

Kriyojenik İşlemin Vermiküler Grafitli Dökme Demirin Aşınma Davranışına Etkisi

Civan Mert Akın

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Metalurji Mühendisliği Anabilim Dalı

Ocak 2015

Effect of Cryogenic Treatment on Wear Behavior of Compacted Graphite Cast Iron

Civan Mert Akin

MASTER OF SCIENCE THESIS

Department of Metallurgical Engineering

January 2015

Kriyojenik İşlemin Vermiküler Grafitli Dökme Demirin Aşınma Davranışına Etkisi

Civan Mert Akın

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca
Metalurji Mühendisliği Anabilim Dalı'nda
YÜKSEK LİSANS TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Doç. Dr. Hakan Gaşan

Ocak 2015

ONAY

Metalurji Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi Civan Mert Akın'ın YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı “Kriyojenik İşlemin Vermiküler Grafitli Dökme Demirin Aşınma Davranışına Etkisi” başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

Danışman : Doç. Dr. Hakan GAŞAN

İkinci Danışman : -

Yüksek Lisans Tez Savunma Jürisi:

Üye : Doç. Dr. Hakan GAŞAN

Üye : Yrd. Doç. Dr. Osman Nuri ÇELİK

Üye : Yrd. Doç. Dr. Nedret AYDINBEYLİ

Üye : Yrd. Doç. Dr. İbrahim ÇELİKYÜREK

Üye : Yrd. Doç. Dr. Mustafa ULUTAN

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun tarih ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Hürriyet ERŞAHAN

Enstitü Müdürü

ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Doç. Dr. Hakan Gaşan danışmanlığında hazırlamış olduğum “Kryojenik İşlemin Vermiküler Grafitli Dökme Demirin Aşınma Davranışına Etkisi” başlıklı YÜKSEK LİSANS tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel etik ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi; tez çalışmamda yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik ilke ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim. 23/01/2015

Civan Mert Akın

İmza

ÖZET

Bu çalışmada, otomobillerde debriyaj baskı plakası parçası olarak kullanılan vermiküler grafitli dökme demire (CGI 300) 4, 12, 24 ve 36 saat sürelerle kriyojenik işlem uygulanmıştır. Kriyojenik işlem sonrası malzemelerin mikroyapısal incelemeleri yapılmış, makro ve mikro sertlikleri ölçülmüş, aşınma deneyleri gerçekleştirilerek işlem görmemiş malzeme ile karşılaştırılmıştır. Kriyojenik işlem, dakikada 2 °C soğutma hızıyla -196 °C'ye soğutularak belirlenen sürelerde bu sıcaklıkta tutularak gerçekleştirilmiştir. -196 °C'den oda sıcaklığına yine dakikada 2 °C ısıtma hızı ile ulaşılmıştır. Mikroyapıda meydana gelen değişikliklerin ve aşınma yüzeylerinin incelenmesinde optik mikroskop ve SEM teknikleri kullanılmıştır. Makrosertlik ve mikrosertliklerde meydana gelen değişikliklerin belirlenmesinde Rockwell B ve Vickers sertlik birimi kullanılmıştır. Aşınma deneyleri ball-on-disc metodu ile her kriyojenik işleme tabi tutulan ve işlem görmemiş numuneler için 5 N ve 10 N yüklerle, 2,5 mm yarıçapta, 100 metre aşınma mesafesi, 10 cm/s hızla kurukoşullarda gerçekleştirilmiştir. Kriyojenik işleme tabi tutulmuş ve işlem görmemiş numunelerin özgül aşınma oranları hesaplanmış ve karşılaştırmalar yapılmıştır. Karşılaştırma sonucu kriyojenik işlem uygulanmış numunelerin tümünün aşınma oranlarında işlem uygulanmamış numuneye göre iyileşme olduğu görülmüştür. 5 N yük uygulanan aşınma deneyinde, 12 saat kriyojenik işlem uygulanan numunenin aşınma direncinde %68,7 oranında artış meydana gelirken, 10 N uygulanan aşınma deneyinde 24 saat kriyojenik işlem uygulanan numunenin aşınma direncinde %69,5 oranında artış olmuştur.

Anahtar kelimeler: Kriyojenik işlem, vermiküler grafitli dökme demir, aşınma

SUMMARY

In this study, cryogenic treatment is applied at 4, 12, 24 and 36 hours to compacted graphite cast iron which is used for clutch pressure plate in automobile. After cryogenic treatment, microstructural investigations, macro and micro hardness test and wear tests were carried out. Cryogenic treatment is applied which the cooling rate of 2 °C per minute to -196 °C and had stood at this temperature at specified times. It was reached at room temperature again with heating rate of 2 °C per minute. Optical microscope and SEM techniques were used to examine the changes in the microstructure and worn surface. Rocwell B and Vickers were drawn on in determining the macrohardness and microhardness changes. Wear tests were carried out dry conditions by using ball-on-disc method for each times of cryogenic treated and untreated samples with 5 N and 10 N normal loads, 2,5 mm radius, 100 meters sliding distance and 10 cm/s sliding velocity. Specific wear rates of cryogenic treated and untreated samples compared each other. Result of the comparisons, both wear rates of cryogenic treated samples decrease according to untreated samples. Test with 5 N normal load, wear resistance of the sample which cryogenic treated at 12 hours was improved %68,7; Test with 10 N normal load, wear resistance of the sample which cryogenic treated at 24 hours was improved %69,5.

Keywords: Cryogenic treatment, compacted graphite cast iron, wear

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğrenimim ve tez çalışmalarım süresince bana her konuda destek olan, bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan danışman hocam Doç. Dr. Hakan GAŞAN'a, laboratuvar çalışmalarım da yardımcı olan tekniker Akif TUTGUN'a teşekkürlerimi sunarım.

Kriyojenik işlem uygulamalarında sağladığı olanaklarla tez çalışmamda büyük yardımları dokunan MMD Makine ve Malzeme Teknolojileri ArGe Danışmanlık ve Mühendislik Hizmetleri San. ve Tic. Ltd. Şti.'ne, vermiküler grafitli dökme demirin teminini sağlayan DEMİSAŞ Döküm Emaye Mamülleri Sanayi A.Ş.'ye teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca, tez çalışmamda yardımlarını esirgemeyen çalışma arkadaşım Yüksek Metalurji ve Malzeme Mühendisi Akın ÖZCAN'a, çalışmalarım boyunca destekleriyle hayatımın her alanında olan Av. Diğdem COŞKUN'a, aileme ve arkadaşlarıma çok teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	vi
SUMMARY	vii
TEŞEKKÜR	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xvi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xvii
 1. GİRİŞ	 1
 2. DÖKME DEMİRLER	 3
2.1 Lamel Grafitli Dökme Demir.....	3
2.2.Küresel Grafitli Dökme Demir	4
2.3 Beyaz Dökme Demir	6
2.4 Vermiküler Grafitli Dökme Demir	8
2.4.1 Vermiküler grafitli dökme demirin tarihi.....	9
2.4.2 Vermiküler grafitli dökme demir üretimi.....	10
2.4.2.1 <u>Kimyasal kompozisyon ve etkileri</u>	10
2.4.2.2 <u>Ergitme</u>	12
2.4.2.3 <u>Vermiküler grafit morfolojisinin elde edilmesi</u>	12
2.4.3 Vermiküler grafitli dökme demirin özellikleri.....	14
2.4.3.1 <u>Mekanik özellikleri</u>	14
2.4.3.2 <u>Fiziksel özellikleri</u>	18

İÇİNDEKİLER (devam)

2.4.4.3 <u>Diğer özellikleri</u>	20
2.4.4 Vermiküler grafitli dökme demirin kullanım alanları	21
3. KRIYOJENİK İŞLEM	23
3.1 Kriyojenik İşlemin Tanımı	23
3.2 Kriyojenik İşlemin Uygulaması	24
3.2.1 Sıcaklığın etkisi	24
3.2.2 Bekletme süresinin etkisi	26
3.2.3 Soğutma ve ısıtma hızının etkisi	28
3.3 Kriyojenik İşlemin Etkileri	29
3.3.1 Mikroyapıya etkisi	29
3.3.2 Mekanik özelliklere etkisi	32
3.4 Kriyojenik işlemin uygulama alanları.....	36
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	37
4.1 Deneysel Malzemeler	37
4.2 Kriyojenik İşlemler	38
4.3 Metalografik İncelemeler	41
4.4 Sertlik ve Aşınma Deneyleri	44
5. DENEYSEL SONUÇLAR	47
5.1 Mikroyapı.....	47
5.2 Sertlik	56
4.3 Aşınma	58

İÇİNDEKİLER (devam)

6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	67
7. KAYNAKLAR DİZİNİ	70

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 Sırasıyla A-E tipi lamel grafitli dökme demir mikroyapısı	4
2.2 Küresel grafitli dökme demirlerin mikroyapısı, a) ferritik, b) perlitik, sertlik 255 HB, c) ferritik, 700 °C’de temperlenmiş, d) perlitik, yağda su verilmiş ve temperlenmiş, sertlik 255 HB	5
2.3 Beyaz dökme demirin mikroyapısı (%3,5 C, %4 Ni, %3 Cr)	7
2.4 Vermiküler grafitli dökme demirin mikroyapısı	9
2.5 Vermiküler grafitli dökme demir için ideal Karbon ve Silisyum oranları	11
2.6 Vermiküler grafitli dökme demirde Cu, Ni ve Sn’nin matris fazına etkisi	12
2.7 Kalıntı Magnezyum miktarının grafit şekline etkisi	13
2.8 Vermiküler morfolojide grafit elde edilebilmesi için Kükürt’e bağlı Seryum alaşımı miktarı	14
2.9 Çekme mukavemeti ve sertliğin vermiküler, küresel ve lamel grafitli dökme demirlerde karşılaştırılması	15
2.10 Vermiküler grafitli dökme demirde kesit kalınlığının çekme mukavemetine etkisi	17
2.11 Perlit oranına bağlı vermiküler ve küresel grafitli dökme demirin darbe direnci karşılaştırılması	18
2.12 Grafit morfolojisine göre termal iletkenliğin oransal değişimi	19
2.13 Vermiküler grafitli dökme demirden üretilen a) Egzoz manifoldu b) Tren fren diski, c) Motor bloğu	21
2.14 Vermiküler grafitli dökme demir kullanılan a) Audi V8 3.3 L dizel motor, b) Jaguar V6 2.7 L dizel motor	22
3.1 Tipik bir kriyojenik işlem çevrimi	24
3.2 Kriyojenik işlem sıcaklığının H13, M1, ve En 19 çelikleri üzerindeki aşınma direncine etkisi	25
3.3 Kriyojenik işlem sıcaklığının iki farklı bekleme süresinde Vanadis, D2 ve H13 çeliklerinin sertliğine etkisi	25
3.4 T-8 ve 1045 çeliklerinin -196 °C ‘de bekletme süreleri ile % değişen aşınma direnci ve % sertlik farklılıkları	26

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

3.5	4 saat bekletme süreli kriyojenik işlemde T8 çeliği için soğutma hızının aşınma direncine etkisi	28
3.6	Yüksek kromlu beyaz dökme demirde östenitleme sıcaklığı ile değişen kalıntı östenit miktarının kriyojenik işlemle değişimi	30
3.7	A2 çeliğinin SEM görüntüsü, a) yağda su verilmiş ve temperlenmiş numune, b) kriyojenik işlem uygulanmış numune	31
3.8	SEM mikroyapı analizi Cu-Cr-Zr mikroyapısı, a) kriyojenik işlem öncesi, b) kriyojenik işlem sonrası	32
3.9	Lamel grafitli dökme demirde temas basıncına göre kriyojenik işlem sonrası aşınma oranlarındaki değişim	34
4.1	Kesilen vermiküler grafitli dökme demir numuneler	37
4.2	Struers Discotom-5 kesme cihazı	38
4.3	“Cryo Üretim” kriyojenik işlem cihazı	39
4.4	4 saat kriyojenik işlem sıcaklık eğrisi program arayüzü	39
4.5	12 saat kriyojenik işlem sıcaklık eğrisi program arayüzü	40
4.6	24 saat kriyojenik işlem sıcaklık eğrisi program arayüzü	40
4.7	36 saat kriyojenik işlem sıcaklık eğrisi program arayüzü	41
4.8	Nikon Eclipse L150 optik mikroskop	42
4.9	JEOL JSM – 5600LV marka taramalı elektron mikroskobu	42
4.10	Struers CitoPress-1 kalıplama cihazı	43
4.11	Struers Tegra Pol-21 zımparalama ve parlatma cihazı	43
4.12	Future Tech FM-700 mikrosertlik cihazı	44
4.13	CSM marka aşınma test cihazı	45
4.14	Multitoyo SJ-400 yüzey profili ölçüm cihazı	46
5.1	Vermiküler grafitli dökme demirin döküm durumunun mikroyapı görüntüleri, a) 100x, b) 200x	48
5.2	24 saat kriyojenik işlem uygulanmış vermiküler grafitli dökme demirin mikroyapı görüntüleri, a)100x, b)200x	49

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

5.3	Vermiküler grafitli dökme demirin 200 büyütmede SEM mikroyapıları, a) orijinal numune, b) 4 saat kriyojenik işlem uygulanmış numune, c) 12 saat kriyojenik işlem uygulanmış numune, d) 24 saat kriyojenik işlem uygulanmış numune, e) 36 saat kriyojenik işlem uygulanmış numune	51
5.4	Orijinal numune SEM mikroyapı	52
5.5	4 saat kriyojenik işlem uygulanmış numune SEM mikroyapı	52
5.6	12 saat kriyojenik işlem uygulanmış numune SEM mikroyapı	53
5.7	24 saat kriyojenik işlem uygulanmış numune SEM mikroyapı	53
5.8	36 saat kriyojenik işlem uygulanmış numune SEM mikroyapı	54
5.9	a) Debriyaj baskı plakasında debriyaja basıldığı anda oluşan anlık sıcaklık dağılımı, b) 60 s periyotlarla çalıştırılan sistemin sürtünme yüzeyinde oluşan sıcaklık.....	56
5.10	Kriyojenik işlem sürelerinin makrosertlik ve mikrosertlik üzerindeki etkisi	58
5.11	5 N yük altında yapılan aşınma deneyleri sonucu oluşan sürtünme katsayıları.....	59
5.12	10 N yük altında yapılan aşınma deneyleri sonucu oluşan sürtünme katsayıları.....	60
5.13	5 N yük altında aşınma deneyleri sonucu aşınma alanı örnekleri, a) orijinal numune, b) 4 saat kriyojenik işlem uygulanmış numune, c) 12 saat kriyojenik işlem uygulanmış numune, d) 24 saat kriyojenik işlem uygulanmış numune, e) 36 saat kriyojenik işlem uygulanmış numune.....	61
5.14	10 N yük altında aşınma deneyleri sonucu aşınma alanı örnekleri, a) orijinal numune, b) 4 saat kriyojenik işlem uygulanmış numune, c) 12 saat kriyojenik işlem uygulanmış numune, d) 24 saat kriyojenik işlem uygulanmış numune, e) 36 saat kriyojenik işlem uygulanmış numune	62
5.15	Orijinal numune ve 4, 12, 24, 36 saat kriyojenik işlem uygulanmış numunelerin 5 N yük altındaki özgül aşınma oranları	63
5.16	Orijinal numune ve 4, 12, 24, 36 saat kriyojenik işlem uygulanmış numunelerin 10 N yük altındaki özgül aşınma oranları	64
5.17	Kriyojenik işlem uygulanmış numunelerin 5 N ve 10 N yük altında yapılan aşınma deneyleri sonrası aşınma dirençlerindeki % artış oranları	65

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

5.18	5 N yük altında yapılan aşınma sonucu oluşan 500x büyütme SEM görüntüleri, a) orijinal numune, b) 12 saat kriyojenik işlem uygulanmış numune.....	66
5.19	10 N yük altında yapılan aşınma sonucu oluşan 500x büyütme SEM görüntüleri, a) orijinal numune, b) 24 saat kriyojenik işlem uygulanmış numune	66

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 Lamel grafitli dökme demir ve küresel grafitli dökme demirin kompozisyonu ..	6
2.2 ASTM A532 Beyaz Dökme Demir Standardı	8
2.3 Vermiküler grafitli dökme demirin (çap:30 mm) oda sıcaklığında mekanik özellikleri	15
2.4 Grafit küreselliğinin mekanik özelliklere etkisi	16
2.5 Farklı sıcaklıklarda lamel, küresel ve vermiküler grafitli dökme demirlerin termal iletkenlikleri	20
3.1 Derin kriyojenik işlemde bekletme sürelerinin malzemelerin mekanik özelliklerine etkisi	27
3.2 Kriyojenik işlemin aşınma direncine etkisi	33
3.3 Bazı malzemelerde kriyojenik işlemin sertlik üzerine etkisi	35
3.4 Kriyojenik işlem sonucu bazı malzemelerdeki servis ömrü artışı	36
4.1 Vermiküler grafitli dökme demirin kimyasal bileşimi	37
5.1 Orijinal numune ve 4, 12, 24, 36 saat kriyojenik işlem uygulanmış numunelerin perlit fazlarında 5µm ‘de sayılan ortalama lamel sayısı	54
5.2 Orijinal ve kriyojenik işlem uygulanmış numunelerin makrosertlik ve mikrosertlikleri	57
5.3 Orijinal numune ve 4, 12, 24, 36 saat kriyojenik işlem uygulanmış numunelerde 5 N ve 10 N yüklerin uygulandığı aşınma deneyleri sonucu oluşan ortalama sürtünme katsayıları	60

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
°C	Santigrat derece
K	Kelvin
W	Weber

<u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklama</u>
MPa	Megapaskal (basınç birimi)
HV	Vickers sertlik birimi
HRB	Rockwell B sertlik birimi
HRC	Rockwell C sertlik birimi
HB	Brinell sertlik birimi
maks.	Maksimum
VGDD	Vermiküler grafitli dökme demir
LGDD	Lamel grafitli dökme demir
KGDD	Küresel grafitli dökme demir
ksi	Kip per square inch (basınç birimi)
m	Metre
cm	Santimetre
s	Saniye
dk	Dakika

µm	Mikrometre
mm	Milimetre
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
g	Gram
N	Newton

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Bu çalışmanın konusu kriyojenik işlemin, debriyaj baskı plaka malzemesi olarak kullanılan vermiküler grafitli dökme demirin aşınma dayanımına etkisinin incelenmesidir.

Vermiküler grafitli dökme demir otomobil üretiminde ağırlık azalmalarına yol açarken aynı zamanda lamel grafitli dökme demire göre daha üstün mekanik özelliklere sahip olması dolayısıyla tercih edilen malzeme haline gelmektedir. Son yıllarda ülkemizdeki döküm firmaları otomotiv sektörüne vermiküler grafitli dökme demirden dökümü yapılan fren diski, egzoz manifoldu, motor bloğu, volan diski ve debriyaj baskı plakası üretimi gerçekleştirmektedir. Yüksek aşınma oranlarına maruz kalan debriyaj baskı plakası yüksek aşınma direnci göstermelidir. Bu doğrultuda üretilen plakanın aşınma direncini artırmaya yönelik çalışmaların yapılması kaçınılmaz durumdadır.

Malzemelerin aşınma direncini artırmaya yönelik çalışmalar, yıllardır süre gelen geleneksel ısıtma işlemleri, yüzey geliştirme işlemleri, malzeme kimyasal kompozisyonun değiştirilmesi gibi metotlarla sürdürülmüştür. Oysa tarihi 1900 'lü yılların başına dayanan kriyojenik işlemin malzeme aşınma dayanımını yüksek oranlarda iyileştirmesi son yirmi yılda göze çarpmaya başlamıştır. Kriyojenik işlem, takım çelikleri başta olmak üzere dökme demirler, kompozitler ve demir dışı alaşımların mikroyapısında meydana getirdiği değişimlerle aşınma direncinde %800 'lere varan artışlar meydana getirmektedir.

Kriyojenik işlem, özel, yalıtılmış kabinler içerisinde iş parçalarının kontrollü olarak -196 °C 'ye kadar soğutulması, bekletilmesi ve oda sıcaklığına ısıtılması ile gerçekleştirilir. Bu sıcaklıklara düşülmesi sisteme kontrollü olarak sıvı azot beslemesi ile sağlanır. İşlem süresi malzeme cinsine göre değişmekle birlikte yaygın olarak 4-36 saat arasında uygulanmaktadır. Avrupa ve Amerika'da çokça uygulanan kriyojenik

işlem büyük şirketlerin varlığıyla yurtdışında oldukça yaygınlaşmıştır. Ülkemizde kriyojenik işlem sahip olduğu üstün özelliklere rağmen yeterli düzeyde ilgi görmemiştir.

Bu çalışmanın 2. bölümünde vermiküler grafitli dökme demirler ayrıntılı olarak anlatılmış, 3. bölümde ise kriyojenik işlemin mekanizması, uygulama alanları ve etkileri dikkate alınarak ayrıntılı biçimde bahsedilmiştir. Çalışmanın 4. bölümü yapılan deneysel çalışmaları, 5. bölümü bu çalışmalarda elde edilen sonuçları ve son olarak 6. bölüm ise sonuçların ayrıntılı irdelemelerini içermektedir.

BÖLÜM 2

DÖKME DEMİRLER

2.1 Lamel Grafitli Dökme Demir

Lamel grafitli dökme demir (Gri dökme demir) yapısında temel olarak demir, karbon ve silisyum bulunduran bir dökme demir çeşididir. Lamel grafitli dökme demirde grafit, östenit içerisinde aşırı doymuş halde lameler yapıda bulunmaktadır. Genellikle yapısında %2,5 - %4 C, %1 – 3 Si bulunmakta ve istenilen mikroyapıya ulaşmak amacıyla Mn (%0,1'in altında ferritik yapı ve %1,2 üzerinde perlitik yapı için) ilavesi yapılmaktadır. Ayrıca eser miktarlarda kalıntı kükürt ve fosfor elementleri yapıda bulunabilmektedir (VanMaldegiam and Rundman, 1986).

ASTM standartlarına göre lamel grafitli dökme demirin çekme mukavemeti göz önüne alınarak sınıflandırması yapılmıştır. Bu sınıflandırma sınıf 20'den (minimum çekme mukavemeti 120 MPa) sınıf 60'a (minimum çekme mukavemeti 410MPa) kadardır. Çoğu uygulamada yüksek mukavemet seçim için ana kistas olmamaktadır. Örneğin fren disklerinde termal direnç önemli olmaktadır ve düşük çekme mukavemetli dökme demirler üstün performanslar sergilemektedir. Titreşimin istenmediği makine parçalarında da düşük çekme mukavemetli sınıf tercih edilmektedir (VanMaldegiam and Rundman, 1986).

Sınıf 20'den sınıf 60'a doğru lamel grafitli dökme demirde genel olarak artış sağlanan özellikler şunlardır:

- Çekme mukavemeti (yüksek sıcaklıklar dahil)
- İnce işleme kabiliyeti
- Elastisite modülü
- Aşınma direnci

Diğer bir taraftan, çekme mukavemetinin azalışıyla artış sağlanan özellikler ise şunlardır:

- İşlenebilirlik
- Termal şok direnci
- Titreşim sönümlene kapasitesi
- İnce kesit dökülebilme yetisi (VanMaldegiam and Rundman, 1986)

Lamel grafiti dökme demirin mikroyapısı perlit ve ferrit matris içerisinde dağılmış lamel yapıda grafitler şeklindedir. Bu mikroyapı kendi içerisinde beş ana sınıfta incelenir. Sınıflandırmada grafitlerin sayıları, büyüklüğü ve dağılımı göz önünde bulundurulur. Grafit sayısı, büyüklüğü ve dağılımı soğuma hızı, karbon miktarı, alaşım elementleri gibi faktörlere bağlıdır. Şekil 2.1’de lamel grafitli dökme demirin 5 tip mikroyapı görüntüleri verilmiştir (VanMaldegiam and Rundman, 1986).

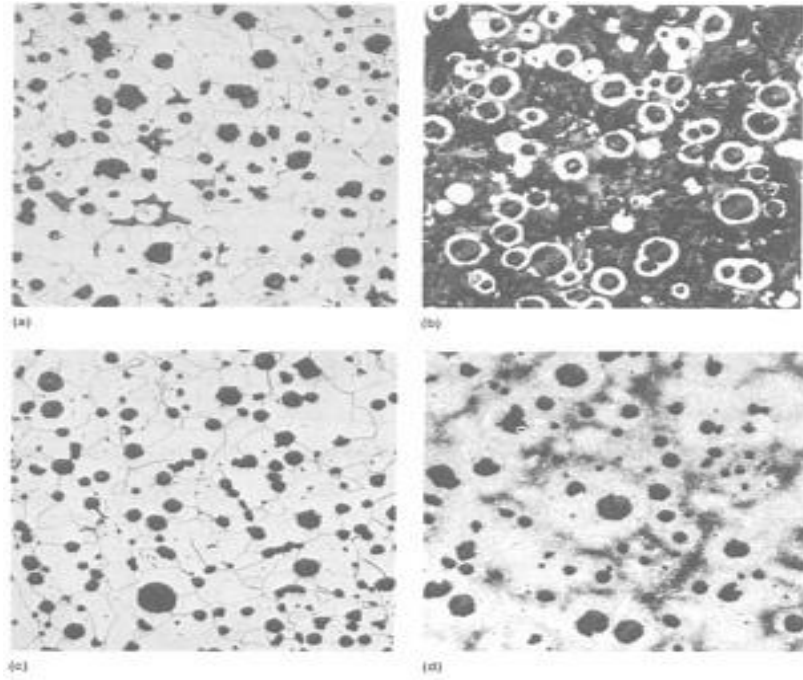


Şekil 2.1. Sırasıyla A-E tipi lamel grafitli dökme demir mikroyapısı (ISO_945-1)

2.2 Küresel Grafitli Dökme Demir

Küresel grafitli dökme demir yapısında küresel grafitler bulundurmaktadır. Küresel grafitli dökme demirlerde katılaşma başladığı zaman ötektik grafit ergimiş demirin içerisinden, gri dökme demirde olduğu gibi, ayrılır. Gri dökme demirden farklı olarak, dökümden önce Mg, Ce gibi farklı elementlerin ilavesiyle grafitler küreselleşir. Küresel grafitte sahip olan dökme demir gri dökme demire göre mukavemeti ve uzaması yüksektir. Küresel grafitler matris içerisinde dağılmış mukavemet artırıcı yapı olarak betimlenirse küresel grafitli dökme demirler kompozit malzemelere benzetilebilir. Şekil

2.2’de farklı küresel grafitli dökme demirlerin mikroyapısı gösterilmiştir (Gundlach and Janowak, 1984).



Şekil 2.2. Küresel grafitli dökme demirlerin mikroyapısı. a) ferritik, b) perlitik, sertlik 255 HB. c) ferritik, 700 °C’de temperlenmiş, d) perlitik, yağda su verilmiş ve temperlenmiş, sertlik 255 HB (Gundlach and Janowak, 1984)

Küreselleştirme, grafitlerin Mg ve Ce ilavesi ile küre şekline getirilmesi işlemidir. Küreselleştirme işlemi 1450-1510 °C aralığında yapılmaktadır. Magnezyumun eriyik metalle tepkimesi çok şiddetli gerçekleşmektedir. Bu nedenle tepkimenin şiddetini azaltacak küreleştirme sistemleri kullanılmaktadır (Elliot, 1988).

Küresel grafitli dökme demirin üretimi için gerekli olan hammaddelerin yüksek saflıkta olması gerekmektedir. Bütün dökme demirler kupol ocaklarında, elektrik ark fırınlarında ve indüksiyon fırınlarında ergitilebilirler. Sıvı olarak küresel grafitli dökme demir, yüksek akışkanlık, mükemmel döküm kabiliyetine sahipken aynı zamanda yüksek yüzey gerilimine sahiptir. Küresel grafitli dökme demirler için kullanılan döküm kumu yüksek yoğunlukta ve rijit olmalıdır. Çizelge 2.1’de lamel grafitli dökme

demir ve küresel grafitli dökme demirin kompozisyonları verilmiştir (Gundlach and Janowak, 1984).

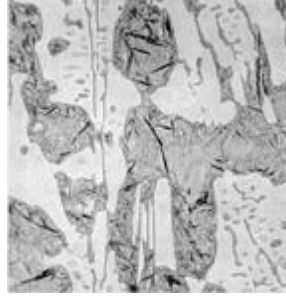
Çizelge 2.1. Lamel grafitli dökme demir ve küresel grafitli dökme demirin kompozisyonu. (Gundlach and Janowak, 1984)

Dökme demir tipi	% Kompozisyon										
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Cu	P	S	Ce	Mg
Lamel grafitli dökme demir	3,25-3,50	0,50-0,90	1,80-2,30	0,05-0,45	0,05-0,20	0,05-0,10	0,15-0,40	0,12 maks	0,15 maks	-	-
Küresel grafitli dökme demir	3,60-3,80	0,15-1,00	1,80-2,80	0,03-0,07	0,05-0,20	0,01-0,10	0,15-1,00	0,03 maks	0,002 maks	0,005-0,20	0,03-0,06

2.3 Beyaz Dökme Demir

Beyaz dökme demir, yapısında bulunan karbonun demir ile birleşmesi sonucu demir karbür oluşturması ile meydana gelmektedir. Bu yapıda karbon, diğer dökme demirlerde olduğu gibi grafit olarak matriste dağılmamaktadır. Beyaz dökme demirde en belirgin sistem aşınma özelliklerini ortaya koyan Fe-Cr-C üçlü sistemidir. Bu sistemde Cr %15' e kadar demir ile yer değiştirerek krom karbür yapısını oluşturabilir. Aşınma direncini önemli derecede yükselten krom karbürün sertliği 1500-1800 HV iken, demir karbür (sementit) fazı 1000-1200 HV sertliğe sahiptir (Kazdal vd., 2012). Alaşımsız beyaz dökme demirin mikroyapısı perlit matriste büyük oranda demir karbürden oluşur (Smith, 2001). Şekil 2.3'te şekilde yüksek karbonlu Ni-Cr alaşımlı

beyaz dökme demirin mikroyapısı gösterilmiştir. Açık renkli bölgeler kromkarbür koyu renkli bölgeler ise perlit fazıdır (ASM Handbook, V: 15).



Şekil 2.3. Beyaz dökme demirin mikroyapısı (%3,5 C, %4 Ni, %3 Cr) (ASM Handbook, V: 15).

Beyaz dökme demirler üretimleri ile diğer dökme demirlerden çok ayrı bir noktadadır. Özellikle alaşım elementlerinin eklenmesi ile üretilen beyaz dökme demirin üretilmesi özel ekipmanlar aracılığı ile sağlanmaktadır. Beyaz dökme demirler (daha çok yüksek alaşımlı beyaz dökme demirler) genel olarak aşınma dayanımına ihtiyaç duyulan yerlerde kullanılmaktadırlar. Bunun nedeni mikroyapısında bulunan birincil ve ötektik karbürlerdir. Krom alaşımlı beyaz dökme demirlerde ise aşınmaya ek olarak korozyon direncinin yüksek olduğu söylenebilir (ASM Handbook, V: 15).

ASTM A 532 standardına göre alaşımlı beyaz dökme demirler sınıflandırılmıştır. Buna rağmen özel uygulamalar için farklı kompozisyonlarda dökümler de mevcuttur. Çizelge 2.2’de ASTM A 532 standartlarına göre alaşımlı beyaz dökme demirlerin kompozisyonları verilmiştir.

Çizelge 2.2. ASTM A532 Beyaz Dökme Demir Standardı

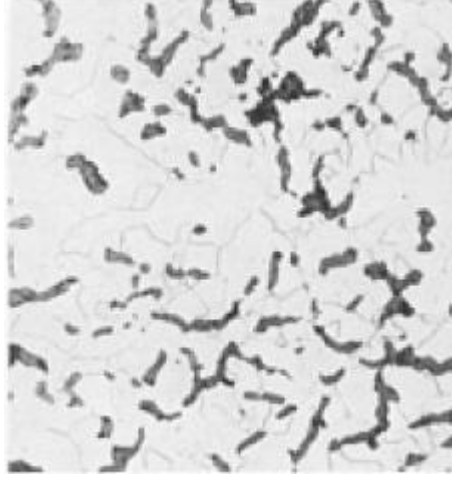
Sınıf	Tür	Gösterimi	%C	%Mn	%Si maks	%Ni	%Cr	%Mo
I	A	Ni-Cr-HC	3.0-3.6	1,3 maks.	0,8	3,3-5,0	1,4-4,0	1.0 maks ^(a)
I	B	Ni-Cr-LC	2.5-3.0	1,3 maks.	0,8	3,3-5,0	1,4-4,0	1.0 maks ^(a)
I	C	Ni-Cr-GB	2.9-3.7	1,3 maks.	0,8	2,7-4,0	1,1-1,5	1.0 maks ^(a)
I	D	Ni-Hi Cr	2.5-3.6	1,3 maks.	1,0-2,2	5,0-7,0	7,0- 11,0	1.0 maks ^(b)
II	A	12% Cr	2.4-2.8	0,5-1,5	1,0	0,5 maks.	11,0- 14,0	0.5- 1.0 ^(c)
II	B	15% Cr- Mo-LC	2.4-2.8	0,5-1,5	1,0	0,5 maks.	14,0- 18,0	1.0- 3.0 ^(c)
II	C	15% Cr- Mo-HC	2.8-3.6	0,5-1,5	1,0	0,5 maks.	14,0- 18,0	2.3- 3.5 ^(c)
II	D	20% Cr- Mo-LC	2.0-2.6	0,5-1,5	1,0	1,5 maks.	18,0- 23,0	1.5 maks ^(c)
II	E	20% Cr- Mo-HC	2.6-3.2	0,5-1,5	1,0	1,5 maks.	18,0- 23,0	1.0- 2.0 ^(c)
III	A	25%Cr	2.3-3.0	0,5-1,5	1,0	1,5 maks.	23,0- 28,0	1.5 maks ^(c)

GB=Grinding balls (öğütücü bilye); Hc=High Carbon (yüksek karbon); Lc=low Carbon (düşük karbon); HiC= High-Chromium (yüksek karbon) ifade etmektedir. a) Maksimum %0,30 P, %0,15 S. b) Maksimum %0,10 P, %0,15 S. c) Maksimum %0,10 P, 0,06S, %1,2 Cu

2.4 Vermiküler Grafitli Dökme Demir

Dökme demirler mikroyapılarına göre gruplandırılmıştır. Yapılarında bulunan grafitlerin morfolojik özelliklerine göre üç ana grupta incelenmektedir; lamel grafitli dökme demir, küresel grafitli dökme demir ve lameler ve küresel arası morfolojiye sahip vermiküler grafitli dökme demir. Vermiküler grafitli dökme demirin grafit morfolojisi lameler ile küresel arası olduğu için malzeme özellikleri açısından da bu iki dökme demirin arasındaki konumdadır. Örneğin, vermiküler grafitli dökme demirin çekme mukavemeti lamel grafitli dökme demire göre yüksek olmasına karşın termal iletkenliği küresel grafitli dökme demirle karşılaştırıldığında düşüktür. Mekanik ve termal özellikleri göz önünde bulundurulduğunda, vermiküler grafitli dökme demir otomotiv endüstrisine uygun gözükmemektedir. Özellikle yeni nesil dizel motor blokları,

kamyon motorları, fren diski ve debriyaj baskı plakası vb. malzemesi olarak kullanılmaya başlanmıştır (König, 2010). Şekil 2.4'te vermiküler grafitli dökme demirin mikroyapısı gösterilmiştir.



Şekil 2.4. Vermiküler grafitli dökme demirin mikroyapısı (ASM Handbook V: 15).

2.4.1 Vermiküler grafitli dökme demirin tarihi

Vermiküler grafitli dökme demirin kullanımı yeni yeni yaygınlaşmaya başlasa da yeni bir mühendislik malzemesi değildir. İlk patent uygulaması 1948 yılında Millis ve arkadaşları tarafından küresel grafitli dökme demirle aynı zamanda başlanmış ve 1949 yılında patenti alınmıştır (Millis et al., 1949). İlerleyen yıllar boyunca, küresel grafitli dökme demir üretimi yapılırken ilave edilen magnezyum miktarına bağlı olarak ıskartaya çıkarılan dökme demir çeşidi olmuştur. 1960'lara kadar tasarlanarak üretilen bir ürün olmamıştır. Örneğin, The Steyr–Daimler–Puch AG dökümcülük şirketi vermiküler grafitli dökme demir üretimine 1969 yılında başlamıştır. Vermiküler grafitli dökme demir üretim teknolojileri bu tarihten sonra gelişmeye başlamıştır. Vermiküler grafitli dökme demir tarihinde en önemli gelişmelerden biri ise Ti ilavesi olmadan endüstriyel üretime uygun dökme demirin üretilmesi olmuştur. Ti ilavesi işlenebilirliğin zorluğunu artıran bir element olmuştur (Sissener et al., 1972).

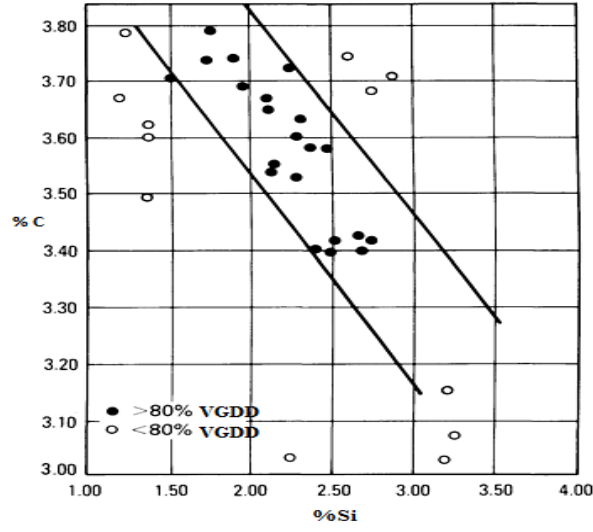
İlerleyen yıllarda vermiküler grafitli dökme demir otomotiv endüstrisinde özellikle tercih edilen malzeme olmuştur. Örneğin, egzoz manifoldu, fren diskleri, motor başlıkları ve motor bloğu gibi otomobil parçalarında vermiküler grafitli dökme demir kullanımı yaygınlaşmıştır (Dawson and Schroeder, 2004).

2.4.2 Vermiküler grafitli dökme demir üretimi

Vermiküler grafitli dökme demirin günümüzdeki üretimi yaygın olmakla beraber küresel grafitli dökme demirinkine benzer bir şekilde üretilmektedir. İlave bir ekipman gerektirmeden küresel grafitli dökme demir üreten iyi düzenlenmiş bir imalathanede vermiküler grafitli dökme demir de üretmek mümkündür (Borghigiani and Marinari, 1982).

2.4.2.1 Kimyasal kompozisyon ve etkileri

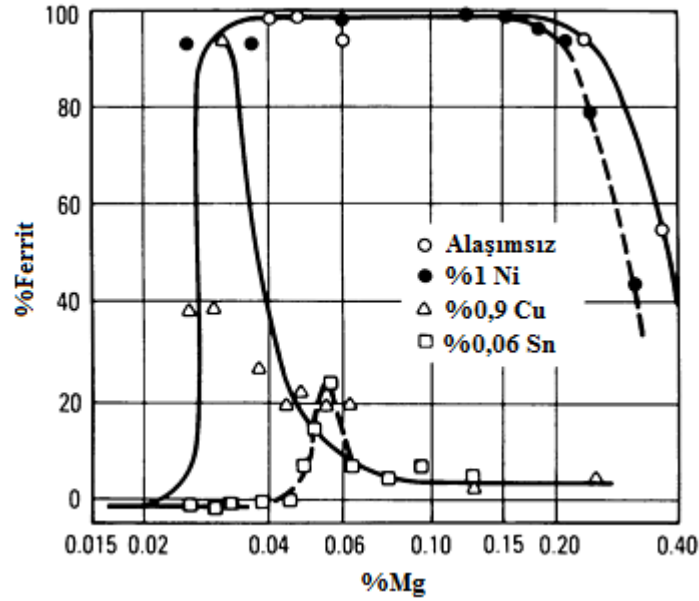
Vermiküler grafitli dökme demirin %3,7'den (ötektikaltı) %4,7'ye (ötektiküstü) değişen geniş aralıkta karbon eşdeğeri mevcuttur. Bunun yanında ayrıca temel olarak %1,7'den %3'e kadar değişen silisyum oranlarına sahip olabilmektedir (Evans, et al., 1976; Sergeant and Evans, 1978; Cooper and Loper, 1978). Sabit silisyum değerlerinde düşük karbon oranları hızlı soğuma eğilimini artırmaktadır. Sabit karbon miktarında yüksek silisyum oranları ise grafit küreselliğini artırmaktadır (Cornell and Loper, 1985). Şekil 2.5'te ideal karbon ve silisyum oranları gösterilmiştir.



Şekil 2.5. Vermiküler grafitli dökme demir için ideal Karbon ve Silisyum oranları (Cornell and Loper, 1985).

Vermiküler grafitli dökme demir üretiminde Mangan oranı %0,1 ile %0,6 arasında olması gerekirken fosfor oranı %0,006'dan az olması gerekmektedir. Ayrıca kükürt giderme işlemlerinden sonra kompozisyonda bulunan kükürt oranı %0,01 ile %0,02 arasında olmalıdır. Bunlarla birlikte, vermiküler grafit elde edilmesini sağlayan, küresel grafitli dökme demirde olduğu gibi Magnezyum, Seryum, Tantal elementlerinin ilavesinin yapılması gerekmektedir (Cooper and Loper, 1978).

Bakır, Kalay, Molibden ve Alüminyum gibi alaşım elementlerinin ilavesi mikroyapıdaki matrisi ferritten perlitte dönüştürmektedir. Örneğin, %0,48 Cu, %0,33 Sn, %0,5 – 1 Mo, %4,55 Al ilavesi perlit matrisin oluşmasını sağlamaktadır (Fowler et al., 1984; Ziegler and Wallace, 1984; Nechtelberger et al., 1970; Martinez and Stefanescu, 1983). Şekil 2.6'da Bakır ve Kalay gibi alaşım elementlerinin, Magnezyum oranı ile değişen perlit fazının oluşumuna etkisi gösterilmiştir (Thury and Hummer, 1972).



Şekil 2.6. Vermiküler grafitli dökme demirde Cu, Ni ve Sn'nin matris fazına etkisi (Thury and Hummer, 1972).

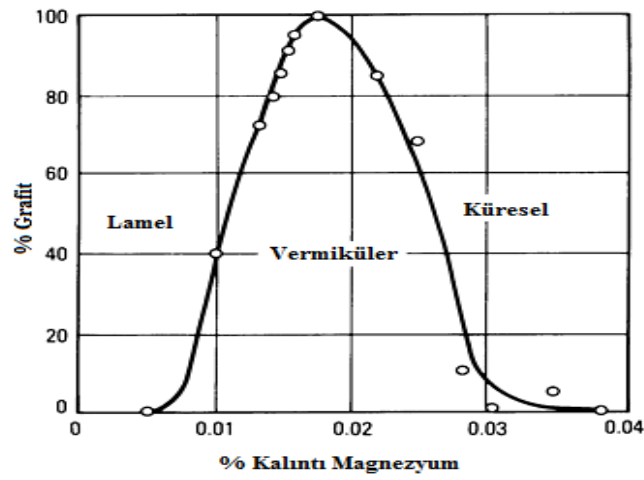
2.4.2.2 Ergitme

Vermiküler dökme demirin ergitme işlemi küresel grafitli dökme demirin ergitme işlemiyle aynı prensiptedir. İndüksiyon ocakları, ark ocakları ve kupol fırınları ergitme işlemi için uygun ekipmanlardır. Eğer mikroyapıda ferritik matris isteniyorsa ergitme işleminde sarf malzeme olarak düşük Mangan, Sülfür ve Fosfor oranlı saf dökme demir kullanılmalıdır. Perlitik matris kabul edilebilirse ergitme işleminde çelik hurda eklenebilir (ASM Handbook, Volume: 15)

2.4.2.3 Vermiküler grafit morfolojisinin elde edilmesi

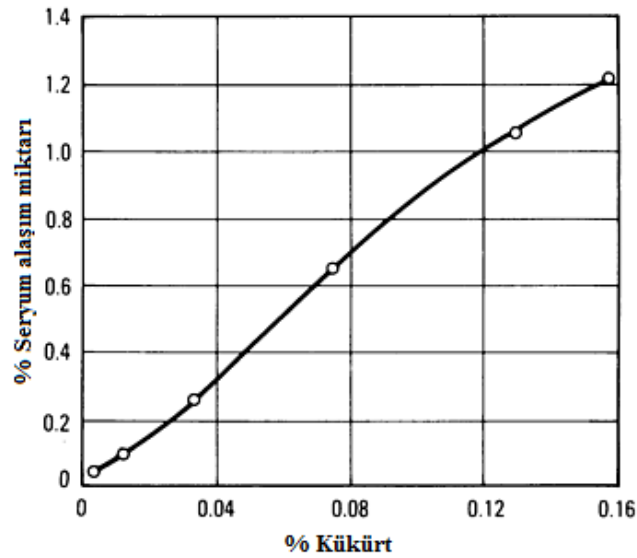
Küresel grafitli dökme demir üretiminde, yapıda buharlaşmadan kalan maksimum kalıntı magnezyum oranı olmalıyken, vermiküler grafitli dökme demir üretiminde bu miktar belirli aralıklarla sınırlandırılmıştır. Magnezyum içeriği belirlenen limitlerin altında olursa grafitler lameler morfoloji oluşmaya başlayacak, üzerinde olursa küresel morfoloji oluşacaktır. Sonuç olarak yapılacak olan dökümün

miktarına göre ve magnezyumun kullanılacağı alanlar göz önünde bulundurularak, tüm bunlara ilaveten dökümün içermesi gereken kalıntı magnezyum miktarı da ($\sim 0,017$) eklenerek kullanılacak olan FeSiMg işlem alaşım miktarı hesaplanır (Nechtelberger et al., 1970). Kalıntı magnezyum miktarının grafit şekline etkisinin gösterildiği Şekil 2.7’de verilmiştir.



Şekil 2.7. Kalıntı Magnezyum miktarının grafit şekline etkisi (Nechtelberger et al., 1970)

Vermiküler grafit morfolojisinin elde edilmesi amacıyla kullanılan bir diğer element Seryum'dur. Kalıntı Seryum miktarı, yapıdaki Kükürt'e bağlı olarak $0,013 - 0,075$ arası değişmektedir. Vermiküler morfolojide grafit elde edilmesi için Kükürt'e bağlı olarak değişen Seryum alaşımı miktarı Şekil 2.8'de görülmektedir (Sissener et al., 1972).



Şekil 2.8. Vermiküler morfolojide grafit elde edilebilmesi için Kükürt'e bağlı Seryum alaşıımı miktarı (Sissener et al., 1972).

2.4.3 Vermiküler grafitli dökme demirin özellikleri

Vermiküler grafitli dökme demir mekanik özellikler bakımından (Çekme mukavemeti, % uzama, sertlik ve elastisite modülü) küresel grafitli dökme demire yakınen, fiziksel özellikler ve yüksek sıcaklık özellikleri göz önüne alındığında lamel grafitli dökme demire daha yakındır (ASM Handbook, Volume: 15).

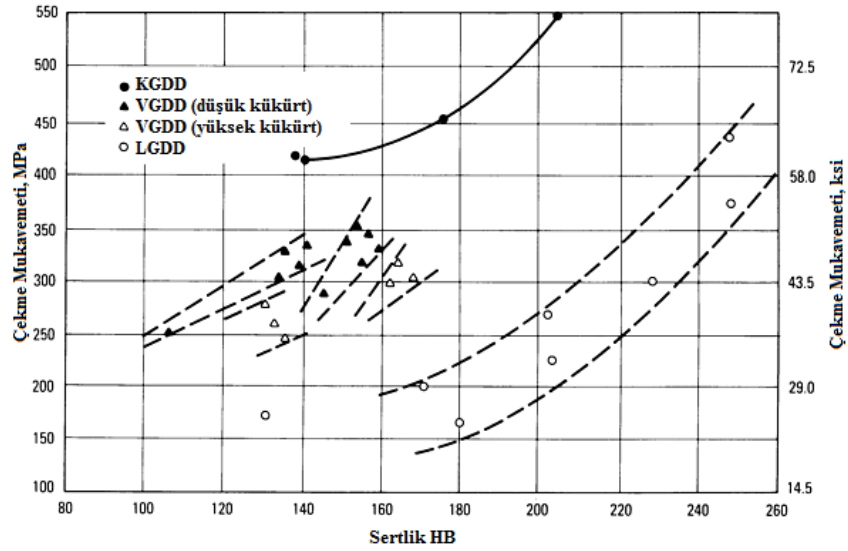
2.4.3.1 Mekanik özellikleri

Vermiküler grafitli dökme demirin mekanik özellikleri matrisin ferritik veya perlitik olmasına göre değişkenlik göstermektedir (ASM Handbook, Volume: 15). Çizelge 2.3'te oda sıcaklığında vermiküler grafitli dökme demirin mekanik özellikleri verilmiştir.

Çizelge 2.3. Vermiküler grafitli dökme demirin (çap:30 mm) oda sıcaklığında mekanik özellikleri (ASM Handbook, Volume: 15).

Matris	Çekme Mukavemeti		Akma Mukavemeti		% Uzama	Elastisite Modülü		Sertlik Brinell
	MPa	ksi	MPa	ksi		GPa	ksi x 10 ³	
Ferritik	250 - 380	36 - 55	175 - 300	25 - 43	3 - 8	120 - 126	17.5 - 18.3	130 - 179
Perlitik	405 - 620	59 - 90	315 - 425	45 - 63	1 - 2	127 - 165	18.5 - 24	207 - 269

Şekil 2.9’da ise vermiküler, lamel ve küresel grafitli dökme demirlerin çekme mukavemeti ile değişen sertlik değerleri karşılaştırılmıştır. Ortalama bir çekme mukavemeti baz alındığında sertlik oranı lamel garfitli dökme demir için 1,3 ise 2,08 vermiküler grafitli dökme demir, 2,75 küresel grafitli dökme demir olmak üzere karşılaştırılma yapılabilmektedir (Cooper and Loper, 1978).



Şekil 2.9. Çekme mukavemeti ve sertliğin vermiküler, küresel ve lamel grafitli dökme demirlerde karşılaştırılması (Cooper and Loper, 1978).

Mekanik özellikleri etkileyen üç faktör kimyasal kompozisyon, mikroyapı (küreselleşme ve matris) ve malzemenin kesit alanıdır. Bu üç faktör birbirine bağımlı durumdadır. Vermiküler grafitli dökme demirde, yapısındaki karbon oranının değişmesinin çekme mukavemetine etkisi düşükken, lamel grafitli dökme demirde bu etki daha yüksektir. Karbon miktarının %4,3 olduğu ötektik alanda bile vermiküler grafitli dökme demirin, ferritik ve perlitik bütün fazlarda, çekme mukavemeti düşük karbon oranlı lamel grafitli dökme demire göre daha yüksektir (Sergeant and Evans, 1978).

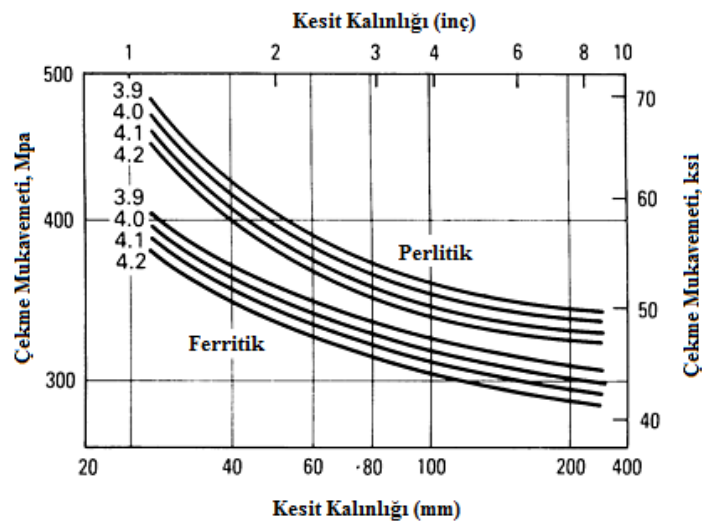
Mekanik özellikleri etkileyen faktörlerden; kimyasal kompozisyonda, karbon oranı yüksek oranda etki etmezken silisyum miktarı arttıkça akma, çekme mukavemeti, sertlik ve yüzde uzamada artış görülmektedir. Ayrıca yapıda silisyum miktarındaki artış matris fazı olan perlit %30 oranlarına kadar azaltılmaktadır. Mekanik özellikleri etkileyen diğer temel elementler alüminyum, kalay, bakır mangan gibi alaşım elementleridir. Bu elementlerin yapıdaki miktarı arttıkça perlit/ferrit oranı ve çekme mukavemeti artmakta, yüzde uzama ise azalmaktadır (Martinez and Stefanescu, 1983).

Mekanik özellikleri etkileyen faktörlerden; mikroyapıda, grafitlerin küresellikleri arttıkça çekme mukavemeti ve yüzde uzama yükselmektedir. Yine de bir dökme demirin vermiküler grafitli olarak sınıflandırılması için küresellik %20' nin altında olmalıdır (Cast Iron Handbook, 1978). Çizelge 2.4'te grafitlerin küreselliği ile mekanik özelliklerin değişimi verilmiştir.

Çizelge 2.4. Grafit küreselliğinin mekanik özelliklere etkisi (Cast Iron Handbook, 1978)

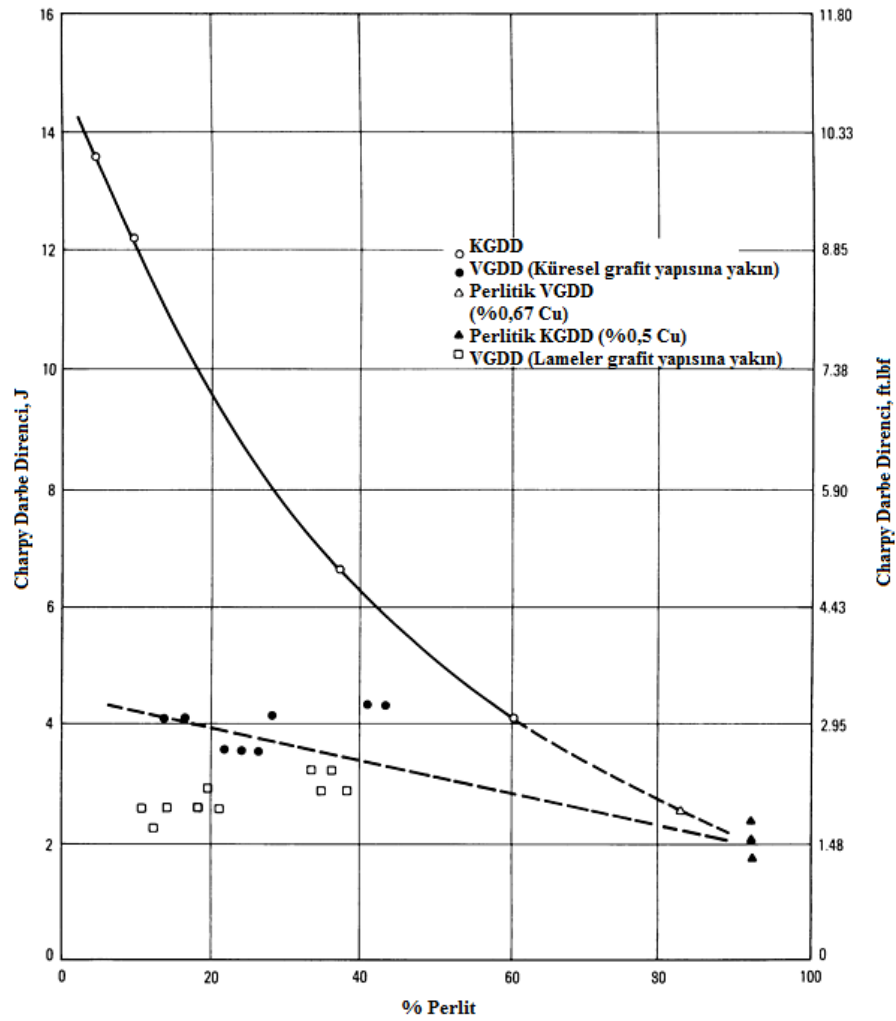
% Küresellik	Çekme Mukavemeti		% Uzama	Termal İletkenlik W/m.K
	MPa	ksi		
10-20	320 – 380	46 – 55	2 – 5	50 – 52
20-30	380 – 450	55 – 65	2 – 6	48 – 50
40-50	450 – 500	65 – 73	3 – 6	38 – 42

Mekanik özellikleri etkileyen faktörlerden; kesit kalınlığı vermiküler grafitli dökme demirde lamel grafitli dökme demire göre daha az bir etkiye sahiptir (Sergeant and Evans 1978). Şekil 2.10'da vermiküler grafitli dökme demirde kesit kalınlığının çekme mukavemetine etkisi gösterilmiştir.



Şekil 2.10. Vermiküler grafitli dökme demirde kesit kalınlığının çekme mukavemetine etkisi (Sergeant and Evans 1978).

Vermiküler grafitli dökme demirin tokluğu, matris perlitik yapıda ise; düşük perlit içerikli küresel grafitli dökme demire göre daha yüksektir. Küresel grafit yapısına daha yakın vermiküler grafitli dökme demirin darbe direnci 4 J civarındadır. Lameler grafit yapısına daha yakın vermiküler grafitli dökme demirin ise darbe direnci 3 J civarındadır (Cooper and Loper, 1978). Şekil 2.11'de perlit oranına bağlı olarak vermiküler ve küresel grafitli dökme demirlerin darbe direnci karşılaştırılmasını göstermektedir.

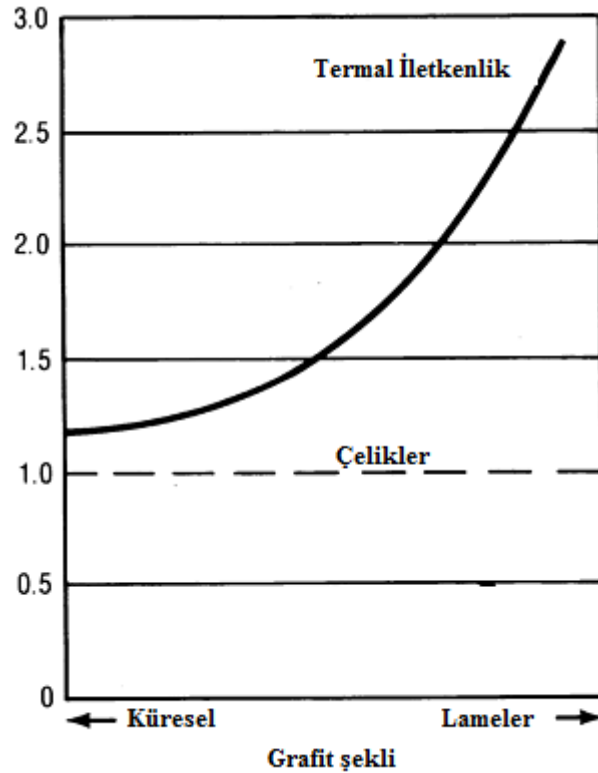


Şekil 2.11. Perlit oranına bağlı vermiküler ve küresel grafitli dökme demirin darbe direnci karşılaştırılması (Cooper and Loper, 1978)

2.4.3.2 Fiziksel özellikleri

Dökme demirlerin kullanım alanlarına bağlı olarak en önemli fiziksel özelliği termal iletkenliktir. Termal iletkenlik, termal gerilimler altında kalan dökme demir parçalarında çok önemli bir rol oynamaktadır. Dökme demirlerin mikroyapısı, özellikle grafit morfolojisi termal iletkenliği azımsanmayacak derecede etkileyen bir faktördür. Bu noktada küresel grafitli dökme demirin termal iletkenliği lamel grafitli dökme

demirin termal iletkenliğinden düşükken, vermiküler grafitli dökme demir bu iki değerin arasındadır (ASM Handbook, V:1) . Şekil 2.12’de grafit morfolojisine bağlı olarak termal iletkenlik özelliğindeki değişim gösterilmiştir.



Şekil 2.12. Grafit morfolojisine göre termal iletkenliğin oransal değişimi (Lohberg and Motz, 1957)

Vermiküler grafitli dökme demirin termal iletkenlik özelliği lamel grafitli dökme demire daha yakındır. Oda sıcaklığında yaklaşık 52-55 W/m.K arası (kimyasal kompozisyona göre değişmektedir) olmaktadır. Sıcaklık arttıkça termal iletkenlik diğer dökme demirlerde olduğu gibi azalmaktadır. Çizelge 2.5'te lamel, küresel ve vermiküler grafitli dökme demirin farklı sıcaklıklardaki termal iletkenlik değerleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir (Nechtelberger et al., 1982).

Çizelge 2.5. Farklı sıcaklıklarda lamel, küresel ve vermiküler grafitli dökme demirlerin termal iletkenlikleri (Nechtelberger et al., 1982).

Grafite morfolojisi	Karbon oranı %	Termal İletkenlik W/m.K				
		100 °C	200 °C	300 °C	400 °C	500 °C
Lamel	3,8	50,24	48,99	45,22	41,87	38,52
	4,8	53,39	50,66	47,31	43,12	38,94
Vermiküler	3,9	38,10	41,0	39,40	37,30	35,20
	4,1	43,54	43,12	40,19	37,68	35,17
Küresel	4,2	32,34	34,75	33,08	31,40	39,31

2.4.3.3 Diğer özellikleri

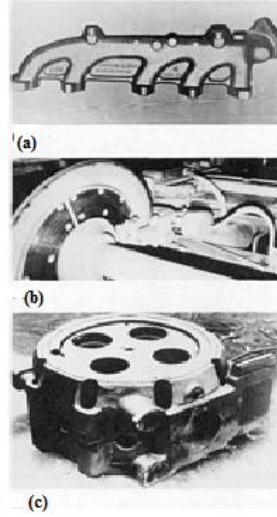
Vermiküler grafitli dökme demirin oda sıcaklığında %5 sülfirik asit içinde korozyon oranı lamel grafitli dökme demirin yarısı kadardır. Sıcaklığın yükselmesi ile bu fark azalmaktadır. Ayrıca perlitik fazda korozyon direnci ferritik fazdaki dirence göre daha yüksektir (ASM Handbook, V:13).

Vermiküler grafitli dökme demirin işlenebilirlik özelliği aynı matris fazında lamel ve küresel grafitli dökme demirin arasındadır. Vermiküler grafit morfoloji etkisi, küçük parçalı ve toz halinde talaş kaldırılması için sertlik sağlamaktadır. Bu nedenle ideal işlenebilirlik özelliğine sahip değildir (Nechtelberger et al., 1982)

Vermiküler grafitli dökme demirin titreşim sönümleme kapasitesinin göreceli olarak diğer dökme demirlerle karşılaştırması “Lamel grafitli dökme demir: Vermiküler grafitli dökme demir: Küresel grafitli dökme demir = 1,0: 0,6: 0,34” şeklindedir (palmer, 1976). Karbon oranının ve matris fazı titreşim sönümleme özelliğinde önemli bir değişiklik yapmamaktadır (Sergeant and Evans, 1978).

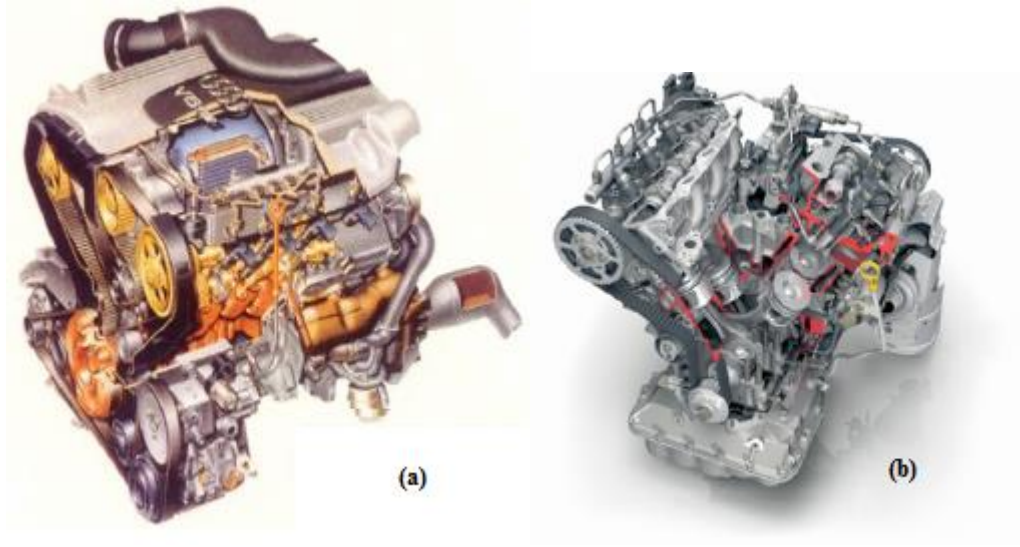
2.4.4 Vermiküler grafitli dökme demirin kullanım alanları

Vermiküler grafitli dökme demirin termal iletkenlik değeri küresel grafitli dökme demire göre yüksek olması, yüksek sıcaklık koşullarında tercih edilmesini sağlamıştır. Örneğin, külçe kalıplar, krank milleri, motor blokları, egzoz manifoldları ve fren diskleri bu özelliği sayesinde kullanım alanlarını oluşturmaktadır (Stefanescu and Loper, 1982). Şekil 2.13'te egzoz manifoldu, tren fren diskleri ve motor bloğu gösterilmiştir.



Şekil 2.13. Vermiküler grafitli dökme demirden üretilen a) Egzoz manifoldu b) Tren fren diskleri c) Motor bloğu (Nechtelberger et al., 1982)

Son yıllarda dizel motor teknolojisinin gelişmesiyle beraber vermicüler grafitli dökme demirden üretilen dizel motor bloklarının sayısı gün geçtikçe artmaktadır. Yorulma mukavemetinin lamel grafitli dökme demire göre yüksek olması motor bloğu ağırlığının azaltılmasına (%22) imkan vermiştir (Guesser et al., 2004). Şekil 2.14'te vermicüler dökme demir kullanılan motorlar gösterilmiştir.



Şekil 2.14 Vermiküler grafitli dökme demir kullanılan a) Audi V8 3.3 L dizel motor b) Jaguar V6 2.7 L dizel motor (Guesser et al., 2004).

BÖLÜM 3

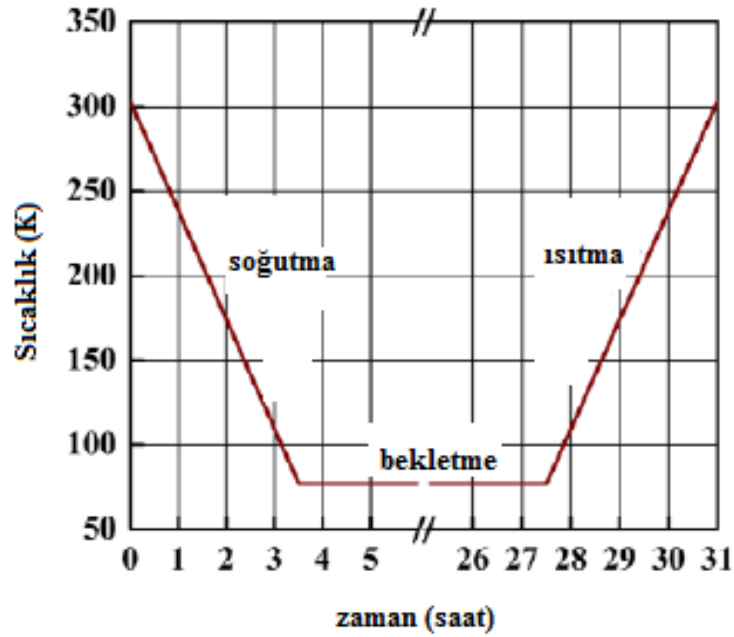
KRİYOJENİK İŞLEM

3.1 Kriyojenik İşlemin Tanımı

Kriyojenik işlem literatürde, malzemeleri sıfırın altındaki sıcaklıklara belirli hızlarda kontrollü bir şekilde soğutmak, bu sıcaklıkta bekletmek ve yine belirli hızlarla oda sıcaklığına ısıtmak olarak tanımlanmaktadır. Kriyojenik işlemin amacı malzemenin mikroyapısında değişikliklere sebep olarak istenilen mekanik özelliklerin kazandırılmasıdır (Thrnton et al., 2011).

Kriyojenik işlem, sıvı azotun işlem yapılacak malzemelerin içerisinde bulunduğu ısı yalıtımlı kriyojenik kabin içerisine beslenmesi ile gerçekleşir. Sıvı azotun kabin içerisine beslenmesi iki şekilde olmaktadır. Birincisi, sıvı halde fan yardımı ile püskürtülerek azot atmosferi oluşumu sağlanması, ikinci ise ısıl değiştiriciler yardımıyla (Preciado et al., 2006).

Sıfır altı işlemler soğutma işleminin yapıldığı sıcaklığa göre 0° C ile -80° C arası “soğuk işlem”, -80° C ile -160° C arası “sığ kriyojenik işlem”, -160° C ile -196° C arası “derin kriyojenik işlem” olarak isimlendirilmektedir. Soğuk işlemde soğutucu olarak kuru buz kullanılırken sığ ve derin kriyojenik işlemde sıvı azot ve sıvı helyum kullanımı söz konusudur (Das et al., 2009). Şekil 3.1’de tipik bir kriyojenik işlem çevrimi gösterilmektedir.



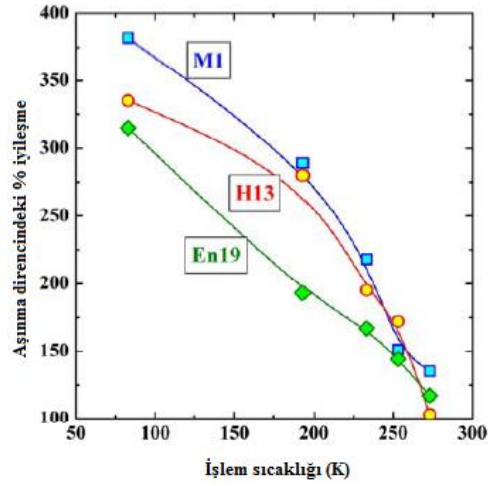
Şekil 3.1. Tipik bir kriyojenik işlem çevrimi (Barron and Thompson, 1990)

3.2 Kriyojenik İşlemin Uygulaması

Kriyojenik işlemin malzemelerin üzerinde mikroyapı, mekanik ve fiziksel özellikleri ve performansına etkisi işlem parametrelerine ve malzemenin kimyasal kompozisyonuna bağlıdır (Das, 2011).

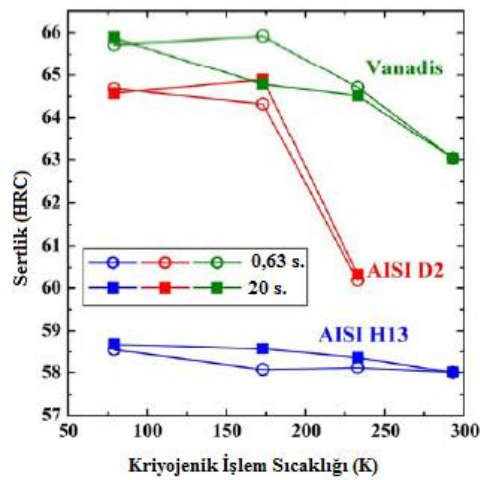
3.2.1 Sıcaklığın etkisi

Kriyojenik işlemde düşük sıcaklıklara ulaşılması özellikle takım çeliklerinde daha yüksek aşınma dayanımı sağlamaktadır. Yüksek aşınma dayanımı ise malzemenin kullanım ömrünü doğrudan artırmaktadır. M1, H13 ve En 19 çelikleri ile yapılan kriyojenik işlemlerde daha düşük sıcaklıklarda bekletme aşınma oranlarının daha yüksek sıcaklıklara bekletilmesine göre belirgin derecede düşük olduğu gözlemlenmektedir (Babu et al., 2005). Şekil 3.2’de M1, H13 ve En 19 çeliklerinde işlem sıcaklığına bağlı aşınma oranlarındaki artış gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Kriyojenik işlem sıcaklığının H13, M1, ve En 19 çelikleri üzerindeki aşınma direncine etkisi (Babu et al., 2005).

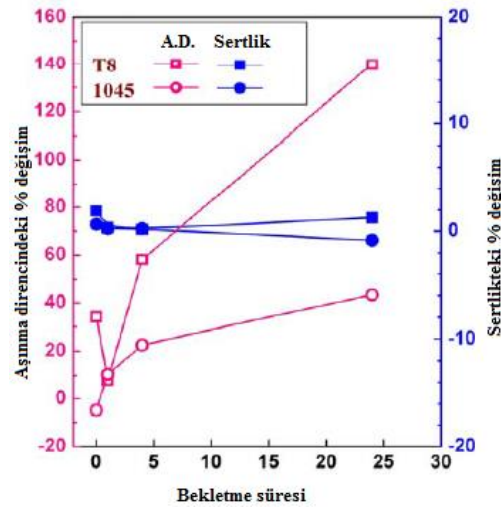
Kriyojenik işlem sıcaklığı, malzemelerin aşınma dayanımına etkisi olduğu gibi sertliklerinde de değişikliklere sebep olmaktadır (Moore and Collins 1993). Şekil 3.3'te Vanadis, D2 ve H13 takım çeliklerinde işlem sıcaklığına bağlı sertliklerindeki değişimler gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Kriyojenik işlem sıcaklığının iki farklı bekleme süresinde Vanadis, D2 ve H13 çeliklerinin sertliğine etkisi (Moore and Collins 1993).

3.2.2 Bekletme süresinin etkisi

Bekletme süresi kriyojenik işlemin malzeme özelliklerine olan etkisini en fazla etkileyen faktörlerden bir tanesidir. Genellikle uzun bekletme süreleri (24 – 36 saat) tavsiye edilmekle beraber malzeme cinsine göre değişen saatlerde bekletme süreleri mevcuttur. İstenilen sıcaklıkta bekletme süresi malzeme içi faz dönüşümlerinin ve atomsal hareketlerin tamamlanmasını sağlamaktadır (Das, 2011). Şekil 3.4'te bekletme sürelerinin T-8 ve 1045 çeliklerinde aşınma oranı ve sertliklerine etkisi gösterilmiştir.



Şekil 3.4. T-8 ve 1045 çeliklerinin -196 °C 'de bekletme süreleri ile % değişen aşınma direnci ve % sertlik farklılıkları (Barron and Mulhern, 1980).

Kriyojenik işlemde malzemeleri belirlenen düşük sıcaklıklarda bekletme süresi malzeme mekanik özelliklerinde değişimlere sebep olmaktadır. Tokluk, sertlik, aşınma direnci, çekme mukavemeti vb. istenilen mekanik özelliklerde bekletme süresinin artışı ile genellikle olumlu etkiler görülmektedir. Çizelge 3.1'de bilim literatürde yapılan çalışmalar sonucu ortaya çıkan, derin kriyojenik işlemde bekletme süreleri ile malzemelerin mekanik özellikleri arasındaki ilişkiler verilmiştir.

Çizelge 3.1. Derin kriyojenik işlemden bekletme sürelerinin malzemelerin mekanik özelliklerine etkisi.

Malzeme	Bekletme süresi (saat)	Sıcaklık (°C)	Etkisi	Referans
AISI M2 ve D3 çeliği	6 ve 24	-180	24 saat bekletme süresinde 6 saate göre aşınma direnci ve kullanım ömrü artışı sağlanmıştır.	(Lal et al., 2001)
AISI A2 çeliği	0,5 ve 24 saat	-196	24 saat bekletme süresinde 0,5 saate göre tokluk, sertlik ve aşınma direncinde orantılı artış sağlanmıştır.	(Zurecki, 2006)
AISI M2 ve T1 çeliği	24 ve 48 saat	-196	48 saat bekletme süresinde 24 saate göre sertlik, eğilme mukavemeti ve tokluğunda artış sağlanmıştır.	(Yun et al., 1998)
AISI D2 çeliği	0,17'den 24 saate	-180	Bekletme süresi uzadıkça aşınma direnci azalarak artmıştır.	(Wang, 2006)
AISI 302 paslanmaz çelik	9 ve 24	-185	Her iki bekletme süresi için sertlik, çekme mukavemeti, yorulma direnci ve korozyon direncinde herhangi bir değişim olmamıştır.	(Baldissera, 2010)
Karbürize edilmiş En 31 çeliği	1 ve 24	-185	24 saat bekletme süresinde 1 saate göre Young modülü ve çekme mukavemeti artmıştır.	(Baldissera, 2010)
100Cr6 çeliği	24 ve 100	-196	Her iki bekletme süresi için sertlik ve yorulma direncinde herhangi bir değişim olmamıştır.	(Kerschler and Lang, 2010)
AISI T42 çeliği	8, 16 ve 24	-185	8 saat bekletme süresinde aşınma direnci yükselmiş, diğer bekletme sürelerinde ise düşmüştür.	(Gogte et al., 2009)

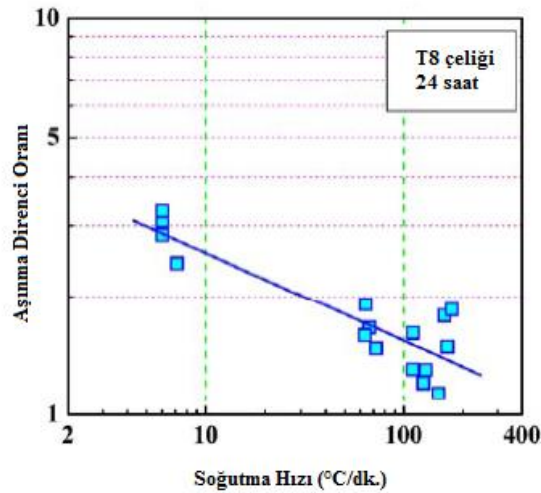
3.2.3 Soğutma ve ısıtma hızının etkisi

Soğutma ve ısıtma hızının kontrolü kriyojenik işlemin başarılı olabilmesi için çok kritik bir konudur. Kriyojenik işlem cihazları, malzemelerin oda sıcaklığından istenilen sıcaklığa düşüşünü belirli hızlarla sağlayabildiği gibi sıcaklığı tekrar oda sıcaklığına çıkarabilmektedir (Levine 2002).

1960'lı yılların ortalarında kriyojenik işlem sıvı azot banyolarında malzemelerin banyoya direkt daldırılması ile gerçekleşmekteydi. Daldırma sonucunda -196°C ile direkt temas eden malzemelerde çatlaklara yol açabilecek termal ve yapısal gerilmeler meydana gelmektedir (Parrish, 1994)

Sonuç olarak yapılan çalışmalarla soğutma ve ısıtma hızının $1-2^{\circ}\text{C/dk.}$ olabileceği vurgulanmıştır (Baldisseara and Delprete 2008).

Şekil 3.5'te T8 çeliğine uygulanan 24 saat süreli kriyojenik işlem sonucu soğutma hızıyla aşınma direncindeki değişim gösterilmiştir.



Şekil 3.5. 24 saat bekletme süreli kriyojenik işlemde T8 çeliği için soğutma hızının aşınma direncine etkisi (Barron and Mulhern, 1980)

3.3 Kriyojenik İşlemin Etkileri

Kriyojenik işlem geniş bir malzeme yelpazesinde iyi sonuçlar verebilmektedir. Uygulandığı malzemelere bağlı olarak değişmekle birlikte genellikle kriyojenik işlemle özellikle yüksek aşınma dayanımları elde etmek mümkündür (Çiçek, vd., 2011)

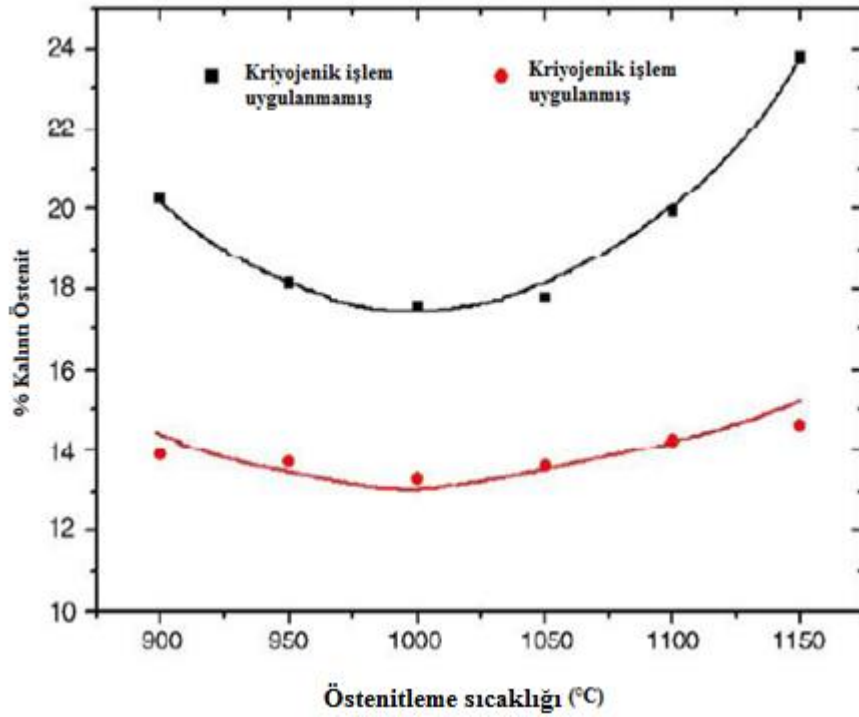
3.3.1 Mikroyapıya etkisi

Kriyojenik işlem üzerine yapılan çalışmalarda, işlemin farklı malzemelerin mikroyapıları üzerinde üç adet değişiklik yaptığı görülmüştür:

- Kalıntı östenit fazını martenzite dönüştürmesi (Paulin, 1993)
- Yeni karbürler oluşturma ve karbür dağılımını homojenleştirilmesi, (Baldisseara and Delprete, 2008)
- Tane yapısını inceltmesidir (Zhisheng, 2003).

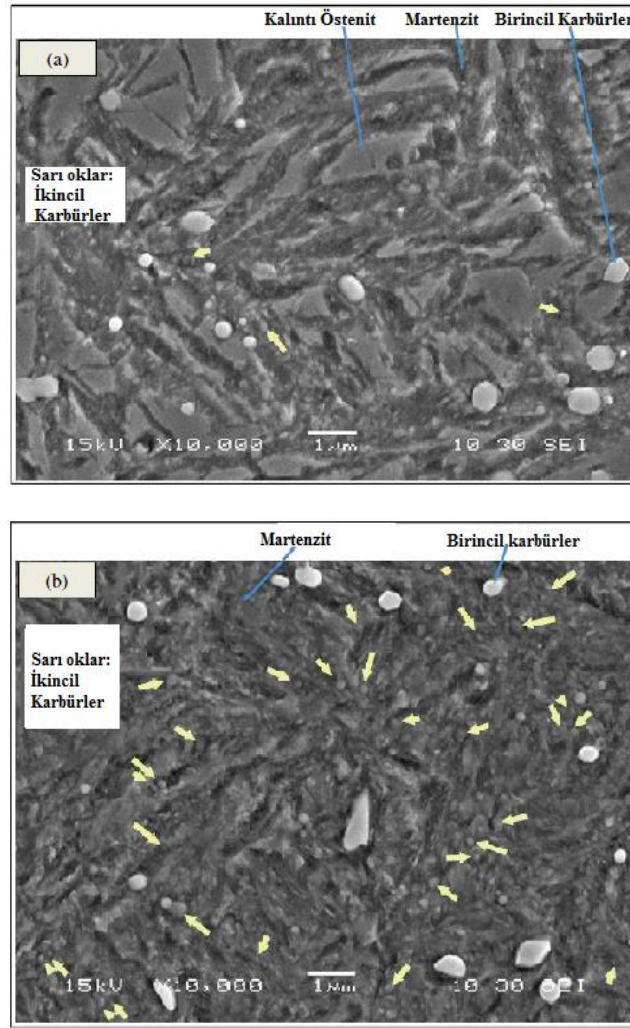
Östenit fazı, yüksek sıcaklıklarda oluşan, yüzey merkezli kübik kristal yapısına sahip demirin bir fazıdır. Çelik, yüksek sıcaklıklardan hızlı soğutulduğu durumlarda yapıda dönüşmeden kalan östenit “kalıntı östenit” olarak tanımlanmaktadır. Östenit fazı martenzite göre daha sünek ve düşük çekme mukavemetine sahiptir (Askeland, 1994). Kriyojenik işlem sonucunda ise kalıntı östenit daha sert ve mukavemetli faz olan martenzite dönüşmektedir. Farklı malzemelerde farklı miktarlarda dönüşümler görülürken, örneğin En 353 çeliğinde %28 olan kalıntı östenit miktarı %14 civarlarına düşmektedir (Bensely et al., 2008).

Kriyojenik işlem süresince düşük sıcaklıklarda malzeme içyapısını etkileyen yüksek miktarlarda çekme kuvvetleri oluşmaktadır. Bu çekme kuvveti neticesinde gerilmeler meydana gelerek kalıntı östenit fazından martenzit oluşumu sağlanmaktadır (Mukherjee, 1985). Şekil 3.6’da yüksek krom alaşımlı dökme demirde farklı östenitleme sıcaklıklarında kalıntı östenit miktarlarının kriyojenik işlemle değişimi gösterilmiştir.



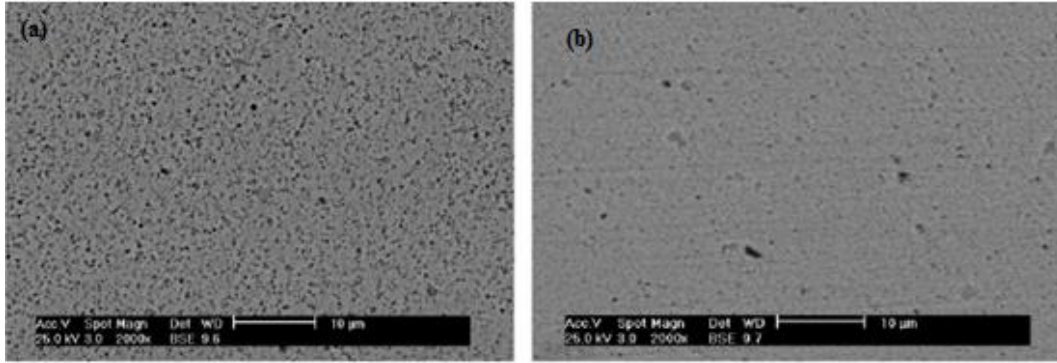
Şekil 3.6. Yüksek kromlu beyaz dökme demirde östenitleme sıcaklığı ile değişen kalıntı östenit miktarının kriyojenik işlemlerle değişimi (Yang et al., 2006)

Kriyojenik işlem, özellikle takım çeliklerinde, kalıntı östeniti martenzite dönüştürmesi ile birlikte karbürün matris içerisinde homojen dağılımını ve yeni ince karbür oluşumları sağlamaktadır. Düşük sıcaklıklarda, kafes içerisinde bulunan karbür yapıcı alaşım elementleri, çekme gerilmelerinin oluşumu ile kafesten dışarı çıkarak yeni karbürler oluşturmaktadır. Bu karbür taneleri yapıda bulunan birincil karbürlerden çok daha küçüktür. M2 çeliğine uygulanan kriyojenik işlem neticesinde, 1 mm^2 'deki karbür miktarı 31358,17'den 83529,73'e yükselmiştir (Paulin, 1993). Şekil 3.7'de A2 çeliğinin mikroyapısında kriyojenik işlem sonrası karbür dağılımı gösterilmiştir.



Şekil 3.7. A2 çeliğinin SEM görüntüsü, a) yağda su verilmiş ve temperlenmiş numune, b) kriyojenik işlem uygulanmış numune (Zurecki, 2006).

Kriyojenik işlem takım çeliklerinde kalıntı östeniti martenzite dönüştürmekte, yeni karbür tanelerinin oluşumunu sağlamaktadır. Takım çeliklerinden farklı olarak kriyojenik işlem demir ve demir dışı alaşımlarda mikroyapıda tane boyutunun küçülmesine sebep olmaktadır. Cu-Cr-Zr alaşımında tane boyutu birim alanda 159,7 nm ‘den 82,9 nm’ye düşmüştür. Ayrıca mikro boşluklar büyük oranda ortadan kaldırılarak daha yoğun bir hacim elde edilmiştir (Zhisheng et al., 2003). Şekil 3.8’de Cu-Cr-Zr alaşımının kriyojenik işlem öncesi ve sonrası SEM analizi sonucu mikroyapıları gösterilmiştir.



Şekil 3.8. SEM mikroyapı analizi Cu-Cr-Zr mikroyapısı, a) kriyojenik işlem öncesi, b) kriyojenik işlem sonrası (Zhisheng et al., 2003).

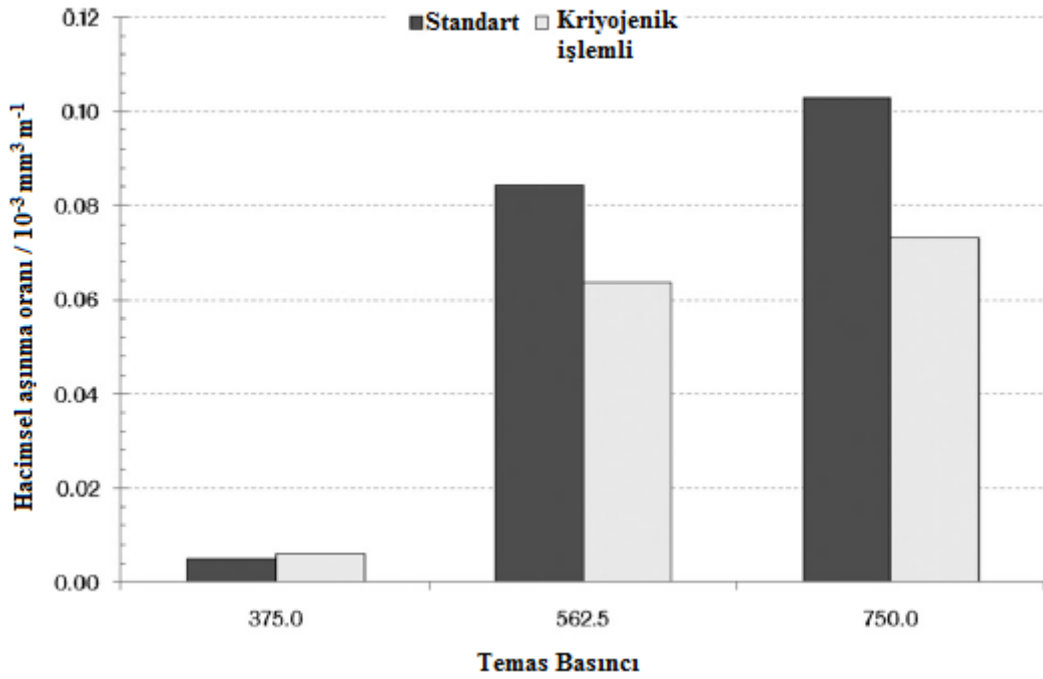
3.3.2 Mekanik özelliklere etkisi

Kriyojenik işlemin malzemenin mekanik özelliklerine en önemli etkisi aşınma direncinde meydana gelmektedir. Özellikle takım çeliklerinde meydana getirdiği %800'lere varan aşınma direncindeki iyileşme göze çarpmaktadır. Çalışmalar göstermektedir ki; kriyojenik işlem sonucu yapıdaki kalıntı östenitin martenzite dönüşmesi ve yeni karbürlerin oluşumu ile birlikte homojen dağılması aşınma direncindeki iyileşmelere yol açmaktadır (Patil and Tated, 2012). Çizelge 3.2'de kriyojenik işlemin bazı malzemelerde meydana getirdiği aşınma dirençlerindeki artışlar gösterilmiştir.

Çizelge 3.2. Kriyojenik işlemin aşınma direncine etkisi (Patil and Tated, 2012).

AISI	-79 °C’de % iyileşme	-196 °C’de % iyileşme
D2	316	817
S7	241	503
52100	195	420
O1	221	418
A10	230	264
M1	145	225
H13	164	209
M2	117	203
T1	141	176
CPM10V	94	131
P20	123	130
440	128	121
430	116	119
303	105	110
8620	112	104
C1020	97	98
AQS	96	97
T2	72	92

Şekil 3.9’da da kriyojenik işlemin lamel grafitli dökme demirde meydana getirdiği aşınma direncindeki artış gösterilmiştir.



Şekil 3.9. Lamel grafitli dökme demirde temas basıncına göre kriyojenik işlem sonrası aşınma oranlarındaki değişim (Thornton et al., 2011)

Kriyojenik işlemin bir başka etkisi malzemenin sertliği üzerindedir. Yapılan çalışmalarda Vickers, Rockwell ve Brinell cinsinden sertlikler ölçülmüştür. Kriyojenik işlem sonrası sertlik değerlerinde önemli artışlar gözlemlenmemiştir. Önemsiz derecede sayılabilecek sertlik artışları kalıntı östenit miktarının azalmasına ve yeni karbürlerin çökmesine bağlanmıştır (Baldisseara and Delprete 2008). Çizelge 3.3'te bazı malzemelerde kriyojenik işlem sonrası sertlik artışları gösterilmiştir.

Çizelge 3.3. Bazı malzemelerde kriyojenik işlemin sertlik üzerine etkisi (Baldisseara and Delprete 2008).

Malzeme	Sertlikteki maksimum artış %
AISI M2	5,26 HRC
AISI H13	6,9 HRC
AISI T1	2,8 HRC
En 353	3,48 HV
En36A	17 HV
Karbürize Çelik	17 HV
AISI 4140	Herhangi bir değişiklik olmamıştır
AISI 4340	2,5 HRC
13Cr2Mn2V	3,2 HRC
3Cr13Mo1V1.5	5,5 HRC
AISI 304L	18,8 HV
Cr-Zr-Cu alaşımı	3,13 HB

Kriyojenik işlem bakır alaşımlarında termal iletkenliği yüksek sıcaklıklarda artırmaktadır. GRCop-84 üzerinde (%8 Cr, %4 Nb) yapılan çalışmada kriyojenik işlem sonrası malzemenin yüksek sıcaklıklarda termal iletkenliği yaklaşık 20 W/mK artış göstermiştir (Isaak and Reitz, 2007)

Kriyojenik işlemin bir diğer olumlu etkisi çekme mukavemeti üzerindedir. Yapılan birkaç araştırmada sertlik ve aşınma dayanımının yanında çekme mukavemetinin de değişimi gözlemlenmiştir. AISI 4140 paslanmaz çelikte %16 oranında bir iyileşme gözlenirken, M2 çeliğinde %30 'lara varan iyileşme oranları yakalanmıştır (Das, 2011)

3.4 Kriyojenik İşlemin Uygulama Alanları

Kriyojenik işleminin kompozit malzemelerden takım çeliklerine, dökme demirlere, demir dışı alaşımlara kadar pek çok kullanım alanı mevcuttur. Özellikle

aşınma ortamlarında çalışan parçalarda yüksek malzeme performansları elde edilmektedir (Das, 2011). Çizelge 3.4'te bazı malzemelerin çalıştıkları ortamlarda kriyojenik işlemle gelişen servis ömürleri gösterilmiştir.

Çizelge 3.4. Kriyojenik işlem sonucu bazı malzemelerdeki servis ömrü artışı (Reitz and Pendray, 2001).

İşlem / Kullanıldığı Yer	Malzeme	Malzeme Ömründeki Artış
Delme (zımba)	M42, M7	%300
Freze ucu	M7	%250
Ahşap kesim testeresi	Yüksek hız takım çelikleri	%500
Delme (matkap ucu)	M2,M7	%600
Pres kalıbı	A9	%350
Diş açma	M2, M7	%300
Pres Kalıbı	D2	%1000
Kesici uç	Karbür	%500

Kriyojenik işlemin ağırlıklı kullanımı takım çelikleri üzerinde olmasına karşın yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde, fren diski, motor blokları gibi aşınmaya maruz kalan dökme demir parçalarında, kaynak elektrotlarında, özellikle WC-Co gibi karbürlü kompozit malzemelerde de kullanımı mevcuttur (Patil and Tated, 2012).

BÖLÜM 4

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1 Deneyisel Malzemeler

Deneylerde, DEMİSAŞ firmasının debriyaj baskı plaka malzemesi amacıyla kullanılmak üzere ürettiği endüstriyel uygulaması olan ve spektral analizi çizelge 4.1’de verilmiş vermiküler grafitli dökme demir (CGI300) kullanılmıştır.

Çizelge 4.1. Vermiküler grafitli dökme demirin kimyasal bileşimi

Element	Fe	C	Si	Mn	S	Mg	Cu	Sn	Cr	Al	P
% ağırlık	93,044	3,54	2,50	0,41	0,012	0,010	0,41	0,040	0,02	0,003	0,011

Kriyojenik işlemden kullanılacak numuneler döküm sonrası, Şekil 4.1’de gösterilen aşınma deneyi için gerekli boyutlarda Şekil 4.2’de gösterilen Struers Discotom-5 kesme cihazında saniyede 0,4 mm hızla, kesilerek hazırlanmıştır.



Şekil 4.1. Kesilen vermiküler grafitli dökme demir numuneler



Şekil 4.2.Struers Discotom-5 kesme cihazı.

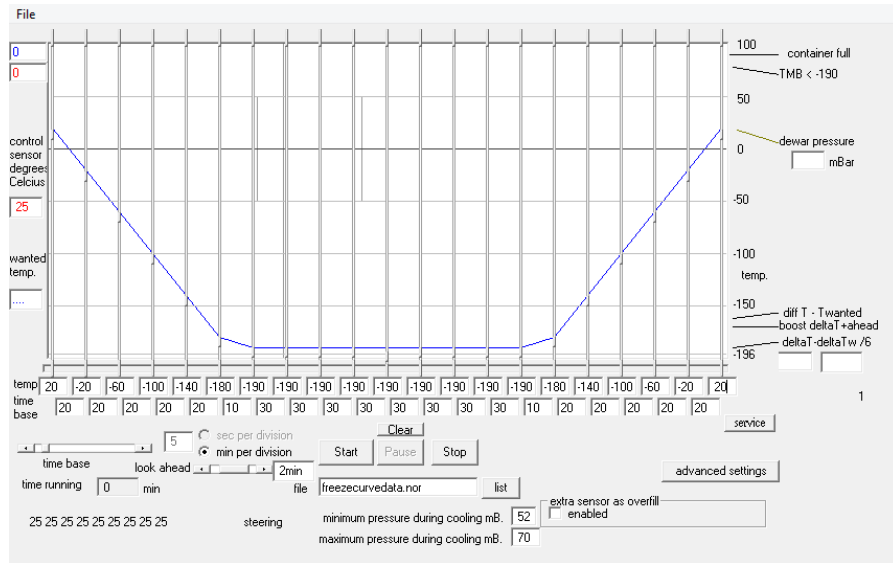
4.2 Kriyojenik İşlemler

Kesilerek alınan 15 numuneden 12'si kriyojenik işlem yapılmak üzere 4 gruba ayrılmıştır. Ayrılan numunelerden 3'er adeti 4, 12, 24, 36 saat olmak üzere farklı sürelerde kriyojenik işleme tabi tutulmuştur. Kriyojenik işlemler MMD Makine ve Malzeme Teknolojileri ArGe Danışmanlık Mühendislik Hizmetleri San. Ve Tic. Ltd. Şti.'nin şekil 4.3'te gösterilen "Cryo Üretim" isimli cihazında gerçekleştirilmiştir. Cihaz iç hacmi 80 lt olup -196 °C sıcaklığa ulaşabilmektedir.

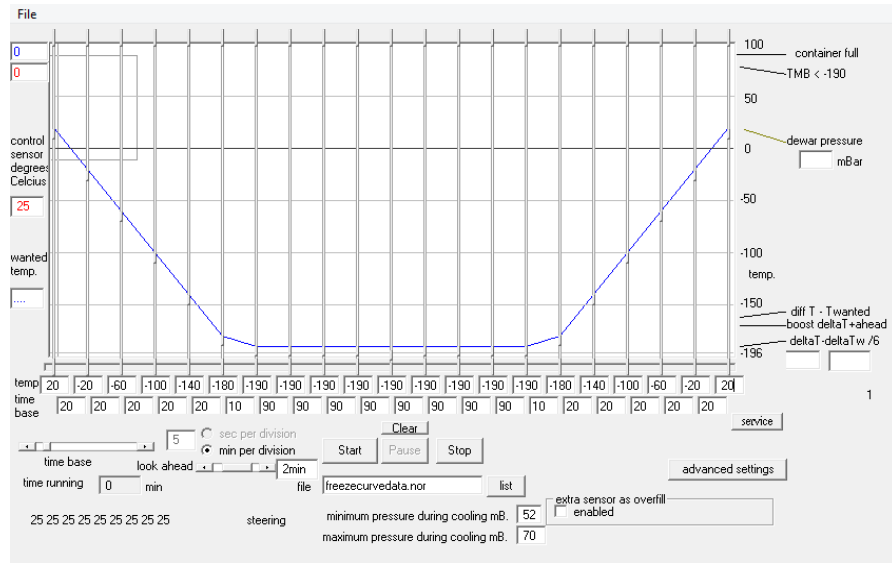


Şekil 4.3. “Cryo Üretim” kriyojenik işlem cihazı.

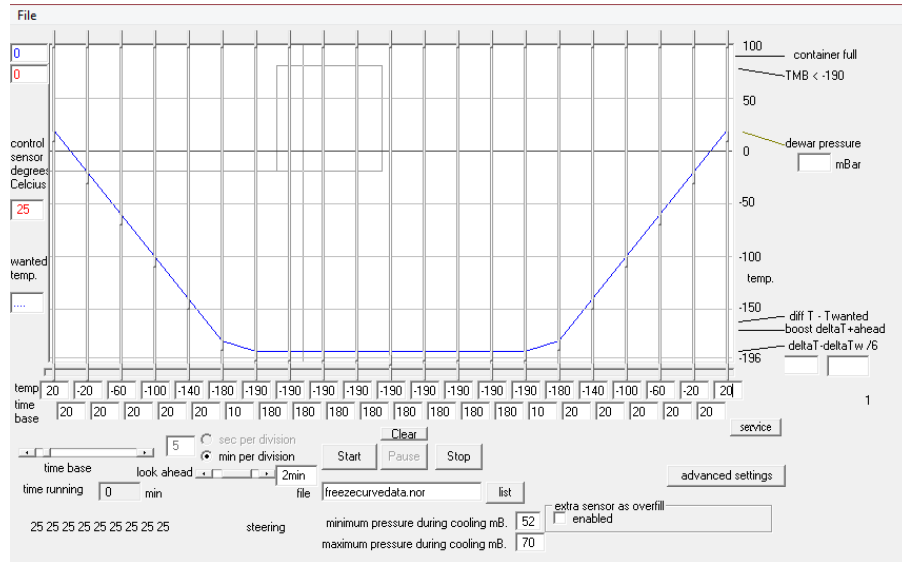
Kriyojenik işlemler, dakikada 2 °C soğutma hızıyla inilen -196 °C sıcaklıkta farklı sürelerde bekletilerek uygulanmıştır. Bu sıcaklıklara soğutmada kullanılan sıvı azotun gönderilmesi ise, sıvı azot dozajlama sistemi ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.4-7’de kriyojenik işlem sıcaklık eğrilerinin program arayüzleri gösterilmektedir.



Şekil 4.4. 4 saat kriyojenik işlem sıcaklık eğrisi program arayüzü



Şekil 4.5. 12 saat kriyojenik işlem sıcaklık eğrisi program arayüzü



Şekil 4.6. 24 saat kriyojenik işlem sıcaklık eğrisi program arayüzü



Şekil 4.8. Nikon Eclipse L150 optik mikroskop

SEM incelemelerinde ise Şekil 4.9’da gösterilen JEOL JSM - 5600LV marka mikroskop kullanılmıştır.



Şekil 4.9. JEOL JSM – 5600LV marka taramalı elektron mikroskobu

Numuneler, mikroyapı incelemeleri öncesi Şekil 4.10'da gösterilen Struers CitoPress-1 cihazında kalıplanarak ve Şekil 4.11'de gösterilen Struers Tegra Pol-21 marka cihazda MD Piano 200 zımpara, MD Allegro ve MD/NP Dap parlatma diskleri kullanılarak metalografik olarak hazırlanmıştır.



Şekil 4.10. Struers CitoPress-1 kalıplama cihazı

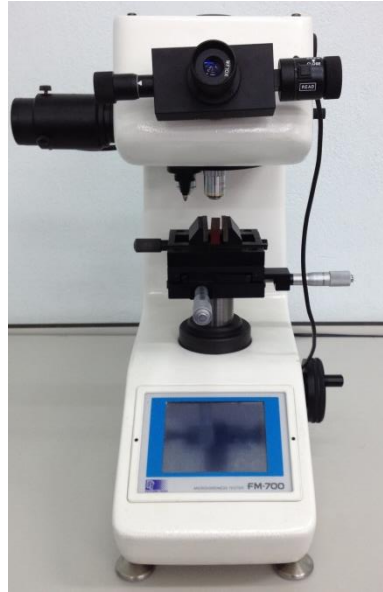


Şekil 4.11. Struers Tegra Pol-21 zımparalama ve parlatma cihazı

Parlatma işleminden sonra numuneler optik mikroskop ve SEM mikroyapı incelemeleri için pikral ile dağlanarak hazırlanmıştır.

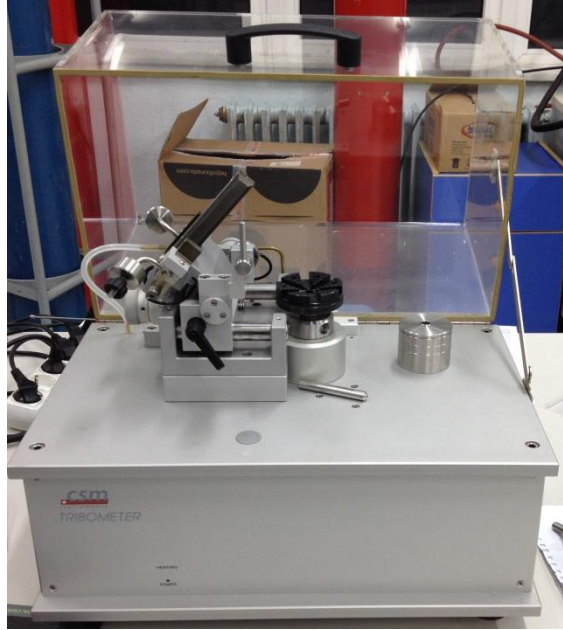
4.4 Sertlik ve Aşınma Deneyleri

Numunelerin makrosertlikleri Zwick marka sertlik cihazında 100 kg toplam yük kullanılarak Rockwell B cinsinde belirlenmiştir. Mikrosertlik ölçümleri, Şekil 4.12’de gösterilen Future Tech FM-700 mikrosertlik test cihazı ile 100 g yükün 10 saniye uygulanması suretiyle gerçekleştirilmiştir. Sertlik değerleri 5 farklı ölçümün ortalaması alınarak belirlenmiştir.



Şekil 4.12. Future Tech FM-700 mikrosertlik cihazı

Aşınma deneyleri Şekil 4.13’te verilen CSM marka test cihazında ball-on-disc metoduyla yapılmıştır. Yüzeyi parlatılmış numuneler, numune tutucu aparatın içerisine sabitlenmiş, aşındırıcı cisim olarak çapı 3 mm WC bilya kullanılmıştır.



Şekil 4.13. CSM marka aşınma test cihazı

Aşınma deneyleri, kuru koşullarda 5 N ve 10 N yük altında, 2,5 mm yarıçapta, 100 m mesafe ve 10 cm/s kayma hızı parametreleri ile gerçekleştirilmiştir. Aşınma deneylerinin ardından numunelerin yüzey profilleri Şekil 4.14'te verilen Multitoyo SJ-400 cihazında ölçülerek OriginPro programında aşınma kesit alanları hesaplanmıştır. Hesaplanan aşınma kesit alanlarından da özgül aşınma oranı değerlerine geçilmiştir.



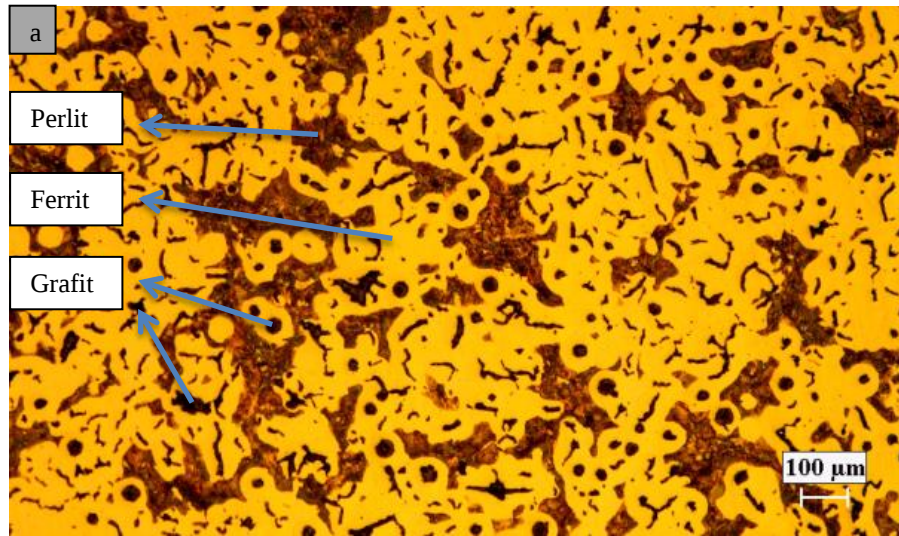
Şekil 4.14. Multitoyo SJ-400 yüzey profili ölçüm cihazı

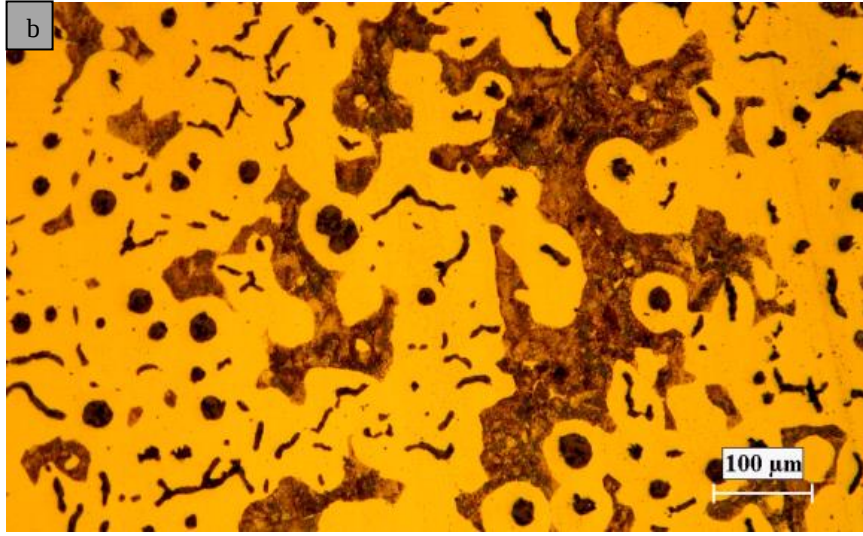
BÖLÜM 5

DENEYSEL SONUÇLAR

5.1 Mikroyapı

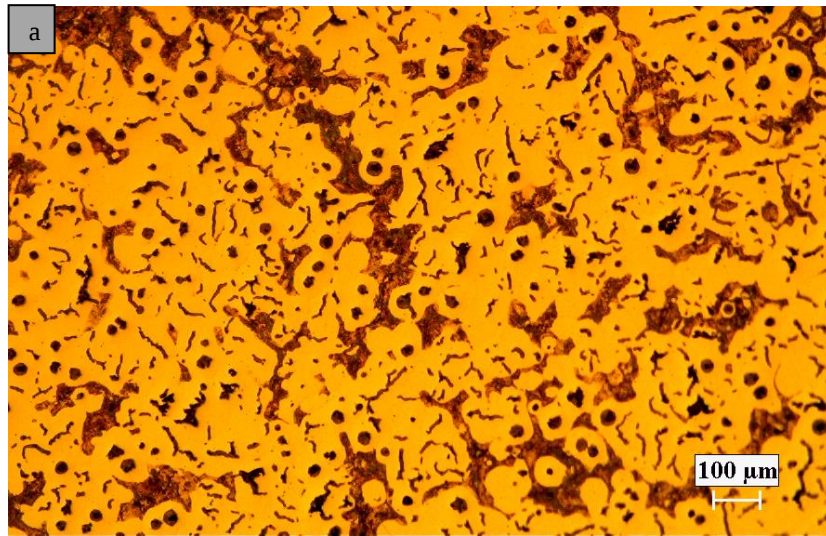
Vermiküler grafitli dökme demirin döküm durumunun optik mikroskopta incelenen mikroyapısı Şekil 5.1’de gösterilmektedir. Vermiküler grafitli dökme demir Fe-C faz diyagramında ötektikaltı bileşimindedir ve mikroyapısı da bu bileşimdeki malzemenin görüntüsünü yansıtmaktadır. Mikroyapı, vermiküler morfolojisinde grafitlerin yanı sıra ferrit ve perlit fazlarını da içermektedir.

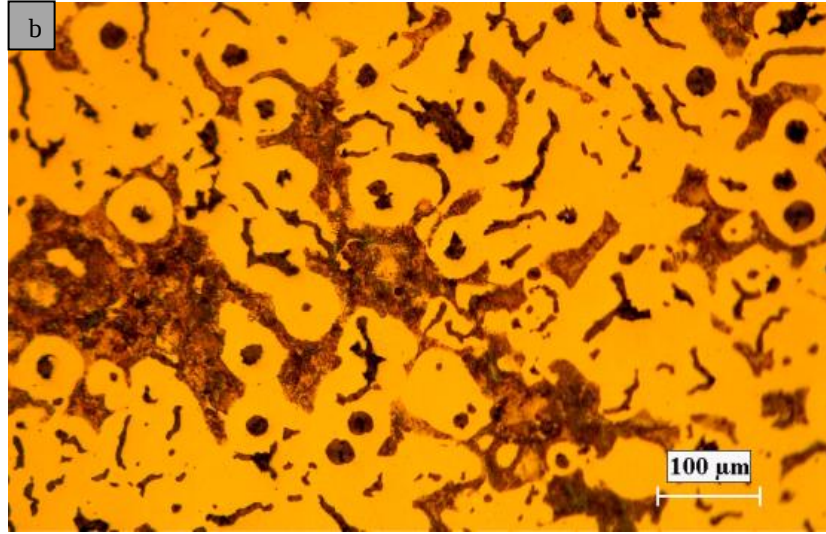




Şekil 5.1. Vermiküler grafitli dökme demirin döküm durumunun mikroyapı görüntüleri, a) 50x, b)100x.

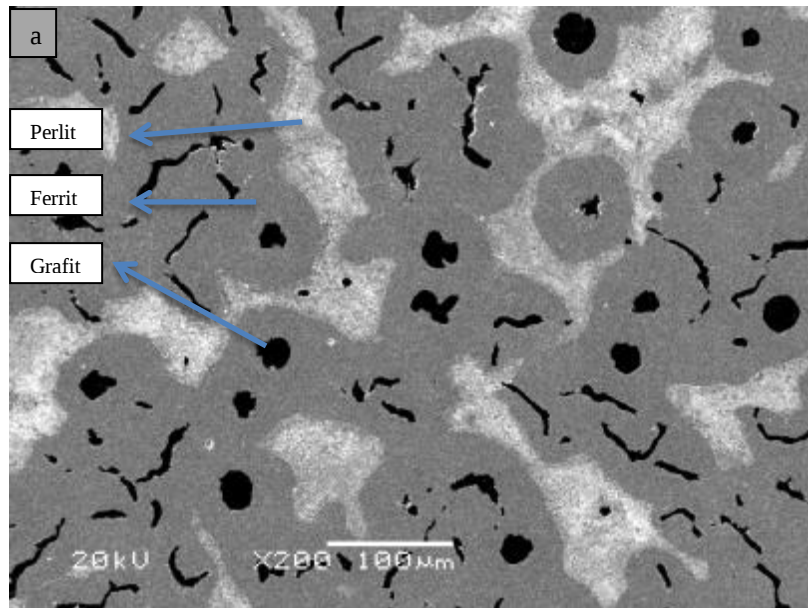
Kriyojenik işlem sonrası vermiküler grafitli dökme demirin Şekil 5.2’de gösterilen optik mikroskopta incelenen mikroyapısında grafit morfolojisinde, perlit ve ferrit fazlarında herhangi bir değişim gözlemlenmemiştir.

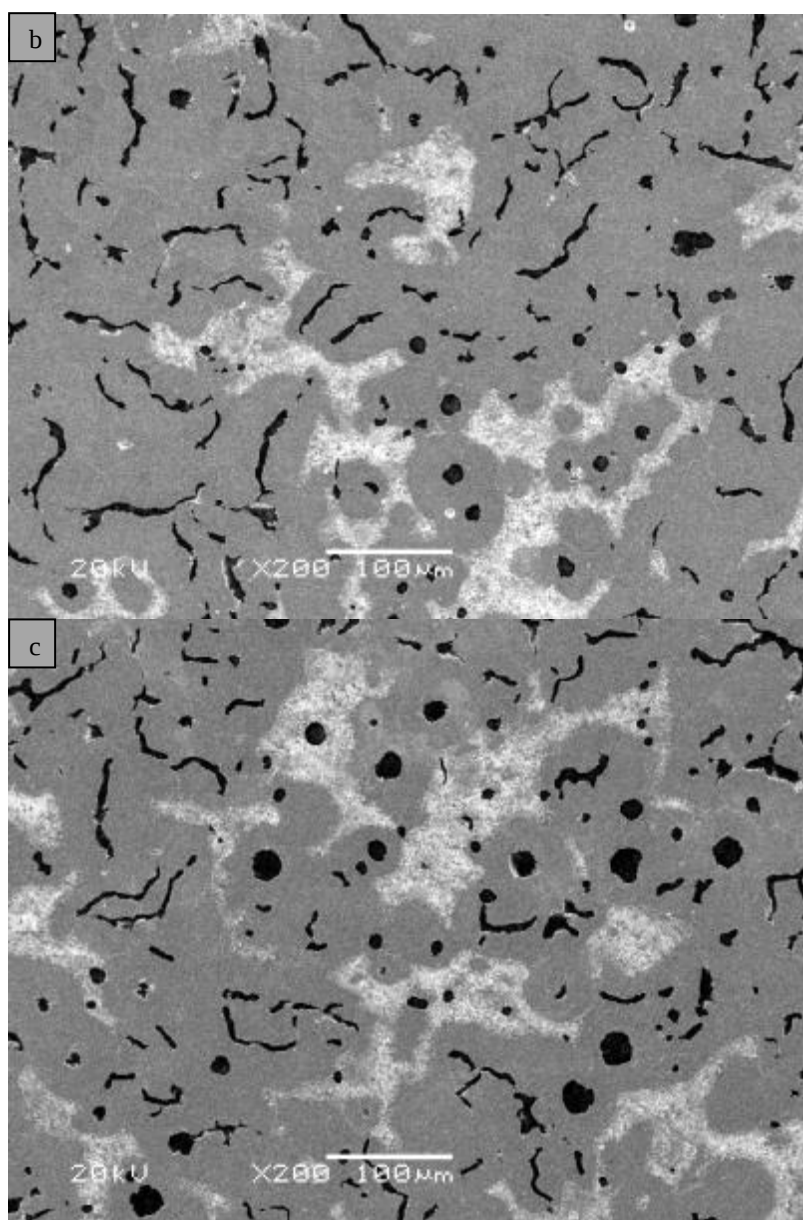


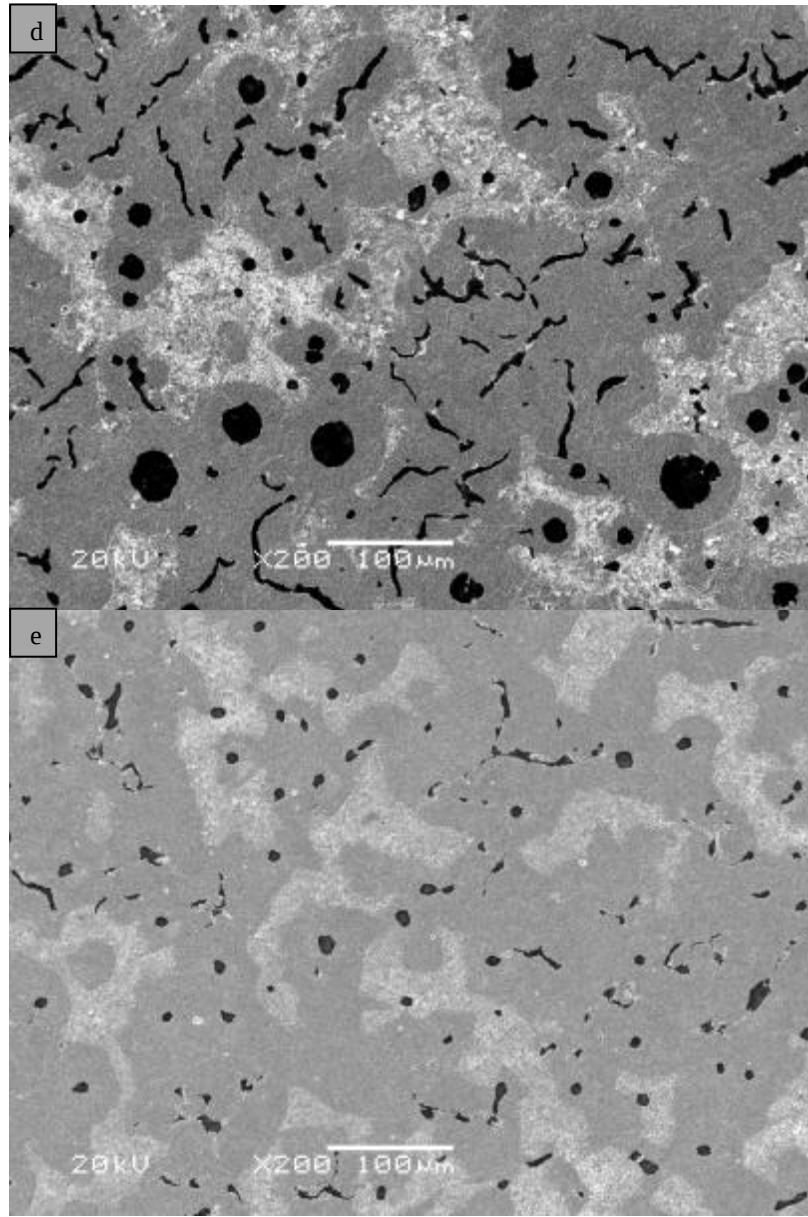


Şekil 5.2. 24 saat kriyojenik işlem uygulanmış vermiküler grafitli dökme demirin mikroyapı görüntüleri, a)50x, b)100x.

Ayrıca şekil 5.3'te gösterilen SEM mikroyapı analizinde, 4, 12, 24, 36 saat kriyojenik işlem uygulanmış numuneler ile orijinal numune arasında 200x büyütmede grafit ve fazlarda herhangi bir değişim görülmemektedir.



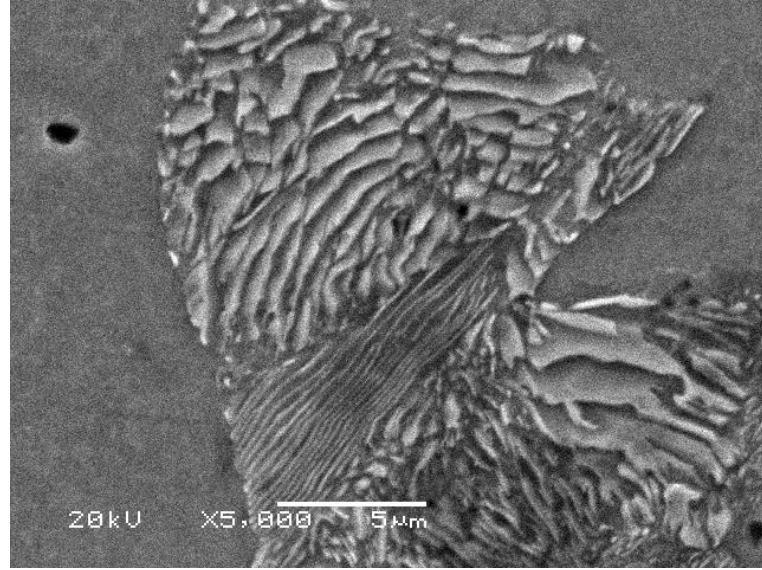




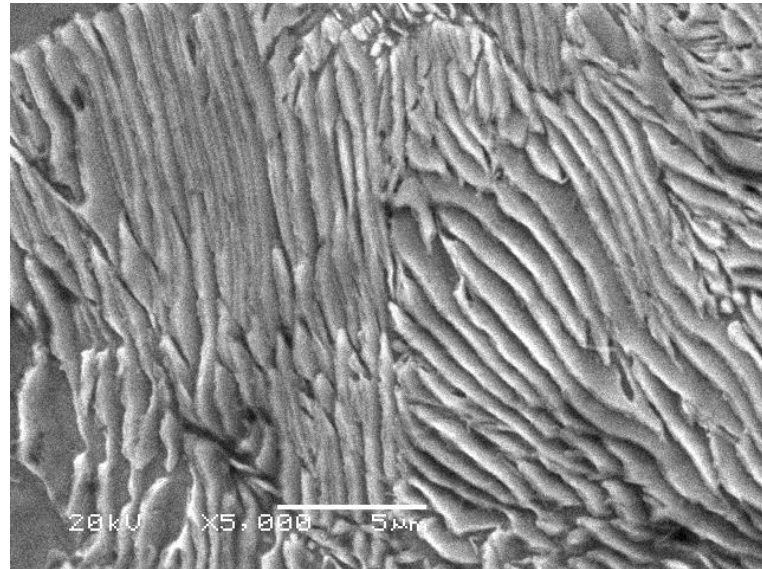
Şekil 5.3. Vermiküler grafitli dökme demirin 200 büyütmede SEM mikroyapıları, a) orijinal numune, b) 4 saat kriyojenik işlem uygulanmış numune, c) 12 saat kriyojenik işlem uygulanmış numune, d) 24 saat kriyojenik işlem uygulanmış numune, e) 36 saat kriyojenik işlem uygulanmış numune

4, 12, 24, 36 saat kriyojenik işlem uygulanmış numuneler ile orijinal numunenin SEM mikroyapı analizi 5000x büyütmede perlit fazları incelendiğinde; orijinal numunenin perlit fazının lameller arası mesafesi heterojen olarak dağılmış ve daha kaba perlit yapısının olduğu görülmektedir. Bununla birlikte kriyojenik işlem uygulanmış numunelerin perlit fazlarındaki lameller arası mesafenin azaldığı ve homojen boyutlarda

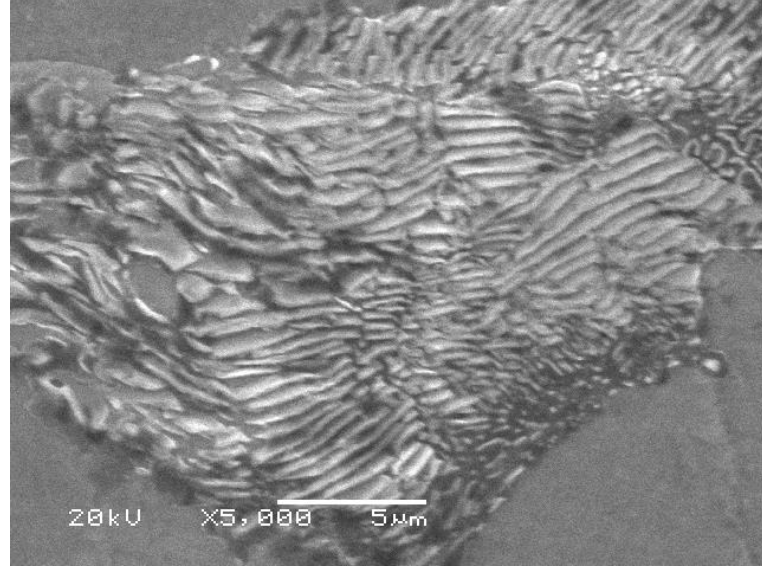
ince perlit fazının oluştuğu görülmektedir. şekil 5.4'te orijinal, şekil 5.5-8'de 4, 12, 24, 36 saat kriyojenik işlem uygulanmış numunelerin SEM ile çekilen 5000x büyütmede mikroyapı görüntüleri verilmiştir.



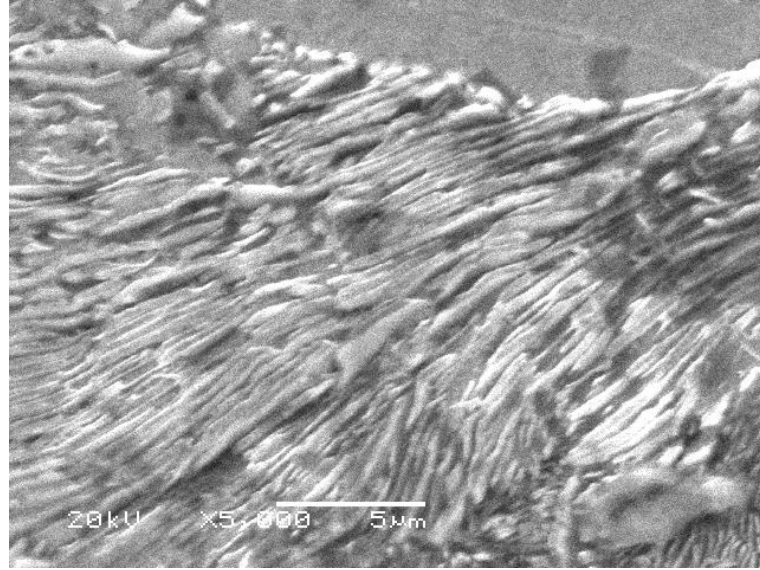
şekil 5.4. Orijinal numune SEM mikroyapı



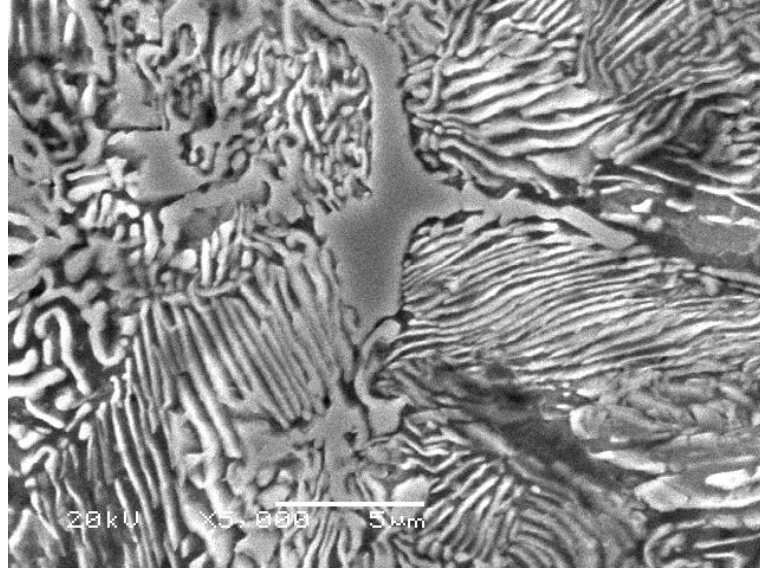
şekil 5.5. 4 saat kriyojenik işlem uygulanmış numune SEM mikroyapı



Şekil 5.6. 12 saat kriyojenik işlem uygulanmış numune SEM mikroyapı



Şekil 5.7. 24 saat kriyojenik işlem uygulanmış numune SEM mikroyapı



Şekil 5.8. 36 saat kriyojenik işlem uygulanmış numune SEM mikroyapı

Çizelge 5.1’de görüldüğü üzere, 5 μm mesafede ortalama lamel sayısı ölçümü ile kriyojenik işlemle perlit fazında ortalama lameller arası mesafenin azaldığı anlaşılmıştır. 15 μm ’lik skala hazırlanarak 10 adet ölçümün ortalaması hesaplanmıştır. Lameller arası en az mesafe 24 saatlik kriyojenik işlemle elde edilirken en fazla mesafe 4 saatlik kriyojenik işlemle elde edilmiştir.

Çizelge 5.1. Orijinal numune ve 4, 12, 24, 36 saat kriyojenik işlem uygulanmış numunelerin perlit fazlarında 5 μm ‘de sayılan ortalama lamel sayısı

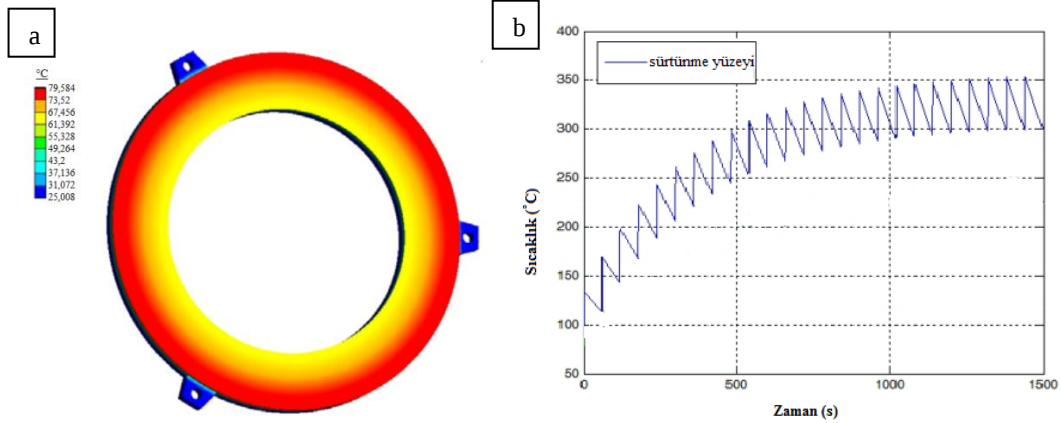
Numune	5 μm ‘deki ortalama lamel sayısı
Orijinal	5,7
4 saat	7,6
12 saat	10,2
24 saat	11,1
36 saat	8,6

Perlit fazında lameller arası mesafenin yüksek olduğu durumlarda bu faza kaba perlit lameller arası mesafenin düşük olduğu durumlarda bu faza ince perlit denilmektedir. Perlite fazında lameller arası mesafe ortalama 0,6-0,7 μm iken sorbitte 0,25 μm ve trostitte 0,1 μm 'dir. Perlite fazı içeren çelikler ve dökme demirlerde östenitleme sıcaklığından soğutma işleminde soğuma hızının artışı ile lameller arası mesafe azalarak kaba perlitten ince perlite geçiş görülmektedir (Bramfitt, 1994, Atkins, 1980) Ayrıca su verilmiş çelikler belirli sıcaklıklarda temperlendiği zaman lameller arası mesafe azalmaktadır (ASM Handbook V:9). Literatürdeki bu çalışmalar göstermektedir ki perlit fazında lameller arası mesafe östenitleme, su verme ve temperleme ile ilişkilidir. Elde edilen sonuçlardan kriyojenik işlemin de vermiküler grafitli dökme demirde lameller arası mesafeyi azalttığı düşünülmektedir.

Kriyojenik işlemin mikroyapı üzerindeki etkileri günümüzde hala bir tartışma konusudur. Farklı bilim adamları farklı teorilerle bu konuya açıklık kazandırmaya çalışmışlardır. Özellikle takım çeliklerinin mikroyapısında meydana getirdiği değişimler üzerinde büyük ölçüde uzlaşma sağlanılsa da dökme demirlerde ve demir dışı metallerde meydana getirdiği değişim ve bu değişimin mekanizması tam olarak bilinmemektedir. Lamel grafitli dökme demirler üzerinde yapılan sadece bir çalışma mevcuttur. Bu çalışmada kriyojenik işlemle birlikte aşınma direncinin artışı tespit edilmiş fakat mikroyapı ve mekanizmasının anlaşılamadığı belirtilmiştir (Thornton et al., 2011). Kriyojenik işlemin takım çeliklerinin mikroyapısında oluşturduğu etkileri konu alan bir çalışmada atomsal düzeyde inceleme yapılmıştır. Çeliklerde HMK yapısında karbon, arayer atomları olarak kafes içerisinde bulunmaktadır. Kriyojenik işlem esnasında mikroyapıda oluşan gerilmelerin kafes yapılarını da etkileyerek karbon atomunun kafesten çıkarak serbest hale geldiği belirtilmektedir. Serbest hale gelen karbon atomları kriyojenik işlemin ısıtma süresinde, kriyojenik işlem ile oluşan veya var olan dislokasyonlarda karbür yapıcı elementlerle birleşerek karbür fazını oluşturmaktadır (Das, 2011). Bu bilgiye istinaden SEM analizinde elde edilen perlit fazındaki lameller arası mesafenin azalması da yeni demirkarbür (sementit) oluşumu ile açıklanabilir. Kriyojenik işlemin, serbest kalan karbon atomları perlit fazındaki ferrit bölgelerinde, yeni sementitlerin oluşumunu sağlayarak lameller arası mesafenin azalmasına yol açtığı düşünülmektedir. Ayrıca 36 saat kriyojenik işlem uygulanan

numunenin SEM analizinde perlit tane sınırları arasında yani karbür oluşumu belirgin şekilde gözlemlenmiştir.

Perlit fazında oluşan lameller arası mesafenin artışı ancak östenitleme sıcaklığına çıkılırsa gerçekleşmektedir. Debriyaj baskı plaka malzemesi üzerinde yapılan çalışmalarda debriyaja basıldığı anda anlık maksimum sıcaklık yaklaşık 80 °C olurken periyodik çalışma koşullarında zamana bağlı maksimum 350 °C' ye kadar ulaşmaktadır (Capetti et al., 2012, Wang et al., 2014). Bu sıcaklık değeri kriyojenik işlemin mikroyapı üzerinde meydana getirdiği değişimleri ortadan kaldıramayacak bir değerdir. Şekil 5.9'da debriyaja basıldığı anda debriyaj baskı plakasında oluşan anlık sıcaklık değerinin dağılımı ve 60 s periyotlarla çalıştırılan sistemin sürtünme yüzeyinde oluşan zamana bağlı sıcaklık eğrisi gösterilmiştir.



Şekil 5.9. a) Debriyaj baskı plakasında debriyaja basıldığı anda oluşan anlık sıcaklık dağılımı (Capetti et al., 2012), b) 60 s periyotlarla çalıştırılan sistemin sürtünme yüzeyinde oluşan sıcaklık (Wang et al., 2014).

5.2 Sertlik

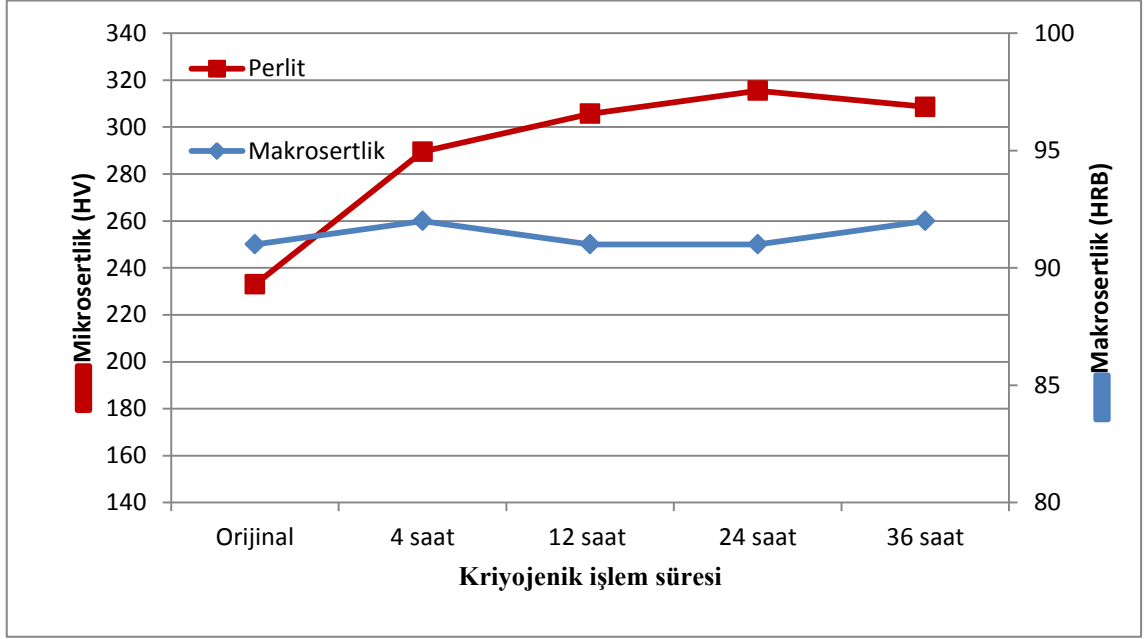
Kriyojenik işlem vermiküler grafitli dökme demirin makrosertliğine dikkat çekecek bir etki yaratmamıştır. Bununla birlikte ferrit fazlarının mikrosertliği kriyojenik işlemle birlikte az miktarda artmıştır. Dikkat çekici değişim perlit fazlarının mikrosertliklerinde oluşmuştur. Perlit fazlarının mikrosertlikleri kriyojenik işlemle

önemli miktarlarda yükselmiştir. Çizelge 5.2’de orijinal numune ve 4, 12, 24, 36 saat kriyojenik işlem uygulanmış numunelerin makro ve mikro sertlikleri gösterilmiştir.

Çizelge 5.2. Orijinal ve kriyojenik işlem uygulanmış numunelerin makrosertlik ve mikrosertlikleri

Numune	Makrosertlik (HRB)	Mikrosertlik Perlit (HV)	Mikrosertlik Ferrit (HV)
Orijinal	91	233	164,7
4 saat	92	289,5	192,7
12 saat	91	305,7	188,3
24 saat	91	315,5	194
36 saat	92	308,6	197,8

Perlit mikrosertliği 24 saat süreli kriyojenik işleme kadar artış gösterirken 36 saat kriyojenik işlemde az da olsa düşüş yaşanmıştır. Ferrit mikrosertliğinde ise kriyojenik işlemle az miktarda artış meydana gelirken, kriyojenik işlem süresi ile kayda değer bir değişim gözlemlenmemiştir. Şekil 5.10’da orijinal numune ve kriyojenik işlem sürelerinin sertlik üzerindeki etkisi gösterilmiştir.



Şekil 5.10. Kriyojenik işlem sürelerinin makrosertlik ve mikrosertlik üzerindeki etkisi

Perlit fazında lameller arası mesafe azaldıkça sertlikte artış meydana gelmektedir. Literatürde yapılan çalışmalarda örneğin 4140 çeliğinde ince perlitin kaba perlite göre sertliği ortalama 100 HV fazladır (Gür ve Tuncer, 2005). Yüksek karbon oranı ihtiva eden çeliklerde yapılan çalışmalarda ise perlit fazının incilmesi ile birlikte farklı miktarlarda sertlik artışları gözlemlenmiştir (Makarov, 2007). Kriyojenik işlem sonucu oluşan ince perlit fazının mikrosertlik ölçümleri yapılan çalışmalarla paralellik göstermektedir.

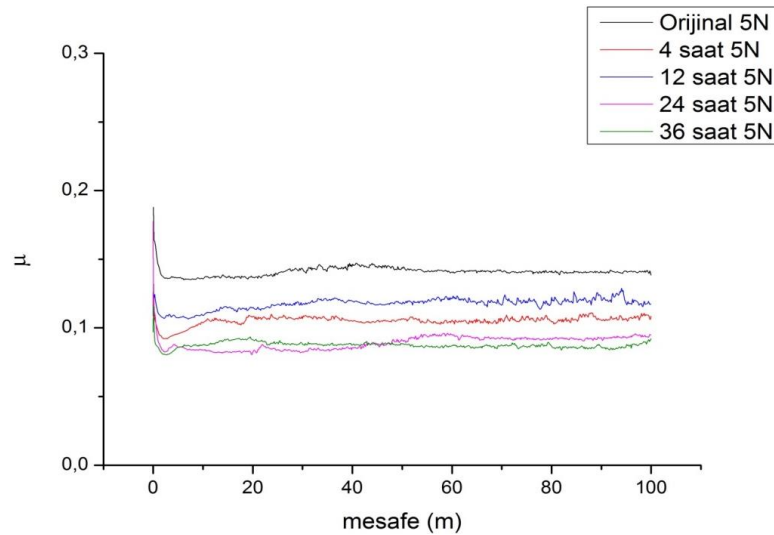
5.3 Aşınma

Kriyojenik işlem uygulanmış numunelerin tümü, orijinal numuneye göre daha az aşınma miktarlarına sahiptir. Kriyojenik işlem sonucu perlit fazında lameller arası mesafenin azalması ve homojenleşmesi ile birlikte mikrosertlikte meydana gelen sertlik artışı aşınma direncinin artışı ile sonuçlanmıştır. Literatürde yapılan çalışmalar sonucuserklik ve aşınma dayanımı arasında genellikle doğru orantı olduğu

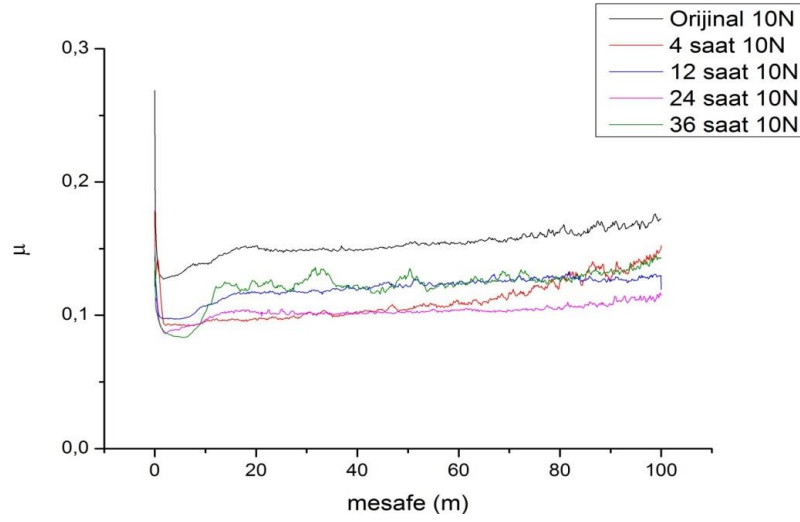
bilinmektedir. Malzemelerde sertlik artışı ile aşınma dayanımı artışı gözlemlenmektedir (Khrushov, 1974, Hornbogen, 1975).

Aşınma deneyleri orijinal numune ve 4, 12, 24, 36 saat kriyojenik işlem uygulanmış numunelere 5 N ve 10 N yüklerle gerçekleştirilmiştir. 5 N yük uygulanan aşınma deneyinde Hertz temas gerilmesi 1,842 GPa, 10 N yük uygulanan numunede ise 2,322 GPa olarak hesaplanmıştır. Debriyaj baskı plakasının aşınması üzerinde yapılan herhangi bir çalışma mevcut değildir. Bu nedenle seçilen yüklerin endüstriyel simülasyona uyup uymadığı anlaşılamamaktadır. Bununla birlikte lamel grafitli dökme demirin kriyojenik işlemi üzerinde yapılan çalışmada, aşınma deneylerinde temas basıncı artışının kriyojenik işlemin aşınma dayanımına etkisine olumlu yansıdığı anlaşılmıştır (Thornton et al., 2011). Bu çalışma göz önünde bulundurularak 5 N ve 10 N olmak üzere farklı 2 yük seçilmiştir.

Orijinal numune ve farklı sürelerde kriyojenik işleme tabi tutulmuş numunelerin 5 N ve 10 N aşınma deneyleri sonucu oluşan sürtünme katsayısı-mesafe grafikleri şekil 5.11 ve 5.12’de gösterilmiştir.



Şekil 5.11. 5 N yük altında yapılan aşınma deneyleri sonucu oluşan sürtünme katsayıları.



Şekil 5.12. 10 N yük altında yapılan aşınma deneyleri sonucu oluşan sürtünme katsayıları

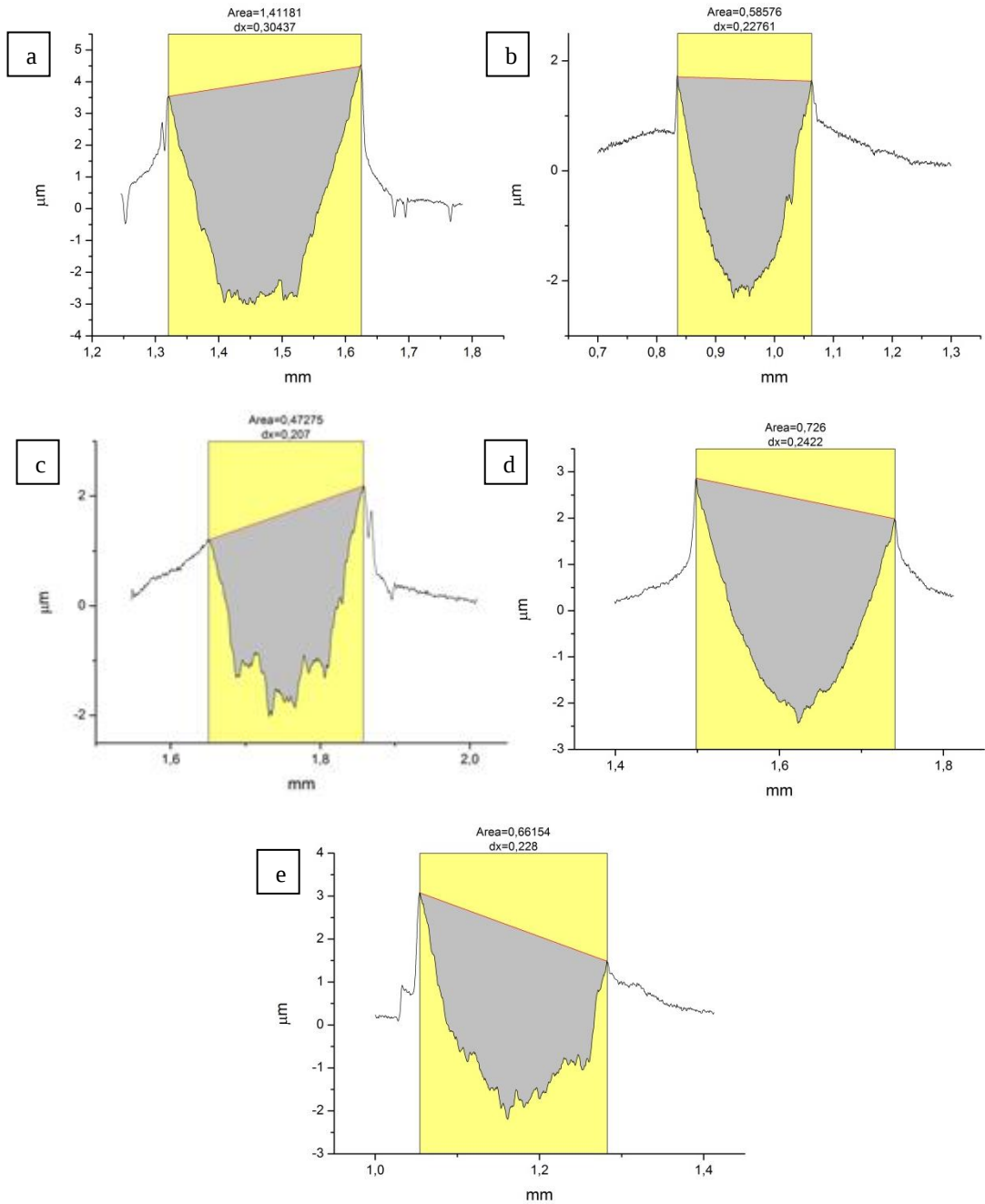
Orijinal numunenin sürtünme katsayısı kriyojenik işleme tabi tutulmuş numuneler göre anlamlı miktarda yüksek çıkmıştır. Bu fark aşınma oranları göze alındığında beklenen bir sonuçtur. Oluşan ortalama sürtünme katsayıları çizelge 5.3'te gösterilmiştir.

Çizelge 5.3. Orijinal numune ve 4, 12, 24, 36 saat kriyojenik işlem uygulanmış numunelerde 5 N ve 10 N yüklerin uygulandığı aşınma deneyleri sonucu oluşan ortalama sürtünme katsayıları.

Numune	Sürtünme katsayısı (5 N)	Sürtünme katsayısı (10 N)
Orijinal	0,141	0,153
4 saat	0,105	0,111
12 saat	0,117	0,120
24 saat	0,089	0,103
36 saat	0,087	0,122

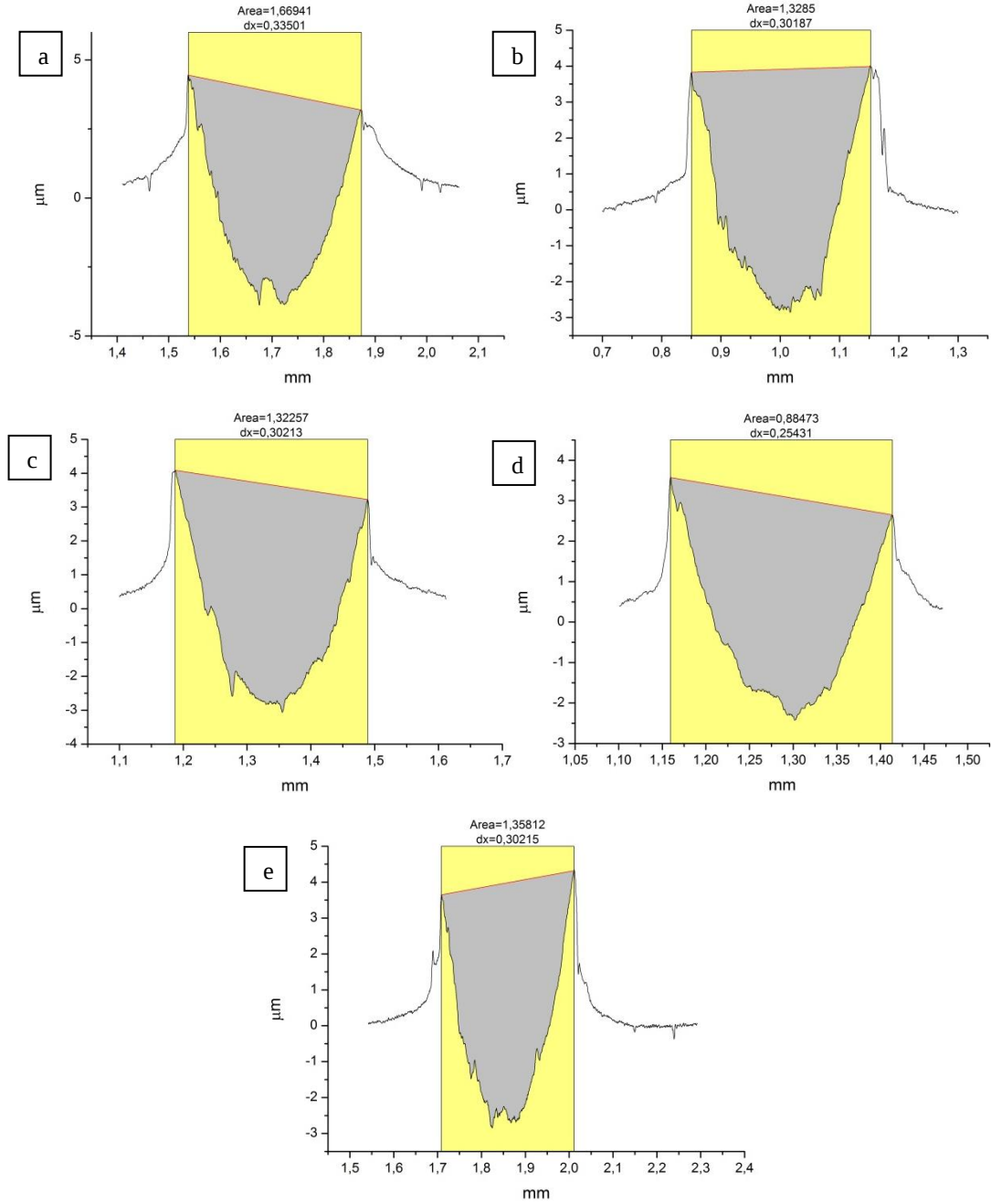
Aşınma deneylerinin sonucunda numunelerin yüzey profilleri 4 farklı doğrultuda ölçülüp ortalama aşınma alanları hesaplanmıştır. Şekil 5.13'te orijinal numune ve 4, 12,

24, 36 saat kriyojenik işlem uygulanmış numunelerin 5 N yük altında aşınma deneyleri yapılan aşınmış kesit alanlarından örnekler gösterilmiştir.



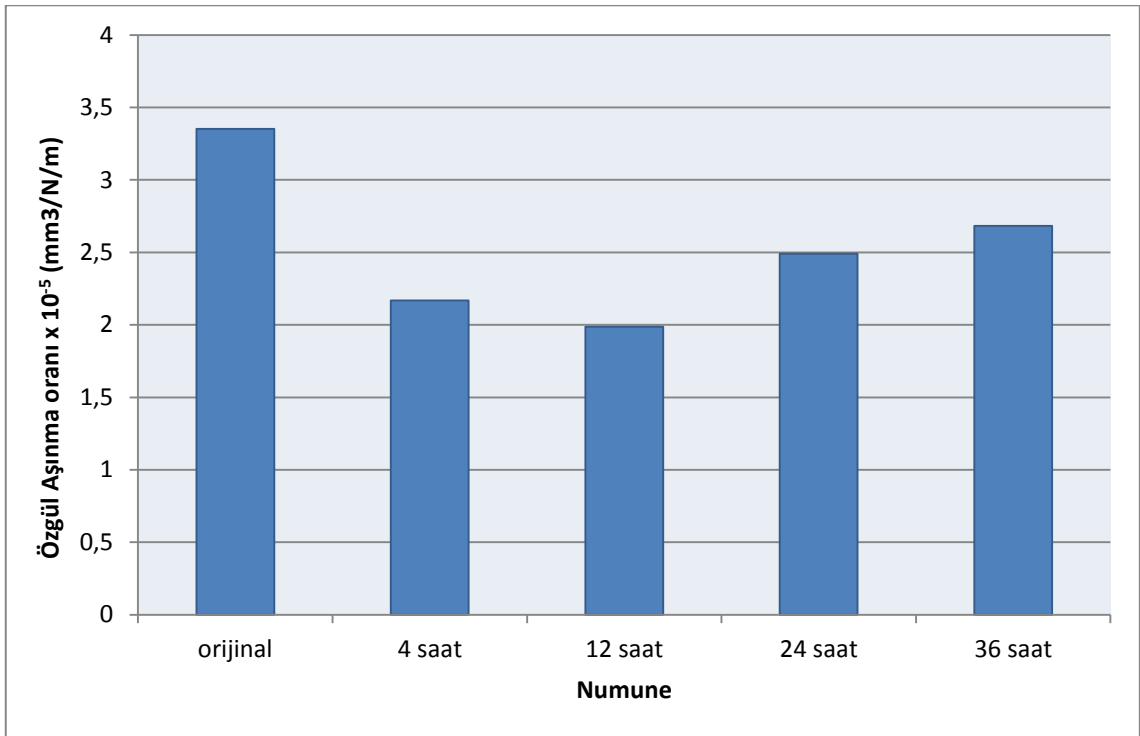
Şekil 5.13. 5 N yük altında aşınma deneyleri sonucu aşınma alanı örnekleri, a) orijinal numune, b) 4 saat kriyojenik işlem uygulanmış numune, c) 12 saat kriyojenik işlem uygulanmış numune, d) 24 saat kriyojenik işlem uygulanmış numune, e) 36 saat kriyojenik işlem uygulanmış numune

Şekil 5.14'te ise orijinal ve 4, 12, 24, 36 saat kriyojenik işlem uygulanmış numunelerin 10 N yük altında aşınma deneyleri yapılan aşınmış kesit alanlarından örnekler gösterilmiştir.



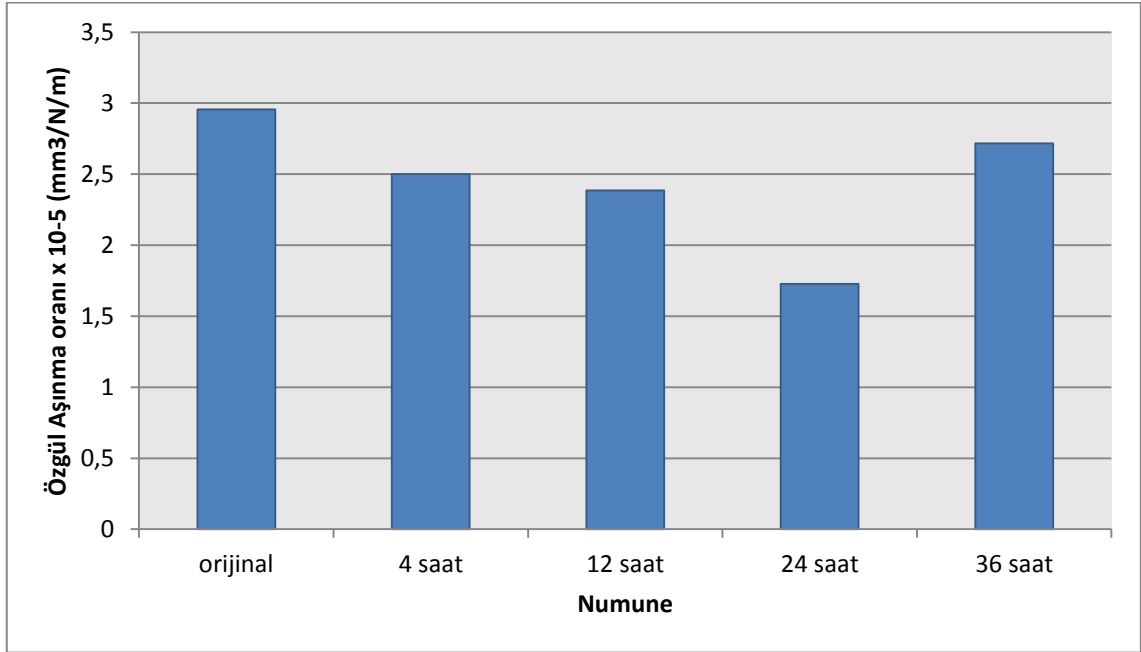
Şekil 5.14. 10 N yük altında aşınma deneyleri sonucu aşınma alanı örnekleri, a) orijinal numune, b) 4 saat kriyojenik işlem uygulanmış numune, c) 12 saat kriyojenik işlem uygulanmış numune, d) 24 saat kriyojenik işlem uygulanmış numune, e) 36 saat kriyojenik işlem uygulanmış numune

Her bir numune için hesaplanan kesit alanlarının ortalamaları alınarak özgül aşınma oranları hesaplanmıştır. Yapılan ölçümlerden Şekil 5.15'te gösterilen orijinal numune ve 4, 12, 24, 36 saat kriyojenik işlem uygulanmış numunelerin 5 N yük altında özgül aşınma oranları hesaplanmıştır. Buna göre; orijinal numunenin özgül aşınma oranı $3,352 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{N}/\text{m}$ iken, en az aşınma oranı 12 saat kriyojenik işlem uygulanmış numunede $1,987 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{N}/\text{m}$ olarak hesaplanmıştır.



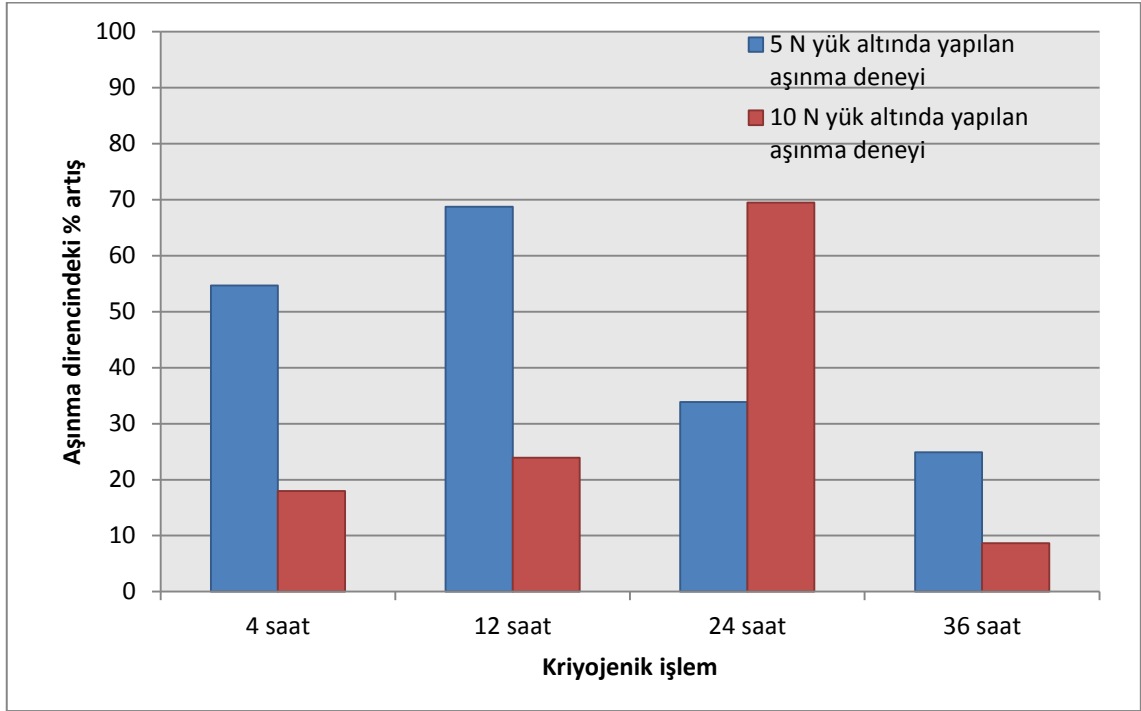
Şekil 5.15. Orijinal numune ve 4, 12, 24, 36 saat kriyojenik işlem uygulanmış numunelerin 5 N yük altındaki özgül aşınma oranları

Şekil 5.16'da 10 N yük altında hesaplanan özgül aşınma oranları gösterilmiştir. Buna göre; orijinal numunenin özgül aşınma oranı $2,955 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{N}/\text{m}$ iken, en az aşınma oranı $1,727 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{N}/\text{m}$ ile 24 saat kriyojenik işlem uygulanmış numunede hesaplanmıştır.



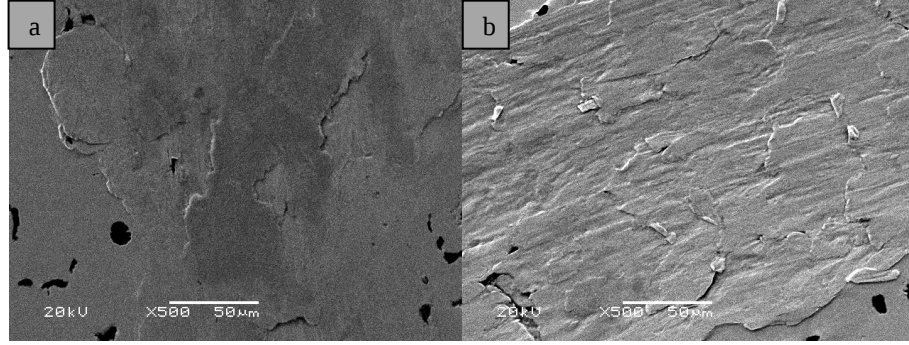
Şekil 5.16. Orijinal numune ve 4, 12, 24, 36 saat kriyojenik işlem uygulanmış numunelerin 10 N yük altındaki özgül aşınma oranları

Kriyojenik işlem uygulanan numunelerin özgül aşınma oranları göze alındığında 5 N yük altındaki aşınma deneylerinde 12 saat kriyojenik işlem uygulanan numunenin aşınma direncinde %68,7 oranında iyileşme görülmektedir. Aynı şekilde 10 N yük altında yapılan aşınma deneylerinde 24 saat kriyojenik işlem uygulanmış numunenin aşınma direncinde %69,5 oranında iyileşme sağlanmıştır. Şekil 5.17’de kriyojenik işlem uygulanmış numunelerin 5 N ve 10 N yük altında yapılan aşınma deneyleri sonrası aşınma dirençlerindeki % artış oranları gösterilmiştir.

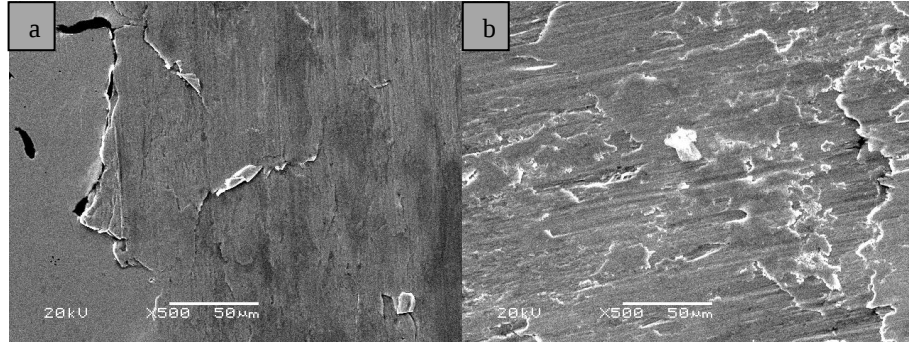


Şekil 5.17. Kriyojenik işlem uygulanmış numunelerin 5 N ve 10 N yük altında yapılan aşınma deneyleri sonrası aşınma dirençlerindeki % artış oranları.

Orijinal ve kriyojenik işlem uygulanmış numunelerden en yüksek aşınma direncinin elde edildiği numunelerin SEM görüntüleri Şekil 5.18 ve Şekil 5.19'da gösterilmiştir. Kriyojenik işlem uygulanmış numunelerde 5 ve 10 N yükler altında daha küçük boyutlarda tabaka ayrışması gözlemlenirken orijinal numunede daha büyük boyutlu tabaka ayrışması görülmektedir. Ayrıca orijinal numune ile kriyojenik işlem uygulanmış numuneler karşılaştırıldığında, orijinal numunenin daha sünek malzemelerde görülen aşınma yüzeyine benzer yüzeye sahip olduğu görülmektedir. Kriyojenik işlem uygulanmış numunelerde, sertlik artışıyla birlikte kopan ve kazınan parçalar görülürken orijinal numunede ise kopan parçaların yüzeye tekrar sıvandığı gözlemlenmiştir.



Şekil 5.18. 5 N yük altında yapılan aşınma sonucu oluşan 500x büyütme SEM görüntüleri, a) orijinal numune, b) 12 saat kriyojenik işlem uygulanmış numune



Şekil 5.19. 10 N yük altında yapılan aşınma sonucu oluşan 500x büyütme SEM görüntüleri, a) orijinal numune, b) 24 saat kriyojenik işlem uygulanmış numune

BÖLÜM 6

SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Kriyojenik işlem, otomobil parçalarında kullanılan dökme demir malzemelerin aşınma dirençlerini iyileştirerek kullanım ömürlerinde önemli artışlara sebep olmaktadır. Kriyojenik işlemin aşınma direncini artıran diğer işlemlere göre ucuz olması ve uygulanan malzemenin bütününe etki etmesi önemli avantajlarındanır (Thornton et al., 2011).

Debriyaj baskı plakası malzemesi olarak üretilen vermiküler grafitli dökme demirin kriyojenik işlemle aşınma direncinde önemli artışlar sağlanmıştır. Farklı sürelerde yapılan işlem sonucu optimum süre, farklı yüklerde uygulanan aşınma deneyleri için ayrı ayrı tespit edilmiştir. Sonuçlar göstermektedir ki, kriyojenik işlemle debriyaj baskı plakası parçasının aşınma direnci artırılabilmekte ve buna bağlı olarak kullanım ömrü uzatılabilmektedir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda verilmektedir;

- Üretilen vermiküler grafitli dökme demir ötektikaltı bileşimde olup, yapılan metalografik incelemelerde perlit, ferrit ve vermiküler morfolojisinde grafitlerin varlığı tespit edilmiştir.
- Kriyojenik işlem sonucunda malzemelerin mikroyapısında fazların türü açısından herhangi bir değişiklik olmamıştır. Bunun yanında, SEM incelemeleri perlit fazında bulunan lameller arası ortalama mesafenin azaldığını göstermektedir. Ayrıca lameller arası mesafenin kriyojenik işlemle homojen dağılımı sağlanmıştır. Lameller arası en düşük mesafe 24 saat kriyojenik işlem uygulanan numunede ölçülmüştür.
- Kriyojenik işlem sonucu vermiküler grafitli dökme demirin makrosertliğinde önemli bir değişim olmamıştır. Bununla birlikte mikrosertliklerde önemli

artışlar meydana gelmiştir. Ferrit fazında ortalama 30 HV sertlik artışı meydana gelmiştir. Perlit fazlarında ise, 4 saat kriyojenik işlem uygulanmış numunede ~56 HV, 12 saat kriyojenik işlem uygulanmış numunede ~72 HV, 24 saat kriyojenik işlem uygulanmış numunede ~82 HV, 36 saat kriyojenik işlem uygulanmış numunede ise ~75 HV sertlik artışı meydana gelmiştir. Meydana gelen bu sertlik artışına perlit fazında lameller arası mesafenin azalmasının etkili olduğu düşünülmektedir.

- Aşınma deneyleri sonucu, kriyojenik işlem uygulanan numunelerin orijinal numuneye göre sürtünme katsayılarında önemli düşüşler meydana gelmiştir.
- 5 N yük uygulanan aşınma deneyleri sonucu, orijinal numune $3,352 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{N/m}$ özgül aşınma oranına sahipken, 12 saat kriyojenik işleme tabi tutulmuş numune $1,987 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{N/m}$ özgül aşınma oranına sahip numune olmuştur. Nispeten daha düşük yüklerde 12 saat kriyojenik işlem uygun süre olarak belirlenmiştir. Perlit fazlarındaki sertlik artışının bu aşınma direncinin oluşumunu sağladığı düşünülmektedir.
- 5 N yük uygulanan aşınma deneyleri sonucu, orijinal numune $3,352 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{N/m}$ özgül aşınma oranına sahipken, 12 saat kriyojenik işleme tabi tutulmuş numune $1,987 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{N/m}$ özgül aşınma oranına sahip numune olmuştur. Nispeten daha düşük yüklerde 12 saat kriyojenik işlem uygun süre olarak belirlenmiştir. Perlit fazlarındaki sertlik artışının bu aşınma direncinin oluşumunu sağladığı düşünülmektedir.
- Aşınma mekanizması incelendiğinde; orijinal numunede daha büyük tabaka ayrışması gözlemlenmiş ve kopan parçaların yüzeye tekrar sıvandığı belirlenmiştir. Kriyojenik işlem uygulanmış numunelerde ise daha küçük tabaka ayrışması görülürken yüzeyden kopan parçalar daha az sıvanmıştır. Bu mekanizma farkına sertliğin artışı gösterilebilir.

Sonuç olarak aşınmaya maruz kalan parçalarda kullanılan vermiküler grafitli dökme demirin aşınma direnci kriyojenik işlem ile iyileştirilebilir. Ancak kriyojenik işlem parametrelerinin doğru bir şekilde belirlenmesi, mikroyapısal değişimlerin gözlenerek aşınma deneyi sonuçlarıyla ilişkilendirilmesi ile mümkündür. Bu bağlamda, yapılan çalışmanın bu konuda ayrıntılı bilgiler sunmakta olup, bu alanda bundan sonra yapılacak çalışmalara oldukça yol gösterici nitelikte olduğu düşünülmektedir.

BÖLÜM 7

KAYNAKLAR DİZİNİ

Askeland, D.,R., 1994, The Science and Engineering of Materials, 3rd Ed., PWS Publishing.

ASM Handbook Volume 1, Properties and Selection Iron, 182.

ASM Handbooks Volume 9, Metallurgy and Microstructure, 147-148.

ASM Hanbook Volume 13, Corrosion, 1383-1384.

ASM Handbook Volume 15, Casting, 1459.

Atkins M., 1977, Atlas of Continuous Transformation Diagrams for Engineering Steels, British Steel Corporation.

Babu, P., S., Rajendran, P., Rao K., N., 2005, Cryogenic treatment of M1, En19 and H13 tool teels to improve wear resistance, IE(I) Journal-MM, 86, 64-67.

Baldissera, P., 2009, Fatigue scatter reduction through deep cryogenic treatment on the 18NiCrMo carburized steel, Materials and Design, 30, 3636-3642.

Baldisseara, P., Delprete, C., 2008, Deep cryogenic treatment: a bibliographic review, The Open Mechanical Engineering Journal, 2, 1-11.

Barron, R., F., Mulhern, C., 1980, Cryogenic treatment of AISI-T8 and C1045 steels, Advances in Cryogenic Engineering Materials, 26, 171-179.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Barron, R.F., Thompson, R., H., 1990, Effect of Cryogenic Treatment on Corrosion Resistance, in Advances in Cryogenic Engineering, 36, 1375-1379
- Bensely, A., Venkatesh, S., Mohan Lal, D., Nagarajan, G., Rajadurai, A., Junik, K., 2008, Effect of cryogenic treatment next term on distribution of residual stress in case carburized En 353 steel, Materials Science and Engineering A, 479 (5), 229-235.
- Borghigiani, E., Marinari, C., 1982, Compacted Graphite Iron Ingot Molds, Transactions of the American Foundrymen's Society, 90, 529-549
- Bramtfitt, B., L., 1994, Advanced In Line Head hardening of Rail, Research Department, Bethlehem Steel Corporation, Pennsylvania Steel Technologies, Inc.
- Capetti, N., Pisaturo, M., Senatore, A., 2012, Cushion Spring Sensitivity to the Temperature Rise in Automotive Dry Clutch And Effects On The Frictional Torque Characteristic, Mechanical Testing and Diagnosis, 3, 28-38.
- Cast Iron Handbook, 1978, 3rd ed., Mashinostrojenie.
- Çiçek, A., Kıvak, T., Turgut, Y., Uygur, İ., Ekici, E., 2011, Derin kriyojenik işlemin kesme kuvvetleri, delik çapları ve takım ömrü üzerine etkileri. 6 th International Advanced Technologies Symposium, Elazığ, 33-36
- Cooper, K., P., Loper, c., R., Jr., 1978, A Critical Evaluation of the Production of Compacted Graphite Cast Iron, Trans. AFS, 86, 267.
- Cornell H., H., Loper, C., R., Jr., 1985, Variables Involved in the Production of Compacted Graphite Cast Iron Using Rare Earth-Containing Alloys, Trans. AFS, 93, 435.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Das, D., 2011, Structure-Property Correlation Of Cryotreated AISI D2 Steel, Doctoral Dissertation, Department of Metallurgy and Materials Engineering Bengal Engineering and Science University.
- Das, D., Ray, K., K., Dutta, A., K., 2009, Influence of temperature of sub-zero treatments on the wear behaviour of die steel, *Wear*, 267, 1361–1370.
- Dawson, S., Schroeder, T., 2004, *AFS Trans.*, 112, 813–821.
- Evans, E., R., Dawson, J., V., Lalich, M., J., 1976, Compacted Graphite Cast Irons and Their Production by a Single Alloy Addition, *Trans. AFS*, Vol 84, 215.
- Elliot, R., *Cast iron technology*, 1988, Butterworths&Co., 136-150.
- Fowler, J., Stefanescu, D., M., Prucha, T., 1984, Production of Ferritic and Pearlitic Grades of Compacted Graphite Cast Iron by the In-Mold Process, *Trans. AFS*, 92, 361.
- Gogte, C., L., Iyer, K., M., Paretkar, R., K., Peshwe D., R., 2009, Deep subzero processing of metals and alloys: evolution of microstructure of AISI T42 tool steel, *Materials and Manufacturing Processes*, 24, 718 – 722.
- Guesser, W., L., Duran, P., V., Krause, W., 2004, Compacted Graphite Iron for Diesel Engine Cylinder Blocks, 11.
- Gundlach R., B., Janowak, J., F., 1984, Approaching Austempered Ductile Iron Properties by Controlled Cooling in the Foundry, in *Proceedings of the First International Conference on Austempered Ductile Iron: Your Means to Improved Performance, Productivity, and Cost*, American Society for Metals.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Gür., C., H., Tuncer B., O., 2005, Characterization of microstructural phases of steels by sound velocity measurement, *Materials Characterization*, 55, 160–166.
- Hornbogen, E., 1975, The Role of Fracture Toughness in the Wear of Metals, *Wear*, 33, 251-259.
- Isaak, C., J., 2007, The Effects of Cryogenic Treatment on the Thermal conductivity of GRCop-84, *Materials and Manufacturing Processes*, 23:1, 82-91.
- ISO_945-1., 2008, Microstructure of cast irons- Part1. Graphite classification by visual analysis. s.l., International Organization for Standardization.
- Kazdal, G., Kazdal Z., Çimenoglu, H., 2012, Kimyasal bileşim ve ısıt işlemin beyaz dökme demirin mikroyapı ve aşınma özelliklerine etkisi, *Maden Kırıcılarında Uygulanabilirliği*, International Iron and Steel Symposium.
- Kerscher, E., Lang K., H., 2010, Increasing the fatigue limit of a high-strength bearing steel by a deep cryogenic treatment; *Journal of Physics: Conference Series*, 240.
- Khrushchov, M., M., 1974, The Principles of Abrasive Wear, *Wear*, 28, 97-99.
- König, M., 2010, Literature review of microstructure formation in compacted graphite iron, *International Journal of Cast Metals Research*, 23, 185.
- Lal, D.,M., Renganarayanan, S., Kalanidhi A., 2001, Cryogenic treatment to argument wear resistance of tool and die steels; *Cryogenics*, 41, 149-155.
- Levine, J., 2002, Cryoprocessing equipment; *Heat Treating Process*; 42-44.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Lohberg K., Motz, J., 1957, Giesserei, 44, 305.

Makarov, A., V., Savrai, R., A., Schastlivtsev, V., M., Tabatchikova, T., I., Egorova, L., 2007, Mechanical Properties and Fracture upon Static Tension of the High-Carbon Steel with Different Types of Pearlite Structure, The Physics of Metals and Metallography, 104, 522–534.

Martinez, F., Stefanescu, D., M., 1983, Properties of Compacted/Vermicular Graphite Cast Irons in the Fe-C-Al System Produced by Ladle and In-Mold Treatment, Trans. AFS, 91, 593.

Millis, D., K., Gagnebin A., P., Pilling N., B., 1949, Grey cast iron having improved properties, patent no. US2485761.

Mukherjee, S., 1985, Deformation-Induced Martensite Transformations in AISI 304L Stainless Steel at Cryogenic and Room Temperatures, MS Thesis, University of Oklahoma.

Moore, K., E., Collins D., N., 1993, Cryogenic treatment of three heat treated tool steels, Key Engineering Materials, 86-87, 47-54.

Nechtelberger, E., Hummer, R., Thury, W., 1970, Aluminum-Alloyed Cast Iron With Vermicular Graphite, Giesserei-Prax., 24, 387

Nechtelberger, E., Pühr, H., von Nesselrode, J., B., Nakayasu, A., 1982, Cast Iron with Vermicular/Compacted Graphite--State of the Art Development, Production, Properties, Applications, International Foundry Congress.

Palmer, K., B., 1976, BCIRA J., Report 1213, 31.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Preciado, M., Bravo, P., M., Alegre J., M., 2006, Effect of low temperature tempering prior cryogenic treatment on carburized steels, Journal of Materials Processing Technology 176, 41–44.

Parrish J., 1994, Retained austenite: new look at an old debate, Advanced Materials and Processes, 145, 25-28.

Paulin P., 1993, Frozen gears; Gear Technology, 10, 26-29.

Patil P., I., Tated, R., G., 2012, Comparison of Effects of Cryogenic Treatment on Different Types of Steels : A Review, IJCA Proceedings on International Conference in Computational Intelligence, No: 9.

Reitz W., Pendray J., 2001, Cryoprocessing of materials: a review of current status, Mater Manuf Process, 16, 829–840.

Sergeant, G.,F., Evans, E.,R., 1978, The Production and Properties of Compacted Graphite Irons, Br. Foundryman, 71, 115.

Thornton, R., Slatter, T., Jones, A., H., Lewis, R., 2011, The effects of cryogenic processing on the wear resistance of grey cast iron brake discs, Wear, 271, 2386– 2395.

Thury, W., Hummer, R., 1972, Herstellung von Perlitischem Gusseisen mit Vermiculargraphit, unpublished research at the Austrian Foundry Research Institute, A.-19, 175.

Sissener, J., Thury, W., Hummer, R., Nechtelberger, E., Giesserei- Rundschau, 1972, 19, 59–65.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Smith, F., W., 2001, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği, (Çev. N. G. Kınıkoğlu).
- VanMaldegiam M., D., Rundman, K., B., 1986, On The Structure and Properties of Austempered Gray Cast Iron, Trans. AFS, 249
- Wang, C.,C., 2006, Wear resistance study on cryogenic treated AISI D2 steel; MS Thesis, Tatung University.
- Wang, Q., Zhu, M., Liu, X., 2014, Coupling Heat Structure Analysis of the Clutch Pressure Plate in Vehicle Overloaded Start Procession, Sensors & Transducers, 182, 156-161.
- Yang, H., Jun, W., Bao-Luo, S., Hao-Huai, L., Sheng-Jia, G., Si-Jiu, H., 2006, Effect of cryogenic treatment on the matrix structure and abrasion resistance of white cast iron subjected to destabilization treatment, Wear, 261, 1150–1154.
- Yun, D., Xiaoping L., Hongshen X., 1998, Deep cryogenic treatment of high-speed steel and its mechanism, Heat Treatment of Metals, 3, 55-59.
- Zhisheng W., Ping, S., Jinrui, L., Shengsun H., 2003, Effect of deep cryogenic treatment on electrode life and microstructure for spot welding hot dip galvanized steel, Materials and Design 24, 687–692.
- Ziegler K., R., Wallace, J.,F., 1984, The Effect of Matrix Structure and Alloying on the Properties of Compacted Graphite Iron, Trans. AFS, 92, 735.
- Zurecki Z. 2006, Cryogenic quenching of steel revisited, Proceedings of the 23rd ASM Heat Treating Society Conference, edited by Herring D., and Hill R., ASM Proceedings, Heat Treating, 106-113.