

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**YÜKSEK BASINÇ TÜRBİNİ ÇARPIŞMA MANİFOLDU UÇAK MOTOR
PARÇASI ÜZERİNDE ATMOSFERİK PLASMA SPRAY YÖNTEMİNİN
UYGULANMASI VE METALOGRAFİK İNCELEMESİNİN YAPILMASI**

SAMET ERGÜL

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMAN: PROF. DR. MEHMET ALİ ARSLAN

TEMMUZ 2024

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**YÜKSEK BASINÇ TÜRBİNİ ÇARPIŞMA MANİFOLDU UÇAK MOTOR
PARÇASI ÜZERİNDE ATMOSFERİK PLASMA SPRAY YÖNTEMİNİN
UYGULANMASI VE METALOGRAFİK İNCELEMESİNİN YAPILMASI**

SAMET ERGÜL

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMAN: PROF. DR. MEHMET ALİ ARSLAN

TEMMUZ 2024

T.R.
GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL

**HIGH PRESSURE TURBINE COLLISION MANIFOLD ON AIRCRAFT
ENGINE PART APPLICATION OF ATMOSPHERIC PLASMA SPRAY
METHOD AND METALLOGRAPHIC REVIEW**

SAMET ERGÜL

**A THESIS OF MASTER OF SCIENCE
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING**

ADVISOR: PROF.DR. MEHMET ALİ ARSLAN

JULY 2024

YÜKSEK LİSANS JÜRİ ONAY FORMU

GTÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulunun 01/07/2024 tarih ve 2024/33 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 08/07/2024 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Samet ERGÜL'ün tez çalışması Makine Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) :Prof.Dr. Mehmet Ali ARSLAN

ÜYE

:Prof.Dr. Fevzi BEDİR

ÜYE

:Prof.Dr. Muhammet KAYFECİ

ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulunun

...../...../..... tarih ve/..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

Bu tez çalışması, uçak motorlarındaki yüksek basınç türbinlerinin çarpışma manifoldları üzerinde atmosferik plazma püskürtme (APS) yöntemi ile kaplama yapılmasını ve bu kaplamaların metalografik incelemelerini ele almaktadır. Araştırmanın temel amacı, APS yöntemi ile elde edilen kaplamaların performansını optimize etmek ve kaplama sürecindeki parametrelerin etkilerini detaylı bir şekilde analiz etmektir. Araştırmada, AMS5510 paslanmaz çelik altlık malzemesi üzerine Metco 51F-NS ticari kodlu, CuAl kimyasal bileşimli plazma tozu kullanılarak kaplama gerçekleştirilmiştir. Kaplama işlemi sırasında, akım, gaz akış oranları (argon ve hidrojen), püskürtme mesafesi ve besleme oranı gibi altı farklı parametre dikkate alınmıştır. Elde edilen kaplamalar, metalografik laboratuvarında kesme, soğuk kalıplama, zımparalama ve parlatma gibi işlemlerle hazırlanarak optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak detaylı bir şekilde incelenmiştir. Ayrıca, enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDS) analizi ile kaplamaların kimyasal ve morfolojik özellikleri değerlendirilmiştir. Çalışmada, belirlenen parametrelerin kaplama kalitesine olan etkileri deneysel tasarım yöntemleri ile analiz edilmiştir. Bu bağlamda, Taguchi metodu kullanılarak yeni parametre setleri oluşturulmuş ve bu parametrelerle yapılan deneyler neticesinde, Cu oranının yüksek ve homojen dağıldığı numunelerin metalografik olarak başarılı olduğu tespit edilmiştir. Elde edilen analizler, APS yöntemiyle kaplama yapılmasının, gaz türbinli jet motorlarında kullanılan malzemelerin yüzey dayanıklılığını ve aşınma direncini artırmada kritik bir rol oynadığını göstermiştir. Bu araştırma, APS yöntemi ile elde edilen kaplamaların etkinliğini optimize ederek, gaz türbinli jet motorlarının performansını ve yüzey mühendisliği uygulamalarını iyileştirmeyi hedeflemektedir. Çalışmanın sonuçları, havacılık endüstrisinde termal püskürtme kaplamalarının geliştirilmesi ve uygulama alanlarının genişletilmesi için önemli bilgiler sunmaktadır. Böylece, APS yöntemi ile kaplama sürecinin optimize edilmesi, yüzey mühendisliği ve ileri malzeme uygulamaları için yenilikçi çözümler sağlayarak sektöre değerli katkılar sağlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: APS, CuAl Kaplama, Termal Püskürtme, Metalografi

ABSTRACT

This thesis work addresses the coating of impact manifolds in high-pressure turbines of aircraft engines using the atmospheric plasma spraying (APS) method and the metallographic examination of these coatings. The primary aim of the research is to optimize the performance of coatings obtained by the APS method and to analyze in detail the effects of the parameters involved in the coating process. In the study, a coating was applied on AMS5510 stainless steel substrate material using a plasma powder with the commercial code Metco 51F-NS, which has a CuAl chemical composition. During the coating process, six different parameters, including current, gas flow rates (argon and hydrogen), spray distance, and feed rate, were considered. The resulting coatings were prepared for detailed examination by undergoing processes such as cutting, cold mounting, grinding, and polishing in a metallographic laboratory, and were then examined using optical microscopy and scanning electron microscopy (SEM). Additionally, the chemical and morphological properties of the coatings were evaluated using energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS) analysis. In the study, the effects of the determined parameters on the coating quality were analyzed using experimental design methods. In this context, new parameter sets were created using the Taguchi method, and as a result of experiments conducted with these parameters, it was found that samples with a high and homogeneous distribution of Cu were metallographically successful. The analyses obtained demonstrated that coating by the APS method plays a critical role in enhancing the surface durability and wear resistance of materials used in gas turbine jet engines. This research aims to improve the performance and surface engineering applications of gas turbine jet engines by optimizing the efficiency of coatings obtained through the APS method. The results of the study provide significant information for the development and expansion of thermal spray coatings in the aerospace industry. Thus, optimizing the coating process with the APS method provides innovative solutions for surface engineering and advanced material applications, offering valuable contributions to the sector.

Keywords: APS, CuAl Coating, Thermal Spray, Metallography

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının hazırlanmasında ve tamamlanmasında katkılarını esirgemeyen, bilgi ve tecrübeleriyle bana yol gösteren ve her aşamada destek olan değerli danışman hocam Prof.Dr. Mehmet Ali ARSLAN'a gönülden teşekkür ediyorum.

Bir diğer yandan her sorumu cevaplayan, gece gündüz demeden çalışmalarına ilgisini ve bilgisini esirgemeyen, önerilerini ve tecrübelerini her zaman dikkate aldığım değerli dostum Uğur Karahan'a en içten şekilde teşekkürlerimi sunarım. Deneysel çalışmalarımın başından sonuna kadar yanımda olan, desteklerini ve yardımlarını benden esirgemeyen değerli yöneticilerim Sn. Evrim AFSAR ve Batuhan Cemre AYAS başta olmak üzere, değerli çalışma arkadaşlarım; Sergen DİLBAZ, Tuba ÇALIK, Osman VAN, Samet ÇOBAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Bu tezi, eğitim ve öğretim hayatım boyunca bana her zaman destek olan ve beni bugünlere getiren sevgili annem, emekli öğretmen rahmetli babam ve her an yanımda olan kardeşlerim ile paylaşıyorum. Onların emekleri ve sevgisi olmasaydı, bu başarıyı elde edemezdim.

Ayrıca, hayatımın her anında yanımda olan, beni cesaretlendiren ve her zorluğun üstesinden gelmemde bana güç veren sevgili eşim Nisa Kaplan Ergül'e sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum. Sizin desteğiniz ve sevginizle bu noktaya geldim. Hepinize minnettarım.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	v
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
TABLolar DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ	1
2. TERMAL PÜSKÜRTME YÖNTEMLERİ	4
2.1. Termal Püskürtme Yönteminin Tarihsel Gelişimi	6
2.2. Termal Püskürtme Yönteminin Uygulama Alanları	8
2.3. Termal Püskürtme Teknolojisi ve Yöntemleri	15
2.3.1. Alev ile Püskürtme Yöntemi	17
2.3.2. Patlamalı Püskürtme Yöntemi (D-Gun)	19
2.3.3. Yüksek Hızlı Oksi Yakıtlı Püskürtme Yöntemi (HVOF)	20
2.3.4. DC-Ark Plazma Püskürtme Yöntemi	26
2.3.5. Atmosferik Plazma Püskürtme Yöntemi (APS)	27
2.3.6. Kontrollü Atmosfer Plazma Püskürtme Yöntemi (CAPS)	29
2.3.7. Vakumlu Plasma Püskürtme Yöntemi (VPS)	30
2.3.8. Soğuk Gaz Plazma Püskürtme Yöntemi (CGPSM)	32
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	36
3.1. Sistem Sabitleri ve Değişkenlerinin Belirlenmesi	36
3.2. Metalografik Analiz	46
4. SONUÇLAR	67
5. TARTIŞMA VE ÖNERİLER	73
KAYNAKLAR	75
ÖZGEÇMİŞ	83

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Ar	:Argon
Al_2O_3	:Alüminyum Oksit
C_3H_8	:Propan
C_2H_2	:Asetilen
C_6H_{14}	:Kerosen
Cu_2O	:Bakır Oksit
CuAl	:Bakır-Alüminyum
T_s	:Altlık Malzeme Sıcaklığı
APS	:Atmosferik Plazma Püskürtme
CAPS	:Kontrollü Atmosfer Plazma Püskürtme
CS	:Soğuk Püskürtme
CMAS	:Kalsiyum-Magnezya-Alumina-Silika
CVD	:Kimyasal Buhar Biriktirme
D-Gun	:Ateşleme Tabancası
DE	:Tutunma (biriktirme) verimliliği
DOE	:DeneySEL Tasarım
EDS	:Enerji Dispersiv Spektrumu
HVAF	:Yüksek Hava Yakıtlı Püskürtme
HVOF	:Yüksek Hızlı Oksi Yakıtlı Alev Püskürtme
LPPS	:Düşük Basınçlı Plazma Püskürtme
MAPP	:Metilasetilenpropadien-stabilize gaz
OFAT	:Her seferinde bir değişken
PTA	:Plazma Transferli Ark Biriktirme
PVD	:Fiziksel Buhar Biriktirme
SEM	:Taramalı Elektron Mikroskobu
S/N R	:Sinyal / Gürültü Oranı
TEC	:Türk Uçak Motor Bakım Merkezi
VPS	:Vakumlu Plazma Püskürtme
VIPS	:Vakum İndüksiyon Plazma Püskürtme
XRD	:X-Ray Difraksiyonu
WAS	:Tel Ark Püskürtme
Wc/Co	:Tungsten Karbid Kobalt

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1: Termal Püskürtme İşlem Sırası [10].	4
Şekil 2.2: Püskürtmenin bir malzemeye çarpması sonucu erimiş/ yarı erimiş 5 parçacıkların deformasyonu [12].	5
Şekil 2.3: Plaka yapısını ve plakalar içindeki ince kristal yapıyı gösteren, plazma 6 püskürtmeli tungsten metal kaplamanın tipik mikro yapısı. (a) Bir kırılma yüzeyinin taramalı elektron mikroskopu görüntüsü. (b) Aynı kaplamanın ışık mikroskopik görüntüsü. Praxair Surface Technologies, Inc.'in izniyle paylaşılmıştır [12].	6
Şekil 2.4: Termal sprej geliştirmelerinin, ekipmanlarının ve malzemelerinin zaman 7 çizelgesi [13].	7
Şekil 2.5: Otomotiv endüstrisinde termal püskürtme uygulanan bileşenler [14].	9
Şekil 2.6: Jet motorunun kaplama çözümü gerektiren kritik kısımlarını gösteren 11 şeması [68].	11
Şekil 2.7: (a)Çöl artlarında çalışan bir askeri helikopter ve motorun etkisinde kaldığı12 çevresel şartlar (b) Hizmet sonrası kum birikintileri ve CMAS etkisinde arızaları bulunan motor bileşenleri [39].	12
Şekil 2.8: (a)Havacılık motorlarında kullanılan aşınmaya dayanıklı malzemeler.(b)13 Çeşitli bileşenler ve tipik kaplama malzemelerinin bileşimlerine göre aşınmaya dayanıklı servis sıcaklık aralıkları [40].	13
Şekil 2.9: Uçak Jet motoru parçalarında, mevcut ve potansiyel Termal Sprej 14 kaplama uygulamaları [13].	14
Şekil 2.10: Termal Püskürtme Global Market Öngörüsü [41].	15
Şekil 2.11: Termal Püskürtme Sistemi Genel Gösterimi	16
Şekil 2.12 : Termal Püskürtme Teknolojilerinin Sınıflandırılması	16
Şekil 2.13: Toz ve tel beslemeli farklı plazma püskürtme prosesler	17
Şekil 2.14: Alev Püskürtme Metodunun Şematik gösterimi: (1) gaz veya sıvı yakıt,18 (2) toz enjeksiyonu, (3) torç gövdesi, (4) püskürtülen kaplama, (5) partikül akışı, (6) yanma sonucu oluşan alev [42].	18
Şekil 2.15: Patlamalı Püskürtme Torcu Şematik Gösterimi [45].	19
Şekil 2.16: HVOF Tabancası ve Yöntem Bileşenleri	21
Şekil 2.17: (a) Namlu ve (b) de Laval tipi nozulları [48].	22
Şekil 2.18: HVOF püskürtme tabancasının çıkış düzlemindeki farklı yakıt/oksijen22 oranları için gaz hızı [48].	22
Şekil 2.19: Oerlikon Metco firmasına ait tipik tasarımlar, (a) su soğutmalı, gazlı 23 yakıt tabancası, (b) su soğutmalı, sıvı yakıtlı tabanca [14].	23
Şekil 2.20: Oerlikon Metco'ya ait Woka-star 610 sıvı yakıtlı HVOF püskürtme 24 tabancası, Güç:293 KW [14].	24
Şekil 2.21: Tipik yüksek hızlı oksijen-gaz kaplama mikroyapıları.(a)Nikel,(b)Alümina,25 (c) WC/Co [13].	25
Şekil 2.22: Plazma torcunu,soğutma suyu kaynağını,gaz kaynağını,güç kaynağını, 28 püskürtme tozu besleyiciyi ve kontrol ünitesini gösteren şema [14].	28
Şekil 2.23: Düşük basınçlı bir plazma püskürtme odasının şematik gösterimi [14].	31
Şekil 3.1: Oerlikon Metco MultiCoat Termal Püskürtme Sistemi Şeması	36
Şekil 3.2: MultiCoat Kontrol Edici Arayüzü	37
Şekil 3.3: JAMBox Kontrol Arayüzü	37

Şekil 3.4: Single 120A tipi Besleyici	38
Şekil 3.5: Volumetrik Tipi Toz Besleme Döngüsü [68].	39
Şekil 3.6: Plazma Püskürtme Sistemi Gaz Yönetim Merkezi	39
Şekil 3.7: ABB Robot Kolları ve Kontrol Ünitesi	40
Şekil 3.8: Soğutucu Sistemi	41
Şekil 3.9: SinplexPro-90 Plazma Püskürtme Tabancası	42
Şekil 3.10: Metco 51F-NS tozu XRD Görünümü	44
Şekil 3.11: (a) Kumlama öncesi ve sonrası (b) AMS 5510 Altlık Malzemesi	44
Şekil 3.12: Bruker D8 Advance Modeli XRD Cihazı	45
Şekil 3.13: Metalografik İncelemede Kullanılan Ekipmanlar;	47
a) Secotom-60 Kesme Cihazı, b) Citovac Soğuk Kalıplama Cihazı, c) Kırılma Fırını, d) Tegramin-30 Parlatma Cihazı, e) Nikon Optik Mikroskopu.	
Şekil 3.14: Yapılan Deneylerin Mikroskopik İncelemesi	50
Şekil 3.15: SEM ile yapılan Kalınlık Ölçümü Sonuçları	53
Şekil 3.16: Jeol JSM-6060LV SEM Cihazı	54
Şekil 3.17: 1.Deneyin EDS Analizi	55
Şekil 3.18: 2.Deneyin EDS Analizi	55
Şekil 3.19: 3.Deneyin EDS Analizi	56
Şekil 3.20: 4.Deneyin EDS Analizi	56
Şekil 3.21: 5.Deneyin EDS Analizi	56
Şekil 3.22: 6.Deneyin EDS Analizi	57
Şekil 3.23: 7.Deneyin EDS Analizi	57
Şekil 3.24: 8.Deneyin EDS Analizi	57
Şekil 3.25: 9.Deneyin EDS Analizi	58
Şekil 3.26: Grup-1'e ait 13.Deneme Kuponu Mikroskopik Görüntüsü	60
Şekil 3.27: Grup-2'ye ait 15.Deneme Kuponu Mikroskopik Görüntüsü	61
Şekil 3.28: Grup-3'e ait 3.Deneme Kuponu Mikroskopik Görüntüsü	61
Şekil 3.29: Grup-4'e ait 1.Deneme Kuponu Mikroskopik Görüntüsü	62
Şekil 3.30: Sinyal/Gürültü Oranları için Yanıt Tablosu	65
Şekil 3.31: Ortalamalar için Yanıt Tablosu	65
Şekil 3.32: Ortalamalar için Ana Etkiler Grafiği	66
Şekil 3.33: Sinyal/Gürültü Oranları için Ana Etkiler Grafiği	66
Şekil 4.1: OFAT'a göre 2.denemeye ait numunenin mikroskop görüntüsü	67
Şekil 4.2: OFAT'a göre 9.denemeye ait numunenin mikroskop görüntüsü	68
Şekil 4.3: Taguchi Matrisine ait 1.Deneme Kuponunun Mikroskopik Görüntüsü	69
Şekil 4.4: Taguchi Matrisine ait 9.Deneme Kuponunun Mikroskopik Görüntüsü	70
Şekil 4.5: Taguchi ile elde edilen reçetenin sonuçları ile ilgili tahmini	70

TABLÖLAR DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Tablo 3.1: APS Sabit Parametreleri	42
Tablo 3.2: APS Değişken Parametreleri	43
Tablo 3.3: APS İlk Denemelerin Parametre Değerleri	45
Tablo 3.4: Aşındırma ve Parlatma Process Parametreleri	46
Tablo 3.5: Kabul Kriterlerinin Detayları	48
Tablo 3.6: Nümerik Puanlama Tablosu	49
Tablo 3.7: Nümerik Olmayan Puanlama Tablosu	49
Tablo 3.8: 9 deney için elde edilen Metalografik Sonuç Tablosu	52
Tablo 3.9: Yeni APS Parametre Seti	58
Tablo 3.10: Değişkenlere Atanan Değerler	59
Tablo 3.11: L16(3 ⁴ 2 ¹) Taguchi Matrisi	59
Tablo 3.12: Yeni Metalografik Değerlendirme Tablosu	63
Tablo 3.13: Taguchi Matrisine Göre Deneyi Tamamlanan Numunelerin Metalografik Sonuçları	64

1. GİRİŞ

Günümüzün gelişmekte olan modern gaz türbinli jet motoru endüstrisi ve teknolojilerinde, yüzey mühendisliği alanına giren konularda önemli çalışmalar yapılmaktadır. Genel yapı itibari ile gaz türbinli jet motorları kompresör, yanma, türbin ve egzoz olmak üzere 4 ana kısımdan oluşmaktadır. Yüzey mühendisliği ile ilgili motorun yanma ve türbin kısımlarında; oksidasyon ve sülfidasyonun (sıcak korozyon) birleşik etkilerine karşı mukavemet ile parçacık erozyonu ve kimyasal etkilere karşı sürdürülebilir koruma sağlayan termal sprej yöntemleri olmak üzere iki ana uygulama yapılmaktadır [1].

Uygun malzeme seçimi, gaz türbinli jet motorlarının verimliliğini artırma ve operasyon ömrünü uzatma konusunda önemli bir yer tutar [69]. Kompresör içindeki sıcaklık, başlangıçtaki ortam sıcaklığından kompresör çıkışına doğru yaklaşık 600 °C'ye kadar yükselir. Bu bölümde genel olarak demir alaşımları, yani çelikler tercih edilir. Yanma ve türbin bölümü parçaları kompresöre göre daha yüksek sıcaklıklarda çalışmaktadır. Malzeme ve tasarım yönünden yaklaşık 1000 °C sıcaklıklarda çalışan türbin bölümü parçaları tüm tasarım ele alındığında en zorlayıcı kısımdır [70]. Yanma ve türbin bölgelerinde, yüksek ısı dirence sahip çelik malzemeler yaygın olarak tercih edilmektedir [2]. Daha yüksek enerji verimliliği elde etmek için, yanma ve türbin kısmında bulunan bileşenlerin çalışma yüzeyi sıcaklıkları, elde edilen yanma sıcaklıkları ve gerekli hava sıkıştırma oranlarıyla orantılı olarak on yıllar boyunca sürekli olarak artmıştır [1]. Türbin bölümüne giren çalışma akışkanının sıcaklığı, genellikle nikel esaslı süper alaşımların dayanabileceği sıcaklıkları aşar. En ileri düzeydeki endüstriyel gaz türbinlerinde, gaz yolu sıcaklıkları pal ve kanat alaşımlarının erime sıcaklıklarının üzerine çıkabilir. Bu gereksinim, etkili soğutma sistemlerinin ve koruyucu termal bariyer kaplamalarının kullanılmasını zorunlu kılar [2]. Bununla birlikte günümüzde yapısal mühendislik malzemelerini korozyon, aşınma, erozyona karşı korumak, ısı yalıtım ve efektif yağlama sağlamak için yüzlerce farklı tür kaplama uygulaması kullanılmaktadır. Bütün bunlar içerisinde termal sprej ile kaplama yöntemi yüksek sıcaklık ortamında çalışan gaz türbinli motorlarda yaygın olarak kullanılmaktadır [3].

Termal püskürtme, kaplama malzemelerinin eritildiği ve kinetik enerji ile parçacıkların, kullanılan termal püskürtme yöntemine bağlı olarak bir gaz veya basınçlı hava akışı kullanılarak alt tabakaya çarptırıldığı ve belirli bir alt tabaka üzerinde bir yüzey yapısı oluşturduğu bir işlemdir [4]. Termal püskürtme metodları uzun yıllardır tüm majör mühendislik uygulamalarında parça koruma ve tamirinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Termal püskürtme işlemlerinin bir avantajı da kaplamaların, alt tabakayı önemli ölçüde ısıtmadan uygulanabilmesidir. Bu, alt tabakanın yapısal bütünlüğünü koruyarak kaplama işleminin daha güvenli ve etkili olmasını sağlar. Termal püskürtmenin diğer bir avantajı ise çoğu durumda parçanın özelliklerini veya boyutlarını değiştirmeden aşınmış veya hasarlı kaplamaların sökülebilmesi ve yeniden kaplanabilmesidir. Son yıllarda, donanım ve malzeme kalitesindeki gelişmeler, termal püskürtme işlemlerinin teknik güvenilirliğini artırmış ve biyomedikal, dielektrik ve elektronik kaplamalar gibi yeni pazarlarda önemli bir büyümeye yol açmıştır [5-6].

Global ölçekte 2022 yılı sonunda 336.8 milyar dolar market büyüklüğüne ulaşan yüzey mühendisliğine ait uygulamaların 2032’de yaklaşık 540 milyar dolar büyüklüğüne ulaşması beklenmektedir [71]. Bu öngörüde, büyümeyi sağlaması düşünülen ilk 3 uygulamanın Termal püskürtme yöntemleri olacağı tahmin edilmiştir. Bir diğer yandan bu uygulamaların en çok Havacılık alanında olacağı ön görülmektedir [7].

Termal püskürtme teknolojileri sürekli olarak gelişirken, her geçen gün yeni zorluklarla karşılaşmaktadır. Paris İklim anlaşması ile birlikte dünya çapında ölçekte 2050 yılına kadar sera gazı salınımının sıfıra yakın bir seviyeye indirilmesi hedeflenmiştir [72]. Bu hedef doğrultusunda bütün alanlarda çalışmalar hız kazanmış, özellikle havacılık alanında sürdürülebilir havacılık yakıtı ile ilgili çalışmalar artmıştır. Bu çalışmanın öncülüğünde havacılık ekosisteminin en önemli bileşeni olan gaz türbinli jet motorlarının ilk üretimden yaşam döngüsünün sonuna kadar olan bakım süreçlerinde de sürekli iyileştirme hedeflenmektedir.

Gaz türbinli jet motorunda bulunan birçok komponentte sürdürülebilir bir parça yaşam döngüsü elde etmek üzere termal püskürtme ile kaplama yaygın olarak kullanılmaktadır [73]. Termal sprej ile kaplama yöntemi birçok parametrenin birbirleri ile etkileşim içerisinde olduğu karmaşık bir süreçtir. Literatürde ve endüstride termal püskürtme parametrelerinin birbirleri ile arasında gerçekleşen etkiyi incelemek üzere çalışmalar yapılmaktadır [74-76].

Bu çalışmanın temel amacı; termal püskürtme parametreleri içerisinde yer alan değişkenler ele alınarak prosesin incelenmesi ve değişkenler arasındaki ilişkilerin deneysel tasarım yöntemleri ile analitik düzlemde ortaya çıkarılmasıdır.

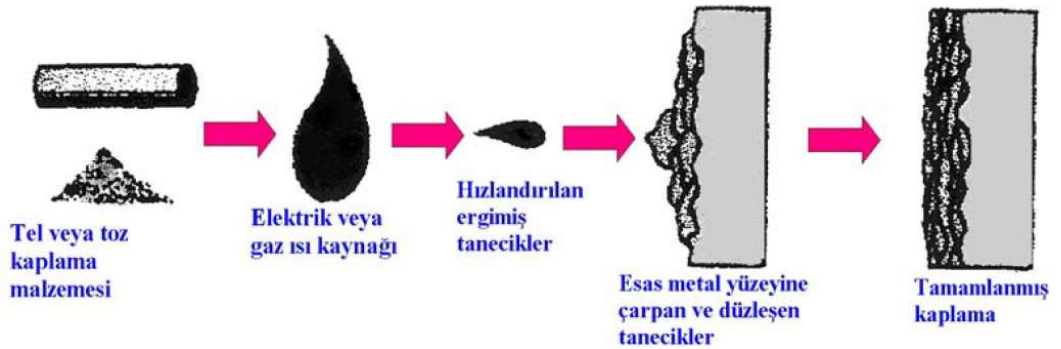
Bu araştırmada, termal püskürtme yöntemleri, parametreleri ve ekipmanlarının tanımlanması; uygulama yapılacak altlık malzemenin kullanım amacına göre doğru yöntemin seçilmesi; ve deneysel tasarım sonucu elde edilen optimize edilmiş verilerle plazma kaplamanın kabul edilebilir kriterler içerisinde uygulanabilirliğinin gösterilmesi hedeflenmektedir.

Çalışmada, termal spre y parametreleri sabit ve değişken değerler olarak uygulama yapılan tesisin ihtiyaçları gözetilerek tanımlanmıştır. Yapılan araştırmada Akım, Argon gazı akış oranı, besleme oranı, püskürtme uzaklığı ve taşıyıcı gaz akış oranı değişken olarak kabul edilmiştir. Deney setleri, Taguchi Metodu benimsenerek Minitab içerisinde oluşturulmuştur. Elde edilen veri setine göre 18 deneme yapılmıştır. Elde edilen tüm numuneler metalografik yönden incelenmiş ve kabul kriterleri içerisine giren en iyi veri seti elde edilmiştir.

2. TERMAL PÜSKÜRTME YÖNTEMLERİ

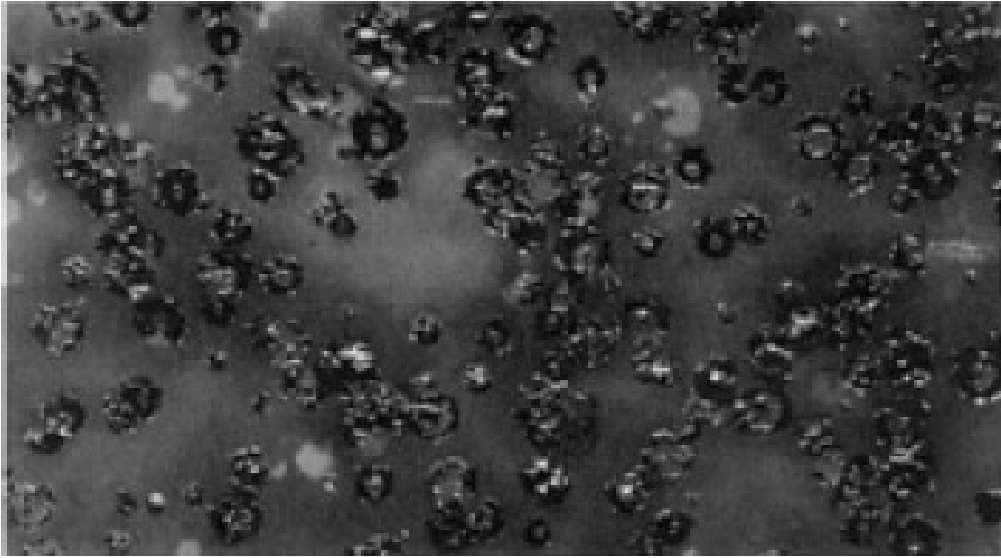
Termal püskürtme kaplama tekniği, proses çeşitliliği, uygulanabilen malzeme çeşitliliği ve üreticiye ekonomik katkıları nedeniyle endüstrinin birçok alanında yaygın olarak kullanılmaktadır [9]. Termal spreyle kaplama, toz veya tel halindeki kaplama malzemesinin elektrik arkı, alev veya plazma ile ısıtılarak, bir püskürtme gazı yardımıyla ısıtılmış partikülleri altlık malzemeye yapışmasını sağlayan yöntemlerin genel adıdır. Termal spreyle kaplamalar korozyon, abrazyon, erozyon, kazıma gibi aşınma olaylarını engellemek, oksidasyonu ve sıcak korozyonu önlemek, ısı yalıtımı, elektrik iletimi veya ısı yalıtımı amacıyla kullanılabilir. [8-9].

Termal püskürtme yöntemi ile tokluğu, sertliği, sürtünme katsayısı ve daha birçok özelliği farklı malzemeler kaplanabilir. Bu malzemeler genel olarak metal, metal alaşımlar, sermetler, seramikler, karbitler, polimerler ve özel kompozit malzemeler olarak sınıflandırılabilir. Kısaca ifade edecek olursak, termal püskürtme ile kaplama önceden hazırlanmış olan esas metale (altlık) çok ince metalik veya metalik olmayan malzemeleri çökeltmek elde edilen bir grup yöntemin genel adıdır [6]. Kapsama malzemesi toz, çubuk ya da tel formunda olabilir. Termal püskürtme tabancası, kapsama malzemesini ısıtmak için gerekli olan sıcaklığı yanıcı gazlar, elektrik arkı veya plazma arkı ile elde eder. Ergiyen kapsama malzemesi kaplanacak olan altlık malzemesinin soğuk olan yüzeyine püskürtülür. Darbe etkisinde yüzeye çarpan tanecikler, düzleşmekte ve esas metale olan ısı transferi ile soğuyarak katılaşmakta ve birbirleri ile temas haline gelerek tabaka meydana getirmektedir. Şekil 2.1 termal püskürtme prosesinin genel işlem sırasını göstermektedir [10].



Şekil 2.1: Termal Püskürtme İşlem Sırası [10].

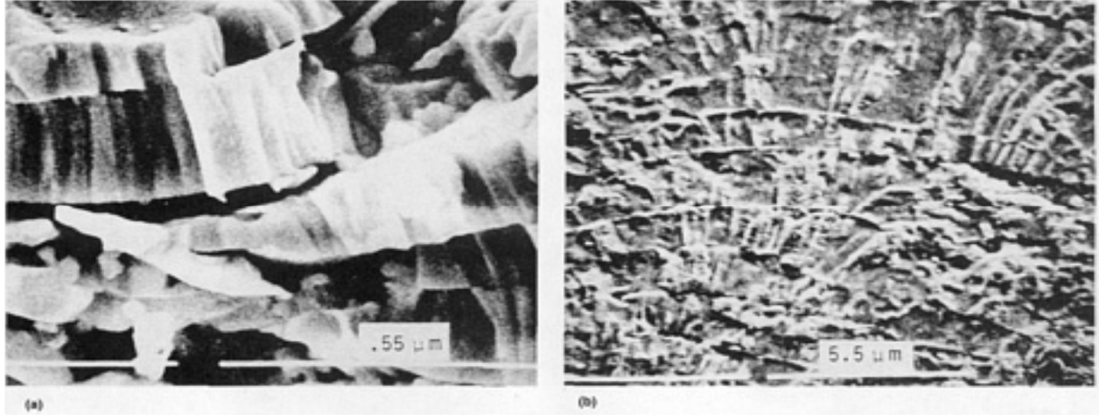
Yöntem konvansiyonel olarak 4 temel kategoriye ayrılır: alev püskürtme, elektrik ark ile püskürtme, plazma ark ile püskürtme ve yüksek hızlı oksijen yakıtlı püskürtme. Temel olarak 4 yöntem içerisinde de ortak olarak değerlendirilen parametre setleri bulunmaktadır. Her bir yöntem için ortak olarak alınabilecek parametreler; iş parçası sıcaklığı, toz parçacığı kimyasal kompozisyonu, tabanca tipi, nozül çapı, akım, net güç, proses gazları (Ar , H_2 , He , N_2), püskürtme uzaklığı, iş parçası çapına bağlı olarak tabla dönüş hızı, yer değiştirme hızı, yüzey hızı, manipülatör step sayısı, paso sayısı, tutunma oranı, kaplama kalınlığı olarak özetlenebilir. Termal püskürtme yönteminde kullanılan enerji yöntemleri kaplama malzemesini (toz, tel veya çubuk formunda) erimiş veya yarı erimiş duruma getirmek amacıyla ısıtmak için kullanılır. Elde edilen ısıtılmış parçacıklar proses gazları tarafından hızlandırılarak daha önceden hazırlanmış olan yüzeye doğru itilir. Şekil 2.2, erimiş damlacıkların yüzeye çarptıkça, akarken ve katılaşırken aldıkları çeşitli şekillerin bir örneğini göstermektedir [18].



Şekil 2.2: Püskürtmenin bir malzemeye çarpması sonucu erimiş/ yarı erimiş parçacıkların deformasyonu [12].

Çeşitli termal püskürtme ile yapılan kaplama örneklerinin tipik kesitleri Şekil 2.3'de gösterilmekte ve kaplamaların lamel yapısını göstermektedir. Bir kaplama, ayrılmadan eritilebilen hemen hemen her malzemeden yapılabilir. Dahası, biriktirme işleminin kendisi malzemenin yapısının yanı sıra bileşimini de önemli ölçüde değiştirebilir. Sonuç olarak, mikro yapı ve kaplamaların özellikleri son derece çeşitli

olabilir. Bu nedenle, bir kaplamanın spesifikasyonu genellikle başlangıç tozunun veya telinin bileşimini ve kullanılacak genel işlem türünü belirtmekten daha fazlasını içermelidir [12].



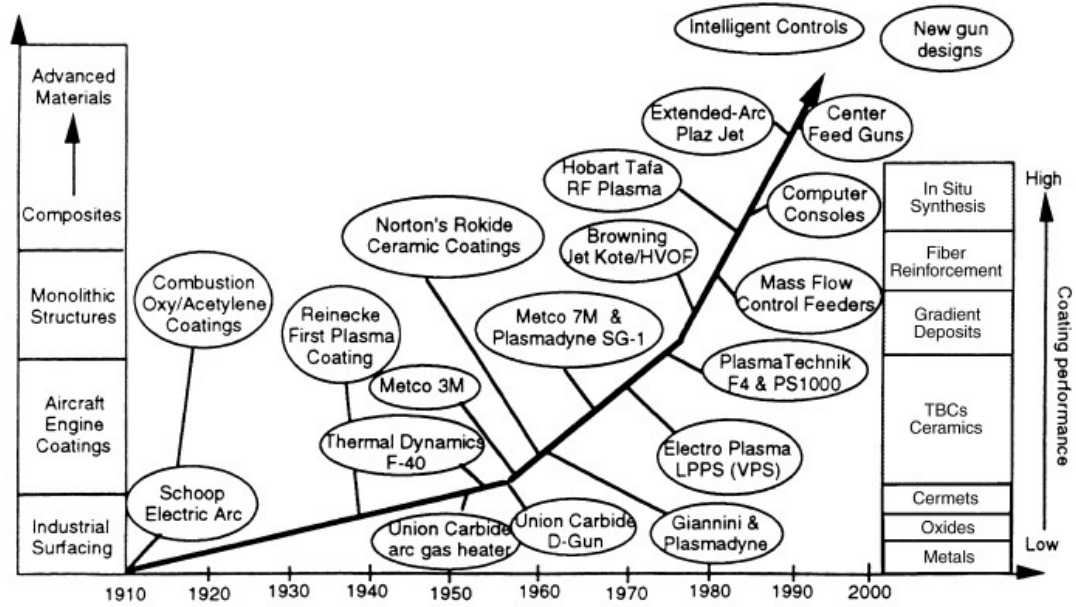
Şekil 2.3: Plaka yapısını ve plakalar içindeki ince kristal yapıyı gösteren, plazma püskürtmeli tungsten metal kaplamanın tipik mikro yapısı. (a) Bir kırılma yüzeyinin taramalı elektron mikroskobu görüntüsü. (b) Aynı kaplamanın ışık mikroskopik görüntüsü. Praxair Surface Technologies, Inc.'in izniyle paylaşılmıştır [12].

2.1. Termal Püskürtme Yönteminin Tarihsel Gelişimi

Termal püskürtme ile kaplamanın en eski kayıtları M.U. Schoop'un 1882 ile 1889 arasında patentlenen çalışmalarına kadar dayanmaktadır. Termal spreyn icadı, termal spreyn sürecinin farklı yönleri hakkında çeşitli patentler alan ve teknolojiyi endüstriyel ölçekte başarılı bir şekilde ticarileştiren M.Schoop ve arkadaşlarına atfedilmektedir [14]. Bu çalışmalarda Schoop, kurşun ve kalay tellerini değiştirilmiş bir oksisasetilen kaynak torcuna beslenmesi ile kaplama yapmayı denemiştir. Yapılan bu çalışmalara “*Metalizasyon*” adı verilmekteydi. 1900’lü yılların başlarında Schoop ve arkadaşları, iletken metal tellerini eritmek ve ana metal üzerine uygulamak için bir elektrik ark yöntemini geliştirmiştir [12].

20. yüzyılın ilk dönemlerinde başlıca tamir amacı ile kullanılan bu yöntem, 1960 sonrasında farklı metotlar ve uygulama yapılan malzeme çeşitliliği bakımından çok hızlı bir gelişme kaydetmiştir. Termal spreyn teknolojisi yirminci yüzyılın başlarında geliştirilmiş olsa da teknoloji esasen alevli spreyleme ile sınırlıydı. 1950’lerin ortalarında Thermal Dynamics Corporation tarafından ilk plazma spreyn torcu

geliştirildi ve bunu şu anda bu alanda kullanılan torç tasarımlarının temelini geliştiren Metco ve Plasmadyne takip etti [14]. II. Dünya Savaşı sonrasında Termal püskürtme yönteminde, temel çalışma prensiplerinde değişme olmaksızın birçok geliştirme kaydedilmiştir. Tozlar artık daha yüksek hızlı jet akımı üretecek şekilde güncellenmiş olan yakma cihazlarının alevlerine daha doğrudan beslenmektedir. Şekil 2.4’de tüm termal sprey süreci, uygulamaları, malzemelerin gelişimi özetlenmekte ve termal püskürtme teknolojisinin dönüm noktaları ve kilometre taşları göstermektedir.



Şekil 2.4 : Termal sprey geliştirmelerinin, ekipmanlarının ve malzemelerinin zaman çizelgesi [13].

Özellikle 1950 yılında NASA’nın kurulması, daha yüksek sıcaklıklarda çalışan ve korozyon dirençli malzemelerin ve kompozitlerin yeni biçimlerini uygulamak için ilave tekniklere olan gereksinimi ortaya çıkarmıştır [10].

1960’lı yıllarda havacılık ve uzay endüstrisinde yeni geliştirilen malzemeler için ortaya çıkan gereksinimler termal püskürtme alanında hızlı gelişmelerin olmasını sebep olmuştur [6]. 1970’li yıllar ile birlikte düşük basınçlı plasma püskürtme, indüksiyon ile püskürtme, yüksek hızlı oksijen yakıtlı püskürtme ve birçok yeni proses geliştirmesi ortaya çıkmıştır. HVOF ve soğuk püskürtme yöntemlerinin kullanılmaya başlamasıyla birlikte, proses koşulları daha yüksek parçacık hızlarına ve daha düşük

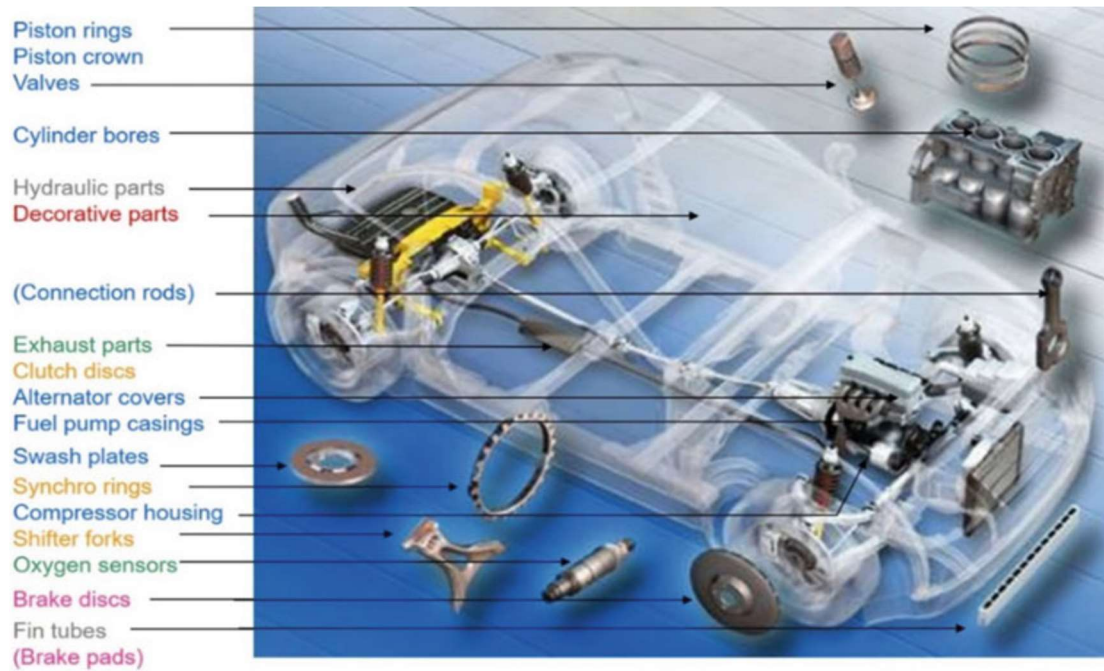
parçacık sıcaklıklarına doğru genişletilme eğilimi göstermiştir. Kompleks geometrileri kaplayabilmek için robotik sistemler geliştirilmeye başlanmıştır. Yeni plazma tabancası geliştirmeleri arasında çoklu katod veya anotlu torçlar ve merkezi enjeksiyon torçları yer almaktadır [77]. İndüksiyon plazma püskürtme son otuz yılda giderek artan bir ilgi görmüştür. Ayrıca, soğuk püskürtme teknolojisi de endüstriyel olarak kabul edilmiş kaplama teknolojileri arasında yerini almıştır. Düşük sıcaklıkta yapılan kaplama işlemi, oksit oluşumunu engeller ve oluşan kaplamanın özellikleri, işlenen malzemenin özelliklerine oldukça yakın olur. Nanometre boyutunda tanecik yapısına sahip malzemelerin (nanofaz malzemeleri veya nanomateryal) özel özelliklerinin keşfi, nanopartikül aglomeralarından oluşan tozlar kullanılarak veya yeni geliştirilen süspansiyon püskürtme teknikleri kullanılarak bu tür malzemelerin kaplamalarının geliştirilmesine yol açmıştır. Nanopartikül süspansiyonunun damlacıkları plazmaya enjekte edilir veya çözelti püskürtme yöntemi kullanılarak, nanopartiküllerin öncü maddeleri sıvı formda plazmaya enjekte edilerek daha sonra nanopartiküller oluşur [14].

2.2. Termal Püskürtme Yönteminin Uygulama Alanları

Termal püskürtme teknolojisi, gelişiminin ilk aşamalarında çoğunlukla tamir, yeniden inşa, güçlendirme ile korozyon, erozyon ve aşınmaya karşı yüzey koruması için kullanılmıştır [78-79]. Teknolojinin endüstriyel ölçekte üretimde daha geniş kabul görmesi, 1980'lerin sonu ve 1990'ların başında havacılık ve nükleer endüstrilerindeki yüksek katma değerli bileşenlerle sınırlı uygulamalarla başlamıştır [80]. Termal sprej püskürtme ile kaplamaların uygulamaları son derece çeşitlidir ve özellikle son 10 yılda, çok çeşitli endüstriyel ölçekli yüzey modifikasyonları kullanılabilir hale gelmiştir. Bu kaplamalar, düşük sürtünme ve yağlayıcı özelliklere sahip yüzeyler için tribolojik ve aşınmaya dayanıklı uygulamalardan, korozyon ve/veya oksidasyona direnç, termal koruma, elektromanyetik koruma, elektriksel yalıtım, aşınabilir contalar, biyomedikal uygulamalar, süper iletken oksitler, hizmet koşullarına göre uyarlanmış termal genleşme katsayısına sahip bileşenler, manyetik kaplamalar, sert kromun yerine geçebilecek kaplamalar ve dekoratif kaplamalar gibi çeşitli alanlarda kullanılmak üzere kabul edilmektedir [21].

Günümüzde termal püskürtme teknolojisi bileşenlerin karakteristiklerini ve yüzey özelliklerini modifiye etmek ve tasarlamak için artık önemli bir “çevre dostu”

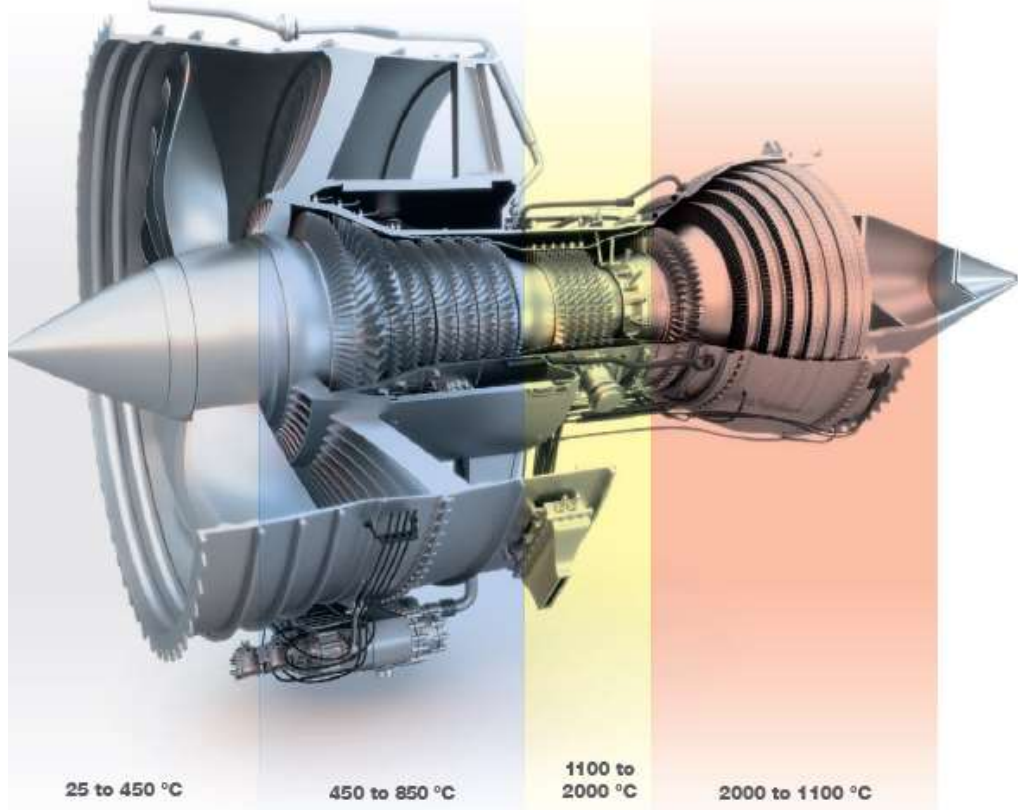
uygulaması olarak görülmektedir. Termal püskürtme teknolojisi, küresel pazarın gelişimi, fiyat rekabeti, ürün ve malzeme düzenlemeleri ile çevre, sağlık ve güvenlik gerekliliklerinin yarattığı baskılar nedeniyle sürekli olarak yenilenmektedir [42]. Bu zorluklar aynı zamanda birçok fırsatı da beraberinde getirmektedir. Örnek olarak bu gelişmeler sonrası çevresel kaygılara sebep olan sert krom kaplama yerine ‘‘daha yeşil’’ bir proses olan elektroliz yöntemiyle altı değerlikli kromyum kaplamalar geliştirilmiştir. Termal püskürtme teknolojisi ulaşım, enerji, malzeme çıkarma ve işleme, biyomedikal, elektronik uygulamalar, havacılık ve uzay, otomotiv, tarım aletler, petrol ve gaz üretimi gibi endüstride çok geniş bir alanda kullanılmaktadır [14,42]. Termal püskürtme teknolojinin sunduğu önemli avantajlardan bir diğeri de çeliğin yaygın kullanımına karşın Al ve Mg gibi daha hafif malzemelerin kullanımına yardımcı olmasıdır. Otomobil endüstrisinde ağırlığı azaltmak için alüminyum motor bloklarının kullanılması, termal püskürtme teknolojinin endüstriyel/toplumsal bir ihtiyaca nasıl verebileceğine bir örnektir. Püskürtme tabancaları, Al alaşımlı silindir bloklarının iç duvarlarını yüksek sıcaklık ve korozyif çalışma ortamlarına dayanıklı malzemelerle kaplamak için tasarlanmıştır. Şekil 2.5, otomotiv endüstrisinde termal püskürtme teknolojisi kullanılarak kaplanan parçaların bir kesitini göstermektedir [32].



Şekil 2.5 : Otomotiv endüstrisinde termal püskürtme uygulanan bileşenler [14].

Bu çalışmanın ana hedeflerinden biri olan gaz türbinli jet motorları, havacılık endüstrisinde termal püskürtme uygulamaları açısından öncü konumdadır. Paris İklim Anlaşması uyarınca 2050 yılına kadar belirlenen net sıfır CO_2 emisyonu hedefinin gerçekleşmesinde havacılık endüstrisi çok büyük yer tutmaktadır [81]. Gelecek yıllarda özellikle jet motorlarından elde edilen emisyonu ve karbon ayak izini azaltmak için biyoyakıtların kullanımı ile hidrojen/hibrit bataryalı motorların kullanımı bazı planlar yapılmış ve hayata geçirilmeye başlanmıştır. Bununla birlikte motor üreticileri verimliliği artırmak üzere çalışmalarını sürdürmektedirler.

Bu verimlilik kazanımları, jet motorunun daha yüksek sıcaklıklarda çalışması, daha hafif yeni bileşenler ve bileşen ömrünü sürdürmek için gelişmiş yüzey mühendisliği çözümlerinin uygulanması gibi zorlukların üstesinden gelinerek elde edilecektir. Yeni yakıtların kullanıma girmesinin akabinde ortaya çıkan yeni zorluklara karşın, yenilikçi malzeme tasarımlarına ek olarak gelişmiş termal bariyer kaplaması, oksidasyona dayanımı yüksek kaplamalar, boşluk kontrolü ve aşınma direnci sağlayan çevreye duyarlı kaplamaların yapılması gerekecektir [82]. Termal püskürtme teknolojisi açısından bakıldığında, gaz türbinli motorların geliştirme alanları; fan, yüksek ve düşük basınçlı kompresörler, yanma odası, türbinin yüksek ve düşük basınçlı kısımları olarak öne çıkmaktadır [83]. Şekil 2.6, jet motorunun kısımlarını ve operasyonel sıcaklıklarını göstermektedir.



Şekil 2.6: Jet motorunun kaplama çözümü gerektiren kritik kısımlarını gösteren şeması [68].

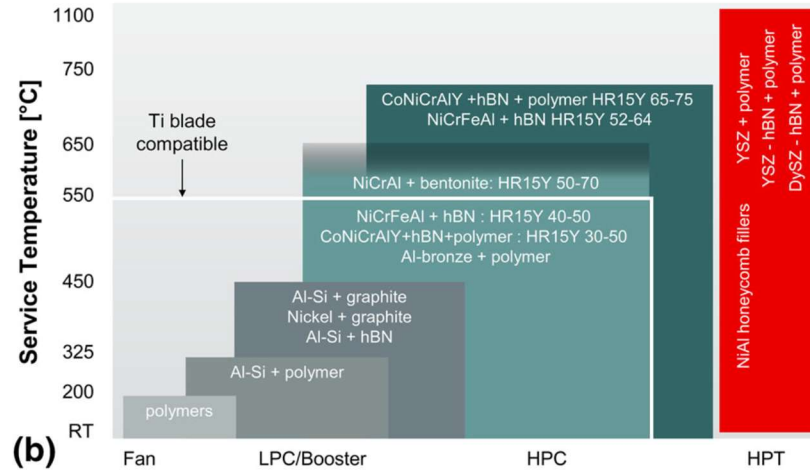
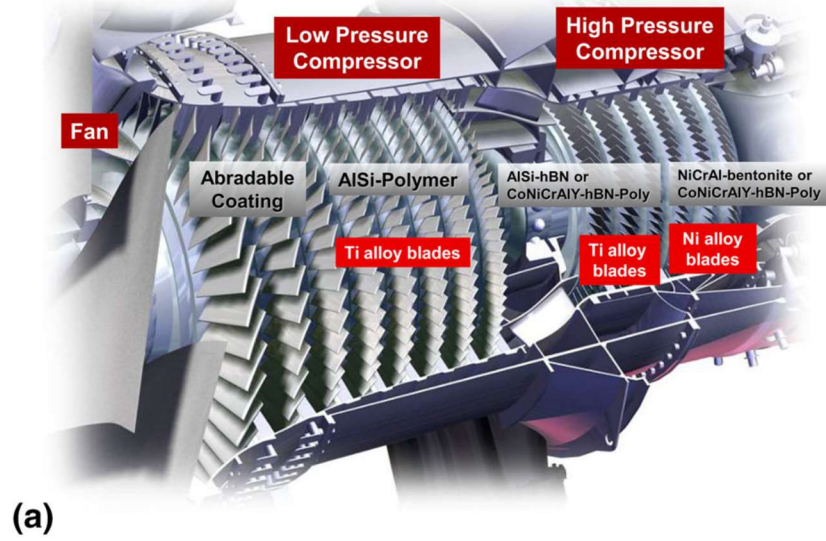
Termal bariyer kaplamaları, düşük termal iletkenlik, faz stabilitesi, sinterleme direnci ve uzun termal döngü ömrü sağlamanın yanı sıra, kalsiyum-magnezya-alümina-silika (CMAS) gibi dış etkenlerin yol açtığı zararlara karşı da parçanın mukavemetini artırmalıdır. CMAS, basit olarak erimiş kumu ifade eder ve parça üzerine etkiğinde termal bariyer kaplamalarını 1150 °C üzerine çıkacak şekilde etkiler. Bu durum önemli derecede kaplamanın bütünlüğünü ve performansını etkilemektedir. Bu zorluk tüm uçak motorları için geçerli olsa da, askeri hava araçları daha zorlu şartlarda çalıştıkları için CMAS etkilerine daha yatkındırlar. Bu da bakım ve onarım süreçlerinin uzamasına neden olmaktadır. Şekil 2.7’de, çöl şartlarında çalışan bir askeri helikopterin motor bileşenlerinin yeniden katılaşmış CMAS kumuyla kaplanmasına ve bunun sonucunda oluşan hasara ait detaylar gösterilmektedir.



Şekil 2.7: (a) Çöl Şartlarında çalışan bir askeri helikopter ve motorun etkisinde kaldığı çevresel şartlar (b) Hizmet sonrası kum birikintileri ve CMAS etkisinde arızaları bulunan motor bileşenleri [40].

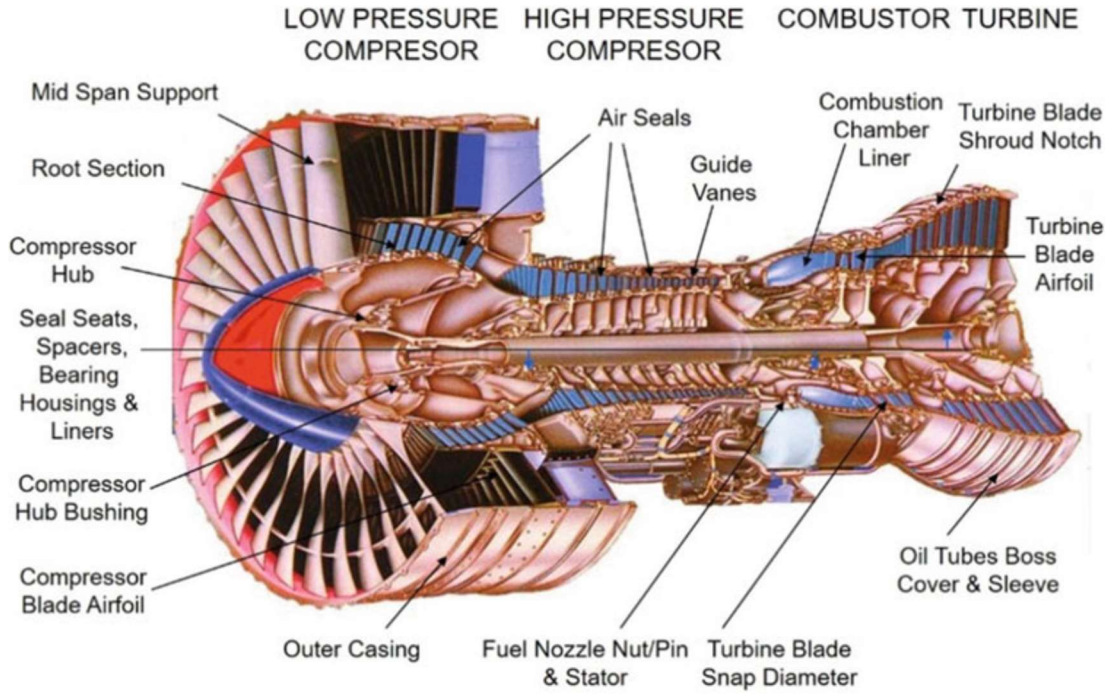
Termal püskürtme kaplamalarına yönelik bir diğer kritik geliştirme ve büyüme alanı, aynı zamanda aşınabilir kaplamalar olarak da adlandırılan boşluk kontrol sistemleridir. Bu sistemler, tipik bir sivil havacılık motoru için genel verimlilik oranında %2 oranında iyileşmeye katkıda bulunur. Boşluk kontrol sistemleri, alçak ve yüksek basınçlı kompresörler ile yüksek basınçlı türbinlerde uygulanmaktadır [83].

Teknik olarak, erozyon dayanımı, kanatçık geometrisi, çalışma ortamı (sıcaklık ve parçanın motordaki konumu), kanatçık hızları ve altlık malzemesi ile uyum gösterme gibi birçok faktöre bağlı olan tasarım gereksinimi vardır. Şekil 2.8’de, jet motorunun farklı bölümleri ve buralarda kullanılan çeşitli kaplama çözümleri göstermektedir.



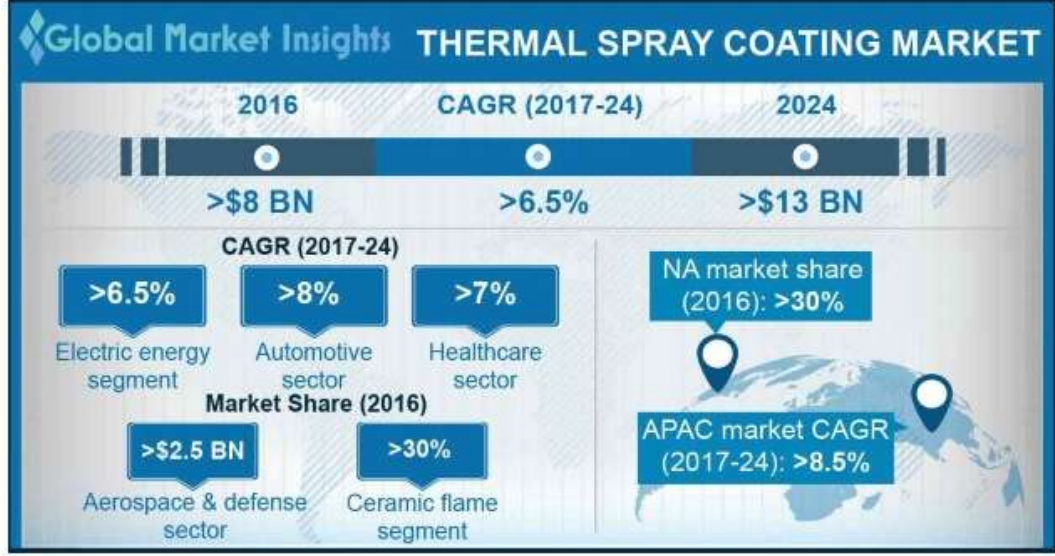
Şekil 2.8: (a) Havacılık motorlarında kullanılan aşınmaya dayanıklı malzemeler.(b) Çeşitli bileşenler ve tipik kaplama malzemelerinin bileşimlerine göre aşınmaya dayanıklı servis sıcaklık Aralıkları [40].

Yapılan kaplama çeşitlerine genel olarak bakıldığında, karşılaşılan en büyük zorluklardan bazıları; kaplamanın mukavemeti, güvenilirlik ve prosesin ekonomisidir. Yıllar içinde, geleneksel yanma püskürtmeli kaplamanın yerini plazma püskürtmeli teknolojiler almaktadır [84]. Şekil 2.9’da genel olarak gaz türbinli jet motorunda termal püskürtme ile kaplama yapılan bölüm ve parçalar gösterilmektedir [40].



Şekil 2.9: Uçak Jet motoru parçalarında, mevcut ve potansiyel Termal Sprey kaplama uygulamaları [13].

Teknolojinin market değeri 2015 yılında 7,58 milyar ABD doları olarak gerçekleşmiş ve 2021 yılı sonunda 11,89 milyar ABD doları büyüklüğüne erişeceği tahmin edilmiştir [18]. Pazarın büyümesine öncülük eden sektörler içerisinde elektrik üretimi, hava taşımacılığı, otomotiv üretimi ve ekonomik kalkınmanın olacağı ön görülmüştür [19]. Bir diğer araştırmaya göre market değeri 2016 yılı itibarıyla 8 milyar ABD doları üzerine çıkmış ve 2024 sonuna kadar yılda ortalama %6,5 oranında büyümesi beklenmiştir. Endüstrinin 2024 yılı öngörüsü bir senede 900 kiloton üzerinde tüketim olacağı üzerine yoğunlaşmıştır. Makine ve ekipmanların performanslarının gelişiminin yanı sıra genel operasyonel maliyetlerinin azaltılması, pazar büyümesini destekleyen temel faktörlerdir. Şekil 2.10’da termal püskürtme pazarının 2024 sonu itibarı ile ulaşacağı değer özetlenmektedir [40]. 2021 yılında yapılan diğer bir market araştırmasına göre toplam termal spre y pazarının 10 milyar USD olduğu ve bunun yaklaşık %60’ının endüstriyel gaz türbinleri (IGT’ler) ve uçak motorlarını içeren türbinlerle ilgili faaliyetlerde olduğu tahmin edilmektedir. Türbin endüstrisinin pazarda bulunan 6 milyar USD’lik payının en büyük kısmı kaplama hizmetlerinden elde edilmektedir [40].

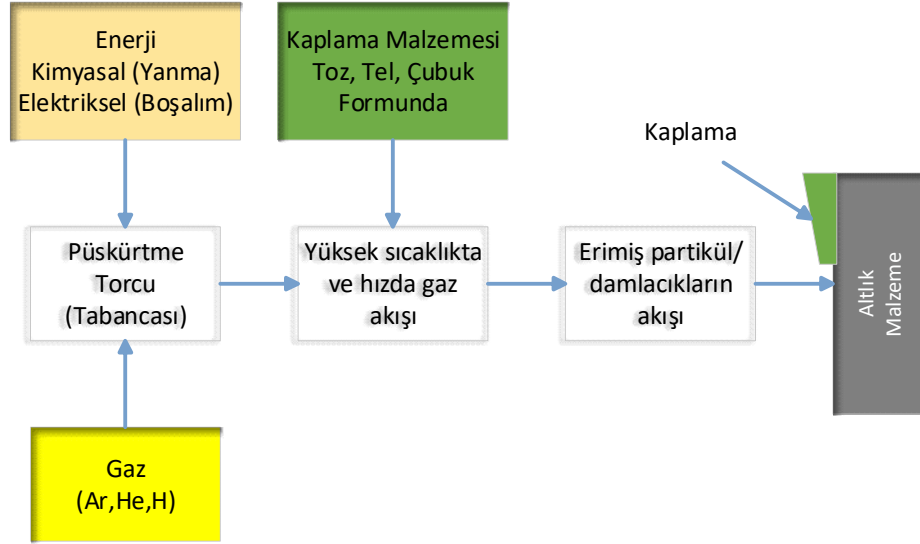


Şekil 2.10: Termal Püskürtme Global Market Öngörüsü [41].

2.3. Termal Püskürtme Teknolojisi ve Yöntemleri

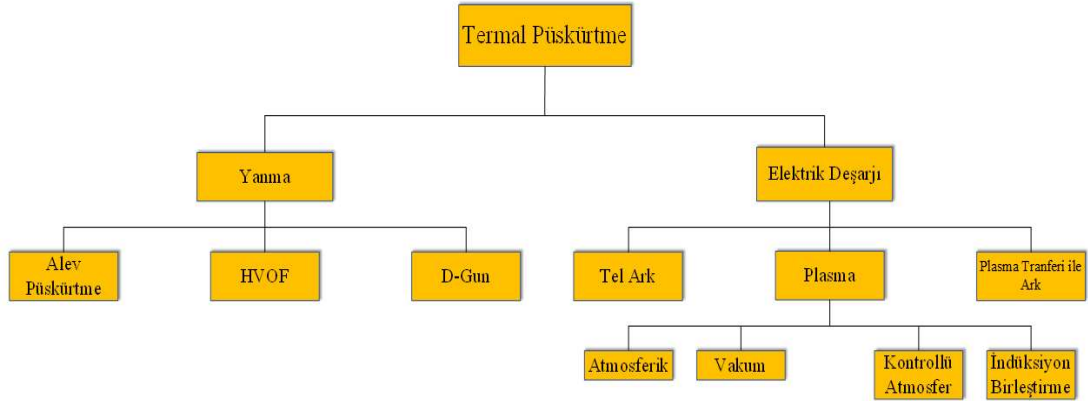
Termal püskürtmenin genel bir tanımı termal sprey terminolojisi derlemesinde şu şekilde verilmiştir: “Termal püskürtme, metalik veya metalik olmayan malzemelerin eriyik veya yarı eriyik formda belirli yüzeyde bir kaplama oluşturmak için biriktirilmesidir. Kaplama malzemesi toz, seramik çubuk, tel veya eriyik malzemelerden oluşabilir.” [20].

Termal püskürtme prosesinin temel adımları Şekil 2.11’de gösterilmektedir. Proses püskürtme işlemine bağlı olarak kimyasal (yanma), elektriksel (elektrik deşarjı) veya farklı enerji kaynaklarının püskürtülecek malzemenin enjekte edildiği bir sıcak gaz akımına dönüştürüldüğü ‘püskürtme torcu’ etrafında merkezlenmiştir. Püskürtme torcuna toz, tel veya diğer şekillerde sokulan malzeme ısıtılır, eritilir ve yüksek sıcaklıktaki, yüksek hızlı gaz akımı tarafından partikül/erimiş damlacık etkisi ile altlık malzemeye doğru fırlatılarak altlık malzeme üzerinde kaplama oluşturur. Yüzeyde oluşan katmanların şekli ve özellikleri, püskürtülen malzemenin karakteristiğine, partikül/damlacık boyutuna, partikül/damlacık sıcaklığına ve altlık malzemesi yüzeyine çarpmadan önceki hızına ve altlık malzemesinin yüzey özelliklerine bağlıdır.



Şekil 2.11: Termal Püskürtme Sistemi Genel Gösterimi.

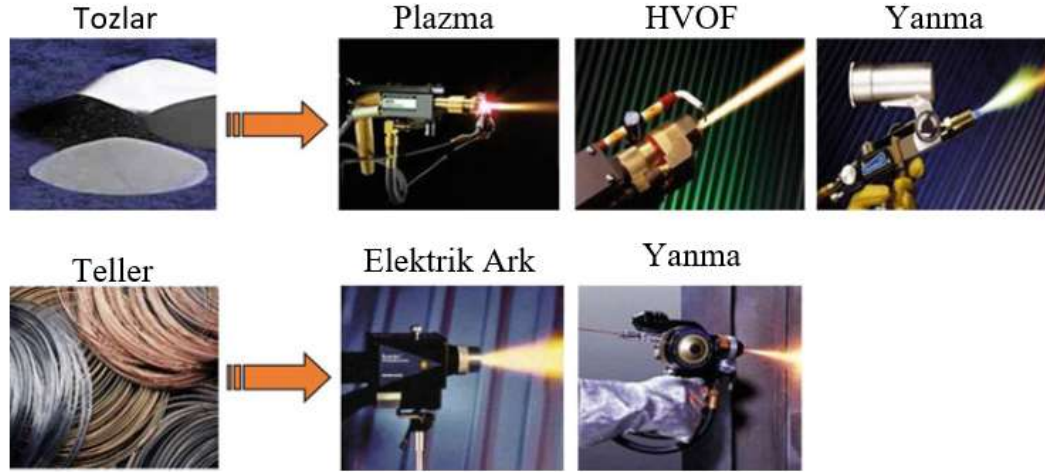
Termal püskürtme yöntemleri proseste kullanılan enerji kaynağına göre oluşan yüksek hız ve sıcaklıktaki gaz akışına göre iki ana gruba ayrılmıştır. Sınıflandırma Şekil 2.12’de özetlenmiştir.



Şekil 2.12 : Termal Püskürtme Teknolojilerinin Sınıflandırılması.

Tarihsel olarak termal püskürtme teknolojisini temsil eden kimyasal (yanma) temelli termal püskürtme prosesleri, alev püskürtme, HVOF veya HVAF ve D-Gun olmak üzere üç ana gruba ayrılır. Yüksek hızlı oksijen yakıtlı alev püskürtme yaklaşık 2000 °C sıcaklıkta 650 m/s hıza ulaşan partikül hızıyla, metaller, sermetler ve bazı seramiklerin kaplamasında kullanılır. Son yıllarda hızla gelişmekte olan ikinci grupta yer alan teknolojiler, APS ve VPS, WAS ve PTA yöntemleridir. Bu sistemlerin merkezinde DC

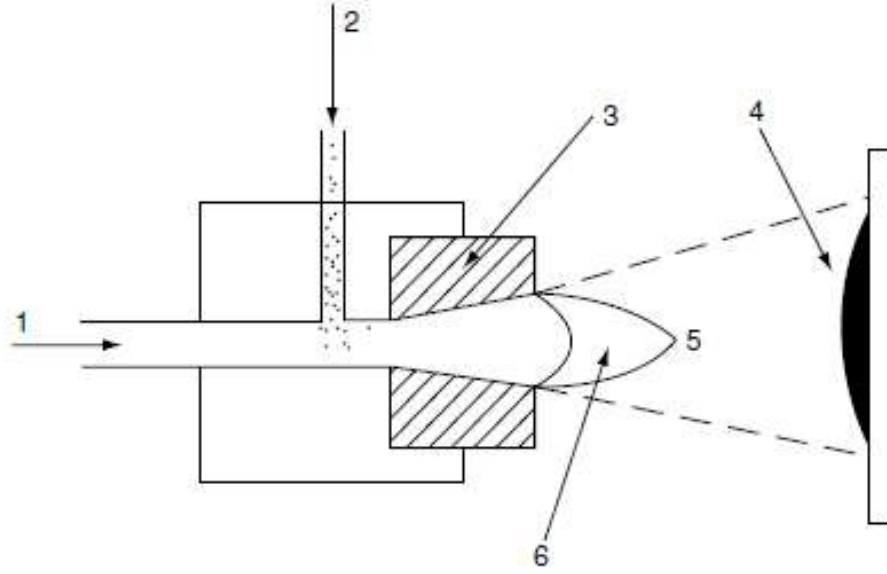
veya radyo frekans indüksiyonu ile elde edilen enerjiden yararlanan plazma püskürtme torcu yardımıyla elde edilen yüksek sıcaklıkta, yüksek hızlı plazma akışı ile püskürtülecek malzemenin ısıtılması, eritilmesi ve atomize hale getirilmesi yer almaktadır. Şekil 2.13’de toz ve tellerin kullanıldığı farklı termal püskürtme proseslerinin görseli yer almaktadır [14].



Şekil 2.13: Toz ve tel beslemeli farklı plazma püskürtme prosesleri.

2.3.1. Alev ile Püskürtme Yöntemi

Alev ile püskürme yöntemi, kronolojik olarak bakıldığında ilk kaplama tekniğidir. 20. yüzyılın başlarında İsviçreli Mühendis Schoop tarafından geliştirilen bu yöntem başlangıçta kalay veya kurşun gibi düşük erime noktalı metaller için kullanılmış sonrasında sıcağa dayanımı yüksek metaller ve seramik malzemeler için de kullanılmaya başlanmıştır [43]. Püskürtme işleminde kullanılan yüksek sıcaklıktaki gaz jeti, yakıcı olarak hava veya saf oksijen kullanılarak prosese uygun bir gaz veya sıvı formunda bulunan yakıtın yakılması ile üretilir. Alev püskürtmenin genel çalışma prensibi Şekil 2.14’de özetlenmiştir. Şekilde gösterilen tipik bir alev püskürtme torcunda, yakıtın oksijen içinde yanmasının sonucunda oluşan kimyasal enerji sıcak bir alev oluşturmak için kullanılır. Gaz, aksenal olarak (1) sisteme girer ve toz (2) püskürtme tabancasına aksenal veya dik açıyla verilebilir (3). Bu yöntemde toz yerine çubuk veya tel formunda malzemeler de kullanılabilir. Sisteme gönderilen partiküller, alevde (6) eriyerek iş parçası yönünde hızlanır [44].

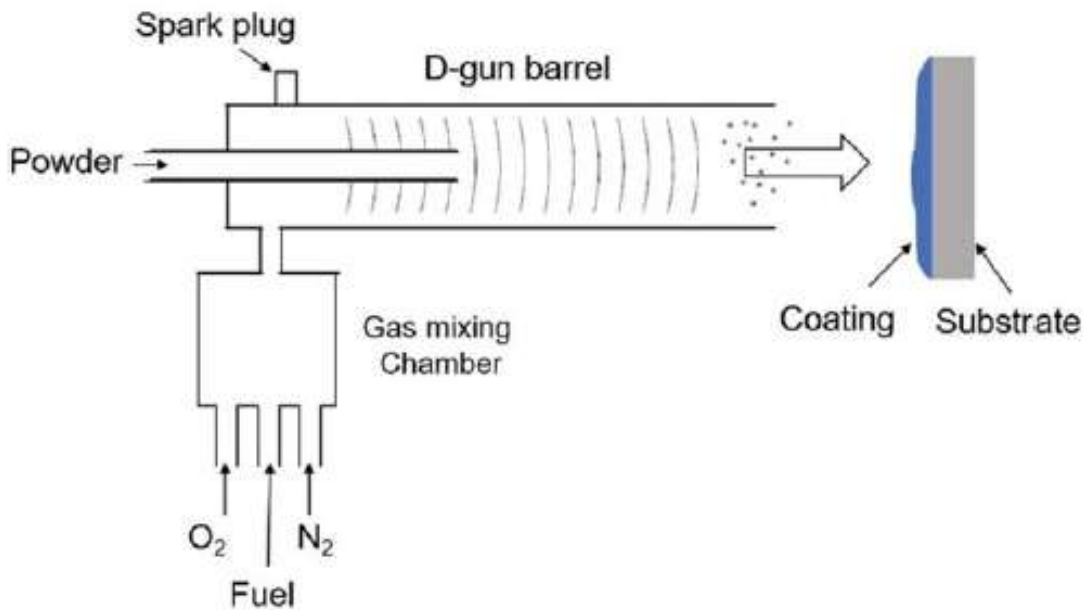


Şekil 2.14: Alev Püskürtme Metodunun Şematik gösterimi: (1) gaz veya sıvı yakıt, (2) toz enjeksiyonu, (3) torç gövdesi, (4) püskürtülen kaplama, (5) partikül akışı, (6) yanma sonucu oluşan alev [43].

Alev ile püskürtme yöntemlerinde genel olarak gaz kompozisyonu (oksijen:yakıt oranı) 1:1 olmakla birlikte bazı durumlarda 1.1:1 olabilmektedir. Oluşan alevin sıcaklığı 3100°C (5600 °F) 'e kadar çıkabilmektedir. Yanma noktasına erişen partikül hızı sistemde 80 ile 100 m/s'ye kadar hızlara çıkabilmektedir. Yakıcı gazların akış oranları ve basınç değerleri sistemde kullanılan torcun (tabancanın) tasarımına göre değişmektedir. Alev püskürtme torçları genel olarak hafif ve karmaşık şekillerin kaplamasında elle kullanıma uygun olarak tasarlanmıştır. Alev ile püskürme yapılan kaplamalar genel olarak %10 üzerinde porozite ve altlık malzemesine nispeten (<30 MPa) düşük yapışma ile tutunur. Bu yöntem endüstride genel olarak düşük maliyeti, birçok malzemeye uygulanabilirliği ve basitliği göz önünde tutularak yaygın olarak kullanılmaktadır. Tipik uygulamalar arasında bor içeren NiCrBSi gibi kendiliğinden akan alaşımlar ve oksidasyonu sınırlandırıcı akışkanlığı artıran silikon bazlı malzemelerin püskürtülmesi yer alır. Alev ile püskürtme, düşük yük koşulları altında çalışan termoplastiklerin ve aşınmış parçaların tamirinde aşınmaya karşı dayanıklı kaplamaların yapılmasında kullanılır [14].

2.3.2. Patlamalı Püskürtme Yöntemi (D-Gun)

D-Gun, malzemeyi eritmek ve iş parçasına itmek için bir yakıt, oksijen ve toz kaplama malzemesi karışımının kontrollü patlamasının kullanıldığı bir alevli püskürtme işlemidir [20]. İlk defa Rusya’da geliştirilen sistem, 1950’li yılların başında Union Carbide firması için çalışan Gfeller ve Baiker tarafından kullanıldı. D-Gun torcu, temel olarak Şekil 2.15’de gösterildiği gibi yakıt ve oksijen karışımının içinde bulunduğu, bir ucu kapalı 1 m boyunda bir namludan oluşmaktadır. Karışımın ateşlenmesi, namlunun kapalı kısmına yakın konumda bulunan bir buji yardımıyla ateşlenir [45]. Tüpün kapalı ucunda 2 MPa civarında basınç oluşur ve bu basınç tüpün orta kısmına enjekte edilen partikülleri sürükleyerek açık uca doğru ilerletir. Enjekte edilen partiküller, uçuş sırasında hızlandırılır ve ısıtılır (çoğu durumda eritilir). Patlama sonucu oluşan basınçlar, hazne basıncı eşitlenene kadar gaz besleme valflerinin kapanmasına neden olur.



Şekil 2.15: Patlamalı Püskürtme Torcu Şematik Gösterimi [44].

Diğer yöntemlerin çoğunun aksine, partikülleri hızlandıran ve altlık malzemesine doğru iten gazın özgül ağırlığı soğuk gazından daha yüksektir (yaklaşık beş kat) ve bu parçacıkları yüksek hızlara çıkmasına sebep olur. Patlama hızı, yanma ürünlerindeki ses hızı ile eşdeğerdir [46]. Yanıcı gazların hızı, Kadyrov ve diğerlerinin tanımladığı

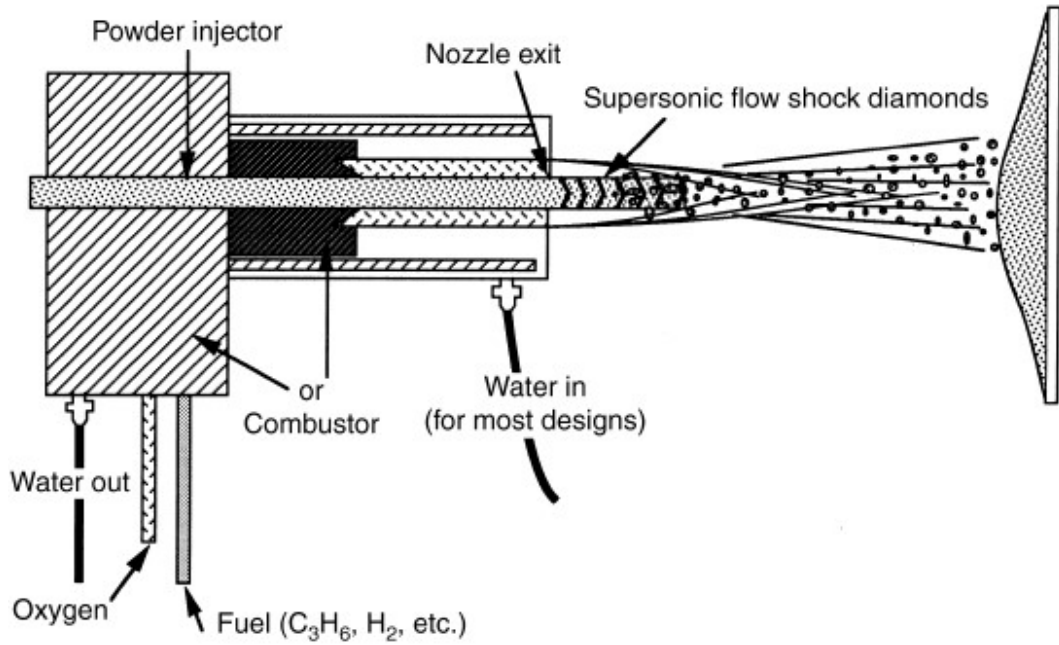
gibi 1000 ila 3000 m/s arasındadır. Bu hızlar büyük ölçüde yanıcı gaz karışımının bileşimine ve basıncına bağlıdır [45]. Patlamalı püskürtme yöntemi, neredeyse oksidasyonsuz, yüksek sertlikli, güçlü bağlanma ve yapışma dayanımına sahip, kalın ve yüksek yoğunluklu kaplamalar elde etmeyi amaçlar. Bu yöntemle kaplanan yüzey, kaplama yapılan yüzey kadar pürüzsüz, korozyona karşı dayanıklı ve aşınma direnci yüksek olur. Özellikle metalik ve sermet malzemeler ile kaplamada birinci sınıf kalitede sonuçlar elde edilir.

2.3.3. Yüksek Hızlı Oksi Yakıtlı Püskürtme Yöntemi (HVOF)

HVOF yöntemi ile püskürtme işlemi 1958 yılında şu anda Praxair Surface Technology olarak bilinen Union Carbide tarafından geliştirilmiştir. Ancak bu yöntem 1980'lerin başında JetKote sisteminin James Browning tarafından tanıtılmasına kadar ticari açıdan önemli hale gelmemiştir. Yöntem prensipleri, yakıt olarak oksijen kullanması farkı haricinde D-Gun yöntemine benzemektedir. Bir diğer farklılık ise HVOF yönteminde yanma işlemi sürekli iken D-Gun için tekrarlı olarak gerçekleşir [43].

Bu teknik, günümüzde karbürlerin püskürtülmesinde standart bir yöntem haline gelmiştir. Havacılık endüstrisinde daha önce elektrolitik krom kullanılarak yapılan birçok uygulama artık HVOF işlemiyle püskürtülen karbürler ve alaşımlar tarafından gerçekleştirilmektedir [46]. HVOF yönteminde prensip olarak yüksek hacimli gazlar bir yanma odasına beslenir ve yanıcı gazların cihazdan çıktığı 8 ila 30 cm (3-12 in.) uzunluğundaki bir sınırlandırıcı nozula beslenir. Gaz akışının yüksek hacmi, yüksek yanma sıcaklığıyla birleştiğinde, nozul çıkışında 1525 ile 1825 m/s aralığında gaz hızları oluşturur. Yüksek hızlı oksijen yakıt olarak H_2 , Propilen, C_3H_8 , C_2H_2 ve C_6H_{14} yer alır. Bunların yanında MAPP, Apache ve Crylene gibi ticarileşmiş gazlar da kullanılmaktadır [13].

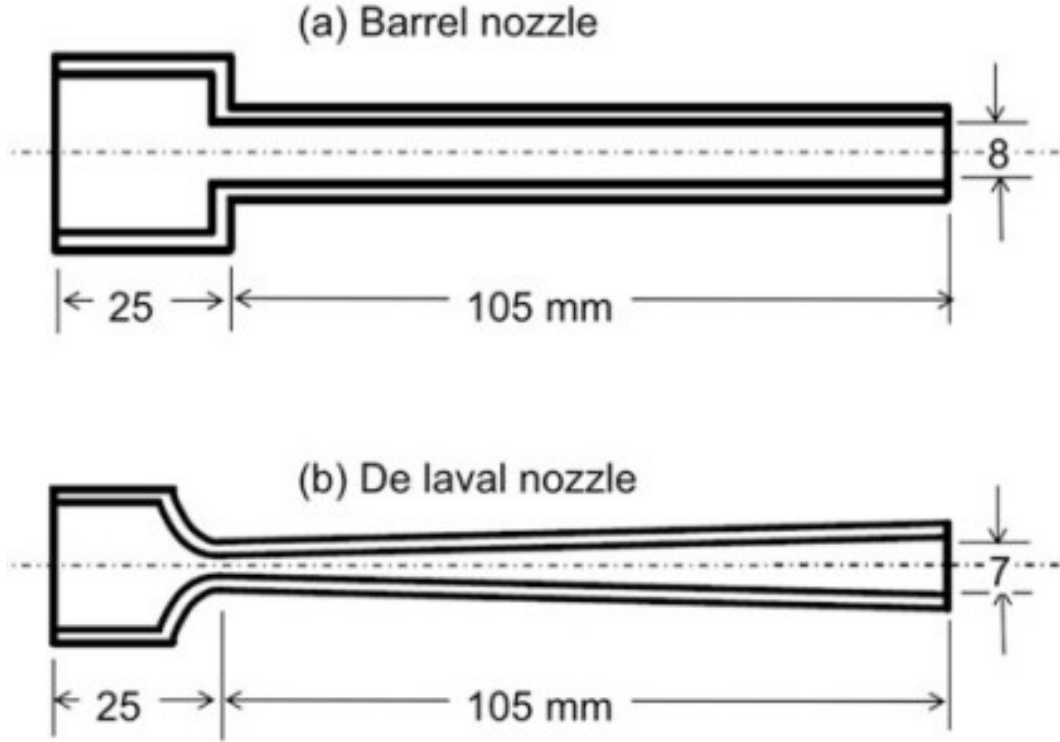
Şekil 2.16, su soğutma, parçacık enjeksiyonu ve yanan gazların sesten hızlı genişlemesini sağlayan bir nozuldan oluşan içten yanmalı bir HVOF sisteminde bulunan temel özellikleri göstermektedir. Bu tasarım sayesinde partikül ısı transferi ve verim, bekleme süresi arttıkça artar. HVOF tarafından üretilen, geleneksel alev veya plazma püskürtmesinden çok daha yüksek olan gaz hızının, kaplama yoğunluğunda ve kaplama yapışmasında buna karşılık gelen bir artışla birlikte parçacık hızını arttırdığı gösterilmektedir [13].



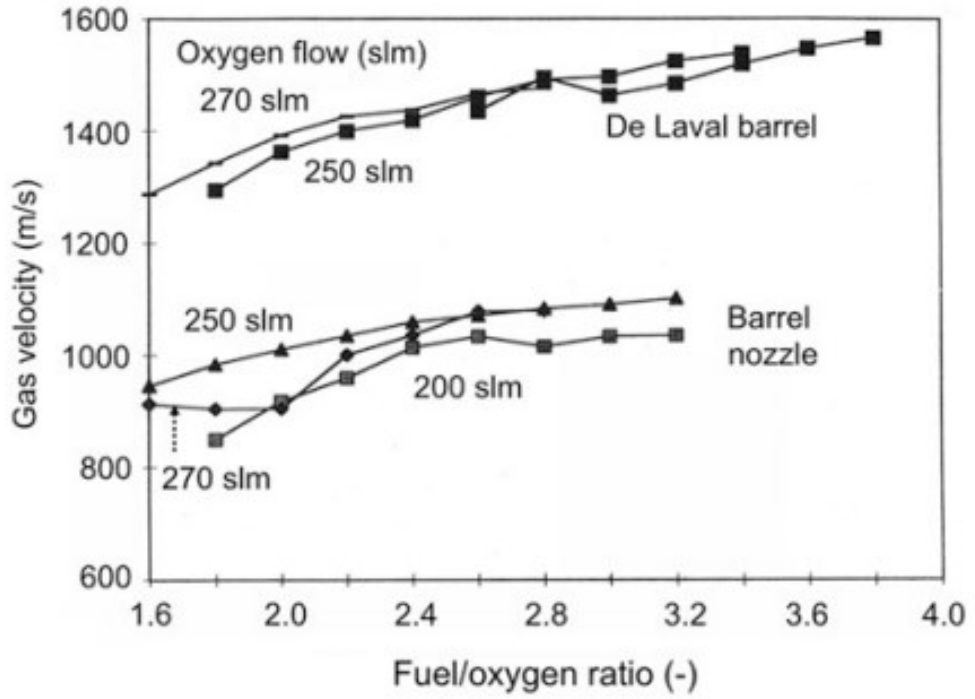
Şekil 2.16: HVOF Tabancası ve Yöntem Bileşenleri [48].

Tüm termal püskürtme proseslerinde olduğu gibi ortam havasına sıcak bir gaz çıktığında, sıcak jet genişmesi ve çevrede yer alan havanın sürüklenmesi nedeniyle oldukça hızlı soğumaktadır. Bu durumu tersine çevirmek için, oluşan jet enerjisinin bir kısmının ortamdaki enerjiye karışmasından çok daha az kaybın olduğu ve nozulun su soğutmalı bir namlu ile (30 cm uzunluğa kadar) uzatılması önerilmiştir. Bu tasarımda jetin bir miktar enerjisi namlunun duvarlarında kaybolursa da ortam havasıyla karışmasına nazaran verim kaybı çok daha azdır [14].

Korpiola ve diğerleri (1997) Şekil 2.17’de, 1 boyutlu sıkıştırılabilir akış modelini esas alarak, basit bir düz namlunun bir laval tipli nozul ile değiştirilmesiyle gaz hızlarının yaklaşık 300 m/s kadar arttığını gözlemlemiştir. Şekil 2.18’de ise Korpiola ve arkadaşları (1997), çıkış düzlemindeki gaz hızının yakıt/oksijen oranına bağlı olduğunu ve yanma hızının ise sabit yakıt/oksijen oranında toplam gaz akışından neredeyse bağımsız olduğunu tespit etmişlerdir [47].



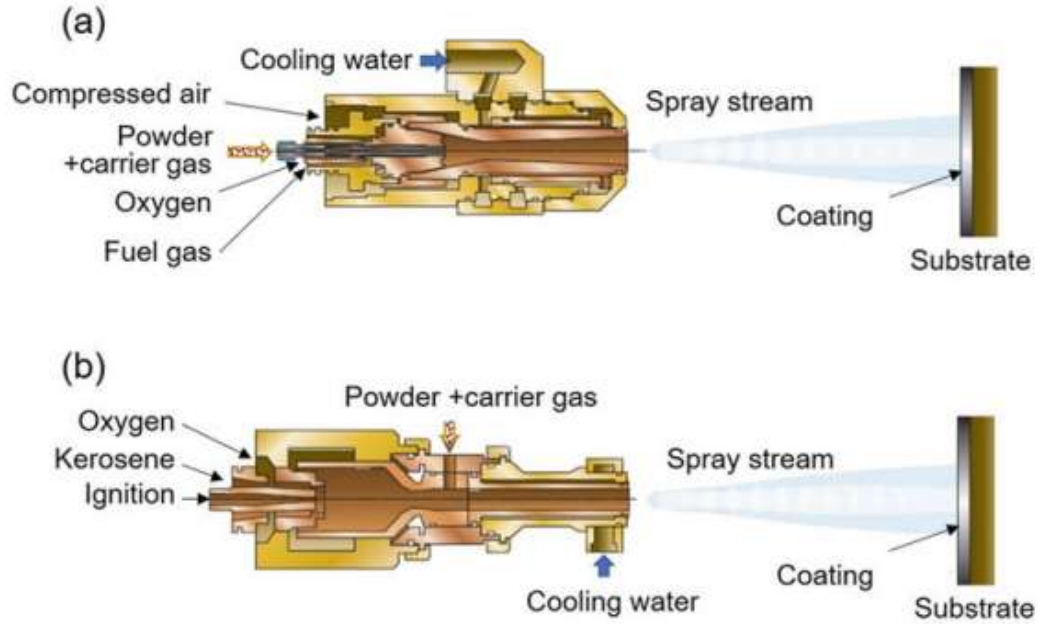
Şekil 2.17: (a) Namlu ve (b) de Laval tipi nozulları [48].



Şekil 2.18: HVOF püskürtme tabancasının çıkış düzlemindeki farklı yakıt/oksijen oranları için gaz hızı [48].

HVOF kullanılarak birçok metalik veya sermet malzemenin (çoğunlukla karbürlerle) püskürtülmesi, kaplamanın kalitesinden ödün vermekten kaçınmak için ortadan kaldırılması veya en azından önemli ölçüde azaltılması gereken partikül oksidasyonuna ve kısmi dekarbürizasyona karşı hassastır. Son yıllarda bu hedef gözetilerek yapılan çalışmalar neticesinde, çok sayıda yenilikçi çözüm geliştirilmiş ve standart HVOF tabancasında değişikliklerin yapılmasına yol açılmıştır [85].

Şekil 2.19 ve Şekil 2.20’de yaygın olarak kullanılan tasarım önerilerinin bazıları gösterilmektedir. Bu tasarımlar çoğunlukla gaz sıcaklığını düşürmeyi, hızını artırmayı ve partikülleri oksitleyici atmosfere maruz kalmaktan mümkün olduğunca korumayı amaçlamaktadır [14].



Şekil 2.19: Oerlikon Metco firmasına ait tipik tasarımlar, (a) su soğutmalı, gazlı yakıt tabancası, (b) su soğutmalı, sıvı yakıtlı tabanca [14].

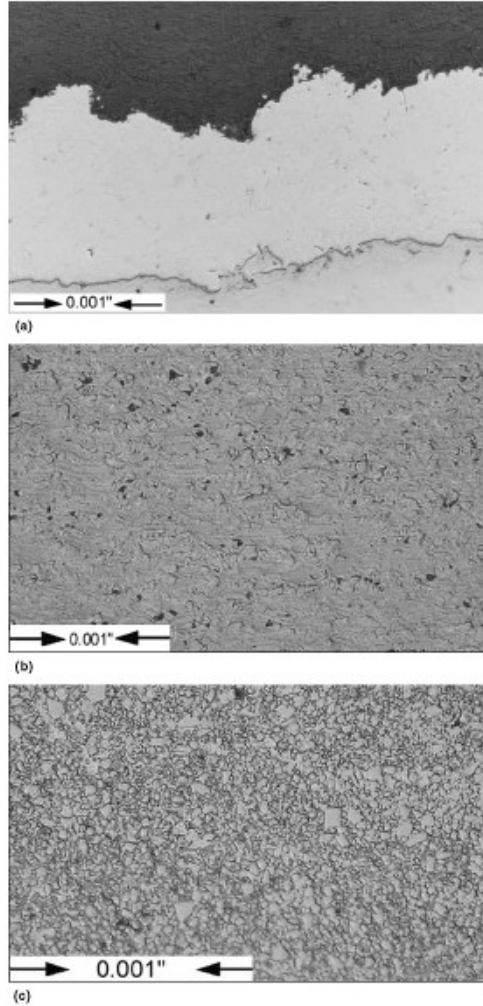


Şekil 2.20: Oerlikon Metco'ya ait Woka-star 610 sıvı yakıtlı HVOF püskürtme tabancası, Güç:293 KW [14].

HVOF kaplama teknolojisinin özelliklerine bakıldığında, özellikle karbür ve oksit kaplamalar açısından, patlama tabancası kaplamaları ile benzer olduğu gözlemlenmiştir. HVOF yöntemiyle üretilen kaplamaların yoğunluk, yapışma ve oksit içeriği açısından yüksek enerjili plazma püskürtmeli kaplamalarla olumlu karşılaştırmalar yapılmaktadır. HVOF kaplama yöntemiyle elde edilen yapışma mukavemeti genellikle ASTM C 633 ("Yapışma veya Kohezyon için Standart Test Yöntemi") standart testiyle sınırlandırılmış olan yaklaşık 83 MPa (yaklaşık 12 ksi) değerini aşmaktadır. Kaplamaların gözenekliliği ise genellikle %1'den daha az olarak bildirilmektedir. HVOF ile yapılan WC/Co (Tungsten Karbür/Kobalt) kaplamaların bileşim analizi, plazma spreyi kaplamalarıyla karşılaştırıldığında, WC'nin sadece küçük bir miktarının W₂C'ye ayrıştığı ve böylece malzemenin yüksek sertlik değerlerini koruduğu görülmektedir. Kerosen-yakıtlı HVOF tabancalarının biriktirme verimliliği (DE), geleneksel HVOF tabancalarına göre daha düşük olma eğilimindedir. Geleneksel HVOF tabancalarında DE genellikle %50 ile %70 arasında değişirken, gazyağı yakıtlı tabancalar için bu oran %35 ile %50 arasındadır [86]. Bu durum, kullanılan hammadde tozunun üst boyut dağılımının bir kısmının kaybedilmesiyle ilişkilendirilmektedir. Ayrıca, daha büyük parçacıkların kaplama sırasında çekiçleme işlemi oynaması ve bu işlemin sıkıştırıcı artık gerilmelerin oluşumuna katkıda bulunması, DE ve kaplama mikro yapısını etkileyen önemli faktörlerdendir. Bu durum,

malzeme biriktirme sırasında parçacıkların daha etkili bir şekilde bağlanmasını ve böylece kaplamanın genel yapısını ve performansını iyileştirmesini sağlar.

Şekil 2.21’de, HVOF kaplama teknolojisi ile üretilen kaplamaların mikro yapılarına ait örnekler sergilenmektedir. Bu örneklerde, ince oksit dağılımları, yoğun ve ince sıçrama yapıları ve yüksek oranda karbür tutulumu dikkat çekmektedir. İnce oksit dağılımları kaplamanın oksidasyon direncini artırırken, yoğun ve ince sıçrama yapıları kaplamanın mekanik özelliklerini iyileştirmekte ve yüksek karbür tutumu ise aşınma direncini artırmaktadır. Bu özellikler, HVOF kaplama teknolojisinin, özellikle aşınma, korozyon ve yüksek sıcaklığa karşı direnç gerektiren uygulamalar için tercih edilmesinin nedenlerinden bazılarıdır [13].



Şekil 2.21 : Tipik yüksek hızlı oksit-gaz kaplama mikroyapıları. (a) Nikel, (b) Alümina, (c) WC/Co [13].

HVOF ve HVAF gibi ilgili teknolojiler, metaller, sermetler (seramik-metal bileşikleri) ve seramikler gibi malzemelerin mühendislik bileşenlerinin yüzeylerine püskürtülmesi için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu kaplama teknikleri, tipik olarak 100–300 µm kalınlığında koruyucu kaplamalar oluşturur ve zorlu çevresel koşullar altında bileşenlerin kullanım ömrünü uzatmak amacıyla tasarlanmıştır [87]. Başlangıçta aşınmaya dayanıklı kaplamaların geliştirilmesine odaklanılmış olsa da günümüzde bu kaplamalar korozyon ve oksidasyon direnci gibi özellikler açısından da geniş çapta incelenmektedir ve bazı durumlarda diğer termal püskürtme teknolojileriyle üretilen kaplamalardan daha üstün performans sergileyebilirler [88]. HVOF/HVAF kaplamaları, denizcilik, havacılık, otomotiv ve diğer pek çok endüstride kritik bileşenlerin korunmasında kullanılmaktadır. Bu teknolojiler, özellikle aşırı aşınma, korozyon ve yüksek sıcaklıklara maruz kalan bileşenlerin performansını ve dayanıklılığını artırmak için tercih edilir [89]. Ayrıca, petrokimya endüstrisinde, proses ekipmanlarının ve bileşenlerinin yüzey özelliklerini iyileştirmek ve bu şekilde ekipmanın kullanım ömrünü uzatmak amacıyla da geniş bir kullanım alanı bulmuşlardır. Bu kaplama yöntemleri, mühendislik bileşenlerinin performansını artırarak, bakım maliyetlerini azaltma ve ekipmanların daha uzun süreler boyunca güvenilir bir şekilde çalışmasını sağlama konusunda önemli avantajlar sağlamaktadır [14].

2.3.4. DC-Ark Plazma Püskürtme Yöntemi

DC plazma püskürtme teknolojisi, tribolojik ve aşınma direnci, korozyon ve/veya oksidasyon direnci, termal koruma, biyomedikal uygulamalar ve bağımsız şekilde püskürtülmüş parçaların biriktirilmesi gibi çok çeşitli uygulamalarda kullanılan en popüler termal püskürtme yöntemlerinden biridir [90]. Bu teknoloji, malzemenin ince toz, çözelti veya süspansiyon halinde püskürtülerek uçuş sırasında eritilmesine ve ardından eriyik damlacıklarının hedef yüzeye çarparak donarak katman katman birikmesine dayanır [91]. Bu süreçte, damlacıkların çarpma anında oluşturduğu donma izleriyle kaplama tabakaları yüzlerce mikrometreye kadar kalınlıklarda birikebilir ve böylece çok sayıda ardışık pul katmanından oluşan bir yapı meydana gelir. Bu yöntem, malzemenin hedef yüzeye yüksek hızda ve erimiş halde ulaşmasını sağlayarak, kaplamanın mükemmel mekanik tutunma ve yoğunluğa sahip olmasını sağlar. DC

plazma püskürtme, yüksek sıcaklık ve hızlı soğuma özellikleri nedeniyle, özellikle termal bariyer kaplamaları ve aşınma dirençli kaplamalar gibi yüksek performans gerektiren uygulamalarda tercih edilen bir yöntemdir. Biyomedikal implantlar gibi hassas uygulamalar için de uygun olan bu teknik, malzemelerin özelliklerini korurken yüksek kaliteli ve fonksiyonel yüzey kaplamaları oluşturabilir [14].

2.3.5. Atmosferik Plazma Püskürtme Yöntemi (APS)

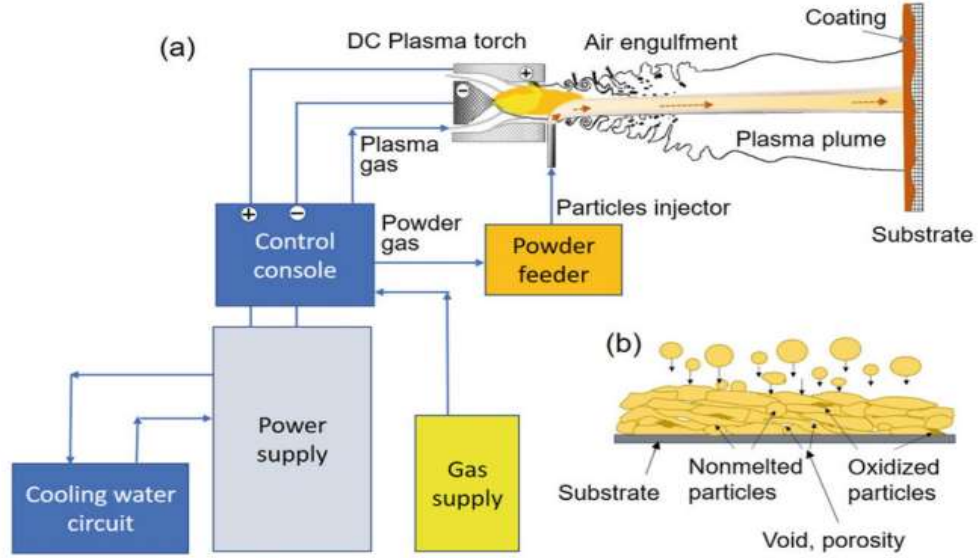
APS işlemi, plazma püskürtme tekniklerinin en temel ve yaygın formudur. Bu işlemde, plazma torcu açık deşarj modunda çalıştırılarak yüksek sıcaklıkta ve hızda bir plazma jeti üretilir. Kaplama malzemesi, ince toz, sıvı çözelti veya süspansiyon formunda bu plazma jetine enjekte edilir. Malzeme plazma jeti içinde hızla ısıtılır, eritilir ve ardından yüksek hızla hedef yüzeye doğru yönlendirilir. Plazma jetinin enerjisi, malzemenin yüzeye çarpma anında hızla soğumasını ve katılaşmasını sağlar, böylece kaplama tabakası oluşturulur [13].

Kaplama kalitesi, plazma püskürtme işleminde birçok faktöre bağlı olarak değişmektedir. Bu faktörler arasında plazma jeti özellikleri, toz veya öncül madde özellikleri, enjeksiyon koşulları, alt tabaka hazırlığı ve plazma torcu ile alt tabaka arasındaki mesafe yer alır. Plazma jetinin özellikleri, jetin sıcaklık, hız ve stabilitesini içerir ve kaplamanın mikro yapısını ve mekanik özelliklerini doğrudan etkiler. Toz veya öncül madde özellikleri, malzemenin erime davranışını, partikül boyut dağılımını ve kimyasal bileşimini kapsar ve bu da kaplamanın yoğunluğunu, yapışmasını ve genel performansını etkiler [43].

Enjeksiyon koşulları, tozun veya öncül maddenin plazma jetine nasıl ve ne hızda enjekte edildiğini belirler ve bu, partiküllerin eriyip yüzeye çarpma şeklini etkiler. Alt tabaka hazırlığı, yüzeyin pürüzlülüğünü, temizliğini ve yapısını içerir ve kaplamanın alt tabakaya yapışmasına doğrudan etki etmektedir. Plazma torcu ile alt tabaka arasındaki mesafe, partiküllerin yüzeye çarpmadan önce soğuma ve yörünge değişikliği yapma olasılığını belirler, bu da kaplamanın yapısını ve özelliklerini etkiler.

Termal püskürtme sistemlerinin açık deşarj modunda çalıştırılması sırasında, ortam havasının plazma jetine sürüklenmesi ve karışması ek bir zorluk oluşturur. Sürüklenen hava, plazma jetini soğutabilir ve söndürebilir, bu da jet yapısını ve püskürtülen partiküllerin maruz kaldığı sıcaklık alanını değiştirir. Bu durum, özellikle kaplamanın

homojenliği ve mekanik özellikleri üzerinde olumsuz etkilere yol açarak kaplama kalitesini düşürebilir. Bu nedenle, optimum kaplama kalitesi elde etmek için plazma püskürtme işlemindeki tüm bu parametrelerin dikkatlice kontrol edilmesi ve ayarlanması gerekmektedir. Bir DC plazma püskürtme sisteminin temel bileşenleri Şekil 2.22'de gösterilmektedir.



Şekil 2.22: Plazma torcunu, soğutma suyu kaynağını, gaz kaynağını, güç kaynağını, püskürtme tozu besleyiciyi ve kontrol ünitesini gösteren şema [14].

APS işlemi, ekonomik avantajları ve açık deşarj çalışma modunda herhangi bir şekil veya boyut sınırlaması olmadan parçaların kaplanabilmesi gibi özellikleri sayesinde, seramiklerin ve yüksek erime sıcaklığına sahip metallerin ve alaşımların kaplanmasında oldukça rekabetçi ve yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir [92]. APS, yüksek sıcaklıkta çalışabilen ve geniş bir malzeme yelpazesi ile uyumlu olan bir teknolojidir, bu da onu özellikle seramikler ve yüksek erime noktasına sahip metaller gibi malzemeler için ideal kılar. APS'nin ekonomik avantajları, işlemin görece düşük işletme ve bakım maliyetleri ile ilişkilendirilebilir. Açık hava ortamında çalışabilmesi nedeniyle, vakumlu sistemler gibi ek ekipmanlara veya özel hazırlıklara gerek duymaz, bu da kurulum ve işletme maliyetlerini azaltır. Ayrıca, APS ile kaplama işleminin hızlı ve verimli bir şekilde gerçekleştirilebilmesi, üretim süreçlerinde maliyet tasarrufu sağlar. APS'nin, kaplanacak parçanın şekli ve boyutlarına ilişkin sınırlamaları olmaması, büyük veya karmaşık geometrilere sahip parçaların kolayca

kaplanabilmesine olanak tanır. Bu esneklik, endüstriyel uygulamalarda APS'nin tercih edilmesinin önemli bir nedenidir. Özellikle, havacılık, enerji ve otomotiv gibi sektörlerde, geniş ve çeşitli parçaların kaplanması gerektiğinde APS önemli bir avantaj sunar. Bu nedenlerle, APS, seramiklerin ve yüksek erime noktasına sahip metallerin ve alaşımların püskürtülmesinde tercih edilen yöntemlerden biri haline gelmiştir ve geniş bir uygulama alanında rekabetçi bir çözüm sunar [14].

2.3.6. Kontrollü Atmosfer Plazma Püskürtme Yöntemi (CAPS)

Plazma püskürtme teknolojisinin gelişiminde, inert gazla dolu bir odada plazma püskürtme fikri önemli bir yenilik olarak kabul edilmektedir. Mash ve diğerleri (1961) ile Stetson ve Hauck (1961) bu konsepti rapor eden ilk kişiler olarak kabul edilir ve bu teknik İnert Plazma Püskürtme (IPS) olarak adlandırılır [49]. Bu yöntem, plazma jetinin çevresel atmosferle olan etkileşimini sınırlayarak kaplama kalitesini artırma potansiyeline sahiptir. Örtülü Plazma Püskürtme (SPS) teknolojisi, toz yüklü plazma jetini çevredeki atmosferle olan temastan koruyarak bir adım daha ileri gitmiştir. Okada ve Maruo (1968) ve Jackson (1969) tarafından geliştirilen bu yöntemde, plazma torcunun anoduna bağlı, alt tabaka ile yakın temas halinde olan ve plazma oluşturan gazların tahliye edilmesini sağlayan bir koruyucu nozül kullanılmıştır. Bu yaklaşım, plazma jetinin stabilitesini ve kaplamanın homojenliğini artırarak daha iyi kaplama özellikleri elde edilmesini sağlar. Modern VPS tesisleri ise hem vakum altında hem de atmosferik basınçtan daha yüksek basınçlarda çalışabilme yeteneği ile dikkat çekmektedir. Ticari bir CAPS kurulumu, 'yumuşak vakum', inert veya reaktif atmosferlerde, 2000 hPa'ya kadar basınçlarda püskürtme yapılmasına olanak tanır. Bu, Jäger ve arkadaşları (1992) tarafından rapor edilmiştir. Ducos (1989) tarafından önerilen Atmosfer Sıcaklık Kontrollü Püskürtme ise, püskürtme atmosferinin ve alt tabaka sıcaklığının aynı anda kontrol edilmesini sağlayarak daha ileri bir teknik geliştirilmiştir. Bu yöntem, kaplama sürecini daha da optimize ederek, özellikle hassas uygulamalar için uygun kaplamaların üretilmesine imkan tanır. Bu gelişmeler, plazma püskürtme teknolojisinin sürekli evrimini ve çeşitli endüstriyel uygulamalarda kaplama kalitesini artırma potansiyelini göstermektedir [43].

2.3.7. Vakumlu Plasma Püskürtme Yöntemi (VPS)

Düşük Basınçlı Plazma Püskürtme (Low Pressure Plasma Spraying - LPPS) veya Vakum Plazma Püskürtme (Vacuum Plasma Spraying - VPS), 1974 yılında Müehlberger tarafından Electro-Plasma Inc. ¹ bünyesinde geliştirilmiştir. Birkaç yıl sonra, çeşitli araştırma grupları VPS tekniğini farklı uygulamalar için kullanmaya başlamışlardır. VPS tekniğini; Wilms (1980) sıcak korozyona dayanıklı kaplamaların biriktirilmesi için, Braguier ve Tueta (1980) bakırın saf kaplamalarını üretmek için, Pawlowski (1980) ise elektronik uygulamalar için tantal kaplamalarını üretmek için kullanmışlardır. Günümüzde, VPS kurulumları ticari olarak mevcut olup, özellikle gaz türbinlerinin bıçaklarına sıcak korozyona dayanıklı kaplamalar uygulamak için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu teknik, yüksek sıcaklıkta çalışan parçaların performansını ve dayanıklılığını artırma konusunda önemli avantajlar sunmaktadır. Düşük basınçlı plazma püskürtmeli kaplamalar, özellikle 50 mikrometreden daha düşük kalınlıklarda, ekonomik bir seçenek haline gelmiştir. Bu, VPS'yi PVD ve CVD gibi diğer gaz fazı biriktirme yöntemlerine karşı teknik bir alternatif yapmaktadır. VPS, özellikle yüksek performanslı kaplamalar gerektiren uygulamalarda, mükemmel kaplama kalitesi ve yoğunluğu sağlama yeteneği ile öne çıkmaktadır. Loch ve arkadaşlarının (2002) çalışmaları gibi, düşük basınçlı plazma püskürtme teknolojisi üzerine yapılan araştırmalar, bu yöntemin kaplama teknolojileri arasında nasıl önemli bir yer tuttuğunu ve çeşitli endüstriyel uygulamalarda nasıl değerli bir araç haline geldiğini göstermektedir [42]. Bu teknolojinin sağladığı yüksek kaliteli kaplamalar, özellikle aşınma, korozyon ve yüksek sıcaklık gibi zorlu koşullar altında çalışan parçaların ömrünü uzatma konusunda kritik öneme sahiptir. Bu teknoloji, kaplama işleminin kontrollü bir vakum ortamında gerçekleştirilmesini sağlayarak kaplama süreci sırasında oksidasyonu önler ve kaplama kalitesini artırarak daha temiz, daha yoğun ve oksijenenden arındırılmış kaplamalar elde edilmesini sağlar [54].

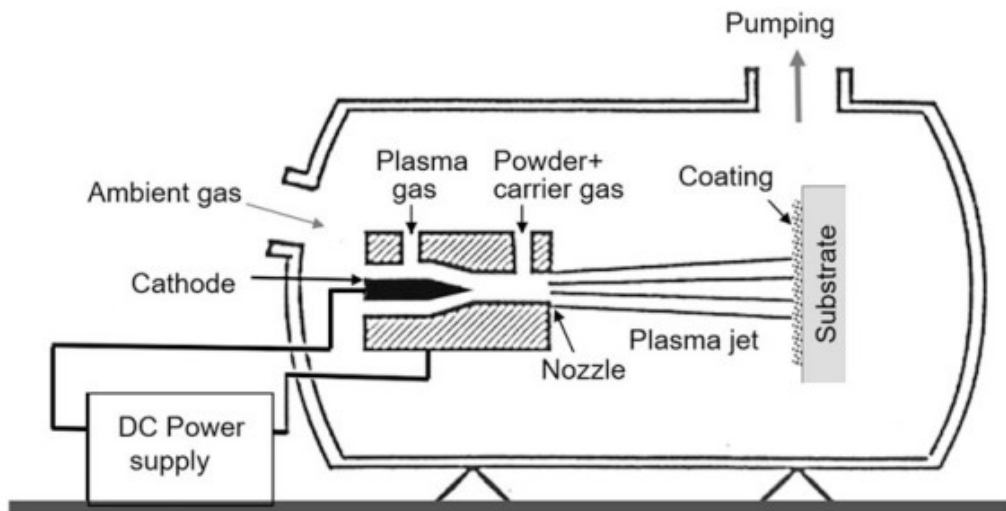
VPS veya LPPS teknolojisinin temel sınırlamalarından biri, kaplanabilecek parçaların boyutlarıyla ilgilidir. Vakum odasının boyutu doğrudan işlenebilecek parça boyutlarını sınırlar. Bu durum, özellikle büyük ölçekli endüstriyel uygulamalar için bir kısıtlama

¹ Electro-Plasma Inc. günümüzde Oerlikon Metco Inc. olarak bilinmektedir.

Kaynak: <https://www.oerlikon.com/metco/en/>

oluşturabilir. Bir diğer sınırlama ise püskürtülecek malzemelerin erime sıcaklıklarıdır. VPS işlemi, yüksek sıcaklıklar gerektiren malzemeler için uygundur, ancak 3000K (yaklaşık 2727°C) ve üzerindeki erime sıcaklıklarına sahip oksit olmayan seramikler gibi bazı malzemeler için yeterli olmayabilir. Bu tür yüksek erime sıcaklığına sahip malzemelerin işlenmesi, plazma jetinin üretebileceği sıcaklıkların ötesine geçebilir, bu da onların VPS ile etkili bir şekilde püskürtülmesini zorlaştırır.

VPS işlemi, genellikle çok büyük boyutlarda olan bir vakum odasında gerçekleştirilir. Şekil 2.23'de gösterilen gibi, bu vakum odaları birkaç metreküpten 10-20 metreküpe kadar değişen hacimlere sahip olabilir. Vakum odasının tipik ölçüleri, çapı yaklaşık 1,5 ila 2,5 metre ve uzunluğu 3 ila 4 metre arasında olacak şekilde belirlenir. Bu büyük odalar, kaplama işlemi sırasında birden fazla parçanın aynı anda işlenmesine olanak tanıyan bir karusel tipi alt tabaka tutucusunu barındırabilir. VPS işleminde kullanılan vakum odası, genellikle bir DC plazma torcu ve kaplama işlemi sırasında torcu çeşitli açılardan ve pozisyonlardan yönlendirebilen bir robotik torç manipülatörü içerir. Bu düzenleme, farklı geometrilere sahip parçaların etkin bir şekilde kaplanmasını sağlayarak kaplama kalitesinin tutarlılığını artırır. Vakum odası genellikle su soğutmalıdır, bu da plazma püskürtme işlemi sırasında yüksek sıcaklıkların oluştuğu durumlarda odanın aşırı ısınmasını önler. Ayrıca, vakum odasının servis ve bakım işlemleri için geniş bir erişim kapısı bulunur, bu da ekipmanın kolayca erişilebilir ve bakımının yapılabilir olmasını sağlamaktadır [14].



Şekil 2.23: Düşük basınçlı bir plazma püskürtme odasının şematik gösterimi [14].

VPS tekniği ile biriktirilen alaşım kaplamalar, genellikle yüksek çekme bağ dayanımına sahip olup, bu değer 80 MPa'dan daha büyük olabilir. Bu yüksek çekme bağ dayanımı, geleneksel epoksi reçine testlerinin uygulanmasını zorlaştırır veya imknsız hale getirir, çünkü bu testler genellikle daha düşük mukavemetli malzemeler için tasarlanmıştır. Bu, VPS ile biriktirilen kaplamaların üstün mekanik özelliklerine işaret eder ve bu kaplamaların özellikle yüksek performans gerektiren uygulamalarda tercih edilmesinin nedenlerinden biridir. VPS ile biriktirilen kaplamaların gözeneklilik oranları genellikle %1 veya %2'den daha düşüktür. Hatta operasyonel spre y parametrelerinin dikkatli bir şekilde seçilmesiyle, gözeneksiz kaplamaların elde edilmesi mümkün olabilir ve kaplamanın koruyucu özelliklerini, özellikle korozyon ve aşınma direncini önemli ölçüde artırabilir. VPS ile oluşturulan kaplamaların tipik kalınlıkları 150 ila 500 µm arasında değişebilir. Bu kalınlık aralığı, VPS teknolojisinin sunduğu esnekliği ve kaplama ihtiyaçlarına göre uyarlama yeteneğini gösterir. Elde edilen kalınlıklar, özellikle gaz trbın bıçakları gibi kritik bileşenlerde sıcak korozyona ve aşınmaya karşı koruma sağlamak için idealdir [43].

VPS/LPPS teknolojisi, termal bariyer kaplamalar, aşınma ve korozyon dirençli kaplamalar, biyomedikal implantlar için kaplamalar gibi çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır. Bu teknik, kaplama sürecini daha kontrollü bir şekilde gerçekleştirmeye olanak tanıdığı ve yüksek kaliteli kaplamalar ürettiği için, özellikle zorlu uygulamalar için ideal bir seçenektir. Oerlikon Metco Inc., bu teknolojinin geliştirilmesi ve ticarileştirilmesi konusunda öncü bir rol oynamış ve dünya çapında birçok endüstride kullanılan çözümler sunmaktadır.

2.3.8. Soğuk Gaz Plazma Püskürtme Yöntemi (CGPSM)

Soğuk gaz püskürtme yöntemi, 1980'lerin sonlarında Novosibirsk, Rusya'da Alkhimov ve arkadaşları tarafından geliştirilmiş yenilikçi bir kaplama teknolojisidir. Bu yöntem ilk olarak, yüksek hızlı 'yeniden giriş araçları'nın tasarımı üzerine çalışmalar sırasında keşfedilmiştir [93]. Araştırma ekibi, süpersonik bir rzgr tünelinde metal izleyici parçacıklar kullanarak yaptığı deneyler sırasında, parçacıkların bazı durumlarda hedef yüzeyi aşındırmak yerine, üzerinde bir kaplama oluşturduğunu gözlemlemiştir. Bu keşif, soğuk gaz püskürtme yönteminin temelini oluşturmuştur [94]. Soğuk gaz püskürtme yöntemi, yüksek hızda gaz akışı içinde katı parçacıkların hedef yüzeye püskürtülmesine dayanır. Bu parçacıklar, yüzeye çarptıklarında plastik deformasyona

uğrar ve bu da yüzeye mekanik olarak bağlanmalarını sağlar. Bu işlem, yüksek sıcaklıkların kullanılmadığı ve bu nedenle malzemenin oksitlenmesi veya termal bozulmasının önüne geçildiği için "soğuk" olarak adlandırılmaktadır. 1994 yılından itibaren, bu teknolojinin mucitlerinden biri olan Profesör Papyrin, Amerika Birleşik Devletleri'ndeki Ulusal Üretim Bilimleri Merkezi'nin himayesinde bir konsorsiyuma katılmıştır. Bu şirketler birliği, Ford, General Electric ve General Motors gibi büyük Amerikan şirketlerini içermekte ve soğuk gaz püskürtme sürecinin teknolojik gelişim olanaklarını incelenmektedir. Soğuk gaz püskürtme yöntemi, özellikle aşınma, korozyon direnci ve termal bariyer kaplamaları gibi uygulamalarda önemli avantajlar sunar ve bu nedenle geniş bir endüstriyel uygulama alanına sahiptir. Bu yöntem, kaplama süreçlerinde kullanılan geleneksel yüksek sıcaklık tekniklerine göre malzeme özelliklerini koruyarak daha geniş bir malzeme yelpazesinin kaplanmasını mümkün kılar.

CuAl alaşımları, mukavemet, sürtünme azaltıcı etki, aşınma önleyici özellik, mükemmel aşınma direnci ve korozyona dayanıklı koruma kombinasyonları nedeniyle makine, otomotiv, havacılık, gemi ve diğer ilgili sektörler gibi modern endüstride kullanılmaktadır [62,64]. Bu alaşımlar genellikle %8-14 Al ve yaklaşık %2-4 Mn, Ni ve Fe içerir. Bronz genellikle rulman gibi korozyon ve sürtünme önleyici malzeme olarak kullanılmaktadır. Bronz, yüksek mukavemet, güçlü esneklik, iyi aşınma direnci ve korozyon direnci gibi nitelikleri nedeniyle önemli bir endüstriyel rol oynamaktadır. Öte yandan, alüminyum bronzların etkileyici korozyon direnci, bakır iyonlarının Cu_2O yüzey tabakasına iyonik taşınımını engelleyen koruyucu bir Al_2O_3 alt tabakasının hızlı oluşumuna bağlanmıştır.

Bu çalışmada, alüminyum bronz-alümina kompozit kaplamalar, yumuşak çelik alt tabakaya geleneksel plazma püskürtme ve yeni bir soğuk püskürtme tekniği kullanılarak uygulanmıştır. Alümina takviye fazının bronz matrisi içinde dağıldığı kompozit kaplamaların mikro yapısı, faz dağılımı, mikro sertlik, yapışma dayanımı ve tribolojik davranışı incelenmiştir [63].

Termal sprey, alüminyum-bronz kaplamalar elde etmek için kullanılan önemli bir yöntemdir ve bu teknoloji sayesinde "Kendiliğinden Tavlanma" fenomeninin neden olduğu gevrekleşme önlenmektedir. Ayrıca, Plazma püskürtme, iç mikro yapısına bakılmaksızın bir yüzey üzerinde istenen özelliklere sahip bir kaplama üretmek için en hayati yöntemlerden biri olarak tanımlanmıştır [65].

CuAl kaplama elde etmek için bu tekniğin bir diğer avantajı, püskürtme sırasındaki ultra yüksek soğutma hızının, özellikle geleneksel kum döküm ve toz metalurjisi gibi sınırlı soğutma hızına sahip işlemlerde meydana gelmeye eğilimli olan 565 ° C'de meydana gelen ötektoid reaksiyonu önleyebilmesidir [62,64].

Bu araştırmada, düşük basınçlı plazma püskürtme yöntemiyle elde edilen alüminyum bronz kaplamaların çelik bilyeye karşı tribolojik özellikleri incelenmiştir. Farklı yüklerin yanı sıra yüksek hız ve sınır yağlama koşullarının etkileri kayma test cihazı kullanılarak değerlendirilmiştir. Alüminyum bronz kaplamalar, farklı çalışma koşulları altında düşük basınçlı plazma püskürtme tekniği ile üretilmiştir. İşleme değişkenleri ile elde edilen kaplamaların tribolojik özellikleri arasındaki ilişki araştırılmıştır. Kaplamaların mikro yapı morfolojisini değerlendirmek için optik ve taramalı elektron mikroskobu kullanılmıştır. Aşınma izlerinin derinlikleri yüzey dokusu ölçüm cihazı ile ölçülmüştür [62].

Buna ek olarak, plazma püskürtme sırasında, ark plazması oluşturmak ve toz hammaddesini hızlandırmak için inert gaz (genellikle Ar) kullanılır, bu da güç hammaddesinin çevre atmosferle etkileşimini sınırlayabilir. Bu çalışmada, farklı miktarlarda alümina içeren bronz-alüminyum kompozit kaplamalar plazma püskürtme yöntemiyle üretilmiş ve tribolojik özellikleri oda sıcaklığında bilye-disk ve kauçuk tekerlek testleri ile incelenmiştir. Bilye-disk sürtünme testi sırasında saf bronz kaplamalarda görülen başlıca aşınma mekanizmaları, aşındırma ve splatlar arası delaminasyon olmuştur [63].

Püskürtme işleminin plazma püskürtmeli kaplamaların yapısı ve özellikleri üzerindeki etkisi önemlidir, ancak literatürde işleme parametrelerinin plazma püskürtmeli CuAl kaplamaların metalografik sonuçları üzerindeki etkisi nadiren tartışılmaktadır. Yapısal morfoloji, sertlik ve kusur seviyesi gibi püskürtmeli kaplamalar için yaygın olarak kullanılan kalite göstergeleri, sürtünme önleyici ve aşınmaya dayanıklı uygulamalara yönelik CuAl kaplamaların değerlendirilmesi için yetersizdir. Bu çalışmada, plazma püskürtme yöntemiyle CuAl kaplaması üretilmiş ve işleme parametrelerinin etkileri, en iyi aşınma direncine sahip kaplamayı elde etmek için değerlendirilmiştir. Ayrıca, bu kaplamanın sürtünme bileşenleri olarak kullanımına yönelik bazı öneriler sunulması amaçlanmıştır [62].

İki farklı parçacık çapına sahip CuAl tozları, atmosferik koşullar altında paslanmaz çelik alt tabakalara (AISI 304L) plazma püskürtme yöntemiyle uygulanmıştır. Alt tabakanın ortalama yüzey pürüzlülüğü Ra iki seviyede incelenmiştir: 0.01–0.03 mm ve 1.89–2.43 mm. Alt tabaka sıcaklığı Ts ise 25, 165 ve 270°C olmak üzere üç farklı değerde değerlendirilmiştir. Sıçramaların yayılma derecesi hesaplanmış ve yüzeyin kesitlerinde element analizi yapılmıştır [66].

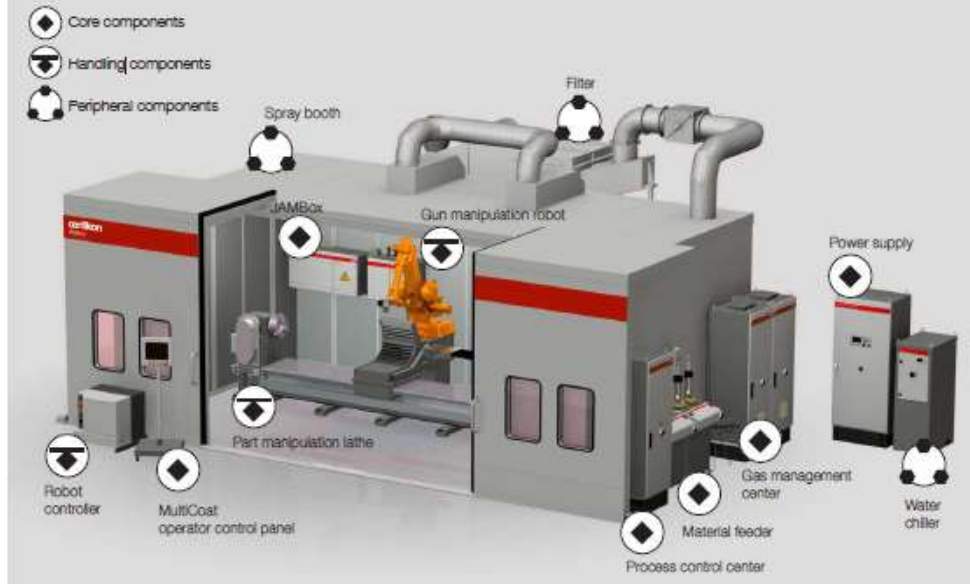
Bu çalışmada, termal püskürtme yöntemiyle uygulanan Ni bazlı alaşım kaplamanın proses optimizasyonu Taguchi yöntemi ve varyans analizi (ANOVA) kullanılarak yapılmıştır. Ni bazlı alaşım kaplamalar, çelik alt tabaka üzerine alev püskürtme yöntemiyle uygulanmış ve ardından sertlik ve aşınma testleri gerçekleştirilmiştir. Deneyler, Taguchi'nin L9 ortogonal dizilimine göre tasarlanmış ve farklı oksijen gaz akışı, asetilen gaz akışı, toz besleme hızı ve püskürtme mesafesi kullanılarak yapılmıştır. Yanıt değişkenleri için çoklu yanıt sinyal-gürültü oranı hesaplanmış ve Taguchi'nin parametrik tasarımı kullanılarak faktörlerin optimum kombinasyonu belirlenmiştir [67].

Bu nedenle, bu çalışma plazma püskürtmeli CuAl kaplamaların üretilmesine ve metalografik sonuçları optimize etmek için işleme parametrelerinin etkilerinin daha fazla değerlendirilmesine odaklanmaktadır. Araştırmanın temel amacı, sürtünme bileşenlerini içeren uygulamalarda CuAl kaplamaların performansını artırmak ve kullanımları için pratik rehberlik sağlamaktır. Bu doğrultuda çalışmada, TEC tesislerinde kurulu, Oerlikon Metco'ya ait MultiCoat termal püskürtme sisteminde plazma püskürtmeli CuAl kaplama üretilmiş ve işleme parametrelerinin etkileri incelenmiştir. Araştırmanın 3.kısımında deneysel çalışmalar gösterilmektedir.

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.1. Sistem Sabitleri ve Değişkenlerinin Belirlenmesi

Bu çalışma TEC tesislerinde kurulu, Şekil 3.1’de belirtilen Oerlikon Metco’ya ait MultiCoat termal püskürtme sisteminde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.1: Oerlikon Metco MultiCoat Termal Püskürtme Sistemi Şeması.

Sistemin ana bileşenlerini püskürtme tabancası, kontrol edici, Jambox, malzeme besleyici, güç kaynağı, gaz yönetim merkezi ve püskürtme tabancasını manipüle eden 6 eksenli çalışan ABB robot kolu sistemin ana parçalarını oluşturmaktadır. Yapılan çalışmada APS uygulamalarında kullanılan cascading arc teknolojisi ile çalışan SinplexPro-90 model tabanca kullanılmıştır. MultiCoat kontrol edici, Plazma JAMBox, gravimetrik kontrol ile hacimsel toz dağıtım sistemi ile çalışan Single 120-A malzeme besleyici, PT3X IPS-100 model güç kaynağı ve ABB’ye ait IRB 4600 model manipülatör robot kolu ve IRB 2600 model soğutucu robot kolu kullanılmıştır. Belirtilen alt parçalara ait resimler sırasıyla belirtilmektedir. MultiCoat sistemi adından da anlaşılacağı gibi, tek bir kontrolörden bir dizi Termal Püskürtme işlemini kontrol edebilen bir kaplama sistemidir.

Şekil 3.2’te MultiCoat sisteminin genel arayüzü gösterilmektedir.



Şekil 3.2: MultiCoat Kontrol Edici Arayüzü.

Şekil 3.3’de Plasma JAMBox ünitesi gösterilmektedir. MultiCoat plazma püskürtme sistemi, konsola bağlı JAM-630 bağlantı ve izleme (JAM) kutusu ile birlikte tedarik edilir. Bu ünitenin temel görevi, plazma püskürtme tabancasına yönlendirme yapılmadan önce elektirik beslemesi ve soğutma suyu için bir bağlantı görevi görür.

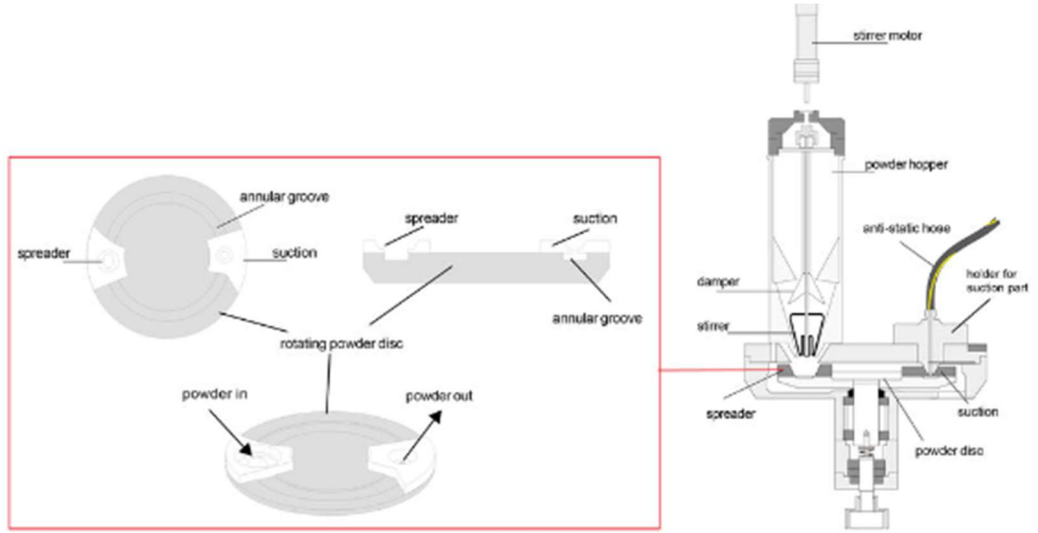


Şekil 3.3 : JAMBox Kontrol Arayüzü.

Şekil 3.4’de Plazma Püskürtme sistemine volumetrik olarak malzeme beslemesi yapan Single 120A modeli besleyici görülmektedir. Volumetrik beslemede, toz haznesinden diskin oluğuna taşınır. Dağıtıcı, tozu tam olarak oluğun tüm genişliği boyunca belirli bir yükseklikte biriktirir. Toz, emme parçası tarafından toz diski oluğundan emilir. Toz, emme parçası tutucusundan spreyci tabancasına doğru antistatik bir hortum içine taşınır. Toz haznesi gaz sızdırmazdır ve düşük miktarda aşırı basınca sahiptir. Gaz, toz haznesinden toz ile birlikte emme kısmından toz hortumuna çıkar. Bu sistemde besleme hızı kontrolü hazne içeriğini sürekli olarak tartmak için bir yük hücresi kullanan mikroişlemci kontrollü bir ağırlık kaybı cihazı tarafından belirlenir. Besleme hızı, zaman içinde ortalaması alınan hazne ağırlık kaybı oranının bir fonksiyonudur. Yük hücresi, haznedeki tozun ağırlığıyla orantılı elektrik sinyalleri üreten hassas bir tartım aletidir. Bu sinyaller, zaman içindeki değişim oranını belirlemek için bir merkezi işlem birimi tarafından işlenir. Besleyicinin yukarıda özetlenen bu döngüsü Şekil 3.5’te gösterilmektedir.



Şekil 3.4 : Single 120A tipi Besleyici



Şekil 3.5: Volumetrik Tipi Toz Besleme Döngüsü [68].

Şekil 3.6’da Plazma püskürtme sisteminde yer alan Gaz Yönetim Merkezi yer almaktadır. Bu ünite sayesinde sistem içerisinde kullanılan tüm gazların iletim hızı ve kontrolü sağlanır.



Şekil 3.6: Plazma Püskürtme Sistemi Gaz Yönetim Merkezi.



(a) Kontrol Ünitesi



(b) IRB 4600 Manipulator Robot Kolu



(c) IRB 2600 Soğutucu Robot Kolu

Şekil 3.7: ABB Robot Kolları ve Kontrol Ünitesi.

Şekil 3.7’de gösterilen, Plazma püskürtme tabancasının bağlı olduğu IRB 4600 daha fazla üretim çıktısı ve daha yüksek kalite ile daha kompakt bir süreç sağlar. 6 eksenli hareket sağlayan robot kolu 20-60 kg arası yük taşıma kapasitesine sahip olup 2,55 m kadar hareket alanına sahiptir. Dört kanallı soğutma sistemiyle donatılmış IRB 2600 manipulatorü ise, IRB 4600 ile aynı karakteristik özelliklere sahiptir ve 12-20 kg rası yük taşıma kapasitesi ile 1,85 metreye kadar hareket alanı bulunur. Şekil 3.8’de gösterilen soğutucu, plazma püskürtme sistemi için kritik bir öneme sahip olup kendisine bağlı şebeke suyunu kullanarak sistem içerisinde soğutma görevini yerine getirmektedir.



Şekil 3.8: Soğutucu Sistemi.

Plasma püskürtme sisteminin en önemli ögesi ise SinplexPro-90 modeli plasma püskürtme tabancasıdır. Bu model, kademeli ark teknolojisinin verimlilik avantajlarını etkili bir biçimde tek katotlu olarak içerisinde bulundurmaktadır. SinplexPro-90, APS sistemlerinin yanında HVOF, HVOF gibi proseslerde de kullanılabilmesiyle öne çıkmaktadır. Şekil 3.9’da IRB 4600 koluna bağlı olan SinplexPro-90 tabancası gösterilmektedir.



Şekil 3.9: SinplexPro-90 Plazma Püskürtme Tabancası.

SinplexPro-90, kademeli ark teknolojisinin verimlilik avantajını tek katotlu bir püskürtme tabancasında birleştirmiş yeni bir teknolojidir. Bu özelliğiyle hem mevcut hem de yeni plazma püskürtme sistemlerinde ekonomik yatırım maliyetiyle yüksek verim sağlamaktadır. Deneysel çalışma öncesi APS parametreleri listelenmiştir. Parametreler sabitler ve değişkenler olmak üzere iki bölüme ayrılmıştır. Parametreler aşağıdaki Tablo 3.1 ve Tablo 3.2’de listelenmiştir.

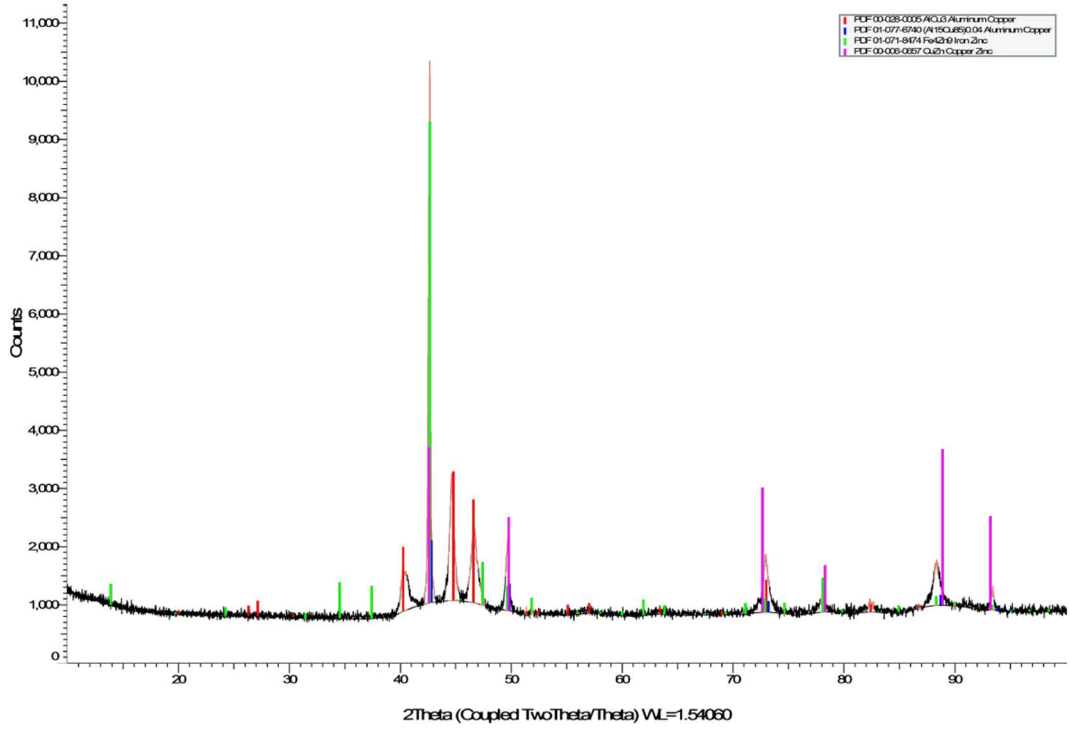
Tablo 3.1: APS Sabit Parametreleri.

No	Sabit Parametre Adı	Birim	Tanım
1	Püskürtme Tabancası	N/A	Tek Katotlu Püskürtme Tabancası
2	Toz Partikül Boyutu	(-53 +5 μm)	Cu 9.5Al 1Fe
3	Proses Gazları	N/A	N/A
4	Besleyici&Hopper Özellikleri	N/A	L tip Hopper
5	Döner Tabla Hızı	m/min	36 rpm
6	Robotik Kol Hızı (adım)	mm	4 mm
7	Altlık Malzeme Sıcaklığı	$^{\circ}\text{C}$	280 $^{\circ}\text{C}$
8	Basınç	N/m^2	4 bar
9	Altlık Malzeme Standardı	N/A	AMS5510 Paslanmaz Çelik (AISI321)
10	Yüzey Hazırlayıcı	N/A	60 grit
11	Paso Sayısı	N/A	15

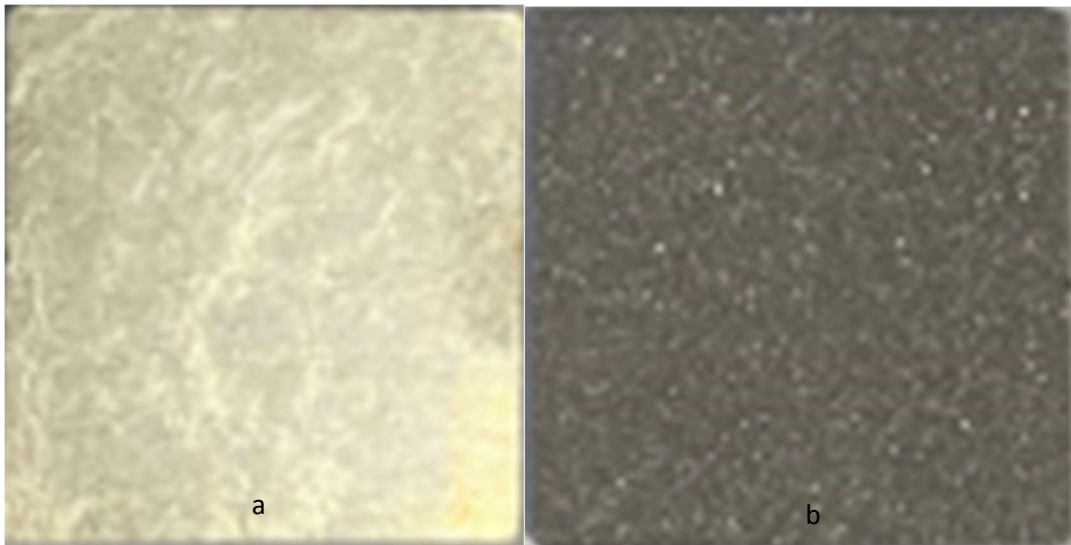
Tablo 3.2: APS Değişken Parametreleri.

No	Değişken Parametre Adı	Birim	Tanım
1	Akım	I	Amper
2	Akış Hızı (Ar)	m^3	V/t (Hacim/dk) (NLPM)
3	Akış Hızı (H_2)	m^3	V/t (Hacim/dk) (NLPM)
4	Taşıyıcı Gaz Akış Hızı (Ar/ H_2)	m^3	V/t (Hacim/dk) (NLPM)
5	Besleme Oranı	g/min	-
6	Püskürtme Uzaklığı	mm	-

Deneysel çalışma için seçilen Cu 9.5Al 1 Fe tozu ticari bir alüminyum bronz olan Metco 51F-NS'dir, gaz atomizasyonu ile üretilmiştir ve alüminyum-bronz tozunun tipik kimyasal bileşimi %9,5 Al, %1 Fe ve dengeli Cu'dur. Alüminyum bronz tozu Oerlikon Metco tarafından sağlanmıştır ve $-53+5 \mu m$ partiküllerden oluşmaktadır. Deneysel çalışmada kullanılan Metco 51 F-NS ticari kodlu tozun kimyasal yönden malzeme karakterizasyonuna ait laboratuvar ortamında XRD yöntemi ile elde edilmiş atomik yapı Şekil 3.10'da gösterilmektedir. Şekil 3.12'de ise XRD analizin gerçekleştirildiği Bruker D8 Advance modeli cihaz görülmektedir. Çıkan sonucun toz üreticisinin TDS'in de belirttiği kimyasal içerik ile uyumlu olduğu görülmüştür. Püskürtme işleminden önce; 17 mm uzunluğunda ve genişliğinde, 1,524 mm kalınlığında dikdörtgen şekilli, AMS5510 paslanmaz çelik numuneler izoprofil alkol ile yağdan arındırılmış ve 60 grit silika kum ile kumlanmıştır. Şekil 3.11'de AMS5510 paslanmaz çeliğin kumlama öncesi ve sonrası görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 3.10: Metco 51F-NS tozu XRD Görünümü.



Şekil 3.11 (a)Kumlama öncesi ve sonrası (b) AMS 5510 Altlık Malzemesi.



Şekil 3.12: Bruker D8 Advance Modeli XRD Cihazı.

Deneysel çalışmanın ilk bölümünde Akım, Akış oranı (Ar ve H_2 için), besleme oranı, püskürtme uzaklığı ve taşıyıcı gaz akış hızı tasarım değişkenleri olarak seçilmiştir. Tablo 3.3’de belirlenen her bir değişkene atana sayısal değerler özetlenmiştir. Bu değerler ve sırayla ilk püskürtme işlemi gerçekleştirilmiştir.

Tablo 3.3: APS İlk Denemelerin Parametre Değerleri.

No	Akım (Amper)	Akış Hızı (Argon)	Akış Hızı (Hidrojen)	Besleme Oranı (g/min)	Püskürtme Uzaklığı (mm)	Taşıyıcı Gaz Akış Hızı (Ar/H_2)
1	480	50	1,5	40	130	-
2	430	40	1	30	90	-
3	530	60	5	50	170	-
4	530	85	2	50	130	-
5	530	70	2,5	50	130	-
6	530	90	5	50	130	-
7	530	90	2	50	100	-
8	500	90	6	50	100	2,8
9	400	110	3	50	100	6

3.2. Metalografik Analiz

Deneysel çalışmanın ilk bölümünün ikinci aşamasında ilk olarak, Struers Secotom-60 kesit alma makinesi ve 5A20 aşındırıcı taş kullanılarak tüm kuponların kesit alma işlemi tamamlanmıştır. Ardından, Struers Citovac montaj makinesi kullanılarak soğuk kalıplama işlemi gerçekleştirilmiş ve her kalıplama kabına 25 gr epoksi reçine ile 7 gr sertleştirici eklenmiştir. Soğuk kalıplama sürecinde 'A' metodu tercih edilmiş, bu yöntemle 0.15 basınç değeri altında 10 dakika süresince basınç uygulanmıştır. Vakum işlemi sonrasında örnekler, 75°C'de 1½ saat süreyle kuru fırında kürlenmiştir. Son olarak, Struers Tegramin-30 taşlama ve parlatma makinesi ile taşlama ve parlatma işlemleri yapılmıştır. Her iki işlem için uygulanan prosedürler Tablo 3.4'de ayrıntılı olarak belirtilmiştir. Şekil 3.13'de metalografik hazırlık ve değerlendirilmesinde kullanılan ekipmanların görseli yer almaktadır. Şekil 3.13 a)'da verilen Secotom-60 ile elde edilen test numunelerinin kesit alma işlemi, b)'de verilen ilen cihaz ile soğuk kalıba alma, c)'de verilen fırın ile kürleme işlemi, d)'de verilen ekipman ile kalıba alınan numunelerin son yüzey işlemleri ve son olarak e)'de verilen cihaz ile optik inceleme aşaması tamamlanmıştır.

Tablo 3.4: Aşındırma ve Parlatma Process Parametreleri.

Aşındırma	No	Disk / Zımpara	Kuvvet (per sample)	Zaman (sn)	Dönüş Hızı (d/dak))
	1	220 grit SiC	25N	0:60 (Düzlem elde edene kadar)	300
	2	320 grit SiC	25N	0:45	300
	3	500 grit SiC	25N	0:45	300
Parlatma	1	MD-Largo+Dia pro Largo (3 μm)	25N	0:45	150
	2	MD-Dac+Dia pro Dac (3 μm)	25N	0:45	150
	3	MD-Nap+Dia pro Nap (0.25 μm)	25N	0:45	150



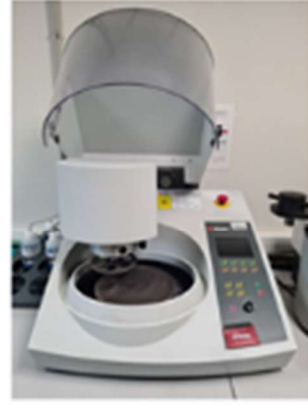
a)



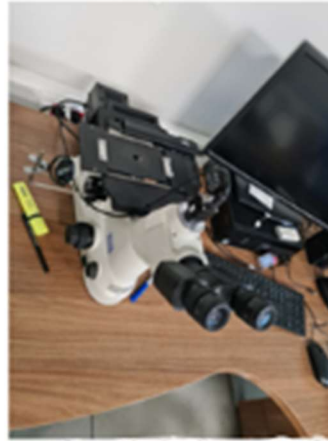
b)



c)



d)



e)

Şekil 3.13: Metalografik İncelemede Kullanılan Ekipmanlar;

a) Secotom-60 Kesme Cihazı, b) Citovac Soğuk Kalıplama Cihazı, c) K rleme Fırını, d) Tegramin-30 Parlatma Cihazı, e) Nikon Optik Mikroskobu.

Metco 51F-NS alüminyum bronz tozunun metalografik kontrolünde kullanılan yedi ana kabul kriteri şunlardır: gözeneklilik, erimemiş partiküller, yüzey içi kirlenme, oksitler ve oksit kümeleri, enine çatlaklar, yüzey içi ayrılma ve delaminasyon. Bu kriterlerin her birinin detayları, Tablo 3.5'te özetlenmiştir.

Tablo 3.5: Kabul Kriterlerinin Detayları.

Ana Kabul Kriterleri	Kabul Kriteri Değerleri
Gözeneklilik	< %5
Erimemiş Partiküller	< %5
Yüzey içi Kirlenme	< %25
Oksitler ve Oksit Kümeler	Oksitlere izin verilmez.
Enine Çatlaklar	Çatlaklara izin verilmez.
Yüzey İçi Ayrılma	Yüzey içi ayrılmaya izin verilmez.
Delaminasyon	Delaminasyona izin verilmez.

Kabul edilebilirlik değerlendirmesi için, Metco 51F-NS alüminyum bronz tozunun her kabul kriterine puanlar atanmıştır. Sayısal olarak değerlendirilebilen kriterler, örneğin gözeneklilik, erimemiş partiküller ve yüzey içi kirlenme için puanlama sıfırdan ona kadar değişmektedir. Sayısal olmayan kriterler, geçer veya geçmez şeklinde değerlendirilir; herhangi bir kusur belirtisi olan durumlar 0 puan alırken, kusur belirtisi olmayanlar 10 puan alır. Bu değerlendirme kriterlerinin detayları ve ölçüm yöntemleri Tablo 3.6 ve Tablo 3.7'de ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Bu yaklaşım sonucunda, numunelerin metalografik incelemeden geçebilmesi için en az 46 puan alması gerekmektedir. Bu, belirlenen kabul kriterlerine dayanarak numunelerin kalite standartlarını karşılayıp karşılamadığını değerlendirmek için kullanılan bir eşik değerdir. Her bir kriterin puanlaması toplanarak, numunenin genel kalitesi hakkında bir karar verilir. Eğer bir numune 46 puan veya üzeri bir skor elde ederse, kabul edilebilir olarak değerlendirilir. Yapılan bu kabul tezin yazarları Ergül ve Arslanın

geliştirdiği bir metoddur. Çalışmanın geri kalanında bu anlayış ‘Ergül-Arslan’ kabulü olarak anılacaktır.

Tablo 3.6: Nümerik Puanlama Tablosu.

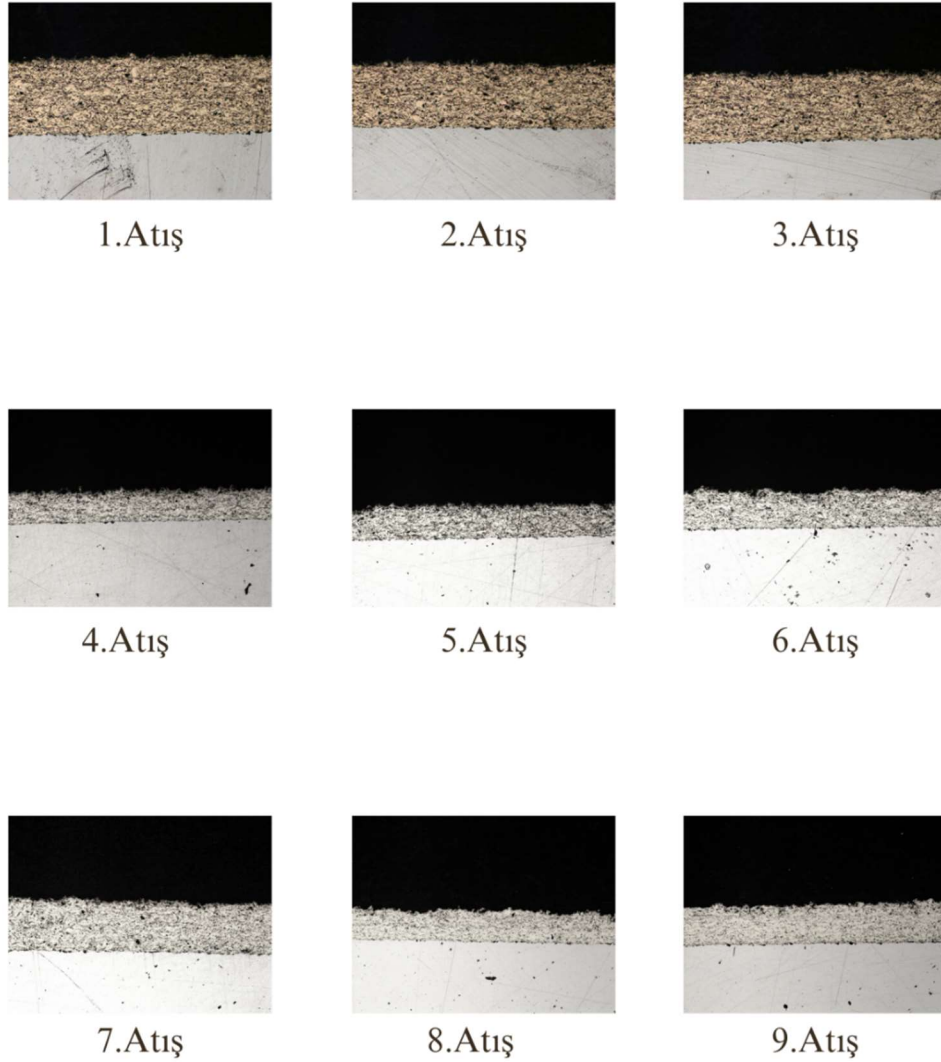
Kabul Kriteri		Puan
Gözeneklilik	1%	10
	2%	8
	3%	6
	4%	4
	5%	2
	>5%	0
Erimemiş Partiküller	1%	10
	2%	8
	3%	6
	4%	4
	5%	2
	>5%	0
Yüzey İçi Kirlenme	5%	10
	10%	8
	15%	6
	20%	4
	25%	2
	>25%	0

Tablo 3.7: Nümerik Olmayan Puanlama Tablosu.

Kabul Kriteri		Puan
Oksitler ve Oksit Kümeleri	Hayır	10
	Evet	0
Enine Çatlaklar	Hayır	10
	Evet	0
Yüzey İçi Ayrılma	Hayır	10
	Evet	0
Delaminasyon	Hayır	10
	Evet	0

Yapılan ilk yedi deneyde, Akım (A), Akış Hızı (Ar/H_2 için), Besleme Hızı (g/dak), ve Püskürtme Mesafesi (mm) gibi parametreler kullanılarak deneyler tamamlanmıştır. Sonraki iki denemede ise bu parametrelere ek olarak Taşıyıcı Gaz Akışı (NLPM) parametresi de dâhil edilmiştir. Bu denemelerin sonuçları, elde edilen mikroskop

görüntüleri ile görselleştirilmiş ve tüm dokuz deneyin görüntüleri Şekil 3.14'de sergilenmektedir. Bu şekilde, farklı deney koşullarının sonuçları üzerindeki etkileri gözlemlenebilir ve karşılaştırılabilir.



Şekil 3.14: Yapılan Deneylerin Mikroskobik İncelemesi.

Tablo 3.8'e dayanarak yapılan değerlendirme, dokuz deneyin tamamının sonuçlarını özetlemektedir. Her bir numune kabul edilebilir puanlar almasına rağmen, değerlendirmeler, ilk altı deneyde gözeneklilik ve oksitlenme seviyelerinin izin verilen sınırların üstünde olduğunu göstermiştir. Yedinci deneyde ise yalnızca oksidasyon izin verilen limitleri aşmıştır. Ancak, Taşıyıcı Gaz akış değerlerinin ayarlanmasıyla

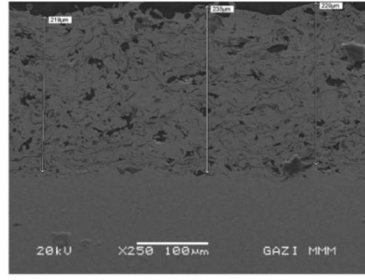
gerçekleştirilen son iki deneyde oksitlenme seviyesinde gözle görülür bir azalma tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, taşıyıcı gaz akışının ayarlanmasının oksidasyon üzerindeki olumlu etkisini göstermektedir ve ileriki deneyler için önemli bir parametre olduğunu ortaya koymaktadır.

Tablo 3.8: 9 deney için elde edilen Metalografik Sonuç Tablosu.

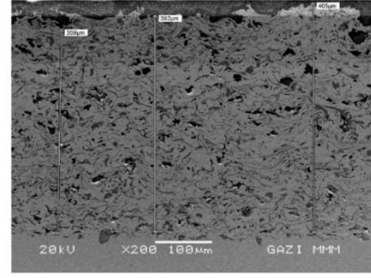
Kabul Kriterleri	Gözeneklilik		Erimemiş Partiküller		Yüzey İçi Kirlenme		Oksitler ve Oksitlenme kümeleri		Enine Çatlaklar		Yüzey İçi Ayrılma		Delaminasyon		Toplam Puan
Deneme No.	Sonuçlar	Puan	Sonuçlar	Puan	Sonuçlar	Puan	Sonuçlar	Puan	Sonuçlar	Puan	Sonuçlar	Puan	Sonuçlar	Puan	
1	6%	0	0%	10	0%	10	Evet	0	Hayır	10	Hayır	10	Hayır	10	50
2	2,2%	6	0%	10	0%	10	Evet	0	Hayır	10	Hayır	10	Hayır	10	56
3	10,41%	0	0%	10	0%	10	Evet	0	Hayır	10	Hayır	10	Hayır	10	50
4	9%	0	0%	10	0%	10	Evet	0	Hayır	10	Hayır	10	Hayır	10	50
5	9,4%	0	0%	10	0%	10	Evet	0	Hayır	10	Hayır	10	Hayır	10	50
6	6,5%	0	0%	10	0%	10	Evet	0	Hayır	10	Hayır	10	Hayır	10	50
7	3,7%	4	0%	10	0%	10	Evet	0	Hayır	10	Hayır	10	Hayır	10	54
8	2,6%	6	0%	10	0%	10	Hayır	10	Hayır	10	Hayır	10	Hayır	10	66
9	1,4%	8	0%	10	0%	10	Hayır	10	Hayır	10	Hayır	10	Hayır	10	68

Optik mikroskop ile elde edilen sonuçları doğrulamak için hazırlanan numuneler Gazi Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Laboratuvarına gönderilmiş ve her biri SEM’de incelenmiştir. Bu muayenede öncelikle kaplama kalınlıklarına bakılmış sonrasında EDS analizi de yapılarak numuneler üzerinden morfolojik yönden 3 farklı bölgede analiz koşturulmuş ve bölgesel olarak kimyasal analizleri yapılmıştır.

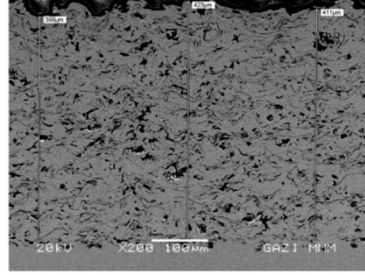
Şekil 3.15’de her bir numuneye ait SEM ile yapılmış kalınlık ölçümü sonucu yer almaktadır. Şekil 3.16’da ise analizin yapıldığı Jeol JSM 6060 Lv model cihaz görülmektedir. Kaplama kalınlığının plazma kaplama boyunca homojen dağılması önemlidir. Homojen dağılmayan ve artan kaplama kalınlık değerlerinden gözeneklilik değerlerinin arttığı görülmüştür.



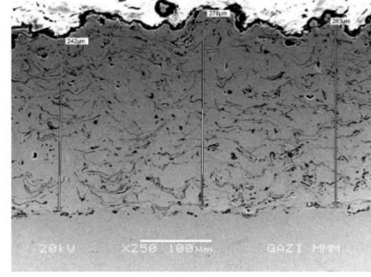
1 Numaralı numune kalınlık ölçümü



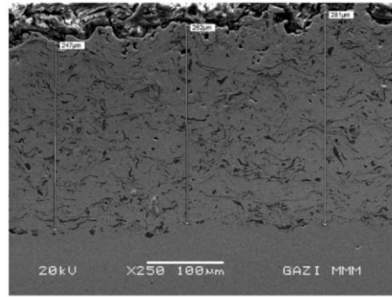
3 Numaralı numune kalınlık ölçümü



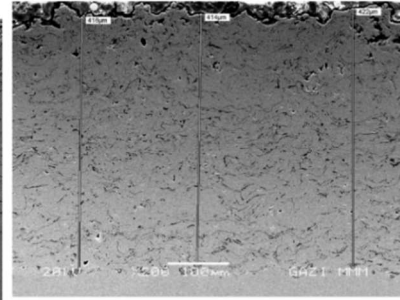
2 Numaralı numune kalınlık ölçümü



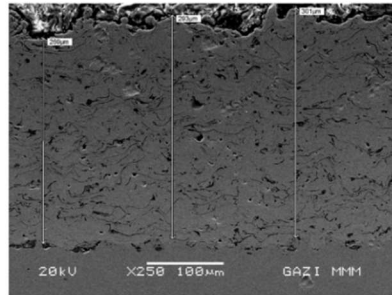
4 Numaralı numune kalınlık ölçümü



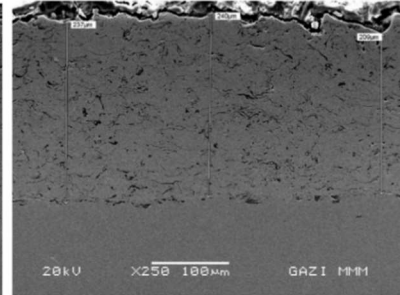
5 Numaralı numune kalınlık ölçümü



7 Numaralı numune kalınlık ölçümü

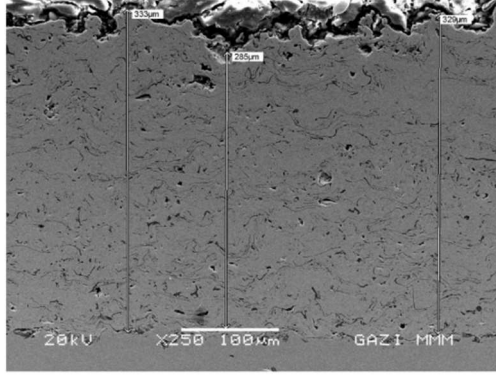


6 Numaralı numune kalınlık ölçümü



8 Numaralı numune kalınlık ölçümü

Şekil 3.15: SEM ile yapılan Kalınlık Ölçümü Sonuçları.



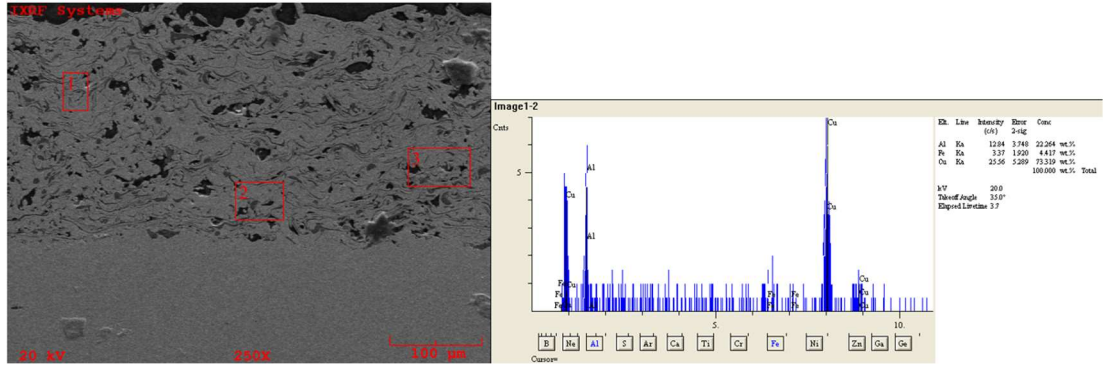
9 Numaralı numune kalınlık
ölçümü

Şekil 3.15: SEM ile yapılan Kalınlık Ölçümü Sonuçları. (Devamı)

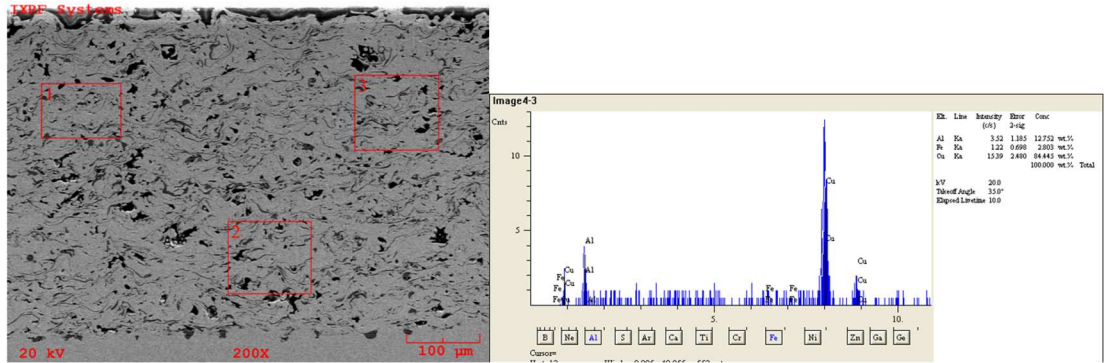


Şekil 3.16: Jeol JSM-6060LV SEM Cihazı.

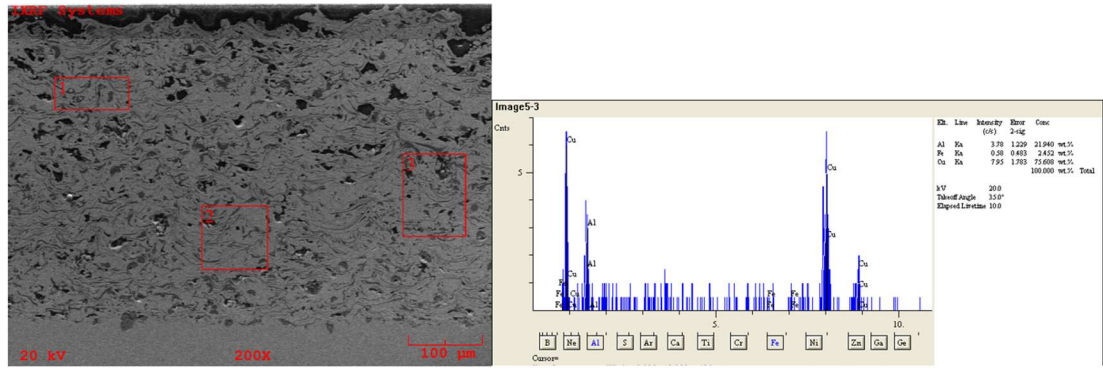
Elde edilen SEM görüntüleri üzerinden EDS analizleri de her bir numune için ayrı ayrı yapılmıştır. Numunelerin üzerinden morfolojik yönden farklı üç bölge seçilmiş ve bu bölgeler için kimyasal analiz yapılmıştır. Tablo 3.8’de yer alan sonuçlar incelendiğinde metalografik yönden en kötü puanı alan 1,3,4,5 ve 6. Numuneler ile en iyi sonuçların elde edildiği 8 ve 9. Numunelerin EDS analizleri kıyaslandığında sonuçların anlamlı olduğu görülmektedir.



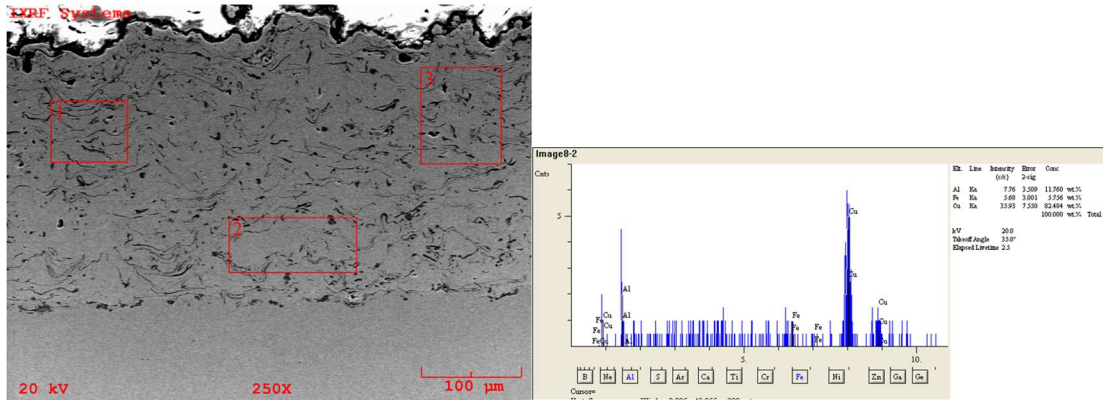
Şekil 3.17: 1.Deneyin EDS Analizi.



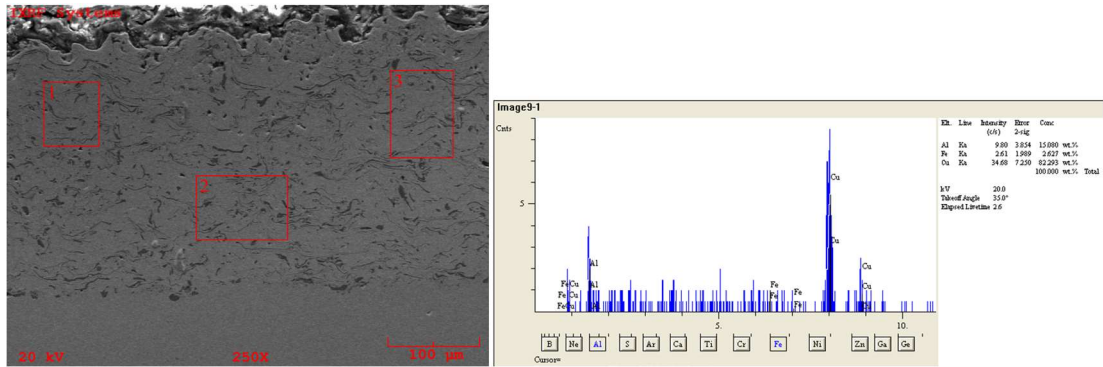
Şekil 3.18: 2.Deneyin EDS Analizi.



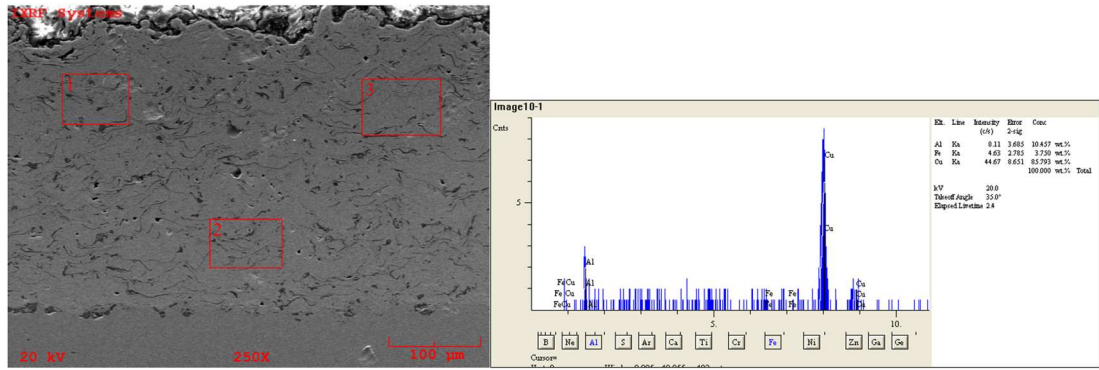
Şekil 3.19: 3. Deneyin EDS Analizi.



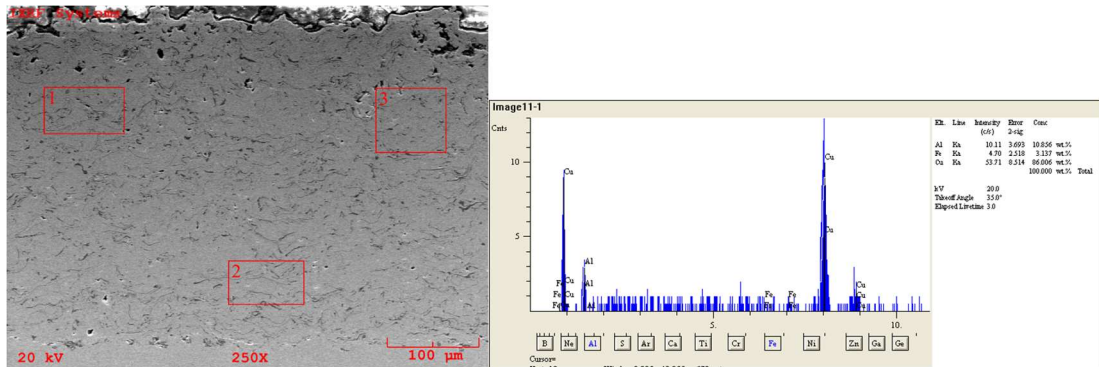
Şekil 3.20: 4. Deneyin EDS Analizi.



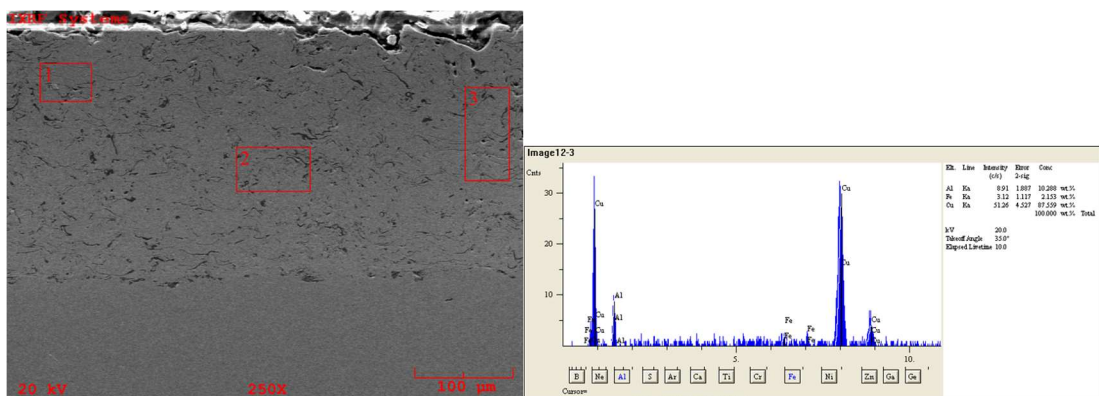
Şekil 3.21: 5. Deneyin EDS Analizi.



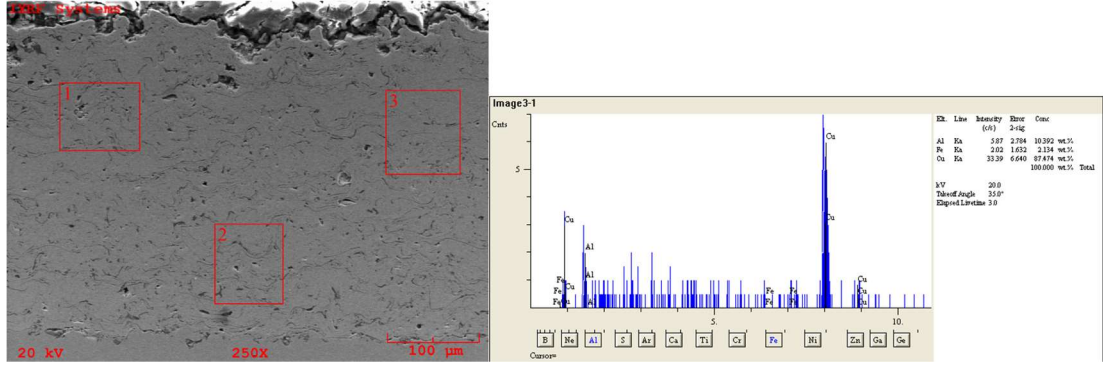
Şekil 3.22: 6.Deneyin EDS Analizi.



Şekil 3.23: 7.Deneyin EDS Analizi.



Şekil 3.24: 8.Deneyin EDS Analizi.



Şekil 3.25: 9.Deneyin EDS Analizi.

EDS analizinde seçilen üç farklı bölgenin kimyasal analizinde, Cu oranının yüksek ve homojen dağıldığı numunelerin metalografik yönden başarılı olduğu görülmüştür. Deney setinin 8. ve 9. Numunelerinde seçilen üç farklı bölge için elde edilen Cu değerlerinin sırasıyla 88,75%, 83,163%, 87,559%, 87,474%, 86,406% ve 87,960% olduğu görülmektedir. Elde edilen sonuçlara istinaden yeni parametre seti oluşturulmuştur. Çalışma belirlenen yeni parametre seti ile Taguchi metodu ile matris oluşturularak tamamlanacaktır. Yeni parametre seti Tablo 3.9’da belirtilmektedir.

Tablo 3.9: Yeni APS Parametre Seti.

No	Değişken Parametre Adı	Birim	Tanım
1	Akım	A	Amper
2	Akış Hızı (Ar)	m^3	V/t (Hacim/dk) (NLPM)
3	Akış Hızı (H_2)	m^3	V/t (Hacim/dk) (NLPM)
4	Püskürtme Uzaklığı	mm	-

Tablo 3.9’da belirtilen parametrelerinden Akım, Akış Hızı (Ar), Akış Hızı (H_2), Taşıyıcı Gaz Akış Hızı (Ar/ H_2) 4 adet değer, Püskürtme Uzaklığı ise 2 adet değer atanarak Taguchi matrisi oluşturulacaktır. Tablo 3.10’da parametrelere atanan değerler görülmektedir.

Tablo 3.10: Değişkenlere Atanan Değerler.

No	Değişken Parametre Adı	Birim	Değer 1	Değer 2	Değer 3	Değer 4
1	Akım	A	370	400	430	460
2	Akış Hızı (Ar)	m^3	90	110	130	150
3	Akış Hızı (H_2)	m^3	1	3	5	7
4	Püskürtme Uzaklığı	mm	100	130	-	-

Tablo 3.11’de ise her bir değişkene atanan değerler ile oluşturulmuş Taguchi matrisi görülmektedir. İlgili değerler Minitba yazılımına girildikten sonra DOE’nin bir altında bulunan Taguchi metodu seçilmiş ve çalışma için L16(4⁴ 2¹)’lik matris oluşturulmuştur.

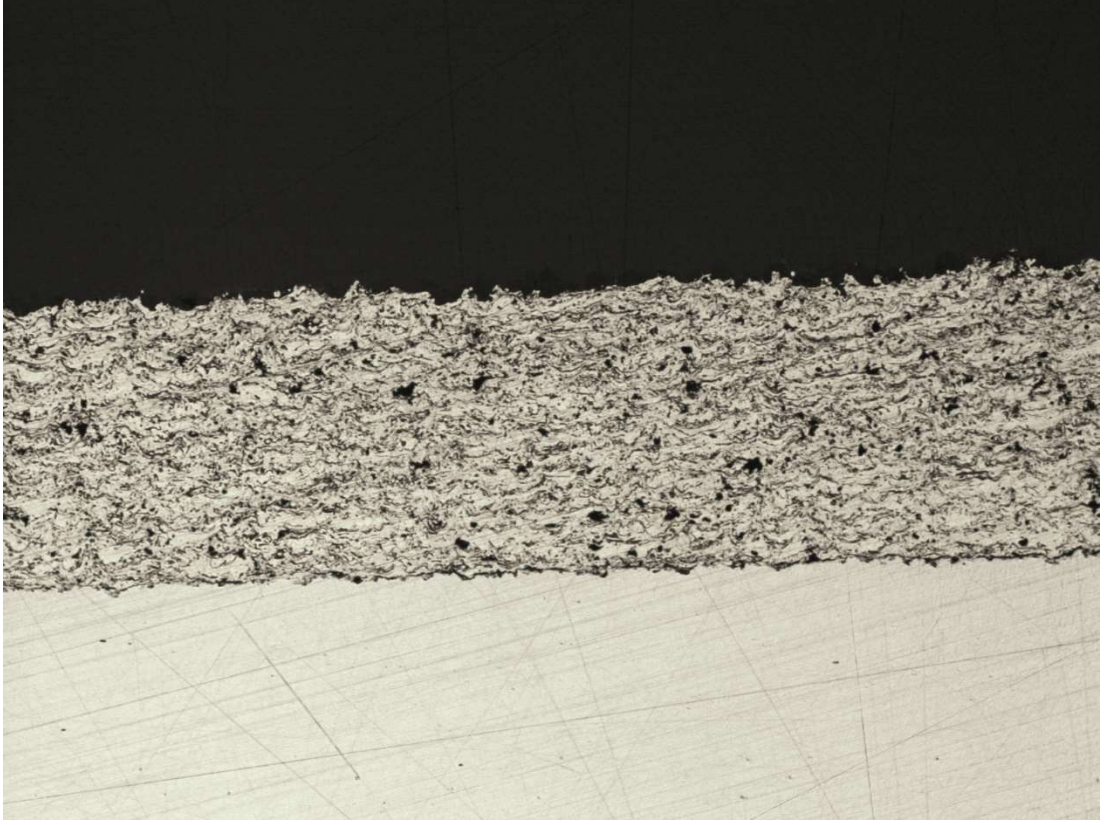
Tablo 3.11: L16(3⁴ 2¹) Taguchi Matrisi.

Deneme No.	Akım (Amper)	Akış Hızı (H_2) (NLPM)	Akış Hızı (Ar) (NLPM)	Püskürtme Uzaklığı (mm)
1	370	1	90	100
2	370	3	110	100
3	370	5	130	130
4	370	7	150	130
5	400	1	110	130
6	400	3	90	130
7	400	5	150	100
8	400	7	130	100
9	430	1	130	100
10	430	3	150	100
11	430	5	90	130
12	430	7	110	130
13	460	1	150	130
14	460	3	130	130
15	460	5	110	100
16	460	7	90	100

L16($3^4 2^1$) Taguchi matrisine tüm kaplamalar bölüm 3.1’de tarif edilen Plazma püskürtme sisteminde aynı sabit parametreler ile değişkenlere atana değerlere göre gerçekleştirilmiştir. Bölüm 3.2 Metalografik Analiz bölümünde anlatıldığı gibi, aynı ekipman ve proses parametreleri kullanılarak 16 adet numunenin soğuk kalıplama, zımparalama ve parlatma işlemleri yapılmış ve son olarak tüm numuneler aynı optik mikroskopta ve aynı şartlar altında incelenmiştir. İlk 9 numune için kurgulanan değerlendirme kriterleri Taguchi Matrisine göre gerçekleştirilen çalışma sonrası değerlendirilmiş ve Tablo 3.12’de özetlendiği şekilde değiştirilmiştir. İlk 9 numune çalışmasında değişkenler OFAT ilkesi gereği atanmış ve buna bağlı olarak sonuçlarda oksitlenme haricinde başarısız oluşmamıştır. Yeni deney setinde elde edilen numuneler 4 grupta sonuçlanmıştır. Gruplar sırasıyla; tüm kriterleri geçmiş, numerik olmayan kriterleri geçmiş ama nümerik kriterlerden geçemeyen, nümerik kriterlerin en fazla birinden kalmış fakat nümerik verilerde başarılı olmuş ve son olarak her iki grupta da tamamı ile başarısız olmak üzere gruplandırılmıştır. Her bir gruba temsil edilen numunelerin mikroskop görüntüleri sırasıyla, Şekil 3.26, Şekil 3.27, Şekil 3.28 ve Şekil 3.29’da verilmiştir. Tablo 3.12’de yeni değerlendirme kriterleri ve Tablo-3.13’de sonuçlar detaylı olarak paylaşılmaktadır.



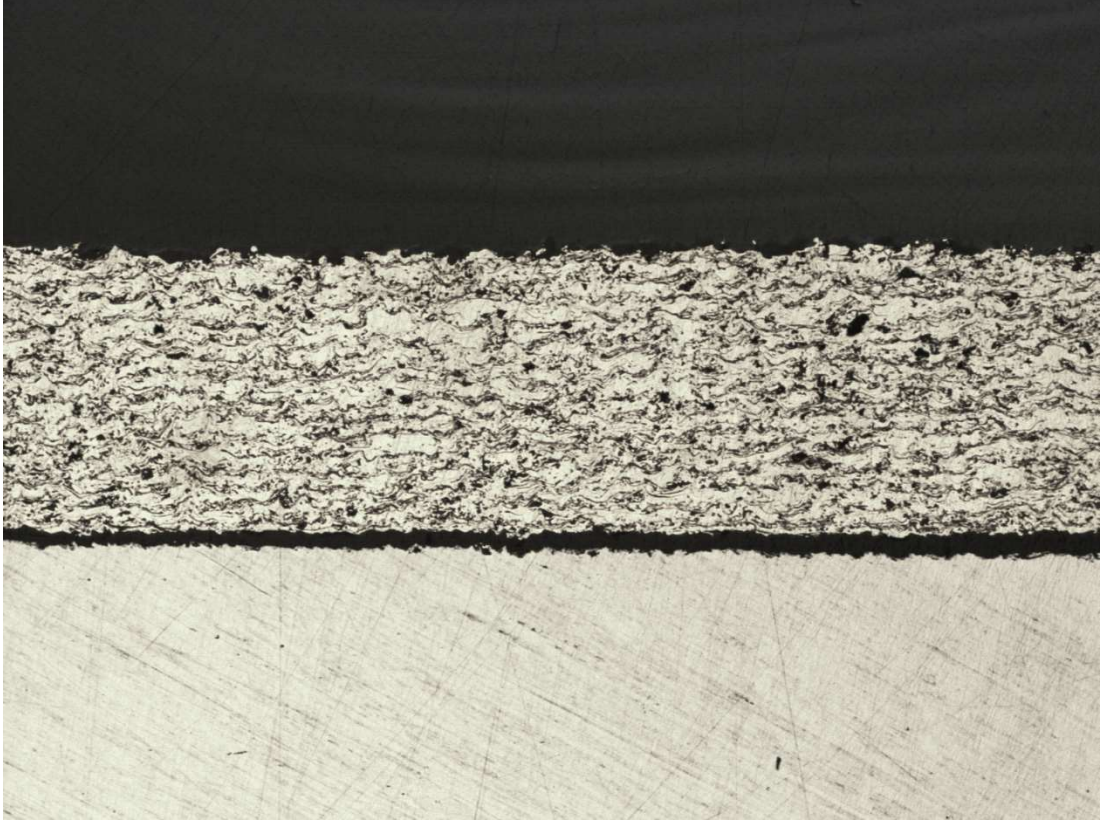
Şekil 3.26 : Grup-1’e ait 13.Deneme Kuponu Mikroskopik Görüntüsü.



Şekil 3.27: Grup-2'ye ait 15.Deneme Kuponu Mikroskopik Görüntüsü.



Şekil 3.28: Grup-3'e ait 3.Deneme Kuponu Mikroskopik Görüntüsü.



Şekil 3.29: Grup-4'e ait 1.Deneme Kuponu Mikroskopik Görüntüsü.

Tablo 3.12: Yeni Metalografik Değerlendirme Tablosu.

Gözeneklilik		Erimemiş Partiküller		Yüzey İçi Kirlenme		Oksitler ve Oksitlenme Kümeleri		Enine Çatlaklar		Yüzey İçi Ayrılma		Delaminasyon	
Maksimum 5%		Maksimum 5%		Maksimum 25%		Var	Yok	Var	Yok	Var	Yok	Var	Yok
1%	10	1%	10	5%	10	0	20	0	20	0	20	0	20
2%	8	2%	8	10%	8								
3%	6	3%	6	15%	6								
4%	4	4%	4	20%	4								
5%	2	5%	2	25%	2								
>5%	0	>5%	0	>25%	0								
6%	-2	6%	-2	25-30%	-2								
7%	-4	7%	-4	30-35%	-4								
8%	-6	8%	-6	35-40%	-6								
9%	-8	9%	-8	40-45%	-8								
10%	-10	10%	-10	45-50%	-10								
11%	-12	11%	-12	50-55%	-12								
12%	-14	12%	-14	55-60%	-14								
13%	-16	13%	-16	60-65%	-16								
14%	-18	14%	-18	65-70%	-18								
15%	-20	15%	-20	70-75%	-20								
16%	-22	16%	-22	75-80%	-22								
17%	-24	17%	-24	80-85%	-24	Kabul Edilebilir Puan Seviyeleri				Minimum		Maksimum	
18%	-26	18%	-26	85-90%	-26					86		110	
19%	-28	19%	-28	90-95%	-28								
>20	-30	>20	-30	>95%	-30								

Tablo 3.13: Taguchi Matrisine Göre Deneyi Tamamlanan Numuneleri Metalografik Sonuçları.

Kabul Kriterleri	Gözeneklilik		Erimemiş Partiküller		Yüzey İçi Kirlenme		Oksitler ve Oksitlenme Kümeleri		Enine Çatlaklar		Yüzey İçi Ayrılma		Delaminasyon		Toplam Puan
Deneme No.	Sonuçlar	Puan	Sonuçlar	Puan	Sonuçlar	Puan	Sonuçlar	Puan	Sonuçlar	Puan	Sonuçlar	Puan	Sonuçlar	Puan	
1	8,37%	-8	<1%	10	100%	-30	Var	0	Yok	20	Yok	20	Var	0	12
2	11,49%	-14	<1%	10	12%	6	Var	0	Yok	20	Yok	20	Yok	20	62
3	6,14%	-4	<1%	10	21,00%	2	Var	0	Yok	20	Yok	20	Yok	20	68
4	6,39%	-4	<1%	10	49,00%	-10	Yok	20	Yok	20	Yok	20	Yok	20	76
5	15,05%	-22	<1%	10	44,00%	-8	Var	0	Yok	20	Yok	20	Yok	20	40
6	19,39%	-28	<1%	10	21,00%	2	Var	0	Yok	20	Yok	20	Yok	20	44
7	2,09%	8	<1%	10	64,00%	-16	Yok	20	Yok	20	Yok	20	Yes	0	62
8	5,11%	-2	<1%	10	61,00%	-16	Var	0	Yok	20	Yok	20	Yes	0	32
9	4,44%	2	<1%	10	19%	4	Yok	20	Yok	20	Yok	20	Yok	20	96
10	3,33%	4	<1%	10	100%	-30	Yok	20	Yok	20	Yok	20	Yes	0	44
11	20,80%	-30	<1%	10	4,45%	10	Var	0	Yok	20	Yok	20	Yok	20	50
12	11,76%	-14	<1%	10	24,00%	2	Var	0	Yok	20	Yok	20	Yok	20	58
13	4,76%	2	<1%	10	21,25%	2	Yok	20	Yok	20	Yok	20	Yok	20	94
14	8,58%	-8	<1%	10	2,50%	10	Var	0	Yok	20	Yok	20	Yok	20	72
15	7,06%	-6	3,80%		16,3%	4	Yok	20	Yok	20	Yok	20	Yok	20	84
16	9,66%	-10	<1%	10	21,00%	2	Var	0	Yok	20	Yok	20	Yok	20	62

Tablo 3.13’de gösterilen elde edilen değerler Minitab yazılımında oluşturulan matrisin her bir deneme sonucuna karşılık sistem çıktısı olarak eklenmiştir. Sonrasında Taguchi matrisi ile elde edilen sonuçlarla birlikte analiz edilmiştir. Analiz sonucunda S/N tabloları ve ortalama değer tabloları ile grafikleri elde edilmiştir. S/N tablosu için ‘Büyük olan daha iyidir’ yaklaşımı seçilmiştir çünkü elde edilen metalografi puanı ne kadar yüksek olursa sonuç o kadar başarılı olmaktadır. Şekil 3.30’da ‘Sinyal/Gürültü Oranları için Yanıt Tablosu’, Şekil 3.31’de ‘Ortalamlar için Yanıt Tablosu’, Şekil 3.32’de ‘Ortalamlar için Ana Etkiler Grafiği’ ve Şekil 3.33’te ‘Sinyal/Gürültü Oranları için Ana Etkiler Grafiği’ görülmektedir.

Response Table for Signal to Noise Ratios

Larger is better

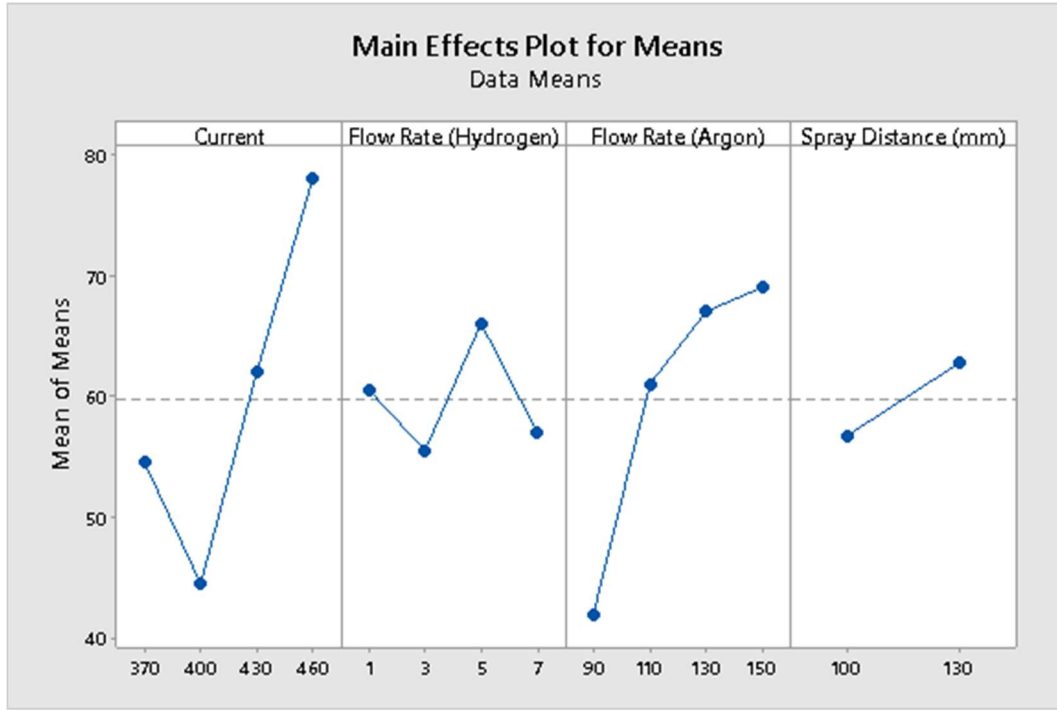
		Flow Rate	Flow Rate	Spray
Level	Current	(Hydrogen)	(Argon)	Distance
				(mm)
1	32.92	33.18	31.07	33.78
2	32.72	34.68	35.41	35.63
3	35.44	36.24	35.89	
4	37.74	34.71	36.45	
Delta	5.02	3.06	5.38	1.85
Rank	2	3	1	4

Şekil 3.30 : Sinyal/Gürültü Oranları için Yanıt Tablosu.

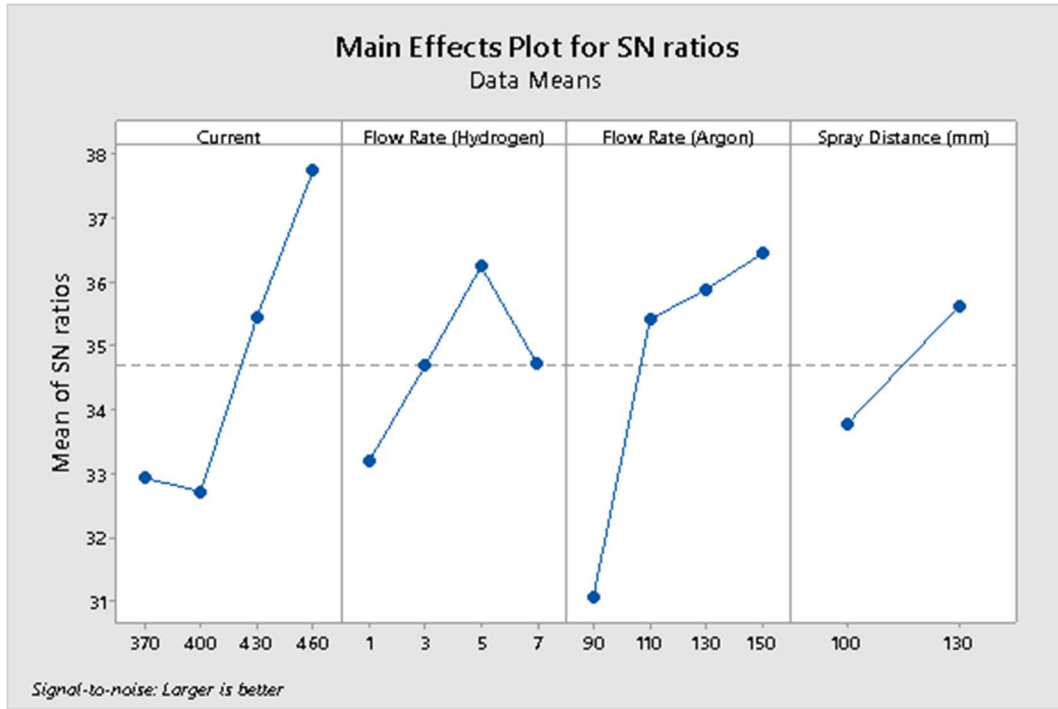
Response Table for Means

		Flow Rate	Flow Rate	Spray
Level	Current	(Hydrogen)	(Argon)	Distance
				(mm)
1	54.50	60.50	42.00	56.75
2	44.50	55.50	61.00	62.75
3	62.00	66.00	67.00	
4	78.00	57.00	69.00	
Delta	33.50	10.50	27.00	6.00
Rank	1	3	2	4

Şekil 3.31 : Ortalamalar için Yanıt Tablosu.



Şekil 3.32: Ortalamalar için Ana Etkiler Grafiği.

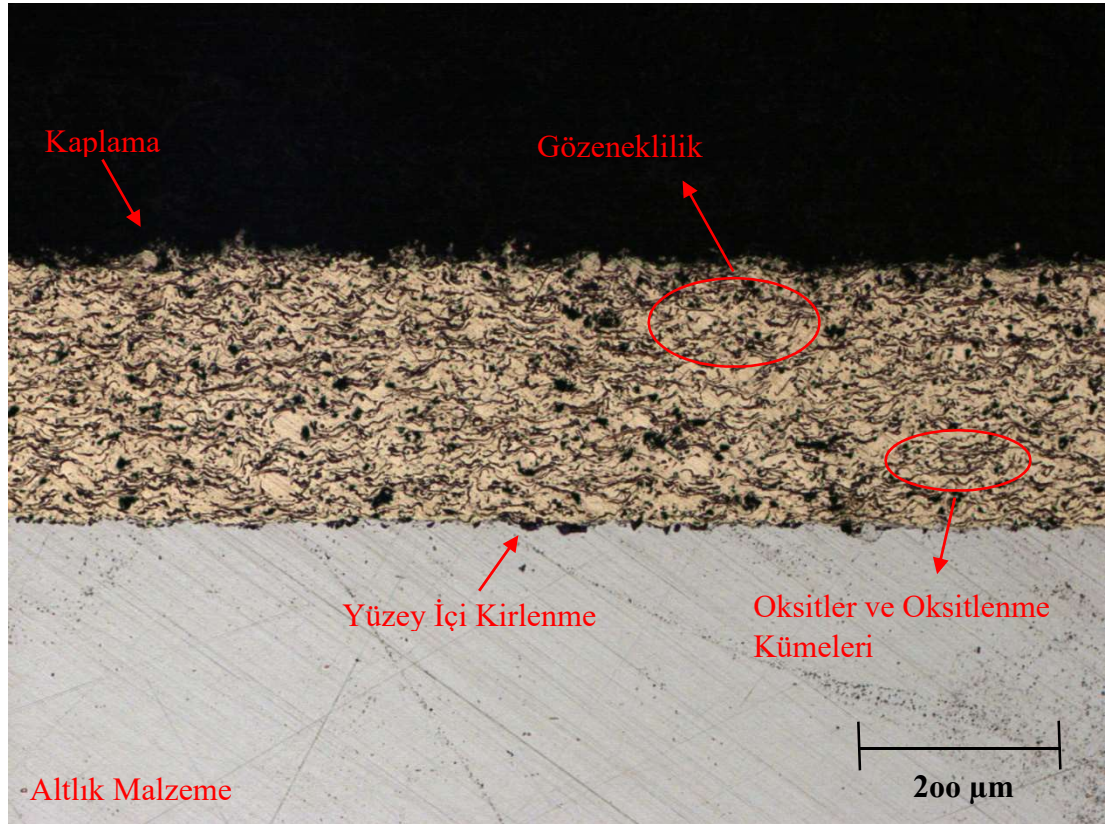


Şekil 3.33: Sinyal/Gürültü Oranları için Ana Etkiler Grafiği.

4. SONUÇLAR

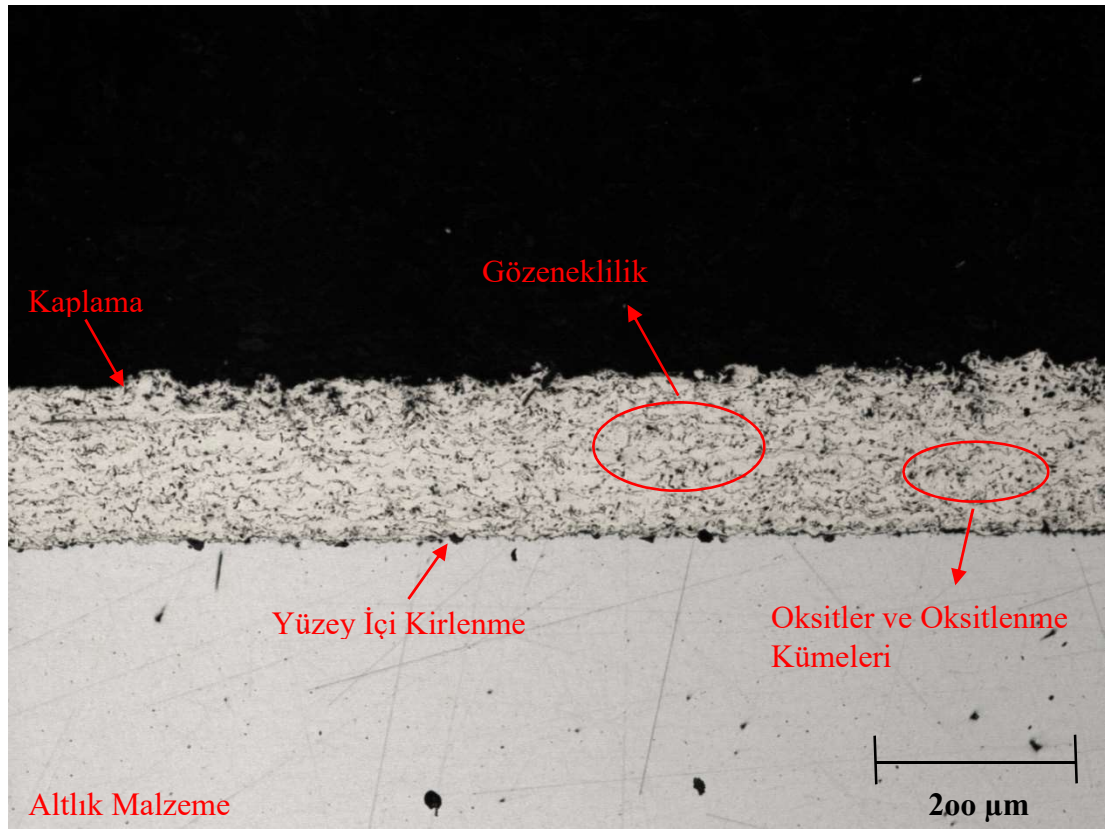
Çalışmada, APS yöntemiyle yapılan kaplamalarda belirlenen proses parametrelerinin birbirleri arasında ki etkileşiminin metalografik açıdan incelemesi yapılmıştır. Örnek olarak seçilen altlık malzeme ve termal püskürtme tozu, gaz türbinli jet motorlarının performansını artırma ve yüzey mühendisliği alanında yenilikçi çözümler sunmak amacıyla seçilmiştir.

Deneyisel çalışmalarımızın ilk bölümünde Tablo 3.3’de verilen değerler ile OFAT’a göre ilk 9 deney yapılmış ve bu yaklaşımın plazma püskürtmenin metalografik yapısını hangi faktörlere bağlı olarak değiştiğini anlamada yeterli olmadığı görülmüştür. İlk 7 numunede, ilk beş değişkene farklı değerler atanmış ve hepsinde ortak olarak oksitlenme görülmüştür. Şekil 4.1’de ilk 7 numuneyi temsil eden görsel paylaşılmış ve genel oksitlenme kümeleri gösterilmiştir.



Şekil 4.1: OFAT’a göre 2.denemeye ait numunenin mikroskop görüntüsü.

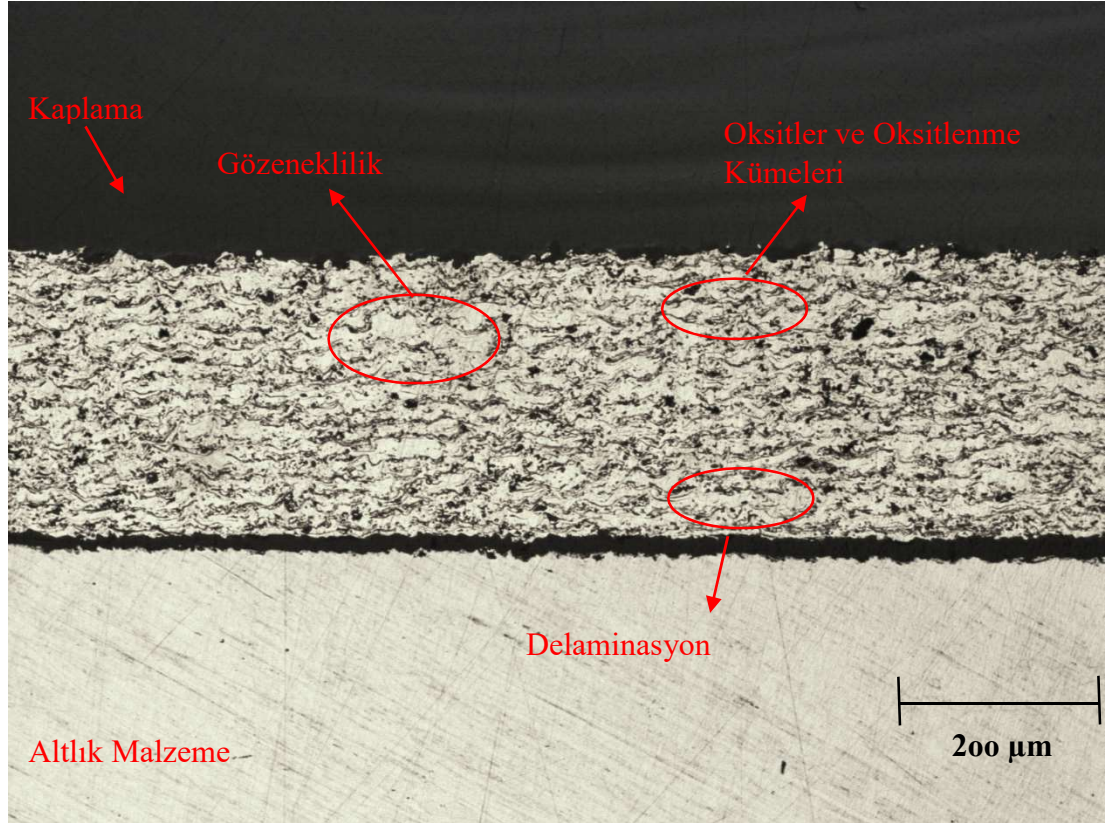
Son iki numune çalışmasında ise belirlenen tüm değişkenlere değer atanmış ve Taşıyıcı Gaz Akış Hızı(Ar/H_2) değeri 6 NLPM olduğunda Oksitlenmenin kabul edilebilir derecede azaldığı gözlemlenmiş, ayrıca gözeneklilik değerinin 1,4% değerinde olduğu tespit edilmiştir. Elde edilen numuneye ait mikroskop görüntüsü Şekil 4.2’de paylaşılmıştır. Gözeneklilik ve oksitlenmenin anlamlı bir derecede iyileştiği gözlemlenmiştir. Bu sonuç, ikinci adımda yapılan 16 adet numune çalışmasında değişkenlere değer atanmasında bir rehber olmuştur.



Şekil 4.2: OFAT’a göre 9.denemeye ait numunenin mikroskop görüntüsü.

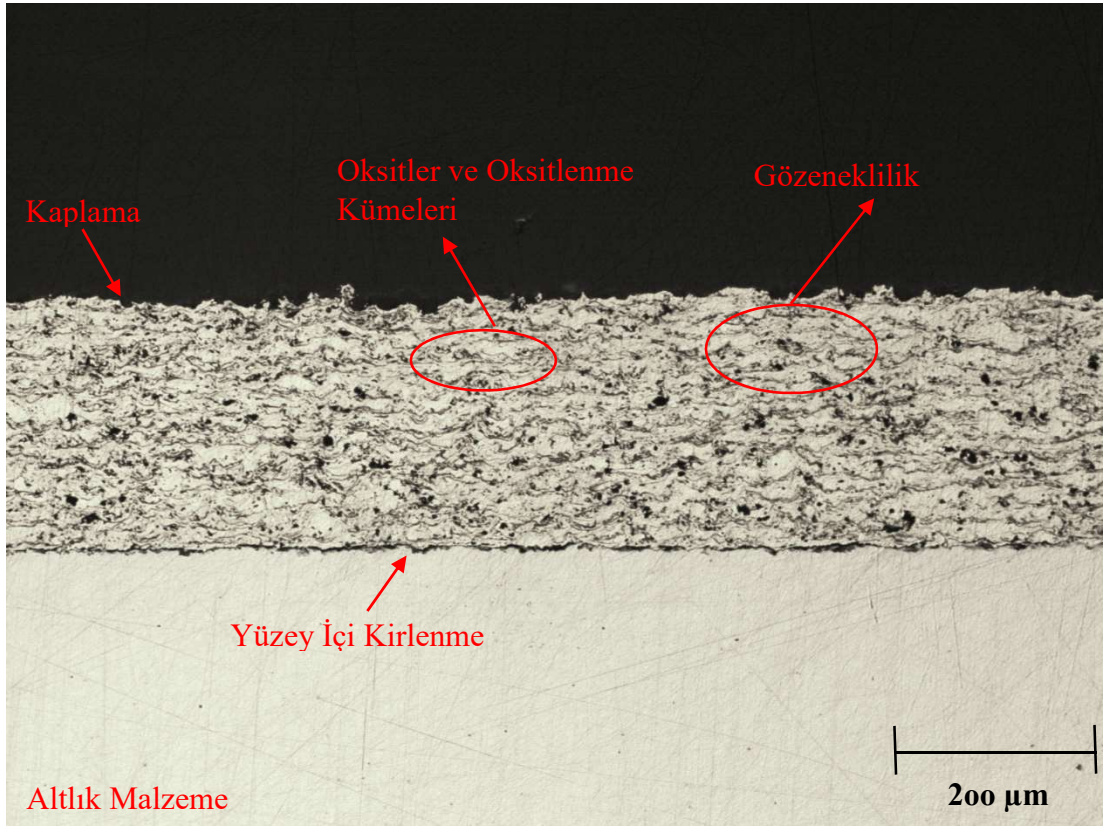
Deneysel çalışmanın ikinci aşamasında Akım (I), Akış Hızı (Ar), Akış Hızı (H_2) ve Püskürtme Uzaklığı (mm) değişken olarak seçilmiştir. $L_{16}(3^4 2^1)$ ’ye göre Taguchi matrisi oluşturulmuş ve elde edilen numuneler 4 sonuç grubunda incelenmiştir. En iyi ve en kötü sonuçları temsilen elde edilen mikroskopik sonuçlar sırasıyla Şekil 4.3 ve Şekil 4.4’te detaylı olarak incelenmiştir. Şekil 4.3’te detaylı olarak görüleceği gibi kaplama ile altlık malzeme arasında yeterli derecede yapışma olmadığı gözlemlenmiş

ve bunun sonucunda neredeyse test kuponu boyunca delaminasyon gözlemlenmiştir. Bununla birlikte; gözeneklilik, yüzey içi kirlenme ve oksitlenme değerlendirmesinde de 1.numune başarılı olamamıştır.



Şekil 4.3: Taguchi Matrisine ait 1.Deneme Kuponunun Mikroskopik Görüntüsü.

Şekil 4.4'te ise Taguchi Matrisine göre yapılan deneme deneylerinde en iyi sonuç elde edilmiştir. Bütün kriterlere göre numunenin metalografik sonucunun başarılı olduğu görülmüştür. En iyi sonuç elde edilen 9.numunenin Metalografik değerlendirme sonucunda aldığı puan 96 olmuştur. Bu denemede akım değeri 430 amper, Hidrojen için akış hızı 1 NLPM, Argon için akış hızı 130 NLPM ve püskürtme uzaklığı 130 mm olarak seçilmiştir. En iyi ikinci sonucu elde eden 13. Numunede ise bu değerler sırasıyla 460 amper, 1 ve 150 NLPM ve püskürtme uzaklığı yine 130 mm değerinde çalışılmıştır. 16 adet yapılan deneme çalışmalarında ilk 9 denemeden farklı olarak Taşıyıcı Gaz Hızı değeri sabit ve 6 NLPM değerinde çalışılmıştır.



Şekil 4.4: Taguchi Matrisine ait 9.Deneme Kuponunun Mikroskopik Görüntüsü.

Şekil 3.32 ve Şekil 3.33'te belirtilen sonuçlara göre Akım 460 amper, Hidrojen ve Argon akış hızları ise sırasıyla 5 ve 150 NLPM, son olarak ise püskürtme mesafesi 130 mm seçilerek Minitab uygulamasından Taguchi sonuçları tahmin edilmiştir. Şekil 4.5'te tahmin sonucuna ilişkin ve parametre ayarları görülmektedir.

Prediction		Settings			
S/N Ratio Mean		Flow Rate		Flow Rate	Spray
		Current (Hydrogen)	(Argon)	Distance	(mm)
41.9426	96.5	4	3	4	2

Şekil 4.5: Taguchi ile elde edilen reçetenin sonuçları ile ilgili tahmini.

Literatür incelendiğinde çalışma sonuçlarıyla paralellik gösteren araştırmalara aşağıda belirtilmektedir.

Yang ve arkadaşları çalışmalarında; Birincil gaz akış hızının artırılmasıyla, püskürtülen toz ile atmosferik çevre arasındaki etkileşim etkin bir şekilde sınırlandırılabilir olduğunu gözlemlemişlerdir. Ayrıca artan birincil gaz akış hızında daha düşük akım değeri ile yani plazma tabancasının daha düşük enerji yoğunluğu, en düşük kusur seviyesine ve en yüksek sertliğe sahip alüminyum-bronz kaplama elde etmek için faydalı olduğunu bildirmişlerdir. Öte yandan düşük birincil gaz akış hızı, toz hammaddesinin plazma tabancasında kalma süresini artırabilir ve artan kalma süresinin, plazma tabancasının daha yüksek giriş gücü ile birleştiğinde, kaplamada gevrek $\beta 0$ fazının çökmesini en fazla sınırlandırır olduğunu raporlamışlardır [61].

Miguel ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, Alüminyum-Bronz kaplamaları APS ve CS yöntemleri ile gerçekleştirmiş ve sonucunda Alümina katkısının, kaplamaların yapışma mukavemeti, mikrosertlik, aşınma ve kayma aşınması açısından performansını artırdığını gözlemlemişlerdir [63].

Sasaki ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, alüminyum bronz kaplamaların yüksek performanslı tribomalzemeler olarak önemli bir potansiyel sergilediğini bildirmişlerdir. Kaplamaların tribo performanslarını etkileyen faktörlerin püskürtme mesafesi, akım, partikül sıcaklığı ve hızı ve gaz basıncı gibi değişkenlerin olduğunu raporlamışlardır [64].

Migeul ve arkadaşları çalışmalarında, Bronz-alümina kaplamaların, saf bronz kaplamalarla karşılaştırıldığında, plazma püskürtme yöntemiyle başarılı bir şekilde elde edilebilir ve önemli ölçüde iyileştirilmiş tribolojik ve mekanik özelliklere sahip olduğunu tespit etmişlerdir. Yaptıkları deneysel araştırmalar ile bronz kaplamalara alümina eklenmesinin aşınma direncinde genel bir artışa ($\%Al_2O_3$ plato etkisi ile) ve sürtünme katsayısında bir artışa neden olduğunu bildirmişlerdir [65].

Christoulis ve arkadaşları sundukları çalışmada, Alt tabaka sıcaklığı ve pürüzlülüğünün eşzamanlı etkisini araştırmanın önemli olduğu göstermişlerdir. Hem ayna parlaklığında parlatılmış hem de kum püskürtme yapılmış alt tabakalarda, Ts'nin önemli bir rol oynadığı bulunmuştur. Ts'nin artması, tutunma morfolojisinin iyileşmesine neden olmaktadır. Ayrıca, alt tabaka sıcaklığının artmasıyla birlikte tutunma derecesinin (j) hafifçe azaldığı bulunmuştur [66].

Kim sunduğu çalışmada, oksijen gaz akışı, asetilen gaz akışı ve püskürtme mesafesinin kaplama özellikleri üzerinde önemli etkileri olduğunu ortaya koymuştur. Optimum proses koşulları; oksijen gaz akışı 53 ft³/h, asetilen gaz akışı 55 ft³/h, toz besleme hızı 30 lb/dak ve püskürtme mesafesi 240 mm olarak belirlenmiştir. Bunun yanı sıra, aşınma oranı ve sertlik değerlerini dikkate alan optimizasyon çalışmaları, kaplama performansını önemli ölçüde iyileştirmiştir. Bu çalışma, termal püskürtme kaplamalarının endüstriyel uygulamalarında proses parametrelerinin optimize edilmesinin kritik önem taşıdığını vurgulamaktadır [67].

5. TARTIŞMA VE ÖNERİLER

Bu tez kullanılan makine sistemi itibarı ile ülkemizde yeni olup, ilgili kaplama makinesi hakkında çok az bilinen olduğundan, ilk olarak keşif ve geçmiş tecrübelerle dayalı bazı deneyler tasarlanmış ve bu çalışmalar üzerine en son adımda oluşturulacak olan Taguchi deneylerine gerekli altyapı oluşturulmuştur. Kısaca tüm bu çalışmaların sonunda elde edilen sonuçlar şunlardır:

1. OFAT'a yapılan ilk 7 deneme deneyinde oksitlenme yüksek seviyede gözlenmiş ve Taşıyıcı Gaz Hızı parametresi değişken olarak deney setine eklenmiştir.
2. OFAT'a göre yapılan son 2 denemede başarılı numuneler elde edilmiş ve yapılan 9 deneme sonucu göz önüne alınarak besleme oranının değişmesinin sonuca önemli derecede etki etmediği görülmüş ve 50 gr/min. olarak sabit değer atanması uygun görülmüştür.
3. Elde edilen 9 numune için SEM ve EDS analizleri yapılmış ve metalografik değerlendirme sonuçlarını doğrulayan çıktılar elde edilmiştir. En kötü numune ile en iyi numune arasında EDS kıyaslaması yapıldığında Cu oranının en iyi numune neredeyse tozun kimyasal kompozisyonuna uygun olarak elde edildiği analiz edilmiştir.
4. Çalışmanın ikinci aşamasında L16 ortogonal Taguchi matrisi oluşturulmuş ve elde edilen sonuçlar ışığında metalografik değerlendirme ölçütünün güncellenmesi gerekmiştir.
5. Yapılan değerlendirme sonucunda en iyi sonucu vermesi tahmin edilen reçete değerleri Minitab üzerinde tahmin edilmiş ve elde edilen sonuçlara paralel olarak çıktı alınmıştır.

İlerleyen zamanlarda yapılacak çalışmalar öneriler ise şunlardır:

1. Çalışmada, 3 numunede yüzeyden ayrılma gözlemlenmiştir. Plazma püskürtme öncesi yüzey hazırlık aşamasında iyileştirme çalışması yapılabilir. Yapılacak çalışmalar yüzeyi kumlama öncesi zımpara ile temizleme ve kumlama sonrası temizleme işleme adımları ile birlikte kumlama parametrelerinin optimizasyonunu içerebilir.

2. Sabit olarak belirtilen altlık malzeme sıcaklığı üzerinde deneysel çalışma yapılabilir. Yüzeye yapışma gözlemlenmesi ön ısıtma süresi ile ilişkili olabilir.
3. 16'lı Taguchi deney setinde belirlenen değişkenlere atanan değerler tekrar gözden geçirilerek Tam Faktöriyel Tasarım metodu ile daha fazla deney yapılarak örneklem artırılabilir ve sonuçlar bu çalışma ile kıyaslanabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Dearnley P.A.,(2017),“Surface engineering for gas turbine engines (GTEs)”, Introduction to surface engineering, 423-448.
- [2] James A.W.,Rajagopalan,S.,(2014),“Gas turbines: operating conditions, components and material requirements”, In Structural alloys for power plants (pp. 3-21). Woodhead Publishing.
- [3] Padture N. P., Gell M.,Jordan, E.H., (2002), “Thermal barrier coatings for gas-turbine engine applications”,Science, 296(5566), 280-284.
- [4] Talib R. J., Saad S., Toff M. R. M., Hashim H., (2003), “Thermal spray coating technology: A review”, Solid State Sci Technol, 11(1), 109-117.
- [5] Wang G. X., Jiang X., Sampath S., (2000), “Grain structure development in plasma sprayed coatings: experiment and modeling”, Minerals, Metals and Materials Society/AIME, Surface Engineering: in Materials Science I(USA), 197-209.
- [6] Amin S., Panchal H., (2016), “A review on thermal spray coating processes. Transfer”, 2(4), 556-563.
- [7] Acumen Reseaarch and Consulting., (2023), “acumenresearchandconsul.com”
- [8] Kaya Ö.A., Çakır K., Bozkurt Y., (2017), “Coating of different alloys on carbon steel by plasma spray method”, International Journal of Engineering Research and Development, 9(3), 36-42.
- [9] Dorfman M. R., (2018), “Thermal spray coatings”, In Handbook of environmental degradation of materials (pp. 469-488), William Andrew Publishing.
- [10] Bilgin S., (2008), “Isıl püskürtme yöntemi ile oluşturulan martenzitik paslanmaz çelik kompozit toz kaplamanın mikroyapı ve mekanik özelliklerinin incelenmesi”, Doctoral dissertation, Marmara Üniversitesi.
- [11] Evkaya M., (2003), “Metallerde aşınmaya karşı yapılan Kaplamada Uygun Toz Materyeli Ve Kaplama yönteminin Bilgisayar Destekli seçimi”, Master's thesis, Marmara Üniversitesi.
- [12] Tucker R.C., (1994)., “Surface Engineering ASM Handbook, vol. 5”, ASM International, USA, 495.
- [13] Davis J.R., (2004), “Handbook of Thermal Spray Technology”, ASM International.
- [14] Boulos M.I., Fauchais P.L., Heberlein J.V. (2021), “Thermal spray fundamentals: from powder to part”, New York, NY, USA, Springer.

- [15] Schoop M.U., (1910), ‘‘Improvements in or connected with the coating of surfaces with metal, applicable also for soldering or uniting metals and other materials’’, UK Patent, 5, 712.
- [16] Schoop M.U., (1911), ‘‘An improved process of applying deposits of metal or metallic compounds to surfaces’’, UK Patent AD, 21066.
- [17] Schoop M.U., (1915), ‘‘U.S. Patent No. 1,133,507’’, Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- [18] Global Thermal Spray Market., (2016), ‘‘Segmented by Product Type,By End-User Industry, and Geography—Trends and Forecasts (2015-2020)’’, Mordor Intelligence.
- [19] Vardelle A., Moreau C., Akedo J., Ashrafizadeh H., Berndt C.C., Berghaus, J.O., Vuoristo P.,(2016), ‘‘The 2016 thermal spray roadmap’’, Journal of thermal spray technology, 25, 1376-1440.
- [20] Hermanek F.J.(Ed.), (2001), ‘‘Thermal spray terminology and company origins’’, ASM international.
- [21] Zierhut J., Haslbeck P., Landes K.D., Barbezat G., Muller M., Schutz, M., (1998), ‘‘TRIPLEX—an innovative three-cathode plasma torch’’, In ITSC 1998 (pp. 1375-1379), ASM International.
- [22] Barbezat G., Landes K., (2000), ‘‘Plasma technology TRIPLEX for the deposition of ceramic coatings in the industry’’, In ITSC 2000 (pp. 881-885), ASM International.
- [23] Dzulko M., Forster G., Landes K.D., Zierhut J., Nassenstein K.,(2005), ‘‘Plasma torch developments’’, In ITSC2005 (pp. 431-434), ASM International.
- [24] Moreau C., Gougeon P., Burgess A., Ross, D., (1995), ‘‘Characterization of particle flows in an axial injection plasma torch (No. CONF-9509182-)’’, ASM International, Materials Park, OH (United States).
- [25] Burgess A.W., (2002), ‘‘Hastelloy C-276 parameter study using the axial III plasma spray system’’, In ITSC2002 (pp. 516-518), ASM International.
- [26] Gärtner F., Stoltenhoff T., Schmidt T., Kreye H., (2006), ‘‘The cold spray process and its potential for industrial applications’’, Journal of Thermal Spray Technology, 15, 223-232.
- [27] Irissou E., Legoux J.G., Ryabinin A.N., Jodoin B., Moreau C., (2008), ‘‘Review on cold spray process and technology: part I—intellectual property’’, Journal of Thermal Spray Technology, 17, 495-516.
- [28] Fauchais P., Montavon G., Lima R.S., Marple B.R., (2011), ‘‘Engineering a new class of thermal spray nano-based microstructures from agglomerated nanostructured particles, suspensions and solutions: an invited review’’, Journal of Physics D: Applied Physics, 44(9), 093001.

- [29] McCune Jr R. C., Reatherford L. V., Zaluzec M.J., (1993), ‘‘U.S. Patent No. 5,194,304’’, Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- [30] Barbezat G., (2001), ‘‘The internal plasma spraying on powerful technology for the aerospace and automotive industries’’, In ITSC2001(pp.135-139), ASM International.
- [31] Wasserman C., Boecking R., Gustafsson S., (2001), ‘‘Replacement for hard chrome plating in printing machinery’’, Thermal Spray 2001: New Surfaces for a New Millennium, 28-30.
- [32] Walser B., (2004), ‘‘The importance of thermal spray for current and future applications in key industries’’, Spraytime, 10(4), 1-7.
- [33] Dorfman M.R., Sporer, D., Meyer P., (2013), ‘‘Thermal spray technology growth in gas turbine applications’’.
- [34] Murugan M., Ghoshal A., Walock M., Bravo L.G., Koneru R., Jain N., Dorfman M., (2021), ‘‘In search of durable sandphobic thermal/environmental barrier coatings for rotorcraft gas turbine engines’’, In AIAA Scitech 2021 Forum (p. 0874).
- [35] Vaßen R., Mack D.E., Tandler M., Sohn Y.J., Sebold D., Guillon O., (2021), ‘‘Unique performance of thermal barrier coatings made of yttria-stabilized zirconia at extreme temperatures ($> 1500^{\circ}\text{C}$)’’, Journal of the American Ceramic Society, 104(1), 463-471.
- [36] Dorfman M.R., Chen D., Dwivedi G., (2018), ‘‘Similarities and Differences in the Design, Development and Commercialization of Advanced TBC’s and Environmental Barrier Coating Materials’’, in Les Rencontres Internationales De La Projection Thermique(9ript), ForschungszentrumJulich, Germany
- [37] Dorfman M.R., Gutleber J., Stapgens M., Wilson S., Zhu D., (2013), ‘‘Importance of the Powder Manufacturing Process in the Development of Robust Coating Solutions’’, in Reliability Durability and Performance Assessment of Thermal Spray Coatings Conference, GE Global Research Center, Schenectady, NY, USA
- [38] Lattime S., Steinetz B., (2002), ‘‘Turbine engine clearance control systems: current practices and future directions’’, In 38th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit (p. 3790).
- [39] Dorfman M.R., Dwivedi G., Dambra C., Wilson S., (2022), ‘‘Perspective: Challenges in the aerospace marketplace and growth opportunities for thermal spray’’, Journal of Thermal Spray Technology, 31(4), 672-684.
- [40] Thermal Spray Coating Market., (2021), ‘‘Global Market Insights. <https://www.gminsights.com/industry-analysis/thermal-spray-coatingmarket>’’.

- [41] Dorfman M.R., Sharma A., (2013), "Challenges and strategies for growth of thermal spray markets: the six-pillar plan", *Journal of thermal spray technology*, 22(5), 559-563.
- [42] Pawlowski L., (2008), "The science and engineering of thermal spray coatings", John Wiley & Sons.
- [43] Smith C.W., (1974), "The basic principles of flame spraying".
- [44] Kadyrov E., Kadyrov V., (1995), "Gas dynamical parameters of detonation powder spraying", *Journal of Thermal Spray Technology*, 4, 280-286.
- [45] Glassman I., (1977), "Combustion", New York: Academic Press.
- [46] Grasset G., (2003), "Projection thermique et codéposition électrolytique", in 1st International Meeting on Thermal Spraying, Lille, 3–4 December, pp. 197–202 unpublished conference proceedings.
- [47] Korpiola K., Hirvonen J.P., Laas L., Rossi F., (1997), "The influence of nozzle design on HVOF exit gas velocity and coating microstructure" *Journal of thermal spray technology*, 6, 469-474.
- [48] Mash D.R., Weare N.E., Walker D.L., (1961), "Process variables in plasma-jet spraying", *JOM*, 13(7), 473-478.
- [49] Okada M., (1968), "New plasma spraying and its application. *British welding journal*".
- [50] Jackson J.E., (1969), "Method of shielding gas effluent", US Patent 347.
- [51] Jager D.A., Stover D., Schlump W., (1992), "High pressure plasma spraying in controlled atmosphere up to two bar", In *Proceedings of International Thermal Spray Conference-Thermal Spray: International Advances in Coatings Technology*, (Vol. 28, pp. 69-74).
- [52] Taylor T.A., Overs M.P., Gill B.J., Tucker Jr R.C., (1985), "Experience with MCrAl and thermal barrier coatings produced via inert gas shrouded plasma deposition", *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 3(6), 2526-2531.
- [53] Meyer P.J., Hawley D., (1991), "Electro-Plasma Inc. LPPS Production Systems", *Thermal spray coatings: Properties, processes and applications*, 4-10.
- [54] Wilms V., (1980), "LPPS deposited coatings for the protection against hot gas corrosion –a first evaluation", in *Proceedings of the 9th International Thermal Spray Conference*, Nederlands Instituut voor Lastechniek, The Hague, The Netherlands, pp. 317–324.

- [55] Braguier M., Tueta R., (1980), "Supersonic and vacuum arc plasma spraying apparatus characteristics and application to metallic coatings", In Proceedings of the 9th International Thermal Spray Conference, Hague.
- [56] Pawlowski L., (1980), "The vacuum plasma sprayed copper and tantalum coatings", in Proceedings of the 9th International Thermal Spray Conference, Nederlands Instituut voor Lastechiek, The Hague, The Netherlands, pp. 299–305.
- [57] Loch M., Barbezat G., Meyer P., (2002), "Progress in the area of low pressure plasma spraying", In ITSC2002 (pp. 347-350), ASM International.
- [58] Alkhimov A.P., (1990), "A method of cold gas-dynamic deposition", In Sov. Phys. Dokl., Vol. 35, pp. 1047-1049.
- [59] Van Steenkiste T., Smith J.R., (2004), "Evaluation of coatings produced via kinetic and cold spray processes", Journal of Thermal Spray Technology, 13, 274-282.
- [60] McCune R.C., Papyrin A.N., Hall J.N., Riggs I.I., Zajchowski P.H., (1995), "An exploration of the cold gas-dynamic spray method for several materials systems (No. CONF-9509182-)", ASM International, Materials Park, OH (United States).
- [61] Yang J., Zhao X., An Y., Liu N., Zhou H., Chen J., (2014), "Effect of processing parameters on properties of plasma sprayed CuAl coating", Materials and Manufacturing Processes, 29(9), 1126-1130.
- [62] Miguel J.M., Guilemany J.M., Dosta S., (2010), "Effect of the spraying process on the microstructure and tribological properties of bronze–alumina composite coatings", Surface and Coatings Technology, 205(7), 2184-2190.
- [63] Alam S., Sasaki S., Shimura H., (2001), "Friction and wear characteristics of aluminum bronze coatings on steel substrates sprayed by a low pressure plasma technique", Wear, 248(1-2), 75-81.
- [64] Miguel J.M., Vizcaino S., Lorenzana C., Cinca N., Guilemany J.M., (2011), "Tribological behavior of bronze composite coatings obtained by plasma thermal spraying", Tribology Letters, 42, 263-273.
- [65] Christoulis D.K., Pantelis D.I., Borit F., Guipont V., Jeandin M., (2006), "Effect of substrate preparation on flattening of plasma sprayed aluminium bronze powders", Surface engineering, 22(6), 420-431.
- [67] Kim K.T., Kim Y.S., (2012), "Optimization for thermal spray process by taguchi method", Journal of Power System Engineering, 16(2), 54-59.
- [68] <https://www.oerlikon.com/metco/en/products-services/thermal-spray-equipment/thermal-spray-components/feeders/?tab=volumetric>

- [69] Ikpe A.E., Owunna I., Ebunilo P.O., Ikpe E., (2016), "Material selection for high pressure (HP) turbine blade of conventional turbojet engines", American journal of mechanical and industrial engineering, 1(1), 1-9.
- [70] Smith J., Scheibel J., Classen D., Paschke S., Elbel S., Fick K., Carlson, D., (2016), "Thermal barrier coating validation testing for industrial gas turbine combustion hardware", Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 138(3), 031508.
- [71] Gawne D.T., Christie I.R., (1992), "Surface Engineering: The discipline and the industry", Transactions of the IMF, 70(4), 184-189.
- [72] Bhowmik A.K., McCaffrey M.S., Ruskey A.M., Frischmann C., Gaffney O., (2020), "Powers of 10: seeking 'sweet spots' for rapid climate and sustainability actions between individual and global scales", Environmental Research Letters, 15(9), 094011.
- [73] Meier S.M., Gupta D.K., (1994), "The evolution of thermal barrier coatings in gas turbine engine applications".
- [74] Sampath S., Jiang X.Y., Matejcek J., Prchlik L., Kulkarni A., Vaidya A., (2004), "Role of thermal spray processing method on the microstructure, residual stress and properties of coatings: an integrated study for Ni-5 wt.% Al bond coats", Materials Science and Engineering: A, 364(1-2), 216-231.
- [75] Zagorski A.V., Stadelmaier F., (2001), "Full-scale modelling of a thermal spray process", Surface and Coatings technology, 146, 162-167.
- [76] Watson M., Gansert R., (2012), "Influence of Thermal Spray Parameters on Two-Wire Arc Aluminum Semiconductor Equipment Coatings", In ITSC 2012 (pp. 393-396), ASM International.
- [77] Zimmermann S., Mauer G., Rauwald K.H., Schein J., (2021), "Characterization of an axial-injection plasma spray torch", Journal of Thermal Spray Technology, 30(7), 1724-1736.
- [78] Mehta J., Mittal V.K., Gupta P., (2017), "Role of thermal spray coatings on wear, erosion and corrosion behavior: a review", Journal of Applied Science and Engineering, 20(4), 445-452.
- [79] Krishna L.R., Babu P.S., Tak M., Rao D.S., Padmanabham G., Sundararajan G., (2020), "Processing of ceramic and cermet composite coatings for strategic and aerospace applications", Handbook of Advanced Ceramics and Composites: Defense, Security, Aerospace and Energy Applications, 1465-1526.
- [80] Fauchais P., Montavon G., Vardelle M., Cedelle J., (2006), "Developments in direct current plasma spraying", Surface and Coatings Technology, 201(5), 1908-1921.

- [81] Fuglestad J., Lund M.T., Kallbekken S., Samset B.H., Lee D.S., (2023), ‘‘A ‘‘greenhouse gas balance’’ for aviation in line with the Paris Agreement’’, Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change, 14(5), e839.
- [82] Subramanian R., Burns A., Stamm W., (2008), ‘‘Advanced multi-functional coatings for land-based industrial gas turbines’’, In Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air, (Vol. 43116, pp. 549-558).
- [83] Wilson S., Sporer D., Dorfman M.R., (2008), ‘‘Technology advances in compressor and turbine abrasives’’, In ITSC2008 (pp. 330-335), ASM International.
- [84] Vardelle A., Moreau C., Themelis N. J., Chazelas C., (2015), ‘‘A perspective on plasma spray technology’’, Plasma Chemistry and Plasma Processing, 35, 491-509.
- [85] Dolatabadi A., Pershin V., Mostaghimi J., (2005), ‘‘New attachment for controlling gas flow in the HVOF process’’, Journal of thermal spray technology, 14, 91-99.
- [86] Rusch W., (2007), ‘‘Comparison of operating characteristics for gas and liquid fuel HVOF torches’’, Thermal Spray, 2007, 572.
- [87] Fauchais P., Vardelle A., (2012), ‘‘Thermal sprayed coatings used against corrosion and corrosive wear’’, Advanced plasma spray applications, 10, 34448.
- [88] Matikainen V., Bolelli G., Koivuluoto H., Sassatelli P., Lusvarghi, L., Vuoristo P., (2017), ‘‘Sliding wear behaviour of HVOF and HVOF sprayed Cr₃C₂-based coatings’’, Wear, 388, 57-71.
- [89] Javed M.A., Ang A.S.M., Bhadra C.M., Piola R., Neil W.C., Berndt C.C., Wade S.A., (2021), ‘‘Corrosion and mechanical performance of HVOF WC-based coatings with alloyed nickel binder for use in marine hydraulic applications’’, Surface and Coatings Technology, 418, 127239.
- [90] Lima C.R., de Souza N.F., Camargo F., (2013), ‘‘Study of wear and corrosion performance of thermal sprayed engineering polymers’’, Surface and Coatings Technology, 220, 140-143.
- [91] Joulia A., Bolelli G., Gualtieri E., Lusvarghi L., Valeri S., Vardelle M., Vardelle A., (2014), ‘‘Comparing the deposition mechanisms in suspension plasma spray (SPS) and solution precursor plasma spray (SPPS) deposition of yttria-stabilised zirconia (YSZ)’’, Journal of the European Ceramic Society, 34(15), 3925-3940.
- [92] Mihm S., Duda T., Gruner H., Thomas G., Dzur B., (2012), ‘‘Method and process development of advanced atmospheric plasma spraying for thermal barrier coatings’’, Journal of thermal spray technology, 21, 400-408.
- [93] Villafuerte J., (2010), ‘‘Recent trends in cold spray technology: looking at the future’’, Surface Engineering, 26(6), 393-394.

[94] Papyrin A., (2007), “The development of the cold spray process”, In The cold spray materials deposition process (pp. 11-42), Woodhead Publishing.

ÖZGEÇMİŞ

Tez yazarı Samet ERGÜL olarak 2014 yılında Samsun Ondokuz Mayıs Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünden mezun oldum. Profesyonel kariyerime 2015 yılında Ürün Geliştirme Mühendisi olarak Teknorot Otomotiv Ürünleri firmasında başladım. Bu rolde, yeni ürünlerin tasarımı ve geliştirilmesi süreçlerini yönettim. 2019 yılında Savunma Sanayisine geçiş yaparak TR Mekanik'te Ar-Ge Mühendisi olarak çalıştım, burada savunma teknolojileri projelerinde önemli katkılarda bulundum. 2021 yılı Temmuz ayından itibaren Türk Uçak Motor Bakım Merkezinde Kıdemli Tamir Mühendisi olarak görev yapmaktayım, havacılık sektöründe bakım ve onarım süreçlerinde uzmanlaşmaya devam ediyorum.