

T.C.
BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ALAŞIMLANDIRILMIŞ EN-GJS-500-7 KALİTE KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME
DEMİRİN MEKANİK, İŞLENEBİLİRLİK, YÜKSEK SICAKLIK AŞINMA,
KOROZYON VE TRİBOKOROZYON DAVRANIŞI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

EMRE AYDIN

TEZ DANIŞMANI
PROF. DR. HARUN MİNDİVAN

BİLECİK, 2023

10592410

T.C.
BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ALAŞIMLANDIRILMIŞ EN-GJS-500-7 KALİTE KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME
DEMİRİN MEKANİK, İŞLENEBİLİRLİK, YÜKSEK SICAKLIK AŞINMA,
KOROZYON VE TRİBOKOROZYON DAVRANIŞI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

EMRE AYDIN

TEZ DANIŞMANI
PROF. DR. HARUN MİNDİVAN

BİLECİK, 2023

10592410

BEYAN

Alaşımlandırılmış EN-GJS-500-7 Kalite Küresel Grafitli Dökme Demirin Mekanik, İşlenebilirlik, Yüksek Sıcaklık Aşınma, Korozyon ve Tribokorozyon Davranışı adlı yüksek lisans tezi hazırlık ve yazımı sırasında bilimsel araştırma ve etik kurallarına uyduğumu, başkalarının eserlerinden yararlandığım bölümlerde bilimsel kurallara uygun olarak atıfta bulunduğumu, kullandığım verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı, tezin herhangi bir kısmının Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunulmadığını, aksinin tespit edileceği muhtemel durumlarda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Bu çalışmanın, Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP), TÜBİTAK veya benzeri kuruluşlarca desteklenmesi durumunda; projenin ve destekleyen kurumun adı proje numarası ile birlikte, ETİK KURUL onayı alınması durumunda ise ETİK KURUL tarih karar ve sayı bilgilerinin beyan edilmesi gerekmektedir.			
DESTEK ALINMIŞTIR		DESTEK ALINMAMIŞTIR	
☒		☐	
Destek alındı ise;			
Destekleyen kurum;			
Desteğin Türü		Proje Numarası	
1- BAP (Bilimsel Araştırma Projesi)			
2- TÜBİTAK			
Diğer;.....			
ETİK KURUL onayı var ise;			
ETİK KURUL karar tarih/sayı:		/.....	

EMRE AYDIN

.../.../2023

İmza

ÖN SÖZ

Yüksek lisans öğrenimimdeki tez çalışmalarım boyunca gösterdiği her türlü destek, ilgi, samimiyet ve yardımlarından dolayı değerli danışman hocam Prof. Dr. Harun Mindivan’a büyük bir teşekkürü borç bilirim.

Deneyisel çalışmalarım süresince yardımlarını esirgemeyen Sn. Doç. Dr. Ferda Mindivan’a ve yine yardımlarını esirgemeyen Ünal Çolak’a teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam boyunca tüm döküm malzeme ihtiyaçlarımda yardımcı olan Demisaş Döküm Emaye A.Ş. ve Visan Vinç ve Hareket Sistemleri Sanayi ve Ticaret LTD.ŞTİ. ailesine teşekkür ve minnetlerimi sunarım.

Son olarak bugünlere gelmemde emeği çok büyük olan annem ve babam Makbule-Mustafa Aydın ve çok sevgili eşim Sinem Aydın ve ailesine sonsuz teşekkür ederim.

Emre Aydın

2023

ÖZET

ALAŞIMLANDIRILMIŞ EN-GJS-500-7 KALİTE KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRİN MEKANİK, İŞLENEBİLİRLİK, YÜKSEK SICAKLIK AŞINMA, KOROZYON VE TRIBOKOROZYON DAVRANIŞI

Günümüzde, küresel grafitli dökme demirler (KGDD) çeliklere göre üstün mekanik özelliklere ve ekonomik avantajlara sahip olduğu için endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır ve imalatçılar spesifik mukavemeti (mukavemet/ağırlık oranı) artırmak için daha düşük kalınlıklarda KGDD'den parçalar geliştirmenin yollarını araştırmaktadır. Son zamanlarda yüksek mukavemet, işlenebilirlik, korozyon ve aşınma direnci, yüksek tribokorozyon performans gibi talepler arttığından, bu alanlara yönelik KGDD'lerin üretim teknolojisi üzerine çalışmalar gerçekleştirilmektedir.

KGDD'lerin mekanik, işlenebilirlik, korozyon, aşınma ve tribokorozyon özellikleri büyük ölçüde metalurjik yapısı tarafından belirlenir. KGDD'lerin matrisinde ferrit ve perlitin uygun bir dengeye sahip olması, tatmin edici mukavemet, işlenebilirlik, korozyon, aşınma ve tribokorozyon performansı elde edilebilir. KGDD üretiminde, genellikle mikroyapıyı kontrol etmek ve malzemenin mekanik özelliklerini iyileştirmek için alaşım elementleri (Si, Mn, Cu, Cr, Sn ve Sb) kullanılır. Her bir alaşım elementi bağımsız olarak değerlendirilemez ve bunlar arasında bazı karmaşık etkileşimler görülebilir. Bu nedenle, alaşım elementlerinin miktarındaki uygun denge, KGDD'lerin üretiminde dikkatlice düşünülmelidir.

Demisaş A.Ş.'den temin edilen 15 mm çapında EN-GJS-500-7 kalite perlitik/ferritik KGDD'ye alaşımlandırmanın (Mn, Cu ve Mn) mekanik, işlenebilirlik, korozyon, tribokorozyon ve yüksek sıcaklık aşınma davranışına etkisi incelenmiştir.

Ağırlıkça hem %0,8 Mn hem de %0,8 Cu ile alaşımlandırılan KGDD'nin grafit nodüllerinin sayısı azalırken boyutları da artmıştır. Alaşımsız KGDD büyük miktarda ferrit fazı içerirken, perlit hacim oranı alaşımlandırma ile birlikte genişledi. Alaşımlandırma ile perlit miktarı artarken, ferrit miktarı ise azalmaktadır. Alaşımlandırma ile akma mukavemeti, çekme mukavemeti ve sertlik değerleri iyileşirken darbe tokluğu azalmaktadır.

En düşük kesme kuvveti değeri, alaşımsız KGDD'nin tornalandığında kaydedildi. Ancak, alaşımsız KGDD en yüksek yüzey pürüzlülüğü değerleri gösterdi. Alaşımlandırmanın yüzey pürüzlülüğü üzerinde belirgin bir etkisi olduğu gözlemlendi, kesme kuvvetleri üzerindeki etkileri biraz daha düşük oldu ve kesme kuvvetleri için %11, yüzey pürüzlülüğü değerleri için ise yaklaşık %50'lik olumlu bir değişim tespit edildi.

En düşük aşınma kaybı, ağırlıkça %0,8 Mn ile alaşımlandırılan KGDD’de edildi, ancak en yüksek mekanik özellikler ağırlıkça hem %0,8 Mn hem de %0,8 Cu ile alaşımlandırılan KGDD’de elde edildi. Mn ile alaşımlandırılan KGDD’nin oda sıcaklığında gerçekleştirilen aşınma deneyine göre 200 °C’de aşınma hızı arttı ve 600 °C’ye kadar aşınma hızı değişmedi. Sıcaklığın artmasıyla aşınma hızında en fazla artış, alaşımsız ve hem Mn hem de Cu ile alaşımlı KGDD’de tespit edildi.

Ağırlıkça %0,8 Mn ile alaşımlandırılan KGDD’nin korozyon direnci, ağırlıkça %3,5 NaCl ortamında en yüksek bulundu. Ancak ağırlıkça hem %0,8 Mn hem de %0,8 Cu ile alaşımlandırılan KGDD’nin korozyon direncini oldukça düşürmektedir. Ağırlıkça %0,8 Mn ile alaşımlandırılan KGDD, hem kuru hem de koroziv ortamlarda daha düşük sürtünme katsayısı (COF) ve daha düşük aşınma hızına sahiptir.

KGDD’lerin kuru ve koroziv koşullarda aşınma mekanizması yumuşak ferrit fazının plastik deformasyonu ve sürüklenmesini içerir, ayrıca yapısal kusurlar nedeniyle aşınma ürünlerinin ve koroziv çözeltinin nüfuz etmesini içerir. Ancak aşınma hasarı, sert perlit fazıyla desteklenen matriste grafitin yağlayıcı özellikleriyle azalmıştır.

Anahtar Kelimeler: Aşınma, Küresel Grafitli Dökme Demir, İşlenebilirlik, Korozyon, Sertlik, Tokluk, Tribokorozyon,

ABSTRACT

MECHANICAL, MACHINABILITY, HIGH TEMPERATURE WEAR, CORROSION AND TRIBOCORROSION BEHAVIOR OF ALLOYED EN-GJS-500-7 QUALITY SPHEROIDAL GRAPHITE DUCTILE IRON

Currently, spheroidal graphite cast iron (KGDD) is widely used in industrial production because of its favourable mechanical properties and economic advantages over the steels, and manufacturers are exploring ways to develop components from KGDD with lower thicknesses to increase specific strength (strength/weight ratio). The requirements on high strength, machining, corrosion and wear resistance, high tribocorrosion performance of KGDD are increasing, and its producing technology has been an important field of research for several years.

The mechanical, machining, corrosion, wear and tribocorrosion properties of KGDD are largely determined by its metallographic structure. An appropriate balance of ferrite and pearlite in the ductile iron matrix can produce satisfactory strength, machining, corrosion, wear and tribocorrosion performance. In KGDD production, the alloying elements (Si, Mn, Cu, Cr, Sn and Sb) are usually used to control the microstructure and to improve the mechanical properties of the material. Each alloying element doesn't work independently and exhibits some complex interaction between them. Hence, the appropriate balance of the amount of the alloying elements must be carefully considered in the KGDD production.

The effect of alloying (Mn, Cu and Mn) on the mechanical, machinability, corrosion, tribocorrosion, and high temperature wear behavior of 15 mm diameter EN-GJS-500-7 quality pearlitic/ferritic KGDD supplied from Demisaş A.Ş. were investigated.

When alloyed with both 0.8% Mn and 0.8% Cu by weight, the number of graphite nodules in KGDD decreased, while their sizes increased. Unalloyed KGDD contains a large amount of the ferrite phase, and the volume fraction of pearlite expands with alloying. With alloying, the amount of pearlite increases, while the amount of ferrite decreases. Alloying improves yield strength, tensile strength, and hardness values, while reducing impact toughness.

The lowest cutting force value was recorded when turning the unalloyed KGDD. However, the unalloyed KGDD showed the highest surface roughness values. It was observed that alloying had a significant effect on surface roughness, with slightly lower effects on cutting forces (11%). A positive change of approximately 50 % for surface roughness values was detected.

The minimum wear loss was obtained in the KGDD alloyed with 0.8% Mn by weight, but the highest mechanical properties were achieved in the KGDD alloyed with both 0.8% Mn and 0.8% Cu by weight. In the wear test conducted at room temperature for the Mn-alloyed KGDD, the wear rate increased at 200 °C, and the wear rate remained constant up to 600 °C. The most significant increase in wear rate with increasing temperature was observed in the unalloyed KGDD and in the KGDD alloyed with both Mn and Cu.

The corrosion resistance of KGDD alloyed with 0.8% Mn by weight was found to be the highest in a 3.5% NaCl environment. However, alloying KGDD with both 0.8% Mn and 0.8% Cu by weight significantly reduces its corrosion resistance. KGDD alloyed with 0.8% Mn by weight exhibits lower coefficients of friction (COF) and lower wear rates in both dry and corrosive environments.

The wear mechanism of KGDDs under both dry and corrosive conditions involves the plastic deformation and ploughing of the soft ferrite phase, along with the penetration of wear debris and corrosive solution due to structural defects. However, wear damage is reduced by the lubricating properties of graphite in the matrix, supported by the hard perlite phase.

Keywords: Wear, Spheroidal Graphite Ductile Iron, Machinability, Corrosion, Hardness, Toughness, Tribocorrosion,

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖN SÖZ.....	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT	iv
İÇİNDEKİLER.....	viii
TABLolar LİSTESİ.....	viii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	ix
KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRLER (KGDD).....	3
2.1. KGDD'lerin Özelliklerine Alaşım Elementlerinin Etkisi	6
3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	9
4. MATERYAL VE YÖNTEM.....	15
4.1. Deney Düzenegi ve Numune Hazırlanması.....	15
4.2. Yapısal Karakterizasyon Çalışmaları.....	15
4.3. Mekanik Karakterizasyon Çalışmaları.....	15
4.4. Aşınma Deneyleri.....	16
4.5. Talaşlı İmalat Deneyleri.....	16
4.6. Elektrolitik Korozyon Deneyleri.....	18
4.7. Tribokorozyon Deneyleri.....	19
5. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	20
5.1. Yapısal Karakterizasyon Sonuçları.....	20
5.2. Mekanik Karakterizasyon Sonuçları.....	30
5.3. Aşınma Sonuçları.....	32
5.4. Talaşlı İmalat Sonuçları.....	43
5.5. Korozyon Sonuçları.....	45
5.6. Tribokorozyon Sonuçları.....	49

6. SONUÇLAR.....	52
KAYNAKÇA.....	54



TABLÖLAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 4.1. İncelenen KGDD’lerin kimyasal bileşimleri ve kodları.....	15
Tablo 4.2. Talaşlı İmalat Parametreleri.....	17
Tablo 5.1. İncelenen KGDD’lerin Kütlesel Sertliği ve Fazların Sertliği.....	31
Tablo 5.4. İncelenen KGDD’lerin Korozyon Verileri.....	47



ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1. KGDD'lerin (a) ferritik, (b) perlitik (255 HB), (c) 700 °C'de (1290 °F) 3 saat tavlanmış ferritik (d) yağda su verilmiş ve sertliği 255 HB olacak şekilde temperlenmiş perlitik mikroyapı görüntüleri (%2 nital dağlanmış 100X büyütme).....	4
Şekil 2.2. Farklı dökme demirlerin gerilme-uzama eğrisine grafit morfolojisinin etkisi.....	5
Şekil 4.1. DMG Mori Gildemeister CTX Alpha 300 CNC Torna Tezgahı.....	17
Şekil 4.2. Kesici Ucun Kesit Görüntüsü.....	18
Şekil 4.3. Tribolojik Test Aparatına Göre Referans, Çalışma ve Karşı Elektrotların Konumunu Gösteren Elektrokimyasal Test Düzeni.....	19
Şekil 5.1. Grafit Nodüllerinin Boyutunu ve Dağılımını Ortaya Çıkarmak için Dağlanmamış KGDD'lerin Parlatılmış Mikroyapı Görüntüleri: (a) $\text{Cu}_{0,5}\text{Mn}_{0,2}$, (b) $\text{Cu}_{0,5}\text{Mn}_{0,8}$ ve (c) $\text{Cu}_{0,8}\text{Mn}_{0,8}$	20
Şekil 5.2. İncelenen KGDD'lerde Grafit İçeriği, Boyut Dağılımı ve Küreselliği.....	21
Şekil 5.3. Farklı Oranlarda Ferrit ve Perlit Gösteren KGDD'lerin Dağlanmış Mikroyapı Görüntüleri: (a) $\text{Cu}_{0,5}\text{Mn}_{0,2}$, (b) $\text{Cu}_{0,5}\text{Mn}_{0,8}$ ve (c) $\text{Cu}_{0,8}\text{Mn}_{0,8}$	22
Şekil 5.4. İncelenen KGDD'lerdeki Mikroyapı Bileşenlerinin Faz Oranları.....	23
Şekil 5.5. Alaşımsız ($\text{Cu}_{0,5}\text{Mn}_{0,2}$) KGDD'nin C, Si, Cu ve Fe Segregasyon Ölçüm Sonuçları.....	24
Şekil 5.6. Mn ile Alaşımlandırılan ($\text{Cu}_{0,5}\text{Mn}_{0,8}$) KGDD'nin C, Si, Fe ve Mn Segregasyon ölçüm Sonuçları.....	25
Şekil 5.7. Hem Mn Hem de Cu ile Alaşımlandırılan ($\text{Cu}_{0,8}\text{Mn}_{0,8}$) KGDD'nin C, Si, Fe, Cu ve Mn Segregasyon Ölçüm Sonuçları.....	26
Şekil 5.8. Mn ile Alaşımlandırılan ($\text{Cu}_{0,5}\text{Mn}_{0,8}$) KGDD'de Elementlerin Dağılımını Gösteren Nokta Haritaları.....	27
Şekil 5.9. Hem Mn Hem de Cu ile Alaşımlandırılan ($\text{Cu}_{0,8}\text{Mn}_{0,8}$) KGDD'de Elementlerin Dağılımını Gösteren Nokta Haritaları.....	28
Şekil 5.10. (a) Alaşımsız ($\text{Cu}_{0,5}\text{Mn}_{0,2}$), (b) Mn ile Alaşımlandırılan ($\text{Cu}_{0,5}\text{Mn}_{0,8}$) ve (c) Hem Mn Hem de Cu ile Alaşımlandırılan ($\text{Cu}_{0,8}\text{Mn}_{0,8}$) KGDD'lerdeki Grafit, Ferrit ve Perlit	

Morfolojisini Gösteren BSE Modundaki EDS Analiziyle Birlikte SEM Mikroyapı Görüntüleri.....	29
Şekil 5.11. Alaşımsız ($\text{Cu}_{0,5}\text{Mn}_{0,2}$), Mn ile Alaşımlandırılan ($\text{Cu}_{0,5}\text{Mn}_{0,8}$) ve Hem Mn Hem de Cu ile Alaşımlandırılan ($\text{Cu}_{0,8}\text{Mn}_{0,8}$) KGDD’lerin XRD Paternleri.....	30
Şekil 5.12. Alaşımsız ($\text{Cu}_{0,5}\text{Mn}_{0,2}$), Mn ile Alaşımlandırılan ($\text{Cu}_{0,5}\text{Mn}_{0,8}$) ve Hem Mn Hem de Cu ile Alaşımlandırılan ($\text{Cu}_{0,8}\text{Mn}_{0,8}$) KGDD’lerin Akma Mukavemeti, Çekme Mukavemeti, Yüzde Uzama, Kütlesel Sertlik ve Darbe Direnci Sonuçları.....	32
Şekil 5.13. Alaşımsız ve Alaşımlı KGDD’lerin Sıcaklığa Bağlı Olarak Aşınma Hızının Değişimi.....	33
Şekil 5.14. Alaşımsız ve Alaşımlı KGDD’lerin Sıcaklığa Bağlı Olarak Ağırlık Kazancının Değişimi.....	33
Şekil 5.15. Alaşımsız ve Alaşımlı KGDD’lerin Sıcaklığa Bağlı Olarak Aşınma Hızına Sertliğin Etkisi	35
Şekil 5.16. Alaşımsız ve Alaşımlı KGDD’lerin Sertlik ve Kırılma Tokluğu Arasındaki İlişki..	35
Şekil 5.17. Alaşımsız ve Alaşımlı KGDD’lerin Sıcaklığa Bağlı Olarak Düşük Büyütme Aşınma Yüzey Görüntüleri (X50).....	37
Şekil 5.18. Alaşımsız ve Alaşımlı KGDD’lerin Sıcaklığa Bağlı Olarak Düşük Büyütme Aşınma Yüzey Görüntüleri (X200).....	38
Şekil 5.19. Alaşımsız ve Alaşımlı KGDD’lerin Sıcaklığa Bağlı Olarak Yüksek Büyütme Aşınma Yüzey Görüntüleri (X1000).....	39
Şekil 5.20. Oda Sıcaklığında Gerçekleştirilen Aşınma Deneyinden Sonra (a) Alaşımsız ($\text{Cu}_{0,5}\text{Mn}_{0,2}$), (b) Mn ile Alaşımlandırılan ($\text{Cu}_{0,5}\text{Mn}_{0,8}$) ve (c) Hem Mn Hem de Cu ile Alaşımlandırılan ($\text{Cu}_{0,8}\text{Mn}_{0,8}$) KGDD’lerin Aşınma Yüzeylerinde EDS Analiziyle Birlikte SEM Görüntüleri.....	40
Şekil 5.21. (a) Alaşımsız ($\text{Cu}_{0,5}\text{Mn}_{0,2}$), (b) Mn ile Alaşımlandırılan ($\text{Cu}_{0,5}\text{Mn}_{0,8}$) ve (c) Hem Mn Hem de Cu ile Alaşımlandırılan ($\text{Cu}_{0,8}\text{Mn}_{0,8}$) KGDD’lerin Aşınma Sürecinin Şematik Diyagramı.....	41
Şekil 5.22. Oda Sıcaklığında Gerçekleştirilen Aşınma Deneyinde Mn ile Alaşımlandırılan KGDD’nin Aşınma Yüzeyinde Deformasyona Uğrayan Küresel Grafit.....	41

Şekil 5.23. (a) 25 °C, (b) 200 °C, (c) 400 °C ve (d) 600 °C’de Alaşimsız ve Alaşımli KGDD’lerin Sürtünme Katsayısı Değişimleri.....	42
Şekil 5.24. Alaşimsız ve Alaşımli KGDD’lerin İşlenmesi Sırasında Kesme Kuvvetinin Değişimi.....	43
Şekil 5.25. (a) Alaşimsız ($\text{Cu}_{0,5}\text{Mn}_{0,2}$), (b) Mn ile Alaşımlandırılan ($\text{Cu}_{0,5}\text{Mn}_{0,8}$) ve (c) Hem Mn Hem de Cu ile Alaşımlandırılan ($\text{Cu}_{0,8}\text{Mn}_{0,8}$) KGDD’lerin Talaşlı İmalat Sonrasında Yüzey Pürüzlülük Değerleri (R_a , R_y , R_z , R_q , R_t).....	43
Şekil 5.26. Alaşimsız ve Alaşımli KGDD’lerin OCP Eğrileri.....	45
Şekil 5.27. Alaşimsız ve Alaşımli KGDD’lerin Tafel Eğrileri.....	46
Şekil 5.28. Korozyon Deneyinden Sonra Alaşimsız ve Alaşımli KGDD’lerin Düşük ve Yüksek Büyütme Korozyon Yüzey Görüntüleri.....	48
Şekil 5.29. (a) Bir Sürtünme Deneyinin Tamamı Boyunca, Kayma Başlamadan Önce Her Bir Numune için 10 Dakika Boyunca ve Deneyler Tamamlandıktan Sonra Aynı Süre Boyunca Süreye Bağlı Olarak Çalışma Elektrot Potansiyelinin (E_{kor}) Değişimi, (b) 30 N Yük Altında, 1,9 cm/s Kayma Hızında OCP Şartları Altında Sürtünme Katsayısındaki Değişim.	49
Şekil 5.30. Alaşimsız ve Alaşımli KGDD’lerin Kuru Kayma ve Korozi Aşınma Koşulları Altında Aşınma Hızları.....	50
Şekil 5.31. Tribokorozyon Deneylerinden Sonra Alaşimsız ve Alaşımli KGDD’lerin Aşınma Yüzey Görüntüleri.....	51

KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ

μ : Sürtünme Katsayısı

μm : Mikrometre

cm : Santimetre

nm : Nanometre

m^2 : Metrekare

g : Gram

dk. : Dakika

ağ. : Ağırlıkça

% : Yüzde

$^{\circ}\text{C}$: Celsius (Santigrat Derece)

N : Newton

GPa : Gigapaskal

MPa : Megapaskal

TPa : Terapaskal

OM : Optik Mikroskop

OCP : Açık Devre Potansiyeli

COF : Sürtünme Katsayısı

KGDD: Küresel Grafitli Dökme Demir

EDS: Enerji Dağılım Spektrometresi

SEM: Taramalı Elektron Mikroskobu

Al_2O_3 : Alümina

HV: Vickers Sertlik

dev. : Devir

s. : Saniye

1. GİRİŞ

Küresel grafitli dökme demirler (KGDD), mikroyapının kontrolüyle çok çeşitli özelliklere sahip olacak şekilde üretilen bir dökme demir grubudur. KGDD'lerde karbon morfolojisi, döküm durumunda küçük küreler (nodüler) olarak bulunmaktadır. Bu yapı eriyikten elde edilir ve karbon oluşumuna engel olacak çok düşük kükürt içeriğine sahip bir dökme demir eriyiğine seryum, magnezyum, sodyum veya diğer elementler ilave edilerek karbon küreler haline dönüştürülür. KGDD'lerde ötektik grafit, katılaşma sırasında erimiş demirden, ötektik grafitin gri dökme demirde ayrılmasına benzer bir şekilde ayrılmaktadır. KGDD'ler, gri dökme demir veya dövülebilir demire göre çok daha mukavemetli ve daha yüksek uzama özelliğine sahiptir. Küresel grafit, dökme demire kazandırdığı özelliklerden dolayı doğal bir kompozit olarak düşünülebilir (Omran, vd., 2014: 90). Birçok yapısal uygulamada diğer dökme demir türlerine göre KGDD'lerin nispeten yüksek mukavemeti ve tokluğu bir avantaj olarak görülmektedir. Ayrıca dövülebilir demirde temper-karbon yumruları üretmek için KGDD'lere ısıtma işlemi uygulanmasına ihtiyaç duyulmamaktadır (Handbook, 2005: 73). %18'den fazla uzamayı (%25'e kadar) garanti eden kalitelerle yüksek süneklik ve 825 MPa'ı aşan çekme mukavemeti veren KGDD'lerin bu özellikleri malzeme seçimi yapılırken tasarımcı açısından önemlidir. Östemperlenmiş KGDD'ler, 1500 MPa'ı aşan çekme mukavemetiyle daha yüksek mekanik ve aşınma direnci sunmaktadır (PourAsiabi vd., 2013: 90). KGDD'ler özellikle iyi işlenebilirlik ve düşük maliyet ile dişli, pinyon ve krank milleri gibi aşınma direnci istenen parçaların imalatında tercih edilmektedir (Abedi vd., 2010: 622). Bu özellikler sayesinde motor blokları, egzoz manifoldları, tekerlek, dişli kutuları, turboşarj muhafazaları, pompa muhafazaları ve diğer çeşitli otomotiv bileşenleri ve çok çeşitli endüstriyel uygulamalarda spesifik mukavemet oranını artırmak için düşük kalınlıklarda KGDD'ler etkin bir şekilde yer almaktadır. Bu parçaların katılaşması sırasında meydana gelen yüksek soğutma hızı, nodül sayısının artmasına neden olabilir. Özellikle motorun çalışması sırasında açılıp ve kapanan emme ve egzoz supapları silindir kafalarının yüzeyine çarparak aşınmaya maruz kalmaktadır. Ayrıca çevresel koşullar nedeniyle korozyon hasarı da oluşmaktadır. Çevre dostu otomobillere olan talep ve aynı zamanda yakıt verimliliği, sıkıştırma oranı, daha yüksek çalışma sıcaklığı, aşınma, yorulma ve korozyon direnci vb. gibi artan talepler, alaşımlandırılmış KGDD'ler gibi özel malzemelere olan ihtiyacı beraberinde getirmektedir.

Günümüzde, kaplin gövdesi gibi sürtünme ve aşınmanın gerçekleştiği çeşitli parçalarda alaşımlandırılmış KGDD'ler kullanılmaktadır (Vaško, 2020: 168). Krom, nikel, molibden,

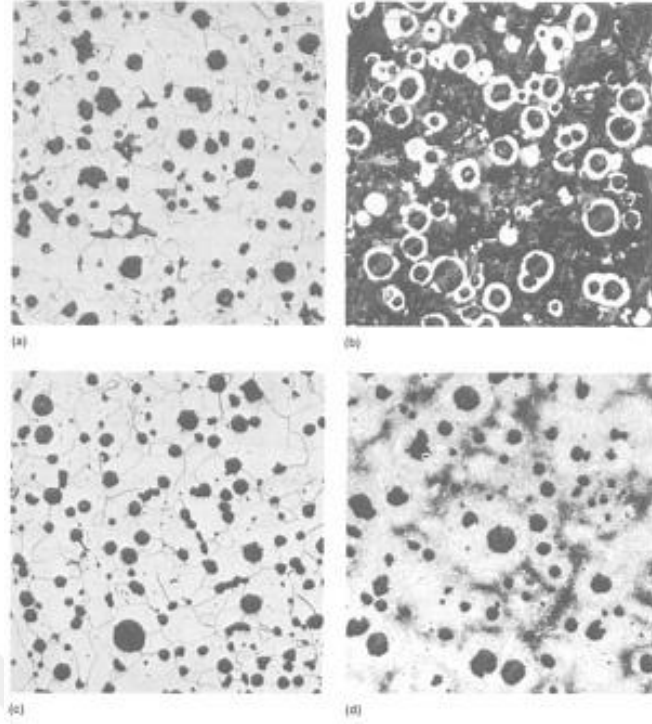
bakır, vanadyum ve bor gibi alaşım elementleri; karbür oluşturucu, perlit kararlaştırıcı veya ferrit oluşumunu teşvik etmek amacıyla tercih edilmektedir. Dökümün kritik kesitlerinde gerekli mekanik özellikleri ve/veya mikroyapıyı elde etmek için gereken ölçüde kontrol etmek için alaşımlama yapılmaktadır. Nodül şekli ve sayısı (grafit nodül sayısı/mm²), KGDD'lerin mekanik özelliklerini etkilemektedir. Nodül sayısı, KGDD üretiminde hassas bir parametredir. Genel olarak, yüksek nodül sayısı, iyi metalurjik kaliteyi gösterir, ancak dökümün her kesit boyutu için optimum bir nodül sayısı aralığı vardır ve bu aralığı aşan nodül sayısı, özelliklerin olumsuz etkilenmesine yol açabilir (Perez vd., 2006: 884; Abedi vd., 2010: 624).

KGDD'ler, yapısında küresel grafit nodüllerinin varlığına atfedilebilecek dikkate değeri mekanik özelliklere sahiptir. Çeliğin yüksek yorulma direnci ve tokluk gibi mekanik özelliklerine ek olarak KGDD'ler, aynı zamanda uygun deformasyon sertleşmesi ve sıcak çalışma özelliklerine de sahiptir. KGDD'lerin bir diğeri avantajı da yaygın olarak hassas ve kritik otomobil parçalarının üretiminde kullanılmasının nedenlerinden biri de düşük maliyetidir (Hosseini vd., 2023: 1). Bu hassas parçalardan biri de krank milinden aldığı hareketi tekrarlı darbe ve kayma hareketine dönüştürerek supapların zamanında açılıp kapanmasını sağlayan eksantrik mili ya da diğeri adıyla kam milidir. KGDD ya da çelik alaşımlarından presle dövülerek veya dökülerek tek parça olarak yapılan bu parça, tek silindirli çim biçme makinelerinden, çok sayıda silindire sahip ağır hizmet deniz motorlarına kadar tüm motor çeşitlerinde kullanılmaktadır. Ucuz otomotiv bileşeni olarak kam mili genellikle korozyon ve/veya yüksek sıcaklık aşınmaya maruz kalırlar. Bu durumda; korozyon, yüksek sıcaklık ve yüksek temas gerilme koşullarında aşınmayı inceleyebilecek sırasıyla tribokorozyon ve yüksek sıcaklık aşınma deneylerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmada, Demisaş A.ř'den temin edilen 15 mm çapında EN-GJS-500-7 kalite perlitik/ferritik KGDD'ye alaşımlandırmanın (Mn, Cu ve Mn) mekanik, işlenebilirlik, korozyon, tribokorozyon ve yüksek sıcaklık aşınma davranışına etkisi incelenmiştir. Bu nedenle, diğeri mekanik özelliklerin yanı sıra, otomotiv sektöründe uzun servis ömrü için korozyon, tribokorozyon ve yüksek sıcaklık aşınma performansı da dikkate alınmalıdır.

2. KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRLER (KGDD)

Dökme demirler, temel olarak çelikler gibi demir ve karbon alaşımıdır ancak daha fazla karbon içerirler. Dökme demirler %2 ile %6,67 karbon içerirler. Yüksek karbon içeriği dökme demiri çok kırılğan yapma eğilimindedir ve ticari olarak üretilen dökme demirler genellikle %2,5 ile %4 arasında karbon içerir. Dökme demirin sünekliği çok düşüktür, hızla erirler ve karmaşık şekillere dökülebilirler. Bu alaşımlara uygulanabilecek tek uygun işlem dökümdür, bu nedenle bunlara dökme demirler denir. Doğru alaşımlama, iyi döküm kontrolü ve uygun ısıtma işlemleri her türlü dökme demirin özellikleri geniş bir aralıkta değiştirilebilir. Dökme demirin fiziksel özellikleri, serbest karbon taneciklerinin şekil dağılımı tarafından büyük ölçüde etkilenecektir. Yaygın dökme demirler kırılğandır, düşük mukavemet özelliklerine sahiptir ve çoğu çelikten daha hızlı dökülebilirler. Beyaz dökme demir, dövülebilir dökme demir, gri dökme demir, küresel grafitli dökme demir (KGDD) ve alaşımlı dökme demir olmak üzere farklı tipte dökme demirler bulunmaktadır (Panda vd., 2015: 15).

KGDD'ler, Fe açısından zengin bir matris içine gömülmüş grafit küresellerden oluşmuş kompozit malzemelerdir. Mekanik özellikleri hem nodül sayısına hem de katılaşma aşaması sırasında grafit ile birlikte oluşan yüksek sıcaklıktaki östenitin dönüşümünden kaynaklanan matris yapısına bağlıdır. Döküm durumunda bu dönüşüm, ferrit veya perlit veya bunların bir karışımına, bazen de küçük kesitlerde dökülen yüksek alaşımlı yapılarda martenzite yol açabilir. Beynit yapısı dökme demirlerde gözlenmez, uygun ısıtma işleminden sonra elde edilir. Ferritik-perlitik matris, küresel grafitlerin etrafındaki ferrit halkalarından ve onlardan uzaktaki perlitik yapıdan (boğa gözü) oluşmaktadır (Lacaze vd., 2016: 1606). KGDD'ler, sfero veya sünek dökme demir olarak bilinir, grafitler mikroyapıda küçük küreler olarak bulunmaktadır (Şekil 2.1). KGDD'de ötektik grafit, gri dökme demirde ötektik grafitin ayrılmasına benzer bir şekilde katılaşma sırasında erimiş demirden ayrılarak oluşmaktadır. Ancak, dökümden önce dökme demirin kimyasal bileşimine ilave edilen katkı maddeleri sayesinde, grafit küre halinde büyümektedir. KGDD'ler yüklemeye maruz kaldığında mikroyapıda bulunan küresel grafitlerin etrafında gerilme konsantrasyonu oluşmaz. Bu nedenle, KGDD'lerin mukavemeti, sünekliği ve tokluğu diğer dökme demir türlerine göre daha yüksektir (ASM, 1990:8). KGDD'ler, artırılmış mukavemet, süneklik ve tokluk gibi özelliklere sahip olmasına rağmen, gri dökme demirle karşılaştırıldığında talaşlı imalat sırasında zayıf performans sergileyebilirler. Ancak, KGDD'ler çelik parçaların yerine kullanıldığında, daha iyi işlenebilirliği en önemli avantaj olarak düşünülmektedir (Seker vd., 2003: 47).

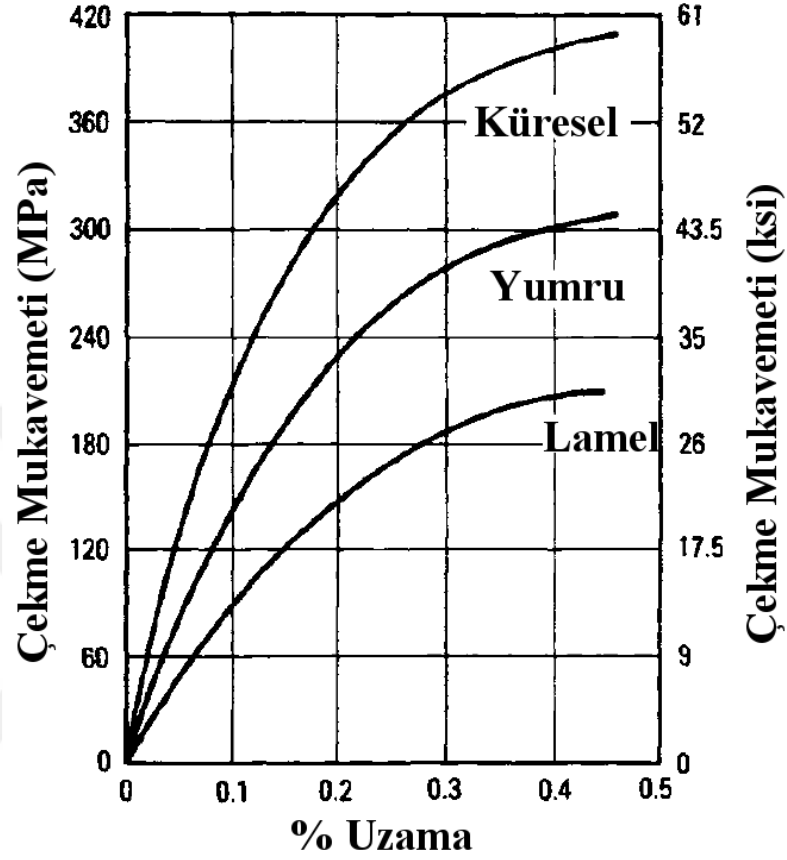


Şekil 2.2. KGDD’lerin (a) ferritik, (b) perlitik (255 HB), (c) 700 °C’de (1290 °F) 3 saat tavllanmış ferritik (d) yağda su verilmiş ve sertliği 255 HB olacak şekilde temperlenmiş perlitik mikroyapı görüntüleri (%2 nital dağlanmış 100X büyütme)

Kaynak: (ASM, 1990: 8).

Diğer dökme demirlere göre KGDD’lerin nispeten yüksek mukavemeti ve tokluğu birçok yapısal uygulamada bir avantaj sunmaktadır. Ayrıca, KGDD’lerde grafitlerin küresel morfolojiye dönüşmesi için ısıl işleme ihtiyaç duyulmaz. Şekil 2.2’de görüldüğü gibi grafit şekli dökme demirlerin mekanik özelliklerini etkileyen en önemli faktördür. KGDD’ler matris faza bağlı olarak ferritik, perlitik, martenzitik ve östenitik olarak sınıflandırmak mümkündür. KGDD’ler genellikle ferrit yapıdadır. Ancak düşük akma mukavemeti ve yüksek sünekliği, belirli uygulamalarda kullanılmasını sınırlamaktadır. Bu nedenle, karbon sementit formunda ilave edilerek, özelliklerin artmasına neden olur. Bu tür KGDD’lere “perlitik KGDD” denir. Soğutma hızı çok yüksekse, matris yapı martenzite dönüşür. Endüstriyel uygulamalar için herhangi bir malzemeyi düşünürken, mekanik özellikler, fiziksel özellikler ve servis koşullarını dikkate almalıyız. Mekanik özellikler; çekme mukavemeti, sertlik, uzama, akma mukavemeti, elastisite modülü, darbe ve yorulma mukavemetini temsil ederken, fiziksel özellikler ise sönümleme kapasitesi, iletkenlik ve işlenebilirliği göstermektedir. Kullanılacak malzeme, aşınma direnci, ısı direnci ve korozyon direnci gibi özellikleriyle belirlenebilen servis koşullarında hasara uğramadan kalabilmelidir. KGDD’lerin kalıp verimi normal olarak diğer

dökme demirlerden daha yüksektir. Porozite genelde merkezde kaldığı için KGDD'ler x-ışını standartlarına göre üretilmektedir. Diğer dökme demirlerde porozite istenmez çünkü boşluklar çatlak olarak sıcak bölgelerin yüzeyine ilerlemektedir.



Şekil 2.2. Farklı dökme demirlerin gerilme-uzama eğrisine grafit morfolojisinin etkisi.

Kaynak: (ASM, 1990: 26).

2.1. KGDD'lerin Özelliklerine Alaşım Elementlerinin Etkisi

KGDD'lerin en önemli avantajlarından biri, döküm halinde yaygın uygulamalarıdır. Bu, üretim maliyetini azaltır ve ısıtma işlemiyle ilgili olası sorunlardan kaçınılmasına yardımcı olur. Tamamen ferritik veya tamamen perlitik bir matris elde etmek için östenitin ötektoid dönüşümünün kontrolü, alaşımlama veya soğutma oranındaki değişiklik (pratik olarak döküm kesit boyutuna bağlıdır) ile sağlanır. En yaygın perlit oluşumunu teşvik eden alaşım elementleri Mn, Cu, ve Sn'dir. Ancak empürite veya eser miktarda bulunan elementler nihai mikroyapıyı büyük ölçüde etkileyebilir. Nodül sayısının artması, östenitten grafit nodüllerine karbon difüzyonunu destekleyerek ve ferrit çekirdeklenmesi için olası bölgeleri çoğaltarak ferrit miktarı üzerinde olumlu bir etkiye sahip olabilir, ancak bunun düşük nodül sayısında daha etkili olduğu belirtilmektedir. Daha kesin olarak, düşük nodül sayılı KGDD'lerin matris yapısı soğuma hızına duyarlı olacakken, yüksek nodül sayısında bir miktar ferrit oluşumunu önlemek için çok yüksek soğutma hızları gerekli olacaktır (Lacaze vd., 2016: 1606). Egzoz manifoldları gibi yüksek sıcaklık uygulamalarında çoğunlukla ferritik matrisli dökme demirler kullanılmaktadır. Bununla birlikte, yüksek sıcaklık uygulamalarına yönelik artan talep, imalatçıların paslanmaz çelikler ve Ni esaslı östenitik KGDD'ler gibi pahalı malzemeleri kullanmaya yöneltmiştir. Bu nedenle talebi düşük maliyetli malzemeler kullanarak karşılayabilmek için yüksek sıcaklık dayanımı ve oksidasyon direnci iyileştirilmiş yeni alaşımlar geliştirilmelidir (Çelik vd., 2020: 190). Aşağıda kararlı ve yarı kararlı sistemlerde östenitin ötektoid dönüşüm prensipleri ile ilgilenirken, özellikle perlit oluşumunu teşvik eden alaşım elementlerinin rolüne vurgu yapılacaktır.

1. Silisyum (Si): Dökme demir matrisindeki Si, ferrit matrisine perlitik bir yapı kazandırmaktadır. Si, dökme demirin yüksek sıcaklıklarda performansını artırırken, ferrit matrisini stabilize etmekte ve oksidasyonu engelleyen Si'ca zengin yüzey tabakası oluşturmaktadır. Si içeriğinin artmasının potansiyel olarak olumsuz etkileri aşağıda sıralanmıştır:

- i) Darbe enerjisini azaltması,
- ii) Sünek gevrek geçiş sıcaklığını artırması.
- iii) Isıl iletkenliğini azaltması.

Si, ferrit fazını teşvik etmek ve güçlendirmek için kullanılır. Bu nedenle, ferrit kalite KGDD üretirken genellikle Si içeriği, %2,2'nin altında tutulur ve perlitik KGDD üretirken %2,5 ile %2,8 arasında kullanılır.

2. Manganez (Mn): Mn, hafif bir perlit teşvik edici olarak işlev görmektedir ve bir miktar akma mukavemeti ve sertlik gibi gerekli özelliklere sahiptir. Mn, ötektoid dönüşümün başlangıcını geciktirir, C'un ferrit içindeki difüzyon hızını azaltır ve sementit (Fe_3C) fazını da stabilize etmektedir. Ancak buradaki sorun, Mn'in neden olduğu kırılganlıktır, bu nedenle sınırlayıcı aralık genellikle 0,3 ile 1,0 arasında olmalıdır. Mn'in kararlı sistemde östenitin ayrışması sırasında ferritin büyüme kinetiği üzerindeki olumsuz etkisi, karbonun grafit nodüllerinin etrafındaki ferrit halkası üzerinden difüzyonunu sürüklenme kuvveti açısından açıklanmıştır (Lacaze vd., 1997: 2015).

3. Bakır (Cu): Cu, güçlü bir perlit teşvik edici özeliğe sahiptir. Bu, akma mukavemetini artırırken aynı zamanda çekme mukavemetini ve sertliği de artırmaktadır ve matris içinde kırılganlık oluşturmaz. Cu, KGDD'lerde östenit dengeleyici olarak bilinir. Cu ilavesi, grafit nodüllerinin yakınında, C atomlarının grafit nodüllerine difüzyonunu bloke eden bir bariyer oluşturmuş olabilir; bu nedenle östenit soğutmanın ötektoid dönüşümü sırasında önemli miktarda perlit üretmektedir (Hsu ve Lin, 2014: 1520). Genellikle az miktarda Cu, perlitik KGDD'de perlit inceltmek için ilave edilir. Cu, grafit hacim oranını artırmakta etkilidir ve bu oran, %0,02 Cu içeren KGDD'de %3,79 iken %2,02 Cu içeren KGDD'de %6,55'e kadar artırarak grafit hacmi oranında %72,8'lik bir artışı temsil etmektedir (Prasetyo vd., 2011: 388). Bu nedenle, KGDD'lerin perlit sınıfında Cu genellikle %0,4 ila %0,8 arasında tutulurken, ferrit sınıfında ise bir kirletici özelliكتedir. Cu'ın, düşük Mn ilavesi ile bir araya getirildiğinde yalnızca bir perlit teşvik edici rolü olabileceği bulunmuştur (Lacaze vd., 1997: 2015).

4. Nikel (Ni): Ni, darbe değerini etkilemeden çekme mukavemetini artırmaya yardımcı olduğu için 0,5-2,0 aralığında olabilir. Ferriti güçlendirirken, ancak dökülebilirliği azaltma konusundaki etkisi Si elementinden çok daha azdır. Ancak büyük miktarlarda eklenmesi durumunda (%2'nin üstünde) kırılganlık riski oluşmaktadır. Yüksek maliyet nedeniyle genellikle matriste eser miktarda bulunmaktadır.

5. Molibdenum (Mo): Mo, hafif bir perlit teşvik edici olarak işlev görmektedir. Özellikle kalın kesitlerde karbür oluşturmaktadır. Akma mukavemetini ve sertliği artırmaktadır. Düşük çekme mukavemeti ve süneklik ile kırılganlık tehlikesi vardır. Ayrıca yüksek sıcaklık özelliklerini iyileştirmektedir. Mo ilavesi, %3.5 NaCl çözeltisinde korozyon potansiyelini dikkate değer şekilde artırabilir ve korozyon akım yoğunluğunu azaltabilir (Han vd., 2015: 314).

6. Krom (Cr): Yüzeyde krom oksit tabakası oluşturarak korozyonu önlediği için ve yüzeyin atmosfere daha fazla maruz kalmasını engellediği için tercih edilir. Ancak güçlü bir karbür oluşturuşu olduğundan, karbürsüz bir yapıda gerekli değildir.

7. Sülfür ve Fosfor: Fosfor (P) soğuk kırılmalığa neden olduğundan ve dökme demirin özelliklerini olumsuz etkileyeceğinden, genellikle çok düşük tutulur veya hiç kullanılmaz. Ancak sülfür (S) ilave edilirken daha iyi işlenebilirlik için kullanılır, ancak genellikle yaklaşık %0,009 ile %0,015 arasında tutulur. S'nin daha fazla ilave edilmesi, sıcak kırılmalığa neden olabilir (Mittal ve Nanda, 2010: 24).

8. Niyobyum (Nb): Nb ilavesinin perlit oluşumunu teşvik ettiğı, perlit lamellerinin aralığını azalttığı ve grafitleşme derecesini azalttığı görülmüştür. Nb içeriğı ağırlıkça %0,08'den az olduğunda grafitten kaynaklanan küresellik ve nodül sayısı önemli ölçüde değişmemiştir. Nb içeren KGDD'lerin yüksek deformasyon sertleşme hızları, onların kendiliğinden büyük ölçüde sertleşebildikleri anlamına gelmektedir, bu da akma sonrası hafif bir plastik şekil değişikliğine uğrayarak kendini giderek daha fazla mukavemetlendirdiğı anlamına gelir (Chen vd., 2017: 416).

9. Alüminyum (Al): Al ilavesiyle serbest ferrit ve karbür azalırken, perlit hacim yüzdesi ise artmaktadır. Al içeriğindeki artış ile aynı zamanda perlit tabakaları arasındaki mesafede azalmaktadır. Al ile alaşımlandırma sonucu Al_6Fe , $AlFe_3C_{0.5}$, Fe_3Al ve $FeAl$ gibi metaller arası bileşikler oluşmaktadır. Al içeriğinin artmasıyla ferrit ve perlitin mikrosertliği ve kütsel sertliği önemli ölçüde artmaktadır (Shayesteh-Zeraati vd., 2010: 129).

10. Vanadyum (V): V ilavesinin perlit oluşumunu teşvik ettiğı, perlit lamellerinin aralığını azalttığı ve grafitleşme derecesini azalttığı görülmüştür. V içeriğı arttıkça grafit nodül sayısının azalmasıyla galvanik çift etkisinin azalması korozyon direncinin artmasına neden olmaktadır. Aşınma direnci açısından ağırlıkça hem %0,5 hem de %0,75 V içeren KGDD'lerin kullanılması, daha yüksek korozyon direnci için ise ağırlıkça %0,75 V içeren KGDD'nin kullanılması önerilmiştir (Turu ve Gecu, 2023: 8).

3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Toktaş vd. (2023), KGDD'lerin yüzeyinde oluşturulan borür tabakalarının kırılma tokluğunu Vickers batıcı uç yöntemi kullanarak incelediler. Bu amaçla alaşımlı (Cu, Ni ve Mo) ve alaşımsız KGDD'ler 900 ve 950 °C sıcaklıklarda 2, 4, 6 ve 8 saat süreyle borlanmıştır. Borür tabakasının kırılma tokluğu, 300 g'lık bir yük altında Vickers batıcı uç kullanılarak test edildi. Alaşımsız KGDD'de borlama ile elde edilen yüzey sertlikleri borlamasız KGDD'lerin sertliğine göre 5, 45-6, 69 kat daha yüksek çıkmıştır. Genel olarak alaşımlı KGDD'ler aynı borlama parametreleri altında daha kalın borür tabakaları elde edilmiştir. Her iki dökme demir tipinde de borlama süresine bağlı olarak kırılma tokluğu 900 °C'de artmış, 950 °C'de ise azalmıştır.

Turu ve Gecu (2023), V (ağırlıkça %0, 0,25, 0,5, 0,75 ve 1) ile alaşımlandırılan KGDD'lerin aşınma ve korozyon özelliklerini incelediler. V içeriğinin ağırlıkça %0,5'e kadar artmasıyla küresel vanadyum karbür oluşumu nedeniyle aşınma direncinin arttığı, ancak daha yüksek V içeriği ile yüksek dallanmış ötektik karbür oluşumu nedeniyle bir azalmaya neden olduğu ortaya çıktı. Aşınma kayıpları, uygulanan yüklerle birlikte artarken, kayma hızının önemli bir etkisi olmadığı görülmüştür. Ağırlıkça %0,75 V ile alaşımlandırılan KGDD'nin korozyon direncinin, ağırlıkça %3,5 NaCl ortamında en yüksek olduğu bulunmuştur. V içeriği arttıkça grafit nodül sayısının azalmasıyla galvanik çift etkisinin azalması korozyon direncinin artmasına neden olmuştur. Tüm bulgular dikkate alındığında aşınma direnci açısından hem ağırlıkça %0,5 hem de %0,75 V içeren KGDD'lerin kullanılması, daha yüksek korozyon direnci için ise ağırlıkça %0,75 V içeren KGDD'nin kullanılması önerilebilir.

Kandemir ve Gecu (2023), mükemmel mekanik dayanım ve aşınma direnci gerektiren otomotiv ve enerji endüstrilerinde geniş bir şekilde kullanılan KGDD'lerin V içeriğinin ve soğuma hızının performansına etkisini araştırdılar. Farklı içeriklerde V (ağırlıkça %0, 0,25, 0,5 ve 1) ile alaşımlandırılan KGDD'ler kum döküm yöntemiyle farklı kesitlerde (10, 20, 30, 40 ve 50 mm) üretildi. V içeriğinin artması ve kesit boyutunun azalması ile birlikte V_8C_7 karbür yoğunluğu ve perlit oranının artarken, ferrit oranı da azalmaktadır. Grafit partiküllerinin sayısı karbür çökmesiyle ters orantılı olduğu tespit edilmiştir. Daha fazla karbür, küreselliğin azalmasıyla birlikte daha kaba grafit kürelerinin oluşumuna yol açtı. Daha ince duvarlı dökümler daha yüksek bir soğutma hızı sağladı ve bu da daha iyi mekanik dayanım sonuçlandırdı. KGDD'lerin akma mukavemeti, çekme mukavemeti ve sertliği artan V ve soğuma hızıyla artmaktadır. Tüm kesit boyutları için en düşük aşınma kayıpları, %0,5 V alaşımlı KGDD'lerde elde edildi. Ağırlıkça %1 V alaşımlı KGDD'lerde artan V_8C_7 karbür

yoğunluğu, darbe dayanıklılığını önemli ölçüde azaltarak, daha yüksek mekanik mukavemetlerine rağmen aşınma direncinin azalmasına neden oldu.

Mourad vd. (2020), farklı tipte aşılama ile tek adımlı ve çift adımlı işlemlerin KGDD'lerin mikroyapısı ve mekanik özelliklerine etkisini incelediler. En etkili aşılama %1,0 Sr, %0,1 Ca, %0,5 Al içeren aşılama ile tek aşamalı veya çift aşamalı olarak kullanıldığında ise %1,0 Sr, %0,5 Al içeren aşılama olduğu tespit edilmiştir. Bu aşılama sırasıyla tek ve çift aşılama işlemleri uygulandığında 20 mm kalınlıkta döküm halindeki KGDD'nin çekme mukavemeti 580 ve 550 MPa olarak tespit edilmiştir. Öte yandan, %2,0'a kadar Ce içeren aşılama kullanılarak yapılan aşılama, yaklaşık 340 MPa ile en düşük çekme mukavemetini gösterdi. Ce içeren aşılama kullanıldığında nodül sayısı 280/mm² iken, %1,0 Sr, %0,1 Ca, %0,5 Al aşılama kullanıldığı zaman nodül sayısı (20 mm kesitte) 100/mm² olmasına rağmen perlit içeriği daha yüksek ve daha yüksek çekme mukavemeti elde edilmiştir.

Çelik vd. (2020), ağırlıkça %3,5 C, %4 Si, %1 Nb, %0–4 Al bileşimine sahip yeni bir KGDD'yi incelemek için Thermo-Calc yazılımıyla termodinamik hesaplamalar uyguladılar. Tasarlanan bileşimler dökülmüş ve hesaplamaları doğrulamak için termal analiz ve mikroyapısal karakterizasyon yapılmıştır. Östenitten perlit (ötektoid dönüşümün) en düşük kritik sıcaklığı, yani A1 hesaplandı ve katılma sırası belirlenmiştir. Hem hesaplamalar hem de deneysel veriler, alüminyum katkısının önemini ortaya koymuştur, çünkü alaşımlardaki alüminyum içeriğinin artmasıyla A1 yükselmiş, böylece alaşımların daha yüksek sıcaklıklarda kullanılma olasılığını göstermiştir. Deneysel veriler, katılma sırasındaki dönüşüm sıcaklığını onaylamış ve katı haldeki denge fazlarının oda sıcaklığında ferrit, grafik ve MC tipi karbürler olduğunu doğrulamıştır.

Omole vd. (2020), dökme demirlerin mekanik performansını iyileştirmek için gereken perlit fazı içeriğini artırmak amacıyla kullanılan düşük ferro alaşım ilavesinin (daha düşük proses ve ürün maliyeti sunan) potansiyellerini değerlendirmek amacıyla düşük miktarlarda molibden, nikel, bakır ve krom ile alaşımlı dökme demirlerin yapısal özellikleri ve mekanik özelliklerini incelediler. KGDD'ler Mo, Ni, Cu ve Cr'nin her biri maksimum %0,2 oranında içermekte ve bir pota fırını kullanılarak üretilmiştir. Sonuçlar, mikro alaşım ilavelerinin perlit içeriğini %30,63'ten %59,38'e kadar önemli bir artışa neden olduğu gözlenmiştir. Mikro alaşım ilaveleriyle sertlikte %1,4-36,5 aralığında, çekme mukavemetinde ise %35,89-80,55 aralığında artış elde edilmiştir. Genel olarak, mekanik özelliklerin en iyi kombinasyonu, krom ve bakırın yanı sıra mikro alaşım katkıları olarak molibden, nikel ve krom içeren KGDD bileşimi için elde edilmiştir.

Song vd. (2017), klorürün demir esaslı metallerin korozyon reaksiyonlarında, ürünlerinde ve kinetiğinde önemli bir rol oynadığını bildirmiştir. Özellikle yüksek klorür seviyelerine sahip tuzlu topraklar gibi toprak ortamlarının dökme demir ve karbon çeliğin korozyonu üzerindeki etkilerini görmek amacıyla, altı farklı klorür konsantrasyonlu topraklara demir esaslı metallerin maruz bırakılmasıyla yapılan 3 aylık bir korozyon testi gerçekleştirilmiştir. Klorür iyonlarının, korozyon reaksiyonlarına yön vererek ve bunlara katılarak pas katmanlarının özelliklerini ve bileşimlerini etkilediği görülmüştür. α -FeOOH, γ -FeOOH ve demir oksitleri başlıca korozyon ürünleridir, yüksek klorür konsantrasyonları sağlandığında β -FeOOH yerine β -Fe₈O₈(OH)₈Cl_{1.35} oluşmuştur. Klorür aynı zamanda korozyon hızlarının azalmasını da bastırarak, pas katmanlarını kalınlaştırarak pas bileşimlerini dönüştürerek difüzyon prosesindeki zorluğu arttırmıştır. Karbon çeliği, klorür saldırılarına dökme demirden daha duyarlıdır. Dökme demir ve karbon çeliğinin korozyon kinetiği sırasıyla olasılığa ve çift doğrusal modele uymaktadır.

Górny vd. (2017), östemperlenmiş KGDD'lerin (ADI) yapısını ve özelliklerini şekillendirmede Cu ve Ni'nin etkisini araştırdı. Dönüşüm kinetiğinde ortaya çıkan değişiklikleri takip etmek amacıyla östenitleme ve östemperleme dönüşümleri incelenmiştir. Dilatometrik sonuçlar, Cu ilavesi ve hem Cu hem de Ni ilavesinin, mikroyapıda daha fazla perlit fazı oluşumundan kaynaklanan östenitleştirme sırasında göreceli genleşmenin azalttığını göstermiştir. Östemperleme prosesinin ilk aşamasında Cu ilavesi ve daha büyük ölçüde hem Cu hem de Ni ilavesi, dönüşüm hızını azalttı, maksimum dönüşüm hızı değerlerini daha uzun sürelerle doğru kaymasına neden olmuştur. Cu ilavesinin çekme mukavemeti ve sertliği arttırdığı ancak aynı zamanda ADI'nin darbe direncini azalttığı bulunmuştur. Bu çalışmanın sonucu, ADI'nin statik ve dinamik mekanik özelliklerinin tatmin edici bir kombinasyonunu elde etmek için, uygun ısıtılma işleminin yanı sıra Cu ve Ni'nin optimal bir kombinasyonunun seçilmesi gerektiğini göstermektedir.

Fren gürültüsü, otomotiv sektöründeki müşterilerin en sık karşılaştığı şikayetlerden biridir ve yolcuların hayal kırıklığına uğraması ve garanti maliyetleri gibi sorunlara neden olmaktadır. Otomobilin konforunun ve ses yalıtımının iyileştirilmesiyle birlikte işlevini de yerine getirmesine rağmen fren sesi müşterilerin endişelerini artırmış ve bu gürültünün bir parça hatası olduğuna inanmalarına neden olmuştur. Bir yapıdaki titreşimi azaltabilecek faktörlerden biri, yapının kendi sönümlenme kapasitesindeki artıştır. Bu nedenle titreşim enerjisini dağıtabilen bir malzeme, fren sistemindeki gürültü, titreşim ve sarsıntı sorunlarını en aza indirebilir. Pereira vd. (2016), Co, Si ve Re içeren farklı KGDD'ler üzerinde mekanik özellikler,

mikroyapısal analiz ve sönümlene kapasitesi üzerine deneysel bir çalışma gerçekleştirmiştir. KGDD'lerin çekme özelliklerini korurken veya arttırırken sönümlene kapasitesini arttırmaya olanak tanıyan en umut verici alaşım elementleri Co, Si ve Re olduğu tespit edilmiştir. Çekme özellikleri üzerinde zararlı bir etki olmaksızın sönümlene kapasitesinin iyileştirilmesi, nodül yoğunluğundaki bir artışla birlikte tamamen ferritik bir matrisin katı eriyik sertleşmesi ile ilişkilidir.

Han vd. (2015) çalışmalarında, molibdenin karbürü östemperlenmiş dökme demirin mikroyapısı, aşınma direnci ve korozyon direnci üzerindeki etkileri inceledi. Sonuçlar, döküm halindeki örneklerin mikroyapılarının genellikle nodüler grafit, perlit ve karbürlerden oluştuğunu ve küreselleşme derecesinin 2-3 olduğunu ve grafit boyutunun tüm örneklerde 6-7 büyüklüğünde olduğunu göstermektedir. Molibden içeriği arttıkça, nodüler grafit miktarı azalırken perlit ve karbür miktarı artmaktadır. Tüm ısıt işlemler görmüş örneklerin mikroyapıları genellikle nodüler grafit, iğnems ferrit, kalıntı östenit ve belirli bir miktarda karbür içerir. Molibden içeriği arttıkça, kalıntı östenit ve karbür miktarı artar, iğnems ferrit daha ince hale gelir ve aşınma direnci ile korozyon direnci artmaktadır. Molibden içeriği ağırlıkça %0,570 olduğunda ortalama ağırlık kaybı 0,218 mg/m²'ye düşmekte, korozyon potansiyeli -0,5626 V'ye ulaştı ve korozyon akım yoğunluğu ise 6.361 x 10⁻⁸ A/cm²'ye düşmektedir.

Omran vd. (2014), KGDD'lerin üretimini etkileyen proses parametrelerini incelemiştir. Bu parametreler sırasıyla kimyasal bileşim, döküm kalınlığı, mekanik özellikler, alaşım elementleri ve mikroyapı içermektedir. KGDD'lerin üretiminde kimyasal bileşim optimize edilmiştir. Magnezyum içeriği arttıkça ve döküm kalınlığı azaldıkça küresellik artmıştır. Üretilen KGDD'lerdeki Cu ve Mn içeriği arttıkça perlit miktarı artmış ve mekanik özellikler iyileşmiştir. Küresellik, Mg içeriği ve diğer parametreler arasındaki ilişkileri gösteren deneysel denklemler kurulmuştur. Perlit miktarı, Cu ve Mn içeriğinin artması ile hızla artarken, döküm kalınlığının artmasıyla hafifçe azalır. Cu içeriğinin etkisi, Mn içeriğinin etkisinden daha büyüktür. Son aşılama arttıkça iyi bir metalurjik kalite elde edilir. Üretilen KGDD'lerde Mg içeriği ve küresellik artışıyla çekme mukavemeti ve sertlik artmaktadır. Aşınma direnci, Mg içeriği, nodülerlik ve perlit artışıyla hafifçe iyileşmektedir. Yüksek sıcaklıkta, normal atmosferik koşullarda sıcaklık arttıkça aşınma direnci azalır, ancak Argon(Ar) atmosferi kullanıldığında aynı yüksek sıcaklıkta, küresellik ve perlit artışıyla aşınma direnci artmaktadır.

Rao vd. (2014), Mn ve Cu içeriğinin ferrit-perlit KGDD'lerin mekanik özellikleri ve işleme performansı üzerindeki etkisini incelediler. Farklı Mn ve Cu içerikleri kullanılarak bir dizi Y-blok numunesi döküldü. Mn'nin KGDD'lerin mukavemetini etkili bir şekilde

artırabileceğini, ancak Mn içeriği %0,9'u aştığında şekil alabilirliğini ve işleme performansını önemli ölçüde azalttığı gözlenmiştir. Düşük Mn içeriğinde yüksek mukavemetli dökümler elde etmek için Mn-Cu alaşımlama işlemi de araştırıldı. Sonuçlar, %0,6-%0,8 Mn ve %0,5-%0,8 Cu ile dökme demirin çekme mukavemetinin 600-725 MPa aralığında olabileceğini, uzama miktarının %5,5'in üzerinde kalabileceğini ve işleme performansının tatmin edici seviyede olduğunu gösterdi.

Binczyk vd. (2007), döküm soğuma hızının (ADI üretmek için östemperlemede başlangıç malzemesi olarak kullanılan KGDD'den yapılan döküm) küresel grafitin morfolojisine ve metal matris bileşiminin etkisini incelediler. Mikroyapı morfolojisinin özellikleri, LUCIA bilgisayar programında 10, 20, 40 ve 60 mm çapındaki dökümler kullanılarak belirlendi. Döküm çapının 10 mm'den, 60 mm'ye artırmanın (yani soğuma hızının azaltılmasının), grafit içeriğini %10'dan %12'ye ve ortalama çökelme alanını yaklaşık 150'den 440 μm^2 'ye çıkarırken, 1 mm² başına grafit çökelti sayısını yaklaşık 700'den 260'ye azalttığı, şekil faktörünün ortalama değerini 0,96'dan 0,84'e azalttığı ve matris içindeki perlit içeriğini yaklaşık %96'dan %84'e düşürdüğü kanıtlanmıştır. Kimyasal bileşimin belirgin bir etkisi olmadığı gibi, tek istisna Mo'nun her soğutma hızında matris içinde perlit içeriğini gözle görülür bir şekilde arttırmasıdır.

Dasgupta vd. (2012), Mn ve Cu tek başına veya birlikte KGDD'lerin mikroyapısı, mikro segregasyon ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisini incelediler. Alaşım A (3,18C, 2,64Si, 0,45Mn), alaşım B (3,35C, 2,51Si, 0,82Mn), alaşım C (3,16C, 2,80Si, 1,08Mn, 0,56Cu) ve alaşım D (3,18C, 3,00Si, 1,04Mn, 1,13Cu) eritildi ve Y bloğu test parçaları şeklinde döküldü. A, B ve C alaşımlarının döküm mikroyapıları ferrit-perlitik yapı içerirken, D alaşımı perlitik yapıdan oluşmaktadır. B alaşımının nodül sayısında önemli bir azalma gözlenirken, C ve D alaşımlarında nodül sayıları daha yüksektir ancak ferrit içeriği büyük ölçüde azalmıştır. Alaşım D en mukavemetli olduğu tespit edildi ($\sigma_c=800$ MPa, Uzama = %5); A ve C alaşımları mukavemet açısından onu takip ediyor; B alaşımı ise dördü arasında en düşük mukavemetli olanıdır. Perlit ile birlikte martenzit fazının varlığı bu alaşımların düşük tokluğundan sorumludur. Mikroprob analizi, grafit nodüllerinin yakınında bir miktar Si segregasyonunu ve pratikte çok az Mn segregasyonunu göstermektedir. FE-SEM ile element haritalaması herhangi bir manganez ayrışmasını göstermez.

Seker vd. (2003), farklı miktarlarda Ni ve Cu ile alaşımlandırılmış KGDD'lerin talaşlı imalat testlerinde mikroyapının ve mekanik özelliklerin kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisini incelemiştir. Alaşımsız KGDD'nin talaşlı imalatında en düşük kesme

kuvveti değeri elde edilirken, en yüksek yüzey pürüzlülüğü kaydedildi. Bu durum alaşımsız KGDD'nin yapısındaki yüksek ferrit içeriğiyle açıklanabilir. Alaşımlı KGDD'ler için elde edilen yüzey pürüzlülük değerleri alaşımsız KGDD'ye göre en az yaklaşık %50 daha iyidir. Bu durum sertliklerinin daha yüksek olmasıyla açıklanabilir. Kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğü açısından en iyi sonuçlar %0,7 Ni ve %0,7 Cu ile alaşımlandırılan KGDD'ye aittir.

Shayesteh-Zeraati vd. (2010), Al ile alaşımlandırılmış KGDD'lerin mikroyapısı ve sertliğini incelemişlerdir. Al ile alaşımlandırma ile serbest ferrit ve karbür azalırken, perlit hacim yüzdesi ise artmaktadır. Ayrıca yüksek Al değerlerinde matrisin yaklaşık %85'inin perlit olduğu tespit edilmiştir. Al içeriğindeki artışın aynı zamanda perlit tabakaları arasındaki mesafenin de azalmasına yol açtığı belirtilmektedir. Al ile alaşımlandırma sonucu Al_6Fe , $AlFe_3C_{0.5}$, Fe_3Al ve $FeAl$ gibi metaller arası bileşikler oluşmaktadır. Ayrıca sertlik ölçümleri, Al içeriğinin artmasıyla ferrit ve perlitin mikrosertliğinin ve kütleli sertliğinin önemli ölçüde arttığını göstermektedir.

4. MATERYAL VE YÖNTEM

4.1. Deney Düzenegi ve Numune Hazırlanması

Ergitme işlemi 6000 kg kapasiteli ABB marka indüksiyon ocağında yapılmıştır. Bu çalışmada EN-GJS-500-7 kalite KGDD'lerin kimyasal bileşimleri Tablo 4.1'de verilmiştir. KGDD'lerin metalografik incelemesi kapsamında reçineye alınan numuneler, standart yöntemlerle zımparalanıp parlatıldıktan sonra %2'lik nital çözeltisi ile dağlanarak optik mikroskop (Nikon Eclipse LV150) ve enerji saçınımlı X-ışını spektroskopisi (EDS, Oxford) donanımlı taramalı elektron mikroskop (SEM, Carl Zeiss Supra) ile incelenmiştir.

Tablo 4.1. İncelenen KGDD'lerin kimyasal bileşimleri ve kodları.

Malzeme Kodu	Kimyasal Bileşim (%Ağ.)									
	C	Si	Cu	P	S	Cr	Mn	Mo	V	Ni
Cu _{0,5} Mn _{0,2}	3,70	2,14	0,50	0,019	0,005	0,057	0,24	0,006	0,012	0,026
Cu _{0,5} Mn _{0,8}	3,67	2,19	0,48	0,02	0,003	0,054	0,81	0,009	0,009	0,029
Cu _{0,8} Mn _{0,8}	3,64	2,22	0,81	0,019	0,003	0,055	0,79	0,01	0,009	0,031

4.2. Yapısal Karakterizasyon Çalışmaları

KGDD'lerde grafit morfolojisi, aşınma ve korozyon deneyleri sonrası yüzey görünüşleri optik metal mikroskop (OM) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir. Mikroyapı incelemeleri için KGDD'ler standart metalografik yöntemle hazırlanmıştır. KGDD'lere ait mikroyapısal görünüşler OM ve SEM ile elde edilmiştir. Küresellik, grafit nodül sayısı, ferrit ve perlit içeriği, ASTM 247'ye uygun olarak Clemex Görüntü Analiz yazılımı ile istatistiksel olarak belirlendi. KGDD'lerin faz analizleri Panalitcal X-ışını kırınım ölçer (XRD) cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. XRD ölçümlerinde $\lambda = 1,54059 \text{ Å}$ dalga boyuna sahip CuK $_{\alpha}$ ışınımı kullanılmıştır.

4.3. Mekanik Karakterizasyon Çalışmaları

Mekanik özellik karakterizasyonu sertlik, çekme ve darbe deneyleriyle yapılmıştır. İncelenen KGDD'lerin kütesel sertliği, mikroyapı çalışmalarında kullanılan numuneler üzerinde Shimadzu HVM mikrosertlik cihaz ile 1 kg yük altında Vickers sertlik değeri cinsinden ölçülmüştür. Sertlik izi, matrisi ve grafiti kapsadığından elde edilen mikrosertlik değeri, dökme demirin kütesel sertliğini karakterize etmektedir. Ayrıca incelenen KGDD'lerin

matris bileşenlerinden ferrit ve perlit fazlarının sertlikleri 25 gr yük altında ölçülmüştür. Sertlik değerleri, en az 5 ölçümün ortalaması alınarak tespit edilmiştir.

Çentiksiz charpy darbe deneyi Mohr & Federhaff A.G. marka darbe testi cihazı yardımıyla ASTM A327-91 standardına uygun olarak oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Darbe deneyi için 10x10x55 mm boyutlarında hazırlanan standart numunelerin kırılması için gerekli enerji, Joule cinsinden en az üç numuneden alınan verilerin ortalaması ile belirlenmiştir.

DIN 50125 standardına göre hazırlanmış çekme test numuneleri 100 KN kapasiteli Zwick Z100 marka test cihazında 5 mm/dk çekme hızında gerçekleştirilmiştir.

4.4. Aşınma Deneyleri

KGDD'lerin aşınma davranışları ASTM G133 standartına göre 25, 200, 400 ve 600 °C şartlarında doğrusal zıt yönlü düzlem-bilye aşınma (reciprocating ball-on-flat) yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Aşınma deneylerinde; 10 mm çapında Al₂O₃ bilye, 30 N normal yük ve 1,9 cm/s kayma hızı altında karşı malzeme olarak kullanıldı ve bu, KGDD'lerin akma mukavemetinden çok daha yüksek olan 1340 MPa'lık bir temas basıncına neden oldu. Aşınma deneyi sırasında sürtünme katsayısı verisi sürekli olarak kaydedilmiştir. Aşınma deneyleri sonrasında aşınma izlerinin 2 boyutlu profilleri Mitutoyo Surtest SJ-400 profilometre cihazı ile 3 boyutlu profilleri ise Nikon görüntüleme yazılımı NIS-Elements ile elde edilmiştir. Her bir numune için profilometre sonuçlarından elde edilen aşınma hacmi uygulanan yüke ve kayma mesafesine bölünerek aşınma hızı elde edilmiştir. Farklı bileşimlerdeki KGDD'lerin mekanik ve yük taşıma kapasitesi, mikroyapı değişiklikleri dikkate alınarak tartışıldı. Aşınma mekanizmasını belirlemek için KGDD'lerin aşınma yüzeyleri üzerinde OM incelemeleri de yapıldı.

4.5. Talaşlı İmalat Deneyleri

Tek bir kesme hızında talaş kesiti sabit tutularak kesme kuvvetlerindeki değişimler incelenerek alaşımsız ve alaşımlı KGDD'lerin işlenebilirliği incelenmiştir. Döküm kaynaklı hataları önlemek için KGDD'lerin yüzeyinden 0,5 mm talaş alınmıştır. Talaşlı imalat deneylerinde kullanılan parametreler Tablo 4.2'de verilmiştir.

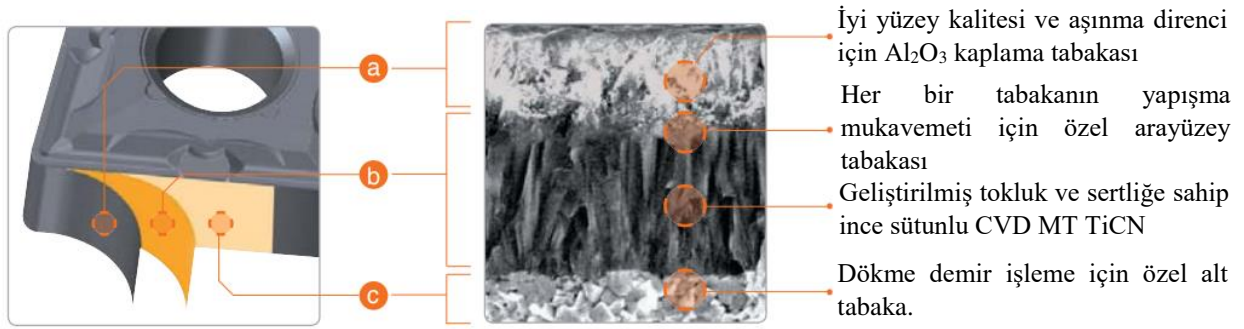
Tablo4.2. Talaşlı İmalat Parametreleri.

İşlem	Tornalama
İlerleme (f, mm/dev)	0,1 mm/dev
Talaş derinliği (a, mm)	0,5 mm
Kesme hızı (V _c , m/dk)	220 m/dk (3050 dev/dk)
İşlenen malzemeler	Cu _{0,5} Mn _{0,2} , Cu _{0,5} Mn _{0,8} ve Cu _{0,8} Mn _{0,8}
Kesme ve Soğutma	Ortogonal, Kuru İşleme
Kullanılan kesici uç	DCMT 070204-HMP NC6210

Talaşlı imalat deneyleri, DMG Mori Gildemeister CTX Alpha 300 CNC torna tezgahında kuru şartlarda dik kesme yöntemi ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.1). Deneylerde gri dökme demir ve KGDD'lerin genel tornalanmasında daha uzun takım ömrü için önerilen 1. kalite Al₂O₃ kaplamaya (DCMT 070204-HMP NC6210) sahip kesici uç tercih edilmiştir. Şekil 4.2'de kullanılan kesici ucun kesit görüntüsü verilmiştir. Talaşlı imalat sırasında kesme kuvvetlerini ölçmek için özel olarak tasarlanan yük ölçer kullanılmıştır.



Şekil4.1. DMG Mori Gildemeister CTX Alpha 300 CNC Torna Tezgahı.



Şekil 4.2. Kesici Ucun Kesit Görüntüsü.

4.6. Elektrolitik Korozyon Deneyleri

KGDD'lerin elektrokimyasal davranışı, Tafel ekstrapolasyon yöntemi kullanılarak ağırlıkça %3,5 NaCl çözeltisinde araştırıldı. Daha önce parlatılan numuneler, elektrokimyasal korozyon deneyleri için 1.68 cm^2 çalışma alanı oluşturacak şekilde saf su ve etanol ile temizlendi. Korozyon deneylerinde, çalışma elektrotu olarak numune, referans elektrot olarak doymuş kalomel elektrot (SCE) ve karşı elektrot olarak grafit çubuk içeren bir potansiyostat sistemi (Gamry model PCI4/750 Potentiostat/Galvanostat) kullanılarak üç elektrotlu bir düzenek kullanıldı. Tafel deneyinden önce numunelerin açık devre potansiyeli (OCP) değerleri 45 dakika boyunca ölçüldü. Tafel deneyleri oda sıcaklığında $\pm 250 \text{ mV}$ aralığında, OCP değerine karşılık 1 mV/s tarama hızında gerçekleştirildi. Sonuçların güvenilirliğini sağlamak için her numune için üç test yapıldı. Korozyona uğrayan yüzeyler, korozyonun neden olduğu değişimi belirlemek için OM ile incelendi.

Korozyon hızı (C_R) değerleri Denklem 4.1 kullanılarak hesaplandı. Burada ASTM G102-89'a göre E_w eşdeğer ağırlıktır ve ρ ise yoğunludur.

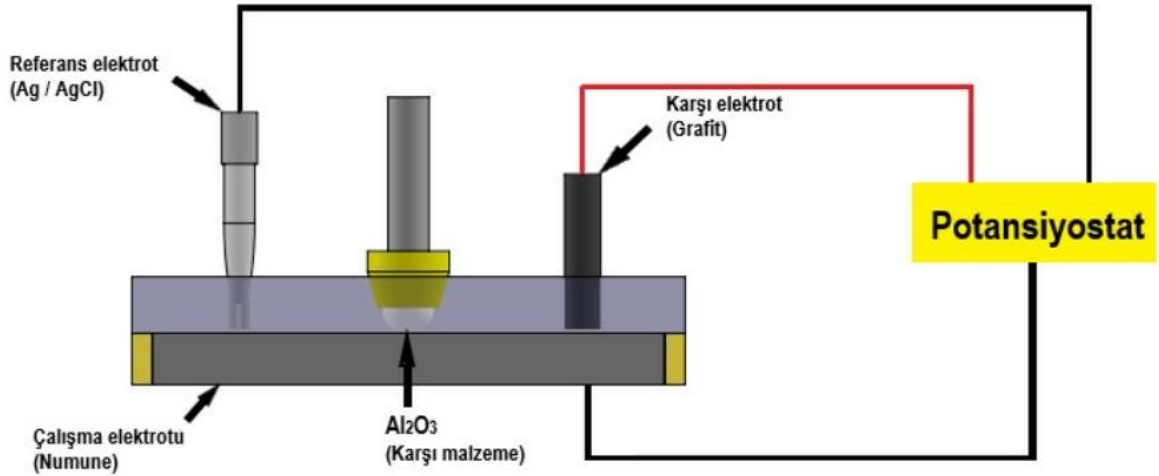
$$C_R = (3.27 \times 10^{-3} \times i_{kor} \times E_w) / \rho \quad (4.1).$$

Ayrıca, alaşımsız KGDD'nin korozyon akım yoğunluğu değeri referans alınarak, alaşımlı KGDD'lerin koruma verimliliği (η) Denklem 4.2 kullanılarak hesaplandı. Burada i_{kor}^o alaşımsız KGDD'lerin korozyon akım yoğunluğu, i_{kor} ise diğer alaşımlı KGDD'nin korozyon akım yoğunluğu değerleridir.

$$\% \eta = (i_{kor}^o - i_{kor}) / i_{kor}^o \times 100 \quad (4.2).$$

4.7. Tribokorozyon Deneyleri

KGDD'lerin tribokorozyon deneyleri, özel olarak tasarlanmış doğrusal zıt yönlü düzlem-bilye aşınma cihazında gerçekleştirildi. Aşınma deneyine başlamadan önce KGDD'lerin yüzeyi alkol ile temizlendi. Tüm deneylerde, 10 mm çapında Al_2O_3 bilye ve 30 N yük uygulandı. Deney sırasında karşı malzeme olarak çelik ve birçok diğer malzemeye kıyasla en az aşınma ürünü oluşumunu teşvik eden üstün sertlik ve kimyasal inertliğe sahip olan Al_2O_3 bilye kullanıldı. Tüm deneyler, 1,9 cm/s hızında ve 57,5 m kayma mesafesi için 11,5 mm strok uzunluğunda gerçekleştirildi. Sürtünme ve aşınma ölçümleri aynı zamanda korozyon deneylerinde kullanılan ağırlıkça %3,5 NaCl çözeltisi kullanıldı. Referans elektrot olarak Ag/AgCl elektrot ve çalışma elektrotu olarak KGDD'ye karşı elektrot görevi gören grafit çubuktan oluşan üç elektrotlu bir elektrokimyasal hücre (Şekil 4.3) kullanıldı.



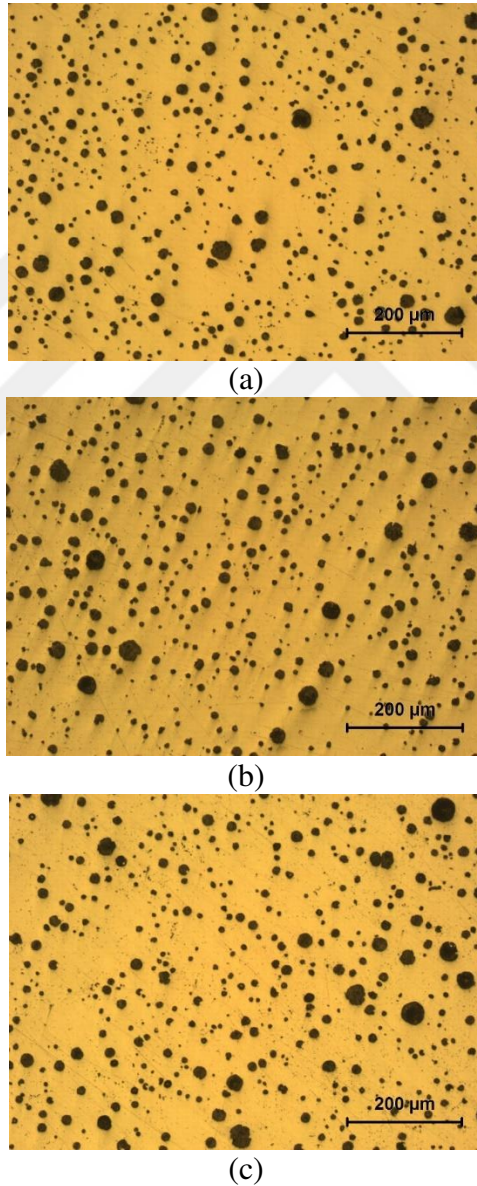
Şekil 4.3. Tribolojik Test Aparatına Göre Referans, Çalışma ve Karşı Elektrotların Konumunu Gösteren Elektrokimyasal Test Düzeni.

Özel olarak tasarlanmış elektrokimyasal hücrede çalışma elektrotu olarak kullanılan KGDD'lerin yüzey alanı $1,68 \text{ cm}^2$ olup, geriye kalan yüzeyler ise reçineyle maskelenmiştir. Tribokorozyon deneyleri OCP şartlarında gerçekleştirildi. OCP'yi stabilize etmek için, numuneler sürtünme testinin başlamasından önce elektrolite 10 dakika boyunca batırıldı ve sürtünme sona erdikten sonra da 10 dakika boyunca orada bırakıldı. OCP eğrileri Gamry model PCI4/750 Potentiostat/Galvanostat kullanılarak çizildi ve izlendi. Karşı malzeme olarak kullanılan Al_2O_3 bilye, yüzeyle elektrokimyasal bağlantı olmaması için inert bir cisim olan polimer tutucuyla hareket etti. Tribokorozyon deneylerinin ardından aşınma miktarını belirlemek için profilometre ve aşınma yüzeylerini incelemek için ise OM kullanıldı.

5. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

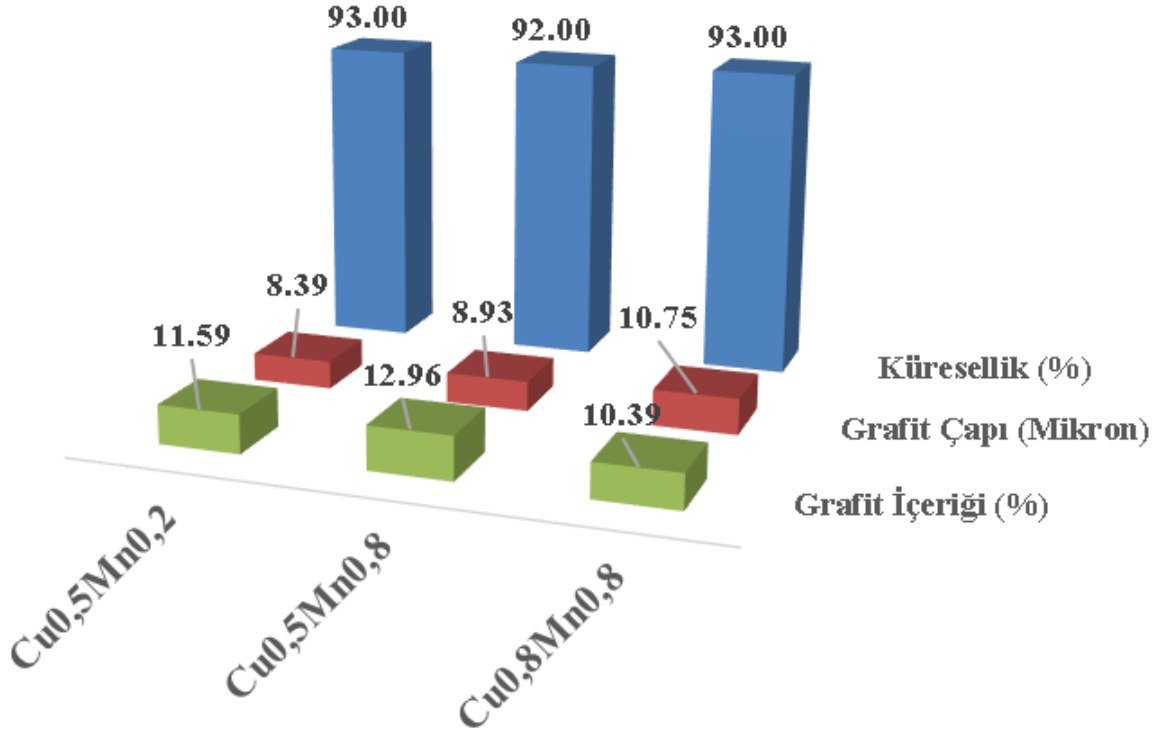
5.1.Yapısal Karakterizasyon Sonuçları

Şekil 5.1, alaşımlandırılan KGDD'lerin parlatılmış mikroyapılarını göstermektedir. Dağlanmamış KGDD'lerin mikroyapıları (Şekil 5.1 a-c), grafit nodüllerinin şeklini, boyutunu ve dağılımını açıkça göstermektedir. Alaşımlamadan önce, daha küçük partikül boyutlarına sahip birçok grafit nodülü elde edilmiştir. Yukardan aşağıya doğru, önceden çekirdeklenmiş grafit nodüllerinin büyüklüğü belirginleşti. Hem Cu hem de Mn ile alaşımlandırılan KGDD'nin grafit nodül sayısında azalma ve partikül boyutunda artış meydana gelmiştir.



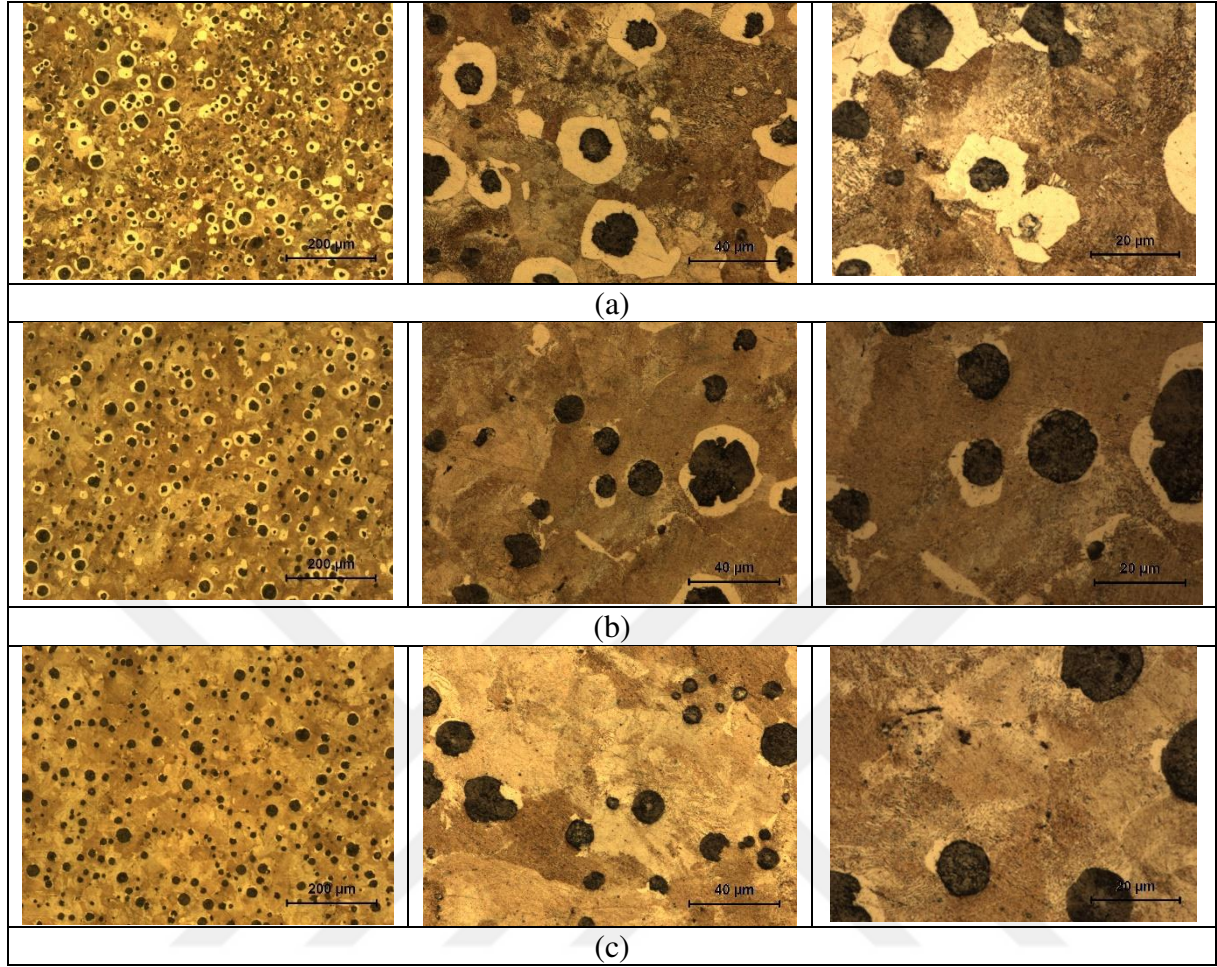
Şekil 5.1. Grafit Nodüllerinin Boyutunu ve Dağılımını Ortaya Çıkarmak için Dağlanmamış KGDD'lerin Parlatılmış Mikroyapı Görüntüleri: (a) $\text{Cu}_{0,5}\text{Mn}_{0,2}$, (b) $\text{Cu}_{0,5}\text{Mn}_{0,8}$ ve (c) $\text{Cu}_{0,8}\text{Mn}_{0,8}$.

Şekil 5.2’de incelenen KGDD’lerde grafit içeriği, ortalama boyutu ve küreselliği verilmiştir. Alaşımsız ve alaşımlandırılan KGDD’lerde grafitlerin küreselliği %92 ila %93 arasında değişmektedir ve alaşımlandırma ile grafit nodüllerin küreselliği değişmemiştir. Mn ile alaşımlandırma ile grafit nodüllerinin boyutu 8,39 μm ’den 8,93 μm ’a arttı. Ancak hem Cu hem de Mn ilavesi daha kaba grafit (10,75 μm) oluşumuna neden olmuştur.



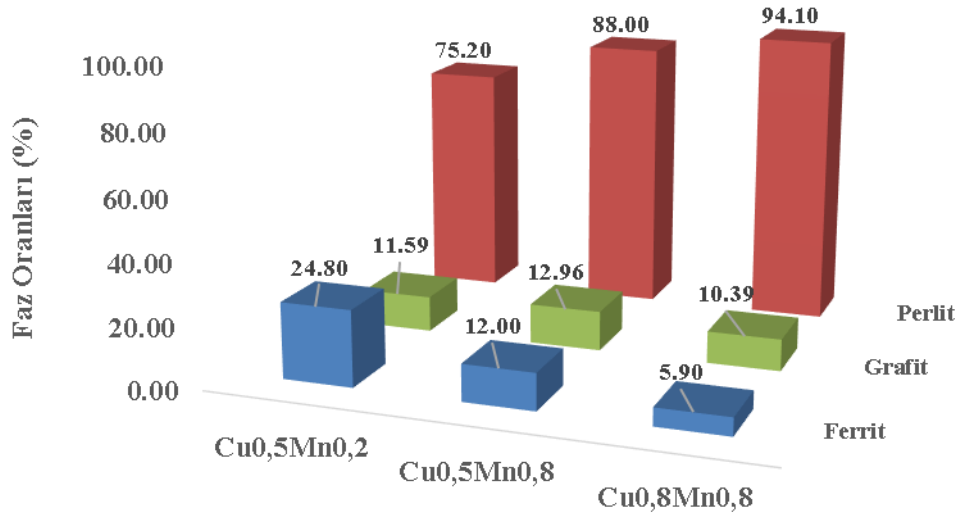
Şekil 5.2. İncelenen KGDD’lerde Grafit İçeriği, Boyut Dağılımı ve Küreselliği.

Şekil 5.3, alaşımsız ve alaşımlandırılan KGDD’lerin %2 nital ile dağlanmış OM görüntülerini göstermektedir. Grafit partikülleri ile ferrit-perlit matris yapıları tüm üretilen KGDD’lerde elde edilmiştir. En yüksek ferrit içeriği alaşımsız KGDD’de ulaşıldı. Grafit nodüllerine yakın bölgeler çoğunlukla ferrit olup, C atomları partiküllere difüzyon yapmıştı (Kandemir ve Gecu, 2023; 4). Dasgupta vd. (2012) tarafından yapılan çalışmayla tutarlı olarak matris yapısındaki perlit içeriği hem Cu hem de Mn ilavesiyle arttı (Dasgupta vd., 2012: 1730). Ferrit miktarı ile nodül sayısı arasındaki iyi bilinen ilişki göz önüne alındığında hem Cu hem de Mn ilavesiyle nodül sayısının azalması, ferrit içeriğinin azalmasına neden olabilir (Kandemir ve Gecu, 2023; 4).



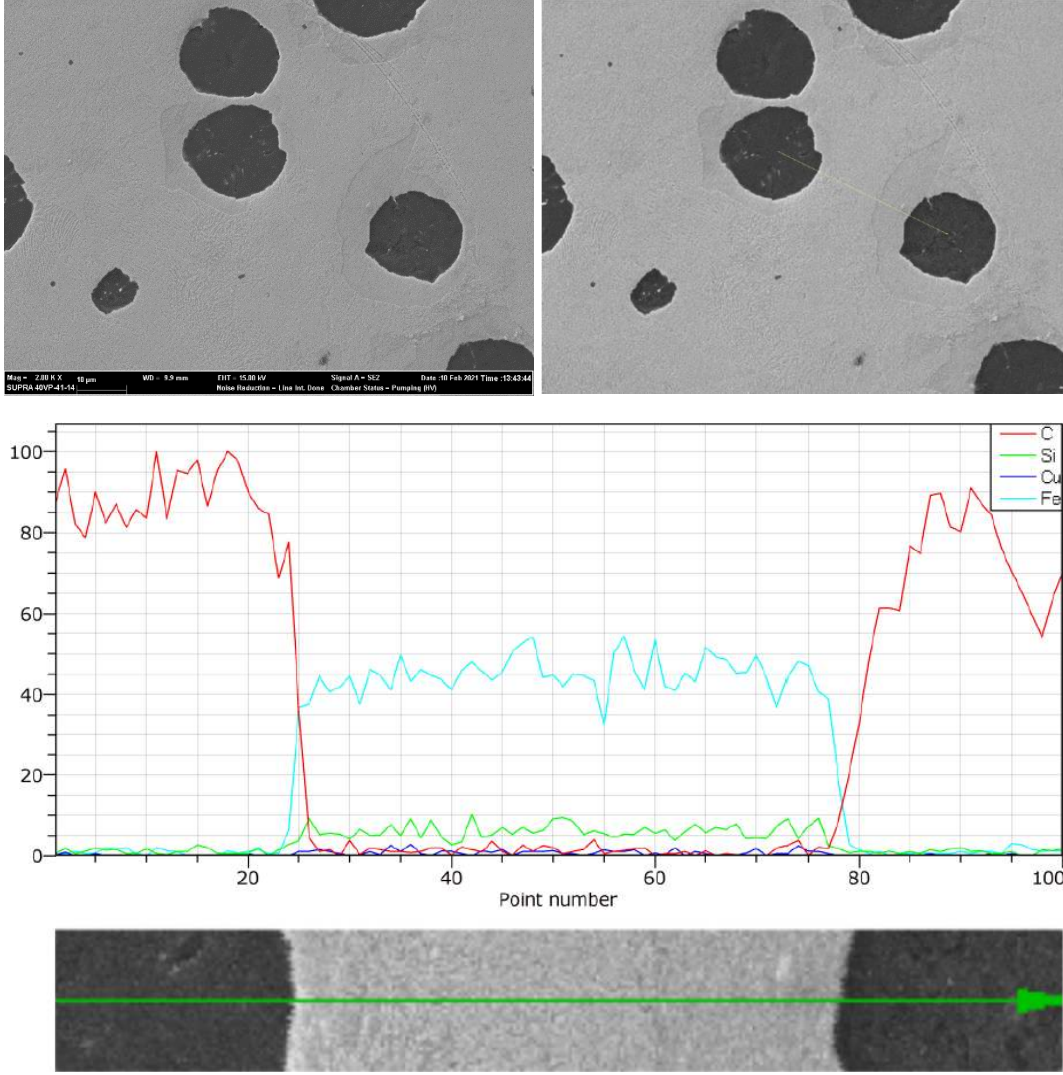
Şekil 5.3. Farklı Oranlarda Ferrit ve Perlit Gösteren KGDD'lerin Dağlanmış Mikroyapı Görüntüleri: (a) $\text{Cu}_{0,5}\text{Mn}_{0,2}$, (b) $\text{Cu}_{0,5}\text{Mn}_{0,8}$ ve (c) $\text{Cu}_{0,8}\text{Mn}_{0,8}$.

Şekil 5.4, alaşımsız ve alaşımlandırılan KGDD'lerin mikroyapı bileşenlerinin faz içeriklerini göstermektedir. Mikroyapı görüntülerinden KGDD'lerin mikroyapıları, grafit nodüllerini çevreleyen ferrit halkalarının (boğa gözü) belirgin biçimde incelmesi ve artan Cu ve Mn içeriğiyle birlikte perlit içeriğinin arttığı açıktır (Şekil 5.3). Görüntü analiz sonuçlarına göre alaşımsız KGDD yaklaşık %24,8'i ferrit, %75,2'si perlit ve %11,59'u grafit içermektedir. Ağırlıkça %0,8 Mn alaşımlı KGDD'de ferrit içeriği %12'e düşerken perlit içeriği %88'e yükseldi. Toplam grafit içeriği ve grafit çapı artan Mn içeriğiyle sırasıyla %11,8 ve %6,43 artış elde edilmiştir. Ağırlıkça hem %0,8 Mn hem de %0,8 Cu ile alaşımlı KGDD'de ferrit içeriği %5,9'a düşerken perlit içeriği %94,1'e yükselmiştir. Her iki alaşım elementinin ilavesiyle toplam grafit içeriği %10,35 oranında azalırken, grafit çapı ise %28,12 oranında artmıştır.

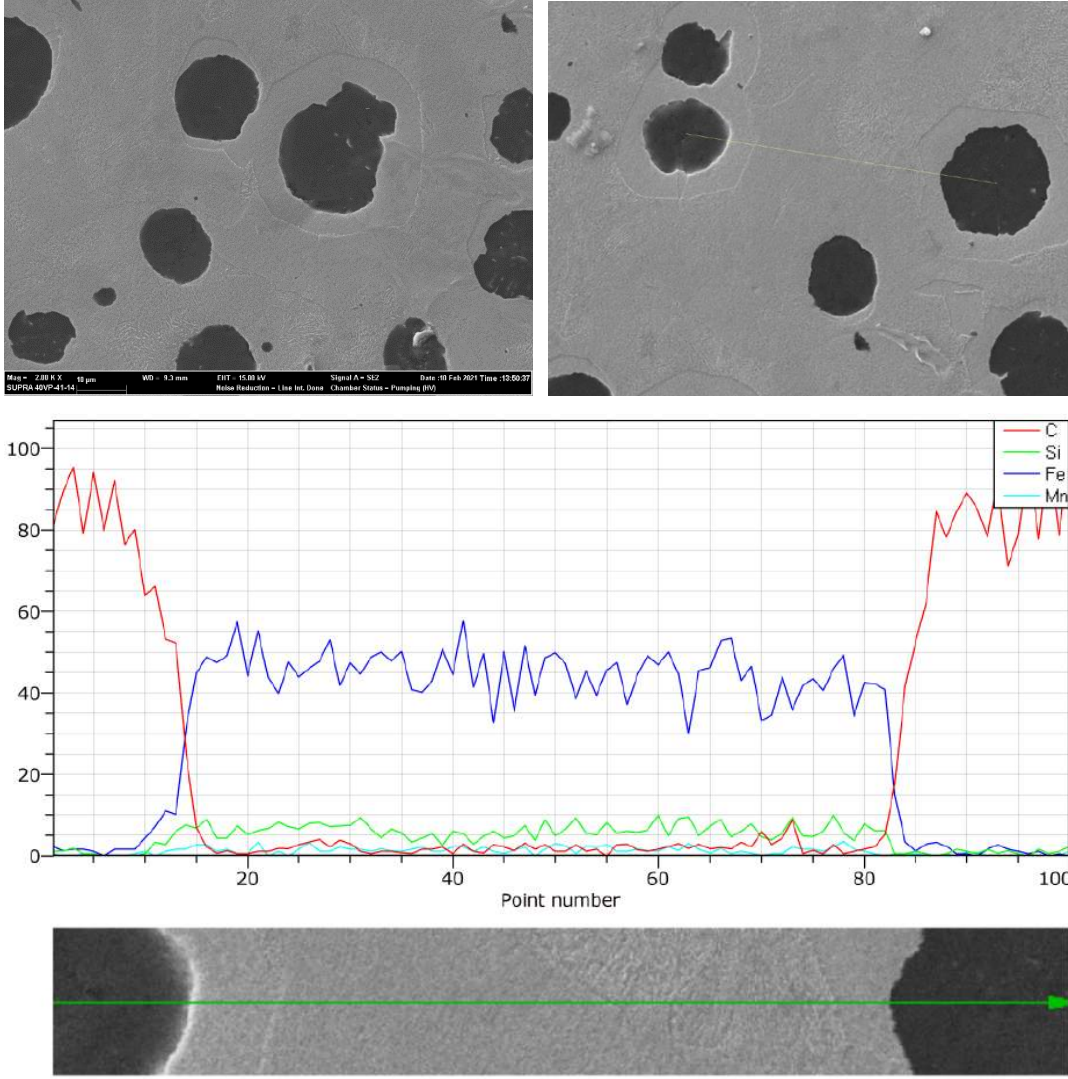


Şekil 5.4. İncelenen KGDD’lerdeki Mikroyapı Bileşenlerinin Faz Oranları.

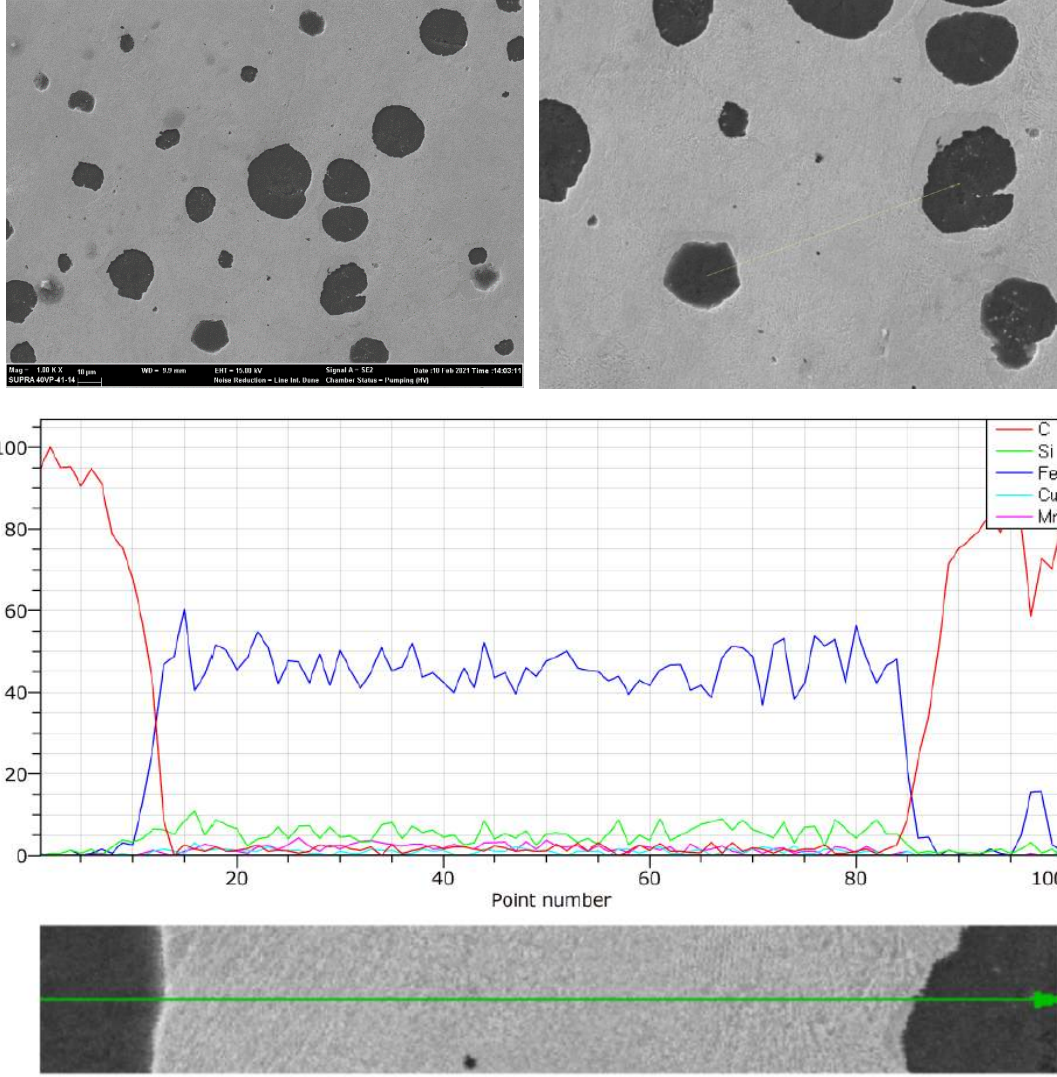
Şekil 5.5, Şekil 5.6 ve Şekil 5.7’de sırasıyla alaşımsız ($\text{Cu}_{0,5}\text{Mn}_{0,2}$), Mn ile alaşımlandırılan ($\text{Cu}_{0,5}\text{Mn}_{0,8}$) ve hem Mn hem de Cu ile alaşımlandırılan ($\text{Cu}_{0,8}\text{Mn}_{0,8}$) KGDD’lerde C, Fe, Si, Mn ve Cu dağılımının analiz sonuçlarını göstermektedir. Bu dağılım haritaları, grafit nodüllerine yakın bir miktar Si segregasyonunu ve az miktarda Mn segregasyonunu göstermektedir. Alaşımsız ve alaşımlı KGDD’lerde birbirine yakın grafit nodül sayısı, hücre sınırlarında Mn segregasyonunun azaltılmasını desteklemesi çok muhtemeldir. Ayrıca, Mn ile alaşımlandırılan ve hem Mn hem de Cu ile alaşımlandırılan KGDD’lerin yüzeyinde element haritalaması gerçekleştirildi ve Şekil 5.8 ila Şekil 5.9’da element haritaları, az miktarda Mn segregasyonunu göstermektedir. Normalde Mn’den ayrılmış bölgelerde bulunan Mn açısından zengin karbür, FE-SEM ikincil elektron görüntülerinin hiçbirinde tespit edilememiştir (Şekil 5.10).



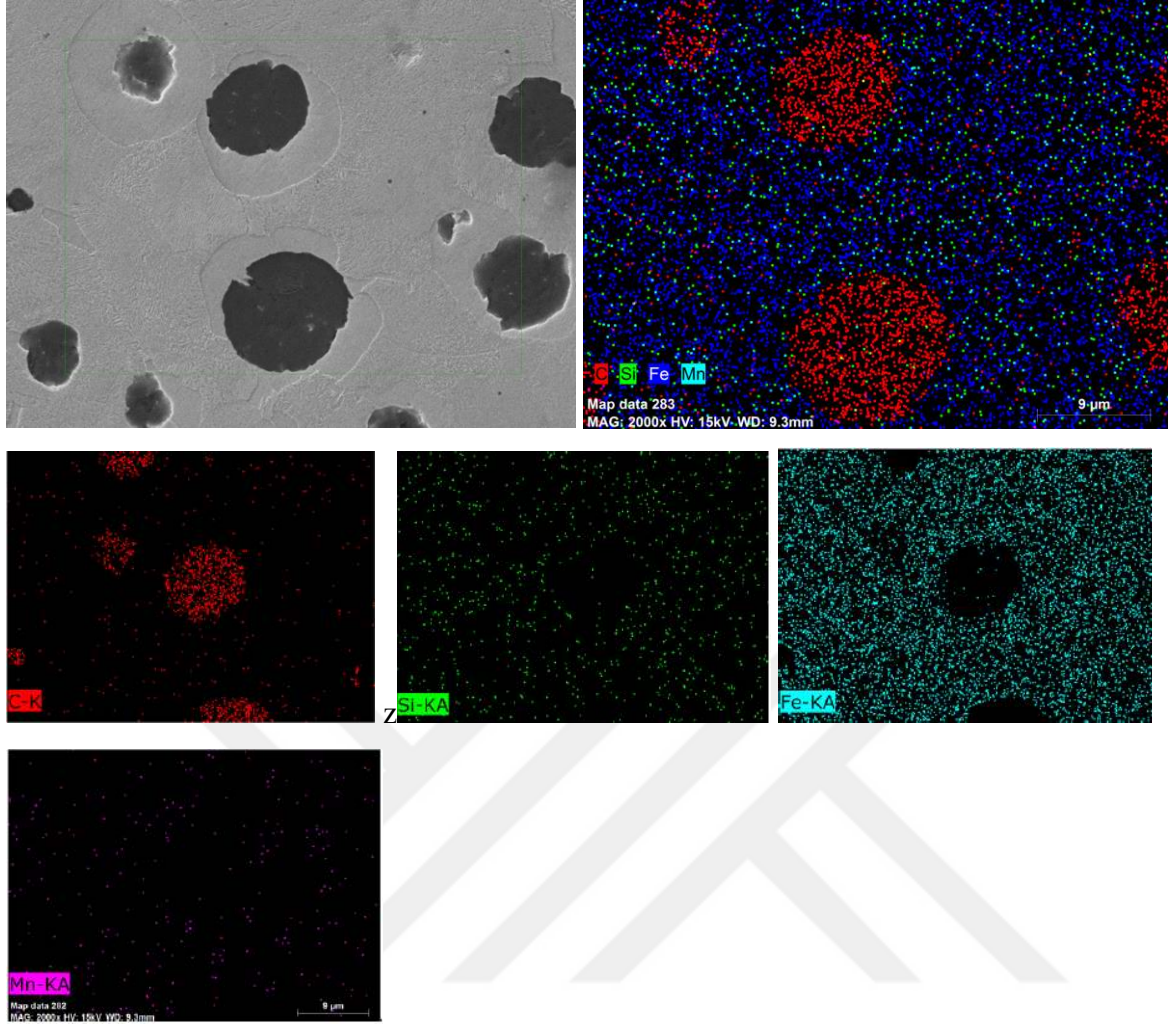
Şekil 5.5. Alaşımsız ($\text{Cu}_{0.5}\text{Mn}_{0.2}$) KGDD'nin C, Si, Cu ve Fe Segregasyon Ölçüm Sonuçları.



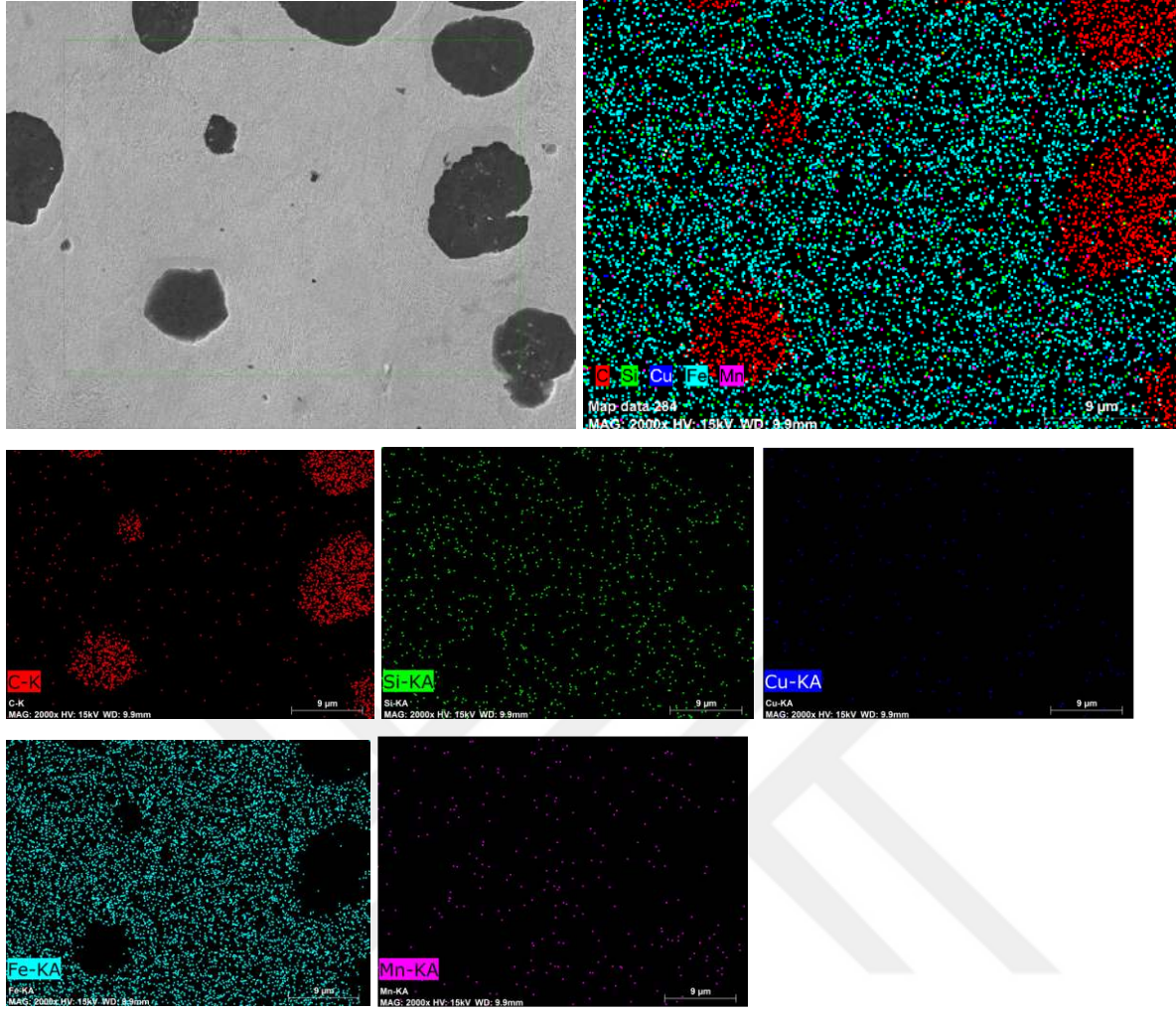
Şekil 5.6. Mn ile Alaşımlandırılan ($\text{Cu}_{0.5}\text{Mn}_{0.8}$) KGDD'nin C, Si, Fe ve Mn Segregasyon Ölçüm Sonuçları.



Şekil 5.7. Hem Mn Hem de Cu ile Alaşımlandırılan ($\text{Cu}_{0.8}\text{Mn}_{0.8}$) KGDD'nin C, Si, Fe, Cu ve Mn Segregasyon Ölçüm Sonuçları.

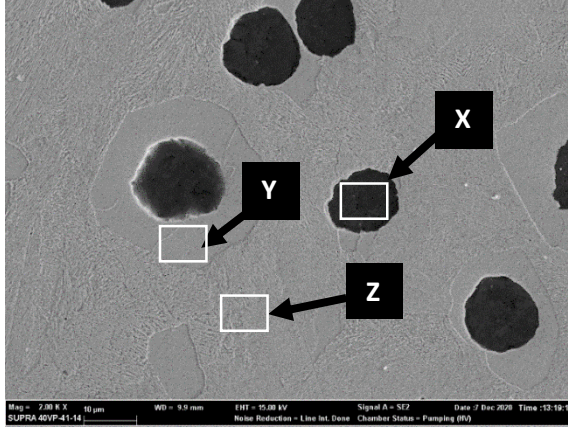


Şekil 5.8. Mn ile Alaşımlandırılan $(\text{Cu}_{0.5}\text{Mn}_{0.8})$ KGDD’de Elementlerin Dağılımını Gösteren Nokta Haritaları.



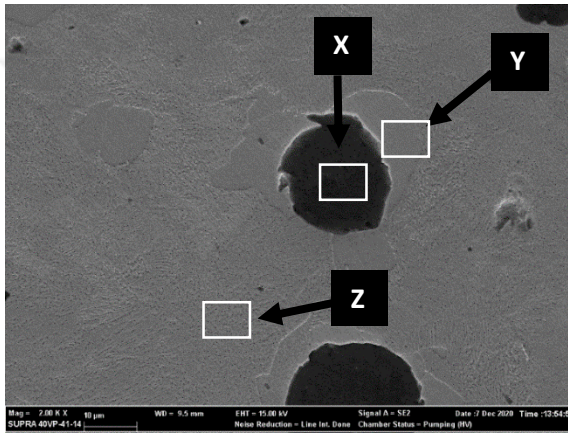
Şekil 5.9. Hem Mn Hem de Cu ile Alaşımlandırılan ($\text{Cu}_{0.8}\text{Mn}_{0.8}$) KGDD’de Elementlerin Dağılımını Gösteren Nokta Haritaları.

Şekil 5.10, geri saçılmış elektron (BSE) modunda FE-SEM görüntülerinden alaşımsız ve alaşımlı KGDD’lerde X, Y ve Z işaretli sırasıyla grafit nodülleri, ferrit ve perlit fazlarından alınan EDS analiz sonuçları ile birlikte mikroyapı görüntüleri verilmektedir. Her bir mikroyapı görüntülerinde Z işaretli alan, perlit içindeki sementit lamel aralığını temsil etmektedir. Hem Cu hem de Mn alaşım elementlerinin eklenmesi, Şekil 5.3 ve Şekil 5.4’te teyit edildiği gibi perlit miktarının artmasına neden olurken, lameller arasındaki mesafe azalarak ince perlit elde edilir. Şekil 5.7’de gösterildiği gibi, Mn, Cu ve Si grafit nodülleri arasında homojen bir şekilde dağılmıştır, bu durum döküm sırasında hızlı soğuma hızına atfedilebilir.



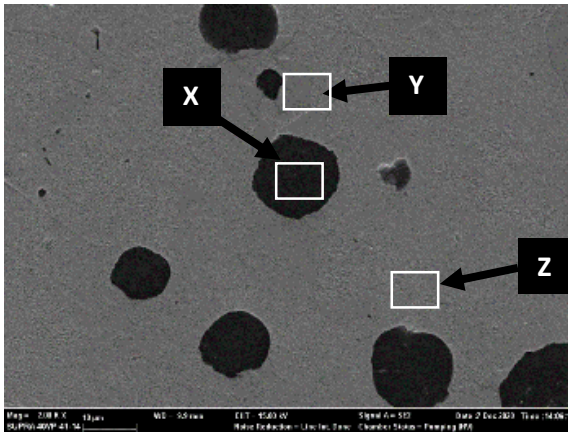
Element (Ağ. %)	X	Y	Z
C	62.15	1.90	5.05
Fe	35.67	96.20	92.17
O	1.70	-	1.41
Si	0.48	1.89	1.36
Mn	-	-	-
Cu	-	-	-

(a)



Element (Ağ. %)	X	Y	Z
C	86.17	52.68	3.40
Fe	13.51	46.38	93.92
O	-	-	-
Si	0.24	0.68	2.15
Mn	0.08	0.26	0.53
Cu	-	-	-

(b)

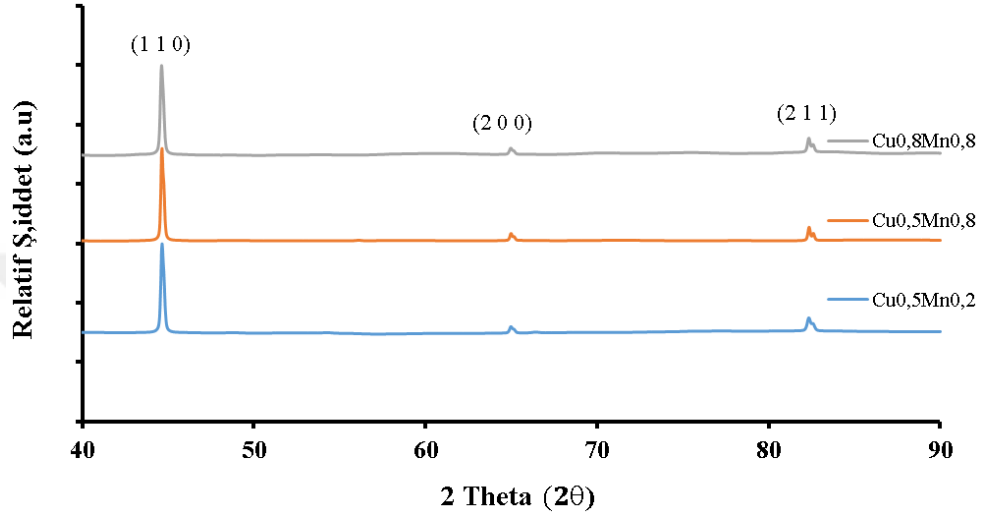


Element (Ağ. %)	X	Y	Z
C	70.48	91.67	3.58
Fe	28.38	4.68	93.05
O	-	3.48	0.57
Si	0.37	-	1.77
Mn	0.26	0.06	0.66
Cu	0.51	0.12	0.37

(c)

Şekil 5.10. (a) Alaşımsız ($\text{Cu}_{0.5}\text{Mn}_{0.2}$), (b) Mn ile Alaşımlandırılan ($\text{Cu}_{0.5}\text{Mn}_{0.8}$) ve (c) Hem Mn Hem de Cu ile Alaşımlandırılan ($\text{Cu}_{0.8}\text{Mn}_{0.8}$) KGDD'lerdeki Grafit, Ferrit ve Perlit Morfolojisini Gösteren BSE Modundaki EDS Analiziyle Birlikte SEM Mikroyapı Görüntüleri.

Alaşımsız ve alaşımlı KGDD'lerin XRD sonuçları Şekil 5.11'de gösterilmektedir. Her bir KGDD için, üç ana kristalografik düzlem ($2\theta=43^\circ$ 'de (1 1 0) düzleminde 2,02 Å düzlemler arası mesafe, $2\theta=65^\circ$ 'de (2 0 0) düzleminde 1,43 Å düzlemler arası mesafe ve $2\theta=82^\circ$ 'de (2 1 1) düzleminde 1,17 Å düzlemler arası mesafe) olduğu tespit edilmiştir. Bu düzlemlerin tümü, metalografik incelemelerden elde edildiği üzere, perlitik-ferritik matrisi doğrulayan hacim merkezli kübik (HMK) kristal yapıya aittir.



Şekil 5.11. Alaşımsız ($\text{Cu}_{0,5}\text{Mn}_{0,2}$), Mn ile Alaşımlandırılan ($\text{Cu}_{0,5}\text{Mn}_{0,8}$) ve Hem Mn Hem de Cu ile Alaşımlandırılan ($\text{Cu}_{0,8}\text{Mn}_{0,8}$) KGDD'lerin XRD Paternleri.

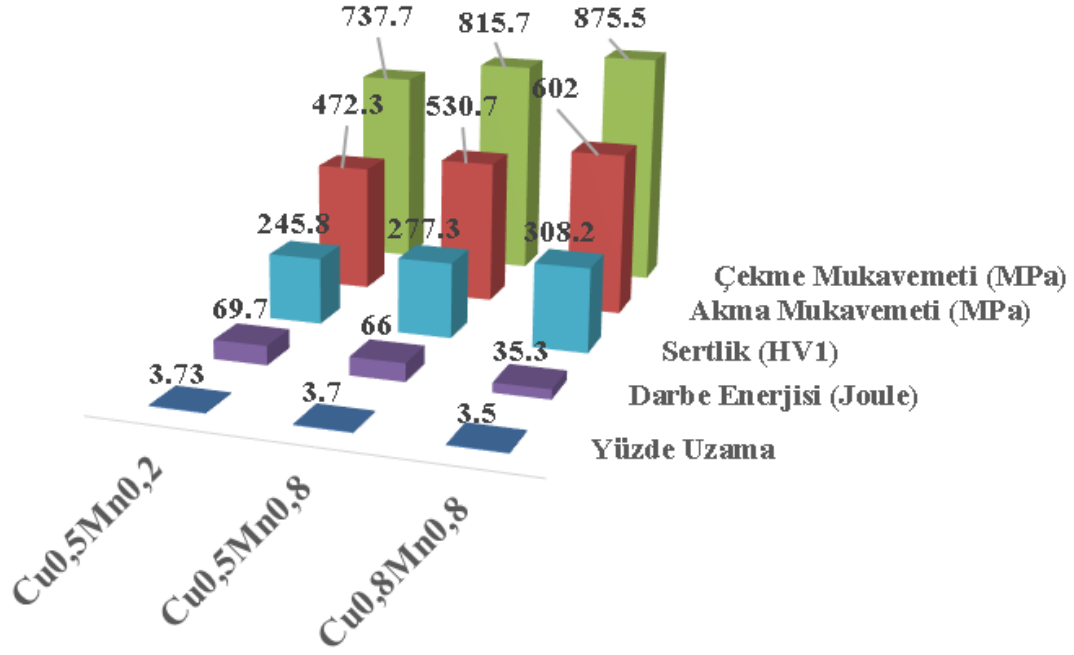
5.2. Mekanik Karakterizasyon Sonuçları

Elde edilen sertlik sonuçları (Tablo 5.1), alaşım elementlerinin eklenmesinden sonra bu özelliğin dikkate değer bir şekilde artması nedeniyle alaşım elementlerinin KGDD üzerindeki etkisini olumlu bir şekilde göstermektedir. Alaşımsız KGDD'nin kütleli sertliği $245,8 \pm 5,7$ HV₁'dir. Bu KGDD'ye Mn ve hem Mn hem de Cu alaşım elementlerinin eklenmesinden sonra sertlikte dikkate değer bir artış olmaktadır ($\text{Cu}_{0,5}\text{Mn}_{0,8}$ için $277,3 \pm 9,4$ ve $\text{Cu}_{0,8}\text{Mn}_{0,8}$ için $308,2 \pm 10,4$). Alaşımsız KGDD ile karşılaştırıldığında alaşımlı KGDD'lerin kütleli sertliği daha yüksektir, bunun nedeni ağırlıkça %0,8 Cu ve %0,8 Mn eklenmesidir. Sertliğin artması muhtemelen alaşım elementlerinin katı eriyik sertleşmesi ile yapısal sertleşmeden kaynaklanmaktadır. Tablo 5.1'den fazların sertliğinin de arttığı görülmektedir. Alaşımlama ile ferritin mikrosertliği alaşımsız KGDD'den beklenmedik bir şekilde yüksektir.

Tablo 5.1. İncelenen KGDD’lerin Kütlesel Sertliği ve Fazların Sertliği.

Malzeme Kodu	Kütlesel Sertlik (HV ₁)	Fazların Sertliği (HV _{0,025})	
		Ferrit	Perlit
Cu _{0,5} Mn _{0,2}	245,8±5,7	126,3±4	301±7
Cu _{0,5} Mn _{0,8}	277,3±9,4	146±12	313±6
Cu _{0,8} Mn _{0,8}	308,2±10,4	Ölçülemedi	338±6

KGDD’lerin mekanik özellikleri doğrudan mikroyapısına bağlıdır. Mekanik özellikler küresel grafitin şekli ve boyutu, ferrit/perlit hacim oranı, fazların morfolojisi ve inceliği ile segregasyon ve tane sınırı özellikleri gibi çeşitli faktörlerden etkilenir. Şekil 5.12’de alaşımsız (Cu_{0,5}Mn_{0,2}), Mn ile alaşımlandırılan (Cu_{0,5}Mn_{0,8}) ve hem Mn hem de Cu ile alaşımlandırılan (Cu_{0,8}Mn_{0,8}) KGDD’lerin akma mukavemeti, çekme mukavemeti, yüzde uzama, kütlesel sertlik ve darbe direnci sonuçları verilmektedir. Sonuçlara göre, alaşımsız KGDD, 472.3 MPa akma mukavemeti, 737.7 MPa çekme mukavemeti ve 245.8 HV₁ kütlesel sertlik değeri ile en düşük mekanik özellikler sergiledi, ancak %3,73’lük bir uzama ile iyi bir süneklik ve 69,7 J darbe enerjisi ile iyi bir tokluk sergiledi. En yüksek akma mukavemeti, çekme mukavemeti ve sertlik değerleri ise hem Mn hem de Cu ile alaşımlandırılan (Cu_{0,8}Mn_{0,8}) KGDD’den elde edilirken darbe dayanımı 69,7 J’dan 35,3 J’e önemli ölçüde azaldı. Perlit içeriğinin artması nedeniyle alaşımsız KGDD’ye göre %18,6 çekme mukavemeti, %27,5 akma mukavemeti ve %25,4 kütlesel sertlik arttı. Ferritik matrise göre daha kırılğan fazların oluşması, KGDD’nin yüzde uzama (süneklik) ve tokluğunda azalmaya neden olmuştur (Kandemir ve Gecu, 2023; 5). Bu azalma, darbe testleri sırasında çatlak başlangıç bölgeleri görevi görmesine atfedilebilir.

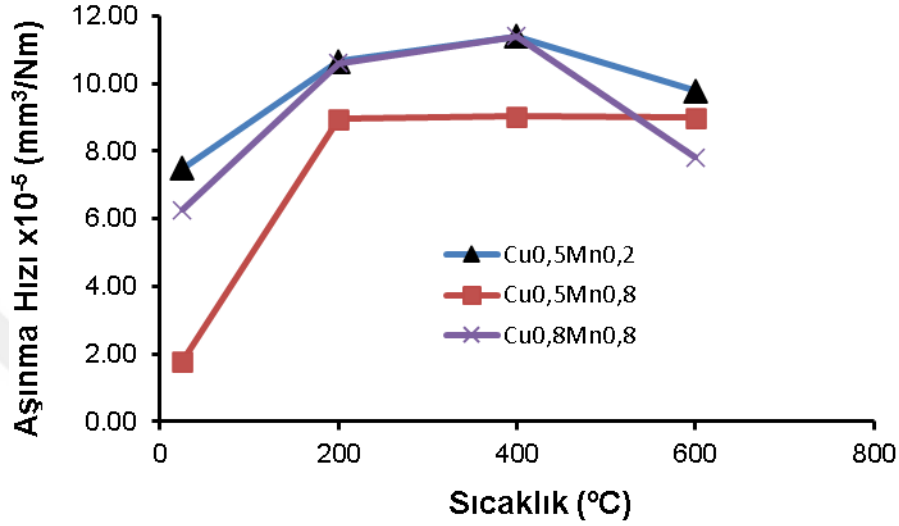


Şekil 5.12. Alaşımsız ($\text{Cu}_{0,5}\text{Mn}_{0,2}$), Mn ile Alaşımlandırılan ($\text{Cu}_{0,5}\text{Mn}_{0,8}$) ve Hem Mn Hem de Cu ile Alaşımlandırılan ($\text{Cu}_{0,8}\text{Mn}_{0,8}$) KGDD'lerin Akma Mukavemeti, Çekme Mukavemeti, Yüzde Uzama, Kütlesel Sertlik ve Darbe Direnci Sonuçları.

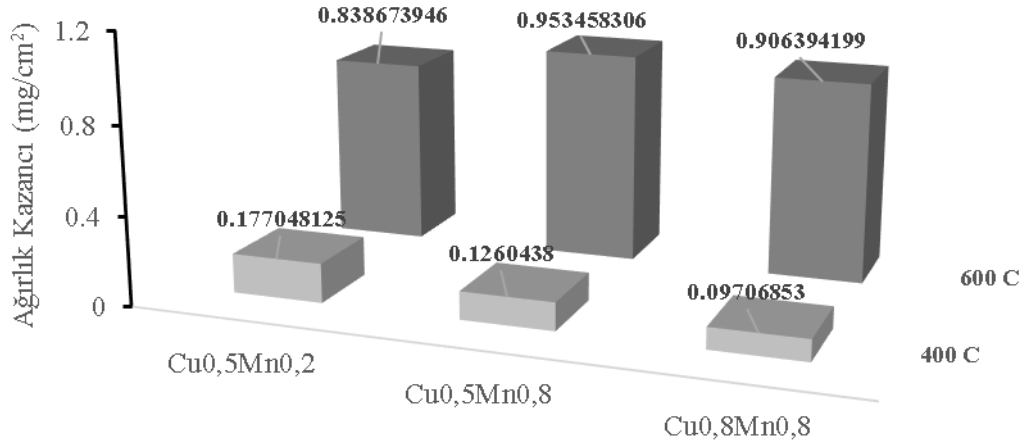
5.3. Aşınma Sonuçları

Şekil 5.13, incelenen KGDD'lerin sıcaklığa bağlı olarak aşınma hızlarının değişimi verilmektedir. Sıcaklık 25°C 'den 400°C 'ye arttıkça alaşımsız ve hem Mn hem de Cu ile alaşımlandırılan KGDD'lerin aşınma hızının $\sim 6-7,5 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ 'den $\sim 11,4 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ 'e kademeli olarak artarak benzer bir eğilim gösterdiği gözlemlendi. Bunun nedeni Archard kanununa uygun olarak sıcaklık arttıkça malzemelerin sertliğinin giderek azalmasıdır (Mindivan, 2023; 942). Ancak sıcaklığın 600°C 'ye yükselmesiyle aşınma hızının $\sim 11,4 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ 'den $\sim 7,8-9,7 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ 'e düşmesi, incelenen KGDD'lerin oksidasyon davranışı ile ilişki olup yüzeylerin daha fazla oksitlendiğini ve yüzeylerin daha kalın oksit tabakası ile kaplandığını göstermektedir. Şekil 5.14'te oksidasyon sonuçlarına göre 9 saat süre ile 400°C 'ye nazaran 600°C 'de alaşımsız, Mn ile alaşımlandırılan ve hem Mn hem de Cu ile alaşımlandırılan KGDD'ler daha yüksek benzer oksitlenme eğilimi sergilemektedir. 600°C 'de en yüksek mekanik özelliklere sahip olan hem Mn hem de Cu ile alaşımlandırılan KGDD, en düşük aşınma hızını ($7,8 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{Nm}$) gösterdi. Mn ile alaşımlandırılan KGDD'nin oda sıcaklığında gerçekleştirilen aşınma deneyine göre 200°C 'de aşınma hızı arttı ve 600°C 'ye kadar aşınma hızı değişmedi. Mn ile alaşımlandırılan KGDD'nin aşınma hızı, tüm numuneler için en düşük

seviyededir. Sıcaklığın artmasıyla aşınma hızında en yüksek artış, alaşımsız ve hem Mn hem de Cu ile alaşımlı KGDD’de görüldü. Alaşımsız KGDD’nin 200, 400 ve 600 °C’de gerçekleştirilen aşınma deneylerinde aşınma hızı oda sıcaklığındaki aşınma hızı değerine nazaran sırasıyla %42,32, %52,2 ve %30,5 arttı.



Şekil 5.13. Alaşımsız ve Alaşımlı KGDD’lerin Sıcaklığa Bağlı Olarak Aşınma Hızının Değişimi.



Şekil 5.14. Alaşımsız ve Alaşımlı KGDD’lerin Sıcaklığa Bağlı Olarak Ağırlık Kazancının Değişimi.

Şekil 5.15, alaşımsız ve alaşımlı KGDD’lerin kütesel sertliğine bağlı olarak 25 °C, 200°C, 400°C ve 600°C’lerde aşınma hızının değişimi görülmektedir. KGDD’lerin yüksek aşınma direnci, perlit ve/veya çökelmiş karbürlere (Turu ve Gecu, 2023:4) atfedilebilir; bu da, çeliğin plastik deformasyon ve kırılma özelliklerini ve dolayısıyla tokluğunu etkiler. Kırılma

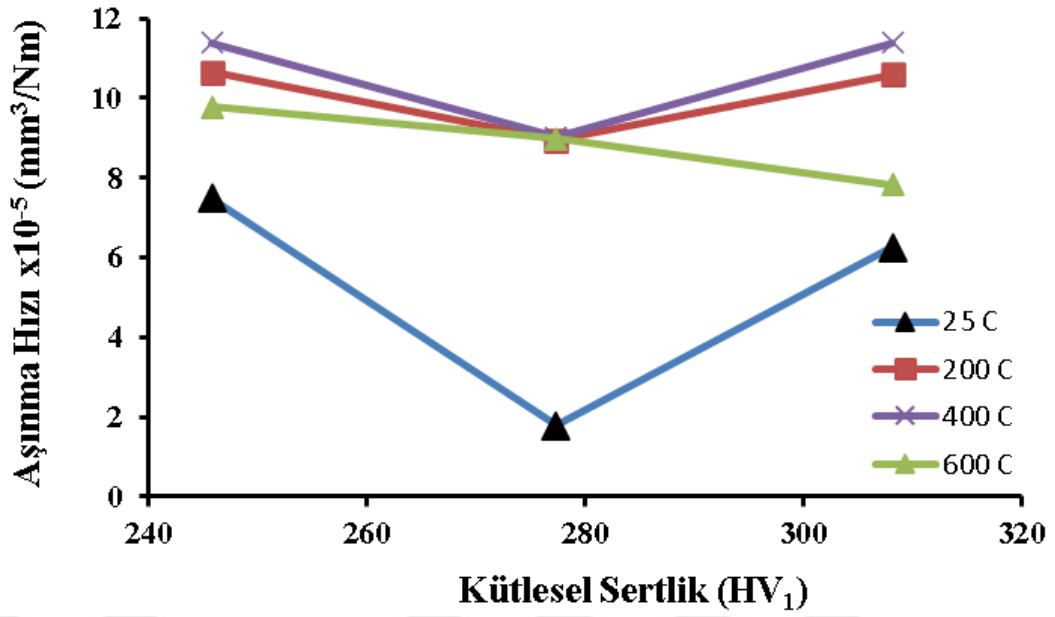
tokluğu, kütleli sertliğin yanı sıra aşınma direnci üzerinde etkisi olan bir malzeme parametresi olarak anılmaktadır (Yıldırım vd.,2000; 185). Mevcut araştırmada, incelenen KGDD'lerin kırılma tokluğu değerleri, ampirik denklemlerden (Hsu vd., 2000; 121) Tablo 5.1'de verilen darbe deneyleri sonuçlarına göre elde edilmiştir;

$$K_{IC}=0,86E_{CVN}+20,2 \quad (5.1)$$

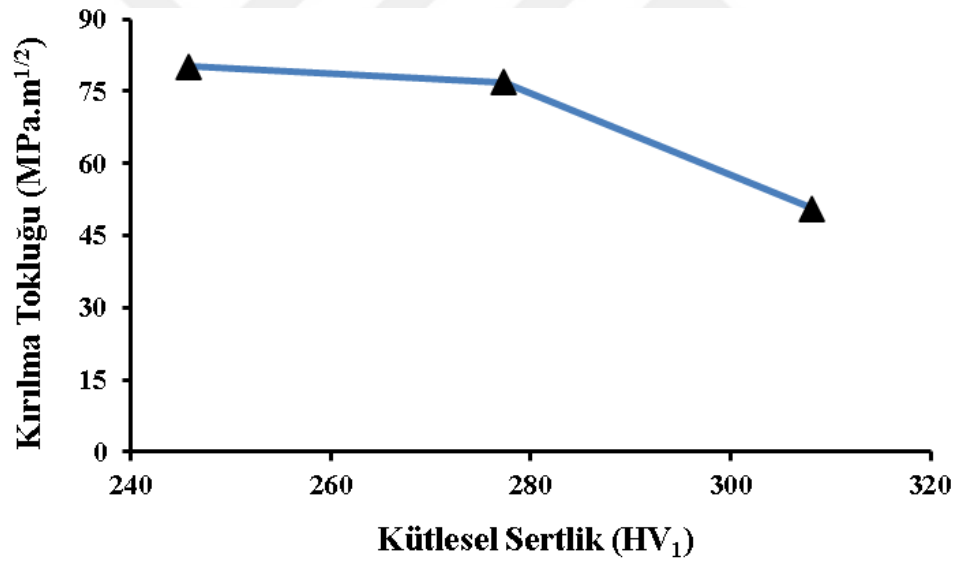
İncelen KGDD'lerin Denklem tablo 5.1'den hesaplanan kırılma tokluğu değerleri kütleli sertliğin bir fonksiyonu olarak Şekil 5.16'da verilmiştir. Denklem 5.1'de kırılma tokluğu (K_{IC}), ve darbe enerjisi (E_{CVN}) değerleri sırasıyla $MPa\sqrt{m}$ ve J birimleriyle temsil edilmektedir. Hesaplanan bu kırılma tokluğu değerleri kesin değerleri temsil etmiyor ancak bu KGDD'lerin tokluk özelliklerinin sayısal olarak karşılaştırılmasında kullanılacaktır.

25 °C, 200°C ve 400°C'lerde alaşımsız ve hem Mn hem de Cu ile alaşımlandırılan KGDD'den (Şekil 5.15) daha yüksek aşınma direncine sahip olan Mn ile alaşımlandırılan KGDD, aynı zamanda benzer kırılma tokluğunda alaşımsız KGDD'den daha yüksek sertliğe sahip olduğu Şekil 5.16'dan açıkça görülmektedir. Bu sonuç, farklı kimyasal bileşime sahip KGDD'lerin aşınma dirençleri karşılaştırıldığında kütle sertliğinin yanı sıra kırılma tokluğunun da dikkate alınması gerektiğini göstermektedir. Aynı kırılma tokluğu değerlerine sahip KGDD'lerde sertlik arttıkça aşınma sırasında plastik deformasyona karşı direncin artması ve aşınma direncinin artması beklenmektedir. Karşı malzeme Al_2O_3 bilyenin batmasına karşı direnç ve aşınma sırasında çatlamaya karşı direnç için sırasıyla yüksek sertlik ve kırılma tokluğu gereklidir.

KGDD'lerde sertlik ile aşınma direnci arasında iyi bir ilişki vardır (Sandıkoglu ve Gecu, 2021:7). KGDD'lerin kırılma tokluğu değerleri aynı aralıkta olduğunda kütleli sertliğin aşınma direncine katkısı baskın hale gelir. Kırılma tokluğu ne kadar düşük olursa, aşınma sırasında malzemenin temas yüzeylerinden uzaklaştırılması o kadar kolay olur. Bu nedenle 25 °C, 200°C ve 400°C'lerde gerçekleştirilen aşınma deneylerinde yüksek sertlik-düşük kırılma tokluğuna sahip hem Mn hem de Cu ile alaşımlandırılan KGDD, düşük sertlik-yüksek kırılma tokluğuna sahip alaşımsız KGDD benzer aşınma davranışı sergilerken, sabit kırılma tokluğu seviyesinde yüksek sertliğe sahip Mn ile alaşımlandırılan KGDD daha yüksek aşınma direnci sergilemiştir. 600 °C'de ise benzer oksitlenme eğilimi gösteren KGDD'ler arasında kırılma tokluğundan ziyade en yüksek kütleli sertliğe sahip olan hem Mn hem de Cu ile alaşımlandırılan KGDD'nin aşınma hızı azalmıştır.



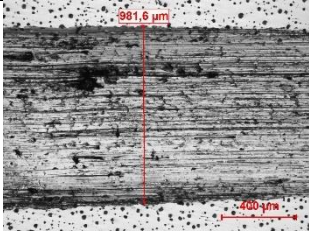
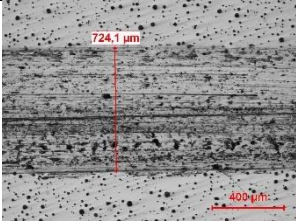
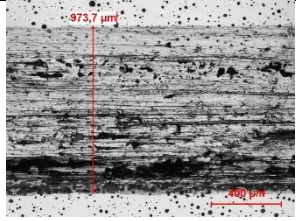
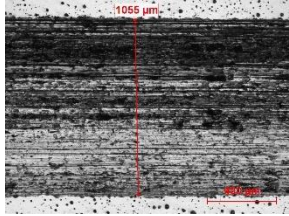
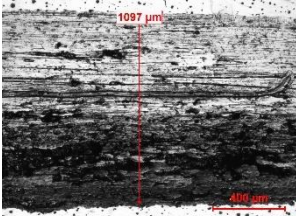
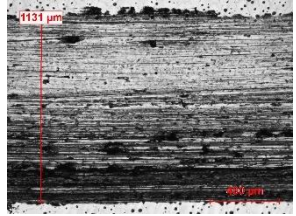
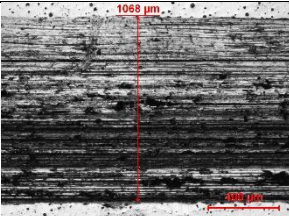
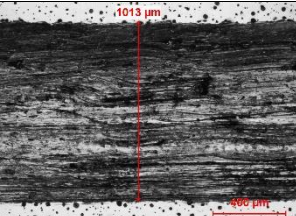
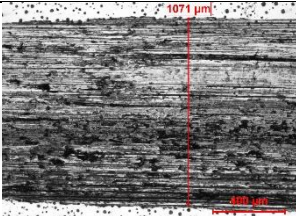
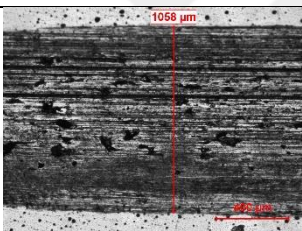
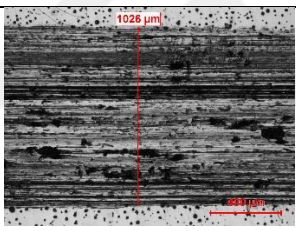
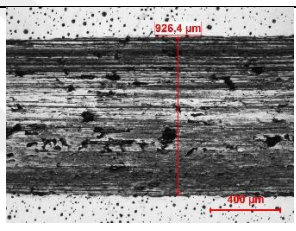
Şekil 5.15. Alaşımsız ve Alaşımlı KGDD'lerin Sıcaklığa Bağlı Olarak Aşınma Hızına Sertliğin Etkisi.



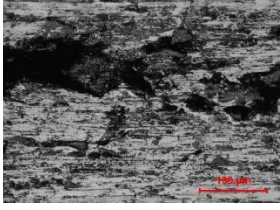
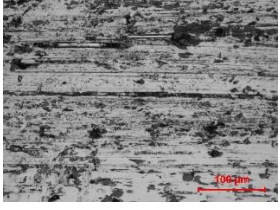
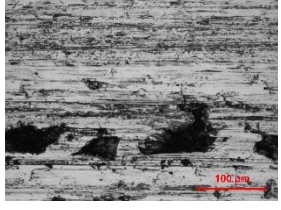
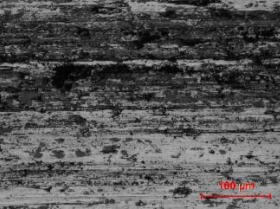
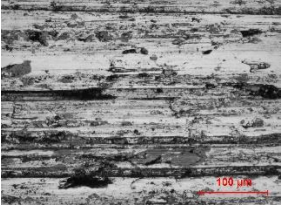
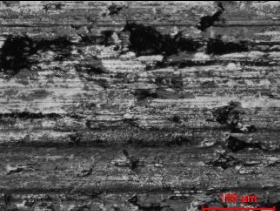
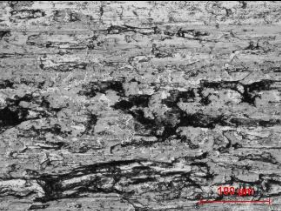
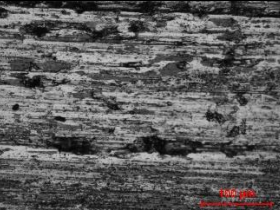
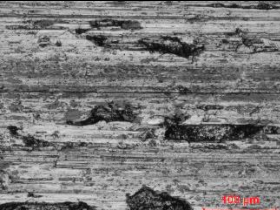
Şekil 5.16. Alaşımsız ve Alaşımlı KGDD'lerin Sertlik ve Kırılma Tokluğu Arasındaki İlişki.

Alaşımsız ve alaşımlı KGDD'lerin aşınma yüzeylerinin morfolojisi Şekil 5.17, Şekil 5.18 ve Şekil 5.19'da sunulmaktadır. Aşınma yüzeyinde birbirine az çok paralel uzanan aşınma izleri görülmektedir. Aşınma yüzeyinin büyük bir bölümünü kaplayan kahverengi bir film, oksitlenmiş yüzeyi temsil etmektedir. Bu durum oda sıcaklığında gerçekleştirilen aşınma deneyinde alaşımsız, Mn ile alaşımlandırılan ve hem Mn hem de Cu ile alaşımlandırılan KGDD'lerin aşınma yüzeylerinde demir oksit ürünlerinin varlığıyla birlikte (Şekil 5.20), oksidasyon aşınmasının olası aşınma mekanizması olabileceğini düşündürmektedir. Perlitik mikroyapının, ferritik olanlardan daha fazla oksit tabakası oluşturma eğiliminde olduğunu

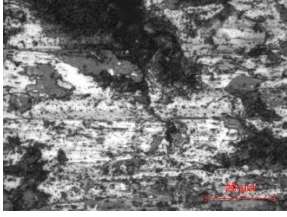
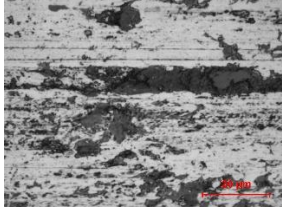
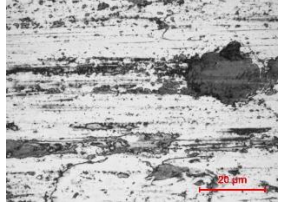
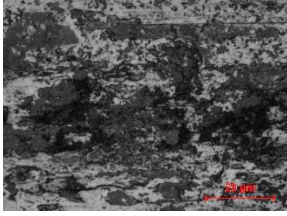
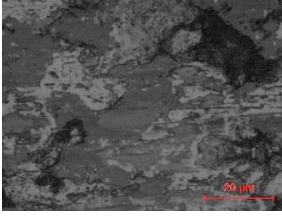
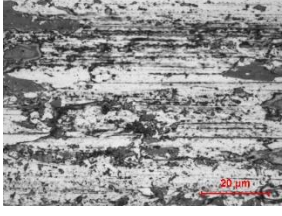
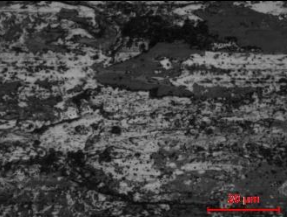
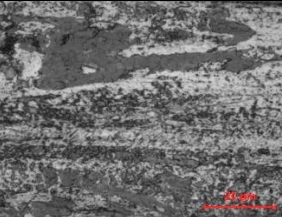
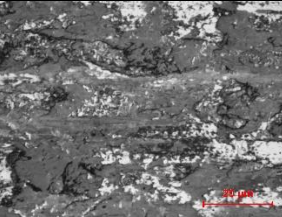
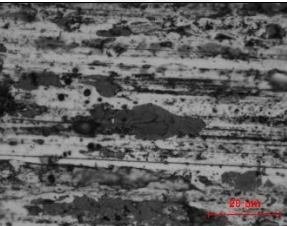
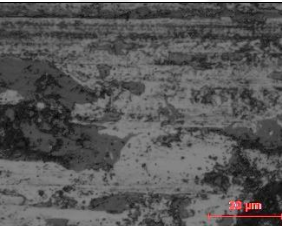
belirtmek gerekir (Abedi vd., 2010: 624). KGDD'ler, küresel grafit, ferrit ve perlitten oluşmakta olup, genellikle küresel grafitin etrafında bulunan yumuşak ferrit fazı aşınma sırasında belirli bir yük altında plastik deformasyona uğrama eğilimindedir. Sonuç olarak, grafit matrizen ayrıldığında ve yüzeyde kendi kendini yağlayan bir izolasyon filmi oluşturarak KGDD'nin sürtünme katsayısını azaltmaya yardımcı olmaktadır. Alaşımsız KGDD'ye göre Mn ile alaşımlandırılan KGDD'de perlit fazının %75'ten %88'e artmasıyla (Şekil 5.17-Şekil 5.19) aşınma yüzeyindeki grafit miktarı artmıştır. Alaşımsız ve Mn ile alaşımlandırılan KGDD'de ferrit fazının düşük sertliği nedeniyle kolaylıkla plastik deformasyona uğrayabilir. Böylece, aşınma deneyi sırasında grafiti çevreleyen ferrit fazı, özellikle alaşımsız KGDD'ye göre Mn ile alaşımlandırılan KGDD'de ferrit fazı %25'ten %12'ye azaldığında grafit matrizen kolay bir şekilde ayrılmaktadır (Şekil 5.21 a ve b). Şekil 5.22'de, oda sıcaklığında gerçekleştirilen aşınma deneyinde Mn ile alaşımlandırılan KGDD'nin aşınma yüzeyinde küresel grafitin deforme olduğu ve yüzeye doğru çıktığı açıkça görülmektedir ve aşınma deneyi sırasında en düşük sürtünme katsayısı (Şekil 5.23 a) sergilemiştir. Grafit nodülleri, sürtünme katsayısını azaltan katı bir yağlayıcı olarak işlev görerek temas yüzeyini azaltmaktadır (Abedi vd., 2010: 626). Ancak, yüksek sıcaklıklarda grafit nodülleri aynı davranışı göstermeyebilir ve sürtünme katsayısı artmaktadır (Şekil 5.23 b-d). Bu durumda temas yüzeylerinin sıcaklığı arttığı için grafit, yağlayıcı olarak etkinliğini kaybetmiş olabilir. Alaşımsız KGDD'ye göre hem Mn hem de Cu ile alaşımlandırılan KGDD'de perlit fazının %75'ten %94'e artmasıyla (Şekil 5.4) sertliğin arttığı (Şekil 5.12), kırılma tokluğunun azaldığı (Şekil 5.16) ve bunun sonucunda aşınma yüzeyindeki grafitin azalarak (Şekil 5.20) aşınma hasarının arttığı görüldü. Bu nedenle perlit fazının %94'e artmasıyla sürtünme katsayısı da artmıştır (Şekil 5.23 a).

	$\text{Cu}_{0,5}\text{Mn}_{0,2}$	$\text{Cu}_{0,5}\text{Mn}_{0,8}$	$\text{Cu}_{0,8}\text{Mn}_{0,8}$
25 °C			
200 °C			
400 °C			
600 °C			

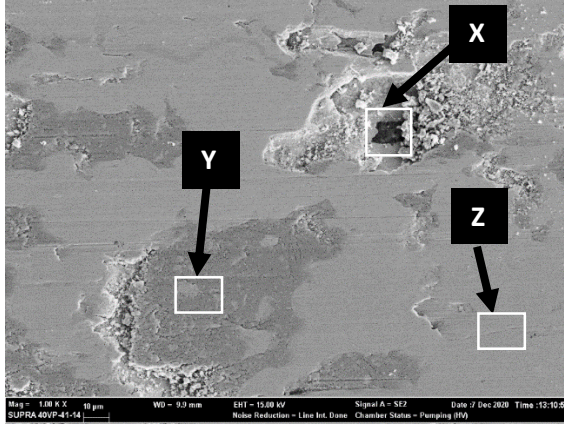
Şekil 5.17. Alaşımsız ve Alaşımlı KGDD'lerin Sıcaklığa Bağlı Olarak Düşük Büyütme Aşınma Yüzey Görüntüleri (X50).

	$\text{Cu}_{0,5}\text{Mn}_{0,2}$	$\text{Cu}_{0,5}\text{Mn}_{0,8}$	$\text{Cu}_{0,8}\text{Mn}_{0,8}$
25 °C			
200 °C			
400 °C			
600 °C			

Şekil 5.18. Alaşımsız ve Alaşımlı KGDD'lerin Sıcaklığa Bağlı Olarak Düşük Büyütme Aşınma Yüzey Görüntüleri (X200).

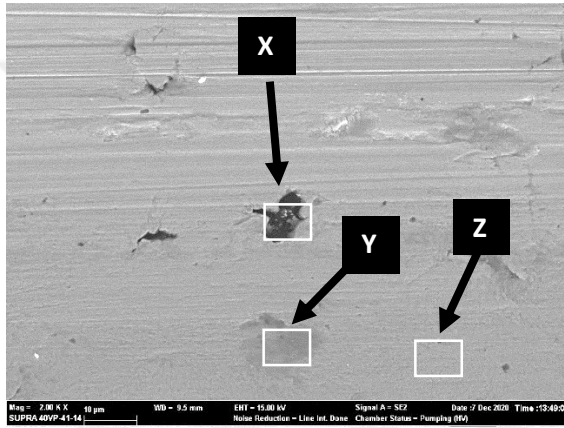
	$\text{Cu}_{0,5}\text{Mn}_{0,2}$	$\text{Cu}_{0,5}\text{Mn}_{0,8}$	$\text{Cu}_{0,8}\text{Mn}_{0,8}$
25 °C			
200 °C			
400 °C			
600 °C			

Şekil 5.19. Alaşımsız ve Alaşımlı KGDD'lerin Sıcaklığa Bağlı Olarak Yüksek Büyütme Aşınma Yüzey Görüntüleri (X1000).



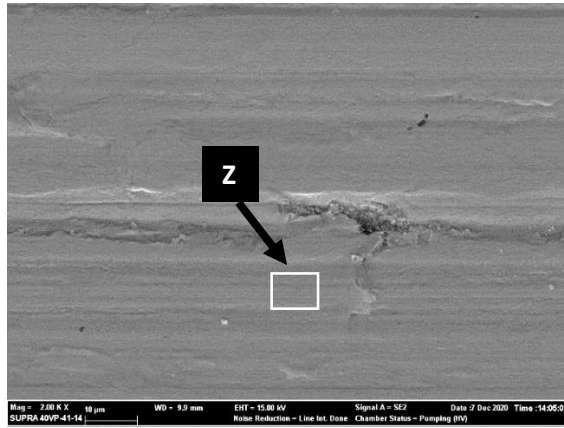
Element (Ağ. %)	X	Y	Z
C	35.62	1.78	1.81
Fe	61.39	69.58	94.63
O	2.04	27.27	1.51
Si	0.95	1.37	2.05
Mn	-	-	-
Cu	-	-	-

(a)



Element (Ağ. %)	X	Y	Z
C	11.12	5.15	4.51
Fe	78.94	75.86	88.06
O	7.77	16.79	5.10
Si	1.58	1.61	1.68
Mn	0.59	0.59	0.65
Cu	-	-	-

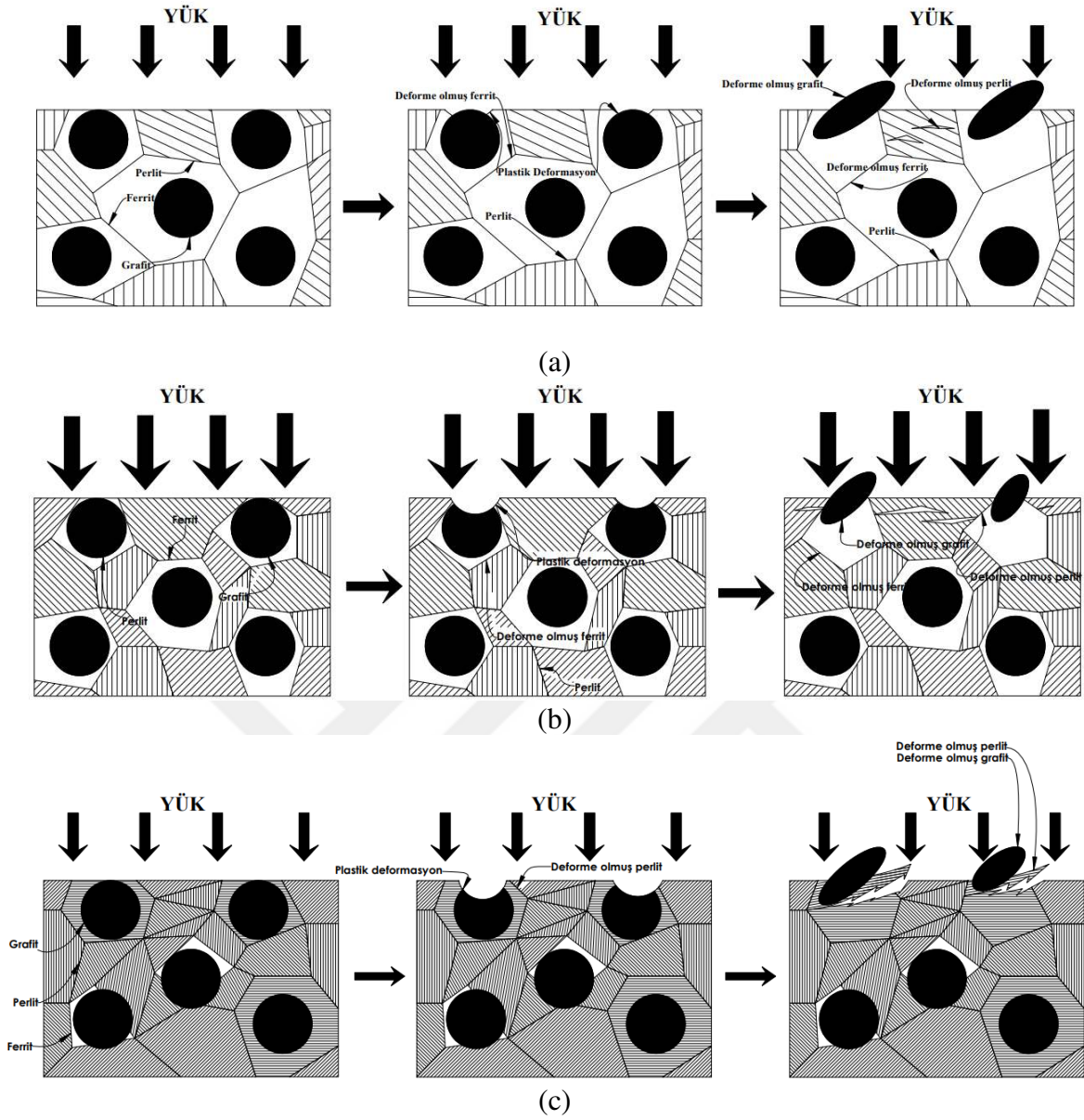
(b)



Element (Ağ. %)	-	-	Z
C	-	-	2.21
Fe	-	-	90.61
O	-	-	4.72
Si	-	-	1.64
Mn	-	-	0.58
Cu	-	-	0.24

(c)

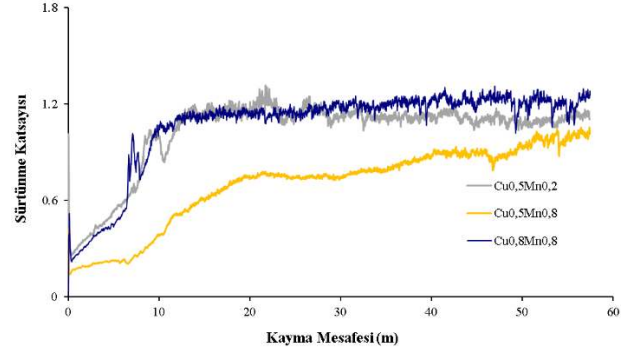
Şekil 5.20. Oda Sıcaklığında Gerçekleştirilen Aşınma Deneyinden Sonra (a) Alaşımsız ($\text{Cu}_{0.5}\text{Mn}_{0.2}$), (b) Mn ile Alaşımlandırılan ($\text{Cu}_{0.5}\text{Mn}_{0.8}$) ve (c) Hem Mn Hem de Cu ile Alaşımlandırılan ($\text{Cu}_{0.8}\text{Mn}_{0.8}$) KGDD'lerin Aşınma Yüzeylerinde EDS Analiziyle Birlikte SEM Görüntüleri.



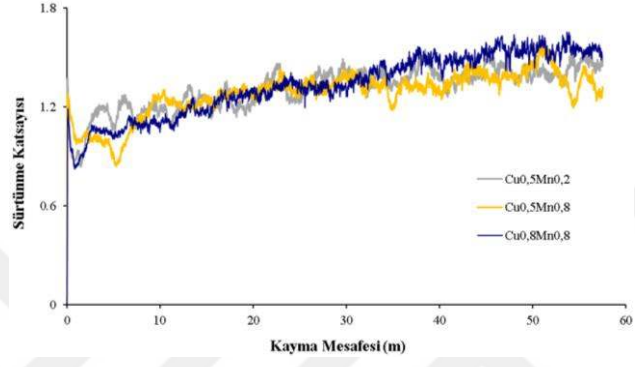
Şekil 5.21. (a) Alaşımsız ($\text{Cu}_{0.5}\text{Mn}_{0.2}$), (b) Mn ile Alaşımlandırılan ($\text{Cu}_{0.5}\text{Mn}_{0.8}$) ve (c) Hem Mn Hem de Cu ile Alaşımlandırılan ($\text{Cu}_{0.8}\text{Mn}_{0.8}$) KGDD'lerin Aşınma Sürecinin Şematik Diyagramı.



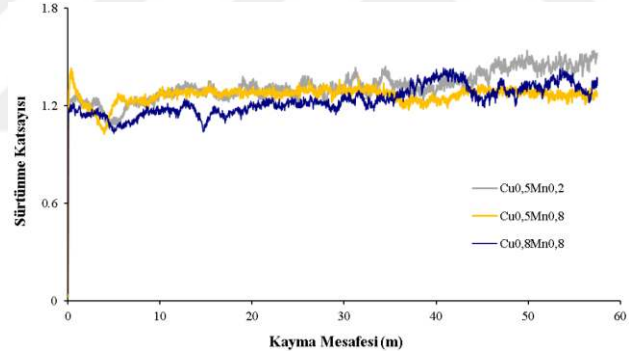
Şekil 5.22. Oda Sıcaklığında Gerçekleştirilen Aşınma Deneyinde Mn ile Alaşımlandırılan KGDD'nin Aşınma Yüzeyinde Deformasyona Uğrayan Küresel Grafit.



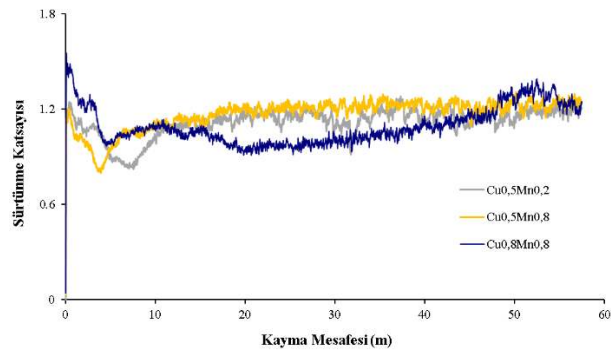
(a)



(b)



(c)

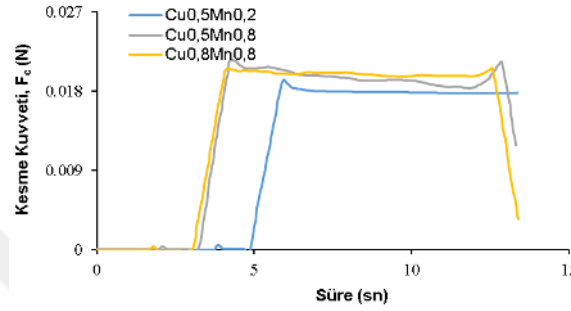


(d)

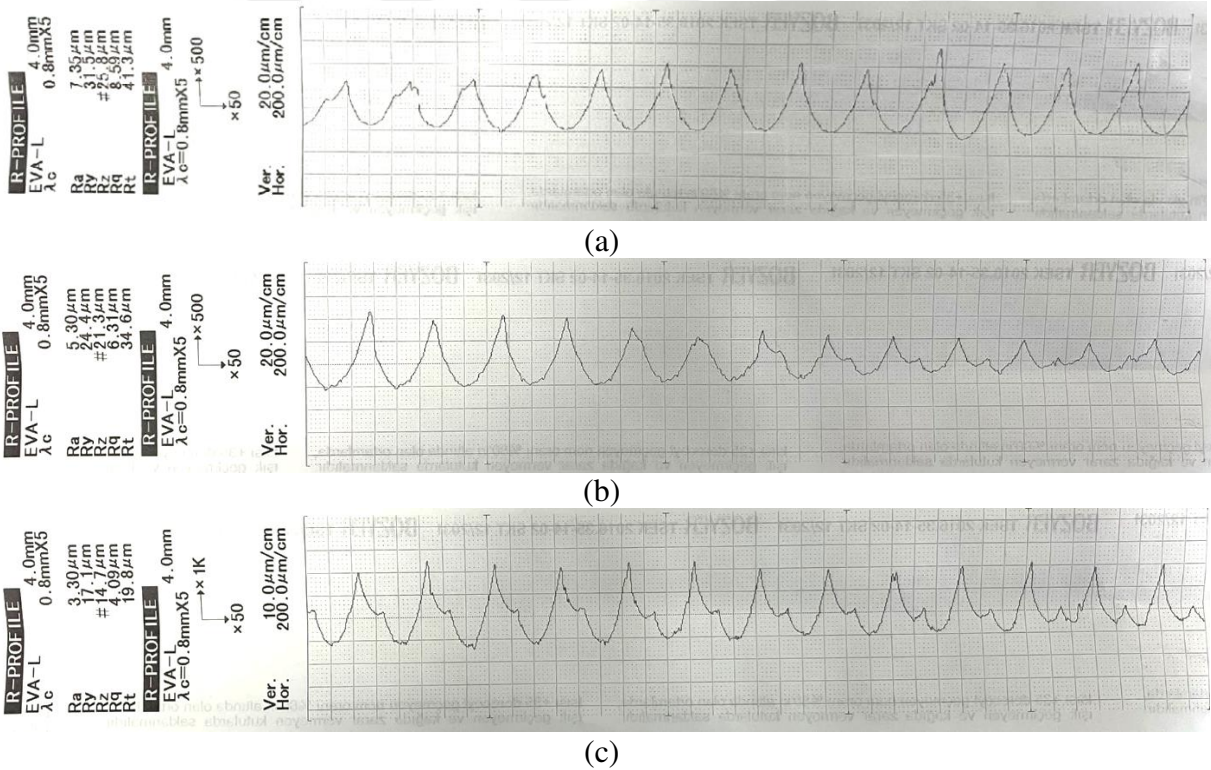
Şekil 5.23. (a) 25 °C, (b) 200 °C, (c) 400 °C ve (d) 600 °C’de Alaşım-sız ve Alaşım-lı KGDD’lerin Sürtünme Katsayısı Değişimleri.

5.4.Talaşlı İmalat Sonuçları

Yüzey pürüzlülüğü ve kesme kuvveti kriterleri referans alınarak bir işlenebilirlik değerlendirmesi yapıldı. Değerlendirme amaçları doğrultusunda, yüzey pürüzlülüğü (R_a) ve birincil kesme kuvveti (F_c) değerleri, alaşımsız ve alaşımlı KGDD'ler tornalandığında kaydedildi, daha önce belirlenmiş mekanik özellikler Şekil 5.12'de verilmiştir. Alaşım elementlerine bağlı kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğündeki değişimler, sırasıyla Şekil 5.24 ve Şekil 5.25'te verilmiştir.



Şekil 5.24. Alaşımsız ve Alaşımlı KGDD'lerin İşlenmesi Sırasında Kesme Kuvvetinin Değişimi.



Şekil 5.25. (a) Alaşımsız ($Cu_{0,5}Mn_{0,2}$), (b) Mn ile Alaşımlandırılan ($Cu_{0,5}Mn_{0,8}$) ve (c) Hem Mn Hem de Cu ile Alaşımlandırılan ($Cu_{0,8}Mn_{0,8}$) KGDD'lerin Talaşlı İmalat Sonrasında Yüzey Pürüzlülük Değerleri (R_a , R_y , R_z , R_q , R_t).

Şekil 5.24, alaşımsız KGDD için tornalama sırasında gereken kesme kuvvetinin, alaşımlı KGDD'lerden daha düşük olduğunu göstermektedir. Ancak, alaşımsız KGDD'nin yüzey pürüzlülüğü değerleri ($R_a=7,35 \mu m$, $R_y=31,5 \mu m$, $R_z=25,8 \mu m$, $R_q=8,59 \mu m$, $R_t=41,3 \mu m$), alaşımlı KGDD'lerden önemli ölçüde daha yüksektir. Alaşımsız KGDD'de önemli ölçüde yüksek ferrit içeriği (%24,8) kesme kuvvetini olumlu etkilediği düşünülmektedir (Şekil 5.4). Çünkü alaşımsız KGDD'deki yüksek ferrit içeriği, kesme kuvveti gereksinimini, yapılarında yüksek miktardaki perlit içeren alaşımlı KGDD'lerden daha düşük hale getirdi. Alaşımsız KGDD'nin düşük çekme mukavemeti (737,7 MPa) ve düşük sertliği (245,8 HV₁) tornalama sırasında kaydedilen en düşük kuvvetin diğer nedenleridir.

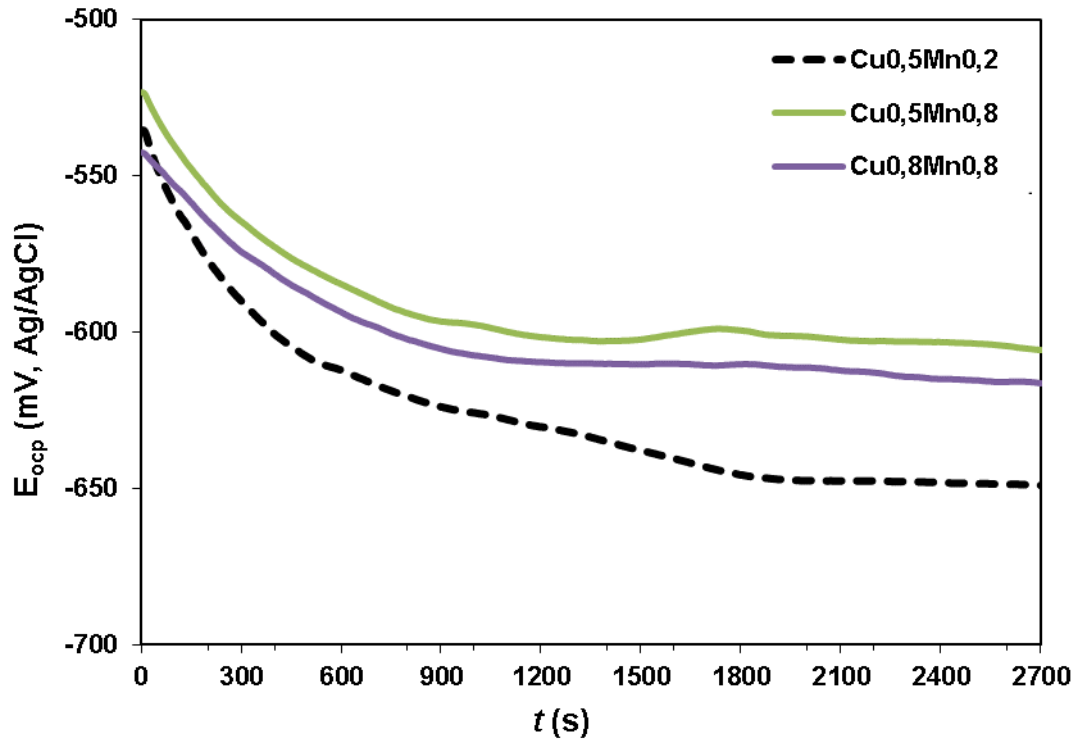
Bu mikroyapısal özelliklerin kesme kuvveti üzerindeki olumlu etkilerine rağmen, işlenmiş yüzeylerin olumsuz etkilediği gözlemlenmiştir. KGDD'lerin işlenmesi sırasında karşılaşılan sorunlar burada da görüldü. Alaşımsız KGDD'nin kötü yüzey kalitesi, bu KGDD'nin yapısındaki en yüksek ferrit içeriğine bağlanabilir. Genel eğilim ferritik KGDD'de akma bölgesindeki malzeme son derece sünek hale gelir ve kesici takımın boşaltma yüzeyine yapışabilir ve kötü yüzey kalitesine neden olabilir (Şeker vd., 2003: 50).

Alaşımlı KGDD'leri tornalarken, alaşımlı KGDD'lerin yapısındaki perlit içeriğinin yaklaşık %17-25 oranında artması nedeniyle kesme kuvvetleri alaşımsız KGDD'ye göre artmıştır. Ancak yüzey kalitesinde önemli gelişmeler kaydedildi. Alaşımlı KGDD'ler arasında benzer kesme kuvveti ve en iyi yüzey pürüzlülük değerleri hem Mn hem de Cu ile alaşımlandırılan KGDD'de elde edilmiştir. Mn ile alaşımlandırılan KGDD'nin hem Mn hem de Cu ile alaşımlandırılan KGDD'le karşılaştırıldığında bir miktar daha düşük çekme mukavemeti (815,7 MPa) ve düşük perlit içeriğinin (%88) pürüzlülük değerlerini artırdığı sonucuna varılabilir. Hem Mn hemde Cu ile alaşımlandırılan KGDD'nin daha iyi yüzey pürüzlülük değerlerinin bulunması ($R_a=3,30 \mu m$, $R_y=17,1 \mu m$, $R_z=14,7 \mu m$, $R_q=4,09 \mu m$, $R_t=19,8 \mu m$), oldukça yüksek sertliğine bağlanabilir.

KGDD'leri Mn ve Cu ile alaşımlandırmak, mikroyapı ve mekanik özellikleri değiştirdi (Şekil 5.3 ve Şekil 5.12), bu da tornalama sırasında kesme kuvvetini ve işlenen KGDD'lerin yüzey kalitesini önemli ölçüde etkiledi. Alaşımlandırma ile kesme kuvveti en az %11 artarken, yüzey kalitesinde de yaklaşık aynı büyüklükte iyileşme gözlemlendi. Alaşımlı KGDD'ler için, alaşımlandırmanın yüzey pürüzlülüğü üzerinde belirgin bir etkisi olduğu bulundu, kesme kuvvetleri üzerindeki etkileri biraz daha düşük oldu ve kesme kuvvetleri için %11, yüzey pürüzlülüğü değerleri için ise yaklaşık %50'lik olumlu bir değişim gözlemlendi.

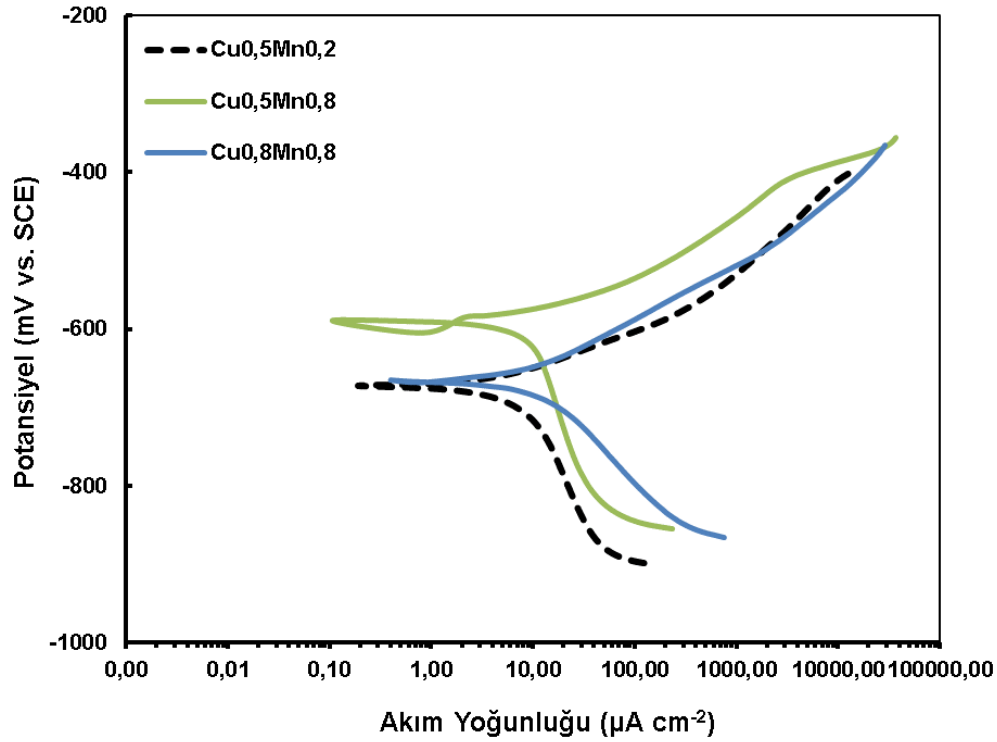
5.5. Korozyon Sonuçları

Her bir KGDD için Açık Devre Potansiyel (OCP) ölçümleri yapıldı ve OCP eğrileri Şekil 5.26’da verildi. Alaşımsız ve alaşımlı KGDD’lerin OCP eğrileri (Şekil 5.26), tüm numunelerin 1800 s sonra kararlı hale geldiğini göstermektedir. Mn ile alaşımlandırılmış KGDD’nin potansiyel değerleri alaşımsız ve hem Mn hem de Cu ile alaşımlandırılmış KGDD’den daha yüksek olduğundan, daha asil bir davranış sergiledi.



Şekil 5.26. Alaşımsız ve Alaşımlı KGDD’lerin OCP Eğrileri.

Alaşımsız ve alaşımlı KGDD’lerin Tafel grafikleri Şekil 5.27’de verilmiştir. İlk gözlemler, tüm numunelerin anodik ve katodik davranışlarının benzer olduğunu göstermektedir. Alaşımsız ve hem Mn hem de Cu ile alaşımlandırılan KGDD’lerin korozyon potansiyeli (E_{kor}) değerleri birbirine oldukça yakın iken, Mn ile alaşımlandırılan KGDD’nin E_{kor} değerinin diğerlerine göre daha pozitif olduğu dikkat çekmektedir. Daha yüksek bir E_{kor} değeri, daha kararlı bir elektrot potansiyelini gösterir ve gecikmiş bir korozyon atağına işaret eder. Ayrıca korozyon hızı değerlendirilirken i_{kor} (korozyon akım yoğunluğu) değerleri de dikkate alınmalıdır.



Şekil 5.27. Alaşımsız ve Alaşımlı KGDD'lerin Tafel Eğrileri.

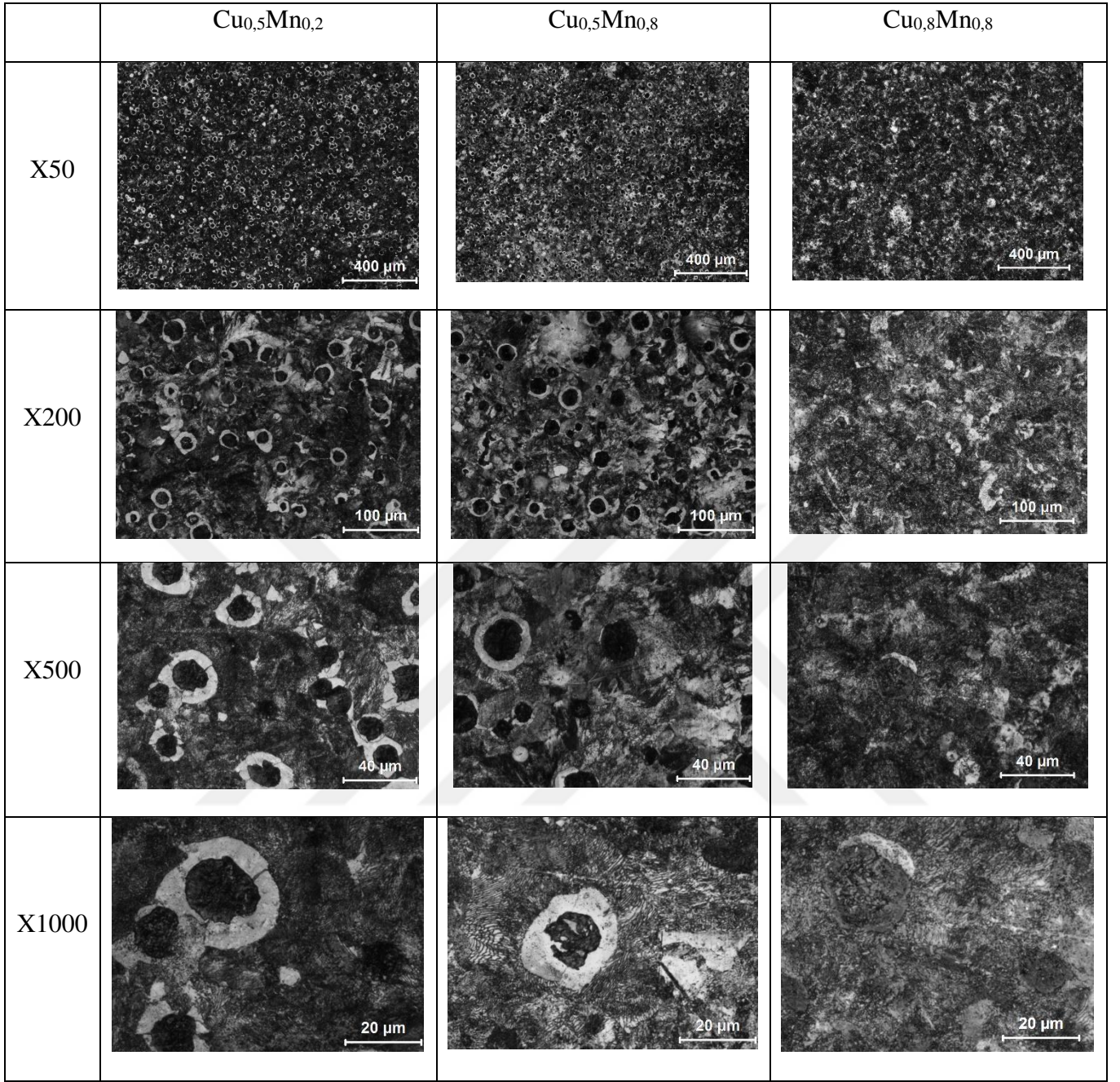
Tablo 5.4'te Tafel ekstrapolasyon yöntemiyle belirlenen E_{kor} ve i_{kor} değerleri verilmektedir. Sonuçlara göre Mn ile alaşımlandırılan KGDD'nin i_{kor} değeri azalmıştır. Korozyon hızı değerleri de i_{kor} değerleri ile doğru orantılı olduğundan benzer bir değişim göstermiştir. Ancak hem Mn hem de Cu ile alaşımlandırılan KGDD farklı bir eğilim gösterdi. En yüksek korozyon koruma verimliliği, en düşük korozyon hızına ($78,45 \times 10^{-3}$ mmpy) sahip olan Mn ile alaşımlandırılan KGDD'de elde edildi. Öte yandan hem Mn hem de Cu ile alaşımlandırılan KGDD'nin i_{kor} değeri, alaşımsız KGDD'den daha yüksek bulunduğundan hem Mn hem de Cu ile alaşımlandırılan KGDD'nin korozyon koruma verimliliği negatif değer olarak hesaplandı. Dolayısıyla hem Mn hem de Cu ile alaşımlandırmanın KGDD'nin korozyon direncini oldukça düşürdüğü söylenebilir. Araştırmacılara göre, korozyona karşı koruyucu bariyer görevi gören dayanıklı ve pasif fazların geliştirilmesi, korozyon direncini artırdı (Turu ve Gecu, 2023; 7) ve bu pasif tabakanın parçalanması, korozyon direncinde hem Mn hem de Cu ile alaşımlandırılan KGDD'de bir azalmaya neden oldu.

Tablo 5.4. İncelenen KGDD'lerin Korozyon Verileri.

Malzeme Kodu	E _{kor} (mV)	I _{kor} (x10 ⁻⁶ A/cm ²)	C _R (x10 ⁻³ mmpy)	%η
Cu _{0,5} Mn _{0,2}	-673	3,85	609,9	-
Cu _{0,5} Mn _{0,8}	-588	0,495	78,45	87
Cu _{0,8} Mn _{0,8}	-667	4,69	743	-21

Test edilen tüm KGDD'ler için, potansiyostatik testler arasındaki farklar, daha belirgin bir lokal ve üniform korozyon ve daha belirgin bir grafit partiküllerinin sıyrılmasından oluşmaktadır. %75 perlit-%25 ferrit içeren alaşımsız KGDD'de korozyon ürünleri yüzeyi tamamen kaplayamadığı görülmektedir (Şekil 5.26). Alaşımsız KGDD'de ferrit fazı koruyucu bir tabaka oluşturmaz ve grafit kürelerinin varlığıyla lokal korozyona maruz kalırlar. Ancak %88 perlit-%12 ferrit içeren Mn ile alaşımlandırılan KGDD'nin akım yoğunluğunun, belirgin bir şekilde azalması (Tablo 5.4) yüzeyde üniform bir korozyon ürünü tabakasının (Şekil 5.26) oluştuğunu göstermektedir. %94 perlit-%6 ferrit içeren hem Mn hem de Cu ile alaşımlandırılan KGDD'nin korozyon yüzeyinde ise grafit partiküllerinin sıyrılması belirgindir ancak korozyon ürünü katmanı aynı zamanda krater yüzeyini kaplayamamıştır.

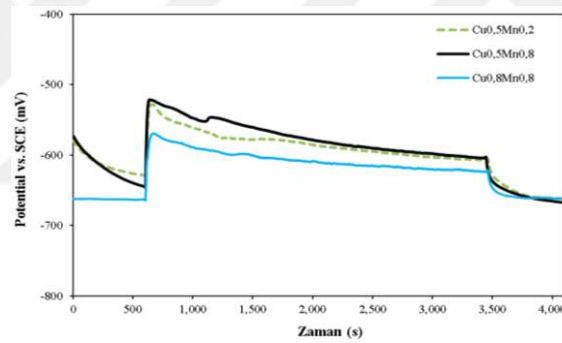
Şekil 5.28, korozyon deneyi sonrasında alaşımsız ve alaşımlı KGDD'lerin yüzeylerini göstermektedir. Önceki çalışmalara göre KGDD'lerde grafit korozyonu, galvanik etki, üniform saldırı, çatlaklar ve çukurlar gözlenebilmektedir (Turu ve Gecu, 2023: 7). Cl⁻ içeren bir ortamda üniform korozyonun bir sonucu olarak, grafit katot ve çevresindeki matriste anot görevi görmesi ile FeCl₂ (Fe²⁺+ 2Cl⁻ → FeCl₂) oluşmaktadır. KGDD'lerde bildirilen galvanik çift oluşumu, ferrit fazı ile grafit nodülleri arasında ve ferrit ile perlit arasında görülebilmektedir. Grafit kürelerin etrafındaki ferrit halkaları, hem grafit kürelerden hem de perlit fazına göre anodiktir (Bracciale vd., 2001:7). Hem Mn hem de Cu ile alaşımlandırılan KGDD'de grafit bölgelerinde soyulma görülebilmektedir, bu da grafit korozyonunun meydana geldiğini düşündürmektedir. Ayrıca sıyrılmış grafit nodülleri grafit korozyonuna işaret etmektedir (Hsu ve Lin, 2014: 1522). Şekil 5.28'de Mn ile alaşımlandırılan KGDD'nin yüzeyinde FeCl₂ bileşiği gözlemlenirken, alaşımsız ve hem Mn hem de Cu ile alaşımlandırılan KGDD'lerin yüzeyinde FeCl₂ bileşiğinin miktarı azalmıştır ve yoğun korozyon nedeniyle karanlık görünmektedir.



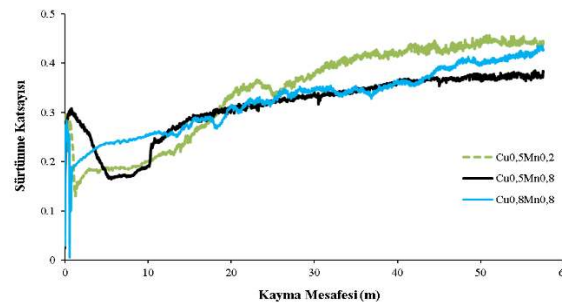
Şekil 5.28. Korozyon Deneyinden Sonra Alaşımsız ve Alaşımlı KGDD'lerin Düşük ve Yüksek Büyütme Korozyon Yüzey Görüntüleri.

5.6. Tribokorozyon Sonuçları

Şekil 5.29, elektrokimyasal hücrede yapılan tribokorozyon deneylerinin sonuçlarını özetlemektedir. Daha az negatif değerler, korozyon yeteneği azalmış anlamına gelir. Benzer bir şekilde, alaşımsız ve Mn ile alaşımlandırılan KGDD'lerin korozyon potansiyeli -522 mV'dan -606 mV'a azalırken, hem Mn hem de Cu ile alaşımlandırılan KGDD ise en düşük negatif değer olarak -571 mV'dan -626 mV'a azalarak diğer KGDD'ler arasında en kötü performansı gösterdi. Şekil 5.29 b, OCP şartları altında 30 N yük altındaki KGDD'lerin ölçülen sürtünme katsayısı (COF) değişimini göstermektedir. KGDD'ler için belirlenen COF değerleri, kuru kayma koşulları altında kaydedilenlere kıyasla bu elektrokimyasal koşullar altında daha düşük değerlere sahiptir. Alaşımsız ve hem Mn hem de Cu ile alaşımlandırılan KGDD'lerin COF değerleri ilk 1 m içerisinde önce 0,27'den 0,17'ye azalıp ardından kararlı COF'ye (0,43) ulaşma süresinde bir artış göstermiştir. Ancak Mn ile alaşımlandırılan KGDD ise ilk 5 m içerisinde COF değeri önce 0,29 artıp ardından 0,17'ye azalma göstermiştir ve kararlı düşük COF değeri (0,36) sergilemiştir.



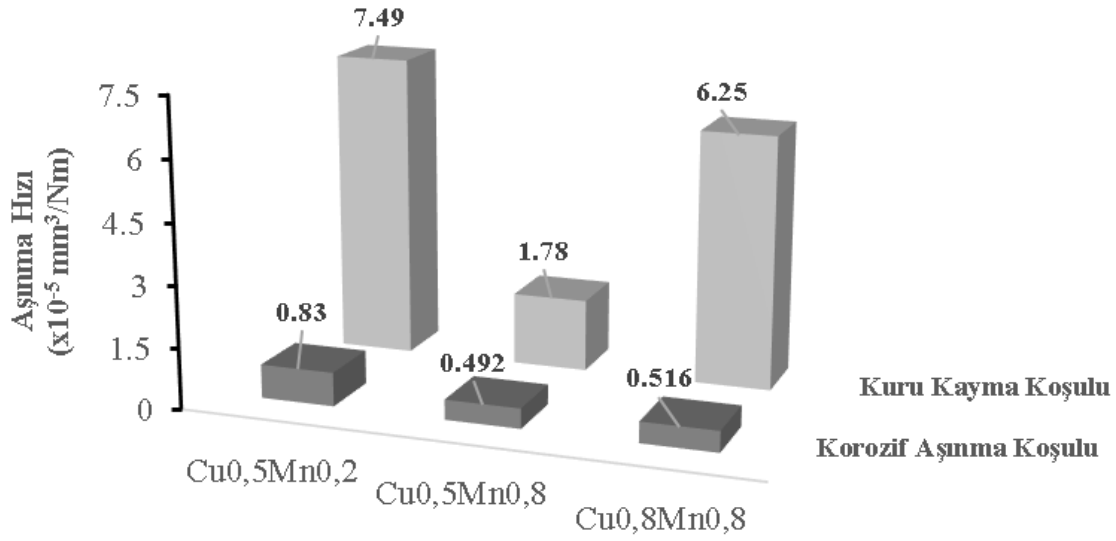
(a)



(b)

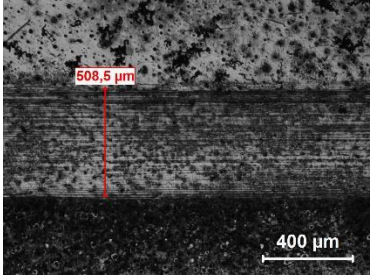
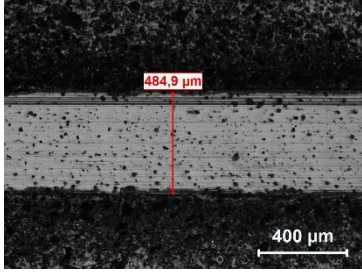
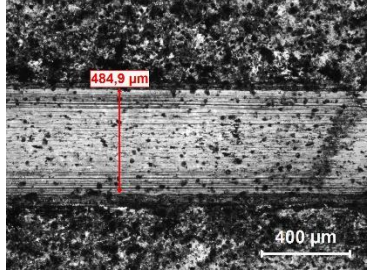
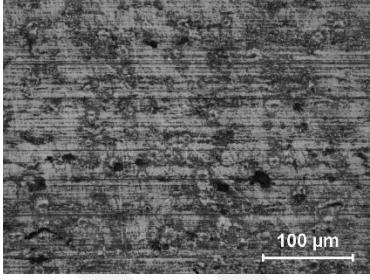
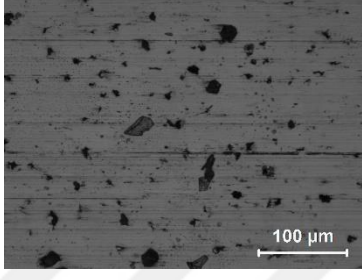
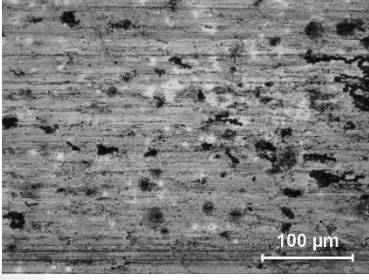
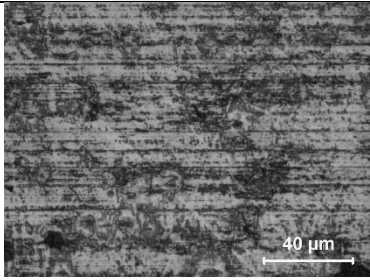
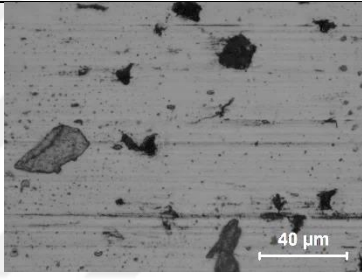
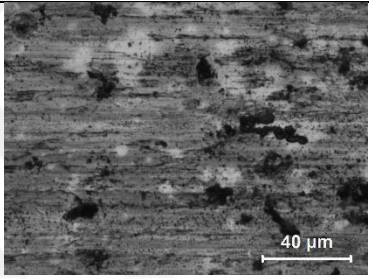
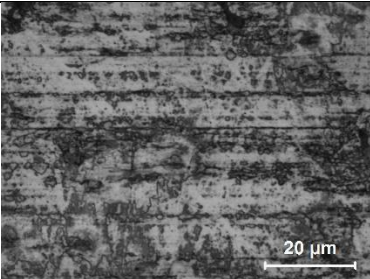
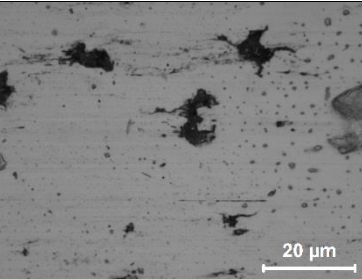
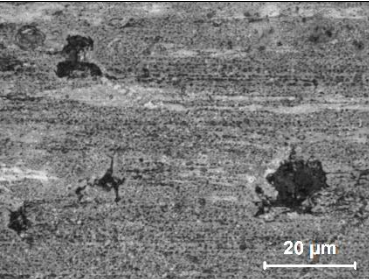
Şekil 5.29. (a) Bir Sürtünme Deneyinin Tamamı Boyunca, Kayma Başlamadan Önce Her Bir Numune için 10 Dakika Boyunca ve Deneyler Tamamlandıktan Sonra Aynı Süre Boyunca Süreye Bağlı Olarak Çalışma Elektrot Potansiyelinin (E_{kor}) Değişimi, (b) 30 N Yük Altında, 1,9 cm/s Kayma Hızında OCP Şartları Altında Sürtünme Katsayısındaki Değişim.

Şekil 5.30, alaşımsız ve alaşımlı KGDD'lerin aşınma hızlarını kuru ve OCP koşulları altında karşılaştırmaktadır. Alaşımsız ve hem Mn hem de Cu ile alaşımlandırılan KGDD'ler kuru kayma koşulları altında sırasıyla $7,49 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ ve $6,25 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ değerlerine sahip en yüksek aşınma hızı gösterdi. İncelenen KGDD'ler tribokorozyon ortamında benzer davranışlar sergiledi. Mn ile alaşımlandırılan KGDD, hem kuru hem de OCP koşulları altında diğer KGDD'lerle karşılaştırıldığında en iyi aşınma direncini gösterdi ve OCP koşulları altında $0,492 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ 'lik bir aşınma hızıyla performansta sırasıyla hem Mn hem de Cu ile alaşımlandırılan KGDD ve alaşımsız KGDD izledi. Genel olarak OCP koşulları altında aşınma hızları, kuru kayma koşulları altında ölçülenlere kıyasla daha düşüktür. Bu gözlem, korozyon çözeltisinin yağlayıcı etkisini doğrulamaktadır.



Şekil 5.30. Alaşımsız ve Alaşımlı KGDD'lerin Kuru Kayma ve Korozif Aşınma Koşulları Altında Aşınma Hızları.

Şekil 5.31, tribokorozyon deneylerinden sonra alaşımsız ve alaşımlı KGDD'lerin aşınma yüzey görüntüleri verilmiştir. Alaşımsız KGDD'ye göre Mn ile alaşımlandırılan ve hem Mn hem de Cu ile alaşımlandırılan KGDD'de perlit fazının artmasıyla (Şekil 5.17-Şekil 5.19) aşınma yüzeyinde grafit miktarı artmıştır. Alaşımsız KGDD'de ferrit fazının düşük sertliği nedeniyle plastik deformasyona uğrayarak aşınma yüzeyinde yoğun aşınma ürünleri gözlemlenebilirken, alaşımlı KGDD'lerin aşınma yüzeyi parlamıştır.

	$\text{Cu}_{0,5}\text{Mn}_{0,2}$	$\text{Cu}_{0,5}\text{Mn}_{0,8}$	$\text{Cu}_{0,8}\text{Mn}_{0,8}$
X50			
X200			
X500			
X1000			

Şekil 5.31. Tribokorozyon Deneylerinden Sonra Alaşımsız ve Alaşımlı KGDD'lerin Aşınma Yüzey Görüntüleri.

6. SONUÇLAR

Bu çalışmada, farklı Mn ve Cu içeriklerine sahip KGDD'ler üretildi, alaşım elementinin uygun bir dengeye sahip olması, farklı mikroyapıların ve özelliklerin elde edilmesine izin vermektedir. Başlıca sonuçları aşağıda özetleyebiliriz.

1. Ağırlıkça hem %0,8 Mn hem de %0,8 Cu ile alaşımlandırılan KGDD'nin grafit nodüllerinin sayısı azalırken boyutları da artmıştır. Alaşımsız KGDD büyük miktarda ferrit fazı içerirken, perlit hacim oranı alaşımlandırma ile birlikte genişledi. Alaşımlandırma ile perlit miktarı artarken, ferrit miktarı ise azalmaktadır.
2. Alaşımlandırma ile akma mukavemeti, çekme mukavemeti ve sertlik değerleri iyileşirken darbe tokluğu azalmaktadır.
3. En düşük kesme kuvveti değeri, alaşımsız KGDD'nin tornalandığında kaydedildi. Ancak, alaşımsız KGDD en yüksek yüzey pürüzlülüğü değerleri gösterdi. Bu durum, alaşımsız KGDD'nin yapısındaki yüksek ferrit içeriğiyle açıklanabilir. Alaşımlandırmanın yüzey pürüzlülüğü üzerinde belirgin bir etkisi olduğu gözlemlendi, kesme kuvvetleri üzerindeki etkileri biraz daha düşük oldu ve kesme kuvvetleri için %11, yüzey pürüzlülüğü değerleri için ise yaklaşık %50'lik olumlu bir değişim tespit edildi.
4. En düşük aşınma kaybını, ağırlıkça %0,8 Mn ile alaşımlandırılan KGDD gösterdi. Ancak en yüksek mekanik özellikler, ağırlıkça hem %0,8 Mn hem de %0,8 Cu ile alaşımlandırılan KGDD'de elde edildi. Mn ile alaşımlandırılan KGDD'nin oda sıcaklığında gerçekleştirilen aşınma deneyine göre 200 °C'de aşınma hızı arttı ve 600 °C'ye kadar aşınma hızı değişmedi. Sıcaklığın artmasıyla aşınma hızında en fazla artış, alaşımsız ve hem Mn hem de Cu ile alaşımlandırılan KGDD'de tespit edildi.
5. Ağırlıkça %0,8 Mn ile alaşımlandırılan KGDD'nin korozyon direnci, ağırlıkça %3,5 NaCl ortamında en yüksek bulundu. Ancak ağırlıkça hem %0,8 Mn hem de %0,8 Cu ile alaşımlandırılan KGDD'nin korozyon direncini oldukça düşürmektedir.
6. Ağırlıkça %0,8 Mn ile alaşımlandırılan KGDD, hem kuru hem de korozif ortamlarda daha düşük sürtünme katsayıları (COF) ve daha düşük aşınma hızına sahiptir. Ayrıca, %0,8 Mn ile alaşımlandırılan KGDD belirgin bir şekilde daha az yüzey hasarı gösterdi.

7. KGDD'lerin kuru ve koroziyel koşullarda aşınma mekanizması yumuşak ferrit fazının plastik deformasyonu ve sürüklenmesini içerir, ayrıca yapısal kusurlar nedeniyle aşınma ürünlerinin ve koroziyel çözeltinin nüfuz etmesini içerir. Ancak aşınma hasarı, sert perlit fazıyla desteklenen matriste grafitin yağlayıcı özellikleriyle azalmıştır.



KAYNAKÇA

- Abedi, H.R. vd.** (2010). Sliding Wear Behavior of A Ferritic–Pearlitic Ductile Cast Iron with Different Nodule Count. *Wear*, 268, 622-628.
- ASM International.** Handbook Committee. (1990). Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys Section: Cast Irons, 1, 8.
- Binczy, F. vd.** (2007). The Effect of Cooling Rate on The Microstructure of Nodular Cast Iron. *Archives of Foundry Engineering*, 7(2), 115-118.
- Bracciale, A. vd.** (2001). Spheroidal Cast Iron Corrosion Resistance Analysis In Simulated Soil Environment by Means of Potentiokinetic And Potentiostatic Tests, *Euromat*, 10-10.
- Chen, X. vd.** (2017). Effects of niobium addition on microstructure and tensile behavior of as-cast ductile iron. *Materials Science and Engineering A*, 688, 416-428.
- Çelik, G. A.vd.** (2020). Thermal and Microstructural Characterization of A Novel Ductile Cast Iron Modified by Aluminum Addition. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 27, 190-199.
- Dasgupta, R.K. vd.** (2012). Microstructure and Mechanical Properties of As-Cast Ductile Irons Alloyed with Manganese and Copper. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 21, 1728-1736.
- Górny, M. vd.** (2017). Transformation Kinetics and Mechanical Properties of Copper-Alloyed and Copper-Nickel Alloyed. *Materials Science Forum*, 925, 181-187.
- Hosseini, S.M. vd.** (2023). Fatigue Crack Initiation Detection in Ductile Cast Iron Crankshaft Under Rotating Bending Fatigue Test Using The Acoustic Emission Entropy Method. *Engineering Failure Analysis*, 144, 1-25.
- Han, Ch. F. vd.** (2015). Effects of Molybdenum on the Wear Resistance and Corrosion Resistance of Carbide Austempered Ductile Iron. *Metallography, Microstructure, and Analysis*, 4, 298–304.
- Handbook, A. S. M.** (2005). Properties and Selection: Irons, Steels, and High Performance Alloys, 1, 73.
- Hsu, C.H., vd.** (2000). Relationship Between Dynamic and Static Toughness of Flake and Compacted Graphite Cast Irons. *Materials Science and Engineering A*, 282, 115–122.

- Hsu, C.H., & Lin, K.T.** (2014). Effects of Copper and Austempering on Corrosion Behavior of Ductile Iron in 3.5 Pct Sodium Chloride. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 45, 1517-1523.
- Kandemir, A.S., Gecu, R.** (2023). Influence of Vanadium Content and Cooling Rate on The Characteristics of Vanadium-Alloyed Spheroidal Graphite Cast Irons. *Journal of Alloys and Compounds*, 934, 1-8.
- Lacaze, J. vd.** (1997). The Role of Manganese and Copper in the Eutectoid Transformation of Spheroidal Graphite Cast Iron. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 28, 2015-2025.
- Lacaze, J. vd.** (2016). Microstructure of As-cast Ferritic-pearlitic Nodular Cast Irons. *ISIJ International*, 56(9), 1606-1615
- Mindivan, H.** (2023). High-Temperature Wear and Oxidation Behavior of Electrochemically Borided Low Carbon Steel. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 38(2) 937-945.
- Mittal, R., & Nanda, S.** (2010). *Property Enhancement of Spheroidal Graphite Cast Iron by Heat Treatment*. (Lisans Tezi). Department of Metallurgical and Materials Engineering National Institute of Technology, Rourkela.
- Mourad, M. vd.** (2020). Influence of Inoculant Type on the Microstructure Characteristics and Mechanical Properties of Ductile Iron. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 73, 1027-1041.
- Omale, S.O. vd.** (2020). Structural Characterization and Mechanical Properties of Pearlite - Enhanced Micro-Alloyed Ductile Irons. *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*, 32, 205-210.
- Omran, A.M. vd.** (2014). Effect of Cu and Mn on the Mechanical Properties and Microstructure of Ductile Cast Iron. *Journal of Engineering Research and Applications*, 4(6),90-96.
- Panda, R.K. vd.** (2015). Austempered Ductile Iron: Processing and Mechanical Properties. *Lambert Academic Publishing*, 1-115.
- Perez, M. vd.** (2006). Wear Resistance of Cu–Ni–Mo Austempered Ductile Iron. *Wear*, 260, 879–88.

PourAsiabi, H. vd. (2013). Effect of Austempering Process on Microstructure and Wear Behavior of Ductile Iron Containing Mn-Ni-Cu-Mo. *Metals and Materials International*, 19, 67-76.

Prasetyo, Y. vd. (2011). Effect of Copper Addition on Mechanical Properties of Nodular Indefinite Chilled Iron (NICI). *Key Engineering Materials*, 457, 386-391.

Rao, L. vd. (2014). Influence of the Composition Ratio of Manganese and Copper on The Mechanical Properties and The Machining Performance of Ductile Iron. *Indian Journal of Engineering and Materials*, 21, 573-579.

Sandikoglu, A., & Gecu, R. (2021). Microstructural, Mechanical and Tribological Characterization of Aluminum-Alloyed Ductile Cast Irons Based on Aluminum Content. *Journal of Alloys and Compounds*, 879, 1-13.

Song, Y. vd. (2017). Effects of Chloride Ions on Corrosion of Ductile Iron and Carbon Steel In Soil Environments. *Scientific Reports*, 7(1), 1-13.

Toktaş, G., & Korkmaz, S. (2023) Indentation Fracture Toughness of Boronized Unalloyed and Alloyed Ductile Iron. *Materials Chemistry and Physics*, 296, 1-7.

Turu, I.C., & Gecu, R. (2023). Wear and Corrosion Behavior of Vanadium-Alloyed Nodular Cast Irons Fabricated by Sand-Casting. *Wear*, 534-535, 1-9.

Vasko, A. (2020). Comparison of Mechanical and Fatigue Properties of Simo-and Sicu-Types of Nodular Cast Iron. *Materials Today: Proceedings* 32, 168-173.

Zeraati, A.S. vd. (2010). Microstructural and Mechanical Properties (Hardness) Investigations of Al-Alloyed Ductile Cast Iron. *Journal of Alloys and Compounds*, 500(1), 129-133.