

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



BORLAMA YÖNTEMİNİN VOLAN, KRANK VE KAM MİLİ
ÜZERİNE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

Mahmut Nedim TANSU

Yüksek Lisans Tezi

Anabilim Dalı: Otomotiv Mühendisliği

Programı: Taşıt Dinamiği ve Kontrol

Danışman: Prof. Dr. Hanbey HAZAR

ELAZIĞ-2017

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BORLAMA YÖNTEMİNİN VOLAN KRANK VE KAM MİLİ ÜZERİNE ETKİSİNİN
ARAŞTIRILMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MAHMUT NEDİM TANSU

141136109

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih :11/12/2017

Tezin Savunulduğu Tarih :29/12/2017

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Hanbey HAZAR

Diğer Jüri Üyeleri : Doç. Dr. Cumali İLKILIÇ

Yrd. Doç. Dr. Emine ŞAP

ARALIK-2017

ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim boyunca bilgi, tecrübe ve desteğini esirgemeyen Otomotiv Mühendisliği Bölümü Bölüm Başkan Yardımcısı Öğretim Üyesi danışman hocam Prof. Dr. Hanbey HAZAR' a teşekkürü bir borç bilirim. Tezime proje kapsamında destekte bulunan FÜBAP birimine teşekkür ederim. Çalışmalarım sırasında benden yardımını esirgemeyen Doç. Dr. Uğur ÇALIĞÜLÜ hocama, Yrd. Doç. Dr. Soner BUYTOZ' a, Dr. Uğur ÖZTÜRK 'e, Yrd. Doç. Dr. Fethi DAĞDELEN' e, Mehmet Şah SARAÇ' a ve Semih TAŞKAYA' ya ayrıca bana çalışmalarımnda her konuda yardımcı olan sözlüm Selma KAYA' ya teşekkür ederim.

Yaşamım boyunca bana maddi ve manevi desteğini esirgemeyen kıymetli aileme teşekkür ederim.

Mahmut Nedim TANSU

ELAZIĞ-2017

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	II
İÇİNDEKİLER	III
ÖZET.....	VII
SUMMARY	IX
TABLolar LİSTESİ.....	XI
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	XII
KISALTMALAR LİSTESİ.....	XVII
SEMBOLLER LİSTESİ.....	XVIII
1. GİRİŞ	1
2. BOR ELEMENTİ	2
2.1. Borun Tarihçesi.....	3
2.2. Bor Mineralleri ve Çeşitleri	3
2.3. Borlama ve Borlama İşlemi	4
2.4. Borun Çelik Yüzeylerinde Sertleştirici Olarak Kullanılması	6
2.5. Borlamada Alaşım Elementlerinin Etkisi	8
2.6. Borlanmış Malzemelerin Kimyasal ve Fiziksel Özellikleri.....	9
2.6.1. Borlamada Tabaka Kalınlığı	9
2.6.2. Borlamada Sertlik Etkisi	10
2.6.3. Borlamada Aşınma Etkisi	12
2.6.4. Borlamanın İç Gerilmelere Etkisi	13
2.6.5. Borlamada Korozyon Etkisi.....	13
2.6.6. Borlamada Yorulma Etkisi	13
2.7. Demir-Bor Denge Diyagramı	14
2.8. Bor İle Elde Edilen Ürünler	15
2.8.1. Boraks Dekahidrat	15
2.8.2. Boraks Pentahidrat	15
2.8.3. Susuz Boraks.....	15
2.8.4. Borik Asit.....	16
2.8.5. Bor Oksit (Susuz Borik Asit).....	16
2.8.6. Sodyum Perborat.....	16

2.8.7.	Diğer Bor Bileşikleri.....	17
2.8.7.1.	Boridler	17
2.8.7.2.	Bor Karbür	17
2.8.7.3.	Bor Nitrür.....	17
2.8.7.4.	Bor Halojenürler	18
2.9.	Bor Ürünlerinin Kullanım Alanları.....	18
2.9.1.	İçten Yanmalı Motorlarda Borlanabilecek Bazı Elemanlar	20
2.9.1.1	Krank Mili.....	20
2.9.1.2	Kam (Eksantrik) Mili	21
2.9.1.3	Volan.....	22
3.	BORLAMA YÖNTEMLERİ.....	23
3.1.	Katı Ortam Borlama Yöntemi.....	24
3.2.	Pasta Borlama Yöntemi	27
3.3.	Sıvı Borlama Yöntemi	28
3.4.	Gaz Borlama Yöntemi	29
3.5.	Plazma Borlama Yöntemi	30
4.	LİTERATÜR ÇALIŞMASI.....	35
5.	MATERYAL ve METOT.....	39
5.1.	Spektrometre Analiz Cihazı	40
5.2.	Kaplama İşlemi	41
5.3.	Deneyde Kullanılan Numuneler	43
5.4.	Metalografik İncelemeler	45
5.4.1.	Hassas Kesme-Parlatma Cihazı	45
5.4.2.	Optik Mikroskop Ölçüm Cihazı.....	48
5.4.3.	Mikrosertlik Analiz Cihazı	49
5.4.4.	Aşınma Analiz Cihazı	49
5.4.5.	SEM ve EDS Analiz Cihazı	51
5.4.6.	XRD Analiz Cihazı	52
5.4.7.	TG Analiz Cihazı	53
5.4.8.	Korozyon Analiz Cihazı	54
6.	DENEYSEL SONUÇLAR ve TARTIŞMA	55
6.1.	Krank Mili Analiz Sonuçları.....	55
6.1.1.	Krank Mili Spektrometre Analiz Sonuçları	55

6.1.2.	Krank Mili Optik Mikroskop Sonuçları.....	56
6.1.3.	Krank Mili Mikro-Sertlik Sonuçları	58
6.1.4.	Krank Mili Muylusunun SEM Görüntüleri.....	60
6.1.5.	Krank Mili Muylusunun EDAX Analizi.....	64
6.1.6.	Krank Mili Muylusunun XRD Analizi	73
6.1.7.	Krank Mili Muylusu Aşınma Analizi Sonuçları.....	75
6.1.8.	Aşınma Sonrası Krank Mili Muylusundaki Sem Görüntüleri	79
6.1.9.	Aşınma Sonrası Krank Mili Muylusu XRD Analiz Sonuçları.....	81
6.1.10.	Krank Mili Muylusunun TGA Analiz Sonuçları	83
6.1.11.	Krank Mili Muylusunun Korozyon Sonuçları	86
6.2.	Kam Mili Analiz Sonuçları.....	87
6.2.1.	Kam Mili Spektrometre Analiz Sonuçları	87
6.2.2.	Kam Mili Optik Mikroskop Sonuçları.....	88
6.2.3.	Kam Mili Mikro-Sertlik Sonuçları.....	89
6.2.4.	Kam Muylusunun SEM Görüntüleri.....	92
6.2.5.	Kam Mili Muylusunun EDAX Analizi.....	96
6.2.6.	Kam Mili Muylusunun XRD Analizi	104
6.2.7.	Kam Mili Muylusu Aşınma Analizi Sonuçları	106
6.2.8.	Aşınma Sonrası Kam Mili Muylusundaki Sem Görüntüleri.....	110
6.2.9.	Aşınma Sonrası Kam Mili Muylusu XRD Analiz Sonuçları.....	112
6.2.10.	Kam Mili Muylusunun TG Analiz Sonuçları	114
6.2.11.	Kam Mili Muylusunun Korozyon Sonuçları	117
6.3.	Volan Analiz Sonuçları.....	117
6.3.1.	Volan Spektrometre Analiz Sonuçları	117
6.3.2.	Volan Optik Mikroskop Analiz Sonuçları	118
6.3.3.	Volan Mikro-Sertlik Sonuçları	120
6.3.4.	Volan SEM Görüntüleri.....	122
6.3.5.	Volan EDAX Analizi.....	126
6.3.6.	Volan XRD Analizi.....	134
6.3.7.	Volan Aşınma Analizi Sonuçları	135
6.3.8.	Aşınma Sonrası Volandaki Sem Görüntüleri.....	138
6.3.9.	Aşınma Sonrası Volan XRD Analiz Sonuçları.....	141
6.3.10.	Volan TG Analiz Sonuçları	143

6.3.11.	Volan Korozyon Analiz Sonuçları.....	145
7.	SONUÇLAR ve TARTIŞMA.....	147
8.	ÖNERİLER	149
	KAYNAKLAR	150
	ÖZGEÇMİŞ.....	150



ÖZET

Metaller ve alaşımları içten yanmalı motorlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Metallerde oluşan aşınma, oksidasyon, yorulma, kırılma ve yüzeylerde oluşabilecek korozyon gibi deformasyonlar içten yanmalı motorların performanslarını olumsuz yönde etkilemektedir. Bu olumsuz etkenler düşünüldüğünde, metal alaşımlı malzemelerde iyileştirilme ihtiyacı duyulmaktadır. Borlama işlemiyle metallerde sertlik artışı, aşınma, korozyon ve oksidasyon direnci yüksek yüzeyler elde edilebilmektedir.

Bu çalışmada içten yanmalı motorlarda bulunan krank mili, kam mili ve volan kutu borlama yöntemiyle 950 °C sıcaklıkta, 4 saatte Ekabor-2 tozu ile kaplanmıştır. Kaplama kalınlığı ~150 mikrondur. Krank ve kam mili için muylulardan, volan için sürtünmeye maruz kalan bölgelerden numuneler alınmıştır. Borlama işlemi sonunda kaplanmış ve kaplanmamış numunelere; spektrometre, optik mikroskop, SEM, EDAX, XRD, mikrosertlik, aşınma, TGA ve korozyon deneyleri uygulanmıştır. Aşınma sonunda yüzeylerdeki deformasyonların etkisiyle oluşabilecek fazlar ve görüntüler için XRD ve SEM analizi tekrar yapılarak kıyaslanmıştır.

Optik ve SEM görüntülerinde borlanmamış muylularda ferrit+perrit fazları, volanda ise dökme demir lamel grafit formu görülmüştür. Borlanmış numunelerde ise Fe₂B ve FeB fazlarına rastlanmıştır.

EDAX analizinde noktasal ve bölgesel olarak ana tabaka, geçiş bölgesi ve borür tabasından kimyasal malzeme kompozisyonları ölçülmüştür.

XRD analizinde borlanmış ve borlanmamış numunelerdeki faz farkları incelenmiştir.

Mikrosertlik analizinde HV_{0,05} için borlanmış numunelerde, borlanmamış numunelere göre sırasıyla krank mili muylusu için 6,7 kat, kam mili muylusu için 6,9 kat ve volan için 5,8 katlık sertlik artışı görülmüştür.

Aşınma analizinde 30 N kuvvet ve 3000 m mesafe sonucu borlanmış numunelerde, borlanmamış numunelere göre sırasıyla; krank mili muylusunda 4 kat, kam mili muylusunda 4,3 kat ve volanda 4,8 katlık aşınma direnci görülmüştür. Artan kuvvet etkisinde bu oranların arttığı görülmüştür. Aşınma sonrası tekrar SEM görüntüleri alınmış borlanmış numunelerde aşınma direncinin arttığı bu görüntülerden de tespit edilmiştir. Aşınma sonrası faz değişimlerini gözlemlemek için tekrar XRD analizi yapılmış fazların

şiddetinin düştüğü ve fazlardaki titreşimin yüzey pürüzlülüğünden dolayı arttığı tespit edilmiş ve değişen fazlar incelenmiştir.

TGA deneyinde 1000 °C sıcaklık sonunda borlanmış numunelerde, borlanmamışlara göre sırasıyla krank mili muylusunda % 2,3, kam mili muylusunda % 5 ve volanda % 7,5 kütle artışında fark tespit edilmiştir. Bu kütle artışına göre borlanmış numunelerde, borlanmamışlara göre sırasıyla krank mili muylusunda 300 °C, kam mili muylusunda 100 °C ve volanda 60 °C oksidasyon gecikmesi görülmüştür.

Korozyon direncinde borlanmış numunelerde, borlanmamış numunelere göre krank mili muylusunda % 85, kam mili muylusunda % 21 ve volanda % 12'lik artış tespit edilmiştir.

Elde edilen sonuçlar, borlama yöntemi kullanılarak volan, krank mili ve kam mili muylularının kaplanmasıyla aşınma direnci, korozyon direnci, sertlik ve oksidasyon değerlerinde dikkate değer bir iyileşme olduğunu göstermiştir. Ayrıca yapılan deneyler borlanmış malzemelerin ömrünün artmasıyla milli ve bireysel ekonomiye katkı sağlayacağını göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Borlama, Aşınma, Korozyon, Oksidasyon, Sertlik, Krank Mili, Kam Mili, Volan

SUMMARY

INVESTIGATION OF EFFECT ON FLYWHEEL, CRANKSHAFT AND CAMSHAFT BY BORONIZING METHOD

Metals and alloys are widely used in internal combustion engines. Deformations such as corrosion, oxidation, fatigue, fracture and corrosion that occur on the metals are affected the performance of internal combustion engines negatively. Considering these negative factors, it is necessary that improved the metal alloy materials. By boronizing process, surfaces which have hardness increase, wear, corrosion and high oxidation resistance can be obtained in metals.

In this study, crankshaft, camshaft and flywheel, which are parts of internal combustion engines, are covered with Ekabor-2 dust for 4 hours at 950 °C by box boronizing method. The coating thickness is 150 microns. Samples were taken from the crank pin for the crankshaft and the camshaft, and for the flywheel the samples were taken from the regions exposed to friction. Coated and uncoated samples at the end of the boronizing process; spectrometer, optical microscope, SEM, EDAX, XRD, microhardness, wear, TGA and corrosion tests were applied. By repeating XRD and SEM analyzes for the phases and images that could be caused by the deformation of the surfaces due to wear were compared.

Boron samples in microhardness results; 6,7 times for the crankshaft, 6,9 times for the camshaft crank pin and 5,8 times for the flywheel, increases were seen.

In the wear analysis of boron samples; crank pin 4 times, camshaft lobes 4,3 times and flywheel 4,8 times wear resistance were seen. It was found that these rates increased under the effect of increasing force. After the wear process, XRD and SEM images were taken again.

In the TGA results, a mass increase of 2.3 % in the crank pin, 5 % in the camshaft lobes and 7.5 % in the flywheel was found between the boronized samples and the non-boronized samples. In the boronized samples against this mass increase; in the crank pin 300 °C, in the camshaft lobes 100 °C, in the flywheel 60 °C oxidation delay were occurred.

In corrosion resistance of boron samples; an increase of 85 % in crank pin, 21 % in camshaft lobes and 12 % in flywheel were seen.

Obtained results have shown that remarkable improvement in abrasion resistance, corrosion resistance, hardness and oxidation values by coating the flywheel and crank pin

using the boronizing method. In addition, experiments show that the life of boron materials will contribute to the national and individual economy.

Keywords: Boronizing, Corrosion, Oxidation, Hardness, Crank shaft, Cam shaft, Flywheel



TABLolar LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1. Bazı Malzemelerin Borlanmış ve Borlanmamış Durumlardaki Sürtünme Katsayıları.....	6
Tablo 2.2. Fe ₂ B ve FeB'nin Bir Kısım Özellikleri	7
Tablo 2.3. Borlama ve Diğer Yöntemlerle Elde Edilmiş Yüzeylerin Sertlik Değerleri	11
Tablo 2.4. Bazı metallerde elde edilen borür fazları ve mikrosertlikleri	12
Tablo 2.5. Bor ürünlerinin sektördeki kullanım alanları	19
Tablo 3.1. Borlama İşleminde kullanılan çeşitli gazların birtakım özellikleri	30
Tablo 3.2. Plazma Destekli Yüzey İşlemlerine Bakış	32
Tablo 5.1. Kutu borlama yönteminde kullandığımız parametreler	42
Tablo 6.1. Aşındırıcı millerin kimyasal bileşimi	55
Tablo 6.2. Krank mili muylusu kimyasal bileşimi.....	56
Tablo 6.3. Kam mili muylusu kimyasal bileşimi.....	87
Tablo 6.4. Volanın kimyasal bileşimi	118

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1. Bor elementinin kafes yapısı	2
Şekil 2.2. Borlama sırasında borür tabakasının oluşum mekanizması	5
Şekil 2.3. a) Tek fazlı FeB tabakası, b) Tek fazlı Fe ₂ B tabakası, c) Geçiş bölgesi, d) Çift fazlı FeB+Fe ₂ B tabakası	5
Şekil 2.4. Borür tabaka kalınlığının metal bileşim oranlarına göre değişimi.....	9
Şekil 2.5. Ekabor-1 ile Borlanmış Ck45 Çeliğinin Tabaka Kalınlığının Zaman ve Sıcaklık ile Değişimi.....	10
Şekil 2.6. Demir-bor denge diyagramı	14
Şekil 2.7. 4 zamanlı bir motorda krank mili ve muyluları	21
Şekil 2.8. 4 zamanlı bir motorda kam mili ve muyluları.....	21
Şekil 2.9. Volan ve volan dişlisi.....	22
Şekil 3.1. Borlama işlemindeki, sertlik-yüzeyden mesafe ilişkisi.....	24
Şekil 3.2. Kutu borlamanın şematik gösterimi soldaki resim kutu hazırlama, sağdaki resim kutunun fırında ısıtılması.....	25
Şekil 3.3. Katı borlama yönteminin şematik gösterimi	26
Şekil 3.4. 900 °C'de 6 saat süreyle borlanan AISI W1 çeliğinin mikroyapısı.....	27
Şekil 3.5. 950 °C 4 saat süreyle pasta borlama yapılan çeliklerin optik görüntüsü a-) AISI 4140, b-) AISI H13	28
Şekil 3.6. Gaz borlama ünitesi	30
Şekil 3.7. Plazma borlamada tesisat şeması	31
Şekil 3.8. Nitrürlenmiş Malzemede (AISI 5140) Nitrürlü Tabakanın Sem Görüntüsü, (T= 450 °C, t=4 saat).....	33
Şekil 3.9. Nitrokarbürülenmiş Malzemede (Saf Demir) Nitrokarbürü Tabakanın Optik Mikroskop Görüntüsü, (T=560 °C, t=1 saat)	33
Şekil 3.10. Plazma ile Borlanan Malzemenin (AISI 4140) Borlu Tabakasının Optik Mikroskop Görüntüsü, (T=950 °C, t=1 saat)	34
Şekil 5.1. Spektrometre analiz cihazı	41
Şekil 5.2. Borlama öncesi hazırlanan numuneler	42
Şekil 5.3. Borlama sonrası numuneler.....	42
Şekil 5.4. Kutu borlama yöntemindeki hazırlık süreci	43

Şekil 5.5. Kutu borlama işleminin öncesi ve sonrası	43
Şekil 5.6. Krank mili ve kullanılan muylular görülmektedir.	44
Şekil 5.7. Kam mili ve Volandan alınan muylular ve kesit görülmektedir.	44
Şekil 5.8. Hassas kesme cihazı.....	45
Şekil 5.9. Sıcak bakalite alma işleminde kullanılan cihaz	46
Şekil 5.10. Zımparalama işleminde kullanılan cihaz	47
Şekil 5.11. Parlatma (Çuhalama) işleminde kullanılan cihaz.....	47
Şekil 5.12. Makro ölçümlerin alındığı cihaz	48
Şekil 5.13. Optik ölçümlerin alındığı optik mikroskop cihazı	48
Şekil 5.14. Mikrosertlik ölçümlerinin alındığı cihaz.....	49
Şekil 5.15. Adhesiv aşınmada kullanılan cihaz.....	50
Şekil 5.16. Numunelerin tartıldığı hassas terazi cihazı	51
Şekil 5.17. SEM ve EDS görüntüleme cihazı	52
Şekil 5.18. XRD cihazı.....	52
Şekil 5.19. TGA cihazı.....	53
Şekil 5.20. Mikro kesme cihazı.....	53
Şekil 5.21. Korozyon Test Cihazı	54
Şekil 6.1. Borlama işlemi sonucunda krank mili muylusu optik görüntüsü (50x).....	56
Şekil 6.2. Borlama işlemi sonucunda krank mili muylusu optik görüntüsü (100x).....	57
Şekil 6.3. Kaplanmamış krank mili muylusu ana tabaka mikro-sertlik değerleri	58
Şekil 6.4. Kaplanmış krank mili muylusu ana tabaka-geçiş bölgesi ve kaplama tabakası mikro-sertlik değerleri	59
Şekil 6.5. Kaplanmış ve kaplanmamış krank mili muylusu mikro-sertlik değerleri.....	59
Şekil 6.6. Kaplanmamış krank mili muylusunun 300x büyütmedeki SEM görüntüsü	61
Şekil 6.7. Kaplanmamış krank mili muylusunun 500x büyütmedeki SEM görüntüsü	61
Şekil 6.8. Kaplanmış krank mili muylusunun 300x büyütmedeki ana tabaka geçiş bölgesi ve borür tabakası SEM görüntüsü.....	62
Şekil 6.9. Kaplanmış krank mili muylusunun 700x büyütmedeki ana tabaka geçiş bölgesi ve borür tabakası SEM görüntüsü.....	63
Şekil 6.10. Kaplanmış krank mili muylusunun 300x ve 700x büyütmelerdeki ana tabaka geçiş bölgesi ve borür tabakası SEM görüntüsü.....	63
Şekil 6.11. Kaplanmamış krank mili muylusunun bölgesel EDAX verileri	65

Şekil 6.12. Kaplanmamış krank mili muylusunun beyaz bir bölgeden alınan noktasal spektrum verileri.....	67
Şekil 6.13. Kaplanmamış krank mili muylusunun gri bir bölgeden alınan noktasal spektrum verileri.....	68
Şekil 6.14. Kaplanmış krank mili muylusunun borür tabakasındaki bölgesel EDAX verileri.....	70
Şekil 6.15. Kaplanmış krank mili muylusunun ana tabakadaki bölgesel EDAX verileri ...	71
Şekil 6.16. Kaplanmış krank mili muylusunun geçiş bölgesindeki bölgesel EDAX verileri.....	73
Şekil 6.17. Kaplanmamış krank mili muylusunun XRD analizi	74
Şekil 6.18. Kaplanmış krank mili muylusunun XRD analizi	75
Şekil 6.19. Krank milinde 10 N basınç altında meydana gelen kütle kayıpları	76
Şekil 6.20. Krank milinde 20 N basınç altında meydana gelen kütle kayıpları	77
Şekil 6.21. Krank milinde 30 N basınç altında meydana gelen kütle kayıpları	78
Şekil 6.22. Krank mili muylusunda aşınma sonrası SEM görüntüsü (200x)	80
Şekil 6.23. Kaplanmış krank mili muylusunda aşınma sonrası SEM görüntüsü (200x).....	80
Şekil 6.24. Kaplanmamış ve kaplanmış krank mili muylusunda aşınma sonrası SEM görüntüleri (200x).....	81
Şekil 6.25. Kaplanmamış krank mili muylusunun aşınma sonrası XRD analizi	82
Şekil 6.26. Kaplanmış krank mili muylusunun aşınma sonrası XRD analizi	83
Şekil 6.27. Kaplanmamış krank mili muylusunun TG analizi	84
Şekil 6.28. Kaplanmış krank mili muylusunun TG analizi	84
Şekil 6.30. Kaplanmış ve kaplanmış krank mili muylusunun korozyon analizi	87
Şekil 6.31. Borlama işlemi sonucunda kam mili muylusu optik görüntüsü (50x)	88
Şekil 6.32. Borlama işlemi sonucunda kam mili muylusu optik görüntüsü (100x)	89
Şekil 6.33. Kaplanmamış kam mili muylusu ana tabaka mikro-sertlik değerleri	90
Şekil 6.34. Kaplanmış kam mili muylusu ana tabaka-geçiş bölgesi ve kaplama tabakası mikro-sertlik değerleri	91
Şekil 6.35. Kaplanmış ve kaplanmamış kam mili muylusu mikro-sertlik değerleri	91
Şekil 6.36. Kaplanmamış kam mili muylusunun 300x büyütmedeki SEM görüntüsü	92
Şekil 6.37. Kaplanmamış kam mili muylusunun 500x büyütmedeki SEM görüntüsü	93
Şekil 6.38. Kaplanmış kam mili muylusunun 300x büyütmedeki ana tabaka geçiş bölgesi ve borür tabakası SEM görüntüsü görülmektedir.	94

Şekil 6.39. Kaplanmış kam mili muylusunun 700x büyütmedeki ana tabaka geçiş bölgesi ve borür tabakası SEM görüntüsü görülmektedir.	94
Şekil 6.40. Kaplanmış kam mili muylusunun 300x ve 700x büyütmelerdeki ana tabaka geçiş bölgesi ve borür tabakası SEM görüntüsü görülmektedir.	95
Şekil 6.41. Kaplanmamış kam mili muylusunun bölgesel EDAX verileri	97
Şekil 6.42. Kaplanmamış kam mili muylusunun gri bir bölgeden alınan noktasal spektrum verileri.....	98
Şekil 6.43. Kaplanmamış kam mili muylusunun beyaz bir bölgeden alınan noktasal spektrum verileri.....	99
Şekil 6.44. Kaplanmış kam mili muylusunun borür tabakasından alınan noktasal spektrum verileri.....	101
Şekil 6.45. Kaplanmış kam mili muylusunun ana tabakasındaki bölgesel EDAX verileri.....	102
Şekil 6.46. Kaplanmış kam mili muylusunun geçiş bölgesindeki bölgesel EDAX verileri.....	104
Şekil 6.47. Kaplanmamış kam mili muylusunun XRD analizi	105
Şekil 6.48. Kaplanmış kam mili muylusunun XRD analizi	106
Şekil 6.49. Kam milinde 10 N basınç altında meydana gelen kütle kayıpları	107
Şekil 6.50. Kam milinde 20 N basınç altında meydana gelen kütle kayıpları	108
Şekil 6.51. Kam milinde 30 N basınç altında meydana gelen kütle kayıpları	109
Şekil 6.52. Kaplanmamış kam mili muylusunda aşınma sonrası SEM görüntüsü (200x)	111
Şekil 6.53. Kaplanmış kam mili muylusunda aşınma sonrası SEM görüntüsü (200x).....	111
Şekil 6.54. Kaplanmamış ve kaplanmış kam mili muylusunda aşınma sonrası SEM görüntüleri (200x).....	112
Şekil 6.55. Kaplanmamış kam mili muylusunun aşınma sonrası XRD analizi.....	113
Şekil 6.56. Kaplanmış kam mili muylusunun aşınma sonrası XRD analizi	114
Şekil 6.57. Kaplanmamış kam mili muylusunun TG analizi	115
Şekil 6.58. Kaplanmış kam mili muylusunun TG analizi	115
Şekil 6.59. Kaplanmış ve kaplanmış kam mili muylusunun TG analizi	116
Şekil 6.60. Kaplanmış ve kaplanmış kam mili muylusunun korozyon analizi	117
Şekil 6.61. Borlama işlemi sonucunda volanın optik görüntüsü (50x)	118
Şekil 6.62. Borlama işlemi sonucunda volanın optik görüntüsü (100x)	119
Şekil 6.63. Kaplanmamış volanın ana tabaka mikro-sertlik değerleri	120

Şekil 6.64. Kaplanmış volanın ana tabaka-geçiş bölgesi ve kaplama tabakası mikro-sertlik değerleri	121
Şekil 6.65. Kaplanmış ve kaplanmamış volanın mikro-sertlik değerleri	121
Şekil 6.66. Kaplanmamış volanın 300x yakınlaştırmadaki ana tabaka SEM görüntüsü...	122
Şekil 6.67. Kaplanmamış volanın 500x yakınlaştırmadaki ana tabaka SEM görüntüsü...	123
Şekil 6.68. Kaplanmamış volanın 300x büyütmedeki ana tabaka geçiş bölgesi ve borür tabakası SEM görüntüsü görülmektedir.	124
Şekil 6.69. Kaplanmış volanın 700x büyütmedeki ana tabaka geçiş bölgesi ve borür tabakası SEM görüntüsü görülmektedir.	124
Şekil 6.70. Kaplanmış volanın 300x ve 700x yakınlaştırmadaki ana tabaka geçiş bölgesi ve borür tabakası SEM görüntüsü görülmektedir.	125
Şekil 6.71. Kaplanmamış volanın bölgesel EDAX verileri	127
Şekil 6.72. Kaplanmamış volanın gri bölgedeki noktasal spektrum verileri.....	129
Şekil 6.73. Kaplanmamış volanda lamel üzerinden alınan noktasal spektrum verileri.....	130
Şekil 6.74. Kaplanmış volanda borür tabakası üzerinden alınan noktasal spektrum verileri.....	131
Şekil 6.75. Kaplanmış volanda beyaz bölge üzerinden alınan noktasal spektrum verileri	132
Şekil 6.76. Kaplanmış volanda gri bölge üzerinden alınan noktasal spektrum verileri	133
Şekil 6.77. Kaplanmamış volanın XRD analizi	134
Şekil 6.78. Kaplanmış volanın XRD analizi	135
Şekil 6.79. Volan için 10 N basınç altında meydana gelen kütle kayıpları.....	136
Şekil 6.80. Volan için 20 N basınç altında meydana gelen kütle kayıpları.....	137
Şekil 6.81. Volan için 30 N basınç altında meydana gelen kütle kayıpları.....	138
Şekil 6.82. Kaplanmamış volanda aşınma sonrası SEM görüntüsü (200x)	139
Şekil 6.83. Kaplanmış volanda aşınma sonrası SEM görüntüsü (200x)	140
Şekil 6.84. Kaplanmamış ve kaplanmış volanda aşınma sonrası SEM görüntüleri (200x).....	140
Şekil 6.85. Kaplanmamış volanda aşınma sonrası XRD analizi	142
Şekil 6.86. Kaplanmış volanda aşınma sonrası XRD analizi	142
Şekil 6.87. Kaplanmamış volanın TG analizi	143
Şekil 6.88. Kaplanmış volanın TG analizi	144
Şekil 6.89. Kaplanmış ve kaplanmış volanın TG analizi	145
Şekil 6.90. Kaplanmış ve kaplanmış volanın korozyon analizi	146

KISALTMALAR LİSTESİ

AISI	: Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü
DIN	: Alman Endüstri Normu
EDAX	: X Işınları Difraktometresi
EN	: Avrupa Standartı
HV	: Vickers Sertlik Değeri
K. Kam	: Kaplanmış Kam
K. Krank	: Kaplanmış Krank
K. Volan	: Kaplanmış Volan
PM	: Partikül Maddeler
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
TGA	: Termo Gravimetrik Analiz
XRD	: X Işınları Difraktometresi

SEMBOLLER LİSTESİ

B	: Bor
B₂O₃	: Bor trioksit
B₄C	: Bor Karbür
BN	: Bor Nitrür
C	: Karbon
Co	: Kobalt
Cr₂O₃	: Krom Oksit
Fe	: Demir
FeB	: Demir Borür
gr	: Gram
H₂SO₄	: Sülfirikasit
HCl	: Hidroklorik Asit
HNO₃	: Nitrik Asit
K/J	: Kelvin/Joule
m/s	: Metre/Saniye
Mg	: Magnezyum
MnB	: Mangan Borür
NaCl	: Sodyum Klorür
Ni	: Nikel
pm	: Pikometre
ppm	: Milyondaki Partikül Miktarı
SiC	: Silisyum Karbür
TiB₂	: Titanyum Diborit
W	: Tungsten (Wolfram)
W/MK	: Watt/Metre Kelvin
µm	: Mikrometre

1. GİRİŞ

Metaller üretim sanayisinin ihtiyaç duyduğu temel maddelerdir. Üretim gerçekleşirken metaller ve alaşımlarına her sektörde ihtiyaç duyulmaktadır. Bu sanayinin en önemli bir kolu bilindiği gibi otomotiv endüstrisidir. Türkiye’de otomotiv endüstrisindeki yıllık ihracat oranları bu sektörün varlığını kanıtlamaktadır. Dolayısıyla otomotiv endüstrisinin Türkiye ve Dünya üzerindeki varlığı düşünüldüğünde, metaller ve alaşımları bu sektörde büyük pay sahibidir.

Motorun çalışması esnasında çalışma ortamı (basınç, aşınma, sürtünme, yüksek sıcaklık, korozyon etkenleri vb.) motor elemanlarını etkilemektedir. Bu etkenlerin neticesinde motor elemanları tribolojik deformasyonlara uğrayarak yüzey özellikleri kötüleşmektedir. Bu deformasyonlar malzemelerin yüzey bölgesinden başlayarak iç yapısına kadar ilerlemekte, yorulma hatta kırılmalara sebep olmaktadır. Bu durumların neticesinde malzeme ömürleri azalmakta; değişim, onarım ve işçilik gibi faktörler düşünüldüğünde ülke ekonomisini ciddi oranda olumsuz etkilemektedir.

Otomotiv sektörü bir bütün olarak göz önüne alındığında araçlarda volan, krank ve kam mili elemanları önemli bir yer tutar. Bu elemanlar yukarıda bahsettiğimiz etkenlere maruz kalmaktadır. Bu etkenler motorun verimli çalışmasını engellemekte ve performans kayıplarına neden olmaktadır.

Bu etkenlerin giderilmesi için son yıllarda çeşitli kaplama yöntemlerine başvurulmaktadır. Kaplama işlemi bir malzemenin, farklı bir malzeme üzerine biriktirilmesi işlemi olarak adlandırılabilir. Çok sayıda kaplama yöntemi mevcuttur. Ancak otomotiv sektöründe kullanılan metallere en uygun kaplama işleminin yapılması alınacak verimi arttıracaktır. Krank mili, kam mili ve volan elemanlarının malzemeleri düşünüldüğünde en uygun kaplama yöntemlerinden biri kutu borlama yöntemidir.

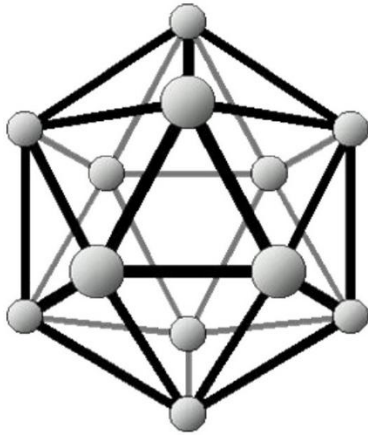
Kutu borlama yöntemi uygulanmasının kolay olması, basit donanım gerektirmesi, ekonomik, güvenli ve kullanılan toz karışımının kimyasal kompozisyonunda değişiklik yapılabilmesi nedeniyle en yaygın kullanılan borlama tekniğidir. Kutu borlama, borlanacak malzemenin bor verici ortam olan toz karışımı içinde belirli sıcaklık ve belirli sürelerde bekletilmesiyle gerçekleştirilir. İşlem sonunda yüksek sertlik, iyi aşınma direnci, iyi korozyon direnci, aside karşı dayanım gibi özellikler kazanılmış olur (Uluköy ve Can, 2006).

2. BOR ELEMENTİ

Bor, doğada tüm canlıların yaşamlarını sürdürmeleri için vazgeçilmez önemli elementlerin başında gelmektedir. Bilim ve teknolojiye hızlı gelişmeler sonucunda dünyada kullanımı hızla artmaktadır. Bor ve bileşiklerinin, makine ve metalürji sanayide kullanımında katma değerinin yüksek olmasından dolayı stratejik önemi yüksek bir maden olmuştur. Bor (B), periyodik cetvelde 3A grubunda bulunan atom numarası 5 ve atom ağırlığı 10,81 olan metal-ametal karışımı bir elementtir. Doğadaki bor atomları dayanıklı B10 ve B11 izotoplarından oluşmaktadır. İzotopların doğadaki bileşiklerinde bulunma oranı yaklaşık 20/80'dir (Kocabaş, 2002).

Bor'un yoğunluğu 2.34 gr/cm ergime sıcaklığı 2200 °C, kaynama sıcaklığı 3600 °C olup yarı iletken bir elementtir. Bor madeni, ilk bakışta beyaz bir kaya şeklinde görünüp, çok sert ve ısıya dayanıklı bir elementtir. Doğada serbest bir halde değil de genelde tuz bileşikleri görünümünde bulunur. Çok sert ve gevrekliği elmadan sonra ikinci gelen elementtir (Çalık, 2002;Şahin, 1999;Yılmaz, 2002).

Ülkemiz bor madeni bakımından dünya rezervlerinin yaklaşık % 72'si gibi büyük bir orana sahiptir ancak dünya borat üretiminin ancak % 18'ini gerçekleştirebilmektedir. Gelişmiş ülkelerde bu boratlardan saf borun yanında, bortioksit (B_2O_3), borkarbür (B_4C) bornitrür (BN), diboran (B_2H_6) ve ferrobör (FeB) gibi rafine bileşikler üretilerek çeşitli endüstriyel alanlarda kullanımı yaygınlaşmıştır (Özsoy, 2001). Şekil 2.1'de bor elementinin kafes yapısı gösterilmektedir.



Şekil 2.1. Bor elementinin kafes yapısı

2.1. Borun Tarihçesi

Bor bileşikleri uzun yıllardır bilinmesine rağmen elementer borun keşfi 1808 yılında Sir Humphry ile Gay-Lussac tarafından keşfedilmiştir (Boron Properties, 1997).

Tarihte ilk olarak 4000 yıl önce Babiller Uzak doğudan borak ithal etmiş ve borakı altın işletmeciliğinde kullanmışlardır. Mısırlarında boru, mumyalamada, tıpta ve metalürji uygulamalarında borakı kullandıkları bilinmektedir (Özsoy, 1991).

İlk olarak boraks kaynağı Tibet göllerinden elde edilmiştir. Bir boraks; koyunlara bağlanan torbalarla Himalayalardan Hindistan'a kadar getirilmiştir. Eski Yunanlılar ve Romalılar boratları günlük yaşamlarında temizlik maddesi olarak da kullanmıştır. İlaç üretimi olarak da ilk Arap doktorlar M.S. 875 yılında kullanılmıştır (Ediz ve Özdağ, 2001).

Boradar ise 13. yüzyıldan günümüze bilinmesine rağmen son zamanlara kadar kullanımı çok azdır. 1772 yılında İtalya'da Scany denilen bölgesinde sıcak su kaynaklarında doğal olarak borik asit "sasolit" minerali keşfedilmiştir. 1836 yılında ise Şili ve Arjantin'deki boratlar bulunmuştur. Bu yataklar 19. yüzyıl sonlarına kadar dünyada bor elde edilen en büyük kaynaklar olmuştur. 1864 yılında ise Amerika'nın Kaliforniya ve Nevada eyaletlerindeki bor yatakları bulunmuştur (Bozkır, 1995).

2.2. Bor Mineralleri ve Çeşitleri

Doğada yaklaşık olarak 230 çeşit bor minerali bulunmasına rağmen bunlardan ticari önem taşıyanlar; tinkal, kolemanit, üleksit, borasit, pandermite, szyabelit, hidroborasit ve karnitir (URL-4).

Bor minerallerinin yapılarında bulunan Na, Ca ve Mg elementlerine göre sınıflandırılarak isimlendirilirler. Na elementinin bulunduğu bileşiklerine tinkal (boraks) Ca elementinin bulunduğu bileşiklerine kolemanit ve Na-Ca elementlerinin bulunduğu bileşiklerine ise üleksit denir. Bor elementi 2'ye ayrılır. Birincisi bor mineralleri, (tinkal, kolemanit, üleksit ve propertit)'dir. İkincisi ise boratlar (kristal borakslar, susuz boraks ve borikasit)'dir (URL-1; Kalafatoğlu ve Örs, 2003).

Ayrıca bor teknolojik ve endüstriyel uygulamalarda daima çeşitli bileşikler halinde olup, bileşikler bor ve kimyasalları olarak kullanılırlar. Bor oksijenle bağ kurmaya yatkın olduğundan dolayı pek çok değişik oksijen bileşiği oluşturup ve basitten karmaşığa doğru

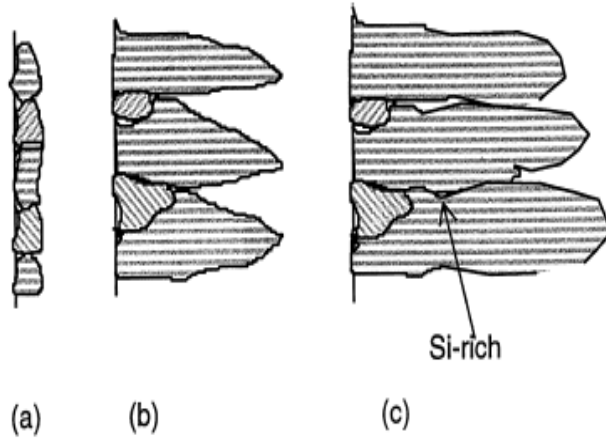
sonsuz sayıda değişik molekül yapılarına sahip olabilen, bor-oksijen bileşimlerinin adı bilim dünyasında “borat” dır (Yılmaz, 2002).

Bor, özellikle demir esaslı malzemelerde alaşım elementi veya yüzey sertleştirme amacı için kullanılmaktadır. Borlama işleminin mekanizması; bor atomları ısı enerjisi etkisiyle metal yüzeyine temasta bulunur ve esas metal atomlarıyla uygun borürler oluştururlar. Bor kaynağının fiziksel durumu katı, sıvı veya gaz olabilir. Borlama işlemi genel anlamda 800-1000 °C sıcaklıkta, 1-8 saat arası süre ile yapılmaktadır. Dolgu malzemesi ve örtü malzeme olarak kullanılan deoksidantlar ise borlama esnasında oksijeni tutarak redükleyici bir ortam oluştururlar ve borlama malzemesinin yüzeye yapışmasını önlerler. Borlama sırasında kullanılan yöntem, borlama malzemesinin elemental yapısı, borlanacak malzemenin cinsi, işlem süresi ve işlem sıcaklığı elde edilen tabakaya etkiyen faktörlerdendir (Ünlü ve Yılmaz S.552).

2.3. Borlama ve Borlama İşlemi

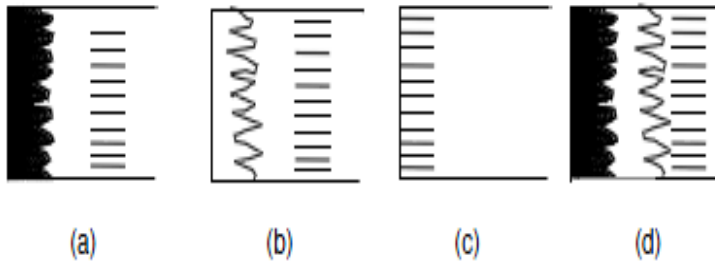
Borlama işi termokimyasal bir yüzey sertleştirme işlemidir. Ayrıca borlama, bor elementinin yüksek sıcaklıkta metal yüzeyine yayılmasıyla beraber yüzeyde bir borür tabakası elde etme işlemidir. Demir borürler termal, elektrik iletkenliği ve yüksek sertlik gibi tipik seramik özelliği gösteren bileşiklerdir. Tane sınırları, dislokasyonlar ve atom boşlukları gibi makro hatalar ile yüzey pürüzlölükleri ve çizikler gibi yüzeyin daha reaktif olduğu yerler borür tabakası için oluşum noktalarıdır. Bu noktalarda Fe₂B tabakası oluşmakta ve gelişmektedir (Şahin, 1999).

Bor difüzyonu Fe₂B ile matris, FeB ve Fe₂B arasında gerçekleştiği düşünülmektedir. Kaplama yüzeyinden iç kısımlara ilerlendikçe Fe₂B fazının ağırlık kazandığı öngörülmektedir. Bu konuyla ilgili yapılan bir çalışmada, yüzeyden belirli oranlarda tabakalar kaldırılmış ve yapılan x-ışınları analizinde bu durum kanıtlanmıştır (Carbucicchio, Bardani ve Palombarini, 1980).



Şekil 2.2. Borlama sırasında borür tabakasının oluşum mekanizması

Şekil 2.3’de demir esaslı malzemelerin borlanmasıyla beraber oluşan ferrobor tabaka çeşitleri görülmektedir.



Şekil 2.3. a) Tek fazlı FeB tabakası, b) Tek fazlı Fe₂B tabakası, c) Geçiş bölgesi, d) Çift fazlı FeB+Fe₂B tabakası (Matuschka, 1980)

2.4. Borun Çelik Yüzeylerinde Sertleştirici Olarak Kullanılması

Borlama işlemi ile malzeme yüzeyinde sert bir seramik tabakası oluşur. Bu işlem Fe üzerine uygulanırsa oluşan tabaka FeB tabakasıdır. Bor difüze edilmiş yüzeylerin sertleştirme direnci, sertleştirme işlemi yapılmamış yüzeylere göre yaklaşık 10 kat fazladır. Fakat ağır yükler altında oluşan gerilmeleriyle pullanma ve çatlamlar görünebilir. Ayrıca borlanmış oksitlenmeyen asitlere karşı iyi bir korozyon direnci de gösterir. Borür tabakasının önemli bir özelliği ise yüksek sertliğe sahip olan durumunu 900-1000 °C'ye ulaşan sıcaklıklarda bile koruyabilmesidir. Bu sayede sahip olduğu tribolojik özelliklerini kaybetmeden aşınmaya ve oksidasyona karşı yüksek direnç gösterebilmektedir (Karamış, Nair ve Selçuk, 1995).

Borlama ile yapılan kaplama işleminde diğer yüzey sertleştirme işlemlerine göre sürtünme katsayısı düşük, korozyona olan direnci yüksek bir tabaka elde edilir. Ayrıca alaşımsız çeliklere de uygulanabilmesiyle bu işlemin önemi vurgulanmaktadır. Borlanmış yüzeylerde yüksek sertlikle beraber teflonun sürtünme katsayısı kadar düşük bir sürtünme katsayısı elde edilebilmektedir. (Atik, 1997) Bunların yanında borlama işleminde tabaka kalınlığı da yeterince önemlidir. En iyi bor tabakası kalınlığı süre ve sıcaklıkla ilgilidir ve tespit edilen bu değerler 950 °C sıcaklık ve 4 saat süre ile katı borlama yöntemi olarak belirlenmiştir (Yılmaz, 1997).

Tablo 2.1. Bazı Malzemelerin Borlanmış ve Borlanmamış Durumlardaki Sürtünme Katsayıları (Linial ve Lavella, 1974)

Malzeme	Sürtünme Katsayısı	
	Borlanmış	Borlanmamış
Düşük Karbonlu Çelik	0.17-0.19	0.585-0.595
Takım Çeliği	0.04-0.07	0.16-0.18
WC+Co Sinter Malzeme	0.1939-0.2335	0.2617-0.2773

Borlama işleminde bor tabakasına C elementinin etkisi vardır. Az karbonlu çeliklerde tabaka kalınlığı artarken, yüksek karbonlu çeliklerde bu oran düşüktür. Borlama işlemi sonucunda oluşan Fe₂B ve FeB fazları arasındaki ısıl genleşme farklılıklarından ötürü yüzeylerde çatlamlar meydana gelir. Bu olumsuz durumu yok etmenin yolu ise fazlardan birini azaltmak veya tamamen ortadan kaldırmaktır. Kaldırılması istenen faz ise FeB

fazıdır (gevreklik, kırılma vb.). Bu sayede tek fazlı Fe₂B veya düşük oranda FeB fazı olan tabaka elde edilmiş olur (Göy, 1984).

Borlama ile demir esaslı malzemelerin çekme ve akma dayanımları % 10-20 yorulma dayanımı % 25 ve korozyonlu yorulma ömrü % 200 artmasına karşı plastite özellikleri azalır. Ancak borlamadaki esas kazanç sertliktir. Çeliklerde 2000 HV civarındadır. Bor tabakası alaşımsız çeliklerde alaşımlı çeliklere oranla 1,5-2 kat daha fazladır (Bozkurt, 1984).

Borlama yöntemi ile yüzeyde seramik bir ferro-bor tabakası elde edildiğinden adhezif aşınmanın azaltılması sağlanmaktadır. Bu nedenlerden dolayı, demir esaslı malzemelerde borlama işlemi kullanılmış ve iyi bir aşınma direnci elde edilmiştir. Ayrıca toz metalürjisi alanında ferro-bor kullanılarak, demir esaslı toz metal yatakların üretilmesinde önem teşkil etmektedir (Ünlü, 2004).

Demir esaslı malzemelerin borlanmasıyla, borlama şartlarına bağlı olarak borlama yüzeyinde ferro-bor fazlarından Fe₂B veya (FeB+Fe₂B) meydana gelir. Borlama sonucunda karbonlu çeliklerde 1800-2000 HV, alaşımlı çeliklerde 2500-2800 HV ve yüksek hız çeliklerinde ise 2800-3300 HV yüzey sertliği elde edilebilmektedir. Bu sertlikler oluşan borür fazlarına göre değişiklik gösterir. FeB fazı Fe₂B fazına göre daha sert, kırılma ve gevrekliktir. Borun oksijene karşı da ilgisi yüksektir. Bütün borürler yüzeylerde ince bir oksit film oluşturur. Bu oksit filmi ise sürtünme esnasında kaynak oluşumunu engelleyerek yağlayıcı bir görev yapmaktadır (Özsoy, 1991).

Tablo 2.2. Fe₂B ve FeB'nin Bir Kısım Özellikleri (Matuschka, 1980; Selçuk, 1994)

Özellik	Fe ₂ B	FeB
Ergime Noktası (°C)	1390	1550
Mikrosertlik (HV)	1600-2000	1600-2400
Uzama Katsayısı (1000°C)	$8 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{K}$	$10 - 16 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{K}$
Termal İletkenlik (1000°C)	0.2-0.3 W/(cm°C)	0.1-0.2 W/(cm°C)
Küri Noktası (°C)	742	325
Yoğunluk (gr/cm ³)	7.00	6.3
Kristal Sistem	Tetragonal Hacim Merkezli	Ortorombik
Kafes Parametreleri (Å)	a:5.078, b:4.249	a:4.053, b:5.495, c:2.496

2.5. Borlamada Alaşım Elementlerinin Etkisi

Borlama işlemi sırasında borür tabakasının oluşumuna ana metaldeki alaşım elementinin de etkisi vardır. Genel olarak bütün alaşım elementleri bu tabakanın kalınlığını azaltmaktadır (Matuschka, 1980). Alaşım elementleri borun difüzyonunu azaltmakta ayrıca ana malzeme ve borür tabakasının özelliklerini de değiştirmektedir (Carbucicchio ve Palombarini, 1987).

Alaşım elementleri tabaka kalınlığını azaltırken tabakanın geometrisiyle de oynarlar. Düşük karbonlu çeliklerde ortaya çıkan girintili çıkıntılı yapı borür tabakasının ana metale bağlantısını güçlendirirken, ara yüzeylerde meydana gelen iç gerilmelerin daha geniş bir alana yayılmasını da sağlamaktadır. Ana metaldeki alaşım elementleri özellikle karbon, krom ve nikel tabakanın geometrisini değiştirirken, ana metal-borür tabakası ara yüzeyini ise düzleştirir (Bozkurt, Üçışık ve Safoğlu, 1979). Alaşım elementlerinin diğer bir etkisi de borür tabakasının sertliğini arttırması ve Fe-B denge diyagramındaki ötektik noktayı aşağı doğru kaydırmasıdır (Matuschka, 1980).

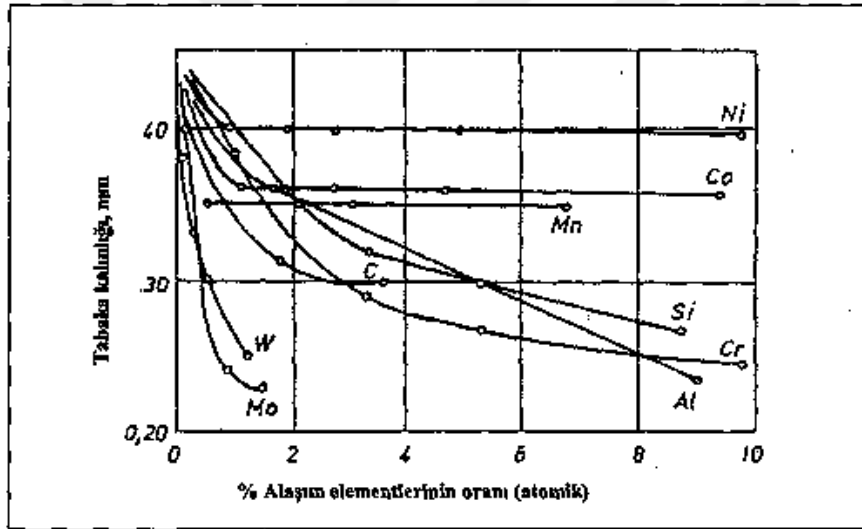
Ana malzemelerin içerisindeki karbon oranının artmasıyla tabaka kalınlığı azalmaktadır. Karbon FeB ve Fe₂B gibi fazlar içerisinde çözünmediği için, karbon fazlalığının sonucunda borür tabakasının altında difüzyon bölgesi meydana gelmektedir. Manganez ve nikel borür tabaka kalınlığını çok miktarda etkilememektedir (Matuschka, 1980). Bu bölgelerdeki karbon, Fe₃C, Cr₃C ve Fe₆C₃ gibi karbürler oluşturarak borlama mekanizmasını etkilemekte, ayrıca borür tabakasını sert ve sıkı yaptığı düşünölmektedir (Badini, Gianoglio ve Pradelli, 1987).

Artan krom miktarıyla tabaka kalınlığında ve ara yüzeylerde oluşan girintili çıkıntılı yapıda azalmalara sebep olmaktadır. % 4 civarı krom içeren çeliklerde kolonsal karakterde bir yapı ve 25-30 µm kalınlıkta bir borür tabakası elde edilirken, % 12 civarı krom içeren çeliklerde 25 µm kalınlıkta ve düz karakterde bir borür tabakası elde edilmiştir. Krom oranı % 26 olan çeliklerde ise bu borür tabakasının kalınlığı 5 µm'yi geçmemektedir. Buna karşı olarak fazla nikel oranı borür tabakasındaki kolonsal yapıyı azaltmakta, yüksek poroziteyi ve kötü mekanik özellikleri de beraberinde getirmektedir (Goeuriot, Fillit, Thevenot ve Driver, 1982).

Silisyum elementi ise borür tabakasının kalınlığını etkilemez, ancak geçiş bölgesinin sertliği Si elementinin artışı ile artar (Permyakov, Yakovchuk ve Cherepin, 1973).

Silisyum aynı zamanda borlama tabakasının gevrekliğini de artırmaktadır. Bu yüzden %1'den fazla Silisyum içeren çelik malzemeleri borlamaya uygun değildir (Fichtl, 1981).

Tungsten, molibden ve vanadyum oranının çelikte artmasıyla tabaka kalınlığı azalmakta ve kolonsal yapı düzleşmektedir. Borlanacak malzemelerde vanadyum oranının % 0.15'i geçmemesi istenmektedir (Matuschka, 1980). Titanyum ise FeB'de çözünmekte ve FeB'nin sertliğini arttırmaktadır. Ayrıca geçiş bölgesinde istenmeyen tane irileşmesini de engelleyici rol üstlenmektedir (Permyakov, Yakovchuk ve Cherepin, 1973). Alaşımlı çeliklerde FeB ve Fe₂B fazlarına ilave olarak alaşım elementleri doğrultusunda TiB₂, Cr₂B, NiB₂ ve CoB gibi bileşiklerden biri veya birkaçı oluşabilmektedir (Goeuriot, Fillit, Thevenot ve Driver, 1982). Şekil 2.4'de metal bileşimlerinin borür tabakasına etkisi görülmektedir.



Şekil 2.4. Borür tabaka kalınlığının metal bileşim oranlarına göre değişimi (Matuschka, 1980)

2.6. Borlanmış Malzemelerin Kimyasal ve Fiziksel Özellikleri

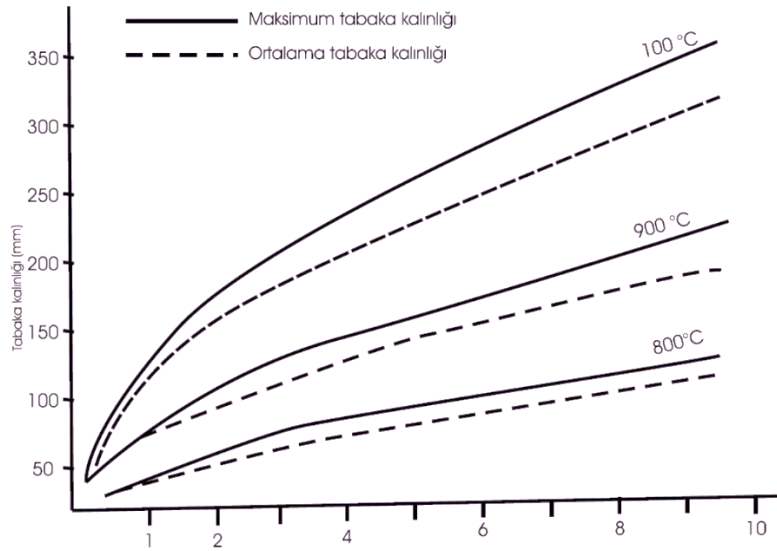
2.6.1. Borlamada Tabaka Kalınlığı

Borlanan malzemenin cinsi, borlayıcı ortamdaki bileşim, yapılan işlem şekli, süre ve sıcaklık borür tabakasındaki kalınlığa etki eden faktörlerdendir. Teorik olarak tabaka kalınlığının bir sınırı yoktur. Bu olay işlem sıcaklığı ve sürenin artması ile gerçekleşir. İşlem sıcaklığının Fe-B denge diyagramındaki ötektik sıcaklığın (1149 °C) altında bir sıcaklıkta olması gerekmektedir. Bu sıcaklığın üstünde bir sıcaklıkta lokal erimeler meydana gelerek malzeme yüzeyi bozulabilir (Bozkurt, 1984).

Tabaka kalınlığını etkileyen bir diğer önemli faktör de kırılgenlıktır. Tabaka kalınlığı arttıkça kırılgenlık da artacağından özellikle FeB ve Fe₂B çift fazlı tabaklarda kalınlığın fazla olmaması sağlanmalıdır (Fichtl, 1981).

Çeliklerde alaşım element miktarı ve karbon miktarının artmasıyla bor difüzyonu ters orantıda azalmaktadır. Bunun sonucunda borür tabakasının hem kalınlığı azalmakta hem de dış şeklindeki yapı düzleşmektedir (Bozkurt, 1984).

Çelik esaslı malzemelerde kullanılan şartlara göre tabaka kalınlığı 20-200 µm arasında olması uygundur. Kırılgenlık yönünden alaşımlı çeliklerde 100 µm, alaşımsız çeliklerde 200 µm tabaka kalınlığı, hatta darbesiz aşınmaya maruz elemanlarda su vermemek koşulu sağlanırsa 400 µm tabaka kalınlığına çıkılabilmektedir. Borlama sıcaklığının artması tabaka kalınlığını arttırdığı gibi poroziteyi de arttırarak tabakanın gevrek olmasına yol açar (Selçuk, 1994). Şekil 2.5’de Ck45 çeliğinin borlamadaki tabaka kalınlığının zaman ve sıcaklık değişimlerine göre oranları gösterilmektedir.



Şekil 2.5. Ekabor-1 ile Borlanmış Ck45 Çeliğinin Tabaka Kalınlığının Zaman ve Sıcaklık ile Değişimi (Matuschka, 1980)

2.6.2. Borlamada Sertlik Etkisi

Borlamanın en büyük etkisi sertlik kavramına olup ana malzeme cinsine ve yüzeyde oluşan borür fazına bağlıdır. FeB fazı Fe₂B fazından daha sert ve daha gevrektr (Atık, 1997). Sertlik ölçümleri mikrosertlik yöntemi kullanılarak vickers veya knoop uçları ile

yapılmaktadır (Matuschka, 1980). Ölçümlerde büyük yüklerin kullanılması çatlamalara ve dökülmelere neden olacağından hatalı ölçümlere yol açar. Ayrıca büyük yükler tabakanın bozulmasına ve altlık bölgesinin deformasyona uğramasına sebep olabilmektedir. Genel olarak bu nedenlerden dolayı 50-100 g'lık yükler kullanılarak ölçümler alınmaktadır (Özsoy, 1991). Tablo 2.3.'de borlama ve diğer yüzey işlemleri ile elde edilmiş olan yüzeylerin sertlik incelemeleri mevcuttur.

Tablo 2.3. Borlama ve Diğer Yöntemlerle Elde Edilmiş Yüzeylerin Sertlik Değerleri (Singhal, 1977)

Malzeme	Mikro Sertlik (kg/mm ²)
Nitrürlenmiş Yüzey	610-940
Gaz ile Karbürüze Edilmiş Yüzey	700-820
Sert Krom Kaplı Yüzey	950-1100
Wc+%13 Co Sinter Malzeme	1300
Borlanmış Karbon Çeliği	1600
Borlanmış AISI H13 Çeliği	1800
Borlanmış AISI A2 Çeliği	1900

Demirli malzemelerin borlanmasıyla, malzeme yüzeyinde FeB ve Fe₂B ile bu bileşiklerin karışımıyla oluşan tek veya çift fazlı borür tabakaları elde edilmektedir. Alaşımlı çeliklerde ve diğer malzemelerde kendi alaşım elementlerinin borürleri oluşmaktadır (Sinha, 1991). Tablo 2.4'de çeşitli malzemelerin borlamayla elde edilen borürler ve mikrosertlik değerleri verilmiştir. Özellikle demir ve çelik türü malzemelerde, borlama işlemi sonucu ana yapının dışında borür tabakası ve geçiş bölgesinden oluşan iki ayrı yapı ortaya çıkmaktadır (Çalık, Delikanlı ve Uzun, 2016).

Tablo 2.4. Bazı metallerde elde edilen borür fazları ve mikrosertlikleri (Sinha, 1991)

Borlanan alt yüzey	Borür tabakasındaki fazlar	Borür tabakasının sertliği (HV)
Fe	FeB Fe ₂ B	1900-2100 1800-2000
Co	CoB Co ₂ B Co ₃ B	1850 1500-1600 700-800
Ni	Ni ₄ B ₃ Ni ₂ B Ni ₃ B	1600 1500 900
Mo	Mo ₂ B MoB ₂ Mo ₂ B ₅	1660 2330 2400-2700
W	W ₂ B	2600
Ti	TiB TiB ₂	2500 3370
Nb	NbB ₂ NbB ₄	2200 -
Ta	Ta ₂ B TaB ₂	- 2500
Hf	HfB ₂	2900
Zr	ZrB ₂	2250
Re	ReB	2700-2900

2.6.3. Borlamada Aşınma Etkisi

Sürtünme katsayısı ve aşınma dayanımı bir sistem özelliği olmakla beraber, genellikle yüksek aşınma direnci sağlamak için malzemenin aşındırıcıdan daha sert ve sürtünme katsayısı daha düşük olması istenir. Borlama ile bu özellikler büyük oranda sağlanmaktadır (Atık, 1997). Borlama ile yüzeyde seramik yapıda bir ferro-bor tabakası elde edileceğinden adhezif aşınmanın azaltılması hedeflenir. Bu nedenle demir esaslı malzemelerde borlama yöntemi uygulanarak bunların da yatak malzemesi olarak kullanılması ve iyi bir aşınma direnci elde edilebilmesi sağlanmaktadır. Yağlı ortamda yapılan deneylerde borlanmış demir esaslı yatakların, borlanmamışlara göre aşınma dayanımlarında yaklaşık olarak 10 kat iyileşme görülmüştür. Borlanmış demir esaslı T/M yatak malzemelerinde ise yağlı ortamda yapılan deneylerde aşınma dirençleri yaklaşık 5 kat iyileşmiştir (Ünlü, 2004).

Ayrıca borun oksijene karşı ilgisi fazla olduğundan dolayı yüzeyde koruyucu bir ince oksit filmi oluşmakta, bu oksijen filmi yüzeyde yağlayıcı bir görev üstlenerek sürtünme katsayısını düşürüp yüzeylerin birbiri ile kaynamasını önlemektedir (Biddulph, 1977).

Yukarıda Tablo 2.1.'de bazı malzemelerin borlanmış ve borlanmamış sürtünme katsayıları gösterilmiştir.

2.6.4. Borlamanın İç Gerilmelere Etkisi

Metallerde borlama işlemi sonrasında borür tabakasında ve borür tabakası-ana metal arasında iç gerilmeler oluşmaktadır. Malzemelerin kimyasal bileşimi, borlama şartları ve uygulanan ısıt işlemler iç gerilmelere etki eden faktörlerdendir. Tabakadaki faz yapısı (tek veya çift faz) ve geometrisi de (düzgün veya girintili çıkıntılı) iç gerilmelerin oluşumuna etki etmektedir (Bozkurt, 1984). İdeal bir borür tabakası için tek fazlı ve tabaka geometrisinin girintili çıkıntılı olması istenmektedir. Ayrıca borlama işleminden sonra uygulanan ısıt işlemler de iç gerilmelere etki etmektedir (Babushkin ve Polyakov, 1973).

2.6.5. Borlamada Korozyon Etkisi

Borür tabakasının suya ve atmosfere karşı korozyon direncinin az olmasına karşılık, bazı asit ve sıvı metallere karşı ise iyi bir direnç göstermektedir. Özellikle HCl, H₂SO₄ ve H₃PO₄ gibi asitlerle birlikte, alüminyum, kurşun ve çinko gibi metallerin sıvı banyolarında borlu malzemelerin korozyon dirençleri çok yüksek olmaktadır (Matuschka, 1980). Yüksek asitli çeliklerde borlama ile koruyucu olarak kullanılan krom oksit yerine daha az koruyucu olan krom borür meydana gelmektedir. Bu bakımdan yüksek alaşımlı malzemelerin borlanması ile beraber daha iyi korozyon özelliği de her zaman elde edilememektedir (Bozkurt, 1984).

2.6.6. Borlamada Yorulma Etkisi

Borlama işleminin uygulanmasıyla yorulma dayanımı da etkilenmektedir. Borlama işlemi ile demir esaslı T/M malzemelerinde yorulma dayanımı artar. Borlanmış demir esaslı FeCu-Grafit malzemesinden üretilen numunelerle yapılan yorulma çalışmalarında, yorulma dayanımları üzerine önemli ölçüde artışın görüldüğü tespit edilmiştir (Yılmaz, 2004).

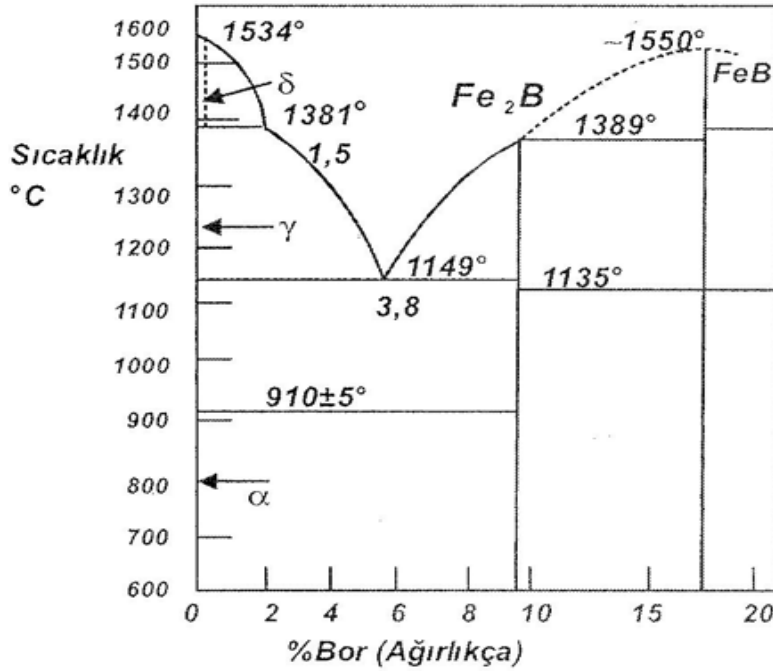
2.7. Demir-Bor Denge Diyagramı

Bor ve bileşikleri özellikle çelik sanayisinde üç önemli kullanım alanı bulmuştur. Bunlar;

1. Çelik üretiminde cüruf yapıcı olarak,
2. Çeliklerin içinde alaşım elementi olarak,
3. Çeliklerde yüzey kaplama ve sertleştirme ısı işlemleri olarak kullanılırlar (Taşçı, 1993).

Borun atom çapı demire oranla % 25 daha küçük olduğundan bu elementte katı eriyik yapmaktadır (Mal ve Tarkan, 1973). Demirde bor erimesi sıcaklığa bağlı olup ferrit fazında 20-80 ppm, östenit fazında ise 55-260 ppm aralığındadır. Bor östenitte ara yer katı eriyiği, α demirde ise yer alan katı bir eriyik yapar (Keown ve Pickering, 1997).

Demir-bor denge diyagramında ağırlıkça % 8.83 bor oranında Fe_2B ve yine ağırlıkça % 16.23 bor oranında FeB ara bileşikler meydana gelmektedir. Ağırlıkça % 3.8 bor oranında ergime sıcaklığı $1149^\circ C$ olan ötektik bir faz oluşmaktadır. Bu nedenlerden ötürü borlanmış yüzey bu sıcaklığa kadar ısıdan etkilenmektedir (Atik, 2001). Şekil 2.6'da demir-bor denge diyagramı gösterilmektedir.



Şekil 2.6. Demir-bor denge diyagramı (Atik, 2001)

2.8. Bor İle Elde Edilen Ürünler

Bor ürünleri aşağıda belirtilmiştir (Ediz, Seyfettinoğlu ve Özdağ, 1997).

2.8.1. Boraks Dekahidrat

Teknolojik olarak alkali metal boratları arasında en önemlilerinden biri olan disodyum tetraborat dekahidrat ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) olarak adlandırılmaktadır. Bu adlandırılan isim boraks dekahidrattır ve doğada tinkal minerali olarak bulunmaktadır. Molekül ağırlığı 381,4 gr./mol, özgül ağırlığı 1,71 (20 °C), özgül ısısı 0,385 kcal/gr/°C (25-50 °C), oluşum ısısı -1497,2 kcal/mol olarak belirtilmiştir. Renksiz ve monoklinik kristal yapısında olan bir tuzdur. Sulu çözeltileri yaklaşık olarak ve konsantrasyondan bağımsız bir şekilde hafif alkali reaksiyon göstermektedir (pH=9,2). Doygun boraks çözeltisi ise 105°C’de kaynamaktadır.

2.8.2. Boraks Pentahidrat

Disodyum tetraborat pentahidratın ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) molekül ağırlığı 291,35 gr/mol, özgül ağırlığı 1,88, özgül ısısı 0,316 kcal/gr/°C ve oluşum ısısı ise -1143,5 kcal/mol’ dür. Mineral adı tinkalkonit olan pentahidrat boraksın dehidrasyonu ile oluşan birikintiler ile bulunmaktadır. Doymuş boraks çözüntüsünün 60 °C’nin üzerindeki sıcaklıklarda kristallenmesi ile oluşmaktadır.

2.8.3. Susuz Boraks

Disodyum tetraborat ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$) molekül ağırlığı 201,27 gr/mol, özgül ağırlığı 2,3, oluşum ısısı -783,2 kcal/mol olup, renksiz ve çok sert bir kristaldir. Kolay öğütülebilir olan bu kristal bir kütle olarak bulunmaktadır. Ergime sıcaklığı 741°C’dir. Higroskopiktir. Boraks hidratların 600-700 °C’de dehidrasyonu ile stabil yapıda susuz boraks üretimi yapılabilmektedir.

2.8.4. Borik Asit

Borik asit (H_3BO_3) molekül ağırlığı 61,83 gr/mol, B_2O_3 'in içeriği % 56,3, erğime noktası sıcaklığı 169 °C, özgül ağırlığı 1,44, oluşum ısısı -1089 kJ/mol, çözünme ısısı 22,2 kJ/mol ve kristal bir yapıda olan maddedir. Oda sıcaklığındaki suda çözünürlüğü az olmasına rağmen, sıcaklık arttıkça çözünürlüğü de önemli miktarda artmaktadır. Bu nedenle sanayide borik asidi kristallendirmek için genelde doymuş çözeltiyi 80 °C'den 40 °C'ye soğutmak yeterli olmaktadır. Bor minerallerinden büyük ölçüde üretilen borik asit başlıca; cam, seramik cam yünü sanayiinde kullanılmakta ve kullanım alanları çok geniştir. Borik asit bor minerallerinin genel olarak sülfürik asitle asitlendirilerek elde edilmektedir. Türkiye'deki borik asit üretimi başlıca; Bandırma'daki Eti Bor A.Ş. Boraks ve Asit fabrika işletmeleri tarafından yapılmaktadır.

2.8.5. Bor Oksit (Susuz Borik Asit)

Ticari olarak kullanılan bor oksit B_2O_3 olarak adlandırılmakta ve genellikle % 1 oranında su içermektedir. Genellikle borik asitten uygun sıcaklıklarda su kaybettirilerek elde edilmektedir. Renksiz ve cam görünümlüdür. Oda sıcaklığında higroskopik bir yapıdadır. Bor oksit ve susuz boraks cam sanayiinde çok kullanılmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda borik asitten su buharlaşırken, B_2O_3 kaybı da artmaktadır. Cam üretim prosesinde borik asit yerine, bor oksit kullanılması enerji ve hammadde avantajı da sağlamaktadır. Ayrıca bor oksit porselen sırlarının hazırlanmasında, çeşitli camlarda, ergitme işlemlerinde ve seramik kaplamalarda da kullanılmaktadır. Bunların yanında pek çok organik reaksiyonun katalizörüdür ve pek çok bor bileşiğinde başlangıç maddesidir.

2.8.6. Sodyum Perborat

Sodyum perborat ($NaBO_2 \cdot H_2O_2 \cdot 3H_2O$) genellikle tetrahidrat yapısında olmaktadır. Perborat üretiminde % 33 oranında B_2O_3 içeren boraks minerali kullanılmaktadır. Sodyum perborat Bandırma'daki Eti Bor A.Ş. Boraks ve Asit fabrikası işletmeleri tarafından üretilmektedir. Sodyum perborat, ağartıcı etkisi nedeniyle yaygın olarak sabun ve deterjan sanayiinde kullanılmaktadır. Ayrıca kozmetik malzemelerin de yapımında, tekstil

endüstrisinde, mum, reçine, tutkal ve sünger sanayiinde katkı maddesi olarak kullanılmaktadır.

2.8.7. Diğer Bor Bileşikleri

Yukarda açıklanan bor bileşiklerinin haricinde piyasada yaygın olarak kullanılan diğer bor bileşikleri aşağıda özetlenmektedir.

2.8.7.1. Boridler

Metalik bir karaktere sahip bor bileşikleridir. Metaller veya metal oksitlerle yaptığı reaksiyon sonucunda elde edilmektedirler. Ticari olarak metal karışımlarının ve borun; alüminyum, magnezyum veya karbon ile indirgenmesi sonucu elde edilmektedirler. Boridler yüksek ergime noktasına, yüksek sertliğe ve iyi bir kimyasal stabiliteye sahiplerdir. Oksidasyona karşı da dirençlidir. Bu sebeplerden ötürü metal yüzeylerinin kaplanmasında, ısıya mukavemetli kazan ve buhar kazanlarının yapımında, korozyona dayanıklı malzemelerin üretilmesinde ve elektronik sanayiinde kullanılmaktadırlar.

2.8.7.2. Bor Karbür

Bor-karbon sistemindeki tek bileşik olan bor karbür, genellikle granül katı olarak elde edilmektedir. Masif ürün olarak elde edilmek istendiğinde ise 1800-2000 °C’de grafit kalıplarda preslenmektedir. Saf bor karbür kristalleri hafif parlak görünümde olmaktadır. Yoğunluğu 2,52 gr/cm³, ergime noktası sıcaklığı 2450 °C’dir. Sıcak preslenmiş bor karbür; aşındırıcı parçalarda, contalarda ve seramik zırhlı yüzeylerin üretilmesinde kullanılmaktadır. 2000 °C’nin üzerindeki sıcaklıkların ölçülmesinde ise termoçift olarak kullanılmaktadır. Ayrıca sertliği nedeniyle abrasiv malzeme yapımında da kullanılmaktadır.

2.8.7.3. Bor Nitrür

Bor nitrür genellikle hegzagonal yapıda oluşmaktadır. Hegzagonal sistemde iken beyaz renkli, talk’a benzeyen ve yoğunluğu 2,27 gr/cm³ olan bir tozdur. Kübik sistemde

oldukça sert bir yapıdadır. Teorik yoğunluğu ise 3,45 gr/cm³'tür ve iyi bir elektrik izolatörüdür. Ergitilerek masifleştirilmiş bor nitrit yüksek bir kimyasal dirence de sahiptir. Kübik yapıda ise bor nitrit çok iyi bir abrasiv malzemedir. Bu özelliğinden dolayı kesici aletlerin yapımında ve sert alaşımların işlenmesinde kullanılmaktadır.

2.8.7.4. Bor Halojenürler

Bor elementinin flor, krom, brom ve iyot gibi halojenler ile yaptığı bileşiklerdir. Bor oksitin derişik sülfürik asit ve florit, kromit, bromit ve iyonit gibi halojenler ile ısıtılmasıyla elde edilmektedir. Bor klorür düşük vizkoziteli, renksiz ve ışığı kıran bir sıvıdır. Ayrıca % 95'i bor-fiber üretiminde kullanılmaktadır.

2.9. Bor Ürünlerinin Kullanım Alanları

Bor ürünlerinin kullanım alanları Tablo 2.5'de maddeler halinde verilmiştir (URL-5).

Tablo 2.5. Bor ürünlerinin sektördeki kullanım alanları

Kullanım Alanı	Kullanım
Savunma Sanayi	Zırh Plakalar, Seramik Plakalar, Ateşli Silah Namluları, Fişek vb.
Cam Sanayi	Bor Silikat Camlar, Laboratuvar Camları, Uçak Camları, Borcam, Pyrex, izole Cam Elyafı, Tekstil Cam Elyafı, Optik Lifler, Cam Seramikleri, Şişe ve Diğer Düz Camlar, Otomotiv
Elektronik ve Bilgisayar Sanayi	Mikro Chipler, LCD Ekranları, CD-Sürücüler, Akım Levhaları, Bilgisayar Ağlarında; Isıya- Aşınmaya Dayanıklı Fiber Optik Kablolar, Yarı İletkenler, Vakum Tüpler, Dielektrik Malzemeler, Elektrik Kondansatörleri, Kapasitörler, Gecikmeli Sigortalar, Bataryalar, Laser
Enerji Sektörü	Gaz türbinleri, Yüksek ısı transistörleri, Bor hidrür yakıtları(boranlar), Isı enerjisi depolayıcılar, Piller, Hidrojen depolayıcılar, Güneş Enerjisinin Depolanması
Görüş Sistemleri	Kamera ve Mercek Camları, Fotoğraf Makinaları, Dürbünler, Banyo ve Film İmalatları
İlaç ve Kozmetik Sanayi	Dezenfekte Ediciler, Antiseptikler, Diğ Macunları, Lens Solüsyonları, Kolonya, Parfüm
İletişim Araçları	Cep Telefonları, Modemler, Televizyonlar vb.
Kağıt Sanayi	Geri kazanılan kâğıtların mürekkeplerinden arındırılması, Yüksek kaliteli kâğıtların parlaklaştırılması, kâğıt hamurunu beyazlatılması
Kimya Sanayi	Bazı kimyasalların indirgenmesi, Elektrolitik İşlemler, Flotasyon İlaçları, Banyo Çözeltileri, Katalistler, Atık Temizleme Amaçlı olarak, Petrol Boyaları, Yanmayan ve Erimeyen Boyalar, Tekstil Boyaları, Yapıştırıcılar, Soğutucu Kimyasallar, Korozyon Önleyiciler, Mürekkep, Pasta ve Cilalar, Kibrit, Kireçlenme Önleyicileri
Koruyucu	Ahşap Malzemeler ve Ağaçlarda Koruyucu olarak, Boya ve vernik Kurutucularında, Küf ve mantar önleyiciler, vb.
Makine Sanayi	Manyetik Cihazlar, Zımpara ve Aşındırıcılar Kompozit Malzemeler, Titreşim söndürücü malzemeler, Sert malzemeler, Motorlar, Katı yağlayıcılar, Yüksek sıcaklık sızdırmazlık contaları, Yüksek performanslı motor yağları, vb.
Metalürji	Kaplama elemanları, Yüksek sıcaklık refrakterleri, Kaplama Sanayiinde Elektrolit Olarak, Paslanmaz ve Alaşımli Çelik, Sürtünmeye-Aşınmaya Karşı Dayanıklı Malzemeler, Kaynak Elektrotları, Metalurjik Flaks, Briket Malzemeleri, Lehimleme, Döküm Malzemelerinde Katkı Maddesi olarak, Kesiciler, Kompozit Malzemeler
Nükleer Sanayi	Nükleer atık depolama (kolemanit cam bloklar), Reaktör Aksamaları, Nötron Emiciler, Reaktör Kontrol Çubukları, Nükleer Kazalarda Güvenlik Amaçlı ve Nükleer Atık Depolayıcı olarak, Nükleer teknolojide emniyet malzemeleri, vb.
Otomotiv Sanayi	Titreşim söndürücü malzemeler, Hava yastığı Şişirme mekanizmaları, Bor hidrür yakıtları (boranlar), Isı enerjisi depolayıcılar, Hidrojen depolayıcılar, Hava Yastıklarında, Hidroliklerde, Plastik Aksamda, Yağlarda ve Metal Aksamalarda, Isı ve Ses Yalıtımı Sağlamak Amacıyla, Antifrizler, vb.
Seramik Sanayi	Emaye, Fayans, Porselen Boyaları, sırlar,vb.
Spor Malzemeleri	Kayak Aksamaları, Tenis Raketleri, Ok-yay, Balık Oltaları, Golf Sopaları, Darbe söndürücüler vb.
Tarım Sektörü	Sentetik gübreler, Biyolojik Gelişim ve Kontrol Kimyasalları, Küf ve mantar önleyiciler, Böcek-Bitki Öldürücüler, Yabani Otlar, vb.
Tekstil Sektörü	Isıya Dayanıklı Kumaşlar, Yanmayı Geciktirici ve Önleyici Selülozik Malzemeler, İzolasyon Malzemeleri, Tekstil Boyaları Deri Renklendiricileri, Dericilikte kireç çöktürücü, Suni İpek Parlatma Malzemeleri, vb.
Tıp	Yapay organlar, Antibiyotikler(boromicyn), Osteopoz Tedavilerinde, Alerjik Hastalıklarda, Psikiyatride, Kemik Gelişiminde ve Artiritte, Menopoz Görüntüleme Cihazlarında, vb.
Uzay ve Havacılık Sanayi	Sürtünmeye-Aşınmaya ve Isıya Dayanıklı Malzemeler, Roket Yakıtı, Uydular, Uçaklar, Helikopterler, Zeplinler, Balonlar, Radar dalgası soğurucular, vb.

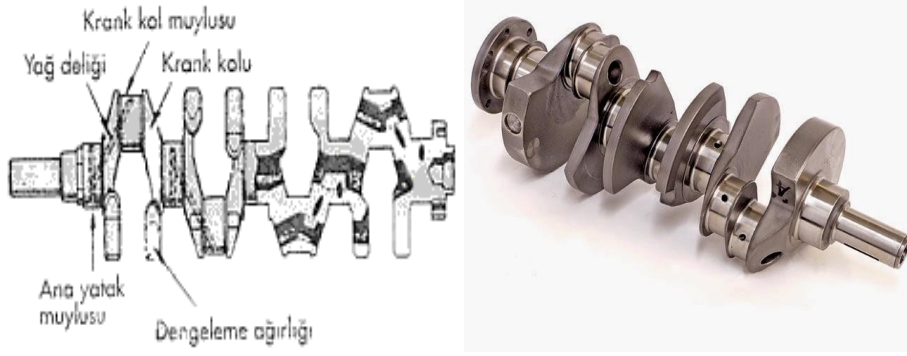
2.9.1. İçten Yanmalı Motorlarda Borlanabilecek Bazı Elemanlar

İçten yanmalı motorlarda motor elemanları metal ve metal alaşımlı malzemelerden imal edilmiş olduğu için borlama yöntemleri kullanılarak yüzey işlemleri geliştirilebilir. Aşağıda borlanabilecek bazı motor elemanları gösterilmektedir (URL-2).

2.9.1.1 Krank Mili

Krank milleri pistonun doğrusal hareketini biyel kolu yardımıyla dairesel harekete çevirebilen motor elemanlarıdır. Krank milleri, genellikle tek parça halinde, dökülerek veya dövülerek alaşımlı çeliklerden yapılmaktadır. Muylu yüzeylerinin darbelere karşı dayanımını arttırmak, aşınmayı azaltmak için belirli bir derinliğe kadar sertleştirilip hassas olarak taşlanmaktadır. Ana yatak ve kol muyluları, kaldıraç kolları, denge ağırlıklar, flanş gibi kısımlardan oluşan krank milleri yapımları esnasında statik ve dinamik olarak dengelenmektedir.

Krank millerinde çoğunlukla aşınma (oval, konik, normal), çizik, yanma, sarma, çataklık, eğilme ve kırılma gibi arızalara rastlanmaktadır. Bu aşınmaların büyük bir kısmı çıkıntı kısımları muylularda meydana gelmektedir. Normal aşınma, muylular üzerinde değişik kuvvetlerin oluşturduğu ve sürtünme sonucu meydana gelen düzgün aşındırma. Her muylu belirli bir süreden sonra aşınarak küçülmektedir. Muylulardaki oval aşınma, sıkıştırma ve ateşleme zamanların temas yüzeylerinin birim alanlarına etkiyen kuvvetlerin diğer zamanlara göre büyük olmasından kaynaklanmaktadır. Konik aşınma ise, ana yatak muylularında genellikle yatak yuvalarının şekillerindeki bozukluğuyla keplerin bir taraflarından fazla sıkmasıyla, yatakların aksel doğrultularının kaymasıyla, kol muylularında da biyel kolunun eğilmesiyle, piston piminin ayarsız olmasıyla veya yağda biriken madeni parçaların yağ deliğinden çıktığı çevreyi aşındırması ile meydana gelmektedir. Muylularda eğiklik 0,076 mm'den fazlaysa krank mili doğrultulmalıdır. Muylulardaki aşınmalar, motor çalışırken yağ basıncının düşük olmasından ve yataklardan çekiç sesine benzer bir ses duyulmasıyla anlaşılmaktadır.



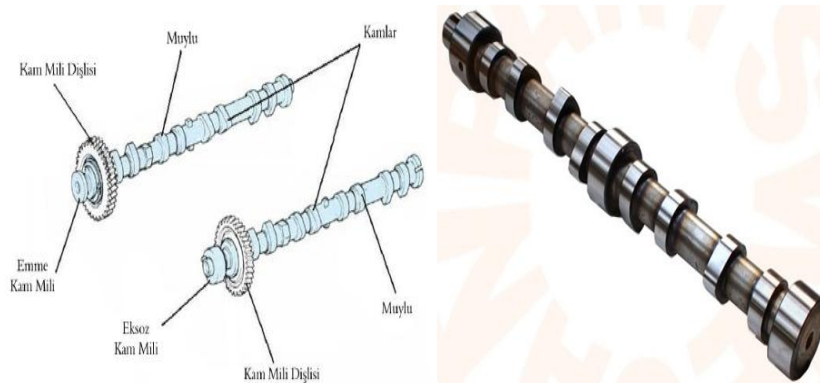
Şekil 2.7. 4 zamanlı bir motorda krank mili ve muyluları

2.9.1.2 Kam (Eksantrik) Mili

Kam millerinin görevi bir motorda supapları istenilen zamanda açmak, supapları istenilen zamanda kapatmak ve supapları gerektiği kadar açık tutmaktır. Karbüratörlü sistemlerde ise, helis dişli yardımıyla distribütör, yağ pompası ve özel bir kam vasıtasıyla yakıt otomatığını çalıştırmaktır.

Günümüz motorlarında 2 tip kam mili üretilmektedir. Enjeksiyonlu yakıt ve elektronik kontrollü ateşleme sistemi olan sistemlerde kam milleri dökme demir alaşımlardan imal edilmektedir. Diğer üretim şekli de kamların boş bir milin üzerine gerekli yerlere uygun açılarla yerleştirilmesidir. Bu şekilde yaklaşık 1,5 kg ağırlık tasarrufu ve yaklaşık 2 kat bükülme direnci sağlanmış olur.

Muylular ise kam milinin gövde içerisine veya silindir kapağı üzerine yataklanmasını sağlamaktadır. Muylulara supap yay basıncı etki eder ve bu basınç ovallik ve aşınmaya neden olabilmektedir. Muylularda aşınmanın 0,02 mm'yi geçmemesi istenir. Geçtiği durumlarda kam mili değiştirilir.



Şekil 2.8. 4 zamanlı bir motorda kam mili ve muyluları

2.9.1.3 Volan

Motorun bütün devirlerinde krank milinin düzgün ve devirli bir şekilde dönmesini sağlamaktadır. Volan iş zamanında bir kısım enerjiyi üzerine alarak diğer zamanlarda pistonların kolayca üst ölü noktayı aşmasını da sağlamaktadır. Volan kavramaya yataklık yapmaktadır. Ayrıca üzerinde bulunan volan dişlisi sayesinde motora ilk hareket verilmektedir.

Volan genellikle dökme demirden imal edilmektedir. Dış tarafına ise dişli dediğimiz çelik bir çember geçirilmektedir.

Volanda arızalar genellikle sürtünme yüzeyi fazla aşınmış, çizilmiş ve çatlamış yüzeyler baskı plakası ile taşlanmaktadır. Bu yüzeyler en fazla 1,5 mm talaş kaldırılarak düzeltilmez. Aksi durumda volan ve baskı plakası değiştirilir. Dişlilerde de aşınma meydana gelmektedir. Kırılma ve aşınma durumu varsa dişliler değiştirilmelidir. Ayrıca volan yüzeyinde eğilme de meydana gelebilmektedir.



Şekil 2.9. Volan ve volan dişlisi

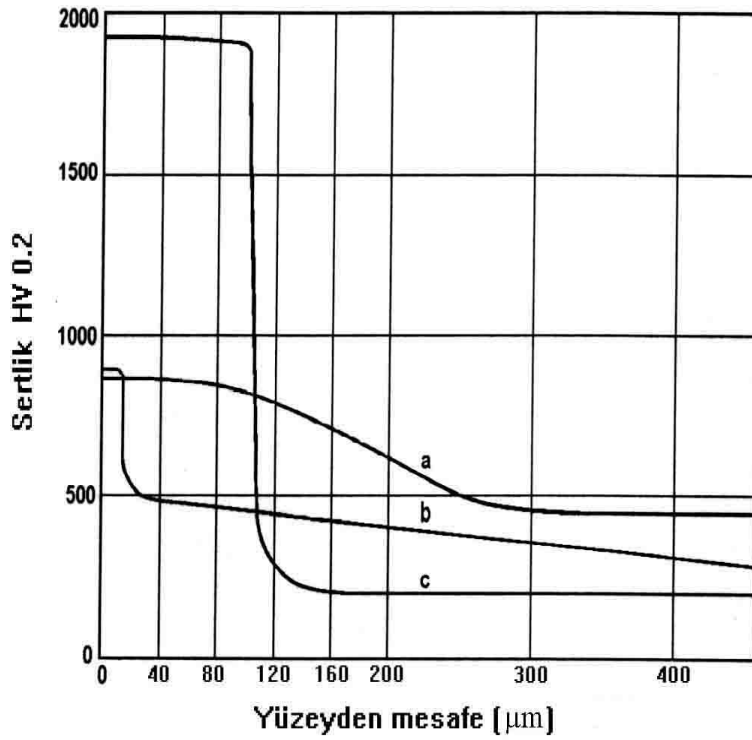
3. BORLAMA YÖNTEMLERİ

Borlama yöntemleri, kullanılan bor kaynağının fiziki durumuna göre belirlenmektedir. Gaz, bir ısıt işlemleri ortamı olarak teknik avantajlar sergilemekte ve nitrüleme, karbürleme, kromlama gibi ısıt işlemlerle başarıyla uygulanmaktadır. Ancak; gaz ve sıvı fazda borlama, ortamın oluşturulması bakımından ciddi zorluklar yaşandığından sık kullanılan bir yöntem olmamakta ve bu nedenle farklı borlama teknikleri katı bor verici kaynaklar dikkate alınarak geliştirilmiştir.

Malzemelerin yüzeylerine değişik metotlarla kaplamalar yapılmaktadır. Örneğin; hem karbürleme yapılması istenildiğinde sertleşmeden sonra sürekli bir geçişle sert kenar bölgesinden yumuşak çekirdek halinde tutabilmek için, hem de tuz banyosunda nitro karbürlemede, nitrür tabakasının özelliğinin yanında, tabakanın altındaki yarı metal difüzyon bölgesi önem taşımaktadır. Bor kaplamada ise sadece kenar bölgesi, yani borür tabakası ile ilgili olan alandır. Anlatılanlara göre değişik ısıt işlemler sonucu oluşan, sertlik–yüzeyden mesafe ilişkileri şekil 3.1’de gösterilmektedir (Karaman, 2003).

Burada;

- a) İlave sertleştirme (16MnCr5, 1saat, 850 °C, sementasyon işlemi ile yağda sertleştirme)
- b) Tuz banyosunda nitro karbürleme (C15, 90 dakika, 580 °C, banyoda su verme işlemi)
- c) Borlama (C45, 3 saat, 900 °C, Durborid 2, yavaş soğutma)



Şekil 3.1. Borlama işlemindeki, sertlik-yüzeyden mesafe ilişkisi (Karaman, 2003)

3.1. Katı Ortam Borlama Yöntemi

Yüzeyi borlanacak malzeme, toz halindeki bor verici ortam içerisinde genellikle 850-1000 °C arası sıcaklıklarda 2–10 saat bekletilmesi ile yapılan işlemdir. Kuru sementasyona benzeyen bu yöntem soygaz atmosferinde yapılabildiği gibi sıkı kapatılmış kutularda olmak şartı ile normal bir şekilde atmosferde de yapılabilmektedir. Sistemin ucuz olması ve özel teçhizat ve teknik gerektirmemesi en önemli avantajlarından (Bozkurt, 1984). Ticari alanda katı ortam borlama maddeleri kullanım alanlarına göre sınıflandırıldıktan sonra satılmaktadır (Taşçı, 1993).

Ekabor-1: Toz halindedir. Uygun tabaka kalınlığının elde edilmesinde kullanılmaktadır. Yüzey pürüzlülüğü açısından da yüksek kaliteye erişilmekte ve genel maksatlı demir ve çelik malzemelerde kullanılmaktadır.

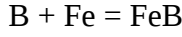
Ekabor-2: Granüllü yapıdadır. Yüzey pürüzlülüğü düşünüldüğünde çok yüksek kaliteye sahiptir. Düşük alaşımlı çelikler için kullanılmaktadır.

Ekabor-3: Granüllü yapıdadır. Ekabor 2'den daha iri taneli bir yapıda olup yüzey kalitesi daha iyidir. Yüksek alaşımlı çelikler için kullanılmaktadır.

Ekabor-HM: Sert metallerin borlanması için özel olarak üretilmektedir.

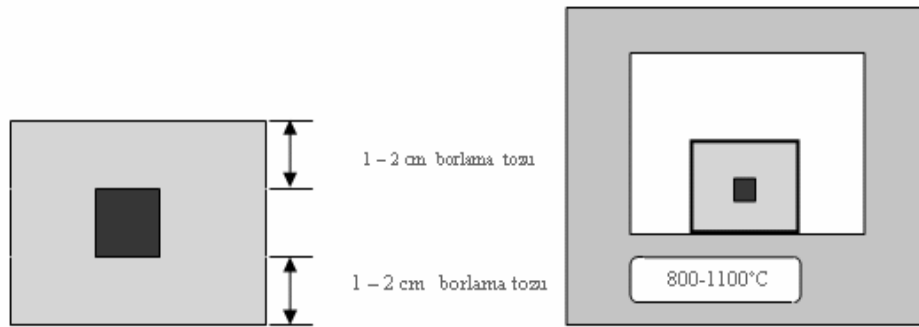
Ekabor-Pasta: Macun şeklide olmakta ve metalik malzemelerin borlanması istenen bölgelerine sürülerek uygulanmaktadır.

Katı ortam borlama prosesinde yer alan reaksiyonlar aşağıdadır.

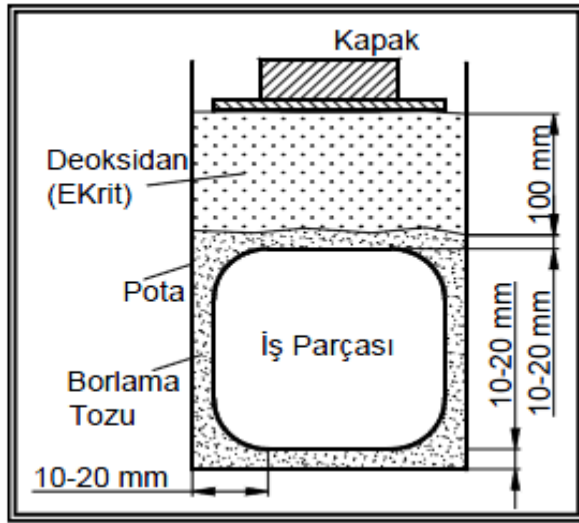


Katı borlama yöntemindeki kullanılan bor bileşikleri; borkarbür, ferrobor ve elementer bordur. Bunlardan en yaygın kullanılanı borkarbürdür. Aktivatör olarak da; sodyum bor florür, potasyum bor florür, baryum florür, sodyum karbonat, amonyum florür ve redükleyici olarak silisyum karbür, grafit ve sodyum klorür gibi maddeler kullanılmaktadır (Matuschka, 1980).

Borlama maddesinin tane boyutu küçüldükçe temas yüzeyi artmaktadır. Temas yüzeyinin artması yayılımı kolaylaştırmakta, dolayısıyla borür tabakasının kalınlığını da arttırmaktadır. Borlama yönteminin diğer önemli bir avantajı ise; borlamadan sonra matris malzemesine istenilen miktarda ısıtılabilir (Buytoz ve Somunkiran, 2005). Kutu borlama yönteminin hazırlanmasındaki şematik gösterim şekil 3.2 ve 3.3’de gösterilmektedir.



Şekil 3.2. Kutu borlamanın şematik gösterimi soldaki resim kutu hazırlama, sağdaki resim kutunun fırında ısıtılması (URL-3)



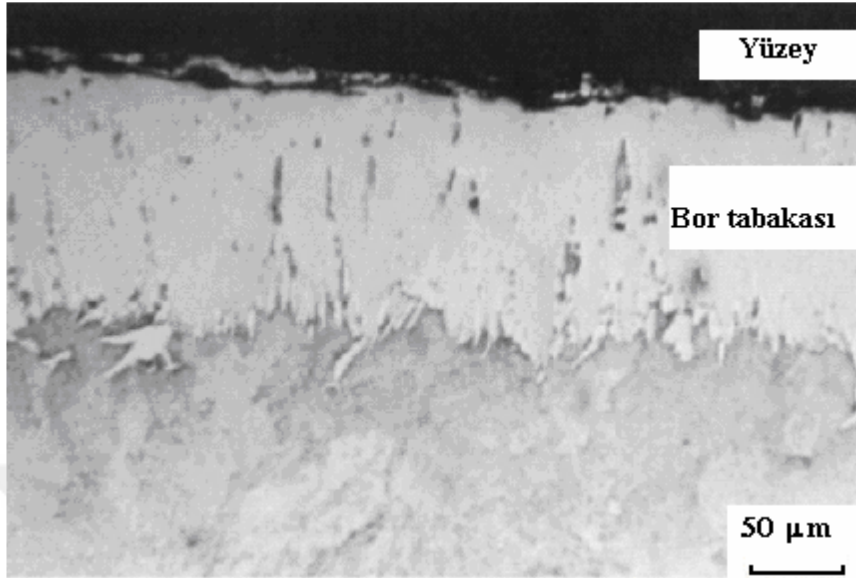
Şekil 3.3. Katı borlama yönteminin şematik gösterimi (Uluköy ve Can, 2006)

Kutu borlamada kullanılan pota, borlama işlemi boyunca bor ajanlarının kaybını önlemek amacıyla kurşunla kaplanarak tüm malzemeler doldurulduktan sonra ağız kısmı demir cürufu veya beton ile kapatılmaktadır. Pota veya kutu yüksek iç gerilmeler, çatlaklar ve kalkmalara neden olmaması ve yeniden toz ilavesi ile (%20-50) borlamaya devam edilebilmesi açısından fırın hacminin %60'ını geçmemelidir (Sinha, 1991).

Borlama kaynağı olarak literatürde verilen toz karışımlarının oranları aşağıdaki gibidir (Sinha, 1991;Özbek, 1999).

- a-) % 5 B₄C, % 90 SiC, %5 KBF₄
- b-) % 50 B₄C, % 45 SiC, %5 KBF₄
- c-) % 85 B₄C, % 15 Na₂CO₃
- d-) % 95 B₄C, % 5 Na₂B₄O₇
- e-) % 84 B₄C, % 16 Na₂B₄O₇
- f-) Amorf bor (% 95–97), % (3-5) KBF₄
- g-) % (40–80) B₄C, % (20-60) Fe₂O₃
- h-) % 60 B₄C, % 5 B₂O₃, % 5 NaF, % 30 demir oksit
- ı-) % 50 Amorf bor, % 1 NH₄F.HF, % 49 Al₂O₃
- k-) % 100 B₄C
- m-) % 20 B₄C, % 5 KBF₄, % 75 Grafit
- n-) % 95 Amorf bor, % 5 KBF₄

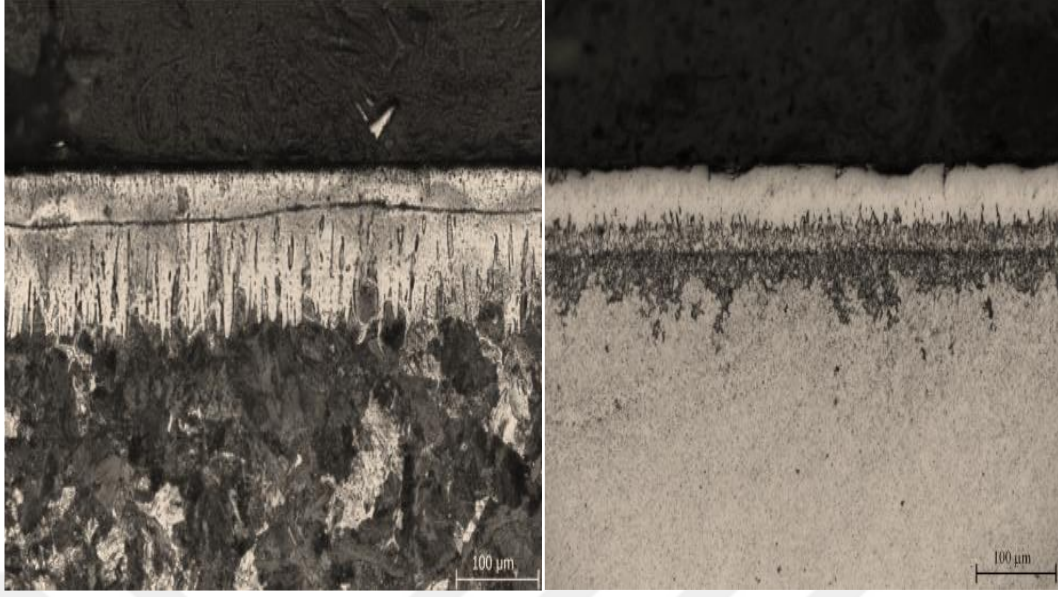
Şekil 3.4’de bir çalışmada kutu borlama yöntemiyle 900 °C sıcaklıkta 6 saat süre ile borlanan AISI W1 çeliği görülmektedir.



Şekil 3.4. 900 °C’de 6 saat süreyle borlanan AISI W1 çeliğinin mikroyapısı (Özbek ve Bindal, 2002)

3.2. Pasta Borlama Yöntemi

Pasta borlama, kutu borlamanın zor veya pahalı düşünüldüğü durumlarda kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemde, % 45 B₄C, (200-400 mesh tane boyutu) ve % 55 kriyolit (Na₃AlF₆ flaks ilaveli) kullanılırken veya iyi bir bağlama ajanı içinde (bütil asetat içinde çözünmüş nitro selüloz) geleneksel borlama tozu karışımı (B₄C-SiC-KBF₄) kullanılmaktadır. Bu yöntemle borlayıcı karışım malzemenin yüzeyine püskürtülerek veya fırçayla sürülerek oluşturulmakta ve kurutmadan sonra istenilen miktarda kurutulmuş tabaka elde edilmektedir. (1-10 mm) Daha sonraki aşamada pasta borlama işlemi yapılmış olan malzeme 800-1000 °C’ lik bir fırında 2-12 saat süreyle ısıtılmaktadır. Bu prosesin kutu borlamadan farklı yanı ise koruyucu atmosfere ihtiyaç duymasıdır. Koruyucu atmosfer olarak argon veya N₂ gerekmektedir. Bu proses büyük parçalarda ve kısmi borlama gerektirecek parçalarda kaplama için idealdir (Başman, 2010). Şekil 3.5’de 950 °C’de 4 saat süreyle pasta borlama yöntemi uygulanan AISI 4140 ve AISI H13 çelikleri görülmektedir.



a-)

b-)

Şekil 3.5. 950 °C 4 saat süreyle pasta borlama yapılan çeliklerin optik görüntüsü a-) AISI 4140, b-) AISI H13 (Dilektaşlı, 2014)

3.3. Sıvı Borlama Yöntemi

Bileşikleri, aktivatör ve redükleyici maddelerden oluşan erimiş tuza, iş parçasının daldırılmasıyla oluşan yöntemdir. Daldırma süresi borlamadaki süredir. Borlama işlemi 900–1100 °C sıcaklıkta ve 2–9 saat süre ile yapılmaktadır. Bu yöntemin dezavantajı ise sıcaklıktır. Sıcaklığın 850 °C'nin altına düşmesi durumunda erimiş boraksın akıcılığı azalacağı için borlama yapılamaz hale gelecektir. Sıvı ortam borlaması esnasında borlanan metal ile redükleyici madde arasında galvanik pil oluşur. Aktif bor oluşumu esnasında metal yüzeyinde katodik bir reaksiyon oluşurken, redükleyici madde yüzeyinde anodik bir reaksiyon oluşmaktadır. Bu işlemin oluşması için; borlanacak metal ile redükleyici madde taneleri arasında elektrokimyasal bir farkın bulunması gerekmektedir. Bu yöntemde borlama banyosu ise sıvı haldedir. Borlama işleminde kullanılan sıcaklık 670–1000 °C aralığında gerçekleştirilmektedir. Sıvı ortamda borlama, iki ana grupta toplanır;

a- Elektrolitik sıvı borlama ve

b- Elektrolizle sıvı borlama yöntemleridir. Bu yöntemlerin çok sayıda dezavantajları vardır. Bunlar;

- Tuz kalıntılarının malzeme üzerinde kalarak ortamda reaksiyona girmeyen borun varlığı, zaman ve para kaybına yol açmaktadır.

- Borlama işleminin başarıyla yürütülmesi açısından banyo viskozitesinin arttırılması gerekli olduğundan tuz ilavesi yapılmaktadır. Bu da işlemdeki maliyeti arttırmaktadır.
- İşlem için malzemeleri korozyif ortamlardan koruyacak fırınlara ihtiyaç duyulmaktadır (Akray, 2007).

3.4. Gaz Borlama Yöntemi

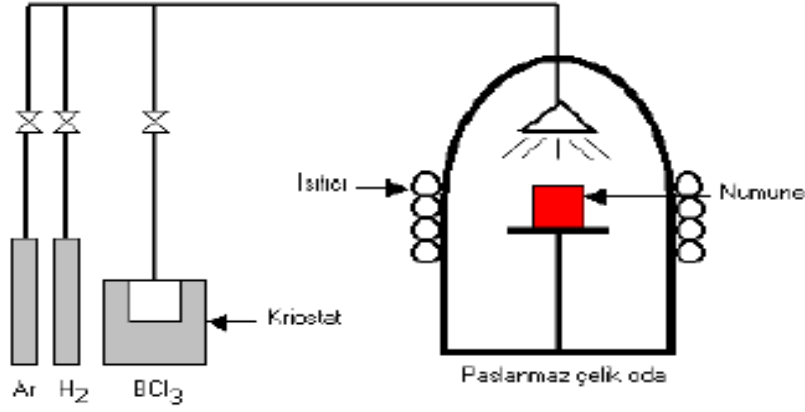
Gaz borlama BCl_3 , H_2 ve N_2 gaz karışımının atmosferde yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilen borlama prosesidir. Bir başka deyimle borlama ortamının gaz fazında olan borlama işlemidir. Borlama işlemi Ar ve H_2 gazlarının ve bir evapotartörde gaz haline getirilmiş bir bor kaynağının belirli karışımının, dış ortama kapalı paslanmaz çelik bir odadaki numune üzerine püskürtülmesiyle yapılmaktadır (Şekil 5.6). İşlem 700–950 °C sıcaklık aralığında ve 67 Kpa 1:15 oranında BCl_3+H_2 gaz karışımında gerçekleştirilmektedir. Gaz borlamada gazlaştırılabilen BCl_3 (bor halitler), BF_3 , B_2H_6 (diboran) ve TEB (trietyl boran) gibi bor bileşikleri ve redüktan olarak da hidrojen gazı kullanılmaktadır. Gaz borlama işleminde sıklıkla bor halitler ve diboran kullanılmaktadır. Diboran ve bor halitlerin gazları zehirlidir ve patlayıcıdır; çevreyi kirletici etki yaptığından dolayı ticari kullanımı da sınırlıdır. Gaz borlamada gaz sirkülasyonu sonucu daha uniform bir bor dağılımı yaşanmakta ve sonradan temizleme işlemi gerektirmediği için numune kolay elde edilmektedir. Şekil 3.6’da gaz borlama ünitesinin şematik resmi görülmektedir.

Gaz borlamanın avantajları;

- Gaz sirkülasyonunun sonucuyla borun daha çok yayılmasını sağlar.
- Katı borlama işlemine göre daha gelişmiş sıcaklık kararlılığı ve elde etme kolaylığı sağlar (Bergmann, 1981).

Gaz borlamanın dezavantajları ise;

- Trimetil bor, borlama beraberinde C yayınına neden olarak tabaka kalitesini bozar.
- Tesisatı daha pahalıdır.
- Ortamı zehirlidir (Barış, 2007).



Şekil 3.6. Gaz borlama ünitesi (Bergmann, 1981)

Borür tabakasının morfolojisi demir esaslı malzemelerde;

- a- Dış tabakalarda ortorombik FeB fazı bulunmakta iken,
- b- İç tabakalarda hacim merkezli tetragonal Fe₂B fazı teşekkül etmektedir.

Alaşımlı çelik malzemelerde bulunan alaşım elementleri borür oluşumunu inhibe eder ve alaşım miktarıyla birlikte oluşan FeB oranı artar. Paslanmaz çelikler borlama işlemlerinde kullanılması bakımından nispeten daha az elverişlidir (Graf ve Matushcka, 1977).

Tablo 3.1’de borlama işleminde kullanılan çeşitli gazların bazı özellikleri verilmektedir.

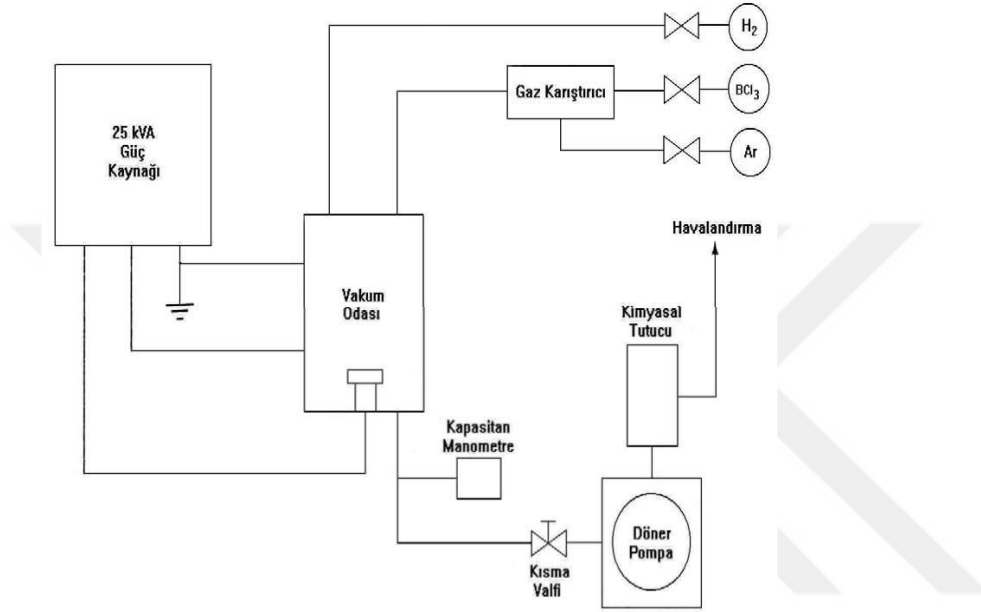
Tablo 3.1. Borlama İşleminde kullanılan çeşitli gazların birtakım özellikleri (Graf ve Matushcka, 1977)

Gazlar	Kimyasal Formül	Molekül Ağırlığı	Teorik Bor Miktarı, %	Donma Noktası °C
Bor Tri Florid	BF ₃	67,82	15,95	-128,8
Bor Tri Klorid	BCl ₃	117,9	9,23	-107,3
Bor Tri Bromit	BBr ₃	250,57	4,32	-46
Di-Boran	B ₂ O ₃	26,69	39,08	-165,5
Bor Tri Metil	(CH ₃) ₃ B	55,92	19,35	-161,5
Bor Tri Etil	(C ₂ H ₅) ₃ B	98,01	11,04	-94,0

3.5. Plazma Borlama Yöntemi

Katı haldeki bir maddeye enerji vererek sıvı hale, sıvı haldeki bir maddeye ise enerji vererek gaz hale son olarak gaz haldeki maddeye enerji verilerek plazma hale getirmek mümkündür. Plazma içerisinde; iyon, uyarılmış atom, elektron, foton ve nötral atom veya

molekül içeren bir karışımdır. Uygulamada plazma ısı enerjisi verilerek, ışınlı veya elektriksel boşalma ile elde edilmektedir. En yaygın kullanılan plazma yöntemi elektriksel boşalma yöntemidir. Bir elektrik gerilim kaynağı gaz içerisinde bulunan iki iletken plaka arasına bağlanırsa belirli şartlar gerçekleştirildiği durumlarda (uygulanan gerilim plakalar arasındaki gazın delinme gerilimi üzerinde ise), bu iki plaka arasında bir elektrik akışı olmaktadır (Küper vd., 2000). Şekil 3.7’de plazma borlama tesisat şeması gösterilmektedir.



Şekil 3.7. Plazma borlamada tesisat şeması (Tezcan, 1996)

Plazma borlama BCl₃, BF₃, B₂H₆ ve TEB (Trietil Boran) gibi bor bileşikleri ve redüktan olarak hidrojen gazı kullanılarak, 800-1000 °C sıcaklıklarda, yaklaşık 2-10 Pa gibi düşük bir basınç altında oluşturulmuş bir plazma içerisinde yapılan borlama işlemidir (Nam vd., 1998; Hunger ve Löbig, 1997). Klasik borlama, tuz borlama ve gaz borlama gibi işlemlerin sonucunda çevreye verilen kirlenici etki nedeniyle son yıllarda plazma borlama işlemi daha yoğun olarak çalışılmaktadır (Yoon vd., 1999). Plazma borlama reaksiyonları aşağıda verilmiştir.



Bor Florür BF₃ ile borlama reaksiyonu ise;

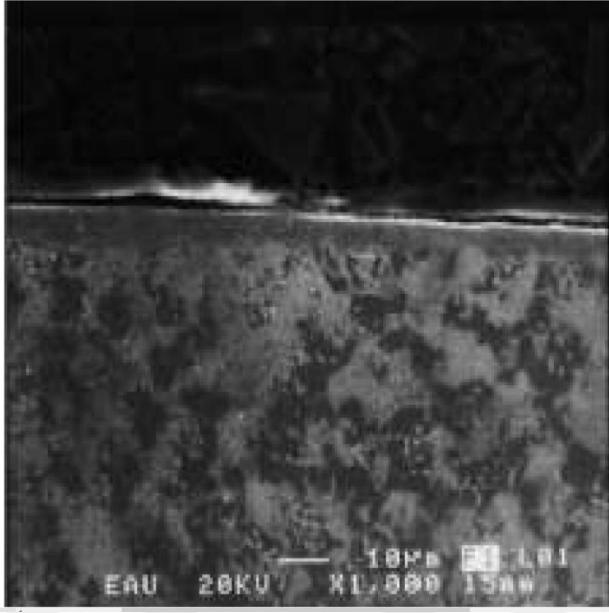


Plazma borlama yönteminin avantajı; yüksek enerji etkinliği, minimum çarpılma ve düşük işlem sıcaklığıdır. Plazma borlama yönteminin dezavantajları ise BCl_3 ve B_2H_6 gazlarının kullanılmasıdır. Bu gazlar pahalı, zehirli, patlayıcı ve korozyona neden olabilmektedir (Hunger ve Löbig, 1997). Plazma borlama yöntemi Almanya’da otomotiv sanayisinde kullanılmaya başlanmasıyla üstün özellikleri nedeniyle endüstrinin dikkatini çekebilmiş ve artan ilgi ile araştırmalar yoğunlaşmıştır (Cabeo vd., 1999). Tablo 3.2’de plazma yöntemleriyle yapılan işlemler görülmektedir.

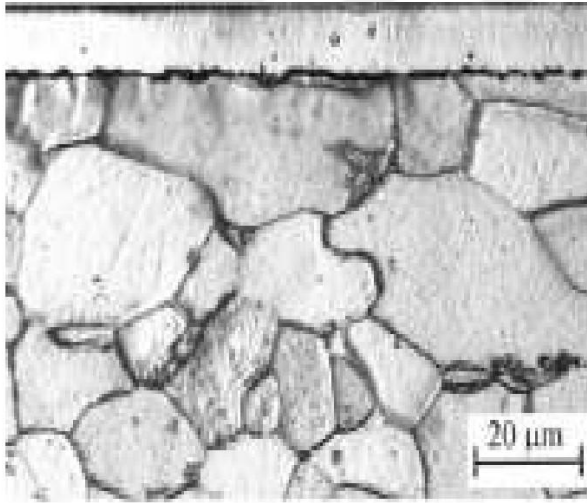
Tablo 3.2. Plazma Destekli Yüzey İşlemlerine Bakış (Çelik vd., 2002)

Uygulanan İşlem	Temel Mantığı	İşlem Sıcaklığı °C	İşlem Basıncı (mbar)	Yüzey Sertlik Sonucu (HV)	Difüzyon Tabakası Kalınlık Sonucu (µm)
Plazma ile karbürleme	Karbonun suda çözünümü ve takip eden su verme	800-1000	1-20	700-800	50-2000
Plazma ile nitrürleme	Arayer N’ua çözünümü	350-590	1-10	500-1200	50-1500
Plazma ile nitrokarbürleme	Arayer C ve N çözünümü	450-580	1-10	800-1100	5-10
Plazma ile borlama	Arayer bor çözünümü	700-1000	1-10	1800-2000	5-400

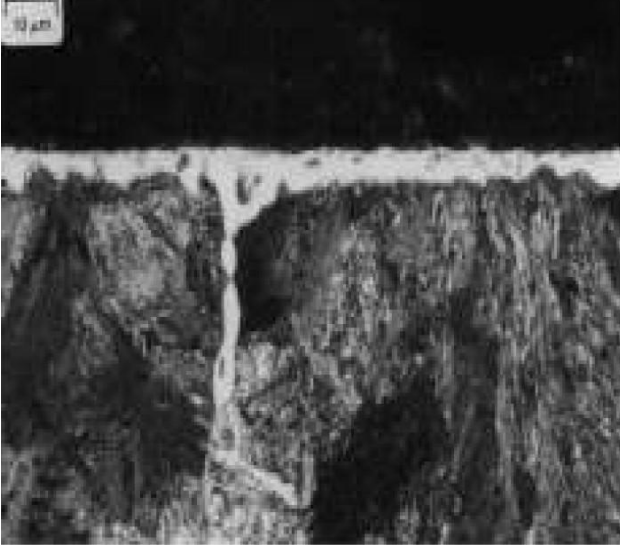
Şekil 3.8’de plazma ile nitrürasyon çalışması görülmektedir. Şekil 3.8’de plazma yöntemiyle nitrokarbürleme çalışması görülmektedir. Şekil 3.10’da ise plazma borlama yöntemi ile elde edilen çalışma görülmektedir. Yine bu yöntemlerin haricinde yöntemlerle türeyen borlama yöntemleri de mevcut olarak günümüzde kullanılmaktadır.



Şekil 3.8. Nitrülenmiş Malzemede (AISI 5140) Nitrürlü Tabakanın Sem Görüntüsü, (T= 450 °C, t=4 saat) (Alsaran ve Çelik, 2001)



Şekil 3.9. Nitrokarbürlenmiş Malzemede (Saf Demir) Nitrokarbürü Tabakanın Optik Mikroskop Görüntüsü, (T=560 °C, t=1 saat) (Malinova vd., 2001)



Şekil 3.10. Plazma ile Borlanan Malzemenin (AISI 4140) Borlu Tabakasının Optik Mikroskop Görüntüsü, (T=950 °C, t=1 saat) (Küper vd., 2000)

4. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

Bayça ve arkadaşları, borlama işlemi üzerine yaptığı bir araştırmada, borlama işlemi yapılan malzemelerde amacın; yüksek sertlik ve çok yüksek aşınma direncine sahip olması ve bu özelliklerini yüksek sıcaklıklarda koruyabilmeleri olduğunu tespit etmiştir. Bu gibi nedenlerden dolayı borlamanın gelişen endüstride önem kazanan bir yüzey sertleştirme işlemi olduğunu, ayrıca borlanmış yüzeylerde sürtünme katsayısının da önemli miktarda düştüğünü ve makine parçalarındaki aşınma kayıplarının azaltılması çalışmalarında borlama işleminin alternatif bir yöntem olduğunu belirtmiştir (Bayça ve Şahin, 2004).

Çalığülü ve arkadaşları, gaz atomizasyon yöntemi kullanılarak üretilmiş % 99 saflıkta Al tozunu matris, % 99 saflığa sahip B₄C (boron-karbür) tozunu ise takviye elemanı olarak kullanıp, ağırlıkça farklı oranlara (% 10, % 20, % 30) sahip metal matrisli kompozit malzemeler üretmiştir. Mikrosertlik sonuçlarına göre % 30 B₄C takviyeli kompozitin ortalama sertliği diğer oranlara göre daha fazla olduğunu tespit etmişlerdir (Orhan vd., 2007).

Hazar ve Öztürk., bir dizel motorunun yanma odası elemanlarından olan silindir gömleği ve supaplar bor içerikli tozlarla katı ortam borlama yöntemi ile kaplanmıştır. Motora adyabatik bir özellik kazandırılmıştır. Silindir gömleğinde ve supaplarda katı ortam borlama yöntemi kullanılarak yaklaşık 150 mikron kalınlığında Fe₂B tabakası elde edilmiştir. Sonuç olarak kaplanan motor elemanları optik mikroskop, SEM, EDAX, XRD, nano-sertlik, adhesiv aşınma ve yüzey pürüzlülüğü yöntemleri ile incelenmiştir. Yüzey sertliği 6 kat artmış ve aşınma direnci 3 kat artmıştır. Ayrıca ısı iletim katsayısında da ciddi oranda bir düşüş görülmüştür (Hazar ve Öztürk, 2015).

Hunger ve arkadaşları, değişik sıcaklıklarda yaptığı aşınma deneyleri sonucunda, borlanmış yüzeylerin özellikle yüksek sıcaklıklar altında, karbürleşmiş ve nitrürlenmiş yüzeylere göre çok daha iyi aşınma dayanımı gösterdiğini belirlemiştir (Hunger ve True 1994).

Kulka ve Pertek, krom ve nikel içerikli düşük karbonlu çeliklerde borlama işlemi yapmış ve karbon miktarının aşınma dayanımı üzerine etkilerini incelemişlerdir. Deneyler sonucunda karbon oranı, % 1,2'den düşük çeliklerde aşınma dayanımı oranının en yüksek seviyeye geldiğini belirlemişlerdir (Kulka ve Pertek, 2003).

Rie, plazma difüzyon proseslerindeki son gelişmeleri araştırdığı çalışmasında; 750 °C sıcaklıkta BC₃ bileşiklerinden yararlanarak plazma (iyon) borürleme yapmış ve 20-30 µm kalınlığında ve 1500 kg.mm² sertliğinde tabakalar elde etmiştir. Bu yöntem ile günümüz otomobillerinde kullanılan yağ pompası dişlilerinin sertleştirilebileceğini belirlemiştir (Rie, 1999).

Genel ve arkadaşları, AISI W1 çeliğini 1-8 saat aralığında Ekabor-1 bileşiklerinden yararlanarak borlama işlemine tabii tutmuşlar ve yüzey sertliklerini ölçmüşlerdir. Sonuç olarak borlanmamış çeliklerdeki yüzey sertliği 260 HV olmasına karşılık borlanmış AISI W1 çeliğinin 1690-1800 HV sertliğinde olduğu görülmüştür. Ayrıca bor tabakasının sertliğinin 950°C'ye kadar borlama sıcaklığıyla beraber azalan oranda arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca bu sıcaklığın proses zamanı 6 saati geçmediği durumlarda optimum sıcaklık olduğu da belirlenmiştir (Genel vd., 2003).

Gopalakrishnan ve arkadaşları, orta karbonlu çelikleri sürekli ve aralıklı olarak katı ve elektroliz yöntemi ile borlama işlemine tabii tutmuşlardır. Numuneler 950 °C'de 4 saat süre ile sürekli ve aralıklı olarak borlanmış ve daha sonra soğutulmaya bırakılmışlardır. Aralıklı olarak ise 950 °C sıcaklıktan 600 °C sıcaklığa kadar 1 saat soğutulmaya bırakılmış ve 4 kez bu işlem tekrarlanmıştır. Yapılan deneyler sonucunda; aralıklı borlama yöntemi ile mikroyapı morfolojisinde, artık gerilme dağılımında, tokluk ve kırılabilirlik gibi mekanik özelliklerde daha iyi sonuçlar alınmışken, yüzey sertliğinde sürekli borlamaya oranla düşmeler görülmüştür. Aralıklı borlamada kırılabilirliğin azaltılabileceği belirlenmiş ve bu yöntem ile yüksek korozyon direnci oluşturulabileceği öngörülmüştür (Gopalakrishnan vd., 2002).

Nam ve arkadaşları, düşük karbonlu çeliklerde plazma borlama yönteminin etkilerini incelemişlerdir. Sonuç olarak borlanmış tabakadaki oluşum hızının ve sertliğin klasik borlama yöntemine göre daha düşük olduğunu belirlemişlerdir (Nam vd., 1998).

Selam, yaptığı çalışmasında gri dökme demirin yüzeyini borla kaplamış ve aşınma dayanımını incelemiştir. Borlu tabakadaki aşınma dayanımının yüksek olduğunu tespit etmiştir. Kayma yolunun artmasıyla sürtünme katsayısı numunelerdeki bor tabakasındaki kalınlığa ters orantılı olarak arttığını, artan yük ve hız değerlerinde ise borlanmamış numunelerin aşınma miktarlarının borlanan numunelere göre daha fazla olduğunu ifade etmiştir (Selam, 1996).

Özer ve Ay, yaptıkları çalışmada AISI 1020, AISI 1060 ve AISI 4140 çeliklerinden imal edilmiş olan borlama numunelerine 840–880–920 ve 960 °C sıcaklıklarında 2–4–6 ve

8 saat sürelerle katı borlama işlemi uygulamışlardır. Bor kaynağı olarak da Ekabor – 2 tozu kullanılmıştır. Borlanan numunelerde optik mikro yapı fotoğrafları çekilmiştir. Difüzyon bölgesinin de kalınlığı ve sertliği ölçülmüştür. Aynı çelik malzemeler alevle yüzey sertleştirme işlemine de tabii tutulmuştur. Elde edilen sonuçlara göre metalografik incelemeler neticesinde bor bileşiklerinin AISI 1020 numunede meydana getirdiği borür tabakasının kolonsal ve dişli yapıda olduğu, AISI 1060 çeliğinde ise tabaka karbonun fazla olmasından dolayı AISI 1020 numuneye göre daha az kolonsal ve daha az dişli yapıda olduğu, AISI 4140 numunede ise alaşım elementi oranının fazlalığından dolayı diğer iki numuneye göre kolonsal yapıdan uzak daha düz bir geometriye sahip tabaka oluştuğu görülmüştür. Ayrıca mikrosertlikler açısından incelendiğinde borlama işlemi sonrasında AISI 1020’de % 423, AISI 1060’da % 336 ve AISI 4104’da % 411’lik bir artış olduğu tespit edilmiştir (OZER ve Ay, 2011).

Er ve Par, çalışmalarında AISI 1030 ve AISI 1050 çeliğine bor kaplama işlemi uygulamış ve bu çeliklerin abrazif aşınmasını deneysel olarak araştırmışlardır. Sonuç olarak yüzey sertliklerinin ve aşınma dayanımlarının işlemsiz borlanmamış hallerine göre 8-10 kat arttığını, sade karbonlu çelik malzemelerde artan karbon miktarıyla elde edilen borür tabaka kalınlıklarını belirgin bir şekilde azalttığı buna karşılık yüzey sertlik değerlerinde ise az da olsa artışa neden olduğunu tespit etmişlerdir (Er ve Par, 2004).

Selçuk, doktora çalışmasında sementasyon ile sertleştirilerek kam mili üretiminde kullanılan AISI 5115 çeliğinin yerine, yüzeyine borlama işlemi uygulanarak sertleştirilen AISI 1020 çeliğinin kullanılabilmesi üzerine deneysel bir çalışma yapmıştır. Aşınma deneyleri kuru sürtünme ortamı şartlarında yapılmış ve deneyler için plaka disk deney düzeneği seçilmiştir. Deney sonunda aşınmış ve aşınmamış sertleştirilmiş yüzey partikülleri x-ışını analiz metoduyla incelenmiş ve beklenen faz gözlenmiştir. Yapılan deneylerin sonuçları birbirleri ile mukayese edilmiş, buna göre borlama ile sertleştirmenin semente etmeye göre daha etkili olduğu ve borlamayla yüzeyi sertleştirilen AISI 1020 çeliğinin düşük yüklerde semente edilmiş AISI 5115 çeliğinin yerine kam mili üretiminde ve diğer kullanım alanlarında kullanılabileceği sonucuna varmıştır (Selçuk, 1994).

Taşçı, bu çalışmasında borlama yapılmış çeliklerin aşınma ve korozyon dayanımları ile ilgili bir araştırma yapmıştır. Borlama yapılan demir grubu malzemelerin bazı asitlere karşı dayanıklılık kazandığını, kopma ve akma mukavemetlerinin % 10-20, yorulma dayanımının % 25 ve korozyonlu yorulma ömürlerinin ise % 200 artmasına karşılık plastisite özelliklerinin azaldığını tespit etmiştir (Taşçı, 1993).

Buytoz ve Somunkıran, yaptıkları bu çalışmalarında borlama yöntemleri ile yapılan yüzey sertleştirme işlemlerini araştırmışlardır. Bu yöntemle yapılan yüzey sertleştirme işlemi diğer yöntemler ile kıyaslandığında; malzemeye çok sert, sürtünme katsayısı düşük, yüksek sıcaklıklarda mukavemeti yüksek ve korozyona karşı dirençli bir kaplama yüzeyi elde edileceğinden endüstride geniş bir kullanım alanı bulunduğu belirtilmiştir (Buytoz ve Somunkıran, 2005).

Gül, yaptığı çalışmasında ferritik-perlitik küresel grafitli dökme demir malzemenin adhesif aşınma direnci üzerine borlama ısıl işleminin etkilerini araştırmıştır. Borlama ısıl işlemi, 960 °C’de 6 saat Ekabor 2 borlama tozu ile gerçekleştirilmiştir. Adhesif aşınma testleri ise disk üzerinde pim tipi aşınma cihazında ve 60 N yük altında 1 m/sn kayma hızında 3600 m, 7200 m, 10800 m ve 21600 m kayma mesafesinde gerçekleştirilmiştir. Adhesif aşınma test sonuçlarına göre borlanmış küresel grafitli dökme demirin adhesif aşınmadaki direncinin, dökülmüş haldeki ferritik-perlitik küresel grafitli dökme demir malzemesine göre 50 kat daha yüksek olduğunu tespit etmiştir (Gül, 2010).

5. MATERYAL ve METOT

Bu çalışmada 4 zamanlı tek silindirli 6LD 400 model Lombardini marka dizel dizel motorunun krank mili ve kam mili, üretici firmadan sıfır olarak temin edilmiştir. Volan ise; 4 silindirli bir motor motorun üretici firmasından sıfır olarak temin edilmiştir. Krank mili ve kam milinin herhangi bir bölgesi değil, muyluları kesilerek kaplama işlemi gerçekleştirilmiştir. Muyluların kesilme nedeni motorun ilk çalışması esnasında krank ve kam milinin yağsız çalışma gerçekleştirmesidir. Yağsız çalışmayla metal-metal sürtünmesi meydana gelmekte ve bu sürtünme muylularda gerçekleştiği için muylular millerden kesilerek alınmıştır.

Muylular ve volandan alınan kesit kutu borlama yöntemi ile kaplanmıştır. Kaplama işlemi Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesindeki Fizik laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Borlama yöntemi olarak kutu borlama yöntemi tercih edilmiştir. Kutu borlama yönteminin tercih edilmesinin başlıca nedenleri; diğer borlama yöntemlerine göre daha kolay, daha ekonomik, kimyasal kompozisyonunda değişiklik yapılabilmesi ve daha basit donanım gerektirmesidir. Kaplamada malzeme olarak Ekabor-2 tozu ve örtü malzeme olarak Ekrit kullanılmıştır. Ekabor-2 tozunun seçilmesindeki temel neden ise çok iyi kalitede yüzey elde edilip, malzemelerin kolay temizlenebilmesidir. Kaplama, yaklaşık 150 mikron kalınlıkta yapılmış olup, malzemelerin; aşınma, sürtünme, yüksek sıcaklık ve korozyon gibi negatif etkenlerden korunması amaçlanmıştır. Kaplama yöntemi olan kutu borlama yöntemi, metallerin aşınma ve ısı iletim direnci yüksek, sürtünme katsayısı düşük, yüksek basınç ve korozyona karşı dayanıklı hale getirilmesinde yaygın olarak kullanılan bir kaplama yöntemidir. Bu yöntemle gerçekleştirilen kaplama sayesinde belirtilen özellikler elde edildiği gibi, kaplama işlemi ana malzemeye nüfuz ederek ana malzemenin yapısını da korumaktadır. Böylece kutu borlama yöntemi, metallere üstün özellikleriyle yüksek servis ömrü kazandırmaktadır.

İlk aşama olarak numunelerin yüzeyleri hassas kesme cihazı ile yüzeyleri düzgün bir şekilde her numuneden, her bir deney için ayrı ayrı 2'ser adet kesilmiş ve kaplanmaları için hazır hale getirilmiştir. 2 adet kesilmesinin nedeni kaplanmış ve kaplanmamış numunelerin kıyaslanabilmesidir.

İkinci aşamada kaplanmış ve kaplanmamış numunelerin yüzey özelliklerinin incelenmesi amacıyla metalografik işlemlere tabii tutulmuştur. Bu amaçla numuneler;

Optik mikroskop, SEM (Scanning Electron Microscopy), EDAX (Energy Dispersive Spectrography), XRD analizlerine tabii tutulmuştur.

Üçüncü aşamada numunelerin mikrosertlik değerleri ölçülmüştür. Daha sonra numuneler aşınma, korozyon, spektrometre analizi ve TGA (Thermal Gravimetre Analysis) deneylerine tabii tutulmuş ve bu deneylerdeki davranışları belirlenmiştir.

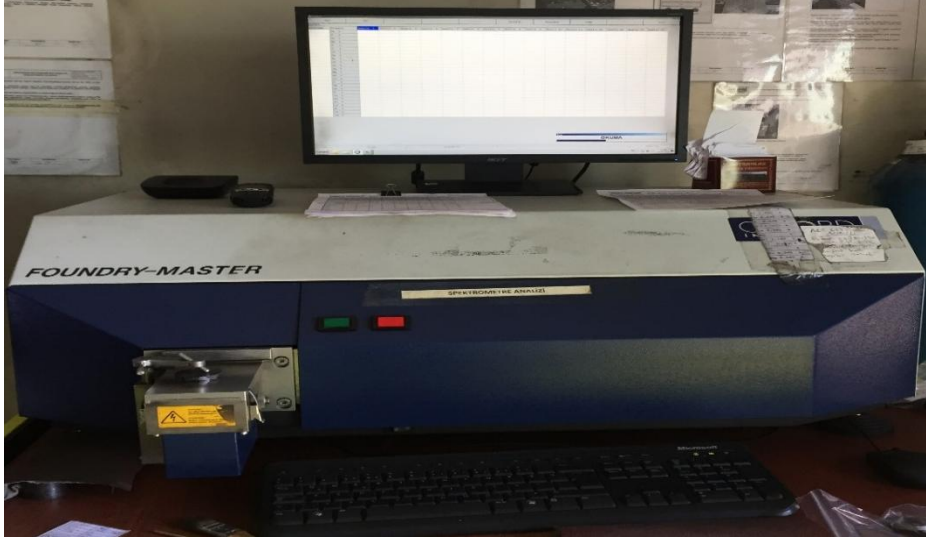
Bu işlemler neticesinde aşağıdakiler amaçlanmıştır;

- Volan, krank ve kam mili üzerinde korozyona karşı bir tabaka oluşturmak,
- Kaplama işlemiyle motorda meydana gelen sarsıntı miktarını azaltmak,
- Motorun zorlu çalışma şartlarında motor parçalarının yüzeyini her türlü deformasyon ve aşınmaya karşı koruyan mukavemetli ve aynı zamanda sürtünme katsayısı düşük bir yüzey elde etmek,
- Kaplanan numunelere adyabatik bir özellik kazandırmak,
- Servis ömürlerini arttırarak milli ve bireysel ekonomiye katkıda bulunmak,
- Ayrıca dünya rezervleri bakımından ülkemizde yüksek bir oranda bulunan bor elementinin otomotiv endüstrisinde kullanılma alanını genişletmek hedeflenmektedir.

Yukarıda bahsedilen çalışmaların detayları aşağıda anlatılmaktadır.

5.1. Spektrometre Analiz Cihazı

Ana malzemelerimizde bulunan elementlerin tayini için spektrometre analizi yapılmıştır. Spektrometre analizi ile krank mili, kam mili ve volanda bulunan elementler belirlenmiştir. Bu analiz Elazığ ilindeki Organize Sanayii bölgesinde özel bir döküm firmasında yaptırılmıştır. Spektrometre analizinde FOUNDRY MASTER marka cihaz kullanılmıştır.



Şekil 5.1. Spektrometre analiz cihazı

5.2. Kaplama İşlemi

Kaplama için kutu borlama yöntemi ve borlayıcı malzeme olarak Ekabor-2 tercih edilmiştir. Bu yöntemin tercih edilmesinin nedeni hem borlama işleminin kolay ve ekonomik olmasıdır. Borlayıcı malzeme olan Ekabor-2'nin tercih edilme nedeni ise malzemeye çok iyi nüfuz ederek malzemeye tutunabilmesi ve daha pürüzsüz bir yüzey elde edilebilmesidir.

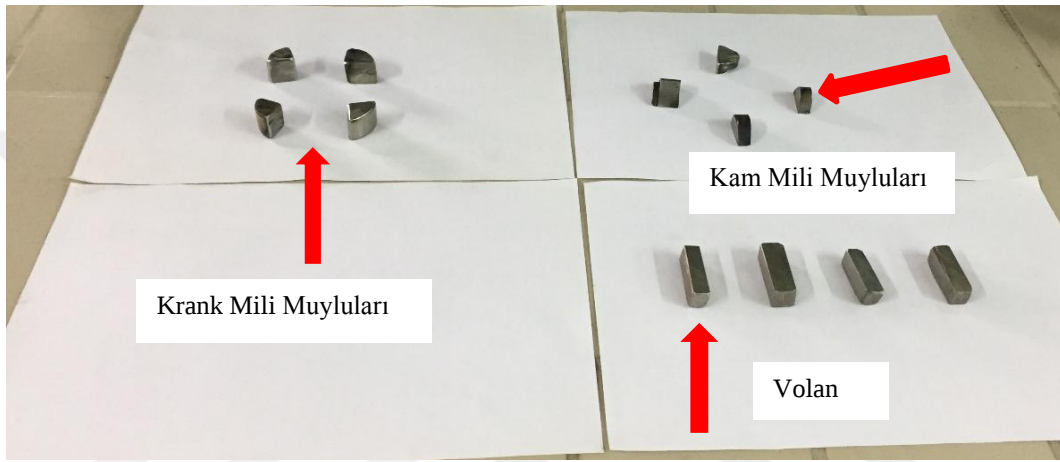
Deneyler için borlama elemanı olarak ticari Ekabor-2 tozu ve deoksidan malzeme olarak da Ekrit kullanılmıştır. Ekabor-2 bor bileşiği ve Ekrit tozu Almanya BORTEC firması ürünü olup Türkiye'de Manisa'da bulunan VEZNELİ A.Ş. firmasından tedarik edilmiştir.

Borlama işlemi PROTHERM marka PID kontrollü fırında gerçekleştirilmiştir. Fırın içi sıcaklık dijital olarak kontrol edilebilmekte ve 1600 °C'ye kadar çıkabilmektedir.

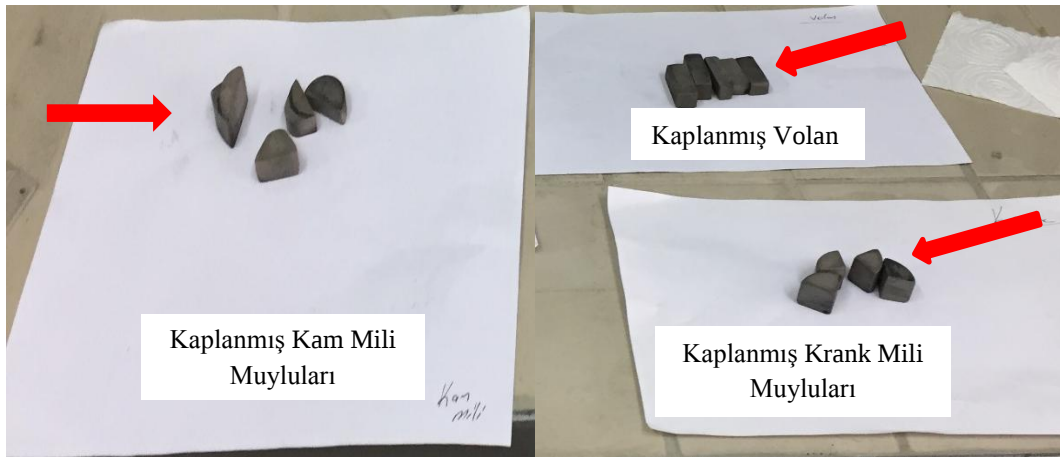
Kutu borlama yönteminin gerçekleştirilmesi için önce 150x150x150 mm³ ölçülerinde paslanmaz çelik bir kutu hazırlanmıştır. Daha sonra numuneler 20x15 mm² ölçülerine kadar hassas kesilmiştir. Kutu içerisine numuneler yerleştirilmiş, hacmi boyunca Ekabor-2 tozu ile doldurulmuştur. Örtü malzeme olarak ekrit kullanılmıştır. Fırın sıcaklığı 950 °C sıcaklığa kademeli olarak ayarlanmıştır. 4 saat boyunca bu sıcaklıkta yaklaşık 150 mikron kalınlığında kaplama işlemi yapılmıştır. Sonra açık hava ile soğutma işlemine geçilmiştir. Kutu borlama yönteminde kullandığımız parametreler Tablo 5.1.'de gösterilmiştir. Borlama işlemine ait görüntüler Şekil 5.2. 5.3. 5.4.ve 5.5.' de gösterilmiştir.

Tablo 5.1. Kutu borlama yönteminde kullandığımız parametreler

Parametreler	
Kaplama Yönteminin Adı	Kutu Borlama Yöntemi
Kaplama Kalınlığı (Mikron)	150 Mikron
Kaplama Süresi	4 saat
Kaplama İçin Hazırlanan Kutu Ölçüleri	150x150x150 mm ³
Kaplamada Fırın Sıcaklığı	950 °C
Kaplamada Kullanılan Toz	Ekabor 2
Kaplama Örtü Malzemesi	Ekrit



Şekil 5.2. Borlama öncesi hazırlanan numuneler



Şekil 5.3. Borlama sonrası numuneler



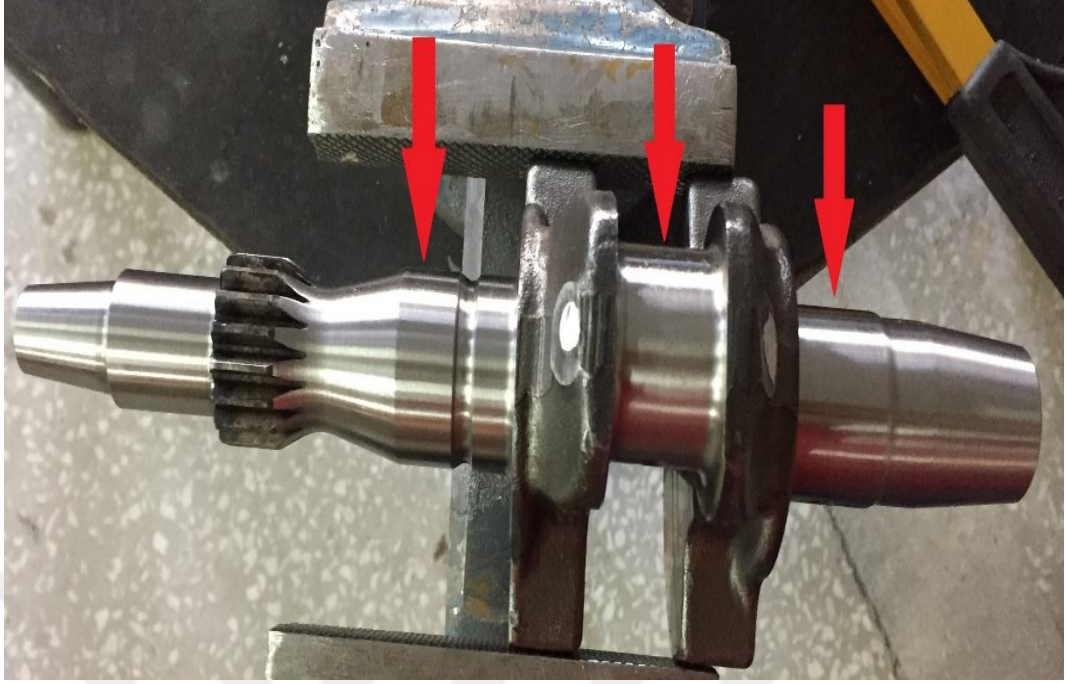
Şekil 5.4. Kutu borlama yöntemindeki hazırlık süreci



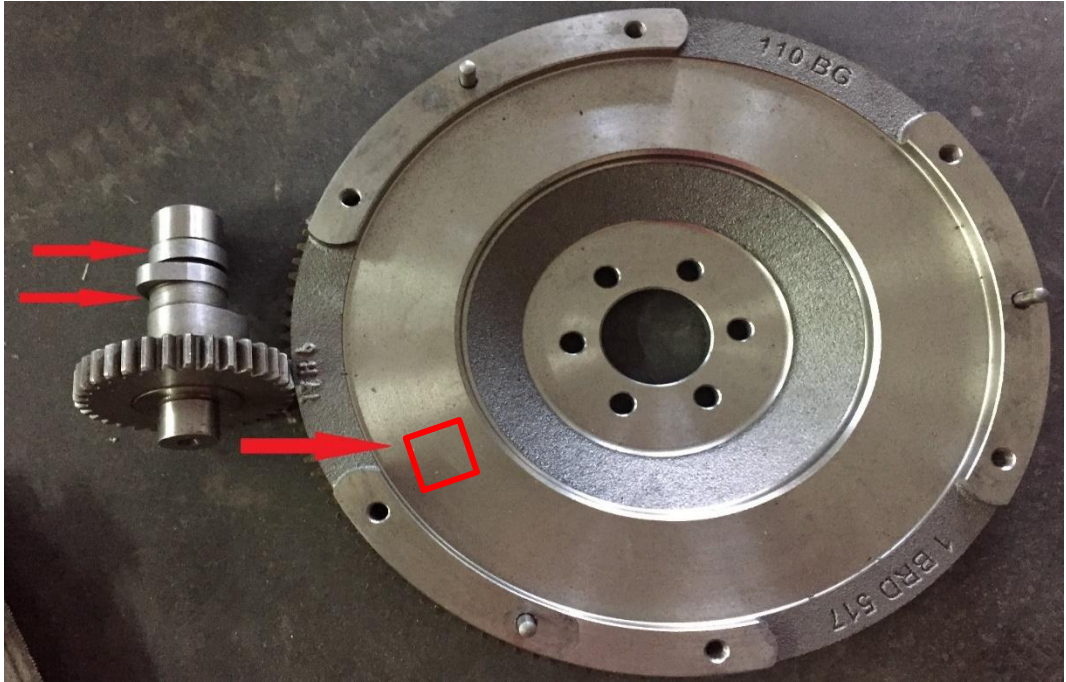
Şekil 5.5. Kutu borlama işleminin öncesi ve sonrası

5.3. Deneyde Kullanılan Numuneler

Krank mili, kam mili ve volan malzemelerinden alınan parçalar aşağıdaki şekillerde gösterilmiştir.



Şekil 5.6. Krank mili ve kullanılan muylular görülmektedir.



Şekil 5.7. Kam mili ve Volandan alınan muylular ve kesit görülmektedir.

5.4. Metalografik İncelemeler

5.4.1. Hassas Kesme-Parlatma Cihazı

Demir testeresi ile kaba kesilen numuneler önce hassas kesme işlemine STRUERS Labotom-5 marka kesme cihazı ile tabii tutulmuş ve bakalite alınabilecek küçük numuneler haline getirilmiştir.



Şekil 5.8. Hassas kesme cihazı

Kesme işlemiyle numuneler 8 mm x 5 mm boyutlarına getirilmiştir. Boyutları küçülen numuneler zımparalama işlemi için sıcak bakalite alınmıştır. Sıcak bakalit işleminde STRUERS CitoPress-1 marka cihaz kullanılmıştır.



Şekil 5.9. Sıcak bakalite alma işleminde kullanılan cihaz

Sıcak bakalite alınan numuneler zımparalama işlemine tabii tutulmuştur. Zımparalama işlemi STRUERS LoboPol-1 marka cihaz ve parlatma işlemi STRUERS Dap7 marka cihaz ile yapılmıştır. Numuneler sırasıyla 60-120-240-400-600-800-1000 ve 1200 grid ölçülerdeki zımpara kağıtlarıyla zımparalama işlemine tabii tutulmuştur. Bu işlem esnasında cihaz 200 devir/dk hızla çalışmaktadır. Zımparalama işlemi sonunda alkol ile yıkanan numuneler saç kurutma makinesi ile kurutularak oksitlenmesi engellenmiştir. Kurutulan numuneler 3 µm'lik elmas süspansiyon kullanılarak çuhalanmıştır. Çuhalama işleminden hemen sonra numuneler su ile yıkanarak alkol banyosuna yatırılmış ve kurutulmuştur. Bu işlemlerin ardından dağlama işlemi için % 2 HNO₃+%98 alkol (nital) çözeltisi hazırlanmıştır. Dağlama işlemi için 10'ar saniye çözeltide bekletilen numuneler daha sonra alkol ile yıkanıp kurutulmuştur.

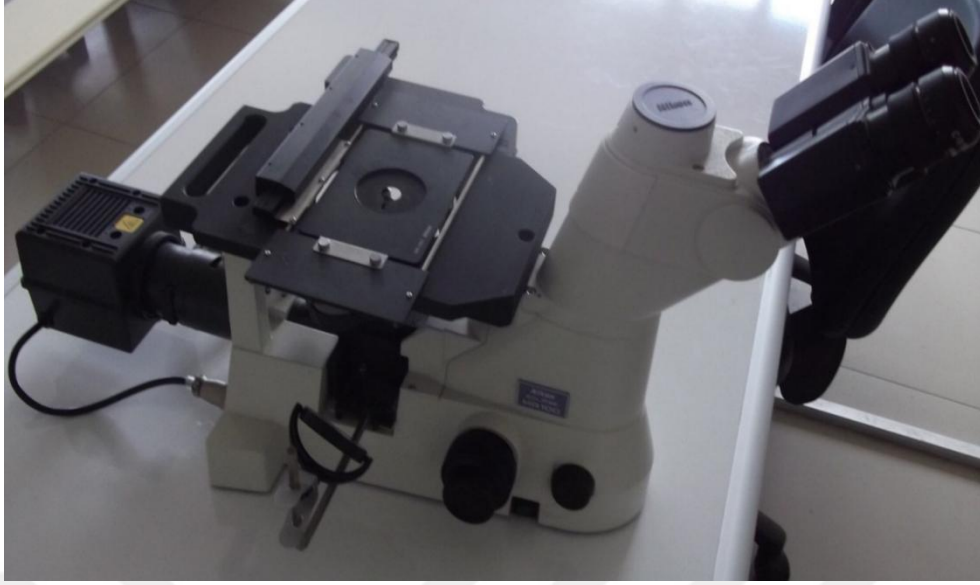


Şekil 5.10. Zımparalama işleminde kullanılan cihaz



Şekil 5.11. Parlatma (Çuhalama) işleminde kullanılan cihaz

Bu işlemlerin ardından makro inceleme işlemine geçilmiş NIKON Eclipse MA/100 marka cihazda numuneler incelenmiştir.



Şekil 5.12. Makro ölçümlerin alındığı cihaz

5.4.2. Optik Mikroskop Ölçüm Cihazı

Makro incelemelerin ardından mikro incelemelere geçilmiştir. Optik mikroskop incelemeleri NİKON Eclipse MA/200 marka cihazda gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.13. Optik ölçümlerin alındığı optik mikroskop cihazı

5.4.3. Mikrosertlik Analiz Cihazı

Kaplanmış ve kaplanmamış numunelerin ayrı ayrı mikrosertlikleri alınmıştır. 2 adet kaplama tabakasından 2 adet geçiş bölgesinden ve 2 adet ana malzemeden mikrosertlikler alınmıştır. Mikrosertlik ölçümleri EMCOTEST Durascan G5 cihazı ile yapılmıştır.

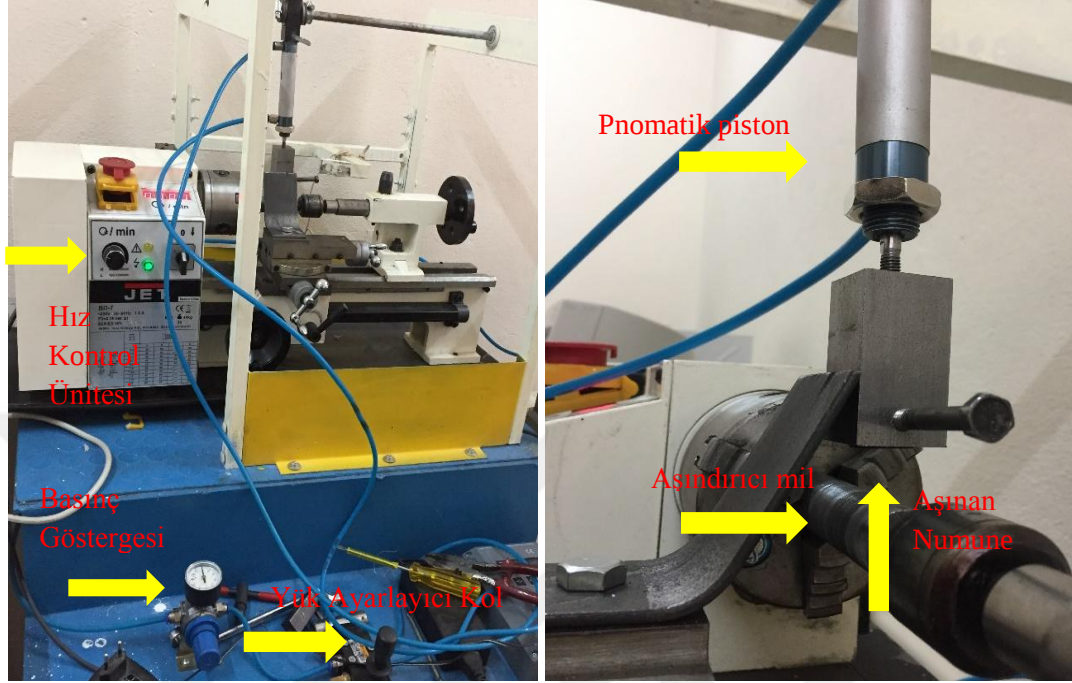


Şekil 5.14. Mikrosertlik ölçümlerinin alındığı cihaz

5.4.4. Aşınma Analiz Cihazı

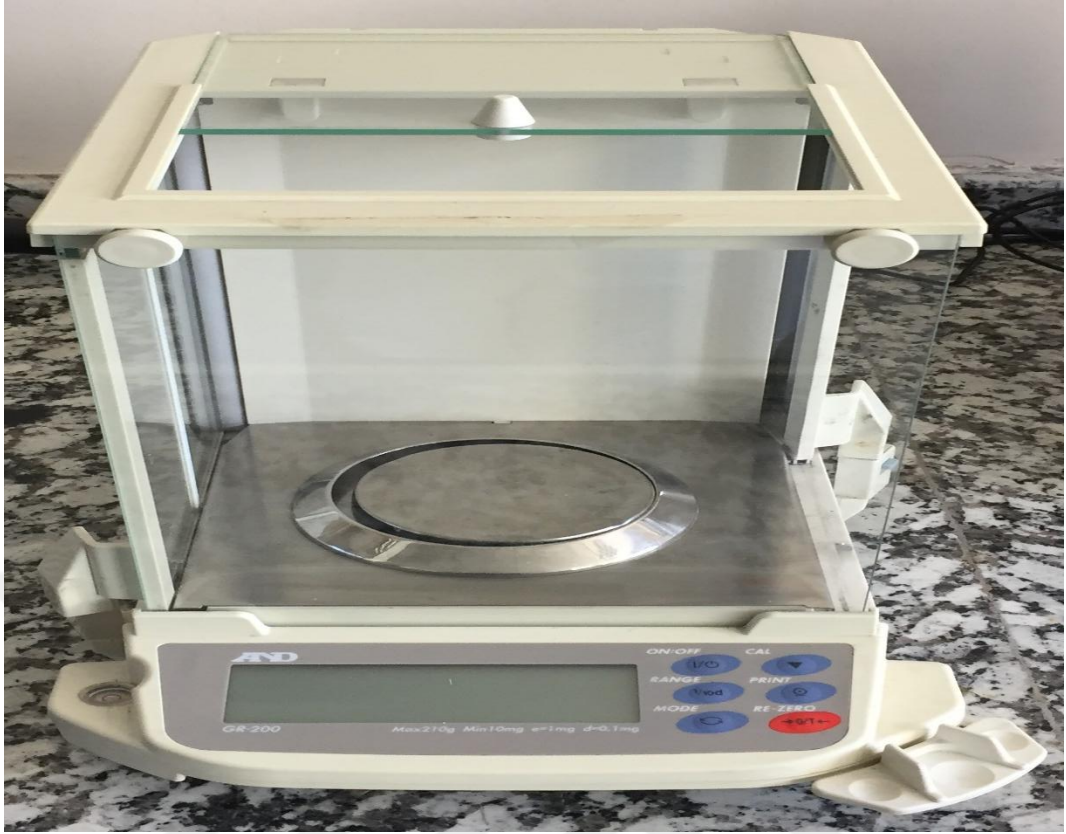
Numunelerdeki adhesiv aşınma deneyi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Kuru pnomatik JET Marka Bd-7 model aşınma test cihazı kullanılmıştır. Malzemeler kaplanmamış ve kaplanmış olarak ayrılmış, her bir malzeme ayrı ayrı aşınma deneyine tabii tutulmuştur. Aşındırıcı mil olarak düşük karbonlu düşük alaşımlı çelik Ø 30 x 80 mm uzunluğunda çelik miller hazırlanmıştır. Her numuneden sonra millerin farklı yüzeyleri aşındırıcı olarak kullanılmıştır. Deneyde yükler manuel bir piston ile sağlanmaktadır. Pistona gerekli kuvveti kompresör sağlamaktadır.

Her bir numune için 10 N, 20 N ve 30 N’luk yükler belirlenmiştir. Aşındırıcı mil için dönme hızı 250 d/dk seçilmiştir.



Şekil 5.15. Adhesiv aşınmada kullanılan cihaz

Kütle kaybını ölçmek için yine Metalurji ve Malzeme laboratuvarında 0,0001 gram hassasiyetinde AND marka GR-200 model terazi kullanılmıştır. Her bir numune için bir yükte toplam kayma mesafesi 1000 metre olup her 100 metrede numuneler sökülerek kütle kayıpları ölçülmüştür.



Şekil 5.16. Numunelerin tartıldığı hassas terazi cihazı

5.4.5. SEM ve EDS Analiz Cihazı

Kaplanmış ve kaplanmamış numunelerin SEM (Scanning Elektron Microscopy) ve EDS (Energy Dispersive Spectrograf) analizi Fırat Üniversitesi MERLAB’da bulunan ZEISS marka EVO MA/10 model görüntüleme cihazında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.17. SEM ve EDS görüntüleme cihazı

5.4.6. XRD Analiz Cihazı

Kaplanmış ve kaplanmamış numunelerin X-Ray Diffraction analizi Fırat Üniversitesi MERLAB’da bulunan BRUKER marka D8 ADVANCE model cihazda gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.18. XRD cihazı

5.4.7. TG Analiz Cihazı

Kaplanmış ve kaplanmamış numunelerin TGA (Termal Gravimetrik Analizi) Fırat Üniversitesi Fizik Laboratuvarında bulunan PerkinElmer marka s2 model cihaz ile yapılmıştır.



Şekil 5.19. TGA cihazı

Deney için numuneler önce $10 \times 10 \times 10 \text{ mm}^3$ ölçülerine kadar DREMEL 200 cihazı ile küçültülmüştür. Daha sonra kaplanmış ve kaplanmamış numuneler sırası ile cihaza yerleştirilmiş ve 50°C başlangıç sıcaklığında, $30^\circ\text{C}/\text{dk}$ artırılarak 1000°C sıcaklığa kadar ısıtılmıştır. Daha sonra cihaz soğumaya bırakılmıştır. Elde edilen diyagramlar ile numunelerin oksitlenme dirençleri kayıt altına alınmıştır.



Şekil 5.20. Mikro kesme cihazı

5.4.8. Korozyon Analiz Cihazı

Kaplanmış ve kaplanmamış numunelere ait korozyon deneyi, Bingöl Üniversitesi Kimya Bölümü Laboratuvarında bulunan korozyon test cihazında yapılmıştır. Korozyon deneyinde elektrokimyasal impedans spektroskopisi tekniği kullanılmıştır. Bu yöntemin avantajı malzemenin yüzey yapısını bozmadan korozyon hızını ölçebilmesidir. 20x20x20 mm³ ölçülerine getirilen numuneler 1'er saat % 3,5'lik NaCl (sulu) çözeltisinde bekletilmiştir. Korozyon direncini belirleyebilmek için ölçümler açık devre potansiyelinde yapılmaktadır. Ölçüm sonuçlarında elde edilen nyquist diyagramlarının çapı yaklaşık korozyon direncini belirlemektedir. Daha sonra elde edilen nyquist diyagramları aracılığı ile numunelerin korozyona karşı dirençleri belirlenmiştir.



Şekil 5.21. Korozyon Test Cihazı

6. DENEYSEL SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Krank mili, kam mili ve volandan alınan kesitler önce içeriklerindeki kimyasal kompozisyonların tayini için spektrometre analizine tabii tutulmuştur. Daha sonra katı ortam borlama yöntemi ile kaplama işlemi yapılmış ve sırasıyla 60-120-240-400-600-800-1000 ve 1200 grid ölçülerdeki zımpara kağıtlarıyla zımparalama ve 3µm'luk parlatma işlemine tabii tutulmuştur. Bu işlemlerin sonrasında % 2 nital çözeltisiyle dağlama yapıldıktan sonra kıyaslanmak yapılmak üzere kaplama tabakası ve kaplanmamış numunelerde aynı yüzeylerdeki bölgelerden görüntüleme ölçümleri (Optik Mikroskop, SEM, EDAX, XRD) yapılmıştır. Görüntüleme işlemlerinden sonra aşınma test cihazında numuneler aşınmaya tabii tutulmuş ve kütle kayıpları ölçülmüştür. Daha sonra numunelerin oksidasyon dirençlerini belirlemek için TGA deneyi yapılmıştır. Son olarak korozyon deneyleri yapılmış olup değerler kayıt altına alınmış ve sonuçlar mukayese edilmiştir.

Ayrıca aşınma deneyinde aşındırıcı malzeme olarak Ø 30 mm x 80 mm ölçülerinde düşük karbonlu düşük alaşımlı çelik silindirik miller kullanılmıştır. Bu millerin malzeme bileşimleri Tablo 6.1'de görülmektedir.

Tablo 6.1. Aşındırıcı millerin kimyasal bileşimi

Malzeme	% C	% Si	% Mn	% P	% S>	% Cr	% Mo	% Ni
Aşındırıcı Mil	Ort.0,116	0,151	0,679	0,0154	0,0403	0,0237	0,0063	0,0516
	0,129	0,147	0,656	0,0147	0,0434	0,0256	0,0068	0,0480

6.1. Krank Mili Analiz Sonuçları

6.1.1. Krank Mili Spektrometre Analiz Sonuçları

Krank mili muylusundan alınan kesit spektrometre analizine tabii tutulmuştur. Malzeme bileşimleri aşağıda verilmiştir.

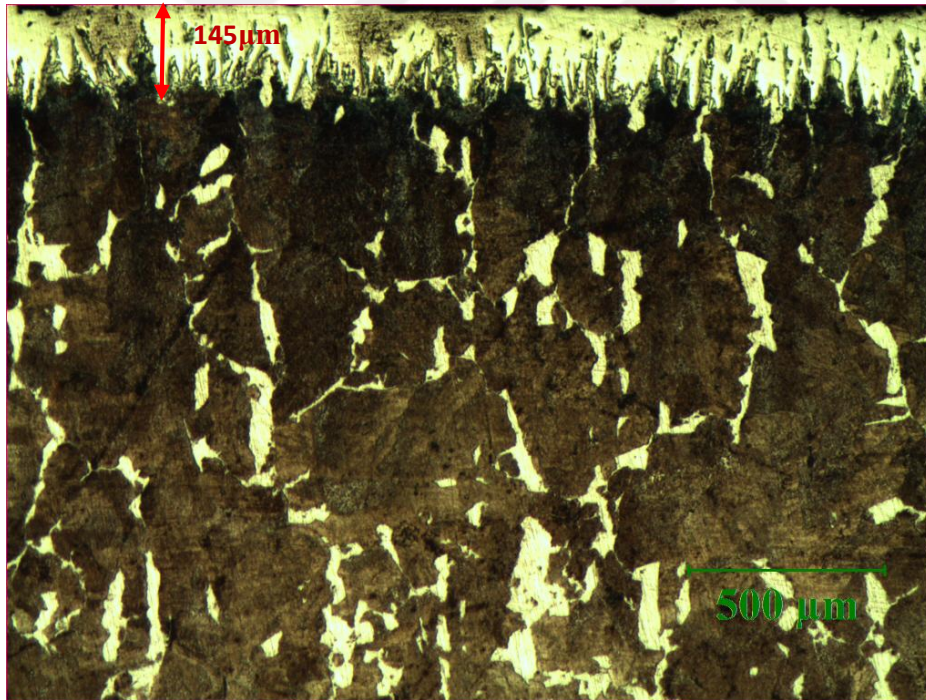
Tablo 6.2. Krank mili muylusu kimyasal bileşimi

Malzeme	% C>	% Si	% Mn	% P	% S	% Cr	% Mo	% Ni
Krank Mili Muylusu	Ort.0,70	0,205	0,948	0,0220	0,0310	0,0297	0,0086	0,0095
	0,75	0,214	0,943	0,0242	0,0491	0,0304	0,0103	0,0096

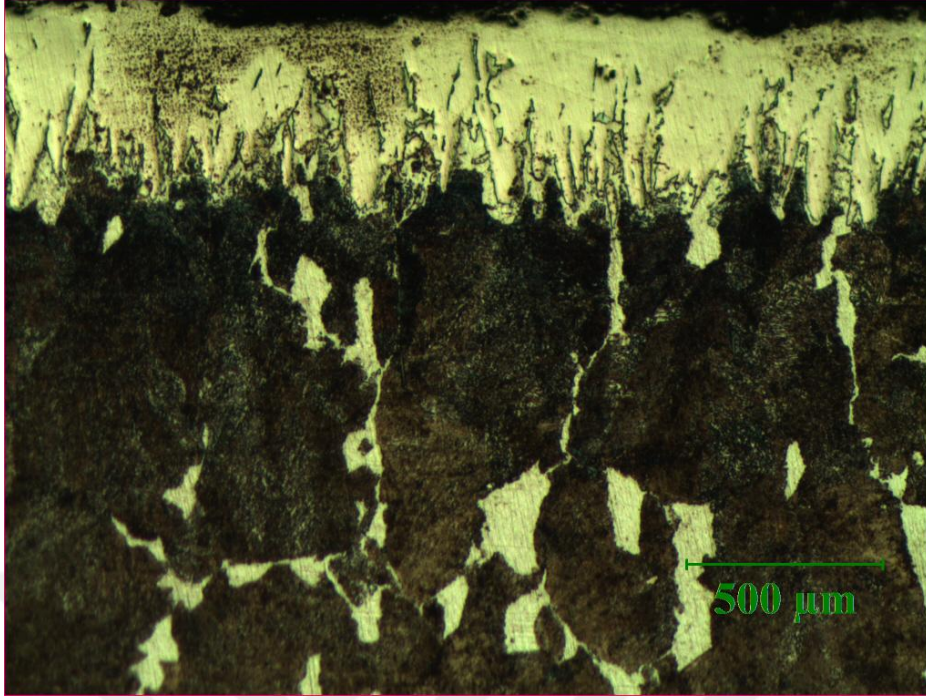
Sonuçlara göre C-Mn-Cr-Mo-Ni oranı dikkat çekmektedir. Malzemedeki kalan miktar Fe elementidir. Bu kimyasal bileşim sonuçlarına göre krank mili muylusu için yüksek karbonlu düşük alaşımlı çelik malzeme olduğu görölmektedir.

6.1.2. Krank Mili Optik Mikroskop Sonuçları

Krank mili muylusu 950 °C sıcaklıkta 4 saat süreyle borlama işleme tabii tutulmuştur. Borlama işleminin sonucu optik mikroskopta kaplama tabakası geçiş bölgesi ve ana tabaka incelenmiştir. Bu görüntüler aşağıda şekil 6.1 ve şekil 6.2’de görölmektedir.



şekil 6.1. Borlama işleminin sonucunda krank mili muylusu optik görüntüsü (50x)



Şekil 6.2. Borlama işlemi sonucunda krank mili muylusu optik görüntüsü (100x)

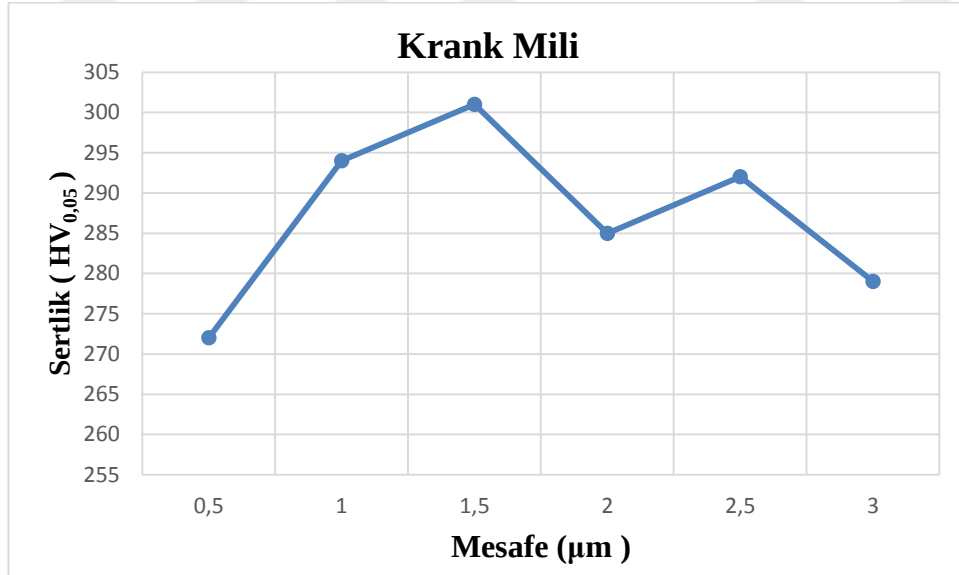
Optik resimlerinden de anlaşılabileceği gibi kaplama tabakası geçiş bölgesi ve ana yapı net bir şekilde görülmektedir. 50x görüntüdeki borlama tabakasındaki kaplama işleminde oluşan fazın maksimum derinliği 145 μm olarak ölçülmüştür. Krank mili yüksek karbonlu düşük alaşımlı ötektit altı beyaz fazı fazla olan bir çelik görünümündedir. Borür tabakasında ise çift fazlı FeB ve Fe₂B fazları görülmektedir. Bu çift fazlı yapı literatürle uyumludur (Sinha, 1991). Optik resimlerde görünen ana yapı ise ferrit+perlit şeklindedir. Siyah bölgelerin çok olması dikkat çekmektedir. Bu bölgelerin fazla olmasının nedeni alaşım elementlerinin kimyasal kompozisyondaki yüzdesel varlığı olarak düşünülmektedir. Krank mili yüksek alaşımlı bir çelik ve karbon oranı yüksek olduğundan dolayı tüm parametrelerinde oluşan borür tabakası çift fazlı (FeB, Fe₂B) veya FeB, Fe₂B şeklindedir.

Borür tabakasındaki kolonsal yapı düşük karbonlu ve alaşımlı çeliklere oranla uçlara doğru daha ince ancak uçlar daha yuvarlak ve dişlerin gövdeleri daha kalın olduğu görülmektedir. Benzer sonuçlar diğer çalışmalarda da elde edilmiştir (ÖZER ve Ay, 2011).

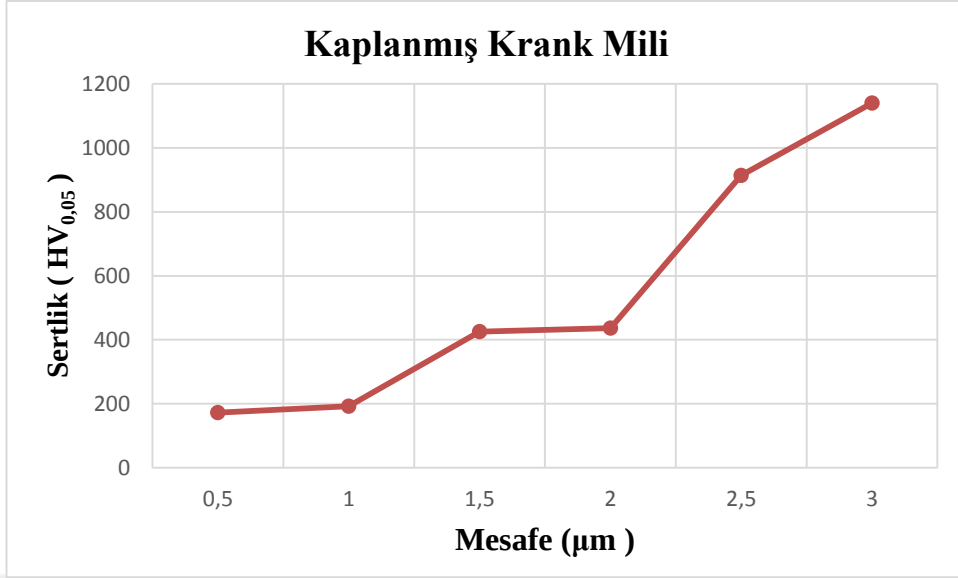
6.1.3. Krank Mili Mikro-Sertlik Sonuçları

Kaplanmış ve kaplanmamış numunelerin mikro-sertlik ölçümleri $HV_{0,05}$ yük altında ve 0,5 mm aralıklarla yapılmıştır. Numunelerin değişen şartlar karşısında sertlik değerleri gözlemlenmiştir. Kaplanmış ve kaplanmamış bölgelerden 1'er adet numune alınarak mikro-sertlik değerleri incelenmiş ve grafikler oluşturulmuştur. Grafikler oluşturulurken borlanmış numunelerde ana tabaka, geçiş bölgesi ve kaplama bölgesinden 2'şer adet mikrosertlik alınmıştır. Kaplama yapılan numunelerde oluşan FeB ve Fe₂B gibi stabil tabakalar sertlik artışını yükseltmiştir. Mikrosertlik analizinde tarama yaparken Vickers bazı zamanlarda karbürlü bölgelere denk gelinmiştir. Bu karbürlere ucun bastırılması sonucu sertlikte ani artışlar görülebilmektedir. Bu nedenle karbürler dikkate alınarak yeniden sertlikler alınmıştır. Aşağıda motor elemanlarının kaplanmış ve kaplanmamış olarak kıyaslanmış mikro-sertlikleri görülmektedir.

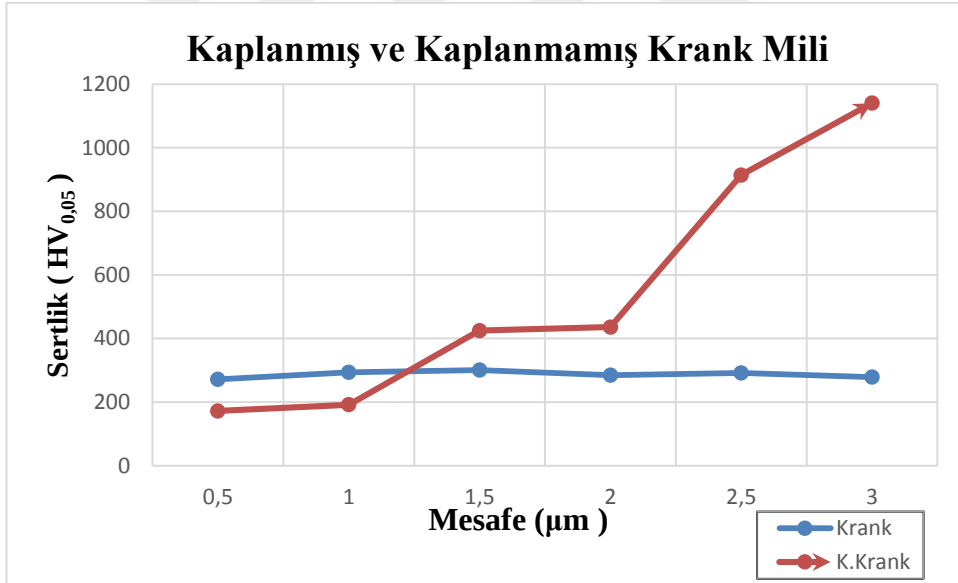
Şekil 6.3'de borlama işlemi yapılmamış krank mili muylusu, Şekil 6.4'de borlama yapılmış krank mili muylusunun ve Şekil 6.5'de her iki işlemin mikro-sertlik grafik değerleri görülmektedir.



Şekil 6.3. Kaplanmamış krank mili muylusu ana tabaka mikro-sertlik değerleri



Şekil 6.4. Kaplanmış krank mili muylusu ana tabaka-geçiş bölgesi ve kaplama tabakası mikro-sertlik değerleri



Şekil 6.5. Kaplanmış ve kaplanmamış krank mili muylusu mikro-sertlik değerleri

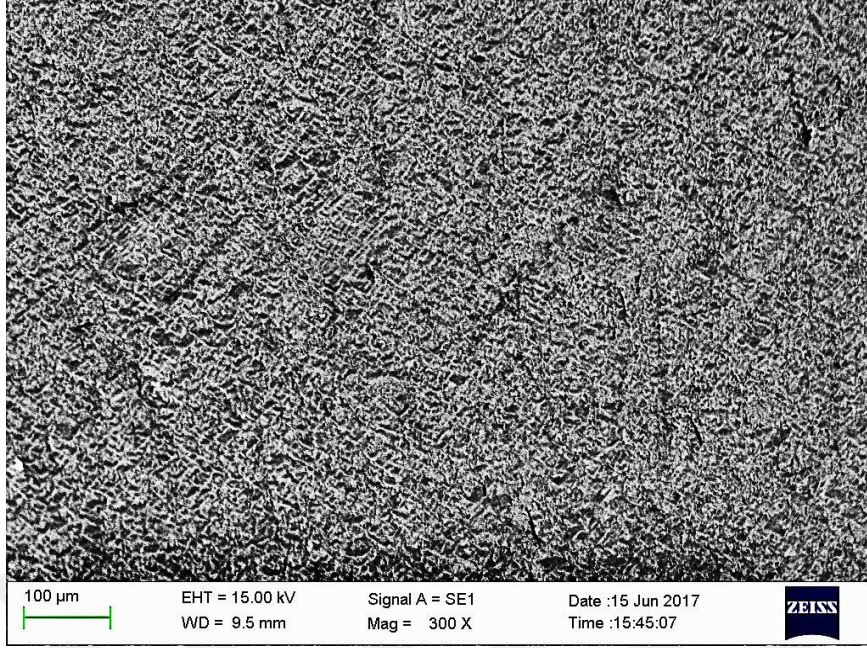
Şekil 6.3'de kaplanmamış krank mili muylusunun mikro-sertlik değerleri görülmektedir. Değerlerden de anlaşılabileceği gibi kaplanmamış krank mili muylusundaki ana tabakanın sertlikleri 272 ile 301 HV değerleri arasındadır. Literatür incelendiğinde yüksek karbonlu ötektoid altı bir çelikte HV₁ için benzer sonuçlar görülmüştür (Güler ve Özcan, 2014).

Şekil 6.4’de kaplanmış krank mili muylusunun ana tabaka-geçiş bölgesi ve kaplama yani borür tabakasından alınan mikro sertlik değerleri görülmektedir. Değerlerden de anlaşılacağı gibi en düşük sertlik 172 HV en yüksek sertlik ise 1140 HV olarak ölçülmüştür. Ana tabaka sertlikleri geçiş bölgesine doğru artmaktadır. Geçiş bölgesindeki sertlik değerleri kaplanmamış krank mili ana tabakasındaki sertliklere göre biraz fazladır. Kaplama tabakasına doğru gidildikçe borür tabakasının sertliği ön plana çıkmaktadır. En yüksek sertlik değerleri borür tabakasında görülmektedir (1140 HV).

Şekil 6.5’de ise kaplanmış ve kaplanmamış krank mili muyluları kıyaslanmıştır. Kaplanmış ve kaplanmamış krank mili numuneleri sertlikleri kıyaslandığında yaklaşık 6,7 katlık bir artışın borlamayla elde edildiği gözlenmiştir. Kaplanmış krank mili muylusunda borür tabakasından geçiş bölgesine geçiş bölgesinden de ana tabakaya doğru değerler alınmıştır. Bu değerlerin ana tabakaya doğru gidildikçe düştüğü görülmüştür. (Delikanlı, vd. 2003) yaptıkları çalışmada sade karbonlu bir çeliğin borlama özelliklerini incelemiş, HV_{0,1} sertlikte bor tabakası, geçiş bölgesi ve ana tabaka için yakın sonuçlar elde etmişlerdir. Bu sonuçlara bakıldığında borlama sonucu krank mili muylusundaki sonuçların literatür ile uyumluluğu göze çarpmaktadır.

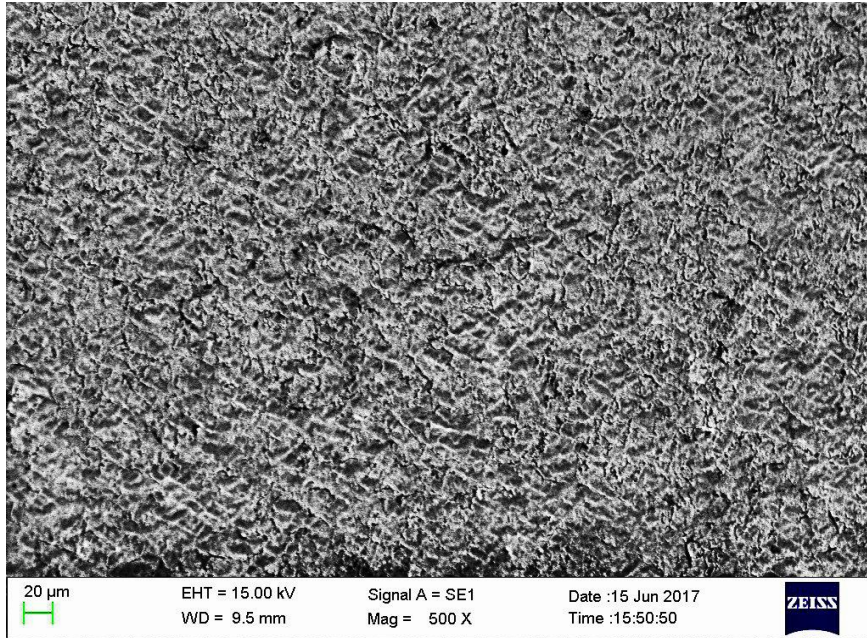
6.1.4. Krank Mili Muylusunun SEM Görüntüleri

Aşağıdaki Şekil 6.6’da kaplanmamış krank mili muylusunun 300x büyütmedeki SEM görüntüsü görülmektedir.



Şekil 6.6. Kaplanmamış krank mili muylusunun 300x büyütmedeki SEM görüntüsü

Şekil 6.7’ de kaplanmamış krank mili muylusunun 500x büyütmedeki SEM görüntüsü görülmektedir.

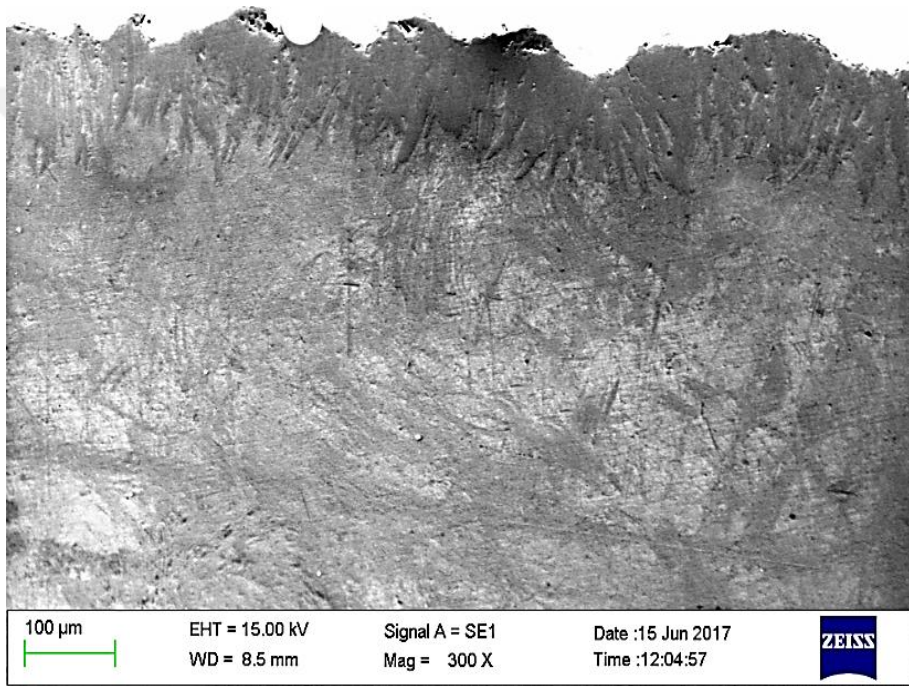


Şekil 6.7. Kaplanmamış krank mili muylusunun 500x büyütmedeki SEM görüntüsü

Şekil 6.6 ve Şekil 6.7’deki görüntülerde krank mili muylusunun herhangi bir kaplama işlemi yapılmamış 300x ve 500x görüntüleri görülmektedir. Krank mili

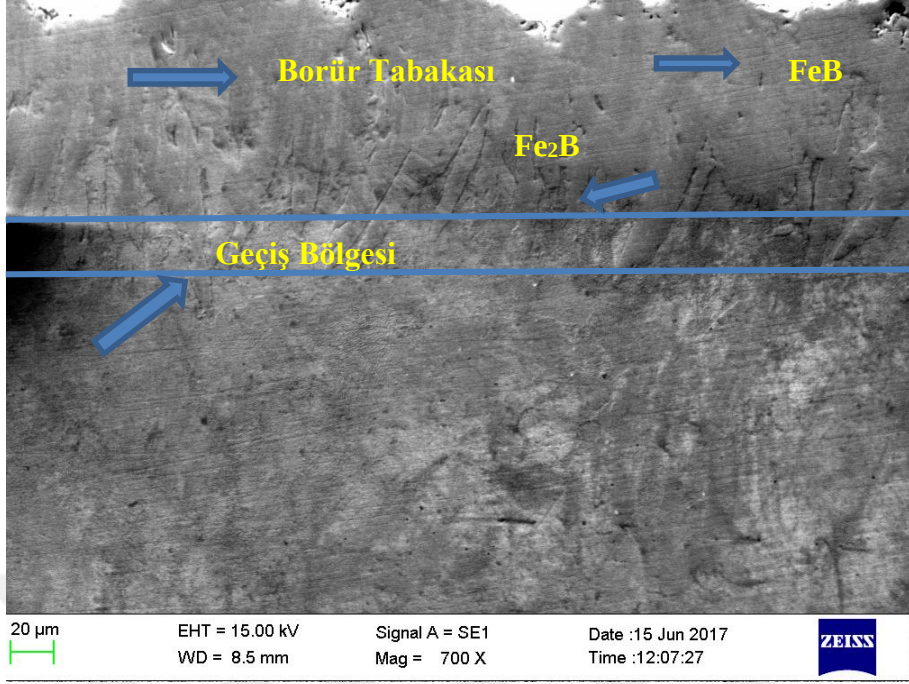
muylularının üretimi esnasında belirli bir derinliğe kadar yüzeyleri sertleştirildiği için bu sertleştirme işlemi esnasında ana yapıda bir sıkışma meydana geldiği düşünülmektedir. Bu işlemle beraber ana yapıda da üst üste binmiş, sıkı bir yapı izlenimi görülmektedir. Kaplanamamış krank mili muylusunda EDAX analiz sonucunda bu yapı için hakim elementler Fe, Mn, C ve düşük oranda Si elementidir. Bu elementler EDAX analizinde daha detaylı bir şekilde anlatılmıştır.

Şekil 6.8’de kaplanmış krank mili muylusunun 300x büyütmedeki SEM görüntüsü görülmektedir.



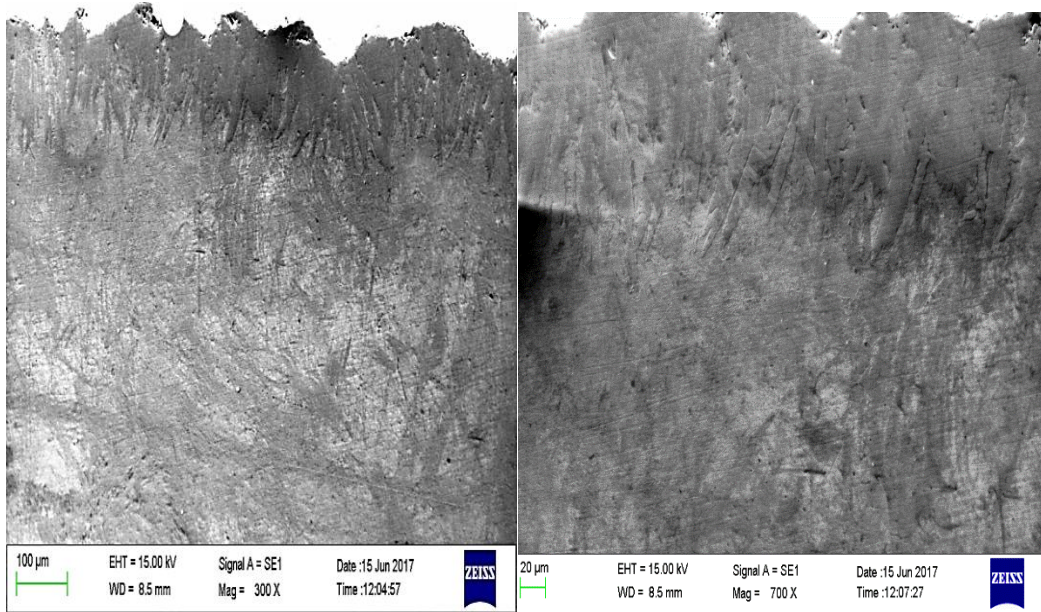
Şekil 6.8. Kaplanmış krank mili muylusunun 300x büyütmedeki ana tabaka geçiş bölgesi ve borür tabakası SEM görüntüsü

Şekil 6.9’da kaplanmış krank mili muylusunun 700x büyütmedeki SEM görüntüsü görülmektedir.



Şekil 6.9. Kaplanmış krank mili muylusunun 700x büyütmedeki ana tabaka geçiş bölgesi ve borür tabakası SEM görüntüsü

Şekil 6.10'da kaplanmış krank mili muylusunun 300x ve 700x yakınlaştırmadaki SEM görüntüsü görülmektedir.

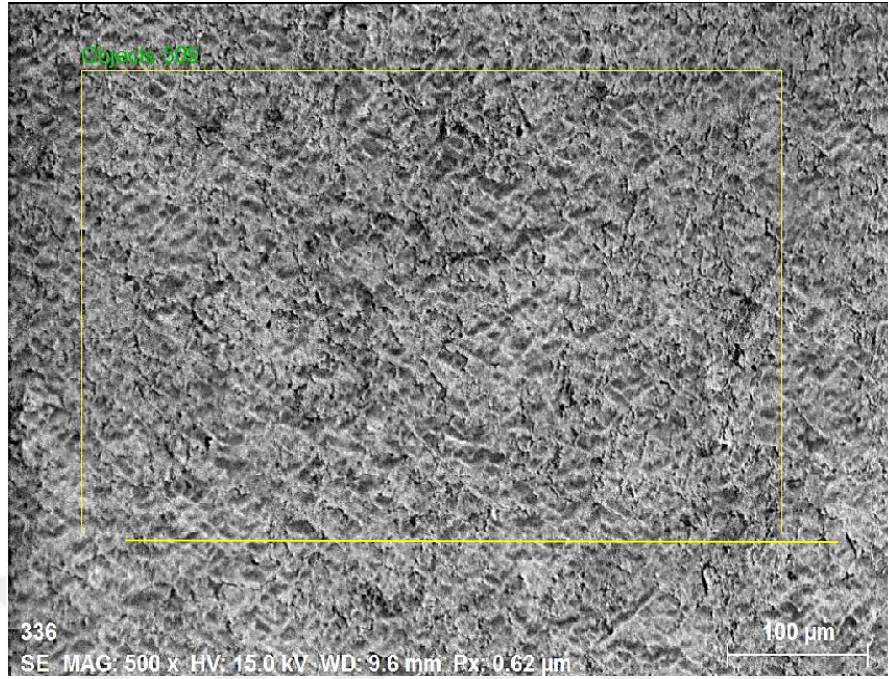


Şekil 6.10. Kaplanmış krank mili muylusunun 300x ve 700x büyütmelerdeki ana tabaka geçiş bölgesi ve borür tabakası SEM görüntüsü

Şekil 6.8, Şekil 6.9 ve Şekil 6.10'daki görüntülerde krank mili muylusunun borlama işlemi yapılmış 300x ve 700x görüntüleri görülmektedir. 950 °C sıcaklıkta 4 saat süreyle borlama işlemi yapılmış krank mili muylusunda borür tabakası dikkat çekmektedir. Borür tabakası çift fazlı FeB+Fe₂B ve baskın Fe₂B kolonsal tabakası net bir şekilde görülmektedir. Fe₂B tabakası iç yapıya doğru kolonsal bir şekilde ilerlemiş ve seyrek ancak kalın bir dişli yapısı görülmektedir. Yapılan bir çalışmada AISI1060 çeliğinin farklı sıcaklıklarda borlanması sonucu benzer sonuçlar bulunmuş ve çalışmamızı desteklemiştir (ÖZER ve Ay, 2011). Geçiş bölgesi borür tabakasının hemen altında görülmektedir. Ana tabakada ise açık ve koyu renkte ferrit ve perlit morfolojisi görülmektedir. Yapılan bu çalışmada kaplanmış krank mili muylusunda borür tabakası üzerinden alınan EDAX analiz sonucunda bu yapı için hakim elementler Fe ve B elementi olmaktadır. Ana yapı üzerinden alınan EDAX analiz sonucunda ise hakim elementler Fe, Mn ve C elementleridir. Bu elementler EDAX analizinde daha detaylı bir şekilde anlatılmıştır.

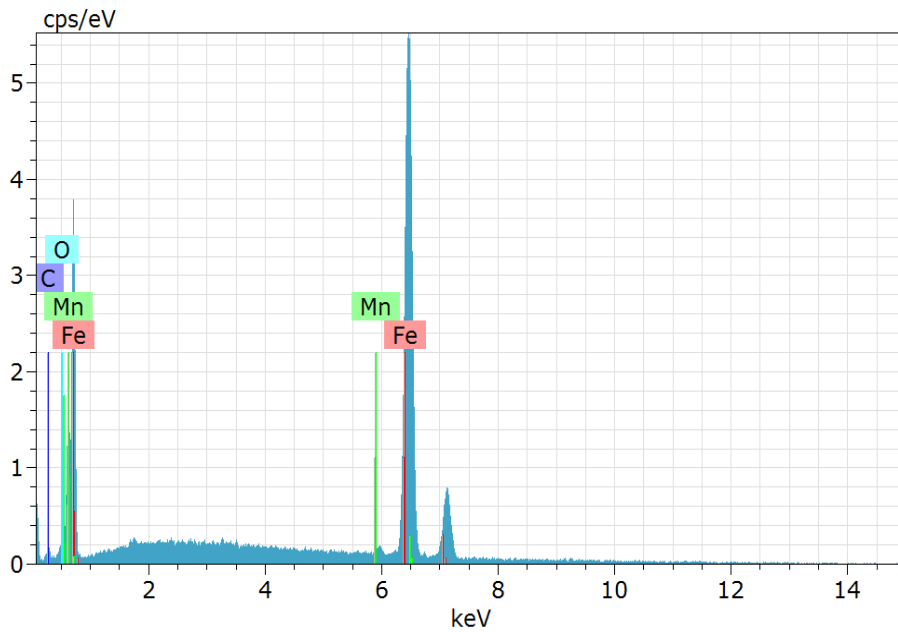
6.1.5. Krank Mili Muylusunun EDAX Analizi

SEM analiziyle beraber kaplanmamış ve kaplanmış krank mili numuneleri mikro-yapı incelemelerinin ardından enerji dağıtıcı spektroskopi (EDAX) analizine tabii tutulmuştur. Görüntüler 500x büyütme üzerinden alınmış olup, bölgesel ve noktasal spektrumlardaki veriler kayıt altına alınmıştır. Şekil 6.11'de kaplanmamış krank mili muylusunun 500x büyütmedeki bölgesel EDAX verileri gösterilmektedir. Krank mili muylusu EDAX verilerine göre hakim elementler Fe, Mn ve C'dir. Bu sonuçlar kaplanmamış krank milinin spektrometre analiz sonuçlarıyla uyumludur.



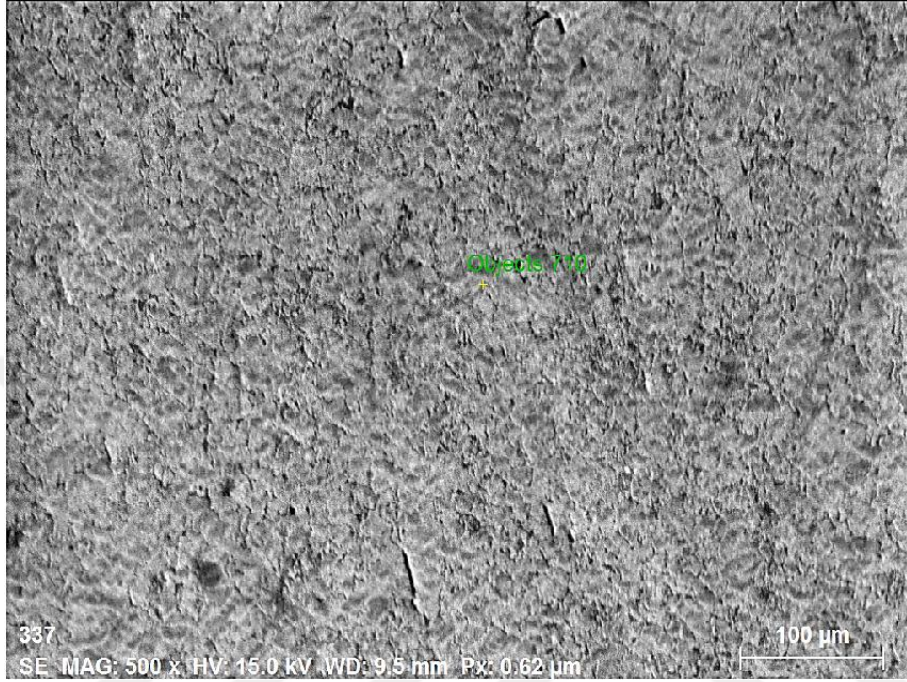
Spectrum: Objects 509

El	AN	Series	Net un.	C norm.	C Atom.	Error (1 Sigma)
			[wt.%]	[wt.%]	[at.%]	[wt.%]
Fe	26	K-series	18567	64.31	90.25	85.05
Mn	25	K-series	2276	5.78	8.11	7.77
C	6	K-series	191	1.17	1.64	7.19
O	8	K-series	0	0.00	0.00	0.00
Total:			71.26	100.00	100.00	



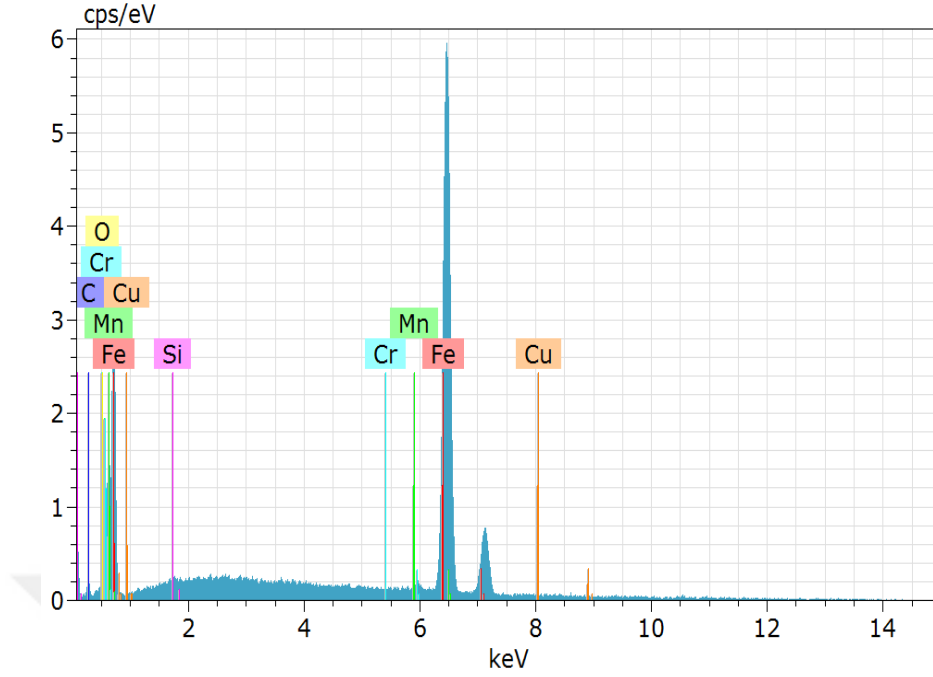
Şekil 6.11. Kaplanmamış krank mili muylusunun bölgesel EDAX verileri

Şekil 6.12’de kaplanmamış krank mili muylusunun 500x büyütmedeki beyaz bir bölgeden noktasal olarak alınan spektrum verileri görülmektedir. Krank mili muylusu EDAX verilerine göre hakim elementler Fe, Mn, C ve az miktarda Si’dir.



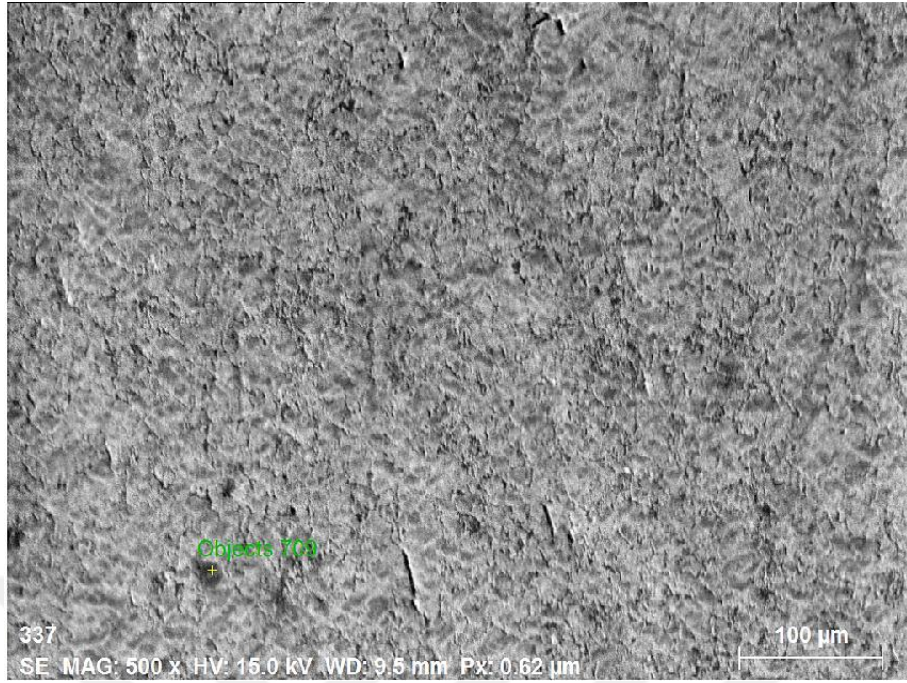
Spectrum: Objects 710

El	AN	Series	Net un.	norm. C	Atom. C	Error (1 Sigma)
			[wt.%]	[wt.%]	[at.%]	[wt.%]
Fe	26	K-series	19250	65.40	89.68	83.89
Mn	25	K-series	2452	6.07	8.33	7.92
C	6	K-series	223	1.33	1.83	7.95
Si	14	K-series	56	0.08	0.11	0.21
Cu	29	K-series	5	0.04	0.05	0.04
O	8	K-series	0	0.00	0.00	0.00
Cr	24	K-series	0	0.00	0.00	0.00
Total:			72.92	100.00	100.00	



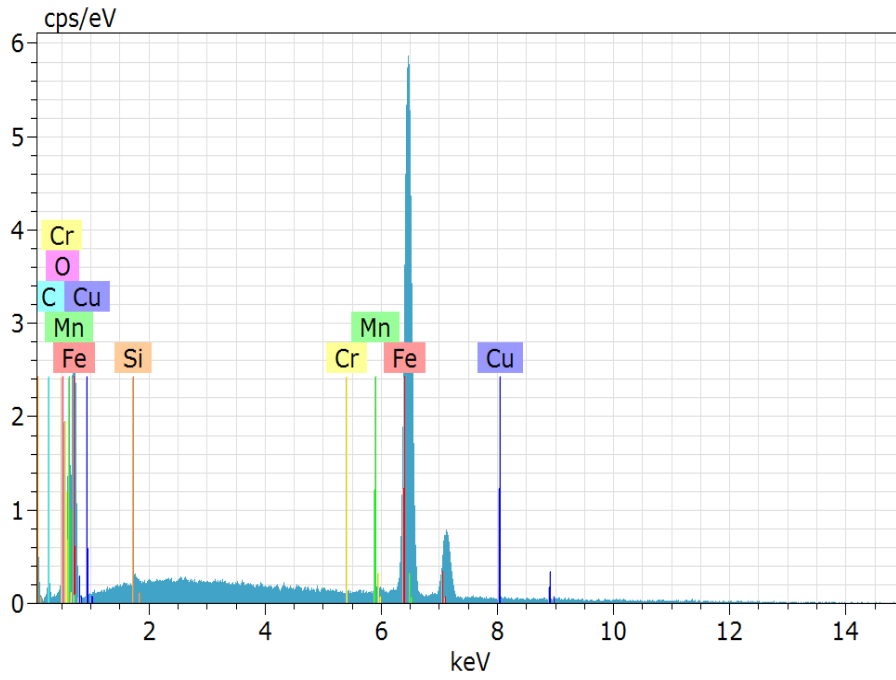
Şekil 6.12. Kaplanmamış krank mili muylusunun beyaz bir bölgeden alınan noktasal spektrum verileri

Şekil 6.13’de kaplanmamış krank mili muylusunun 500x büyütmedeki gri bir bölgeden noktasal EDAX verileri gösterilmektedir. Krank mili muylusu noktasal alınan spektrum verilerine göre hakim elementler Fe, Mn, C ve az miktarda görülen Si’dur.



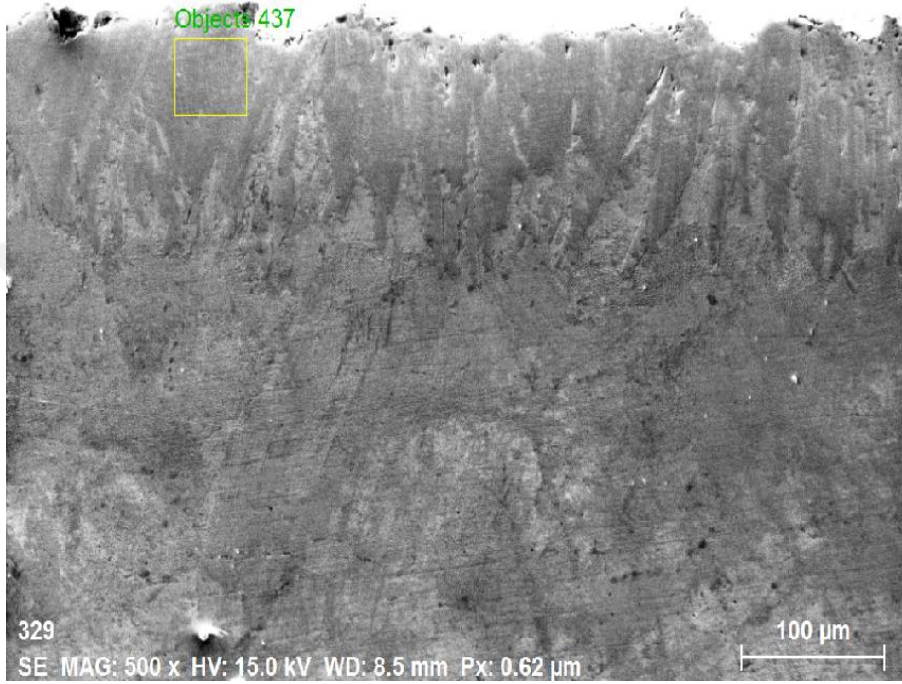
Spectrum: Object's 709

El	AN	Series	Net	unn. C	norm. C	Atom. C	Error (1 Sigma)
			[wt.%]	[wt.%]	[wt.%]	[at.%]	[wt.%]
Fe	26	K-series	19605	65.14	89.47	82.82	2.00
Mn	25	K-series	2446	5.99	8.23	7.74	0.25
C	6	K-series	263	1.54	2.11	9.08	0.56
Si	14	K-series	106	0.14	0.19	0.36	0.04
O	8	K-series	0	0.00	0.00	0.00	0.00
Cr	24	K-series	0	0.00	0.00	0.00	0.00
Cu	29	K-series	0	0.00	0.00	0.00	0.00
Total:			72.81	100.00	100.00		



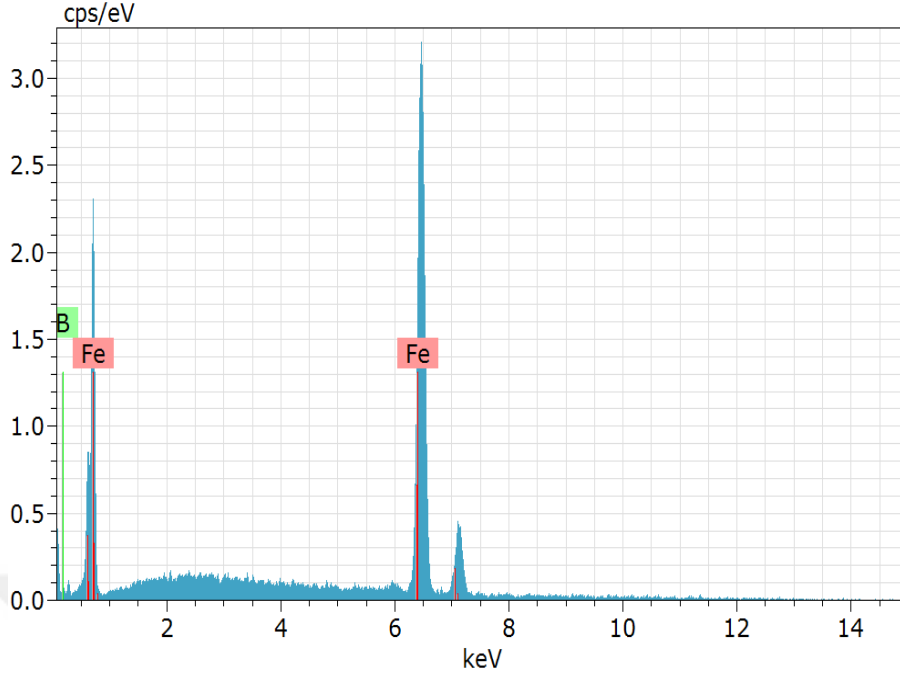
Şekil 6.13. Kaplanmamış krank mili muylusunun gri bir bölgeden alınan noktasal spektrum verileri

Şekil 6.14’de kaplanmış krank mili muylusunun 500x büyütmedeki kaplama tabakasındaki bölgesel EDAX verileri görülmektedir. Krank mili muylusu EDAX verilerine göre hakim elementler Fe ve B’dir. Bu sonuçlar kaplanmış krank milinin spektrometre analiz sonuçlarıyla uyumludur. Burada dikkat çeken bor elementinin yüzdesel oranının (% 9,08) literatür ile de uyumlu olmasıdır (Matuschka, 1980).



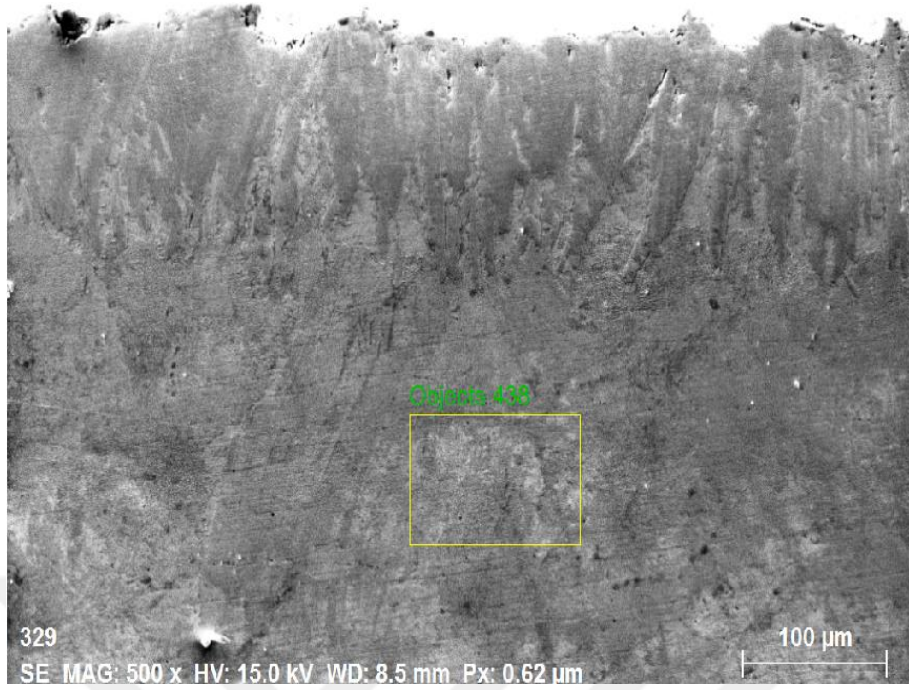
Spectrum: Objects 437

El	AN	Series	Net unkn.	C norm.	C Atom.	Error (1 Sigma)
			[wt.%]	[wt.%]	[at.%]	[wt.%]
Fe	26	K-series	10534	55.18	90.92	65.98
B	5	K-series	92	5.51	9.08	34.02
Total:			60.68	100.00	100.00	



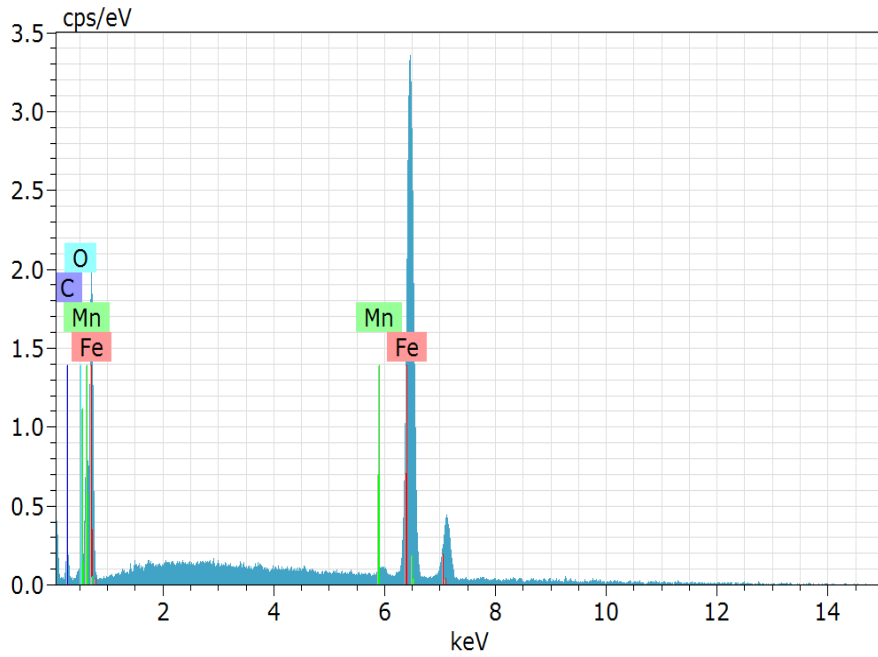
Şekil 6.14. Kaplanmış krank mili muylusunun borür tabakasındaki bölgesel EDAX verileri

Şekil 6.15’de kaplanmış krank mili muylusunun 500x büyütmedeki ana tabakadaki bölgesel EDAX verileri gösterilmektedir. Krank mili muylusu EDAX verilerine göre hakim elementler Fe, C, Mn ve düşük miktarda O’dur. Oksijen elementinin borlama esnasında bor tozları arasındaki hava ile teması sonucu oluştuğu düşünülmektedir.



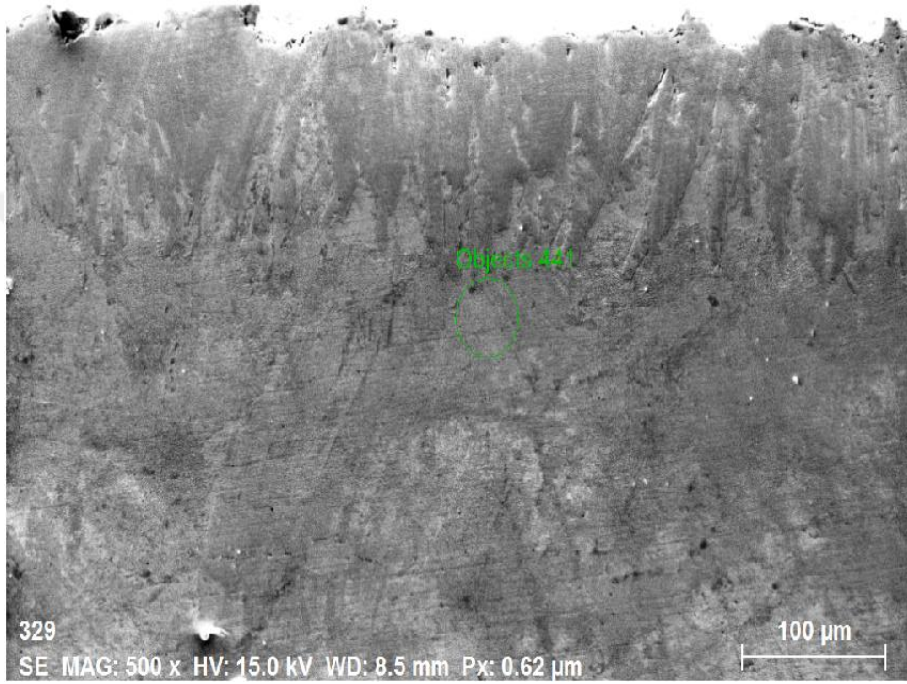
Spectrum: Objects 438

El	AN	Series	Net un.	un. C	norm. C	Atom. C	Error (1 Sigma)
			[wt.%]		[wt.%]	[at.%]	[wt.%]
Fe	26	K-series	10943	62.50	87.70	76.45	1.98
Mn	25	K-series	1365	5.86	8.22	7.29	0.27
C	6	K-series	276	2.73	3.83	15.53	0.95
O	8	K-series	50	0.17	0.24	0.74	0.14
Total:			71.26	100.00	100.00		



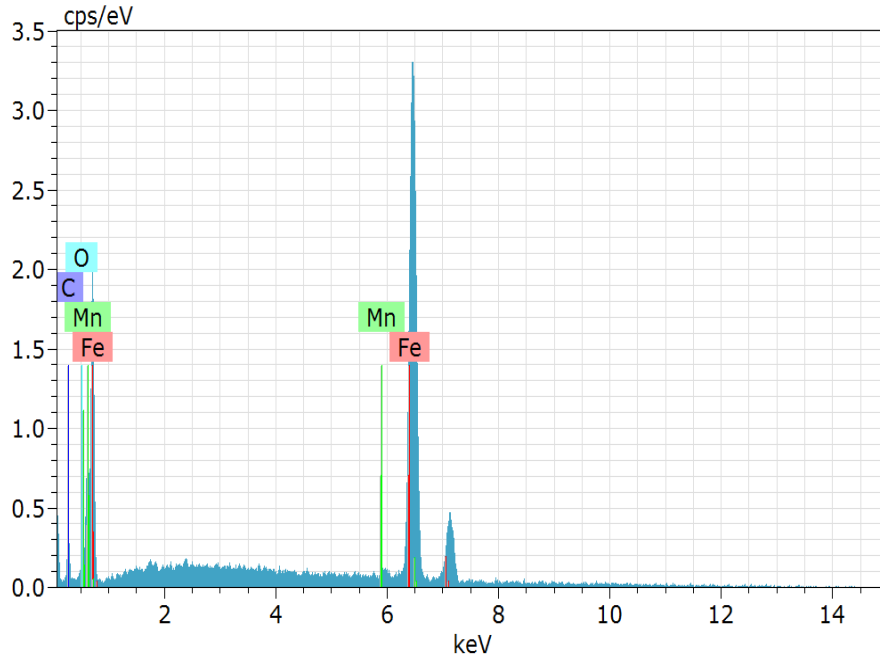
Şekil 6.15. Kaplanmış krank mili muylusunun ana tabakadaki bölgesel EDAX verileri

Şekil 6.16'da kaplanmış krank mili muylusunun 500x büyütmedeki geçiş bölgesinden alınan bölgesel EDAX verileri gösterilmektedir. Krank mili muylusu EDAX verilerine göre hakim elementler Fe, C, Mn ve düşük miktardaki O elementidir. Burada C elementinin yüzdesel oranı dikkat çekmektedir. Borlama işlemlerinde C elementi çözünemediğinden borür tabakasının altına itilmekte ve geçiş bölgesinde kalmaktadır. Bu nedenle C elementi % 5,32 gibi yüksek bir norm değerinde görülmüştür.



Spectrum: Objects 441

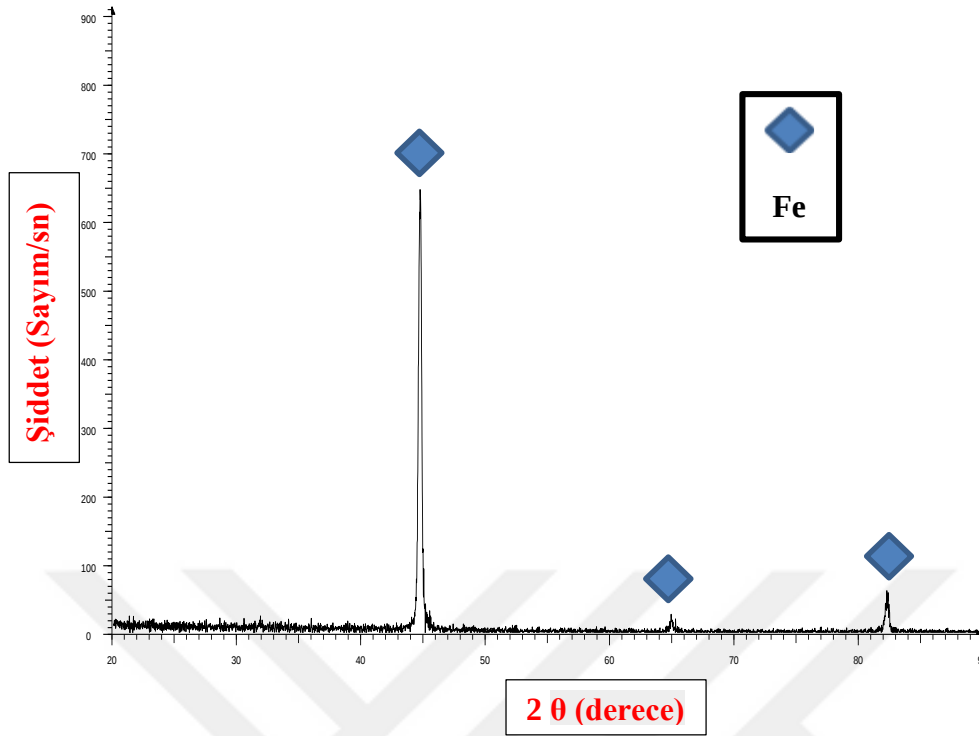
El	AN	Series	Net unkn.	C norm.	C Atom.	C Error (1 Sigma)
			[wt.%]	[wt.%]	[at.%]	[wt.%]
Fe	26	K-series	11089	60.51	86.33	71.90
Mn	25	K-series	1406	5.71	8.14	6.89
C	6	K-series	401	3.73	5.32	20.60
O	8	K-series	43	0.14	0.21	0.60
Total:			70.09	100.00	100.00	



Şekil 6.16. Kaplanmış krank mili muylusunun geçiş bölgesindeki bölgesel EDAX verileri

6.1.6. Krank Mili Muylusunun XRD Analizi

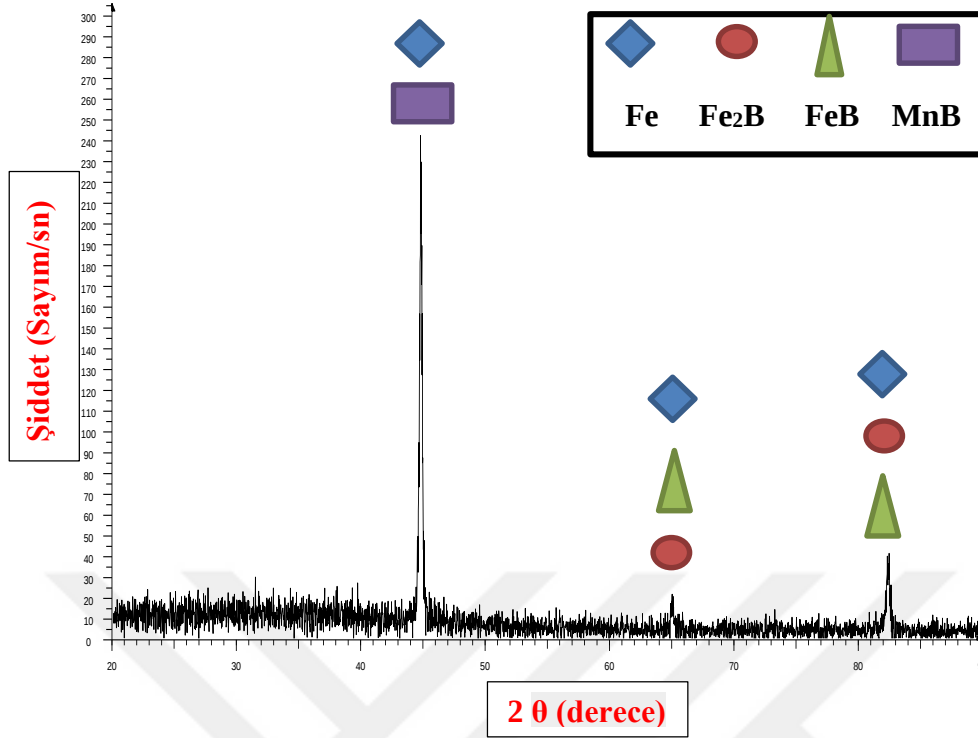
Borlanmış ve borlanmamış numunelerin mevcut fazlardaki bileşiklerini belirlemek amacı ile X-ışınları difraksiyon analizi yapılmıştır. Burada amaç borlanmış ve borlanmamış numunelerdeki bileşik farklılıklarını görebilmektir. XRD analizi ışın tabancası 20-90° açılarında konumlandırılmıştır. Şekil 6.17’de kaplanmamış krank mili muylusunun mevcut fazlardaki bileşikleri XRD analizi ile görülmektedir. Burada hakim faz Fe elementidir. Malzeme kompozisyonu düşünüldüğünde Fe elementinin fazlarda yer alması olağandır (%98).



Şekil 6.17. Kaplanmamış krank mili muylusunun XRD analizi

Şekil 6.18’de kaplanmış krank mili muylusunun mevcut fazlardaki bileşikleri XRD analizi ile görülmektedir. Hakim fazlar Fe, Fe₂B, FeB ve MnB fazlarıdır. Görülmekte olan fazlardan da anlaşılabileceği gibi çift fazlı FeB+Fe₂B ve bunların yanı sıra krank muylusundaki Mn oranının etkisiyle MnB fazı görülmektedir. Demir esaslı malzemelerde borlama işlemi sonucunda borür tabakasını oluşturan fazlardan olan Fe₂B içerdiği demir oranın yüksek olması nedeniyle numunedeki en dış bölgede oluşan FeB fazının hemen altında bulunmaktadır. Bu iki faz testere dişini andıran bir oluşumla birbirlerine kenetlenerek borür dediğimiz tabakayı oluşturmuşlardır (Topuz, Çiçek ve Akar, 2016).

(Topuz, 2016) yaptığı çalışmada DIN 1.2842 çeliğine 850 °C ve 950 °C sıcaklıklarda borlama işlemi uygulamıştır. İşlem sonrası oluşturulan XRD sonuçlarına göre Şekil 6.18’deki hakim fazların uyumu görülmektedir.



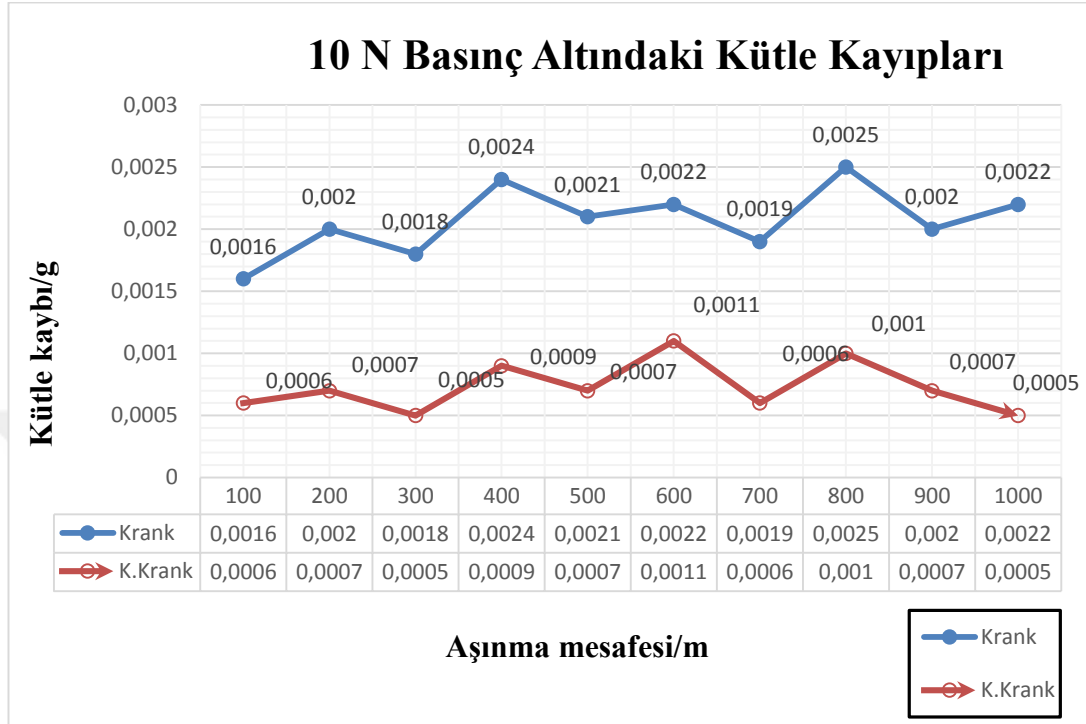
Şekil 6.18. Kaplanmış krank mili muylusunun XRD analizi

6.1.7. Krank Mili Muylusu Aşınma Analizi Sonuçları

Krank mili motorun çalışması esnasında özellikle muylulardan aşınmaktadır. Muylu yüzeyleri her ne kadar sertleştirme işlemine tabii tutulsa da zamanla metal-metal teması ile aşınmaya maruz kalmaktadır. Muylular yağlama kanalları vasıtasıyla yağlanmaktadır. Ancak motorun özellikle ilk çalışması sırasında yağlama işlemi olmadığında kuru sürtünme olayı gerçekleşir ve dolayısıyla aşınma miktarı en fazla bu esnada oluşur. Bu nedenle Ø 30 mm x 80 mm uzunluğunda düşük karbonlu düşük alaşımlı çelik silindirik miller hazırlanmıştır. Kaplanmış ve kaplanmamış krank mili muyluları materyal metot kısmında detaylı bir şekilde anlatıldığı gibi aşınmaya maruz bırakılmıştır.

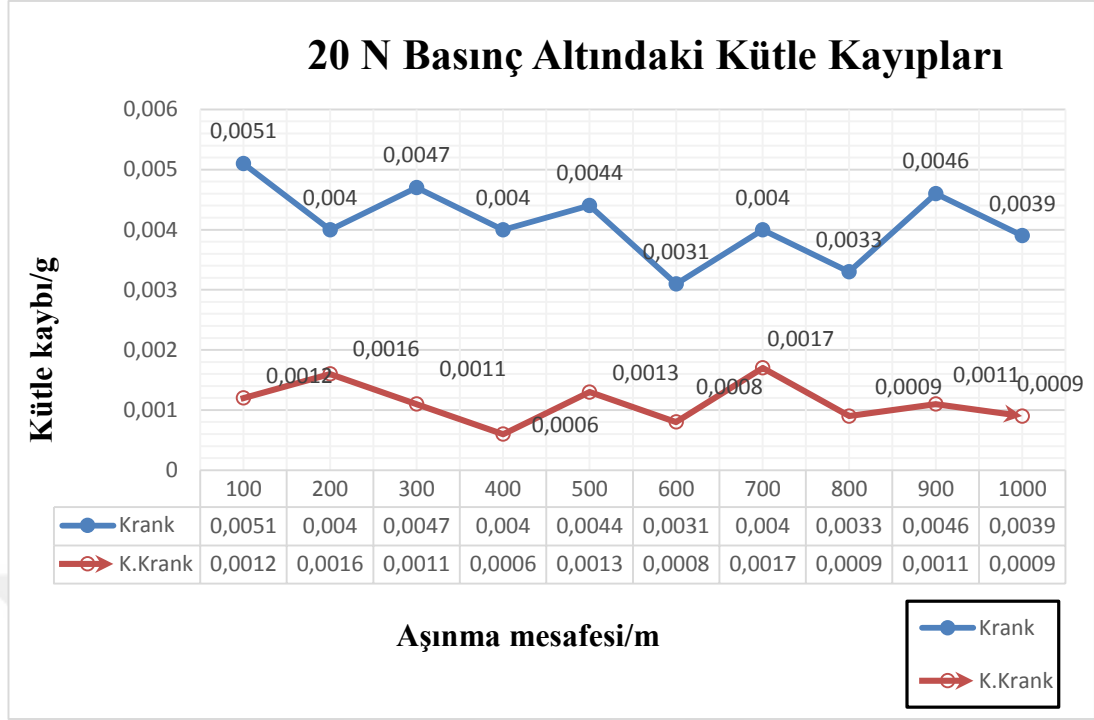
Şekil 6.19'da borlama işlemi yapılmamış ve borlama işlemi yapılmış krank mili muylusunda, 10 N basınç ve 1000 m kayma mesafesiyle oluşan kütle kayıplarının sonuçları verilmiştir. İlk 100 m'deki kütle kaybı krank milinde 0,0016 g iken, borla kaplanmış krank milinde bu miktar 0.0003 g'dır. Bu iki değer arasındaki orantısal kütle kaybı yaklaşık 5,4 kat olmaktadır. 1000 m sonunda ise krank milindeki kütle kaybı 0,0022 g iken, borla kaplanmış krank milinde kütle kaybı 0.0005 g olarak gerçekleşmiştir. 1000 m sonunda bu iki kütle kaybının orantısal değeri 4,4 kat olmaktadır. 1000 m'nin sonunda

toplam kütle kayıpları kaplanmamış krank milinde 0,0207 g iken, kaplanmış krank milinde 0,0064 g olmuştur. Orantısal olarak kütle kaybı yaklaşık 3,3 katı kadar gerçekleşmiştir.



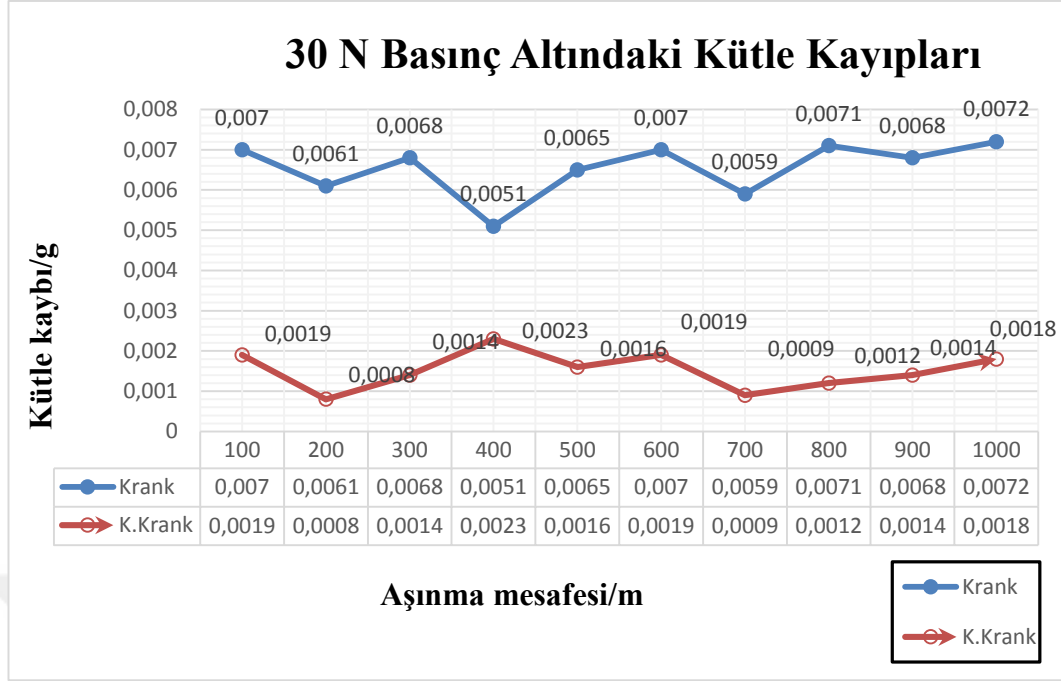
Şekil 6.19. Krank milinde 10 N basınç altında meydana gelen kütle kayıpları

Şekil 6.20’de 20 N basınç ve 1000 m kayma mesafesiyle oluşan kütle kayıplarının sonuçları verilmiştir. İlk 100 m’deki kütle kaybı krank milinde 0,0051 g iken, borla kaplanmış krank milinde ölçülen kütle kaybı 0,0012 g’dır. Bu iki değer arasındaki orantısal fark yaklaşık 4,3 kattır. 1000 m sonunda ise krank milindeki kütle kaybı 0,0039 g iken, borla kaplanmış krank milinde ağırlık kaybı 0,0009 g olduğu görülmüştür. 1000 m sonunda bu iki kütle kaybının orantısal değerinin yaklaşık 4,4 kat olduğu belirlenmiştir. 1000 m’nin sonunda toplam kütle kayıpları kaplanmamış krank milinde 0,0409 g iken, kaplanmış krank milinde 0,0112 g olmuştur. Sonuçlara göre kaplanmamış krank milinde yaklaşık 3,7 kat kütle kaybının daha fazla olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 6.20. Krank milinde 20 N basınç altında meydana gelen kütle kayıpları

Şekil 6.21’de 30 N basınç ve 1000 m kayma mesafesiyle oluşan kütle kayıplarının sonuçları verilmiştir. İlk 100 m’deki kütle kayıpları kaplanmamış krank milinde 0,0070 g iken, borla kaplanmış krank milinde bu kütle kaybı 0.0019 g’dır. Bu iki değer arasındaki orantısal fark yaklaşık 3,7 kattır. 1000 m sonunda ise krank milindeki kütle kaybı 0,0072 g iken, borla kaplanmış krank milinde kütle kaybı 0.0018 g olarak gerçekleşmiştir. 1000 m sonunda borlama işlemi yapılmamış numunenin, yapılmış numuneye göre 4 kat daha fazla aşındığı görülmüştür. 1000 m’nin sonunda toplam kütle kayıpları kaplanmamış krank milinde 0,0655 g iken, kaplanmış krank milinde 0,0152 g olmuştur. Toplam kütle kaybının yaklaşık 4,3 kat olduğu belirlenmiştir.



Şekil 6.21. Krank milinde 30 N basınç altında meydana gelen kütle kayıpları

Aşınma işlemi sonuçlarına bakıldığında kaplama işlemi yapılmış krank mili muylusunda yaklaşık kütle kaybının 4 kat azaldığı görülmektedir. Bunun nedeninin borlama işlemi sonucuyla yüzeylerde oluşan ve metal-metal temasını geciktiren oksit filmi olduğu düşünülmektedir. Bu film, katı yağlama görevi üstlenip, sürtünme katsayısını azaltmıştır. Azalan sürtünme katsayısıyla aşınma temas oranı da azalmıştır. Mikro-sertlik sonuçlarında 6,7 kat artış görülen borür tabakasındaki kütle kaybı minimum seviyeye düşürülmüştür (Selçuk, 1994).

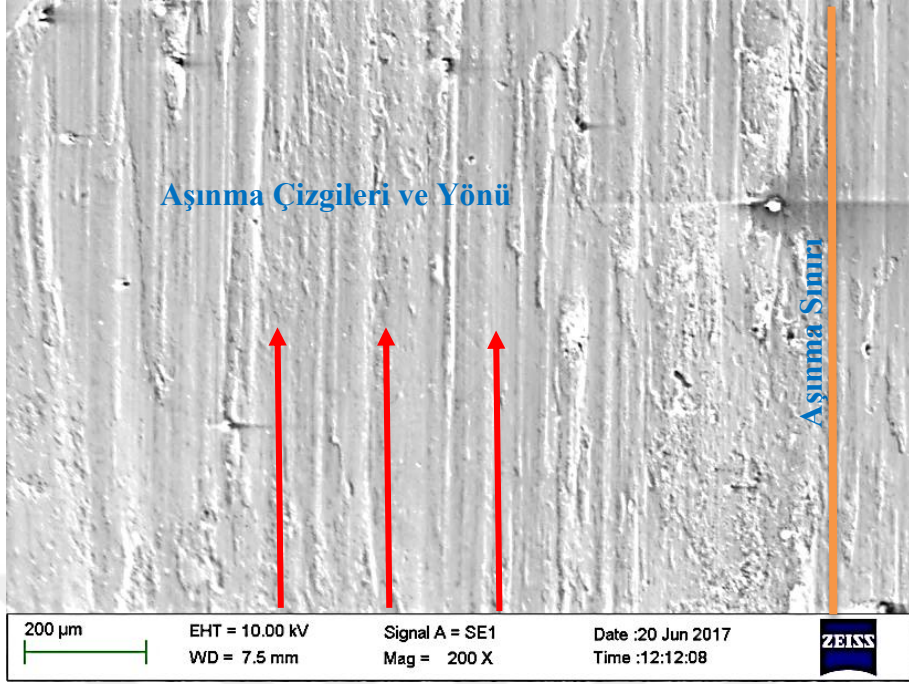
Borlama işlemiyle çift fazlı FeB+Fe₂B tabakası oluşturduğu optik resimlerde de mevcuttur (Subrahmanyam ve Gopinath, 1984). Oluşan borür tabakası numunenin sertliğini arttırmış ve sertliğin artışıyla darbe, aşınma ve yorulma gibi olumsuz etmenlerin de büyük oranda düşeceği düşünülmektedir. Literatür incelendiğinde benzer çalışmalarda da borlama işlemi yapılmış malzemelerin kütle kayıplarındaki azalmalar gözlenmiştir (Er ve Par, 2004).

6.1.8. Aşınma Sonrası Krank Mili Muylusundaki Sem Görüntüleri

Aşınma deneylerinde kaplama tabakasındaki ana element olan borun oksijene karşı ilgisi yüksek olduğundan borür tabakası üzerinde ince bir oksit filmi oluşmaktadır. Bu tabaka metal-metal temasını geciktirmekte, katı yağlama görevi yaparak sürtünme katsayısını azaltmaktadır. Yüzeylerin kimyasal bileşimi ve sürtünen yüzeylerin kimyasal kararlılığı eleman çiftleri arasındaki yüzey çekim kuvvetini azaltmış ve dolayısıyla aşınma dayanımını arttırmıştır. Borlu tabakaların soğuk kaynak eğilimleri ise düşüktür, ayrıca aşınmayı önlemek için yağlanmasına da ihtiyaç duyulmamaktadır. Bu durum özellikle adhesiv tip aşınmayı önleme konusunda büyük yarar sağlamaktadır (Selçuk, 1994).

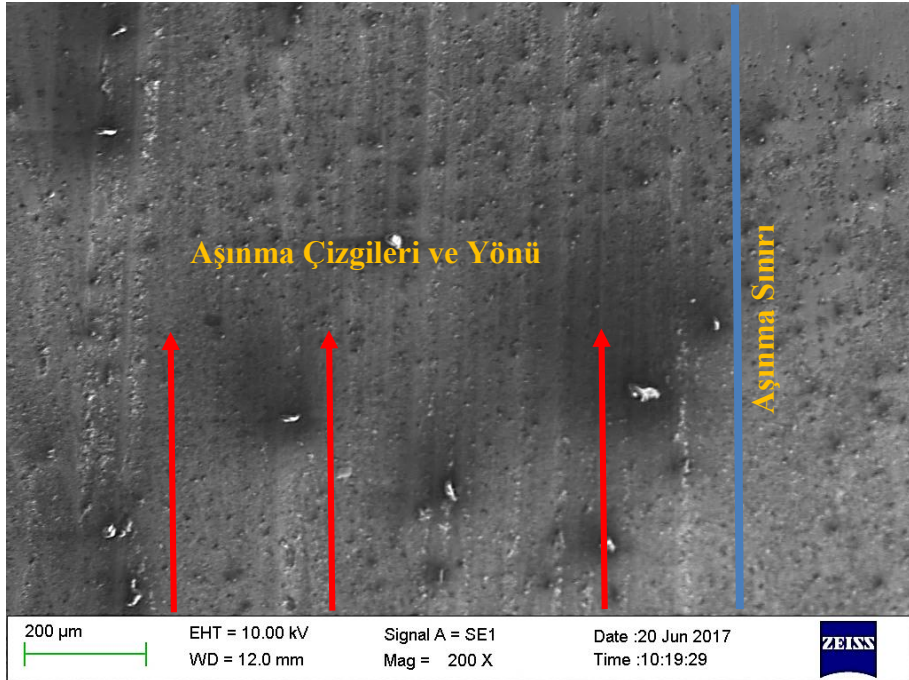
Kuru tip adhesiv aşınma işleminin ardından numunelerde meydana gelen yüzey deformasyonlarını incelemek için SEM analizi yapılmıştır. SEM analizinde yüzeylere 200x büyütme yapılarak incelenmiştir. Bu analiz sonuçları genel anlamda borlanmış yüzey ve borlanmamış yüzeylerin farkını göstermektedir. Borlanmış yüzeylerde aşınma sonrası oluşan deformasyonlar daha az ve hala aşınmamış bölgeler mevcutken, borlanmamış numunelerde deformasyonlar daha yaygın ve neredeyse aşınmamış bölge bulunmamaktadır. Ayrıca borlanmış yüzeylerde aşınma çizgileri daha ince ve kısa iken, borlanmamış yüzeylerde aşınma çizgileri kalın ve uzundur.

Şekil 6.22’de aşınma deneyi sonrasındaki kaplanmamış krank mili muylusunun 200x yakınlaştırmadaki SEM görüntüsü görülmektedir.



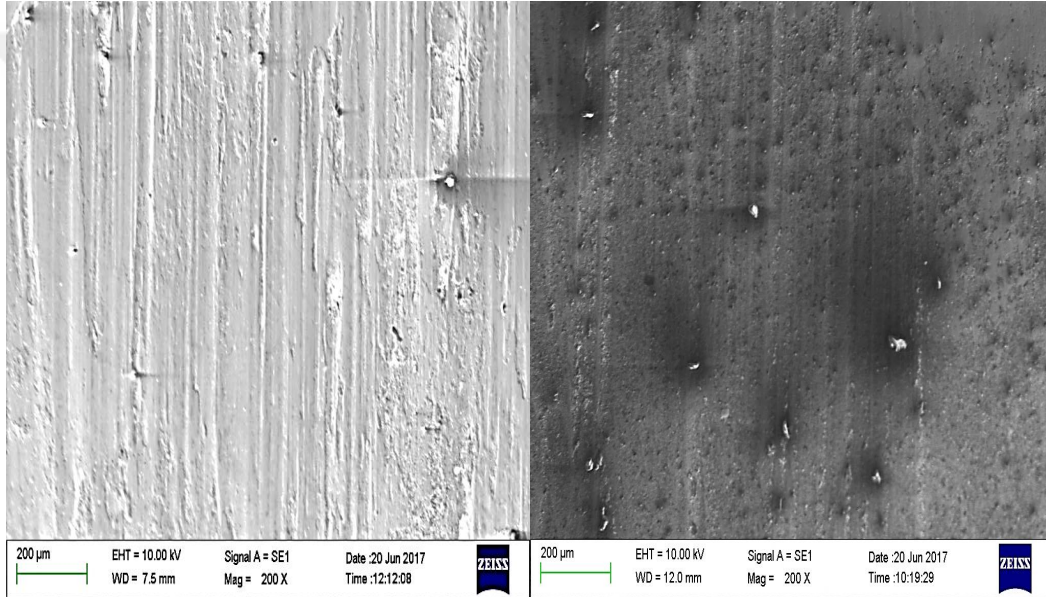
Şekil 6.22. Krank mili muylusunda aşınma sonrası SEM görüntüsü (200x)

Şekil 6.23'de aşınma deneyi sonrasındaki kaplanmış krank mili muylusunun 200x yakınlıştırmadaki SEM görüntüsü görülmektedir.



Şekil 6.23. Kaplanmış krank mili muylusunda aşınma sonrası SEM görüntüsü (200x)

Şekil 6.24’de kaplanmamış ve kaplanmış krank mili muylusunda aşınma deneyi sonrasındaki 200x yakınlaştırmadaki SEM görüntüsü görülmektedir. Bu görüntülere göre kaplanmamış krank mili muylusunun yüzeylerinde belirgin deformasyonlar görülmekte, aşınma çizgilerinin daha kalın ve uzun olduğu izlenmektedir. Kaplanmış krank mili muylusunda ise bor elementinin malzemeye iyi nüfuz etmesi ve sertliğinin fazla olması nedeniyle aşınma bölgeleri daha küçük, aşınma çizgileri daha ince ve kısa olduğu görülmektedir. Borlama işlemiyle oluşan borür tabakasındaki oksit filminin, yağlayıcı görev üstlendiği, metal-metal temasını minimum seviyeye indirdiği ve yüzey kalitesini arttırdığı görülmüştür.



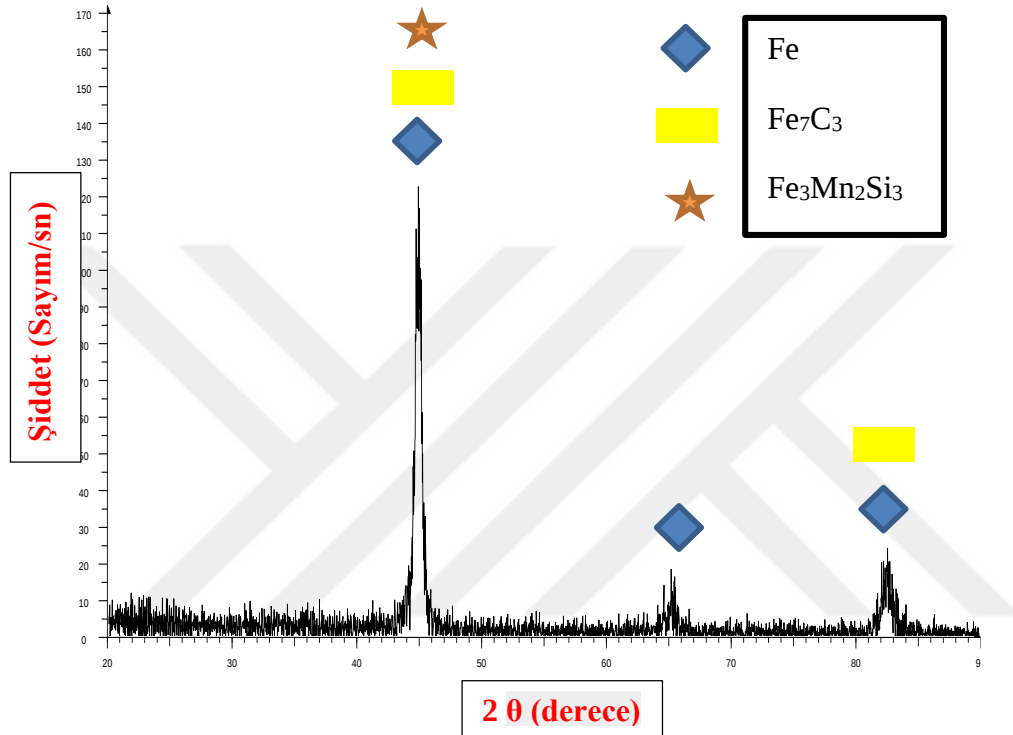
Şekil 6.24. Kaplanmamış ve kaplanmış krank mili muylusunda aşınma sonrası SEM görüntüleri (200x)

6.1.9. Aşınma Sonrası Krank Mili Muylusu XRD Analiz Sonuçları

Aşınma işlemi krank mili numunesi ile çelik miller arasında bir temas oluşturacağından, bu temas ile değişebilecek fazların analizini belirlemek için tekrar XRD analizi yapılmıştır.

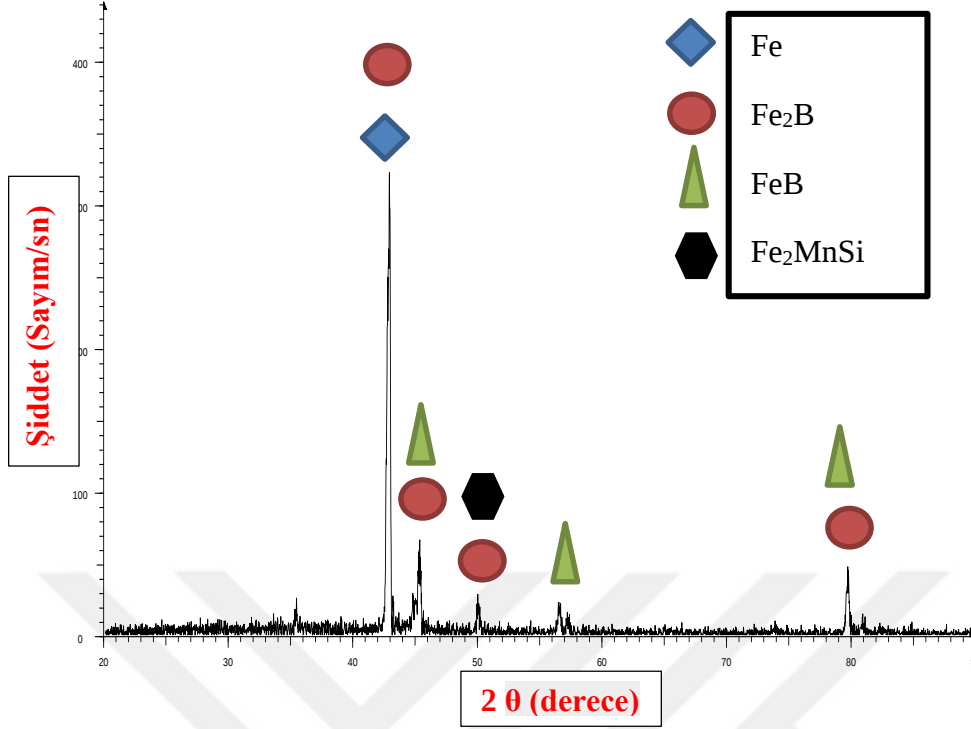
Şekil 6.25’de aşınma sonrası kaplanmamış krank mili muylusunun XRD analizi sonuç grafiği görülmektedir. Aşınma işlemi olmayan kaplanmamış krank mili muylusunda XRD analizi sonucu sadece Fe elementinin varlığına rastlanılmıştır. Ancak aşınma işlemi yapılmış kaplanmamış krank mili muylusunda Fe elementinin yanında Fe_7C_3 ve $Fe_3Mn_2Si_3$

bileşikleri de görülmektedir. Bu bileşiklerin varlığının, aşındırıcı milin malzemesindeki kimyasal kompozisyondan kaynaklandığı düşünülmektedir. Krank mili numunesinde aşınma öncesi alınan XRD analizinde pikler daha az titreşimli ve düz iken, aşınma sonrası alınan XRD sonuçlarına göre piklerde fazla miktarda titreşim görülmektedir. Bunun sebebinin ise aşınma sonrası yüzey kalitesinin düşmesi olarak değerlendirilebilir.



Şekil 6.25. Kaplanmamış krank mili muylusunun aşınma sonrası XRD analizi

Şekil 6.26’da aşınma sonrası kaplanmış krank mili muylusunun XRD analizi sonuç grafiği görülmektedir. Aşınma işlemi yapılmayan kaplanmış krank mili muylusundan farklı olarak, aşınma işlemi yapılmış krank mili muylusunda Fe_2MnSi fazı görülmektedir. Bu fazın tıpkı şekil 6.25’de olduğu gibi aşınma işlemi esnasında aşındırıcı mil ile temas sonucu oluştuğu düşünülmektedir. Ayrıca aşınma öncesi kaplanmış krank milindeki XRD sonucunda oluşan piklerin sayısı daha az iken, aşınma sonrası XRD sonucunda oluşan piklerin sayısı daha fazladır. Piklerdeki artışın adhesiv aşınmada temas sonucu malzemelerdeki yapışmayla meydana gelebileceği düşünülmektedir.

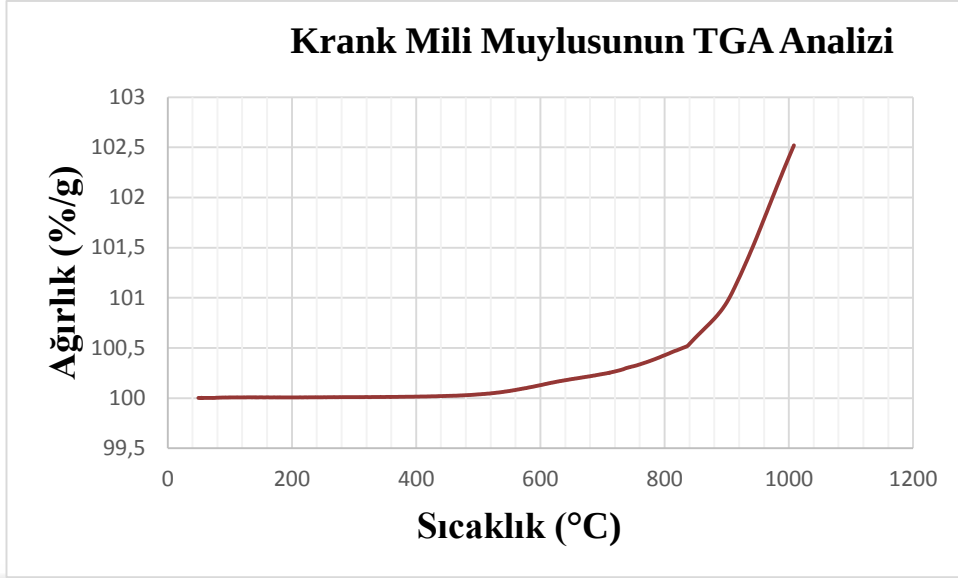


Şekil 6.26. Kaplanmış krank mili muylusunun aşınma sonrası XRD analizi

6.1.10. Krank Mili Muylusunun TGA Analiz Sonuçları

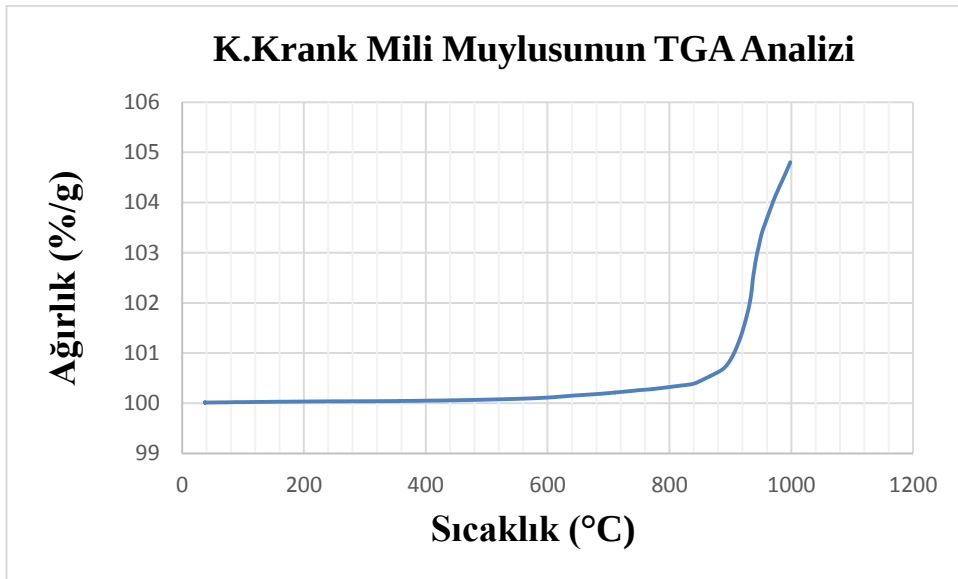
Deneylerde kullanılan numunelerin termal oksitlenmeye karşı davranışlarını ve bu oksitlenme sonrası aldıkları kütle oranlarını incelemek amacıyla hava ortamında TGA deneyi yapılmıştır. TGA deneyinde ölçümler 50 °C başlangıç sıcaklığı ile başlayıp 1000 °C sıcaklığa kadar 30 °C/dk ısıtma hızıyla yapılmıştır. Deneyde kullanılan krank mili numuneleri ortalama 10x10x10mm³ ölçülerine kadar küçültülmüştür. Daha sonra kaplanmış ve kaplanmamış krank mili muylularının termal oksitlenme davranışları grafiklerle elde edilmiştir.

Şekil 6.27’de yüksek karbonlu düşük alaşımlı kaplanmamış krank mili muylusunun TGA analiz grafiği görülmektedir. Grafik eğrisinden görüleceği gibi sıcaklık arttıkça kütle kazanımı 600 °C’ye kadar lineer olarak artış göstermiştir. 600 °C’den sonra oksitlenme davranışı parabolik olarak devam etmektedir. Grafik verilerine göre ilk ağırlık 3,8172 gr iken, 1000 °C sonunda oksitlenerek ağırlık kazanan numunenin son ağırlığı 3,9134’tür. 1000 °C sıcaklık sonunda kazanılan kütle miktarı % 2,52 olmaktadır.



Şekil 6.27. Kaplanmamış krank mili muylusunun TG analizi

Borlama işlemi yapılmış krank mili muylusunun TGA ölçüm sonuçları Şekil 6.28’de verilmiştir. Grafik eğrisinden görüleceği gibi sıcaklık arttıkça kütle kazanımı 900 °C’ye kadar lineer olarak artış göstermiştir. 900 °C’den sonra oksitlenme değişimi daha hızlıdır. Grafik verilerine göre ilk ağırlık 7,0935 gr iken, 1000 °C sonunda oksitlenerek ağırlık kazanan numunenin son ağırlığı 7,4333’ tür. Oda sıcaklığından 1000 °C sıcaklığa kadar ısıtılması sonucunda numunenin yaklaşık % 4,8 kadar kütle kazanımı gerçekleştiği görülmektedir.

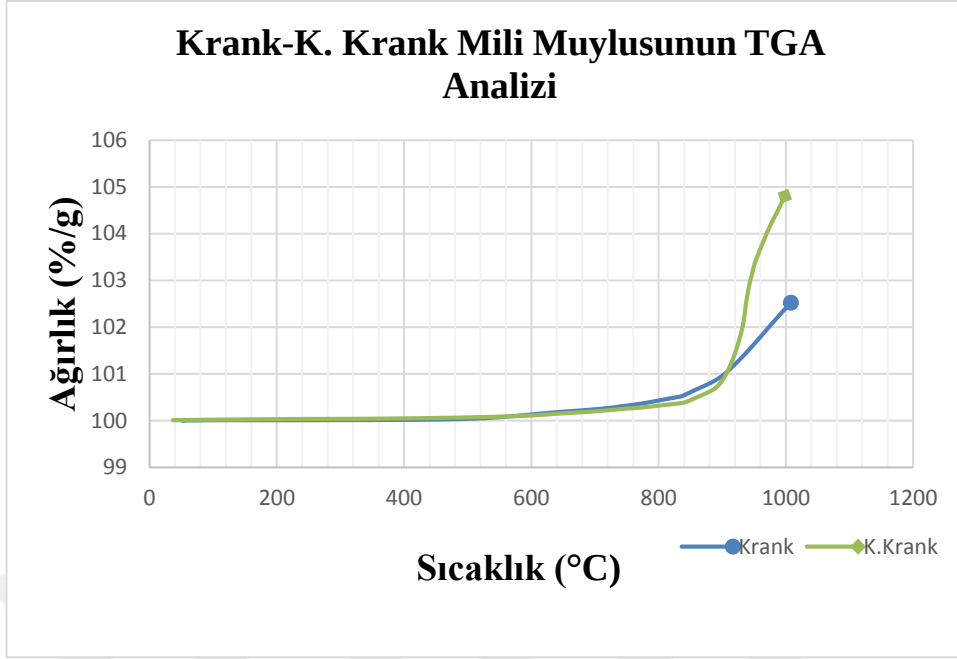


Şekil 6.28. Kaplanmış krank mili muylusunun TG analizi

Şekil 6.29'da kaplanmamış krank mili muylusu ile kaplanmış krank mili muylusunun TG analiz grafiği karşılaştırılmaktadır. Grafik verilerine göre kaplanmamış krank mili muylusunda kütle kazanımı % 2,52 iken, kaplanmış krank mili muylusunda bu oran % 4,8 olmaktadır. Aradaki oransal fark yaklaşık % 2,3 tür. Kaplanmamış krank mili muylusunda lineer kütle artışı 600 °C sıcaklığa kadar devam ederken, bor ile kaplanmış krank mili muylusunda bu artış 900 °C sıcaklığa kadar devam etmektedir. Bu bilgilere bakılarak kaplanmamış numune 600 °C sıcaklıktan sonra oksitlenmeye daha duyarlı olmasına rağmen, kaplanmış numune yaklaşık 900 °C sıcaklıklarda oksitlenmeye yatkındır. Her ne kadar kaplanmış numunede 900 °C'den sonra kütle kazanımı yüksek olsa bile, 900 °C sıcaklığa kadar oksitlenmesini 300 °C geciktirmiştir.

Yapılan bir çalışmada dökme demir malzemesi borlanmış ve TGA deneyine tabii tutulmuştur. Bu deneyde borlanmış numunedeki TG eğrisi yaklaşık 900 °C sıcaklıkta şiddetli ekzotermik oksitlenme başlamış ve 930 °C sıcaklıkta bor oksitin gazlaşmasıyla endotermik bir karakter oluşturduğu görülmüştür. TG eğrisine bakıldığında borlanmış krank mili muylusundaki bu yapı yaptığımız çalışmayı doğrulayıcı niteliktedir (Arısoy, 2015).

Bilindiği gibi bor elementinin oksijene karşı ilgisi yüksektir. Bu deneysel çalışmada grafik verilerine göre borlanmış krank mili muylusunda yüksek sıcaklıklarda oksijenle tepkimeye girerek kütle artışı sağlamış ve BO_3 , B_2O_3 gibi oksijenle bileşikler oluşturduğu düşünülmektedir. Bu deneysel çalışmada, kaplanmış krank mili muylusunda yüksek sıcaklıklarda bor ile oksijen elementinin fazlaca tepkimeye girdiği, ana malzemesi çelik olan kaplanmamış krank mili muylusunda ise oksitlenme tepkimesinin yüzdesel olarak düştüğü görülmektedir. Motor çalışırken yüksek sıcaklıklara ulaşmaktadır. Ancak muylularda bu sıcaklıklar görülmemekte hatta, yağlama kanalları vasıtasıyla soğutma işlemi bile yapılacağından bu sıcaklıklara motor çalışırken ulaşılmamaktadır. Bu nedenle borlama işleminin bu motor elemanlarına rahatça uygulanabileceği düşünülmektedir.



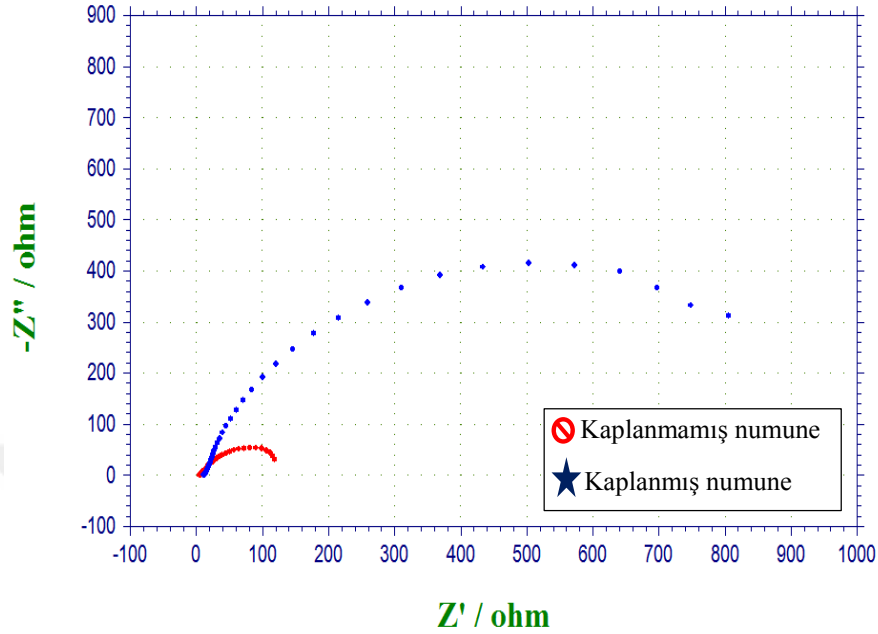
Şekil 6.29. Kaplanmış ve kaplanmış krank mili muylusunun TG analizi

6.1.11. Krank Mili Muylusunun Korozyon Sonuçları

Korozyon deneyinde kullanılan teknik ile (Elektrokimyasal İmpedans Spektroskopisi) malzeme yüzeylerinin yapısını bozmadan korozyon hızı ölçülebilmektedir. Elde edilen sonuçlar Nyquist diyagramları şeklinde gösterilmektedir. Korozyon direnci belirlemek için yapılan ölçümler açık devre potansiyelinde yapılmakta, ölçümler sonucunda elde edilen Nyquist diyagramının çapı malzemenin yaklaşık olarak korozyon direncini göstermektedir.

Şekil 6.30'da görülen Nyquist diyagramında kaplanmamış krank mili muylusu ve Ekabor-2 tozu ile kaplanmış krank mili muylusuna ait yarım daireler malzemenin % 3,5 NaCl sulu çözeltisi içerisinde göstermiş olduğu direnç değerleridir. Ekabor-2 ile kaplanmış krank mili muylusunun korozyon direnci, kaplanmamış krank mili muylusunun korozyon direncine göre % 85 fazla olduğu görülmektedir. Yapar U., bir çalışmasında Orta karbonlu C60 çeliğini termokimyasal borlama yöntemini kullanarak kaplamış ve daha sonra % 10 H₂SO₄ ortamında korozyona maruz bırakmıştır. Bu işlemin sonucunda borlanmış C60 numunesinde korozyon direncinin, borlanmamış numuneye oranla 73 kat arttığını görmüştür. Ayrıca çalışmasında artan karbon oranının da korozyon direncini olumlu etkilediğini görmüştür. Krank mili numunesinin yüksek karbonlu bir çelik olduğu

spektrometre analizinde görüldüğü için (>%0,70) korozyon direncinin % 85 olması beklenen bir sonuçtur (Yapar, 2015).



Şekil 6.30. Kaplanmış ve kaplanmamış krank mili muylusunun korozyon analizi

6.2. Kam Mili Analiz Sonuçları

6.2.1. Kam Mili Spektrometre Analiz Sonuçları

Kam mili muylusundan alınan kesit spektrometre analizine tabii tutulmuştur. Malzeme bileşimleri aşağıda verilmiştir.

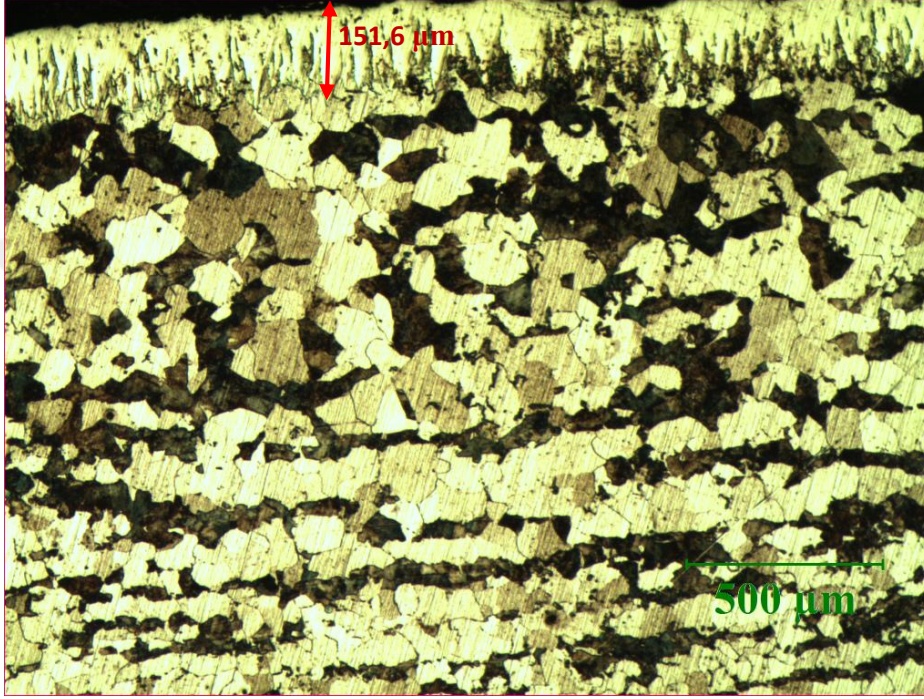
Tablo 6.3. Kam mili muylusu kimyasal bileşimi

Malzeme	% C	% Si	% Mn	% P	% S	% Cr	% Mo	% Ni
Kam Mili Muylusu	Ort.0,180	0,323	0,729	0,0134	0,0127	0,502	0,167	0,408
	0,197	0,322	0,696	0,0135	0,0126	0,485	0,161	0,391

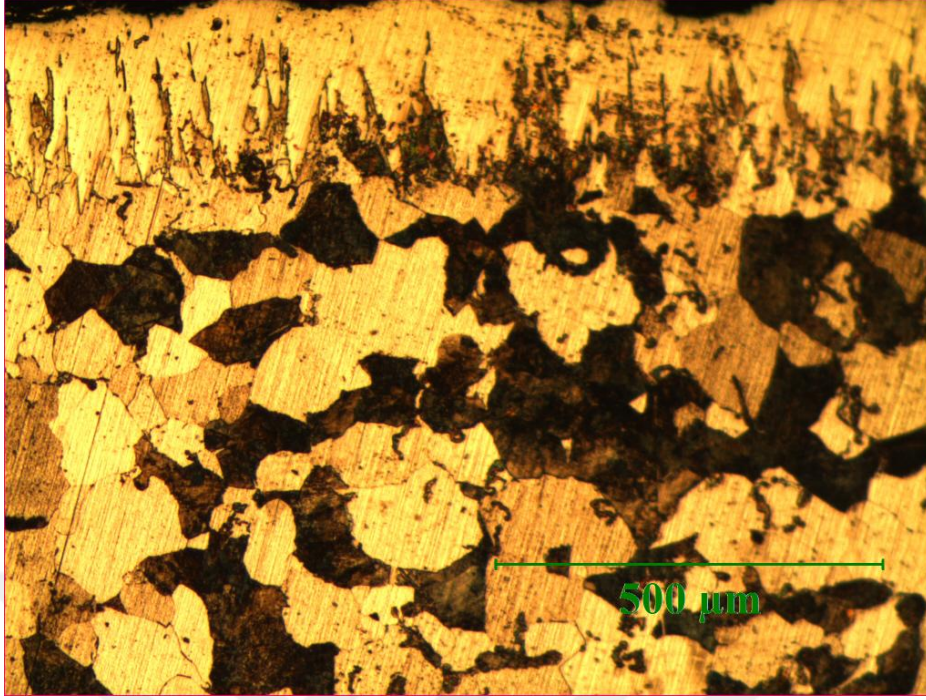
Sonuçlara göre C-Mn-Cr-Mo-Ni oranı dikkat çekmektedir. Malzemedeki kalan miktar Fe elementidir. Bu kimyasal bileşim sonuçlarına göre kam mili muylusu için düşük karbonlu, düşük alaşımlı bir çelik malzeme olduğu düşünülmektedir.

6.2.2. Kam Mili Optik Mikroskop Sonuçları

Kam mili muylusu 950 °C sıcaklıkta 4 saat süreyle borlama işlemine tabii tutulmuştur. Borlama işlemi sonucu optik mikroskopta borlu yapı ve ana tabaka incelenmiştir. Bu görüntüler aşağıda Şekil 6.31 ve Şekil 6.32’de görülmektedir.



Şekil 6.31. Borlama işlemi sonucunda kam mili muylusu optik görüntüsü (50x)



Şekil 6.32. Borlama işlemi sonucunda kam mili muylusu optik görüntüsü (100x)

Optik resimlerinde görüldüğü gibi kaplama tabakası geçiş bölgesi ve ana yapı net bir şekilde görülmektedir. 50x görüntüdeki borlama tabakasındaki kaplama işleminde oluşan fazın maksimum derinliği 151,6 μm olarak ölçülmüştür. Kam milinin optik analizinde düşük alaşımlı düşük karbonlu ötektoid altı, ferrit+perrit fazların varlığı görülmektedir. Borür tabakasında çift fazlı FeB ve Fe₂B fazları görülmektedir. Bu çift fazlı yapı literatürle uyumludur (Matuschka, 1980). Optik resimlerde görünen ana yapı ise ferrit+perlit şeklindedir. Beyaz bölgelerin çok olması dikkat çekmektedir. Bu bölgelerin fazla olmasının nedeni alaşım elementlerinin kimyasal kompozisyondaki yüzdesel varlığı olarak düşünülmektedir. Kam mili düşük alaşımlı bir çelik ve karbon oranı düşük olduğundan dolayı tüm parametrelerinde oluşan borür tabakası çift fazlı FeB+Fe₂B şeklindedir.

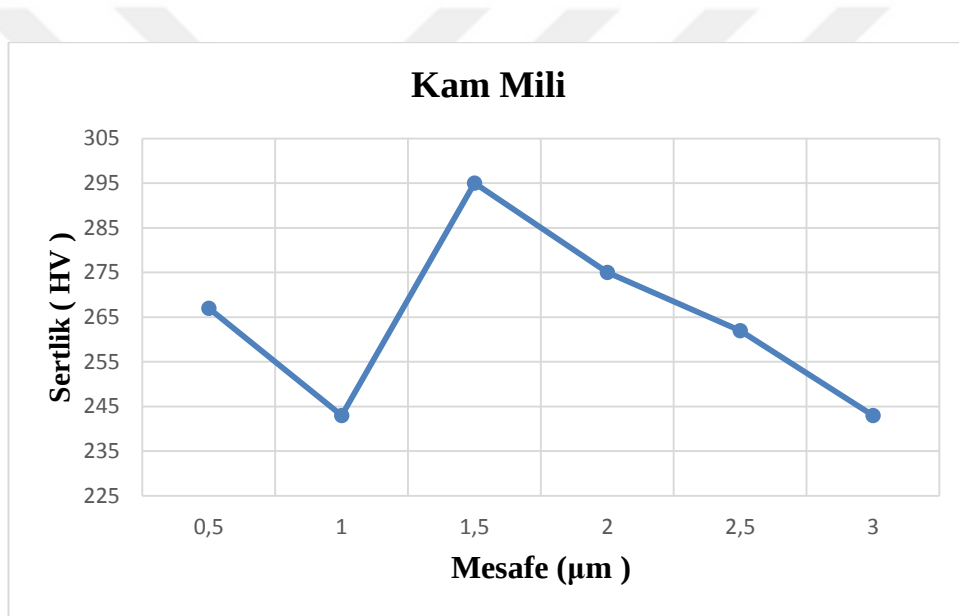
Ayrıca borür tabakasındaki kolonsal yapının yüksek alaşımlı ve yüksek karbonlu çelik olan krank miline göre farkı, uçlara doğru daha ince ve daha sivri dişli bir formda olduğu göstermektedir (ÖZER ve Ay, 2011).

6.2.3. Kam Mili Mikro-Sertlik Sonuçları

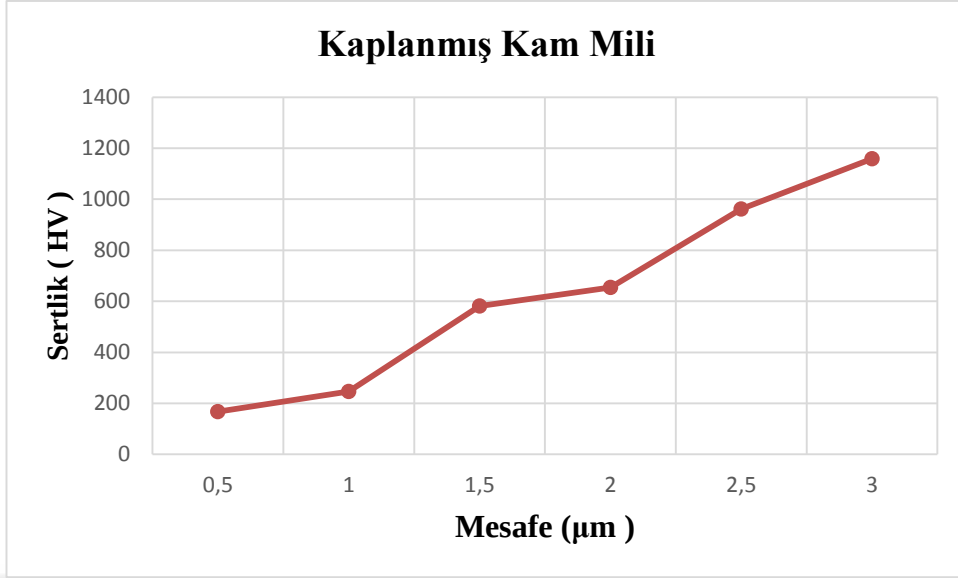
Kaplanmış ve kaplanmamış kam mili muylularının mikro-sertlik ölçümleri HV_{0,05} yük altında ve 0,5 mm aralıklarla yapılmıştır. Numunelerin değişen şartlar karşısında

sertlik değerleri ölçölmüştür. Kaplanmış ve kaplanmamış numunelerden 1'er adet mikro-
sertlik değeri alınarak incelenmiş ve grafikler oluşturulmuştur. Grafikler oluşturulurken
ana tabaka, geçiş bölgesi ve kaplama bölgesinden 2'şer adet mikrosertlik değeri alınmıştır.
Kaplama yapılan numunelerde oluşan borür tabakasındaki sertliklerde yüksek artış
görülmüştür.

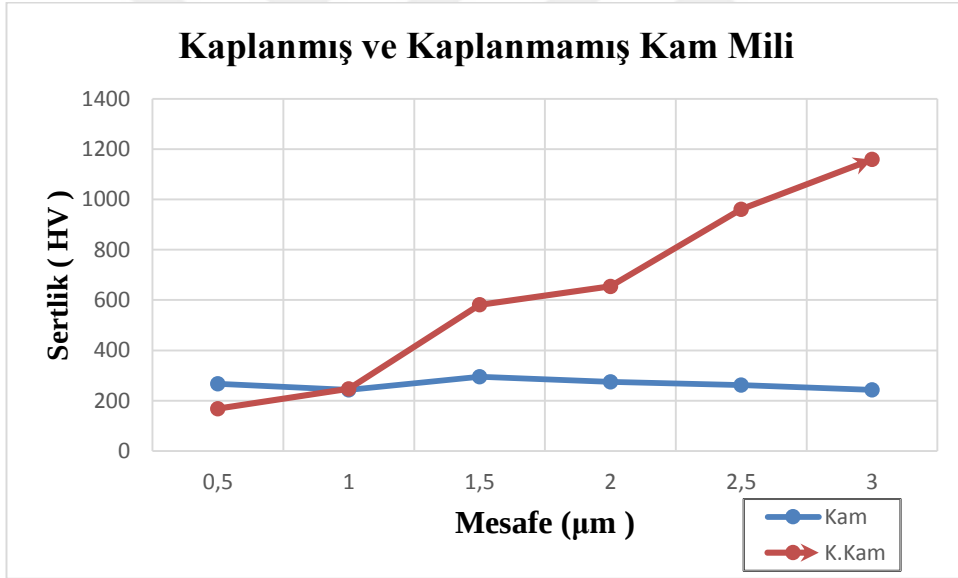
Şekil 6.33'de kaplama yapılmamış kam mili muylusu ile Şekil 6.34'de kaplama
yapılmış kam mili muylusunun mikro-sertlik grafik değerleri görölmektedir. Kaplanmış
kam mili muylusunda ana tabakadan geçiş bölgesine, geçiş bölgesinden de borür
tabakasına doğru değerler alınmıştır. Bu değerlerin borür tabakasına doğru gidildikçe
yükseldiğı görölmüştür.



Şekil 6.33. Kaplanmamış kam mili muylusu ana tabaka mikro-sertlik değerleri



Şekil 6.34. Kaplanmış kam mili muylusu ana tabaka-geçiş bölgesi ve kaplama tabakası mikro-sertlik değerleri



Şekil 6.35. Kaplanmış ve kaplanmamış kam mili muylusu mikro-sertlik değerleri

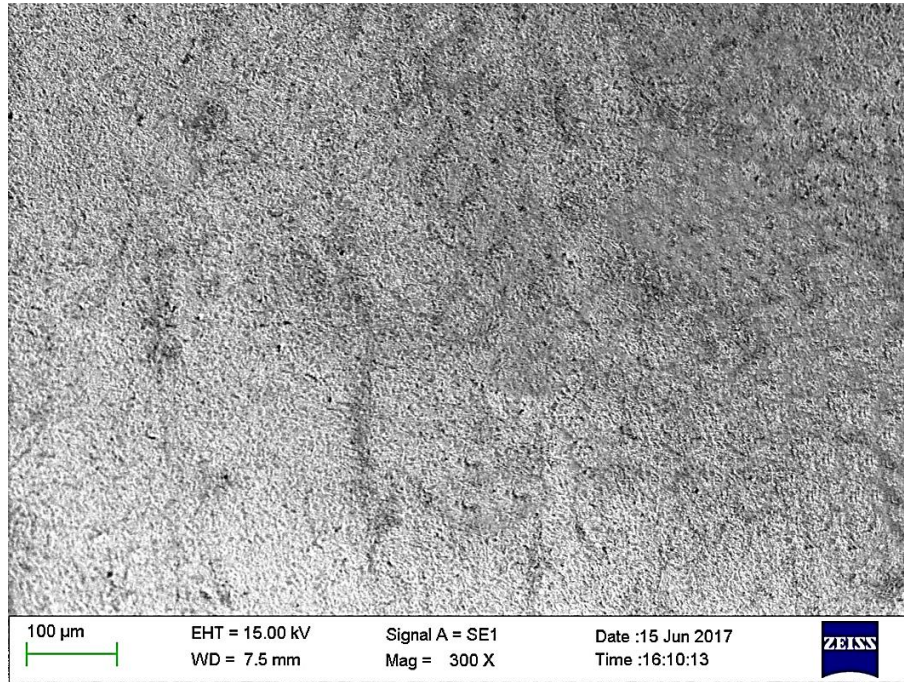
Şekil 6.33’de kaplanmamış kam mili muylusunun mikro-sertlik değerleri görülmektedir. Değerlerden de anlaşılabileceği gibi kaplanmamış kam mili muylusundaki ana tabakanın sertlikleri 243 ile 295 HV arasında değişmektedir. Şekil 6.34’de kaplanmış kam mili muylusunun ana tabaka-geçiş bölgesi ve borür tabakası mikro sertlik değerleri görülmektedir. Bulunan değerlerde en düşük sertlik 168 HV en yüksek sertlik ise 1159 HV olarak ölçülmüştür. Ana tabaka sertlikleri geçiş bölgesine doğru artmaktadır. Geçiş bölgesindeki sertlik değerleri kaplanmamış kam mili ana tabakasındaki sertliklere göre

biraz fazladır. Kaplama tabakasına doğru gidildikçe borür tabakasının sertliği ön plana çıkmaktadır. En yüksek sertlik değerleri borür tabakasında görülmektedir (1159 HV). (Uslu ve Cömert, 2004) yaptıkları çalışmada AISI1040 çeliğini 950 °C sıcaklıkta 6 ve 8 saat borlamış ve 265-1416 HV aralıklarında mikrosertlik sonuçlarına ulaşmışlardır. Bu çalışmaya bakıldığında, borlanmış kam mili muylusunun mikrosertlik değerleriyle benzerlikler gösterdiği görülmektedir.

Şekil 6.35’de ise kaplanmış ve kaplanmamış krank mili muyluları kıyaslanmıştır. Borlanmış ve borlanmamış krank mili numuneleri sertlikleri kıyaslandığında yaklaşık 6,9 katlık bir artışın borlamayla elde edildiği gözlenmiştir. Yapılan deneysel bir çalışmada alaşımsız Ç1035 çeliği katı ortam borlama yöntemiyle 950°C sıcaklıkta kaplanmış ve HV_{0,1} mikrosertlik değeri için ana yapı 266 HV, geçiş bölgesi 681 HV ve kaplama bölgesi 1281 HV olarak belirlenmiştir. Literatürdeki bu çalışmanın, yaptığımız çalışmayla uyumluluğu göze çarpmaktadır (Çalık, Delikanlı ve Uzun, 2004).

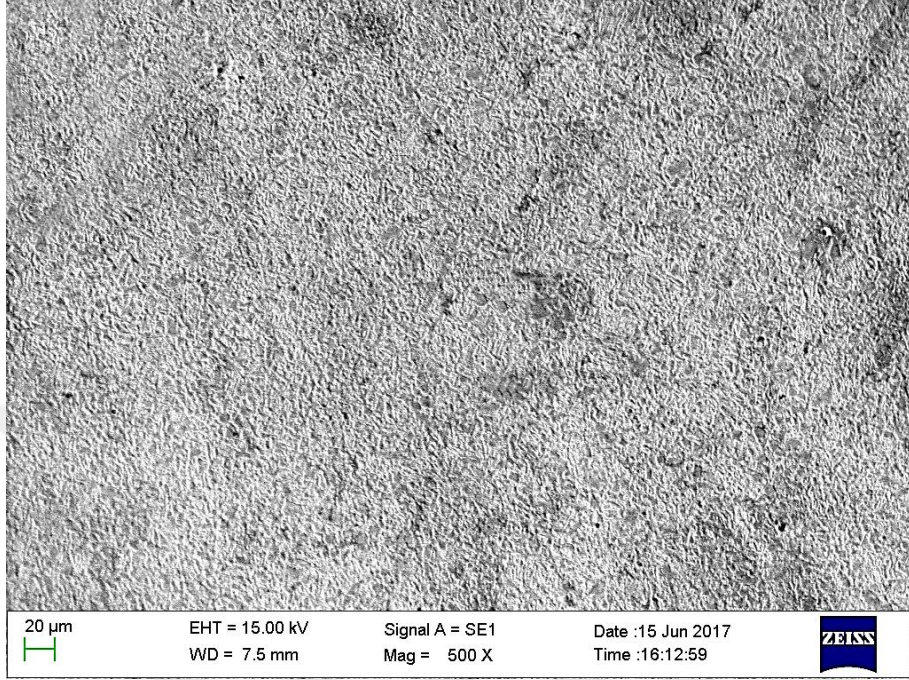
6.2.4. Kam Muylusunun SEM Görüntüleri

Aşağıdaki Şekil 6.36’da kaplanmamış kam mili muylusunun 300x büyütmedeki SEM görüntüsü görülmektedir.



Şekil 6.36. Kaplanmamış kam mili muylusunun 300x büyütmedeki SEM görüntüsü

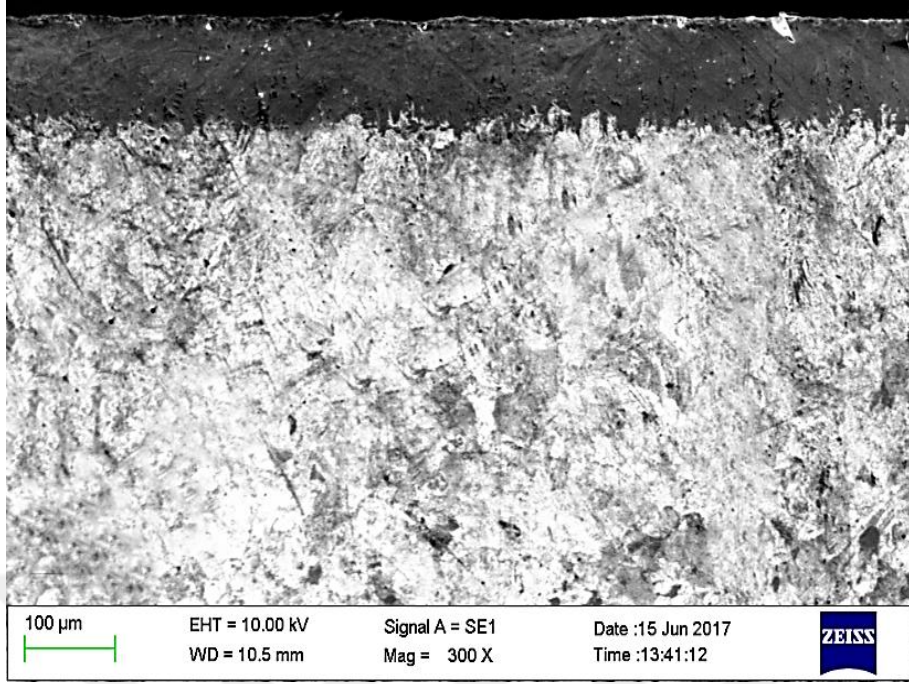
Şekil 6.37’de kaplanmamış kam mili muylusunun 500x büyütmedeki SEM görüntüsü görülmektedir.



Şekil 6.37. Kaplanmamış kam mili muylusunun 500x büyütmedeki SEM görüntüsü

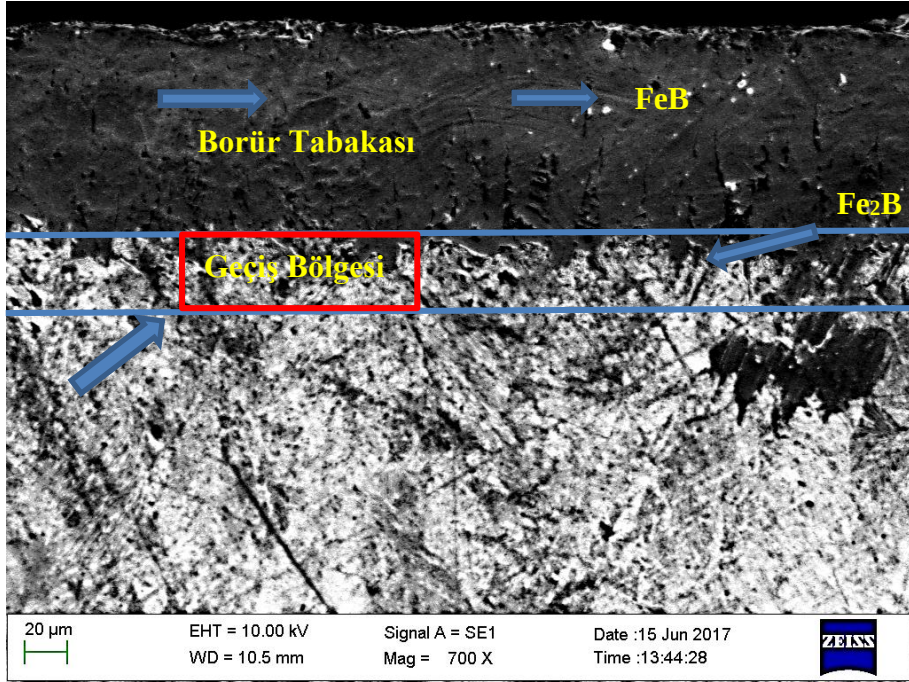
Şekil 6.36 ve Şekil 6.37’deki görüntülerde kam mili muylusunun herhangi bir kaplama işlemi yapılmamış 300x ve 500x görüntüleri görülmektedir. Kam mili muylularının üretimi esnasında yüzeyleri aynı krank mili belirli bir derinliğe kadar sertleştirildiği için bu sertleştirme işlemi esnasında ana yapıda bir sıkışma meydana geldiği düşünülmektedir. Bu işlemle beraber ana yapıda da üst üste binmiş, sıkı bir yapı görüntüsü görülmektedir. Krank miline göre kam milinde yapıdaki taneler daha küçük olarak görülmektedir. Kaplanmamış kam mili muylusunda EDAX analiz sonucunda bu yapı için hakim elementler Fe, Mn, C, Si ve düşük oranda Cr elementidir. Bu elementler EDAX analizinde daha detaylı bir şekilde anlatılmıştır.

Şekil 6.38’de kaplanmış kam mili muylusunun 300x büyütmedeki SEM görüntüsü görülmektedir.



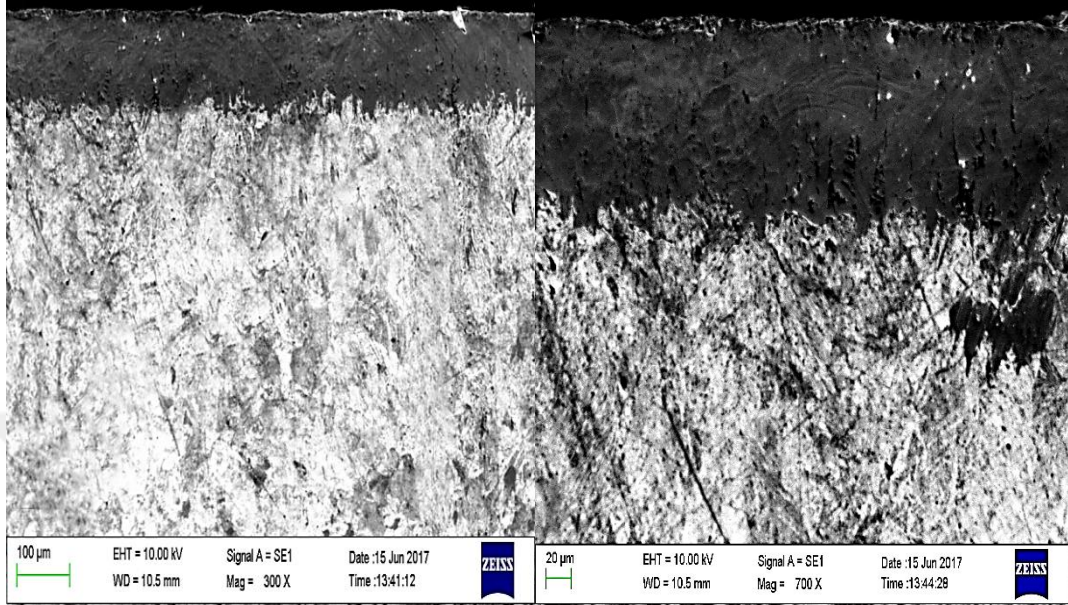
Şekil 6.38. Kaplanmış kam mili muylusunun 300x büyütmedeki ana tabaka geçiş bölgesi ve borür tabakası SEM görüntüsü görülmektedir.

Şekil 6.39’da kaplanmış kam mili muylusunun 700x büyütmedeki SEM görüntüsü görülmektedir.



Şekil 6.39. Kaplanmış kam mili muylusunun 700x büyütmedeki ana tabaka geçiş bölgesi ve borür tabakası SEM görüntüsü görülmektedir.

Şekil 6.40’da kaplanmış kam mili muylusunun 300x ve 700x büyütmelerdeki SEM görüntüsü görülmektedir.

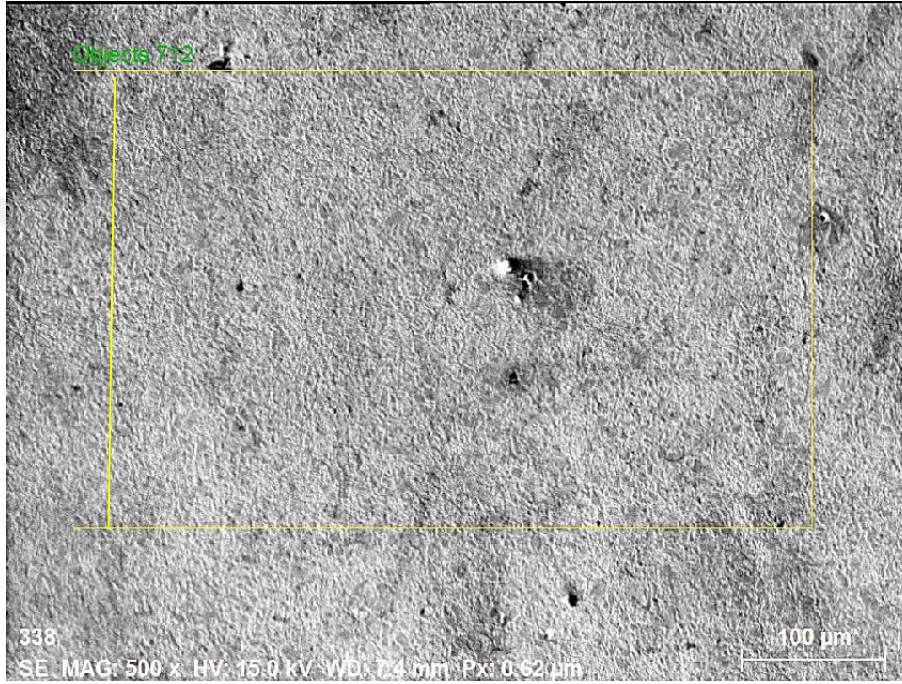


Şekil 6.40. Kaplanmış kam mili muylusunun 300x ve 700x büyütmelerdeki ana tabaka geçiş bölgesi ve borür tabakası SEM görüntüsü görülmektedir.

Şekil 6.38, Şekil 6.39 ve Şekil 6.40’da ki görüntülerde kam mili muylusunun borlama işlemi yapılmış 300x ve 700x görüntüleri görülmektedir. 950 °C sıcaklıkta 4 saat süresince borlama işlemi yapılmış kam mili muylusunda borür tabakası dikkat çekmektedir. Borür tabakası çift fazlı FeB+Fe₂B ve Fe₂B kolonsal tabakası net bir şekilde görülmektedir. Literatür de bu olayı doğrulamaktadır (Sinha, 1991). Buradaki Fe₂B tabakasında kolonsal yapı daha ince ve sivri bir şekilde malzemeye difüze etmektedir. Fe₂B tabakası iç yapıya doğru kolonsal bir şekilde ilerlemiş ve krank milinin dişli yapısına göre daha seyrek ve ince bir dişli yapısı görülmektedir (Özer ve Ay, 2011). Geçiş bölgesi borür tabakasının hemen altında görülmektedir. Ana tabakada ise daha çok açık renkte olup, yer yer koyu renkte ferrit ve perrit morfolojisi görülmektedir. Ana tabaka üzerinde yer yer zımpara çizikleri görülmektedir. Kaplanmış kam mili muylusunda da krank mili muylusunda olduğu gibi borür tabakası üzerinden alınan EDAX analiz sonucunda bu yapı için hakim elementler Fe ve B elementi olmaktadır. Ana yapı üzerinden alınan EDAX analiz sonucunda ise hakim elementler Fe, Mn ve C elementleridir. Bu elementler EDAX analizinde daha detaylı bir şekilde anlatılmıştır.

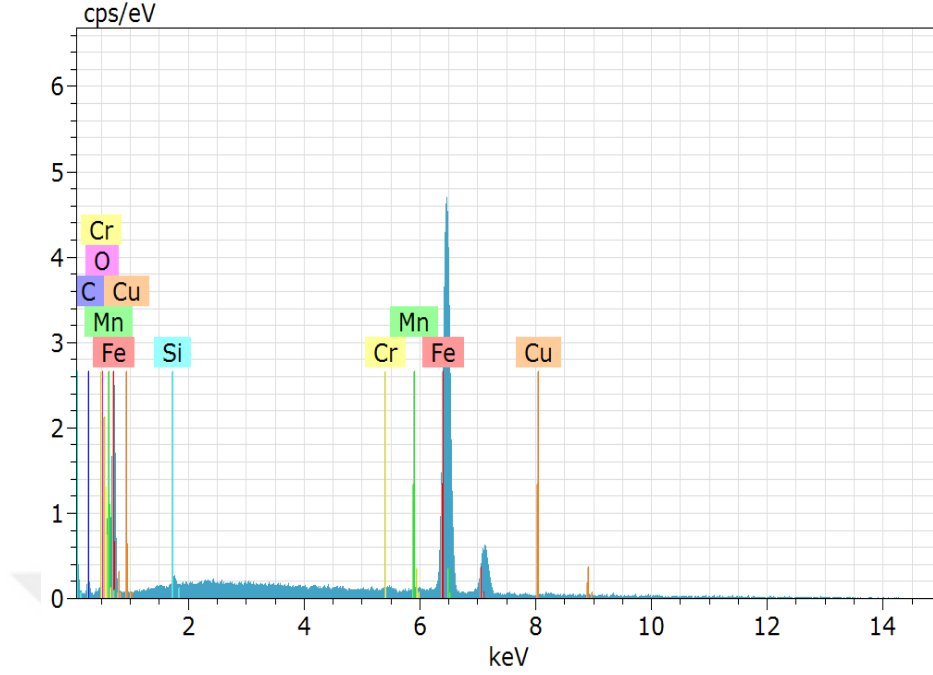
6.2.5. Kam Mili Muylusunun EDAX Analizi

Şekil 6.41’de kaplanmamış kam mili muylusunun 500x büyütmedeki bölgesel EDAX verileri gösterilmektedir. Kam mili muylusu EDAX verilerine göre hakim elementler Fe, Mn ve C olurken düşük oranda bulunan elementler ise Si, O, ve Cr’ dur. Bu sonuçlar kaplanmamış kam milinin spektrometre analiz sonuçlarıyla uyumludur.



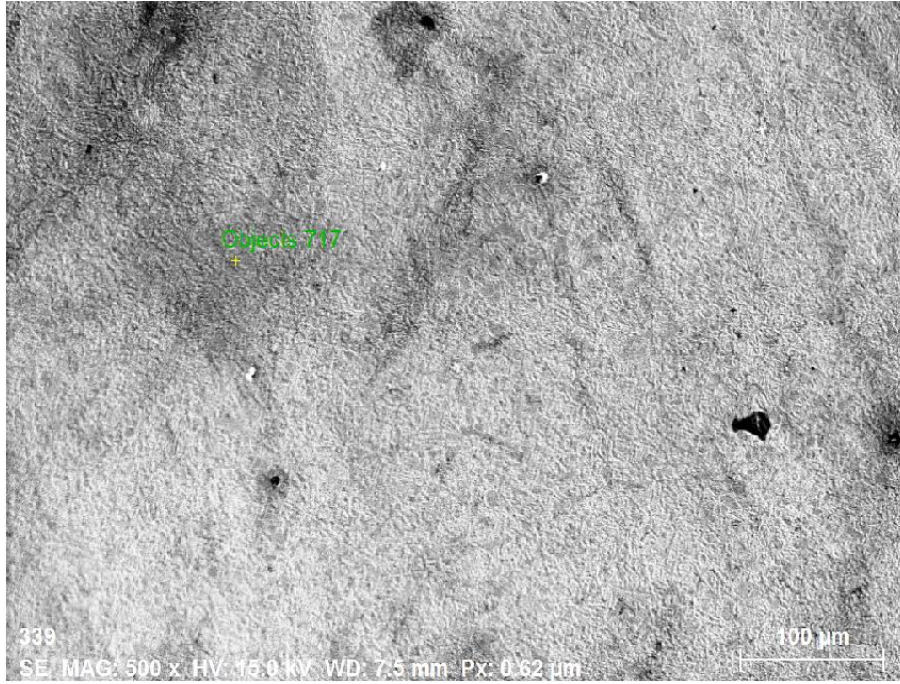
Spectrum: Objects 712

El	AN	Series	Net	unn. C	norm. C	Atom. C	Error (1 Sigma)
				[wt.%]	[wt.%]	[at.%]	[wt.%]
Fe	26	K-series	15271	64.01	88.02	78.66	1.99
Mn	25	K-series	1867	5.96	8.20	7.45	0.26
C	6	K-series	283	2.08	2.87	11.91	0.73
Si	14	K-series	163	0.30	0.41	0.74	0.06
O	8	K-series	101	0.26	0.35	1.10	0.15
Cr	24	K-series	50	0.10	0.14	0.14	0.04
Cu	29	K-series	0	0.00	0.00	0.00	0.00
Total:				72.72	100.00	100.00	



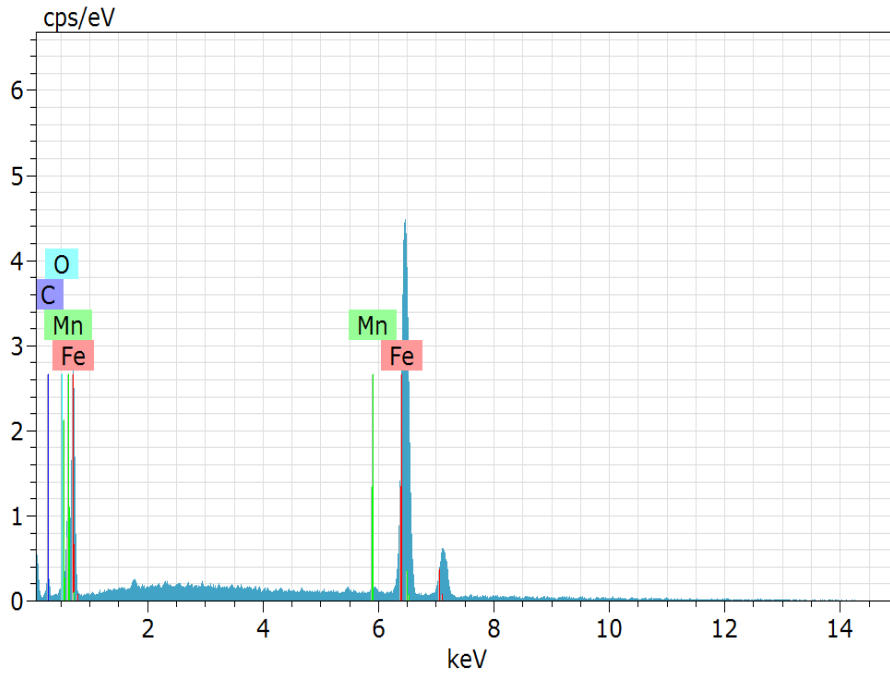
Şekil 6.41. Kaplanmamış kam mili muylusunun bölgesel EDAX verileri

Şekil 6.42’de kaplanmamış kam mili muylusunun 500x büyütmede gri bir bölgeden alınan noktasal spektrum verileri gösterilmektedir. Kam mili muylusu spektrum verilerine göre hakim elementler Fe, Mn, C ve düşük miktarda O elementidir.



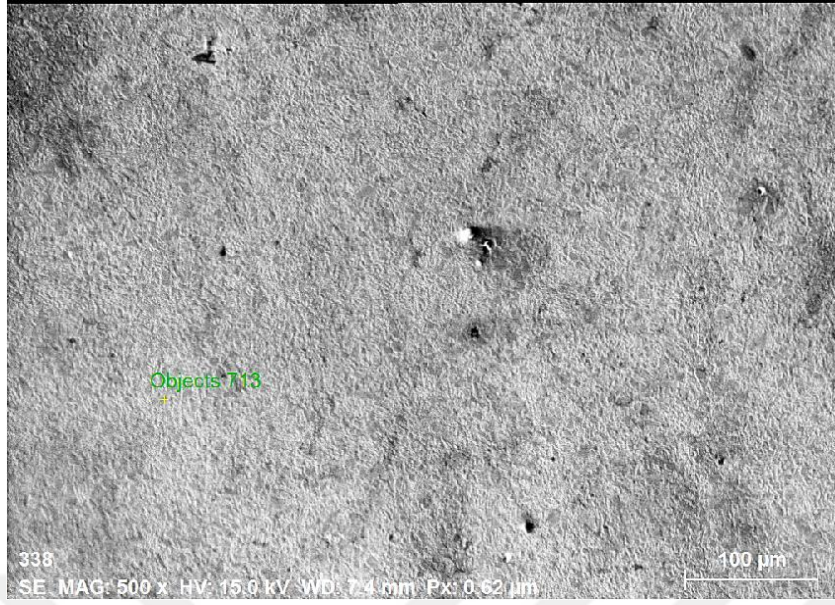
Spectrum: Objects 717

El	AN	Series	Net unkn.	C norm.	C Atom.	Error (1 Sigma)
			[wt.%]	[wt.%]	[at.%]	[wt.%]
Fe	26	K-series	14888	63.32	87.61	1.97
Mn	25	K-series	1897	6.13	8.48	0.27
C	6	K-series	376	2.77	15.57	0.87
O	8	K-series	22	0.06	0.24	0.08
Total:			72.27	100.00	100.00	



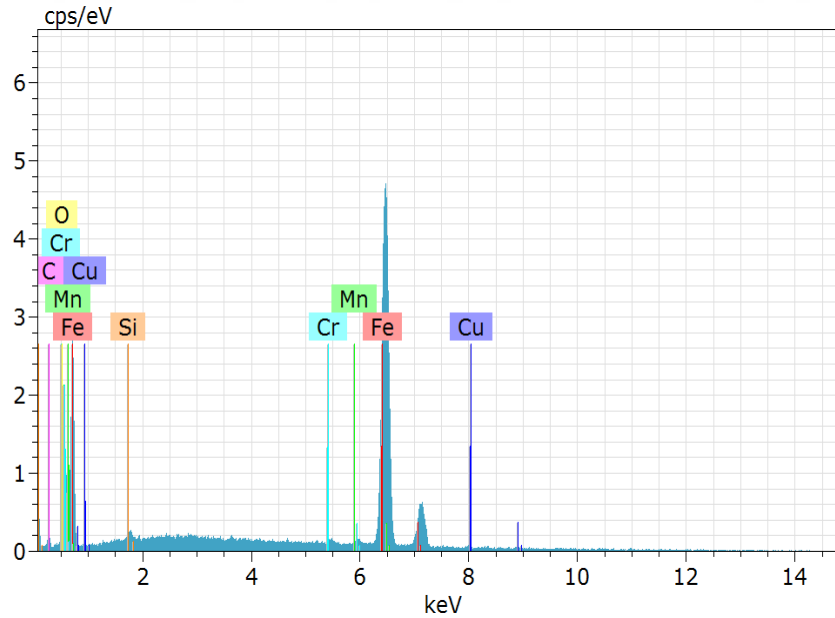
Şekil 6.42. Kaplanmamış kam mili muylusunun gri bir bölgeden alınan noktasal spektrum verileri

Şekil 6.43’de kaplanmamış kam mili muylusunun 500x büyütmede beyaz bir bölgeden alınan noktasal spektrum verileri gösterilmektedir. Kam mili muylusu spektrum verilerine göre hakim elementler Fe, Mn, C olurken, düşük miktarda Si, Cu, Cr elementlerine rastlanılmıştır.



Spectrum: Objects 713

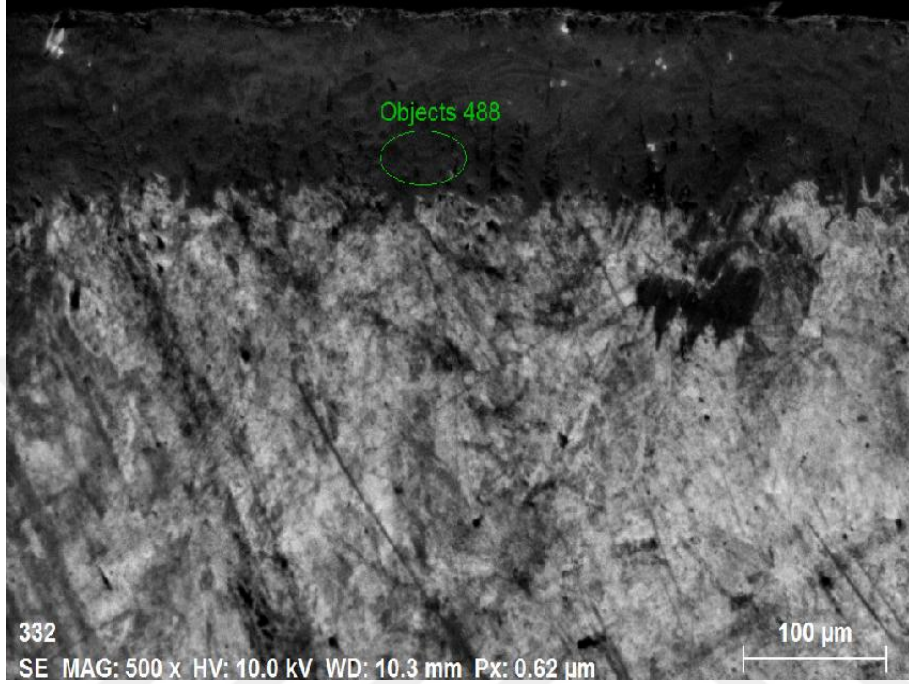
El	AN	Series	Net un.	C norm.	C Atom.	Error (1 Sigma)
			[wt.%]	[wt.%]	[at.%]	[wt.%]
Fe	26	K-series	15689	62.14	88.88	82.26
Mn	25	K-series	1898	5.75	8.22	7.74
C	6	K-series	208	1.46	2.08	8.97
Si	14	K-series	134	0.24	0.34	0.63
Cu	29	K-series	26	0.24	0.34	0.28
Cr	24	K-series	45	0.09	0.13	0.13
O	8	K-series	0	0.00	0.00	0.00
Total:			69.91	100.00	100.00	



Şekil 6.43. Kaplanmamış kam mili muylusunun beyaz bir bölgeden alınan noktasal spektrum verileri

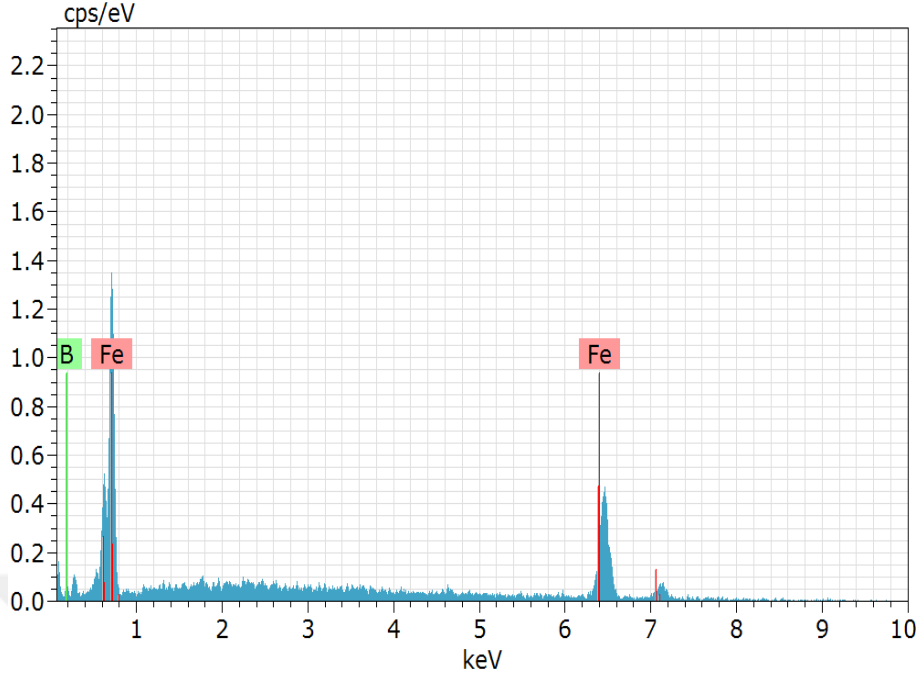
Şekil 6.44’de kaplanmış kam mili muylusunun 500x büyütmedeki kaplama tabakasından alınan noktasal spektrum verileri gösterilmektedir. Kam mili muylusu

spektrum sonuçlarına göre hakim elementler Fe ve B'dir. Bu sonuçlar kaplanmış kam milinin spektrometre analiz sonuçlarıyla uyumludur. Burada dikkat çeken bor elementinin yüzdesel oranının (6,86) literatür değerlerine yakın olmasıdır.(Matuschka, 1980)



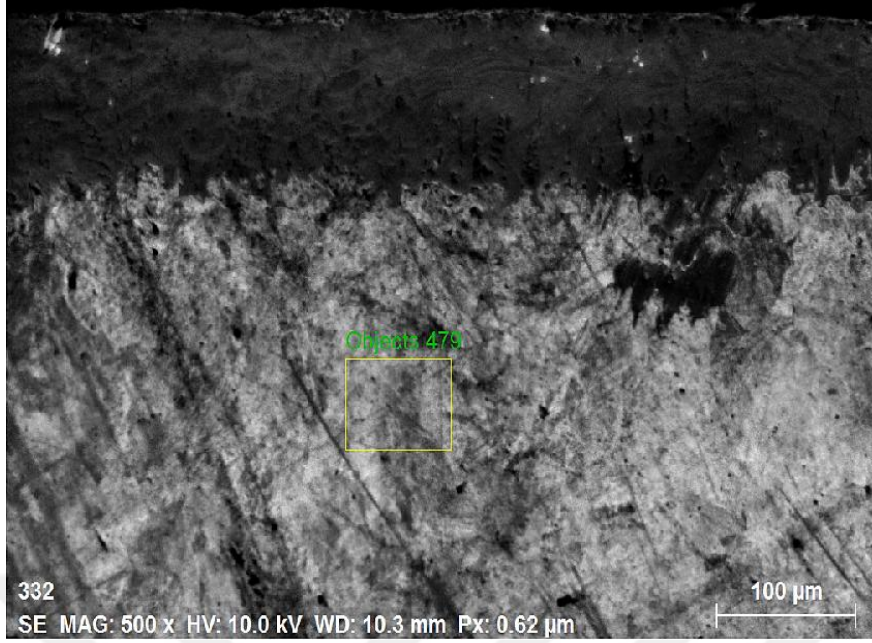
Spectrum: Objects 488

El	AN	Series	Net unkn.	C norm.	C Atom.	C Error (1 Sigma)
			[wt.%]	[wt.%]	[at.%]	[wt.%]
Fe	26	K-series	1277	59.31	93.14	72.43
B	5	K-series	63	4.37	6.86	27.57
Total:			63.68	100.00	100.00	



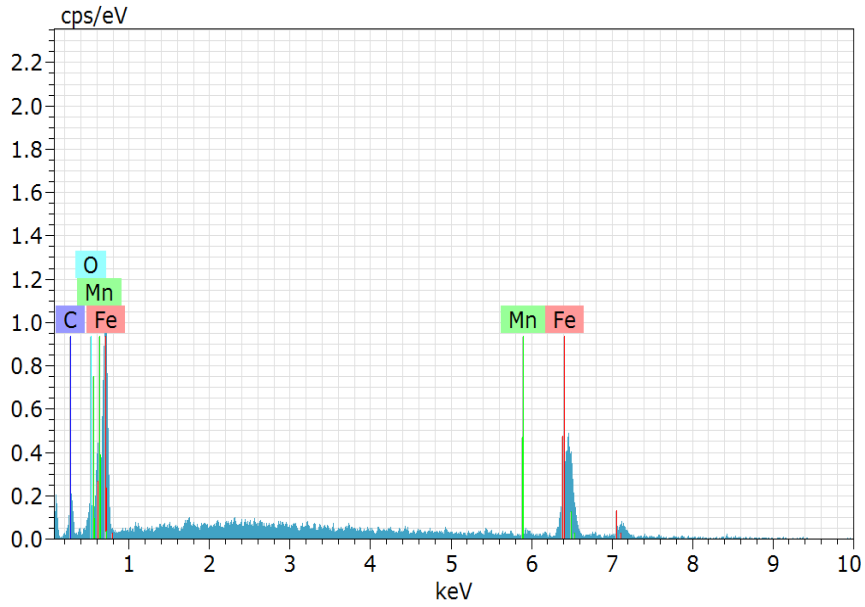
Şekil 6.44. Kaplanmış kam mili muylusunun borür tabakasından alınan noktasal spektrum verileri

Şekil 6.45’de kaplanmış kam mili muylusunun 500x büyütmedeki ana tabakasındaki bölgesel EDAX verileri gösterilmektedir. Kam mili muylusu EDAX verilerine göre hakim elementler Fe, Mn, C ve O elementleridir.



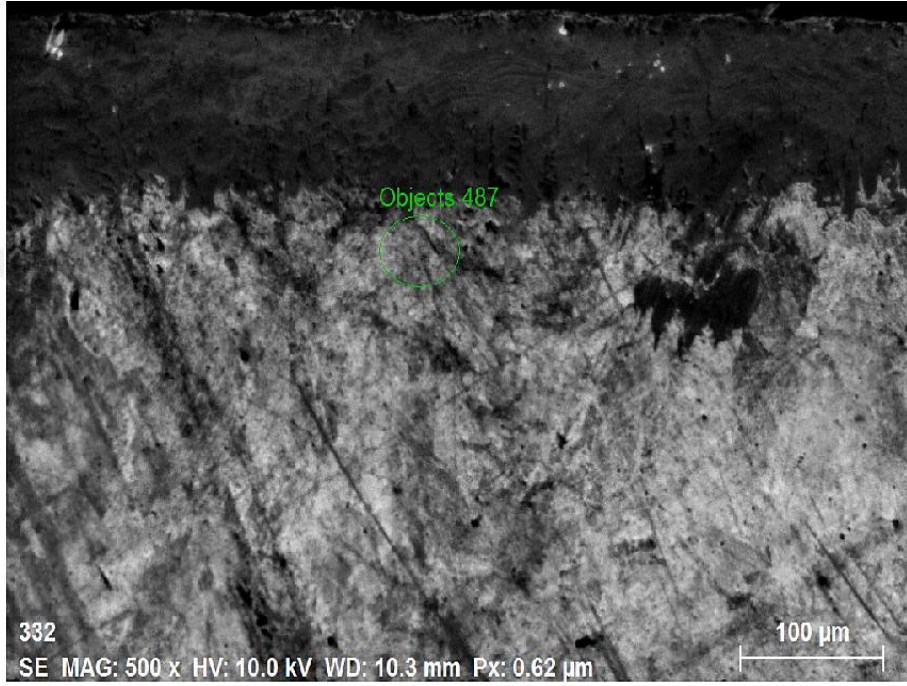
Spectrum: Objects 479

El	AN	Series	Net un.	C norm.	C Atom.	Error (1 Sigma)
			[wt.%]	[wt.%]	[at.%]	[wt.%]
Fe	26	K-series	1384	65.93	89.17	76.96
Mn	25	K-series	168	4.60	6.23	5.46
C	6	K-series	246	2.75	3.72	14.92
O	8	K-series	123	0.65	0.88	2.66
Total:			73.94	100.00	100.00	



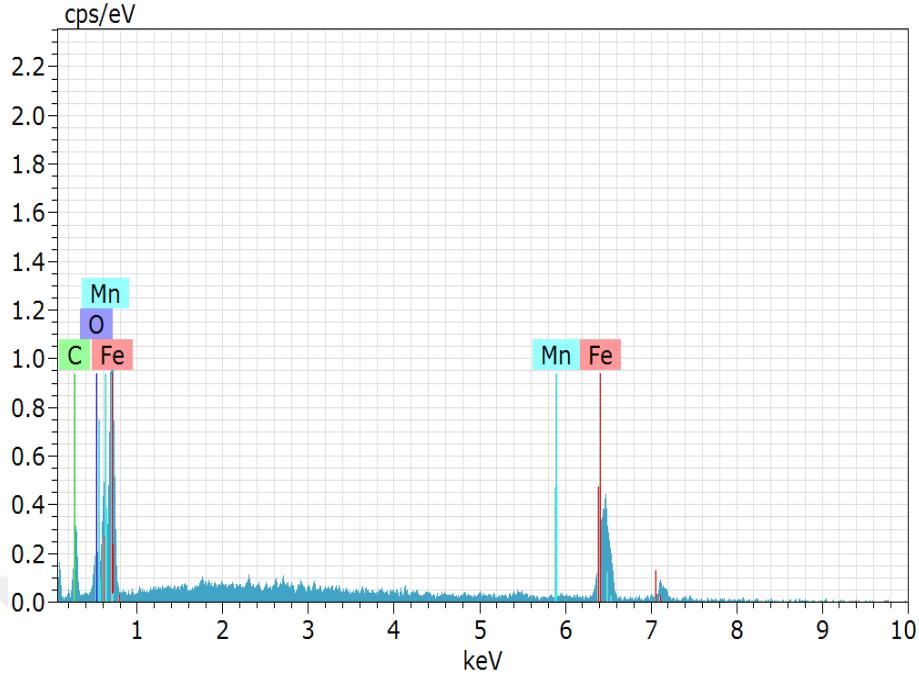
Şekil 6.45. Kaplanmış kam mili muylusunun ana tabakasındaki bölgesel EDAX verileri

Şekil 6.46’da kaplanmış kam mili muylusunun 500x büyütmedeki geçiş bölgesindeki bölgesel EDAX verileri gösterilmektedir. Kam mili muylusu EDAX verilerine göre hakim elementler Fe, Mn, C ve O elementleridir. Geçiş bölgesinde dikkat çeken C oranının yüksek olmasıdır. Bilindiği gibi C elementi borlama esnasında çözünemez ve aşağı doğru itilir. C elementinin norm değerinin % 5,87 olması bu olayın bir sonucudur.



Spectrum: Objects 487

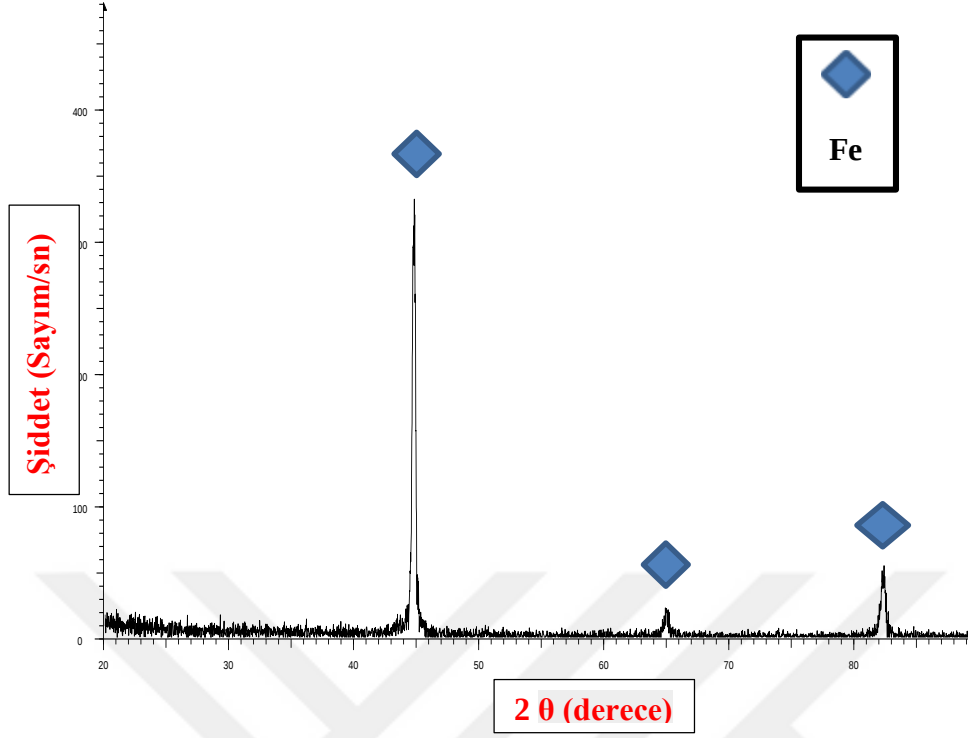
El	AN	Series	Net unkn.	C norm.	C Atom.	C Error (1 Sigma)
			[wt.%]	[wt.%]	[at.%]	[wt.%]
Fe	26	K-series	1167	56.28	85.08	3.34
Mn	25	K-series	167	4.87	7.36	0.51
C	6	K-series	352	3.88	21.69	1.24
O	8	K-series	205	1.12	4.72	0.45
Total:			66.15	100.00	100.00	



Şekil 6.46. Kaplanmış kam mili muylusunun geçiş bölgesindeki bölgesel EDAX verileri

6.2.6. Kam Mili Muylusunun XRD Analizi

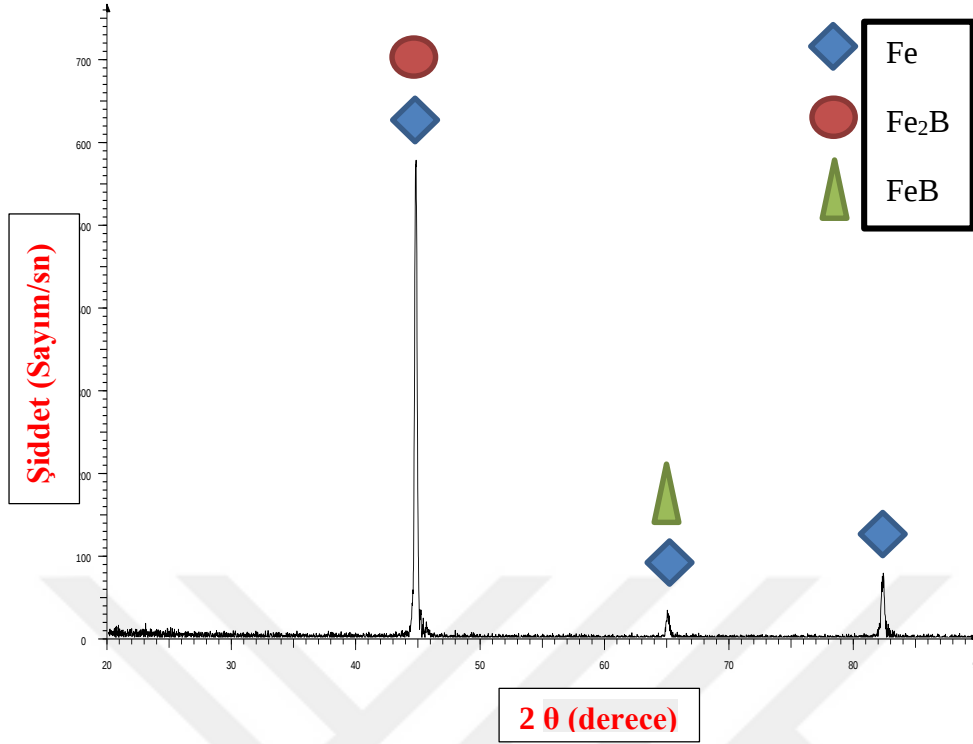
Kaplanmış ve kaplanmamış numunelerin mevcut fazlardaki bileşiklerini belirlemek amacı ile X-ışınları difraksiyon analizi yapılmıştır. Burada amaç borlanmış ve borlanmamış numunelerdeki bileşik farklılıklarını görebilmektir. Şekil 6.47’de kaplanmamış kam mili muylusunun mevcut fazlardaki bileşikleri XRD analizi ile görülmektedir. Malzeme kompozisyonu düşünüldüğünde Fe elementinin fazlarda yer alması olasıdır (% 97,5).



Şekil 6.47. Kaplanmamış kam mili muylusunun XRD analizi

Şekil 6,48’de kaplanmış kam mili muylusunun mevcut fazlardaki bileşikler XRD analizi ile görülmektedir. Burada hakim faz Fe elementi ve Fe_2B bileşiğidir. Fe_2B bileşiğinin pik yapması aslında istenilen bir sonuçtur. Çünkü FeB fazı daha sert ancak daha gevrektrir. Bu nedenle Fe_2B fazının varlığı FeB fazına göre daha çok istenilmektedir. Kaplanmamış krank milinde maksimum Fe elementinin pik şiddeti 650 sayım/sn olurken, kaplanmamış kam milinde bu değer 350 sayım/sn olarak görülmüştür. Spektrometre analizi düşünüldüğünde kaplanmış kam mili çeliği literatürdeki XRD sonuçlarıyla uyumludur.

Bir deneysel çalışmada düşük karbonlu C10 çeliğine termokimyasal borlama işlemi uygulanmış ve alınan XRD sonuçlarına göre hakim fazları FeB ve Fe_2B bulmuştur. Bu çalışmanın kaplanmış kam mili numunesiyle benzer kimyasal kompozisyon ve benzer sonuçlar içerdiği görülmektedir (Yapar, 2015).

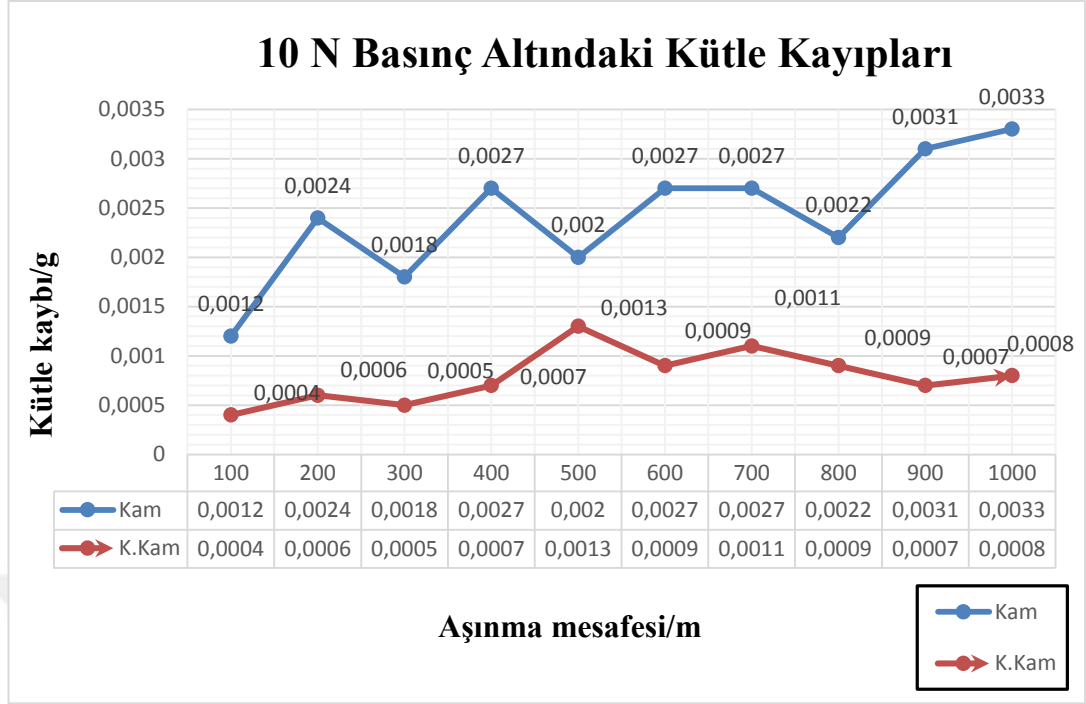


Şekil 6.48. Kaplanmış kam mili muylusunun XRD analizi

6.2.7. Kam Mili Muylusu Aşınma Analizi Sonuçları

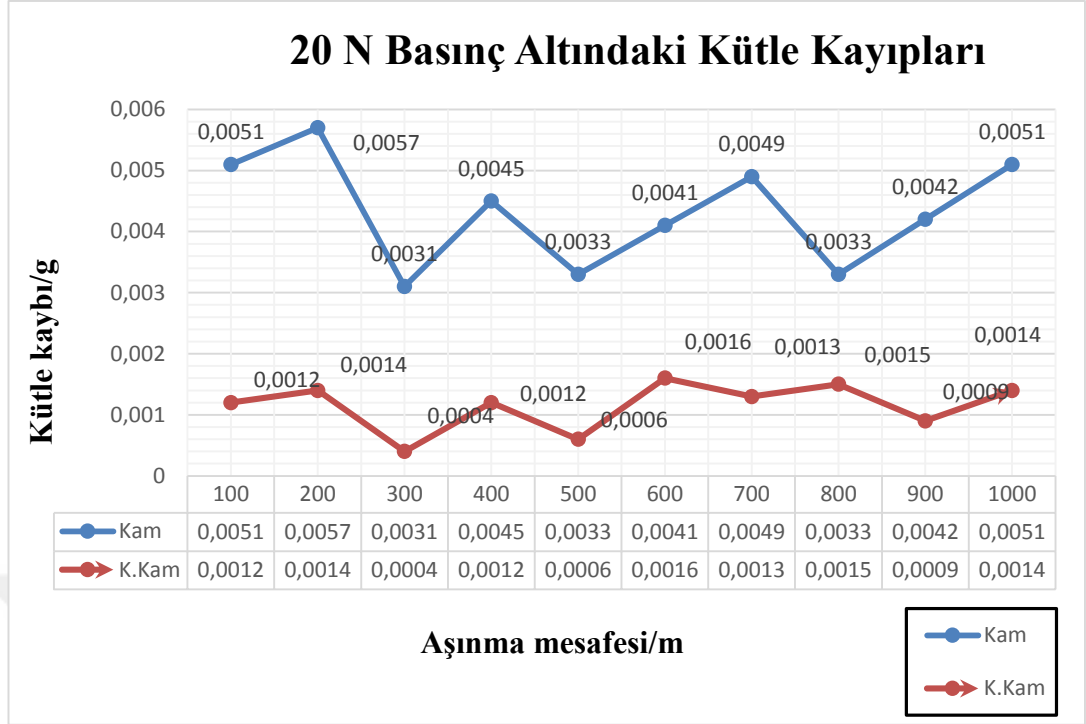
Kam mili motorun çalışmasıyla beraber krank milinde olduğu gibi genellikle muylulardan aşınmaktadır. Muylu yüzeylerine her ne kadar sertleştirme işlemi yapılsa da zamanla metal-metal sürtünmesi ile aşınmaya maruz kalmaktadır. Muylularda yağlama kanalları mevcuttur. Ancak motorun özellikle ilk çalışması sırasında kuru sürtünme gerçekleştiğinden dolayı aşınma oranı en fazla bu esnada gerçekleşmektedir. Kaplanmış ve kaplanmamış krank mili muyluları aşındırıcı milin etkisiyle aşınma analizi yapılmış olup, materyal metot kısmında detaylı bir şekilde anlatıldığı gibi uygulanmıştır.

Şekil 6.49'da borlama işlemi yapılmamış ve borlama işlemi yapılmış kam mili muylusunda, 10 N basınç ve 1000 m kayma mesafesiyle oluşan kütle kayıplarının sonuçları verilmiştir. İlk 100 m'deki kütle kaybı kam milinde 0,0012 g iken, borla kaplanmış kam milinde bu kütle kaybı 0.0004 g'dır. Bu iki değer arasındaki orantısal kütle kaybı 3 katı kadardır. 1000 m sonunda ise kam milindeki kütle kaybı 0,0033 g iken, borla kaplanmış kam milinde kütle kaybı 0.0008 g olarak gerçekleşmiştir. 1000 m sonunda bu iki kütle kaybının orantısal değeri yaklaşık 4,2 katı kadardır. 1000 m'nin sonunda toplam kütle kayıpları kaplanmamış kam milinde 0,0241 g iken, kaplanmış kam milinde 0,0079 g olmuştur. Orantısal kütle kaybı yaklaşık olarak 3,1 katı kadar gerçekleşmiştir.



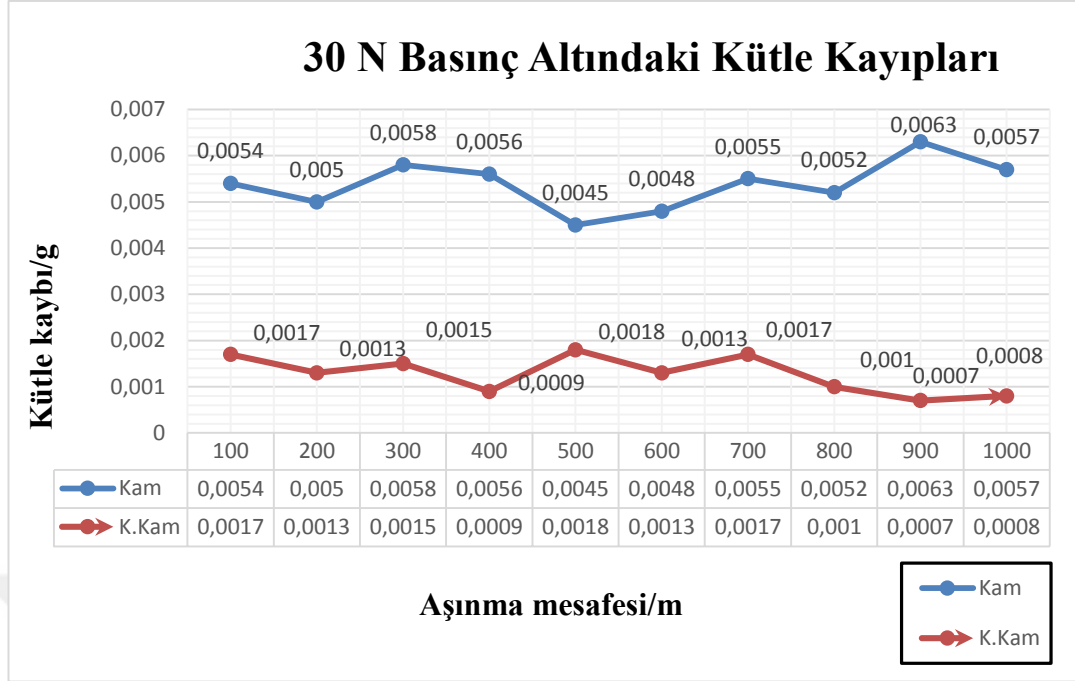
Şekil 6.49. Kam milinde 10 N basınç altında meydana gelen kütle kayıpları

Şekil 6.50’de borlama işlemi yapılmamış ve borlama işlemi yapılmış kam mili muylusunda, 20 N basınç ve 1000 m kayma mesafesiyle oluşan kütle kayıplarının sonuçları verilmiştir. İlk 100 m’deki kütle kaybı kam milinde 0,0051 g iken, borla kaplanmış kam milinde bu kütle kaybı 0.0012 g’dır. Bu iki değer arasındaki orantısal kütle kaybı 4,25 katı kadardır. 1000 m sonunda ise kam milindeki kütle kaybı 0,0051 g iken, borla kaplanmış kam milinde kütle kaybı 0.0014 g olarak gerçekleşmiştir. 1000 m sonunda bu iki kütle kaybının orantısal değeri yaklaşık 3,7 katı kadardır. 1000 m’nin sonunda toplam kütle kayıpları kaplanmamış kam milinde 0,0433 g iken kaplanmış kam milinde 0,0117 g olmuştur. Orantısal kütle kaybı yaklaşık olarak 3,7 katı kadar gerçekleşmiştir.



Şekil 6.50. Kam milinde 20 N basınç altında meydana gelen kütle kayıpları

Şekil 6.51’de borlama işlemi yapılmamış ve borlama işlemi yapılmış kam mili muylusunda, 30 N basınç ve 1000 m kayma mesafesiyle oluşan kütle kayıplarının sonuçları verilmiştir. İlk 100 m’deki kütle kaybı kam milinde 0,0054 g iken, borla kaplanmış kam milinde bu kütle kaybı 0.0017 g’dır. Bu iki değer arasındaki orantısal kütle kaybı yaklaşık 3,2 katı kadardır. 1000 m sonunda ise kam milindeki kütle kaybı 0,0057 g iken, borla kaplanmış kam milinde bu kütle kaybı 0.0008 g olarak gerçekleşmiştir. 1000 m sonunda bu iki kütle kaybının orantısal değeri yaklaşık 7,2 katı kadardır. 1000 m’nin sonunda toplam kütle kayıpları kaplanmamış kam milinde 0,0538 g iken, kaplanmış kam milinde 0,0127 g olmuştur. Orantısal kütle kaybı yaklaşık olarak 4,3 katı kadar gerçekleşmiştir.



Şekil 6.51. Kam milinde 30 N basınç altında meydana gelen kütle kayıpları

Aşınma işlemi sonuçlarına bakıldığında kaplama işlemi yapılmış krank mili muylusunda yaklaşık kütle kaybının 4,3 kat azaldığı görülmektedir. Bor elementinin malzemeye kaplama işlemi sırasında malzemeye iyi nüfuz etmesi ve ince bir oksit filmi oluşturması aşınma oranını düşürmüştür. Böylece metal-metal teması azalmış ve bu temastan kaynaklanacak sürtünme sıcaklığı kısmen düşürüldüğü için malzemelerden kopabilecek talaş miktarını azaltmıştır. Muylular yağlama kanalları vasıtasıyla motor çalışırken sürekli yağlanır. Bu olay muylulardaki oluşabilecek metal temasını düşürüp aynı zamanda soğutma işlemi de görmektedir.

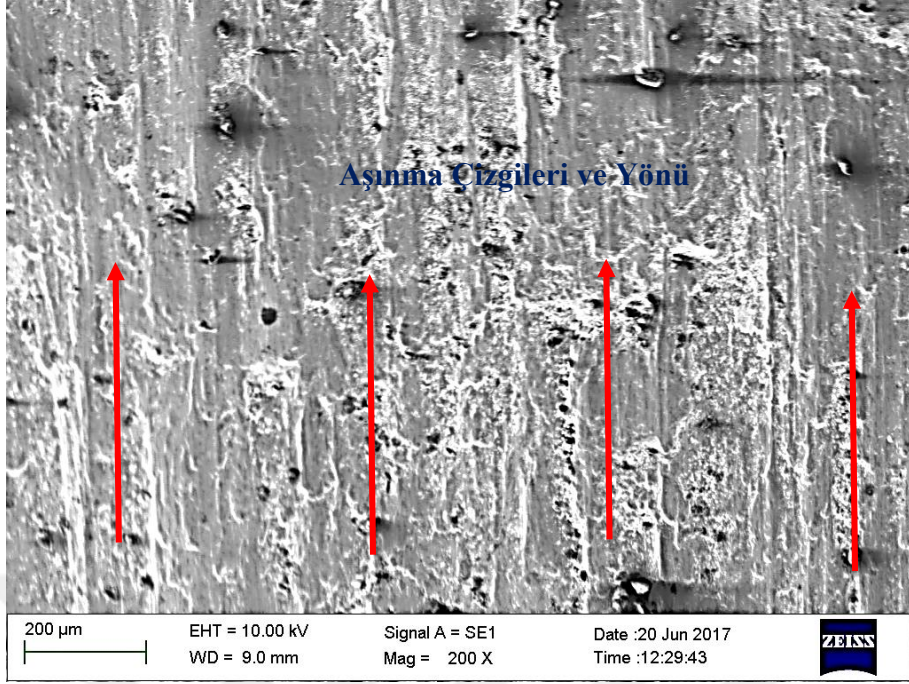
Düşük karbonlu düşük alaşımlı bir çelik olan kam mili muylusu bu deneysel çalışmada 10-20-30 N’luk basınçlar etkisinde 3000 m boyunca borlanmamış kam mili muylusunda kütle kaybı lineer bir şekilde artış göstermiştir. Bor ile kaplanmış muyluda ise bu olay çok daha azdır. Bunun nedeninin borlama işlemi sonucuyla yüzeylerde oluşan ve metal-metal temasını geciktiren oksit filmi olduğu düşünülmektedir. Bu film, katı yağlama görevi üstlenip, sürtünme katsayısını azaltmıştır. Azalan sürtünme katsayısıyla aşınma temas oranı azalmıştır (Selçuk, 1994). Mikro-sertlik sonuçlarında 6,9 kat artış görülen borür tabakasındaki kütle kaybı minimum seviyeye düşürülmüştür. Bu çalışma yağlı bir ortamda yapılacak ve basınç miktarı arttırılacak olursa kaplanmamış ve kaplanmış numunedeki bu lineer artışın daha fazla olacağı düşünülmektedir.

Yıldızlı ve arkadaşları yaptıkları bir çalışmada düşük karbonlu AISI1020 çeliğini borlanmış ve daha sonra eroziv aşınma davranışını incelemişlerdir. Eşit sürelerde eroziv aşınmaya maruz kalan numunelerde borlanmış numunenin üstünlüğü öne çıkmış ve aşınma direncini yaklaşık 5 kat yüksek bulmuşlardır. Düşük karbonlu bir çelik olan kam mili numunesinde, 4,3 kat olarak bulunan aşınma direncinin literatürle uyumu görülmüştür (Yıldızlı, Odabaşı ve Nair, 2003).

6.2.8. Aşınma Sonrası Kam Mili Muylusundaki Sem Görüntüleri

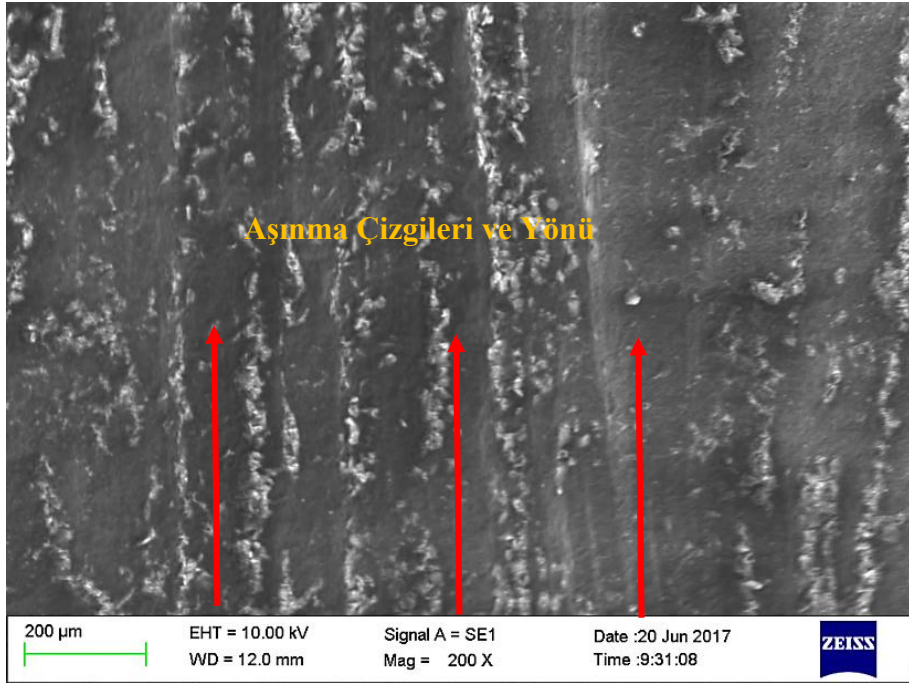
Kuru tip adhesiv aşınma işleminin ardından kam mili numunelerinde meydana gelen yüzey deformasyonlarını incelemek için SEM analizi yapılmıştır. SEM analizinde yüzeylere 200x büyütme yapılarak incelenmiştir. Bu analiz sonuçlarıyla genel anlamda borlanmış yüzey ve borlanmamış yüzeylerin farkı incelenmiştir. Borlanmış yüzeylerin kimyasal bileşimi ve sürtünen yüzeylerin kimyasal kararlılığı eleman çiftleri arasındaki yüzey çekim kuvvetini azaltmış ve dolayısıyla aşınma dayanımını arttırmıştır. Artan aşınma dayanımıyla beraber borlanmış yüzeylerde aşınma sonrası oluşan deformasyonlar daha az ve hala aşınmamış bölgeler görülmüşken, borlanmamış numunelerde deformasyonlar daha yaygındır. Ayrıca borlanmış krank mili numunesinde olduğu gibi yüzeylerde aşınma çizgileri daha ince ve kısa iken, borlanmamış yüzeylerde aşınma çizgileri kalın ve uzundur.

Şekil 6.52’de aşınma deneyi sonrasındaki kaplanmamış kam mili muylusunun 200x yakınlaştırmadaki SEM görüntüsü görülmektedir.



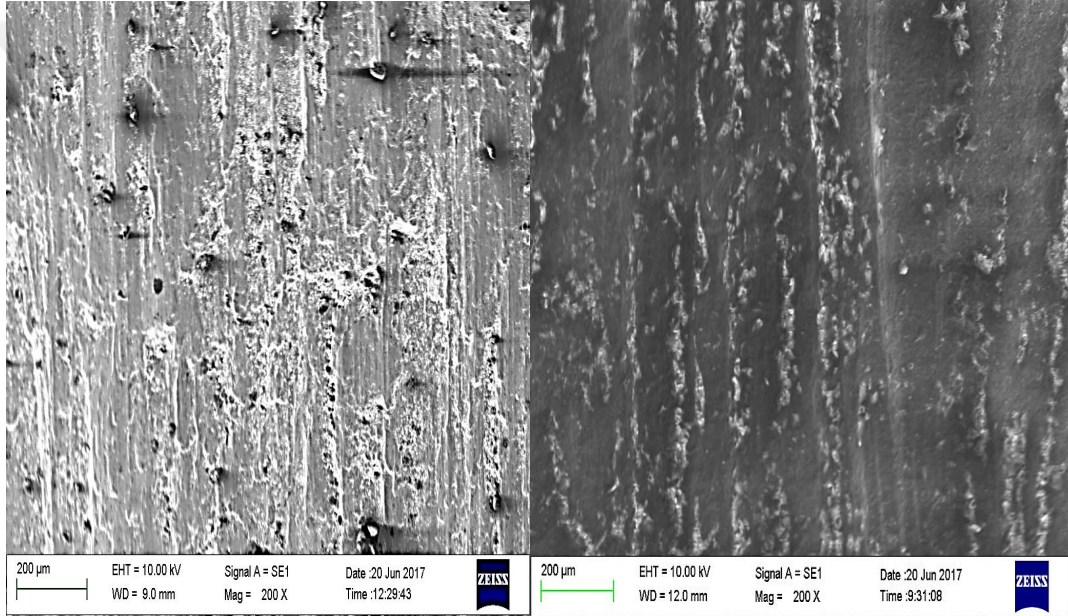
Şekil 6.52. Kaplanmamış kam mili muylusunda aşınma sonrası SEM görüntüsü (200x)

Şekil 6.53’de aşınma deneyi sonrasındaki kaplanmış kam mili muylusunun 200x yakınlıştırmadaki SEM görüntüsü görülmektedir.



Şekil 6.53. Kaplanmış kam mili muylusunda aşınma sonrası SEM görüntüsü (200x)

Şekil 6.54’de aşınma deneyi sonrasındaki kaplanmamış ve kaplanmış kam mili muylusunun 200x yakınlaştırmadaki SEM görüntüleri görülmektedir. Kaplanmamış kam mili muylusunda metal-metal teması sonucu yüzeydeki deformasyonlar krank mili muylusuna göre daha belirgindir. Aşınma çizgileri daha karmaşık bir formda, aşınma yönleri ise dağınık haldedir. Yüzey neredeyse tamamen deforme olmuş durumdadır. Kaplanmış kam milinde ise aşınma çizgileri çok daha ince, yer yer deforme olmayan bölgeler görülmektedir. Ayrıca çizgiler daha düzenli bir formdadır. Şekil 6.53’de borür tabakasındaki oksit filmi, aşınma esnasında yağlayıcı bir görev üstlenmiş metal-metal temasını minimum seviyeye indirmiş ve yüzey kalitesini arttırdığı görülmüştür.



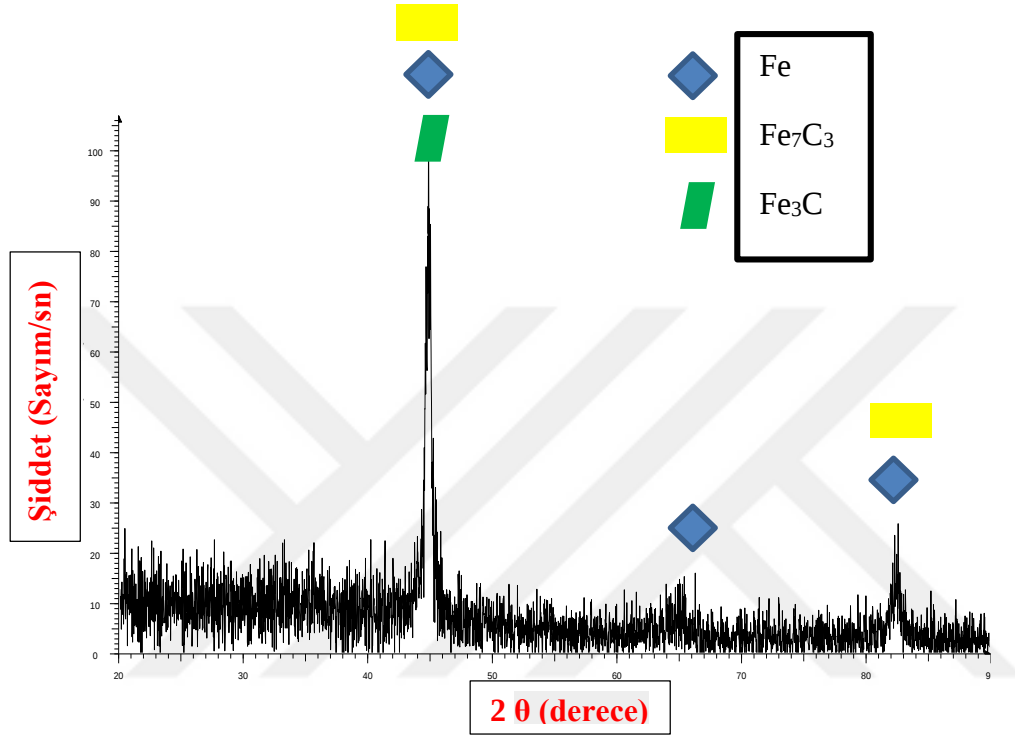
Şekil 6.54. Kaplanmamış ve kaplanmış kam mili muylusunda aşınma sonrası SEM görüntüleri (200x)

6.2.9. Aşınma Sonrası Kam Mili Muylusu XRD Analiz Sonuçları

Aşınma işlemi kam mili numunesi ile aşındırıcı mil arasında bir temas oluşturacağından, bu temas ile değişebilecek fazların analizini belirlemek için tekrar XRD analizi yapılmıştır.

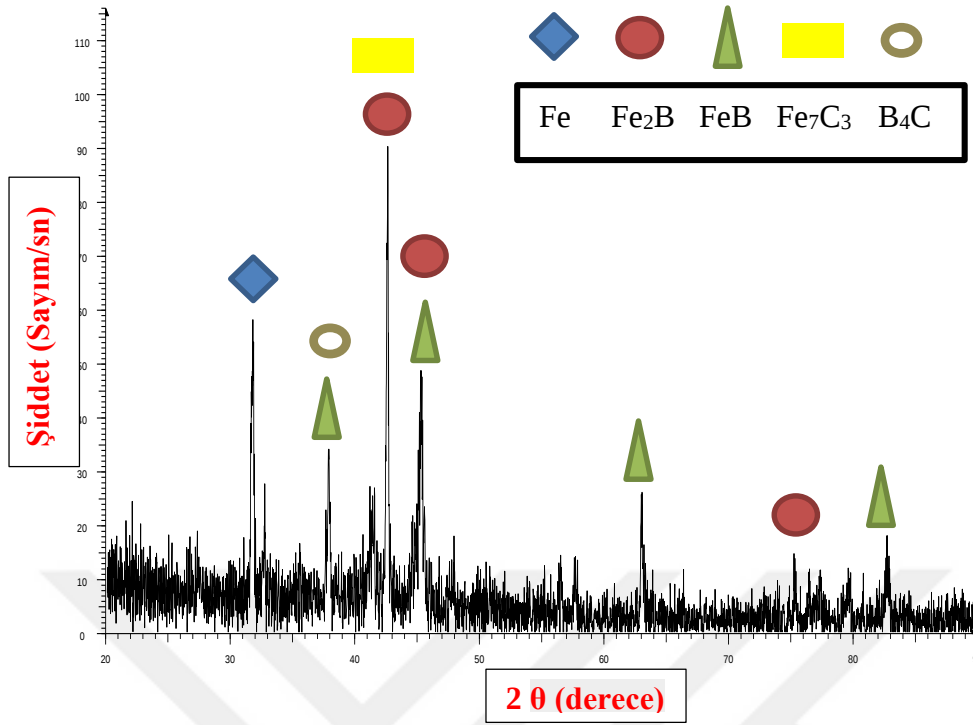
Şekil 6.55’de aşınma sonrası kaplanmamış kam mili muylusunun XRD analizi sonuç grafiği görülmektedir. Burada dikkat çeken husus aşınma işlemi olmayan kaplanmamış kam mili muylusunda XRD analizi sonucu sadece Fe elementinin varlığı görülmekte iken, aşınma işlemi yapılmış kaplanmamış kam mili muylusunda Fe elementinin yanında Fe_7C_3 ve Fe_3C bileşiklerinin de görülmesidir. Bu bileşiklerin varlığının, aşındırıcı mil ile kam

mili malzemesinin teması sonucu olduğu düşünülmektedir. Kam mili numunesinde aşınma öncesi alınan XRD analizinde pikler daha az titreşimli ve düz iken, aşınma sonrası alınan XRD sonuçlarına göre piklerde fazla miktarda titreşim görülmektedir. Bunun sebebi ise aşınma sonrası oluşan yüzey pürüzlülüğü olduğu düşünülmektedir.



Şekil 6.55. Kaplanmamış kam mili muylusunun aşınma sonrası XRD analizi

Şekil 6.56’da aşınma sonrası kaplanmış kam mili muylusunun XRD analizi sonuç grafiği görülmektedir. Aşınma işlemi yapılmayan kaplanmış kam mili muylusundan farklı olarak, aşınma işlemi yapılmış ve kaplanmış krank mili muylusunda Fe_7C_3 ve B_4C fazları görülmektedir. Fe-C elementi bileşik oluşturmaya iki yatkın elementtir. Aşınma sırasında aşındırıcı mil ile temas sonucu kaplanmış kam milindeki Fe-C elementlerinin bileşik oluşturduğu düşünülmektedir. Ayrıca aşınma öncesi kaplanmış kam milindeki XRD sonucunda; fazlar için oluşan piklerin şiddeti yüksek iken, aşınma sonrası XRD sonucunda; oluşan piklerin şiddeti belirgin bir şekilde azalmıştır (550-90 sayım/sn). Bu olayın aşınma esnasındaki düşen yüzey kalitesinin bir sonucu olduğu düşünülmektedir.

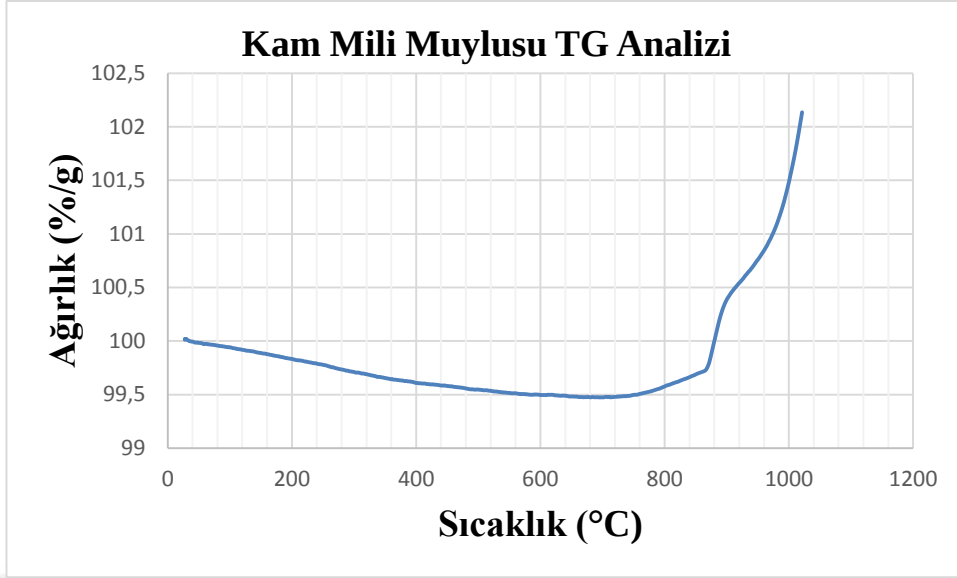


Şekil 6.56. Kaplanmış kam mili muylusunun aşınma sonrası XRD analizi

6.2.10. Kam Mili Muylusunun TG Analiz Sonuçları

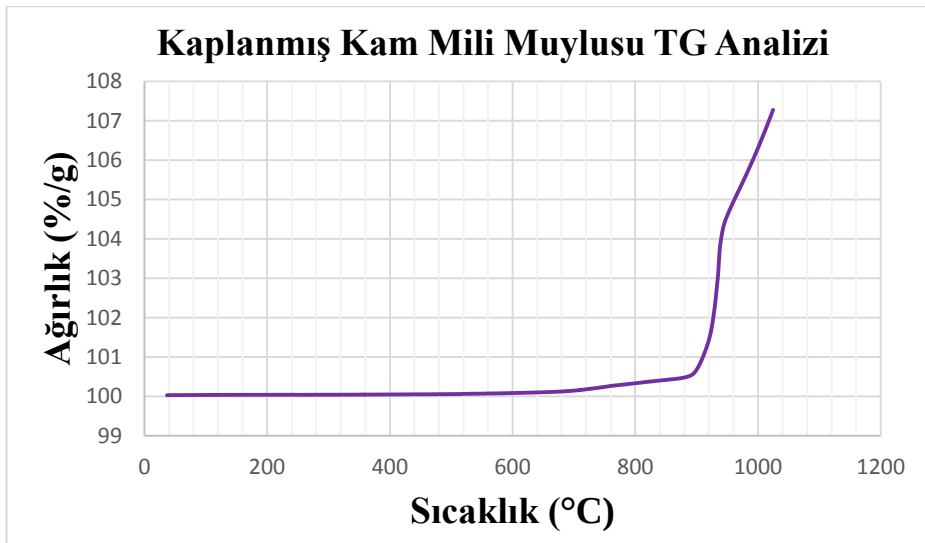
Kam mili ve kaplanmış kam mili muylularının termal oksitlenmeye karşı davranışlarını ve bu oksitlenme sonrası aldıkları kütle oranlarını incelemek amacıyla hava ortamında TGA deneyi yapılmıştır. TGA deneyinde ölçümler 50 °C başlangıç sıcaklığı ile başlayıp 1000 °C sıcaklığa kadar 30 °C/dk ısıtma hızıyla yapılmıştır. Deneyde kullanılan kam mili numuneleri yaklaşık 10x10x10 mm³ ölçülerine kadar küçültülmüştür. Daha sonra kaplanmış ve kaplanmamış kam mili muylularının termal oksitlenme davranışları grafiklerle elde edilmiştir.

Şekil 6.57’de düşük karbonlu düşük alaşımlı kaplanmamış kam mili muylusunun TG analiz grafiği görülmektedir. Grafik eğrisinden görüleceği gibi sıcaklık arttıkça kütle düşüşü lineer olarak 700 °C’ye kadar devam etmektedir. 700 °C’den sonra oksitlenme davranışı kütle artışına neden olmuş ve parabolik olarak devam etmiştir. Grafik verilerine göre ilk ağırlık 9,2961 gr iken, 1000 °C sonunda oksitlenerek ağırlık kazanan numunenin son ağırlığı 9,4934’ tür. Oransal olarak 1000 °C sıcaklık sonunda kazanılan kütle miktarı % 2,12 olmaktadır.



Şekil 6.57. Kaplanmamış kam mili muylusunun TG analizi

Borlama işlemi yapılmış kam mili muylusunun TG analiz grafiği Şekil 6.58’de görülmektedir. Grafik eğrisinden görüleceği gibi sıcaklık arttıkça kütle kazanımı lineer olarak 900 °C’ye kadar artış göstermiştir. 900 °C sıcaklıktan sonra oksitlenme değişimi hız kazanmıştır. 1000 °C sıcaklığa kadar parabolik bir şekilde artış kütle artışı görülmüş ve 1000 °C sıcaklıkta pik değerine ulaşmıştır. Grafik verilerine göre ilk ağırlık 45,6564 gr iken, 1000 °C’nin sonunda oksitlenerek ağırlık kazanan numunenin son ağırlığı 48,9011 gr’dır. Oransal olarak 1000°C’deki sıcaklığın sonunda kazanılan kütle miktarı % 7,1 olmaktadır.

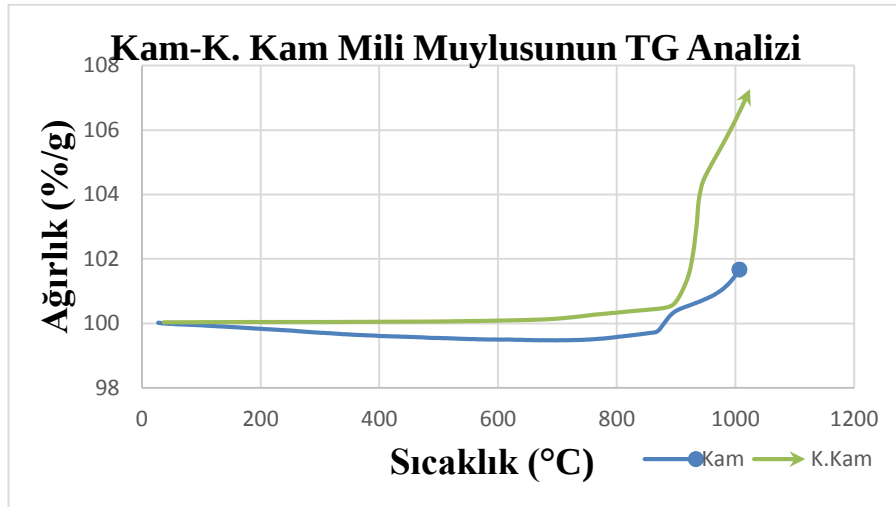


Şekil 6.58. Kaplanmış kam mili muylusunun TG analizi

Şekil 6.59’da kaplanmamış kam mili muylusu ile kaplanmış kam mili muylusunun TGA grafiği görülmektedir. Grafik eğrisinden görüleceği gibi sıcaklık arttıkça kaplanmış numunede kütle kazanımı 900 °C’ye kadar lineer olarak artış göstermiştir. Ancak kaplanmamış numunede 700 °C’ye kadar lineer bir azalma mevcuttur. Kaplanmamış kam mili muylusunda oksitlenme hızı 800 °C’de başlarken bor ile kaplanmış kam mili muylusunda yüksek kütle kazanımı 900 °C’de başlamaktadır.

Viricelle B₄C ile yaptığı bir çalışmada yüzeylerde oluşan boroksidin 800 °C sıcaklığa kadar vizkoz bir karakterde zayıf gazlaşma özelliğine sahip olduğunu 900 °C’den sonra ise boroksidin gazlaşması ile birlikte koruyucu özelliğinin ortadan kalkarak oksidasyonun hızlandığını belirtmişlerdir. Şekil 6.58’de görülen TG eğrisi bu olayı kanıtlayan bir durumdadır (Viricelle vd, 2000).

Şekil 6.59’a bakılarak borlama işleminin oksitlenme başlangıç süresini yaklaşık 100 °C geciktirdiği görülmektedir. 1000 °C sıcaklıkta her iki eğri de pik değerine ulaşmıştır. Ancak pik değerleri arasında oransal farklılıklar gözlemlenmiştir. Grafik verilerine göre kaplanmamış kam mili muylusunda kütle kazanımı % 2,12 iken, kaplanmış kam mili muylusunda bu oran % 7,1 olmaktadır. Aradaki oransal fark yaklaşık % 5 tir. Bu olayda ne kadar orantısız olarak oksitlenme davranışlarındaki kütle kazanımı borlanmış numunede daha fazla olsa da yüksek oksitlenme davranışını yaklaşık 100 °C geciktirdiği için borlamanın olumlu yönde etkisi olmaktadır. Motor çalışırken kam mili muylularında bu yüksek sıcaklıklara ulaşılmadığından TG analizi bakımından borlama işleminin uygulanması pozitif bir yönde etki edecektir.

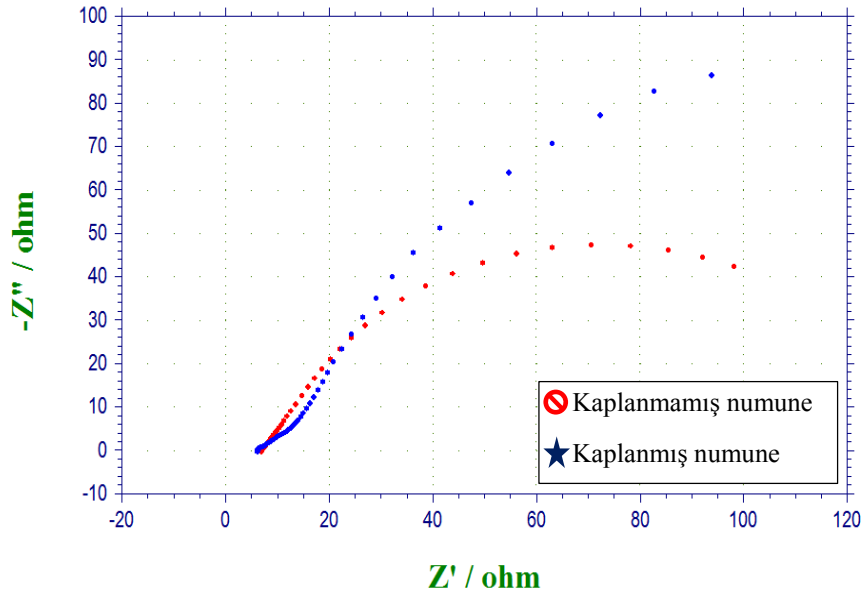


Şekil 6.59. Kaplanmış ve kaplanmamış kam mili muylusunun TG analizi

6.2.11. Kam Mili Muylusunun Korozyon Sonuçları

Şekil 6.60'da görülen Nyquist diyagramında kaplanmamış kam mili muylusu ve Ekabor-2 tozu ile kaplanmış kam mili muylusuna ait yarım daireler, malzemenin % 3,5 NaCl sulu çözeltisi içerisinde göstermiş olduğu direnç değerleridir. Ekabor-2 ile kaplanmış kam mili muylusunun korozyon direnci, kaplanmamış kam mili muylusunun korozyon direncine göre % 21 fazla olduğu görülmektedir.

(Yapar, 2015) Düşük karbonlu C10 (% 0,13) çeliğini termokimyasal borlama yöntemini kullanarak kaplamış ve daha sonra % 10 H₂SO₄ ortamında korozyona maruz bırakmıştır. Bu işlemin sonucunda borlanmış C10 numunesinde korozyon direncinin, borlanmamış numuneye oranla 3 kat arttığını görmüştür. Karbon oranının düşmesi korozyon direncini de düşürmüştür ancak yine de olumlu yönde etkilemiştir. Kam mili numunesinin düşük karbonlu bir çelik olduğu spektrometre analizinde görüldüğü için (% 0,18) korozyon direncinin % 21 olması beklenen bir sonuçtur.



Şekil 6.60. Kaplanmış ve kaplanmamış kam mili muylusunun korozyon analizi

6.3. Volan Analiz Sonuçları

6.3.1. Volan Spektrometre Analiz Sonuçları

Volan'dan alınan kesit spektrometre analizine tabii tutulmuştur. Malzeme bileşimleri aşağıda verilmiştir.

Tablo 6.4. Volanın kimyasal bileşimi

Malzeme	% C	% Si	% Mn	% P	% S>	% Cr	% Mo	% Ni
Volan	Ort.3,49	L 2,09	0,688	0,0135	0,140	0,0980	0,0056	0,0058
	3,83	L 2,03	0,683	0,0172	0,141	0,0846	0,0049	0,0030

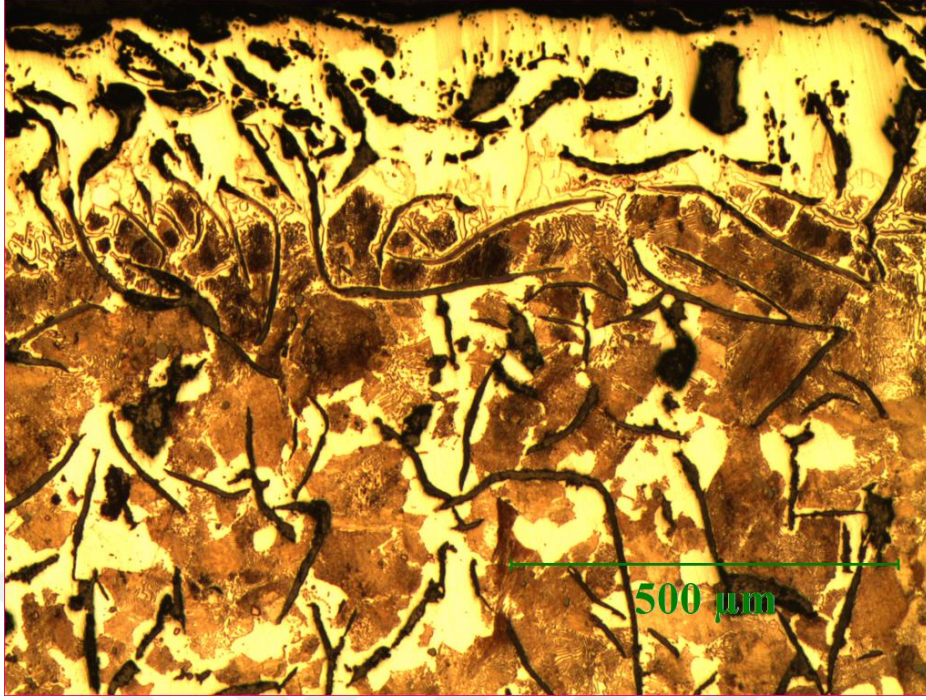
Sonuçlara göre yüksek karbon ve silisyum oranı dikkat çekmektedir. Malzemedeki kalan miktar Fe elementidir. Bu kimyasal bileşim sonuçlarına göre volanın dökme demir bir malzeme olduğu görülmektedir.

6.3.2. Volan Optik Mikroskop Analiz Sonuçları

Volan 950 °C sıcaklıkta 4 saat süreyle borlama işlemine tabii tutulmuştur. Borlama işlemi sonucu optik mikroskopta borlu yapı ve ana tabaka incelenmiştir. Bu görüntüler aşağıda Şekil 6.61 ve Şekil 6.62’de görülmektedir.



Şekil 6.61. Borlama işlemi sonucunda volanın optik görüntüsü (50x)



Şekil 6.62. Borlama işlemi sonucunda volanın optik görüntüsü (100x)

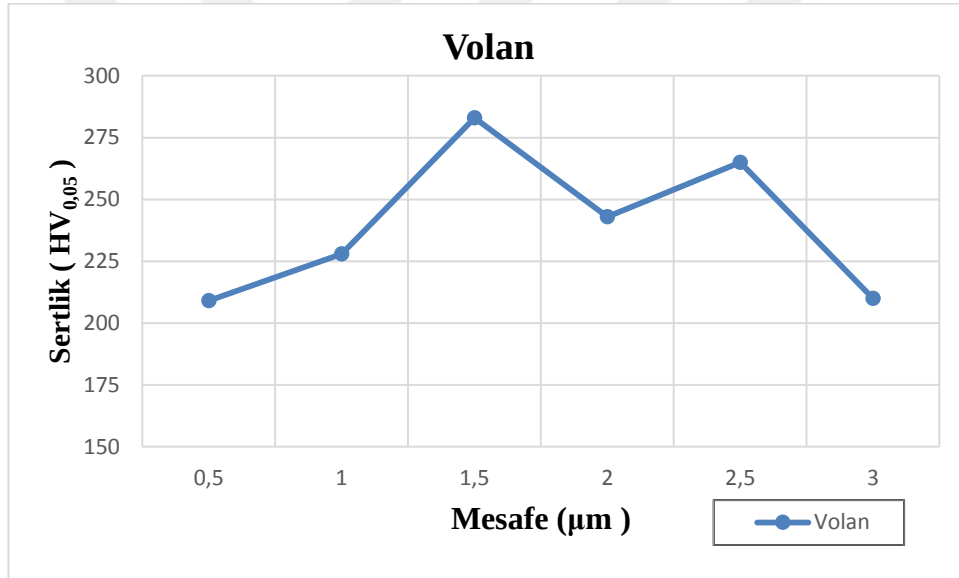
Optik resimlerinde görüldüğü gibi kaplama tabakası geçiş bölgesi ve ana yapı net bir şekilde görülmektedir. 50x görüntüdeki borlama tabakasındaki kaplama işleminde oluşan fazın maksimum derinliği 131,4 μm olarak ölçülmüştür. Optik resimlerde volanın lamel grafitli dökme demir olduğu görülmektedir. Borür tabakasında çift fazlı FeB ve Fe₂B fazları görülmektedir. Yüksek karbon ve silisyum oranının varlığı borür tabakası içerisinde de görülmektedir. Karbon ve silisyum oranının yüksek olması borlama esnasında ana yapının içeri itilmesine yol açmıştır. Ayrıca karbon oranının yüksek olması borlama işini zorlaştırmıştır. Bunun sonucunda Fe₂B tabakasındaki kolonsal yapının düzleştiği görülmektedir.

Ayrıca bor atomunun yarıçapı: 85 pm ve karbon atomunun yarı çapı: 70 pm olduğundan dolayı borlama işlemi esnasında bor atomları demir atomları ile bağ oluşturmamaktadır. Karbonun borlamaya karşı gösterdiği direnç buradan da anlaşılmaktadır. Dökme demirler malzemelere uygulanan borlama işlemi literatür ile uyumludur (ÖZER ve Ay, 2011).

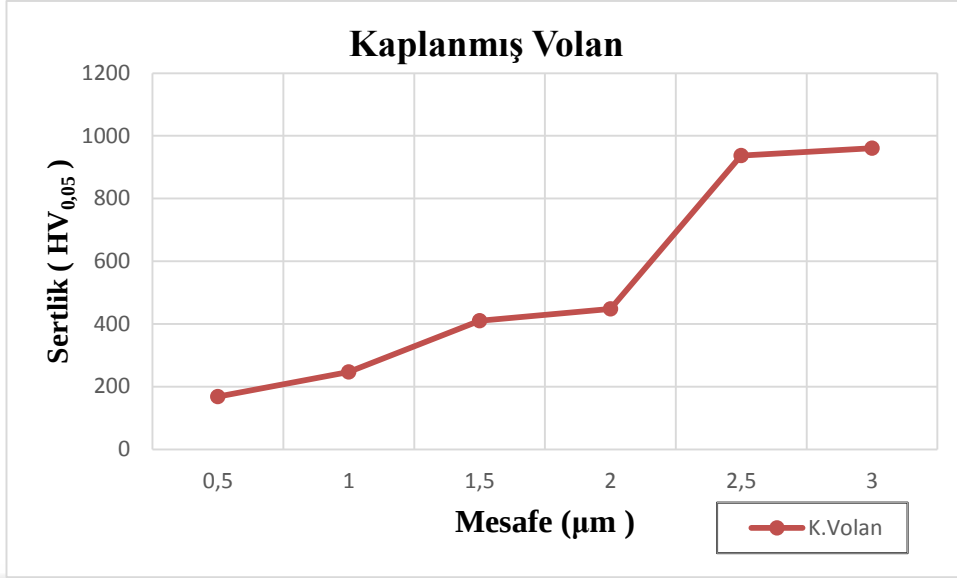
6.3.3. Volan Mikro-Sertlik Sonuçları

Kaplanmış ve kaplanmamış volanın mikro-sertlik ölçümleri $HV_{0,05}$ yük altında ve 0,5 mm aralıklarla yapılmıştır. Numunelerin değişen şartlar karşısında sertlik değerleri gözlemlenmiştir. Kaplanmış ve kaplanmamış bölgelerden 1'er adet numune alınarak mikro-sertlik değerleri incelenmiş ve grafikler oluşturulmuştur. Grafikler oluşturulurken ana tabaka, geçiş bölgesi ve kaplama bölgesinden 2'şer adet mikrosertlik alınmıştır.

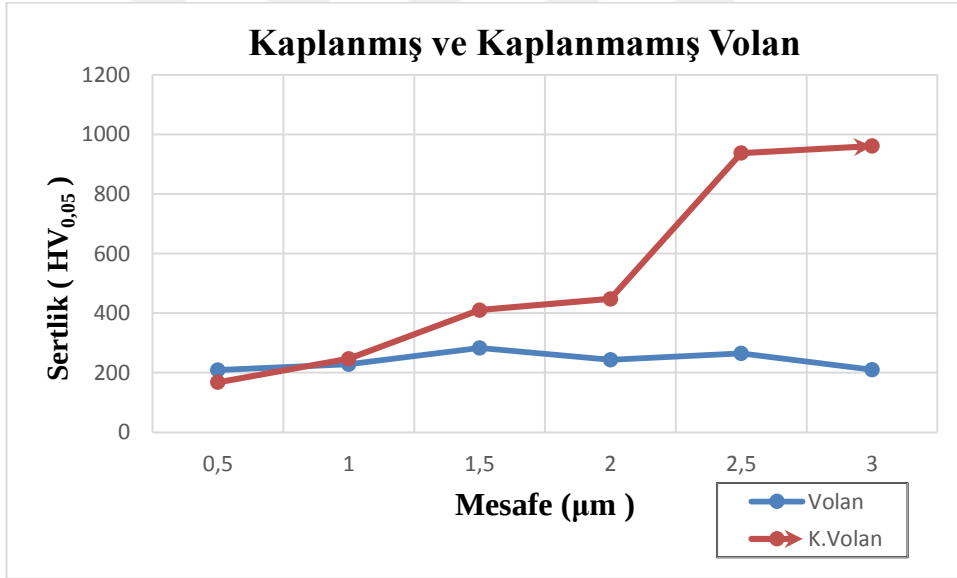
Şekil 6.63'de borlama işlemi yapılmamış volan ve Şekil 6.64'de borlama işlemi yapılmış volanın mikro-sertlik grafik değerleri görülmektedir. Kaplanmış volanda ana tabakadan geçiş bölgesine, geçiş bölgesinden de borür tabakasına doğru değerler alınmıştır. Bu değerlerin borür tabakasına doğru gidildikçe yükseldiği görülmüştür.



Şekil 6.63. Kaplanmamış volanın ana tabaka mikro-sertlik değerleri



Şekil 6.64. Kaplanmış volanın ana tabaka-geçiş bölgesi ve kaplama tabakası mikro-sertlik değerleri



Şekil 6.65. Kaplanmış ve kaplanmamış volanın mikro-sertlik değerleri

Şekil 6.63’de kaplanmamış volanın mikro-sertlik değerleri görülmektedir. Değerlerden de anlaşılabileceği gibi kaplanmamış volandaki ana tabakanın sertlikleri 209 ile 283 HV arasında değişmektedir. Malzeme temini yaptığımız firmanın volan için söylediği GG26 lamel grafitli dökme demir malzemesi spektral analiz sonuçları ile uyumludur.

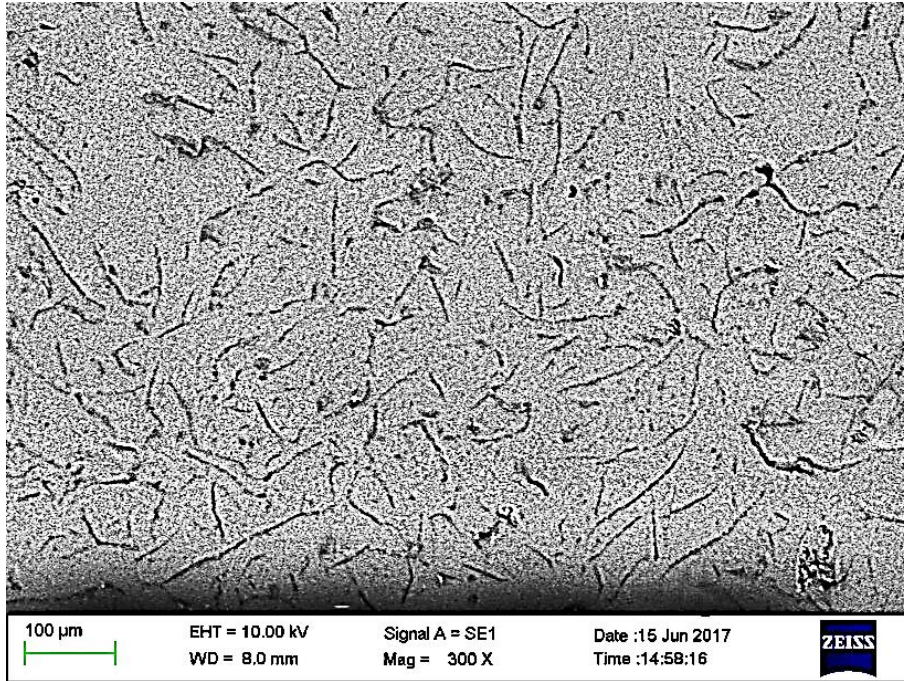
Şekil 6.64’de kaplanmış volanın ana tabaka-geçiş bölgesi ve kaplama yani borür tabakası mikro sertlik değerleri görülmektedir. Değerlerden de anlaşılabileceği gibi en

düşük sertlik 168 HV en yüksek sertlik ise 961 HV olarak ölçülmüştür. Ana tabaka sertlikleri geçiş bölgesine doğru artmaktadır. Geçiş bölgesindeki sertlik değerleri kaplanmamış volanın ana tabakasındaki sertliklere göre fazladır. Kaplama tabakasına doğru gidildikçe borür tabakasının sertliği ön plana çıkmaktadır. En yüksek sertlik değerleri borür tabakasında görülmektedir (961 HV).

Şekil 6.65’de ise kaplanmış ve kaplanmamış volan kıyaslanmıştır. Borlanmış ve borlanmamış volanın sertlikleri kıyaslandığında yaklaşık 5,8 katlık bir artışın borlamayla elde edildiği gözlenmiştir. Bu değerler volanın malzeme içeriği olarak değerlendirildiğinde literatür ile uyumluluğu göze çarpmaktadır (6 kat)(Hazar ve Öztürk, 2015).

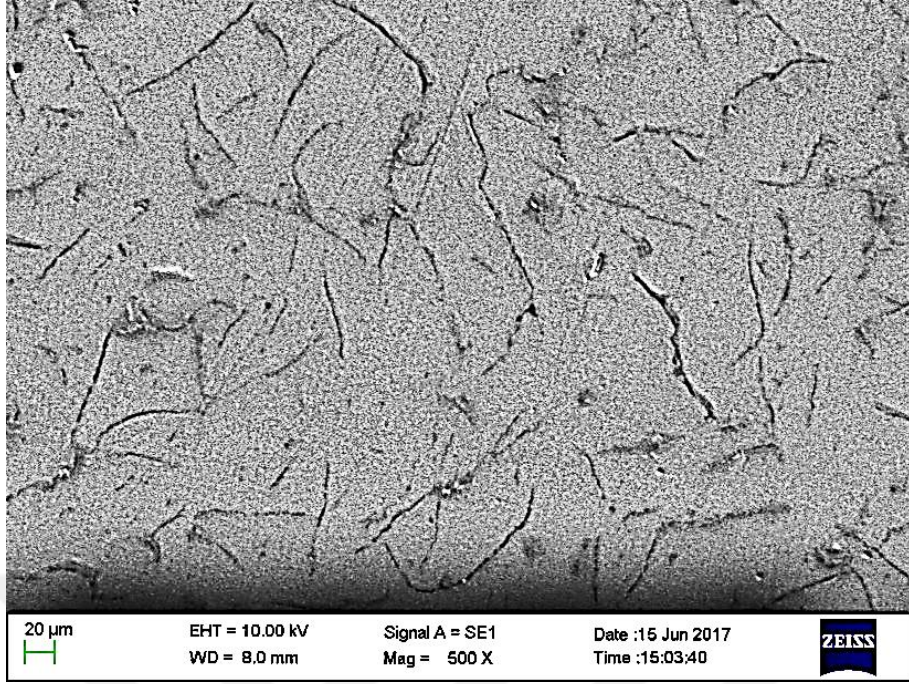
6.3.4. Volan SEM Görüntüleri

Aşağıdaki Şekil 6.66’da kaplanmamış volanın 300x yakınlaştırmadaki SEM görüntüsü görülmektedir.



Şekil 6.66. Kaplanmamış volanın 300x yakınlaştırmadaki ana tabaka SEM görüntüsü

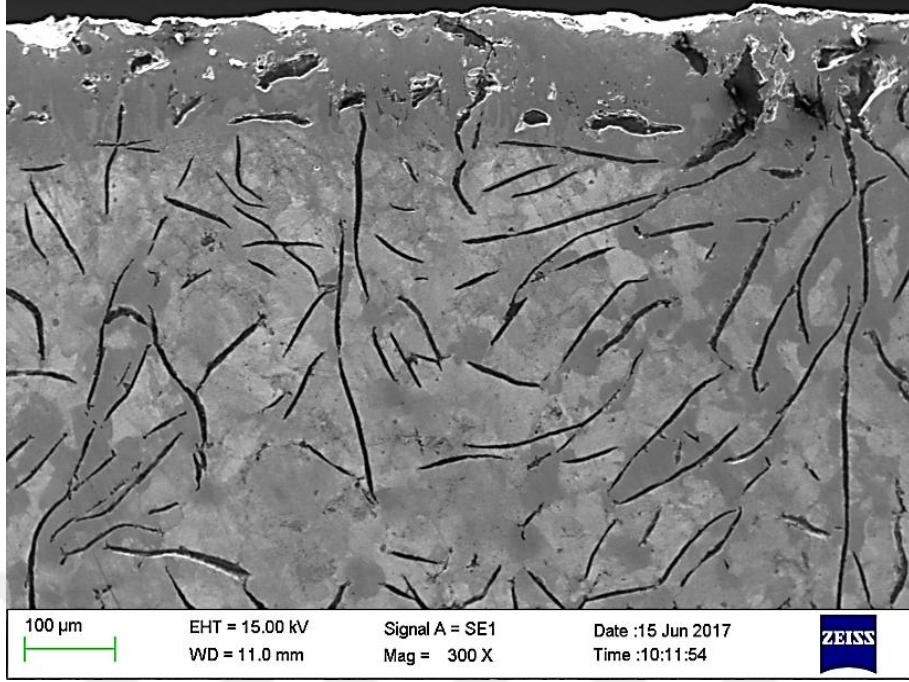
Şekil 6.67’de kaplanmamış volanın 500x yakınlaştırmadaki SEM görüntüsü görülmektedir.



Şekil 6.67. Kaplanmamış volanın 500x yakınlaştırmadaki ana tabaka SEM görüntüsü

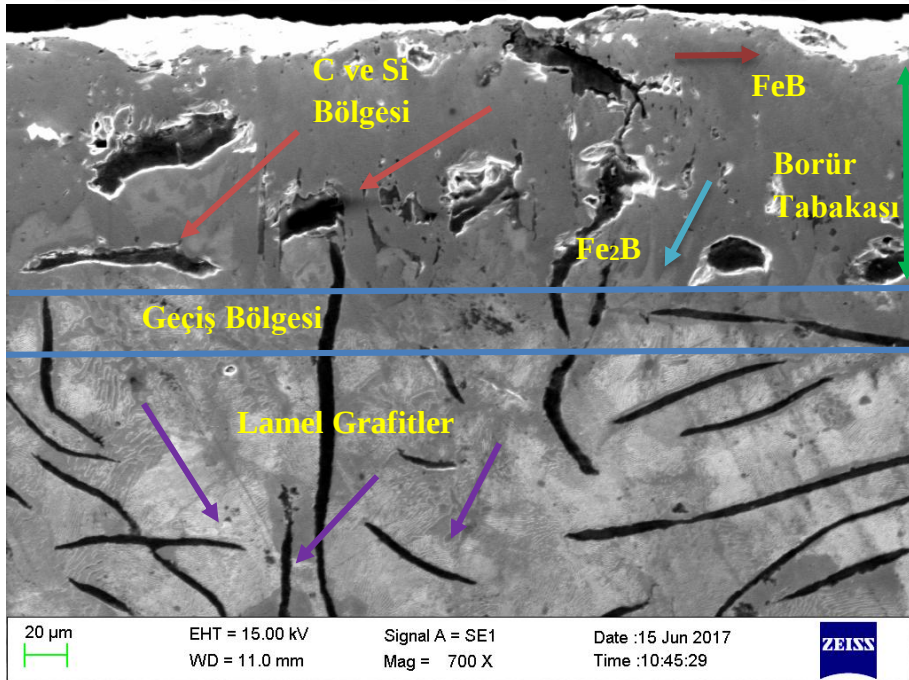
Şekil 6.66 ve Şekil 6.67'deki görüntülerde volanın herhangi bir kaplama işlemi yapılmamış 300x ve 500x görüntüleri görülmektedir. Volan'ın tipik bir dökme demire ait lamel grafitli bir yapıya sahip olduğu ile bu görüntülerden net bir şekilde anlaşılmaktadır. Lameller ana yapı içerisine yayılmış bir durumdadır. Yer yer zımpara çizikleri ve küçük oksitlenmeler görülmektedir. Volan'ın 300x ve 500x görüntüleri dökme demir malzemelere uygulanan borlama işlemi GG25 ve GG26 malzemelerde de tespit edilmiştir ve literatürle uyumlu olduğu görülmektedir.(Hazar ve Öztürk, 2015) Kaplanmamış volanın EDAX analiz sonucunda bu yapı için hakim elementler Fe, Mn ve C elementleridir. Noktasal analizde yer yer oksijen elementine de rastlanmaktadır. Bu elementler EDAX analizinde daha detaylı bir şekilde anlatılmıştır.

Şekil 6.68'de kaplanmış volanın 300x büyütmedeki SEM görüntüsü görülmektedir.



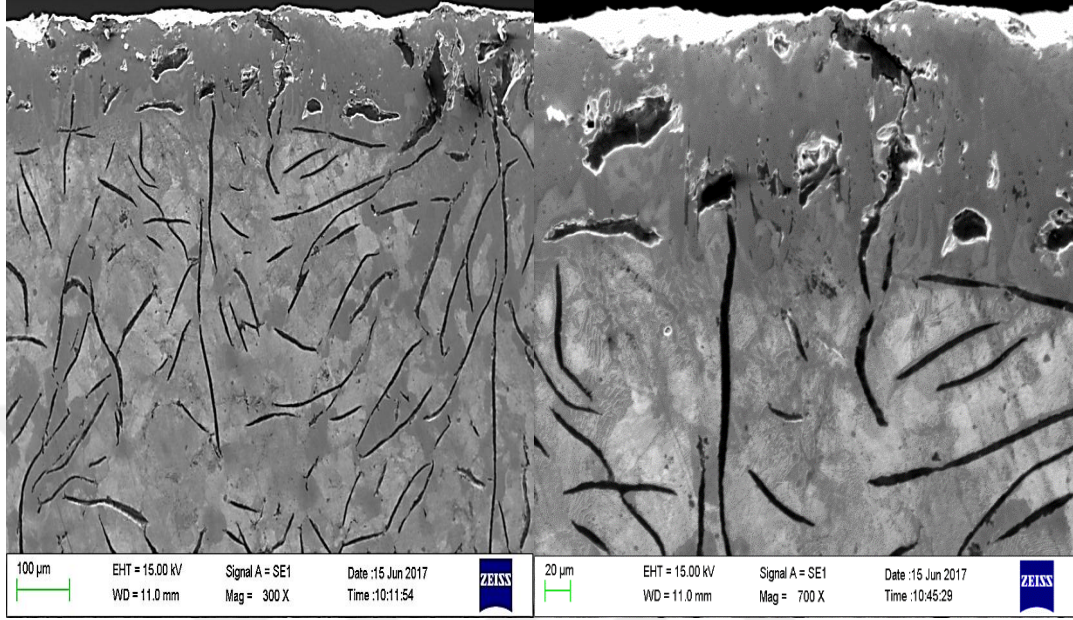
Şekil 6.68. Kaplanmamış volanın 300x büyütmedeki ana tabaka geçiş bölgesi ve borür tabakası SEM görüntüsü görülmektedir.

Şekil 6.69’da kaplanmış volanın 700x büyütmedeki SEM görüntüsü görülmektedir.



Şekil 6.69. Kaplanmış volanın 700x büyütmedeki ana tabaka geçiş bölgesi ve borür tabakası SEM görüntüsü görülmektedir.

Şekil 6.70’de kaplanmış volanın 300x ve 700x yakınlaştırmadaki SEM görüntüsü görülmektedir.



Şekil 6.70. Kaplanmış volanın 300x ve 700x yakınlaştırmadaki ana tabaka geçiş bölgesi ve borür tabakası SEM görüntüsü görülmektedir.

Şekil 6.68, Şekil 6.69 ve Şekil 6.70’deki görüntülerde volanın borlama işlemi yapılmış 300x ve 700x görüntüleri görülmektedir. 950°C sıcaklıkta 4 saat süresince borlama işlemi yapılmıştır. Resimlerde de görüldüğü gibi dökme demirde borlama sonrası oluşan ve literatürde adı geçen tüm fazların, bölgelerin ve elementlerin karşılığı yer almaktadır. En üstten başlanırsa FeB tabakası, hemen altında Fe₂B tabakası borlama ile bor difüzyonu ile yüzey altına itilen ve dökme demir kimyasal bileşiminde görülen C ve Si elementlerinin yoğunluklu olduğu bölgeler ve bu yapının hemen altında ise geçiş bölgesi diye adlandırılan bölge ve en altta ise tipik dökme demire ait lamel grafitler görülmektedir. Fe₂B’nin testere dişini andıran ve dökme demirin içine işleyen morfolojisi dikkat çekmektedir. Literatürdeki yüzey morfolojine ait teknik bilgilerde elde ettiğimiz bulguları doğrulamaktadır.(Chatterjee ve Fischer, 1981;Dearnley vd., 1985;Galibois vd., 1980)

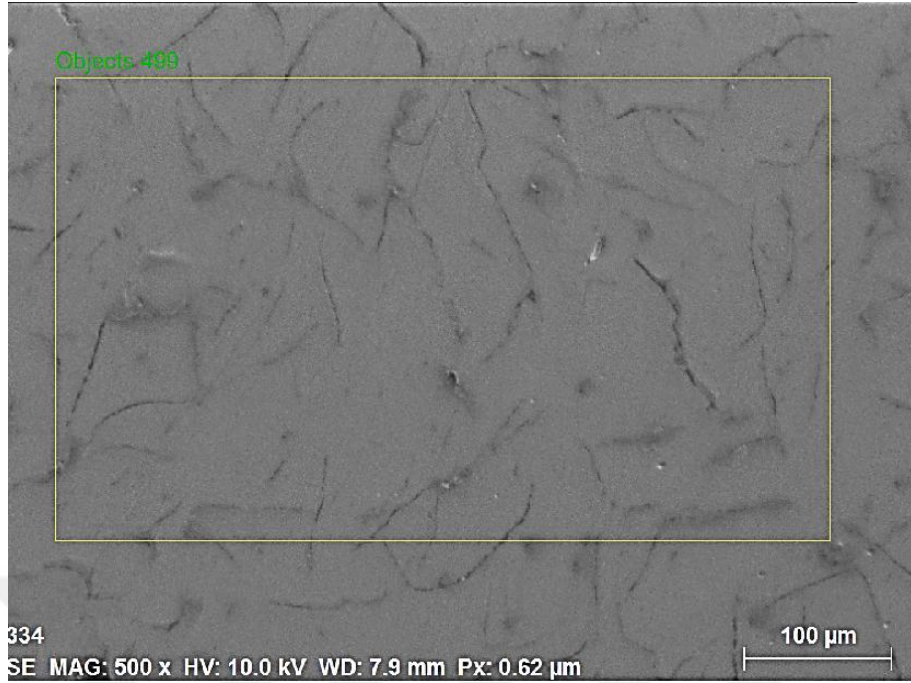
Şekil 6.69’da borür tabakaya ait mikro yapı görüntüsü net bir şekilde ortaya çıkmıştır. Testere dişini andıran ve geçiş bölgesine kolonsal bir şekilde uzanan yapı dikkat çekmektedir. Bu mikro yapı (Matuschka, 1980) tarafından sınıflandırılan FeB ve Fe₂B fazlarını barındıran yapıyla birebir örtüşmektedir. Özellikle Şekil 6.69’da borlama ile yüzey altına itilen ve karbon ve silisyumca zengin koyu renkte olan bölgeler dikkat

çekmektedir. Bu yapılar dökme demir malzemelerin yapısında mevcut ve elementler olup bor atomlarının yüksek sıcaklık altında yüzeye difüzyonu ile aşağıya doğru itilen elementlerdir. C ve Si elementleri Şekil 6.69'da gösterilmiştir. Bu elementlerin üzerinde bulunan borür tabakasının homojenliği dikkat çeken ikinci bir ayrıntıdır. Böylece amaçlanan yüzeyde bor bakımından zengin bir yapının oluştuğu net bir şekilde söylenebilir.(Hazar ve Öztürk, 2015)

Kaplanmış krank ve kaplanmış kam mili muylusunda olduğu gibi borür tabakası üzerinden alınan EDAX analiz sonucunda bu yapı için hakim elementler Fe ve B elementi olmaktadır. Ancak kaplanmış krank ve kam milindeki borür tabakasından farklı olarak siyah bölgelerde C elementine rastlanmıştır. Ana yapı üzerinden alınan EDAX analiz sonucunda ise hakim elementler Fe, Mn ve C elementleridir. Bu elementler EDAX analizinde daha detaylı bir şekilde anlatılmıştır.

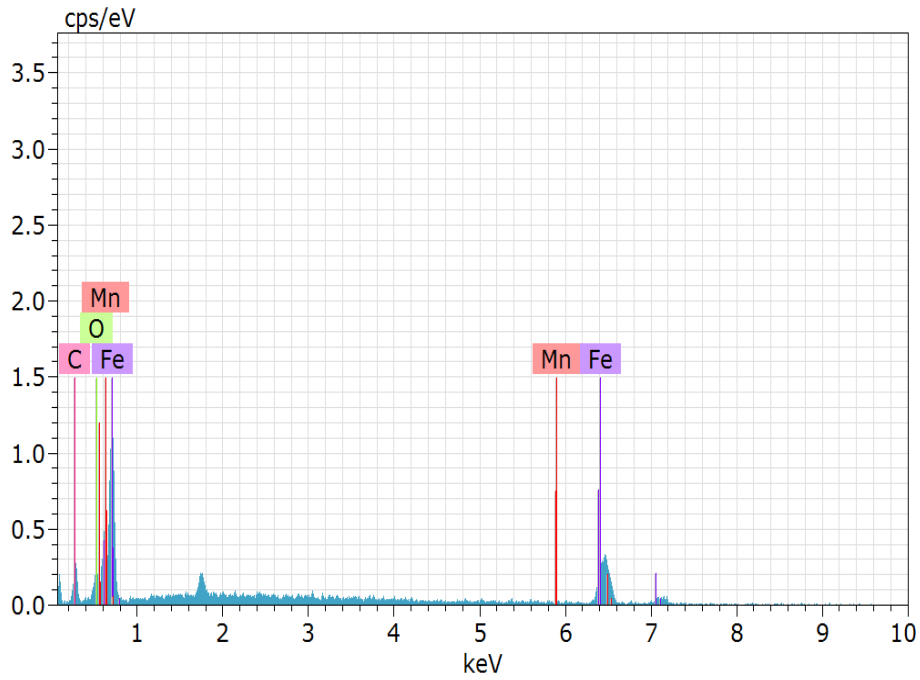
6.3.5. Volan EDAX Analizi

SEM analiziyle beraber kaplanmamış ve kaplanmış volanın mikro-yapı incelemelerinin ardından enerji dağıtıcı spektroskopi (EDAX) analizine tabii tutulmuştur. Şekil 6.71'de kaplanmamış volanın 500x büyütmedeki bölgesel EDAX verileri gösterilmektedir. Volandaki EDAX verilerine göre hakim elementler Fe, Mn, C ve O' dur. Bu sonuçlarda dikkat çeken husus Si varlığının görülmemesi ve O elementi varlığının yüksek çıkmasıdır. Spektral analiz sonuçlarında volan malzemesi için yaklaşık % 2 oranında Si elementi görülmüştür. XRD analiz sonuçlarında da Si elementiyle bileşiklere rastlanmıştır. Ancak EDAX verilerinde Si elementi bulunamamıştır. Oksijen elementinin görülmesi kaplama esnasında malzemenin hava ile temasından, Si elementi yokluğunun da EDAX cihazındaki sistemsel kaynaklı bir hatadan dolayı olduğu düşünülmektedir.



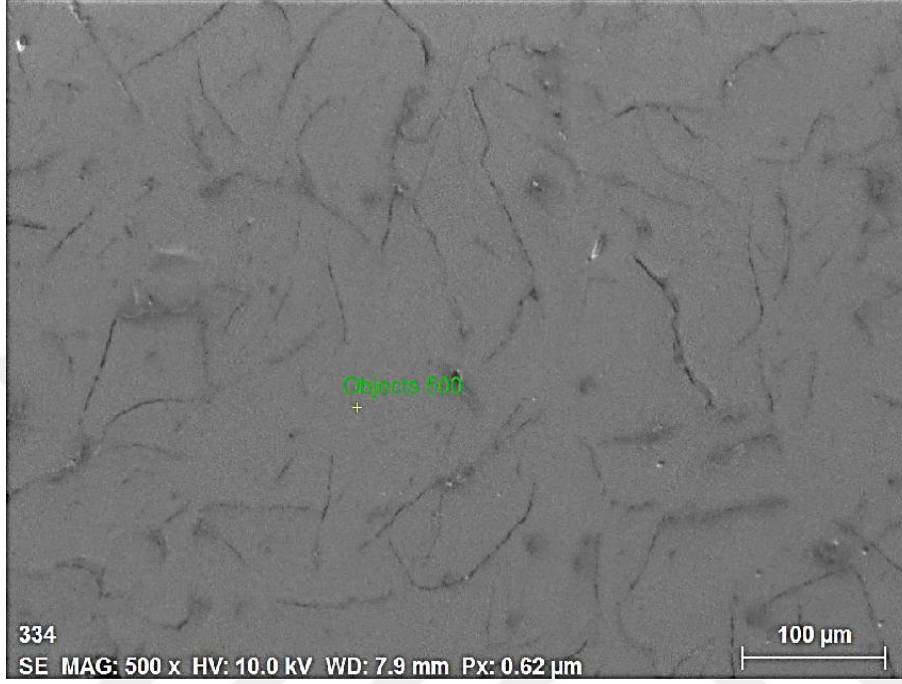
Spectrum: Objects 499

El	AN	Series	Net unkn.	C norm.	C Atom.	Error (1 Sigma)
			[wt.%]	[wt.%]	[at.%]	[wt.%]
Fe	26	K-series	958	56.91	85.08	66.29
Mn	25	K-series	125	4.36	6.52	5.16
C	6	K-series	312	4.22	6.30	22.84
O	8	K-series	208	1.40	2.10	5.70
Total:			66.89	100.00	100.00	



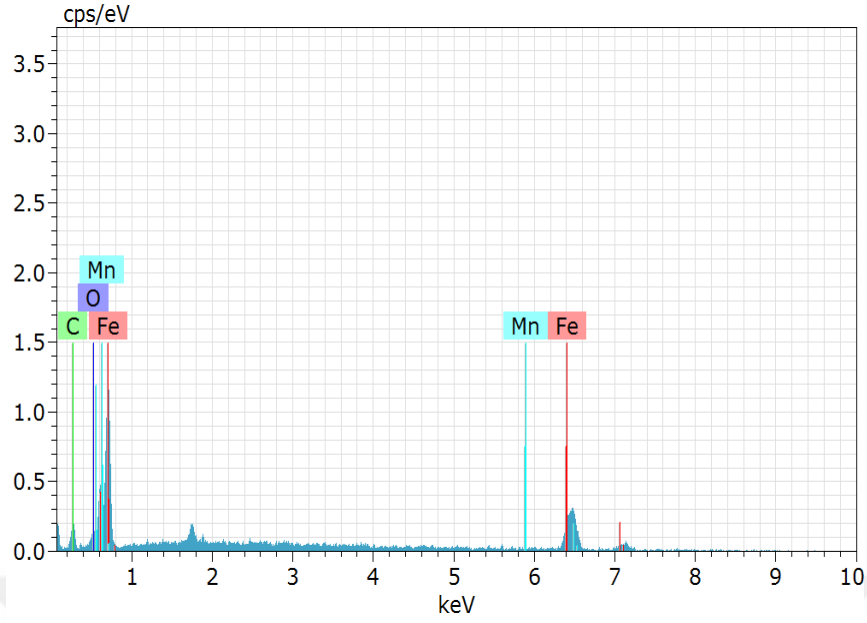
Şekil 6.71. Kaplanmamış volanın bölgesel EDAX verileri

Şekil 6.72’de kaplanmamış volanın 500x büyütmede gri bölgedeki noktasal spektrum verileri gösterilmektedir. Volandaki spektrum verilerine göre hakim elementler Fe, Mn, C ve düşük oranda O’ dur.



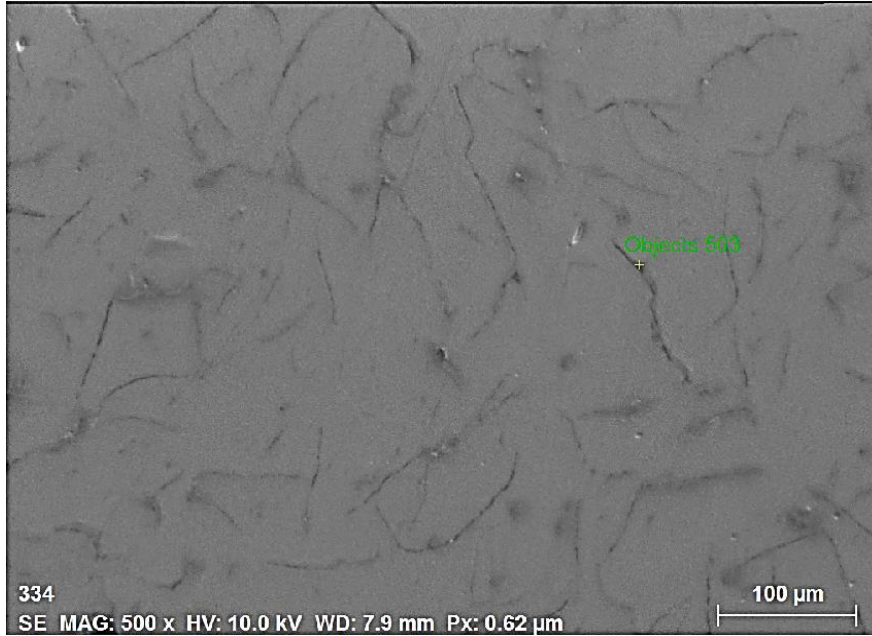
Spectrum: Objects 500

El	AN	Series	Net unn.	C norm.	C Atom.	C Error (1 Sigma)
			[wt.%]	[wt.%]	[at.%]	[wt.%]
Fe	26	K-series	997	53.53	88.48	73.83
Mn	25	K-series	107	3.51	5.81	4.93
C	6	K-series	230	2.89	4.77	18.51
O	8	K-series	93	0.57	0.94	2.73
Total:			60.50	100.00	100.00	

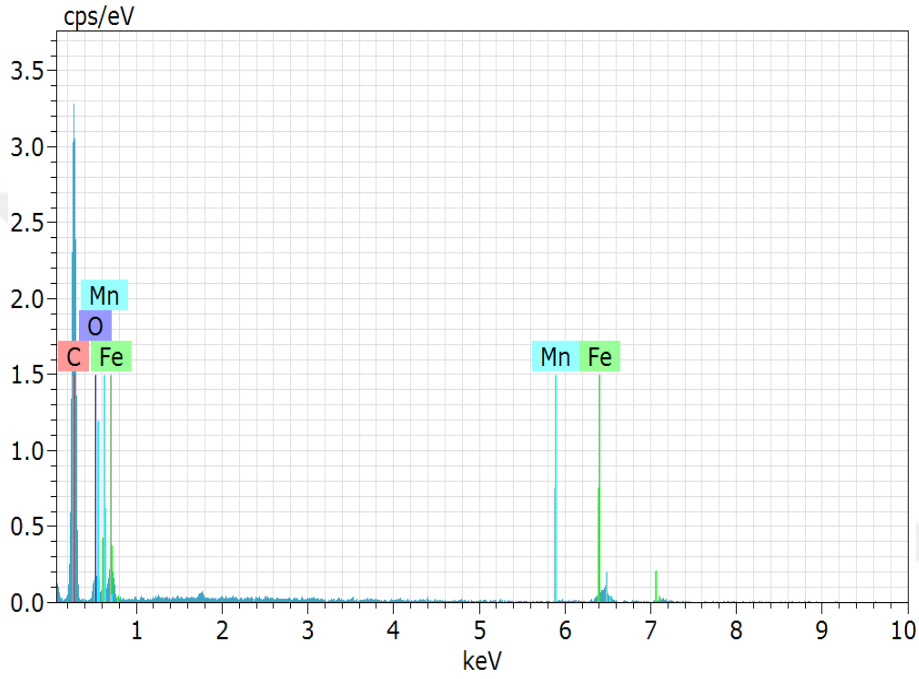


Şekil 6.72. Kaplanmamış volanın gri bölgedeki noktasal spektrum verileri

Şekil 6.73’de kaplanmamış volanın 500x büyütmede lamel üzerinden alınan noktasal spektrum verileri gösterilmektedir. Volandaki spektrum verilerine göre hakim elementler C, Fe, O ve düşük oranda Mn’dir. Bu sonuçlarda da dikkat çeken husus C varlığının yüzdesel fazlalığıdır. Lamellerdeki C oranı varlığı spektrometre sonuçları ile uyumludur.

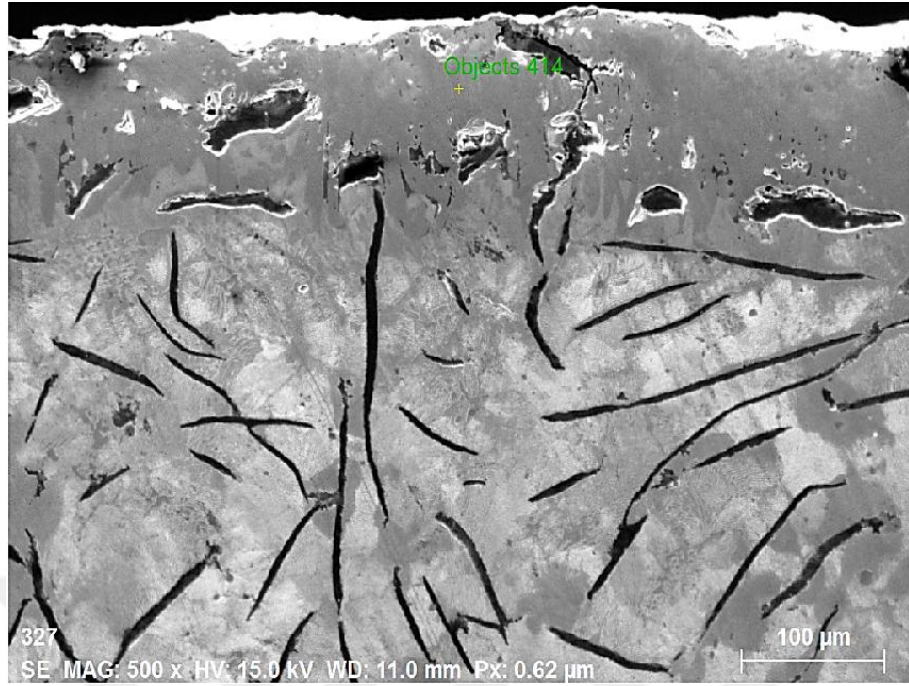


Spectrum: Objects 503						
El	AN	Series	Net unkn.	C norm.	C Atom.	Error (1 Sigma)
			[wt.%]	[wt.%]	[at.%]	[wt.%]
C	6	K-series	4365	54.06	62.78	8.70
Fe	26	K-series	281	27.41	31.83	2.39
O	8	K-series	247	4.36	5.06	1.57
Mn	25	K-series	4	0.28	0.32	0.16
Total:			86.11	100.00	100.00	



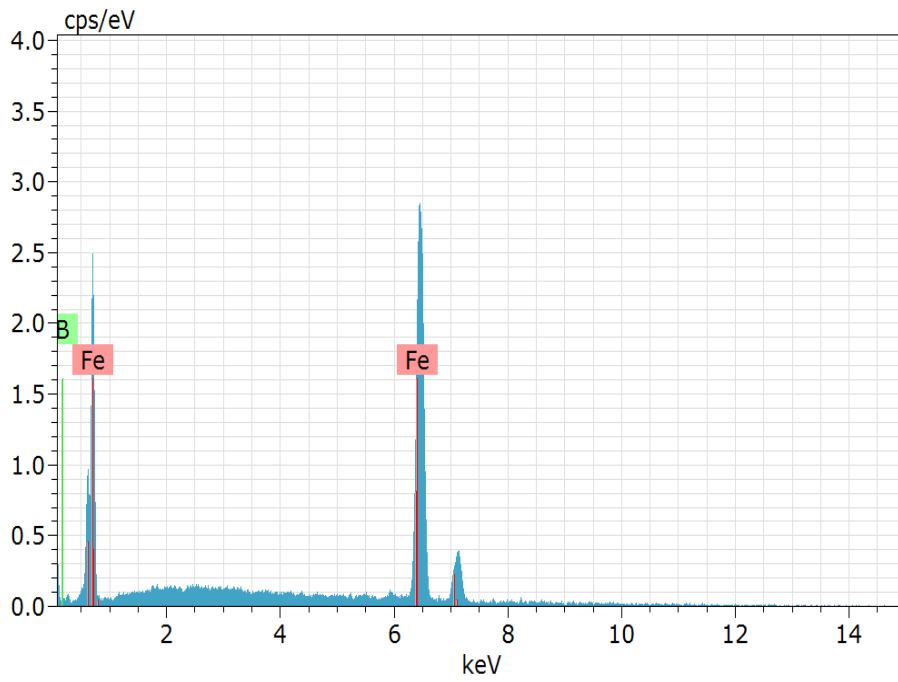
Şekil 6.73. Kaplanmamış volanda lamel üzerinden alınan noktasal spektrum verileri

Şekil 6.74’de kaplanmış volanın 500x büyütmede borür tabakası üzerindeki bir bölgeden noktasal spektrum verileri gösterilmektedir. Kaplanmış volandaki spektrum verilerine göre hakim elementler Fe ve B’ dur. (B: % 8,49) Bu sonuçlar incelendiğinde literatür ile uyumlu olduğu görülmektedir (Matuschka, 1980).



Spectrum: Objects 414

El	AN	Series	Net	unn. C	norm. C	Atom. C	Error (1 Sigma)
			[wt.%]	[wt.%]	[wt.%]	[at.%]	[wt.%]
Fe	26	K-series	9872	58.09	91.51	67.60	1.86
B	5	K-series	80	5.39	8.49	32.40	2.97
Total:			63.48	100.00	100.00		



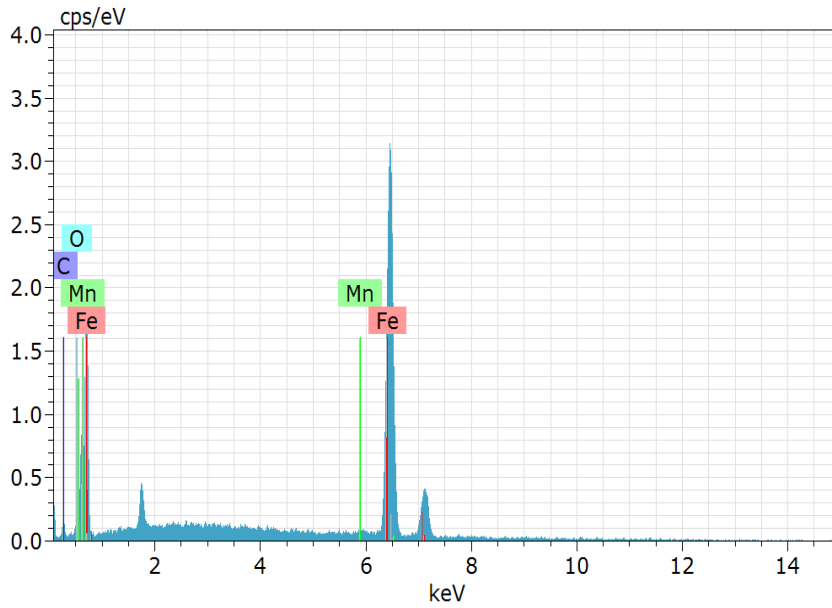
Şekil 6.74. Kaplanmış volanda borür tabakası üzerinden alınan noktasal spektrum verileri

Şekil 6.75’de kaplanmış volanın 500x büyütmede beyaz bölge üzerinden alınan noktasal spektrum verileri gösterilmektedir. Kaplanmış volandaki spektrum verilerine göre hakim elementler Fe, Mn, ve C elementleridir. Burada dikkat çeken yüksek yüzdesel orandaki Mn atomudur. (Mn: % 8,34)



Spectrum: Objects 416

El	AN	Series	Net unkn.	C norm.	C Atom.	C Error (1 Sigma)
			[wt.%]	[wt.%]	[at.%]	[wt.%]
Fe	26	K-series	9990	62.19	89.02	81.10
Mn	25	K-series	1224	5.83	8.34	7.72
C	6	K-series	169	1.84	2.64	11.18
O	8	K-series	0	0.00	0.00	0.00
Total:			69.86	100.00	100.00	



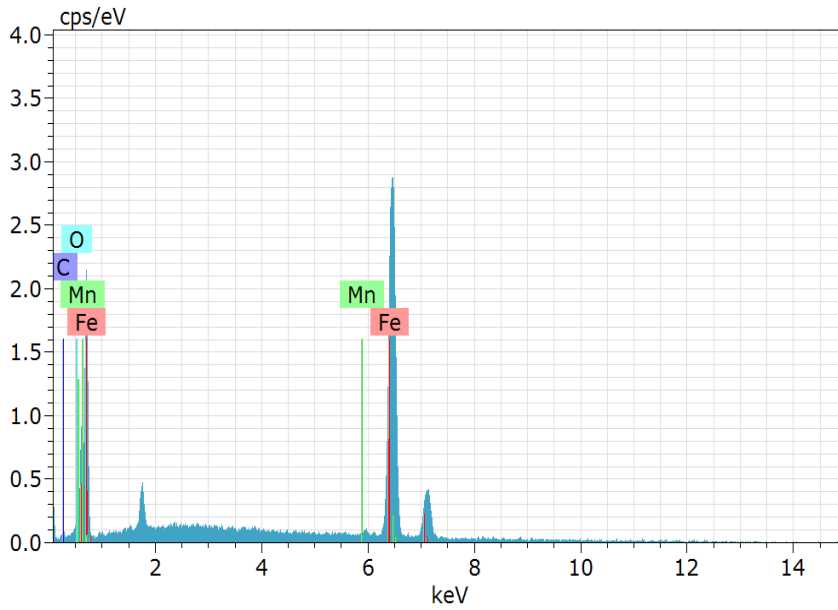
Şekil 6.75. Kaplanmış volanda beyaz bölge üzerinden alınan noktasal spektrum verileri

Şekil 6.76'da kaplanmış volanın 500x büyütmede gri bölge üzerinden alınan noktasal spektrum verileri gösterilmektedir. Kaplanmış volandaki spektrum verilerine göre hakim elementler Fe, Mn, ve C elementleridir. Burada dikkat çeken yüksek yüzdesel orandaki Mn elementidir. (Mn: % 8,41)



Spectrum: Objects 417

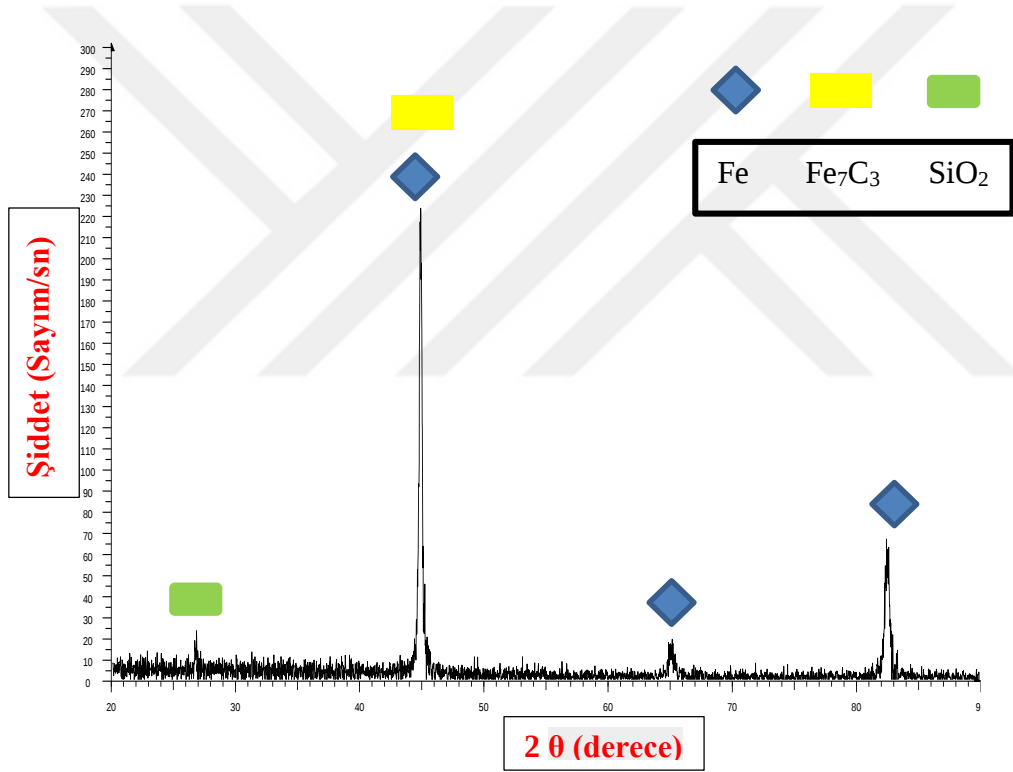
El	AN	Series	Net unkn.	C norm.	C Atom.	C Error (1 Sigma)
			[wt.%]	[wt.%]	[at.%]	[wt.%]
Fe	26	K-series	9864	59.81	90.15	85.53
Mn	25	K-series	1207	5.58	8.41	8.11
C	6	K-series	89	0.96	1.44	6.36
O	8	K-series	0	0.00	0.00	0.00
Total:			66.34	100.00	100.00	



Şekil 6.76. Kaplanmış volanda gri bölge üzerinden alınan noktasal spektrum verileri

6.3.6. Volan XRD Analizi

Borlanmış ve borlanmamış volanın mevcut fazlardaki bileşiklerini belirlemek amacı ile X-ışınları difraksiyon analizi yapılmıştır. Burada amaç borlanmış ve borlanmamış volandaki bileşik farklılıklarını görebilmektir. XRD analizi ışın tabancası 20-90° açılarında konumlandırılmıştır. Şekil 6.77’de kaplanmamış volanın mevcut fazlardaki bileşikleri XRD analizi ile görülmektedir. Volan tipik bir dökme demir malzeme yapısına sahip olduğundan oluşan fazlar Fe, Fe₇C₃ ve SiO₂’dir. Spektrometre analizindeki malzeme kompozisyonunda yüksek C ve Si oranı XRD sonuçlarına yansiyarak bileşikleri ortaya çıkardığı düşünülmektedir.

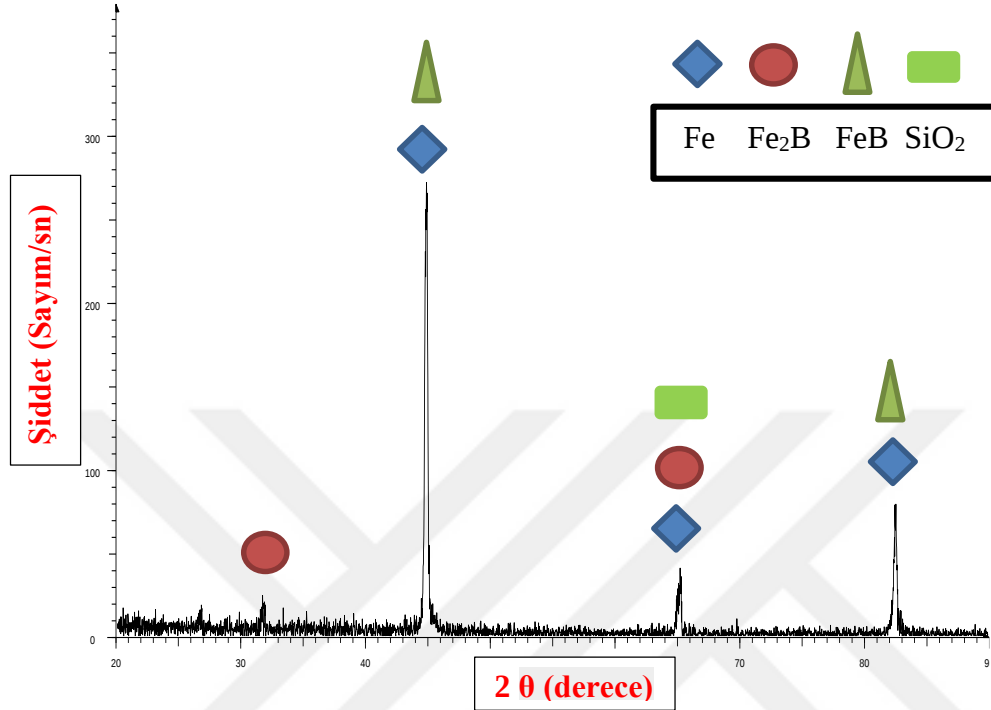


Şekil 6.77. Kaplanmamış volanın XRD analizi

Borlanmış malzemelerin tribolojik özellikleri borür tabakasındaki mikro yapıya bağlıdır. Fe₂B fazının üzerindeki FeB tabakası, Fe₂B yüzeyinden uzaklaştırıldığında istenilen pürüzsüz temiz bir yüzey elde edileceği için malzeme için faydalı olabilmektedir (Lilualental vd., 1983).

Şekil 6.78’de kaplanmış volanın mevcut fazlardaki bileşikleri XRD analizi ile görülmektedir. Borlamanın dökme demir malzemelere uygulanmasıyla oluşan fazlar Fe,

Fe₂B, FeB ve SiO₂'dir. Spektrometre analizi ve literatür incelendiğinde kaplanmış kam mili çeliği literatürdeki XRD sonuçlarıyla uyumludur (Hazar ve Öztürk, 2015).



Şekil 6.78. Kaplanmış volanın XRD analizi

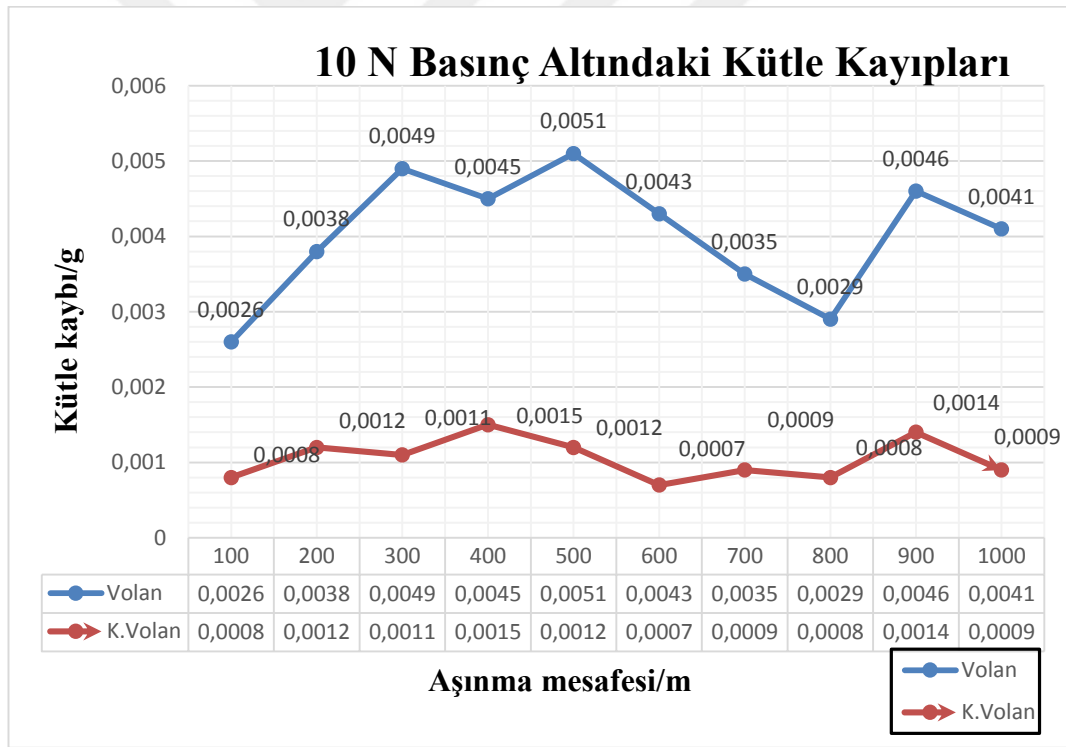
6.3.7. Volan Aşınma Analizi Sonuçları

Materyal metod kısmında da detaylı bir şekilde anlatıldığı gibi numunelere ait adhesiv aşınma karakteristiklerini ölçmek için pnomatik tip bir aşınma cihazı kullanılmıştır. Aşındırıcı malzeme olarak Ø 30 mm x 80 mm ölçülerinde düşük karbonlu düşük alaşımlı çelik silindirik miller kullanılmıştır. Aşınma deneyi kuru ortamda gerçekleştirilmiştir. 10-20-30 N değerlerindeki üç farklı kuvvet altında; kaplanmış ve kaplanmamış numuneler adhesiv aşınma testine tabii tutulmuştur. Her bir basınç değeri için 1000m kayma mesafesi dikkate alınmıştır. Her 100m'de ise numuneler tartılarak kütle kayıpları kayıt altına alınmıştır. Bu işlem kaplanmış ve kaplanmamış numuneler olmak üzere ikisi için de ayrı bir şekilde yapılmış ve sonuçlar kıyaslanmıştır.

Volan motor çalıştığı sırada aşırı ısı değişiminden dolayı eğilmeye maruz kalmaktadır. Bu eğilmeler volanın balanssız hareket etmesine ve motorda titreşimlere yol açmaktadır. Bu yüksek ısı değişimleri sebebiyle zamanla eğilme davranışı da sergileyebilmektedir. Bu olay neticesinde balanssız bir dönüş sergilerken motor sesini ve

performansını etkilemektedir. Ayrıca volanda balata aşınmasından dolayı aşınma da meydana gelmektedir. Bu nedenlerden dolayı borlama işlemi ana malzemesi dökme demir olan volana uygulanmış ve aşınma davranışı incelenmiştir.

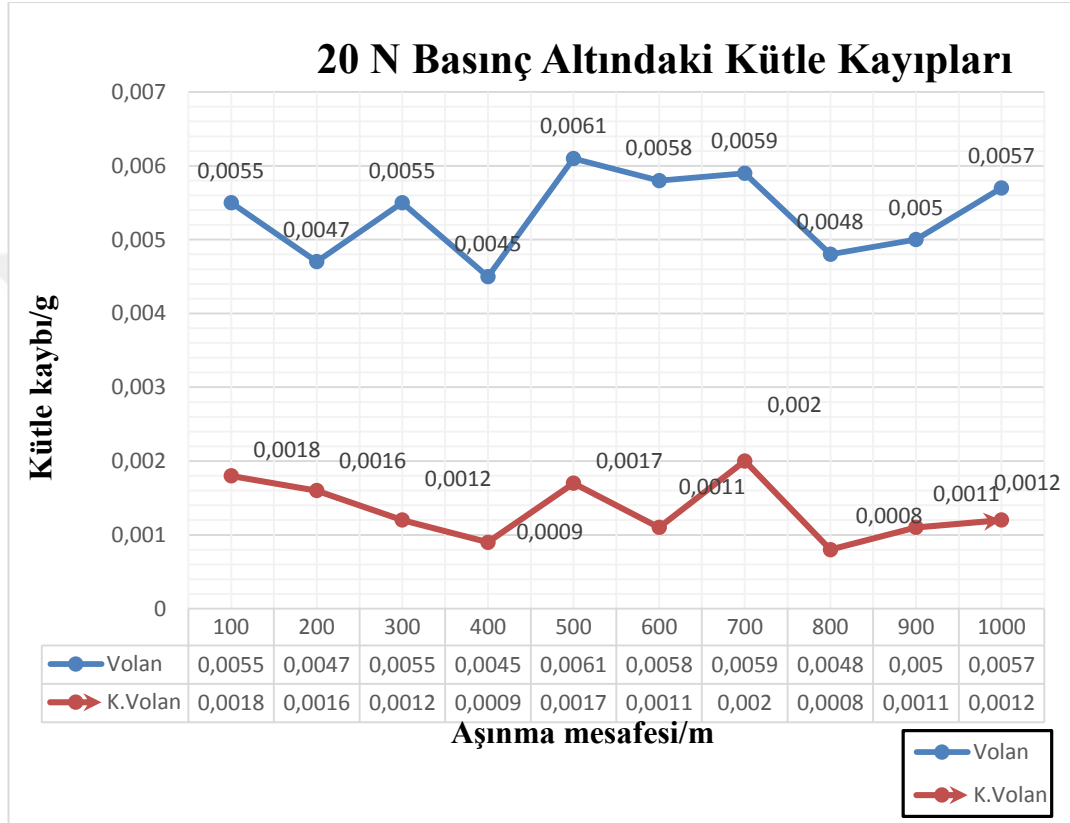
Şekil 6.79’da borlama işlemi yapılmamış ve borlama işlemi yapılmış volanın 10 N basınç ve 1000 m kayma mesafesiyle oluşan kütle kayıplarının sonuçları verilmiştir. İlk 100 m’deki kütle kaybı volanda 0,0026 g iken, borla kaplanmış volanda bu kütle kaybı 0,0008 g’dır. Bu iki değer arasındaki orantısal fark yaklaşık 3,3 katı kadardır. 1000 m sonunda ise volandaki kütle kaybı 0,0041 g iken, borla kaplanmış volandaki kütle kaybı 0,0009 g olarak gerçekleşmiştir. 1000 m sonunda bu iki ağırlık kaybının orantısal farkı 4,6 katı kadardır. 1000 m’nin sonunda toplam kütle kayıpları kaplanmamış volanda 0,0403 g iken, kaplanmış volanda 0,0105 g olmuştur. Orantısal olarak kütle kaybı farkı yaklaşık olarak 3,9 katı kadar gerçekleşmiştir.



Şekil 6.79. Volan için 10 N basınç altında meydana gelen kütle kayıpları

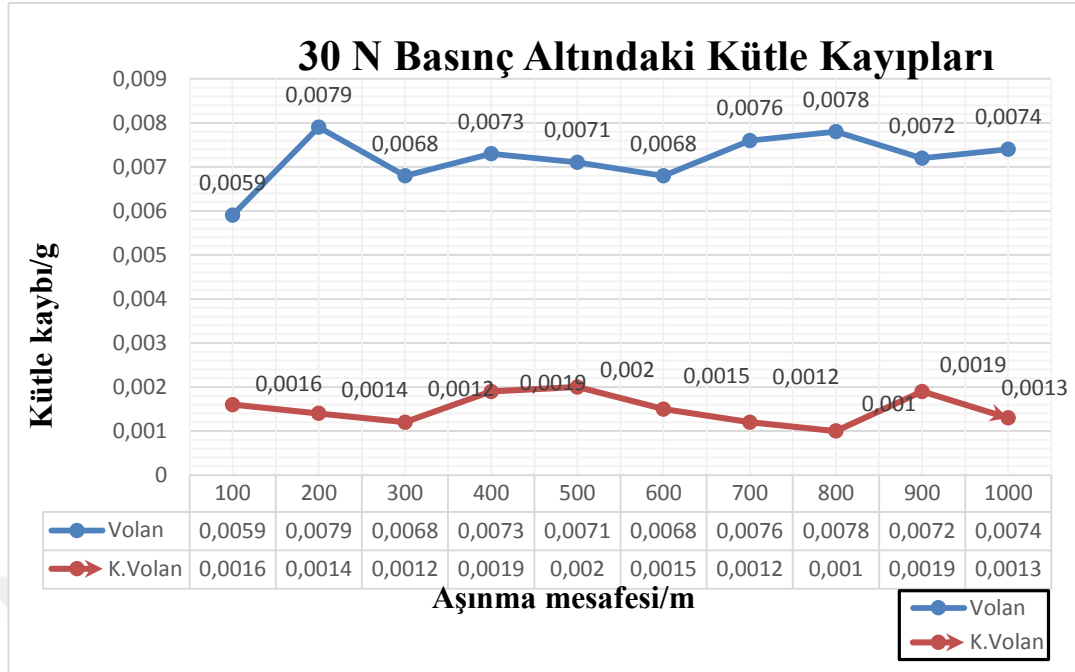
Şekil 6.80’de borlama işlemi yapılmamış ve borlama işlemi yapılmış volanın 20 N basınç ve 1000 m kayma mesafesiyle oluşan kütle kayıplarının sonuçları verilmiştir. İlk 100 m’deki kütle kaybı volanda 0,0055 g iken, borla kaplanmış volanda bu kütle kaybı 0,0018 g’dır. Bu iki değer arasındaki orantısal fark yaklaşık 3,1 katı kadardır. 1000 m

sonunda ise volandaki kütle kaybı 0,0057 g iken, borla kaplanmış volanda kütle kaybı 0.0012 g olarak gerçekleşmiştir. 1000 m sonunda bu iki ağırlık kaybının orantısal farkı 4,75 katı kadardır. 1000 m'nin sonunda toplam kütle kayıpları kaplanmamış volanda 0,0535 g iken, kaplanmış volanda 0,0134 g olmuştur. Orantısal olarak kütle kaybı yaklaşık 4 katı kadar gerçekleşmiştir.



Şekil 6.80. Volan için 20 N basınç altında meydana gelen kütle kayıpları

Şekil 6.81’de borlama işlemi yapılmamış ve borlama işlemi yapılmış volanın 30 N basınç ve 1000 m kayma mesafesiyle oluşan kütle kayıplarının sonuçları verilmiştir. İlk 100 m’deki kütle kaybı volanda 0,0059 g iken, borla kaplanmış volanda bu kütle kaybı 0.0016 g’dır. Bu iki değer arasındaki orantısal fark yaklaşık 3,7 katı kadardır. 1000 m sonunda ise volandaki kütle kaybı 0,0074 g iken, borla kaplanmış volanda bu değer 0.0013 g olarak gerçekleşmiştir. 1000 m sonunda bu iki kütle kaybı değerinin farkı yaklaşık 5,7 katı kadardır. 1000 m’nin sonunda toplam kütle kayıpları kaplanmamış volanda 0,0718 g iken, kaplanmış volanda 0,0150 g olmuştur. Orantısal olarak kütle kaybı yaklaşık 4,8 katı kadar gerçekleşmiştir.



Şekil 6.81. Volan için 30 N basınç altında meydana gelen kütle kayıpları

Aşınma işlemi sonuçlarına bakıldığında kaplama işlemi yapılmış volanda 3000 m sonunda yaklaşık kütle kaybının 4,8 kat azaldığı görülmektedir. Aşınma sonuçlarında görüldüğü gibi borla kaplı numune, dökme demir numuneye göre çok daha az kütle kaybına uğramıştır. Hazar ve Öztürk yaptıkları çalışmada, GG25 dökme demir bir malzemeyi 950 °C ve 4 saat süre ile Ekabor-2 tozu ile kaplamış ve 20-35-50 N’luk adhesiv aşınma sonucu borla kaplı numunenin, dökme demir numuneye göre kütle kaybının yaklaşık 6,5 kat olarak bulmuşlardır (Hazar ve Öztürk, 2015). Literatürde benzer sonuçlar alınan çalışmada, volan için bu sonuçlar değerlendirildiğinde 10-20-30 N’luk kuvvetler altında 4,8 kat olduğundan artan kuvvetler doğrultusunda lineer bir artış olacağı düşünülmektedir.

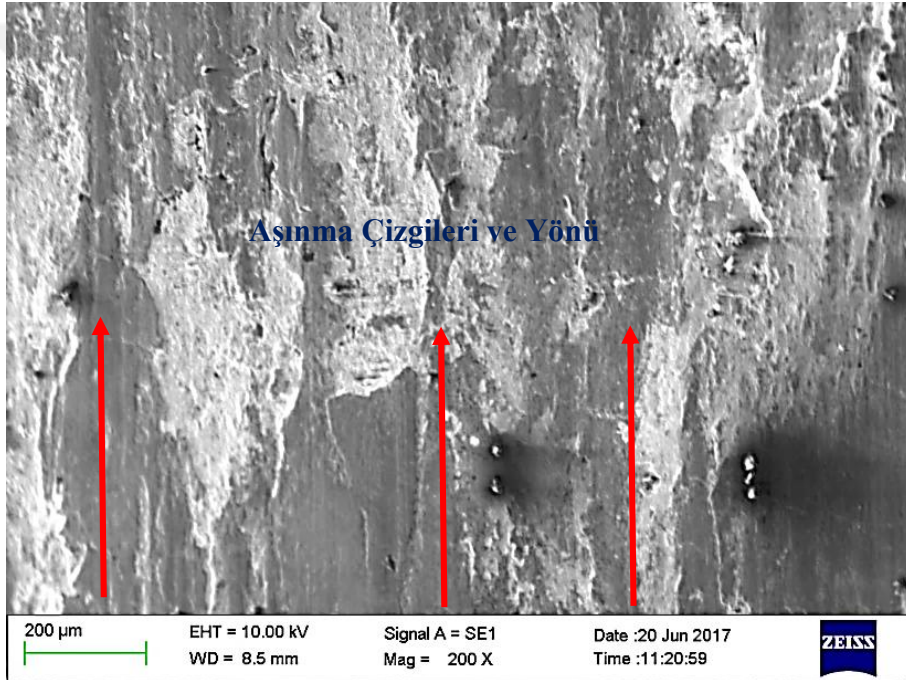
Daha önce yapılan demir esaslı malzemelere borlama işleminin uygulanması sonucunda aşınma dirençlerinin arttırıldığı çalışmamızı desteklemektedir (Bayça ve Şahin, 2004; Hunger ve True, 1994).

6.3.8. Aşınma Sonrası Volandaki Sem Görüntüleri

Kuru tip adhesif aşınma işleminin ardından dökme demir ve borla kaplı numunelerde meydana gelen yüzey deformasyonlarını incelemek için SEM analizi yapılmıştır. SEM

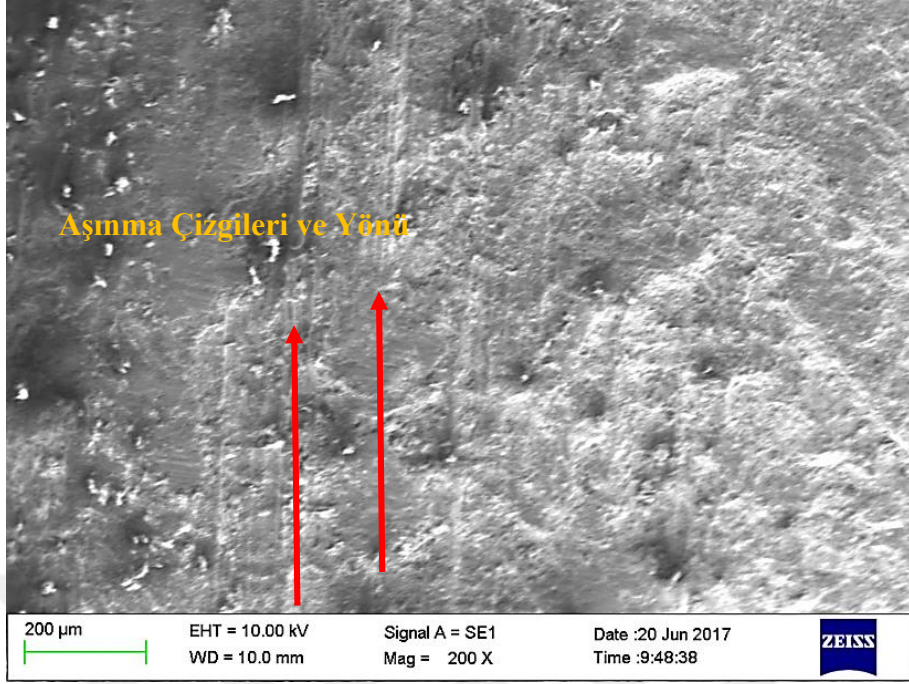
analizinde yüzeylere 200x büyütme yapılarak incelenmiştir. Bu analiz sonuçları genel anlamda borlanmış yüzey ve borlanmamış yüzeylerin farkını açık bir şekilde göstermektedir. Borlanmış yüzeylerde aşınma sonrası oluşan deformasyonlar daha az ve hala aşınmamış bölgeler mevcutken, borlanmamış numunelerde daha deformasyonlar daha fazla ve neredeyse aşınmamış bölge bulunmamaktadır. Ayrıca borlanmış yüzeylerde aşınma çizgileri daha ince ve kısa iken, borlanmamış yüzeylerde aşınma çizgileri net değil ve neredeyse görülmemektedir.

Şekil 6.82’de aşınma deneyi sonrasındaki kaplanmamış volanın 200x büyütmedeki SEM görüntüsü görülmektedir.



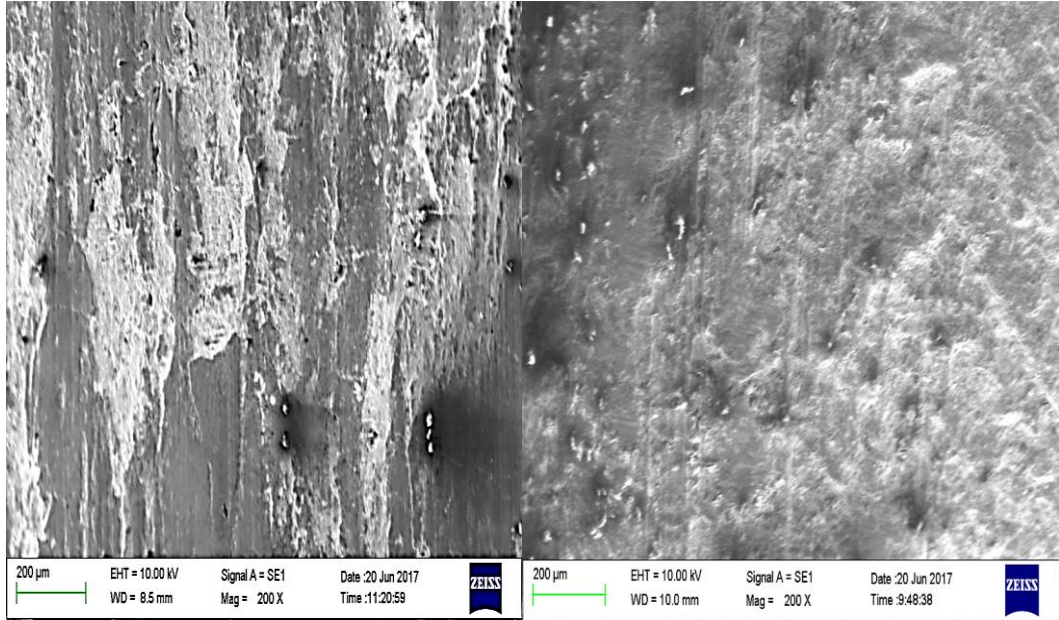
Şekil 6.82. Kaplanmamış volanda aşınma sonrası SEM görüntüsü (200x)

Şekil 6.83’de aşınma deneyi sonrasındaki kaplanmış volanın 200x büyütmedeki SEM görüntüsü görülmektedir.



Şekil 6.83. Kaplanmış volanda aşınma sonrası SEM görüntüsü (200x)

Şekil 6.84’de aşınma deneyi sonrasındaki kaplanmamış ve kaplanmış volanın 200x büyütmedeki SEM görüntüsü görülmektedir.



Şekil 6.84. Kaplanmamış ve kaplanmış volanda aşınma sonrası SEM görüntüleri (200x)

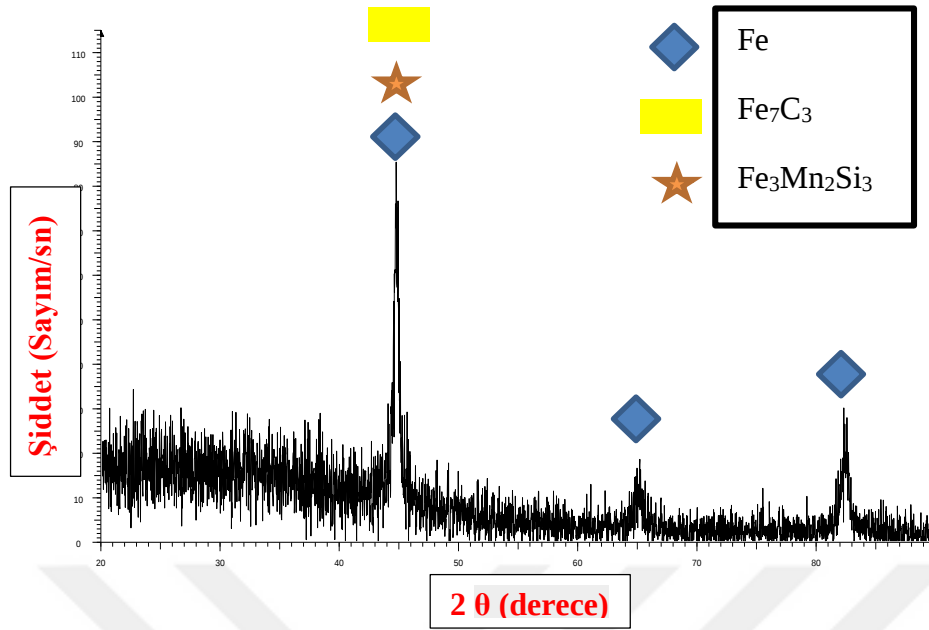
Kaplanmamış volanda aşınma çizgileri belirsiz bir durumdadır. Yüzeylerin tamamı neredeyse deforme olmuştur. Kaplanmış volanda ise aşınma çizgileri belirgin ve kısa olduğu gözlenmektedir. Henüz aşınmayan bölgeler mevcuttur. Aşınma olayı daha bölgesel olarak izlenmektedir (Hazar ve Öztürk, 2015).

Adhesif aşınma, yapışma aşınması olarak da adlandırılmakta olup, iki malzemenin birbiri üzerinde hareket etmesini sağlayan ve metalik birleşmelerin meydana geldiği sonrasında ise birbiri üzerinde kayan parçacıkların yüzeylerden ayrılmasıyla sonuçlanan bir aşınma çeşididir. Deneyler sonucunda kaplanmamış numune ile aşındırıcı mil arasında mikro kaynamanın görüldüğü ve yer yer malzeme transferi olduğu görülmektedir. Kaplanmış bölgelerde ise yüzeylerde meydana gelen bu aşınma mekanizmasının kaplanmamış dökme demirde oluşan bu aşınma mekanizmasından farklı olduğu düşünülmektedir. Bir ifadeyle; aşınma olayı sürtünme ile doğrudan bağlantılı bir süreçtir. Bilindiği gibi borlanmış yüzeylerin sürtünme katsayıları teflonunkine yakın oranda olup dökme demirden çok daha az bir seviyede olmaktadır (Atik, 1997). Bu faktörler göz önüne alındığında yapılan çalışmalara uygun olduğu görülmektedir.

6.3.9. Aşınma Sonrası Volan XRD Analiz Sonuçları

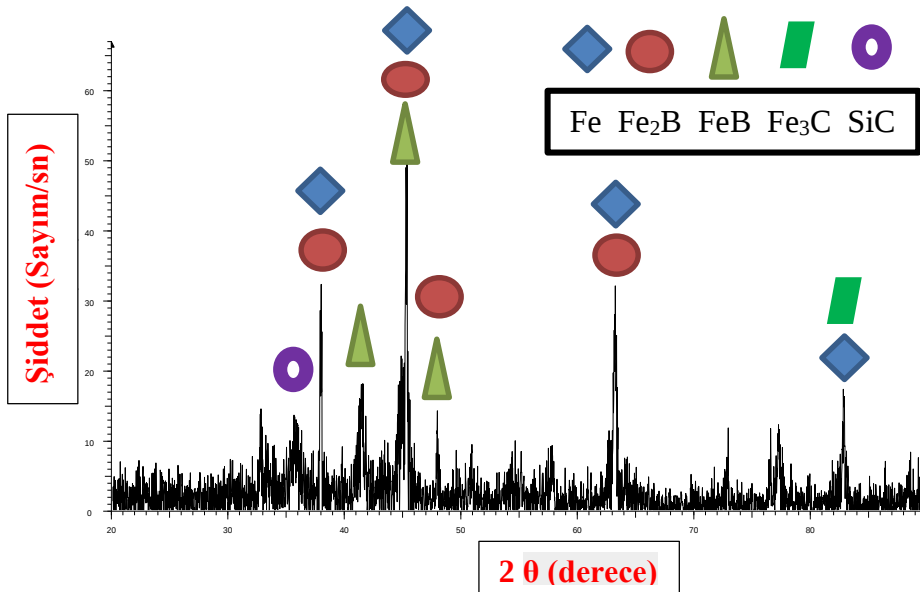
Aşınma işlemi dökme demir malzeme olan volan ile aşındırıcı mil arasında bir temas oluşturacağından, bu temas ile değişebilecek fazların analizini belirlemek için tekrar XRD analizi yapılmıştır.

Şekil 6.85’de aşınma sonrası kaplanmamış volanın XRD analizi sonuç grafiği görülmektedir. Burada dikkat çeken husus aşınma işlemi olmayan kaplanmamış volanda XRD analizi sonucu Fe, Fe_7C_3 ve SiO_2 bileşiklerinin varlığı görülmekte iken, aşınma işlemi yapılmış kaplanmamış krank mili muylusunda Fe, Fe_7C_3 ve $Fe_3Mn_2Si_3$ bileşiklerinin de görülmesidir. Si elementi burada Fe ve Mn elementleri ile bileşik oluşturmuştur. Bu bileşiklerin varlığının, aşındırıcı mil ve dökme demir temasıyla kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 6.85. Kaplanmamış volanda aşınma sonrası XRD analizi

Şekil 6.86’da aşınma sonrası kaplanmış volanın XRD analizi sonuç grafiği görülmektedir. Aşınma işlemi yapılmayan kaplanmış volandan farklı olarak, aşınma işlemi yapılmış ve kaplanmış volanda Fe_3C ve SiC fazları görülmektedir. Si elementinin dökme demir malzeme kompozisyonundaki varlığının fazlarla ortaya çıktığı düşünülmektedir. Bu fazlarının aynı şekil 6.85’de olduğu gibi aşınma işlemi esnasında aşındırıcı mil ile temas sonucu dökme demirin malzeme kompozisyonu çerçevesinde oluştuğu düşünülmektedir.

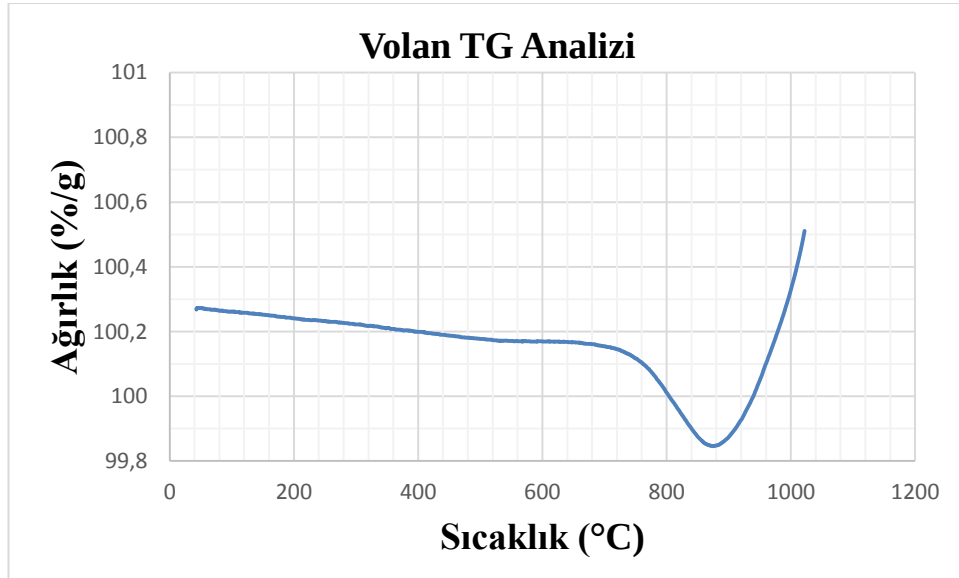


Şekil 6.86. Kaplanmış volanda aşınma sonrası XRD analizi

6.3.10. Volan TG Analiz Sonuçları

Deneylerde kullanılan dökme demir ve borla kaplanmış malzemelerin termal oksitlenmeye karşı davranışlarını ve bu oksitlenme sonrası aldıkları kütle oranlarını incelemek amacıyla hava ortamında TGA deneyi yapılmıştır. TGA deneyinde ölçümler 50 °C başlangıç sıcaklığı ile başlayıp 1000 °C sıcaklığa kadar 30 °C/dk ısıtma hızıyla yapılmıştır. Deneyde kullanılan volan ortalama 10x10x10 mm³ ölçülerine kadar küçültülmüştür. Daha sonra kaplanmış ve kaplanmamış volanın termal oksitlenme davranışları grafiklerle elde edilmiştir. Bu olay materyal metot kısmında detaylıca anlatılmıştır.

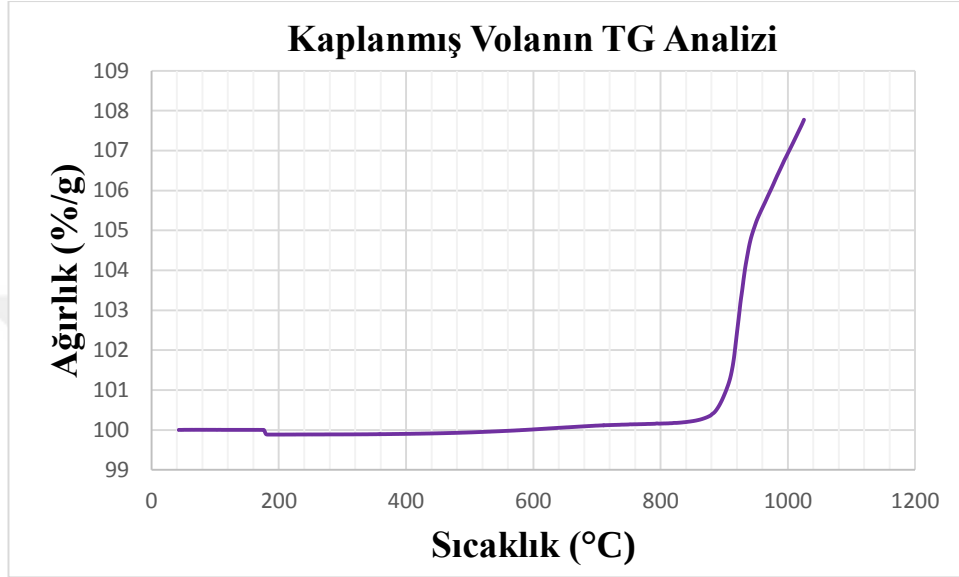
Şekil 6.87’de ana malzemesi lamel grafitli dökme demir olan kaplanmamış volanın TG analiz grafiği görülmektedir. Grafik eğrisinden görüldüğü gibi sıcaklık arttıkça kütle kaybı 850 °C’ye kadar lineer olarak düşüş göstermiştir. 850 °C’den sonra eğri oksitlenme kazanımı başlamış ve 1000 °C sıcaklıkta eğri pik değerine ulaşmıştır. Grafik verilerine göre ilk ağırlık 18,7 gr iken, 1000 °C sonunda oksitlenerek ağırlık kazanan numunenin son ağırlığı 18,7453’ tür. Oransal olarak 1000 °C sıcaklık sonunda kazanılan kütle miktarı yaklaşık % 0,25 olmaktadır.



Şekil 6.87. Kaplanmamış volanın TG analizi

Şekil 6.88’de bor ile kaplanmış volanın TG analiz grafiği görülmektedir. Grafik eğrisinden görüleceği gibi sıcaklık arttıkça kütle kazanımı yaklaşık 900 °C sıcaklığa kadar lineer olarak artış göstermiştir. 900 °C sıcaklıkta yüksek oksitlenme davranışı başlamıştır.

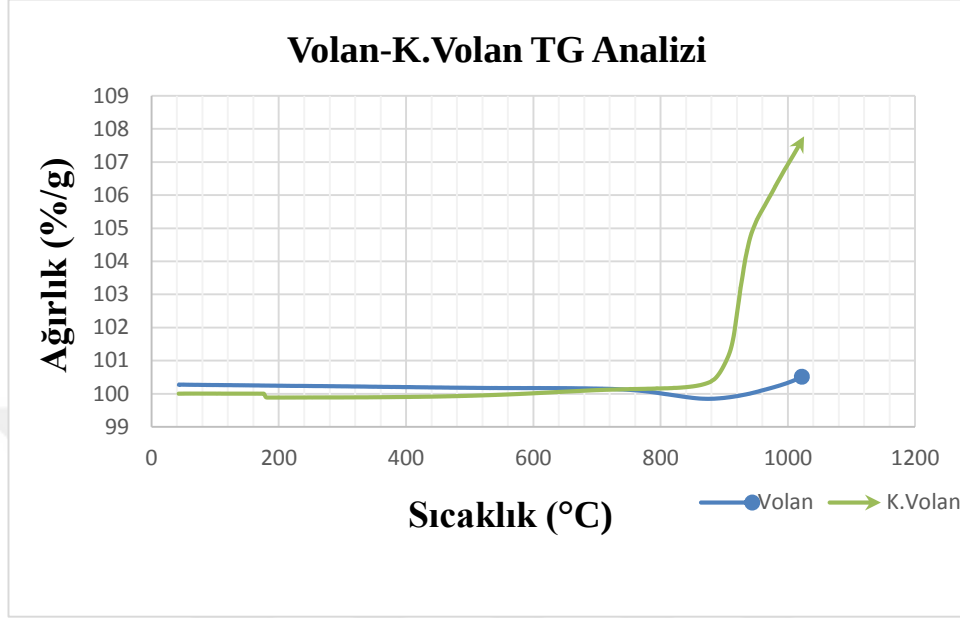
1000 °C sıcaklıkta eğri pik değerine ulaşmıştır. Grafik verilerine göre ilk ağırlık 59,4540 gr iken, 1000 °C sonunda oksitlenerek ağırlık kazanan numunenin son ağırlığı 64,0750'dir. Oransal olarak 1000 °C sıcaklık sonunda kazanılan kütle miktarı yaklaşık olarak % 7,77 olmaktadır.



Şekil 6.88. Kaplanmış volanın TG analizi

Şekil 6.89'da kaplanmamış ve kaplanmış volanın TG analiz grafiği görülmektedir. Viricelle ve arkadaşları yaptıkları bir çalışmada B_2O_3 bileşiğinin ergiyerek pota dibine doğru ilerlediğini düşünmüş ve yüzeyde homojenliğini kaybeden boroksit tabakasının koruyuculuğunu da kaybederek oksidasyonun hızlandığını belirtmişlerdir (Viricelle vd, 2000). Grafik eğrisinden görüleceği gibi sıcaklık arttıkça kaplanmış numunede kütle kazanımı 900 °C'ye kadar lineer olarak artış göstermiştir. Ancak kaplanmamış numunede 840 °C'ye kadar kütle miktarında lineer bir düşüş görülmüştür. Kaplanmamış volanda yüksek kütle kazanımı 840 °C sıcaklıkta başlarken bor ile kaplanmış volanda da yüksek kütle kazanımı 900 °C başlamaktadır. Borlama ile yüksek oksitlenme başlangıç sıcaklığını arttırdığından oksitlenme süresini de geciktirmiştir. 1000 °C deki sıcaklıklarda her iki eğri de pik değerine ulaşmıştır. Ancak pik değerleri arasında oransal farklılıklar gözlemlenmiştir. Grafik verilerine göre kaplanmamış volanda kütle kazanımı % 0,25 iken, kaplanmış volanda bu oran % 7,77 olmaktadır. Aradaki oransal fark yaklaşık % 7,5' tir. Arısoy yaptığı bir çalışmada borlanmış alaşımlı dökme demire TG-DTA deneyi uygulamış ve başlangıçta 106,564 mg olan malzemenin 976 °C'de 112,978 mg'a yükseldiğini

gözlemiştir. Bu fark yaklaşık % 6,41'dir (Arısoy, 2015). Bu çalışmaya bakıldığında borlanmış volan ile uygunluğu görülmektedir.



Şekil 6.89. Kaplanmış ve kaplanmış volanın TG analizi

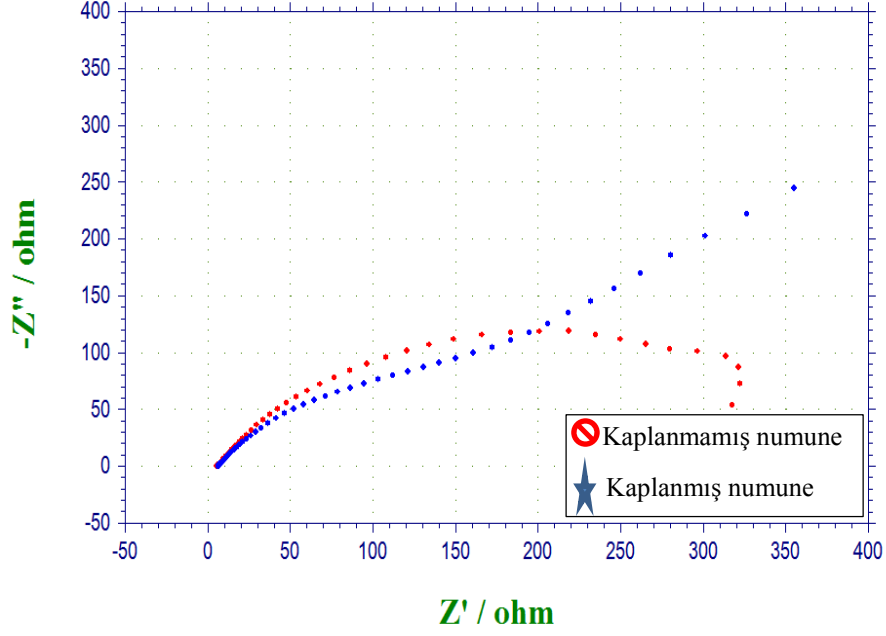
Bu sonuçlara bakılarak borlamada yüksek sıcaklıklarda oksijenle bor elementi fazlaca tepkimeye girdiği ve malzemelerin kütle kazandıkları, borlanmamış numunelerde ise bu oranın çok daha düşük olduğu görülmektedir. Ancak çalışılan motor elemanlarında hiçbir zaman 900 °C gibi yüksek sıcaklıklar görülmediğinden borlama işleminin uygulanabileceği düşünülmektedir.

6.3.11. Volan Korozyon Analiz Sonuçları

Korozyon deneyi ile ilgili teknik bilgi materyal metot kısmında detaylıca verilmiştir. Şekil 6.90'da görülen Nyquist diyagramında kaplanmamış volan ile Ekabor-2 tozu ile volana ait yarım daireler, malzemenin % 3,5 NaCl sulu çözeltisi içerisinde göstermiş olduğu direnç değerleridir. Ekabor-2 ile kaplanmış volanın korozyon direnci, kaplanmamış volanın korozyon direncine göre % 12 fazla olduğu görülmektedir.

Akray yüksek lisans tezinde GG40 küresel grafitli dökme demiri korozyona maruz bırakmış ve borlama işlemi sonucu döküm haline göre %14'lük bir korozyon direnci artışı

sağlamıştır (Akay, 2007). Bu sonuca bakılarak volan için borlama sonucu bulduğumuz korozyon direnci artışı (% 12) literatür ile uyumlu olmaktadır.



Şekil 6.90. Kaplanmış ve kaplanmamış volanın korozyon analizi

7. SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Yapılan bu tez çalışmasında kullanılan motor elemanlarının aşınma, korozyon ve sürtünme gibi olumsuz etkenlerin azaltılması hedeflenmiştir. Motorun çalışması esnasında bu saydığımız etkenlerin iyileştirilmesi için volan, krank ve kam mili muyluları kutu borlama yöntemi ile kaplanmıştır. Çalışılan motor elemanları günümüz araçlarında kullanılmaktadır. Bu elemanlar hiç kullanılmamış olarak temin edilmiştir. Elemanlardan aynı bölgelerden kıyaslanmak üzere numuneler kesilmiştir. Bu numuneler kutu borlama işlemi ile kaplanmıştır. Borlama işlemi gerçekleştirildikten sonra volan, krank ve kam milinden alınan numunelerin her biri kaplanmamış ve kaplanmış olarak kıyaslamaya tabii tutulmuştur. Bu numuneler önce spektrometre analizi ile malzeme konsantrasyonlarına bakılmış sonra ise metalografik incelemeler (Spektrometre, Optik Mikroskop SEM, EDAX, XRD) yapılmıştır. Bu işlemlerin ardından borlanmış ve borlanmamış numuneler üzerinde; aşınma, mikro-sertlik, TGA ve korozyon deneyleri yapılmıştır. Ayrıca aşınma sonrası kaplanmış ve kaplanmamış numunelerde SEM analizi ve XRD analizi yapılmıştır. Bu sonuçlara göre;

- ✓ Yapılan deneyler sonucunda malzeme kompozisyonunda numunelerin dökme demir (volan), düşük karbonlu çelik (kam mili) ve yüksek karbonlu çelik (krank mili) olduğu belirlenmiştir. Optik ve SEM görüntülerinde borlanan numunelerde FeB ve Fe₂B tabakasının olduğu tespit edilmiştir. Aşınma sonucu alınan SEM görüntülerinde borlanan numunelerde aşınma çizgileri ince ve belirgin iken, borlanmamış numunelerde çizgiler yaygın ve belirsiz görülmüştür. Bu durum borlamanın yüzeylerde oluşturduğu bir oksit film ve bu filmin sürtünme katsayısını azaltması olarak düşünülmektedir.
- ✓ Deneyler sonucunda EDAX verilerine göre borlanmış numunelerden olan krank mili muylusunda borür tabakasından alınan spektrum sonuçlarına göre; B elementinin varlığı % 9,08, kam mili muylusunda B elementinin varlığı % 6,86 ve volandaki B elementinin varlığı % 8,49 olarak tespit edilmiştir. Bu durumun borlama esnasında bor elementinin malzemeye olan difüzyonun sonucu olduğu düşünülmektedir.
- ✓ Deneyler sonucunda XRD verilerine göre borlama işlemi yapılmayan numunelerde Fe ve Fe-C fazları mevcutken, borlanan numunelerde Fe₂B, FeB,

MnB ve Fe-B-Mn gibi bileşik oluşturan fazların oluştuğu tespit edilmiştir. Aşınma sonucu alınan XRD analizinde fazlarda titreşim oranının arttığı ve şiddetlerinin düştüğü görülmektedir. Bu durumun aşınma sonucu düşen yüzey kalitesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

- ✓ Kaplama sonrasındaki mikrosertlik sonuçlarında kaplanmış krank mili muylusunda 6,7 kat, kaplanmış kam mili muylusunda 6,9 kat ve kaplanmış volanda 5,8 katlık kaplanmamış numunelere göre bir sertlik artışı tespit edilmiştir. Bu durumun borlama işlemindeki bor elementinin varlığıyla gerçekleştiği düşünülmektedir.
- ✓ Aşınma analizi sonuçlarında 30 N ve 3000 m mesafe sonucu borlanmış numunelerde sırasıyla; krank mili muylusunda 4 kat, kam mili muylusunda 4,3 kat ve volanda 4,8 katlık borlanmamış numunelere göre bir aşınma direnci görülmüştür. Bu durumun borlamayla meydana gelen yüksek sertlik ve düşük sürtünme katsayısından dolayı oluştuğu düşünülmektedir.
- ✓ TGA deneyleri sonuçlarında 1000 °C sonunda borlanan numunelerde sırasıyla; krank mili muylusunda % 2,3, kam mili muylusunda %5 ve volanda % 7,5'lik borlanmamış numunelere göre oksitlenme sonucu kütle artışında fark meydana gelmiştir. Bu kütle artışına karşı borlanmış numunelerde borlanmamışlara göre sırasıyla; krank mili muylusunda 300 °C, kam mili muylusunda 100 °C ve volanda 60 °C oksitlenme sıcaklıklarında gecikme meydana gelmiştir. Bu durumun borlamadaki B₂O₃ etkileşiminin yaklaşık 900 °C sıcaklıkta meydana gelmesinden dolayı olduğu düşünülmektedir.
- ✓ Korozyon deneyi sonuçlarında borlanmış numunelerde borlanmamış numunelere göre sırasıyla; krank mili muylusunda % 85, kam mili muylusunda % 21 ve volanda % 12'lik korozyon direnci artışı meydana gelmiştir. Bu deneyde malzemelerin korozyon ömürlerini arttığı tespit edilmiştir.

8. ÖNERİLER

Yapılan bu deneysel çalışmada borlama yöntemi ile volan, krank ve kam mili muylularının yüzey özellikleri geliştirilmiştir. Aşınma, oksidasyon, yorulma, kırılma ve korozyon gibi yüzey deformasyonlarıyla gelen olumsuz etkenlerin azaltılması hedeflenmiştir. Uygulanan borlama yöntemi ile bu motor elemanlarının yüzey özelliklerinde iyileşmeler görülmüştür.

Yapılan çalışmaya ek olarak aşağıdaki öneriler dikkate alınabilir;

- ✓ Aynı kaplama yöntemleri ile farklı motor elemanlarına uygulanabilir.
- ✓ Kutu borlama yöntemi yerine diğer borlama yöntemleri kullanılabilir.
- ✓ Borlama süresi ve tabaka kalınlığı değiştirilebilir.
- ✓ Borlama için kullanılan toz değiştirilebilir.
- ✓ Farklı bir kaplama yöntemi ile borlama yöntemi kıyaslanabilir.
- ✓ Borlanmış ve borlanmamış motor elemanlarıyla motor belirli bir süre çalıştırılıp kestirimci bakım yöntemleri uygulanarak malzeme ömürlerinin farkı tespit edilebilir.

KAYNAKLAR

- Akroy İ. S.** (2007). Küresel Grafitli Dökme Demirlere Uygulanan Yüzey İşlemlerinin Aşınma Direncine Etkisinin İncelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.*
- Alsaran, A., Çelik, A.** (2001). Structural Characterization of Ion-nitrided AISI 5140 Low Alloy Steel, *Materials Characterization*, 47(3–4), 207.
- Arisoy, C.** (2015). Borlama ve nitrokarbürleme yüzey işlemlerinin cam ambalaj üretiminde kullanılan dökme demir kalıpların performansına etkileri. *Diss. Fen Bilimleri Enstitüsü*,. Retrieved from
- Atik, E.** (1997). Çeliklerin Borlanarak Aşınma Dayanımlarının Arttırılması. *Mühendis ve Makine*, 445, 17–20.
- Atik, E.** (2001). Farklı bir yüzey sertleştirme yöntemi: Borlama. *Makina Metal Dergisi*, sayı:1.
- Babushkin, B., ve Polyakov, B.** (1973). Residual stresses in steel after boriding from melts. *Metal Science and Heat Treatment*, 15, 577–580.
- Badini, C., Gianoglio, C., ve Pradelli, G.** (1987). The effect of carbon, chromium and nickel on the hardness of borided layers. *Surface and Coatings Technology*, 30, 157–170.
- Barış M.** (2007). Farklı Borlama Sürelerinin Transmisyon Çeliğinde Abrasif Aşınma Davranışlarına Etkisinin İncelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara.*
- Başman, G.** (2010). AISI 316 L Tipi Paslanmaz Çeliğin Termokimyasal Difüzyon Yöntemi İle Borlanmasında, Borlama Banyosu Bileşenlerinin Borür Tabakası Özelliklerine Etkisi,. *Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.*
- Bayça, S.U., Şahin, S.** (2004). Borlama. *Mühendis ve Makine, Ankara*,.
- Bergmann, H.W., B. U.** (1981). Influence Of Cr, Mn, Co and Ni on the Crystallization Behaviour of $(Fe_{1-x}Mx)_y$ Metalloid $1-y$ Metallic Glasse. *MRS Online Proceedings Library, Almanya.*
- Biddulph, R.** (1977). Boronizing for erosion resistance. *Thin Solid Films*, 45, 341–347.

- Boron Properties**, 1997.” (n.d.). “*Boron Properties*” *Handbook of Chemistry and Physics and ACM* 1997.
- Bozkır, S.** (n.d.). Çeviri 1995. *Bor Ekonomisi*. Raskill Information Services LTD 2 Clampharn Road London SW9 Oja - England Nisan 1995 - Ekim 1995, syf. 145.
- Bozkurt, N.** (1984). Bor Yayınımla Çeliklerde Yüzey Sertleştirme. Doktora Tezi. *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Bozkurt, N., Üçışık, A. H., Safoğlu, R. A.** (1979). Çeliklerde Bor İle Yüzey Sertleştirme 3. Ulusal Metalurji Kongresi O.D.T.Ü.
- Buytoz, S. ve Somunkiran, İ.** (2005). Borla Kaplanan Yüzeyin Mikroyapı Ve Mekaniksel Özellikleri. *Elektronik*, 2005(4), 41–45.
- Cabeo, E.R., Laudien, G., Biemer, S., Rie, K.-T., Hoppe, S.** (1999). Plasma-assisted Boriding of Industrial Components in a Pulsed D.C. Glow Discharge,. *Surface and Coating Technology*, V116-119, p229.
- Carbucicchio, M., Bardani, L., ve Palombarini, G.** (1980). Mössbauer and metallographic analysis of borided surface layers on Armco iron. *Journal of Materials Science*, 15, 711–719.
- Carbucicchio, M., ve Palombarini, G.** (1987). Effects of alloying elements on the growth of iron boride coatings J. Mater. Sci.Let. 6; *Journal of Materials Science Letters*, 1147–1149.
- Chatterjee-Fischer, R.** (1981). Hart.-Tech.Mitt., Vol 36 (No.5), p 248-254.
- Çalık**, 2002. (n.d.). Türkiye’nin bor madenleri ve özellikleri. *Makine ve Mühendis Dergisi*, Sayı 508, 36–41.
- Çalık, A., Delikanlı, K. ve Uzun, A.** (2004). Ç 1035 Çeliğin Borlama Özelliklerinin İncelenmesi. *II.Uluslararası Bor Sempozyumu*, 23-25 Eylül 2004 Eskişehir Türkiye.
- Çelik Ayhan, Alsaran Akgün, Karakan, M.** (2002). Plazma ile Termokimyasal Yüzey İşlemleri. *Mühendis ve Makine Dergisi, Atatürk Üniversitesi*, Cilt 43, Sayı 510.
- Dearnley, P. and Bell, T.** (1985). Surf.Eng., Vol 1((No.3)), p 203-217.
- Delikanlı, ve A.** (2003). Sade Karbonlu Bir Çeliğin Borlama Özelliklerinin İncelenmesi. *Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Ens.*, 5(1).

- Dilektaşlı E.** (2014). Bazı Alaşımlı Çeliklerin Yüksek Sıcaklık Aşınma Davranışına Borlama İşleminin Etkisi. *Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi.*
- Ediz N, Seyfettinoğlu , M. A., Ö. H.** (1997). “Kil Minerallerinin Tügsaş-Kütahya Azot Fabrikası Baca Gazlarının Filtrasyonunda Kullanımın Araştırılması.”
- Ediz, N. ve Özdağ, H.** (2001). Bor mineralleri ve ekonomisi. *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 2, 133–149.
- Er, Ü., Par, B.** (2004). Bor Yayınıyla Yüzeyi Sertleştirilmiş AISI 1030 ve AISI 1050 Çeliklerinin Abrasif Aşınma Dayanımlarının İncelenmesi. *Osman Gazi Ü. Müh. Mh. Fak. Dergisi, Eskişehir*, 17, 1.
- Fichtl, W.** (1981). Boronizing and its practical applications. *Materials in Engineering*, 2, 276–286.
- Galibois, A. Boutenko, O. and Voyzelle, B.** (1980). *Acta Metall.*, Vol 28, p 1753-63,1765-71.
- Genel, K., Ozbek, I. and Bindal, C.** (2003). Kinetics of Boriding of AISI W1 steel,. *Materials Science and Engineering A* 347, 311–314.
- Goeuriot, P., Fillit, R., Thevenot, F. ve Driver, J.** (1982). The influence of alloying element additions on the boriding of steels. *Materials Science and Eng.*, 9–19.
- Göy, Z.** (1984). Borlama. Yüksek Lisans Tezi. *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.*
- Graf, A., Matushcka, W.** (1977). Borieren. *Carl Hanser Verlag, München, Wien*, , 1–87.
- Gül, F.** (2010). Ferritik-perlitik küresel grafitli dökme demirin adhesif aşınma dayanımı üzerine borlama yüzey işleminin etkisi,. *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.*, Cilt 25, No 2, 389–395.
- H. Güler; R. Özcan.** (2014). Yüksek Karbonlu Çeliklere Su Verme İşleminin Mekanik Özelliklere Etkisinin İncelenmesi. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, Cilt 19, Sayı 2, 2014.
- Hazar, H. Öztürk, U.** (2015). Borlama Yüzey Kaplama Teknolojisinin Bir Dizel Motorun Yanma Odası Elemanlarına Uygulanması,. *Fen Bilimleri Enstitüsü, Fırat Üniversitesi, Doktora Tezi.*

- Hunger, H. J., Löbig, G.** (1997). Generation of Boride Layers on Steel and Nickel Alloys by Plasma Activation of Boron Trifluoride, Thin Solid Films, 310, 244–250.
- Hunger, H., True, G.** (1994). Boronizing to Produce Wear-resistant Surface Layers. *Heat Treatment of Metals*, 2, 31–39.
- Hunger, H.-J. A. T. G.** (1994). Boronizing to Produce Wear-resistant Surface Layers,. *Heat Treatment of Metals*, 2, 31–39.
- Kalafatoğlu, İ. ve Örs, S.** (2003). 21. Yüzyılda bor teknolojileri ve uygulamaları. *Balıkesir Üniversitesi, FBE Dergisi*, 5.1 Balıkesir.
- Karaman, Y.** (2003). Endüstriyel Borlama ve Tekstil Endüstrisinde Bir Uygulama.
- Karamış, M., Nair, F., ve Selçuk, B.** (1995). Borlanmış Malzemelerin Tribolojik Özellikleri, 6. Denizli Malzeme Sempozyumu. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi*.
- Keown, S. ve Pickering, F.** (1997). Some aspects of the occurrence of Gooran in Alay sheels. *Metal Science*, 26,7, H 225-234.
- Kocabaş, Ş.** (2002). Demirin İçindeki Güç. *Eğitim Bilim Dergisi*, Sayı 42.
- Kulka, M. and Pertek, A.** (2003). The Importance of cCarbon Content Beneath Ironborides After Boriding Of Chromium and Nickel-based Low-carbon Steel. *Applied Surface Science (Article in Press)*,.
- Küper, A., Qiao, X., Stock, H.R., Mayr, P.** (2000). A Novel Approach to Gas Boronizing, Surface and Coating Technology, V130, p87-94.
- Liluentel, W. Tacikowski, J. ve Senatorski, J.** (1983). Proceedings of Heat Treatment 81,. *The Metals Society*, P 193-197.
- Linial, A. ve Lavella, J.** (1974). New Processes for Obtaining Increased Metal Hardness and Reduced Friction Properties by Boronizing. Pt. 3. *Industrial Heating*.
- Mal, K. ve Tarkan, S.** (1973). Diffused B Ups Hardness, Wear Resistance of Metals. *Materials Engineering*, 77, 70–71.
- Malinova, T., Malinov, S., Pantev, N.** (2001). Simulation of Microhardness Profiles for Nitrocarburized Surface Layer by Artifical nueral Network,. *Surf. Caot. Tech.*, 135, 258.
- Matuschka, A. G.** (1980). Boronizing. *Boronizing Carl Hanser Verlag, München Wien Germany*.

- Nam, K., S., Lee, K. H., Lee, S R. Kwon, S. C.** (1998). A Study on Plasma-Assisted Boriding of Steels, *Surface and Coatings Technology*, 98, 886–890.
- Nam, K.S., Lee, K.H., Lee, S.R., and Kwon, S. C.** (1998). A Study on Plasma-Assisted Boriding of Steels. *Surface and Coatings Technology* 98, 886–890.
- Orhan, A., Gür, KA., Çalgülü, U.** (2007). Al Matrisli B4 C Takviyeli Kompozitlerin Sıcak Presleme Yöntemiyle Üretimi. *Makine Teknol. Elekt. Derg.*, 4, 8–13.
- Özbek I., B. C.** (2002). Mechanical Properties of Boronized AISI W4.
- Özbek, İ.** (1999). Borlama Yöntemi ile (AISI M50, AISI M2) Yüksek Hız Çeliklerinin ve AISI W1 Çeliğinin Yüzey Performanslarının Geliştirilmesi. *Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi.*
- ÖZER, M. Ay, İ.** (2011). Üç Farklı Çeliğe Katı Borlama İşlemi Yapılmasının İç Yapı ve Sertlik Üzerine Etkisinin İncelenmesi. *Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir.*
- Özsoy, A.** (1991). Çeliğin borlanması borür tabakası, geçiş zonu ve ana matriksin özelliklerinin iyileştirilmesi. *Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora.*
- Özsoy, A.** (2001). Borlama ile İlgili Genel Bir Değerlendirme. *Endüstriyel Yüzey Teknolojileri Dergisi, Sayı, 22, s.10-13, İstanbul.*
- P. Gopalakrishnan, P. Shankar, M. P. ve S.S. Ramakrishnan.,** (2002). Interrupted Boriding of Medium- Carbon Steels. *Metallurgical and Materials Transactions, 33A,5, Academic Research Library, 1475–1485.*
- Permyakov, V., Yakovchuk, Y., ve Cherepin, V.** (1973). Effect of silicon on formation of boride coatings. *Metal Science and Heat, 15, 251–253.*
- Rie, K.-T.** (1999). Recent Advances in Plasma Diffusion Processes,. *Surface and Coatings Technology 112, 56–62.*
- Selam M.** (1996). Borlanmış Gri Dökme Demirin Aşınma Davranışlarının Deneyisel Araştırılması. *Y.Lisans Tezi, Erciyes Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.*
- Selçuk B.** (1994). Borlanmış AISI 1020 ve AISI 5115 Çeliklerinin Sürtünme ve Aşınma Davranışlarının İncelenmesi. *Doktora Tezi, Erciyes Ü. Fen Bil. Ens., Kayseri.*

- Singhal, S.** (1977). A hard diffusion boride coating for ferrous materials. *Thin Solid Films*, 45, 321–329.
- Sinha, A. K.** (1991). Boriding,. *Boriding Asm Handbook, Vol.4, J. Heat Treating*, 434–447.
- Subrahmanyam J., G. K.** (1984). Wear Studies on Boronized Mild Steel. Vol.95, Pp. 287-292, 1984.
- Şahin, S.** (1999). Katı Borlama Yöntemi ile Ferrobör Üretimi ve Özelliklerinin Belirlenmesi. Doktora Tezi. *Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, s 86, Manisa.
- Taşçı, A.** (1993). Borlanmış Çeliklerin Aşınma Ve Korozyon Dayanımları. *İÜ, EBE Yüksek Lisans Tezi, İstanbul*, 45.
- Tezcan, R.** (1996). Borlama İşlemi ve Endüstriyel Uygulamaları. *Y.Lisans Tezi, Osmangazi Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir*,.
- Topuz, P.** (2016). DIN 1.2842 Çeliğinin Borlanması ile Oluşan Borür Tabakası Üzerine Borlama Sıcaklık ve Süresinin Etkileri. *Journal of Boron*, 1, 15–19.
- Topuz, P., Çiçek, B. ve Akar, O.** (2016). Kinetic investigation of AISI 304 stainless steel boronized in indirect heated fluidized bed furnace. *Int. Journal of Mining and Metallurgy-Sect. B Metallurgy*, 52(1) B, 63–68.
- Uluköy, A., Can, A. Ç.** (2006). Çeliklerin Borlanması-Boronizing of Steel. *Journal of Engineering Sciences*, 12(2), 189–198.
- URL-1** <http://www.bath.ac.uk/boron>. (n.d.). Retrieved September 16, 2017,
- URL-2** Retrieved December 4, 2017, from <http://megep.meb.gov.tr/>
- URL-3** Mühendis ve Makine D. (2004). Mühendis ve Makine Dergisi, Mayıs. Son Erişim Tarihi 11.09.2017
- URL-4** BOR RAPORU, (2002). TMMOB Maden Mühendisleri Odası. Son Erişim Tarihi 07.08.2017
- URL- 5** Bor Raporu. (2003). Son Erişim Tarihi 19.10.2017
- Uslu İ., C. H.** (2004). Borlanan A181 1040 ve AISI P20 Kalıp Çeliklerinin Bazı Mekanik Özellikleri. *SAU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 8. Cilt 1. Sayı, Mart*.
- Ünlü Sadık, B. ve Yılmaz, S. S.** (n.d.). Bor ve borlamanın kullanım alanları. *Mühendis ve Makine Dergisi*, 552, 48–54.

- Ünlü, B.** (2004). Kaymalı Yataklarda Tribolojik Özelliklerin ve Borlanmış Demir Esaslı Malzemelerin Yatak Olarak Kullanılabilirliğinin Belirlenmesi. *Doktora Tezi, CB Ü. Fen Bil. Enst., Manisa.*
- Viricelle, J., P. Goursat, ve D. B.-H.** (2000). Oxidation behaviour of a boron carbide based material in dry and wet oxygen. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 63.2 , 507–515.
- Yapar, U.** (2015). Düşük ve Orta Karbonlu Çeliklerin Termokimyasal Borlama ile Yüzey Özelliklerinin Geliştirilmesi. *İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.*
- Yıldızlı, K., Odabaşı, D., ve Nair, F.** (2003). Borlanmış AISI 1020 Çeliğinin Eroziv Aşınma Davranışının İncelenmesi. *BAÜ Fen Bil. Enst. Dergisi.*
- Yılmaz, A.** (2002). Her derde deva hazinemiz bor. *TUBİTAK-Bilim ve Teknik Dergisi, Ankara, (Mayıs Sayısı), 38–48.*
- Yılmaz, S.** (1997). Çeliklerde Bor le Yüzey Sertleştirme. *Yüksek Lisans Tezi, CB Ü. Fen Bil. Enst.*
- Yılmaz, S.** (2004). Demir Esaslı T/M Parçaların Yüzey Sertleştirme İşlemlerinin Fiziksel ve Mekanik Özelliklerine Etkisi. *Doktora Tezi, CB Ü. Fen Bil. Enst.*
- Yoon, J. H., Jee, Y. K., Lee, S. Y.** (1999). Plasma Paste Boronizing Treatment of the Stainless Steel AISI 304, *Surface and Coatings Technology*, 112, 71–75.

ÖZGEÇMİŞ

1989 yılında Elazığ'da doğdum. İlköğretim ve lise öğrenimimi Elazığ'da tamamladım. 2009 yılında kazanmış olduğum Fırat Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Makine Eğitimi Otomotiv Öğretmenliği bölümünden 2013 yılında mezun oldum. 2014 yılında Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Otomotiv Mühendisliği Taşıt Dinamiği ve Kontrol ana bilim dalında yüksek lisans öğrenimime başladım. 2013 yılında bir özel motorlu araçlar sürücü kursunda kurum müdürü ve motor öğretmeni olarak göreve başladım. Hala sürücü kursunda motor öğretmeni olarak devam etmekteyim. 2015 yılında mühendislik tamamlama sınavı ile Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Makine Mühendisliği bölümünü kazandım. 2016 yılında Teknoloji Fakültesi Makine Mühendisliği bölümü mezunuyum.