

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ELEKTRİK ARK PÜSKÜRTME YÖNTEMİ İLE
FeCrMn ESASLI KOMPOZİT KAPLAMALARIN
ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU**

DOKTORA TEZİ
Ahmet GÜLEÇ

Enstitü Anabilim Dalı : METALURJİ VE MALZEME MÜH.
Tez Danışmanı : Prof. Dr. Ahmet TÜRK

Haziran 2014

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

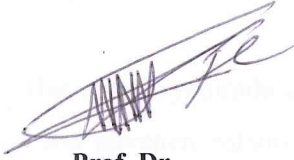
ELEKTRİK ARK PÜSKÜRTME YÖNTEMİ İLE
FeCrCMn ESASLI KOMPOZİT KAPLAMALARIN
ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

DOKTORA TEZİ

Ahmet GÜLEÇ

Enstitü Anabilim Dalı : METALURJİ VE MALZEME MÜH.

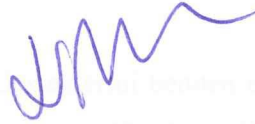
Bu tez 24 / 06 / 2014 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul/red-
edilmiştir.



Prof. Dr.
Fevzi YILMAZ
Jüri Başkanı



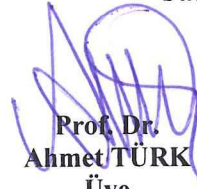
Prof. Dr.
Kenan GENEL
Üye



Prof. Dr.
Hüseyin ÇİMENÖĞLU
Üye



Prof. Dr.
Fatih ÜSTEL
Üye



Prof. Dr.
Ahmet TÜRK
Üye

ÖNSÖZ

Öncelikle doktora çalışmam boyunca danışmanım olarak tezimin deneysel ve teorik tüm aşamalarında fikir ve tecrübeleriyle büyük katkı sağlayan ve çalışmalarımda beni yönlendiren değerli hocam sayın Prof. Dr. Ahmet TÜRK'e çok teşekkür ederim. Aynı şekilde bilgi ve tecrübeleri ile yolumu aydınlatan ve bu tezin oluşturulmasında her türlü desteği esirgemeyen değerli hocam sayın Prof. Dr. Fatih ÜSTEL'e teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışmalarım sırasında her türlü imkanlarından yararlandığım Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji Mühendisliği Bölüm Başkanlığı, başta sayın Prof. Dr. Hatem AKBULUT olmak üzere tüm Bölüm öğretim üyelerine ve araştırma görevlilerine teşekkürü bir borç biliyorum. Termal püskürtme kaplama alanındaki çalışmalarımdaya desteği ve yardımları sebebiyle sayın Prof. Dr. Fevzi YILMAZ'a minnettarlığımı ifade etmek isterim. Tez izleme jürisinde görev alarak tezime katkı sağlayan sayın Prof. Dr. Kenan GENEL'e de ayrıca teşekkür ederim.

Ayrıca çalışmalarım boyunca bana desteklerini esirgemeyen değerli arkadaşlarım Metalurji Yük. Mühendisi Özgür CEVHER ve Yrd. Doç. Dr. Oğuz GÜLER'e ayrıca teşekkür ederim.

Her zaman yanımda olan, her zaman desteklerini benden esirgemeyen ve her daim bana güvenen babam Turgut GÜLEÇ, annem Handan GÜLEÇ ve kardeşim Ömer GÜLEÇ'e gönülden minnettarım.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	ix
TABLolar LİSTESİ.....	xviii
ÖZET.....	xx
SUMMARY.....	xxi
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ VE AMAÇ.....	1
BÖLÜM 2.	
TERMAL PÜSKÜRTME KAPLAMALAR.....	3
2.1. Giriş.....	3
2.2. Termal Püskürtme Kaplamaların Tarihçesi.....	4
2.3. Termal Püskürtme Kaplama Yöntemleri.....	5
2.3.1. Alev püskürtme yöntemi.....	6
2.3.2. Elektrik ark püskürtme yöntemi.....	7
2.3.3. Plazma püskürtme yöntemi.....	8
2.3.4. Yüksek hızlı oksî-yakıt tekniği (HVOF).....	9
2.3.5. RW (Döndürerek Ergitme) yöntemi.....	10
2.4. Termal Püskürtme Kaplamaların Mikroyapısı.....	11
2.4.1. Porozite ve yoğunluk özellikleri.....	11
2.4.2. Yapışma ve iç gerilme özellikleri.....	13
2.4.3. Mekanik özellikleri.....	15
2.4.4. Termal genişleme ve termal iletkenlik.....	16

BÖLÜM 3.

ELEKTRİK ARK PÜSKÜRTME TEKNOLOJİSİ.....	17
3.1. Giriş.....	17
3.2. Elektrik Ark Püskürtme Teknolojisi.....	17
3.3. Elektrik Arkının Karakteristik Özelliği.....	20
3.4. Elektrik Ark Püskürtme Kaplama Malzemeleri ve Kullanım Alanları.....	26
3.4.1. Al ve alaşımları.....	27
3.4.2. Zn ve alaşımları.....	28
3.4.3. Ni ve alaşımları.....	28
3.4.4. Özlü tel uygulamaları ve konu ile ilgili literatür özeti.....	29

BÖLÜM 4.

ELEKTRİK ARK PÜSKÜRTME KAPLAMALARA ETKİ EDEN FAKTÖRLER.....	37
4.1. Giriş.....	37
4.2. Püskürtme Mesafesinin Etkisi.....	37
4.3. Püskürtme Gaz Cinsinin Etkisi.....	38
4.4. Püskürtme Gaz Basıncının Etkisi.....	47
4.5. Amper ve Voltajın Etkisi.....	52

BÖLÜM 5.

AŞINMA MEKANİZMALARI VE ELEKTRİK ARK PÜSKÜRTME KAPLAMALARDA AŞINMA	57
5.1. Giriş.....	57
5.2. Abrazif aşınma.....	59
5.3. Adhezif aşınma.....	60
5.4. Korozif aşınma.....	61
5.5. Yorulma aşınması.....	62
5.6. Eroziv aşınma.....	63
5.7. Elektrik Ark Püskürtme Kaplamalarda Aşınma Mekanizmaları.....	66
5.7.1. Aşınma üzerine yüzey topografisinin etkisi.....	67

5.7.2. Yüzey dislokasyonlarının davranışı.....	67
5.7.3. Çatlak ve debris oluşumu.....	68
BÖLÜM 6.	
DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	69
6.1. Altlık Malzemesi.....	69
6.2. Kaplama Teli.....	69
6.2.1. Toz boyut analizi.....	70
6.3. Kaplama Uygulamaları.....	70
6.3.1. Akım değişimine bağlı olarak üretilen kaplamalar.....	71
6.3.2. Voltaj değişimine bağlı olarak üretilen kaplamalar.....	71
6.3.3. Primer gaz basıncı değişimine bağlı olarak üretilen kaplamalar.....	72
6.3.4. Püskürtme mesafesinin değişimine bağlı olarak üretilen kaplamalar.....	73
6.4. Mikroyapısal İnceleme.....	74
6.4.1.Özlu kaplama telinin mikroyapısal incelemesi.....	74
6.4.2. Kaplamaların mikroyapısal incelemesi.....	74
6.5. Kaplamalarda Oksit ve Porozite Tayini.....	75
6.6. Mikrosertlik Ölçümü.....	76
6.7. Makrosertlik (Bulk Sertlik) Ölçümü.....	77
6.8. XRD (X-Işınları Difraksiyon) Analizi.....	77
6.9. Abrasif Aşınma Testleri.....	78
6.10. Partikül Sıcaklık ve Hızının Ölçülmesi.....	81
BÖLÜM 7.	
DENEYSEL SONUÇLAR.....	83
7.1. Giriş.....	83
7.2. Kaplama Telinin Karakterizasyonu.....	84
7.2.1. Telin öz kısmının XRD analizi.....	86
7.3. Akımın Etkisi.....	87
7.3.1. XRD analiz sonuçları.....	91
7.4. Voltajın Etkisi.....	98

7.4.1. XRD analiz sonuçları.....	102
7.5. Primer Gaz Basıncının Etkisi.....	111
7.5.1. XRD analiz sonuçları.....	120
7.6. Püskürtme Mesafesinin Etkisi.....	125
7.6.1. XRD analiz sonuçları.....	130
7.7. Abrazif Aşınma Testi Sonuçları.....	137
7.8. Partikül Hızı ve Sıcaklık Ölçüm Sonuçları.....	162
BÖLÜM 8.	
DENEYSEL SONUÇLARIN İRDELENMESİ.....	165
8.1. Üretilen Kaplamaların Yapısal Özellikleri.....	165
8.2. Karbür Morfolojisi ve Bileşimi.....	170
8.2.1. Karbonun etkisi.....	171
8.2.2. Kromun etkisi.....	171
8.2.3. Manganın etkisi.....	172
8.3. Üretilen Kompozit Kaplamaların Abrazif Aşınma Performansları..	179
BÖLÜM 9.	
SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	184
9.1. Sonuçlar.....	184
9.2. Öneriler.....	189
KAYNAKLAR.....	190
ÖZGEÇMİŞ.....	197

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

HVOF	: Yüksek hızlı oksı-yakıt tekniği
RW	: Döndürerek ergitme
LPPS	: Düşük basınçlı plazma sprey
EAP	: Elektrik ark püskürtme
V	: Hız
U_g	: Gaz hızı
SEM	: Taramalı elektrom mikroskobu
h_\square	: Saat
psi,	: İnç kareye pound cinsinden uygulanan kuvvet
kPa	: kilo paskal
MPa	: Mega paskal
A	: Akım
V	: Voltaj
Pr	: Primer gaz basıncı
D	: Püskürtme mesafesi
TEM	: Geçirimli electron mikroskobu
DSC	: Diferansiyel taramalı kalorimetre
XRD	: X-ışınları difraksiyonu
EDAX	: Enerji dispersif x-ray spektrometresi
HVAS	: Yüksek hızlı elektrik ark püskürtme tekniği
ASTM	: Amerikan standardı
EDS	: Enerji dispersif x-ray spektroskopisi
HV	: Vickers sertlik
HRA	: Rockwell A sertlik
O	: Oksijen
γ	: Östenit fazı

AFS	: American Foundy Society
HMK	: Hacim merkezli kübik kristal yapı
YMK	: Yüzey merkezli kübik kristal yapı
L	: Sıvı ergiyik
GTWA	: Gaz tungsten ark kaynağı

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1.	Termal sprey işleminin temel şeması.....	4
Şekil 2.2.	Dr. Schoop'un ürettiği elektrik operasyonlu püskürtme aleti	5
Şekil 2.3.	Termal püskürtme prosesleri grafiği.....	6
Şekil 2.4.	Alevle toz püskürtme yöntemi.....	7
Şekil 2.5.	Elektrik ark püskürtme yöntemi.....	8
Şekil 2.6.	Plazma püskürtme yöntemi.....	9
Şekil 2.7.	Yüksek hızlı oksî-yakıt yöntemi (HVOF).....	10
Şekil 2.8.	Kaplama sonrası parçanın ergitilme işlemi (RW).....	10
Şekil 2.9.	a) Çarpma etkisiyle partikülün levha şeklini alması b) Kaplama mikroyapısı.....	12
Şekil 2.10.	Klasik bir plazma kaplama tabakasına ait mikroyapı görüntüleri.	14
Şekil 3.1.	Elektrik ark püskürtme prosesi.....	18
Şekil 3.2.	Elektrik ark sistem bileşenleri.....	19
Şekil 3.3.	Katot ve anot arasında oluşan ark sütunu.....	20
Şekil 3.4.	Lineer bir arkın bölgelerinin şematik olarak gösterimi.....	22
Şekil 3.5.	Yayılan ve büzölmüş anot ve katot bileşenleri. Üst tel katot, alt tel anot a) Ark tamamen genişlemiş ve genişlemiş anot kabuğuna doğru yayılmış, b) Anotta yayılan bileşen telin ucundan anot kabuğuna doğru ilerlemiş.....	23
Şekil 3.6.	Anottan kopan parçacıklar	24
Şekil 3.7.	Katottan püskürme ile dışarı fırlayan partiküller	24
Şekil 3.8.	Farklı atomize jet akımındaki ergime ve kopma.....	25
Şekil 3.9.	Özlü tel yapımı.....	29
Şekil 3.10.	Özlü kaplama teli kesit mikroyapısı.....	29
Şekil 3.11.	Özlü tel kesit görüntüsü, b) aynı tel ile oluşturulmuş kaplama yapısından elde edilen kesit görüntüsü.....	31

Şekil 3.12.	a) Kaplama telindeki öz kısmı, b) Özlü tel kaplama sırasında arkta meydana gelen damlacıklar.....	32
Şekil 3.13.	Kaplama sırasında oluşan birincil ve ikincil dropletler.....	32
Şekil 3.14.	Ark püskürtme özlü tel kaplamadaki deneysel kurgunun şematik gösterimi.....	35
Şekil 4.1.	Atomize püskürtülen gaz akış hızı ve oksit birikim yüzdesi grafiği, kullanılan güç değerleriyle beraber verilmiştir.....	39
Şekil 4.2.	Kaplamalardaki oksit birikiminin farklı gaz basınçlarında ve değişik atomize gaz türünde karşılaştırılması (güç: 3100 W).....	40
Şekil 4.3.	a) Her iki gaz içinde sertlik ve oksit birikim yüzdesi grafiği b) Gaz akış hızı ile kaplamadaki karbon yüzdesi (güç 3100 W).....	40
Şekil 4.4.	Azotun püskürme hızı ve oksit birikimine göre elastik modül.....	41
Şekil 4.5.	Elastik modülü – gaz püskürtme hızı grafiği.....	41
Şekil 4.6.	Üç gaz akışı hızlarında partikül çapları ve hız arasındaki ilişki.....	43
Şekil 4.7.	Üç farklı gaz akışı hızı için partikül çapları ve sıcaklık arasındaki ilişki.....	43
Şekil 4.8.	a) Gaz akım hızı karşısında partikül hızlarının yayılımı b) Gaz akım hızına göre partikül çaplarının yayılımı.....	44
Şekil 4.9.	Uçan partiküllerde ayrılma olayının şematik olarak tarif edilmesi..	44
Şekil 4.10.	Aynı tür kaplamalar için iki farklı gaz hızında elde edilen kaplama mikro yapıları.....	45
Şekil 4.11.	Gaz akım hızı ve cinsine bağlı olarak kaplamada oluşan oksit içeriği.....	46
Şekil 4.12.	Gaz besleme oranına karşın sertliklerin yayılımı.....	47
Şekil 4.13.	Atomize gaz olarak hava kullanıldığında kaplama yapısı a) Düşük hızda 94 N m b) Orta hızda 110 N m ³ /h ⁻¹ , c) Yüksek hızda 144 N m ³ /h ⁻¹	48
Şekil 4.14.	SEM mikroskobunda çelik üstüne şiddetle çarpan partiküllerin farklı gaz atım hızlarındaki görüntüleri.....	48
Şekil 4.15.	Püskürtme hızının mikrosertlik ve oksit içeriğine etkisi.....	49
Şekil 4.16.	Püskürtme hızının porozite içeriğine etkisi.....	50
Şekil 4.17.	Tel boşanımı esnasında anot ve katotta ergime davranışı.....	51

Şekil 4.18.	Al partikül boyut dağılımı a) Gaz basıncı 0,31 MPa b) Gaz basıncı 0,45 MPa c) Gaz basıncı 0,59 Mpa.....	51
Şekil 4.19.	Atomize gaz basıncı ile partikül hızları arasındaki ilişki.....	52
Şekil 4.20.	Farklı voltaj ve akım ile partikül sıcaklığı ilişkisi.....	53
Şekil 4.21.	Farklı voltajlarda, atomize gaz basıncıyla partikül sıcaklığı ilişkisi.....	53
Şekil 4.22.	24 V ve 0,2 MPa operasyon parametrelerinde ark huzmesi.....	54
Şekil 4.23.	Tel besleme ve dalgalanmanın periyodik hareketi.....	55
Şekil 4.24.	Voltajın pürüzlülük ile ilişkisi.....	55
Şekil 4.25.	Elektrik ark püskürtme ile 200 A ve 0,4 MPa’da üretilen kaplama mikroyapıları.....	56
Şekil 5.1.	Bir tribosistemin şematik gösterimi.....	58
Şekil 5.2.	Abrazif aşınma mekanizmaları.....	59
Şekil 5.3.	İki elemanlı ve üç elemanlı abrazif aşınmanın şematik gösterimi.	60
Şekil 5.4.	Adhezyon ile malzeme transferi.....	61
Şekil 5.5.	Korozif aşınma mekanizmasının şematik gösterimi.....	62
Şekil 5.6.	Yüzey çatlak oluşumu ve ilerlemesi sürecinin şematik gösterimi...	63
Şekil 5.7.	Çarpma açısı ve hızına bağlı olarak farklı erozyon mekanizmaları a) düşük çarpma açısında abrazif etki, b) düşük hız yüksek açıda yorulma, c) orta hız yüksek açıda gevrek kırılma yada plastik deformasyon, d) yüksek hızda yüzeyde meydana gelen erime, e) erozyonun ikincil etkileri, f) kristal latisindeki atomsal erozyon.....	65
Şekil 5.8.	Sünek ve gevrek malzemelerin çarpma açılarına bağlı olarak erozif aşınma oranlarının değişimi.....	66
Şekil 6.1.	Elektrik ark püskürtme kaplama prosesi.....	70
Şekil 6.2.	Jeol 6060 LV marka taramalı elektron mikroskop (SEM).....	75
Şekil 6.3.	Mikroyapı oksit ve porozite tayini akış şeması.....	76
Şekil 6.4.	XRD cihazı.....	77
Şekil 6.5.	ASTM G 65 – 04 Abrazif aşınma testi şematik kurulumu.....	78
Şekil 6.6.	Bu çalışma için imal edilmiş ASTM G 65 – 04 Abrazif aşınma test cihazı.....	79
Şekil 6.7.	ASTM G 65 – 04 Abrazif aşınma testi.....	80

Şekil 6.8.	a) Partikül hızı ve sıcaklığı ölçümü için kurulan düzenek, b) Püskürtme esnasında partikül hızı ve sıcaklığının ölçümü.....	81
Şekil 7.1.	Bu çalışmada kullanılan FeCrCMn esaslı özlü telin kesit taramalı elektron mikroskop (SEM) görünüşü.....	84
Şekil 7.2.	Telin öz kısmını oluşturan tozların taramalı elektron mikroskop (SEM) görüntüleri.....	84
Şekil 7.3.	Özlü telin taramalı elektron mikroskopu görüntüleri ve EDS analizleri.....	85
Şekil 7.4.	a) Telin öz kısmının taramalı elektron mikroskop görüntüsü, b) öz kısmının EDS analizi.....	85
Şekil 7.5.	Özlü telin öz kısmını oluşturan tozun boyut analizi.....	86
Şekil 7.6.	Telin öz kısmının XRD analizi.....	87
Şekil 7.7.	26 V ve 28 V voltaj değerlerinde 100 A, 200 A ve 300 A olan üç farklı akım değerinde üretilen kaplamaların optik mikroyapıları...	88
Şekil 7.8.	a) Akım değişimine göre kaplamadaki yüzde porozite değişimi, b) Akım değişimine bağlı olarak kaplamadaki oksit yüzdesi değişimi	90
Şekil 7.9.	a) Akım değişiminin mikrosertlik üzerine etkisi, b) Akım değişiminin kaplama bulk sertliği üzerine etkisi.....	90
Şekil 7.10.	Akım değerinin değiştirilmesi ile üretilen kaplamaların XRD analiz sonuçları.....	91
Şekil 7.11.	A11 ve A22 kaplama numunelerinin XRD analiz sonuçları.....	92
Şekil 7.12.	A11 nolu kaplamanın SEM görüntüsü ve 4 noktadan alınmış EDS analiz sonuçları.....	93
Şekil 7.13.	A22 nolu kaplamanın SEM görüntüsü.....	94
Şekil 7.14.	A22 numunesine ait 1 ve 4 nolu bölgeden alınan EDS analiz sonuçları.....	95
Şekil 7.15.	2 ve 3 nolu bölgeden alınan EDS analiz sonuçları.....	95
Şekil 7.16.	A22 nolu kaplama numunesinin SEM görüntüsü.....	96
Şekil 7.17.	2, 3 ve 4 nolu bölgelerden alınan EDS analiz sonuçları.....	96
Şekil 7.18.	1 ve 5 nolu bölgelerden alınan EDS analiz sonuçları.....	97

Şekil 7.19.	100 A, 200 A ve 300 A akım seviyelerinde 26 V, 28 V ve 32 V olan üç farklı voltaj değerinde üretilen kaplamaların optik mikroyapıları.....	98
Şekil 7.20.	a) Voltaj değişimine bağlı olarak % porozite değişimi, b) Voltaj değişimine bağlı olarak % oksit değişimi.....	100
Şekil 7.21.	a) Voltaj değişimine bağlı olarak kaplamaların mikrosertlik değerleri, b) Voltaj değişimine bağlı olarak kaplamaların bulk sertlik değerleri.....	101
Şekil 7.22.	100 A, 200 A ve 300 A amper seviyelerinde voltaj değişimine bağlı olarak üretilen kaplamaların XRD analiz sonuçları.....	102
Şekil 7.23.	V13, V21, V22 ve V33 kaplama numunelerinin XRD analiz sonuçları.....	103
Şekil 7.24.	V22 (200 A/28 V) kaplama numunesinin taramalı elektron mikroskop görüntüsü ve EDS analiz sonuçları.....	104
Şekil 7.25.	V22 (200 A/28 V) kaplama numunesinin taramalı elektron mikroskop görüntüsü ve EDS analiz sonuçları.....	106
Şekil 7.26.	V22 (200 A/28 V) kaplama numunesinin taramalı elektron mikroskop görüntüsü ve EDS analiz sonuçları.....	106
Şekil 7.27.	V22 (200 A/28 V) kaplama numunesinin taramalı elektron mikroskop görüntüsü.....	107
Şekil 7.28.	1 ve 2 nolu bölgeden alınan EDS analiz sonuçları.....	107
Şekil 7.29.	3 ve 4 nolu bölgeden alınan EDS analiz sonuçları.....	108
Şekil 7.30.	V23 (300 A/28 V) kaplama numunesinin taramalı elektron mikroskop görüntüsü ve EDS analiz sonuçları.....	109
Şekil 7.31.	V33 (100 A/32 V) kaplama numunesinin taramalı elektron mikroskop görüntüsü ve EDS analiz sonuçları.....	110
Şekil 7.32.	1, 3 ve 4 nolu bölgelerden alınmış EDS analiz sonuçları.....	111
Şekil 7.33.	100 A, 200 A ve 300 A akım seviyelerinde 26 V, 28 V ve 32 V olan üç farklı voltaj değerinde üretilen kaplamaların optik mikroyapıları.....	113
Şekil 7.34.	Primer gaz basıncı değişimine bağlı olarak % porozite değişimi...	115

Şekil 7.35.	Primer gaz basınç değişimine bağlı olarak üretilen kaplamaların % oksit değişimi.....	116
Şekil 7.36.	Primer gaz basınç değişimine bağlı olarak üretilen kaplamaların mikrosertlik değerleri.....	117
Şekil 7.37.	Primer gaz basıncı değişimi ile üretilen kaplamaların bulk sertlik değerleri.....	119
Şekil 7.38.	Primer gaz basıncı değişimi ile üretilen kaplamaların XRD analiz sonuçları	120
Şekil 7.39.	Pr21 ve Pr 31 numunelerinin XRD analiz sonuçları.....	121
Şekil 7.40.	Pr31 nolu numunenin taramalı elektron mikroskop görüntüsü ve 6 bölgeden alınan EDS analizleri.....	122
Şekil 7.41.	1, 2 ve 3 nolu bölgelerin EDS analiz sonuçları.....	123
Şekil 7.42.	4, 5 ve 6 nolu bölgelerin EDS analiz sonuçları.....	123
Şekil 7.43.	Pr23 nolu numunenin taramalı elektron mikroskop görüntüsü ve 4 bölgeden alınan EDS analizleri.....	124
Şekil 7.44.	100 A, 200 A akım seviyelerinde, 26 V, 28 V ve 32 V voltaj değerlerinde 100 mm ve 150 mm. kaplama mesafelerinde üretilen kaplamaların optik mikroyapıları.....	126
Şekil 7.45.	Kaplama mesafesinin değişimine bağlı olarak kaplamalardaki % porozite değişimi a) D1, D2 ve D3, b) D4, D5 ve D6.....	127
Şekil 7.46.	Kaplama mesafesinin değişimine bağlı olarak kaplamalardaki % oksit değişimi a) D1, D2 ve D3, b) D4, D5 ve D6.....	128
Şekil 7.47.	Kaplama mesafesinin değişimine bağlı olarak kaplamalardaki mikrosertlik değişimi a) D1, D2 ve D3, b) D4, D5 ve D6.....	129
Şekil 7.48.	Kaplama mesafesinin değişimine bağlı olarak kaplamalardaki makro sertlik (HRA) değişimi a) D1, D2 ve D3, b) D4, D5 ve D6.....	130
Şekil 7.49.	100 A ve 200 A akım seviyelerinde 26 V, 28 V ve 32 V voltaj değerlerinde kaplama mesafesinin değişimine bağlı olarak üretilen kaplamaların XRD sonuçları.....	131
Şekil 7.50.	D32 ve D51 numunelerinin XRD analiz sonuçları.....	132
Şekil 7.51.	D51 nolu kaplamanın taramalı elektron mikroskop görüntüsü.....	133
Şekil 7.52.	1, 3 ve 4 nolu bölgelerin EDS analiz sonuçları.....	133

Şekil 7.53.	2 nolu bölgelerin EDS analiz sonuçları	134
Şekil 7.54.	D51 nolu kaplamanın taramalı elektron mikroskop görüntüsü.....	135
Şekil 7.55.	1 ve 2 nolu bölgeden alınan EDS analiz sonuçları.....	135
Şekil 7.56.	3, 4 ve 5 nolu bölgelerin EDS analiz sonuçları.....	136
Şekil 7.57.	ASTM G65–04 abrazif aşınma testinde kullanılan kumun taramalı elektron mikroskop görüntüsü.....	138
Şekil 7.58.	a) Akım değişimine bağlı olarak üretilen kaplamaların abrazif aşınma hacim kaybı grafiği, b) Voltaj değişimine bağlı olarak üretilen kaplamaların abrazif aşınma hacim kaybı grafiği.....	138
Şekil 7.59.	Gaz basıncına bağlı olarak üretilmiş kaplamaların üretilen kaplamaların abrazif aşınma hacim kaybı grafiği, b) Püskürtme mesafesine bağlı olarak üretilmiş kaplamaların üretilen kaplamaların abrazif aşınma hacim kaybı grafiği.....	139
Şekil 7.60.	13 Cr’lu çelik kaplama ile FeCrCMn esaslı özlü tel kaplamanın ASTM G65 – 04 standardı Prosedür A’ya göre abrazif aşınma hacim kaybı grafiği.....	140
Şekil 7.61.	a) 3 bar primer gaz basıncında üretilmiş dropletler, b) 4 bar primer gaz basıncında üretilmiş dropletler, c) 5 bar primer gaz basıncında üretilmiş dropletler (28 V_200 A_150 mm).....	141
Şekil 7.62.	3 bar primer gaz basıncı ile üretilen dropletlerin taramalı elektron mikroskop görüntüsü ve 3 noktadan alınan EDS analizleri (28 V_200 A_150 mm).....	142
Şekil 7.63.	4 bar primer gaz basıncı ile üretilen dropletlerin taramalı elektron mikroskop görüntüsü ve 3 noktadan alınan EDS analizleri (28 V_200 A_150 mm).....	142
Şekil 7.64.	4 bar primer gaz basıncı ile üretilen dropletlerin taramalı elektron mikroskop görüntüsü ve 3 noktadan alınan EDS analizleri (28 V_200 A_150 mm).....	143
Şekil 7.65.	Kaplama ve aşınma arayüzeyi taramalı elektron mikroskop (SEM) görüntüsü a) 13 Cr’lu çelik kaplama, b) FeCrCMn esaslı özlü tel kaplama.....	144

Şekil 7.66.	FeCrCMn esaslı özlü tel kaplamanın ASTM G65-04 abrazyon testi sonrası aşınan yüzeylerin taramalı elektron mikroskop (SEM) görüntüleri, abrazyon yivleri, Delaminasyon, oksit adacıkları ve aşındırıcı partiküller.....	146
Şekil 7.67.	a) Aşınma testi sonrası FeCrCMn esaslı özlü tel kaplama yüzeyindeki boşlukta yer alan aşındırıcı partikül ve debrislerin taramalı elektron mikroskop (SEM) görüntüsü b) Aşınma yüzeyinde (Cr,Fe) ₇ C ₃ karbürün varlığı ve yapıyı taşıması.....	147
Şekil 7.68.	3 bölgeden EDS analiz sonuçları.....	148
Şekil 7.69.	FeCrCMn esaslı kaplamanın aşınma yüzeyi SEM mikroyapısı.....	150
Şekil 7.70.	4 nolu bölgeden alınan EDS analiz sonuçları.....	150
Şekil 7.71.	Akım değişimine bağlı olarak kaplama bulk sertliği (HRA) ile aşınma hacmi (mm ³) ilişkisi (A1: 26 V_4 bar_150 mm , A2: 28 V_4 bar_150 mm), b) Voltaj değişimine bağlı olarak kaplama bulk sertliği (HRA) ile aşınma hacmi (mm ³) ilişkisi (V1: 100 A_4 bar_150 mm, V2: 200 A_4 bar_150 mm, V3: 300 A_4 bar_150 mm).....	152
Şekil 7.72.	a) Primer gaz basıncı değişimine bağlı olarak kaplama bulk sertliği (HRA) ile aşınma hacmi (mm ³) ilişkisi (Pr1: 100 A_26 V_150 mm, Pr2: 100 A_28 V_150 mm,), b) Primer gaz basıncı değişimine bağlı olarak kaplama bulk sertliği (HRA) ile aşınma hacmi (mm ³) ilişkisi (Pr3: 200 A_26 V_150 mm, Pr2: 200 A_28 V_150 mm), c) Primer gaz basıncı değişimine bağlı olarak kaplama bulk sertliği (HRA) ile aşınma hacmi (mm ³) ilişkisi (Pr5: 300 A_28 V_150 mm).....	153
Şekil 7.73.	a) Püskürtme mesafesi değişimine bağlı olarak üretilen kaplamalarda kaplama bulk sertliği (HRA) ile aşınma hacmi (mm ³) ilişkisi (D1: 100 A_26 V_4 bar, D2: 100 A_28 V_4 bar, D3: 100 A_32 V_4 bar), b) Primer gaz basıncı değişimine bağlı olarak kaplama bulk sertliği (HRA) ile aşınma hacmi (mm ³) ilişkisi (Pr3: 200 A_26 V_150 mm, Pr2: 200 A_28 V_150 mm)...	153

Şekil 7.74.	Pr41 numunesinin taramalı elektron mikroskop (SEM) görüntüsü.....	154
Şekil 7.75.	3 bölgeden alınan EDS analiz sonuçları.....	154
Şekil 7.76.	Pr41 numunesinin aşınan yüzeyi taramalı elektron mikroskop görüntüsü.....	155
Şekil 7.77.	Pr41 nolu numunenin taramalı elektron mikroskop (SEM) incelemesi.....	156
Şekil 7.78.	Pr41 nolu numuneden alınmış EDS analizi.....	156
Şekil 7.79.	V33 nolu numunenin ASTM G65–04 abrazif aşınma testi sonrası aşınan yüzeylerin taramalı elektron mikroskop (SEM) incelemesi.....	157
Şekil 8.80.	a) Pr41 numunesinin abrazif aşınmaya maruz kalmamış yüzeyi, b) Pr41 numunesinin abrazif aşınmaya maruz kalmış yüzeyi.....	159
Şekil 7.81.	Pr41 numunesinin aşınmaya kalmış yüzeyinin taramalı elektron mikroskop (SEM) görüntüsü.....	160
Şekil 7.82.	1 ve 2 nolu bölgeden alınmış EDS analiz sonuçları.....	160
Şekil 7.83.	V33 nolu numunenin ASTM G 65–04 abrazif aşınma testi sonrası taramalı elektron mikroskobu (SEM) kesit mikroyapısı.....	161
Şekil 7.84.	a) Akım - partikül sıcaklığı ilişkisi, b) Akım partikül hızı ilişkisi...	162
Şekil 7.85.	a) Voltaj - partikül sıcaklığı ilişkisi, b) Voltaj partikül hızı ilişkisi.	163
Şekil 7.86.	a) Voltaj - partikül sıcaklığı ilişkisi, b) Voltaj partikül hızı ilişkisi.	163
Şekil 8.1.	Fe- Cr-C üçlü denge sistemi.....	173
Şekil 8.2.	FeCrCMn esaslı özlü tel kaplamada gerçekleştirilen mikrosertlik ölçüm profili.....	179
Şekil 8.3.	a) Kaplama yapısındaki $(Cr,Fe)_7C_3$ karbürünün sertlik ölçüm izi, b) $\gamma - (Fe,Cr) + (Cr,Fe)_{23}C_6$ yapısının sertlik ölçüm izi.....	179

TABLolar LİSTESİ

Tablo 3.1.	Elektrik ark püskürtmede kullanılan bazı tel malzemeleri ve kullanım alanları.....	26
Tablo 3.2.	Elektrik ark püskürtme kaplama prosesinde kullanılan bazı özlü teller ve kullanım alanları.....	30
Tablo 3.3.	Kaplama parametreleri.....	31
Tablo 3.4.	Kullanılan özlü tellerin bileşimi.....	33
Tablo 6.1.	FeCrCMn esaslı özlü telin (Metco 8222) bileşimi.....	69
Tablo 6.2.	Akım değişimine bağlı olarak üretilen kaplama numunelerinin üretim parametreleri.....	71
Tablo 6.3.	Voltaj değişimine bağlı olarak üretilen kaplama numunelerinin üretim parametreleri.....	72
Tablo 6.4.	Primer gaz basıncı değişimine bağlı olarak üretilen kaplama numunelerinin üretim parametreleri.....	73
Tablo 6.5.	Kaplama mesafesinin değişimine bağlı olarak üretilen kaplama numunelerinin üretim parametreleri.....	74
Tablo 6.6.	ASTM G 65 – 04 abrazif aşınma test parametreleri.....	80
Tablo 6.7.	Partikül hızı ve sıcaklıklarının ölçüldüğü püskürtme parametreleri.....	82
Tablo 7.1.	Akıma değişimine bağlı olarak kaplamadaki oksit, porozite ve mikrosertlik ile kaplama bulk sertliği değerleri.....	89
Tablo 7.2.	Voltaj değişimine bağlı olarak kaplamalardaki oksit, porozite, mikrosertlik ve kaplama bulk sertliği değerleri.....	99
Tablo 7.3.	Gaz basıncına bağlı olarak kaplamadaki oksit, porozite ve kaplama bulk sertliği değerleri.....	114

Tablo 7.4.	100 mm ve 150 mm. kaplama mesafesine bağlı olarak üretilen kaplamalardaki oksit, porozite, kaplama mikrosertlik ve kaplama bulk sertlik değerleri.....	127
Tablo 7.5.	ASTM G65–04 standardında belirtilen test prosedürleri.....	138
Tablo 7.6.	13 Cr’lu çelik ve FeCrCMn esaslı kompozit kaplama parametreleri ve kaplama özellikleri.....	140
Tablo 8.1.	FeCrCMn esaslı özlü teldeki elementlerin elektrik ark püskürtme kaplamalardaki etkisi.....	172
Tablo 8.2.	Fe-Cr-C sisteminde U1, U2 ve U3 reaksiyonları.....	174
Tablo 8.3.	Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerin mikroyapısında bulunan fazlar ve kafes parametreleri.....	174

ÖZET

Anahtar kelimeler: Özlü tel, elektrik ark püskürtme, M_7C_3 , $M_{23}C_6$, abrazif aşınma

Bu çalışmada, endüstride abrazif aşınmalı ortamlarda çalışan iş parçalarının abrazif aşınma dayanımlarını arttırmak için kullanılan FeCrCMn esaslı özlü tel kaplamaların elektrik ark püskürtme yöntemi ile farklı proses parametrelerinde üretilmesi ve proses parametrelerinin kaplama yapısına etkisinin incelenmesi ve kaplamaların abrazif aşınma performansına etkisinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla Metco firmasının 8222[®] kodlu 28Cr5CMn ticari bileşime sahip özlü kaplama teli kullanılmıştır. Proses parametreleri olan akım, voltaj, primer gaz basıncı ve püskürtme mesafesinin değiştirilmesi ile kaplamalar üretilmiştir. Üretilen kaplamaların optik mikroskop, taramalı elektron mikroskobu (SEM) incelemesi ile EDS analizi gerçekleştirilmiştir. X ışınları difraksiyon analizi (XRD) ile üretilen kaplamalarda oluşan fazlar analiz edilmiştir. İmaj analiz programı ile kaplamalardaki oksit ve porozite tayinleri gerçekleştirilmiş, 10 saniye boyunca 20 N.'luk yük kullanılarak mikrosertlik ve HRA cinsinden kaplama makro sertlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

Kaplamalarda yapılan karakterizasyon çalışması sonucunda kaplama ana fazında Cr_7C_3 , $(Cr,Fe)_7C_3$ ve az miktarda Mn_7C_3 olarak M_7C_3 , $(Cr,Fe)_{23}C_6$ olarak $M_{23}C_6$ karbürlerinin bulunduğu, yapının $\gamma - (Cr,Fe) + (Cr,Fe)_{23}C_6$ 'dan oluştuğu tespit edilmiştir.

Proses parametreleri değiştirilerek üretilen kompozit kaplamalar bu çalışma için özel olarak tasarlanıp üretilen abraziif aşınma test cihazında 30 saniye boyunca ASTM G65-04 standardına göre abrazif aşınma testine tabi tutulmuşlardır. Abrazif aşınma testi sonrası kaplamaları aşınma yüzeyleri taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve EDS analizi ile incelenmiştir. Ayrıca optimum proses parametrelerinde üretilen 13 Cr'lu metalik çelik tel kaplama ve FeCrCMn esaslı kompozit kaplama abrazif aşınma testine tabi tutularak performansları kıyaslanmıştır.

Bu çalışma sonucunda proses parametrelerin kaplama karakteristiğini etkilediğini, oksit miktarının yüksek olduğu kaplamalarda kaplama makro sertliğinin düştüğü görülmüştür. Abrazif aşınma testi sonrasında kaplama makro sertliği yüksek olan kaplamaların daha yüksek abrazif aşınma dayanımı gösterdiği, düşük kaplama makro sertliğine sahip olan kaplamaların abrazif aşınma sebepli hacim kayıplarının yüksek olduğu tespit edilmiştir. FeCrCMn esaslı özlü tel kaplamanın 13 Cr'lu metalik çelik kaplamaya göre % 57 oranında daha yüksek abrazif aşınma performansına sahip olduğu bu çalışmada tespit edilen diğer bir unsurdur.

PRODUCTION AND CHARACTERIZATION OF FeCrCMn BASED COMPOSITE COATINGS BY TWIN WIRE ARC SPRAYING

SUMMARY

Key Words: Cored wire, twin wire arc spraying, M_7C_3 , $M_{23}C_6$, abrasive wear

In this study, it was focused on the investigation effect of process parameters of FeCrCMn based composite coatings produced by twin wire arc spraying technique with different process parameters on abrasion wear performance of industrial components which in used severe abrasion environment. It was used Metco 8222[®] (28Cr5CMn) cored wire as a coating wire in this study. FeCrCMn based composite coatings were produced by twin wire arc spraying technique with different process parameters such as amperage, voltage, primary gas pressure and spraying distance. The coatings were investigated optical microscopy and scanning electron microscopy (SEM) with EDS analysing methods. By x-ray diffraction (XRD) method, phases were determined in the coatings. Oxide and porosite amount of the coatings were indicated by using image analyzer (Image J[®]). Microhardnesses of coatings were measured with 20 N during 10 seconds and coating makro hardnesses of coatings were determined as HRA.

After characterization of coatings, M_7C_3 as Cr_7C_3 , $(Cr,Fe)_7C_3$ and less amount Mn_7C_3 and $M_{23}C_6$ as $(Cr,Fe)_{23}C_6$ complex carbide were found in coating structures. It was appeared to consist of main coating phases was $\gamma - (Cr,Fe) + (Cr,Fe)_{23}C_6$.

The abrasion tests of coatings which produced by different process parameters were carried out during 30 seconds according to ASTM G65-04 standard, Procedure A in abrasive tester which produced only this study. After abrasion tests, the surface of the coatings were investigated by scanning electron microscopy (SEM) and EDS analys. To determined of cored wire coatings abrasion wear performance, 13 Cr metallic wire coating and FeCrCMn based composite coating produce by twin wire spraying in optimum process parameteres were tested with abrasion test according ASTM G65-04, Procedur C during 30 minutes and compared with wear volume losses of two coatings.

In this study, it was found that process parameters affected on coating characteristics. Bulk hardnesses of coatings were decreased when oxide amount was high. The coatings which had higher bulk hardness appeared to be higher abrasion performance. It was found that FeCrCMn based composite coatings had more than 50 % performance than 13 % Cr steel coating.

BÖLÜM 1. GİRİŞ VE AMAÇ

Kullanılan iş parçalarının dış etkenlere dayanım kullanım ömrünü artırmak, iş parçasında istenen elektrik ve ısı yalıtımı temin etmek ve bunların sonucu olarak dekoratif amaçla çeşitli yüzey kaplamalar uzun zamandan bu yana başarı ile uygulanmaktadır. Endüstriyel ihtiyaca göre uygulanan bu kaplamalar çok çeşitli sınıflara ayrılmaktadır. Bu çeşitlilik sebebiyle yüzey mühendisliği olarak yeni bir ilgi alanı meydana gelmiştir. Termal püskürtme kaplama uygulamaları 1900'lü yıllarının başlarında ortaya çıkmış yüzey kaplama uygulamalarından bir tanesi olmakla beraber endüstrinin uzun servis ömür ihtiyacının karşılanması açısından önemli bir alternatiftir. Termal püskürtme kaplamalar diğer kaplama uygulamalarına göre nispeten kolay ve düşük maliyetli yöntemler grubudur. Bu sebeple endüstride geniş bir kullanım alanına sahiptir. Termal püskürtme yöntemi ile kaplama türüne bağlı olarak mikron seviyelerinden mm mertebelerine kadar kaplamalar üretilebilmektedir.

Elektrik ark püskürtme yöntemi, termal püskürtme kaplama yöntemlerinden bir tanesidir. Diğer termal püskürtme yöntemlerine göre kolay ve mobilize uygulama imkânı ile düşük maliyetli bir uygulama olması bu yöntemin en büyük avantajıdır. Tel formundaki metalik veya özlü tel diye tabir edilen sert partikül takviyeli kaplama telleri ile istenen özelliklere sahip kaplama yapısı elde edilebilmektedir. Basit kullanımıyla beraber elektrik ark püskürtme tekniği farklı uygulamalar için günümüz araştırmacılarının ilgi alanlarından bir tanesini oluşturmaktadır. Farklı tür tel kombinasyonları, nozul tasarımları ile son yıllarda sensör imalatından kalıp üretimine kadar uygulamalarda geniş ölçüde çeşitliliğe sahip bir yöntem olmaktadır.

Özlü tellerin elektrik ark püskürtme kaplama yönteminde kaplama teli olarak kullanılması, aşınma ve korozyona karşı yüksek dayanıma sahip kaplamaların üretilebilmesine olanak sağlamaktadır. Kompozit karakterli olan bu kaplamalar iş parçalarına metalik kaplamalara göre daha yüksek servis ömürleri

sağlayabilmektedir. Abrazif aşınmalı ve şiddetli korozyon ortamlarda özlü tel kullanılarak üretilen kompozit karakterli kaplamalar başarı ile endüstriyel alanlarda kullanılabilir.

Kaplama parametreleri, genel olarak bütün termal püskürtme tekniklerinde kaplama karakteristiğini doğrudan etkilemektedir. Deneysel uygulamalarda ve deneylerde doğru kaplama parametrelerinin belirlenmesi hem uygulanacak kaplamaların kalitesini arttıracak hem de zamandan ve malzemedan tasarruf sağlayacaktır. Bu sebeple elektrik ark püskürtme tekniğinde başarılı kaplamaların üretilmesi için kaplama parametrelerinin etkisinin incelenmesi ve değerlendirilmesi büyük önem kazanmaktadır.

Elektrik ark püskürtme yöntemi ülkemizde geniş şekilde kullanılmaktadır Bu yöntem ile özlü tel kullanılarak üretilen kompozit karakterli kaplamalar alanında bir çalışma bulunmamaktadır. Bu sebeple konu hakkında bilgi birikimi de mevcut değildir. Bu çalışmada özellikle önemli avantajları barındıran, uygulanabilirliği ve düşük maliyete sahip elektrik ark püskürtme yöntemi ile özlü tel kaplama uygulaması konusunda, proses parametrelerinin nihai kaplama yapısına etkisi ve buna bağlı olarak üretilen kompozit kaplamaların abrazif aşınma performanslarının incelenmesi amaçlanmıştır. Elde edilen sonuçlar ile bu alandaki bilgi altyapısı oluşturulacak ve endüstriyel uygulamalara ışık tutacaktır.

BÖLÜM 2. TERMAL PÜSKÜRTME KAPLAMALAR

2.1. Giriş

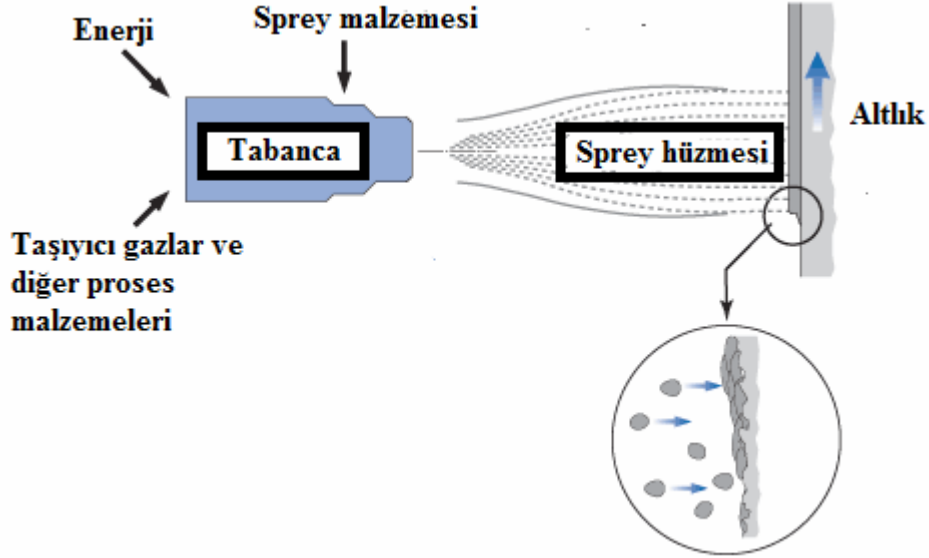
Malzemelerin görünen yüzeylerine başka bir malzemenin biriktirilmesi işlemine genel olarak kaplama denilir. Kaplamalar kullanılacak malzemeye ve isteğe göre değişik avantajlar sağlamaktadır. En çok yüzeyin erozyon - korozyon koruma ve yüzey özelliklerini geliştirmek için kullanılırlar.

Kullanılan bu yüzey biriktirme teknikleri kullanıcılar tarafından farklı alanlarda değerlendirilip kullanılır. Kullanılacak sistemin uygulanabilirliği; fiyat, uygulama kolaylığı, boyutu, avantajları – dezavantajları, çevreye ve çalışanlara etkisi vs. birçok etkiye bağlıdır. Kurumlar veya kişiler bu etkileri göz önüne alarak kendilerine uygun kaplama tekniğini seçer ve kullanırlar. Bu kaplama teknikleri genellikle metal ve metal olmayan malzemeleri kaplama malzemesi olarak kullanır. Kaplama kategorilerinden birisi olan sert yüzey kaplamalar dünyada en çok kullanılan kaplama yöntemlerini oluşturmaktadır [1].

Sert yüzey kaplamalar, aşınmış ve yıpranmış parçalara veya yeni imal edilmiş ve aşınmaya dayanım kazandırmak için uygulanan bir tekniktir. Bu tip uygulamaları genel olarak kaplama, kaynak ve termal püskürtme teknikleri olarak sınıflandırabiliriz.

Bu tekniklerden birisi olan termal püskürtme kaplama uygulamaları geniş bir alanı kapsamaktadır. Termal püskürtme kısaca; toz, tel veya çubuk formundaki malzemelerin, bir ergitme işlemi uygulanarak kaplanacak yüzeye hızlı bir şekilde püskürtülmesi işlemidir. Kaplama malzemesi ergimiş veya yarı ergimiş partiküller haline dönüşür ve kaplanacak yüzeye bir atomize gaz ile püskürtülürler. Bu partiküller yüzeye üst üste gelecek şekilde hızla çarparak katmanlı kaplama yapısını

oluştururlar [2]. Şekil 2.1.'de termal püskürtme kaplama tekniğinin şematik görünümü verilmiştir.

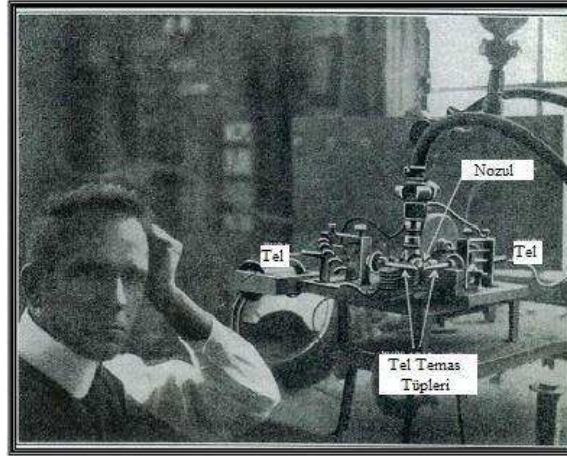


Şekil 2.1. Termal sprej işleminin temel şeması [3]

2.2. Termal Püskürtme Kaplamaların Tarihçesi

Termal püskürtme metalizasyon sistemini ilk olarak 19.yy başlarında Dr. Max Shcoop Zürih/İsviçre'de geliştirmiştir. Dr. Schoop, icadını oğlunun oyun oynamasından etkilenerek şekillendirmiştir. Hızla vurulan topun yüzeye çarptığında bir miktarının da yüzeyde kaldığını şaşırarak gözlemlemiştir. Bu olay, eğer partiküller ergitilip bir şekilde püskürtülürse yüzeyde bu şekilde birikebileceği fikrini vermiştir. Dr. Shcoop oksijen ve asetilen ile alev kaynağı oluşturan ve hava basıncıyla ergiyen partikülleri püskürten bir tabanca dizayn etmiştir (Şekil 2.2.). 1933 yılında Amerika'da yaşayan Rae Axline, George Lufkin ve Herb Ingham, sonradan Metco Anonim olarak adlandırılan kuruluş bünyesinde bu sistemi geliştirmişlerdir. Daha sonrasında bu sistem günden güne yeni uygulamalar ile endüstriyel kullanıma sahip olmuştur. Üretilen metal tabancaları genellikle korozyonu engellemekte ve değişik makine parçalarının tamirinde kullanılmıştır.

Gelişmeler ile farklı tiplerde kaplama malzemelerin (tel, toz ve çubuk) kullanılabilmesi sağlanmış ve farklı ısıtma sıcaklıklarında kaplama yapılabilmesine olanak sağlanmıştır [3].



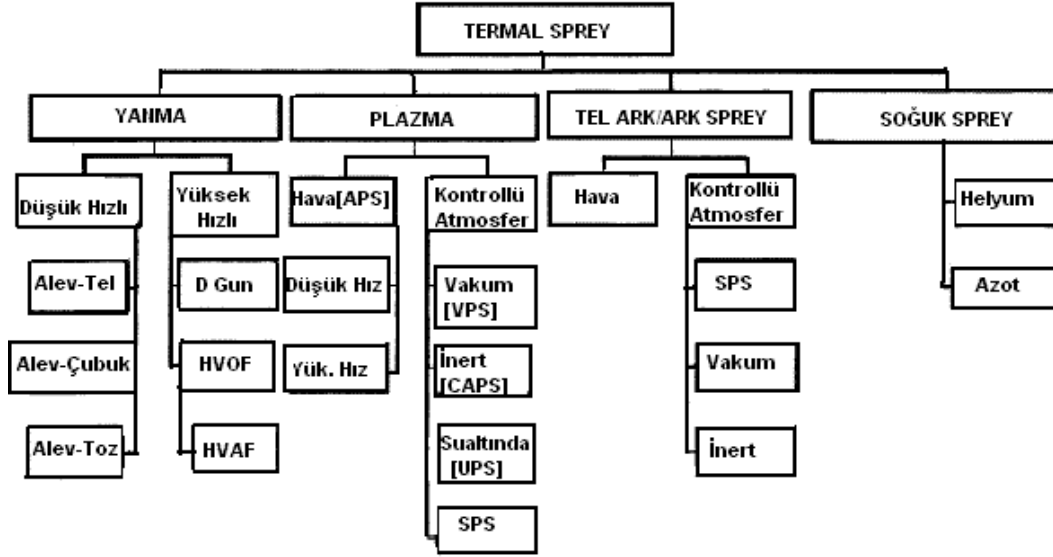
Şekil 2.2. Dr. Schoop'un ürettiği elektrik operasyonlu püskürtme aleti [3]

1950-60'lı yıllara kadar tam olarak kullanılmayan kaplama yöntemleri, bu yıllardan sonra hızla gelişim göstermiş ve çok çeşitli uygulama alanları bulmuştur. Termal sprey kaplama yöntemleri bugün dünyada sıkça kullanılan yüzey koruma tekniklerinden bir tanesidir [3].

2.3. Termal Püskürtme Kaplama Yöntemleri

Kullanılacak olan malzemelerin çeşitliliği ve kaplamada kullanılan proseslerin uygulamadaki kolaylığı termal püskürtme kaplamaların en önemli avantajlarından bir tanesidir. Termal püskürtme kaplamaların sınıflandırılması yöntemdeki farklılıklara göre yapılmaktadır. Ana sınıflandırma kullanılan malzeme cinsi (tel, toz ve çubuk) ve malzemeyi ısıtma biçimi (alev, elektrik ark ve plazma ile) kriter alınarak yapılmaktadır. Dünyada yaygın olarak kullanılan termal püskürtme teknikleri alevle tel-toz püskürtme, elektrik ark püskürtme, HVOF ve plazmadır. Yine bu prosesler kendi içlerinde sınıflara ayrılmakta, istenen ortam ve koşullarda kullanılmak üzere seçilmektedir. Termal püskürtmenin genel olarak sınıflandırması Şekil 2.3.'de verilmektedir. Üretilen kaplamalarda kaplama yapısı içerisinde poroziteler, oksitler,

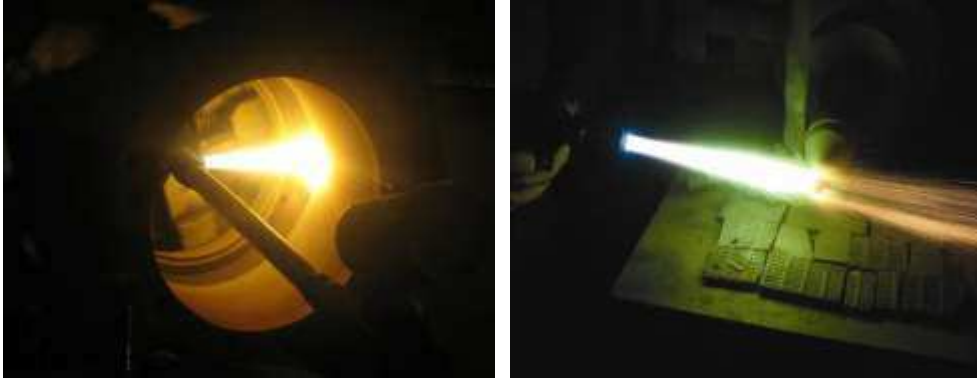
ergimiş / yarı ergimiş / ergimemiş partiküller vs. yapılar oluşmaktadır. Kaplama mikroyapılarının oluşumunda başta kullanılan termal püskürtme tekniği olmak üzere birçok farklı parametre etkili olmaktadır. Optimum bir kaplama yapısı elde etmek için bu parametrelere dikkat edilmesi gerekmektedir [4].



Şekil 2.3. Termal püskürtme prosesleri [5]

2.3.1. Alev püskürtme yöntemi

Alev püskürtme, toz, tel veya çubuk halindeki kaplama malzemesinin oksijenin asetilen, propan, propilen vb. bir yakıtla alev kaynağı oluşturularak ergitilip, basınçlı bir hava yardımıyla yüzeye püskürtülmesi işlemidir (Şekil 2.4.). Püskürtme prosesi genel olarak alevle toz püskürtme ve alevle tel püskürtme olarak ikiye ayrılmaktadır. Yaklaşık olarak 2480°C'nin altında ergime derecesine sahip olan bütün malzemeler bu sistem ile kaplanabilmektedir. Alev kaynağının sıcaklığı seçilecek yakıtla göre değişmektedir [6].



Şekil 2.4. Alevle toz püskürtme yöntemi

Alev sıcaklığının düşüklüğü ve yüksek porozite içermesine rağmen alevle püskürtme yöntemleri günümüzde hala sıklıkla kullanılmaktadır. Bakımı kolay ve kullanımı basittir. Ayrıca uygulamadaki malzeme çeşitliliği büyük bir avantaj sağlar. Cihazının taşınabilirliği kaplama uygulamasındaki avantajlarından bir tanesidir. Parçayı yerinde kaplama imkânı veren bir sistemdir. Diğer proseslere nazaran daha ucuz olduğundan endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır [6].

2.3.2. Elektrik ark püskürtme yöntemi

Elektrik ark püskürtme eski bir püskürtme tekniği olmasına rağmen günümüzde hala kullanılmaktadır ve önemini yitirmemiştir. Bunun en büyük sebebi hala gelişmiş termal püskürtme tekniklerine nazaran daha ekonomik olmasıdır. Ark sprej diğer kaplama proseslerinden daha fazla birikme verimine sahiptir. Ayrıca düşük işletim maliyeti sağladığı için hala vazgeçilmez kaplama proseslerinden bir tanesidir.

Tel formundaki iki malzemenin ark oluşturulması ve bir yüzeye püskürtülmesi işlemidir. Tel sürücüler ile sisteme beslenen teller burada (+) ve (-) yükle yüklenirler ve uçlarda ark oluştururlar. Daha sonra bir püskürtücü gaz vasıtasıyla, ark ile ergimiş teller yüzeye püskürtülür (Şekil 2.5.). Atomize gaz olarak genelde hava kullanılmakla beraber azot veya argonda kullanılabilir. Ark sıcaklığı çoğu malzeme için yeterli bir sıcaklık olan 5000 °C civarındadır [6].



Şekil 2.5. Elektrik ark püskürtme yöntemi

Gerektiğinde yüksek birikme verimi sağlayan, büyük boyutlu parçaların kaplanmasında olanak sağlaması, taşınabilir bir proses olması vb. özellikleriyle oldukça fazla avantaja sahiptir. İletken olmak kaydıyla değişik yapıdaki kompozit tellerde kaplamada kullanılabilir. Bütün bu avantajlarının yanında bu işlemleri oldukça düşük maliyetlerde yapması bu sistemin vazgeçilemez tekniklerden birisi olduğunu ortaya koymaktadır [7].

2.3.3. Plazma püskürtme yöntemi

Yüksek enerjili bir kaplama prosesi olan plazma püskürtme yöntemi, özellikle seramik esaslı malzemelerin kaplanmasında başarıyla uygulanmaktadır. Hidrojen veya helyum yanıcı gazlarıyla beraber argon veya azot gazları kullanılmaktadır. Sisteme verilen elektrik ile tabanca içerisinde bir plazma oluşturulur. Bu sırada toz beslemeyle beraber plazmada ergitilen tozlar yüzeye püskürtülür ve kaplama yapısı elde edilir (Şekil 2.6.). Oluşan plazma sıcaklığının yüksek olması (15.000 – 25.000 °C) ergime derecesi yüksek olan seramik tozlarında rahatlıkla kaplanmasına imkân

vermektedir. Partikülleri iyi ergimiş, yüksek yoğunluklu bir kaplama yapısı elde edilmektedir.

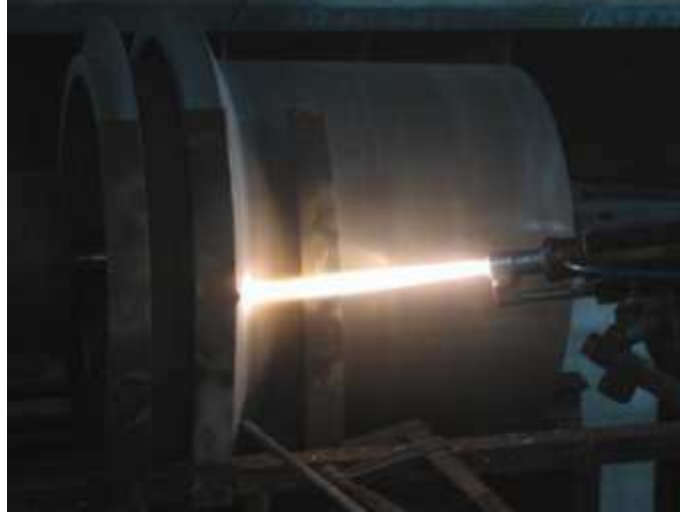
Uzay sanayiden, tekstil sanayisine, kâğıt sektöründen tel çekmeye kadar geniş bir kullanım alanı vardır. Bunların yanında yatırım ve bakım maliyetleri oldukça yüksektir. Ayrıca prosesin taşınmasının zorluğu ve yüksek maliyeti önemli dezavantajlarıdır [8].



Şekil 2.6. Plazma püskürtme yöntemi

2.3.4. Yüksek hızlı oksji-yakıt tekniği (HVOF)

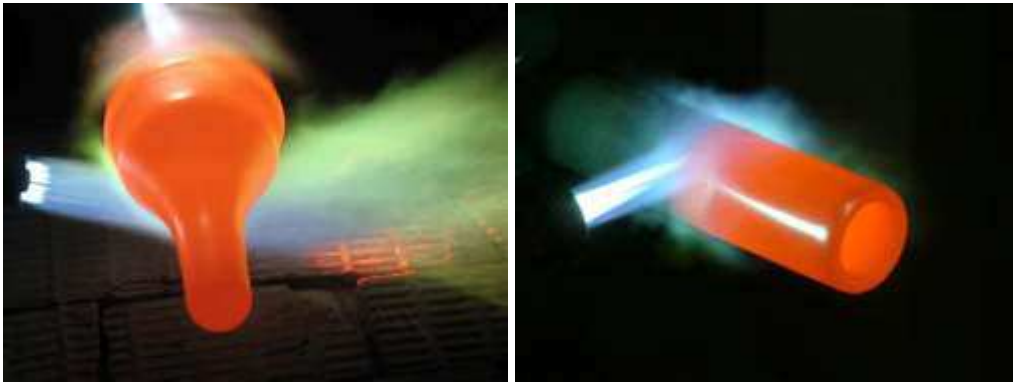
HVOF prosesi termal püskürtme kaplamalarda yüksek hızlarda, sert ve çok yoğun kaplama yapıları elde etmek için kullanılan bir prosestir. Kerosen, asetilen, propan veya hidrojen gibi yakıtlar oksijen ile yakılarak, ergimiş partiküller yüzeye çok yüksek hızlarda püskürtülürler. Partiküllerin hız artışı için nozul tipleri diğer termal püskürtme kaplama tekniklerine nazaran daha uzundur. Ana tema partikülleri ısı ile ergiterek değil, çok yüksek hızlarda yüzeye çarptırarak kaplama yapısını elde etmektir (Şekil 2.7.). Elde edilen kaplamalar çok düşük miktarlarda porozite içerir. Kaplama yapısı çok yoğun, sert ve oldukça yüksek yapışma mukavemeti sergilerler. Endüstride çok yüksek aşınma dayanımı istenen parçalarda, galvaniz hattında çalışan parçalarda, karıştırma bıçaklarında sertleştirici olarak ve diğer birçok alanda kullanılmaktadır [4].



Şekil 2.7. Yüksek hızlı oksji-yakıt yöntemi (HVOF)

2.3.5. RW (Döndürerek Ergitme) yöntemi

Alevle püskürtmede bir diğeri kaplama işlemleri püskürtme ve ergitme işlemidir. Kısaca RW diye adlandırılan bu sistem termal püskürtme tekniğinin önemli kaplama uygulamalarından bir tanesidir. Malzeme kaplama işleminden sonra yaklaşık olarak 1050 °C'ye kadar alevle ısıtılıp döndürülür. Püskürtülen kaplama böylece malzemeyle metalurjik bir bağ yapmakta ve çok düşük poroziteli mükemmel bir kaplama yapısı elde edilebilmektedir (Şekil 2.8.). Uygulanacak RW işleminde altlık malzemenin belli bir kalınlıkta ve boyutta olması, ayrıca ergitme sıcaklığının da yüksek olması gerekmektedir [9].



Şekil 2.8. Kaplama sonrası parçanın ergitilme işlemi (RW)

Ergitme öncesi yapılan kaplama işlemi genellikle alevle toz püskürtme veya HVOF püskürtme sistemiyle yapılır. Ergitme yapılırken kaplamanın akma noktasına çok dikkat edilmelidir. Zira akma noktası geçilirse kaplama malzeme üzerinde akar ve toplanır.

RW işlemi genellikle çok düşük porozite ve sertlik istenen yerlerde veya çarpma ve aşınmanın da aynı ortamda olduğu bölgelerde kullanılmaktadır. Kaplama yapısının altlık malzemeyle metalürjik bir bağ yapması dolayısıyla kaplamada atma, kırılma ve çatlama riski diğer kaplama çeşitlerine nazaran daha azdır.

2.4. Termal Püskürtme Kaplamaların Mikroyapısı

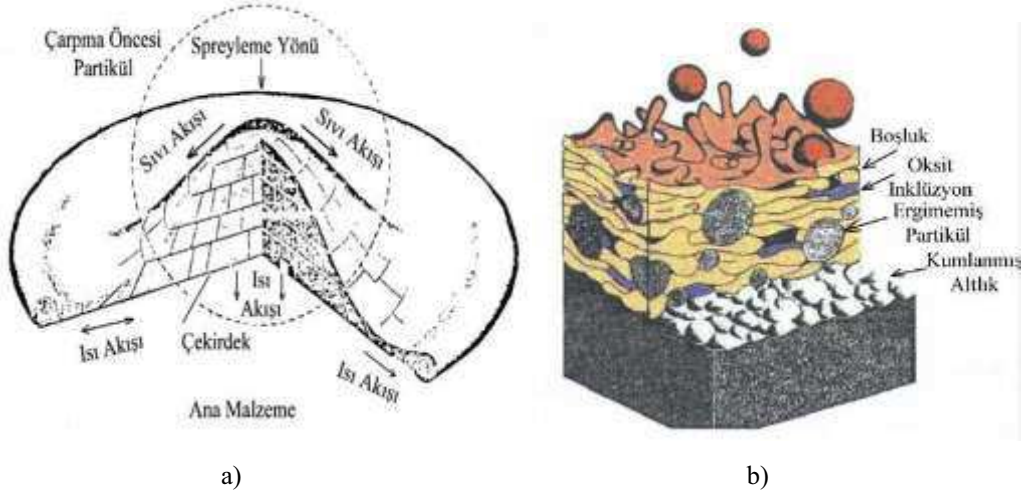
Termal püskürtme tekniğinde tel, toz ve çubuk halindeki malzemelerin bir şekilde ergitilip bir püskürtme gazı vasıtasıyla yüzeye gönderilmektedir. Kaplama malzemesi ergitilip parçacıklar halinde hızla altlık yüzeyine yapışırlar. Partiküller yüzeye çarptıklarında dışa doğru yayılırlar, ısıları düşer ve son derece yüksek hızda katılışırlar (Şekil 2.9. a) [11].

Hızla ısılarını kaybeden bu partiküller yaklaşık bir disk görünümüne sahiptirler. Peşpeşe gelen yapışma ile de kaplama yapısı oluşturulur. Termal püskürtme kaplamalarda mikroyapı levhasal katmanlar şeklinde meydana gelmektedir. Yapının içerisinde poroziteler, ergimemiş partiküller, oksit ve yarı ergimiş partiküller oluşacaktır. Şekil 2.9.b'de tipik bir termal püskürtme mikroyapısı görülmektedir. Bu yapıların miktarları termal püskürtme tekniklerine ve kullanılan cihaz parametrelerine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Partiküllerin mikroyapı görünümü ve ergimiş partikülün yüzeye çarptığındaki splat formasyonu Şekil 2.8.'de görülebilir [10].

2.4.1. Porozite ve yoğunluk özellikleri

Termal püskürtme yöntemlerinde metalik esaslı kaplamalar için neredeyse teorik yoğunluklara ulaşılırken seramik esaslı kaplamalarda % 3–20 arasında porozite

görülmektedir. Porozite, püskürtme yoluyla üretilen kaplamaların karakteristik özelliğidir.



Şekil 2.9. a) Çarpma etkisiyle partikülün levha şeklini alması b) Kaplama mikroyapısı [10]

Bazı durumda poroziteli yapılar tercih edilirken (örneğin termal bariyer uygulamalarındaki düşük termal iletkenlik için) bazı uygulamalarda ise (örneğin yüksek aşınma direnci için) yüksek yoğunluğa ihtiyaç duyulmaktadır. Plazma spre yay kaplamalarda, porların geometrisi ve dağılımı üniform değildir. Meydan gelen porozitelerin çapları 20 µm ila 100 µm arasında değişmektedir. Poroziteleri oluşturan çeşitli nedenler vardır.

Bunların başlıcaları;

1. Kaplama esnasında ikinci bir partikül aynı bölgeye ulaşmış bir önceki partikülün üstüne ulaştığında boşluk oluşturabilir. Bu olaya gölge etkisi denir.
2. Kaplama esnasında oluşabilen dar delikler ve/veya gaz inklüzyonları poroziteye neden olabilir.
3. Ergimemiş ya da daha büyük partiküllerin ortamda bulunması poroziteye neden olabilir.
4. Aşırı ısınmadan ve yüksek hızdan kaynaklanan partikül patlamaları ve böylece ortaya çıkan yıkıcı şok dalgaları poroziteye neden olabilir.

Kaplamalarda poroziteyi azaltmak için alınabilecek bazı önlemler mevcuttur bunların başlıcaları;

1. Altlık yüzeyini önceden ısıtarak temas sıcaklığını arttırmak ve yüzeye çarpan ergimiş damlacıkların viskozitelerini azaltmak,
2. Düşük basınçlı (LPPS) plazma sprey sistemi kullanarak partiküllerin çarpma hızlarını dolayısı ile kinetik darbe enerjilerini arttırmak,
3. Kaplama sonrası bazı işlemler uygulamak, (tavlama yaparak katı hal difüzyonu ile mikroporozitelerin azaltılması, kaplamalara sıcak izostatik press uygulanması, lazer ile yüzey yoğunlaştırma işlemleri, düşük sıcaklık uygulamaları için kaplamaların polimerle infiltrasyonu v.b.)

Termal püskürtme kaplamalarda porozite miktarının tayini arşimet metodu, noktasal sayım ya da basınçlı porozimetre kullanımı gibi işlemler başta olmak üzere farklı metotlar kullanılarak yapılabilir. Porozite kaplamaların, sertlik, aşınma direnci ve yapışma mukavemetini azaltır ve kullanım ortamına bağlı olarak iş parçasının servis ömrünü kısaltabilir [12, 13].

2.4.2. Yapışma ve iç gerilme özellikleri

Termal püskürtme kaplamalarda yapışma üç ana mekanizma tarafından kontrol edilir. Bunlar;

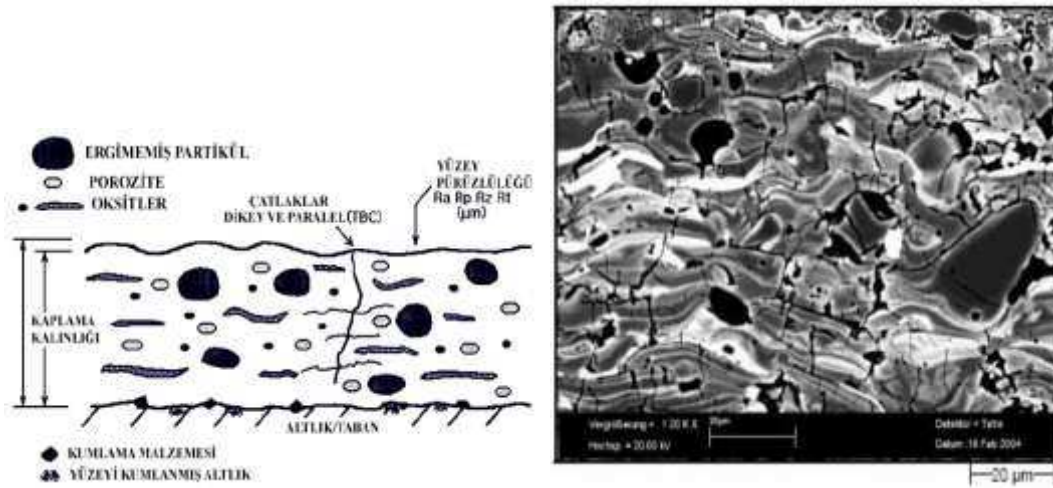
a) Mekanik bağlanma: Mekanik bağlanmada yüzey pürüzlülüğü önemli rol oynar. Altlıkların kaplanmadan önce mekanik bağlanmanın oluşması için kumlama ile pürüzlendirilir. Mekanik bağlanmanın etkin olabilmesi için partiküllerin yeterli plastikliğe, yüksek darbe hızlarına, düşük vizkoziteye ve iyi ıslatabilirliğe sahip olması gerekmektedir.

b) Fiziksel bağlanma: Bu mekanizma Fick kanunlarına göre temas sıcaklığının artması ile artan difüzyonun kontrol ettiği difüzyon kontrollü bir bağlanmadır. Altlıkların ön ısıtma işlemine tabi tutulması ile fiziksel bağlanma etkin olur. Ön ısıtma işlemi ayrıca iç gerilmelerin azaltılmasını sağlar. Difüzyon kontrollü bir

durum olan fiziksel bağlanma genellikle yapışma mekanizmaları içerisinde küçük bir role sahiptir.

c) Kimyasal bağlanma: Bu olay ince reaksiyon katmanlarının yapışmayı gerçek bir metalurjik bağ oluşturarak moleküler düzeyde meydana getirmesi ile oluşur.

Kaplamaların bağ/yapışma mukavemeti, kaplama parametrelerine, kaplanması istenen malzeme özelliğine ve altlığın cinsine (demir veya demir dışı) ve altlık yüzeyinin durumuna (temizliğine, pürüzlülük derecesine ve geometrisine) bağlı olarak değişir. Termal püskürtme yöntemiyle üretilen seramik kaplamalar, gevrek ve kırılğan yapıları nedeniyle, metal esaslı kaplamalara nazaran daha düşük yapışma mukavemetine sahiptir. Kaplamaların yapışma mukavemeti artan tabaka kalınlığı nedeniyle azalır. Şekil 2.10.'da mikroçatlaklar içeren termal püskürtme seramik kaplama mikroyapısı görülmektedir. Altlık ile seramik tabaka arasındaki termal genişleme uyumsuzluğunun giderilmesine yönelik uygulanan ara metalik kaplamalar (Ni-Al, Ni-Cr, NiAlCrY), yapışma mukavemetini olumlu yönde geliştirir [12,13].



Şekil 2.10. Klasik bir plazma kaplama tabakasının şematik ve mikroyapı görünümü [12]

2.4.3. Mekanik özellikler

Termal püskürtme kaplamalar aşınma, sertlik gibi mekanik özellikler bakımından üstün kaplamalardır. Kaplamalar, muhtelif tür aşınmalara (abrazif, adhezif, erozif vb.) karşı genel olarak yüksek direnç gösterirler. Karbürler (WC, TiC, MoC, TaC, NbC, Cr₃C₂), sert oksitler (Al₂O₃, TiO₂, Cr₂O₃), metaller (W, Mo, Ti, Ta) ve bazı alaşımlar (NiCoCrAlY) aşınmaya dirençli başlıca örneklerdir. Karbürlerin ergime sıcaklıkları oldukça yüksek olduklarından ve oksidasyon, dekarbürizasyon olayları genellikle çok yüksek sıcaklıklarda olduğu için genellikle saf karbür tozları tam olarak ergitilemezler. Bu yüzden bu tozlar Ni, Co, Cr gibi metalik tozlar ile karıştırılarak kolay ergimeleri sağlanır. Oksit esaslı seramikler yüksek sertlikleri ve ergime sıcaklıkları nedeniyle özellikle aşınma uygulamalarına karşı başarıyla kullanılmaktadır. Kaplamaların sertliği; püskürtülen malzemeye, kaplama sistemine ve proses parametrelerine bağlıdır. Artan püskürtme hızı ile sertlik ve yoğunluk artar. Kaplama malzemesinin karbür, metal veya oksit karakterli seramik olması durumuna göre tabakanın sertliği değişir. Örnek olarak kalite bir çeliğin ısıtma işlem sonrası sertlik değeri yaklaşık 700 Vickers (55 HRC), bir elektrolitik sert krom kaplamanın 800–900 Vickers iken oksit esaslı seramiklerin sertlik değeri 1200 HV_{0.3}'den (Al₂O₃) başlayıp 1600 HV_{0.3}'e (Cr₂O₃) kadar çıkabilmektedir [12,13].

Kaplamaların mukavemetine etki eden en önemli faktörlerden birisi kaplamanın kalınlığıdır. Kaplama kalınlığı ile kalıntı gerilme adı verilen iç gerilmeler genel olarak doğru orantılı olarak değişir. Mukavemet ise artan kaplama kalınlığı ile ters orantılı olarak düşer. Kalıntı gerilmelerin artışı kaplamanın altlıktan ayrılmasını teşvik eder. Ayrıca, kaplama tabakasının elastisite modülü artar, yüksek porozite ve oksit içeriği mukavemeti olumsuz yönde etkiler. Lamelleri arasındaki kohezyon kuvveti, kaplamanın mukavemetini ifade etmektedir [14].

2.4.4. Termal genleşme ve termal iletkenlik

Kaplamalar için termal genleşme ve termal iletkenlik çok önemli parametrelerdir. Altlık ile kaplama malzemesinin termal olarak uyum içerisinde olması sağlıklı kaplama tabakalarının elde edilmesi açısından çok önemlidir. Öyle ki termal genleşme katsayılarının birbirinden çok farklı olması iş parçasının sıcaklığa maruz kaldığı durumlarda altlık ve kaplama tabakasının farklı oranlarda genleşmesine dolayısı ile kaplamanın zarar görmesine sebep olur. Örneğin; metal altlıklar ile seramik esaslı kaplamalar arasındaki termal uyumsuzluklar kalıntı gerilmelerin oluşmasına ve işlem sonrası kaplamaların dökülmesine sebep olabilir. Bu durumun önlenmesi için genleşme katsayıları birbirine yakın altlık ve kaplama malzemeleri seçmek bütün riski ortadan kaldırmaz. Bu amaçla termal spreycaplamalarda ara bağlayıcı malzeme ya da malzemeler kullanılmaktadır. Bağ tabaka adı verilen bu katmanlar tek ya da çoklu tabaka olarak kullanılabilir. Genellikle bağ tabakalar Ni, Cr, Al gibi metalik tozların kombinasyonları şeklindedir. Bağ tabaka kalınlıkları güncel çalışmalarda 75–125 µm arasında değişmektedir [14,15].

Termal püskürtme kaplama uygulamalarında ana kaplamadan önce kaplanan bağ tabakanın sağladığı avantajlar aşağıda verilmiştir;

1. Farklı termal genleşme katsayılarına sahip malzemeler (altlık metal, kaplama, seramik) kaplanması işlemlerinde sağlam kaplama tabakalarının elde edilmesi
2. Altlık malzemeyi korozyon ve oksidasyon problemlerinden korumak,
3. Sert altlık malzemelerin yüzey pürüzlendirilmesi işleminin efektif olarak yapılamaması durumlarında kullanılabilme,
4. Bağlanma hatalarına karşı ilave emniyet sağlamak için pürüzlendirilmiş altlık malzeme yüzeyine ara kaplama uygulanmasının yapılabilmesi,

BÖLÜM 3. ELEKTRİK ARK PÜSKÜRTME TEKNOLOJİSİ

3.1. Giriş

Elektrik ark püskürtme prosesi, termal püskürtme proseslerinden bir tanesidir. Tel formundaki iletken malzeme (+) ve (-) yük ile beraber uçta bir elektrik arkı oluşturulur. Oluşan ark içerisinde ergitilen tel malzeme atomize gaz yardımıyla hızla altlık malzemeye yönlendirilir. Kaplama süresince teller bir sürücü yardımıyla tabancaya sürekli beslenmektedir.

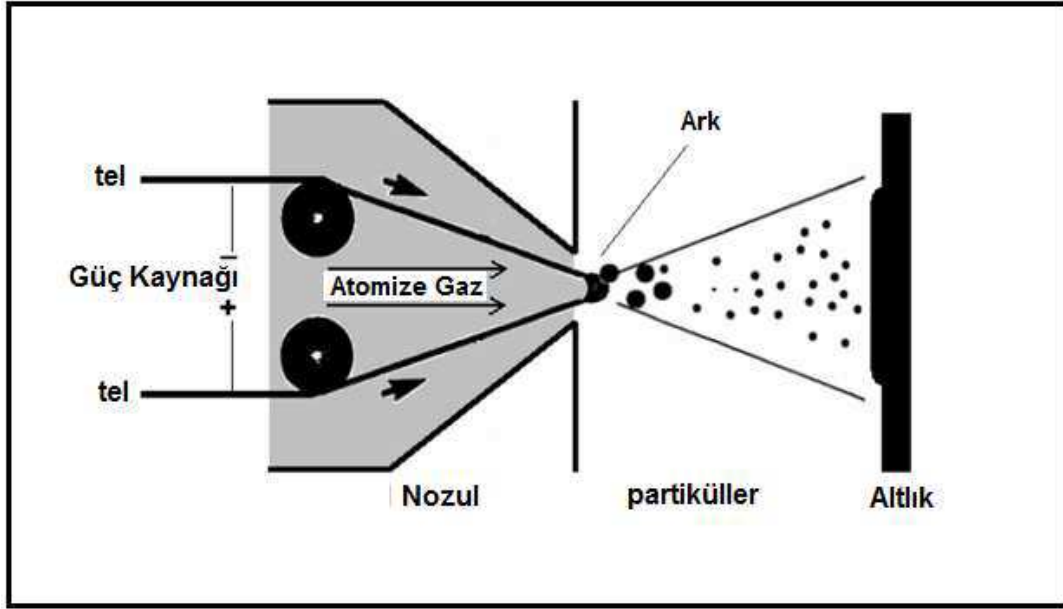
Elektrik ark prosesiyle genelde aşınma dayanımı ve korozif ortamdan korunma amacıyla uygulamalar yapılmaktadır. Bu sebeple daha çok Zn, Al, Cr benzeri malzemeler veya alaşımları kaplama malzemesi olarak kullanılmaktadır. Kullanılacak kaplama malzemesinin iletken olması gerektiği için seramik esaslı malzemeler ancak özlü tel formunda kullanılabilirler. Bu proses ile çok geniş alanlar hızlı bir şekilde kaplanabilmektedir. Uygulaması diğer proseslere nazaran daha kolaydır.

Elektrik ark prosesi gelişmiş dünya ülkelerinde 1900'lü yıllardan itibaren hızla kullanılmaya başlanmasına rağmen ülkemizde henüz yeterli kullanım alanı bulamamıştır. Artan teknoloji ve gelişim ile beraber ülkemizin de yavaş yavaş bu sektöre girmeye başladığı söylenebilir. Elektrik ark püskürtme sayesinde yaptığımız kaplamalarla malzemeler aşınmaya ve korozyona dayanıklı hale getirilmekte ve bu şekilde uzun yıllar kullanılabilirlerdir.

3.2. Elektrik Ark Püskürtme Teknolojisi

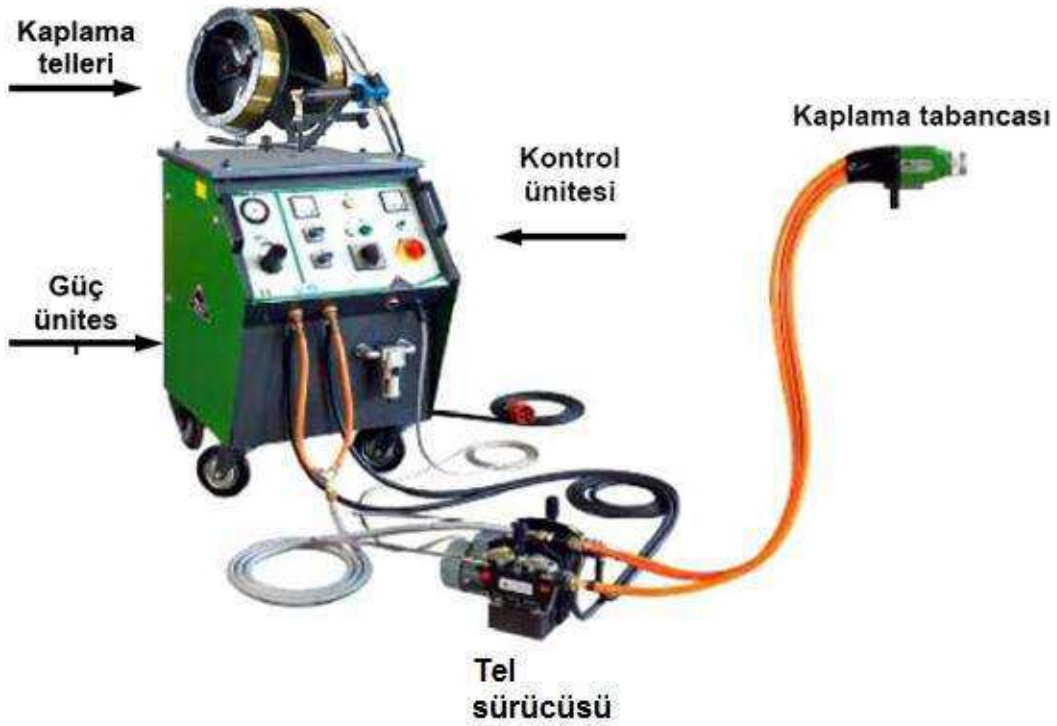
Elektrik ark püskürtme sisteminde iletken iki tel anot ve katot olarak kullanılmaktadır. Bir sürücü vasıtasıyla tabanca ucuna sürülen bu teller arasında bir

elektrik arki meydana gelir ve bu ark ile eriyen tel partikülleri de atomize bir gaz vasıtasıyla hızlı bir şekilde altlık malzemeye püskürtülürler. Şekil 3.1.'de tipik bir ark püskürtme sisteminin şematik görünümü verilmektedir [16].



Şekil 3.1. Elektrik ark püskürtme süreci [12]

Ark püskürtme tekniğinde erime bölgesi gerisinde bulunan nozul ile gaz akışının hızı ve yayılımı sağlanmaktadır. Eriyen partiküller bu sayede altlık üstünde biriktirilir ve lamel yapıda klasik termal püskürtme kaplama yapısı elde edilmektedir. Ark sıcaklığının $4000-5000^{\circ}\text{C}$ 'lere ulaşması tel halindeki hemen hemen bütün malzemelerin bu sistem ile kaplama oluşturmaya olanak sağlamaktadır. Proses parametreleri kullanılan tele ve istenen kaplama türüne göre değişmektedir. Kaplama sistemi genel olarak kontrol ünitesi, güç ünitesi, tel besleme ve tabancadan meydana gelmektedir. Sistemin en önemli bileşeni tabancadır (Şekil 3.2.). Püskürtme tabancasına monte edilebilen farklı nozul tipleri uygulamadaki çeşitliliği arttırabilmektedir.



Şekil 3.2. Elektrik ark sistem bileşenleri [20, 21]

Elektrik ark püskürtme sistemi diğer termal püskürtme uygulamaları ile kıyaslandığında birçok avantaja sahiptir. Özellikle ilk yatırım maliyeti daha ucuzdur. Bu avantajı sebebiyle bazı uygulamalarda plazma püskürtme tekniğinin yerine uygulanabilmektedir.

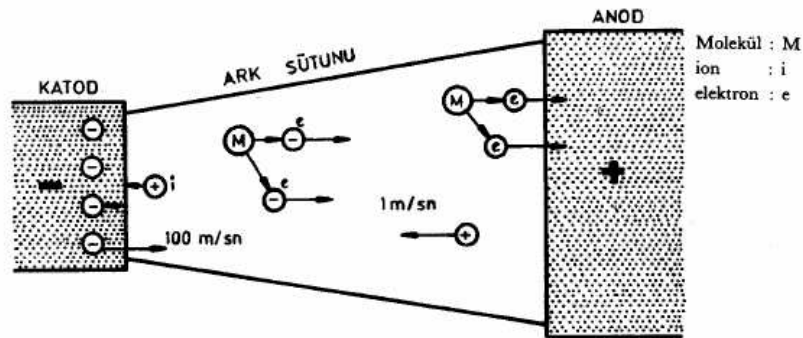
Kontrol parametrelerinin kolaylığı, işçi sağlığı açısından uygulamanın nispeten daha güvenli oluşu ve geniş alanların yüksek hızlarda kaplanabilirliği elektrik ark püskürtme tekniğinin endüstride tercih edilmesini sağlamıştır. Bunlara ek olarak bazı proseslerde uygulanamayan veya uygulanması zor yerlerin mobilize olarak yerinde kaplama uygulamasına imkân tanınması sistemin diğer bir üstün tarafıdır.

Bunun yanında kaplama mikroyapısında porozite, oksit miktarı ve ergimemiş partikül içeriği yüksektir. Kaplama esnasında dropletlerin oluşumu asimetric bir davranış sergilemektedir. Diğer tekniklere nazaran daha pürüzlü bir yapının elde edilmesi istenen işe göre avantaj veya dezavantaj sağlayabilmektedir [17].

3.3. Elektrik Arkının Karakteristik Özelliği

Ark, iyonlaşmış gaz arasında yer alan, iki elektrot arasındaki elektrik deşarjıdır. Ark üç temel bölümden meydana gelir. Ark sütunu; içinde kararsız gerilim farkı bulunur. Katot ve anot bölgeleri; elektrotların soğutucu etkisinin hızlı gerilim düşmesine götürdüğü bölgelerdir. Ark sütunu şarj dengesine, düşük elektrik alanına ve ısı kaynağı olarak kullanılan yüksek sıcaklığa sahiptir. Elektrik ark spreyde oluşan elektrik arkı iyonize gaz vasıtasıyla elektrik akımından oluşturulur. İyonize gaz (+) ve (-) elektrik yüklü iki telin ilerleyip birleşme noktasında birbiri ile temas edip ark alevi meydana getirmesi ile oluşturulur. Yüksek elektrik akım yoğunluğu gerekli güç desteğinin devamlılığını iyonize olmuş bölge sağlar. Ark içinde elektronlarını kaybetmiş pozitif yüklü iyonlar bulunur. Bu da anottan katotta pozitif gaz iyon akışıdır [1].

Ark sütunu nötr ve uyarılmış bir gaz atomları karışımıdır. Bu merkez sütunda elektronlar, atomlar ve iyonlar devamlı hareket ederler ve sürekli çarpışma halindedirler (Şekil 3.3). Ark sütununun en sıcak bölümü burası olmakla beraber parçacıkların hareketi en şiddetli durumdadır. Dış bölüm ya da ark alevi bir ölçüde daha soğuktur ve merkezi sütunda ayrılmış gaz moleküllerinin yeniden bileşmesinden ibarettir.



Şekil 3.3. Katot ve anot arasında oluşan ark sütunu [18]

Elektrik ark oluşumu içerisinde katot elektron vermektedir. Katot alanında meydana gelen ısı başlıca, katodun yüzeyine çarpan pozitif iyonlardan kaynaklanmaktadır. Anottaki ısıyı katottan anoda akan elektronlar temin etmektedirler. Sonuç olarak katot, ölçüsü akım şiddetiyle doğru orantılı olarak elektron veren elektrottur. Bu elektronlar, yolları boyunca, moleküllere çarparlar. Enerjileri yeterli ise bu darbe iyon oluşmasına yol açar. İyonlar ise elektrik yüklü moleküllerden başka bir şey değildir.

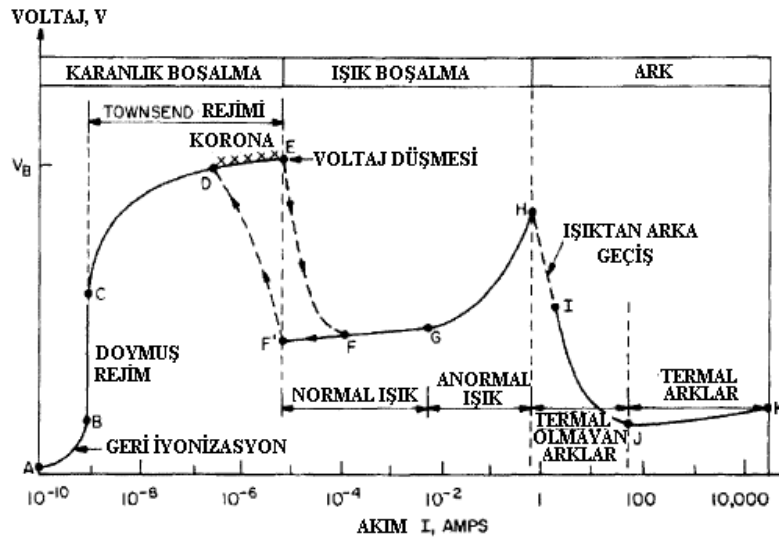
Elektrik ark oluşumunda kullanılan gazların (argon, helyum, azot, hidrojen) molekülleri bir elektron kaybederek pozitif iyonlar oluştururlar. Böylece, çarpışmadan sonra iki elektrot anoda doğru gider, bu arada pozitif iyon katoda doğru hareket eder ve katot bu şekilde bombardımana uğrar. Buna karşılık oksijen bir elektron yakalayıp anoda doğru giden negatif iyonlar oluşturabilir. Böylece oluşan arklarda üç tip yer değiştirme olayı görülmektedir.

- a) Esas itibariyle katottan çıkan ve anodu bombardıman eden elektronlar;
- b) Katoda doğru geri dönen pozitif iyonlar
- c) Anoda doğru giden negatif iyonlar

Elektronların hızı yaklaşık 100 m/sn, iyonların ise 1 m/sn'dir. Elektronlar iyonlardan daha hızlı olduğundan dolayı akımın büyük bölümü elektronlar tarafından taşınır.

Anot ve katot civarında (anoda 0,1 mm; katoda 1/10000 mm mertebesinde) ani gerilim düşmeleri meydana gelir (Şekil 3.4). Ark sütunu boyunca ise bu düşme kademeli olmaktadır. Bu anodik ve katodik geçiş bölgeleri, buralarda mevcut olan gerilim düşmelerine bağlı olarak yüksek bir ısı yayılımının merkezidir. Aradaki ark sütunu ise elektriksel olarak nötr bir ortam teşkil etmektedir [18].

Düşen bir voltaj-akım oranında EAP prosesi işletimi "termal ark" sınıflandırılması içindedir ve bölgesel termodinamik dengede olduğu düşünülür.



Şekil 3.4. Lineer bir arkın bölgelerinin şematik olarak gösterimi [18]

EAP' de oluşan elektrik arkı iyonize gaz vasıtasıyla elektrik akımından oluşturulur. İyonize gaz (+) ve (-) elektrik yüklü iki telin ilerleyip birleşme noktasında birbiri ile temas edip ark alevi meydana getirmesi ile oluşturulur. Yüksek elektrik akım yoğunluğu gerekli güç desteğinin devamlılığını iyonize olmuş bölge sağlar. Ark içinde elektronlarını kaybetmiş pozitif yüklü iyonlar bulunur. Bu da anottan katotta pozitif gaz iyon akışıdır [18].

Elektrik ark püskürtme sisteminde ark içindeki ergime anot ve katotta aynı şekilde olmamaktadır. Anodun, katottan farklı bir ergime davranışı sergilemesi kendisinin klasik bir özelliğidir. Bu farklılık iki elektrottaki sıcaklık, ergime ve damlacık formasyonunu çok değiştirmektedir. Buda partikül boyutunu, hızını ve yörüngelerini etkiler.

Ark bileşiminde katotta büzülme anotta da yayılma belirgin şekilde ortaya çıkmaktadır. Anot ve katottaki bu farklı ergime davranışına bağlı olarak ısınma, ergime ve partikül oluşumu iki elektrotta farklı biçimlenmektedir. Şekil 3.5.'de bu durum açıkça görülmektedir.

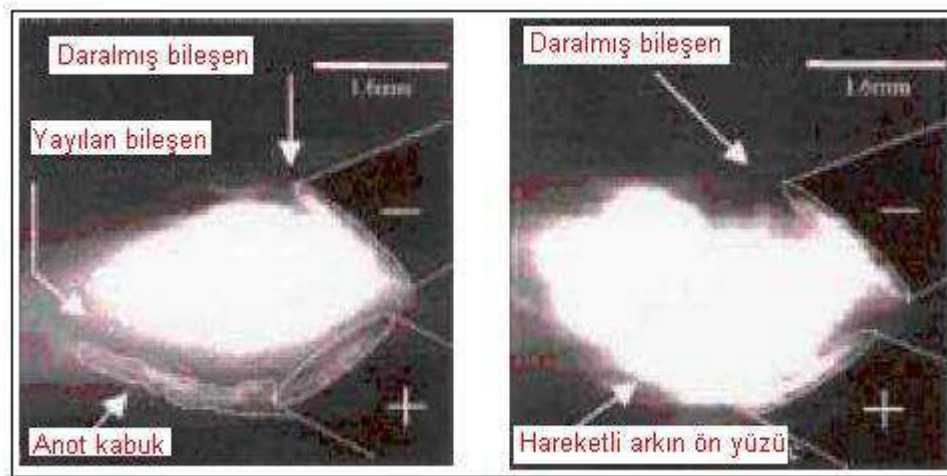
Anodun katoda göre daha soğuk olması telin daha yavaş ergimesine neden olur. Bunun sonucu olarak oldukça büyük partiküller meydana gelir. Bazı büyük partiküller ise atomize gaz ile parçalanır ve daha küçük partikül ayrılırlar. Bu

asimetrik ergime davranışı püskürtme paternini ve kaplama yapısını etkilemektedir (Şekil 3.6.).

Anotta ergime yavaş olmaktadır. Bu sebeple tel ucundan ayrılan partiküller daha büyük olmaktadır. Bu kararsız ergime rejimi, püskürtme davranışı ve kaplama yapısını etkilemektedir. Katotta ergime daha lokalizedir ve ergimiş partiküller atomize gaz tarafından çok hızlı bir şekilde püskürtülür. Sonuçta damlacıklar daha küçük olur. Katotta daha yüksek ergime hızı ve daha sıkı yapı, anotta ise daha dağınık bir yapı elde edilir.

Katot pozitif gaz iyonlarının çarpışması ile yüksek derecede ısınır. Bu durum, ısınan yüzeyden elektron gibi elektriksel yüklü parçacıkların serbest kalmasına sebep olur. Katot yüzeyinden elektron aktığı için, onların enerjisinin büyük bir bölümü iyonize gazlara verilir. Bu nedenle anot katottan daha soğuk olmaktadır [19].

Anotta sıcaklık ile tel yüzeyine vurur ve ergimiş metalden küçük parçacıklar yaratılarak kaplama katmanları oluşturulur. Anottan kopan parçalar atomize gaz ile tabanca ucuna doğru giderler (Şekil 3.6.).



Şekil 3.5. Yayılan ve büzülmüş anot ve katot bileşenleri. Üst tel katot, alt tel anot a) Ark tamamen genişlemiş ve genişlemiş anot kabuğuna doğru yayılmış, b) Anotta yayılan bileşen telin ucundan anot kabuğuna doğru ilerlemiş [19]

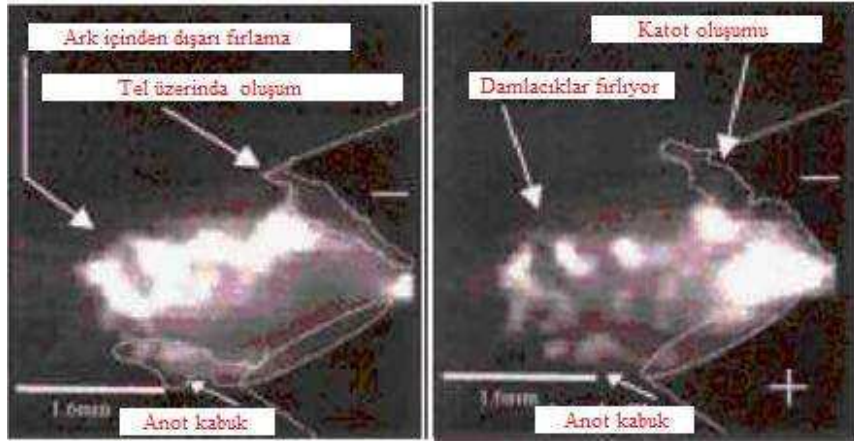


Şekil 3.6. Anottan kopan parçacıklar [19]

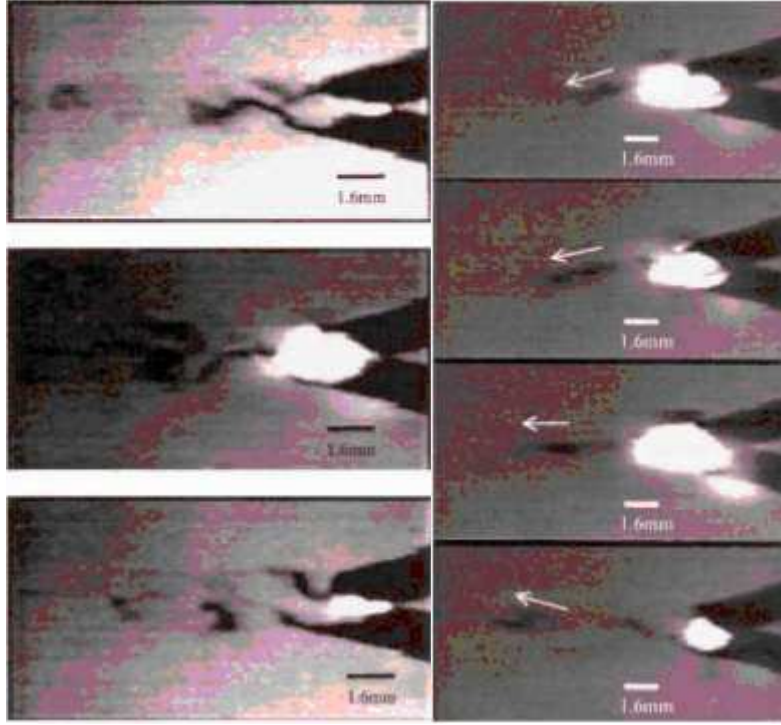
Bu yayılım sürekli devam eder. Anot kabuk durmadan parçalanırken, ark elektrotlar ile belli mesafedeki noktada sürer. Bu dönüşüm aerodinamik davranışı için arktaki dalgalanma hareketi akla gelebilir. Ark söndüğünde de anotta ergime meydana gelebilir

Katotta metal ayrımında üç farklı mekanizma görülür;

- 1) Katottan jet ile ergimiş partiküller dışarı fırlar (Şekil 3.7.)
- 2) Tel çevresinde/sınırında kabuk formundan önce ergime ve parçalanma görülür. Daralan ark katot yüzeyine hareket eder
- 3) Katot ağız kenarından anota benzer biçimde kabuk oluşur. Bu anota göre daha küçük boyutludur.



Şekil 3.7. Katottan püskürme ile dışarı fırlayan partiküller [19]



Şekil 3.8. Farklı atomize jet akımındaki ergime ve kopma [19]

Ergitilen iki tel ile ark arasındaki ilişki tel boşalmasında akışkan dinamiğinin oluşmasına sebebiyet verir. Bu durumda bir girdap problemi yaratacaktır. Anot ve katodun jet akışında yarattığı bu dalgalanmalar kaplamada kullanılan parametreler ile doğrudan ilişkilidir. Arkta meydana gelen girdapı yaratan bu dalgalanmalar yapılan çalışmalar ile tespit edilmiştir. Arkta girdap oluşumu vizkozite ile sıcaklığa göre değişmektedir. Şekil 3.8.'de jet akışındaki değişim görülebilir. Şekil 3.8.'de meydana gelen büyük girdap yapısı anot ve katot içerisinde görülebilmektedir. Kabuk kritik bir uzunluğa ulaşacak, boyutun artmasıyla da kabuk üzerindeki aerodinamik etkiler artacaktır. Buda daha büyük bir girdap akışının gerçekleşmesine sebep olacaktır.

Büyük girdap yapılarının oluşumu metal damlacıklarının da yörüngeleri etkileyip, kontroller edilmesini güçleştirecektir. Yeni teknikler ve dizaynlar ile büyük girdap akımlarını azaltmaya yönelik çalışmalar yapılmaktadır. Böylece daha düşük türbülans yapıları elde edilebilecektir [19].

Ancak bu kaplama sisteminde sadece iletken tel kullanım zorunluluğu kaplama malzemesi açısından çeşitliliği engellemektedir. İletken olmayıp tel haline getirilemeyen malzemeler de iletken dış yüzeyler kullanılarak aynı kaplama sisteminde kullanılabilirlerdir.

3.4. Elektrik Ark Püskürtme Kaplama Malzemeleri ve Kullanım Alanları

Elektrik arkının oluşabilmesi için elektrik ark püskürtme sisteminde kullanılacak tellerin iletken karakterde olması gerekmektedir. Endüstride yaygın olarak kullanılan iletken teller korozyon koruma uygulamaları amaçlı olmakla beraber aşınma dayanımı ve yüzey tamiratları için de kullanılmaktadır.

Tablo 3.1. Elektrik ark püskürtmede kullanılan bazı tel malzemeleri ve kullanım alanları [21]

KAPLAMA TELİ	KULLANIM ALANI
Zn	Korozyondan koruma
Zn/Al 85/15	Endüstri ve deniz atmosferindeki korozyondan koruma, SO ₂ 'li ortamlarda yüksek korozyon direngeliği
Al	Endüstri ve deniz atmosferindeki korozyondan koruma, 800°C ve üzerindeki sıcaklıklarda yüksek sıcaklık korozyonundan korunma ve gıda endüstrisi
AlMg5	Deniz atmosferinde korozyon dayanımının sağlanması
NiTi	Mükemmel bağ tabakası kaplaması oluşturma
%13 Cr'lu çelik	Aşınma dayanımı, zayıf korozyon direngeliği
FeCrAl	Yüksek sıcaklık korozyonuna direngelik ve mükemmel aşınma dayanımı
Mo	Kazımalı korozyon dayanımı
NiCr 80/20	Korozyon dirençli kaplamalar ve seramik üst kaplamalar için bağ tabaka kaplaması
NiAlMo	Oksidasyon, termal şok ve abrazyon dayanımı
Paslanmaz Çelik	Aşınma ve korozyon dayanımı
NiCrMo	Asidik, sıcak gaz korozyonuna karşı dayanım

Elektrik ark püskürtme tekniği yüksek kaplama hızı ve birikme verimiyle önemli bir kullanım avantajına sahiptir. Bu şekilde geniş alana sahip yüzeyler çok hızlı bir şekilde kaplanabilmektedir. Harici bir ısıtıcı gaz kullanımına gerek olmadığı için altlık malzemeye ısı girdisi çok az seviyelerdedir ve altlığın çarpılma riski minimumdur [20]. Birçok malzeme bu yöntem ile kaplama olarak altlık yüzeylerinde biriktirebilmektedir. Özellikle korozyondan korunma ve aşınmaya dayanıklı yüzeylerin oluşturulmasında bu yöntemde kullanılacak malzeme çeşitliliği mevcuttur. Tablo 3.1.'de elektrik ark püskürtme sisteminde kullanılan bazı malzemeler ve kullanım amacı verilmektedir [21].

3.4.1. Al ve alaşımları

Metalik alüminyum kaplamalar gıda endüstrisinde, deniz altı uygulamalarında, ticari alanlarda ve askeri uygulamalarda korozyondan koruma için kullanılan kaplamalardır [1–2]. Alüminyumun korozyon koruma alanı asidik bölgededir. Alüminyum kaplamalar özellikle yüksek sıcaklık korozyonuna karşıda yüksek korozyon direngenliğine sahiptir. Özellikle AlMg5 alaşım kaplamalar deniz atmosferine maruz kalan gemilerin ve petrol platformların korozyona karşı korunmasında başarılı bir şekilde uygulanmaktadır [21].

Deniz ortamı ve atmosferik korozyondan koruma amaçlı kullanılan alüminyum kaplamaların uygulandığı servis parçalarının kullanım ömürlerini 20 yıla yakın uzattığı rapor edilmiştir [21]. Alüminyum, çelikten daha düşük bir elektrokimyasal potansiyele sahip olması sebebiyle korozyon sebepli oksidasyona direngenlik sağlamaktadır. Çevre ile çelik altlık arasında bulunan bir Al kaplama ile galvanik koruma meydana getirilebilmektedir.

Kaplama kalınlığı 0.08–0.15 mm civarındaki Al ve alaşım kaplamaları, balık saklama tanklarından gemi zincir kilitlerine, denizcilikte ve deniz suyuna karşı birçok alanda üzerine polimerik kapama uygulanarak sıkça kullanılmaktadır. Kimyasal korozyona karşı da yüksek dayanıma sahip olan Al ve alaşım kaplamaları yağ arıtım parçalarında, ticari ekipmanlarda ve asidik, yumuşak veya sert su ortamında kullanılabilir.

Al kaplamalar 900°C'ye kadar oksidasyona karşı direnç gösterebilmektedirler. Bu sebeple çelik ısı parçalarında, buhar panellerinde kullanılan ferritik çeliklerde, otomotiv endüstrisinde termal şoka dayanım ve parçaların servis ömürlerini artırmak amacıyla kullanılmaktadır. Ayrıca elektrik iletkenliği açısından metal olmayan malzemelerin yüzeylerine uygulanarak biriken statik elektriği dağıtmak ve radyo frekansları veya elektromanyetik etkilere karşı korumak için de uygulanmaktadır [22].

3.4.2. Zn ve alaşımları

Metalik inko ve alaşım kaplamaları elik yapılarda korozyondan koruma amacıyla kullanılmaktadır. Zn kaplamalar elik ve betonarme köprüler, bina kolon ve kirişler buyek elik yapılar, dökme demir borular, su kuleleri, sıvı depolama tankları ve ev ve sanayi tüplerinin kaplanması gibi uygulamalarda başarı bir şekilde kullanılmaktadırlar [22].

Galvanik etki sebebiyle elik köprülerde sıklıkla kullanılan çinko kaplamalar, uygulanmış olduğu yapıların korozyon dayanımını oldukça artırmaktadır. Bu şekilde yapıların servis ömürleri de artmış olur. Çinkonun oksitlenme potansiyeli oldukça duşektur. Uygulanan kaplama ile yüzeyde ince bir çinko oksit yapısı havayla etkileşimde olacaktır. Burada inko oksit ortamdaki nem ile reaksiyonu sonucu çinko hidroksit formunu oluşturur. Karbondioksit ve çinko hidroksit reaksiyonları da yüzeyde çinko karbonat katmanları meydana getirmektedir. Yumuşak ve diğer kaplama malzemelerine nazaran ucuz olması Zn ve Zn alaşımlarının kullanımını yaygınlaştırmaktadır [23].

Çinko ve alüminyum alaşımı olan Zn/Al 85/15 kaplamalar hem Zn hem de Al'un korozyon koruma davranışını birarada bulundurmaktadır. Bu sebeple korozyona karşı hem asidik hem de bazik ortamda koruma sağlamaktadır. Uygulandığı elik yapıların servis ömürlerini oldukça arttırmaktadır. Bu kaplamalar elik köprülerin kaplanmasında başarı ile kullanılmıştır [22,24].

3.4.3. Ni ve alaşımları

Nikel ve nikel alaşım kaplamaları deniz atmosferindeki ve desalinasyon alanlarındaki komponentlerin korozyona karşı korunması amaçlı uygulanmaktadır. Özellikle elektrik ark püskürtme NiCu30Fe kaplamalar indirgeyici ortamlarda ve oksitli akışkanlarda mükemmel korozyon koruma sağlamaktadır.

Elektrik ark püskürtme ile üretilen NiCr 80/20 kaplamalar ıslak ortamdaki korozyona karşı koruma için uygulanan bir diğer nikel alaşım kaplamadır. Mükemmel bir

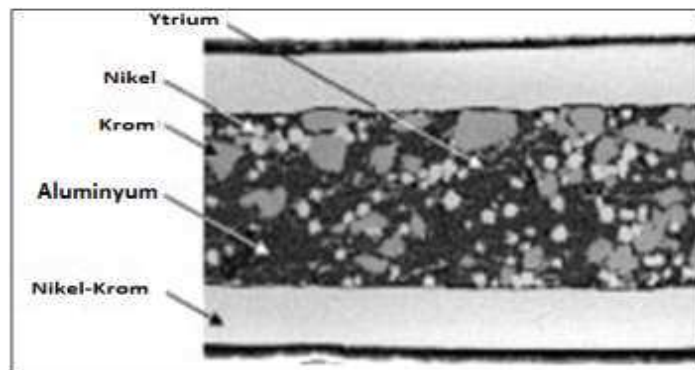
korozyon koruması sağlayan NiCr 80/20 alaşım kaplamaların üretiminde atomize gaz olarak atmosferik hava yerine argon kullanılması gerekmektedir [21,25].

3.4.4. Özlü tel uygulamaları ve konu ile ilgili literatür özeti

Yukarıda bahsedildiği şekilde sadece iletken metalik malzemelerin tel formunda kullanılması zorunluluğu kaplama malzemesi açısından çeşitliliği engellemektedir. İletken olmayan veya tel haline getirilmesi mümkün olmayan malzemeler iletken teller ile dış yüzeyleri oluşturması ile beraber kullanılabilir. Bu tür tellere özlü tel denmektedir (Şekil 3.9.) [20].



Şekil 3.9. Özlü tel yapımı [21]



Şekil 3.10. Özlü kaplama teli kesit mikroyapısı

Özlü tel olarak adlandırılan bu tip malzemeler ile daha iyi korozyon ve aşınma dayanımı sağlanabilmektedir. İhtiyaç duyulan uzun servis ömürleri ve gelişen teknoloji kullanılan komponent ve parçaların daha sağlam ve uzun süre kullanımını

zorunlu kılmaktadır. Özel olarak üretilen bu teller ile oluşturulan kaplamalar sayesinde istenen korozyon ve aşınmaya karşı dayanım mükemmel bir şekilde sağlanabilmektedir. Şekil 3.9.'da özlü tel üretim aşamaları verilmektedir. Şekil 3.10.'da özlü kaplama telin kesit mikroyapısı görülmektedir. Tablo 3.2.'de genel olarak kullanılan özlü tel türleri, kullanım alanlarıyla beraber verilmiştir.

Tablo 3.2. Elektrik ark püskürtme kaplama prosesinde kullanılan bazı özlü teller ve kullanım alanları [20, 21]

ÖZLÜ TEL BİLEŞİMİ	UYGULAMA ALANI
FeCrCMn	Abrazif aşınma dayanımı
FeCMnSi	Kuru atmosferde yüksek aşınma dayanımı
FeCrBSi + WCCoCr	Mükemmel aşınma dayanımı, iyi genel korozyon direngeliği ve iyi bağ mukavemeti
FeCrSi	Aşınma dayanımı ve yüksek sıcaklık korozyonu dayanımı (900°C'nin üstü)
NiCr 50/50	Yüksek sıcaklık korozyon dayanımı (900°C üstü)
NiBSi + WC	Yüksek abrazif aşınma dayanımlı kaplamalar, iyi genel korozyon direngeliği
NiCrBSi	Islak atmosferde yüksek korozyon direnci, iyi aşınma dayanımı
NiCrAl	Oksidasyon ve korozyon dayanımı
FeNiCr	Yüksek sıcaklık korozyonu dayanımı

Elektrik ark püskürtme kaplamalar termal spreyci ailesi içerisindeki en ucuz kaplama yöntemidir. Parametrelerin diğer yöntemlere göre az olması, kurulumunun kolay olması ve mobilize sistem avantajı nedeniyle yurtdışındaki uygulamalarda geniş yer almaktadır. Buna karşın ülkemizdeki uygulamalar için bakir bir teknolojidir. Özellikle özlü tel kaplamalar endüstride çeşitli alanlarda kullanılmasına rağmen, uygulama alanları, kaplama parametreleri ve kaplama özellikleri çok bilinmemektedir.

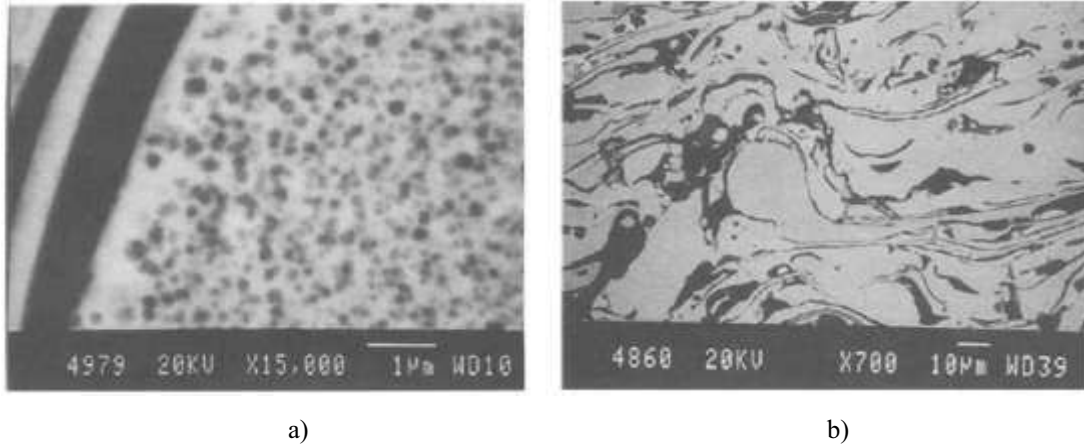
Elektrik ark püskürtme özlü tel kaplama uygulamaları konusunda birçok çalışma yürütülmüş ve yürütülmeye devam etmektedir. Özellikle kaplama malzemesi çeşitlendirilebilirliği sebebiyle zorlu koşullarda yüksek dayanıma sahip sert ve aşınma dayanımlı yüzeyler elde edilebilmektedir. Karbür ve oksitli bileşiklerin tel içine yerleştirilmesi ile üretilen özlü teller ile yapılan kaplama uygulamalarında metal olmayan unsurların kaplamada takviye fazları şeklinde bulunması ile servis ömür performanslarının artmasını sağlamaktadır. Birçok avantajı bir arada barındıran özlü teller ile ilgili yapılan çalışmaların özeti aşağıda verilmektedir.

S. Dallaire ve H. Levert [26]' in çalışmasında; 304 paslanmaz çelik kabuk kısmı içine %10 ila 65 TiB₂, %1 ila 15 ilaveler ve balans olarak 316 L paslanmaz çelikten üretilmiş özlü teller kaplama malzemesi olarak kullanılmıştır. Kaplamalar Tablo 3.3.'de verilen kaplama parametrelerinde üretilmiştir. Şekil 3.11'de özlü kaplama teli ve kaplama mikroyapısı verilmektedir.

Tablo 3.3. Kaplama parametreleri

Voltaj	26–30 V
Akım	100–150 A.
Gaz basıncı	6 bar
Mesafe	150 mm.

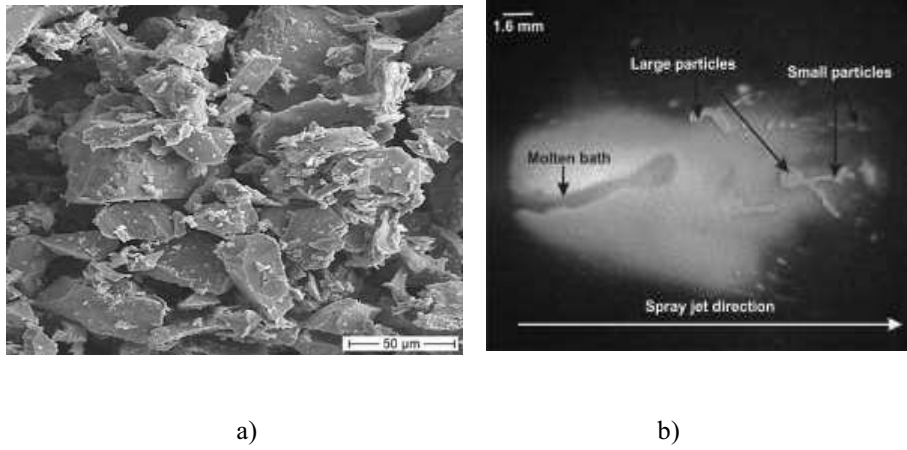
Üretilen bu kaplamalara abrazyon testi uygulanmış ve bir optik profilometre ile hacim kaybı ölçülmüştür. Ölçülen hacim kaybının artan TiB₂ yüzdesinin artması ile azaldığı tespit edilmiştir. Fakat yine de bu durumun lineer olarak meydana gelmediğini gösteren büyük farklılıklar bulunmuştur.



Şekil 3.11. a) Özlü tel kesit görüntüsü, b) aynı tel ile oluşturulmuş kaplama yapısından elde edilen kesit görüntüsü [26]

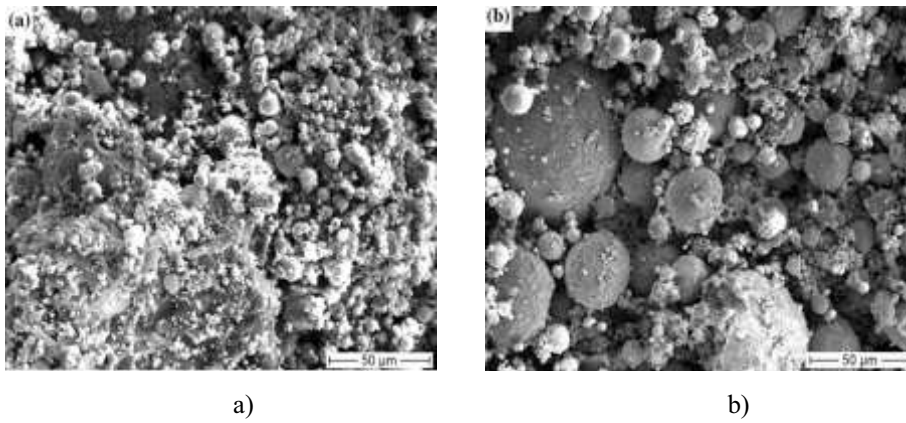
W. Tillwann ve arkadaşlarının [27] çalışmasında; ark sprey özlü tel kaplamaların üretilmesi sırasında oluşan partiküllerin özellikleri incelenmiştir (Şekil 3.12). Yüksek hız kamera ile farklı parametrelerdeki farklı özlü teller kaplama sırasında oluşan partiküller gözlenmiştir. Tablo 3.4.'de kullanılan tellerin bileşimi verilmektedir. Havada yol alan partiküllerin hız ve sıcaklık gibi özellikleri değerlendirilmiş, buna bağlı olarak partikül davranışları ve farklı püskürtme koşullarında partikül karakteristikleri incelenmiştir. Aynı zamanda partikül içerikli gaz akışı nümerik

olarak simüle edilerek bu simülasyon çalışma kapsamında deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 3.12. a) Kaplama telindeki öz kısmı, b) Özlü tel kaplama sırasında arkta meydana gelen damlacıklar [27]

Çalışmada kapalı nozul sistemli Smartarc 350 PPG ark püskürtme sistemi kullanılmıştır. Kaplama parametreleri; Akım: 320 A., Voltaj: 32 V, Primer gaz basıncı: 6 bar, Püskürtme mesafesi: 45-150 mm.'dir.



Şekil 3.13. Kaplama sırasında oluşan birincil ve ikincil dropletler [27]

Tablo 3.4. Kullanılan özlü tellerin bileşimi [27]

Tel	İçerik, % ağı.	Tane Boyutu (μm)	Sargı malzemesi	Sargı malzemesinin kalınlığı (μm)
FeCrBSiMn	Cr-19, Mn-1.6, Si-1.6, B-3.8, Fe-Bal.	40-70	Fe	200
NiCrBSi-PC	Cr-24, Si-5.25, B-1.8, PC-0,4, Ni-Bal.	40-70	Ni	200

W. Tillwan ve arkadaşlarının [27] çalışmasında yüksek ergime sıcaklığına sahip kaplama tellerinde, düşük ergime sıcaklığına sahip tellere göre daha küçük partiküllerin üretildiği tespit edilmiştir (Şekil 3.13). Küçük partiküllerin yüksek yüzey alanlarına bağlı olarak büyük partiküllere göre daha hızlı soğuduğu bu çalışmada tespit edilen diğer bir konudur. Şekil 3.13’de oluşan elektrik arkı içerisindeki kaplama telinden atomize gaz ile ayrılan birincil ve ikincil damlacıklar (droplet) görülmektedir.

J.B. Chneg ve arkadaşlarının [28] çalışmasında; Fe-esaslı metalik cam kaplamaların mekanik özellikleri araştırılmış, elektrik ark püskürtme yöntemi ile üretilen bu kaplamaların x-ışınları analizi, TEM, DSC ve optik mikroskop çalışmaları ile karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir. Kaplama yapısında amorf fazlar ve α -(Fe,Cr) nanokristalin fazların bulunduğu yapılan karakterizasyon çalışmaları sonrası tespit edilmiştir. Ayrıca bu çalışmada üretilen metalik cam kaplamaların aşınma dayanımı AISI 1045 ve 3Cr13 martensitik çeliklere göre sırasıyla 7 ve 2,3 kat yüksek olduğu gözlenmiştir.

Dingyong He ve arkadaşlarının [29] çalışmasında; petrokimya endüstrisinde kullanılacak alternatif bir kaplama olarak Ni esaslı kaplamaların antiklorin iyon korozyon performansları tuz püskürtme testi ve elektrokimyasal korozyon testleri ile incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar gerçek kullanım ortamı simüle edilerek irdelenmiştir. Bu çalışmada Ni-esaslı özlü tel (2 mm) kullanılmış olup, bu özlü telin sargı malzemesi Ni80Cr20 bileşimidir. Teldeki öz kısmı doluluk oranı: %33-35 olacak şekilde Ni, Cr, Mo ve CrB sert partikül takviye telin öz kısmını oluşturmuştur. Bu çalışmada JZY-150 marka elektrik ark püskürtme sistemi kullanılmıştır ve proses parametreleri; Voltaj: 28-32 V, Akım: 180-210 A, Primer hava basıncı: 0,4:4-0,6:6 MPa:bar dır. NiCr sargı içine Ni, Cr, Mo ve CrB tozları konulmuş özlü telden

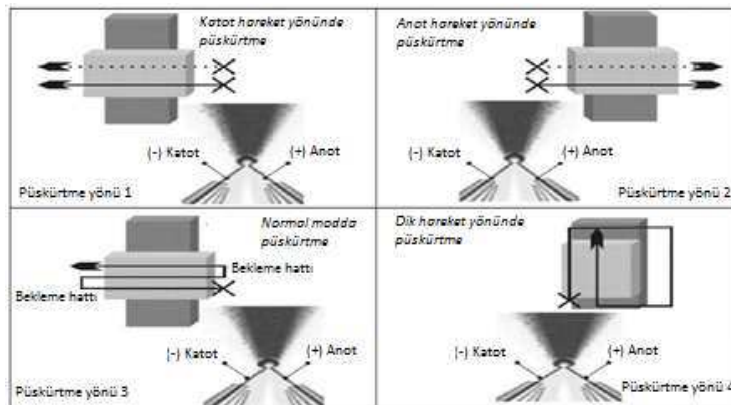
elektrik ark püskürtme ile kaplamalar üretilmiştir. Ni-Cr-Mo ve Ni-Cr-B kaplamalar XRD, SEM, EDAX ve optik mikroskop ile karakterize edilmiş ve kaplamaların kompakt bir yüzeye sahip olduğu ve bağ mukavemetinin 40 MPa'dan fazla olduğu bulunmuştur. Potanstiyodinamik polarizasyon ölçümü yapılmış ve kaplamaların korozyon davranışlarının incelemesi amacıyla tuz püskürtme testi uygulanmıştır. Mo ve az miktarda nadir element ilavesinin Ni-esaslı özlü tellerin korozyon performansının artırılması bu çalışmada görülmüştür. Tuz püskürtme testi sonrası % 9 Mo içerikli kaplamalar ile % 5 Mo içerikli kaplamalar karşılaştırılmış ve % 9 Mo oranında daha fazla yüksek oranda ve derin pittinglere sahip olduğu görülmüştür.

W. Tillmann ve arkadaşlarının [30] çalışmasında; elektrik ark püskürtme prosesinin simülasyonu ve modelleme için deneysel kurulum datalarının çıkarılması hedeflenmiştir. Buna bağlı olarak AS 850, Co Durum marka (Cr % 4, Mn < % 1, Si % 1,4, C % 2, WSC % 50, Fe-balans) özlü tel ve Ni % 99,9 saflıkta metal tel kullanılmıştır. Bu malzemenin dolgu malzeme boyutu 35–75 µm. arasındadır. Metco Smartarc 350 PG, Accuraspray-gs cihazı kaplamaları üretmek için kullanılmış olup kaplama mesafesi: 45 mm., 100 mm., 150 mm., olarak belirlenmiştir. Atomize gaz basıncı: (-1,0,+1) (2-0, 4-3, 6-6), Voltaj (V): (-1,0,+1) (28, 31, 34), Akım (A): (-1,0,+1) (180, 220, 260) değerleri kaplama parametresi olarak seçilmiştir. Bu çalışmada Tagucci yöntemi uygulanarak değişkenlere bağlı olarak (-1, 1, -1), (1,1,-1), (-1, -1, -1), (1,-1,-1), (-1, 1,1), (1,1,1), (-1,-1,1), (1,-1,1) şeklinde proses kurgusu yapılmıştır.

Ding Yong He ve arkadaşlarının [31] çalışmasında; kobalt kaplamalı tungsten karbür (WC/12Co), nikel kaplamalı tungsten karbür (WC/12Ni) ve FeB alaşım tozları özlü tel içine dolgu olarak kullanılmış ve Fe-FeB-WC kompozit kaplamalar üretilmiştir. Kaplamaların mikroyapıları ve faz kompozisyonları araştırılmış, kaplamaların aşınma performansları ve mekanizmaları incelenmiştir. Kaplama malzemesi olarak FeB, WC/12Co ve WC/12Ni dolgu ile 304 L paslanmaz çelik sargılı 2 mm.'lik özlü tel kullanılmıştır. Kaplama prosesi JZY–250 ark sprey cihazında gerçekleştirilmiş ve kaplama parametreleri; Voltaj: 32 V, Akım: 180 A, Gaz basıncı: 0,55 MPa, Püskürtme mesafesi: 100 mm. olarak seçilmiştir. Bu çalışmada mikrosertlik ölçümü 100 g. yük, 15 s. uygulanarak tespit edilmiş ve sertlik değeri 10 ölçümün ortalaması

olarak alınmıştır. Üretilen kaplamalara abrazif aşınma testi de uygulanmış olup test; modifiye ıslak kum, kauçuk teker, silika (angular biçimli, 224 ila 355 mm arasında), temas yükü 100 N ve teker hızı 240 rpm. olacak şekilde kurgulanmış ve gerçekleştirilmiştir. Test sonrası ağırlık kaybı ölçülerek, aşınan yüzeylerin SEM, EDX ve XRD analizleri yapılmıştır. Özlü tel kullanılarak hazırlanan kaplamalar lamelli yapıya sahip olup, her iki kaplamada mevcut genel fazlar Fe-Cr ve Fe₂B dir. XRD paternlerinde WC ve α-WC fazlarının kaplama yapısında bulunduğu tespit edilmiştir. Fakat W₂ kodlu kaplamalarda aynı yapılar görülmemiştir. FeB dolgu içerikli kaplamaların WC içerikli kaplamalara oranla daha kolay biriktirelebildiği sonucuna varılmıştır. Fe-FeB-WC içerikli iki ark sprey kaplamaların ortalama sertlikleri 920 HV_{0,1} ve 872 HV_{0,1} olup 3Cr13 kaplamalardan daha yüksek sertlik değerlerinde olduğu görülmüştür. W1 kodlu kaplamaların daha iyi abrazif aşınma dayanımına sahip olduğu da aşınma testleri sonucunda görülmüştür.

W. Tillmann ve arkadaşlarının [32] çalışmasında; püskürtme alan düzensizliğinin kaplama yapısına etkisini araştırılmıştır. Kaplama malzemesi olarak Cored Wire (CW) AS850, Co Durum (Cr % 4, Mn < % 1, Si % 1,4, C % 2, WSC % 50Fe balans ve dolgu çapı 35-75 mm.) özlü tel ile Ni % 99,9 metalik tel (MW) kullanılmıştır. Altı olarak 70x50x10 ölçülerinde adi karbonlu çelik kullanılmıştır. Deneysel kurgu ise Şekil 3.14.'de gösterildiği gibi katot yönünde, anot yönünde ve anot-katot arasında dikey doğrultuda şeklinde yapılmıştır.



Şekil 3.14. Ark püskürtme özlü tel kaplamadaki deneysel kurgunun şematik gösterimi [32]

Kaplamalar 4 bağımsız parametre (primer gaz, sekonder gaz, ark voltaj ve akım) ile üretilmiş olup, metalurjik inceleme; porozite, sertlik ve kalınlık ölçülmesi ile yapılmıştır.. Adhezyon testi ise sadece özlü tel kaplamalar için uygulanmıştır.

BÖLÜM 4. ELEKTRİK ARK PÜSKÜRTME KAPLAMALARA ETKİ EDEN FAKTÖRLER

4.1. Giriş

Elektrik ark püskürtme kaplama yönteminde birçok faktör partikül ergimesine etki etmektedir. Düzensiz ark oluşumu, atomize gaz püskürtmedeki dalgalanmalar ve tellerin ark oluşumuna izin vermeyecek şekilde ani ısınmaları neticesinde birbirine yapışarak hareket edememeleri bu faktörlerden birkaçıdır. Oluşturulan arkın partikül tiplerine göre doğru ayarlaması gerekir.

Atomize olmuş partiküllerin oluşumu, tel uçlarından ayrılması ve hareketleri sırasındaki kinetik enerjileri, atomize gaz jetin özelliklerine ve kaplama malzemesine bağlıdır. Genellikle proses parametreleri olan atomize gaz basıncı, atomize gazın cinsi, voltaj akımı, püskürtme mesafesi, tel besleme hızı ve ark püskürtme tabancasındaki nozul sistemi nihai kaplama yapısını belirlemektedir [33-36].

4.2. Püskürtme Mesafesinin Etkisi

Püskürtme mesafesi kaplama yapısını etkileyen en önemli parametrelerden biridir. Tavsiye edilen sprej mesafeleri 125 mm ila 200 mm arasındadır. Genel olarak uygulanan püskürtme mesafesi 150 mm' dir. Püskürtme mesafesinin kısa olması oluşan damlacıkların (dropletler) hava ile temas zamanını düşüreceğinden oksit içeriği de düşük olacaktır. Püskürtme mesafesinin artması ile oksit oranı artacak ve damlacıkların (dropletler) hızı düşeceği için altlık yüzeyine iyi yapışma ve homojen dağılım göstermeyecekleri için porozite içeriği artacaktır [18].

Artan mesafe ile gaz hızı düşmektedir. Tabanca nozulundan çıkış hızı 255 ms^{-1} iken 150 mm'lik eksenel bir mesafede gazın hızı 75 ms^{-1} 'e düşmektedir. Eksenel mesafeyi

95 mm'ye düşürdüğümüzde gazın hızı yaklaşık 120 ms^{-1} olmaktadır. Bu hız 135 ms^{-1} ve 150 ms^{-1} 'e kadar daha da hızlanmaktadır [37].

4.3. Püskürtme Gaz Cinsinin Etkisi

Elektrik ark püskürtme uygulamalarında ergitilen tel bir atomize gaz ile yüzeye püskürtülür. Kullanılan gazın cinsi kaplama yapısını oldukça etkilemektedir. Uygulamanın cinsine ve önemine göre atomize gaz tipinin seçimi oldukça önem taşımaktadır. Konu üzerinde yapılan araştırmalar bunun önemini ortaya koymaktadır.

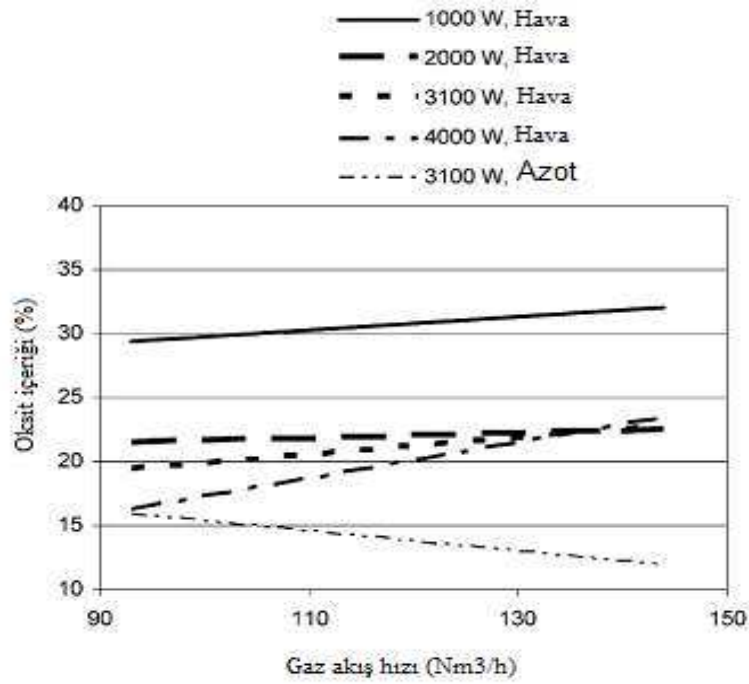
Elektrik ark püskürtme kaplamalarda atomize gaz olarak genelde hava kullanılır. En büyük avantajı kolay bulunur ve ucuz olmasıdır. Atomize gaz olarak hava kullanılan prosesler, oksit içeriği yüksek kaplamalar üretilir. Bu sayede yüksek abrazyon ve aşınma dayanımı sağlanır. Bunun yanında oksit oranı yüksek kaplamalar, kaplamanın mekanik ve yapışma özelliklerine zarar verebilir. Püskürtme ve birikme sırasında meydana gelen oksitler kaplama-altlık malzeme arasındaki yapışma kuvvetini düşürür. Bu sebeple sertliği yüksek oksitli kaplama üretiminde adhezyon problemi ile karşılaşılabilir. Hava kullanarak üretilen kaplamalarda porozite oranı da yükselmekte ve kaplamanın mekanik özelliklerinin düşmesine sebep olmaktadır [11].

Yapılan araştırmalarda, çelik kaplamalarda atomize gaz olarak azot kullanıldığında, oksidasyon yoğunluğunun düzenli bir şekilde azaldığı görülmüştür. Püskürtme parametre değişiminin, kaplamaların mikroyapı, mekanik özellik ve mikrosertliğe etki ettiği de tespit edilmiştir [38].

Yapılan bir çalışmada deney boyunca kaplamaya basınçlı atomize gaz olarak hava verilmiş, değişik püskürtme aralıklarında (toz besleme ve gaz basınçlarında) mikrosertlik, mikroyapı ve elastik modülü araştırılmıştır. Kaplamada kullanılan atomize gaz aralıklarının, (azot ve hava) püskürtme parametreler kaplama yapısına olan etkileri incelenmiştir. Parametreler değiştirilerek çalışmalar yürütülmüş olup, sekonder gaz kullanımının etkileri de araştırılmıştır [38].

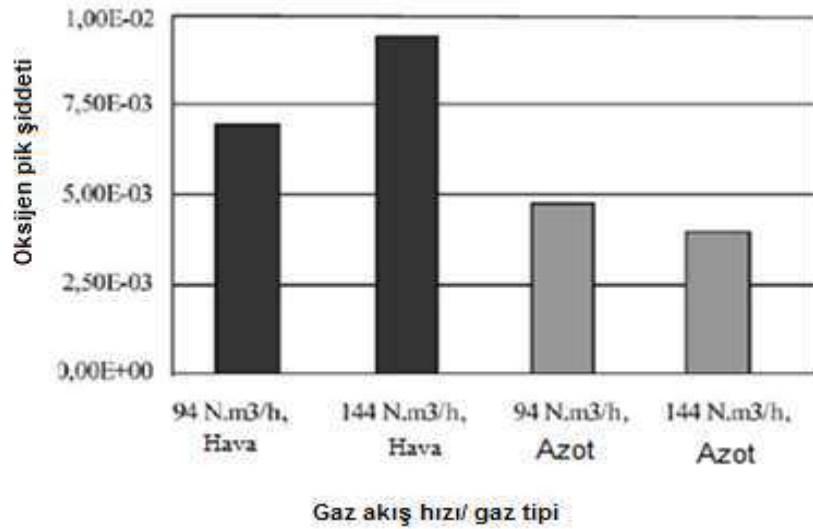
Atomize püskürtülen gaz atım hızının oksit birikimine etkisi Şekil 4.1.'de verilmiştir. Hava kullanıldığı zaman, gaz akım hızı arttıkça oksit birikimi artmaktadır. Azotta ise tam tersi bir davranış görülmektedir.

Grafikten de görülebildiği gibi azot kullanıldığında gaz basıncının artmasıyla beraber oksit içeriği daha düşük seviyelere doğru ilerlemiştir. Hava kullanıldığında ise gaz basıncıyla beraber oksit birikimi üst seviyelere çıkmıştır.

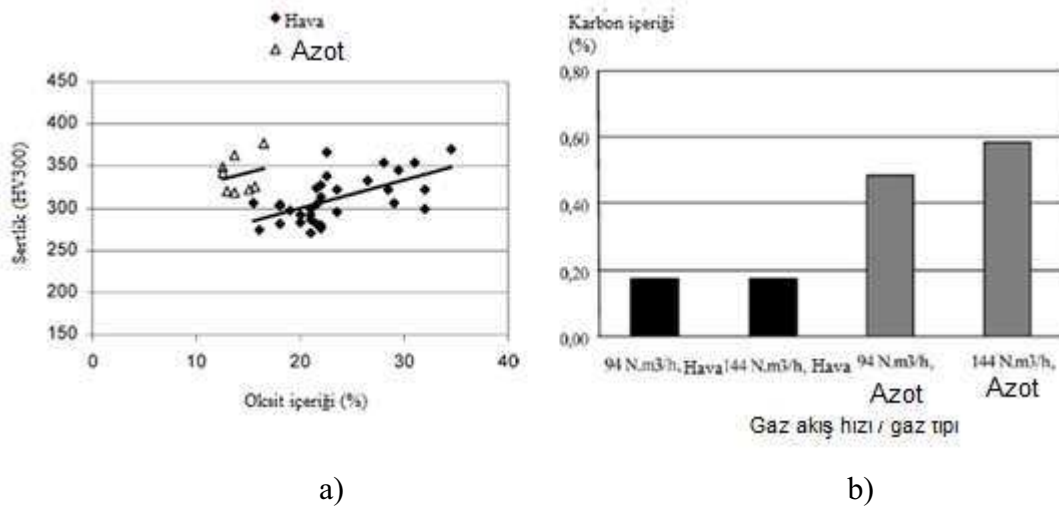


Şekil 4.1. Atomize püskürtülen gaz akış hızı ve oksit birikim yüzdesi grafiği, kullanılan güç değerleriyle beraber verilmiştir [38].

Analiz sonuçlarına göre oksit birikimi her iki gaz basıncına göre de Şekil 4.2.'de verilmiştir.



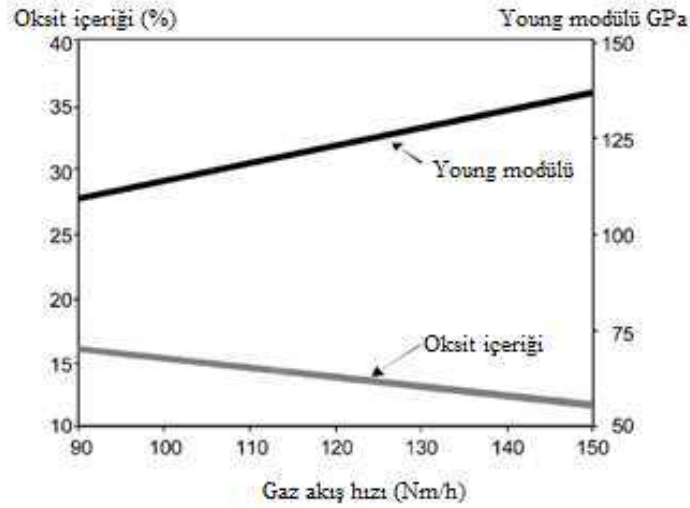
Şekil 4.2. Kaplamalardaki oksit birikiminin farklı gaz basınçlarında ve değişik atomize gaz türünde karşılaştırılması (güç: 3100 W) [38].



Şekil 4.3. a) Her iki gaz içinde sertlik ve oksit birikim yüzdesi grafiği b) Gaz akış hızı ile kaplamadaki karbon yüzdesi (güç 3100 W) [34]

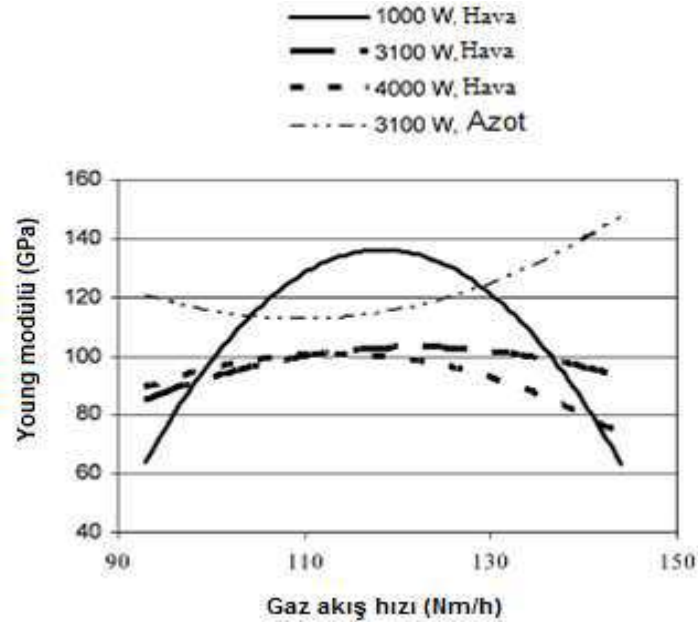
Farklı gazların kullanımı ile sertlik ve oksit birikimi benzer özellikler göstermekte ve kaplamalardaki oksit birikimi - sertlik arasında bağlantı kurabilmek mümkün olmaktadır. Buna göre atomize gaz olarak azotun kullanılması ile kaplamadaki oksit miktarı azalmaktadır. Şekil 4.3.a'da görülebileceği azot kullanılan uygulamalardaki kaplama sertliği hava kullanımına göre yüksek olmaktadır. Kaplama bünyesindeki karbon miktarı da yüksetir (Şekil 4.3. b). Azot kullanılarak yapılan kaplama ile hava kullanarak yapılan kaplama arasında % 0,2 – 0,5 C fark vardır. Bu da oksidasyon nedenli karbon yanmalarının azot kullanıldığında düştüğünü açıklamaktadır.

Basınçlı gaz olarak hava kullanıldığında ortalama elastik modülü 100 ± 10 GPa, azot kullanıldığında ise ortalama elastik modülü 120 ± 10 GPa olarak elde edilmiştir. Azot gazı akış hızının oksit birikimi ve buna bağlı elastik modülü değerindeki değişimler Şekil 4.4.'de gösterilmiştir.



Şekil 4.4. Azotun püskürtme hızı ve oksit birikimine göre elastik modül grafiği [38]

Şekil 4.5.'de ise her iki gaz içinde elastik modül – gaz akım hızının değişik güçlerde davranışı gösterilmiştir.



Şekil 4.5. Elastik modülü – gaz püskürtme hızı grafiği [38]

Azot kullanıldığında, gaz akış hızı arttıkça elastik modül bir miktar düşmekte, ancak gaz akışındaki artış devam ettikçe elastik modül artmaktadır.

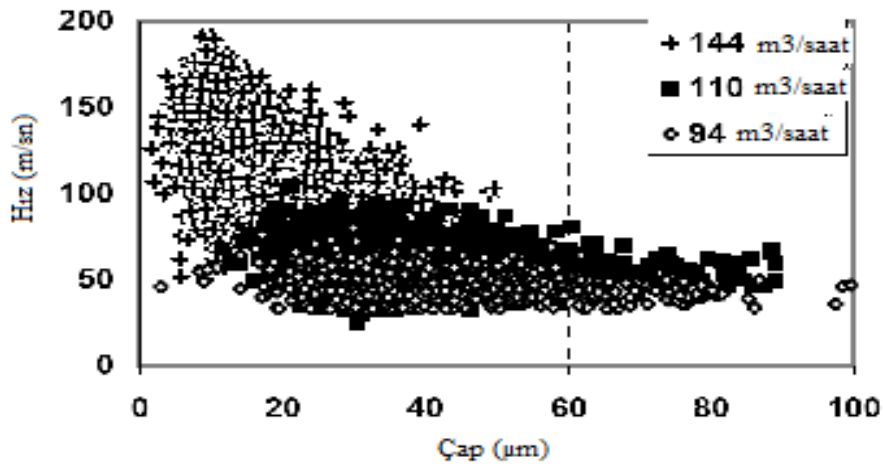
Hava kullanıldığında ise tam tersine bir durum söz konusudur. Doğrusal olmayan bir davranış gözlenmiştir. Elastik modül hız arttıkça maksimum değere ulaşmış ($120 \text{ N m}^3 \text{ h}^{-1}$, de) ve ilerledikçe tekrar azalmaya başlamıştır. Bu olay büyük olasılıkla iki mekanizmadan kaynaklanmıştır;

Birincisi, partiküller çok iyi düzleşmiş ve mikroyapısal olarak daha homojen bir kaplama yapısı meydana getirmiştir. Elektrik ark püskürtme ile üretilen kaplamalarda yüksek elastik modül, yüksek gaz hızlarında yüksek ince lamel oluşumuyla sağlanabilir. Ayrıca kaplamada homojenlikte bu şekilde sağlanabilir. İkincisi, metal püskürtme kendi doğası sebebiyle oksit oluşumudur. Oksit oluşumu düşük homojenlikte kaplama yapısının meydana gelmesine sebep olmaktadır. Yüksek oksit birikimi, düşük elastik modül anlamına gelmektedir. Atomize gaz olarak hava kullanıldığında yüksek oksit birikimi yaşanmaktadır. Bu nedenle havada yüksek püskürtme hızları ve havanın yoğunluğu, kaplamada elastik modülünü düşürmektedir.

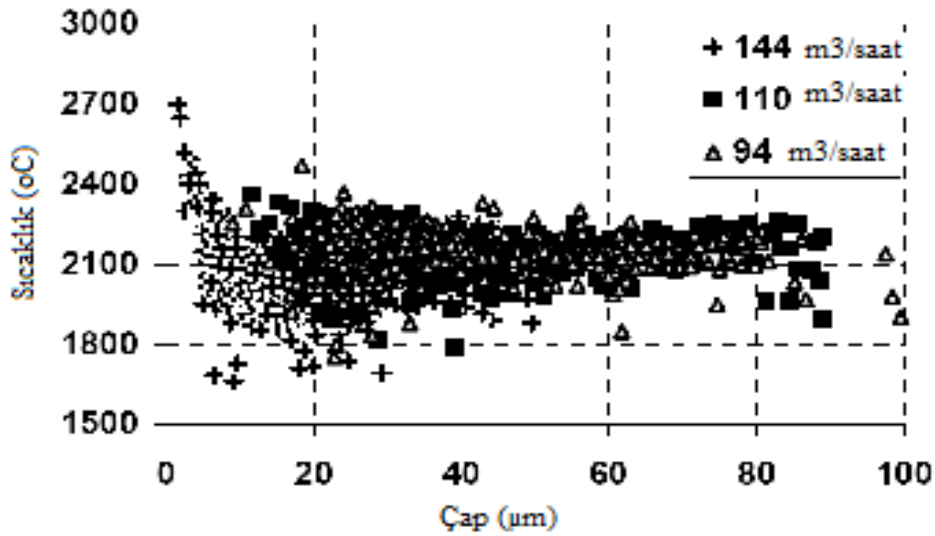
Sonuçta, atomize gaz tipinin oksit birikimine ve dolayısıyla sertlik ve elastik modülüne etki ettiği aşıkardır. Atomize gaz olarak hava kullanıldığında düşük gaz hızlarında ve atomize gaz olarak azot kullanıldığında yüksek gaz hızlarında düşük oksit birikiminin meydana geldiği görülmüştür. Ayrıca, her iki gaz tipinde de yüksek oksit birikimi sert bir kaplama yapısını meydana getirmektedir. Ancak azot kullanıldığında, kaplamada daha iyi karbon yanmaları düşük olmaktadır.

Kaplamanın elastik modülü, splat kalınlığı ve oksit birikimi püskürtme parametrelerine göre değişmektedir. Proses parametreleri en çok kaplamanın elastik modülünü etkilemektedir. Azotla kullanıldığı zaman elastik modül değerleri yüksek elde edilmiştir [38].

Şekil 4.6.' da partikül hızı ve partikül çapları, Şekil 4.7.'de farklı gaz akış hızları (hava) için sıcaklık ve partikül çapları arasındaki ilişki verilmektedir [38].



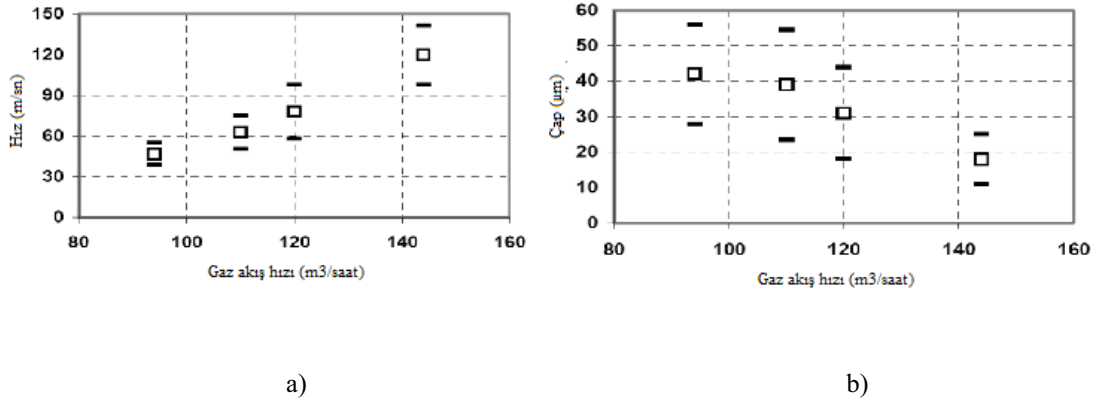
Şekil 4.6. Üç gaz akışı hızlarında partikül çapları ve hız arasındaki ilişki [39]



Şekil 4.7. Üç farklı gaz akışı hızı için partikül çapları ve sıcaklık arasındaki ilişki [39]

Verilmiş olan gaz akış hızları ve hızın artmasıyla birlikte partikül boyutu küçülür. Bu eğilim hava akış hızı artırıldığı zaman da doğrulanmıştır. Diğer bir durumda gaz akımı değiştirilirken tanecik sıcaklığının gelişiminde çok fazla farklılıklar yoktur.

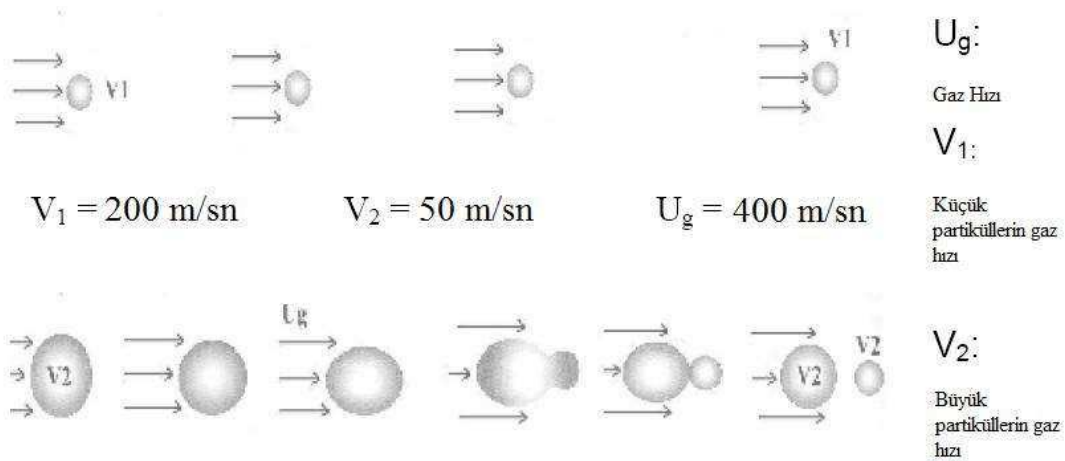
Şekil 4.8.' de belirtilen gaz besleme oranları ile hız ve çap arasındaki ilişkiler verilmiştir.



Şekil 4.8. a) Gaz akış hızı karşısında partikül hızlarının yayılımı b) Gaz akım hızına göre partikül çaplarının yayılımı [39]

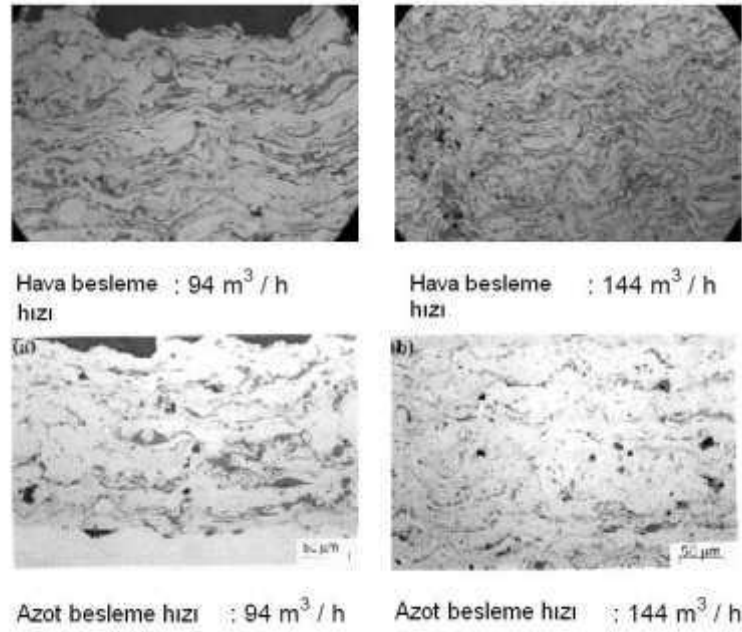
Örnek sonuçlara göre; akış oranı artarken hız 40 m/sn'den 120 m/s arttığında damlacık boyutu da 42 µm'den 17 µm'ye düşmektedir. Bu da küçük damlacık boyutlarının daha yüksek hızlarda ve akım oranlarında ortaya çıktığını göstermektedir.

Genel olarak bu süreçte kullanılan proseslerle partiküllerin yayınımları izah edilebilir. Aslında bazı küçük dropletler tellerin uç kısımları elektrik arkıyla ergitilerek doğrudan üretilmiştir. Diğer taraftan bazı damlacıklarda uçuş sırasında birbirlerinden ayrılarak kendisinden daha küçük damlacıkları oluşturmuşlardır. İki partikül davranışının (büyük ve küçük) yüksek hızlı bir gaz akımında şematik olarak görünümü Şekil 4.9.'da verilmiştir.



Şekil 4.9. Uçan partiküllerde ayrılma olayının şematik olarak tarif edilmesi [39]

Bazı durumlarda partikül ve püskürme arasındaki bağıl hız büyük partiküllerin boyutlarını önemli derecede etkiler. Püskürtme esnasındaki etkiyen aerodinamik etki sebebiyle orijinal büyük damlacıklardan daha küçük damlacıkları koparak oluşabilmektedir. Bu şekilde yüksek gaz akış oranlarında hız dağılımı ve küçük taneciklerin oluşumunun sebebini açıklayabilmektedir.

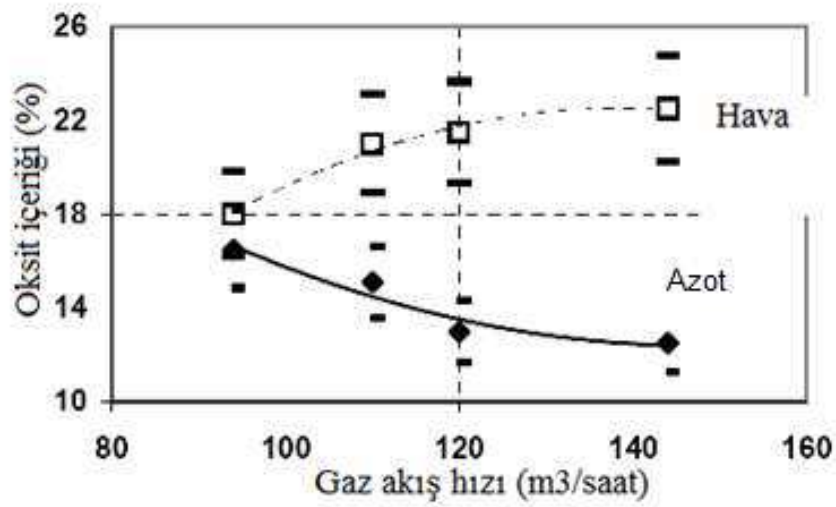


Şekil 4.10. Aynı tür kaplamalar için iki farklı gaz hızında elde edilen kaplama mikro yapıları [39]

Kaplamalarda kullanılan herhangi bir gazın akım hızı arttırıldığında daha ince lamelli yapılar meydana gelir (Şekil 4.10.). Yüksek büyütmelede yapılan kaplama yapı incelemesinde kaplama morfolojisindeki lamellerin boyut ve şekillerinde farklılıklar daha net gözlemlenmiştir. Kaplamalar partiküllerin altlık üzerine küçük partiküllerin daha yüksek hızlarda ve daha yüksek gaz akış hızı ile püskürtülmüştür. Daha yüksek hıza sahip partiküller yüksek kinetik enerji ile çarpma etkisine bağlı olarak daha çabuk deforme olup yayılmıştır. Bu sebeple kaplama kalınlığının ve kaplama morfolojisinin değişimi söz konusudur. Sonuç olarak düşük gaz akışında biriktirilen kaplamaların homojen olmayan bir yapıya sahip olduğu ve daha yüksek gaz akış oranlarında daha ince ve daha düzenli bir yapı oluşturduğu söylenebilmektedir.

Her numunenin üç farklı yerinde bulunan gri bölgeler oksit yoğun bölgeler olarak tanımlanmıştır. Genellikle oksitler püskürtme esnasında partiküllerin toplam

yüzeylerine etki eden oksidan atmosfere ve püskürtme esnasındaki durumlara bağlıdır. Diğer taraftan elektrik tel ark püskürtme prosesinde ergiyen tel malzemeleri oksidasyona yatkın metalik malzemelerdir. Bu sebeple püskürtülen kaplamalar içerisinde oksidasyon bölgelerinin oluşmasına sebep olur. Atomize gaz olarak azot ve hava karışımı kullanılmış ve kaplamalarda meydana gelen oksit yoğunluğu karşılaştırılmıştır. Şekil 4.11.'de gaz akış oranına karşı oksit bileşiminin dağılımı gösterilmiştir [39].

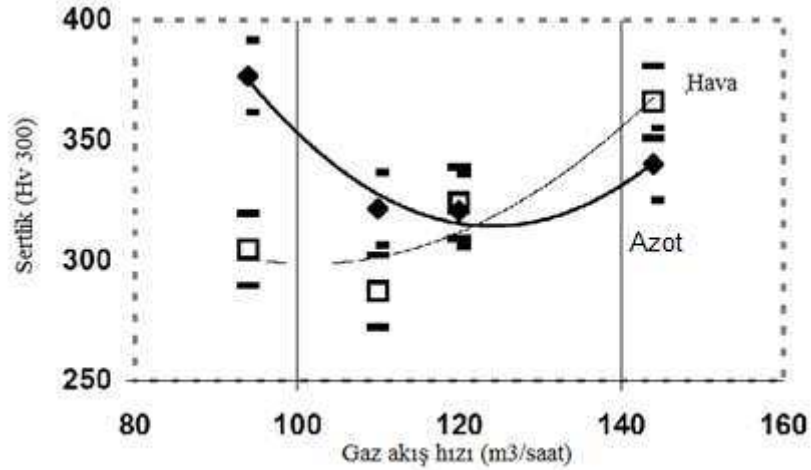


Şekil 4.11. Gaz akış hızı ve cinsine bağlı olarak kaplamada oluşan oksit içeriği [39]

Azot ve havanın ayrı ayrı kullanıldığı uygulamada gaz akış hızının artmasıyla hava atomizasyonunda oksit içeriği %18'den %22'ye yükselirken, azot atomizasyonunda ise oksit içeriği %17'den %12'ye düşmüştür.

Hava püskürtme esnasında, püskürtme akımı içerisinde uçan ve havanın çevrelemiş olduğu ergimiş partiküllerin oksidasyonunda kayda değer bir artış söz konusudur. Akış hızının artması ile ergimiş partiküller daha çok hızlanarak damlacıkların parçalanmasına ve daha küçük damlacıklara dönüşmesine neden olur. Daha küçük damlacıklar daha büyük spesifik yüzey alanlarından dolayı büyük damlacıklara nazaran oksijenle daha çok tepkimeye girer. Bu kaplamalar daha yüksek oksijen içeriğini ortaya koyması için daha hızlı hava akımı altında püskürtülmüştür. Azot basıncı arttırdığın damlacıklar incelmekte ve oksit içeriği daha da düşmektedir. Bu

sonuçla daha yüksek azot akış basıncında daha düşük oksijenli partikülleri oluşur. Sonuçta azot ergimiş partikülleri oksidasyona karşı korur. Partikül boyutunun azalması ile yüzey alanının artmasına karşın oksijen miktarı düşmektedir.

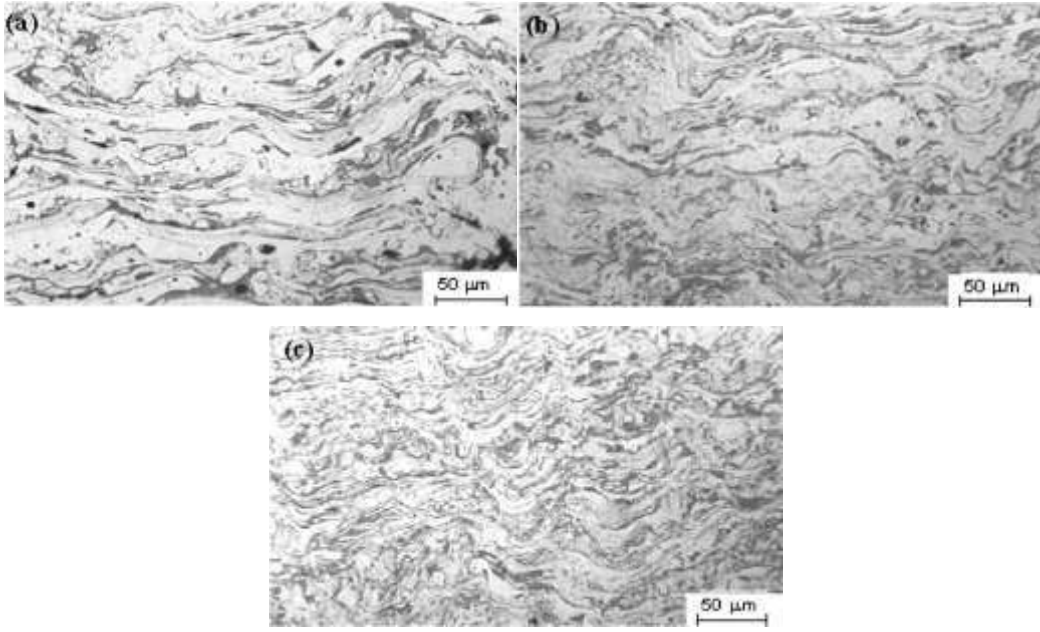


Şekil 4.12. Gaz besleme oranına karşın sertliklerin değişimi [39]

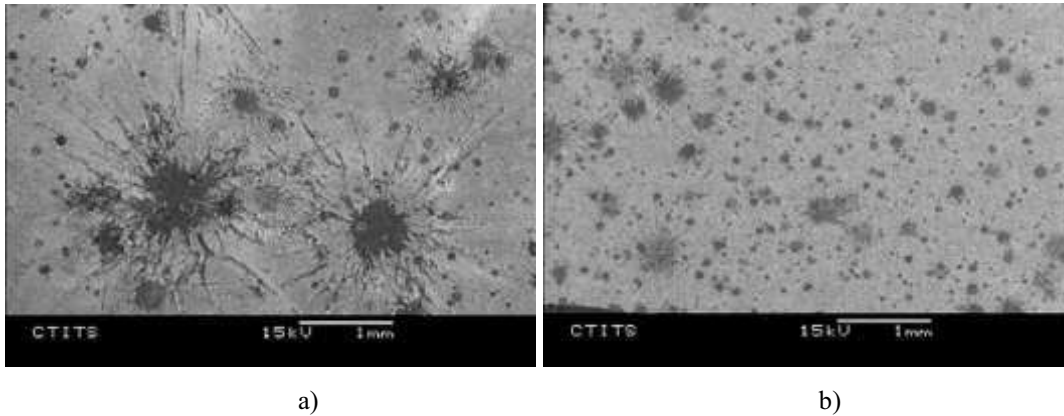
Atomize gaz olarak havanın kullanılması durumunda gaz akış hızı arttığında kaplamaların oksit içeriğinin arttığı görülmüştür (Şekil 4.12.). Daha yüksek hızlarda meydana gelen oksit içerikleri kaplamanın sertliklerin önemli derecede arttırmaktadır. Buna karşın azotun atomize gaz olarak kullanıldığı kaplamalar incelendiğinde kaplamanın sertliklerinin ilk olarak gaz akım hızının artması ile düştüğü gözlemlenmiştir. Bu olay oksit miktarındaki azalma ile açıklanmaktadır. Kaplama prosesi esnasında oksit miktarındaki azalma doğal olarak karburlü kompozit kaplamalarda sertliğin kaybını minimumda tutmaktadır.

4.4. Püskürtme Gaz Basıncının Etkisi

Farklı atomize gaz basınçlarında üretilen kaplamaların mikroyapıları Şekil 4.13.'de verilmektedir. Atomize gaz basıncının lamel kalınlıklarına etkisi oldukça yüksektir. Genel olarak elektrik ark püskürtme kaplamalarda yüksek gaz basıncı kaplamadaki porozite miktarını düşürmektedir [38].



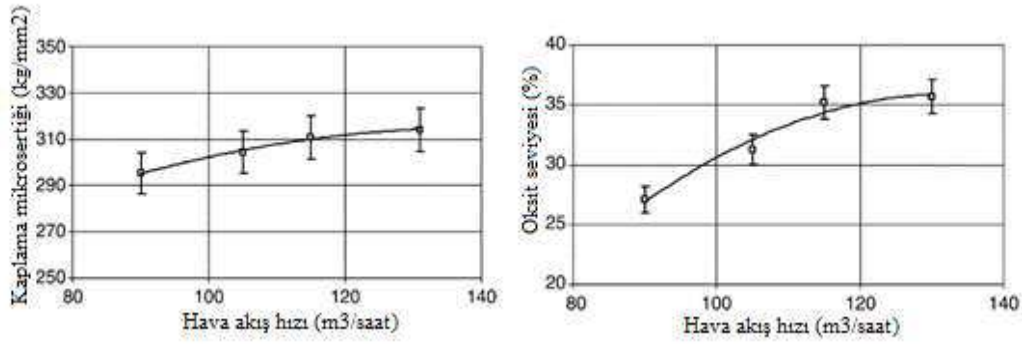
Şekil 4.13. Atomize gaz olarak hava kullanıldığında kaplama yapısı a) Düşük hızda $94 \text{ N m}^3\text{h}^{-1}$, b) Orta hızda $110 \text{ N m}^3\text{h}^{-1}$, c) Yüksek hızda $144 \text{ N m}^3\text{h}^{-1}$ [38]



Şekil 4.14. a) Hava atomizasyonunun düşük gaz atım hızındaki partikül görünümü; ortalama çap $760 \mu\text{m}$ (güç 3100 W , hava atış hızı $94 \text{ N m}^3\text{h}^{-1}$) b) Hava atomizasyonunun yüksek gaz atım hızındaki partikül görünümü; ortalama çap $122 \mu\text{m}$ (güç 3100 W , hava atış hızı $144 \text{ N m}^3\text{h}^{-1}$) [38]

Şekil 4.14.'de çelik üstüne şiddetle çarpan partiküllerin farklı gaz akış hızlarında meydana gelmiş SEM mikroskobundaki görüntüleri verilmiştir.

Düşük gaz basıncının kullanıldığı kaplama uygulamalarında çok büyük splatlar oluşmaya olup bu durum Şekil 4.14'de görülebilmektedir [38].

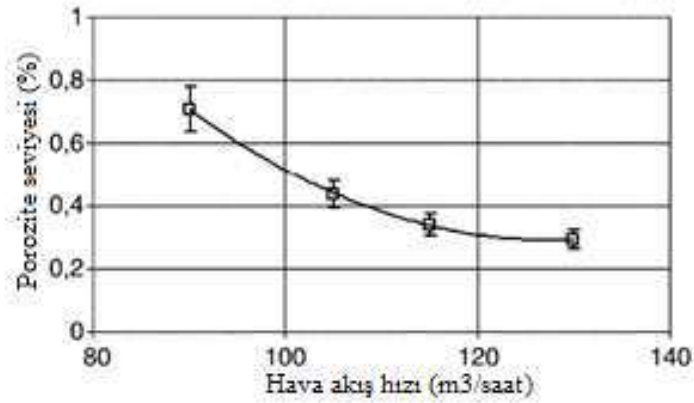


Şekil 4.15. Püskürtme hızının mikrosertlik ve oksit içeriğine etkisi [11]

Yüksek püskürtme hızlarında kaplamaların daha sert olduğu görülebilir. Bunun sebebi daha küçük partiküllerde yüksek yüzey alanlarına bağlı olarak daha fazla oksitlenmenin meydana gelmesidir (Şekil 4.15.) [11].

Püskürtme sırasında, püskürtülen ergimiş partiküller etrafındaki havayla temas ederek okside olur. Arttırılan atomize gaz basıncı ve yüksek hızlarda bu temas daha fazla olur. Küçük partiküller, büyük partiküllere nazaran daha fazla oksitlenir. Çünkü daha büyük yüzey alanları vardır. Sonuçta yüksek atomize hava basıncı, yüksek oksit oluşumunu meydana getirir. Hızlı partiküller yüksek kinetik enerjiye sahip olarak saçılır. Böylece yoğunluk artar ve porozite azalır. Partikül hızı ve partikül sıcaklığı kaplama yapısını belirler [11].

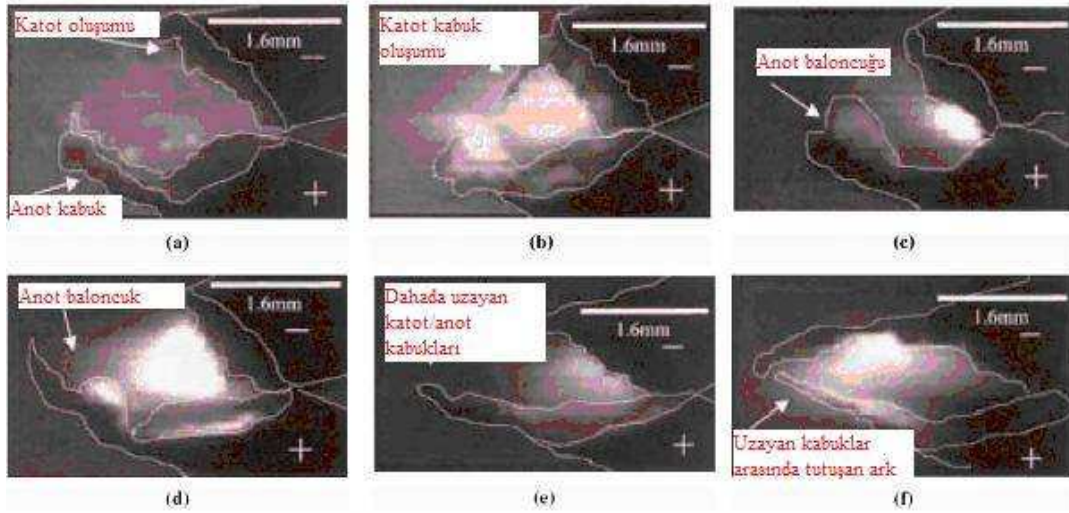
Partiküller hızları arttıkça daha iyi vizkozite göstermektedir. Yüksek kinetik enerji ile hareket eden küçük partiküllerin oluşturduğu kaplama yapısında daha az porozite bulunmaktadır (Şekil 4.16.). Bu şekilde meydana gelen kaplama daha yoğun olmaktadır [40].



Şekil 4.16. Püskürtme hızının porozite içeriğine etkisi [40]

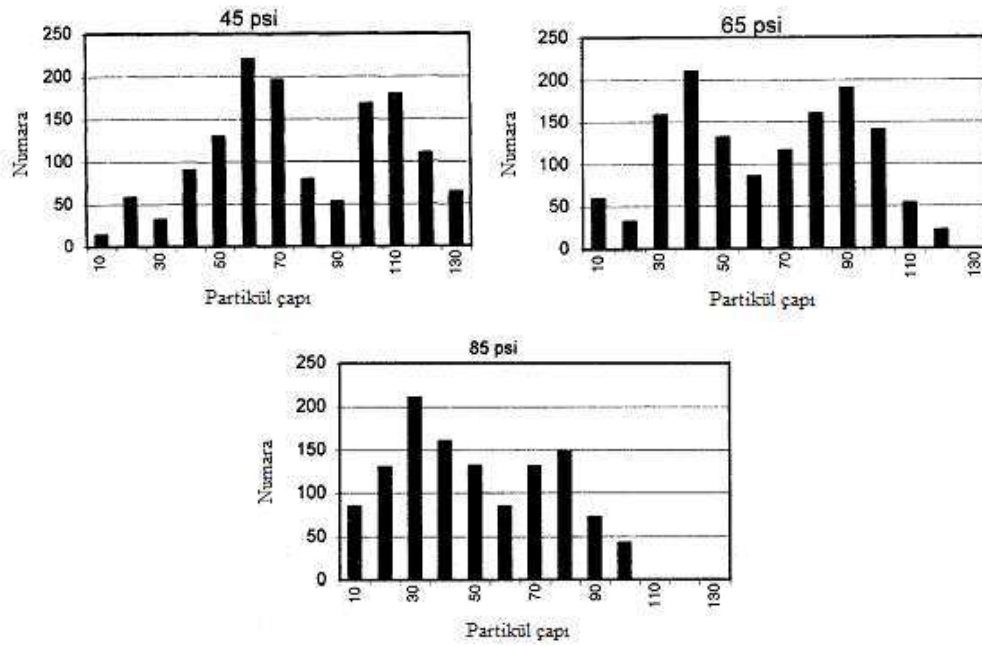
Gaz basıncının bir diğer etkisi anot ve katotta ergime davranışını değiştirmesidir. Gaz basıncı arttığında anotta tel ucunda metal aglomerasi (topaklanması) meydana gelmektedir (Şekil 4.17.). Anot ucunda baloncuk bir katman oluşacaktır. Baloncuk büyür ve bir noktada parçalanarak dağılır (Şekil 4.17.d). Ara basınçlarda bu etki en üst seviyededir (345 kPa / 50 psi). Daha yüksek basınçlarda baloncuk oluşumu ve kabuk gerilimi azalır hatta yok olur (Şekil 4.17e., Şekil 4.17f.). Katottaki kabuk daha uzun olmasına rağmen hala anottakinden kısadır. Şekil 4.17a.-Şekil 4.17.b ile Şekil 4.17.e- Şekil 4.17.f karşılaştırılırsa, basınç arttırıldığında ve değişik nozullar ile çalışıldığında (daralan- genişleyen) daha uzun boyutlarda eşit kabuk oluşumu elde edilebilecektir.

Düşük gaz basıncında da iki elektrotta ergime mekanizmasının kontrolü yapılabilir. Bu da anot kabukta minimum oluşum ve katot kabuk oluşmadan meydana getirilecektir [19].



Şekil 4.17. Tel boşanımı esnasında anot ve katotta ergime davranışı [19]

Yüksek hızlı video grafikler ile yüksek hızlı atomize gaz basıncın daha küçük damlacıklar (μm) ürettiği Şekil 4.18’de görülebilmektedir [11].



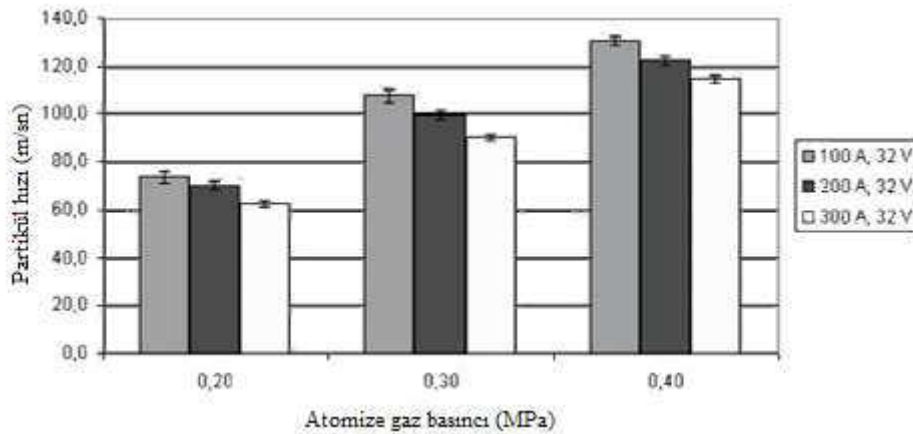
Şekil 4.18. Al partikül boyut dağılımı a) Gaz basıncı 0,31 MPa b) Gaz basıncı 0,45 MPa c) Gaz basıncı 0,59 MPa [11]

Elektrik ark püskürtme kaplamalarda azalan şekilde sırasıyla %27 (± 4), %18 (± 4) ve %12 (± 3) porozite değerleri, 0,31 Mpa, 0,45 MPa ve 0,59 MPa gaz basınçlarında elde edilmiştir. Görülebileceği gibi gaz basıncı, porozite için çok önemli bir parametredir. Yüksek atomize gaz basınçlarında küçük partiküller yüksek çarpma hızlarında kaplamayı oluştururlar. Hızlı partiküller yüksek kinetik enerji yayımları ile çarpmada daha kolay deforme olur. Bu şekilde düşük miktarda porozite meydana getirirler ve kaplama yoğunluğu artar [11].

4.5. Amper ve Voltajın Etkisi

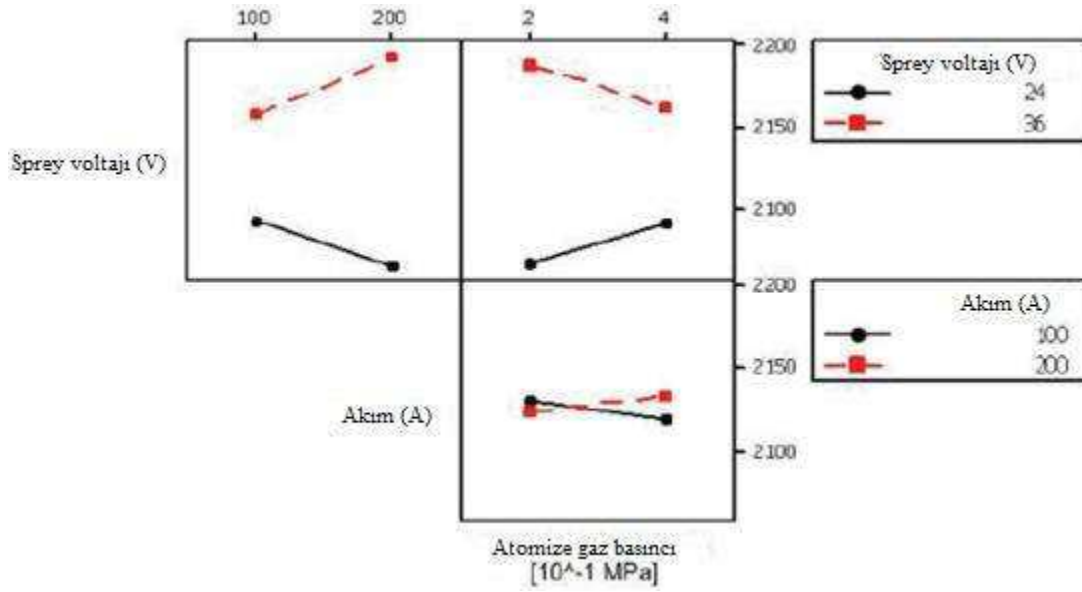
Amper ve voltajın elektirik ark püskürtme sistemindeki etkisi çok önemlidir ve kaplama yapısını direkt etkilemektedir. Amper ve voltaj değerlerindeki değişim partikül oluşumu, partikül yoğunluğu, partikül boyutu ve partikül sıcaklığını doğrudan etkilemektedir.

Akımın artması ile partikül hızının azaldığı Şekil 4.19.'da görülebilmektedir. Akım ile besleme hızı arasındaki ilişkidir. Tel besleme hızı, yüksek akım değerlerinde artmaktadır. Bu da fazla malzemenin ergimesine olanak sağlayıp, ergime akışının değişimine sebebiyet verir ve sonuçta partikül hızı azalır, bir miktarda partikül sıcaklığı artar [41].

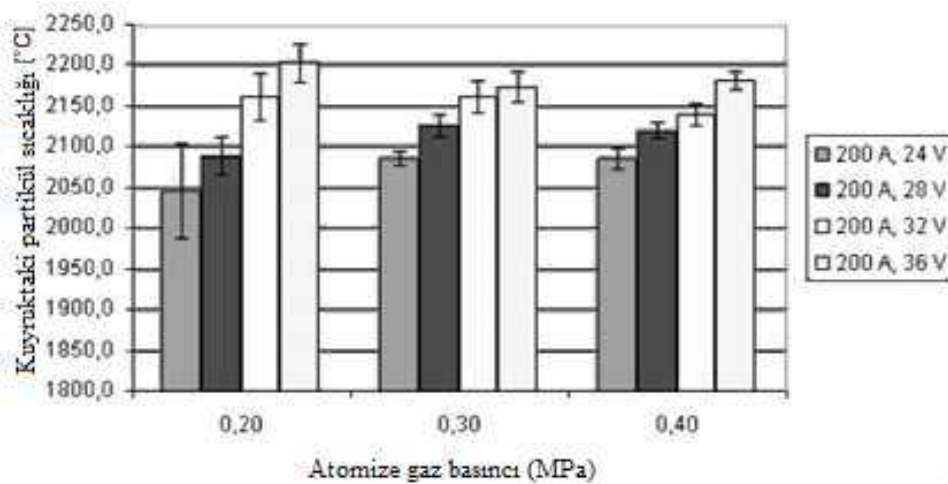


Şekil 4.19. Atomize gaz basıncı ile partikül hızları arasındaki ilişki [41]

Tellerin uç kısımlarında ergime oluşumu sonrası malzemenin akışkanlık davranışı, malzemenin vizkozitesine bağlı olup partikül hızını önemli derecede etkiler. Yüksek voltaj seviyelerinde uzayan ark ile sıcaklık artar ve ergime havuzunda vizkozite düşer. Yüksek voltaj seviyelerinde partikül hızı hemen hemen sabit kalmaktadır [41].



Şekil 4.20. Farklı voltaj ve akım ile partikül sıcaklığı ilişkisi [41]

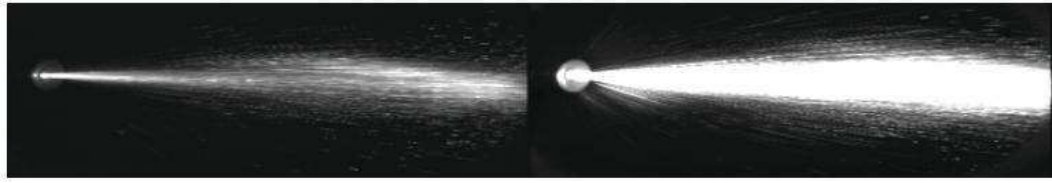


Şekil 4.21. Farklı voltajlarda, atomize gaz basıncıyla partikül sıcaklığı ilişkisi [41]

Yüksek voltaj değeriyle uzun ark oluşacak, bu sebeple ergime havuzunun sıcaklığı artacaktır. Partikül sıcaklığı yüksek voltajda yüksek, düşük voltajda ise düşüktür. Şekil 4.20.'de bu etki görülebilir. Şekil 4.21'de farklı voltajlarda, atomize gaz basıncıyla partikül sıcaklığı ilişkisi verilmektedir.

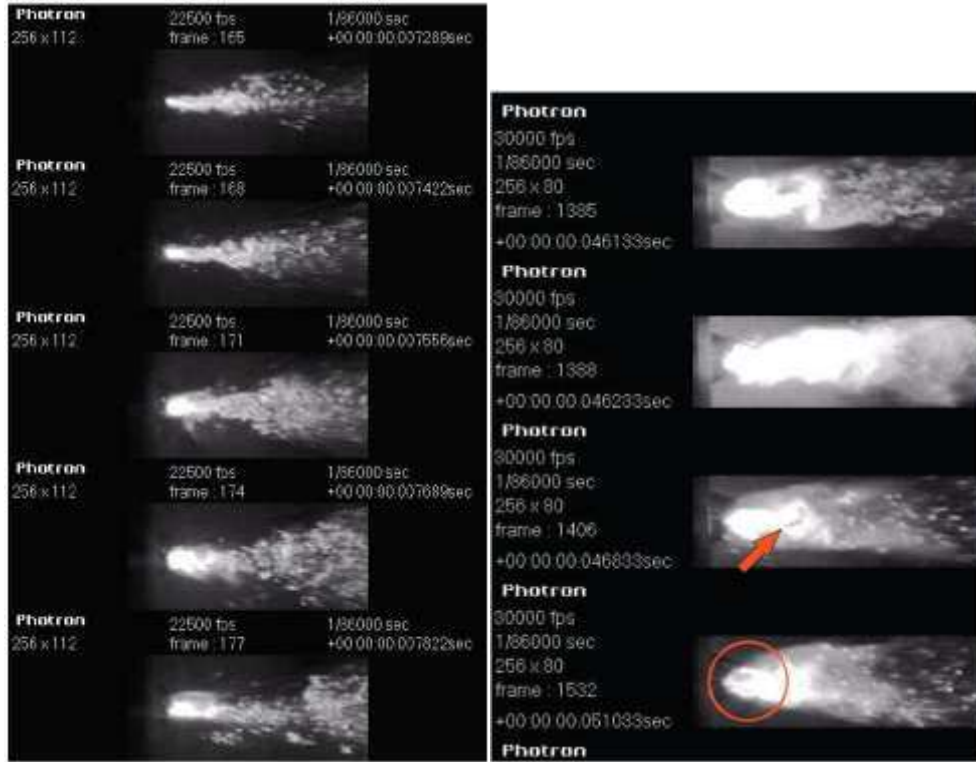
Artan akım değeri ile püskürtme genişliği çok artmaktadır. Bu ergime miktarının ve tel boşalmasındaki ergime vizkozitesinin bir etkisidir. Yüksek voltaj seviyelerinde gaz basıncının püskürtmeye önemli bir etkisi olmamıştır. Ancak düşük seviyelerde etkisi mevcuttur. Atomize gaz basıncı 0,2–0,4 MPa aralığında püskürtme hızının merkezi farklılaşmaktadır.

Püskürtme hızı boyutunun voltaj ve gaz basıncı ile değişimi odaklanma gereken küçük alanlar ile büyük alanlardaki uygulamalarda önemli bir etkiye sahiptir (Şekil 4.22.).

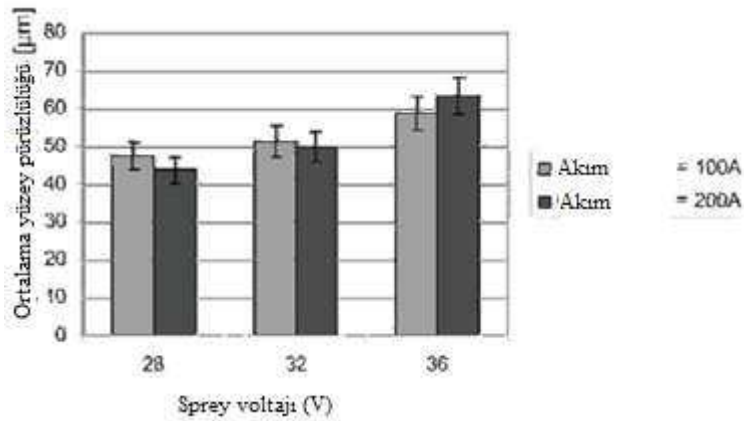


Şekil 4.22. 24 V ve 0,2 MPa operasyon parametrelerinde ark huzmesi; sol taraf 100 A, sağ taraf 200 A [41,44]

Şekil 4.23.'de tel besleme ile ark oluşumunda meydana gelen dalgalanmanın periyodik hareketi görülmektedir. Yüksek akımda ve düşük voltaj seviyelerinde ergitmenin olması kararsız ark oluşumuna sebep olmaktadır. Yüksek akımda ve düşük voltajda yüksek ergitme meydana getirecek olmasına karşın ark oluşumunda düzensizlik meydana getirecektir. Bu da arkta dalgalanma meydana getirecektir. Yüksek ergime miktarı öncelikli olarak arkın önündedir. Daha sonra dalgalanma püskürtme başına doğru geri gelecektir. Yüksek voltaj seviyelerinde uzun ark oluşacak ve sıcaklıkla ergime vizkozitesi azalacaktır (Şekil 4.23.). Yüksek tel besleme hızlarında voltajının artmasıyla kararlı ark oluşumu meydana gelmekte ve tel uçlarından küçük partiküllerin oluşumu sağlanmış olmaktadır [41–44].



Şekil 4.23. Tel besleme ve dalgalanmanın periyodik hareketi [41]



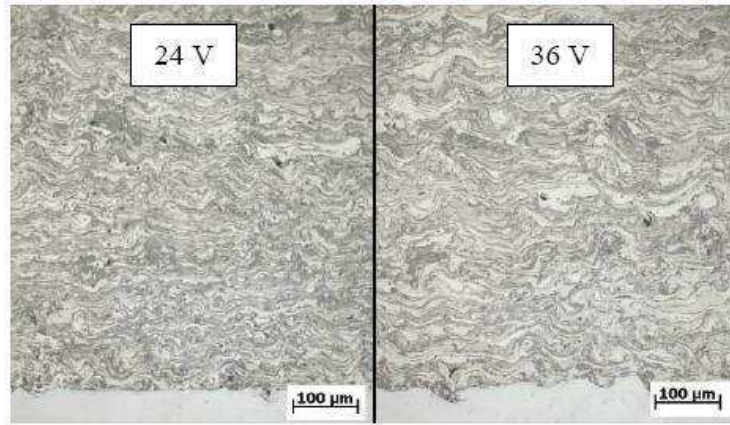
Şekil 4.24. Voltajın pürüzlülük ile ilişkisi [41]

Şekil 4.24.' de görüleceği gibi kaplama voltaj değeri arttıkça büyük partiküller oluşmakta ve kaplamada pürüzlülük de artmaktadır. Voltaj 28 – 36 V'da pürüzlülük %12 artmıştır. Sadece yüksek voltajda, düşük akımda daha düşük porozite çıkmış, diğerlerinde akım değerinin artmasıyla kaplamaların pürüzlülüğü düşmüştür [41].

Düşük voltaj değeri ark sıcaklığını düşürecekler. Düşük voltajda akımın artması ergime sıcaklığı azaltır. Yüksek akım değeriinde tel besleme hızı yüksek olmakta ve ergime için yeterli ısıl girdi oluşmamaktadır. Telin hızlı bir şekilde arka doğru hareket etmesi ile ergime gereken tel miktarı artacak, düşük voltaj sebebiyle oluşan kısa arka meydana gelen partiküllere yeteri kadar ısıl girdi sağlanamayacaktır. Sadece küçük partiküller düşük vizkoziteyle hızlanıp yüzeye saçılacaktır.

Yüksek voltaj ergitme için yeterli ark enerjisi meydana getirir. Bu sebeple büyük partiküllerin tel uçlarından kopmasına rağmen yüksek vizkozite gösterir. Bu partiküller diğerlerine nazaran kısmen atomize olurlar ve bu şekilde yüzeyde iyi bir tutunma gösterir. Düşük voltajda oluşan partiküllere nazaran daha büyük yapışma mukavemetine sahip olur.

Şekil 4.25.'de düşük poroziteli mükemmel yapışmış partiküller görülmektedir. Partikül boyutları voltaja bağlıdır. Düşük voltajda yuvarlak partiküller üretilmiştir [37].



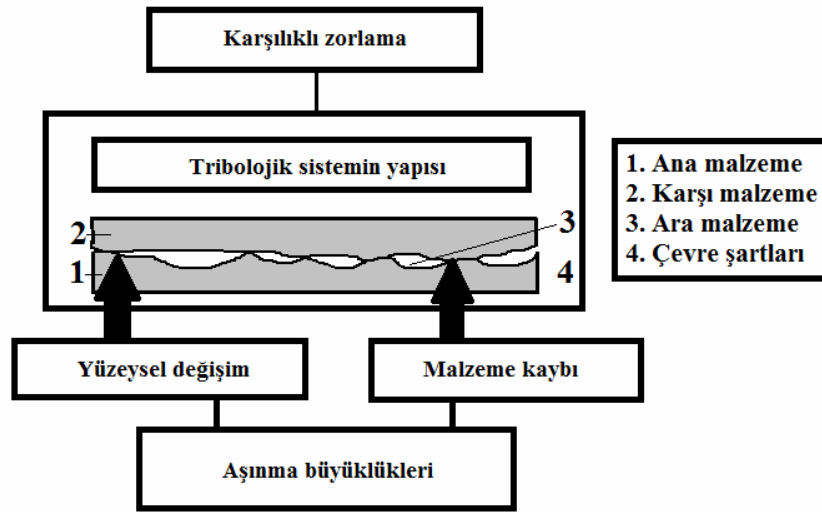
Şekil 4.25. Elektrik ark püskürtme ile 200 A ve 0,4 MPa'da üretilen kaplama mikroyapıları [37]

BÖLÜM 5. AŞINMA MEKANİZMALARI VE ELEKTRİK ARK PÜSKÜRTME KAPLAMALARDA AŞINMA

5.1. Giriş

Aşınma, hareketli metalik parçalarda korozyon ve sürünme ile birlikte en sık karşılaşılan 3 hasar modundan biridir. Ekonomik ve teknolojik bir bakış açısına bağlı olarak yüzey mühendisliğinin gelişmesi ile beraber tribolojik iş parçalarının yüzeyine yüksek performanslı aşınmaya direngen bir kaplama uygulaması tribolojik performansın geliştirilmesi için en etkili yaklaşımdır. Termal püskürtme kaplamalar yüzey mühendisliği alanında çok kullanılmaktadır. Özellikle elektrik ark püskürtme kaplama prosesi, mobilize olması, ucuz ve etkili kalın kaplamaların üretimine izin vermesi bakımından en çok tercih edilen termal püskürtme kaplama yöntemlerinden biridir. Yüzey mühendisliği alanındaki yeni gelişmeler, elektrik ark püskürtme yöntemi ile metalik esaslı kaplamaların yanında iletkenliği sağlayan metalik bir kabuk ile içinde sert seramik partiküllerin veya sermetlerin bulunduğu özlü teller ile yüksek aşınma performanslı kompozit kaplamalarda üretilebilmektedir.

Aşınma tribolojik olarak bakıldığında şüphesiz en önemli konudur. Ana malzeme (aşınan), karşı malzeme (aşındırıcı), ortam, yük ve hareket unsurlarının tamamı bir tribosistem oluşturur. Şekil 5.1’de bir tribosistemin şematik yapısı görülmektedir.



Şekil 5.1. Bir tribosistemin şematik gösterimi [45]

Tribolojide daima yüzey çiftleri ele alınır. Yani sürtünme ve aşınma davranışları aslında sadece malzeme özelliği olarak ele alınmaz, aynı zamanda kayma yüzey çiftleri içindeki etkileşimleri ve ortam etkisini de içeren sistem özellikleri olarak kabul edilir. Tribolojide önem kazanan diğer başlıca malzeme özellikleri; ısı iletkenlik, ısı genleşme, ıslatma kapasitesi, mukavemet, yüzey sertliği ve yorulma ömrüdür. Tribolojide ısı özelliklerinin önemi sürtünen ve aşınan malzemelerin ısınmasından ileri gelmektedir [45].

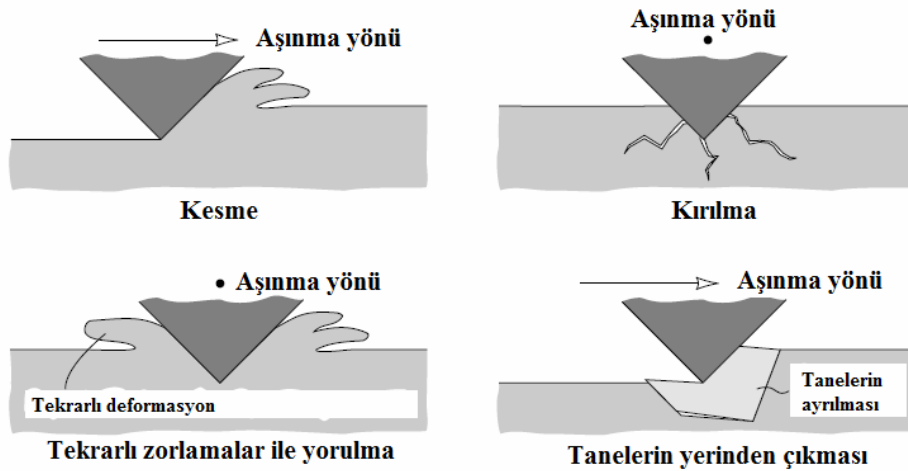
Aşınma genellikle önceden bilinen bir hasar tipidir. Birbiri ile temasta olan malzeme yüzeyleri oksit filmleri veya yağlayıcılar ile korunsalar da mekanik zorlamalar altında oksit tabakasının veya yağlamanın bozulması iki yüzeyin birbirine doğrudan temas etmesine sebep olabilir. Bu koşullarda oluşan sürtünme malzemelerin servis ömrünü kısıtlayan aşınma olayına neden olur. Bu durum yağlama, filtreleme, uygun malzeme seçimi ve uygun tasarım gibi önlemler ile azaltılabilir. Ancak kesinlikle tamamen önlenemez [45].

Bir tribolojik sistemin elemanları arasında çeşitli zorlamalar sebebi ile meydana gelen aşınmanın farklı türleri ve dolayısı ile farklı sınıflandırmaları söz konusudur. Bu mekanizmaların başlıcaları aşağıda verilmiştir.

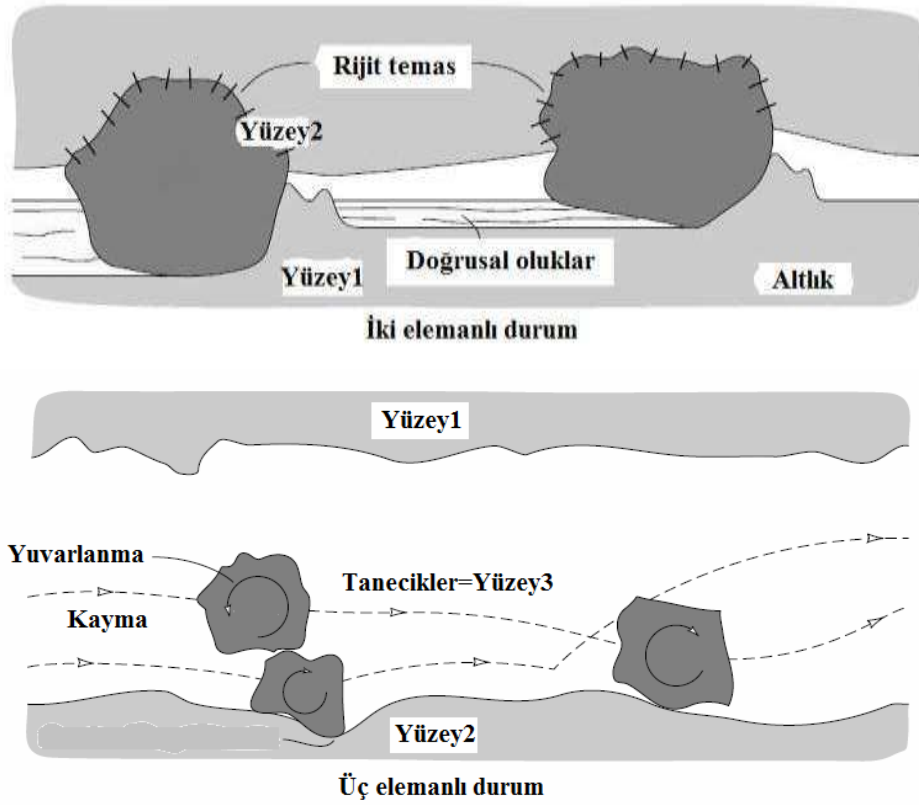
5.2. Abrazif Aşınma

Sert partikül veya sert yüzey kabarıklarının katı yüzeylerde hareket etmesi ile oluşur. Abrazif aşınma katı bir nesnenin yük altında kendi kadar yada kendinden daha sert malzemeler ile karşılaştığı her durumda kaçınılmaz olan bir hadisedir. Çizici kesici ya da çarpan zorlamalar sebebi ile meydana gelen bir aşınma mekanizmasıdır. Herhangi bir malzeme yumuşak olsa bile ortamdaki sert partiküller sebebi ile abrazif aşınmaya sebep olabilir. Şekil 5.2’de abrazif aşınmanın meydana getirdiği başlıca hasar mekanizmaları görülmektedir.

Abrazif aşınma kendisini iki elemanlı ve üç elemanlı olmak üzere iki farklı şekilde gösterebilir. İki elemanlı aşınma pürüzlü bir yüzeyin yada hareketsiz aşındırıcı taneciklerin yüzeyden malzeme kaldırması ile meydana gelir. Üç elemanlı aşınma ise iki yüzey arasında hareket edebilen tanelerin yüzeyden malzeme kaldırması ile oluşur [46]. Şekil 5.3.’de bu durum şematik olarak görülebilmektedir.



Şekil 5.2. Abrazif aşınma mekanizmaları [46].



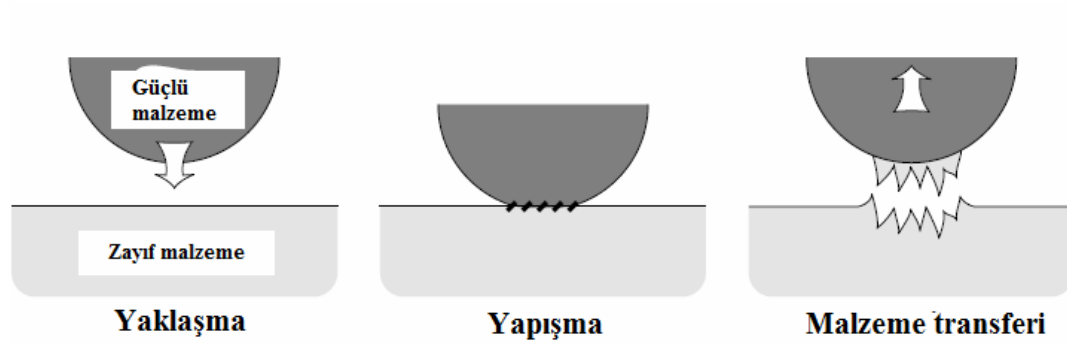
Şekil 5.3. İki elemanlı ve üç elemanlı abrazif aşınmanın şematik gösterimi [44].

5.3. Adhesif Aşınma

Adhesif aşınma oldukça değişken sürtünme katsayıları ve yüksek aşınma oranları ile kendini gösteren ciddi bir aşınma mekanizmasıdır. Özellikle birbirleri ile kayma sürtünmesi yapan malzemelerde görülen bir olaydır. Birbiri üzerinde kayan yüzeylerin ancak küçük bir kısmı temas halindedir. Bu küçük yüzeylerdeki gerilmeler çok düşük yüklerde dahi akma gerilmesi sınırına ulaşırlar ya da geçerler. Böylece moleküler yapışma kuvvetleri etkisini gösterir.

Bir katının diğer bir katı ile teması belli koşullar altında gerekli bir durumdur. Temas eden yüzeylerde yapışma etkisi kendini gösterir. Yapışma etkisi artan yüzey pürüzlülüğü ve yüzey sertliği ile azalan bir etkiye sahiptir. Bu aşınma mekanizmasında, karşılıklı çalışan yüzeylerde yapışma olup, karşılıklı yüzeylerde malzeme film transferine neden olur. Yüzeyler arasındaki yapışmayı gözlemlemek zordur. Adhezyon ve kayma deneyleri yüksek vakum altında atmosfer koşullarında

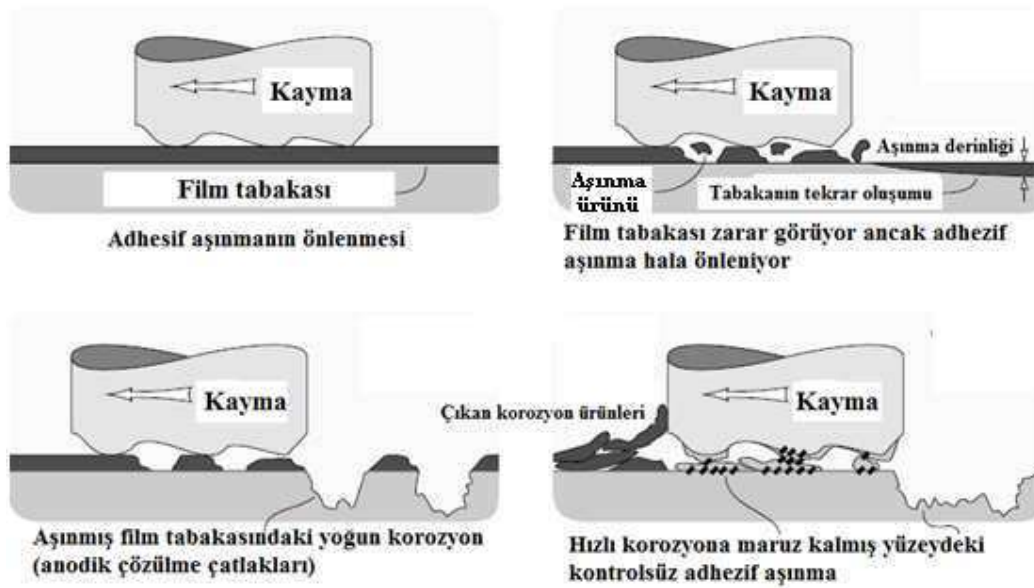
verdiği tribolojik sonuçlardan farklı sonuçlar verir. Şekil 5.4’de adhezyon mekanizması ile malzeme transferi görülmektedir.



Şekil 5.4. Adhezyon ile malzeme transferi [46]

5.4. Koroziif Aşınma

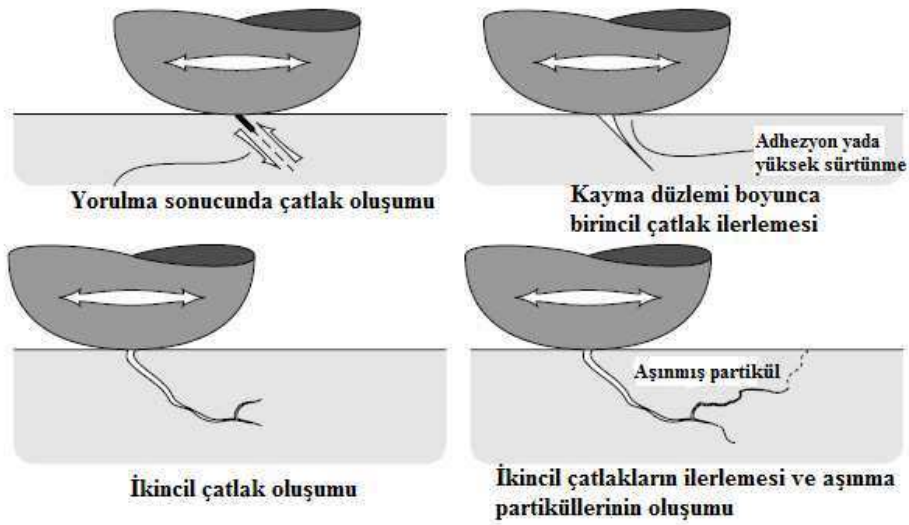
Malzemenin çevre ile kimyasal ve elektrokimyasal etkileşiminden dolayı oluşan bir aşınma mekanizmasıdır. Yüzeyde korozyona karşı koruyucu bir tabaka oluşmazsa koroziif ortamda aşınma kaçınılmazdır. Adhezif aşınmayı önleyen yüzeydeki kimyasal reaksiyonlar kontrol edilmez ise ciddi malzeme kaybına yol açarlar. Bir malzemenin yüzeyinde korozyon önleyici bir tabaka oluşması şu olayları beraberinde getirir. Oluşan yağlayıcı tabaka korozyon ve aşınmaya karşı dayanıklıdır. Bu film tabakasının deforme olması aşınmayı hızlandırır. Öyle ki aşınmış film tabakası ile alt malzeme bir galvanik çift oluşturabilir. Böylece aşınma hızı artar. Şekil 5.5’de koroziif bir aşınma mekanizmasının şematik gösterimi görülmektedir. Şekilde korozyondan koruyucu tabaka oluşumu, tabakanın mekanik etkiler ile zarar görmesi sonucunda malzemenin hala adhezif aşınmaya direnmesi, film tabakasının tamamen aşınması ile yoğun koroziif aşınma etkisi ve hızlanan koroziif etkiler sonucunda ortaya çıkan adhezif aşınma etkileri net olarak görülmektedir [46].



Şekil 5.5. Korozif aşınma mekanizmasının şematik gösterimi [46]

5.5. Yorulma Aşınması

Yorulma aşınması, genellikle sıcaklık ve mekanik etkilerin bir kombinasyonudur. Sıcaklık ve mekanik etkilerin belli periyotlar ile tekrarlanmaları bünyede çatlak ve kırıkların oluşmasına sebep olur. Tekrarlı yükleme ve deformasyonlar, çatlakların genişlemesine, ilerlemesine ve diğer komşu çatlaklarla birleşmesine neden olur. Çatlaklar yüzeye paralel doğrultuda oluşur ve sonuçta uzun ince aşınmış tabakalar meydana gelir. Şekil 5.6'da yorulma ile çatlak oluşumu ve ilerleme mekanizması şematik olarak görülmektedir [47].



Şekil 5.6. Yüzey çatlak oluşumu ve ilerlemesi sürecinin şematik gösterimi [47]

Birincil çatlaklar yüzeyden başlayarak kayma düzlemleri boyunca yayılırlar. Birincil çatlakların varolan derin çatlaklar ile birleştiğinde ikincil çatlaklar oluşabilir. Gelişmekte olan çatlakların bu şekilde ilerlemesi ile yüzeyden partiküller ayrılır.

5.6. Eroziyon Aşınma

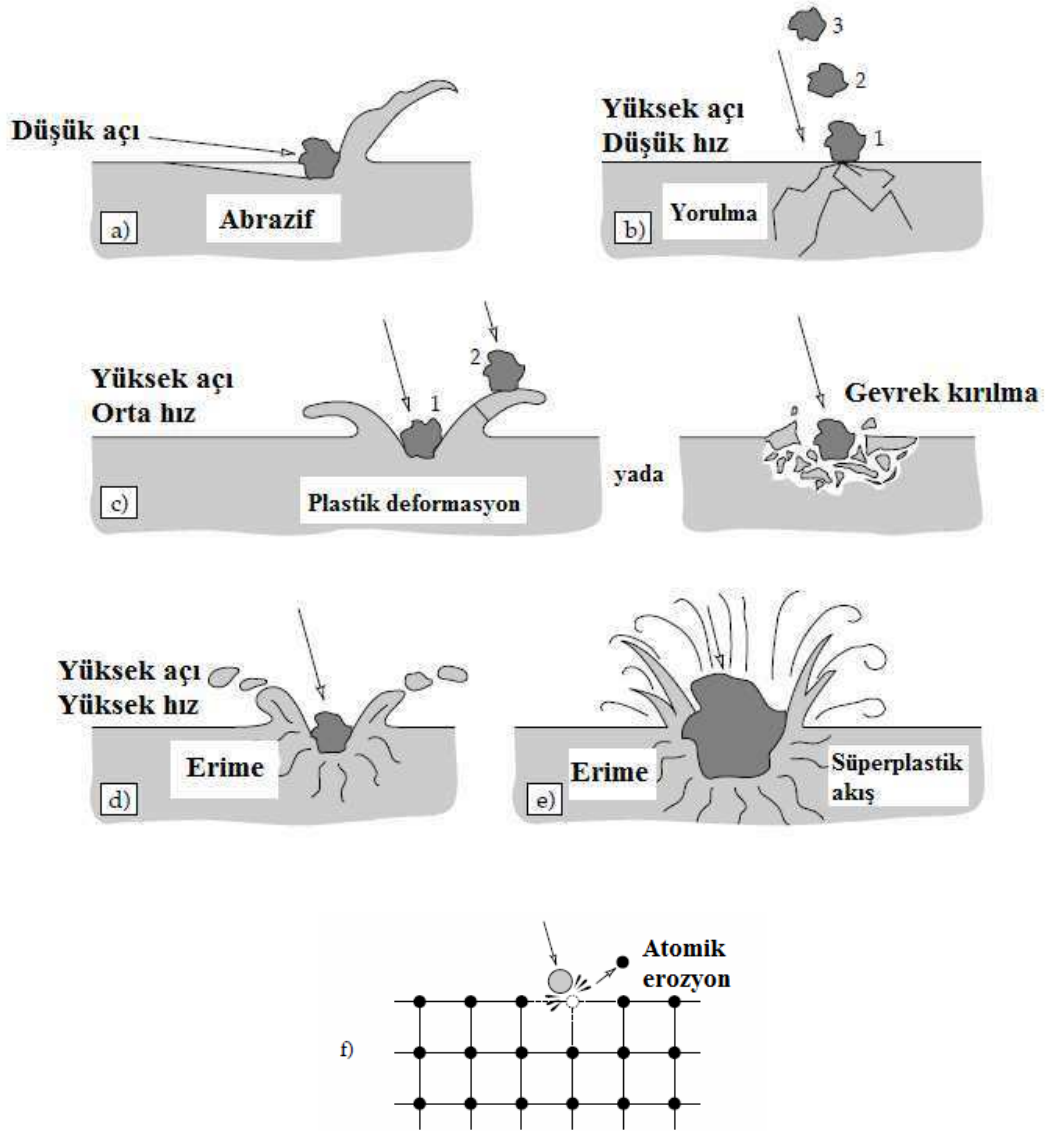
Erozyon bir akışkana karşı malzemenin yüzeyinden madde kaybı olarak tanımlanabilir. Akışkan sıvı veya gaz halde olabileceği gibi katı (toz) halde de olabilir. Yüzeye çarpan malzemenin tipine göre katı yada sıvı partikül erozyonu olarak adlandırılır. Eroziyon aşınma çok rastlanılan bir aşınma türüdür. Örneğin olarak uçakların gaz tribün bıçaklarında uçuş esnasında kum ve benzeri yapıların oluşturduğu aşınmanın neden olduğu hasar söylenebilir. Bu aşınma tipinde erozyona sebep olan partiküllerin özellikleri çok önemlidir. Eroziyon aşınma pek çok aşınma türünü içinde bulunduran geniş bir kavramdır. Aşınma mekanizmalarının tayin eden başlıca parametreler malzeme cinsi, partikülün çarpma açısı, çarpma hızı ve boyutudur. Eğer çarpan partikül sert ve katı bir halde ise aşınma abrazyon karakterlidir. Eğer aşındırıcı ortam sıvı ise olay abrazyondan çok sıvı akışkanın tekrarlayan stresleri ile oluşan bir mekanizma haline gelir. Şekil 5.7’de çarpma açısının ve partikül hızının erozyona etkileri görülmektedir. Eğer çarpma açısı düşük ise olay abrazyon eğilimlidir. Yüksek çarpma açılarında ise tipik eroziyon aşınma etkileri görülür.

Çarpma açısı 0° le 90° arasında olabilir. Bu açının 0° olması durumunda aşınma, partiküller yüzeye tam olarak çarpma etkisi göstermediği için önemsizdir. Düşük çarpma açılarında (20° ye kadar) eğer partiküller sert yüzey yumuşak ise ciddi aşınma meydana gelir. Bu koşullarda aşınma mekanizması abrazif karakterlidir. Eğer yüzey gevrek ise çarpma açısının artması ile aşınma artar. Açılı 90° 'ye yaklaştıkça aşınma oranı belirgin ölçüde artış gösterir. Eroziv aşınmanın düşük açılarda yüksek değerler gösterdiği duruma sünek durum, yüksek açılarda yüksek değerler gösterdiği duruma ise gevrek durum adı verilir. Şekil 5.8'de malzeme karakterinin sünek yada gevrek olmasına göre aşınma oranlarının çarpma açıları ile değişimi görülmektedir.

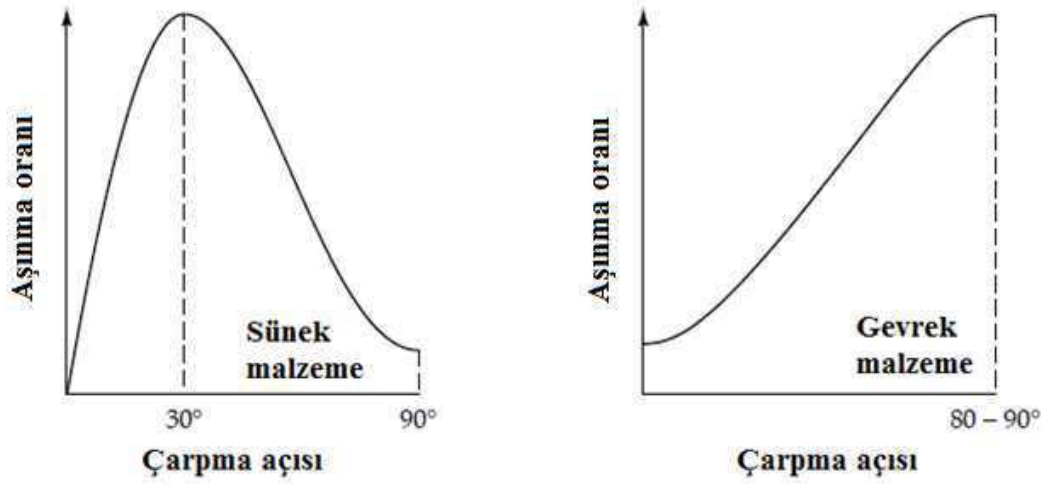
Partikül hızının eroziv aşınma üzerindeki etkisi büyüktür. Eğer partikül hızı çok düşük ise darbedeki stres plastik deformasyon için yetersiz kalır ve aşınma kendini yorulma olarak gösterir. Partikül hızı arttırıldığında örneğin 20 m/s lik bir hızda plastik deformasyon oluşur. Rejim tekrarlı plastik deformasyonlar olarak kendini belli eder. Eğer partiküller küresel ya da küt şekilli ise son derece etkin bir plastik deformasyon oluşur. Çok yüksek partikül hızlarında ise darbe yüzeyinde ergimeye varan sonuçlar oluşabilir [46].

Yukarıda anlatılan aşınma mekanizmalarının dışında seramik ve cam-seramik malzemelerde görülen farklı durumlarda mevcuttur. Seramiklerde görülen başlıca mekanizmalar; mikrokırılma, tribokimyasal aşınma, termomekanik aşınma ve plastik akıştır.

Mikrokırılma seramik malzemelerde meydana gelen aşınmanın en önemli kaynağıdır. Bu olay iç hacim hataları ile ilgilidir. Seramiklerde hammadde ve üretim kaynaklı çatlak, boşluk, inklüzyon ve zayıf tane sınırı gibi hatalar mikroçatlak oluşumunun temelini teşkil ederler. Statik temas şartlarında gerçek temas alanı çok küçük olduğundan yük uygulandığında temas noktalarındaki gerilmeler çok yüksek değerlere ulaşır. Metallerde plastik deformasyona sebep olan bu olay seramiklerde yüksek gevreklikten dolayı kırılma meydana getirir. Dinamik kayma temas şartlarında ise, temas arayüzeyindeki yüksek gerilmelere ek olarak tanjantsal olarak etkiyen kayma gerilmeleri de üretilir. Yapıdaki bu gerilmeler yüzey çatlaklarının oluşumuna sebep olur [47].



Şekil 5.7. Çarpma açısı ve hızına bağlı olarak farklı erozyon mekanizmaları a) düşük çarpma açısında abrazif etki, b) düşük hız yüksek açıda yorulma, c) orta hız yüksek açıda gevrek kırılma yada plastik deformasyon, d) yüksek hızda yüzeyde meydana gelen erime, e) erozyonun ikincil etkileri, f) kristal latisindeki atomik erozyon [46]



Şekil 5.8. Sünek ve gevrek malzemelerin çarpma açlarına bağlı olarak erozif aşınma oranlarının değişimi [46]

Statik şartlar altında nispeten yüksek kararlılık gösteren seramikler, dinamik temas durumunda çevredeki maddelerle etkileşim gösterebilir. Oksit seramikler dışında oksit olmayan seramiklerde görülen bu durum malzemenin aşınmasına sebep olur. Kayma ve sürtünme esnasında oluşan bir diğer etki ise ortaya çıkan yüksek ısıdır. Üretilen sürtünme ısısının miktarı; sürtünme katsayısı, uygulanan güç ile doğru orantılı nominal temas alanı ile ters orantılı olarak değişir. Üretilen ısı nedeni ile temas noktalarının sıcaklığı diğer bölgelere göre ciddi oranda yüksektir. Seramiklerdeki ısı iletkenlik metallere göre düşük olduğundan sürtünme sırasında oluşan bu ısı malzeme bünyesinde dağılamaz. Sonuç olarak malzemede bir sıcaklık gradyenti oluşur. Bu durum ısıl gerilmelerin oluşumuna sebep olur. Bu gerilmeler diğer etkilerle birlikte aşınmaya neden olur. Seramik aşınma mekanizmalarından bir diğeri ise plastik akıştır. Bu olay genellikle kayma yüzeylerinde oluşmakta ve yoğun aşınma kırıntı partikül adacıklarından meydana gelmektedir [45].

5.7. Elektrik Ark Püskürtme Kaplamalarda Aşınma Mekanizmaları

Lamelar yapıya sahip olan elektrik ark püskürtme kaplamalar abrazif aşınmalı ortama maruz kalabilir. Aşınma esnasında aşındırıcı partikül ile kaplama yüzeyinin teması esnasında normal ve açısız yükler pulluklanma hareketi ile temas noktalarından içeriğe doğru transfer edilir. Kaplama yüzeyindeki tepelikler kolayca

deforme olur ve devamlı yükleme sebebiyle deformasyon neticesinde bazıları kırılır. Kaplama yüzeyindeki tepeciklerin deformasyonu ve kırılması neticesinde nispeten düzgün bir yüzey elde edilir. Birinci olarak yüzey düzleşir, temas tepecikleri kaybolur. Aşınma boyunca yük transferi aşındırıcı partikül-düzleme doğru bir meydana gelir. Kaplama yüzeyi her nokta meydana gelen çevimli yükleme ile karşı karşıya kalır. Kaplama yüzeyindeki sert tepecikler ile oluşan yüzeyi kaldırma etkisi plastik kayma deformasyonu oluşturur. Bu deformasyon tekrarlı yükleme ile birikir. Aşınma arayüzeyinde deformasyon devam ettiği için kaplama yüzeyinin hemen altında çatlaklar meydana gelir. Temas bölgesinin hemen altında oluşan yüksek basma gerilmesi üç eksenli durumuna bağlı olarak meydana gelir ve yüzeye çok yakın çatlaklar tehlikelidir. Birinci olarak çatlak oluşur, yüklemenin devam etmesine ve deformasyona bağlı olarak oluşan çatlaklar ilerler. İlerleyen bu çatlaklar komşu kırıklar ve porlarla birleşir. Bu kırıklar son olarak kaplama yüzeyine doğru hareket ettiği zaman delaminasyon meydana gelir.

5.7.1. Aşınma üzerine yüzey topografisinin etkisi

Bütün yüzeylerde tepecikler bulunur. Sert bir yüzey elektrik ark püskürtme kaplama yüzeyi boyunca hareket ettiğinde kaplama tepecikleri hem hızlı bir şekilde kırılır hem de deforme olur. Yüzeyde kayma prosesi ile kaplama yüzeyinden ayrılan tepeciklerin oranı mevcut yüzey pürüzlülüğüne, uygulanan yüke ve tepeciklerin mekanik özelliklerine bağlıdır. Bu sebeple yüzey hazırlama püskürtme kaplamaların aşınma dayanımları için yüzey hazırlama kritik bir durumdur. Yüksek tepecikler birinci olarak deformasyona uğramaktadır ve bunu daha alçakta kalan tepecikler takip etmektedir.

5.7.2. Yüzey dislokasyonlarının davranışı

Elektrik ark püskürtme kaplama yüzeyinde sert başka bir yüzey hareket ettiğinde harekete maruz kalan yüzeyde temas esnasında halihazırda püskürtme çarpma katılaşma ve çarpma ile deformasyon sebepli yoğun şekilde kaplamanın yüzeyindeki dislokasyonlara ilaveten tepeciklerin kırılması ile yeni dislokasyonlar meydana gelir. Dislokasyonların oluşmasına bağlı olarak bunların bazıları çok yakın bir şekilde

yüzeyle paralel konumlanmaktadır. Oluşan dislokasyonların yoğunluğu yüzeyde altlığa doğru kısma nazaran daha fazladır. Bu sebeple kaplama yüzey alanının büyük çoğunluğu ara yüzeyden daha fazla soğuk deformasyon uğrar ve plastik deformasyon oluşmasına sebep olur.

5.7.3. Çatlak ve debris oluşumu

Konu ile ilgili yapılan araştırmalarda çatlak oluşumu yüksek basma gerilmesinin yüzeydeki tepeliklerin temas alanlarının yanında oluşmalarına bağlı olarak kaplama yüzeyinin altında meydana geldiği gösterilmiştir. Aşındırıcı yüzey ve/veya partikül teması boyunca oluşan dislokasyonlar temas ara yüzey tabakasında oluşturduğu için çatlak ve porlar oluşabilmektedir. Kaplama içerisinde oksit, nitrür, karbür ve yeniden katılmış partikül gibi sert partiküller mevcut olduğunda bu sert partiküllerin kopması yoluyla kaplamada boşluk oluşma ihtimali yüksek olmaktadır. Bunun sebebi uygulanan yük ile mobilize olmuş dislokasyonların hareketi bu sert partiküller tarafından durdurulur. Sert partiküller kaplama matrisinin kohezif kuvvetinden daha güçlü olduğunda dislokasyon sert partikül önünde yığılması ve stresin birikimi neticesinde çatlak ve boşluklar oluşabilmektedir. Küçük çatlaklar dislokasyon yığılma stresi altında bu sert partiküllerin ayrılması sırasında oluşabilmektedir. Boşluklar plastik deformasyon boyunca kaplama içerisindeki sert partikülün etrafında matrisin plastik akışı ve matris – partikül arayüzeydeki dekohezyon yoluyla meydana gelebilmektedir. Sürtünme arayüzeyinde çatlakların ve kırıkların oluşması aşınma debrislerin oluşacağı anlamına gelmemektedir. Kaplama yüzeyinden koparak serbest kalmış debris yalnızca kırıklar ve boşluklar kaplama arayüzey mukavemetinin kaplama yüzeyinde ve aşındırıcının arayüzeyde uyguladığı kayma gerilmesinden daha az olduğu durumda birleşmesi sebebiyle meydana gelmektedir. Bu kırık ve boşluklar üç mekanizma ile birbirine bağlanır: boşlukların büyümesi, çatlakların ilerlemesi ve boşluklar arasında metalin (kaplama ana fazı) plastik kayma deformasyonu [48].

BÖLÜM 6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

6.1. Altlık Malzemesi

Bu çalışmada altlık malzemesi olarak 50x50x2 mm. ölçülerinde St 37 çelik sac kullanılmıştır. Bu saclar kaplama uygulama öncesi yüzeylerindeki kir ve yağlardan arındırılması amacıyla alkol ile temizlenmiştir. Kumlama prosesi ile yüzey pürüzlendirme işlemi gerçekleştirilmiştir. Altlık malzemesi tabancayı 90 derece görece şekilde sabitlenmiştir.

6.2. Kaplama Teli

Bu çalışmada kompozit kaplama üretimi için FeCrCMn esaslı özlü tel (Metco 8222®) kullanılmıştır. Kabuk kısmı demir esaslı olup, firmanın öz kısmı için vermiş olduğu bileşim Tablo 6.1’de görülmektedir.

Tablo 6.1. FeCrCMn esaslı özlü telin (Metco 8222) bileşimi

Elementler	Cr	C	Mn	Fe
Bileşim (%)	28	5	1	balans

FeCrCMn esaslı özlü teli birçok iş parçasında aşınma dayanımının sağlanması için endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılan bir kaplama teli malzemesidir. Bu çalışmada özellikle endüstride yaygın olarak kullanılan FeCrCMn esaslı özlü tel kaplamaların özelliklerinin optimize edilmesi ve parametrelerin aşınma dayanıma etkisinin belirlenmesi hedeflenmiştir ve endüstriye uygulamaları için yol göstermesi amacı taşımaktadır.

6.2.1. Toz boyut analizi

Metco 8222[®] telde toz halde bulunan öz kısmı telden ayrılarak biriktirildikten sonra Microtec[®] marka ve S3500 model toz boyut ölçüm analizi cihazı ile toz haldeki özün toz boyut analizi yapılmıştır.

6.3. Kaplama Uygulamaları

Kaplamalar Sakarya Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Termal Sprey Teknolojileri Araştırma Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Kaplamalar Elektrik ark püskürtme yöntemi ile üretilmiştir. Bunun için Smart Arc 350 (Sulzer Metco, Almanya) elektrik ark püskürtme cihazı kullanılmıştır.



Şekil 6.1. Elektrik ark püskürtme kaplama prosesi

Metco 8222[®] özlü teli için önerilen kaplama parametreleri Akım: 200 – 350 A, Voltaj: 28 – 32 V ve Gaz Basıncı: 3,8 – 4,8 bardır. Bu amaçla, elektrik ark püskürtme yöntemindeki kaplama parametrelerin üretilen kompozit kaplamalara olan etkisinin araştırılması amaçlı 4 temel kaplama parametresi değişken olarak seçilmiştir. Bu seçilen temel parametreler akım, voltaj, gaz basıncı ve mesafedir. Bu parametreler Metco 8222[®] özlü teli için önerilen kaplama proses parametrelerine göre seçilmiştir. Şekil 6.1’de elektrik ark püskürtme kaplama prosesi görülmektedir

6.3.1. Akım değişimine bağlı olarak üretilen kaplamalar

Ark akımı: Akım arkın giriş gücünü kontrol eder ve tel uçlarındaki ısınma ve ergime davranışını etkilemektedir. Bu parametre sisteme dahil edilen malzeme ve buna eşdeğer olarak ergiyen malzemeyi belirlemektedir. Bu çalışma kapsamında elektrik ark püskürme kaplama prosesinde akım değeri değişiminin özlü tel kaplamalarda kaplama yapısı ve abrazif aşınma performansına etkisinin tayini için 26 V ve 28 V voltaj seviyelerinde 100 A, 200 A ve 300 A olarak kaplama numuneleri üretilmiştir. Akım değişimine bağlı olarak üretilen kaplamaların proses parametreleri Tablo 6.2.'de verilmektedir.

Tablo 6.2. Akım değişimine bağlı olarak üretilen kaplama numunelerinin üretim parametreleri

Numune	Proses Parametreleri			
	Akım (A)	Voltaj (V)	Gaz Basıncı (bar)	Mesafe (mm)
A11	100	26	4	150
A12	200	26	4	150
A13	300	26	4	150
A21	100	28	4	150
A22	200	28	4	150
A23	300	28	4	150

6.3.2. Voltaj değişimine bağlı olarak üretilen kaplamalar

Voltaj: Kaplama teline uygulanan voltaj ark giriş gücünü kontrol eder ve dolaylı olarak tellerin ucundaki ısınma ve ergime oranını etkilemektedir. Bu çalışma kapsamında elektrik ark püskürme kaplama prosesinde voltaj değeri değişiminin özlü tel kaplamalarda kaplama yapısı ve abrazif aşınma performansına etkisinin tayini için 100 A, 200 A ve 300 A akım seviyelerinde 26V, 28 V ve 32 V voltaj değeri olarak kaplama numuneleri üretilmiştir. Voltaj değişimine bağlı olarak üretilen kaplamaların proses parametreleri Tablo 6 3'de verilmektedir.

Tablo 6. 3. Voltaj değişimine bağlı olarak üretilen kaplama numunelerinin üretim parametreleri

Numune	Proses Parametreleri			
	Akım (A)	Voltaj (V)	Gaz Basıncı (bar)	Mesafe (mm)
V11	100	26	4	150
V12	100	28	4	150
V13	100	32	4	150
V21	200	26	4	150
V22	200	28	4	150
V23	200	32	4	150
V31	300	26	4	150
V32	300	28	4	150
V33	300	32	4	150

6.3.3. Primer gaz basıncı değişimine bağlı olarak üretilen kaplamalar

Atomize gaz basıncı: Atomize gaz basıncı akışı hacim akış oranını ve atomize gaz hızını belirlemektedir. Gaz hızı doğrudan kopan damlacıkların hızını da etkilemektedir. Bu çalışma kapsamında elektrik ark püskürme kaplama prosesinde primer gaz basıncı değeri değişiminin özlü tel kaplamalarda kaplama yapısı ve abrazif aşınma performansına etkisinin tayini için 100 A, 200 A, 300 A akım ve 26 V, 28 V voltaj seviyelerinde 3 bar, 4 bar ve 5 bar primer gaz basıncında kaplama numuneleri üretilmiştir. Primer gaz basıncı değişimine bağlı olarak üretilen kaplamaların proses parametreleri Tablo 6.4’de verilmektedir.

Tablo 6.4. Primer gaz basıncı değişimine bağlı olarak üretilen kaplama numunelerinin üretim parametreleri

Numune	Proses Parametreleri			
	Akım (A)	Voltaj (V)	Gaz Basıncı (bar)	Mesafe (mm)
Pr11	100	26	3	150
Pr12	100	26	4	150
Pr13	100	26	5	150
Pr21	100	28	3	150
Pr22	100	28	4	150
Pr23	100	28	5	150
Pr31	200	26	3	150
Pr32	200	26	4	150
Pr33	200	26	5	150
Pr41	200	28	3	150
Pr42	200	28	4	150
Pr43	200	28	5	150
Pr51	300	28	3	150
Pr52	300	28	4	150
Pr53	300	28	5	150

6.3.4. Püskürtme mesafesinin değişimine bağlı olarak üretilen kaplamalar

Bu çalışma kapsamında elektrik ark püskürme kaplama prosesinde kaplama mesafesi değişiminin özlü tel kaplamalarda kaplama yapısı ve abrazif aşınma performansına etkisinin tayini için 100 A, 200 A, 300 A akım ve 26 V, 28 V voltaj seviyelerinde 3 bar, 4 bar ve 5 bar primer gaz basıncında kaplama numuneleri üretilmiştir. Püskürtme mesafesi değişimine bağlı olarak üretilen kaplamaların proses parametreleri Tablo 6.5.'de verilmektedir.

Tablo 6.5. Kaplama mesafesinin değişimine bağlı olarak üretilen kaplama numunelerinin üretim parametreleri

Numune	Proses Parametreleri			
	Akım (A)	Voltaj (V)	Gaz Basıncı (bar)	Mesafe (mm)
D11	100	26	4	<i>100</i>
D12	100	26	4	<i>150</i>
D21	100	28	4	<i>100</i>
D22	100	28	4	<i>150</i>
D31	100	32	4	<i>100</i>
D32	100	32	4	<i>150</i>
D41	200	26	4	<i>100</i>
D42	200	26	4	<i>150</i>
D51	200	28	4	<i>100</i>
D52	200	28	4	<i>150</i>
D61	200	32	4	<i>100</i>
D62	200	32	4	<i>150</i>

Bu parametreler ile beraber toplam 56 adet kaplama numunesi üretilmiş olup ayrı bölümlerdeki aynı parametrelere sahip kaplama numuneleri birbirinden bağımsız olarak değerlendirilmiştir.

6.4. Mikroyapısal İncelemeler

6.4.1. Özlü kaplama telinin mikroyapısal incelemesi

Bu çalışmada kaplama malzemesi olarak kullanılan Metco 8222[®] telinin optik mikroskop görüntüleri Zeiss AX10 marka optik mikroskop cihazı ile çeşitli büyütme elde edilmiştir. Ardından JEOL 6060 LV marka taramalı elektron mikroskop (SEM) ile kesit incelemesi yapılmış olup telin kabuk kısmı ile öz kısmının EDS analizleri gerçekleştirilmiştir.

6.4.2. Kaplamaların mikroyapısal incelemesi

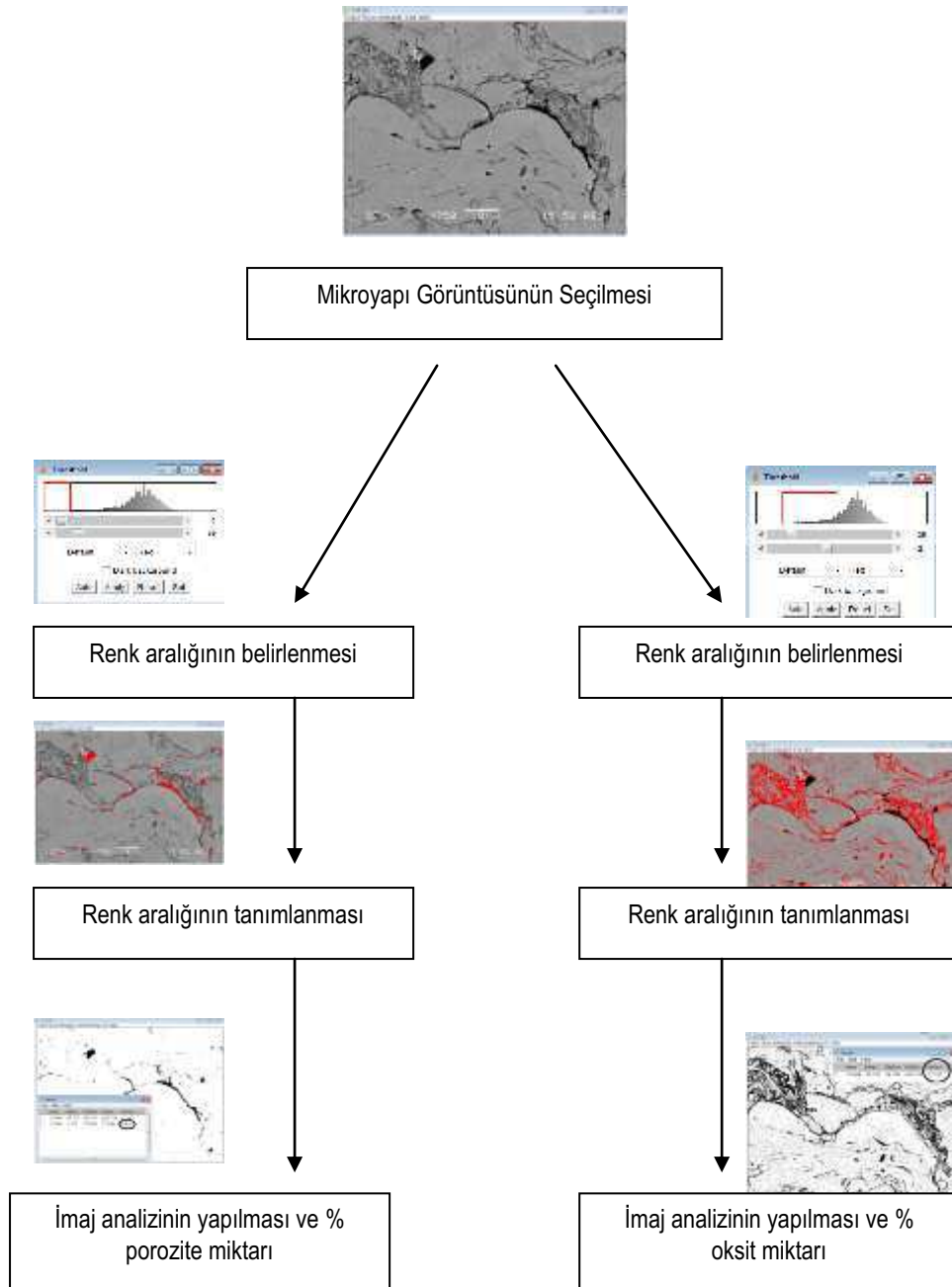
Belirlenen her parametre için üretilmiş kaplamaların optik mikroskop görüntüleri çeşitli büyütme gerçekleştirilmiş olup kaplamaların kalınlıkları da belirlenmiştir. Üretilen kaplama numunelerinin taramalı elektron mikroskop incelemeleri de yapılmış olup EDS analizleri de gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.2’de taramalı elektron mikroskobu görülmektedir.



Şekil 6.2. Jeol 6060 LV marka taramalı elektron mikroskop (SEM)

6.5. Kaplamalarda Oksit ve Porozite Tayini

Bu çalışmada belirlenmiş parametrelerde üretilen kaplamaların oksit ve porozite (%) tayinleri ImageJ® Version 43.1 programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla üretilmiş kaplama numunelerinin her birinden 10 adet X 750 büyütmede taramalı elektron mikroskobu görüntüsü alınmıştır. Şekil 6.3.'de imaj analiz programı ile kaplama mikroyapısındaki % oksit ve % porozite tayini akış şeması verilmektedir.



Şekil 6.3. Mikroyapı oksit ve porozite tayini akış şeması

6.6. Mikrosertlik Ölçümü

Belirlenen parametrelerde üretilen kaplamalardan Shmatzu marka mikrosertlik cihazı ile 15 saniye boyunca 2 N. yükleme koşullarında mikrosertlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Üretilen her kaplama numunesinden 8 adet mikrosertlik değeri ölçülüp mikrosertlik değeri olarak bu değerlerin ortalaması alınmıştır.

6.7. Makrosertlik (Makro Sertlik) Ölçümü

Belirlenen parametrelerde üretilmiş kaplama numunelerine Struer Duramin[®] 500 sertlik ölçüm cihazı ile HRA cinsinden makrosertlik ölçümü gerçekleştirilmiştir. Numunelere 1 sn. 98,10 N.luk ön yükleme ve 15 sn. 588,60 N.luk ana yükleme uygulanmıştır. Makrosertlik ölçümü öncesi pürüzlü olan numunelerin yüzeyleri kaba zımpara ile düzgün hale getirilmiştir. Her numune üzerinden 5 ölçüm gerçekleştirilmiş olup makrosertlik değeri bu ölçümlerin ortalaması olarak alınmıştır.

6.8. XRD (X-Işınları Difraksiyon) Analizi

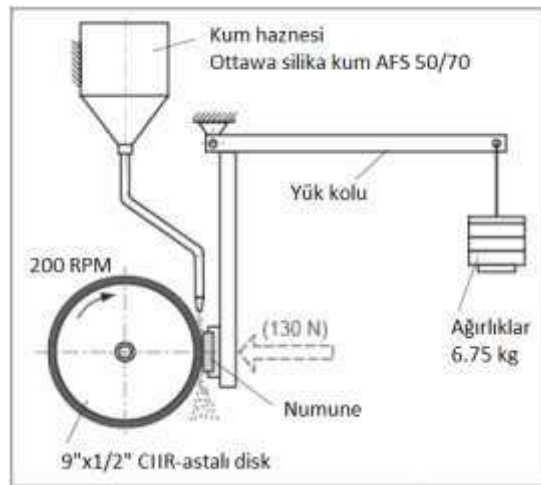
Belirlenmiş parametrelerde elektrik ark püskürtme yöntemi ile üretilen kaplama numunelerine kaplama yapısında meydana gelen fazların ve tel ile nihai kaplama yapısında meydana gelen faz dönüşümlerini tespit etmek amaçlı XRD analizi yapılmıştır. XRD çalışmalarında, dalga boyu $\lambda=1.54056$ olan $\text{CuK}\alpha$ ışın demeti kullanılarak tarama açısı (2θ) $0-90^\circ$ arasında olacak şekilde $2^\circ/\text{dk}$. tarama hızında RIGAKU[®] XRD D/MAX/2200/PC marka x-ışınları difraktometresi kullanılmıştır. Şekil 6.4'de XRD cihazı görülmektedir.



Şekil 6.4. XRD cihazı

6.9. Abrazif Aşınma Testleri

FeCrCMn esaslı bir özlü tel endüstride genel olarak abrazif aşınma dayanımı istenilen alanlarda kullanılır. Belirlenmiş parametrelerde üretilmiş özlü tel kaplamaların abrazif aşınma deneyleri ASTM G65 – 04 “Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus” standardına göre tarafımca bu çalışma için imal edilmiş abrazif aşınma test cihazında ASTM G65 – 04 şartlarında gerçekleştirilmiştir. Bu test metodu metalik kaplamaların abrazif çizilme dayanımlarını tanımlamak amacıyla kuru kum/kauçuk diskten oluşan bir testtir. Test cihazı Şekil 7.5 ‘de şematik olarak görüldüğü gibi aşınmaya dayanıklı kauçuk kaplı paslanmaz çelik döner disk ile numunenin bağlanacağı bir koldan meydana gelir. Cihazın tepesinde kumun konulacağı bir hazne mevcut olup kum bu haznedeki cazibe ile disk ile numune arasına doğru akar. Numunenin yerleştirileceği kolun diğer kısmına istenildiği veya gerekli olduğu durumlarda ağırlık takılabilmektedir. Test şartları ASTM G65 – 04 standardına göre ayarlanmıştır. Buna göre test için kullanılmak üzere AFS 50/70 boyut ölçülerinde silika kumu temin edilmiştir. Haznesinden disk ve numune arasına doğru kum akışı 300 gr/dak. olacak şekilde ayarlanmıştır. Test uygulanacak numunelerin yüzeyleri test öncesi kurutma uygulanmış olup alkol ile temizlenmiştir. Bu standartta 4 test prosedürü bulunmaktadır; Şekil 6.5.’de ASTM G 65 – 04 abrazif aşınma testi düzeneği şematik görünümü verilmektedir.



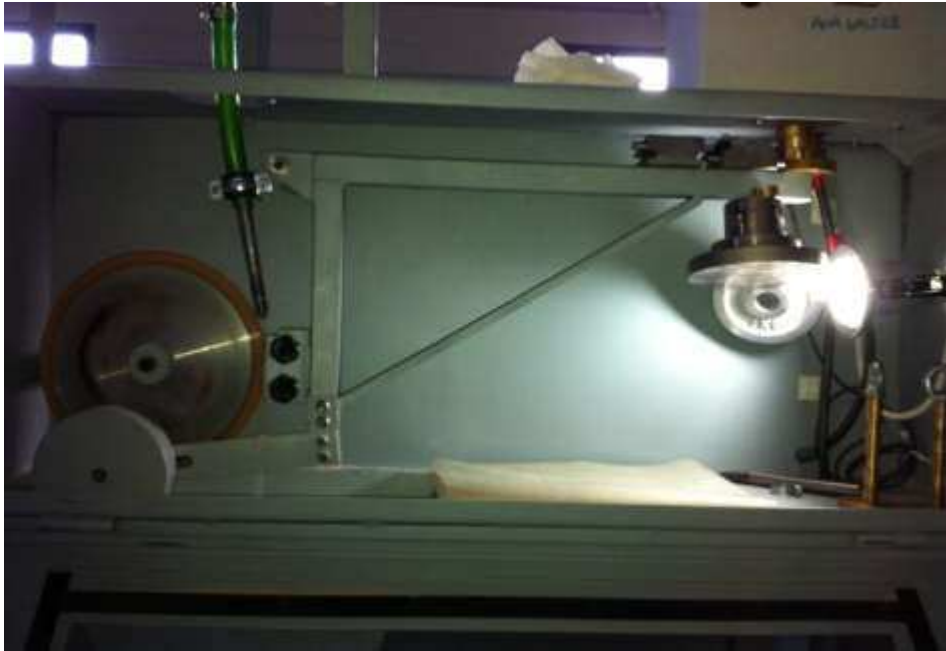
Şekil 6.5. ASTM G 65 – 04 Abrazif aşınma testi şematik kurulumu

Prosedür A: Bu prosedür şiddetli bir aşınma durumu içerir ve özellikle yüksek abrazif aşınma dayanımlı malzemeler için çok kullanışlıdır.

Prosedür B: Prosedür A'nın daha kısa zamanlı olanıdır. Bu yöntem abrazif aşınmaya dayanımlı malzemeler için kullanılabilir. Ancak bu prosedür orta ve düşük seviyeli abrazyon dayanımına sahip malzemeler için kullanışlıdır.

Prosedür C: İnce kaplamalarda kullanılması için Prosedür A'nın kısaltılmış halidir.

Prosedür D: Bu prosedür düşük abrazif dayanımlı malzemeler için kullanışlı olan Prosedür A'nın hafif yük varyasyonlarını içeren yöntemidir. Ayrıca bu prosedür spesifik tip veya Prosedür A ile geliştirilmiş hacim kayıpları birbirine yakın olan malzemeler için kullanışlıdır.



Şekil 6.6. Bu çalışma için imal edilmiş ASTM G 65 – 04 Abrazif aşınma test cihazı

Şekil 6.6.'da ASTM G 65 – 04 abrazif aşınma test cihazı, Şekil 6.7'de abrazif aşınma testi görülmektedir.



Şekil 6.7. ASTM G 65 – 04 Abrazif aşınma testi

Bu çalışma için belirlenmiş operasyon parametrelerinde üretilen kaplamaların kalınlıklarının farklı olmasından dolayı Prosedür C test uygulaması için seçilmiştir. Prosedür C şartlarının sağlanması amaçlı numune 30 saniye boyunca 200 rpm dönen disk ile dakikada 300 gr olan kum akışı arasında abrazif aşınmaya maruz bırakılmıştır.

Tablo. 6.6. ASTM G 65 – 04 abrazif aşınma test parametreleri

Belirlenmiş Prosedür	Numuneye Uygulanacak Yük, ^B N (lb)	Disk Devir Sayısı	Çizgisel Abrazyon	
			m	(ft)
A	130 (30)	6000	4309	(14 138)
B	130 (30)	2000	1436	(4 711)
C	130 (30)	100	71.8	(236)
D	45 (10.1)	6000	4309	(14 138)
E	130 (30)	1000	718	(2 360)

Test öncesi AND GR 200 model hassas terazi ile ağırlık ölçüm hassasiyeti 0,0001 g hassasiyetinde ayarlanmış olup yoğunlukları, test öncesi ağırlıkları ve test sonrası ağırlıkları ölçülmüştür. Tablo 6.6.'da ASTM G 65 – 04 abrazif aşınma test parametreleri verilmektedir.

6.10. Partikül Sıcaklık ve Hızının Ölçülmesi

Elektrik ark püskürtme kaplama sisteminde proses parametreleri püskürtme esnasında oluşan partiküllerin hızını ve sıcaklığını etkilemektedir. Buna bağlı olarak kaplama yapısı da değişmektedir. Bu çalışmada kaplama üretimi için uygulanan parametrelerin hızı ve sıcaklığına bağlı olarak kaplama yapısına olan etkisinin incelenmesi için Sakarya Üniversitesi Termal Sprey Teknolojileri Laboratuvarında mevcut olan SprayWatch 2i Sci/Oseir Finland cihazı kullanılarak kurulan düzenek ile Tablo 6.7’de belirtilen parametrelerde oluşan partiküllerin hızı ve sıcaklığı ölçülmüştür.



a)

b)

Şekil. 6.8. a) Partikül hızı ve sıcaklığı ölçümü için kurulan düzenek, b) Püskürtme esnasında partikül hızı ve sıcaklığının ölçümü

Tablo 6.7. Partikül hızı ve sıcaklıklarının ölçüldüğü püskürtme parametreleri

Akımın Etkisi			
Akım (A)	Voltaj (V)	Primer gaz basıncı (bar)	Püskürtme mesafesi (mm)
100			
200	28	4	150
300			
Voltajın Etkisi			
Akım (A)	Voltaj (V)	Primer gaz basıncı (bar)	Püskürtme mesafesi (mm)
	26		
200	28	4	150
	32		
Gaz basıncının etkisi			
Akım (A)	Voltaj (V)	Primer gaz basıncı (bar)	Püskürtme mesafesi (mm)
		4	
200	28	5	150
		6	

Şekil 6.8. elektrik ark püskürtme yönteminde oluşan partiküllerin sıcaklık ve hızlarının ölçümü için kurulan düzenek ile püskürtme esnasındaki görünümü verilmektedir. Şekil 6.8. a)'da görüleceği gibi SprayWatch kaplamaların üretilme mesafesi olan 150 mm.'ye yerleştirilmiş ve 300 mm yanal mesafe olacak şekilde konumlandırılmıştır.

BÖLÜM 7. DENEYSEL SONUÇLAR

7.1. Giriş

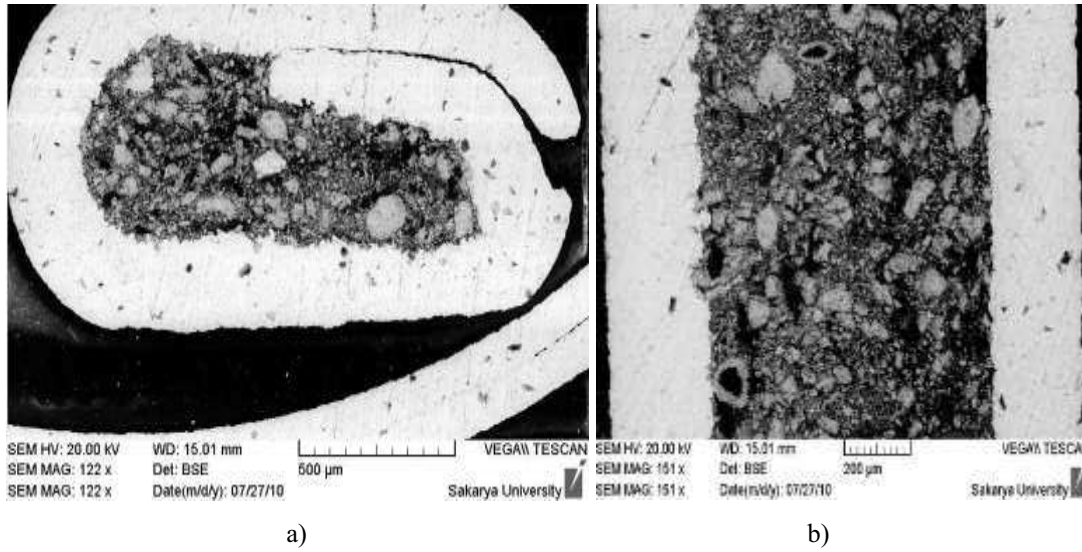
Bu çalışmada abrazif aşınmaya maruz kalan parçaların aşınma performanslarının iyileştirilmesi amaçlı uygulanan metalik tel kaplamalara alternatif olarak üretilen yeni nesil özlü tel kaplama malzemesi olan FeCrCMn esaslı (Metco 8222®) kaplamaların elektrik ark püskürtme yöntemiyle çeşitli parametrelerde üretilmesi ve bu proses parametrelerinin üretilen kaplamaların aşınma performanslarına etkisi incelenerek optimum parametrelerin belirlenmesi amaçlanmıştır.

Özlü tel kullanılarak üretilen kaplamalar içerdikleri sert karbür esaslı fazlardan dolayı kompozit kaplamalar olarak tanımlanır. Telin malzeme bileşimi ve içinde bulunan öz kaplama prosesi esnasında yüksek sıcaklık ve gaz akışının oluşturduğu aerodinamik etkilere maruz kalmakta, tel ve özü oluşturan elementler faz dönüşümüne uğramaktadır. Kaplama prosesi parametreleri nihai kaplama yapısını ve özelliklerini etkilemektedir. Kaplama yapısının oluşması sırasında meydana gelen deformasyon ve hızlı katılma, termal püskürtme kaplamaların yapısal karakterinin belirlenmesinde primer etkenlerdir.

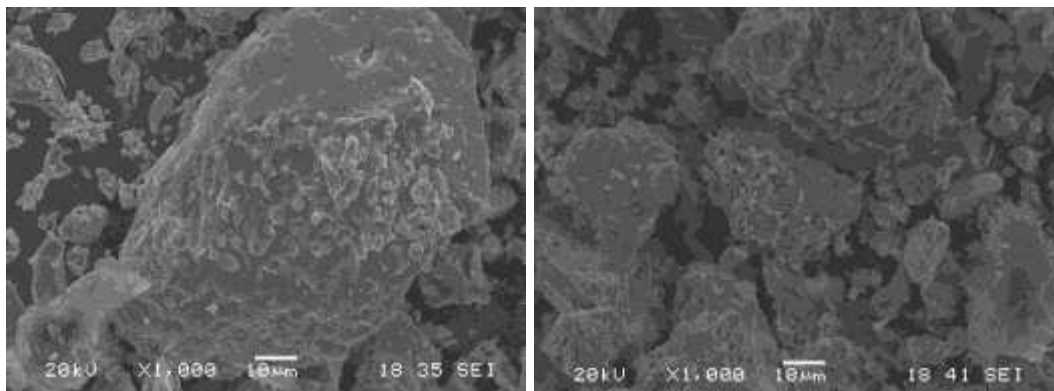
Bu çalışmada FeCrCMn esaslı özlü tel ile üretilen kaplamalarda elektrik ark püskürtme proses parametre değişiminin nihai kaplama yapısına etkisi incelenmiştir. Bu amaçla akım, voltaj, primer gaz basıncı ve püskürtme mesafeleri değiştirilerek çeşitli kaplama numuneleri üretilerek karakterize edilmiştir. Bu kaplamalar abrazif aşınma dayanımı istenilen yerlerde kullanıldığından dolayı abrazif aşınma performansları da bu çalışmada irdelenmiştir.

7.2. Kaplama Telinin Karakterizasyonu

Bu çalışmada kullanılan FeCrCMn esaslı özlü telin ön ve yan kesit görüntüsü Şekil 7.1’de verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi telin öz kısmı ile sargı kabuk kısmı açık olarak ayırt edilebilmektedir. Telin öz kısmının ayrıntılı taramalı elektron mikroskop (SEM) görüntüleri Şekil 7.2’de verilmektedir.

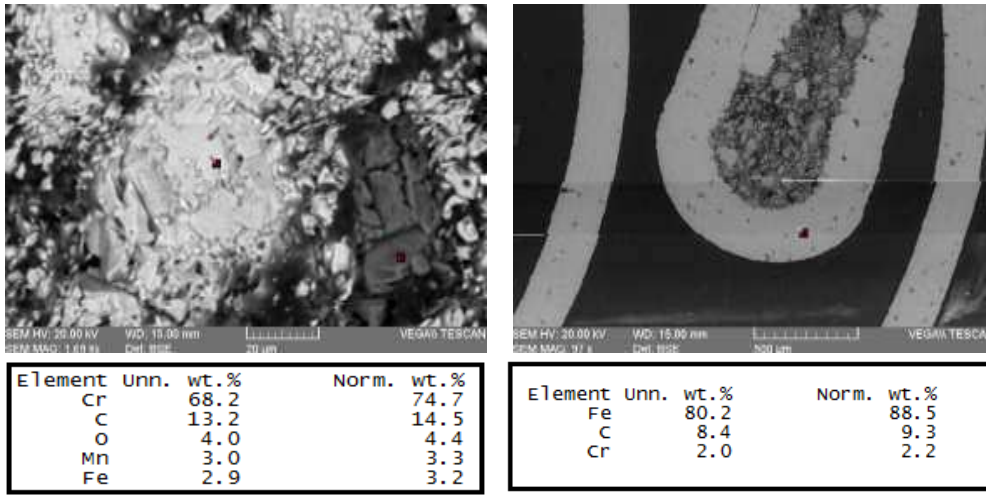


Şekil 7.1. FeCrCMn esaslı özlü telin kesit taramalı elektron mikroskop (SEM) görünüsü; a) ön kesit taramalı elektron mikroskop (SEM) görünüsü, b) yan kesit taramalı mikroskop (SEM) görünüsü



Şekil 7.2. Telin öz kısmını oluşturan tozların taramalı elektron mikroskop (SEM) görüntüleri

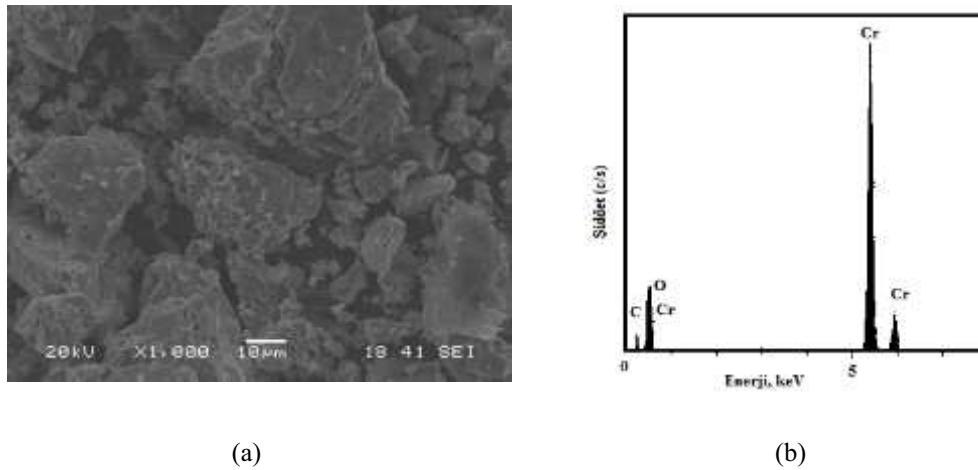
FeCrCMn esaslı özlü telin öz kısmı ve sargı kabuk kısmının taramalı elektron mikroskop (SEM) görüntüleri ile uygulanan EDS analiz sonuçları Şekil 7.3’de verilmiştir. Telin öz kısmına uygulanan alan EDS analiz sonucunda ticari tel bileşiminde verilen Cr, C ve Mn elementleri görülmektedir. Telin sargı kabuk kısmının ise demir esaslı olduğu EDS analiz sonucunda anlaşılabilir.



a)

b)

Şekil 7.3. Özlü telin taramalı elektron mikroskobu görüntüleri ve EDS analizleri; a) öz kısmının EDS analizi, b) sargı kabuk kısmı EDS analizi



(a)

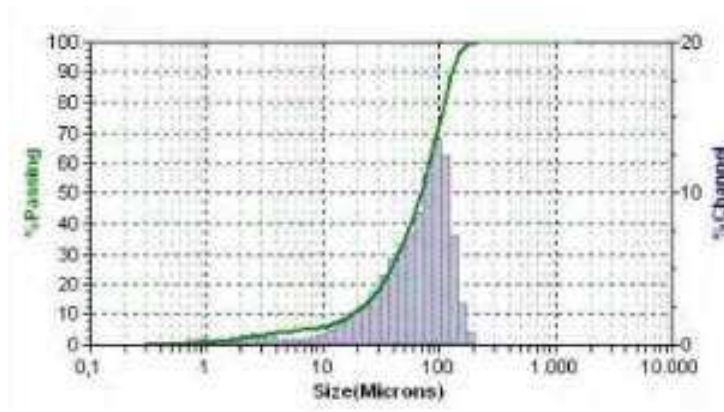
(b)

Şekil 7.4. a) Telin öz kısmının taramalı elektron mikroskop görüntüsü, b) öz kısmının EDS analizi

Bu çalışmada kullanılan özlü telin öz kısmını oluşturan tozun taramalı elektron mikroskop (SEM) görüntüsü Şekil 7.4.a’ da verilmektedir. Görüntüdeki tanelerden alınan EDS analizinde yapının genel itibari ile krom karbürlerden meydana geldiği krom (Cr), ve karbon (C) piklerinden anlaşılabilir. EDS analizinde karbon (C)

pikinin şiddeti tam değeri ifade etmemesine karşın yapıda karbonun (C) varlığına işaret etmektedir (Şekil 7.4 b).

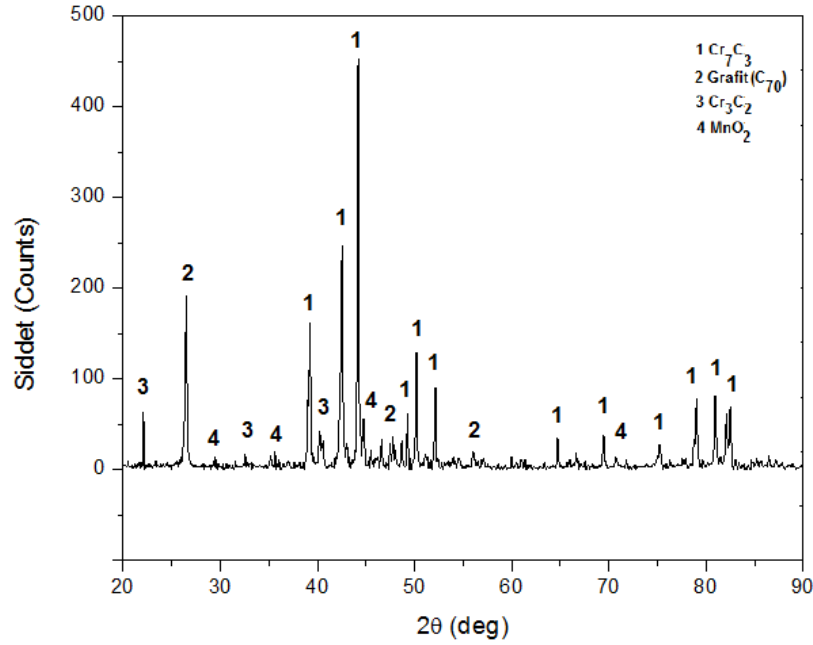
Bu çalışmada kullanılan özlü telin öz kısmını oluşturan tozların boyut analizi gerçekleştirilmiş olup Şekil 7.5.'de toz boyut dağılım eğrisi görülmektedir. Toz boyut analizi sonucunda telin öz kısmını oluşturan tozların ortalama tane boyutunun 71,43 μm olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 7.5. Özlü telin öz kısmını oluşturan tozun boyut analizi

7.2.1. Telin öz kısmının XRD analizi

Telin öz kısmının hangi fazlardan meydana geldiğini belirlemek amacıyla FeCrCMn esaslı özlü telin öz kısmının XRD analiz sonucu Şekil 7.6'da verilmektedir. Şekil 7.6'da görüldüğü gibi telin öz kısmı ticari olarak verilen bileşimi karşılayan krom karbür (Cr_7C_3), grafit (C_{70}) ve manganoksitten (MnO_2) meydana gelmektedir. Telin öz kısmı telden mekanik olarak ayrıldığından MnO_2 'nin bu esnada oluştuğu düşünülmektedir.



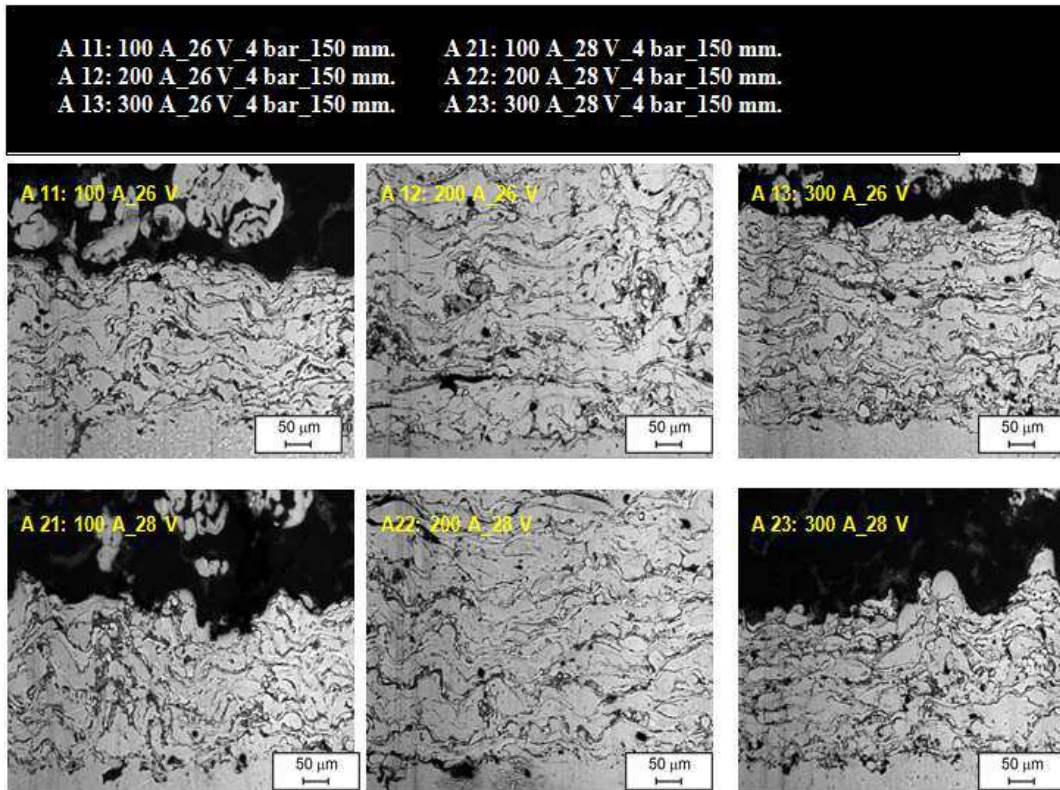
Şekil 7.6. Telin öz kısmının XRD analizi

7.3. Akımın Etkisi

Elektrik ark püskürtme kaplama prosesindeki proses parametrelerden biri olan akımın artması veya azalması tel besleme hızını belirlemektedir. Akım ile besleme hızı arasındaki bu ilişki sebebiyle akımın artması, oluşan partiküllerin hızını beklendiği şekilde düşürmektedir [49]. 26 V ve 28 V olan iki farklı voltaj seviyesinde 100 A, 200 A ve 300 A olan üç farklı akım değerinde üretilen kaplamaların optik mikroyapıları Şekil 7.7’de verilmektedir.

Şekil 7.7’deki mikroyapılardan görüleceği gibi amper ve voltajın artması ile daha iyi bir kaplama yapısı oluşmaktadır. Özellikle her iki voltaj değeri olan 26 V_28 V, 200 A akım değerinde üretilmiş kaplamalar (A12, A22) yüksek birikme verimine sahip olduğu belirlenmiştir. 26 V_100 A (A11) ve 28 V_100 A (A21) proses parametrelerinde üretilen kaplamalar diğer kaplamalara göre daha düşük bir ark enerjisi ile üretilmiştir. Bu sebeple diğer kaplamalara göre daha kaba bir yapı ve düşük birikme verimine sahiptir. Akım ve voltaj değerlerinin yükseltilmesi ile kaplama yapısı daha homojen bir yapı görünümü sergilemektedir (A13 nolu kaplama).

Voltaj değeri 26 V'dan 28 V'a yükseltilmesi ile kaplama telleri arasında oluşan arkın sıcaklığı artmaktadır. Bu şekilde tel ucunda oluşan damlacıkların atomize gaz yardımı ile kopması ve yönlmesi ile oluşan partiküllerin sıcaklıkları artar ve yüzeye çarptıklarında daha iyi bir saçılım gösterir. Ark sıcaklığının artması ile partikül sıcaklıklarındaki artış kaplama yapısının daha homojen olmasını sağlamaktadır. Ancak yüksek enerji seviyeli kaplamalarda (28 V/300 A) homojenliğin bozulduğu Şekil 7.7'de görülmektedir (A23). Çünkü sıcaklığın artması ile tel ucundan kopan partiküller daha kaba yapıli olur ve kaplamanın homojenliğı bozulur.



Şekil 7.7. 26 V ve 28 V voltaj değeriinde 100 A, 200 A ve 300 A olan üç farklı akım değeriinde üretilen kaplamaların optik mikroyapıları

Düşük amper ve voltaj seviyelerinde tel uçlarının ergimesi ile oluşan damlacıklara yeterli ısı girdisi olmamaktadır. Bu nedenle özellikle özlü tellerde oluşan partiküllerin tam olarak ergimesi sağlanamamaktadır. Bu davranış elektrik ark püskürtme metalik kaplamalarda görülenin tersi bir davranıştır. Elektrik ark püskürtme metalik kaplamalarda tel ucunda oluşan ark ısıyla ergime meydana gelmektedir ve yarı ergimiş halde olan partiküller altlığa doğru yol alırken tekrar

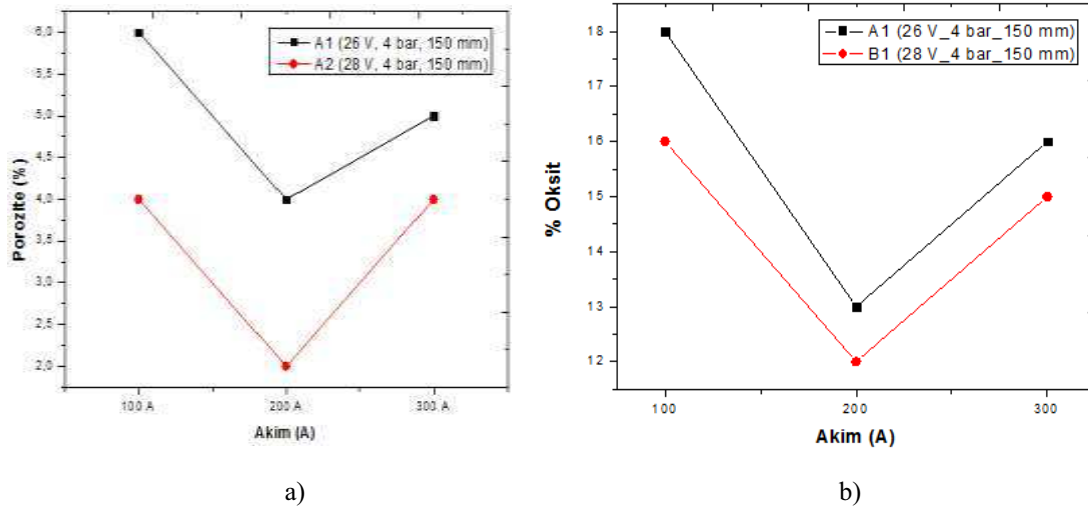
katılaşabilmektedir. Ancak özlü teller kullanıldığında özü oluşturan seramik karakterli oksit veya karbür esaslı bileşiklerin oluşturacağı partiküllerin ergimesi düşük ısı enerjisi girdisi sebebiyle tam olarak sağlanamamaktadır [50]. Bu sebepten düşük ısı girdili kaplamalar olan A11 ve A21’de, ergimemiş veya sonradan katılaşmış partiküllerin diğer kaplama yapılarından daha yoğun olarak bulunduğu Şekil 7.7’de görülebilmektedir. 26 V ve 28 V voltaj seviyelerinde 100 A, 200 A ve 300 A amper değerlerinde üretilen kaplamalar oksit ve porozite miktarları ile mikrosertlik ve kaplama makro sertliği değerleri Tablo 7.1’de verilmektedir.

Tablo 7.1. Akım değişimine bağlı olarak kaplamadaki oksit, porozite ve mikrosertlik ile kaplama makro sertliği değerleri

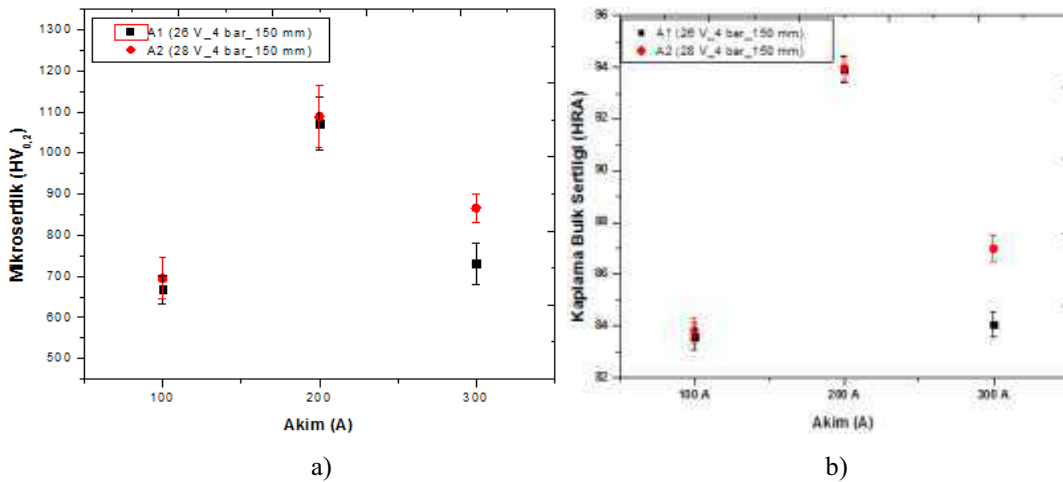
NUMUNE	PROSES PARAMETRELERİ				POROZİTE (%)	OKSİT (%)	MİKROSERTLİK (HV _{0,2})	MAKRO SERTLİK (HRA)
	Akım (A)	Voltaj (V)	Gaz basıncı (bar)	Mesafe (mm)				
A 11	100	26	4	150	6	18	668	83,59
A 12	200				4	13	1071	93,89
A 13	300				5	16	731	84,06
A 21	100	28	4	150	4	16	695	83,81
A 22	200				2	12	1089	93,95
A 23	300				5	15	866	86,99

Şekil 7.8 a’da 26 V ve 28 V voltaj seviyelerinde 100 A, 200 A ve 300 A akım değerinde üretilen kaplamaların akım değişimine bağlı olarak % porozite değerleri verilmektedir. Şekilde 7.8.a’da görüldüğü gibi 28 V voltaj değerinde üretilen kaplamalar 26 V voltaj değerinde üretilene göre daha düşük porozite miktarına sahiptir. Her iki voltaj seviyesinde de 200 A akım değerinde üretilen kaplamalar düşük porozite miktarına sahip olup, 28 V_200 A parametrelerinde üretilen kaplamalar en düşük porozite miktarına sahiptir.

Şekil 7.8 b’de 26 V ve 28 V voltaj değerleri ile 100 A, 200 A ve 300 A akım değerlerinde üretilen kaplamalardaki oksit miktarlarının değişimi verilmektedir. Şekil 7.8 b’de görüleceği üzere 26 V_300 A ve 28 V_300 A proses parametreleri haricinde 28 V voltaj değerinde üretilen kaplamaların 26 V voltaj değerinde üretilen kaplamalardan daha düşük oksit miktarına sahip olduğu görülmektedir. 26 V_300 A ve 28 V_300 A proses parametrelerinde üretilen kaplamalardaki oksit miktarı aynı olup parametreye bağlı bir değişim gözlenmemiştir.



Şekil 7.8. a) Akım değişimine bağlı olarak kaplamadaki yüzde porozite değerleri, b) % oksit değerleri



Şekil 7.9. Akım değişiminin (a) mikrosertlik üzerine etkisi, (b) makro sertliği üzerine etkisi

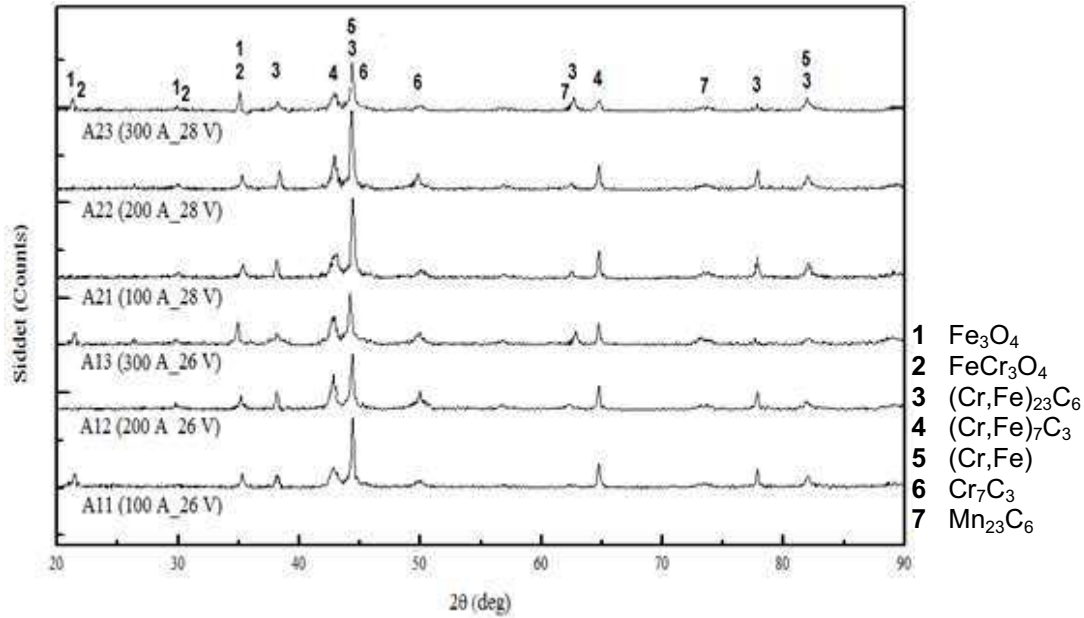
Şekil 7.9 a'da 26 V ve 28 V voltaj seviyelerinde 100 A, 200 A ve 300 A akım değerlerinde üretilmiş kaplamalardaki mikrosertlik değerleri akım değişimine bağlı olarak verilmektedir. 28 V voltaj değerlerinde üretilen kaplamaların 26 V voltaj değerinde üretilen kaplamalardan daha yüksek mikrosertlik değerine sahiptir. Özellikle her iki voltaj seviyesinde 200 A'de üretilen kaplamalar en yüksek mikrosertliğe sahiptir. 28 V_200 A değerinde üretilen kaplamada ölçüm aralığı diğerlerine göre daha geniştir. Bu durumun kaplama yapısındaki oksit alanlarına ve kaplama kalınlığına bağlı olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Şekil 7.9 b'de 26 V ve 28 V voltaj seviyelerinde 100 A, 200 A ve 300 A akım değerlerinde üretilen kaplamaların kaplama makro sertliğinin grafiksel gösterimi

verilmiştir. 28 V voltaj değerinde üretilen kaplamaların 26 V voltaj değerinde üretilen kaplamalardan daha yüksek kaplama makro sertliğine sahip olduğu Şekil 7.9 a'da görülmektedir. Özellikle 26 V_200 A ve 28 V_200 A proses parametrelerinde üretilmiş kaplamalar daha yüksek kaplama makrosertliğine sahiptir.

7.3.1. XRD analiz sonuçları

Tablo 7.1'de belirtilen parametrelerde farklı akım değerleri ile üretilen kaplama XRD analiz sonuçları Şekil 7.10'da verilmektedir

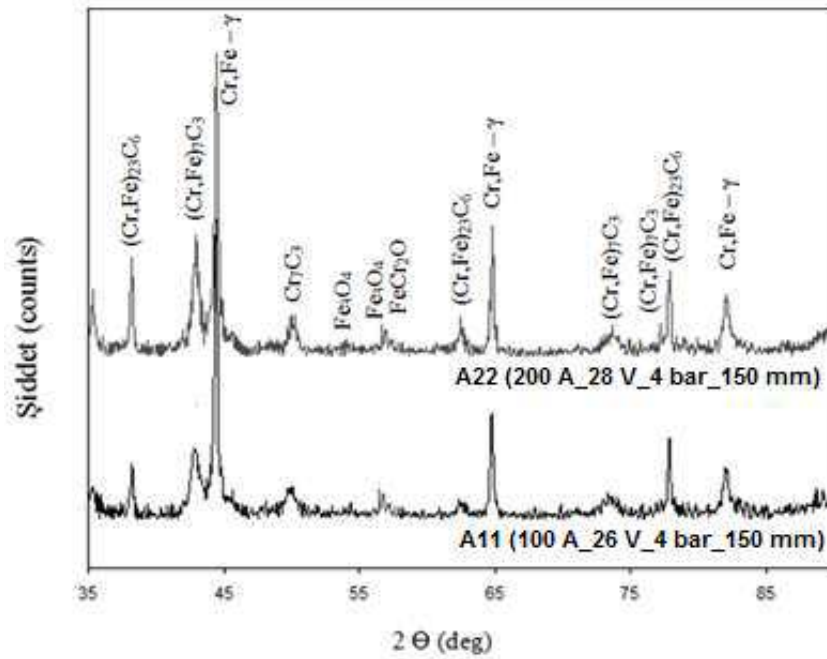


Şekil 7.10. Akım değerinin değiştirilmesi ile üretilen kaplamaların XRD analiz sonuçları

Şekil 7.10'daki XRD sonuçları, kaplama yapısında (γ - Cr,Fe) katı çözeltilisi ile kompleks karbürler olan $M_{23}C_6$ [(Cr,Fe) $_{23}C_6$], M_7C_3 [(Cr,Fe) $_7C_3$, Cr_7C_3 ve Mn_7C_3] ve Cr ve Fe' in oksitlerinin bulunduğunu göstermektedir. Özellikle 26 V/ 200 A (A12) ve 28 V/200 A (A22) parametre değerlerinde üretilen kaplamaların karbür piklerinin [(Cr,Fe) $_{23}C_6$, Mn_7C_3 , Cr_7C_3] yükseldiği, Fe_3O_4 ve $FeCr_3O_4$ oksit piklerinin ise 300 A akım değerinde üretilenlerde yükseldiği görülmektedir.

Kaplama yapısındaki M_7C_3 , $M_{23}C_6$ karbürlerin yoğunluğu ve kaplama ana fazı ile uyumlu olarak kaplama yapısında bulunması kaplamanın sertliğini etkilemektedir. 26

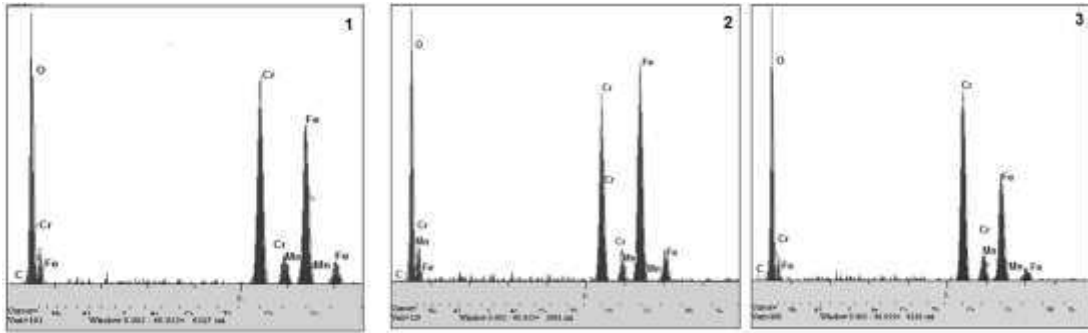
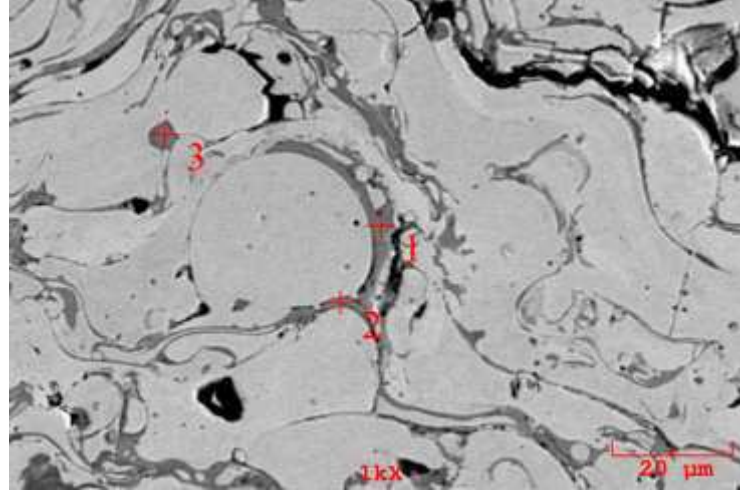
V_200 A (A12) ve 28 V_200 A (A22) proses parametrelerinde üretilen kaplamaların makro sertlikleri diğer üretilen kaplamalara göre yüksektir. En yüksek kaplama makro sertliğine sahip olan A22 numunesi ile farklı akımlarda üretilen kaplamalardan en düşük kaplama makro sertliğine sahip A11 numunesinin XRD analiz sonuçları Şekil 7.11’de birbiri ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 7.11. A11 ve A22 kaplama numunelerinin XRD analiz sonuçları

Şekil 7.11’deki XRD spektrumları bakıldığında A11 numunesi ile A12 numunesinin kaplama yapıları γ – Cr,Fe katı çözeltilisi (γ) ile beraber hegzagonal yapılu Cr_7C_3 , yüzey merkezli kübik yapılu $(\text{Cr,Fe})_7\text{C}_3$, $(\text{Cr,Fe})_{23}\text{C}_6$ kompleks karbürler ve Mn_7C_3 ’den oluşmuştur. Farklı akım ve voltaj parametrelerinde elektrik ark püskürtme yöntemi ile üretilen A11 ve A22 kaplamalardan, yüksek kaplama makro sertliğine sahip olan A22 numunesine ait XRD spektrumlarındaki karbür piklerinin daha yüksek olduğu Şekil 7.11’de görülmektedir. Karbür yapılarının yoğun olması A22 numunesindeki yüksek sertliğin sebebini açıklamaktadır. Elektrik ark püskürtme yöntemi ile üretilen kaplamalarda hızlı soğuma rejiminden dolayı kararsız ara fazların kaplama yapısında bulunmaktadır. Karbür yapıcı yeterli karbonun bulunması ($\text{M}_{23}\text{C}_6 + \gamma$) ötektik östenit yapısının oluşmasını sağlamaktadır.

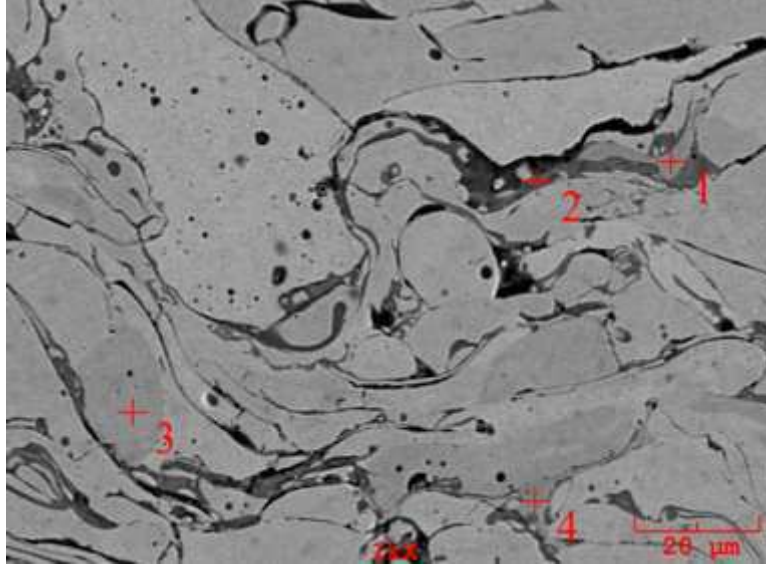
XRD analiz sonuçlarından sonra yüksek makro sertliğine sahip A22 (93,95 HRA) nolu numune ile düşük makro sertliğe sahip A11 numunesinin taramalı elektron mikroskop (SEM) ve EDS incelemesi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 7.12. A11 nolu kaplamanın SEM görüntüsü ve 4 noktadan alınmış EDS analizi sonuçları

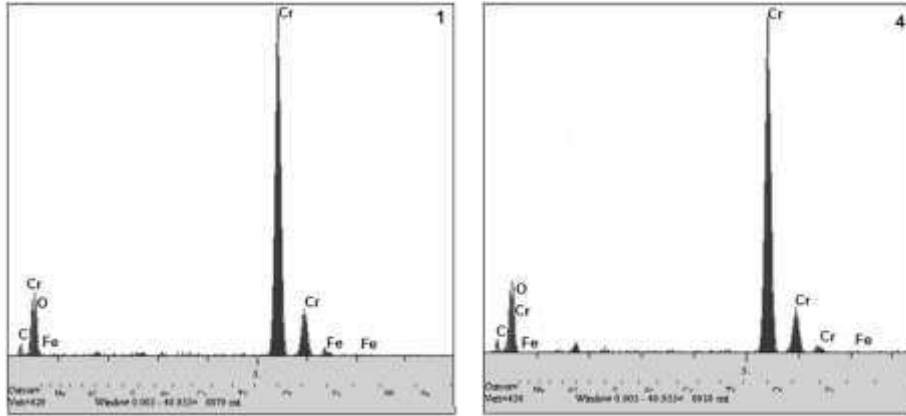
A11 nolu kaplama numunesinin taramalı elektron mikroskop (SEM) görüntüsü ile EDS analiz sonuçları Şekil 7.12’de verilmektedir. A11 kaplama yapısının SEM görüntüsünde termal püskürtme kaplama yapısını karakterize eden laminar birikme yapısı, oksit, porozite ve mikroçatlakların bulunduğu görülmektedir. A11 nolu kaplamanın oksit oranı % 18 olup farklı akım değerlerinde üretilmiş diğer kaplama numuneleri içerisinde en yüksek olanıdır. Şekil 7.12’de görüleceği gibi elektrik ark püskürtme kaplama yapılarındaki iki oksit oluşum mekanizması olan hem yüzey oksitler hem de difüze oksitler yapıda bulunmaktadır. Bu bölgelerden alınan EDS analiz sonuçlarında O pikinin yüksek olması SEM görüntüsündeki yapıların oksit olduğunu desteklemektedir. 1 ve 2 nolu analiz yüzey (sınır) oksit kısımdan, 3 nolu

EDS analizi difüze oksit üzerinden alınmıştır. Her üç analizde de oksijen piklerinin yüksekliği açıkça görülmektedir. Şekil 7.13’de A22 numunesinin SEM mikroyapısı ve mikroyapı üzerindeki EDS analizinin yapıldığı 4 bölge görülmektedir.



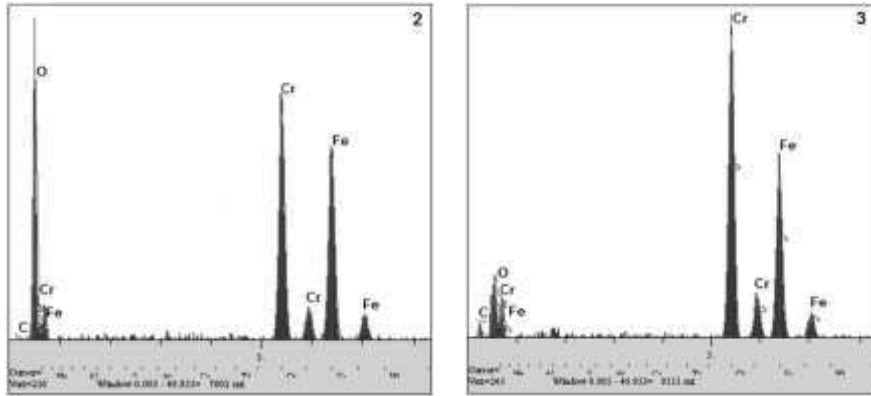
Şekil 7.13. A22 nolu kaplamanın SEM görüntüsü

A22 nolu kaplama numunesi 26 V ve 28 V seviyelerinde 100 A, 200 A ve 300 A olarak 3 farklı akım değerinde üretilen kaplama grubu arasında yüksek kaplama makro sertliğine (93,89 HRA) sahip 2. numunedir. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile yapılan inceleme neticesinde 1 ve 4 nolu bölgeden alınan EDS analiz sonuçlarında yoğun bir şekilde Cr piki ile beraber C ve O pikleri yer almaktadır. XRD analiz sonuçları ile ilişkilendirildiğinde 1 ve 4 nolu bölgelerin Cr_7C_3 fazlarının olduğu, bu bölgelerden alınan EDS analiz sonuçları ile anlaşılmaktadır. EDS analiz sonuçları Şekil 7.14.’de verilmektedir.



Şekil 7.14. A22 numunesine ait 1 ve 4 nolu bölgeden alınan EDS analiz sonuçları

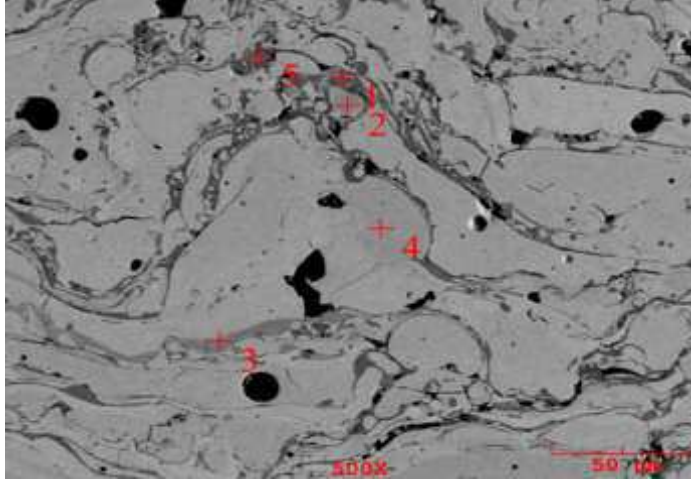
Kaplama yapısı bünyesindeki Cr_7C_3 bölgeleri lameller arasında bulunmaktadır. Krom karbürde kaplama prosesi esnasında yüzey oksidasyonuna bağlı olarak veya yüzey oksitler ile birlikte bulunmasından dolayı EDS analiz sonuçlarında O pikleri mevcut olabilmektedir.



Şekil 7.15. 2 ve 3 nolu bölgeden alınan EDS analiz sonuçları

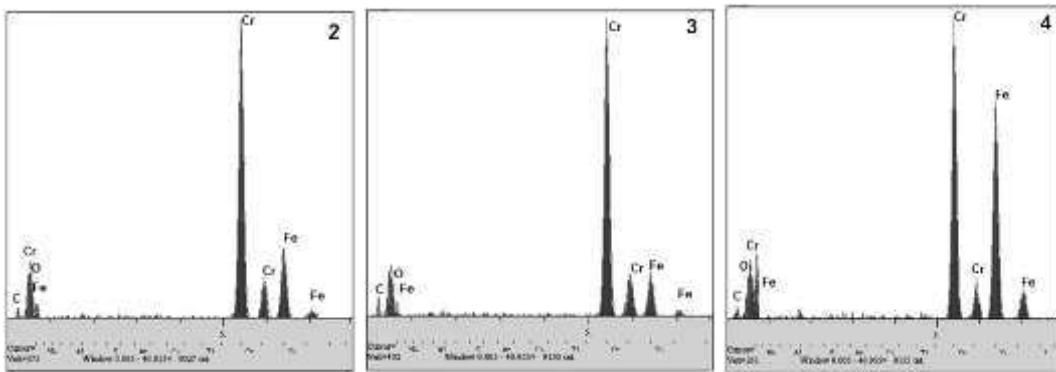
Şekil 7.13'deki A22 numunesinin SEM mikroyapısında ana faz haricinde daha açık renk kontrastına sahip bölgelerin yoğun olarak bulunduğu görülmektedir. Bu bölgeler (2 ve 3 nolu bölgeler) üzerinden alınan EDS analiz sonuçları Şekil 7.15'de verilmektedir. 2 ve 3 nolu EDS analiz sonucunda görüleceği gibi Cr ve Fe piklerinin yoğun olduğu, C ve O piklerinin bulunduğu görülmektedir. Söz konusu bölgelerin $(Cr,Fe)_7C_3$ karbür bölgelerinin olduğu düşünülmektedir. Bu karbürlerin faz içerisinde ana faz ile uyumlu bir şekilde dağılmaktadır. A22 numunesinin sahip olduğu yüksek sertliğin söz konusu karbürlerin ana faza dağılmış olarak bulunmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. 2 nolu bölge, yüzey oksit alanı içerisinde

bulunmakta olup koyu gri bir renktedir. Kaplama prosesindeki püskürtme esnasında söz konusu karbürün oksitlenmesi ile 2 nolu bölgenin oksit bölgesi olduğu, bu bölgeden alınan EDS analiz sonucunda yüksek şiddette O piki bulunması sebebiyle düşünülmektedir.



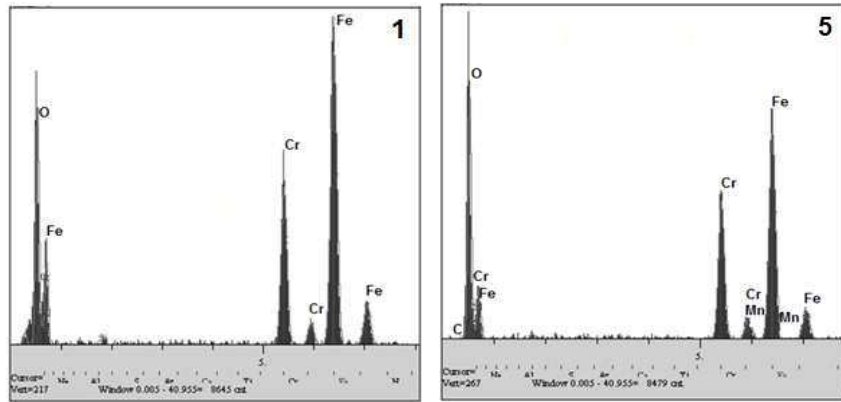
Şekil 7.16. A22 nolu kaplama numunesinin SEM görüntüsü

Şekil 7.16'da A22 numunesinin diğer bir taramalı elektron mikroskop (SEM) görüntüsü verilmektedir. A22 numunesinin SEM mikroyapı görüntüsü incelendiğinde renk kontrastına göre farklı fazların yapıda bulunduğu anlaşılmaktadır. Mikroyapı üzerinde 5 bölgede EDS analizi yapılmıştır. 2, 3 ve 4 nolu bölgeden yapılan EDS analizi sonuçları Şekil 7.17'de verilmektedir.



Şekil 7.17. 2,3 ve 4 nolu bölgelerden alınan EDS analiz sonuçları

2., 3. ve 4. bölgeden alınan EDS analiz sonuçlarında bakıldığında Cr, Fe, O ve C pikleri görülmektedir. 7.16'da SEM mikroyapısında 2 ve 3 bölge 4. bölgeye göre daha koyu bir renge sahiptir. Buna ilave olarak 2 ve 3 nolu bölgeden alınan EDS analiz sonuçlarına bakıldığında Cr piklerinin şiddetinin yüksek olduğu Fe pik şiddetinin ise daha düşük olduğu görülmektedir. Özellikle 2 nolu bölgeye bakıldığında karbür olduğu tahmin edilen sert köşeli bir yapının lameller arasında kaldığı görülmektedir. Bu oluşumun kaplama telinin öz kısmında bulunan Cr_7C_3 karbürün tamamen ergimeyerek yapıda lameller arasında kalması şeklinde olduğu tahmin edilmektedir. Aynı durum 3 nolu bölge için de geçerli olmaktadır. 2 ve 3 nolu bölgeler Cr_7C_3 karbürler olup kaplama yapısına özellikle lamel sınırları boyunca uyumlu bir şekilde dağılmıştır. 4 nolu bölgeden alınan EDS analiz sonucunda Fe pikinin 2 ve 3 nolu bölgeden alınan EDS analiz sonuçlarına göre artmış olduğu görülmektedir. 4 nolu bölgenin $(Cr,Fe)_{23}C_6 + \gamma - Cr,Fe$ olduğu tahmin edilmekte olup, $(Cr,Fe)_{23}C_6$ kompleks karbürü Cr ve Fe zengin karbür olarak EDS analizinde tanımlanmaktadır [52]. $(Cr,Fe)_{23}C_6$ karbürü östenit matris ile çevrelenmektedir.

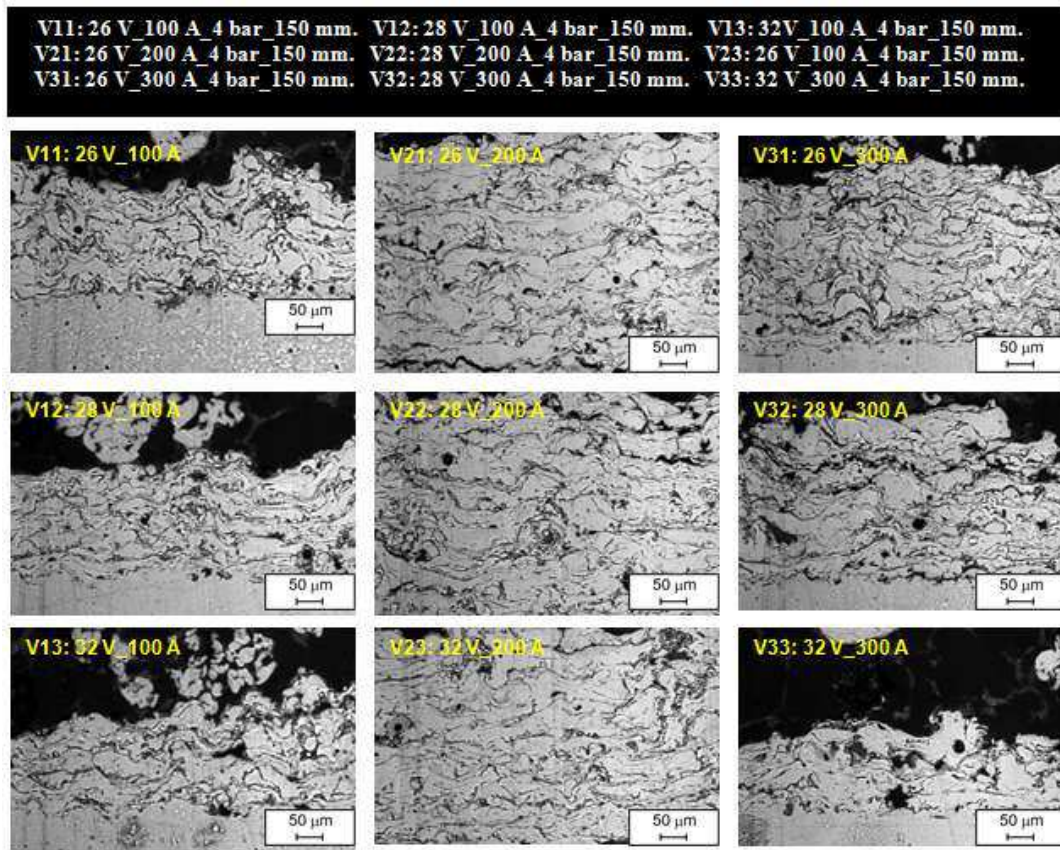


Şekil 7.18. 1 ve 5 nolu bölgelerden alınan EDS analiz sonuçları

Şekil 7.18'de görüldüğü üzere, 1 ve 5 nolu koyu bölgeler $(Cr,Fe)_7C_6 + \gamma - Cr,Fe$ ötektiküstü şeklinde birbirini çevreleyen bir yapıdır ve EDS analiz sonuçları mevcut yapıların bulunduğunu desteklemektedir [52]. EDS analizleri lamel sınırlarında olduğu ve koyu renge sahip olduğu için bu bölgeler oksit bölgesidir. EDS analiz sonuçlarındaki yüksek O pikleri bunu açıklamaktadır.

7.4. Voltajın Etkisi

Elektrik ark püskürtme kaplama prosesindeki parametrelerden biri olan voltaj sisteme giren ısı miktarı belirlemektedir. Özellikle kaplama prosesinde voltaj değerlerindeki artış partiküllerin sıcaklıklarının artmasına ve daha kaba tanelerin oluşmasına sebep olmaktadır. Ancak partikül hızını düşürmektedir [49]. 100 A, 200 A ve 300 A akım değerlerinde 26 V, 28 V ve 32 V olarak voltaj değişiminin her üç akım seviyesinde kaplama yapısına etkisi incelenmiştir. Bu şekilde üretilen kaplamaların optik mikroyapıları Şekil 7.19'de verilmektedir.



Şekil 7.19. 100 A, 200 A ve 300 A akım seviyelerinde 26 V, 28 V ve 32 V olan üç farklı voltaj değerinde üretilen kaplamaların optik mikroyapıları

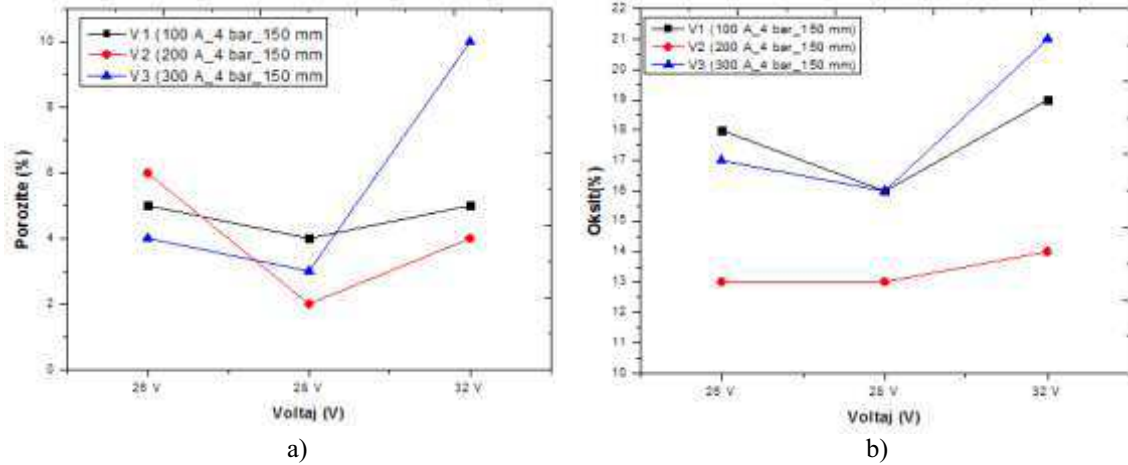
Şekil 7.19'deki mikroyapılara bakıldığında kaplama yapılarının lamelar olduğu, oksit porozite ve mikroçatlak gibi genel termal püskürtme kaplama yapı bileşenlerinin bulunduğu görülmektedir. 26 V_200 A, 28 V_200 A ve 32 V_200 A parametre değerlerinde üretilen kaplamaların altlık yüzeyine birikmeleri nispeten diğer

kaplama yapılarına göre daha homojendir. 26 V_100 A, 28 V_100 A ve 32 V_100 A parametre değerlerinde üretilmiş kaplamaların voltajın artması ile daha homojen ve ince lamelli bir kaplama yapısına sahip olmuştur. Bunun sebebi yüksek sıcaklığa sahip partiküllerin yüzeyde daha iyi bir yayılım göstermeleridir. 26 V_200 A, 28 V_200 A ve 32 V_200 A parametre değerlerinde üretilmiş kaplamalarda voltaj değerinin artması ile kaplamayı oluşturan lamellerin kalınlaştığı ve kaplamada mikroçatlak oluşumun arttığı görülmektedir. Bunun da partiküllere ısıl girdinin voltajın artması ile arttığı ve kaplama yapısı oluştururken hızlı soğuma (ani katılma) sebebiyle meydana gelen termal stres birikimi özellikle sert karbür fazlarında çatlak oluşmasına sebep olduğu düşünülmektedir. Özellikle 32 V_300 A parametre değerinde üretilmiş kaplamanın homojen bir kaplama yapısına sahiptir. Amper ve voltajın artması ile ısıl girdinin yükselmesi buharlaşma ve saçılmayı arttırmakta ve bu sebeple 32 V_200 A parametre değerinde homojen bir kaplama yapısı oluşmaktadır.

Tablo 7.2. Voltaj değişimine bağlı olarak kaplamalardaki oksit, porozite, mikrosertlik ve kaplama makro sertliği değerleri

NUMUNE	PROSES PARAMETRELERİ				POROZİTE (%)	OKSİT (%)	MİKROSERTLİK (HV _{0,2})	MAKRO SERTLİK (HRA)
	Akım (A)	Voltaj (V)	Gaz basıncı (bar)	Mesafe (mm)				
V11	100	26	4	150	5	18	682	83,59
V12		28			4	16	731	83,81
V13		32			19	536	80,13	
V21	200	26	4	150	6	13	1011	93,89
V22		28			13	1121	93,95	
V23		32			14	989	91,91	
V31	300	26	4	150	4	17	745	84,06
V32		28			16	866	86,99	
V33		32			21	534	80,10	

100 A, 200 A ve 300 A akım seviyelerinde 26 V, 28 V ve 32 V voltaj parametre değerlerinde üretilen kaplamalara ait oksit, porozite, mikrosertlik ve kaplama makro sertlik değeri Tablo 7.2.'de verilmektedir.

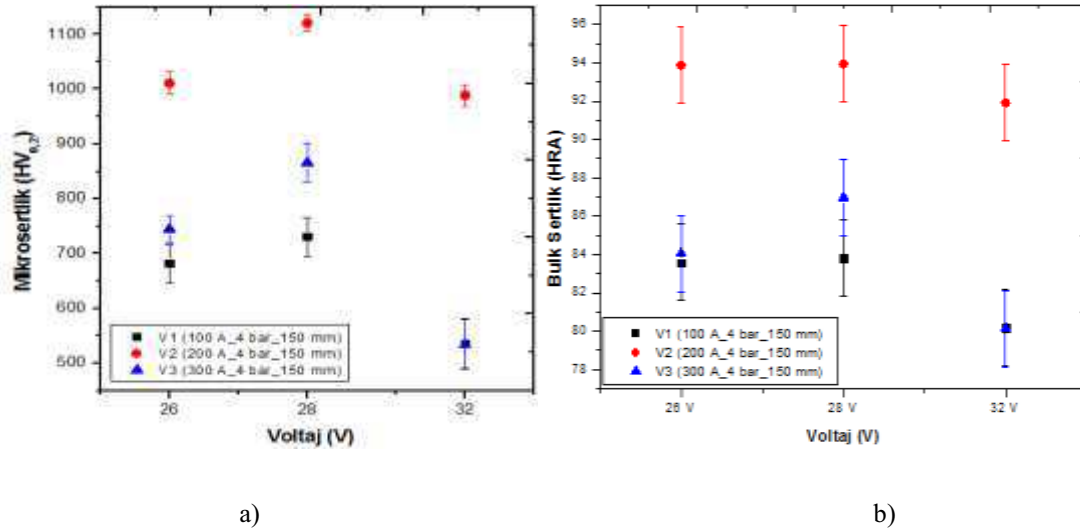


Şekil 7.20. a) Voltaj değişimine bağlı olarak % porozite değişimi, b) Voltaj değişimine bağlı olarak % oksit değişimi

Şekil 7.20'de 1000 A, 200 A ve 300 A seviyelerinde 26 V, 28 V ve 32 V voltaj değerlerinde üretilen kaplamaların voltaj değişimine bağlı olarak % porozite değişimi verilmektedir. Şekil 7.20 a' da görüldüğü gibi 28 V voltaj değerinde üretilen kaplamalar en düşük porozite oranına sahiptir. Voltaj değeri 26 V'dan 28 V'e yükseldiğinde kaplamalardaki % porozite miktarı düşmekte olup voltaj değeri 32 V'a çıkarıldığında 100 A, 200 A ve 300 A seviyelerinde % porozite miktarı tekrar yükselmektedir. 32 V_300 A parametre değerinde üretilen kaplamaların en yüksek % porozite değerine sahip olduğu Şekil 7.20 a' da görülmektedir. Voltajın artması ile kaplama teli ucunda oluşan damlacıkların yüksek sıcaklık değerlerine sahip olması ile oksidasyonun artması ve bu şekilde oluşan kaplamadaki porozitenin artmasına sebep olduğu düşünülmektedir.

Şekil 7.20 b' de 100 A, 200 A ve 300 A seviyelerinde 26 V, 28 V ve 32 V voltaj değerlerinde üretilen kaplamaların voltaj değişimine bağlı olarak % oksit değişimi verilmektedir. Kaplamalarda voltajın artması ile oksit miktarının arttığı Şekil 7.20 b'deki grafikten görülebilmektedir. Özellikle 32 V voltaj değerinde üretilen kaplamalardaki oksit miktarı 26 V ve 28 V voltaj değerlerin üretilmiş kaplamalardan daha yüksek olmaktadır. 32 V voltaj değerinde partikül ısısının yükselmesi havada yol alan ve altlık yüzeyine çarpan dropletlerin oksitlenme miktarı yüksek olmasına sebep olmaktadır. 200 A akım seviyesinde üretilen kaplamalar en düşük % oksit değerlerine sahiptir. Kaplama yapısının 200 A akım değerinde diğer parametrelere

göre daha iyi olması, birikme ve lamellerin birbirine daha sıkı bağlanmalarının bir sonucu olduğu düşünülmektedir.



Şekil 7.21. a) Voltaj değişimine bağlı olarak kaplamaların mikrosertlik değerleri, b) Voltaj değişimine bağlı olarak kaplamaların makro sertlik değerleri

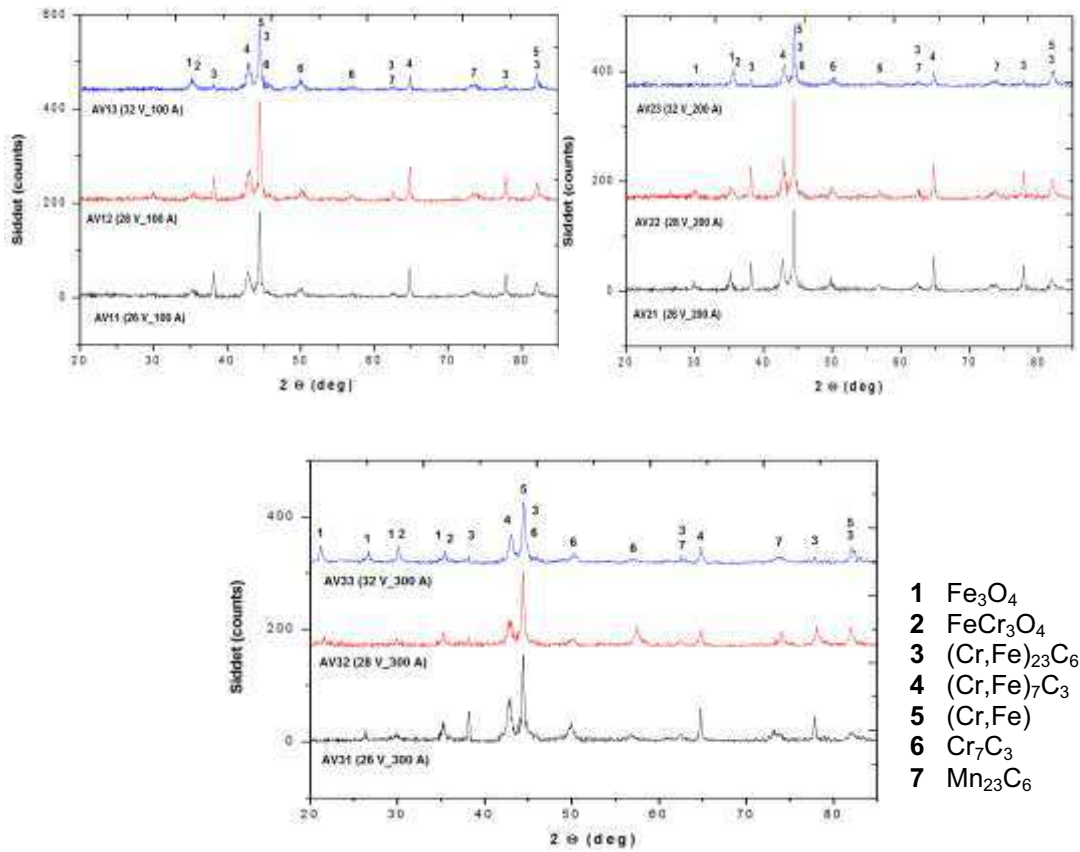
Şekil 7.21' de 100 A, 200 A ve 300 A akım seviyelerinde 26 V, 28 V ve 32 V voltaj değerlerinde üretilmiş kaplamalardan ölçülen mikrosertlik değerleri verilmektedir. 100 A'de üretilen kaplamaların mikrosertliklerinin en düşük değere sahip oldukları, 200 A'de üretilmiş kaplamaların ise mikrosertlik değerlerinin diğer üretilen kaplamalara göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. 28 V_200 A'de üretilmiş kaplamaların en yüksek mikrosertlik değerlerine sahip olduğu Şekil 7.21 a'daki grafikten görülebilmektedir. Püskürtme sırasında amper değerinin artması, birim alanda oluşan damlacık sayısının artması ve damlacıkların sıcaklıklarında artması sağlamaktadır. Damlacık sıcaklığının artması ve birim alana daha fazla telin beslemesi ile kaplama yapısı daha homojen olmakta ve telin içeriğindeki karbürler yapıda homojen olarak yayılabilmektedir. 300 A'de üretilen kaplamalarda ise bu homojenlik bozulmaktadır ve telin sıcaklığı daha da artarak oksidasyon oranını arttırmaktadır. Bu sebeple 200 A'de üretilen kaplamaların mikrosertlik değerlerinin yüksek olmaktadır.

Şekil 7.21 b' de görüldüğü üzere en 200 A_26 V (V21), 200 A_28 V (V22) ve 200 A_32 V (V23)'da üretilen kaplamaların daha yüksek kaplama makro sertliğine

sahiptir. 100 A_26 V (V11), 100 A_28 V (V12) ve 100 A_32 V (V13)'da üretilen kaplamaların ise en düşük kaplama makro sertliklerine sahip oldukları Şekil 7.21'de görülebilmektedir.

7.4.1. XRD analiz sonuçları

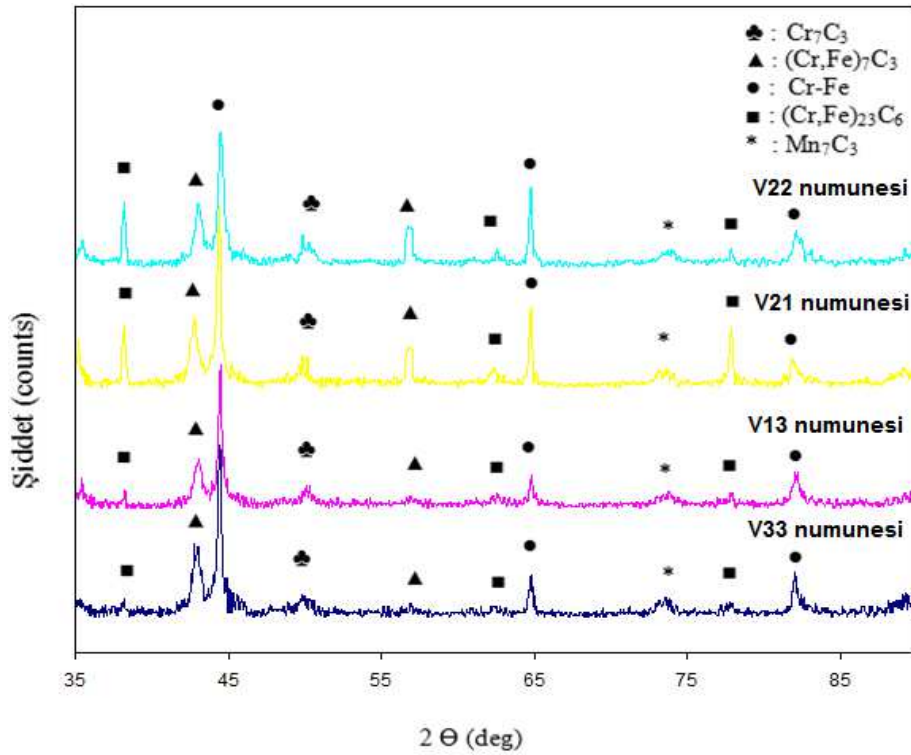
Voltaj değişiminin kaplama yapısına olan etkisini belirlemek için 100 A, 200 A ve 300 A akım seviyelerinde 26 V, 28 V ve 32 V voltaj değerlerinde kaplamalar üretilmiştir. Bu üretilen kaplama numunelerinin XRD analiz sonuçları Şekil 7.22'de verilmektedir.



Şekil 7.22. 26 V, 28 V ve 32 V voltaj değerlerinde, 100 A, 200 A ve 300 A seviyelerinde voltaj değişimine bağlı olarak üretilen kaplamaların XRD analiz sonuçları (4 bar_150 mm)

XRD sonuçlarına göre, kaplama yapısında γ - Cr, Fe katı çözeltisi ile kompleks karbürler olan M₂₃C₆ [(Cr,Fe)₂₃C₆] ve M₇C₃ [(Cr,Fe)₇C₃, Cr₇C₃ ve Mn₇C₃] karbürleri ve oksitleri olan Fe₃O₄ ve FeCr₃O₄ bulunmaktadır. Özellikle 200 A/26 V (V21) ve 200 A/28 V (V22) ve 200 A/32 V (V23) parametre değerlerinde üretilen

kaplamaların karbür piklerinin $[(Cr,Fe)_7C_3]$, Cr_7C_3 , $Cr_{15.58}Fe_{7.42}C_6$ ve Mn_7C_3 , yükseldiği, oksit piklerinin de $(Fe_3O_4, Fe_{1.5}Cr_{1.5}O_4)$ 300 A/32 V proses parametrelerinde yükseldiği görülmektedir. Kaplama yapısındaki karbürlerin yoğunluğu kaplama sertliğini arttırmaktadır. 200 A_26 V (V21) ve 200 A_28 V (V22) ve 200 A_32 V (V23) püskürtme parametrelerinde üretilen kaplamaların makro sertliklerinin diğer üretilen kaplamalara göre yüksek olduğu Şekil 7.22. b)' de görülebilmektedir. Bu yönüyle XRD sonuçlarındaki karbür piklerinin artışı ile kaplama makro sertlik değerlerinin artması durumu birbirine uyumludur.

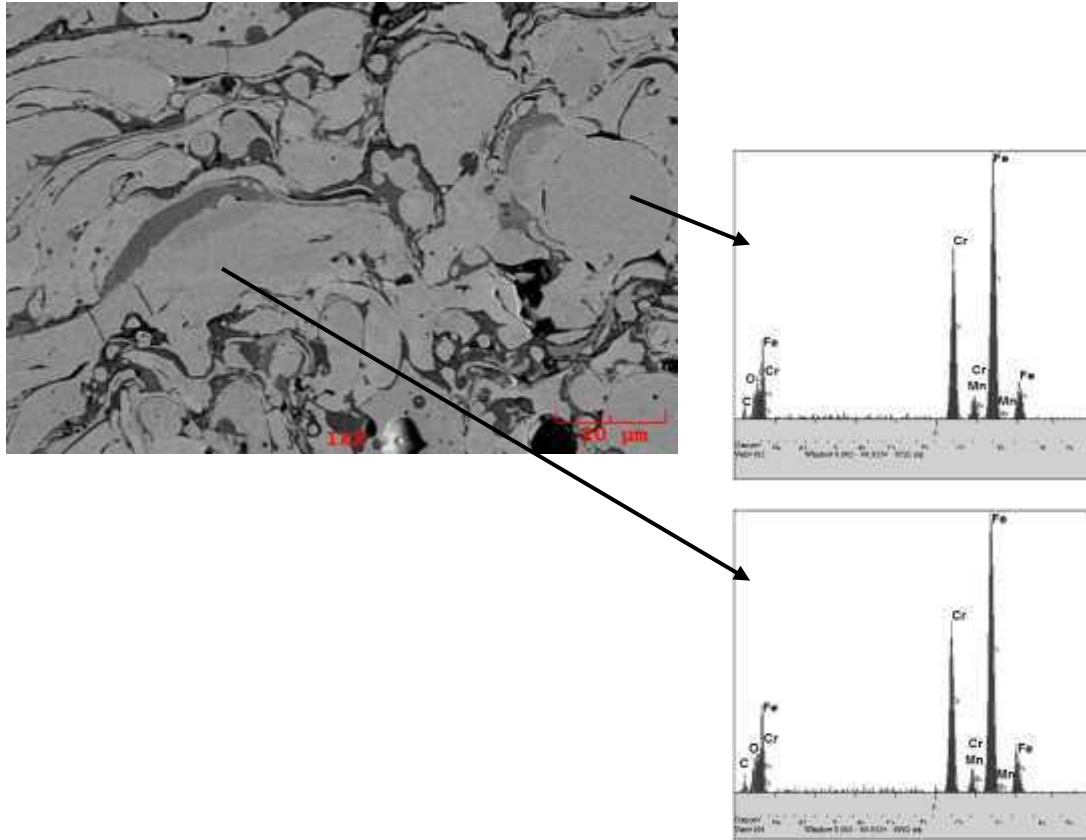


Şekil 7.23. V13, V21, V22 ve V33 kaplama numunelerinin XRD analiz sonuçları

Püskürtme parametreleri içerisinde voltaj değişimine bağlı olarak üretilen kaplama numunelerindeki sertlik artışı ile kaplama yapısındaki karbür oluşumu ilişkisini belirlemek amacıyla üretilen kaplama numunelerinden en yüksek kaplama makro sertliğine sahip V21 (93,89 HRA) ve V22 (93,89 HRA) numuneler ile en düşük kaplama makro sertliğine sahip V13 (80,18 HRA) ve V33 (80,13 HRA) kaplama numunelerinin XRD analiz sonuçları Şekil 7.23'de karşılaştırılmıştır. Şekil 7.23'de görüleceği gibi yapıdaki en yüksek sertliğe sahip karbür olan M_7C_3 (1200 – 1800

HV) piklerinin 26 V ve 28 V_200 A'de üretilen V21 ve V22 numunelerinde yüksek, 32 V_100 A ve 300 A'de üretilen V13 ve V33 numunelerinde daha düşük olduğu görülmektedir. Bu durum kaplamanın makro sertliğini etkilemektedir.

XRD analiz sonuçlarından sonra yüksek kaplama makro sertliğine sahip olan 200 A_26 V (V21) ve 200 A_28 V (V22) kaplama numuneleri ile en düşük kaplama makro sertliğine sahip 100 A_32 V (V13) ve 300 A_32 V (V33) kaplama numunelerinin taramalı elektron mikroskop (SEM) incelemesi ile EDS analizi gerçekleştirilmiştir.

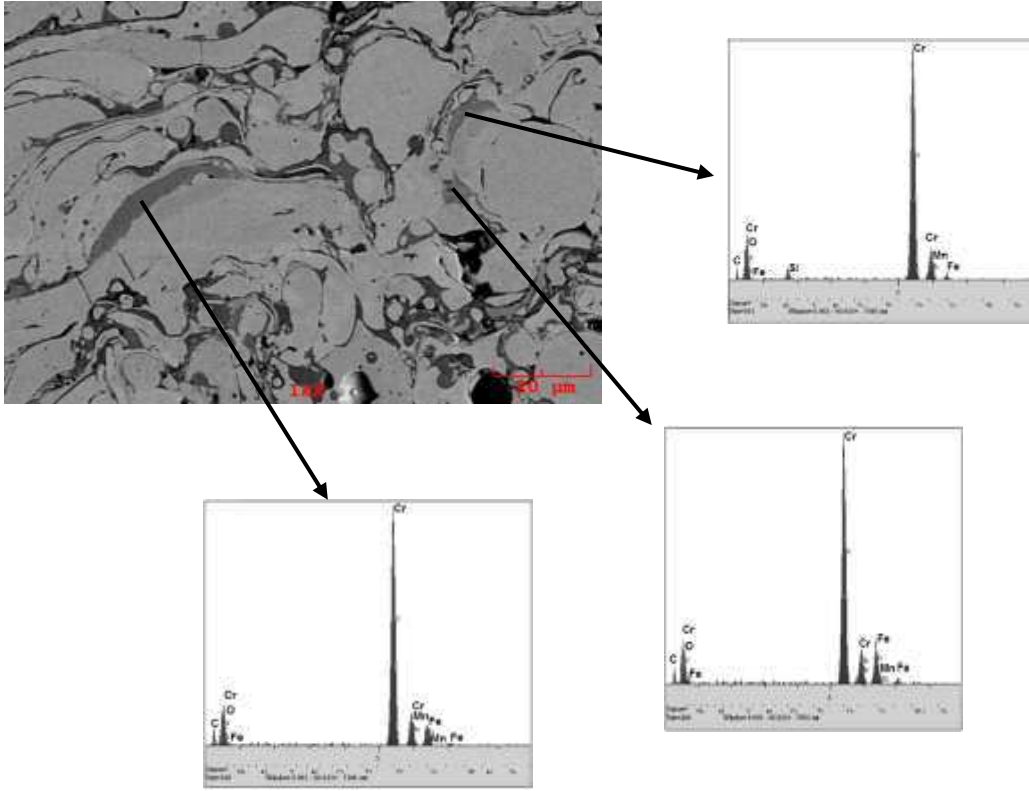


Şekil 7.24. V22 (200 A/28 V) kaplama numunesinin taramalı elektron mikroskop görüntüsü (SEM) ve EDS analiz sonuçları

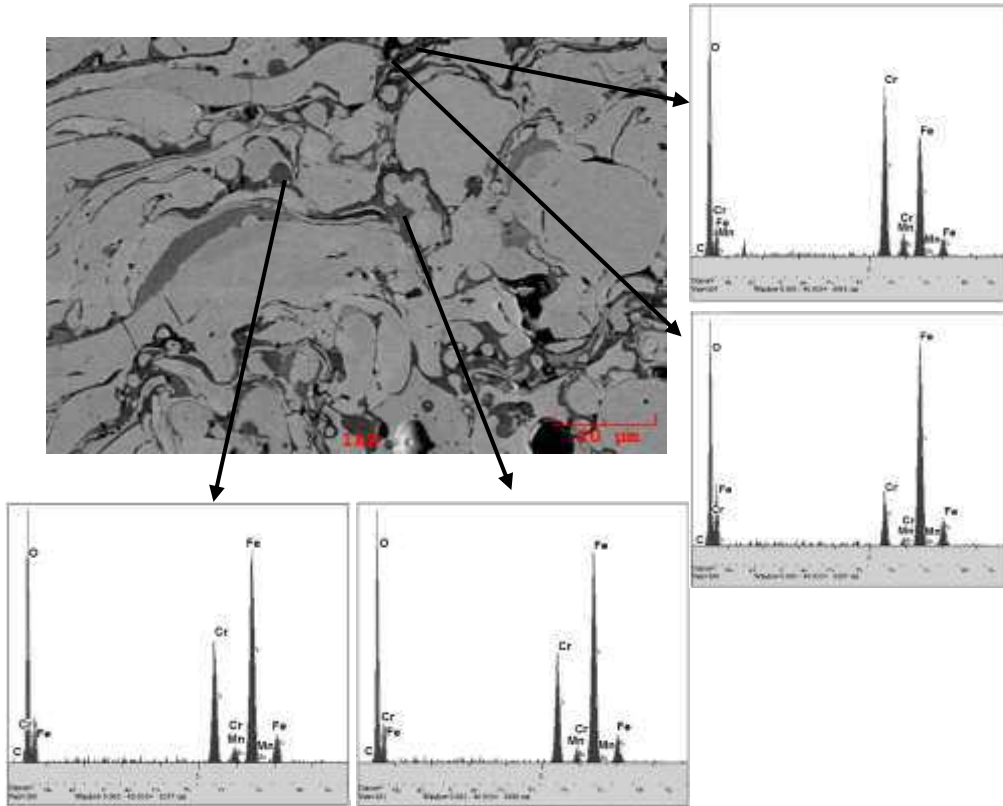
V21, V22 ve V23 numunelerinin sertlikleri sırasıyla 93,89 HRA, 93,95 HRA ve 91,91 HRA olup diğer kaplamalara göre daha yüksektir. FeCrCMn esaslı özlü tel kaplamada sertlik değerinin yüksek olması yapıda bulunan M_7C_3 ve $M_{23}C_6$ metalik karbürlere bağlıdır. Atomize gaz basıncı olarak hava kullanılması ve kaplama prosesinin atmosferik ortamda gerçekleştirilmesi kaplamaların oksitlenmesini

arttırmaktadır. Bünyedeki karbonun oksijen ile reaksiyona girmesine sebep olmaktadır. Karbon, karbür yapıcı olduğundan dolayı kaplama prosesi sırasında karbon yanmasının düşük olması istenir. Telin ergimesi ile oluşan damlacıklar havada yol alırken ve altlık yüzeye çarpmaları esnasında oksitlenmenin düşük olması istenmektedir. 200 A'da 26 V, 28 V ve 32V voltaj değerlerinde üretilen V21, V22 ve V23 numunelerinin sertlik değerlerinin yüksek olması yapıda karbürlerin oluştuğunun da bir göstergesidir. Bu amaçla yapılan taramalı elektron mikroskop incelemesi ve EDS analizleri Şekil 7.24 verilmektedir.

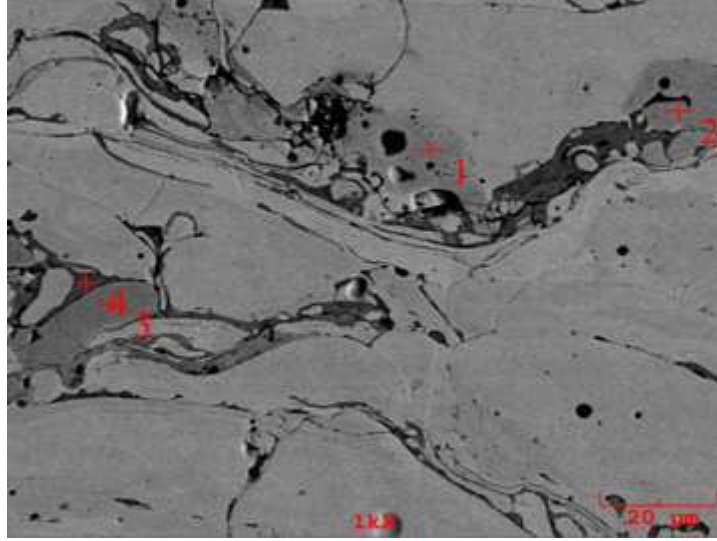
Şekil 7.24'de görülen V22 nolu numunede kaplama ana fazını oluşturan lamellerden alınan EDS analiz sonuçları Fe, Cr, C, O ve Mn piklerini vermektedir. Fe piklerinin Cr'a göre yüksek olması söz konusu kaplama yapısının γ - Cr,Fe + (Cr,Fe)₂₃C₆ olabileceği tahmin edilmiştir. Şekil 7.26'da V22 numunesinin SEM görüntüsü ile SEM mikroyapı görüntüsündeki lameller arasında yer alan yapıların EDS analizlerinde sonuçları verilmiştir. Lameller arasındaki koyu renkli alanlarda yapılan EDS analiz sonuçlarında Cr piklerinin yüksek olduğu görülmektedir. Bu şekilde söz konusu lameller arasında gömülü olarak bulunan bu yapıların Cr₇C₃ olduğu düşünülmektedir. Özlü kaplama telinin öz kısmında bulunan Cr₇C₃ karbürün püskürtme esnasında tam olarak ergimeden lameller arasında kalabilmektedir. Şekil 7.25'de görüleceği üzere söz konusu karbür yapısının yapıda uyumlu şekilde bir ana faz ile sarıldığı görülmektedir. Lamellerin sınır tabakalarında bulunmasına karşın çevresi ile uyumlu bir pozisyondadır. Kompozit karakterli kaplama yapısında Cr₇C₃ karbürlerinin yapı ile uyumlu bir şekilde bulunması kaplama abrazyon aşınma karşı dayanım için önemlidir. Sertlik değerlerinin yüksek olduğu kaplamalardan alınan EDS analizlerinde Cr piki Fe piklerine göre daha şiddetlidir. Cr piklerinin yüksek şiddete sahip olması Cr₇C₃ ve (Cr,Fe)₇C₃ karbür fazlarının yapıda bulunduğu anlamını taşımaktadır. Kaplama yapısında bulunan bu karbürler ile kaplama sertliği arasında ilişki bulunmaktadır. V21 ve V22 numunelerinin yüksek sertliği birbiri ile ilişkilidir. Şekil 7.26'de koyu gri renge sahip olan bölgelerden alınmış EDS analiz sonuçları görülmektedir. EDS analiz sonuçları kaplama yapısını oluşturan (Cr,Fe)₂₃C₆ + γ -Cr,Fe fazını tanımlamakta ve yüksek O piki ile bu alanların oksit bölgelerinin olduğunu belirtmektedir.



Şekil 7.25. V22 (200 A/28 V) kaplama numunesinin taramalı elektron mikroskop (SEM) görüntüsü ve EDS analiz sonuçları

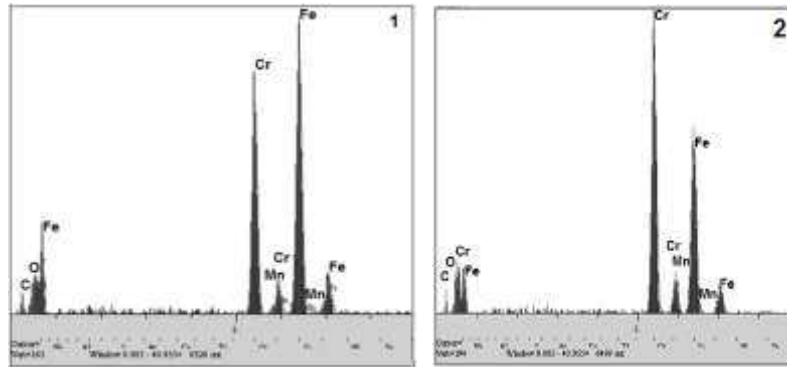


Şekil 7.26. V22 (200 A/28 V) kaplama numunesinin taramalı elektron mikroskop (SEM) görüntüsü ve EDS analiz sonuçları



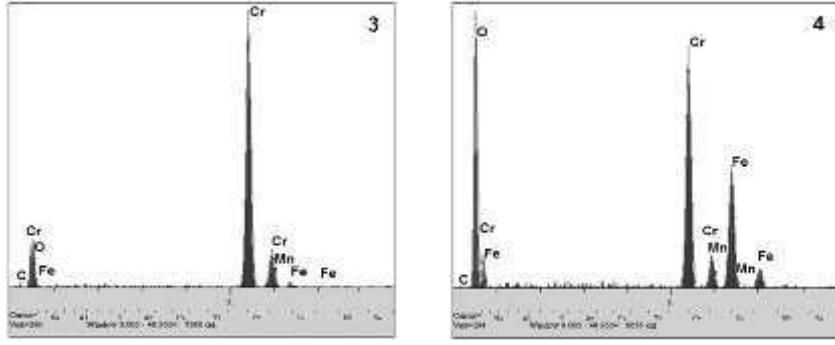
Şekil 7.27. V22 (200 A/28 V) kaplama numunesinin taramalı elektron mikroskop görüntüsü

Şekil 7.27’de V22 kaplama numunesinin kaplama yapısı üzerindeki diğer bölgelerinden alınan taramalı elektron mikroskop (SEM) görüntüsünde yapıdaki karbür fazları açıkça görülebilmektedir. Kaplama yapısına göre daha koyu renge sahip karbür adacıklarının hangi tür karbür oldukları EDS analizi ile tespit edilmeye çalışılmıştır.



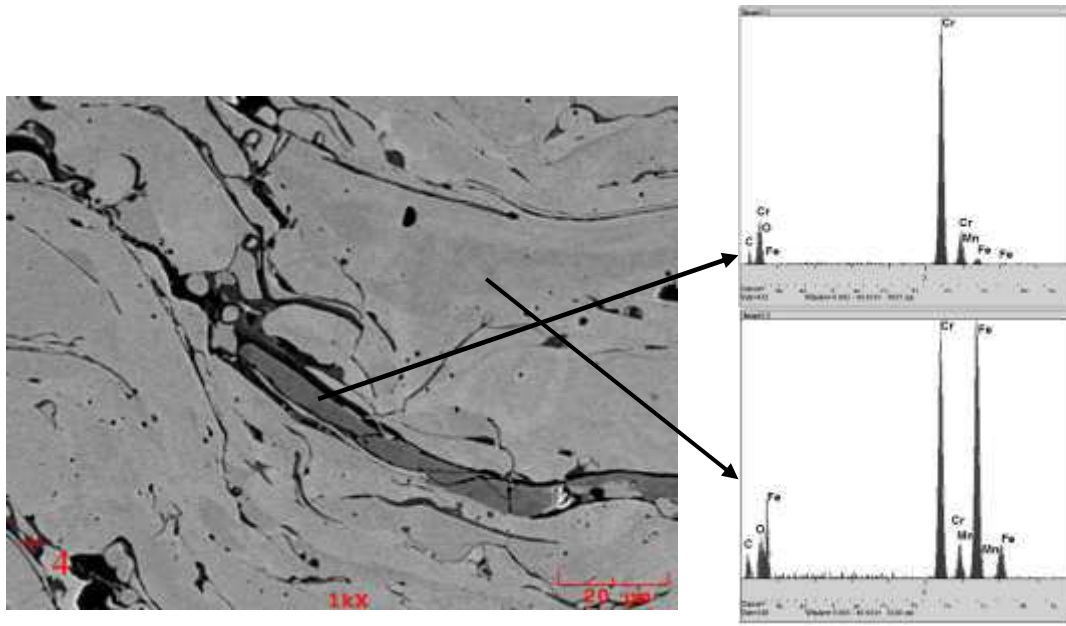
Şekil 7.28. 1 ve 2 nolu bölgeden alınan EDS analiz sonuçları

Şekil 7.28’da görüleceği gibi EDS analizi alınan 1 nolu bölge Fe piki zengin, 2 nolu bölge ise Cr piki daha zengindir. 1 nolu bölgeden alınan EDS analizi sonucu bu bölgenin $(Cr,Fe)_23C_6 + \gamma-Cr,Fe$ olduğunu tanımlamaktadır. Aynı şekilde 2 nolu bölgeden alınan EDS analiz sonucuna göre 2 nolu bölgenin $(Cr,Fe)_7C_3$ karbürü olduğu düşünülmektedir.



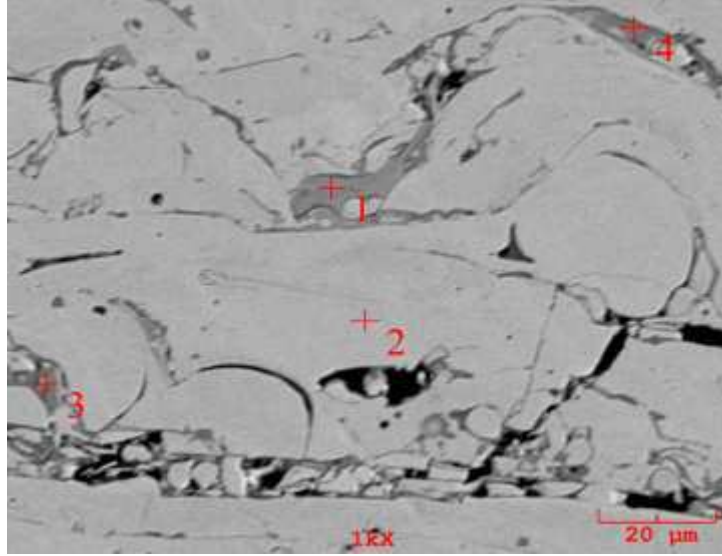
Şekil 7.29. 3 ve 4 nolu bölgeden alınan EDS analiz sonuçları

3 nolu bölge dikkatlice incelendiğinde 1 ve 2 nolu bölgeden daha koyu bir renge sahip olduğu görülmektedir. Söz konusu lameller arasında kalmış olup kaplama yapısı içerisinde farklı bir faz olduğu renk kontrast farkından anlaşılmaktadır. Genel olarak lameller arasında yapıdaki oksitler bu şekilde bulunmaktadır. Bu bölgeden alınan EDS analiz sonucuna bakıldığında Cr pikinin çok yüksek ve yapıda bulunan diğer elementleri ise çok düşük olduğu görülmektedir. EDS analiz sonucunda C pikinin bulunması mevcut yapının telin öz kısmında bulunan ve ergimeden kaplama yapısında bulunan Cr_7C_3 olduğunu tanımlamaktadır. EDS analizi yapılan diğer bölgeden alınan analiz sonucunda lamel arasındaki yapıdan farklı olarak Cr ve Fe pikinin yükseldiği ve Mn pikinin de C ve O ile birlikte bulunduğu görülmektedir. Bu sonuca bağlı olarak 4 nolu bölgenin Cr_2O_3 , MnO_2 ve Fe_2O_3 gibi oksitlerden olma ihtimali çok yüksektir.



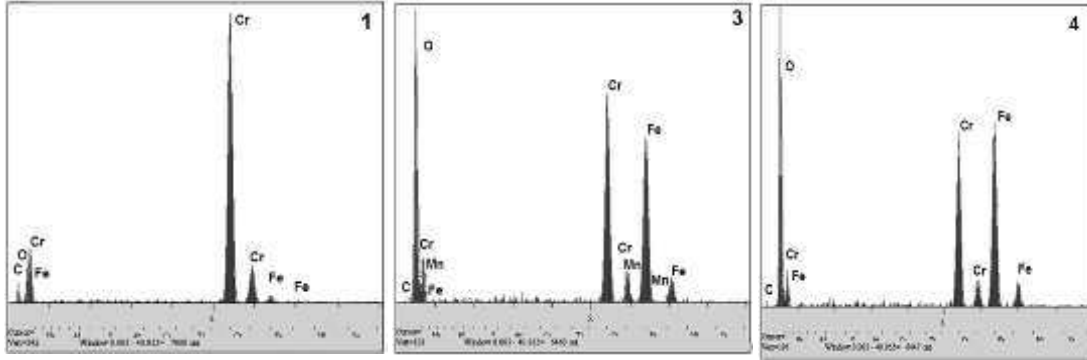
Şekil 7.30. V23 (300 A/28 V) kaplama numunesinin taramalı elektron mikroskop görüntüsü ve EDS analiz sonuçları

V23 numunesinde kaplama teli öz kısmında bulunan Cr_7C_3 partiküllerinin kaplama yapısı içerisinde lamelleri arasında veya lamel içine dağılmış bir şekilde bulunabilmektedir. Kaplama prosesi atmosferik ortamda gerçekleştirilmesi ve atomize gaz olarak basınçlı havanın kullanılması sebebiyle kaplama teli özü içerisinde bulunan Cr_7C_3 partiküllerinin oksitlenmesi ve öz içerisindeki grafitin de yanması söz konusudur. Kaplama parametrelerinin optimum olarak ayarlanmasındaki maksat kaplama tel ve öz kısımdaki Fe, Cr, Mn partiküllerinin C kaynağı olarak grafit ile kompleks karbürlerin oluşmasını ve kaplama yapısında bulunmasının sağlanmasıdır. Oksidasyonun yüksek olması C'nun yanmasına Cr ve Mn ile Fe'in de oksitlenmesine sebebiyet verecektir. Genel anlamda 200 A/28 V'da üretilecek kaplamaların sertliklerinin yüksek olmasının sebebi olarak, yapılan XRD ve EDS analiz sonuçlarında da görüleceği üzere kompleks karbürlerin oluşması ve ana fazın bu karbürleri taşıyabilecek toklukta olmasıdır. Bu şekilde yapıdaki grafitin ise karbürlerin oluşması için C kaynağı olması oksitlenme oranı ve süresinin optimize edilmesi anlamına gelmektedir. Şekil 7.30'da V23 nolu numuneye ait mikroyapıda iki lamel arasında bulunan Cr_7C_3 karbür yapısı görülmektedir.



Şekil 7.31. V33 (100 A/32 V) kaplama numunesinin taramalı elektron mikroskop görüntüsü ve EDS analiz sonuçları

Şekil 7.31’de V33 numunesinin taramalı elektron mikroskop (SEM) incelemesi ve çeşitli bölgelerden alınmış EDS analiz sonuçları verilmektedir. Voltaj değişimine bağlı olarak üretilmiş kaplama numunelerinde en düşük sertliğe V33 (80,10 HRA) numunesi sahiptir. V33 numunesi üzerinde yapılan taramalı elektron mikroskop (SEM) incelemesi kaplama ana fazındaki lameller arasında koyu renkli bölgelerin bulunduğu görülmektedir. Bu bölgeden alınan EDS analizi sonuçları Şekil 7.32’de verilmektedir. 1 nolu analizde Cr piklerinin şiddetinin yüksek olmasının yanında C ve oksitlenmeye bağlı olarak O pikleri mevcuttur. Taramalı elektron mikroskopu (SEM) görüntüsünde 1 nolu analiz bölgesinin kaplama ana faz arasında kalmış bir Cr_7C_3 olduğu anlaşılmaktadır. Kaplama fazını oluşturan elementlerin pikleri 2 nolu EDS analizinde görülmektedir. 3 ve 4 nolu analiz sonuçlarının yapıdaki koyu bölgeleri oluşturan oksitlerin olduğu yüksek O piklerinden anlaşılabilir.



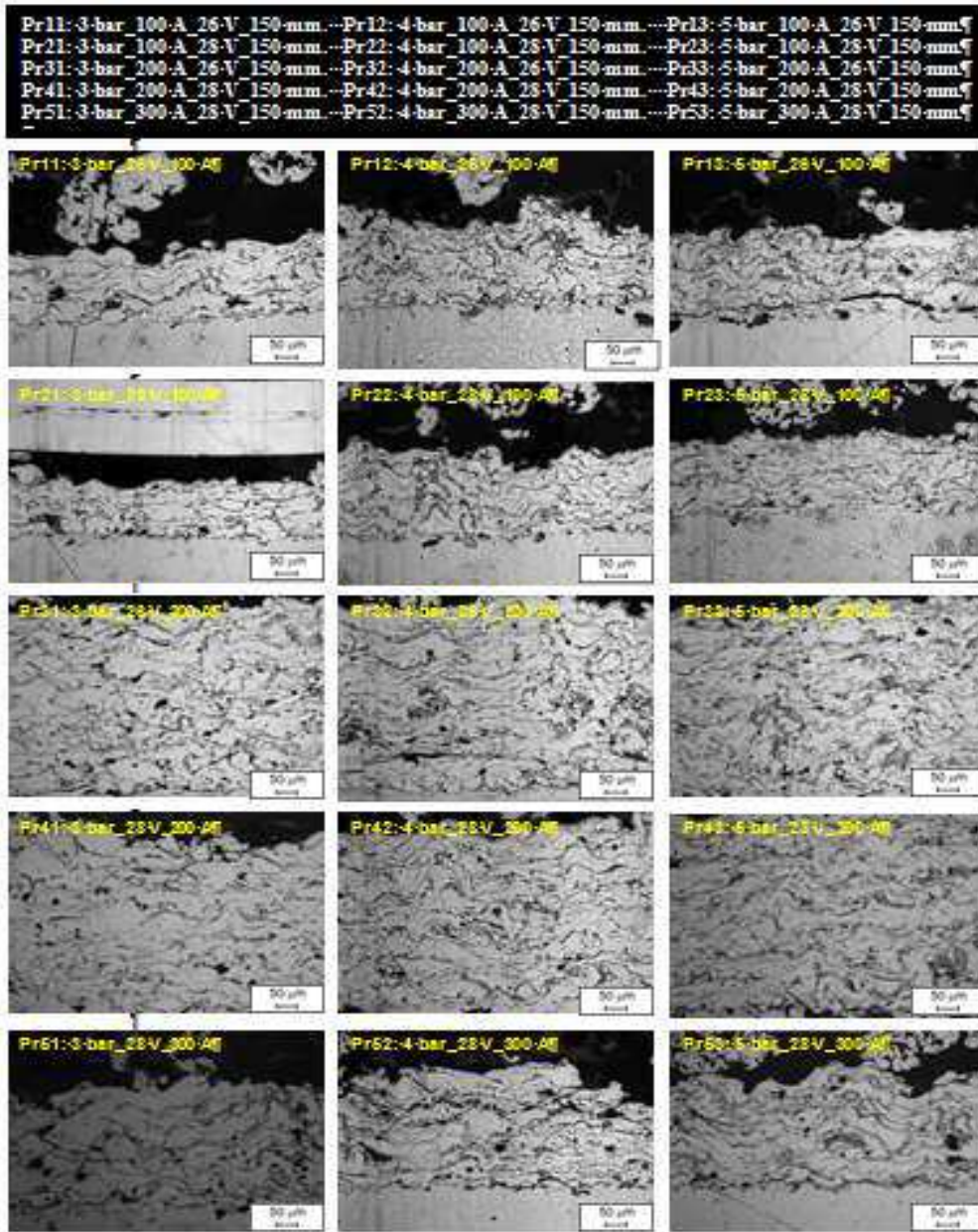
Şekil 7.32. 1, 3 ve 4 nolu bölgelerden alınmış EDS analiz sonuçları

Şekil 7.32’de görüleceği üzere voltaj değişimine bağlı olarak üretilen kaplamalar arasında en düşük kaplama sertliğine sahip olan V33 numunesinin taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüsünde bulunan koyu gri bölgelerden alınan EDS analiz sonuçlarında 1 nolu bölgede daha düşüktür. 3 ve 4 nolu bölgelerde O piklerinin yüksek olduğu görülmektedir. Bunun oksidasyona bağlı olarak karbonun yanması ile karbür miktarının azalmasının sebebi olarak düşünülmektedir. Tablo 7.2.’de belirtilen parametrelere göre olarak voltaj değişimine bağlı olarak üretilmiş numunelerden V33 nolu numunenin oksit miktarı % 21 olup diğer numunelere göre yüksek bir değerdir. EDS analiz sonuçları da kaplamadaki yüksek oksijen miktarını yüksek olan O pikleri desteklemektedir. Bu durum kaplama prosesi sırasında oluşan damlacıkların havada yol alırken ve altlık yüzeyine çarpmaları sırasında yüksek oranda oksitlendiği ve bu durumun kaplama yapısına yansıdığı anlaşılmaktadır. V33 nolu numune 300 A_32 V_4 bar_150 mm proses parametrelerinde üretilmiş olup voltaj değerinin 32 V değerinde olması teller arasında oluşan arkın ısısını arttırmakta ve oluşan damlacıklara giren ısı yük miktarı yükseltmektedir. Bu yüksek ısı girişi oksidasyonun artması için bir itici güç oluşturmaktadır.

7.5. Primer Gaz Basıncının Etkisi

Elektrik ark püskürtme kaplama prosesindeki parametrelerden biri olan primer gaz basıncı kaplama teli uçlarında eriyen damlacıklardan koparak oluşan partiküllerin hızlarını ve şekillerini belirleyen bir parametredir [49]. Primer gaz basınç

değerlerindeki değişim partiküllerin boyut ve altlığa doğru yol alma hızlarını da etkileyecektir. Atomize gaz olarak havanın kullanılması ve havanın içerisinde yaklaşık % 21 oranında oksijen bulunmasına ilave olarak prosesin atmosferik koşullarda gerçekleştirilmesi oluşan partiküllerin oksidasyon davranışını arttırmaktadır. Ayrıca partikül hızlarına bağlı olarak partikül içi devinasyon yoğunluğu değişecek olup oluşan oksitlerin partikül içerisine difüze olması veya partikül çevresinin bir kabuk gibi sarmasına sebebi olacaktır. Buna ilaveten gaz basıncındaki değişimler ergiyik partiküllerin altlık yüzeyine çarpma davranışlarını da etkileyebilmekte ve oksidasyonun seviyesini de etkilemektedir. Elektrik ark püskürtme yöntemi ile üretilmiş FeCrCMn esaslı özlü tel kaplamalarda primer gaz basınç değerinin değişimi, oluşan ergiyik ve yarı ergiyik damlacıkların oksidasyon davranışını etkileyeceği için kaplamaların aşınma davranışını da etkileyecektir. Gaz basınç değişiminin özlü kaplama telini oluşturan elementlere (Cr, C ve Mn) ve sonucunda kaplama yapısına etkisinin belirlenmesi için 26 V, 28 V ve 32 V voltaj ve 100 A, 200 A ve 300 A akım seviyelerinde 3 bar, 4 bar ve 5 bar gaz basıncı değerlerinde kaplamalar üretilmiştir. Bu şekilde üretilen kaplamaların optik mikroyapıları Şekil 7.33'de verilmektedir.



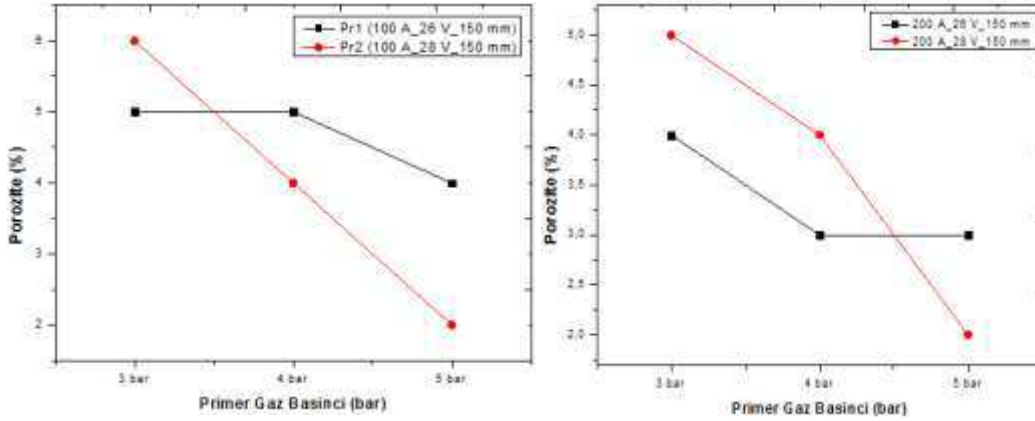
Şekil 7.33. 100 A, 200 A ve 300 A akım seviyelerinde 26 V, 28 V ve 32 V olan üç farklı voltaj değerinde üretilen kaplamaların optik mikroyapıları

Şekil 7.33’de görüleceği üzere gaz basıncının değişimi kaplama mikroyapısını etkilemektedir. Gaz basıncının yükselmesi ile lameller incelmektedir. Bu şekilde daha ince ve düzgün kaplama yapısı meydana gelmiştir. Özellikle bu durum 26 V ve 28 V seviyelerinde 200 A’de üretilen kaplamalarda daha açık görülebilmektedir. Şekil 7.33’de primer gaz basıncının değişimine bağlı olarak üretilen kaplamaların optik mikroskop yapılarında oksit ve porozitelerin bulunduğu ilave olarak kaplama yapılarında mikroçatlakların da oluştuğu görülmektedir. 200 A’ de üretilen

kaplamaların birikmelerinin homojen ve yoğun bir kaplama yapısı oluşturmaktadır. 100 A_26 V ve 100 A_28 V'da üretilen kaplamaların diğer parametrelerde üretilen kaplamalara göre daha az birikme verimine sahip olduğu Şekil 7.33'de görülebilmektedir. 26 V, 28 V ve 100 A, 200 A ve 300 A seviyelerinde 3 bar, 4 bar ve 5 bar gaz basıncı değerlerinde üretilen kaplamalar karakterize edilerek oksit ve porozite miktarları ile mikrosertlik ve kaplama makro sertliği Tablo 7.3'de verilmektedir.

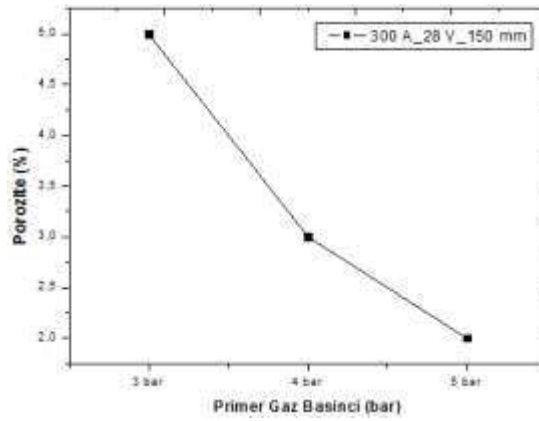
Tablo 7.3. Gaz basıncına bağlı olarak kaplamadaki oksit, porozite ve kaplama makro sertliği değerleri

NUMUNE	PROSES PARAMETRELERİ				POROZİTE (%)	OKSİT (%)	MİKROSERTLİK (HV _{0,2})	MAKRO SERTLİK (HRA)
	Akım (A)	Voltaj (V)	Gaz basıncı (bar)	Mesafe (mm)				
Pr 11	100	26	3	150	5	18	795	84,77
Pr 12	100	26	4	150	5	19	695	83,59
Pr 13	100	26	5	150	4	21	553	83,04
Pr 21	100	28	3	150	6	16	734	84,41
Pr 22	100	28	4	150	4	19	704	83,81
Pr 23	100	28	5	150	2	24	512	81,16
Pr 31	200	26	3	150	4	10	1260	94,76
Pr 32	200	26	4	150	3	11	1233	94,40
Pr 33	200	26	5	150	3	13	1011	93,89
Pr 41	200	28	3	150	5	9	1392	94,83
Pr 42	200	28	4	150	4	12	1092	93,95
Pr 43	200	28	5	150	2	13	1008	93,63
Pr 51	300	28	3	150	5	14	866	87,66
Pr 52	300	28	4	150	3	20	792	83,99
Pr 53	300	28	5	150	2	23	641	82,70



a)

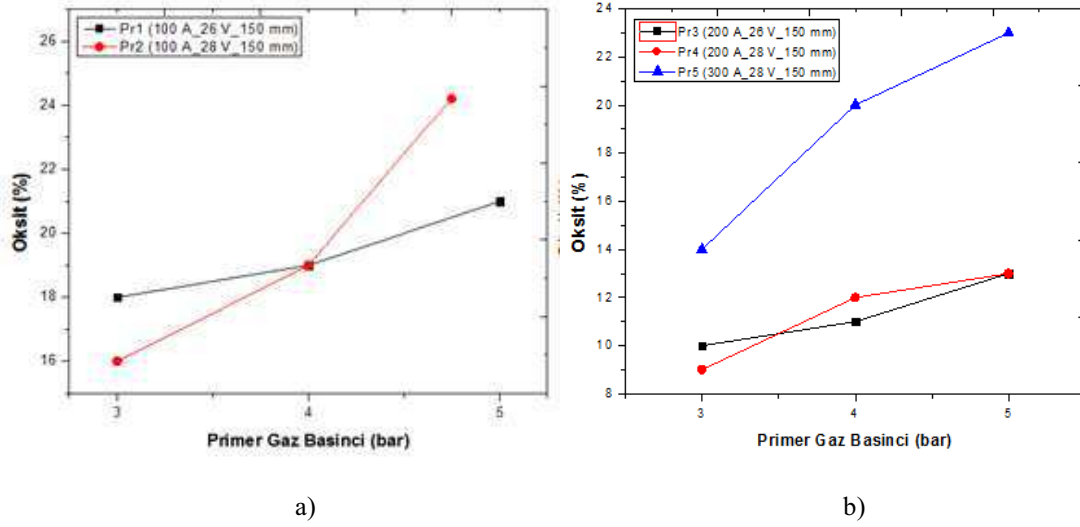
b)



c)

Şekil 7.34. Primer gaz basıncı değişimine bağlı olarak % porozite değişimi a) 100 A, 26 ve 28 V seviyelerinde üretilen kaplamalarda % porozite değişimi, b) 200 A, 26 V ve 28 V seviyelerinde üretilen kaplamaların % porozite değişimi, c) 300 A, 28 V seviyesinde üretilen kaplamalarda % porozite değişimi

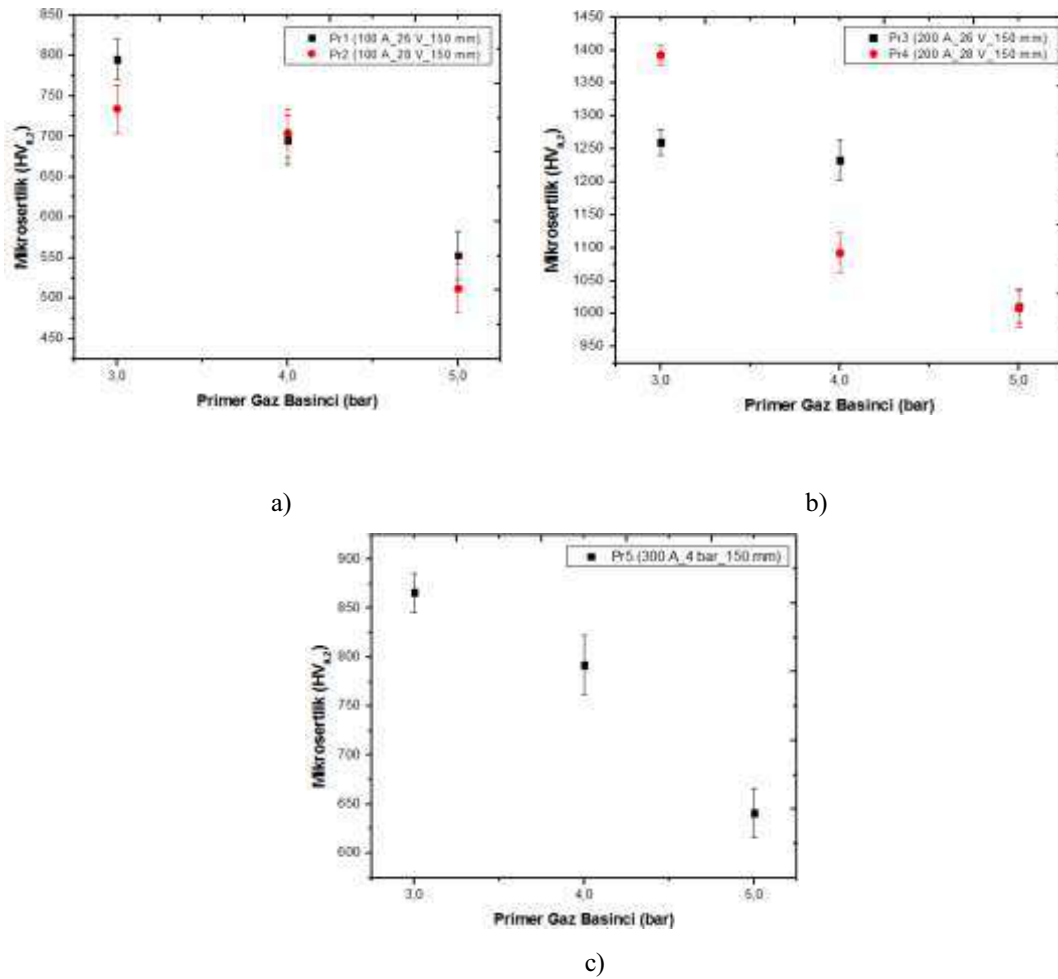
Şekil 7.34'de görüleceği üzere genel olarak elektrik ark püskürtme kaplama prosesinde primer gaz basıncının artması ile kaplamadaki % porozite miktarı düşmektedir. Gaz basıncının artması ile 200 A_28 V (Pr21, Pr22 ve Pr23)'da üretilen kaplamalardaki % porozite miktarındaki önemli ölçüde azalma gelmiştir.



Şekil 7.35. Primer gaz basıncı değişimine bağlı olarak % oksit değişimi a) 100 A, 26 ve 28 V seviyelerinde üretilen kaplamalarda % oksit değişimi, b) 200 A, 26 V/28 V ve 300 A, 28 V seviyelerinde üretilen kaplamaların % oksit değişimi

Şekil 7.35’de primer gaz basınç değişimine bağlı olarak üretilen kaplamalardaki % oksit değişimleri verilmektedir. Elektrik ark püskürtme kaplama prosesinde gaz basıncının artması, birim alandaki oksijen miktarını arttırmaktadır. Kaplama prosesinde gaz basıncının artması oksidasyonun artmasına ve kaplama yapısındaki oksit miktarının artmasına sebep olmaktadır. Şekil 7.35’de gaz basıncının artması ile kaplamalardaki % oksit oranındaki artış açıkça görülmektedir. Şekil 7.35 a’da 100 A_26 V’da üretilen kaplamalarda primer gaz basıncı 3 bardan 4 bara çıktığında kaplamadaki % oksit miktarı artmış olup, 4 bardan 5 bara yükseldiğinde kaplamadaki oksit miktarında az bir değişim olmuştur. 100 A_26 V parametre değerlerinde tellerin ergime sıcaklığı ve havadaki yol alma süresindeki değişime bağlı olarak gaz basıncının 4 bardan 5 bara yükselmesi, kaplamadaki oksit miktarında büyük bir değişime sebep olmamıştır. Bunun sebebi olarak parametre değerlerinin birbirine yakın kaplama özelliklerini vermesi şeklinde yorumlanmıştır. Kaplama teli ucunda ergiyip atomize olarak ayrılan partiküllerin hızları 3 barda 4 bara göre daha düşük olmaktadır. Bu sebeple oluşan partikülün hava da yol alırken oksijen ile temas etme süresi yüksek olmakta, bu uzun havada yol alma süresince partikül içerisinde meydana gelen sıvı yarı ergiyik devinasyonu sebebiyle oksitlerin partikül içerisine difüze olma olasılığı artabilmektedir. Kaplama prosesindeki primer gaz basıncı 3 bardan 4 bara yükseldiğinde hızların artması sebebiyle oluşan partiküllerin havada yol alma süreleri kısalmaktadır. Buna bağlı olarak ortamdaki oksijen ile temas etme

süresi kısalmaktadır. Ancak atomize gaz basıncının artması ile gaz içerisindeki oksijen yoğunluğu ters orantılı bir şekilde artmaktadır. Bu da partiküller ile partiküllerin yüzeye çarpması esnasında oksidasyonu arttırmaktadır. Farklı gaz basıncında üretilen kaplamaların tamamında gaz basıncının yükselmesi ile kaplamadaki % oksit oranı artmıştır. 100 A_28 V parametrelerinde üretilen kaplamaların en düşük mikrosertlik değerine sahip olduğu görülmektedir.

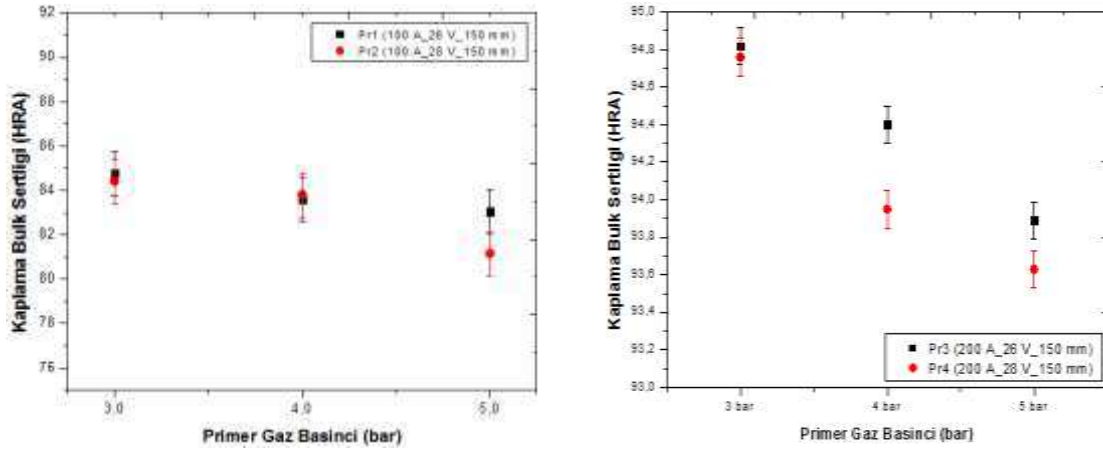


Şekil 7.36. Primer gaz basınç değişimine bağlı olarak üretilen kaplamaların mikrosertlik değerleri; a) Pr1 ve Pr2 kodlu numuneler, b) Pr3 ve Pr4 kodlu numuneler, c) Pr 5 kodlu numunelere

Bunun sebebinin voltajın artmasından oluşan arkı sıcaklığını artması ve tel ucunun aşırı ısınması sebebiyle daha büyük partiküllerin oluşmasıdır. Bu şekilde partiküllerin sıcaklıklarının artması oksidasyonu da arttırmaktadır. Yüksek sıcaklıktaki büyük partiküller yüzeye çarpmaları ile daha fazla saçılma göstermekte olup bu esnada saçılan partiküllerinde oksitlenmesi mümkün olmaktadır.

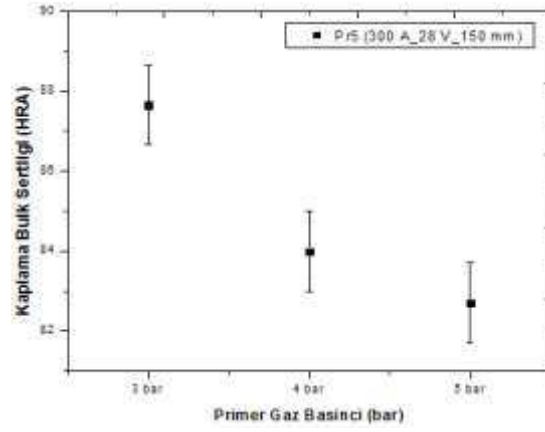
Primer gaz basıncı değişimine (3 bar, 4 bar ve 5 bar) bağlı olarak üretilmiş kaplama numuneleri üzerinde gerçekleştirilen mikrosertlik ölçüm sonuçları Şekil 7.36'da verilmektedir. Şekil 7.36'daki mikrosertlik sonuçlarına bakıldığında primer gaz basıncının artması ile mikrosertlik değerlerinin düştüğü görölmektedir. Primer gaz basıncının artması ile gaz içerisindeki oksijen yoğunluğunda artış olmasından dolayı kaplamalarda oksitlenme artmaktadır. Oksijen miktarındaki bu yükselme telin özünde bulunan ve karbür kaynağı olan karbonun yanmasına sebep olmaktadır. Bu durum kaplama yapısındaki karbürlerin oluşmaması veya oluşan karbürlerin tekrar oksitlenmesi anlamına gelmektedir. Amper ve voltajın artması ile mikrosertlik değerlerindeki ölçüm aralıklarının genişlediği Şekil 7.36 c'de görölmektedir. Bunun sebebi sıcaklığın ve birim alandaki ergimiş partikül miktarının artması ile kaplamadaki oksitli alan fraksiyonun artmasıdır. Voltajın artması ergime ısısı ile partikülün sıcaklığını arttırmaktadır. Partikül sıcaklığının artması oksidasyon oranını da arttırmaktadır. Amperin artması tel besleme oranını arttırmakta olup birim alanda oksitlenen partikül miktarının artması anlamına gelmektedir. En yüksek kaplama bulk sertliğine 200 A'de üretilen kaplamalar sahip olmaktadır. Kaplamada ölçülen % oksit değerleri de bu durumu yansıtmaktadır.

Şekil 7.37'de primer gaz basınç değişimine bağlı olarak üretilmiş kaplama numunelerinin kaplama makro sertlikleri verilmektedir. Şekil 7.37'de verilen sertlik değerlerine bakıldığında genel eğilimin gaz basıncının artması ile kaplama makro sertlik değerinin düşmesidir. Bunun sebebi olarak kaplama yapısında meydana gelmesi istenen karbürlü yapıları oluşturacak karbonun gaz basıncının artışı ile oksijen yoğunluğunun artmasına bağlı olarak yanmasıdır. Kaplama yapısında istenilen karbür yoğunluğu elde edilememektedir. Ancak 28 V_100 A (Pr21)'de üretilen kaplamalarda bunun tersi bir sertlik davranışına sahip olduğu görölmektedir. Bunun sebebinin voltaj değerinin artması ile partikül sıcaklığlarının artmasına bağlı olarak daha büyük partiküllerin tel ucundan kopması ve diğer parametrelerde üretilen partiküllerden daha az yüzey alanına sahip olmasıdır.



a)

b)



c)

Şekil 7.37. Primer gaz basınç değişimine bağlı olarak üretilen kaplamaların makro sertlik değerleri; a) Pr1 ve Pr2 kodlu numuneler, b) Pr3 ve Pr4 kodlu numuneler, c) Pr 5 kodlu numuneler

Bu durumun oksidasyonu düşürdüğü tahmin edilmektedir. Gaz basıncının artması ile bu partiküllerin havada aldıkları yol süresi azaldığından oksidasyon zamanı da azalmaktadır. Bu durum, oluşan karbür yapıların korunmasını sağlamakta, 28 V_100 A'da üretilen kaplama numunelerinde bahsedilen durumun meydana geldiği düşünülmektedir.

7.5.1. XRD analiz sonuçları

Tablo 6.3’de görülebileceği üzere 100 A, 200 A ve 300 A akım ile 26 V, 28 V ve 32 V voltaj seviyelerinde 3 bar, 4 bar ve 5 bar değerlerindeki primer gaz basıncının kaplama yapısı üzerine etkisinin incelenmesi amaçlı belirtilen parametrelerde kaplama numuneleri üretilmiştir. Üretilen bu kaplama numunelerinin XRD analiz sonuçları Şekil 7.38’de verilmektedir.

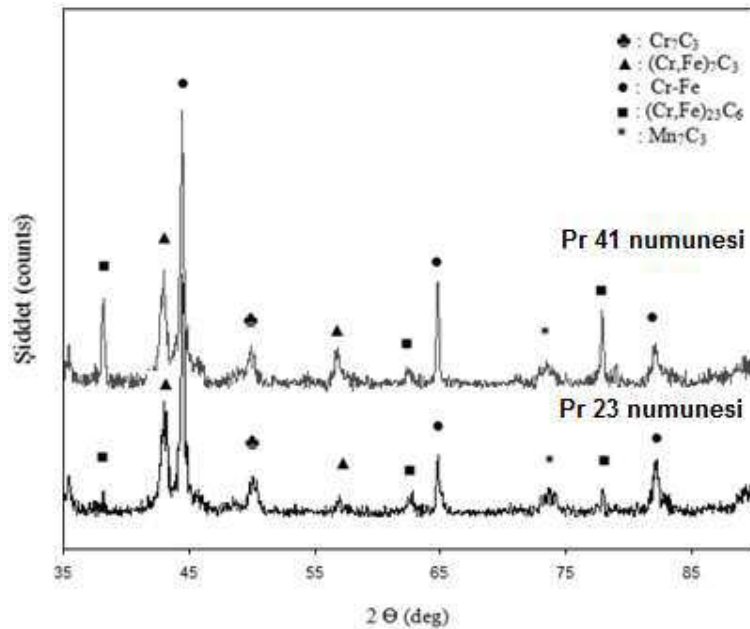


Şekil 7.38. Primer gaz basıncı değişimi ile üretilen kaplamaların XRD analiz sonuçları

Şekil 7.38’de verilen XRD sonuçları, kaplama yapısında (Cr, Fe – γ) katı çözültisi ile kompleks karbürler olan M₂₃C₆ [(Cr,Fe)₂₃C₆] ve M₇C₃ [(Cr,Fe)₇C₃, Cr₇C₃ ve Mn₇C₃] karbürleri ve oksitleri [(Fe,Cr)₃O₄ ve Fe₃O₄] bulunmaktadır. Özellikle 200 A/26 V, 200 A/28 V proses parametrelerinde üretilen kaplamalarda karbür piklerinin [(Cr_{15.58}Fe_{7.42}C₆, Cr₇C₃, (Cr,Fe)₇C₃ ve Mn₇C₃] şiddetinin diğer kaplamaların XRD

analizlerindeki piklere daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum aynı kaplamalardaki sertlik değerlerinin yüksek olma sebebini açıklamaktadır.

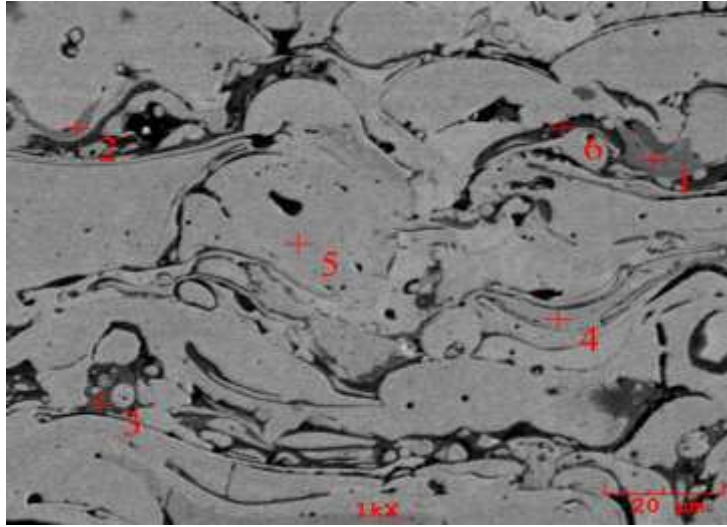
100 A, 200 A ve 300 A ile 26 V ve 28 V seviyelerinde 3 bar, 4 bar ve 5 bar primer gaz basıncında üretilen kaplamaların kaplama makro sertlik değerlerine bakıldığında 200 A amper değeri ile 26 V ve 28 V voltaj değerinde üretilen kaplamaların diğer parametrelerde üretilen kaplamalara göre daha yüksek kaplama makro sertliğine sahip olmaktadır. Yüksek sertlik değerlerinin anlaşılması amaçlı numunelerin XRD analizinden sonra taramalı elektron mikroskop (SEM) incelemesi ve EDS analizleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 7.39'da farklı akım ve voltaj seviyelerinde farklı gaz basıncı değerlerinde üretilen kaplamalar içerisinde en yüksek kaplama makro sertliğine sahip Pr41 numunesi ile en düşük kaplama makro sertliğine sahip Pr23 numunesinin XRD analizleri daha detaylı olarak verilmektedir. Bunun sebebi parametrelerin birbirine çok yakın olması sebebi ile ayırt edilmesinde güçlük yaşanmasından dolayıdır. Pr41 ve Pr23 numunelerinin taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve EDS analizleri de gerçekleştirilmiştir.



Şekil 7.39. Pr41 ve Pr 23 numunelerinin XRD analiz sonuçları

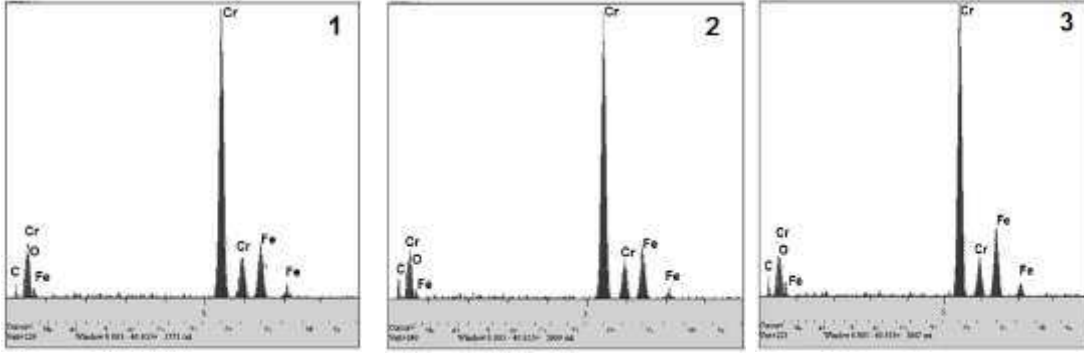
Şekil 7.39'da verilen XRD sonuçları, kaplama yapısında (Cr, Fe – γ) katı çözeltilisi ile kompleks karbürler olan $M_{23}C_6$ [(Cr,Fe) $_{23}C_6$] ve M_7C_3 [(Cr,Fe) $_7C_3$, Cr $_7C_3$ ve Mn $_7C_3$]

karbürleri ve oksitleri $[\text{Fe,Cr}]_3\text{O}_4$ ve Fe_3O_4] bulunmaktadır. Pr31 (200 A_26 V_150 mm_3 bar) numunesinde karbür piklerinin $[(\text{Cr,Fe})_7\text{C}_3, \text{Cr}_7\text{C}_3 (\text{Cr,Fe})_{23}\text{C}_6$ ve $\text{Mn}_7\text{C}_3,$) yükseldiği, Pr21 numunesinde (100 A_28 V_150 mm_3 bar) ise oksit piklerinin ($\text{Fe}_3\text{O}_4, (\text{Fe,Cr})_3\text{O}_4,$) yükseldiği görülmektedir. Kaplama yapısındaki karbürlerin yoğunluğu kaplama sertliğini arttırmaktadır. 200 A_26 V_3 – 4 – 5 bar (Pr31, Pr32 ve Pr33) ve 200 A_28 V_3 – 4 – 5 bar (Pr41, Pr42 ve Pr43) püskürtme parametrelerinde üretilen kaplamaların makro sertlikleri diğer üretilen kaplamalara göre yüksektir. Bu yönüyle XRD sonuçlarındaki karbür piklerinin artışı ile kaplama makro sertlik değerlerinin artışı birbirine uyumludur.



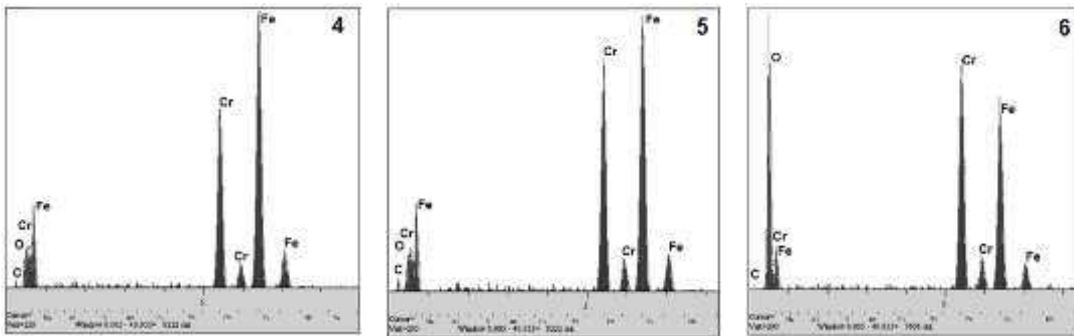
Şekil 7.40. Pr41 nolu numunenin taramalı elektron mikroskop görüntüsü ve 6 bölgeden alınan EDS analizleri

Şekil 7.40'da farklı gaz basıncı değerlerinde üretilmiş kaplama numunelerinin en yüksek sertliğe sahip olan Pr41 numunesinin taramalı elektron mikroskop (SEM) görüntüsü ve bu görüntü üzerinde 6 bölgeden EDS analizi alınmıştır. Şekil 7.41'de lameller arasında koyu gri renkte olan 1, 2 ve 3 nolu bölgeden EDS analiz sonuçları verilmiştir.



Şekil 7.41. 1, 2 ve 3 nolu bölgelerin EDS analiz sonuçları

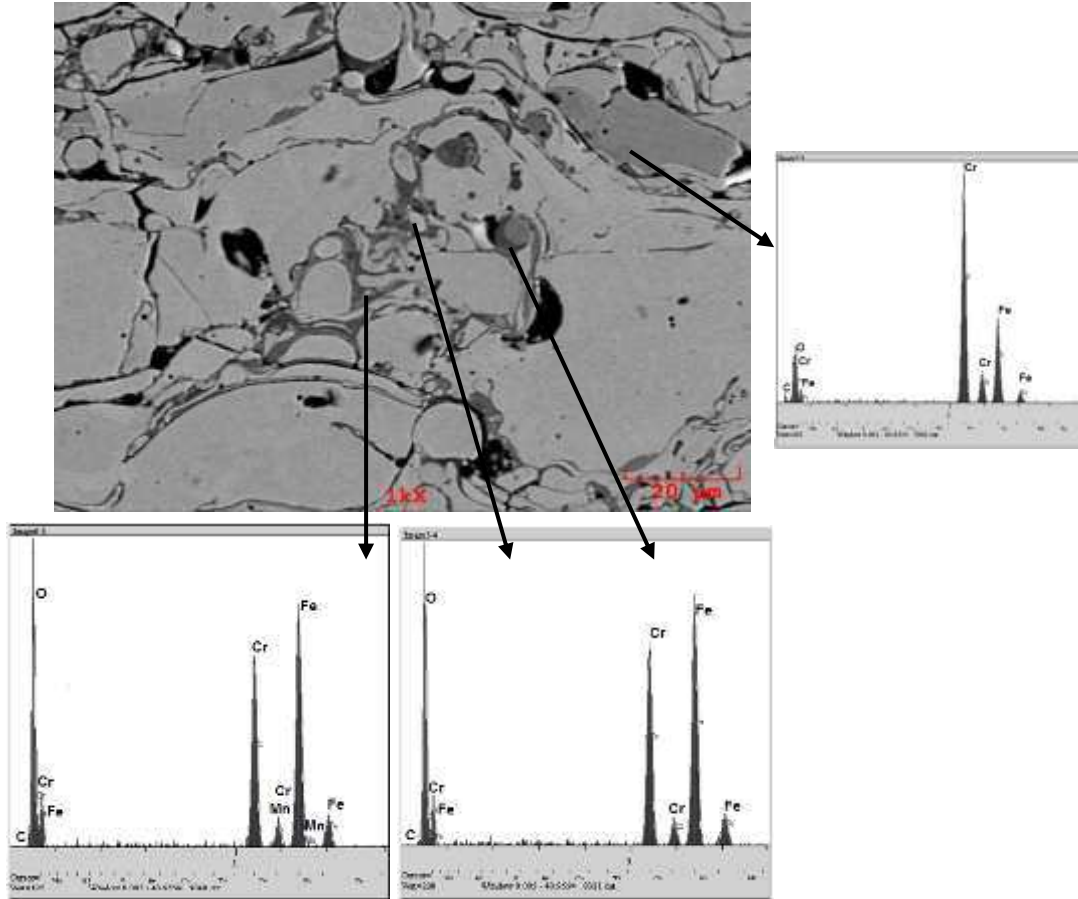
Şekil 7.41’de görülen Pr41 numunesinin SEM görüntüsünde kaplama ana fazına göre daha koyu renge sahip bölgelerden alınan EDS analiz sonuçlarında Cr piklerinin çok yüksek ve kaplama fazındaki diğer elementlerinin daha düşük olduğu görülmektedir. Bu sonuçlar XRD analiz sonuçları ile de karşılaştırıldığında bu bölgelerin Cr_7C_3 olduğunu tanımlamaktadır.



Şekil 7.42. 4, 5 ve 6 nolu bölgelerin EDS analiz sonuçları

Şekil 7.42’de Pr41 numunesinin SEM görüntüsündeki 4, 5 ve 6 nolu bölgeden alınan EDS analiz sonuçları verilmektedir. Pr41 kaplama SEM görüntüsündeki kaplama ana fazından alınan EDS analiz sonuçlarına bakıldığında 4 ve 5 nolu EDS analiz sonucu $(Cr,Fe)_{23}C_6 + \gamma-Cr,Fe$ olduğu anlaşılmaktadır. 6 nolu bölgenin ise diğer EDS alınan fazlardan daha koyu bir renge sahip olduğu Şekil 7.40’daki Pr41 numunesinin SEM görüntüsünde görülebilmektedir. 6 nolu bölgenin EDS analiz sonucuna bakıldığında O pikinin yükseldiği görülmektedir. Bu bölgenin oksit bölgesi olduğu EDS analizi sonucunda tanımlanabilmektedir.

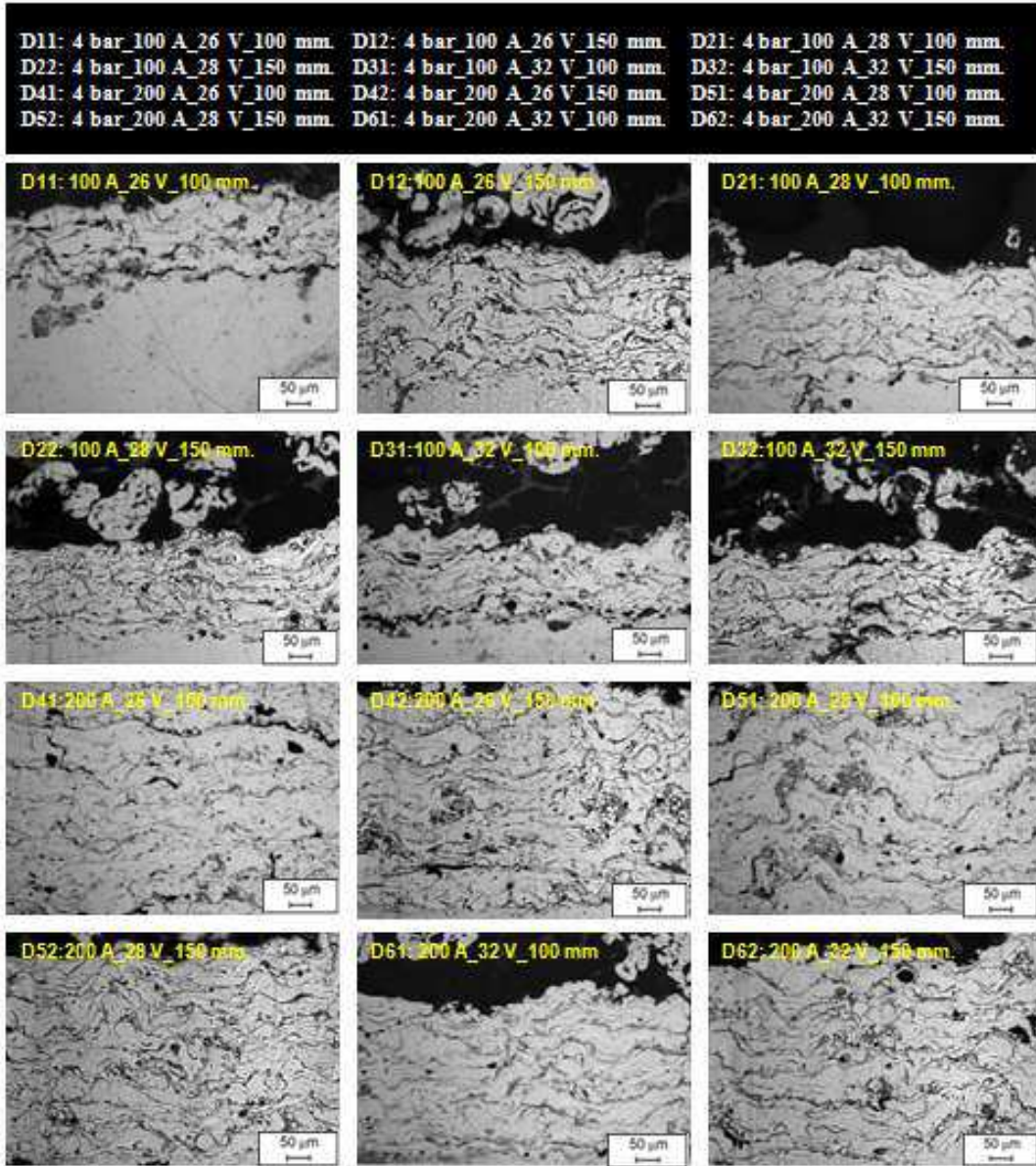
Şekil 7.43’de Pr23 nolu numunenin taramalı elektron mikroskop (SEM) görüntüsü ile aynı görüntü üzerinden 4 nokta üzerinden alınmış EDS analiz sonuçları verilmektedir. Pr23 nolu numunenin kaplama makro sertliği, primer gaz basıncı değiştirilerek üretilmiş kaplamalar içerisinde en düşük olanıdır (81,16 HRA). Bunun sebebi kaplamadaki oksit oranının diğer parametrede üretilenlerden daha yüksek olmasıdır (% 24). Kaplama yapısında oluşan karbür yapılarının oksitlenmesi ve kaplama esnasında karbür yapıcı olan karbonun yanması sebebiyle kaplamanın sertlik değerinin düşmesi olarak yorumlanmıştır. Şekil 7.43’deki koyu renkli fraksiyonunun kaplama yapısı içerisinde yoğunlaştığı anlaşılmakta ve bu bölgelerden alınan EDS analizlerinde ise O piklerinin yükseldiği görülmektedir.



Şekil 7.43. Pr23 nolu numunenin taramalı elektron mikroskop görüntüsü ve 4 bölgeden alınan EDS analizleri

7.6. Püskürtme Mesafenin Etkisi

Elektrik ark püskürtme kaplama prosesindeki kaplama yapısını etkileyen bir diğer proses parametrelerinden biri de püskürtme mesafedir. Püskürtme mesafesi tel uçlarında ergiyerek atomize gaz basıncı yardımıyla ayrılan partiküllerin havada kalma süresi ve altlık yüzeyine çarpma, saçılma davranışını belirlemektedir. Mesafedeki değişim partiküllerin altlığa doğru yol alma mesafelerindeki atmosfer ile etkileşimi ve partikül hızlarını etkilemektedir. Buna bağlı olarak partiküllerin havada kalma süresi ve partikülün oksidasyon davranışları etkilenebilmektedir. Mesafenin azalması ile partiküller altlık yüzeyine atmosfer ile etkileşim süresi kısılacak ve hızlarını kaybetmeden altlığa ulaşabilecektir. Bu şekilde yüzeye çarpan yarı ergimiş partiküllerin çarpma anında deforme olacak ve üst üste birikerek iyi bir kaplama yapısı meydana getirilebilecektir. Mesafenin çok kısa olması geri saçılmaya da yola açabilmektedir. Bu çalışmada FeCrCMn esaslı özlü kaplamalarda kaplama mesafesi değişiminin kaplama özelliklerine etkisini belirlemek amaçlı 26 V, 28 V voltaj ve 100 A, 200 A akım seviyelerinde 100 mm. ve 150 mm mesafe ölçülerinde kaplamalar üretilmiştir. Söz konusu proses parametrelerinde üretilen kaplamaların optik mikroyapıları Şekil 7.44'de verilmektedir.



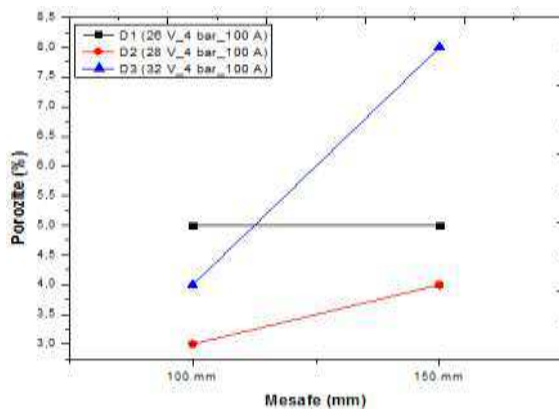
Şekil 7.44. 100 A, 200 A akım seviyelerinde, 26 V, 28 V ve 32 V voltaj değerlerinde 100 mm ve 150 mm. kaplama mesafelerinde üretilen kaplamaların optik mikroyapıları

Şekil 7.44'de görüldüğü gibi farklı akım ve voltaj değerlerinde kaplama mesafesinin değiştirilmesi kaplamaların mikroyapılarını etkilemektedir. 26 V, 28 V ve 32 V voltaj değerlerinde 100 A'de üretilen kaplamaların birikmeleri 200 A'de üretilenlerden daha düşük olduğu Şekil 7.44'de görülebilmektedir. Aynı kaplama parametrelerinde 150 mm kaplama mesafesinde üretilen kaplamaları 100 mm'de üretilen kaplamalardan daha homojen bir kaplama yapısına sahiptir. D11, D12, D21 ve D22 kaplama optik mikroyapılarına bakıldığında D11 ve D21'de daha D21 ve D22'ye göre daha düşük bir birikmeye sahip olduğu görülmektedir. Bu durumun

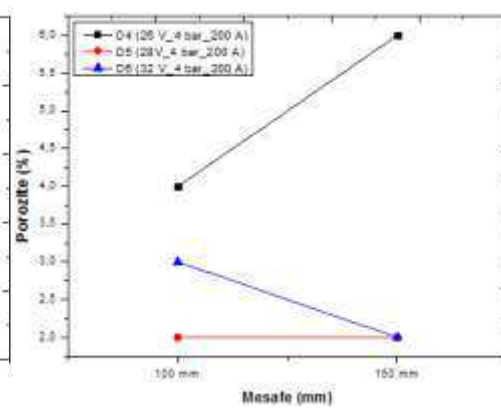
kaplama tel uçlarından ergiyerek ayrılan damlacıkların (droplet) havada yarı ergiyik duruma geçmeleri ve yüzeye çarpıp geri saçılmalarına bağlı olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. 200 A’de daha fazla damlacığın altlığa doğru hareket etmesine bağlı olarak diğer kaplama yapılarından daha yüksek birikmeye sahip olduğu görülebilmektedir. 100 A ve 200 A akım seviyelerinde 26 V, 28 V ve 32 V voltajlarında 100 mm ve 150 mm kaplama mesafelerinde üretilen kaplamalar karakterize edilerek oksit ve porozite miktarları ile mikrosertlik ve kaplama makro sertliği Tablo 7.4’de verilmektedir.

Tablo 7.4. 100 mm ve 150 mm. kaplama mesafesine bağlı olarak üretilen kaplamalardaki oksit, porozite, kaplama mikrosertlik ve kaplama makro sertlik değerleri

NUMUNE	PROSES PARAMETRELERİ				POROZİTE (%)	OKSİT (%)	MİKROSERTLİK (HV _{0,2})	MAKRO SERTLİK (HRA)
	Akım (A)	Voltaj (V)	Gaz basıncı (bar)	Mesafe (mm)				
D11	100	26	4	100	5	18	872	87,70
D12	100	26	4	150	5	20	784	83,59
D21	100	28	4	100	3	21	745	83,81
D22	100	28	4	150	4	19	743	83,22
D31	100	32	4	100	4	18	889	86,76
D32	100	32	4	150	8	24	452	80,18
D41	200	26	4	100	4	12	1233	94,74
D42	200	26	4	150	6	13	1021	93,89
D51	200	28	4	100	2	10	1405	94,82
D52	200	28	4	150	2	12	1092	93,95
D61	200	32	4	100	3	13	1033	93,40
D62	200	32	4	150	2	14	1015	91,91



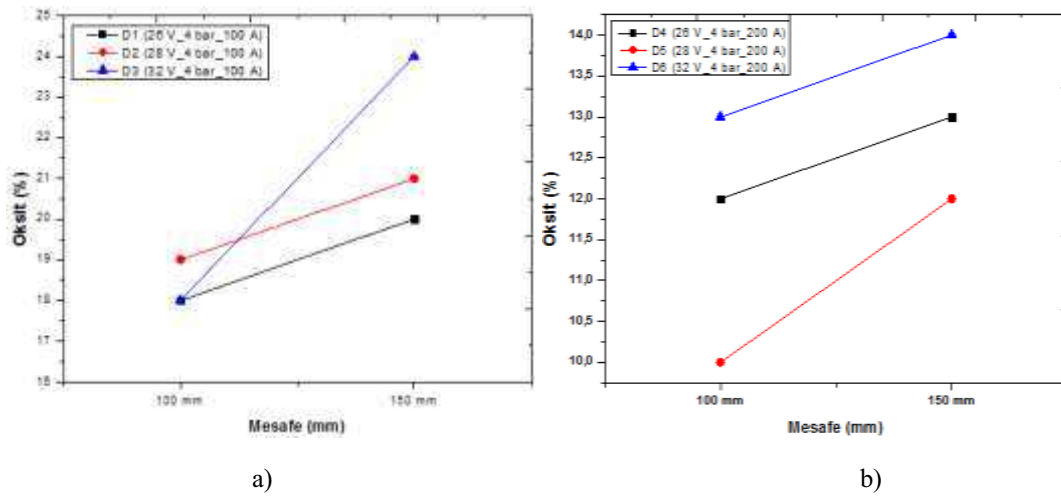
a)



b)

Şekil 7.45. Kaplama mesafesinin değişimine bağlı olarak kaplamalardaki % porozite değişimi a) D1, D2 ve D3, b) D4, D5 ve D6

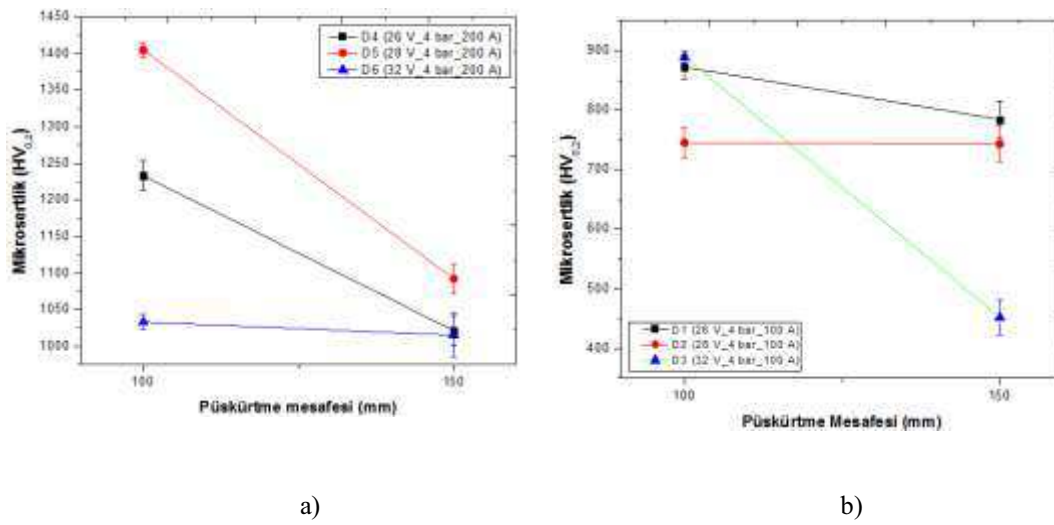
Şekil 7.45.'de 100 A ve 200 A akım seviyelerinde 26 V, 28 V ve 32 V voltaj değerlerinde iki farklı 100 mm ve 150 mm kaplama mesafelerinde üretilen kaplamalardaki % porozite değerleri verilmektedir. Şekil 7.44 a)'daki D2 ve D3 nolu kaplamalardaki % porozite değerleri kaplama mesafesinin artması ile artmıştır. D1 numunesinde % porozite değerinde herhangi bir değişim olmadığı görülmektedir. Şekil 8.34. b'de D4 numunesinde % porozite değeri artmış, D5 numunesinde ise % porozite değerinde herhangi bir değişim olmamıştır. D6 numunesinde ise % porozite miktarında azalma olduğu Şekil 7.45 b'de görülmektedir.



Şekil 7.46. Kaplama mesafesinin değişimine bağlı olarak kaplamalardaki % oksit değişimi a) D1, D2 ve D3, b) D4, D5 ve D6

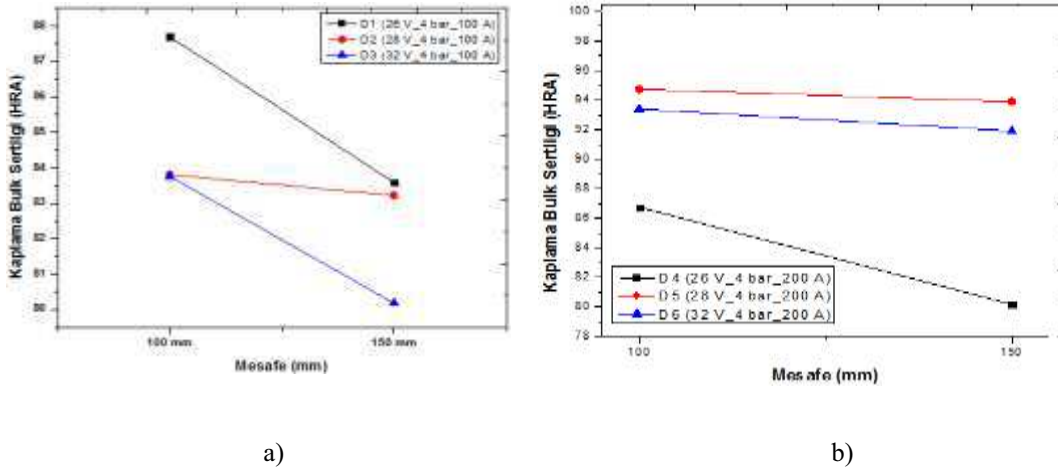
Şekil 7.46'da 100 A ve 200 A akım seviyelerinde 26 V, 28 V ve 32 V voltaj değerlerinde iki farklı 100 mm ve 150 mm kaplama mesafelerinde üretilen kaplamalardaki % oksit değerleri verilmektedir. Şekil 7.46'da görüleceği gibi kaplamalardaki oksit miktarı kaplama mesafesinin artması ile artmaktadır. Özellikle 100 A'de üretilen kaplamaların (%) oksit değerleri 200 A'de üretilen kaplamaların (%) oksit değerlerinden yüksek olmaktadır. Elektrik ark püskürtme kaplama prosesinde kaplama mesafesi oluşan damlacıkların alacakları yolu belirlemektedir. Kaplama mesafesinin artması, oluşan damlacıkların alacakları mesafenin artması anlamına geldiğinden damlacığın atmosfer ile etkileşim zamanını arttırmaktadır. Havadaki oksijen ile etkileşim süresinin artması kaplamalardaki oksit miktarını etkileyecektir. Bu durum Şekil 7.46'da görülebilmektedir. 32 V_100 A ve 200 A kaplama parametrelerinde üretilen kaplamaların oksit miktarında 26 V ve 28 V voltaj

parametrelerinde üretilen kaplamalardan daha yüksek oksit miktarına bağlıdır. Kaplama prosesinde voltaj değerinin artması tel ucunda oluşan ark sıcaklığını arttırmakta ve daha iri, daha sıcak damlacıkların oluşmasına sebep olmaktadır. Düşük voltaj değerlerinde ise daha düşük sıcaklıkta olan damlacıklar meydana gelmektedir. Yüksek partikül sıcaklığı havadaki oksidasyonun artmasına sebep olmakta ve bu şekilde kaplamadaki oksit miktarı artmaktadır. Yüksek sıcaklığa sahip damlacıkların havadaki oksijen ile temas süresinin artması ile kaplamadaki oksit miktarının artması olduğu Şekil 7.46'da görülebilmektedir.



Şekil 7.47. Kaplama mesafesinin değişimine bağlı olarak kaplamalardaki mikrosertlik değişimi a) D1, D2 ve D3, b) D4, D5 ve D6

Şekil 7.47.'de 100 A ve 200 A akım seviyelerinde 26 V, 28 V ve 32 V voltaj değerlerinde iki farklı 100 mm ve 150 mm kaplama mesafelerinde üretilen kaplamalardaki mikrosertlik (HV_{0.2}) değişim grafikleri verilmektedir. 100 mm ve 150 mm kaplama mesafelerinde üretilen kaplamalardan D3 numunesi haricinde diğer kaplamaların mikrosertlik (HV_{0.2}) değerlerinde azalma görülmektedir. Kaplama mesafesinin artması ile kaplamalardaki oksit miktarı artmaktadır. Kaplamalardaki oksit miktarının artması ve karbür yanması (oksitlenmesi) sonucunda kaplamalardaki mikrosertlik değerlerinde bir azalma olduğu Şekil 7.47'de görülebilmektedir.

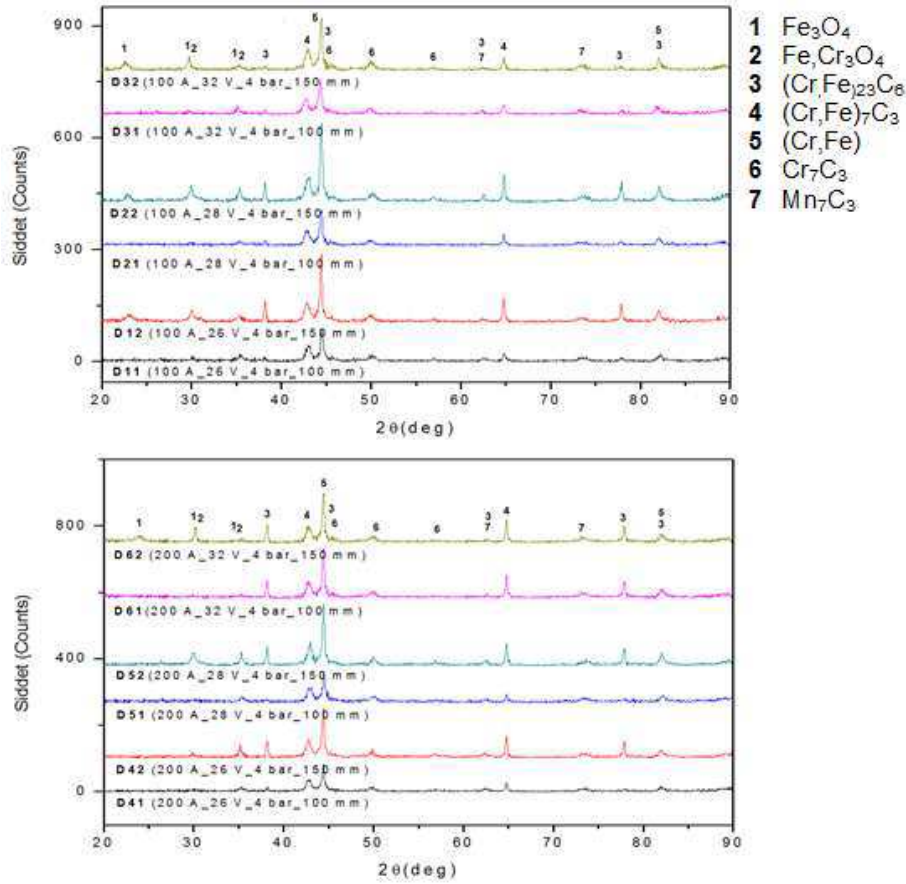


Şekil 7.48. Kaplama mesafesinin değişimine bağlı olarak kaplamalardaki makro sertlik (HRA) değişimi a) D1, D2 ve D3, b) D4, D5 ve D6

Şekil 7.48.'de 100 A ve 200 A akım seviyelerinde 26 V, 28 V ve 32 V voltaj değerlerinde 100 mm ve 150 mm olarak iki farklı kaplama mesafelerinde üretilen kaplamalardaki kaplama makro sertliği (HRA) değişim grafikleri verilmektedir. Kaplama mesafesinin artması ile kaplamaların makro sertliklerinde azalma meydana gelmiştir. 32 V, 100 A değerlerinde üretilen D3 numunesinin sertliği diğer kaplamalara göre en düşük olmaktadır. Genel olarak 100 A'de üretilen kaplamaların 200 A'de üretilen kaplamalardan daha düşük kaplama makro sertliğine sahiptir. Voltajın artması ve kaplama mesafesinin artması kaplamadaki % oksit miktarını arttırmakta ve kaplama yapısında oluşan karbürlerin oksitlenmesine sebep olmaktadır. Bunun yanında kaplama ana fazının da oksitlenmesi kaplamanın tokluğunu düşürmekte ve karbürlerin yapıda tutunmasını negatif yönde etkileyebilmektedir. Kaplama mesafesinin artması kaplama makro sertliğini düşürmektedir (Şekil 7.48).

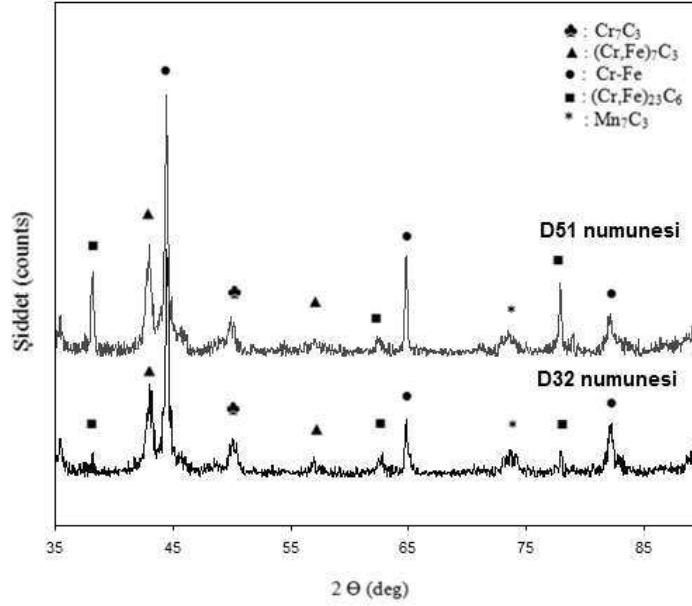
7.6.1. XRD analiz sonuçları

Tablo 7.4'de görüldüğü gibi 100 A ve 200 A akım seviyelerinde 26 V, 28 V ve 32 V voltaj değerlerinde 100 mm ve 150 mm olarak kaplama mesafesinin değiştirilmesi ile kaplamalar üretilmiştir. Tablo 7.4'de belirtilen parametrelerde 100 mm ve 150 mm olarak üretilen kaplamaların XRD analiz sonuçları Şekil 7.49'da verilmektedir.



Şekil 7.49. 100 A ve 200 A akım seviyelerinde 26 V, 28 V ve 32 V voltaj değerlerinde kaplama mesafesinin değişimine bağlı olarak üretilen kaplamaların XRD sonuçları

Şekil 7.49’da verilen XRD sonuçlarına bakıldığında kaplama telinin öz kısmını oluşturan elementlerin (Cr ve Mn) karbürlerinin ve oksitlerinin bulunduğu görülmektedir. Kaplama ana fazı ise $[(Cr,Fe)_{23}C_6 + \gamma - Cr,Fe]$ katı eriyiğinden oluşmaktadır. Kaplama bu hali ile sert karbür ve oksit fazlarının ana fazda bir arada bulunduğu kompozit bir yapıya sahiptir. Kaplama yapısında bulunan karbürlerin XRD analiz sonucunda sahip oldukları pikler incelendiğinde özellikle 200 A’de üretilen kaplamalarda diğerlerine göre yüksek olduğu görülmektedir. Bu şekilde 200 A’de üretilen kaplamaların sertliklerinin yüksek olmasının sebebinin bu sebepten olduğu düşünülmektedir.

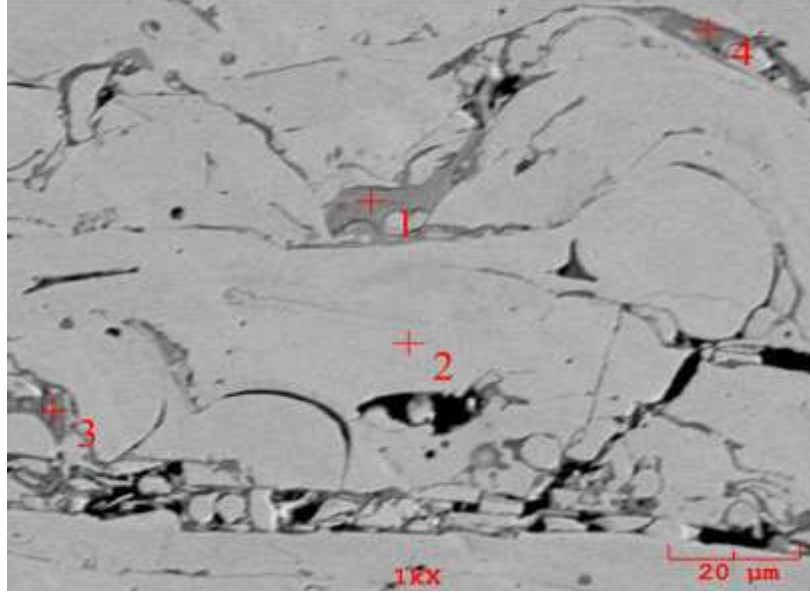


Şekil 7.50. D32 ve D51 numunelerinin XRD analiz sonuçları

Şekil 7.50’de verilen XRD sonuçları, kaplama yapısında (Cr, Fe – γ) katı çözeltilisi ile kompleks karbürler olan $M_{23}C_6$ [(Cr,Fe) $_{23}C_6$] ve M_7C_3 [(Cr,Fe) $_7C_3$, Cr_7C_3 ve Mn_7C_3] karbürleri ve oksitleri [(Fe,Cr) $_3O_4$ ve Fe_3O_4] bulunmaktadır. Pr51 numunesinde (200 A_28 V_3 bar_100 mm) karbür piklerinin [(Cr,Fe) $_7C_3$, Cr_7C_3 (Cr,Fe) $_{23}C_6$ ve Mn_7C_3] yükseldiği, Pr32 numunesinde (100 A_32 V_4 bar_150 mm) ise oksit piklerinin (Fe_3O_4 ve (Fe,Cr) $_3O_4$) yükseldiği görülmektedir. Kapsama yapısındaki karbürlerin yoğunluğu kaplama sertliğini arttıracaktır. Püskürtme mesafesinin değişimi ile Tablo 7.4’deki parametrelere göre üretilen kaplamalarda 200 A akım parametresinde üretilen kaplamaların makro sertliklerinin diğer üretilen kaplamalara göre daha yüksektir (D41, D42, D51, D52, D61 ve D62) . Bu yönüyle XRD sonuçlarındaki karbür piklerinin artışı ile kaplama makro sertlik değerlerinin artış birbirine uyumludur.

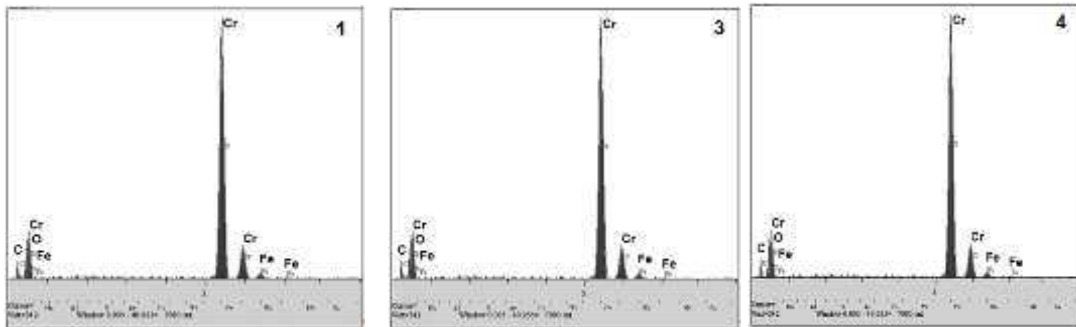
Şekil 7.51’de 100 A ve 200 A akım seviyelerinde 26 V, 28 V ve 32 V voltaj değerlerinde 100 mm ve 150 mm olarak kaplama mesafesinin değiştirilmesi ile üretilen kaplamalardan en yüksek kaplama makro sertliğine sahip D51 kodlu numunenin taramalı elektron mikroskop (SEM) görüntüsü ve Şekil 7.52 ve Şekil 7.53’de 4 bölgeden alınmış EDS analiz sonuçları verilmektedir. Şekil 7.50’de verilen taramalı elektron mikroskop ve Şekil 8.51 ve Şekil 8.52’deki EDS analiz sonuçlarına

bakıldığında 2 nolu bölgenin kaplamanın ana fazı olan $(Fe,Cr)_{23}C_6 + Cr,Fe - \gamma$ olduğu anlaşılmaktadır.



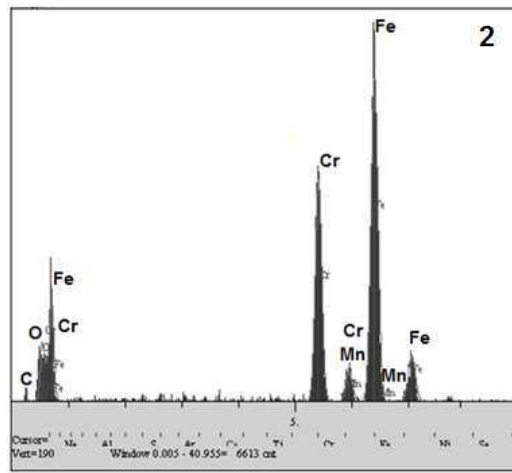
Şekil 7.51. D51 nolu kaplamanın taramalı elektron mikroskop görüntüsü

Şekil 7.51’de Tablo 7.4’de verilen parametrelere göre mesafe değişimine bağlı olarak üretilen kaplamalardan en yüksek kaplama makro sertliğine sahip D51 (200 A_28 V_4 bar_100 mm) numunesinin taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüsü verilmektedir. D51 numunesinin SEM görüntüsünde akım, voltaj ve primer gaz basıncı değiştirilerek üretilmiş kaplama yapılarında bulunan matrise göre koyu renkli yapılar bulunmaktadır. Şekil 7.52’de 1, 3 ve 4 nolu bölgelerden alınan EDS analiz sonuçları verilmektedir.



Şekil 7.52. 1, 3 ve 4 nolu bölgelerin EDS analiz sonuçları

Şekil 7.51'deki D51 numunesinin SEM görüntüsündeki lameller arasındaki yapıların Şekil 7.52'deki EDS analiz sonuçlarının Cr piki yönünden zengin olduğu diğer elementlerin (Fe, O ve C) daha düşük bir pik şiddetine sahip olduğu görülmektedir. Bu sebeple lameller arasında ana fazdan daha koyu olan bu yapıların Cr_7C_3 olduğu EDS analiz sonuçlarından yorumlanmaktadır. Bu tür yapıların D51 numunesinde yoğun olarak bulunduğu yapılan SEM incelemesinde görülmektedir. Cr_7C_3 karbürün yapı içerisinde $(Cr,Fe)_7C_3$ yapılar ile birlikte bulunması ile kaplama yapısının sertliğinin yüksek olmasının sebebini vermektedir.

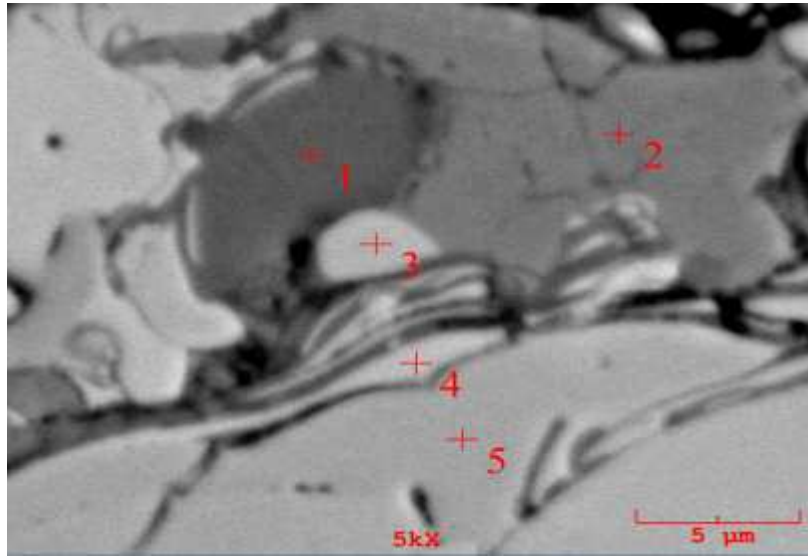


Şekil 7.53. 2 nolu bölgelerin EDS analiz sonuçları

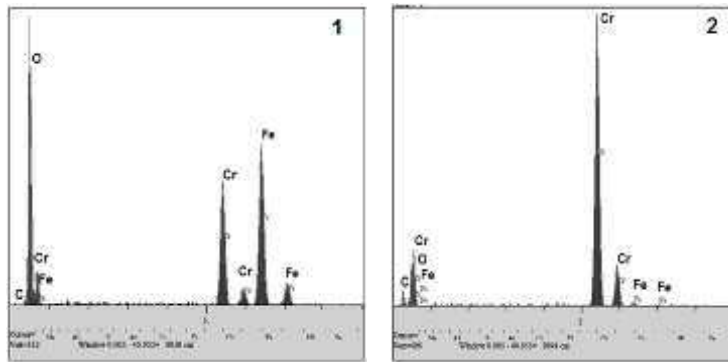
Şekil 7.53'de D51 numunesinin SEM görüntü üzerinde ana kaplama fazını oluşturan 2 nolu bölgeden alınan EDS analiz sonucu verilmektedir. 2 nolu bölgede alınan EDS analiz sonucu Fe yönünden zengin olması $(Cr,Fe)_{23}C_6 + Cr,Fe - \gamma$ yapısını tanımlamaktadır. Mn pikinin EDS analiz sonucunda bulunması ise Mn_7C_3 karbürünü tanımlamaktadır. Mn, yapıdaki Cr gibi davranarak söz konusu karbür yapısını oluşturmaktadır.

Ana fazın içine dağılmış şekilde (özellikle tane sınırlarına) Cr_7C_3 bulunduğu 1, 3 ve 4 nolu EDS analiz sonuçlarındaki Cr ve C piklerinin yoğunluğundan yorumlanabilmektedir. Yine aynı şekilde krom karbürlerin (Cr_7C_3) faz içine yayıldığı ve kaplama ana fazı içerisinde homojen ve düzgün bir dağılım göstererek uyumlu bir kompozit yapı oluştuğu anlaşılabilir. Sert karbür partiküllerin ana faz içerisindeki homojen dağılımı sebebiyle D51 kodlu kaplamanın kaplama makro

sertlik değeri yüksektir. Birçok kompleks karbür D51 numunesi içerisinde bulunmaktadır. Kaplama prosesi sırasında oluşan karbürlerin yapıda bulunması ve oksitlenmeden kalması kaplamanın sertliğini arttırmaktadır. Şekil 7.54’de D51 numunesinin SEM incelemesi ve sonrasında 5 bölgeden alınan EDS analiz sonuçları kaplama prosesinde oluşan bu kompleks karbürleri tanımlanmasında yardımcı bir unsur olduğu düşünülmektedir.



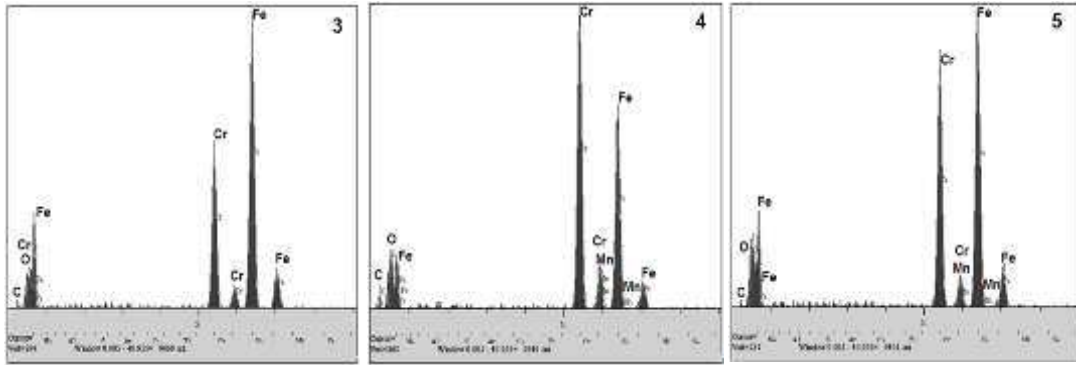
Şekil 7.54. D51 nolu kaplamanın taramalı elektron mikroskop görüntüsü



Şekil 7.55. 1 ve 2 nolu bölgeden alınan EDS analiz sonuçları

Şekil 7.55’de SEM mikroyapısındaki 1 ve 2 nolu bölgeden alınan EDS analiz sonuçları görülmektedir. Şekil 7.54’deki D51 numunesinin SEM görüntüsünde 1 nolu bölgenin oksit bölgesi olduğu EDS analizi tanımlamaktadır. Bu bölgenin renginin de daha koyu olması oksit olduğunu da desteklemektedir. 1 nolu bölgenin yanındaki gri renkli olan 2 nolu bölgeden alınan EDS analizi Cr yönünden oldukça

zengindir. Bu sebeple 2 nolu bölgeden alınan EDS analiz sonucu 2 nolu bölgenin Cr_7C_3 karbürünü tanımladığı düşünülmektedir. Şekil 7.56'de 3, 4 ve 5 nolu bölgenin EDS analizi sonuçları verilmektedir. Şekil 7.54'de 1 ve 2 nolu bölgeler arasında kalan daha açık renkli alan 3 nolu bölgenin EDS analizi sonucuna bakıldığında yapının Fe'ce zengin, Cr'ca fakir olduğu görülmektedir. Bu EDS sonucu 3 nolu bölgenin $[(\text{Cr,Fe})_{23}\text{C}_6 + \gamma\text{-Cr,Fe}]$ yapısı olabileceğini belirtmektedir.



Şekil 7.56. 3, 4 ve 5 nolu bölgelerin EDS analiz sonuçları

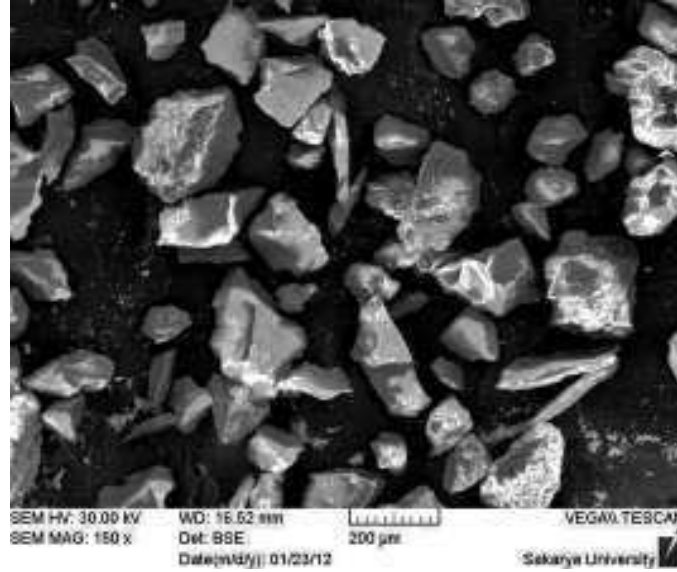
Yine aynı şekilde 5 nolu bölgeden alınan EDS analiz sonucu 3 nolu bölgeden alınan EDS analiz sonucu ile benzerlik göstermektedir. Sadece 5 nolu bölgedeki Cr piki, 3 nolu bölgeye göre biraz daha yüksektir. Mn piki 4 ve 5 nolu bölgedeki EDS analiz sonucunda görülmektedir. 5 nolu bölge $[(\text{Cr,Fe})_{23}\text{C}_6 + \gamma\text{-Cr,Fe}]$ yapısını tanımlayabilmektedir. Bu bölgede kaplama prosesi sırasında oluşan $(\text{Cr,Fe})_{23}\text{C}_6$ kompleks karbürünün ötektik (Cr,Fe) katı eriyi ile sarılmaktadır. Mn pikinin bulunması manganın karbür ve/veya oksit şeklinde yapıda bulunduğunu ifade etmektedir. Mn, Cr gibi davrandığı için karbür yaparak kaplama yapısında bulunabilmektedir. 4 nolu bölgeden alınan EDS analizi ise Cr Fe'e göre daha zengindir. Bu da 4 nolu bölgenin kaplamaya sertliğini veren M_7C_3 karbürlerinden biri olan $(\text{Cr,Fe})_7\text{C}_3$ karbürü olarak yorumlanmaktadır.

7.7. Abrazif Aşınma Testi Sonuçları

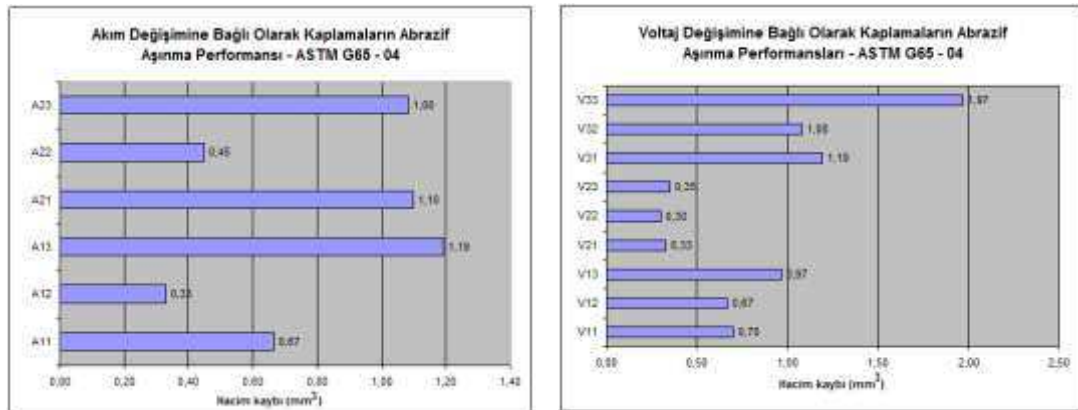
Bu çalışmada kullanılan FeCrCMn esaslı özlü tel kaplamalar abrazif aşınmalı koşullarda çalışan iş parçalarında abrazif aşınma dayanımı sağlamak amacıyla metalik kaplamalara alternatif olarak uygulanmaktadır. Elektrik ark püskürtme proseslerinde proses parametrelerinin FeCrCMn esaslı özlü tel kaplamaların abrazif aşınma performansına etkisinin belirlenmesi amaçlı abrazif aşınma deneyleri ASTM G65 – 04 “Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus” standardına göre bu çalışma için özel olarak tasarlanıp imal edilmiş tribometer abrazif aşınma test cihazında ASTM G65 – 04 şartlarında gerçekleştirilmiştir. Amper, voltaj, gaz basıncı ve püskürtme mesafenin değişimine bağlı olarak üretilen kaplama numunelerinden 50 x 10 mm boyutlarında abrazif aşınma test numuneleri hazırlanmıştır. Kaplama kalınlıklarının kaplama parametrelerine göre değişkenlik göstermesi sebebiyle test şartları ASTM G65 – 04 standardında belirtilen test prosedürlerinden Prosedür C olarak seçilmiştir ve test süresi 30 sn. olacak şekilde ayarlanmıştır (Tablo 7.5). Kaplamaların teorik yoğunlukları hacim kaybı hesabında kullanılmış olup kaplamaların teorik yoğunluklarından bu çalışmada tespit edilen % porozite değerleri düşülmüştür. Abrazif aşınma testi için AFS 50/70 boyut ölçülerinde silika kumu kullanılmış olup kum haznesinden disk ve numune arasına doğru kum akışı 300 gr/dak. olacak şekilde ayarlanmıştır. Şekil 7.56’da abrazif aşınma testinde kullanılan silika kumun taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüsü verilmiştir. Şekil 7.57’de akım değişimine ve voltaj değişimine bağlı olarak üretilen kaplamalarda abrazif aşınma testi sonucu meydana gelen aşınma hacim kaybı verilmektedir. 26 V ve 28 V seviyelerinde 100 A, 200 A ve 300 A proses parametrelerinde (bütün kaplamalarda gaz basıncı: 4 bar, püskürtme mesafesi: 150 mm.) üretilen kaplamalarda her iki voltaj seviyelerinde 200 A’de üretilen kaplamaların (A12 ve A22) aşınma hacimlerinin daha az olduğu Şekil 7.57 a’da görülmektedir. 26 V ve 28 V olan her iki voltaj seviyesinde 100 A ve 300 A akım değerlerinde üretilen kaplamaların abrazif aşınma hacimlerinin yüksektir. Özellikle 26 V_300 A parametre değerlerinde üretilen A13 kaplamanın en yüksek aşınma hacim kaybına sahiptir.

Tablo 7.5. ASTM G65-04 standardında belirtilen test prosedürleri

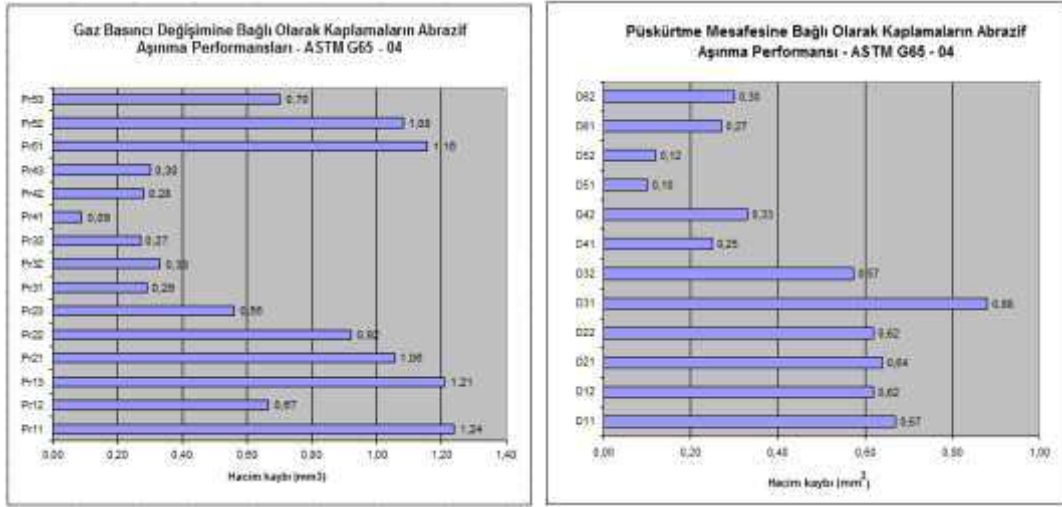
Belirlenmiş Prosedür	Numuneye Uygulanacak Yük, ^B N (lb)	Disk Devir Sayısı (devir/dak)	Çizgisel Abrazyon	
			M	(ft)
A	130 (30)	6000	4309	(14 138)
B	130 (30)	2000	1436	(4 711)
C	130 (30)	100	71.8	(236)
D	45 (10.1)	6000	4309	(14 138)
E	130 (30)	1000	718	(2 360)



Şekil 7.57. ASTM G65-04 abrazyon testinde kullanılan kumun taramalı elektron mikroskop görüntüsü



Şekil 7.58. a) Akım değişimine bağlı olarak üretilen kaplamaların abrazyon aşınma hacim kaybı grafiği, b) Voltaj değişimine bağlı olarak üretilen kaplamaların abrazyon aşınma hacim kaybı grafiği



a)

b)

Şekil 7.59. Gaz basıncına bağlı olarak üretilmiş kaplamaların üretilen kaplamaların abrazif aşınma hacim kaybı grafiği, b) Püskürtme mesafesine bağlı olarak üretilmiş kaplamaların üretilen kaplamaların abrazif aşınma hacim kaybı grafiği

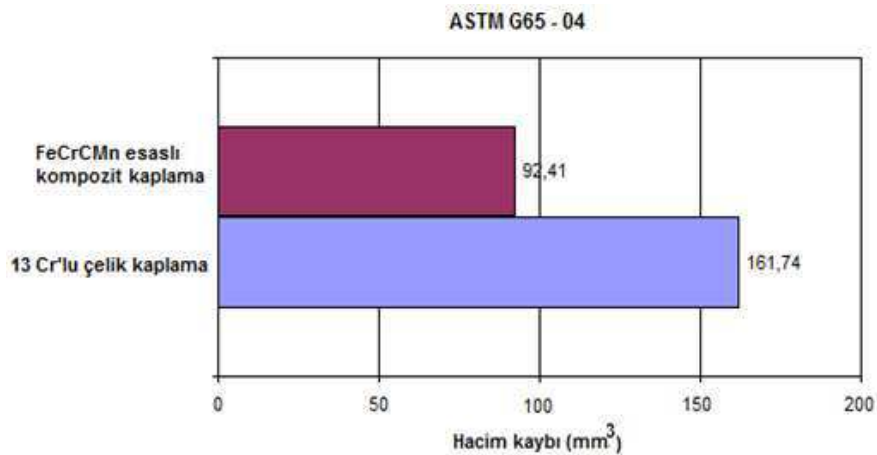
Şekil 7.58 b’de 100 A, 200 A ve 300 A akım seviyelerinde 26 V, 28 V ve 32 V olarak 3 farklı voltaj değerinde üretilen kaplamaların aşınma hacim kaybı değerleri verilmektedir. Şekil 7.58 b’de görüldüğü üzere 200 A’de üretilen (200 A_26 V, 200 A_28 V ve 200 A_32 V) kaplamaların 100 A ve 300 A akım seviyelerinde üretilen kaplamalardan daha düşük aşınma hacim kaybına sahip olduğu görülmektedir. Şekil 7.58 a)’da 26 V ve 28 V voltaj ile 100 A, 200 A ve 300 akım seviyelerinde 3 bar, 4 bar ve 5 bar primer gaz basıncında üretilmiş kaplamaların abrazif aşınma hacim kaybı grafiği verilmektedir. Şekil 7.59 a’da görüldüğü üzere en düşük abrazif aşınma hacmi değerine sahip Pr41 numunesidir. 3 bar, 4 bar ve 5 bar primer gaz basıncında üretilen kaplamaların aşınma hacmi grafiğine bakıldığında özellikle 200 A_26 V ve 200 A_28 V’da üretilen kaplamaların (Pr31, Pr32, Pr33, Pr41, Pr42 ve Pr43) diğer parametrelerde üretilen kaplamalardan daha düşük aşınma hacmine sahip olduğu görülmektedir. 100 A_26 V_150 mm_3 bar proses parametrelerinde üretilen Pr11 ve 100 A_26 V_150 mm_5 bar proses parametrelerinde üretilmiş Pr13 kaplama ile 300 A_28 V_150 mm_3 bar proses parametrelerinde üretilen Pr51 ve 300 A_28 V_150 mm_4 bar proses parametrelerinde üretilen Pr52 nolu kaplama en yüksek abrazif aşınma hacim kaybına sahiptir. Şekil 7.59 b’de 100 A, 200 A akım seviyelerinde, 26 V, 28 V ve 32 V voltaj değerlerinde 100 mm ve 150 mm olan iki farklı püskürtme mesafesinde üretilmiş kaplamaların abrazif aşınma hacim miktarı grafiği

verilmektedir. Genel itibari ile 200 A'de üretilmiş kaplamaların 100 A'de üretilen kaplamalardan daha düşük abrazyon aşınma hacim kaybı gösterdiği Şekil 7.58 ve Şekil 7.59'da görülebilmektedir.

Bu çalışmada kullanılan elektrik ark püskürtme yöntemi ile üretilen FeCrCMn esaslı özlü tel kaplamalar, şiddetli abrazyon aşınmalı ortamlarda aynı yöntem ile üretilmiş olan 13 Cr'lu çelik kaplamalara alternatif bir kaplama olarak endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Özlü tel kaplamalar metalik kaplamaların sağlayamadığı yüksek abrazyon aşınma dayanım özelliğini sağlayabilmektedir. Özellikle kaplama yapısında sert partikül ihtiva eden kompozit karakterli özlü tel kaplamalar metalik kaplamalara nazaran daha yüksek aşınma dayanımı sağlamaktadır. Bu amaçla FeCrCMn esaslı özlü tel kaplama ile 13 Cr'lu çelik kaplamanın abrazyon aşınma performansının karşılaştırılması amaçlı ASTM G65 – 04 standardı Prosedür A'ye göre aşınma testine tabi tutulmuş olup kaplama parametreleri ile kaplama özellikleri Tablo 7.6'da, abrazyon aşınma testi sonrası aşınma hacim kaybı grafiği de Şekil 7.60'da verilmektedir.

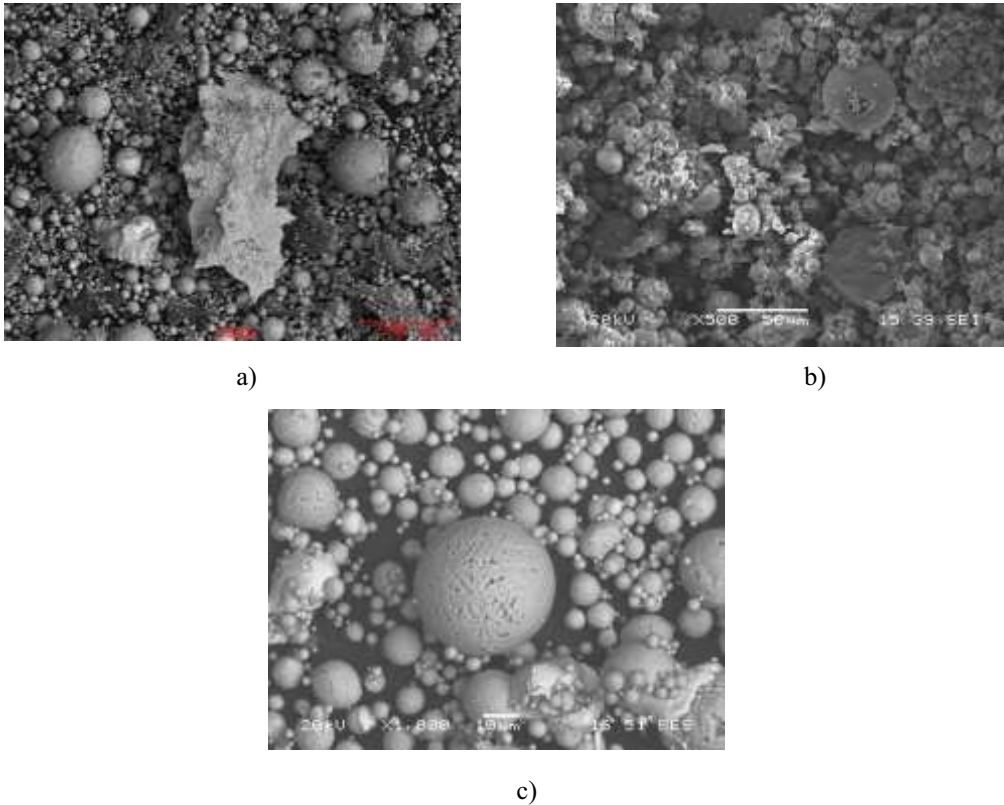
Tablo 7.6. 13 Cr'lu çelik ve FeCrCMn esaslı kompozit kaplama parametreleri ve kaplama özellikleri

Kaplama Parametreleri	Akım (A)	Voltaj (V)	Gaz basıncı (bar)	Mesafesi (mm)	Porozite (%)	Oksit (%)	Mikrosertlik (HV _{0,2})
FeCrCMn	200	28	3	100	2,0	10,0	1229
13 Cr'lu	250	29	4	150	2,4	18,5	575

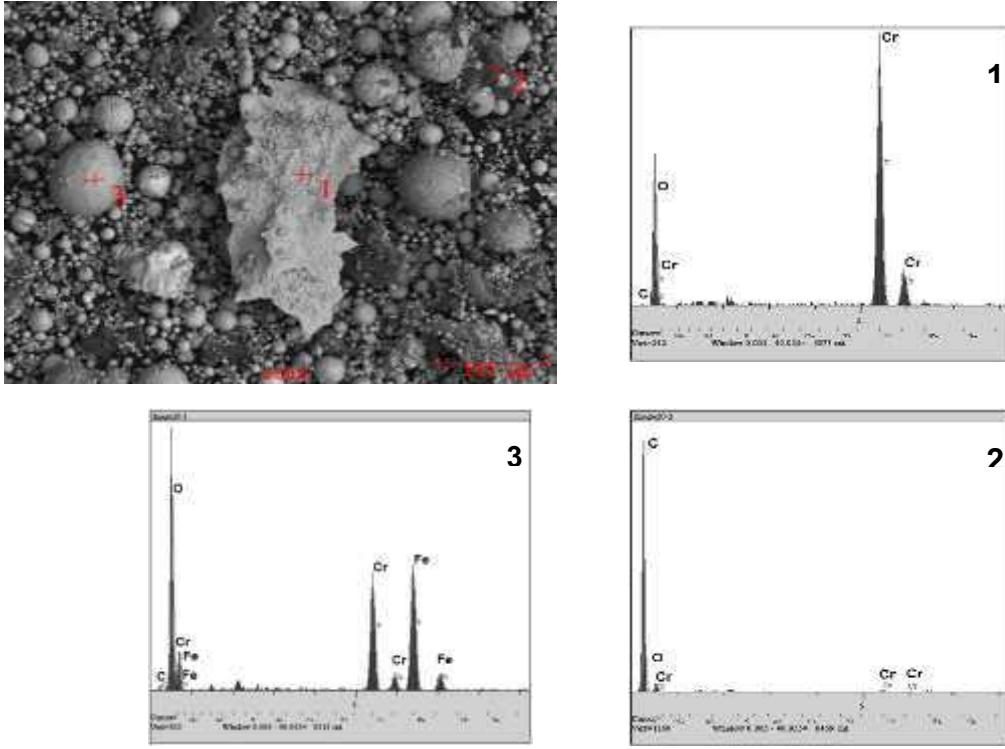


Şekil 7.60. 13 Cr'lu çelik kaplama ile FeCrCMn esaslı özlü tel kaplamanın ASTM G65 – 04 standardı Prosedür A'ye göre abrazyon aşınma hacim kaybı grafiği

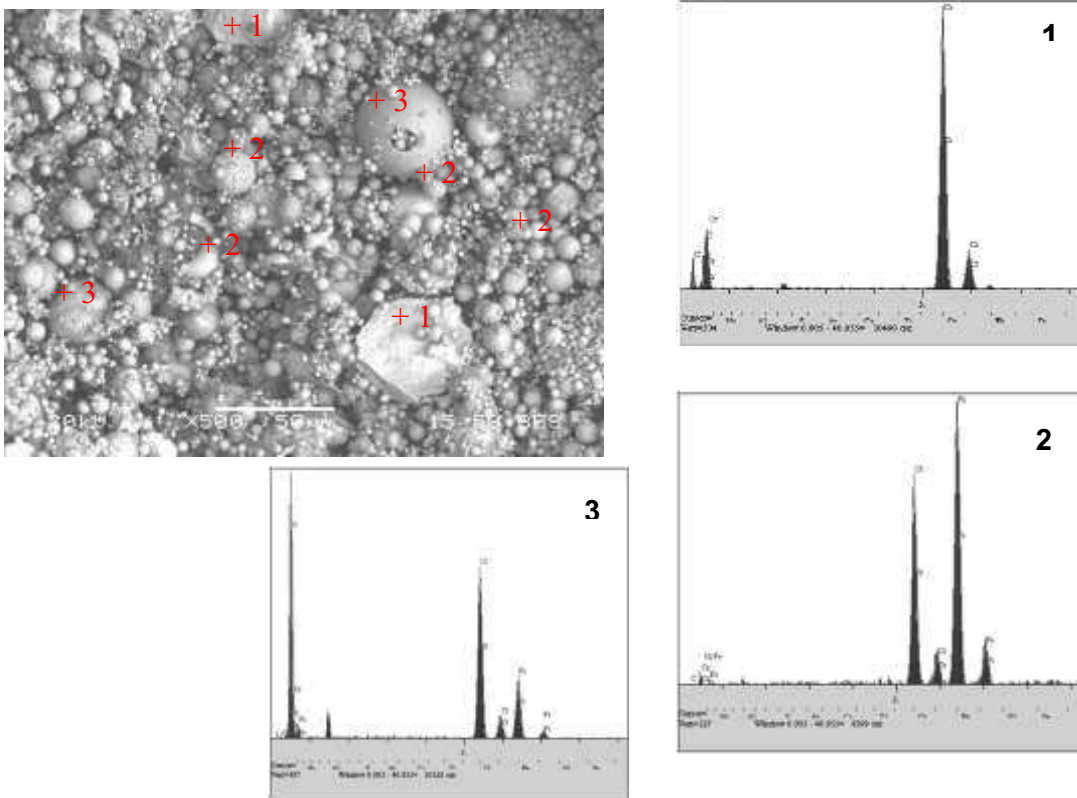
FeCrCMn esaslı kompozit kaplamanın özlü telin göstermiş olduğu yüksek abrazyon aşınma performansının sebebi olarak kaplama yapısında bulunan karbür adacıkları (M_7C_3 ve $M_{23}C_6$) bulunmasıdır. Bu karbür adacıkları özlü tel kaplama telinin öz kısmında bulunan karbürlerin elektrik ark püskürtme prosesi ile kaplama yapısındaki oluşumunun anlaşılması amaçlı kaplama prosesi esnasında oluşan damlacıklar suda soğutularak toplanmıştır. Özellikle kaplama telinde bulunan Cr_7C_3 karbürün kaplama yapısında ergimeden bulunması durumu incelenmiştir. Bu amaçla 28 V_200 A_150 mm_3 bar, 28 V_200 A_150 mm_4 bar ve 28 V_200 A_150 mm_5 bar proses parametrelerinde oluşan damlacıkların (dropletlerin) taramalı elektron mikroskop (SEM) incelemesi ve EDS analizi yapılmıştır. Şekil 7.61’de 3 bar, 4 bar ve 5 barda üretilmiş damlacıkların (dropletler) taramalı elektron mikroskop görüntüleri verilmiştir. Şekil 7.61 a ve b’ de 3 ve 4 bar primer gaz basıncında üretilen damlacıkların arasında keskin köşeli bir yapının bulunduğu görülebilmektedir. Bu yapıların özlü kaplama telinin özünde bulunan karbür parçacıklarının olduğu tahmin edilmektedir. Aynı yapılar üzerinden alınan EDS analizi sonuçları bu durumu desteklemektedir.



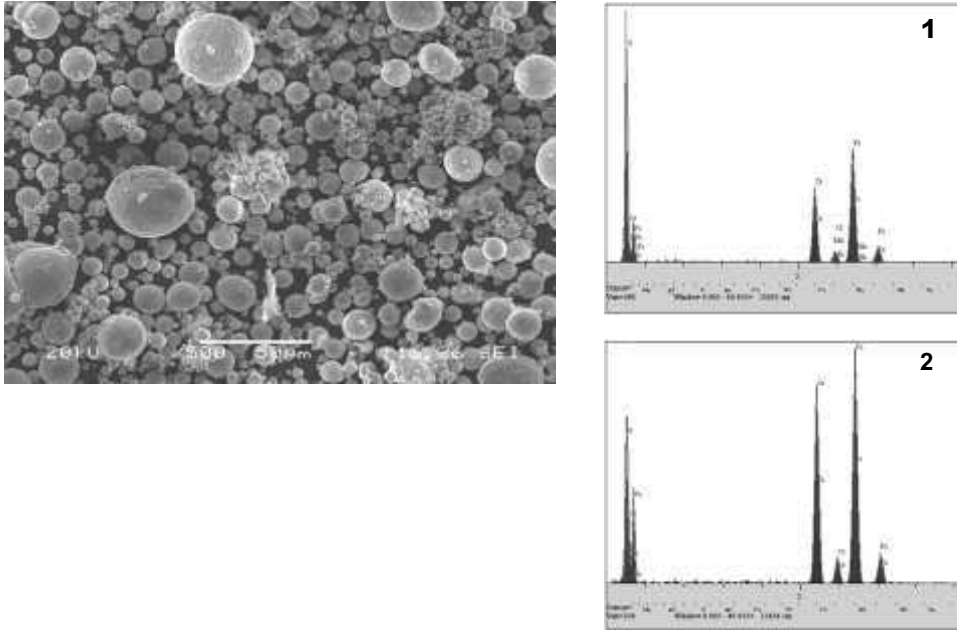
Şekil 7.61. a) 3 bar primer gaz basıncında üretilmiş dropletler, b) 4 bar primer gaz basıncında üretilmiş dropletler, c) 5 bar primer gaz basıncında üretilmiş dropletler (28 V_200 A_150 mm)



Şekil 7.62. 3 bar primer gaz basıncı ile üretilen dropletlerin taramalı elektron mikroskop görüntüsü ve 3 noktadan alınan EDS analizleri (28 V_200 A_150 mm)



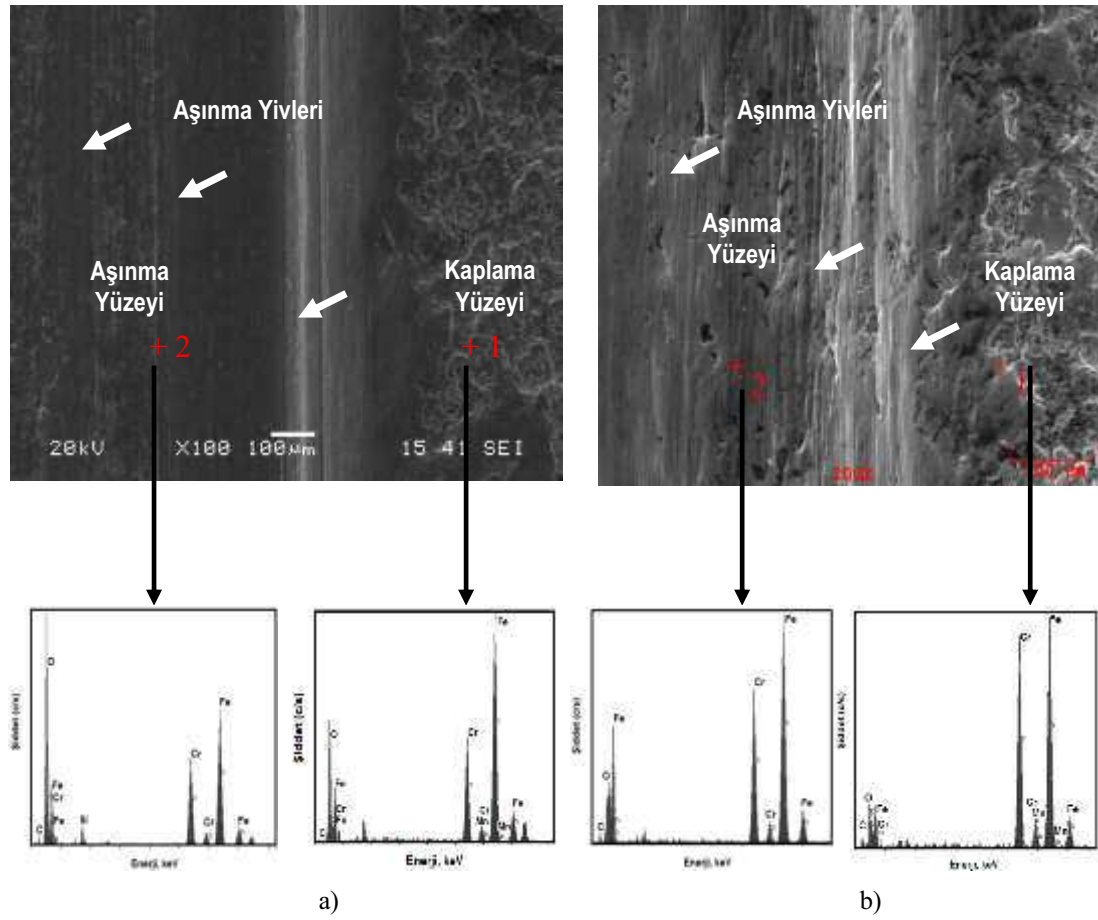
Şekil 7.63. 4 bar primer gaz basıncı ile üretilen dropletlerin taramalı elektron mikroskop görüntüsü ve 3 noktadan alınan EDS analizleri (28 V_200 A_150 mm)



Şekil 7.64. 4 bar primer gaz basıncı ile üretilen dropletlerin taramalı elektron mikroskop görüntüsü ve 3 noktadan alınan EDS analizleri (28 V_200 A_150 mm)

Şekil 7.62, Şekil 7.63 ve Şekil 7.64’de 3 bar, 4 bar ve 5 bar primer gaz basıncında üretilen damlacıkların (droplet) taramalı elektron mikroskop (SEM) görüntüleri ve EDS analizleri verilmektedir. Şekil 7.62’de 3 bar primer gaz basıncında üretilen damlacıklar arasında keskin köşeli bir yapı görülmektedir. 1 nolu EDS analiz sonucuna bakıldığında Cr, O ve C piklerinin bulunmaktadır. 1 nolu EDS analiz sonucuna göre mevcut yapının telin özünde bulunan ve kaplama prosesi boyunca tam olarak ergimeden kalan kromkarbür (Cr_7C_3) olduğu anlaşılmaktadır. Düşük atomize gaz basıncında oluşan damlacıkların atmosfer koşulu daha fazla temas halindedir. Bu sebeple damlacıkların havada altlığa doğru yol almaları boyunca meydana gelen oksidasyon sonucu yapının oksitlendiği ve O pikinin bu sebepten bulunduğu düşünülmektedir. 2 nolu bölgenin EDS analizinde yüksek C piki bulunmaktadır. Bunun kaplama teli özünde bulunan ve karbür yapıcı olan karbonun yapıda korunarak damlacıklar arasında bulunması olduğu düşünülmektedir. 3 nolu EDS analiz sonucunda kaplama yapısı olan $(Fe,Cr)_{23}C_6 + \gamma-Cr,Fe$ fazını oluşturan Fe, Cr, O, C bulunmaktadır. Elektrik ark püskürtme, atmosferik koşullarda gerçekleştirilen bir proses olması ve atomize gaz olarak havanın kullanılması sebebiyle yapıda oksitlerin bulunması beklenmektedir 3 bar primer gaz basıncı ile ergimiş kaplama telinin ucundan ayrılan damlacıklar altlık yüzeyine doğru ilerlerken atmosfer ile 4 bar ve 5 bara göre daha uzun bir sürede yol almaktadır. Bunun da yapıyı oluşturan bu

damlacıkların daha fazla havadaki oksijen ile temas halinde olması anlamına gelmektedir. EDS analizi sonucundaki yüksek O pikinin bu sebepten bulunduğu düşünülmektedir. Şekil 7.64'de 4 bar primer gaz basıncı ile üretilmiş damlacıkların taramalı elektron mikroskop (SEM) görüntüleri ve EDS analizleri verilmektedir. 1 nolu EDS analizinin alındığı bölgeler telin özünü oluşturan sert karbür partikülleri olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 7.65. Kaplama ve aşınma arayüzeyi taramalı elektron mikroskop (SEM) görüntüsü a) 13 Cr'lu çelik kaplama, b) FeCrCMn esaslı özlü tel kaplama

Bu yapılar telin tabanca ucunda oluşan ark sıcaklığına maruz kalması ile ergiyerek damlacıkların atomize gaz ile tel ucundan ayrılması şeklinde meydana gelen küresel damlacıklara benzememekte olup Şekil 7.1 ve Şekil 7.2'de bu çalışmada kullanılan FeCrCMn esaslı özlü telin öz kısmını oluşturan sert karbür yapılarına benzemektedir. 1 nolu bölgeden alınan EDS analizi sonucunda bulunan Cr ve C pikleri, damlacıklar arasında bulunan keskin köşeli yapının telin özünde olan ve tamamen ergimemiş haldeki Cr_7C_3 yapısını tanımlamaktadır. Çeşitli parametrelerde üretilmiş özlü tel

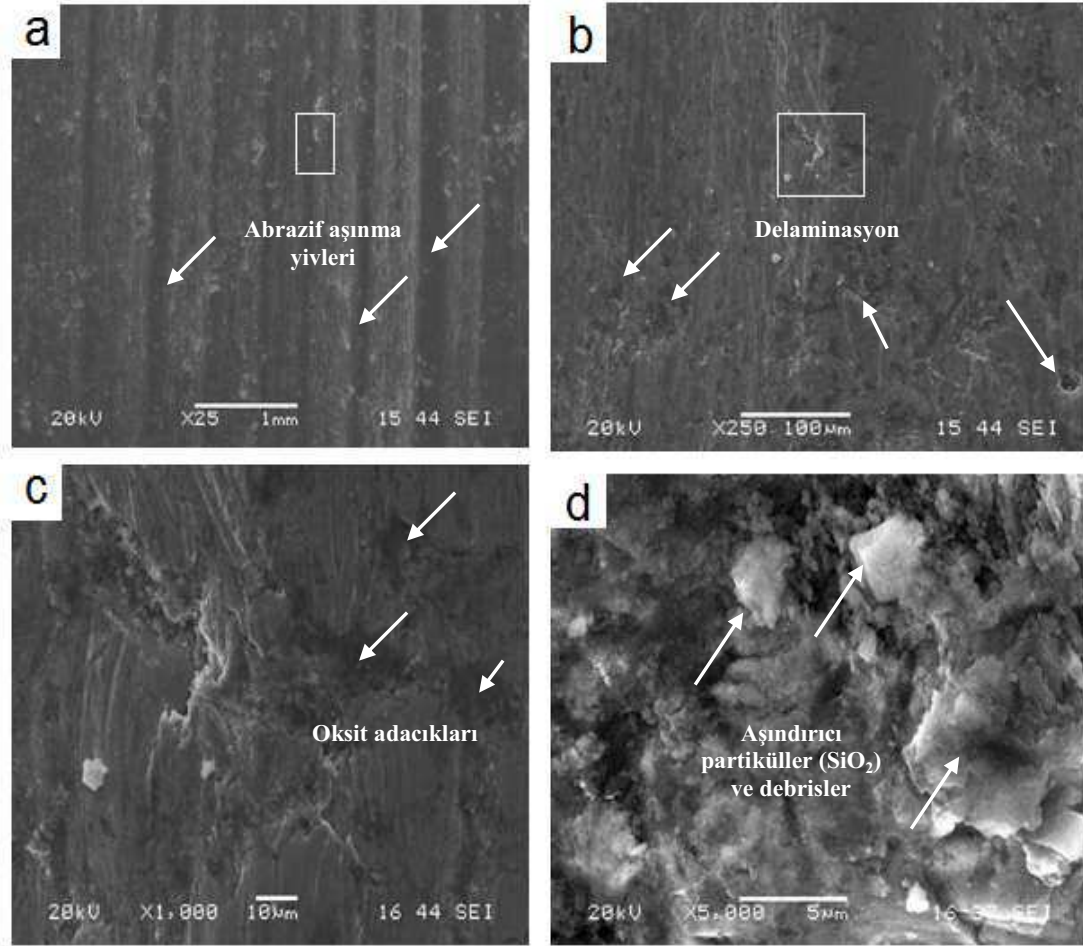
kaplamalar üzerinden yapılan EDS analizleri aynı analiz sonuçları ile karşılaşılmış olup, bu yapılar kaplama yapısında bulunan ergimeden kalan Cr_7C_3 kaplama olarak tanımlanmıştır.

Şekil 7.65’de 28 V_200 A_150 mm_4 bar proses parametresinde elektrik ark püskürtme yöntemi ile üretilmiş kaplamaların ASTM G65 – 04 standardına göre 13 Cr’lu çelik kaplama ile FeCrCMn esaslı özlü tel kaplama Prosedür A şartlarında gerçekleştirilen abrazif aşınma testi sonrası kaplama ve aşınma ara yüzeyi taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüsü verilmektedir. Elektrik ark püskürtme prosesinde atomize gaz olarak hava kullanıldığında, kaplamada oksitlerin oluşması beklenen bir durumdur. Aşınma testi öncesi her iki kaplamada kaplama bölgesinden alınan EDS analizi sonucunda O piki bulunmaktadır. Abrazif aşınma testi sonrası aşınan yüzeylerden alınan EDS analizi sonucunda O pikini yükseldiği görülmektedir. Abrazif aşınma sırasında aşındırıcı partikül temasına bağlı olarak ortaya çıkan ısı ve temas yüzeylerindeki flash sıcaklık kaplamanın aşınan yüzeylerinde tribo – oksidasyona bağlı olarak oksitlenme yoğunluğu artmıştır. 13 Cr’lu çeliğin aşınma yüzeyleri ve oluşan aşınma yivleri daha düzgün olmasına karşın FeCrCMn esaslı özlü tel kaplamanın aşınma yivleri daha belirgin ve düz bir hat izlememektedir. FeCrCMn esaslı özlü tel kaplamadaki aşınma yivlerindeki düz hattan sapmalar kaplama yapısı içerisinde bulunan M_7C_3 ve $M_{23}C_6$ kompleks karbürlerinin yüksek sertlikte çizilmeye karşı dirençli bölgeler oluşturması sebebiyle bu bölgelerdeki yer değiştirme olarak yorumlanmaktadır.

ASTM G65–04 abrazif aşınma testi sonrası FeCrCMn esaslı özlü tel kaplamanın aşınma yüzeylerinin detaylı olarak taramalı elektron mikroskop (SEM) ve EDS analizleri ile incelenmiştir. Şekil 7.66’de FeCrCMn esaslı özlü tel kaplamanın taramalı elektron mikroskop (SEM) görüntüsü verilmiştir. Aşınma yüzeylerinin incelenmesi sonucunda birkaç aşınma mekanizmasının birbirini takip edecek şekilde birarada bulunduğu anlaşılmaktadır. Bu mekanizmalar delaminasyon, abrazif yivlenme ve tribo-oksidadasyondur.

Delaminasyon, farklı lamellerin veya onlara ait parçaların ayrılmasıdır. Abrazif aşınma sırasında meydana gelen mikroçatlaklar ve lameller arasındaki oksit veya

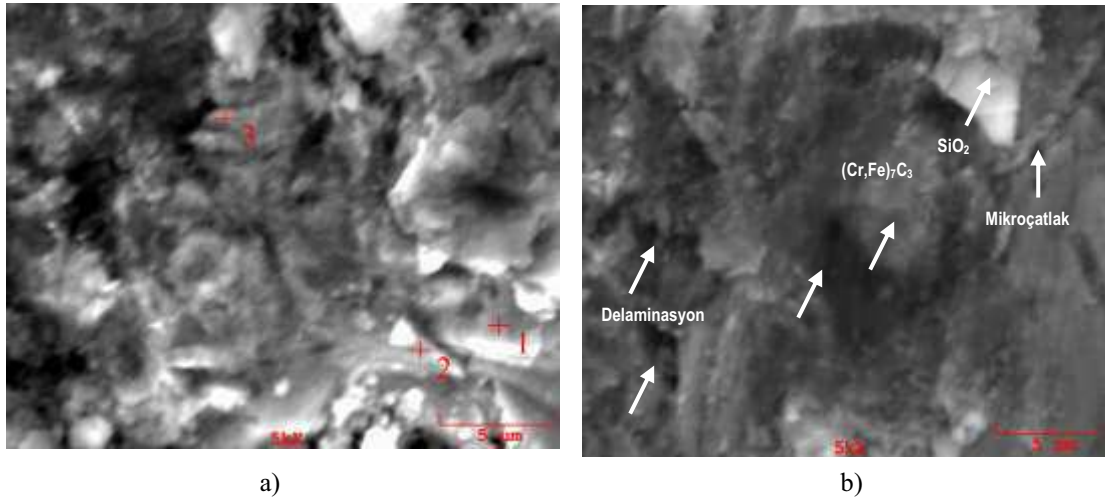
özlü telin özünde bulunan ve ergimedenden kaplama yapısında lameller arasında yerleşen karbür parçacıklarının zayıf nokta oluşturması ile lamellerin birbirinden ayrılmasıdır.



Şekil 7.66. FeCrCMn esaslı özlü tel kaplamanın ASTM G65-04 abrazif aşınma testi sonrası aşınan yüzeylerin taramalı elektron mikroskop (SEM) görüntüleri, abrazif yivler, delaminasyon, oksit adacıkları ve aşındırıcı partiküller.

Sürtünme kuvveti ile meydana gelen kayma gerilmeleri tekrarlı bir şekilde yorulma çatlaklarının lamel sınırları boyunca ilerlemesine neden olur. Kaplamanın üst tarafından ayrılmalar meydana gelir. Oluşan gerilmeler sebebiyle lameller kopmaya başlayana kadar büyük plastik gerilme ortaya çıkmaktadır. Lamel sınırları birçok termal püskürme kaplamada en zayıf bölgedir. Özlü veya metalik kaplamalar kaplama prosesi boyunca ince oksit tabakalarının oluşmasına bağlı olarak kırılabilir karakterli olabilmektedir. Abrazif yivler sert aşındırıcı partiküllerin kaplama yüzeyinde meydana getirdiği mikroçentiklenme ve/veya mikro mertebede yüzeyin pulluklanmasıdır. Aşındırıcı partiküllerin sert ve keskin kenarları veya ara yüzeyde

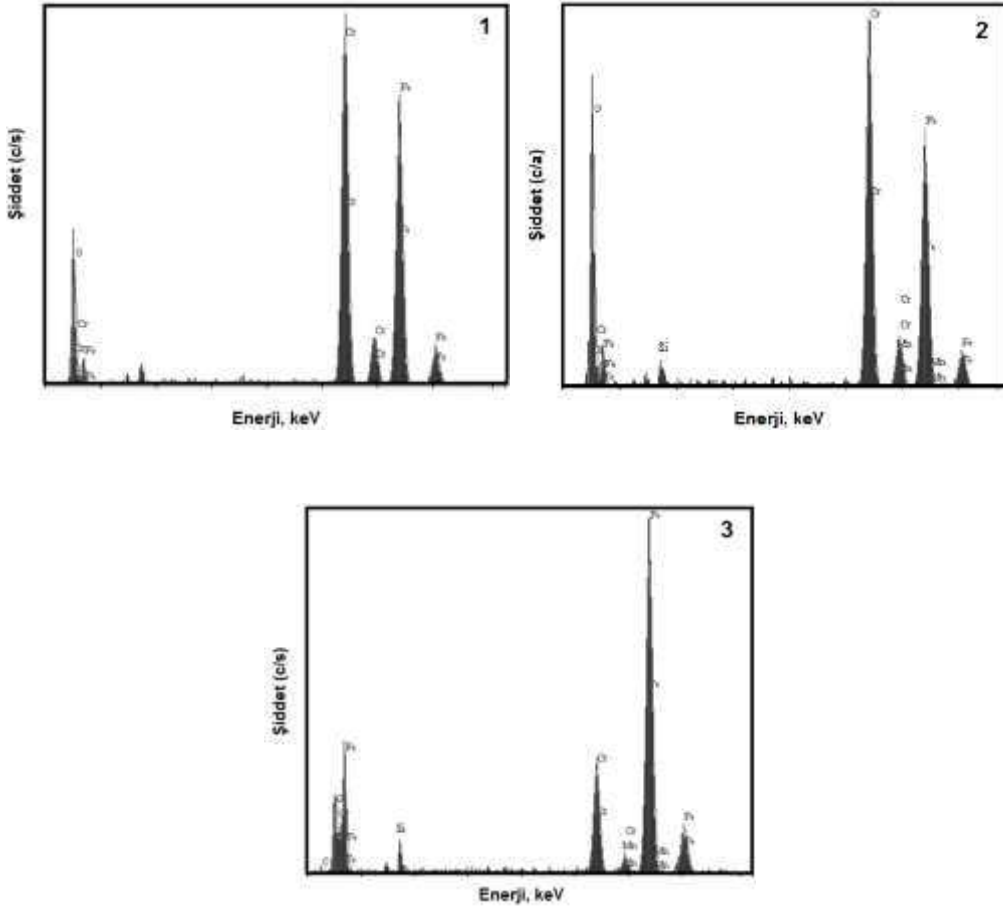
kırlmaları neticesinde meydana gelir. Buna ilaveten kaplama yapısından ayrılan parçalar da aşındırıcı debris görevi görür ve yüzeyi aşındırmaya başlar. Kaplama yüzeyinde oluşan aşınma yivlerinin bir diğer sebebi de budur. Abratif aşınma sırasında ortaya çıkan ısı da yüzey oksidasyonu için bir itici güç oluşturmaktadır. Aşınma testi boyunca katastrofik bir oksidasyon için kritik sıcaklık yüzeylerin sürtünmesi sırasındaki çok yüksek flash sıcaklığı ile aşılmaktadır. Tribo-oksidasyon bu şekilde abrafif aşınma sırasında malzeme kaybına sebep olmaktadır. Yüzeyden malzeme kaybı ve debrislerin oluşması tribo-oksidasyon ile meydana gelmektedir. Abratif aşınma sırasında oluşan debrisler ve aşındırıcı partiküller yüzeyde oluşan boşlukları doldurarak malzeme kaybını düşürebilirler [53]. Şekil 7.66 d’de kaplama yüzeyinde bulunan bir boşluğun aşındırıcı partiküller ve oluşan debrisler ile doldurulduğu görülmektedir. Tribo-oksidasyon aşınmasının yanında kaplama yüzeyinde aşındırıcı partiküller ve debrislerin yüzeydeki flash sıcaklığını artırması ve yüzeyde oksit adacıklarını oluşturmasıdır.



Şekil 7.67. a) Aşınma testi sonrası FeCrCMn esaslı özlü tel kaplama yüzeyindeki boşlukta yer alan aşındırıcı partikül ve debrislerin taramalı elektron mikroskop (SEM) görüntüsü b) Aşınma yüzeyinde $(Cr,Fe)_7C_3$ karbürün varlığı ve yapıyı taşıması

Debrislerin kaplamadaki boşlukta birikmiş olarak görülebildiği taramalı elektron mikroskop (SEM) mikroyapısı Şekil 7.67’de görülmektedir. Abratif aşınma testi sırasında meydana gelen delaminasyon, aşınma yivleri ve tribo-oksidasyon aşınma mekanizmaları ile yüzeyden ayrılan parçacıkların yüzeyleri oksitlenerek aşındırıcı debrisleri oluşturması ile birlikte kaplama yapısında bulunan sert karbür partiküllerinin aşındırıcı olarak kaplama arayüzeyine girmesi ile yüzeydeki malzeme

kaybını arttırmaktadır. Ancak ara yüzeyde kalan bu parçalar kaplama aşınma yüzeyinde meydana gelen boşlukları doldurmaktadır. Şekil 7.67’de görülen 1, 2 ve 3 nolu bölgeden alınan EDS analiz sonuçları Şekil 7.68’de verilmektedir.

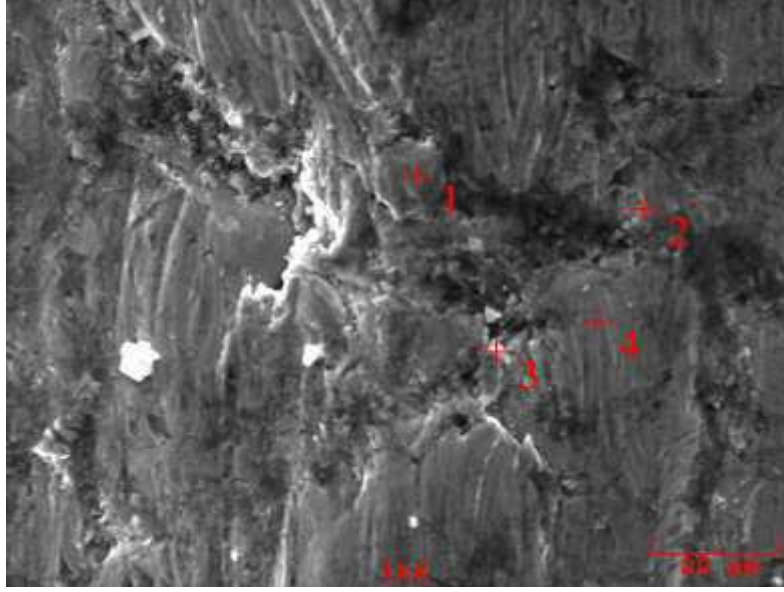


Şekil 7.68. 3 bölgeden EDS analiz sonuçları

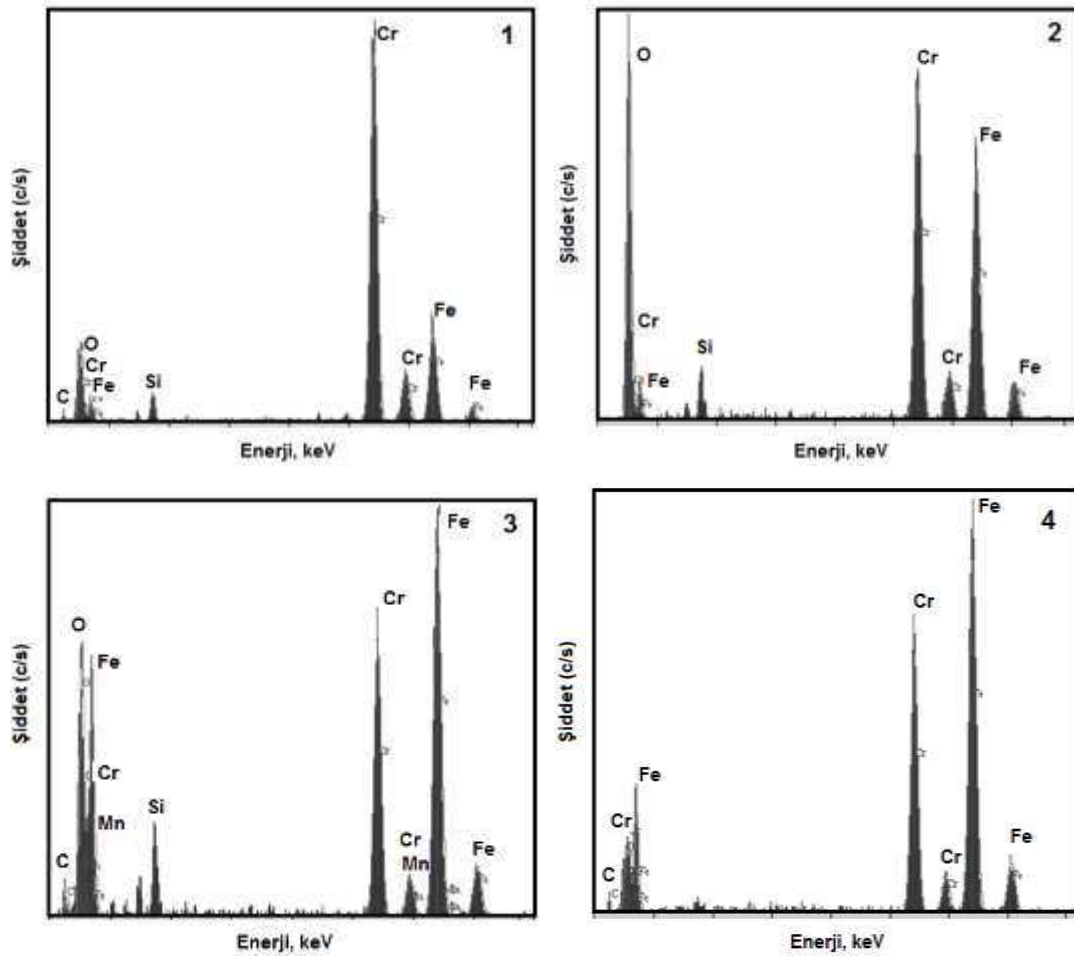
1 ve 2 nolu bölgeden alınan EDS analiz sonucunda mevcut bölgeler Cr’ca zengindir ve bu EDS analiz sonucu $(Cr,Fe)_7C_3$ karbür yapısını işaret etmektedir. 2 nolu bölgeden alınan EDS analizinde O pikinin yüksek olması söz konusu bölgenin abrazyon aşınma testi sırasında kaplama yapısından ayrılıp oksitlenen bir debris olabileceğini ifade edebilmektedir. EDS analizi sonucunda Si’un varlığı bu kanıyı güçlendirmekle birlikte tam olarak debris tanesi olarak ifade edilmesi güçtür. 3 nolu bölgenin EDS analiz sonucu Fe’ce zengin olup Cr’a fakirdir. Bu analiz sonucu $(Cr,Fe)_{23}C_6 + \gamma - (Cr,Fe)$ yapısını tanımlamaktadır. Ancak O piki 2 nolu EDS

analizinden düşük şiddete sahip olması sebebiyle söz konusu bölgenin kaplama yapısı olduğunu düşünülmektedir.

ASTM G65–04 standardına göre uygulanmış abrazyon aşınma deneyi neticesinde 13 Cr'lu çelik kaplama ile FeCrCMn esaslı özlü tel kaplamanın aşınan yüzeylerinin taramalı elektron mikroskobu (SEM) incelemesi Şekil 7.69'de görülmektedir. Yine aynı şekilde 13 Cr'lu çelik kaplama yüzeyindeki aşınma yivlerinin daha düzgün ve doğrusal olduğu, bunun aksine FeCrCMn esaslı özlü tel kaplama yüzeyinde meydana gelen aşınma yüzeylerinin doğrusal olmadığı ve tepe bölgelerde doğrusaldan sapmış olduğu gözlenmiştir. Bunun sebebinin mikroyapı incelemelerinde tespit edilmiş kaplama yapısı içerisinde elektrik ark püskürtme prosesi sırasında meydana gelen çeşitli kompleks karbürlerin $[(Cr,Fe)_7C_6]$ ve $(Cr,Fe)_{23}C_6$ oluşması ve karbür adacıkları şeklinde kaplama yapısına yayılması, aşınma testi sonrası kaplama yüzeyinde tepecik şeklinde görülen yapıları oluşturduğu düşünülmektedir. Kaplama yapısının $(Cr,Fe)_{23}C_6 + \gamma-(Cr,Fe)$ katı eriyiğininin oluştuğu bu çalışmada tespit edilmiştir. Özellikle yüksek kaplama makro sertliğine sahip kaplamalarda telin özünde bulunup kaplama yapısına tam olarak ergimeden yerleşen Cr_7C_3 karbürlerin bulunduğu tespit edilmiştir. Abrazyon aşınma sırasında kaplama yapısında bulunan karbürler kaplama yapısında yeterince tok ve sağlam olması kaplama yapısını aşınmaya karşı desteklemektedir. Özlü tel kaplamaların yüksek aşınma performansına sahip olmaları bu durumdan ileri gelmektedir. Özlü tel kaplamaların metalik tel kaplamalara göre abrazyon aşınmaya karşı dayanımlarının yüksek olması bu sebeptir ve metalik kaplamalara bu yönü ile önemli bir alternatiftir.



Şekil 7.69. FeCrMn esaalı kaplamanın aşınma yüzeyi SEM mikroyapısı

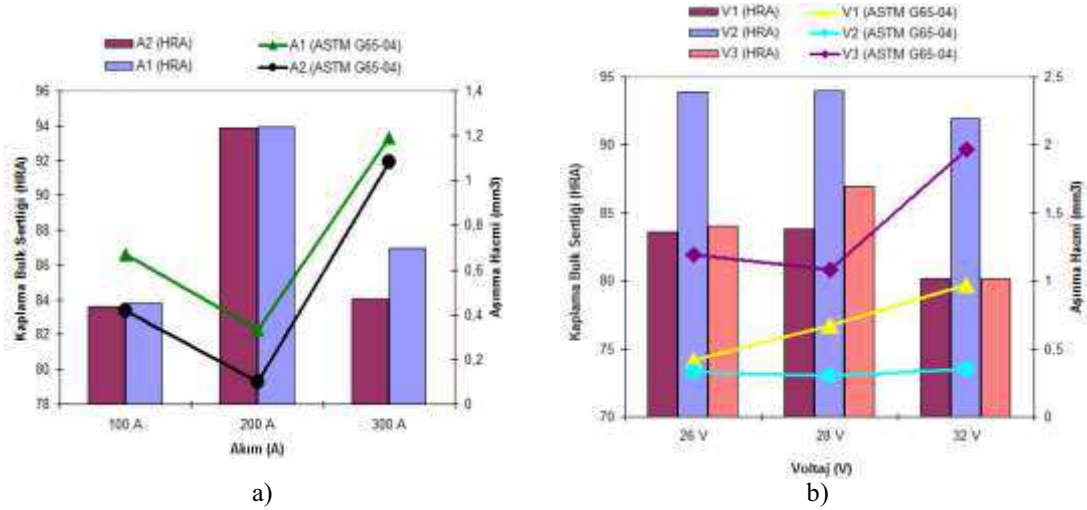


Şekil 7.70. 4 nolu bölgeden alınan EDS analiz sonuçları

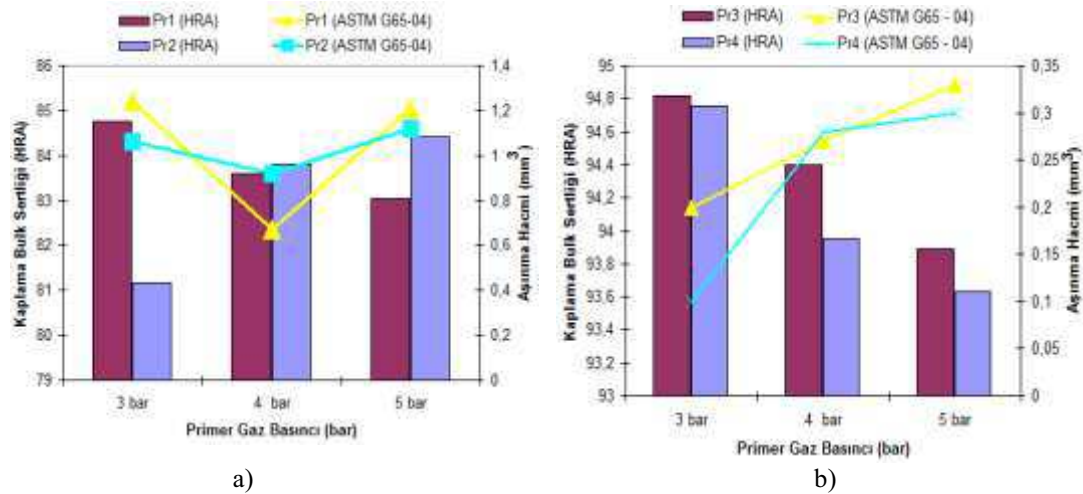
FeCrCMn esaslı özlü tel kaplamada aşınma yüzeyinde meydana gelen aşınma yivlerindeki doğrusal olmayan yönlenmenin, yapıda meydana gelen sert karbürlerin aşınma yönüne engel teşkil etmesinden kaynaklanmaktadır. Abrazif aşınmaya karşı dayanım sağlayan ve karbür bölgeleri kaplama yüzeyinde aşınma sebepli malzeme ayrılması ile tepecikler oluşturduğu ve aşındırıcı partiküllere karşı dayanım sağladığı düşünülmektedir. Şekil 7.70'de aşınma yüzeylerinde alınan EDS analiz sonuçları verilmektedir. Şekil 7.70'de FeCrCMn esaslı özlü tel kaplamanın aşınan yüzeyinin taramalı elektron mikroskop (SEM) görüntüsünde 1 nolu bölgenin EDS analizi sonucunda Cr pikinin yüksek olduğu görülmektedir. EDS analizi sonucunda C'un bulunması, 1 nolu tepecik şeklindeki yapı krom karbür olarak tanımlanabilmektedir. Fe'in fakir olması γ -Cr,Fe katı çözeltisi olarak bölgenin kaplama ana fazı olarak karbürü sardığı, abrazif aşınma neticesinde Cr_7C_3 karbürün yapıya tutunarak kaplama yapısından malzeme kaybını önlediği düşünülmektedir. 1 nolu bölgenin analiz sonucunda Si'un bulunması abrazif aşındırıcı olarak bulunan SiO_2 'in sürtünme sebeple kaplama yüzeyine sıvanması olarak yorumlanmıştır.

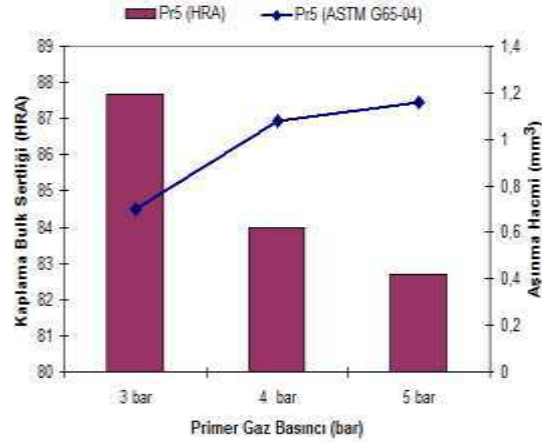
2 nolu bölgeden alınan EDS analiz sonucunun Cr'ca zengin ve Fe'ce fakir olması 2 nolu bölgenin $(Cr,Fe)_7C_3$ olduğunu tanımlamaktadır. Aşınmaya bağlı olarak yüzeyde oksitlenme sebebiyle oksit yapıların oluşması, bu bölgede alınan EDS analiz sonucunda O pikinin şiddetinin yüksek olmasının sebebidir. 3 ve 4 nolu EDS analizi kaplama yapısını tanımlamakta olup mevcut yapının γ - Cr,Fe katı eriyiği ile sarılmış $(Cr,Fe)_{23}C_6$ kompleks karbürüdür. 3 nolu bölgeden alınan EDS analiz sonucunda O pikinin yüksek olması abrazif aşınma testi boyunca sürtünmeye bağlı tribo-oksidasyona bağlı oluşan yüzey oksitlerden kaynaklandığı düşünülmektedir. Elektrik ark püskürtme yöntemi ile üretilen FeCrCMn esaslı özlü tel kaplamaların atmosferik koşullarda üretilmesi, oluşan damlacıkların (dropletlerin) altığa doğru yol alması sırasında ve altlık yüzeyine çarpması esnasında oksidasyona uğramaktadır. Bu sebeple kaplama yapısında oksitlerin bulunması doğal bir durumdur. Üretilen kaplamalarda kaplama makro sertliği ile oksit miktarı arasında bir ters orantı ilişkisi mevcuttur. Kaplamada % oksit miktarının artması ile kaplama makro sertliğinin düştüğü bu çalışmada tespit edilmiştir. Elektrik ark püskürtme yöntemi ile üretilen kaplamalarda kaplama sertliği özellikle abrazif aşınma dayanımı için belirleyici bir kriterdir. FeCrCMn esaslı özlü tel kaplamalarda oksit oranı yüksek kaplamaların

makro sertlikleri düşük olmaktadır. Akım, voltaj, primer gaz basıncı ve püskürtme mesafeleri değiştirilerek üretilen kaplamalarda kaplama makro sertliği ile abrazyon aşınma hacim kaybı arasındaki ilişki Şekil 7.71 Şekil 7.72 ve Şekil 7.73'de verilmektedir.



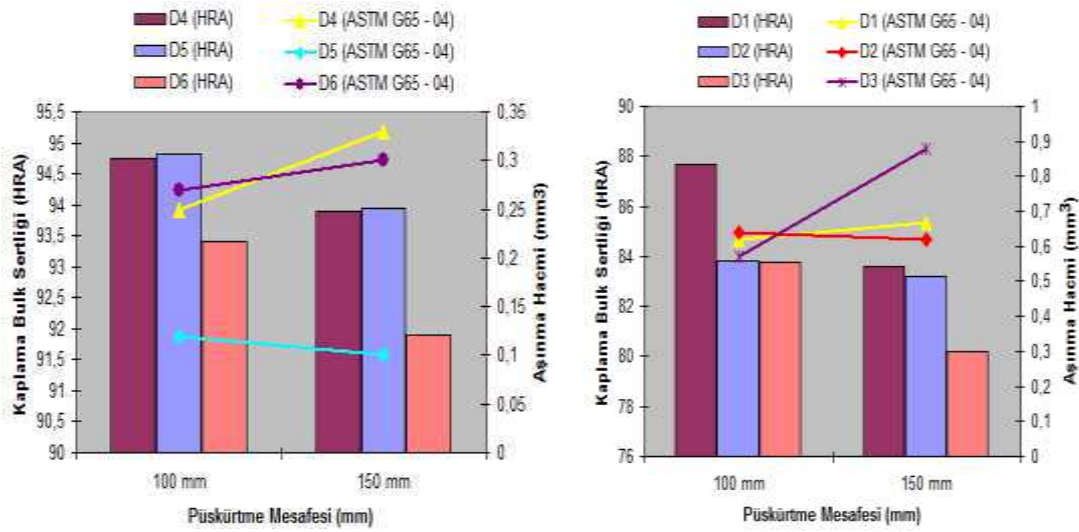
Şekil 7.71. Akım değişimine bağlı olarak kaplama makro sertliği (HRA) ile aşınma hacmi (mm³) ilişkisi (A1: 26 V_4 bar_150 mm , A2: 28 V_4 bar_150 mm), b) Voltaj değişimine bağlı olarak kaplama makro sertliği (HRA) ile aşınma hacmi (mm³) ilişkisi (V1: 100 A_4 bar_150 mm, V2: 200 A_4 bar_150 mm, V3: 300 A_4 bar_150 mm)



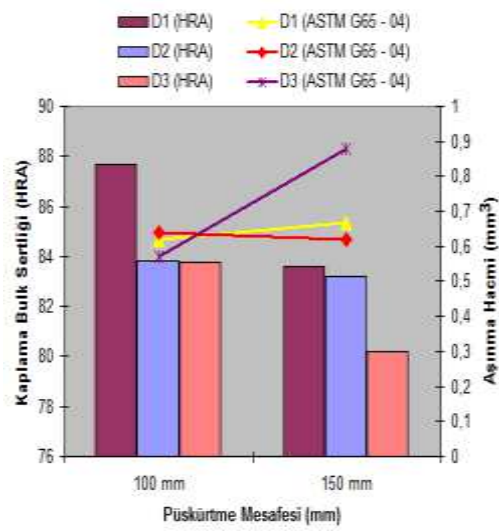


c)

Şekil 7.72. a) Primer gaz basıncı değişimine bağlı olarak kaplama makro sertliği (HRA) ile aşınma hacmi (mm³) ilişkisi (Pr1: 100 A_26 V_150 mm, Pr2: 100 A_28 V_150 mm), b) Primer gaz basıncı değişimine bağlı olarak kaplama makro sertliği (HRA) ile aşınma hacmi (mm³) ilişkisi (Pr3: 200 A_26 V_150 mm, Pr2: 200 A_28 V_150 mm), c) Primer gaz basıncı değişimine bağlı olarak kaplama makro sertliği (HRA) ile aşınma hacmi (mm³) ilişkisi (Pr5: 300 A_28 V_150 mm),



a)

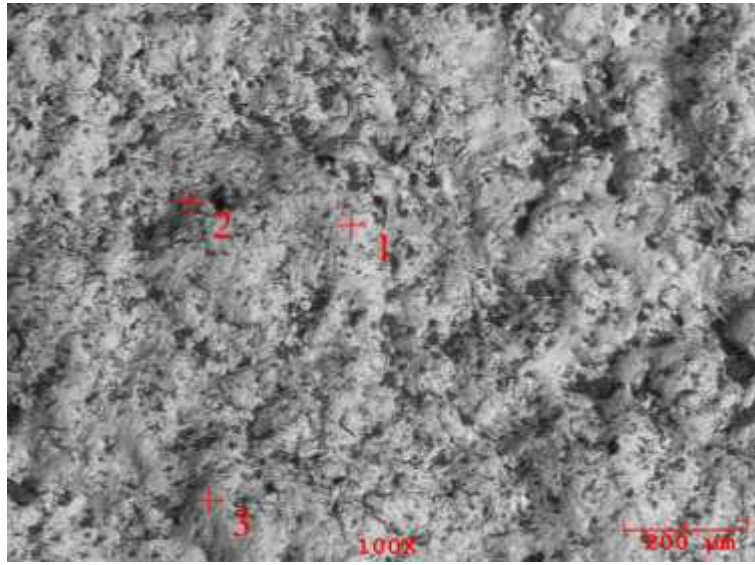


b)

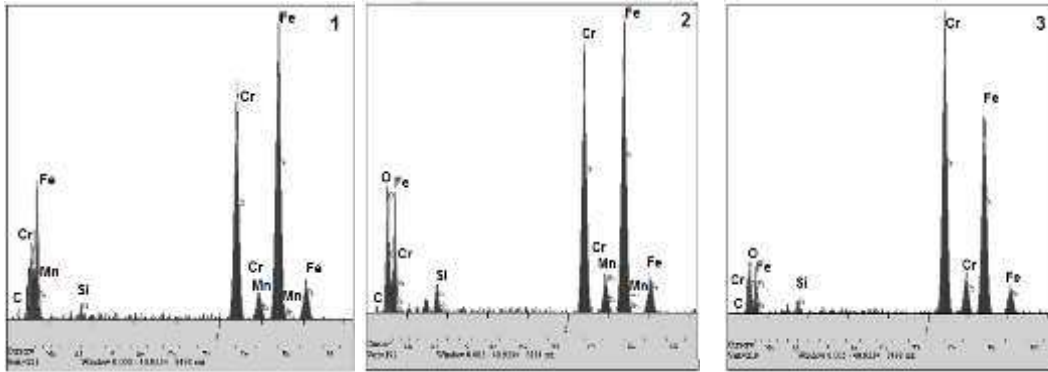
Şekil 7.73. a) Püskürtme mesafesi değişimine bağlı olarak üretilen kaplamalarda kaplama makro sertliği (HRA) ile aşınma hacmi (mm³) ilişkisi (D1: 100 A_26 V_4 bar, D2: 100 A_28 V_4 bar, D3: 100 A_32 V_4 bar), b) Primer gaz basıncı değişimine bağlı olarak kaplama makro sertliği (HRA) ile aşınma hacmi (mm³) ilişkisi (Pr3: 200 A_26 V_150 mm, Pr2: 200 A_28 V_150 mm)

Şekil 7.71, Şekil 7.72 ve Şekil 7.73'de görüleceği üzere genel olarak kaplama makro sertlikleri (HRA) yüksek olan kaplamalar daha düşük abrazyif aşınma hacim kaybına sahiptir. Kaplama makro sertliği düşük olan kaplamalarda abrazyif aşınma direnci genel olarak düşük olmaktadır. FeCrCMn esaslı özlü tel kaplama makro sertliğinin

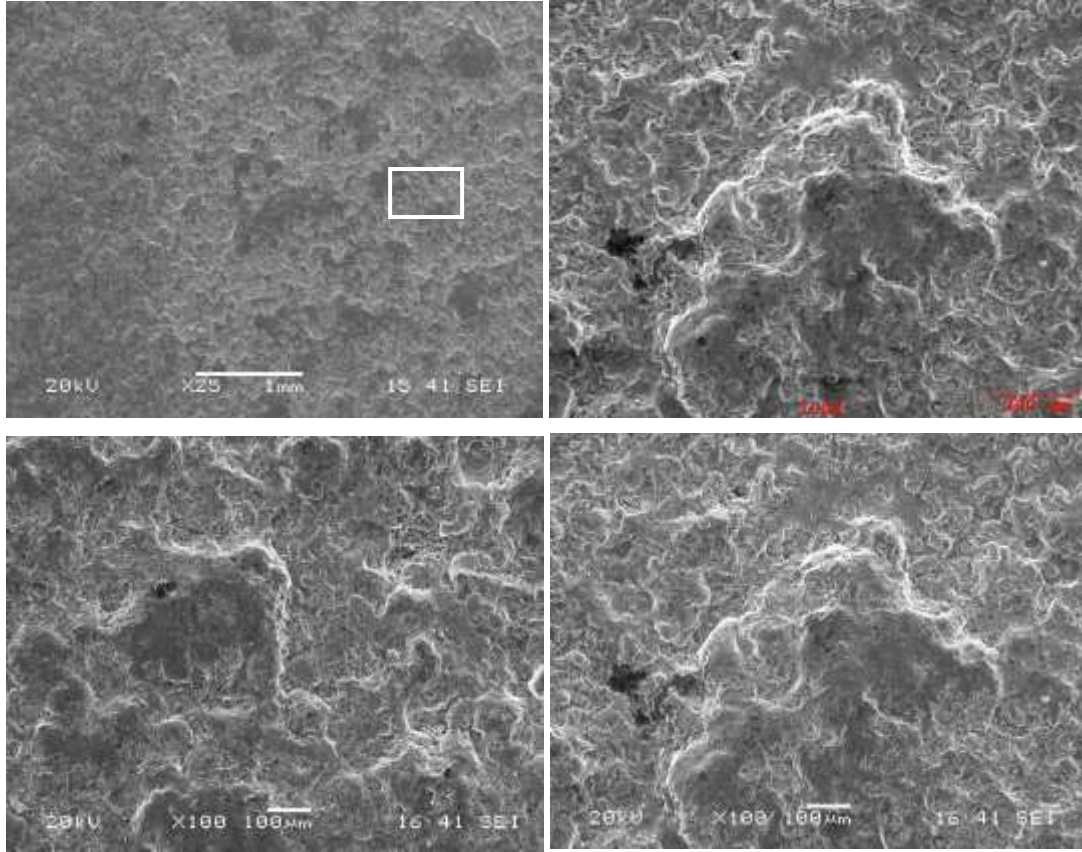
kaplamanın abrazif aşınma dayanımının belirlenmesinde kritik bir öneme sahip olduğu, elde edilen sonuçlar ile görülebilmektedir. Buradan yola çıkarak, FeCrCMn esaslı özlü tel kaplamaların abrazif aşınma dayanımlarının belirlenmesinde proses parametrelerinin etkisinin anlaşılması amaçlı olarak abrazif aşınma testi sonrası en yüksek aşınma hacim kaybına sahip V33 (1,97 mm³ – 300 A_32 V_4 bar_150 mm) numunesi ile en düşük aşınma hacim kaybına sahip Pr41 (0,10 mm³ – 200 A_28 V_3 bar_150 mm) numunesinin taramalı elektron mikroskop (SEM) incelemesi ve EDS analizleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 7.74. Pr41 numunesinin taramalı elektron mikroskop (SEM) görüntüsü



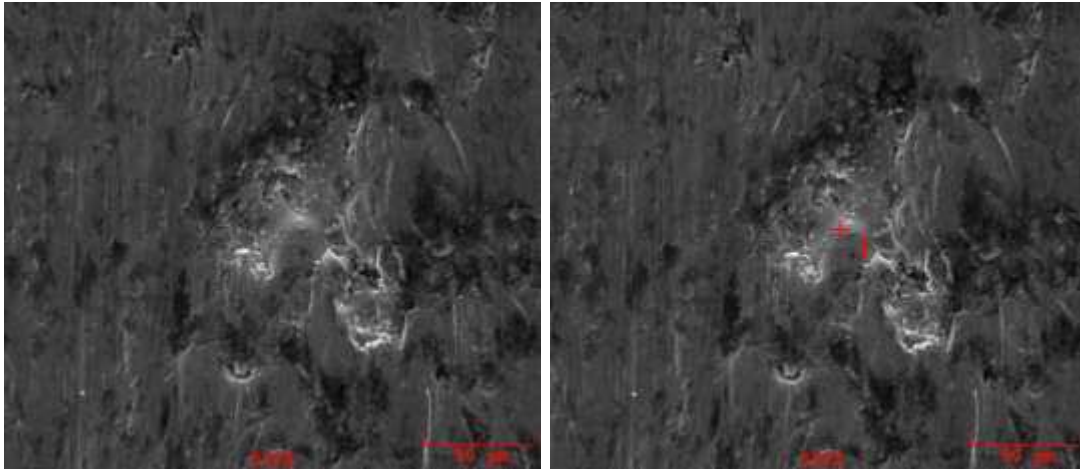
Şekil 7.75. 3 bölgeden alınan EDS analiz sonuçları



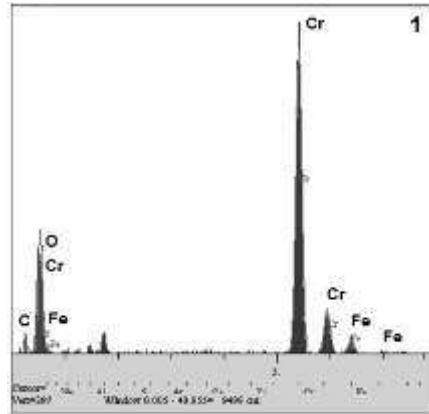
Şekil 7.76. Pr41 numunesinin aşınan yüzeyi taramalı elektron mikroskop görüntüsü

Şekil 7.74’de Pr41 numunesinin aşınma yüzeyi taramalı elektrom mikroskobu (SEM) görüntüsü, Şekil 7.75’de 3 bölgeden alınan EDS analiz sonuçları verilmektedir. FeCrCMn esaslı özlü tel kaplamalar yapısında barındırdıkları sert karbürler neticesinde kompozit karakterli yapıdır. Bu kaplamaların abrazif aşınmalı ortamda tercih edilmelerinin sebebi, yapısında M_7C_3 [Cr_7C_3 , $(Cr,Fe)_7C_3$], Mn_7C_3] ve $M_{23}C_6$ [$(Cr,Fe)_{23}C_6$] gibi kompleks karbürleri barındırmasıdır (Şekil 7.76). Kaplama numuneleri üzerinde gerçekleştirilen EDS analizleri ile bu kompleks karbürler birbirinden ayırt edilebilmektedir. Elektrik ark püskürtme kaplamalarda kaplamayı oluşturan damlacıklar ani olarak katılaşmaktadır. Bu şekilde hızlı katılaşma sonucu kararsız yapılar meydana gelmektedir. Kararsız bir faz olan ve yüksek sertliğe sahip, yüksek sıcaklıklarda kararlı $(Cr,Fe)_7C_3$ ($\leq 500^\circ C$) karbürü oluşmakta, daha sonra soğuma koşulları esnasında $(Cr,Fe)_{23}C_6 + \gamma-Cr,Fe$ katı çözeltilisi kaplama yapısını oluşturmaktadır. Buradan hareketle Pr41 numunesinin taramalı elektron mikroyapısı (SEM) görüntüsünde 3 bölgeden EDS analizi alınmıştır (Şekil 7.75). 1 ve 2 nolu

EDS analizi Fe'ce zengin olup genel kaplama yapısı olan $(Cr,Fe)_{23}C_6 + \gamma-Cr,Fe$ fazını tanımlamaktadır. 3 nolu bölgeden alınan EDS analizi ise Cr'ca zengin olup yüksek sertlikteki (1300-1500 HV) $(Cr,Fe)_7C_3$ fazını tanımlamaktadır. Buradan da anlaşılacağı gibi kaplama yapısının farklı bölgelerinde farklı karbür türlerinin bulunduğu ve bu şekilde kaplamanın kompozit karaktere sahip olduğu anlaşılabilmektedir.



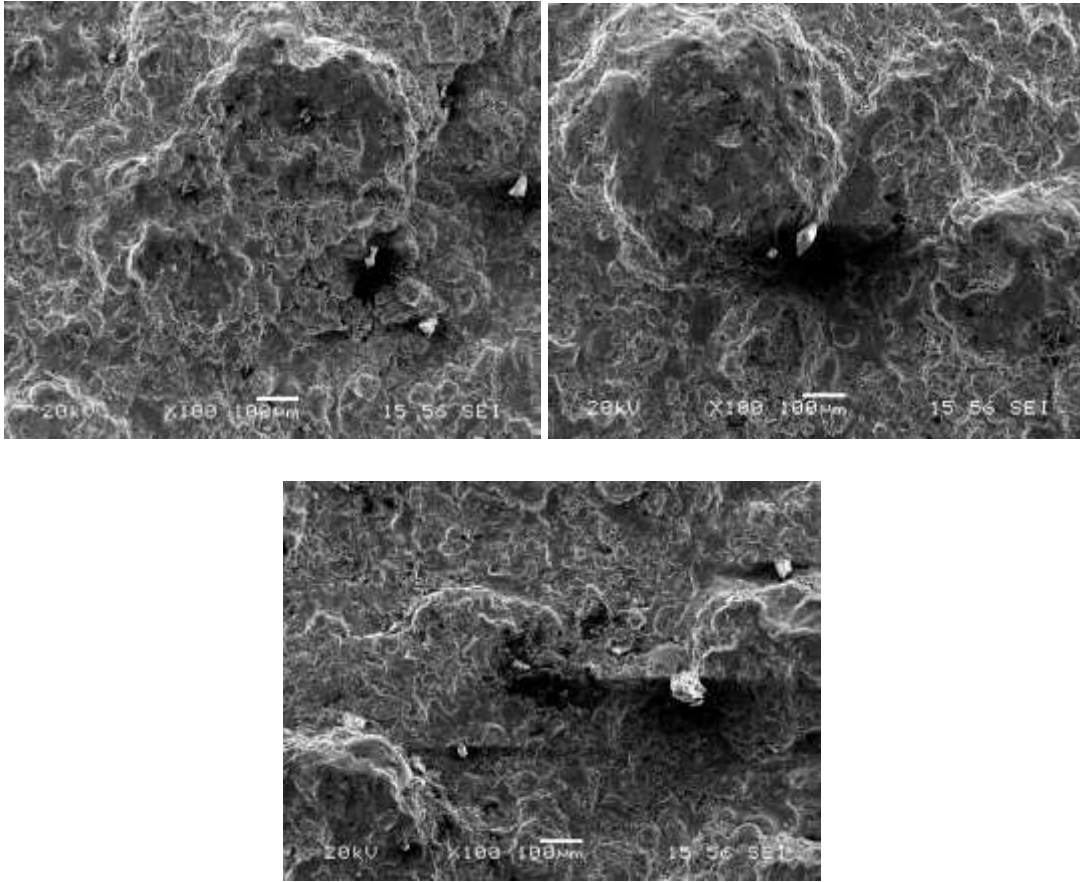
Şekil 7.77. Pr41 nolu numunenin taramalı elektron mikroskop (SEM) incelemesi



Şekil 7.78. Pr41 nolu numuneden alınmış EDS analizi

Pr41 numunesinde yapılan taramalı elektron mikroskop (SEM) incelemesi aşınan yüzeyde tepecikler olduğu görülmektedir. Mevcut tepeciklerin kaplamanın abrazyon sırasında kaplamadan malzeme kaybını önleyen karbür tepecikleri olduğu düşünülmektedir. Kaplama prosesi boyunca oluşan yüksek sertlikteki karbür

adacıkları abrazif aşınma sırasında malzeme kaybını önlemektedir. Buradaki en kritik nokta kaplama yapısının yeterince tok olması ve abrazif aşınma boyunca karbürleri ve karbür parçacıklarını taşıyabilmesidir. Pr41 numunesi bu çalışma kapsamında amper, voltaj, primer gaz basıncı ve mesafenin değiştirilmesi ile üretilen kaplamalar içerisinde en düşük oksit oranına sahip olanıdır. Bu çalışmada, kaplama ana fazındaki oksit yoğunluğunun kaplamanın tokluğunu düşürdüğü tahmin edilmektedir. Bu sebepten kaplama yapısında bulunan karbürler kaplama fazı tarafından desteklenememektedir. Şekil 7.77’de Pr41 nolu kaplamanın aşınma yüzey görüntüsü, Şekil 7.78’de, aynı bölgeden alınan EDS analizleri verilmektedir.



Şekil 7.79. V33 nolu numunenin ASTM G65-04 abrazif aşınma testi sonrası aşınan yüzeylerin taramalı elektron mikroskop (SEM) incelemesi

Şekil 7.77’de görüldüğü üzere kaplama yapısında bulunan karbürler ve/veya karbür adacıkları abrazif aşınma sırasında kaplama yapısında kalarak kaplamanın abrazif aşınma dayanımını arttırmaktadır. Abrazif aşınma testi sırasında aşındırıcı SiO_2

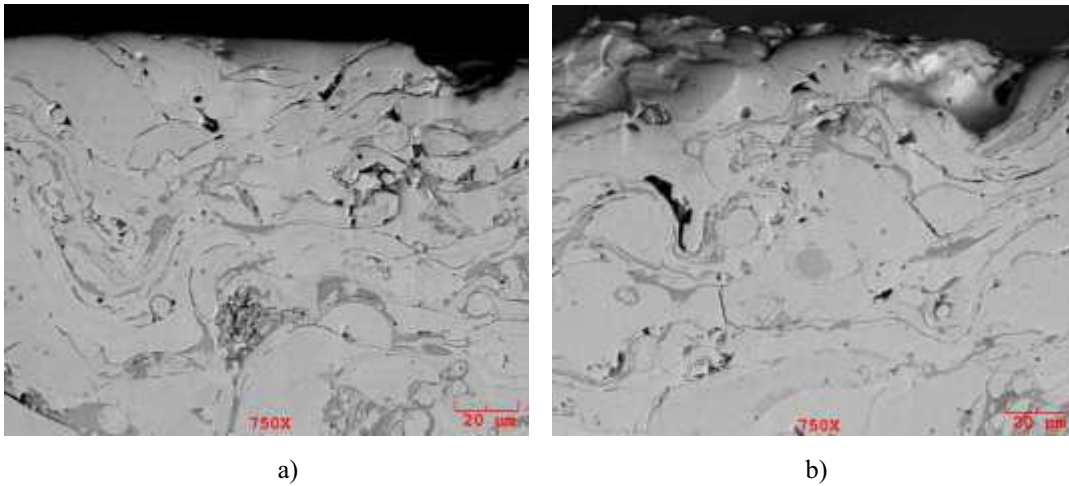
partiküller kaplama yapısından malzeme kaybına sebep olurken yüksek sertlikteki (1300-1500 HV) $(Cr,Fe)_7C_3$ ve Cr_7C_3 karbürler ile karşılaştığında kaplama yüzeyinden malzeme koparmaları zorlaşmaktadır. Bu şekilde aşınma arayüzeyinde meydana gelen malzeme kaybı daha düşük olmaktadır.

Şekil 7.78'deki aşınma yüzeyindeki tepecik bölgesinden alınan EDS analiz sonucunun Cr'a çok zengin olduğu görülmektedir ve Cr_7C_3 'ü tanımlamaktadır. Abrazif aşınma sırasında aşındırıcı partiküller yüzeyde malzeme kaybına sebep olurken karbür kısmında malzeme kaybı ana faza göre daha az olmaktadır. Aşındırıcı partiküller karbür yüzeyi aşındıramamaktadır. Bu sebepten karbürlerin bulunduğu bölgeler aşınma yüzeyinde tepecik şeklinde kalmıştır [54]. Burada mevcut kaplama yapısının karbürü taşıyabilmesi çok önemlidir.

Şekil 7.79'de elektrik ark püskürtme kaplama prosesi parametreleri olan akım, voltaj, primer gaz basıncı ve mesafe değişimine bağlı olarak üretilmiş numuneler içerisinde ASTM G 65-04 abrazif aşınma testi sonucu en yüksek malzeme hacim kaybına sahip olan V33 numunesine ait taramalı elektron mikroskop (SEM) mikroyapı görüntüleri verilmektedir. Mikroyapılarda görüleceği üzere aşınma yüzeyinde derin boşluklar ve çatlaklar bulunmaktadır. Abrazif aşınma testi sırasında aşındırıcı partiküller kaplama yüzeyinden aşınma oyuklanması, mikroçatlak oluşumu ve tribo-oksidasyon aşınma mekanizmaları ile malzeme kaybına sebep olurken, kaplama yapısında bulunan karbürleri taşıyamadığı için karbürler koparak yapıdan ayrılmaktadır. Şekil 7.79'da bulunan derin boşluklar bu durumu tanımlamaktadır. Aşındırıcı partiküllerin kaplama yüzeyinde oluşan derin boşluklar arasına girdiği ve kaplama yapısına saplanıp kaldığı da görülebilmektedir. V33 numunesi akım, voltaj, primer gaz basıncı ve mesafenin değiştirilmesi ile üretilen özlü kaplamalar içerisinde yüksek oksit oranına sahip olan numunelerden biridir (%21). Buradan anlaşılacağı üzere oksidasyonun yoğun olması ve yapıdaki oksit yoğunluğunun yüksek olması kaplama yapısını daha kırılgan bir hale getirmektedir. Bu şekilde kaplama yapısı aşınma testi boyunca kırılgan yapısı sebebiyle bünyesindeki kompleks karbürleri destekleyememektedir. Aşınma testi sırasında kaplama yapısının oksidasyon sebepli kırılganlaşması sebebiyle mikroçatlaklar oluşmakta, bu çatlaklar lameller boyunca ilerlemektedir. Genel olarak termal püskürtme kaplamalarda lamel arasında yer alan oksit bölgeleri

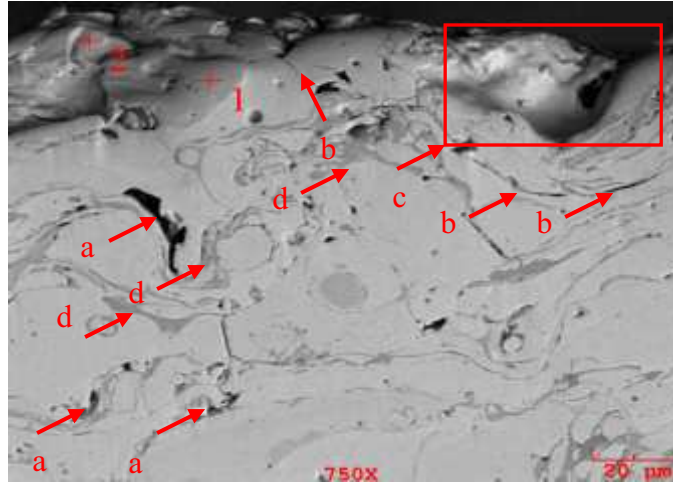
zayıf noktalar oluşturduğu için lamellerin birbirinden ayrılmasına sebep olmaktadır. Yine aynı şekilde karbürlerde meydana gelen mikroçatlaklar sebebiyle de kaplama yapısından ayrılmaktadır. Bu aşınma mekanizması ile aşınma testi boyunca kaplamada meydana gelen malzeme kaybı artmaktadır.

Şekil 7.80'de ASTM G 65-04 abrazif aşınma testi sonrasında aşınmaya maruz kalmış yüzeyin kesiti ile aşınmaya maruz kalmamış kesitin yüzey görüntüsü verilmektedir. Her iki kesit mikroyapı görüntüsünde oksit, porozite ve mikroçatlakların bulunduğu görülmektedir. Aşınma öncesi kesit mikroyapı görüntüsünde yüzey kısmında mikroçatlakların bulunduğu görülmektedir. Kaplama yapısındaki porozitelerin oksit bölgelerinde bulunmakta olup lameller arası kohezyonun iyi olduğu söylenebilmektedir.

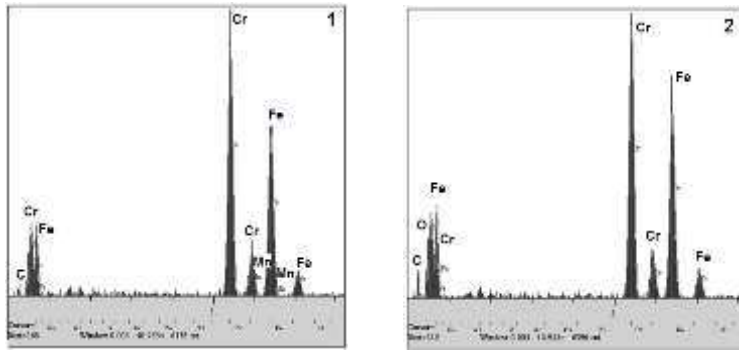


Şekil 8.80. a) Pr41 numunesinin abrazif aşınmaya maruz kalmamış yüzeyi, b) Pr41 numunesinin abrazif aşınmaya maruz kalmış yüzeyi

Şekil 7.80 b'de abrazif aşınma testine maruz kalmış yüzeyin mikroyapı görüntüsünde lameller arası malzeme kaybının olduğu açıkça görülebilmektedir. Yüzey bir tepecik görünümünü almıştır. Ancak aşınma testi sonrası yapıda mikroçatlak yoğunluğunda herhangi bir artışın olmaması kaplama yapısının yeterince tok bir yapıda olduğu kanaatini oluşturmaktadır. Bu şekilde yapıdaki karbürler kaplama yapısından ayrılmamaktadır. Bu durum kaplamanın abrazif aşınma performansını yükseltmekte ve minimum aşınma hacim kaybının oluşmasını sağlamaktadır.



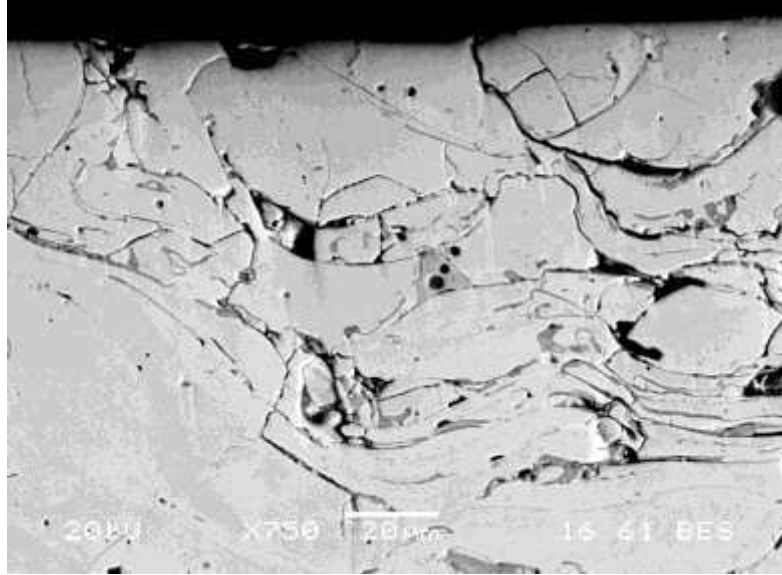
Şekil 7.81. Pr41 numunesinin aşınmaya kalmış yüzeyinin taramalı elektron mikroskop (SEM) görüntüsü; a – porozite, b – mikroçatlak, c – lameller arası malzeme kaybı, d – oksit



Şekil 7.82. 1 ve 2 nolu bölgeden alınmış EDS analiz sonuçları

Şekil 7.81’de Pr41 numunesinin aşınma sonrası taramalı elektron mikroskop kesit görüntüsü verilmekte olup Şekil 7.82’de mevcut SEM mikroyapı görüntüsünün yüzeydeki iki bölgesinden alınan EDS analiz sonucu verilmektedir. Şekil 7.81’de Pr41 numunesinin kesit SEM görüntüsünde mikroçatlakların olduğu görülmektedir. Bunun yanında SEM mikroyapı kesit görüntüsünde kare içine alınan boşluklu bölge aynı bölgede mevcut bir lamelin yapıdan ayrıldığı izlenimini vermektedir. Bununla beraber oluşan mikroçatlakların bu bölgede yoğunlaşması bu görüşü kuvvetlendirmektedir. Kaplama yapısında abrazif aşınma testi sırasında meydana gelen plastik deformasyon ve gerilme kuvvetleri mikroçatlak yoğunluğunun artmasını tetiklemektedir. Mikroçatlaklar termal püskürtme kaplamalardaki zayıf

bölgeler olan lamel sınırlarını takip ederek ilerler ve en son mevcut lamelin kaplama yapısından ayrılması ile sonuçlanan malzeme kaybı meydana gelir.



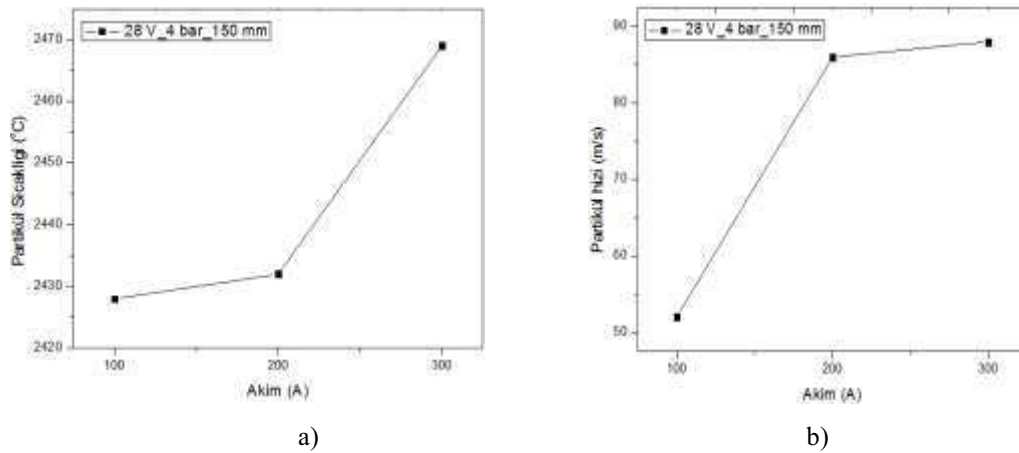
Şekil 7.83. V33 nolu numunenin ASTM G 65-04 abrazyif aşınma testi sonrası taramalı elektron mikroskobu (SEM) kesit mikroyapısı

Pr41 numunesi akım, voltaj, primer gaz basıncı ve mesafenin değiştirilmesi ile üretilen özlü tel kaplamalar içerisinde en yüksek abrazyif aşınma dayanım performansı gösteren kaplamadır. Bu çalışma kapsamında yapılan mikroyapısal incelemeler, karakterizasyon çalışmaları ve XRD analizleri ile özlü tel kaplamalarda yapıda kompleks karbürlerin bulunduğu tespit edilmiştir. Bu karbürlerin kaplama yapısının desteklemesine bağlı olarak abrazyif aşınma testi boyunca kaplama yapısında kalabildiği ve kaplamanın abrazyif aşınma performansını arttırdığı da ayrıca tespit edilmiş diğer bir husustur. Şekil 7.82’de yer alan aşınmaya maruz kalan kaplama yüzeyinin iki bölgesinden alınan EDS analiz sonucu Cr’ca zengindir ve $(Cr,Fe)_7C_3$ karbürünü tanımladığı düşünülmektedir. Abrazyif aşınma sırasında malzeme yüzeyindeki malzeme kaybı karbürlerin yapıda mevcut olması ile azalmıştır. Bu şekilde malzeme yüzeyinde bulunan karbürler (özellikle M_7C_3 ve $M_{23}C_6$) aşındırıcı partiküllerin yüzeyden parça sıyırılmalarını sahip oldukları yüksek sertlik sebebiyle güçleştirmiştir.

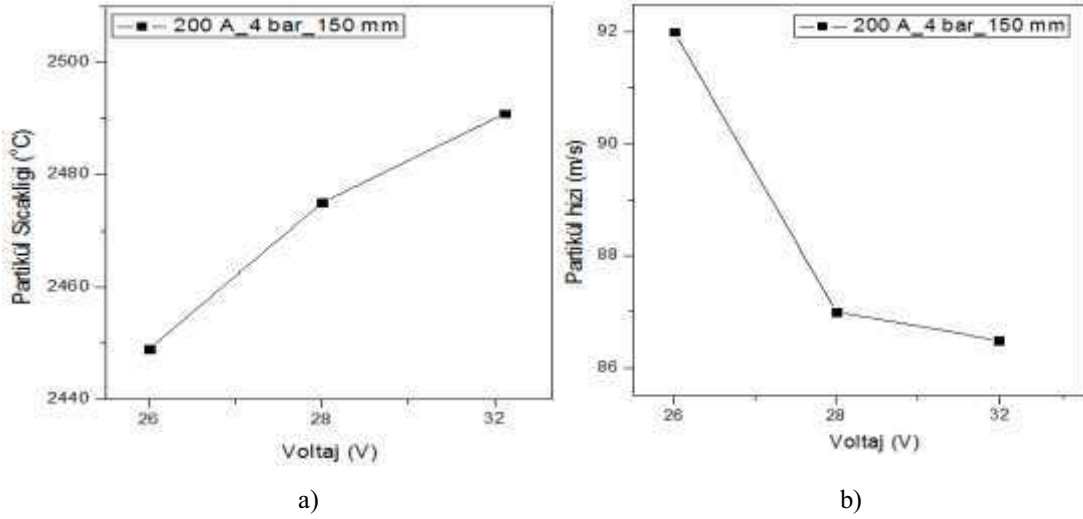
Şekil 7.83’de ASTM G65 – 04 abrazif aşınma testi sonrası üretilen kaplamalar arasında en yüksek aşınma hacim kaybına sahip numune olan V33 numunesinin kesit görüntüsü verilmektedir. Şekil 7.83’de görüleceği üzere kaplama yapısında mikroçatlakların yoğunluğu Pr41 nolu numuneye göre yüksektir. Yüksek oksit miktarına sahip olması kaplamanın kırılgan bir yapıya sahip olmasına sebep olurken, abrazif aşınma testi boyunca kaplama yapısında meydana gelen gerilme kuvvetlerinin sebep olduğu plastik deformasyon ile meydana gelen mikroçatlaklar malzeme kaybının artmasına sebep olmaktadır [54]. Kaplama yapısında bulunan kompleks karbürler ise yapının kırılganlığı sebebiyle kaplama yapısı tarafında taşınmamakta ve yapıdan ayrılmaktadır. Bu şekilde abrazif aşınma testi boyunca aşındırıcı partiküller daha fazla malzemeyi yüzeyden koparmaktadır. Bu sebeple kaplama yapısının elektrik ark püskürtme prosesi boyunca proses parametrelerine göre etkilendiği, bunun da üretilen özlü tel kaplamaların abrazif aşınma performansını etkilediği bu çalışmada tespit edilmiştir.

7.8. Partikül Hızı ve Sıcaklık Ölçüm Sonuçları

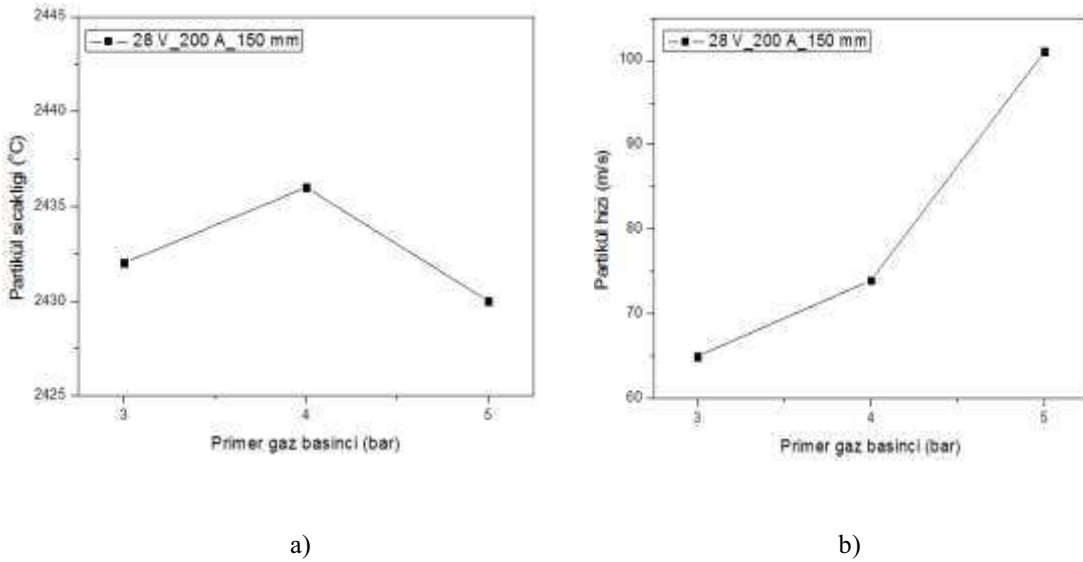
Bu çalışma kapsamında elektrik ark püskürtme kaplama sisteminde kullanılan parametrelerin ergimiş ve/veya yarı ergimiş partiküllerin hız ve sıcaklıklarına olan etkisinin belirlenmesi için SprayWatch ile Tablo 6.7.’de belirtilen parametrelerde oluşan partiküllerin sıcaklık ve hızları ölçülmüştür.



Şekil 7.84. a) Akım - partikül sıcaklığı ilişkisi, b) Akım partikül hızı ilişkisi



Şekil 7.85. a) Voltaj - partikül sıcaklığı ilişkisi, b) Voltaj partikül hızı ilişkisi



Şekil 7.86. a) Voltaj - partikül sıcaklığı ilişkisi, b) Voltaj partikül hızı ilişkisi

Şekil 7.84'de akım ile partikül sıcaklığı ve hızı arasındaki ilişkisi verilmektedir. Şekil 7.84'de görüleceği üzere akımın artması ile partikül sıcaklığında artış olmakta ve sıcaklık artışı ile beraber partikül hızının düştüğü görülmektedir. Şekil 7.85'de voltaj ile partikül sıcaklığı ve partikül hızı ilişkisi verilmektedir. Voltajın artması ile partikül sıcaklığının artmış olduğu görülmektedir. Partikül sıcaklığının artması ile daha iri taneli partiküller tel ucundan ayrılmaktadır. Bu sebeple sıcaklığın artması ile akım -partikül sıcaklığı ve hızı ilişkisi gibi partikül hızı düşmektedir. Primer gaz basıncı ile partikül hızı ve sıcaklığı ilişkisi Şekil 7. 86'de verilmektedir. Primer gaz

basıncının genel anlamda partikül sıcaklığı üzerinde ihmal edilebilir derecede olduğu bilinmekte olup Şekil 7.86 a'daki Şekilde görüleceği gibi 4 bar'da üretilen kaplamaların parikl sıcaklıklarının 3 ve 5 bar'a göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Primer gaz basıncının artması ile partikül hızlarının önemli derece arttığı Şekil 7.86 b.'de görülmektedir.

BÖLÜM 8. DENEYSEL SONUÇLARIN İRDELENMESİ

8.1. Üretilen Kaplamaların Yapısal Özellikleri

Bu çalışmada akım, voltaj, primer gaz basıncı ve püskürtme mesafesi değişimine bağlı olarak üretilen kompozit kaplamaların karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir. Üretilen kaplamalar mikroyapı, oksit ve porozite içeriği, mikrosertlik ve makrosertlik değerleri irdelenerek yapısal özellikleri değerlendirilmiştir. Akım, voltaj, primer gaz basıncı ve püskürtme mesafesinin değişimi ile üretilen kaplamaların yapısı ve kaplama parametrelerinin değiştirilmesi ile elde edilen sonuçların, literatürle uyumu aşağıda verilmiştir:

100 A, 200 A ve 300 A'de üretilen kaplamaların optik mikroyapıları incelendiğinde akımın 100 A'den 200 A'ye yükselmesi ile daha yoğun bir kaplama yapısının olduğu görülmüştür (Şekil 7.7). Oluşan yoğun kaplamanın neticesi olarak porozite miktarı 200 A'de üretilen kaplamalarda 100 A'de üretilen kaplamalara göre azalma göstermiştir. Ancak akım değerinin 200 A'den 300 A'ye artırılması ile kaplamaların porozite miktarında az miktarda bir yükselme olmuştur. Benzer durum kaplamalardaki % oksit içeriği için de geçerlidir. Akım değişimine bağlı olarak 26 V'da üretilen kaplamaların 28 V'da üretilen kaplamalara göre daha yüksek porozite ve oksit değerine sahip olduğu bu çalışmada tespit edilmiştir. 100 A, 200 A ve 300 A akım seviyelerinde ve 26 V, 28 V, 32 V voltaj değerlerine bağlı olarak üretilen kaplamalarda (Şekil 7.19), akımın 100 A'den 200 A'ye artması ve voltajın 26 V'dan 28 V'a yükselmesi sonucu kaplamanın % porozite miktarı azalmıştır. Genel olarak 200 A'de üretilen kaplamalar daha düşük % oksit oranına sahip iken, 200 A_28 V proses parametre eşleşmesinde üretilen kaplamaların en düşük oksit içeriğine sahip olduğu görülmüştür. Homojen ve yüksek performanslı bir kaplama yapısının elde edilmesi için tel uçlarında oluşan arkın stabil olması önemlidir. Akımın artması ile partikül sıcaklığında bir miktar artış meydana gelmektedir (Şekil 7.84 a). 100 A'den

200 A'e akımın artması ile kaplamadaki oksit ve porozitenin azalması oluşan partiküllerin sıcaklıklarının artması ile tel uçlarında oluşan arkın stabilliğini arttırmış ve tel ucunda daha yoğun bir ergiyik banyosunun oluşmasına sebep olmuştur. Kelkar [55]'in elektrik ark püskürtme tekniğinin modellenmesi üzerine yapmış olduğu doktora çalışmasında, akımın 200 A'den 100 A'e düşürülmesi ile maksimum elde edilen ark sıcaklığının daha düşük olduğu belirtilmiştir. Bu çalışmada akımın 100 A'den 200 A'e yükselmesi ile daha stabil arkın oluştuğu gözlenmiştir. Ark sıcaklığının artması ile daha iyi bir ergime meydana gelmiş ve buna bağlı olarak oksit ve porozite miktarı azalmıştır. Ancak akım değeri 200 A'den 300 A'e geldiğinde ark sıcaklığının artması sonucu oksit ve porozite miktarında genel olarak bir artışın olduğu ifade edilebilir (Şekil 7.84 b). Tilmann ve arkadaşlarının [38] özlü tel ile elektrik ark püskürtme sırasındaki asimetric ergime davranışını inceledikleri çalışmada, 150 mm olan püskürtme mesafesinde voltajın 28 V'dan 34 V'a yükseltilmesinin damlacık sıcaklığının 50 ila 100 °C arttırdığı belirtilmiştir. Yüksek ark voltaj seviyelerinde oksidasyonun yüksek olmasının sebebi olarak damlacık sıcaklığındaki artış gösterilmiştir. Newbery ve arkadaşlarının [49] elektrik ark püskürtme prosesi boyunca üretilen çelik damlacıklarının hızı ve sıcaklığı üzerine yapmış oldukları çalışmada ark voltajının yükselmesi ile ark sıcaklığının arttığı belirtilmiştir. Ark sıcaklığındaki artış sebebiyle daha iri ve yüksek sıcaklığa sahip damlacıkların oluştuğu ifade edilmiştir. Bu çalışmada da benzer sonuç bulunmuştur (Şekil 7.85 a). Yine aynı çalışmada akımın artması ile tel besleme hızının artacağı, bu şekilde tel uçlarında oluşacak primer damlacıkların artacağı ve püskürtme aksındaki hızın azalacağı belirtilmiştir. Elektrik ark püskürtme sisteminde akımın artması ile damlacıkların hızı Şekil 7.84 b'den görüldüğü gibi yavaşlamaktadır. Akım değerinin 200 A'den 300 A'e yükselmesi ile kaplamadaki % oksit ve porozite miktarı artmıştır. Bunun sebebi olarak akımın artması ile damlacığın sıcaklığının artması ve hızının azalması ile oksidasyonun daha yoğun meydana gelmesidir (Şekil 7.84). Akımın yükselmesi ile (300 A) damlacık sıcaklığının ve havada kalma süresinin artması, 200 A'e göre daha yüksek sıcaklığa sahip damlacığın atmosferdeki oksijen ile daha fazla etkileşimde bulunması anlamına gelmektedir. Kaplamadaki % oksit miktarının artışı bu şekilde açıklanabilir. Oksitlenmiş partiküllerde yüzey gerilimi daha yüksek olacağından dolayı porozitenin artması beklenen bir durumdur. Wilden ve arkadaşlarının [41] elektrik ark püskürtme yöntemi ile X46Cr13 kaplama

teli kullanarak yapmış oldukları çalışmada voltaj ve akımın artması ile partikül hızlarının düştüğünü, voltajın artması ile partikül sıcaklığının önemli ölçüde arttığı ve akımın artması ile de partikül sıcaklığında bir miktar artış olduğu gösterilmiştir (Şekil 7.84 ve Şekil 7.85). Yine aynı çalışmada akımın ve voltajın artması ile elektrik ark püskürtme sisteminde oluşan püskürtme hüzmesinin genişlediği ve kaplamanın yüzey pürüzlülüğünün arttığı tespit edilmiştir. Bu tespite bağlı olarak bu çalışmada 28 V voltaj seviyesinde 200 A'den 300 A'e akımın yükselmesi ile kaplama yapısındaki homojenliğin bozulmasının sebebinin püskürtme hüzmesinin genişlemesi olduğu düşünülmektedir.

Primer gaz basıncı partikül hızını ve şeklini direkt olarak etkileyen en önemli parametredir [49]. Primer gaz basıncının artması ile partikül hızları artmaktadır (Şekil 7.86). Bu çalışmada primer gaz basıncının artmasına bağlı olarak kaplama yapısının değişimi (Şekil 7.33) ve oksit ile porozite oluşumuna etkisi incelenmiştir. 100 A, 200 A ve 300 A akım değerleri ile 26 V ve 28 V voltaj seviyelerinde 3 bar, 4 bar ve 5 bar olacak şekilde primer gaz basıncı değiştirilerek üretilen özlü tel kaplamalar üretilmiştir. Bütün parametrelerde gaz basıncının artması ile lamel boylarının incelendiği, porozite miktarının azaldığı ve oksit miktarının arttığı yapılan karakterizasyon çalışmalarında görülmüştür. Primer gaz basıncının artması ile tel uçlarındaki ergiyik banyodan ayrılan damlacıkların boyutları küçülmektedir. Planche ve arkadaşlarının [40] 0,8 C'lu çelik tel kullanarak elektrik ark püskürtme parametrelerinin kaplama yapısına etkilerini inceledikleri çalışmada, gaz akış oranının 94 m³/saat 'den 130 m³/saat'e çıkarıldığında daha ince lamelli bir kaplama yapısı elde edildiği belirtilmiştir. Bunun sebebi olarak oluşan partikül boyutlarının gaz akış oranındaki artış ile küçülmesi olarak açıklanmıştır. Yine Wilden ve arkadaşlarının [41] yapmış olduğu çalışmada gaz basıncının artması ile oluşan partiküllerin hızlarında artış olduğu gösterilmiştir. Bu çalışmada primer gaz basıncının yükselmesi ile elde edilen ince lamelli kaplama yapıları yukarıda belirtilen çalışmaların sonuçları ile uyumludur. Bu çalışmada 28 V seviyesinde 200 A'den 300 A'e akım değerinin yükselmesi ile artan ark sıcaklığı sonucu 200 A'e göre daha düzensiz ve birikme verimi düşük kaplama yapılarının meydana geldiği görülmüştür. Wilden ve arkadaşlarının [41] yapmış olduğu çalışmada elektrik ark püskürtme kaplamalarda gaz akış oranının artması ile kaplamadaki porozite yüzdesinin düştüğü,

oksit yüzdesinin arttığı tespit edilmiştir. X. Wang [48]'ın elektrik ark püskürtme prosesi üzerine yapmış olduğu doktora çalışmasında gaz basıncının 45 psi, 65 psi ve 85 psi olduğunda üretilen kaplamaların porozite miktarları sırasıyla % 27, % 18 ve % 12 olduğu belirtilmiştir. Yine aynı çalışmada gaz basıncının 45, 65 ve 85 psi olarak arttırıldığında kaplamadaki oksit miktarının sırasıyla % 18,2, % 19,5 ve % 24,8 olduğu belirtilmiştir. Mevcut çalışmada elde edilen sonuçlar ile yukarıda belirtilen çalışmalardaki sonuçlar birbiri ile uyumludur.

Kaplama mesafesi kaplama yapısını etkileyen bir diğer parametre olup bu çalışma kapsamında değerlendirilmiştir (Şekil 7.44). Kaplama mesafesinin artması ile kaplamadaki oksit ve porozite miktarının arttığı görülmüştür. Tillmann ve arkadaşlarının [30] 1,6 mm ölçüsünde özlü tel kullandıkları ark püskürtme sisteminde asimetrik ergime davranışı üzerine yapmış oldukları çalışmada, partikül hızının mesafenin artması ile azaldığı gösterilmiştir. Partikül hızındaki azalma neticesinde kaplamadaki porozite miktarı artmıştır. Hızı azalan partikülün havada kalma süresinin artmasına bağlı olarak kaplama yapısındaki oksit miktarının artması beklenen bir durumdur. Bu çalışmada kaplama mesafesinin artması ile oksit ve porozite miktarındaki artış Tillmann ve arkadaşlarının [30] yapmış olduğu çalışma ile neden-sonuç ilişkisi bakımından birbiri ile uyum göstermektedir.

Elektrik ark püskürtme tekniği ile üretilen kaplamalar poroziteli kaplamalar olup plazma kaplama, HVOF yöntemleri gibi termal püskürtme yöntemlerine göre en yüksek poroziteye sahip kaplamalardır. Bu çalışmada üretilen FeCrCMn esaslı kompozit kaplamalarda tespit edilen porozite miktarı % 2 ila % 10 arasında değişmekte olup ortalama % 4–5 civarındadır. Üretilen kaplamalarda tespit edilen % porozite miktarları düşük bir değer olarak algılanabilmektedir. Özlü tel kaplamalar ile ilgili yapılan çalışmalarda, W. Tillmann ve M. Abdulgader [56] tarafından üretilen (WC 12Co 30 %, B 1,7 – 2 %, Si 4 – 5 %, C 0,4 %, Ni Bal) özlü tel kaplamaların porozite miktarları % 2,89 - % 3,10 ila % 1,66 - % 1,79 olarak bulunmuştur. V. E. Buchanan [57] tarafından FeCrB özlü tel kullanarak elektrik ark püskürtme yöntemi ile üretilmiş oldukları kaplama yapısındaki oksit ve porozite oranlarının % 2 ila % 4,5 arasında değiştiği tespit edilmiştir. He ve arkadaşlarının [31] yapmış olduğu çalışmada Cr₃C₂ dolgulu paslanmaz çelik özlü tel ile üretilmiş

kompozit kaplamalardaki porozite miktarının % 0,9 ila % 3,1 arasında değiştiği bulunmuştur. Wang ve Seitz [58] çeşitli bileşimlerdeki Fe, Cr, C, B ve Si içerikli demir esaslı özlü teller ile alev püskürtme, ark püskürtme ve yüksek hızlı alev püskürtme (HVCC) yöntemleri kullanılarak kaplamalar üretmiştir. Yapılan bu çalışmada üretilmiş kaplamaların porozite içerikleri % 3 ile % 6, oksit miktarları ise % 3 ile % 8 arasında değiştiği tespit edilmiştir. İ. Y. şeker [59], 13 Cr'lu elik tel ile çeşitli kaplama parametrelerinde üretmiş olduğu kaplamalardaki porozite miktarını % 1,7 ila % 6,89 arasında değiştiğini ifade etmiştir. Belirtilen çalışmalardaki porozite değerleri ile bu çalışmada bulunan değerler birbiri ile uyum içindedir.

FeCrCMn esaslı özlü tel kullanılarak elektrik ark püskürtme yöntemi ile akım, voltaj, primer gaz basıncı ve püskürtme mesafesi parametrelerinin değişimine bağlı olarak üretilen kompozit kaplamaların mikro ve makro sertlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Ölçüm sonrasında elde edilen kaplamaların mikro ve makro sertlik değerleri birbiri ile uyum göstermektedir. En yüksek kaplama sertlik değerleri 200 A, 28 V, 4 bar ve 100 mm. püskürtme mesafesi parametrelerinde üretilen kaplamada elde edilmiştir. Elde edilen bu sertlik değerinde kaplama oksit miktarının düşük olduğu görölmüştür. Genel olarak üretilen kaplamalarda ölçülen sertlik değerlerinin kaplamaların % oksit artışı ile azaldığı tespit edilmiştir. Planche ve arkadaşlarının [40] 0,8 C'lu elik tel kullanılarak elektrik ark püskürtme kaplamalarda proses parametrelerinin havadaki partikül ve nihai kaplama yapısına etkisini inceledikleri çalışmalarında, kaplama mikrosertliğinin oksidasyonun artması ile artacağı belirtilmiştir. Mevcut çalışmada elektrik ark püskürtme yöntemi ile üretilen FeCrCMn esaslı özlü tel kaplamalarda elde edilen sonuç ile çelişkilidir. Ancak Newbery ve Grant [60]'ın elektrik ark püskürtme ile elik tel püskürtme esnasında oksidasyonun incelenmesi üzerine yapmış oldukları çalışmada, 1,6 mm elik tel kullanılmış olup kontrollü bir şekilde azotlu bir ortama 0, % 5, % 10, % 15 ve % 20 oranlarında oksijen katılarak kaplamalar üretilmiştir. Söz konusu çalışmada gazdaki oksijen miktarının artması ile kaplamadaki oksijen konsantrasyonunun arttığı ve karbon konsantrasyonunun azaldığı tespit edilmiştir. Ortamın oksijen konsantrasyonu % 10 olduğunda üretilen kaplamalarda altlığa yakın bölgelerde yaklaşık % 2,3, kaplamanın üst kısmında yaklaşık % 4 oranında oksit iğeriği tespit edilmiştir. Oksijen miktarı % 19,7'ye çıkarıldığında kaplamanın altlığa yakın bölümlerindeki oksit konsantrasyonu %

12'ye, kaplamanın üst kısmında % 31'e yükseldiği tespit edilmiştir. Yine aynı çalışmada atomize gazdaki oksijen miktarının artması ile çelik damlacıkların mikrosertliklerinin düştüğü ifade edilmiştir. Atomize gaz olarak azot kullanılarak üretilen kaplamalarda mikrosertlik 510 VHN iken %19,2 O₂ ile üretilen kaplamalarda mikrosertlik yaklaşık 330 VHN'a düşmektedir. Makrosertlik değerlerinin de atomize gaz basıncındaki oksijen miktarının artması ile azaldığı belirtilmiştir. Mevcut çalışma kapsamında FeCrCMn esaslı özlü tel kaplamalarda primer gaz basıncının değişimine bağlı olarak üretilen kaplamalarda 200 A_26 V_3 bar_150 mm proses parametrelerinde üretilen kaplamanın oksit miktarı % 10 olup mikrosertlik değeri 1260 HV_{0,2} ve makrosertlik değeri 95 HRA olarak elde edilmiştir. Aynı proses parametrelerinde primer gaz basıncı 3 bardan 5 bara yükseltildiğinde kaplamanın oksit miktarı % 13'e yükselmiş olup mikrosertlik değeri 1011 HV_{0,2} ve makrosertlik değeri 94'e düşmüştür. Buradan anlaşılacağı gibi elektrik ark püskürtme çelik ve çelik esaslı özlü tel kaplamalarda oksidasyonun yoğunluğuna bağlı olarak karbon azalması meydana geldiği için kaplamaların sertlik değerleri düşmektedir. Newbery ve Grant [60]'ın yapmış oldukları çalışmada elde ettikleri sonuç ile mevcut çalışmada elde edilen sonuçlar birbiri ile uyumludur.

8.2. Karbür Morfolojisi ve Bileşimi

FeCrCMn esaslı özlü kaplama teli şiddetli abrazyon aşınmalı ortamlarda aşınma dayanımı için kullanılmaktadır. Elektrik ark püskürtme yöntemi, termal püskürtme yöntemleri ve ark kaynağını bir arada barındıran çok genel özelliklere sahip bir prosestir. Prosesin bütün safhalarında ergimiş metal üzerine atmosferik oksijenin sabit ve yüksek yoğunluklu etkisi; ergimiş metaldeki oksijenin kütle transfer katsayısı ve diğer metalurjik faktörler ile karşılaştırıldığında daha yüksektir. Buna bağlı olarak ergiyiğin üzerinde daha fazla cüruf bulunabilmektedir. Bu prosesin kendine has özellikleri analiz edildiğinde elektrik ark püskürtme kaplamaları için arzu edilen kaplama alaşım bileşimi elde edilebilir ve alaşım elementleri bu amaçla oranlanabilir. Alaşım elementleri oksidasyona karşı ergimiş metali korumalıdır. Bu şekilde; arzu edilen yüksek seviyedeki mekanik ve servis özelliklerinin kaplama yapısında bulundurulur. FeCrCMn esaslı özlü tel bileşimindeki alaşım elementlerinin kaplama yapısına etkisi aşağıda verilmiştir [61].

8.2.1. Karbonun etkisi

Çeliğin karbon içeriğinin artması ile çeliğin ergime derecesi düşer ve ergimiş koşullardaki akışkanlık artar. Önemli miktarda karbon elektrik ark püskürtme prosesi sırasında yanar. Kaplamanın karbon içeriği tel bileşimi ile karşılaştırıldığında önemli ölçüde düşmektedir. Bunun sebebi olarak karbonun yüksek reaksiyon kapasitesi ve oksijene karşı yüksek afinitesi olarak açıklanmaktadır. Bu sebeple FeCrCMn esaslı özlü telde karbon oranının yüksek tutulması öngörülmektedir. Karbon çelikte yüksek sertleştirici etkiye sahiptir. Su verme işleminde yüksek sertlikteki martensitik yapının oluşumuna imkan vermektedir. Bilindiği gibi su verilmiş şartlarda U8 çeliğinin (% 0,76 – 0,83 C) sertliği 63-65 HRC'dir. Ancak elektrik ark püskürtme tekniğinde karbonun kaplama sertliği üzerindeki etkisi tam olarak kanıtlanamamıştır. Bunun sebebi olarak; birincisi kaplama prosesi boyunca karbon yanmasının yüksek olması, ikincisi ise püskürtme boyunca kaplama tabakaları arasında ısıl işleme maruz kalmasıdır. Karbon tel bileşiminde düşük konsantrasyonda kalması durumunda metali oksidasyona karşı koruyamaz [61].

8.2.2. Kromun etkisi

Krom alaşımlama için yaygın olarak kullanılmaktadır. Fe – Cr alaşım sisteminin kırılğan sigma fazı (FeCr) oluşumu ve sertliği düşük miktarda arttırması sebebiyle pratik uygulamalar için pek bir önemi bulunmamaktadır. Genel olarak Fe-Cr-C üçlü sisteminin pratik uygulamalarda kullanılmasının sebebi bu durumdur. Aşınma dayanımlı alaşımların servis özelliklerinde kromun etkisi karbon rezonansı içinde çok güçlüdür. Fe-Cr-C alaşımlarının yüksek derecedeki servis özellikleri metalik ana faz ve karbürlerin mikrosertlik, miktar, boyut ve morfolojisi ile tanımlanmaktadır [61].

Çeliklerde krom ortorombik Cr_3C_2 , trigonal Cr_7C_3 ve kübik $Cr_{23}C_6$ karbürleri biçiminde oluşabilir. Cr_3C_2 karbürü Fe-Cr-C sisteminde yalnızca az sayıdaki durumlarda bulunabilir. Birçok durumda, krom içeriği % 7'den düşük ise sementit tipi karbürler oluşur. Krom hızlı soğumanın bulunduğu koşullarda çeliğin sertleşebilirliğini arttırır. Bu sebeple kromlu çelik kaplama yapısı genellikle

martensit ve temper ürünlerinden oluşur. Başlangıçtaki tel bileşiminde yüksek oranda krom bulunması halinde kaplama $Cr_{23}C_6$ karbürleri ve küçük miktarda ostenit içerecektir. Krom büyük oranda kaplamanın korozyon dayanımını ve adhezyon verimliliğini arttırmaktadır. Krom elektrik ark püskürtme sırasında yanmamaktadır [61].

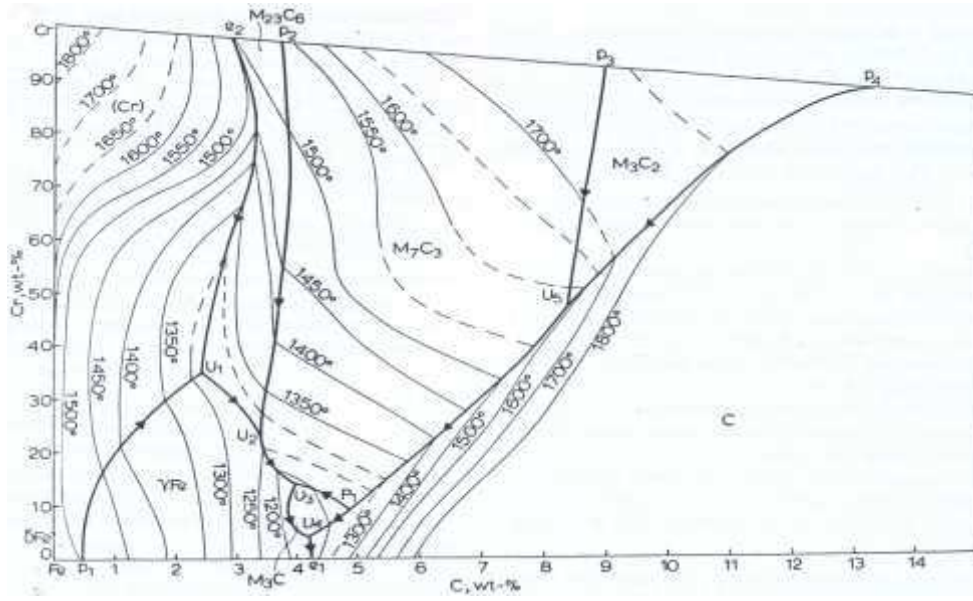
8.2.3. Manganın etkisi

Aşınma dayanımlı alaşımlar için manganın önemi östenit oluşturma kapasitesi ve karbür stabilizasyonu şeklinde tanımlanmaktadır. Manganın östenit üzerindeki stabilizasyon etkisi nikel ile benzerdir.

Tablo 8.1. FeCrCMn esaslı özlü teldeki elementlerin elektrik ark püskürtme kaplamalardaki etkisi [61]

Parametre	Karbon	Krom	Mangan
Sertlik	Arttır	Arttır	Etkisi yok
Şekil değiştirme	Düşürür	Etkisi yok	Düşürür
Aşınma dayanımı	Arttır	Arttır	Etkisi yok
Bağ mukavemeti	Düşürür	Etkisi yok	Etkisi yok
Oksidasyon derecesi	Etkisi yok	Etkisi yok	Düşürür
Partikül sıcaklığı	Etkisi yok	Arttır	Etkisi yok

Mangan beynit aralıktaki dönüşümü bastırır ve martensitik dönüşüm sıcaklığının büyük oranda düşmesi ile geniş bir aralıkta dönüşüm proses süresini arttırmaktadır. Bu sebeple mangan ile çeliklerin alaşımlandırılması yapı içerisinde önemli miktarda kalıntı ostenit oluşumuna neden olur. Birçok durumda oluşmuş bu yapı (kalıntı ostenit, martensit ve karbür) darbeli yükleme altında yüksek servis özelliklerine sahiptir. Fe-Cr-Mn-C sistem alaşımındaki optimum mangan içeriği % 2-4 oranındadır. Tablo 8.1.'de elektrik ark püskürtmede alaşım elementlerinin etkilerinin analiz sonuçları verilmektedir [61].



Şekil 8.1. Fe- Cr-C üçlü denge sistemi [62].

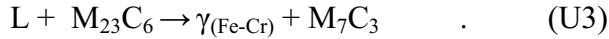
Bu çalışmada kullanılan FeCrCMn esaslı özlü teldeki 28Cr-5C-1Mn bileşimi ile elektrik ark püskürtme kaplama yapısında yüksek sertliğe sahip M_7C_3 ve $M_{23}C_6$ kompleks karbürlerin oluşması istenmektedir. Şekil 8.1’deki Fe-Cr-C üçlü denge sistemi ve bu sistemde M_7C_3 ile $M_{23}C_6$ karbürlerin hangi aralıkta bulunduğu, Tablo 8.2’deki dönüşüm formülleri ile verilmektedir. Tablo 8.3’de Fe-Cr-C sisteminde bulunan fazların kristal yapıları ve kafes parametreleri görülmektedir. Oluşan karbürler çok karmaşık ve farklı kristal yapıya sahiptir ve bu Tablo 8.3’de verilmiştir [62].

$Cr_{23}C_6$ karbürü kompleks bir yapıda bulunup mevcut karbür yapısı birim hücrelerinde 92 metalik atom bulunmaktadır. Bu büyük birim hücreler 8 küçük hücreye bölünebilir. Bu küçük hücrelerin kenarları alternatif enbo-oktehdral ve küp biçimindeki krom atomlarının grupları ile çevrelenmiştir. Genelde bu bölünme geometrik açıklama amacı ile yapılmıştır ve molekül gruplandırma oluşumu anlamına gelmemektedir.

$Cr_{23}C_6$ kafes yapısı içerisinde karbon atomları büyük kafesin kenarlarındaki metal atomları da kübo-oktehdral arasındaki araya yerleşir. Bu şekilde her karbon atomu 8 metal atom komşuya sahiptir. $Cr_{23}C_6$ içerisinde, Cr’un yaklaşık %30’u Fe iyonları

ile yer değiştirebilir. Fe atomları kafeste yer almakta olup kubo-oktehdralde yer alamamaktadır.

Tablo 8.2. Fe-Cr-C sisteminde U1, U2 ve U3 reaksiyonları [62-64]



Tablo 8.3. Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerin mikroyapısında bulunan fazlar ve kafes parametreleri [63]

Faz	Kafes Yapısı
γ Fe	YMK
α ...Fe	HMK
Cr	HMK
Fe_3C	Ortorombik
$Cr_{23}C_6$	YMK
Cr_7C_3	Hekzagonal
σ (% 14,7 Cr)	Tetragonal

Fe atomları Cr atomlarından daha küçüktür ve Cr ayrıca Cr_7C_3 karbürlerini oluşturmaktadır. Cr_7C_3 kafes yapısı karmaşık ve hegzagonal bir simetriye sahiptir. Cr_7C_3 içerisinde, Cr'un yarısının yerini Fe atomları alabilmektedir. Cr ayrıca serbest şekilde sementit içerisinde çözünebilmektedir. Bu sebeple Cr içeren bir çelik içerisinde hem sementit hem de krom karbür oluşur. Bu şekilde yapı hem Cr hem de Fe içermektedir. Bu çalışmada elektrik ark püskürtme yöntemi ile üretilen FeCrCMn esaslı kompozit kaplamaların XRD analizleri ve EDS incelemelerinde Cr ve Fe'in bir arada hem oluşan karbür yapılarında hem de kaplama ana fazını oluşturan katı çözeltilerde olduğu tespit edilmiştir. Özellikle $(Cr,Fe)_{23}C_6$ karbürünün hızlı katılaşma sebebiyle Cr,Fe katı eriği ile beraber bulunduğu ve bu şekilde kaplama yapısını oluşturduğu da bu çalışmada tespit edilmiştir. Benzer çalışmaları yürüten araştırmacıların [62-65] yayınladıkları sonuçlar mevcut bulguları desteklemektedir.

Elektrik ark püskürtme yöntemi ile FeCrCMn esaslı özlü tel kompozit kaplamalarda karbür oluşumu ile ilgili olarak telin öz yapısında bulunan Mn, Cr'a benzer şekilde davranmaktadır. Ayrıca kararlı bir Mn-C sisteminde kararlı karbür içermesi yönüyle Fe atomlarına benzerliği daha yüksektir. Yüksek sıcaklıktaki ark ile ergiyen telden

yine yüksek sıcaklık ile hareket eden damlacıkların (droplet) altlık yüzeyine çarpması sonucu meydana gelen ani katılaşmayla Cr'un oluşturduğu kompleks karbürler olan $Mn_{23}C_6$ ve Mn_7C_3 gibi yüksek sıcaklıkta kararlı olan karbürler kaplama yapısında bulunabilmektedir. Bu karbürlerin yapıda bulunması kaplama yapısında $Cr_{23}C_6$ veya Cr_7C_3 fazlarının da bulunduğu anlamını taşıdığı Lu ve arkadaşlarının [63] yapmış olduğu çalışmada belirtilmiştir. Bu çalışma kapsamında üretilen kompozit kaplama yapılarının yüksek sertlik değerlerine ulaşması M_7C_3 tipi karbürlerin kaplama yapısında ana faz ile uyum içerisinde bulunmasına bağlıdır. Bu şekilde FeCrCMn esaslı özlü tel ile üretilen kompozit kaplamaların abrazif aşınma dayanımları kaplamaların sahip olduğu yüksek sertliklerine bağlı olduğu görülmüştür. M_7C_3 tipi karbürler en yüksek mikrosertlik değerine sahip karbürlerdir. Tablo 8.3'de karbür tipleri ile mikrosertlik ilişkileri verilmektedir. Bu sebeple üretilen kompozit kaplamalarda M_7C_3 tipi karbürlerin varlığı çok önemlidir. M_7C_3 karbürler yüksek karbon konsantrasyonunda mevcut olmaktadır [63].

Lu ve arkadaşları [63] bir Fe-Cr-C üçlü sisteminde karbon davranışının ve buna bağlı karbürlerin oluşumunun tespiti için yapmış olduğu çalışmada $(Cr,Fe)_{23}C_6$ karbürünün $Cr_{23}C_6$ 'dan önemli derecede daha stabil olduğunu tespit etmişlerdir. Bir Fe-Cr-C sisteminde $(Cr,Fe)_{23}C_6$ karbürleri daha yoğun bir şekilde oluşacaktır. Bu çalışmada kullanılan FeCrCMn esaslı özlü tel ile kaplama yapısının geneli $(Cr,Fe)_{23}C_6 + Cr,Fe - \gamma$ olduğu yapılan XRD analizleri ve EDS çalışmaları sonucu tespit edilmiştir. C. Fan ve arkadaşları, [64] gaz tungsten ark kaynak (GTWA) tekniğini kullanarak ASME A36 çeliğine Cr ve C dolgu ile yüksek kromlu Fe-Cr-C sert yüzey oluşturmuşlardır. Farklı karbon dolgu oranına bağlı olarak ötektik altı, ötektik ve ötektik üstü yapılar kaplama yüzeyinde gözlenmiştir. Dolgu yüzeyinden alınan XRD analizi ve yapılan mikroyapı çalışmasına bağlı olarak ötektiküstü kompozisyonda Cr-Fe katı çözeltisi (α), $(Cr,Fe)_{23}C_6$ ve $(Cr,Fe)_7C_3$ yapıları tespit edilmiştir. Özellikle kütleli $(Cr,Fe)_{23}C_6$ kompleks karbürünün merkezde $(Cr,Fe)_7C_3$ karbürü içerdiği ve mevcut kaynak kaplamanın yüksek sertliğinin (HRC 70) bundan kaynaklandığı belirtilmiştir. Ayrıca, kütleli $(Cr,Fe)_{23}C_6$ 'nın ötektik yapı ile sarıldığı ve bunun da çatlak oluşumunu sınırladığı gözlenmiştir. % 5 grafit ilavesi sonrası primer Cr-Fe katı çözelti matrisi ferrit (α) ve ince ötektik yapı ($M_{23}C_6 + \alpha$) yapıda bulunmaktadır. Fan ve arkadaşlarının [56] çalışmasında yavaş katılaşmaya bağlı olarak Cr,Fe katı

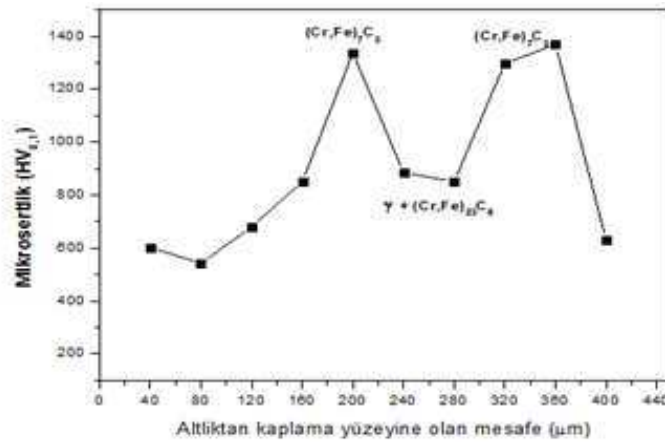
çözeltisi (α) fazında bulunmaktadır. L. Lu ve arkadaşlarının [63] yapmış olduğu çalışmada yönlendirilmiş katılaşma ile üretilmiş yüksek kromlu dökme demir yapısı incelemiştir. Yönlendirilmiş katılaşma ile üretilen yüksek kromlu dökme demirin hızlı katılaşan bölgelerdeki meydana gelmiş fibroz yapılarının XRD incelemesinde östenit faz (γ), M_7C_3 ve $M_{23}C_6$ karbür yapılarının bulunduğu tespit edilmiştir. Söz konusu çalışmada hızlı katılaşan bölgelerde Cr,Fe katı eriyiği olarak ferrit fazı (α) yerine östenit (γ) fazının yapıda bulunduğu belirtilmiştir. X. Wu [65]'nin lazer sentezli demir esaslı alaşım kaplamalarındaki hızlı, dengesiz katılaşma mikroyapıları ve faz dönüşümleri üzerine yapmış olduğu çalışmada hızlı katılaşma şartlarında ötektik üstü mikroyapıya sahip olduğu, γ – östenitin ve $\gamma + (\gamma + M_7C_3)$ fazlarının bulunduğu belirtilmiştir. Zhang ve Lei [66] lazer sırlama ile Ni-Cr₃C₂ kompozit kaplamalarının mikroyapı ve erozif-korozif aşınma performansı üzerine yapmış olduğu çalışmada, hızlı katılaşma şartlarının olduğu lazer sırlamada kaplamanın XRD analizi sonucunda yapının östenit (γ) ve M_7C_3 (M: Fe,Cr) karbürden oluştuğu belirtilmiştir. Yapılan çalışmalarda görüldüğü üzere bir Fe-Cr-C sisteminde normal katılaşma şartlarında ana faz Cr,Fe (γ) \rightarrow Cr,Fe (α)'ya dönüşmektedir. Elektrik ark püskürtme kaplama prosesinde altlık yüzeyinde oluşturulan kaplama yapısı ani ve hızlı katılaşma koşullarında oluşmaktadır. Elektrik arkının sıcaklığı ile oluşan ve atomize gaz ile altlığa doğru ilerleyen eriyik ve/veya yarı eriyik damlacıklar (droplet) altlık yüzeyine çarptıkları anda hızlı bir şekilde katılaşır. Damlacıkların üst üste gelmesi ile oluşan lamellar kaplama yapısı dengesiz bir mikroyapıya sahiptir. Fe-Cr-C sisteminde dengeli katılaşma ile oluşan fazlar elektrik ark püskürtme kaplamalarda bulunmamaktadır. Bu sebepten yüksek sıcaklıklarda kararlı olan (≈ 850 °C) östenit fazı (γ) Cr,Fe katı çözeltisi olarak kaplama fazında $(Cr,Fe)_{23}C_6$ kompleks karbürü ile birlikte bulunmaktadır. Hill ve arkadaşlarının [67] abrazif aşınma dayanımına sahip plastik kalıp çeliğinin üretilmesinde HVOF ve APS olarak iki termal püskürtme yöntemini kullanılmış olup kaplama yapısının M_7C_3 ve $M_{23}C_6$ karbürleri ile beraber tamamiyle östenitik olduğunu tespit etmişlerdir. Bu çalışmada elektrik ark püskürtme kaplama prosesi ile akım, voltaj, primer gaz basıncı ve mesafenin değişimine bağlı olarak üretilmiş kaplamalar üzerinde yapılan XRD analizlerinde, kaplama yapısının (Cr, Fe – γ) katı çözeltisi ile kompleks karbürler olan $M_{23}C_6$ [$(Cr,Fe)_{23}C_6$] ve M_7C_3 [$(Cr,Fe)_7C_3$, Cr_7C_3 ve Mn_7C_3] karbürleri içerdiği görülmüştür. Bunun yanında termal püskürtme kaplamalarda oluşan oksit yapıları [$(Fe,Cr)_3O_4$, Fe_3O_4] üretilen

kaplamalarda bulunmaktadır. XRD analizlerinde oksit piklerinin çok yoğun olmadığı ve genişleme gösterdiği tespit edilmiştir. Bunun sebebinin hızlı soğumadan (yaklaşık 10^6 K/s) dolayı amorf/kristalin fazda bulunmaları olarak yorumlanmıştır. D. Y. He ve arkadaşlarının [29] ark püskürtme Fe-FeB-WC kaplamaların mikroyapı ve aşınması üzerine yapmış olduğu çalışmada da benzer tespitler yapılmıştır. Bu çalışmada elde edilen XRD sonuçları yukarıda belirtilen literatür ile uyum göstermektedir.

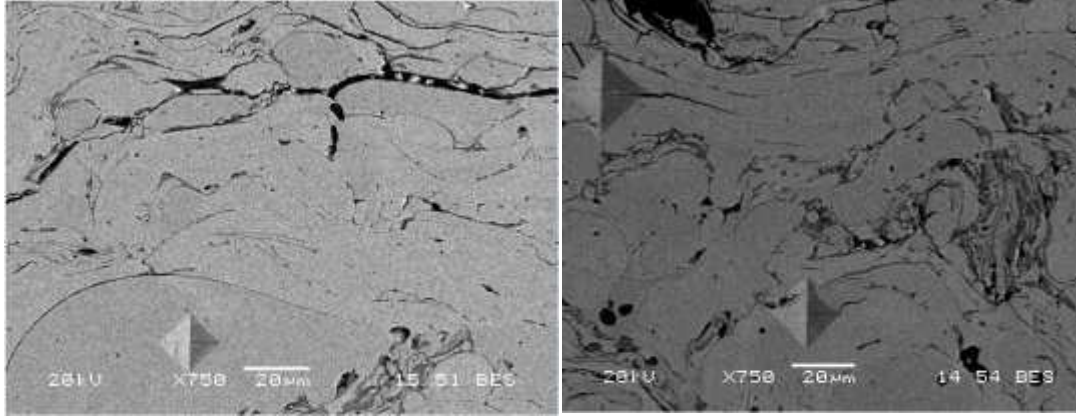
XRD analiz sonuçlarına bakıldığında özlü tel kaplamaların yapılarında M_7C_3 ve $M_{23}C_6$ kompleks karbürlerin varlığı görülür. Bu karbürler $(Cr_{0,70},Fe_{0,30})_7C_3$ ve $(Cr_{15,56},Fe_{7,42})C_6$ şeklindedir. Mn, Cr gibi davranarak Mn_7C_3 yapısını oluşturabilmektedir. Ayrıca kaplama ana fazı hızlı katılaşma sebebiyle γ -Cr,Fe katı çözeltilisinden meydana gelmektedir [67-68]. Fe-Cr-C üçlü sisteminde hızlı katılaşma koşullarında γ -(Cr,Fe) katı çözeltilisi ile M_7C_3 karbürünün meydana geldiği X.Wu [65]'nin Fe, Cr, W, Ni ve C içerikli toz lazer cladding sonrası yapmış olduğu yapı incelemesinde tespit edilmiştir. Yine aynı çalışmada M_7C_3 karbürü üzerinden alınmış olunan ATEM/EDX microchemistry dadasında % element konsantrasyonu Cr için 45,84 ve Fe için 30,46 olarak tespit edilmiştir. M_7C_3 karbürü trigonal kafes yapısına sahip olup kromca zengin bir karbürdür. Kafes parametreleri $a = 14,0 \text{ \AA}$ ve $c = 4,5 \text{ \AA}$ 'dur. Fe ve Mn bu fazda çözünür. M_7C_3 karbürde, Cr miktarı diğer alaşım elementlerine göre yeterince yüksek olmaktadır [68-69]. Lu ve arkadaşlarının [63] yapmış olduğu çalışmada bir Fe-Cr-C ötektik alaşımının katılaşması sırasında oluşan yapıdaki M_7C_3 fibrelerin EDS analizlerinde Fe içeriğinin % ağırlık olarak ortalama 29,991 ve Cr içeriğinin ise ortalama % 61,245 olduğu bulunmuştur. S. Buytoz [70]'un Fe-Cr-C kaplamalarını mikroyapısal olarak incelediği çalışmasında, M_7C_3 karbürü üzerinden alınmış EDS analiz sonucunda ağırlıkça % olarak Cr'un 65,95 ve Fe'in ise 27,15 olduğu tespit edilmiştir ve M_7C_3 karbürünü Cr'ca zengin bir karbür olarak tanımlamıştır. Cai ve arkadaşlarının [71] yapmış olduğu çalışmada, EDS analiz sonucunda M_7C_3 karbürünü Cr'ca zengin, $M_{23}C_6$ karbürünü de temel olarak birbirine yakın değerlerde Fe ve Cr içerikli olarak tarif edilmiştir. Belirtilen bütün bu literatür çalışmalarına bağlı olarak bu çalışmada EDS analizlerinden elde edilen yüksek krom ve düşük demirli sonuçları M_7C_3 [$(Cr,Fe)_7C_3$] olarak yorumlanmıştır. Cr ve Fe değerlerinin birbirine yakın olduğu EDS analiz sonuçları $M_{23}C_6$ [$(Cr,Fe)_{23}C_6$] olarak değerlendirilmiştir. Wilden ve arkadaşlarının [41] elektrik ark püskürtme ile

X46Cr13 teli kullanarak üretmiş oldukları kaplamalarda yapmış oldukları EDS analizlerinde kaplama mikroyapısındaki açık renkli alanlarda demir miktarının yükseldiği krom miktarının düştüğünü, koyu bölgelerde ise sonuçların değişkenlik gösterdiği belirtilmiştir. Açık gri alanlarda demir miktarının düştüğü, koyu gri alanlarda ise demir ve kromum miktarının azalarak oksit miktarının arttığı da ifade edilmiştir. Bu çalışmada elde edilen mikroyapıların EDS analizlerinde aynı durum görülmüş olup değerlendirmeler yukarıda verilen literatür ile uyumludur.

Fe-Cr-C sisteminde yer alan kompleks karbür oluşumu üzerine yapılan çalışmada [64] elde edilen yüksek sertliğin $(Cr,Fe)_7C_3$ ve $(Cr,Fe)_{23}C_6$ karbürlerinden ileri geldiği belirtilmiştir. FeCrCMn esaslı özlü tel kaplamalarda da aynı durum geçerli olmaktadır. Kaplamanın yüksek sertliklere ulaşması yapısındaki kompleks karbürlere bağlıdır. Bu karbürlerin kaplama yapısında bulunması kaplamaların abrazif aşınma dayanımlarının artmasında önemli rol oynar. Ancak bu karbürlerin matris ile uyum halinde bulunması gerekmektedir. Bir Fe-Cr-C üçlü sisteminde yüksek sertliğe sahip $(Cr,Fe)_7C_3$ (≈ 1600 HV) karbür fazı %2-5 C ve %18-30 Cr krom içeriği olduğunda meydana gelmektedir [66]. Elektrik ark püskürtme yöntemindeki proses parametreleri tel özü bileşimindeki Fe28Cr5CMn değerinin korunup kaplama fazında karbür yapılarının oluşabilmesi ve homojen bir şekilde kaplama yapısında dağılması aşınma performansı için önemlidir. Bu çalışmada bütün kaplamalarda M_7C_3 ve $M_{23}C_6$ tipi karbürlerin oluştuğu görülmüştür. Kaplama bölgesinden alınan mikrosertlik değerlerinde değişkenliklerin olduğu da tespit edilmiştir.



Şekil 8.2. FeCrCMn esaslı özlü tel kaplamada gerçekleştirilen mikrosertlik ölçüm profili



a)

b)

Şekil 8.3. a) Kaplama yapısındaki $(Cr,Fe)_7C_3$ karbürünün sertlik ölçüm izi, b) $\gamma - (Fe,Cr) + (Cr,Fe)_{23}C_6$ yapısının sertlik ölçüm izi

FeCrCMn kaplama tabakasının altlık doğrultusundan kaplama yüzeyine doğru alınan mikrosertlik değerleri incelendiğinde mikrosertlik değerlerinin kaplamanın çeşitli bölgelerinde farklılık göstermektedir (Şekil 8.2.). Şekil 8.3.'de kaplama yapısındaki M_7C_3 ve $M_{23}C_6$ karbürlerinden alınmış sertlik ölçüm izleri verilmektedir. Yüksek mikrosertlik değerlerine sahip bölgeler M_7C_3 tipi $(Cr,Fe)_7C_3$ karbürünü tanımlamıştır.

8.3. Üretilen Kompozit Kaplamaların Abrazif Aşınma Performansları

Elektrik ark püskürtme yöntemi ile üretilen FeCrCMn esaslı kaplamalarda karbürler mikroyapıda hacimce % 30–40 arasında bulunmaktadır. Bunu dışında kalan kısım matristir. Dengeli katılaşma yapısına sahip olan yüksek alaşımlı beyaz dökme demir alaşımlarında mikroyapı esas itibari ile perlit-sementit fazlarından ibaret olmasının yanında M_7C_3 tipi krom-karbür de içerir. Bu krom-karbürlerin yapıda bulunması kaplamanın abrazif aşınma dayanımları için çok önemlidir. Bu karbürler yüksek sertliğe sahip olmaları sebebiyle aşındırıcı partiküllerin kaplama yüzeyinden malzeme kaybına direnç gösterir.

Bu çalışmada ASTM G65-04'e göre gerçekleştirilen abrazif aşınma testi sonrası yüksek mikro ve makro sertliğine sahip kaplamalar yüksek abrazif aşınma dayanımı göstermiştir. Püskürtme parametreleri kaplamanın yapısını etkilemektedir. Yüksek ark sıcaklığının sağlandığı, yüksek gaz basıncının kullanıldığı ve uzun havada kalma

süresinin bulunduğu proses parametrelerinde oksidasyonun yüksek olduğu bu çalışmada tespit edilmiştir. Oksidasyon yoğunluğuna bağlı olarak kaplamalarda oksit miktarı artmış ve porozite miktarı da benzer şekilde artmıştır. FeCrCMn esaslı özlü tel kaplamalarda oksitli bölgelerin genellikle damlacıkları sardığı veya çarpma esnasında oluşan lamellerin altında yer aldığı görülmüştür. Kaplama ana fazı seramik esaslı kompozit karakterli olması sebebiyle mikroçatlakların da yapıda bulunduğu yapılan optik mikroskop ve SEM çalışmaları sonucu tespit edilmiştir. Abrazif aşınma testi sonunda yapılan yüzey incelemesinde en az malzeme hacim kaybına sahip kaplamalarda karbürlerin yüzeyde tutunarak malzeme kaybını engelledikleri görülmüştür. Bunun tersi olarak aşınma testi sonrası yüksek malzeme hacim kaybına sahip olan kaplamaların yüzeylerinde derin boşlukların bulunduğu, bu sebepten yüzeydeki karbür bölgelerin veya lamellerin yüzeyden ayrıldığı anlaşılmıştır. Bu sonuçlara bağlı olarak aşınma mekanizmasının delaminasyon olduğu görülmüştür. Abrazif aşınma esnasında kaplama yüzeyinde plastik kayma deformasyonu meydana gelir. Aarayüzeyde aşındırıcı partiküllerin etkisi ile stres birikimine bağlı olarak mikroçatlaklar oluşmaya başlar. Yüzeydeki deformasyona bağlı olarak mikroçatlaklar lamellerlerin kenarındaki oksit bölgelerinden ilerler ve kaplamadaki diğer çatlaklar veya boşluklar ile birleşerek lamelin yapıdan ayrılmasına sebep olur. Bu sebeple kaplamalarda yüksek kohezyon dayanımı yüksek abrazif aşınma performansı için çok kritiktir. Proses parametrelerinin havada yol alan damlacıkların oksidasyon davranışını etkilediği gibi altlık yüzeyine çarpmaları esnasındaki oksidasyonda lamellerin kohezyon kuvvetini düşürmektedir. X. Wang [48]'ın elektirik ark püskürtme sistemi üzerine yapmış olduğu çalışmada Inconel 625 püskürtme kaplamanın aşınma davranışını incelemiş ve kaplamada meydana gelen malzeme kaybını aynı şekilde açıklamıştır.

Bu çalışmada yüksek kaplama sertliğine sahip kaplamaların yüksek abrazif aşınma performansı gösterdiği tespit edilmiştir. Chang ve arkadaşlarının [72] yüksek karbonlu Fe-Cr-C sert yüzey alaşımı ile gaz tungsten ark ergitme prosesi kullanılarak dolgu kaynağı uygulamış oldukları çalışmalarında oluşturulan dolguların sertliğinin $(Cr,Fe)_7C_3$ karbür miktarına bağlı olduğu, sertliği yüksek olan kaplamaların daha az aşınma ağırlık kaybı (g) gösterdiği tespit edilmiştir. Sert ve aşınma dayanımı sağlayan $(Cr,Fe)_7C_3$ (1300 HV) karbürü yeterince güçlü ve sünek $\gamma - Cr,Fe$ ötektik

matrisinin içerisinde uniform olarak dağılması durumunda kompozite kaplama yüksek ve uniform bir sertliğe sahip olmaktadır. Abrazif aşınma sırasında $(Cr,Fe)_7C_3$ karbürü aşındırıcı partikül ile temas halinde olduğu zaman sahip olduğu yüksek sertlik sebebiyle plastik deformasyonu başarılı bir şekilde engelleyebilmektedir. Bu şekilde yüzeyden daha fazla malzeme ayrılmasını önlemektedir. Xu ve arkadaşlarının [73] yüksek hızlı ark püskürtme yöntemi ile üretilen Fe-Al ve Fe-Al/WC kaplamaların aşınma dayanımları üzerine yapmış oldukları çalışmada Fe-Al kaplamanın mikrosertliği $238,9 \text{ kg mm}^{-2}$, Fe-Al/WC kaplamanın mikrosertliği $321,4 \text{ kg mm}^{-2}$ olarak bulunmuştur. Bu kaplamaların aşınma performanslarına bakıldığından mikrosertliği yüksek olan Fe-Al/WC kaplamanın yaklaşık 4 kat daha yüksek aşınma dayanımı gösterdiği tespit edilmiştir. Bu çalışmada gerçekleştirilen 13 Cr'lu çelik ile FeCrCMn esaslı özlü tel kaplamaların ASTM G65-04'e göre gerçekleştirilen abrazif aşınma testi sonrası FeCrCMn özlü tel kaplamanın yüzeyindeki küçük tepecikler söz konusu karbürlerin varlığını açıklamaktadır. Burada $(Cr,Fe)_7C_3$ karbürü abrazif aşınma sırasında kaplamanın abrazif aşınma dayanımında baskın rol oynamıştır. $(Cr,Fe)_7C_3$ karbürü kaplama ana fazını oluşturan $\gamma - Cr,Fe + (Cr,Fe)_{23}C_6$ fazının daha fazla aşınmasını önemli ölçüde engellemiştir. $(Cr,Fe)_7C_3$ karbürü de güçlü ve yeterince sünek ana faz tarafından desteklenmiştir. Liu ve arkadaşları [74] tarafından yapılan çalışmada benzer sonuca ulaşılmıştır. Matsuo ve arkadaşlarının [75] püskürtülerek oluşturulmuş yüksek kromlu beyaz dökme demir alaşımların aşınma performansları üzerine yapmış oldukları çalışmada püskürtme ile üretilmiş yüksek kromlu alaşımın yüksek oksidasyon dayanımı ve östenit, martensit ve karbürlerin birbirini taşıyabilen bir yapı içerisinde bulunması sebebiyle yüksek aşınma dayanımı gösterdiği belirtilmiştir. Liu ve arkadaşlarının [76] plazma transfer ark işlemi ile üretilmiş $(Cr,Fe)_7C_3$ takviyeli kompozit kaplamanın mikroyapısı ve aşınma dayanımı üzerine yapmış oldukları çalışmada, karbon çeliğine göre yüksek aşınma dayanımı gösteren $(Cr,Fe)_7C_3$ takviyeli kaplamada takviye fazının homojen bir şekilde yapıda dağılması ve bu takviye fazını taşıyabilecek şekilde güçlü ve sünek bir ötektik yapının bulunmasından kaynaklandığı belirtilmiştir. Buchanan ve arkadaşlarının [77] ark kaynağı ile yüzey sertleştirilmiş Fe-Cr-C alaşımlarının mikroyapısı ve abrazif aşınması üzerine yağmış oldukları çalışmada yapıda bulunan karbürlerin yeterince tok bir mikroyapı tarafından desteklenmesi durumunda alaşımın abrazif aşınma dayanımının yüksek olacağı belirtilmiştir. Bu çalışma kapsamında değerlendirilen

akım, voltaj, primer gaz basıncı ve püskürtme mesafesi kaplama yapısındaki M_7C_3 tipi karbürlerin oluşumunu ve kaplama ana fazın bu karbürü yeterince iyi taşıyabilecek toklukta ve süneklite olmasını etkilemektedir. Özellikle 28 V_200 A_4 bar_150 mm proses parametresinde oluşturulan kaplamaların abrazif aşınma dayanımlarının yüksek olması söz konusu bu mekanizmadan kaynaklanmaktadır.

Bu çalışmada, ASTM G65–04 abrazif aşınma testinde yüksek hacim kaybı gösteren kaplamalar ise genel olarak 300 A_32 V_3 bar ve 100-150 mm. parametre değerlerinde üretilen kaplamalardır. Akım ve voltaj değerinin artması ile ark sıcaklığının yükselmesi kaplamanın oksidasyonunu arttırmaktadır. Yüksek oksidasyon sebebiyle kaplamadaki kırılğan oksit alanları artmakta ve ani katılaşma sebebiyle mikroçatlak oluşumu daha yoğun gerçekleşmektedir. Genel itibari ile oksitli alanlar lamelleri çevreleyecek şekilde kaplamada bulunmaktadır. Bu şekilde kaplama yapısı daha kırılğan bir hal almaktadır. Buna ek olarak kaplama teli içeriğinde bulunan karbon yüksek ark sıcaklığı ve oksidasyon sebebiyle yanmakta ve karbürleri oluşturacak yeterli karbon miktarı azalmış olmaktadır. Bütün bunlar neticesinde yüksek ark sıcaklığı parametrelerinde üretilen kaplamaların mikroyapıları soğuma rejimi streslerine bağlı olarak devamlı mikroçatlak, lamel arayüzeylerinde porlar ve oksitler yoğun olarak bulunmaktadır. Bu bölgeler kaplamanın devamlı bir aşındırıcı etki ile karşılaştığında zayıf ve hasar oluşturacak bölgeler olarak davranır. Zayıf adhezyonun bir sonucu olarak lamelar tip mikroyapıya sahip bu kaplamalar herhangi bir yük ve aşındırıcı ile karşı karşıya kaldığında mikroçatlaklar ilerler, oksit ve diğer kırılmış bölgelerle birleşerek lamelin bünyeden ayrılmasına sebep olur. Üretilen kaplama bu şekilde hasara uğrarlar. Abrazif aşınma dayanımı düşük olan kaplamalardaki malzeme kaybının sebebinin bu durum olduğu düşünülmektedir.

BÖLÜM 9. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

9.1. Sonuçlar

Bu çalışmada endüstride kullanılan sert partiküllerin bulunduğu FeCrCMn esaslı özlü kaplama telleri ile elektrik ark püskürtme tekniği kullanılarak kompozit esaslı kaplamaların çeşitli proses parametrelerinde üretilmesi ve proses parametrelerinin kaplamaların abrazif aşınma performansına etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda elektrik ark püskürtme prosesinin temel parametreleri olan akım, voltaj, primer gaz basıncı ve püskürtme mesafesi değiştirilerek FeCrCMn esaslı kaplamalar üretilmiştir. Üretilen bu kaplamalara yapısal karakterizasyon sonrasında, bu çalışma için ASTM G65 standardı şartlarına uygun olarak üretilmiş abrazif aşınma test cihazında abrazif aşınma testi uygulanmıştır. Abrazif aşınma test sonrasında aşınma yüzeyleri SEM ile incelenmiş ve X-ışınları ile oluşan fazlar belirlenmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

1. Bu çalışmada kullanılan FeCrCMn esaslı özlü telin yapılan SEM incelemesi ve EDS analizi sonucunda telin kabuk kısmının düşük karbonlu çelik olduğu, öz kısmının ise C ile beraber % 68,2 Cr ve % 3 Mn elementlerinden oluştuğu belirlenmiştir. Özlü telin kabuğu ile beraber ortalama analizi Fe - %28 Cr %5 C ve %1 Mn'dır. Telin öz kısmının toz boyutunun ortalama 71 μ m olduğu tespit edilmiştir.
2. Kaplama telinden ayrılan özler üzerinde gerçekleştirilen X-ışınları incelemesinde telin öz kısmında Cr_7C_3 karbürünün yanı sıra grafit, Cr_2C_3 ve MnO_2 bulunduğu tespit edilmiştir.

3. Deneysel çalışmalarda farklı parametrelerde 72 adet numune üretilmiştir. Kontrol edilen parametrelere; Akım (100-300 A), voltaj (28-32 V), primer gaz basıncı (3-5 bar) ve püskürtme mesafesi (100-150 mm) dir.
4. Farklı akım, voltaj, primer gaz basıncı ve püskürtme mesafesine bağı olarak üretilen kaplamalarda mikroyapının elektrik ark püskürtme kaplamanın tipik özelliklerinden olan splat yapılarını belirgin olarak gösterdiği gözlenmiştir. Bunun yanı sıra kaplama yapısında oksit, porozite ve yeniden katılmış partiküllerin mevcut olduğu tespit edilmiştir. Optimizasyon çalışmaları her bir parametrenin ayrı ayrı mikroyapıya (oksit ve karbür oluşumuna) etkisi üzerinden irdelenerek optimum sprey parametreleri belirlenmiştir.
5. Akımın ve voltajın artması ile ark sıcaklığı artmaktadır.
6. Akımın ve voltajın artması ile damlacık sıcaklıklarında artış meydana gelmektedir.
7. Ark sıcaklığındaki artış daha iri ve yüksek sıcaklığa sahip damlacıkların oluşmasına sebep olur. Bu da damlacık hızını düşürmektedir.
8. Akımın artması ile tel besleme hızı artacak ve oluşan primer damlacık miktarında artış olacaktır. Bu da püskürtme aksındaki hızın düşmesine sebep olmaktadır.
9. Sıcaklık oksitlenmeyi arttıracak, bu şekilde porozite ve oksit miktarı artacaktır.
10. Kaplama prosesi esnasındaki oksidasyonun yükselmesi ile karbon yanması meydana gelmekte ve kaplamanın sertliği düşmektedir.
11. Optimum kaplama parametreleri 200 A, 28 V, 3 bar ve 100 mm. olarak belirlenmiştir.

12. 100 A, 200 A ve 300 A akım ve 26 V ve 28 V voltaj seviyelerinde 3 bar, 4 bar ve 5 bar olarak üç farklı primer gaz basıncı değerlerinde üretilen kaplamalarda genel olarak porozitenin primer gaz basıncının artması ile azaldığı tespit edilmiştir. En düşük porozite değeri 100 A-28 V-5 bar-150 mm (Pr23 - %2), 200 A-28 V-5 bar-150 mm (Pr43 - %2) ve 300 A-28 V-5 bar-150 mm (Pr53 - %2) proses parametrelerinde elde edilen kaplamalarda ölçülmüştür. Üç farklı primer gaz basıncında üretilen kaplamalarda oksit miktarının gaz basıncının artması ile arttığı tespit edilmiştir. Oksit miktarının artması ile kaplama makro sertliğinin düştüğü görülmüştür. En yüksek kaplama makro sertliği değeri 26 V ve 28 V voltaj seviyelerinde 200 A akım değerinde üretilen kaplamalarda ölçülmüştür. En yüksek kaplama makro sertliğine sahip kaplama 200 A_26 V_3 bar_150 mm proses parametresinde üretilen kaplamada elde edilmiştir (Pr41 – 94,82 HRA).
13. 26 V, 28 V ve 32 V voltaj ve 100 A ve 200 A akım seviyelerinde 100 mm ve 150 mm olarak iki farklı püskürtme mesafesinde üretilen kaplamalarda mesafenin artması ile porozite miktarının arttığı, sadece 100 A ve 26 V ile 200 A ve 28 V proses parametrelerinde üretilen kaplamalarda porozite oranının değişmediği görülmüştür. Üretilen kaplamalarda genel olarak kaplama mesafesinin artması ile oksit miktarı artmış ve en düşük oksit miktarı 200 A akım ile 26 V ve 28 V voltaj seviyelerinde üretilen kaplamalarda ölçülmüştür. Düşük oksit miktarına bağlı olarak en yüksek kaplama makrosertliği 200 A_26 V_4 bar_100 mm (D41) ve 200 A_28 V_4 bar_100 mm (D51) proses parametrelerinde üretilen kaplamalarda elde edilmiştir (D41 – 94,74 HRA ve D51 – 94,83 HRA).
14. Farklı akım, voltaj, primer gaz basıncı ve püskürtme mesafesinde üretilen kaplamalarda yapılan x-ışınları çalışması sonrası elde edilen XRD sonuçlarında kaplama yapısında $(Cr,Fe)_{23}C_6$, $(Cr,Fe)_7C_3$, Cr_7C_3 ve $Mn_{23}C_6$ gibi kompleks karbürler ile beraber $(Cr,Fe) - \gamma$ östenitik katı eriyiği ve Fe_3O_4 ile $FeCr_2O_4$ oksitlerinin bulunduğu belirlenmiştir. $M_{23}C_6$ ve M_7C_3 tipi olan $(Cr,Fe)_{23}C_6$, $(Cr,Fe)_7C_3$, Cr_7C_3 ve $Mn_{23}C_6$ karbürlerinin kaplama makro sertliği yüksek olan kaplamalarda yüksek olduğu tespit edilmiştir. Özellikle

M_7C_3 tipi karbürler olan $(Cr,Fe)_7C_3$ ve Cr_7C_3 karbürlerin varlığının kaplamalardaki yüksek makrosertliğin sebebi olduğu tespit edilmiştir.

15. Üretilen kaplamalara, bu çalışma için özel olarak dizayn edilen abrazif aşınma test cihazında ASTM G65-04 standardı Prosedür C şartları olan 30 sn hızlandırılmış abrazif aşınma testi uygulanmış ve akım değiştirilerek üretilenlerde A12 (0,33 mm³), voltaj değiştirilerek üretilenlerde V22 (0,30 mm³), primer gaz değiştirilerek üretilenlerde Pr41 (0,10 mm³) ve püskürtme mesafesi değiştirilerek üretilenlerde ise D51 (0,10 mm³) kaplamaların en düşük hacim kaybına sahip olduğu görülmüştür. Genel olarak en düşük hacim kaybına sahip kaplamaların düşük oksit miktarına (%9-13) ve buna bağlı olarak en yüksek kaplama makrosertliğine (94 – 95 HRA) sahip kaplamalar olduğu tespit edilmiştir.
16. Özlü tel kaplamaların metalik kaplamalara göre abrazif aşınma performansının tespiti amacıyla bu çalışma için belirlenen optimum proses parametrelerinde üretilen 13 Cr'lu çelik ve FeCrCMn esaslı özlü tel kaplamalara ASTM G65-04 standardı Prosedür A şartlarında (30 dakika) abrazif aşınma testi uygulanmıştır (13 Cr'lu çelik için: 200 A_28 V_5 bar_150 mm, FeCrCMn için: 200 A_28V_3 bar_100 mm). Aşınma testinde FeCrCMn esaslı özlü tel kaplamaların 13 Cr'lu çelik kaplamalara göre % 57 oranında daha yüksek abrazif aşınma performansına sahip olduğu görülmüştür.
17. Abrazif aşınma sonrası aşınma yüzeylerinin incelenmesi neticesinde birkaç aşınma mekanizmasının birarada bulunarak kaplama yüzeylerinde malzeme kaybına sebep olduğu anlaşılmıştır. Bu aşınma mekanizmaları delaminasyon, abrazif yivlenme ve tribo-oksidasyondur.
18. 13 Cr'lu çelik kaplama ile FeCrCMn esaslı özlü tel kaplama yüzeylerinin abrazif aşınma testi sonrasında oluşan yivlerin farklı olduğu görülmüştür. 13 Cr'lu çelik kaplama yüzeyinde oluşan aşınma yivlerinin düzgün bir hat şeklinde olduğu, FeCrCMn esaslı özlü tel kaplama yüzeyinde oluşan aşınma

yivlerinin ise düzgünlükten saptığı gözlenmiştir. Yapılan SEM incelemesi ve EDS analizi neticesinde aşınma yivlerinin düzgünlükten sapmış olduğu kaplama yüzeyinde tepeciklerin varolduğu görülmüş ve bu tepecikleri M_7C_3 karakterli olan $(Cr,Fe)_7C_3$ ile Cr_7C_3 karbürlerinin oluşturduğu anlaşılmıştır.

19. Farklı akım, voltaj, primer gaz basıncı ve püskürtme mesafesinde üretilen kaplamalar içerisinde en düşük aşınma hacim kaybını gösteren kaplamanın 200 A_28 V_3 bar_150 mm proses parametresinde üretilmiş Pr41 nolu ($0,10 \text{ mm}^3$) ve 200 A_28 V_4 bar_100 mm proses parametresinde üretilen D51 nolu kaplamadır ($0,10 \text{ mm}^3$) kaplamalar olduğu tespit edilmiştir. Belirtilen parametrede üretilen kaplama % 9 olarak en düşük % oksit oranına ve 95 HRA ile en yüksek kaplama makro sertliğine sahiptir. Ondan sonra gelen en düşük abrazyon aşınma performansı gösteren kaplamanın. Bu kaplamanın da ölçülen oksit değeri % 10'dur ve sahip olduğu kaplama makro sertliği 95 HRA'dır.
20. Farklı akım, voltaj, primer gaz basıncı ve püskürtme mesafesinde üretilen kaplamalar içerisinde % 1,97 oranı ile en yüksek aşınma hacim kaybına sahip kaplamanın 300 A_32 V_4 bar_150 mm proses parametresinde üretilmiş V33 nolu kaplamanın olduğu tespit edilmiştir. Belirtilen parametrede üretilen kaplamanın % 21 ile en yüksek oksit değeri ve 80 HRA değeri ile en düşük kaplama makro sertliğine sahip olduğu görülmüştür.
21. En düşük aşınma hacim kaybına sahip kaplamalardan biri olan Pr41 nolu kaplama numunesinde abrazyon aşınma testi sonrası aşınma yüzeylerinde yapılan SEM incelemesi ve EDS analizi neticesinde aşınma yüzeylerinde M_7C_3 tipi Cr_7C_3 ve $(Cr,Fe)_7C_3$ karbürlerin kaplama ana fazı ile uyumlu bir şekilde bulunduğu tespit edilmiştir.
22. En yüksek aşınma hacim kaybına sahip olan V33 nolu kaplama numunesinde abrazyon aşınma testi sonrası aşınma yüzeylerinde yapılan SEM incelemesi ve EDS analizi neticesinde aşınma yüzeylerinde M_7C_3 tipi karbürlerin yapıda tutunamayıp ayrıldığı, bu şekilde abrazyon aşınmaya dayanım gösterecek sert

partiküllerin yapıdan ayrılması neticesinde abrazif aşınma sebepli yüzeyden malzeme kaybının arttığı görülmüştür.

9.2. Öneriler

1. Bu çalışmada elektrik ark püskürtme yöntemi kullanılarak özlü tel ile üretilmiş kompozit karakterli kaplamaların abrazif aşınma performansı üzerine etkisinin belirlenmesinde değişken olarak kullanılan proses parametreleri olan akım, voltaj, primer gaz basıncı ve püskürtme mesafesinde haricinde sekonder gazın etkisi de araştırılabilir.
2. Primer gaz olarak kullanılan hava yerine azot, argon ve karbondioksit kullanılarak özlü telden üretilecek kompozit karakterli kaplamalardaki oksit oranları ve yapıları araştırılabilir ve kaplamalardaki oksit ve/veya nitrür gibi fazların varlığının kaplamaların abrazif aşınma performansları üzerine etkisi incelenebilir.
3. Bu çalışmada olduğu gibi farklı akım, voltaj, primer gaz basıncı ve püskürtme mesafesi değişimine bağlı olarak üretilen kaplamaların adhesiv ve erozif aşınma performansları üzerine benzer çalışmalar yapılabilir.
4. Farklı parametrelerde elektrik ark püskürtme tekniği ile üretilmiş kompozit kaplamaların yapışma mukavemeti ile abrazif aşınma performansı üzerine benzer bir çalışma yapılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] HUSSARY, N., Investigation into the wire arc spraying process, Thesis of Doctor of Philosophy, University of Minnesota, May 2003.
- [2] DAVID, J.R., Handbook of Thermal Spray Technology, ASM International 2004.
- [3] STOKES, J., Theory and application of the high velocity oxy-fuel (hvof) thermal spray process, Dublin City University, 2008.
- [4] www.sulzermetco.com, 5 Mayıs 2011
- [5] GEORGE, M., ROBERT., JACK, R., MERLE, T., Second national conference on thermal spray, 31 October – 2 November, 1984.
- [6] PAWLOWSKI, L., The science and engineering of thermal spray coating, Wiley&Sons, New York, NY,1995.
- [7] LUH-MAAN, C., MAGED, E.G., Metalization of steel brrigdes:research and practice, division of construction engineering and management school of civil engineering, Purdue University, May, 1999.
- [8] KRUGER, J., KNEPPER, M., Arc spray coating for industrial application, International Thermal Spray Conference, Essen, Germany, 4-6 March 2002.
- [9] KARAKAŞ, Y., Çelik yüzeylerin kaplanması, Erdemir Bilim ve Teknoloji Serisi, 2006.
- [10] SACRISTE, D., GOUBOT, N., DHERS, J., DUCOS, M., VARDELLE, A., An evaluation of the electric arc spray and (HPPS) processes for the manufacturing of high power plasma spraying MCrAlY coating, Journal of Thermal Spray Technology, ASM International, pp: 352-358, 2001.
- [11] WANG, X., HEBERLEIN, J., PFENDER, E., GEBERICH W., Effect of nozzle configuration, gas pressure, and gaz type on coating properties in wire arc spray, Journal of Thermal Spray Technology, Volume 8, pp: 565-575, December 1999.

- [12] YÜKSEK, E., ALTUNCU, E., ŞEKER, İ., Y., ÜSTEL, F., Plazma sprey kaplama yöntemi ve teknolojik uygulamaları, Galvanoteknik Dergisi, 06, 2006.
- [13] HEIMANN, R., B., Plasma-spray coating, VCH Verlagsgesellschaft, 1996.
- [14] DEMİRKIRAN, A.Ş., MgZrO₃ Esaslı Fonksiyonel Değişken Kaplamaların İncelenmesi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 1997.
- [15] EDITOR DAVIS, J.R., Handbook of Thermal Spray Technology, ASM International, New York, USA, 2004.
- [16] NEWBERY, A.P., GRANT, P.S., Oxidation during electric arc spray forming of steel, Journal of Materials Processing Technology 178, pp. 259 – 279, 26 March 2006.
- [17] TRAM, T., The influence of preparation on the bond strength of Zinc twin-wire arc spray coating on steel, A thesis of Master of Science, San Jose State University, August 2004.
- [18] OĞUZ B., Ark kaynağı, OERLIKON Yayını, 1989.
- [19] HUSSARY, N.A., HEBERLEIN, J.V.R., Atomization and particle – jet interactions in the wire-arc spraying process, Journal of Thermal Spray Technology, Volume: 10 (4), pp: 604-610, December 2001.
- [20] DONNA, P.G., Oxidation behavior of in-flight molten aluminium droplets in the twin-wire electric arc thermal spray process, Doctor of Philosophy, Idaho State University, May 2005.
- [21] SAMPSON, E.R., Thermal spray coating for corrosion protection: An overview, Materials Performance, pp: 27-30, December 1997.
- [22] GÜLEÇ, A. Termal püskürtme tekniği ile yüksek performanslı Zn/Al (85/15) Kaplamaların Üretimi ve Karakterizasyonu, SAÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ağustos 2006.
- [23] GULEC A., CEVHER O., TURK A., USTEL F., YILMAZ F. The Behaviors of Accelerated Corrosion of Zn, Al, and Zn/15Al Coatings on Steel Surface”, Journal of Materials and technology 45, 477-482, 2011.
- [24] GULEC A., CEVHER O., TURK A., USTEL F., YILMAZ F. Performance Comparison of Thermal Sprayed Coatings for Ductile Iron Pipe", Materials Performance 30, February 2011.
- [25] YÜKSEK E., Ark spray teknolojisi ile şekilli parça üretimi, Yüksek Lisans Tezi, SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Ağustos 2008.

- [26] DALLAIRE, S., LEVERT, H., Development of cored wires for improving the abrasion wear resistance of austenitic stainless steel, *Journal of Thermal Spray Technology*, Volume 6(4), p: 456-462, December 1997.
- [27] TILLWANN, W., VOGLI, E., ABDULGADER, M., GURRIS, M., KUZMIN D., and TURE S., Particle behavior during the arc spraying process with cored wires, *Journal of Thermal Spray Technology*, Volume 17(5-6), p: 966-973, Mid-December 2008.
- [28] CHNEG, J.B., Liang, X.B., Xu, B.S., Wu, Y.X., Characterization of mechanical properties of FeCrBSiMnNbY metallic glass coatings, *Journal of Materials Science* 44, p:3356-3363, 2009.
- [29] HE, D., DONG, N., and JIANG J., Corrosion behavior of arc sprayed Nickel-base coatings, *Journal of Thermal Spray Technology*, Volume 16(5-6), pp: 850-856, Mid-December 2007.
- [30] TILLMANN, W., VOGLI, E., and ABDULGADER, M., Asymmetric Melting Behavior in Twin Wire Arc Spraying with Cored Wires” *Journal of Thermal Spray Technology*, Volume 17(5-6), pp: 974-982, Mid-December 2008.
- [31] HE, D. Y., FU, B. Y, JIANG, J. M., and Li, X. Y., Microstructure and wear performance of arc sprayed Fe-FeB-Wc coatings, *Journal of Thermal Spray Technology*, Volume 17(5-6), pp: 757-761, Mid-December 2008—757.
- [32] TILLMANN, W., VOGLI, E., and ABDULGADER, M., The correlation between the coating quality and the moving direction of the twin wire arc spraying gun, *Journal of Thermal Spray Technology*, Volume 19 (1-2), pp: 409-437, January 2010.
- [33] TAKAYUKI, W., TADAYUKI S., ATSUSHI, N., Electrode phenomena investigation of wire arc spraying for preparation of Ti-Al intermetallic compounds, Tokyo Institute of Technology, Japan 2002.
- [34] LIAO, H.L., ZHU, Y.L., BOLOT, R.C., CODDET, S.N., Size distribution of particles from individual wires and the effects nozzle geometry in twin wire arc spraying, *Surface & Coating Technology*, 16 March 2005.
- [35] BINSHI, X., WEI, Z., SHINNING, M., BAOHONG, T., XIUBING, L., Structure and properties of coatings deposited by high velocity arc spray technique, *Journal of Tribology*, July 2000.
- [36] STEFFENS, H.D., NASSENSTEIN, K., Influence of spray velocity on arc sprayed coating structure, *Journal of Thermal Spray Technology*, Volume 8 (3), pp: 454-560, September 1999.

- [37] NEWBERY, A.P., RAYMENT, T., GRANT, P.S. A particle image velocimetry investigation of in-flight and deposition behaviour of steel droplets during electric arc spray forming, Department of Materials, University of Oxford, 27 January 2004.
- [38] JANDIN, G., LIA, H., FENG, Z.Q., CODDET, C., Correlations between operation condition, microstructure and mechanical properties of twin wire arc sprayed steel coatings, Materials Science and Engineering, pp: 298-305, 22 April 2002.
- [39] JANDIN, G., PLANCHE, H., LIAO, CODDET, C., BELFORS, F., Relationships between in-flight particle characteristic and coating microstructure for the twin wire arc spray process, International Thermal Spray Congress, Orlando, ABD, 2003.
- [40] PLANCHE M.P., LIAO H., CODDET, C., BELFORT, F., Relationships between in-flight particle characteristics and coating microstructure with a twin wire arc spray process and different working conditions, Surface & Coating Technology, pp: 215-2226, 15 April 2003.
- [41] WILDEN , J., BERGMANN, J.P., JAHN, S., KNAPP, S., VAN RODJINEN, F., FISCHER, G., Investigation about the chrome steel wire arc spray process and the resulting coating properties, Thermal Spray 2007: Global Coating Solution (Ed.) Marple B.R., 2007.
- [42] DALLAIRE, S., Hard arc-sprayed coating with enhanced erosion and abrasion wear resistance, ASM International, pp: 511-519, 14 February 2000.
- [43] ABEDINI, A., POURMOUSA, A., CHANDRA, S., MOSTAGHIMI, J., Effect of substrate temperature on the properties of coatings and splats deposited by wire arc spraying, Centre for Advanced Coatings Technology, Department of Mechanical and Industrial Engineering, University of Toronto, 9 July 2006.
- [44] GARTNER, F., KIRSTEN, A., VOYER, J., KREYE, H., BUSCHINELLI, A.J.A., SCHIEFLER, M.F.O., Influence of process parameters on the quality of thermally sprayed X46Cr13 stainless steel coatings, 2. Brazilian Manufacturing Congress, 18-21 May 2003.
- [45] SOYKAN, Ş., Seramik Kaplanmış Malzemelerin Aşınma Özelliklerinin İncelenmesi, Araştırma Notları, Sakarya Üniversitesi, 1994.
- [46] STACHOWIAK, G.W., BATCHELOR, A.W., Engineering Tribology, Butterworth Heineman, Avusturya 2005.
- [47] ÖZDİN, K., Alüminyum Esaslı SiC Takviyeli Kompozitlerin Üretimi ve Aşınma Özelliklerinin Araştırılması, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Ankara, 2006.

- [48] WANG, X. Investigation of two-wire arc spray process, PhD Thesis, The University of Minnesota, March, 1996.
- [49] NEWBERY, A.P., GRANT, P.S., NEISER, R.A., The velocity and temperature of steel droplets during electric arc spraying, *Surface & Coating Technology* 195, pp:91 – 101, 2005.
- [50] FANG, J.J., LI, Z.X., QIAN, M., REN, C.L., Shi, Y.W., Effect of powder size in cored wire on arc-sprayed metal-ceramic coatings, *International Thermal Spray Conference*, May 14-16, Beijing, China, ITSC 2007.
- [51] ZHANG, L., LIU, B., YU, H., SUN, D.S., Rapid solidification non-equilibrium microstructure and phase transformation of plasma cladding Fe-base alloy coating, *Surface & Coating* 201, pp: 5931-5939, 2007.
- [52] BOLELLI, G., BONFERRONI, B., LAURILA, J., LUSVARGHI, L., MILANTI, A., NIEMI, K., VUORISTO, P., Micromechanical properties and sliding wear behaviour of HVOF-sprayed Fe-based alloy coating, 2012, pp: 29-47, *Wear* 276-277.
- [53] KIRCHGABNER, M., BADISCH, E., FRANEK, F., Behaviour of iron-based hardfacing alloys under abrasion and impact, *Wear* 265, pp: 772-779, 2008.
- [54] BUCHANAN, V.E., MCCARTEY, D.G., SHIPWAY, P.H., A comparison of abrasive wear behaviour of iron-chromium based hardfaced coatings deposited by SMAW and electric arc spraying, *Wear* 264, pp: 542-549, 2008.
- [55] KELKAR, M., Modeling and experimentation to characterize the wire arc spray process, PhD Thesis, The University of Minnesota, September, 1998.
- [56] TILLMANN, W., ABDUGADER, M., , *International Thermal Spray Conference*, ITSC 2007, May 14-16, Beijing, China.
- [57] BUCHANAN, V.E., The comparative effect of sugarcane juice on the abrasion-corrosion behaviour of Fe-Cr-B electric arc sprayed and Fe-Cr-C weld coatings, *Journal of Materials Engineering and Performance* Volume 21 (2), pp: 231-239, February 2012.
- [58] WANG, B.Q., SEITZ, M.W., Comparison in erosion behaviour of iron-base coatings sprayed by three different arc-spray processes, *Wear* 250, pp: 755-761, 2001.
- [59] ŞEKER, İ.Y., Ark sprey teknoloji yardımıyla üretilen krom içerikli kaplamaların karakterizasyonu, Yüksek lisans tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Haziran 2009.

- [60] NEWBERY, A.P., GRANT, P.S., Oxidation during electric arc spray forming of steel, *Journal of Materials Processing Technology* 178, 256-269, 2006.
- [61] KONSTANTINOV V.M., GUBANOV, A.S., Effect of alloying elements of steel wire on structure and properties of coatings in electric arc spraying, *Welding International*, Vol. 22, pp: 113-117, February 2008.
- [62] <http://web.firat.edu.tr/daum/docs/61/07%20Y%C3%BCksek%20kromlu%20%20M7C3-Yahya%20TA%C5%9EGIN-%C3%B6dendi-7%20syf-37-43.doc>, 3 Haziran 2013.
- [63] LU, L., SODA, H., MCLEAN, A., Microstructure and mechanical properties of Fe-Cr-C eutectic composite, *Materials Science and Engineering*, A347, pp: 214-222, 2003.
- [64] FAN, C., CHE, M., CHANG, C.M., WU, W., Microstructure change caused by $(\text{Cr,Fe})_{23}\text{C}_6$ carbides in high chromium Fe-Cr-C hardfacing alloys, *Surface & Coating* 201, pp: 908-912, 2006.
- [65] WU, X., Rapidly solidified nonequilibrium microstructure and phase transformation of laser-synthesized iron-based alloy coating, *Surface and Coating*, 115, pp: 153-162, 1999.
- [66] ZHANG, D.W., LEI, T.C., The microstructure and erosive-corrosive wear performance of laser-clad Ni-Cr 3C_2 composite coating, *Wear* 255, pp: 129-133, 2003.
- [67] HILL, H., KUNZE, M., HEET, C., PETSCH, A., WEBER, S., REITER, R., GIESE, P., THEISEN, W., WIELAGE, W., WESLING, V., Correlation of processing route and heat treatment with the abrasive wear resistance of a plastic mold steel, *Mat.-wiss.u. Werkofftech.* 43, No.8, 2012.
- [68] POKHMURSKA, H., DOVHUNYK, V., STUDENT, M., BIELANSKA, E., BELTOWSKA, E., Tribological properties of arc sprayed coating obtained from FeCrB and FeCr-based powder wires, *Surface and Coating Technology* 151-152, pp: 492-494, 2002.
- [69] SELÇUK, B., Borlanmış AISI 1020 ve 5115 çeliklerinin sürtünme ve aşınma davranışlarının incelenmesi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makinae Anabilim Dalı, 1994.
- [70] BUYTOZ, S., Microstructural properties of M_7C_3 eutectic carbides in a Fe-Cr-C alloy, *Materials Letters* 60, pp: 605-608, 2006.
- [71] CAI, G.J., ANDREN, H.O., SVENSSON, L.E., Microstructural change of a 5% Cr steel weld metal during tempering, *Materials Science and Engineering* A242, pp: 202-209, 1998.

- [72] CHANG, C.M., CHEN, Y.C., WEITE, W., Microstructural and abrasive characteristics of high carbon Fe-Cr-C hardfacing alloy, *Tribology International* 43, pp: 929-934, 2010.
- [73] XU, B., ZHU, Z., MA, S., ZHANG, W., LIU, W., Sliding wear behavior of Fe-Al and Fe-Al/WC coatings prepared by high velocity arc spraying *Wear* 257, pp: 1089–1095, 2004.
- [74] LIU, Y.F., HAN, J.M., LI, R.H., LI, W.J., XU, X.Y., WANG, J.H., YANG, S.Z., Microstructure and dry-sliding wear resistance of PTA clad (Cr,Fe)₇C₃/γ-Fe ceramal composite coating, *Surface Science* 252, pp:7539-7544, 2006.
- [75] BUCHANAN, V.E., SHIPWAY, P.H., MCCARTEY, D.G., Microstructure and abrasive wear behaviour of shielded metal arc welding hardfacings used in the sugarcane industry, *Wear* 263, pp:99-110, 2007.
- [76] MATSUO, T.T., KIMINAMI, C.S., BOTTA, W.J., BOLFARINI, C., Sliding wear of spray-formed high-chromium white cast iron alloys, *Wear* 259, pp: 445-452, 2005.
- [77] LIU, Y.F., XIA, Z.Y., HAN, J.M., ZHANG, G.L., YANG, S.Z., “Microstructure and wear behavior of (Cr,Fe)₇C₃ reinforced composite coating produced by plasma transferred arc weld-surfacing process, *Surface & Coating Technology* 201, pp: 863-867, 2006.

ÖZGEÇMİŞ

Ahmet GÜLEÇ, 04.01.1980 de Sakarya' da doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Sakarya' da tamamladı. 1997 yılında Sakarya Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümünden mezun oldu. 1997 yılında başladığı SAÜ Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bölümünü 2003 yılında bitirdi. 2004 yılında yine aynı bölüme girdi ve 2006 yılında mezun oldu. 2006 – 2012 yılları arasında İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi – İSKİ, Abone İşleri Avrupa 1. Bölgesi Dairesi Başkanlığı'nda Kontrol Mühendis olarak çalıştı. Bu süre içerisinde içmesuyu ve atıksu işletmeciliği, yapım işi kontrolörlüğü, malzeme temin, muayene teslim ve kalite kontrolü ile kazısız rehabilitasyon ve yenileme teknolojileri ve su kayıpları ile mücadele projelerinde aktif rol aldı. Şu anda Hidropark MMC ve AzerTeknolayn MMC Bakü/Azerbaycan firmasında Proses ve Kalite Direktörü olarak görev yapmaktadır.