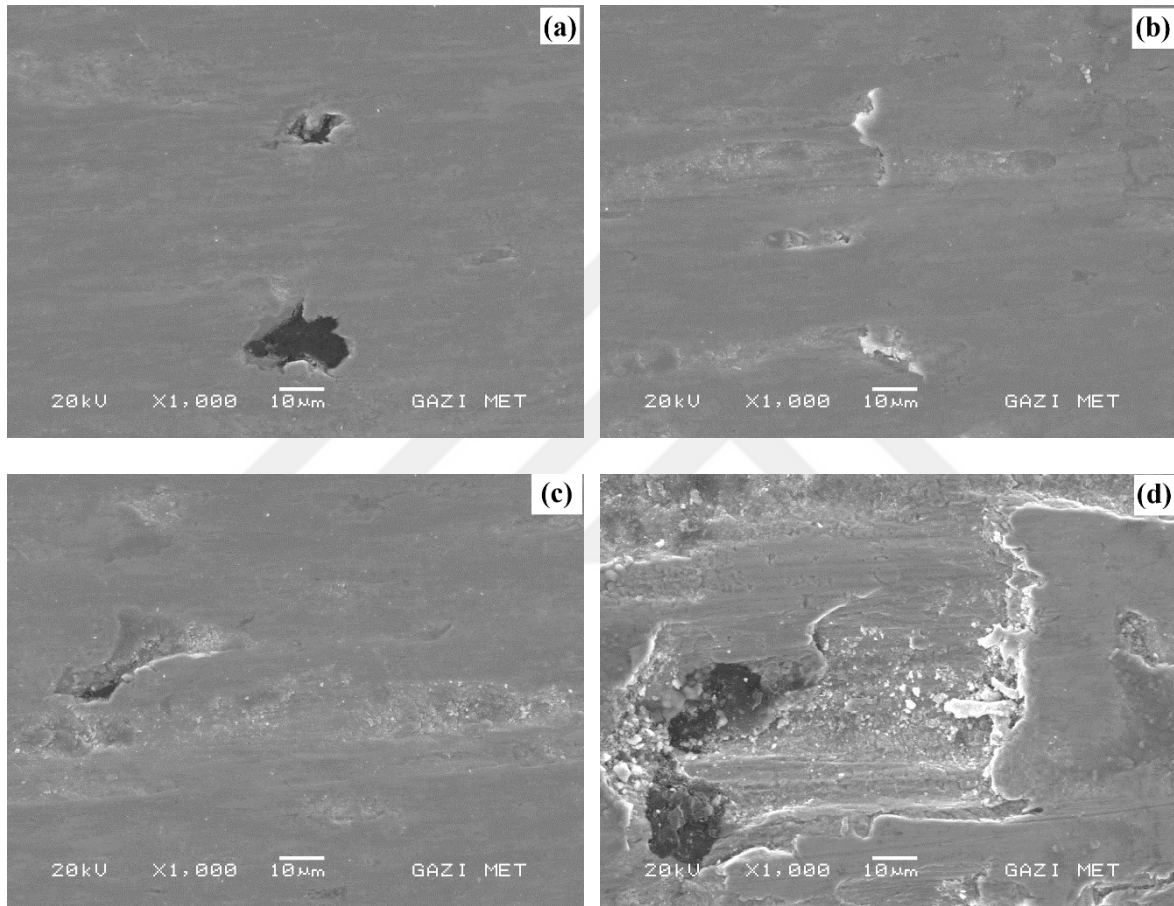
Aşınma testleri sırasında, grafit nodülleri kırılabilir ve aşınma hattına yayılabilir. Küçük grafit parçacıkları, aşınma kaybının azaltılmasında elverişli olan sürtünme katsayısını düşürmek için kuru yağlayıcı görevi göreceği bildirilmiştir [3]. Akışkan yağlayıcı eklenmeden yapılan aşınma testlerinde, oksidatif aşınma çoğunlukla ana aşınma mekanizmalarından biri olarak rapor edilmiştir [27, 148, 153]. Oksidatif tabaka, yüksek kırılabilirlik nedeniyle kayma hareketi sırasında kolayca kırılır. Ayrıca, yüksek sertliğe sahip bazı oksidatif aşınma kalıntıları ( $Fe_2O_3$  ve  $FeO$ ) yüzeyi çizebilir ve hatta ana malzemeyi yırtabilir [27, 157]. Östemperleme ısı işlemi tek basamaklı olan ÖKGDD'den oluşan numuneler her zaman çelikten veya yüksek sertlikteki diğer demir içeren malzemelerden yapılmış malzemeler ile karşı karşıya kaldığından, sert yüzeydeki pürüzler, iki gövdeli aşındırıcı aşınma olan göreceli yumuşak ÖKGDD yüzeyindeki oyukları delecek ve yivler açacağı bildirilmiştir [148]. Ek olarak, aşınma testlerinde [27, 153, 162, 165] belirgin hale gelen yapışkan aşınmayı temsil eden aşınma izi üzerinde yaygın olarak şiddetli plastik akışı ve delaminasyon gözlemlendiği bilinmektedir. Çatlaklar, matristeki grafit nodüllerinin etrafında çekirdeklenme eğilimindedir ve grafit nodüllerinin üzerinde sert bir çentik

oluştugu bildirilmektedir. Yüzey altı yorgunluğunun, malzeme delaminasyonu ve ayrılmasının ilerlemesinde potansiyel bir aşınma mekanizması olabileceği öne sürülmüştür [184, 185]. Grafit nodüllerinin stres konsantrasyon noktaları olarak kabul edilebileceği sonucuna varılmıştır [186, 187]. Çatlaklar, küçük ölçekli çukurlar veya büyük ölçekli parçalar oluşturmak için yüzey altındaki bir grafit nodülünden bitişik grafit nodüllerine veya dış yüzeye yayılmaya uygundurlar. Çatlaklar ayrıca aşınma kalıntılarının ve kirliliklerin tekrar tekrar kayması veya temas yüzeyindeki sert pürüzlerin kazınmasıyla da oluşturulabilir. Yüksek lokalize gerilme veya plastik deformasyon altında, kalıntı östenit yüzeyde veya yüzey altında martenzite dönüşeceği bilinmektedir. Bununla birlikte, temas yüzeyinin kırılabilirliği de artacaktır. ÖKGDD numunelerinin hazırlanmasında, taşlama ve parlatma adımlarında grafit nodüllerinin çıkarılması nedeniyle yüzeydeki bazı boşluklar da çatlak oluşumunu hızlandıracaktır. Tek aşamalı ÖKGDD'nin aşınmış yüzeyindeki analize göre, oksidatif aşınma, iki gövdeli abrazif aşınma, üç gövdeli abrazif aşınma, yapışkan aşınma, tabakalara ayrılma ve yorgunluk aşınması gibi çoklu potansiyel aşınma mekanizmalarına sahip olduğu bildirilmiştir [3].

ÖKGDD'lerde hakim olan aşınma mekanizmaları araştırmacılar tarafından incelenmiştir [2, 25-27, 87, 148, 151, 153, 157, 160, 161, 163, 165, 173, 176, 188]. Bu araştırmalar neticesinde başlıca aşınma mekanizmaları olarak oksidatif aşınma [2, 27, 148, 153, 157, 160, 163, 176], delaminasyon [25, 26], grafit nodülleri etrafında çatlak oluşumu [25, 173], aşınma kalıntılarının yapışması [26, 27], aşındırıcı aşınma [26, 87, 176], östenitin stres sebebiyle martenzite dönüşümünün işareti olan beyaz katman oluşumu [161, 165, 188] gösterilmektedir. Oksidasyon, malzeme yüzeyi ile yüksek sıcaklıkta oksijen arasındaki kimyasal reaksiyonun sonucudur, yüzeyde bir oksit tabakası oluşturur. Yaklaşık 200 °C'lik bir sıcaklıkta oluşan oksit, ağırlıklı olarak  $Fe_3O_4$ 'tür [151]. Bu tabaka aşınma işlemi sırasında aşınma ile tahrip edildiğinde, başka bir tabaka oluşmaya başlar. Malzemenin aşınması, aşındırıcı tabakanın çıkarılması ve oluşumu tekrarlandığı için gerçekleşmektedir.

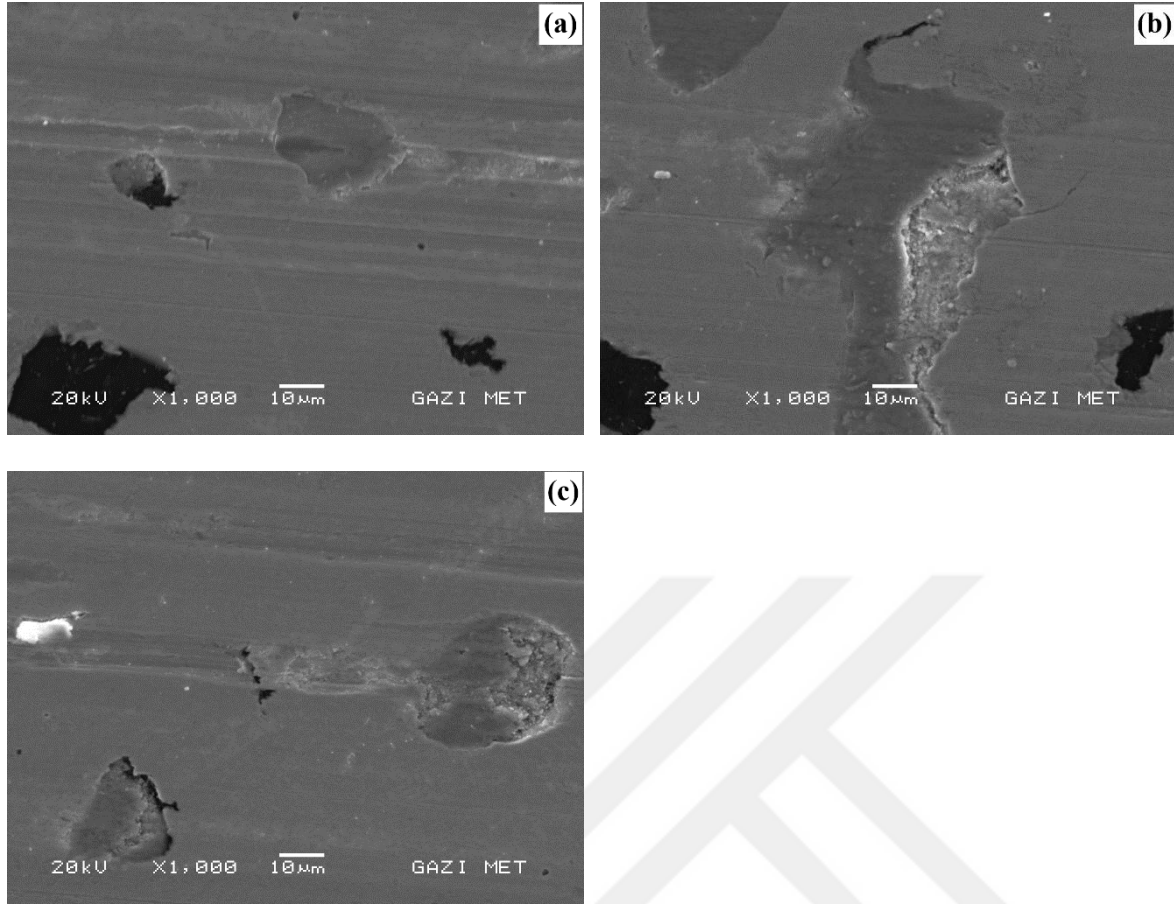
Östemperlenmiş numunenin (ADI) SEM görüntüsü Resim 5.3'te verilmiştir. Resim 5.3.a'da siyah olarak görünen grafit yapısına oldukça düzgün bir yüzey eşlik etmektedir. Grafitlerin hemen kenarlarında veya üzerinde beyaz oksit tabakası oluşmuştur. Resim 5.3.b'de aşınmanın neden olduğu plastik deformasyon gözlemlenebilmektedir. Resim 5.3.d'den görüleceği üzere plastik olarak deformasyona uğrayarak aşınan malzemenin yüzey ayrılması veya parça kopması mevcuttur ve oluklar oluşmuştur. Küçük beyaz

noktacıklar şeklinde görünen yapı ise oksitlerdir. Parça kopmasının mikro çatlakların yoğunlaştığı yerler olan grafit nodüllerine yakın olduğu görülmektedir. Bu tip kopmalarda öncelikle yüzeydeki mikro çatlakların oluşması ve ilerlemesi gerektiği bilinmektedir. İkinci olarak da alt yüzeyde başlatılan yorulma çatlakları olabilir veya deformasyon kısıtlamalarının maksimum olduğu östenit-martenzit arayüzünden başlayabileceği düşünülmektedir [150].



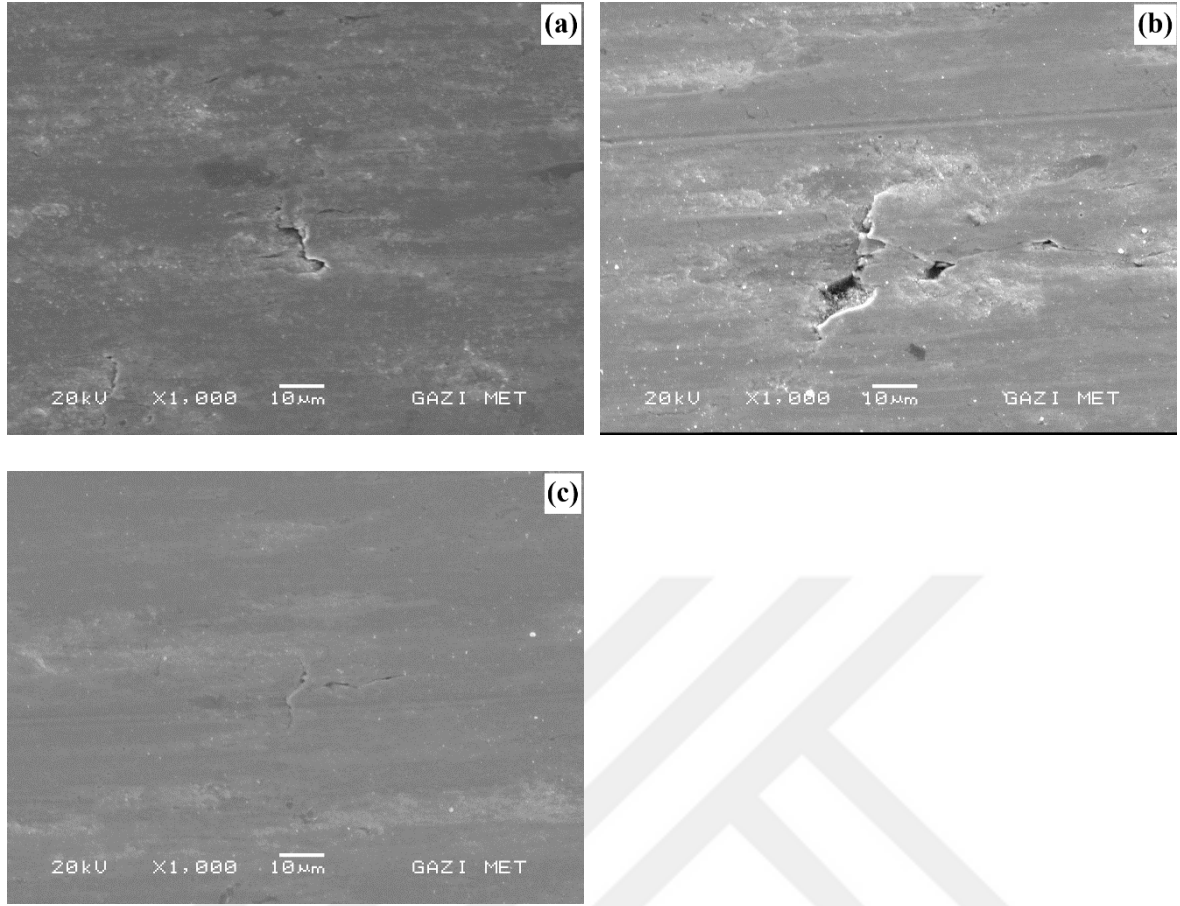
Resim 5.3. (a-d) Östemperlenmiş numunenin (ADI) SEM görüntüsü (Büyütme X1000)

Tam Tavlanmış + Östemperlenmiş (FADI) numunenin SEM görüntüsü Resim 5.4'te verilmiştir. Resim 5.4.a'da görüleceği üzere plastik deformasyon mevcuttur. Ayrıca yüzeyde çok az miktarda çukurcuklar görülmektedir. Resim 5.4.b'de mikro çatlak oluşumu net bir şekilde görülmektedir. Resim 5.4.c'de mikro çatlakların fazlalığı göze çarpmaktadır. Görünen beyazlığın ise aşınma esnasındaki oksidasyondan kaynaklandığı düşünülmektedir.



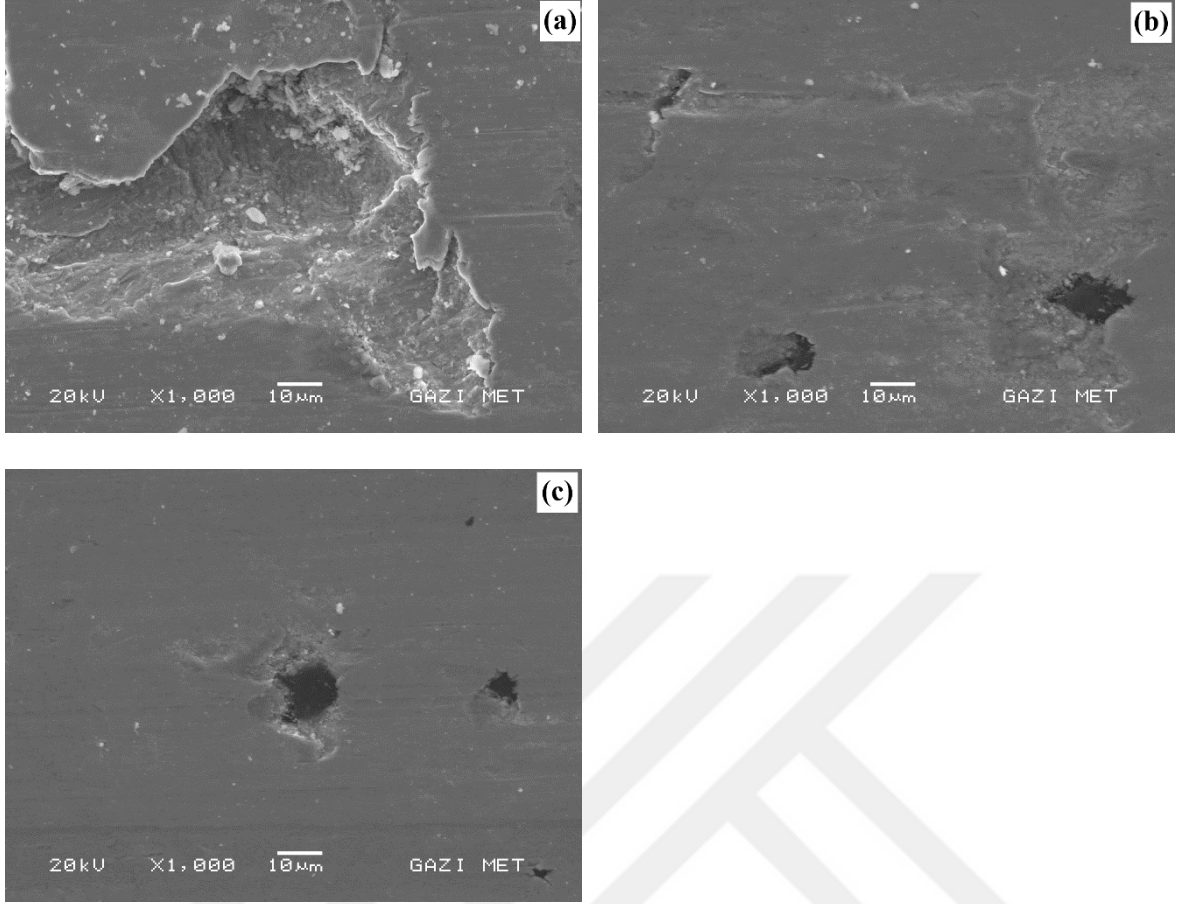
Resim 5.4. (a-c) Tam Tavlanmış + Östemperlenmiş (FADI) numunenin SEM görüntüsü (Büyütme X1000)

Normalize + Östemperlenmiş (NADI) numunenin SEM görüntüsü Resim 5.5'te verilmiştir. Resim 5.5.a'da plastik defrmsayona ek olarak mikro çatlak görülmektedir. Resim 5.5.b'de görülebileceği üzere yüzeyde aşınma kalıntılarının oluşturduğu düşünülen oksitler görülmektedir. Ayrıca aşınma esnasında oluşan oluk derinleşmiştir. Resim 5.5.c'de ise daha mikro çatlaklar ile birlikte yüzeysel olduğu düşünülen oluklar görülmektedir.



Resim 5.5. (a-c) Normalize Edilmiş + Östemperlenmiş (NADI) numunenin SEM görüntüsü (Büyütme X1000)

Çift Östemperlenmiş numunenin (DADI) SEM görüntüsü Resim 5.6'da verilmiştir. Resim 5.6.a'da yüzeyden parça kopması görülmektedir. Resim 5.6.b'de grafit nodüllerinin aşınma esnasındaki plastik deformasyon sonrası şekillerinde bozulma gözlemlenmiştir. Oluklanmalar derin oluşmuştur. Mikro çatlaklar da yine gözlemlenen yapılarındandır.



Resim 5.6. (a-c) Çift Östemperlenmiş numunenin (DADI) SEM görüntüsü (Büyütme X1000)



## 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, ön ısıt işlemlerin ÖKGDD'nin mikro yapı, mekanik özellik ve aşınma davranışı üzerine etkisi araştırılmıştır. Bu çalışmadan aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilir;

- 1- Östempereleme öncesi ısıt işlemler ÖKGDD'lerin mekanik özellikleri üzerinde oldukça büyük etkiye sahiptir. ÖKGDD'in mekanik özellikleri, ilk başlangıç matris mikro yapısı kontrol edilerek değiştirilebilir.
- 2- Ön ısıt işlem sonuçlarına göre tam tavlama sonrası ferritik matrisli, normalizasyon sonrası perlitik matrisli ve östempereleme sonrası ösferritik matris yapısına sahip KGDD elde edilmiştir.
- 3- Çift östempereleme ısıt işlemiyle en ince taneli mikro yapı elde edilmiştir. En yüksek sertlik, akma ve çekme dayanımı çift östemperelenmiş numunede (DADI) elde edilmiştir. Bu değerler sırasıyla 348 HV, 801,6 MPa ve 1094,5 MPa olarak ölçülmüştür. Normalize Edilmiş + östemperelenmiş numune (NADI) ile çift östemperelenmiş numunede (DADI) birbirine çok yakın değerler elde edilmiştir. NADI için çekme dayanımı 1089,1 MPa iken DADI'da 1094,5 MPa, toplam uzama NADI için %8,7 iken DADI'da % 8,4 ve sertlik değeri NADI'da 326 HV iken DADI'da bu değer 348 HV olarak ölçülmüştür.
- 4- Tam tavllanmış + östemperelenmiş numunede (FADI), geleneksel östemperelenmiş (ADI) haline göre akma ve çekme dayanımında gelişme gözlemlenmemiştir. Akma dayanımı değeri ADI'da 713,9 MPa iken FADI'da 706,5 MPa, çekme dayanımı değeri ADI'da 1029,6 MPa iken FADI'da 1026,9 MPa olarak ölçülmüştür. Toplam uzama değeri ADI'da %7,7 iken FADI'da %4 daha fazla ölçülerek % 11,8 olarak elde edilmiştir. Böylelikle en yüksek toplam uzama değeri FADI'da elde edilmiştir.
- 5- Ön ısıt işlem uygulanmış ve östemperelenmiş numunelerin sertlik değerleri 300-350 HV arasında değişmektedir.
- 6- Sabit aşınma koşullarında aşınmayla gerçekleşen en az ağırlık kaybı 0,6 mg ile çift östemperelenmiş numunede (DADI) elde edilmiştir. Aynı zamanda bu numune  $\mu = 0,356$  ile en düşük ortalama sürtünme katsayısına sahiptir. Buna karşın en yüksek ağırlık kaybı  $\mu = 0,697$  ile en yüksek ortalama sürtünme katsayısına sahip tam tavllanmış + östemperelenmiş numunede (FADI) 2,9 mg olarak elde edilmiştir.

- 7- Aşınmış yüzeylerde plastik olarak deformasyona uğrayarak aşınan malzemenin yüzey ayrılması veya parça kopması, oksitler ve aşınma olukları belirgin olarak gözlenmiştir.



## KAYNAKLAR

1. Ramkumar, T., Madhusudhanan, S., and Rajendran, I. (2020). Effect Of Nickel On The Microstructure, Mechanical And Tribological Properties Of Austempered Ductile Cast Iron For Steering Knuckle Applications. *Archvies of Metallurgy and Materials*, 65(1), 15-25.
2. Bramaramba, V., and Sen, S. (2020). Optimization Study on Sliding Wear Characteristics and Heat-Treatment Conditions of Different Grades of Ferritic Ductile Cast Iron. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 73(5), 1131-1146.
3. Wang, B., Barber, G. C., Qiu, F., Zou, Q., and Yang, H. (2020). A review: phase transformation and wear mechanisms of single-step and dual-step austempered ductile irons. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(1), 1054-1069.
4. Kovacs, B. (1987). Development of austempered ductile iron (ADI) for automobile crankshafts. *Journal of Heat Treating*, 5(1), 55-60.
5. Keough, J. R., and Hayrynen, K. L. (2000). Automotive applications of austempered ductile iron (ADI): a critical review. *Society of Automobile Engineers Transactions*, 344-354.
6. Bahmani, M., Elliott, R., and Varahram, N. (1997). Austempered ductile iron: a competitive alternative for forged induction-hardened steel crankshafts. *International Journal of Cast Metals Research*, 9(5), 249-257.
7. Lefevre, J., and Hayrynen, K. L. (2013). Austempered Materials for Powertrain Applications. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 22(7), 1914-1922.
8. Zhu, S. J., Wang, L. G., Yang, K. J., and Sun, Y. F. (2005). Study on isothermal quenching process of ADI for crankshaft. *Zhuzao Jishu/Foundry Technology*, 26(9), 760-762.
9. Larumbe, L. H., Delgado, E. H., Alvarez-Vera, M., and Villanueva, P. P. (2017). Forming process using austempered ductile iron (ADI) in an automotive Pitman arm. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 91(1), 569-575.
10. Sulamet-Ariobimo, R., Yudha, G., Sukarnoto, T., Mujalis, Y., and Oktaviano, Y. (2017). *Thin Wall Austempered Ductile Iron Connecting Rod for Lighter Automotive Component-Production of Thin Wall Ductile Iron Connecting Rod*. SAE Technical Paper. JSAE 20179125/SAE 2017-32-0125. JSAE/SAE Small Engine Technologies Conference & Exhibition.
11. Gagne, M. (1985). The influence of manganese and silicon on the microstructure and tensile properties of austempered ductile iron. *Transactions of the American Foundry Society*, 133, 801-812.

12. Moore, D. J., Rouns, T. N., and Rundman, K. B. (1986). Effect of manganese on structure and properties of austempered ductile iron: A process window concept. *Transactions of the American Foundry Society*, 94, 255-264.
13. Yu, S. K., and Loper Jr., C. R. (1988). The effect of molybdenum, copper and nickel on the pearlitic and martensitic hardenability of ductile cast irons. *Transactions of the American Foundry Society*, 96, 811-822.
14. Grech, M., and Young, J. M. (1990). Influence of Austempering Temperature on the Characteristics of Austempered Ductile Iron Alloyed with Cu and Ni. *Transactions of the American Foundry Society*, 98, 345-352.
15. Yaşar, H. (1994). *The effect of Cu and austempering treatment parameters on the impact toughness and hardness of ductile cast iron*. Unpublished Master's Thesis, The Middle East Technical University, The Graduate School of Natural and Applied Sciences, Ankara.
16. Bahmani, M., Elliott, R., and Varahram, N. (1997). The austempering kinetics and mechanical properties of an austempered Cu–Ni–Mo–Mn alloyed ductile iron. *Journal of Materials Science*, 32(18), 4783-4791.
17. Hamid Ali, A. S., and Elliot, R. (1997). Influence of austenitising temperature on austempering on Mn–Mo–Cu alloyed ductile iron, Part 2 Mechanical Properties. *Materials Science and Technology*, 13, 24-30.
18. Owhadi, A., Hedjazi, J., and Davami, P. (1998). Wear behaviour of 1-SMn austempered ductile iron. *Materials Science and Technology*, 14.
19. Yazdani, S., and Elliott, R. (1999). Influence of molybdenum on austempering behaviour of ductile iron Part 1–Austempering kinetics and mechanical properties of ductile iron containing 0·13% Mo. *Materials Science and Technology*, 15(5), 531-540.
20. Yazdani, S., and Elliott, R. (1999). Influence of molybdenum on austempering behaviour of ductile iron Part 2–Influence of austenitising temperature on austempering kinetics, mechanical properties, and hardenability of ductile iron containing 0·13% Mo. *Materials Science and Technology*, 15(5), 541-546.
21. Yazdani, S., and Elliott, R. (1999). Influence of molybdenum on austempering behaviour of ductile iron Part 3–Austempering kinetics, mechanical properties, and hardenability of ductile iron containing 0·25% Mo. *Materials Science and Technology*, 15(8), 885-895.
22. Yazdani, S., and Elliott, R. (1999). Influence of molybdenum on austempering behaviour of ductile iron Part 4–Austempering behaviour of ductile iron containing 0·45% Mo. *Materials Science and Technology*, 15(8), 896-902.
23. Bosnjak, B., Radulovic, B., Pop-Tonev, K., and Asanovic, V. (2000). Microstructural and mechanical characteristics of low alloyed Ni–Mo–Cu austempered ductile iron. *The Iron and Steel Institute of Japan*, 40(12), 1246-1252.

24. Eric, O., Sidjanin, L., Miskovic, Z., Zec, S., and Jovanovic, M. (2004). Microstructure and toughness of CuNiMo austempered ductile iron. *Materials Letters*, 58(22-23), 2707-2711.
25. Pérez, M. J., Cisneros, M. M., and López, H. F. (2006). Wear resistance of Cu–Ni–Mo austempered ductile iron. *Wear*, 260(7-8), 879-885.
26. Sahin, Y., and Kilicli, V. (2011). Abrasive wear behaviour of SiCp/Al alloy composite in comparison with ausferritic ductile iron. *Wear*, 271(11-12), 2766-2774.
27. Batra, U., Batra, N., and Sharma, J. D. (2012). Wear Performance of Cu-Alloyed Austempered Ductile Iron. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 22(4), 1136-1142.
28. Han, J. M., Zou, Q., Barber, G. C., Nasir, T., Northwood, D. O., Sun, X. C., and 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.
29. Colombo, D. A., Echeverría, M. D., Dommarco, R. C., and Massone, J. M. (2016). Influence of TiN coating thickness on the rolling contact fatigue resistance of austempered ductile iron. *Wear*, 350-351, 82-88.
30. Yalcin, M., Cetin, B., and Davut, K. (2019). Influence of Cu and Ni Alloying on the Microstructure and Mechanical Properties of Austempered Ductile Iron Castings. *Acta Physica Polonica A*, 135(4), 55-67.
31. Yang, P., Fu, H., Nan, R., Guo, X., Lin, J., and Lei, Y. (2019). Effect of Ti Modification on Microstructures and Properties of Carbodic Austempered Ductile Iron. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 28(4), 2335-2347.
32. Bendikiene, R., Bahdanovich, A., Cesnavicius, R., Ciuplys, A., Grigas, V., Jutas, A., Marmysh, D., Nasan, A., Shemet, L., Sherbakov, S., and Sosnovskiy, L. (2020). Tribo-fatigue Behavior of Austempered Ductile Iron MoNiCa as New Structural Material for Rail-wheel System. *Materials Science*, 26(4), 432-437.
33. Landesberger, M., Koos, R., Hofmann, M., Li, X., Boll, T., Petry, W., and Volk, W. (2020). Phase Transition Kinetics in Austempered Ductile Iron (ADI) with Regard to Mo Content. *Materials*, 13(22), 5266.
34. Machado, H. D., Aristizabal-Sierra, R., Garcia-Mateo, C., and Toda-Caraballo, I. (2020). Effect of the Starting Microstructure in the Formation of Austenite at the Intercritical Range in Ductile Iron Alloyed with Nickel and Copper. *International Journal of Metalcasting*, 14(3), 836-845.
35. Nan, R., Fu, H., Yang, P., Lin, J., and Guo, X. (2020). Microstructure Evolution and Wear Resistance of Cu-Bearing Carbodic Austempered Ductile Iron after Austempering. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 29(4), 2440-2459.

36. Yang, P., Fu, H., Li, G., Liu, J., and Zhao, X. (2020). Microstructures and properties of carbidic austempered ductile Iron containing Fe<sub>3</sub>C particles and superfine ausferrite. *Materials & Design*, 186.-190.
37. Adebayo, A. O., Ajibola, O. O., Owa, A. F., Borisade, S. G., Alaneme, K. K., and Oyetunji, A. (2021). Characterisation and dry sliding wear behaviour of 2.29 wt% aluminium-alloyed ductile iron. *Materials Today: Proceedings*, 38, 1152-1158.
38. Górný, M., Angella, G., Tyrała, E., Kawalec, M., Paź, S., and Kmita, A. (2019). Role of Austenitization Temperature on Structure Homogeneity and Transformation Kinetics in Austempered Ductile Iron. *Metals and Materials International*, 25(4), 956-965.
39. Delia, M., Alaalam, M., and Grech, M. (1998). Effect of Austenitizing Conditions on the Impact Properties of an Alloyed Austempered Ductile Iron of Initially Ferritic Matrix Structure. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 7(2), 265-272.
40. Wilk-Kołodziejczyk, D., Regulski, K., Giętka, T., Gumienny, G., Jaśkowiec, K., and Kluska-Nawarecka, S. (2018). The Selection of Heat Treatment Parameters to Obtain Austempered Ductile Iron with the Required Impact Strength. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 27(11), 5865-5878.
41. Cheng, H., Fu, H., Ma, S., Lin, J., and Lei, Y. (2018). Effects of austenitizing process on microstructures and properties of carbidic austempered ductile iron. *Materials Research Express*, 6(1), 016522.
42. Gietka, T., Szykowny, T., and Dymski, S. (2007). The influence of saturation of cast iron austenite with carbon on the ausferrite transformation. *Arch Found England*, 7(3), 241-246.
43. Rao, P. P., and Putatunda, S. K. (2003). Investigations on the fracture toughness of austempered ductile irons austenitized at different temperatures. *Materials Science and Engineering: A*, 349(1), 136-149.
44. Kılıçlı, V. (2004). *Küresel Grafitli Dökme Demirlerde Kısmi Östenitleme ve Östemperleme Isıl İşleminin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklere Etkisi*. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Metal Eğitimi Ana Bilim Dalı, Ankara.
45. Basso, A., Martinez, R., and Sikora, J. (2007). Influence of austenitising and austempering temperatures on microstructure and properties of dual phase ADI. *Materials Science and Technology*, 23(11), 1321-1326.
46. Erdogan, M., Kilicli, V., and Demir, B. (2009). Transformation characteristics of ductile iron austempered from intercritical austenitizing temperature ranges. *Journal of Materials Science*, 44(5), 1394-1403.
47. Aristizabal, R., Foley, R., and Druschitz, A. (2012). Intercritically Austenitized Quenched and Tempered Ductile Iron. *International Journal of Metalcasting*, 6(4), 7-14.

48. Hsu, C., and Lin, K. (2011). A study on microstructure and toughness of copper alloyed and austempered ductile irons. *Materials Science and Engineering: A*, 528(18), 5706-5712.
49. Cui, J., and Chen, L. (2015). Microstructures and mechanical properties of a wear-resistant alloyed ductile iron austempered at various temperatures. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 46, 3627-3634.
50. Wang, B., Barber, G., He, M., Sun, X., Shaw, M., Slattery, B., and Seaton, P. (2016). *Study of ausferrite transformation kinetics for austempered ductile iron with and without Ni*. Paper presented at the SAE 2016 World Congress & Exhibition, Detroit.
51. Angella, G., Donnini, R., Bonollo, F., Fabrizi, A., and Zanardi, F. (2017). Assessment of the austempered process evolution through tensile testing. *La Metallurgia Italiana*, 6, 11-17.
52. Hegde, A., Sharma, S., and Sadanand, R. (2019). Mechanical characterization and optimization of heat treatment parameters of manganese alloyed austempered ductile iron. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, 13(1), 4356-4367.
53. Donnini, R., Fabrizi, A., Bonollo, F., Zanardi, F., and Angella, G. (2017). Assessment of the microstructure evolution of an austempered ductile iron during austempering process through strain hardening analysis. *Metals and Materials International*, 23, 855-864.
54. Olofsson, J., Larsson, D., and Svensson, I. L. (2011). Effect of Austempering on Plastic Behavior of Some Austempered Ductile Iron Alloys. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 42(13), 3999-4007.
55. Rao, P. P., and Putatunda, S. K. (1998). Dependence of fracture toughness of austempered ductile iron on austempering temperature. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 29(12), 3005-3016.
56. Aranzabal, J., Gutierrez, I., Rodriguezibabe, J. M., and Urcola, J. J. (1992). Influence of Heat Treatments on Microstructure and Toughness of Austempered Ductile Iron. *Materials Science and Technology*, 8(3), 263-273.
57. Aranzabal, J., Gutierrez, I., and Urcola, J. J. (1994). Influence of Heat Treatments on Microstructure of Austempered Ductile Iron. *Materials Science and Technology*, 10(8), 728-737.
58. Kinalır, K. G. (1997). *The effect of austempering heat treatment on the microstructure and mechanical properties of ductile irons*. Unpublished Master's Thesis, The Middle East Technical University, The Graduate School of Natural and Applied Sciences, Ankara.
59. Coşkun, A. (1999). *Effect of austempering parameters on the mechanical characteristics of ductile cast iron*. Unpublished Master's Thesis, The Middle East Technical University, The Graduate School of Natural and Applied Sciences, Ankara.

60. Putatunda, S. K., and Gadicherla, P. K. (2000). Effect of austempering time on mechanical properties of a low manganese austempered ductile iron. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 9(2), 193-203.
61. Rashidi, A. M., and Moshrefi-Torbati, M. (2000). Effect of tempering conditions on the mechanical properties of ductile cast iron with dual matrix structure (DMS). *Materials Letters*, 45(3-4), 203-207.
62. Baydogan, M., and Cimenoglu, H. (2001). The effect of austempering time on mechanical properties of a ductile iron. *Scandinavian Journal of Metallurgy*, 30(6), 391-395.
63. Keleş, E. (2001). *The effect of austempering process parameters on the mechanical properties of ductile iron*. Unpublished Master's Thesis, The Middle East Technical University, The Graduate School of Natural and Applied Sciences, Ankara.
64. Cakir, M. C., Bayram, A., Isik, Y., and Salar, B. (2005). The effects of austempering temperature and time onto the machinability of austempered ductile iron. *Materials Science and Engineering: A*, 407(1-2), 147-153.
65. Gür, C. H., Kilicli, V., and Erdogan, M. (2008, 25-28 Oct). *Investigating the Austempering Parameters of Ductile Iron by Magnetic Barkhausen Noise Technique*. Paper presented at the 17th World Conference on Nondestructive Testing, Shanghai, China.
66. Kim, Y. J., Shin, H., Park, H., and Lim, J. D. (2008). Investigation into mechanical properties of austempered ductile cast iron (ADI) in accordance with austempering temperature. *Materials Letters*, 62(3), 357-360.
67. Sellamuthu, P., Samuel, D., Dinakaran, D., Premkumar, V., Li, Z., and Seetharaman, S. (2018). Austempered ductile iron (ADI): influence of austempering temperature on microstructure, mechanical and wear properties and energy consumption. *Metals*, 8(1), 53-59.
68. Rinaldo, H., Januar, M., and Sinaga, M. M. (2019). Effect of austempering treatment time on strength, ductility, hardness, and abrasive wear resistance of JIS FCD 700 ductile iron. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 541.
69. Wang, C., Liu, R., Li, S., Gu, C., Du, X., Sun, Y., and Tian, J. (2019). Effect of austempering temperature on microstructure of ausferrite in austempered ductile iron. *Materials Science and Technology*, 35(11), 1329-1336.
70. P. Nawrocki, K. W., K. Łukasik, D. Myszka. (2018). Influence of Pre-heat Treatment on Mechanical Properties of Austempered Ductile Cast Iron. *Archives Of Foundry Engineering*, 18(1/2018), 176-180.
71. Şenses, B., Yıldırım, Y., Efe, Y., and Kılıçlı, V. (2021, 1-3 April). *Effect of Pre-Heat Treatments on Microstructures and Mechanical Properties of Austempered Ductile Iron (ADI)*. Paper presented at the 5th International Iron&Steel Symposium (UDCS'2021), Karabük, Türkiye.

72. Guesser, W. L., Lopes, C. L., and Bernardini, P. A. N. (2020). Austempered Ductile Iron with Dual Microstructures: Effect of Initial Microstructure on the Austenitizing Process. *International Journal of Metalcasting*, 14(3), 717-727.
73. Johansson, M. (1977). Austenitic-Bainitic Ductile Iron. *American Foundry Society Transactions*, 85, 117-122.
74. Wade, N., and Ueda, Y. (1981). Mechanical properties of ductile cast iron with duplex matrix. *Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan*, 21(2), 119-126.
75. Dorazil, E., Barta, B., Munsterova, E., Stransky, L., and Havar, A. (1982). High strength bainitic ductile cast iron. *American Foundry Society International Cast Metals Research*, 7, 52-60.
76. Janowak, J. F., and Gundlach, R. B. (1983). Development of a ductile iron for commercial austempering. *American Foundry Society Transactions*, 91, 377-388.
77. Voigt, R. C., and Loper, C. (1984). Austempered ductile iron-process control and quality assurance. *Journal of Heat Treating*, 3(4), 291-309.
78. Schissler, J. M., and Saverna, J. (1985). The effect of segregation on the formation of austempered ductile iron. *Journal of Heat Treating*, 4, 167-176.
79. Bak, C., Schissler, J. S., Chabaut, J., and Gouvenel, D. (1986). *Stability of ADI structures at room temperatures*. Paper presented at the 2nd International Conference on Austempered Ductile Iron, Ann Arbor, USA.
80. Voigt, R., Eldoky, L., and Chiou, H. (1986). Fracture of ductile cast irons with dual matrix structures. *American Foundry Society Transactions*, 94, 645-656.
81. Moore, D. J., Rouns, T. N., and Rundman, K. B. (1987). The relationship between microstructure and tensile properties in austempered ductile iron. *American Foundry Society Transactions*, 94, 765-774.
82. Elliot, R. (1988). *Cast Iron Technology*. (First edition). London: Butterworth-Heinemann, 136-150.
83. Kobayashi, T., and Yamamoto, H. (1988). Development of high toughness in austempered type ductile cast iron and evaluation of its properties. *Metallurgical Transactions A*, 19(2), 319-327.
84. Voigt, R. C. (1989). Austempered ductile iron-processing and properties. *Cast Metals*, 2(2), 71-93.
85. Grech, M., and Young, J. M. (1990). Effect of austenitizing temperature on tensile properties of Cu-Ni austempered ductile iron. *Materials Science and Technology*, 6, 415-421.
86. Kovacs Sr, B. V. (1990). Austempered ductile iron: fact and fiction. *Modern Casting*, 80(3), 38-41.

87. Zhou, H. Y., Li, Y. Q., Yin, Z., Ran, M. R., Liu, S. B., Huang, Y., Zhang, W. D., Zheng, W. Y., and Liu, J. Y. (2020). Microstructure and mechanical behaviors of grinding balls produced by dual matrix structure two-step austempering process. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(3), 4672-4681.
88. ASTM. (2016). *Standard Specification for Austempered Ductile Iron Castings (A897/A897M)*.
89. TSE. (2012). *Dökümler- Östemperlenmiş sünek dökme demirler (TS EN 1564)*.
90. Kilicli, V., and Erdogan, M. (2006). Tensile properties of partially austenitised and austempered ductile irons with dual matrix structures. *Materials Science and Technology*, 22(8), 919-928.
91. Kilicli, V., and Erdogan, M. (2007). Effect of ausferrite volume fraction and morphology on tensile properties of partially austenitised and austempered ductile irons with dual matrix structures. *International Journal of Cast Metals Research*, 20(4), 202-214.
92. Sahin, Y., Erdogan, M., and Kilicli, V. (2007). Wear behavior of austempered ductile irons with dual matrix structures. *Materials Science and Engineering: A*, 444(1-2), 31-38.
93. Erdogan, M., Kilicli, V., and Demir, B. (2008). The influence of the austenite dispersion on phase transformation during the austempering of ductile cast iron having a dual matrix structure. *International Journal of Materials Research*, 99(7), 751-760.
94. Kilicli, V., and Erdogan, M. (2008). The strain-hardening behavior of partially austenitized and the austempered ductile irons with dual matrix structures. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 17(2), 240-249.
95. Sahin, Y., Kilicli, V., Ozer, M., and Erdogan, M. (2010). Comparison of abrasive wear behavior of ductile iron with different dual matrix structures. *Wear*, 268(1-2), 153-165.
96. Basso, A., Martinez, R., and Sikora, J. (2011). Influence of chemical composition and holding time on austenite (gamma) -> ferrite (alpha) transformation in ductile iron occurring within the intercritical interval. *Journal of Alloys and Compounds*, 509(41), 9884-9889.
97. Basso, A. D., Martinez, R., and Sikora, J. A. (2011). *Characteristics of the transformations occurring within the intercritical interval of ductile iron*. Paper presented at the Key Engineering Materials.
98. Lagarde, M., Basso, A., Dommarco, R. C., and Sikora, J. (2011). Development and Characterization of a New Type of Ductile Iron with a Novel Multi-phase Microstructure. *The Iron and Steel Institute of Japan*, 51(4), 645-650.

99. Basso, A., Caldera, M., Rivera, G., and Sikora, J. (2012). High Silicon Ductile Iron: Possible Uses in the Production of Parts with "Dual Phase ADI" Microstructure. *The Iron and Steel Institute of Japan*, 52(6), 1130-1134.
100. Ovali, I., Kilicli, V., and Erdogan, M. (2013). Effect of Microstructure on Fatigue Strength of Intercritically Austenitized and Austempered Ductile Irons with Dual Matrix Structures. *The Iron and Steel Institute of Japan*, 53(2), 375-381.
101. Basso, A., Caldera, M., and Massone, J. (2015). Development of High Silicon Dual Phase Austempered Ductile Iron. *The Iron and Steel Institute of Japan*, 55(5), 1106-1113.
102. Soliman, M., Nofal, A., and Palkowski, H. (2015). Alloy and process design of thermo-mechanically processed multiphase ductile iron. *Materials & Design*, 87, 450-465.
103. Panneerselvam, S., Putatunda, S. K., Gundlach, R., and Boileau, J. (2017). Influence of intercritical austempering on the microstructure and mechanical properties of austempered ductile cast iron (ADI). *Materials Science and Engineering: A*, 694, 72-80.
104. Zhang, H., Wu, Y. X., Li, Q. J., and Hong, X. (2018). Mechanical properties and rolling-sliding wear performance of dual phase austempered ductile iron as potential metro wheel material. *Wear*, 406, 156-165.
105. Soliman, M., Palkowski, H., and Nofal, A. (2020). Effect of Thermo-mechanical Processing on Structure and Properties of Dual-Phase Matrix ADI with Different Si-Contents. *International Journal of Metalcasting*, 14(3), 853-860.
106. Tenaglia, N. E., Pedro, D. I., Boeri, R. E., and Basso, A. D. (2020). Influence of silicon content on mechanical properties of IADI obtained from as cast microstructures. *International Journal of Cast Metals Research*, 33(2-3), 72-79.
107. Doong, J., and Chen, C. (1989). Fracture toughness of bainitic nodular cast iron. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 12(2), 155-165.
108. Moore, D., Rouns, T., and Rundamn, K. (1985). The effect of heat treatment, mechanical deformation and alloying elements on rate of bainitic formation in austempered ductile cast iron. *Journal of Heat Treating*, 4(1), 7-24.
109. Andoko, R. S., Anindito, P., and Surya, I. (2014). The effects of two-steps austempering heat treatment on the tensile strength and toughness of nodular cast iron. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 8(3), 107-115
110. Dakre, V., Peshwe, D. R., Pathak, S. U., and Likhite, A. (2019). TEM Analysis of austempered ductile iron processed through conventional and two-step austempering process. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 72, 911-917.
111. Ravishankar, K. S., Rao, P. P., and Udupa, K. R. (2010). Improvement in fracture toughness of austempered ductile iron by two-step austempering process. *International Journal of Cast Metals Research*, 23(6), 330-343.

112. Yang, J., and K., P. S. (2004). Influence of a novel two-step austempering process on the strain-hardening behavior of austempered ductile cast iron (ADI). *Materials Science and Engineering: A*, 382(1-2), 265-279.
113. Basso, A. D., Pra, A. L. D., Echeverria, M. D., and Sosa, A. D. (2018). Study of dimensional change of high-silicon ductile iron with ADI and Dual-Phase-ADI microstructures starting from different as-cast structures. *International Journal of Cast Metals Research*, 31(3), 144-152.
114. Hedge, A., and Sharma, S. (2018). Comparison of machinability of manganese alloyed austempered ductile iron produced using conventional and two step austempering processes. *Materials Research Express*, 5(5), 114-121.
115. Elsayed, A. H., Megahed, M. M., Sadek, A. A., and Abouelela, K. M. (2009). Fracture toughness characterization of austempered ductile iron produced using both conventional and two-step austempering processes. *Materials & Design*, 30(6), 1866-1877.
116. Sethuram, D., and Murthy, K. (2012). Tensile strength and mechanical properties evaluation of permanent mould ductile iron subjected to novel two step austempering process. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 2(3), 2621-2627.
117. Yang, J., and Putatunda, S. K. (2004). Improvement in strength and toughness of austempered ductile cast iron by a novel two-step austempering process. *Materials & Design*, 25(3), 219-230.
118. Putatunda, S. K. (2010). Comparison of the Mechanical Properties of Austempered Ductile Cast Iron (ADI) Processed by Conventional and Step-Down Austempering Process. *Materials and Manufacturing Processes*, 25(8), 749-757.
119. Dakre, V., Peshwe, D. R., Pathak, S. U., and Likhite, A. (2017). Mechanical Characterization of Austempered Ductile Iron Obtained by Two Step Austempering Process. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 70(9), 2381-2387.
120. Putatunda, S., and Bingi, G. (2012). Influence of step-down austempering process on the fracture toughness of austempered ductile iron. *Journal of Materials Science and Engineering with Advanced Technology*, 5(1), 39-70.
121. Karsay, S. I. (1979). Ductile iron production and practices. *American Foundry Society Transactions*, 133-141.
122. Kovacs, B. V. (1994). On the terminology and structure of ADI. *American Foundry Society Transactions*, 102, 417-420.
123. Walton, C. F. (1991). Introduction to the heat treating of cast irons. (Eds.). *A.S.M. Metals Handbook*. 682-692.
124. Kovacs, B. (1994). On the terminology and structure of ADI. *A.F.S. Transactions*, 102, 417-420.

125. Elliot, R. (1992). Cast irons. F. B. Pickering (Eds.). *Constitution and properties of steels*. Weinheim: Materials Science and Technology, 692-737.
126. Darwish, N., and Elliot, R. (1993). Austempering of low manganese ductile irons Part 1 Processing window. *Materials Science and Technology*, 9, 572-585.
127. Darwish, N., and Elliot, R. (1993). Austempering of low manganese ductile irons Part 3 variation of mechanical properties with heat treatment conditions. *Materials Science and Technology*, 9, 882-889.
128. Hamid Ali, A. S., Uzlov, K. I., Darwish, N., and Elliot, R. (1994). Austempering of low manganese ductile irons Part 4 Relationship between mechanical properties and microstructure. *Materials Science and Technology*, 10, 34-40.
129. Mallia, J., Grech, M., and Smallman, R. (1998). Effect of silicon content on transformation kinetics of austempered ductile iron. *Materials Science and Technology*, 14(5), 452-460.
130. Yescas, M., Bhadeshia, H., and MacKay, D. (2001). Estimation of the amount of retained austenite in austempered ductile irons using neural networks. *Materials Science and Engineering: A*, 311(1-2), 162-173.
131. Wen, D. C., and Lei, T. S. (1999). The mechanical properties of a low alloyed austempered ductile iron in the upper ausferrite region. *The Iron and Steel Institute of Japan International*, 39(5), 493-500.
132. Du, Y., Gao, X., Wang, X., Wang, X., Ge, Y., and Jiang, B. (2020). Tribological behavior of austempered ductile iron (ADI) obtained at different austempering temperatures. *Wear*, 456-457.
133. Aranzabal, J., Gutierrez, I., Rodriguez-Ibabe, J., and Urcola, J. (1997). Influence of the amount and morphology of retained austenite on the mechanical properties of an austempered ductile iron. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 28(5), 1143-1156.
134. Irvine, K. J., and Pickering, F. B. (1965). High carbon bainitic steels. Iron and Steel Institute. *London*. 110-125.
135. Kumari, U. R., and Rao, P. P. (2009). Study of wear behaviour of austempered ductile iron. *Journal of Materials Science*, 44(4), 1082-1093.
136. Benam, A. S. (2015). Effect of alloying elements on austempered ductile iron (ADI) properties and its process. *China Foundry*, 12(1), 54-70.
137. Nazarboland, A., and Elliott, R. (1997). The relationship between austempering parameters, microstructure and mechanical properties in a Mn-Mo-Cu alloyed ductile iron. *International Journal of Cast Metals Research*, 10, 87-97.
138. Kovacs, B. V. (1991, March). *The effects of alloying elements and their segregation in ADI*. Paper presented at the Proceedings of 3rd World Conference on ADI, ASM, Chicago, USA.

139. Venugopalan, D., and Alagarsamy, A. (1990). Effects of Alloy Additions on the Microstructure and Mechanical Properties of Commercial Ductile Iron. *American Foundry Society Transactions*, 98, 122-132.
140. Türker, F. Ş. (1998). *Production and heat treatment of alloyed high strength ductile iron*. Unpublished Master's Thesis, The Middle East Technical University, The Graduate School of Natural and Applied Sciences, Ankara.
141. Dawson, J. V., and Sage, A. M. (1989). High strength cast irons containing vanadium annealed ductile irons and high carbon grey irons. *The Foundryman*, 479-489.
142. Shen, X. P., Harris, S. J., and Noble, B. (1995). Influence of small vanadium and cobalt additions on microstructure and properties of ductile iron. *Materials Science and Technology*, 11(9), 893-900.
143. ASTM. (1984). *Standard Specification for Ductile Iron Castings (A536)*.
144. DIN. (2012). *Founding - Ausferritic spheroidal graphite cast irons (DIN EN 1564)*.
145. DIN. (2019). *Founding - Spheroidal graphite cast irons (DIN EN 1563)*.
146. Lerner, Y. S., and Kingsbury, G. R. (1998). Wear Resistance Properties of Austempered Ductile Iron. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 7(1), 48-52.
147. Nili Ahmadabadi, M., Ghasemi, H. M., and Osia, M. (1999). Effects of successive austempering on the tribological behavior of ductile cast iron. *Wear*, 231, 293-300.
148. Haseeb, A. S. M. A., Aminul Islam, M., and Mohar Ali Bepari, M. (2000). Tribological behaviour of quenched and tempered, and austempered ductile iron at the same hardness level. *Wear*, 244, 15-19.
149. Roy, A., and Manna, I. (2001). Laser surface engineering to improve wear resistance of austempered ductile iron. *Materials Science and Engineering a-Structural Materials Properties Microstructure and Processing*, A297, 85-93.
150. Bosnjak, B., Verlinden, B., and Radulovic, B. (2003). Dry sliding wear of low alloyed austempered ductile iron. *Materials Science and Technology*, 19(5) 60-71.
151. Zimba, J., Simbi, D. J., and Navara, E. (2003). Austempered ductile iron: an alternative material for earth moving components. *Cement and Concrete Composites*, 25(6), 643-649.
152. Dommarco, R. C., Sousa, M. E., and Sikora, J. A. (2004). Abrasion resistance of high nodule count ductile iron with different matrix microstructures. *Wear*, 257(11), 1185-1192.

153. Zimba, J., Samandi, M., Yu, D., Chandra, T., Navara, E., and Simbi, D. J. (2004). Un-lubricated sliding wear performance of unalloyed austempered ductile iron under high contact stresses. *Materials & Design*, 25(5), 431-438.
154. Sahin, Y., and Durak, O. (2007). Abrasive wear behaviour of austempered ductile iron. *Materials & Design*, 28(6), 1844-1850.
155. Francucci, G., Sikora, J., and Dommarco, R. (2008). Abrasion resistance of ductile iron austempered by the two-step process. *Materials Science and Engineering: A*, 485(1-2), 46-54.
156. Straffelini, G., Giuliari, C., Pellizzari, M., Veneri, E., and Bronzato, M. (2011). Dry rolling-sliding wear of austempered cast iron. *Wear*, 271(9-10), 1602-1608.
157. Straffelini, G., Pellizzari, M., and Maines, L. (2011). Effect of sliding speed and contact pressure on the oxidative wear of austempered ductile iron. *Wear*, 270(9-10), 714-719.
158. Podgornik, B., Vizintin, J., Thorbjornsson, I., Johannesson, B., Thorgrimsson, J. T., Martinez Celis, M., and Valle, N. (2012). Improvement of ductile iron wear resistance through local surface reinforcement. *Wear*, 274-275, 267-273.
159. Bosnjak, B., Verlinden, B., and Radulovic, B. (2013). Dry sliding wear of low alloyed austempered ductile iron. *Materials Science and Technology*, 19(5), 650-656.
160. Zammit, A., Abela, S., Wagner, L., Mhaede, M., and Grech, M. (2013). Tribological behaviour of shot peened Cu–Ni austempered ductile iron. *Wear*, 302(1-2), 829-836.
161. Cardoso, P. H. S., Israel, C. L., and Strohaecker, T. R. (2014). Abrasive wear in Austempered Ductile Irons: A comparison with white cast irons. *Wear*, 313(1-2), 29-33.
162. Zhang, J., Zhang, N., Zhang, M., Zeng, D., Song, Q., and Lu, L. (2014). Rolling–sliding wear of austempered ductile iron with different strength grades. *Wear*, 318(1-2), 62-67.
163. Bedolla-Jacuinde, A., Guerra, F. V., Rainforth, M., Mejía, I., and Maldonado, C. (2015). Sliding wear behavior of austempered ductile iron microalloyed with boron. *Wear*, 330-331, 23-31.
164. Sahil Sharma, R. G. (2015). Effect of Austempering Temperature and Time on the Wear Characteristics of Austempered Ductile Iron(ADI). *International Journal of Engineering Research and General Science*, 3(1), 986-990.
165. Balos, S., Rajnovic, D., Dramicanin, M., Labus, D., Eric-Cekic, O., Grbovic-Novakovic, J., and Sidjanin, L. (2016). Abrasive wear behaviour of ADI material with various retained austenite content. *International Journal of Cast Metals Research*, 29(4), 187-193.

166. Zhang, N., Zhang, J., Lu, L., Zhang, M., Zeng, D., and Song, Q. (2016). Wear and friction behavior of austempered ductile iron as railway wheel material. *Materials & Design*, 89, 815-822.
167. Cheng, H., Fu, H., Ma, S., Lin, J., and Lei, Y. (2018). Effects of austenitizing process on microstructures and properties of carbidic austempered ductile iron. *Materials Research Express*, 6(1) 17-22.
168. Sellamuthu, P., Samuel, D., Dinakaran, D., Premkumar, V., Li, Z., and Seetharaman, S. (2018). Austempered Ductile Iron (ADI): Influence of Austempering Temperature on Microstructure, Mechanical and Wear Properties and Energy Consumption. *Metals*, 8(1) 55-64.
169. Yürektürk, Y., and Baydoğan, M. (2019). Effect of aluminizing and austempering processes on structural, mechanical and wear properties of a SSF ductile iron. *Materials Research Express*, 6(1). 70-82
170. Chen, X., Zhao, L., Zhang, W., Mohrbacher, H., Wang, W., Guo, A., and Zhai, Q. (2019). Effects of niobium alloying on microstructure, toughness and wear resistance of austempered ductile iron. *Materials Science and Engineering: A*, 760, 186-194.
171. Dueñas, J. R., Hormaza, W., and Castro Güiza, G. M. (2019). Abrasion resistance and toughness of a ductile iron produced by two molding processes with a short austempering. *Journal of Materials Research and Technology*, 8(3), 2605-2612.
172. Liu, Y., Sun, Y., Zhang, W., and Du, X. (2019). Effect of QPQ Nitriding Parameters on Properties of Pearlite Ductile Cast Iron. *International Journal of Metalcasting*, 14(2), 556-563.
173. Pedro, D. I., and Dommarco, R. C. (2019). Rolling contact fatigue resistance of Carbidic Austempered Ductile Iron (CADI). *Wear*, 418-419, 94-101.
174. Silva, K. H. S., Carneiro, J. R., Coelho, R. S., Pinto, H., and Brito, P. (2019). Influence of shot peening on residual stresses and tribological behavior of cast and austempered ductile iron. *Wear*, 440-441.
175. Souza Oliveira Pimentel, A., Luiz Guesser, W., Rodrigues Custódio da Silva, W. J., Dolabella Portella, P., Woydt, M., and Burbank, J. (2019). Abrasive wear behavior of austempered ductile iron with niobium additions. *Wear*, 440-441.
176. Wen, F., Zhao, J., Zheng, D., He, K., Ye, W., Qu, S., and Shangguan, J. (2019). The Role of Bainite in Wear and Friction Behavior of Austempered Ductile Iron. *Materials (Basel)*, 12(5), 33-41.
177. ASTM. (2017). *Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus (G99-17 )*.
178. ASTM. (2017). *Standard Test Method for Ranking Resistance of Materials to Sliding Wear Using Block-on-Ring Wear Test (G77)*.

179. ASTM. (2013). *Standard Test Methods for Determining Average Grain Size* (E112).
180. ASTM. (2013). *Standard Practice for X-Ray Determination of Retained Austenite in Steel with Near Random Crystallographic Orientation* (E975).
181. Roberts, C. S. (1953). Effect of carbon on the volume fractions and lattice parameters of retained austenite and martensite. *Journal of Metals*, 5(2), 203-204.
182. ASTM. (2021). *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials* (E8/E8M).
183. Hayrynen, K. L., Moore, D. J., and Rundman, K. B. (1992). Tensile and Fatigue Properties of Relatively Pure ADI. *American Foundry Society Transactions*, 100, 93-104.
184. Chiniforush, E. A., Rahimi, M. A., and Yazdani, S. (2016). Dry sliding wear of Ni alloyed austempered ductile iron. *China Foundry*, 13(5), 361-367.
185. Prado, J. M., Pujol, A., Cullell, J., and Tartera, J. (1995). Dry sliding wear of austempered ductile iron. *Materials Science and Technology*, 11(3), 294-298.
186. Stokes, B., Gao, N., and Reed, P. A. S. (2007). Effects of graphite nodules on crack growth behaviour of austempered ductile iron. *Materials Science and Engineering: A*, 445-446, 374-385.
187. Wang, B., He, M., Barber, G. C., Schall, J. D., Tao, C., and Sun, X. (2018). Rolling contact fatigue resistance of austempered ductile iron processed at various austempering holding times. *Wear*, 398-399, 41-46.
188. Du, Y., Gao, X., Wang, X., Wang, X., Ge, Y., and Jiang, B. (2020). Tribological behavior of austempered ductile iron (ADI) obtained at different austempering temperatures. *Wear*, 456, 203396.





*GAZİ GELECEKTİR..*