



**SÜPERALAŞIMLARIN VE TİTANYUM
ALAŞIMLARININ YÜKSEK HIZ OKSİJEN
YAKIT (YHOY) TERMAL SPREY YÖNTEMİ
İLE KAPLANMASI
Yüksek Lisans Tezi**

Özge BAYRAK

Eskişehir 2025

**SÜPERALAŞIMLARIN VE TİTANYUM ALAŞIMLARININ YÜKSEK HIZ
OKSİJEN YAKIT (YHOY) TERMAL SPREY YÖNTEMİ İLE KAPLANMASI**

Özge BAYRAK

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Ali Çelik

Eskişehir

Eskişehir Teknik Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Ağustos 2025

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Özge BAYRAK' ın “SÜPERALAŞIMLARIN VE TİTANYUM ALAŞIMLARININ YÜKSEK HIZ OKSİJEN YAKIT (YHOY) TERMAL SPREY YÖNTEMİ İLE KAPLANMASI” başlıklı çalışması 22/08/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından değerlendirilerek “Eskişehir Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği” nin ilgili maddeleri uyarınca, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim dalında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Unvan Adı Soyadı

İmza

Üye

: Doç. Dr. Ali ÇELİK

Üye

: Prof. Dr. Hakan GAŞAN

Üye

: Doç. Dr. Erhan AYAS

Prof. Dr. Harun BÖCÜK

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

22/08/2025

DANIşMAN ONAYI

Danişmanlığını yürüttüğüm Yüksek Lisans ęrencisi zge BAYRAK, “SüPERALAşIMLARIN VE TTANYUM ALAşIMLARININ YÜKSEK HIZ OKSJEN YAKIT (YHOY) TERMAL SPREY YNTEM İLE KAPLANMASI” başlıklı tez çalışmasını tamamlamıştır. Hazırlamış olduğu tez tarafımca incelenmiş ve öğrencinin tez savunma sınavına alınması bilimsel ve etik açıdan uygun görülmüştür.

Tez Daniřmanı

Doç. Dr. Ali ÇELİK

ÖZET

SÜPERALAŞIMLARIN VE TİTANYUM ALAŞIMLARININ YÜKSEK HIZ OKSİJEN YAKIT (YHOY) TERMAL SPREY YÖNTEMİ İLE KAPLANMASI

Özge BAYRAK

Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalı

Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Ağustos 2025

Danışman: Doç. Dr. Ali ÇELİK

HVOF termal sprey kaplama süreci, yüksek sıcaklık koşullarında çalışan parçaların aşınma direnci özelliğinin sağlanması, oksitlenme ve korozyon direncinin artırılması ve bu sayede malzemelerin ömrünü uzatmak amacıyla kullanılmaktadır. Bunun için yüksek sıcaklıklarda özelliklerini koruyabilen tungsten karbür kobalt gibi toz malzemeler yüzey uygulanmaktadır. Bu tez çalışmasında, farklı özelliklere sahip tungsten karbür kobalt tozlarının, Nikel ve Titanyum esaslı alaşımlar üzerine HVOF termal sprey kaplama çalışmaları yapılmış olup kaplanmış parçaların mikroyapı ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Çalışmada havacılık endüstrisinde kullanılan uçak motoru malzemeleri esas alınmıştır. Kaplama süreci sonrasında sertlik, mikroyapı, çekme, eğme testleri malzemelere uygulanmış, x-ışını difraksiyonu (XRD) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizleri ile detaylı olarak incelenmiş ve sonuçları değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre mikroyapının iyileştirilmesi ile mekanik özelliklerin olumlu yönde etkilendiği belirlenmiştir. Oksit ikincil fazlar, boşluklar, çatlaklar, ergimemiş tanecikler gibi mikroyapısal kusurların kaplamanın mukavemetini azalttığı bulunmuştur.

Anahtar Sözcükler: Tungsten karbür kobalt, HVOF, Inconel, Titanyum, Mikroyapı ve mekanik özellikler.

ABSTRACT

COATING OF SUPERALLOYS AND TITANIUM ALLOYS WITH HIGH VELOCITY OXYGEN FUEL THERMAL SPRAY PROCESS

Özge BAYRAK

Department of Materials Science and Engineering

Eskişehir Technical University, Institute of Graduate Programs, August 2025

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Ali Çelik

The High Velocity Oxy-Fuel (HVOF) thermal spray coating process is widely utilized to improve the wear resistance of components operating under high-temperature conditions, enhance oxidation and corrosion resistance, and thereby extend the service life of materials. To achieve this, surface coatings are applied using powder materials such as tungsten carbide-cobalt, which are capable of maintaining their properties at elevated temperatures. In this thesis, HVOF thermal spray coatings were applied using tungsten carbide-cobalt powders with varying characteristics onto nickel- and titanium-based alloys. The microstructural and mechanical properties of the coated samples were examined. The study primarily focused on materials commonly used in aircraft engine components within the aerospace industry. Following the coating process, various tests were conducted to evaluate the performance of the coatings, including hardness measurements, microstructural analysis, tensile and bending tests. Additionally, characterization techniques such as X-ray Diffraction (XRD) and Scanning Electron Microscopy (SEM) were employed for detailed analysis. The results revealed that enhancements in the microstructure had a positive effect on the mechanical properties of the coatings. However, the presence of microstructural defects such as oxide secondary phases, voids, cracks, and unmelted particles was found to significantly reduce the coating's overall strength and performance.

Keywords: Tungsten Carbide Cobalt, HVOF, Inconel, Titanium, Microstructural and mechanical properties.

TEŞEKKÜR

Öncelikle bana güvenen, inanan, desteğini hiçbir zaman esirgemeyen ve tez sürecim boyunca motivasyonumu sağlamamda öncülük eden sayın hocam Doç. Dr. Ali Çelik' e; her zaman desteğini hissettiğim, tecrübesi ve parlak fikirleriyle kariyer yolumu çizmemde yol gösterici değerli yöneticim Ümit Yusuf Öztürk'e çok teşekkür ederim. Hayatımda oldukları ve hayatıma dokundukları için kendimi çok şanslı hissediyorum.

Ayrıca bu çalışmanın gerçekleştirilmesine imkan sağlayan Eskişehir Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Malzeme Bilimi ve Mühendisliği bölümüne ve Türk Havacılık Uzay Sanayi A.Ş.'ye saygılarımı arz ederim.

Her daim yanımda olan, varlıklarıyla desteklerini hiçbir zaman eksik etmeyen canım aileme sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum.

Özge BAYRAK

22/08/2025

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmanın Eskişehir Teknik Üniversitesi tarafından kullanılan “bilimsel intihal tespit programı”yla tarandığını ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Özge BAYRAK

İÇİNDEKİLER

Sayfa

BAŞLIK SAYFASI.....	I
JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI.....	II
DANIŞMAN ONAYI	III
ÖZET	IV
ABSTRACT.....	V
TEŞEKKÜR	VI
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ.....	VII
İÇİNDEKİLER.....	VIII
TABLolar DİZİNİ	XI
ŞEKİLLER DİZİNİ	XII
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XV
1. GİRİŞ	1
2. HAVACILIK SEKTÖRÜNDE KULLANILAN PARÇALARIN KAPLAMA TEKNİKLERİ	2
2.1. Havacılık Sektöründe Kullanılan Parçaların Kaplamasında Kullanılan Fiziksel Teknikler.....	3
2.2. Havacılık Sektöründe Kullanılan Parçaların Kaplamasında Kullanılan Kimyasal Teknikler.....	3
3. HAVACILIK SEKTÖRÜNDE KULLANILAN ALAŞIMLAR	5
3.1. Titanyum (Ti6Al4V) Alaşımları	6
3.2. Inconel Alaşımları.....	9

4. HAVACILIK SEKTÖRÜNDE KULLANILAN PARÇALARIN TERMAL SPREY YÖNTEMİ İLE KAPLANMASI.....	11
4.1. Termal Sprey Kaplamanın Sınıflandırılması.....	12
4.1.1. Alev kaynaklı termal sprej prosesi	13
4.1.1.1. Detonasyon sprej (D-Gun sprej).....	13
4.1.1.2. Alev püskürtme.....	14
4.1.1.3. Yüksek hızlı oksijen yakıt (HVOF).....	17
4.1.2. Elektrik kaynaklı termal sprej prosesi.....	20
4.1.2.1. Plazma sprej.....	20
4.1.2.2. Tel ark sprej.....	21
4.1.3. Kinetik kaynaklı termal sprej prosesi.....	22
4.1.3.1. Soğuk sprej kaplama prosesi.....	22
5. HAVACILIK PARÇALARININ KAPLANMASINDA KULLANILAN TUNGSTEN KARBÜR KOBALT MALZEMELERİ	24
5.1. Tungsten Karbür Kobalt Tozunun Özellikleri	25
5.2. Tungsten Karbür Kobalt Tozunun Mikro Yapı Özellikleri	26
5.3. Tungsten Karbür Kobalt Tozunun Fazları.....	28
6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	30
6.1. Alaşımların Kaplanması.....	30
6.2. Mikroyapı ve Faz Analizi.....	31
6.3. Termal Sprej Kaplama Yapışma Mukavemeti Test Yöntemi.....	31
6.4. Vickers Sertlik Testi	33
7. SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	35
7.1. Tozların Karakterize Edilmesi	35
7.2. Inconel Malzemelerin HVOF Termal Sprej ile Kaplanması	40
7.2.1. Mikroyapısal sonuçlar	40

7.2.2. Mekanik karakterizasyon	46
7.3. Titanyum (Ti6Al4V) Malzemelerin HVOF Termal Sprey ile Kaplanması..	49
7.3.1. Mikroyapısal Özellikler.....	49
7.3.2. Mekanik karakterizasyon	54
8. GENEL SONUÇLAR İLE LİTERATÜR İLE KARŞILAŞTIRMA	58
KAYNAKÇA.....	60
ÖZGEÇMİŞ	



TABLÖLAR DİZİNİ

Sayfa

Tablo 3.1. Titanyum Alaşımlarının Karşılaştırılması [2]	7
Tablo 3.2. Sektörde genellikle kullanılan malzemelerin uygulama alanları ve alaşımın modifikasyonları [3]	8
Tablo 3.3. Inconel 718'in Kimyasal Bileşimi ve Kullanım Alanları [4]	10
Tablo 4.1. Termal Sprey Tekniklerinin Karşılaştırılması	23
Tablo 5.1. WC tanecikleri için tane boyutu aralıkları [19]	27
Tablo 7.1. Inconel 718 alaşımının kaplama süreci ile ilgili veriler.....	40
Tablo 7.2. Toz bazlı kaplanan Inconel 718 kuponlarının sertlik sonuçları	47
Tablo 7.3. Titanyum alaşımının kaplama süreci ile ilgili veriler	50
Tablo 7.4. Toz bazlı kaplama yapılan Titanyum (Ti6AL4V) kuponlarının sertlik sonuçları.....	55
Tablo 8.1. Tez sonuçları ile literatürün karşılaştırılması.....	59

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Yüzey Mühendisliği Teknikleri [1]	2
Şekil 3.1. Çekme dayanımı grafiği	7
Şekil 3.2. TEI-TS1400 Turboşaft Motoru	9
Şekil 4.1. Genel Termal Sprey Prosesi [8]	11
Şekil 4.2. Termal spreynin kaplama türlerinin sınıflandırılması [8]	12
Şekil 4.3. Termal püskürtme proseslerinin şematik sınıflandırması	13
Şekil 4.4. D-Gun prosesinin şematik diyagramı [4]	14
Şekil 4.5. Tel Alev Sprey Yöntemi [13]	15
Şekil 4.6. Toz Alev Sprey Yöntemi [13]	16
Şekil 4.7. HVOF prosesinin şematik diyagramı [10]	17
Şekil 4.8. HVOF prosesini etkileyen parametreler [16]	18
Şekil 4.9. Plazma Sprey Prosesi [13]	20
Şekil 4.10. Tel Ark Sprey Prosesi [13]	21
Şekil 4.11. Soğuk Sprey Kaplama Prosesi [10]	22
Şekil 5.1. Çeşitli toz morfolojileri. WC-Co granül kategorisine girerken, katkı imalatında kullanılan diğer birçok toz küresel veya düzensiz morfolojilere sahiptir	26
Şekil 5.2. Tipik bir WC-Co mikro yapısının çizimi. Sert bir kobalt bağlayıcı, 0,2 µm ile >5,0 µm arasında değişen boyutlardaki sert tungsten karbür taneciklerini çevreler [19]	27
Şekil 5.3. WC Faz Diagramı [19]	29
Şekil 6.1. Proses Akış Diyagramı	30
Şekil 6.2. ASTM C-633 standart test numunesi	32
Şekil 6.3. Vickers Sertlik Ölçümü	33
Şekil 6.4. Eğme Testi Ekipmanı	34

Şekil 7.1. HVOF termal kaplamada kullanılan T1 tozuna ait (a) düşük, (b) yüksek büyütmedeki mikroyapı görüntüleri ve (c) toza ait tane boyut dağılım grafiği.	35
Şekil 7.2. HVOF termal kaplamada kullanılan T2 tozuna ait (a)düşük, (b) yüksek büyütmedeki mikroyapı görüntüleri ve (c) toza ait tane boyut dağılım grafiği.	36
Şekil 7.3. HVOF termal kaplamada kullanılan T3 tozuna ait (a)düşük, (b) yüksek büyütmedeki mikroyapı görüntüleri ve (c) toza ait tane boyut dağılım grafiği.	37
Şekil 7.4. HVOF termal kaplamada kullanılan tozlara ait x-ışını grafiği.....	38
Şekil 7.5. (a) T1, (b) T2 ve (c) T3 tozlarından alınan EDX analizi spektrumu ve tozların elementel dağılımları	39
Şekil 7.6. WC-Co ikili faz diyagramı [23]	40
Şekil 7.7. T1 tozu ile kaplanan Inconel 718 malzemesinin kesitinden alınan (a) düşük (b) yüksek büyütmelerdeki mikroyapı görüntüleri	42
Şekil 7.8. T2 tozu ile kaplanan Inconel 718 malzemesinin kesitinden alınan (a) düşük (b) yüksek büyütmelerdeki mikroyapı görüntüleri	43
Şekil 7.9. T3 tozu ile kaplanan Inconel 718 malzemesinin kesitinden alınan (a) düşük (b) yüksek büyütmelerdeki mikroyapı görüntüleri	45
Şekil 7.10. Kaplama işlemi sonrasında T1, T2 ve T3 tozları ile kaplanan Inconel 718 altlık yüzeylerinden alınan XRD analizleri.....	46
Şekil 7.11. Inconel 718 altlık üzerine kaplanmış WC-Co tabakasından alınan Vickers sertlik ölçümünün temsili görüntüsü.....	47
Şekil 7.12. Inconel 718 altlık malzeme ile T1, T2 ve T3 kaplamaların bağlanma mukavemet değerleri.....	48
Şekil 7.13. T1, T2 ve T3 tozları ile kaplanan Inconel 718 plakaların eğme testi sonrası görüntüleri.....	49
Şekil 7.14. T1 tozu ile kaplanan Ti-6A-4V malzemesinin kesitinden alınan (a) düşük (b) yüksek büyütmelerdeki mikroyapı görüntüleri	51
Şekil 7.15. T2 tozu ile kaplanan Ti-6A-4V malzemesinin kesitinden alınan (a) düşük (b) yüksek büyütmelerdeki mikroyapı görüntüleri	52
Şekil 7.16. T3 tozu ile kaplanan Ti-6A-4V malzemesinin kesitinden alınan (a) düşük (b) yüksek büyütmelerdeki mikroyapı görüntüleri	53
Şekil 7.17. T1, T2 ve T3 ile kaplanan titanyum kuponlara ait XRD grafikleri.....	54

Şekil 7.18. Ti-6A-4V altlık malzeme ile T1, T2 ve T3 kaplamaların bağlanma mukavemet değerleri.....	56
Şekil 7.19. T1, T2 ve T3 tozları ile kaplanan Ti-6A-4V plakaların eğme testi sonrası görüntüleri.....	57



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

PVD :	Fiziksel Buhar Biriktirme
CVD :	Kimyasal Buhar Biriktirme
HVOF :	Yüksek Hızlı Oksi Yakıtlı Sprey
XRD :	X-ışınları Difraksiyonu
SEM :	Taramalı Elektron Mikroskobu
EDX :	Elementel Haritalama
Al :	Alüminyum
Ti :	Titanyum
Mg :	Magnezyum
Ni :	Nikel
Fe :	Demir
C :	Karbon
WC :	Tungsten Karbür



1. GİRİŞ

Havacılık sektöründe kullanılan kaplama teknikleri, metalik malzemelerin performansını ve işlevselliğini artırmada önemli bir rol oynamaktadır. Kaplama teknikleri genel olarak fiziksel ve kimyasal yaklaşımlar olarak kategorize edilebilir [1].

Havacılık endüstrisindeki hızlı büyüme, uçak yapımında kullanılan malzemelerin geliştirilmesi için zemin hazırlamıştır. Ana etken, uçak bileşenlerinin ağırlığının azaltılması ve hizmet ömrünün artırılmasıdır. Havacılık süper alaşımları genellikle döküm, işlenmiş, dövülmüş ve sinterlenmiş formlarda bulunmaktadır. Dünya çapında üretilen titanyumun yaklaşık %60' ı uçak gövdeleri, füzeler ve uzay araçları gibi hava uygulamalarındadır. Uçak motoru alaşımlarının ağırlıkça yaklaşık %50' si de nikel bazlı alaşımlardır. Termal püskürtme, kaplama malzemesinin sıcak bir gaz ortamında hızla ısıtıldığı ve aynı anda yüksek bir hızda hazırlanmış bir alt tabaka yüzeyine yansıtıldığı ve burada istenilen kaplama kalınlığını üretmek üzere biriktirildiği bir dizi işlem için kullanılmaktadır [6]. Termal Sprey Kaplama; ısı kaynağına göre alev, elektrik ve kinetik olarak sınıflandırılmaktadır [8].

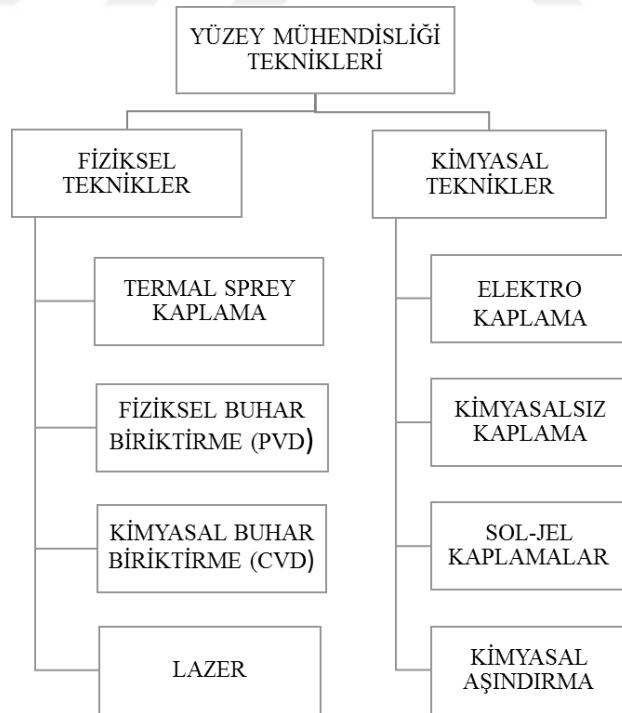
Bu tez çalışmasında, farklı boyut ve şekillere sahip tungsten karbür kobalt tozlarının, Inconel ve titanyum süperalaşımlar üzerine kaynağı alev HVOF termal kaplama çalışmaları yapılmış olup mikroyapı ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Üretilen kaplama malzemesinden elde edilen sertlik, mikro yapı, çekme, eğme testleri yapılmıştır. İleri karakterizasyon tekniklerinden X-ışınları difraksiyonu (XRD), taramalı elektron mikroskobu (SEM), elementel haritalama (EDX) analizleri ile detaylı olarak incelenmiş ve sonuçları değerlendirilmiştir.

Toz üretimi, öğütme, istenilen şekli elde etmek için tozu presleme, ön sinterleme ve ardından sinterleme olmak üzere dört aşamadan oluşur. Üretimin detaylı süreci Karbon siyahı, Tungsten karbür ve metal oksitleri karıştırılır. Karbon tungsten ile bağ yapana kadar karışım ısıtılarak tungsten karbür tozu elde edilmektedir. Toz, vaks ve kobaltla ile ardından bilyalı değirmen kullanarak iyice karıştırılmaktadır. Son toz kalıba konur ve istenen şekle preslenmektedir. Preslenmiş bileşen ardından sinterlenerek toz elde edilmektedir [19]. Bu çalışmada, tungsten karbür kobalt tozu ile HVOF termal kaplama yapılmış olup günümüzde tercih edilen başlıca tozlar arasında yer aldığı söylenebilir.

2. HAVACILIK SEKTÖRÜNDE KULLANILAN PARÇALARIN KAPLAMA TEKNİKLERİ

Yüzey mühendisliğinde kullanılan kaplama teknikleri, çeşitli endüstrilerde metalik malzemelerin performansını ve işlevselliğini artırmada önemli bir rol oynamaktadır. Kaplama teknikleri genel olarak fiziksel ve kimyasal yaklaşımlar olarak kategorize edilebilir. Fiziksel teknikler; termal püskürtme kaplamaları, fiziksel buhar biriktirme (PVD), kimyasal buhar biriktirme (CVD) ve lazer yüzey mühendisliği gibi yüzeyi değiştirmek için ısı veya enerji uygulamasını içermektedir. Bu teknikler, sertlik, yapışma ve yüzey dokusu dahil olmak üzere yüzey özelliklerinin belirli gereksinimleri karşılayacak şekilde uyarlanmasında çok yönlülük sunmaktadır. Öte yandan, elektro kaplama, elektriksiz kaplama, sol-jel kaplamalar ve kimyasal aşındırma gibi kimyasal teknikler, yüzeyin kontrollü biriktirilmesi ve kimyasal modifikasyonu için fırsatlar sunarak korozyon direnci ve işlevsellikte iyileştirmeler sağlamaktadır [1].

Kaplama teknikleri, metallerin yüzey özelliklerinin istenen özelliklere ve performansa ulaşmasında önemli bir rol oynar. Bu bölümde, metallerin yüzey mühendisliğinde kullanılan birincil fiziksel ve kimyasal teknikleri ele alınmaktadır [1].



Şekil 2.1. Yüzey Mühendisliği Teknikleri [1]

2.1. Havacılık Sektöründe Kullanılan Parçaların Kaplamasında Kullanılan

Fiziksel Teknikler

Termal püskürtme kaplamaları, yüksek hızlı termal püskürtme tabancası kullanılarak ergimiş veya yarı ergimiş malzemelerin metal yüzeye biriktirilmesini içermektedir. Yaygın olarak kullanılan malzemeler arasında seramikler, metaller ve polimerler bulunur. Ergimiş parçacıklar alt tabakaya yapışarak aşınma direnci, korozyon koruması ve termal yalıtım gibi özellikleri artıran bir kaplama oluşturur. Çeşitli termal püskürtme teknikleri arasında plazma püskürtme, alev püskürtme, yüksek hızlı oksijen yakıtlı (HVOF) püskürtme, soğuk sprey ve ark püskürtme bulunmaktadır [1].

PVD, metal yüzeylere ince filmlerin biriktirilmesini içeren vakum tabanlı bir tekniktir. İşlem, kaynak malzemelerin fiziksel buharlaşmasını ve yoğunlaşmasını kullanarak ince bir kaplama tabakasının oluşmasını sağlar. Püskürtme ve buharlaştırma gibi teknikler; metaller, seramikler ve alaşımlar gibi malzemelerin biriktirilmesinde kullanılmaktadır. PVD kaplamalar, mükemmel yapışma, sertlik ve kimyasal kararlılık sunarak aşınmaya dayanıklı ve dekoratif uygulamalar için uygun hale getirilmektedir [1].

CVD, buharlaştırılmış öncü moleküllerin reaksiyonuyla metal yüzeylere ince filmlerin biriktirilmesini sağlayan bir kimyasal tekniktir. Öncü moleküller ısıtılmış alt tabaka üzerinde ayrışarak katı bir kaplama oluşturmaktadır. CVD kaplamalar; mükemmel yapışma, bileşim ve kalınlık üzerinde hassas kontrol sergiler. Yaygın uygulamalar arasında korozyon koruması, optik kaplamalar ve yarı iletken üretimi bulunmaktadır [1].

Lazer yüzey mühendisliği teknikleri, metallerin yüzey özelliklerini değiştirmek için lazerlerin kullanımını içermektedir. Lazer yüzey işleme yöntemleri arasında lazer kaplama, lazer alaşımlama, lazer sertleştirme ve lazer yüzey dokulandırma bulunur. Bu teknikler; sertlik, aşınma direnci ve termal davranış gibi yüzey özellikleri üzerinde hassas kontrol sağlayan yerleştirilmiş bir işlem sunmaktadır [1].

2.2. Havacılık Sektöründe Kullanılan Parçaların Kaplamasında Kullanılan

Kimyasal Teknikler

Elektro kaplama, bir elektrokimyasal işlemle iletken bir alt tabaka üzerine bir metal kaplamanın biriktirilmesini içeren yaygın olarak kullanılan bir tekniktir. Alt tabaka metal iyonları içeren bir elektrolit çözeltisine daldırılır ve istenen metalin elektro

kaplamasını başlatmak için bir elektrik akımı uygulanır. Elektro kaplama, korozyon direnci, estetik ve iletkenlik gibi yüzey özelliklerinin geliştirilmesini sağlamaktadır [1].

Elektro kaplamanın aksine, elektrolitik olmayan kaplama harici bir güç kaynağına ihtiyaç duymadan bir metal kaplamanın bir alt tabakaya biriktirilmesini içeren elektrokimyasal olmayan bir işlemdir. Kaplama, kontrollü bir kimyasal indirgeme reaksiyonu ile oluşturulmaktadır. Elektrolitik olmayan kaplama, düzgün kaplama kalınlığı, mükemmel yapışma ve karmaşık şekilleri ve iletken olmayan malzemeleri kaplama yeteneği gibi avantajlar sunmaktadır [1].

Sol-jel kaplamalar, koloidal bir süspansiyon veya "sol" üretmek için metal alkoksitlerin veya metal tuzlarının hidrolizi ve yoğunlaşmasıyla oluşturulmaktadır. Sol, metal yüzeye uygulanır ve ardından kurutma ve kütleme ince bir filmin oluşumuyla sonuçlanır. Sol-jel kaplamalar; iyi yapışma, optik şeffaflık ve kimyasal direnç gibi avantajlar sunmaktadır [1].

3. HAVACILIK SEKTÖRÜNDE KULLANILAN ALAŞIMLAR

Havacılık endüstrisindeki hızlı büyüme, uçak yapımında kullanılan malzemelerin geliştirilmesi için zemin hazırlamıştır. Ana etken, uçak bileşenlerinin ağırlığının azaltılması ve hizmet ömrünün artırılmasıdır. Bu nedenle; ağırlığı azaltmak, hasar toleransını, yorulma ve korozyon direncini artırmak için optimize edilmiş özelliklerle malzemeleri iyileştirmek için çok sayıda araştırma yapılmıştır. Havacılık uygulamalarında yeni malzemelerin sürekli geliştirilmesinin temel amacı; yakıt verimliliğini, performansını artırmak ve maliyetleri düşürmektir. Havacılık uygulamaları için mühendislik malzemelerinin seçimi hem ekonomik hem de çevresel konuları etkilediğinden, bu malzemelerin üstün özelliklere sahip olması beklenmektedir. Süper alaşımlar ilk olarak 1950' lerin başında askeri gaz türbinleri için geliştirilmiştir. O zamandan beri, süper alaşımlar sürekli geliştirilmektedir ve bu alanda çok sayıda yeni malzeme üretilmiştir. Aynı zamanda, süper alaşımlar, sıcaklıkların 1200-1400 °C' ye ulaştığı jet ve roket motorlarının en güçlü parçalarında kullanılan değerli bir yüksek sıcaklık malzemesi sınıfıdır. Al, Ti, Mg ve Ni bazlı alaşımlar, üstün avantajları sayesinde havacılık endüstrisi için geliştirilebilir alaşımlar haline gelmiştir. Yüksek sıcaklığa dayanıklı alaşımlar, havacılık motoru parçalarının üretiminde kullanılan ana kaynaklardır. Bu süper alaşımlar dört ana kategoriye ayrılır: Nikel bazlı alaşımlar, kobalt bazlı alaşımlar, demir bazlı alaşımlar ve titanyum alaşımlarıdır. Demir bazlı süper alaşımlar, Fe' ye ek olarak önemli miktarda Cr, Ni ve çok az miktarda Mo veya W içermektedir. Fe bazlı süper alaşımlar ve katı çözelti takviyeli alaşımlar, yüksek sıcaklıklarda düşük mukavemetleri nedeniyle süper alaşımların en zayıflarıdır [3].

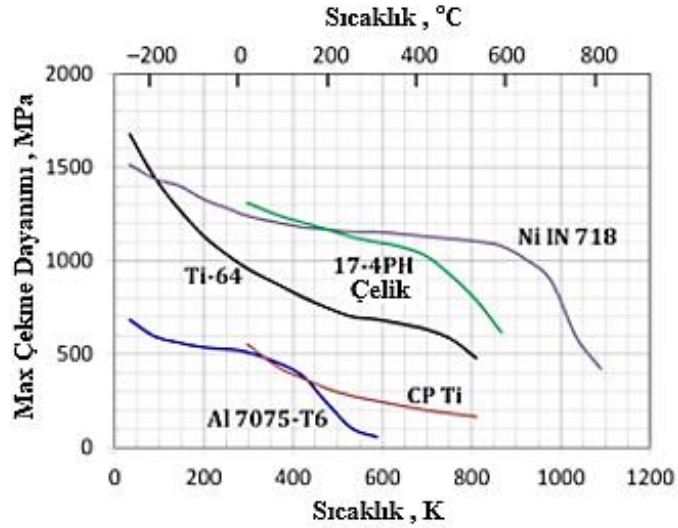
Havacılık süper alaşımları genellikle döküm, işlenmiş, dövülmüş ve sinterlenmiş formlarda bulunmaktadır. Döküm yöntemleriyle üretilen parçalar toklukla birlikte mükemmel kesme mukavemeti gösterir. Bu özellikler düşük talaş kesme nedeniyle işlenebilirlik sorunlarına neden olur. Dövme ve işlenmiş parçalar genellikle yüksek mukavemete, üstün yorulma ve kırılma direncine sahiptir. Daha karmaşık ve neredeyse net şekilli parçalar toz metalurjisi yöntemi kullanılarak üretilir. Bu üretim yöntemindeki parçalar son derece düşük işlenebilirlik sunmakta olup çok aşındırıcıdır [3].

3.1. Titanyum (Ti6Al4V) Alaşımları

Titanyum (Ti: atom numarası 22), yaklaşık %0,6 seviyesinde yer kabuğunda dokuzuncu en bol bulunan elementtir ve alüminyum, demir ve magnezyumdan sonra dördüncü en bol bulunan yapısal metaldir. Yüksek mukavemet, düşük yoğunluk, mükemmel korozyon direnci ve biyouyumluluk, titanyumu çeşitli uygulamalar için çekici kılan başlıca özelliklerdir. Örnekler arasında uçaklar (düşük yoğunlukla birlikte yüksek mukavemet), uçak motorları (yüksek mukavemet, düşük yoğunluk, yorulma ve yaklaşık 550°C' ye kadar iyi sürünme direnci), biyomedikal cihazlar (korozyon direnci, yüksek mukavemet, düşük elastik modül ve biyouyumluluk) ve kimyasal işleme ekipmanları (korozyon direnci) yer alır. Başlıca kullanımı (dünya çapında üretilen titanyumun yaklaşık %60'ı) hala uçak motorları, uçak gövdeleri, füzeler ve uzay araçları gibi hava uygulamalarıdır. Ti ve alaşımlarının bazı temel özellikleri Tablo 1' de listelenmiştir ve Fe, Ni ve Al bazlı diğer yapısal metalik malzemelerle karşılaştırılmıştır. Ti, en yüksek mukavemet-yoğunluk oranına sahip olmasına rağmen, yüksek maliyeti nedeniyle yalnızca belirli niş uygulama alanları için tercih edilen malzemedir. Bu yüksek maliyet, esas olarak titanyumun oksijenle yüksek reaktivitesinin ve yüksek hammadde maliyetinin bir sonucudur. Oksijen kontaminasyonunu önlemek için Ti metal çıkarma üretim süreçlerinin yanı sıra eritme süreçleri sırasında vakum veya inert atmosfer kullanımı gereklidir. Titanyum ile diğer havacılık metalleri arasındaki klasik karşılaştırma, Şekil 2'de gösterildiği gibi mukavemet-ağırlık oranı temelinde yapılır [1]. Ticari saflıkta (CP) titanyum ve işgücü Ti alaşımı Ti-6Al-4V (Ti-64) için sıcaklık fonksiyonu olarak çekme mukavemetleri, Şekil 3.1' de 7075-T6 alüminyum alaşımı, çökelti sertleştirmeli (PH) paslanmaz çelik (17-4PH) ve nikel bazlı süper alaşım IN718 ile karşılaştırılmıştır. Titanyumun birçok endüstriyel uygulamasının (örneğin kimyasal, petrol ve gaz vb.) birincil nedeni mukavemetten ziyade üstün korozyon direncidir [2].

Tablo 3.1. *Titanyum alaşımlarının karşılaştırılması [2]*

KARAKTERİSTİK	Ti	Fe	Ni	Al
Erime Noktası (°C)	1670	1538	1455	660
Kristal Yapı	bcc (β), hcp (α)	fcc (γ), bcc (α)	fcc	fcc
Faz Dönüşümü (°C)	882 ($\beta \rightarrow \alpha$)	912 ($\gamma \rightarrow \alpha$)	-	-
Elastiklik Modülü (GPa)	115	215	200	72
Akma Gerilimi (MPa)	1000	1000	1000	500
Yoğunluk (g/cm ³)	4.5	7.9	8.9	2.7
Isıl Genleşme Katsayısı (10 ⁻⁶ /°C)	9	11.8	13.4	23.1
Isı İletkenliği, (W/m°C)	7	80	90	237
Isı Kapasitesi (J/kg°C)	530	450	440	900
Elektriksel Direnç ($\mu\Omega m$)	1.67	0.09	0.07	0.03
Korozyon Direnci (bağıl)	Çok yüksek	Düşük	Orta	Yüksek
Oksijenle Tepkime (Bağıl)	Çok yüksek	Düşük	Düşük	Yüksek
Metal Maliyeti (Bağıl)	Çok yüksek	Düşük	Yüksek	Orta



Şekil 3.1. *Çekme dayanımı grafiği*

Tablo 3.2’ de, sektörde genellikle kullanılan malzemelerin uygulama alanları ve alaşımların modifikasyonları α , $\alpha + \beta$, β tipine göre sınıflandırılarak verilmiştir [3].

Tablo 3.2. Sektörde genellikle kullanılan malzemelerin uygulama alanları ve alaşımların modifikasyonları [3]

α Titanyum Alaşımları:	Uygulama
Ti-3Al-2.5V	Uçakların yüksek basınçlı kanal boruları bu alaşımla üretildiğinde, çelikten yapılmış borulara kıyasla %40 ağırlık tasarrufu sağlamaktadır. Bu alaşım, kabul edilebilir korozyon mukavemeti ve iyi kaynaklanabilirlik hidrolik borular üretmeye uygunluğu ile öne çıkmaktadır.
Ti-5Al-2.5Sn	İyi stabiliteye sahip kaynaklı eklemler 1000 °F’ye kadar oksidasyon direncine sahiptir. Bu da uçak ve buhar türbinleri için kanat üretimine uygun hale getirmektedir. Kriyonejik sıcaklıklara kadar sünekliğini ve kırılma tokluğunu koruyabilme yeteneği, bu alaşımların uzay aracının turbo pompasında H2 depolamak için kullanılmasına olanak tanımaktadır.
Ti-6-2-4-2	Boeing 757 uçağının RB211-535-E4 motorunu, ara parçalarını, kanatlarını ve kompresör disklerini üretmek için kullanılmaktadır.
Ti-5.5Al-3.5Sn-3Zr-1Nb-0.25Mo-0.3Si	
$\alpha + \beta$ Titanyum Alaşımları:	Uygulama
Ti-6Al-4V	Gövde parçalarında kullanılan toplam Ti hacminin yaklaşık %80’i bu alaşımdan üretilmektedir. Ayrıca, jet motoru bileşenleri ve uçak gövdelerinde miktar olarak büyük bir paya sahiptir. Kokpit camlarında, ihtiyaç duyulan darbe direnci bu dövme alaşım tarafından sağlanmaktadır.
β Titanyum Alaşımları	Uygulama
Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn	Boeing 777’de boru hatları malzemesi almakta ve gövde daha hafif olmaktadır. Bu alaşımdan üretilen yaylar, çeliğe göre daha hafif, daha az hacme ve daha fazla korozyon dayanımına sahiptir.

- **α Titanyum Alaşımları:**

Buradaki α -stabilizatör elementlerin miktarı α - α alaşımları ve süper α alaşımları olarak iki sınıfa ayrılır. Uçaklarda kullanılan motor parçalarında α -Ti alaşımlarının kullanılmasının önemli nedeni, çoğu ısı işlem sırasında mukavemetlerini koruyabilmeleridir.

- **$\alpha + \beta$ Titanyum Alaşımları:**

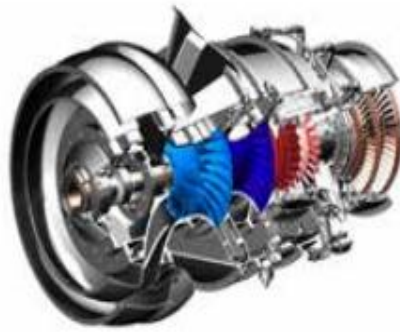
$\alpha + \beta$ titanyum alaşımlarının kırılma tokluğu, mükemmel kesme mukavemeti, sünekliği α -Ti alaşımlarından daha iyidir. Bu alaşımların çekme ve yorulma mukavemeti Ti-Ti alaşımlarından daha iyidir.

- **β Titanyum Alaşımları:**

Isıl işlem yoluyla $\beta + \text{Ti}$ alaşımlarının mekanik özelliklerinde meydana gelen mikro yapısal değişiklikler, malzemenin uçak gövdesi parçalarına uymasını sağlamaktadır. Özellikle $\alpha + \beta$ fazındaki Ti alaşımları, süper elastikiyet ve şekil hafızası, yalnızca biyo-uygulamalarda değil, aynı zamanda otomotiv ve havacılık gibi farklı endüstrilerde de giderek daha değerli özellikler haline gelmiştir. Diğer malzemelerle karşılaştırıldığında, geleneksel yöntemlerle üretilen titanyum bazlı süper alaşımlar, nispeten yüksek maliyetleri ve zayıf işlenebilirlikleri nedeniyle üretimde nispeten sınırlıdır [30]. Titanyum içeren katkı üretim teknolojilerinde giderek daha fazla sayıda özel malzeme elde edilebilmektedir. Ti6Al4V alaşımı genellikle EBM (elektron ışınli eritme) teknolojisi kullanılarak katkısız imalat parçalarının üretiminde kullanılmaktadır [3].

3.2. Inconel Alaşımları

Yüksek sıcaklıklarda yüksek mekanik ve kimyasal özelliklerini koruyabilme yeteneği, süper alaşımları jet motorlarının döner ve sabit bileşenlerinde kullanım için mükemmel bir malzeme haline getirmektedir. Süper alaşımlarla üretilen bileşenler, geleneksel çelikten üretilen bileşenlerden daha hafiftir. Bu, daha az yakıt ekonomisi ve kirlilikte azalma anlamına gelmektedir. Uçak motoru alaşımlarının ağırlıkça yaklaşık %50' si nikel bazlı alaşımlardır. Bu alaşımlar, daha yüksek yoğunluğa sahip çelikten daha yüksek bir mukavemet / ağırlık oranı sunmaktadır. Süper alaşımlar, yüksek sıcaklık direnci, tokluk ve oksitleyici ortamlara karşı direnç kombinasyonuna sahip olağanüstü bir metal sınıfıdır.



Şekil 3.2. TEI-TS1400 Turboşaft Motoru

Nikel bazlı süper alaşımlar genellikle motor parçalarında, örneğin motor kompresör disklerinde, türbin disklerinde, yatak parçalarında, gövdede, kanatçıklarda ve diğer çalışan parçalarda uygulanmaktadır. Bu bağlamda, gelişmiş gaz türbini motorlarının, sivil havacılıktaki yaşam döngüsü maliyetlerine olan talebi karşılamak için giderek daha yüksek yakıt bütçesi seviyelerine, daha düşük NO_x emisyonlarına, daha düşük gürültüye ve birim ağırlığa ulaşması muhtemeldir. Bu zorluklar kaçınılmaz olarak yüksek basınçlı kompresör ve türbin disk rotorlarının daha yüksek sıcaklıklara ve gerilimlere dayanabilen malzemelerden yapılmasını gerektirir. Bu kritik parçaların üretiminde yüksek mukavemetli nikel bazlı süper alaşımlara ihtiyaç duyulur, çünkü yanlış malzeme seçimi yolcuların ve uçağın güvenliğini tehdit edebilir. Kimyasal bileşim açısından, bazı nikel bazlı alaşımlar şu şekilde sınıflandırılabilir: (i) ticari olarak saf Ni; (ii) Ni-Cu alaşımları; (iii) Ni-Mo alaşımları; (iv) Ni-Cr-Mo alaşımları ve (v) Ni-Cr-Fe alaşımlarıdır [3].

Bir uçak motorunun %50' si, en yaygın kullanılan Ni-Fe-Cr alaşımı olan Inconel 718' den yapılır. Döküm ve işlenmiş nikel bazlı alaşımlar için yıllık üretim hacminin sırasıyla %25 ve %45' ini oluşturur. Nikel bazlı süper alaşımlar, mevcut endüstriyel uçaklardaki motor ağırlığının %40-50' sini kapsar ve özellikle çalışma sıcaklıkları 1250 °C' yi aşan yanma ve türbin segmentlerinde kullanılır [3].

Tablo 3.3. *Inconel 718'in Kimyasal Bileşimi ve Kullanım Alanları [4]*

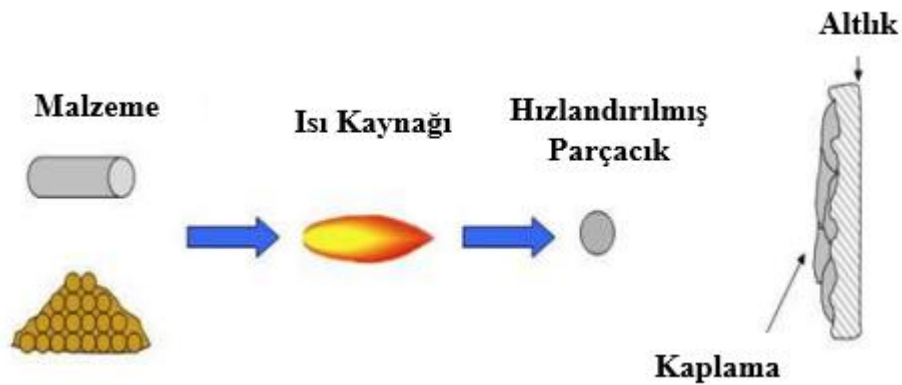
Süperalaşımın Adı	Kimyasal Bileşimi (Ağırlıkça) %	Kullanım Alanları
Inconel 718	Ni 53, Cr 19, Co 1, Mo 3, Ti 1, Nb 4	Jet motoru, gaz türbini operasyonları

4. HAVACILIK SEKTÖRÜNDE KULLANILAN PARÇALARIN TERMAL SPREY YÖNTEMİ İLE KAPLANMASI

Termal sprey kaplama yöntemleri toz veya tel halinde bulunan kaplama malzemelerinin yakıcı, taşıyıcı ve yanıcı gazlarla birlikte bir püskürtme tabancası yardımıyla püskürtülerek altlık malzeme üzerinde biriktirilip, koruyucu tabakanın elde edilmesi prensibine dayanmaktadır. Termal sprey kaplama; çeşitli metallerin, seramiklerin, polimerlerin ve kompozitlerin aşınmaya, korozyona, yıpranmaya, yüksek sıcaklığa, kimyasallara ve erozyona karşı koruma sağlamak amacıyla hemen hemen her metale uygulanabildiği çok yönlü ve potansiyel olarak uygun maliyetli bir teknolojidir [5].

Termal püskürtme, kaplama malzemesinin sıcak bir gaz ortamında hızla ısıtıldığı ve aynı anda yüksek bir hızda hazırlanmış bir alt tabaka yüzeyine yansıtıldığı ve burada istenilen kaplama kalınlığını üretmek üzere biriktirildiği bir dizi işlem için kullanılmaktadır [6].

Toz, tel veya çubuk formunda malzemelerin bir ısı kaynağı (plazma, ark, alev) ile kısmen veya tamamen ergitilmesi ve hızla yüzeye püskürtülmesi ile katmanlar halinde kaplama tabakası oluşturulmaktadır (Şekil 4). Ergimiş damlacıkların daha soğuk yüzeye çarpması üzerine damlacıklar yüzeye yapışan ince lameller parçacıklara dönüşür, üst üste biner ve birbirine kenetlenir ve ardından katılaşır [7].



Şekil 4.1. Genel Termal Sprey Prosesi [8]

Termal sprey kaplama işleminin üretim hızı ve yapışma gücü diğer kaplama işlemlerine kıyasla çok yüksektir. Düşük maliyet, çok yönlülük, yüksek işlem hızı gibi çeşitli avantajları nedeniyle, en yaygın olarak uçak motorlarında, termik santrallerde,

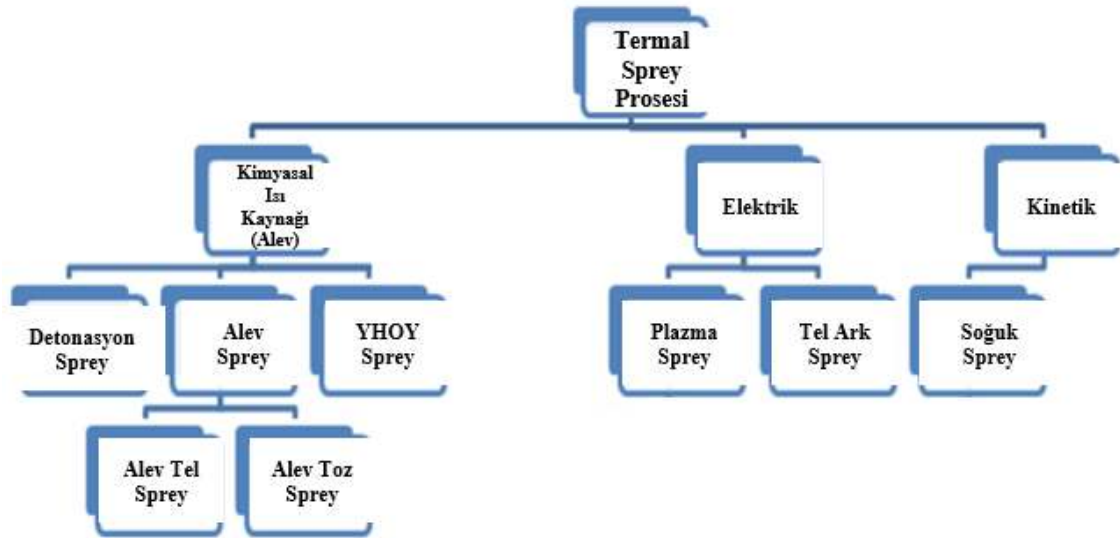
köprülerde, foto kimya endüstrisinde, otomotiv sistemlerinde, kimyasal işlem ekipmanlarında, kalıplarda, deniz türbinlerinde, güç üretim ekipmanlarında kullanılmaktadır [8].

Bu teknoloji ile her metalin aşınmış parçaları da yeniden inşa edebilir elle veya robotlarla, sahada veya fabrikada uygulanabilir. Bu kabiliyetler; parça ömrünü artırmış, verimliliği iyileştirmiş ve onarım maliyetlerini düşürmektedir [5].

İlk termal püskürtme işlemi (alev püskürtme) 1911'de İsviçre' de M.U. Schoop tarafından icat edilmiştir. Tel püskürtme, D-Gun püskürtme işlemi (R.M. Poorman, H.B. Sargent ve H. Lamprey tarafından icat edilmiş olup 1955' te patentlenmiştir. HVOF (G.H. Smith, J.E Pelton ve R.C. Eschenbach tarafından icat edilmiştir ve 1958' de patentlenmiştir. Plazma sprej kaplama ise (R.M. Gage, O.H. Nestor ve D.M. Yenni tarafından icat edilmiş ve 1962' de patentlenmiştir) [9].

Termal Sprej Kaplama; Şekil 5 'te de görüldüğü gibi ısı kaynağına göre alev, elektrik ve kinetik olarak sınıflandırılmaktadır.

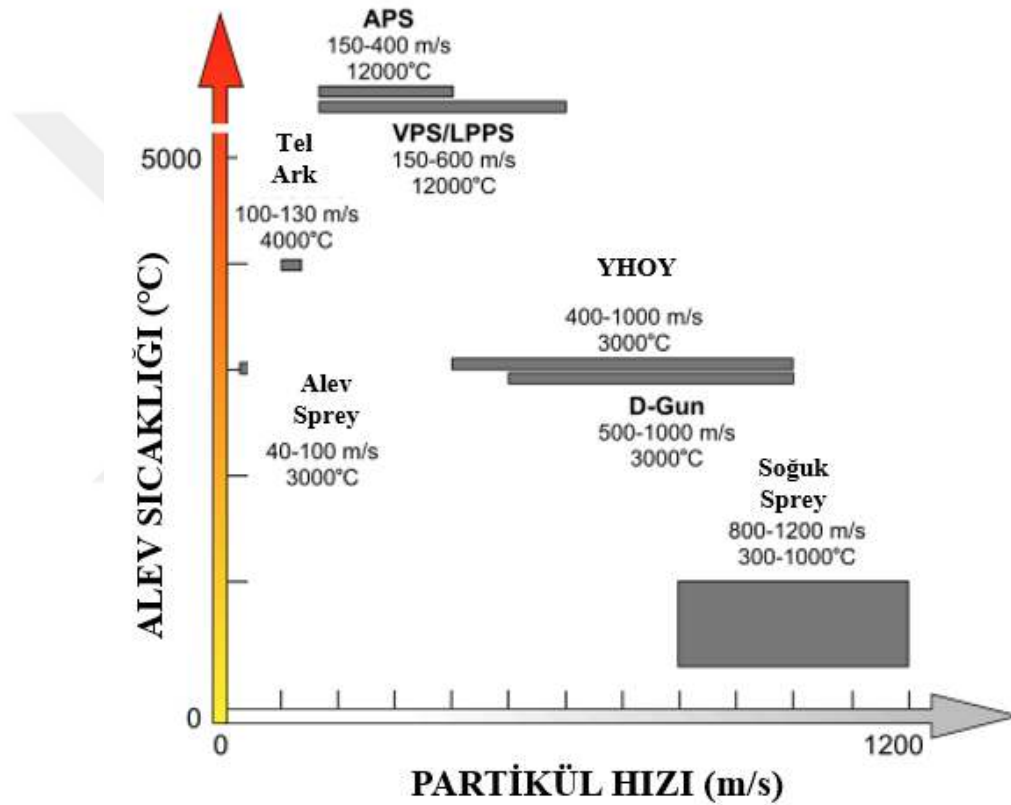
4.1. Termal Sprej Kaplamanın Sınıflandırılması



Şekil 4.2. Termal sprej kaplama türlerinin sınıflandırılması [8]

Alevin termal ve kinetik enerjisi, yakıt gazı ve oksijenin yanma karışımlarıyla veya bir elektrik güç kaynağı kullanılarak üretilmektedir. Enerji kaynağına göre, termal püskürtme yöntemleri: plazma püskürtme yöntemleri (atmosferik plazma APS, vakum plazma VPS ve düşük basınçlı plazma LPPS), yanma alev püskürtme yöntemleri (alev

püskürtme), yüksek hızlı oksijen/hava-yakıt yöntemleri (HVOF/HVAF), elektrik ark yöntemleri (tel ark), patlama yöntemi (D-Gun) ve en son teknoloji olarak soğuk gaz yöntemleridir (CGS). Alevin sıcaklığı, püskürtülecek uygun malzemeler üzerinde güçlü bir etkiye sahiptir. Seramik kaplamalar esas olarak atmosferik plazma püskürtme yöntemi kullanılarak üretilirken, sermetler gibi sıcaklığa duyarlı malzemeler daha düşük alev sıcaklığına sahip yöntemlerle püskürtülür. Şekil 6' da çeşitli püskürtme sistemleri için ortalama çalışma aralıkları gösterilmektedir.



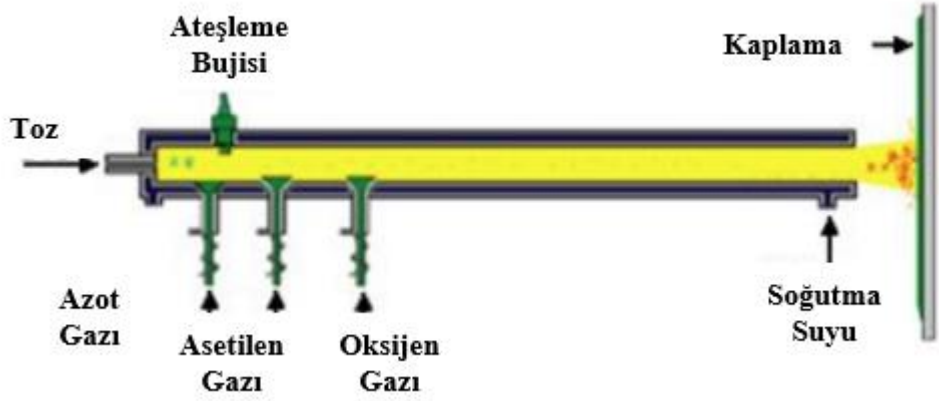
Şekil 4.3. Termal püskürtme proseslerinin şematik sınıflandırması

4.1.1. Alev kaynaklı termal sprej prosesi

4.1.1.1. Detonasyon sprej (D-Gun sprej)

D-gun püskürtme işlemi, oldukça iyi yapışma gücüne sahip termal püskürtme işlemidir. Bu işlemde bir kaplama tozu ve oksijen (O_2) ve asetilen gazı (C_2H_2) karışımı, bir ucu kapalı, diğer ucu açık olan boru şeklindeki bir namludan beslenmektedir. Gaz karışımını ateşlemek için buji kullanılır. Geri tepmeyi önlemek amacıyla, gaz girişlerini örtmek için azot gazı (N_2) kullanılır. Gaz karışımının yanması nedeniyle, gaz akımı boyunca yayılan yüksek basınçlı şok dalgaları (patlama dalgası) oluşturur. Sıcak gazlar

parçacıkları süpersonik hıza çıkarır. Bu parçacıklar daha sonra namludan çıkar ve manipülâtör tarafından tutulan alt tabakaya çarparak bir kaplama oluşturmaktadır.

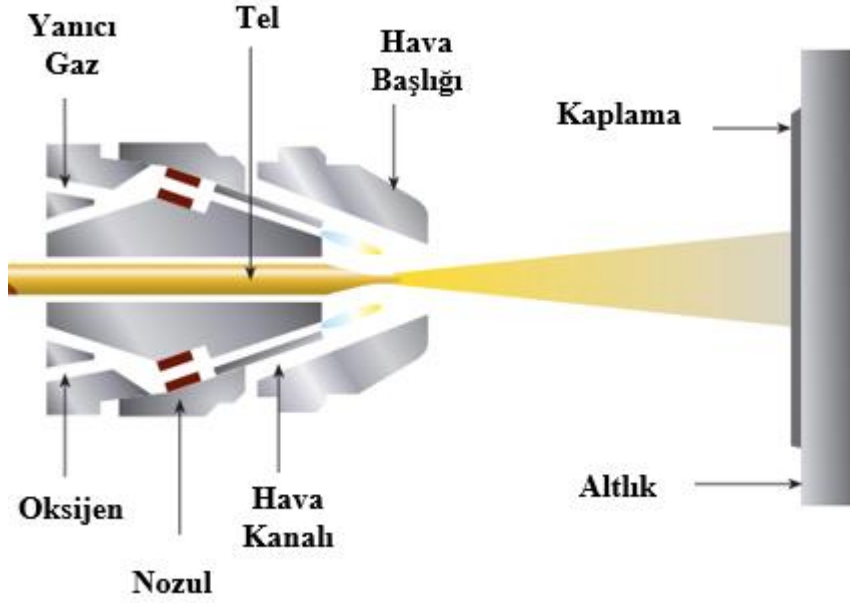


Şekil 4.4. D-Gun prosesinin şematik diyagramı [4]

4.1.1.2. Alev püskürtme

Alev püskürtme, düşük sermaye yatırımı, yüksek verimlilik ve biriktirme oranları ve göreceli işletme kolaylığı ve ekipman bakım maliyeti ile karakterize edilen termal püskürtme süreçlerinin en eskisidir. Alev püskürtme, kaplama malzemesini eritmek için ısı kaynağı olarak yanıcı gaz kullanır. Bu süreç kullanılarak kaplamalar olarak çok çeşitli malzemeler çubuk, tel veya toz formunda biriktirilebilir. Alev püskürtme tabancaları ve bileşenlerin büyük çoğunluğu elle püskürtülür [8]. Alev püskürtme sürecinin şematik diyagramı Şekil 8 ve 9’ da gösterilmiştir.

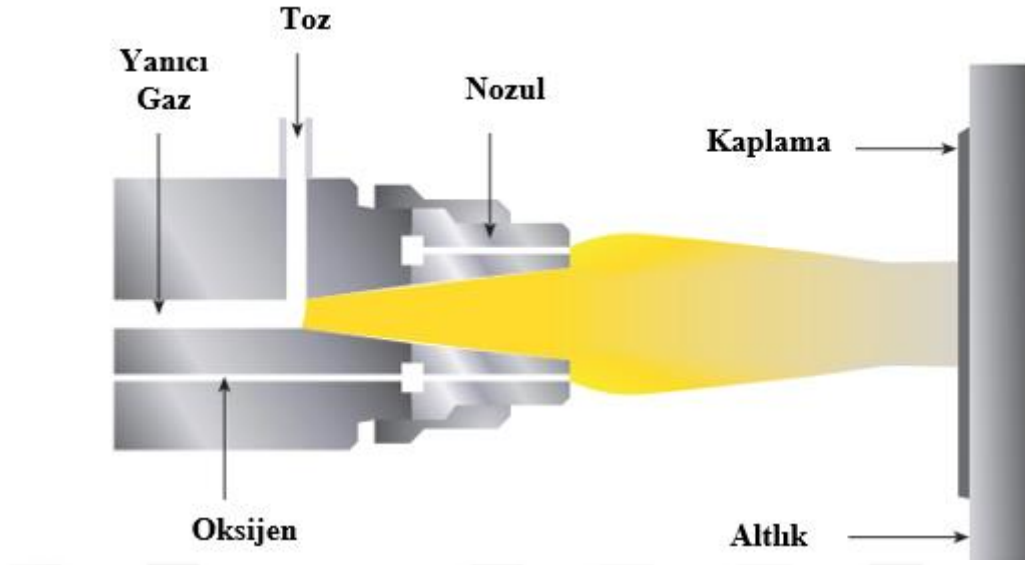
Asetilen, propan, metil-asetilen-propadien (MAPP) gazı ve hidrojen, oksijenle birlikte yaygın olarak kullanılan alev püskürtme gazlarıdır. Alev sıcaklıkları ve özellikleri oksijen-yakıt gazı oranına ve basınca bağlıdır [7].



Şekil 4.5. Tel Alev Sprey Yöntemi [13]

Tel püskürtme işleminde, tel püskürtme malzemesi gaz halindeki oksijen-yakıt alevinde eritilmektedir. Yakıt gazı asetilen, propan veya hidrojen olabilir. Tel, aleve eş merkezli olarak beslenir, burada eritilir ve ergimiş malzemeyi iş parçası ya da altlık yüzeyine yönlendiren basınçlı havanın eklenmesiyle atomize edilmektedir [13].

Tel alev püskürtmede, alevin birincil işlevi hammadde malzemesini eritmektir. Daha sonra bir hava akımı ergimiş malzemeyi atomize eder ve iş parçasına doğru iter. Paslanmaz çelik gibi malzemeler için püskürtme oranları 0,5 ila 9 kg/saat (1 ila 20 lb/saat) aralığındadır. Yine, çinko ve kalay alaşımları gibi daha düşük erime noktasına sahip malzemeler çok daha yüksek oranlarda püskürtülür. Alev eritme için gereken aşırı enerji girişi nedeniyle alt tabaka sıcaklıkları genellikle 95 ila 205 °C (200 ila 400 °F) arasında değişir. Çoğu termal püskürtme işleminde, giriş enerjisinin %10' undan daha azı hammadde malzemesini eritmek için kullanılır [11] [12].

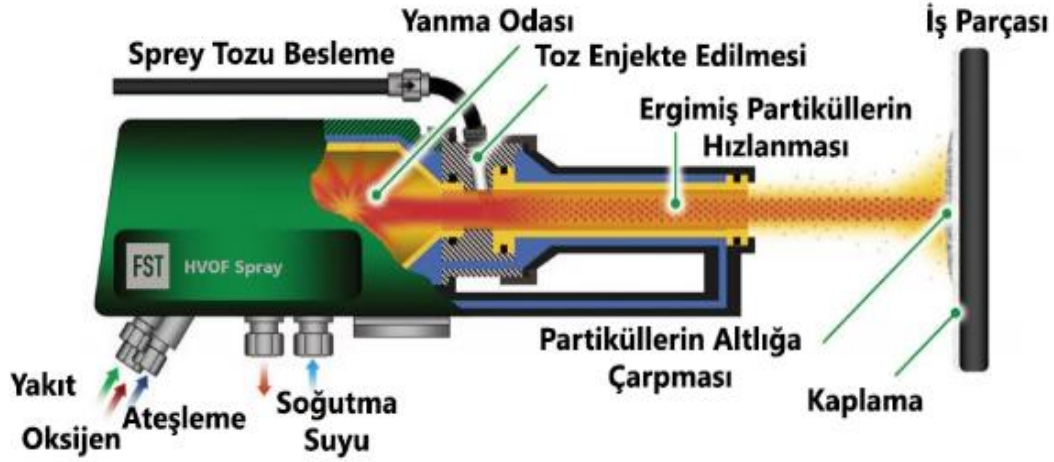


Şekil 4.6. *Toz Alev Sprey Yöntemi* [13]

Bu kaplama işlemi, tel alev püskürtme işlemiyle aynı çalışma prensibine dayanmaktadır, tek fark kaplama malzemesinin bir püskürtme tozu olmasıdır. Bu nedenle, tüm püskürtme malzemeleri tel formunda üretilmediğinden daha geniş bir püskürtme malzemesi seçeneği mevcuttur [13].

Alev tozu işleminde, toz haline getirilmiş besleme stoğu oksijen yakıtlı alevle aspire edilir, eritilir ve alev ve hava jetleri tarafından iş parçasına ya da altlığa taşınır. Parçacık hızı nispeten düşüktür (<100 m/s) ve tortuların bağ mukavemeti genellikle daha yüksek hızdaki işlemlerden daha düşüktür. Gözeneklilik yüksek olabilir ve kohezyon mukavemeti de genellikle daha düşüktür. Püskürtme oranları genellikle düşük erime noktalı malzemeler hariç tüm malzemeler için 0,5 ila 9 kg/saat (1 ila 20 lb/saat) aralığındadır, bunlar önemli ölçüde daha yüksek hızlarda püskürtülür. Alt tabaka yüzey sıcaklıkları alev çarpması nedeniyle oldukça yüksek olabilir [11] [12].

4.1.1.3. Yüksek hızlı oksijen yakıt (HVOF)



Şekil 4.7. HVOF prosesinin şematik diyagramı [10]

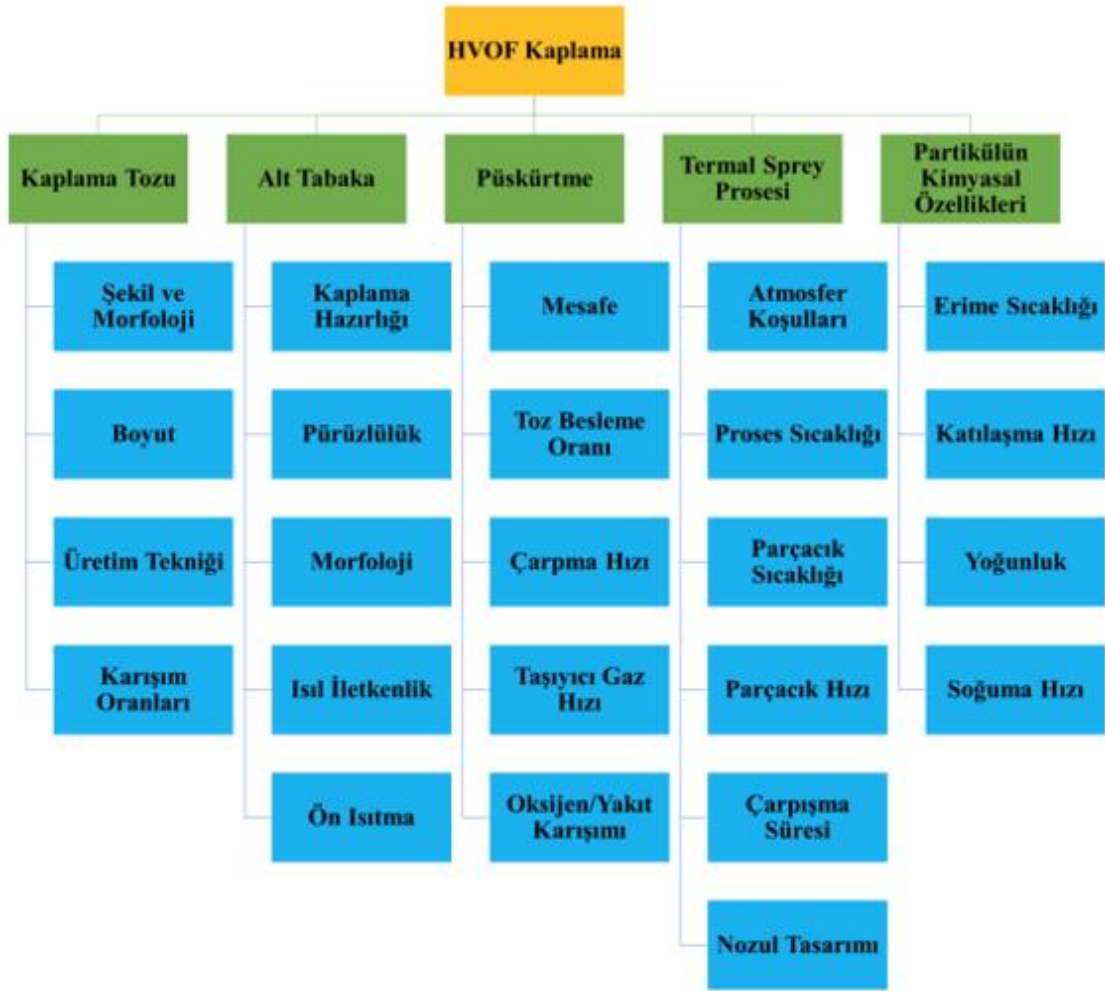
Yüksek hızlı oksijen yakıt spray veya sektörde HVOF olarak adlandırılan kaplama teknolojisi sert krom kaplamaların yerini almaya başlamıştır. Yüksek hızlarda püskürtme kabiliyeti ile sermet kaplamalar üretilmektedir. Proses yoğun bir sıvı/gaz yakıt ve oksijen akışı sağlamaktadır. Bu nedenle proses maliyetleri artmaktadır. HVO (oksijen) F prosesler yerini HVA (hava) F prosesine bırakması gündemdedir. Oksijen yerine hava kullanımı ile kaplama üretim maliyetleri önemli ölçüde düşürmekte ve kaplama performansını artırmaktadır [15].

HVOF (Yüksek hızlı oksijen-yakıt) püskürtme, düşük gözeneklilik ve yüksek yapışma özelliğine sahip kaplama üretmek için tercih edilen yöntemlerdir. HVOF püskürtmede, hidrojen, kerosen, propan, propilen, doğal gaz, etilen veya asetilen gibi oksijen ve yakıt karışımının yakılmasıyla ısı üretilir. Özel nozul tasarımı sayesinde süpersonik hızda bir jet üretilir. Düşük miktarda bozunma, metalik malzemelerin oksidasyonu ve faz dönüşümleri ile yoğun kaplamalar üretme yeteneği, HVOF prosesinin temel özelliğidir. Bunun nedeni, parçacıkların nispeten soğuk bir alevde kısa kalma süresidir. Sermet ve metal kaplamalar üretmek için yaygın olarak kullanılır, ancak HVOF prosesinin yoğun seramik kaplamalar biriktirebildiği de gösterilmiştir [14].

HVOF prosesinde, yakıt ve oksijen püskürtme tozuyla birlikte yanma odasına sokulur. Gazların yanması, odada yüksek bir sıcaklık ve yüksek basınç üretir ve bu da gazların nozuldaki süpersonik akışına neden olur. Toz parçacıkları yanma odasında ve nozuldaki geçerken erir veya kısmen erir. Alev sıcaklığı, yakıt, yakıt gazı/oksijen

oranına ve gaz basıncına bağlı olarak 2500 °C ile 3200 °C aralığında değişir. HVOF prosesinde, parçacıklar alev sıcaklığına, parçacık kalma süresine, malzeme erime noktasına ve termal iletkenliğe bağlı olarak tamamen veya sadece kısmen erir [14].

HVOF kaplama prosesini etkileyen parametreler Şekil 4.8’ de verilmiştir.



Şekil 4.8. HVOF prosesini etkileyen parametreler [16]

HVOF prosesinde kullanılan başlıca ekipmanlar

HVOF püskürtme tabancası; metaller, alaşımlar, süper alaşımlar ve karbürlerin yüksek bütünlükteki kaplamalarını üretmek için geliştirilmiştir. Yakıt olarak Hidrojen kullanılmaktadır. Tabanca ile püskürtülen kaplamalar yüksek yoğunluk, düşük oksit içeriği, iyi mikro sertlik ve mükemmel işlenebilirlikle yüksek bağ mukavemetleri sergilemektedir. Enjekte edilen püskürtme malzemesinin düzgün bir şekilde ısıtılmasını sağlayan yüksek basınçlı bir alev üretmek için oksijen, yakıt gazı (Hidrojen) ve hava kullanılmaktadır. Gaz akışı, nozul aracılığıyla süpersonik hızlara çıkarılır ve gaz akışı toz

parçacıklarını alt tabakaya doğru iter. Tek tek parçacıklar çarpma sırasında plastik olarak deforme olur ve kaplamayı alt tabakaya sıkıca bağlar. Bu kaplamalar çok yoğundur, düşük gözenekliliğe, öngörülebilir kimyasallara ve ince, homojen mikro yapılara sahiptir. Eksenel toz enjeksiyonu, kaplama malzemesini alevin merkezine odaklayarak, genişletilmiş hava başlığının duvarlarında kaplama malzemesi birikimini azaltır ve nozul aşınmasını en aza indirir. Bu tabancalar, yüksek basınçta çalıştığından; kontrolörler ve toz besleyiciler HVOF işlemi için özel olarak tasarlanmıştır [17].

Toz besleme, termal püskürtme uygulamaları için özel olarak tasarlanmış basınçlı bir ünedir. Tüm toz bazlı termal püskürtme işlemleri için ekonomik bir toz besleyicidir. Besleyici, toz diskinin hızıyla toz besleme hızını doğrudan kontrol eden hacimsel bir prensiple çalışmaktadır. Çalışma sırasında toz diskindeki yuvalar tozla dolar. Yerçekimi, taşıyıcı gaz ve toz diskinin dönüşü; tozu toz hortumuna iletir. İnert bir taşıyıcı gaz, tozu termal püskürtme tabancasına taşır [17].

Parçaların, HVOF kaplama prosesi sırasında ısınmaması için soğutma nozulları kullanılmaktadır. Soğutma nozullarının optimum hizalanması için ayrı ve hareketli bir direğe monte edilmiştir. Her soğutma nozulu ayrı bir manuel valf ile açılıp kapatılabilir. Harici soğutma jetlerine ve tabancaya monte edilmiş soğutma jetlerine sağlanan soğutma havası beslemesi manuel bir anahtar ile açılıp kapatılabilir veya robot programının bir parçası olarak robot tarafından otomatik olarak kontrol edilebilmektedir [17].

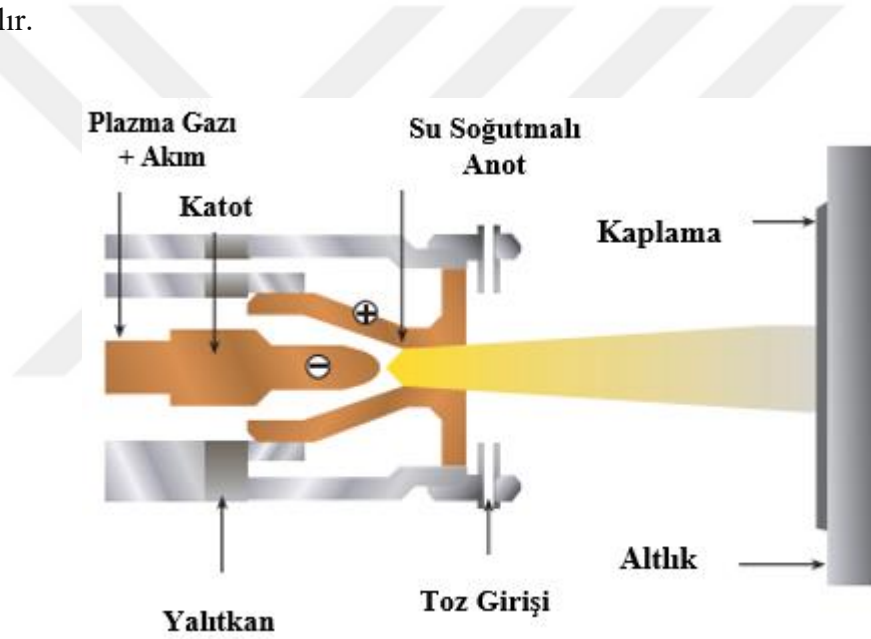
Özelleştirilmiş kabinler, modüler panel tasarımıyla inşa edilmiştir. Her panel, galvanizli yumuşak çelik dış levha ile delikli çelik iç astar arasına yerleştirilmiş farklı yoğunluklarda ses emici malzemelerden oluşan bir paketle sandviç yapıdan üretilmiştir. Kabin, tek veya çift kanatlı kapı veya üstten vinç kullanılarak parçaların kolayca yüklenmesi için sürgülü üstten kapılarla donatılabilir. Kapılar, içerideki gürültünün dayanıklı olmasını sağlamak için sıkı bir şekilde kapatılmıştır. Kapılar ve duvarlar, emniyetli ve gölgeli camlı pencerelere sahip olabilir. Kabin, egzoz kanalları, elektrik kabloları vb. için gereken tüm penetrasyon geçişlerine sahiptir. Kabin panelleri ve kapıları, kopma gürültüsünü en aza indirecek şekilde inşa edilmektedir [17].

4.1.2. Elektrik kaynaklı termal sprej prosesi

4.1.2.1. Plazma sprej

En olgun ve çok yönlü termal püskürtme yöntemlerinden biridir. Bu işlemde, püskürtme ısı kaynağı olarak işlev gören yüksek sıcaklıkta iyonize plazma gazı akışı oluşturmak için bir DC elektrik arkı kullanılmaktadır [8].

Bir anot ile bir tungsten katot arasında yüksek frekanslı bir ark tutuşturulur. Elektrotlar arasından akan gaz (yani He, H₂, N₂ veya karışımları) iyonize olur ve böylece birkaç santimetre uzunluğunda bir plazma alevi oluşur. Alev sıcaklığı 16000° K'ye kadar ulaşabilir. Sprey malzemesi, tabanca nozulunun dışında bir toz olarak plazma alevine enjekte edilir, burada eritilir ve gaz tarafından alt tabaka yüzeyine fırlatılır.



Şekil 4.9. Plazma Sprej Prosesi [13]

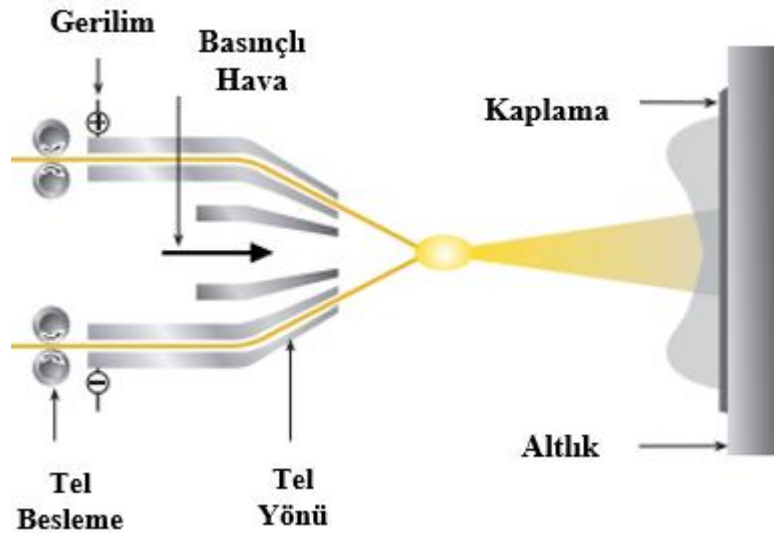
Geleneksel plazma püskürtme işlemi, genellikle hava veya atmosferik plazma püskürtme (APS) olarak adlandırılır. Toz ısıtma bölgesindeki plazma sıcaklıkları, bilinen herhangi bir malzemenin erime noktasının önemli ölçüde üzerinde olan yaklaşık 6000 ila 15.000 °C (11.000 ila 27.000 °F) arasındadır. Plazmayı üretmek için, genellikle argon veya argon-hidrojen karışımı olan bir inert gaz, bir DC arkı ile aşırı ısıtılır. Toz hammaddesi, inert bir taşıyıcı gaz aracılığıyla sokulur ve plazma jeti tarafından iş parçasına ya da altlığa doğru hızlandırılır. Alt tabaka sıcaklıklarını 95 ila 205 °C (200 ila 400 °F) aralığında tutmak için püskürtme hızını soğutma veya düzenleme gerekebilir. Ticari plazma püskürtme tabancaları 20 ila 200 kW aralığında çalışır. Buna

göre, püskürtme oranları büyük ölçüde tabanca tasarımına, plazma gazlarına, toz enjeksiyon şemalarına ve malzeme özelliklerine, özellikle boyut, dağılım, erime noktası, morfoloji ve görünür yoğunluk gibi parçacık özelliklerine bağlıdır [12].

Vakum plazma püskürtme (VPS), yaygın olarak düşük basınçlı plazma püskürtme (LPPS, Sulzer Metco'nun tescilli ticari markası) olarak da adlandırılan 10 ila 50 kPa (0,1 ila 0,5 atm) aralığındaki basınçlarda bir odada modifiye edilmiş plazma püskürtme meşaleleri kullanılmaktadır. Düşük basınçlarda plazma çap ve uzunluk olarak büyür ve yakınsak/ıraksak nozulların kullanımıyla daha yüksek bir gaz hızına sahip olur. Oksijenin olmaması ve daha yüksek alt tabaka sıcaklıklarıyla çalışabilme yeteneği, çok daha düşük oksit içeriğine sahip daha yoğun, daha yapışkan kaplamalar üretir [12].

4.1.2.2. Tel ark sprey

Elektrik ark tel püskürtme ile, genellikle aynı bileşime sahip iki zıt yüklü metal telin temasıyla bir ark oluşmaktadır. Bu, tel malzemesinin ucunda erimeye yol açmaktadır. Hava, ergimiş püskürtme malzemesini atomize eder ve alt tabakaya doğru hızlanır. Püskürtme oranı, eridikçe tel beslemesinin uygun şekilde düzenlenmesiyle ayarlanır, böylece sabit bir ark sağlanabilir.



Şekil 4.10. Tel Ark Sprey Prosesi [13]

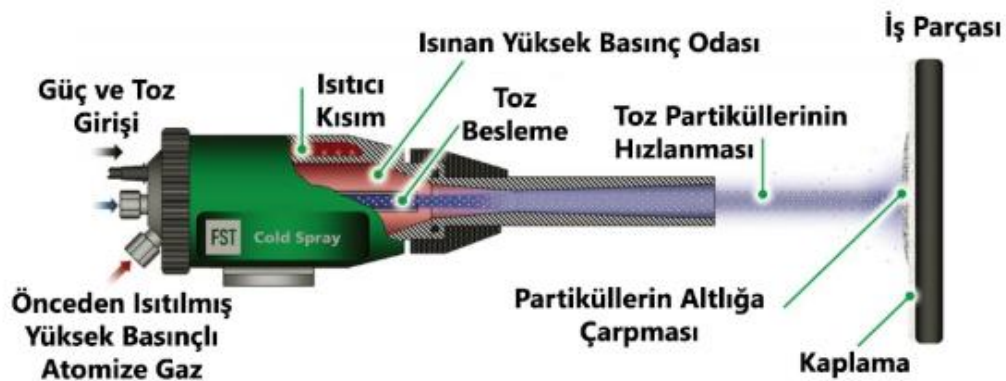
Elektrik ark püskürtme işleminde, yüksek akımlı doğru akım (DC) güç kaynağına bağlı iki tüketilebilir tel elektrot tabancaya beslenir ve bir araya gelerek aralarında

tellerin uçlarını eriten bir ark oluşturur. Ergimiş metal daha sonra atomize edilir ve bir hava akımıyla alt tabakaya doğru itilir. İşlem enerji açısından verimlidir çünkü tüm giriş enerjisi metali eritmek için kullanılır. Püskürtme oranları öncelikle çalışma akımıyla yönlendirilir ve hem erime noktası hem de iletkenliğe bağlı olarak değişir. Genellikle bakır bazlı ve demir bazlı alaşımlar gibi malzemeler 4,5 kg (10 lb)/100 A/h hızında püskürtülür. Çinko 11 kg (25 lb)/100 A/h hızında püskürtülür. Alt tabaka sıcaklıkları çok düşük olabilir çünkü alt tabakaya sıcak gaz jeti yönlendirilmez. Elektrik ark püskürtme ayrıca inert gazlar kullanılarak veya kontrollü atmosfer odasında da gerçekleştirilebilir [12].

4.1.3. Kinetik kaynaklı termal sprej prosesi

4.1.3.1. Soğuk sprej kaplama prosesi

Ergitme olmaksızın çok daha yüksek hızlarda püskürtme kabiliyetine sahip termal sprej kaplama yöntemi soğuk (kinetik) sprej kaplama olarak adlandırılmaktadır. Genel olarak metalik (Al, Cu, Ni, Ti, Ta, Zn, Ag, Co, Nb ve alaşımları ve belirli metal matrisli kompozitler: Al-SiC gibi) esaslı toz parçacıklar sprej tabancasından ses hızına yakın hızlarda püskürtülerek termal sprej kaplama yöntemleri arasında en hızlı püskürtme kabiliyetine sahip yöntemlerin başındadır. Kinetik enerji ile kaplama tabakaları oluşturulmaktadır [18].



Şekil 4.11. Soğuk Sprej Kaplama Prosesi [10]

Soğuk püskürtme, sünek metallerin toz halindeki hammaddelerinin, işlem gazı olarak azot veya helyum kullanılarak 300 ila 1200 m/s (985 ila 3940 ft/s) hızlarda uygulandığı bir malzeme biriktirme işlemidir. İşlem, nozuldaki genişletilmiş gaz

ve parçacık akışının nispeten düşük sıcaklıkları (0 ila 800 °C veya 32 ila 1470 °F) nedeniyle genellikle "soğuk gaz-dinamik püskürtme" olarak adlandırılmaktadır. 14 kg/saate (30 lb/saate) kadar toz besleme hızları mümkündür [12].

Günümüzde kullanılan termal sprej tekniklerinin karşılaştırılması Tablo 4.1' de verilmiştir.

Tablo 4.1. *Termal Sprej Tekniklerinin Karşılaştırılması*

Özellikler	Ark Sprej	Alev Sprej	Plazma Sprej	HVOF
Termal Kaynak	Elektik Ark	Gaz ($O_2 + C_2H_2$, $O_2 + H_2$)	Plazmanın arkı	Gaz ($H_2/C_3H_8/LPG$)
Partikül Sıcaklığı	5000 °C'ye kadar	3000 °C'ye kadar	16000 °C'ye kadar	3000 °C'ye kadar
Partikül Hızı	150-300 m/s	40-150 m/s	150-600 m/s	800-1000 m/s
Max Sprej Oranı	150 kg/hr'e kadar	32 kg/hr'e kadar	3000 kg/hr'e kadar	20 kg/h
Sprej Mesafesi	15-25 cm	10-20 cm	14-20 cm	15-20 cm
Toz Giriş	5-10 kW	100-200 kW	200 kW'a kadar	50 kW'a kadar
Hava Akış Hızı	60 m ³ /h'e kadar	70 m ³ /h'e kadar	5.4 m ³ /h'e kadar	3-4.2 m ³ /h'e kadar
Çekme Mukavemeti	Yüksek	Mükemmel	Orta	İyi
Sertlik	Yüksek	İyi	Orta	Mükemmel

5. HAVACILIK PARÇALARININ KAPLANMASINDA KULLANILAN TUNGSTEN KARBÜR KOBALT MALZEMELERİ

Yapışık tungsten karbür, sert malzeme parçacıkları ve yumuşak bağlayıcının birleşimi nedeniyle büyük aşınma direnci sunar ve tungsten karbürü nozullar, kesme takımları, matkap uçları vb. gibi geniş uygulama yelpazesine sahip en eski ve en önemli toz metalurji ürünlerinden biri yapar. WC' de aşınma özellikleri daha önemlidir. Sertlik ve elastiklik modülü, sürtünme ve aşınma arasındaki ilişki mikroyapı üzerinde araştırılabilir [19].

Temel olarak, toz üretimi, öğütme, istenilen şekli elde etmek için tozu presleme, ön sinterleme ve ardından sinterleme olmak üzere dört aşamadan oluşur. Üretimin detaylı süreci Karbon siyahı, Tungsten karbür ve metal oksitleri karıştırılır. Karbon tungsten ile bağ yapana kadar karışım ısıtılarak tungsten karbür tozu elde edilmektedir. Toz, vaks ve kobaltla ile ardından bilyalı değirmen kullanarak iyice karıştırılmaktadır. Son toz kalıba konur ve istenen şekle preslenmektedir. Preslenmiş bileşen ardından sinterlenerek toz elde edilmektedir [19].

Kobalt, yapışma özellikleri nedeniyle tungsten karbür için en yaygın kullanılan bağlayıcıdır. Kobalt, 4170 °C 'nin altındaki sıcaklıklarda kararlı olan altıgen paketlenmiş form ve 1495 °C'ye kadar kararlı olan yüz merkezli kübik form olmak üzere iki allotropik formda bulunur. Kobaltın erime noktası Tungsten karbür tungsten, karbonla birleşerek 24 GPa'lık maksimum mikro sertliğe sahip iki karbür WC ve 30 GPa'lık mikro sertliğe sahip W₂C oluşturur. Saf WC, standart atmosfer koşulları altında erimez, ancak W-C faz diyagramında görüldüğü gibi yaklaşık 27800 °C'nin üzerindeki bir sıcaklıkta sıvı bir faza ve grafitte ayrışmaktadır [19].

Tungsten karbür-kobalt (WC-Co), sermet olarak bilinen bir seramik ve metal kompozit türüdür. WC-Co, yüksek yoğunluğu, sertliği, kırılma tokluğu ve eğilme mukavemeti ile bilinmektedir. Bu da onu kesici takımlar, aşındırıcılar ve zırh delici mermiler için ideal hale getirmektedir. WC-Co, bu durumda tungsten karbür olan sert karbürlerden, sünek bir metal bağlayıcı (Co) matrisinde oluşur. WC fazı, yüksek sertlik ve elektrik iletkenliği sağlar. Sert faz/metalik bağlayıcı oranı ve işleme parametreleri aracılığıyla mikro yapıyı uyarlayarak WC-Co parçalarında çok çeşitli özellikler elde edilebilir. WC Co'nun mekanik özelliklerini uyarlama yeteneği, onu çok çeşitli uygulamalar için uygun hale getirmektedir. WC-Co parçaları geleneksel olarak presleme, ekstrüzyon veya kalıplama işlemi ve ardından sıvı faz sinterlemesi yoluyla

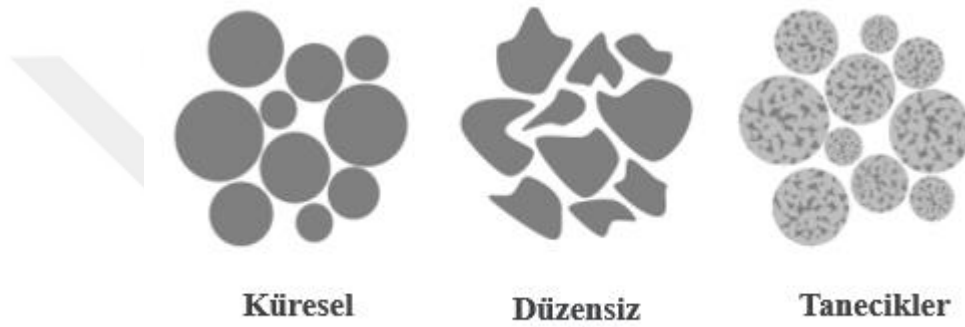
üretir ve bu da parçaların kalıp kapasiteleri tarafından belirlenen birçok geometride yapılmasına olanak tanır. WC-Co tozu, parçaların şekillerini korumasına yardımcı olmak için biçimlendirmeden önce bir plastikleştirici ile karıştırılır. Toz sıkıştırma yüksek basınçlarda gerçekleşir ve yeşil bir parça ile sonuçlanır. Ek işleme genellikle bir kalıp kullanılarak elde edilemeyen geometriler elde etmek için yeşil parçalar üzerinde yapılır. Yeşil parçalar daha sonra bir ön sinterleme ve son bir sıvı faz sinterleme işleminden geçirilir. Sinterleme sırasında, ergimiş kobalt sıvı faz olarak oluşur ve WC tanelerinin yüzeyini ıslatarak onları kısmen çözer. WC çözüldükçe yer değiştirir ve orijinal WC tanesinin yüzeyine yeniden çöker ve bağlayıcı matris olarak Co ile üç boyutlu bir WC iskeleti oluşturur [19].

5.1. Tungsten Karbür Kobalt Tozunun Özellikleri

Nanokristalin WC-Co tozu, WC-Co sert metal parçalarının üretiminde kullanılan ham maddedir. Tozlardaki WC' nin tane boyutları, nihai WC-Co parçalarının mikro yapısı ve özelliklerinde büyük bir rol oynar. Toz, yüksek enerjili bilyalı öğütme, yerinde karbürizasyon, plazma sentezi, kimyasal sentez, kimyasalsız kaplama ve püskürtme dönüşüm süreçleri dahil olmak üzere çeşitli yöntemler kullanılarak nano taneli WC ve kobalt metalden sentezlenir. WC-Co tozunun ince taneli yapısına rağmen, yüksek yoğunluklu nihai parçalar, yüksek sıcaklıkta sıvı faz sinterleme gereksinimi nedeniyle mikron ölçeğinde WC tanelerine sahiptir. Endüstride, püskürtme dönüşüm süreçleri yaygın olarak kullanılır. Bu yöntem, küçük WC tane boyutunu korurken birkaç adımda yüksek saflıkta tozlar üretebilir. İşlem, daha sonra öncül tozlar oluşturmak için püskürtülerek kurutulan W, Co ve C karışık bir çözeltisinin hazırlanmasıyla başlar ve daha sonra nanokristalin WC-Co kompozit tozunun sentezlendiği sürekli bir indirgeme-karbürizasyon sürecinden geçirilir. Elde edilen tozdaki WC ve Co moleküler düzeyde karıştırılarak amorf bir karbür tozu elde edilir. Endüstride kullanılan bir diğer yaygın toz sentez yöntemi, elementel WC ve Co' nun karıştırıldığı ve 10-120 saat boyunca bilyeli öğütüldüğü yüksek enerjili bilyeli öğütmedir. Öğütme ortamı WC-Co' dan yapılmamışsa bu yöntem potansiyel olarak kirlenmeye neden olabilir. Öğütme işlemi, tekrarlanan deformasyon, kırılma ve soğuk kaynak yoluyla WC' nin tane boyutunu azaltmaya yardımcı olur [19].

Sentezlenen WC-Co tozunu şekillendirmeye hazırlamak için, toz parçacıkları tipik olarak 15 ila 45 mm arasında olan daha büyük küresel parçacıklara, tipik olarak bir vaks

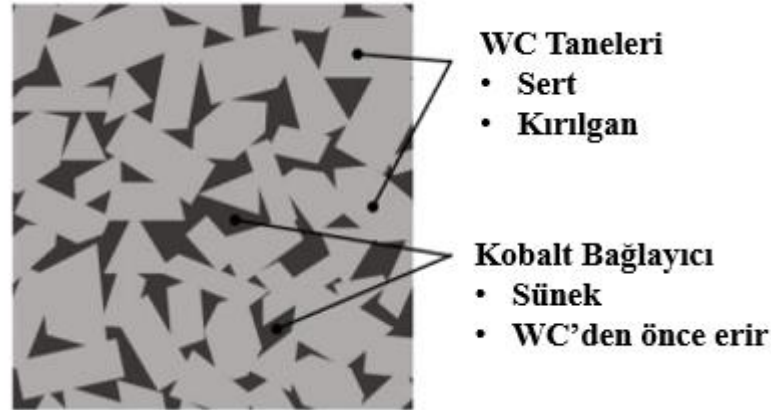
olan bir plastikleştirici ile aglomere edilir. Elde edilen granüller kapalı gözeneklere ve çok düşük yoğunluğa sahiptir, bu da onları şekillendirilebilirliğin kolaylığı nedeniyle toz metalurjisi teknikleri için ideal hale getirir. Ancak, katkı maddesi imalatında, hammadde tozunun düşük yoğunluğu, yüksek yoğunluklu son parçalar elde etmek için bir zorluk teşkil eder. Şekil 15, katkı maddesi imalatında kullanılan küresel veya düzensiz tipik metal tozlarının ve parçalanabilen ve yalnızca yüzey kuvvetleriyle bir arada tutulan WC-Co tozunun küresel granüllerinin bir karşılaştırmasını göstermektedir [19].



Şekil 5.1. Çeşitli toz morfolojileri. WC-Co granül kategorisine girerken, katkı imalatında kullanılan diğer birçok toz küresel veya düzensiz morfolojilere sahiptir.

5.2. Tungsten Karbür Kobalt Tozunun Mikro Yapı Özellikleri

WC-Co mikro yapısı, kobalt metal matrisi küçük fazı ile çevrili tungsten karbür tanelerinden oluşur (Şekil 16), bu da onu benzersiz bir malzeme sınıfı yapar. WC-Co mikro yapıları tipik olarak WC tane boyutu ve Co içeriği ile tanımlanır ve parça özellikleri bu iki faktörden büyük ölçüde etkilenir. Tipik olarak, WC tane boyutu mikron boyut aralığındadır ancak 0,5 μm 'nin altındaki "ultra ince"den 5,0 μm 'nin üzerindeki "ekstra kaba"ya kadar değişebilir. Tablo 19, tane boyutu tanımlamasının çeşitli kategorilerini ayrıntılı olarak açıklamaktadır [19].



Şekil 5.2. Tipik bir WC-Co mikro yapısının çizimi. Sert bir kobalt bağlayıcı, $0,2 \mu\text{m}$ ile $>5,0 \mu\text{m}$ arasında değişen boyutlardaki sert tungsten karbür taneciklerini çevreler [19]

WC/WC temasları mikro yapıda bir iskelet oluşturur ve bu temasların mikro yapıdaki oranı bitişiklik olarak bilinir. Bağlayıcı hacim oranı, WC iskeletinin varlığı nedeniyle karışım kuralına göre basitçe belirlenemez. Tipik kobalt bağlayıcı içeriği %2 ile %18 ağırlık arasındadır. Bağlayıcı hacim oranı Co içeriğiyle orantılıdır ve bağlayıcının ortalama serbest yolundan ve ortalama WC tane boyutundan hesaplanabilir.

Tablo 5.1. WC tanecikleri için tane boyutu aralıkları [19]

Tane Boyutu Tanımı	Boyut Aralığı (μm)
Ultra İnce	0.2-0.5
Alt Mikron	0.5-0.9
İnce	1.0-1.3
Orta	1.4-3.4
İri Taneli	2.5-5.0
Extra İri Taneli	>5.0

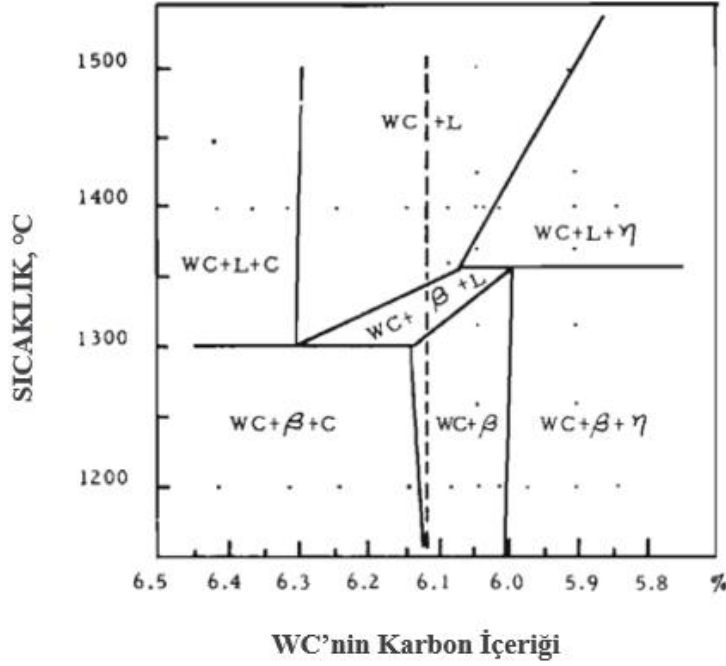
WC-Co tane boyutu ve bağlayıcı içeriği, kenar çizgisi tokluğu, yığın tokluğu, sertlik ve termal iletkenlik gibi özellikleri belirler. WC tane boyutu mikron ölçeğine düşürüldüğünde, aşınma direnci ve sertliğin arttığı gözlemlenir. Tane boyutu nano ölçeğe doğru daha da düşürüldüğünde, sertlik, mukavemet ve tokluk daha da artırılabilir. Genel bir kural olarak; sertlik ve aşınma direnci azalan tane boyutuyla artarken, tokluk artan Co içeriğiyle azalmaktadır. Hem sinterleme parametreleri hem de kobalt konsantrasyonu WC tane boyutu ve büyümesinde rol oynar. Tane boyutunu

kontrol etmenin bir başka yöntemi de alaşıma bir tane büyüme inhibitörü eklemektir; bu da WC tane şeklini değiştirir. Bu genellikle mikro yapıda karbür oluşturan V, Ti, Cr, Ta, Mo veya Nb gibi bir elementtir. Vanadyum en etkili tane büyümesi inhibitörüdür, ancak VC WC tane sınırı köşelerinde çöktüğünde gevrekleşmeye neden olabilir. Ti' nin tane büyümesini engellemenin yanı sıra tane boyutunu dengelediği bulunmuştur. Korozyon direnci Cr ilavesiyle etkilenebilir. Tane büyümesi inhibitörlerinin kullanımı ve etkileri hala tam olarak anlaşılmadığından bu alanda çok fazla çalışma vardır [19].

5.3. Tungsten Karbür Kobalt Tozunun Fazları

WC-Co, WC' nin C içeriği %6,12 'ye yakın olduğunda ideal olarak iki fazdan oluşur: hekzagonal WC taneleri ve Co bağlayıcı. Ancak, işleme parametrelerine bağlı olarak karbon konsantrasyonu değişebilir. Bu farklılık, üçüncü bir fazın oluşmasıyla sonuçlanır. Karbon açığı durumunda, kırılğan bir M_6C , η fazı oluşur ve fazla karbon durumunda, yumuşak grafit formları oluşur. Bu fazlardan herhangi birinin varlığı, malzeme performansına zarar verir ve istenen uygulamalar için işe yaramaz hale getirir. Çoğu zaman, η fazı Co_2W_4C veya Co_3W_3C olarak oluşur.

η fazı, karbon içeriğine ve sinterleme sıcaklığına bağlı olarak iki farklı morfolojiye sahiptir. Faz diyagramının WC + L + η bölgesinde sinterlemenin meydana geldiği durumlarda, η fazı ince düzensiz bir şekilde kendini gösterir. Ancak, faz diyagramının WC + L bölgesinde sinterlemeden oluşan η fazı, sonunda oktahedral bir şekle sahip büyük bir taneye dönüşen dendritik büyüme gösterir. Bu η fazı, diğer alaşım elementlerine dayalı olarak değişen bileşim ve kafes parametresine sahip M_6C tipidir.



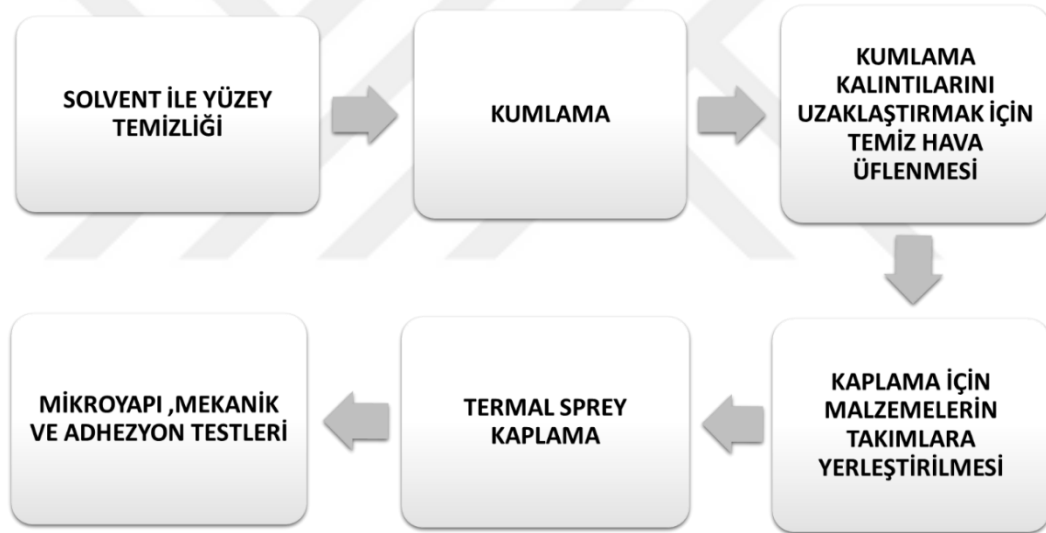
Şekil 5.3. WC Faz Diagramı [19]

Sinterleme sırasında WC %6,00' dan az at.C içerdiğinde Eta fazı oluşur. Bu konsantrasyonda, η fazı düşük sıcaklıkta bile kalacaktır. Ancak, konsantrasyon %6,00 ile 6,06 at.C arasında hafifçe artırılırsa, η fazı söndürme sırasında ortaya çıkacaktır. η fazı, kontrollü yavaş soğutma ile oda sıcaklığında önlenabilir ve bu da fazın ayrışmasına neden olur [33]. Sinterleme sıcaklığı ve ısıtma programı, %6,00 ile 6,06 at.C arasında C içeriğine sahip alaşımlar için de bir rol oynar. 1370 °C civarındaki sıcaklıklarda, β fazı mikro yapı boyunca daha büyük bölümlerde mevcuttur. Ancak, sinterleme sıcaklığı 1500 °C' ye yaklaştıkça, η fazı bir ağ şeklinde tane sınırları boyunca çöker. İlginç bir şekilde, η fazının varlığının şekillendirme işlemleri sırasında sıkıştırma basıncından etkilendiği de gösterilmiştir. Daha yüksek bir sıkıştırma basıncı daha az η fazının oluşmasına neden olur ve soğuk izostatik presleme kullanıldığında η fazı oluşmaz. Sıkıştırma basıncı ile η fazı oluşumu arasındaki ters ilişki, daha yüksek basınçla sıkıştırılan numunelerde oluşan serbest yüzeylerdeki azalmadan kaynaklanır. Serbest yüzey alanı azaltılarak, karbonun oksijenle temas halinde olduğu alan azalır ve oksijenle reaksiyon nedeniyle kaybedilen karbon miktarı azalır. Sonuç olarak, C içeriği korunur ve C' de bir eksiklik olmadan η fazı oluşamaz [19].

6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

HVOF termal sprey kaplama prosesinde kullanılan tozlar, yüksek sıcaklıklarda aşınma direnci özelliğini sağlaması ve oksitlenme korozyon direnci sayesinde ısınan ve aşınan yüzeyleri korumak, malzemelerin ömrünü uzatmak amacıyla kullanılmaktadır.

Bu tez çalışmasında, içerik ve morfolojik olarak farklı özelliklere sahip WC-Co esaslı tozlar ile (T1, T2 ve T3 olarak gösterilecektir); havacılık sektöründe yaygın olarak kullanılan Inconel 718 süperalaşımı ve Titanyum alaşımı (Ti6Al4V) malzemeler termal sprey kaplama yöntemi ile kaplanmıştır. Termal sprey kaplama prosesi ile 3 farklı toz 2 farklı altlık üzerine aynı koşullarda uygulanmış, elde edilen kaplamaların mikroyapısal ve mekanik özellikleri ortaya konulmuştur. HVOF termal sprey kaplama öncesi ve sonrasında uygulanan süreç aşamaları Şekil 6.1’ de verilen akış diyagramında görülmektedir.



Şekil 6.1. Proses Akış Diyagramı

6.1. Alaşımların Kaplanması

İlk olarak; malzeme yüzeyinde yağ, gres, toz olmasının engellenmesi ve kaplamanın daha iyi tutunması için solvent ile numuneler temizlenmiştir. Sonrasında yüzeyin kaplamaya hazırlanması amacıyla, yüzeye kumlama işlemi uygulanmıştır. Burada amaç yüzey pürüzlülüğünü arttırarak kaplamanın bağlanma mukavemetini arttırmaktır. İşlem sonrasında kumlamadan kalan artık tozlar basınçlı hava ile malzemelerden uzaklaştırılmıştır. Kumlamadan sonra malzemeler belirlenen tozlar ile kaplanmıştır. Termal sprey kaplama işlemine başlanılmadan, malzeme üzerindeki nemi

gidermek için ön ısıtma yapılmıştır. Gaz akış hızları, sprej mesafesi, sprej açısı ve besleme hızı gibi kaplama parametreleri optimize edildikten sonra özellikleri farklı 3 farklı WC-Co tozu ile kaplama işlemi gerçekleştirilmiş olup, işlemde termal sprej kaplama tabancası kullanılmıştır. Çalışmada Inconel 718 ve Ti-6Al-4V alaşımları altlık olarak kullanılmış ve elde edilen kaplama özellikleri incelenmiştir.

6.2. Mikroyapı ve Faz Analizi

Kaplanan altlıklar metalografik numune hazırlama yöntemleri ile incelenmek üzere hazırlanmıştır. İlk olarak kesme işlemi uygulanmış, sonrasında numuneler sıcak kalıplanarak metalografik parlatma işlemine uygun hale getirilmiştir. Parlatma termal sprej kaplama uygulanmış numunelerin mikroyapı analizleri ve sertlik ölçümleri için oldukça önemlidir. Numuneler öncelikle zımparalama, sonrasında ise parlatma işlemlerinden geçirilerek mikroyapı analizi için hazır hale getirilmiştir.

Mikroyapısal analizler taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve bu mikroskoba bağlı ikincil elektron (SE) ve geri yansıya elektron (BE) detektörleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Numunelerdeki elementel dağılım ise aynı mikroskoba bağlı enerji dağılım x-ışını spektrometresi (EDX) ile belirlenmiştir. Numune içeriğindeki fazlar Rigaku Miniflex marka, hedef metali bakır olan bir X-ışını tüpünden üretilen ($\text{CuK}\alpha=1,54 \text{ nm}$) x-ışınları ile ($2\theta = 10-90^\circ$) taranarak bulunmuştur.

6.3. Termal Sprej Kaplama Yapışma Mukavemeti Test Yöntemi

Inconel 718 süper alaşımlı numunelerde; mikro yapı, eğme ve sertlik özelliklerinin incelenmesinde AMS 5596 Inconel alaşımlı dikdörtgen 1 x 3 boyutunda (en x uzunluk) malzemeler kullanılmıştır. Çekme testinde ise AMS 5662 Inconel malzemesi 1 inc (25,4 cm) çapında numuneler kullanılmıştır.

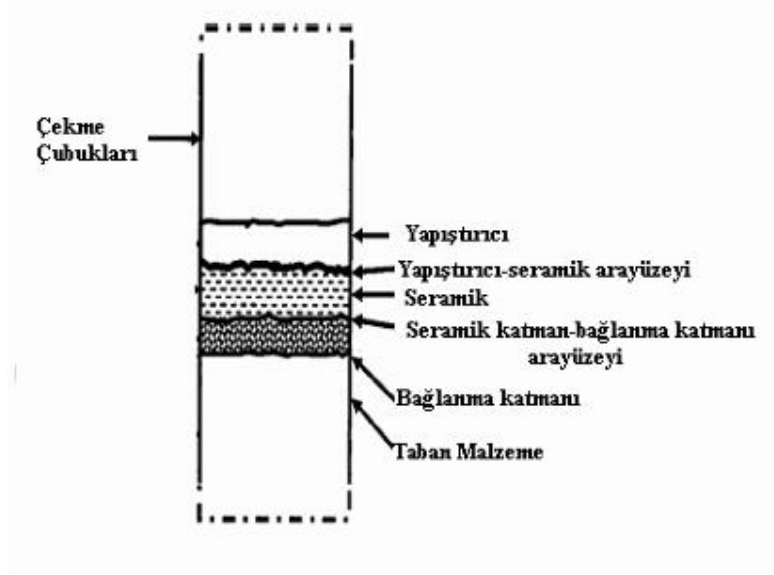
Titanyum süper alaşımlı numunelerde ise; mikro yapı, eğme ve sertlik özelliklerinin incelenmesinde AMS 4911 titanyum alaşımlı dikdörtgen 1 x 3 boyutunda (en x uzunluk) malzemeler kullanılmıştır. Çekme testinde ise AMS 4928 titanyum malzemesi 1 inc (25,4 cm) çapında numuneler kullanılmıştır.

Yapılan çalışmada kullanılan malzemelerin bilgi ve boyutları Tablo 6' daki gibidir.

Tablo 6.1. *Malzeme Bilgi ve Boyutları*

Malzeme Bilgileri		Malzeme Boyutları	
Çekme	Mikroyapı, Eğme ve Sertlik	Çekme	Mikroyapı, Eğme ve Sertlik
AMS 5662 (Inconel)	AMS 5596 (Inconel)	1.000 çapında, 2.25 ± 0.010 uzunluğunda silindirik numune (Dış kısmındaki dişlisi, 1.00 ± 0.010)	Dikdörtgen panel 1.0 X 3.0
AMS 4928 (Titanyum)	AMS 4911 (Titanyum)		

Termal spreycaplamalarda yapışma mukavemet ölçümü, ASTM C-633 standardına göre yapılmaktadır (Şekil 6.2). 1 inç çapındaki silindirik numuneye kaplama işlemi yapılarak, yüzeyi pürüzlendirilmiş 1 inç çapındaki aynı ikinci bir numuneye yapıştırılması ile çekme testi uygulanmaktadır. Elde edilen değer, numunenin kesit alanına bölünerek yapışma mukavemeti hesaplanmaktadır. Numunelerin kopmanın olduğu bölge, kopmanın tipini ve çeşitli karakteristik özelliklerini belirlemektedir.



Şekil 6.2. *ASTM C-633 standart test numunesi*

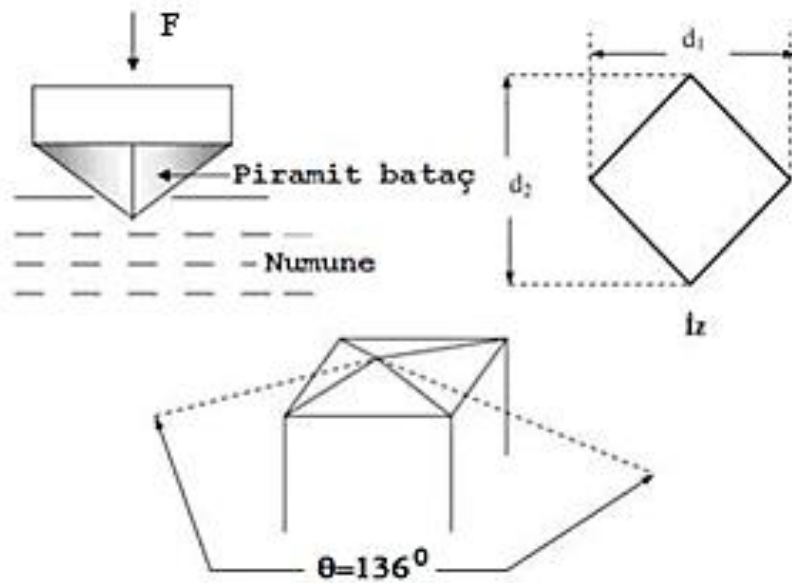
Çekme testinde kullanılan silindirik numunelerden biri kaplanmış, diğeri kumlama yapılmış iki numunenin önce yüzey temizliği solvent ile yapılmıştır. Sonrasında uygun

takım kullanılarak, özel bir tip film yapıştırıcı ile numuneler birbirine yapıştırılmıştır. Her toz için 3 numune çifti yapıştırılmış ve bu üç numunenin ortalaması alınmıştır. Özel bir tip yapıştırıcıyla yapılan denemelerde film yapıştırıcı yüzeylere konulmuştur. Numuneler takıma yerleştirilmiş ve her numune tork metre ile sabitlenmiştir. Numunelerin takıma basınçla sıkıştırılma işlemi ile kürlenme esnasında yapıştırıcı içerisinde oluşan kimyasal reaksiyonlar sonucu açığa çıkan gazların yapıştırıcı katmanını boşluklu hale getirmesinin engellenmesi amaçlanmıştır. Daha sonra numuneler etüve konularak kürlenmesi sağlanmıştır. Kürlenmiş numunelerin çekme testi, Instron cihazı ile ASTM C 633'e göre yapılmıştır.

6.4. Vickers Sertlik Testi

Vickers sertlik testi, malzemelerin yüzey sertliğini ölçmek için kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntem özellikle çok ince malzemeler ve mikro sertlik ölçümleri için uygundur.

Vickers testinde, dikdörtgen tabanlı piramit şeklinde (136° açısıya sahip) elmas uçlu bir girici, malzeme yüzeyine belirli bir kuvvetle bastırılır. Belli bir süre baskı uygulandıktan sonra yük kaldırılır ve malzeme yüzeyinde kalan iz (indentation) ölçülür. Giricinin bıraktığı izin diyagonal uzunlukları ölçülerek sertlik değeri hesaplanır. Bu tez çalışmasında kaplanan ve bakalite alınan kuponlara 300 gramlık yük uygulanarak 10 farklı ölçüm alınmıştır ve elde edilen ölçüler Eşitlik 6.1'de uygulanarak sertlik değeri elde edilmiştir.



Şekil 6.3. Vickers Sertlik Ölçümü

$$\frac{2F \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)}{d^2} = \frac{1.854F}{d^2} \quad (6.1)$$

HV = Vickers sertlik değeri (kgf/mm² veya N/mm²)

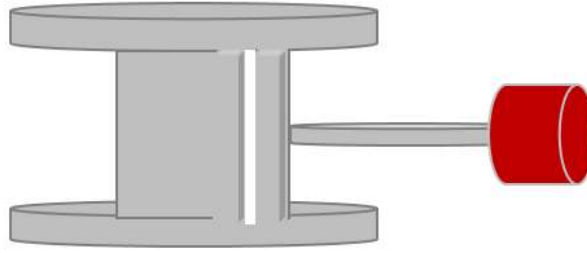
F= Uygulanan kuvvet (kgf cinsinden)

d = İzin ortalama diyagonal uzunluğu (mm cinsinden)

Ortalama diyagonal uzunluk şu şekilde bulunur:

Bu tez çalışmasında, incelenen bakalit numuneleri üzerinden her bir numune için 10 adet kontak alınmış ve vickers test cihazı ile 300 gram yük uygulanarak ASTM E 384'e göre mikrosertlik ölçümleri yapılmıştır. Sonrasında, alınan ölçümlerin ortalaması hesaplanmıştır.

Eğme testi ise, eğme ekipmanı (Şekil 6.4) ile yapılarak kaplama üzerinde soyulma, dökülme veya alt tabakadan ayrılma belirtisi görülme durumu incelenmiştir. Eğme testi sonrası, kaplamanın çatlaması belirli bir durumda kabul edilebilir.

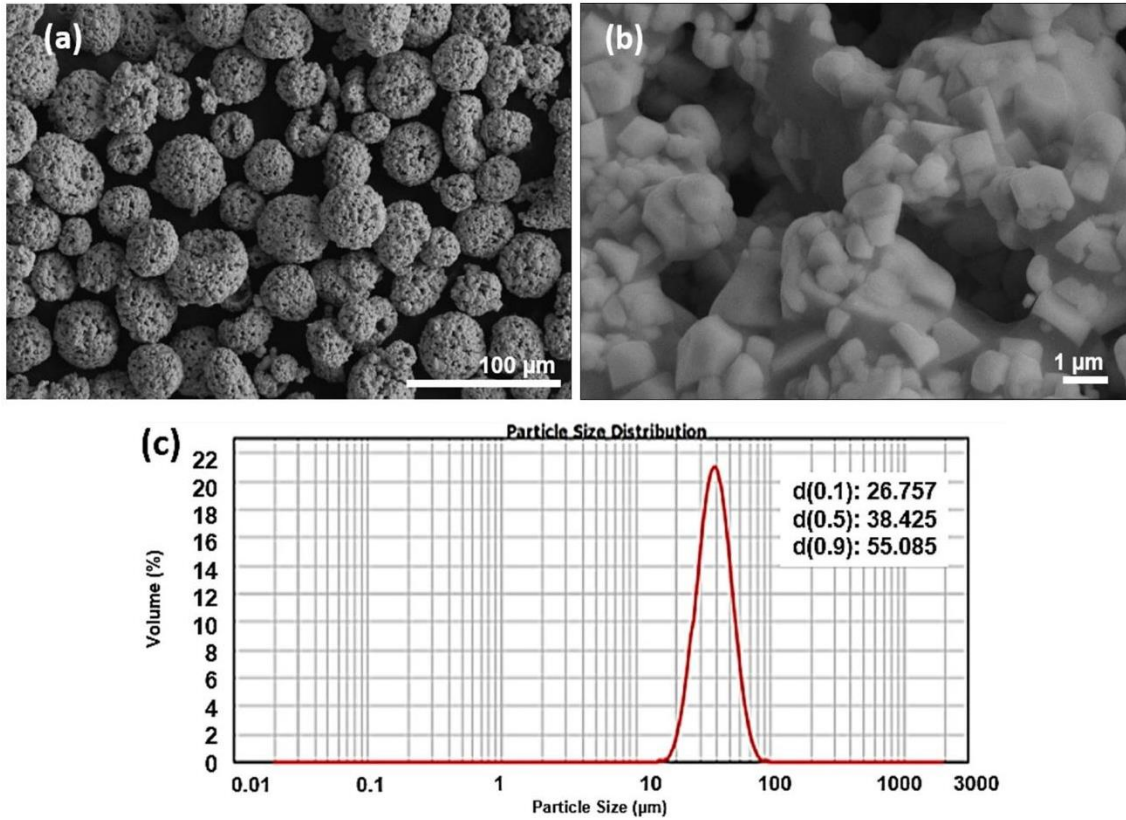


Şekil 6.4. Eğme Testi Ekipmanı

7. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

7.1. Tozların Karakterize Edilmesi

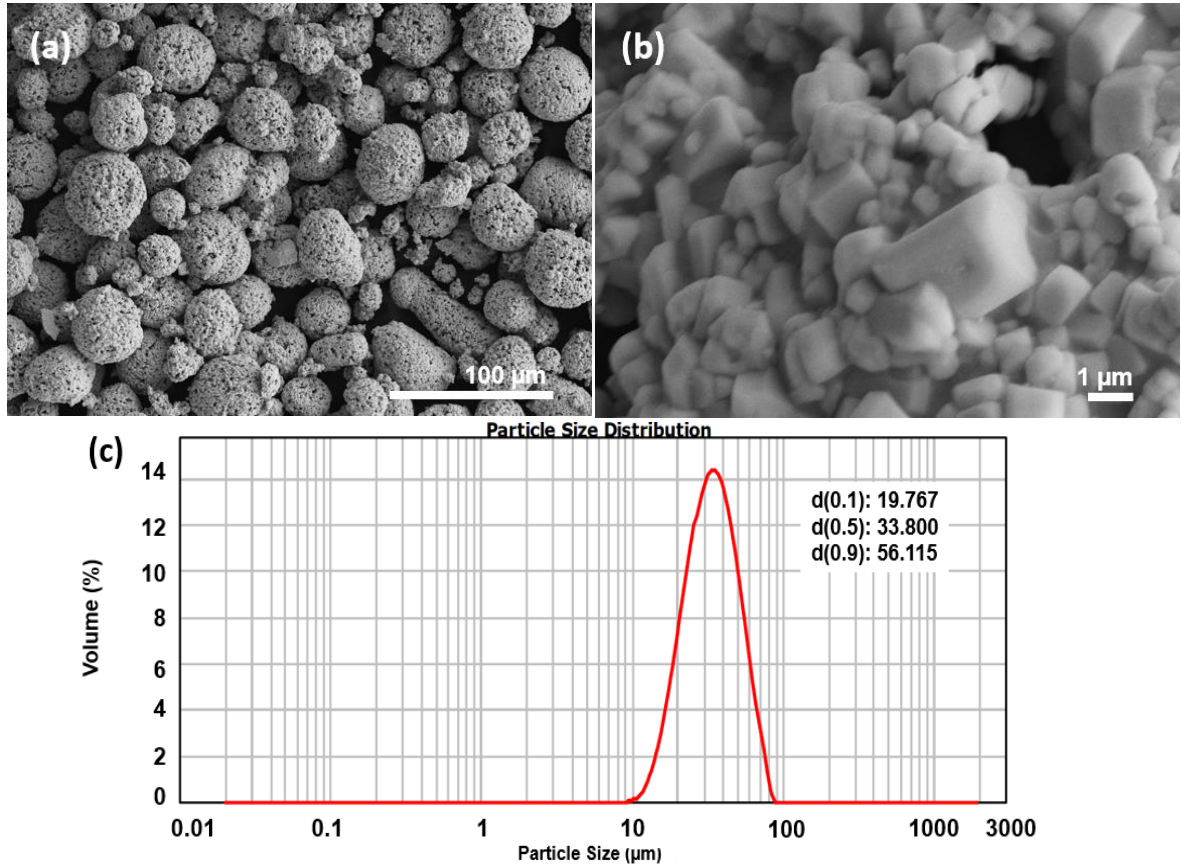
Şekil 7.1’ de HVOF kaplama sürecinde kullanılan T1 tozuna ait mikroyapı düşük ve yüksek büyütmelelerdeki mikroyapı görüntüleri (sırasıyla Şekil 7.1 (a) ve (b)) ile toza ait tane boyut dağılım grafiği verilmektedir. T1 tozunun içerisinde ağırlıklı olarak 10-50 μm boyut aralığında küresele yakın donut şekilli granüllerin yer aldığı görülmektedir (Şekil 7.1 (a)). Mikroyapı görüntüsünden anlaşılan tane boyut dağılımı, aynı zamanda Şekil 7.1 (c)’de verilen lazer kırınım yöntemi ile ölçülen tane boyut dağılım grafiğinden de takip edilebilmektedir. Grafiğe göre tozun; ortalama boyutun $\sim 38 \mu\text{m}$, d_{10} değerinin $\sim 26 \mu\text{m}$ ve d_{90} değerinin ise $\sim 55 \mu\text{m}$ olan dar bir dağılıma sahip olduğu görülmektedir. Granül içerisinde ise boyutları 1-2 μm aralığında değişen düzensiz şekilli birincil WC taneleri ve bu taneleri bir arada tutan bir bağlayıcı ortam görülmektedir (Şekil 7.1 (b)).



Şekil 7.1. HVOF termal kaplamada kullanılan T1 tozuna ait (a)düşük, (b) yüksek büyütmedeki mikroyapı görüntüleri ve (c) toza ait tane boyut dağılım grafiği.

T2 tozuna ait mikroyapı görüntüleri ve tozun tane boyut dağılım grafiği sırasıyla Şekil 7.2 (a)-(c)’ de verilmektedir. T2 tozu granül morfolojisi açısından T1 tozu ile

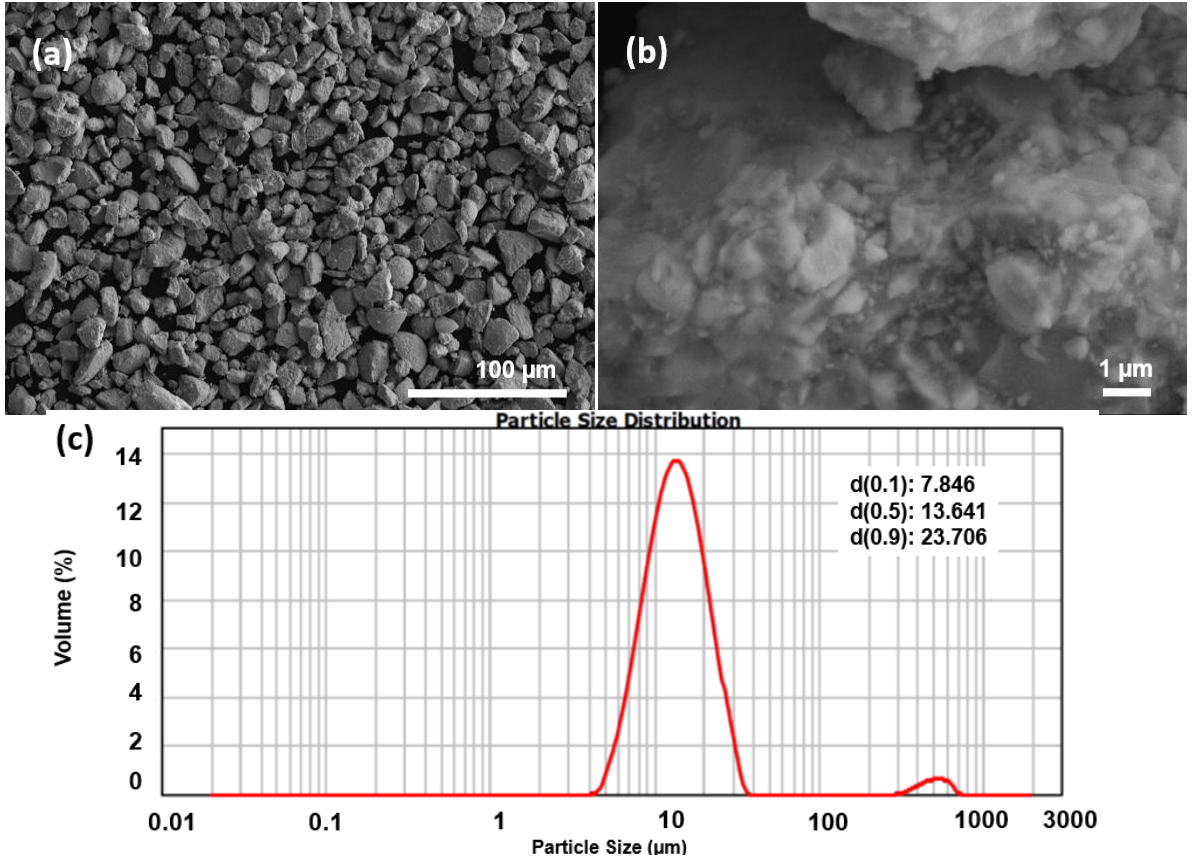
benzerlik gösterse de tane boyut dağılımı açısından farklı özelliklere sahiptir. T2 tozu içerisinde boyutları 10 μm 'nin altında olan ve düzensiz şekillere sahip taneler yer alırken (Şekil 7.2 (a)), bu durum Şekil 7.2 (c)'de verilen dağılım grafiğinde de açıkça görülmektedir. Birincil WC tanelerinin de T1 tozuna kıyasla daha geniş bir dağılıma sahip olduğu Şekil 7.2 (b)'de verilen mikroyapı görüntüsündeki mikronaltı taneler ile 3-5 μm boyutlarındaki iri tanelerin bir arada bulunmasından anlaşılmaktadır. Bununla birlikte bu toz içerisindeki birincil WC tanelerinin daha sıkı bir şekilde bir arada bulundukları, bağlayıcı faz yoğunluğunun bir miktar daha düşük olduğu görüntülerden anlaşılmaktadır.



Şekil 7.2. HVOF termal kaplamada kullanılan T2 tozuna ait (a)düşük, (b) yüksek büyütmedeki mikroyapı görüntüleri ve (c) toza ait tane boyut dağılım grafiği.

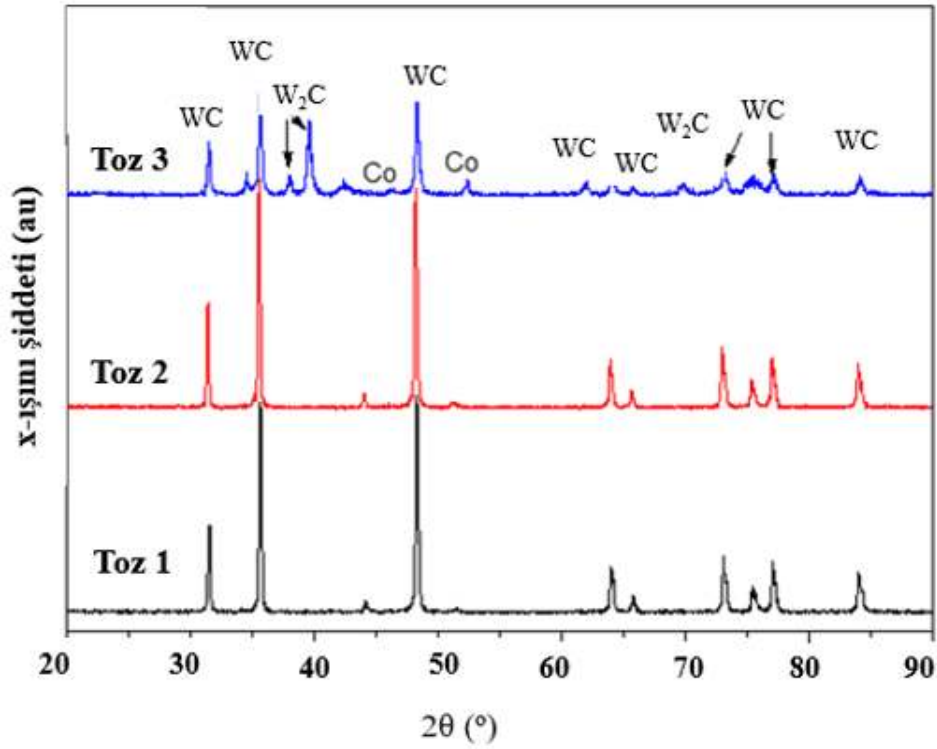
T3 tozuna ait mikroyapı görüntüleri ve tozun tane boyut dağılım grafiği sırasıyla Şekil 7.3 (a)-(c)'de verilmektedir. T3 tozunun T1 ve T2 tozlarından çok farklı bir morfolojiye sahip olduğu küreselden çok uzak düzensiz şekillere sahip görece olarak daha küçük parçacıkları bulundurmasından anlaşılmaktadır (Şekil 7.3 (a)). Bu tozun

diğer tozlardan oldukça farklı bir yapıda olmasının tamamen farklı bir üretim yöntemi ile üretilmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Şekil 7.3 (b)'de verilen yüksek büyütmede alınan SEM görüntüsünde birincil tanelerin de oldukça düzensiz şekillerde ve geniş bir boyut dağılımda oldukları görülmektedir.



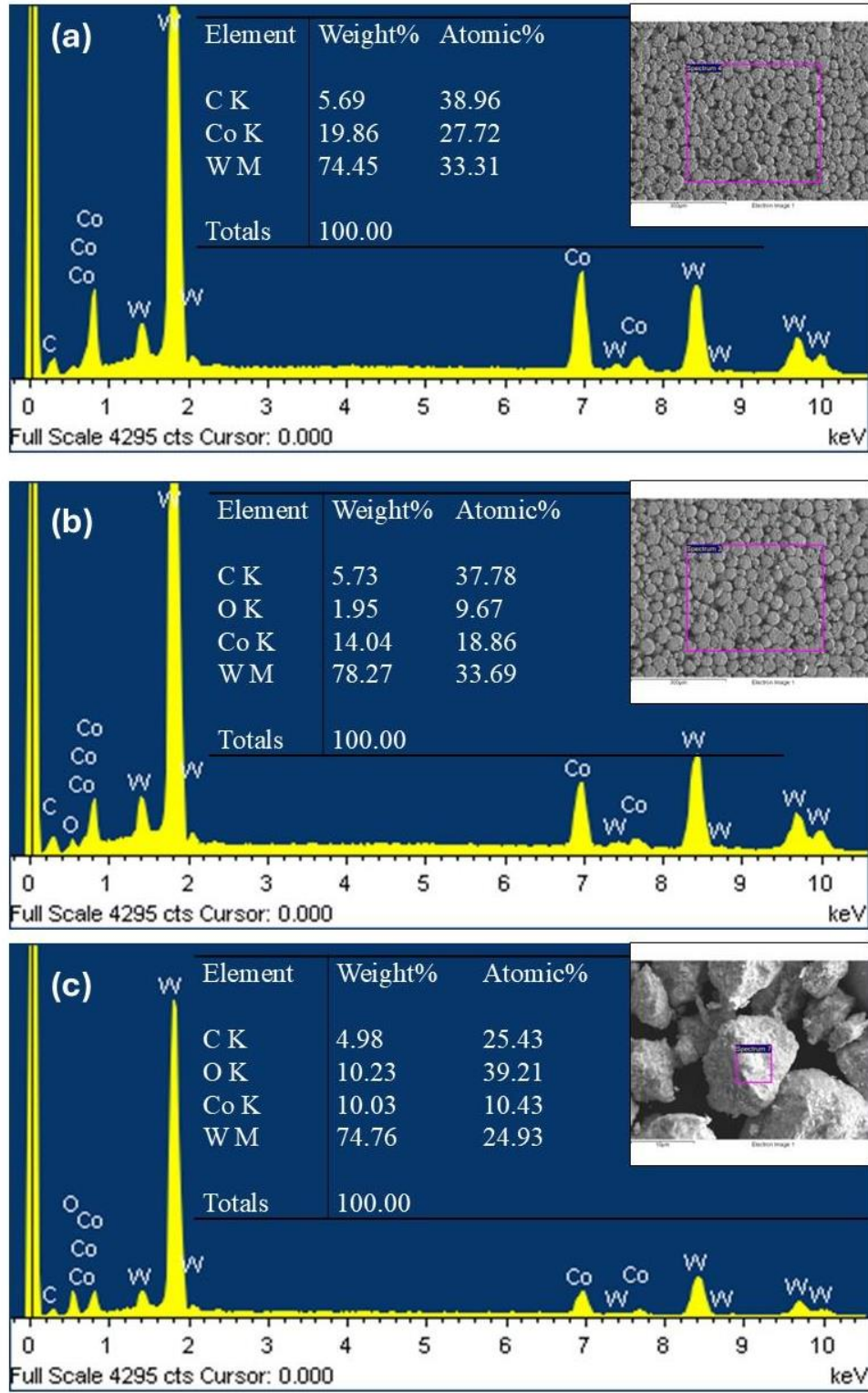
Şekil 7.3. HVOF termal kaplamada kullanılan T3 tozuna ait (a)düşük, (b) yüksek büyütmedeki mikroyapı görüntüleri ve (c) toza ait tane boyut dağılım grafiği.

Şekil 7.4' te T1, T2 ve T3 tozlarına ait XRD grafikleri verilmektedir. SEM ve tane boyut analizlerini doğrular nitelikte, T1 ve T2 tozlarının içeriklerinin de benzer olduğu ve bu tozlarda WC ve Co fazlarının yer aldıkları belirlenmiştir. T3 tozunda ise WC ve Co piklerine ilave olarak W_2C fazına ait piklerin yer aldığı görülmektedir.

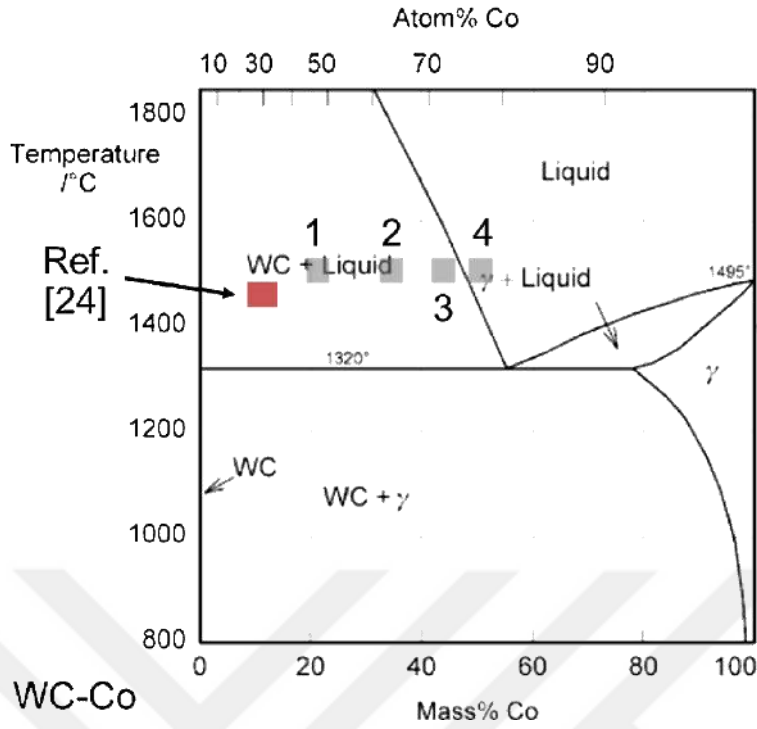


Şekil 7.4. HVOF termal kaplamada kullanılan tozlara ait x-ışını grafiği.

Şekil 7.4’ te verilen XRD grafiklerinde Co fazına ait piklerin bulunması sitemde bu fazın yer aldığını göstermektedir. Ancak WC-Co sınıfı malzemelerde WC tane boyutu ve şekli kadar Co içeriği de özellikleri etkileyen önemli bir değişken durumundadır. Şekil 7.5’ te verilen ve Co içeriğini yaklaşık olarak belirlemek amacıyla gerçekleştirilen EDX analizine göre T1 ve T2 tozlarının Co içeriklerinde yaklaşık %5 oranında farklılık belirlense de tozun tedarik edildiği firma tarafından gerçekleştirilen XRF sonuçlarına göre T1 ve T2 tozlarının her ikisinin de yaklaşık %16 Co içerdiği, T3 tozunun ise %12 Co içerdiği belirlenmiştir. Buradaki sapma EDX analizinin doğruluk hassasiyeti içerisinde kabul edilebilir seviyelerde olup, bu analizin kantitatif analiz için uygun olmadığını göstermektedir. Yapısal aşınma dayanımı gerektiren uygulamalarda kullanılan WC-Co malzemelerinde Co içeriği genellikle %10’un altında tutulmak istense de bu çalışmadaki gibi kaplama uygulamalarında miktarın yüksek olması uygulama sırasında yüksek oranda sıvı faz eldesi açısından önem kazanmaktadır. Diğer iki toza kıyasla daha düşük Co içeriğine sahip T3 tozunun yüzeye uygulama sürecinde daha düşük sıvı faza sahip olacağı Şekil 7.6’ da verilen WC-Co ikili faz diyagramında da görülmektedir [23].



Şekil 7.5. (a) T1, (b) T2 ve (c) T3 tozlarından alınan EDX analizi spektrumu ve tozların elementel dağılımları



Şekil 7.6. WC-Co ikili faz diyagramı [23]

7.2. Inconel Malzemelerin HVOF Termal Sprey ile Kaplanması

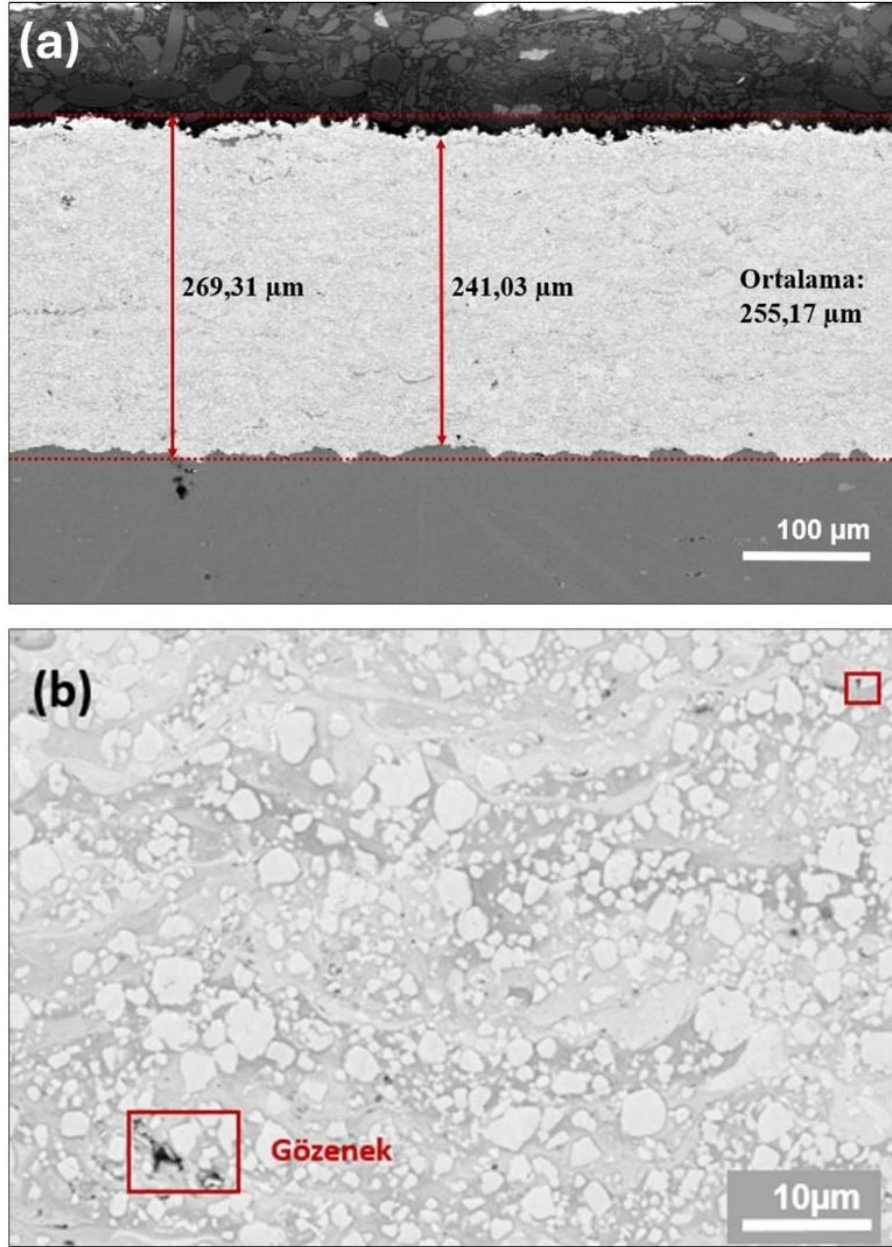
7.2.1. Mikroyapısal sonuçlar

HVOF termal sprej ile kaplanan Inconel 718 malzemelerin mikroyapı ve mekanik karakterizasyon sonuçları bu bölümde değerlendirilmiştir. Inconel 718 altlığın kaplama sürecine ilişkin altlık kalınlığı, kaplamada uygulanan paso (tabaka) sayısı, kaplama kalınlığı ve pürüzlülük gibi bilgiler Tablo 7.1’ de verilmektedir.

Tablo 7.1. Inconel 718 alaşımının kaplama süreci ile ilgili veriler

Malzeme	Toz	Test	Çıplak Kalınlık (μm)	Paso Sayısı	Kaplama Kalınlığı (μm)	Pürüzlülük (Ra)
INCONEL	T1	Eğme	4.45	5	175.17	135
		Mikroyapı	4.47	29	255.17	
		Çekme	-	29	255.17*	
	T2	Eğme	4.47	6	245.17	131
		Mikroyapı	4.38	25	208.96	
		Çekme	-	25	208.96*	
	T3	Eğme	4.38	5	175.17	83
		Mikroyapı	4.47	20	278.28	
		Bond	-	20	278.28*	

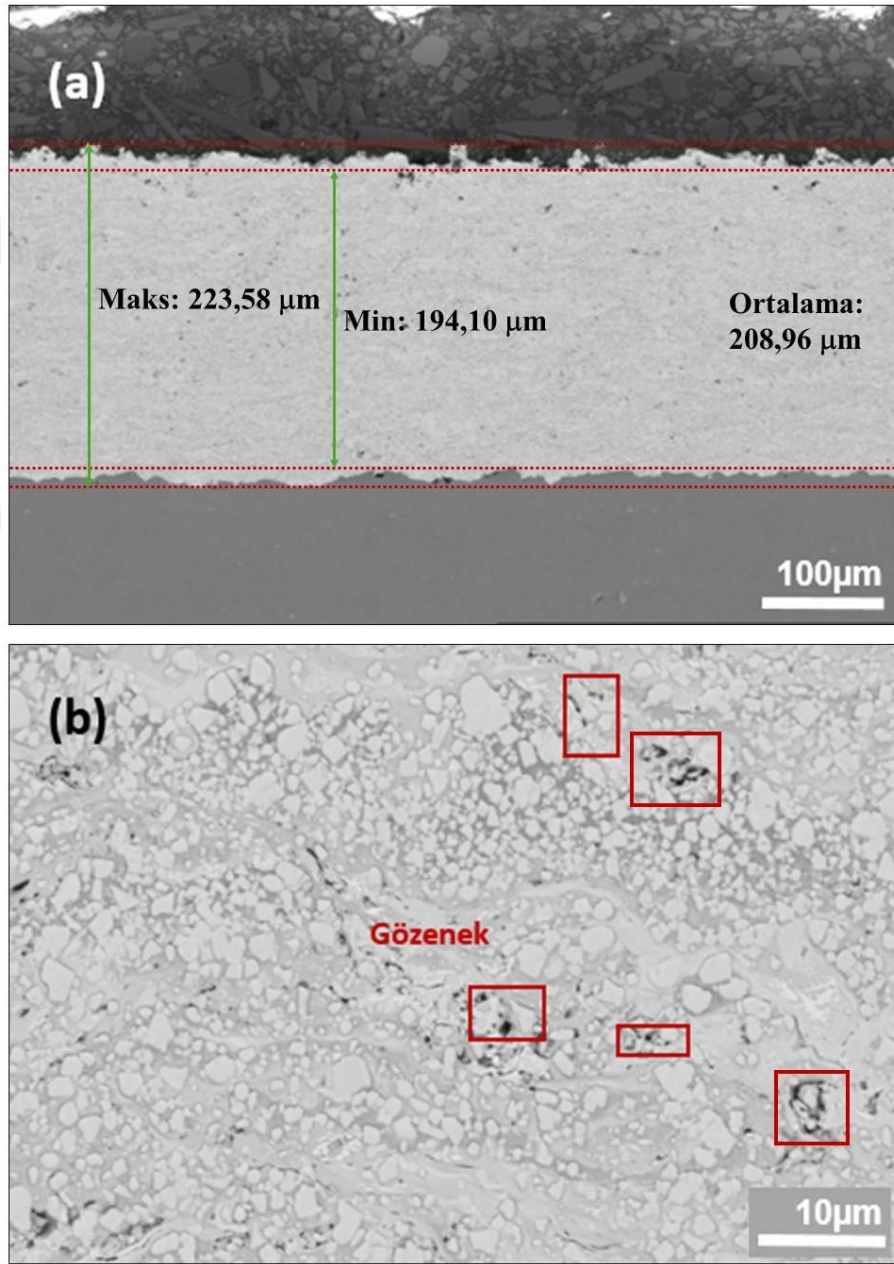
Şekil 7.7’ de T1 tozu ile kaplanan Inconel 718 alaşımına ait düşük ve yüksek büyütmedeki kesit mikroyapı görüntüleri verilmektedir. Şekilden açık gri tonda görülen Inconel 718 altlık malzemesi yüzeyinde 29 paso uygulanarak biriktirilen kaplama tabakasının ~255 µm kalınlıkta olduğu görülmektedir (Şekil 7.7 (a)). Kplama tabakasında Şekil 7.7 (b)’ de kırmızı çerçeve içerisinde gösterilen küçük gözenekler dışında büyük boyutlu belirgin bir porozite görülmemektedir. Görüntü analiz programları kullanılarak belirlenen porozite miktarının bu numune için %0,012 olduğu belirlenmiştir. Kplama tabakasındaki boşluk toz özelliklerinin dışında kplama sırasında uygulanan alev hızı ve sıcaklığı gibi parametrelerden etkilenmektedir. Eğer kplama tabakasında ergimeden kalan toz partikülleri bulunursa yapıdaki porozite artış göstermekte ve buna bağlı olarak mekanik özellikler olumsuz yönde etkilenmektedir. Bu numune için ergimemiş partikül bulunmaması ve gözenek oranının oldukça düşük olması kplama parametrelerinin uygunluğunu göstermektedir. Şekil 7.7 (b)’ de verilen kplama tabakasının yüksek büyütmedeki SEM görüntüsünde beyaz tonda mikronaltı boyutlardan birkaç mikrometre boyutlara kadar geniş bir boyut dağılımına sahip WC taneleri görülmektedir. Başlangıçta 1-2 µm aralığında bir dağılım gösteren WC tanelerinin (Şekil 7.1 (b)), kplama sonrasında bir miktar daha küçülerek daha geniş bir boyut aralığına sahip oldukları, morfolojik olarak da keskin köşeli yapıdan daha kavisli bir yapıya dönüştükleri görülmektedir. Bu dönüşümün WC tanelerinin uygulama sırasında oluşan Co içeriği zengin eriyik içerisinde kısmi çözünmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Tanelerin etrafında bulunan bağlayıcı fazın açık ve koyu gri arasında farklı gri tonlarında kontrasta sahip olması WC çözünürlüğünün bölgesel olarak değişim gösterdiğini ispatlamaktadır.



Şekil 7.7. T1 tozu ile kaplanan Inconel 718 malzemesinin kesitinden alınan (a) düşük (b) yüksek büyütmelelerdeki mikroyapı görüntüleri

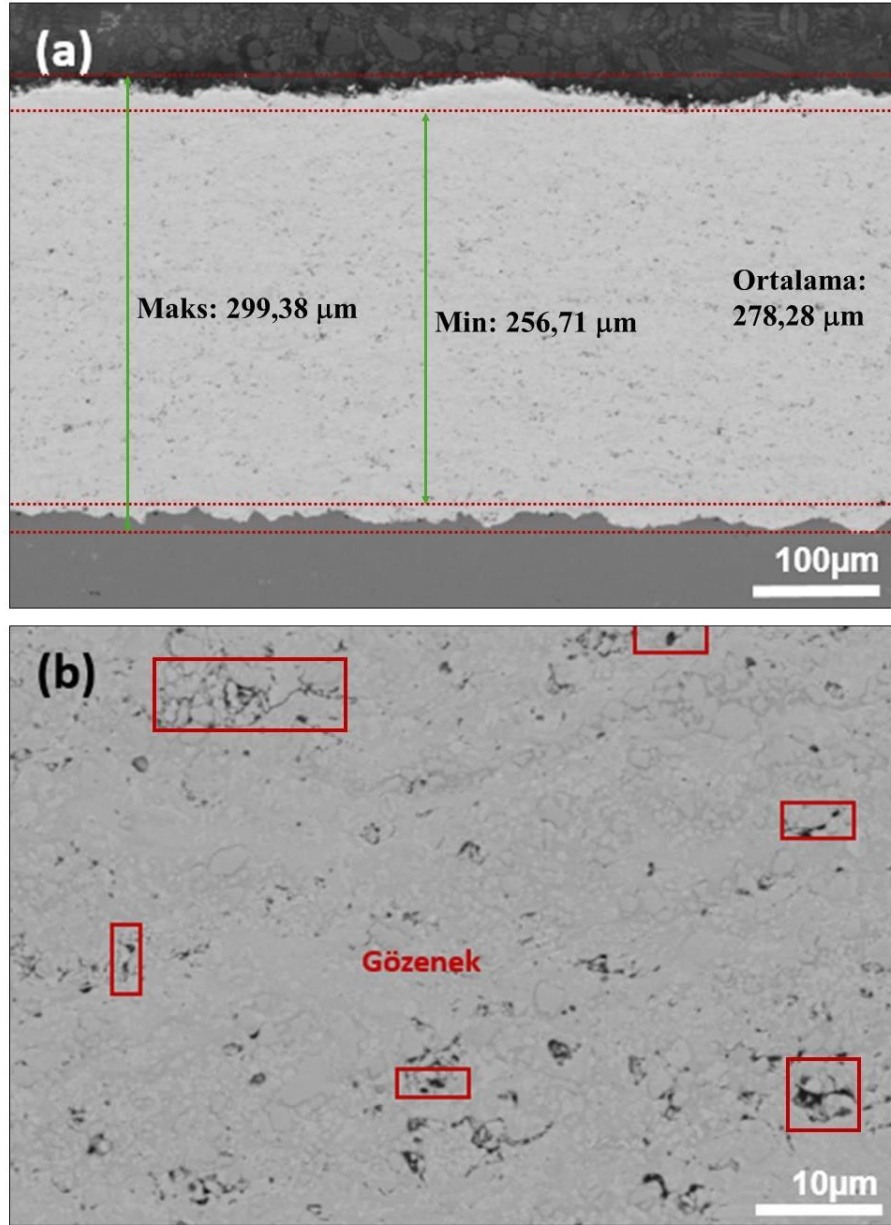
T2 tozu ile kaplanan Inconel 718 altlığı ait düşük ve yüksek büyütmelelerdeki kesit mikroyapı görüntüleri Şekil 7.8’ de verilmektedir. T1 tozu ile benzer Co içeriğine sahip olan T2 tozunun yüzeye uygulanmasıyla yaklaşık 210 µm kalınlığında bir kaplamanın yüzeyde elde edildiği görülmektedir (Şekil 7.2 (a)). T2 tozunun T1’e kıyasla daha geniş bir tane boyut dağılımına sahip olup, ortalama tane boyutunun bir miktar daha düşük olması kaplama tabakasındaki WC tanelerinin daha ince elde edilmesini sağlamıştır. T1 kaplama tabakasına benzer şekilde WC çözünürlük farklılıklarının neden olduğu gri ton değişimi bu malzeme için de söz konudur. Diğer taraftan, b tozu ile elde edilen kaplama

tabakasında gözenek boyut ve sayısının bir miktar daha fazla olduğu Şekil 7.8 (b)' de kırmızı çerçeve ile gösterilen bölgelerden anlaşılmaktadır. Bu numunede hesaplanan gözenek miktarı SEM görüntülerini doğrular nitelikte %0.372 olarak belirlenmiştir. Gözenek miktarındaki artışın kaplama sırasında uygulanan alev sıcaklığının gereğinden fazla olması nedeniyle kısmi buharlaşmadan kaynaklanabileceği düşünülmektedir. Bu numune için sıcaklığın bir miktar daha düşük tutulmasının gözenek oluşumunu azaltmaya katkı sağlayabileceği ön görülmektedir.



Şekil 7.8. T2 tozu ile kaplanan Inconel 718 malzemesinin kesitinden alınan (a) düşük (b) yüksek büyütmelelerdeki mikroyapı görüntüleri

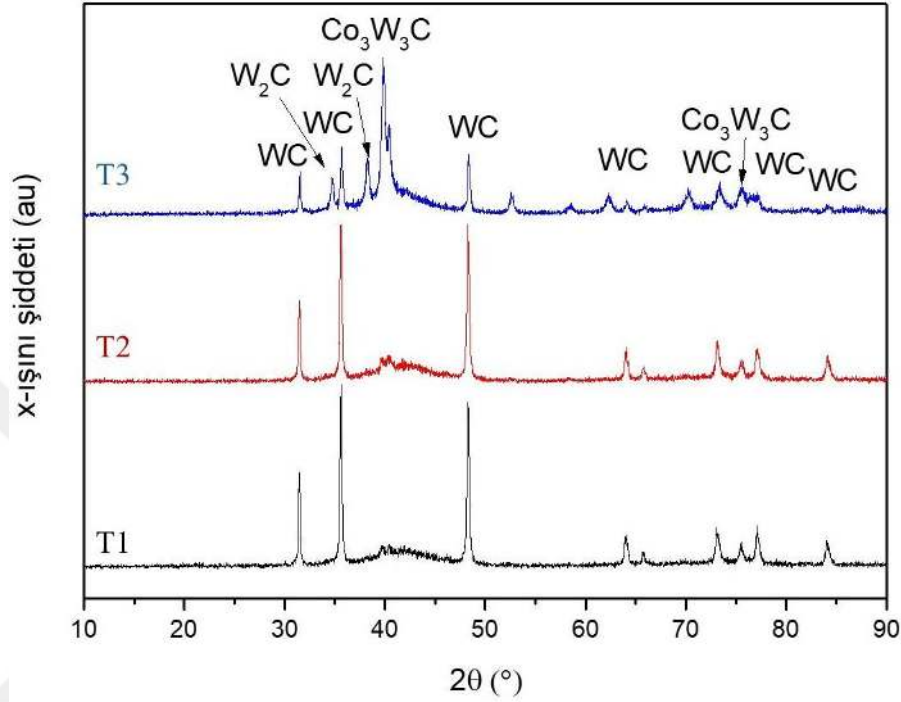
T3 tozu ile kaplanan Inconel 718 alaşıma ait düşük ve yüksek büyütmelelerdeki kesit mikroyapı görüntüleri Şekil 7.9' da verilmektedir. Bu toz ile eşde edilen kaplama kalınlığının daha düşük paso sayısına rağmen (Tablo 7) en yüksek olması tozun paketlenmesinin yüksek olduğunu göstermektedir. İç boşluğu faz olan granül yapısındaki T1 ve T2 tozlarına kıyasla T3 tozunun daha sıkı bir paketlenme gösterdiği ve buna bağlı olarak kaplama kalınlığının yüksek olduğu düşünülmektedir. Buna ilave olarak elde edilen kaplama tabakasında Şekil 7.9 (b)' de kırmızı çerçeve ile gösterilen yüksek gözenek miktarı (%0,324) ve ergimeden kalan tanelerin neden olduğu hataların görülmesi de bir diğer beklenen sonuçtur. T3 tozundaki düşük Co fazı içeriğine bağlı olarak işlem sırasında oluşan sıvı fazın miktarının yetersiz kalması gözenek ve diğer hataların yok edilmesini engellemektedir. Şekil 7.9 (b)' de verilen mikroyapı görüntüsündeki bir diğer farklılık ise diğer kaplama tabakalarında belirgin biçimde ayırt edilen WC tanelerinin bu malzeme özelinde keskin bir kontrast oluşturmamasıdır. Ayrıca diğer mikroyapılara WC çözünürlüğüne bağlı olarak farklı gri tonlarda görülen bağlayıcı faz burada ayırt edilememektedir. Bu durumun WC ile Co fazlarının arasında ergime sırasında birbiri içerisinde gerçekleşen çözünme miktarının diğer tozlardakine kıyasla fazla olmasından kaynaklandığı ve buna bağlı olarak tek fazlı bir yapıya benzer mikroyapının elde edildiği düşünülmektedir. Yapılan çalışmaya benzer şekilde kullanılan altlık ve toz ile; T.Y. Cho ve arkadaşları, mikron ve nano WC-Co tozlarının Inconel 718 malzeme üzerine HVOF kaplamaları üzerine bir çalışma yapmıştır. (0.1–1µm) boyutundaki WC–Co tozu ile kaplanan altlık üzerinde 2.7–9.0% arasında gözeneklilik, (1–40 µm) boyutundaki WC–Co tozu ile kaplanan altlık üzerinde 2.5–5.5% arasında gözenek bulunduğu gözlemlenmiştir [20].



Şekil 7.9. T3 tozu ile kaplanan Inconel 718 malzemesinin kesitinden alınan (a) düşük (b) yüksek büyütmelerdeki mikroyapı görüntüleri

Şekil 7.10' da T1, T2 ve T3 tozları ile kaplanan Inconel 718 altlıklarının yüzeylerinden çekilmiş XRD grafikleri görülmektedir. T1 ve T2 tozları kaplama işlemi öncesindeki yalnızca WC ve Co fazlarını içerirken, T3 tozunda karbür fazının aynı zamanda W_2C formunda da bulunduğu Şekil 7.10' da verilen XRD grafiğinde görülmektedir. Bu durum kaplama sonrasında da genel anlamda benzerlik göstermektedir. Buna ilave olarak, T3 tozu ile gerçekleştirilen kaplama işlemi sonrasında SEM görüntülerinden çıkarılan sonuçları doğrular nitelikte Co fazı içerisinde WC tanelerinin çözünmesine bağlı olarak Co_3W_3C bileşiğinin oluştuğu belirlenmiştir

[24]. Çözünmeye bağlı yeni ara bileşiklerin oluşumu $2\theta=40-45^\circ$ arasındaki piklerin bir miktar yükselmesine bağlı olarak T1 ve T2 tozlarında da görüldüğü ancak bu piklerin şiddetlerinin düşük olmasına bağlı olarak bu oluşumların ilgili tozlar için sınırlı kaldığı sonucuna ulaşılmıştır.

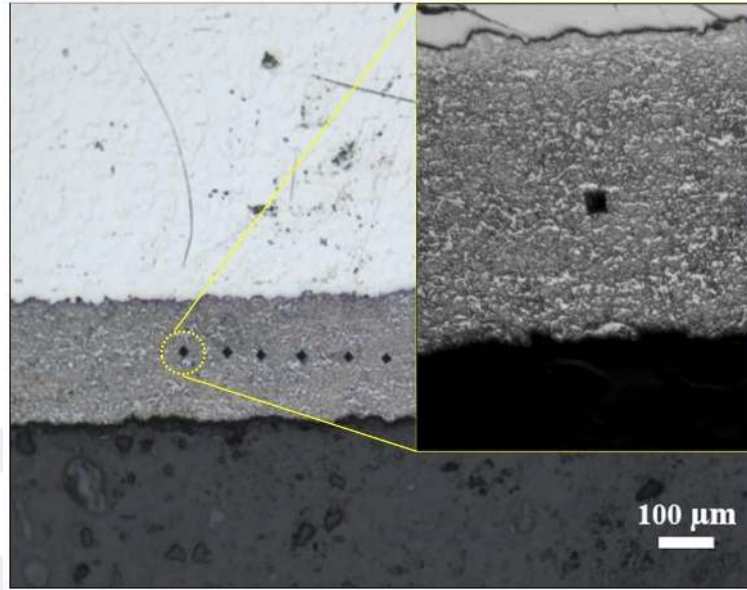


Şekil 7.10. Kaplama işlemi sonrasında T1, T2 ve T3 tozları ile kaplanan Inconel 718 altlık yüzeylerinden alınan XRD analizleri

7.2.2. Mekanik karakterizasyon

T1, T2 ve T3 tozlarıyla kaplanmış Inconel 718 alaşımının kaplama tabakasından alınan mikrosertlik ölçümleri sonrasında elde edilen indent izlerinin temsili görüntüsü ve mikrosertlik sonuçları sırasıyla Şekil 7.11 ve Tablo 7.2’ de verilmektedir. Sertlik ölçümleri her bir numune için 10 farklı noktadan alınmış ve bu ölçümlerin ortalaması hesaplanmıştır. T1, T2 ve T3 tozları ile kaplanan numunelerin kaplama sertlikleri sırasıyla 1390, 1329 ve 1353 HV03 olarak birbirlerine oldukça yakın değerler elde edilmiştir. Benzer Co içeriğine sahip T1 tozu ile elde edilen kaplamaya kıyasla daha ince WC tane boyutuna sahip olan T2 kaplamasının düşük sertliğe sahip olmasının daha fazla oranda yer alan gözenek miktarına ($\sim 0,35$) bağlı olduğu düşünülmektedir. T3 tozunun ise en düşük oranda Co bağlayıcı fazını içerdiğinden normal koşullarda belirgin bir sertlik avantajına sahip olması beklenmektedir. Ancak bu toz ile elde edilen kaplama tabakasındaki gözenek ve hatalara ilave olarak Co içerisinde WC tanelerinin göstermiş oldukları yüksek çözünürlük miktarı ve buna bağlı olarak oluşan ara bileşikler sertlik

düşüşüne neden olmaktadır. Fakat, kaplama tabakasındaki bu hataların mekanik özelliklere önemli bir etkisinin olacağı beklenmemektedir.



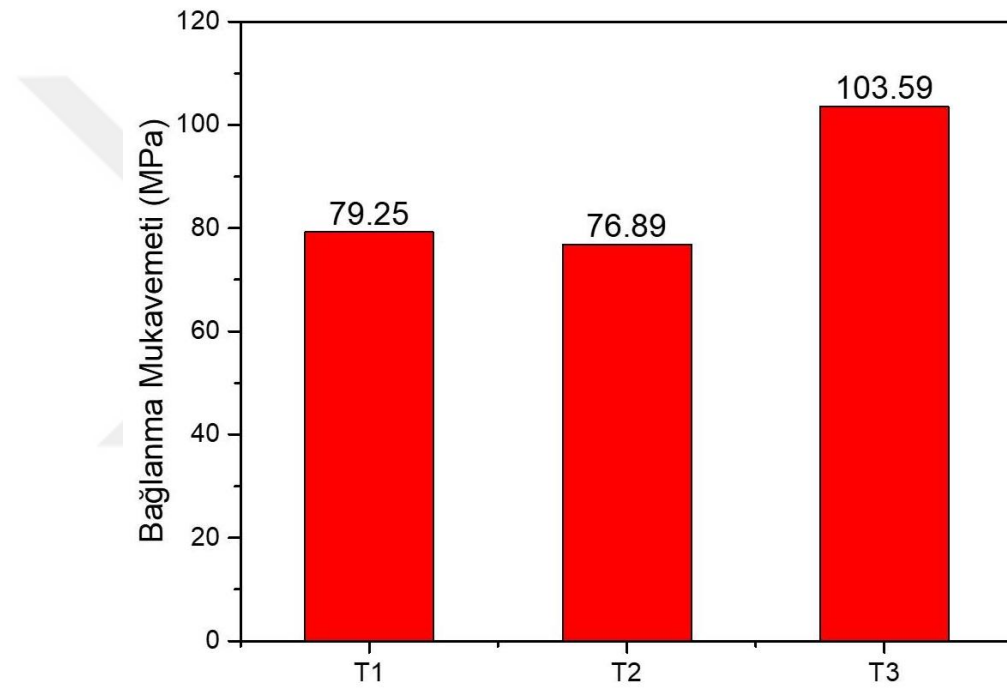
Şekil 7.11. Inconel 718 altlık üzerine kaplanmış WC-Co tabakasından alınan Vickers sertlik ölçümünün temsili görüntüsü

Tablo 7.2. Toz bazlı kaplanan Inconel 718 kuponlarının sertlik sonuçları

	T1 (HV03)	T2 (HV03)	T3 (HV03)
Nokta 1	1471	1210	1257
Nokta 2	1326	1192	1304
Nokta 3	1408	1349	1441
Nokta 4	1325	1293	1420
Nokta 5	1387	1418	1221
Nokta 6	1349	1348	1471
Nokta 7	1386	1337	1315
Nokta 8	1484	1328	1302
Nokta 9	1411	1396	1486
Nokta 10	1357	1420	1318
Ortalama	1390 (±55)	1329 (±79)	1353 (±93)

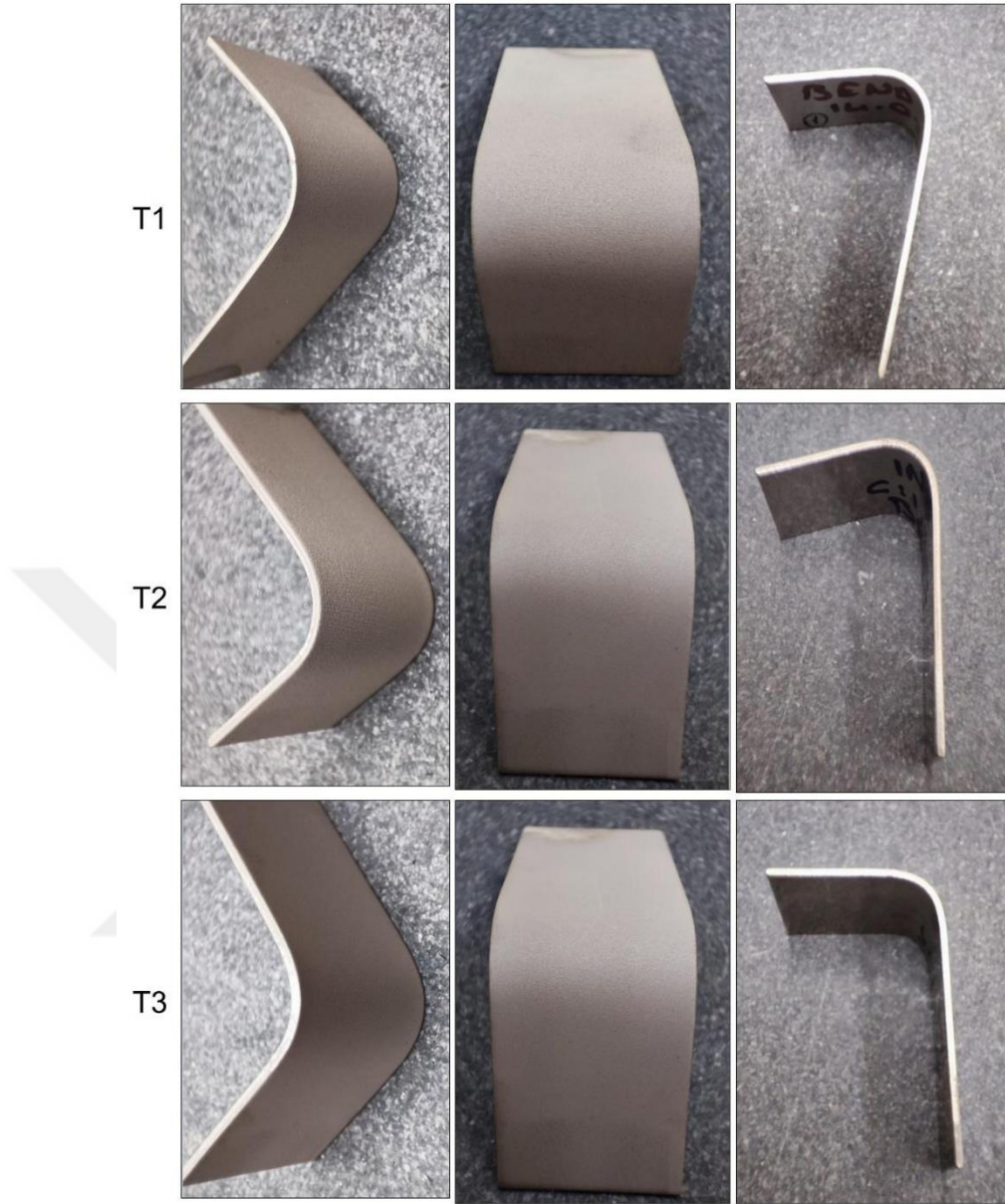
Bağlanma mukavemeti testleri ASTM C-633 standartlarına göre gerçekleştirilmiştir. Her toz için 3 numune çifti oluşturulmuş olup, elde edilen ortalama bağlanma mukavemeti değerleri Şekil 7.12’ de verilmektedir. T1 tozu ile kaplanan Inconel 718 alaşımına kaplamanın bağlanma mukavemeti 79,25 MPa, T2 tozu ile elde edilen mukavemet değeri 76,89 MPa ve T3 tozu ile elde edilen değer ise 103,59 olarak kaydedilmiştir (Şekil 7.12). Benzer Co içeriklerine ve kaplama sonrasında faz içeriklerine sahip olan T1 ve T2 tozlarının altlığa tutunması da benzer bulunmuş, Co

içeriği düşük olan T3 tozunun ise daha yüksek bir bağlanma mukavemeti sağladığı belirlenmiştir. Buradaki farkın Co içerisinde yüksek çözünme gösteren WC taneleri ve bunun sonucunda oluşan daha homojen yapıdan kaynaklandığı düşünülmektedir. T1 ve T2 kaplamalarında yapıda belirgin şekilde bulunan WC taneleri ile bağlayıcı faz arasındaki genleşme katsayısı farkı T3 kaplamasında WC çözünürlüğünün artmasıyla birlikte düşüş eğilimi göstermekte ve soğuma sırasında daha düşük ısı gerilme oluşması ve buna bağlı olarak daha az hata oluşmasını sağlamaktadır. Bu ise yüksek bağlanma mukavemetini beraberinde getirmektedir.



Şekil 7.12. Inconel 718 altlık malzeme ile T1, T2 ve T3 kaplamaların bağlanma mukavemet değerleri

Şekil 7.13’ te 3 T1, T2 ve T3 tozlarıyla kaplanan Inconel 718 plakaların, 90 derece açı ile eğme testi sonrasındaki görüntüleri verilmektedir. Şekil 7.13’ te de görüldüğü üzere test sonrası numune kaplamalarına herhangi bir soyulma, dökülme veya alt tabakadan ayrılma belirtisi görülmemiştir. Bu test bükülmenin gerçekleştiği bölgede alt ve üst yüzeylerde oluşan sırasıyla çekme ve basma gerilmeleri altında kaplama tabakasının bütünlüğünün belirlenebilmesi için gerçekleştirilmekte olup herhangi bir hasar belirlenmemiş olması kaplamanın dayanımını ispatlamaktadır.



Şekil 7.13. *T1, T2 ve T3 tozları ile kaplanan Inconel 718 plakaların eğme testi sonrası görüntüleri*

7.3. Titanyum (Ti6Al4V) Malzemelerin HVOF Termal Sprey ile Kaplanması

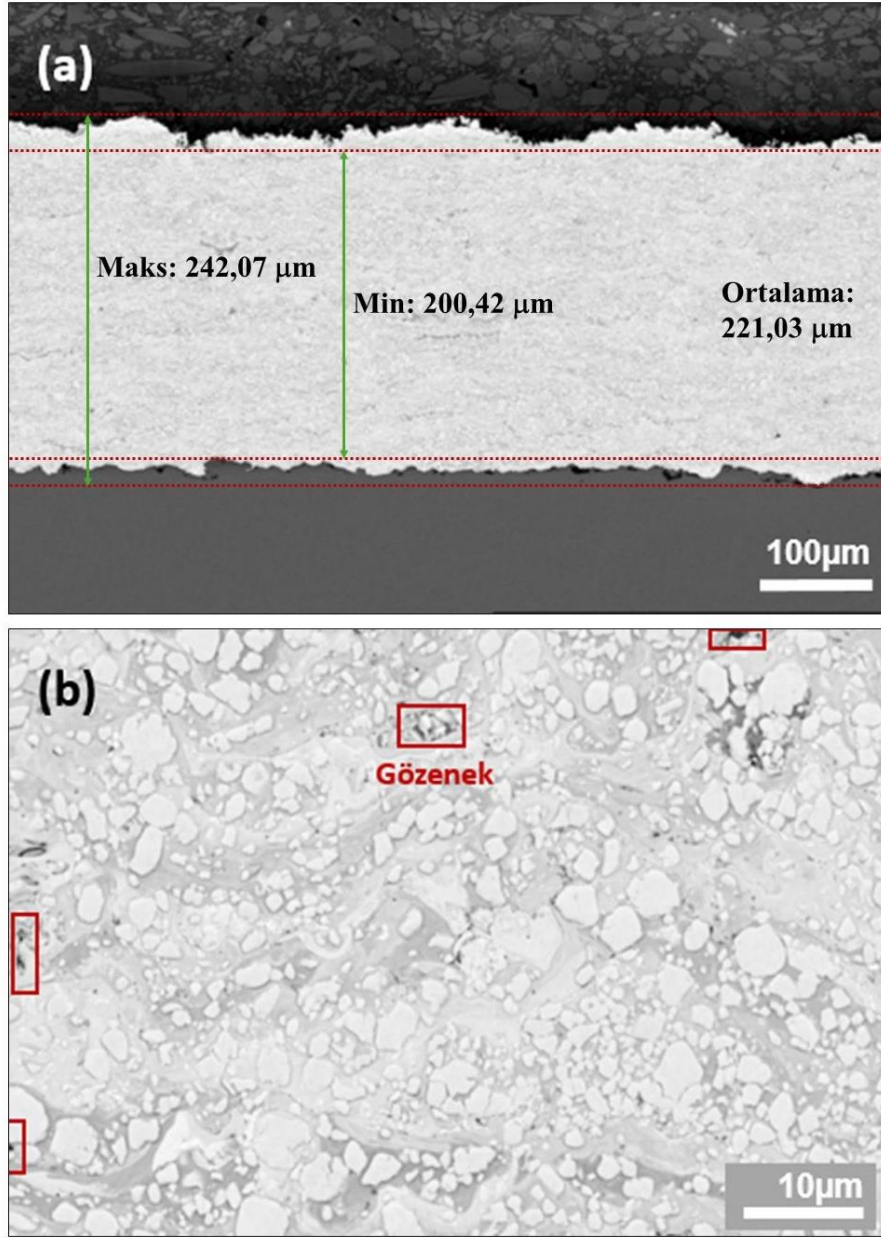
7.3.1. Mikroyapısal özellikler

HVOF termal spreyci yöntemi ile kaplanan Ti-6Al-4V alaşımının mikroyapı ve mekanik karakterizasyon sonuçları bu bölümde değerlendirilmiştir. Ti-6Al-4V altlığın kaplama sürecine ilişkin altlık kalınlığı, kaplamada uygulanan paso (tabaka) sayısı, kaplama kalınlığı ve pürüzlülük gibi bilgiler Tablo 7.3’ de verilmektedir.

Tablo 7.3. *Titanyum alaşımlarının kaplama süreci ile ilgili veriler*

Malzeme	Toz	Test	Çıplak Kalınlık (μm)	Paso Sayısı	Kaplama Kalınlığı (μm)	Pürüzlülük (Ra)
Ti-6A-4V	T1	Eğme	3.85	5	175.17	121
		Mikroyapı	3.76	29	221.03	
		Çekme	-	29	221.03*	
	T2	Eğme	3.85	6	175.17	119
		Mikroyapı	3.85	25	265.52	
		Çekme	-	25	265.52*	
	T3	Eğme	3.76	5	175.17	74
		Mikroyapı	3.85	20	176.21	
		Çekme	-	20	176.21*	

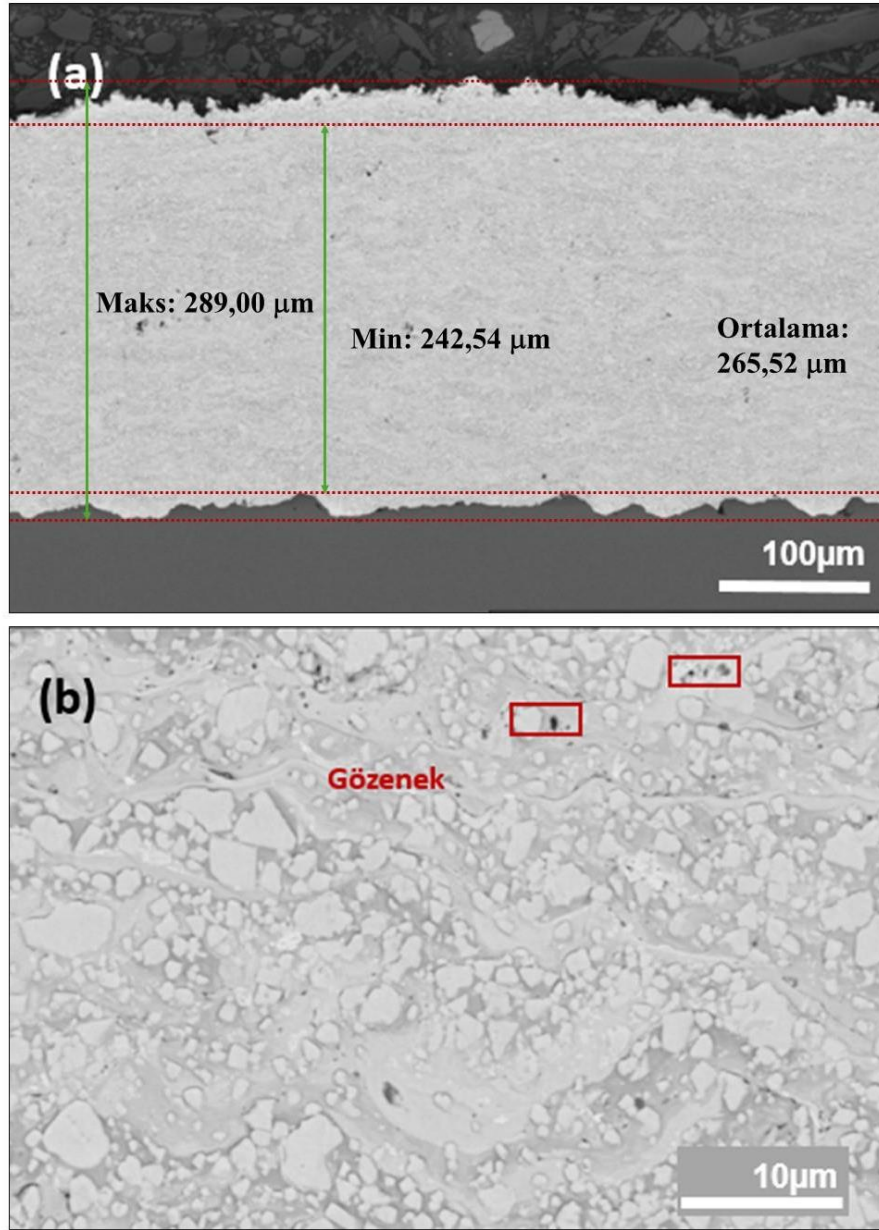
Şekil 7.14' te T1 tozu ile kaplanan Ti-6A-4V alaşımına ait düşük ve yüksek büyütmedeki kesit mikroyapı görüntüleri verilmektedir. Şekilden koyu gri tonda görülen Ti-6A-4V altlık malzemesi yüzeyinde 29 paso uygulanarak biriktirilen kaplama tabakasının ~221 μm kalınlıkta olduğu görülmektedir (Şekil 7.14 (a)). Inconel altlık üzerine yapılan kaplama çalışmalarına benzer şekilde Ti-6A-4V alaşımına uygulanan kaplama tabakasında Şekil 7.14 (b)'de kırmızı çerçeve içerisinde gösterilen küçük gözenekler dışında büyük boyutlu belirgin bir porozite görülmemektedir. Görüntü analiz programları kullanılarak belirlenen porozite miktarının bu numune için %0,068 olduğu belirlenmiştir. Şekil 7.14 (b)'de verilen kaplama tabakasının yüksek büyütmedeki SEM görüntüsünde beyaz tonda WC taneleri görülmektedir. Ti-6A-4V alaşımına uygulanan T1 tabakasının Inconel 718 alaşımına uygulanan T1 tabakası ile oldukça benzer oldukları, taneleri birbirine bağlayan bağlayıcı fazın da tamamen benzer özelliklere sahip olduğu belirlenmiştir.



Şekil 7.14. T1 tozu ile kaplanan Ti-6A-4V malzemesinin kesitinden alınan (a) düşük (b) yüksek büyütmelelerdeki mikroyapı görüntüleri

T2 tozu ile kaplanan Ti-6A-4V altlığına ait düşük ve yüksek büyütmelelerdeki kesit mikroyapı görüntüleri Şekil 7.15’ te verilmektedir. T1 tozu ile benzer Co içeriğine sahip olan T2 tozunun yüzeye uygulanmasıyla yaklaşık 265 µm kalınlığında bir kaplamanın yüzeyde elde edildiği görülmektedir (Şekil 7.15 (a)). Kaplama işlemi sonrasında elde edilen kaplamanın mikroyapısal özelliklerinin Inconel 718 alaşımına uygulanan kaplama ile büyük oranda benzer olmakla birlikte WC tane boyutunda bir miktar daha incelme belirlenmiştir. Benzer şekilde bu toz ile elde edilen kaplama tabakasında gözenek boyut ve sayısının bir miktar daha fazla olduğu Şekil 7.15 (b)’de kırmızı

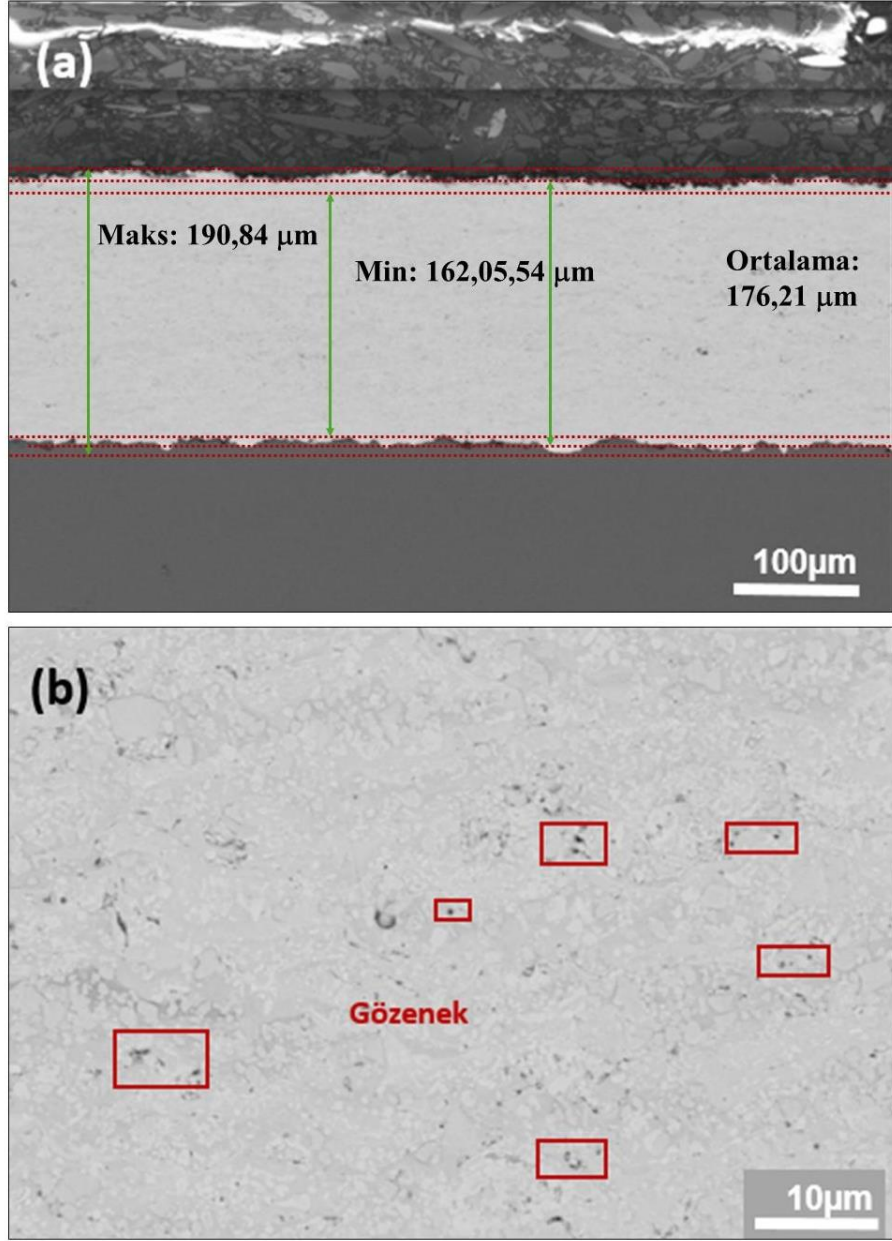
çerçeve ile gösterilen bölgelerden anlaşılmaktadır. Bu numunede hesaplanan gözenek miktarı SEM görüntülerini doğrular nitelikte %0.290 olarak belirlenmiştir.



Şekil 7.15. T2 tozu ile kaplanan Ti-6A-4V malzemesinin kesitinden alınan (a) düşük (b) yüksek büyütmelerdeki mikroyapı görüntüleri

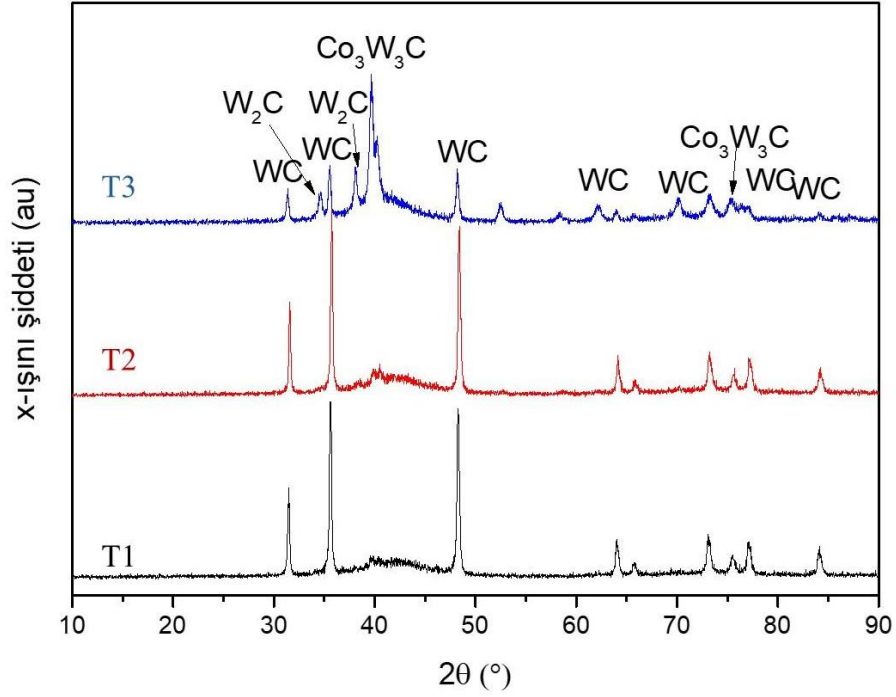
T3 tozu ile kaplanan Ti-6A-4V alaşıma ait düşük ve yüksek büyütmelerdeki kesit mikroyapı görüntüleri Şekil 7.16' da verilmektedir. Bu toz ile elde edilen kaplama kalınlığı düşük paso sayısına bağlı olarak (Tablo 7.3) en düşük olarak belirlenmiştir. Elde edilen kaplama tabakasında Şekil 7.16 (b)' de kırmızı çerçeve ile gözenekler

bulunmaktadır. Bu gözeneklerin miktarının Inconel için uygulanan kaplamadaki gözenek miktarından az da olsa düşük olduğu sonucuna ulaşılmıştır (%0,210).



Şekil 7.16. T3 tozu ile kaplanan Ti-6A-4V malzemesinin kesitinden alınan (a) düşük (b) yüksek büyütmelelerdeki mikroyapı görüntüleri

Şekil 7.17’ de T1, T2 ve T3 tozları ile kaplanan Ti-6A-4V altlıkların yüzeylerinden çekilmiş XRD grafikleri görülmektedir. XRD sonuçları da mikroyapısal özelliklere benzer şekilde Inconel 718 altlık üzerine uygulanan kaplama ile benzer faz dağılımlarının elde edildiğini göstermektedir.



Şekil 7.17. T1, T2 ve T3 ile kaplanan titanyum kuponlara ait XRD grafikleri

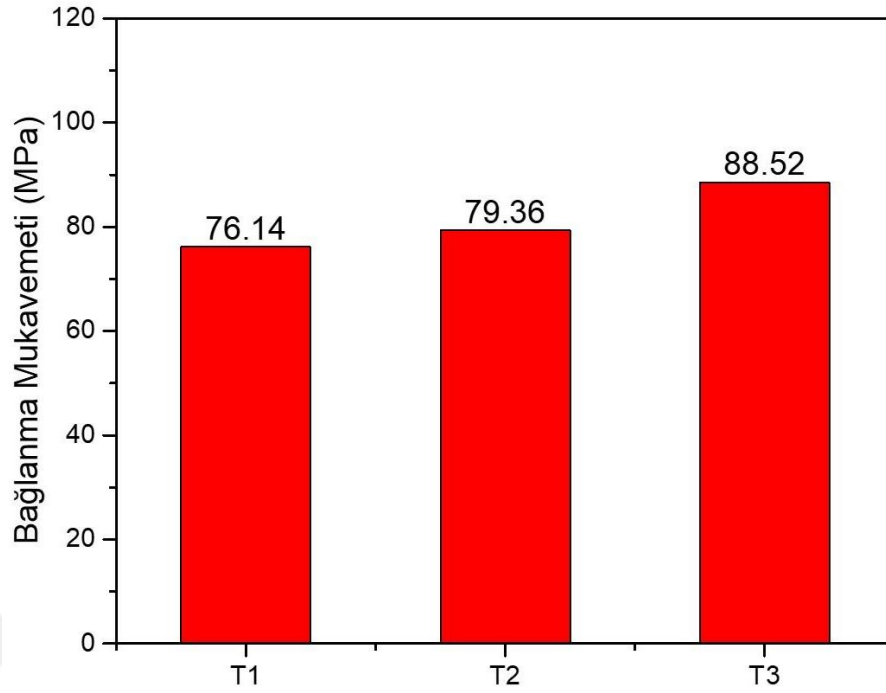
7.3.2. Mekanik karakterizasyon

T1, T2 ve T3 tozlarıyla kaplanmış Ti-6A-4V alaşımının kaplama tabakasından alınan mikrosertlik ölçümleri sonuçları Tablo 7.4' te verilmektedir. Sertlik ölçümleri her bir numune için 10 farklı noktadan alınmış ve bu ölçümlerin ortalaması hesaplanmıştır. T1, T2 ve T3 tozları ile kaplanan numunelerin kaplama sertlikleri sırasıyla 1393, 1486 ve 1583 HV03 olarak elde edilmiştir. Benzer Co içeriğine sahip T1 tozu ile elde edilen kaplamaya kıyasla Ti-6A-4V alaşımı üzerinde Inconel 718 alaşımına kıyasla daha da küçük WC tanelerini bulunduran T2 tabakasinda sertliğin artış eğiliminde olduğu görülmektedir. T3 kaplaması ise düşük Co içeriğine ve Inconel 718 kaplamasından daha az gözenek içermesine bağlı olarak 1583 HV03 değeri ile sertliği en yüksek kaplama olarak kaydedilmiştir.

Tablo 7.4. Toz bazlı kaplama yapılan Titanyum (Ti6AL4V) kuponlarının sertlik sonuçları

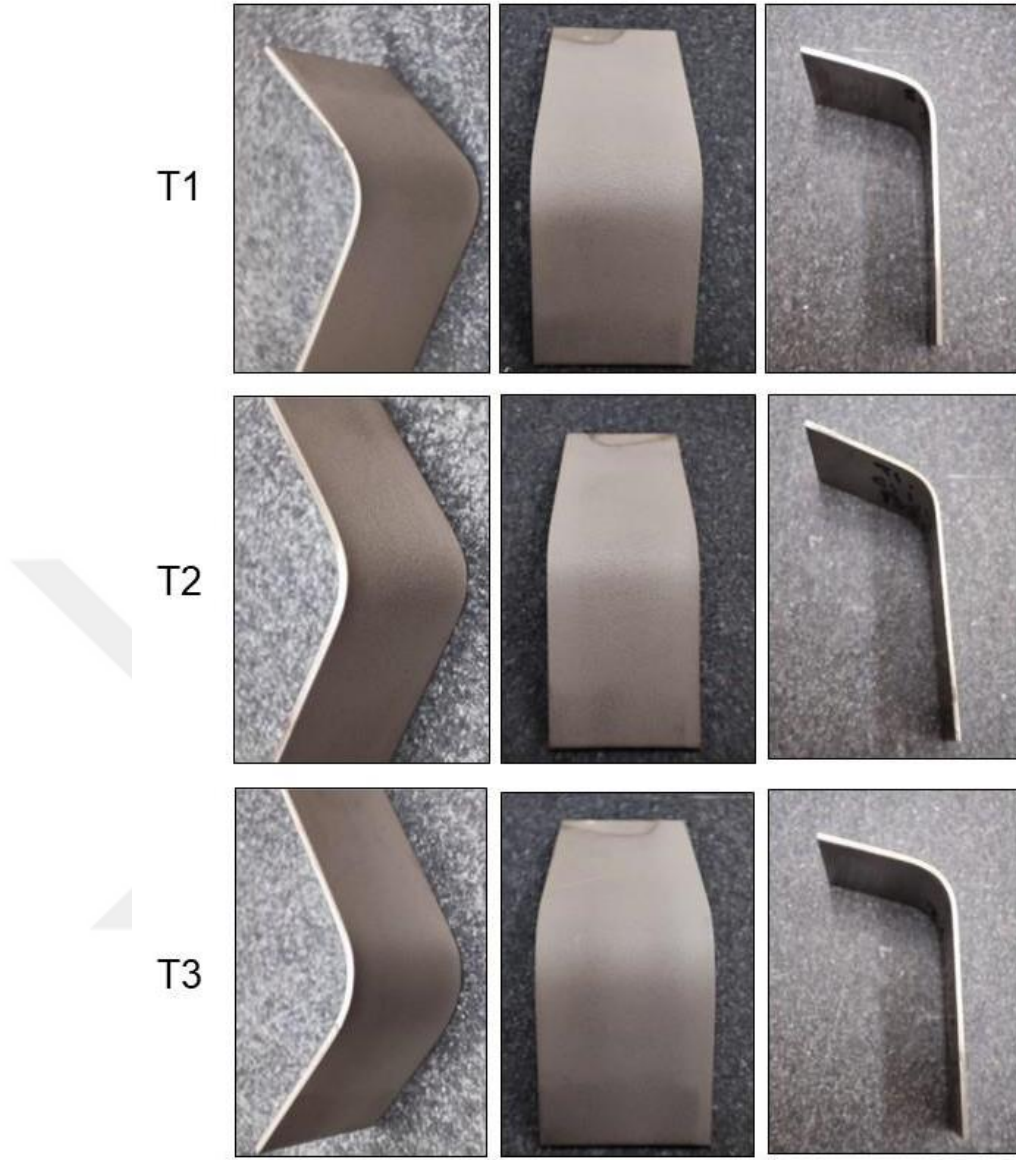
	T1 (HV03)	T2 (HV03)	T3 (HV03)
Nokta 1	1372	1823	1640
Nokta 2	1315	1625	1536
Nokta 3	1360	1221	1417
Nokta 4	1384	1592	1924
Nokta 5	1420	1360	1449
Nokta 6	1384	1924	1523
Nokta 7	1358	1325	1580
Nokta 8	1498	1221	1609
Nokta 9	1408	1361	1640
Nokta 10	1432	1413	1510
Ortalama	1393 (± 50)	1486 (± 245)	1583 (± 141)

Bağlanma mukavemeti testlerinde her toz için 3 numune çifti oluşturulmuş olup, elde edilen ortalama bağlanma mukavemeti değerleri Şekil 7.18’ de verilmektedir. T1 tozu ile kaplanan Ti-6A-4V alaşımına kaplamanın bağlanma mukavemeti 76,14 MPa, T2 tozu ile elde edilen mukavemet değeri 79,36 MPa ve T3 tozu ile elde edilen değer ise 88,52 olarak kaydedilmiştir (Şekil 7.18). Benzer Co içeriklerine ve kaplama sonrasında faz içeriklerine sahip olan T1 ve T2 tozlarının altlığa tutunması burada da benzer bulunmuş, Co içeriği düşük olan T3 tozunun ise Inconel altlığa bağlanma mukavemetinden bir miktar daha düşük olsa da diğer tozlara kıyasla daha yüksek bir bağlanma mukavemeti sağladığı belirlenmiştir. Altlık malzemesinin yüksek oranlarda Ti içermesi bu elementin reaksiyona girme eğiliminin yüksek olmasına bağlı olarak bağlanma açısından bir avantaj oluşturabileceği düşünülmektedir. Elde edilen değerler Inconel altlık değerleri ile kıyaslandığında çok farklı olmasa da Ti alaşımlarının daha zayıf mekanik özellikleri dikkate alındığında Ti elementinin varlığına bağlı olarak daha etkin bir bağlanma gerçekleştiğini göstermektedir.



Şekil 7.18. *Ti-6Al-4V altlık malzeme ile T1, T2 ve T3 kaplamaların bağlanma mukavemet değerleri*

Şekil 7.19’ da 3 T1, T2 ve T3 tozlarıyla kaplanan Ti-6Al-4V plakaların, 90 derece açı ile eğme testi sonrasındaki görüntüleri verilmektedir. Şekil 7.19’ da görüldüğü üzere test sonrası numune kaplamalarına herhangi bir soyulma, dökülme veya alt tabakadan ayrılma belirtisi görülmemiştir. Bu test bükülmenin gerçekleştiği bölgede alt ve üst yüzeylerde oluşan sırasıyla çekme ve basma gerilmeleri altında kaplama tabakasının bütünlüğünün belirlenebilmesi için gerçekleştirilmekte olup herhangi bir hasar belirlenmemiş olması kaplamanın dayanımını ispatlamaktadır.



Şekil 7.19. *T1, T2 ve T3 tozları ile kaplanan Ti-6A-4V plakaların eğme testi sonrası görüntüleri*

8. GENEL SONUÇLAR İLE LİTERATÜR İLE KARŞILAŞTIRMA

Bu tez çalışmasında, içerik ve morfolojik olarak farklı özelliklere sahip WC-Co esaslı tozlar ile; havacılık sektöründe yaygın olarak kullanılan Inconel 718 süperalaşımı ve Titanyum alaşımı (Ti6Al4V) malzemeler termal sprej kaplama yöntemi ile kaplanmıştır. Termal sprej kaplama prosesi ile 3 farklı toz 2 farklı altlık üzerine aynı koşullarda uygulanmış, elde edilen kaplamaların mikroyapısal ve mekanik özellikleri ortaya konulmuştur. Mikroyapıda bulunan oksitler, boşluklar, çatlaklar, ergimemiş tanecik gibi kusurlar kaplamanın mukavemetini azalttığı görülmektedir. Termal sprej prosesi kaplama esnasında hidrojen, oksijen, azot akış hızı, toz besleme hızı, sprej mesafesi, sprej açısı gibi birçok parametreden etkilenmektedir. HVOF termal sprej kaplamada, mikroyapının iyileştirilmesi ise mekanik özellikleri olumlu etkilediği görülmektedir.

- Mikroyapı incelendiğinde, T1, T2, T3 tozlarıyla kaplanan Inconel 718 süperalaşım malzemelerde gözeneklilik sırasıyla %0.012, %0.372 ve %0.324 bulunurken; Titanyum alaşımı (Ti6Al4V) malzemeler ise %0.068, %0.290 ve %0.210 olarak analiz edilmiştir.
- Mekanik özelliklerden sertlik sonuçları T1, T2, T3 tozlarıyla kaplanan Inconel 718 süperalaşım malzemelerde sırasıyla 1390, 1329 ve 1353; Titanyum alaşımı (Ti6Al4V) malzemeler ise 1393, 1486 ve 1583 (HV300) olarak sonuçlanmıştır.
- Mekanik özelliklerden bağlanma mukavemeti sonuçları T1, T2, T3 tozlarıyla kaplanan Inconel 718 süperalaşım malzemelerde sırasıyla 79.25, 76.89 ve 103.59; Titanyum alaşımı (Ti6Al4V) malzemeler ise 76.14, 79.36 ve 88.52 mPA olarak sonuçlanmıştır.
- Çekme testine tabi tutulan kaplanmış malzemeler incelendiğinde ise; Inconel 718 süperalaşımı ve Titanyum alaşımı (Ti6Al4V) malzeme plaka kaplamalarında herhangi bir soyulma, dökülme veya alt tabakadan ayrılma belirtisi görülmemiştir.

Yapılan bu çalışmada, kaplama yapılan Inconel 718 süperalaşımı ve Titanyum alaşımı (Ti6Al4V) mikroyapı, mekanik ve bağlanma mukavemeti sonuçları birbirine benzer görülmektedir. Bu çalışmanın elde edilen verilerin literatürdeki çalışmalardaki verilerle kıyaslaması Tablo 8.1' de verilmektedir. Sonuçlardan hareketle, yapılan bu çalışmanın başarılı bir şekilde tamamlandığı görülmektedir.

Tablo 8.1. Tez sonuçları ile literatürün karşılaştırılması

LİTERATÜR ÇALIŞMALARI	ÇALIŞMA KONUSU	ALTLIK	KAPLAMA TOZU	VİCKERS SERTLİK SONUCU	GÖZENEKLİLİK	BAĞ DAYANIMI
T.Y. Cho ve arkadaşları [20]	Mikron ve nano WC-Co tozlarının Inconel 718 malzeme üzerine HVOF kaplamaları üzerine bir çalışma	Inconel 718	(0.1–1 µm) boyutunda ki WC-Co (1–40 µm) boyutunda ki WC-Co	(0.1–1 µm) için 850–1250 (HV200) (1–40 µm) için 930–1250 (HV200)	(0.1–1 µm) için 2.7–9.0% (1–40 µm) için 2.5–5.5%	-
W. Tillmann ve arkadaşları [21]	İnce tozlar kullanılarak HVOF sprey kaplamalarının özellikleri üzerindeki sprey açısının etkisini	Çelik	WC-12Co	1396 ± 16 HV (90°) 1216 ± 25 HV (40°)	Püskürtme açısının 90°'den 50°'ye düşürülmesiyle, ortalama değeri %1,69 ± 0,08 olan gözeneklilik, 20° 'de maksimum %3,15 ± 0,65'e kadar artırdığı gözlemlenmiştir .	-
Josep A. Picas ve arkadaşları [22]	HVOF termal sprey prosesleriyle kaplanan WC-CoCr bazlı kaplamaların özelliklerini	Çelik	WC-CoCr	1122-1415 (HV300)	%0,17-%0,74	-
Tez çalışması	Inconel altlıkların üzerine, HVOF ile uygulanan farklı şekillere ve boyutlara ait tungsten karbür kobalt kaplama karakterizasyon çalışması	Inconel 718	WC-Co	T1: 1390 T2: 1329 T3: 1353 (HV300)	T1: %0.012 T2: %0.372 T3: %0.324	T1: 79.25 T2: 76,89 T3: 103,59 (MPa)
Tez çalışması	Titanyum altlıkların üzerine, HVOF ile uygulanan farklı şekillere ve boyutlara ait tungsten karbür kobalt kaplama karakterizasyon çalışması	Titanyum	WC-Co	T1: 1393 T2: 1486 T3: 1583 (HV300)	T1: %0.068 T2: %0.290 T3: %0.210	T1: 76.14 T2: 79.36 T3: 88.52 (MPa)

KAYNAKÇA

- [1] Ramezani, M., Ripin, Z.M., Pasang, T. and Jiang, C. (2023). Surface Engineering of Metals: Techniques, Characterizations and Applications. *Metals*, 13, 1299.
- [2] Tamirisakandala, S., Crist, E.M. and Russo P.A. (Undated). *RTI International Metals NASA*.
- [3] Yurtkuran, H. (2021). An Evaluation on Machinability of Titanium Alloy and Nickel Based Superalloys Used in Aerospace Industry. *Manufacturing Technologies and Applications*, Vol: 2, Issue: 2, (10-29).
- [4] Kollová, A. and Pauerová, K. (2022). Superalloys – characterization, usage and recycling. *Manufacturing Technology Engineering Science And Research Journal*, V. 22, Issue 5.
- [5] (2022). Thermal Spray Processes and Application Examples. *ASM Thermal Spray Society*.
- [6] Tucker, R.C. (1994). Thermal Spray Coating. *ASM Handbook: Surface Engineering*, Vol. 5, pp. 497-509.
- [7] Amin S. and Panchal H. (2016). A Review on Thermal Spray Coating Processes. *International Journal of Current Trends in Engineering and Research (IJCTER)*, Volume 2, Issue 4, pp. 556 – 563.
- [8] Kumar, R. and Kumar, S. (2018). Thermal Spray Coating: A Study. *International Journal Of Engineering Sciences and Research Technology IJESRT*.
- [9] Poorman, R.M., Sargent, H.B. and Lamprey, H. (1955). Method and Apparatus Utilizing Detonation Waves for Spraying and Other Purposes , *U.S. Patent 2, 714, 563*.
- [10] **http-1:** <https://teslab.sakarya.edu.tr/tr/icerik/10716/42049/hvof>
(Erişim tarihi: 14.04.2025)
- [11] Thorpe, M.L. (1993). *Adv. Mater. Process*, Vol 143 (No. 5), p 50–56.
- [12] (2004). Introduction to Thermal Spray Processing, *ASM International Handbook of Thermal Spray Technology*.
- [13] **http-2:** <https://hartmetallgroup.com/wp-content/uploads/2021/03/Introduccion-al-Thermal-Spray-V6.pdf>
(Erişim tarihi: 10.05.2025)
- [14] Sun L., Berndt C.C., Gross K.A. and Kucuk A. (2001). Material Fundamentals and Clinical Performance of Plasma Sprayed Hydroxyapatite Coatings: Review, *J. Biomed. Mater. Res: Appl. Biomater*, Vol. 58, pp. 570–592.

- [15] Altuncu, E. ve Üstel, F. (2017). Termal Sprey Kaplama Sektöründe Son Gelişmeler. *Metallurji ve Malzeme Dergisi*, Sayı:184, sayfa 43-47.
- [16] Yılmaz, S.E. (2023). *Hvof Tekniği Kullanılarak Üretilen WC-Co ve NiCR Kaplamaların Katı Partikül Eroziyon Aşınma Davranışlarının İncelenmesi*. Bartın: Bartın Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü.
- [17] **http-3:** <https://www.fst.nl/thermal-spray-equipment/modular-thermal-spray-systems/hvof-spray-systems/hv-50-hvof-system-gas-fuel.html> (Erişim tarihi: 01.06.2025)
- [18] Altuncu, E. (2021). Katmanlı İmalat Teknolojisinde Termal Sprey Teknolojisi ile üretim kabiliyeti. *Metallurji ve Malzeme Dergisi*, Sayı:1, sayfa 35-43.
- [19] Kimes, K. (2021). *Methods for Increasing Density of Binder Jet 3D Printed Tungsten Carbide-Cobalt*. B.S. in Materials Science and Engineering, University of Pittsburgh.
- [20] Cho, T.Y., Yoon, J.H., Kim, K.S., Song, K.O., Joo, Y.K., Fang, W., Zhang, S.H. Youn, S.J., Chun, H.G. and Hwang, S.Y. (2008). A study on HVOF coatings of micron and nano WC-Co powders. *Surface and Coatings Technology*.
- [21] Tillmann, W., Baumann, I., Hollingsworth, P. and Laemmerhirt, I.-A. (2013). Influence of the Spray Angle on the Properties of HVOF Sprayed WC-Co Coatings Using (210+2 µm) Fine Powders. *ASM International Journal of Thermal Spray Technology*, Volume 22(2-3), Sheet 272 - 279.
- [22] Picas, J. A., Punset, M., Baile, M.T., Martin, E. and Forn, A. (2009). Properties of WC-CoCr Based Coatings Deposited by Different HVOF Thermal Spray Processes. *Plasma Process. Polym.*, 6, Sheet 948 - 953.
- [23] Cramer, C. L., Nandwana, P., Lowden, R. A., and Elliott A. M. (2019). Infiltration studies of additive manufacture of WC with Co using binder jetting and pressureless melt method. *Additive Manufacturing*, 28, 333-343.
- [24] Koutsomichalis, A., Vaxevanidis, N.M., Petropoulos, G., Mourlas, A., and Antoniou, S. S. (2008). Friction, wear and mechanical behaviour of plasma sprayed WC-%12CO coatings on mild steel. *In Proceedings of the 7. International Conference, Coatings in Manufacturing Engineering*, pp. 259-268).

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad : Özge BAYRAK

Yabancı Dil : İngilizce

Eğitim ve Mesleki Geçmişi:

- 2013-2018, Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği/Lisans
- 2022-2025, Eskişehir Teknik Üniversite, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği/Yüksek Lisans
- 2019-Halen, Türk Havacılık ve Uzay Sanayii (TUSAŞ), Özel Proses Mühendisi