

AISI 4140 Çelik Malzemenin Yüzey Özelliklerini Geliştirmek İçin Yenilikçi Bir PTA
Yöntemi

Gökçe Mehmet Ay

DOKTORA TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Mayıs 2017



A Novel PTA Coating Method to Improve Surface Properties of Steels

Gökçe Mehmet Ay

DOCTORAL DISSERTATION

Mechanical Engineering Department

May 2017

AISI 4140 Çelik Malzemenin Yüzey Özelliklerini Geliştirmek İçin Yenilikçi Bir PTA
Yöntemi

Gökçe Mehmet Ay

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Konstrüksiyon-İmalat Bilim Dalı
DOKTORA TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Doç. Dr. Osman Nuri Çelik

TÜBİTAK 2211D ve BAP projesi ile desteklenmiştir

Mayıs 2017

ONAY

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı DOKTORA öğrencisi Gökçe Mehmet Ay'ın DOKTORA tezi olarak hazırladığı "AISI 4140 Çelik Malzemenin Yüzey Özelliklerini Geliştirmek İçin Yenilikçi Bir PTA Yöntemi" başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

Danışman : Doç. Dr. Osman Nuri Çelik

Doktora Tez Savunma Jürisi:

Üye : Doç. Dr. Osman Nuri Çelik

Üye : Prof. Dr. Orhan Şerif Komaç

Üye : Doç. Dr. Dilek Turan

Üye : Doç. Dr. Osman Torun

Üye : Yrd.Doç. Dr. Mustafa Ulutan

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

Prof.Dr. Hürriyet Erşahan
Enstitü Müdürü

ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Doç. Dr. Osman Nuri Çelik danışmanlığında hazırlamış olduğum “**AISI 4140 Çelik Malzemenin Yüzey Özelliklerini Geliştirmek İçin Yenilikçi Bir PTA Yöntemi**” başlıklı tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel etik ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi; tez çalışmamda yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik ilke ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim. .../.../20...

Gökçe Mehmet Ay

ÖZET

Sürtünme ve aşınma birbiri üzerinde hareket eden tüm parçalarda değişen oranlarda görülen iki olgudur. Sürtünme ve aşınmanın etkilerini azaltmak için çeşitli yağlama ve yüzey özellikleri geliştirme yöntemleri uygulanmaktadır. Bu çalışmada Plazma Transfer Ark ile yüzey kaplama yöntemi kullanılarak Nikel bazlı Borlu bir kaplama geliştirilmiştir. Nikel bazlı kaplamalar lazer kaplamada ve PTA'da kullanılıyor olsa da Nikel'in sadece Bor'la beraber uygulandığı kaplama mevcut değildir.

Bor kaynağı olarak Ekabor II ve saf B_4C kullanılmıştır. Bu iki malzemenin ayrı ayrı farklı oranlarda Nikel ile karıştırılması sonucunda elde edilen kaplama malzemesi AISI 4140 yüzeyine kaplanmıştır. Kaplanmış parçalardan alınan numuneler mikroyapı analizine ve aşınma testine tabi tutulmuştur.

Hazırlanan numunelerin mikroyapısı optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu ile incelenmiştir. Yapıdaki fazların netleştirilmesi için X ışını Kırınım (XRD) Analizi uygulanmıştır. Bu incelemelerin sonucunda kaplamada Fe-Ni, Fe-Ni-B, Ni-B ve Fe-B fazlarının oluştuğu tespit edilmiştir. Bu fazların oluşumunun sistemdeki Bor oranına ve soğuma hızına bağlı olduğu tespit edilmiştir.

Kaplanmış parçanın olası çalışma şartlarına benzer bir aşınma testi Ball-on-disk testi ile uygulanmış ve kaplamanın aşınma karakteristiği elde edilmiştir. Aşınma incelemesinde yüzeyde sürtünmeyi düşürücü etki yapan oksitlerin oluştuğu, Nikel alaşımlarının aşınma testinde karşı kütle olan WC bilyada aşınmaya sebep olup malzeme transfer olduğu gözlenmiştir. Deney sonuçlarının istatistiki incelemesi sonucunda kaplamaya katılan Bor Karbür oranı ile elde edilen sürtünme katsayısı arasında doğrusal bir ilişki olduğu tespit edilmiştir. Deneylerin ışığında Bor kaynağı olarak borlamada kullanılan Ekabor II'nin Bor Karbür kadar iyi bir Bor kaynağı olduğu tespit edilmiştir.

Bu çalışmada geliştirilen kaplamanın özellikle yüksek sıcaklık ve korozif ortamlarda çeliklerin yüzey özelliklerini geliştirmek için uygun bir yöntem olduğu anlaşılmıştır.

Anahtar Kelimeleri: Plazma Transfer Ark, Nikel, Bor Karbür

SUMMARY

Friction and wear are two phenomena seen in varying proportions in all moving parts. Various lubrication and surface modification methods are applied to reduce the effects of friction and wear. In this study, a nickel-based boron coating was developed using the Plasma Transfer Arc surface coating method. Nickel-based coatings are used in laser coating and PTA, but Nickel coatings are not used with just Boron.

Ekabor II and pure B₄C were used as boron source. Coating material obtained by mixing these two materials with Nickel at different ratios was applied on the AISI 4140 steel substrate. The samples from the coated pieces microstructure analysed and they were subjected to wear test.

Microstructure of prepared samples was examined by optical microscope and scanning electron microscope. X-Ray Diffraction (XRD) Analysis was applied to clarify the phases in the building. As a result of these investigations, it was found that Fe-Ni, Fe-Ni-B, Ni-B and Fe-B phases were formed in the coating. It has been determined that the formation of these phases depends on the Boron ratio in the system and the rate of cooling.

A wear test similar to the possible operating conditions of the coated part was carried out by Ball-on-disc test and the wear characteristic of the coating was obtained. When wear test results were inspected, it is observed that on the surface oxides that have friction reducing effect were formed and Nickel alloys formed in coating caused wear on WC ball and material transfer is observed. Examining the test results by statistical methods, it was determined that there is a linear relationship between the coefficient of friction and the ratio of boron carbide addition in the coating. In the light of these experiments, it was determined that Ekabor II, that is used as boronizing agent, was as good boron source as Boron Carbide.

It was found that the coating developed in this study is a suitable for surface modification of steels especially in high temperature and corrosive environments.

Keywords: Plasma Transferred Arc, Nickel, Boron Carbide

TEŞEKKÜR

Doktora çalışması sonucunda ortaya çıkan eser bir kişinin ismini taşısa da aslında büyük bir ekibin başarısıdır. Aşağıda isimleri geçenler benim doktora tezi çalışmamda değerli katkılarıyla bana destek olan ve yol gösterenlerdir.

En başta sayın tez danışmanım, hocam Doç.Dr. Osman Nuri ÇELİK'e en içten teşekkürlerimi sunmak istiyorum. Onun tez sürecindeki sabrı, yol göstericiliği, motivasyonu, engin bilgisi ve bilgeliği olmasaydı bu çalışma tamamlanamazdı. Ondan daha iyi bir danışman ve bilimin zorluklarla dolu yolunda rehber düşünemiyorum.

Danışmanım dışında bana yol gösteren sayın Tez İzleme Kurulu üyeleri Prof.Dr. Orhan Şerif KOMAÇ ve Doç.Dr. Dilek TURAN'a teşekkür etmek istiyorum. Onlar bana ufkumu açmama sebep olan zor sorular sorsalar da, yolumu bulmak için gereken desteği benden hiç esirgemediler.

Üniversitemizin Uygulama ve Araştırma Merkezinde SEM ve XRD çalışmalarında benim isteklerimi yerine getirebilmek için cihazın pek bilinmeyen özelliklerini araştırıp uygulayan sayın Dr. Gökhan DİKMEN, Dr. Esmâ OCAK, Dr. Betül YILMAZ ÖZTÜRK, Okan USLU ve Gökhan Solmaz'a teşekkür etmek istiyorum.

Bölümde beraber çalıştığım arkadaşlarıma kahve içerken tezimle ilgili konuşmama katlandıkları, hep daha iyisini aramak için motive ettikleri için teşekkür etmek istiyorum.

Çalışmamı destekledikleri için TÜBİTAK 2211D ve ESOGÜ BAP'a teşekkür ederim.

Annem ve babama, beni bilimsel merak duygusuyla yetiştirdikleri ve beni destekledikleri için teşekkür etmek istiyorum.

Son olarak bu çalışmada bana en büyük desteği veren, aklımdaki huzurun ve içimdeki mutluluğun kaynağı; oğlum, kızım ve sevgili eşime teşekkür etmek istiyorum.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	vi
SUMMARY	vii
TEŞEKKÜR	viii
İçindekiler	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xvi
1. GİRİŞ VE AMAÇ	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	4
2.1. Plazma Transfer Ark Yöntemi (PTA)	6
2.2. Kullanılan Partikül Malzemeler	8
3. MATERYAL VE YÖNTEM	13
3.1. Numune Hazırlığı	14
3.2. Kullanılan Cihazlar	16
3.3. Aşınma Testi	18
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	21
4.1. Mikroyapı incelemesi	21
4.2. Aşınma Deneyi Sonuçları	82
4.2.1. Sürtünme ve aşınma karakteristikleri	82
4.2.2. Aşınma izi SEM ve EDS analizi	95
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	141
KAYNAKLAR DİZİNİ	143
6. Özgeçmiş	150

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
1.1 Leonardo da Vinci'nin Triboloji deney fikirleri	1
2.1 Yüzey özelliği geliştirme metodları	5
2.2 PTA Torç Şematik Gösterimi	6
2.3 PTA Toz Beslemeli Torç Şematik Gösterimi	7
2.4 Bor Karbon Faz Diyagramı (Schwetz ve Karduck, 1991)	9
2.5 Bor Demir Faz Diyagramı (ASM, 1990)	10
2.6 Bor Nikel Faz Diyagramı (ASM, 1990)	12
2.7 Nikel Demir Faz Diyagramı (ASM, 1990)	12
3.1 E2 karışımı XRD analizi	14
3.2 İşlem akış şeması	15
3.3 Ball on Disk testi şematik	19
4.1 N1 panorama 50x %2 Nital 40s	21
4.2 N1 numunesi optik inceleme, %2 Nital 40s	22
4.3 N1 SEM görüntüsü	23
4.4 C1 panorama 50x %2 Nital 40s	24
4.5 C1 numunesi optik inceleme, %2 Nital 40s	25
4.6 C1 SEM görüntüsü	26
4.7 N2 panorama 50x %2 Nital 40s	27
4.8 N2 numunesi optik inceleme, %2 Nital 40s	28
4.9 N2 SEM görüntüsü	29
4.10 C2 panorama, %2 Nital 40s	30
4.11 C2 numunesi optik inceleme, %2 Nital 40s	31
4.12 C2 SEM görüntüsü	32
4.13 C3 panorama, 50x, %2 Nital 40s	34
4.14 C3 numunesi optik inceleme	35
4.15 C3 SEM görüntüsü	36
4.16 N1, C1, N2, C2 ve C3 numunelerinin XRD analizi	38
4.17 C4 panorama, 50x, %2 Nital 40s	39
4.18 C4 optik inceleme, %2 Nital 40s	40
4.19 C4 SEM görüntüsü	41
4.20 C5 panorama, 50x, %2 Nital 40s	42
4.21 C5 numunesi optik inceleme, %2 Nital 40s	43

4.22	C5 SEM görüntüsü	44
4.23	D1 panorama 50x %2 Nital 40s	45
4.24	D1 numunesi optik inceleme	46
4.25	D1 numunesi SEM görüntüleri	47
4.26	D1 EDS sonuçları	48
4.27	D2 panorama 50x %2 Nital 40s	49
4.28	D2 numunesi optik inceleme	50
4.29	D2 numunesi SEM görüntüleri	51
4.30	D2 EDS sonuçları	51
4.31	D3 panorama 50x %2 Nital 40s	53
4.32	D3 numunesi optik inceleme	54
4.33	D3 numunesi SEM görüntüleri	55
4.34	D3 EDS sonuçları	56
4.35	C4, C5, D1, D2 ve D3 numunelerinin XRD analizi	58
4.36	E1 numunesi 50x panoramik görüntüsü, %2 Nital 40s	59
4.37	E1 numunesi optik inceleme, %2 Nital 40s	60
4.38	E1 numunesi SEM görüntüleri	61
4.39	E1 EDS sonuçları	62
4.40	E2 numunesi 50x panoramik görüntüsü	63
4.41	E2 numunesi optik inceleme	64
4.42	E2 numunesi SEM görüntüleri	65
4.43	E2 EDS sonuçları	66
4.44	E3 numunesi 50x panoramik görüntüsü, %2 Nital 40s	67
4.45	E3 numunesi optik inceleme, %2 Nital 40s	68
4.46	E3 numunesi SEM görüntüleri	69
4.47	E3 EDS sonuçları	70
4.48	E4 numunesi 50x panoramik görüntüsü, %2 Nital 40s	71
4.49	E4 numunesi optik inceleme, %2 Nital 40s	72
4.50	E4 numunesi SEM görüntüleri	73
4.51	E4 EDS sonuçları	74
4.52	E5 numunesi 50x panoramik görüntüsü, %2 Nital 40s	75
4.53	E5 numunesi optik inceleme, %2 Nital 40s	76
4.54	E5 numunesi SEM görüntüleri	77
4.55	E5 EDS sonuçları	78
4.56	Yüzeyden kaplama içine E5 SEM görüntüleri	80
4.57	Saf B ₄ C içeren numunelerin karşılaştırılması	81
4.58	Elde Nikel ile karıştırılmış Ekabor II içeren kaplama malzemesi PTA ile yüzeye uygulanmış numunelerin ortalama sürtünme katsayıları	83

4.59	Elde Nikel ile karıştırılmış Ekabor II içeren kaplama malzemesi PTA ile yüzeye uygulanmış numunelerin Toplu Sürtünme Katsayısı Mesafe Grafiği	83
4.60	Elde Nikel ile Karıştırılmış Ekabor II TM içeren kaplama malzemesi PTA ile yüzeye uygulanmış numunelerin Aşınma profilleri	84
4.61	Değirmende Nikel ile karıştırılmış Ekabor içeren kaplama malzemesi PTA ile yüzeye uygulanmış numunelerin ortalama sürtünme katsayıları	85
4.62	Değirmende Nikel ile karıştırılmış Ekabor II içeren kaplama malzemesi PTA ile yüzeye uygulanmış numunelerin Toplu Sürtünme Katsayısı Mesafe Grafiği	86
4.63	Değirmende Nikel ile Karıştırılmış Ekabor II TM içeren kaplama malzemesi PTA ile yüzeye uygulanmış numunelerin Aşınma profilleri	86
4.64	Saf B ₄ C ile Ni içeren kaplama malzemesi PTA ile yüzeye uygulanmış numunelerin Aşınma profilleri	87
4.65	Saf B ₄ C ile Ni içeren kaplama malzemesi PTA ile yüzeye uygulanmış numunelerin Toplu Sürtünme Katsayısı Mesafe Grafiği	88
4.66	Saf B ₄ C ile Ni içeren kaplama malzemesi PTA ile yüzeye uygulanmış numunelerin ortalama sürtünme katsayıları	88
4.67	Sürtünme katsayısı karşılaştırmaları	89
4.68	Karışım oranının Sürtünme Katsayısına etkisi	91
4.69	Sürtünme Katsayısı ve Aşınma Hacminin Karışım oranlarına göre grafikleri	92
4.70	Sürtünme Katsayısı ve Aşınma Hacminin birbirlerine göre ve Karışım oranları, Sürtünme Katsayısı ve Aşınma Hacminin 3B grafikleri	93
4.71	Sürtünme Katsayısı ve Aşınma Hacmine göre en iyi sonuçlar kümesi	94
4.72	N1 Aşınma SEM genel görüntü	95
4.73	N1 numunesi Aşınma İzi SEM görüntüleri	96
4.74	N1 aşınma izi EDS sonuçları	97
4.75	C1 Aşınma SEM genel görüntü	98
4.76	C1 numunesi Aşınma İzi SEM görüntüleri	99
4.77	C1 aşınma izi EDS sonuçları	100
4.78	N2 Aşınma SEM genel görüntü	101
4.79	N2 numunesi Aşınma İzi SEM görüntüleri	102
4.80	N2 aşınma izi EDS sonuçları	103
4.81	C2 Aşınma SEM genel görüntü	104
4.82	C2 numunesi Aşınma İzi SEM görüntüleri	105
4.83	C2 aşınma izi EDS sonuçları	106
4.84	C3 Aşınma SEM genel görüntü	107
4.85	C3 numunesi Aşınma İzi SEM görüntüleri	108
4.86	C3 aşınma izi EDS sonuçları	109
4.87	C4 Aşınma SEM genel görüntü	110
4.88	C4 numunesi Aşınma İzi SEM görüntüleri	111

4.89 C4 aşınma izi EDS sonuçları	111
4.90 C5 Aşınma SEM genel görüntü	113
4.91 C5 numunesi Aşınma İzi SEM görüntüleri	114
4.92 C5 aşınma izi EDS sonuçları	115
4.93 D1 Aşınma SEM genel görüntü	116
4.94 D1 numunesi Aşınma İzi SEM görüntüleri	117
4.95 D1 aşınma izi EDS sonuçları	117
4.96 D2 Aşınma SEM genel görüntü	119
4.97 D2 numunesi Aşınma İzi SEM görüntüleri	120
4.98 D2 aşınma izi EDS sonuçları	121
4.99 D3 Aşınma SEM genel görüntü	122
4.100D3 numunesi Aşınma İzi SEM görüntüleri	123
4.101D3 aşınma izi EDS sonuçları	123
4.102E1 Aşınma SEM genel görüntü	125
4.103E1 numunesi Aşınma İzi SEM görüntüleri	126
4.104E1 aşınma izi EDS sonuçları	127
4.105E2 Aşınma SEM genel görüntü	128
4.106E2 numunesi Aşınma İzi SEM görüntüleri	129
4.107E2 aşınma izi EDS sonuçları	130
4.108E3 Aşınma SEM genel görüntü	131
4.109E3 Aşınma SEM 2000x bölge A	132
4.110E3 aşınma izi EDS sonuçları	133
4.111E4 Aşınma SEM genel görüntü	134
4.112E4 aşınma izi SEM Görüntüleri	135
4.113E4 aşınma izi EDS sonuçları	136
4.114E5 Aşınma SEM genel görüntü	137
4.115E5 aşınma izi SEM görüntüsü	138
4.116E5 aşınma izi EDS sonuçları	139
4.117Ni bazlı sert fazlar içeren kaplamada adhezyon (Silva ve D'Oliveira, 2015) . . .	140

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
1.1 AISI 4140 Kimyasal kompozisyonu	2
2.1 Nikel kullanım alanları	11
3.1 Numune karışım oranları	13
3.2 Arkaplan temizleme ayarları	16
3.3 Veri düzgünleştirme ayarları	17
3.4 Malzeme özellikleri	20
4.1 Şekil 4.3'den alınan EDS analizi sonuçları	23
4.2 Şekil 4.6'den alınan sonuçlar	26
4.3 Şekil 4.9'dan alınan sonuçlar	29
4.4 Şekil 4.12'dan alınan sonuçlar	33
4.5 Şekil 4.15'den alınan sonuçlar (Ağırlıkça Oranlar)	36
4.6 Şekil 4.19'dan alınan sonuçlar	41
4.7 Şekil 4.22'den alınan sonuçlar	44
4.8 D1 Numunesi EDS sonuçları	48
4.9 D2 Numunesi EDS Sonuçları	52
4.10 D3 Numunesi EDS Sonuçları	56
4.11 E1 Numunesi EDS sonuçları	62
4.12 E2 Numunesi EDS Sonuçları	66
4.13 E3 Numunesi EDS Sonuçları	70
4.14 E4 Numunesi EDS Sonuçları	74
4.15 E5 Numunesi EDS Sonuçları	78
4.16 N1 Numunesi Aşınma İzi EDS sonuçları	96
4.17 C1 Numunesi Aşınma İzi EDS sonuçları	99
4.18 N2 Numunesi Aşınma İzi EDS sonuçları	102
4.19 C2 Numunesi Aşınma İzi EDS sonuçları	105
4.20 C3 Numunesi Aşınma İzi EDS sonuçları	108
4.21 C4 Numunesi Aşınma İzi EDS sonuçları	112
4.22 C5 Numunesi Aşınma İzi EDS sonuçları	114
4.23 D1 Numunesi Aşınma İzi EDS sonuçları	118
4.24 D2 Numunesi Aşınma İzi EDS sonuçları	121
4.25 D3 Numunesi Aşınma İzi EDS sonuçları	124
4.26 E1 Numunesi Aşınma İzi EDS sonuçları	126

4.27 E2 Numunesi Aşınma İzi EDS sonuçları	129
4.28 E3 Numunesi Aşınma İzi EDS sonuçları	132
4.29 E4 Numunesi Aşınma İzi EDS sonuçları	135
4.30 E5 Numunesi Aşınma İzi EDS sonuçları	138

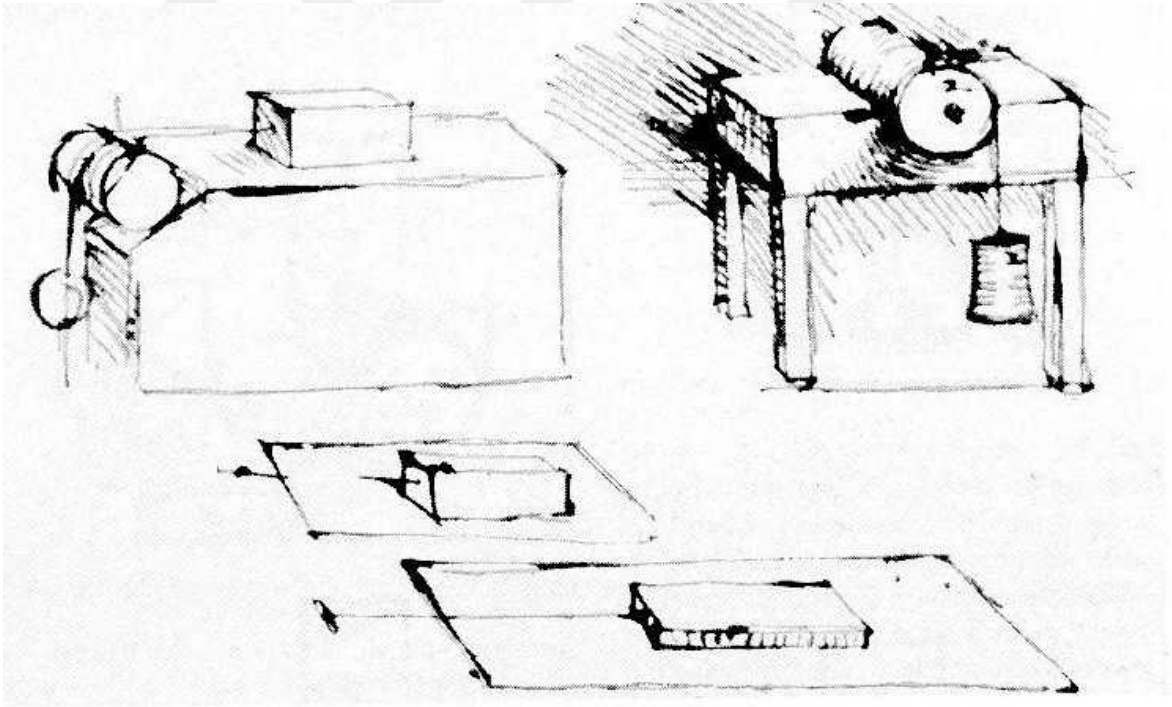


SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simge veya Kısaltma	Tanım	Sayfa Numarası
ν	Poisson oranı	19
ρ_0	maksimum Hertzian gerilmesi	18, 19
d	deformasyon derinliği	19
E	Elastisite Modülü	19
F	yük	19
PTA	Plazma Transfer Ark	2
R	yarı çap	19

1. GİRİŞ VE AMAÇ

Modern dünya hareket eden sistemler üzerinden dönmektedir. İnsanoğlu tekerleğin icadından itibaren hareketi kullanarak işlerini kolaylaştırmaktadır. At arabasından, buharın getirdiği sanayi devrimine, oradan da uzay araştırmalarına kadar hareketli sistemler insanlığın gelişmesinin yolunu açmıştır. İnsanlık hareketli sistemleri kullanmaya başladığı yıllardan itibaren hareket eden kütlelerin arasında oluşan sürtünme ve aşınma ile ilgili araştırmalar yapmıştır. İlk araştırmaların 1493’de ünlü sanatçı ve bilim insanı Leonardo da Vinci tarafından kayıt altına alındığı kabul edilmektedir (Hutchings, 2016). Her ne kadar Triboloji terimi daVinci’nin ölümünden 450 yıl sonra ortaya çıksa da Şekil1.1’de de görüldüğü üzere ilk sürtünme deneyleri onun tarafından tasarlanmıştır.



Şekil 1.1: Leonardo da Vinci’nin Triboloji deney fikirleri

Hareket eden kütlelerin karşılaştığı sürtünme ve aşınmanın çağlar boyunca önemli bir araştırma konusu olmasının sebebi, sistemlerde önemli bir verimlilik düşüşüne sebep olmalarıdır. Örneğin 2009 rakamlarına göre sadece kara taşıtlarındaki sürtünme ile fazladan kullanılan yakıt 208 milyar litredir (Holmberg vd., 2012). Bu rakama diğer sektörlerdeki

sürtünme ve aşınma ile kaybedilen enerji de eklendiğinde kazanılabilecek verimliliğin ne kadar yüksek olduğu anlaşılmaktadır.

Sürtünme ve aşınma ile başa çıkabilmek için önce yağlama ve yeni tasarımlar göz önüne alınmıştır. Isıl işlem tekniklerinin gelişmesi, çeşitli ısıl işlem yöntemleri ile sürtünme ve aşınmaya dirençli malzemeler elde edilmesi için çalışılmıştır. Ancak yağlama, ısıl işlem ve tasarımla ulaşılabilecek kazanç sınırlı olmaktadır. Malzemelerin yüzey özelliklerini geliştirmek için başka yöntemlere ihtiyaç duyulmuştur. Yüzey özelliklerini geliştirmek için çeşitli malzemelerin PTA ile yüzeye kaplanması; kullanım kolaylığı ve kaplama tozu seçimindeki özgürlük ile önemli bir kaplama yöntemidir (Wilden vd., 2006).

Bu çalışmada endüstriyel uygulamalarda sürtünme ve aşınmaya dirençli yeni bir yüzey elde edilmesi amaçlanmıştır. Bu yüzey için Plazma Transfer Ark (PTA) Plazma Transfer Ark kaynak tekniği kullanılmış ve AISI 4140 çelik altlıklar üzerinde Nikel ve Bor Karbür (B_4C) karışımı ile sert yüzey elde edilmiştir. Kimyasal kompozisyonu Çizelge 1.1’de verilen AISI 4140 çeliği otomotivden, takım gövdelerine, fikstürlerden dişlilere, bir çok makine parçasında ve endüstride kullanılan önemli bir çeliktir. Bu çeliğin yüzey özelliklerini geliştirmek için üretilecek bir yöntemin kullanım alanı da geniş olacaktır.

Çizelge 1.1: AISI 4140 Kimyasal kompozisyonu

Element	İçerik (%)
Cr	0,80 - 1,10
Mn	0,75 - 1,0
C	0,380 - 0,430
Si	0,15 - 0,30
Mo	0,15 - 0,25
S	0,040
P	0,035

Metal dışı sert malzemeler arasında yüksek ergime noktası, yüksek sertliği, iyi mekanik özellikleri ve kimyasal ajanlara direnci ile B_4C PTA için iyi bir ara yüzey malzemesidir (Thévenot, 1990). Yüzey özellikleri iyileştirilmesinde kullanılan Bor Karbür saf halde ve endüstride borlama için kullanılan Ekabor II TM ’den elde edilmiştir. Çalışmanın amacı bu iki Bor Karbür kaynağının malzemenin yüzey özelliklerine etkisini de incelemektir. Nikel bazlı B_4C kaplama ile yüzeyin sürtünme katsayısının ve aşınma özelliklerinin geliştirilmesi hedeflenmektedir.

Bu çalışmada Literatür Araştırması bölümünde konu ile ilgili güncel ve temel bilgiler verilmiştir. Materyal ve Yöntem bölümünde kullanılan malzemeler ve cihazlar tanıtılmış, deney planı ve seçim sebepleri açıklanmıştır. Bulgular ve Tartışma bölümünde numunelerin mikroyapı analizler ve aşınma test sonuçları incelenmiştir. Sonuç ve Öneriler bölümünde yapılan çalışmadan elde edilen sonuçlar anlatılmış ve öneriler sunulmuştur.



2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Endüstride kullanılan parçalar sürtünme ve aşınmaya maruz kalmaktadır. Bu etkileri azaltmak önemli bir araştırma konusudur. Çeşitli yöntemler uygulayarak aşınmanın ve sürtünmenin etkilerini azaltmak mümkündür. Yağlama geçmişten günümüze aşınma ve sürtünme etkilerini azaltma yöntemlerinin başında gelmektedir. Ancak yağlamanın mümkün ya da yeterli olmadığı uygulamalar için yüzey mühendisliği yöntemleri uygulanmaktadır. Yüzey mühendisliği yöntemleri Şekil 2.1’de gösterildiği üzere iki ana kategoride incelenebilir.

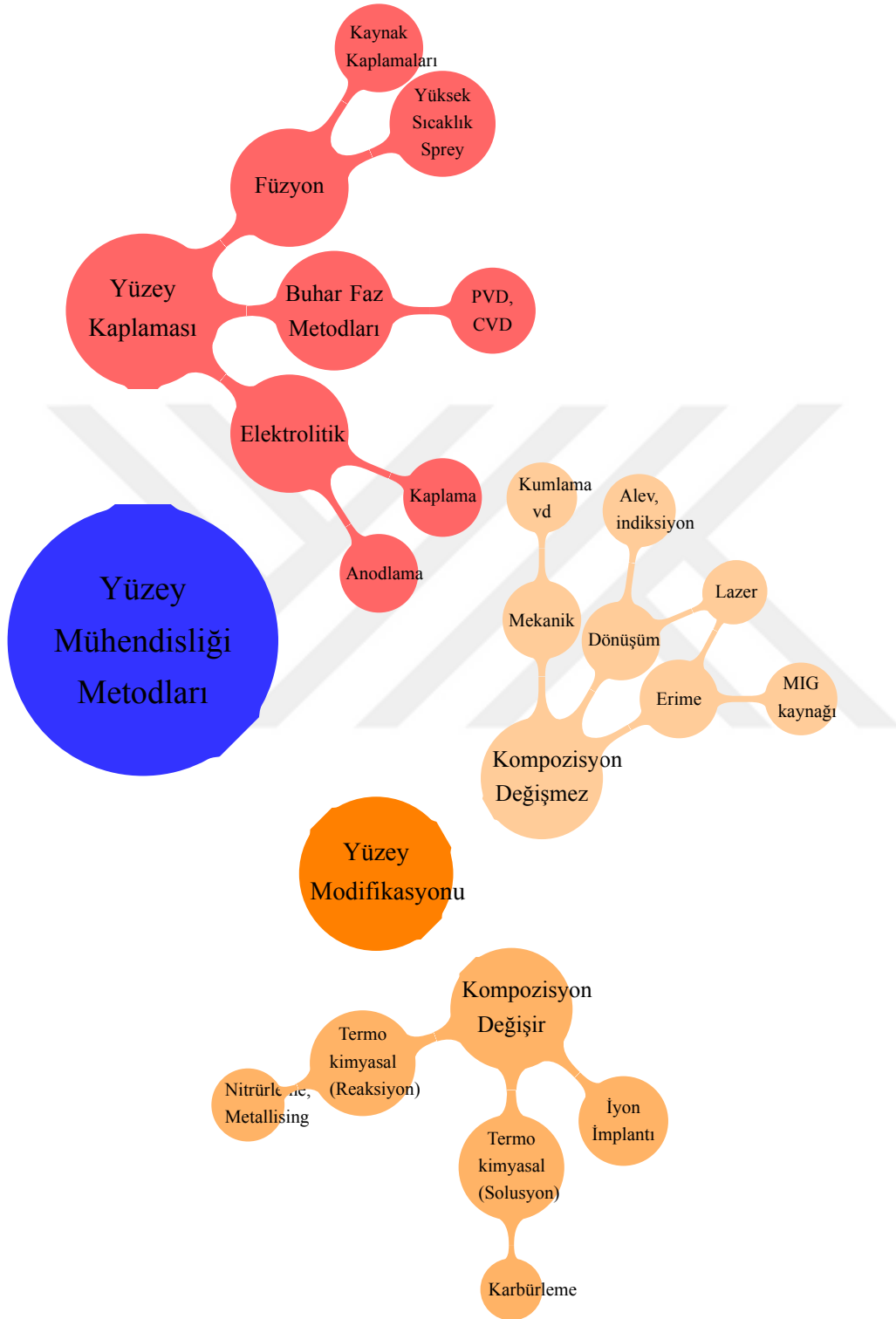
Bu kategorilerden biri yüzey modifikasyonlarıdır. Bu alt başlıkta incelenen yöntemler yüzeyin kompozisyonu değiştiren sementasyon, nitrürasyon gibi yöntemler ve işlem yapılan yüzeyin kompozisyonunu değiştirmeyen kuşlama ya da lazer sertleştirme.

İkinci kategori yüzey kaplamalarıdır. Kaplamalar altlık malzemenin tokluk gibi özelliklerini koruyup istenilen yüzey özelliklerini kazandırdıkları için tercih edilen bir yüzey özelliği geliştirme yöntemidir. Kaplamalar farklı yöntemlerle yapılmakta ve yüzeylere korozyon dayanımı, aşınma dayanımı, sürtünme azaltımı ya da sertlik kazandırmak için uygulanabilirler. Ne tür kaplama yapılacağını göz önüne alırken önemli üç prensibin ele alınması gereklidir.

- Tüm koşullara uygun evrensel bir kaplama yoktur
- Kaplamalar iyi ya da kötü değildirler
- Kaplama seçimi çeşitli özelliklerin optimizasyonudur. Bazı özelliklerde gelişme sağlanırken bazılarında gerileme kaçınılmazdır (Asthana vd., 2006)

Sanayide en çok kullanılan yüzey kaplama yöntemleri lazer giydirme , plazma transfer ark giydirme, alev sprej ve plazma sprej yöntemleridir. Termal sprej ve plazma sprej işlemleri çalışma ortamını sağlıksız hale getirebilir ve bu işlemlerle oluşturulan kaplama altlığa mekanik olarak bağlandığından yüklemelere dayanımı düşüktür. Lazer giydirme malzemenin yansıtıcılığına bağlı olduğu ve tezgahların yüksek maliyeti sebebiyle büyük çaplı endüstriyel uygulamalarda kullanımı sınırlıdır.

Plazma Transfer Ark (Plasma Transferred Arc (PTA)) yöntemi ise 40.000K’in üzerinde sıcaklıklara ulaşıldığı, uygulamanın nispeten kolay olması, baz malzemenin

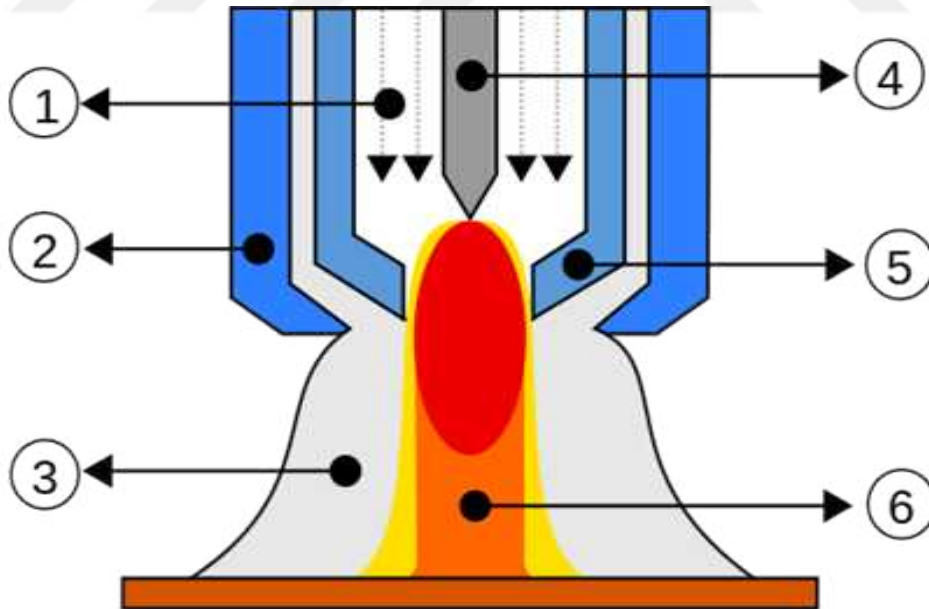


Şekil 2.1: Yüzey özelliği geliştirme metodları

yansıtıcılığından bağımsız olduğu için önemli bir yüzey mühendisliği tekniğidir (Y.-F. Liu, X.-B. Liu, vd., 2010). PTA çok kalın kaplamalar elde etmeye izin verdiği, malzemede düşük termal gerilime sebep olduğu, göz ardı edilebilir çözünme oranları, yüksek enerji yoğunluğu sayesinde cam ve seramik kalıplarında, otomotiv valflerinde, kimyasal ve petro-kimyasal vanalarda, laminasyon silindirlerinde, plastik ekstrüzyon vidaları ve kalıplarında kullanılmaktadır (Gatto vd., 2004).

2.1 Plazma Transfer Ark Yöntemi (PTA)

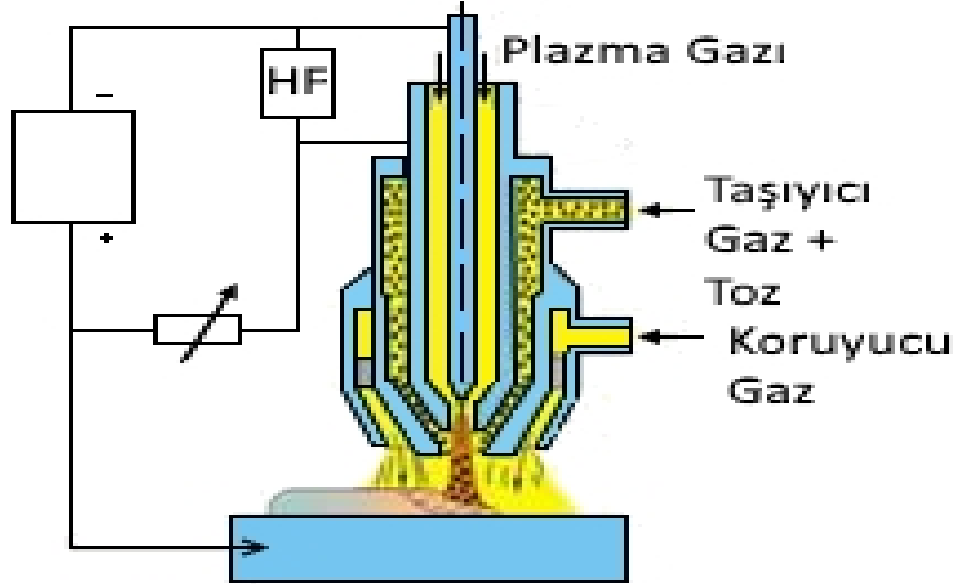
PTA gaz tungsten ark kaynak (GTAW) yöntemine benzer bir işlemdir. Elektrik arkı çoğunlukla tungsten'den imal edilmiş bir elektrot ile iş parçası arasında oluşur. PTA'nın GTAW'dan farkı elektrodu torçun gövdesi içine yerleştirerek plazma arkı koruyucu gazdan ayrılabilmesidir. Oluşan plazma akışı sıkıştırılan iyi işlenmiş bir bakır nozuldan geçerek ses hızına yakın yüksek hızlara ve 30.000°C hatta üstünde sıcaklıklara ulaşır. Tüm ark kaynağı işlemlerinde plazma oluşuyor olsa da PTA'daki plazmanın sıkıştırılmış olması en temel farkıdır. Plazma gazı olarak Argon kullanılır. Demir alaşımı malzemelerde koruyucu gaz olarak Argon veya Argon/Hidrojen karışımı kullanılmaktadır. Alüminyum ve titanyum altlıkların kaplanması içinse koruyucu gaz Argon ya da Helyum'dur.



Şekil 2.2: PTA Torç Şematik Gösterimi

Şekil 2.2'de PTA torçunun şematik çizim bulunmaktadır. Şekildeki öğeler sırasıyla; 1) Gaz plazma, 2) Nozzle Koruması, 3) Koruyucu gaz, 4) Elektrod, 5) Nozzle Daraltıcı, 6)

Elektrik arkıdır. Torç eğer PTA ile toz besleme de yapılması gerekiyorsa Şekil 2.3’de olduğu gibi bir ya da daha fazla toz besleme kanalı ile geliştirilir.



Şekil 2.3: PTA Toz Beslemeli Torç Şematik Gösterimi

(Plasma transferred arc surfacing (PTA-surfacing) 2013)

PTA işlemi sırasında uygulanan akım, toz besleme hızı, ilerleme hızı ve plazma gaz debisi ortaya çıkan kaplamanın özelliklerini etkilemektedir. Kaplamalarda kullanılan toz malzemelerin ve yukarıda bahsedilen özelliklerin optimum dengede olması PTA kaplamasının istenen özellikleri sağlaması için önemlidir. PTA işlemi ile ilgili özellikler kullanılan kaplama tozuna karar verilmesinden sonra optimize edilmektedir. Kaplama için kullanılacak tozların da çeşitli kısıtları vardır (Deuis vd., 1998).

1. Tozun tane boyutu $50\mu\text{m}$ ile $150\mu\text{m}$ arasında olmalıdır. Bu sınırların dışındaki tane boyutları besleme sorunlarına sebep olmaktadır.
2. Toz taneleri küresel ya da keskin köşeli (angular shape) olmalıdır. Uzun ip (fiber) tane şekilleri beslemede sorun çıkartmaktadır.
3. Kaplama malzemesi ve kaynak havuzu yakın yoğunlukta olmalıdır. Yüksek yoğunlukta parçacıklar kaynak havuzunda çökme gösterebilir.

Yukarıdaki kriterler de göz önüne alınarak çeşitli malzemeler PTA kaplama için kullanılmıştır. Çeliklere; Ni tabanlı, Ni tabanlı WC içeren, Co tabanlı WC içeren, NiCrWC,

Co tabanlı Cr_3C_2 içeren, Co tabanlı TiC içeren, Co-Cr-Mo tabanlı VC içeren, Çelik-10Ni 19Cr tabanlı VC içeren, Paslanmaz Çelik tabanlı NbC içeren, Alaşım çeliği tabanlı VC, NbC içeren, Alaşım çeliği tabanlı TiC ve NbC tozlar kullanılarak kaplamalar uygulanmıştır. Alüminyum alaşımları üzerine Cu, Ni, Cr, Ti, Si tabanlı tozlar uygulanır. Titanyum ve alaşımları içinse Al 5456 tabanlı TiC, WC veya Cr_3C_2 içeren, Ti-6Al-4V tabanlı W_2C veya Cr_3C_2 içeren, Titanyum bazlı TiC içeren tozlar kullanılmaktadır (Deuis vd., 1998).

PTA yöntemi ile yeni araştırmaların odaklandığı bir başka alan ise kendinden gelişen yüksek sıcaklık sentezleme (Self-propogating high temperature synthesis: SHS) yöntemi ile yerinde sentezleme (in situ synthesis) ile yüksek performanslı seramik malzemenin PTA işlemi ile kaplamada oluşturulmasıdır. Bu yöntemin tercih edilmesinde düşük enerji ihtiyacı ve yüksek ürün saflığı önemli bir etken olmuştur [5]. Bu yöntemle TiB_2 (Hou, 2013; P. Zhang vd., 2011; Wu vd., 2011; Xibao vd., 2005), TiC (Corujeira Gallo vd., 2013; Gallo, 2013; Y. Liu vd., 2007), Fe_3Al (Fan vd., 2008), $Fe_2TiSi/\gamma-Fe/Ti_5Si_3$ (Y.-F. Liu, Han, vd., 2006), TiB (Hou, 2013) üretilmiştir.

PTA ile kullanılan malzemelerden kendinden yağlayıcı olanları yüzey sertliği yanı sıra sürtünme azaltması gereken işlemlerde de önem taşımaktadır. MoS_2 'nin çelikte PTA ile (Skarvelis ve Papadimitriou, 2009) ve $TiAl_6V_4$ 'de ise lazer cladding ile çalışılmıştır (Yang vd., 2013).

2.2 Kullanılan Partikül Malzemeler

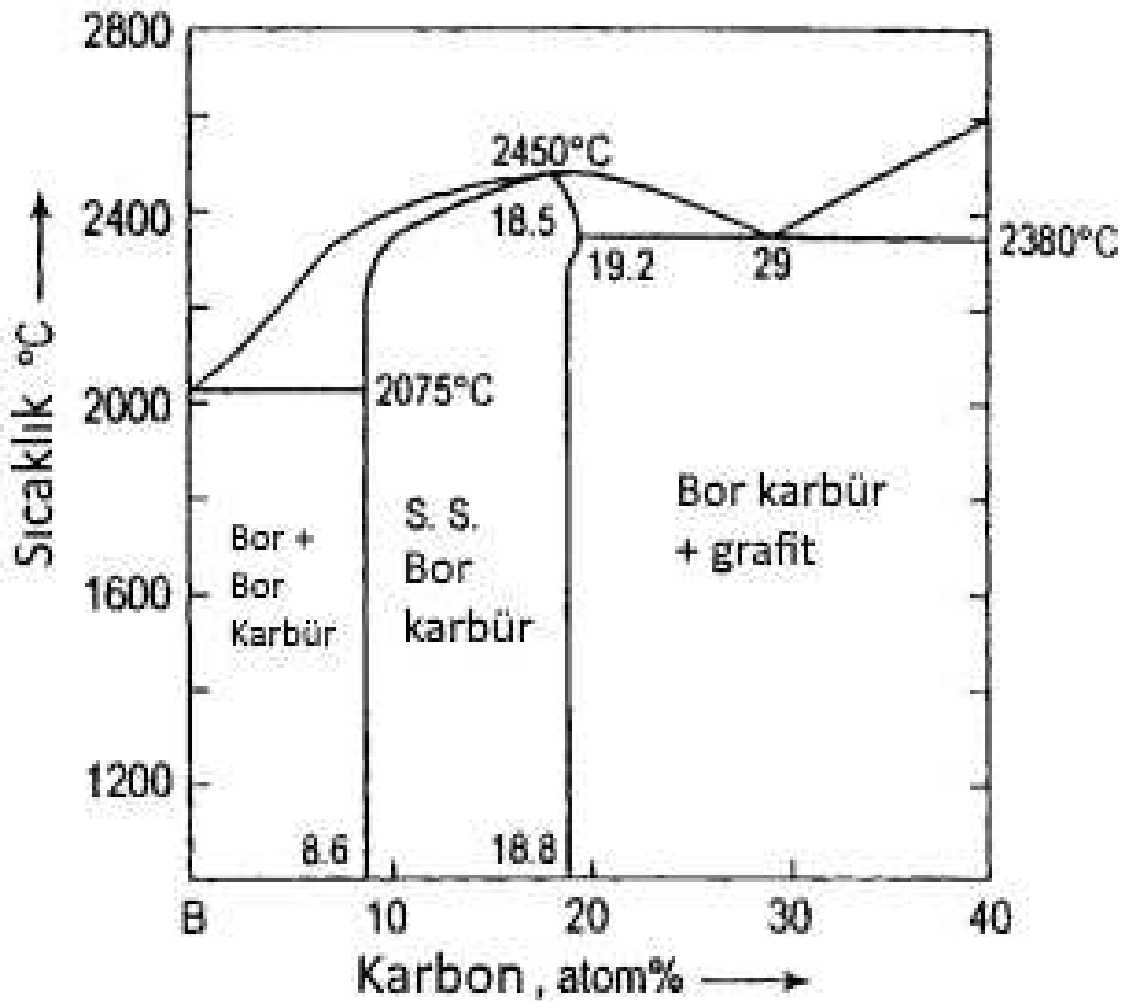
Bor Karbür (B_4C)

Bor Karbür bileşiği Joly tarafından 1858'de üretilmiş ve B_3C olarak adlandırılmıştır. 1883 yılında Moisson tarafından ise B_6C olarak adlandırılmıştır. 1934'e gelindiğinde stoikometrik formülü olan B_4C kabul edilmiştir (Thévenot, 1990).

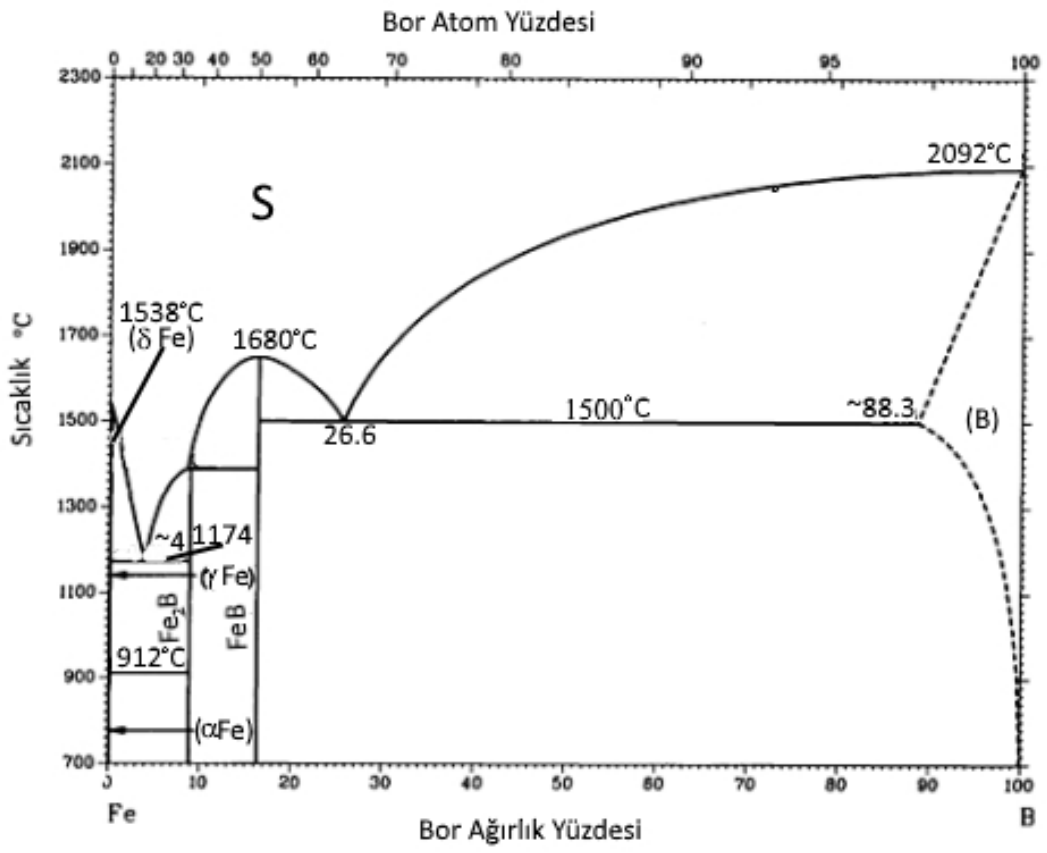
B_4C Şekil 2.4'de faz diyagramında da görüleceği üzere $2450^\circ C$ ergime noktası ve 3670HV sertliği ile sanayide kullanılan önemli bir malzemedir (Wolfe, 2010). B_4C sertliği ve aşınma dayanımı ile sert metal ve seramiklerin taşlanmasıyla sıklıkla kullanılır. Ayrıca bir yüzey özelliği geliştirme tekniği olan Borlama'da B_4C kullanılır. Borlama ile oluşan FeB ve/veya Fe_2B tabakası tungsten karbür sertliğine yakın sertlik göstermektedir (Schmalzried ve Schwetz, 2013). B_4C 'ün kaplamada kullanımı sadece borlama ile sınırlı değildir. Elmasa benzer kaplamalarda (Diamond Like Coating [DLC]) (Harris vd., 2002), Manyetik Püskürtme kaplamalarında (Y. Chen vd., 2006), (Achar vd., 2010), Kimyasal Buhar Kaplama (CVD) (Conde vd., 2000) ve Lazer kaplamalarda (Lomovsky vd., 2013)

B_4C kullanılmaktadır. Bor'un demir ile Şekil 2.5'de verilen faz diyagramında da görüldüğü üzere FeB ve Fe_3B fazları oluşmaktadır.

B_4C PTA içinde literatürde tek başına kullanılmamıştır. Özellikle Ti ile TiB oluşturacak, Fe ve Ti tozları ile beraber (Xibao vd., 2005)-(Wang vd., 2006) ya da tek başına Fe (Xibao, 2005) kullanılmıştır. B_4C 'ün en büyük avantajı toz beslemeli PTA'da plazma arkında erimeden kaynak havuzuna ulaşabilmesidir (Xibao, 2005).



Şekil 2.4: Bor Karbon Faz Diyagramı (Schwetz ve Karduck, 1991)



Şekil 2.5: Bor Demir Faz Diyagramı (ASM, 1990)

Nikel

Nikel metal endüstrisi için önemli elementlerden biridir. Dökme demir, paslamaz çelik ve demir dışı metallerin sık kullanılan alaşım elementlerindedir. Bunun dışında Nikel bazlı alaşımlar da endüstride kullanılmaktadır. Nikel endüstride bu kullanım alanları dışında kaplamalarda, seramiklerde, bataryalarda ve manyetik süperiletkenlerde de kullanılmaktadır. ABD Jeoloji Araştırmasına göre dünyada 2014 yılında 2.400.000 ton Nikel üretilmiştir (USGS, 2015). 2011 yılı rakamlarına göre dünyada Nikel kullanım alanları Çizelge 2.1’de verilmiştir (LME, 2012). Nikel aşınma, korozyon ve ısı direnci

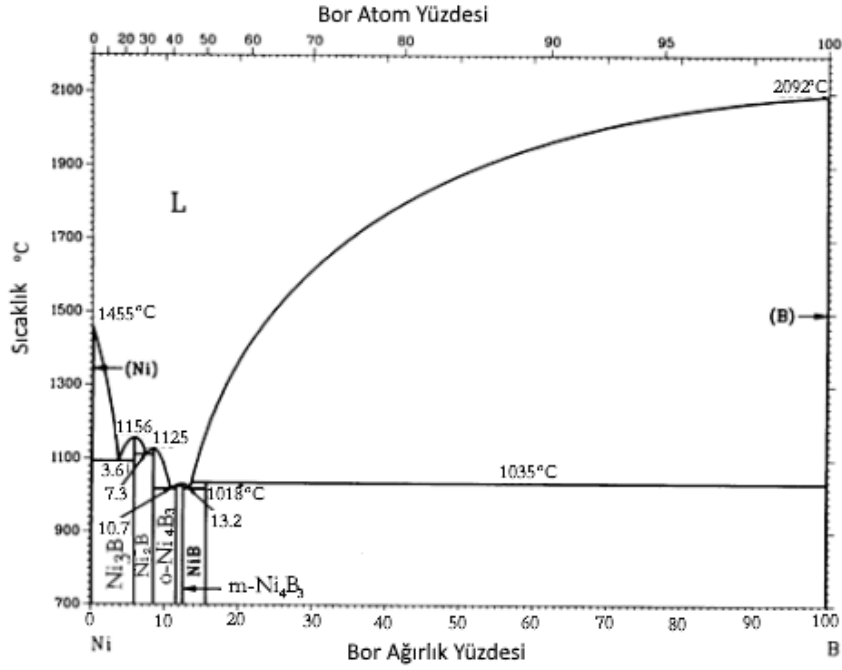
Çizelge 2.1: Nikel kullanım alanları

Nikel kullanımı	%
Paslanmaz Çelik	66
Diğer alaşımlar	24
Kaplama	8
Kimyasallar	3

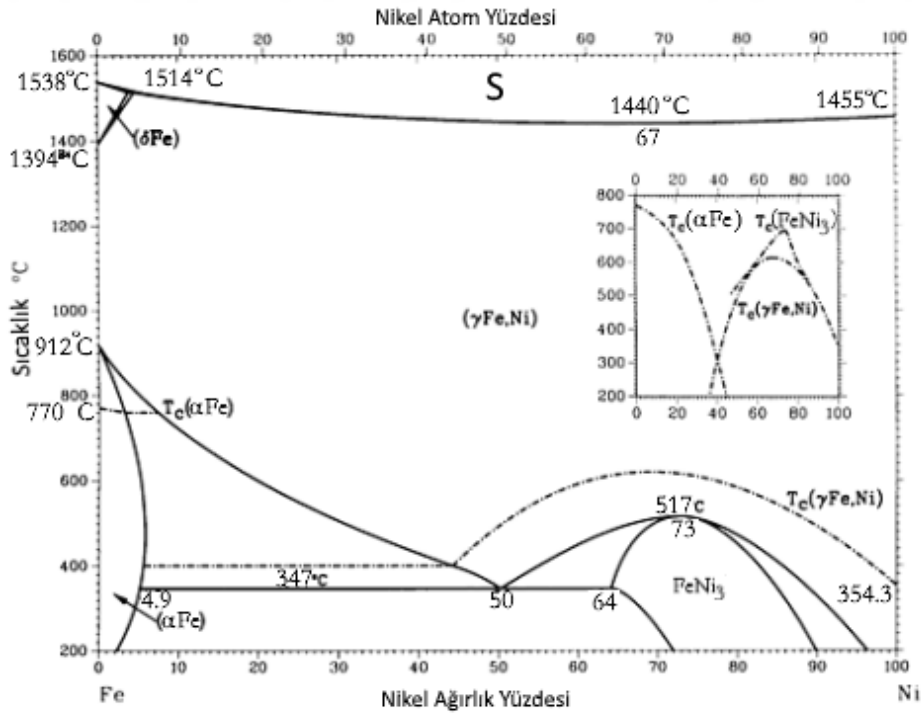
gerektiren uygulamalarda kaplama baz malzemesi olarak da kullanılmaktadır. Nikel ile kaplamalar kendinden eritkenli (self fluxing) kaplama olarak adlandırılmakta ve alev spreyleme, yüksek hızlı oksijen-hava yakıt spreyleme (HVOF, HVAF), patlama tabancası spreyleme (D-gun), elektrik ark spreyleme, plazma spreyleme, plazma transfer ark kaynağı ve lazer kaplama yöntemleri kullanılmaktadır (Simunovic vd., 2014). Literatürde Ni bazlı PTA kaplamalarda daha çok NiCrBSi kullanıldığı görülmüştür (Arkadi Zikin vd., 2012), (Flores vd., 2009). Kaplamanın sertliğini arttırmak için NiCrBSi ile WC (Esteban Fernández vd., 2003), W_2C (Jones ve Waag, 2011) kullanıldığı gibi, TiC-NiMo ya da Cr_3C_2 -Ni karışımları (A. Zikin vd., 2013) da kullanılmıştır.

Şekil 2.6’da verilen Bor Nikel Faz Diyagramı incelendiğinde bu iki elementin Ni_3B , Ni_2B , $o-Ni_4B_3$, $m-Ni_4B_3$, NiB, NiB_2 ve yüksek B oranlarında NiB_{12} fazları oluşturduğu görülmektedir.

Şekil 2.7’deki Nikel Demir faz diyagramı incelendiğinde, yüksek Nikel oranlarında $FeNi_3$ fazının oluştuğu görülmüştür. Bu fazın yanı sıra Fe_3Ni ve FeNi fazları da görülmektedir.



Şekil 2.6: Bor Nikel Faz Diyagramı (ASM, 1990)



Şekil 2.7: Nikel Demir Faz Diyagramı (ASM, 1990)

3. MATERYAL VE YÖNTEM

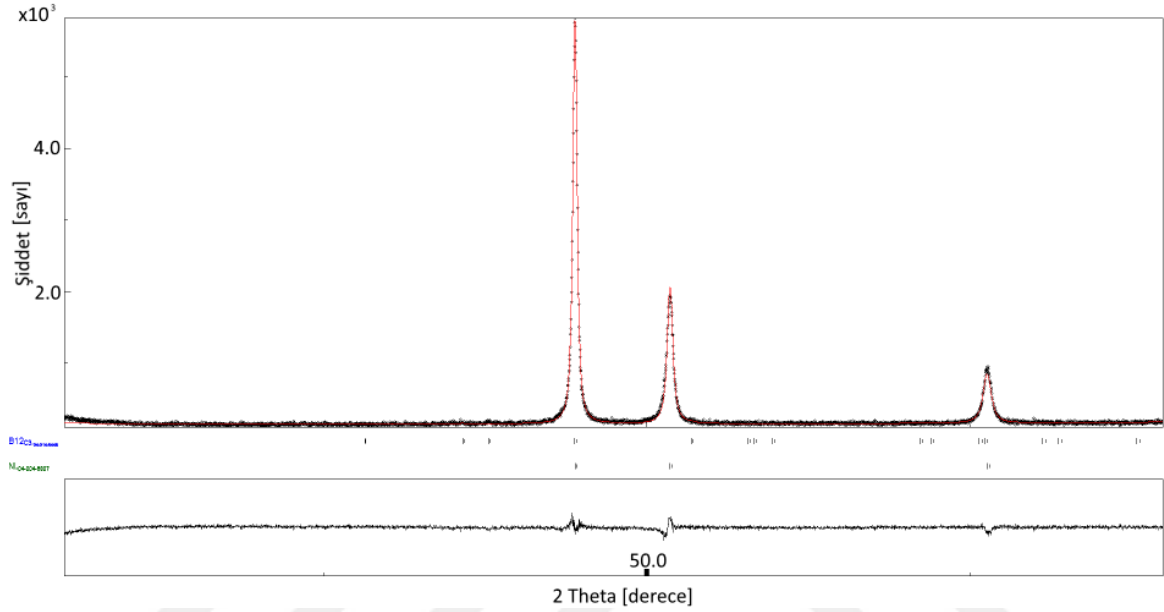
Bu çalışmada %5 B₄C, %5 KBF₄ ve %90 SiC (Suwattananont, 2010) içeren Ekabor II® ve saf B₄C kullanarak PTA kaplaması çalışmaları yapılmıştır. Nikel baz olarak kullanılmış ve Ekabor II® ile B₄C tozları Çizelge 3.1’de belirtilen oranlarda Argon atmosferinde değirmende ya da elde Nikel tozu ile karıştırılmıştır. Nikel tozu Alfa Aesar’dan temin edilmiş, 100 mesh (boyut 149 μ m) ve %99 saflıktadır. Bor karbür H.C. Starck’dan temin edilmiş, d50’si 1-2 μ m ve %99 saflıktadır.

Elde edilen karışım AISI 4140 malzeme üzerine PTA kullanarak uygulanmıştır. AISI 4140 çeliği otomotivden, takım gövdelerine, fikstürlerden dişlilere, bir çok makine parçasında ve endüstride kullanılan önemli bir çeliktir. Bu çeliğin üzerine yapılan kaplama ile aşınma karaktersitiklerini geliştirmek bu sektörlerde verimlilik artışına sebep olacaktır.

Çizelge 3.1: Numune karışım oranları

Numune	Toz	Oran		
		Partikül	Nikel	Karıştırma
N1	Ekabor II®	%4	%96	Elde
C1	Ekabor II®	%6	%94	Elde
N2	Ekabor II®	%8	%92	Elde
C2	Ekabor II®	%10	%90	Elde
C3	Ekabor II®	%12	%88	Elde
C4	Ekabor II®	%4	%96	Değirmen
C5	Ekabor II®	%6	%94	Değirmen
D1	Ekabor II®	%8	%92	Değirmen
D2	Ekabor II®	%10	%90	Değirmen
D3	Ekabor II®	%12	%88	Değirmen
E1	B4C	%4	%96	Değirmen
E2	B4C	%6	%94	Değirmen
E3	B4C	%8	%92	Değirmen
E4	B4C	%10	%90	Değirmen
E5	B4C	%12	%88	Değirmen

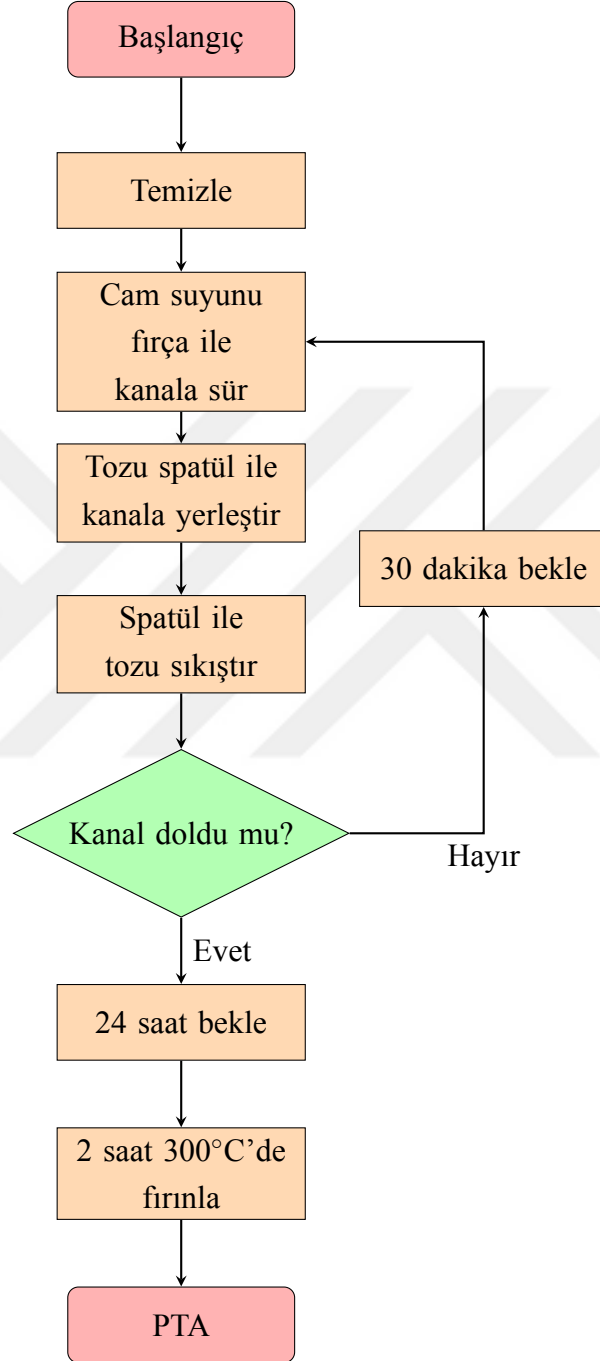
Değirmende hazırlanan toz karışımları için malzemeler bilye ağırlığının beşte biri oranında attritör haznesine konulmuş ve argon gazı altında 60 dakika öğütülmüşlerdir. Hazırlanan tozların XRD analizi yapılmış ve Şekil 3.1’de verilen sonuçlar incelenmiştir. İnceleme sonucunda Nikel ve B₄C’nin değirmende karıştırılması sırasında yeni bir alaşım oluşturmadıkları tespit edilmiştir.



Şekil 3.1: E2 karışımı XRD analizi

3.1 Numune Hazırlığı

Hazırlanan tüm tozlar 100x40x20mm AISI 4140 altlık üzerine uygulanmıştır. Altlık malzemelerin üzerine 1mm derinliğinde 3mm genişliğinde kanal açılmış, tozlar bu kanala yerleştirilmiştir. Tüm numunelerin yüzeyleri Şekil 3.2’deki işlem planına göre hazırlanmıştır. Yüzeyler alkol ile temizlendikten sonra cam suyu bir fırça yardımı ile ince bir katman halinde kanala uygulanmıştır. Ardından spatül ile alınan kaplama tozu kanala yerleştirilmiş ve toz sıkıştırılmıştır. Bu işlem yarım saat ara ile kanal doluncaya kadar tekrar edilmiştir. Kanal dolduktan sonra numuneler 24 saat nem almayacak ve güneş görmeyecek şekilde desikatörde bekletilmiştir. 24 saatin sonunda numuneler 2 saat süreyle 300 °C’de fırınlanmış ve ardından tüm numunelerin ısı girdisinin sabit olması için 100 A’de elde PTA ile kaplama yapılmıştır. PTA işlemi sırasında torç uzaklığı 8 ila 10 mm arasında sabit tutulmuştur.



Şekil 3.2: İşlem akış şeması

3.2 Kullanılan Cihazlar

Hazırlanan numunelerin mikroyapı analizi için Nikon Eclipse L150 optik mikroskobu, JEOL JSM 5600LV taramalı elektron mikroskobu ve XRD için Panalytical Empryean cihazı kullanılmıştır. Aşınma testi için CSM tribometre kullanılmıştır. Veri işleme için R üzerinde çalışan yazarın geliştirdiği trib paketi kullanılmıştır.

Aşınma testleri ve metalografi çalışmaları yapabilmek için numunelerden 3 kesit alınmıştır. İlk 2 cm'lik kesit başlangıç koşullarını gösterdiği için atılıp kalan 2 örnek aşınma testi ve mikroyapı analizi ile incelenmiştir.

XRD analizinde kullanılan yöntem

Panalytical Empryean cihazı ile $10,0052 2\theta^\circ$ ile $89,9942 2\theta^\circ$ arasında $0,0130 2\theta^\circ$ adım ile her adımda 97,92 saniye beklenerek bakır anod ile ölçüm alınmıştır. Ham veri Çizelge 3.2'de verilen değişkenler girilerek temizlenmiştir. Ardından verideki gürültünün düşürülmesi için beşinci seviyeden bir polinom kullanılmıştır. Bu işlem için kullanılan ayarlar Çizelge 3.3'da verilmiştir.

İşlenmiş veri üzerinden tepeler bulunmuş ardından da bu tepelerle örtülecek malzemeler araştırılmıştır. Eşleştirme en uygun malzemeler bulununcaya kadar devam etmiştir.

Çizelge 3.2: Arkaplan temizleme ayarları

Değişken	Değer
Add to net scan	Nothing
User defined intensity	-5
Correction method	Automatic
Bending factor	0
Minimum significance	0.7
Minimum tip width	0
Maximum tip width	1
Peak base width	2
Use smoothed input data	No
Granularity	40

Çizelge 3.3: Veri düzgünleştirme ayarları

Değişken	Değer
Polynomial Type	Quintic
Convolution range	7
Degree of smoothing	7
Fast Fourier	Yes
Omit Peaks	Yes
Adaptive Denoising	No
Automatic Decomposition Level	Yes
Decomposition Level	4

3.3 Aşınma Testi

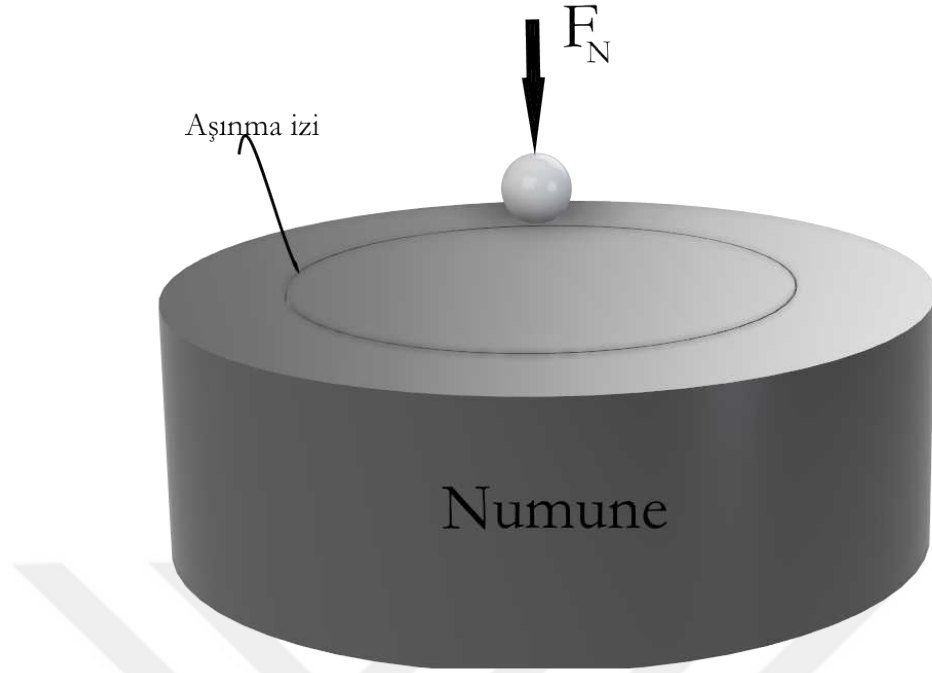
Aşınma testi ile numunelerin tribolojik özelliklerinin tespiti hedeflenmiştir. Literatürde disk üzerinde çubuk (pin on disk), disk üzerinde bilye (ball on disk), 4-bilye testi (4-ball test), yüzük üstü blok testi (block on ring) mevcuttur (Ludema, 1996). Araştırmacıların en uygun testi seçmeleri önem taşımaktadır. Aşınma ve sürtünme, malzeme özellikleri değil sistem özellikleri olduğu için, sisteme uygun seçilmelidir. Bu seçim sırasında göz önüne alınan kriterler şunlardır

- Birbiri üzerinde hareket eden parçaların hareketi (sürekli ya da kesik vb...)
- Sistemin yağlanma durumu
- Hareket eden parçaların temas şekli

Bu çalışmada kaplama yapılan parçaların sürekli hareket gösteren bir sistemde kullanılacağı düşünülerek, yağsız ortamda, noktasal temas altında test edilmesine karar verilmiştir. Bu koşulları yerine getiren en uygun test ball on disk testi olduğuna karar verilmiştir.

Ball-on-Disk (BoD) yöntemi malzemelerin aşınma ve sürtünme karakterini tespit etmek için uygulanan bir testtir. Testler ASTM standardına uygun yapılır (ASTM, 2016). Şematik olarak Şekil 3.3'de gösterildiği gibi bir bilyenin numune üzerine F kuvveti ile basılması ve numunenin döndürülmesi ile yapılır. Test cihazı sürtünme kuvvetini ölçerek sürtünme katsayısını hesaplar. Test sonrasında aşınma iz profili ölçülerek, numunedeki toplam aşınma miktarı hesaplanır. Bu test çeşitli mesafelerde ve yüklerde uygulanabilmektedir. Test kriterlerine karar verilmesi önemli bir aşamadır. Burada dikkate alınması gereken temel parametre bilye ile altlık malzemenin temas yüzeyinde oluşan temas gerilmesidir.

Ball-on-disk testi uygulanırken yük, mesafe ve hız kriterlerine karar verilmesi gerekmektedir. Uygulanan yük malzemenin üzerinde oluşacak Hertzian gerilmelerini etkileyeceği için en kritik koşuldur. Literatürde ball-on-disk testleri için 600 N (Yuan vd., 2008), 36 N (Svahn vd., 2003), 10 N (Robles Hernández vd., 2011), 9,8 N (Du vd., 2011), 4 N (Y.-F. Liu, Han, vd., 2006) ve 3 N (Çelik, 2013) yükler kullanılmıştır. Ancak sadece yükler bilgi vermez. Bahsedilen makaleler incelendiğinde bilye çaplarının 40 mm ile 3 mm arasında değiştiği görülmüştür. Tüm çalışmalarda ortak olarak 2 GPa ile 3 GPa arası maksimum Hertzian gerilmesi (ρ_0) görülmüştür. Bir küre ve düzlem arasında oluşan Hertzian temas gerilmesi denklemler 3.1, 3.2, 3.3 ve 3.4 kullanılarak hesaplanabilir.



Şekil 3.3: Ball on Disk testi şematik

Malzemenin Elastisite Modülü (E), Poisson oranı (ν), yarı çap (R), yük (F) değerleri ρ_0 ve deformasyon derinliği (d) bulmak için yeterlidir.

Çizelge 3.4’de verilen malzeme özellikleri kullanılarak gerilmeler hesaplandığında 3 N yük altında ρ_0 2005,6 MPa çıkmaktadır. Altlık malzemenin ve kaplamanın özellikleri göz önüne alındığında bu gerilme tribolojik özelliklerini göstermek için yeterlidir. Daha yüksek gerilmelerde aşınma izinin derinleşmesi ve kaplamanın dışına taşması ihtimali mevcuttur.

$$\rho_0 = \frac{1}{\pi} \left(\frac{6FE^{*2}}{R^2} \right) \quad (3.1)$$

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1 - \nu_1^2}{2E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{2E_2} \quad (3.2)$$

$$F = \frac{4}{3} E^* R^{1/2} d^{3/2} \quad (3.3)$$

$$d = \left(\frac{9F^2}{16RE^{*2}} \right)^{1/3} \quad (3.4)$$

Çizelge 3.4: Malzeme özellikleri

Malzeme	Poisson Oranı	Elastisite Modülü (GPa)
AISI 4140	0,30	210
WC	0,24	713

Bu testin yapılabilmesi için yüzeylerin belli bir düzlük ve pürüzlülük oranına getirilmesi gerekmektedir. Bu amaçla numunelerin yüzeyleri zımparalanmıştır. Aşınma testine tabi tutulan numunelerin yüzey Ra değeri $0,004\mu\text{m}$ 'dir.



4. BULGULAR VE TARTIŞMA

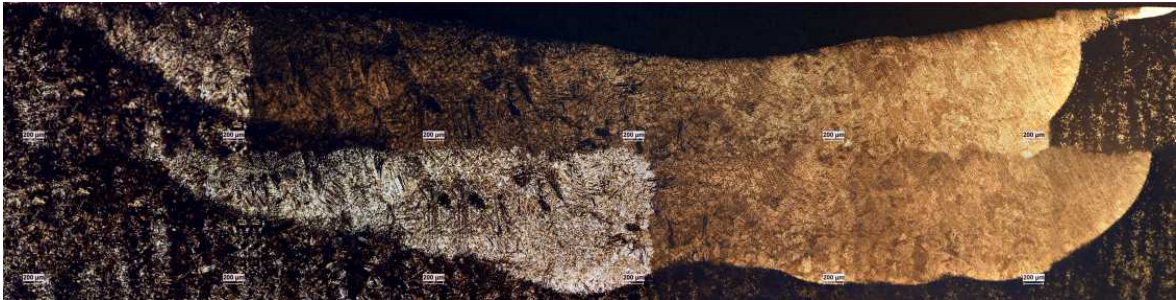
Yapılan deneysel çalışmalar, Aşınma, SEM ve EDS, optik mikroyapı ve XRD analizleriyle karakterize edilmiştir. Metalografi analizleri için numuneler 40 s %2 Nital karışımı ile çalkalanarak dağlanmıştır. Aşınma numuneleri de zımparalanıp yüzeyleri parlatıldıktan ve %99 saflıkta Etanol ile temizlendikten sonra WC bilya ile test edilmiştir.

4.1 Mikroyapı incelemesi

Mikroyapı incelemesi için PTA ile yüzeyi modifiye edilen tüm numunelerin öncelikle 50x değerinde panoramik görüntüsü alınmıştır. Yüzey görüntüsünün incelenmesi ile detay mikroyapı incelemesi yapılmıştır.

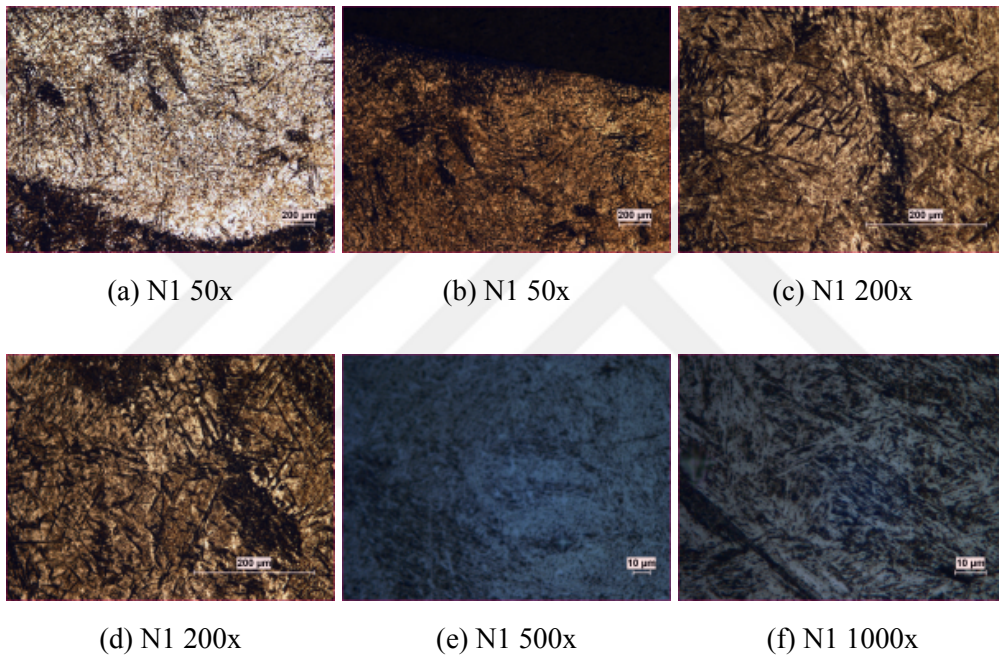
N1 kodlu numunenin mikroyapı analizi

N1 kodlu numuneye ait mikroyapı analizleri Şekil 4.1 ve 4.2’de verilmiştir. Şekil 4.1’de verilen makro görüntü incelendiğinde yüzeyde kullanılan Ni+B partiküllerinin PTA sırasında homojen yayılmadığı, yüzeyde farklı faz yapılarının oluştuğu görülmektedir.



Şekil 4.1: N1 panorama 50x %2 Nital 40s

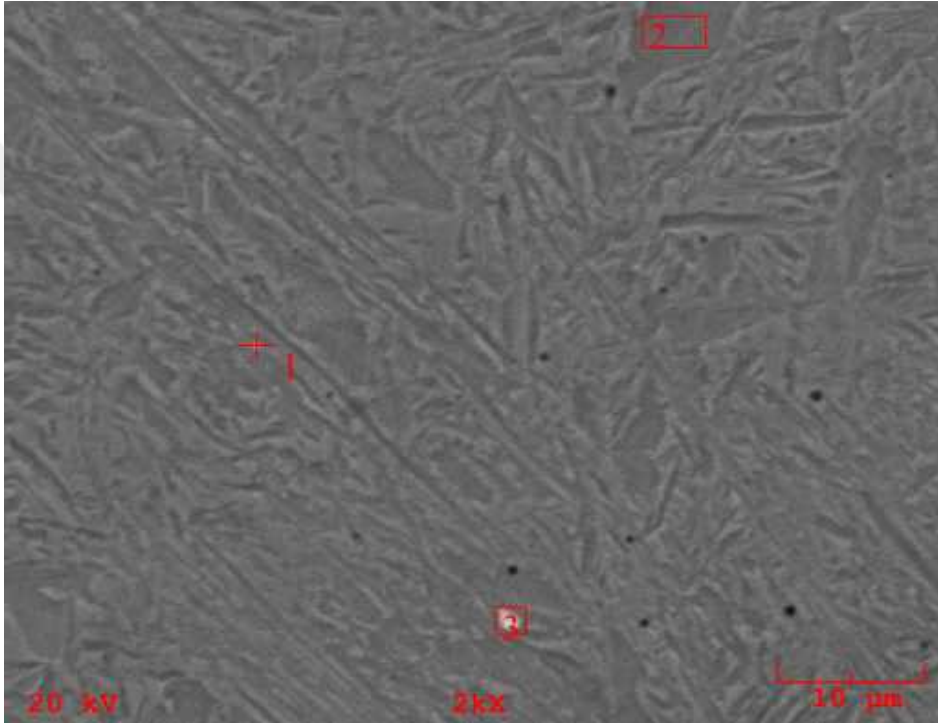
Bölge üzerinde yapılan ayrıntılı mikroyapı analizi Şekil 4.2’de verilmiştir. Genel olarak oluşan yapının iğnesel olduğu ve Nital ile dağlanmadığı görülmektedir. Yapının sertliği 400 VSD ölçülmüştür.



Şekil 4.2: N1 numunesi optik inceleme, %2 Nital 40s

N1 kodlu numune SEM ve EDS analizi

Şekil 4.3’de N1 numunesinin SEM mikroyapı resmi verilmiştir. Bu resim üzerinde iğnesel faza EDS analizi yapılmış ve sonuçları Çizelge 4.1’de verilmiştir. Elde edilen bulgular kaynak bölgesinde Fe-C, Fe-Ni ve Fe-B yapılarının oluştuğunu doğrulamaktadır. Elde edilen sonuçlar literatürde Pavel vd., 1993’de yaptığı Fe-Ni-C alaşımları ile ilgili yayınlarda uyumludur. Detay olarak yapıda Fe_{0.91} B_{0.09}, sementit ve FeNi olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 4.3: N1 SEM görüntüsü

Çizelge 4.1: Şekil 4.3’den alınan EDS analizi sonuçları

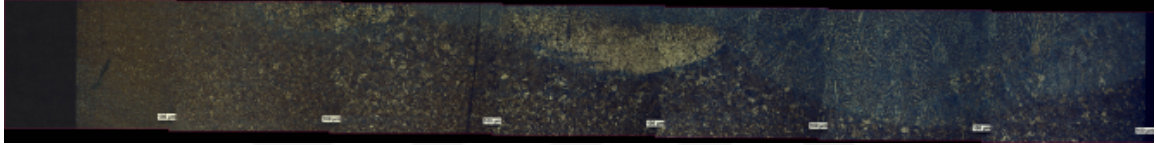
Element	A1	A2	A3
C	1,600	1,197	1,909
Si	0,437	0,294	0,277
V	0,132	0,171	0,138
Fe	90,627	90,170	89,923
Ni	7,204	8,168	7,753

C1 kodlu numunenin mikroyapı analizi

C1 kodlu numuneye ait mikroyapı analizi için panoramik görüntü Şekil 4.4a ve 4.4b'de verilmiştir. Panoramik görüntü 7x2 görüntünün birleştirilmesi sonucu oluşturulmuştur. İncelendiğinde farklı fazların olduğu kaplamanın bir kenarında Nital ile dağlanmayan bir faz yığılması olduğu görülmektedir. Bu dağlanmayan fazın Demir Nikel fazı olduğu SEM ve EDS analizi ile anlaşılmıştır.



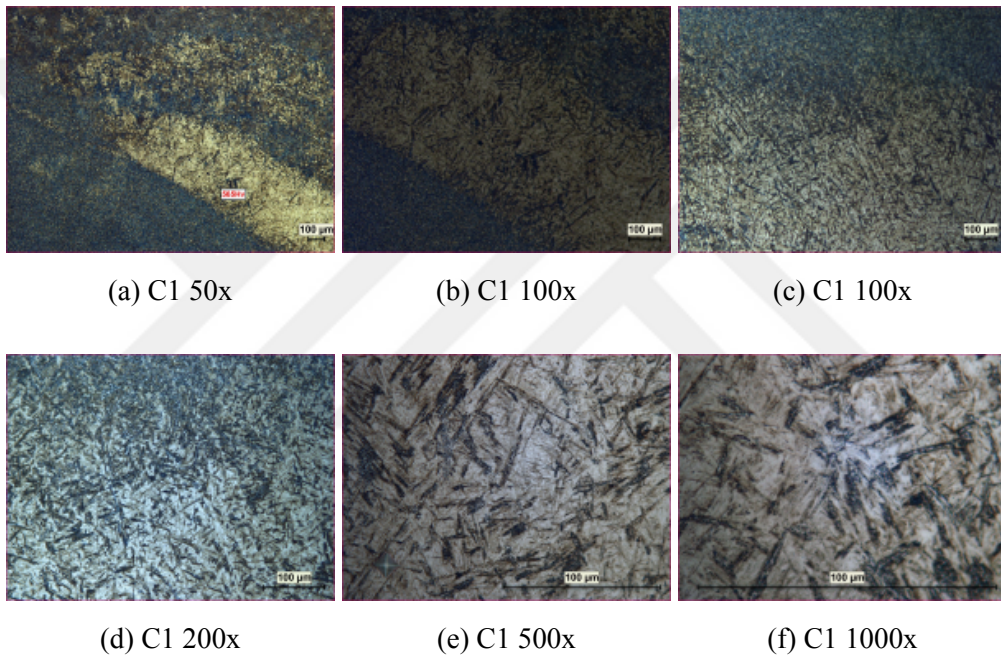
(a) C1 panorama 1



(b) C1 panorama 2

Şekil 4.4: C1 panorama 50x %2 Nital 40s

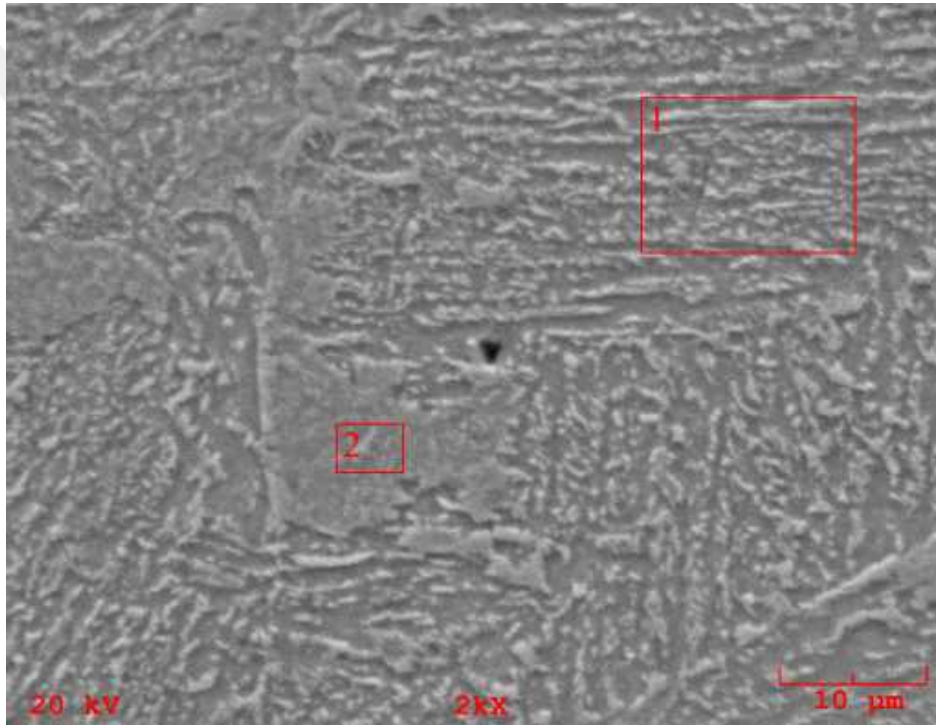
C1 numunesinin üzerinde yapılan ayrıntılı mikroyapı analizi Şekil 4.5'de verilmiştir. Kaplama bölgesi incelendiğinde iğnesel yapılar olduğu görülmektedir. Sertlik 565 VSD ölçülmüştür. Kaynak bölgesinin heterojen yapı göstermesi kaynak havuzunda farklı yoğunlukta malzemelerin farklı katmanlaşmasından ve kaplama sırasında kaynak havuzunun kenarlarına yığılmasından dolayıdır.



Şekil 4.5: C1 numunesi optik inceleme, %2 Nital 40s

C1 numunesi SEM ve EDS Analizi

Şekil 4.6'de C1 numunesinin SEM mikroyapı resmi verilmiştir. Bu yapı üzerinde fazların EDS analizi yapılmış ve Çizelge 4.2'de verilmiştir. C1 numunesinin yüzeyinde Ni varlığı, yapıda Ni sağlayacak başka bir kaynak olmadığı için kaplamanın yüzeyde oluştuğunu göstermektedir. Ni'in aksine EDS'de karbon varlığı ölçülemedi. Bu yapıda karbon olmadığı anlamına gelmemektedir. Kaynak bölgesinin XRD analizi Şekil 4.16'de verilmiştir. Elde edilen bulgular yapıda Fe_{0.91} B_{0.09} fazı ve FeNi fazları oluştuğunu doğrulamaktadır. Bu sonuç optik mikroskop görüntülerinde dağlanmayan bölgenin FeNi fazı olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 4.6: C1 SEM görüntüsü

Çizelge 4.2: Şekil 4.6'den alınan sonuçlar

Element	A1	A2
C	0	0
Si	1,009	0,865
Fe	97,498	98,072
Ni	1,493	1,063

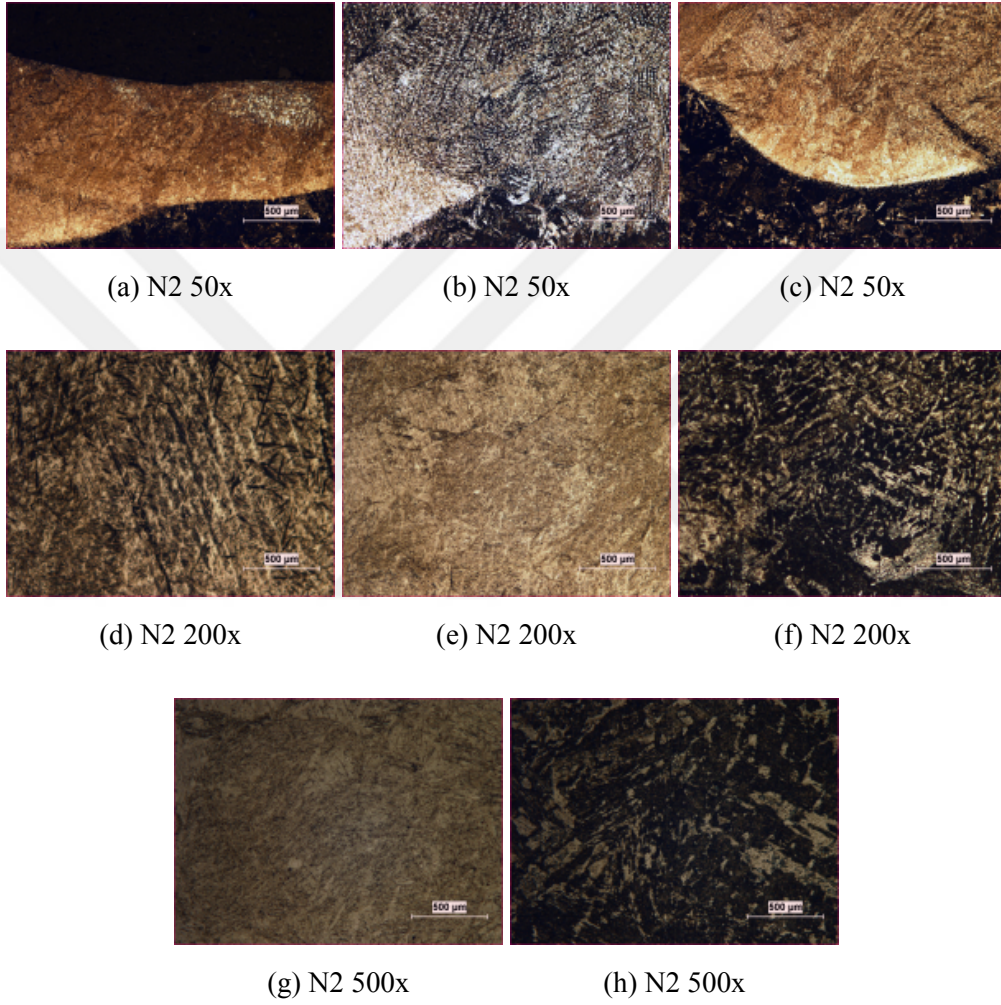
N2 kodlu numunenin mikroyapı analizi

N2 kodlu numunenin genel kaynak bölgesi Şekil 4.7’de verilmiştir. Yapı incelendiğinde farklı fazların oluştuğu, özellikle altlık metale geçiş bölgesinde karışımında dağlanmayan farklı bir fazın bulunduğu görülmektedir. Bu fazın FeNi fazı olduğu EDS ve XRD analizi sonrası tespit edilmiştir.



Şekil 4.7: N2 panorama 50x %2 Nital 40s

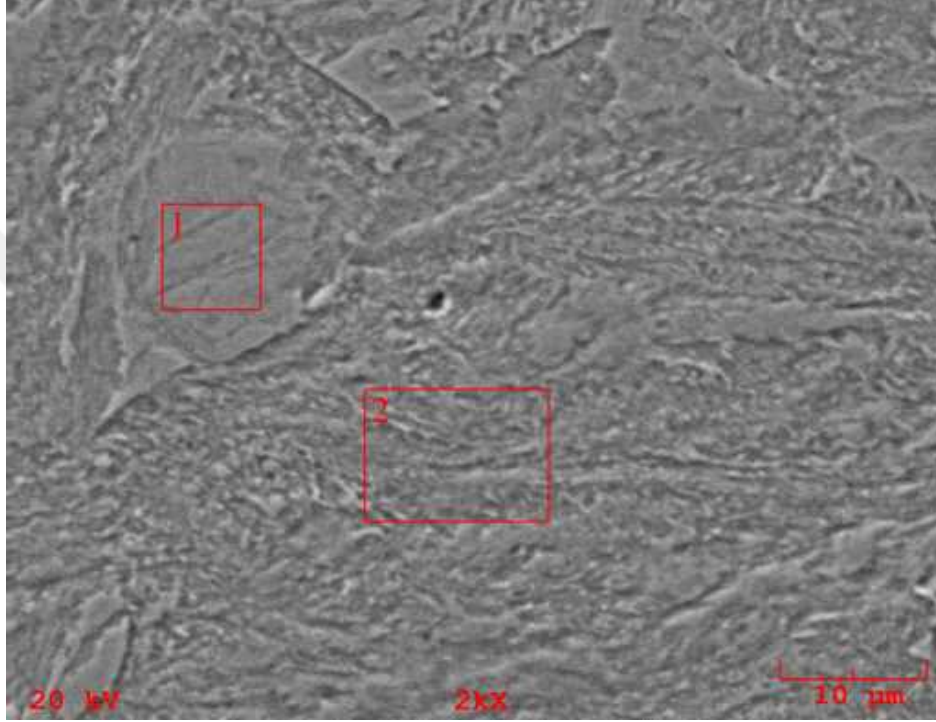
N2 numunesi üzerinde ayrıntılı mikroyapı analizi Şekil 4.8’de verilmiştir. Şekil 4.8b incelendiğinde iğnesel yapıyla bir faz ile küçük taneli başka bir fazın varlığı görülmektedir. Şekil 4.8a incelendiğinde kaplamanın üstünde birikmiş dağlanmayan bir yapının olduğu görülmektedir. Bu iğnesel yapıya yaklaşıldığında Şekil 4.8h’de görüldüğü üzere N1’den farklı olarak yapının küçük tanelerin birleşmesinden olduğu görülmektedir. Şekil 4.8g incelendiğinde ise küçük taneli yapının arasında Nital’in az dağladığı başka bir fazın olduğu görülmektedir. XRD analizi sonrası bu fazın Nikel fazının içinde oluşmuş $Ni_{23}B_6$ fazı olduğu anlaşılmıştır. Bu faz sert bir faz olup Gale ve Wallach, 1991’de gösterdiği üzere Ni-B sıvıdan katıya geçerken oluşmaktadır .



Şekil 4.8: N2 numunesi optik inceleme, %2 Nital 40s

N2 numunesi SEM ve EDS

N2 numunenin SEM görüntüsü Şekil 4.9'de verilmiştir. EDS analizinde N2 yüzeyinde düşük oranda Nikel ölçülmüştür. İki numaralı bölgeden yapılan EDS analizinde yüksek çıkan karbon, karbür oluşumu olduğunu göstermektedir. Şekil 4.16'da verilen kaynak bölgesi XRD analizinde B0.25 Fe0.375 Ni 0.375 ile $Ni_{23}B_6$ ve Fe0.91 B0.09 fazları bulunmuştur.



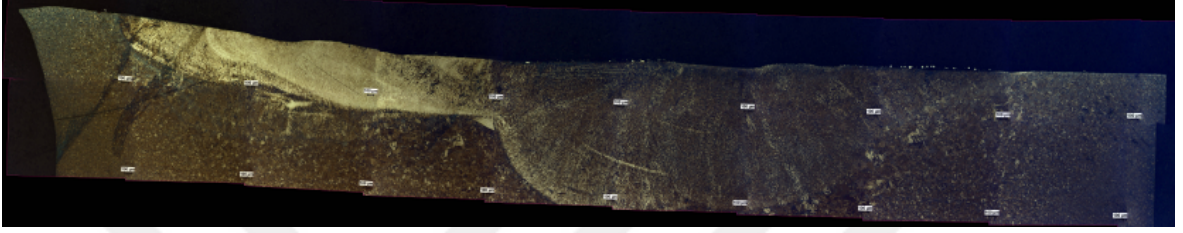
Şekil 4.9: N2 SEM görüntüsü

Çizelge 4.3: Şekil 4.9'dan alınan sonuçlar

Element	A1	A2
C	0,938	3,265
Si	0,515	0,487
Fe	98,338	96,046
Ni	0,209	0,203

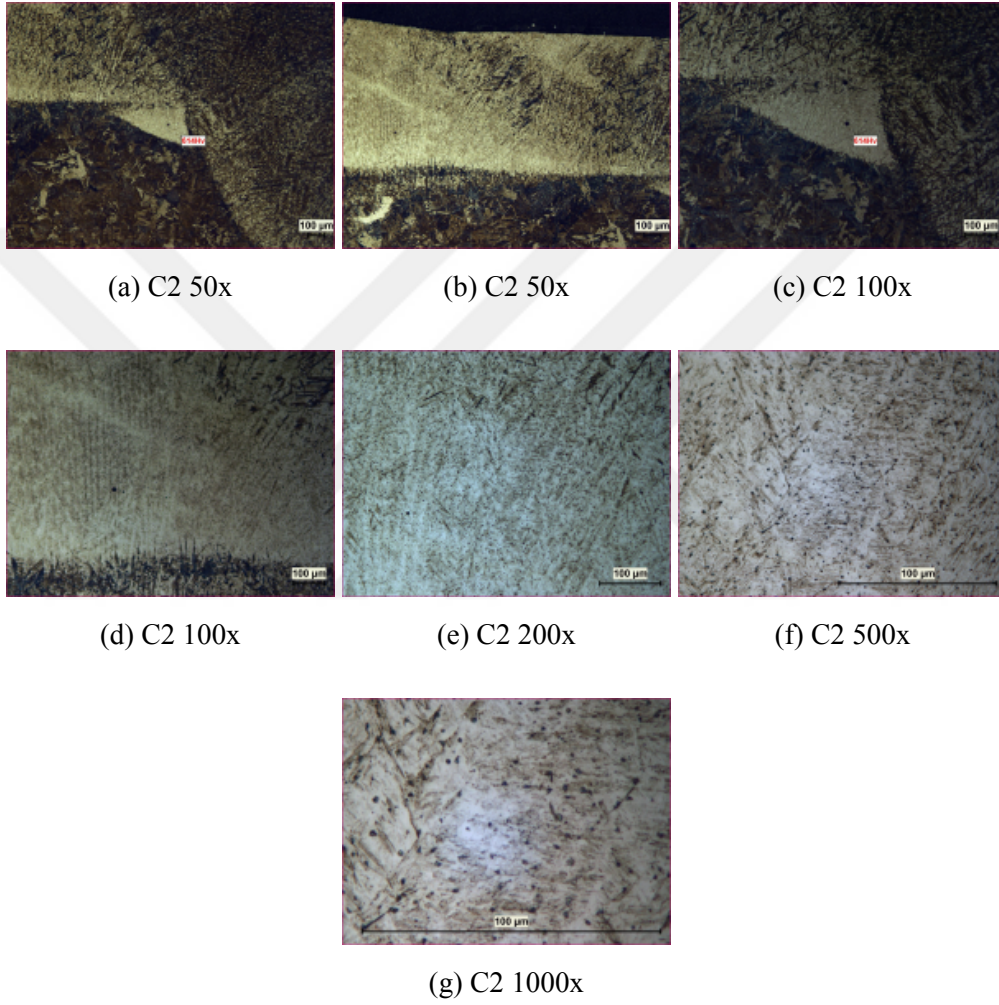
C2 kodlu numunenin mikroyapı analizi

C2 kodlu numunenin genel kaynak bölgesi Şekil 4.10'de verilmiştir. Yapı incelendiğinde farklı fazların olduğu kaplama bölgesinin kenarlarında Nital ile dağlanmayan beyaz bir fazın olduğu görülmektedir. Bu bölgenin XRD analizi sonrası FeNi ve $(Fe_9 B)_{0.2}$ fazları içerdiği anlaşılmıştır. Kaplamanın altlık yapıdan farklı bir faz oluşturduğu panoramik görüntüde anlaşılmaktadır.



Şekil 4.10: C2 panorama, %2 Nital 40s

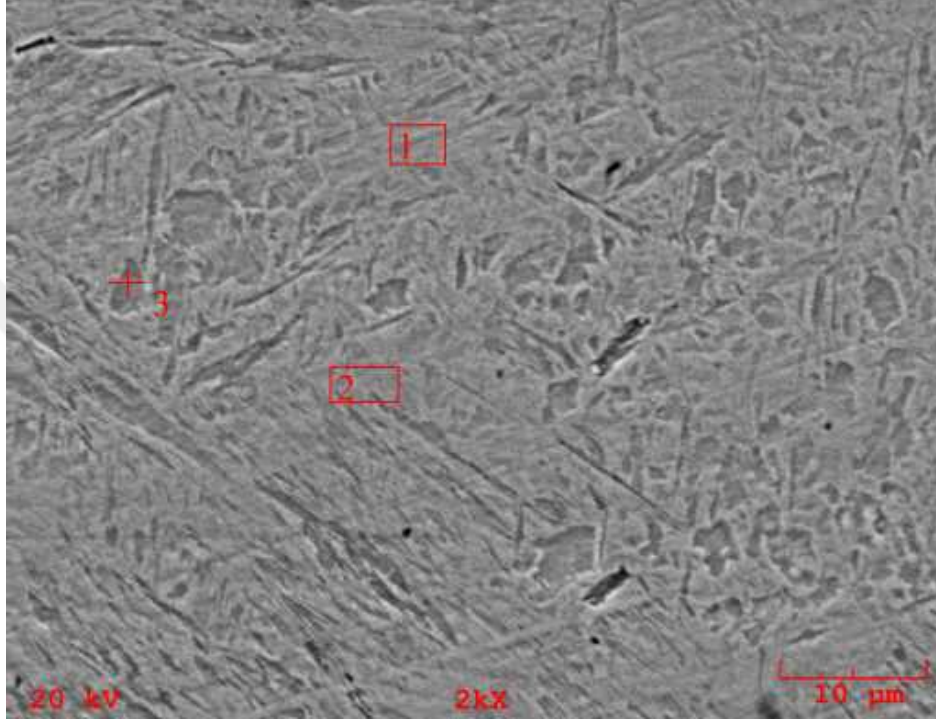
Ayrıntılı inceleme yapmak için C2 numunesinin çeşitli bölgelerinden daha yüksek büyütmelede de optik inceleme yapılmıştır. Çekilen görüntüler Şekil 4.11'de verilmiştir. Şekiller 4.11e,4.11f, 4.11g incelendiğinde iğnesel yapılı fazın etrafında oluşmuş çökeltme benzeri bir fazın varlığı görülmektedir. Bu çökelmiş faz $(Fe_9 B)_{0.2}$ 'dir. Şekil 4.11a incelendiğinde dağlanmamış 614 VSD sertliğe sahip bir bölgenin varlığı görülmüştür. Yukarıda da belirtildiği üzere bu fazın FeNi olduğu sertlik bilgisi tarafından da desteklenmektedir (Gehrels vd., 1994, s. 580). XRD sonuçları incelendiğinde Fe 0.916 Ni 0.08 fazının da oluştuğu görülmektedir. Ekabor II oranı artışıyla N2 numunesinde B-Fe-Ni alaşımı oluşurken, $(Fe_9 B)_{0.2}$ oluşmasıyla iki farklı Fe-Ni fazı oluşmuştur.



Şekil 4.11: C2 numunesi optik inceleme , %2 Nital 40s

C2 numunesi SEM ve EDS

C2 kodlu numunenin SEM görüntüsü Şekil 4.12’de verilmiştir. Şekil 4.16’de verilen kaynak bölgesi XRD analizinde B0.25 Fe0.375 Ni 0.375 ile $Ni_{23}B_6$ ve Fe0.91 B0.09 fazları bulunmuştur.



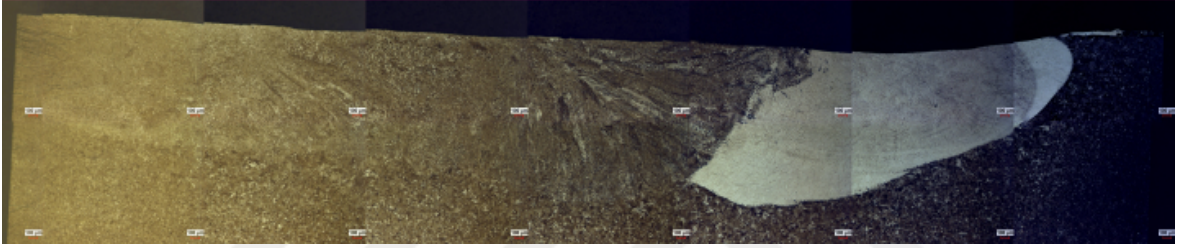
Şekil 4.12: C2 SEM görüntüsü

Çizelge 4.4: Şekil 4.12'dan alınan sonuçlar

Element	A1	A2	A3
C	0,000	0,000	0,421
Si	0,877	0,787	0,557
P	0,015	0,019	0,030
S	0,000	0,063	0,000
K	0,079	0,047	0,088
V	0,170	0,056	0,089
Cr	0,780	0,755	0,604
Mn	0,997	0,893	0,761
Fe	92,194	92,741	92,810
Ni	4,621	4,476	4,495
Mo	0,267	0,162	0,145

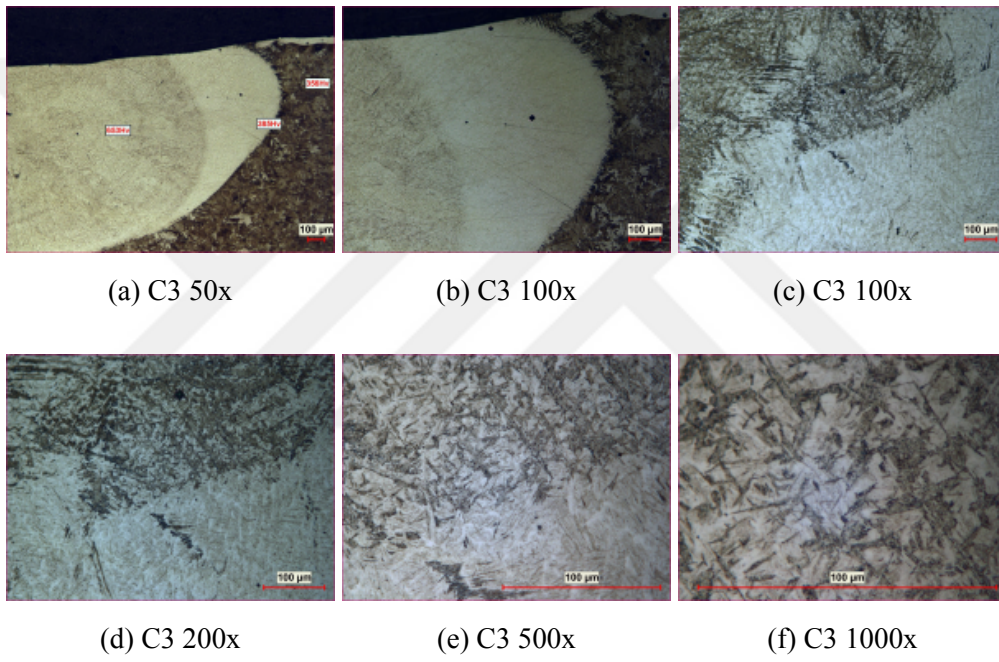
C3 kodlu numunenin mikroyapı analizi

C3 kodlu bölgenin kaynak bölgesini gösteren genel bir görüntüsü Şekil 4.13’de verilmiştir. Yapı incelendiğinde farklı fazların oluştuğu kaplama bölgesinin kenarlarında Nital ile dağlanmayan beyaz bir fazın oluştuğu görülmektedir. Şekil 4.16’da verilen XRD sonuçları incelendiğinde FeNi ve Fe_{0.91} B_{0.09} fazlarının oluştuğu tespit edilmiştir. Şekil 4.14a’de incelendiğinde yapıda dağlanmış bir faz bulunan bir bölge ve dağlanmamış bir bölge görülmektedir. Dağlanmamış bölgenin sertliği 385 VSD’dir. Bu bilgiler ve EDS analizi ışığında o bölgenin Nikel olduğu anlaşılmıştır. Elde karıştırma ile homojen bir karışım elde edilemediği için kaynak havuzunun kenarlarında Nikel kalmıştır. Kaplamanın altlık yapıdan farklı bir faz oluşturduğu panoramik görüntüde anlaşılmaktadır.



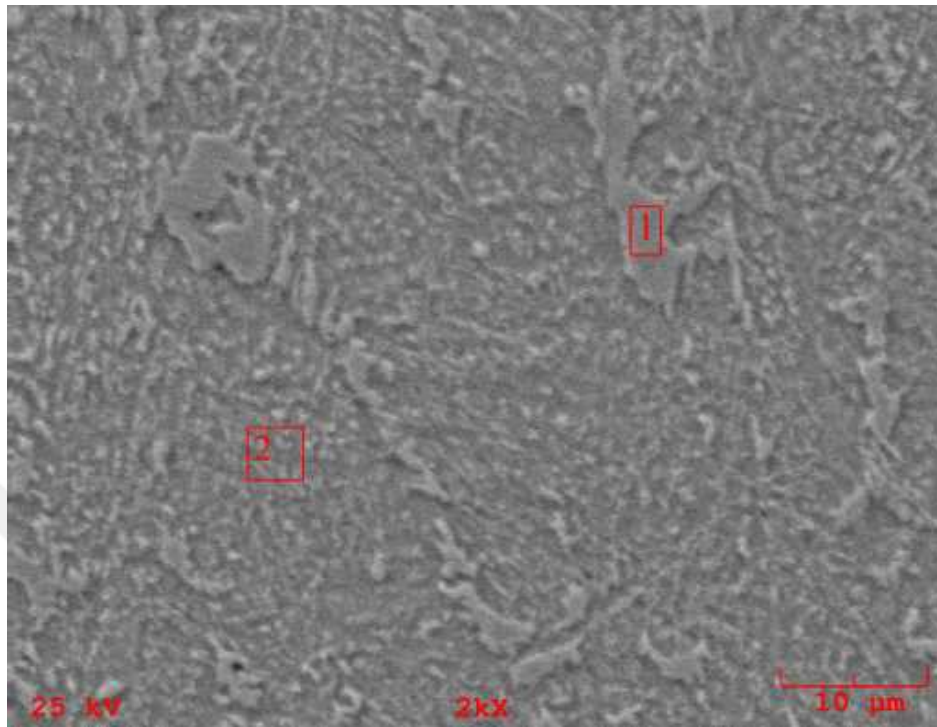
Şekil 4.13: C3 panorama, 50x, %2 Nital 40s

Ayrıntılı inceleme yapmak için C3 numunesinin çeşitli bölgelerinden daha yüksek büyütmelerde de optik inceleme yapılmıştır. Çekilen görüntüler Şekil 4.14’da verilmiştir. Şekil 4.14a incelendiğinde dağlanmamış bölgede 653 VSD sertlik görülmüştür. Şekil 4.14e incelendiğinde dendritik yapıların oluştuğu görülmektedir. Isı etkili bölgede sertliğin 350 VSD civarında olduğu göz önüne alındığında kaplamada sert FeNi ve (Fe₉ B)_{0.2} oluştuğu anlaşılmıştır. Şekil 4.14c incelendiğinde yüzeyde oluşan faz ile numunenin içine doğru oluşan fazın soğuma hızından dolayı farklılaştığı görülmektedir.



Şekil 4.14: C3 numunesi optik inceleme

C3 kodlu numune SEM ve EDS analizi



Şekil 4.15: C3 SEM görüntüsü

C3 numunesi SEM görüntüsü ve EDS analizi incelendiğinde A1 bölgesinde A2 bölgesinin üç katına yakın Nikel bulunduğu görülmektedir. Şekil 4.16'de verilen XRD analizi sonuçlarına göre A2 bölgesindeki fazın sementit ve $(Fe_9B)_{0.2}$ olduğu anlaşılmaktadır.

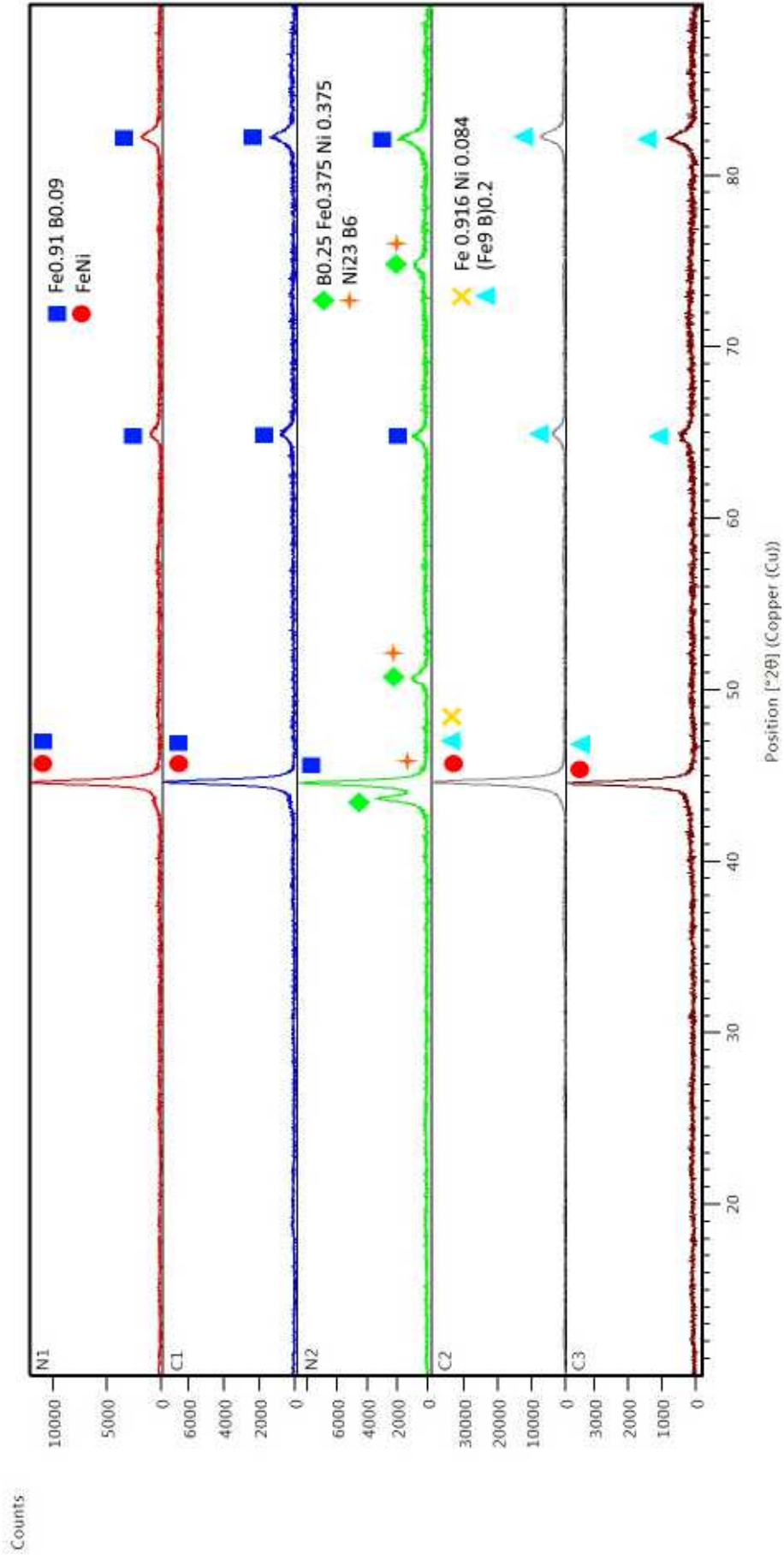
Çizelge 4.5: Şekil 4.15'den alınan sonuçlar (Ağırlıkça Oranlar)

Element	A1	A2
C	0,0	0,0
Si	1,082	1,154
Fe	95,933	97,790
Ni	2,984	1,056

N1, C1, N2, C2 ve C3 numunelerinin XRD analizi

N1, C1, N2, C2 ve C3 numunelerinin XRD analizi sonuçları Şekil 4.16'da toplu olarak verilmiştir. XRD deseni incelendiğinde FeNi fazının tüm numunelerde belirgin olarak oluştuğu, bununla beraber N2 numunesinde fazın FeNiB olarak yer aldığı görülmüştür. Düşük Ekabor II oranlarında Fe_{0.91}B_{0.09} sert fazı gözlenirken oran arttıkça (Fe₉B)_{0.2} fazının oluştuğu gözlenmiştir. Ekabor II oranının artışı %8 içeren N2 numunesinde Fe-Ni-B ve Ni₂₃B₆ fazı oluşumuna sebep olmuştur. %10 Ekabor II içeren numune C2'de ise (Fe₉B)_{0.2} ve Fe_{0.916}Ni_{0.08} fazı oluşmuştur.





Şekil 4.16: N1, C1, N2, C2 ve C3 numunelerinin XRD analizi

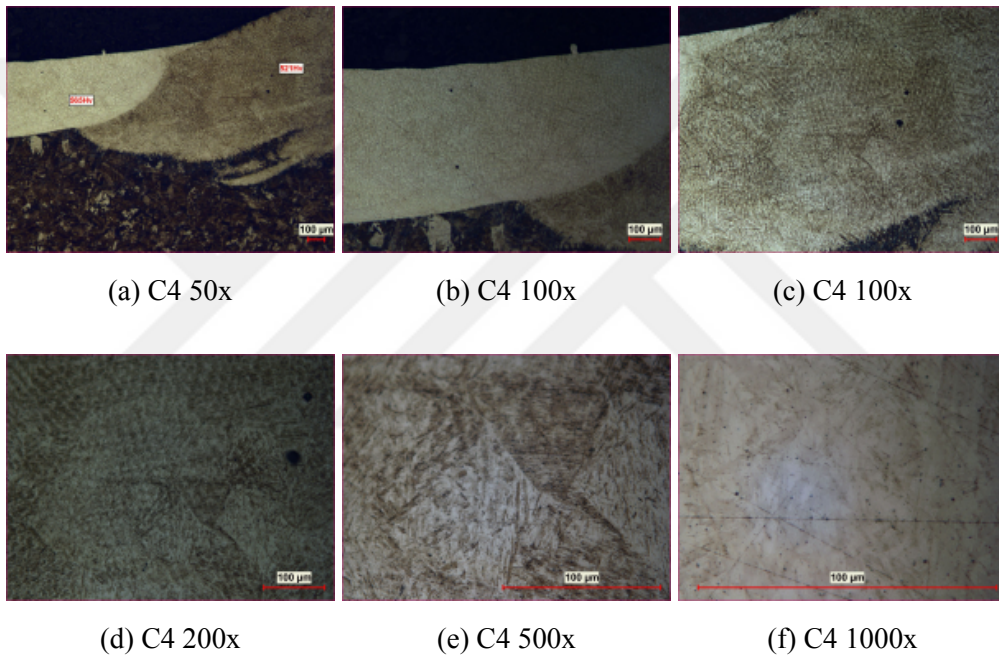
C4 kodlu numunenin mikroyapı analizi

C4 kodlu numunenin genel kaynak bölgesi yapısı Şekil 4.17’de verilmiştir. Yapı incelendiğinde farklı fazların olduğu kaplama bölgesinde Nital ile dağlanmayan beyazın farklı tonlarında fazların olduğu görülmektedir. Numuneye ait XRD deseni (Şekil 4.35) incelendiğinde numunede Fe_2Ni ve $B0.67 Fe1.33 Ni.67$ fazlarının olduğu görülmektedir. Mikroyapının homojen olması ve N1 numunesinden farklı olmasının sebebi kaplamada kullanılan tozun değirmende homojen karışmasıdır.



Şekil 4.17: C4 panorama, 50x, %2 Nital 40s

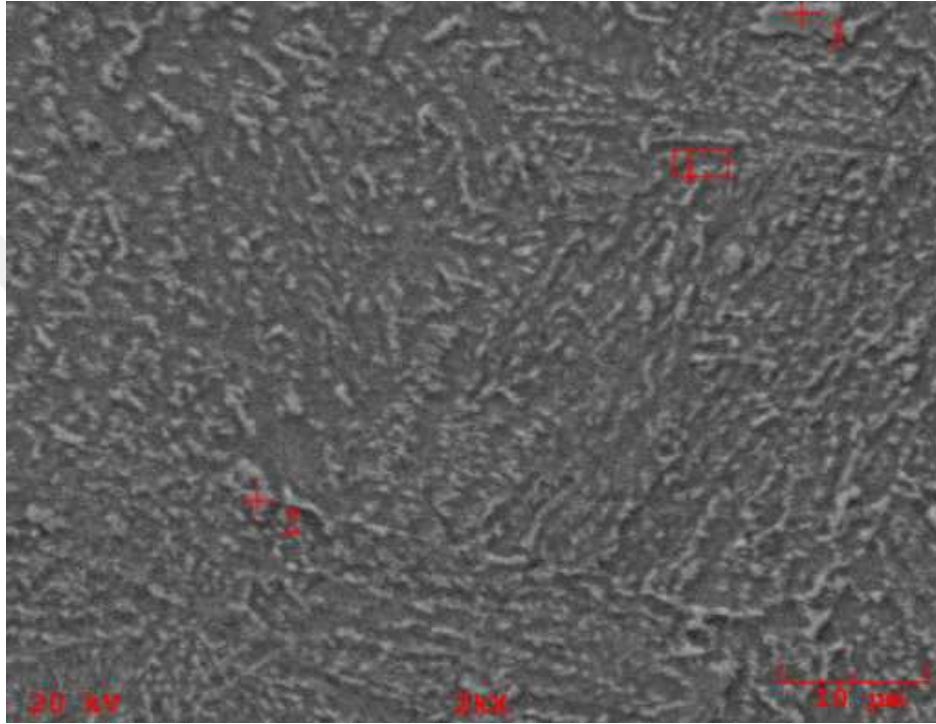
Ayrıntılı inceleme yapmak için C4 numunesinin çeşitli bölgelerinden daha yüksek büyütme oranlarında da optik inceleme yapılmıştır. Elde edilen görüntüler Şekil 4.18’de verilmiştir. Şekil 4.18a incelendiğinde dağlanmamış bölgede 565 VSD ve 535 VSD sertlikte iki farklı faz görülmüştür. Şekiller 4.18d ve 4.18e incelendiğinde iğnesel yapıların olduğu görülmektedir.



Şekil 4.18: C4 optik inceleme, %2 Nital 40s

C4 kodlu numunenin SEM ve EDS analizi

C4 numunesinin SEM görüntüsü ve EDS analizi incelendiğinde yapının N1'in SEM görüntüsünden farklı olduğu görülmüştür. Numunenin Şekil 4.35'de verilen XRD analizinde çıkan fazların N1 kodlu numuneden farklı olması bu sonucu doğrulamıştır. XRD deseni incelendiğinde $B0.67 Fe1.33 Ni0.67$ ve Fe_2Ni fazları olduğu tespit edilmiştir.



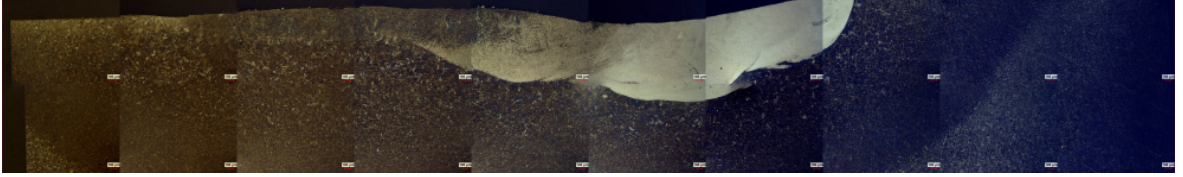
Şekil 4.19: C4 SEM görüntüsü

Çizelge 4.6: Şekil 4.19'dan alınan sonuçlar

Element	A1	A2	A3
C	0,527	0,0	0,0
Si	0,388	0,417	0,424
Mn	0,840	0,417	0,424
Fe	97,532	98,290	98,202
Ni	0,712	0,230	0,230

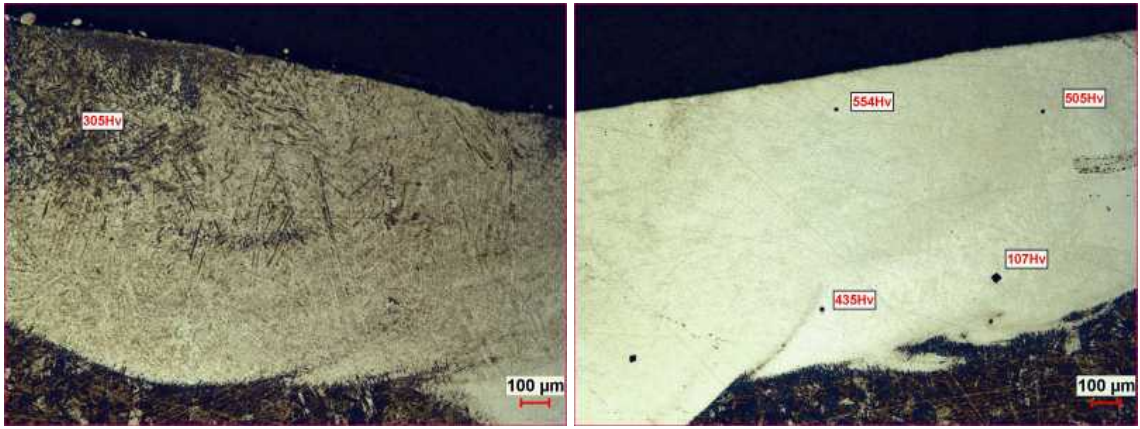
C5 kodlu numunenin mikroyapı analizi

C5 kodlu numunenin genel kaynak yapısı görüntüsü Şekil 4.20’de verilmiştir. Yapı incelendiğinde farklı fazların oluştuğu kaplama bölgesinde Nital ile dağlanmayan beyaz Ni içeren fazın baskın olduğu görülmektedir. Numuneye ait XRD deseni (Şekil 4.35) incelendiğinde bu numunede $Ni_{23}B$ oluştuğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.20: C5 panorama, 50x, %2 Nital 40s

Ayrıntılı inceleme ve mikrosertlik testleri için farklı bölgeler daha yüksek büyütme oranlarında incelenmiştir. Geçiş bölgesinde 350 VSD civarı sertlik görülmekteyken Şekil 4.21a, beyaz bölgede daha yüksek 550 VSD’ye yakın sertlikte bölgeler görülmektedir Şekil 4.21b. Şekil 4.21c incelendiğinde sertliğin aynı beyaz fazın içinde dendritik yapıdan kaynaklandığı görülmektedir. XRD sonuçlarından bu yapının sert bir faz olan $Fe_{0.91}B_{0.09}$ olduğu anlaşılmıştır.



(a) C5 50x

(b) C5 50x

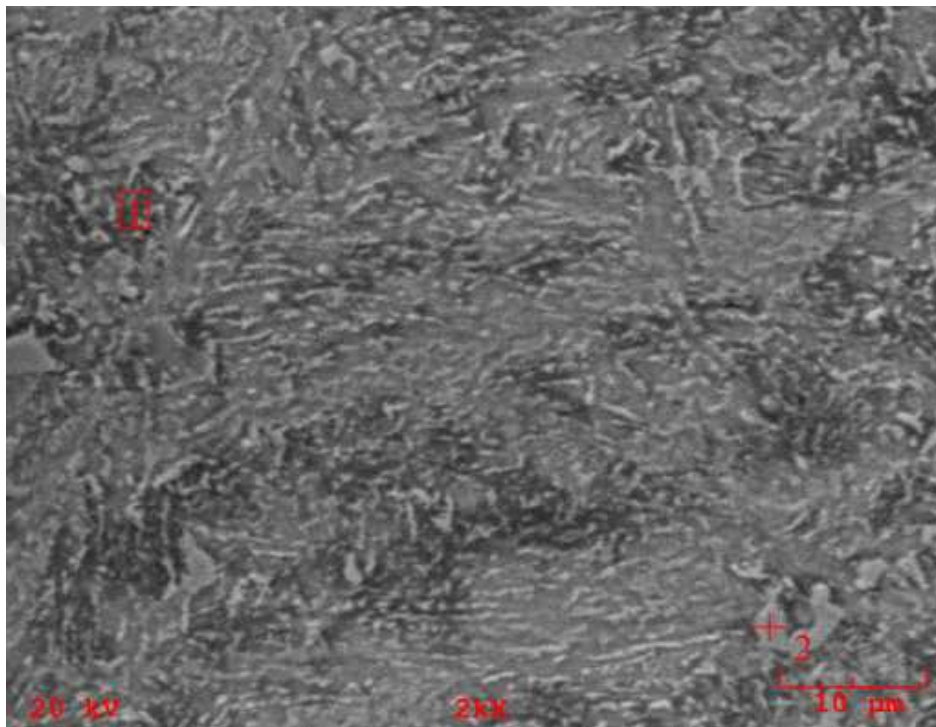


(c) C5 200x

Şekil 4.21: C5 numunesi optik inceleme, %2 Nital 40s

C5 kodlu numune SEM ve EDS analizi

C5 numunesinin SEM görüntüsü (Şekil 4.22) ve EDS analizi (Çizelge 4.7 incelendiğinde A2 bölgesindeki gibi diğer yapılardan farklı fazlar görülmüştür. A2 bölgesi EDS analizi yapıldığında bölgenin yüksek Ni içerdiği ölçülmüştür. Yüksek Ni oranı bu fazın $Ni_{23}B$ olduğunu göstermektedir. $Ni_{23}B$ çökelmeyle taneler arasında oluşan bir fazdır (Gale ve Wallach, 1991). SEM görüntüsü de bu fazın varlığını desteklemektedir.



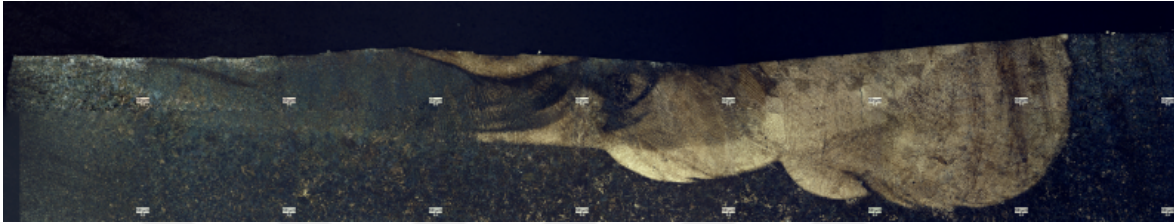
Şekil 4.22: C5 SEM görüntüsü

Çizelge 4.7: Şekil 4.22'den alınan sonuçlar

Element	A1	A2
C	0,0	0,0
Si	0,542	0,858
Mn	0,522	0,977
Fe	98,710	97,416
Ni	0,226	0,749

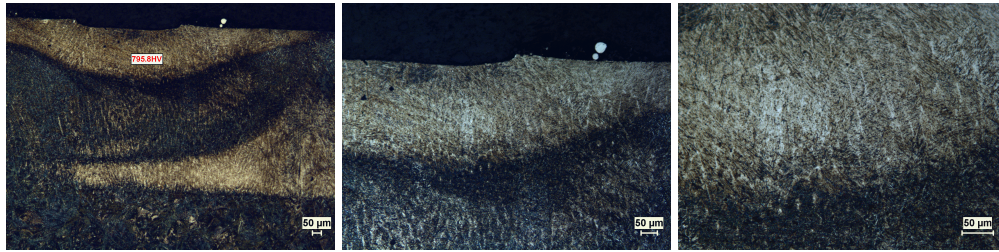
D1 kodlu numunenin mikroyapı analizi

D1 kodlu numunenin kaynak bölgesi genel yapısı Şekil 4.23’de verilmiştir. Yapı incelendiğinde farklı fazların oluştuğu kaplama bölgesinde Nital ile dağlanmayan beyaz ve dağlanmış daha koyu renkli fazlar olduğu görülmektedir. Bu fazların incelenmesi için EDS ve XRD analizleri yapılmıştır. Panoromik görüntü incelendiğinde kaplamanın kaynak havuzunda dağılımı sonucu altlık malzemesi ile karıştığı kaplamanın solunda belli olmaktadır.



Şekil 4.23: D1 panorama 50x %2 Nital 40s

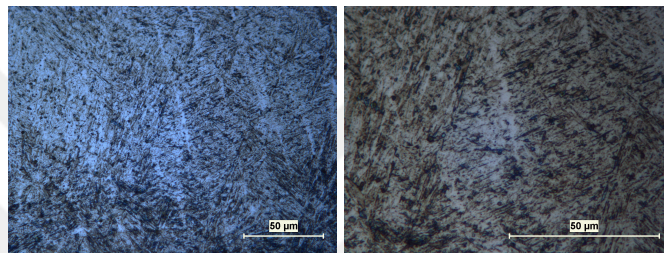
Ayrıntılı inceleme için ve mikrosertlik testleri için farklı bölgeler daha yüksek büyütmelelerde incelenmiştir görüntüler Şekil 4.24’de verilmiştir. Şekil 4.24a’da 795 VSD sertlik görülen, dendritik ve yönlenmiş yapı Şekiller 4.24b,4.24c, 4.24d ve 4.24e’de incelenmiştir. Şekil 4.24f’de 551 VSD sertlik gözlenen yapıda bir de mikroçatlak görülmüştür. Aynı bölgenin şekiller 4.24g, 4.24h, 4.24i ve 4.24j’de incelenmesinde yönlenmiş dendritik yapının varlığı görülmektedir. Numunenin XRD deseni (Şekil 4.35) incelendiğinde bu sert yapıların $(Fe_9B)_{0.2}$ olduğu anlaşılmaktadır.



(a) D1 50x

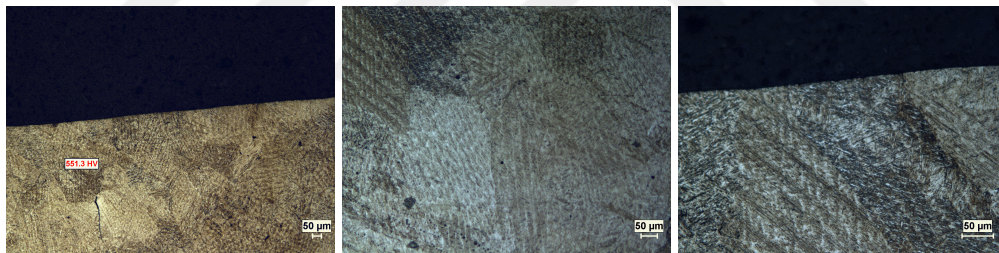
(b) D1 100x

(c) D1 200x



(d) D1 500x

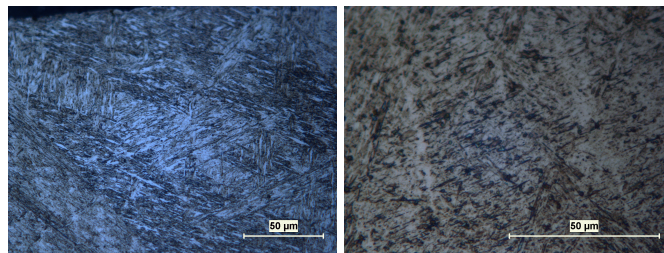
(e) D1 1000x



(f) D1 50x

(g) D1 100x

(h) D1 200x



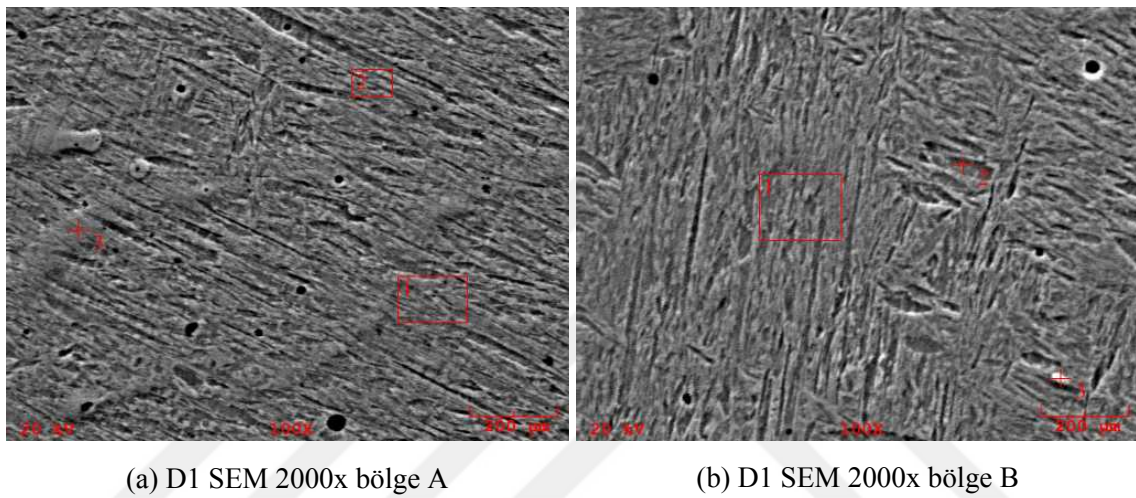
(i) D1 500x

(j) D1 1000x

Şekil 4.24: D1 numunesi optik inceleme

D1 kodlu numunenin SEM ve EDS analizi

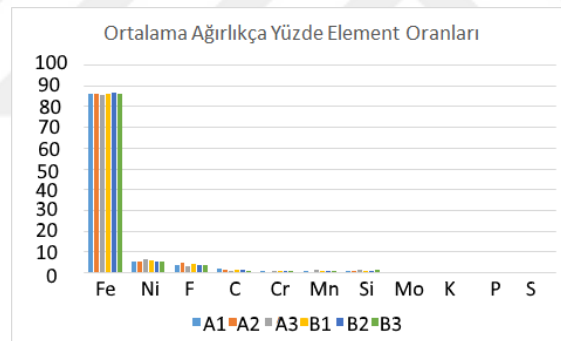
D1 kodlu numunenin SEM görüntüleri Şekil 4.25’de verilmiştir. A bölgesi Şekil 4.24f’de gözüken 551 VSD sertlikli bölge, B bölgesi ise Şekil 4.24a’de gözüken 795 VSD sertlikli bölgedir. EDS sonuçlarında Ni oranının B’de daha az olduğunu göstermektedir. SEM görüntüleri ve EDS sonuçları incelendiğinde Fe_{11.5} Ni_{11.5} B₆ fazının soğuma sırasında 450-500°’de oluştuğu (Brinkman vd., 2011) bu fazın arasında da $(Fe_9B)_{0.2}$ fazının oluştuğu anlaşılmıştır.



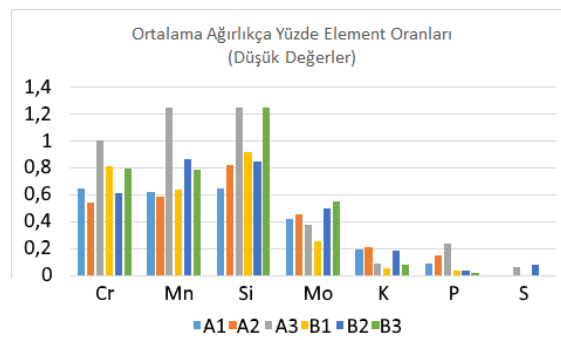
Şekil 4.25: D1 numunesi SEM görüntüleri

Çizelge 4.8: D1 Numunesi EDS sonuçları

Element	D1					
	A1	A2	A3	B1	B2	B3
C	1,867	1,233	0,673	1,270	1,180	0,993
F	3,850	4,654	3,091	4,112	3,602	3,983
Si	0,648	0,817	1,248	0,913	0,848	1,244
P	0,087	0,146	0,233	0,036	0,039	0,023
S	0,000	0,000	0,066	0,000	0,081	0,000
K	0,192	0,208	0,087	0,055	0,180	0,080
Cr	0,643	0,539	1,004	0,810	0,614	0,793
Mn	0,620	0,587	1,248	0,635	0,861	0,789
Fe	86,312	86,236	85,638	86,161	86,745	85,972
Ni	5,360	5,127	6,334	5,752	5,356	5,569
Mo	0,421	0,452	0,378	0,257	0,494	0,553



(a) D1 EDS elementlerin ağırlıkça oranı

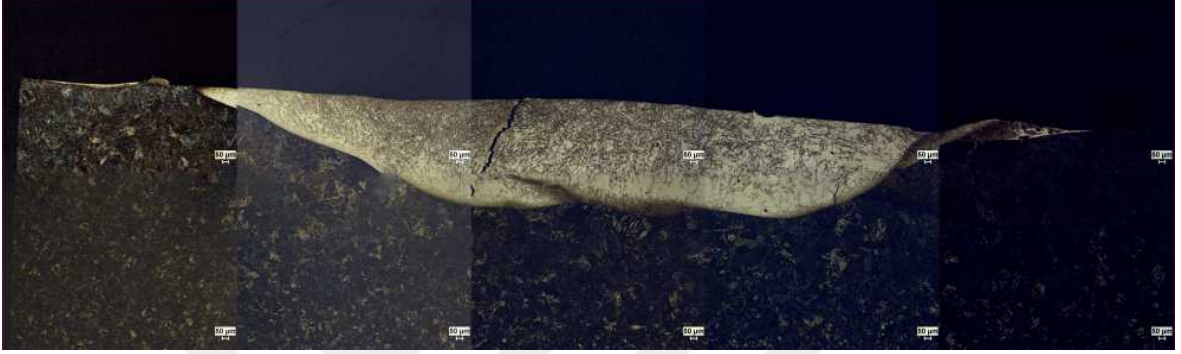


(b) D1 EDS elementlerin oranı düşük olanlar

Şekil 4.26: D1 EDS sonuçları

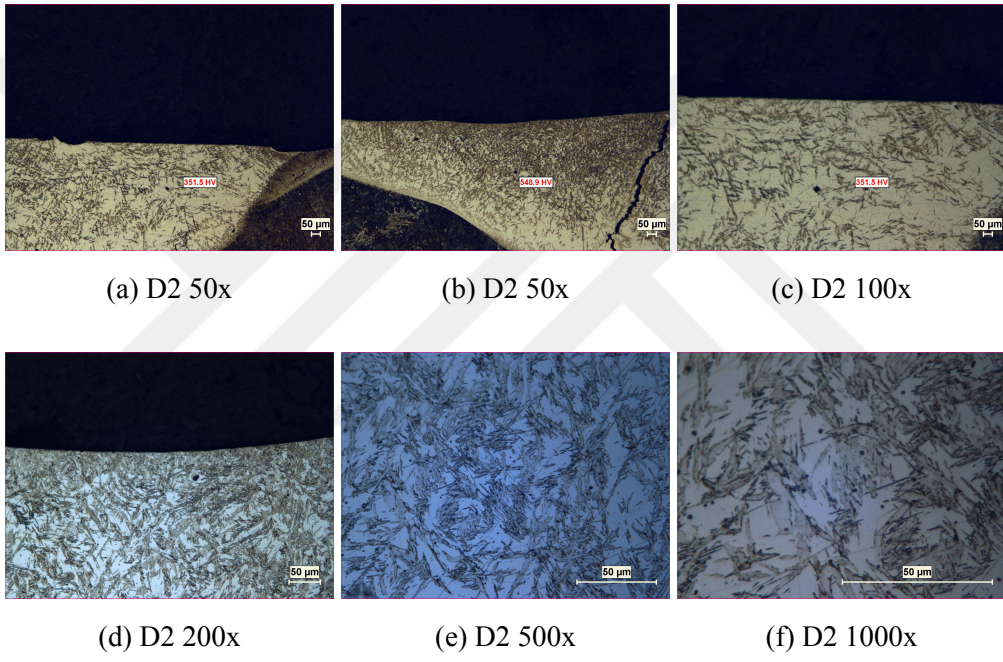
D2 kodlu numunenin mikroyapı analizi

D2 kodlu numunenin mikroyapı analizi Şekil 4.27’de verilmiştir. Yapı incelendiğinde kaplama bölgesinde Nital ile dağlanmayan beyaz bir faz ve içinde dağlanan başka bir fazın olduğu görülmektedir. Numunenin XRD analizinde (Şekil 4.35) dağlanmayan fazların iki farklı Fe-Ni-B fazı olduğu anlaşılmıştır.



Şekil 4.27: D2 panorama 50x %2 Nital 40s

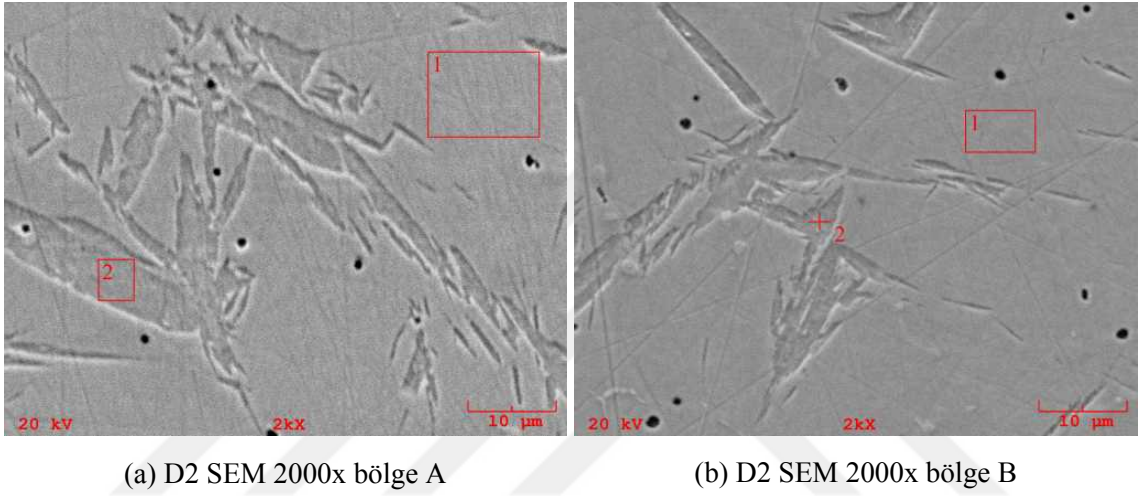
Ayrıntılı inceleme için daha yüksek büyütmelelerde görüntüler Şekil 4.28’de verilmiştir. Oluşan yapıların dendritik ve yönlenmiş olduğu görülmektedir. Mikro çatlak oluşan bölgede 538 VSD sertlik tespit edilmiştir. Bu çatlağın oluştuğu bölgede sert ancak mikro çatlak oluşturabilecek fazların varlığını göstermektedir. Kaplamadaki Bor oranının artışı numunenin XRD deseninde (Şekil 4.35) de görüleceği üzere Fe-Ni-B fazları ve Fe_{0.91} B_{0.09} oluşmasına sebep olmuştur. Fe_{0.91} B_{0.09} fazı hızlı soğuma sonucu oluşmaktadır (Y. D. Zhang vd., 1986) ve mikro çatlaklara bu sert faz sebep olmaktadır.



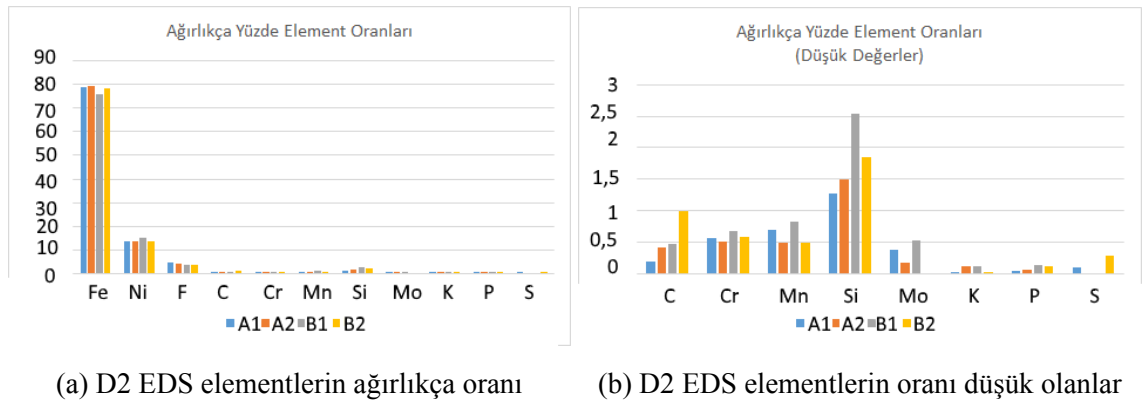
Şekil 4.28: D2 numunesi optik inceleme

D2 kodlu numune SEM ve EDS Analizi

D2 kodlu numunenin SEM mikroyapı resimleri Şekil 4.29 verilmiştir. Yapı incelendiğinde D2 numunesinin diğer numunelerden farklı bir mikroyapısı olduğu görülmektedir. Bu yapının oluşmasının sebebi D2’de diğerlerinde olmayan iki Fe-Ni-B fazının, B0.67 Fe1.33 Ni0.67 ile Fe0.375 Ni0.375 B0.25 fazlarının oluşmuş olmasıdır. XRD deseninde (Şekil 4.35) tespit edilen bu fazların varlığını D2 numunesinin EDS analizinde görülen yüksek Ni ve düşük Fe oranları doğrulamaktadır.



Şekil 4.29: D2 numunesi SEM görüntüleri



Şekil 4.30: D2 EDS sonuçları

Çizelge 4.9: D2 Numunesi EDS Sonuçları

Element	D2			
	A1	A2	B1	B2
Fe	78,873	79,219	76,176	78,584
Ni	13,493	13,584	14,957	13,400
F	4,389	3,949	3,584	3,699
C	0,187	0,422	0,461	0,993
Cr	0,566	0,506	0,677	0,585
Mn	0,688	0,490	0,833	0,491
Si	1,276	1,490	2,538	1,849
Mo	0,375	0,170	0,533	0,000
K	0,029	0,115	0,106	0,017
P	0,034	0,055	0,134	0,106
S	0,090	0,000	0,000	0,276

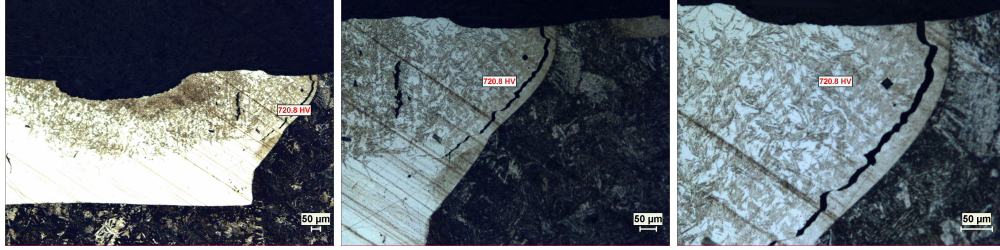
D3 kodlu numunenin mikroyapı analizi

D3 kodlu numunenin mikroyapı analizi Şekil 4.31’de verilmiştir. Yapı incelendiğinde kaplama bölgesinde ergimiş metalin heterojen dağıldığı görülmektedir. Nital ile dağlanmayan beyaz bir faz, o fazın içinde dağlanan başka bir faz ve kaplamanın kenarında dağlanan başka bir faz olduğu görülmektedir. Dağlanmayan fazın numunenin XRD deseni (Şekil 4.35) incelendiğinde B_1Fe_1Ni olduğu anlaşılmıştır. Dağlanan faz ise Cr_4B fazıdır . Kaplamada belirgin bir mikro çatlak oluşmuştur. Bu mikro çatlak da D2 kodlu numunedeki gibi $Fe_{0.91}B_{0.09}$ fazı sebebiyle oluşmuştur.



Şekil 4.31: D3 panorama 50x %2 Nital 40s

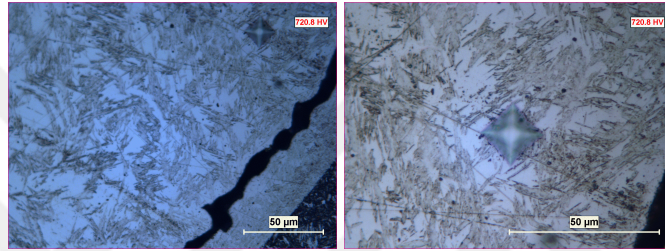
Ayrıntılı inceleme için ve mikrosertlik testleri için farklı bölgeler daha yüksek büyütme oranlarında incelenmiştir görüntüler Şekil 4.32’de verilmiştir. Oluşan yapıların dendritik ve yönlendirilmiş olduğu görülmektedir. Şekiller 4.32a, 4.32b, 4.32c, 4.32d, 4.32e kaplamanın sağında 720 VSD sertlik beyaz fazın içinde oluşan dağlanan fazda gözlenmiştir. Bu bölge kaplamanın en sert bölgesidir. Şekil 4.32f kaplamanın solundaki fazların geçiş bölgesi incelenmiştir. Beyaz gözüken $B_1Fe_1Ni_1$ fazının sertliği 189Hv olup dağlanmış fazın sertliği 645 VSD ile 580 VSD arasındadır. Bu bölgede de sert fazda mikro çatlaklar gözlenmiştir. Yukarıda da belirtildiği üzere bu sert faz XRD sonuçları açığında $Fe_{0.91}B_{0.09}$ fazıdır. Dendrit kollarının beyaz fazın içine devam ettiği ancak iki fazın ayrımının net olduğu Şekiller 4.32g ve 4.32h’de gözükmemektedir.



(a) D3 50x

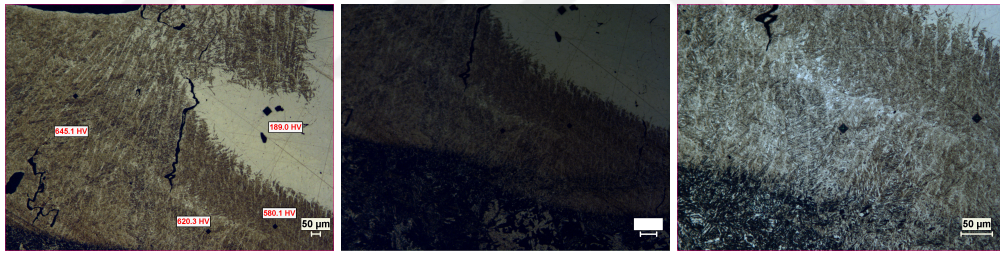
(b) D3 100x

(c) D3 200x



(d) D3 500x

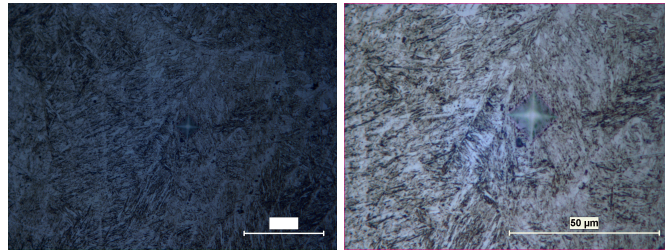
(e) D3 1000x



(f) D3 50x

(g) D3 100x

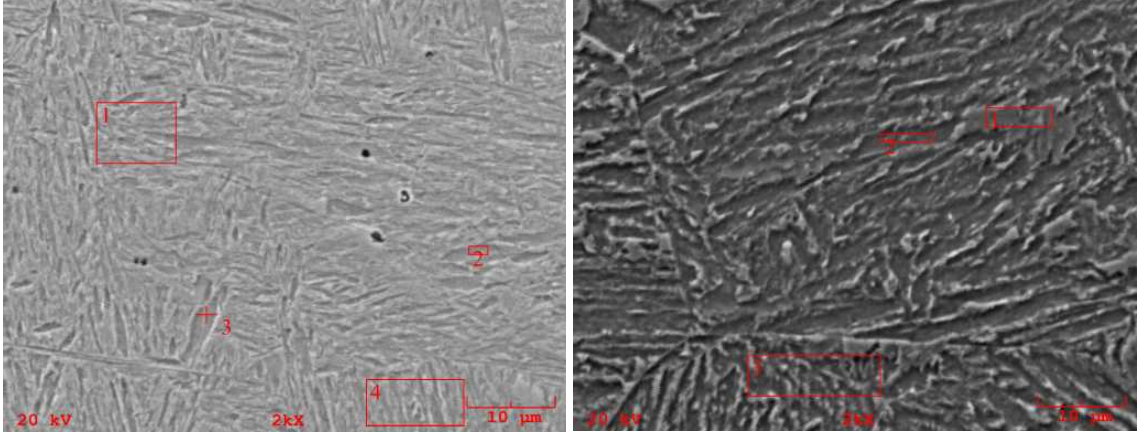
(h) D3 200x



(i) D3 500x

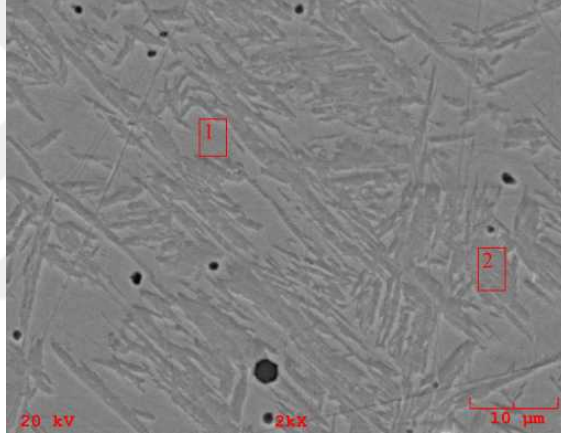
(j) D3 1000x

Şekil 4.32: D3 numunesi optik inceleme

D3 kodlu numunenin SEM ve EDS analizi

(a) D3 SEM 2000x bölge A

(b) D3 SEM 2000x bölge B



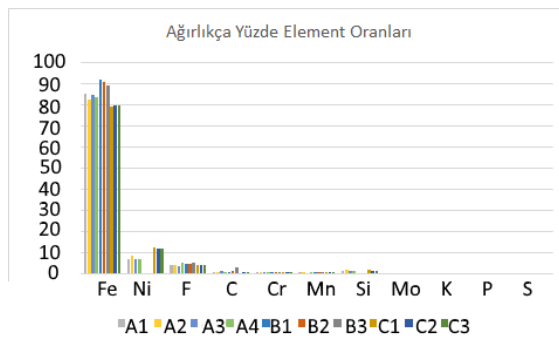
(c) D3 SEM 2000x bölge C

Şekil 4.33: D3 numunesi SEM görüntüleri

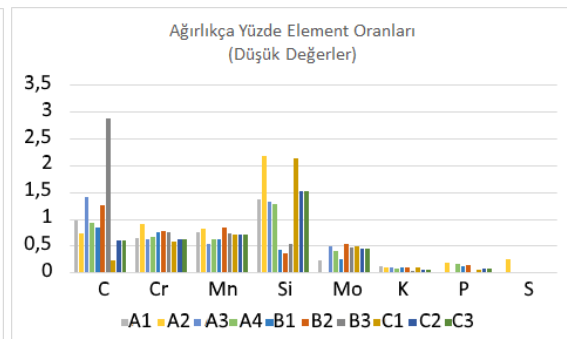
Çizelge 4.10: D3 Numunesi EDS Sonuçları

Element	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3
Fe	84,908	82,343	84,768	83,454	91,814	90,961	88,956
Ni	6,951	8,355	6,905	7,219	0,210	0,171	0,185
F	4,006	4,105	3,786	5,121	4,831	4,815	5,386
C	0,980	0,741	1,408	0,937	0,839	1,255	2,871
Cr	0,659	0,913	0,639	0,681	0,763	0,779	0,766
Mn	0,769	0,831	0,552	0,629	0,627	0,838	0,738
Si	1,362	2,165	1,328	1,290	0,429	0,375	0,535
Mo	0,236	0,000	0,498	0,409	0,250	0,551	0,485
K	0,130	0,099	0,098	0,081	0,109	0,113	0,050
P	0,000	0,186	0,018	0,179	0,129	0,141	0,029
S	0,000	0,262	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Element	C1	C2	C3
Fe	79,028	79,642	79,642
Ni	12,513	12,076	12,076
F	4,073	4,175	4,175
C	0,240	0,609	0,609
Cr	0,596	0,627	0,627
Mn	0,728	0,725	0,725
Si	2,137	1,532	1,532
Mo	0,510	0,465	0,465
K	0,105	0,058	0,058
P	0,069	0,091	0,091
S	0,000	0,000	0,000



(a) D3 EDS elementlerin ağırlıkça oranı



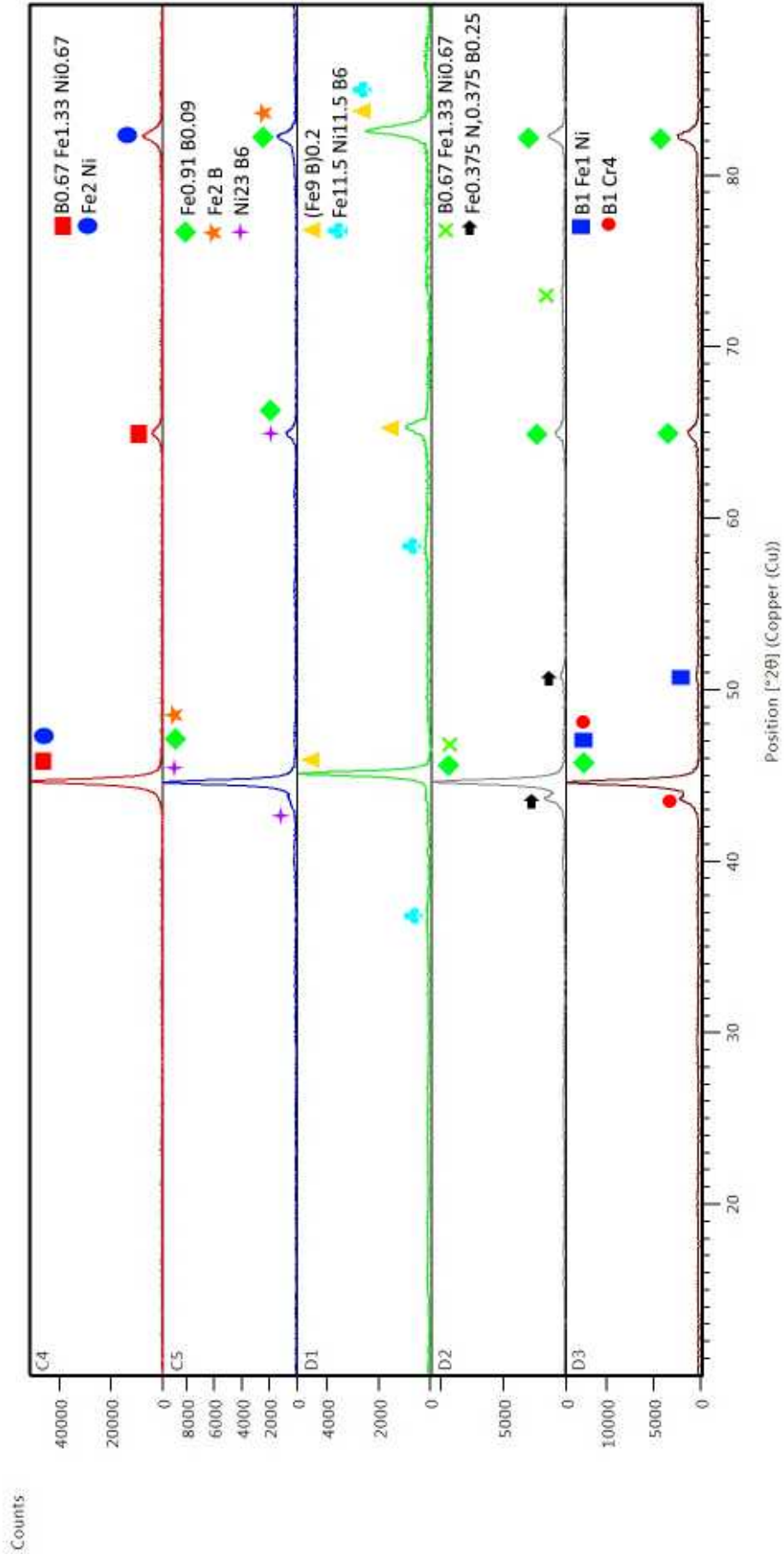
(b) D3 EDS elementlerin oranı düşük olanlar

Şekil 4.34: D3 EDS sonuçları

C4, C5, D1, D2 ve D3 numunelerinin XRD analizi

XRD deseni (Şekil 4.35) incelendiğinde değirmende karıştırmanın kaplamada elde karıştırmadan farklı alaşımlar oluşmasını sağladığı görülmektedir. Bunun sebebi kaplama tozunun homojen dağılmasıdır. Bu sayede örneğin elde karıştırılan N1 numunesinde sadece Fe-B ve Fe-Ni fazları oluşmuşken, aynı miktarda Ekabor II içeren C4 numunesinde Fe-Ni-B fazı oluşabilmiştir. Homojen karışımın bir başka etkisi de $Fe_{0.91}B_{0.09}$ fazının D1 numunesi hariç tüm numunelerde $(Fe_9B)_{0.2}$ fazı yerine oluşmuş olmasıdır.





Şekil 4.35: C4, C5, D1, D2 ve D3 numunelerinin XRD analizi

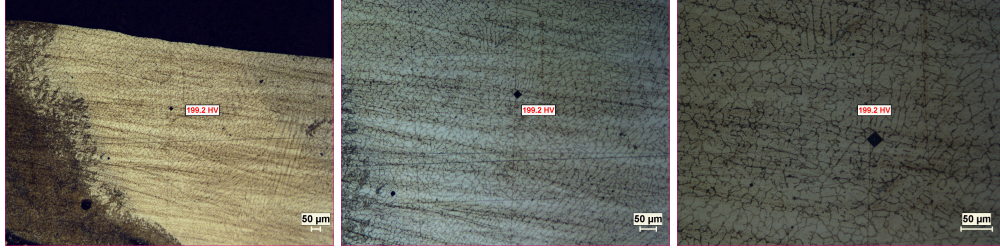
E1 kodlu numunenin mikroyapı analizi

E1 kodlu numunenin mikroyapı analizi Şekil 4.36'da verilmiştir. Yapı incelendiğinde kaplamada ergimiş metalin üç bölge oluşturduğu görülmektedir. Nital ile düşük seviyede dağlanan beyaz bir faz ve kaplamanın kenarlarında dağlanan başka bir faz olduğu görülmektedir. Numunenin XRD analizi (Şekil 4.57) incelendiğinde E1 numunesinde $Fe_{0.91}B_{0.09}$, $Fe_{0.916}Ni_{0.81}$ ve Fe_2Ni olduğu görülmektedir. Dağlanmayan fazın Şekil 4.38b'de verilen EDS analizinde daha yüksek Nikel içerdiği ölçülmüştür. Bu fazın $Fe_{0.916}Ni_{0.81}$ ve Fe_2Ni 'den oluştuğu anlaşılmıştır.



Şekil 4.36: E1 numunesi 50x panoramik görüntüsü, %2 Nital 40s

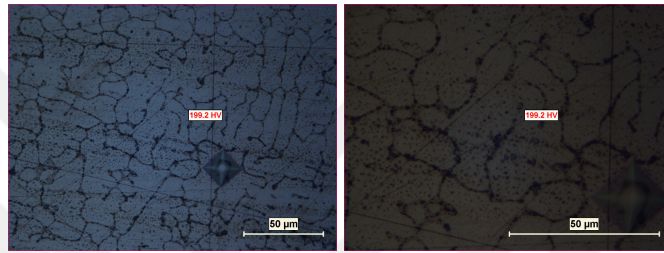
Ayrıntılı inceleme için ve mikrosertlik testleri için farklı bölgeler daha yüksek büyütmelelerde incelenmiştir görüntüler Şekil 4.37'da verilmiştir. Şekil 4.37a'da Nital ile az dağlanan bölge verilmiştir. Bu bölgenin sertliği 200 VSD ölçülmüştür. Şekil 4.37f'de kaplama kenarındaki yapı verilmiştir. Bu bölge Şekiller 4.37g, 4.37h, 4.37i ve 4.37j'de görüldüğü üzere iç içe iki farklı fazdan oluşmaktadır. Numunenin XRD analizi incelendiğinde bu yapının Fe_2Ni içinde oluşmuş $Fe_{0.916}Ni_{0.81}$ fazı olduğu anlaşılmıştır.



(a) E1 numunesi 50x

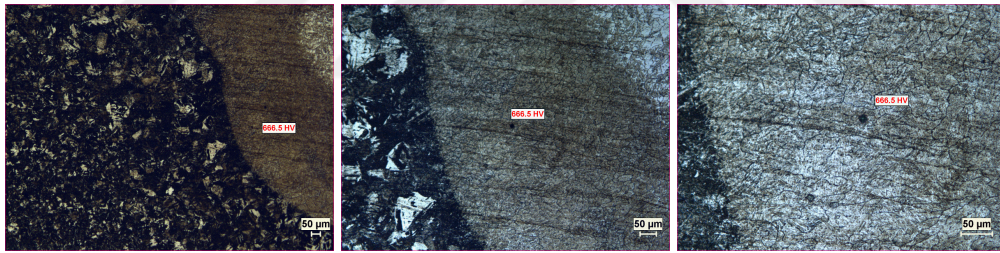
(b) E1 numunesi 100x

(c) E1 numunesi 200x



(d) E1 numunesi 500x

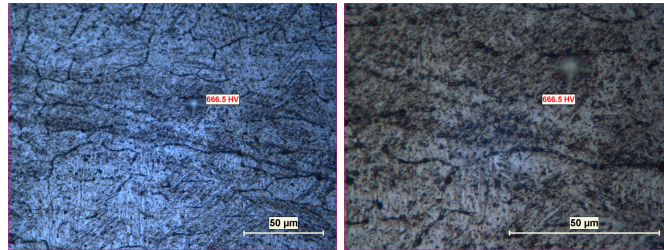
(e) E1 numunesi 1000x



(f) E1 numunesi 50x

(g) E1 numunesi 100x

(h) E1 numunesi 200x



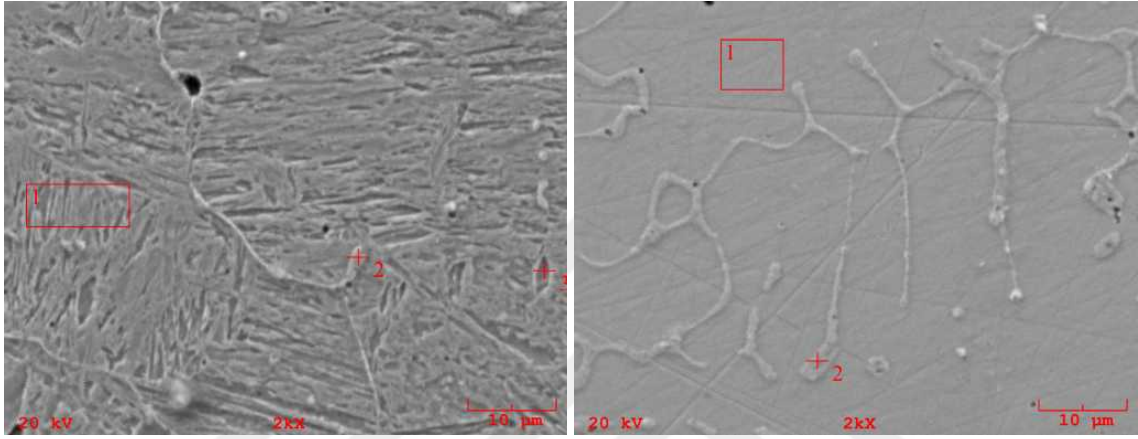
(i) E1 numunesi 500x

(j) E1 numunesi 1000x

Şekil 4.37: E1 numunesi optik inceleme, %2 Nital 40s

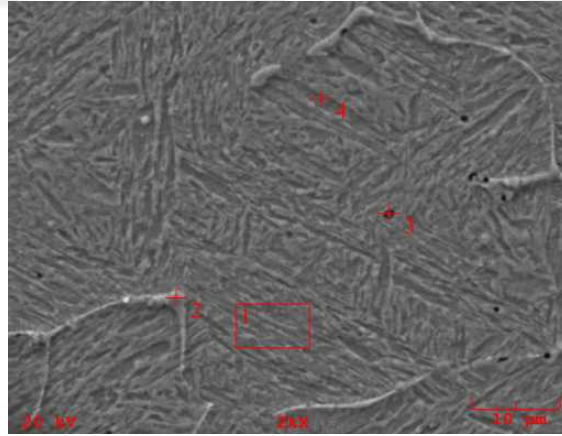
E1 kodlu numune SEM ve EDS analizi

E1 kodlu numunenin SEM mikroyapı görüntüleri Şekil 4.38’de verilmiştir. Yapının incelenmesinde A ve C bölgeleri ile B bölgesinin farklı olduğu anlaşılmaktadır. Çizelge 4.11 ve Şekil 4.39 incelendiğinde B bölgesinde yüksek Nikel olduğu görülmektedir. Bu sonuçlar XRD bilgisi ile birleştirildiğinde B bölgesinde yukarıda bahsedilen Fe-Ni fazlarının oluştuğu ve yapının o yüzden farklılaştığı anlaşılmıştır.



(a) E1 SEM 2000x bölge A

(b) E1 SEM 2000x bölge B

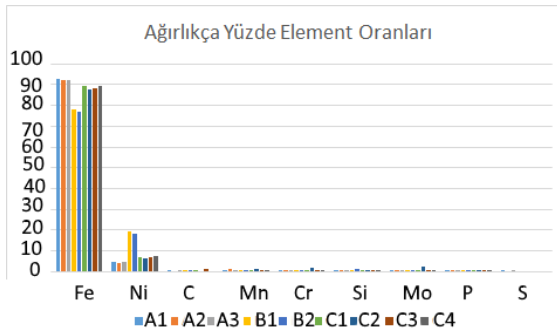


(c) E1 SEM 2000x bölge C

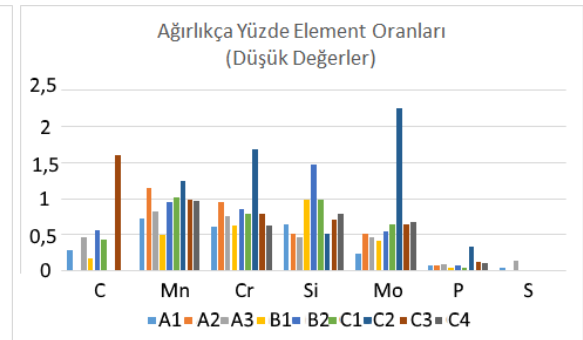
Şekil 4.38: E1 numunesi SEM görüntüleri

Çizelge 4.11: E1 Numunesi EDS sonuçları

Element	E1								
	A1	A2	A3	B1	B2	C1	C2	C3	C4
Fe	92.636	92.454	92.191	77.975	77.02	89.325	87.747	88.281	89.405
Ni	4.738	4.328	4.586	19.263	18.516	6.752	6.245	6.861	7.441
C	0.286	0	0.463	0.171	0.562	0.436	0	1.596	0
Mn	0.724	1.145	0.826	0.502	0.95	1.021	1.237	0.982	0.967
Cr	0.611	0.956	0.756	0.633	0.847	0.791	1.679	0.783	0.629
Si	0.637	0.511	0.472	0.992	1.474	0.984	0.509	0.717	0.784
Mo	0.238	0.522	0.468	0.417	0.55	0.648	2.247	0.651	0.67
P	0.083	0.085	0.094	0.047	0.081	0.042	0.337	0.128	0.104
S	0.047	0	0.143	0	0	0	0	0	0



(a) E1 EDS elementlerin ağırlıkça oranı

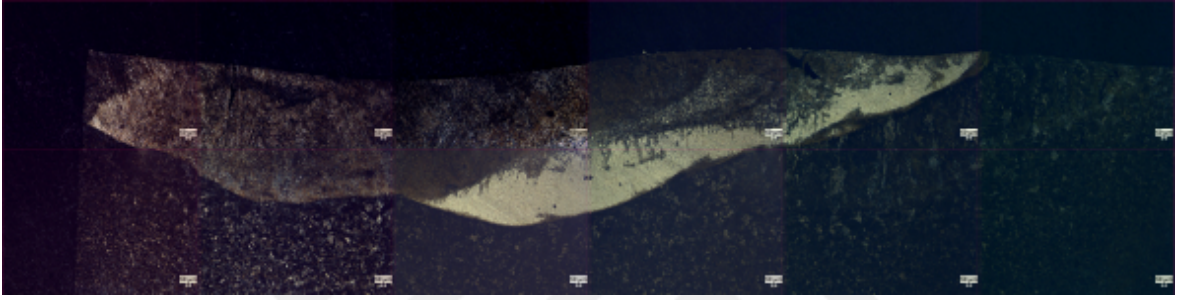


(b) E1 EDS oranı düşük olanlar

Şekil 4.39: E1 EDS sonuçları

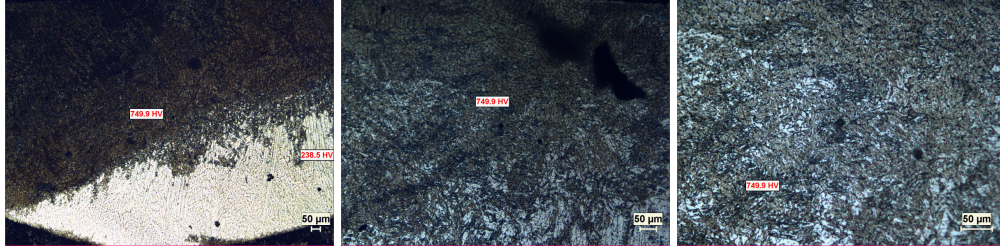
E2 kodlu numunenin mikroyapı analizi

E2 kodlu numunenin mikroyapı analizi Şekil 4.40'da verilmiştir. Yapı incelendiğinde kaplama bölgesinde ergimiş metalin iki fazdan oluştuğu görülmektedir. Nital ile düşük seviyede dağlanan beyaz ve dipte kalan bir faz ve kaplamanın üstünde dağlanan başka bir faz olduğu görülmektedir. Bu iki faz arasında geçiş bölgelerinde karışım vardır, ayırım net değildir. Numunenin XRD analizi (Şekil 4.57) incelendiğinde yapıda Fe_{0.91} B_{0.09} ve Fe₂Ni oluştuğu görülmektedir. Dağlanmayan bu fazın içindeki Ni oranı göz önüne alınırsa o yapıda Ni ve Fe₂Ni olduğu anlaşılmıştır.



Şekil 4.40: E2 numunesi 50x panoramik görüntüsü

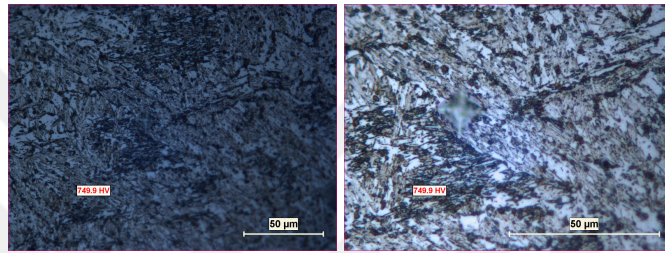
Ayrıntılı inceleme için ve mikrosertlik testleri için farklı bölgeler daha yüksek büyütme oranlarında incelenmiş, görüntüler Şekil 4.41'de verilmiştir. Şekil 4.41a'da Nital ile dağlanan bölge verilmiştir. Bu bölgenin sertliği 750 VSD olup, Şekiller 4.41b, 4.41c, 4.41d ve 4.41e'de görüldüğü üzere iğne yapılı bir yapı mevcuttur. Bu iğne yapılı yapı Fe₂Ni arasında gelişen Fe_{0.91} B_{0.09}'dur. Şekil 4.41f'de kaplamanın altındaki yapı verilmiştir. Bu bölgenin sertliği 240 VSD'dir. Bu faz Şekiller 4.41g, 4.41h, 4.41i ve 4.41j'de görüldüğü üzere çökeltme ve iğne yapılı fazdan oluşmuştur. Ana faz Nikel olup çökeltme ile oluşan yapı Fe₂Ni'dir. Arada iğne yapılı Fe_{0.91} B_{0.09} görülmektedir.



(a) E2 numunesi 50x

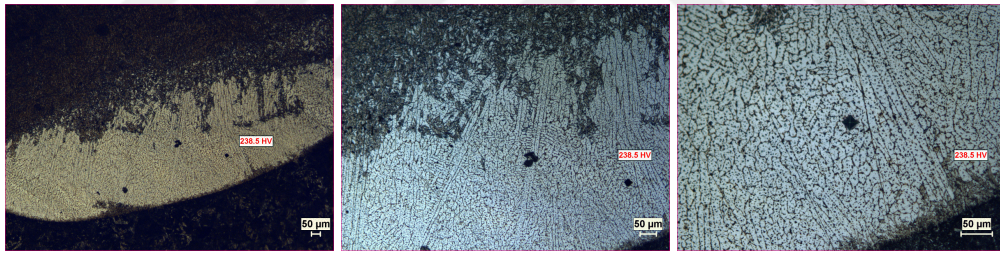
(b) E2 numunesi 100x

(c) E2 numunesi 200x



(d) E2 numunesi 500x

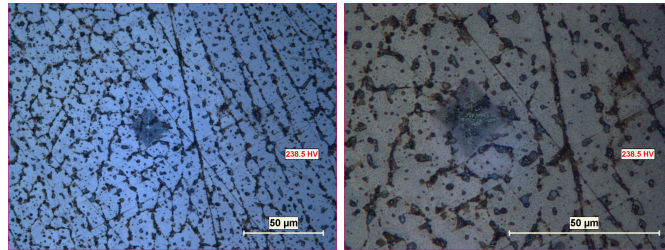
(e) E2 numunesi 1000x



(f) E2 numunesi 50x

(g) E2 numunesi 100x

(h) E2 numunesi 200x



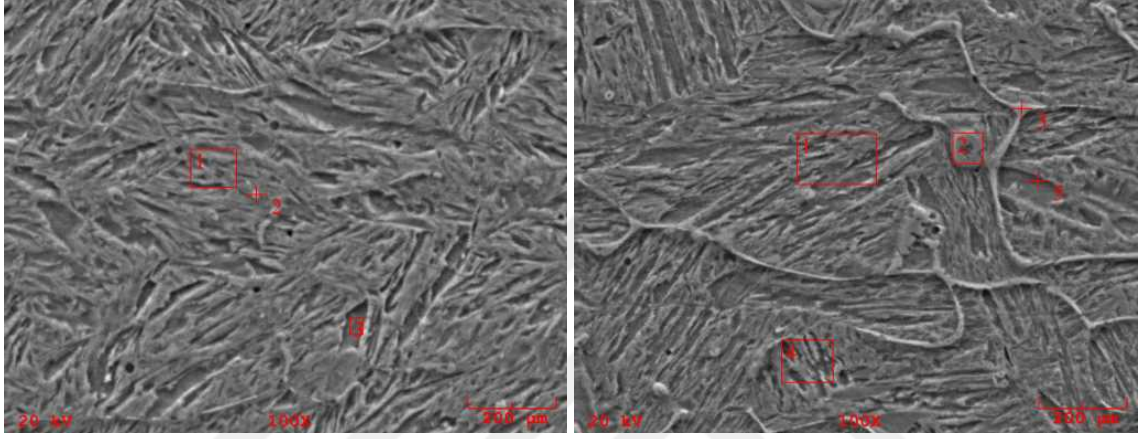
(i) E2 numunesi 500x

(j) E2 numunesi 1000x

Şekil 4.41: E2 numunesi optik inceleme

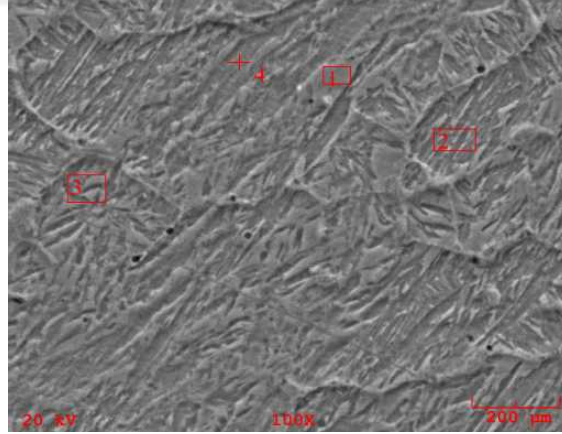
E2 kodlu numune SEM ve EDS analizi

E2 kodlu numune SEM görüntüleri (Şekil 4.42) incelendiğinde yapının üç bölgede de benzer olduğu görülmektedir. EDS analizi ise C bölgesinde A ve B bölgesinden daha fazla Ni olduğunu göstermektedir. Bu bölgede Fe_2Ni oluşumu daha fazla olduğu için bu sonuçlar gerçekleşmiştir. A ve B bölgesindeki yüksek karbon oranı o bölgede karbür oluştuğunu göstermektedir.



(a) E2 SEM 2000x bölge A

(b) E2 SEM 2000x bölge B

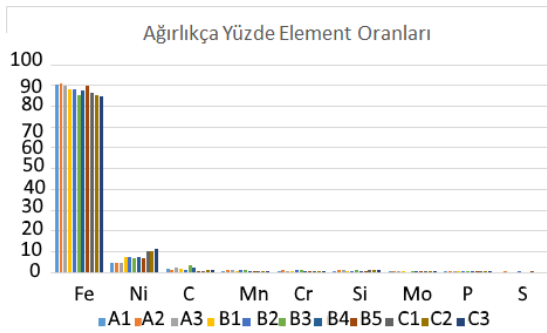


(c) E2 SEM 2000x bölge C

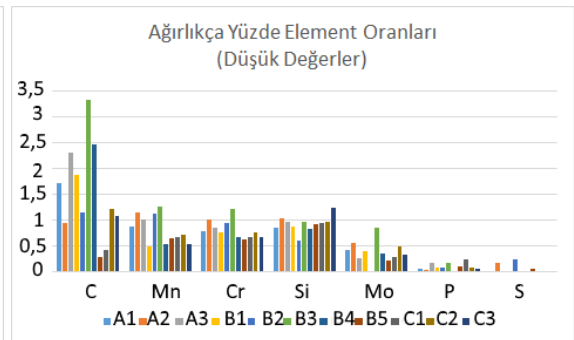
Şekil 4.42: E2 numunesi SEM görüntüleri

Çizelge 4.12: E2 Numunesi EDS Sonuçları

E2								
E	A1	A2	A3	B1	B2	B3	B4	B5
Fe	90.639	90.717	89.656	88.075	88.384	85.234	87.599	90.049
Ni	4.613	4.36	4.734	7.4	7.424	6.92	7.488	6.995
C	1.725	0.949	2.306	1.872	1.156	3.326	2.474	0.295
Mn	0.874	1.146	1.018	0.504	1.133	1.269	0.552	0.662
Cr	0.8	1.009	0.86	0.781	0.943	1.225	0.685	0.64
Si	0.858	1.035	0.975	0.882	0.612	0.98	0.833	0.932
Mo	0.435	0.556	0.271	0.407	0	0.857	0.361	0.23
P	0.056	0.055	0.18	0.079	0.1	0.188	0.008	0.121
S	0	0.174	0	0	0.249	0	0	0.077
E.	C1	C2	C3					
Fe	86.332	85.188	84.753					
Ni	10.368	10.533	11.29					
C	0.436	1.223	1.081					
Mn	0.679	0.727	0.546					
Cr	0.686	0.771	0.673					
Si	0.945	0.973	1.245					
Mo	0.297	0.504	0.343					
P	0.258	0.08	0.069					
S	0	0	0					



(a) E2 EDS elementlerin ağırlıkça oranı

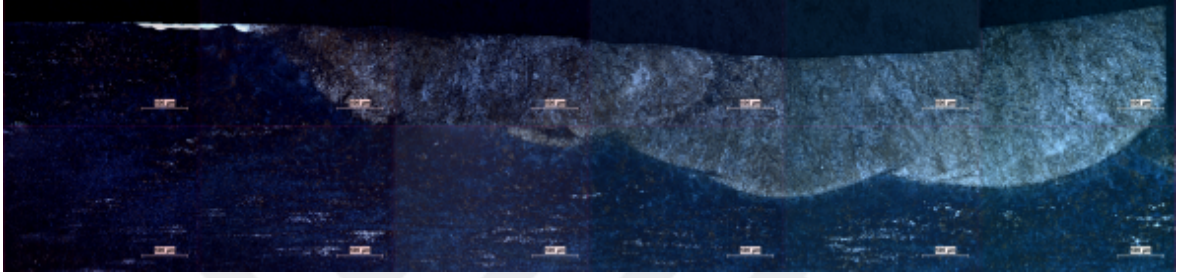


(b) E2 EDS elementlerin oranı düşük olanlar

Şekil 4.43: E2 EDS sonuçları

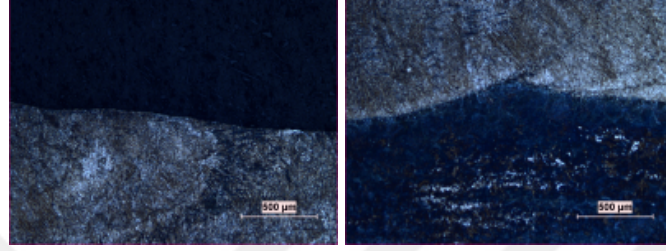
E3 kodlu numunenin mikroyapı analizi

E3 kodlu numunenin mikroyapı analizi Şekil 4.44'da verilmiştir. Yapı incelendiğinde kaplama bölgesinde ergimiş metalin iki fazdan oluştuğu görülmektedir. Oluşan yapının büyük çoğunluğu Nital ile dağlanan bir fazdır. Bu faz yönlenmiştir. Nital ile düşük seviyede dağlanan beyaz kaplamanın sol üstünde kalan bir faz da dikkatli incelemede görülmektedir. Bu dağlanmamış fazların Şekil 4.57'de verilen XRD analizi incelendiğinde Fe-Ni-B olduğu anlaşılmıştır.



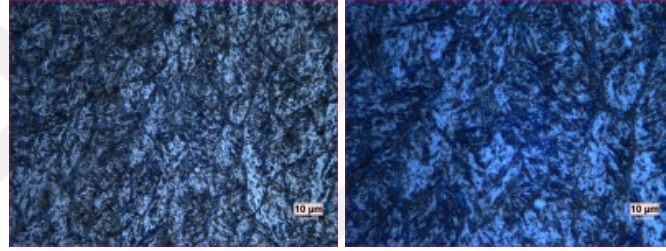
Şekil 4.44: E3 numunesi 50x panoramik görüntüsü, %2 Nital 40s

Ayrıntılı inceleme için ve mikrosertlik testleri için farklı bölgeler daha yüksek büyütmelede incelenmiştir görüntüler Şekil 4.45'de verilmiştir. Kaplamanın genelinde dendritik bir faz görülmektedir. Şekil 4.45a'da gözüken bölgede sertlik 712 VSD ölçülmüştür. Kaplamada genel olarak sertlik 350 VSD üstünde ölçülmüştür. Arada oluşan iğnesel yapının sertliği arttırdığı anlaşılmıştır. EDS ve XRD analizinden bu yapının Fe_2B olduğu tespit edilmiştir.



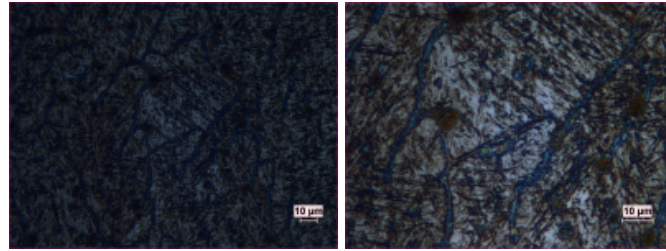
(a) E3 numunesi 50x

(b) E3 numunesi 50x



(c) E3 numunesi 500x

(d) E3 numunesi 1000x



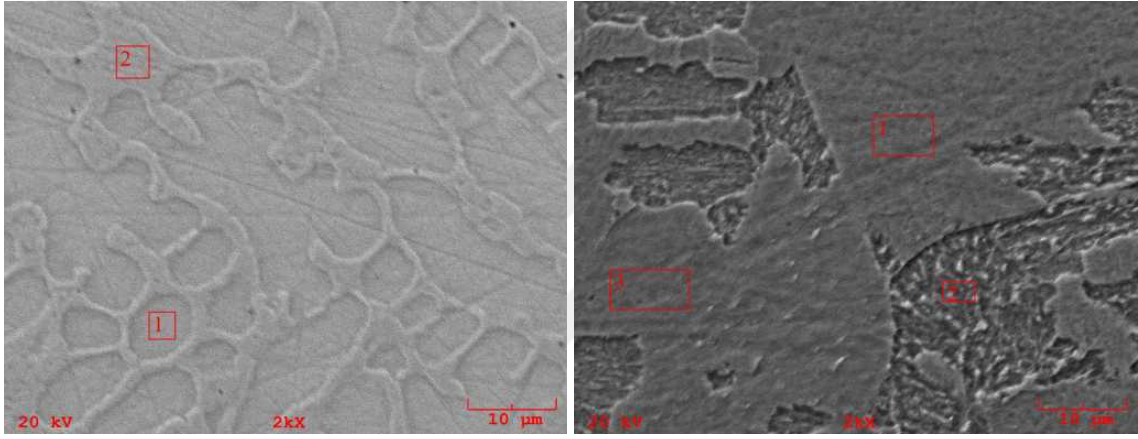
(e) E3 numunesi 500x

(f) E3 numunesi 1000x

Şekil 4.45: E3 numunesi optik inceleme, %2 Nital 40s

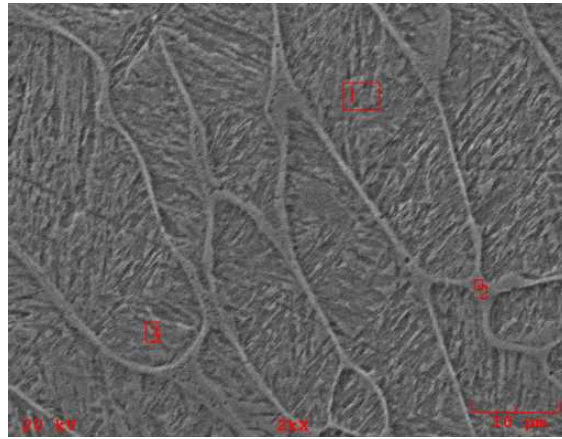
E3 kodlu numune SEM ve EDS Analizi

E3 kodlu numune SEM mikroyapı analizi (Şekil 4.46) incelendiğinde A, B ve C bölgelerinin farklı olduğu görülmektedir. Çizelge 4.13’de verilen EDS analizi incelendiğinde A bölgesinde yüksek oranda Nikel bulunduğu görülmektedir. Kaplamanın katılaşması sırasında bu bölgede yüksek miktarda Nikel içeren alaşımlaroluşmuştur. XRD analizi incelendiğinde bu alaşımın $Fe_3Ni_{20}B_6$ olduğu görülmektedir. Aynı fazın yüksek Nikel içeren C bölgesinde de olduğu SEM görüntüsü ve EDS analizinden görülmektedir. C bölgesinde daha düşük tespit edilen Ni miktarı o bölgede daha yoğun $Fe_{11.5}Ni_{11.5}B$ oluştuğunu göstermektedir. Bu fazın arasında iğne yapılı Fe_2B oluşmuş ve yapıya sertliğini kazandırmıştır.



(a) E3 SEM 2000x bölge A

(b) E3 SEM 2000x bölge B

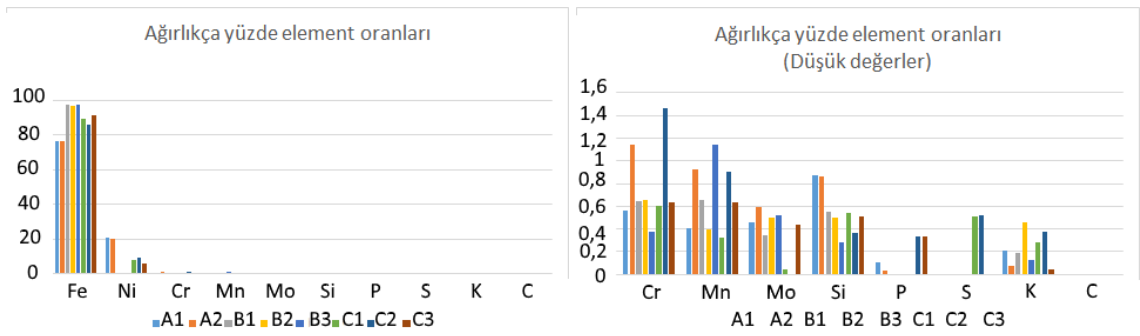


(c) E3 SEM 2000x bölge C

Şekil 4.46: E3 numunesi SEM görüntüleri

Çizelge 4.13: E3 Numunesi EDS Sonuçları

Element	A1	A2	B1	B2	B3	C1	C2	C3
Fe	76.352	76.217	97.272	96.83	97.279	89.706	86.292	91.25
Ni	21.043	20.162	0.344	0.655	0.288	8.002	9.75	6.155
Cr	0.56	1.142	0.645	0.66	0.373	0.602	1.459	0.632
Mn	0.409	0.923	0.655	0.394	1.143	0.327	0.9	0.639
Mo	0.459	0.592	0.341	0.501	0.518	0.041	0	0.433
Si	0.873	0.862	0.552	0.5	0.278	0.537	0.369	0.514
P	0.101	0.031	0	0	0	0	0.331	0.338
S	0	0	0	0	0	0.508	0.52	0
K	0.204	0.07	0.191	0.461	0.121	0.278	0.379	0.039
C	0	0	0	0	0	0	0	0



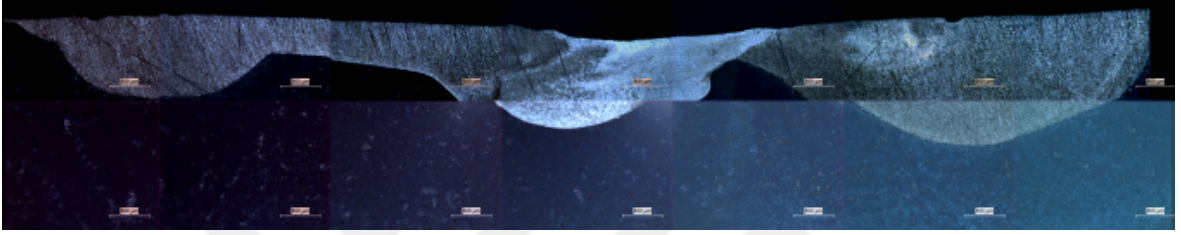
(a) E3 EDS elementlerin ağırlıkça oranı

(b) E3 EDS elementlerin oranı düşük olanlar

Şekil 4.47: E3 EDS sonuçları

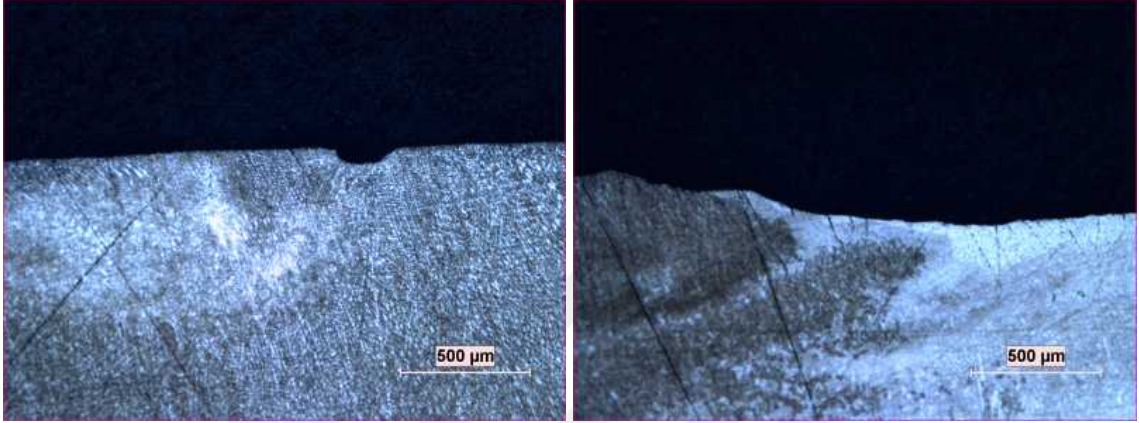
E4 kodlu numunenin mikroyapı analizi

E4 kodlu numunenin mikroyapı analizi Şekil 4.48’de verilmiştir. Yapı incelendiğinde kaplama bölgesinde ergimiş metalin iki fazdan oluştuğu görülmektedir. Kaplamanın ortasında dağlanmamış bir faz mevcuttur. İki kenarda Nital ile dağlanmış bir faz bulunmaktadır. Kaplamada Nital ile dağlanan fazın içinde dağlanmamış bir öbek de görülmektedir. Numunenin XRD analizi (Şekil 4.57) incelendiğinde dağlanmamış fazın $Ni_{26}B_6$ olduğu tespit edilmiştir. Dağlanmış fazın ise Fe-Ni fazı ve borürlerden oluştuğu anlaşılmıştır.



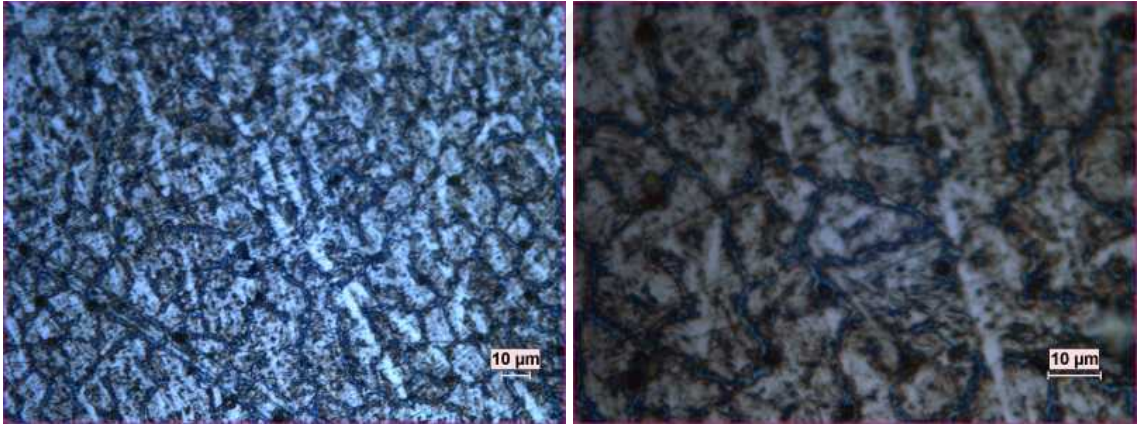
Şekil 4.48: E4 numunesi 50x panoramik görüntüsü, %2 Nital 40s

Ayrıntılı inceleme için ve mikrosertlik testleri için farklı bölgeler daha yüksek büyütme oranlarında incelenmiştir görüntüler Şekil 4.49’de verilmiştir. Dendritik fazların arasında bir başka fazın çekirdeklendiği görülmektedir. Şekil 4.49c ve 4.49d’de içinde başlayan çekirdeklenme görülmektedir. Şekil 4.49a’de 629 VSD sertlik ölçülmüştür. Şekil 4.49b’den sertlik ölçümü alındığında beyaz bölgeden düşük sertlik ölçülürken (275 ve 300 VSD), dağlanmış bölgeye gidildiğinde sertliğin 1306 VSD’ye kadar çıktığı görülmüştür. Dağlanmış bölgede sertlik ortalama 750 VSD ölçülmüştür. Dağlanmış bölgede fazların XRD analizi göz önüne alındığında sert yapılar olan CrB, FeB ve $(Fe_9B)_{0.2}$ olduğu anlaşılmıştır.



(a) E4 numunesi 50x

(b) E4 numunesi 50x



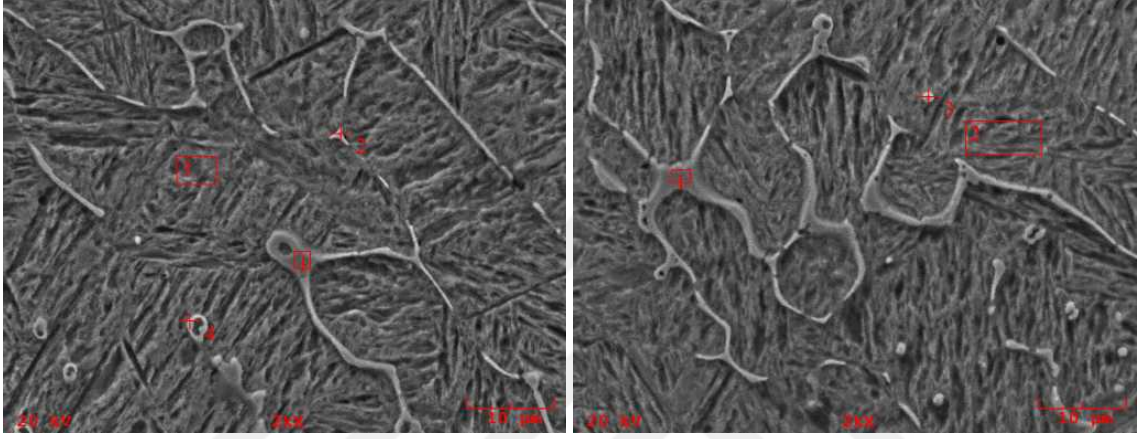
(c) E4 numunesi 500x

(d) E4 numunesi 1000x

Şekil 4.49: E4 numunesi optik inceleme, %2 Nital 40s

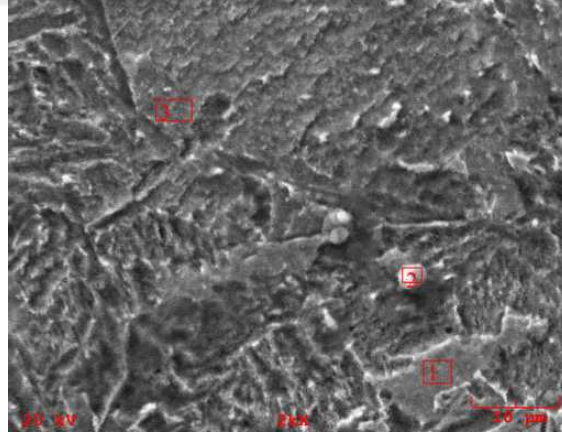
E4 kodlu numunenin SEM ve EDS Analizi

E4 kodlu numunenin SEM mikroyapı görüntüleri (Şekil 4.50) incelendiğinde yapının E3 numunesine benzediği görülmektedir. E3’de görülen $\text{Fe}_3\text{Ni}_{20}\text{B}$ bu numunede oluşmamış olsa da yüksek Ni içeren Ni_{23}B_6 XRD analizinde görülmüştür. Şekil 4.50c incelendiğinde bu bölgede Nikel oranının daha düşük olduğu görülmektedir. XRD analizi ışığında bu yapıların FeB olduğu anlaşılmıştır.



(a) E4 SEM 2000x bölge A

(b) E4 SEM 2000x bölge B

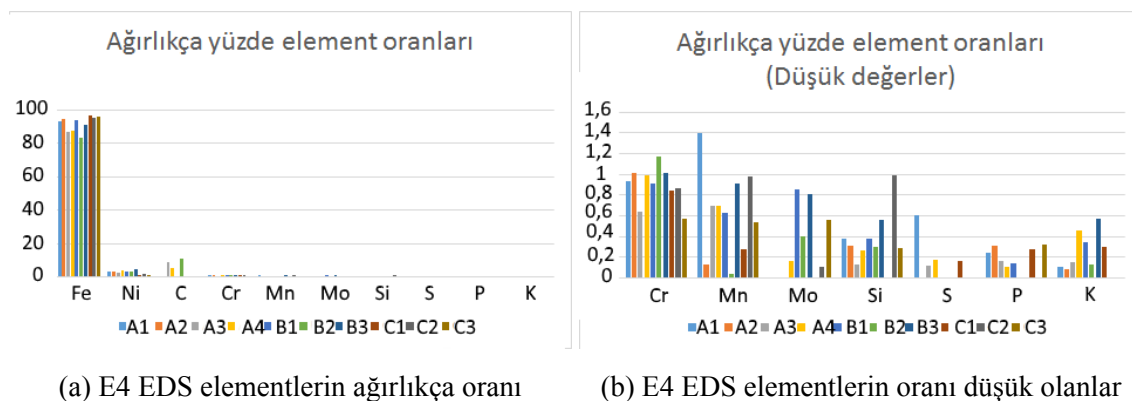


(c) E4 SEM 2000x bölge C

Şekil 4.50: E4 numunesi SEM görüntüleri

Çizelge 4.14: E4 Numunesi EDS Sonuçları

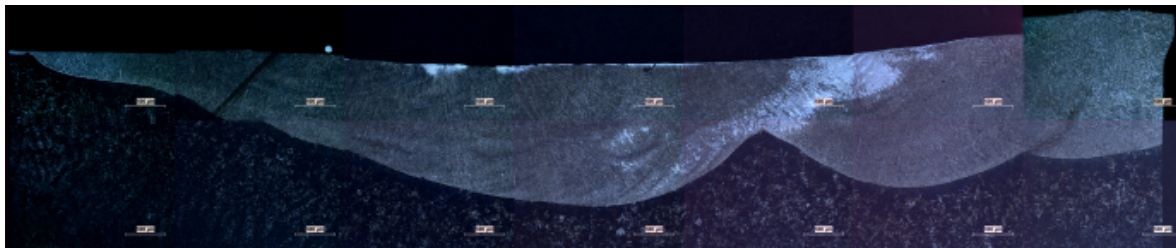
	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	C1	C2	C3
Fe	93.446	94.83	86.723	87.598	93.861	83.726	91.376	96.921	95.13	96.392
Ni	2.895	3.329	2.725	4.15	2.893	3.433	4.774	1.238	1.925	1.334
C	0	0	8.657	5.405	0	10.809	0	0	0	0
Cr	0.931	1.009	0.635	0.988	0.908	1.165	1.011	0.837	0.868	0.57
Mn	1.397	0.131	0.697	0.69	0.63	0.039	0.906	0.272	0.981	0.533
Mo	0	0	0	0.167	0.853	0.399	0.805	0	0.106	0.563
Si	0.379	0.305	0.126	0.27	0.373	0.304	0.554	0	0.99	0.29
S	0.607	0	0.117	0.179	0	0	0	0.162	0	0
P	0.241	0.312	0.164	0.101	0.14	0	0	0.276	0	0.319
K	0.105	0.084	0.155	0.452	0.343	0.125	0.574	0.294	0	0



Şekil 4.51: E4 EDS sonuçları

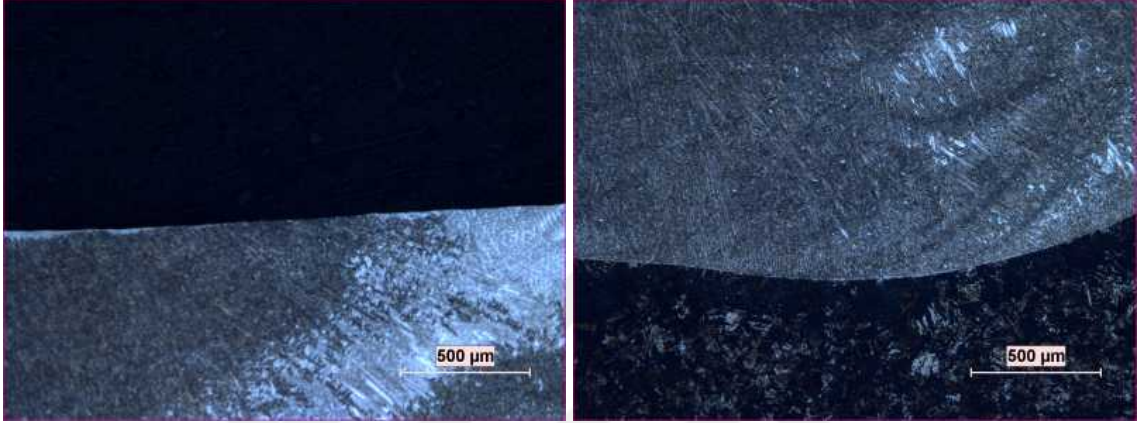
E5 kodlu numunenin mikroyapı analizi

E5 kodlu numunenin mikroyapı analizi Şekil 4.52’de verilmiştir. Yapı incelendiğinde kaplama bölgesinde ergimiş metalin iki fazdan oluştuğu görülmektedir. Kaplamanın ortasında ve üstünde dağlanmamış bir faz mevcuttur. Kaplamanın genelinde Nital ile dağlanmış bir faz bulunmaktadır. Nital ile dağlanan fazın içinde dağlanmamış fazın karıştığı bölgeler de görülmektedir. Numunenin XRD deseni (Şekil 4.57) incelendiğinde dağlanmamış fazın Ni_2B olduğu anlaşılmıştır.



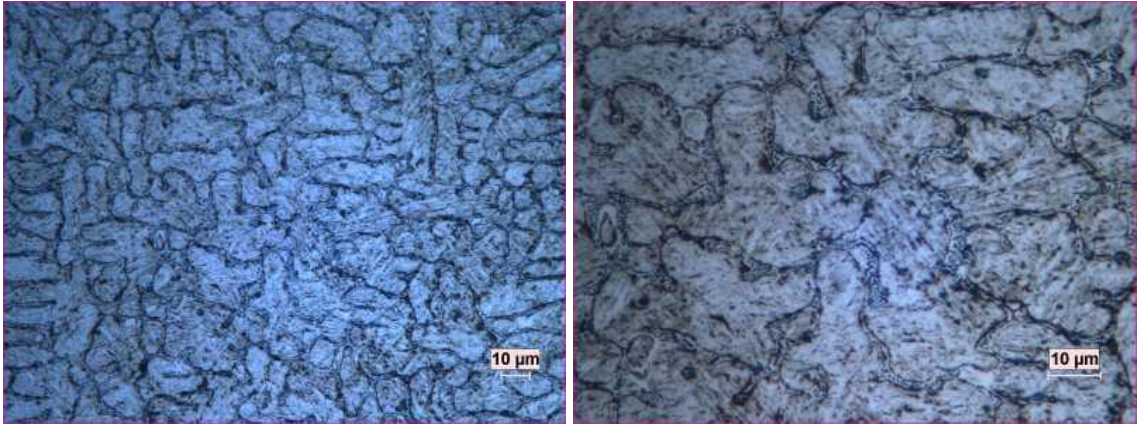
Şekil 4.52: E5 numunesi 50x panoramik görüntüsü, %2 Nital 40s

Ayrıntılı inceleme için farklı bölgelerin daha yüksek büyütmelerde görüntüleri Şekil 4.53’de verilmiştir. Şekiller 4.53a ve 4.53b’de dağlanmış fazına arasına karışmış dağlanmamış faz görülmektedir. Dendritik fazların arasında bir başka fazın çekirdeklendiği görülmektedir. Şekil 4.49c ve 4.49d’de içinde başlayan çekirdeklenme görülmektedir. Şekil 4.53a’da görülen beyaz bölgenin sertlik testi yapıldığında orada sertliğin 354 VSD olduğu görülmüştür. Kaplamanın diğer bölgelerinde Nital ile dağlanmış fazda yapılan sertlik ölçümlerinde ortalama 950 VSD sertlik görülmüştür. Nital ile dağlanan fazın XRD sonuçları göz önüne alındığında $(Fe_9B)_{0.2}$ ile CrB’den oluştuğu anlaşılmıştır. İkisi de sert olan bu alaşımlar kaplamanın sertliğini sağlamıştır.



(a) E5 numunesi 50x

(b) E4 numunesi 50x



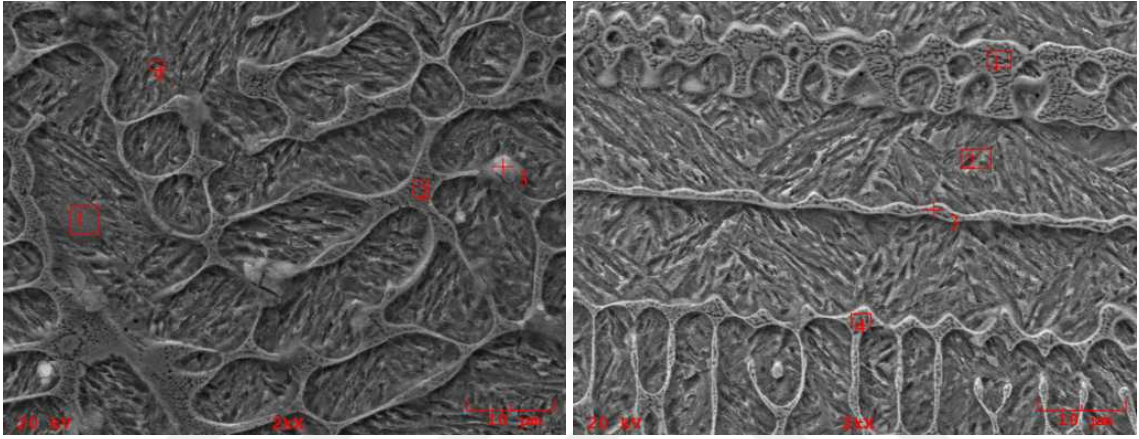
(c) E5 numunesi 500x

(d) E5 numunesi 1000x

Şekil 4.53: E5 numunesi optik inceleme, %2 Nital 40s

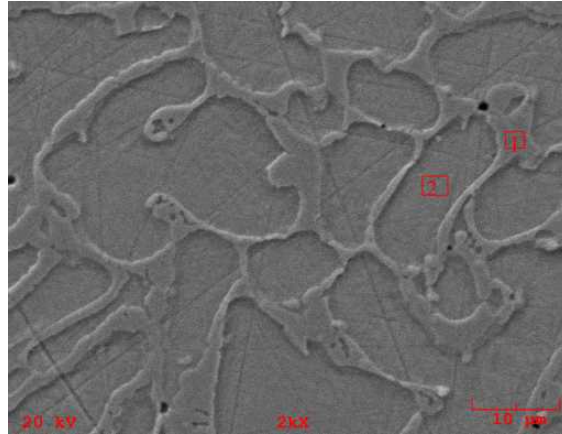
E5 kodlu numunenin SEM ve EDS analizi

E5 kodlu numunenin mikroyapı SEM analizi (Şekil 4.54) incelendiğinde soğuma hızına bağlı olarak ilk oluşan dendritik fazın içinde başka bir fazın oluştuğu görülmektedir. Bu fazın ne olduğu aşağıda ayrıntılı SEM görüntüleri ile tartışılmıştır. EDS analizi incelendiğinde yüksek Nikel içeren bölgelerin yoğun olduğu gözlenmektedir. Şekil 4.54a'deki A3 noktasında yüksek Cr tespit edilmiştir. Oluşan yapının CrB olduğunu bu sonuç desteklemektedir.



(a) E5 SEM 2000x bölge A

(b) E5 SEM 2000x bölge B

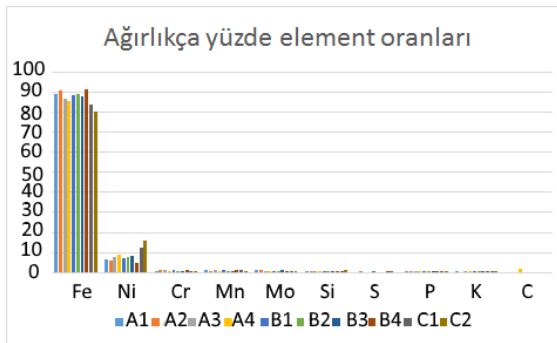


(c) E5 SEM 2000x bölge C

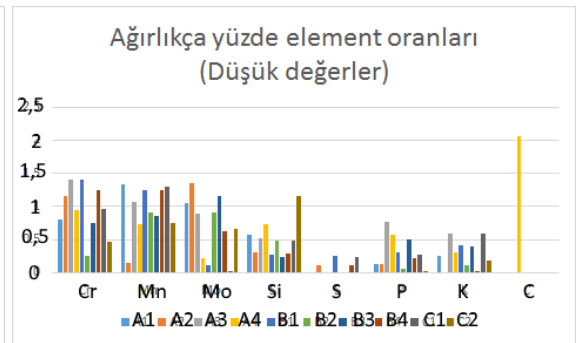
Şekil 4.54: E5 numunesi SEM görüntüleri

Çizelge 4.15: E5 Numunesi EDS Sonuçları

	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	B4	C1	C2
C	0	0	0	2.063	0	0	0	0	0	0
Si	0.57	0.304	0.512	0.738	0.278	0.478	0.228	0.285	0.484	1.15
P	0.138	0.136	0.765	0.577	0.302	0.068	0.494	0.215	0.274	0.023
S	0	0.106	0	0	0.255	0	0	0.114	0.234	0
K	0.252	0	0.587	0.299	0.417	0.108	0.398	0.024	0.598	0.183
Cr	0.802	1.158	1.407	0.936	1.399	0.251	0.744	1.239	0.963	0.458
Mn	1.337	0.141	1.066	0.733	1.238	0.914	0.864	1.242	1.296	0.75
Fe	89.24	90.759	86.953	85.647	88.778	89.416	88.008	91.45	83.97	80.554
Ni	6.615	6.045	7.811	8.796	7.224	7.859	8.115	4.811	12.163	16.218
Mo	1.046	1.351	0.899	0.212	0.108	0.906	1.148	0.621	0.018	0.664



(a) E5 EDS elementlerin ağırlıkça oranı

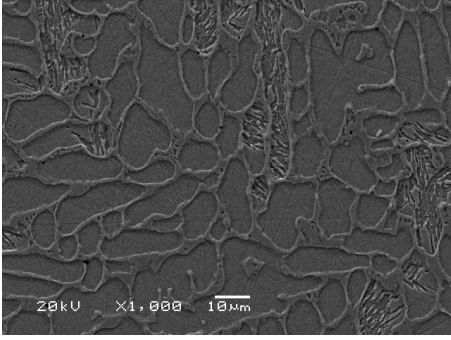


(b) E5 EDS elementlerin oranı düşük olanlar

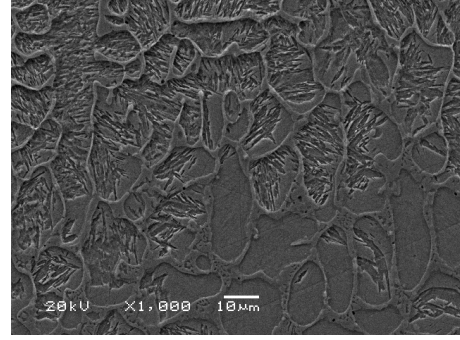
Şekil 4.55: E5 EDS sonuçları

E5 numunesi yüksek B₄C içeren kaplama malzemesi sayesinde kaplamada oluşan tüm yapıların aynı numunede görülebilmeye imkân vermiştir. Şekil 4.56'de yüzeyden başlayarak kaplama içine doğru 1000x büyütmede SEM görüntüleri verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde Şekiller 4.56b ve 4.56b'de faz değişimi net olarak görülmektedir. Yüzeyde oluşan ve Şekil4.56a'da gözüken fazın arasında iğne yapılı yeni bir faz oluşmaya başlamıştır. Şekil 4.56c'de iğne yapılı ince taneli bu faz ilk fazın içindeki boşlukları tamamen doldurmuştur. Daha içeri gidildiğinde bu fazdan daha iri taneli başka bir fazın oluşmaya başladığı Şekil 4.56d'de görülmektedir. Şekil 4.54c'de ilk fazın oluştuğu bölgeden alınan EDS analizinde ilk oluşan fazın yüksek Cr'lu olduğu görülmektedir.

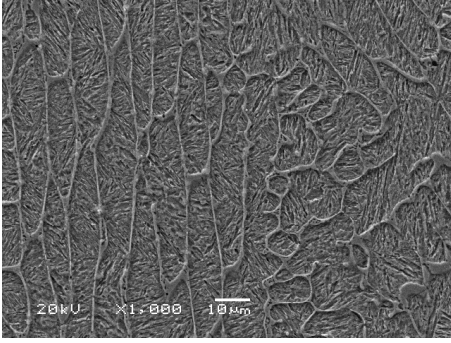




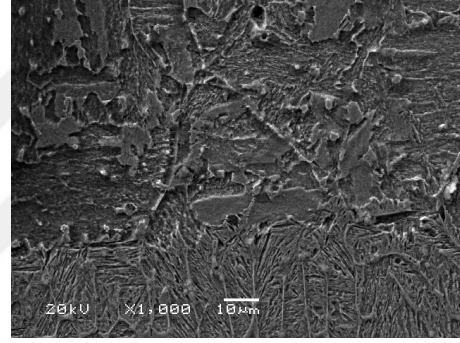
(a)



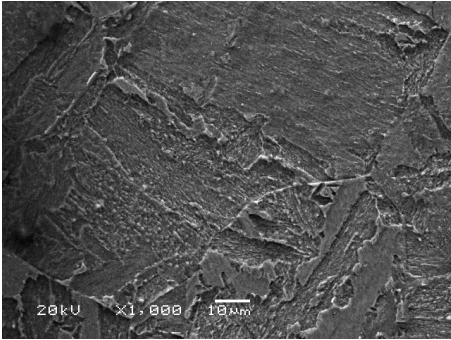
(b)



(c)

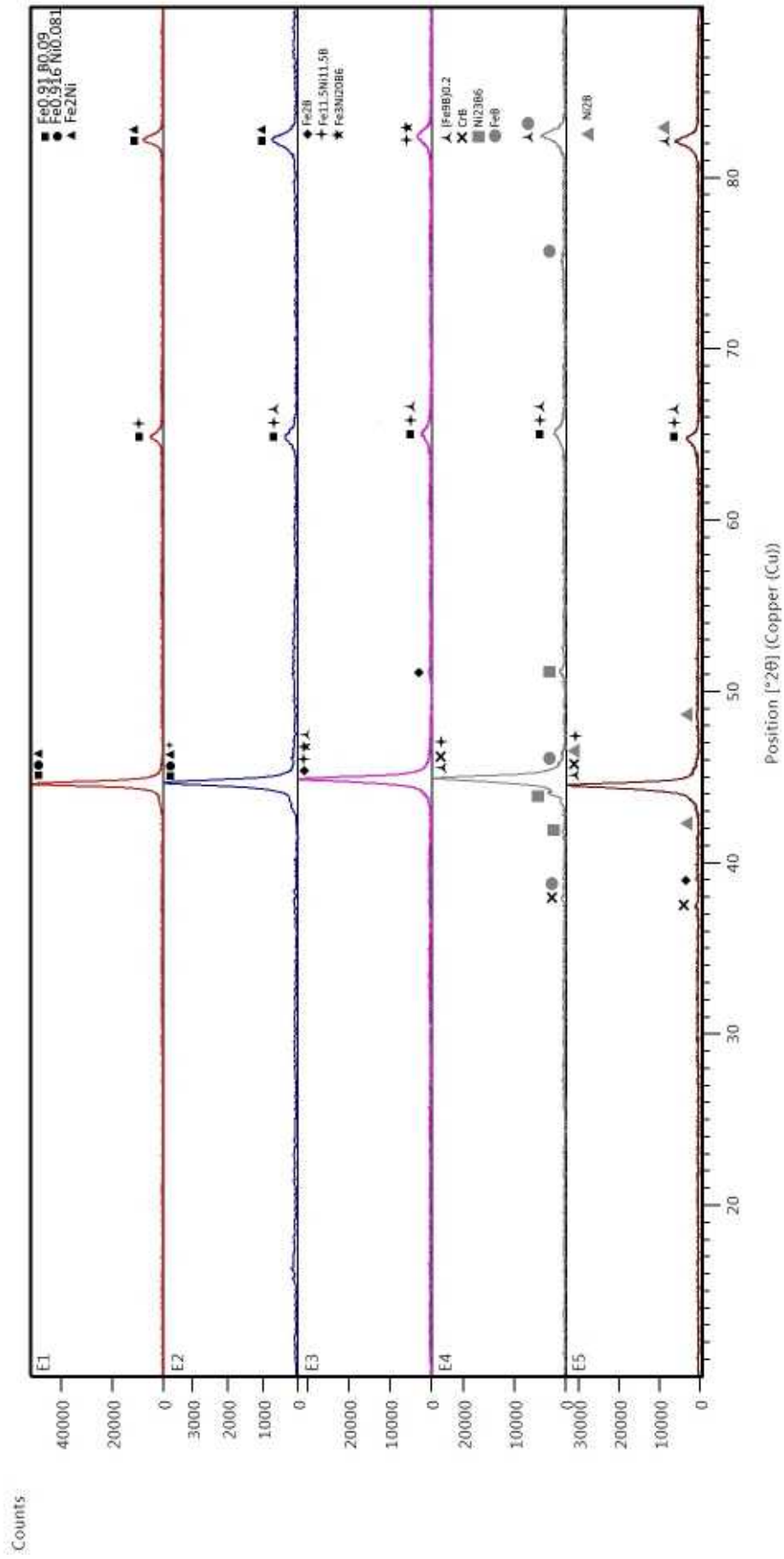


(d)



(e)

Şekil 4.56: Yüzeyden kaplama içine E5 SEM görüntüleri



Şekil 4.57: Saf B₄C içeren numunelerin karşılaştırılması

4.2 Aşınma Deneyi Sonuçları

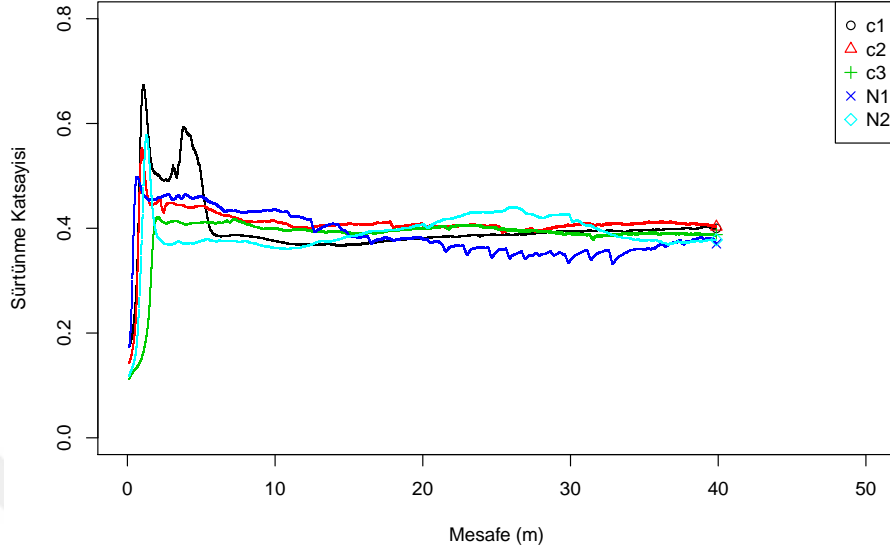
Aşınma testleri ball-on-disk geometrisinde kaynaklı bölgeler üzerinde yapılmıştır. Numuneler yüzey pürüzlülük değerleri $R_a = 0,01 \mu\text{m}$ olacak şekilde parlatılmıştır. Tüm deneyler 3N yükte, 3mm'lik WC bilyanın yüzeye bastırılmasıyla yapılmıştır. Deneylerde 2,5 cm/s hızda, 40m mesafede, 6 mm çaplı bir yol izlenmiştir. Tüm analizler ham veriden tez sırasında geliştirilen R dili ile yazılmış *trib* (AY, 2015) paketi ile yapılmıştır.

4.2.1 Sürtünme ve aşınma karakteristikleri

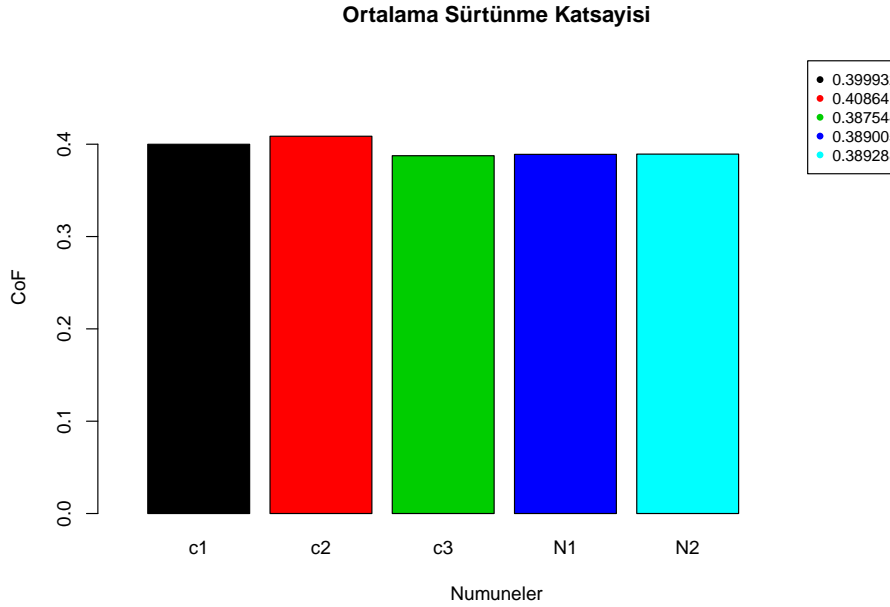
Sürtünme katsayısı mesafe grafiklerini oluşturmak için test cihazından alınan ham veri trib paketi ile 100 adımlı hareketli ortalama ile filtrelendikten sonra grafiği çıkartılmıştır. Numuneler beşli gruplar halinde değerlendirilmiştir. İlk beşli grup elde karıştırılan Nikel ve Ekabor IITMkarışımı yapılan grup olan N1, C1, N2, C2 ve C3 grubudur. Bu grubun sürtünme katsayısı grafikleri Şekil 4.58'de verilmiştir. Test boyunca hesaplanan ortalama sürtünme katsayıları da Şekil 4.59'de verilmiştir.

İkinci beşli grup, değirmende karıştırılan Nikel ve Ekabor IITMkarışımı ile PTA uygulanmış olan C4, C5, D1, D2 ve D3 grubudur. Şekil 4.61'de bu beş numunenin toplu sürtünme katsayıları mesafe grafiği verilmiştir. Test boyunca hesaplanan ortalama sürtünme katsayıları da Şekil 4.62'de verilmiştir.

Üçüncü beşli grup, değirmende karıştırılan Nikel ve saf B₄C karışımı PTA uygulanmış olan E1, E2, E3, E4 ve E5 grubudur. Şekil 4.65'de bu beş numunenin toplu sürtünme katsayıları mesafe grafiği verilmiştir. Test boyunca hesaplanan ortalama sürtünme katsayıları da Şekil 4.66'da verilmiştir.

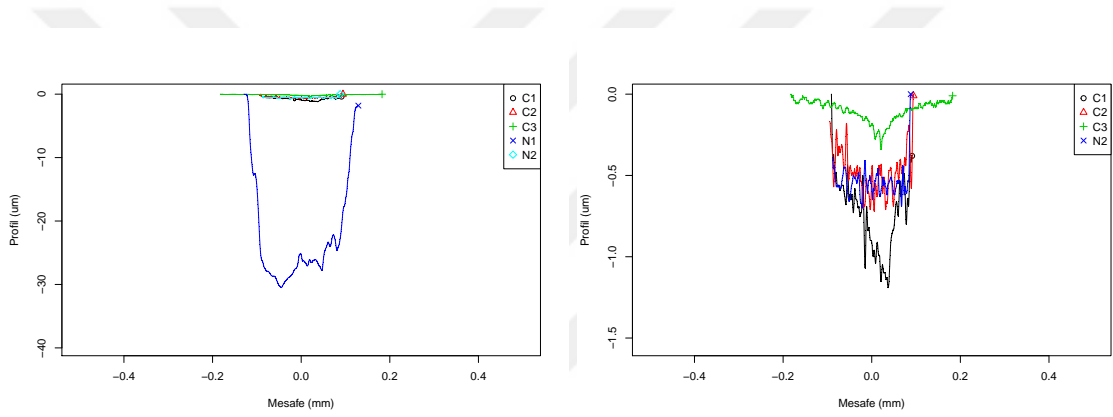


Şekil 4.58: Elde Nikel ile karıştırılmış Ekabor II içeren kaplama malzemesi PTA ile yüzeye uygulanmış numunelerin ortalama sürtünme katsayıları



Şekil 4.59: Elde Nikel ile karıştırılmış Ekabor II içeren kaplama malzemesi PTA ile yüzeye uygulanmış numunelerin Toplu Sürtünme Katsayısı Mesafe Grafiği

Şekil 4.58 incelendiğinde, C1 numunesinde 8. metreye ulaşan diğer numunelerde ilk 2 metrede stabil duruma geçen sürtünme katsayısı görülmektedir. Sürtünme katsayısının başlangıçta yükselmesi, ardından düşmesi bileye ile numune arasında sürtünmeyi azaltan bir ara yüzey oluşmasına bağlıdır. C1 numunesinin mikroyapı analizinde görüldüğü üzere yüzeyde homojen dağılım olmaması sürtünme katsayısındaki artışa sebep olmuştur. N1 numunesi sürtünme katsayısı incelendiğinde benzer mikroyapıya ve aynı fazlara sahip olmasına rağmen 20'inci metreden itibaren kaplamadaki sert fazların kırılmasından sonra ortaya çıkan sert parçacıkların etkisi ile testere dişi benzeri bir grafik gösterdiği görülmektedir. Ortalama sürtünme katsayısı en iyi olan C3 numunesinde bu iyileşmenin sebebi içerdiği sert $(Fe_9B)_{0.2}$ fazıdır. Bu faz sayesinde yüzeydeki sert katman tepe yapmadan dengeli konuma geçmeyi sağlamış ve sürtünme katsayısını düşürmüştür.

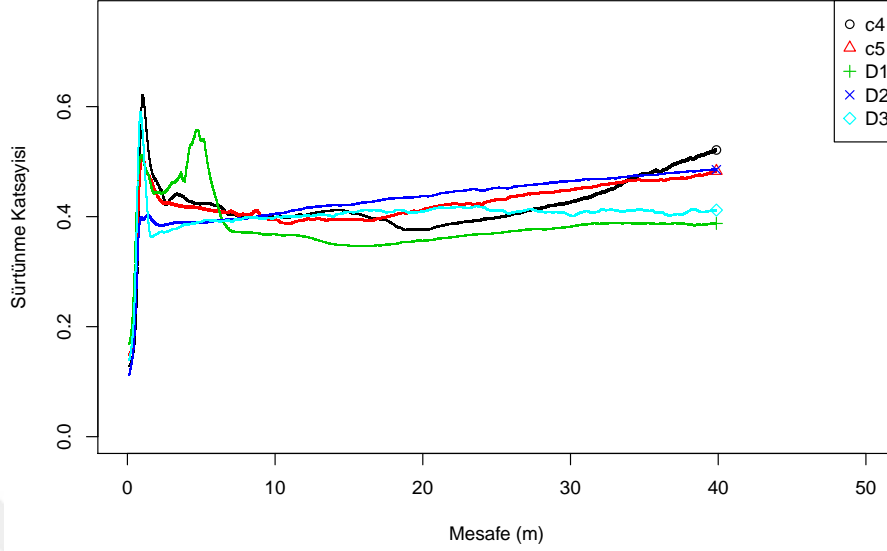


(a) Set1 Toplu Aşınma Profili

(b) Set1 Toplu Aşınma Profili, N1 çıkartılmış

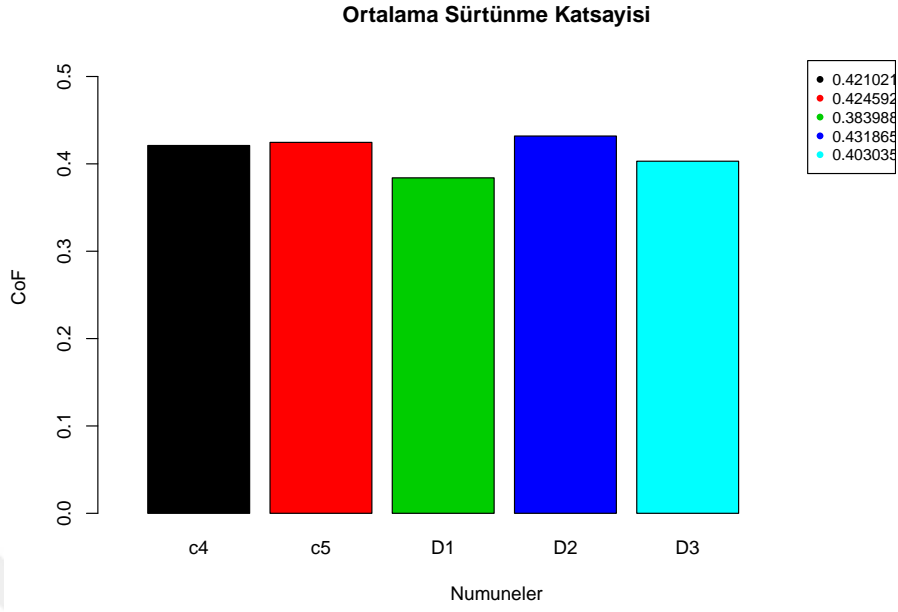
Şekil 4.60: Elde Nikel ile Karıştırılmış Ekabor IITM içeren kaplama malzemesi PTA ile yüzeye uygulanmış numunelerin Aşınma profilleri

Numunelerin aşınma profilleri incelendiğinde, Şekil 4.60'de görüldüğü üzere N1 numunesinin sürtünme katsayısı mesafe grafiğinde de görülen sert parçacıkların sürtünme katsayısını artırma özelliği aşınma izinin derinleşmesine ve genişlemesine sebep olmuştur.

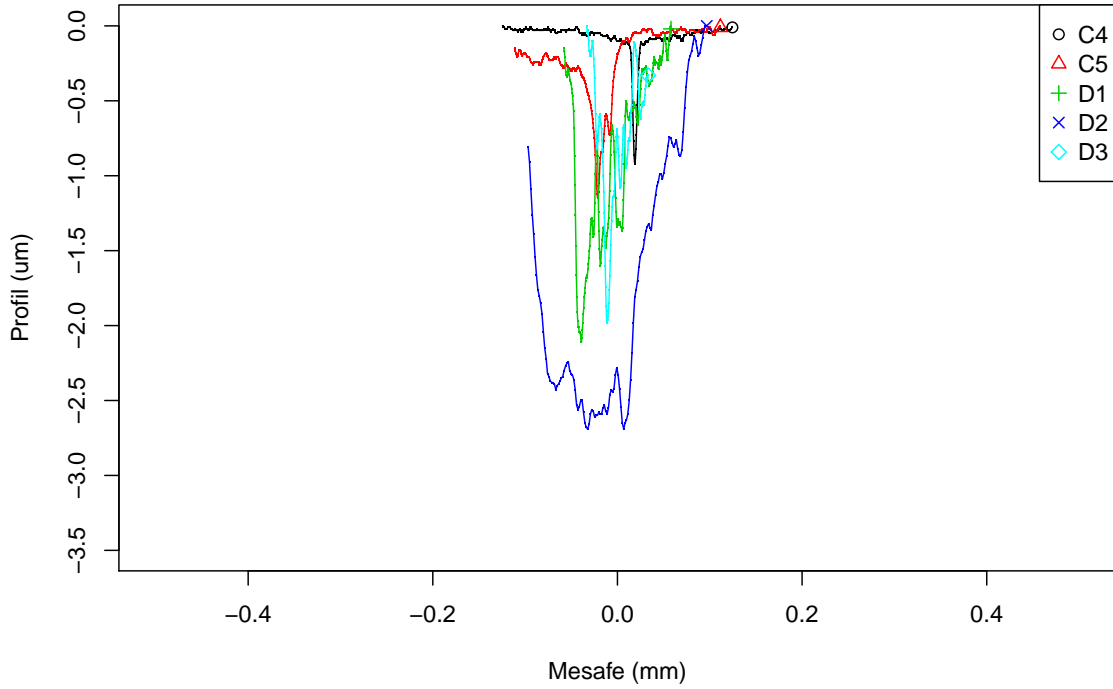


Şekil 4.61: Değirmende Nikel ile karıştırılmış Ekabor içeren kaplama malzemesi PTA ile yüzeye uygulanmış numunelerin ortalama sürtünme katsayıları

Şekil 4.61 incelendiğinde D2 numunesinin diğer numunelerden farklı olarak kısa süre dengeli durumda kaldıktan sonra, 10'uncu metrenin ardından sürtünme katsayısının arttığı görülmektedir. Aşınma izi SEM ve EDS analizi incelendiğinde bunun sebebinin adhezyon aşınması ile WC bilye üzerinden kopan parçaların yapıya üçüncül kütle olarak girmesi ve abresiv aşınmayı arttırması olduğu görülmüştür. D2 numunesindeki başka numunelerde görülmeyen $Fe_{11.5}Ni_{11.5}B_6$ fazı oluşmuş ve adhezyonun yükselmesine sebep olmuş ve sürtünme katsayısını arttırmıştır. D3 numunesi ise ani bir tepe yaptıktan sonra hızla dengeli konuma gelmiş ve sürtünme katsayısı diğer numunelerden düşük seyretmiştir. D3 numunesinin mikroyapı analizi incelendiğinde bu numunede Cr_4B fazı oluştuğu görülmektedir. Bu sert faz sürtünmeyi ve aşınmayı azaltmıştır. D2 numunesinde başlangıçta sürtünme katsayısında bir artış ardından azalış ve tekrar bir artış sonrası düşüş görülmektedir. Bunun sebebi sürtünmeyi azaltan oksitlerin oluşması onların kırılması ve daha dayanıklı başka oksit yapıların oluşmasıdır. Numunenin aşınma izinin SEM görüntüsü ve EDS analizinden anlaşıldığı üzere bu fazların kırılmaya sebep olması ve üçüncü kütle olarak aşınmayı arttırması, Şekil 4.63 incelendiğinde D2 numunesinin aşınma izinin de derinleşmesine sebep olmuştur.



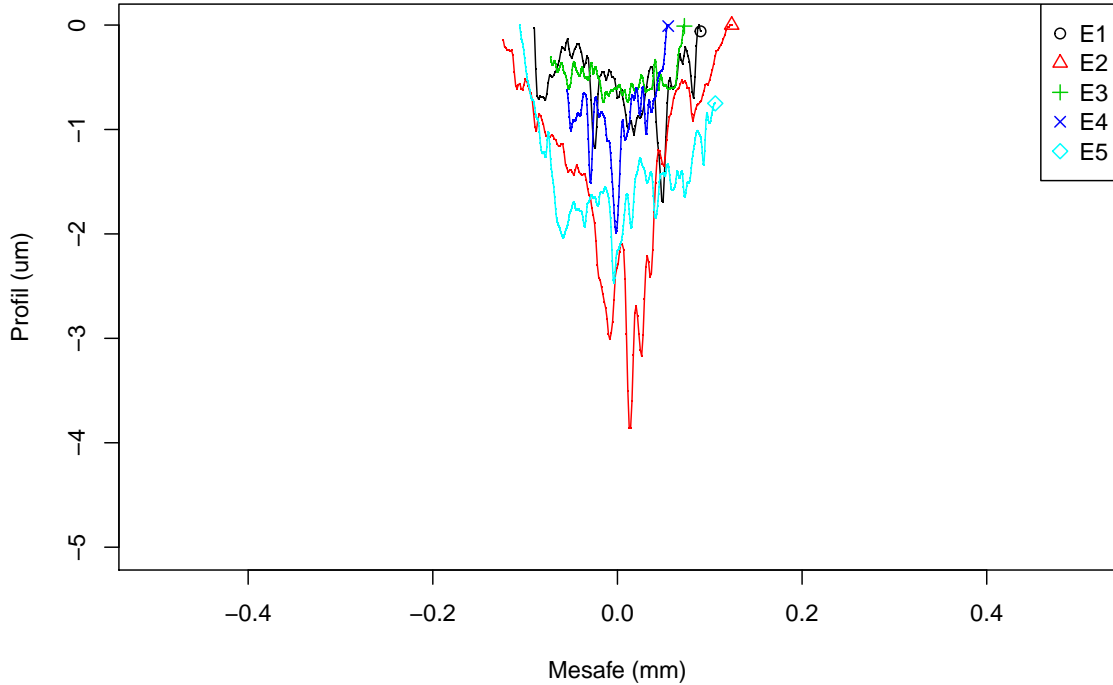
Şekil 4.62: Değirmende Nikel ile karıştırılmış Ekabor II içeren kaplama malzemesi PTA ile yüzeye uygulanmış numunelerin Toplu Sürtünme Katsayısı Mesafe Grafiği



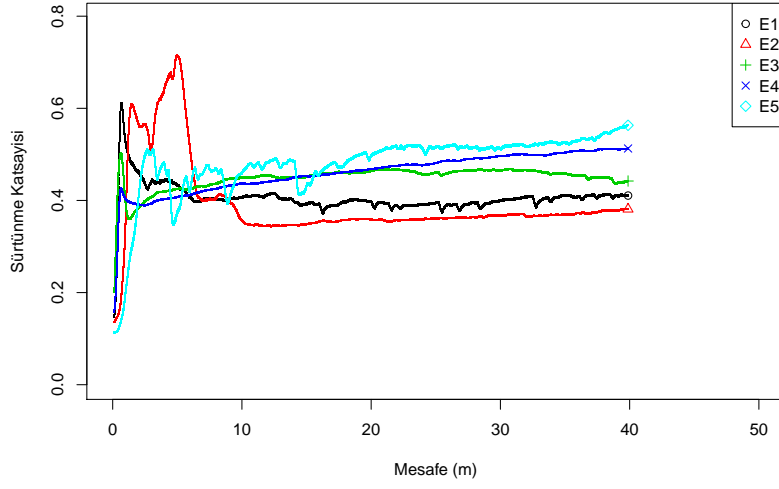
Şekil 4.63: Değirmende Nikel ile Karıştırılmış Ekabor IITM içeren kaplama malzemesi PTA ile yüzeye uygulanmış numunelerin Aşınma profilleri

Şekil 4.65 incelendiğinde E2 numunesinde D2 numunesinde gözlenen önce azalıp sonra tekrar arttıktan sonra dengelenen sürtünme katsayısı görülmüştür. Başlangıçtaki bu ilerleyişin sebebi sürtünmeyi azaltan oksitlerin oluşması ve ardından kırılmasıdır. E5 numunesi incelendiğinde testere dişine benzer bir grafikte ilk 20 metrenin devam ettiğini sonra da 35'inci metre civarı sürtünme katsayısının tekrar yükseldiği görülmektedir. Bu yapı oksitlerin sürtünmeyi azalttığı ancak ardından kırıldığını göstermektedir. Bu numunenin mikroyapı analizi incelendiğinde içeriğinde yüksek oranda Fe, Cr ve Ni borürler içerdiği görülmüştür. Bu sert fazlar testin başında kırılmış ve ardından geçici bir sürtünme azalmasına sebep olsalar da SEM görüntüleri ve EDS analizi göstermiştir ki sürtünme ve aşınmanın artmasına sebep olmuşlardır.

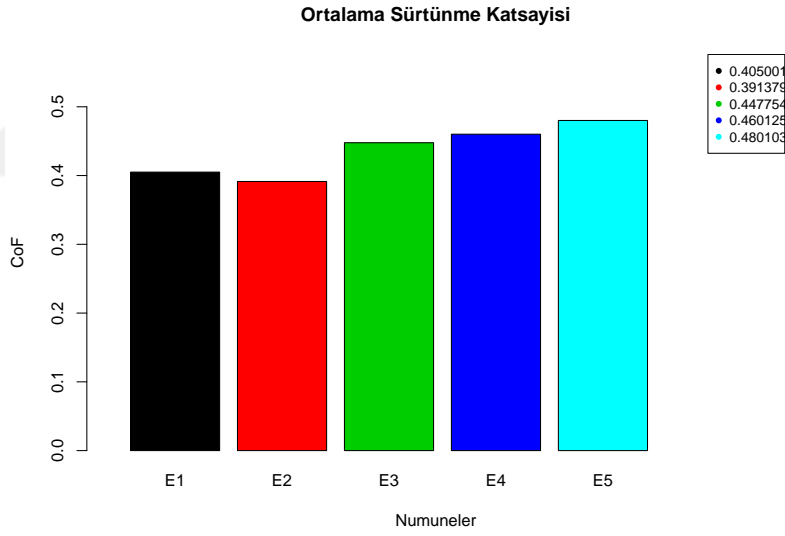
Şekil 4.64 incelendiğinde en derin aşınma izinin E2 numunesinde olduğu görülmektedir. Yukarıda da değinildiği üzere kırılğan Fe_2Ni fazının varlığı aşınma karakteristiklerini kötü yönde etkilemiştir. İkinci en derin iz olan E5 numunesinin iz derinliğinin sebebi ise yapısında bulunan sert fazlardır.



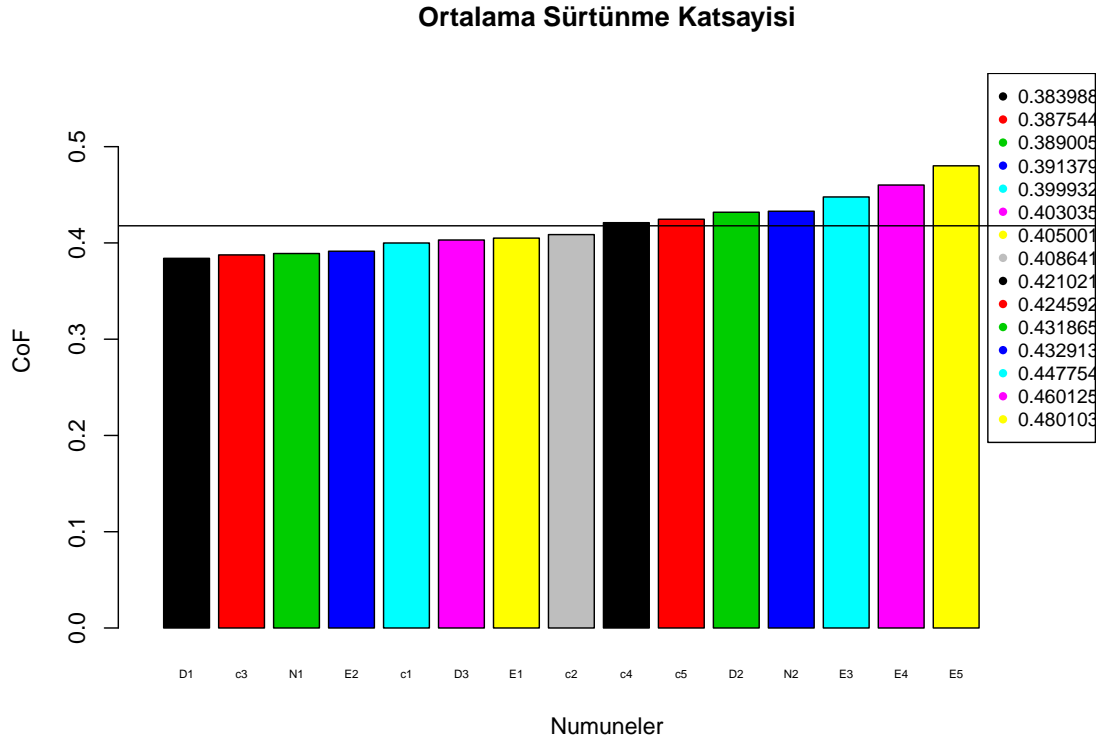
Şekil 4.64: Saf B_4C ile Ni içeren kaplama malzemesi PTA ile yüzeye uygulanmış numunelerin Aşınma profilleri



Şekil 4.65: Saf B_4C ile Ni içeren kaplama malzemesi PTA ile yüzeye uygulanmış numunelerin Toplu Sürtünme Katsayısı Mesafe Grafiği

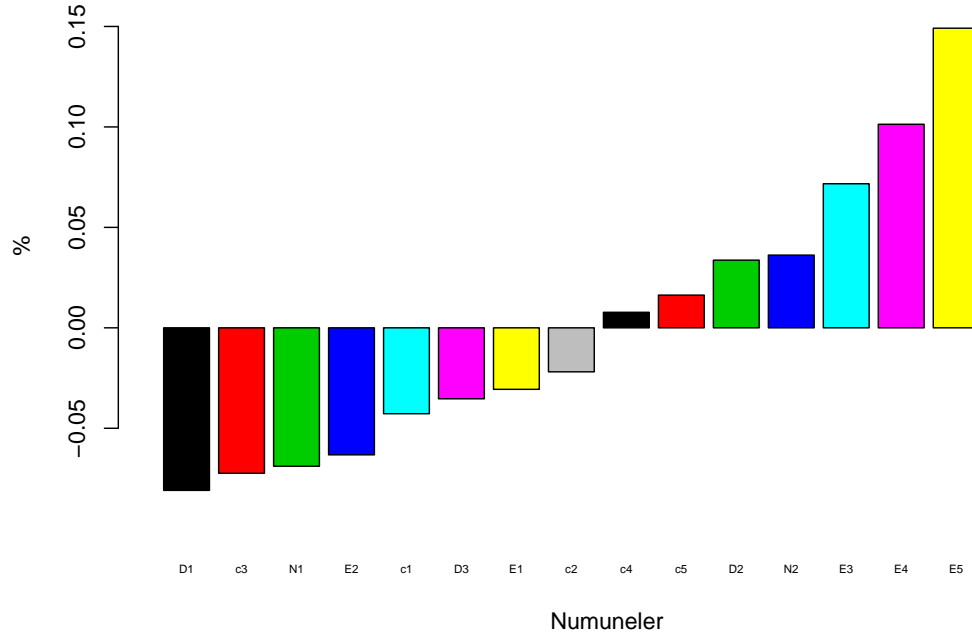


Şekil 4.66: Saf B_4C ile Ni içeren kaplama malzemesi PTA ile yüzeye uygulanmış numunelerin ortalama sürtünme katsayıları



(a) Tüm Numuneler Ortalama Sürtünme Katsayıları

Sürtünme Katsayılarının Toplam ortalamadan yüzdellik farkı



(b) Tüm Numuneler, Ortalama Sürtünme Katsayılarının toplam ortalama katsayıdan yüzdellik farkı

Şekil 4.67: Sürtünme katsayısı karşılaştırmaları

Aşınma test sonuçlarının incelenmesi için sürtünme katsayısının yüzdelik değişimi (Şekil 4.67b), Aşınma izi Hacmi ve Karışım Oranı (şekil 4.69a) ve Ortalama Sürtünme Katsayısı ve Karışım Oranı (Şekil 4.69b) grafikleri oluşturulmuştur. Ortalama sürtünme katsayısındaki değişim %30 gibi büyük bir yelpazede gözlenmiştir.

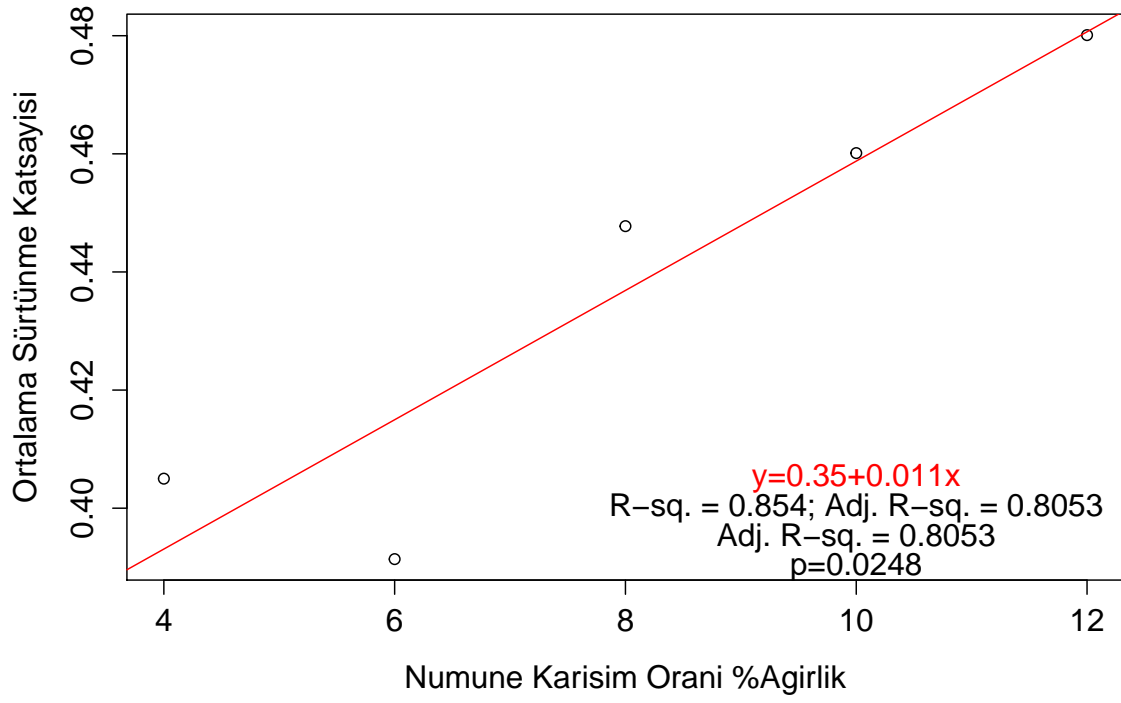
Sonuçların daha iyi anlaşılabilmesi için oluşturulan toplu grafiklerde, tekrar edilmesine rağmen düşük homojenlikten dolayı N1 numunesinin aşınmasının çok yüksek gözleendiği için çıkartılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde aynı oranlarda Ekabor II içeren numunelerde bile özellikle aşınma hacimlerinde farklı sonuçlar alındığı gözlenmiştir. %6 Ekabor II içeren C5 ve C1 ile %6 B₄C içeren E2 numunelerinin karşılaştırılmasında elde hazırlanan C1 kodlu numenin daha yüksek aşınmaya sahip olduğu E2'nin ise en yüksek aşınma oranına sahip olduğu görülmektedir. Aynı numunelerin sürtünme katsayıları incelendiğinde E2 ve C1 kodlu numenin yaklaşık aynı sürtünme katsayısına sahip oldukları görülmektedir. %8 ve %10 Ekabor II içeren numunelere gelindiğinde elde hazırlananların daha düşük aşınma hacmine sahip olduğu görülmektedir. Bu numunelerin sürtünme katsayıları incelendiğinde elde hazırlanan numunelerin daha düşük sürtünme katsayısına sahip olduğu görülmektedir. %8 ve %10 B₄C içeren numunelerin aşınma hacimleri Ekabor II içeren numunelerden daha iyi çıksa da sürtünme katsayıları daha yüksek çıkmıştır. Bunun sebebi Ekabor II'nin içindeki malzemelerin daha sert yüzey elde edilmesine katkı göstermeleri ancak bu yüzeylerin abrasiv aşınmayı arttırıcı, üçüncü kütle oluşturan, kopmalara dayanıklı olmamasıdır.

B₄C içeren numuneler incelendiğinde artan B₄C oranının sürtünme katsayısında bir artışa sebep olduğu görülmektedir. Bu sonuçlar istatistiksel olarak incelendiğinde bir doğrunun yerleştirilebildiği bulunmuştur (Şekil 4.68). Bulunan doğru $y = 0.35 + 0.011x$ analiz edildiğinde $p = 0,0248$ değeri ile uygun değerler vermiştir.

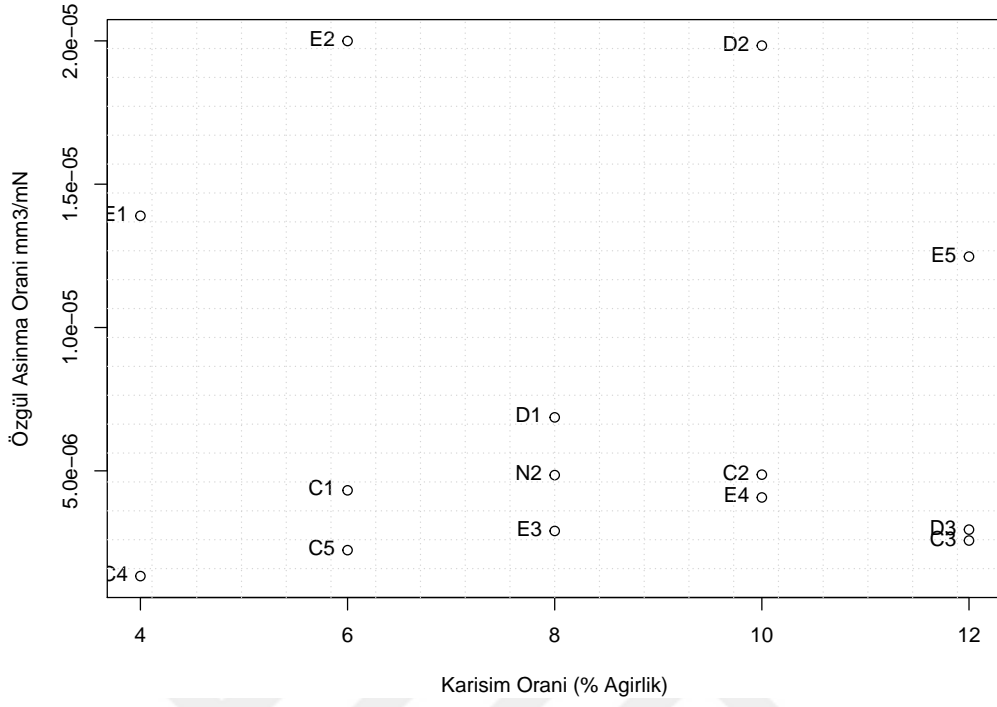
Ekabor II kullanılan numuneler için benzer bir çalışma değerlere polinom oturtmak mümkün olmadığından yapılamamıştır.

Gerçekleşen aşınma ve sürtünmeyi daha iyi inceleyebilmek için Sürtünme Katsayısı ve Aşınma Hacmi grafiği (Şekil 4.70a) ve tüm verinin 3B grafiği (Şekil 4.70b) oluşturulmuştur. Bu grafikler incelendiğinde E2 (%6 B₄C) ve D2'nin (%10 Ekabor II) çıkartılması halinde düşük aşınma hacmi olduğu görülmektedir.

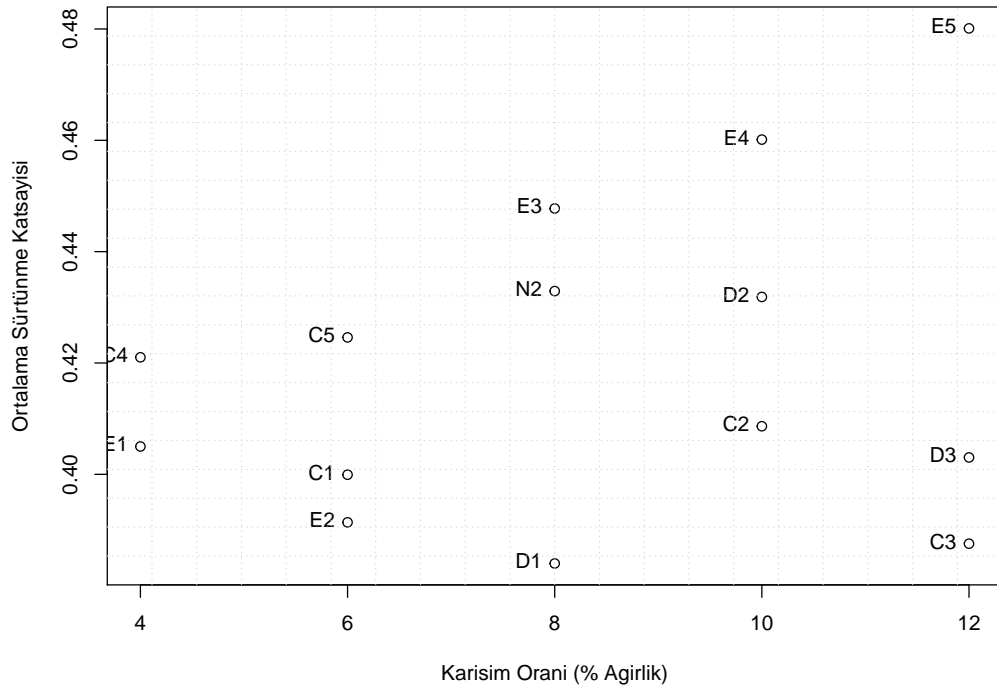
Sonuçlar sadece aşınma testine göre incelendiğinde Şekil 4.71'de de görüldüğü üzere en iyi sonuçlar C3, D3 kodlu numunelerde elde edilmiştir. Bu sonuçlara göre karışımdaki %12 Ekabor II oranıyla en iyi sonuç elde edilmiştir.



Şekil 4.68: Karışım oranının Sürtünme Katsayısına etkisi

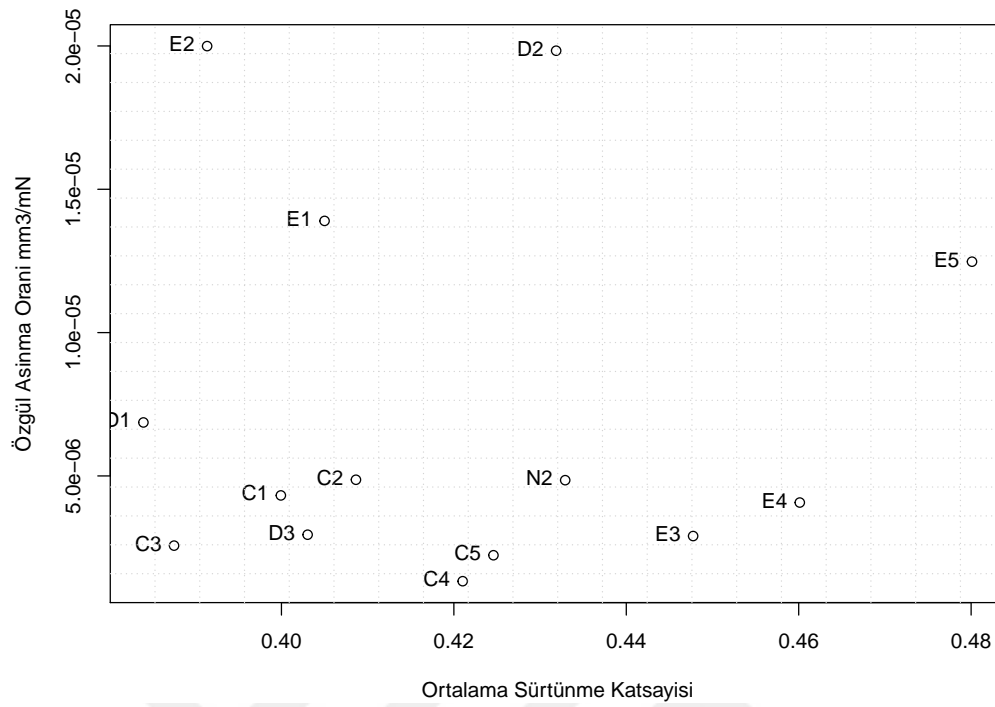


(a) Aşınma Hacmi ve Karişim Oranı

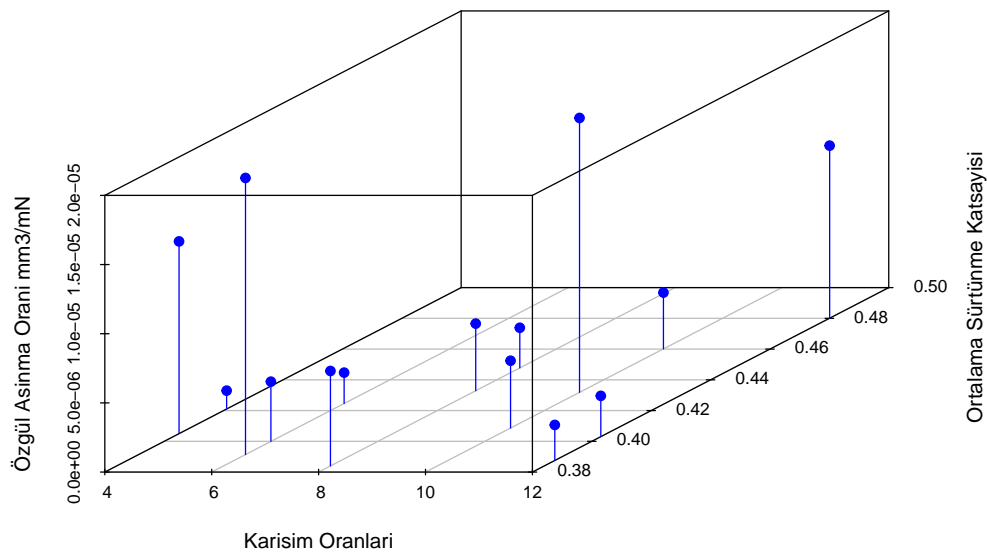


(b) Sürtünme Katsayısı ve Karişim oranları

Şekil 4.69: Sürtünme Katsayısı ve Aşınma Hacminin Karişim oranlarına göre grafikleri

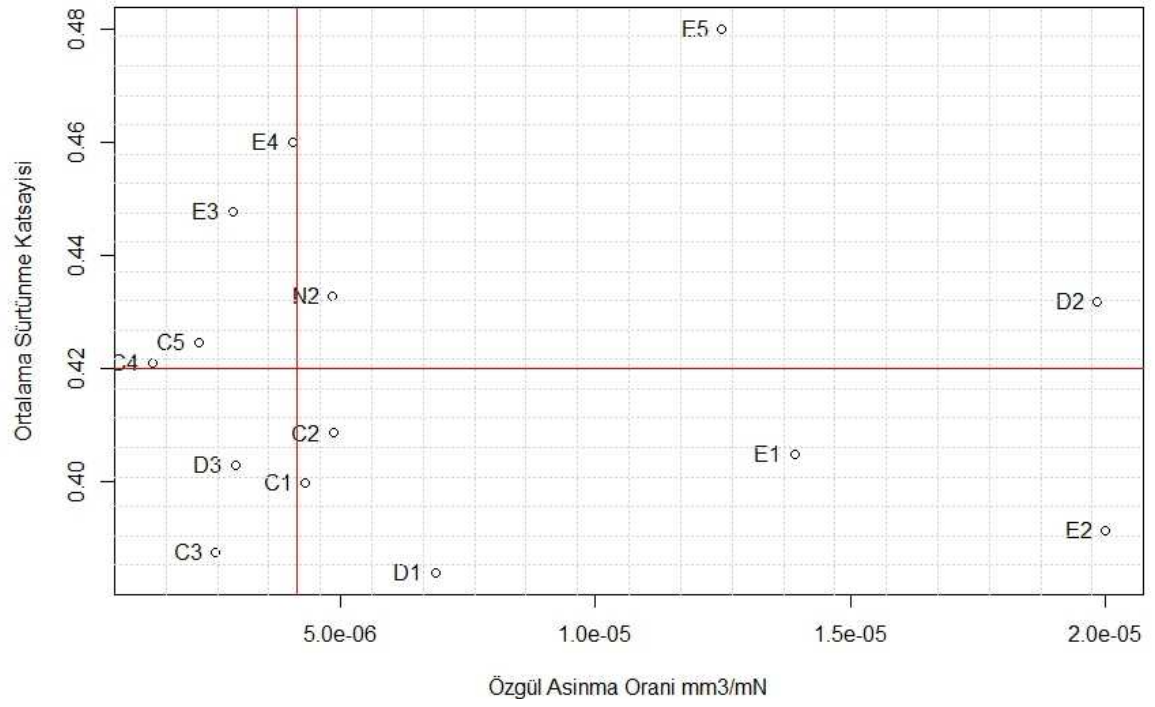


(a) Sürtünme Katsayısı ve Aşınma Hacmi



(b) Sürtünme Katsayısı, Karışım oranları ve Aşınma Hacmi 3B Grafiği

Şekil 4.70: Sürtünme Katsayısı ve Aşınma Hacminin birbirlerine göre ve Karışım oranları, Sürtünme Katsayısı ve Aşınma Hacminin 3B grafikleri

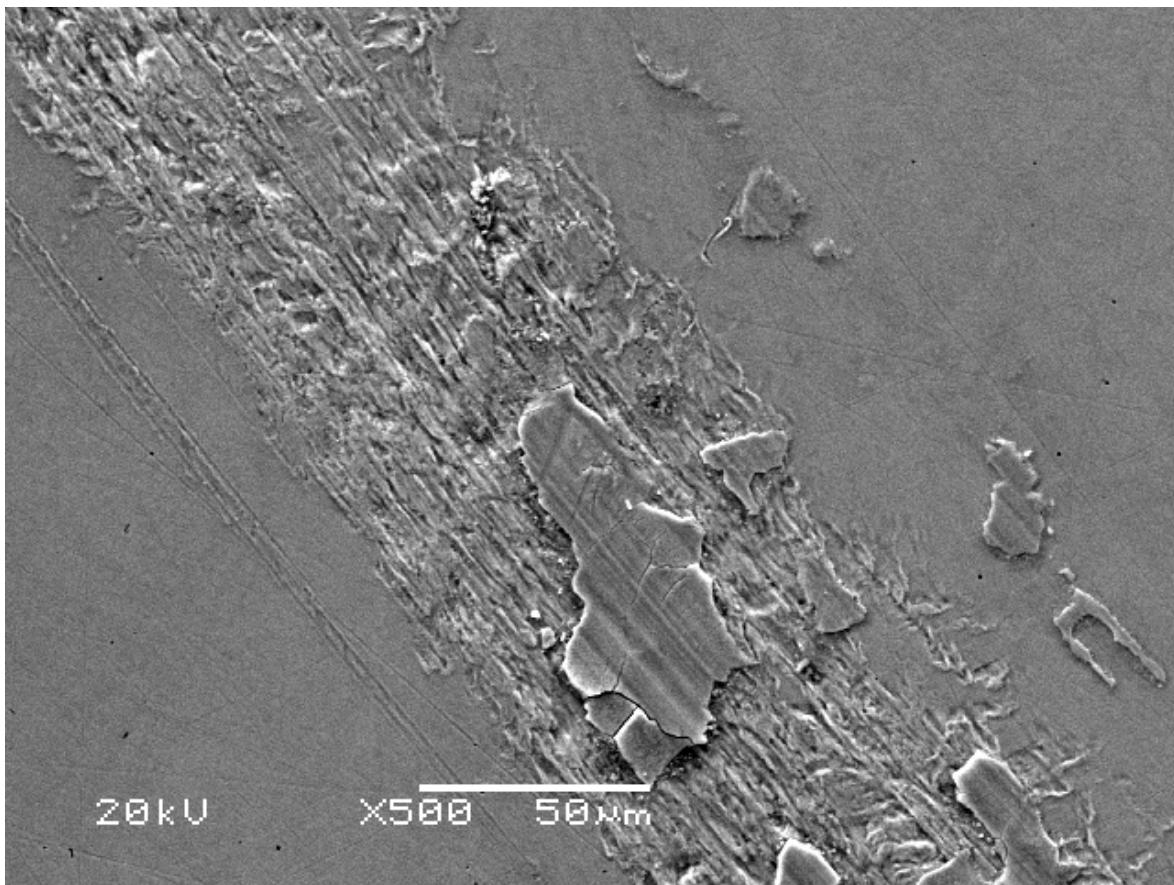


Şekil 4.71: Sürtünme Katsayısı ve Aşınma Hacmine göre en iyi sonuçlar kümesi

4.2.2 Aşınma izi SEM ve EDS analizi

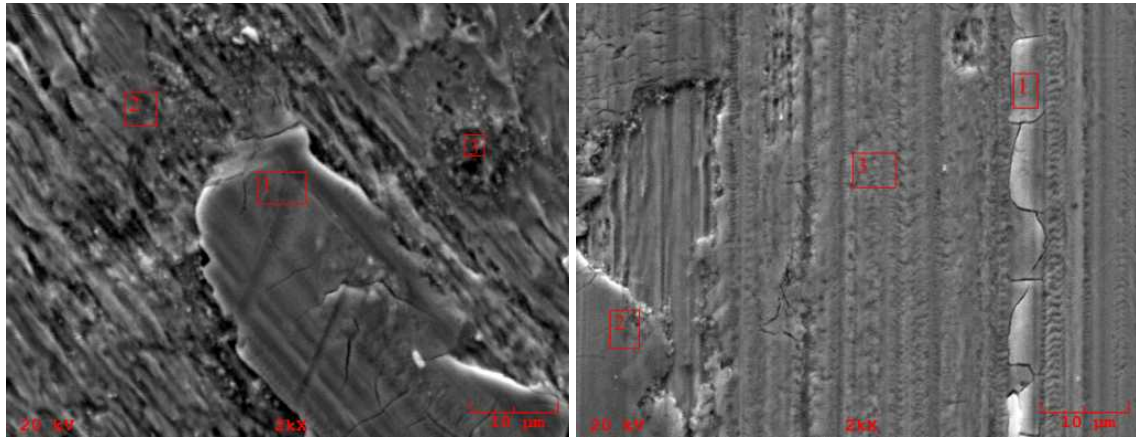
N1 Aşınma SEM ve EDS analizi

N1 kodlu numunenin aşınma izi Şekil 4.72’de verilmiştir. Bu görüntü incelendiğinde abrasiv ve adhesiv aşınmanın etkileri görülmektedir. Aşınma ile yüzeyden kopan parçalar ve adhesiv aşınma ile yüzeyde oluşan plakalar görülmektedir. Plakaların üzerinde yorulma çatlakları tespit edilmiştir.



Şekil 4.72: N1 Aşınma SEM genel görüntü

Şekil 4.73a incelendiğinde abrasiv aşınmanın etkileri ve adhesiv aşınma ile yüzeyde oluşmuş tabakalı yapı görülmektedir. Şekil 4.73b’de yüzeyden kopmuş parçaların bıraktığı iz ve yorulma çatlakları görülmektedir. Şekil 4.73a’da görülen tabakalı adhezyon yapısına EDS analizi yapılmış ve WC karbür bilyeden aşınma ile malzeme transfer olduğu anlaşılmaktadır.



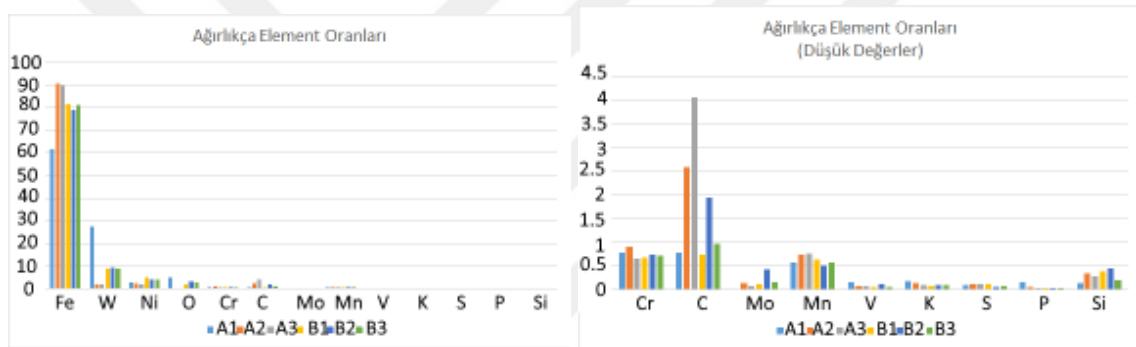
(a) N1 Aşınma SEM 2000x bölge A

(b) N1 Aşınma SEM 2000x bölge B

Şekil 4.73: N1 numunesi Aşınma İzi SEM görüntüleri

Çizelge 4.16: N1 Numunesi Aşınma İzi EDS sonuçları

	A1	A2	A3	B1	B2	B3
Fe	61.721	90.569	89.774	81.591	79.001	81.201
W	27.674	1.784	2.012	8.934	9.325	9.032
Ni	2.847	2.413	1.867	4.908	4.255	4.285
O	4.931	0.19	0.243	1.786	3.081	2.652
Cr	0.771	0.899	0.65	0.667	0.745	0.717
C	0.777	2.582	4.054	0.731	1.933	0.971
Mo	0	0.123	0.08	0.108	0.433	0.143
Mn	0.571	0.74	0.76	0.626	0.511	0.569
V	0.146	0.069	0.074	0.059	0.11	0.055
K	0.17	0.134	0.095	0.071	0.099	0.1
S	0.097	0.114	0.118	0.111	0.041	0.074
P	0.161	0.043	0.001	0.029	0.022	0.004
Si	0.134	0.339	0.274	0.379	0.443	0.195

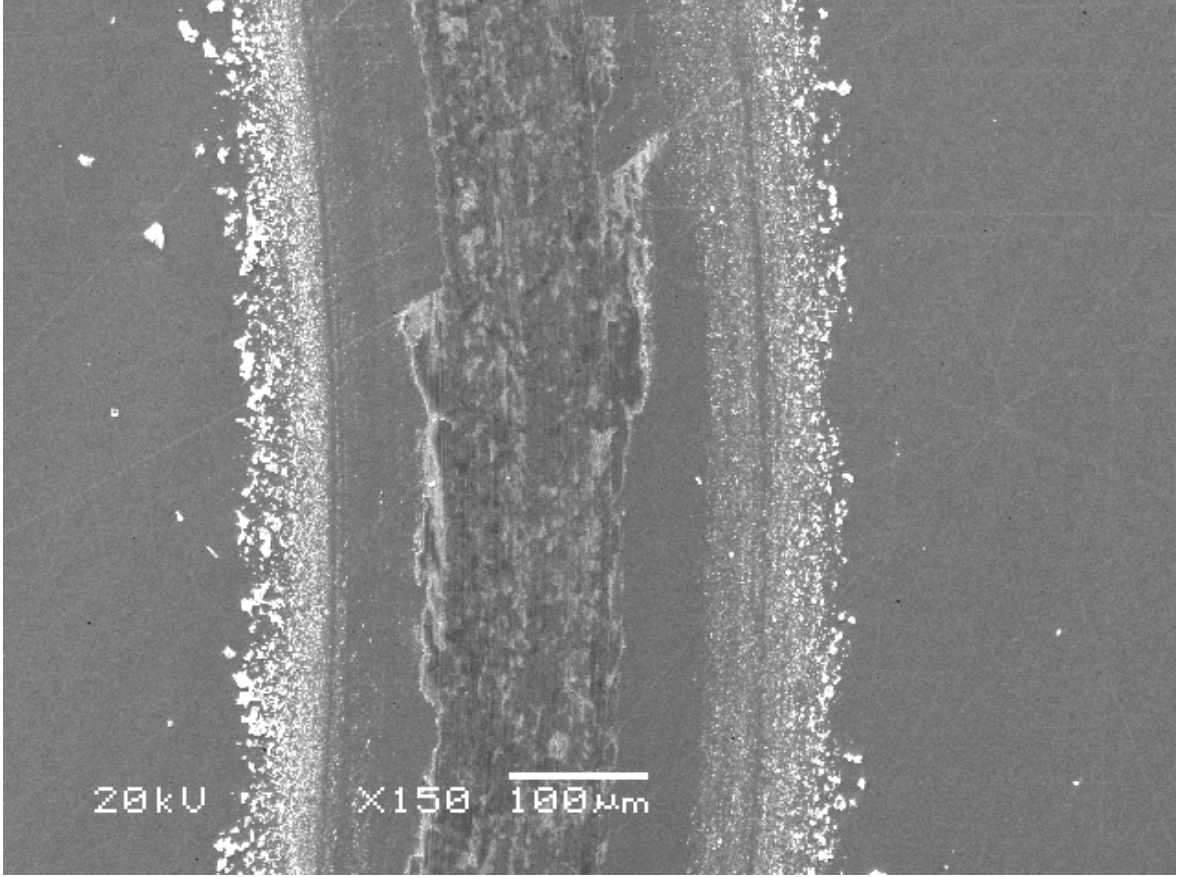


(a) N1 aşınma izi EDS elementlerin ağırlıkça oranı (b) N1 aşınma izi EDS elementlerin ağırlıkça oranı düşük

Şekil 4.74: N1 aşınma izi EDS sonuçları

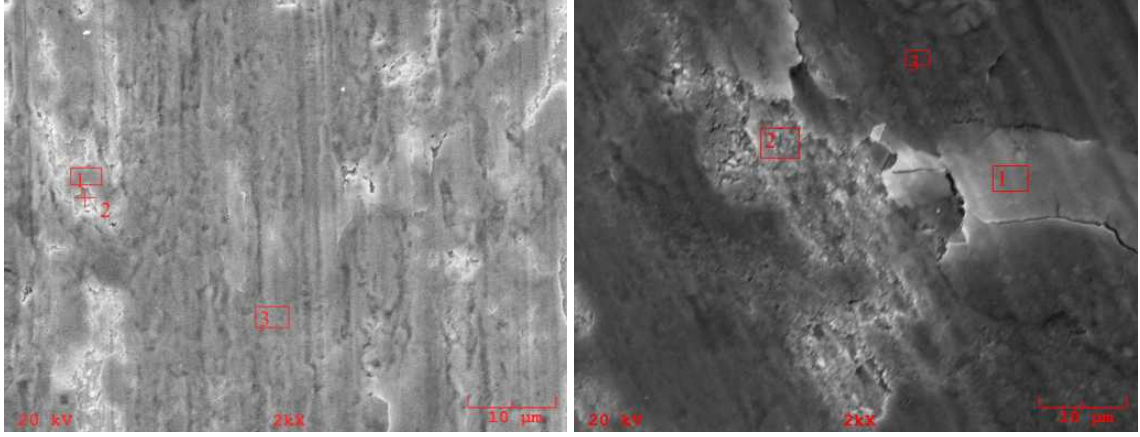
C1 Aşınma SEM ve EDS analizi

C1 kodlu numunenin aşınma izi Şekil 4.75’de verilmiştir. Bu görüntü incelendiğinde abrasiv ve adhesiv aşınmanın etkileri görülmektedir.



Şekil 4.75: C1 Aşınma SEM genel görüntü

Şekil 4.76a incelendiğinde abrasiv aşınmanın etkileri daha net görülmektedir. Şekil 4.76b’de yüzeyden kopmuş parçalar olduğu görülmektedir. Şekil 4.76a’da WC karbür bilyeden aşınma ile transfer olduğu EDS analizi yapılan üç noktada da yüksek W varlığından anlaşılmaktadır. Şekil 4.76b’de aşınma sonrası kopan bölgenin (B2) EDS analizi yapıldığında düşük W görülmektedir. W oranı adhesiv aşınma ile taşınan bölgelerden (B1 ve B3) yapılan EDS analizlerinde artmaktadır.



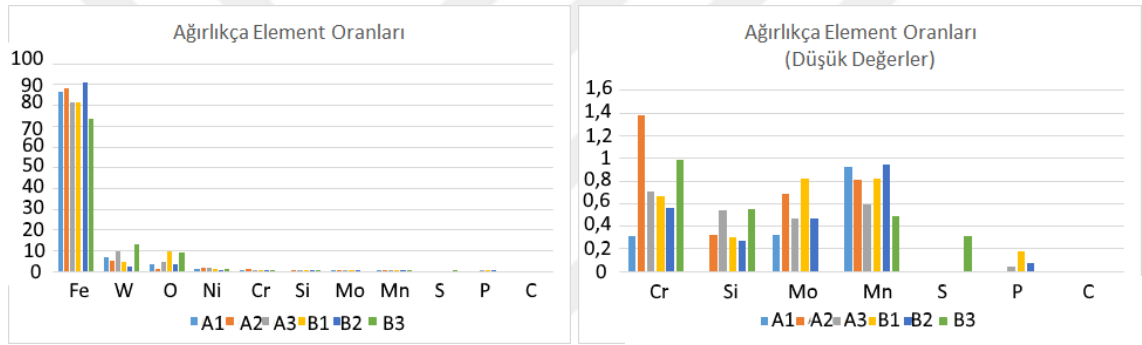
(a) C1 Aşınma SEM 2000x bölge A

(b) C1 Aşınma SEM 2000x bölge B

Şekil 4.76: C1 numunesi Aşınma İzi SEM görüntüleri

Çizelge 4.17: C1 Numunesi Aşınma İzi EDS sonuçları

	A1	A2	A3	B1	B2	B3
Fe	86.356	88.301	81.542	81.285	91.06	73.743
W	7.205	5.252	9.647	4.522	2.212	13.424
O	3.314	1.501	4.833	9.98	3.391	9.381
Ni	1.565	1.753	1.644	1.427	1.012	1.107
Cr	0.31	1.377	0.702	0.663	0.561	0.989
Si	0	0.325	0.537	0.3	0.271	0.555
Mo	0.322	0.683	0.466	0.82	0.473	0
Mn	0.928	0.809	0.592	0.824	0.941	0.488
S	0	0	0	0	0	0.312
P	0	0	0.039	0.178	0.077	0
C	0	0	0	0	0	0

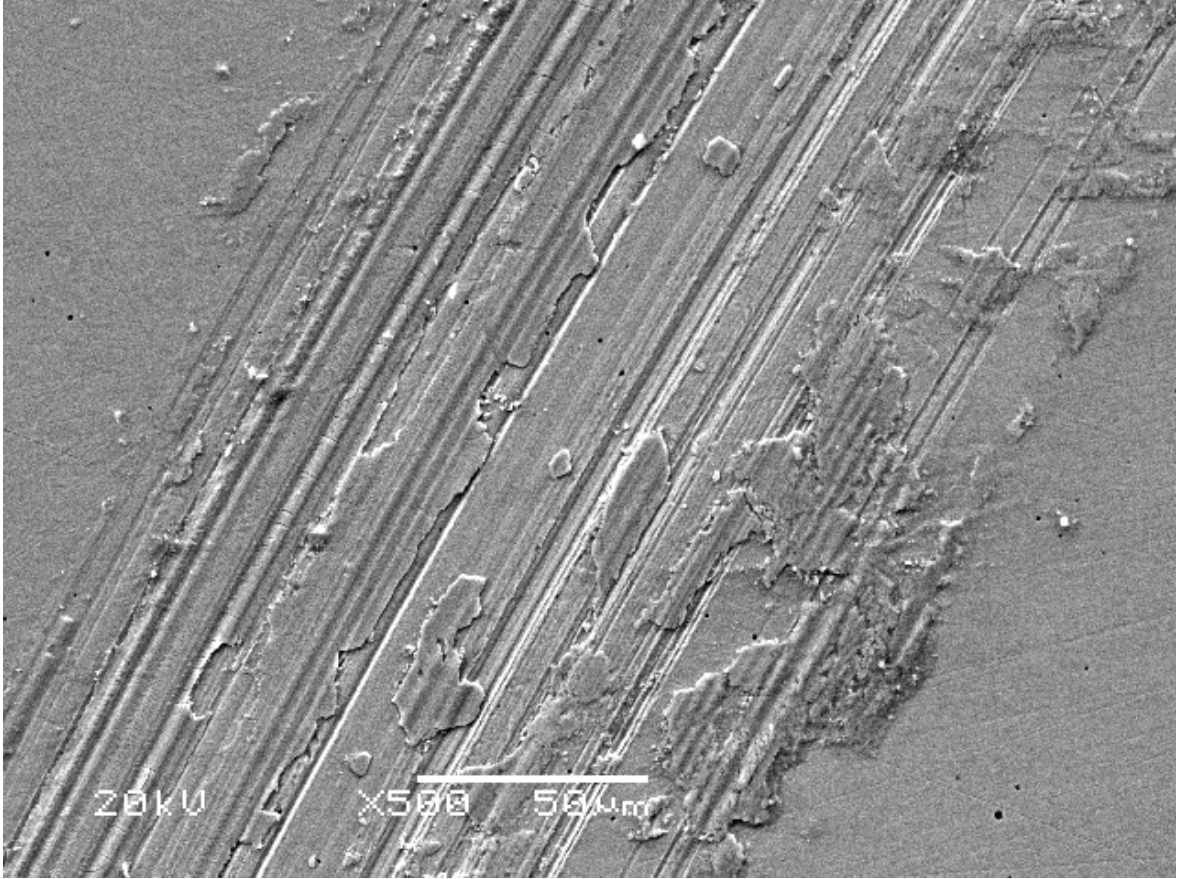


(a) C1 aşınma izi EDS elementlerin ağırlıkça oranı (b) C1 aşınma izi EDS elementlerin ağırlıkça oranı düşük

Şekil 4.77: C1 aşınma izi EDS sonuçları

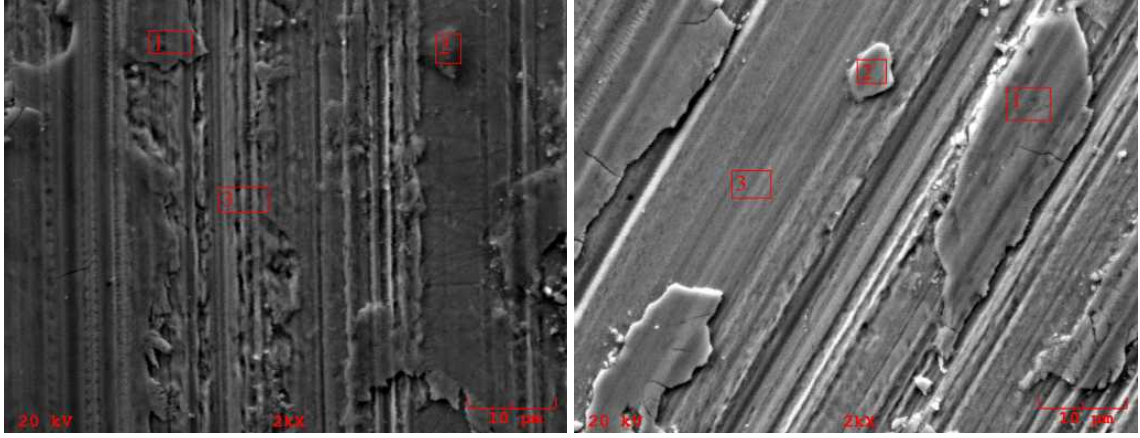
N2 Aşınma SEM ve EDS analizi

N2 kodlu numunenin aşınma izi Şekil 4.78'de verilmiştir. Bu görüntü incelendiğinde abrasiv aşınma sonucu oluşan pulluk izi benzeri izler ve adhesiv aşınma sonucu oluşan tabakalı yapılar görülmektedir.



Şekil 4.78: N2 Aşınma SEM genel görüntü

Şekil 4.79a incelendiğinde abrasiv aşınma ile oluşan pulluk izine benzer izler görülmektedir. Şekil 4.79b'de pulluk izlerine ek olarak adhesiv aşınmanın varlığını gösteren laminasyon izleri görülmektedir.



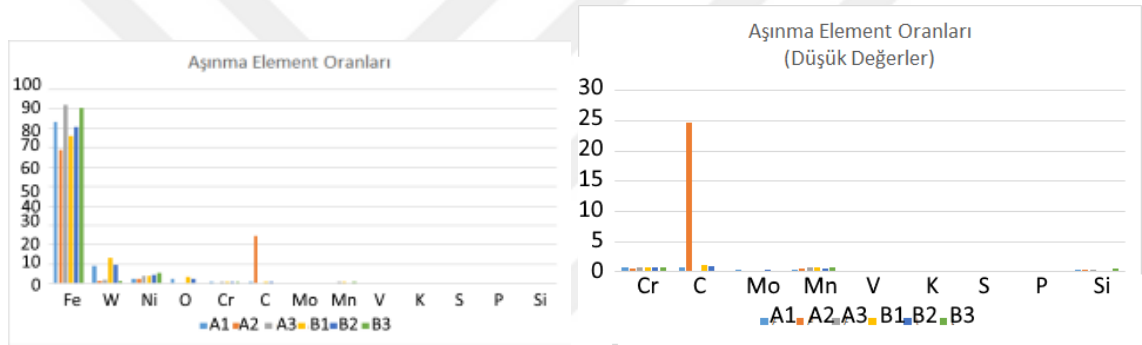
(a) N2 Aşınma SEM 2000x bölge A

(b) N2 Aşınma SEM 2000x bölge B

Şekil 4.79: N2 numunesi Aşınma İzi SEM görüntüleri

Çizelge 4.18: N2 Numunesi Aşınma İzi EDS sonuçları

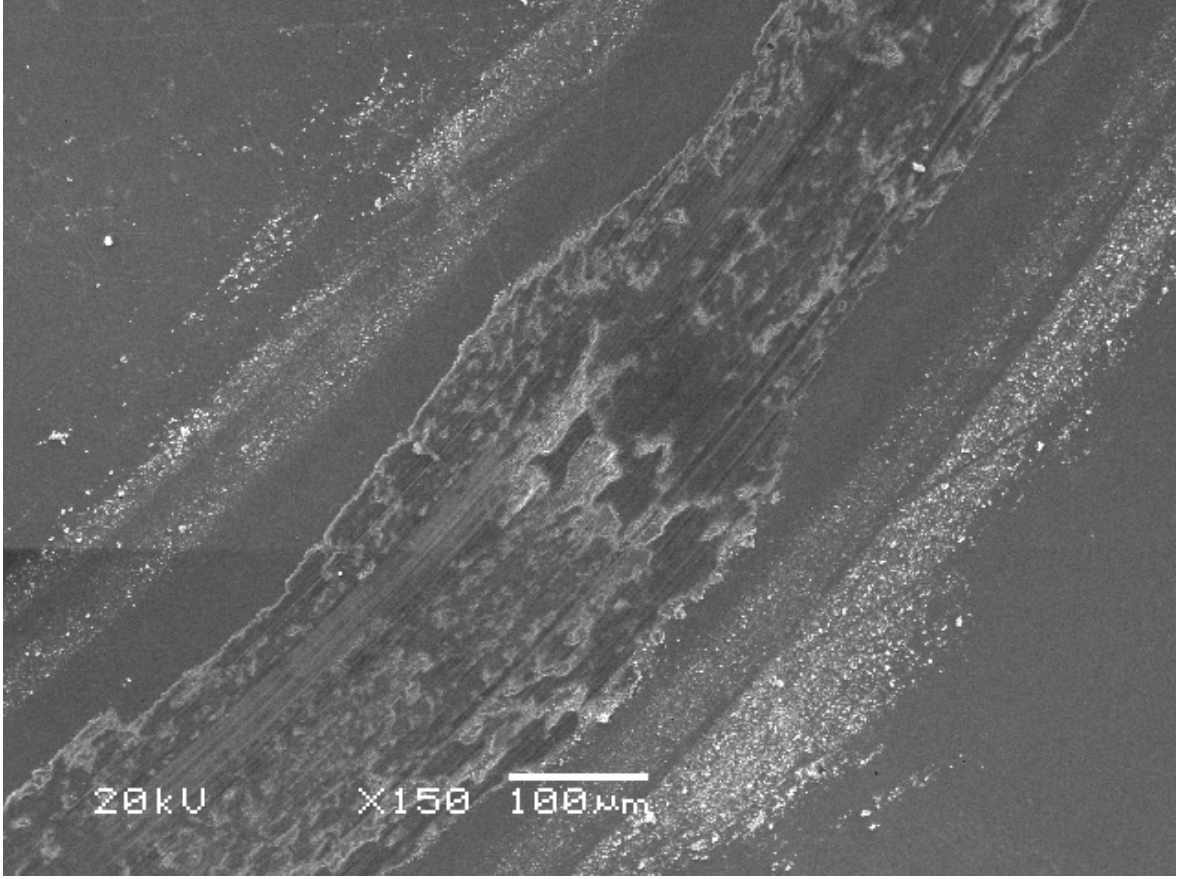
	A1	A2	A3	B1	B2	B3
Fe	83.002	68.918	91.791	76.135	80.493	90.438
W	9.07	1.454	1.834	13.062	9.503	1.386
Ni	2.624	2.675	3.858	4.04	4.39	5.394
O	2.452	0.187	0	3.361	2.596	0
Cr	0.762	0.632	0.822	0.685	0.794	0.698
C	0.778	24.682	0.081	1.144	0.908	0.225
Mo	0.327	0.254	0.145	0.276	0.447	0.24
Mn	0.438	0.609	0.729	0.681	0.53	0.782
V	0.063	0.056	0.1	0.119	0.068	0.087
K	0.073	0.067	0.062	0.152	0.042	0.134
S	0	0	0.091	0	0	0
P	0.106	0.009	0.041	0.146	0.05	0.06
Si	0.305	0.456	0.445	0.198	0.18	0.557



(a) N2 aşınma izi EDS elementlerin ağırlıkça (b) N2 aşınma izi EDS elementlerin ağırlıkça oranı
oranı düşük

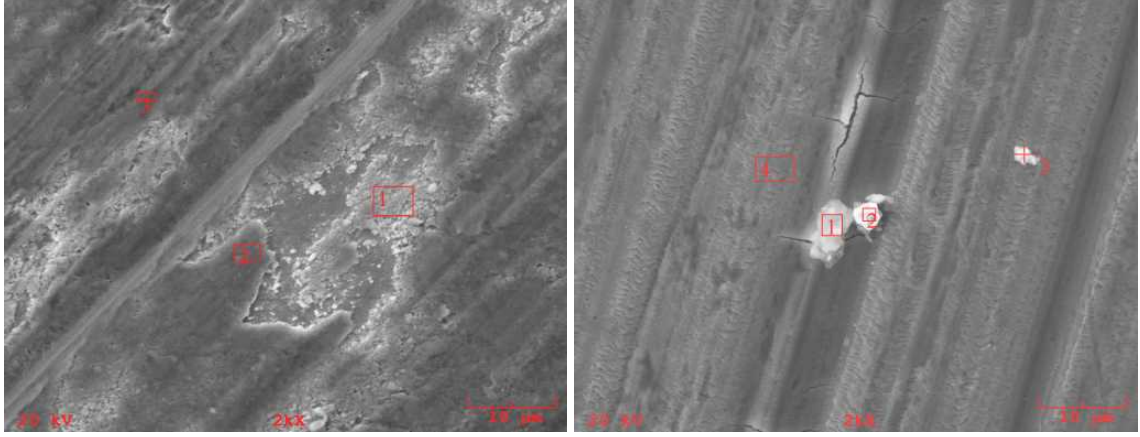
Şekil 4.80: N2 aşınma izi EDS sonuçları

C2 kodlu numunenin aşınma izi Şekil 4.81’de verilmiştir. Bu görüntü incelendiğinde abrasiv aşınmayı gösteren pulluk izi benzeri izler ve adhesiv aşınmayı gösteren yüzeye yapışmış laminasyon izleri görülmektedir.



Şekil 4.81: C2 Aşınma SEM genel görüntü

Yüksek büyütme ile aşınma izi incelendiğinde Şekil 4.82a’da adhesiv aşınma ile yüzeye taşınmış ancak sonra kopmuş malzeme görülmektedir. Bu gözlem A2’de görülen yüksek W oranı ile de desteklenmektedir. Şekil 4.82b incelendiğinde ise kopmuş ve yüzeye saplanmış parçalar görülmektedir. Özellikle B2 bölgesinin EDS sonucunda yüksek Nikel, Karbon ve Tungsten görülmüştür. Bu parçanın WC bilyeye yapışmış ancak sert bir bölgeye gelince kopmuş bir parça olduğu düşünülmektedir. Şekil 4.82b’de ayrıca yorulma çatlakları da görülmektedir.



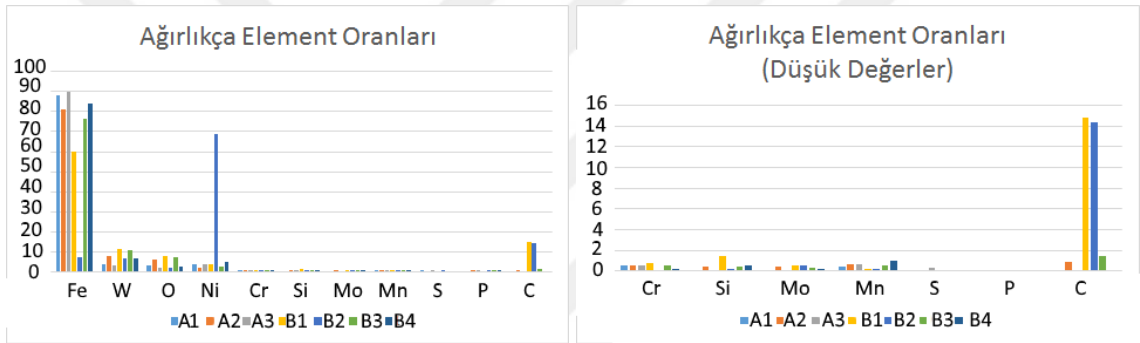
(a) C2 Aşınma SEM 2000x bölge A

(b) C2 Aşınma SEM 2000x bölge B

Şekil 4.82: C2 numunesi Aşınma İzi SEM görüntüleri

Çizelge 4.19: C2 Numunesi Aşınma İzi EDS sonuçları

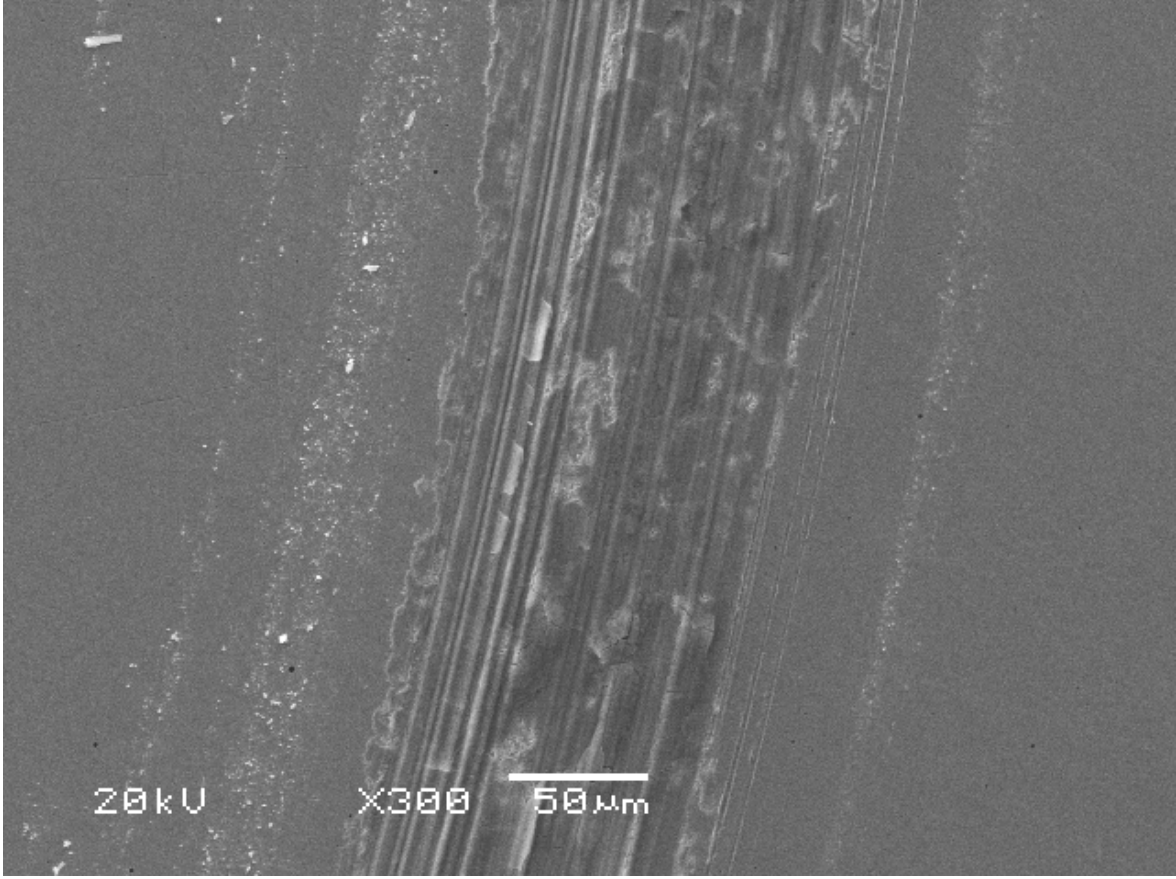
	A1	A2	A3	B1	B2	B3	B4
Fe	88.322	81.329	89.771	59.732	7.101	76.539	83.815
W	3.902	7.628	3.217	11.08	6.422	10.545	6.436
O	3.048	5.905	1.746	7.794	1.997	6.981	2.715
Ni	3.613	2.073	3.489	3.605	68.941	2.458	4.728
Cr	0.568	0.564	0.532	0.795	0.143	0.576	0.277
Si	0	0.442	0.153	1.478	0.199	0.499	0.589
Mo	0	0.431	0	0.557	0.53	0.325	0.245
Mn	0.459	0.624	0.701	0.177	0.213	0.519	1.072
S	0.087	0	0.351	0	0.05	0	0
P	0	0.147	0.039	0	0.069	0.049	0.125
C	0	0.857	0	14.781	14.336	1.509	0



(a) C2 aşınma izi EDS elementlerin ağırlıkça oranı (b) C2 aşınma izi EDS elementlerin ağırlıkça oranı düşük

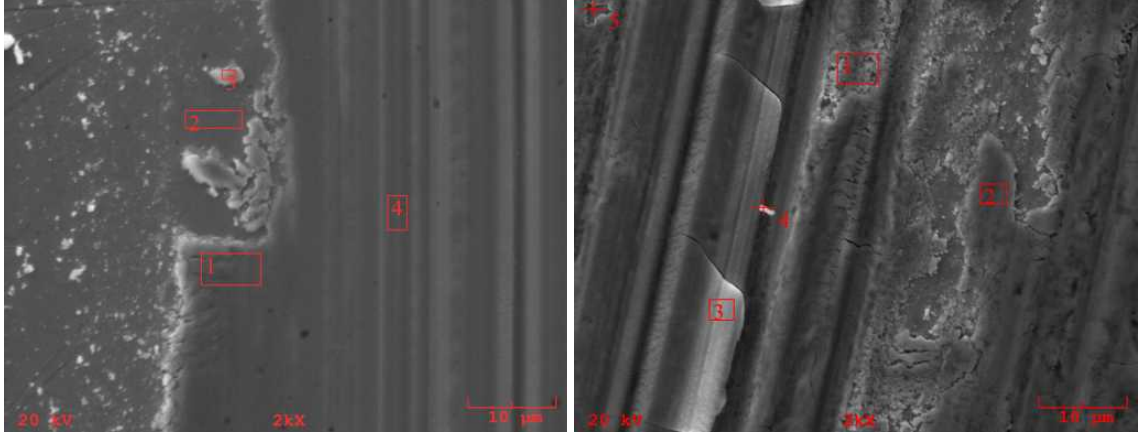
Şekil 4.83: C2 aşınma izi EDS sonuçları

C3 kodlu numunenin aşınma izi Şekil 4.84'de verilmiştir. Bu görüntü incelendiğinde abrasiv aşınmayı gösteren pulluk izi benzeri izler ve adhesiv aşınmayı gösteren yüzeye yapışmış laminasyon izleri görülmektedir.



Şekil 4.84: C3 Aşınma SEM genel görüntü

Şekil 4.85a incelendiğinde pulluk izi gibi abrasiv aşınma izlerinin yanı sıra adhesiv aşınma ile yüzeye yapışmış ve sonra parçalanarak ayrılmış malzeme de görülmektedir. A1 bölgesinde %9'a yakın W varken abrasiv aşınma izlerinin görüldüğü A4 bölgesinde de %5'e yakın W bulunmaktadır. Yapıda W olmadığına göre W ancak WC bilyeden gelebilir. Adhasiv aşınmanın daha yoğun gözüktüğü Şekil 4.85b'de ise yüksek W içeren kopmuş bölgeler mevcuttur. Özellikle B3 bölgesi incelendiğinde %15 W içerdiği görülmektedir. Bu bölgede adhesiv aşınma ile yüzeye yapışmış malzemenin yorulma çatlakları ile yüzeyden parçalanıp kopmak üzere olduğu görülmektedir. Numune yüzeyi incelendiğinde numunede baskın olan aşınma mekanizmasının abrasiv aşınma olduğu düşünülmektedir. Yüzeyde oluşan sert fazların abrasiv aşınmaya dirençli olması da bu numunenin Şekil 4.71'de de gözüktüğü üzere en iyi sürtünme ve aşınma özellikleri göstermesine sebep olmuştur.



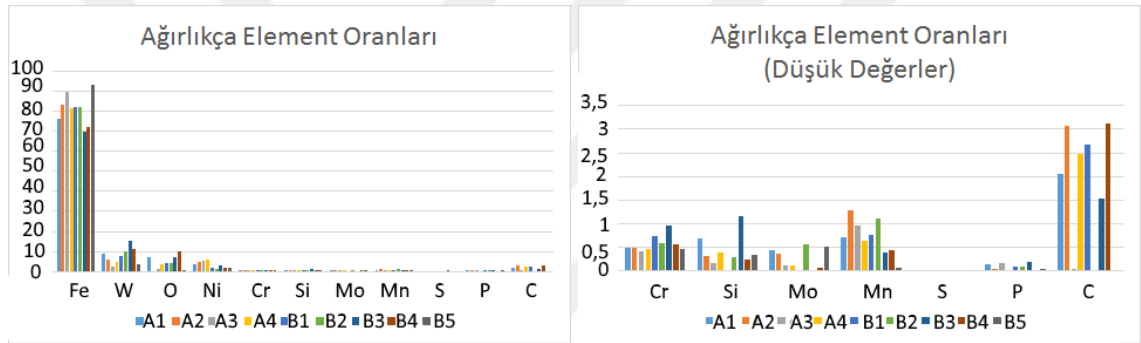
(a) C3 Aşınma SEM 2000x bölge A

(b) C3 Aşınma SEM 2000x bölge B

Şekil 4.85: C3 numunesi Aşınma İzi SEM görüntüleri

Çizelge 4.20: C3 Numunesi Aşınma İzi EDS sonuçları

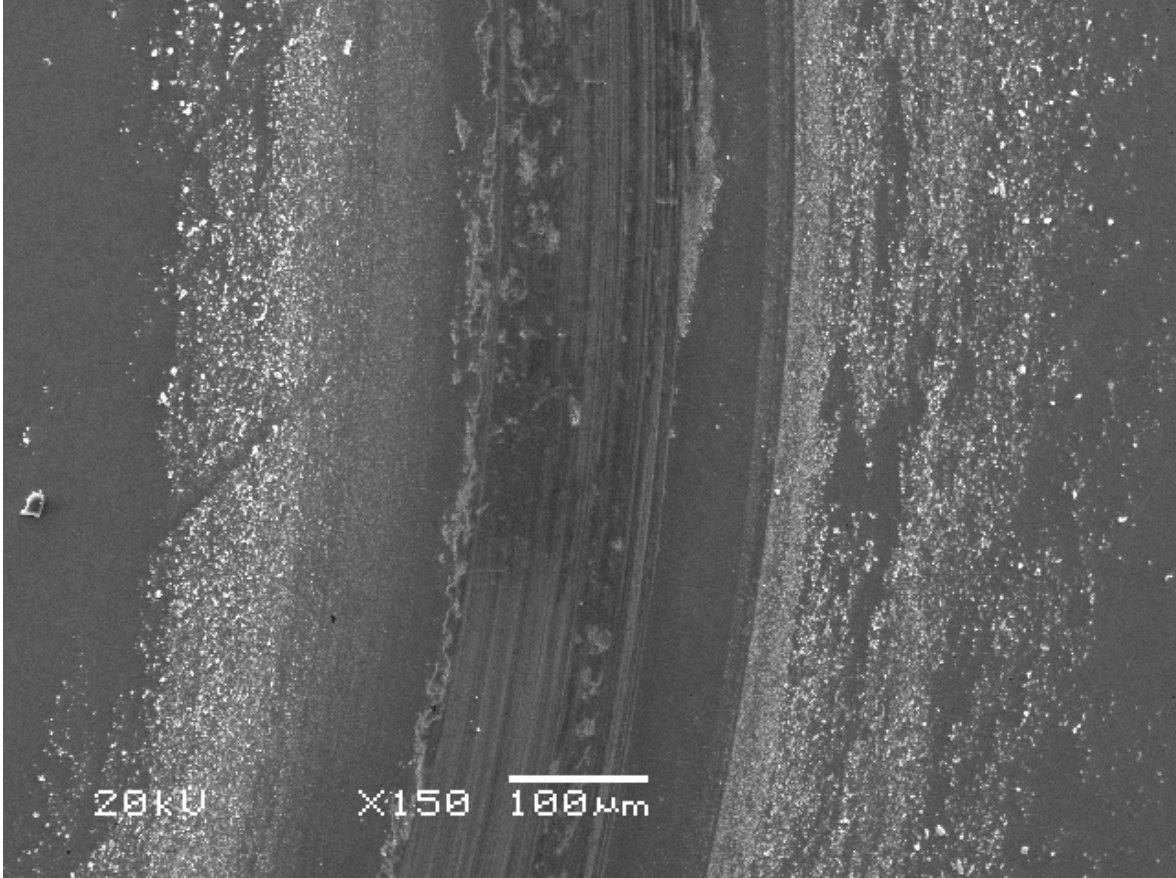
	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	B4	B5
Fe	76.045	83.249	89.628	81.699	82.118	82.062	70.081	72.161	93.029
W	8.878	6.068	2.271	4.826	7.426	9.829	15.556	11.188	3.327
O	6.873	0	0.995	3.702	4.445	4.187	7.342	10.127	0.194
Ni	3.681	5.076	5.21	5.683	1.673	1.251	2.739	2.06	1.975
Cr	0.494	0.493	0.411	0.477	0.75	0.604	0.961	0.58	0.471
Si	0.686	0.33	0.175	0.39	0.027	0.294	1.164	0.246	0.34
Mo	0.442	0.375	0.129	0.119	0	0.576	0	0.072	0.525
Mn	0.708	1.278	0.975	0.636	0.772	1.103	0.385	0.448	0.08
S	0	0	0	0	0	0	0.036	0	0
P	0.137	0.048	0.166	0	0.102	0.094	0.207	0	0.059
C	2.055	3.082	0.041	2.468	2.686	0	1.529	3.119	0



(a) C3 aşınma izi EDS elementlerin ağırlıkça (b) C3 aşınma izi EDS elementlerin ağırlıkça oranı oranı düşük

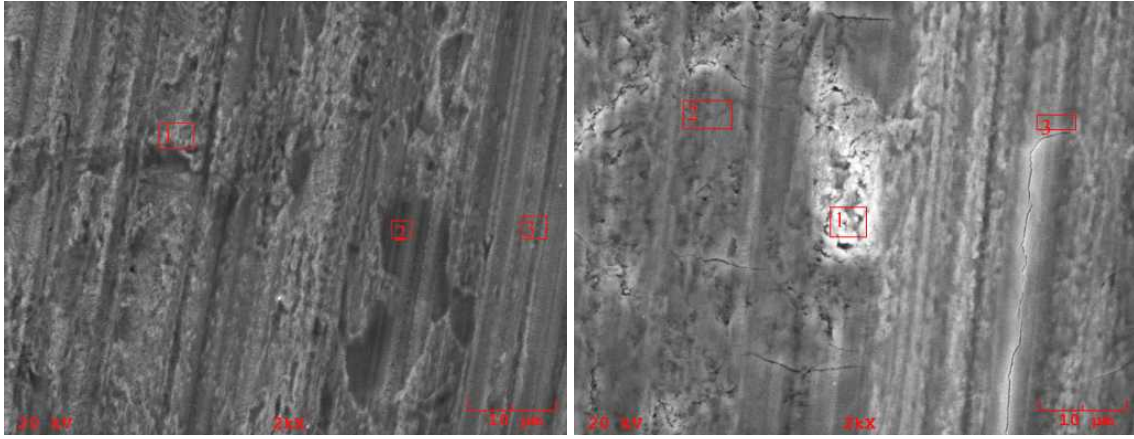
Şekil 4.86: C3 aşınma izi EDS sonuçları

C4 kodlu numunenin aşınma izi Şekil 4.87’de verilmiştir. Bu görüntü incelendiğinde abrasiv aşınmayı gösteren pulluk izi benzeri izler ve adhesiv aşınmayı gösteren yüzeye yapışmış laminasyon izleri görülmektedir.



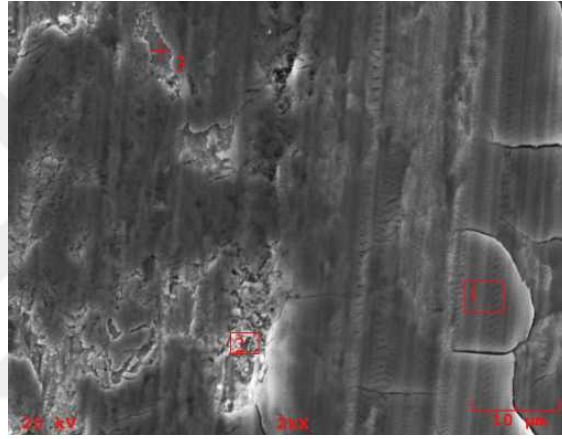
Şekil 4.87: C4 Aşınma SEM genel görüntü

Şekil 4.88a incelendiğinde yer yer adhesiv aşınma ile taşınmış ve yüzeye yapışmış malzeme görülmektedir. Yüzeyin EDS analizinde %13’e varan W görülmektedir. Adhesiv aşınma ardından gelen parçalanma ve çatlaklar Şekil4.88b’de de gözükmemektedir. Bu çatlaklar temas yüzeyinde yorulma oluşuğunu göstermektedir. Ancak en yoğun adhesiv aşınma etkisi Şekil 4.88c’de gözükmemektedir. C4 bölgesindeki plaka halinde yapışmış ve içinde %20 W bulunan parça aşınma ile WC bilyeden malzeme taşındığını göstermektedir. Adhesiv aşınma sonucu yüzeye yerleşen plakalar metalurjik bir bağ ile bağlanmadıkları için kopmakta ve abrasiv aşınmayı artırıcı etki göstermektedirler.



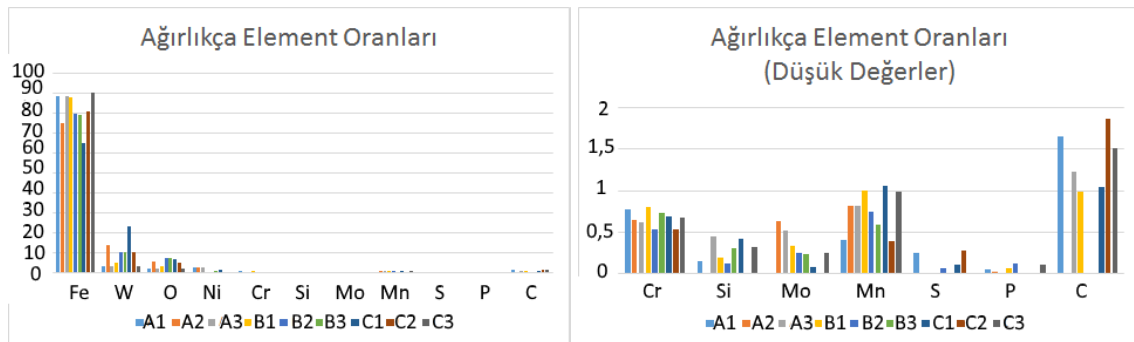
(a) C4 Aşınma SEM 2000x bölge A

(b) C4 Aşınma SEM 2000x bölge B



(c) C4 Aşınma SEM 2000x bölge C

Şekil 4.88: C4 numunesi Aşınma İzi SEM görüntüleri



(a) C4 aşınma izi EDS elementlerin ağırlıkça oranı

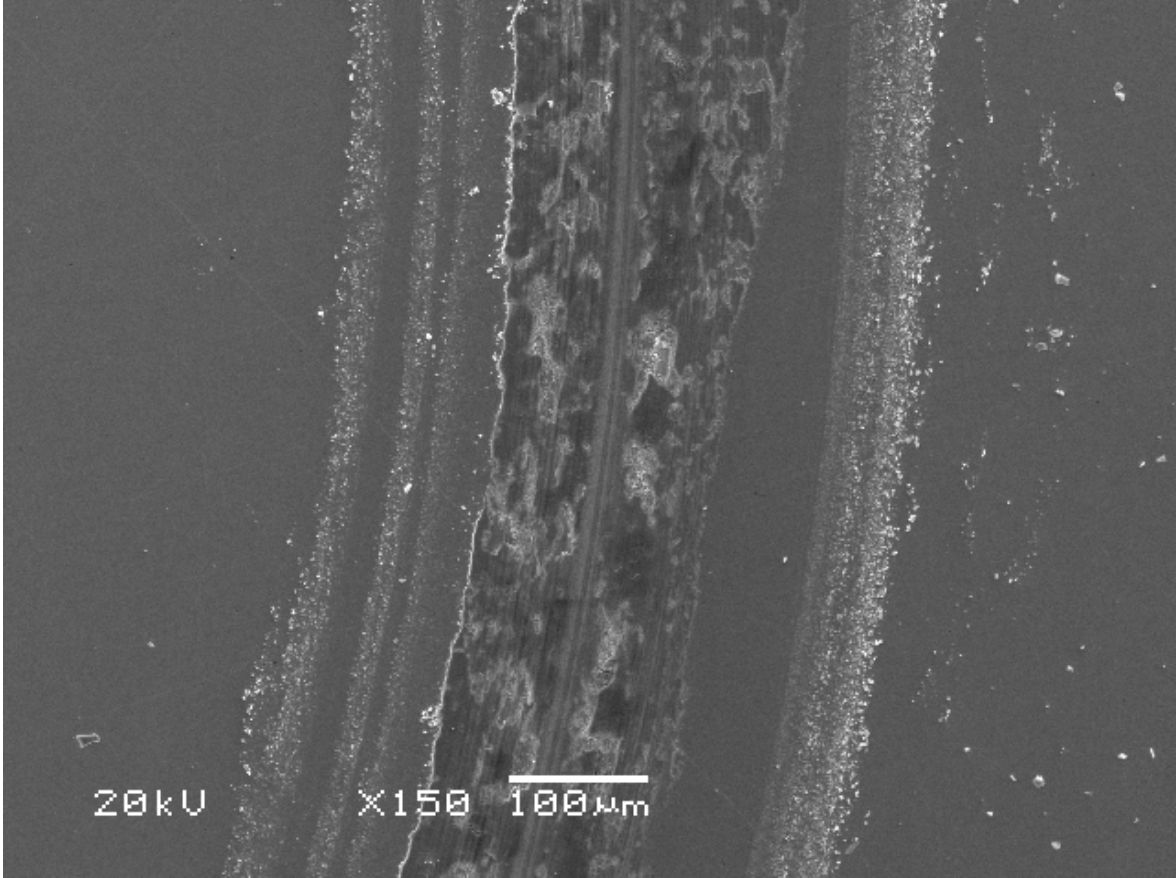
(b) C4 aşınma izi EDS elementlerin ağırlıkça oranı düşük

Şekil 4.89: C4 aşınma izi EDS sonuçları

Çizelge 4.21: C4 Numunesi Aşınma İzi EDS sonuçları

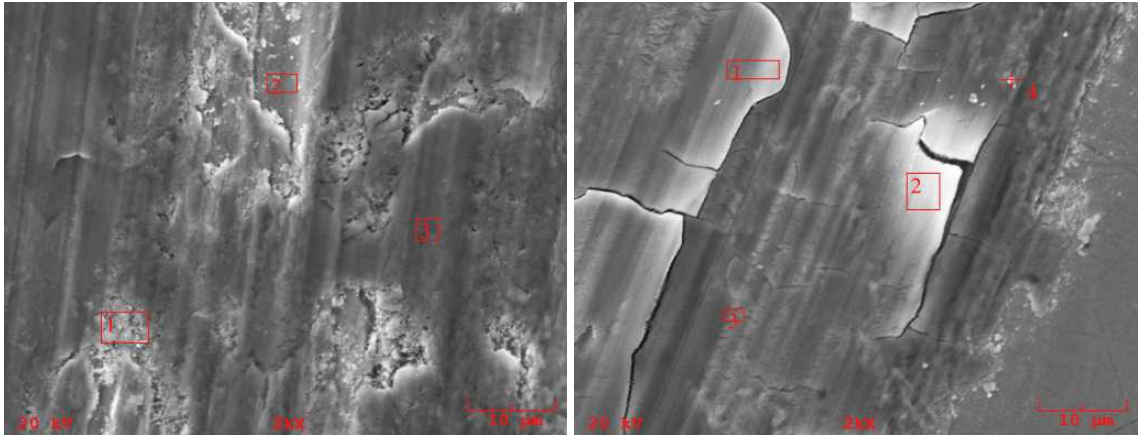
	A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2	C3
Fe	88.501	75.146	88.199	87.95	79.808	78.964	64.66	80.683	90.114
W	3.207	13.943	3.165	5.099	10.35	10.492	23.292	10.44	3.318
O	2.17	6.016	1.965	3.357	7.351	7.682	7.013	5.411	2.15
Ni	2.831	2.763	3.041	0.203	0.634	0.982	1.614	0.408	0.557
Cr	0.77	0.653	0.621	0.804	0.533	0.735	0.694	0.533	0.682
Si	0.158	0	0.448	0.195	0.131	0.307	0.423	0	0.322
Mo	0	0.635	0.523	0.334	0.248	0.232	0.077	0	0.249
Mn	0.401	0.82	0.811	1.005	0.75	0.587	1.059	0.39	0.984
S	0.254	0	0	0	0.067	0	0.117	0.276	0
P	0.056	0.025	0	0.061	0.127	0.017	0	0	0.117
C	1.651	0	1.227	0.993	0	0	1.049	1.859	1.506

C5 kodlu numunenin aşınma izi Şekil 4.90'da verilmiştir. Bu görüntü incelendiğinde adhesiv aşınma sonucu yüzeyde laminasyon ve bilyenin geçtiği yerde abrasiv aşınmayı gösteren pulluk izi benzeri izler görülmektedir.



Şekil 4.90: C5 Aşınma SEM genel görüntü

Şekil 4.91a incelendiğinde yüzeye adhesiv aşınma ile taşınmış ve yapışmış laminasyon izlerinin varlığı görülmektedir. Plakalardan parçalanarak ayrılan bölgelerden kaplamanın ortaya çıktığı örneğin bölge A2'de görülmektedir. İncelenen A3 ve Şekil 4.91b'de B2 ve B3'de alanlarının yüksek W içerdiği görülmektedir. Mekanik bir bağ ile bağlı olan bu plakalar önce ize dik yorulma çatlakları ile çatlamış ardından aşınma izine paralel çatlaklarla kalkmıştır.



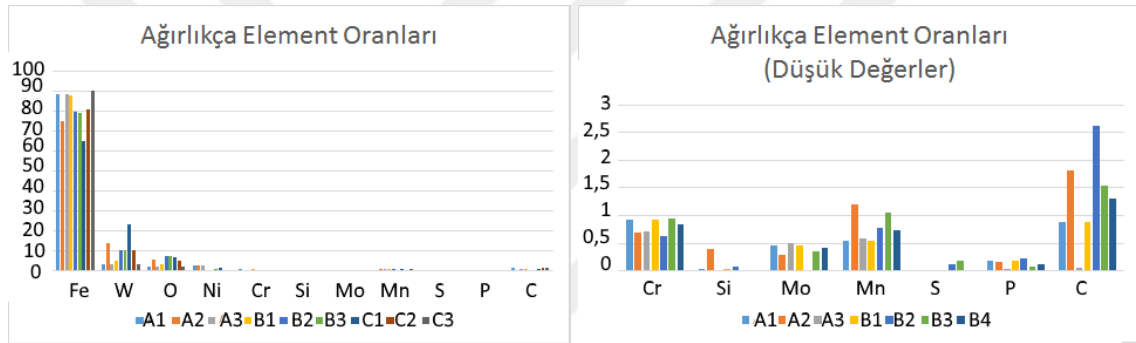
(a) C5 Aşınma SEM 2000x bölge A

(b) C5 Aşınma SEM 2000x bölge B

Şekil 4.91: C5 numunesi Aşınma İzi SEM görüntüleri

Çizelge 4.22: C5 Numunesi Aşınma İzi EDS sonuçları

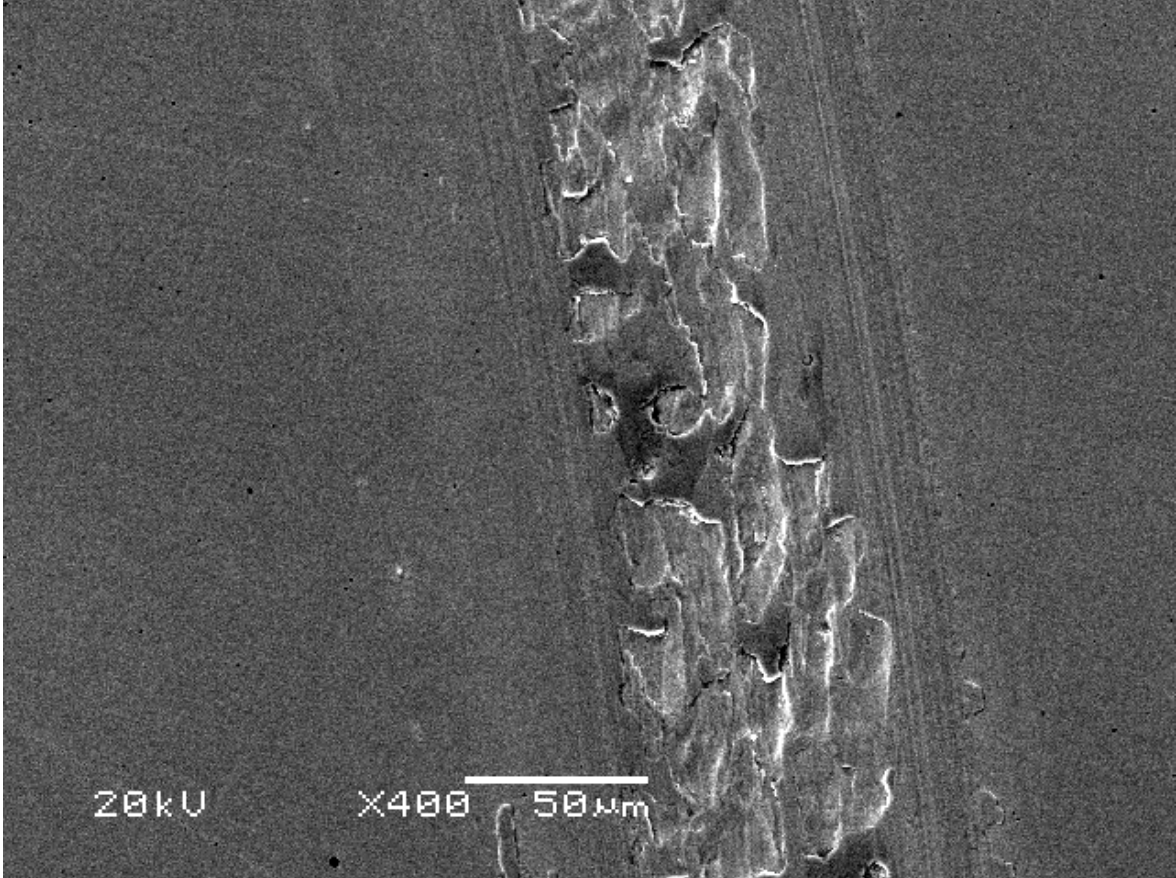
	A1	A2	A3	B1	B2	B3	B4
Fe	85.542	93.376	72.061	85.542	73.705	71.214	86.632
W	5.202	2.043	14.117	5.202	16.561	16.239	4.918
O	5.721	0	10.386	5.721	3.71	7.131	3.708
Ni	0.526	0.032	1.552	0.526	1.582	1.278	1.321
Cr	0.928	0.694	0.711	0.928	0.629	0.941	0.843
Si	0.043	0.398	0	0.043	0.069	0	0
Mo	0.449	0.285	0.504	0.449	0	0.355	0.413
Mn	0.534	1.204	0.583	0.534	0.77	1.046	0.731
S	0	0	0	0	0.124	0.18	0
P	0.173	0.153	0.023	0.173	0.223	0.071	0.126
C	0.882	1.814	0.063	0.882	2.629	1.544	1.308



(a) C5 aşınma izi EDS elementlerin ağırlıkça oranı (b) C5 aşınma izi EDS elementlerin ağırlıkça oranı düşük

Şekil 4.92: C5 aşınma izi EDS sonuçları

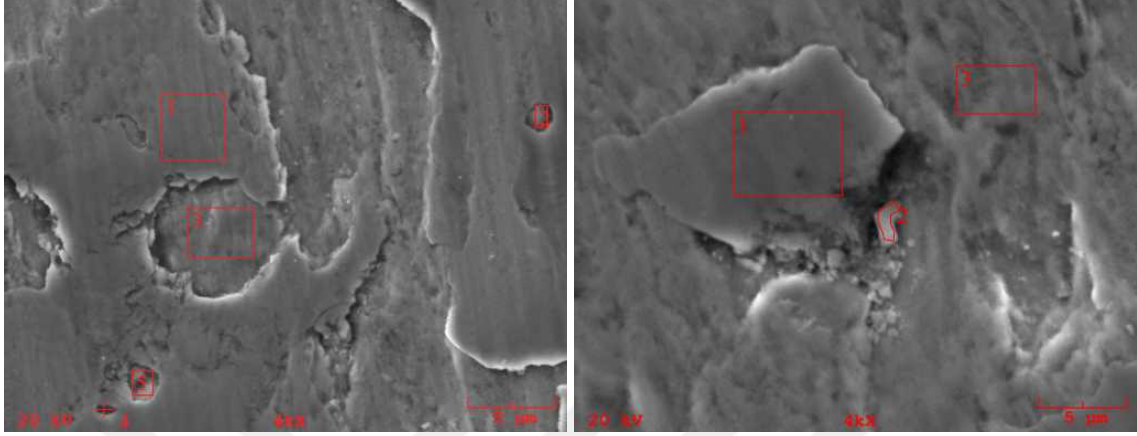
D1 kodlu numunenin aşınma izi Şekil 4.93'de verilmiştir. Bu görüntü incelendiğinde adhesiv aşınma etkisiyle yüzeyde laminasyon ve ardından kopmuş malzeme bölgeleri ve bilyenin geçtiği yerde abrasiv aşınmayı gösteren pulluk izi benzeri izler görülmektedir. Aşınma izinin diğer numunelerden daha ince olduğu bu görüntüde de anlaşılmaktadır.



Şekil 4.93: D1 Aşınma SEM genel görüntü

Şekil 4.94a incelendiğinde adhesiv aşınma ile kopup tekrar yüzeye yapışmış bölgeler görülmektedir. Bu bölgelerden malzeme kopması olduğu şekilde görülmektedir. Laminasyon izlerine ve kopup açığa çıkan malzemeye EDS analizi yapıldığında katmanlı bölgelerde (A1, A4 ve A5) %5 civarı W olduğu, katmanın kopup ayrıldığı A3 bölgesinde %2 civarı W olduğu ancak kopup gelen bir parçanın saplandığı A2 bölgesinde %15 W olduğu görülmüştür. Bu katmanların yüksek oksijen içerdiği, sürtünme ile meydana gelen yüksek flaş sıcaklıklarında oluşan oksit tabakalarıdır. Şekil 4.94b incelendiğinde aşınma yorulması görülmektedir. Aşınma ile taşınan %18 oranında yüksek W içeren B1 bölgesinin etrafında başka katmanlardan gelmiş ve daha düşük W içeren B2 parçası mevcuttur. Yüzey ise B3 bölgesi EDS'inden anlaşılacağı üzere daha önce adhesyonla taşınmış %4 civarında

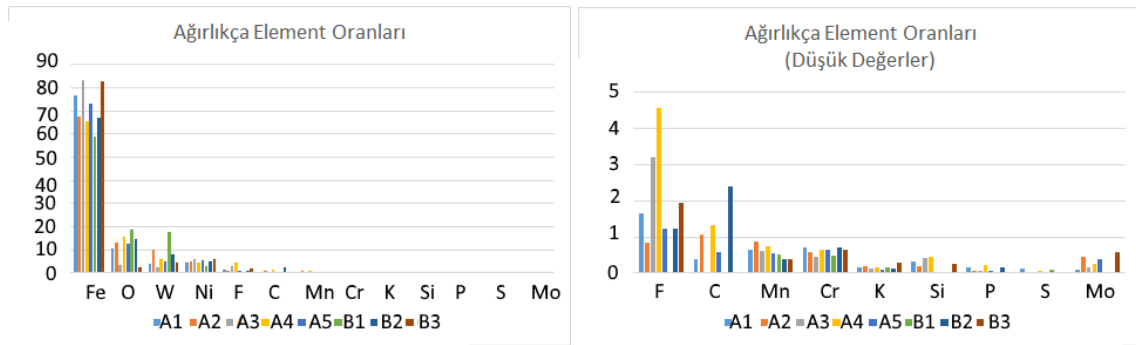
W içermektedir. Katmanın kopup ayrıldığı B3 bölgesinde düşük Oksijen bulunmakta ancak B1 ve B2’de daha yüksek oksijen bulunmaktadır. Bu oksit katmanının yüzeyden ayrıldığını ve sonra başka bir bölgeye yerleştiğini göstermektedir.



(a) D1 Aşınma SEM 2000x bölge A

(b) D1 Aşınma SEM 4000x bölge B

Şekil 4.94: D1 numunesi Aşınma İzi SEM görüntüleri



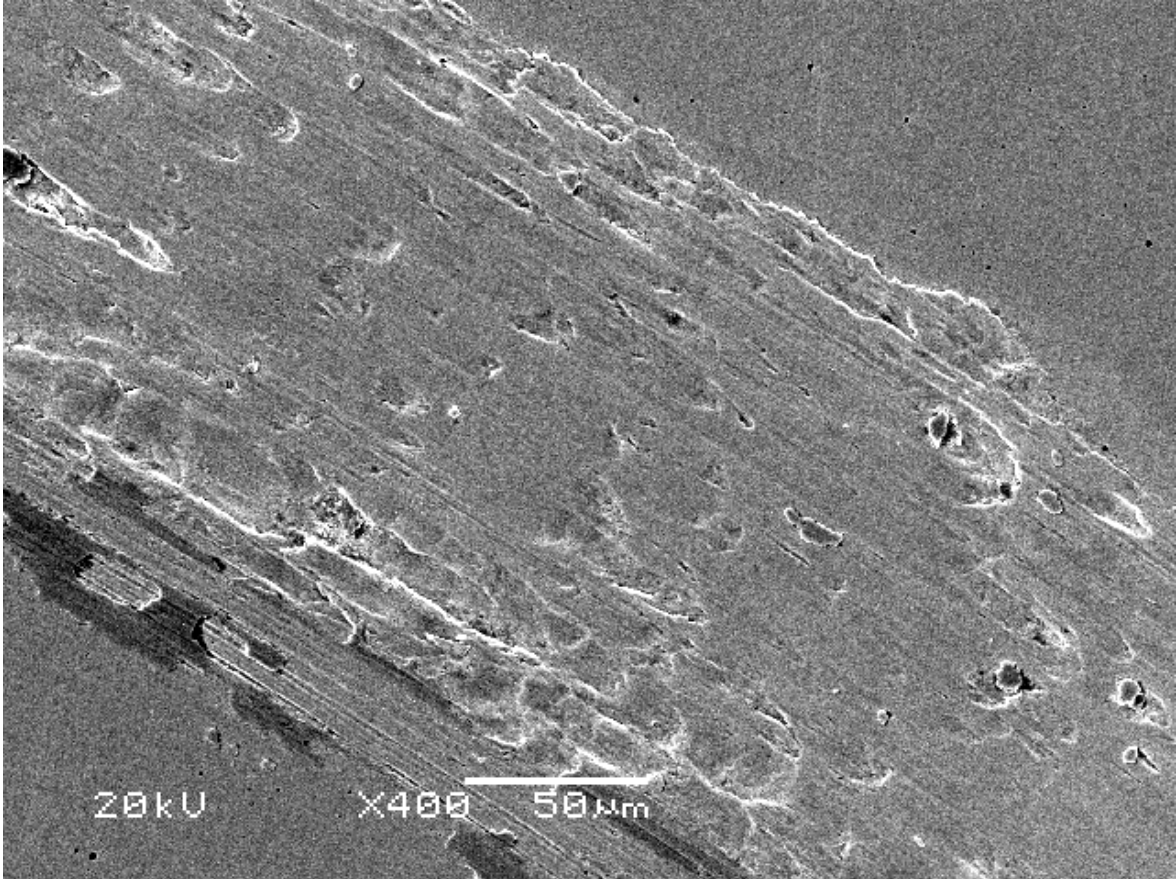
(a) D1 aşınma izi EDS elementlerin ağırlıkça oranı (b) D1 aşınma izi EDS elementlerin ağırlıkça oranı düşük

Şekil 4.95: D1 aşınma izi EDS sonuçları

Çizelge 4.23: D1 Numunesi Aşınma İzni EDS sonuçları

Element	D1							
	A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3
Fe	76.513	67.559	83.148	65.500	73.261	58.855	67.261	83.001
O	10.699	12.983	3.292	15.728	12.556	18.821	14.625	2.370
W	4.192	10.196	2.601	5.929	4.836	17.950	7.968	4.500
Ni	4.361	4.961	5.946	4.383	5.773	3.103	5.076	5.945
F	1.639	0.837	3.203	4.567	1.23	0.000	1.242	1.952
C	0.392	1.067	0.000	1.317	0.597	0.000	2.410	0.000
Mn	0.647	0.886	0.629	0.754	0.539	0.524	0.376	0.400
Cr	0.713	0.575	0.440	0.660	0.654	0.500	0.725	0.659
K	0.148	0.201	0.128	0.155	0.094	0.160	0.120	0.306
Si	0.309	0.189	0.404	0.450	0	0.000	0.025	0.268
P	0.166	0.079	0.051	0.222	0.079	0.000	0.158	0.025
S	0.130	0.000	0.000	0.072	0	0.087	0.000	0.000
Mo	0.092	0.467	0.159	0.261	0.382	0.000	0.013	0.573

D2 kodlu numunenin aşınma izi Şekil 4.96'da verilmiştir. Bu görüntü incelendiğinde adhesiv aşınma ile yüzeye yapışmış ve ardından kopmuş malzeme bölgeleri, kenarlarda bilyenin geçtiği yerde abrasiv aşınmayı gösteren pulluk izi benzeri izler görülmektedir. Bu görüntünün en önemli özelliği parça parça kopan bölgelerin net gözükmesidir. Aşınma yönünde ilerlerken bir engel çıkıp kopan parçaların varlığı belirgindir.



Şekil 4.96: D2 Aşınma SEM genel görüntü

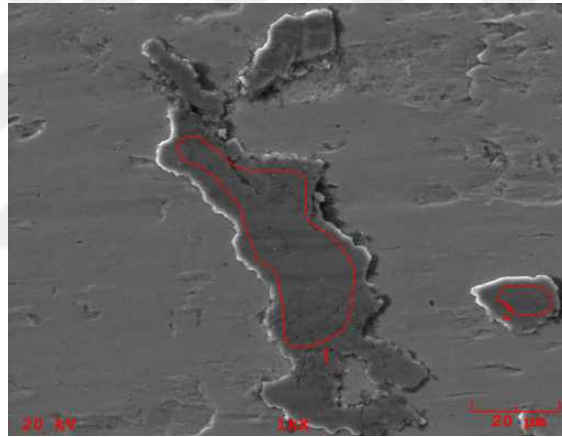
Şekiller 4.97a ve 4.97b incelendiğinde başka bir yerden kopup gelmiş ve sonra saplanmış parçalar görülmektedir. Şekil 4.97a, Şekil 4.97b'deki B3 bölgesinin daha büyük büyütme ile incelenmiş halidir. B1, B2 ve B3 bölgelerinde yüksek oranda W mevcuttur. A1 daha yakından incelendiğinde %12'ye yakın W içerdiği anlaşılmaktadır. A2 ve A3 bölgeleri daha düşük W, daha yüksek Ni içermektedirler. Şekil 4.97c incelendiğinde C1 bölgesinde büyük, C2 bölgesinde daha küçük adhesyonla yapışmış iki parça olduğu görülmektedir. Bu parçaların EDS analizinde %12 ve %14 W içerdiği, yüksek oranda oksijen ihtiva ettiği görülmüştür. Bu sonuç WC bilyeden aşınma ile transfer olduğunu ve yüzeyde oksit tabakası

oluşturduğunu göstermektedir. Oluşan oksitlerin bazıları yağlayıcı olarak davranmış, bir kısmı ise kırılıp abrasiv etki yaratmıştır.



(a) D2 Aşınma SEM 4000x bölge A

(b) D2 Aşınma SEM 2000x bölge B

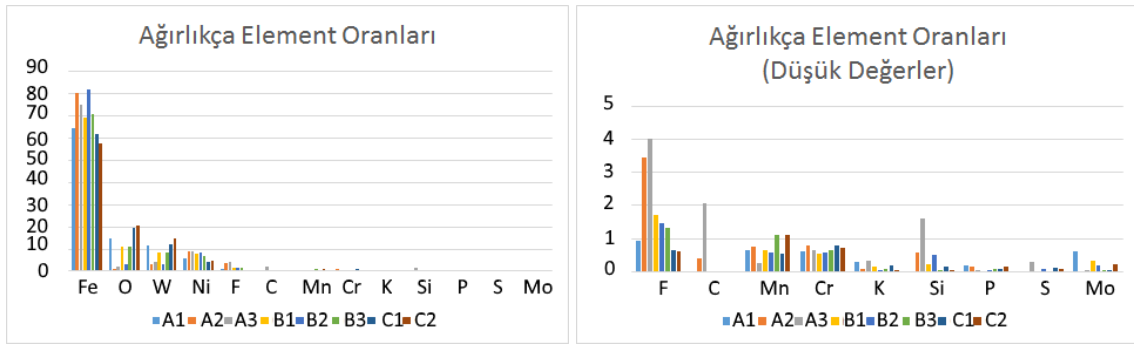


(c) D2 Aşınma SEM 2000x bölge B

Şekil 4.97: D2 numunesi Aşınma İzi SEM görüntüleri

Çizelge 4.24: D2 Numunesi Aşınma İzi EDS sonuçları

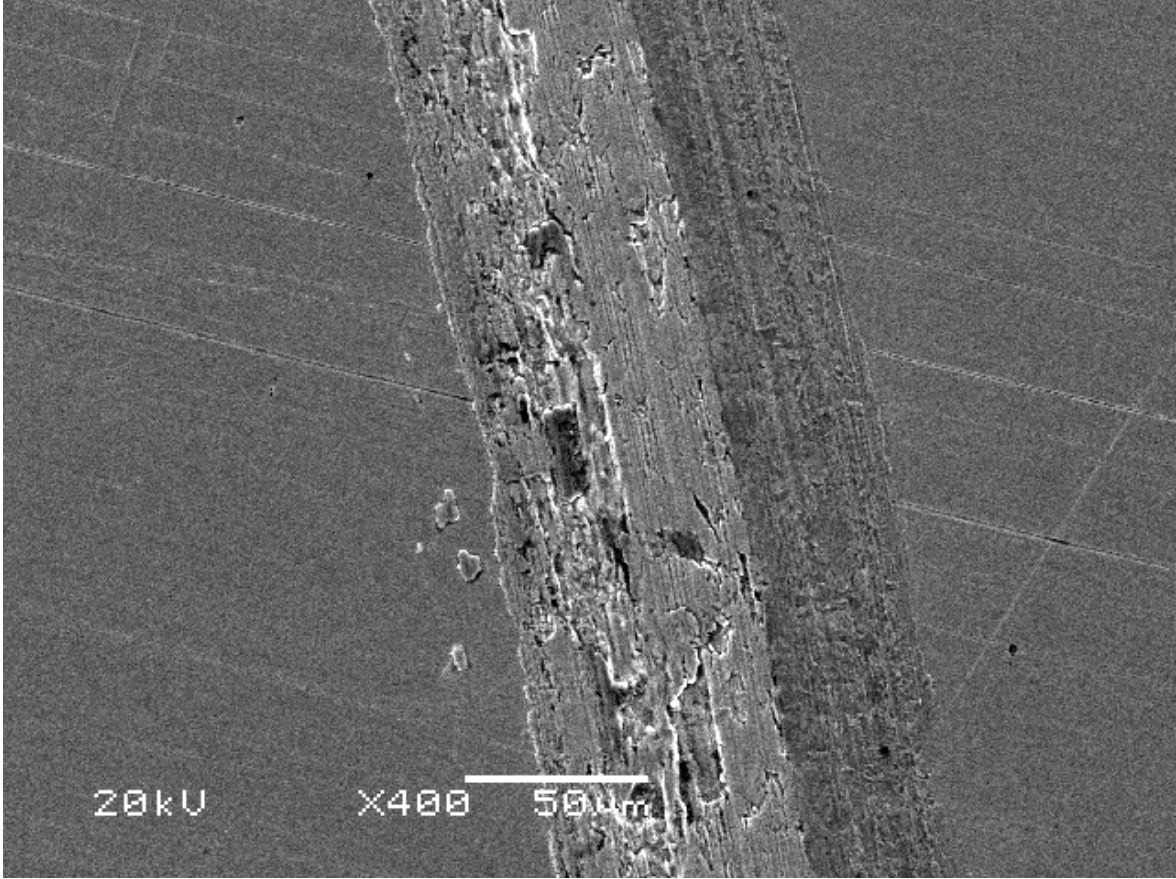
Element	D2							
	A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2
Fe	64.369	80.339	75.155	69.074	81.578	70.449	61.687	57.447
O	14.984	0.869	2.323	11.274	3.211	10.824	19.283	20.352
W	11.717	3.400	4.345	8.227	3.377	8.610	12.167	14.737
Ni	5.609	9.201	8.905	7.808	8.370	6.753	4.311	4.505
F	0.947	3.434	4.028	1.722	1.452	1.332	0.642	0.606
C	0.000	0.411	2.056	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Mn	0.659	0.748	0.271	0.634	0.580	1.100	0.560	1.119
Cr	0.627	0.775	0.662	0.553	0.565	0.650	0.778	0.708
K	0.298	0.073	0.323	0.154	0.059	0.087	0.182	0.037
Si	0.000	0.584	1.593	0.235	0.509	0.043	0.147	0.014
P	0.189	0.165	0.027	0.000	0.030	0.099	0.068	0.157
S	0.000	0.000	0.280	0.000	0.083	0.000	0.110	0.078
Mo	0.601	0.000	0.032	0.318	0.186	0.052	0.066	0.241



(a) D2 aşınma izi EDS elementlerin ağırlıkça oranı (b) D2 aşınma izi EDS elementlerin ağırlıkça oranı düşük

Şekil 4.98: D2 aşınma izi EDS sonuçları

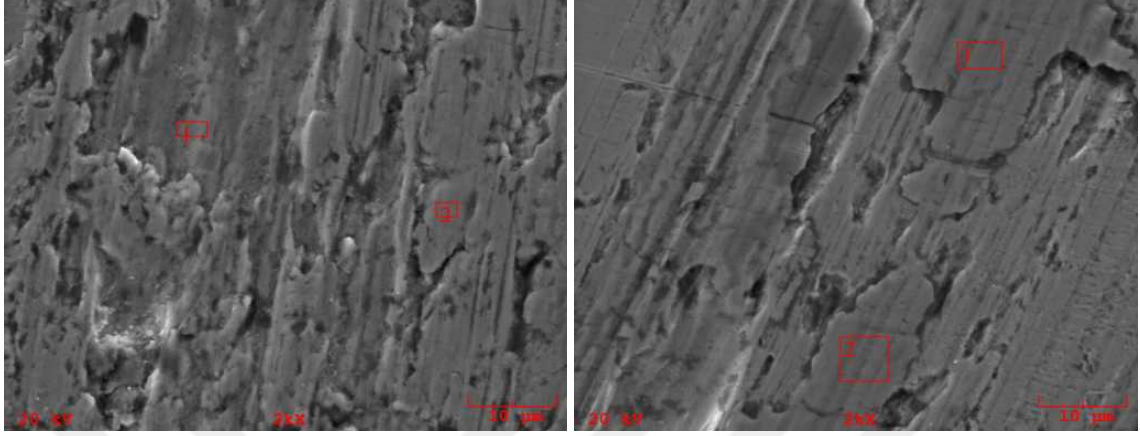
D3 kodlu numunenin aşınma izi Şekil 4.99’da verilmiştir. Bu görüntü incelendiğinde adhesiv aşınma etkisi daha düşük görülmektedir. Daha önceki numunelerdeki gibi yüzeyde büyük katmanlar gözükmemektedir. Ancak bir engelle karşılaşınca kadar aşınma yönünde ilerlemiş ve sonra parça koparıp kalkmış gibi gözükken bölgeler mevcuttur. Abrasiv aşınma işareti olan pulluk izine benzer izler bu görüntüde mevcuttur.



Şekil 4.99: D3 Aşınma SEM genel görüntü

Şekil 4.100a ve Şekil 4.100b numune üzerindeki aşınmayı göstermektedir. Abrasiv aşınma izleri ve kaplamanın aşınmanın etkisiyle kalkıp parçalandığını gösteren bölgeler mevcuttur. Bu numunede adhesiv aşınmanın daha düşük etkisi olmuştur. Bunun sebebinin içindeki yüksek oranda sert B_4C ’den kaynaklandığı düşünülmektedir. Silva ve D’Oliveira’nın 2015 çalışmasında yumuşak fazın dalga gibi yüzeyde kaydığı ve ardından sert faza geldiğinde yüzeyde laminasyon oluşturduğunu gösterilmiştir. Kaplamadaki yüksek B_4C içeriğinin etkisi ile daha sık oluşan sert fazlar malzeme yüzeyinde yumuşak faz Nikel’in adhesiv aşınmaya direnç oluşturmuştur. Ancak bu sert fazlar kırılğan olduğu için yüzeyde gözlenen aşınma sonucunu vermiştir. Sert faz daha düşük sürtünme katsayısı ve

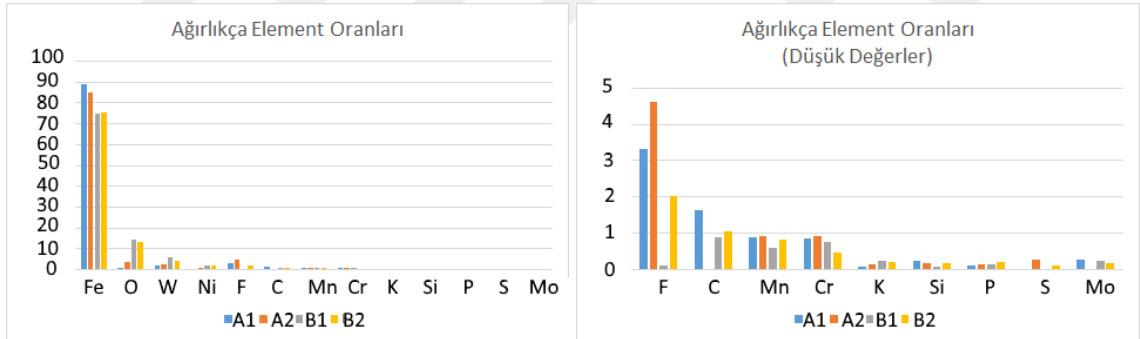
aşınmaya sebep olmuştur. Bu sebeple Şekil 4.71’de görüldüğü üzere en iyi sürtünme ve aşınma değerleri içinde %12 Ekabor II olan numunelerde gerçekleşmiştir.



(a) D3 Aşınma SEM 2000x bölge A

(b) D3 Aşınma SEM 2000x bölge B

Şekil 4.100: D3 numunesi Aşınma İzi SEM görüntüleri



(a) D3 aşınma izi EDS elementlerin ağırlıkça oranı

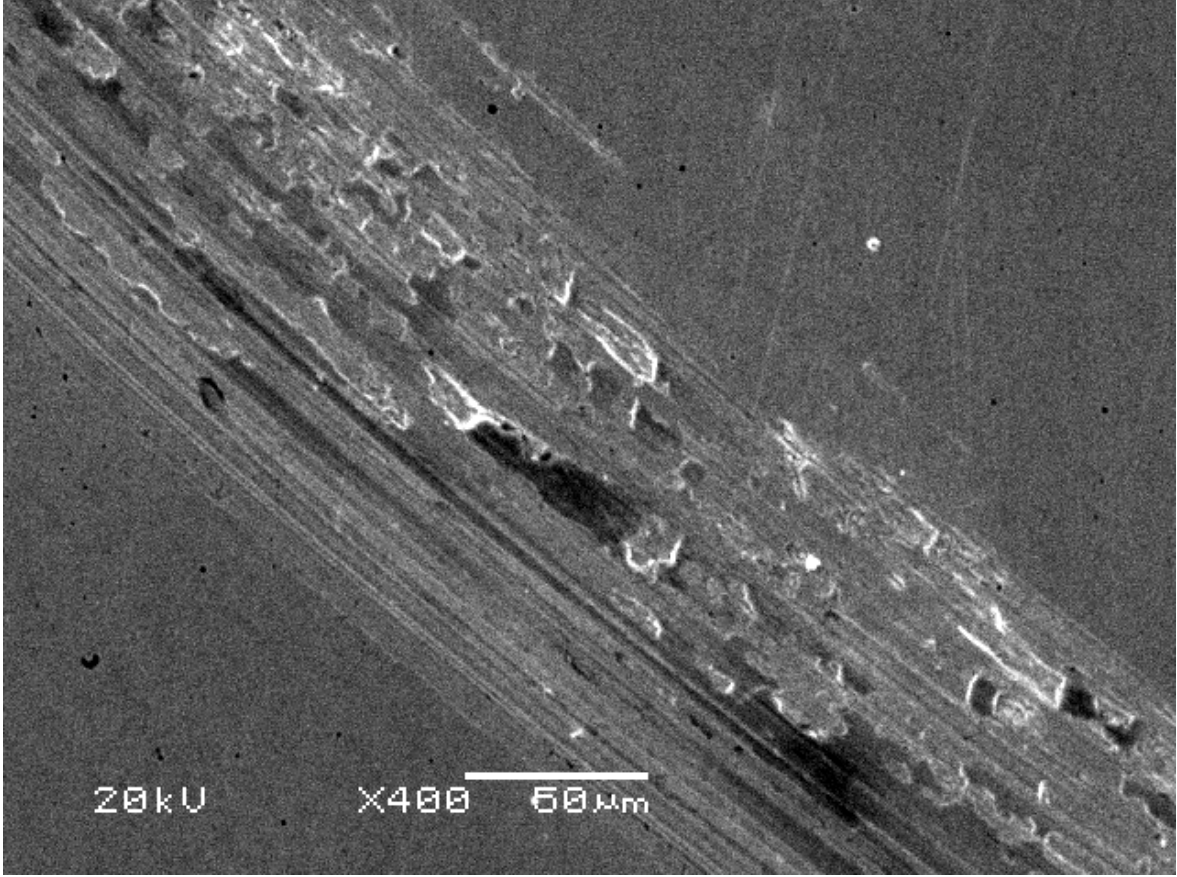
(b) D3 aşınma izi EDS elementlerin ağırlıkça oranı düşük

Şekil 4.101: D3 aşınma izi EDS sonuçları

Çizelge 4.25: D3 Numunesi Aşınma İzi EDS sonuçları

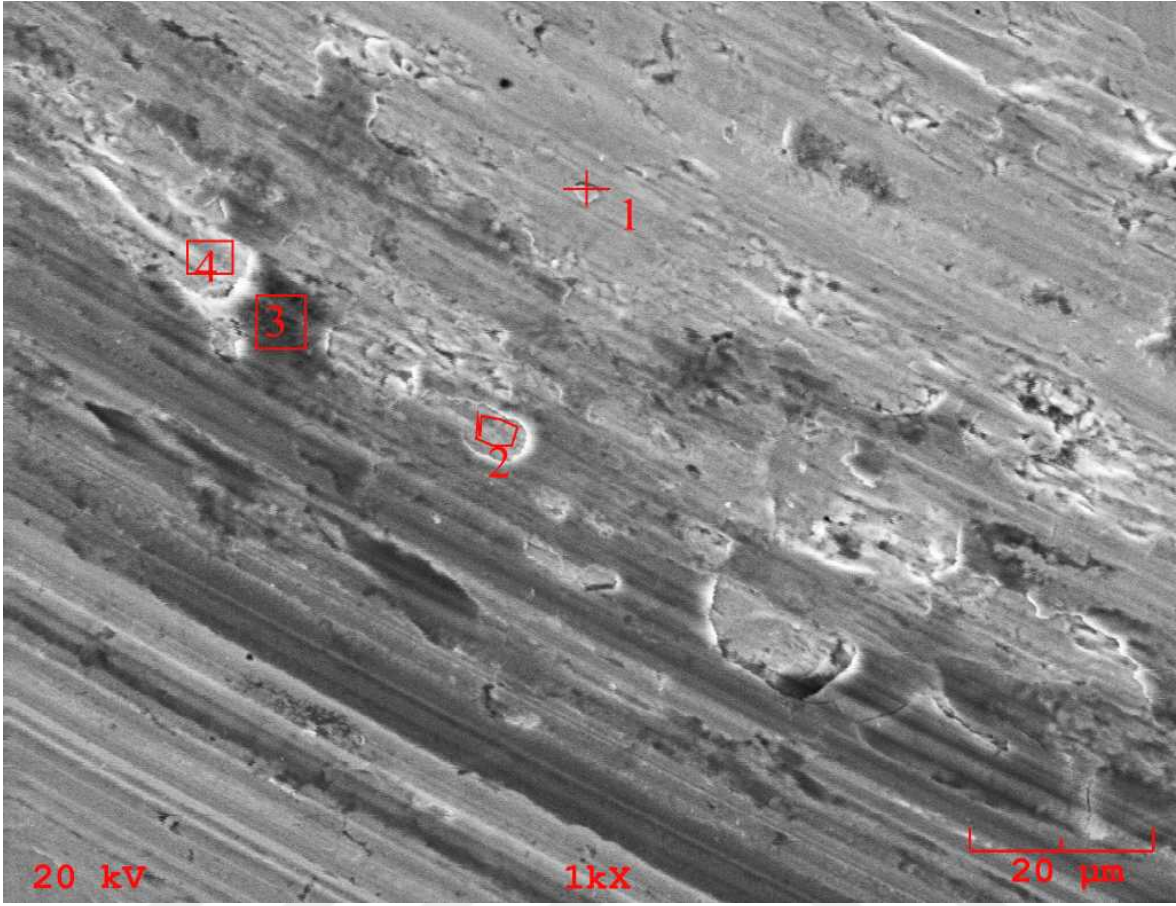
Element	D3			
	A1	A2	B1	B2
Fe	89.142	85.243	74.926	75.186
O	1.129	3.937	14.162	13.123
W	1.798	2.813	5.847	4.147
Ni	0.497	0.758	1.976	2.228
F	3.313	4.623	0.112	2.039
C	1.651	0.025	0.878	1.069
Mn	0.899	0.940	0.609	0.829
Cr	0.861	0.926	0.768	0.468
K	0.072	0.132	0.261	0.218
Si	0.253	0.184	0.077	0.172
P	0.110	0.134	0.137	0.229
S	0.000	0.284	0.000	0.110
Mo	0.277	0.000	0.250	0.181

E1 kodlu numunenin aşınma izi Şekil 4.102’de verilmiştir. Bu görüntü incelendiğinde adhesiv aşınma etkisi daha düşük görülmektedir. Yer yer adhesiv aşınma ile taşınmış malzeme yüzeyde gözüktüğü de abrasiv aşınma etkileri daha baskındır. Abrasiv aşınma işareti olan pulluk izine benzer izler bu görüntüde mevcuttur.



Şekil 4.102: E1 Aşınma SEM genel görüntü

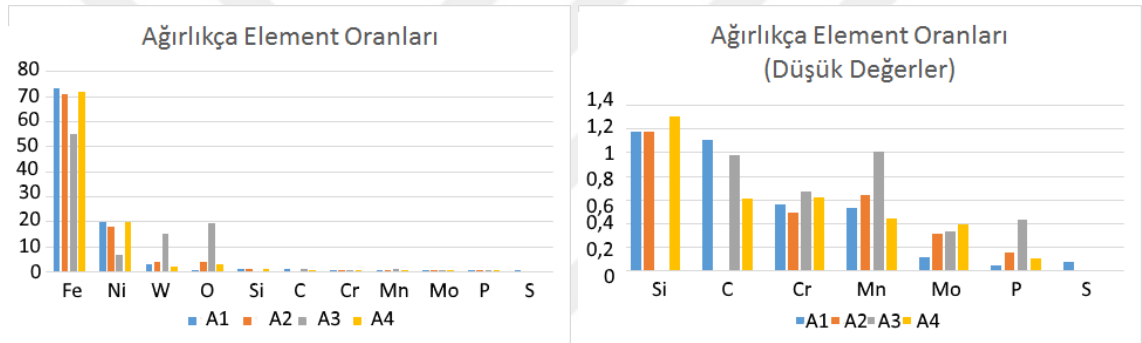
Şekil 4.103 incelendiğinde adhesiv aşınma ile taşınmış bölgeler ve abrasiv aşınmaya eşlik eden adhesiv aşınma ile yüzeye yapışmış katmanların olduğu bölgeler görülmektedir. Bu bölgelerden A3 %15 W ihtiva etmekte ve aşınma ile WC bilyeden transfer olduğunu göstermektedir. Bu numunede A3 bölgesi dışındaki bölgelerde yüksek Ni görülmesi, Ni kaplama kalınlığının yeterli olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.103: E1 numunesi Aşınma İzi SEM görüntüleri

Çizelge 4.26: E1 Numunesi Aşınma İzi EDS sonuçları

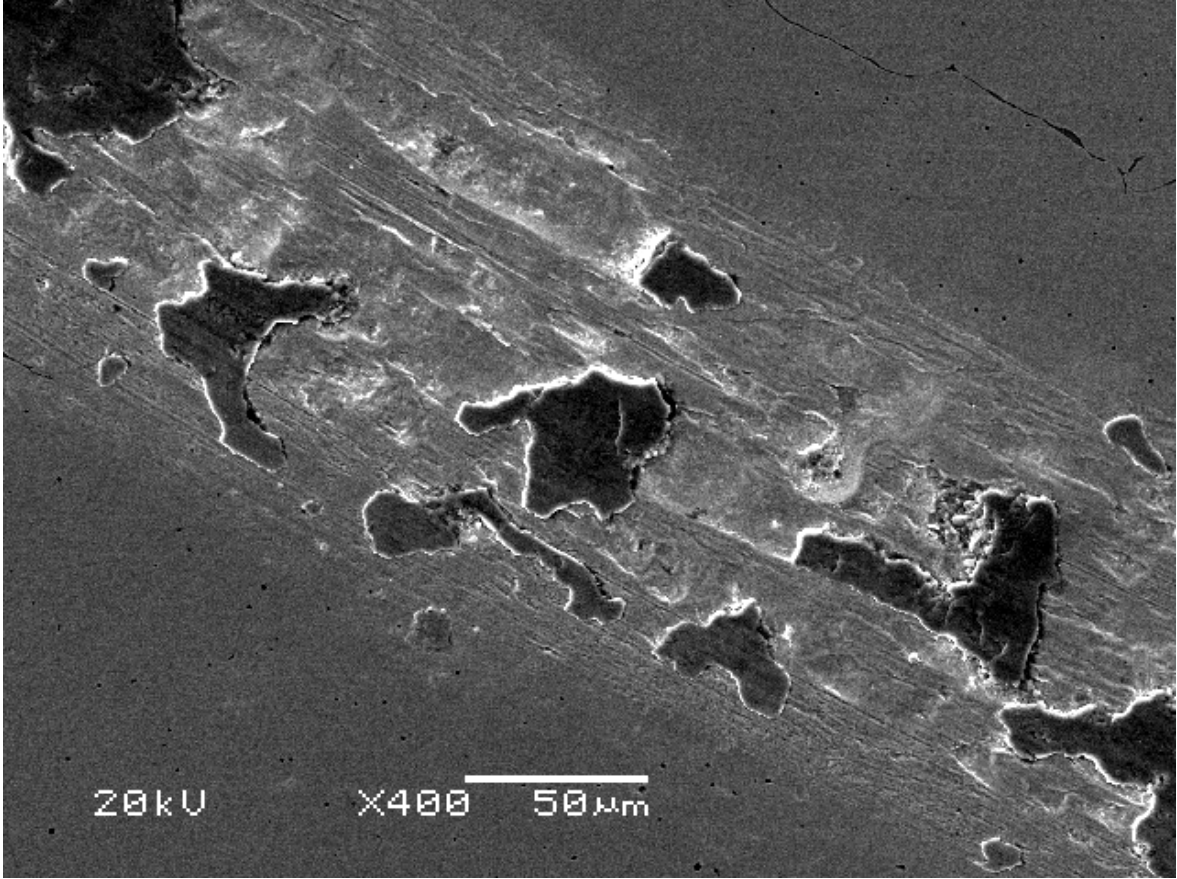
Element	E1			
	A1	A2	A3	A4
Fe	73.437	71.205	54.884	71.956
Ni	19.886	18.225	6.921	19.714
W	2.942	3.781	15.394	2.088
O	0.112	4.012	19.373	2.757
Si	1.176	1.174	0	1.307
C	1.107	0	0.981	0.615
Cr	0.565	0.495	0.673	0.618
Mn	0.536	0.637	1.013	0.442
Mo	0.114	0.317	0.331	0.392
P	0.052	0.154	0.429	0.111
S	0.074	0	0	0



(a) E1 aşınma izi EDS elementlerin ağırlıkça oranı
 (b) E1 aşınma izi EDS elementlerin ağırlıkça oranı düşük

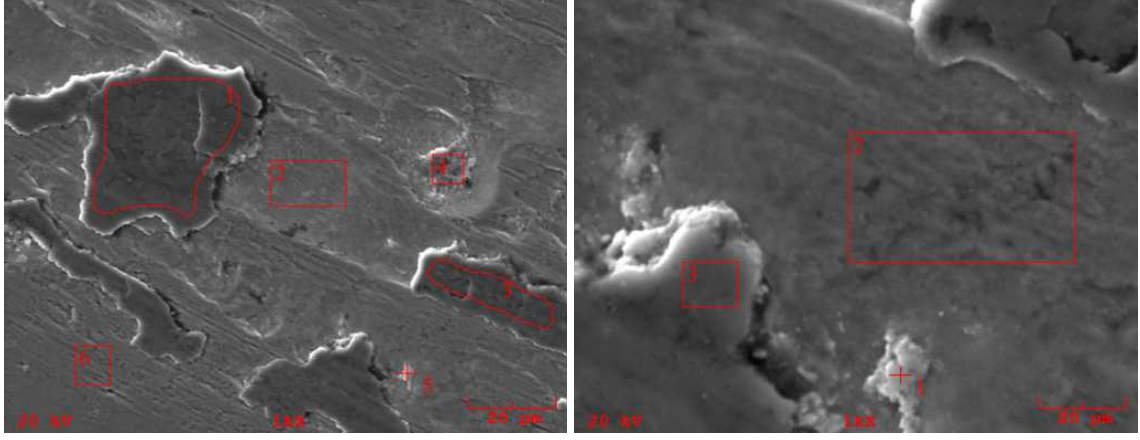
Şekil 4.104: E1 aşınma izi EDS sonuçları

E2 kodlu numunenin aşınma izi Şekil 4.105’de verilmiştir. Bu görüntü incelendiğinde adhesiv aşınma etkisinin yüksek olduğu görülmektedir. Yer yer adhesiv aşınma ile taşınmış malzeme yüzeyde gözükmekte, izin geneli incelendiğinde abrasiv aşınma daha az görülmektedir. Abrasiv aşınma işareti olan pulluk izine benzer izler bu görüntüde oldukça azdır.



Şekil 4.105: E2 Aşınma SEM genel görüntü

Şekiller 4.106a ve 4.106a incelendiğinde abrasiv aşınmadan ziyade adhesiv aşınmanın bu numunede etkin aşınma şekli olduğu görülmektedir. A3,A4, B1 ve B3 bölgelerinde yüksek oranda W ölçülmüştür. Bu adhesiv aşınma olduğu fikrini destekleyen bir veridir. Diğer bölgelerde Nikel oranının yüksekliği kaplama kalınlığının yeterli olduğunu göstermektedir. Şekil 4.71 incelendiğinde E2’nin düşük sürtünme katsayısına sahip olduğu ancak aşınma hacminin yüksek olduğu görülmektedir. Nikelin oluşturduğu yumuşak fazlar ve oluşan oksitler adhesiv aşınma sırasında düşük sürtünme sağlamış ancak SEM görüntülerinden de anlaşılacağı üzere ortalamanın üstünde aşınmıştır.



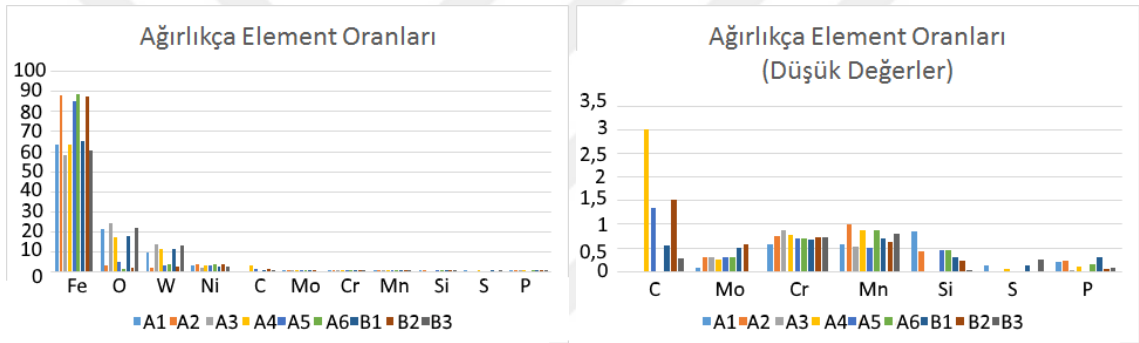
(a) E2 Aşınma SEM 1000x bölge A

(b) E2 Aşınma SEM 1000x bölge B

Şekil 4.106: E2 numunesi Aşınma İzi SEM görüntüleri

Çizelge 4.27: E2 Numunesi Aşınma İzi EDS sonuçları

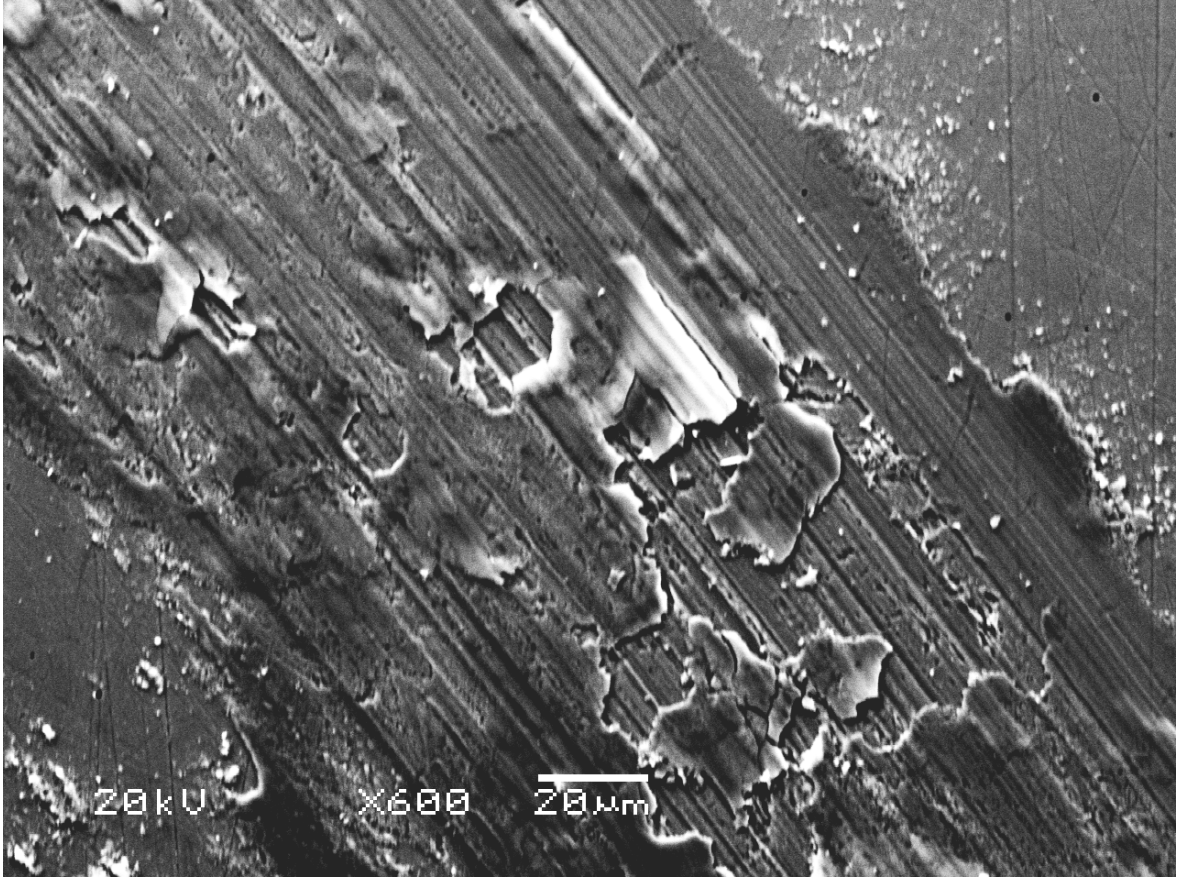
Element	E2								
	A1	A2	A3	A4	A5	A6	B1	B2	B3
Fe	63.687	88.066	58.516	63.698	85.147	88.874	64.988	87.836	60.525
O	21.341	3.37	24.013	17.22	5.085	1.225	17.678	2.144	21.907
W	9.573	2.246	13.632	11.074	3.363	3.848	11.329	2.501	12.864
Ni	2.988	3.572	2.11	2.907	3.118	3.56	2.822	3.799	2.499
C	0	0	0	3.006	1.34	0	0.549	1.52	0.29
Mo	0.081	0.312	0.308	0.252	0.294	0.309	0.494	0.567	0
Cr	0.575	0.759	0.865	0.782	0.708	0.712	0.688	0.728	0.738
Mn	0.573	0.992	0.54	0.88	0.494	0.865	0.704	0.62	0.791
Si	0.858	0.44	0	0	0.452	0.448	0.307	0.234	0.042
S	0.126	0	0	0.068	0	0	0.131	0	0.249
P	0.198	0.244	0.016	0.113	0	0.159	0.312	0.05	0.095



(a) E2 aşınma izi EDS elementlerin ağırlıkça oranı (b) E2 aşınma izi EDS elementlerin ağırlıkça oranı düşük

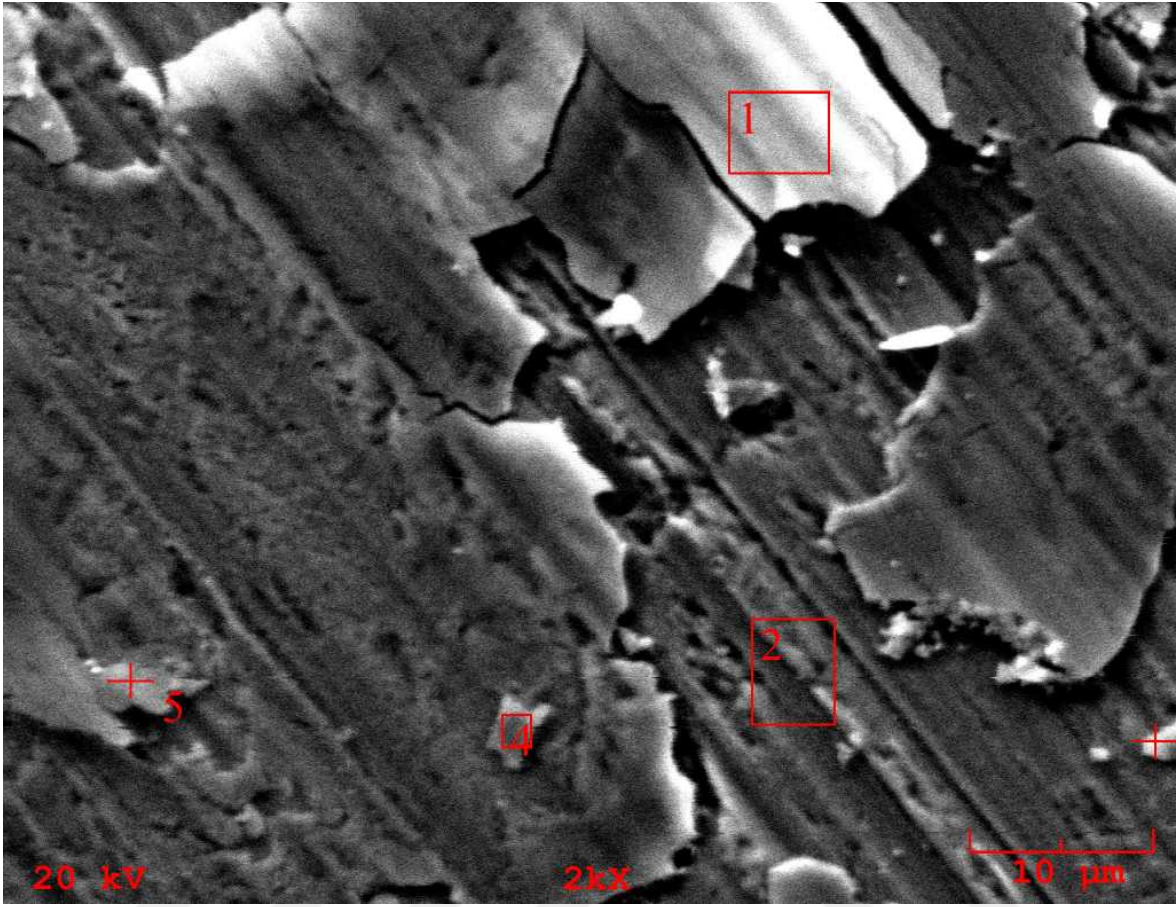
Şekil 4.107: E2 aşınma izi EDS sonuçları

E3 kodlu numunenin aşınma izi Şekil 4.108’de verilmiştir. Bu görüntü incelendiğinde yüzeyde abrasiv ve adhesiv aşınmanın etkileri görülmektedir. Abrasiv aşınma ile oluşan pulluk izi benzeri izler, laminasyon yapıları ve yorulma çatlakları yüzeyde görülmektedir.



Şekil 4.108: E3 Aşınma SEM genel görüntü

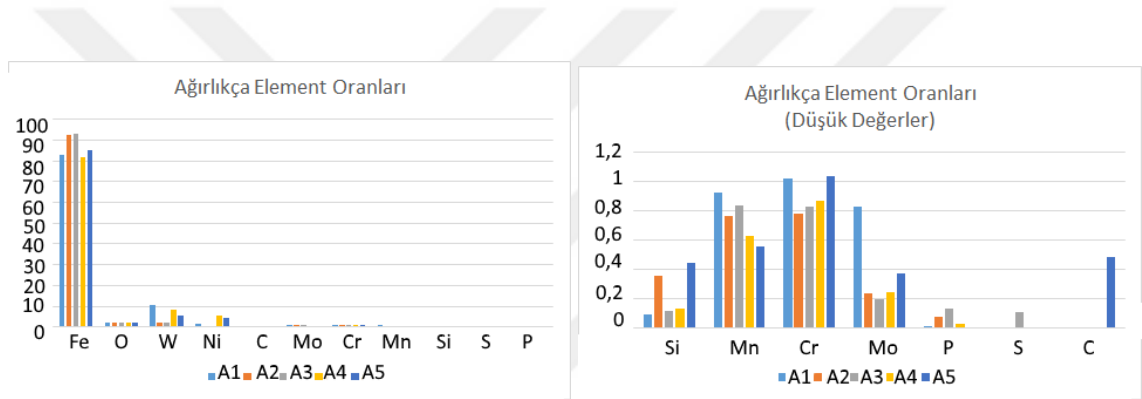
Şekil 4.109 incelendiğinde adhesiv ve abrasiv aşınmanın etkilerinin olduğu gözlenmektedir. Yüzeyde belirgin yorulma çatlakları görülmektedir. A2 bölgesinde abresiv aşınma çizgileri belirgindir. Bu bölgeden yapılan EDS analizinde ve aynı aşınmanın olduğu A3 bölgesinde düşük W ve yüksek Fe görülmektedir (Çizelge 4.28). Ancak adhesiv etkilerin gözlemlendiği A1, A4 ve A5 bölgelerinde plakalar halinde yeniden yapışmalar görülmektedir. Bu bölgelerin EDS analizinde yüksek miktarda W bulunduğu görülmüştür. W'nin kaplamada olmadığı göz önüne alınırsa ancak aşındırıcı bilyeden geldiği düşünülmektedir. Şekil 4.110 incelendiğinde Ni oranının %2'lerde kaldığı görülmektedir. Düşük Nikel oranı kaplamada kaplama kalınlığı düşük kaldığını ya da aşınma ile incelendiğini göstermektedir.



Şekil 4.109: E3 Aşınma SEM 2000x bölge A

Çizelge 4.28: E3 Numunesi Aşınma İzi EDS sonuçları

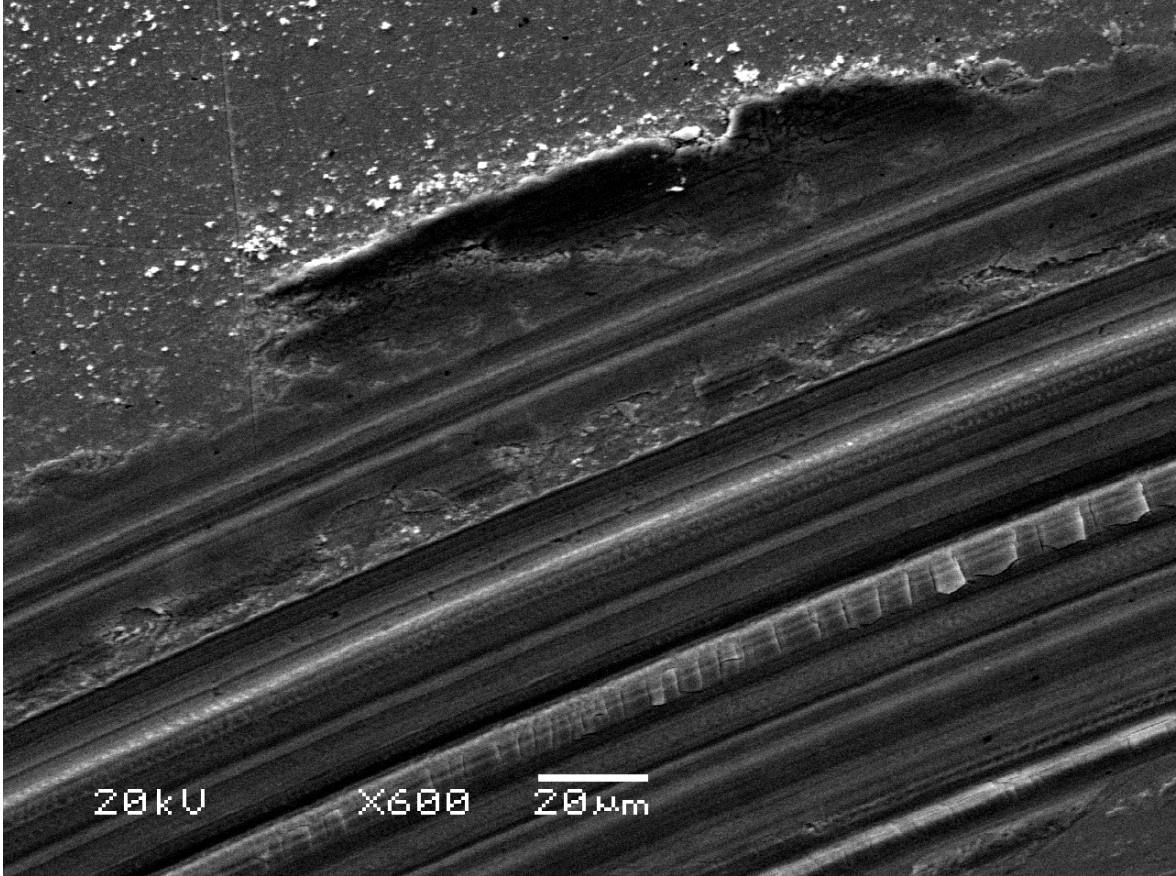
	A1	A2	A3	A4	A5
Fe	82,798	92,740	93,083	81,784	85,078
Ni	2,211	2,335	2,376	2,348	2,197
W	10,442	2,096	2,162	8,302	5,660
O	1,687	0,633	0,173	5,678	4,191
Si	0,089	0,358	0,115	0,132	0,440
Mn	0,921	0,759	0,833	0,629	0,553
Cr	1,016	0,774	0,822	0,863	1,029
Mo	0,829	0,232	0,196	0,240	0,370
P	0,008	0,074	0,133	0,024	0,000
S	0,000	0,000	0,107	0,000	0,000
C	0,000	0,000	0,000	0,000	0,483



(a) E3 aşınma izi EDS elementlerin ağırlıkça oranı (b) E3 aşınma izi EDS elementlerin ağırlıkça oranı düşük

Şekil 4.110: E3 aşınma izi EDS sonuçları

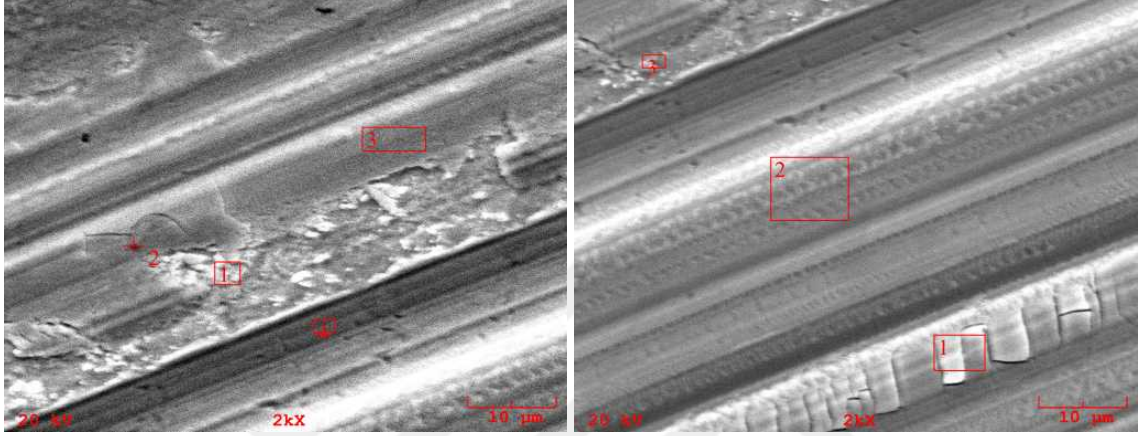
E4 kodlu numunenin aşınma izi Şekil 4.111'de verilmiştir. Bu görüntü incelendiğinde yüzeyde abrasiv aşınmanın etkileri ve yorulma izleri görülmektedir. Abrasiv aşınma ile oluşan pulluk izi benzeri izler, laminasyon yapıları ve yorulma çatlakları yüzeyde görülmektedir.



Şekil 4.111: E4 Aşınma SEM genel görüntü

Şekil 4.112 incelendiğinde iki farklı aşınma sonucu görülmektedir. Şekil 4.112a'da A1 bölgesinde gözlenen kaplamanın parçalanarak ayrıldığı aşınma ile Şekil 4.112b'de B1 bölgesinde görülen yorulma çatlakları malzemenin aşınma özellikleri hakkında önemli bilgi vermektedir. Kaplamanın Çizelge 4.29'da verilen EDS sonuçları incelendiğinde koparak kalkan kaplamanın olduğu bölgenin etrafında aşınmaya göre kopma olmayan bölgede (A2) yüksek Cr, Mn ve Mo olduğu görülmektedir. Yüksek Cr sertliği arttırmış, Mn kaplamanın o bölgesinin tokluğunu arttırmış, Mo ise katı yağlayıcı olarak görev yapmıştır. Bu iki element parçalanıp kopmayı önlemektedir. A2 bölgesi genel yapının en düşük Ni ve Fe oranına sahip ancak en yüksek W oranını içermektedir. Bu veriler ışığında SEM görüntüsünden de yola çıkarak o bölgede WC bilyenin üzerine yapışmış kaplamanın oraya taşındığı ve yeni etrafından daha güçlü bir katman oluşturduğu düşünülmektedir. Ancak bu katman

oluşurken kopan parçalar A1 bölgesindeki parçalanmaya sebep olmuştur. Şekil 4.112b’de görülen B1 bölgesi ise yorulma çatlakları göstermektedir. Bu çatlaklar ve yüksek W oranı o bölgede yorulmaya sebep olabilecek sert bir yapı oluştuğunu düşündürmektedir. XRD analizi sonucunda bu yapının FeB olduğu anlaşılmıştır. Keza abresiv aşınma izleri görülen B3 bölgesinde de en yüksek W oranı gözlenmiştir (Şekil 4.113). Yüksek W oranı olmasından yola çıkarak bu bölgede sert CrB oluştuğu anlaşılmıştır.



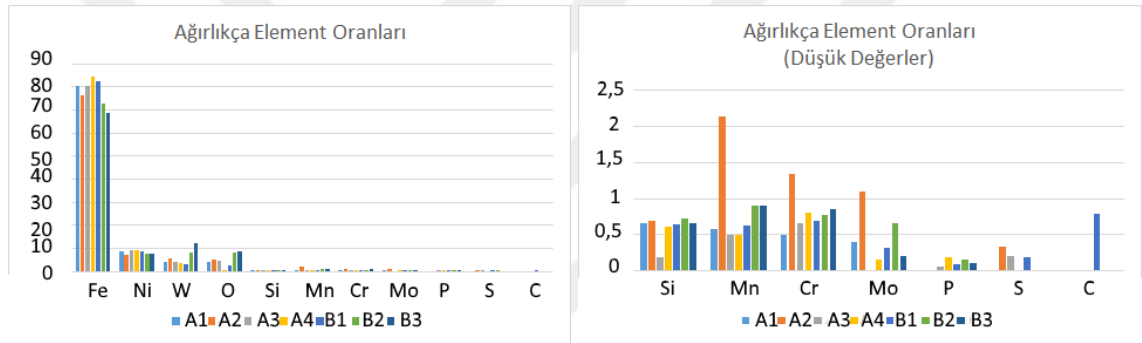
(a) E4 Aşınma SEM bölge A

(b) E4 Aşınma SEM bölge B

Şekil 4.112: E4 aşınma izi SEM Görüntüleri

Çizelge 4.29: E4 Numunesi Aşınma İzi EDS sonuçları

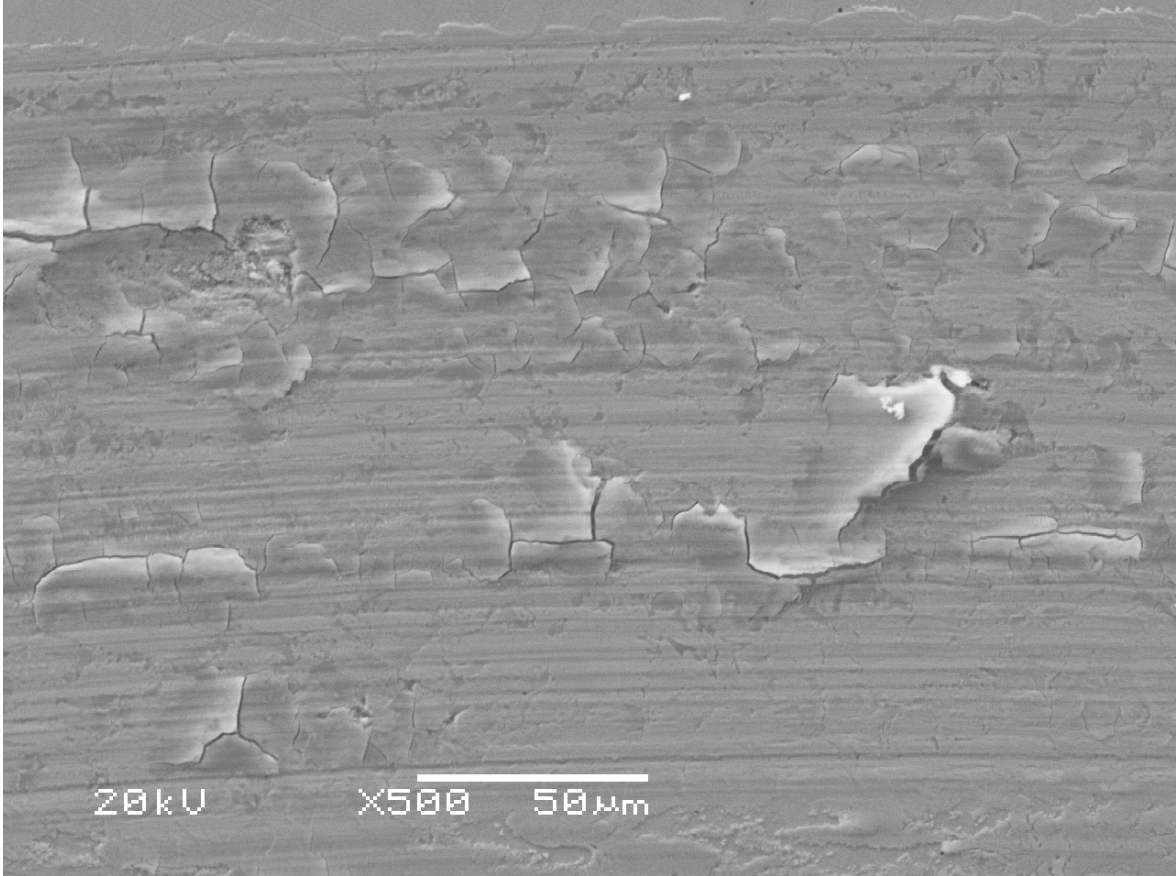
	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3
Fe	80,607	76,503	80,232	84,251	82,359	72,813	68,631
Ni	8,958	6,971	9,298	9,427	8,537	7,610	7,634
W	4,245	5,638	3,953	3,556	3,168	8,224	12,506
O	4,034	5,293	4,904	0,504	2,564	8,120	8,506
Si	0,664	0,697	0,185	0,614	0,649	0,722	0,653
Mn	0,586	2,132	0,495	0,495	0,634	0,905	0,899
Cr	0,506	1,341	0,664	0,804	0,697	0,781	0,855
Mo	0,400	1,090	0,000	0,158	0,326	0,662	0,201
P	0,000	0,000	0,057	0,190	0,095	0,156	0,114
S	0,000	0,335	0,211	0,000	0,183	0,006	0,000
C	0,000	0,000	0,000	0,000	0,787	0,000	0,000



(a) E4 aşınma izi EDS elementlerin ağırlıkça oranı (b) E4 aşınma izi EDS elementlerin ağırlıkça oranı düşük

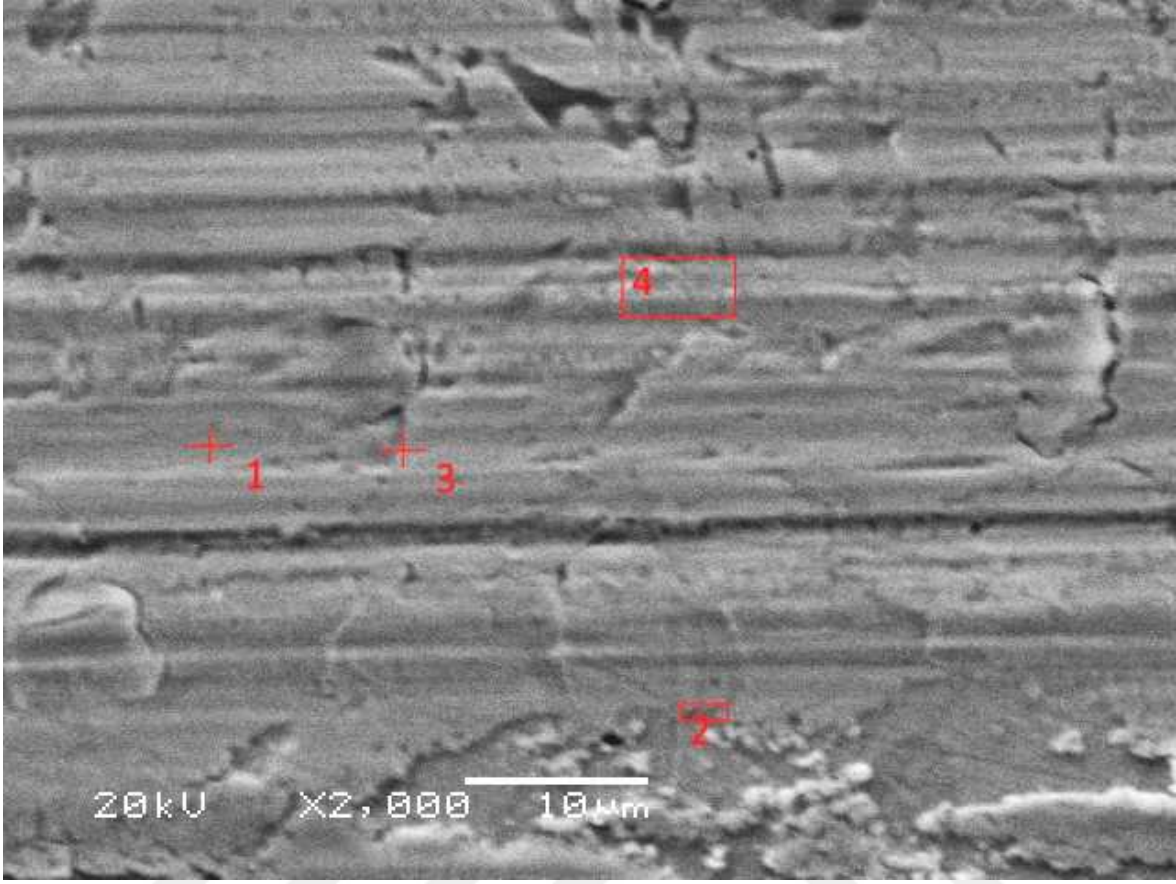
Şekil 4.113: E4 aşınma izi EDS sonuçları

E5 kodlu numunenin aşınma izi Şekil 4.114'de verilmiştir. Bu görüntü incelendiğinde yüzeyde abrasiv ve adhesiv aşınmanın etkileri ve yorulma izleri görülmektedir. Abrasiv aşınma ile oluşan pulluk izi benzeri izler, laminasyon yapıları ve yorulma çatlakları yüzeyde görülmektedir.



Şekil 4.114: E5 Aşınma SEM genel görüntü

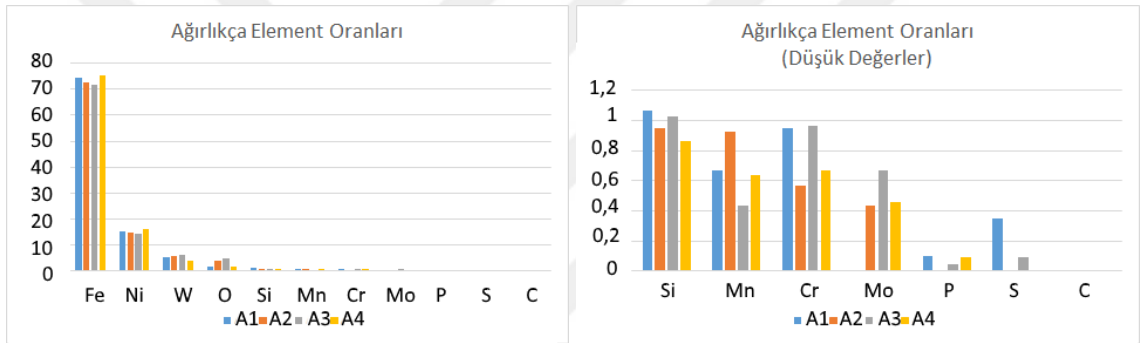
Şekil 4.115 incelendiğinde yüzeyde abrasiv aşınmanın çok etkin olduğu görülmektedir. Kaplama içindeki yüksek B_4C oranının etkisi ile bilye üzerine sıvanan kaplamanın sert karbürlere denk gelerek koptuğu ve yüzeye geri yapıştığı parçalandığı görülmektedir. Diğer numunelerden daha farklı olarak Çizelge 4.30'da görüleceği üzere yüksek Si miktarı kaplamada Silisyum Karbürlerin oluştuğunu göstermektedir. Kaynak sırasında B_4C 'nin parçalanması sonucu ortaya çıkan karbon 4140 çeliği içindeki silisyumla birleşerek yüzeyde SiC oluşturmuştur ancak bu yapı homojen dağılmamıştır. Bu sebeple XRD analizinde SiC'e rastlanmamıştır. Şekil 4.116 incelendiğinde karbür oluşturucu kromun da diğer numunelerden daha yüksek değerde olduğu görülmektedir. XRD incelemesi sonucunda bu kromun yapıdaki krom borürlerden geldiği bulunmuştur.



Şekil 4.115: E5 aşınma izi SEM görüntüsü

Çizelge 4.30: E5 Numunesi Aşınma İzi EDS sonuçları

	A1	A2	A3	A4
Fe	74,645	72,460	71,559	75,502
Ni	15,031	14,848	14,238	15,985
W	5,497	5,805	6,301	3,926
O	1,704	4,023	4,674	1,866
Si	1,062	0,945	1,023	0,859
Mn	0,666	0,922	0,435	0,636
Cr	0,946	0,564	0,964	0,671
Mo	0,000	0,432	0,668	0,460
P	0,097	0,000	0,048	0,096
S	0,353	0,000	0,091	0,000
C	0,000	0,000	0,000	0,000

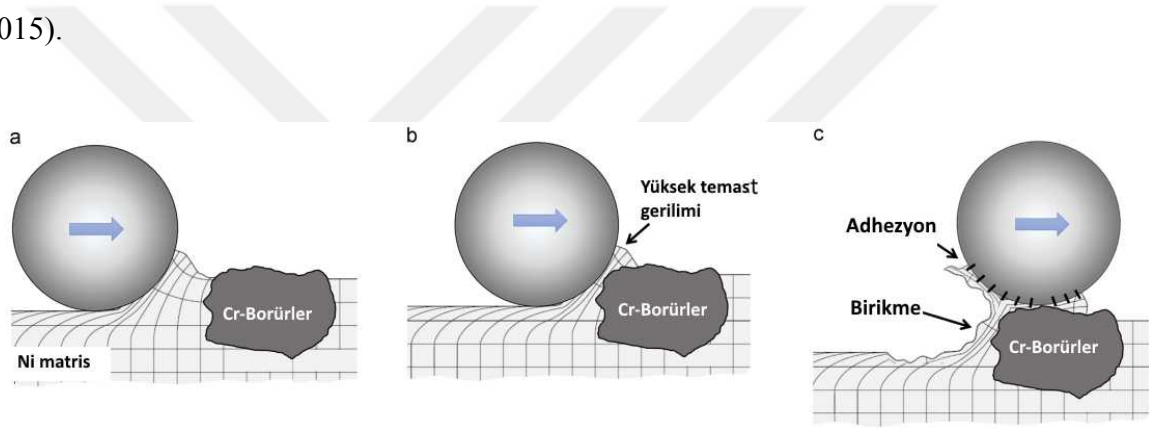


(a) E5 aşınma izi EDS elementlerin ağırlıkça oranı (b) E5 aşınma izi EDS elementlerin ağırlıkça oranı düşük

Şekil 4.116: E5 aşınma izi EDS sonuçları

Ni içeren kaplamaların WC ile çalışmasında görülen adhezyon aşınması

Numunelerin aşınma test sonuçları ile aşınma izinin SEM ve EDS analizleri incelendiğinde görülmüştür ki Ni bazlı kaplama WC bilyede yüksek oranda adhezyona sebep olmaktadır. Bu konuda literatür incelendiğinde WC'ün Kobalt, Demir ve Nikel'le ıslanma açısının 0 olduğu görülmüştür (Macedo vd., 2003). Islanma açısı daha çok sıvı metal için önemli bir kriter olsa da aşınma sırasında ani parlamalarla Nikel'in erimesi ve WC'e yapışması mümkündür. WC takımların Nikel alaşımlarında kullanımı üzerine yapılan çalışmalarda (Liao ve Shiue, 1996) ve (Xue ve W. Chen, 2011) WC'ün Nikel içinde çözüldüğünü ve takımda adhezyon oluştuğunu bulmuşlardır. Da Silva ve arkadaşlarının NiCrSiB kaplama üzerine yaptıkları çalışmada Nikel bazın bilyeye sıvandı ve sert karbür ya da borürlere geldiğinde adhezyona sebep olduğu bulunmuştur (Silva ve D'Oliveira, 2015).



Şekil 4.117: Ni bazlı sert fazlar içeren kaplamada adhezyon (Silva ve D'Oliveira, 2015)

Şekil 4.117'de görüldüğü üzere aşınma testi sırasında bilye yumuşak bir metal olan matrisdeki Ni'i dalga gibi önünde taşır (a). Bu dalga sert bir faza örneğin krom borür bölgesine denk geldiğinde yüksek temas gerilmesi oluşur (b). Bu temas gerilmesi sonucunda bilyenin taşıdığı nikel dalgası bilyeden ayrılır ancak ayrılırken de adhezyon aşınmasına sebep olur (c). Aşınma sonucu EDS analizleri incelendiğinde aynı mekanizmanın işlediği görülmüştür.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada çelik yüzey özelliklerini geliştirmek için Plazma Transfer Ark kaynağı ile yüzeye uygulanabilecek bir yenilikçi kaplama geliştirilmesi amaçlanmıştır. Yüzey özelliklerini geliştirmek için Bor Karbür ve baz olarak da Nikel içeren bir kaplama malzemesi araştırılmıştır. Bor Karbür kaynağı olarak borlamada kullanılan Ekabor II malzemesi ve saf Bor Karbür kullanılmış ve birbirlerine göre etkilerine bakılmıştır. Çalışmada Nikel bazlı, %4 ile %12 arasındaki oranlarda değişen Ekabor II ve B₄C içeren kaplama malzemeleri elde ve değirmende hazırlanarak, PTA yöntemi ile AISI 4140 çelik üzerine kaplanmıştır. Bu işlem sonrasında hazırlanan numunelerin mikroyapıları ve aşınma karakteristikleri incelenmiştir. Bu incelemeler sonucunda şu bilgilere ulaşılmıştır:

- Değirmende hazırlanan tozların homojen karışmış olması, kaplamanın daha homojen olmasına sebep olmuştur. Ancak homojen olmasının kaplamanın aşınma karakteristiğine menfi ya da müspet bir etkisi olmamıştır.
- Ekabor II oranı arttıkça kaplamada borlu bileşiklerin oranı da artmaktadır. Düşük oranlarda Fe-Ni fazları gözlemlenirken, yüksek oranlarda Ni-B fazları gözlenmiştir. Fe-B fazları ise tüm oranlarda kaplamada görülmüştür.
- B₄C içeren kaplamada oran arttıkça AISI 4140 içindeki diğer krom ile de borürler oluşmuştur.
- B₄C oranı arttıkça sürtünme katsayısında yükselme olmuştur. Bunun sebebi Nikel bazlı kaplamanın WC ile yüksek adhezyon aşınmasına sebep olmasıdır.
- Kaplamada Bor oranı arttıkça aşınma izinde yorulma çatlakları da artmıştır. Bunun sebebi Fe-B fazlarının yorulmaya yatkın olmasıdır.
- Kaplamada önce hızlı soğuyan fazların olduğu ardından da oluşan kaplamaların arasında Fe-B fazlarının olduğu görülmüştür. PTA sonrasında soğuma hızını kontrol ederek oluşan fazların kontrolü gelecek çalışmalar için mümkündür. B₄C yerine Ekabor II kullanılmasının mümkün olduğu bu çalışmada tespit edilmiştir.

Bu sonuçlar ışığında Nikel bazlı B₄C içeren kaplamalarla ilgili aşağıdaki önerilerde bulunmaktadır.

- Nikel bazlı kaplamaların adhezyon özelliğinin yüksek olması sebebiyle, kullanılan bölgede adhezyonla karşılaşılacağı hesaplanmalıdır.
- Nikel bazlı kaplamanın içinde sert fazlar oluşturarak kaplama yapıldığında bu sert fazların kaplama içindeki oranı dikkatli tespit edilmelidir. Kaplamanın normal çalışma şartlarında adhezyon dalgası oluşturacağı göz önüne alınmalı, sert faz miktarını arttırmanın her zaman sürtünme ve aşınma karakteristiğini iyileştirmeyeceği unutulmamalıdır.
- Nikel bazlı B₄C kaplamalarda saf B₄C kullanılacaksa ağırlıkça %4 geçilmemelidir. Ancak Ekabor II kullanılacaksa ağırlıkça %12 Ekabor II oranı en iyi sonuç veren karışımdır.
- Kaplamaya Bor ekleyerek Borlu sert fazlar elde etmek için saf bor karbür yerine Ekabor II'nin de kullanılabilceği bulunmuştur.

Kaplama özelliklerinin geliştirilmesi için Bor Karbürün yanında kaplamaya eklenebilecek farklı malzemelerin etkisinin incelenmesi gelecek çalışmalar için planlanmaktadır. Kaplama hazırlama tekniğinin kaplamanın triboloji karakteristikleri üzerinde etkisi göz önüne alındığında optimum malzeme hazırlama tekniğinin geliştirilmesi için farklı değirmenlerde ve farklı koşullarda kaplama malzemesi hazırlanması araştırılacaktır.

KAYNAKLAR DİZİNİ

Achar, D.R.G., M. Kamaraj ve C. S. Ganesh Bavisetty (2010). “Effect of Boron Carbide Addition on Wear Behaviour of Cobalt Based Hardfacings by Plasma Transferred Arc Process”. *Materials Science Forum* 638-642, 3745–3750.

ASM (1990). *ASM handbook*. 10th ed. Materials Park OH: ASM International.

Asthana, Rajiv, Ashok Kumar ve Narendra B. Dahotre (2006). “5 - Coatings and Surface Engineering”. *Materials Processing and Manufacturing Science*. Burlington: Academic Press, 313–395.

ASTM (2016). *ASTM G99-05(2016), Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus*.

AY, Gokce Mehmet (2015). *trib: Analysing and Visualizing Tribology Measurements*. R package version 1.2.0 bibtex: ay_trib: 2015.

Brinkman, Kyle, Elise Fox, Paul Korinko, David Missimer, Thad Adams ve Dong Su (2011). “The role of partial crystallinity on hydrogen permeation in Fe–Ni–B–Mo based metallic glass membranes”. en. *Journal of Membrane Science* 378.1-2, 301–307.

Chen, Yanfeng, Yip-Wah Chung ve Shu-You Li (2006). “Boron carbide and boron carbonitride thin films as protective coatings in ultra-high density hard disk drives”. *Surface and Coatings Technology* 200.12–13, 4072–4077.

Conde, O, A. J Silvestre ve J. C Oliveira (2000). “Influence of carbon content on the crystallographic structure of boron carbide films”. *Surface and Coatings Technology* 125.1–3, 141–146.

- Corujeira Gallo, S., N. Alam ve R. O'Donnell (2013). "In-situ synthesis of titanium carbides in iron alloys using plasma transferred arc welding". *Surface and Coatings Technology* 225, 79–84.
- Çelik, Osman Nuri (2013). "Microstructure and wear properties of WC particle reinforced composite coating on Ti6Al4V alloy produced by the plasma transferred arc method". *Applied Surface Science* 274, 334–340.
- Deuis, R.L., J.M. Yellup ve C. Subramanian (1998). "Metal-matrix composite coatings by PTA surfacing". *Composites Science and Technology* 58.2, 299–309.
- Du, Lingzhong, Chuanbing Huang, Weigang Zhang, Tiegang Li ve Wei Liu (2011). "Preparation and wear performance of NiCr/Cr₃C₂-NiCr/hBN plasma sprayed composite coating". *Surface and Coatings Technology* 205.12, 3722–3728.
- Esteban Fernández, J., Ma del Rocío Fernández, R. Vijande Diaz ve R. Tucho Navarro (2003). "Abrasive wear analysis using factorial experiment design". *Wear* 255.1–6, 38–43.
- Fan, Peng, Eric Riddle, Zhigang Z. Fang ve H.Y. Sohn (2008). "Iron aluminide coatings by an in-situ reaction process". *Surface and Coatings Technology* 202.24, 6090–6094.
- Flores, J.F., A. Neville, N. Kapur ve A. Gnanavelu (2009). "An experimental study of the erosion–corrosion behavior of plasma transferred arc MMCs". *Wear* 267.1–4, 213–222.
- Gale, W. F. ve E. R. Wallach (1991). "Microstructural development in transient liquid-phase bonding". en. *Metallurgical Transactions A* 22.10, 2451–2457.
- Gallo, Santiago Corujeira (2013). "Low Cost Precursors for In-Situ Synthesis of Composite Materials Using Plasma Transferred arc Welding". en. *PRICM*. Ed. Fernandrquis. John Wiley & Sons, Inc., 2345–2351.

- Gatto, A., E. Bassoli ve M. Fornari (2004). “Plasma Transferred Arc deposition of powdered high performances alloys: process parameters optimisation as a function of alloy and geometrical configuration”. *Surface and Coatings Technology* 187.2–3, 265–271.
- Gehrels, Tom, Mildred Shapley Matthews ve A. M. Schumann, **editors** (1994). *Hazards due to comets and asteroids*. Space science series. Tucson: University of Arizona Press.
- Harris, S. J., G. G. Krauss, S. J. Simko, R. J. Baird, S. A. Gebremariam ve G. Doll (2002). “Abrasion and chemical–mechanical polishing between steel and a sputtered boron carbide coating”. *Wear* 252.1–2, 161–169.
- Holmberg, Kenneth, Peter Andersson ve Ali Erdemir (2012). “Global energy consumption due to friction in passenger cars”. *Tribology International* 47, 221–234.
- Hou, Qing Yu (2013). “Microstructure and wear resistance of steel matrix composite coating reinforced by multiple ceramic particulates using SHS reaction of Al–TiO₂–B₂O₃ system during plasma transferred arc overlay welding”. *Surface and Coatings Technology* 226, 113–122.
- Hutchings, Ian M. (2016). “Leonardo da Vinci's studies of friction”. *Wear* 360–361, 51–66.
- Jones, M. ve U. Waag (2011). “The influence of carbide dissolution on the erosion–corrosion properties of cast tungsten carbide/Ni-based PTAW overlays”. *Wear* 271.9–10, 1314–1324.
- Liao, Y.S. ve R.H. Shiue (1996). “Carbide tool wear mechanism in turning of Inconel 718 superalloy”. en. *Wear* 193.1, 16–24.
- Liu, Y.F., J.S. Mu, X.Y. Xu ve S.Z. Yang (2007). “Microstructure and dry-sliding wear properties of TiC-reinforced composite coating prepared by plasma-transferred arc weld-surfacing process”. *Materials Science and Engineering: A* 458.1–2, 366–370.

Liu, Yuan-Fu, Jian-Min Han, Rong-Hua Li, Wei-Jing Li, Xiang-Yang Xu, Jin-Hua Wang ve Si-Ze Yang (2006). “Microstructure and dry-sliding wear resistance of PTA clad (Cr, Fe)₇C₃/γ-Fe ceramal composite coating”. *Applied Surface Science* 252.20, 7539–7544.

Liu, Yuan-Fu, Xiu-Bo Liu, Xiang-Yang Xu ve Si-Ze Yang (2010). “Microstructure and dry sliding wear behavior of Fe₂TiSi /γ-Fe/Ti₅Si₃ composite coating fabricated by plasma transferred arc cladding process”. *Surface and Coatings Technology* 205.3, 814–819.

LME (2012). *London Metal Exchange: Production and consumption*.

Lomovsky, O. I., G. V. Golubkova, N. V. Bulina, I. Yadroitsev ve I. Smurov (2013). “Laser-induced reactions in layers of B₄C + Fe and B + C + Fe mixtures on a steel substrate”. en. *Inorganic Materials* 49.6, 564–567.

Ludema, K. C. (1996). *Friction, wear, lubrication: a textbook in tribology*. Boca Raton: CRC Press.

Macedo, H. R de, A. G. P da Silva ve D. M. A de Melo (2003). “The spreading of cobalt, nickel and iron on tungsten carbide and the first stage of hard metal sintering”. *Materials Letters* 57.24–25, 3924–3932.

Pavel, E., G. Băluță, C. Giurgiu, D. Barb ve V. Sandu (1993). “Effects of pressure, time, and various additives on the crystallization of graphite and (Fe_{1-x}Ni_x)₃C carbide in the Fe□Ni□C system”. *Materials Characterization* 30.2, 107–112.

Plasma transferred arc surfacing (PTA-surfacing) (2013). Industrial Page.

Robles Hernández, Francisco C., Nicholas G. Demas, Kari Gonzales ve Andreas A. Polycarpou (2011). “Correlation between laboratory ball-on-disk and full-scale rail performance tests”. *Wear* 270.7–8, 479–491.

- Schmalzried, Clemens ve Karl A. Schwetz (2013). “Silicon Carbide- and Boron Carbide-Based Hard Materials”. en. *Ceramics Science and Technology*. Ed. Ralf Riedel ve I.-Wei Chen. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 131–227.
- Schwetz, Karl A. ve P. Karduck (1991). “Investigations in the boron-carbon system with the aid of electron probe microanalysis”. *Journal of the Less Common Metals* 175.1, 1–11.
- Silva, Leandro J. da ve Ana Sofia C. M. D’Oliveira (2015). “NiCrSiBC Coating: Microstructure and Hardness of Coatings Processed by Arc and Laser”. *Soldagem & Inspecao* 20.1. WOS:000360652100005, 39–47.
- Simunovic, Katica, Tomislav Saric ve Goran Simunovic (2014). “Different Approaches to the Investigation and Testing of the Ni-Based Self-Fluxing Alloy Coatings-A Review. Part 2: Microstructure, Adhesive Strength, Cracking Behavior, and Residual Stresses Investigations”. *Tribology Transactions* 57.6. WOS:000345317900002, 980–1000.
- Skarvelis, P. ve G.D. Papadimitriou (2009). “Plasma transferred arc composite coatings with self lubricating properties, based on Fe and Ti sulfides: Microstructure and tribological behavior”. *Surface and Coatings Technology* 203.10–11, 1384–1394.
- Suwattananont, Naruemon (2010). “Multi-component boron coatings on low carbon steel AISI 1018”. Doktora Tezi. The New Jersey Institute of Technology.
- Svahn, Fredrik, Åsa Kassman-Rudolphi ve Erik Wallén (2003). “The influence of surface roughness on friction and wear of machine element coatings”. *Wear* 254.11, 1092–1098.
- Thévenot, Francois (1990). “Boron carbide—A comprehensive review”. *Journal of the European Ceramic Society* 6.4, 205–225.
- USGS (2015). *Nickel*. techreport. US Geological Survey, 108–109.

- Wang, Xibao, Hongling Shun, Chunguo Li, Xiaofeng Wang ve Dong Sun (2006). “The performances of TiB₂-contained iron-based coatings at high temperature”. *Surface and Coatings Technology* 201.6, 2500–2504.
- Wilden, J., J. P. Bergmann ve H. Frank (2006). “Plasma transferred arc welding—modeling and experimental optimization”. en. *Journal of Thermal Spray Technology* 15.4, 779–784.
- Wolfe, Tonya Brett Bunton (2010). “Homogeneity of metal matrix composites deposited by plasma transferred arc welding”. English. Ph.D. Ann Arbor, United States.
- Wu, Daoliang, Xibao Wang, Panpan Zhang, Lijuan Cai ve Hongling Sun (2011). “Defects in the in situ synthesized TiB₂/Fe composite coatings during PTA process”. *Applied Surface Science* 257.23, 10119–10125.
- Xibao, Wang (2005). “The metallurgical behavior of B₄C in the iron-based surfacing alloy during PTA powder surfacing”. *Applied Surface Science* 252.5, 2021–2028.
- Xibao, Wang, Wang Xiaofeng ve Shi Zhongquan (2005). “The composite Fe–Ti–B–C Coatings by PTA powder surfacing process”. *Surface and Coatings Technology* 192.2-3, 257–262.
- Xue, Chao ve Wuyi Chen (2011). “Adhering layer formation and its effect on the wear of coated carbide tools during turning of a nickel-based alloy”. *Wear* 270.11–12, 895–902.
- Yang, Rongjuan, Zongde Liu, Yongtian Wang, Guang Yang ve Hongchuan Li (2013). “Synthesis and characterization of MoS₂/Ti composite coatings on Ti6Al4V prepared by laser cladding”. *AIP Advances* 3.2, 022106.
- Yuan, C.Q., Z. Peng, X.P. Yan ve X.C. Zhou (2008). “Surface roughness evolutions in sliding wear process”. *Wear* 265.3–4, 341–348.

- Zhang, Panpan, Xibao Wang, Lijie Guo, Lijuan Cai ve Hongling Sun (2011). “Characterization of in situ synthesized TiB₂ reinforcements in iron-based composite coating”. *Applied Surface Science* 258.4, 1592–1598.
- Zhang, Y. D., W. A. Hines, J. I. Budnick, M. Chao, F. H. Sanchez ve R. Hasegawa (1986). “NMR study of the boron site occupations in rapidly quenched Fe-B crystalline alloys”. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 61.1, 162–168.
- Zikin, A., E. Badisch, I. Hussainova, C. Tomastik ve H. Danninger (2013). “Characterisation of TiC-NiMo reinforced Ni-based hardfacing”. *Surface & Coatings Technology* 236. WOS:000329884300007, 36–44.
- Zikin, Arkadi, Sotiraq Ilo, Priit Kulu, Irina Hussainova, Christian Katsich ve Ewald Badisch (2012). “Plasma Transferred ARC (PTA) Hardfacing of Recycled Hardmetal Reinforced Nickel-matrix Surface Composites”. *Materials Science-Medziagotyra* 18.1. WOS:000302512200003, 12–17.

6. ÖZGEÇMİŞ

Gökçe Mehmet AY 3 aralık 1979'da İstanbul'da doğmuştur. Ortaokul ve lise eğitimini Eskişehir Anadolu Lisesinde gerçekleştirmiş ve 1997 yılında başladığı lisans eğitimini Orta Doğu Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünde tamamlamıştır. 2001 yılında Orta Doğu Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünde “Yüksek Hassasiyetli CNC Hareket Kontrolü” üzerine yüksek lisans çalışmasına başlamıştır. Aynı adlı TÜBİTAK projesinde 2002-2004 yılları arasında araştırmacı olarak görev almıştır.

2002 yılında Türkiye’de yeni teknoloji vakum tüplü güneş enerjisi sistemlerinin üretilmediğini görüp bu konuda çalışmalar yapmak üzere Onat Makine Isı Enerji Sistemleri şirketini kurmuştur. Yüksek lisans eğitimini Ankara’da devam ederken Eskişehir’de iki yılı aşkın bir araştırma geliştirme faaliyetiyle vakum tüplü güneş enerjisi sistemlerinin imalatını gerçekleştirmiştir.

Aralık 2004 – Aralık 2005 tarihleri arasında Hava Savunma Yedek Subay olarak askerlik görevini tamamlamıştır.

Gökçe Mehmet AY Bor Nitrür üretim tekniğinin sanayiye kazandırılması için kurulmuş olan Bortek Bor Teknolojileri ve Mekatronik şirketinde 2006-2012 yılları arasında görev almıştır. Bortek 2008 yılından itibaren Türkiye’de ilk ve tek Bor Nitrür üreticisi olup dünyada bu teknolojiye sahip sayılı firma arasına girmiştir. Gökçe Mehmet AY Ulusal Bor Araştırmaları Enstitüsünün desteklediği “Endüstriyel Bor Nitrür Üretiminin Araştırılması” adlı projesinde görev almıştır. Bu proje çerçevesinde kullanılan fırınlar, diğer aksamaların tasarımlarını, uygulanmasını ve devreye alınması üzerine çalışmıştır. Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı SANTEZ destekleri çerçevesinde gerçekleştirilen “Hekzagonal Bor Nitrür Ürün Özelliklerine Öğütmenin Etkisi” isimli projede de mekanik tasarım ve uygulama görevlerini üstlenmiştir.

Gökçe Mehmet AY Şubat 2012 – Eylül 2013 arasında Anadolu Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünde görev almıştır. 2013 Kasım’ında Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak göreve başlamıştır. 2014-2015 yılları arasında “Çelik yüzey özelliklerini geliştirmek için PTA ile yenilikçi kaplama incelenmesi” isimli BAP araştırmacı doktora öğrencisi olarak projesinde çalışmıştır.

Gökçe Mehmet AY'ın BORTEK'te yaptığı çalışmalar sonucunda bir adet tek başına, bir adet de ortak buluş sahibi olduğu iki patent başvurusunda bulunmuştur.

Eğitim:

- 1997-2001 Orta Doğu Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü (Lisans)
- 2001-2004 Orta Doğu Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü (Yüksek Lisans)
- 2011- Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü (Doktora)

Sivil Toplum Kuruluşları Üyelikleri:

- 1999-2001 ASME ODTÜ kurucu üyesi
- 1999-2001 Makine Mühendisleri Odası öğrenci üye
- 2002- Makine Mühendisleri Odası üye
- 2005- Linux Kullanıcıları Derneği üye