

T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**PLAZMA PÜSKÜRTME YÖNTEMİ KULLANARAK YÜZEYİ Al_2O_3 -
 TiO_2 TOZLARIYLA KAPLANAN DÜŞÜK KARBONLU ÇELİĞİN
MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Emine ERSÖZ

091122108

Anabilim Dalı: Metalurji Eğitimi

Programı: Malzeme

Tez Danışmanı: Yrd.Doç.Dr.Soner BUYTOZ

ELAZIĞ

Kasım-2011

T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**PLAZMA PÜSKÜRTME YÖNTEMİ KULLANARAK YÜZEYİ Al_2O_3 - TiO_2 TOZLARIYLA KAPLANAN DÜŞÜK KARBONLU ÇELİĞİN
MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Emine ERSÖZ

091122108

Anabilim Dalı: Metalurji Eğitimi

Programı: Malzeme

Tez Danışmanı: Yrd.Doç.Dr.Soner BUYTOZ

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 30 Kasım 2011

ELAZIĞ

Kasım-2011

T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**PLAZMA PÜSKÜRTME YÖNTEMİ KULLANARAK YÜZEYİ Al_2O_3 - TiO_2 TOZLARIYLA KAPLANAN DÜŞÜK KARBONLU ÇELİĞİN
MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Emine ERSÖZ

091122108

Anabilim Dalı: Metalurji Eğitimi

Programı: Malzeme

Bu Yüksek Lisans Tezi, 23/11/2011 tarihinde aşağıda belirtilen jüri tarafından oybirliği / oyçokluğu ile başarılı / başarısız olarak değerlendirilmiştir.

Danışman: **Yrd.Doç.Dr.Soner BUYTOZ**

Jüri: **Doç.Dr. Hanbey HAZAR**

Jüri: **Yrd.Doç.Dr.Aydın DİKİCİ**

TEŞEKKÜR

Bu tezin önerilmesinde ve çalışmalarım esnasında benden yardımını esirgemeyen danışman hocam sayın Yrd.Doç.Dr. Soner BUYTOZ'a teşekkürü bir borç bilirim.

Deneylelimin yapılmasında benden yardımını esirgemeyen Gaziantep Serkapsan Makine ve Seramik Kaplama İşletmesi'nden Sayın Salih KILINÇ'a ve teknik personeline teşekkürlerimi sunarım.

XRD analizlerinin yapımında yardımlarını esirgemeyen Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölüm Başkanı sayın Prof. Dr. Mustafa AKSOY ve Uzman Selçuk KARATAŞ'a, SEM analizlerinin yapımında yardımlarını esirgemeyen Fizik Bölümü FÜEMLAB sorumlusu sayın Prof. Dr. Yusuf ATICI ve Arş. Gör. Ünal AKGÜL'e teşekkürlerimi sunarım. Mikrosertlik deneylelimin yapımında yardım ve desteğini esirgemeyen Bartın Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölüm Başkanı sayın Doç. Dr. Bülent KURT'a teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca 2066 proje numarasıyla maddi destek sağlayan Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırmaları Projeleri Birimi (FÜBAP)'ne teşekkür ederim.

Son olarak maddi ve manevi her türlü desteklerini hiçbir zaman benden esirgemeyen sevgili aileme teşekkürü bir borç bilirim.

Emine ERSÖZ

ELAZIĞ-2011

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
TEŞEKKÜR	I
İÇENDEKİLER	II
ÖZET	V
SUMMARY	VI
ŞEKİLLER LİSTESİ	VII
TABLolar LİSTESİ.....	IX
BÖLÜM 1. GİRİŞ	1
BÖLÜM 2. TERMAL (ISIL) PÜSKÜRTME YÖNTEMİ.....	3
2.1.Termal Püskürtme Yöntemine Genel Bakış	3
2.2.Termal Püskürtme Yönteminin Tarihçesi.....	6
2.3.Termal Püskürtme Yönteminde Kaplama Öncesi Yapılan İşlemler.....	6
2.4.Termal Püskürtme Yönteminde Kullanılan Kaplama Tozları	8
2.5.Termal Püskürtme Yöntemi ile Kaplanmış Yüzeylerin Özellikleri.....	10
2.6.Termal Püskürtme Yönteminin Çeşitleri	11
2.6.1.Alevle Püskürtme Yöntemi.....	12
2.6.2.Elektrik Arkıyla Püskürtme Yöntemi	13
2.6.3.Patlamalı Püskürtme Yöntemi	13
2.6.4.Yüksek Hızlı Oksijen Püskürtme (HVOF) Yöntemi	14
2.6.5.Plazma Püskürtme Yöntemi	14
BÖLÜM 3. PLAZMA PÜSKÜRTME YÖNTEMİ.....	17
3.1.Plazmanın Tanımı	17
3.2.Plazmanın Özellikleri	18
3.3.Plazmanın Kullanım Alanları	19
3.4.Plazma Püskürtme Tekniğine Genel Bakış.....	19
3.5.Plazma Püskürtme Tekniğinin Uygulanışı	20
3.6.Plazma Gazlarını Özellikleri.....	22

3.7.Plazma Püskürtme Yönteminde Kullanılan Kaplama Tozlarının Özellikleri.....	27
3.8.Plazma Püskürtme Yönteminin Sınıflandırılması.....	27
3.9.Plazma Püskürtme Yöntemi ile Yapılan Kaplamaların Temel Özellikleri.....	29
3.9.1.Mikroyapı Özellikleri.....	29
3.9.2.Porozite	29
3.9.3.Yapışma Mukavemeti	30
3.9.4.İç Gerilmeler	31
3.9.5.Kaplama Kalınlığı.....	33
3.9.6.Sertlik ve Aşınma Direnci.....	33
3.10.Plazma Püskürtme Yöntemi ile Yapılan Kaplama Öncesi İşlemler	33
3.11.Plazma Püskürtme Kaplama Ünitesi.....	35
3.11.1.Plazma Püskürtme Tabancası	35
3.11.2.Güç Ünitesi	36
3.11.3.Gaz Besleme Ünitesi.....	37
3.11.4.Toz Besleme Ünitesi.....	37
3.11.5.Soğutma Ünitesi.....	37
3.11.6.Kontrol Ünitesi	38
3.12.Plazma Püskürtme ile Kaplama Yönteminin Avantajları	38
3.13.Plazma Püskürtme Yöntemi ile Kaplama Yönteminin Sınırlamaları	39
3.14.Plazma Püskürtme ile Kaplama Sitemindeki Gelişmeler	40
3.15.Plazma Püskürtme Yönteminin Uygulama Alanları.....	40
3.16.Plazma Püskürtme ile Kaplama Yöntemine Etki Eden Faktörler.....	43
3.17.Plazma Püskürtme Üzerine Yapılan Çalışmalar	44
BÖLÜM 4. SERAMİKLER.....	48
BÖLÜM 5. DENEYSEL İŞLEMLER.....	52
5.1.Deneylerde Kullanılan Malzemeler	52
5.2.Deney Tozlarının Özellikleri	54
5.3.Malzemelerin Mekanik Özellikleri.....	59
5.4.Plazma Püskürtme ile Kaplama İşleminin Yapılışı	60

5.5.Metalografik İncelemeler.....	62
5.6.Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM) İncelemeleri.....	62
5.7.X-Işınım Kırınımı İncelemeleri	62
5.8.Mikrosertlik İncelemeleri	62
BÖLÜM 6. SONUÇLAR.....	63
6.1.Mikroyapı Sonuçları	63
6.2 EDX ve XRD Sonuçları.....	68
6.3.Mikrosertlik Sonuçları	74
BÖLÜM 7. GENEL SONUÇLAR.....	78
KAYNAKLAR	79
ÖZGEÇMİŞ	87

ÖZET

Bu çalışmada, Al_2O_3 - TiO_2 kompozit kaplamaları farklı oranlarda karıştırılmış mikron tane boyutundaki Al_2O_3 ve TiO_2 tozlarının atmosferik plazma sprej (APS) yöntemi kullanılarak SAE 1040 çeliği yüzeyinde üretildi. TiO_2 ilavesinin kaplamanın mikroyapı, faz bileşimi ve mikrosertlik özellikleri üzerine etkisi taramalı elektron mikroskobu (SEM), enerji dağılım spektrometresi (EDS), X-ışın difraktometresi (XRD) ve mikrosertlik testi ile araştırıldı. Sonuçlar Al_2O_3 - TiO_2 kompozit kaplamalarının hem tamamen ergimiş bölgeler hem de kısmen ergimiş bölgelerden oluştuğunu ve tamamen ergimiş bölgelerin lamelli bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir. Tozlardaki kararlı α - Al_2O_3 ve anatase- TiO_2 'den Al_2O_3 - TiO_2 kompozit kaplamasında baskın halde bulunan yarı kararlı γ - Al_2O_3 , rutil- TiO_2 ve Al_2TiO_5 'e faz dönüşümü gözlenmiştir. TiO_2 toz miktarının artmasıyla gözenek miktarında azalma tespit edilmiştir. Kaplama tabakasının mikrosertlikliği alt tabaka malzemesine göre 3-4.5 kat daha yüksektir. Kaplamaların ortalama mikrosertlik değerleri 650-850 HV olarak değişmiştir.

Anahtar Kelimeler: Plazma püskürtme, seramik kaplama, mikroyapı

SUMMARY

In this study, Al_2O_3 - TiO_2 composite coatings were thermally sprayed on the SAE 1040 steel using atmospheric plasma spray (APS) process of mixed different rates micron-sized TiO_2 and micron-sized Al_2O_3 powders. The effects of TiO_2 addition on the microstructure, phase compositions and microhardness of the coatings were investigated by using scanning electron microscopy (SEM), energy dispersive spectroscopy (EDS), X-ray diffractometry (XRD) and microhardness tester. The results show that the Al_2O_3 - TiO_2 composite coatings consists of both fully melted regions and partially melted regions, and the fully melted region has a lamellar-like structure. Phase transformation from mainly stable α - Al_2O_3 and anatase- TiO_2 in the powders to predominant metastable γ - Al_2O_3 , rutile- TiO_2 and Al_2TiO_5 phase in the Al_2O_3 - TiO_2 composite coatings was observed. It was identified that the pore content was decreased with increased of the TiO_2 powder rate. The microhardness of the coating layers 3-4.5 times higher than substrate material. The average microhardness values of the coatings were changed as 650-850 HV.

Keywords: Plasma spray, ceramic coating, microstructure

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1.Termal püskürtme yönteminde kullanılan kaplama malzemeleri	3
Şekil 2.2.Termal püskürtme işlem sırası	4
Şekil 2.3.Termal püskürtmede partikülün yüzeye yapışma modeli.....	7
Şekil 2.4.Termal püskürtme yöntemine bağlı olarak kullanılan toz tane boyutu	8
Şekil 2.5.Toz morfolojileri (şematik)	9
Şekil 2.6.Üretim yöntemine bağlı olarak elde edilen toz morfolojileri	10
Şekil 2.7.Termal püskürtme toz prosesinin tipik şekli ve kaplamada oluşan yapılar	11
Şekil 3.1.Maddenin plazma hali	17
Şekil 3.2.Plazma püskürtme kaplama tabakasının görünümü	22
Şekil 3.3.Plazma gazlarının a) relatif mol ağırlığı b) özgül ağırlık ve c) termal iletkenlik katsayısı özelliklerinin karşılaştırılması	24
Şekil 3.4.Plazma gazlarının a) ark gerilimi ve b) ark girişi özelliklerinin karşılaştırılması	25
Şekil 3.5. Plazma gazlarının a) özgül ısı kapasitesi b) iyonizasyon potansiyeli ve c) sıcaklık özelliklerinin karşılaştırılması.....	26
Şekil 3.6.Kaplama tabakasındaki porozite	30
Şekil 3.7.Kaplama tabakası ve ana malzemede oluşan gerilmeler	32
Şekil 3.8.Plazma püskürtme ünitesi.....	35
Şekil 3.9.Plazma püskürtme tabancasını şematik görünümü	36
Şekil 3.10.Plazma püskürtme ile kaplama yöntemine etki eden faktörler.....	44
Şekil 5.1.Kaplama tozlarının SEM fotoğrafı ve EDX noktaları, (a) %100 Al ₂ O ₃ , (b) Al ₂ O ₃ -%3 TiO ₂ , (c) Al ₂ O ₃ -%13TiO ₂ , (d) Al ₂ O ₃ -%40TiO ₂ , (e) NiCr tozu	54
Şekil 5.2.Kaplama tozlarının XRD grafikleri, (a) Al ₂ O ₃ -%3TiO ₂ , (b) Al ₂ O ₃ -%13TiO ₂ , (c) Al ₂ O ₃ -%40TiO ₂ , (d)%100 Al ₂ O ₃ , (e) NiCr tozu.....	57
Şekil 5.3.Kaplama işleminin prensip şeması	60
Şekil 5.4. Kaplanan SAE 1040 malzemesinin üretim parametrelerine göre gösterimi	61
Şekil 6.1. Al ₂ O ₃ -TiO ₂ kaplamaların SEM fotoğrafları, (a) Al ₂ O ₃ -%3TiO ₂ , (b) Al ₂ O ₃ -%13TiO ₂ , (c) Al ₂ O ₃ -%40TiO ₂ , (d) %100 Al ₂ O ₃ seramik oksit kaplamalar	63
Şekil 6.2. Al ₂ O ₃ -TiO ₂ kaplamaların SEM fotoğrafları, (a) Al ₂ O ₃ -%3TiO ₂ , (b) Al ₂ O ₃ -%13 TiO ₂ , (c) Al ₂ O ₃ -%40TiO ₂ , (d) %100 Al ₂ O ₃ seramik oksit kaplamalar	65

Şekil 6.3. Plazma püskürtme sırasında kaplama tozlarının şematik gösterimi.....	66
Şekil 6.4. %100 Al ₂ O ₃ seramik oksit kaplamaların SEM fotoğrafları, (a) 75 mm püskürtme mesafesi (b) 100 mm püskürtme mesafesi, (c) 150 mm püskürtme mesafesi	67
Şekil 6.5. Al ₂ O ₃ -TiO ₂ kaplamaların EDX analiz grafikleri, (a) Al ₂ O ₃ -%3TiO ₂ , (b) Al ₂ O ₃ -%13 TiO ₂ , (c) Al ₂ O ₃ -%40TiO ₂ , (d) %100 Al ₂ O ₃ seramik oksit kaplamalar.....	68
Şekil 6.6. Al ₂ O ₃ -TiO ₂ denge diyagramı	71
Şekil 6.7. % 60 Al ₂ O ₃ - %40 TiO ₂ seramik oksit kaplamasının SEM mikroyapısı.....	72
Şekil 6.8. Al ₂ O ₃ -TiO ₂ kaplamalarının XRD grafikleri	73
Şekil 6.9. Al ₂ O ₃ -TiO ₂ kaplamalarının ortalama mikrosertlik değerleri.....	75

TABLÖLAR LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1. Termal püskürtme yöntemlerinin karşılaştırılması	15
Tablo 2.2. Endüstriyel sektörlere göre termal püskürtme işlemi uygulamaları	16
Tablo 3.1. Plazma gazlarının özellikleri	23
Tablo 3.2. Plazma püskürtme tekniğinin uygulama alanları.....	42
Tablo 4.1. Ticari seramik malzemelerin mekanik ve fiziksel özellikleri	51
Tablo 5.1. Kaplama tozlarının karışım miktarları ve üretim parametreleri	53
Tablo 6.1. Al ₂ O ₃ -TiO ₂ kaplamaların EDS analizi	72

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Gelişen teknolojiyle birlikte malzemelerin kullanım alanlarının artmasına bağlı olarak malzeme yüzeyleri birçok dış ortam etkilerine maruz kalır. Malzemelerin kullanım zamanı içerisinde; zamanla aşınma, oksitlenme ve mukavemetinde azalma meydana gelir. Birçok metal malzeme aşınma ve korozyondan olumsuz yönde etkilenir [1,2]. Özellikle çelik malzemelerde bu tür dış ortam etkileri nedeniyle yorulma meydana gelir.

Günümüzde malzemeleri bu tür dış ortam etkilerinden korumak, maruz kaldıkları yorulma, korozyon, sürtünme ve aşınma gibi etkilere olan direncini arttırmak amacıyla yüzey geliştirme ve kaplama tekniklerinin geliştirilmesi bir gereklilik halini almıştır. Buna bağlı olarak zamanla artan talepler ve ihtiyaçlar doğrultusunda bilimle uğraşan insanlar ve özel ticari şirketler yüzey mühendisliği alanında birçok farklı işlem ve farklı malzeme kullanmaya başlamıştır. En ideal yüzey ve taban malzemesini üretmek için yapılan çalışmalar günümüzde halen devam etmektedir.

Yüzey mühendisliği alanında yapılan işlemler sonucunda ana malzeme mukavemetinin iyi ve sürekliliğinin yeterli, buna karşılık malzeme yüzeyinin sert ve aşınmalara karşı dayanıklı olması gerekir.

Yüzey sertleştirme işlemleri genelde iki farklı yöntemle yapılır. Birinci yöntem de, normal koşullarda yeterli sertlik değerine ulaşmayan çelik malzemelerin yüzeyine sementasyon ile karbon geçirtililerek, nitrürleme işlemi veya borlama işlemleri gibi teknikler uygulanarak malzeme yüzeyinin doğrudan sertleşmesi sağlanır. İkinci yöntemde ise, malzeme yüzeyine bir bağlayıcı yardımıyla farklı bir malzemenin kaplanmasıyla malzeme yüzeyi sertleştirilir. En fazla uygulanan yöntem; metalik malzemeleri aşınma ve korozyondan korumak için yüzeyine bir kaplama yapmaktır [3].

Malzemelerin yetersiz kaldığı dış ortam etkilerinde genellikle malzeme yüzeyine dış etkilere karşı daha dayanıklı malzemelerle kaplama yapılarak dayanımı artırılır. Yüzey kaplama işlemlerinde genelde metal yüzeylerin kaplanması yanı sıra nadiren metal olmayan yüzeyleri de kaplamak mümkündür. Kaplama işlemi sonucunda malzeme yüzeyi sert, mukavemeti yüksek ve aşınmaya karşı dayanıklı olurken, malzemenin iç kısmı ise enerji absorbesi sonucunda tok kalır.

Yüzey kaplama işlemi genelde, metal malzemelerde malzemelerin yüzey özelliklerini geliştirmek, aşınma, korozyon, sürtünme ve yorulma gibi dış ortam etkilerine karşı dayanıklılığını arttırmak amacıyla, kimyasal veya fiziksel olarak (PVD, CVD, plazma püskürtme, alevle püskürtme... vb.) malzeme yüzeyine farklı malzeme tozlarının (seramik tozları gibi) kaplanması işlemidir.

Termal püskürtme yöntemi genelde aşınmaya, ısınmaya ve korozyona maruz kalan makine elemanlarında meydana gelen yüzey bozulmalarını tamirde kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemde, dış ortam etkileri sonucu bozunmaya uğrayan makine elemanın bileşimine uygun bir toz veya toz kompozisyonunun ergitilerek veya yarı ergiyik hale getirilerek bozulan bölge kaplanır veya dolgu yapılır.

Plazma püskürtme yöntemi de ısı püskürtme yöntemleri arasında endüstriyel amaçlı kullanılan yöntemlerden biridir. Plazma püskürtme yönteminin iki önemli avantajı vardır. Bunlardan birincisi çok yüksek sıcaklıklara çıkılabildiği için diğer yöntemlerle ertilmesi mümkün olmayan tozların kaplamada kullanılmasını mümkün kılar. İkincisi ise maddelere daha iyi ısı transferi sağlar. Ayrıca plazma püskürtme yönteminin inert gaz ortamında yapılması da yöntemin avantajıdır.

Plazma püskürtme kaplama tekniğiyle üretilen kaplamalarda porozite, iğne deliği (pinhole) ve mikro çatlaklar gibi yapısal hatalar bulunmaktadır [4]. Bu yapısal hataların altlık ile kaplama malzemesi arasında oluşturduğu kanalcıklar nedeniyle, korozyon sıvıları ve gazlar kaplama-altlık arasına nüfuz ederek korozyona neden olabilir. Bunu tetikleyen neden bağlanma mukavemeti ve kaplama kalınlığıdır. Plazma püskürtmeyle kaplama da bağlanma mukavemetini arttırmak için malzeme yüzeyi pürüzlendirilir ve bir ara bağlayıcı kullanılır. Kaplama kalınlığı ise genelde en ince olması istenilir.

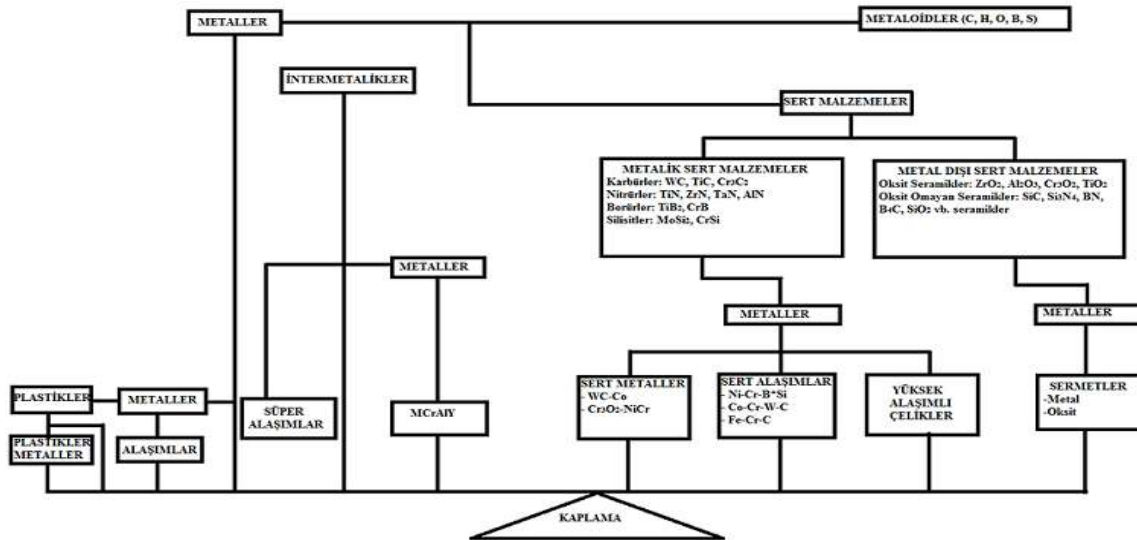
Bu çalışmada, plazma püskürtme tekniğiyle farklı toz karışımları kullanılarak ($Al_2O_3-TiO_2$), farklı sprey mesafelerinde elde edilen kaplamaların mikroyapı ve mekanik özelliklerinde meydana gelen değişimler araştırılmıştır.

BÖLÜM 2. TERMAL (ISIL) PÜSKÜRTME YÖNTEMİ

2.1. Termal Püskürtme Yöntemine Genel Bakış

Endüstriyel uygulamalarda çeşitli olumsuz etkilere maruz kalan malzeme yüzeylerinin bu özelliklerden etkilenmesini önlemek amacıyla yapılan difüzyonsuz kaplama yöntemine termal (ısı) püskürtme yöntemleri denir. Bu yöntemlerle tel, çubuk veya toz şeklindeki kaplama malzemeleri bir püskürtme tabancasında yanıcı, yakıcı ve taşıyıcı gazların yardımıyla püskürtülerek malzeme yüzeyinde bir kaplama katı oluşturulur [5]. Yöntemde kullanılan kaplama malzemesi tel, çubuk veya toz şeklindeki metal, metal dışı malzemeler veya seramiklerdir. Bu yöntemle ana malzemenin özellikleri değişmezken, kaplama tabakası sayesinde ana malzeme aşınmaya, korozyona ve ısıya karşı direnç kazanır.

Termal püskürtme yöntemiyle tokluğu, sertliği, sürtünme katsayısı ve bunun gibi farklı birçok özelliğe sahip 2000’den fazla malzeme kaplanabilir. Bu malzemeler saf metaller, metal alaşımları, sermetler, seramikler, karbitler, polimerler ve özel kompozit malzemeler olarak sınıflandırılabilirler [6].

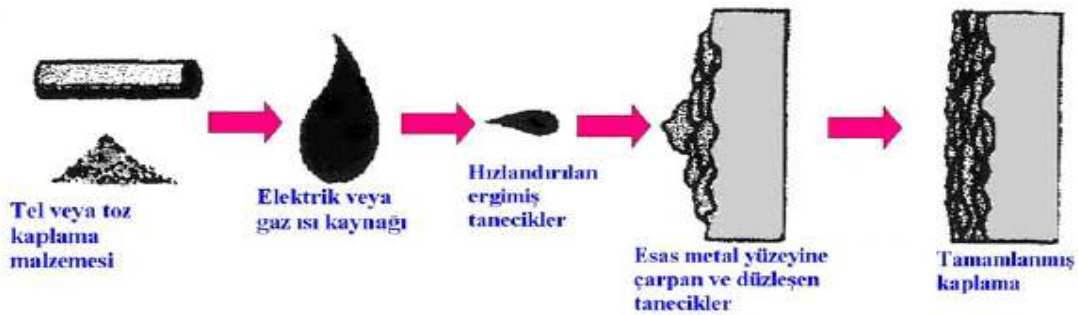


Şekil 2.1. Termal püskürtme yönteminde kullanılan kaplama malzemeleri [7]

Termal püskürtme yöntemlerinde kaplama tabakasının sertliği işlem parametrelerine, kaplama malzemesinin türüne ve ana malzemeye göre değişir. Ayrıca kaplamayı;

1. Termal kinetik enerjinin oluşturulması,
2. Püskürtme malzemesinin enerji etkileşimi,
3. Püskürtme partiküllerinin kaplanacak malzemeye etkileşimi,
4. Püskürtme akısının (alev, plazma, vb.) bileşim, sıcaklık, hız, püskürtme mesafesi, dış ortam ve çalkantı (türbülans) etkileri,
5. Malzeme beslemenin partikül ya da tel boyutu ve şekli, ilerleme, enjeksiyon metodu ve geometrisi, taşıyıcı gaz akış şekli ve hızı, kimyasal ve fiziksel özellikleri,
6. Kapanacak malzemenin yüzey bileşimi, yüzey profili, sıcaklık, kimyasal ve fiziksel özellikleri, püskürtme tabancasına göre hızı,
7. Püskürtme tabancasının lüle geometrisi, gücü, gaz akışları ve gaz bileşimi de etkiler [5].

Termal püskürtme kaplama yönteminde diğer yöntemlere nazaran daha kısa sürede (1-10 mm/sn) kaplama yapılabilmesi bu yöntemin daha fazla tercih edilmesini sağlamıştır. Kapanabilecek malzeme türünün geniş bir yelpaze oluşturması ve kaplanabilecek malzemede herhangi bir geometrik kısıtlamanın olmaması bu yöntemin seri olarak yapılmasına olanak sağlamıştır.



Şekil 2.2. Termal püskürtme işlem sırası [8]

Termal püskürtme yönteminde belirli bir ısı kaynağıyla ergimiş veya yarı ergimiş hale gelen partiküller işlem gazları veya atomizasyon jetleriyle kaplama yüzeyine doğru

hızla püskürtülür. Yüzeye çarpan partiküller birikerek lamelar yapı meydana getirir ve kalın bir kaplama tabakası oluşturur [9].

Termal püskürtme yönteminde kaplama malzemesi ana malzeme yüzeyine mekanik, kimyasal, metalurjik veya bunların kombinasyonu şeklinde bağlanır.

Termal püskürtme yönteminin uygulanma sebepleri aşağıdaki gibi sıralanabilir:

1. Aşınma direncine karşı,
2. Oksidasyon direncine karşı,
3. Korozyon direncine karşı,
4. Boyutsal restorasyon,
5. Çevresel aşınma kontrolü eldesi,
6. Termal bariyer oluşturma,
7. Elektriksel iletim veya direnç kazandırma,
8. Biyomedikal uygulamalar [10].

Termal püskürtme yöntemi kullanılan malzeme şekline göre iki şekilde sınıflandırılır:

1. Malzemenin toz şeklinde olması,
2. Malzemenin tel ya da çubuk şeklinde olması.

Toz şeklinde püskürtmede, toz partikülleri yüksek ısı kaynağının içinden geçerek ergimiş ya da yarı ergimiş hale gelirler. Bu toz partikülleri bir metal yüzeye çarptıklarında o yüzeyin düzensiz bölgelerine takılarak bir yapışmış dolgu oluştururlar. Yüzey, daha iyi bir yapışma olması için önceden pürüzlendirilir.

Tel veya çubuk püskürtmede, kaplanacak olan katı malzeme sürekli bir şekilde bir yüksek basınçlı hava ile çevrili bir ısı kaynağının içine sürülür. Kaplanacak malzemenin yüzeyi alev tarafından ısıtılıp hava akımı ile ince damlacıklar halinde atomize edilir ve ana malzeme yüzeyine gönderilir. Ergime noktası 2760 °C'nin altındaki tüm metal ve seramikler bu yolla malzeme yüzeyine kaplanırken bu sıcaklığın üstündeki malzemeler için ısı kaynağı olarak plazma kullanılır.

2.2.Termal Püskürtme Yönteminin Tarihçesi

Termal püskürtme konusunda ilk çalışmalar incelendiğinde, akla ilk başta 20. yüzyılın ilk dönemlerinde yaşayan İsviçreli bilim adamı Dr. M. Schoop gelir. Dr. Schoop sıvı kurşunu oyuncak topa püskürttüğünde kurşunun bütün yüzeye yapışıp tutunduğunu gördükten sonra, ısı kaynağı olarak oksijen ve asetilenin; ergimiş malzemeyi püskürtmek içinse basınçlı havanın kullanıldığı bir tabanca dizayn etmiş ve böylece termal püskürtme teknolojisinin temellerini atmıştır [4]. Bu yöntem daha sonra Amerika’da R. Axline, G. Lufkin ve H. Ingham tarafından geliştirilmiş ve 1933 yılında MetcoInc.’ın kurulmasıyla hızlı bir gelişme ve endüstriye uygulanma sürecine girmiştir [11].

Termal püskürtme yöntemi ile kaplama tekniği endüstriyel olarak ilk defa 1939’ da Reinecke tarafından kullanılmış ve daha sonra Amerikan şirketleri tarafından geliştirilmiştir [12]. Termal püskürtme 20. yüzyılın ilk dönemlerinde tamir amacı ile kullanılırken 1960’ tan sonra termal püskürtme işleminde yöntemler ve kullanılan malzemeler bakımından çok hızlı bir gelişme meydana gelmiştir. Meydana gelen bu gelişmelerin doğal sonucu olarak da birçok uygulama çeşitliliği ortaya çıkmıştır.

Plazma püskürtme yöntemi de yine 1939’ da Reinecke tarafından kullanılmıştır. Kaynak tekniklerinin gelişmesiyle plazma püskürtme yönteminde de çeşitli ilerlemeler olmuştur. Uzay endüstriyel uygulamalarında çokça tercih edilen bir yöntem olan plazma püskürtme ile kaplama yöntemi 1970’ li yıllardan sonra en çok kullanılan termal kaplama yöntemi haline gelmiştir. Başlangıçta 20-40 kW güce sahip olan plazma püskürtme tabancaları günümüzde 250 kW güce kadar kullanılabilir [13]. Plazma püskürtme yönteminde yüksek ark voltajlarının kullanılması kesintisiz kullanımı mümkün kılmıştır. Kesintisiz kullanım ve yüksek gaz akış hızı yöntemin havacılıktan biyomedikal uygulamalara kadar geniş bir alanda kullanımına imkân sağlamıştır.

2.3.Termal Püskürtme Yönteminde Kaplama Öncesi Yapılan İşlemler

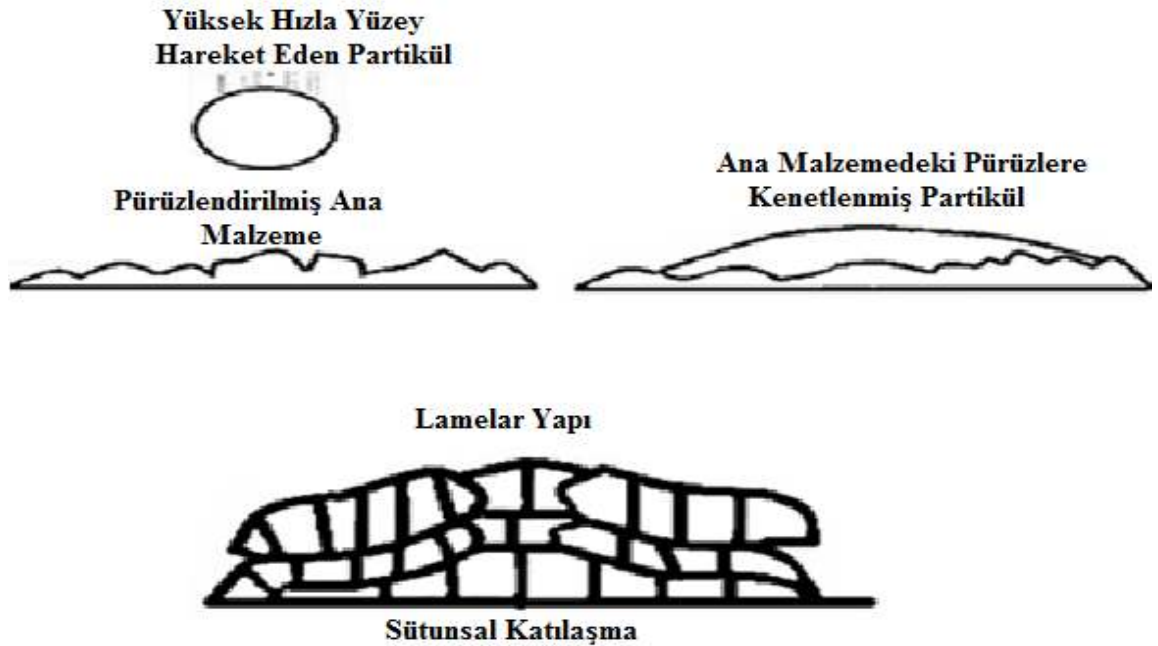
Termal püskürtme yönteminde kaplama malzemesi ana malzeme yüzeyine mekanik, kimyasal, metalurjik veya bunların bileşimi şeklinde bağlanır. Malzeme

yüzeyinde iyi bir bağlanma sağlanabilmesi için malzeme yüzeyinin kaplama işlemi öncesi bazı ön işlemlerden geçirilmesi gerekir. Bu işlemlere yüzey hazırlama işlemleri denir.

Yüzey hazırlamada yapışma mukavemetini arttırmak için kaplanacak ana malzeme yüzeyinin yağ, boya, pas, tuz ve korozyon etki yapabilecek kirlere temizlenmesi gerekir. Yağ, boya, pas, tuz ve korozyon etki yapabilecek kirlere temizlemek için solvent temizleme yapılır. Solvent temizlemede, ana malzeme yüzeyi 130-150 °C sıcaklıktaki buhar, basınçlı su veya hidrokarbonlu kimyasallarla temizlenir.

Ana malzeme yüzeyinde iyi bir mekanik yapışma sağlanabilmesi için ana malzeme yüzeyinin pürüzlendirilmesi gerekir. Yüzeyi pürüzlendirmek için kumlama işlemi yapılır. Solvent işleminden sonra sert Al_2O_3 -SiC veya sert köşeleri olan çelik aşındırıcılar basınçlı havayla ana malzeme yüzeyine püskürtülür ve böylece malzeme yüzeyi pürüzlendirilmiş olur. Malzeme yüzeyi pürüzlendirildiğinden kolay korozyona uğrayabileceği için en az 4 saat içinde kaplamanın yapılması gerekir.

Eğer malzeme yüzeyinde kaplanmasını istemediğimiz yerler varsa buraların üzerine kaplama öncesi bir macun sürülerek örtülür. Bu işlemde maskeleme işlemi denir.



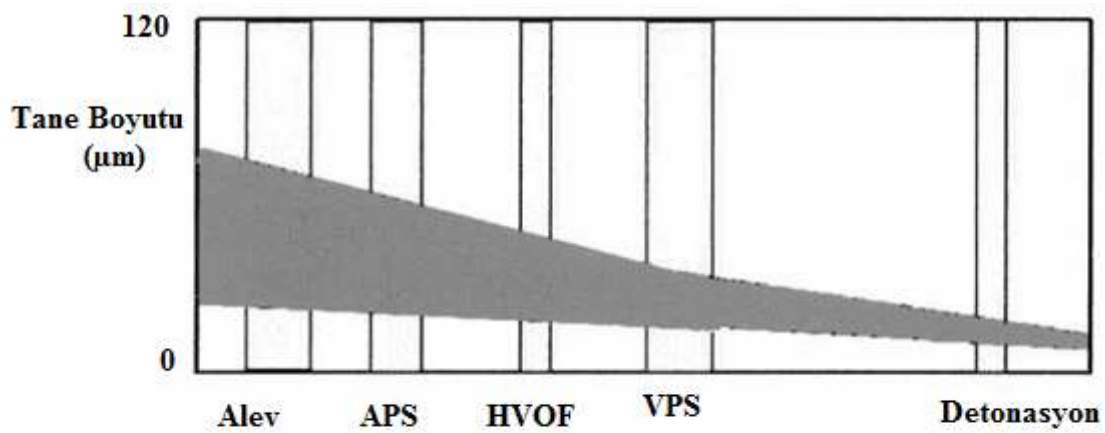
Şekil 2.3. Termal püskürtmede partikülün yüzeye yapışma modeli [14]

2.4. Termal Püskürtme Yönteminde Kullanılan Kaplama Tozları

Termal püskürtme yönteminde toz olarak üretilen ve süblimleşmeyen birçok malzeme, plastik, karbür, seramik ve metaller kaplama malzemesi olarak kullanılabilir. Bu malzemelerden elde edilen tozların tane boyutları farklıdır. Tozlardan beklenen en önemli özellikler; ergitme ortamına iyi beslenebilmesi (akışkanlık) ve homojen ergime davranışı gösterebilmesidir [15].

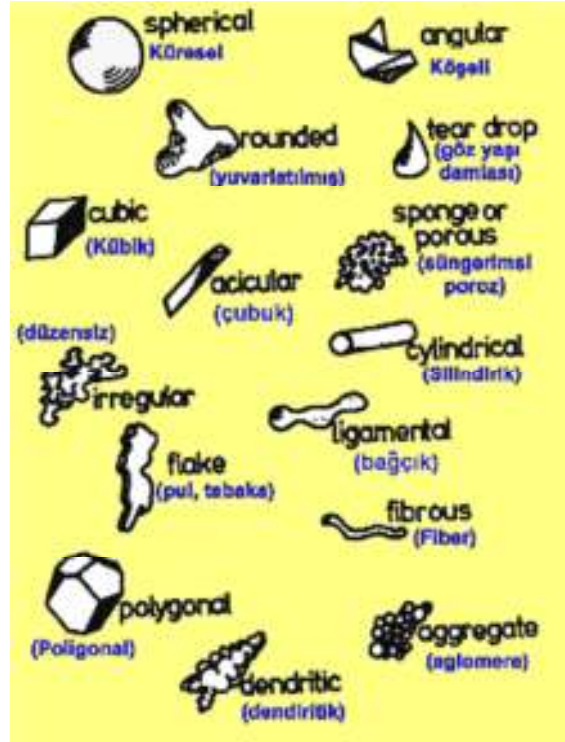
Plazma püskürtme yöntemi ile kaplamada, ergitmede yüksek bir enerjinin kullanılıyor olması toz tane boyutunda sınırlama yapmazken, HVOF (Yüksek Hızlı Oksijen Püskürtme) yönteminde toz tane boyutunun büyük olması kaplama tozlarının ergime için yeterli zaman bulamadan ana malzeme yüzeyine yapışmasına neden olacağı için kaplama tabakasında ergimemiş tozlara rastlanır. Termal püskürtme yöntemlerinde toz boyutunun yanı sıra ergime sıcaklığına da dikkat edilmelidir.

Termal püskürtme yöntemiyle kaplamada kullanılan tozların tane boyutu ve boyut dağılımı önemli bir parametredir. Termal püskürtme yöntemlerinde kullanılan tozlar genel olarak seçilen kaplama işlemine bağlı olarak 5 μm -120 μm arasında değişir. 5 μm altında veya 120 μm üstünde kullanılan tozlar kaplama üzerine olumsuz etkiler yapar. 5 μm 'nın altındaki tozlar toz besleme ünitesini tıkalabilir.



Şekil 2.4. Termal püskürtme yöntemine bağlı olarak kullanılan toz tane boyutu [16]

Termal püskürtme yöntemlerinde kullanılan tozların morfolojisi de tozun ergime zonuna beslenmesinde önemli bir faktördür. Tozun ergime zonuna düzensiz beslenmesi, tozun homojen ergimemesine ve buna bağlı olarak kaplamada kalınlık ve bileşim farklılığına yol açar.



Şekil 2.5. Toz morfolojileri (şematik) [15]

Küresel toz şekli ergitme zonuna mükemmel beslenir. Ancak tozun minimum hacim/yüzey oranı nedeniyle ısı transferini ve ergime davranışını olumsuz etkiler. Düzensiz toz şekli ise tozun çok hızlı ergimesini sağlar. Böylece tozlar birbirine kolayca yapışırlar ve ergitme zonuna beslenmeleri zayıf olur.

Metal karakterli tozlar küresel veya aglomere edilerek yuvarlatılmış bir şekilde kullanılırken, seramik karakterli tozlar ise genellikle köşeli, keskin köşeli ve düzensiz formda üretilirler [4].

<u>Toz Tipi</u> <u>Üretim</u>	Eritilmiş Öğütülmüş	Sinterlenmiş Öğütülmüş	aglomere sinterlenmiş	küresel	atomize edilmiş
					
<u>Partikül Şekli</u>	bulk-köşeli	bulk-köşeli	küresel	küresel	küresel -düzensiz
<u>Mikroyapı</u> <u>- Porozite</u> <u>-Tane boyutu</u> <u>Homojenite</u>	yoğun İri- ince alaşımli	yoğun-poroz İri- ince alaşımli	Poroz orta - ince alaşımli (heterojen)	yogun - içi boş orta - ince alaşımli (heterojen)	poroz - içi boş ince alaşımli

Şekil 2.6. Üretim yöntemine bağlı olarak elde edilen toz morfolojileri [15]

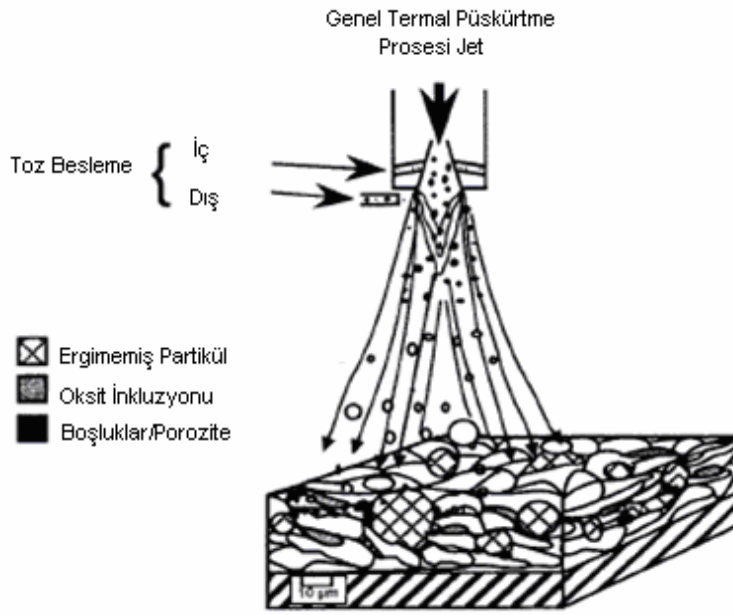
2.5.Termal Püskürtme Yöntemi ile Kaplanmış Yüzeylerin Özellikleri

Termal püskürtme yönteminde toz partikülleri ana malzeme yüzeyine mekanik, kimyasal, metalurjik veya bunların bileşimi şeklinde bağlanır. Bağlanma mukavemeti malzeme yüzeyindeki pürüzlülüğe, partiküllerin erimesine ve yerleşimine, püskürtülmüş yüzeylerin gerilme kuvvetine ve tozların mekaniksel olarak bağlanmasına bağlıdır. Bağlanma mukavemetini olumsuz yönde etkileyen kusurlar genelde ana malzemeyle kaplama malzemesi arasındaki ara yüzeyde meydana gelir. Kaplanacak yüzey oksit, kir, yağ ve lokal bağlanmayı düşürücü yada engelleyici etkenlerden temizlenmezse bağlanma mukavemeti düşer.

Termal püskürtme yönteminde toz partikülleri yaklaşık 50-1000 m/sn hızla ana malzeme yüzeyine püskürtülür. Yüzeye püskürtülen tozlar belirgin bir deformasyona uğrayarak ince bir tabaka veya lamelar şekilde ana malzeme yüzeyine yapışır. Her bir toz partikülünün soğuma süresi ortalama $>10^{-6}$ K/sn'dir. Bu akış hızı ve soğuma sonucunda ana malzeme yüzeyinde üniform, taneli ve polikristalli bir yapı oluşur [16]. Püskürtülmüş

kaplama tabakası ortama % 0-10 arası porozite içerebilir. Bu porozite bazı durumlarda kayganlık özelliği nedeniyle aşınma ve sürtünmeyi düşürdüğü için bir avantaj kabul edilebilir.

Termal püskürtme yönteminde yapışma ve birleşmeyi sınırlandıran diğer bir önemli faktör püskürtülmüş yüzeylerde oluşan artık gerilimdir. Biriken artık gerilimler kaplama kalınlığını da sınırlandırmaktadır [9].



Şekil 2.7. Termal püskürtme toz prosesinin tipik şekli ve kaplamada oluşan yapılar [9]

2.6. Termal Püskürtme Yönteminin Çeşitleri

Termal püskürtme yöntemleri kaplama tozunun ergitilmesinde kullanılan ısıyı sağlayan kaynağa göre isimlendirilir. En popüler olan 5 termal püskürtme yöntemi şunlardır:

1. Alevle püskürtme yöntemi,
2. Elektrik arkıyla püskürtme yöntemi,
3. Patlamalı (Detonasyon) püskürtme yöntemi,
4. Yüksek hızlı oksijen püskürtme (HVOF) yöntemi,

5. Plazma püskürtme yöntemi.

Termal püskürtme yöntemleri arasında en yeni olan yöntem Yüksek Hızlı Oksijen Püskürtme (HVOF) yöntemidir.

2.6.1.Alevle Püskürtme Yöntemi

Alevle püskürtme yöntemi, ergime sıcaklığı oksit-asetilen alev sıcaklığının (2480 °C' nin) altında olan, tel veya toz halindeki kaplama malzemesinin kaplanacak yüzeye püskürtülmesi esasına dayanır [17]. Toz veya tel olan kaplama malzemesi püskürtme tabancasından geçirilir ve organik yakıtın yanmasıyla ortaya çıkan sıcaklığın etkisiyle ergitilir. Ergimiş partiküllerin ana malzemeye çarpmasını sağlayacak şekilde hız veren basınçlı havayla ergimiş partiküller ana malzeme yüzeyine püskürtülür. Asetilen, metil-asetilen, propadien ve doğal gaz gibi yakıtlar oksijenle birlikte bu sistemde kullanılan yakıtlardır [18]. Alevle püskürtme sistemi diğer yöntemlere nazaran düşük sıcaklıkta ve düşük püskürtme hızında yapılır.

Alevle püskürtme yöntemi en eski termal püskürtme yöntemidir. Yöntemde metal teller, metalik veya metal dışı tozlar, seramikler vb. birçok malzeme kaplama malzemesi olarak kullanılır. Bu yöntemde kaplama malzemesi çeşitli yanma ısisına sahip alevle ergiyik hale getirilir. Ergime noktası düşük malzemeler seçilirse (Al, polimer vb.) yanma ısisı da düşük seçilir. Düşük yanma ısisına da propan gazıyla ulaşılır.

Alevle püskürtme yönteminde kullanılan kaplama malzemesinin biçimine bağlı olarak tel kullanarak alevle püskürtme ve toz kullanılarak alevle püskürtme diye iki gruba ayırmak mümkündür. Alevle tel püskürtmede kaplama malzemesi tel şeklindedir ve püskürtme tabancası içerisinde tel besleme sistemindedir. Tel püskürtme tabancası içerisinde çeşitli hızlarla beslenir. Kaplama telinin çevresinden bir kanal boyunca gelen yanıcı ve yakıcı gazların oluşturduğu alev tele sürünerek telin ergimesini sağlar. Alevle toz püskürtmede ise, kaplama malzemesi toz şeklindedir. Kaplama tozu taşıyıcı gaz yardımıyla püskürtme tabancasına iletilir ve aynı anda gelen yanıcı-yakıcı gaz karışımının oluşturduğu alev sayesinde toz ergir.

Alevle püskürtme yöntemi termal püskürtme yöntemlerinin en basit ve en ucuz olanıdır. Ancak bu yöntemle yapılan kaplamaların en büyük dezavantajı bağ gücünün düşük ve kaplama yapısının gözenekli olmasıdır. Bunun nedeni ise kaplama malzeme hızının yavaş, akış oranının ve basıncının düşük olmasıdır.

2.6.2.Elektrik Arkıyla Püskürtme Yöntemi

Elektrik arkıyla püskürtme yönteminde, kaplama malzemesi tel şeklindedir. Kaplama malzemesi elektrik arkından elde edilen ısı sayesinde ergir. Isı elektrik arkından elde edildiği için bu yöntemde ısınma olmaz. Bu yöntemde biri anot diğeri katot olarak kullanılan iki tel, tel besleme sistemiyle püskürtme tabancasının ucuna gelir. Bu iki tel arasında oluşan arkla teller ergir ve püskürtme gazıyla ana malzeme yüzeyine ergimiş partiküller püskürtülür. Bu işlemde kısmen sünek ve elektriksel iletkenliğe sahip kaplama malzemeleri kullanılabilir [19].

2.6.3.Patlamalı Püskürtme Yöntemi

Patlamalı püskürtme yönteminde toz şeklindeki kaplama malzemesi, taşıyıcı azot gazıyla taşınarak asetilen ve oksijen tepkime gazlarının (yanıcı-yakıcı gazlarının) bulunduğu yanma bölümünde karıştırılır. Karışan gazlar sonucunda oluşan kıvılcımlarla şiddetli patlamalar olur ve patlamanın etkisiyle toz partikülleri ısı ve yüksek kinetik enerjiyle kaplanacak malzeme yüzeyine püskürür. Toz partiküllerinin kaplanacak ana malzeme yüzeyine yüksek kinetik enerjiyle çarpması bağlanma gücünün kuvvetli olmasını sağlar.

Bu yöntemde kaplama malzemesi olarak tungstenkarbit gibi sert ve aşınma dayanımı yüksek malzemeler kolayca kullanılabilir [20]. Yöntemin çok gürültülü olması bir dezavantajdır. Ses şiddeti 150 desibelden fazladır. Bu nedenle işlemin ses izolasyonlu bir odada yapılması gerekir.

Bu yöntemde genellikle kaplama malzemesi olarak karbürler ve karbür esasları kullanılır. Kaplamanın özellikleri genelde püskürtme mesafesi, gaz karışım oranı, tozların patlama ortamında bekleme süresine bağlı olarak farklılık gösterir.

2.6.4.Yüksek Hızlı Oksijen Püskürtme (HVOF) Yöntemi

Yüksek hızlı oksijen püskürtme yöntemi kısmen termal püskürtme yöntemleri arasında sayılır. Termal püskürtme yöntemleri arasına en yeni katılan yöntemdir. Bu yöntem genel olarak alevle püskürtme yöntemine benzer. Farkı yanıcı-yakıcı gaz karışımı püskürtme tabancasındaki yanma odasında yanarak yüksek gaz basıncıyla patlatılır. Böylece çok yüksek püskürtme hızı sağlanır. Yanıcı gaz olarak propan ve propilen kullanılır [20]. Gaz yakıtı olarak ise sıvı oksijen kullanılır.

Kaplama tozu yaklaşık olarak 800m/sn hızla ana malzeme yüzeyine püskürtülür. Kaplamanın mikroyapı ve mekanik özellikleri plazma arkı püskürtme yöntemindeki kaplamalara benzemekle birlikte daha yüksek yoğunluğa ve daha yüksek bağ mukavemetine ulaşılabilmektedir [17].

Yüksek hızlı oksijen püskürtme yöntemi, diğer püskürtme yöntemleri içinde en yüksek bağ mukavemeti ve en az gözenekliliğe sahiptir. Yanma odasına giren tozlar homojen olarak ısındığı için kaplama mikroyapısı oldukça homojendir. Seramiklerin ergime sıcaklıkları çok yüksek olduğu için (>3300 °C) seramik kaplama için yeterli bir yöntem değildir. Genelde seramik kaplama plazma püskürtme yöntemiyle yapılır.

2.6.5.Plazma Püskürtme Yöntemi

Plazma püskürtme yöntemi konusu Bölüm 4'te detaylı olarak ele alınacaktır.

Tablo 2.1.Termal püskürtme yöntemlerinin karşılaştırılması [16]

İşlem	Toz alev	Tel alev	HVOF	D-Gun tabanca	Tel ark	Açık hava plazma	Yüksek enerjili plazma	Vakum Plazma
Eritme için gerekli enerji kW/kg	11-22	11-22	22-200	220	0.2-0.4	13-22	9-13	11-22
Güç kW	25-75	50-100	100-270	100-270	4	30-80	100-850	50-100
Maksimum sprey oranı Kg/s	7	9	14	1	16	5	23	10
Oksit içeriği %	6	4	0.2	0.1	0.5-3	0.5-1	0.1	-
Bağlanma dayanımı	Düşük	Orta	Çok yüksek	Çok yüksek	Yüksek	Yüksek	Çok yüksek	Çok yüksek
Nispi yapışma dayanımı A	3	4	8	8	6	6	8	9
Partikül çarpma hızı m/sn	30	180	610-1060	910	240	240	240-1220	240-610
Alev veya plazma sıcaklığı °C	2200	2800	3100	3900	5500	5500	8300	8300
Gaz akışı m³/s	11	71	28-57	11	71	4.2	17-28	8.4

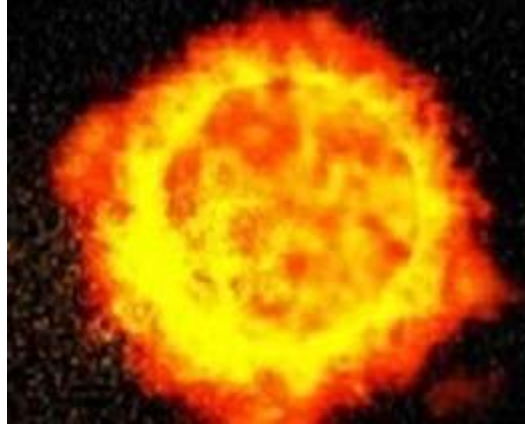
Tablo 2.2.Endüstriyel sektörlere göre termal püskürtme işlemi uygulamaları [16]

Oksifuel	Sprey	HVOF	D-Gun	Hava plazma	Vakum plazma	Örtülü plazma	Endüstri sektörü
*		*	*	*	*	*	Hava gaz tirbünü
*		*		*			Otomotiv motorları
	*	*	*	*			Ticari ekipmanlar
*	*	*					Çimento ve Yapı elemanları
*		*	*	*			Kimyasal işlemler
*							Bakır ve pirinç fabrikalar
*		*	*	*	*		Havacılık ve savunma
*		*		*			Dizel motorlar
		*	*	*	*		Elektrik ve elektronik
		*		*			Elektrik sektörü
*		*					Dövme metal
*		*	*	*	*	*	Hidro enerji tirbünleri
		*		*			Demir çelik döküm
*							Marina üretimi ve tamiri
		*	*	*	*	*	Medikal
*	*	*		*			Madencilik
		*	*	*			Nükleer
*	*	*	*	*			Petrol endüstrisi
*		*		*			Demiryolu

BÖLÜM 3. PLAZMA PÜSKÜRTME YÖNTEMİ

3.1.Plazmanın Tanımı

Plazma, eşit sayıda serbest elektron ve pozitif iyon bulunduran maddenin katı, sıvı ve gaz hali yanında dördüncü hali olarak adlandırılan, yüksek enerji düzeyine ulaşmış, elektriği ileten yoğunlaştırılmış bir gazdır. Plazma halinde madde katı, sıvı ve gaz haline göre daha düzensizdir. Gazların iyonlaşması sonucu ortaya çıkan toplam enerjinin bir bölümü ışık enerjisine dönüşerek kaybolur. Doğal olarak görülen plazma çok seyrek olarak ortaya çıkar. Kuzey yarım kürede geceleri gökyüzünde ortaya çıkan ışıklar bir doğal plazmadır. Güneş tamamen plazma fazından meydana gelmiştir. Ayrıca yıldızların içindeki maddede plazma fazıdır [21].



Şekil 3.1.Maddenin plazma hali

Gazlar ısıtılınca önce atomlarına ayrılır ve dış yörünge elektronlarının kopması ile pozitif yüklü iyon haline gelirler. Plazma fazının oluşumu örneklendirilirse; azot molekülü ısıtılınca önce azot atomu sonra da azot iyonu oluşur.



Bunun sonucunda molekül, atom, iyon ve elektron bulunduran bir karışım meydana gelir. Bu karışıma plazma denir.

Gazın iyonlaşma oranına göre iki çeşit plazma vardır [22]. Birincisi; tam veya yarı iyonlaşmış plazmadır. Bu tür plazmalar termonükleer sıcaklıkta karşılaşılan plazmalar olup sıcaklık birkaç milyon derecedir. Güneş ve yıldızlar bu plazmaya örnek verilebilir. İkincisi ise; kısmi iyonlaşmış plazmadır. Bu tür plazmalarda iyonlaşma oranı % 50'yi ara sıra aşar. Sıcaklık 2000 °C ile 10000 °C arasındadır. Bu tür plazmalar sanayide kullanılır. Gazlar yalıtkan iken plazma iletkenidir. Bu da sanayi için çok önemlidir [23].

Plazmanın iki önemli avantajı vardır. Birincisi bilinen bütün malzemeleri eritebilecek derecede yüksek sıcaklık elde etmenin mümkün olması, ikincisi ise diğer malzemelere daha iyi ısı transferi sağlamasıdır.

Plazma ışınının hızı akış hızı ile doğru ve nozul çapının karesiyle de ters orantılıdır. Plazma ısının hızı, taşıyıcı gazın akış hızının artmasıyla önemli derecede etkilenir ve böylece plazma sıcaklığı ve hızı azalır [24].

3.2. Plazmanın Özellikleri

Plazmanın özelliklerini aşağıdaki gibi sıralayabiliriz [25]:

1. Plazma dış ortama karşı elektriksel olarak nötrdür, yani plazma içerisinde pozitif yüklerin sayısı negatif yüklerin sayısına eşittir.
2. Elektrik ve ısıyı iyi iletmektedir. Plazma içerisinde özellikle elektronlar elektrik ve ısı iletiminde önemli rol oynamaktadır.
3. Yüksek sıcaklığa ve enerji yoğunluğuna sahiptir.
4. Plazmayı magnetik ve termik olarak sıkıştırmak dolayısı ile enerji yoğunluğunu ve sıcaklığını yükseltmek mümkündür.
5. Anizotropik bir yapıya sahiptir, yani özellikleri yöne bağlı olarak değişmektedir.
6. Elektrik ve magnetik alandan etkilenmektedir.
7. Kaplanan malzemenin tokluk ve kolay şekillendirilebilme gibi özellikleri korunup ayrıca da malzeme ısıya ve korozyona daha dayanıklı hale gelmektedir.

8. Kaplamaların yapısı heterojen olup, yarı kararlıdır ve genellikle birbirine yapışmış halde bulunan farklı tanelerden meydana gelir.
9. Porozite plazma püskürtme kaplamaların karakteristik bir özelliği olup yapısal göstergelerindendir.
10. Plazma kaplamaların önemli bir özelliği de kullanılan kaplama tozuna bağlı olarak 200-1550 HV arasında değişen sertlikleridir.

3.3.Plazmanın Kullanım Alanları

Plazma, günümüzde floresan lambadan televizyona kadar çok geniş bir yelpazede kullanılmaktadır. Günlük yaşam ihtiyaçlarının yanı sıra otomotiv, kalıpcılık, makine imalatı, metal şekillendirme, plastik işleme, döküm, madencilik vb. endüstriyel uygulamalarda da kullanılmaktadır.

Plazma kullanılarak malzeme birleştirme, malzeme kesme, hedeflenmiş malzemenin yüzey özelliklerini değiştirme, yüzey sertleştirme ve yüzey kaplama yapılmaktadır. Plazma kullanılarak yapılan işlemlerin ilk yatırımı maliyetinin yüksek olmasına karşın işlem maliyeti çok düşüktür.

3.4.Plazma Püskürtme Tekniğine Genel Bakış

Plazma püskürtme kaplama teknolojisi, termal püskürtme ailesinin çok yönlü kullanıma sahip bir alt grubu olup 1937’ de Reineck’e tarafından bulunmuştur. Daha sonra Amerika şirketlerince teknik geliştirilmiştir.

Plazma püskürtme yöntemi, malzeme yüzeyinde yeni bir fonksiyonel tabakanın üretilbildiği önemli bir yöntemdir ve malzemelerin, aşınma, korozyon ve yüksek sıcaklık hasarlarına karşı yüzey dirençlerini geliştirmek için kullanılmaktadır [23]. Ayrıca plazma püskürtme yöntemiyle pahalı olmayan bir ana malzeme üzerine ince ve koruyucu değerli

yüksek bir kaplama yaparak korozyona ve ısıya dayanıklı hale getirilirken ana malzemenin üstün özellikleri de (tokluk, kolay şekillenebilme vb.) korunur.

Plazma püskürme yöntemi ile kaplama tekniğinde, malzeme yüzeyine kaplanmak istenen metalik, seramik, kompozit veya oksit esaslı tozlar bir plazma arkı içerisinde ergitilir. Ergiyen malzeme, bir plazma tabancasıyla kaplanacak malzeme yüzeyine püskürtülerek kaplama işlemi yapılır.

Plazma, kaplama tabancası içerisinde su soğutmalı bakır anot ile toryumlu katot arasında oluşturulan yüksek voltaj arkı (DC) içerisinde plazma gazları olarak nitelendirilen Ar-H₂-N₂ ve He gazlarının geçirilmesiyle elde edilir [26].

Plazma püskürtme ile kaplama yönteminde, sıcaklık ticari gaz ekipmanlarıyla 15000 °C'nin üstüne çıkabildiği için bilinen her türlü malzemenin ergimesi mümkündür. Bazı püskürtme sistemlerinde sıcaklık 30000°C'yi aşabilmektedir. Bu da plazma püskürtme yöntemi ile kaplamada, kaplama malzemesi olarak çok geniş bir yelpazenin kullanıla bilinmesine olanak sağlamıştır. Ayrıca plazma tarafından oluşan yüksek gaz hızı, püskürtme esnasında malzemede ayrışma veya çözülmenin oluşmasını engellemiştir.

3.5.Plazma Püskürtme Tekniğinin Uygulanışı

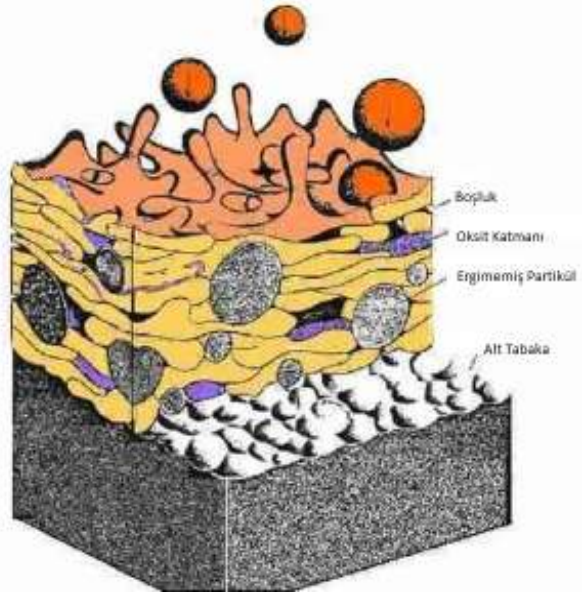
Plazma püskürtme yöntemi ile kaplama tekniğinde, kaplama işleminde ana malzemenin kaplama işlemine hazırlanması kaplama işleminin en çok dikkat edilmesi gereken kademelerinden birisidir. Kaplamanın ana malzemeye gerektiği gibi bağlanması ancak kaplanacak yüzeyin iyi bir şekilde hazırlanmasıyla mümkündür. Mekanik bağlanmanın yanında partiküllerin ana malzeme ile mikro kaynaması ve kimyasal bağ oluşumu gibi diğer bağlanma mekanizmaları da mevcuttur. Bütün bu bağlanma mekanizmaları temas alanının arttırılmasını ve yüzeyin aktivasyonunu gerektirir. Güçlü bir kaplama-ana malzeme bağı oluşturmak için gerekli şartlar; yüzey üzerindeki nem, yağ ve oksit filmlerinin kaldırılması ve uygun bir yüzey pürüzlülüğünün sağlanmasıdır. Yüzey temizliği ve pürüzlendirilmesi için aşındırıcı malzeme olarak genelde 30-36 gritlik Al₂O₃ (Alümina) tozu ile kumlama yapılır [27]. Ayrıca metallerin kaplanması işleminde yüzey

pürüzlülüğünün yanı sıra ana malzeme ile kaplama malzemesi arasındaki termal genleşme uyumsuzlukları ve elastisite modülü gibi farklı özelliklerin olumsuz etkilerini gidermek için bir ara bağlayıcı kullanılır [28]. Seramiklerin elastisite modülleri metallere göre daha yüksek, termal genleşme katsayıları ise daha düşüktür. Ara tabakadan beklenen performansın alınması için, kaplama kalınlığının 100 mikronu aşmaması gereklidir [24].

Püskürtme işlemine geçmeden önce kaplama yapılacak malzemeye bir ön ısıtma (yaklaşık 80-320°C) yapılır. Bunda amaç malzeme yüzeyindeki nemi almak ve püskürtülen ilk toz partikülleri için kuru ve ılık bir yüzey sağlamaktır. Ancak aşırı ön ısıtmalar oksitlenmeye neden olacağı için kaçınılmalıdır.

Yüzeyi hazırlanan ana malzeme, plazma alevine dik olarak yerleştirilip sabitlenir. Yoğun ve iyi kaliteli bir kaplama elde edebilmek için, püskürtülen tozların ana malzeme yüzeyine dik olarak çarpması gerekir. Püskürtme işlemi esnasında plazma tabancası elle veya otomatik olarak kontrol edilir.

Plazma püskürtme kaplamada, kaplama tozları bir taşıyıcı gaz yardımıyla (Ar-N₂) plazma alevi içerisine gönderilir. İyonize gaz içerisinde ortaya çıkan yüksek sıcaklık sebebiyle toz çapına bağlı olarak partiküller tam veya yarı ergiyik halde ana malzeme yüzeyine ivmelendirilirler. Hızla ana malzeme yüzeyine çarpan ergiyik yine yüzeye hızla yapışarak lamelli bir hal alır ve yine hızla soğur ($> 10^{-6}$ K/s) [29]. Ana malzeme yüzeyine bu şekilde biriken milyonlarca toz partikülü istenilen koruyucu yüzey tabakasını meydana getirir.



Şekil3.2.Plazma püskürtme kaplama tabakasının görünümü[30]

3.6.Plazma Gazlarının Özellikleri

Plazma püskürtme yöntemi ile kaplama tekniğinde, plazma alevini oluşturmak için Ar-He-N₂-H₂ veya bunların bileşimleri kullanılır. Plazma gazlarının belli oranlarda karışımlar halinde kullanılmasında ki amaç plazma alevinin entalpisini ve hızını arttırmaktır. Hangi gazın seçileceği plazma alevi için arzulanan sıcaklık ve hız değerleri kaplama malzemesi ve ana malzemenin kararlılıklarına bağlıdır.

Plazma gazlarının iyonlaşması sonucunda toplam enerjilerinin bir bölümü kaybolarak ışık enerjisine dönüşür. Çift atomlu plazma gazlarındaki (N₂ ve H₂) kayıplar tek atomlulara (Ar ve He) göre daha fazladır.

Plazma gazları tek tek kullanıla bilindikleri gibi belli oranlarda karışım halinde de kullanılırlar. Bundaki amaç, plazma alevinin entalpisini ve hızını arttırmaktır.

Ar ve He gaz karışımları genelde hava plazma sisteminde kullanılır. Ar primer gaz olarak kullanılır. H₂ gazının ısı iletim katsayısı yüksek olmasına karşın plazma ısısı çok düşüktür. Bu nedenle daha yüksek çalışma voltajları gerektiği için kaplama işleminde

sekonder gaz olarak kullanılır. Genelde H_2 gazı sisteme yaklaşık % 5-25 oranlarında katılır.

N_2 gazı plazma gazı olarak nadiren tercih edilir. Reaktif bir gaz olduğu için vakum plazma sisteminde koruyucu ortam olarak kullanılarak AlN-TiN-TiAlN-MoN gibi nitrür esaslı kaplamaları üretilmesine imkân sağlar [14].

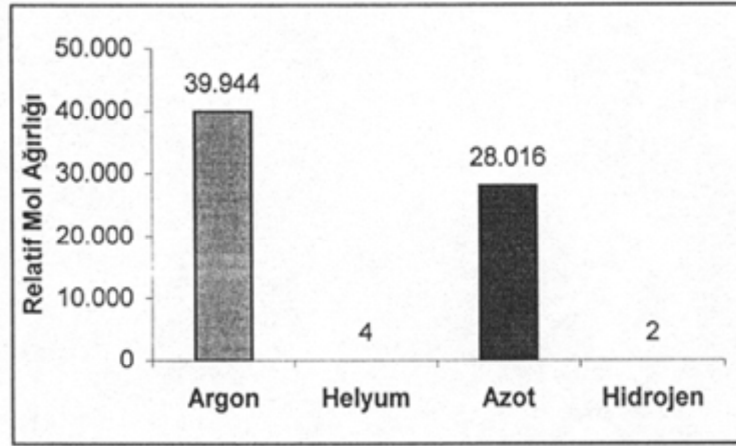
Ar gazı, N_2 gazına göre daha düşük gerilimde ve iki kat daha fazla plazma ısısı verdiği için yoğun kaplamaların üretiminde kullanılır.

He gazı tıpkı H_2 gazı gibi Ar ve N_2 gazlarına göre daha yüksek bir ısı iletkenliğe sahiptir. Fakat iyonlaşabilmesi için çok yüksek çalışma gerilimlerine ihtiyaç duyulduğu için vakum plazma kaplama sistemlerinde Ar-He gaz karışımının ısı enerjisini arttırmada üçüncü gaz olarak kullanılır. He gazının pahalı bir gaz olması en büyük dezavantajıdır.

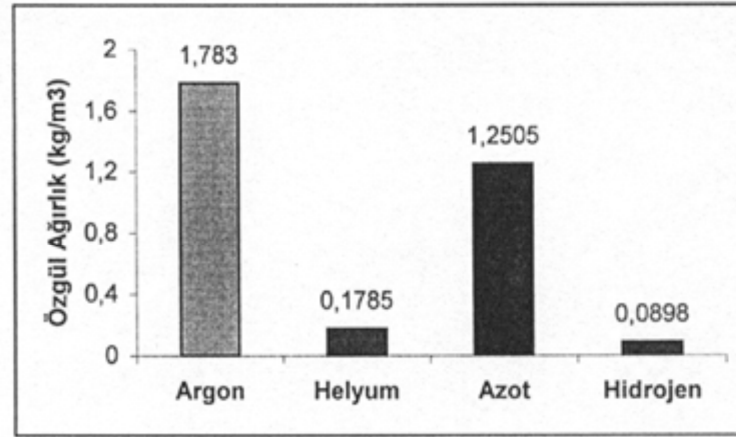
Başlıca plazma gazlarının özellikleri Tablo 3.1.'de verilmiştir.

Tablo3.1. Plazma gazlarının özellikleri [31]

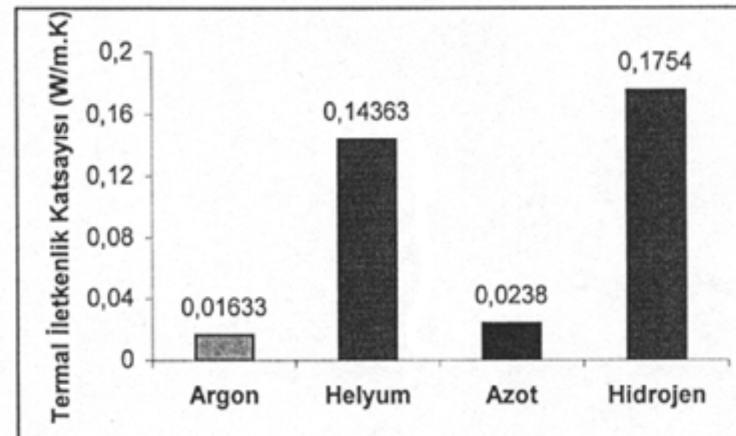
ÖZELLİKLER	PLAZMA GAZLARI			
	Ar	He	N_2	H_2
RealatifMol Ağırlık	39,944	4,0002	28,016	2,0156
Özgül Ağırlık (0°C,100 kPa) ($kg\ m^{-3}$)	1,783	0,1785	1,2505	0,0898
Isıl İletkenlik Katsayısı (0°C) ($W\ mK$)	16,3	143,6	23,8	175,4
Özgül Isı Kapasitesi (20°C) ($kJ\ kgK$)	511	5233	1046	14268
Ark Gerilimi (V)	40	47	60	62
Ark Girişi (kW)	-	50	65	120
İyonlaşma Potansiyeli (eV)				
Başlangıç	15,70	24,05	14,50	13,50
Bitiş	27,50	54,10	29,40	-
Plazma Arkı Sıcaklığı (K)	14000	20000	7300	5100



a

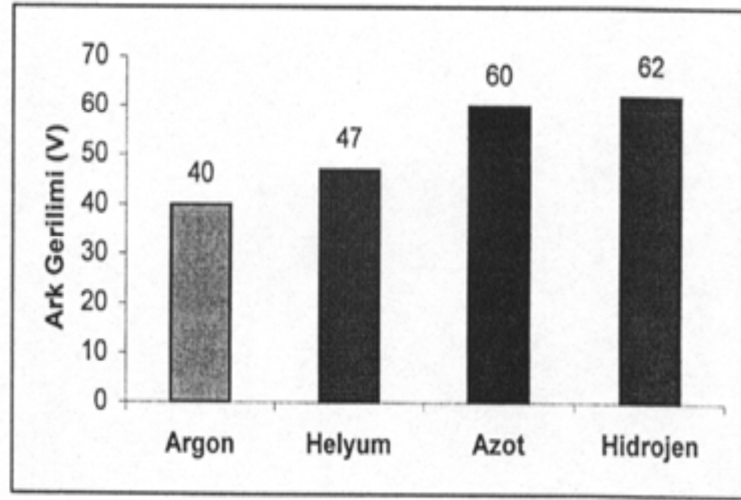


b

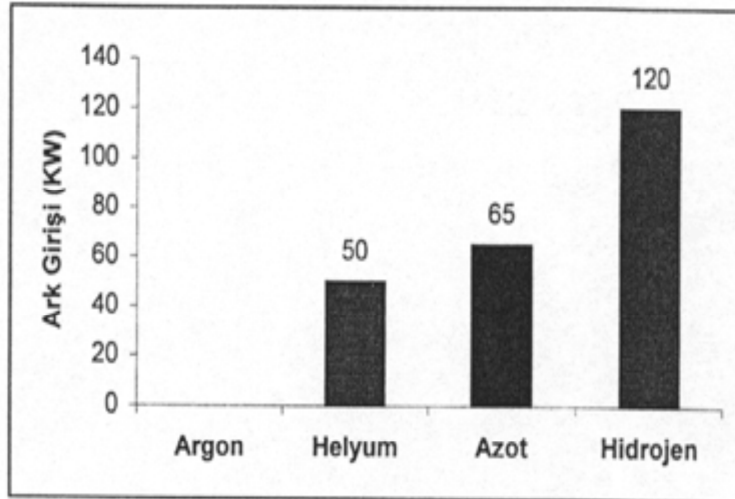


c

Şekil 3.3. Plazma gazlarının a) relatifmol ağırlığı, b) özgül ağırlık ve c) termal iletkenlik katsayısı özelliklerinin karşılaştırılması [32].



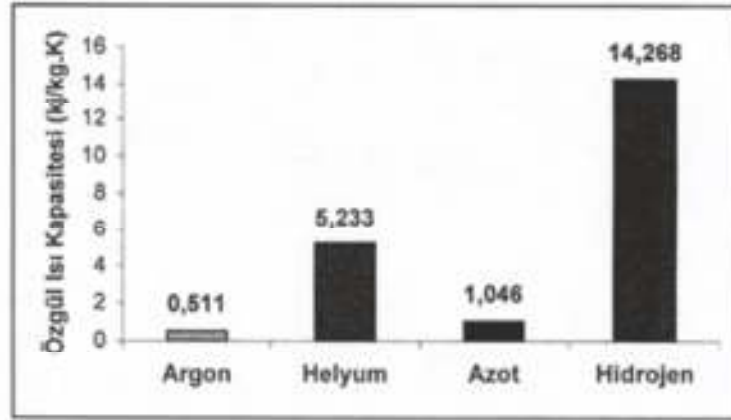
a



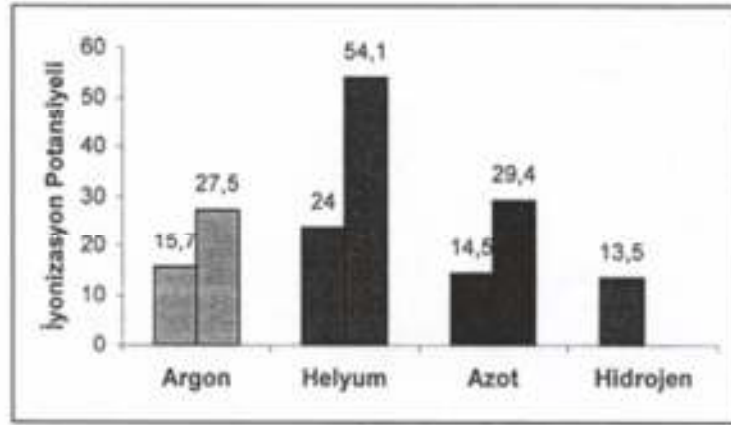
b

Şekil 3.4. Plazma gazlarının a) ark gerilimi ve b) ark girişi özelliklerinin karşılaştırılması

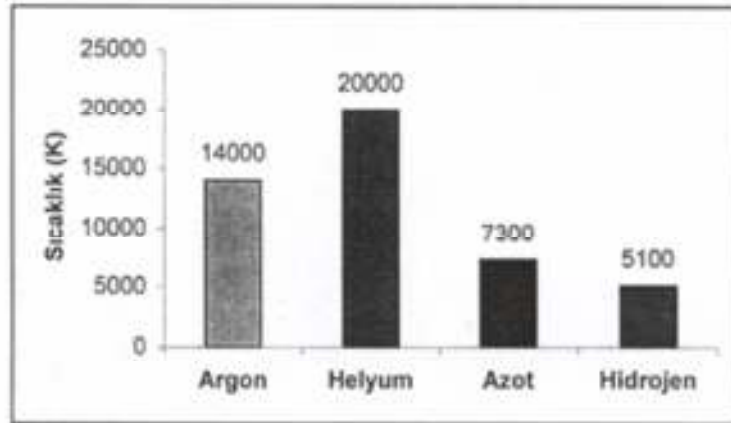
[32]



a



b



c

Şekil 3.5. Plazma gazlarının a) özgül ısı kapasitesi, b) iyonizasyon potansiyeli ve c) sıcaklık özelliklerinin karşılaştırılması [32]

3.7.Plazma Püskürtme Yönteminde Kullanılan Kaplama Tozlarının Özellikleri

Plazma püskürtme yönteminde toz boyut dağılımı mümkün mertebede üniform ve tozlar şekil olarak küresel olmalıdır. Çünkü plazma alevinde çok ince olan kaplama tozları buharlaşırken iri tozlar tam olarak ergimeden ana malzeme yüzeyine püskürürler. Kaplama tozlarının ergimesi plazma tabancasının anot ile katodu arasındaki ark bölgesinin beslenmesi ile mümkündür. Tozlar genellikle plazma alevine dik olarak enjekte edilirler. Kaplama tozları plazma alevinin ısı ve kinetik etkileriyle ergir ve ana malzeme yüzeyine püskürtülür.

Plazma püskürtme yöntemi ile kaplama işleminde kaplama tozlarının yaklaşık % 40-50’lik kısmı yörünge sapmaları ve aşırı erime sonucu buharlaşarak kaybolur.

Plazmada ergiyen toz partikülleri yüksek kimyasal aktiviteye sahiptirler. Bu nedenle toz partikülleri ile ortam atmosferinin gazları arasında; gaz adsorbsiyonu, kimyasal etkiler, oksit tabakası oluşumu ve difüzyon gibi birçok etkileşim oluşur.

Plazma alevi içerisinde yüzey gerilimi nedeniyle küresel olan toz partikülleri ana malzemeye çarpınca deforme olurlar ve lamelli bir şekil alarak katılaşır.

3.8.Plazma Püskürtme Yönteminin Sınıflandırılması

Plazma püskürtme yöntemi atmosfer şartlarına, plazma üflecinin dizaynına, sistemde kullanılan plazma parametrelerine ve plazma işleminin gerçekleştiği ortama göre isimlendirilmektedir. Başlıca plazma püskürtme ile kaplama yöntemleri:

1. Atmosferik plazma püskürtme (APS) yöntemi,
2. Vakum plazma püskürtme (VPS) yöntemi,
3. İnert plazma püskürtme (IPS) yöntemi,
4. Su altında plazma püskürtme (SPS) yöntemi olmak üzere 4’e ayrılır.

Plazma işlemi koruyucu atmosfer altında yani açık atmosfer ortamı ve basıncında gerçekleşiyorsa bu yöntem “Atmosferik Plazma Püskürtme (APS) Yöntemi” denir. Endüstriyel alanda en fazla kullanılan yöntem atmosferik plazma püskürtme yöntemidir. Bu yöntem metal ve seramik yüzeylerin kaplanması yaygın olarak kullanılır.

Atmosferik plazma püskürtme (APS) yönteminde güç ünitesi, kontrol ünitesi, soğutma ünitesi ve plazma tabancasından oluşan bir sistem vardır. Kaplanacak ana malzeme veya plazma tabancası otomatik veya yarı otomatik tezgâhlarla hareket ettirilir. Atmosferik plazma püskürtme yönteminde (APS) daha yoğun kaplamalar elde etmek, birim zamandaki malzeme birikim hızını arttırmak ve tabancanın ısı verimini % 70-75 oranlarına yükseltebilmek için 250 kW'lık güçlerde çalışılır. Atmosferik plazma püskürtme yönteminde (APS) kaplama esnasında kaplama tozunun % 40 veya % 50'si yörünge sapması ve aşırı erime sonucu buharlaşma gibi nedenlerden dolayı kaybolur. Daha fazla kaplama tozunun ana malzemeye kaplanmasını sağlamak ve eriyen tozların oksitlenmesini engellemek için de yine 250 kW'lık ark gücünde çalışılır.

Plazma işlemi, vakum altında veya düşük basınçlı gaz ortamında gerçekleşiyorsa “Vakum Plazma Püskürtme (VPS) yöntemi” denir. Vakum altında plazma püskürtme tekniği oksijen afinitesi yüksek malzemelerin kaplanmasında kullanılır. Bu yöntemde püskürtülen toz partikülleri seyreltilmiş bir ortamdan daha az soğuyarak ve daha az yavaşlayarak geçerler. Dolayısıyla kaplama tabakası daha az yüksek kinetik enerjiye sahip partiküllerle üretilir. Sonuç olarak bu tip kaplamalar düşük oranlarda porozite ve oksit içerir [9]. Vakum plazma püskürtme yöntemi (VPS) vakum kabin basıncı değerine göre düşük basınçlı plazma püskürtme (yaklaşık 50-200 mbar kabin basıncında) ve yüksek basınçlı plazma püskürtme (200 mbar'dan daha yüksek kabin basıncında) diye adlandırılır. Vakum plazma püskürtme (VPS) sistemi; güç ünitesi, plazma tabancası, toz besleme ünitesi, soğutma ünitesi, vakum ünitesi ve kabin içindeki atıkları temizleme ünitesinden meydana gelir. Vakum plazma püskürtme yöntemi (VPS) vakum altında gerçekleştiği için oksitsiz kaplamalar elde edilmektedir. Vakum plazma püskürtme yönteminde (VPS) kabin basıncı arttıkça plazmanın boyu kısalmış ve böylece hem birim zamanda daha fazla toz ergir hem de plazmanın enerjisi arttığı için seramikler gibi yüksek ergime sıcaklığına sahip kaplama tozlarının ergimesi kolaylaşır.

Plazma işlemi, inert veya koruyucu gaz altında gerçekleşiyorsa bu yöntem “İnert Plazma Püskürtme (IPS) Yöntemi” denir. İnert plazma püskürtme (IPS) yönteminde inert gaz olarak genellikle Ar gazı kullanılır.

Plazma işlemi, su altında gerçekleşiyorsa “Su Altında Plazma Püskürtme (SPS) Yöntemi” denir. Su altında plazma püskürtme yöntemi, plazma püskürtme yöntemi ile kaplama teknolojisinde kullanılan en son yeniliktir. Bu yöntem sayesinde su içerisinde bulunan parçaların bakım, onarım ve kaplanması mümkün olmuştur. Su altında ve kısa püskürtme mesafesinde kaplama yapılması plastiklerin kaplanmasını mümkün kılmıştır. Su altında gerçekleşmesi ile altlık malzemesinin iyi soğuması sonucu kalın kaplama kalınlıkları ve daha yüksek yapışma özelliği elde edilir [33].

En fazla kullanılan plazma püskürtme yöntemi ile kaplama teknikleri sırasıyla; atmosferik plazma püskürtme (APS), vakum altında plazma püskürtme (VPS) ve inert veya koruyucu gaz altında plazma püskürtme (IPS) yöntemleridir.

3.9.Plazma Püskürtme Yöntemi ile Yapılan Kaplamaların Temel Özellikleri

3.9.1.Mikroyapı Özellikleri

Ana malzeme yüzeyine püskürtülen toz partiküller, ana malzeme yüzeyine çarptığı zaman kinetik enerjileri ısı ve deformasyon enerjisine dönüşür. Ana malzemeye temas anında toz partikülleri ısılarını ana malzemeye vererek soğuyup katılışır. Plazma alevi içerisinde yüzey gerilimi nedeniyle küresel olan toz partikülleri ana malzemeye çarpınca deforme olurlar ve lamelli bir şekil alarak katılışır. Kaplamalar anizotropiktir. Bu nedenle kaplamaların fiziksel özellikleri yöne bağlıdır.

Kaplamalar heterojen yapıda olup yarı kararlıdır ve birbirine yapışmış farklı boyutlu tanelerden oluşur.

3.9.2.Porozite

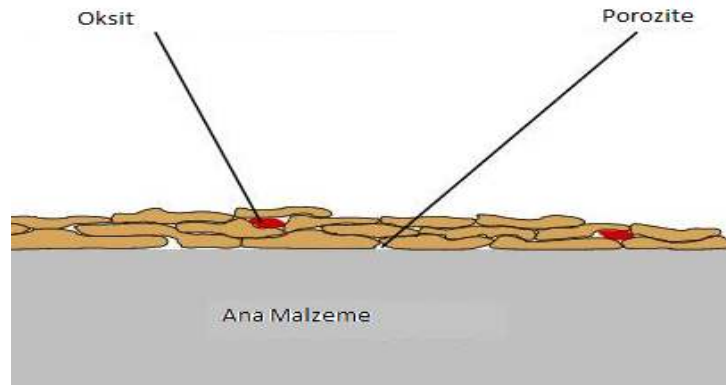
Porozite, plazma püskürtme yöntemi ile yapılan kaplamalarda karakteristik bir özelliktir ve yapı içerisindeki boşlukları ifade eder. Porozitelerin geometrisi ve dağılımı üniform değildir. Gevrek ve sert tozlar kullanılarak yapılan plazma sprej kaplamalarda porozite oranı oldukça yüksektir. Yüksek viskoziteli tozlar ve güçlü plazma üniteleriyle

yapılan plazma püskürtme yöntemi ile yapılan kaplamalarda daha yoğun kaplama tabakası elde edilir.

Plazma püskürtme kaplamalarında porozite oluşumu püskürtme tabancasının gücü, kaplama esnasında ki püskürtme parametreleri ve kaplama tozunun tane boyutuna bağlıdır.

Porozite miktarının yüksek olması özellikle mekanik özellikler üzerinde olumsuz etki yapar. Birbirine bağlanmış fazla sayıda porozitekorozif etkenlerin altlık malzemeye ulaşarak zararlı etkilere yol açar. Düşük poroziteye sahip kaplamalarda elastisite modülü yüksek olur ve bu da kırılmalara neden olur. Artan porozite miktarı ile elastisite modülü azalır. Ama bazı durumlarda da poroziteli yapı arzulanabilir. Örneğin; filtrasyon, termal izolasyon gibi. Bu gibi durumlarda porozite elde etmek için uzun püskürtme mesafesi ve iri taneli tozlar kullanılmalıdır.

Plazma püskürtme yöntemi ile yapılan kaplamalarda iki tür porozite vardır. Birincisi; çökeltile partiküller arasındaki boşlukların tam olarak doldurulamamasıyla oluşan yapı kusuru porozite. İkincisi ise; kaplamaların doğal özelliği olan ince porozite (mikro boşluklar).



Şekil 3.6.Kaplama tabakasındaki porozite [34]

3.9.3.Yapışma Mukavemeti

Yapışma mukavemeti, taban malzemesinden bir birim kaplama alanının ayrılması veya koparılması için gerekli olan kuvveti ifade eder [24]. Plazma püskürtme yöntemiyle

yapılan kaplamaların yapışma mukavemeti; kaplama parametrelerine, kaplanmak istenen malzeme özelliğine ve altlığın cinsine (demir veya demir dışı) ve altlığın yüzey durumuna (temizliliğine, pürüzlülük derecesine ve geometrisine) bağlı olarak değişir [35].

Yapışma, seramik esaslı kaplamalarda mekanik olarak, metal esaslı kaplamalarda genelde VanderWaals kuvvetleri ve difüzyon işlemleriyle olur. Seramik malzemeler kırılğan yapıları nedeniyle metal esaslı kaplamalara oranla daha düşük yapışma mukavemeti gösterirler. Bu nedenle yapışma mukavemetini arttırmak için genelde bir bağlayıcı (Ni-Al, Ni-Cr, Ni-Al-Cr-Y) kullanılır. Ayrıca bu bağlayıcı ana malzeme ile kaplama arasındaki termal genleşme farklılığını da önler. Plazma püskürtmede kaplamalar için artan kaplama kalınlığı yapışma mukavemetini düşürür. Kaplamalarda artan yapışma mukavemetiyle korozyon direncide artar. İyi bir yapışma mukavemeti iyi bir yüzey hazırlama işlemiyle elde edilir. Yüzeyi iyi temizlenmiş ve pürüzlendirilmiş kaplamalarda kaplama tabakası birbirine daha iyi yapışarak korozyona daha iyi direnç gösterir.

Kaplama tokluğunun geliştirilmesi de yapışma mukavemetini arttıran bir yöntemdir. Kaplama tokluğunu geliştirmek için iki veya daha fazla fazın birlikte çökmesi sağlanır. Böylece yapıda oluşan ikinci faz çatlak ilerlemesini önleyerek kaplama mukavemetini artırır.

3.9.4. İç Gerilmeler

Plazma püskürtme yöntemi ile yapılan kaplamalarda, kaplama tabakasının çatlamasına veya ana malzemeden ayrılmasına yol açan basma ve çekme iç gerilmeleri oluşur. Bu gerilmelerin nedeni; püskürtülen malzemenin üniform olmayan dağılımı, kaplama ile ana malzeme arasındaki termal genleşme farklılığı, ana malzemenin üniform olmayan bir şekilde ısıtılması ve ana malzemenin şekli ile boyutudur.

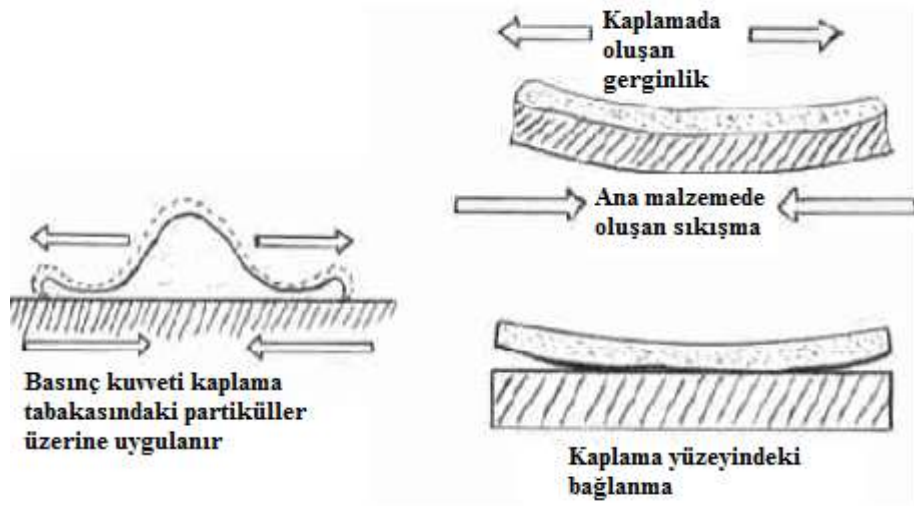
Plazma püskürtme yönteminde ergitilerek veya yarı ergiyik hale getirilerek altlık malzemeye püskürtülen partiküller sıcak oldukları için katılaşma sırasında büzülerek çekme gerilmeleri oluşturur. Partiküller ana malzemeden daha sıcak oldukları için katılaşma esnasında altlık malzemeye ısı transferi yaparlar. Partiküllerde meydana gelen çekme gerilmeleri kaplama tabakasında çatlaklar oluşturarak basma gerilmeleri medya getirir.

Bu iç gerilmeler ara tabaka uygulamasıyla (bağlayıcı) veya ön ısıtma ya da soğutmayla azaltılabilir. Kaplama tabakasıyla ana malzemenin termal genleşme katsayıları arasındaki farkın küçük olması gerekir. Aksi halde iç gerilmeler artar. Bu çatlama ve kaplama tabakasının kopmasına neden olur.

Kaplamada termal genleşme davranışı için 2 durum düşünülebilir.

1. $(\alpha)_{\text{kaplama}} > (\alpha)_{\text{ana malzeme}}$ olması halinde; kaplama malzemesinin termal genleşme katsayısı ana malzemenin termal genleşme katsayısından daha büyük olduğu için ana malzemeye oranla daha fazla genişler ve çekme yükleri nedeniyle kaplama tabakası eğilecektir.
2. $(\alpha)_{\text{kaplama}} < (\alpha)_{\text{ana malzeme}}$ olması halinde; ana malzemenin termal genleşme katsayısı kaplama tabakasının termal genleşme katsayısından daha büyük olduğu için kaplama malzemesi ana malzemeye termal olarak uyum sağlayamaz ve kırılabilir.

Bu nedenlerle kaplama tabakasıyla ana malzemenin termal genleşme katsayıları arasındaki farkın küçük olması yapışma mukavemeti için en uygundur.



Şekil 3.7. Kaplama tabakası ve ana malzemede oluşan gerilmeler [31]

3.9.5. Kaplama Kalınlığı

Kaplama mukavemetini etkileyen diğerk bir etken ise kaplama tabakasının kalınlığıdır. Artan kaplama kalınlığı ile yapışma mukavemeti düşer. 500 µm'nun üzerine çıkan kaplama kalınlıklarında mekanik işleme yapılarak yüzey pürüzlendirilir. Kaplama kalınlığının artması iç gerilmeleri arttırır ve kaplama ana malzemedan kolay ayrılır. Yani yapışma mukavemeti düşer. Seramik kaplamalarda da artan kaplama kalınlığı ile yapışma mukavemeti azalır.

3.9.6.Sertlik ve Aşınma Direnci

Plazma püskürtme yöntemi ile yapılan kaplamaların bir diğerk önemli özelliğı sertliktir. Kaplamaların sertliğı kaplama tozuna bağılı olarak genelde 200-1500 HV arasında değışir. Kaplamaların sertliğı; porozite, kaplama malzemesi, kaplama tabakasının heterojen yapısı, püskürtme ekipmanı, proses parametreleri ve uygulanan yük değıerine bağılıdır.

Plazma püskürtme kaplamalar genelde aşınma direncini arttırmak için yapılır. Aşınma direnci kaplanan malzemenin cinsine ve kaplama yapılacak çalışma ortamının özelliğine bağılı olarak değışir. Seramik kaplamalar birçok metalden daha iyi aşınma ve erozyon direncine sahiptirler ve dizel motorları da dâhil aşınma ve erozyon dirençli uygulamalarda yaygın olarak kullanılırlar. Bununla beraber, alevle püskürtmedeki kadar olmasa da poroziteler nedeniyle plazma püskürtme yöntemi ile oluşturulan kaplamalar korozyon için yetersiz kalabilmektedir [36].

3.10.Plazma Püskürtme Yöntemi ile Yapılan Kaplama Öncesi İşlemler

Kaplama işleminin en çok dikkat edilmesi gereken kademelerinden birincisi yüzey hazırlama işlemleridir. Yüzey hazırlamada amaç kaplama malzemesinin ana malzemeye gerektiğı gibi bağlanmasını sağlamaktır. Güçlü bir bağlanma yüzeyin her türlü kir, yağ ve oksit tabakasından arındırılması, yüzey üzerindeki nemin kaldırılması ve yüzey pürüzlülüğünün sağlanmasıyla olur. Kaplama kalınlığının artması, kalınlık yönünden sertliğı düşürür. Kaplamada püskürtme hızı ne kadar yüksekse, sertlikte o kadar yüksek

olur. Kaplama içerisindeki oksitler, karbürler sertliği arttırırken yapışma mukavemetini düşürür.

Uygulanacak kaplama malzemesinin türüne ve kaplama tabakasının kalınlığına bağlı olarak yüzey hazırlama işlemleri yapılır. 500 µm'nun üzerindeki kaplama kalınlıklarında malzeme yüzeyinde oluk şeklinde pürüzlendirme yapılır. Bu yöntemle “mekanik işleme” denir. Bu yöntemde malzeme yüzeyinden talaş kaldırıldığı için çok sert, kırılgan, kompleks geometrili yüzeylerde değil, yumuşak malzemelere uygulanması gerekir.

Kaplanacak ana malzeme yüzeyi gözenekli ise bu gözeneklere giren yağ ve gres kaplama esnasında buharlaşır ve kaplama tabakasının yapışma mukavemetini düşürür. Bu nedenle yağ ve gresten kimyasal çözücüler yardımıyla temizlenmelidir. Daha sonra yağ, gres ve paslardan temizlenen ana malzeme yüzeyi bir aşındırıcı yardımıyla pürüzlendirilir. Bu işleme kumlama da denir. Kumlamada aşındırıcı olarak dökme demir veya çelik griti, SiC veya Al₂O₃ kullanılır. Kumlanmış ana malzemenin yüzeyi pürüzsüz dalgalı değil keskin değişimli (pikli) olmalıdır. Kumlamada kullanılan havanın ve kumlama malzemesinin kuru ve temiz, daha önce kullanılmamış, olması gerekir. Kumlama yapıldıktan sonra malzeme yüzeyi temiz tutulmalı, püskürtme yapılarına kadar her türlü kirden, parmak izi dahil, korunmalıdır. Kaplama işlemi kumlama işleminden sonra 24 saat içerisinde yapılmalıdır. Böylece yüzey oksitlenme oluşmadan kaplanmış olur.

Plazma püskürtme yöntemi ile kaplama tekniğinde soğuk bir işlem olmasına rağmen çoğu uygulamalarda ana malzemeye bir ön ısıtma yapılır. Ön ısıtma yapmadaki amaç;

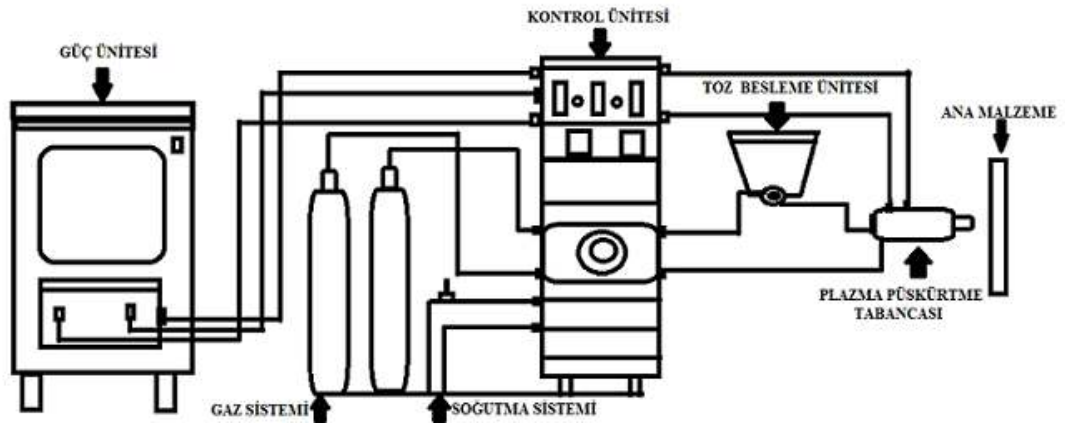
1. Ana malzemedeki nem kaldırarak,
2. Bağlanmayı gerçekleştirmek,
3. Malzemeler arasındaki farklı termal genleşmeleri dengelemek,
4. Püskürtülen ilk toz partikülleri için kuru ve ılık bir yüzey sağlamaktır.

Ön ısıtma sıcaklığı ana malzemeye bağlı olarak 80-320°C arasında değişir.

3.11.Plazma Püskürtme Kaplama Ünitesi

Plazma püskürtme yöntemiyle kaplama işleminin yapıldığı plazma püskürtme ünitesi;

1. Plazma püskürtme tabancası (Plazma üfleci)
2. Güç ünitesi
3. Gaz besleme ünitesi
4. Toz besleme ünitesi
5. Soğutma ünitesi
6. Kontrol ünitesinden meydana gelmektedir.



Şekil 3.8.Plazma püskürtme ünitesi

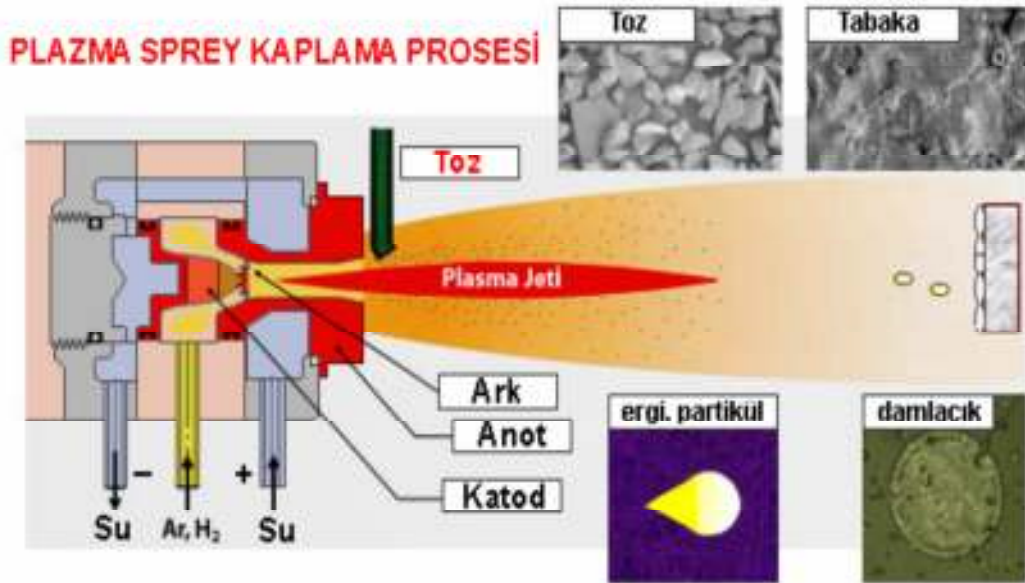
3.11.1.Plazma Püskürtme Tabancası

Kaplama ünitesinin en önemli çalışma ünitesi plazma püskürtme tabancasıdır. Plazmanın üretilmesindeki tüm aşamalar plazma püskürtme tabancası içerisinde gerçekleşir.

Plazma püskürtme tabancasında arkı oluşturan anot ve katot malzemeleri bulunur. Plazma püskürtme tabancasında anot olarak saf bakır, katot olarak da tungsten (W) kullanılır. Tungsten katot içerisine çeşitli oranlarda ThO_2 (% 0.9-4.2), ZrO_2 (% 0.3-0.9),

LaO₂ (% 0.9-1.2) veya CeO₂ gibi oksitler katılır. Böylece arkın tutuşması iyileşir, elektrot daha yüksek akımlar yüklenebilir ve elektrotun ömrü uzar. Örneğin; ThO₂ miktarında 0.5'lik artış katottun ömrünü aynı akım yoğunluğuna oranla 3.5 kat artırır [32]. Plazma bu anot ve katot arasında oluşan elektrik arkı içerisinde plazma gazlarının iyonizasyonu ile elde edilir. Plazma gazları katodun etrafından ve nozul görevi gören anodun içerisinden geçirilir. Katot boyunca ilerleyen plazma gazı, doğru akım (DC) içerisinde ısınır ve plazma sıcaklığına ulaşan gaz, nozul anottan plazma alevi olarak püskürtülür. Anot ve katot arasında oluşan ark sayesinde toz halinde beslenen kaplama malzemesi ergitilir ve ana malzeme yüzeyine püskürtülür.

Klasik plazma tabancaları için toz hızları 125-350 ms⁻¹ aralığında olmakla birlikte bazı yüksek hız plazma tabancaları ile ise 400-550 ms⁻¹ lik toz hızları elde edilebilmektedir [25].



Şekil 3.9. Plazma püskürtme tabancasının şematik görünümü[37]

3.11.2. Güç Ünitesi

Plazmayı oluşturan gazların iyonlaştırılması ve toz partiküllerinin plazma püskürtme tabancasına taşınması için gerekli elektrik gücünü sağlayan sistem güç ünitesidir.

Plazma püskürtme yöntemi ile üretilen kaplamaların özellikleri ile güç ünitesinin kapasitesi arasında önemli bir ilişki vardır. Konvensiyonel plazma püskürtme kaplama sistemlerinin gücü 40 kW iken şimdilerde 80-120 ve 220 kW'lık sistemler kullanılmakta ve bu sistemler sayesinde partikül hızı artmaktadır. Artan partikül hızına bağlı olarak porozitesi düşük, üstün mekanik özellikli yoğun kaplamalar elde edilmektedir.

3.11.3.Gaz Besleme Ünitesi

Plazma gazlarını görevi toz partiküllerini püskürtmek, toz partiküllerini hızlandırmak ve toz partiküllerini ana malzeme yüzeyine taşımanın yanı sıra toz partiküllerinin etrafını sararak atmosferin zararlı etkilerinden korumaktır.

Plazma gazlarını oluşturan Ar-He-N₂-H₂'nin işlem parametrelerine uygun karışımlar ve akış hızları gaz besleme ünitesinde ayarlanır. Böylece plazmanın sıcaklığı, büyüklüğü ve plazma arkının stabilizasyonu kaplama tozlarına bağlı olarak kontrol edilmiş olur.

3.11.4.Toz Besleme Ünitesi

Plazma püskürtme ile kaplama yönteminde farklı yollarla üretilen ve farklı akış özellikleri gösteren kaplama tozlarını plazma içerisine taşıma toz besleme ünitesiyle gerçekleştirilir. Homojen ve kaliteli bir kaplama tabakası elde etmek için kaplama tozları düzenli bir şekilde ve istenilen miktarda plazma içerisine taşınmalıdır. Taşıyıcı gaz olarak genelde N₂ veya Ar gazları kullanılır.

3.11.5.Soğutma Ünitesi

Plazma püskürtme ile kaplama işlemi boyunca çok yüksek sıcaklığa maruz kalan plazma tabancası soğutma ünitesi yardımıyla soğutulur. Soğutma işlemi sürekli devir daim yapana su ile gerçekleştirilir. Plazma tabancasında saf bakır anot kullanılırsa tabanca içerisinde 8000 °C'ye kadar çıkan ısının tabancayı eritmesini engeller ve soğutma sıvısına bu ısının transferini sağlayarak soğutmaya katkı sağlar.

3.11.6.Kontrol Ünitesi

Plazma püskürtme tabancasına beslenen plazma gazları yüksek gerilim veya yüksek frekans yardımıyla tutuşturulur. Plazma gazları, kaplama tozları, çalışma voltajı ve plazma arkı ile ilgili bütün ayarlamalar kontrol ünitesinde manuel veya bilgisayar yardımıyla yapılır.

3.12.Plazma Püskürtme ile Kaplama Yönteminin Avantajları

Plazma püskürtme ile kaplama yönteminin avantajlarını aşağıdaki gibi sıralayabiliriz:

1. Plazma püskürtme ile kaplama yönteminde bilinen bütün malzemeleri ergitebilecek kadar yüksek sıcaklık elde edilmesi mümkündür. Bu, yüksek ergime sıcaklığına sahip seramik tozlarının kaplama malzemesi olarak kullanılmasını mümkün kılmıştır.
2. Toz formunda ve belirli tane boyutlarında üretilen tüm malzemeler plazma püskürtme ile kaplama yönteminde kullanılabilir.
3. Plazma püskürtme ile kaplama yöntemi diğer malzemelere daha iyi ısı transferi sağlayabilmektedir.
4. Çok küçük ve çok büyük parçaların kaplanması mümkündür.
5. Kompleks şekilli parçaların kaplanması mümkündür.
6. Kaplama sistemi otomasyona entegre olabilecek esnekliğe sahiptir.
7. Kaplamanın yapılacağı ortamın çevreden izole edilmesi ile çevre dostu bir sistemdir.
8. Vakum plazma püskürtme yöntemi (VPS) ile çok düşük gözenekli, oksit veya inklüzyon içermeyen kaplamaların üretimi sağlanmıştır.
9. Kaplanacak parçanın yüzey temizliği ve ön ısıtma işlemleri hava plazma ile plazma tabancası vasıtasıyla yapılabilir. Fakat önceden pürüzlendirilmiş olan yüzeyin atmosferik ortamda ön ısıtma işlemi yüzeyde oksitlenmeye neden olacak ve kaplama kalitesini bozacaktır. Vakum plazma püskürtme sisteminde (VPS) ise hem

parçanın ısıtılması hem de yüzey temizleme ve pürüzlendirme işlemleri herhangi bir kumlama tozu kullanılmadan yine vakum altında sıkıntısız gerçekleştirir.

10. Vakum plazma püskürtme sisteminde (VPS) N_2 'nin koruyucu atmosfer olarak kullanılması durumunda, nitrür esaslı kaplamaların (TiN, AlN, TiAlN,...) üretilmesi mümkün olmuştur. Fakat kaplama esnasında istenmeyen metal-nitrür fazlarının oluşumunun kontrolü zordur.
11. Vakum plazma püskürtme (VPS) ile kaplama sonrasında takiben ısıtma işlemi uygulanmasıyla intermetalik faz oluşumları sağlanarak kaplama kalitesi artırılabilir.
12. Kaplanacak malzemenin sıcaklığı soğutma ile $200^{\circ}C$ 'den daha düşük sıcaklıklarda tutulabilir. Böylece yapıda distorsiyon olma ve son haline işlenmiş malzemeler kaplanabilir. Alt tabakada değişiklik olmaz. Alüminyum, kalay, çinko alaşımları gibi düşük ergime noktalı alaşımlardan yapılmış parçaların kaplanması mümkün olur.

3.13. Plazma Püskürtme ile Kaplama Yönteminin Sınırlamaları

Plazma püskürtme ile kaplama yönteminin sınırlamaları şöyle sıralanabilir:

1. Plazma püskürtme ile kaplama yöntemlerinin ilk yatırım maliyetleri yüksektir.
2. Vakum plazma püskürtme ile kaplama yönteminde vakum sistemlerinin bakım maliyetleri yüksektir.
3. Plazma püskürtme ile kaplama sırasında kaplama tozlarının bir kısmı yörünge değişimi ve aşırı ısınma sonucu oluşan buharlaşmayla kaybolmaktadır. Bu özellikle seramik esaslı kaplamalarda kaplama veriminin % 40-60 arasında değişmesine neden olur. Bu durum kaplamanın maliyetini artırır.
4. Plazma püskürtme yöntemiyle kaplanacak olan malzemeler, alüminyum, çinko ve alaşımları gibi düşük ergime sıcaklığına sahip malzemeler veya ince et kalınlığına sahip malzemeler ise kaplama esnasında yüksek ısı girdisi nedeniyle içyapılarında değişim ve çarpılmalar görülebilir. Bunu giderebilmek için ısı girdisini kaplama esnasında ayarlamak veya uygun bir soğutma işlemi uygulamak gerekir.
5. Kaplama sonrası oluşan yüzey pürüzlülüklerini gidermek için uygulanan yüzey bitirme işlemleri ek maliyet ve zaman gerektirir.

6. Tungsten karbür (WC), krom karbür (CrC_2), titanyum karbür (TiC) ve bor karbür (B_4C) gibi karbür esaslı tozlar çok yüksek sıcaklıktaki plazma alevine maruz kalarak ergirler. Ergiyen tozların ana malzeme yüzeyine çarpması sonrası hızla soğuması sonucunda kaplama tabakasında istenmeyen kararsız karbür fazları oluşur. Bu fazlar, kaplamanın mukavemet ve korozyon özellikleri üzerine olumsuz etki eder. Bu nedenle, plazma püskürtme ile kaplama yöntemiyle karbür esaslı tozların püskürtülmesini sınırlamıştır.

3.14.Plazma Püskürtme ile Kaplama Sistemindeki Gelişmeler

Gelişen teknolojiye paralel olarak plazma püskürtme ile kaplama yönteminin uygulama alanları artmış ve yöntemde uygulama alanları doğrultusunda gelişmeler olmuştur. Bu gelişmeler şöyle sıralanabilir:

1. Son yıllarda araba motorlarında verimi arttırmak, boyutunu sınırlandırmak, yakıt tüketimini düşürmek gibi bazı üstün özellikleri otomotiv sektörüne kazandırmak için silindir gömleklerinin ve piston halkalarının plazma püskürtme yöntemiyle aşınmaya karşı daha dirençli bir malzemeyle (örneğin seramiklerle) kaplanması ve böylece seri üretime dayalı sektöre uyum sağlaması çalışmaları devam etmektedir.
2. Son dönemlerde vakum plazma püskürtme (VPS) sisteminde üretimi hızlandırmak ve maliyeti azaltmak için tek bir kaplama çevriminde birden fazla malzemenin kaplanabilmesini sağlamak amacıyla yeni bir vakum sistemi geliştirilmiştir.

3.15.Plazma Püskürtme Yönteminin Uygulama Alanları

Plazma püskürtme yönteminin uygulama alanları şöyle sıralanabilir:

1. Uçak sanayinde; yanma odaları, türbin kanatları (termal bariyer kaplamalar),
2. Tekstil sanayinde; barmag makinelerinin yivli silindirleri, seydel makineleri koparma silindirleri, godetler, çekme silindirleri, iplik kılavuzları,
3. Tel çekme ve kablo sanayinde; makaralar ve kasnaklar,
4. Demir-çelik sanayinde; seramik kapaklar,
5. Kâğıt sanayinde; kurutma silindirleri, salmastra burçları,

6. Termik elektrik santrallerinde; gaz türbin kanatları,
7. Otomotiv sanayinde; segmanlar, pistonlar, turbo şarj rotorları,
8. Petrokimya sanayinde; salmastra kovanları, piston rodları,
9. Kimya sanayinde; mekanik salmastralar,
10. Savunma sanayinde; roket nozulları.

Plazma püskürtme yönteminin uygulandığı çeşitli endüstri kolları, kaplama işlemini uygulandığı kaplamalar ve kaplama türleri Tablo 3.2.'de verilmiştir.

Tablo 3.2.Plazma püskürtme tekniğinin uygulama alanları [32]

Endüstri Alanı	Amaç	Uygulanan Malzeme	Kaplama türü
Otomotiv	Aşınma, termal bariyer korozyon direnci	Valfler	$\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiO}_2+\text{Y}_2\text{O}_3$
Kimya	Aşınma ve korozyon direnci	Şaftlar, tüpler, brülör, bıçaklar ve soğutma sistemleri	MoCrBSi , Al_2O_3+ TiO_2 , ZrSiO_4 , $\text{Cr}_2\text{C}_3+\text{NiCr}$
Hidrolik Makineleri	Aşınma, erozyon, kavitasyon ve korozyon direnci	Pompalar, şaftlar	$\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiO}_2$, ZrSiO_4 , Cr_2O_3
Cam	Termal bariyer, abrasif ve korozyon direnci	Cam presleme mandrelleri, cam yapıcı çubuklar	$\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiO}_2$, ZrSiO_4 , ZrO_2
Uçak ve Uzay	Sıcak gaz korozyon direnci	Uçak gaz türbinlerinin yanma odaları, pervane statörleri, türbin panelleri, pervane platformları	Termal bariyer esaslı kaplamalar
Nükleer Teknoloji	Termal bariyer ve aşınma direnci	Genleşme ölçer, termokupul, güç jeneratörü, yakıt elemanları	Al_2O_3 , $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{MgO}$, ZrO_2 , $\text{Cr}_2\text{C}_3+\text{NiCr}$
Kağıt Sanayi	Aşınma	Kurutma silindirleri	Mo-NiCr
Termik Elektrik Santralleri	Sıcak gaz korozyon direnci	Gaz türbin kanatları	MCrAlY

3.16. Plazma Püskürtme ile Kaplama Yöntemine Etki Eden Faktörler

Plazma püskürtme yöntemi ile kaplama tekniğine etki eden başlıca faktörler; ana malzeme üzerinden etki edenler, plazma gazı ve alevi üzerinden etki edenler, toz malzeme ve enjeksiyonu üzerinden etki edenler, plazma tabancası üzerinden etki edenler ve çevre üzerinden etki edenler olmak üzere birçok faktör vardır [38].

Ana malzeme üzerinden etki eden faktörler:

1. Yüzeyin hazırlanma şartları,
2. Sıcaklık,
3. Termal iletkenlik,
4. Difüzyon katsayısı,
5. Termal genleşme katsayısı.

Plazma gazı üzerinden etki eden faktörler:

1. Gaz bileşimi ve gaz debisi,
2. Entalpi,
3. Plazma alevi sıcaklığı,
4. Plazma hızı,
5. Partiküllerin ısı ve momentum transferi,
6. Kimyasal reaksiyonlar.

Plazma tabancası üzerinden etki edenler:

1. Tabancanın izafi hareketi,
2. Güç miktarı,
3. Tabanca dizaynı.

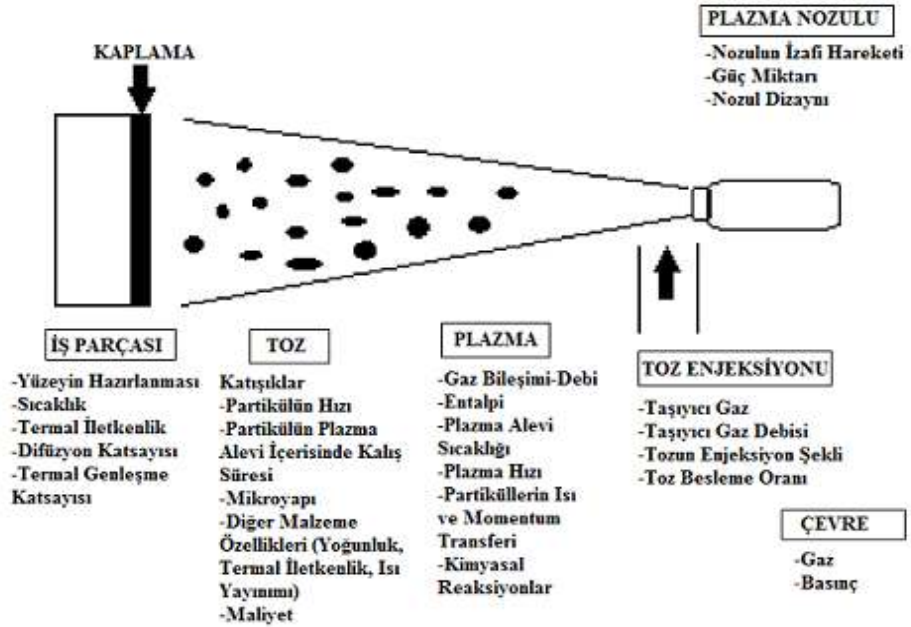
Toz malzemesi ve enjeksiyonu üzerinden etki edenler:

1. Tozun şekli ve boyut dağılımı,
2. Tozun kimyasal bileşimi ve katışıqlar,
3. Partikül hızı,
4. Partikülün plazma alevi içerisinde kalış (uçuş) süresi,

5. Mikroyapı,
6. Diğer malzeme özellikleri (yoğunluk, termal iletkenlik, ısı yayılımı),
7. Tozun maliyeti,
8. Taşıyıcı gazın cinsi,
9. Taşıyıcı gaz debisi,
10. Tozun enjeksiyon şekli,
11. Toz besleme oranı.

Çevre üzerinden etki eden faktörler:

1. Ortam gazı,
2. Ortam gaz basıncı.



Şekil 3.10.Plazma püskürtme ile kaplama yöntemine etki eden faktörler [38]

3.17.Plazma Püskürtme Üzerine Yapılan Çalışmalar

Geçmişten günümüze kadar bilimle uğraşan insanlar malzemelerin ömrünü uzatmak ve mekanik özelliklerini iyileştirmek adına plazma püskürtme ile kaplama alanında birçok çalışma yapmışlardır. Bu çalışmalara örnekler verirse şöyle sıralanabilir.

Liu ve Gu [39] çalışmalarında Q235 sade karbonlu çeliğe plazma ark püskürtme ile Ni-Cr-C elementlerinin toz karışımlarını kullanarak ürettikleri kaplamaların mikroyapı, mikrosertlik ve aşınma davranışlarını incelemişlerdir. Plazma püskürtme ile kaplama yöntemiyle hızlı katılaşma sonucunda mikroyapı kaba blok şeklinde Cr_7C_3 karbürleri ile iç kısımlarda γ/Cr_7C_3 ötektik matrisi oluşmuştur. Kuru kayma aşınma testleri sonucunda kompozit kaplamanın aşınma direnci aşırı derecede artmış ve sertliği ise çok yüksek olmuştur.

Chen ve Li [40] demir esaslı alaşımlar kullanarak AISI 1020 çelik yüzeyini plazma ark yöntemiyle kaplamışlardır. Mikroyapı incelemeleri sonucunda ana faz $\gamma-(Fe, Ni)$ ve diğer faz $(Cr, Fe)_7(C, B)_3$ olmuştur. Kaplama sertliği ana malzemeye oranla çok artmasına rağmen oluşumu düzgün değildir. Kaplamaların aşınma direnci oluşan farklı yapılar nedeni ile büyük oranda artmıştır.

Song ve arkadaşları [41] orta karbonlu çelik malzeme yüzeyine farklı parametreler ile plazma sprej yöntemi ile Al_2O_3 -%8 TiO_2 tozu kaplamışlardır. XRD analizlerinde $\gamma-Al_2O_3-TiO_2$ ve $\alpha-Al_2O_3$ fazlarını görülmüştür. Sertlik incelemesinde ise püskürtme parametresinin değişimine bağlı olarak sertlik artmıştır. Aşınma oranı ise püskürtme parametresinin değişimine bağlı olarak farklılık göstermiştir.

Shanmugavelayutham ve arkadaşları [42] paslanmaz çelik ana malzeme yüzeyine, Al_2O_3 içerisine farklı yüzdelerde ilave edilmiş ZrO_2 tozlarını plazma püskürtme yöntemi ile kaplamışlardır. Artan ZrO_2 oranına bağlı olarak adhezyon aşınma direnci azalmıştır. Sertlik ölçümlerinde ise sertlik değerleri 1083HV ve 1371HV arasında değişmiştir.

Sarıkaya [43] AISI 304L paslanmaz çelik malzeme yüzeyine 300-500 °C sıcaklıklarda plazma püskürtme yöntemi ile Al_2O_3 kaplamıştır. Kaplama sonrası artan sıcaklığın kaplama mikroyapısı ve mekanik özellikleri üzerine etkisini araştırmıştır. Yüksek sıcaklıkta sertlik artmış gözeneklilik ise azalmıştır.

Hazar ve Öztürk [13] plazma püskürtme yöntemi ile seramik kaplanmış bir dizel motorunda biyodizel kullanımını deneysel olarak incelenmesi ilgili yaptıkları çalışmada, 4 zamanlı dizel motorun yanma odası elemanları olan piston, silindir kafası, egzoz ve emme subapları seramik malzeme olan Al_2O_3 -%13 TiO_2 ile plazma püskürtme yöntemi kullanarak

kaplamışlardır. Önce kaplanmış yüzeyle sonra kaplanmamış yüzeyler aynı şartlar altında test edilmiştir. Deneyler sonucunda kaplanmış yüzeylerin mikroyapısı ve yüzey davranışları kaplanmamış yüzeylere göre daha üstün özellikler göstermiştir.

Özel ve arkadaşları [44] AA2024 alüminyum alaşımı üzerine $Al_2O_3/Al_2O_3+TiO_2$ tozunun plazma püskürtme yöntemi ile kaplanması ile ilgili yaptıkları çalışmada AA2024-T4 alüminyum alaşım yüzeyine plazma püskürtme yöntemi ile Al_2O_3 ve farklı oranlarda TiO_2 tozları ile kaplama yapmışlardır. Yapılan kaplama sonucunda TiO_2 'nin mikroyapı ve yüzey pürüzlülüğüne olan etkisini araştırmışlardır. Kaplanan yüzeylerin mikroyapısını incelemiş ve yüzey pürüzlülük değerlerini ölçmüşlerdir. Deneyler sonucunda $Al_2O_3+TiO_2$ içerikli kaplamalarda TiO_2 miktarındaki artış ile yüzey pürüzlülüğü ve gözenek miktarı azalmıştır.

Saral [4] AISI 304L östenitik paslanmaz çelik ve Ç1030 sade karbonlu çelik malzeme yüzeyine NiCrAlY ara bağlayıcısı kullanarak plazma püskürtme yöntemiyle çeşitli oranlarda Al_2O_3 ilaveli YSZ- Al_2O_3 kaplama yapmıştır. Yapılan kaplamalar da Al_2O_3 miktarındaki artış yüzey pürüzlülük değerlerini ve kaplama yüzeyindeki porozite miktarını azaltmıştır. Al_2O_3 miktarında ki artışa paralel olarak kaplamaların sertlik değerlerinin artmış ve mekanik özelliklerinin iyileşmiştir.

Yılmaz ve arkadaşları [45] AISI 304L paslanmaz çelik malzeme yüzeyine plazma püskürtme yöntemiyle çeşitli oranlarda TiO_2 içeren $Al_2O_3-TiO_2$ kaplama yapmışlardır. Yapılan kaplamalarda artan TiO_2 miktarına bağlı olarak mekanik özelliklerin değişimini incelemişlerdir. TiO_2 miktarının artmasıyla kaplamaların kırılma tokluğu artmış ve sertlik azalmıştır. Kaplama tabakalarında mikroyapı incelemeleri sonucunda $\gamma-Al_2O_3$, $\alpha-Al_2O_3$, TiO_2 ve Al_2TiO_5 fazları görülmüştür.

Jafarzadeh ve arkadaşları [46] plazma püskürtme yöntemiyle çelik malzeme yüzeyine Al_2O_3 -%13 TiO_2 kaplama yapmışlardır. Yapılan deneyler sonucunda kaplamaların mikroyapısını ve kavitasyon erozyonunu incelemişlerdir. Toz besleme hızının artmasıyla püskürtme esnasında toz sarfiyatının artmış ve toz partiküllerinin tam ergimeye fırsat bulamadığı için kaplama içerisinde yarı ergimiş ve ergimemiş partiküllerin ve porozite miktarında artma olmuştur. Kaplama içerisinde yarı ergimiş ve ergimemiş

partiküllerin artmasıyla kaplamanın sertliğinde artmış ve mekanik özellikleri azalmıştır. Kaplamaların kavitasyon erozyonuna karşı direnci de artmıştır.

Çal [26] AISI 316 çelik malzeme yüzeyine plazma püskürtme yöntemiyle ara bağlayıcılı ve ara bağlayıcısız Al_2O_3 - TiO_2 tozlarına %5-10 HA karıştırarak kaplama yapmıştır. Ara bağlayıcı kullanılarak yapılan kaplamalarda ara bağlayıcı tabakası kaplamanın mekanik özelliklerini geliştirmiştir. Ara bağlayıcı olmadan doğrudan ana kaplama yapıldığında kaplama kesitinin geniş olması nedeniyle kaplama esnasında oluşan ani soğumalar fazla iç gerilmelere yol açmış ve kaplama tabakasında çatlaklara neden olmuştur.

Yugeswaran ve arkadaşları [47] AISI 4626 çelik malzeme yüzeyine farklı kritik plazma püskürtme parametrelerinde ve çeşitli oranlarda TiO_2 içeren Al_2O_3 - TiO_2 kompozit kaplamaları yapmışlardır ve bu kaplamaların plazma jeti sıcaklığına ve kaplama tabakasına etkisini incelemişlerdir. Al_2O_3 -%40 TiO_2 kaplama hariç tüm Al_2O_3 - TiO_2 kompozit kaplamalarda artan kritik plazma püskürtme parametresiyle anti aşınma davranışı ve sertlik artmıştır. Ayrıca kaplamadaki TiO_2 oranı ergime sıcaklığını azalttığı için saf Al_2O_3 kaplamalarda daha homojen ve daha az porozite içeren kaplama tabakası oluşmuştur.

BÖLÜM 4. SERAMİKLER

Makine parçaları ve makine elemanları çalışmalarından dolayı pek çok aşınma kuvvetine maruz kalırlar ve birlikte çalışmadan doğan ısı etkisiyle de aşınırlar. Dünya çapında yapılmış olan istatistiklere göre makine elemanları ve makine parçalarının yaklaşık olarak %70'inin işe yaramaz hale gelmesinin sebebi aşınmadır [48]. Bu nedenle aşınmayı önlemek için birçok yöntem geliştirilmiştir.

Doğada bulunan 90 küsur elementten sadece 25 tanesi endüstriyel malzemelerin elde edilmesinde kullanılmaktadır. Bunlar; metalik malzemeler, organik malzemeler, kompozit malzemeler ve seramik malzemeler olarak 4 ana başlık altında toplanabilir.

1960'lı yıllarda ağır çalışma şartları altında metallerin yetersiz kalması seramik kaplanmış malzemeler üzerine yapılan araştırmaları arttırmıştır. Seramik kaplamaların tercih edilmesinin en önemli nedeni yüksek sıcaklık dayanımına sahip olmaları ve seramiklerin bazılarının yüksek biyouyuma sahip olmalarıdır.

Seramikler, bir veya birden fazla metalin, metal olmayan elementlerle birleşerek oluşturduğu inorganik bileşiklerdir. Seramikler farklı bileşimde kristal ve cam yapılı fazları içerir ve genelde porozite içerirler. Seramikler genel olarak iyonik ve kovalent bağlı yapılardır.

Seramikler, dış etkilerle parçalanan kayalardan ayrılan kil vb. maddelerin pişirilmesiyle oluştuğu için halk arasında pişmiş toprak olarak da bilinirler. Seramik malzeme üretiminde kil hamuruna belirli maddeler katarak değişik şekillendirme yöntemleriyle kullanılan hamurun bünyesine uygun bir pişirme ile seramik malzemeye istenilen niteliği kazandırma imkânı vardır [49].

Mühendislik uygulamalarında kullanılan seramik malzemeler geleneksel seramik malzemeler ve mühendislik seramik malzemeleri olmak üzere iki grupta toplanır. Seramikler düşük yoğunluk, yüksek sertlik, kimyasal kararlılık ve yüksek sıcaklık dayanımına sahip olmaları nedeniyle birçok mühendislik uygulamalarında kullanım alanı bulmuştur.

Seramik kaplamalarda çok geniş bir kullanım perspektifine sahiptir. Seramik çifti mekanik parçalar, su içinde abrasif aşınmaya karşı gösterdikleri yüksek dirençten dolayı, mil yatağı ve su pompalarında ve daha birçok mühendislik uygulamasında büyük potansiyele sahiptir [50].

Seramikler ve seramik türevleri birçok makine elemanının hem üretiminde hem de kaplanmasında kullanılmaktadır. Seramikler ve seramik türevleri genelde yüzey koruma, sürtünmeyi azaltma, korozyonu önleme, tokluğu ve aşınma direncini arttırmak amacıyla kaplama malzemesi olarak kullanılır ve ana malzeme yüzeyine plazma püskürtme yöntemi, iyon implantasyonu yöntemi, sol-jel yöntemi ve bunlar gibi birçok termal püskürtme yöntemi kullanılarak kaplanır.

Seramik kaplamaların endüstriyel olarak yapılış amacı ısı ve mekanik direnci arttırmaktır. Makine imalatında kullanılan seramiklere “ileri teknoloji seramikleri” denir. Bu seramikler çok ince tozlardan üretilirler ve üstün mekanik özelliklere sahiptirler. Al_2O_3 ve TiO_2 kaplamalar yüksek aşınma dayanımı ve termal direnç yeteneğinden dolayı sık tercih edilen seramik kaplamalardır.

Seramik türevleri yani yapısal seramikler üstün sürtünme kabiliyetine sahiptirler. Bu nedenle motor parçaları, türbin kanatları, türbin rotorları ve sevk parçalarında kullanılır. İleri teknoloji seramikleri ise yüksek sertliğe sahip oldukları için aşınma dirençleri yüksektir.

Seramik malzemelerde aşınmayı etkileyen faktörler; sertlik, termal iletkenlik, kırılma tokluğu, korozyon direnci ve porozitedir. Seramik malzemeler gerilmeli yüklere göre basma altındaki yüklere karşı daha mukavemetlidirler. Seramiklerde çatlak oluşumu ve yayılma direnci iyileştirilerek seramiklerin mekanik özellikleri ve aşınma dirençleri yükseltilir.

Seramikler sert ancak kırılgan malzemelerdir. Gevrek malzemeler oldukları için iç yapıda kusurlar, çentikler, çizikler, mikro çatlaklar ve gerilme yığılmaları olur ve çekme etkisinde çabuk kırılırlar. Basınç mukavemetleri yüksek, çekme mukavemetleri düşüktür.

Seramik malzemelere ilginin artmasının başlıca nedenleri aşağıda belirtilmiştir [51]:

1. Yüksek sıcaklıklara dayanıklılık,
2. Kimyasal kararlılığın yüksek olması,
3. Çok sert olmaları,
4. Metallerden hafif olmaları (%40 mertebesine varan)
5. Hammadde olarak bol miktarda bulunması ve genellikle metallere kıyasla ucuz olması,
6. Pahalı ve stratejik metalleri ihtiyaç göstermemesi,
7. Erezyon ve aşınmaya karşı dayanıklı olmaları,
8. Oksitlenmeye karşı dirençlerinin yüksek olması,
9. Sürtünme katsayısının düşük olması,
10. Basma kuvvetinin yüksek olmasıdır.

Seramik malzemeler oksit seramikler ve oksit olmayan seramikler olarak gruplandırılabilirler.

Oksit seramikler; alümina, zirkonya, magnezya vb. diğer metal oksit esaslı seramiklerdir. Oksit seramikler iyonik bağlıdır. Yüksek erime noktasına, düşük aşınma direncine ve elektriksel özelliklere, yüksek elastisite modülü, yüksek sertlik, gevreklik, refrakterlik, düşük termal genişlemeye sahiptirler. Ayrıca korozyona karşı direnç gösterirler ve aşındırıcı olarak da kullanılırlar. Oksit seramiklerin başında kolay bulunması ve ucuz olması nedeniyle Al_2O_3 (Alümina) gelir. Alümina sert ve korozyona karşı iyi direnç gösteren bir seramiktir. TiO_2 ise genelde alümina kaplamalarda 2. faz olarak kullanılır. Yine bir oksit seramik olan ZrO_2 (Zirkonya) termal bariyer kaplamalarda kullanılır.

Oksit olmayan seramikler ise karbür seramikler ve nitrür seramikler olarak iki gruba ayrılır. En önemli karbür seramiklerin başında SiC ve B_4C gelir. B_4C yüksek

sıcaklık, yüksek sertlik düşük yoğunluk, kimyasal maddelere karşı iyi direnç ve mekanik özelliklere sahip olduğu için endüstriyel uygulamalarda tercih edilir. SiC ise Al_2O_3 'dan daha sert ve ısıya karşı daha dayanıklıdır. Bu nedenle refrakter olarak ve hem de aşındırıcı olarak kullanılır. Nitrür seramiklerin başında da Si_3N_4 gelir. Si_3N_4 yıpranma dayanımı, darbe dayanımı, aşırı yüksek sertlik, ısı iletkenlik, düşük ısı genleşmesi ve ani ısı farklılıklarına karşı üstün direnç gösterir.

Seramiklerin yüksek sıcaklıkta mukavemet, sertlik, korozyon direnci ve yorulma direnci yüksektir. Aşınmanın etkili olduğu uygulamalarda oldukça çok kullanılan ticari seramik malzemelerin mekanik ve fiziksel özellikleri Tablo 4.1.'de verilmiştir.

Tablo 4.1.Ticari seramik malzemelerin mekanik ve fiziksel özellikleri [52]

ÖZELLİKLER	Al_2O_3	SiC	Si_3N_4	PZS	Sialon	TiC	WC/Co	Pyrex
Yoğunluk	3.9	3.1	3.3	5.8	3.2	4.9	3	2.5
Sertlik (HV)	1500	2700	1300	1600	1780	3000	1500	-
Elastisite Modülü	370	410	276	200	290	430	552	70
Çekme Mukavemeti	262	100	524	700	450	896	896	-
Basma Mukavemeti	2600	-	-	1850	3500	-	-	-
Eğme Mukavemeti	380	550	660	690	-	250	250	69
Kırılma Tokluğu	-	4.6	4.5	9.5	7.7	-	-	-
Possion Oranı	0.26	0.19	0.24	0.23	-	0.19	-	0.2
Ergime Noktası	2015	2700	1900	2700	-	-	-	-

BÖLÜM 5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada SAE1040 çelik malzeme yüzeyine plazma püskürtme yöntemiyle değişen oranlarda TiO_2 ilaveli Al_2O_3 - TiO_2 kompozit kaplama yapılmıştır. Değişen TiO_2 ilavesine ve püskürtme mesafesine bağlı olarak mikroyapı ve mekanik özelliklerde meydana gelen değişimler incelenmiştir.

5.1. Deneylerde Kullanılan Malzemeler

Deneylerde alt malzeme olarak 20 mm çapında 80 mm boyunda 0.039 C, 0.25 Si, 0.72 Mn, 0.04 P ve geri kalan Fe kimyasal bileşimine sahip SAE1040 çeliği, kaplama tozu olarak ise; Al_2O_3 (ergime sıcaklığı 2070°C) tozu ile TiO_2 (ergime sıcaklığı 1830°C) tozu kullanılmıştır. Bağlayıcı tabaka tozu olarak -53+11 μm tane boyutlu Ni-20Cr (suda atomize edilmiş) metalik alaşım tozu kullanılmıştır. NiCr tozunun ara bağlayıcı olarak kullanılma nedeni; alt malzeme olarak kullanılan SAE1040 çelik malzeme ile kaplama malzemesi olarak kullanılan Al_2O_3 - TiO_2 tozları arasında oluşan ısıl genleşme farkını ortadan kaldırmak ve daha iyi bir bağlanma mukavemeti elde edebilmektir. Ara bağlayıcının kullanılması kaplamanın mekanik özelliklerini iyileştirir [25]. Ara bağlayıcı tabakası ana malzeme tabakasından daha incedir (20 μm) ve bu incelik nedeni ile iç gerilmeleri, ana malzemenin maruz kalacağı etkileri asgari düzeye indirir. Ara bağlayıcı kullanılarak yapılan kaplamaların bağ mukavemeti değerleri ara bağlayıcı kullanılmadan yapılan kaplamaların bağ mukavemeti değerlerine kıyasla daha yüksektir [53].

Kaplama prosedürü için farklı üretim parametrelerinde elde edilecek kaplama malzemelerindeki tozların karışım miktarları ve üretim parametreleri numune işlemlerine göre Tablo 5.1’de gruplandırılmıştır.

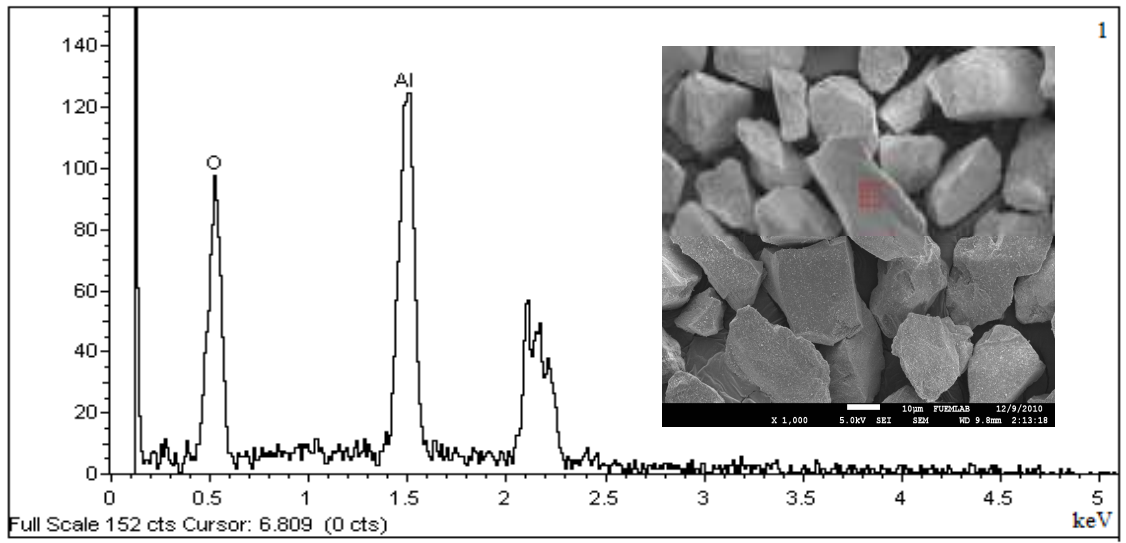
Tablo 5.1.Kaplama tozlarının karışım miktarları ve üretim parametreleri

Püskürtme Mesafesi (mm)	Gerilim (V)	Akım (A)	Taşıyıcı Gaz Ar (lt/dk)	İkincil Gaz H ₂ (lt/dk)	Plazma Gazı Ar (lt/dk)	Kaplama Tozu ve Miktarı (%)		Numune Adı
						Al ₂ O ₃	TiO ₂	
75	75-80	500	11,4	6,6	73	97	3	N ₁
	60-70		9	8,8	35	87	13	N ₂
	60-70		9	6,6	49	60	40	N ₃
	75-80		11,4	6,6	73	100	-	N ₄
100	75-80		11,4	6,6	73	97	3	N ₅
	60-70		9	8,8	35	87	13	N ₆
	60-70		9	6,6	49	60	40	N ₇
	75-80		11,4	6,6	73	100	-	N ₈
150	75-80		11,4	6,6	73	97	3	N ₉
	60-70		9	8,8	35	87	13	N ₁₀
	60-70		9	6,6	49	60	40	N ₁₁
	75-80		11,4	6,6	73	100	-	N ₁₂

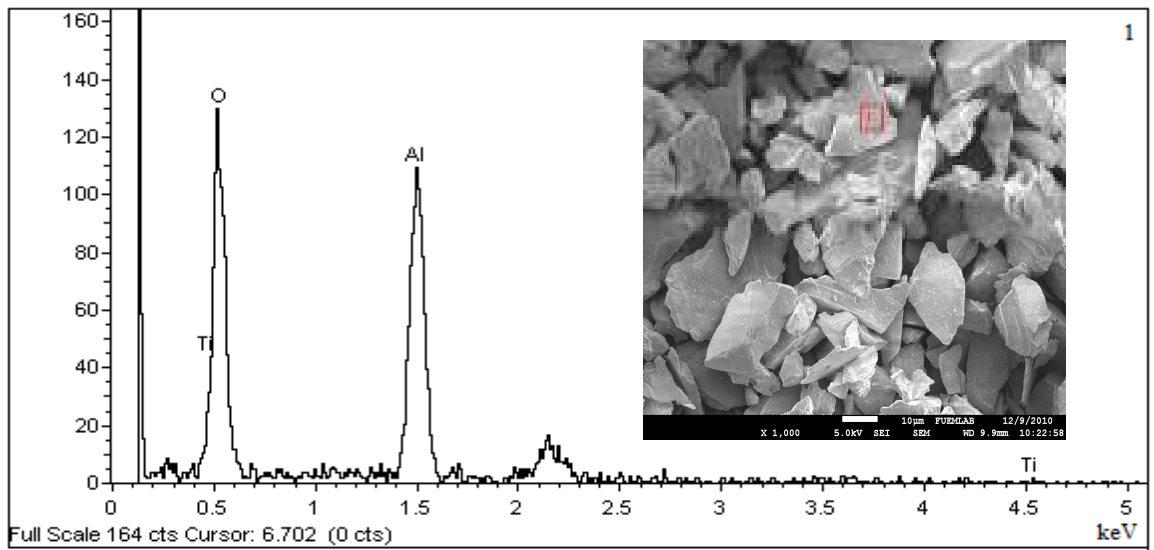
Bu çalışmada altlık malzemesi olarak kullanılan SAE1040 çelik malzeme 100 mm boyunda ve 25 mm çapında silindirik malzemedir.

5.2.Deney Tozlarının Özellikleri

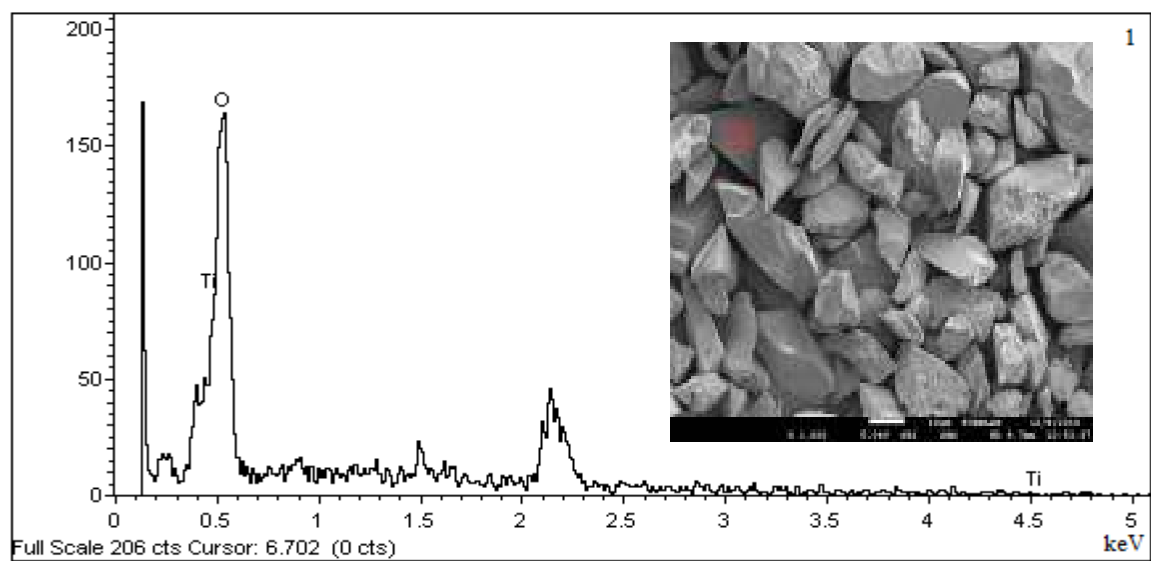
Plazma püskürtme ile kaplama işleminde kullanılan kaplama tozlarının ve ara bağlayıcı tozunun SEM mikroyapıları ve bu mikroyapılar üzerinde alınan EDX analizleri Şekil 5.1’de verilmiştir.



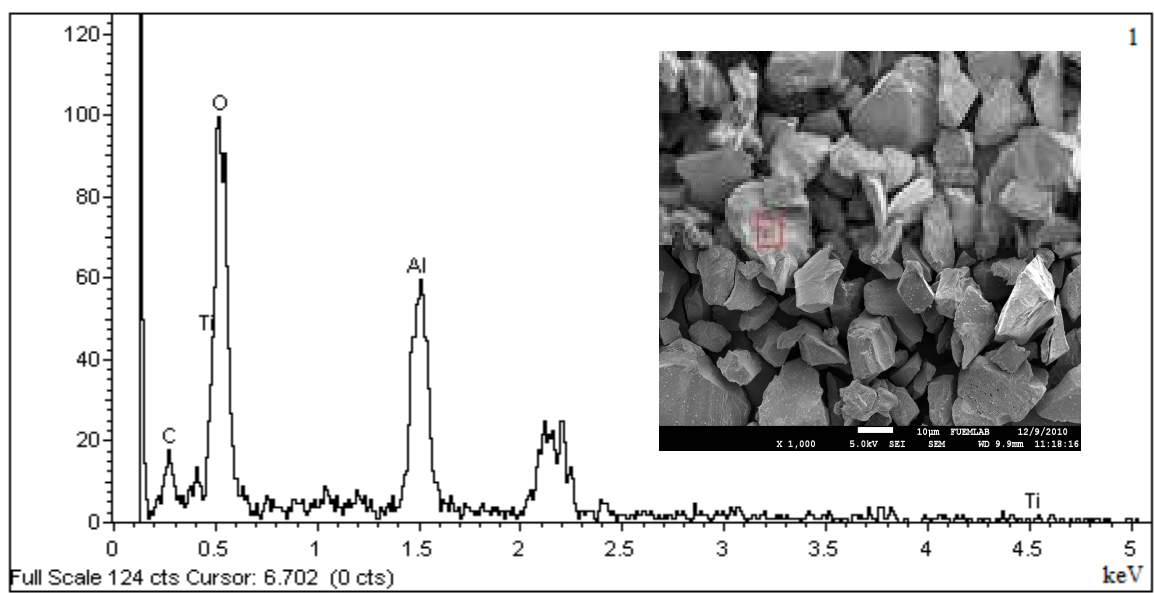
(a)



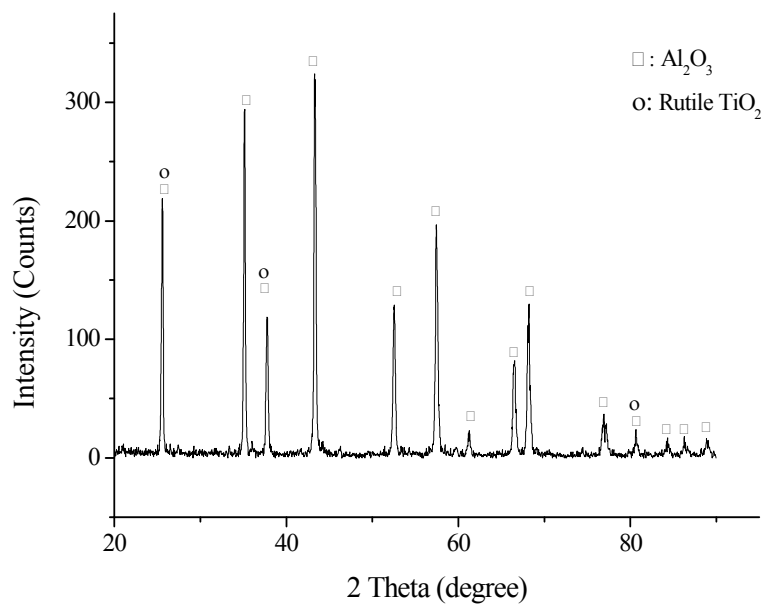
(b)



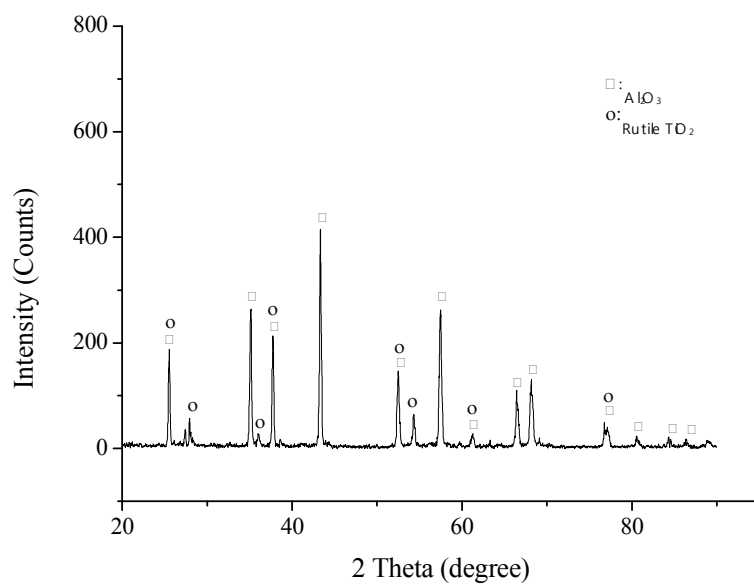
(c)



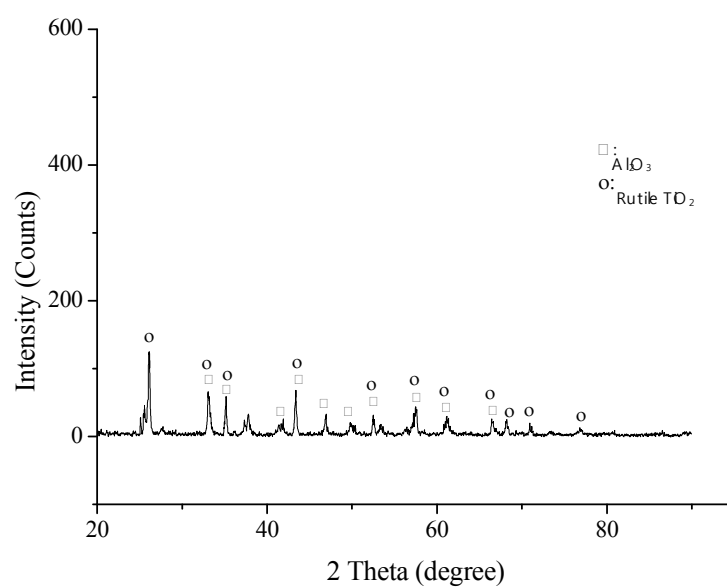
(d)



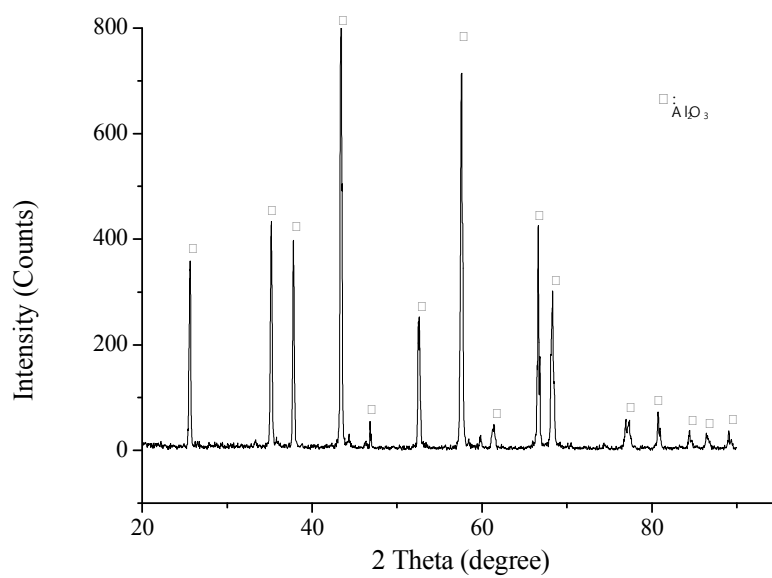
(a)



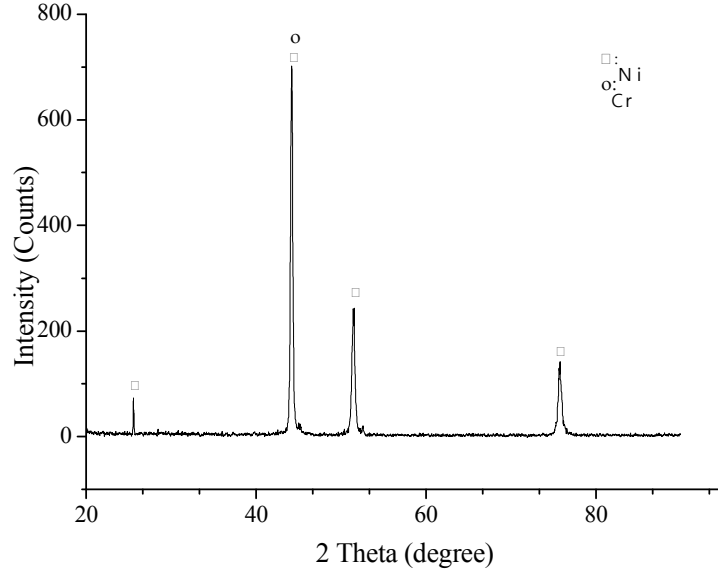
(b)



(c)



(d)



(e)

Şekil 5.2. Kaplama tozlarının XRD grafikleri, (a) Al_2O_3 -%3 TiO_2 , (b) Al_2O_3 -%13 TiO_2 , (c) Al_2O_3 -%40 TiO_2 , (d)%100 Al_2O_3 , (e) NiCrtozu

XRD verilerinden de anlaşılacağı üzere, Şekil 5.2 (d)'de verilen saf Al_2O_3 tozu yapı olarak α - Al_2O_3 'dir. Şekil 5.2 (a)- Şekil 5.2 (c)'de ise %3 TiO_2 , %13 TiO_2 ve %40 TiO_2 ile alaşımlandırılmış Al_2O_3 - TiO_2 tozlarının SEM ve XRD verilerinde yoğun olarak α - Al_2O_3 ile Rutile- TiO_2 fazları mevcuttur. NiCr ara bağlayıcı tozunun XRD verilerinde ise Ni ve Cr pikleri görülmüştür.

5.3. Malzemelerin Mekanik Özellikleri

Deneyde kullanılan SAE1040 çeliğinin, Al_2O_3 ve TiO_2 tozlarının mekanik özellikleri literatürden alınmıştır.

SAE1040 çeliği yapı (imalat) çeliği olarak da bilinir. Endüstride temini oldukça kolay olan SAE1040 çeliği ısıt işlemlerle çok yüksek sertlik değerlerine ulaşabilen bir çeliktir. SAE1040 çeliği transmisyon millerinin, rayların ve dişlilerin yapımında kullanılır.

Al_2O_3 tozunun en önemli mekanik özelliği sertliğidir. Bu nedenle aşındırıcı sektöründe terci edilir. Yüksek sıcaklıklarda dahi sertlik özelliğini korur. Al_2O_3 termal ve

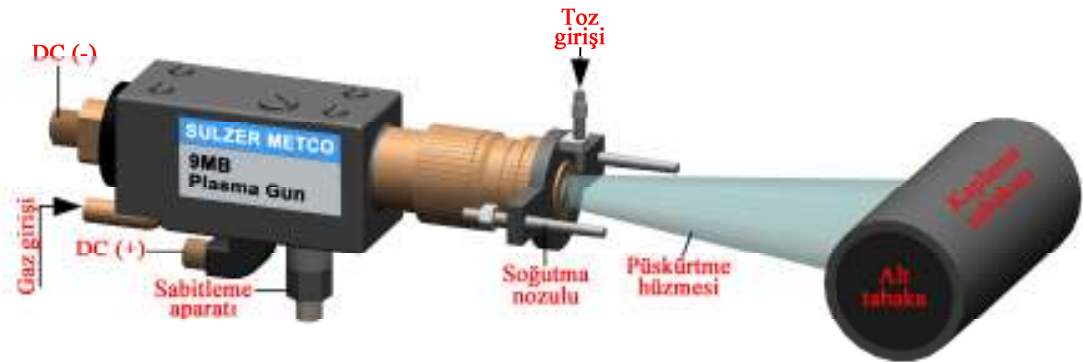
kimyasal olarak kararlıdır. Ergime noktası 2070°C'dir. Yüksek sıcaklıklarda kimyasal maddelere ve mekanik yüklere karşı en dayanıklı refrakter malzemelerden biridir.

TiO₂'in ergime sıcaklığı daha düşüktür ve Al₂O₃ taneleriyle kolayca bağlanabildiğinden Al₂O₃ tanelerinin ergime noktasını düşürür, bu yüzden daha iyi bir kaplama performansı elde edilir. Al₂O₃, gevrektiler ve TiO₂ ilavesiyle sertliği dengede tutarak kaplamanın tokluğunu oldukça yükseltir. Kırılabilirliği kuvvetlendirmek, yüksek sertlik ve kırılma tokluğuna sahip kompozit malzemeler üretmek için matris içerisine 2. faz olarak TiO₂ eklenir. Saf TiO₂'in rutil ve anafaz olmak üzere iki kristal şekli vardır.

Bu tür kaplamalar da, plazma jeti bölgesine kısa bir sürede enjekte edilen seramik taneleri eritmek için yüksek bir sıcaklık ve ısı akışı sağlandığından genellikle plazma püskürtme teknolojisi uygulanır. Bunun yanı sıra, püskürtülen tanelerin hızlı katılaşması, termal gerilmelerden dolayı meydana gelebilen mikroçatlakların varlığı ve kaplama tabakasının kalınlığının bir kaç yüz mikron olması dezavantajıdır

5.4. Plazma Püskürtme ile Kaplama İşleminin Yapılışı

Hem bağlayıcı hem de oksit kaplama tabakasının üretilmesinde 80 kVA gücüne sahip SulzerMetco 9 MB atmosferik plazma püskürtme kaplama sistemi kullanıldı. Plazma püskürtme kaplama işlemini prensip şeması Şekil 5.3'de verilmiştir.



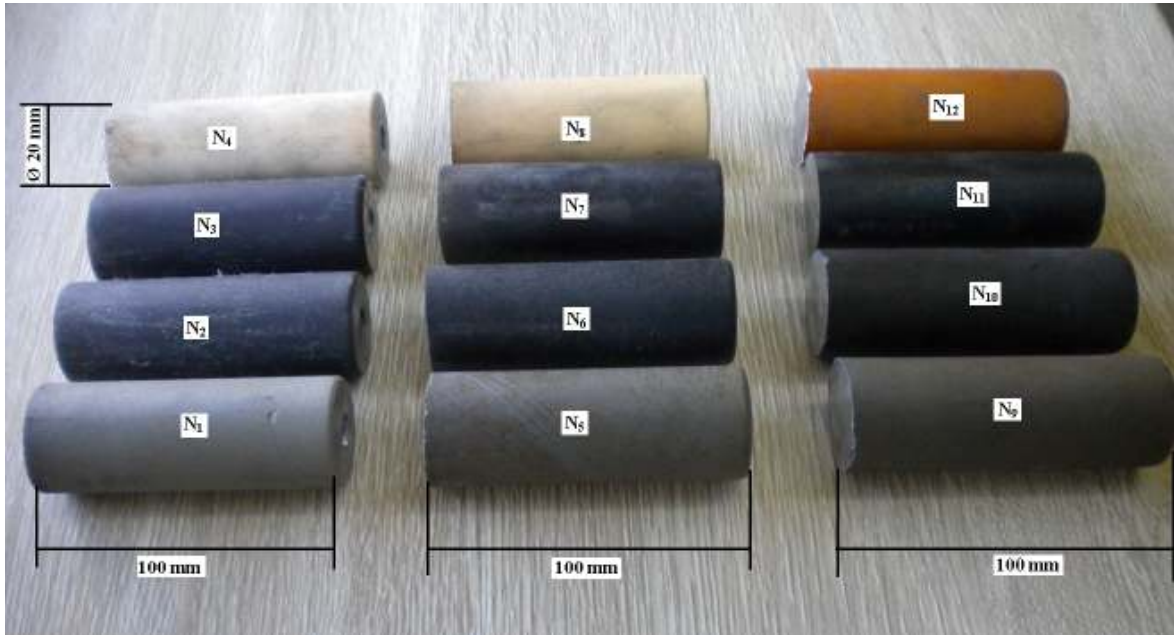
Şekil 5.3. Kaplama işleminin prensip şeması

Kaplama işleminde plazma gazı ve taşıyıcı gaz olarak Ar gazı, ikincil gaz olarak ise H₂ gazı kullanıldı. Kullanılan gazların debileri Tablo 5.1’de verilmiştir.

Plazma püskürtme prosedürü gerçekleştirilmeden önce, mevcut tozlar 80°C’lik ortamda nemden arındırılması amacıyla fırınlandırıldı. Daha sonra kaplanacak numune yüzeylerine MetcoSeal AP+APT karışımı püskürtülerek yüzey temizlenmesi ve daha iyi bir bağlanma mukavemeti elde edebilmek için yüzey pürüzlendirilmesi yapıldı.

Seramik kaplamalarda plazma hüzmesinin üretilmesinde kullanılan Ar gazını akış oranı 35- 49- 73 lt/dk olarak ayarlandı. Plazma püskürtme tabancası, püskürtme mesafesi 75- 100- 150 mm şeklinde ayarlanarak kaplama tozları tabancaya dıştan enjekte edilip plazma akışına paralel olacak şekilde yönlendirildi. H₂ gazı akış oranı 6.6- 8.8 lt/dk ve taşıyıcı gaz akış oranı 9- 11.4 lt/dk olarak ayarlandı.

Seramik oksit kaplama katmanı ile alt malzeme arasında ısıl genleşme farkını ortadan kaldırmak ve daha iyi bir bağlanma mukavemeti elde edebilmek için yaklaşık 20 µm kalınlığında NiCr bağlayıcı toz ile tabaka oluşturuldu. Son olarak 300 µm kalınlığında belirtilen oranlardaki Al₂O₃-TiO₂ toz karışımından oluşan oksit kaplaması bağlayıcı tabaka üzerinde üretildi.



Şekil 5.4. Kaplanan SAE 1040 malzemesinin üretim parametrelerine göre gösterimi

5.5. Metalografik İncelemeler

Kaplama işlemi tamamlandıktan sonra numuneler, SEM, EDX, XRD, mikrosertlik ve aşınma analizleri için hazırlanmıştır. Öncelikle her bir analiz için 10×10×10 mm ölçülerinde numuneler alındı. Daha sonra numuneler metalografik işlemlerden geçirildikten sonra %2'lik nital (%2 HNO₃-%98 alkol) çözeltisinde daldırma yöntemiyle 30-35 saniyelik süreyle dağlandı.

5.6. Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM) İncelemeleri

Hazırlanan numunelerin mikroyapısının nasıl olduğu, değişen TiO₂ oranına ve püskürtme mesafesine bağlı olarak yapıda meydana gelen değişimlerin neler olduğunu anlayabilmek için, Fırat Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümünde bulunan JEOL JSM 7001F model taramalı elektron mikroskobu ile çalışmalar yapılmıştır.

5.7. X-Işın Kırınımı (XRD) İncelemeleri

Farklı TiO₂ oranlarında numunelerde meydana gelebilecek yapıları belirlemek amacıyla Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliğinde bulunan Bruker D8 Advance Bilgisayar Kontrollü X-Işınları Difraktometresi kullanılarak X-ışın kırınımı çalışmaları yapılmıştır.

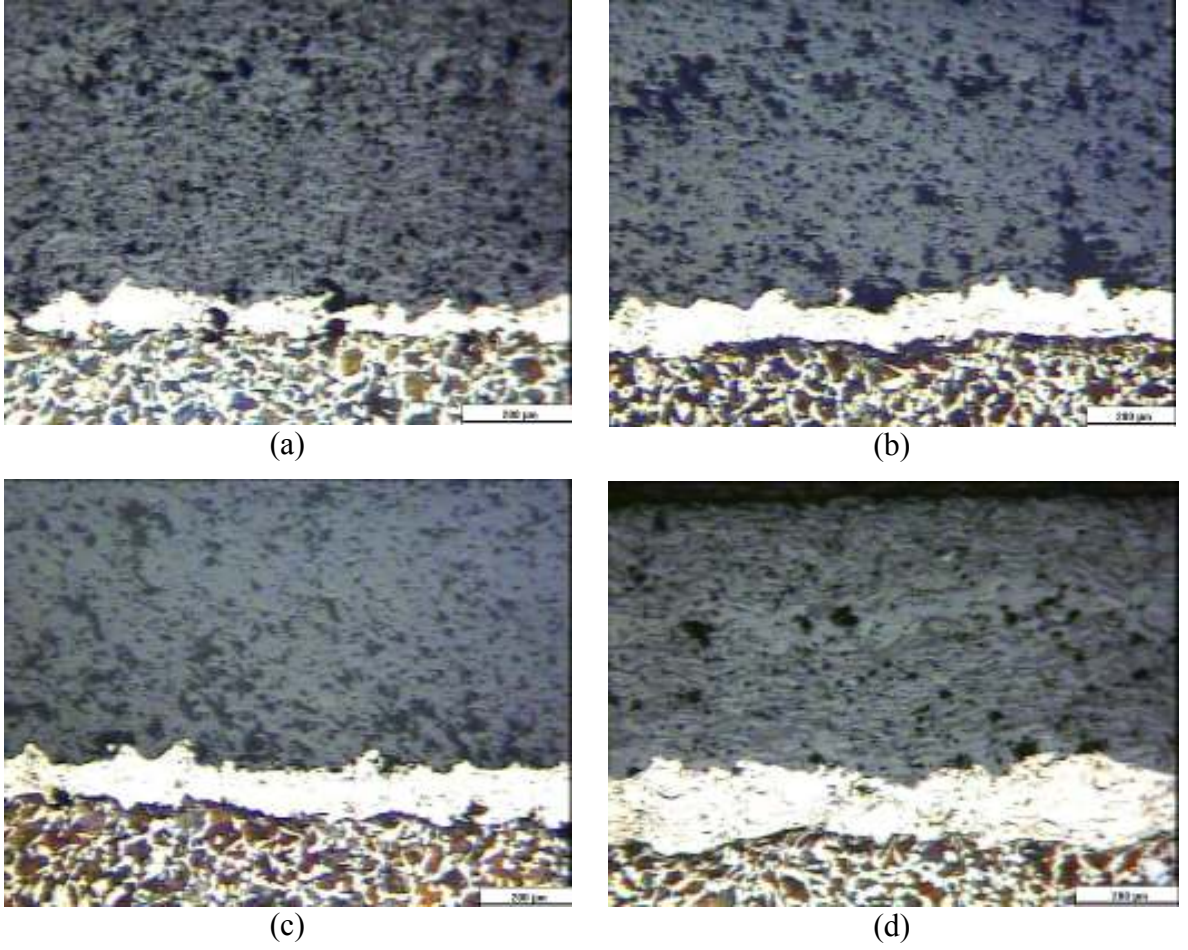
5.8. Mikrosertlik İncelemeleri

Farklı TiO₂ oranlarında ve farklı püskürtme mesafelerinde numunelerde meydana gelebilecek yapıların sertlik ölçümünü belirlemek amacıyla Bartın Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliğinde bulunan Future-Tech FM700 marka sertlik ölçme cihazı kullanılarak kaplamanın üst yüzeyinden alt malzemeye doğru bir hat boyunca 10 sn bekleme süresinde ve 100 gr yük altında mikrosertlik çalışmaları yapılmıştır.

BÖLÜM 6. SONUÇLAR

6.1.Mikroyapı Sonuçları

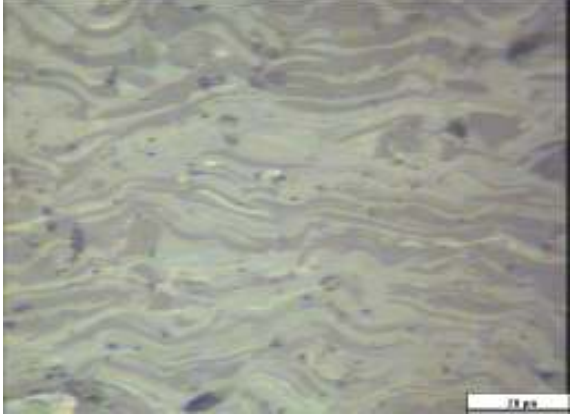
Plazma püskürtme yöntemiyle üretilen %100 Al_2O_3 , %97 Al_2O_3 -%3 TiO_2 , %87 Al_2O_3 - %13 TiO_2 , %60 Al_2O_3 - %40 TiO_2 kaplamaların SEM fotoğrafları Şekil 6.1 ve Şekil 6.2’de verilmiştir.



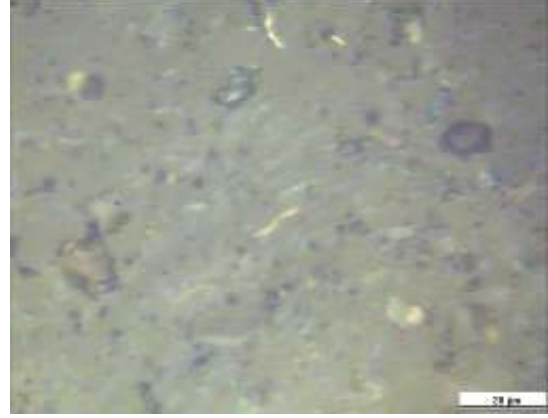
Şekil 6.1. Al_2O_3 - TiO_2 kaplamaların SEM fotoğrafları, (a) Al_2O_3 -%3 TiO_2 , (b) Al_2O_3 -%13 TiO_2 , (c) Al_2O_3 -%40 TiO_2 , (d) %100 Al_2O_3 seramik oksit kaplamalar

Şekillerde görüldüğü gibi kaplamalar genel olarak kaplama tabakası, ara tabaka ve alt malzeme olarak üç bölgeden oluşmuştur. Kaplama tabakasının kalınlığı her bir kaplamada 300 µm'dur. Mikroyapı fotoğrafları incelendiğinde, kaplama işlemi ısıl püskürtme yöntemlerinden biri olan plazma püskürtme yöntemiyle yapıldığı için yapı içerisinde gözenek ve mikro boşluk oluşumu görülmektedir [45,54]. Tüm seramik kaplamalarda ısıl püskürtme kaplamalarında çok iyi bilinen ve ergiyik haldeki metal damlacıkların alt malzemeye çarpıp sürekli bir şekilde ısıtmasıyla oluşan lamelli mikroyapı görülmektedir [55,56]. Alt tabaka yüzeyine püskürtülen toz partiküller yüzeye çarptığı zaman kinetik enerjileri ısı ve deformasyon enerjisine dönüşür. Temas anında toz partikülleri ısılarını ana malzemeye vererek soğuyup katılışır. Plazma alevi içerisinde yüzey gerilimi nedeniyle küresel olan toz partikülleri alt tabakaya çarpınca deforme olurlar ve lamelli bir şekil alarak katılışır. Kaplama tabakalarının optik yapılarından da görüldüğü gibi (Şekil 6.1) bu lamelli yapılar hemen hemen ana malzeme yüzeyine paralel şekildedir [57].

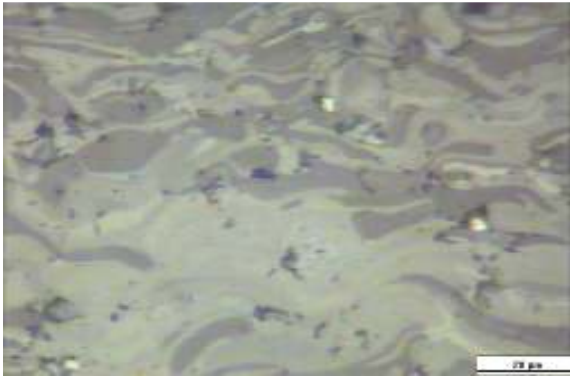
Bolelli ve arkadaşları [62] plazma püskürtme ile ürettikleri Al_2O_3 -%13 TiO_2 kaplamasında TiO_2 'in ergiyerek kısmen Al_2O_3 ile karışıp farklı TiO_2 miktarına sahip lamelli yapının oluştuğunu rapor etmişlerdir. Ayrıca TiO_2 'in sıçrayan partiküller arasında iyi bir yapışma sağladığını açıklamışlardır.



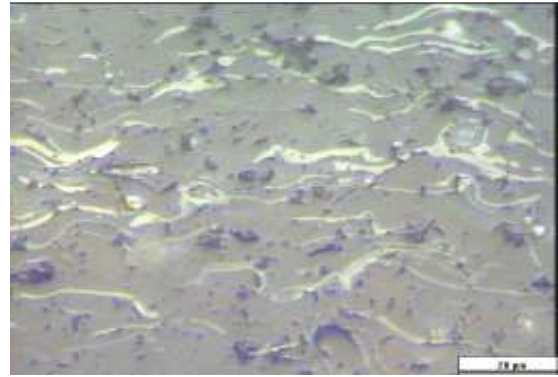
(a)



(b)



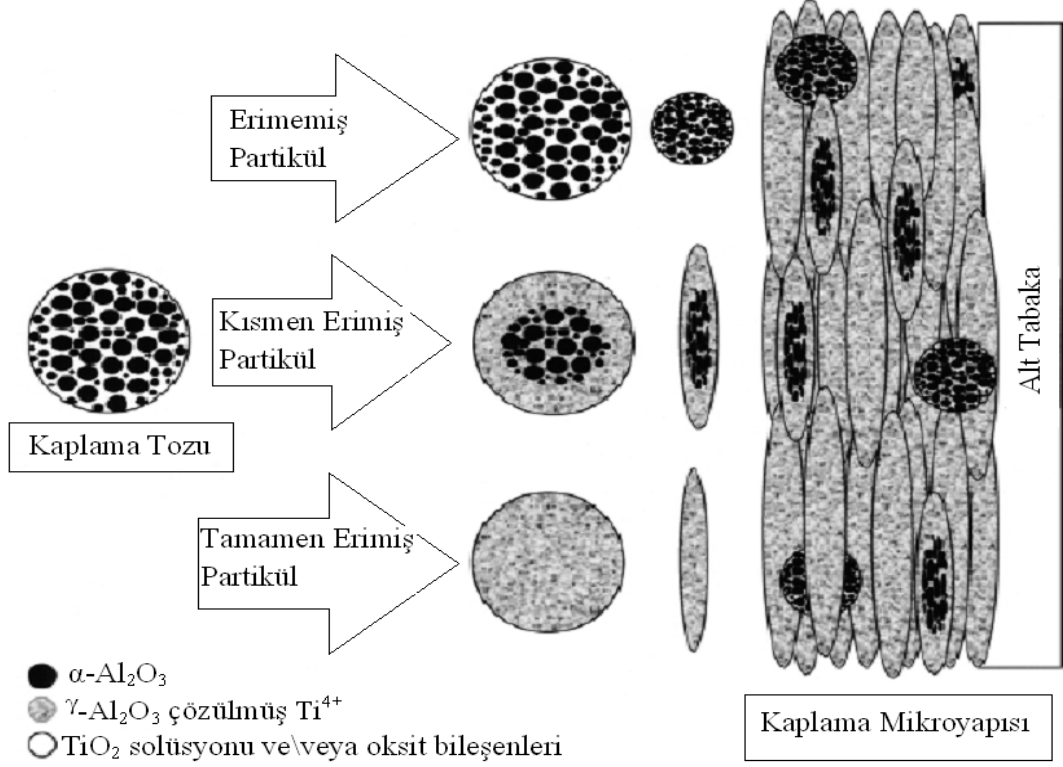
(c)



(d)

Şekil 6.2. Al_2O_3 - TiO_2 kaplamaların SEM fotoğrafları, (a) Al_2O_3 -%3 TiO_2 , (b) Al_2O_3 -%13 TiO_2 , (c) Al_2O_3 -%40 TiO_2 , (d) %100 Al_2O_3 seramik oksit kaplamalar

Şekil 6.2’de Al_2O_3 ve Al_2O_3 - TiO_2 kaplanan tabakaların optik mikroyapıları yüksek büyütmede incelendiğinde; seramik oksit kaplamalarda gözenekler olduğu net bir şekilde belirlenebilmektedir. İmage analizinden faydalanılarak yapılan tespitte oksit katmanların gözenek miktarı ortalama % 6’ ya yakındır. Bu gözenek oluşumu genel olarak tüm ısı püskürtme kaplamalarında meydana gelmektedir [58,59]. Gözeneklilik, yetersiz dolgu ve pürüzlü kaplama yüzeyine çarpan ergiyik partiküllerin ıslatma kabiliyetinin yetersiz olmasından kaynaklanmaktadır [60].

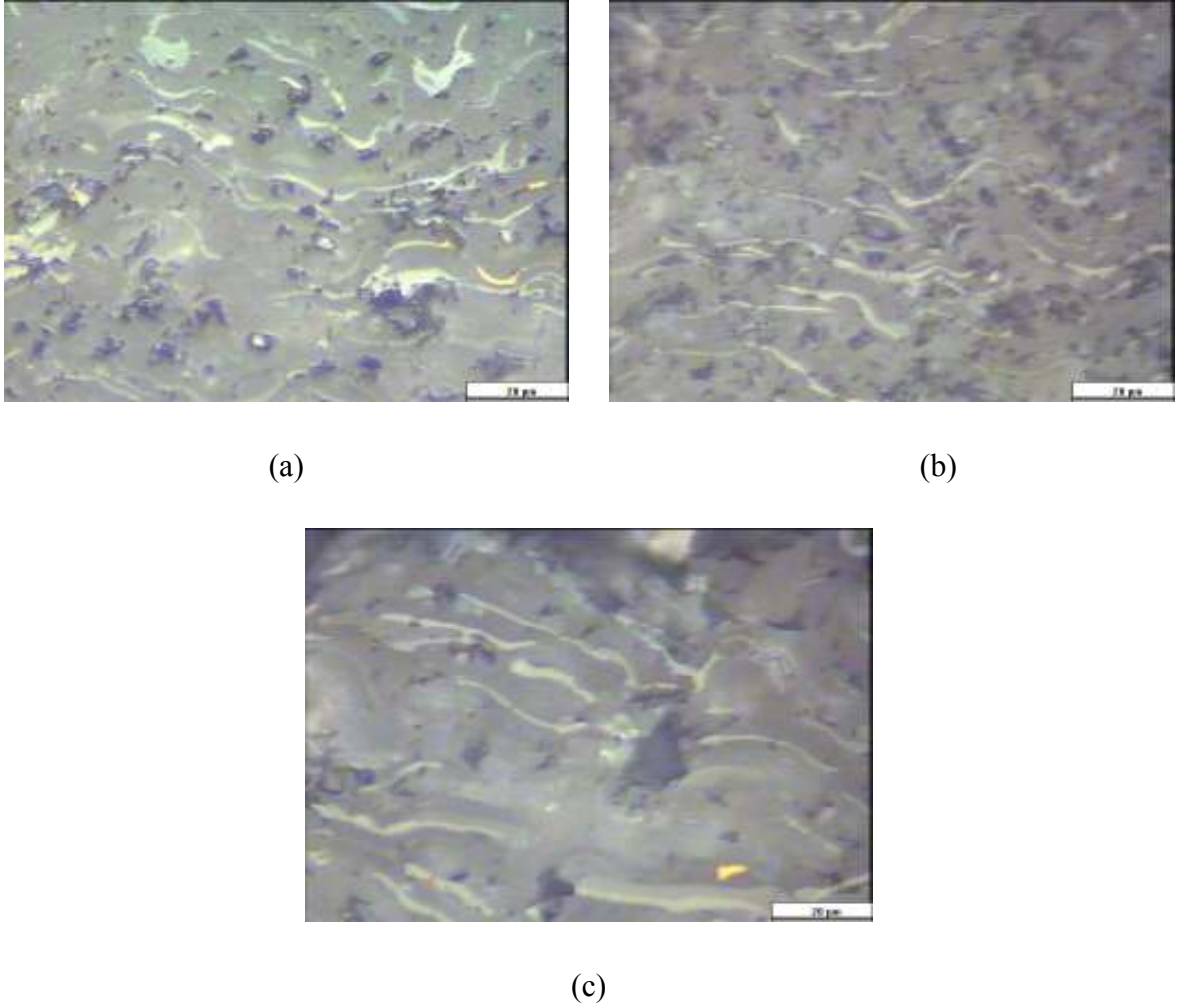


Şekil 6.3. Plazma püskürtme sırasında kaplama tozlarının şematik gösterimi [61]

Plazma püskürtme sistemlerinde kaplama tozu üç süreçten geçer. Birinci kademedede toz plazma jetine enjekte edilir, ikinci kademedede toz ile plazma alevi ara reaksiyona girerek ısıtılır ve ergitilir, üçüncü ve son kademedede ise alt tabakaya yüksek ısı ve hızla çarptırılarak hızla katılaşır. Katılaşma sırasında tozların ergiyik durumları da üçe ayrılabilir; tamamiyle ergiyen, kısmen ergiyen ve hiç ergimeyen şeklindedir (Şekil 6.2). Normal şartlar altında plazma alevinin oluşturduğu yüksek ısıdan dolayı ergimeyen toz miktarı azdır. Bunun sonucunda çoğu tozlar plazma püskürtme sırasında tamamiyle veya kısmen ergir. Tozların ergiyik durumları üç duruma ayrılabilir. Eğer plazma jet alev sıcaklığı 2070°C' nin üstündeyse (Al₂O₃' in ergime sıcaklığı 2070 °C) toz ergiyecektir ve sonuçta Şekil 6.2' de görüldüğü gibi tamamiyle ergitilmiş bir bölge oluşacaktır. Sıcaklık 1830° C ile 2070 °C arasındaki bir bölgede olduğunda TiO₂ (TiO₂' in ergime sıcaklığı 1830 °C) tamamiyle ergirken, Al₂O₃ ergimeyecektir. Sıcaklık TiO₂ ve Al₂O₃ ergime noktaları arasında olduğu için sıvı faz sinterlemesi oluşacaktır. Sıvı faz sinterlemesi sırasında matris

içerisinde TiO_2 ergiyik haldeyken Al_2O_3 taneleri ergimeyecek ve topaklaşacağından dolayı gözeneklilik ve taneler arası bağlanmayı da zayıflatacaktır [57].

Şekillerde görüldüğü gibi (Şekil 6.1) tüm kaplamalar karşılaştırıldığında en az gözenek ve mikro boşluk Al_2O_3 -%40 TiO_2 içeren N_3 - N_7 ve N_{11} numunelerinde görülmüştür. Al_2O_3 - TiO_2 kompozit kaplamalarda artan TiO_2 ilavesiyle oksit ergime sıcaklığı azaldığı ve buna bağlı olarak saf Al_2O_3 kaplamalara oranla artan TiO_2 oranıyla daha az gözenekli ve daha iyi performans gösteren kaplamalar elde edildiği belirlenmiştir [47].



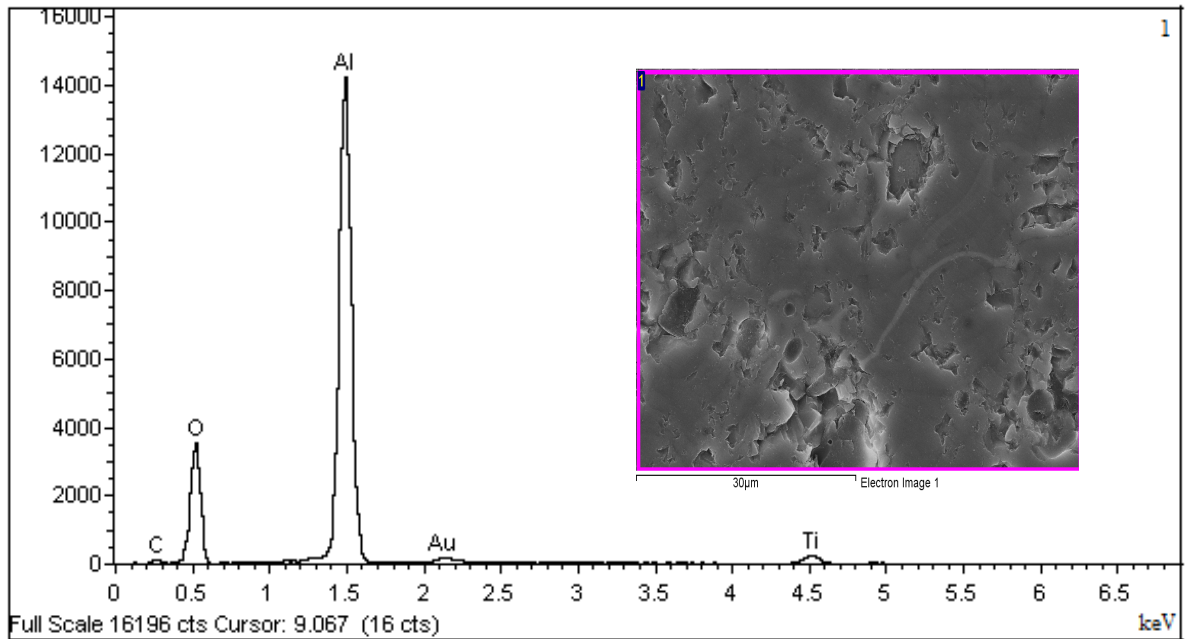
Şekil 6.4. %100 Al_2O_3 seramik oksit kaplamaların SEM fotoğrafları, (a) 75 mm püskürtme mesafesi, (b) 100 mm püskürtme mesafesi, (c) 150 mm püskürtme mesafesi

Plazma püskürtme yöntemiyle farklı püskürtme mesafesiyle üretilen $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ (75-100-150 mm) kompozit kaplamaların mikroyapısına püskürtme mesafesinin etkisi Şekil 6.4’de görülmektedir. Püskürtme mesafesi kaplamanın mikroyapı özelliklerine etki etmekte ve püskürtme mesafesi arttıkça kaplama içerisinde gözenek miktarı artmakta ve sertlik ise azalmaktadır. Gözenek miktarının artması, püskürtme mesafesinin artmasıyla kaplama tozlarının malzeme yüzeyine püskürtülürken meydana gelen toz kayıplarıyla açıklanabilir [63,64]. Azalan püskürtme mesafesiyle de mikroyapıda ergimemiş partikül miktarında artış görülmüştür. Bu da azalan püskürtme mesafesiyle kaplama tozlarının ergime için yeterli zaman bulamadan ana malzeme yapışmasıyla açıklanabilir.

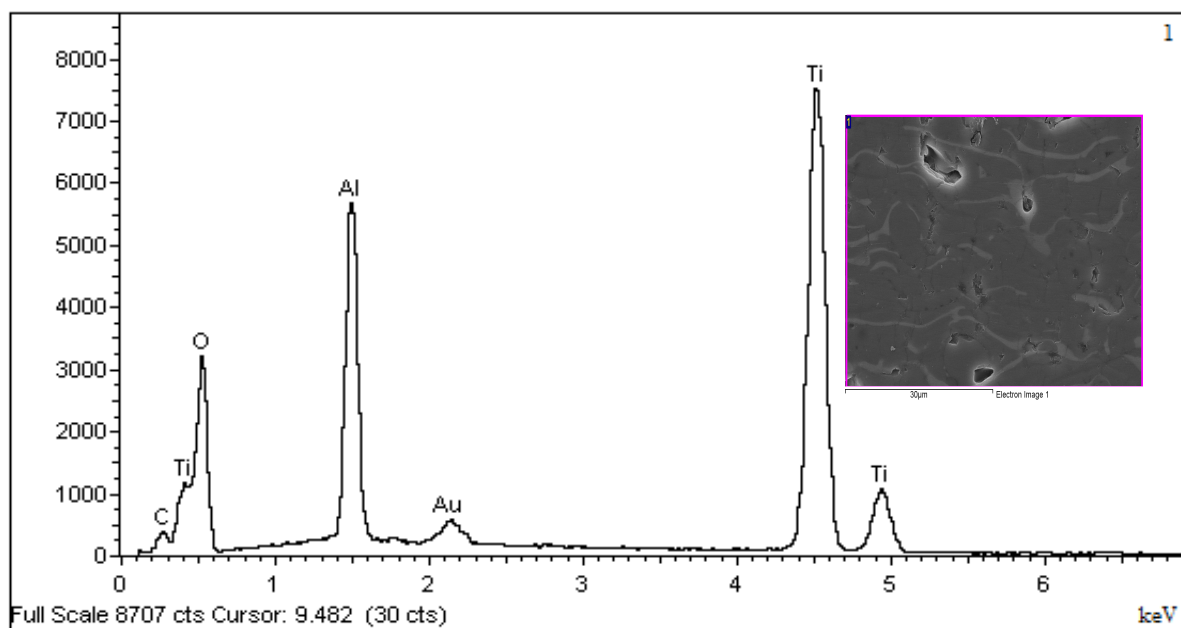
Farklı püskürtme mesafeleriyle üretilen $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ kompozit kaplamalarda en ideal mikroyapıya 100 mm püskürtme mesafesiyle yapılan $\text{N}_5\text{-N}_6\text{-N}_7$ ve N_8 numuneleriyle ulaşılır. Bunun nedeni; 100 mm püskürtme mesafesinde kaplama tozu partiküllerinin ergimeleri için yeterli sıcaklığa ulaşmaları, yüzeye çarpma hızlarının yüksek olması, yüksek yoğunluk ve yapışma dayanımının elde edilmesidir.

6.2.EDX ve XRD Sonuçları

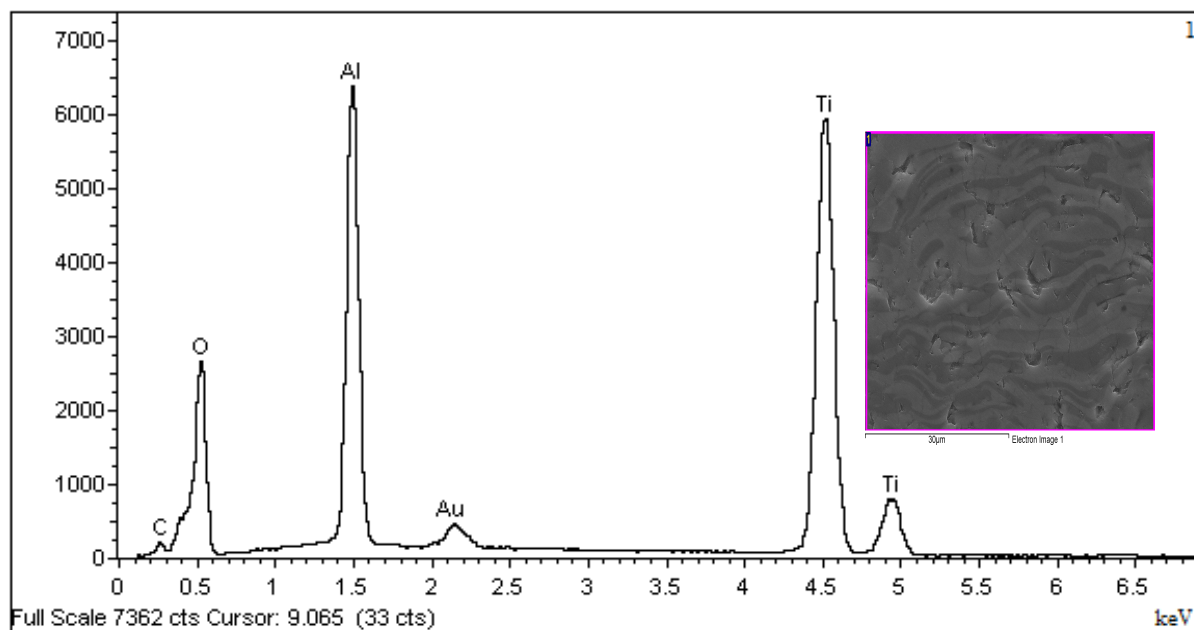
Şekil 6.5’da $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ kompozit kaplamaların EDX analiz grafikleri verilmiştir.



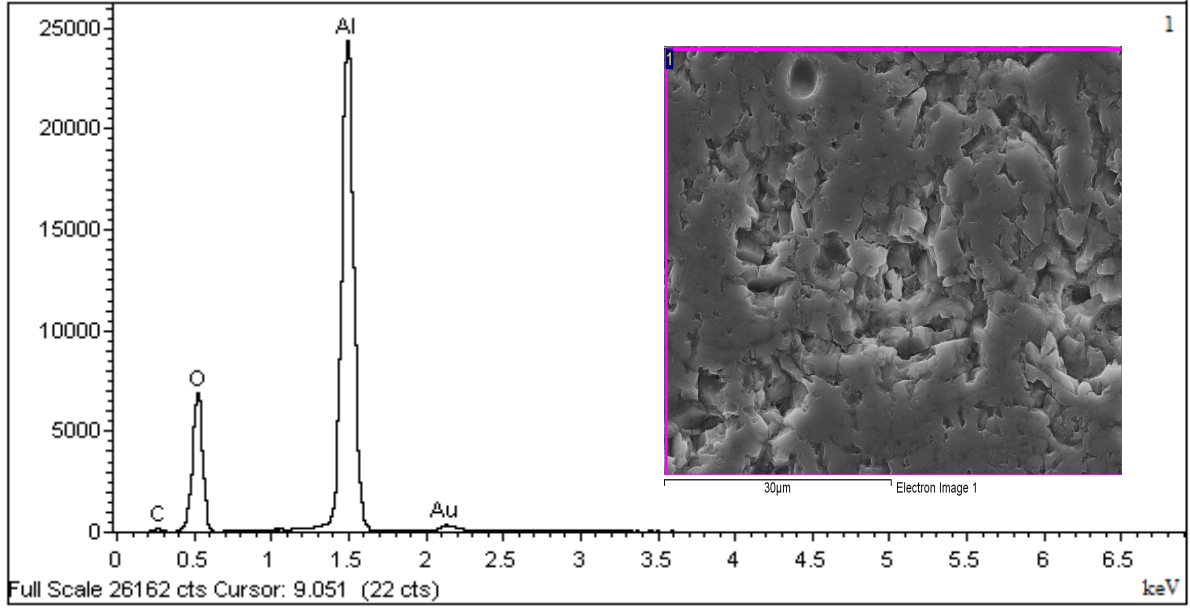
(a)



(b)



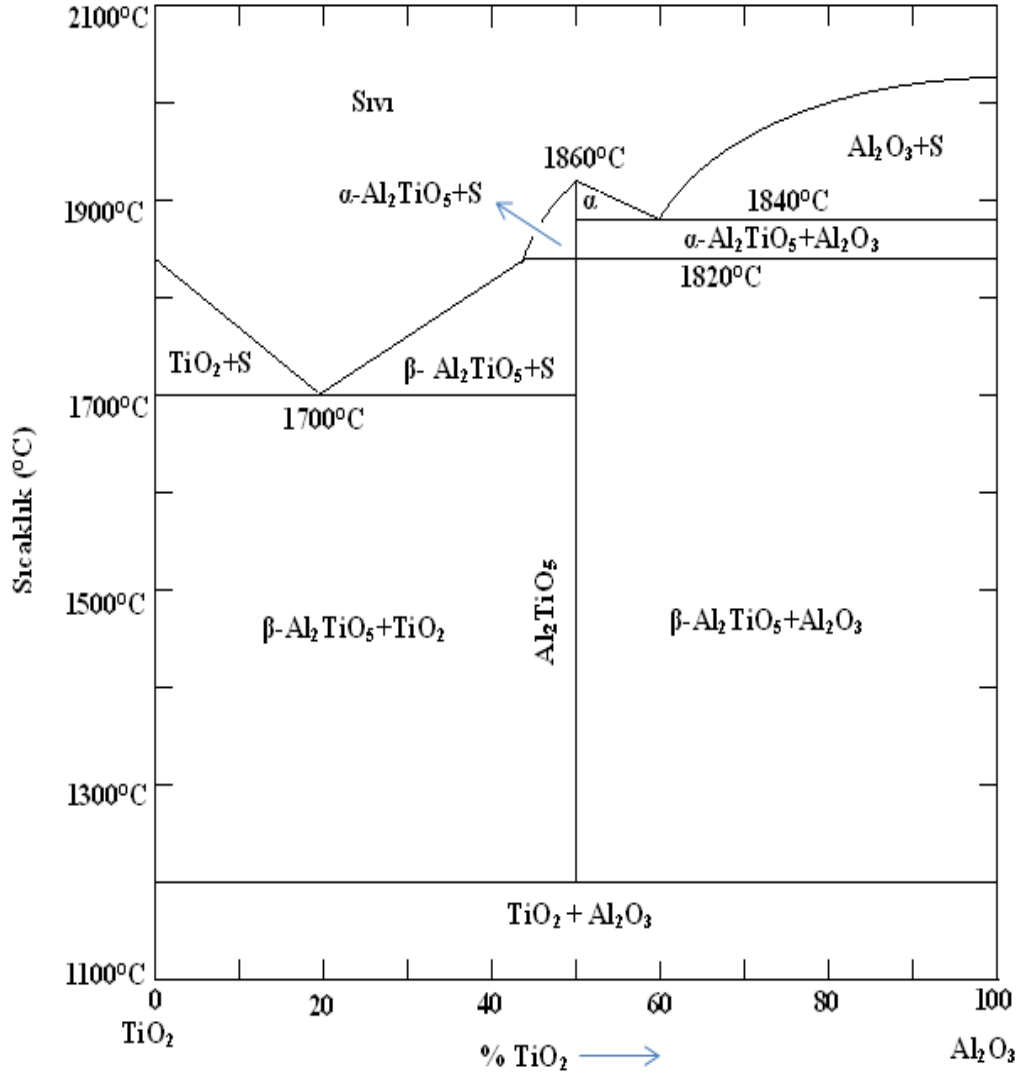
(c)



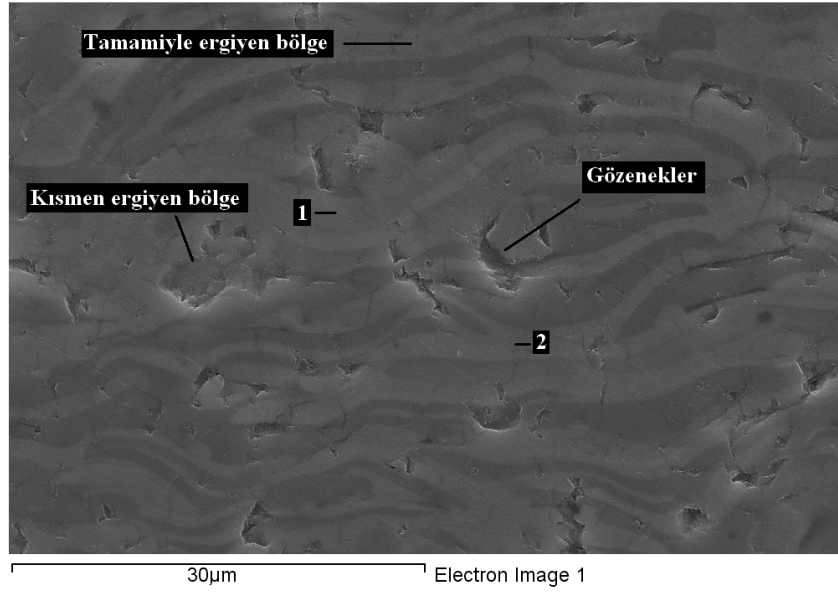
(d)

Şekil 6.5. Al_2O_3 - TiO_2 kaplamaların EDX analiz grafikleri, (a) Al_2O_3 -%3 TiO_2 , (b) Al_2O_3 -%13 TiO_2 , (c) Al_2O_3 -%40 TiO_2 , (d) %100 Al_2O_3 seramik oksit kaplamalar

Plazma püskürtme ile yapılan kaplamalarda alüminanın farklı fazları bulunur. γ - Al_2O_3 fazı hakim faz, α - Al_2O_3 fazı ise azınlıkta olan fazdır ve kısmi dönüşümle Rutil- TiO_2 fazı bulunur (Şekil 6.6) [65]. Metastabil γ - Al_2O_3 faz dönüşümü daha düşük çekirdeklenme serbest enerjisi ve hızlı soğuma (hızlı katılaşma) sayesinde olur [47,66]. γ - Al_2O_3 faz dönüşümü α - Al_2O_3 fazına göre mekanik özellikleri gelişmektedir [67].



Şekil 6.6. Al_2O_3 - TiO_2 denge diyagramı



Şekil 6.7. % 60 Al₂O₃ - %40 TiO₂ seramik oksit kaplamasının SEM mikroyapısı

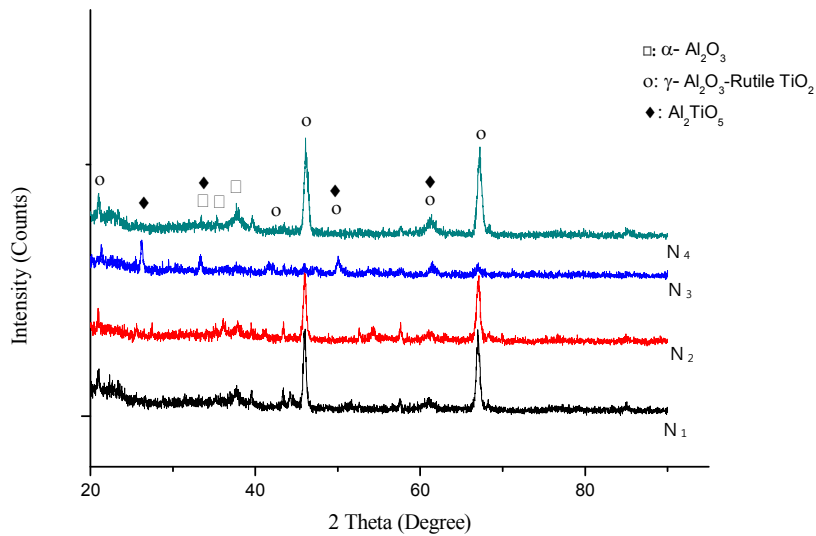
Şekil 6.7’ de % 60 Al₂O₃ - %40 TiO₂ seramik oksit esaslı kaplamasına ait SEM mikroyapısı verilmiştir. Şekilden de belirleneceği gibi lamelli yapılar, gözenekler, tamamiyle ergiyen ve kısmen ergiyik bölgeler net olarak görülebilmektedir.

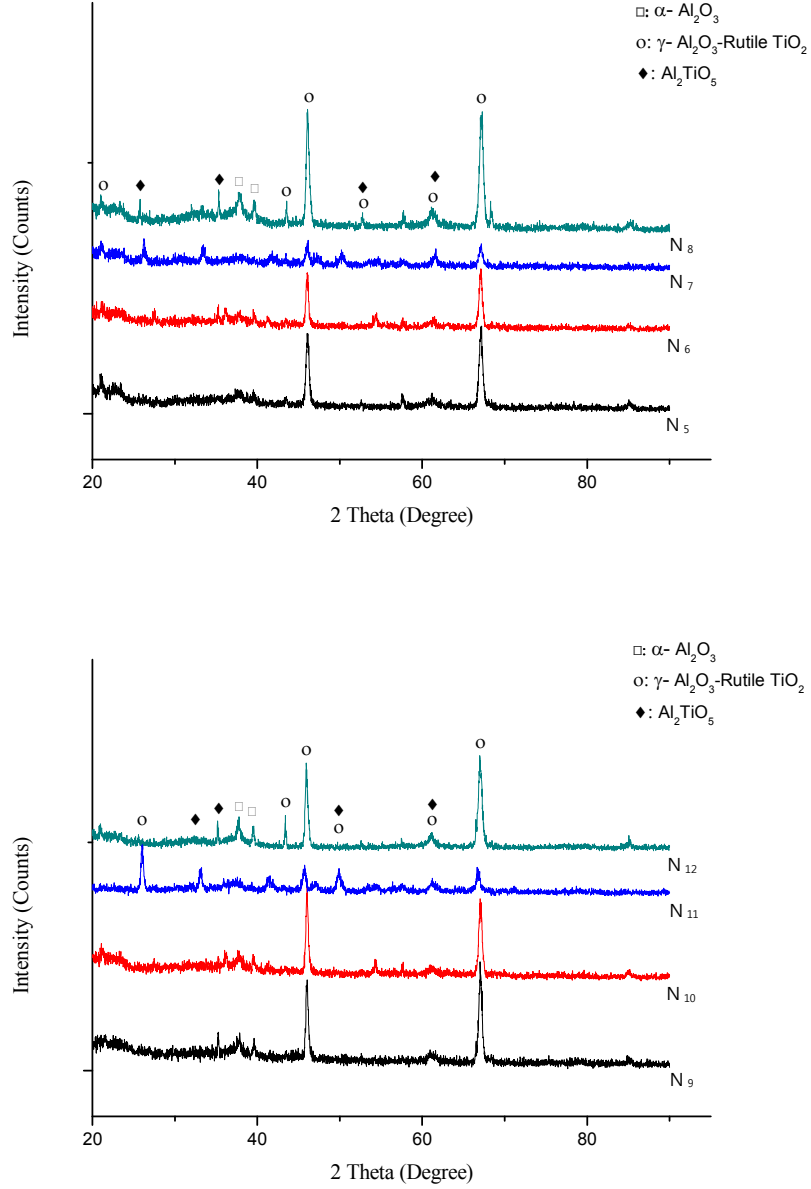
Tablo 6.1. Al₂O₃-TiO₂ kaplamaların EDS analizi

Numune No	EDX alınan bölge	Elementler				
		C	O	Al	Ti	Au
N ₁ (%97Al ₂ O ₃ -%3TiO ₂)	1	2.01	46.36	41.70	7.94	1.98
	2	2.27	47.04	47.27	1.08	2.34
N ₂ (%87Al ₂ O ₃ -%13TiO ₂)	1	3.98	47.77	10.96	35.07	2.21
	2	3.22	45.15	47.18	1.97	2.23
N ₃ (%60Al ₂ O ₃ -%40TiO ₂)	1	1.40	46.72	10.05	39.56	2.27
	2	2.65	46.37	14.86	33.64	2.49
N ₄ (%60Al ₂ O ₃ -%40TiO ₂)	1	5.75	48.38	43.48	-	2.39
	2	-	-	-	-	-

Şekil 6.7’de 1 ve 2 ile belirtilen bölgelerden alınan EDS verileri tüm kaplama numunelerine uygulanarak alınmıştır ve Tablo 6.1’ de verilmiştir. Seramik esaslı kaplamalardan EDX verilerini sağlıklı alabilmek için numuneler Au ile kaplanmıştır. Dolayısıyla analizlerde bir miktar Au elementi de okunmuştur. Tablo 6.1’ e göre, Al_2O_3 kaplaması %43.48 Al, %48.38 O, %2.39 Au ve %5.75 C elementleri içermiştir. N_4 , N_8 ve N_{12} numunesine ait olan EDS verilerine göre hakim faz Al_2O_3 içeren yapı olduğu açıktır. %3, %13 ve %40 TiO_2 ilaveli Al_2O_3 seramik oksit kaplı N_1 , N_2 , N_3 , N_5 , N_6 , N_7 , N_9 , N_{10} ve N_{11} numunelerinde farklı renk kontrastına sahip (Şekil 6.6’ da görüldüğü gibi) lamelli yapı meydana geldiğinden, tüm numunelerden 1 ve 2 olarak isimlendirilen bölgelerden EDS verileri alınmıştır. N_1 , N_2 , N_3 , N_5 , N_6 , N_7 , N_9 , N_{10} ve N_{11} numuneleri Tablo 6.1’ e göre incelendiğinde, açık gri rengine sahip lamelli bölgeler Al elementince zengin, matris olarak ifade ettiğimiz daha koyu gri olan bölgeler ise Al ve Ti elementlerince zengin olarak katılaşma meydana gelmiştir. Yine TiO_2 miktarı arttıkça kaplama tabakasında da Ti element miktarının arttığı net bir şekilde bellidir.

Plazma püskürtme ile üretilen seramik oksit kaplamaların XRD grafikleri Şekil 6.8’de verilmiştir.





Şekil 6.8. Al₂O₃-TiO₂ kaplamalarının XRD grafikleri

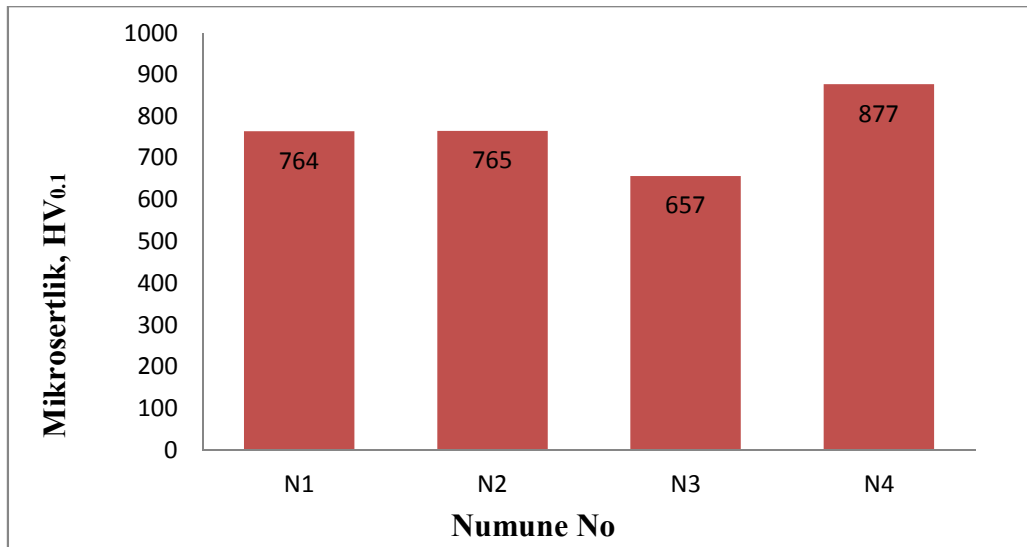
Plazma püskürtme ile üretilen seramik oksit kaplamaların XRD grafiği Şekil 6.8’ de verilmiştir. %100 Al₂O₃ seramik tozu kaplanan N₄- N₈ ve N₁₂ numunelerinin XRD grafiklerine bakılacak olursa başlıca faz γ -Al₂O₃ fazı, az miktarda da α -Al₂O₃ fazları mevcuttur. Geberman ve arkadaşlarının yaptıkları araştırmada α -Al₂O₃ plazma püskürtmeyle kaplama sonrası bu yapının düşük çekirdeklenme enerjisinden dolayı γ -Al₂O₃ fazına dönüştüğünü belirtmişlerdir [57]. Al₂O₃ seramiği ile farklı oranlarda TiO₂

ilaveli oksitin plazma püskürtmeyle kaplanması sonrası elde edilen N₁- N₂- N₃- N₅- N₇- N₉- N₁₀ ve N₁₁ numunelerinin XRD verilerinde γ - Al₂O₃ ve α - Al₂O₃, fazlarından başka farklı miktarlarda TiO₂ toz miktarına bağlı olarak Al₂TiO₅ ve TiO₂ (rutil) fazları oluşmuştur. Al₂O₃ tozu ile TiO₂ oksit tozları karıştırılır ve topaklaşmayı önlemek için plazma püskürtme öncesi homojenleştirilir. İki oksit arasında temas alanları tane boyutlarından dolayı çok büyüktür. Bu yüzden plazma püskürtme sırasında Al₂TiO₅ oluşması doğaldır. Homojenleştirilen tozlar aynı zamanda kaplamanın da homojenliğine müsaade eder [68]. Genel olarak Al₂TiO₅ fazı Al₂O₃ ve TiO₂ fazları arasında 1280±1°C'nin üzerindeki katı hal reaksiyonu ile aşağıdaki denkleme göre oluşur [69]:

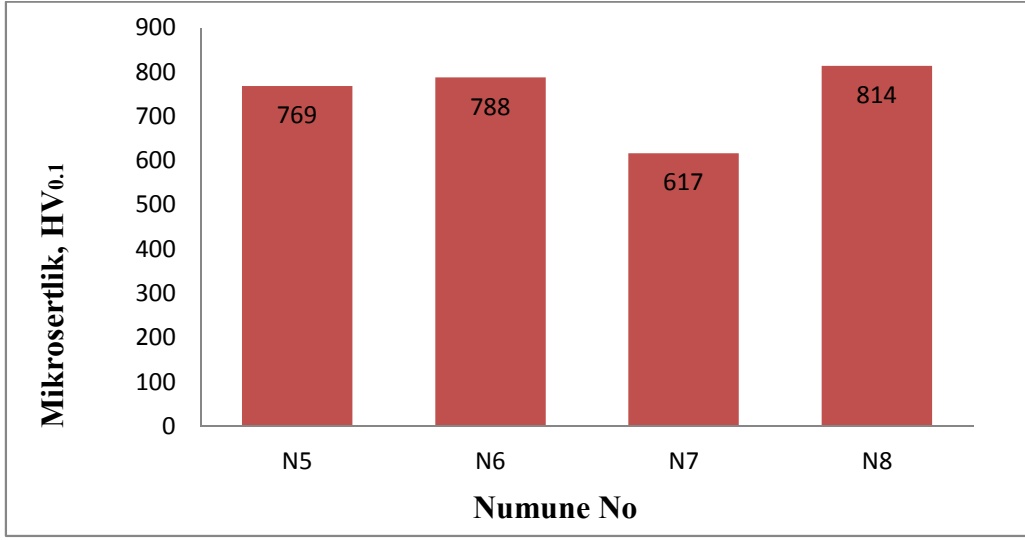


6.3. Mikrosertlik Sonuçları

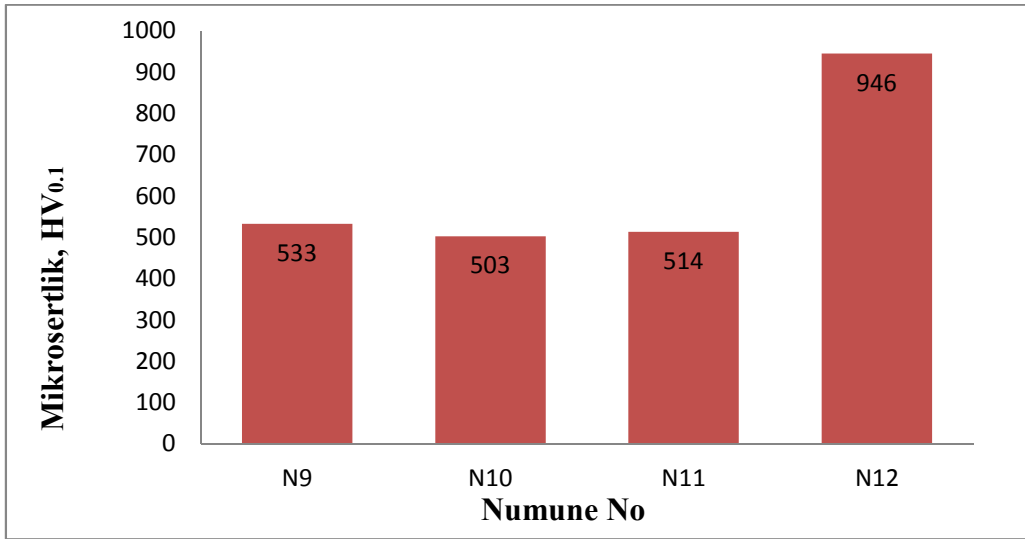
Plazma püskürtme yöntemiyle yapılan kaplamalarda mikrosertlik ve özellikleri; plazma torç tasarımı, plazma arkı gücü ve işletme parametreleri, plazma gazı, püskürtme mesafesi ve toz besleme oranı gibi çok sayıda parametreye bağlıdır [53]. Prensip olarak Al₂O₃-TiO₂ kompozit kaplamaların mikrosertlik değeri kaplama bileşimine bağlıdır ve artan TiO₂ oranıyla mikrosertlik azalır [70-72]. Şekil 6.9'da Al₂O₃-TiO₂ (% 97-3, % 87-13 ve % 60-40) ve Al₂O₃ (%100) kaplamalarının yan kesit yüzeylerinden alınan ortalama mikrosertlik değerleri verilmiştir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 6.9. Al₂O₃ ve Al₂O₃/TiO₂ kaplamalarının ortalama mikrosertlik değerleri

Mikrosertlik değerleri kaplama bölgelerinin en az 7 farklı bölgelerinden alınarak ortalama değerleri kaydedilmiştir. % 100 Al₂O₃ kaplama yapılan N₄- N₈ ve N₁₂ numunelerinin sertlik değerleri sırasıyla 877 HV_{0.1}, 814 HV_{0.1}, ve 946 HV_{0.1} olarak ölçülürken , %TiO₂ oranına bağlı olarak sertlik değerinde kayda değer bir düşüş tespit

edilmiştir. Bununla birlikte üretilen kaplama tabakalarının sertlik değerleri 3- 4.5 katıdır. Yılmaz ve arkadaşları [45] plazma püskürtme yöntemiyle yaptıkları Al_2O_3 - TiO_2 (%87-13, %60-40, %50-50) kaplamalarda Al_2O_3 -%13 TiO_2 kaplamanın mikrosertlik değerinin Al_2O_3 -%40 TiO_2 ve Al_2O_3 -%50 TiO_2 kaplamalara oranla daha yüksek olduğunu açıklamışlardır. Al_2O_3 partikülleri TiO_2 partiküllerinden daha serttir [55]. Bu durum Al_2O_3 miktarının artışıyla tamamen erimiş bölgelerde Al_2O_3 miktarının çok olması ve gözenekliliğin az olmasıyla açıklanabilir [73]. Bundan başka, ergimeyen taneleri içeren kaplamalarda ya γ - Al_2O_3 fazından ziyade α - Al_2O_3 fazının yoğun olarak bulunmasından ya da fakir bir taneler arası bağlanmadan (kohezyon) dolayı yüksek bir sertlik sergileyebilir [62]. Şekil 6.8’de verilen XRD sonuçları da bunu doğrulamaktadır. Kaplamada bulunan ergimeyen tanelerin yüksek oranda bulunması veya tane boyut morfolojisinden dolayı sertlik artar [74]. Habib ve arkadaşları [70], alevle püskürtme yöntemiyle yaptıkları Al_2O_3 - TiO_2 kaplamalarda Al_2O_3 -%40 TiO_2 kaplamalarda kaplamada oluşan Al_2TiO_5 formu nedeniyle sertliğin azaldığını tespit etmişlerdir. Ayrıca; TiO_2 katkılı Al_2O_3 seramik kompozit malzemelerde oluşan Al_2TiO_5 fazı gözenek miktarını azaltmaktadır [75].

Plazma püskürtme yöntemiyle yapılan kaplamalarda mikrosertlik özelliklerine etki eden bir diğer faktörde püskürtme mesafesidir. Azalan püskürtme mesafesiyle genelde mikrosertlik artar. Tamamen erimiş bölgeler daha yumuşak olduğu için püskürtme mesafesiyle sertlik belirlenmesi kısmen erimiş bölgelerde önemli rol oynar [41]. Azalan püskürtme mesafesiyle kısmen erimiş bölgelerde hacim fraksiyonu azalır, böylece sertlik artar [41]. Farklı püskürtme mesafeleriyle üretilen Al_2O_3 - TiO_2 kompozit kaplamalarda N_1 - N_2 - N_3 ve N_4 numunelerinin sertliği en yüksektir.

BÖLÜM 7. GENEL SONUÇLAR

Al_2O_3 tozu ve değişen oranlarda TiO_2 tozu ilaveli Al_2O_3 - TiO_2 kompozit kaplamalar, SAE 1040 çeliği üzerinde atmosferik plazma püskürtme sistemi kullanılarak üretilmiştir. Lamelli ve tabakalı bir mikroyapı elde edilmiştir. Mikroyapıda lamelli yapı, ergimemiş partikül, ergimiş/ yarı ergimiş partikül bölgeleri ve gözenekler gözlenmiştir. Artan TiO_2 ilavesi ile SEM fotoğraflarından gözeneklerin azaldığı tespit edilmiştir. Plazma püskürtme ile üretilen kaplamalarda Al_2O_3 kaplamaları az miktarda α - Al_2O_3 ile yoğun olarak γ - Al_2O_3 bulundururken, TiO_2 ilaveli kaplamalar farklı oranlarda Al_2TiO_5 ve TiO_2 (rutil) ile α - Al_2O_3 ile γ - Al_2O_3 fazlarını içermektedir. Kaplamaların sertlik değerlerinde alt malzemeye nazaran 3-4.5 katlık bir artış belirlenmiştir. Saf Al_2O_3 (%100 Al_2O_3) kaplamada sertlik değeri en yüksektir. Artan TiO_2 ilavesiyle sertlik değerinde düşme görülmüştür.

Ayrıca püskürtme mesafesi açısından mikroyapılar değerlendirildiğinde artan püskürtme mesafesine bağlı olarak gözenek miktarında ve ergimemiş partikül miktarında artış görülmüştür. Püskürtme mesafesi açısından mikrosertlik değeri incelendiğinde ise artan püskürtme mesafesine bağlı olarak sertlik değerinde azalma görülmüştür. Azalan püskürtme mesafesiyle genelde mikrosertlik artar. Tamamen erimiş bölgeler daha yumuşak olduğu için püskürtme mesafesiyle sertlik belirlenmesi kısmen erimiş bölgelerde önemli rol oynar [41]. Azalan püskürtme mesafesiyle kısmen erimiş bölgelerde hacim fraksiyonu azalır, böylece sertlik artar [41]. Ancak saf Al_2O_3 kaplamalarda artan püskürtme mesafesiyle sertlik değerlerinde pek fazla bir değişim görülmemiştir.

KAYNAKLAR

- [1]. Wang , X. Y.,Li, D. Y., Application of an Electrochemical Scratch Technique to Evaluate Contributions of Mechanical and Electrochemical Attacks to Corrosive Wear of Materials, Wear, Volume 259. (2005), pp. 1490
- [2]. Ruhi, G.,Modi, O.P., Sinha, A.S.K., Singh, I. B., Effect of Sintering Temperatures on Corrosion and Wear Properties of Sol-Gel Alumina Coatings on Surface Pre-Treated Mild Steel, Corrosion Science, Volume 50, (2008), pp. 639-649
- [3]. Shan,C. X.,Hou, X., Choy, K.H., Corrosion Resistance of TiO₂ Films Grown on Stainless Steel by Atomic Layer Deposition, Surface & Coating Technology, Volume 202, (2008), pp. 2399-2402
- [4]. Saral, U., Alümina İlavesinin YSZ Termal Bariyer Kaplamaların Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, 2007, Sakarya, pp. 3-7
- [5]. Ulutan, M., AISI 4140 Çeliğin Yüzey Sertleştirme İşlemleri ve Kaplama Yöntemleri Sonrası Mekanik Davranışlarının Araştırılması, Doktora Tezi, (2007), pp. 305
- [6]. Evkaya, M., Metallere Aşınmaya Karşı Yapılan Kaplamada Uygun Toz Materyali ve Kaplama Yönteminin Bilgisayar Destekli Seçimi, Yüksek Lisans Tezi, M.Ü.F.B.E., İstanbul, (2003), pp. 1-27
- [7]. Pawlowski, L., “The Science and Engineering of Thermal Spray Coating”, Wiley & Sons, New York. NY, (1995), pp. 405
- [8]. Karadaş, V., Yüksek Sıcaklıklarda Isı Yalıtımı ve Korozyona Dayanıklılık Sağlayan Metalik ve Seramik Katmanlı Yüzey Kaplamalarının Bozunma Nedenleri ve Önleme Yöntemlerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, (2006), pp. 1-96

- [9]. Knight, R., Smith, R.W., “Thermal Spray Forming of Materials”, Powder Metal Technologies and Applications, Volume 7, ASM Handbook, ASM International, (1998), pp. 408-419
- [10]. Novinski, E.R., Application of Thermal Spray Processes to Conserve Critical Materials, Workshop on Conservation and Substitution Technology for Critical Materials, Conference Proceedings, Vanderbilt University, (1981)
- [11]. Soykan, Ş., Üstel, F., Çelik, E., Termal Sprey Teknolojisi, Erdemir Bilim ve Teknoloji Serisi, Çelik Yüzeylerin Kaplanması, (2006), pp. 222-224
- [12]. Yiğit, S., Metal Püskürtme ve Uygulamaları, Devlet Bakanlığı Yayınları No: 59, Ankara, (1998), pp. 11-12
- [13]. Hazar, H., Öztürk, U., Bir Dizel Motorda Al_2O_3 - TiO_2 Kaplanmış Piston ve Supapların Yüzey Mikroyapılarının İncelenmesi, Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi, 6-1, (2009), pp. 11-16
- [14]. Sarıkaya, Ö., Yüzey Mühendisliği ve Yöntemleri, (2007), Adapazarı, pp. 321
- [15]. Üstel, F., Yılmaz, F., “Termal Sprey Kaplama Teknolojisinde Kullanılan Kaplama Tozları ve Karakterizasyonu”, 4. International Powder Metallurgy Conference May, Sakarya, (2005), pp. 18-22
- [16]. Davis, J.R., Introduction to Thermal Spray Processing, Handbook of Thermal Spray Technology Editor, ASM International and the Thermal Spray Society, (2004), pp. 3-13
- [17]. Bilgin, S., Isıl Püskürtme Yöntemi ile Oluşturulan Martenzitik Paslanmaz Çelik Kompozit Toz Kaplamanın Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, (2008), pp. 128
- [18]. Güleç, A., Termal Püskürtme Tekniği ile Yüksek Performanslı Zn\Al (85\15) Kaplamaların Üretimi ve Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, (2006), pp. 141
- [19]. Stokes, J., The Theory and Application of the HVOF Thermal Spray Process, Publisher Dublin University, (2006), pp. 204

- [20]. David, G.R., Yüzeylerin Kaplanmaya Hazırlanması, Yüzey İşlemler Sayı 15, pp. 220-226
- [21]. Fabbri Bilim ve Teknik Ansiklopedisi, Cilt 8, Kültür Bakanlığı, pp. 2292
- [22]. Ünalı, Y., Plazma Sprey Kaplama Deneyi, Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, (2005), Sakarya, pp. 1-8
- [23]. Kempton, K., “Where Thermal Spray Coating are Most Cast Effective”, Welding Journal, (1991), pp. 41-44
- [24]. Erođlu, A.S., Alüminyum Matrisli Seramik Partikül Takviyeli Kompozit Kaplamaların Plazma Püskürtme Tekniği ile Üretilmesi ve Aşınma Davranışının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ, (2008), pp. 1-93
- [25]. Çal, B., Kalsiyum Fosfat Takviyeli Alümina-Titania Kaplamaların Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, (2006), pp. 1-98
- [26]. Yüksek, E., Altuncu, E., Şeker, Y., Üstel, F., Plazma Sprey Kaplamaların Teknoloji Uygulamaları Bölüm-II, Galvanoteknik Dergisi, Volume 7,(2007), pp. 14-17
- [27]. Evcin, A.,Kepekçi, B.D., Barut, İ., Coating of Hydroxyapatite Powder by Plasma Spray Method on Stainless Steel, 5. Uluslararası İleri Teknolojileri Sempozyumu (IATS’09), (2009), pp. 1-5
- [28]. Yeşildal, R., Günay, Y.Z., The Coating Plasma Spray Method and Research of Spray Characteristics, DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, (2007), pp. 59-76
- [29]. Üstel, F., “Plazma Sprey Kaplama Teknolojisi”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri, İstanbul, (1995), pp. 1-66
- [30]. http://www.arl.psu.edu/capabilities/mm_mp_ct_cs.html , 3 Ocak 2011
- [31]. Evcin, A., Kaplama Teknikleri Ders Notları, (2006), pp. 1-8

- [32]. Sarıkaya, Ö., Al-%12 Si Malzeme Üzerine Plazma Püskürtme Tekniği ile Al+Si+B₄C Kaplama, Doktora Tezi, Sakarya, (2003), pp. 142
- [33]. Salman, S., Plazma ve Alev Püskürtme Tekniği ile Al₂O₃-%13 TiO₂ ve Cr₂O₃-%5 SiO₂-%3 TiO₂ Seramik Kaplanan Malzemelerin Özellikleri, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, (1995)
- [34]. Soykan, S., Üstel, F., Çelik, E., Avcı, E., “Plazma Sprey Tekniğiyle Üretilen Seramik Kaplamaların Sürtünme ve Aşınma Davranışlarının İncelenmesi”, Turkish Journal of Engineering & Environmental Sciences, Volume 21, No: 6, (1997), pp. 417-423
- [35]. Erdoğan, M., Güneş, İ., Develi, F., Plazma Sprey ve Kullanım Alanları, Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi, (2006) , pp. 61-66
- [36]. Thorpe, M.L., “Thermal Spray: Industry in Transition”, Advanced Materials and Process, Vol. 143(5), (1993), pp. 50-56
- [37]. Üstel, F., Yılmaz, M.B., Termal ve Çevresel Bariyer Kaplamalar ve Uygulamaları, IV. Uluslararası Seramik Kongresi, (2006), Sakarya Üniversitesi
- [38]. Kalyoncu, M., Makine-İmalat Teknolojileri Sempozyumu Bildiriler Kitabı, MMO Yayınları, Volume 228, (1999), .pp. 167-174
- [39]. Liu, X.,Gu, Y., Plasma Jet Clad γ /Cr₇C₃ Composite Coating on Steel, Materials Letters, Volume 60, (2006) , pp. 577-580
- [40]. Chen, H., Li, H., Microstructure and Wear Resistance of Fe-Based Coatings Formed by Plasma Jet Surface Metallurgy, Materials Letters, Volume 60, (2006), pp. 1311-1314
- [41]. Song, E.P.,Ahn, J., Lee, S., Kim, N.J., Effects of Critical Plasma Spray Parameter and Spray Distance on Wear Resistance of Al₂O₃-%8 TiO₂ Coatings Plasma-Sprayed with Nanopowders, Surface & Coatings Technology, Volume 202, (2008), pp. 3625-3632
- [42]. Shanmugavelayutham, G., Yano, S., Kobayashi, A., Microstructural Characterization and Properties of ZrO₂-Al₂O₃Therma Barrier Coatings by Gas Tunnel-Type Plasma Spraying, Vacuum, Volume 80, (2006), pp. 1336-1340

- [43]. Sarıkaya, Ö., Effect of the Substrate Temperature on Properties of Plasma Sprayed Al_2O_3 Coatings, *Materials and Design*, Volume 26, (2005), pp. 53-57
- [44]. Özel, S., Turhan, H., Sarsılmaz, F., AA2024 Alüminyum Alaşımı Yüzeyine $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiO}_3$ Tozunun Plazma Sprey Yöntemiyle Kaplanması, *Science and Engineering*, Volume 20(3), (2008), pp. 503-508
- [45]. Yılmaz, R., Kurt, A.O., Demir, A., Tatlı, Z., Effects of TiO_2 on the Mechanical Properties of the Al_2O_3 - TiO_2 Plasma Sprayed Coating, *Journal of the European Ceramic Society*, Volume 27, (2007), pp. 1319-1323
- [46]. Jafarzadeh, K., Valefi, Z., Ghavidel, B., “The Effect of Plasma Spray Parameters on the Cavitation Erosion of Al_2O_3 - TiO_2 Coatings”, *Surface & Coatings Technology*, Volume 205, (2010), pp. 1850-1855
- [47]. Yugeswaran, S., Selvarajan, V., Vijay, M., Ananthapadmanabhan, P.V., Sreekumar, K.P., “Influence of Critical Plasma Spraying Parameter (CPSP) on Plasma Sprayed Alumina-Titania Composite Coatings”, *Ceramics International*, Volume 36, (2010), pp. 141-149
- [48]. Özkan, A., Baba, F., Ayan, S., Seramiklerin Makine Elemanları ve Mekanizmaları Üzerine Uygulanabilirliği ve İmalat Yöntemlerinin İrdelenmesi, *TİMAK (Tasarım İmalat Analiz Kongresi)*, (2006), pp. 276-283
- [49]. Ünal, O., Seramik Malzemeler, Yapı Malzemeleri Ders Notları, Gazi Üniversitesi, (2009), pp. 1-13
- [50]. Chen, M., Kato, K., Adachi, K., Friction and Wear of Self Mated SiC and Si_3Ni_4 Sliding in Water, *Wear*, Volume 250, (2001), pp. 246-255
- [51]. Öztürk, M., SiC İlaveli Alümina Seramik Kompozitler, Yüksek Lisan Tezi, Sakarya, (2007), pp. 165
- [52]. Başman, G., Atar, E., Kayalı, E.S., Seramik Malzemelerin Aşınma Davranışı, *Metalurji Dergisi*, (2006), pp. 1-5

- [53]. Yılmaz, Ş., İpek, M., Çelebi, G.F., Bindal, C., “The Effect of Bond Coat on Mechanical Properties of Plasma Sprayed Al_2O_3 and Al_2O_3 -wt. %13 TiO_2 Coatings on AISI 316L Stainless Steel”, Vacuum, Volume 77, (2005), pp. 315-321
- [54]. Özel, S., Alüminyum Alaşımı ve Bronzu Yüzeyine Oksit ve Karbür Bileşiklerinin Plazma Sprey Yöntemiyle Kaplanması Araştırılması, Doktora Tezi, (2009), pp. 164
- [55]. Li, C.J., Yang, G.J., Ohmori, A., “Relationship between particle erosion and lamellar microstructure for plasma-sprayed alumina coatings”, Wear, Volume 260, (2006), pp. 1166-1172
- [56]. Lee, C.H., Kim, H.K., Choi, H.S., Ahn, H.S., “Phase transformation and bond coat oxidation behavior of plasma-sprayed zirconia thermal barrier coating”, Surface and Coatings Technology, Volume 124, (2000), pp. 1-12
- [57]. Yılmaz, Ş., “An evaluation of plasma-sprayed coatings based on Al_2O_3 and Al_2O_3 -13 wt.% TiO_2 with bond coat on pure titanium substrate”, Ceramics International, Volume 35, (2009), pp. 2017-2022
- [58]. Yin Z., Tao, S., Zhoua, X., Ding, C., “Particle in-flight behavior and its influence on the microstructure and mechanical properties of plasma sprayed Al_2O_3 coatings”, Journal of the European Ceramic Society, Volume 28, (2008), pp. 1143-1148
- [59]. Lin, X., Zeng, Y., Lee, W.S., Ding, C., “Characterization of alumina–3 wt.%titania coating prepared by plasma spraying of nanostructured powders”, Journal of the European Ceramic Society, Volume 24, (2004), pp. 627–634
- [60]. Li, C.J., ang, W.Z., “Quantitative Characterization of Lamellar Microstructure of Plasma-Sprayed Ceramic Coatings Through Visualization of Void Distribution”, Materials Science and Engineering A, Volume 386, (2004), pp. 10-19

- [61]. Wang, D., Tian, Z., Shen, L., Liu, Z., Huang, Y., "Microstructural Characteristics and Formation Mechanism of Al₂O₃-13 wt.% TiO₂ Coatings Plasma-Sprayed with Nanostructured Agglomerated Powders", *Surface & Coatings Technology*, Volume 203, (2009), pp. 1298-1303
- [62]. Bolelli, G., Cannillo, V., Lusvarghi, L., Manfredini, T., "Wear Behaviour of Thermally Sprayed Ceramic Oxide Coatings", *Wear*, Volume 261, (2006), pp. 1298-1315
- [63]. Yetgin, S.H., "Alev Püskürtme Yöntemi ile Al₂O₃ ve Cr₂O₃ Kaplanmış AlMg₃ Alaşımının Kaplama Özelliklerinin Deneysel Olarak İncelenmesi", *Yüksek Lisans Tezi*, (2005), Dumlupınar Üniversitesi, pp. 34
- [64]. Yılmaz, R., "Isıl Püskürtme Yöntemleriyle Kaplanan Malzemelerin Mikroyapı ve Mikrosertlik Karakterizasyonu", 10. Denizli Malzeme Sempozyumu ve Sergisi, (2004), pp. 256-263
- [65]. Li, C.G., Wang, Y., Guo, L., He, J., Pan, Z., Wang, L., "Laser Remelting of Plasma-Sprayed Conventional and Nanostructured Al₂O₃-13 wt. % TiO₂ Coatings on Titanium Alloy", *Journal of Alloys and Compounds*, Volume 506, (2010), pp. 356-363
- [66]. Wang, Y., Li, C., Guo, L., Tian, W., Laser Remelting of Plasma Sprayed Nanostructured Al₂O₃-TiO₂ Coatings at Different Laser Power, *Surface & Coating Technology*, Volume 204, (2010), pp. 3559-3566
- [67]. Chou, T.C., Nieh, T.G., McAdams, S.D., Pharr, G.M., "Microstructures and Mechanical Properties of Thin Films of Aluminumoxide", *Scripta Metallurgica et Materialia*, Volume 25, (1991), pp. 2203-2208
- [68]. Gurappa, I., "Development of Appropriate Thickness Ceramic Coatings on 316 L Stainless Steel for Biomedical Applications", *Surface and Coatings Technology*, Volume 161, (2002), pp. 70-78

- [69]. Yang, Y., Wang, Y., Wang, Z., Liu, G., Tian, W., “Preparation and Sintering Behaviour of Nanostructured Alumina/Titania Composite Powders Modified With Nano-Dopants”, *Materials Science and Engineering A*, Volume 490, (2008), pp. 457-464
- [70]. Habib, K.A., Saura, J.J., Ferrer, C., Damra, M.S., Gimenez, E., Cabeda, L., “Comparison of Flame Sprayed $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ Coatings: Their Microstructure Mechanical Properties and Tribology Behavior”, *Surface & Coating Technology*, Volume 201, (2006), pp. 1436-1443
- [71]. Fervel, N., Normand, B., Coddet, C., “Tribological Behaviour of Plasmas Sprayed Al_2O_3 Based Cermet Coating”, *Wear*, Volume 230, [1999], pp. 70-77
- [72]. Normand, B., Fervel, N., Coddet, C., Nikitine, V., “Tribological Properties of Plasma Sprayed Alumina-Titania Coating: Role and Control of Microstructure”, *Surface & Coating Technology*, Volume 123, (2000), pp. 278-287
- [73]. Xinhua L., Yi Z., Xiaming Z., Chuanxian D., “Microstructure of Alumina-3wt.%Titania Coatings by Plasma Spraying with Nanostructured Powders”, *Materials Science and Engineering A*, Volume 357, (2003), pp. 228-234
- [74]. Hoffmann, S., Norberg, S.T., Yoshimura, M., “Melt Synthesis of Al_2TiO_5 Containing Composites and Reinvestigation of the Phase Diagram $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--TiO}_2$ by Powder X-ray Diffraction”, *Journal of Electroceramics*, Volume 16, (2006), pp. 327–330
- [75]. Ilgar, F., “ TiO_2 Katkısının Alüminanın Sinterlenme Davranışına etkisinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, (2008)

ÖZGEÇMİŞ

Emine ERSÖZ, 1984 yılında Elazığ'da doğdu. İlk ve orta öğrenimini Elazığ'da tamamladı. 2004 yılında Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Metal Eğitimi Bölümünü kazandı ve 2008 yılında mezun oldu. 2009 yılında Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji Eğitimi Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisan öğrenimine başladı ve halen aynı anabilim dalında çalışmalarına devam etmektedir.