

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**PLAZMA PÜSKÜRTME TEKNİĞİ İLE KAPLANMIŞ
TEKSTİL PARÇASININ AŞINMA ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Seramik Müh. Yeşim SERT

Enstitü Anabilim Dalı : METALURJİ VE MALZEME MÜH.

Enstitü Bilim Dalı : METALURJİ VE MALZEME MÜH.

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Nil TOPLAN

Eylül 2007

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**PLAZMA PÜSKÜRTME TEKNİĞİ İLE KAPLANMIŞ
TEKSTİL PARÇASININ AŞINMA ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Seramik Müh. Yeşim SERT

Enstitü Anabilim Dalı : METALURJİ ve MALZEME MÜH.

Bu tez 12/09/2007 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.

**Yrd. Doç. Dr. Nil TOPLAN
Jüri Başkanı**

**Doç. Dr. Fatih ÜSTEL
Üye**

**Yrd. Doç. Dr. Ramazan YILMAZ
Üye**

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın yürütülmesi ve sonuçlandırılması esnasında değerli fikir ve bilgi birikimlerini benimle paylaşan ve beni yönlendiren saygıdeğer hocam Yrd. Doç. Dr. Nil TOPLAN'a sonsuz teşekkür ederim. Ayrıca çalışmalarımı yakından ilgilenen ve tecrübelerini paylaşmaktan çekinmeyen sayın hocam Doç. Dr. Fatih ÜSTEL'e teşekkürü bir borç bilirim.

Araştırmam esnasında parça temini ile ilgili yardımlarından ötürü sevgili ağabeyim Metin YILMAZ'a ve ANMEN Tekstil yetkililerine teşekkür ederim.

Laboratuvar çalışmalarım sırasındaki yardımlarından dolayı Araştırma Görevlileri Mehmet Oğuz GÜLER, Nuray KARAKUŞ, Özgür CEVHER, Güven YARDAKAŞ ve Ediz ERCENK'e teşekkür ederim. Parça üretimi ve kaplama işlemleri esnasındaki katkılarından dolayı teknisyen Ebubekir CEBECİ ve Ersan DEMİR'e teşekkür ederim. SEM ve XRD çalışmalarım sırasındaki katkılarından dolayı Uzman Fuat KAYIŞ'a teşekkür ederim.

Evlatları olmaktan her zaman onur duyduğum, desteklerini her an hissettiğim sevgili anne ve babama şükran ve minnet duygularıyla.

Son olarak da bir tanecik ağabeyime sevgilerle.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	ii
İÇİNDEKİLER	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR LİSTESİ	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	viii
TABLolar LİSTESİ.....	xii
ÖZET.....	xiii
SUMMARY	xiv
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ.....	1
BÖLÜM 2.	
TERMAL PÜSKÜRTME KAPLAMALAR.....	4
2.1. Giriş.....	4
2.2. Termal Püskürtme Kaplamaların Yapısı ve Özellikleri.....	5
2.2.1. Gerilim.....	6
2.2.2. Porozite.....	7
2.2.3. Oksitler.....	8
2.2.4. Yüzey yapısı.....	8
2.2.5. Mukavemet	8
2.3. Termal Püskürtme Kaplama Yöntemleri.....	8
2.3.1. Alev püskürtme.....	10
2.3.2. Elektrik ark püskürtme.....	14
2.3.3. Detonasyon tabancası.....	16
2.3.4. Plazma püskürtme.....	18

2.3.5. Yüksek hızlı oksji-yakıt (HVOF) püskürtme.....	18
2.4. Termal Püskürtme Kaplamaların Uygulama Alanları.....	20
2.4.1. Otomobil endüstrisi.....	20
2.4.2. Makine/İmalat endüstrisi.....	21
2.4.3. Tekstil endüstrisi.....	22
2.4.4. Matbaa endüstrisi.....	23
2.4.5. Enerji sanayi.....	24
2.4.6. Uçak sanayi.....	24
2.4.7. Savunma sanayi.....	25
2.4.8. Tıp teknolojisi.....	26

BÖLÜM 3.

PLAZMA PÜSKÜRTME YÖNTEMİ.....	28
3.1. Giriş.....	28
3.2. Plazma ve Oluşumu.....	29
3.3. Plazma Gazları.....	33
3.4. Plazma Püskürtme Sistemi.....	35
3.4.1. Güç ünitesi.....	36
3.4.2. Gaz besleme ünitesi.....	36
3.4.3. Toz besleme ünitesi.....	36
3.4.4. Plazma püskürtme tabancası.....	37
3.5. Kaplamaların Oluşumu.....	38
3.5.1. Partikül taşınımı.....	38
3.5.2. Plazmada partikül hareketi.....	38
3.5.3. Erimiş malzeme ile ortam atmosferinin etkileşimi.....	39
3.5.4. Partiküllerin ana malzemeye çarpması.....	39
3.5.5. Püskürtme esnasında kaplama malzemesinin fiziksel ve kimyasal dönüşüm.....	40
3.6. Plazma Kaplamaların Temel Özellikleri.....	40
3.6.1. Yapı.....	40
3.6.2. Yoğunluk ve porozite.....	42
3.6.3. Yapışma mukavemeti.....	43
3.6.4. Kaplama kalınlığı.....	44

3.6.5. Sertlik.....	44
3.6.6. Termal genleşme.....	44
BÖLÜM 4.	
SÜRTÜNME VE AŞINMA.....	45
4.1. Sürtünme.....	45
4.1.1. Kuru sürtünme.....	48
4.1.2. Sınır sürtünmesi.....	48
4.1.3. Yuvarlanma sürtünmesi.....	48
4.2. Aşınma.....	49
4.2.1. Aşınma türleri.....	49
4.2.1.1. Adhesiv aşınma.....	50
4.2.1.2. Abrasiv aşınma.....	51
4.2.1.3. Yorulma aşınması.....	53
4.2.1.4. Koroziif aşınma.....	54
BÖLÜM 5.	
DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	55
5.1. Deneysel Çalışmalar.....	55
5.2. Kullanılan Deney Malzemeleri.....	57
5.2.1. Altık malzemesi.....	57
5.2.2. Kaplama tozları.....	58
5.3. Kaplamaların Üretimi.....	59
5.3.1. Altık yüzeyinin hazırlanması.....	59
5.3.2. Plazma püskürtme kaplama tekniği ile gerçekleştirilen kaplama işlemi.....	59
5.4. Kaplamaların Karakterizasyonu.....	61
5.4.1. Metalografik çalışma.....	61
5.4.2. Yüzey pürüzlülük ölçümü.....	62
5.4.3. Kaplama kalınlık ölçümü.....	63
5.4.4. Sertlik ölçümü.....	63
5.4.5. Faz analizi.....	64
5.4.6. Yoğunluk ölçümü.....	64

5.4.7. Bağ mukavemeti deneyi.....	65
5.4.8. Aşınma deneyi.....	66
BÖLÜM 6.	
DENEYSEL SONUÇLAR VE İRDELEME.....	69
6.1. Kaplama Tozlarının Mikroyapısı ve Karakterizasyonu.....	69
6.2. Kaplamaların Yüzey Pürüzlülüğü.....	79
6.3. Kaplamaların Mikroyapısı.....	80
6.4. Kaplamaların XRD İncelemeleri.....	91
6.5. Kaplama Kalınlığı.....	95
6.6. Kaplama Sertliği.....	96
6.7. Yoğunluk.....	99
6.8. Bağ Mukavemeti.....	101
6.9. Kaplamaların Aşınma Özellikleri.....	102
BÖLÜM 7.	
SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	112
7.1. Sonuçlar.....	112
7.2. Öneriler.....	114
KAYNAKLAR.....	115
ÖZGEÇMİŞ.....	117

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

APS	: Atmosferik plazma püskürtme
ASTM	: Amerikan Standart
E	: Elastik Modül, (GN/m ²)
E _c	: Young modülü, GPa
E _d	: Disosiasyon enerjisi
H	: Sertlik, (HV)
HVOF	: Yüksek hızlı oksijen yakıt püskürtme
HV	: Vickers sertlik değeri
k _c	: Termal iletkenlik, W/m-°C
L	: Boy, (mm)
m	: Weibull modülü
m _k	: Kuru ağırlık, (gr)
m _s	: Sudaki ağırlık, (gr)
P	: Uygulanan yük, (N)
% R.Y	: Relatif yoğunluk
ρ	: Yoğunluk, (gr/cm ³)
ρ _B	: Bulk yoğunluk, (gr/cm ³)
ρ _T	: Teorik yoğunluk, (gr/cm ³)
μ _k	: Sürtünme katsayısı
1	: % 100 TiO ₂
2	: %100 Cr ₂ O ₃
3	: %60 Al ₂ O ₃ -%40 TiO ₂
4	: %87 Al ₂ O ₃ - %13 TiO ₂
5	: %75 Cr ₂ O ₃ - %25 TiO ₂
6	: %50 Cr ₂ O ₃ - %50 TiO ₂
7	: %25 Cr ₂ O ₃ - %75 TiO ₂

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1.	Termal püskürtme kaplama prosesi.....	5
Şekil 2.2.	Termal püskürtme kaplama teknikleri.....	9
Şekil 2.3.	Tel alev püskürtme tabancası.....	11
Şekil 2.4.	Tel alev püskürtme tesisatı.....	11
Şekil 2.5.	Toz alev püskürtme tabancası.....	12
Şekil 2.6.	Toz alev püskürtme tesisatı.....	12
Şekil 2.7.	Elektrik ark püskürtme tabancası.....	15
Şekil 2.8.	Elektrik ark püskürtme tertibatı.....	15
Şekil 2.9.	Detonasyon tabancası (d-gun).....	17
Şekil 2.10.	Detonasyon tabancasının çalışma prensibi.....	17
Şekil 2.11.	Plazma püskürtme prosesi.....	18
Şekil 2.12.	Yüksek hızlı oksî-yakıt (HVOF) püskürtme prosesi.....	19
Şekil 2.13.	Yüksek hızlı oksî-yakıt püskürtme (HVOF) püskürtme tertibatı.....	19
Şekil 2.14.	Termal püskürtme yöntemiyle kaplanmış parçalar.....	21
Şekil 2.15.	Termal püskürtme yöntemiyle kaplanmış disk, pompa şaftı.....	21
Şekil 2.16.	Tekstil endüstrisinde kullanılan mekik parçası.....	22
Şekil 2.17.	Mekik parçasının kullanım alanı.....	23
Şekil 2.18.	Matbaa endüstrisinde termal püskürtme kaplamanın kullanım alanı.....	23
Şekil 2.19.	Termal püskürtme kaplama teknolojisinin uygulandığı gaz türbinleri...	24
Şekil 2.20.	Uçak sanayinde kaplama yapılan parçalar.....	25
Şekil 2.21.	Kaplama yapılan tank parçaları.....	25
Şekil 2.22.	Tıp teknolojisinde termal kaplamanın kullanıldığı yerler.....	26
Şekil 3.1.	Nötral bir atomun şematik gösterimi.....	29
Şekil 3.2.	Diatomik moleküllerin disasyasyonu.....	30
Şekil 3.3.	İyonizasyon ve plazma gazının oluşumu.....	30
Şekil 3.4.	Plazma ışınındaki sıcaklık dağılımı a) Laminer akış.....	31
	b) Türbülanslı akış.....	31

Şekil 3.5.	a) Argon, b) Azot plazmasındaki sıcaklık dağılımı.....	32
Şekil 3.6.	Plazma püskürtme sisteminin bileşenlerinin şematik olarak gösterimi..	35
Şekil 3.7.	Plazma püskürtme tabancası.....	37
Şekil 3.8.	Plazma alevinde toz partiküllerin deformasyonu ve ana malzeme ile bağlanması.....	40
Şekil 3.9.	Tipik bir plazma püskürtme kaplamaya ait mikroyapısı.....	42
Şekil 4.1.	Statik ve kinetik sürtünmenin şematik anlatımı.....	46
Şekil 4.2.	Adhezyon aşınmanın şematik gösterimi.....	50
Şekil 4.3.	İki ve üç yüzeyli abrasiv aşınma tipleri.....	52
Şekil 4.4.	Erozyon aşınmanın şematik gösterimi.....	53
Şekil 4.5.	Yorulma aşınmasının şematik gösterimi.....	54
Şekil 5.1.	Deneysel çalışma programı.....	56
Şekil 5.2.	Plazma püskürtme tekniği ile üretilen kaplamalar.....	60
Şekil 5.3.	Mikroyapı analiz cihazı.....	62
Şekil 5.4.	Yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı.....	62
Şekil 5.5.	Kaplama kalınlık ölçüm cihazı.....	63
Şekil 5.6.	Mikrosertlik ölçüm cihazı.....	63
Şekil 5.7.	X-Işınları difraktometre cihazı.....	64
Şekil 5.8.	Yoğunluk ölçüm cihazı.....	65
Şekil 5.9.	CSM instruments tribometer aşınma cihazı.....	66
Şekil 5.10.	Leica MZ75 stereo mikroskop.....	67
Şekil 6.1.	1 kodlu toz bileşiminin SEM görüntüsü ve EDS analizi.....	69
Şekil 6.2.	2 kodlu toz bileşiminin SEM görüntüsü ve EDS analizi.....	70
Şekil 6.3.	3 kodlu toz bileşiminin SEM görüntüsü ve EDS analizi.....	70
Şekil 6.4.	4 kodlu toz bileşiminin SEM görüntüsü ve EDS analizi.....	71
Şekil 6.5.	5 kodlu toz bileşiminin SEM görüntüsü ve EDS analizi.....	72
Şekil 6.6.	6 kodlu toz bileşiminin SEM görüntüsü ve EDS analizi.....	73
Şekil 6.7.	7 kodlu toz bileşiminin SEM görüntüsü ve EDS analizi.....	73
Şekil 6.8.	1 kodlu kaplama toz bileşiminin XRD paterni.....	76
Şekil 6.9.	2 kodlu kaplama toz bileşiminin XRD paterni.....	76
Şekil 6.10.	3 kodlu kaplama toz bileşiminin XRD paterni.....	77
Şekil 6.11.	4 kodlu kaplama toz bileşiminin XRD paterni.....	77
Şekil 6.12.	5 kodlu kaplama toz bileşiminin XRD paterni.....	78

Şekil 6.13.	6 kodlu kaplama toz bileşiminin XRD paterni.....	78
Şekil 6.14.	7 kodlu kaplama toz bileşiminin XRD paterni.....	79
Şekil 6.15.	Plazma püskürtme tekniği ile yapılan seramik kaplamaların yüzey pürüzlülük değerleri.....	80
Şekil 6.16.	Plazma püskürtme tekniği ile kaplanmış bileşimlerin mikroyapısı: a)1, b)2, c)3, d)4, e)5, f)6, g)7 kodlu toz bileşimleri, optik mikroyapısı.....	82
Şekil 6.17.	1 kodlu kaplama bileşiminin SEM görüntüsü.....	83
Şekil 6.18.	a)1 kodlu kaplama bileşiminin SEM görüntüsü, b) 1 noktasının, c) 2 noktasının, d) 3 noktasının , EDS analizi.....	83
Şekil 6.19.	2 kodlu kaplama bileşiminin SEM görüntüsü.....	84
Şekil 6.20.	3 kodlu kaplama bileşiminin SEM görüntüsü.....	85
Şekil 6.21.	3 kodlu kaplama bileşiminin SEM görüntüsü, b) 1 noktasının, c) 2 noktasının, d) 3 noktasının, e) 4 noktasının, f) 5 noktasının, g) 6 noktasının EDS analizi.....	87
Şekil 6.22.	4 kodlu kaplama bileşiminin SEM görüntüsü, c) 1 noktasının, d) 2 noktasının, e) 3 noktasının, f) 4 noktasının EDS analizleri.....	87
Şekil 6.23.	5 kodlu kaplama bileşiminin SEM görüntüsü, c) 1 noktasının, d) 2 noktasının, e) 3 noktasının, f) 4 noktasının EDS analizleri.....	88
Şekil 6.24.	6 kodlu kaplama bileşiminin SEM görüntüsü, c) 1 noktasının, d) 2 noktasının, e) 3 noktasının, f) 4 noktasının EDS analizleri.....	89
Şekil 6.25.	7 kodlu kaplama bileşiminin SEM görüntüsü, c) 1 noktasının, d) 2 noktasının, e) 3 noktasının, f) 4 noktasının EDS analizleri.....	90
Şekil 6.26.	1 kodlu kaplama bileşiminin XRD paterni.....	91
Şekil 6.27.	2 kodlu kaplama bileşiminin XRD paterni.....	92
Şekil 6.28.	3 kodlu kaplama bileşiminin XRD paterni.....	92
Şekil 6.29.	4 kodlu kaplama bileşiminin XRD paterni.....	93
Şekil 6.30.	5 kodlu kaplama bileşiminin XRD paterni.....	93
Şekil 6.31.	6 kodlu kaplama bileşiminin XRD paterni.....	94
Şekil 6.32.	7 kodlu kaplama bileşiminin XRD paterni.....	94
Şekil 6.33.	Kaplama bileşimlerinin kalınlık değerleri.....	96
Şekil 6.34.	Kaplama bileşimlerinin sertlik değerleri grafiği.....	97

Şekil 6.35.	Kaplama bileşimlerinin a)1 kodlu, b)2 kodlu, c)3 kodlu, d)4 kodlu, e)5 kodlu, f)6 kodlu, g)7 kodlu mikrosertlik değeri için meydana getirilen izlerin fotoğrafları.....	99
Şekil 6.36.	Kaplama bileşimlerinin relatif yoğunluk değişim grafiği.....	100
Şekil 6.37.	Kaplama bileşimlerine ait sertlik değerleri ile relatif yoğunluk değerlerinin aynı grafikte gösterilişi.....	101
Şekil 6.38.	Kaplama bileşimlerinin bağ mukavemeti değer grafiği.....	102
Şekil 6.39.	Kaplamaların sürtünme katsayısı – kayma süresi değişim grafiği ve stereo mikroskop görüntüleri a)1A kodlu kaplama, b)1B kodlu kaplama.....	103
Şekil 6.40.	Kaplamaların sürtünme katsayısı – kayma süresi değişim grafiği ve stereo mikroskop görüntüleri a)2A kodlu kaplama, b)2B kodlu kaplama.....	103
Şekil 6.41.	Kaplamaların sürtünme katsayısı – kayma süresi değişim grafiği ve stereo mikroskop görüntüleri a)3A kodlu kaplama, b)3B kodlu kaplama.....	104
Şekil 6.42.	Kaplamaların sürtünme katsayısı – kayma süresi değişim grafiği ve stereo mikroskop görüntüleri a)4A kodlu kaplama, b)4B kodlu kaplama.....	105
Şekil 6.43.	Kaplamaların sürtünme katsayısı – kayma süresi değişim grafiği ve stereo mikroskop görüntüleri a)5A kodlu kaplama, b)5B kodlu kaplama.....	105
Şekil 6.44.	Kaplamaların sürtünme katsayısı – kayma süresi değişim grafiği ve stereo mikroskop görüntüleri a)6A kodlu kaplama, b)6B kodlu kaplama.....	106
Şekil 6.45.	Kaplamaların sürtünme katsayısı – kayma süresi değişim grafiği ve stereo mikroskop görüntüleri a)7A kodlu kaplama, b)7B kodlu kaplama.....	107
Şekil 6.46.	Ortalama sürtünme katsayısı-sertlik değişim grafiği.....	108
Şekil 6.47.	Kaplamaların aşınma hız değişim grafiği.....	109
Şekil 6.48.	a)1A, b)1B, c)2A, d)2B, e)3A, f)3B, g)4A, h)4B, ı)5A, i)5B, j)6A, k)6B, l)7A, m)7B kodlu kaplamaların aşınma sonrası SEM görüntüleri	111

TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1.	Alev püskürtme gazları.....	12
Tablo 3.1.	Plazma gazlarının temel fiziksel ve kimyasal özellikleri.....	33
Tablo 5.1.	Altlık malzemesinin kimyasal bileşimi.....	57
Tablo 5.2.	Altlık malzemesinin mekanik özellikleri.....	57
Tablo 5.3.	Altlık malzemesinin fiziksel özellikleri.....	57
Tablo 5.4.	Kullanılan tozların bazı fiziksel özellikleri.....	58
Tablo 5.5.	Kullanılan tozların kimyasal kompozisyonu, tane boyut dağılımı ve morfolojisi.....	58
Tablo 5.6.	Üretilen kaplama toz karışımlarının ağırlık oranları.....	59
Tablo 5.7.	Plazma püskürtme parametreleri.....	60
Tablo 5.8.	Kaplamaların aşınma hızı hesaplarında kullanılan değişken ve bağıntılar.....	67
Tablo 5.9.	Numunelere uygulanan aşınma deney parametreleri.....	68
Tablo 6.1.	Yüzey pürüzlülük ölçüm sonuçları.....	80
Tablo 6.2.	Farklı bileşimlerde elde edilen kaplama kalınlık değerleri.....	95
Tablo 6.3.	Kaplama bileşimleri ve sertlik değerleri.....	96
Tablo 6.4.	Kaplama bileşimlerinin teorik, bulk ve relatif yoğunluk değerleri	99
Tablo 6.5.	Kaplama bileşimlerine ait bağ mukavemeti değerleri.....	101

ÖZET

Anahtar kelimeler: Tekstil Parçası, Mekik, Plazma Püskürtme Kaplama, Aşınma

Endüstriyel bir problemin çözümüne yönelik olan bu çalışmada, tekstil endüstrisinde dokuma tezgâhlarında kullanılan ve aşınmaya maruz kalan “mekik” adı verilen parçaların kullanım ömrünün arttırılması amacıyla plazma püskürtme kaplama tekniği kullanılmıştır. Bu çalışma ile yurt dışından yüksek bedeller karşılığında ithal edilmek zorunda olunan parçaların kaplama yöntemleri ile kullanım ömürlerini arttırarak; ekonomiye faydalı girdiler sağlamak ve tekstil sektöründeki verimliliğin iş akışı açısından arttırılması hedeflenmiştir. Laboratuar şartlarında yapılan çalışmalarda; plazma püskürtme kaplama tekniği ile Al_2O_3 -%13TiO₂, Al_2O_3 -%40TiO₂, %100Cr₂O₃, %100TiO₂, %75Cr₂O₃-%25TiO₂, %50Cr₂O₃-%50TiO₂ ve %25Cr₂O₃-%75TiO₂ kaplama tozları kullanılarak Al esaslı altlık malzeme üzerine kaplamalar gerçekleştirilmiştir. Kaplamaların bağ mukavemeti, aşınma ve mikro sertlik değerleri tespit edilmiş, X-Işınları, SEM ve mikro yapı incelemeleri yapılmıştır.

INVESTIGATION OF THE WEAR BEHAVIOUR OF THE TEXTILE COMPONENT COATED BY PLASMA SPRAY COATING TECHNIQUE

SUMMARY

Keywords: Textile parts, Shutter, Plasma Spray Coating, Wear.

In this study an industrial problem have been studied and plasma coating techniques have been employed in order to increase the service life of “shutters” which is spare part of a textile workbenches operating under wear conditions. The aim of this study is to reduce the export costs of shutters by the means coating them with the plasma spray for to increase the service life of the shutters which will also provide extra inputs to the economy. The coatings have been performed by using Al_2O_3 -%13 TiO_2 , Al_2O_3 -%40 TiO_2 , %100 Cr_2O_3 , %100 TiO_2 , %75 Cr_2O_3 -%25 TiO_2 , %50 Cr_2O_3 -%50 TiO_2 and %25 Cr_2O_3 -%75 TiO_2 powders over aluminum substrates by the means of atmospheric plasma coating techniques. The bonding strength, wearing micro hardness, values have been determined and X-Ray, SEM and micro structures have been examined.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

20. yy.'ın ilk diliminde tamir amacıyla kullanılmaya başlanan termal püskürtme kaplama tekniği 1910 yılında İsviçre de Dr. Max Ulrick Schoop ve arkadaşları tarafından, iletken metal telleri eritmek, atomize etmek ve ana metal üzerine uygulamak amacı ile elektrik ark yöntemi olarak geliştirilmiştir. Dr. Max Ulrick Schoop, yüksek basınçta jet içerisindeki gaz ve ergimiş metali esas malzeme yüzeyine göndererek ilk metal püskürtme yöntemi tesisini kurmuştur. Bu çalışmalar 1939'da Reinecke tarafından endüstriye aktarılmış ve ilerleyen yıllarda Amerikan şirketleri tarafından geliştirilmiştir. Termal püskürtme kaplama yöntemlerinden plazma püskürtme kaplama ise R. M. Gage ve O. H. Nestor tarafından keşfedilmiş olup; 1962 yılında D. M. Yenni tarafından patenti alınmıştır. Bu yöntemlerle üretilen kaplamalar universal bir karaktere sahip olmaları nedeni ile proses hızlı bir gelişme göstermiş ve önem kazanmıştır [1-3].

Termal püskürtme tekniği ileri teknoloji metal-seramik tozlarının en çok kullanıldığı alandır. Tungsten ve krom karbürden nikel ve demir esaslı tozlara, alüminyum oksitten alümina titanyaya kadar geniş bir malzeme çeşitliliği söz konusudur. Alüminyum oksit ve titanyum dioksitten meydana gelen seramik tozlar; yüksek sertlikleri ve inert özellikleri sayesinde başta tekstil ve kimya sektörü olmak üzere pek çok alanda kullanılmaktadır. Bu kaplamalar, krom kaplamanın yerini almış ve kaplama ömrünü 10 kat arttırmıştır. Nikel ve kobalt esaslı krom, bor ve silisyum alaşımları, tungsten karbürü benzer malzemeler çeşitli endüstrilerin aşınma problemine çözüm getirmiştir [1-3].

Termal püskürtme kaplama tekniklerine olan ilgi malzeme sınırlamasının az olması nedeni ile çok yüksektir. Başlangıçtaki ilkel uygulamalardan çok ileri tatbikatlara doğru kaplama teknolojisi; ekipman, malzeme ve uygulama alanı

açısından büyük gelişme göstermiştir. Kısıtlı gaz/tel metodundan şaşırtıcı sayıda toz grubunun kullanıldığı sistemlere geçiş olmuştur. Kaplama malzemesi olarak tozlar, teller, çubuklar ve kompozit karışımlar kullanılmaktadır. Ayrıca homojen ve çok ince bir kaplama tabakası elde edilebilir ve böylelikle ilave ısı işleme ihtiyaç duyulmaz. Termal püskürtme kaplama sistemi 1920'lerde endüstriye kullanılmaya başlanmıştır. Bunlar, basit (oksijen/propan) alevli ve havalı püskürtme tabancalarıdır. Bu sistem çinko, pirinç, bronz ve çelik telin korozyon ve aşınma problemlerine karşı tamir amaçlı kaplamaları içermektedir. Günümüzde imalat sanayi sofistike makineler için hafif ve uzun ömürlü parçalara yönelmiştir ve otomobil, tekstil ve uçak-uzay araçlarında bu durum aşırı şekilde hissedilmektedir. Yüksek kaplama kalitesi, iyi bağ mukavemeti, hassas yüzey bitirme ve düşük porozite malzemede aranılan koşullar olmuştur. Bunu sağlamak için plazma sistemi doğmuştur. Argon/Hidrojen gaz çifti ile elde edilen plazma jetinde sıcaklık 15.000-25.000°C, partikül püskürtme hızı ise 150-500 m/sn ye kadar çıkmaktadır. Kontrollü ve sabit hızla jete katılan her türlü toz ergiyebilmekte ve yoğun kaplamalar elde edilmektedir [1-5].

Aşınmaya dirençli malzemelerin kullanımı ile oluşturulan yüzey kaplamalarını oluşturmak üzere en yaygın kullanılan yöntemlerin başında eritme esaslı termal püskürtme kaplama yöntemleri gelmektedir. Termal püskürtme kaplama yöntemleri kolay uygulanabilirlikleri, malzemede çarpılma tehlikesi yaratmayacak ısı girdileri, birçok türdeki malzemenin çeşitli amaçlar için püskürtülebilme olanağı sağlamaları gibi üstünlüklere sahiptirler [6].

Birbirleri ile temas konumunda olan yüzeyler hareket ettiklerinde oluşan aşınma, gittikçe artan malzeme kaybına sebep olarak her iki yüzey için hasar oluşturmaktadır. Aşınma, parçalar arasındaki açıklığın artmasına, istenmeyen hareket serbestliğine, hassasiyet kaybına ve bununla beraber çok daha hızlı aşınmaya ve bazen de yorulma kırılmasına neden olmaktadır [7].

Aşınmadan dolayı meydana gelen ekonomik kaybın önlenmesi veya azaltılması ve boşa giden doğal kaynakların daha verimli bir şekilde kullanılması, aşınma olayının yeterince anlaşılması ve aşınmayı önlemede etkili yöntemlerin kullanılması ile mümkün olacaktır. Kaplanan tabakaların kullanım sırasında gösterdikleri yüksek aşınma dirençleri de kullanım artışının bu yönde gelişmesini teşvik etmektedir [7].

Endüstriyel bir problemin çözümüne yönelik olarak yapılan bu çalışmada, tekstil endüstrisindeki dokuma tezgâhlarında kullanılan, aşınmaya maruz kalan ve “mekik” adı verilen parçaların kullanım ömrünün arttırılması amaçlanmaktadır. Bu çalışma ile yurt dışından yüksek bedeller karşılığında ithal edilmek zorunda olunan parçaların, plazma kaplama tekniği kullanılarak kullanım ömrünün arttırılması hedeflenmektedir. Böylece ekonomiye faydalı girdiler sağlanarak tekstil sektöründeki verimliliğin iş akışı açısından da arttırılması amaçlanmıştır.

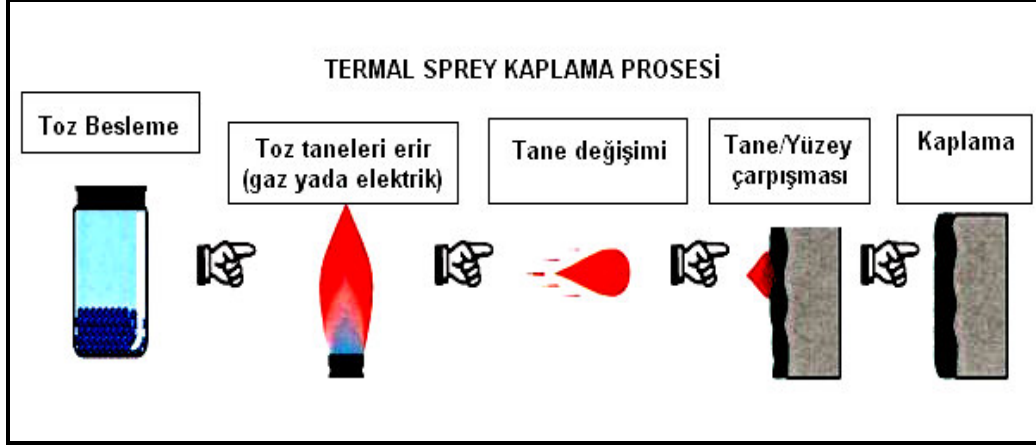
BÖLÜM 2. TERMAL PÜSKÜRTME KAPLAMALAR

2.1. Giriş

İlk zamanlarda metalizasyon (metallizing) adıyla anılan Termal püskürtme yeni bir teknoloji olmamakla birlikte, 20. yy.'ın ilk diliminde tamir amacıyla kullanılmaya başlanmıştır. 1910 yılında İsviçre de Dr. Max Ulrick Schoop ve arkadaşları tarafından, iletken metal telleri eritmek, atomize etmek ve ana metal üzerine uygulamak amacı ile elektrik ark yöntemi geliştirilmiştir. Dr. Max Ulrick Schoop, yüksek basınçta jet içerisindeki gaz ve ergimiş metali esas malzeme yüzeyine göndererek ilk metal püskürtme yöntemi tesisini kurmuştur. Bu çalışmalar 1939'da Reinecke tarafından endüstriye aktarılmış ve ilerleyen yıllarda Amerikan şirketleri tarafından geliştirilmiştir. Termal püskürtme kaplama yöntemlerinden plazma püskürtme kaplama ise R. M. Gage ve O. H. Nestor tarafından keşfedilmiş olup; 1962 yılında D. M. Yenni tarafından patenti alınmıştır. Bu yöntemlerle üretilen kaplamalar universal bir karaktere sahip olmaları nedeni ile proses hızlı bir gelişme göstermiş ve önem kazanmıştır [1-3].

Termal püskürtme kaplama; çalışma parçası üzerine, erimiş materyalin biriktirilmesi/çökmesi/doldurulması suretiyle oluşturulan koruyucu kaplamadır. Dolgu maddesi ince partiküller halinde (5-200 mikron) püskürtülen bir tabancada erir. Hızlı bir gaz bulutu onu çarpıp, yayılıp, kilitleneceği düzensiz yüzeye taşır ve partiküller hızla katlaşır. Partiküller yüzeye mekanik, kimyasal yada metalurjik olarak bağlanır. Milyonlarca tanecik aynı anda ısıtıldığından her biri aynı ısı etkisinde kalmamaktadır. Bu nedenle taneciklerin bir kısmı tamamen ergimekte, kaplamada boşluk ve ergimemiş tanecikler meydana gelmektedir. Bu durum, termal püskürtme kaplama tekniğinde seçilen işlem parametrelerine ve püskürtülen

malzemeye bağı olarak değişmektedir. Şekil 2.1’de termal püskürtme kaplama prosesine yer verilmiştir.



Şekil 2.1. Termal püskürtme kaplama prosesi [8]

Termal püskürtme kaplamalar, işlenecek yüzeye gelişmiş özellikler ve performans kalitesi katması açısından geleceğe yönelik, oldukça etkin fakat bir o kadar da maliyetli yöntemlerdir. Ürün ve kaplama farklılığı sınırsız denilebilecek şekilde geliştirilebilir. Kaplamalar; metal, seramik, plastik veya istenilen fiziksel ölçüt sınırlarındaki herhangi bir kombinasyon da yapılabilmektedir. Pek çok endüstri alanında Termal püskürtme kaplama prosesinden faydalanılarak malzeme ömrü uzatılmakta, böylece yüksek performans ve düşük bakım giderleri konusunda avantajlar sağlanmaktadır.

2.2. Termal Püskürtme Kaplamaların Yapısı ve Özellikleri

Termal püskürtme kaplama işlemlerinin büyük bir bölümü havayla temas içinde yada hava atomizasyonu kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Kimyasal etkileşimler, özellikle oksitlenme, püskürtme esnasında meydana gelmektedir. Metalik partiküllerin yüzeyleri oksit tabakasıyla çevrili olacak şekilde oksitlenir, bunlar tane yada tane sınırlarını saran oksit inklüzyonlarıdır.

Küçük kürelerin soğuk yüzeye hızla çarpmaları sonucu hızlı soğumaları ve yassılaşımları yüzeyde lamelsi yada mercimeksi tane yapılarının oluşmasına neden olmaktadır. Kaplamalar lamel yada yassılaşımlı taneler halinde ve altlık malzemeye paralel olarak görülmektedir. Partikülün sıcaklığı, hızı, boyutu, altlık malzemenin sıcaklığı ve yüzey pürüzlülüğü bağ mukavemeti üzerinde etkili olmaktadır.

Dökülmüş malzemelere göre kaplamanın yapısı daha heterojendir. Bunun sebebi, darbe alan farklı durumlardaki tekil partiküllerin varlığıdır. Çünkü tüm partiküllerin aynı boyut ve aynı hızda olmaları, aynı sıcaklığı oluşturmaları imkansızdır.

Bilinen kaplama yöntemleri çeşitli nedenlerden dolayı belirli oranlarda (%0,025-%50) porozite içerirler. Bu nedenler; Erimeemiş partiküllerin düşük çarpışma enerjisi, erimeemiş partiküllerin açıdan dolayı neden olduğu gölgeleyici efektler, çekme ve stres oluşturan etkiler şeklinde sıralanabilir. Kaplamalar bu sebeplerden dolayı altlık malzemedan farklı fiziksel ve kimyasal özellikler göstermektedirler [8,9].

2.2.1. Gerilim

Partiküller püskürtme esnasında çarpmanın etkisiyle hızla soğur ve katılışırlar. Bu da çoğu malzemede çekme yada küçülmeyi beraberinde getirir. Bu durum partikülde çekme gerilim stresi ve yüzeyle altlık arasında basma stresi yaratır. Kaplama oluştuğça çekme gerilmeleri de beraberinde meydana gelir. Kaplama yoğun olarak yapıldığında artan kaplama kalınlığı, çekme gerilmeleri, bağ mukavemeti ve yapışma mukavemetini yenerek kaplamanın başarısız olmasına neden olur. Yüksek çekme direncine sahip malzemeler bazı ostenitik paslanmaz çeliklerde olduğu gibi, yüksek seviyelerde stres oluşturma yapısına sahip olduklarından düşük kalınlık limitleri vardır. Genelde ince kaplamalar kalın kaplamalara nazaran daha dayanıklı olurlar.

Püskürtme metodu ve kaplamanın mikro yapısı kaplamada biriken stresin derecesini etkilemektedir. Yoğun kaplamalar, porozite içeren kaplamalara nazaran daha az stres yüklüdürler. Çok yüksek kinetik enerji ve düşük termal enerji kullanılan HVOF gibi sistemlerde ise diğerlerine göre çok yoğun ve daha az stresli kaplamalar üretilir. Bu durum partikülün çarpma anında oluşan mekanik deformasyonun yol açtığı basma

gerilmelerinin, soğuma ve katılaşmada oluşan çekme gerilmeleriyle karşılanması şeklinde açıklanır [1-3].

2.2.2. Porozite

Ön ısıtma uygulanmış kaplamalar, fuse kaplamalar ve VPS hariç çoğu termal kaplama yönteminde porozite görülmektedir. %1-25 oranında meydana gelen porozite normal karşılanmakta olup proses ve malzemede yapılacak olan değişiklikler ile porozite oranı ayarlanabilmektedir. Termal püskürtme kaplamalarda 3 farklı porozite çeşidine rastlanabilir. Birinci tip porozite erimemiş yada yeniden katılmış partiküllerin etrafında düşük akışkanlıkta olan ve sonradan çarparak eriyen damlaların sebep olduğu, yaklaşık beş eksenli geniş porlar şeklindedir. Bu tip poroziteler lameller arasında yer alır. Kaplanan yüzeye oldukça paraleldir ve erimiş taneciklerin çarpma sonrasında hızla katılaşmasından oluşur. İkinci tip porozite yassı şeklindedir ve yassı por olarak adlandırılır, kısıtlanmış termal çekmenin yani daralmanın sebep olduğu gerilmelerin açığa çıkması için soğutma yapılması esnasında oluşan çatlaklardır. Bu çatlaklar lameller arasındaki yüzeylere neredeyse diktir.

Yassı kusurlar toplam poroziteyi belirgin bir şekilde arttırmaz fakat artık gerilmelerin olduğu kadar elastik sabitlerinde üzerinde büyük etkisi mevcuttur. Artık gerilmeler iki ana mekanizmanın etkisiyle ortaya çıkar; tabakalı yapılar arasında oluşan porozitenin soğuması sırasında oluşan tavlama gerilmeleri ve altlık ile kaplamanın farklı termal genleşme katsayılarından oluşan soğuma gerilmeleridir. Bunlara ek olarak çarpmanın etkisiyle oluşan plastik deformasyon ve faz dönüşümleri gibi diğer mekanizmalarda etkilidir.

Porozitenin önemli olduğu bazı durumlar şunlardır; Porozite yağlama-yağlayıcılar için rezervuar görevi görmekte, termal bariyer özelliklerini arttırmakta, stres gerilim seviyesini azaltıp kalınlık limitlerini arttırmakta, şoka karşı dayanım özelliklerini arttırmaktadır. Porozite aynı zamanda kaplamaların korozyon, mukavemet, makro sertlik ve aşınma davranışlarınınada zarar verebilmektedir [9].

2.2.3. Oksitler

Metalik kaplamaların çoğu kaplamanın içerisinde yer alan maddeler ve açıkta gerçekleştirilen termal püskürtme sebebi ile oksidasyona maruz kalmaktadır. Oksitler genelde ana metalden daha sert olurlar. Yüksek oksit içeren kaplamalar genelde daha sert ve aşınmaya dayanıklı olup, kaplamalardaki oksit oranının yüksek olması korozyon, mukavemet ve işlenebilirlik yönünden zararlı olabilir.

2.2.4. Yüzey yapısı

Ön püskürtme yapılmış yüzeyler incelendiğinde genelde pürüzlü ve tekstürlü bir yapının varlığı ile karşılaşılır ve ön püskürtme yapılmış çoğu kaplama bu haliyle yüksek sürtünme yüzeylerine sahiptir. Bazı plazma püskürtme seramik kaplamalar ile pürüzsüz fakat tekstürlü kaplamalar üretilir ve bunlar tekstil endüstrisi için önemli kaplamalardır.

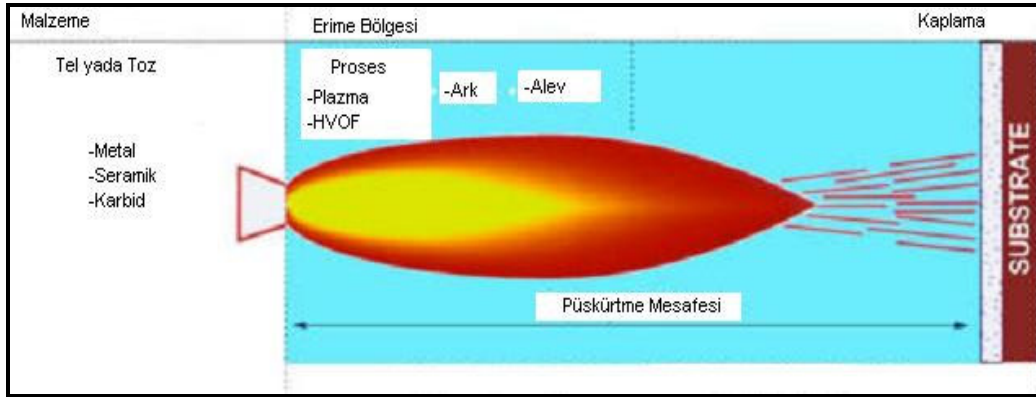
2.2.5. Mukavemet

Partikül, tane sınırı ve kaplama-altlık ara yüzeyi arasındaki ilişki kaplamanın mukavemet, süneklik ve darbe özelliklerini etkilemektedir. Kaplamalar taşıyabilecekleri yük açısından kısıtlı olup, çoğu zaman kendilerini destekleyecek altlık malzemeye ihtiyaç duyarlar. Altlık malzemesinin mukavemet özelliğinin yüksek olması, kolay işlenebilir ve ekonomik olması istenir. Kaplama yüzeyinden beklenen spesifik özellikleri sağlaması arzu edilir [1-3].

2.3. Termal Püskürtme Kaplama Yöntemleri

Termal püskürtme kaplama metal ve metal olmayan malzemelerin ısıtılıp ergitilerek tabaka oluşturulmasıyla gerçekleştirilen bir işlemdir. Ergitilmiş malzeme gaz jeti içerisinde püskürtme tabancası vasıtasıyla kaplanacak yüzeye püskürtülmektedir. Ergimiş toz partikülleri kullanılacak yüzeye püskürtüldüğünde yassılaşıyor ve buldukları yüzeyin şeklini alırlar.

Yüzeyin şeklini alan plakalar soğuyup katılarak sıralı katmanlar halinde belirli kalınlığa ulaşırlar. Şekil 2.2’de termal püskürtme kaplama tekniklerine yer verilmiştir. Kaplama kalınlığı püskürtülecek malzemenin ve iş parçasının şekline bağlı olarak 0,05 - 2,5 mm. arasında, yapışma direnci 600 – 1.000 psi ve pürüzlülük % 10 - 20 arasında değişmektedir [3].



Şekil 2.2. Termal püskürtme kaplama teknikleri [10]

Püskürtme mesafesi genellikle 100-200 mm. arasındadır. Püskürtme demetinin püskürtülen yüzeye teşkil ettiği açı 45° 'den az olmamalıdır. Aksi halde püskürtülen tabaka, süngerimsi bir yapı oluşturur. En iyi sonuç 70° püskürtme açısı ile elde edilmektedir. Ekonomik açıdan dar açılı bir püskürtme demetinin kullanılması tavsiye edilir. Böylece kalınlığı düzgün olan bir püskürtme tabakası sağlanmış olur. Dar açılı püskürtme durumunda tabancanın ilerleme hızının yüksek olması gerekir. Böylece istenilen kalınlıktaki püskürtme tabakası; birkaç yada her bir tabaka bir öncekine dik olacak şekilde püskürtülür.

Kenarlar daima ilk önce püskürtülmeli ve 45° açı kullanılmalıdır. Yüzey üzerinde oluşan kaplama tabakasının yoğunluğu malzemenin türüne, kullanılan püskürtme metoduna, püskürtme işleminin sırasına ve sonrasındaki aşamalara bağlıdır [3].

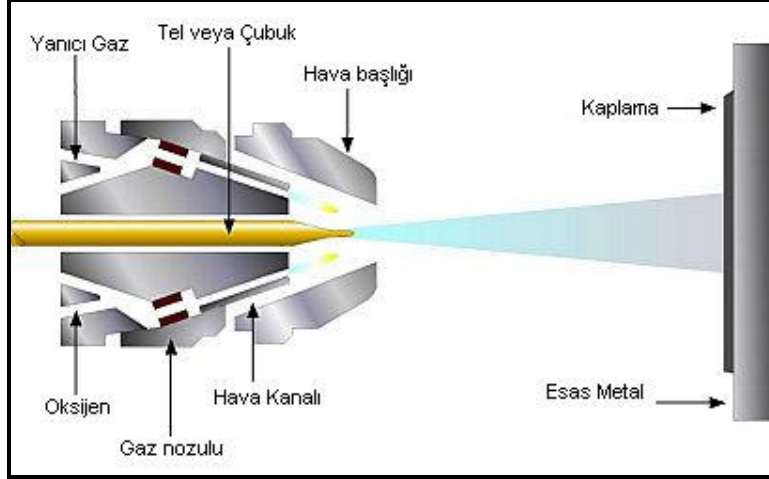
Pek çok termal püskürtme metodu mevcut olmakla birlikte ticari amaçla kullanılan dört temel püskürtme metodu bulunmaktadır. Bunlar; Alev püskürtme, elektrik ark püskürtme, detonasyon tabancası ve plazma püskürtme teknikleridir. Ayrıca termal püskürtme ailesine son olarak katılan yüksek hızlı oksijen-yakıt püskürtme bu yöntemlere alternatif olarak geliştirilmiştir [3].

2.3.1. Alev püskürtme

Termal püskürtme tekniklerinin en basit ve ucuz olan yöntemlerinden biridir. Alev püskürtme tekniği kaplanacak malzemenin cinsine bağlı olarak tel, toz veya çubuk kullanılarak uygulanabilmektedir. Tel, toz veya çubuk olsun alevle püskürtme tekniği düşük sermayeli yatırım, yüksek çökelme oranı ve verimliliği, kullanılma kolaylığı, düşük bakım maliyeti ile karakterize edilmektedir.

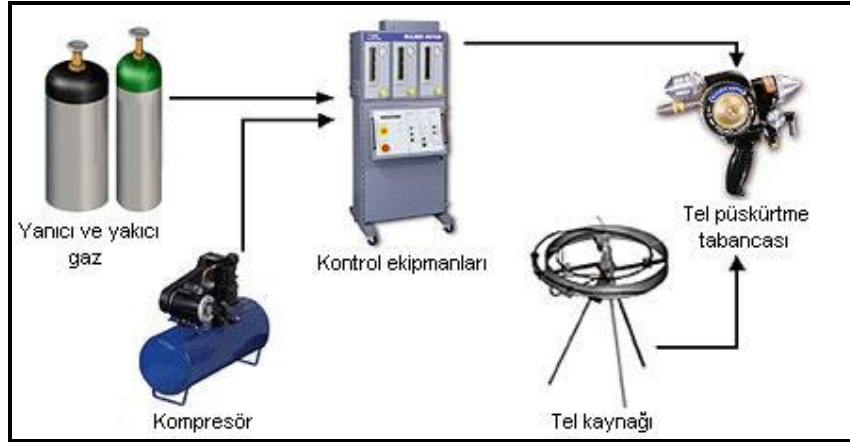
Tel alev püskürtme tekniği; tel halinde üretilmiş ve ergime sıcaklığı oksijen-asetilen alev sıcaklığının altında olan herhangi bir metalin kaplanacak yüzeye püskürtülmesi şeklinde gerçekleştirilir. Kaplanacak metal tel sürücü ile püskürtme tabancasının nozuluna beslenmektedir. Tel nozul içinden geçerken oksijen ve yanıcı gaz karışımı yardımı ile iletilmektedir. Ergimiş metal yüksek basınçlı hava ile atomize edilerek kaplanacak yüzeye püskürtülmektedir.

Tel alev püskürtme tekniğinde, alevin fonksiyonu metalin iletmesini sağlamaktır. Kaplanan yüzeyin sıcaklığı 95-200°C arasında değişmektedir. Şekil 2.3'de tel veya çubuk püskürtme tabancası şematik olarak görülmektedir [1-3,10].



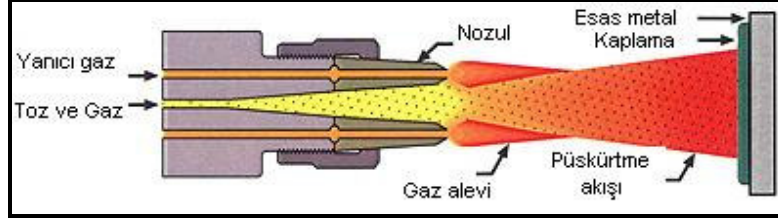
Şekil 2.3. Tel alev püskürtme tabancası [10]

Tel alev püskürtme tekniğini için gerekli olan tesisat tertibatında yanıcı ve yakıcı gaz, kompresör, kontrol ekipmanları, tel besleme kaynağı ve tel püskürtme tabancası yer almaktadır. Şekil 2.4’de tel veya çubuk alev püskürtme tertibatı görülmektedir.



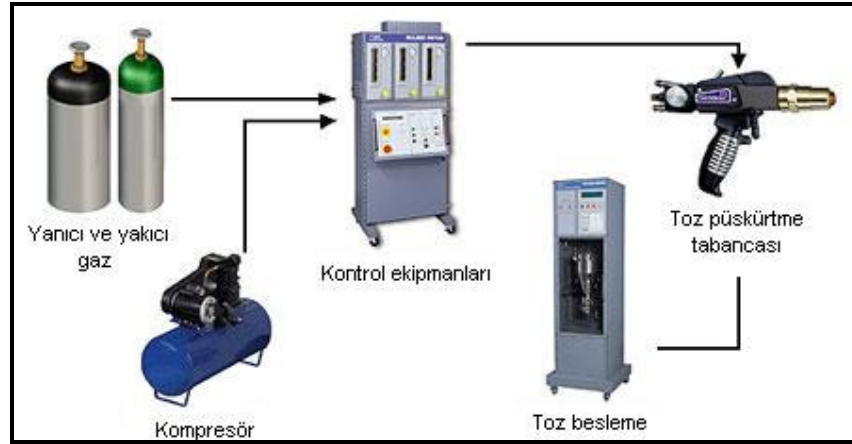
Şekil 2.4. Tel alev püskürtme tesisatı [11]

Toz alev püskürtme tekniğinde ise toz formunda üretilen metal alaşımları vakum yardımı ile oksijen alevi içerisine beslenir. Ergiyen partiküller parça yüzeyine taşıyıcı gaz yardımı ile taşınır. Şekil 2.5’de toz alev püskürtme tabancası şematik olarak görülmektedir [13].



Şekil 2.5. Toz alev püskürtme tabancası [8]

Toz alev püskürtme tekniği için gerekli olan tesisat tertibatında yanıcı ve yakıcı gaz, kompresör, kontrol ekipmanları, toz besleme kaynağı ve toz püskürtme tabancası yer almaktadır. Şekil 2.6’da toz alev püskürtme tertibatı görülmektedir.



Şekil 2.6. Toz alev püskürtme tesisatı [11]

Alev püskürtme tekniğinde, kaplama malzemesini eritmek için gerekli olan ısı kaynağı, yanıcı gazlar ile elde edilmektedir. Yakıcı gaz olan oksijenin yanında kullanılan yanıcı gazlar asetilen, propan veya hidrojenidir. Bu gaz karışımları ile ilgili bilgiler Tablo 2.1’de verilmiştir.

Tablo 2.1. Alev püskürtme gazları [1-3]

Gaz karışımı	Alev Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	Isı Değeri (kJ/mm^3)	Tutuşma Hızı (cm/sn)	Alev Verimi (kJ/cm)
Oksijen-Asetilen	3.200	56.430	1.350	45
Oksijen-Hidrojen	2.650	10.740	890	11
Oksijen-Propan	2.850	93.423	370	14

Gaz değişiminde alevle püskürtme tabancasının değişimine gerek yoktur. Kaplama malzemesini ergitmek için kullanılan gaz karışımları sayesinde ergiyen püskürtme taneciklerinin hızları 30-150 m/sn arasındadır. Kaplama malzemesinin toz biçiminde olması durumunda, toz malzeme aleve enjekte edilir ve burada ısıtılır. Sıcak gaz çıkışı ile iş parçası yüzeyine gönderilir. Tel veya çubuk biçimindeki kaplama malzemesi alev içinde bir erime ucu oluşturur ve buraya basınçlı havanın püskürtülmesi ile alev, püskürtme akışına dönüşür, tanecikler iş parçasına doğru gönderilir. Şekil 2.4’de bir tel veya çubuk alev püskürtme tesisatı, Şekil 2.6’da da toz alev püskürtme tesisatı görülmektedir.

Kaplamanın iyi kalitede olması için seramik tozları alevin merkez kısmı içinden yol olarak kaplanacak yüzeye gelmelidir. Taneciklerin bu tip yörünge izlemesi en iyi ısı transferini de sağlar. Ancak bazı tanecikler alevin dış kısmından gidebilir. Dış kısmından giden taneciklerin hızı ve sıcaklığı alevin merkezinden gidenlere nazaran daha düşüktür. Bu sebeple kaplamanın yapı ve gözeneklilik özellikleri alev ve kaplanacak yüzey hareket ettirilmediği takdirde uniform olmaz.

Bütün ısıl püskürtme işlemlerinin atmosfer ortamında yapılması, kaplama işlemi sırasında tozların hızının azalmasına neden olur. Bu durum kaplamada boşluklara neden olmaktadır. Püskürtme işlemi sırasında erimiş olan damlalar oksitlenir. % 20 kadar yüksek boşluk seviyeleri, mekanik mukavemeti azaltmakta ancak yağlamalı kayma gibi bazı tribolojik uygulamalarda kontrollü boşluklar faydalı bölgesel yağ depoları sağlamak bakımından yararlı olmaktadır [1-3].

Alev ile püskürtme yöntemi kullanılarak 25-30 MPa bağlantı mukavemeti, % 10-15 arasında değişen boşluklu ve % 15’e kadar oksit bileşenli kaplamalar elde edilmektedir. Alev sıcaklığı 3.000°C dolayında, erimiş damlalar 2000°C’nin üzerinde olup yaklaşık 100 m/sn hızla esas metale çarpmaktadır. Metalik teller rahatlıkla püskürtülebilir. Seramik malzemelerin çubukları ve seramik veya seramik tozlarını içeren tel formlu malzemelerde püskürtülebilir [6].

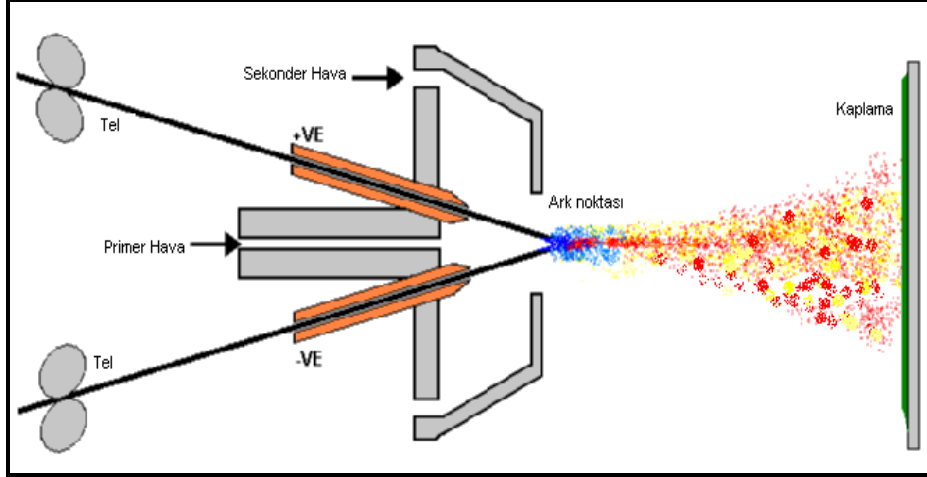
Alev püskürtmede elde edilen metalik kaplamalardaki boşluk, püskürtme işleminden sonra yüzeye uygulanan ısıtma ile (oksi-asetilen veya endüksiyon gibi) azaltılabilir. Bu işlemde püskürtme-eritme yöntemi ile sıfır boşluk seviyeli kaplama ve esas malzeme ile kaplama arasında güçlü bağlanma elde edilir. Ancak eritme işlemi sırasında esas malzemenin yüzey sıcaklığı yükselir. Bu yöntemde kullanılan nikel ve kobalt esaslı alaşımlar, erime noktasının düşürülmesi bakımından bor, fosfor yada silisyum veya bunların kombinasyonlarının ilave edilmesi ile kullanılabilir.

Alev püskürtme yönteminin düşük ilk yatırım maliyeti, yüksek dolgu oranı ve düşük bakım masrafı en önemli olan avantajlarıdır. Yöntemin dezavantajları ise düşük bağ mukavemeti, kaplama tabakasındaki yüksek boşluk seviyesi ve düşük çalışma sıcaklığıdır. Bu yöntem, aşınmış veya tolerans dışına çıkmış parçaların yenilenmesi amacı ile endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Alevle püskürtme yöntemi ile gaz türbinleri için Cr_3C_2 , gaz türbinleri ve jet motorlarının yanma odaları ZrO_2 , MHD jeneratör kanalları için Al_2O_3 , roket nozulları için $ZrO_2+Al_2O_3$ kaplamaları yapılmaktadır [1-3].

2.3.2. Elektrik ark püskürtme

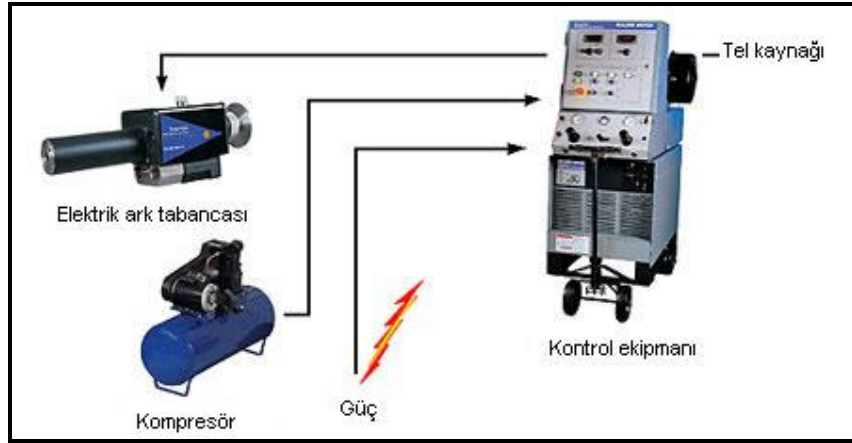
Elektrik ark püskürtme yönteminde, iki tel elektrot arasında bir ark meydana getirilmekte ve $4.000^{\circ}C$ 'nin üzerinde bölgesel sıcaklıklar oluşturulmaktadır. Böylece eriyen malzemenin basınçlı hava yardımı ile esas malzeme üzerine gönderilmesi esasına dayanmaktadır. Şekil 2.7'de elektrik ark püskürtme tabancası şematik olarak görülmektedir.

Elektrik ark püskürtme yöntemi özellikle büyük malzemeler üzerine kalın kaplamaların yüksek hızlarda biriktirilmesi için uygundur. Tel ergime veriminin çok yüksek oranlarda gerçekleşmesi işlemde yüksek biriktirme hızlarının elde edilmesini sağlamaktadır.



Şekil 2.7. Elektrik ark püskürtme tabancası [11]

Elektrik ark püskürtme yönteminde, sabit akım güç kaynağı arkta açık devre 18-35 volt direk akım sağlar. Basınçlı hava, 25-35 ft³/dk debi ve 40-90lb/in² ile erimiş teli atomize eder, damlacıklar oluşturur ve altlık malzemeye doğru iter. Bu yöntemde akım 150-800A'dır. Elektrik ark püskürtme tekniğini için gerekli olan tesisat tertibatında kontrol ekipmanı, tel kaynağı, kompresör ve elektrik ark tabancası yer almaktadır. Şekil 2.8' de elektrik ark püskürtme tertibatı görülmektedir [11].



Şekil 2.8. Elektrik ark püskürtme tertibatı [10]

Elektrik ark püskürtme yönteminde kullanılan ark tabancasının püskürtme mesafesi 7,5-12,5 cm. arasındadır. Bu mesafenin yakın olması parçanın kısa sürede ısınmasına sebebiyet verir. Bu ısınmanın engellenmesi amacı ile tabancanın yan ilerleyerek dönüş hızının artırılması yada hava üfleme soğutucularının kullanılması gerekir.

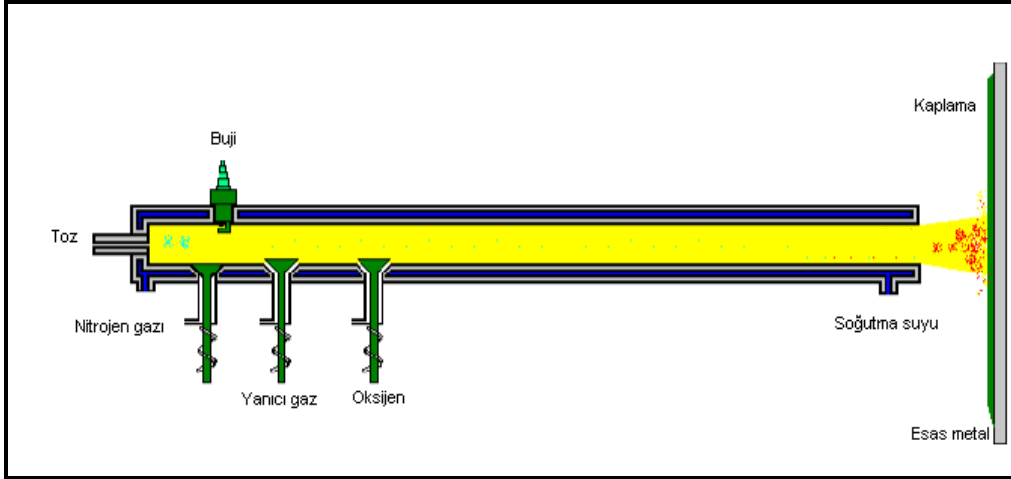
Elektrik ark yöntemi 1,5 mm. çapında elektriksel olarak iletken, yumuşak telin kullanılması ile sınırlı olduğundan karbürler, nitrürler ve oksitler püskürtülemez. Elektrik ark püskürtme ile korozyona, erozyona ve sürtünmeye dirençli kaplamalar ile makine parçalarının geri kazanılması veya kullanılmış makine parçalarının karakteristiklerinin iyileştirilmesi için yeniden dolgu kaplamaları elde etme olanağı vardır. Elektrik ark püskürtme yöntemi, otomotiv sanayinde üst tavan karoserinin birleştirilmesinde kullanılmaktadır. Bu yöntemin dezavantajı ise; ortaya çıkardığı gürültü ve tozdur [4,5].

2.3.3. Detonasyon tabancası

Detonasyon tabancası tekniğinde; 1-1,5 m. uzunluğunda, 2-3 cm. iç çapında su soğutmalı bir yanma odası kullanılmaktadır. Taşıyıcı gaz ve oksijen gaz karışımı patlatılarak kaplanacak toz tanelerinin ergime sıcaklığına kadar ısıtılması ve kaplanacak malzeme yüzeyine yaklaşık 750 m/s hızla püskürtülmesi esasına dayanmaktadır.

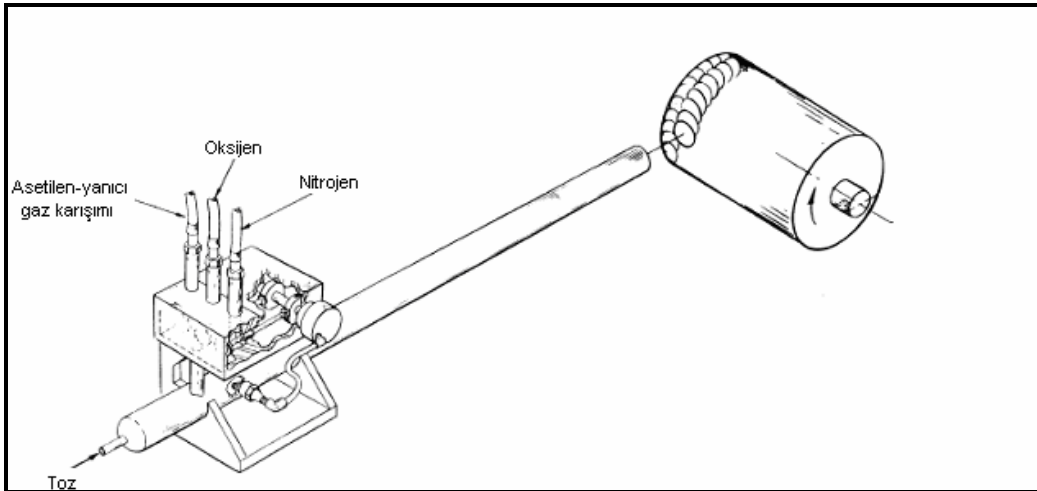
Bu yöntemde alev sıcaklığı yaklaşık 3.000°C, esas malzeme sıcaklığı ise CO₂ soğutma sistemi ile 150°C'nin altında olup, erimiş damlaların hızı 800 m/sn'dir. Bu yöntem kullanılarak boşluk seviyesi % 0.5-1 arasında olan ve iyi bağlanmış kaplamalar meydana getirilebilir. Şekil 2.9'da detonasyon tabancasının şematik görünümüne yer verilmiştir [12].

Detonasyon tabancası yöntemi çok gürültülü olması nedeni ile işlem, ses izolasyonu yapılmış bir odada operatör tarafından uzaktan kumanda edilerek yapılmaktadır. Bu yöntem ile 50-60 HRC'den daha yüksek sertliğe sahip tüm malzemeler kaplanabilmektedir. Elde edilen kaplamalar yoğun, sert ve yüksek yapışma özelliğine sahiptir. İş parçasının az ısınması ve karbürler gibi ergime sıcaklığının yüksek olduğu malzemelerin kaplanması prosesin avantajıdır. Metalik olmayan altlık malzemeler detonasyon tabancası tekniği ile kaplanamaz; bunun nedeni yüksek hızdaki gaz akışının yüzey erozyonuna neden olmasıdır [1-4].



Şekil 2.9. Detonasyon tabancası (d-gun) [12]

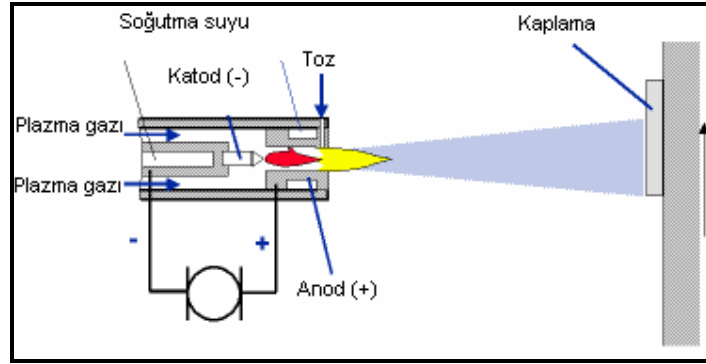
Detonasyon tabancası yönteminde püskürtme tabancası uzun namlu biçiminde bir tüpten oluşmaktadır. Yöntemde oksijen-asetilen gaz karışımı saniyede 4-8 kez elektrik kıvılcımı ile tutuşturularak toz taneciklerinin ısıtılmasını ve hızlandırılmasını sağlayan kontrollü patlama dalgaları meydana getirilir. Patlamalı püskürtme tabancası yanıcı gazların ısı ve kinetik enerjilerinden faydalandığı bir yöntemdir. Her defasında toz enjekte edilir ve patlamadan önce azot gazı boşaltılır [1-4]. Şekil 2.10'da detonasyon tabancasının çalışma prensibi görülmektedir.



Şekil 2.10. Detonasyon tabancasının çalışma prensibi [12]

2.3.4. Plazma püskürtme

Plazma püskürtme tekniğinde bir katot ve anot arasında elektrik arkı yaratılır. Plazma jeti, genellikle Ar, N₂, H₂ veya He olan soygazın, nozul içinde oluşturulan bu elektrik arkı içinden geçirilerek 20.000°C sıcaklığında bir plazma oluşturulur. Plazmanın tabancadan çıkışı sırasında bir taşıyıcı gaz aracılığıyla metal tozları bu plazma hüzmesi içine beslenir. Plazma alevi bu metal veya seramik tozlarını eriterek kaplanacak malzeme yüzeyinde kaplamayı oluşturur. Şekil 2.11’de plazma püskürtme yöntemi şematik olarak gösterilmiştir.

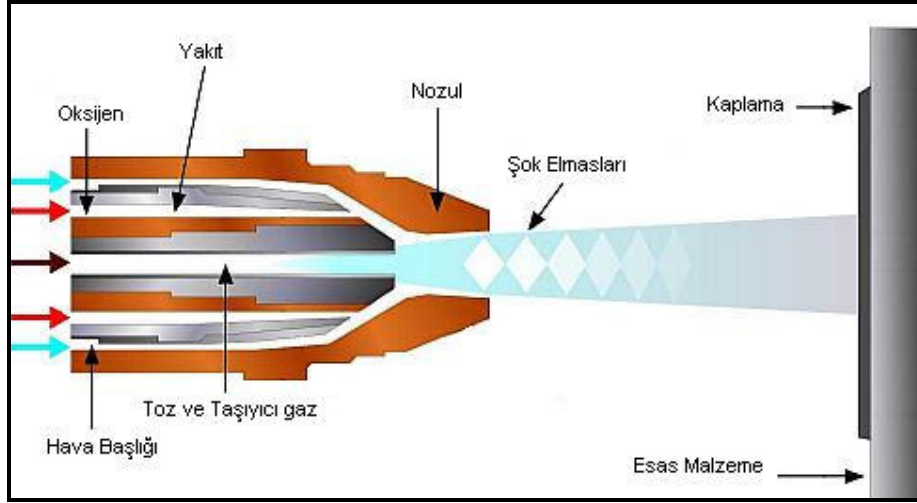


Şekil 2.11. Plazma püskürtme prosesi [7]

2.3.5. Yüksek hızlı oksı-yakıt (HVOF) püskürtme

Yüksek hızlı oksı-yakıt (HVOF) püskürtme yöntemi 1980’li yılların başında detonasyon tabancası yöntemine alternatif olarak geliştirilmiştir. Termal püskürtme yöntemleri arasında son on yılın en ileri teknolojisi olarak yer edinmiştir.

Yüksek hızlı oksı-yakıt püskürtme yönteminde, oksijen ve yakıt bir oda içerisinde yakılır ve tozların enjekte edildiği nozula doğru yönlendirilir. Ardından nozul içerisinde yer alan tozlar ve yanıcı gaz ses üstü bir hızla atmosfere çıkar. Şekil 2.12’de yüksek hızlı oksı-yakıt püskürtme prosesi görülmektedir [3-5].



Şekil 2.12 Yüksek hızlı oksî-yakıt (HVOF) püskürtme prosesi [10]

Yüksek hızlı oksî-yakıt püskürtme yöntemi, işlenebilir yüksek kalitede metal, karbür ve farklı özel kaplamalar oluşturabilmek için geliştirilmiş bir sistemdir. Bu yöntemde tanecikler 0.75 MPa gibi yüksek bir basınç ve 1200 m/sn gibi bir hızla iş parçası üzerine çarparlar. Bu taneciklerin ortaya çıkarttıkları kinetik enerji diğer püskürtme yöntemlerine oranla çok daha yüksektir. Taneciklerin form değiştirip yayılarak malzeme yüzeyinde yer alan tüm gözenekleri doldurması sonucu yoğun ve bağlama mukavemetleri yüksek kaplamalar elde edilir. Yüksek hızlı oksî-yakıt püskürtme tekniğini için gerekli olan tesisat tertibatında oksijen ve yanıcı gaz, kontrol ekipmanı, toz besleme ünitesi, kompresör, HVOF tabancası ve tabanca için gerekli olan su yer almaktadır. Şekil 2.13’de yüksek hızlı oksî-yakıt püskürtme tertibatı görülmektedir.



Şekil 2.13 Yüksek hızlı oksî-yakıt püskürtme (HVOF) püskürtme tertibatı [11]

2.4. Termal Püskürtme Kaplamaların Uygulama Alanları

Termal püskürtme kaplama sistemleri endüstride çok geniş kullanım alanlarına sahiptirler. Bu sayede metal ve metal alaşımların yanı sıra suni madde, seramik ve sert metallerin de kaplanması mümkün olmaktadır. Kaplamanın amacı aşınma ve korozyon mukavemetinin yanı sıra, iletkenlik veya izolasyon özellikleri gibi elektriksel amaçlara da yöneliktir. Ayrıca termal izolasyon veya yapışmazlık özellikleri de hedeflenebilmektedir.

Termal püskürtme kaplama teknikleri sadece belli bir alana veya amaca yönelik olmayan, değişken amaç ve uygulamalara yönelik metal ve seramiklerin birçok şekilde kaplanmasını sağlayan yöntemlerdir. Alev ve elektrik arkı püskürtme yöntemlerinin yanı sıra 80'li yıllarda plazma püskürtme ve 90'lı yıllarda yüksek hızlı alev püskürtme yöntemleri de endüstride kendilerine yer edinmişlerdir.

2.4.1. Otomobil endüstrisi

Termal püskürtme kaplama teknikleri son yıllarda otomobil endüstrisinde de başarılı bir şekilde kullanılmaktadır. Tel alev püskürtme tekniğinde molibden kullanılarak senkron halkaları, debriyaj ayırma çatalları gibi aktarma elemanları kaplanmaktadır. Molibdenin olağanüstü aşınma ve kayma özellikleri çok daha iyi bağlantı özellikleri sağlamaktadır [14].

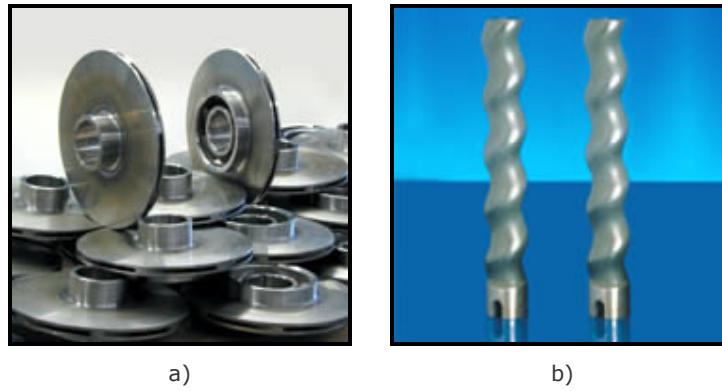
Transmisyon yapısına göre kaplamalar dıştan, içten veya her iki taraftan da yapılabilir. Termal püskürtme kaplama teknikleri kullanılarak alüminyum motorlarının piston segmanlarının ve silindir gömleklerinin içlerinin kaplanması da mümkün hale getirilmiştir. Şekil 2.14'de termal püskürtme yöntemiyle kaplanmış turbo şarjörler ve fren diskleri görülmektedir.



Şekil 2.14. Termal püskürtme yöntemiyle kaplanmış a) Turbo Şarjörler, b) Fren Diskleri [14]

2.4.2. Makine/İmalat endüstrisi

Termal püskürtme kaplama teknikleri makine imalat endüstrisinde de yoğun olarak kullanılmaya başlanmıştır. Yatak halkalarının aşınmaya karşı korunmaları ve diğer sızdırmazlık uygulamaları olan şaft koruyucu yatakları veya pompa şaftları yüksek değerlerde seramik kaplamalara ihtiyaç duymaktadır. Ayrıca cam imalatındaki hadde silindirleri veya pas giderme tesisatları ile şerit çekme tesisatlarının arıtma sistemlerinde de termal püskürtme kaplama tekniklerinden faydalanılmaktadır. Şekil 2.15' de termal püskürtme yöntemiyle kaplanmış disk ve pompa şaftı görülmektedir.



Şekil 2.15. Termal püskürtme yöntemiyle kaplanmış a) Disk, b) Pompa şaftı [14]

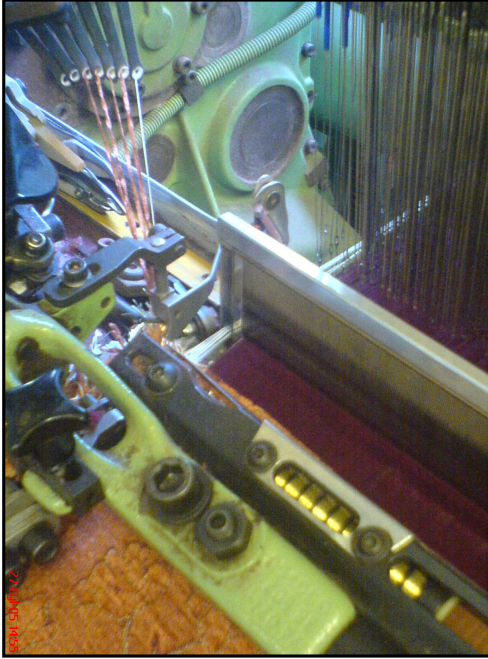
2.4.3. Tekstil endüstrisi

Tekstil endüstrisinde daha önce kullanılan galvanik kromlu elemanlar ihtiyaca yeteri kadar cevap veremediğinden sentetik elyafların imalatında da seramik kaplamalar kullanılmaya başlanmıştır. Elyaf ile temas halinde olan örneğin; yumak işçileri, galetler, aktarma doğrusalları, hava silindirleri içindeki merdaneler v.b. gibi elemanlar için kaplama malzemesi olarak genellikle Al_2O_3/TiO_2 uygulanmaktadır.

Endüstriyel bir problemin çözümüne yönelik olarak yapılan bu çalışmada, tekstil endüstrisinde dokuma tezgâhlarında kullanılan, aşınmaya maruz kalan ve “mekik” adı verilen parçaların kullanım ömrünün arttırılması amaçlanmıştır. Yurt dışından yüksek bedeller karşılığında ithal edilmek zorunda olunan parçaların, plazma kaplama tekniği kullanılarak kullanım ömrünün arttırılması hedeflenmiştir. Böylece ekonomiye faydalı girdiler sağlanarak tekstil sektöründeki verimliliğin iş akışı açısından da arttırılması amaçlanmaktadır. Şekil 2.16’da kullanım ömrünü arttırmak amacı ile özellikleri iyileştirilmeye çalışılan mekik parçası görülmektedir. Şekil 2.17’de ise mekiğin kullanım yeri verilmektedir.



Şekil 2.16. Tekstil endüstrisinde kullanılan mekik parçası



a)



b)

Şekil 2.17. Mekik parçasının kullanım alanından görüntüler a) Mekiğin çalışma ortamı b) Mekiğin görüntüsü

2.4.4. Matbaa endüstrisi

Termal püskürtme kaplama teknikleri ile matbaa endüstrisinde merdane olarak adlandırılan parçaların kaplanması söz konusudur. Ayrıca ofset baskı makinelerinin boya guddeleri yüzeyde özel hassasiyet isteyen seramik ile kaplanmaktadır.



Şekil 2.18. Matbaa endüstrisinde termal püskürtme kaplama tekniğinin kullanım alanları [14]

2.4.5. Enerji sanayi

Sabit gaz türbinleri alanında termal püskürtme kaplama teknikleri çok önemli bir yer tutmaktadır. Özellikle türbin kanatları, yanma odaları, alev boruları, geçiş parçaları veya kapak segmentleri sıcak gaz korozyonuna karşı veya termal izolasyon için, termal püskürtme kaplama teknikleri ile korunmaktadır. Başka uygulama alanları ise rotor şaftları ve helezon kompresörlerdir. Güç ünitelerinde kullanılan geri dönüşümlü materyal ve sert egzost sınır değerleri kazanlardaki akıtma olukları için gittikçe daha büyük bir yük oluşturmaktadır. Bu nedenle termal püskürtülmüş koruyucu kaplamalar bu alanda önemli bir görev üstlenmektedir [14]. Kaplamalar aynı zamanda mobil sistemler sayesinde, elektrik ark ve yüksek hızlı alev püskürtme tekniği yardımı ile sabit sistemlerin koruyucu kaplama uygulamalarını yapabilmeyi sağlar. Şekil 2.19'da Termal püskürtme kaplama teknolojisinin uygulandığı gaz türbin kanatları görülmektedir.



Şekil 2.19. Termal püskürtme kaplama teknolojisinin uygulandığı gaz türbin kanatları [14]

2.4.6. Uçak sanayi

Uçak sanayinde kaplanmış parçalar, tahrik düzeneklerinden, türbin ve itici kanatlardan, alev borularından şaryolara kadar uzanan geniş bir kullanım alanına sahiplerdir. Kaplamalar, türbin kanatları ile gömlekleri üzerindeki çatlakları minimum seviyeye indirerek türbinlerin çalışma performansını en üst seviyede kalmasını sağlar. Hidrolik elemanları yüksek hızlı alev püskürtme sayesinde sert metal bazlı WC/Co ve NiCr/Cr₃C₂ kaplamaları uygulanarak üstün koruma sağlanır.

Şekil 2.20’de uçak sanayinde kaplama yapılan, tiger helikopter parçaları ve roket parçaları görülmektedir.



a)



b)

Şekil 2.20. Uçak sanayinde kaplama yapılan a)Tiger helikopter parçaları, b) Roket parçaları [15]

2.4.7. Savunma sanayi

Ağırlık nedenlerinden dolayı tanklarda alüminyum tahrik ve döndürücü tekerlekler kullanılmaktadır. Bunlarda ilerleme için tahrik bir zincir ve palet yardımı ile yapıldığından aşınmaya karşı kaplamalara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu birleştirmenin hazırlık safhasında özel bir prosesten geçirildikten sonra, kaplama ve mekanik işlemeyi takiben özel bir kauçuklama uygulanıp, cilalanıp monte edilir. Şekil 2.21’de kaplama yapılan tank parçaları görülmektedir.



Şekil 2.21. Kaplama yapılan tank parçaları [16]

2.4.8. Tıp teknolojisi

Günümüz tıp teknolojisinde termal püskürtme kaplama uygulamalarını düşünmemek mümkün değildir. Kemiklerde uygulanan implant (protez) tedavilerinde, protezler titan, hidroksil apatit, alüminyum oksit veya kalsiyum karbonat ile kaplanmaktadır. Protezlerin yüzeyindeki hassas ve süngerimsi yumuşak yapı, kemik yapısı ile uyum sağlayıp uzun ömürlü bir kullanım sağlamaktadır.

Kaplama tekniği daha ince kaplama uygulamaları yönünde önemli bir gelişim süreci içindedir. WC/Co veya NiCr/Cr₃C₂ bazlı kaplamalarda bu güne kadar mümkün olmayan yeni kaplama teknikleri uygulanmaya başlanmıştır. Bu kaplamalar çok sıkı bir yapı, yüksek sertlik ve kuvvetli bir bağ mukavemeti sağlayıp, imalat ve tamir maliyetlerinde önemli derecede tasarruf sağlamaktadır. Kaplama tekniğinde sağladığı ekonomik avantajlardan dolayı sert krom kaplamalar günümüzde endüstrinin hemen her alanında yerini almış durumdadır.

Termal püskürtme tekniği hemen hemen endüstrinin her alanında yüksek performans gösterip, yapı elemanlarının imalatında yüksek kalite ve kolay yeniden imal edilebilirlik özellikleri sunarak çeşitli kaplama malzemesi ve sistemi sayesinde diğer yöntemlerde olmayan bir esneklik sağlamaktadır. Şekil 2.22’de tıp teknolojisinde termal kaplamanın kullanıldığı gövde eklemi ve diz eklemi görülmektedir [17].



a)Gövde eklemi



b)Diz eklemi

Şekil 2.22. Tıp teknolojisinde termal kaplamanın kullanıldığı a) Gövde eklemi, b) Diz eklemi [14]

BÖLÜM 3. PLAZMA PÜSKÜRTME KAPLAMA YÖNTEMİ

3.1. Giriş

Plazma püskürtme kaplama tekniği 25 yıldan daha uzun bir süredir kullanılmaktadır. Bu gerçekle birlikte, bu teknolojiye dayalı bilim hala zayıf bir şekilde gerçekleştirilmektedir. 50'li yılların sonunda, 60'lı yılların başında ilk önemli incelemeler temel refrakter malzemelerinin püskürtülmesi için plazma torçları kullanılarak rapor edilmiştir. Bugün, herhangi bir malzeme, herhangi bir altlık üzerine plazma püskürtme için kullanılabilir. Bu esneklik, bu teknolojinin hızlı gelişmesi için temel nedenlerden biridir. Plazma püskürtmenin uygulamaları korozyon, sıcaklık ve abrasiv direnç kaplamalarını ve aynı zamanda hızlı soğuma prosesinin avantajını alan monolitik ve son ürün şekillerini kapsamaktadır.

Plazma püskürtme kaplama yönteminde kaplama işlemi, kaplama malzemesi olarak kullanılan tozların yüksek sıcaklıklara (8.000-20.000°C) ısıtılmış bir plazma alevinde ergitilerek önceden hazırlanmış ana malzeme yüzeylerine püskürtülmesinden ibarettir. Elde edilen kaplamalar, lamelli bir yapıya sahiptir ve özellikleri kullanılan kaplama sistemi tarafından önemli oranda etkilenir.

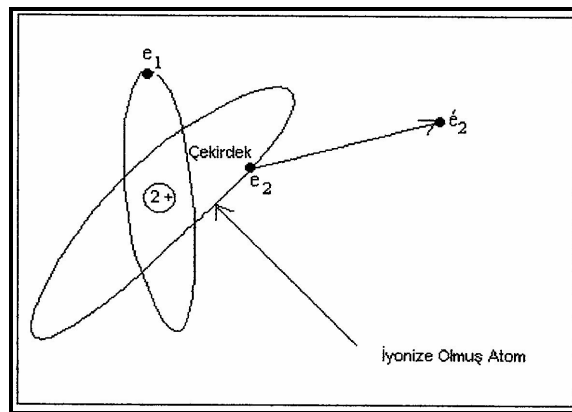
Plazma püskürtme yöntemiyle üretilen kaplamaların belirli bir avantajı vardır. Bu yöntemle metalleri, seramikleri, plastikleri veya bunların kombinasyonlarını püskürtmek mümkündür. Camsı metallerin tozları, amorf yapılarında değişiklik olmadan plazma ile püskürtülebilir. Ayrıca, yüksek sıcaklık süper iletken malzemelerinin de plazma püskürtme prosesi ile püskürtüldüğü bilinmektedir. Plazma kaplamalar, altlık malzemeye metalurjik olarak etki etmezler; çünkü altlık sıcaklığını fazla arttırmazlar. Argon ve helyum gibi soy gazların kombinasyonlarının kullanımı ile plazma püskürtme işlemi esnasında kaplamanın oksidasyonu minimize edilir. Plazma kaplamaların kirlenmesi herhangi bir yanma ürününün

bulunmamasından dolayı oldukça düşük seviyelerdedir. Yüksek yoğunlaşma hızı nedeniyle kompozisyonda önemli bir değişiklik olmaz.

Plazma kaplama işlemi esnasında ana metal sıcaklıklarını düşük tutarak hassas parçaların ısıl deformasyonlara uğrama endişesi ortadan kaldırılır. Daha yüksek sıcaklıklarda kullanım için gerekli olan malzeme kalitesinin düşürülmesi maliyetin azalmasına neden olur. Ayrıca yanma odaları gibi yerlerde seramik kaplamalar sayesinde elde edilen yalıtım nedeniyle, hem daha yüksek sıcaklıklarda çalışma imkanı sağlanır hem de ısı kaybı azaltılır [1-3].

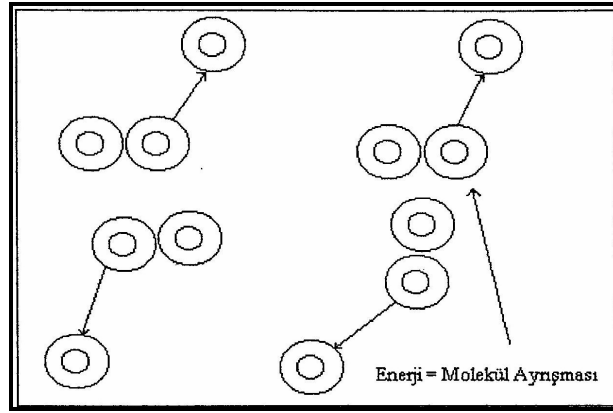
3.2. Plazma ve Oluşumu

Plazma, malzemenin buharının normal gaz halinden daha yüksek bir enerji seviyesine yükseldiği hali ifade etmektedir. Normal gazlar ayrı moleküllerden oluşurken plazma parçalanmış ve ayrılmış aynı moleküllerden oluşur. Yani plazma, içerisinde pozitif iyon, uyarılmış ve nötr atom, molekül, serbest elektron ve foton bulunan, gaz durumundan daha yüksek enerji düzeyine yükseltilmiş malzemelerin buharıdır. Bir cm^3 plazmada yaklaşık 10^9 ile 10^{10} yüklenmiş partikül mevcuttur. Şekil 3.1’de gösterilen nötr bir atom, çekirdek etrafında dönen, pozitif elektrik yüklü iki elektrona sahiptir.



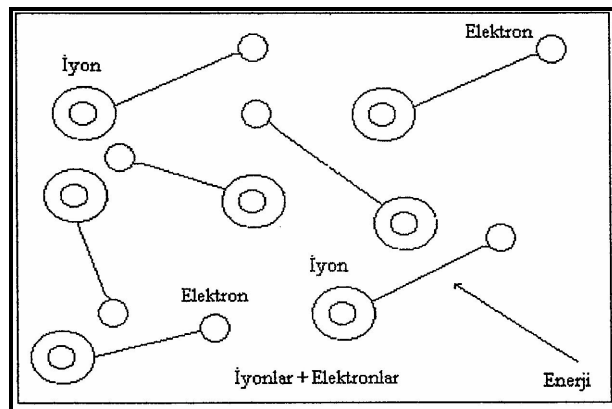
Şekil 3.1. Nötr bir atomun şematik gösterimi [13]

Şekil 3.1’de görüldüğü gibi bu atomda iki pozitif elektrik yükü vardır ve çekirdek etrafında dönen iki elektronla nötr haldedir. Bu durumdaki atoma yeterince enerji uygulanırsa en azından bir elektron yörüngesinin dışına atılmış olur. Bu işlem için gerekli enerji ise, o atom için iyonizasyon enerjisi olarak isimlendirilir. İki veya daha fazla nötr atomun birleşmesi molekül olarak adlandırılır ve tek bir parça olarak kabul edilir. Bu ise diatomik gazlar dediğimiz azot veya hidrojen gibi gazlardaki durumu ifade etmektedir. Şekil 3.2’de ise azot gibi diatomik gaz moleküllerinin ayrıştığı dört molekül görülmektedir. Yeterli enerji uygulanırsa, moleküller gerilerinde atom bırakacak şekilde ayrılırlar ve bu olay disosiasyon olarak tanımlanır.



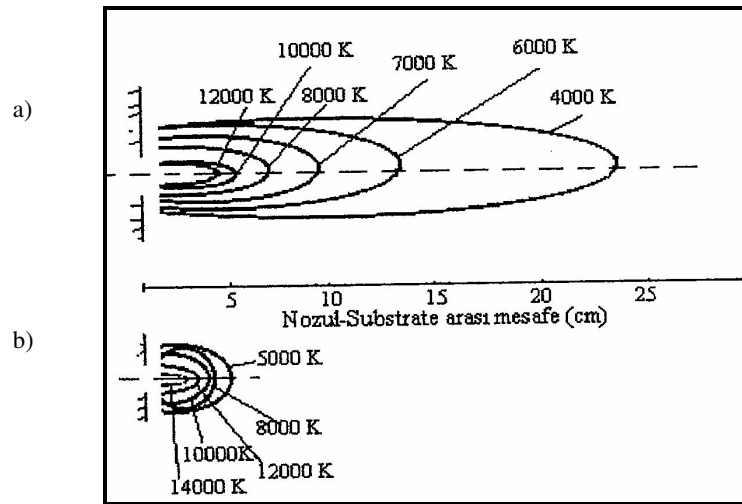
Şekil 3.2. Diatomik moleküllerin disosiasyonu [13]

Daha fazla enerjinin uygulanması ile bu atomlardan en az bir elektron ayrılarak Şekil 3.3’de ki durum oluşur. Böylece atomlar iyonize edilmiş olurlar ve sonuç gaz plazma olarak adlandırılır.



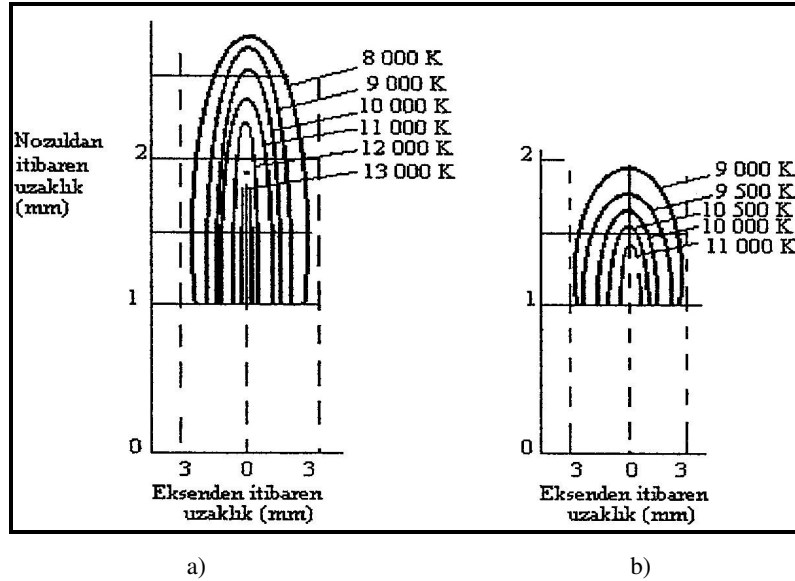
Şekil 3.3. İyonizasyon ve plazma gazının oluşumu [13]

Argon ve helyum gibi tek atomlu gazların plazma oluşturma mekanizmasını açıklayan bu model, N_2 ve H_2 gibi iki veya daha fazla nötr atoma sahip gazlara da uygulanabilir. N_2 ve H_2 gibi diatomik gazlarda iki nötr atomun birleşmesi ile oluşmuş moleküller mevcuttur. Böyle bir sisteme dışarıdan yeterli bir enerji uygulanması durumunda molekül bağı parçalanır ve ayrılan atomlar birbirinden uzaklaşır. Bu olaya molekül ayrışması adı verilir. Molekül ayrışmasıyla oluşan atomların iyonlaşması ile plazma gazı oluşturulur. Plazmanın tümü elektriksel olarak nötrdür. Plazma ışınının sıcaklığı plazma torcunun çalışma parametrelerine ve plazma gazının cinsiyle etkilenebilen iyonizasyon derecelerine bağlı olmaktadır. Plazma ışınındaki tipik sıcaklık dağılımı Şekil 3.4’de gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Plazma ışınındaki sıcaklık dağılımı a) Laminer akış, b) Türbülanslı akış [14]

Argon ve azot ışınlarının sıcaklıklarının mukayesesi Şekil 3.5’de verilmiştir. Plazma ışının hızı, taşıyıcı gazın akış hızının artmasıyla önemli derecede etkilenir ve böylece plazma sıcaklığı ve hızı azalır. Modern plazma torcunun daha yüksek hızlara çıkartılması amaçlanmaktadır. Plazma ışını yüksek sıcaklıklarla birlikte oldukça yüksek hızla beslenen tozları eritmek ve püskürtmek için uygulanmaktadır. Sonuçta erimemiş partiküller altlığa çarptırılarak kaplama oluşturulmaktadır.



Şekil 3.5. a) Argon, b) Azot plazmasındaki sıcaklık dağılımı [14]

Plazmanın iki önemli avantajı vardır: Birincisi oldukça yüksek sıcaklık, ikincisi maddelere daha iyi ısı transferi sağlamasıdır. Isıtıcı ortam ile ısıtılan malzeme arasındaki sıcaklık farkı ne kadar yüksek ise ısıtma hızı da o derece yüksek olmaktadır. Plazma içindeki parçacıkların hızlarının yüksek oluşu nedeniyle, özellikle elektronlar, elektrik ve ısı iletiminde esas rolü oynarlar. Aynı elektriksel yüke sahip olmakla beraber elektronlar, (+) yüklü iyonlardan kütleye daha küçüktür ve üzerlerine etkileyen kuvvet eşittir.

Plazma ortamı yüksek sıcaklık ve enerji yoğunluğuna sahiptir. Plazmanın sıcaklığı ve enerji yoğunluğu, plazma ekseninde maksimum olup, radyal yönde dışarı doğru değerler hızla azalır. Plazmayı magnetik olarak sıkıştırmak, dolayısıyla enerji yoğunluğunu ve sıcaklığını yükseltmek mümkündür. Plazma anizotropiktir, yani özellikleri farklı doğrultularda değişir ve elektrik ve manyetik alandan etkilenir. Bu proses yüksek ısı transferi sağlamasına rağmen plazma püskürtme tabancası ile elde edilen termal enerjinin ancak % 3-5'i kaplanacak olan malzemenin ertilmesinde kullanılır.

3.3. Plazma Gazları

Plazma gazının fonksiyonu, malzemeyi ısıtmak, parçacıkların hareketini hızlandırmak ve kaplama yüzeyine taşımaktır. Ayrıca parçacıkların etrafını sarma ve atmosferin kimyasal etkisinden sıcak yüzeyi koruma görevi de vardır. % 5-25 oranında azot karıştırılan hidrojen atmosferik oksijen ile yanarak iyi bir koruyucu görevi sağlamaktadır. Plazma torcundaki gaz ortamı; plazma oluşumunu, elektrotları oksitlenmeye karşı koruma ve soğumasını sağlamaktadır. Plazma püskürtme kaplama teknolojisinde kullanılan gazlar, farklı ısı kapasiteleri, farklı iyonlaşma özelliği gösterdiklerinden dolayı önemlidir. Azot, argon, hidrojen ve helyum gazları kullanılmaktadır. Plazma gazları tek tek kullanılabilirler gibi çoğunlukla belli oranlarda karışımlar halinde kullanılırlar. Burada amaç, plazma alevinin entalpisini ve hızını arttırmaktır. Tablo 3.1’de plazma gazlarına ait temel fiziksel ve kimyasal özellikler verilmiştir [14].

Tablo 3.1 Plazma gazlarının temel fiziksel ve kimyasal özellikleri [14].

Özellikler	Plazma Gazları			
	Argon	Helyum	Azot	Hidrojen
Relatif Mol Ağırlığı	39.944	4.0002	28.016	2.0156
Spesifik Ağırlık; 0°C, 100 Pa (kg/m ³)	1.783	0.1785	1.2505	0.0898
Termal iletkenlik Katsayısı, 0°C (W/m.K)	0.01633	0.14363	0.0238	0.1754
Spesifik Isı Kapasitesi, 20°C (kJ/kg.K)	0.511	5.233	1.046	14.268
İyonizasyon Potansiyeli (V)				
İlk Kademe	15.7	24.05	14.5	13.5
Son Kademe	27.5	54.1	29.4	-
Sıcaklık (°K)	14000	20000	7300	5100
Ark Voltajı (V)	40	47	60	62
Ark Girişi (kW)	-	50	65	120

Plazma püskürtme yönteminde, kullanılan gazlar tek veya çift atomludur. Tek atomlu gazlar argon ile helyum, çift atomlu gazlara ise azotu söyleyebiliriz ve bu gazlar plazma püskürtmede en çok kullanılan gazlardır. Tek atomlu gazlarda çok yüksek sıcaklıklar elde edilir. Çok atomlu gazlar daha da yüksek ısı içeriğine sahiptirler. Bu çift atomlu gazlar iyonlaşma için gerekli enerjiyi açığa çıkarırlar ve ayrıca ayrışma için gerekli enerjiyi de sağlamaktadır. Gazın seçimi plazmanın niteliklerini kapsamaktadır. Plazma gazlarının uygun seçimi sonucunda gazların kalitesiyle

plazma nozulu ve elektrotunun ömrü üzerinde önemli etkisi vardır. Kullanılacak gazlarda şu özelliklerde aranmaktadır; çok düşük bir rutubet oranına sahip olmalı ve oksijen içerikli olmaları gereklidir. Ayrıca plazma püskürtme işleminde kuru gazlar önerilmekte ve çığ noktası maksimum -60°C olmalıdır. Gazların oksijen içeriği % 0,3'ü geçmemelidir.

3.3.1. Azot

Kaplama prosesinde kullanılan azotun disasyasyonu 5.000°K 'de başlar ve 9.000°K 'de % 95 tamamlanırken, iyonlaşması ise 8.000°K 'de başlayıp $10.000-23.000^{\circ}\text{K}$ 'de bitmektedir. 7.000°K 'nin üzerindeki sıcaklıklarda, azot plazması diğer gazların plazmasından daha fazla ısıya sahiptir. Azot gazı entalpisinin yüksek olmasından dolayı daha yoğun kaplamalar üretilmesine imkan sağlamaktadır.

3.3.2. Hidrojen

Diğer taraftan yaygın plazma gazı olarak yaygın bir şekilde kullanılan hidrojenin, disasyasyonu 2.000°K 'de başlayıp tamamı 6.000°K 'de tamamlanmaktadır. Hidrojen 25.000°K 'de tamamen iyonize olmaktadır. Hidrojen'in disasyasyonu azottan düşük ve termal kondüktivitesi ve ark voltajı diğer gazlardan daha yüksektir. Ancak hidrojen plazmasının sıcaklığı diğer gazlardan daha düşüktür.

3.3.3. Argon

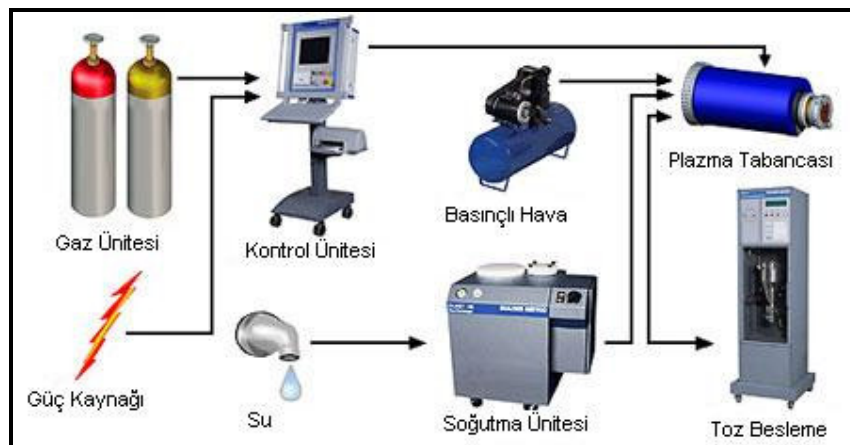
Argonun iyonlaşması 5.000°K 'de başlar ve 22.000°K 'de tamamlanmaktadır. Ar, He gibi bir atomlu gazların entalpi, H_2 ve N_2 gibi iki atomlulardan daha düşüktür. Plazma haline kolay geçtiği için argon gazı tercih edilmektedir. Ayrıca stabil ark sağlar ve daha düşük çalışma voltajı gerektirmektedir.

3.3.4. Helyum

Plazma sıcaklığını arttırmak ve transfer özelliklerini geliştirmek amacıyla helyum gazı ikincil gaz olarak kullanılmaktadır. Sürekli bir şekilde doğru akım boşalmasını sağlamak için 20-80 kW arasında değişen güç üniteleri kullanılmaktadır. Helyum gazı yardımcı gaz olarak argon ile birlikte kullanılır. Ark voltajını arttırmaya yönelik bir gazdır [1-3].

3.4. Plazma Püskürtme Kaplama Sistemi

Plazma püskürtme yöntemi ile kaplama işleminin gerçekleştirildiği sistem; güç ünitesi, gaz besleme ünitesi, toz besleme ünitesi ve püskürtme tabancasından meydana gelmektedir. Bu yöntemde DC elektrik arkı, nozul ile elektrot arasında oluşur. Soygaz (genellikle argon) veya gaz soy gaz karışımları ile gücü ark bölgesine gönderilir ve elektrik arkı ile ısıtılır. Gaz karışımı, yaklaşık olarak 8.000°C'ye kadar ısınarak iyonize hale gelir. Böylece, yüksek sıcaklık plazma hüzmesi tabancasının nozulundan çıkar. Bu sistemde, seramik tozları plazma alevine, taşıyıcı gaz yardımıyla süspanse halinde beslenir. Yüksek sıcaklığın etkisiyle eriyen tozlar, kaplama yapılacak yüzeye hızla çarparak katılaşmaktadır. Plazma püskürtme sonunda elde edilen kaplamaların yapısı, ince ve tabakalıdır. Bazı kaplamalarda ise hızlı katılaşma sonucu amorf yapı elde edilmektedir. Şekil 3.6'da plazma püskürtme sisteminin bileşenleri şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 3.6. Plazma püskürtme sistemi bileşenlerinin şematik olarak gösterimi [11]

3.4.1. Güç ünitesi

Sistemde kullanılan güç, kaplamaların kalitesine etki etmektedir. İlk zamanlarda kullanılan plazma püskürtme sisteminin gücü 40 kW iken daha sonra sırasıyla 80, 120 ve 220 kW'lık güç üniteleri kullanılmaya başlamıştır. 80 kW'lık güce sahip olan konvansiyonel sistemler yerini daha verimli ve güçlü sistemlere bırakmıştır. Güç ünitesinin kaplama özelliklerine etkisi, katottan yayılan serbest elektronların hızının, anot ile olan potansiyel farkına bağlılığından dolayıdır. Bu durumda plazma gazı çarpma etkisi ile iyonize olur. Üflecin ucundan çıkan kaplama tozları daha hızlı olarak yüzeye çarpar ve yoğun bir kaplama elde edilmesine imkan vermektedir.

3.4.2. Gaz besleme ünitesi

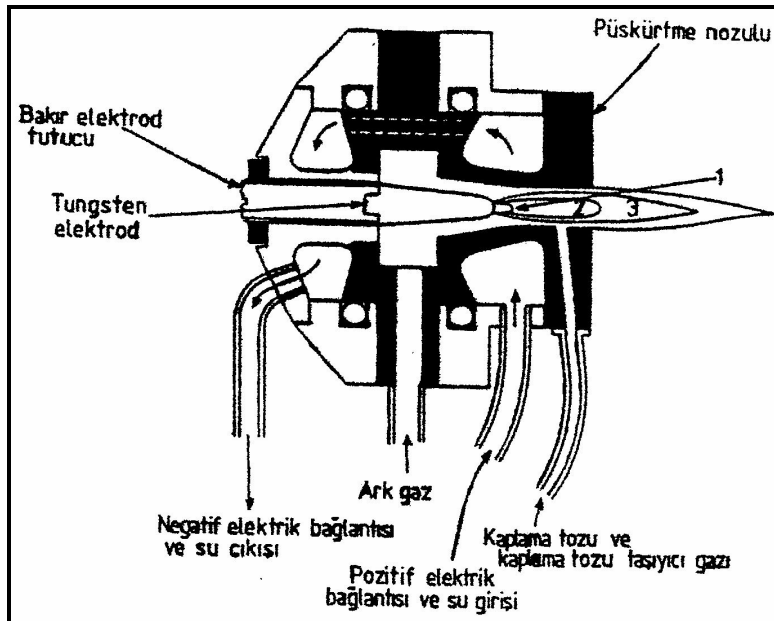
Plazma püskürtme kaplama teknolojisinde kullanılan gazlar, farklı ısı kapasiteleri ve iyonlaşma özelliği gösterdiklerinden önemlidirler. Azot, argon, hidrojen ve helyum gazları plazma püskürtme kaplama yönteminde kullanılmaktadır. Plazma gazının fonksiyonu püskürtülen malzemeyi, parçacıkları hızlandırarak kaplama yüzeyine taşımaktır. Plazma gazının ısı ve sıcaklığı; ark akımı, plazma gazın akışı, gazların karışım oranı, özellikleri ve nozulun cinsine göre kontrol edilmektedir.

3.4.3. Toz besleme ünitesi

Ulaşılan yüksek proses sıcaklıkları sayesinde plazma püskürtme yöntemleri, hemen hemen sınırsız bir spektrumla fonksiyonel yüzey kaplama tabakalarının üretimine imkan sağlar. Kaplamada kullanılan farklı malzeme ve farklı boyutlu tozlar, kimyasal bileşimlerine, tane boyutuna ve kullanım alanlarına göre sınıflandırılır. Plazma tozları sinterleme, sol-jel, mikro peletleme vb. farklı yöntemlerle üretilmektedir. Kaplama tozlarının özellikleri, püskürtme tabakalarının mikro yapısına ve mekanik özelliklerine etki etmektedir.

3.4.4. Plazma püskürtme tabancası

Anot olarak saf bakır ve katot olarak %2 toryumlu tungstenin kullanıldığı tabancada plazma, bu iki elektrot arasındaki elektrik arkında plazma gazlarının iyonizasyonu ile elde edilir. Doğru akım elektrik arkı genelde anot-katot teması ile ateşlenir. Uygulamada nötr plazma gerektiği için, anot boş bir nozul şeklinde dizayn edilmiş ve ark devresinin nozul içinde tamamlanması sağlanmıştır. Kullanılan plazma gazları, katodun etrafından ve aynı zamanda nozul görevini gören anodun içerisinden geçirilmektedir. Katot boyunca verilen plazma gazı, bu ark içerisinde ısıtmakta ve plazma sıcaklığına erişen gaz nozul anottan plazma alevi olarak püskürtülmektedir. Bu sistemde, seramik tozlar plazma alevine, taşıyıcı gaz yardımı ile süspansiyon halinde beslenir. Yüksek sıcaklığın etkisi ile eriyen tozlar, kaplama yapılacak yüzeye süpersonik bir hızla çarparak katılır. Püskürtme tabancasında katot, anot ve cidar eksenlerinin birbirine çakışacak şekilde dizayn edilmesi gereklidir. Ayrıca izolasyonların ve cidarların direkt olarak plazma ile teması önlenmelidir. Plazmaya beslenen plazma gazları ve kaplama tozları plazma eksenine göre simetrik beslenmelidir. Ark akımı ve voltajı; anot/katot dizaynı, gaz akış hızı ve gaz bileşimi gibi değişkenlere bağlı olarak belirlenmektedir. Şekil 3.7’de plazma püskürtme tabancasının şekli görülmektedir.



Şekil 3.7. Plazma püskürtme tabancası [8]

3.5. Kaplamaların Oluşumu

Plazma kaplamaların oluşum prosesi, püskürtme tabakalarının özelliklerini etkileyen birkaç kademedir meydana gelir. Plazma alevinin yüksek ısı ve kinetik enerjisi, kullanılan tozun eritilmesini ve ana malzemeye doğru hareketini mümkün kılar. Plazma tabakasına tozun gönderilme biçimi ile tozun şekli ve granülitesi, belli bir hızdaki partiküllerin hareketini etkiler. Plazma alevi ile erimiş malzeme ve ortam atmosferi arasındaki etkileşim; partiküllerin fiziksel olarak erime ve kimyasal olarak dönüşüm şeklini etkiler.

3.5.1. Partikül taşınımı

Taşınım özellikleri, toz partiküllerinin şekli ve boyutuyla belirlenir. Toz boyut dağılımı mümkün olduğunca üniform, şekli ise küresel olmalıdır. Çünkü plazma alevinde daha ince tozlar buharlaşmaya, büyük tozlar ise tam olarak erimemeye neden olurlar. Püskürtme tozlarının tamamen eriyebilmesi için ancak plazma tabancasının anot ile katodu arasındaki ark bölgesine beslenmeleri gerekir. Bugün için kullanılan sistemlerin büyük bir kısmında toz, reaktif olmayan bir gaz vasıtasıyla, nozul dışında plazma alevine radyal olarak enjekte edilmektedir [8].

3.5.2. Plazmada partikül hareketi

Plazma alevinin eksenine dik olarak enjekte edilen bir toz partikülü birçok faktörün belirlediği bir hareket mekanizmasına sahiptir. Ana malzemeye doğru hareket halindeki partikül alevi, belli açılı konik bir şekle sahiptir. Bu açı; plazma alevine partiküllerin beslenme hızının, partikül boyutunun, plazma alev hızı ile dağılımının bir fonksiyonudur. Ayrıca plazma tabancasıyla ilgili olan tabanca tipi toz besleyici ve ark randımanı gibi faktörlerde partiküllerin plazma alevindeki hareket mekanizmasını etkiler [7].

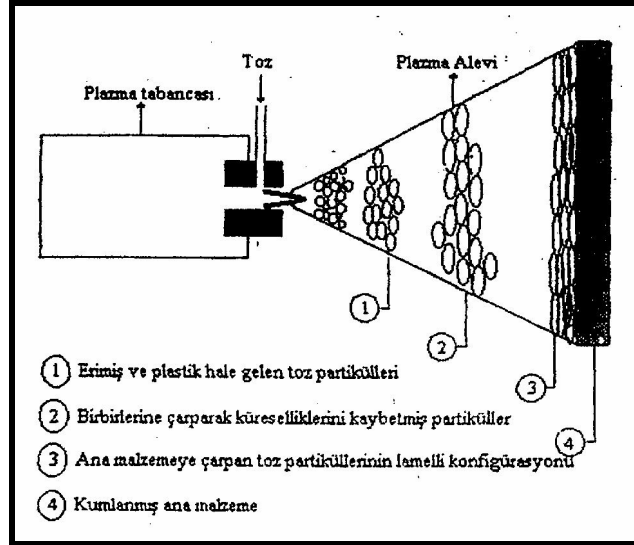
3.5.3. Erimiş malzeme ile ortam atmosferinin etkileşimi

Plazma alevine beslenen toz partikülleri, alevin ısı ve kinetik etkileri sayesinde erir ve ana malzeme yüzeyine püskürtülür. Plazma alevinden toz partikülüne ısı transfer mekanizması, çok kompleks bir olaydır ve bugüne kadar tam olarak anlaşılammıştır. Plazma alevinde eriyen toz partikülleri, yüksek kimyasal aktiviteye sahiptirler. Dolayısıyla partiküller ile ortam atmosferini oluşturan gazlar arasında gaz adsorpsiyonu, kimyasal etkiler, oksit tabakalarının oluşumu ve difüzyon prosesleri gibi birçok karşılıklı etkileşim mekanizması söz konusudur.

3.5.4. Partiküllerin ana malzemeye çarpması

Plazma alevindeki erimiş partiküller ana malzeme yüzeyine çarptığı zaman, kinetik enerjileri ısı ve deformasyon enerjisine dönüşür. Partiküller ana malzemeye temas ettiklerinde, ısılarını yüzeye aktarıp hızla soğur ve katılırlar. Partiküllerin o andaki davranışları sıcaklıklarına, hızlarına ve soğuma oranlarına bağlıdır.

Plazma alevindeki hareket esnasında yüzey gerilimi nedeniyle küresel şekle sahip oldukları düşünülen erimiş partiküller, ana malzeme yüzeyine çarptıklarında ısı ve kinetik enerjilerini kaybederek deforme olurlar ve sonra 5-15 mm kalınlığında lameller şeklinde katılırlar. Bu durum Şekil 3.8'de plazma alevinde toz partiküllerinin deformasyonu ve ana malzeme ile bağlanması şeklinde gösterilmiştir.



Şekil 3.8. Plazma alevinde toz partiküllerin deformasyonu ve ana malzeme ile bağlanması [14]

3.5.5. Püskürtme esnasında kaplama malzemesinin fiziksel ve kimyasal dönüşümü

Plazma alev sıcaklığının çok yüksek olması ile mevcut fiziksel ve kimyasal prosesler erimiş malzemede birçok dönüşüme neden olur. Kaynama noktaları ergime noktalarına yakın malzemeler, güçlükle püskürtülebilir. Örneğin; MgO parçalanır ve oluşan ürünler kolayca gaz haline geçer. Polimorfik malzemeler ise, allotropik dönüşüm gösterirler ve çok hızlı soğuma nedeniyle metastabil halde bulunurlar.

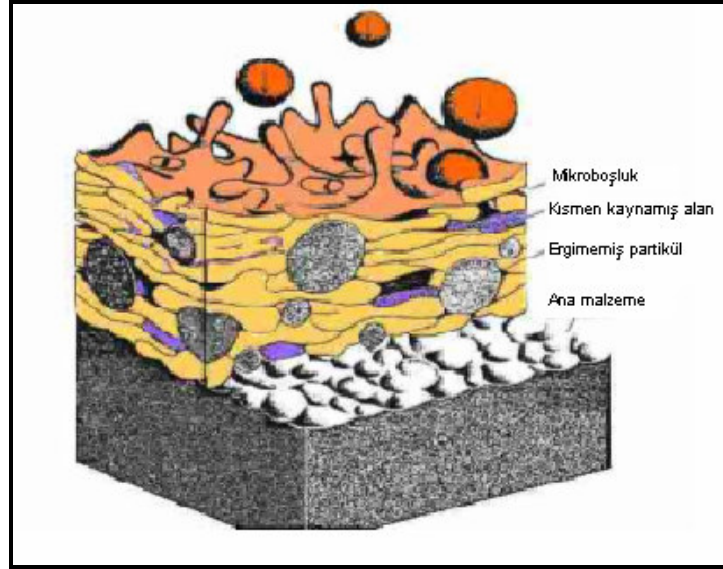
3.6. Plazma Kaplamaların Temel Özellikleri

3.6.1. Yapı

Plazma püskürtme prosesi, püskürtme yönüne bağlı bir proses olduğu için, sonuç kaplama lamelli yapıda ve anizotropiktir. Bundan dolayı, kaplamaların fiziksel özellikleri yöne bağlıdır. Lamelleşme çok büyük olasılıkla altlık malzeme yüzeyine paraleldir. Plazma püskürtme prosesi ile düşük poroziteye sahip kaplamaların eldesi mümkündür. Ancak, bu tür kaplamaların elastisite modülleri yüksek olur ve kırılmaya neden olur.

Seramik kaplamaların gevrekliği çok tabakalı katmanlar kullanılarak azaltılabilir. Kaplamanın bir miktar porozite içermesi de elastisite modülünü düşürerek kırılabilirliği azaltabilir. Steffens ve Fischer yaptıkları çalışmada, artan porozite miktarı ile elastisite modülünün azaldığını ve elastisite modülünün porozitenin bir fonksiyonu olduğunu ileri sürmüşlerdir. Poisson katsayısının ise poroziteye bağımlılığının olmadığını belirtmektedirler. Porozitenin diğer bir avantajı termal bariyer kaplamalar seçeneğinde karşımıza çıkar. Poroz kaplamaların termal iletkenliği daha yoğun olanlarından daha düşüktür. Ancak birbirine bağlanmış porozite sayısının kaplama içerisinde fazla olması, korozif etkenlerin altlık malzemeye ulaşip, bunlara zararlı etki etmesi açısından iyi değildir [4].

Plazma püskürtme prosesi ile üretilen seramik kaplamalarda ergitilerek altlık malzemeye püskürtülen her bir partikül altlık malzemeye hızla çarparak katılır. Gelen partikülün sıcak olmasından dolayı, katılması esnasında büzülerek çekme gerilmelerinin oluşmasına neden olur. Yüze püskürtülen partiküller altlık malzemeden daha sıcak olduğundan, ergimiş veya yan ergimiş partiküllerden altlık malzemeye ısı transferi oluşmaktadır. Gelen partiküllerin büzülmesi ile oluşan çekme gerilmeleri kaplama içinde çatlakları oluşturur ve altlık malzeme de basma gerilmeleri meydana gelir. Kaplama tabakası içinde çatlakları oluşturan diğer bir yol da altlık malzeme ve kaplama malzemesi arasındaki termal genleşme katsayısı uyumsuzluğundan kaynaklanabilir. Yüksek sıcaklıklarda, altlık malzeme genellikle seramik kaplamadan daha yüksek termal genleşme katsayısına sahip olduğundan, altlık malzemenin genleşmesi kaplama içerisinde çekme gerilmelerine ve bundan dolayı da çatlakların oluşmasına neden olabilir. Şekil 3.9'da bir kaplama tabakasında proses şartlarına bağlı olarak ergimemiş partiküller, inklüzyonlar, mikro boşluklar, oksitler ve porozite görülmektedir.



Şekil 3.9. Tipik bir plazma püskürtme kaplamaya ait mikroyapının şematik olarak gösterilişi [18]

3.6.2. Yoğunluk ve porozite

Porozite, püskürtme kaplamaların karakteristik bir özelliğidir ve yapısal göstergesidir. Viskozitesi yüksek tozlar ve yüksek güçlü plazma üniteleri kullanılarak daha yoğun bir kaplama tabakası elde edilebilir. Gevrek ve sert tozlardan elde edilmiş kaplamalar yüksek porozite oranlarına sahiptirler. Ancak uygun toz granülitesi ve püskürtme parametreleri seçildiğinde, sert tozlardan bile yoğun bir kaplama eldesi mümkün olmaktadır. Özellikle kaplamaların mekanik özellikleri üzerine olumsuz bir etkiye sahip olan yüksek porozite miktarı, termal izolasyon ve filtrasyon gibi uygulamalar için arzu edilen bir durumdur. Yüksek poroziteli kaplamalar, uzun püskürtme mesafesi ve iri taneli tozlar kullanılmak suretiyle kolaylıkla hazırlanabilir [11].

Plazma kaplamalarda iki tip porozite mevcuttur. Birincisi, çökeltilmiş partiküller arasındaki boşlukların tam olarak doldurulamaması nedeniyle yapıdaki kusurlarla birleşmiş iri (açık) porozitedir. Diğeri ise, kaplamaların doğal bir özelliği olan ince porlar (mikroboşluklar)'dır. Plazma püskürtme kaplamaların yoğunluğu, aynı tozlardan yapılmış kompakt malzemelerin yoğunluğundan düşüktür ve genellikle teorik yoğunluğun % 85-93'ü arasında değişir.

3.6.3. Yapışma mukavemeti

Püskürtülen katman altlık üzerine mekanik kumlama, valans ve van der waals kuvvetlerin kombinasyonları olarak yapışmaktadır. Genellikle püskürtülen kaplama tok olan metal altlıktan daha fazla kırılımandır. Seramik kaplamalar altlığın yüzeyi ile metalik olarak bağlanmaz. Bu nedenle seramik kaplamaların yapışması metalik kaplamalara göre daha zayıftır. Metaller üzerine püskürtülen metalik kaplamalar difüzyonla bağlanmaktadır. Benzer şekilde seramik yüzeyler üzerine yapılan seramik kaplamalarda da difüzyon olabilir. Bütün püskürtülen kaplamalar için altlığa yapışma, artan kaplama kalınlığı ile azalır.

Seramik kaplamalardaki mekanik yapışmada etkili olan ara bağlayıcıda kimyasal bağlanma önem kazanmaktadır. Temas sıcaklığı, yüzey kompozisyonu ve püskürtülen partiküllerin katılma zamanı kaplama tabakasının yapışma mukavemetine etki etmektedir. Püskürtülen metal ve seramik partiküllerin altlık ile olan kimyasal metalurjik etkileşimler ve farklı miktarlarda porozite ve oksit içerdiklerinden dolayı yapışma mukavemeti de değişmektedir.

Kaplamanın yapışma mukavemeti arttıkça korozyon direnci de artar. Mekanik yapışmada en önemli faktör yüzey hazırlama işlemleridir. Bu işlemler kaplamanın kalınlığına, cinsine ve yüzey pürüzlendirme yöntemlerine bağlı olarak kaliteyi arttırmaktadır. Standartlara uygun olarak yüzeyi pürüzlendirilmiş altlıklarla kaplama tabakası birbirine daha iyi bir şekilde yapışarak korozyona daha iyi direnç gösterir.

Kaplamanın yapışma mukavemetini arttırmak için geliştirilen en son yöntem kaplamanın tokluğunun geliştirilmesidir. Kaplamanın tokluğunun geliştirilmesi iki veya daha fazla birlikte çökeltilmesi ile gerçekleşir. Yapıda yer alan ikinci faz çatlak ilerlemesini önler. Seramik malzemelere seramik matrisi çok ince fiberler takviye edildiğinde tokluk artar. Örneğin alümina matrisin SiC lifleri ile kuvvetlendirilmesi sonucu seramik kompozitlerde tokluğun artmasına neden olur.

3.6.4. Kaplama kalınlığı

Seramik kaplamanın artan kalınlığı ile yapışma değerleri aşağıya düştüğü için yaklaşık 0,1 mm kaplama kalınlığında 30-49 MPa olur. 0,3 mm kalınlıklarında bu değer 5-10 MPa'a, 0,5mm'de ise 4 - 7 MPa'a düşer. Bu azalma farklı termal genleşme katsayıları ve farklı ergime noktalan nedeniyle iç gerilmelere sebep olur. Kaplamaların hızlı soğumasıyla oluşan bu tür iç gerilmeler kaplamada çatlak başlangıcına neden olur. Kaplamaların homojen olmayan dağılımı ve ısıtılması, plazma tabancasının faaliyetinde yerel değişimlerin meydana gelmesi ve iç gerilmelerin artmasıyla sonuçlanır.

3.6.5. Sertlik

Sertlik, plazma püskürtme kaplamaların önemli bir özelliğidir ve kullanılan kaplama tozuna bağlı olarak 200-1500 HV arasında değişir. Kaplama tabakalarının sertliği; porozite tabakanın heterojen yapısı ve uygulanan yük değeri ile farklılık arz eder.

3.6.6. Termal genleşme

Yüksek sıcaklıklarda çalışan roket nozulları ve gaz türbinlerinin yanma odalarında kullanılan seramik kaplamaların gösterdiği termal genleşme davranışları, bu tip uygulamalarda kaplamalardan beklenen performansın elde edilmesinde bilinmesi gereken en temel özelliktir [1-3].

BÖLÜM 4. SÜRTÜNME VE AŞINMA

4.1. Sürtünme

Sürtünme genel anlamda, temas halindeki ya da birbiri üzerinde hareket eden veya hareket ihtimali bulunan yüzeylerin hareketlerine karşı gösterilen direnç olarak tanımlanır. Diğer adıyla triboloji cisimlerin bağıl hareketinde yüzeylerin etkileşimini inceleyen bilim dalıdır.

Triboloji, birbiriyle temas eden iki yüzey arasındaki etkileşimleri inceleyen, fizik ve kimya bilimlerinden, mekanik ve malzeme bilimine kadar birçok farklı alan tarafından incelenen, ev aletlerinden uzay araçlarına kadar her alandaki teknik araç ve gerecin aşınması gibi ekonomik açıdan önem arz eden alanlarda büyük kayıplara neden olan problemleri tanımlayan ve işlevsel analizler uygulayan bir bilim dalıdır.

Birbiri üzerinde hareket eden yüzeyler, arasına yağlayıcı madde konulup konulmaması bakımından temas yüzeylerinin durumuna göre, kuru, yarı sıvı ve sıvı sürtünme olarak üç halde de incelenebilir. Bir yüzey üzerinde bulunan bir cisim itilmeye karşı, karşı yönde bir direnç kuvveti oluşturur. Bu direnç kuvveti, tutmalı (statik) direnç kuvveti olarak isimlendirilir. Bir cismi hareket ettirebilmek için tutmalı sürtünme kuvvetinden daha büyük bir itme kuvvetine gereksinim vardır. Cisim hareket halinde ise tutmalı sürtünme kuvvetinden daha küçük boyutlardaki sürtünme kuvveti oluşur. Bu kuvvete kaymalı (dinamik) sürtünme kuvveti denir ve bu kuvvet itme kuvvetine karşı yöndedir.

Temasta bulunan iki malzemedenden biri diğerinin üzerinde kayarken diğer malzemenin karşı yüzeyin hareketine gösterdiği direnç **Sürtünme Kuvveti** olarak

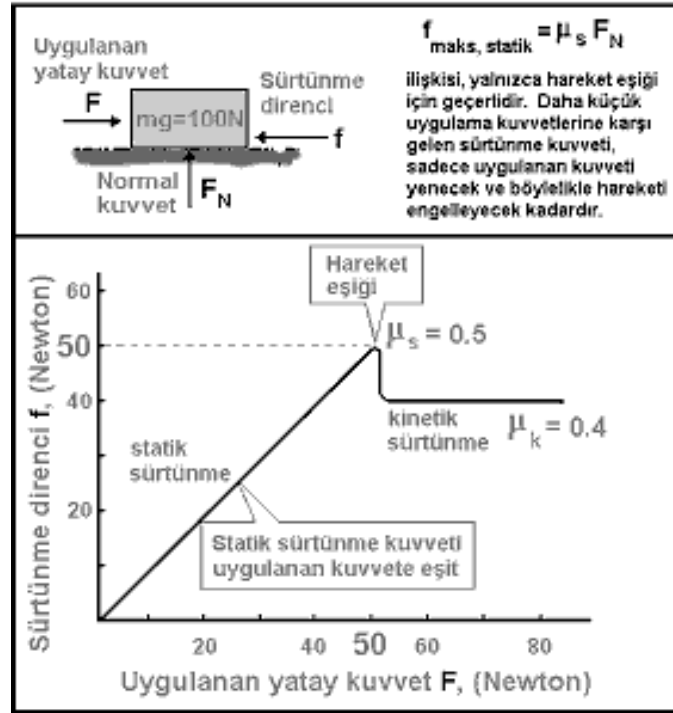
adlandırılır. Sürtünme kuvveti ve normal yük arasındaki orantılılık, ‘kinetik’ ve ‘statik’ sürtünme katsayıları ile tanımlanmaktadır. Kuvvet (F_s), temas yüzeyinin normali (P ya da F_N) ile ilişkili olup,

$$F_s = \mu_s \cdot P$$

olarak hesaplanır. μ_s statik sürtünme katsayısı olarak tanımlanır. Kayma başladıktan sonra, kaymayı engelleyici kuvvet yavaşça azalır. Bu durumda denklem;

$$F_k = \mu_k \cdot P$$

olacaktır. μ_k kinetik sürtünme katsayısı olarak adlandırılır. Kinetik sürtünme, ısı olarak karşımıza çıkmaktadır.



Şekil 4.1. Statik ve kinetik sürtünmenin şematik anlatımı [19]

Sürtünme çalışmalarının tümünde ki esas problem, sürtünme katsayısını belirlemektir. Aşınmaya göre (aşınma için), aşınan malzemenin hacim oranı (V) ya da değerinin belirlenmesi ve aşınmadan dolayı ağır hasarın meydana geldiği şartların saptanması gerekmektedir.

Sürtünme daima enerji dağılımı ile ilgilidir ve enerji kaybının oluşum süreci birkaç aşama halinde tanımlanır.

1. Durum. Mekanik enerji temas bölgesinde ortaya çıkar ve gerçek temas alanının oluşumuna sebep olur.
2. Durum. Mekanik enerji elastik deformasyon, plastik deformasyon, kızıklama ve adhezyon şeklinde gerçek temas bölgesinin içerisine doğru ilerler.
3. Durum. Mekanik enerjinin; termal dağılım (ısı), hata, çatlak, enerji birikimi ve plastik olarak dönüşüm, akustik ve termal emilim gibi farklı şekillerde dağılımı.

Sürtünmenin etkileri belirlendiğinden veya fonksiyonları kontrol edildiğinden beri tasarım ve üretim sürecinde, malzemenin sürtünme özellikleri dikkate alınarak, cihazın ömrü ve verimliliği belirlenmektedir

İzafi hareket yapan yüzeyler arasında bir yağlayıcı madde konulması veya konulmaması bakımından sürtünme olayı kuru, sınır ve sıvı olmak üzere üç halde incelenir. Genel anlamda kuru sürtünme, birbirine göre izafi harekette bulunan ve doğrudan doğruya temasta olan iki yüzey arasında oluşan sürtünmedir. Yüzeyler arasında bir yağlayıcı madde konulması halinde iki durum ortaya çıkabilir. Her iki yüzey yağlayıcı madde tarafından tamamen ayrılmış olabilir ve esas sürtünme yağlayıcı maddenin tabakaları arasında oluşur; bu hale sıvı sürtünmesi denir. İkinci durumda, yani yüzeyler tamamıyla ayrılmadığı takdirde, sınır sürtünmesi hali vardır.

4.1.1. Kuru sürtünme

Pratikte sürtünme denilince akla gelen sürtünme kuru sürtünmedir. Aşınma, enerji kaybı ve sıcaklık yükselişi gibi olaylar kuru sürtünme sonucunda oluşur. Teknikte sürtünme hem istenilen, hem de istenilmeyen olaylar olarak ortaya çıkar. Fren, kavrama ve sürtünmeli çarklar gibi makine elemanlarında sürtünme istenilen bir olaydır. Bu gibi yerlerde sürtünme artırılır. Bunların dışında bütün izafi hareket yapan yüzeylerde istenilmeyen bir olaydır. Yük tatbik edilmeden önce temas halindeki tabakalar arasında bir bağlantı oluşur. Yük uygulandıktan sonra tabakanın bir kısmı kopar ve buradaki küçük temas alanlarında metal kaynama meydana gelir. İzafi hareket yapan yüzeylerde sürtünme metal kaynak bağlar ile tabakalar arasındaki bağlantıların oluşturduğu dirençtir. Sürtünme kuvveti, hem kaynak bağlarını, hem de bağlantıları koparan kuvvettir [20].

4.1.2. Sınır sürtünmesi

Yüzeyler arasında bulunan herhangi bir yağlayıcı maddeye rağmen sıvı sürtünmesi hali oluşturulmadığı takdirde, sınır sürtünmesi hali ortaya çıkar. Pratikte en çok rastlanan bu sürtünme halinde, sürtünme katsayısı 0,03 - 0,1 arasında değişir. Yüzeyler arasına bir yağlayıcı konulması halinde yağlayıcı maddenin molekülleri, adsorpsiyon olayının sonucu olarak madensel yüzeylere düzgün ve muntazam bir şekilde yapışırlar [20].

4.1.3. Yuvarlanma sürtünmesi

Yuvarlanma sürtünmesi, yuvarlanma hareketine karşı temas yüzeylerinde oluşan dirençtir. Teorik bakımdan tam rijit ve yüzeyi pürüzsüz olan tam silindirik veya küre şeklinde bir elemanın, rijit pürüzsüz bir düzlem üzerinde serbest yuvarlanmasında hiçbir sürtünme meydana gelmez. Aslında bu tür elemanların temas yüzeylerinde elastik ve daha az olarak da plastik deformasyonlar oluşur. Temas yüzeyleri doğru veya nokta değil de alan şeklindedir. Ayrıca hareket yönüne doğru temas alanında bir dalga meydana gelmektedir. Genellikle yuvarlanma, elastik deformasyon ve kaymadan oluşan bir sürtünme olayı

şeklindedir. Sonuç olarak yuvarlanma sürtünmesinde, sürtünme kuvveti normal kuvvetin çok küçük bir payıdır [20].

4.2. Aşınma

Karşılıklı yüzeylerin birbirleri ile etkileşimleri sonucu mekanik harekete bağlı olarak malzemede istenmeyen kopma, şeklinde tanımlanan aşınma, sürtünme etkisinin de kaçınılmaz bir sonucudur. Aşınma sonucu birbiriyle çalışan yüzeyler arasında meydana gelen boşluklar çalışma sırasında istenilmeyen durumlara yol açarak o oranda da istenilen fonksiyonların yerine getirilmesini zorlaştırır.

Aşınma mekanizması, sürtünme boyunca meydana gelen karmaşık değişimler olarak tanımlanabilir. Genel olarak aşınma tek bir mekanizma olarak karşımıza çıkmaz. Aşınma, mikro çatlaklar sebebiyle fiziksel dağılım yada kimyasal çözünme veya temas arayüzeyinde ergimenin bir sonucu olarak ortaya çıkabilmektedir. Genel olarak aşınma, hacim kaybı miktarı ve aşınma yüzeyinin durumu ile değerlendirilir. Aşınma değeri, aşınma hızı, spesifik aşınma hızı ya da aşınma katsayısı olarak tanımlanır. Aşınma, malzemenin özelliği değil, bir sistem cevabıdır. Aşınma tribosistemdeki dinamik parametreler, çevresel parametreler ve malzeme parametrelerindeki ufak bir değişim ile oldukça şiddetli değişebilir.

4.2.1. Aşınma türleri

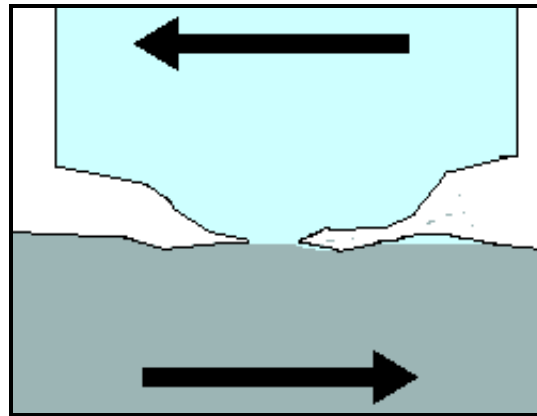
Sürtünerek çalışan malzeme çifti arasındaki karşılıklı zorlama neticesinde meydana gelen aşınmanın değişik türleri vardır. En yaygın bilinen aşınma durumu kaymalı aşınmadır. Kaymalı aşınmada bir yüzey diğerinin üzerinde kayarken, tekrarlı kayma sonucu malzeme yüzeyinin doğasından kaynaklanan pürüzlülükler dışında pürüzlü bir yüzey ya da malzeme yüzeyinde tepeler-çukurlar gibi oluşumlar görülür. Bu pürüzlülükler kaymanın devamı halinde yerlerinden ayrılarak ya sistemden uzaklaşır yada kayma ara yüzeyine yerleşerek aşınma partikülleri olarak davranırlar.

Aşınma mekanizmaları genel olarak dört başlıkta incelenmektedir.

1. Adhesiv aşınma
2. Abrasiv aşınma
3. Yorulma aşınması
4. Korozyon aşınması

4.2.1.1. Adhesiv aşınma

Plastik temas halindeki iki yüzey arasında temas arayüzeyi relatif kaymaya direnç gösterecek kadar adhesiv bağ mukavemetine sahiptir. Dislokasyonlardan meydana gelen plastik deformasyon, basma ve kayma gerilmeleri altında temas bölgesinde çıkar. Şekil 4.2’de adhezyon aşınmanın şematik gösterimi verilmiştir. Temas alanındaki böyle deformasyonların sonucu olarak birleştirilmiş gerilme ve kayma hasar modlarında çatlak başlangıcı ve ilerlemesi teşvik edilir. Çatlak temas arayüzeyine ulaştığı zaman aşınma partikülleri meydana gelir ve adhesiv transfer tamamlanır. Temas arayüzeyindeki adhesiv bağlanmanın oluşturduğu bu tür aşınma, adhesiv aşınma olarak adlandırılır. Adhezyon temastaki iki malzemenin sertliğinin artması ile düşmektedir [20,21].



Şekil 4.2. Adhezyon aşınmanın şematik gösterimi [17]

4.2.1.2. Abrasiv aşınma

Abrasiv aşınma, katı yüzey boyunca, katı yüzeye karşı hareket eden sert partikül ya da sert yükseltelerin oluşturduğu aşınma türüdür. Aşınma genellikle temas eden yüzeyler arasındaki sert partiküllerin ya da diğerine göre sert yüzeylerin relatif hareketlerinden dolayı meydana gelen malzeme kaybını içeren katı yüzeyin hasarı olarak tanımlanır. Üç tip abrasiv aşınma mekanizması mevcuttur. Bunlar;

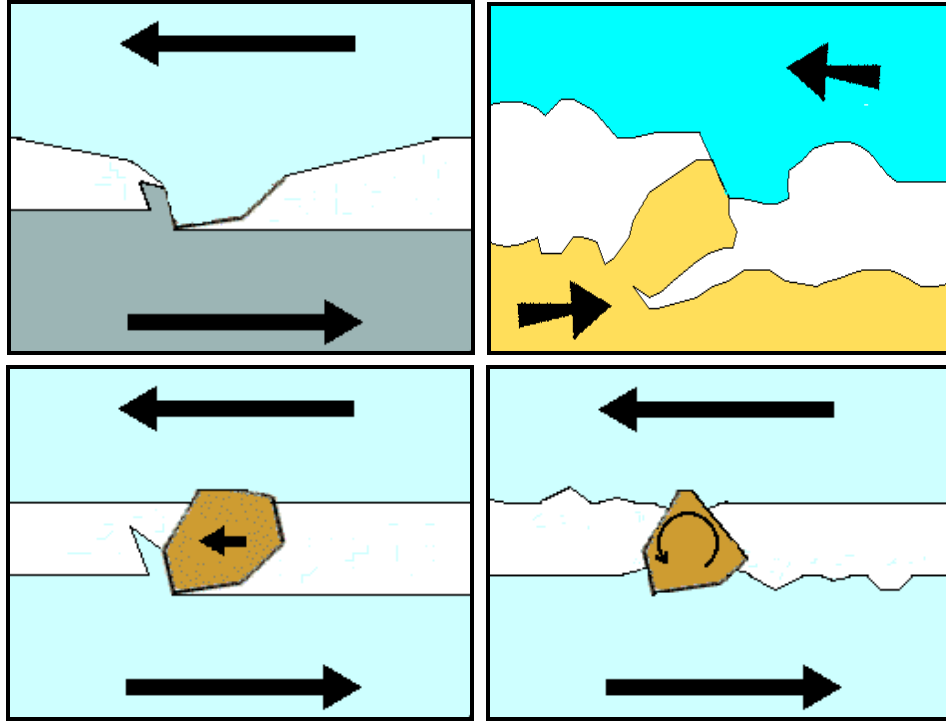
1. Kesme,
2. Pulluklama,
3. Kızaklamadır.

Yumuşak malzemeler için en ağır aşınma mekanizması kesmedir. Bu proses boyunca abrasiv uç, malzemelerin işlenmesinde olduğu gibi yüzeyden malzemeyi plaka ya da talaş şeklinde kaldırır. Sert abrasiv partiküller için mekanizmanın kızaklamadan kesmeye dönüşmesi için kritik bir açı (örn: bakır için 45°, alüminyum için 85°) ve penetrasyon derinliği mevcuttur.

Pulluklama, abrasiv ucun önünde meydana gelir. Pulluklama mekanizmasında, yiv önünde toplanan malzeme miktarı, kenarlara toplanan malzeme miktarından fazladır. Yine de pulluklama oluşumu abrasiv aşınmanın hafif hasar bırakan mekanizmalarından sayılmaktadır.

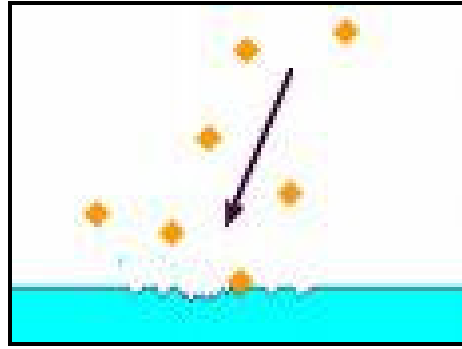
Kızaklama türü aşınma, temastaki iki yüzeyin sertliklerinin birbirinden farklı olduğu durumlarda meydana gelir. Diğerine göre daha sert olan malzeme yüzeyindeki tepecikler daha yumuşak olan yüzeyin içine girer ve eğer ki bir hareket söz konusu ise yüzeyde yiv oluşumuna sebep olurlar. Kızaklama oluşumunun iki ana sebebi yüzeylerdeki tepecikler yada temas bölgesinde bulunan sert partiküllerdir. Kızaklama mekanizmasında malzeme, yüzeyde meydana gelen yivlerin kenarlarına toplanır. Bu düşük yüklerde meydana gelir ve herhangi bir malzeme kaybına yol açmaz. Hasar, malzemenin yüzeyinde soğuk deformasyon sebebiyle gelişen ve büyüyen dislokasyonlar sonucu meydana gelir.

Aşınan ya da aşındıran yüzeylerde aşınma hızı, malzemenin doğasına değil, her iki yüzey karakteristiğine, yüzeyler arasındaki abrasiv mevcudiyetine, temas hızına ve diğer çevresel şartlara bağlıdır. Abrazyon tipik olarak temas ortamına göre olduğu gibi temas tipine göre de karakterize edilir. Temas tipleri iki-yüzeyle ve üç-yüzeyle aşınmayı kapsamaktadır. Şekil 4.3’de iki ve üç yüzeyle abrasiv aşınma tipleri verilmiştir. İki-yüzeyle temas, abrasiv malzemenin tek yüzey üzerindeki hareketinde, üç-yüzeyle temas ise abrasivin iki yüzey arasındaki hareketinde meydana gelmektedir.



Şekil 4.3. İki-yüzeyle ve üç-yüzeyle abrasiv aşınma tipleri [6]

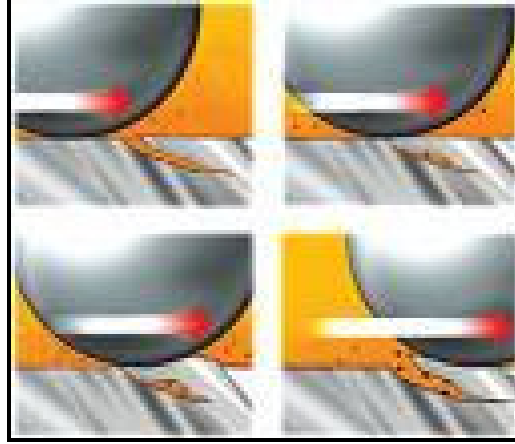
Erozyon aşınması, aşınma partiküllerinin yada gaz, sıvı gibi akışkan bir ortamda bulunan aşındırıcı parçacıkların yüzeye serbestçe çarpması sonucu malzeme yüzeyinden parçaların kopmasıyla ortaya çıkmaktadır. Sıcaklık ve akış hızı arttıkça aşınma hızlanır. Katı parçacıkların bağıl hareketleri katı yüzeye paralel olduğunda aşınma abrasif erozyon olarak adlandırılır. Katı parçacıkların bağıl hareketi katı yüzeye dik olduğundan ise aşınma çarpma erozyonu olarak adlandırılır [20,21]. Şekil 4.4'de erozyon aşınmanın şematik gösterimine yer verilmiştir.



Şekil 4.4. Erozyon aşınmanın şematik gösterimi [6]

4.2.1.3. Yorulma aşınması

Adhesiv ve abrasiv aşınma mekanizmalarında aşınma partikülü oluşması için tekrarlı temasın olmasına gerek yoktur. Tekrarlı temasın olduğu yerlerde aşınma ürünlerinin oluşması için farklı bir aşınma mekanizması mevcuttur. Böyle tekrarlı temas halinde meydana gelen aşınma, yorulma aşınması olarak adlandırılır. Tribolojik zorlamalar genel olarak yüzeyde görülen, büyüklüğü zamana ve konuma göre değişen mekanik gerilmeler sonucu meydana geldiklerinden yorulma aşınması birçok aşınma prosesinde görülür. Neticede malzeme yüzeyinde çatlaklar oluşur ve bu da yüzeyden parçacıkların ayrılması, çukur ve oyukların meydana gelmesine sebep olur. Şekil 4.5'de yorulma aşınmasının şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 4.5. Yorulma aşınmasının şematik gösterimi [17]

Yuvarlanma teması söz konusu olduğunda hasarda yorulma mekanizması daha fazla önem taşır. Bilyeli bir yatakta yorulma periyodu basitçe yatağın dönme sayısı ile ilgilidir. Bir küre veya silindirde temas noktasındaki maksimum gerilme, yüzeyin biraz altında bir yerde meydana geldiğinden yorulma hasarı gerilmenin en yüksek olduğu yerde başlar. Yüzeyin altında yorulma çatlakları oluşur ve bunlar yuvarlanma temasıyla ilgili karakteristik karıncalanma hasarı oluşturarak yüzeyden nispeten büyük metal parçacıkları ayrılmasına neden olur [20-21].

4.2.1.4. Korozif aşınma

Korozif aşınmada yüzeyden malzeme uzaklaşması, aşınma yüzeyinde kimyasal reaksiyon filminin oluşumu ile gerçekleşir. Reaksiyon ürünlerinin yüzeye kuvvetli bir şekilde yapışması ve bulk malzeme gibi davranması durumunda, aşınma mekanizmasının da neredeyse bulk malzeme ile aynı olacağı öngörülmektedir. Yine de birçok durumda böyle reaksiyon ürünleri bulk malzemeden farklı davranmaktadır ki bu durumda katı yüzeyin korozif ortam ile etkileşimleri ile reaksiyon ürünlerinin oluşumu korozif aşınmayı meydana getirir.

Korozif aşınmada oluşan reaksiyon ürünleri sürtünme ile yüzeyden kalkar. Bu durumda reaksiyon tabakalarının aşınma hızı, yüzeyde oluşan ve yüzeyden kalkan reaksiyon ürünlerinin hızı ile ilgilidir [6,7,20-21].

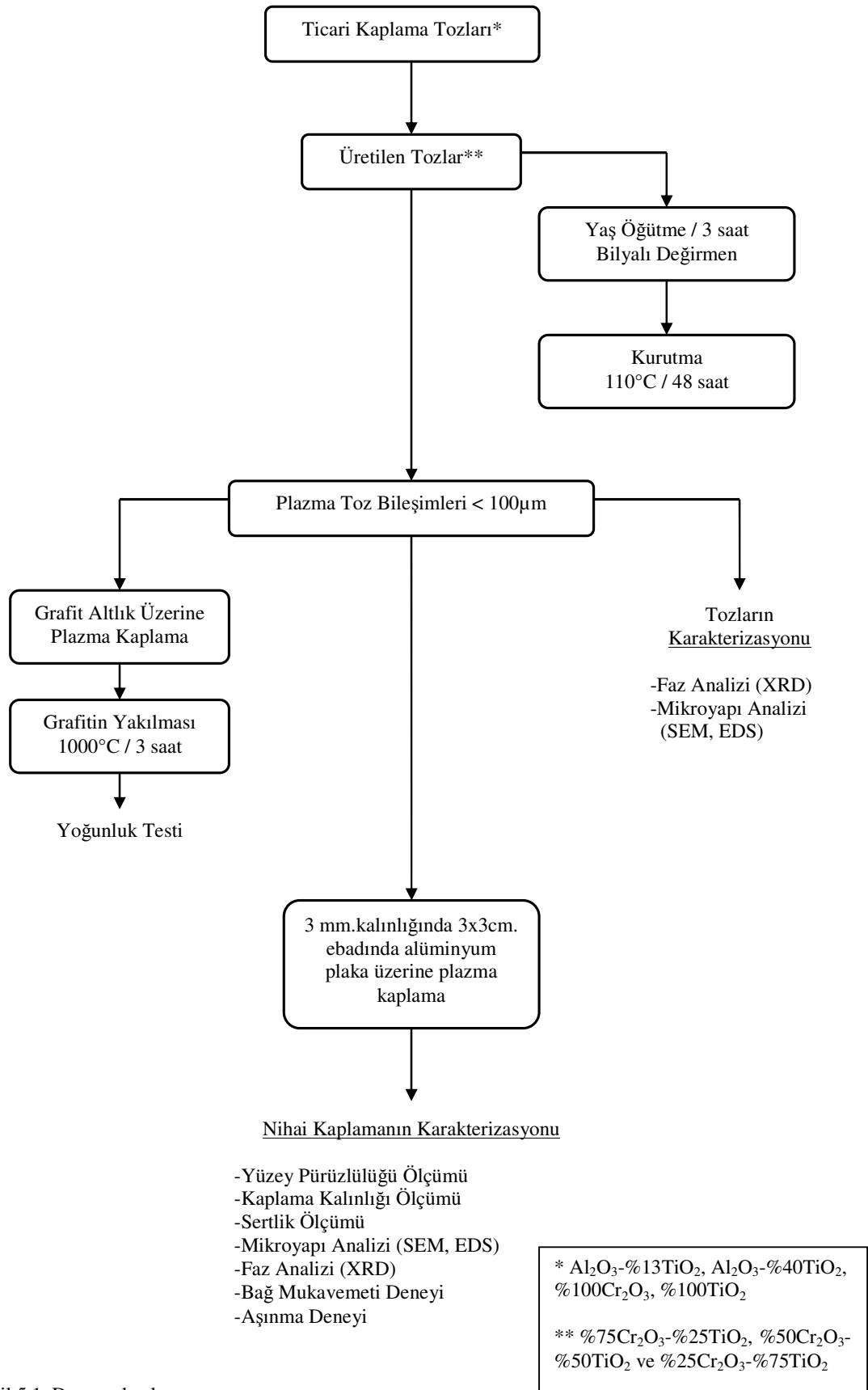
BÖLÜM 5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

5.1. Deneysel Çalışmalar

Mevcut çalışma ile tekstil endüstrisinde dokuma tezgâhlarında kullanılan ve aşınmaya maruz kalan “mekik” adı verilen alüminyum esaslı parçaların kullanım ömrünün arttırılması hedeflenmiştir. Bu amaçla altlık olarak seçilen AA 1050 [TSE normu Al 99,5 (Etial-5)] alüminyum malzeme üzerine plazma püskürtme kaplama tekniği ile Al_2O_3 -%13TiO₂, Al_2O_3 -%40TiO₂, %100Cr₂O₃, %100TiO₂, %75Cr₂O₃-%25TiO₂, %50Cr₂O₃-%50TiO₂ ve %25Cr₂O₃-%75TiO₂ olmak üzere yedi farklı seramik kaplama toz bileşimleri kullanılarak kaplama işlemi gerçekleştirilmiştir.

Kullanılan kaplama tozlarının mikroyapısı ve faz analizleri SEM-EDS ve XRD analizleri ile tespit edilmiştir. Optik mikroskop, X-Işınları, SEM ve EDS ile analiz edilmiş kaplamalar üzerinde sertlik, yüzey pürüzlülüğü ve bağ mukavemeti deneyleri yapılmıştır. Karakterize edilen bu numunelere daha sonra yoğunluk ve aşınma deneyi uygulanmıştır. Şekil 5.1’de yer alan çalışma programı doğrultusunda kaplama tozları ve kaplamalar üretilmiştir. Plazma kaplama tozuna ve elde edilen kaplamalara uygulanan karakterizasyon çalışmaları da akış şemalarında belirtilmiştir.

Çalışmada METCO firmasına ait Al_2O_3 -%13TiO₂, Al_2O_3 -%40TiO₂, %100Cr₂O₃, %100TiO₂ kaplama tozlarının yanı sıra mevcut tozlar belirli oranlarda karıştırılarak %75Cr₂O₃-%25TiO₂, %50Cr₂O₃-%50TiO₂ ve %25Cr₂O₃-%75TiO₂ olmak üzere üç farklı kaplama tozu üretimi de gerçekleştirilmiştir. Tekstil endüstrisinde kullanılan parçaların kaplamasında yaygın olarak kullanılan Al_2O_3 -%13TiO₂ tozlarının yanı sıra diğer toz bileşimlerinin etkisi detaylı olarak incelenen çalışmada, araştırılan özellikler karşılaştırılmalı olarak belirtilmiştir.



Şekil 5.1. Deneysel çalışma programı

5.2. Kullanılan Deney Malzemeleri

5.2.1. Altlık malzemesi

Yapılan çalışmada, altlık malzemesi olarak alüminyum esaslı AA 1050 [TSE normu Al 99,5 (Etial-5)] alaşımı kullanılmıştır. Uygulanacak deneyler için 3mm. kalınlığında 3x3cm. boyutunda parçalar hazırlanmıştır. Altlık malzemesinin kimyasal bileşimi Tablo 5.1’de verilmiştir. Tablo 5.2’de altlık malzemesinin mekanik özellikleri, Tablo 5.3’de ise fiziksel özellikleri yer almaktadır.

Tablo 5.1. Altlık malzemesinin kimyasal bileşimi

Element	Al	Si	Mn	Fe	Mg	Ti	Cu	Zn	Diğer
Bileşim(%)	99,50	0,25	0,05	0,40	0,05	0,03	0,05	0,05	0,003

Tablo 5.2. Altlık malzemesinin mekanik özellikleri

MEKANİK ÖZELLİKLER					
Altlık Malzemesi	Akma Dayanımı (Kg/mm ²)	Çekme Dayanımı (Kg/mm ²)	%Uzama (50mm) (mm)	Sertlik (HB) (Kg/mm ²)	Kesme Dayanımı (Kg/mm ²)
ETİAL-5	2,5	7	30	20	-

Tablo 5.3. Altlık malzemesinin fiziksel özellikleri

FİZİKSEL ÖZELLİKLER				
Altlık Malzemesi	Özgül Ağırlık (gr/cm ³)	Elastisite Modülü (Kg/mm ²)	Isısal İletkenlik (Cal/cmS°C)	Genleşme Katsayısı (20-100°C) 1/°C
ETİAL-5	2,71	7000	0,52	24x10 ⁶

5.2.2. Kaplama tozları

Deneylerde kaplama tozu olarak, Metco firması tarafından üretilen Al_2O_3 -%13 TiO_2 (Metco 130SF), Al_2O_3 -%40 TiO_2 (Metco 131VF), %100 Cr_2O_3 (Metco 106), %100 TiO_2 (Metco 102) kullanılmıştır. Tablo 5.4’de kullanılan bu tozlar ile ilgili bazı fiziksel özelliklere yer verilmiştir. Tablo 5.5’de ise kullanılan tozların kimyasal kompozisyonu, tane boyut dağılımı ve morfolojisi yer almaktadır.

Tablo 5.4. Kullanılan tozların bazı fiziksel özellikleri

Özellikler	%100 TiO_2	%100 Cr_2O_3	Al_2O_3 -%40 TiO_2	Al_2O_3 -%13 TiO_2
Yoğunluk (gr/cm^3)	4,23	5,21	4,07	4,00
Ergime sıcaklığı ($^\circ\text{C}$)	1.870	2.435	1.980	2.030
Termal iletkenlik($\text{W}/\text{m}^\circ\text{C}$)	6,50	-	13,40	16,50

Tablo 5.5. Kullanılan tozların kimyasal kompozisyonu, tane boyut dağılımı ve morfolojisi

Kullanılan Tozlar	Kimyasal Kompozisyon	Tane Boyut Dağılımı (μm)	Toz Morfolojisi
1	%100 TiO_2	-53+11 μm	Köşeli
2	%100 Cr_2O_3	-53+11 μm	Küresel
3	Al_2O_3 -%40 TiO_2	-45+5 μm	Köşeli
4	Al_2O_3 -%13 TiO_2	-30+5 μm	Köşeli

Hazırlanan toz bileşimleri ise Tablo 5.6’da verilmiştir. Tabloda verilen oranlarda tartılan tozlar bilyeli değirmende alümina bilye kullanılarak 3 saat süre ile yaş olarak karıştırılmıştır. Ardından Nüve FN 400 tip etüvde 48 saat süre ile kurutulmuştur. Kuruyan tozda meydana gelen topaklaşma sebebi ile 100 μm ’luk elekten geçirilen tozlar plazma püskürtme işleminde kullanılmıştır.

Tablo 5.6. Üretilen kaplama toz karışımlarının ağırlık oranları

Bileşim	Cr ₂ O ₃ (ağ.%)	TiO ₂ (ağ.%)
5	75	25
6	50	50
7	25	75

5.3. Kaplamaların Üretimi

5.3.1. Altlık yüzeyinin hazırlanması

Kaplanacak malzeme olarak kullanılan alüminyum esaslı AA 1050 malzeme kumlamadan önce ve sonra yağ, kir ve pislik gibi istenmeyen maddelerden arındırılmıştır.

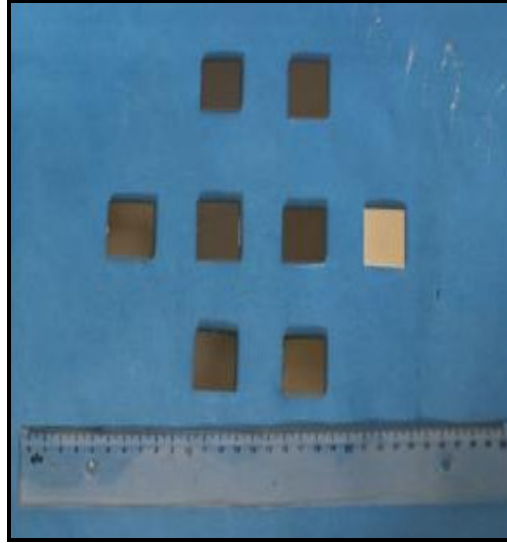
Seramik kaplama yapılacak yüzeylerin temizlenmesi işleminden sonra seramik kaplamanın metalik malzemeye uygun şekilde bağlanması için metalik malzemelerin pürüzlendirilmesi gerekir. Literatüre uygun şekilde pürüzlendirme yüzeye kum püskürtülerek yapılmıştır. Kullanılan kum kaplanacak malzemeye göre seçilmiş olup alüminadır.

5.3.2. Plazma püskürtme kaplama tekniği ile gerçekleştirilen kaplama işlemi

DeneySEL çalışmalarda, kaplama tekniklerinden en yaygın ve kolay kullanıma sahip olan ve Türkiye’de de uygulama imkanı olan, Plazma püskürtme kaplama tekniği kullanılmıştır. Kaplama işlemi Sakarya Üniversitesi plazma kaplama laboratuvarında manuel olarak çalışan ve 40 Kw’lık güç ünitesine sahip olan atmosferik plazma kaplama sistemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sistemde primer gaz olarak argon, sekonder gaz olarak hidrojen kullanılmıştır. Tablo 5.7’de Plazma püskürtme sisteminde kullanılan parametreler yer almaktadır. Şekil 5.2’de yapılan kaplamaların makro görüntüleri yer almaktadır. Şekilde açık renkli numune altlık malzemesinin kumlanmış hali olup; diğer numuneler yedi farklı kaplama tozu ile gerçekleştirilen kaplamaları göstermektedir.

Tablo 5.7. Plazma Püskürtme Parametreleri

Kaplama Malzemesi	1-7 kodlu bileşimler
Kaplanacak Ana Malzeme	AA 1050 [TSE normu Al 99,5 (Etial-5)]
Plazma Tipi	Ar + H ₂
Argon Akış Hızı (lt./saat)	2830
Hidrojen Akış Hızı (lt./saat)	425
Nitrojen Akış Hızı (lt./saat)	-
Plazma Akımı (A)	500
Ark Voltajı (V)	60-70
Plazma Tabancası Tipi	METCO 3MB
Nozul ve Elektrod	W katod-Cu anod
Nozul Çapı (mm.)	8
Enjektör Mesafesi (mm.)	100
Enjektör Açısı	90°
Taşıyıcı Gaz Akışı (lt./saat)	1048



Şekil 5.2. Plazma püskürtme kaplama tekniği ile üretilen kaplamalar

5.4. Kaplamaların Karakterizasyonu

Manuel olarak uygulanan ve atmosferik plazma püskürtme tekniği ile üretilen kaplamaların karakterizasyon çalışmaları sırasında yapılan deneyler;

- Metalografik çalışma (Optik Mikroskop)
- Yüzey pürüzlülüğü ölçümü,
- Kaplama kalınlığı ölçümü,
- Sertlik ölçümü,
- Mikroyapı analizi (SEM, EDS),
- Faz analizi (XRD),
- Yoğunluk ölçümü,
- Bağ mukavemeti deneyi,
- Aşınma deneyi.

5.4.1. Metalografik çalışma

Kaplanmış numuneler Buehler Metaserv marka cihaz yardımı ile bakalite alınmış, ardından bakalite alınan numuneler Metaserv 2000 marka zımpara cihazında sırasıyla 120, 320, 400, 600 ve 800 gritlik SiC zımpara kağıtları kullanılarak zımparalama işlemi gerçekleştirilmiştir. Zımparalanan numuneler Struers DAP-3 marka parlatma cihazı kullanılarak parlatılmış ve optik mikroskopta görüntü almaya uygun hale getirilmiştir. Bu şekilde hazırlanan numunelerin metalografik incelemesi, Olympus BHM-313U marka optik mikroskop yardımıyla gerçekleştirilmiş ve metalografik inceleme ile kaplamanın yapısı, kaplama kalınlığı, kaplamanın porozitesi hakkında bilgi sahibi olunmuştur.

Üretilen plazma kaplama tozlarının ve kaplamaların parlatılmış yüzey görüntüleri JEOL JSM-6060LV marka taramalı elektron mikroskobu kullanılarak alınmıştır. Kaplamaların EDS görüntüleri de yine taramalı elektron mikroskobu kullanılarak alınmıştır. Şekil 5.3'de mikroyapı analiz cihazı görülmektedir.



Şekil 5.3. Mikroyapı analiz cihazı

5.4.2. Yüzey pürüzlülük ölçümü

Plazma püskürtme kaplama tekniği ile seramik kaplama yapıldıktan sonra yüzey pürüzlülük değerleri Mahr – Perthometer cihazı ile ölçülmüştür. Şekil 5.4’de yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı görülmektedir.



Şekil 5.4. Yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı [22]

5.4.3. Kaplama kalınlık ölçümü

Kaplama kalınlık değerleri Positector 6000 cihazı ile ölçülmüştür. Şekil 5.5’de kullanılan kaplama kalınlık ölçüm cihazı yer almaktadır.



Şekil 5.5. Kaplama kalınlık ölçüm cihazı [23]

5.4.4. Sertlik ölçümü

Mikrosertlik deneyi için seramik kaplanmış numuneler bakalite alındıktan sonra metalografik olarak hazırlanmış ve parlatılmıştır. Leica Vmhtmot mikrosertlik ölçüm cihazıyla 200 gr’lık yükler 15 sn. süre tatbik edilerek ölçümler gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.6’da deneyde kullanılan mikrosertlik ölçüm cihazı görülmektedir. Her bir kaplama için 6 ölçüm yapılarak ortalama sertlik değerleri tespit edilmiştir.



Şekil 5.6. Mikrosertlik ölçüm cihazı

5.4.5. Faz Analizi (X-Işınları Difraktometresi)

Deneyler esnasında kullanılan yedi farklı seramik kaplama tozu ve bu tozlar ile yapılan kaplamaların faz analizleri RIGAKU D/MAX/2200/PC marka X-Işınları difraktometresi ve Cu $K\alpha$ radyasyonu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.7’de X-Işınları difraktometre cihazı yer almaktadır.



Şekil 5.7. X-Işınları difraktometre cihazı

5.4.6. Yoğunluk ölçümü

Plazma püskürtme kaplama tekniği ile grafit altlık üzerine gerçekleştirilen ve kaplama sonrası grafit altlıktan ayrılan kaplama tabakalarının yoğunlukları MPIF (Metal Powder Industry Federation) 42 no’lu standarttan yararlanılarak ölçülmüştür [24]. Şekil 5.8’de gösterilen Precisa XB 220A marka yoğunluk ölçüm cihazı kullanılarak yoğunluk hesaplanmıştır. Seramik tozlar Grafit çubuk üzerine plazma püskürtme kaplama tekniği kullanılarak kaplanmıştır. Bu şekilde hazırlanan çubuklar etüvde 1000 °C de 3 saat süreyle bekletilmiş ve grafitin yanması sağlanmıştır. Kalan kaplamalardaki grafitin temizlenmesi amacıyla her bir numune alkol ile temizlenmiş ve sıcak hava üfleyici ile kurutulmuştur.



Şekil 5.8. Yoğunluk ölçüm cihazı

Archimed prensibine göre numunelerin öncelikle havadaki ağırlıkları daha sonrada saf sudaki ağırlıkları tartılmış Eşitlik (5.1) yardımıyla yoğunluk hesabı yapılmıştır.

$$\rho_{\text{Bulk}} = (m_k \cdot \rho_{\text{su}}) / [m_k - (m_s - m_{\text{askı}})] = m_k / (m_k - m_s) \quad (5.1)$$

Eşitlik (5.1)'de, m_k numunenin kuru ağırlığı, m_s numunenin sudaki ağırlığı, $m_{\text{askı}}$ askının ağırlığı ve ρ_{su} suyun yoğunluğudur. Suyun yoğunluğu 1 gr/cm^3 ve askının darası alınarak sıfırlanmıştır.

Malzemenin relatif yoğunluk değeri ise Eşitlik (5.2) yardımı ile hesaplanmıştır.

$$\%R.Y = (\rho_B / \rho_T) \cdot 100 \quad (5.2)$$

Eşitlik (5.2)'de $\%R.Y$ relatif yoğunluğu, ρ_B bulk yoğunluğu, ρ_T ise teorik yoğunluğu ifade etmektedir.

5.4.7. Bağ mukavemeti deneyi

Seramik kaplamaların bağ mukavemetlerinin ölçümünde bir tür çekme testi olan ASTM G133-95 test yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntem sayesinde plazma püskürtme yöntemi ile kaplanmış seramik kaplamaların adhesif veya kohesif bağ mukavemetlerini ölçmek mümkündür [25]. ASTM G133-95 standardına uygun

olarak hazırlanan düzeneğe ve numuneler Dartec marka deney cihazı kullanılarak test edilmiştir. Deney sırasında Versachem Titanium Epoxy System marka yapıştırıcı kullanılmıştır. Bu yapıştırıcı numunelerin her iki yüzeyine ve deney çubuklarına ince bir şekilde sürülerek numunelerin deney çubuklarına yapıştırılması sağlanmıştır. Bu şekilde numuneler üç gün süreyle oda sıcaklığında bekletilerek yapışma gerçekleştirilmiştir.

5.4.8. Aşınma deneyi

Aşınma deneyi için Sakarya Üniversitesi laboratuvarında yer alan CSM Instruments Tribometer cihazı kullanılmış ve lineer aşınma gerçekleştirilmiştir. Aşındırıcı olarak 6mm. çapında alümina bilye seçilmiştir. Deney numuneleri 3mm. kalınlığında, 3x3cm. ebadında hazırlanmıştır. Hasar iz kalınlıkları her bir numune için 0,8x2,0X büyütmede çekilen stereo mikroskop görüntülerinden tespit edilmiştir. Şekil 5.9'da CSM Instruments Tribometer aşınma deney cihazı yer almaktadır. Kaplamaların aşınma hızı hesaplarında kullanılan değişken ve bağıntılar Tablo 5.8'de verilmiştir. Tablo 5.9'da ise kaplanan deney numunelerine uygulanan aşınma deney parametreleri görülmektedir. Seramik kaplamaların aşınma sonrası Stereo mikroskop görüntüleri ise Leica MZ75 marka mikroskop ile tespit edilmiştir. Şekil 5.10'da Leica MZ75 stereo mikroskop yer almaktadır.



Şekil 5.9. CSM instruments tribometer aşınma deney cihazı



Şekil 5.10. Leica MZ75 stereo mikroskop

Tablo 5.8. Kaplamaların aşınma hızı hesaplarında kullanılan değişken ve bağıntılar [20]

Aşınma Değişkeni	Tanımı
L (mm)	Hasar iz kalınlığı
r = 3 (mm)	Aşındırıcı bilye yarıçapı
S (mm ²)	Hasar alanı
V (mm ³)	Hasar hacmi
R = 1 (mm)	Aşınma iz yarıçapı
θ (rad)	Kesim açısı
d (µm)	Hasar derinliği
$\theta = 2 \arcsin(L/6)$ $S = (1/2).r^2(\theta - \sin\theta)$ $V = 2\pi (R+L/2).S$ $d = (1/2) [2r - (4r^2 - L^2)^{1/2}]$	
Aşınma Hızı = V/ Toplam İz Uzunluğu	

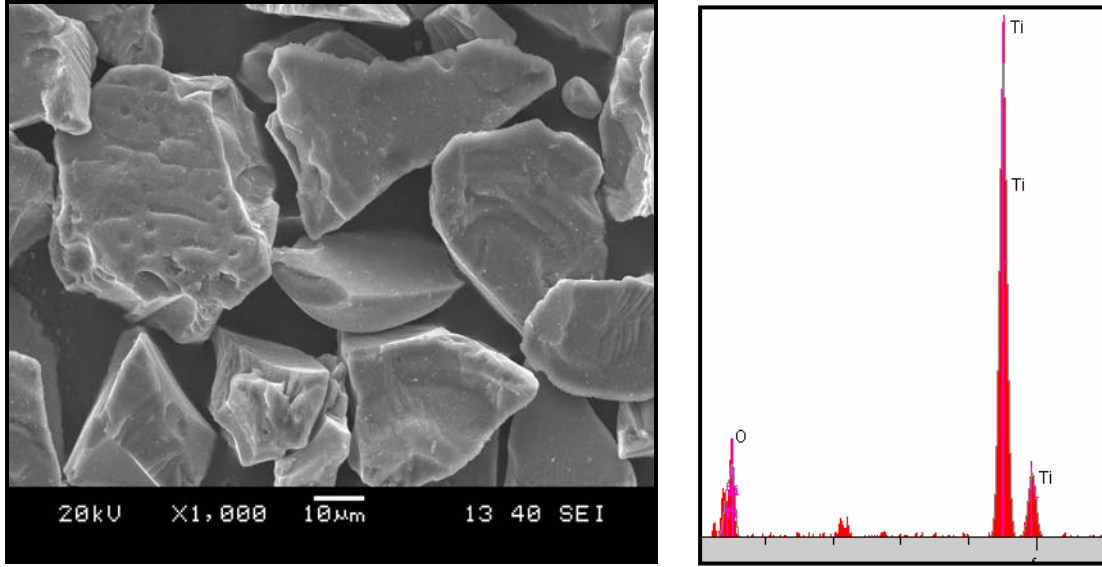
Tablo 5.9. Kaplanan deney numunelerine uygulanan aşınma deney parametreleri

DENEY ŞARTLARI					DENEY SONUÇLARI		
Kap. No	Kaplama Bileşimi	Yol (m)	Yük (N)	Hız (m/sn)	İz Genişliği (mm)	Aşınma Hızı ($10^{-3} \text{mm}^3/\text{m}$)	Ortalama Sürtünme Katsayısı (μ_k)
1A	%100TiO ₂	150	5	0,10	0,30	4,72	0,392
1B	%100TiO ₂	150	5	0,15	0,32	5,03	0,190
2A	%100Cr ₂ O ₃	150	5	0,10	0,11	1,72	0,248
2B	%100Cr ₂ O ₃	150	5	0,15	0,17	2,67	0,074
3A	Al ₂ O ₃ -%40TiO ₂	150	5	0,10	0,35	5,51	0,368
3B	Al ₂ O ₃ -%40TiO ₂	150	5	0,15	0,37	5,83	0,223
4A	Al ₂ O ₃ -%13TiO ₂	150	5	0,10	0,26	4,09	0,333
4B	Al ₂ O ₃ -%13TiO ₂	150	5	0,15	0,31	4,88	0,142
5A	%75Cr ₂ O ₃ -%25TiO ₂	150	5	0,10	0,18	2,82	0,280
5B	%75Cr ₂ O ₃ -%25TiO ₂	150	5	0,15	0,20	3,14	0,110
6A	%50Cr ₂ O ₃ -%50TiO ₂	150	5	0,10	0,17	2,67	0,322
6B	%50Cr ₂ O ₃ -%50TiO ₂	150	5	0,15	0,24	3,77	0,144
7A	%25Cr ₂ O ₃ -%75TiO ₂	150	5	0,10	0,29	4,56	0,357
7B	%25Cr ₂ O ₃ -%75TiO ₂	150	5	0,15	0,32	5,03	0,196

BÖLÜM 6. DENEYSEL SONUÇLAR VE İRDELEME

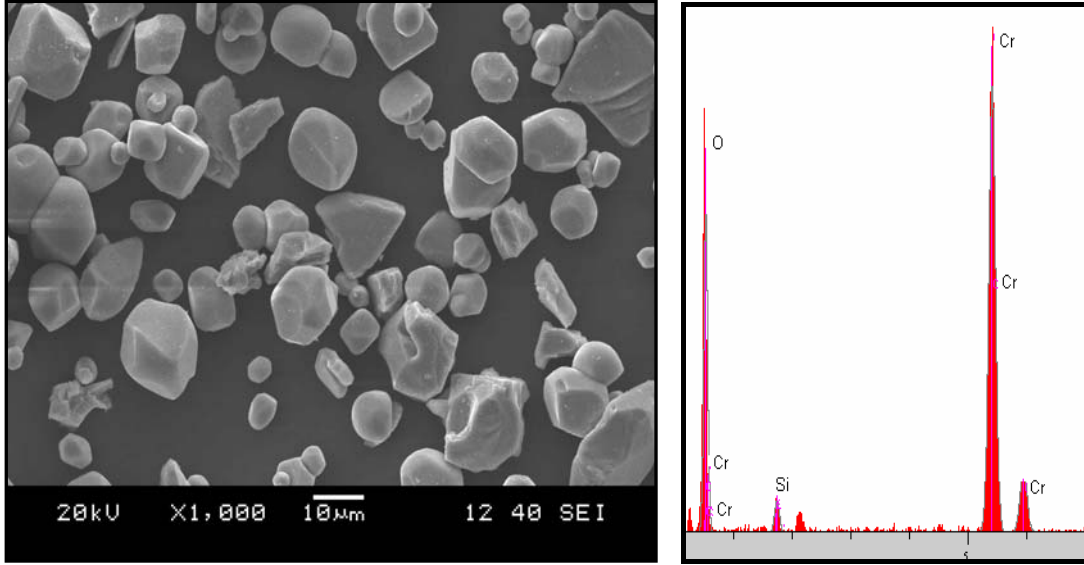
6.1. Kaplama Tozlarının Mikroyapısı ve Karakterizasyonu

Yedi farklı bileşimdeki kaplama tozlarının SEM mikroyapıları ve bu mikroyapılar üzerinden alınan EDS analizleri Şekil 6.1-6.7 arasında verilmiştir. Kaplama tozlarının SEM mikro yapılarından, tozların tane morfolojileri ve tane boyutları hakkında bilgilere ulaşılmaktadır.



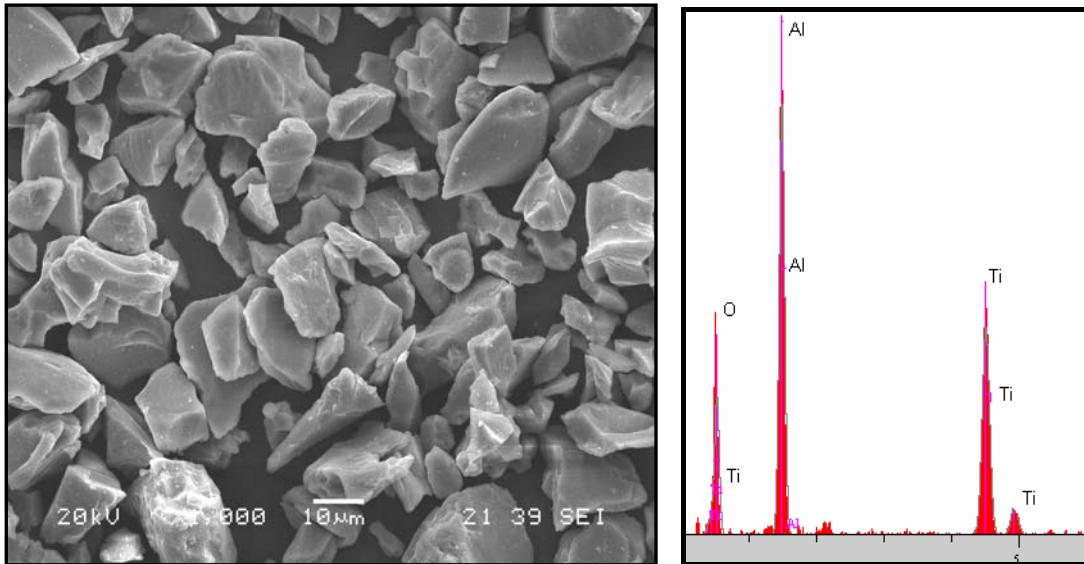
Şekil 6.1. 1 kodlu toz bileşiminin SEM görüntüsü ve EDS analizi

Şekil 6.1'de Metco firmasından temin edilen ve %100 TiO₂'e ait olan SEM görüntüsü ve EDS analizi yer almaktadır. %100 TiO₂ tozlarının köşeli karakterde olduğu görülmektedir. Bu karakter üretim yöntemi olan ergitme-öğütmeden dolayıdır ve tozların tane boyut dağılımı üretici firmanın belirttiği üzere -53+11 µm aralığında değişmektedir. EDS analizinde toz bileşimine ait olan Ti ve O'ne ait pikler tespit edilmiştir.

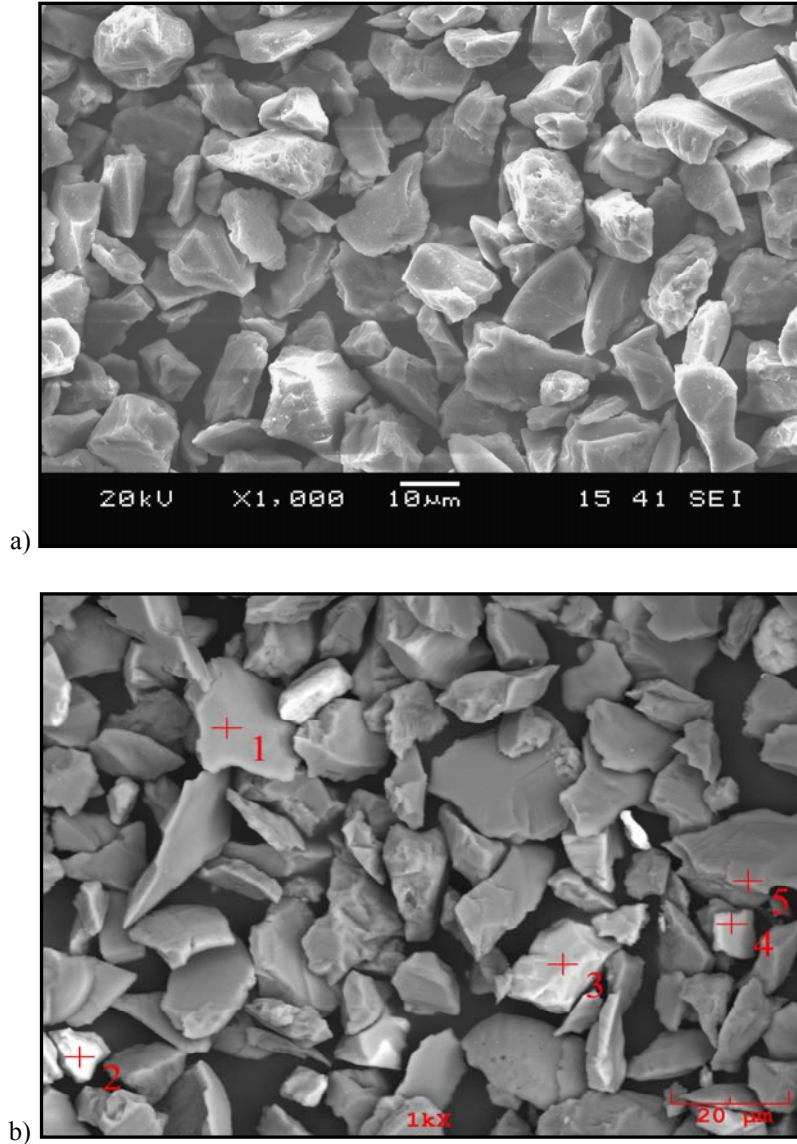


Şekil 6.2. 2 kodlu toz bileşiminin SEM görüntüsü ve EDS analizi

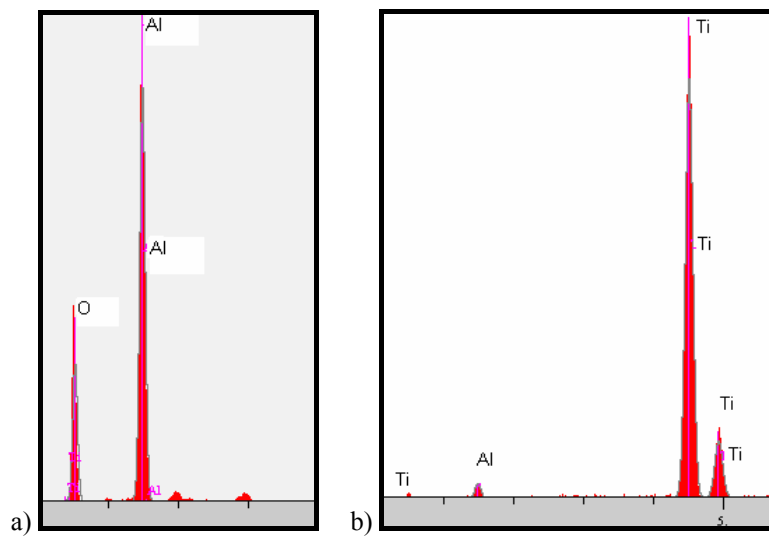
Şekil 6.2’de Metco firmasında temin edilen %100 Cr₂O₃’e ait olan SEM görüntüsü ve EDS analizi yer almaktadır. %100 Cr₂O₃ tozlarının ağırlıklı olarak küresel yapıda olduğu gözlenmektedir. Toz tane boyutlarının TiO₂’e nazaran daha küçük boyutta olduğu EDS analizinde toz bileşiminde belirtilen Cr ve O piklerinin yanı sıra yapıda Si’ a ait piklerin varlığı dikkat çekmektedir.



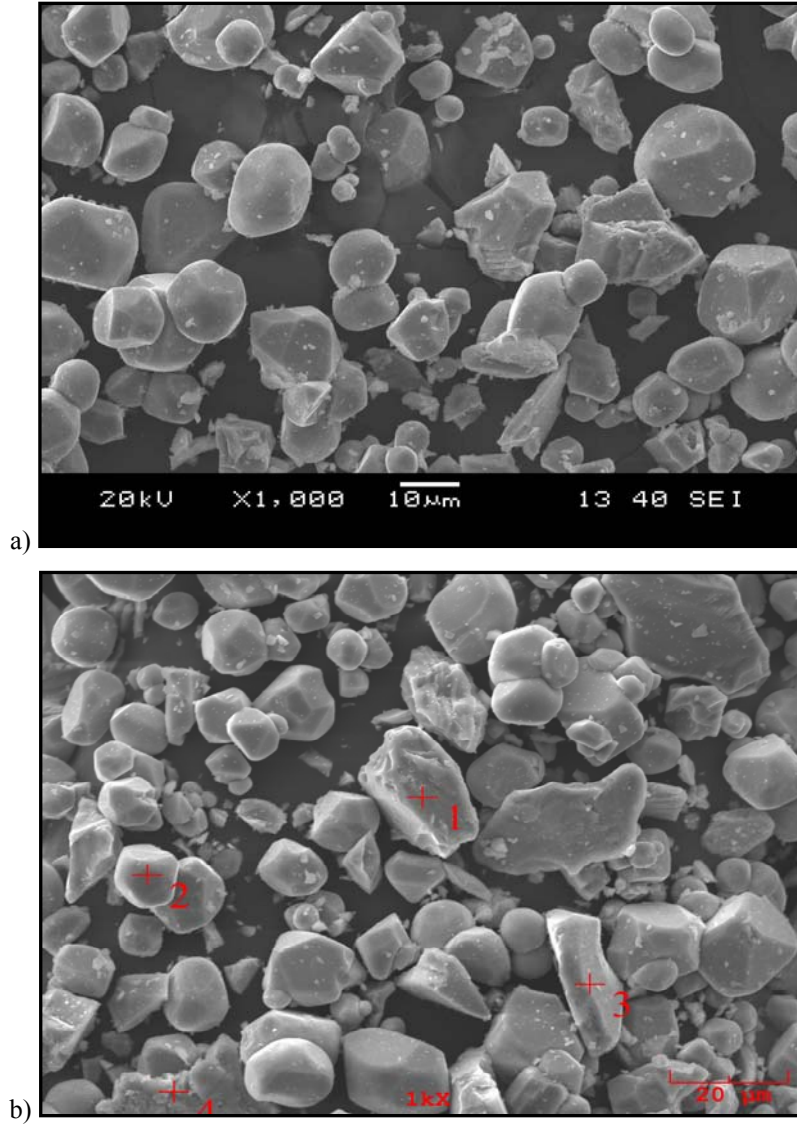
Şekil 6.3. 3 kodlu toz bileşiminin SEM görüntüsü ve EDS analizi



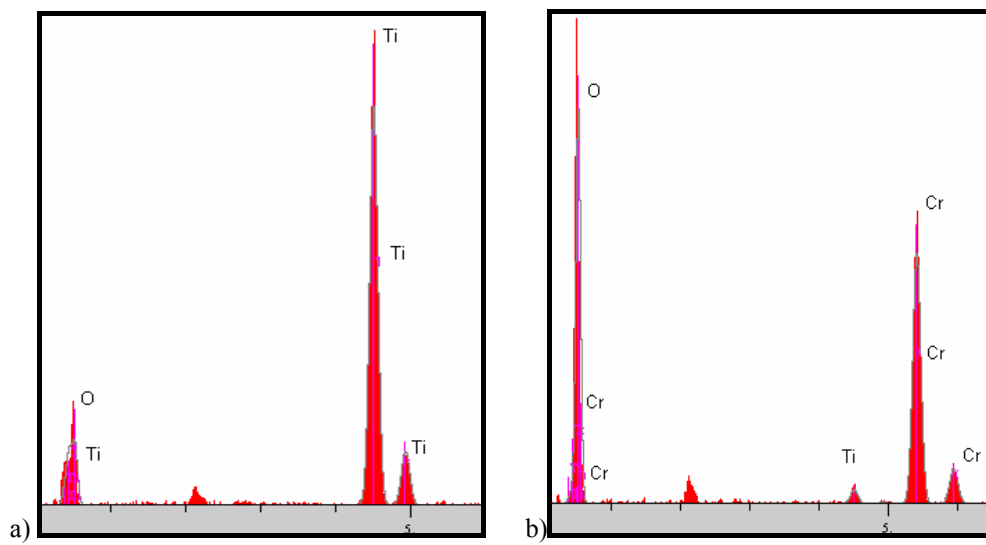
Şekil 6.4. 4 kodlu kaplama toz bileşiminin a) SEM, b) ikincil elektron görüntüsü



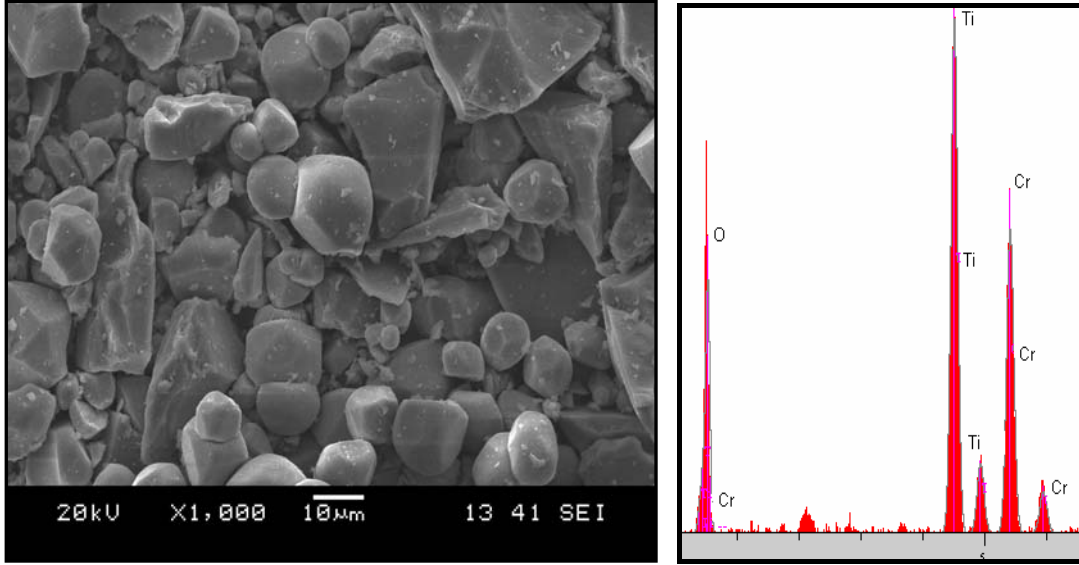
Şekil 6.4.1. 4 kodlu kaplama toz bileşiminin a) 1,5, b) 2-4 noktalarına ait EDS analizi



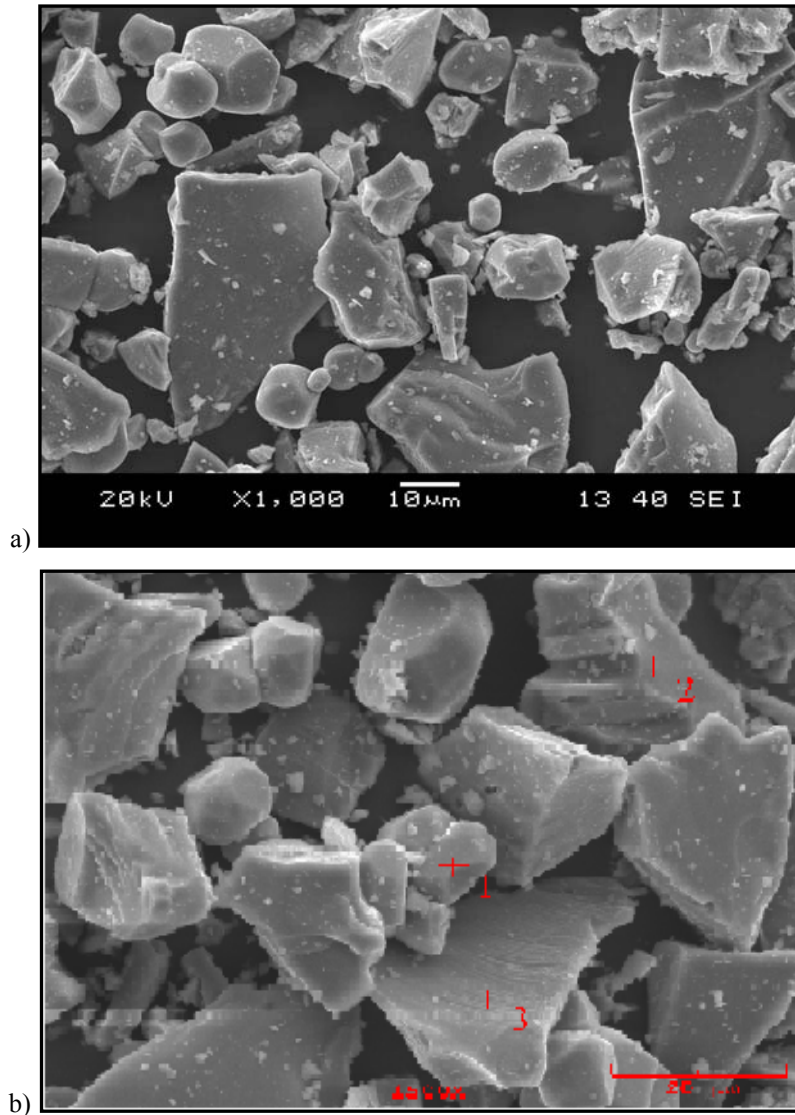
Şekil 6.5. 5 kodlu kaplama toz bileşiminin a) SEM, b) ikincil elektron görüntüsü



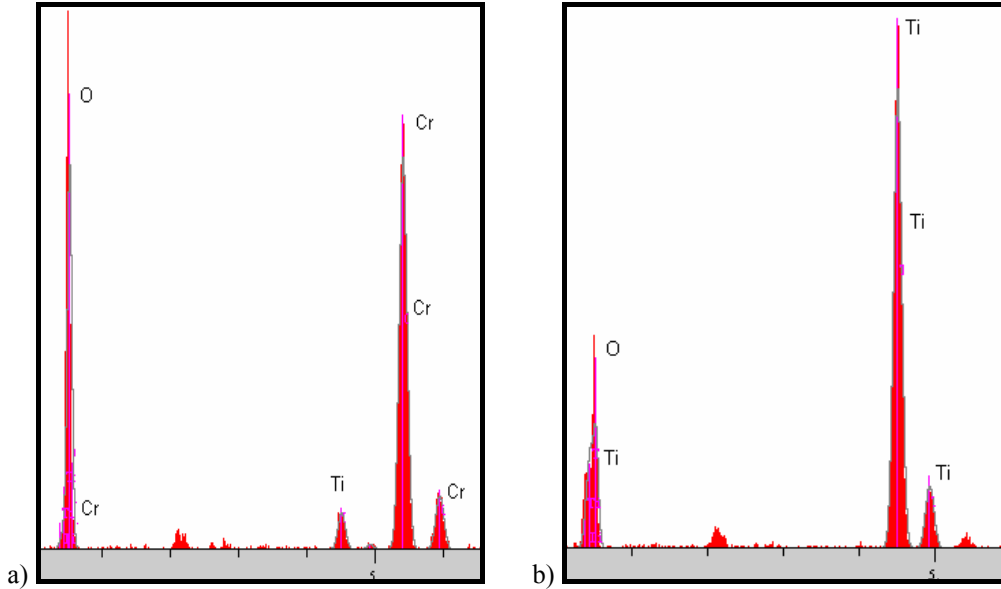
Şekil 6.5.1. 5 kodlu toz bileşiminin a) 1, 3, 4, b) 2 noktalarına ait EDS analizi



Şekil 6.6. 6 kodlu kaplama toz bileşiminin SEM görüntüsü ve EDS analizi



Şekil 6.7. 7 kodlu kaplama toz bileşiminin a) SEM, b) ikincil elektron görüntüsü



Şekil 6.7.1. 7 kodlu kaplama toz bileşiminin a)1, b) 2,3 noktalarına ait EDS analizi

Şekil 6.3’de Metco firmasından temin edilen Al_2O_3 -%40 TiO_2 tozuna ait SEM görüntüsü ve EDS analizi yer almaktadır. Al_2O_3 -%40 TiO_2 tozlarının köşeli karakterde olduğu gözlenmektedir. Yer yer keskin köşeler dikkat çekmektedir. EDS analizinde Al piklerinin şiddetinin Ti piklerine oranla daha yüksek olduğu görülmektedir.

Şekil 6.4’de Metco firmasından temin edilen Al_2O_3 -%13 TiO_2 tozuna ait SEM görüntüsü ve EDS analizi yer almaktadır. Al_2O_3 -%13 TiO_2 tozunun köşeli yapıda olduğu ve yer yer köşelerin keskinleştiği görülmektedir. Nokta bazında yapılan EDS analizinde koyu gri renkte görülen 1 ve 5 no’lu tanelerin Al_2O_3 , parlak gri renkte görülen 2,3 ve 4 no’lu tanelerin TiO_2 olduğu tespit edilmiştir.

Şekil 6.5’de bilyeli değirmende 3 saat süre ile yaş karıştırma yapılarak hazırlanan %75 Cr_2O_3 -%25 TiO_2 tozuna ait SEM görüntüsü ve EDS analizi verilmiştir. Keskin olmayan köşeli tozlara rastlansa da kübik ve küresel tozların yoğunluğu göze çarpmaktadır. Nokta bazında yapılan EDS analizi ile 1 ve 4 no’lu tanelerin Ti, 2 ve 3 no’lu tanelerin Cr’ca zengin tozlar olduğu tespit edilmiştir.

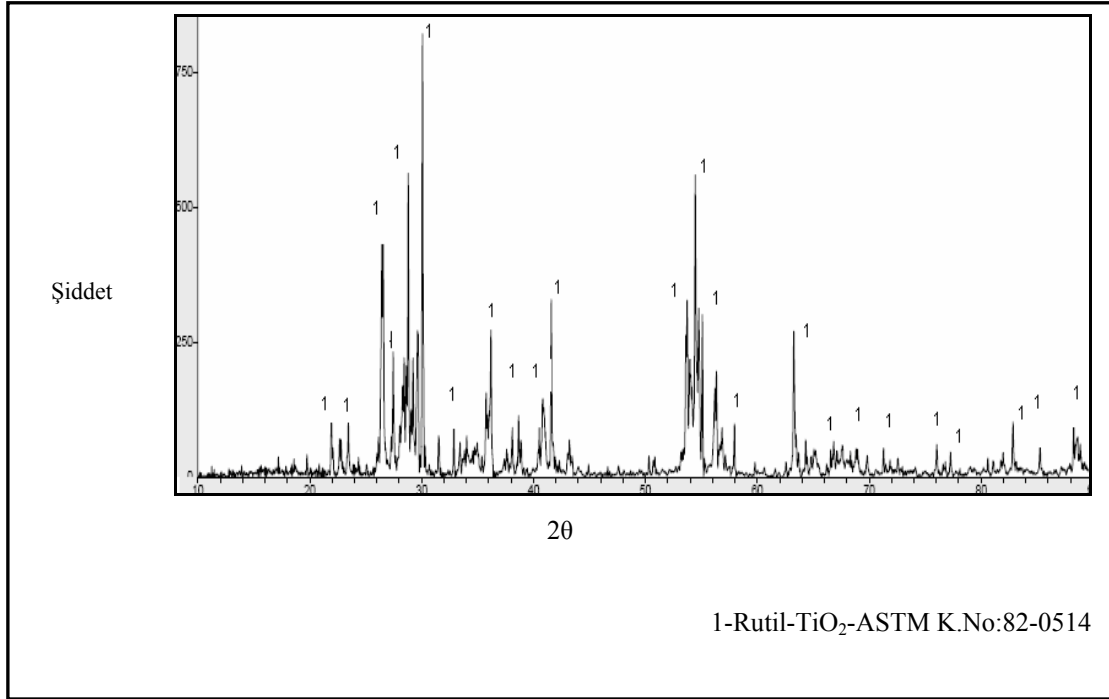
Şekil 6.6’da bilyeli değirmende 3 saat süre ile yaş karıştırma yapılarak hazırlanan %50 Cr_2O_3 -%50 TiO_2 tozuna ait SEM görüntüsü ve EDS analizi görülmektedir. Yapıda yer yer küresel, kübik ve köşeli tanelere rastlanmaktadır. Bu düzensizliğin

karıştırılmadan kaynaklandığı düşünülmektedir. Yapılan EDS analizinde Ti ve Cr elementlerine ait pikler olduğu görülmektedir. Ti pik şiddetinin Cr'a oranla yüksek olduğu görülmektedir.

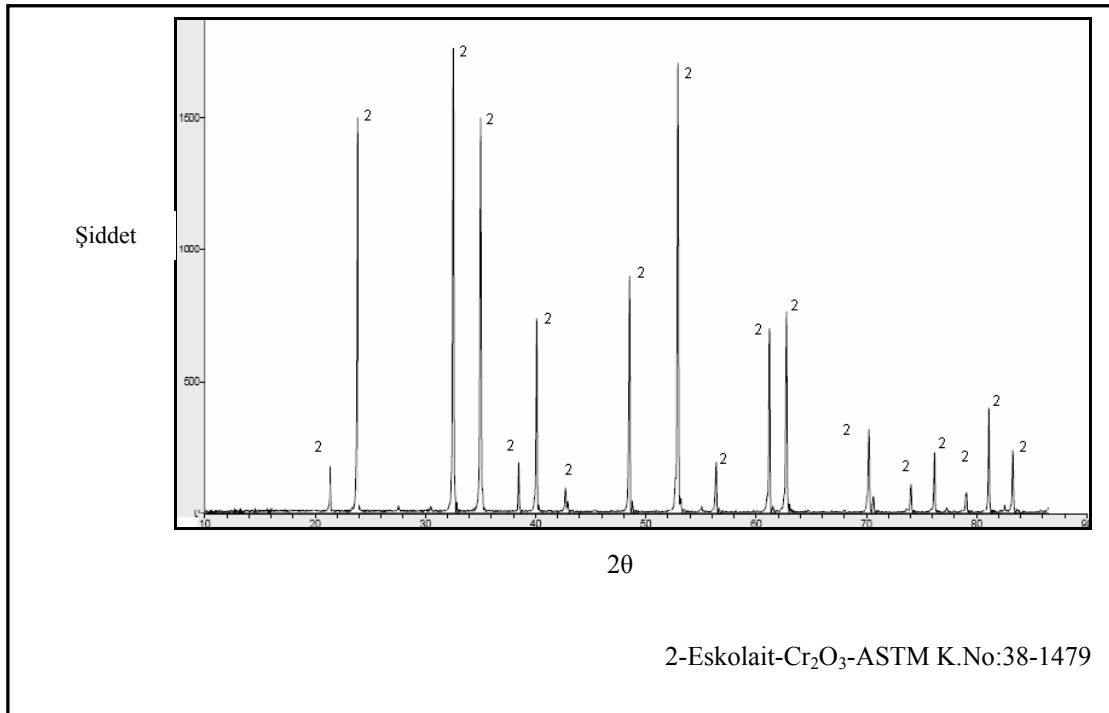
Şekil 6.7'de değirmende 3 saat süre ile yaş karıştırma yapılarak hazırlanan %25Cr₂O₃-%75TiO₂ tozuna ait SEM görüntüsü ve EDS analizi görülmektedir. Yapıda küresel karakterde tozlara rastlansa da çoğunluğu köşeli karakterdeki tozlar oluşturmaktadır. Yapılan EDS analizinde 1 no'lu tanenin Cr, 2 ve 3 no'lu tanelerin Ti'ca zengin tozlar olduğu görülmektedir.

1-4 kodlu tozlar Metco firmasına ait hazır kaplama tozları olup, üretici firma üretim yöntemine göre tozun tane şekli ve tane boyut dağılımını belirlemiştir. 5-7 kodlu tozlar ise hazır kaplama tozlarının belli oranlarda tartılıp, bilyeli değirmende karıştırılması neticesinde yeniden bir işleme tabi tutuldukları için; keskin köşeli ve daha iri tane yapısına sahip TiO₂ toz tanelerinde parçalanmalar ve tane boyutunda küçülmeler olduğu gözlenmiştir.

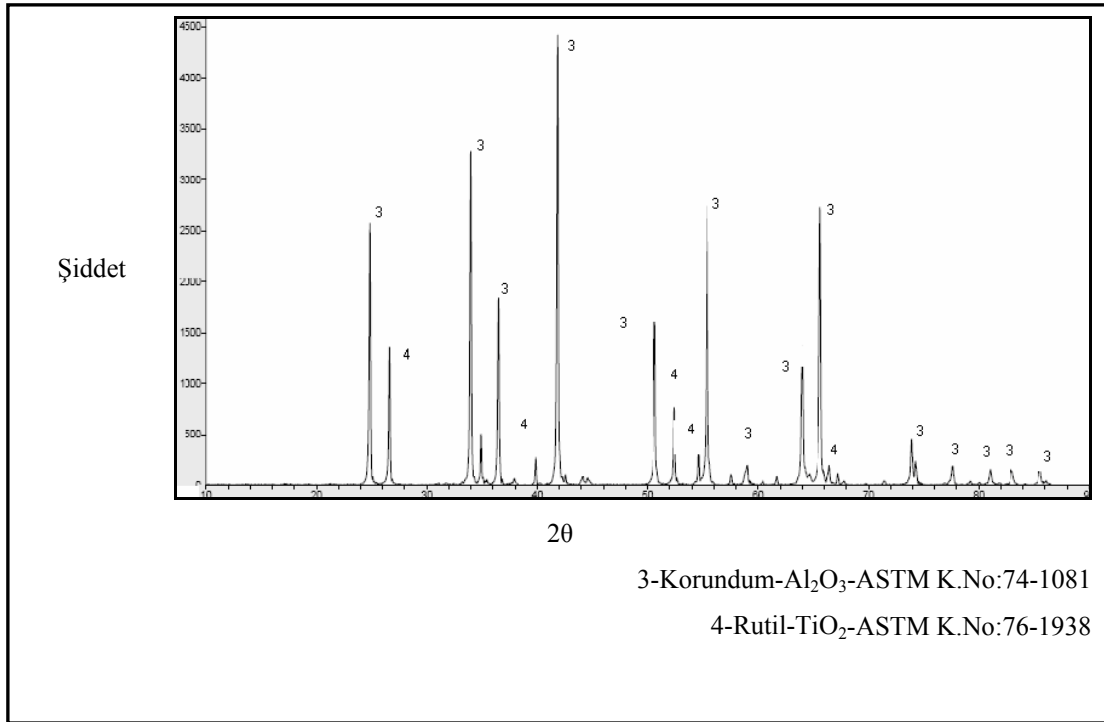
Şekil 6.8-6.14'de çalışma esnasında kullanılan kaplama toz bileşimlerinin XRD paternleri yer almaktadır. Şekil 6.8'de %100TiO₂ tozuna ait XRD paterni görülmektedir. Burada titanyum dioksit tetragonal kristal yapısına sahip olan rutil formunda yapıda yer almaktadır. Şekil 6.9'da %100Cr₂O₃ tozuna ait XRD paterninde, krom oksit hegzagonal kristal yapısına sahip olan eskolait formunda yapıda yer almaktadır. Şekil 6.10'da Al₂O₃-%40TiO₂ tozuna ait XRD paterninde, Al₂O₃ hegzagonal kristal yapısına sahip olan korundum formunda, TiO₂ ise tetragonal kristal yapısına sahip olan rutil formunda yapıda bulunmaktadır. Şekil 6.11'de Al₂O₃-%13TiO₂ tozuna ait XRD paterni görülmektedir. Burada Al₂O₃ hegzagonal kristal yapısına sahip korundum şeklinde, titanyum dioksit tetragonal kristal yapısına sahip rutil şeklinde yapıda yer almaktadır.



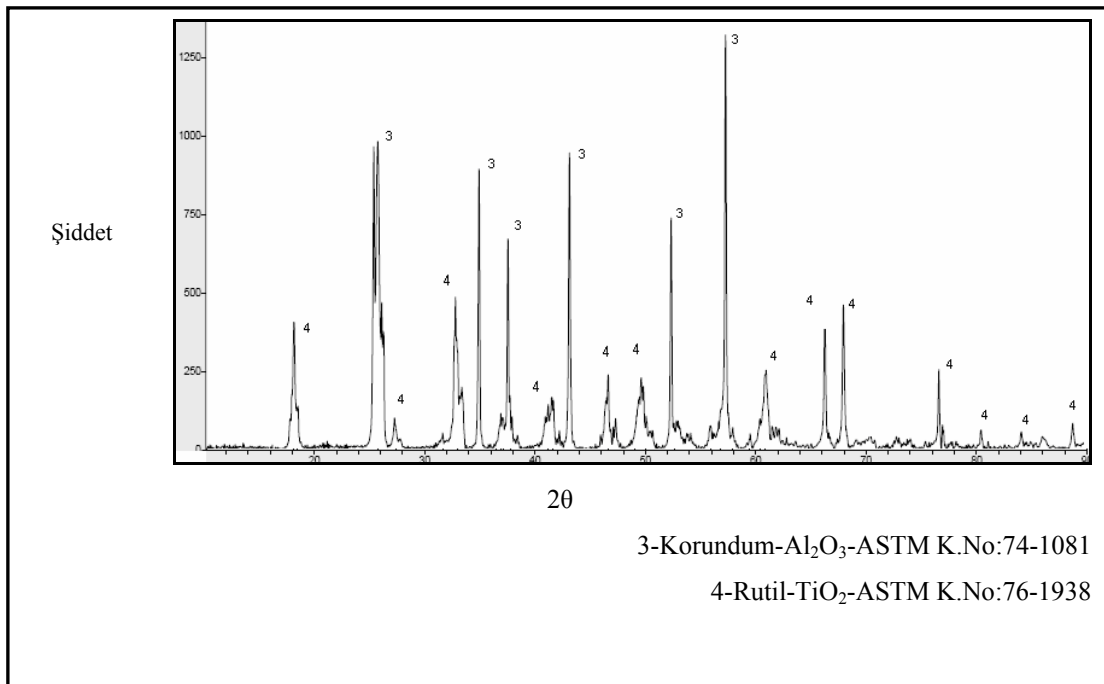
Şekil 6.8. 1 kodlu kaplama toz bileşiminin XRD paterni



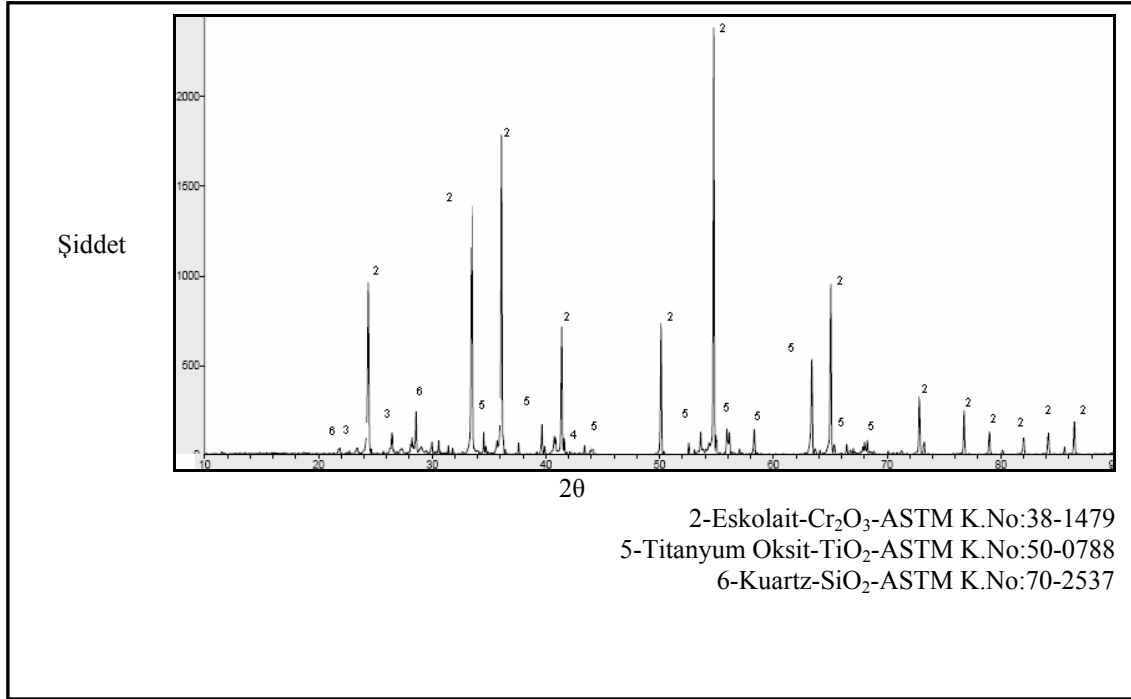
Şekil 6.9. 2 kodlu kaplama toz bileşiminin XRD paterni



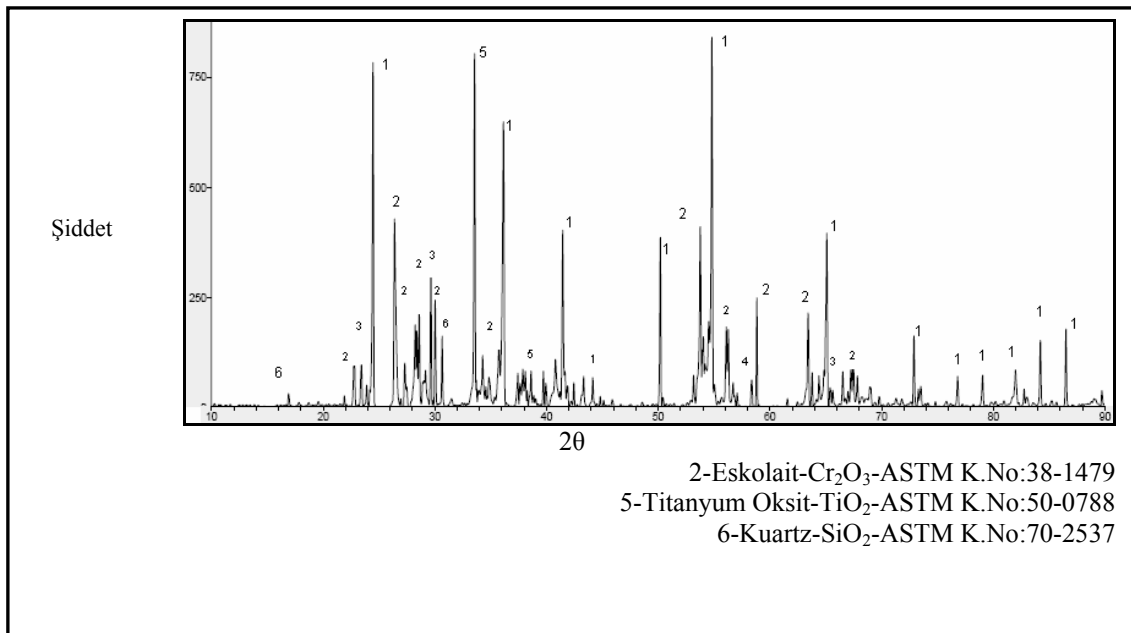
Şekil 6.10. 3 kodlu kaplama toz bileşiminin XRD paterni



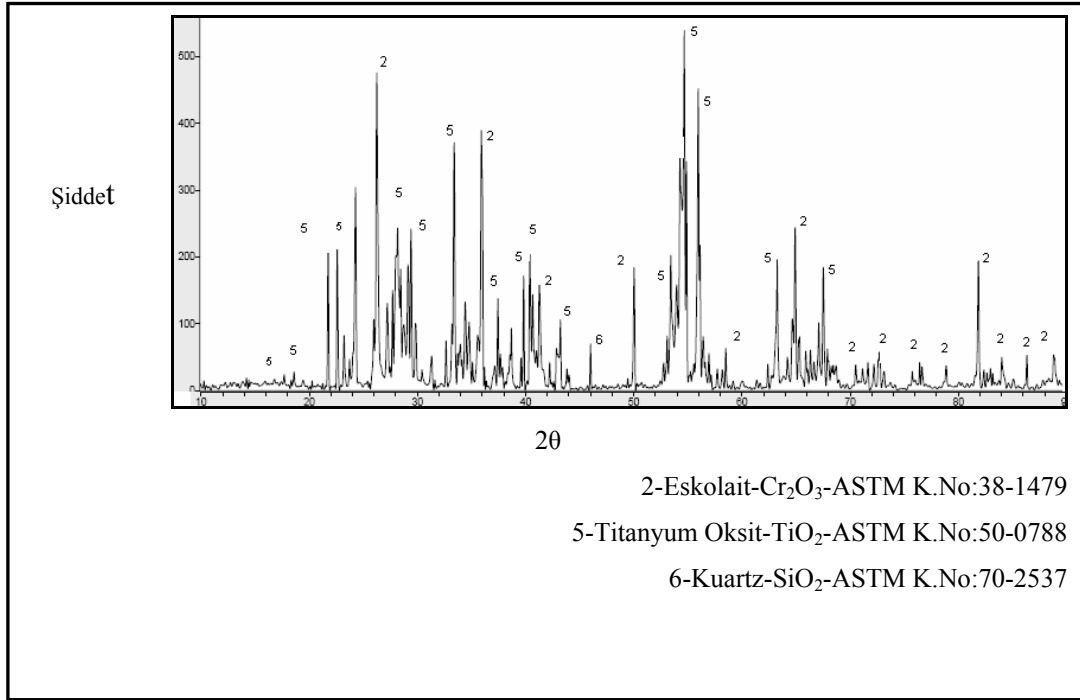
Şekil 6.11. 4 kodlu kaplama toz bileşiminin XRD paterni



Şekil 6.12. 5 kodlu kaplama toz bileşiminin XRD paterni



Şekil 6.13. 6 kodlu kaplama toz bileşiminin XRD paterni



Şekil 6.14. 7 kodlu kaplama toz bileşiminin XRD paterni

Şekil 6.12’de ağ.%75Cr₂O₃-ağ.%25TiO₂ tozuna ait XRD paterni görülmektedir. Burada Cr₂O₃ hegzagonal kristal yapısındaki eskoloid şeklinde yapıda bulunmaktadır. Şekil 6.13’de ağ.%50Cr₂O₃-ağ.%50TiO₂, Şekil 6.14’de ağ.%25Cr₂O₃-ağ.%75TiO₂ tozlarına ait XRD paternleri görülmektedir. Her iki paternde de Cr₂O₃ hegzagonal kristal yapısındaki eskoloit şeklinde görülmektedir. Ayrıca Şekil 6.12, 6.13 ve 6.14’de verilen XRD paternlerinden 5-7 kodlu kaplama tozlarının yapısında SiO₂’in olduğu tespit edilmiştir. Cr₂O₃’in bileşiminde bulunan SiO₂’in ayrıca 5-7 kodlu kaplama tozlarının bilyeli değirmende yaş karıştırma ile üretimi esnasında ortamdaki bileşimlere girmiş olabileceği düşünülmektedir.

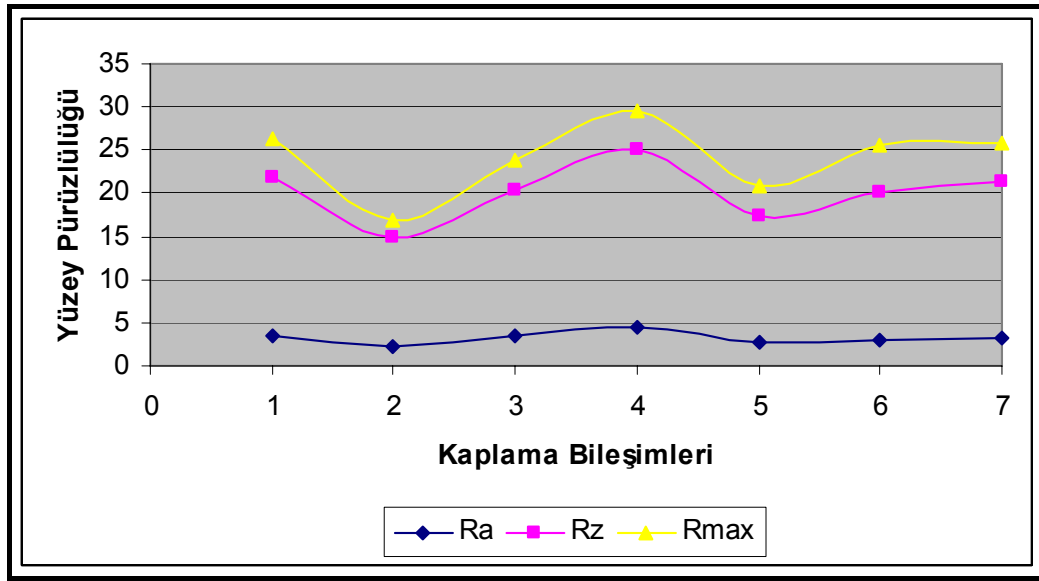
6.2. Kaplamaların Yüzey Pürüzlülüğü

1-7 kodlu bileşimlerle kaplanmış yedi tane numunenin yüzey pürüzlülük değerleri ölçülmüştür. Yüzey pürüzlülüğünde meydana gelen artış, kaplamaların açık porozitesini arttırmakta ve korozyona hassas bir yapı oluşturmaktadır [1-3]. 1, 2, 5, 6 ve 7 kodlu kaplamaların yüzey pürüzlülük ölçüm sonuçları incelendiğinde TiO₂ miktarının artıp, Cr₂O₃ miktarının azaldığı durumlarda yüzey pürüzlülük değerlerinin arttığı gözlenmiştir. 3 ve 4 kodlu kaplamaların yüzey pürüzlülük ölçüm sonuçları

incelendiğinde ise Al_2O_3 miktarının artıp, TiO_2 miktarının azalması durumunda yüzey pürüzlülük değerlerinde artış olduğu görülmüştür. Tablo 6.1’de yüzey pürüzlülük ölçüm sonuçları verilmiştir. Şekil 6.15’de ise sonuçların grafik olarak değerlendirilmesi görülmektedir.

Tablo 6.1. Yüzey pürüzlülük ölçüm sonuçları

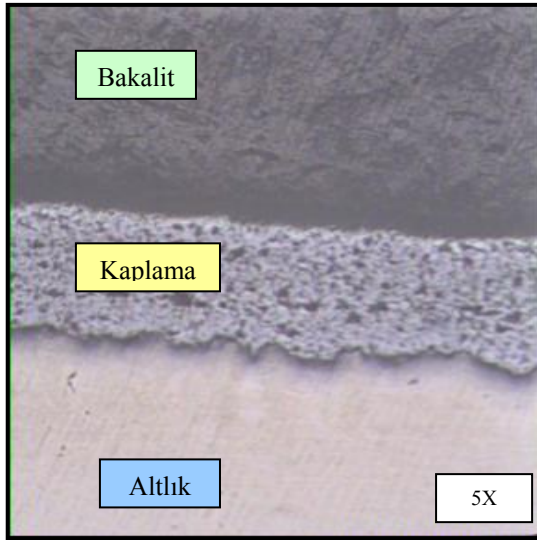
Kaplama Bileşimleri	1	2	3	4	5	6	7
Ra (μm)	3,553	2,346	3,437	4,443	2,836	3,011	3,325
Rz (μm)	21,725	14,966	20,358	25,033	17,466	20,166	21,258
Rmax (μm)	26,425	16,933	23,953	29,546	20,912	25,533	25,736



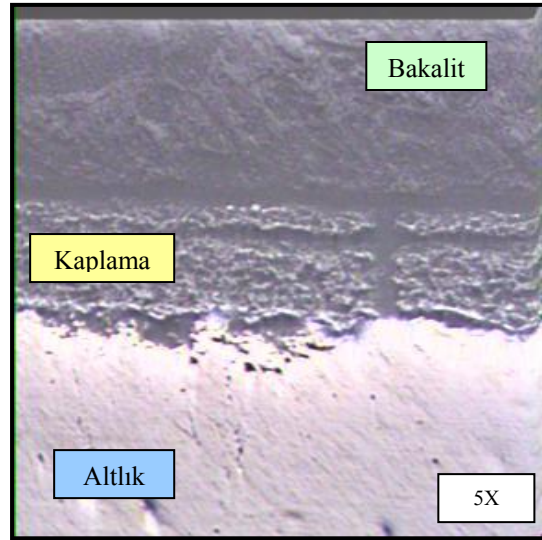
Şekil 6.15. Plazma püskürtme tekniği ile yapılan seramik kaplamaların yüzey pürüzlülük değerleri

6.3. Kaplamaların Mikroyapısı

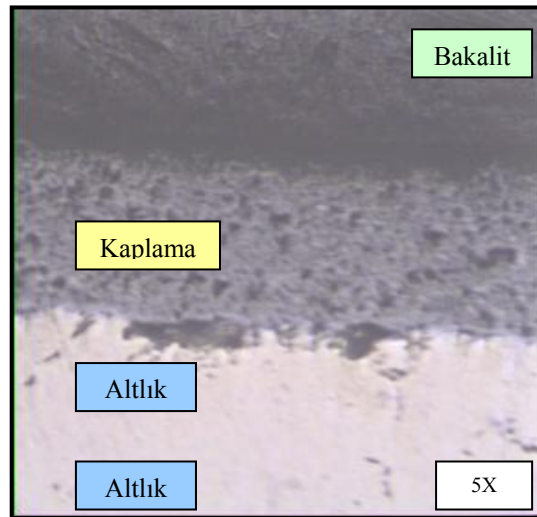
Şekil 6.16. (a.g)’de plazma püskürtme kaplama sonrası parlatılmış numunelerin 5X büyütmedeki optik mikroyapıları görülmektedir. Yapılan metalografik çalışmalar sonucunda farklı bileşimlerdeki 1-7 kodlu kaplamalar optik mikroskop yardımıyla incelenmiş, bu incelemeler neticesinde; kaplama yapısı, kaplama kalınlığı ve kaplamanın porozitesi hakkında bilgi edinilmiştir.



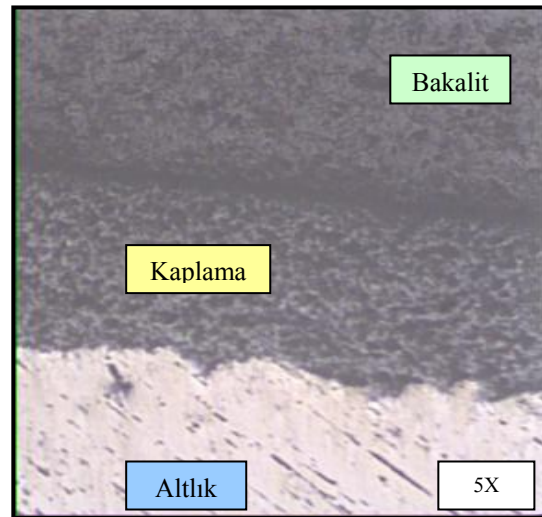
a)



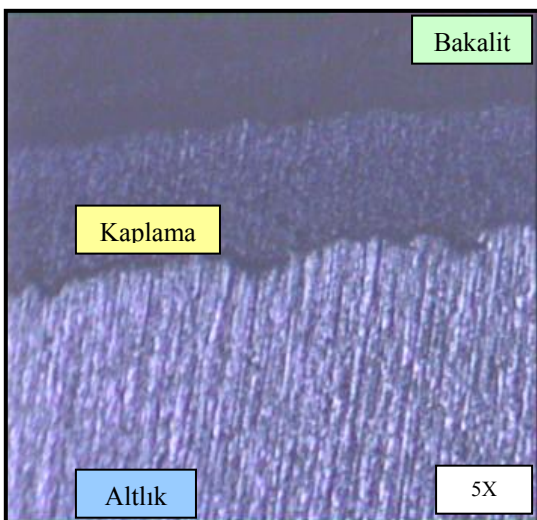
b)



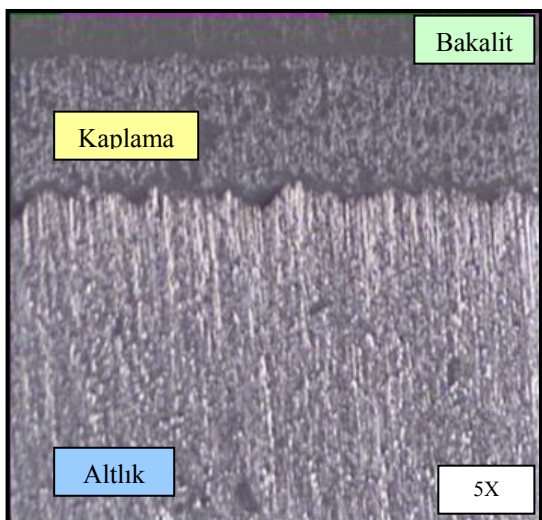
c)



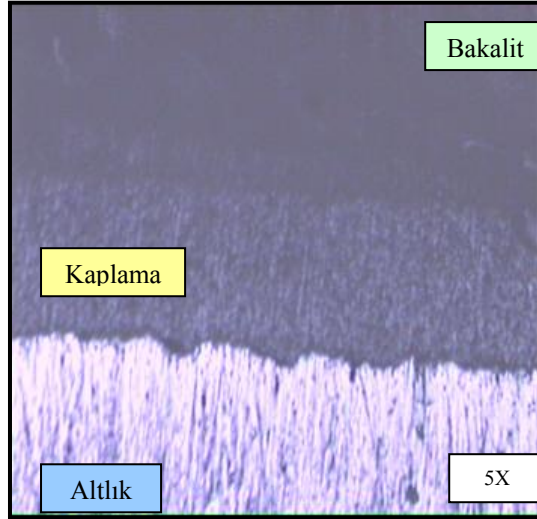
d)



e)



f)



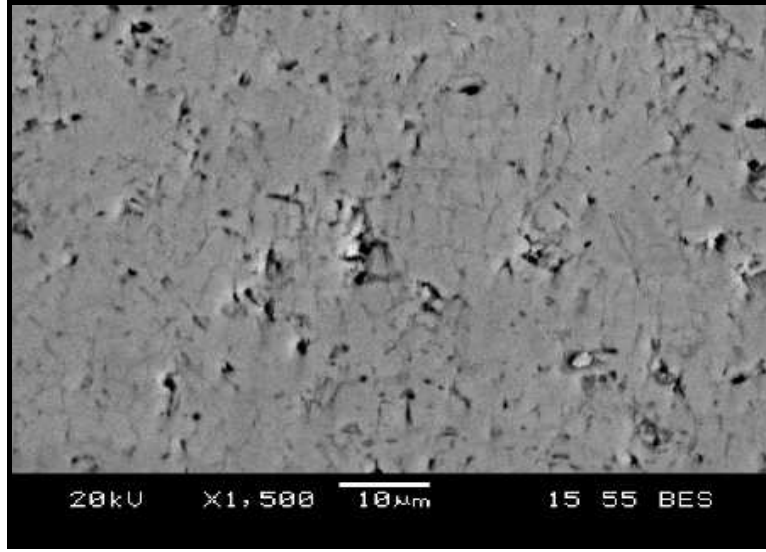
g)

Şekil 6.16. Plazma püskürtme tekniği ile kaplanmış bileşimlerin optik mikroyapısı: a)1, b)2, c)3, d)4, e)5, f)6, g)7 kodlu bileşimler

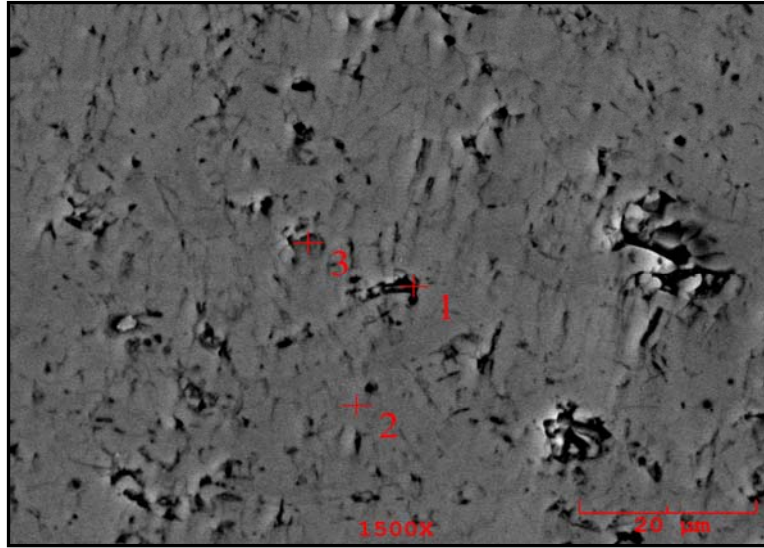
Alüminyum esaslı altlık malzeme üzerine farklı bileşimlerdeki yedi kaplama tozunun kaplanması ile gerçekleştirilen çalışmanın optik mikroyapı görüntüleri, meydana gelen kaplamaların homojen yapıda olduğu, ancak kaplanmış bazı bileşimlerde (2, 3) kaplama sonrası ara yüzeyde ayrılmalara neden olabilecek boşlukların varlığı göze çarpmaktadır (Şekil 6.16 b,c).

1 kodlu kaplama bileşiminin, 2 kodlu kaplama bileşimine nazaran altlık malzeme ile uyumunun daha iyi olduğu, 1, 2, 5, 6 ve 7 kodlu kaplama bileşimlerine ait optik mikroskop görüntüleri incelendiğinde ise artan TiO_2 miktarının altlık malzeme ve kaplama arasındaki uyumluluğu arttırdığı görülmektedir. 3 ve 4 kodlu kaplama bileşimlerinden elde edilen optik mikroskop görüntülerinden ise ağırlıkça Al_2O_3 oranının yüksek olması durumunda yapıda sık rastlanan porozitelerin olduğu dikkat çekmektedir. Ayrıca yer yer kaplama ve altlık malzeme arasında ayrılmalara neden olabilecek boşlukların varlığı göze çarpmaktadır.

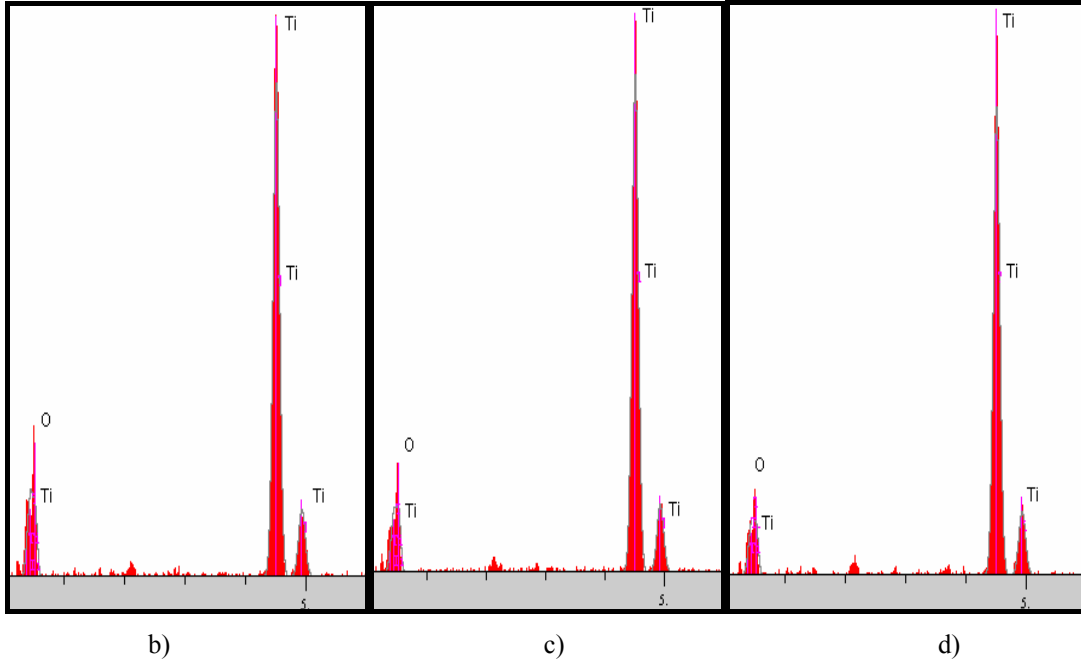
Şekil 6.17’de 1 kodlu kaplama bileşiminin SEM görüntüsü yer almaktadır. %100 TiO_2 kullanılarak yapılan bu kaplamanın yapısında poroziteye rastlanmıştır. Porozitenin mevcudiyeti kaplamaların karakteristik bir özelliğidir. Daha önce Fervel tarafından raporlandığı gibi termal püskürtme kaplamalarda %6-%9 oranında porozite mevcut olabilir [26].



Şekil 6.17. 1 kodlu kaplama bileşiminin SEM görüntüsü

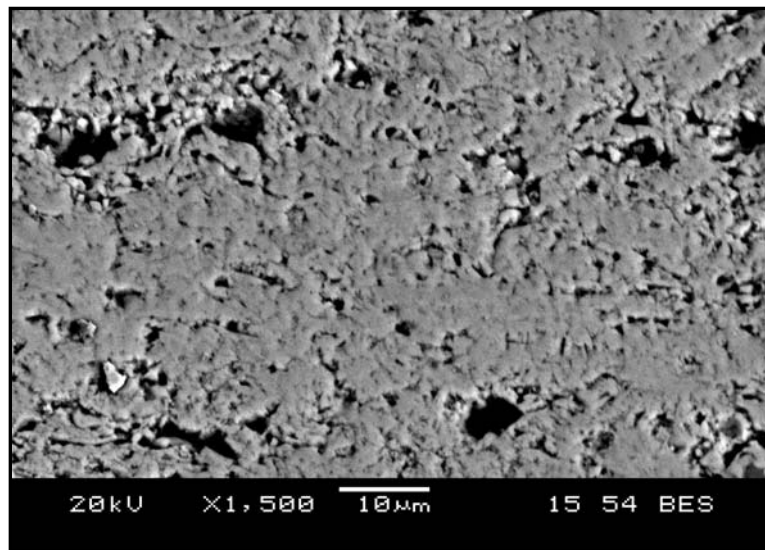


a)

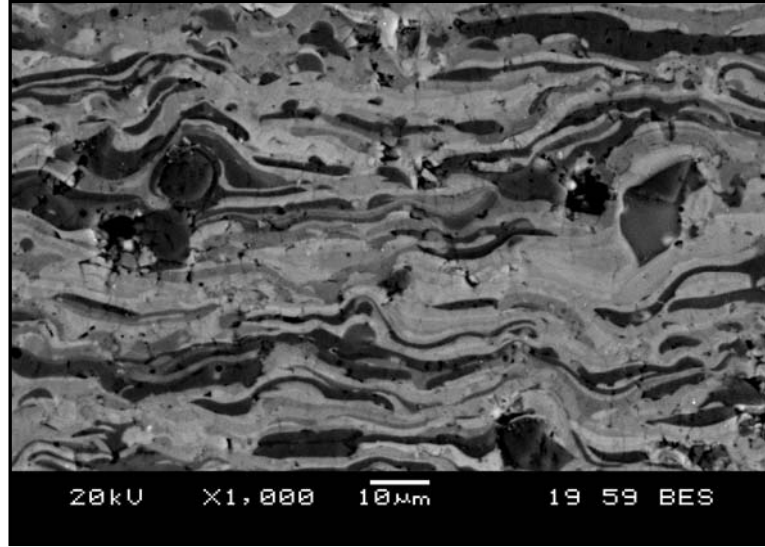


Şekil 6.18. a)1 kodlu kaplama bileşiminin SEM görüntüsü, b) 1 noktasının, c) 2 noktasının, d) 3 noktasının EDS analizi

Şekil 6.18’de de 1 kodlu kaplama bileşiminin SEM görüntüsünün yanı sıra nokta bazındaki EDS analizi verilmiştir. 1, 2 ve 3 noktaları için yapılan EDS analizlerinde bu noktaların TiO_2 olduğu tespit edilmiştir. Şekil 6.19’da 2 kodlu kaplama bileşiminin SEM görüntüsü görülmektedir. Şekil 6.18 ve Şekil 6.19’da yapıda porozitenin yanı sıra ergimemiş partiküllerin olduğu da göze çarpmaktadır.

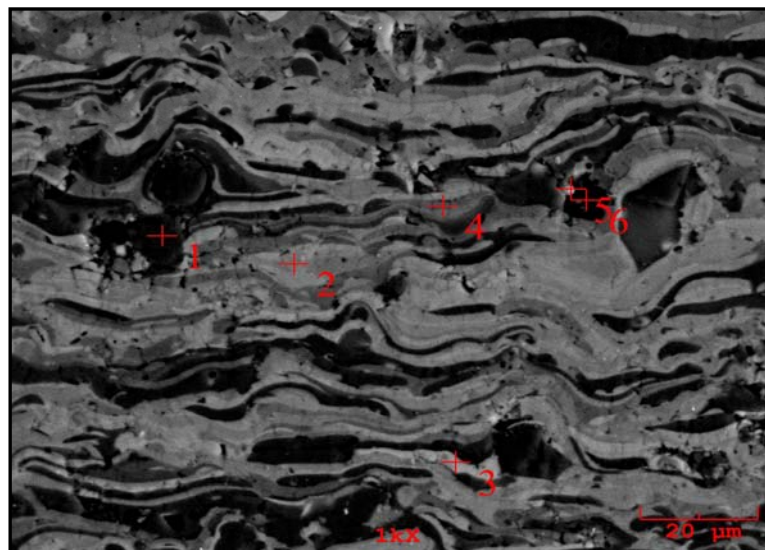


Şekil 6.19. 2 kodlu kaplama bileşiminin SEM görüntüsü

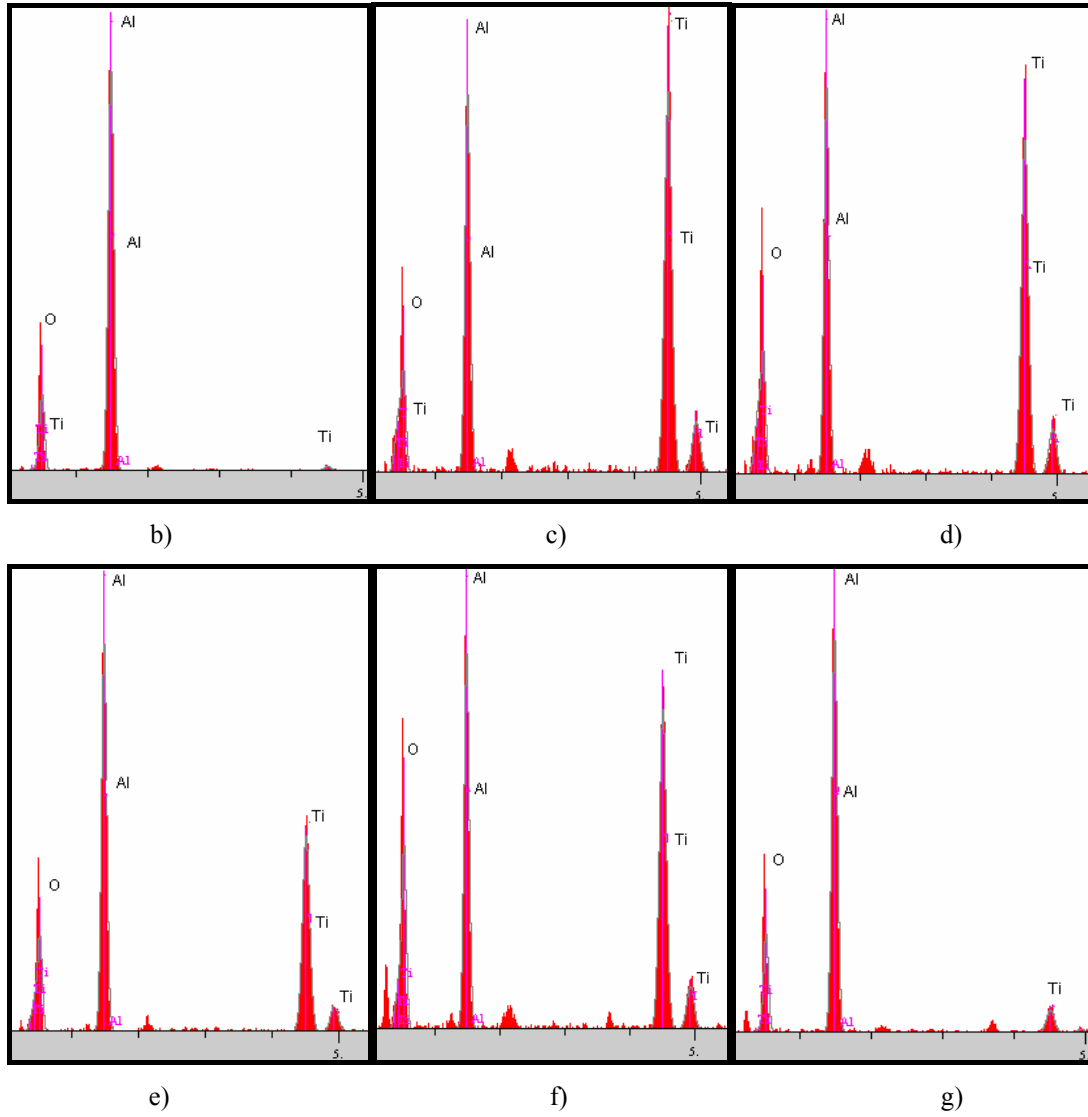


Şekil 6.20. 3 kodlu kaplama bileşiminin SEM görüntüsü

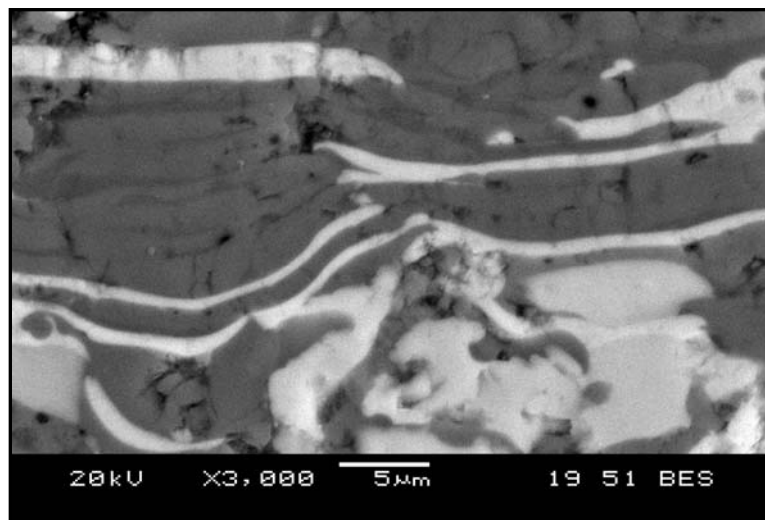
Şekil 6.20’de 3 kodlu kaplama bileşiminin SEM görüntüsünde; plazma püskürtme kaplamaların tipik yapısı olan tabakalı lameller şeklinde birikmiş kaplama mikroyapısı görülmektedir. Mikroyapıda koyu renkli bölgelerin bileşimde %40 oranında mevcut alüminaya, diğer açık renkli bölgelerin TiO_2 ’ye ait olduğu ve yapıda ergimemiş partiküller olduğu tespit edilmiştir. Şekil 6.21’de 3 kodlu kaplama bileşiminin SEM görüntüsünün yanı sıra noktasal EDS analizi de yer almaktadır. EDS analizi verilerinden faydalanılarak koyu renkli bölgelerin alümina, açık renkli bölgelerin titanyum olduğu sonucuna varılmıştır.



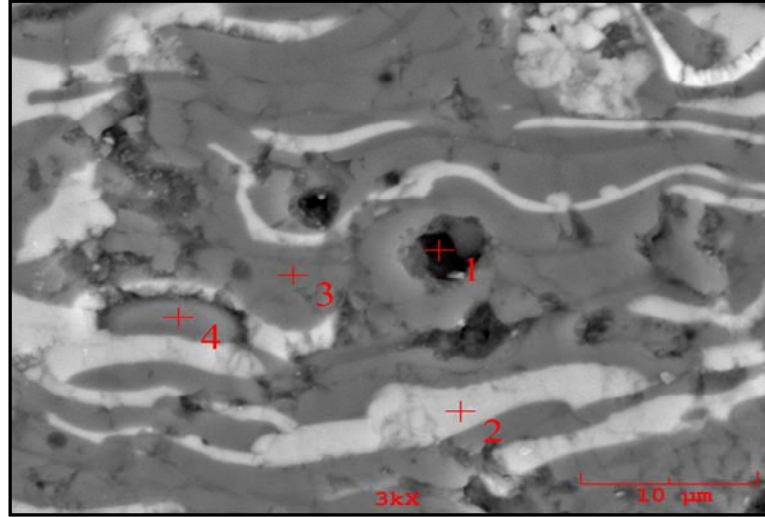
a)



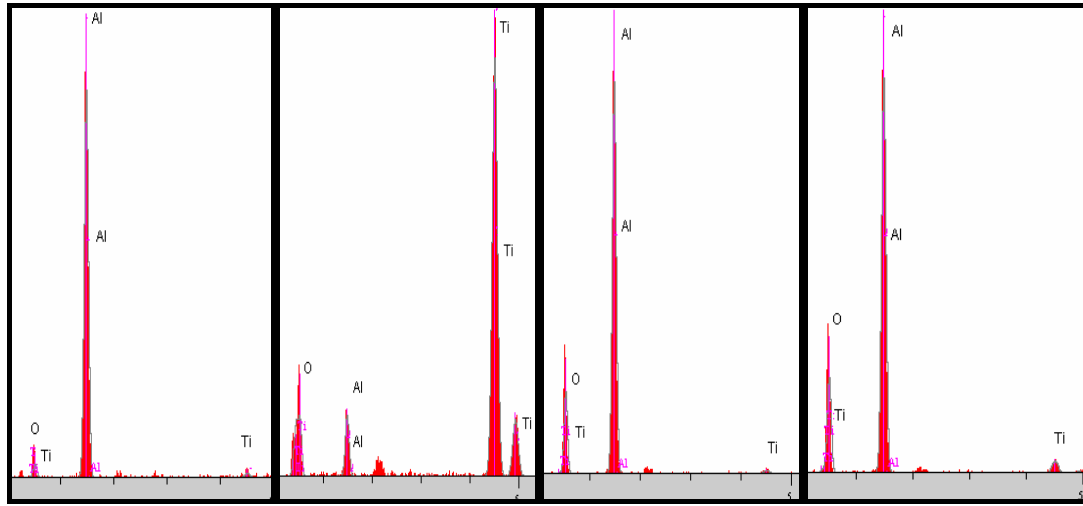
Şekil 6.21. a) 3 kodlu kaplama bileşiminin SEM görüntüsü, b) 1, c) 2, d) 3, e) 4, f) 5, g) 6 noktalarının EDS analizi



a)



b)



c)

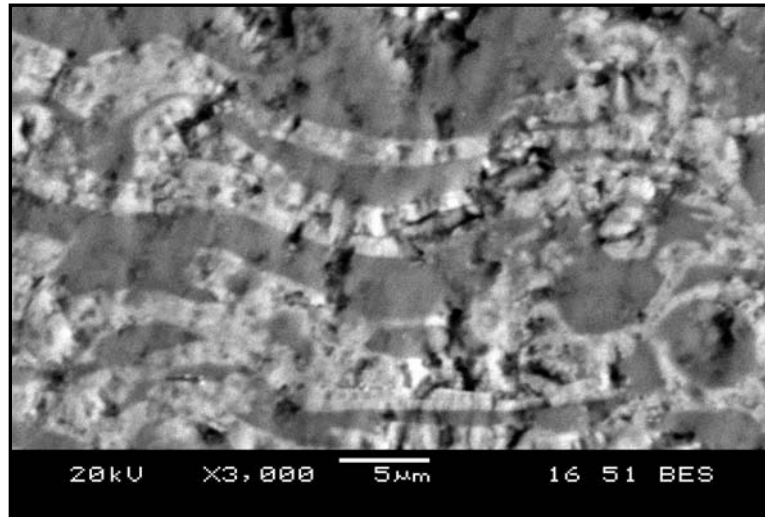
d)

e)

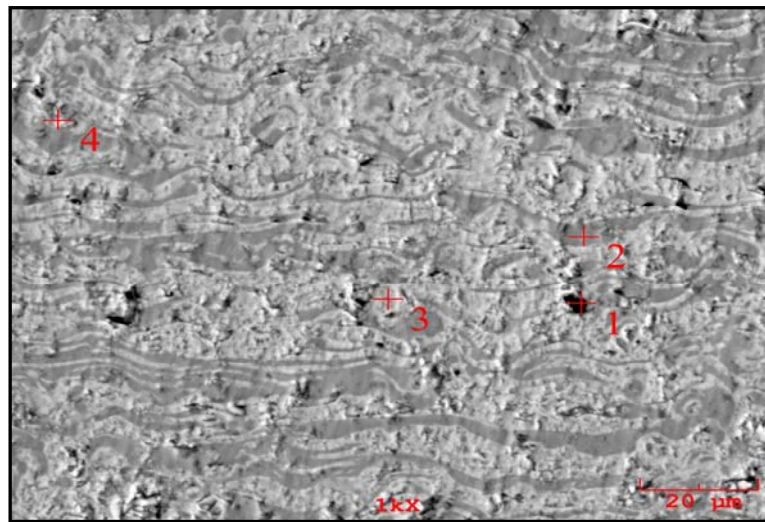
f)

Şekil 6.22. a) ve b) 4 kodlu kaplama bileşiminin SEM görüntüsü, c) 1, d) 2, e) 3, f) 4 noktalarının EDS analizleri

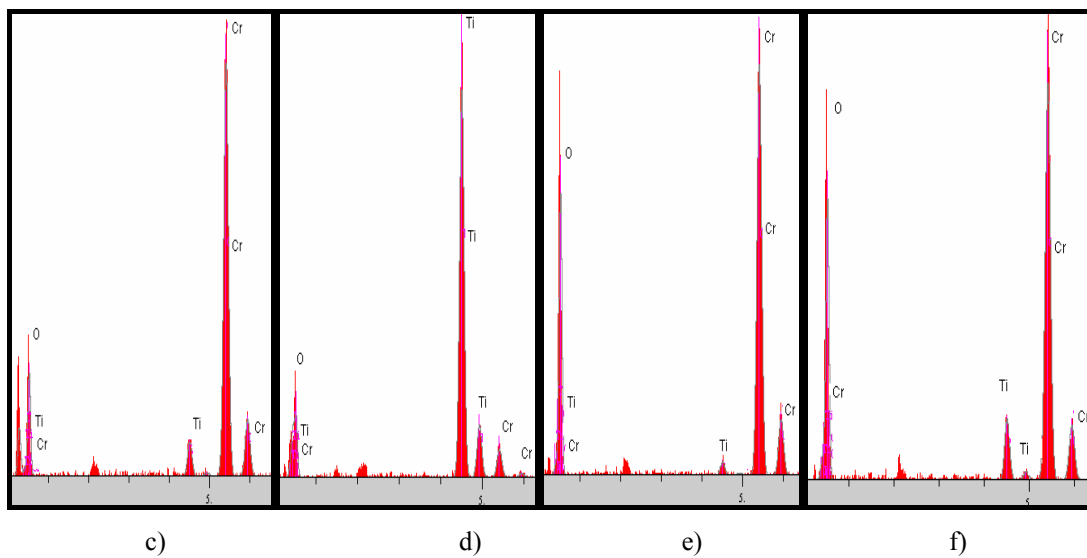
Şekil 6.21’de 3 kodlu kaplama bileşiminin, Şekil 6.22’de 4 kodlu kaplama bileşiminin SEM görüntüleri ve EDS analizleri verilmiştir. Her iki yapıda da plazma kaplamaların tipik yapısı olan lameller yapıya rastlanmıştır. Ayrıca ergimemiş partiküllerin varlığı da tespit edilmiştir. Her iki kaplama bileşimi için elde edilen EDS sonuçlarından koyu renkli bölgelerin alümina, açık renkli bölgelerin titanyaya ait olduğu tespit edilmiştir. %13 oranında TiO_2 içeren 4 nolu bileşimde açık renkli bölgelerin 3 kodlu bileşime göre daha az olduğu görülmektedir. Literatürde de Al_2O_3 - TiO_2 bileşimlerinden elde edilen kaplamalarda beyaz renkli bölgelerin TiO_2 , gri renkli bölgelerin Al_2O_3 olduğu ifade edilmektedir [26].



a)



b)



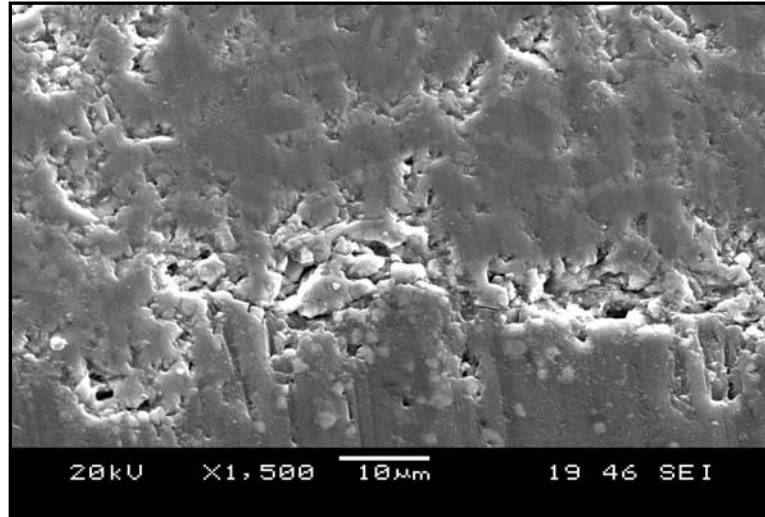
c)

d)

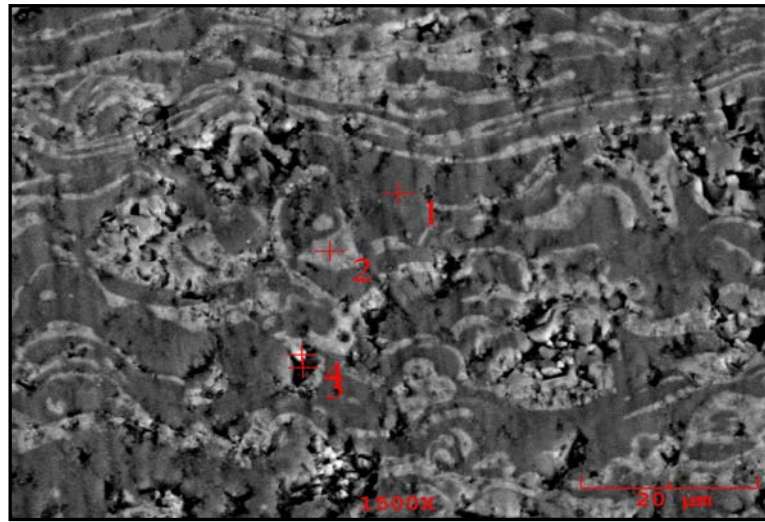
e)

f)

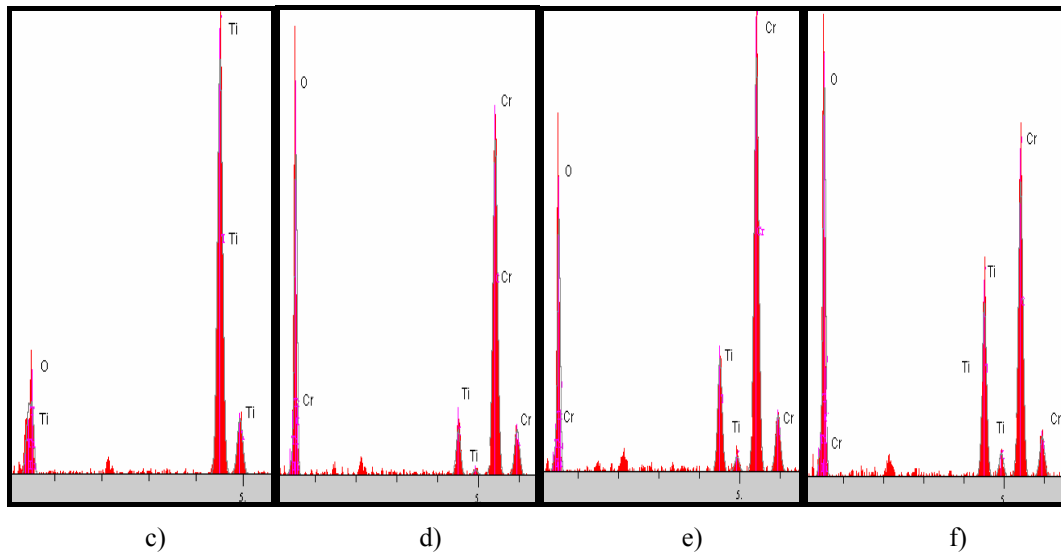
Şekil 6.23. a) ve b) 5 kodlu kaplama bileşiminin SEM görüntüsü, c) 1, d) 2, e) 3, f) 4 noktalarının EDS analizleri



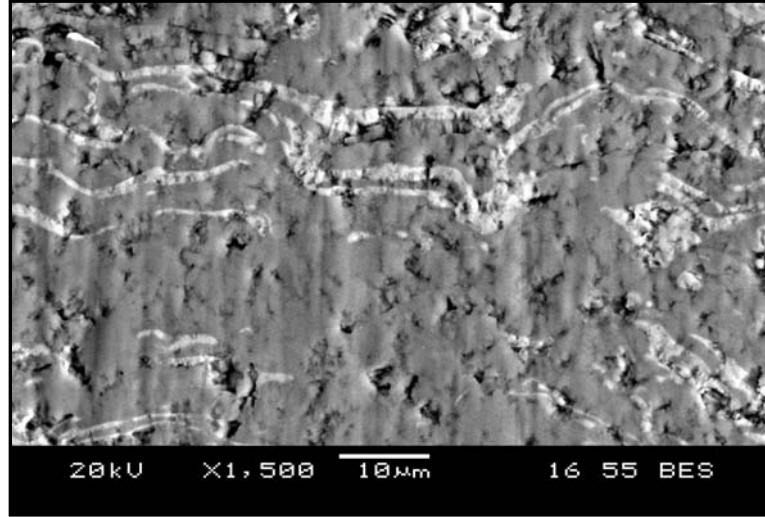
a)



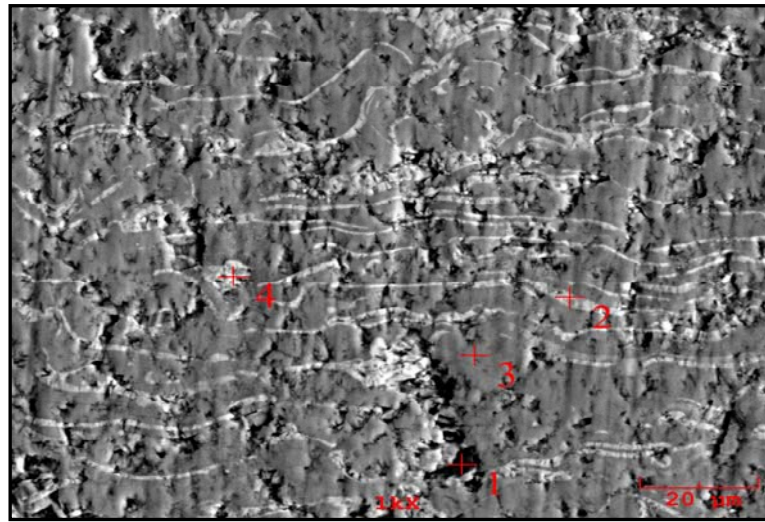
b)



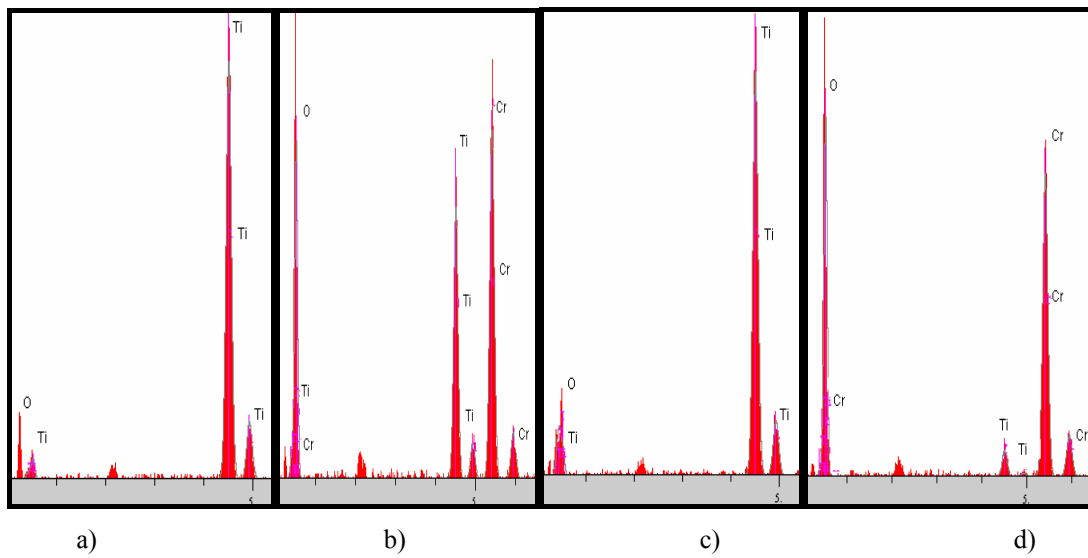
Şekil 6.24. a) ve b) 6 kodlu kaplama bileşiminin SEM görüntüsü, c) 1, d) 2, e) 3, f) 4 noktalarının EDS analizleri



a)



b)



a)

b)

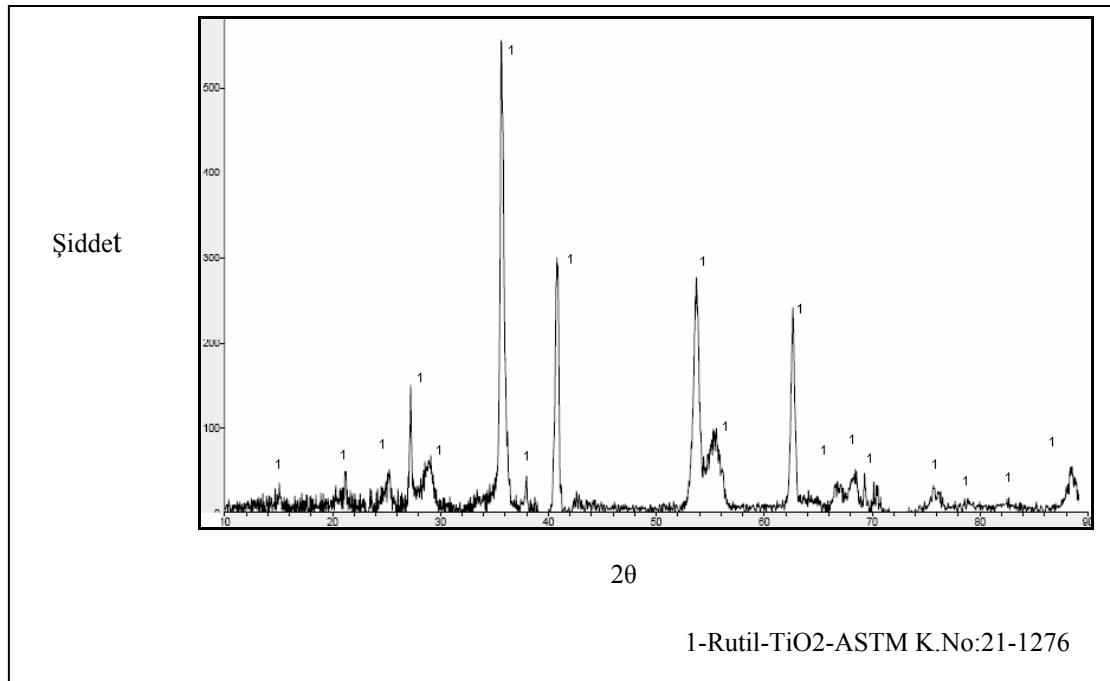
c)

d)

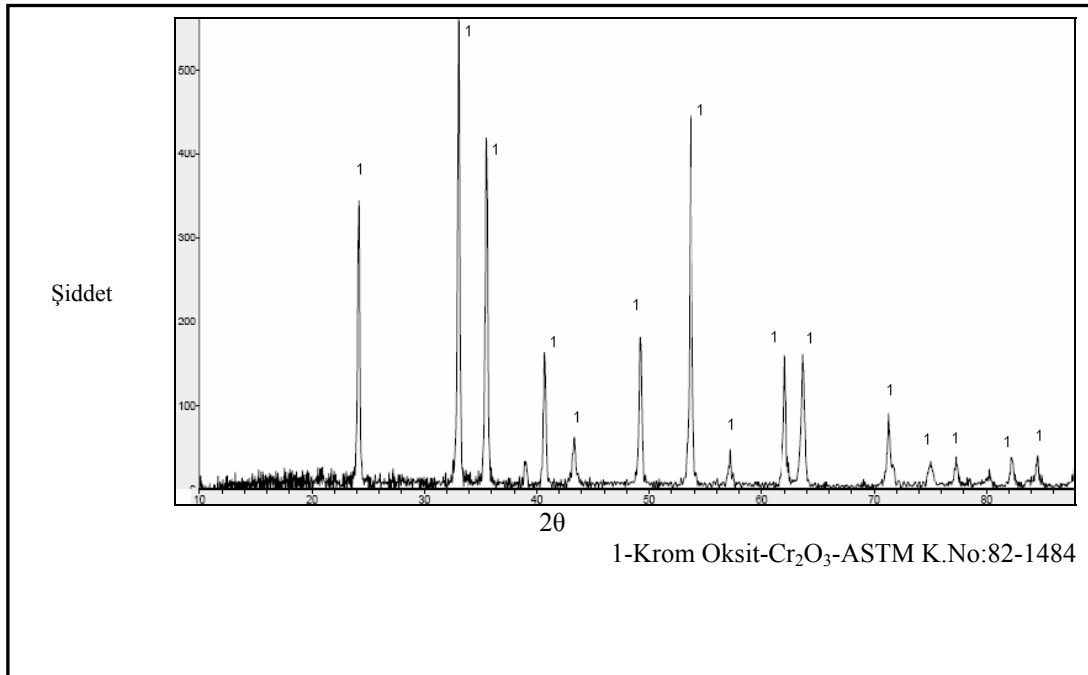
Şekil 6.25. a) ve b) 7 kodlu kaplama bileşiminin SEM görüntüsü, c) 1, d) 2, e) 3, f) 4 noktalarının EDS analizleri

Şekil 6.23'de 5 kodlu kaplama bileşiminin, Şekil 6.24'de 6 kodlu kaplama bileşiminin, Şekil 6.25'de ise 7 kodlu kaplama bileşiminin SEM görüntüleri ve EDS analizleri görülmektedir. Her üç yapıda da lamelli plazma kaplama mikroyapısı gözlenmektedir. Şekil 6.24'de kaplamada porozitelerin varlığı dikkat çekmektedir. Ayrıca her üç yapıda da porozitenin yanı sıra tabakalar arası ergimemiş partiküllerin varlığından söz edilebilir. Elde edilen EDS analizi grafiklerinden koyu renkli bölgelerin titanyumca, açık renkli bölgelerin kromca zengin olduğu tespit edilmiştir. 5-7 kodlu kaplama tozları ile gerçekleştirilen plazma püskürtme kaplamaların SEM görüntülerinde TiO_2 miktarı arttıkça koyu renkli bölgelerin arttığı belirtilebilir.

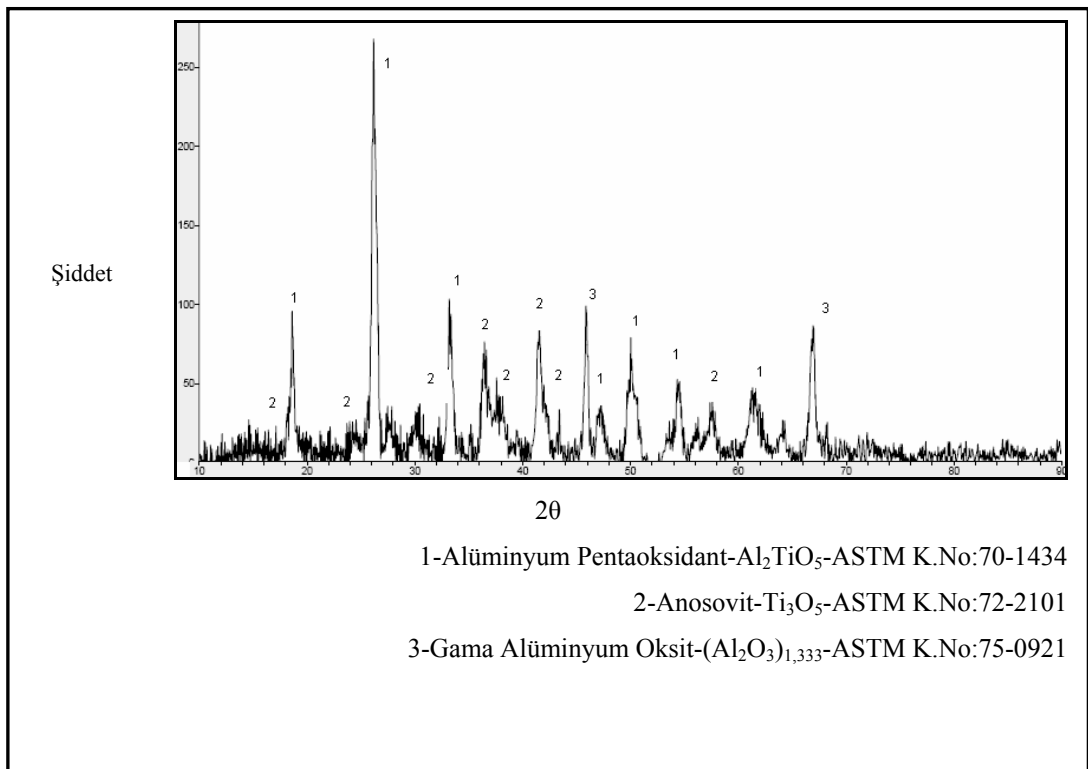
6.4. Kaplamaların XRD İncelemeleri



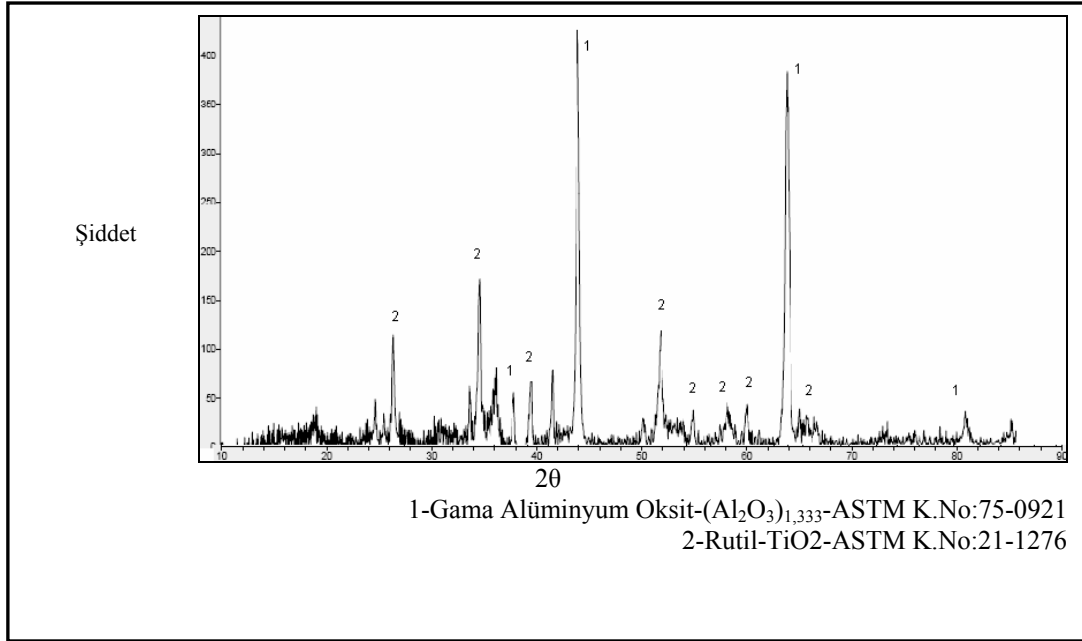
Şekil 6.26. 1 kodlu kaplama bileşiminin XRD paterni



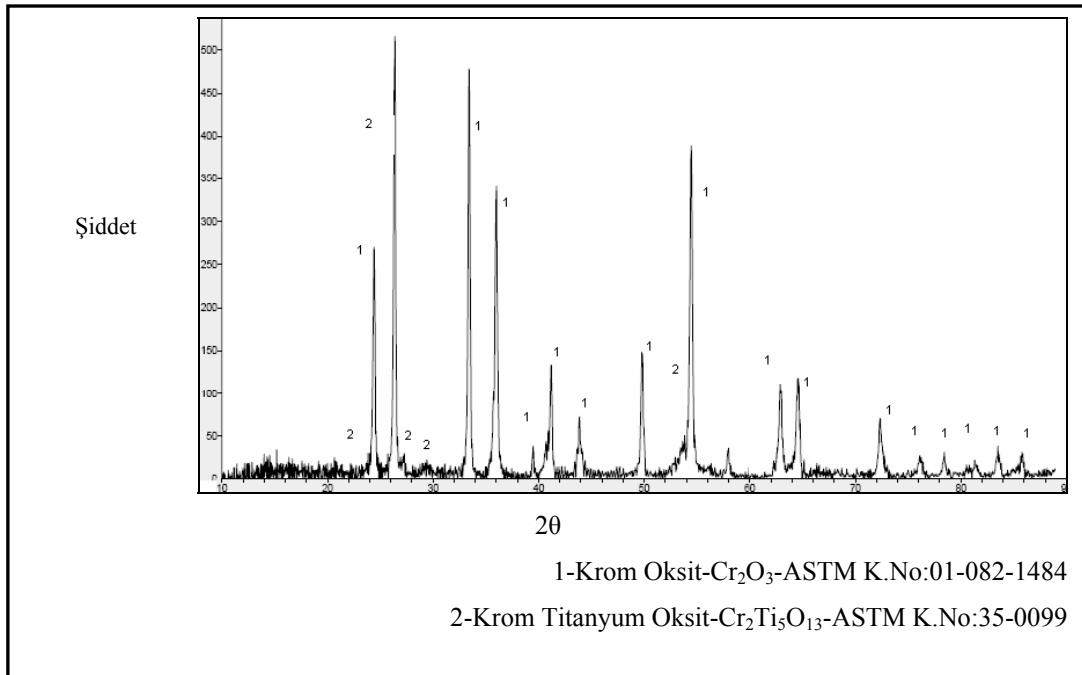
Şekil 6.27. 2 kodlu kaplama bileşiminin XRD paterni



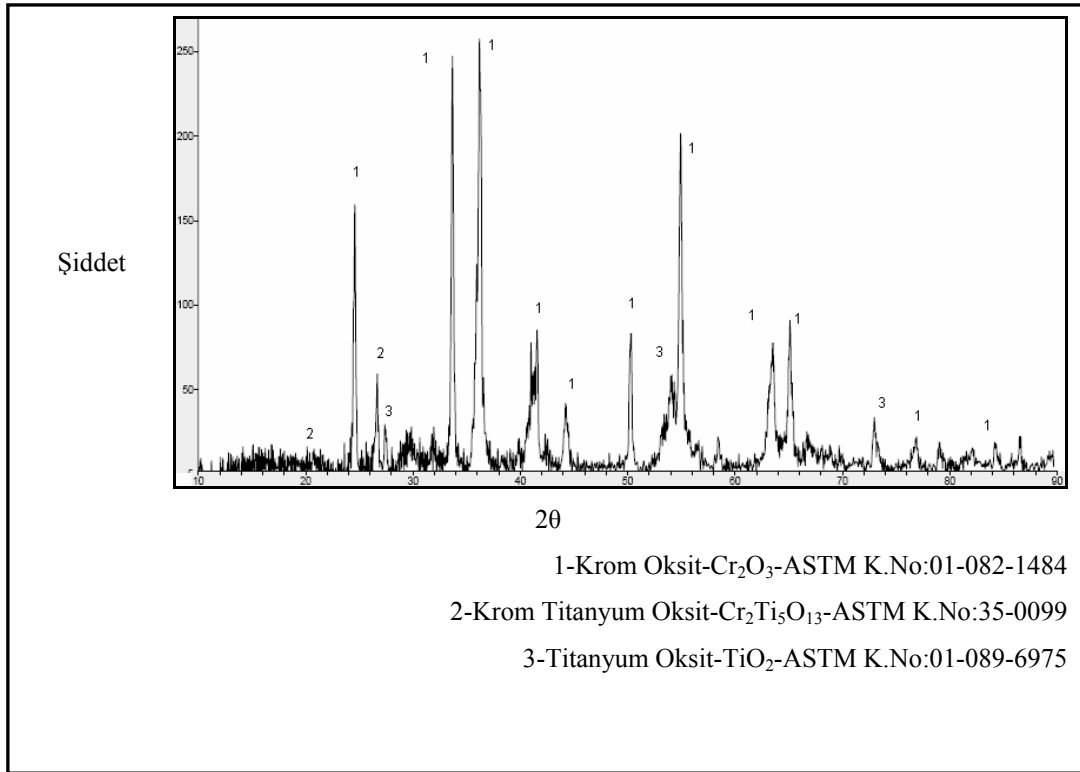
Şekil 6.28. 3 kodlu kaplama bileşiminin XRD paterni



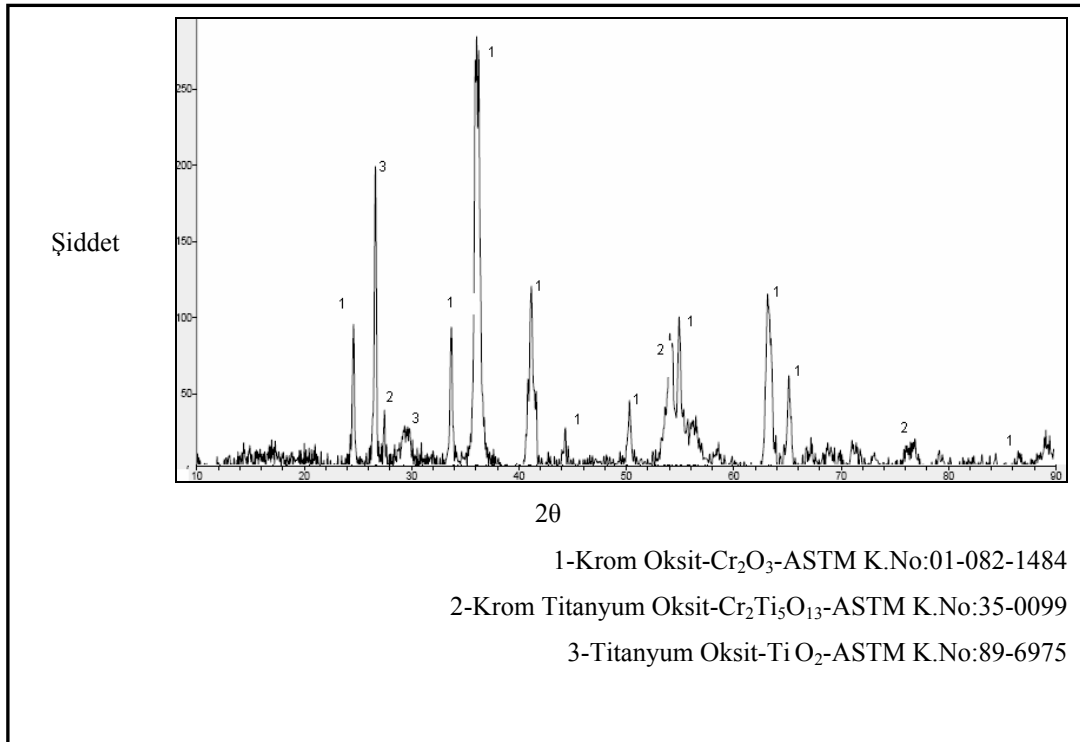
Şekil 6.29. 4 kodlu kaplama bileşiminin XRD paterni



Şekil 6.30. 5 kodlu kaplama bileşiminin XRD paterni



Şekil 6.31. 6 kodlu kaplama bileşiminin XRD paterni



Şekil 6.32. 7 kodlu kaplama bileşiminin XRD paterni

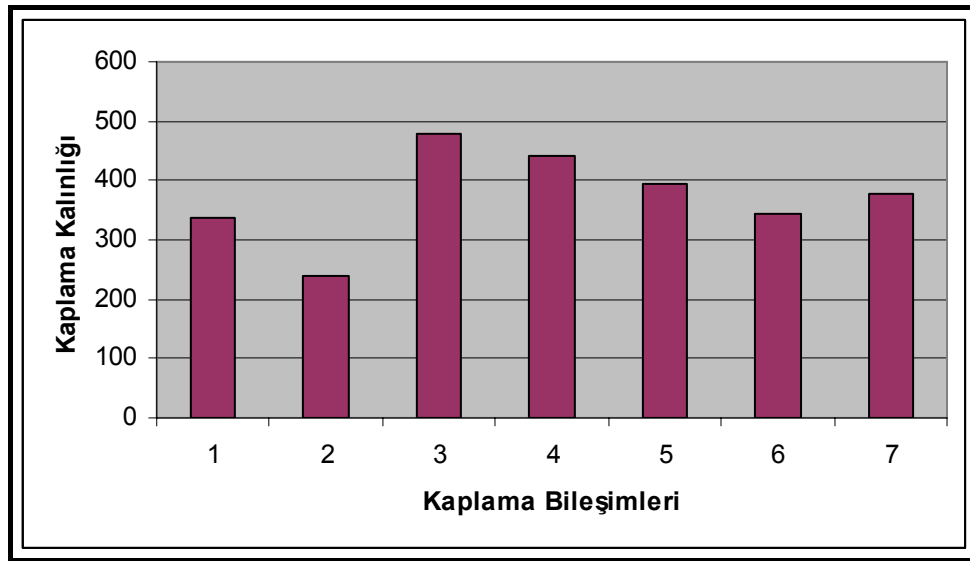
Kaplamaların XRD paternleri Şekil 6.26-32 arasında yer almaktadır. Kaplama tozlarının XRD paternlerini, kaplamaların XRD paternleriyle karşılaştırdığımızda pik şiddetlerinde azalmaların olduğu görülmektedir. Bunun sebeplerinden biri de plazma kaplama işlemi sırasında kaplama tozlarının yüksek sıcaklıklara maruz kalmalarıdır [1-3]. Bu azalma özellikle 3 ve 4 kodlu numune piklerinde daha fazladır. 2 kodlu kaplama toz bileşiminde Cr_2O_3 kaplamanın tek fazlı olduğu ve tamamen Cr_2O_3 fazından ibaret olduğu Şekil 6.27’de görülmektedir. Literatürde de Cr_2O_3 için benzer sonucun olduğu tespit edilmiştir [27]. 3 kodlu kaplama toz bileşiminde korundum (Al_2O_3) ve rutil (TiO_2) fazlarına rastlanmış olup bu toz ile gerçekleştirilen kaplamada alüminyum pentaoksit (Al_2TiO_5), anasovit (Ti_3O_5) ve gama alüminyum oksit (Al_2O_3)_{1,333} fazlarının varlığı Şekil 6.28’de görülmektedir. 4 kodlu kaplama toz bileşiminde korundum (Al_2O_3), rutil (TiO_2), alüminyum titanyum oksit (Al_2TiO_5) ve alüminyum titanyum oksit nitrit fazları yer alırken Şekil 6.29’da ki kaplama XRD paterninde gama alüminyum oksit ve rutil fazlarına rastlanmıştır. Literatürde Al_2O_3 - $\%13\text{TiO}_2$ ve Al_2O_3 - $\%40\text{TiO}_2$ tozları kullanılarak yapılan kaplamaların XRD paternlerinde Al_2TiO_5 fazına rastlanmıştır [26]. 5 kodlu kaplama toz bileşiminde yer alan eskolait (Cr_2O_3) ve titanyum oksit (TiO_2) fazları yerine, kaplamada krom oksit (Cr_2O_3) ve krom titanyum oksit ($\text{Cr}_2\text{Ti}_5\text{O}_{13}$) fazları görülmektedir. 6 ve 7 kodlu kaplama toz bileşimlerinin XRD paternlerinde eskolait (Cr_2O_3) ve titanyum oksit (TiO_2) fazları görülürken Şekil 6.31’de ki 6 kodlu kaplama bileşimi ve Şekil 6.32’de ki 7 kodlu kaplama bileşimlerinin XRD paternlerinde krom oksit (Cr_2O_3), krom titanyum oksit ($\text{Cr}_2\text{Ti}_5\text{O}_{13}$) ve titanyum oksit (TiO_2) fazlarına rastlanmıştır.

6.5. Kaplama Kalınlığı

Kaplama işlemi manuel bir sistem yardımıyla gerçekleştirildiğinden dolayı tüm numuneler için farklı sonuçlar elde edilmiştir. Kalınlık değerleri Tablo 6.2’de verilmiştir. Şekil 6.33’de kaplama bileşimlerinin kalınlık değerleri grafik olarak gösterilmektedir.

Tablo 6.2. Farklı bileşimlerde elde edilen kaplama kalınlık değerleri

Bileşimler	S.T.1	S.T.2	S.T.3	S.T.4	S.T.5	S.T.6	S.T.7
Kalınlık (μm)	336	238	480	442	395	344	376



Şekil 6.33. Kaplama bileşimlerinin kalınlık değerleri (μm)

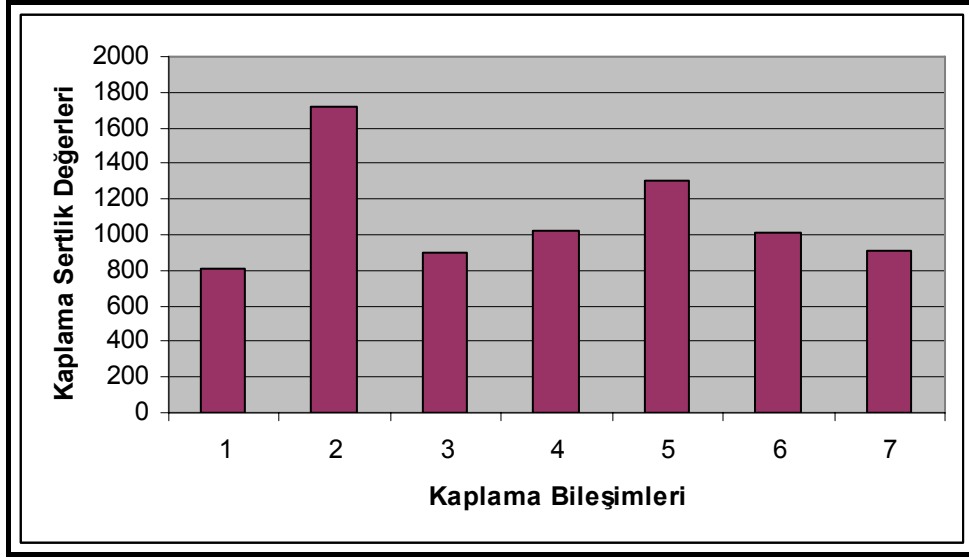
Kaplama kalınlıkları incelendiğinde sonuçların 238-480μm arasında değiştiği görülmektedir. En yüksek kaplama kalınlığı 3 kodlu Al_2O_3 -%40TiO₂ bileşiminde, en düşük kaplama kalınlığı ise 2 kodlu Cr₂O₃ bileşimde tespit edilmiştir.

6.6. Kaplama Sertliği

Kaplama sertlik değerleri Tablo 6.3’de verilmiş olup bu değerler ile elde edilen grafik Şekil 6.34’de görülmektedir.

Tablo 6.3. Kaplama bileşimleri ve sertlik değerleri

Kaplama Bileşimleri	Sertlik(HV)
1	812
2	1724
3	899
4	1028
5	1302
6	1010
7	913



Şekil 6.34. Kaplama bileşimlerinin sertlik değerleri grafiği

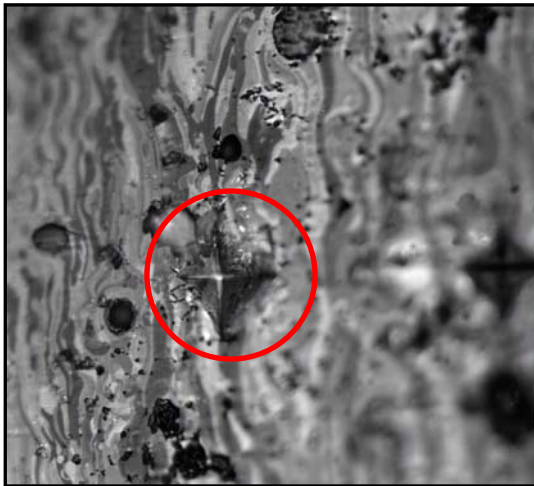
Şekil 6.34’de kaplama bileşiminin sertlik değerleri grafiği incelendiğinde %100 Cr_2O_3 içeren 3 kodlu kaplama bileşiminin sertlik değerinin en yüksek olduğu görülmektedir. Literatürde Cr_2O_3 ile yapılan çalışmada sertlik değerinin çok yüksek olduğu tespit edilmiştir [27]. 5, 6 ve 7 kodlu kaplama bileşimlerinde Cr_2O_3 oranının artmasıyla birlikte sertlik değerlerinin arttığı sonucuna varılmaktadır. %100 TiO_2 içeren 1 kodlu kaplamanın sertlik değerinin düşük olduğu tespit edilmiştir. 3 ve 4 kodlu kaplamalarda TiO_2 miktarı azaldıkça sertlik değerinin yükseldiği görülmektedir. Literatürde artan TiO_2 miktarının mikrosertlik değerini düşürdüğü görülmektedir [26]. Şekil 6.35’de ise plazma püskürtme ile elde edilen seramik kaplamaların mikro sertlik değeri için meydana getirilen izlerin fotoğrafları yer almaktadır.



a)



b)



c)



d)



e)



f)



g)

Şekil 6.35 Kaplama bileşimlerinin a)1, b)2, c)3, d)4, e)5, f)6, g)7 kodlu mikrosertlik iz görüntüleri

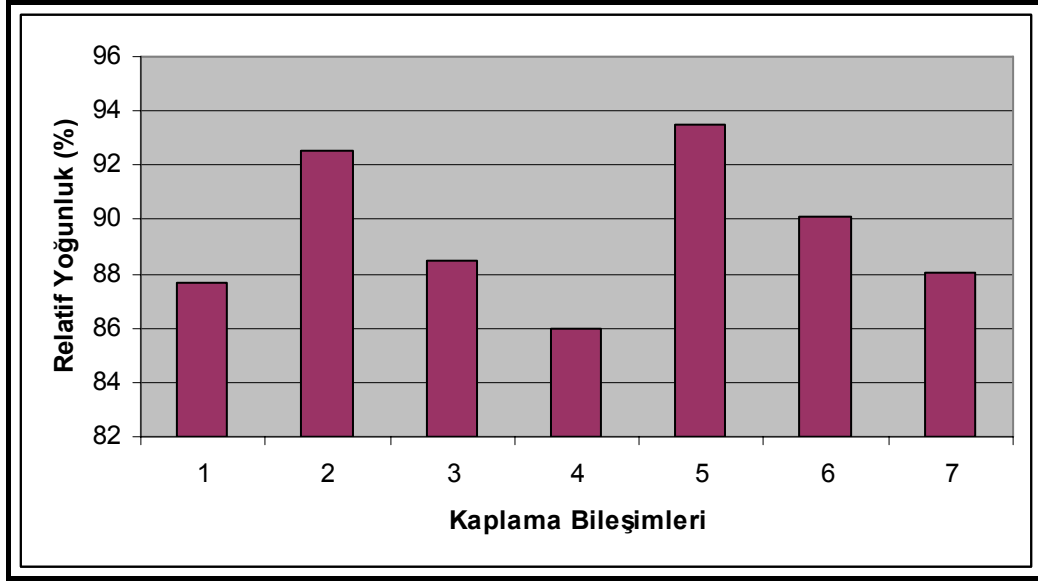
Şekil 6.35’de görüldüğü üzere en küçük mikrosertlik izleri Cr_2O_3 miktarının yüksek olduğu 2 ve 5 kodlu bileşimlerde, en büyük sertlik izi ise 1 kodlu kaplamada elde edilmiştir. Görüntüler sertlik değerleri ile paralellik göstermektedir.

6.7. Yoğunluk

Kaplama bileşimlerinin denklem (5.1) ve (5.2) yardımı ile hesaplanan teorik, bulk ve relatif yoğunluk değerleri Tablo 6.4’de verilmiştir. Şekil 6.36’da kaplama bileşimlerinin relatif yoğunluk değişim grafiği yer almaktadır.

Tablo 6.4. Kaplama bileşimlerinin teorik, bulk ve relatif yoğunluk değerleri

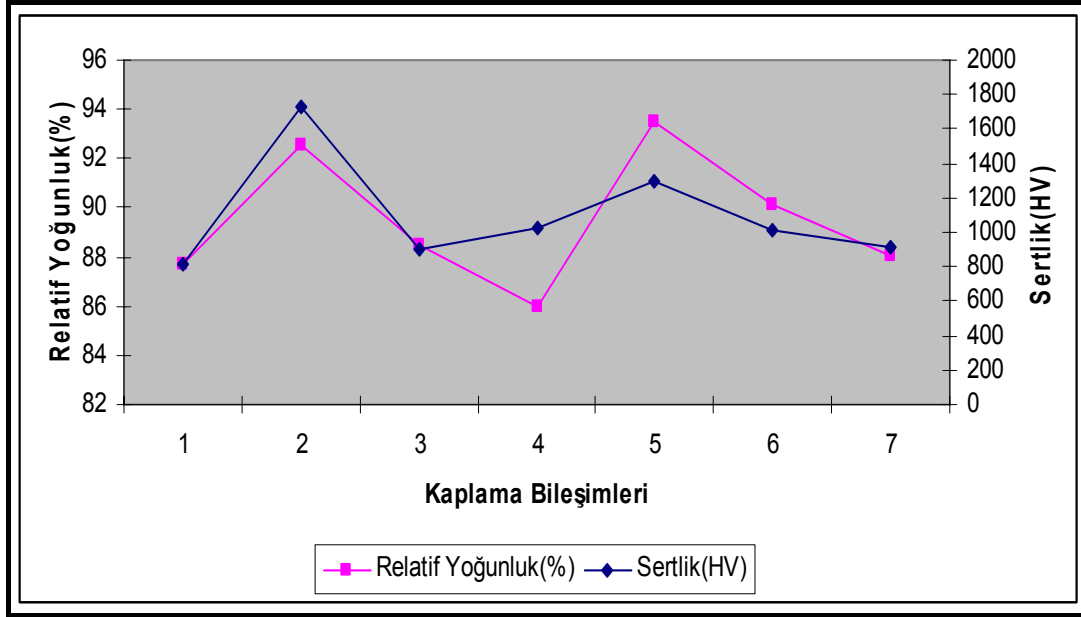
Kaplama Bileşimleri	Yoğunluklar (gr/cm^3)		
	Teorik Yoğunluk	Bulk Yoğunluk	Relatif Yoğunluk (%)
1	4,23	3,71	87,70
2	5,21	4,92	92,51
3	4,07	3,60	88,45
4	4,00	3,44	86,00
5	4,92	4,86	93,49
6	4,66	4,20	90,12
7	4,43	3,90	88,03



Şekil 6.36. Kaplama bileşimlerinin relatif yoğunluk değişim grafiği

Şekil 6.36'da yer alan kaplama bileşimlerinin relatif yoğunluk değişim grafiğinde ağ.%100TiO₂'ye ait olan 1 kodlu kaplama bileşiminin relatif yoğunluk değerinin düşük, ağ.%100Cr₂O₃'e ait olan 2 kodlu kaplama bileşiminin ise relatif yoğunluk değerinin yüksek olduğu görülmektedir. 5, 6 ve 7 kodlu kaplama bileşimlerinde ağ.%TiO₂ miktarının azalması ve ağ.%Cr₂O₃ miktarının artması ile birlikte relatif yoğunluk değerlerindeki düşüş dikkat çekmektedir. 3 ve 4 kodlu kaplama bileşimlerinin relatif yoğunluk değerleri ağ.%Al₂O₃ miktarının artması ve ağ.%TiO₂ miktarının azalması ile birlikte azalmaktadır.

Şekil 6.37'de kaplama bileşimlerine ait sertlik değerleri ile relatif yoğunluk değerleri aynı grafikte verilmiştir. Bu grafikte sertlik değerleri arttıkça, relatif yoğunluk değerlerinin de arttığı görülmektedir. Ancak 4 kodlu kaplama bileşiminde sertlik değerinin arttığı, relatif yoğunluk değerinin ise azaldığı görülmektedir.



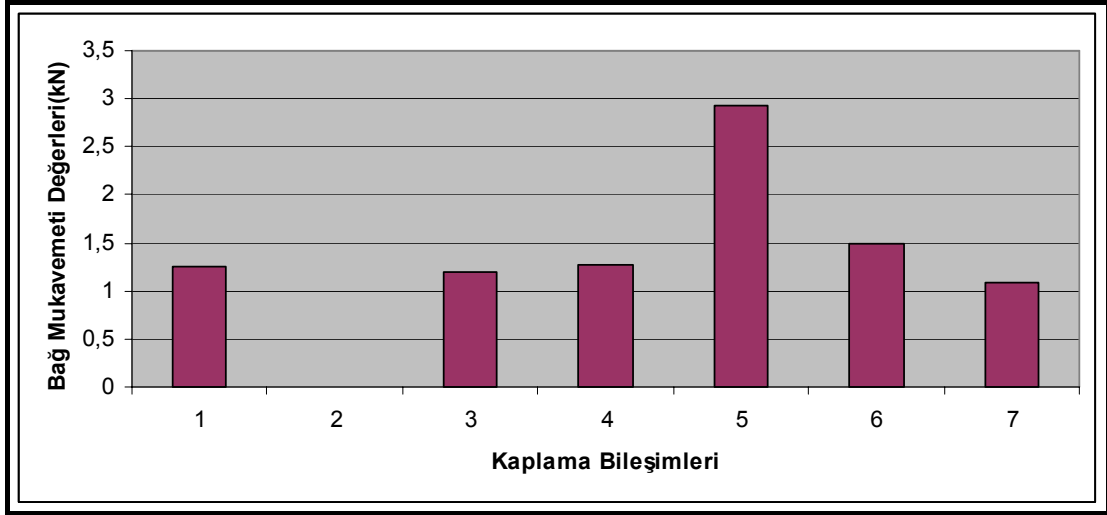
Şekil 6.37. Kaplama bileşimlerine ait sertlik değerleri ile relatif yoğunluk değerlerinin aynı grafikte gösterilişi

6.8. Bağ Mukavemeti

Tablo 6.5’de kaplama bileşimlerine uygulanan bağ mukavemeti deney sonuçları yer almaktadır. 2 kodlu kaplama bileşimine ait olan ölçümler sırasında deney koşullarındaki olumsuzluktan dolayı kaplama altlıktan ayrılmış ve ölçüm gerçekleştirilememiştir. Şekil 6.38’de kaplama bileşimlerine bağlı olarak bağ mukavemetinin değişim grafiği verilmiştir. En yüksek bağ mukavemeti değeri 5 kodlu, en düşük bağ mukavemeti değeri ise 7 kodlu bileşimde elde edilmiştir.

Tablo 6.5. Kaplama bileşimlerine ait bağ mukavemeti değerleri

Kaplama Bileşimleri	Bağ Mukavemeti Değerleri (kN)
1	1,247
2	-
3	1,200
4	1,278
5	2,920
6	1,500
7	1,089

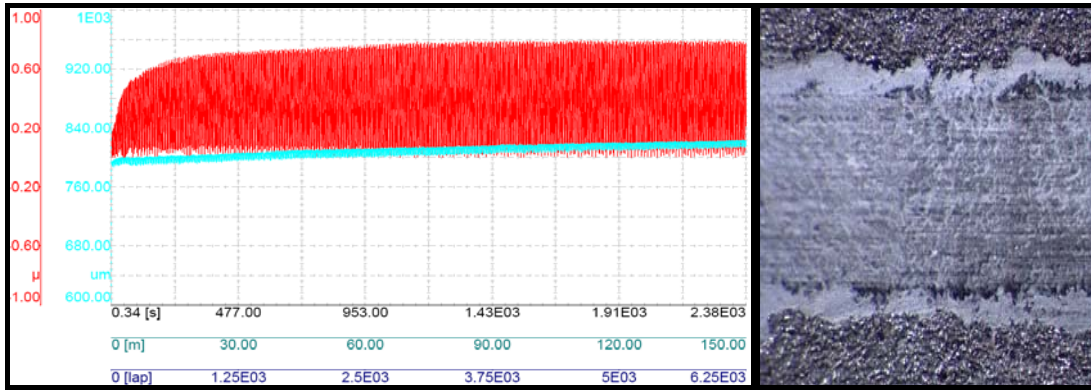


Şekil 6.38. Kaplama bileşimlerinin bağ mukavemeti değer grafiği

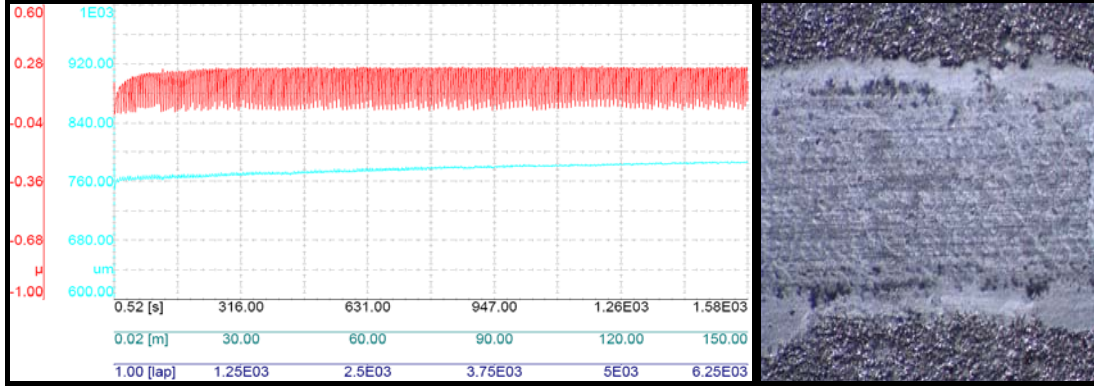
Deney sonuçlarından 5, 6 ve 7 kodlu kaplama bileşimlerinde ağ.%Cr₂O₃ miktarının artması ile bağ mukavemeti değerlerinde artış gözlenmektedir. 3 ve 4 kodlu kaplama bileşimlerinde artan ağ.%Al₂O₃ oranıyla birlikte bağ mukavemeti değerlerinde de az da olsa bir artışın olduğu görülmektedir.

6.9. Kaplamaların Aşınma Özellikleri

Plazma püskürtme kaplamaların lineer aşınma deneylerinden elde edilen sürtünme katsayısı değerlerinin, kayma süresi ve kayma mesafesi ile olan ilişkisi Şekil 6.39-45 arasında verilmiştir. Şekillerde kırmızı renk sürtünme katsayısını, yeşil renk ise derinliği ifade etmektedir.

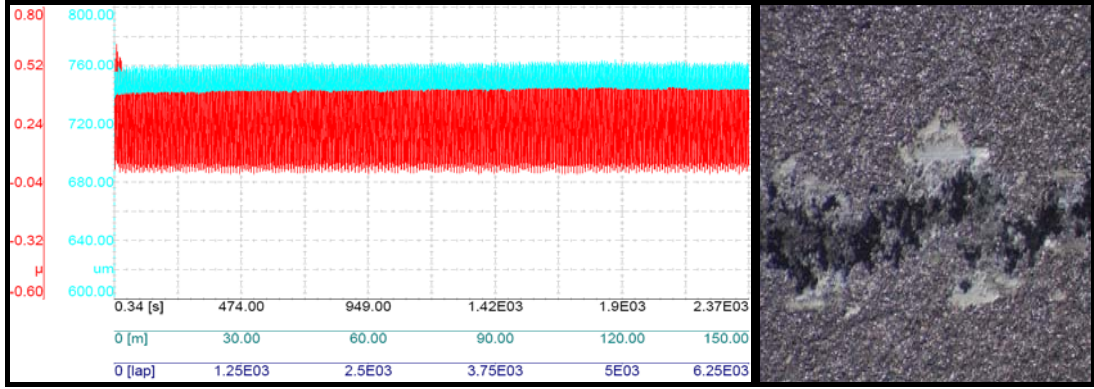


a)

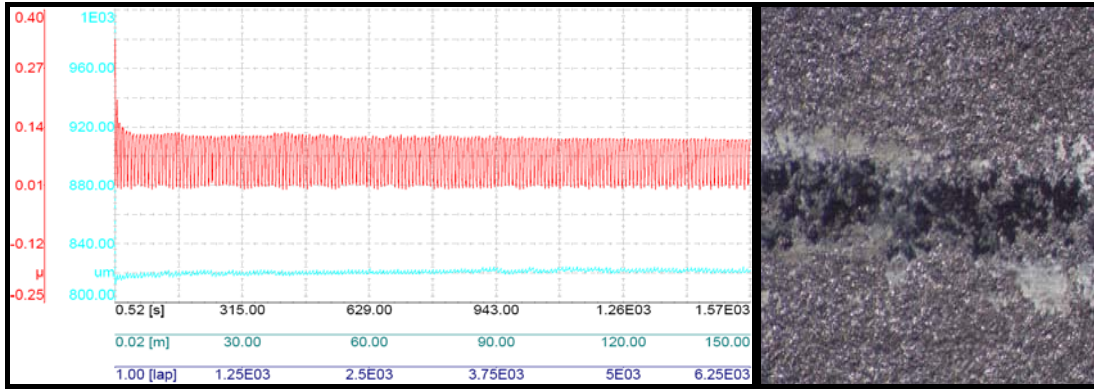


b)

Şekil 6.39. Kaplamaların sürtünme katsayısı – kayma süresi değişim grafiği ve stereo mikroskop görüntüleri a) 1A kodlu kaplama, b) 1B kodlu kaplama

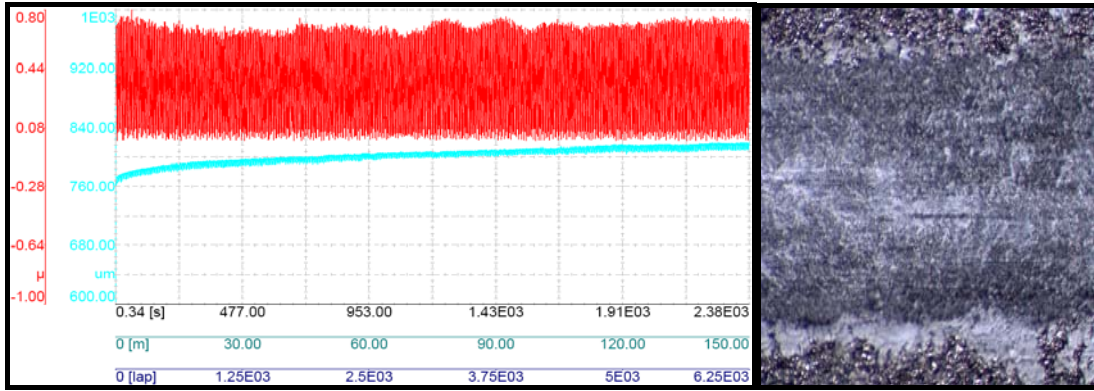


a)

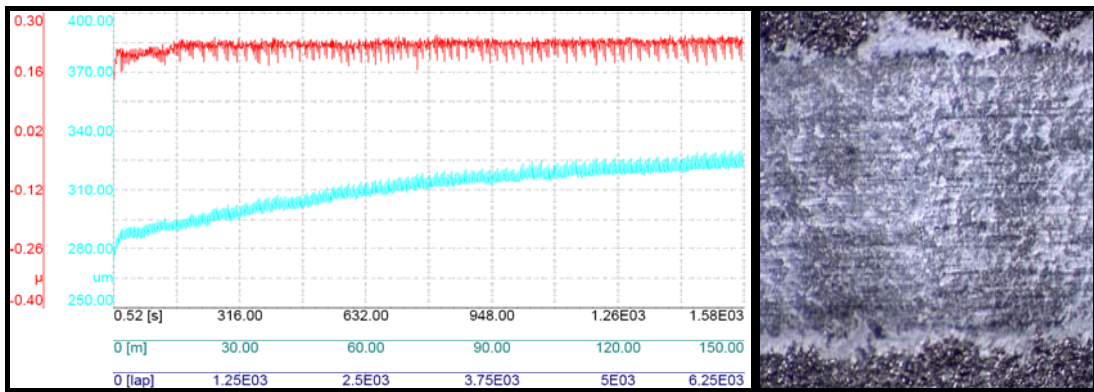


b)

Şekil 6.40. Kaplamaların sürtünme katsayısı – kayma süresi değişim grafiği ve stereo mikroskop görüntüleri a) 2A kodlu kaplama, b) 2B kodlu kaplama

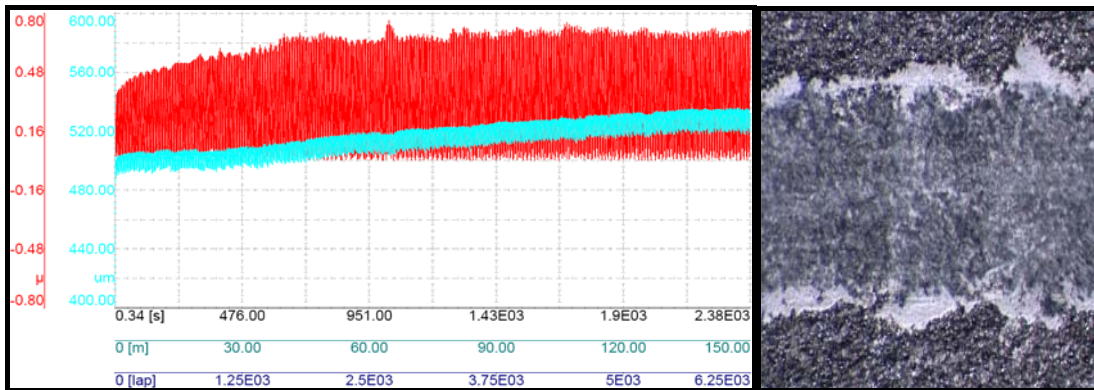


a)

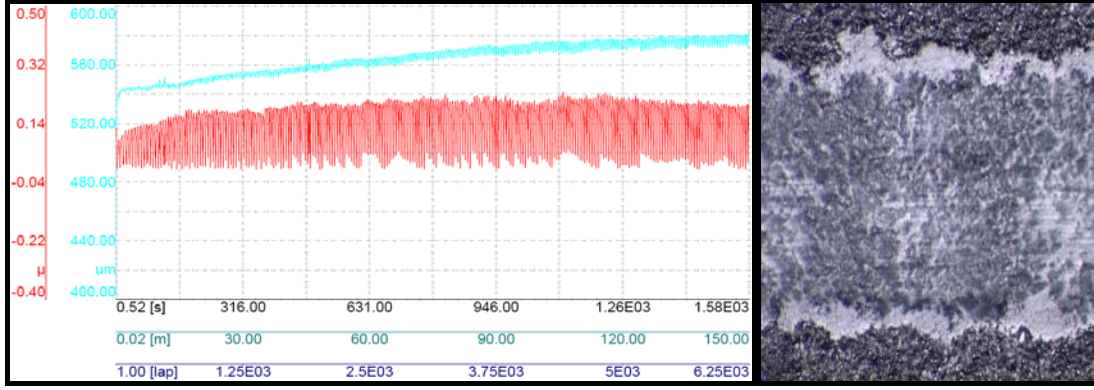


b)

Şekil 6.41. Kaplamaların sürtünme katsayısı – kayma süresi değişim grafiği ve stereo mikroskop görüntüleri a) 3A kodlu kaplama, b) 3B kodlu kaplama

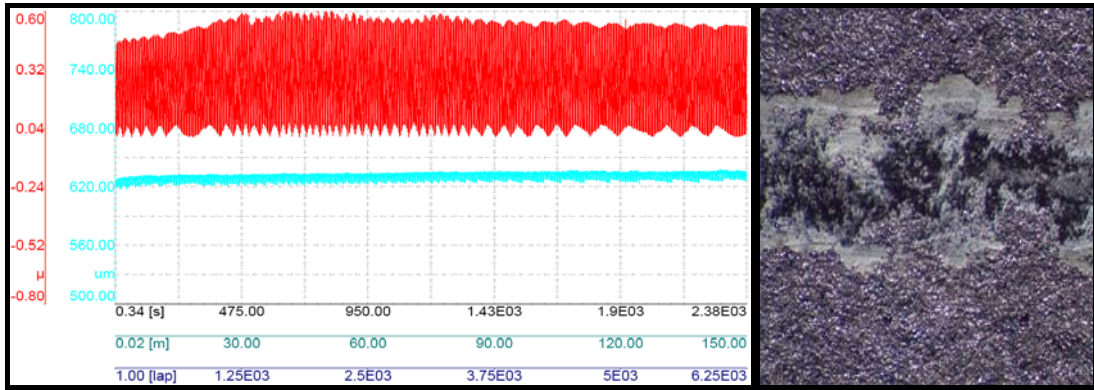


a)

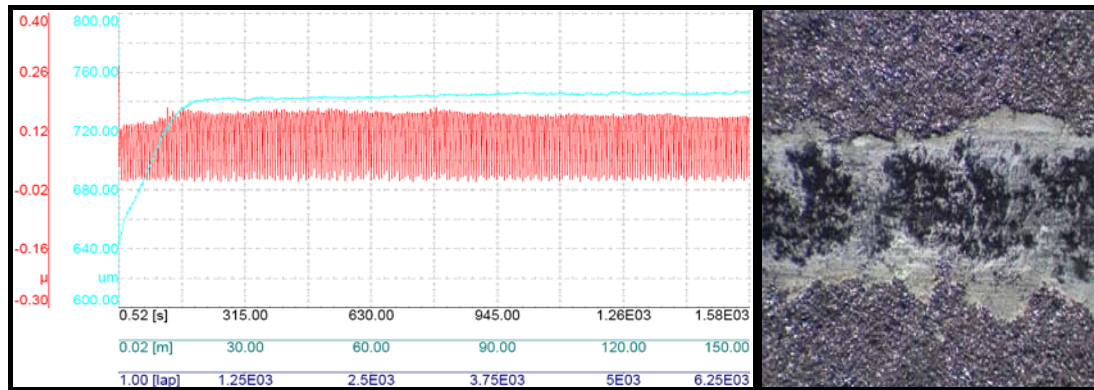


b)

Şekil 6.42. Kaplamaların sürtünme katsayısı – kayma süresi değişim grafiği ve stereo mikroskop görüntüleri a) 4A kodlu kaplama, b) 4B kodlu kaplama

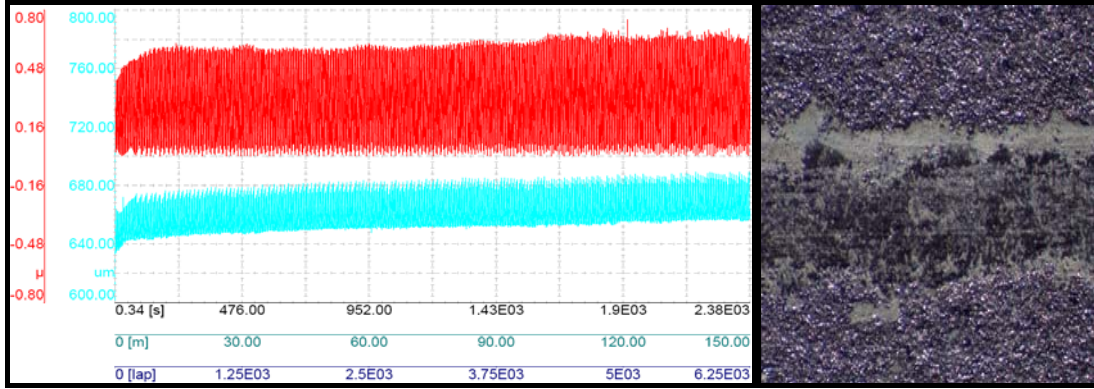


a)

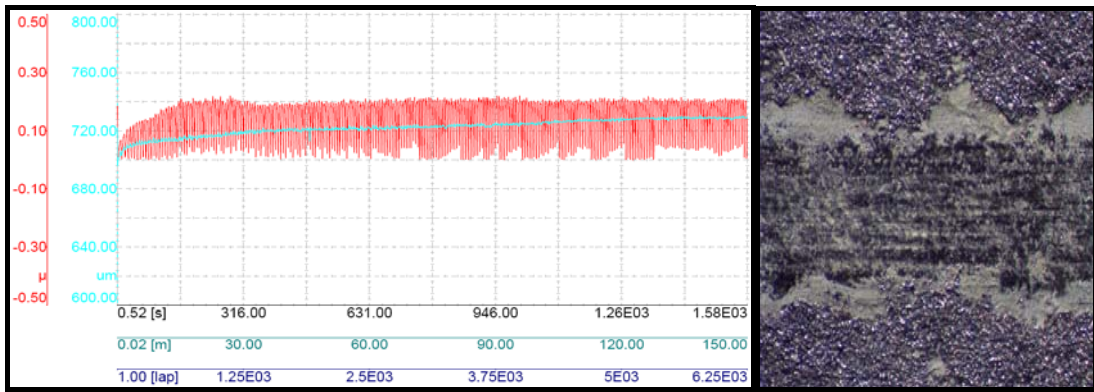


b)

Şekil 6.43. Kaplamaların sürtünme katsayısı – kayma süresi değişim grafiği ve stereo mikroskop görüntüleri a) 5A kodlu kaplama, b) 5B kodlu kaplama

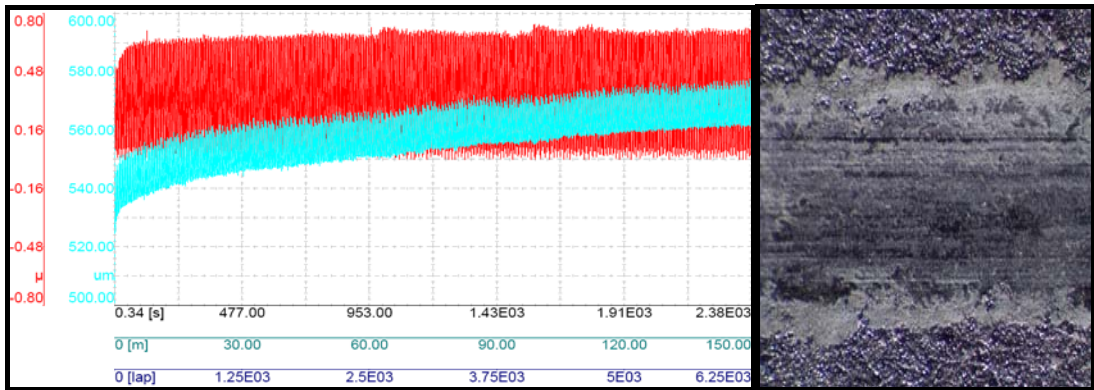


a)

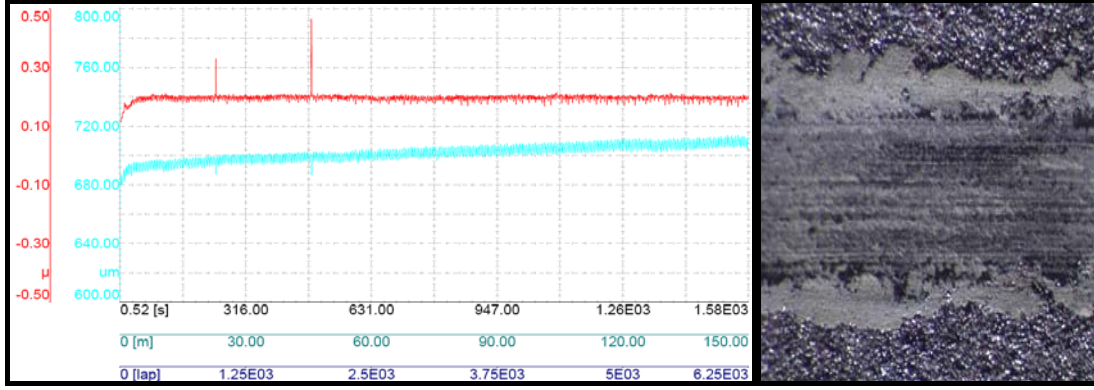


b)

Şekil 6.44. Kaplamaların sürtünme katsayısı – kayma süresi değişim grafiği ve stereo mikroskop görüntüleri a) 6A kodlu kaplama, b) 6B kodlu kaplama



a)



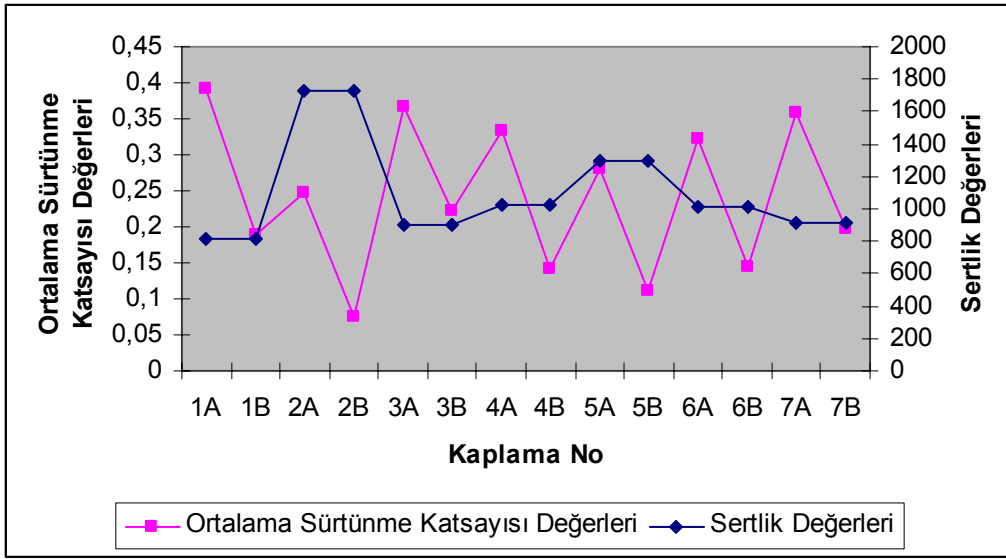
b)

Şekil 6.45. Kaplamaların sürtünme katsayısı – kayma süresi değişim grafiği ve stereo mikroskop görüntüleri a) 7A kodlu kaplama, b) 7B kodlu kaplama

Aşınma parametreleri 150 m. yol, 5 N yük ve 0,10 ve 0,15 m/sn aşınma hızları olarak belirlenmiş olup; mevcut 7 bileşim belirtilen aşınma parametrelerine tabii tutulmuştur. 2 farklı aşınma hızında her bir bileşim A ve B şeklinde (örneğin 1 kodlu bileşim 0.1 m/sn de 1A, 0.15 m/sn de 1B olarak) kodlanmıştır. 2, 5, 6 ve 7 kodlu aşınma numunelerinde Cr_2O_3 miktarı arttıkça sürtünme katsayısının düştüğü tespit edilmiştir. Aşınma hızının artışına bağlı olarak ise sürtünme katsayısı değerlerinde düşüş kaydedilmiştir. Sürtünme katsayısının düşmesi mevcut bileşimlerin aşınmaya dirençli olduğunun göstergesi olarak belirtilebilir.

1, 3 ve 4 kodlu kaplamalarda ise; TiO_2 miktarı arttıkça sürtünme katsayısı değerlerinde artış gözlenmiştir. Sürtünme katsayılarındaki artış malzemenin aşınmaya karşı gösterdiği direncinin düşük olduğunu göstermektedir.

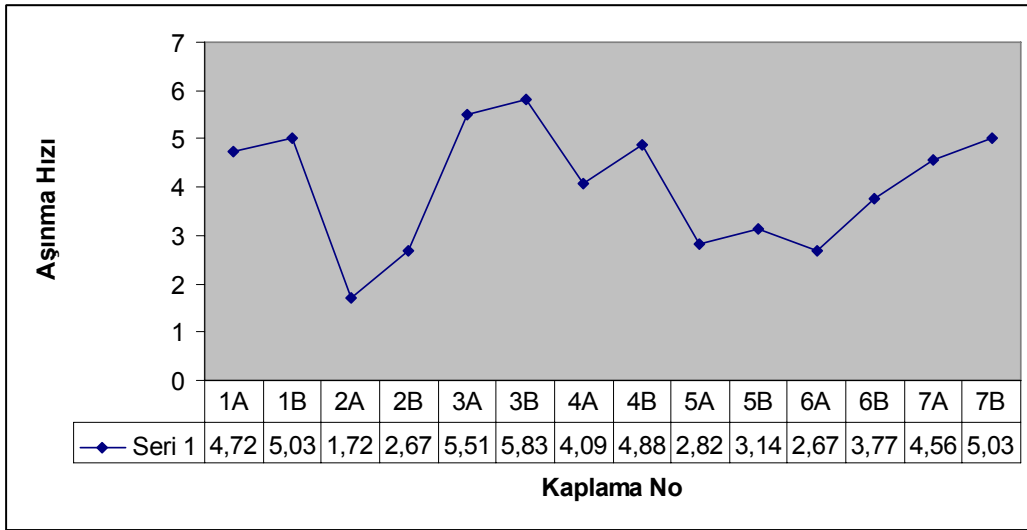
Genel olarak malzemelerdeki aşınma, oluşan izlerin genişliği ve derinliği ile orantılı olup; aşınma izlerinin genişliği açısından stereo mikroskop görüntülerinden aşınma hızı arttıkça iz genişliğinin arttığı söylenebilir. 1 ve 2 kodlu numunelerin görüntüleri irdelendiğinde; artan aşınma dayanımına paralel olarak aşınma hasar izi genişliğinin de azaldığı görülmektedir.



Şekil 6.46. Ortalama sürtünme katsayısı (μ_k) - sertlik değerleri (HV) değişim grafiği

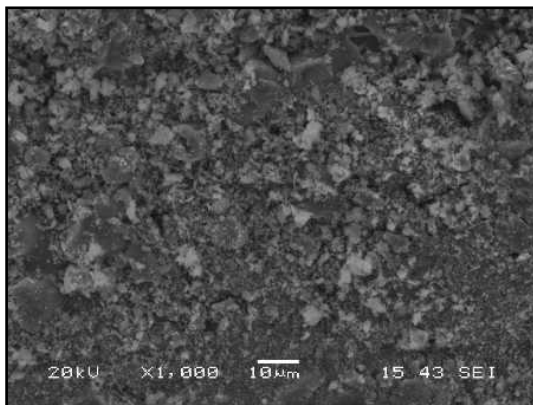
Plazma püskürtme yöntemi ile kaplanmış seramik kaplamaların aşınma direnci ve sertliği arasındaki ilişki; sertlik ne kadar yüksek ise aşınma direnci de o kadar yüksek olur şeklinde literatürde belirtilmektedir [27]. Sürtünme katsayısı düşük olan kaplamaların aşınma dirençleri daha yüksektir. Mevcut çalışmada, %25Cr₂O₃-%75TiO₂, %50Cr₂O₃-%50TiO₂, %75Cr₂O₃-%25TiO₂ ve %100 Cr₂O₃ bileşimlerinde ortalama sertlik değerleri sırasıyla 913, 1010, 1302 ve 1724 HV olup aşınma sonuçları ile paralellik göstermiştir. TiO₂ miktarı arttıkça kaplamanın mikrosertlik değeri düşmekte dolayısı ile kaplamanın aşınma direnci de düşmektedir.

Şekil 6.47'de kaplamaların bileşimine bağlı olarak aşınma hızı grafiği yer almaktadır. Literatürde plazma püskürtme kaplamalarda uygulanan yükün artmasıyla birlikte aşınma hızının arttığı ifade edilmektedir [28,29]. Mevcut çalışmada sürtünme katsayısının en düşük olduğu %100 Cr₂O₃ bileşiminin aşınma hız değeri de grafikten görüldüğü üzere en düşük değeri göstermiştir.

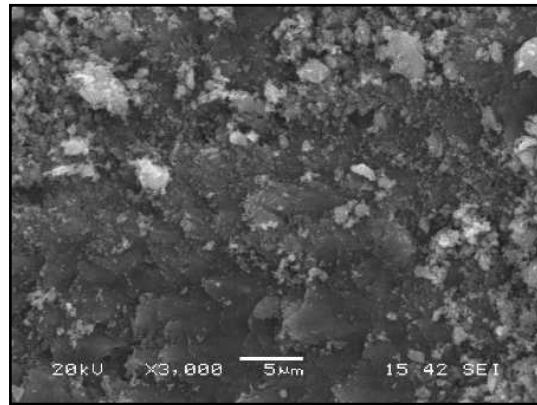


Şekil 6.47. Kaplama no – aşınma hızı ($10^{-3} \text{ mm}^3/\text{m}$) grafiği

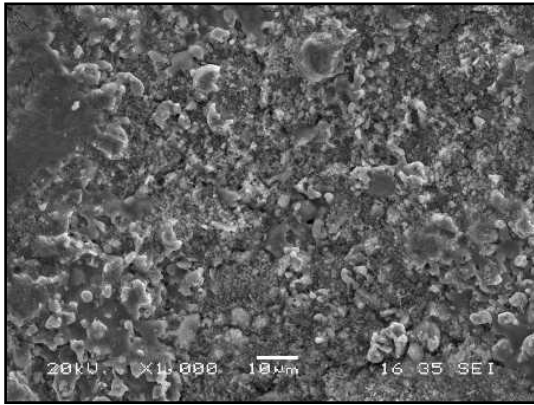
Şekil 6.48'de sabit 150m yol, 5N yük ve 2 farklı aşınma hızı 0.1 ve 0.15m/sn aşınma parametreleri uygulanarak aşınma testine tabi tutulan numunelere ait SEM görüntüleri verilmiştir. SEM görüntüleri incelendiğinde genel olarak plastik deformasyonun olduğu, yüzeyden parçaların koptuğu, yivlerin olduğu belirtilebilir. Abrasif aşınma sırasında hasar izleri üzerinde gevrek kırılmayı belirten küçük çatlaklar da oluşmaktadır. 5A ve 5B kodlu numunelere ait SEM görüntülerinde oluşan çatlaklar görülmektedir (Şekil 6.48 ı) ve i)). Şekil 6.48. e)'de yüzeyden kopan parçanın oluşturduğu boşluk görülebilmektedir.



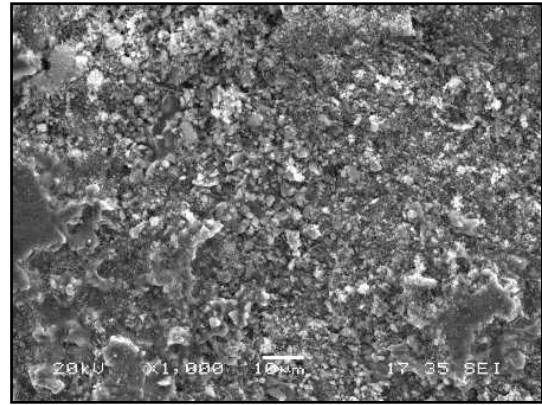
a)



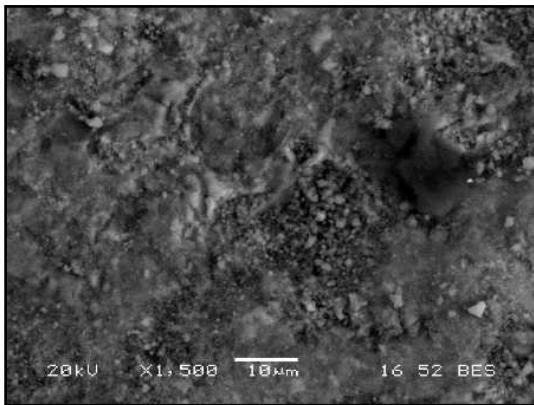
b)



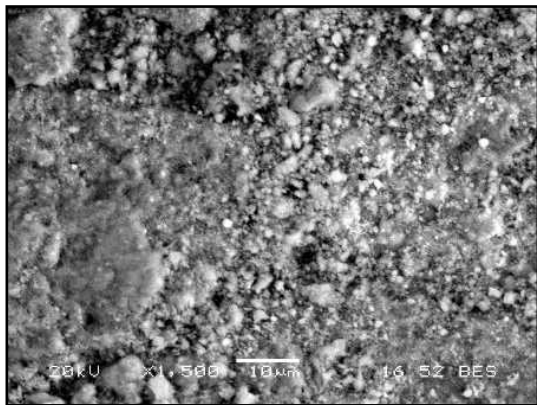
c)



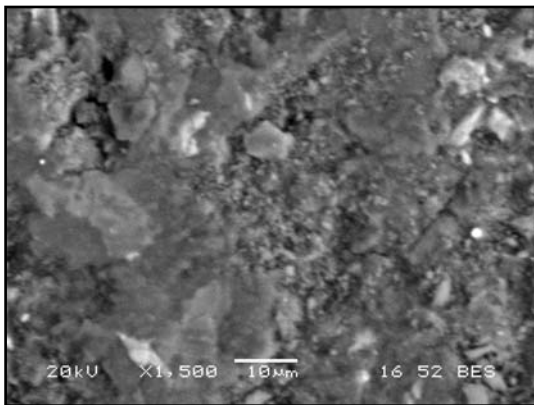
d)



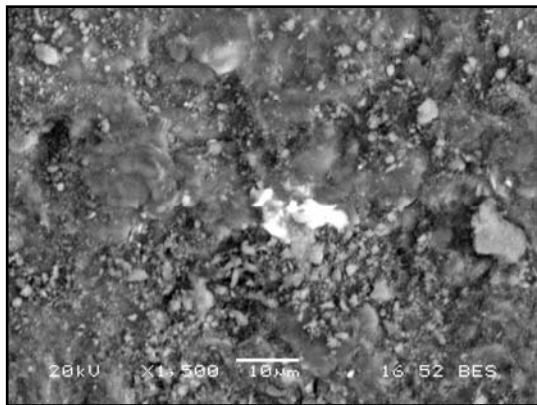
e)



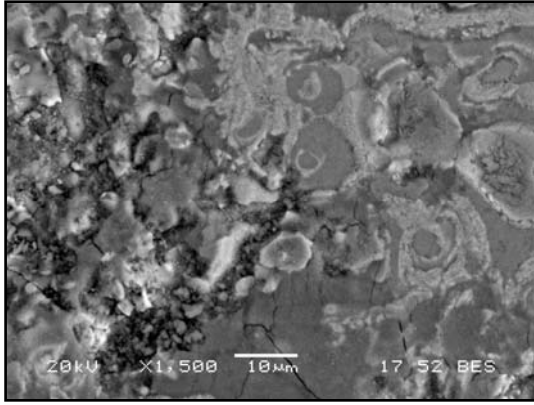
f)



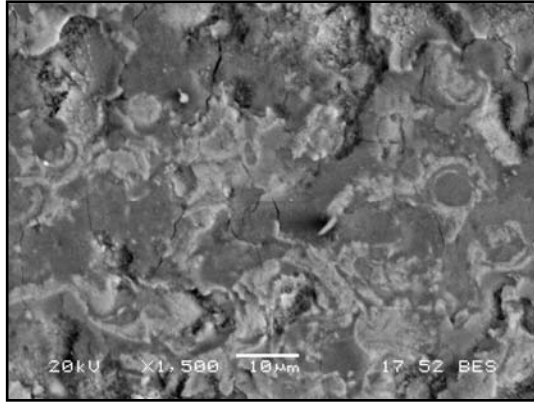
g)



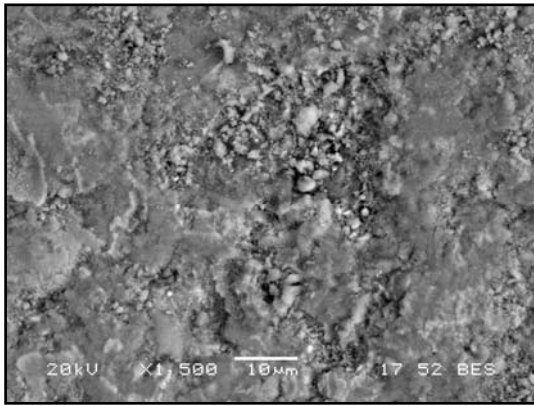
h)



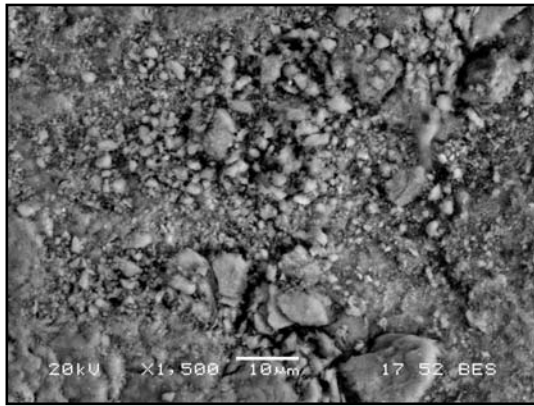
i)



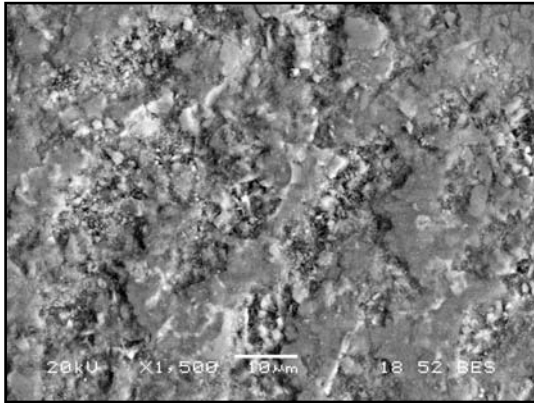
i)



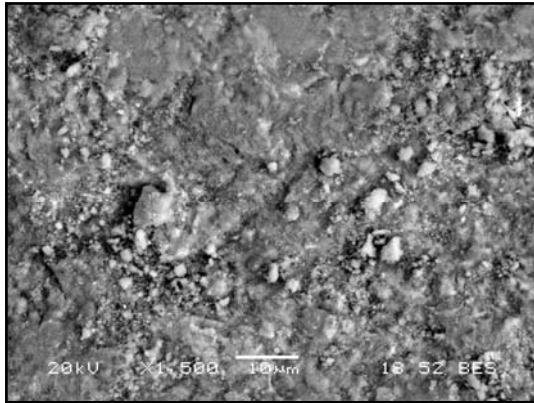
j)



k)



l)



m)

Şekil 6.48. a)1A, b)1B, c)2A, d)2B, e)3A, f)3B, g)4A, h)4B, i)5A, i)5B, j)6A, k)6B, l)7A, m)7B kodlu kaplamaların aşınma sonrası SEM görüntüleri

BÖLÜM 7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

7.1. Sonuçlar

Yedi farklı kaplama tozu kullanılarak yapılan bu çalışmada tekstil endüstrisinde dokuma tezgahlarında kullanılan mekik parçasının kullanım ömrünün arttırılması hedeflenmiştir. Bu amaçla yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar şöyledir;

- Mevcut çalışmada Metco 102, Metco 106, Metco 131 VF ve Metco 130 SF kaplama tozları ile Metco 102(TiO_2)- Metco 106(Cr_2O_3)- kaplama tozlarının ağırlıkça %75 Cr_2O_3 -%25 TiO_2 , %50 Cr_2O_3 -%50 TiO_2 ve %25 Cr_2O_3 -%75 TiO_2 oranlarında bilyeli değirmende yaş olarak karıştırılması ile 3 farklı kaplama tozu daha üretilmiştir.
- Yapılan SEM analizi ile; %100 TiO_2 tozlarının keskin köşeli karakterde, %100 Cr_2O_3 tozlarının ağırlıklı olarak küresel morfolojide, Al_2O_3 -%40 TiO_2 ve Al_2O_3 -%13 TiO_2 tozlarının köşeli karakterde ve karmaşık şekillerde olduğu tespit edilmiştir. %75 Cr_2O_3 -%25 TiO_2 , %50 Cr_2O_3 -%50 TiO_2 ve %25 Cr_2O_3 -%75 TiO_2 bileşimlerindeki tozların SEM görüntülerinde ise küresel morfolojideki Cr_2O_3 tozunun miktarına bağlı olarak karışımın küreselden karmaşık şekilli fakat öğütme işleminin etkisi ile daha küçük tane boyutlu tozlardan oluştuğu belirlenmiştir.
- Kaplama tozlarının XRD analizinde TiO_2 , Cr_2O_3 ve Al_2O_3 'in çeşitli bileşiklerine ve farklı formlardaki yapılarına rastlanmıştır.
- Kaplamaların yüzey pürüzlülüğü incelemelerinde TiO_2 miktarının artıp, Cr_2O_3 miktarının azaldığı durumlarda yüzey pürüzlülük değerlerinin arttığı, Al_2O_3

miktarının artıp, TiO_2 miktarının azaldığı durumlarda yüzey pürüzlülük değerlerinde artış olduğu görülmüştür.

- Kaplamaların optik mikroyapı görüntülerinde siyah olarak gözüken noktalar porozite olarak belirlenmiş ve yoğunluk testi ile yapıda %6.51-14 oranında porozitenin olduğu tespit edilmiştir.
- Kaplamaların SEM görüntüleri incelendiğinde; plazma püskürtme kaplamaların tipik bir özelliği olan tabakalı lameller yapı göze çarpmaktadır. Kaplamalarda yer yer poroziteye ve ergimemiş partiküllere rastlanmıştır. EDS analizlerinden kaplamalarda koyu renkli bölgelerin alümina açık renkli bölgelerin titanya olduğu görülmektedir. Krom içeren bölgeler açık renk olarak görülmektedir.
- Kaplama sertlikleri incelendiğinde; Cr_2O_3 oranının artması ile sertlik değerlerinin arttığı görülmektedir. Sertlik değeri ayrıca TiO_2 miktarı azaldıkça da artmıştır.
- En düşük yoğunluk değerine Al_2O_3 -%13 TiO_2 bileşiminde, en yüksek yoğunluk değerine ise %75 Cr_2O_3 -%25 TiO_2 bileşiminde ulaşılmıştır. Genel olarak Cr_2O_3 ile Al_2O_3 miktarlarının artması sertlik değerini artan yönde etkilemiştir.
- Bağ mukavemeti değerleri incelendiğinde; Cr_2O_3 miktarının artması ile bağ mukavemeti değerlerinde artış gözlenmiştir. Al_2O_3 miktarının artmasıyla da bağ mukavemeti değerlerinde az da olsa bir artış olduğu görülmüştür.
- Aşınma deneyleri karşı yüklemeli (reciprocating) aşınma test cihazında 6mm çapında Al_2O_3 bilye kullanılarak 5 N yük, 150 m yol ve 0.1 ve 0.15m/s kayma mesafelerinde gerçekleştirilmiştir. Kaplamaların aşınma davranışları incelendiğinde; artan TiO_2 miktarının sürtünme katsayısı değerlerini arttırdığı dolayısıyla artan TiO_2 'nin malzemenin sürtünmeye karşı gösterdiği aşınma direncini düşürdüğü; Cr_2O_3 miktarı arttıkça ise aşınma hızına bağlı olarak sürtünme katsayısı değerlerinin düştüğü dolayısı ile aşınma direncinin arttığı tespit edilmiştir.

7.2. Öneriler

- $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ tozları bilyeli değirmende karıştırılarak farklı bileşimde kaplama tozları rahatlıkla elde edilebilir. Tozların değirmende karıştırma süreleri artırılarak elde edilen farklı morfolojideki tozların kaplamaların özelliklerine olan etkisi incelenebilir.
- Üretilen kaplamaların yoğunluk ölçümleri arşimed prensibinin yanı sıra civa porozimetresi yardımıyla da ölçülebilir.
- Aşınma deney parametreleri olan yol, yük ve hız değişkenleri farklılaştırılarak elde edilen sonuçlar incelenebilir.
- Atmosferik plazma püskürtme kaplama teknolojisi kullanılarak gerçekleştirilen mevcut çalışma; diğer termal püskürtme yöntemleri ile de üretilip karşılaştırma yapılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] PAWLOWSKI, L., "The Science and Engineering of Thermal Spray Coating", John Wiley & Sons, New York, 1995.
- [2] HEIMANN, R. B., "Plasma-Spray Coating", Weinheim, 1996.
- [3] MATEJKA, D., BENKO, B., "Plasma Spraying of Metallic and Ceramic Materials", John Wiley & Sons, New York, 1989.
- [4] ÜSTEL, F., TOPLAN, N., ve YILMAZ, F., "Termal Sprey Kaplama Teknikleri", IV. Seramik Kongresi, pp.697-703, Eskişehir, Eylül 1998.
- [5] GEÇKİNLİ, E.A., İleri Teknoloji Malzemeleri, İ.T.Ü., 1992.
- [6] www.gordonengland.co.uk/wear
- [7] www.wear-management.ch
- [8] www.spray-itsa.com
- [9] Askaynak, "Termik Püskürtme Notları", İstanbul, 1991.
- [10] www.plasmathermalcoatings.com
- [11] www.sulzermetco.com
- [12] www.faculty.rsu.edu
- [13] www.gordonengland.co.uk
- [14] www.plasmacoat.co.uk
- [15] www.terolabservices.com
- [16] www.globalspec.com
- [17] www.aludra.nl/Eng/Coatings
- [18] www.newagestudwelding.com

- [19] www.biltek.tubitak.gov.tr
- [20] KARA, M., “Alüminyum Oksitin Sürtünme ve Aşınma Davranışları”, Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Eylül 1998.
- [21] SOYKAN, Ş., “Seramik ve Metal Esaslı Plazma Sprey Kaplamaların Aşınma Davranışları”, Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, 1996.
- [22] www.mahr.com
- [23] www.makro-teknik.com
- [24] Publ. By Metal Powder Industries Federation., “Standart Test Methods for Metal Powders and Powder Metallurgy Products”, NJ, 1985.
- [25] ASTM G133-95; Standart test method for linearly reciprocating ball-on-flat sliding wear.
- [26] YILMAZ, R., KURT, A.O., DEMİR, A., TATLI, Z., “Effects of TiO₂ on The Mechanical Properties of The Al₂O₃-TiO₂ Plasma Sprayed Coating”, Journal of the European Ceramic Society, Vol.27, pp:1319-1323, 2007.
- [27] AKIN, U., MİNDİVAN, H., SAMUR. R., KAYALI, S., ÇİMENOĞLU, H., “Alüminyum Üzerine Uygulanan Seramik Kaplamaların Aşınma Davranışlarının İncelenmesi”, 10. Denizli Malzeme Sempozyumu ve Sergisi, Denizli, Nisan 2004.
- [28] HUANG, C., CHUANXIAN, D., PINGYU, Z., PEIQING, L., SOO, W. L., “Wear of Plasma-Sprayed Nanostructured Zirconia Coatings Against Stainless Steel Under Distilled-Water Conditions”, Surface and Coatings Technology, Vol.173, pp:144-149, 2003.
- [29] SALMAN, S., “Plazma ve Alev Püskürtme Tekniğiyle Al₂O₃-%13TiO₂ ve Cr₂O₃-%5SiO₂-%3TiO₂ Seramik Kaplanan Malzemelerin Özellikleri”, Yıldız Teknik Üniversitesi, Metalurji Mühendisliği Anabilim Dalı, Ekim 1995.

ÖZGEÇMİŞ

Yeşim Sert, 03.04.1979 da Bursa'da doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Bursa'da tamamladı. 1996 yılında Bursa Cumhuriyet Lisesinden mezun oldu. 1997 yılında başladığı Afyon Kocatepe Üniversitesi Seramik Mühendisliği bölümünü 2001 yılında derece ile bitirdi. Şu an Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim dalında yüksek lisans öğrencisidir. Aynı zamanda metal sektöründe faaliyet gösteren aile firması içerisinde üretim mühendisi olarak görev yapmaktadır.