

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

**YÜKSEK BASINÇLI SOĞUK SPREY YÖNTEMİYLE ÜRETİLMİŞ
TİC KATKILI PASLANMAZ ÇELİK KAPLAMALARIN AŞINMA
DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Olca KAYA

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

AĞUSTOS 2025

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

**YÜKSEK BASINÇLI SOĞUK SPREY YÖNTEMİYLE ÜRETİLMİŞ
TİC KATKILI PASLANMAZ ÇELİK KAPLAMALARIN AŞINMA
DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Olca KAYA

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç.Dr. Ediz ERCENK

AĞUSTOS 2025

OlcaY KAYA tarafından hazırlanan “YÜKSEK BASINÇLI SOĞUK SPREY YÖNTEMİYLE ÜRETİLMİŞ TİC KATKILI PASLANMAZ ÇELİK KAPLAMALARIN AŞINMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ” adlı tez çalışması 15.08.2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Jüri Başkanı : **Doç. Dr. Mehmet UYSAL**
Sakarya Üniversitesi

Jüri Üyesi : **Doç. Dr. Ediz ERCENK (Danışman)**
Sakarya Üniversitesi

Jüri Üyesi : **Doç. Dr. Eren YILMAZ**
Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi



ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Eğitim-Öğretim Yönetmeliğine ve Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesine uygun olarak hazırlamış olduğum “YÜKSEK BASINÇLI SOĞUK SPREY YÖNTEMİYLE ÜRETİLMİŞ TİC KATKILI PASLANMAZ ÇELİK KAPLAMALARIN AŞINMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ” başlıklı tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın tüm aşamalarında yukarıda belirtilen yönetmelik ve yönergeye uygun davrandığımı, tezin içerdiği yenilik ve sonuçları başka bir yerden almadığımı, tezde kullandığım eserleri usulüne göre kaynak olarak gösterdiğimi, bu tezi başka bir bilim kuruluna akademik amaç ve unvan almak amacıyla vermediğimi ve 20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince Sakarya Üniversitesi’nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Enstitü tarafından belirlenmiş ölçütlere uygun rapor alındığını, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun ortaya çıkması halinde doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi beyan ederim.

(...../...../20.....).

Olcay KAYA





Vakitlerinden feragat ettiğim canım eşim Gizem KAYA ve oğlum Atlas KAYA'ya



TEŞEKKÜR

Bilgi ve tecrübesiyle çalışmalarım sürecinde danışmanlığımı üstlenen ve desteğini hep hissettiğim değerli hocam Doç. Dr. Ediz ERCENK’e teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmanın gerçekleşmesinde ekipmanları ve firma kabiliyetlerini sonuna kadar kullandıran Ratetech İleri Teknolojik Malzemeler San. ve Tic. A.Ş. ‘ne teşekkürlerimi sunarım.

Tezin ortaya çıkmasında güçlü pay sahibi olan ve süreç boyunca desteğini hiç esirgemeyen Hüseyin Bahadır YÜCEL’e samimiyetle teşekkür ederim.

Olcay KAYA



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ	v
TEŞEKKÜR	ix
İÇİNDEKİLER	xi
KISALTMALAR	xiii
SİMGELER	xv
ŞEKİL LİSTESİ	xvii
ÖZET	xix
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Kapsamı	1
1.2. Tezin Amacı	1
2. LİTERATÜR TARAMASI	3
2.1. Cold Spray Yöntemi ve Temel İlkeleri	3
2.2. Yüksek Basıncılı Cold Sprey Avantajları ve Bağlanma Mekanizmaları	9
2.3. 430 Serisi Paslanmaz Çelikler ve Titanyum Karbür Mekanik Özellikleri	12
2.3.1. 430 serisi paslanmaz çelik mekanik özellikleri	12
2.3.2. Titanyum karbür mekanik özellikleri	16
2.3.3. Titanyum karbür tozlarının ergime içeren kaplama yöntemlerinde kullanılması yarattığı sorunlar	20
2.3.3.1. Yüksek sıcaklığa bağlı oksidasyon ve faz bozulmaları	20
2.3.3.2. İnterlameller gevrekliğe bağlı mikroçatlaklar	21
2.3.3.3. Kimyasal uyumsuzluk ve faz dönüşüm sorunları	22
2.3.3.4. Koroziyon ortamlarda dayanım kaybı	22
2.3.3.5. Sağlık ve çevre güvenliği açısından kısıtlamalar	23
2.3.3.6. Cold spray yönteminin alternatif olarak öne çıkışı	24
3. DENEYSEL ÇALIŞMA	27
3.1. Deneyin Yapılışı ve Numunelerin Hazırlanması	27
3.1.1. Altlık hazırlığı	27
3.1.2. Tozların karıştırılması	27
3.1.3. Kaplama işlemi	27
3.1.4. Numune kesimi ve parlatılması	27
3.2. Optik Mikroskop	28
3.3. Sertlik Ölçümü	28
3.4. Yüzey Pürüzlülük Ölçümü	29
3.5. SEM İncelemesi	29
3.6. XRD İncelemeleri	30
3.7. Aşınma Deneyi	30
4. DENEYSEL SONUÇLAR	33
4.1. Mikroyapı İncelemesi	33
4.2. Sertlik ve Yüzey Pürüzlülük İncelemesi	34
4.3. SEM Analizi	35

4.4. XRD İncelemesi	40
4.5. Aşınma Deneyi	43
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	51
KAYNAKLAR.....	53
ÖZGEÇMİŞ.....	59



KISALTMALAR

430L	: 430L Ferritik Paslanmaz Çelik
CS	: Cold Spray – Soğuk Sprey
EDS	: Energy Dispersive Spectroscopy – Enerji Dağılımlı Spektroskopi
FSS	: Ferritic Stainless Steel – Ferritik Paslanmaz Çelik
HPCS	: High Pressure Cold Spray – Yüksek Basıncılı Soğuk Sprey
HRC	: Rockwell Sertlik Değeri
HV	: Vickers Sertlik Değeri
HVOF	: High Velocity Oxy Fuel - Yüksek Hızlı Oksi-Yakıt
SEM	: Scanning Electron Microscope – Taramalı Elektron Mikroskopi
TiC	: Titanium Carbide – Titanyum Karbür
XRD	: X-Ray Diffraction – X-Işını Difraksiyonu
CK45	: Orta karbonlu yapı çeliği ($C \approx 0.45\%$)



SİMGELER

%	: Yüzde
mm	: Milimetre
mm³/Nm	: Aşınma Hızı Birimi [Hacim / Kuvvet·Mesafe)
N	: Newton
μ	: Sürtünme Katsayısı





ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1. CS kaplama sisteminin şematik gösterimi (Espallargas, 2015, s.2827).	5
Şekil 2.2. CS kaplama sistemlerinin şematik gösterimi (Espallargas, 2015, s.2827)..	7
Şekil 2.3. (a) TiC'nin kristal yapısı ve (b) Ti–C atomlarının [111] yönünde izdüşümü. Daha küçük atomlar C atomlarıdır. (Li et al., 2008, s.52).	17
Şekil 2.4. Termal püskürtme yöntemlerinin parçacık sıcaklığı ve parçacık hızı grafiği (Champagne et al., 2016 s.441).....	25
Şekil 3.1. Optik mikroskop	28
Şekil 3.2. Yüzey pürüzlülük ölçümünde kullanılan cihaz	29
Şekil 3.3. Aşınma deneyi cihazı.....	31
Şekil 4.1. Mikroyapı görselleri (a) %30 TiC katılı 430L toz kaplama, (b) %20 TiC katılı 430L toz kaplama, (c) %10 TiC katılı 430L toz kaplama, (d) 430L toz kaplama	34
Şekil 4.2. TiC katkı oranına göre sertlik ve yüzey pürüzlülük değerleri	35
Şekil 4.3. 430L toz ile yapılan kaplamaya ait SEM görüntüsü.....	36
Şekil 4.4. 430L toz ile yapılan kaplama SEM analizi.....	36
Şekil 4.5. %10 TiC katılı 430L toz ile yapılan kaplamaya ait SEM ve EDS haritası	37
Şekil 4.6. %10 TiC katılı 430L toz ile yapılan kaplama SEM görüntüsü.....	37
Şekil 4.7. %20 TiC katılı 430L toz ile yapılan kaplamaya ait SEM ve EDS haritası	38
Şekil 4.8. %20 TiC katılı 430L toz ile yapılan kaplama SEM görüntüsü.....	38
Şekil 4.9. %30 TiC katılı 430L toz ile yapılan kaplamaya ait SEM ve EDS haritası	39
Şekil 4.10. %30 TiC katılı 430L toz ile yapılan kaplama SEM görüntüsü.....	40
Şekil 4.11. 430L toz kaplama XRD analizi	40
Şekil 4.12. %10TiC katılı 430L toz kaplama XRD analizi.....	41
Şekil 4.13. %20TiC katılı 430L toz kaplama XRD analizi.....	41
Şekil 4.14. %30TiC katılı 430L toz kaplama XRD analizi.....	42
Şekil 4.15. Toz gruplarına göre kaplamaların aşınma deneyi sonuçları	44
Şekil 4.16. Toz gruplarına göre sürtünme katsayıları ve kayma mesafeleri.....	44
Şekil 4.17. 430L toz kaplama aşınma deneyi sonuçları.....	45
Şekil 4.18. %10 TiC katılı 430L toz kaplama aşınma deneyi sonuçları	45
Şekil 4.19. %20 TiC katılı 430L toz kaplama aşınma deneyi sonuçları	46
Şekil 4.20. %30 TiC katılı 430L toz kaplama aşınma deneyi sonuçları	46
Şekil 4.21. Aşınma izlerinden alınmış SEM görüntüleri	48
Şekil 4.22. Aşınma sonrası elde edilmiş tozlara ait sem görüntüleri ve elementel analizler	50



**YÜKSEK BASINÇLI SOĞUK SPREY İLE 430 PASLANMAZ MALZEME VE
TİTANYUM KARBÜR TAKVİYELİ 430 PASLANMAZ MALZEME
TOZLARININ METAL YÜZEY KAPLAMASINDA KULLANIMI:
MİKROYAPI-SERTLİK İNCELEMESİ**

ÖZET

Bu tez çalışmasında, yüksek basınçlı soğuk sprej (High Pressure Cold Spray – HPCS) yöntemi kullanılarak 430L paslanmaz çelik (SS) tozları ve titanyum karbür (TiC) takviyeli 430L paslanmaz çelik tozları metal yüzeylere kaplanmış, elde edilen kaplamaların mikroyapı ve sertlik özellikleri incelenmiştir. Çalışmada, dört farklı kompozisyon kullanılmıştır: saf 430L paslanmaz çelik, %10 TiC katkılı 430 paslanmaz çelik, %20 TiC katkılı 430L paslanmaz çelik ve %30 TiC katkılı 430 paslanmaz çelik. Araştırmanın temel amacı, TiC katkısının kaplamaların mekanik performansına, sertlik değerlerine ve mikroyapısal özelliklerine etkilerini ortaya koymak ve yüksek basınçlı soğuk sprej yönteminin bu tür kompozit kaplamalar için uygulanabilirliğini değerlendirmektir.

Kaplama öncesinde tozların morfolojisi taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile analiz edilmiş, kaplama sonrası faz yapısı X-ışını kırınımı (XRD) yöntemiyle belirlenmiştir. Kaplamaların yüzey pürüzlülüğü profilometre cihazı ile ölçülmüş, sertlik dağılımı ise Vickers mikrosertlik yöntemiyle değerlendirilmiştir. Ayrıca, kesit yüzeylerinden alınan mikroyapı görüntüleri SEM ve enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDS) teknikleriyle incelenerek TiC partiküllerinin dağılımı, kaplama yoğunluğu ve kaplama–altlık ara yüzeyindeki bağlanma kalitesi gözlemlenmiştir.

Elde edilen bulgular, TiC katkısının kaplama özelliklerini önemli ölçüde etkilediğini göstermiştir. TiC oranı arttıkça sertlik değerlerinde artış gözlemlenmiş, özellikle %20 TiC takviyeli kaplama en dengeli sonuçları vermiştir. Bu kompozisyonda yüksek sertlik değerleri, homojen partikül dağılımı ve yoğun bir mikroyapı elde edilmiştir. Bununla birlikte, %30 TiC içeren kaplamalarda porozite oranında artış ve lokal kümelenmeler gözlemlenmiş, bu durum kaplamanın homojenliğini ve mekanik bütünlüğünü olumsuz etkilemiştir. Saf 430L paslanmaz çelik kaplamalarda ise daha düşük sertlik değerleri elde edilmiş, ancak bağlanma kalitesi açısından başarılı sonuçlar gözlemlenmiştir.

Sonuç olarak, yüksek basınçlı soğuk sprej yöntemi ile 430L paslanmaz çelik ve TiC takviyeli paslanmaz çelik tozlarının yüzey kaplamalarında etkin bir şekilde kullanılabileceği görülmüştür. Özellikle %20 TiC katkılı kaplamanın, sertlik artışı ile mikroyapısal bütünlük arasında optimum dengeyi sağladığı, en yüksek sertlik ve aşınma direncine ise %30 TiC katkısı ile ulaşıldığı belirlenmiştir. Bu çalışma, soğuk sprej yöntemiyle üretilen TiC takviyeli kaplamaların aşınma direnci, mekanik dayanım ve korozyon direncinin geliştirilmesi amacıyla endüstriyel uygulamalarda kullanılabileceğini göstermektedir.



HIGH-PRESSURE COLD SPRAY DEPOSITION OF 430 STAINLESS STEEL AND TITANIUM CARBIDE-REINFORCED 430 STAINLESS STEEL POWDERS: MICROSTRUCTURAL AND HARDNESS INVESTIGATION

SUMMARY

The present study focuses on the development and characterization of coatings produced by the High-Pressure Cold Spray (HPCS) technique using 430L stainless steel powders and titanium carbide reinforced 430L stainless steel composite powders. The investigation primarily aims to evaluate the influence of TiC reinforcement on the microstructural and hardness properties of the coatings, while also assessing the applicability of the HPCS technique as an effective surface engineering method for advanced material systems. Cold spray, as a relatively recent solid-state coating process, has gained increasing attention in recent years due to its ability to overcome limitations of conventional thermal spray processes. Unlike plasma spraying, flame spraying, or other thermal techniques, cold spray operates at relatively low temperatures, where particles are accelerated to supersonic velocities by means of high-pressure carrier gases, typically nitrogen or helium, and adhere to the substrate upon impact without undergoing significant melting. This unique deposition mechanism eliminates thermal degradation, phase decomposition, and oxidation problems, enabling the fabrication of coatings that retain the original chemical and structural characteristics of the feedstock materials. Such a feature is especially critical when working with materials that are sensitive to oxidation or when reinforcing phases must remain chemically stable during deposition.

Stainless steels, particularly ferritic grades such as 430L stainless steel, are widely used in engineering applications due to their corrosion resistance, relatively low cost, and ease of fabrication. However, their relatively moderate hardness and wear resistance often limit their application in environments where surface durability is of prime importance. To address this limitation, reinforcement with ceramic particles such as titanium carbide provides a promising strategy. Titanium carbide is known for its exceptional hardness, high melting point, and excellent chemical stability. When integrated into a metallic matrix, it serves to improve wear resistance, enhance load-bearing capability, and extend service life. Therefore, combining 430L stainless steel with TiC reinforcement through cold spray deposition presents an opportunity to fabricate coatings with improved mechanical and surface properties while retaining the corrosion resistance of stainless steel.

The powders used in this study consisted of four different compositions: pure 430 stainless steel, and 430L stainless steel reinforced with 10, 20, and 30 weight percent TiC. Prior to deposition, the powders were characterized using scanning electron microscopy to evaluate particle morphology and distribution. The cold spray process was carried out using optimized parameters to ensure that the particles reached sufficiently high velocities to achieve deposition, while avoiding excessive thermal input. Following deposition, coatings were carefully characterized through multiple techniques. X-ray diffraction was employed to identify the phases present and to

determine whether any phase transformations or chemical reactions occurred during deposition. SEM imaging and energy dispersive spectroscopy were used to examine coating cross-sections, identify reinforcement dispersion, and evaluate coating density as well as interface quality. Surface roughness was measured using a profilometer, while microhardness tests were performed using the Vickers method to obtain hardness distributions across the coatings.

The results of the study demonstrated that the inclusion of TiC reinforcement had a significant effect on the properties of the coatings. Pure stainless steel coatings produced by cold spray exhibited good adhesion to the substrate and dense microstructures, consistent with the expected characteristics of solid-state deposition. However, their hardness values remained relatively low, highlighting the limitations of stainless steel in terms of mechanical performance when unreinforced. The introduction of TiC reinforcement addressed this limitation by enhancing the hardness of the coatings, with a clear correlation observed between increasing TiC content and improved hardness. The 10% TiC reinforced coatings exhibited noticeable improvement, while the 20% TiC reinforced coatings delivered the most balanced performance, combining high hardness values with a uniform distribution of reinforcement particles and minimal porosity. In contrast, the 30% TiC coatings, although harder than the pure stainless steel coatings, suffered from increased porosity and local agglomerations of ceramic particles, which undermined overall structural integrity.

The microstructural analyses confirmed that cold spray successfully embedded the TiC particles within the stainless steel matrix. At moderate reinforcement levels, particularly 20%, TiC particles were evenly distributed, ensuring effective load transfer between the metallic matrix and the ceramic reinforcement. This distribution contributed significantly to the improvement of hardness and the overall performance of the coating. However, at higher reinforcement levels such as 30%, challenges related to particle acceleration and bonding were evident. Due to the relatively high density and brittleness of TiC, some particles did not achieve sufficient velocity for proper embedding, resulting in weakly bonded particles and micro-voids within the coating. This in turn reduced coating homogeneity and compromised the potential benefits of reinforcement at excessive ratios.

X-ray diffraction results provided further insights. The analyses revealed that the cold spray process preserved the chemical integrity of the stainless steel and TiC powders, with no significant phase decomposition detected. This is a critical advantage compared to thermal spraying, where high process temperatures often lead to phase instability or oxidation. The retention of original powder phases in cold spray coatings ensures that both the metallic matrix and ceramic reinforcement maintain their intended properties, a factor that directly contributes to the success of the method in fabricating advanced composite coatings.

Surface roughness analyses also reflected the impact of TiC reinforcement. Pure stainless steel coatings presented relatively smooth surfaces, while the incorporation of TiC particles led to slight increases in surface roughness due to the harder, angular morphology of ceramic particles. Nevertheless, these increases remained within acceptable ranges and are not expected to pose major drawbacks in practical applications. In fact, slight increases in surface roughness can sometimes benefit coating–substrate adhesion or further coating applications, depending on the service environment.

The microhardness results established the reinforcing role of TiC conclusively. Pure stainless steel coatings had the lowest hardness values, reflecting the inherent properties of the base alloy. The addition of TiC led to significant increases in hardness, with the 20% TiC coatings once again emerging as the optimal composition. The results highlighted that an appropriate level of ceramic reinforcement can substantially enhance surface performance while excessive levels may have diminishing or even negative effects due to structural inhomogeneity.

When compared with similar studies in the literature, the findings of this research are consistent with observations made in other material systems where ceramic reinforcement is added to metallic matrices. Many studies underline the trade-off between reinforcement content and coating quality, emphasizing that optimal performance is achieved at moderate reinforcement levels. The results of this thesis contribute to this broader understanding by specifically demonstrating the behavior of 430L stainless steel reinforced with TiC through cold spray.

The implications of these findings extend to several industrial applications. In sectors such as petrochemicals, energy production, and chemical processing, where components are exposed to harsh environments involving wear, corrosion, and mechanical stress, the development of coatings with enhanced surface properties is crucial. The ability to fabricate dense, hard, and well-bonded coatings without subjecting materials to high temperatures makes cold spray a particularly suitable method. Furthermore, the fact that cold spray preserves the corrosion resistance of stainless steel while improving hardness through TiC reinforcement is of notable practical significance.

The study also underscores potential future directions. Further investigations could focus on optimizing process parameters for higher reinforcement contents to overcome the porosity and agglomeration issues observed at 30% TiC. Additional characterization, such as wear testing and corrosion performance evaluation, would provide a more comprehensive understanding of the coatings' suitability for industrial use. Moreover, expanding the scope to other types of reinforcements, such as titanium nitride or other carbides, may open new opportunities for tailoring coating properties to specific applications.

In conclusion, the research successfully demonstrates that high-pressure cold spray can be effectively used to deposit 430L stainless steel and TiC reinforced 430L stainless steel coatings. The results highlight the role of TiC in enhancing hardness and microstructural characteristics, with 20% reinforcement identified as the most favorable composition under the studied conditions. The work contributes to the growing field of cold spray technology and reinforces the position of this process as a promising surface engineering method for developing advanced composite coatings with improved mechanical performance and durability.



1. GİRİŞ

Günümüzde mühendislik uygulamalarında kullanılan yapı ve makine parçaları, çalıştıkları zorlu çevresel koşullar nedeniyle zamanla yüzeysel hasarlara uğramakta, bu da performans kayıplarına ve maliyetli bakım süreçlerine yol açmaktadır. Özellikle aşınma, korozyon ve termal gerilmeler gibi yüzey kaynaklı problemler, endüstride sıklıkla karşılaşılan arızaların başında gelmektedir. Bu tür sorunlara karşı, yüzey mühendisliği çözümleri büyük önem kazanmış; yüzey kaplama teknolojileri, malzemenin yüzey özelliklerini iyileştirme amacıyla yoğun bir şekilde araştırılmıştır. Cold spray (soğuk püskürtme) yöntemi, düşük sıcaklıkta çalışan, termal bozulmaları en aza indiren, yoğun ve gözeneksiz kaplamalar sunabilen yenilikçi bir yöntem olarak bu alanda öne çıkmaktadır. Bu tez çalışması, cold spray yöntemiyle 430L ferritik paslanmaz çelik matrisine TiC (titanyum karbür) takviyesi uygulanarak üretilen kaplamaların mekanik özelliklerini ve mikroyapılarını incelemeyi amaçlamaktadır.

1.1. Tezin Kapsamı

Bu tez çalışması kapsamında, katkısız 430L paslanmaz çelik ve TiC katkılı (%10, %20, %30) 430L paslanmaz çelik tozları CK45 altlık yüzeyine cold spray yöntemi ile kaplanmıştır. Hazırlanan kaplamalar üzerinde mikroyapı analizi, sertlik ölçümleri ve aşınma testlerini gerçekleştirilerek katkı oranlarının yapısal ve mekanik etkileri değerlendirilmiştir. Araştırmanın hedefi, katkı oranı arttıkça oluşan yapısal değişimlerin sertlik ve mikroyapı üzerinde nasıl bir etki yarattığını ortaya koymak ve cold spray yöntemiyle TiC gibi seramik katkıların verimli bir şekilde uygulanabilirliğini göstermektir. Elde edilen bulgular, cold spray teknolojisinin paslanmaz çelik esaslı kompozit kaplamalar üzerindeki potansiyelini açığa çıkarmayı ve ileri yüzey mühendisliği uygulamaları için yol gösterici olmayı hedeflemektedir.

1.2. Tezin Amacı

Bu çalışmanın temel amacı, cold spray yöntemi kullanılarak 430L ferritik paslanmaz çelik tozlarına belirli oranlarda (ağırlıkça %10, %20 ve %30) TiC takviyesi yapılarak CK45 çeliği yüzeyine kaplanması sonucunda elde edilen yapıların mekanik ve

mikroyapısal davranışlarını karşılaştırmalı olarak incelemektir. TiC'nin ergime içeren kaplama tekniklerinde karşılaştığı oksidasyon, faz dönüşümü ve çatlama gibi sınırlamaların cold spray yöntemiyle nasıl aşıldığı bu kapsamda değerlendirilmiştir. Literatürde, paslanmaz çelik matrisli cold spray kaplamalarda TiC takviyesinin etkilerini sistematik olarak ele alan sınırlı sayıda çalışma bulunmakta; dolayısıyla bu tez, bu alandaki boşluğu doldurarak hem akademik literatüre hem de endüstriyel uygulamalara katkı sunmayı hedeflemektedir.



2. LİTERATÜR TARAMASI

2.1. Cold Spray Yöntemi ve Temel İlkeleri

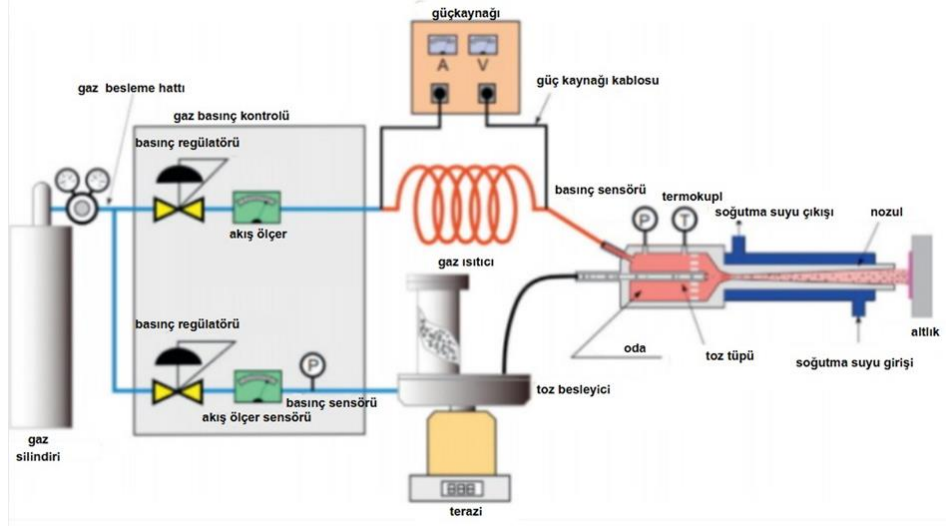
1980’li yılların ortalarında, Anatoli Papyrin ve ekibi tarafından Rusya’da soğuk sprej prosesi icat edilmiştir. Soğuk sprej sisteminin püskürtme ünitesini oluşturan temel bileşenler; bir süpersonik nozul, toz haznesi ve gaz ısıtma bobininden oluşmaktadır. Soğuk sprej işleminde, helyum veya azot gibi yüksek basınçlı işlem gazı kullanılır; besleme malzemesindeki tozlar, ergime sıcaklıklarının altında ısıtılarak nozul aracılığıyla yüksek hızda hızlandırılır ve alt tabakaya çarptırılır. Kaplama, plastik deformasyon koşulları altında düşük gözeneklilik, yüksek yapışma ve kohezyon dayanımı ile oluşur; bu da kaplamaların sertlik, korozyon ve aşınma özelliklerini iyileştirir (Ashokkumar et al.,2021, s.7582; Karthikeyan et al.,2004, s.3).

Cold spray (CS), son yıllarda yüzey mühendisliği alanında dikkat çeken, katı hal biriktirme esasına dayalı yenilikçi bir kaplama teknolojisidir. Bu yöntemde partiküller, taşıyıcı bir gaz (çoğunlukla azot veya helyum) yardımıyla ses üstü hızlara çıkarılarak altlık malzeme yüzeyine çarptırılır. Çarpma esnasında, yüksek kinetik enerji nedeniyle partiküller plastik deformasyona uğrar ve yüzeye bağlanırlar. Bu bağlanma, tamamen katı hâlde gerçekleştiğinden dolayı termal sprej yöntemlerinde sıkça karşılaşılan ergimeye bağlı olumsuzluklar burada görülmez (Champagne, 2021, s. 1).

CS yöntemi, temel olarak bir De Laval tipi konverjan-diverjan nozul aracılığıyla yüksek basınçlı gaz akımı oluşturulmasına dayanır. Bu nozuldan geçen gaz, taşıdığı toz partiküllerini 300–1500 m/s aralığında hızlara çıkararak yüzeye çarptırır (Moridi et al., 2014, s. 369). Partiküllerin bu hızlara ulaşması, çarpma sırasında yüzeyde plastik deformasyona neden olarak bağlanma için gerekli koşulları oluşturur. Tipik olarak 5–100 µm çapındaki partiküller kullanılır ve işlem sıcaklığı partikülün ergime noktasının oldukça altındadır. Bu sayede yapısal stabilite, mikroyapı bütünlüğü ve kimyasal bileşim büyük ölçüde korunur (Tekin et al., 2021, s. 108). Soğuk püskürtme tozlarının parçacık çarpması süreci (ilk temas anından kinetik enerjinin tamamen dağılmasına kadar) yaklaşık 100 ns sürmektedir. (Assadi et al.,2016, s.384) Cold spray yönteminde

parçacıklar süpersonik hızlarda ($300\text{--}1200\text{ ms}^{-1}$) alt tabakaya püskürtülmektedir (Wei et al.,2023, s.1).

Nozulda daha yüksek gaz akış hızları elde etmek için, sıkıştırılmış gaz genellikle önceden ısıtılır ve $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ kadar yüksek ön ısıtma sıcaklıkları kullanılır, ancak tipik olarak parçacık erime sıcaklığının %40-70 aralığındadır. Sprey parçacıklarının sıcak gazla temas süresi oldukça kısa olduğundan ve gaz nozulun ıraksak bölümünde genişlerken hızla soğuduğundan, parçacıkların sıcaklığı başlangıçtaki gaz ön ısıtma sıcaklığının önemli ölçüde altında kalır. Dolayısıyla, biriktirme, katı haldeki parçacıklardan tortular üreterek, hammadde toz malzemesinin erime sıcaklığının altında meydana gelecek şekilde kolayca kontrol edilebilir. Bu nedenle, Cold Spray tortuları esasen oksidasyon, buharlaşma, gaz salınımı, büzülme gözenekliliği ve termal olarak indüklenen kalıntı gerilimler gibi geleneksel termal püskürtme tortularında yaygın olarak gözlemlenen termal olarak indüklenen kusurlardan arındırılmıştır (Rokni et al., 2017, s.1308). Diğer termal püskürtme yöntemlerinde ise sıcaklık genellikle $2000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'nin üzerine çıkmaktadır. Soğuk sprej teknikleri kullanılarak, $100\text{ }\mu\text{m}$ ile $1500\text{ }\mu\text{m}$ arasında değişen kalınlıklarda son derece yoğun ve ağır kaplamaların elde edilmesi de mümkündür (Ashokkumar et al.,2021, s.7582; Assadi et al.,2016, s.385). Cold spray yönteminde taşıyıcı gazın ısıtılmasının nedeni, diğer termal püskürtme yöntemlerinde olduğu gibi tozu eritmek değil, gazın hızını arttırmaktır. Nozuldan geçen taşıyıcı gaz genişleyerek entalpiyi kinetik enerjiye dönüştürür. Bu nedenle, taşıyıcı gaz hızla soğur ve nozulu daha düşük sıcaklıklarda terk eder (Kılıçay et al.,2024, s.1)



Şekil 2.1. CS kaplama sisteminin şematik gösterimi (Espallargas, 2015, s.2827).

Soğuk püskürtmede Zn, Al ve Cu gibi nispeten düşük erime noktasına ve düşük mekanik mukavemete sahip malzemeler, düşük akma mukavemetine sahip oldukları ve yüksek sıcaklıklarda önemli ölçüde yumuşama gösterdikleri için ideal malzemelerdir. Bu malzemeleri kullanarak yoğun kaplamalar üretmek için gaz ön ısıtması gerekmez veya yalnızca düşük işlem sıcaklıkları gerekir. Al'in biriktirilmesinin Zn ve Cu gibi diğer yumuşak malzemelere göre biraz daha zor olmaktadır (Moridi et al.,2014, s.371). Soğuk püskürtme, metalik, alaşım ve kompozit tozlar da dahil olmak üzere birçok tozun, istenmeyen herhangi bir bozulma olmadan püskürtülmesinde kullanılmaktadır (Chavan et al.,2013, s.463).

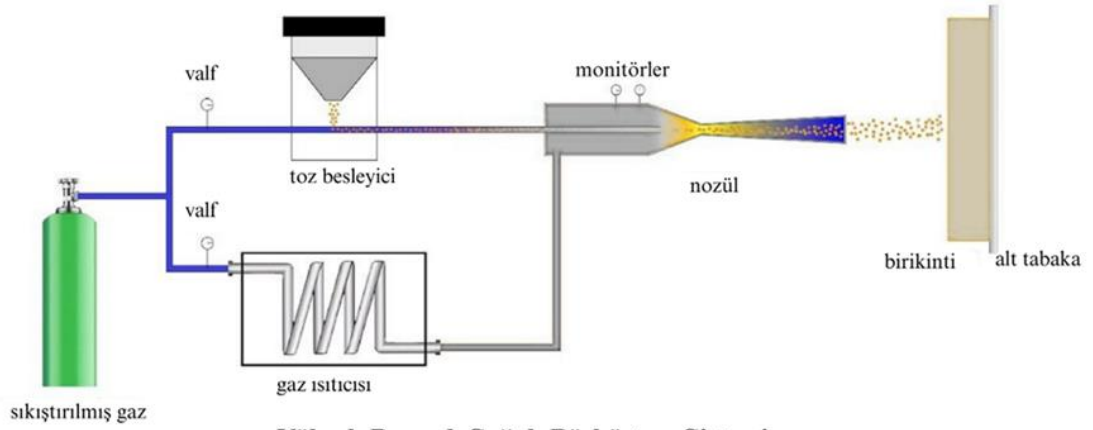
Ni, Al ve Zn gibi saf metaller ve kompozitleri, Cold Spray (CS) yöntemiyle farklı alt tabaka malzemeleri üzerine başarıyla püskürtülen yaygın sünek malzemelerdir. Ek olarak, kaplama ve alt tabakanın yapışması alt tabaka sertliğinden önemli ölçüde etkilenir. Düşük plastik deformasyon özellikleri nedeniyle CS'nin seramikleri ve sert karbürleri biriktirmesi zordur. Soğuk püskürtmede, daha verimli biriktirme için püskürtülen parçacık hızı artırılarak plastik deformasyon artırılabilir. Ancak, seramik gibi düşük sünekliğe sahip malzemelerde, parçacık hızındaki artış kırılma olasılığını önemli ölçüde artırır. Bu nedenle, soğuk püskürtme yönteminde seramik malzemelerin metal bağlayıcılarla biriktirilmesi mümkündür. Seramik/metal malzemelerin biriktirilmesinde, yumuşak metal bileşen bir bağlayıcı görevi görür ve bağlanmayı kolaylaştırır. Bununla birlikte, yüksek karbür içeriğine sahip sermet kaplama katmanları elde etmek hala zordur. Başarılı biriktirme katmanları elde etmek için bağlayıcı ve seramik miktarı kritik öneme sahiptir. CS sürecinde parçacık hızındaki

artış metal (bağlayıcı) fazın plastik deformasyonunu artırsa da seramik parçacıkların kırılmasına ve parçalanmasına neden olarak biriktirmeyi zorlaştırmaktadır (Kılıçay et al.,2024, s.2).

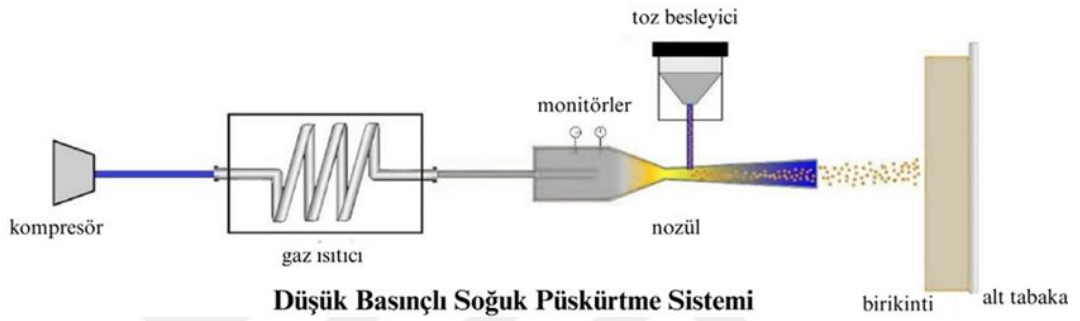
Cold spray sistemleri genellikle ikiye ayrılır: yüksek basınçlı cold spray (HPCS) ve düşük basınçlı cold spray (LPCS). HPCS sistemlerinde taşıyıcı gaz 2–5 MPa aralığında basınçlandırılır ve genellikle helyum tercih edilir; böylece partiküller çok daha yüksek hızlara ulaşabilir. LPCS sistemleri ise 0.5–1 MPa arasında çalışır ve daha düşük hızlara ulaşır. Bu sistemler genellikle portatif uygulamalar ve maliyet avantajı için tercih edilirken, HPCS sistemleri daha yüksek kaplama kalitesi ve verimlilik sağlar (Yin et al., 2018, s. 196).

Yüksek basınçlı soğuk spreylere (HPCS); Toz partiküllerinin yüksek basınçlı (HP) bir gaz kaynağından spray nozul boğazına enjekte edildiği bir kaplama biriktirme işlemidir. Düşük basınçlı soğuk spreylere (LPCS); Toz partiküllerinin düşük basınçlı (L.P.) bir gaz kaynağından spray nozulünün ayrılan kısmına enjekte edildiği bir kaplama biriktirme işlemidir.

Bu sistemler tipik olarak çok taşınabilir ve daha küçüktür ve parçacık hızı 300 ila 600 m/s arasında değişir. Bu işlem daha hafif malzemeler için kullanılır ve normalde itici gaz olarak hazır azot veya hava kullanılır. Bununla birlikte, HPCS daha yüksek yoğunluklu toz partikülleri kullanır. Bu sistemler sabittir ve güç parçacık hızları 800 ila 1400 m/s arasında değişir. Ayrıca, HPCS için itici gaz olarak nitrojen veya helyum seçilir. Her iki sistemin de bazı sınırlamaları vardır, yüksek basınçlı toz besleme Cold Spray sistemleri için, toz geri akışını önlemek amacıyla, ana gaz akışından daha yüksek bir basınçta çalışan bir yüksek basınçlı toz besleyici kullanılmalıdır. Yüksek basınçlı toz besleyiciler tipik olarak çok büyük ve pahalıdır. Ayrıca, en büyük zorluk nozul tıkanması ile ilgilidir. Parçacık hızı ve sıcaklığı arttığında bu durum daha da şiddetlenir. Sorunun üstesinden gelmek için, daha büyük bir ortalama parçacık çapına veya daha yüksek akma dayanımına (sertlik/elastik modül) sahip ikinci bir parçacık popülasyonu ilk parçacık popülasyonu ile karıştırılmalıdır. HPCS sisteminin bir diğer dezavantajı, partikül erozyonu nedeniyle nozul boğazının ciddi şekilde aşınmasıdır, bu da nozul çalışmasını etkiler ve çalışma koşullarında ve birikinti kalitesinde büyük değişikliklere yol açar. Sert partiküller püskürtüldüğünde bu durum daha da kötüleşir. Öte yandan, düşük basınçlı toz besleme Cold Spray sistemleri daha basit ekipmanlara sahiptir (Singh et al.,2022, s.2826).



Yüksek Basıncılı Soğuk Püskürtme Sistemi



Düşük Basıncılı Soğuk Püskürtme Sistemi

Şekil 2.2. CS kaplama sistemlerinin şematik gösterimi (Espallargas, 2015, s.2827).

LPCS'de taşıyıcı gaz sadece püskürtme tabancasında ısıtılırken, HPCS prosesinde gaz, püskürtme tabancasının yanı sıra ayrı bir ısıtma ünitesinde önceden ısıtılır.

Birim zaman başına beslenebilecek toz miktarı, artan gaz akışlarıyla artar ve bu nedenle HPCS sürecinde daha fazla olabilir (Rokni et al., 2017, s.1310).

CS sürecinde kaplama oluşabilmesi için partiküllerin, malzemeye özgü bir kritik hızı aşması gerekir. Kritik hız, partikülün yüzeye yeterli deformasyonla tutunmasını sağlayan minimum hızdır ve parçacığın yoğunluğu, sünekliği, çapı, yüzey oksitlenmesi gibi özelliklerle doğrudan ilişkilidir (Razavipour et al., 2020, s. 2). Bu çarpma sırasında adyabatik kesme bölgeleri oluşur; burada lokal sıcaklık artışıyla birlikte partikül-altlık arayüzünde geçici metalürjik bağlanma imkânı doğar. Ayrıca yüzey pürüzlülüğü ve oksit tabakasının yapısı da bağlanma mekanizmasını doğrudan etkiler (Hussain et al., 2009, s. 365).

Parçacık çapı, malzeme kombinasyonları ve diğer sabit parametreler için öngörülen kritik hızı da etkiler. Kritik hız, parçacığın alt tabakaya bağlandığı parçacık çarpma hızını ifade eder. Genel eğilim, aynı malzeme için daha büyük çaplı parçacıkların daha küçük çaplılara kıyasla daha düşük kritik hızlar göstermesidir. Bunun nedeni, küçük

parçacıkların daha yüksek dinamik akma dayanımına sahip olması ve daha yüksek şekil değiştirme hızları nedeniyle daha rijit davranmasıdır. Bir diğer açıklama ise, büyük parçacıkların daha yüksek kinetik enerjiye sahip olması ve alt tabakayla bağlanmak için daha düşük bir hıza ihtiyaç duymalarıdır (Ahmed Fardan et al.,2021, s.17).

Cold spray'in en güçlü yönlerinden biri, düşük sıcaklıkla çalışması sayesinde oksidasyon, faz dönüşümü, kalıntı gerilmeler gibi olumsuzlukların minimize edilmesidir. Termal sprej tekniklerinde ergime ve hızlı soğuma kaynaklı iç gerilmeler, gözeneklenme ve yapışma problemleri sık görülürken, CS bu riskleri büyük ölçüde ortadan kaldırır. CS ile üretilen kaplamalar genellikle daha yoğun, gözeneksiz, daha sağlam bir yapıya sahiptir (Moridi et al., 2014, s. 370).

Bu yöntemin uygulama alanı oldukça geniştir. Havacılık sektöründe türbin kanatlarının restorasyonunda, otomotivde piston yüzeylerinde, enerji sektöründe boru hatlarının kaplanması, elektronik endüstrisinde yüksek iletkenlikli kaplamalarda kullanılmaktadır. Aynı zamanda biyomedikal uygulamalarda da örneğin titanyum esaslı biyoyumlu kaplamaların üretiminde tercih edilmektedir (Tekin et al., 2021, s. 112). Son yıllarda cold spray, yalnızca bir kaplama yöntemi değil, aynı zamanda bir katmanlı üretim (additive manufacturing) süreci olarak da değerlendirilmekte ve karmaşık geometrilere sahip 3D yapılar cold spray ile üretilmektedir (Yin et al., 2018, s. 198).

Ancak yöntemin bazı sınırlamaları da bulunmaktadır. Örneğin çok sert veya gevrek partiküller yeterli deformasyonu sağlayamadığı için yüzeye tutunamayabilir. Ayrıca helyum gibi taşıyıcı gazların yüksek maliyeti, nozul aşınmaları ve sistemin ilk kurulum yatırımının yüksek olması gibi teknik ve ekonomik engeller söz konusudur (Moridi et al., 2014, s. 371). Tüm bu nedenlerle proses parametrelerinin hassas şekilde optimize edilmesi gerekmektedir. Bu parametreler arasında gaz basıncı, sıcaklığı, nozul geometrisi, püskürtme mesafesi ve partikül morfolojisi sayılabilir.

Sonuç olarak cold spray yöntemi, düşük sıcaklıkla katı hâlde biriktirme yapabilen, kimyasal bileşimi ve mikroyapıyı koruyan, gözeneksiz ve yüksek yapışma dayanımına sahip kaplamalar üretebilen, modern ve çok yönlü bir teknolojidir. Gelişen ekipmanlar, daha iyi kontrol sistemleri ve malzeme çeşitliliği ile birlikte bu yöntemin, özellikle

hassas yüzey uygulamaları ve onarım teknolojilerinde gelecekte çok daha yaygın bir kullanıma sahip olması beklenmektedir.

2.2. Yüksek Basınçlı Cold Spray Avantajları ve Bağlanma Mekanizmaları

Yüksek basınçlı cold spray (High Pressure Cold Spray - HPCS), cold spray teknolojisinin en yaygın ve etkili alt dalıdır. Bu sistemde taşıyıcı gazlar genellikle 2–5 MPa basınçla kullanılır ve gaz çıkış hızı, De Laval tipi nozullar aracılığıyla ses üstü seviyelere çıkarılır. Bu sayede toz partikülleri 1000–1400 m/s'ye kadar hızlara ulaşabilir. Elde edilen yüksek kinetik enerji, partiküllerin yüzeye etkin biçimde yapışmasını sağlar (Moridi et al., 2014, s. 370). Düşük basınçlı sistemlere kıyasla çok daha yüksek kaplama kalitesi, yapışma dayanımı ve yoğunluk elde edilmesi, HPCS sistemlerinin tercih edilmesinin başlıca nedenidir.

Yüksek basınçlı cold spray sistemlerinde taşıyıcı gaz olarak genellikle helyum veya azot kullanılır. Helyum, düşük yoğunluğu sayesinde partikül hızını artırma konusunda en verimli gazlardan biridir; ancak yüksek maliyeti nedeniyle birçok endüstriyel uygulamada azotla değiştirilmiştir. Azot, helyuma göre daha ekonomik olmasına rağmen, partiküllere ilettiği kinetik enerji daha düşüktür. Bu nedenle azot kullanılan sistemlerde nozul ısısı ve gaz sıcaklığı gibi parametrelerin optimize edilmesi daha kritik hale gelir (Tekin et al., 2021, s. 118).

HPCS'nin LPCS'ye göre birincil avantajları, daha büyük malzeme seçimi ve daha iyi yatak kalitesidir, ancak HPCS ekipmanının yatırım maliyetleri LPCS'den daha fazladır. Ayrıca, HPCS daha fazla gaz akışı ve toz besleme oranlarıyla daha verimli olabilir (Rokni et al., 2017, s. 1311).

HPCS sistemleri, LPCS'lere kıyasla çok daha geniş bir malzeme yelpazesi biriktirebilir. Bunun nedeni, HPCS sistemlerinin önemli ölçüde daha yüksek parçacık darbe hızları üretmesi ve dolayısıyla alt tabaka ile bitişik parçacıklarla arayüzde yüksek plastik deformasyon oluşumunu artırmasıdır. Birikimin oluşumu, parçacık darbeleri yoluyla yüksek gerinim oranı deformasyonuna büyük ölçüde bağlıdır ve bu nedenle, malzeme ve işlem parametrelerinin parçacık deformasyonu üzerindeki etkileri kritik öneme sahiptir (Rokni et al., 2017, s. 1312).

HPCS sistemleriyle elde edilen kaplamalar, yüksek partikül hızları sayesinde düşük gözeneklilik (<%1), yüksek sertlik, düşük oksit içeriği ve mükemmel yapışma

özellikleri sergiler. Ayrıca yüksek deformasyon oranı sayesinde partikül-partikül ve partikül-altlık arayüzünde yoğun bir bağ oluşur. Bu özellikleriyle HPCS, aşınmaya dayanıklı, yüksek sıcaklıkta çalışabilen ve korozyon direnci gerektiren yüzeylerin kaplanması oldukça başarılıdır. Özellikle havacılık, savunma ve enerji endüstrilerinde HPCS yöntemiyle kaplanan parçaların servis ömründe ciddi artışlar sağlanmıştır (Yin et al., 2018, s. 197).

Cold spray yönteminde bağlanma mekanizması, esas olarak mekanik kilitleme ve metalürjik etkileşimler yoluyla gerçekleşir. Mekanik kilitleme, partikülün altlık yüzeye çarpmasıyla yüzey pürüzlülüğüne fiziksel olarak tutunmasıdır. Bu tutunma, özellikle altlık yüzeyinin kumlama veya mekanik işleme ile hazırlanması durumunda daha etkin hale gelir. Metalürjik bağlanma ise çarpma anında yüzeydeki oksit tabakasının kısmen kırılması ve partikül-altlık arasında geçici atomik temas bölgelerinin oluşması ile gerçekleşir (Hussain et al., 2009, s. 367). Bu temas bölgeleri zamanla difüzyonla güçlenir ve kalıcı bağa dönüşür.

Soğuk spreylere kaplamalarda oluşan artık gerilmeler, çoğunlukla plastik deformasyon ve çekiçleme etkisi nedeniyle basma karakterindedir. Parçacık çarpması esnasında ve sonrasında oluşan çeşitli gerilmeler, kaplama içerisinde oluşan nihai artık gerilme durumunu belirlemektedir. Bu gerilmeler üç ana başlık altında toplanabilir:

Çekiçleme Gerilmesi;

Yüksek hızda yüzeye çarpan parçacıklar, yüzey tabakasında basma yönünde artık gerilmeler meydana getirir. Bu mekanizma, yüzeyde kalıntı basma gerilmeleri oluşturarak yorulma direncini artıran ve çatlak ilerlemesini geciktiren shot peening işlemine benzer. Çekiçleme gerilmeleri, parçacıkların kinetik enerjisinin yüzeye transferiyle oluşur ve yapının mekanik dayanımını iyileştirir. Soğuma Gerilmesi; Deforme olan parçacıkların soğuması sırasında büzülme, altındaki kaplama tabakası veya substrat tarafından sınırlandırıldığında çekme yönünde gerilmeler meydana gelir. Bu tip gerilmeler, sıcak olan sıçrama bölgesinin serbestçe büzülemeden alt yapı tarafından kısıtlanmasıyla oluşur. Soğuma ve çekiçleme kaynaklı bu gerilmeler çoğunlukla birlikte değerlendirilir ve biriktirme gerilmeleri olarak adlandırılır. Termal Gerilmeler: Kaplama malzemesi ile substrat arasındaki termal genişleme katsayısı (CTE) farkı nedeniyle oluşan gerilmelerdir. Bu tür gerilmeler, iki malzeme arasındaki CTE uyumsuzluğuna bağlı olarak çekme veya basma karakterinde olabilir. Örneğin,

eğer CTE kaplama> CTE substrat, soğuma sırasında kaplamada çekme, substratta ise basma gerilmeleri gelişir. Bu durum, termal döngüler sırasında kaplama bütünlüğü açısından kritik olabilir. Soğuk spreyci kaplamalardaki artık gerilme durumunu, düşük biriktirme sıcaklıkları nedeniyle termal ve soğuma gerilmeleri büyük ölçüde etkilemez. Termal gerilmeler, alt tabaka sıcaklığının 400 °C'nin üzerine çıkması durumunda artar. Sıcaklıklar 400 °C'nin altında ise termal ve soğuma gerilmeleri ihmal edilebilir (Ahmed Fardan et al.,2021, s.3).

Bağlanma mekanizmaları üzerinde en kritik etkenlerden biri kritik hız kavramıdır. Her partikül malzemesi için bir minimum çarpma hızı vardır; bu hızın altında partikül yüzeye yapışamaz ve geri seker. Kritik hız, partikülün sünekliği, yoğunluğu, çapı ve yüzey durumu gibi değişkenlere bağlıdır. HPCS sistemleri, sağladığı yüksek hızlarla birçok malzemenin kritik hızını aşarak başarıyla kaplama yapılmasına olanak tanır (Razavipour et al., 2020, s. 3).

Son yıllarda yapılan çalışmalar, bağlanma mekanizmasında adyabatik kesme instabilitesinin önemli rol oynadığını ortaya koymuştur. Çarpma anında partikül ve altlık arasında çok kısa sürede yüksek deformasyon meydana gelir ve bu deformasyon bölgesinde sıcaklık hızla artar. Ancak bu sıcaklık artışı çevreye yayılmadan sınırlı bir bölgede kalır ve bu bölge adyabatik olarak kabul edilir. Bu lokal sıcaklık artışı, metalin akma gerilimini düşürerek plastik akışa neden olur. Böylece partikül, altlığa şekil vererek tutunur ve arayüzde bir miktar mikroskobik difüzyon oluşabilir (Hussain et al., 2009, s. 368).

Bunun yanı sıra, partikül yüzeyinde mevcut olan oksit tabakası, bağlanmayı engelleyici bir faktör olabilir. Oksit tabakaları genellikle partikülün yapışmasını zorlaştırır, çünkü bu yüzeyler inerttir ve metal-metal bağ oluşumunu engeller. Bu nedenle partiküller ya taze işlenmiş ya da yüzeyi aktif hale getirilmiş olmalıdır. Yapılan çalışmalarda, uzun süre açık havada bekletilmiş toz partiküllerinin yüzeylerinde biriken oksit kalınlığının artmasıyla birlikte kaplama veriminin düştüğü tespit edilmiştir (Razavipour et al., 2020, s. 4). Bu durum, cold spray uygulamalarında toz kalitesinin ve depolama koşullarının ne denli önemli olduğunu göstermektedir.

HPCS sistemlerinde altlık yüzeyinin hazırlanması da bağlanma açısından kritik bir öneme sahiptir. Altlığın kumlama, asitleme veya mekanik işleme tabi tutulması yüzey pürüzlülüğünü artırarak mekanik kilitlemeyi güçlendirir. Ayrıca yüzeydeki oksit ve

kontaminasyonlar da bu işlemlerle temizlenerek daha kararlı bir bağlanma ortamı sağlanır. Bazı çalışmalar, kaplama öncesi yapılan bu yüzey hazırlık işlemlerinin kaplama kalitesini %30'a kadar artırabildiğini ortaya koymuştur (Moridi et al., 2014, s. 373).

Tüm bu veriler değerlendirildiğinde, yüksek basınçlı cold spray sistemleri, yüksek hız, yüksek kaplama kalitesi, geniş malzeme seçeneği ve üstün bağ dayanımı ile cold spray teknolojisinin en gelişmiş formunu oluşturmaktadır. HPCS, özellikle zorlu ortamlarda çalışan makine parçalarının onarımı, yüzey sertliği ve korozyon direncinin artırılması gibi kritik uygulamalarda yüksek performans sunar. Gelecekte bağ mekanizmalarının daha iyi anlaşılması ve proses parametrelerinin daha hassas kontrolü ile HPCS sistemlerinin çok daha yaygın bir kullanım alanına sahip olması beklenmektedir.

2.3. 430 Serisi Paslanmaz Çelikler ve Titanyum Karbür Mekanik Özellikleri

2.3.1. 430 serisi paslanmaz çelik mekanik özellikleri

AISI 430 paslanmaz çeliği, ferritik mikroyapıya sahip ve nikel içermeyen bir krom bazlı paslanmaz çelik türüdür. Bu çelik, özellikle maliyet etkinliği, iyi korozyon direnci ve form verme yeteneği nedeniyle mutfak eşyaları, otomotiv parçaları ve endüstriyel fırın parçaları gibi alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Wang et al., 2022, s. 2). Ferritik karakteri, düşük karbon içeriği ve yüksek krom oranı ile öne çıkar; bu özellikler, sertleşmeye yatkınlığı sınırlı kılarken, boyutsal kararlılık ve manyetik özellikler gibi avantajlar sunar (Lo et al., 2009).

Günümüzde ferritik paslanmaz çelikler (FSS), otobüslerin yapısal iskeletlerinde ve dış panel uygulamalarında yaygın olarak kabul görmektedir. FSS'lerin mikroyapısı tamamen ferritik olabileceği gibi, tane sınırlarında martenzitin bulunduğu ferrit-martenzit karışımı bir yapı da olabilir. Tamamen ferritik mikroyapı, yüksek sıcaklıklarda östenit oluşumunun baskılanması ile elde edilebilir. Tane sınırı martenziti ya katı hal östenit dönüşümüyle ya da katılaşmanın son evresinde oluşabilir. AISI 430 tipi FSS'lerde yaygın oluşum mekanizması, katı hal östenit dönüşümüdür (Alizadeh-Sh et al., 2014, s. 258).

Son yıllarda, FSS, östenitik paslanmaz çeliklerle karşılaştırıldığında düşük nikel içeriği, düşük fiyatı ve yüksek maliyet etkinliği nedeniyle giderek daha fazla ilgi görmektedir. FSS'nin birincil temsilcisi olarak hizmet veren AISI 430 FSS, çok sayıda avantaja sahiptir. Örneğin, 430 FSS düşük doğrusal genleşme katsayısına, yüksek ısı

iletkenliğine, çukurlaşma korozyonuna ve gerilim korozyonuna karşı daha iyi dirence, mükemmel soğuk çalışma performansına, uzun hizmet ömrüne ve hurda çelik olarak tamamen geri dönüştürülebilme özelliğine sahiptir. Bu nedenle, binaların iç ve dış dekorasyonu, asansörler, mutfaklar, ev aletleri ve otomobiller dahil olmak üzere çok çeşitli uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Meng et al.,2024, s.1).

Paslanmaz çelikler, bünyelerinde bulunan krom, nikel ve diğer alaşım elementleri sayesinde geliştirilmiş korozyon direnci ile diğer çelik türlerinden ayrılmaktadır. Ferritik paslanmaz çelikler ise, %10 ila %30 arasında değişen krom içeriğine ve %0,2'nin altında karbon oranına sahip, doğrudan kromlu ve ısıtılma işlemle sertleştirilemeyen paslanmaz çelik sınıfını temsil etmektedir. Bu çelikler, ısıtılma işlem uygulamasıyla belirgin bir sertlik kazanmazken, soğuk şekillendirme işlemleriyle yalnızca sınırlı bir sertlik artışı elde edilebilmektedir. (Babur et al.,2022, s.1) AISI 430 alaşımı, yaklaşık %17 oranında krom içeriğiyle ferritik paslanmaz çelikler arasında en yaygın kullanılan türlerden biri olarak öne çıkmaktadır (Wang et al., 2020, s.184).

Cheng ve arkadaşları, ferritik paslanmaz çelik kaliteleri olan 430, 443 ve 445'in izotermal oksidasyon davranışını 1150 °C'de nemli hava ortamında incelemiştir. Test süresi boyunca, üç çeliğin kırılma tipi oksidasyonu ya hızlı (430 ve 443 çelikleri) ya da yavaş (445 çeliği) şekilde gerçekleşmiştir. 430 numaralı çelik üzerinde oluşan çok katmanlı oksit tabakası, çelikteki tüm kromun tükenmesi nedeniyle homojen kalınlıkta ve düzgün bir çelik/oksit ara yüzeyine sahip olmuştur. Ayrıca, deneysel koşullar altında, üç paslanmaz çeliğin tane boyutlarının 1150 °C'deki oksidasyon davranışı üzerinde anlamlı bir etkisinin olmadığı belirlenmiştir (Cheng et al.,2016, s.20).

Krom (Cr), ferrit fazının oluşumunu teşvik eden bir elementken; nikel (Ni), östenit fazının gelişimini destekleyen bir elementtir. Martenzit fazı, östenit fazının dönüşümü sonucunda meydana gelmektedir. Yapılan analizler, ferrit fazlarının martenzit fazlarına kıyasla daha yüksek krom içeriğine sahip olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca, martenzitik faz dönüşümü, genellikle kristal yapıda belirgin düzeyde deformasyon ve gerilim birikimine neden olmaktadır (Wang et al.,2020, s.189).

Ferritik paslanmaz çeliklerin (FSS) bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Örneğin, östenitik paslanmaz çeliklere (ASS) kıyasla daha düşük kırılma dayanımı ve iş sertleşme kabiliyetine sahip olmaları, bu malzemelerin endüstriyel uygulamalarını kısıtlamaktadır. Bu sınırlamaların giderilmesine yönelik çözüm önerileri arasında,

FSS'ye Mn elementi ilave edilerek oda sıcaklığında östenitik mikroyapının stabilizasyonu sağlanması veya FSS ile ASS'nin birlikte kullanıldığı hibrit yapıların oluşturulması yer almaktadır. Buna ek olarak, nitrürleme ya da karbonlama gibi bazı yüzeysel ısıt işlemler uygulanarak, yüzey tabakasının mekanik dayanımı artırılabilir ve böylece malzemenin genel mekanik performansı iyileştirilebilir (Wang et al.,2022, s.1). Her ne kadar ferritik paslanmaz çelikler (FSS) genellikle sertleştirilemeyen çelikler olarak kabul edilse de yüksek güçlü lazer uygulamaları, AISI 430 çeliğinin lokal mikrosertliğini etkin bir şekilde artırabilmektedir. Lazerle işleme sonucunda işlem bölgesinde belirgin bir tane irileşmesi gözlenmesine rağmen, elde edilen maksimum mikrosertlik, büyük oranda oluşan krom karbür çökeltileri ile tane sınırlarında meydana gelen martensit iğneciklerinden kaynaklanmaktadır. Lazer ışınının merkezinden uzaklaştıkça, martensit oluşumunun ve karbür çökmesinin azalmasına bağlı olarak mikrosertlikte düşüş meydana gelmektedir (Wang et al.,2022, s.9).

Mekanik özellikler açısından AISI 430 çeliği, orta derecede çekme dayanımı ve düşük akma dayanımı ile karakterizedir. Ancak bu malzeme, klasik ısıt işlemlerle martensitik dönüşüme girmediğinden, sertleştirme kapasitesi sınırlıdır. Yine de yapılan bazı geliştirme çalışmaları, AISI 430'un mikroyapısal dönüşümler aracılığıyla mekanik özelliklerinin iyileştirilebileceğini göstermektedir. Örneğin, Liang et al. (2019) tarafından uygulanan Quenching & Partitioning (Q&P) ve Quenching & Tempering (Q&T) işlemleri sayesinde, ferrit-martensit-östenit fazlarının bir arada bulunduğu çok fazlı mikroyapılar elde edilmiş ve buna bağlı olarak çekme dayanımı 815 MPa'a, uzama oranı ise %21.6'ya kadar çıkarılmıştır.

430 paslanmaz çeliğinin bu özellikleri, çoğunlukla mikroyapı bileşimi ile ilişkilidir. Ferrit fazı, yüksek termal iletkenliğe sahip olup plastik şekillenmeye uygundur. Buna karşın martensit fazı sertliği artırırken kırılabilirliği de artırır. Liang ve arkadaşlarının (2019) çalışmasında, 1000 °C'de 5 dakikalık bir ön ısıtma ve ardından 150 °C'de yağ banyosu ile yapılan ani soğutma işlemi sonucunda, %5–6 oranında östenit fazı stabilize edilmiştir. Bu faz, TRIP (Transformation Induced Plasticity) etkisiyle uzama oranını iyileştirmekte ve plastik şekillenme kapasitesini artırmaktadır. Bu durum, özellikle cold spray yöntemi gibi mekanik deformasyona dayalı biriktirme süreçlerinde çeliğin performansını olumlu etkileyebilir.

Mikrosertlik açısından değerlendirildiğinde, işlenmemiş 430 çeliği yaklaşık 160 HV Vickers sertliğine sahiptir (Wang et al., 2022, s. 5). Ancak lazer ile sertleştirme gibi yüzeysel ısıt işlemler uygulanarak, bu değer %90'a kadar artırılabilir. Yüzeyde oluşan martensit iğnecikleri ve krom karbür çökeltileri, bu sertlik artışında başat rol oynamaktadır. Özellikle çift yönlü lazer uygulamaları ile homojen sertlik dağılımı elde edilmiştir ve çekme dayanımı %45.8, akma dayanımı ise %60 oranında artırılabilmiştir (Wang et al., 2022, s. 8).

Yüksek sıcaklık uygulamaları altındaki davranış incelendiğinde, 430 paslanmaz çeliği intergranüler korozyon ve tane büyümesi gibi olumsuzluklara karşı duyarlıdır. Bu nedenle ısıt işlem ve yüzey hazırlığı süreçlerinin dikkatle optimize edilmesi gerekmektedir. Bununla birlikte, malzemenin düşük termal genleşme katsayısı ve yüksek termal iletkenliği sayesinde, soğuk püskürtme gibi düşük sıcaklıklı yöntemlerde mikroyapı stabilitesi korunabilir. Bu yönüyle, cold spray uygulamalarında altlık malzeme olarak tercih edilmesi için uygun bir adaydır (Moridi et al., 2014, s. 372).

Mekanik dayanım açısından ise, ferritik paslanmaz çeliklerin genellikle düşük iş sertleşme katsayısı sergilediği bilinmektedir. Bu durum, yüksek enerji içeren deformasyon uygulamalarında sınırlayıcı olabilir. Ancak çok fazlı mikroyapılar ve ince tane yapısı gibi parametreler kontrol altına alınarak, bu sınırlamalar büyük ölçüde giderilebilmektedir (Lu et al., 2019, s. 277). Örneğin, 430 çeliği lazer ısıt işlemine tabi tutulduğunda tane boyutlarında belirgin bir küçülme görülmüş, bu da mukavemet üzerinde olumlu bir etki yaratmıştır.

Bütün bu veriler ışığında, 430 ferritik paslanmaz çeliğinin cold spray yöntemiyle kaplanması başarılı sonuçlar elde edilmesi mümkündür. Yüzey sertliği, deformasyon toleransı ve yapışma mekanizmaları açısından yeterli seviyede performans sunan bu çelik, özellikle aşınmaya dayanıklı ve pasif ortam koşullarında kullanılacak kaplamalar için uygun bir altlık malzeme olmaktadır. Bununla birlikte, cold spray yöntemiyle yapılan kaplamalarda, 430 çeliğin yüzey hazırlığı, oksit tabakasının durumu ve tane sınırları gibi mikro düzeyde parametreler dikkatle kontrol edilmelidir.

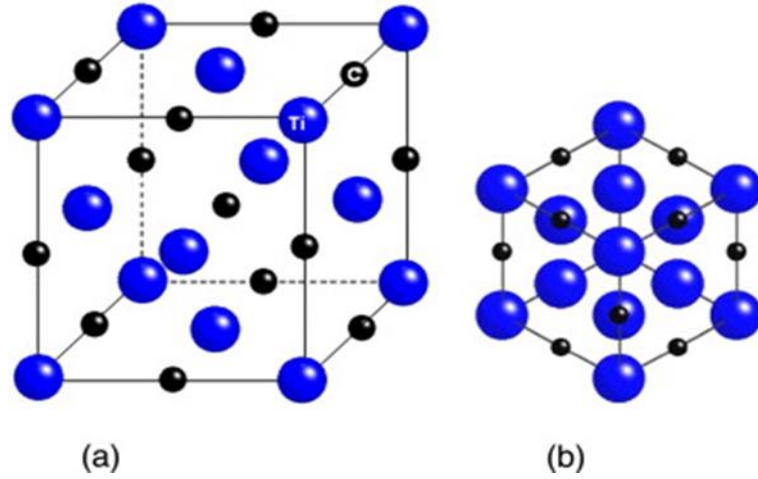
430L paslanmaz çelikler ise 430 ferritik paslanmaz çeliğin düşük karbonlu bir versiyonudur ve özellikle toz metalurjisi, metal enjeksiyon kalıplama (MIM) ve

sinterleme gibi proseslerde kullanılmak üzere geliştirilmiştir. Karbon oranı %0,03'ün altına düşürüldüğü için krom karbür çökmesi minimize edilmekte, böylece tane sınırlarında karbür oluşumuna bağlı intergranüler korozyon riski ortadan kalkmaktadır. Bu özelliği sayesinde 430L, kaynaklanabilirliği yüksek ve korozyon direnci daha kararlı bir ferritik paslanmaz çelik türü olarak öne çıkmaktadır. Ayrıca düşük karbon içeriği, sinterleme sırasında daha homojen ferritik mikroyapının elde edilmesine katkı sağlamakta ve gözenekliliğin azalmasına yardımcı olmaktadır (Upadhyaya, 2002; German, 2013).

Mekanik özellikler açısından 430L, standart 430 paslanmaz çeliğe kıyasla biraz daha düşük çekme dayanımı ve sertlik göstermesine rağmen daha iyi şekillendirilebilirlik, süneklik ve tokluk sunmaktadır. Bu nedenle, özellikle karmaşık geometrilere sahip parçaların üretiminde tercih edilmektedir. Ayrıca 430L tozları, düşük karbon miktarları sayesinde sinterleme sonrası boyutsal stabiliteyi artırmakta ve homojen dağılımlı ferrit matrisinde daha az karbür fazı içermektedir. Tüm bu avantajlar, 430L paslanmaz çeliği toz metalurjisi tabanlı kaplamalar ve ince duvarlı mühendislik parçaları için oldukça uygun bir malzeme haline getirmektedir (ASM International, 1994; German & Bose, 1997).

2.3.2. Titanyum karbür mekanik özellikleri

Titanyum (Ti) ile karbon (C) arasındaki bileşikler arasında (TiC , Ti_2C , Ti_3C_2 , Ti_8C_{12} , $Ti_{13}C_{14}$, $Ti_{13}C_{22}$ vb.), kristal yapısı bakımından en kararlı olanı, yüzey merkezli kübik (FCC) yapıya sahip titanyum monokarbür (TiC) bileşiğidir. Bu yapı içerisinde titanyum ve karbon atomları, sıkı paketlenmiş yüzey merkezli kübik düzende yerleşmiştir. Karbon atomları, titanyum atomlarının oluşturduğu oktahedral boşluklarda yer alır. Bu karakteristik kristal yapı, kovalent, iyonik ve metalik bağ türlerinin bir arada bulunmasına olanak tanır. Bu nedenle, TiC çok çeşitli zorlu çalışma koşullarında geniş bir uygulama alanına sahiptir. Yüksek termal kararlılığı ve mükemmel radyasyon direnci sayesinde, TiC özellikle uzay araçlarında kullanılan ileri düzey yapısal malzemeler ile yeni nesil nükleer fisyon ve füzyon reaktörleri için umut vadeden bir aday olarak değerlendirilmektedir. Biyomalzeme alanında ise TiC ; yapay eklem, kemik güçlendirme materyali veya fototermal tedavi ajanı olarak da işlev görebilmektedir (Xiang et al., 2024, s.10).



Şekil 2.3. (a) TiC'nin kristal yapısı ve (b) Ti-C atomlarının [111] yönünde izdüşümü. Daha küçük atomlar C atomlarıdır. (Li et al., 2008, s.52).

Titanyumkarbür (TiC), yüksek sertlik, aşınma direnci ve termal kararlılık özellikleri ile öne çıkan, teknik seramikler sınıfında yer alan bir malzemedir. Kübik kristal yapıya sahip olan TiC'nin teorik sertliği 30 GPa'a, elastik modülü ise 400–600 GPa aralığına ulaşabilmektedir. Bu özellikleri sayesinde özellikle aşınma dayanımının kritik olduğu ortamlarda tercih edilen bir takviye fazı olarak birçok metal matrisli kompozit sistemde yaygın olarak kullanılmıştır (Liao et al., 2021, s. 2). Yüksek erime noktası ($\sim 3160^\circ\text{C}$), TiC'yi özellikle termal olarak kararlı kaplama sistemleri için uygun hale getirir. Aynı zamanda TiC bu özellikleri ile çelikler üzerinde uygun bir kaplama malzemesidir (Hamedi et al., 2024, s.2).

TiC, önemli bir inorganik metalik olmayan malzeme ve tipik geçiş metal karbürüdür. Kristal yapısı mikroskobik iyonik bağlar, metal bağları ve kovalent bağlar içerir. NaCl kristali ile aynı kübik yapıya ve yüzey merkezli kübik kristal yapıya sahiptir. TiC, bundan dolayı düşük yoğunluk ($4,93 \text{ g/cm}^3$), yüksek elektrik iletkenliği ($30 \times 10^6 \Omega \text{ cm}$), yüksek termal iletkenlik ($21 \text{ W/m}\cdot\text{K}$), yüksek termal ve kimyasal kararlılık, düşük elektrik direnci ($68 \mu\Omega\cdot\text{cm}$). Yüksek aşınma direnci ve termal deformasyon direnci, düşük nötron soğurma kesiti, metallere karşı düşük sürtünme katsayısı gibi olağanüstü niteliklere sahiptir. TiC, esas olarak TiC bazlı seramiklerin üretiminde hammadde olarak kullanılır. Ayrıca çeşitli metal matrisli kompozitlerin üretiminde takviye maddesi veya aşınmaya dayanıklı kaplamalar için aşınma önleyici madde olarak kullanılır. Uygulaması, işleme, yüzey mühendisliği, toz metalurjisi ve elektronik endüstrisi gibi birçok alanı kapsar (Nguyen et al., 2021, s.449; Shen et al., 2021; Song et al., 2009; Ma et al., 2018; Li et al., 2008; Wang et al., 2006). Diğer çoğu seramik

gibi TiC de düşük tokluğa ve zayıf kırılma tokluğuna sahiptir ve bu da gelişmiş bir yapısal malzeme olarak uygulamalarını engeller. Bu sorunun üstesinden gelmenin etkili bir yolu, TiC bazlı kompozitler üretmektir (Liu et al.,2016, s.166).

TiC'nin mekanik katkı potansiyeli, onu yalnızca titanyum gibi sünek metallerle değil, aynı zamanda paslanmaz çelikler gibi daha sert matrislerle de birlikte kullanmak için cazip kılar. Metal matris kompozitlerinde (MMK) TiC katkısı, özellikle Vickers sertliği, kuru sürtünme dayanımı ve oksidasyon direnci gibi parametrelerde iyileşme sağlar. Bu katkının etkisi, partikül boyutu, dağılım homojenliği, yüzey etkileşimi ve kullanılan matrisin mikroyapısal karakteri ile doğrudan ilişkilidir (Zhou et al., 2023, s. 4).

Degan ve Shipway çalışmasında, TiC'nin yük taşıma kapasitesinin ve sürtünme sırasında metal-metal temasını azaltma yeteneğinin, TiC içeren metal matrisli kompozitlerin (MMC) aşınma performansındaki iyileşmeden sorumlu olduğunu belirtmiştir (Hamed et al., 2024, s.2).

Literatürde TiC'nin cold spray yöntemiyle kaplanması genellikle Ti veya Al gibi sünek metallerle birlikte çalışılmıştır. Örneğin, Chen et al. (2021) tarafından yapılan çalışmada %65 TiC içeren Ti matrisli kompozit kaplamalar, supersonik hızlarda cold spray yöntemiyle başarıyla altlık yüzeye uygulanmış ve ortalama sertlik değerlerinin 579 HV seviyelerine ulaştığı belirtilmiştir. Bu tip sünek matrisler, seramik fazın aglomerasyonunu azaltmakta ve yapışma kabiliyetini artırmaktadır. Ancak bu çalışmalar, doğrudan ferritik paslanmaz çelik matrislerle yapılan TiC katkılı cold spray uygulamaları kadar yaygın değildir.

Seungchan Cho çalışmasında, SS431 ve TiC-SS431 kompozitinin yüksek sıcaklık mekanik özelliklerini araştırmıştır. Sıcaklık yükseldikçe, SS431'in Vickers sertliği kademeli olarak azalmış, buna karşın TiC-SS431 kompozitinin sertliği tüm sıcaklık aralığında SS431'inkine kıyasla belirgin şekilde yüksek kalmıştır. Özellikle 800 °C sıcaklıkta, TiC-SS431 kompozitinin sertliği SS431'in sertliğinin yaklaşık 3,65 katı olarak ölçülmüştür. Aynı zamanda farklı sıcaklıklarda (700, 800 ve 900 °C) çekme testleri yapılmıştır. TiC-SS431 kompozitinin çekme dayanımının tüm sıcaklıklarda SS431 alaşımınınkinden önemli ölçüde daha yüksek olduğu sonucuna varılmıştır. Aynı çalışmada, SS431'in yüksek sıcaklıklarda HMK (Hacim Merkezli Kübik) kafes yapısından YMK (Yüzey Merkezli Kübik) kafes yapısına faz dönüşümü geçirdiği, bu

dönüşümün ise termal iletkenlik ve ısı genleşme katsayısında (CTE) önemli değişikliklere yol açtığı belirlenmiştir. Buna karşılık, TiC–SS431 kompoziti, faz dönüşümünden etkilenmeksizin kararlı termal iletkenlik ve CTE değerleri sergilemiştir (Cho et al., 2023, s.7251).

430L ferritik paslanmaz çelik gibi sert ve düşük nikel içerikli matrislerde TiC ile birlikte çalışmak, literatürde oldukça sınırlı örneklerle temsil edilmektedir. Bunun nedeni, hem paslanmaz çeliklerin cold spray yönteminde parçacık deformasyonu için gerekli kritik hızının yüksek olması hem de TiC gibi gevrek fazların yüzeye bağlanmasının zorluklarıdır (Moridi et al., 2014, s. 373). Bununla birlikte, bazı öncü çalışmalar TiC katkısının 430L gibi ferritik paslanmaz matrislerde cold spray yoluyla uygulanmasının mümkün olduğunu ortaya koymuştur. Bu tür sistemlerde, TiC katkısı yalnızca sertlik kazandırmakla kalmaz; aynı zamanda kaplamanın yüzeysel aşınma direncini ve kuru sürtünme koşullarında tribolojik stabilitesini de iyileştirir (Zhang et al., 2022).

Bir diğer önemli parametre, TiC'nin soğuk püskürtme bağlanma davranışıdır. Gevrek yapısı nedeniyle TiC parçacıkları altlığa doğrudan yapışmakta zorlanabilir. Bu nedenle, paslanmaz çelik gibi sünek fakat yüksek dayanımlı matrisler içinde TiC'nin homojen dağılımı kritik rol oynar. Özellikle 10–30 wt.% gibi ağırlıkça oranlarda TiC takviyesi, mekanik özelliklerde anlamlı artışlar sağlarken, gözeneklilik ve bağ dayanımı gibi parametreleri optimum düzeyde tutma imkânı sunar (Liang et al., 2020, s. 118). Bu katkı düzeyleri, seramik parçacıkların çarpma sonrası yerleşimini optimize ederken aynı zamanda soğuk püskürtme bağlanma mekanizmalarıyla da uyumlu çalışır.

Cold spray ile üretilen 430L SS + TiC kompozit kaplamaların mekanik karakteristiği üzerine yapılan deneysel gözlemler, matrisin sünek yapısının, TiC'nin kaplama içinde dağılılabilişliğini artırdığını ve deformasyon bölgesinde mekanik bağın gelişmesini kolaylaştırdığını göstermektedir. TiC'nin, mikroyapı içinde çekirdeklenme merkezleri oluşturduğu, bu sayede tane incilmesi ve mikrosertlik artışı sağladığı da bazı literatürlerde belirtilmektedir (Zhou et al., 2023, s. 5).

Yine de TiC katkısının aşırıya kaçtığı durumlarda, parçacıklar arası bağ dayanımında zayıflama, gözenek oluşumu ve kırılgeçirgenlik gibi problemler gözlemlenebilir. Bu nedenle katkı oranlarının kontrollü olması, partikül boyutu dağılımının dar tutulması

ve nozul tasarımıından püskürtme mesafesine kadar olan proses parametrelerinin iyi optimize edilmesi gerekmektedir (Moridi et al., 2014, s. 374). Özellikle ferritik paslanmaz çeliklerde bu tip katkıların başarılı şekilde uygulanabilmesi için yüzey hazırlığı (örneğin kumlama) ve uygun gaz sıcaklığı gibi hazırlık adımları büyük önem taşır.

Bu bağlamda, literatürde TiC'nin 430L ferritik paslanmaz çelik ile birlikte cold spray yöntemiyle uygulanmasına dair araştırmalar oldukça sınırlı olup, bu ikilinin birlikte kullanımı büyük oranda açıklığa kavuşturulmamıştır. Bu çalışmanın özgün yönlerinden biri, bu boşluğu doldurarak, farklı oranlarda (10%, 20%, 30%) TiC katkısının 430L paslanmaz matris içindeki etkilerini sistematik olarak değerlendirmek ve bu kaplamaların mikroyapısal ve mekanik performanslarını analiz etmektir.

2.3.3. Titanyum karbür tozlarının ergime içeren kaplama yöntemlerinde kullanılmasının yarattığı sorunlar

Titanyum karbür (TiC), yüksek sertliği, düşük yoğunluğu ve kimyasal kararlılığı sayesinde metal matrisli kompozit kaplamalarda yaygın olarak kullanılan bir seramik takviye malzemesidir. Ancak, bu malzemenin plazma spreyleme, HVOF (High-Velocity Oxy-Fuel), lazer kaplama ve PTA (Plazma Transfer Ark) gibi ergime içeren yüzey kaplama yöntemleriyle uygulanması sırasında çeşitli mikroyapısal, mekanik ve kimyasal sorunlarla karşılaşmaktadır. Bu bölümde, ergime temelli yöntemlerin TiC partikülleri üzerindeki olumsuz etkileri sistematik olarak incelenmektedir.

2.3.3.1. Yüksek sıcaklığa bağlı oksidasyon ve faz bozulmaları

Ergime içeren termal kaplama yöntemlerinde partiküller, plazma veya gaz alevi içerisinde 2000 °C'ye kadar ulaşan sıcaklıklara maruz kalmakta ve bu süreçte in-flight (uçuş esnası) oksidasyon kaçınılmaz hâle gelmektedir. TiC partiküllerinin yüksek sıcaklıkta ortam havasıyla temas etmesi sonucunda TiO₂ oluşumu gözlemlenmiş ve bu oksit fazlarının hem sertliği azalttığı hem de yapışma mukavemetini düşürdüğü raporlanmıştır (Testa vd., 2022, s. 3). Özellikle TiC-WC-NiCr gibi çok fazlı sistemlerde, WC'nin çevresinde TiC ile reaksiyona girerek (W,Ti)C geçiş fazları oluşturduğu, ancak bu yapıların kaplama sonrasında oksidasyona açık hale geldiği belirtilmektedir (Testa vd., 2022, s. 5).

S. Deshpande ve arkadaşları çalışmalarında, Ni-%5 Al kaplamalarda kullanılan farklı termal püskürtme yöntemlerinin (HVOF, APS, Tel Ark) parçacık oksidasyonu

üzerindeki etkilerini incelemektedir. Uçuş sırasında parçacıklar oksijenle temas ederek yüzeylerinde veya iç yapılarında oksitlenmeye uğrayabilir. Bu oksidasyon; parçacık sıcaklığı, çevresel hava ile etkileşim, jetin hızı ve türbülansı gibi faktörlere bağlıdır. HVOF yönteminde parçacık sıcaklığı daha düşük ve bağıl hız az olduğundan oksidasyon daha sınırlı olup genellikle parçacığın içinde yayılmış iç oksitler ve ince bir oksit kabuğu şeklinde gözlenir. Buna karşılık, APS (Hava plazma püskürtme) ve Tel Ark püskürtme yöntemlerinde daha yüksek sıcaklık ve hava karışımı nedeniyle daha yoğun ve yüzeye segregasyon olmuş oksitler oluşur (Deshpande et al., 2006, s.5398).

Parçacık boyutu da oksidasyon davranışını etkiler; küçük parçacıklar tüm hacme yayılmış oksitler içerirken, büyük parçacıklarda yüzeyde oksit kabukları görülür. Ayrıca, parçacıklar yeterince erimemişse yüzey oksitlenmesi belirginleşir. Yapılan analizler ve mikroskobik incelemeler, oksit dağılımının uçuş sırasında gerçekleşen türbülans ve ısı değişimi ile şekillendiğini ortaya koymaktadır. HVOF yöntemi, daha az oksidasyon ve homojen yapı sunması açısından kaplama kalitesi için daha avantajlıdır (Deshpande et al., 2006, s.5399).

2.3.3.2. İnterlameller gevrekliğe bağlı mikroçatlaklar

TiC içeren kaplamalarda, ergime-sonrası lameller arası bölgelerde oluşan gevrek yapılar, yüksek gerilme altında mikroçatlaklara neden olmaktadır. Bu durum aşınma sırasında "lamel soyulması" olarak bilinen yüzeysel parçalanmalara neden olmakta ve özellikle yüksek temas yüklerinde katman kopmaları ile sonuçlanmaktadır (Bolelli vd., 2019, s. 7). TiC-FeNiCr sistemlerinde bu gevrek yapıların, yüzey yorgunluğu altında belirgin performans düşüşüne yol açtığı gösterilmiştir.

Bolelli çalışmasında, HVOF püskürtmeli TiC-FeCrAl kaplamaların özelliklerini incelemiş ve bir dezavantaj olarak bu kaplamaların gevrek bir davranış sergilediğini görmüştür. Bu durum, özellikle 3 N yük altında gerçekleştirilen Berkovich sertlik ölçümleri sırasında malzemenin çatlaması ve yüzeyden kalkmasıyla belirginleşmektedir. Bu gevrek yapı, kaplamanın yüksek gerilmeli üç-cisimli aşındırma koşullarına tepkisini, HVOF yöntemiyle kaplanmış Cr₃C₂-NiCr referans kaplamaya kıyasla olumsuz yönde etkilemektedir. Hem lameller arası (inter-lamellar) hem de lamel içi (intra-lamellar) gevrek kırılmalar, bu kaplamalarda daha yüksek aşındırıcı aşınma kayıplarına katkıda bulunmaktadır (Bolelli et al., 2019, s.49).

2.3.3.3. Kimyasal uyumsuzluk ve faz dönüşüm sorunları

Demirin ferrit ve perlit fazları, küpün sekiz köşesinde konumlanmış atomlar ve küpün merkezinde bulunan ek bir atom ile karakterize edilen gövde merkezli kübik (BCC) yapılara sahiptir. Saf demir atomları 911 °C'ye kadar bir BCC yapısı içinde düzenlenmiştir. Bu sıcaklığın üzerinde, yapı yüz merkezli kübik (FCC) faz geçişine uğrar. BCC'den FCC yapısına geçiş, demir ve çeliğin yoğunluğunda %8-9'luk bir artışa neden olur ve bu da malzeme geçiş sıcaklığının üzerine ısıtıldığında hacimsel boyutta büzölmeye neden olur. Faz dönüşümü yüksek sıcaklıklarda meydana geldiğinde, demir ve çeliklerin boyut kararlılığı önemli ölçüde bozulur. Bu nedenle, çabalar çeliklerin yüksek sıcaklık özelliklerini iyileştirmeye yöneliktir (Cho et al., 2023, s.7242).

Ergime içeren yöntemlerde metal matris ile TiC arasındaki kimyasal uyumsuzluk, çözünme ve yeni faz oluşumları ile sonuçlanabilmektedir. Özellikle FeCrAl gibi matrislerle kaplama yapılırken, TiC'nin kısmen çözünerek istenmeyen geçiş fazlarının oluştuğu ve bu yapıların kaplamanın genel performansını olumsuz etkilediği rapor edilmiştir (Testa vd., 2022, s. 6). Ayrıca, ergime sonrası hızlı soğutma koşulları nedeniyle oluşan kalıntı gerilmeler, kaplamada mikroyapı kararsızlığına neden olmaktadır.

2.3.3.4. Korozyon ortamlarda dayanım kaybı

Bazı çalışmalar, HVOF ile uygulanan TiC-FeCrAl kaplamaların, özellikle sulu korozyon ortamlarda yeterli koruma sağlayamadığını ortaya koymuştur. Bunun nedeni, FeCrAl matrisinin işlem sırasında Al içeriğinin oksitlenerek tükendiği ve koruyucu film tabakasının zayıfladığı yönündedir. Ayrıca, kaplama sırasında oluşan gözenek yapısı ve interlamel oksit fazları, elektrokimyasal reaksiyonlara açık alanlar yaratmakta ve bu da kaplamanın korozyon akım yoğunluğunu artırmaktadır (Testa vd., 2022, s. 7).

Venkata ve arkadaşlarının çalışması, soğuk püskürtme yöntemiyle üretilen Ti6Al4V–TiC kaplamanın yüksek sıcaklıktaki tribolojik davranışını incelemiştir. WC-Co küresi karşı yüzey olarak kullanılarak, kaplamanın farklı sıcaklıklardaki aşınma direnci değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, kaplamanın tüm sıcaklıklarda üstün aşınma direnci sergilediğini ortaya koymuş ve bu durumun yüksek sıcaklık koşullarında dahi güvenilir aşınma koruması sağladığını göstermiştir. Ana aşınma mekanizması olarak aşındırıcı aşınma tespit edilmiş olsa da kompozit kaplama içerisinde oluşan tribolojik tabakanın aşınmayı azalttığı belirlenmiştir. 200 °C üzerindeki sıcaklıklarda ise, WO₃,

CoWO₄ ve TiO₂ içeren oksit tabakalarının koruyucu bariyer görevi görerek aşınma direncini artırdığı görülmüştür (Lakkannavar et al., 2024, s.5).

Bolelli ve arkadaşlarının incelediği çalışmalarda, TiC esaslı kaplama formülasyonlarında alaşım matrisinin transpasif rejimde selektif korozyona uğradığı gözlemlenmiştir. Özellikle TiC-NiCr ve TiC-FeNiCr kaplamalarında, korozyon hasarı kaplama boyunca homojen şekilde ilerlemiş ve matris fazı neredeyse tamamen çözünmüştür. Bu nedenle, TiC parçacıkları korozyondan etkilenmeden kalmış, ancak artık yapısal destekten yoksun hâle gelmiştir. TiC-WC-NiCr kaplamalarının kesit morfolojisi ise bir miktar farklılık göstermektedir; bu durumda, belirgin bir şekilde ağır korozyona uğramış bölge ile etkilenmemiş bir bölge arasında net bir ayrım gözlenmemektedir. Ancak, bazı lameller boyunca matris fazının tamamen çözündüğü görülmektedir (Bolelli et al., 2020, s.11).

2.3.3.5. Sağlık ve çevre güvenliği açısından kısıtlamalar

Manuel olarak kullanılan termal sprey kaplama yöntemlerinde işçiler akut veya kronik akciğer rahatsızlıklarına neden olabilecek gazlara, buharlara tozlara vb. maruz kalabilir. Teorik olarak otomatik püskürtme sistemleri kullanıldığında bile işçiler daha düşük seviyede de olsa aynı risklere maruz kalabilir. Termal sprey işlemleri sırasında oluşan toz ve parçacıklar, yüzeye ulaşamayıp sıçrayabilir veya buharlaşarak ince tozlar oluşturabilir. Bu parçacıklar solunduğunda boyutlarına göre solunum sisteminin farklı bölgelerine ulaşabilir ve sağlık riski oluşturabilir (Hériaud-Kraemer et al., 2003, s.542).

Termal püskürtme işlemleri sırasında operatörler, yanma ürünlerinden kaynaklanan CO ve CO₂ gibi gazlara, plazma püskürtme sırasında oluşan NO_x ve O₃ gibi toksik gazlara, ayrıca yüksek buhar basıncına sahip malzemelerin buharlaşmasıyla ortaya çıkan metal buharlarına maruz kalabilir. Bu tehlikeler özellikle plazma püskürtmede daha belirgin olup, kullanılan gaz türleri ve malzeme özelliklerine bağlı olarak değişkenlik gösterir (Hériaud-Kraemer et al., 2003, s.543).

HVOF ve plazma sprey gibi yöntemlerde yaygın olarak kullanılan tungsten (W) ve kobalt (Co) içerikli sistemlerin, insan sağlığı açısından mutajenik ve kanserojen etkileri bulunduğu Avrupa Kimyasallar Ajansı (ECHA) tarafından rapor edilmiştir. Özellikle kobalt tozlarının inhalasyonu, astım, dermatit ve pulmoner fibrozis gibi sağlık problemlerine yol açmaktadır (Testa vd., 2022, s. 2). Bu nedenlerle, ergime

içeren yöntemlerde TiC kullanımı, alternatif bağlayıcı sistemlere yönelimi tetiklemiş ancak istenen performansa ulaşmak çoğu zaman mümkün olamamıştır.

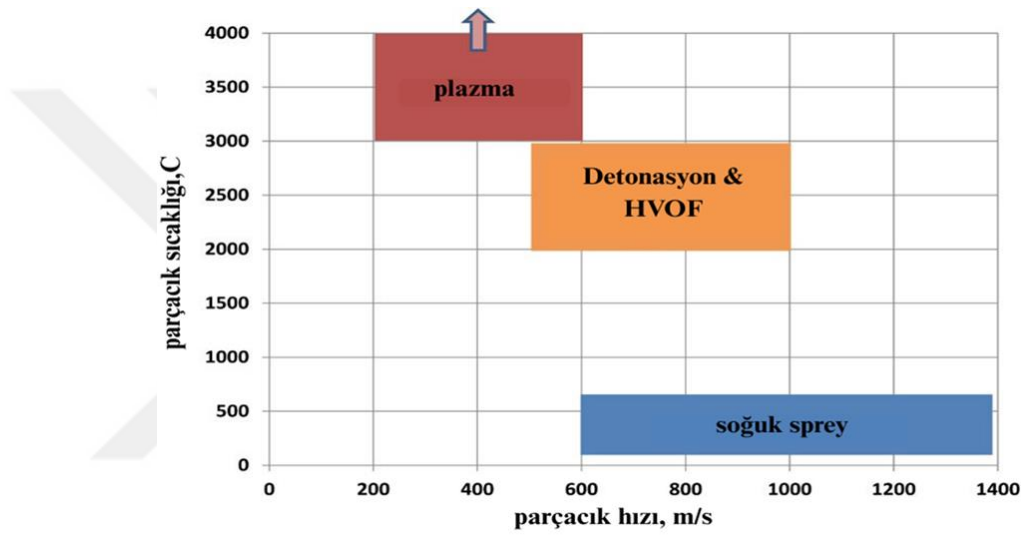
2.3.3.6. Cold spray yönteminin alternatif olarak öne çıkışı

Soğuk püskürtme yöntemi, geleneksel termal püskürtme yöntemlerine kıyasla daha düşük sıcaklıklarda (tipik olarak 400 °C, maksimum 800 °C) gerçekleştirildiğinden, damlacık oluşumu sırasında meydana gelen tane irileşmesi gibi olumsuz etkileri önler. Plazma püskürtme gibi geleneksel tekniklerde bu sıcaklıklar genellikle 2 500 °C'nin üzerindedir ve bu durum parçacıkların erimesine neden olurken, soğuk püskürtmede biriktirme işlemi parçacıkların erimesine değil, plastik deformasyonuna dayanır. Ayrıca, düşük sıcaklıkta gerçekleşmesi sayesinde, kaplanan malzemelerin istenmeyen fazlara dönüşmesini veya yüksek sıcaklık faz geçişlerine uğramasını engellediğinden, soğuk püskürtme yöntemi tercih edilen bir kaplama tekniği hâline gelmiştir (Gan et al., 2015, s.209).

AC Karaoğlu ve diğerleri çalışmasında, APS (Atmosferik Plazma Püskürtme), HVOF (Yüksek Hızlı Oksijen Yakıtlı Püskürtme) ve CGDS (soğuk gaz dinamik sprej) yöntemleriyle üretilen CoNiCrAlY bağ kaplamalarının aşınma performansı ve mikroyapısal özellikleri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar; CGDS yöntemiyle üretilen numuneler, HVOF ve APS yöntemlerine kıyasla en yüksek yüzey sertliğine sahiptir. CGDS kaplamaları, HVOF ve APS kaplamalarına göre daha yüksek yüzey pürüzlülüğü değerleri göstermektedir. CGDS yöntemiyle üretilen kaplamalarda, HVOF ve APS kaplamalarına kıyasla daha düşük hacimsel aşınma (aşınma sonucu meydana gelen malzeme kaybı) tespit edilmiştir (Karaoglanli et al., 2013, s.16).

Xinliang Xie ve diğerleri çalışmasında Ni kaplı FeSiAl kompozit tozu kullanılarak Soğuk Sprej (CS) ve Yüksek Hızlı Oksijen Yakıtlı (HVOF) yöntemleriyle üretilen Ni/FeSiAl SMC (yumuşak manyetik kompozit) kaplamaların mikroyapısı, tribolojik ve manyetik özellikleri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. CS yöntemiyle elde edilen kaplamalar, yüksek yoğunluk ve daha fazla parçacık deformasyonu ile karakterize edilirken; HVOF kaplamalarda daha fazla oksit içeriği ve gözle görülür kusurlar tespit edilmiştir. Her iki yöntemde de belirgin faz dönüşümü gözlenmemiş, ancak HVOF kaplamalarında FeSiAl parçacıklarının kısmi ergimesi görülmüştür. Ni bağlayıcı tabakası her iki yöntemde de başarılı kaplama oluşumu açısından kritik rol oynamış, CS'de yüksek çarpma hızı ile plastik deformasyonla metalik bağ sağlanırken, HVOF'de sıcaklık etkisiyle bağ oluşumu desteklenmiştir (Xie et al., 2019, s.232).

P. Richer ve arkadaşları, CoNiCrAlY kaplamasının Atmosferik Plazma Sprey (APS), Yüksek Hızlı Oksijen Yakıtlı (HVOF) ve Soğuk Sprey yöntemleriyle elde edilen farklı kaplama süreçleri sonucunda oksidasyon özelliklerini incelemiştir. Kaplamalara 1000 °C sıcaklıkta, 5, 25, 50 ve 100 saat izotermal ısıt işlemler uygulanmıştır. Oksit büyüme hızları, SEM, XRD ve EDS analizlerinden elde edilen verilerle değerlendirilmiştir. APS yöntemiyle elde edilen kaplamalarda, HVOF ve soğuk spre y yöntemlerine kıyasla daha yüksek düzeyde oksidasyon gözlemlenmiştir. CoNiCrAlY bağ kaplamalarında oksidasyon miktarı, APS ve HVOF yöntemlerine göre soğuk spre y yönteminde daha azdır (Richeret al., 2010, s.3974).



Şekil 2.4. Termal püskürtme yöntemlerinin parçacık sıcaklığı ve parçacık hızı grafiği (Champagne et al., 2016 s.441).

Tüm bu sınırlamalar, son yıllarda cold spray gibi katı hâl kaplama yöntemlerinin TiC gibi yüksek sıcaklığa hassas katkılar için ön plana çıkmasına neden olmuştur. Cold spray yönteminde, düşük işlem sıcaklıkları sayesinde TiC'nin yapısı korunur, oksidasyon ve faz bozulmaları engellenir, interlamel çatlak oluşumu minimize edilir (Chen vd., 2021, s. 6). Ayrıca, cold spray yöntemi ile üretilen kaplamalar, gözeneklilik açısından daha homojen ve bağ dayanımı yüksek yapılar sunmaktadır.



3. DENEYSEL ÇALIŞMA

3.1. Deneyin Yapılışı ve Numunelerin Hazırlanması

Bu çalışmada, CK45 çeliği altlık yüzeyine, katkısız 430L paslanmaz çelik tozu ve %10, %20, %30 oranlarında Titanyum Karbür (TiC) katkılı 430L paslanmaz çelik tozları, yüksek basınçlı soğuk sprej (High Pressure Cold Spray - HPCS) yöntemiyle kaplanmıştır. Kaplama işlemlerinde Höganäs firmasına ait 430L paslanmaz çelik tozu (Fe: Bal., C:<0.03, Si:0.9, Cr:17, Mn:0.1) ve Höganäs x-TiC serisi TiC tozu (Ti:79.4, C:19.6, O:1) kullanılmıştır.

Numunelerin hazırlanması süreci şu şekilde gerçekleştirilmiştir:

3.1.1. Altlık hazırlığı

CK45 çelik levhalar, yüzeydeki oksit ve kir tabakasının giderilmesi amacıyla kumlama işlemine tabi tutulmuştur. Bu işlem, yüzey pürüzlülüğünü artırarak soğuk sprej kaplamanın mekanik bağlanmasını kolaylaştırmak için yapılmıştır.

3.1.2. Tozların karıştırılması

TiC katkılı toz karışımları, ağırlıkça %10, %20 ve %30 oranlarında hazırlanmış; homojen bir karışım elde edilmesi amacıyla düşük devirli mekanik karıştırıcıda belirli sürelerle karıştırılmıştır.

3.1.3. Kaplama işlemi

HPCS sisteminde taşıyıcı gaz olarak azot kullanılmış ve sistem 2–5 MPa aralığında bir gaz basıncıyla çalıştırılmıştır. Nozuldan çıkan toz partikülleri 1000–1500 m/s hızlara ulaşarak CK45 altlığa çarptırılmıştır. Süpersonik hızda gerçekleşen bu çarpma sonucu partiküller plastik deformasyona uğrayarak altlık yüzeye bağlanmıştır. İşlem sıcaklığı, tozların ergime sıcaklığının oldukça altında tutulmuştur.

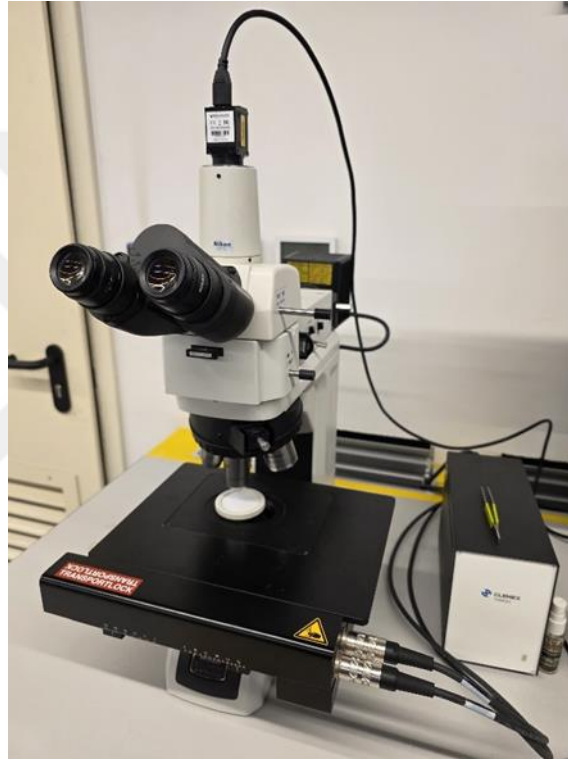
3.1.4. Numune kesimi ve parlatılması

Kaplama sonrası hazırlanan numuneler, Mecatome T265 numune kesme cihazı kullanılarak kesilmiş ve standart metalografi prosedürlerine uygun olarak zımparalanıp parlatılmıştır.

Elde edilen numuneler için optik mikroskop incelemesi, sertlik ölçümü, SEM incelemesi, XRD ölçümü ve aşınma deneyi gerçekleştirilmiştir.

3.2. Optik Mikroskop

Mikroyapı incelemeleri, Şekil 3.1’de görülen Nikon optik mikroskop ve bu mikroskoba entegre Clemex görüntü analiz sistemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu sistem sayesinde kaplama yüzeylerinin mikroyapısal özellikleri detaylı şekilde incelenmiştir.



Şekil 3.1. Optik mikroskop

3.3. Sertlik Ölçümü

Mikrosertlik cihazı, Leica VMHT Microhardness Tester kullanılmıştır. Bu cihaz, malzemelerin sertliğini ölçmek için Vickers veya Knoop indenterlerini kullanarak mikroskopik düzeyde testler yapmaktadır. Cihaz, ASTM E-384 ve EN ISO 6507 standartlarına uygun olarak 12 farklı test kuvveti seçeneği sunmakta ve yüzeyin mikro sertlik değerlerini hassas bir şekilde ölçebilmektedir. Motorize sistemi sayesinde test kuvvetleri kolayca ayarlanabilir ve otomatik odaklama fonksiyonu ile yüksek çözünürlükte görüntüleme sağlayabilmektedir. Bu cihaz, kaplamanın ve ana malzemenin sertlik profilinin belirlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır.

Sertlik deneyi 200 gr yük ile 15 saniye uygulanarak ölçüldü. 5 ölçümün ortalaması alınarak kabul edilmiştir.

3.4. Yüzey Pürüzlülük Ölçümü

Yüzey pürüzlülük ölçümleri, Şekil 3.2’de gösterilen TR200 yüzey pürüzlülük cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ölçümlerde cihazın iğne ucu, numune yüzeyi boyunca belirlenen mesafe boyunca taranmış ve elde edilen profil verileri cihazın dijital ekranı üzerinden kaydedilmiştir. Bu yöntem ile kaplama yüzeylerinin ortalama pürüzlülük (Ra) değerleri belirlenerek kaplama kalitesi ve yüzey özellikleri hakkında karşılaştırmalı değerlendirmeler yapılmıştır.



Şekil 3.2. Yüzey pürüzlülük ölçümünde kullanılan cihaz

3.5. SEM İncelemesi

Taramalı elektron mikroskobu (SEM) yaygın olarak kullanılan mikroskoplardanır. Bu mikroskopta elektron ışını kullanılarak, çok küçük bir noktaya yüksek odaklama ile yüzey topografyasının görüntüleri elde edilir. İncelenen yüzeyin çok yüksek çözünürlüklü ve kesin bir şekilde resimlerinin alınması ve bunun yanında taranan nesnenin doğrusal boyutları hakkında bilgi toplanmasını sağlar. Enerji dağıtıcı X-ray analizi (EDX) eşliğinde SEM, yüzeyin elementel analizine kolay, hızlı ve tahribatsız bir şekilde ulaşımı sağlar. SEM-EDX ile çoğu element tespiti yapılır. Taramalı elektron mikroskobu (SEM), elektron ışınını odaklamak için mercekle sisteminden ve tarama için sapma bobinlerinden faydalanmaktadır. Ayrıca numuneden yayılan ikincil elektronları toplayan dedektör bulunmaktadır. Bu yapı iki yoğunlaştırıcı mercek ve bir

objektif mercekten oluşan lens sistemidir. Görüntü iyileştirme, saptırıcı bobin ve diğer lensleri ayarlayarak gerçekleştirilir.

SEM gözlemleri JEOL JSM-6060 taramalı elektron mikroskobu ile gerçekleştirilmiştir.

3.6. XRD İncelemeleri

X-ışını kırınımı (XRD), kristalin malzemelerin birim hücre yapısının incelenmesi ve faz tanımlaması için hızlı ve güvenilir bir analitik tekniktir. Monokromatik X-ışınları, katot ışın tüpü yardımıyla üretilir, filtrelenerek odaklanır ve numuneye yönlendirilir. Numuneden saçılan ışınlar, dedektör tarafından kaydedilir ve elde edilen kırınım desenleri Bragg Yasası ($n\lambda = 2d\sin\theta$) ile değerlendirilir. Bu yasa, elektromanyetik radyasyonun dalga boyunu, kristalin kırınım açısı ve kafes düzlemleri arası mesafe (d) ile ilişkilendirmektedir.

Numune, belirli bir 2θ aralığında tarandığında, kristalin rastgele oryantasyonu sayesinde tüm olası kırınım yönleri elde edilir. Kaydedilen kırınım piklerinin d-aralıklarına dönüştürülmesi, her kristalin kendine özgü d-mesafeleri sayesinde fazların tanımlanmasına olanak sağlar. Böylece XRD yöntemi, malzemenin kristal yapısının ve içerdiği fazların hızlı bir şekilde belirlenmesinde etkin bir yöntem olarak kullanılmaktadır.

Deneyler, XRD D/MAX/2200/PC marka XRD cihazı ile gerçekleştirilmiştir.

3.7. Aşınma Deneyi

Kaplamaların aşınma ve sürtünme karakterlerini belirlemek amacıyla Şekil 3.3.'de gösterilen CSM Tribometer cihazında aşınma testleri uygulanmıştır. Deney, 5 N uygulanan yük, 500 m kayma mesafesi ve 10 m/s kayma hızı parametrelerinde gerçekleştirilmiştir. Tüm aşınma testleri %40-50 relatif nem içeren kuru aşınma koşullarında ve oda sıcaklığında gitmeli-gelmeli (reciprocating) bilya üzeri disk koşullarında gerçekleştirmiştir. Karşıt ve aşındırıcı bilya olarak 6 mm çapına sahip alümina bilyalar kullanılmıştır. Aşınma genliği olarak da 20 mm seçilmiştir.



Şekil 3.3. Aşınma deneyi cihazı



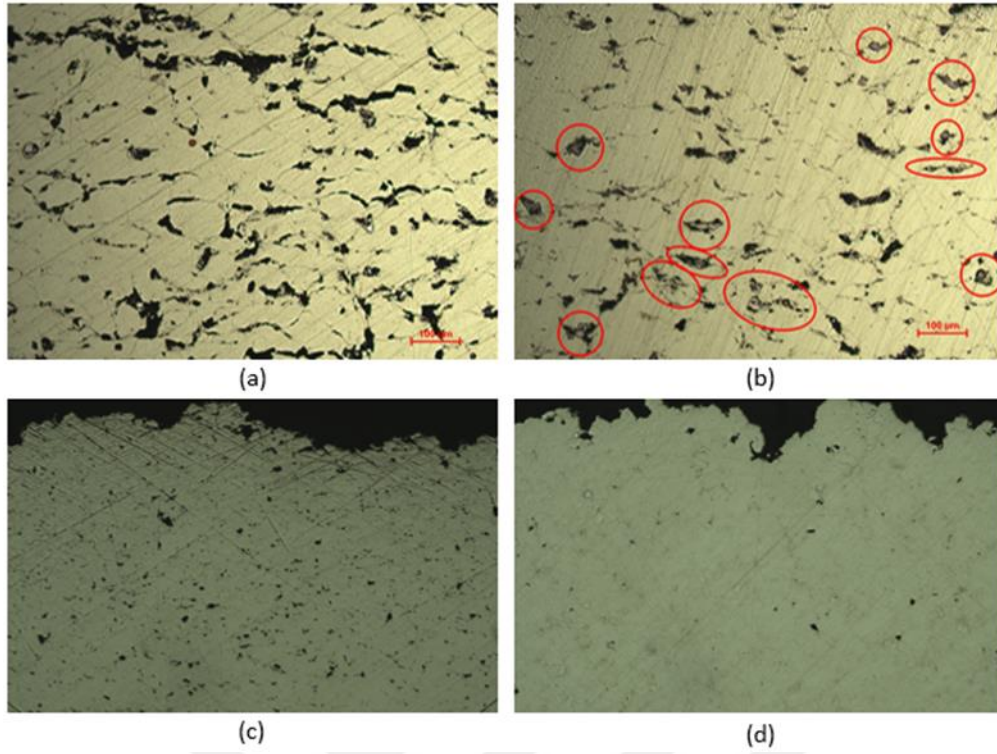
4. DENEYSEL SONUÇLAR

4.1. Mikroyapı İncelemesi

Optik mikroskop aracılığıyla kaplamaların mikroyapıları incelenmiştir. Şekil 4.1(a)'da görülen %30 TiC katkılı numunede, karbür partiküllerinin matris içerisinde belirgin şekilde dağıldığı ve bazı bölgelerde yoğunlaştığı izlenmektedir. Karbürler çoğunlukla düzensiz geometrilere sahiptir ve homojen dağılmayan bölgelerde lokal yığılmalar meydana gelmiştir. Bununla birlikte, kaplama–altlık arayüzü boyunca yapısal süreklilik korunmuştur.

Şekil 4.1(b)'deki %20 TiC katkılı numune, benzer şekilde dağılmasız incelenmiş olup gözenek benzeri boşlukların önemli bir kısmının içinde karbür bulunduğu gözlemlenmiştir. Kırmızı dairelerle işaretlenen alanlarda bu karbür oluşumları seçilebilir durumdadır. Karbürlerin varlığı matrisin sertlik ve aşınma direnci açısından güçlendiğini göstermektedir.

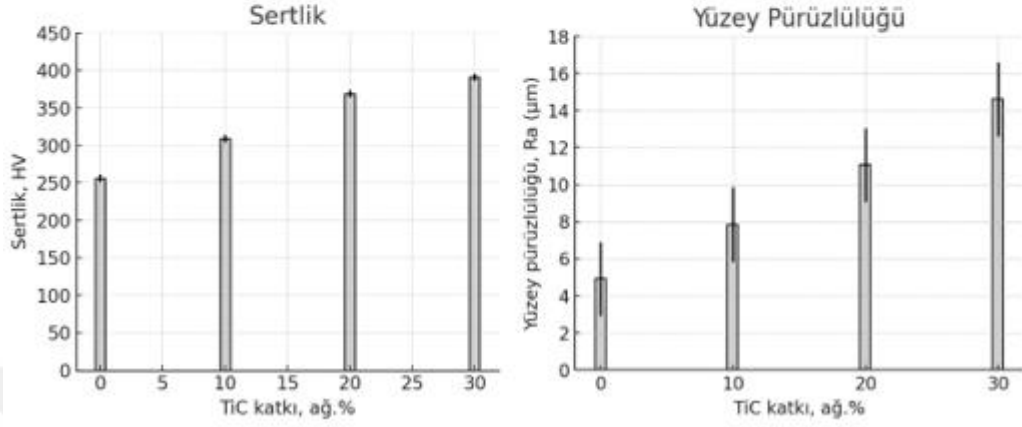
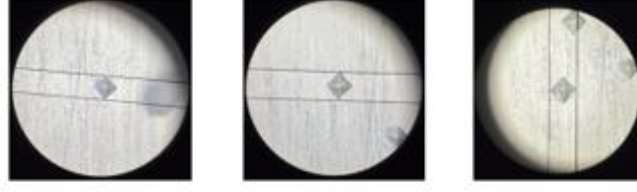
%10 TiC katkılı numune Şekil 4.1(c)'de sunulmuştur. Bu numunede karbürler, daha sınırlı ve dağınık şekilde yer almakta olup, yapı genelde daha homojen görünmektedir. Gözenek oranı diğer katkılı numunelere göre daha düşüktür.



Şekil 4.1. Mikroyapı görselleri (a) %30 TiC katılı 430L toz kaplama, (b) %20 TiC katılı 430L toz kaplama, (c) %10 TiC katılı 430L toz kaplama, (d) 430L toz kaplama

4.2. Sertlik ve Yüzey Pürüzlülük İncelemesi

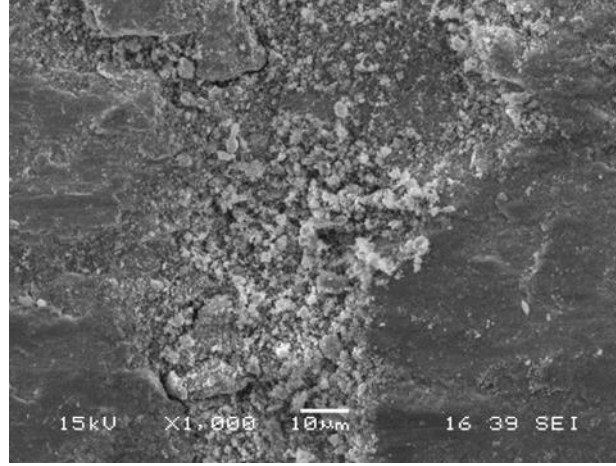
Şekil 4.2’de ölçülen sertlik değerleri ve yüzey pürüzlülük değerleri verilmiştir. Yapılan Vickers mikrosertlik ölçümleri sonucunda, katkısız 430L paslanmaz çelik kaplamada ortalama 256 HV, %10 TiC katılı numune için 309 HV, %20 TiC katılı numune için 369 HV, %30 TiC katılı numune için 391 HV olarak ölçülmüştür. Yüzey pürüzlülük değerleri ise 430L paslanmaz çelik kaplamada ortalama 4,91 μm , %10 TiC katılı numune için 7,85 μm , %20 TiC katılı numune için 11,05 μm , %30 TiC katılı numune için 14,62 μm olarak ölçülmüştür. Hem sertlik değerleri hemde yüzey pürüzlülük değerleri artan TiC katkısı ile artmış görünmektedir. TiC tozunun sertliği 430 serisi paslanmaz çelikler ile karşılaştırıldığında çok yüksektir. TiC partiküllerin kompozit etkisi yaparak kaplama sertliğini belirgin şekilde artırdığı düşünülmektedir. Yüzey pürüzlülüklerinin ise TiC katkısı ile artmasının, kaplama esnasında sert TiC partiküllerin yüzeyde oluşturduğu mekanik etkiler (çarpma, yüzeye gömülme) ve kaplama esnasında bazı TiC partiküllerin yüzeyde tutunamaması sonucu oluşan boşluklar/oyuklar ile ilgili olduğu düşünülmektedir.



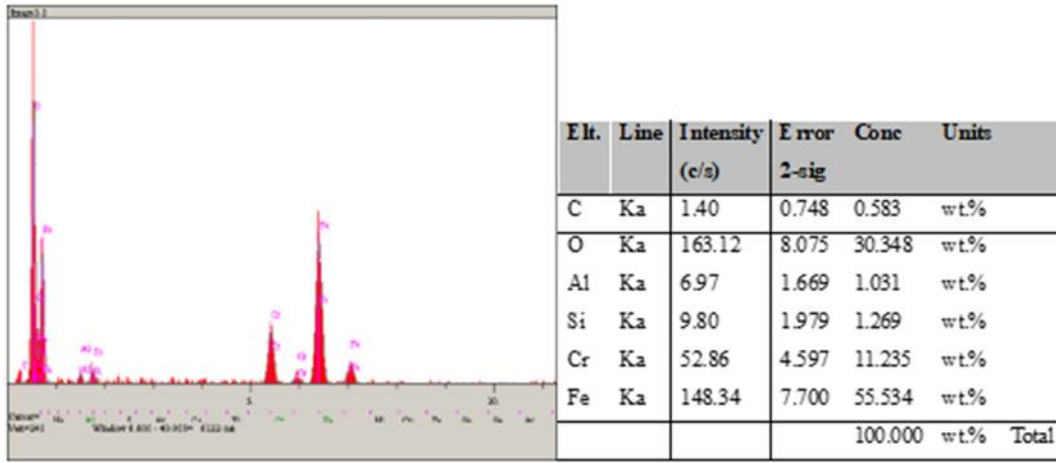
Şekil 4.2. TiC katkı oranına göre sertlik ve yüzey pürüzlülük değerleri

4.3. SEM Analizi

430L paslanmaz çelik tozunun kimyasal bileşimi; %64,14 oranında demir (Fe) ve %10,70 oranında krom (Cr) olduğu, ayrıca belirli oranlarda oksijen (%22,76), silisyum (%1,28), alüminyum (%0,34), fosfor (%0,23) ve eser miktarda nikel (%0,55) içerdiği tespit edilmiştir. Katkisız 430L paslanmaz çelik tozu kullanılarak üretilmiş kaplamaların cepheden alınmış SEM görüntüsü Şekil 4.3'te verilmiştir. Kaplamanın belli bölümlerde homojen ve az pürüzlü, belli bölümlerde ise düzensiz ve pürüzlü yapıda olduğu görülmektedir. Kaplama üzerinden alınan EDS analizi paslanmaz çelik kimyasal bileşim karakteristiğini göstermektedir ve yüzeyde oksitlenmeye bağlı olarak oksijen içeriğinin yüksek olduğunu görülmektedir. Bu durum kaplama esnasında bir miktar oksidasyonun oluştuğuna işaret etmektedir. SEM görüntüsünün genelinden alınan bölgesel EDS analizinde paslanmaz çelik içeriğinde bulunan Fe, Al, Cr ve Si en güçlü pikler şeklinde görülmektedir, kimyasal bileşim ile uyum içermektedir.



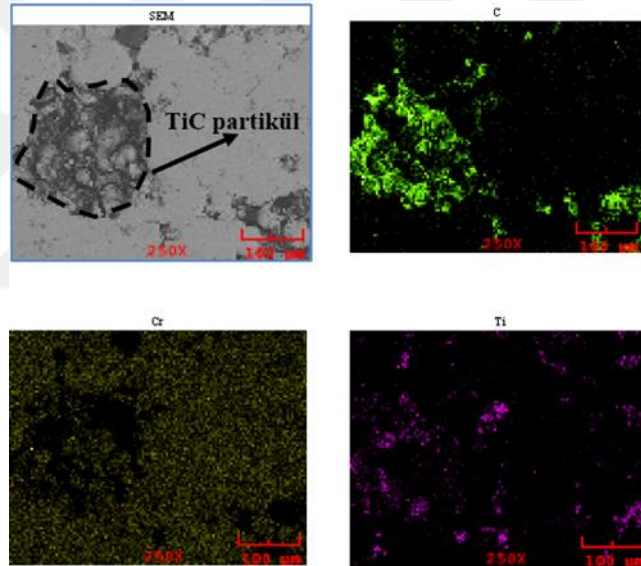
Şekil 4.3. 430L toz ile yapılan kaplamaya ait SEM görüntüsü



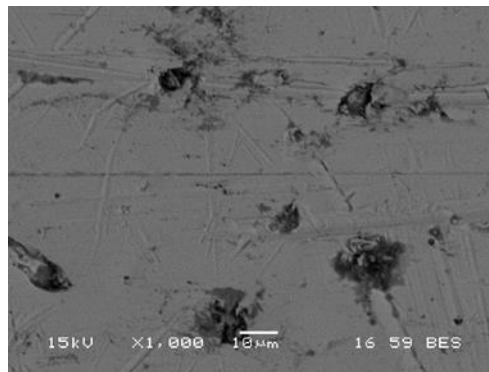
Şekil 4.4. 430L toz ile yapılan kaplama SEM analizi

%10 TiC katkılı kaplamada yapılan SEM-EDS analizi TiC tanelerinin görüntülenmesi için EDS haritaları şeklinde verilmiştir. SEM görüntüsünde TiC tanelerin paslanmaz çelik matris içine gömüldüğü net şekilde görülmektedir. TiC tanenin bulunduğu bölgeden alınan yoğun karbon sinyali bu bölgede TiC partikülü olduğunu onaylamaktadır. Kullanılan TiC tozlarının boyut aralıkları 15-45 μm olduğu düşünüldüğünde görüntüde tespit edilen TiC yoğun bölgenin boyutları 100 μm nin üzerindedir. Bu durum TiC tozlarının kaplama esnasında kısmen aglomere olduğunu göstermektedir. Aglomerasyon riski toz metalurjisinde çok rastlanılan bir sorun olup toz boyutu azaldıkça aglomerasyon riski artar. Düşük toz boyutuna ve yüksek yüzey alanına sahip tozlar yüksek yüzey enerjisine sahip oldukları için aglomere olarak yüzey enerjilerini düşürmek isterler. Ayrıca tozların statik yükleride birbirlerine yapışmalarını destekler. Kaplama esnasındaki sıcaklık etkiside aglomere olma eğilimini etkilemiş olabilir. Tüm bu parametreler düşünüldüğünde TiC tozların bir

miktar aglomere olduğu ve paslanmaz çelik matris içine gömüldüğü düşünülmektedir. Diğer yandan EDS analizinden alınan güçlü karbon sinyalleri kaplama esnasında TiC tozların bozulmadığını göstermektedir. TiC tozların termal olarak dirençli olduğu bilinmektedir. Oksidasyon riski ise genel olarak 700°C üzerindeki sıcaklıklarda başlar. Kaplama esnasında ulaşılan sıcaklıklar bu civarda olmakla birlikte TiC tozların büyük oranda stabil kaldığı düşünülmektedir, EDS analizindeki güçlü karbon sinyalleri bu düşünceyi desteklemektedir. Cr ise TiC partikül dışındaki bölgede homojen şekilde dağılmış görünmektedir. Şekil 4.5'te %10 TiC katkılı kaplamadan alınan SEM görüntüsü verilmiştir. Daha düşük büyütmeden alınan makro SEM görüntüsünde kaplama genelinde TiC partikül zengin bölgelerin dağıldığı gözlenmektedir. Bu bölgelerin farklı boyutlarda olması TiC partiküllerin aglomerasyonu ile oluşan farklı boyutlu TiC esaslı tanelerin paslanmaz çelik matriste gömüldüğünü göstermektedir.

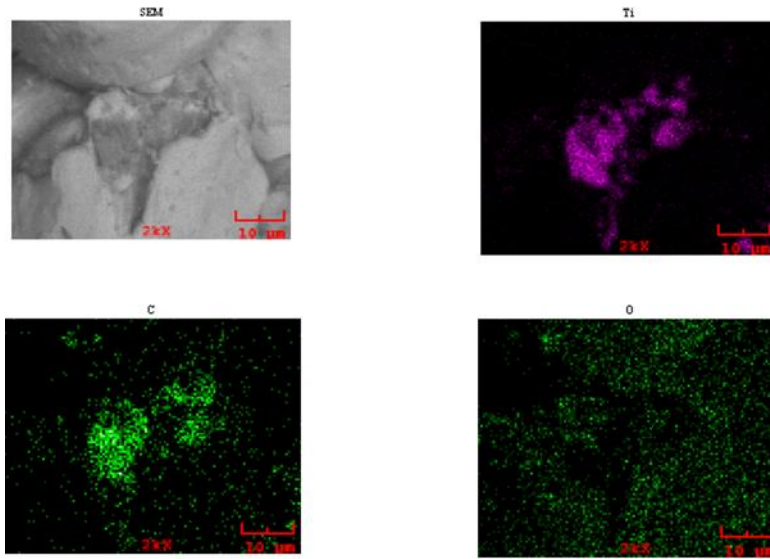


Şekil 4.5. %10 TiC katkılı 430L toz ile yapılan kaplamaya ait SEM ve EDS haritası

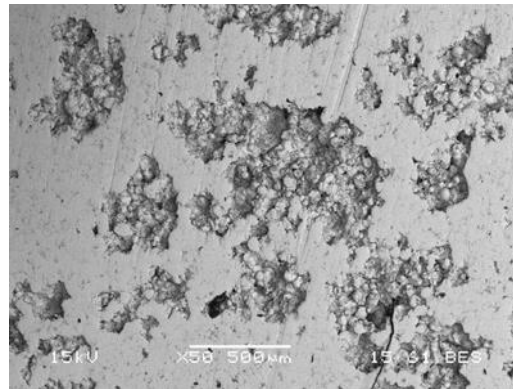


Şekil 4.6. %10 TiC katkılı 430L toz ile yapılan kaplama SEM görüntüsü

Şekil 4.7’de %20 TiC katkılı numuneye ait SEM görüntüsü ve EDS haritası verilmiştir. Daha yüksek yüyütmede alınan SEM görüntüsünde paslanmaz çelik matris içinde TiC partikülü net olarak görülmektedir. EDS analizinde Ti ve C sinyallerinin yüksek olduğu partikülün bulunduğu bölgede O sinyalleri düşmüştür, bu durum TiC partikülün stabil kaldığını göstermektedir. Ayrıca görüntü ölçeğine bakıldığında TiC bölgenin 15-30 µm civarında olduğu görülmektedir. Kullanılan TiC tozları bu boyut aralıklarındadır, TiC tozların tamamen aglomere olmadığı bazı tozların topaklanmadan paslanmaz çelik matriste yer aldığı gözlenmiştir. Şekil 4.8’de aynı numuneden alınan daha küçük büyütme makro görüntüde TiC partiküllerin aglomerasyonuna bağlı olarak çok farklı boyutta oluşmuş TiC esaslı aglomerantlar gözlenmiştir. Bu durum TiC miktarının artmasına bağlı olarak aglomerasyon eğiliminin arttığını, kaplama yüzeyinde çok farklı boyutlarda TiC esaslı bölgelerin oluştuğu tespit edilmiştir.

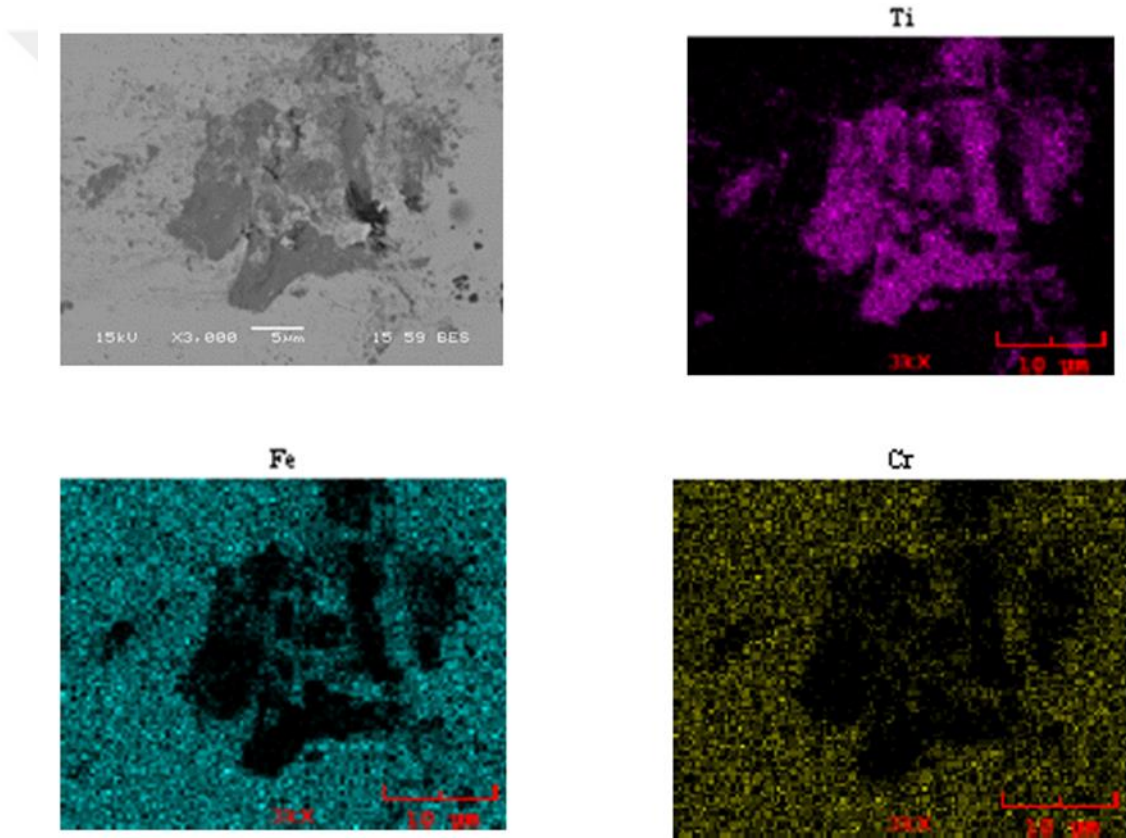


Şekil 4.7. %20 TiC katkılı 430L toz ile yapılan kaplamaya ait SEM ve EDS haritası

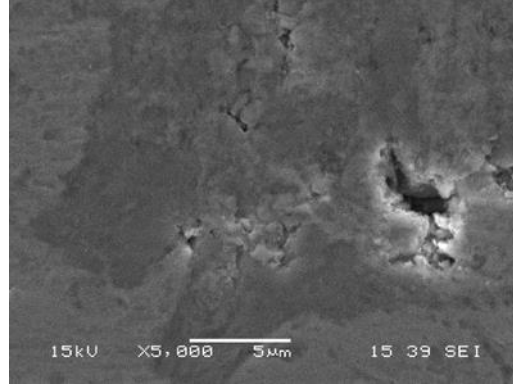


Şekil 4.8. %20 TiC katılı 430L toz ile yapılan kaplama SEM görüntüsü

Şekil 4.9’da %30 TiC katkıli kaplamadan alınmış SEM görüntüsü ve EDS haritası verilmiştir. Görüntüde diğer katkıli kaplama numunelerine benzer olup TiC partiküllerin yine paslanmaz çelik matris içinde gömülü şekilde olduğu gözlenmiştir. İlgili anlandan Fe ve Cr sinyallerinin alınmaması bölgenin TiC esaslı partikül olduğunu onaylamaktadır. Şekil 4.10’da aynı TiC esaslı bölgeden alınmış daha büyük büyütmede çekilmiş SEM görüntüsü verilmiştir. Görüntüde dikkat çekici bir sonuç olarak boşluk görülmektedir. Kaplamalardan alınan optik görüntülerdede gözlenen bu boşlukların yüzeyde tutunamayan TiC partiküllerinin yerlerini kaybetmeleri kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Kaplama esnasında yüzeyde tutunamayan TiC partikülleri boşluk oluşmasına sebep olmaktadır.



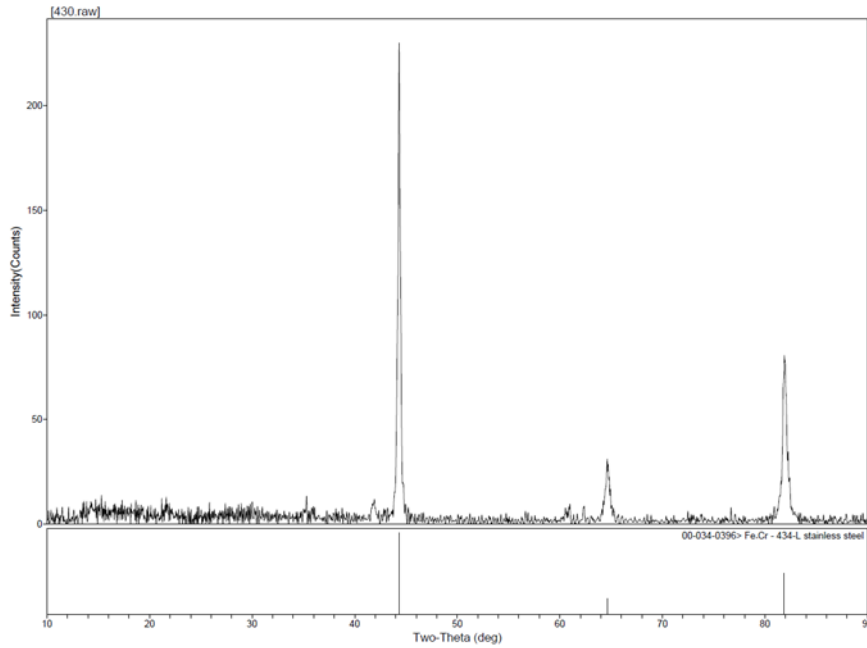
Şekil 4.9. %30 TiC katkıli 430L toz ile yapılan kaplamaya ait SEM ve EDS haritası



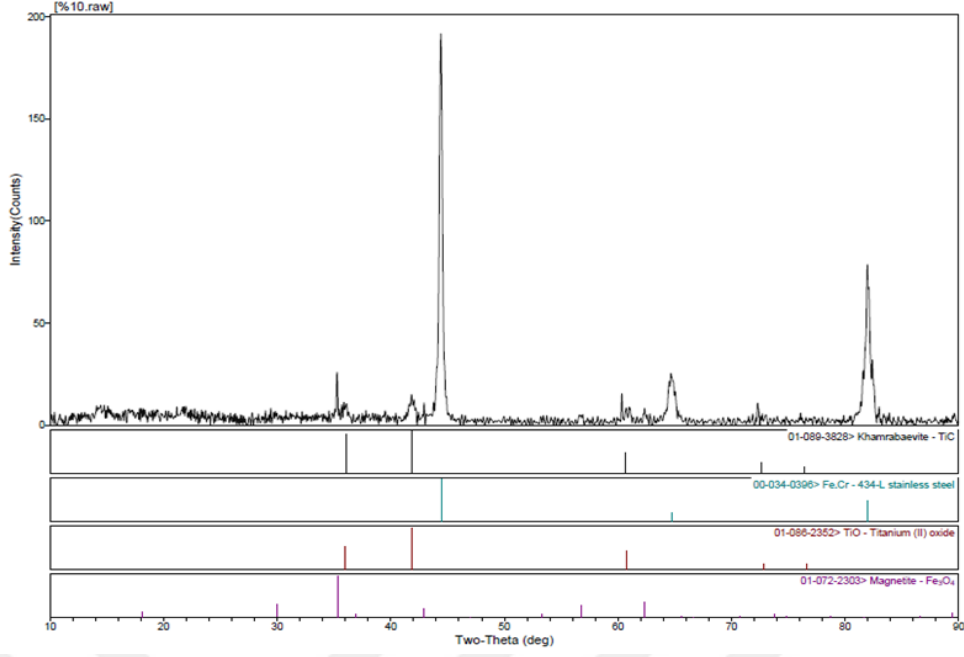
Şekil 4.10. %30 TiC katılı 430L toz ile yapılan kaplama SEM görüntüsü

4.4. XRD İncelemesi

Şekil 4.11’de TiC katkısız paslanmaz çelik kaplamaya ait XRD analiz sonucu verilmiştir. Katkısız 430L paslanmaz çelik kaplamaya ait XRD analizinde baskın olarak Fe-Cr esaslı fazlar tespit edilmiş, bu durum kaplamanın temel yapısının paslanmaz çelik karakteristiğini koruduğunu ve kaplama sırasında önemli bir faz dönüşümünün gerçekleşmediğini göstermiştir. Tespit edilen pikler 00-034-0396 kart numaralı 434 L paslanmaz çelik paternine uyum göstermiştir.

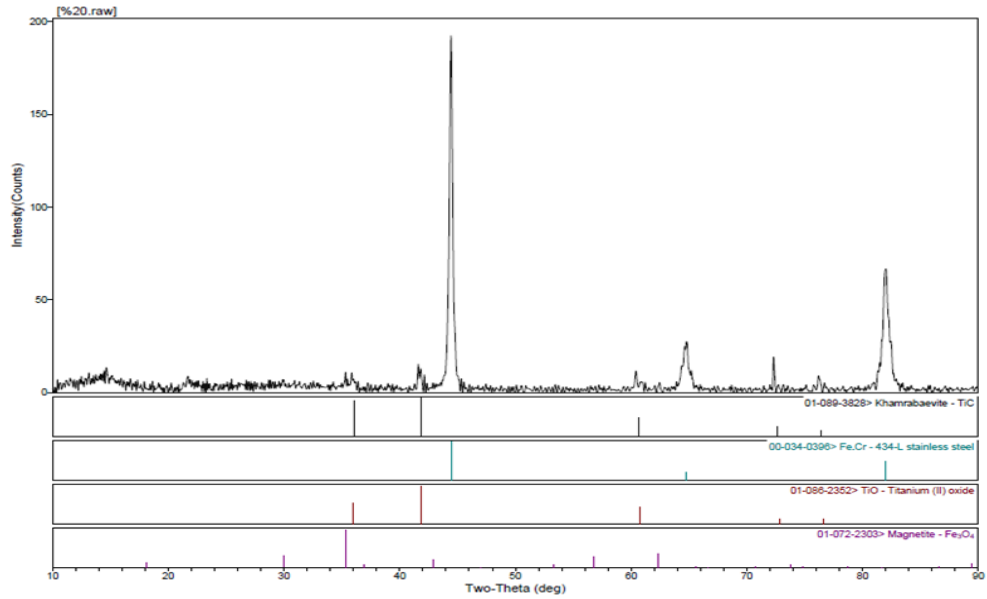


Şekil 4.11. 430L toz kaplama XRD analizi



Şekil 4.12. %10TiC katkılı 430L toz kaplama XRD analizi

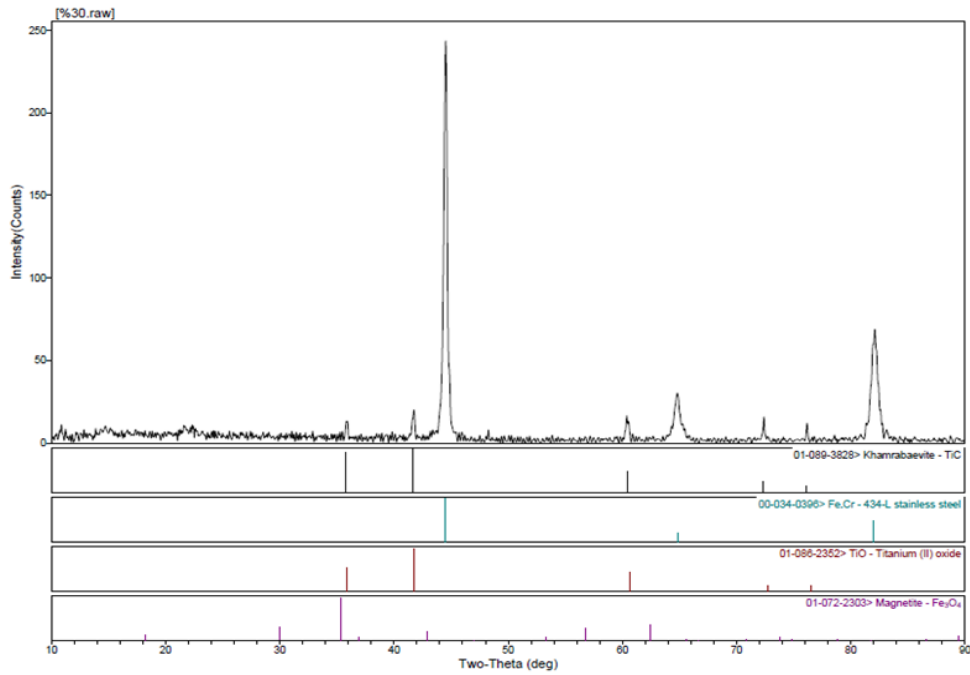
Şekil 4.13'te %20 TiC katkılı paslanmaz çelik kaplamaya ait XRD analiz sonucu verilmiştir. XRD analizleri sonucunda; Khamrabaevite (TiC-01-089-3828), Fe-Cr esaslı paslanmaz çelik fazı (00-034-0396), TiO (01-086-2352) ve magnetit (Fe_3O_4 -01-072-2303) fazları tespit edilmiştir. Bu durum, seramik katkının yapıda etkin bir şekilde yer aldığını, aynı zamanda kaplama sırasında sınırlı seviyede oksitlenmenin gerçekleştiğini ve matris ile takviye faz arasında yapısal bütünlüğün korunduğunu göstermektedir.



Şekil 4.13. %20TiC katkılı 430L toz kaplama XRD analizi

Şekil 4.14'te %30 TiC katkılı paslanmaz çelik kaplamaya ait XRD analiz sonucu verilmiştir. %30 TiC katkılı 430L paslanmaz çelik kaplamada yapılan XRD analizleri, Khamrabaevite (TiC-01-089-3828), Fe-Cr esaslı paslanmaz çelik fazı (00-034-0396), TiO (01-086-2352) ve magnetit (Fe₃O₄-01-072-2303) fazları tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, artan TiC oranıyla birlikte seramik fazların kaplamaya başarıyla entegre edildiğini ve bunun yanı sıra oksitlenmenin nispeten daha belirgin hale geldiğini ortaya koymaktadır.

TiC katkılı tüm numunelerde aynı fazlar tespit edilmiştir. Fazların pik şiddetleri arasında major bir fark görülmemiştir. Sonuçlar TiC ve paslanmaz çeliğin kısmen oksitlendiğini göstermektedir. Oksidasyona rağmen TiC partiküllerin kaplamada varlığını sürdürdüğü SEM/EDS analizleri ile gözlenmişti, XRD analizlerindedeki TiC fazının piklerinin gözlenmesi SEM/EDS sonuçlarını desteklemektedir. Dikkat çekici bir sonuçta TiO₂ yapısının yerine TiO yapısının oluşmasıdır. TiO yapısı TiO₂ ile karşılaştırıldığında daha az kararlıdır ve oksitlenmeye eğilimlidir. Yeterli hava ve sıcaklık ortamında TiO yapısı kolayca TiO₂'ye dönüşebilir. Burada TiO₂ yerine TiO tespit edilmiş olması sıcaklık ve/veya oksijen miktarının yeterli olmaması şeklinde yorumlanmıştır. Demir ise oksitlenerek manyetite dönüşmüştür. Demirin oksitlenmesini takip eden ilk yapı +2 değerlikli oksit formu, devamında hem +2 hemde +3 değerlikli demirin olduğu manyetit formudur.



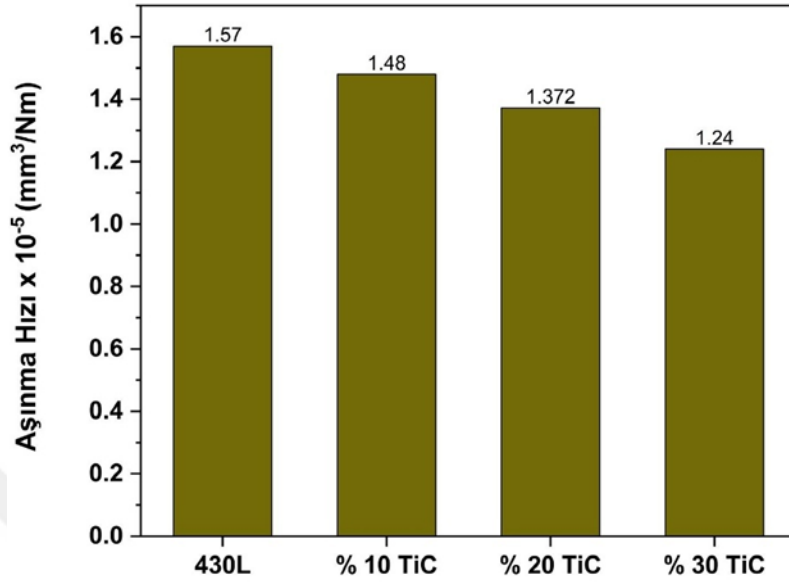
Şekil 4.14. %30TiC katkılı 430L toz kaplama XRD analizi

4.5. Aşınma Deneyi

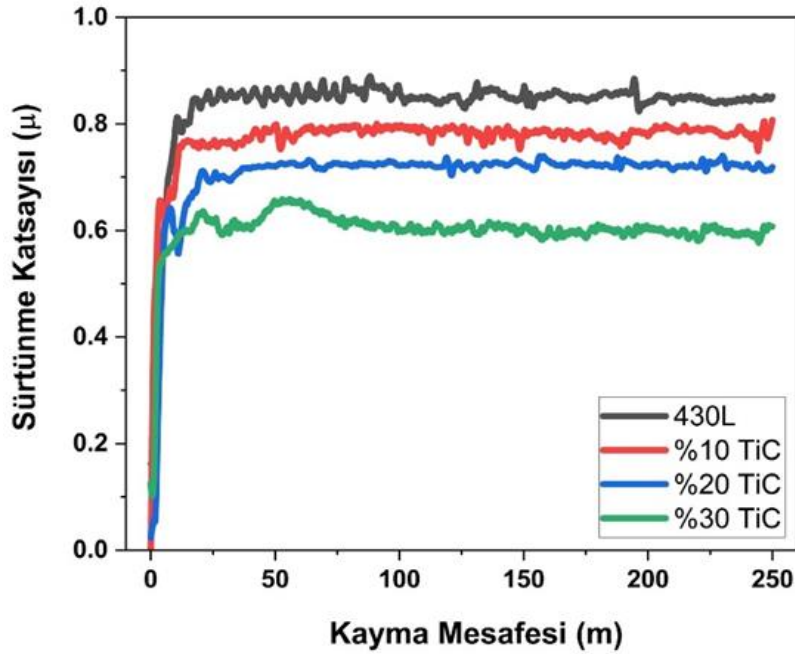
Şekil 4.15’de aşınma deneylerine ait deney sonuçları verilmiştir. Aşınma hızları TiC içeriğine bağlı olarak $1,24-1,57 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{nm}$ aralığında tespit edilmiştir. Sonuçlar kaplamada artan TiC miktarına bağlı olarak aşınma hızlarının düştüğünü göstermektedir. Çalışmanın temel amacı olarak metal matrisli seramik partikül takviyeli kompozit kaplama üretmek ve paslanmaz çelik kaplamanın aşınma direncini artırmaktır, sonuçlar TiC takviyesinin aşınma direncini artırdığını göstermektedir. Kompozit malzemelerde takviye elemanı genel olarak daha sert ve mekanik açıdan daha mukavim malzemeler olup aşınma direncini artırır. Bir ferritik paslanmaz çelik türü olan 430 serisi paslanmaz çelikler aşınmaya karşı dayanıksızdır, sertlik değerleri ortalama 150-200 HV dir. TiC ise ileri teknolojik seramik malzemeler içinde yüksek mekanik/termal dirence sahiptir ve sertlik değerleri 2800-3000 HV civarındadır. Görüldüğü üzere seramik partiküllerin sertlikleri paslanmaz çelik matrisin on katından fazla görünmektedir. Böylece TiC partiküller 430L paslanmaz çelik esaslı kaplamanın aşınma direncini met çekilde artırmıştır.

Şekil 4.16’da ise numunelere ait aşınma testlerinde elde edilmiş sürtünme katsayısı sonuçları verilmiştir. Sürtünme katsayısı değerleri $0,55-0,9 \mu$ aralığında tespit edilmiştir. Artan TiC katkısı ile birlikte sürtünme katsayıları azalmıştır. Sürtünme katsayısının değişiminin farklı parametreler tarafından etkilendiği görülmektedir. İlk olarak oksitlenmeyi düşündüğümüzde hem paslanmaz çelik matrisin hemde TiC partiküllerin kısmen oksitlendiği tespit edilmiştir. Oksit tabakaları sürtünme katsayısı farklı şekillerde etkileyebilir. Sert, kırılğan ve düzensiz oksit tabakaları sürtünme katsayısı artırabilir. Yumuşak, ince ve yapışma sorunu olmayan oksit tabakaları ise yüzeyde nispeten kaygan bir film oluşmasına sebep olabilir. TiC katkısının artması ile birlikte daha fazla TiC tozunun TiO_2 ’ya dönüştüğünü düşünürsek, artan TiC miktarı ile oksit miktarının göreceli olarak arttığını söyleyebiliriz. Sonuç olarak artan TiC miktarı ile oluşan oksitlenmenin artması sürtünme katsayısının düşmesine sebep oluyorsa, oluşan oksit filmleri kaygan davranıyor olabilir. Diğer yandan sürtünme ile oluşan ısınmada oksitlenmeyi destekleyen bir durumdur. XRD analizinde TiO_2 yerine TiO tespit edilmiştir. Buda TiC için çok yüksek bir oksitlenme etkisinin olmadığını dolayısı ile ısı etkisinin nispeten düşük kaldığı, ısınmanın çok olmadığına işaret etmektedir. Isı etkisinin çok olmaması sürtünme etkisinin düşük olduğunu yani oluşan ara tabakanın

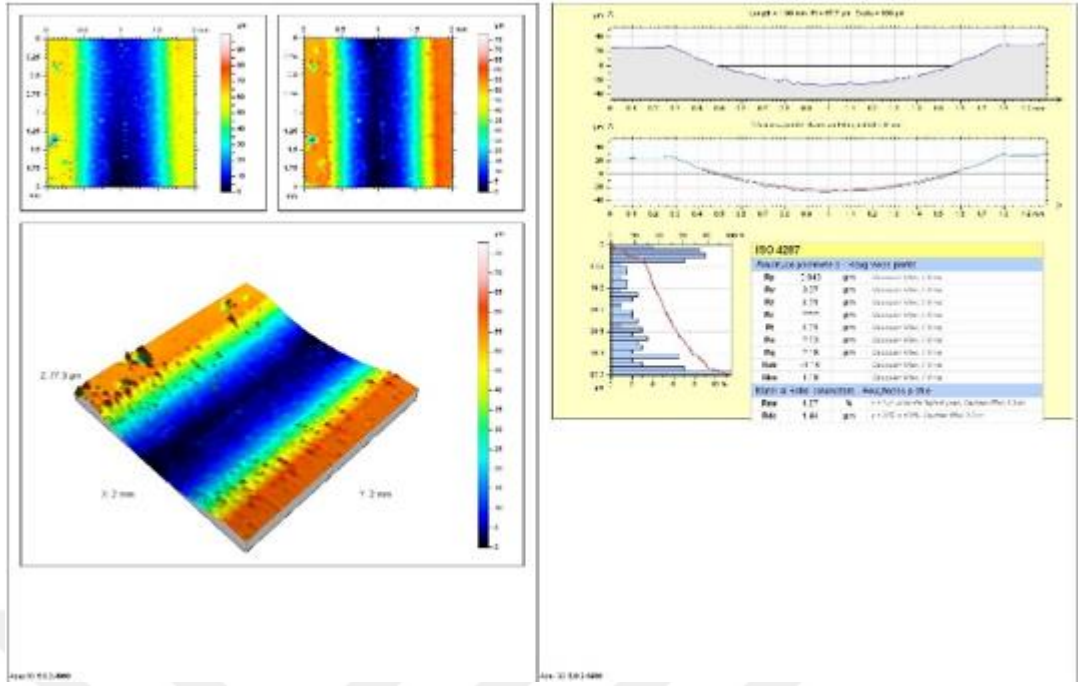
kaygan olduğunu gösterir. Buda oksitlenmenin sürtünme katsayısını düşürmesini desteklemektedir.



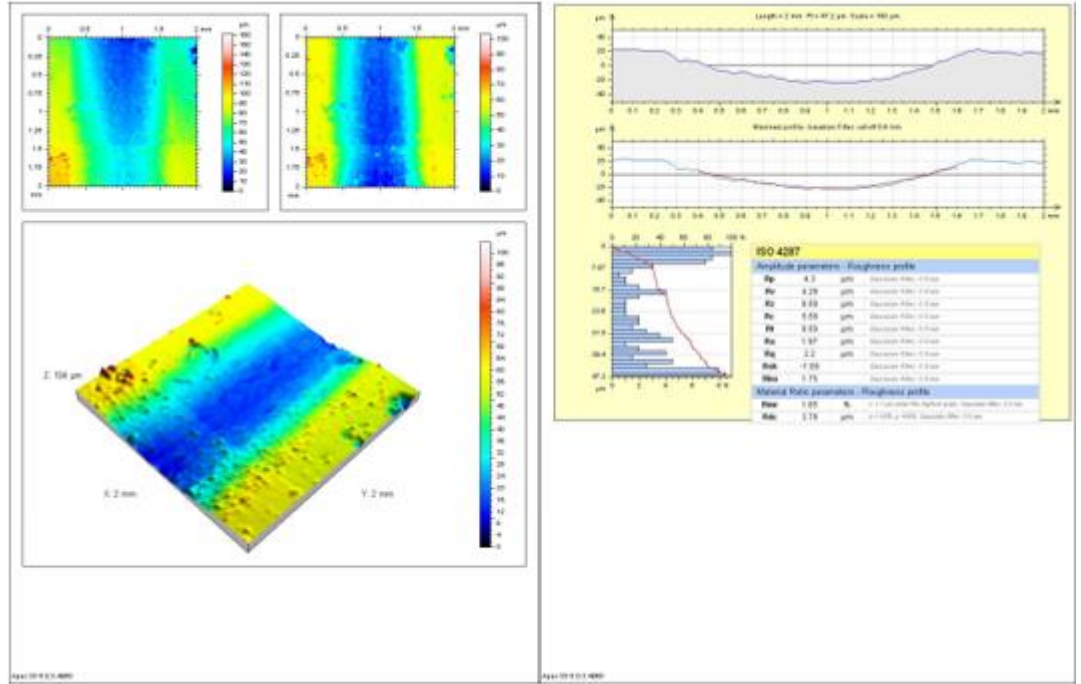
Şekil 4.15. Toz gruplarına göre kaplamaların aşınma deneyi sonuçları



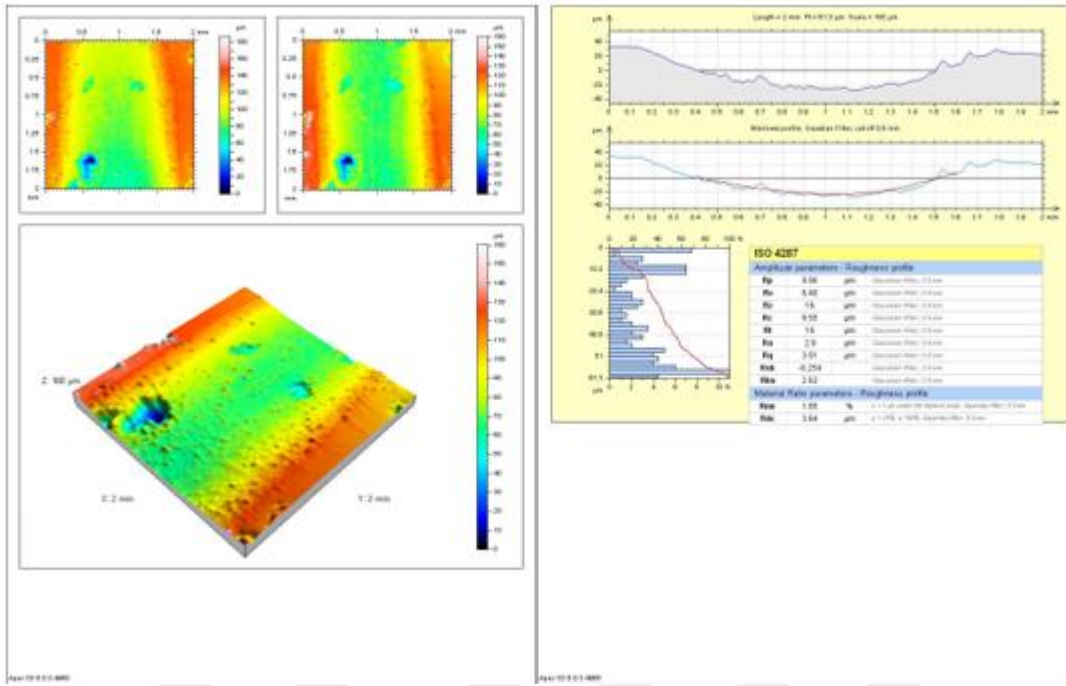
Şekil 4.16. Toz gruplarına göre sürtünme katsayıları ve kayma mesafeleri



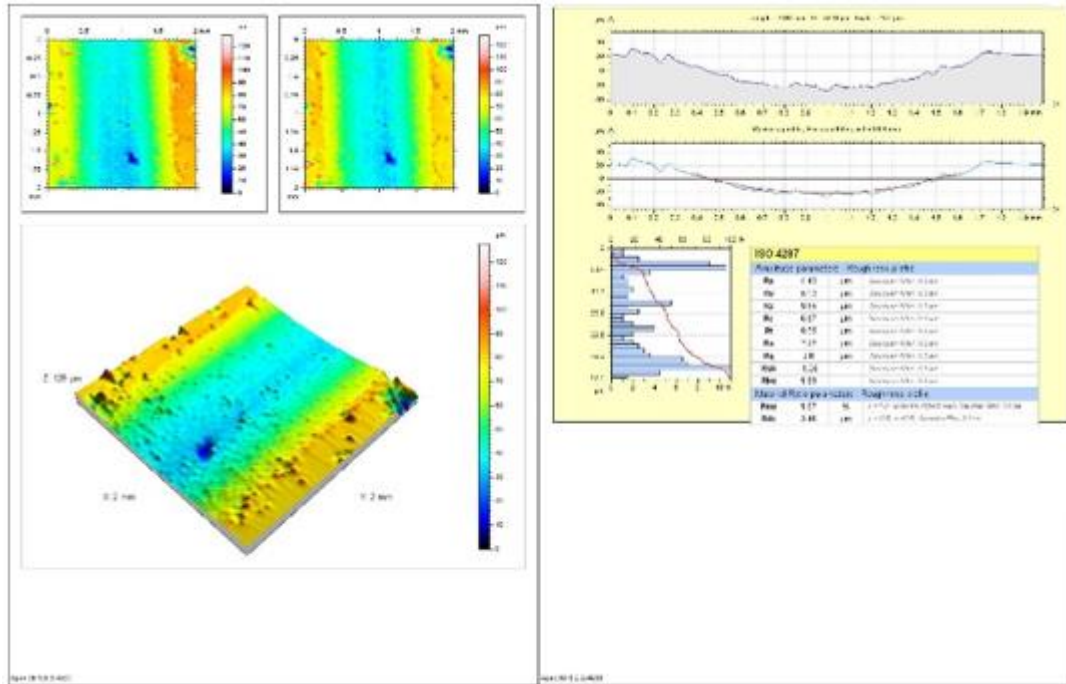
Şekil 4.17. 430L toz kaplama aşınma deneyi sonuçları



Şekil 4.18. %10 TiC katkılı 430L toz kaplama aşınma deneyi sonuçları



Şekil 4.19. %20 TiC katkılı 430L toz kaplama aşınma deneyi sonuçları



Şekil 4.20. %30 TiC katkılı 430L toz kaplama aşınma deneyi sonuçları

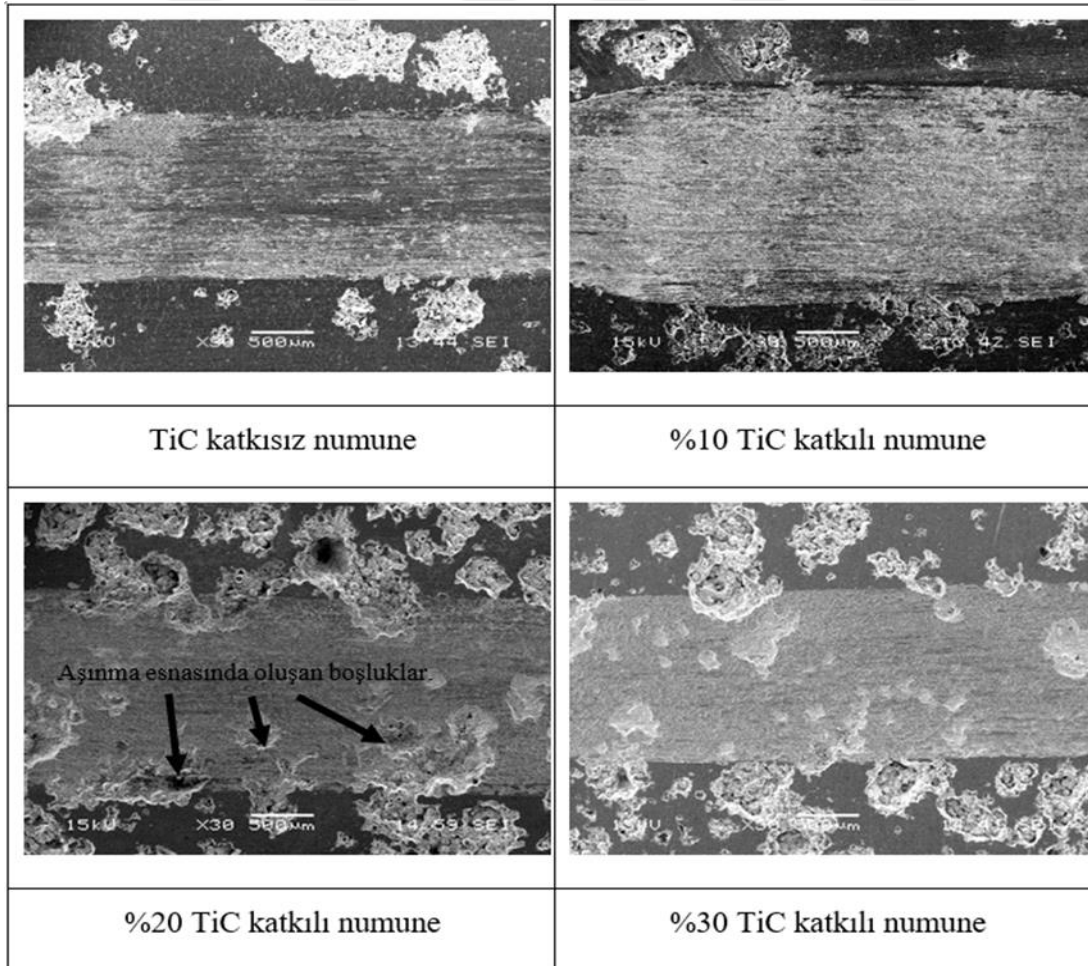
Şekil 4.17-4.20'de aşınma numunelerine ait profilometre görüntüleri verilmiştir. Görünlerde artan TiC katkısı ile birlikte aşınma iz derinliklerinin azaldığı gözlenmektedir. Sonuçlar aşınma hızı ve sürtünme katsayısı sonuçlarını desteklemektedir. TiC katkısız ve %10 TiC katkılı numunelerin profilometre görüntülerinde derin sürekli izler görülürken %20 ve %30 TiC katkılı numunelerde

daha sığ izler vardır. %20 ve %30 TiC katkılı numunelerde izlerin içinde bölgesel derin alanlar dikkat çekmektedir. Bu durum bu numunelerde aşınma esnasında TiC partiküllerin koptuğu ve yerine boşlukların oluştuğu şeklinde yorumlanmıştır.

Elde edilen veriler, TiC katkısının artan oranlarda uygulanmasının aşınma hızını azalttığını ve dolayısıyla kaplamanın aşınma direncini önemli ölçüde iyileştirdiğini göstermektedir. Ancak katkı oranı arttıkça iyileşme oranının azaldığı, yani belirli bir katkı seviyesinden sonra artışın daha sınırlı fayda sağladığı görülmektedir. Ayrıca TiC oranı arttıkça sürtünme katsayısı düşmekte ve sistem daha kararlı bir sürtünme davranışı sergilemekte olduğu da kaydedilmiştir.

Aşınma testleri sonrasında aşınma izlerinden alınmış SEM görüntüleri Şekil 4.21’de verilmiştir. TiC katkısız ve %10 TiC katkılı numunelerin aşınma izlerinde yoğun abrazif aşınma izleri görülmektedir. Bu numunelerde sürtünme katsayılarının diğer numunelerden yüksek olması bu numunelerde ana aşınma mekanizmasının abrazif aşınma olduğuna işaret etmektedir. Abrazif aşınmanın temel nedenleri aşınma yüzeylerindeki sert parçalıkların veya pürüzlü bölgelerin diğer yüzeyleri kazımasıdır. Katkısız numunede abrazif etkinin temelinde yatan neden sert parçacıklar olması düşük olasılıktır. Çünkü paslanmaz çelik nispeten yumuşak bir malzemedir ve partikül kopması düşük olasılıktır. Bu numunede pürüzlü yüzeylerin abrazif etkiye sebep olduğu düşünülmektedir. %10 TiC katkılı numunede ise TiC partiküllerin kopmasına, yerlerinden çıkmasına bağlı olarak TiC partiküllerin aşınmada yüzeyler arasında kalmasına bağlı olarak abrazif etkiyi ortaya çıkardığı düşünülebilir. Yani üç cisimli aşınma olarak bilinen mekanizma ortaya çıkarak TiC partiküllerin aşınmada iki yüzey arasında sıkışması ve pulluklama etkisi ile birlikte sert abrazif aşınma izleri oluşmuş olabilir. Bu durum %10 TiC katkılı numunede sürtünme katsayısının yüksek olması ile desteklenmektedir. %20 ve %30 TiC katkılı numunelerdeki aşınma izlerine bakıldığında ise abrazif yivlerin azaldığı, aşınma mekanizmasının abrazif karakterden adhezif karaktere döndüğünü göstermektedir. Bu numunelerdeki aşınma izleri kazımadan ziyade yapışma şeklinde olmuştur. Adhezif aşınmayı destekleyen en önemli parametre yüzeylerin yapışmasıdır. Seramiklere göre sertliği düşük olan metal yüzeylerde sıklıkla görülür. Diğer yandan metal yüzeylerdeki yüksek yüzey enerjisi yüzeylerin birbirine yapışmasını destekler. Bu çalışmada aşınma esnasında alumina bilye kullanılmıştır. Yani seramik/metal yüzeyleri aşınma yüzeyleri olmuştur, dolayısı ile yüzey enerjisi kaynaklı bir yapışmadan bahsetmek doğru olmayabilir. Diğer yandan

adhezif aşınmayı destekleyen bir diğer parametre yüzey pürüzlülüğüdür. Yüzey pürüzlülüğü arttıkça adhezif aşınma riski artar. Yüzeydeki pürüzlü bölgeler mikro kaynak etkisi yaparak yapışmaya neden olabilir. Kaplamalarda artan TiC miktarına bağlı olarak yüzey pürüzlülüğünün bir miktar arttığı düşünülmektedir. TiC partiküllerin aglomere olması ve yüzeydeki düzensiz birikmeler pürüzlülüğü artırıcı etki yapacaktır. Yüzey pürüzlülüğünün artması ile birlikte aşınma mekanizmasının adhezife dönüşü beklenen bir sonuç olabilir. Diğer yandan TiC partiküllerin aşınma esnasında yerlerinden çıktıkları ve yüzeyde oyuk/boşluk oluşturmalarında yüzey pürüzlülüğünü artırdığı düşünülmektedir. Ölçülen yüzey pürüzlülük değerleri bu fikri desteklemektedir, artan TiC katkısı ile yüzey pürüzlülük değerlerinin arttığı tespit edilmiştir. Tüm bu mekanizmalar %20 ve %30 TiC katkılı numunelerde aşınma mekanizmasının abrazyondan adhezife değişimine sebep olmuş olabilir.

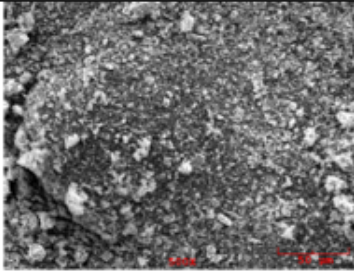
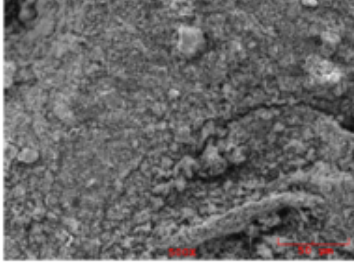
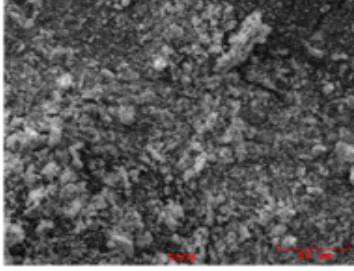
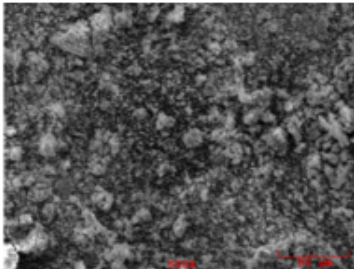


Şekil 4.21. Aşınma izlerinden alınmış SEM görüntüleri

Şekil 4.22’de aşınma sonrası elde edilmiş aşınma tozlarına ait SEM görüntüleri ve elementel analiz değerleri verilmiştir. Aşınma tozları birbirleri ile elementel analiz

olarak karşılaştırılacağı için aynı miktarda aşınma tozu analize maruz bırakılmıştır. Tüm aşınma tozlarına ait SEM görüntülerinde düzensiz, farklı şekillerde ve boyutlarda kaplamaların toz partikülleri ve daha büyük parçalar halinde kaplama yüzeyinden ayrıldığı görülmektedir. TiC katkısız numunun aşınma testlerinden elde edilmiş tozlarda Fe, Cr ve O elementleri tespit edilmiştir. Aşınma testleri sonucunda elde edilmiş aşınma tozlarının tamamında O tespit edilmiştir, aşınma esnasında oksitlenme etkisinin olduğu görülmektedir. Aşınma tozlarında Fe ve Cr metallerinin yoğun şekilde tespit edilmesi paslanmaz çeliğin yüzeyden kalktığını göstermektedir. Paslanmaz çelik kaplama parçaları yüzeyi terk ederken ara yüzeyde kalan küçük parçalar yüzeyin abrazif aşınmasına neden olmuş olabilir. Diğer yandan sert alumina bilye yüzeyi kazıyarak parçaların kopmasına sebep olmuş görülmektedir. %10 TiC katkılı numuneye gelindiğinde yine Fe, Cr ve O elementleri görülmektedir. Bu sefer bir miktar Ti'un aşınma tozlarına katıldığı gözlenmiştir. TiC partiküllerinin aşınma esnasında yerlerinden çıkmış olduğu görülmektedir. Artan TiC partikülleri ile birlikte kazıma etkisinin arttığı düşünülmektedir. Bu numunenin aşınma tozundan elde edilen Fe ve Cr şiddetleri katkısız numunenin aşınma tozundan elde edilen Fe ve Cr şiddetlerinden yüksektir. Buda kazıma, pulluklama etkilerinin güçlü olduğu bir aşınma ortamının olduğu fikrini desteklemektedir. Aşınma SEM görüntülerinde elde edilen abrazif yivler bu fikri destekler niteliktedir. %20 TiC katkılı numunenin aşınma deneylerinden elde edilen aşınma tozlarının analizlerindedeki Fe, Cr, O ve Ti elementleri dikkat çekmektedir. Ti miktarı arttığı için Ti şiddeti artmıştır, bu durum artan Ti miktarı ile birlikte daha fazla TiC'ün yerinden çıktığını göstermektedir. Bu kaplamada Fe ve Cr şiddetleri azalmıştır. Artan TiC miktarı ile daha az paslanmaz çeliğin kaplamadan kalktığı düşünülebilir. Zaten %20 ve %30 TiC katkılı kaplamalarda elde edilmiş aşınma tozları miktar olarak diğer kaplamaların aşınmasından elde edilmiş aşınma tozlarına göre bir miktar daha azdır. Kaplamada TiC miktarı arttıkça daha az kaplamanın kalktığını düşündüğümüzde aşınma mekanizmasının değişimi muhtemeldir. Kaplamada daha fazla TiC bulunması aşınma esnasında daha fazla TiC partikülünün yerini kaybetmesine ve arkasında boşluk oluşturmaya sebep olacaktır. Normal şartlarda bir malzemenin yüzeyinde oluşan oyuklar, boşluklar yüzey pürüzlülüğünü çok etkileyebilir. Yüzey pürüzlülüğünü asıl etkileyen parametre yüzeydeki çıkıntılardır. Ancak kaplamadaki TiC miktarının artması ile birlikte çok aşınma esnasında çok fazla oyuk/boşluk oluşması, ayrıca bu boşlukların şekil ve boyutlarının çok farklı olması yüzey pürüzlülüğünü artıran bir etki yapmış olabilir.

Yüzey pürüzlülüğünün artmasıda aşınma mekanizmasının abrazyonla adhezif aşınmaya geçişine neden olmuş olabilir. %30 TiC katkılı numunede yine Fe, Cr, O ve Ti elementleri tespit edilmiş olup Ti miktarı diğer kaplamalara göre artarken Fe ve Cr miktarı azalmıştır. Bu numunede aşınma muhtemelen adhezif karakterli olup parça kalkması şeklinden ziyade sıvanma şeklindedir. Alınma hızı, sürtünme katsayısı ve aşınma izi SEM görüntüleri bu fikri destekler niteliktedir.

	<table><tr><th>Elt.</th><th>Line</th><th>Intensity (c/s)</th><th>Error 2-sig</th><th>Conc</th><th>Units</th></tr><tr><td>O</td><td>Ka</td><td>96.56</td><td>6.214</td><td>22.757</td><td>wt. %</td></tr><tr><td>Al</td><td>Ka</td><td>1.83</td><td>0.855</td><td>0.344</td><td>wt. %</td></tr><tr><td>Si</td><td>Ka</td><td>7.83</td><td>1.769</td><td>1.275</td><td>wt. %</td></tr><tr><td>P</td><td>Ka</td><td>1.44</td><td>0.759</td><td>0.232</td><td>wt. %</td></tr><tr><td>Cr</td><td>Ka</td><td>42.19</td><td>4.108</td><td>10.702</td><td>wt. %</td></tr><tr><td>Fe</td><td>Ka</td><td>139.76</td><td>7.476</td><td>64.140</td><td>wt. %</td></tr><tr><td>Ni</td><td>Ka</td><td>0.74</td><td>0.545</td><td>0.549</td><td>wt. %</td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td>100.000</td><td>wt. %</td></tr></table>	Elt.	Line	Intensity (c/s)	Error 2-sig	Conc	Units	O	Ka	96.56	6.214	22.757	wt. %	Al	Ka	1.83	0.855	0.344	wt. %	Si	Ka	7.83	1.769	1.275	wt. %	P	Ka	1.44	0.759	0.232	wt. %	Cr	Ka	42.19	4.108	10.702	wt. %	Fe	Ka	139.76	7.476	64.140	wt. %	Ni	Ka	0.74	0.545	0.549	wt. %					100.000	wt. %						
Elt.	Line	Intensity (c/s)	Error 2-sig	Conc	Units																																																								
O	Ka	96.56	6.214	22.757	wt. %																																																								
Al	Ka	1.83	0.855	0.344	wt. %																																																								
Si	Ka	7.83	1.769	1.275	wt. %																																																								
P	Ka	1.44	0.759	0.232	wt. %																																																								
Cr	Ka	42.19	4.108	10.702	wt. %																																																								
Fe	Ka	139.76	7.476	64.140	wt. %																																																								
Ni	Ka	0.74	0.545	0.549	wt. %																																																								
				100.000	wt. %																																																								
TiC katkısız numune																																																													
	<table><tr><th>Elt.</th><th>Line</th><th>Intensity (c/s)</th><th>Error 2-sig</th><th>Conc</th><th>Units</th></tr><tr><td>O</td><td>Ka</td><td>114.89</td><td>6.776</td><td>20.751</td><td>wt. %</td></tr><tr><td>Al</td><td>Ka</td><td>1.41</td><td>0.750</td><td>0.198</td><td>wt. %</td></tr><tr><td>Si</td><td>Ka</td><td>5.76</td><td>1.517</td><td>0.699</td><td>wt. %</td></tr><tr><td>P</td><td>Ka</td><td>0.15</td><td>0.242</td><td>0.017</td><td>wt. %</td></tr><tr><td>Ti</td><td>Ka</td><td>6.40</td><td>1.599</td><td>0.985</td><td>wt. %</td></tr><tr><td>Cr</td><td>Ka</td><td>65.60</td><td>5.120</td><td>12.615</td><td>wt. %</td></tr><tr><td>Fe</td><td>Ka</td><td>189.15</td><td>8.694</td><td>64.504</td><td>wt. %</td></tr><tr><td>Ni</td><td>Ka</td><td>0.42</td><td>0.410</td><td>0.231</td><td>wt. %</td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td>100.000</td><td>wt. %</td></tr></table>	Elt.	Line	Intensity (c/s)	Error 2-sig	Conc	Units	O	Ka	114.89	6.776	20.751	wt. %	Al	Ka	1.41	0.750	0.198	wt. %	Si	Ka	5.76	1.517	0.699	wt. %	P	Ka	0.15	0.242	0.017	wt. %	Ti	Ka	6.40	1.599	0.985	wt. %	Cr	Ka	65.60	5.120	12.615	wt. %	Fe	Ka	189.15	8.694	64.504	wt. %	Ni	Ka	0.42	0.410	0.231	wt. %					100.000	wt. %
Elt.	Line	Intensity (c/s)	Error 2-sig	Conc	Units																																																								
O	Ka	114.89	6.776	20.751	wt. %																																																								
Al	Ka	1.41	0.750	0.198	wt. %																																																								
Si	Ka	5.76	1.517	0.699	wt. %																																																								
P	Ka	0.15	0.242	0.017	wt. %																																																								
Ti	Ka	6.40	1.599	0.985	wt. %																																																								
Cr	Ka	65.60	5.120	12.615	wt. %																																																								
Fe	Ka	189.15	8.694	64.504	wt. %																																																								
Ni	Ka	0.42	0.410	0.231	wt. %																																																								
				100.000	wt. %																																																								
%10 TiC katkılı numune																																																													
	<table><tr><th>Elt.</th><th>Line</th><th>Intensity (c/s)</th><th>Error 2-sig</th><th>Conc</th><th>Units</th></tr><tr><td>O</td><td>Ka</td><td>125.71</td><td>7.090</td><td>25.727</td><td>wt. %</td></tr><tr><td>Al</td><td>Ka</td><td>3.85</td><td>1.241</td><td>0.560</td><td>wt. %</td></tr><tr><td>Si</td><td>Ka</td><td>5.76</td><td>1.518</td><td>0.728</td><td>wt. %</td></tr><tr><td>P</td><td>Ka</td><td>0.68</td><td>0.522</td><td>0.085</td><td>wt. %</td></tr><tr><td>Ti</td><td>Ka</td><td>10.58</td><td>2.869</td><td>3.448</td><td>wt. %</td></tr><tr><td>Cr</td><td>Ka</td><td>53.24</td><td>4.614</td><td>11.221</td><td>wt. %</td></tr><tr><td>Fe</td><td>Ka</td><td>158.87</td><td>7.970</td><td>57.394</td><td>wt. %</td></tr><tr><td>Ni</td><td>Ka</td><td>1.45</td><td>0.760</td><td>0.838</td><td>wt. %</td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td>100.000</td><td>wt. %</td></tr></table>	Elt.	Line	Intensity (c/s)	Error 2-sig	Conc	Units	O	Ka	125.71	7.090	25.727	wt. %	Al	Ka	3.85	1.241	0.560	wt. %	Si	Ka	5.76	1.518	0.728	wt. %	P	Ka	0.68	0.522	0.085	wt. %	Ti	Ka	10.58	2.869	3.448	wt. %	Cr	Ka	53.24	4.614	11.221	wt. %	Fe	Ka	158.87	7.970	57.394	wt. %	Ni	Ka	1.45	0.760	0.838	wt. %					100.000	wt. %
Elt.	Line	Intensity (c/s)	Error 2-sig	Conc	Units																																																								
O	Ka	125.71	7.090	25.727	wt. %																																																								
Al	Ka	3.85	1.241	0.560	wt. %																																																								
Si	Ka	5.76	1.518	0.728	wt. %																																																								
P	Ka	0.68	0.522	0.085	wt. %																																																								
Ti	Ka	10.58	2.869	3.448	wt. %																																																								
Cr	Ka	53.24	4.614	11.221	wt. %																																																								
Fe	Ka	158.87	7.970	57.394	wt. %																																																								
Ni	Ka	1.45	0.760	0.838	wt. %																																																								
				100.000	wt. %																																																								
%20 TiC katkılı numune																																																													
	<table><tr><th>Elt.</th><th>Line</th><th>Intensity (c/s)</th><th>Error 2-sig</th><th>Conc</th><th>Units</th></tr><tr><td>O</td><td>Ka</td><td>118.11</td><td>6.871</td><td>27.781</td><td>wt. %</td></tr><tr><td>Al</td><td>Ka</td><td>1.21</td><td>0.695</td><td>0.213</td><td>wt. %</td></tr><tr><td>Si</td><td>Ka</td><td>5.77</td><td>1.519</td><td>0.881</td><td>wt. %</td></tr><tr><td>P</td><td>Ka</td><td>1.06</td><td>0.650</td><td>0.160</td><td>wt. %</td></tr><tr><td>Ti</td><td>Ka</td><td>20.12</td><td>2.011</td><td>4.045</td><td>wt. %</td></tr><tr><td>Cr</td><td>Ka</td><td>40.62</td><td>4.029</td><td>10.186</td><td>wt. %</td></tr><tr><td>Fe</td><td>Ka</td><td>131.40</td><td>7.248</td><td>55.512</td><td>wt. %</td></tr><tr><td>Ni</td><td>Ka</td><td>1.74</td><td>0.833</td><td>1.222</td><td>wt. %</td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td>100.000</td><td>wt. %</td></tr></table>	Elt.	Line	Intensity (c/s)	Error 2-sig	Conc	Units	O	Ka	118.11	6.871	27.781	wt. %	Al	Ka	1.21	0.695	0.213	wt. %	Si	Ka	5.77	1.519	0.881	wt. %	P	Ka	1.06	0.650	0.160	wt. %	Ti	Ka	20.12	2.011	4.045	wt. %	Cr	Ka	40.62	4.029	10.186	wt. %	Fe	Ka	131.40	7.248	55.512	wt. %	Ni	Ka	1.74	0.833	1.222	wt. %					100.000	wt. %
Elt.	Line	Intensity (c/s)	Error 2-sig	Conc	Units																																																								
O	Ka	118.11	6.871	27.781	wt. %																																																								
Al	Ka	1.21	0.695	0.213	wt. %																																																								
Si	Ka	5.77	1.519	0.881	wt. %																																																								
P	Ka	1.06	0.650	0.160	wt. %																																																								
Ti	Ka	20.12	2.011	4.045	wt. %																																																								
Cr	Ka	40.62	4.029	10.186	wt. %																																																								
Fe	Ka	131.40	7.248	55.512	wt. %																																																								
Ni	Ka	1.74	0.833	1.222	wt. %																																																								
				100.000	wt. %																																																								
%30 TiC katkılı numune																																																													

Şekil 4.22. Aşınma sonrası elde edilmiş tozlara ait sem görüntüleri ve elementel analizler

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, CK45 çelik altlık üzerine yüksek basınçlı soğuk sprej (HPCS) yöntemi ile katkısız 430L ferritik paslanmaz çelik ve farklı oranlarda (%10, %20, %30) TiC (Titanyum Karbür) takviyeli 430L ferritik paslanmaz çelik kaplamalar üretilmiş; elde edilen numuneler üzerinde mikroyapı, sertlik, yüzey pürüzlülüğü, XRD faz analizi ve aşınma performansları incelenmiştir.

Elde edilen başlıca sonuçlar aşağıda sunulmuştur:

Mikrosertlik değerleri, artan TiC katkısı ile birlikte yükselmiştir. Katkısız 430L kaplamada 206 HV olarak ölçülen ortalama sertlik değeri, %10 TiC katkısında 215 HV, %20 TiC katkısında 232 HV ve %30 TiC katkısında 245 HV olarak belirlenmiştir.

Yüzey pürüzlülüğü değerleri, TiC oranındaki artışa paralel olarak yükselmiş; katkısız numunede 4,91 μm olan ortalama pürüzlülük değeri, %30 TiC katkısında 14,62 μm seviyesine ulaşmıştır.

Mikroyapı incelemeleri, TiC takviyesinin matris içerisinde sert faz dağılımını artırarak aşınma direncini olumlu etkilediğini, ancak yüksek katkı oranlarında homojen dağılımın zorlaşabileceğini göstermiştir.

XRD analizleri, kaplamalarda ferrit fazının yanı sıra TiC ve oksit fazlarının varlığını ortaya koymuştur. TiC katkı oranı arttıkça TiC faz piklerinin şiddeti belirgin şekilde artmıştır.

Tüm bu sonuçlar değerlendirildiğimiz doğrultusunda aşağıdaki önerilerde bulunabiliriz.

Optimum katkı oranı olarak %20–%30 aralığı, sertlik ve aşınma direnci bakımından uygun görülmektedir; ancak bu oranlarda yüzey pürüzlülüğü artışı dikkate alınmalıdır.

Yüksek pürüzlülük değerlerinin, bazı uygulamalarda performansı olumsuz etkilemesini önlemek amacıyla kaplama sonrası taşlama veya polisaj işlemleri önerilmektedir.

Çalışmada elde edilen sonuçların bütüncül şekilde değerlendirilmesi için ilerleyen araştırmalarda korozyon, erozyon ve yüksek sıcaklık aşınma testleri gerçekleştirilmelidir.

TiC takviyeli 430L kaplamaların, madencilik, pompa rotorları, vana elemanları ve benzeri yüksek aşınma direnci gerektiren endüstriyel uygulamalarda kullanılabilirliği değerlendirilmelidir.



KAYNAKLAR

- Fardan, A., Berndt, C. C., & Ahmed, R. (2021). Numerical modelling of particle impact and residual stresses in cold sprayed coatings: A review. *Surface and Coatings Technology*, 409, 126835. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.126835>
- Alizadeh-Sh, M. A. R. A. S. H. I., Marashi, S. P. H., & Pouranvari, M. (2014). Resistance spot welding of AISI 430 ferritic stainless steel: phase transformations and mechanical properties. *Materials & Design (1980-2015)*, 56, 258-263. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.11.022>
- Ashokkumar, M., Thirumalaikumarasamy, D., Thirumal, P., & Barathiraja, R. (2021). Influences of Mechanical, Corrosion, erosion and tribological performance of cold sprayed Coatings A review. *Materials Today: Proceedings*, 46, 7581-7587. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.664>
- ASM International. (1994). *Metals Handbook, Powder Metallurgy (Vol. 7, 10th ed.)*. ASM International, Materials Park, OH.
- Assadi, H., Kreye, H., Gärtner, F., & Klassen, T. J. A. M. (2016). Cold spraying—A materials perspective. *Acta Materialia*, 116, 382-407. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.06.034>
- Babur, M. Z., Noori, A. S., Iqbal, Z., Shafiq, M., Asghar, M., Alghtani, A. H., ... & Zaman, A. (2022). Study of the Role of Titanium and Iron Cathodic Cages on Plasma-Nitrided AISI 430 Ferritic Stainless Steel. *Micromachines*, 13(10), 1739. <https://doi.org/10.3390/mi13101739>
- Bolelli, G., Colella, A., Lusvarghi, L., Morelli, S., Puddu, P., Righetti, E., Sassatelli P., Testa, V. (2020). TiC–NiCr thermal spray coatings as an alternative to WC–CoCr and Cr₃C₂–NiCr. *Wear*, 450, 203273. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2020.203273>
- Bolelli, G., Colella, A., Lusvarghi, L., Puddu, P., Rigon, R., Sassatelli, P., & Testa, V. (2019). Properties of HVOF-sprayed TiC–FeCrAl coatings. *Wear*, 418-419, 36-51. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2018.11.002>
- Champagne, V. K. (2021). *Practical Cold Spray*. Springer.
- Champagne, V., & Helfrich, D. (2016). The unique abilities of cold spray deposition. *International Materials Reviews*, 61(7), 437-455. <https://doi.org/10.1080/09506608.2016.1194948>
- Kusiński, J., Kac, S., Kowalski, K., Dosta, S., Georgiou, E. P., Garcia-Forgas, J., & Matteazzi, P. (2018). Microstructure and properties of TiC/Ti coatings deposited by the supersonic cold gas spray technique. *Archives of Metallurgy and Materials*. <https://doi.org/10.24425/122416>

- Cheng, X., Jiang, Z., Monaghan, B. J., Wei, D., Longbottom, R. J., Zhao, J., ... & Jiang, L. (2016). Breakaway oxidation behaviour of ferritic stainless steels at 1150 C in humid air. *Corrosion Science*, 108, 11-22. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2016.02.042>
- Cho, S., Lee, J., Shin, S., Lee, D., Kim, M., Kwon, H., ... & Kim, J. (2023). Enhancing high-temperature properties of stainless steel composite with titanium carbide reinforcement: a study on coefficient of thermal expansion, thermal conductivity, and strength. *Journal of Materials Research and Technology*, 25, 7241-7253. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.07.162>
- Deshpande, S., Sampath, S., & Zhang, H. (2006). Mechanisms of oxidation and its role in microstructural evolution of metallic thermal spray coatings—Case study for Ni–Al. *Surface and Coatings Technology*, 200(18-19), 5395-5406. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2005.07.072>
- Espallargas, N. (Ed.). (2015). *Future development of thermal spray coatings: Types, designs, manufacture and applications*. Elsevier.
- Gan, J. A., & Berndt, C. C. (2015). Nanocomposite coatings: thermal spray processing, microstructure and performance. *International materials reviews*, 60(4), 195-244. <https://doi.org/10.1179/1743280414Y.00000000048>
- German, R. M. (2013). *Powder Metallurgy and Particulate Materials Processing*. Metal Powder Industries Federation.
- German, R. M., & Bose, A. (1997). *Injection Molding of Metals and Ceramics*. Metal Powder Industries Federation.
- Hamed, H., & Isfahani, T. (2024). Wear and corrosion properties of mechanically coated 316 stainless Steel-TiC nanocomposites. *Results in Engineering*, 24, 102966. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102966>
- Hériaud-Kraemer, H., Montavon, G., Coddet, C., Hertert, S., & Robin, H. (2003). Harmful risks for workers in thermal spraying: a review completed by a survey in a French company. *Journal of thermal spray technology*, 12, 542-554. <https://doi.org/10.1361/105996303772082297>
- Hussain, T., McCartney, D. G., Shipway, P. H., & Zhang, D. (2009). Bonding mechanisms in cold spraying: The contributions of metallurgical and mechanical components. *Journal of Thermal Spray Technology*, 18(3), 364–379. <https://doi.org/10.1007/s11666-009-9298-1>
- Karaoglanli, A. C., Caliskan, H., Gok, M. S., Erdogan, A., & Turk, A. (2013). A Comparative Study of the Microabrasion Wear Behavior of CoNiCrAlY Coatings Fabricated by APS, HVOF, and CGDS Techniques. *Tribology Transactions*, 57(1), 11–17. <https://doi.org/10.1080/10402004.2013.820372>
- Karthikeyan, J. (2004). Cold spray technology: International status and USA efforts. *Report from ASB Industries Inc., Barbeton, OH, 44203*, 1-14.
- Kılıçay, K. (2024). A practical approach to fabrication of nano-Al₂O₃ reinforced MMC coatings by cold spray: Characterization of nanomechanical and tribological performance. *Materials Today Communications*, 39, 109257. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2024.109257>

- Lakkannavar, V., Yogesha, K. B., Prasad, C. D., Phanden, R. K., & Prasad, S. C. (2024). Thermal spray coatings on high-temperature oxidation and corrosion applications—a comprehensive review. *Results in Surfaces and Interfaces*, 16, 100250. <https://doi.org/10.1016/j.rsurfi.2024.100250>
- Li, S. B., Xiang, W. H., Zhai, H. X., & Zhou, Y. (2008). Formation of TiC hexagonal platelets and their growth mechanism. *Powder Technology*, 185(1), 49-53. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2007.09.018>
- Li, X., Dong, Z., Westwood, A., Brown, A., Zhang, S., Brydson, R., ... & Rand, B. (2008). Preparation of a titanium carbide coating on carbon fibre using a molten salt method. *Carbon*, 46(2), 305-309. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2007.11.020>
- Liang, W., Lu, H.-H., Guo, H.-K., Zhang, W.-G., & Liang, W. (2019). Improving the mechanical properties of the AISI 430 stainless steels by using Q&P and Q&T processes. *Materials Letters*, 240, 275-278. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2019.01.029>
- Liu, X., Li, J., Yu, X., Fan, H., Wang, Q., Yan, S., ... & Jiang, W. (2016). Graphene nanosheet/titanium carbide composites of a fine-grained structure and improved mechanical properties. *Ceramics International*, 42(1), 165-172. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.08.071>
- Lo, K. H., Shek, C. H., & Lai, J. K. L. (2009). Recent developments in stainless steels. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 65(4-6), 39-104. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2009.03.001>
- Ma, Y., Bao, C., Song, S., & Lei, J. (2018). Effects of TiC addition on microstructures, mechanical properties and fracture behaviors of porous titanium carbide ceramics. *Ceramics International*, 44(16), 19919-19925. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.07.255>
- Meng, L., Li, W., Lu, H., Wang, S., Shi, Q., Ma, J., ... & Zheng, L. (2024). Influence of cooling manners on microstructure and mechanical properties of AISI 430 ferritic stainless steel. *Materials Science and Engineering: A*, 889, 145853. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2023.145853>
- Moridi, A., Hassani-Gangaraj, S. M., Guagliano, M., & Dao, M. (2014). Cold spray coating: Review of material systems and future perspectives. *Surface Engineering*, 36(6), 369-395. <https://doi.org/10.1179/1743294414Y.00000000270>
- Chavan, N. M., Kiran, B., Jyothirmayi, A., Phani, P. S., & Sundararajan, G. (2013). The corrosion behavior of cold sprayed zinc coatings on mild steel substrate. *Journal of thermal spray technology*, 22(4), 463-470. <https://doi.org/10.1007/s11666-013-9893-z>
- Nguyen, V. H., Delbari, S. A., Asl, M. S., Van Le, Q., Shokouhimehr, M., Namini, A. S., & Mohammadi, M. (2021). Microstructure–property correlation in nano-diamond and TiN added TiC-based ceramics. *Ceramics International*, 47(1), 449-460. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.08.152>

- Razavipour, M., Rahmati, S., Zúñiga, A., Criado, D., & Jodoin, B. (2021). Bonding mechanisms in cold spray: Influence of surface oxidation during powder storage. *Journal of Thermal Spray Technology*, 30(1), 304-323. <https://doi.org/10.1007/s11666-020-01123-5>
- Rokni, M. R., Nutt, S. R., Widener, C. A., Champagne, V. K., & Hrabe, R. H. (2017). Review of relationship between particle deformation, coating microstructure, and properties in high-pressure cold spray. *Journal of thermal spray technology*, 26(6), 1308-1355. <https://doi.org/10.1007/s11666-017-0575-0>
- Shen, L., Zhao, Y., Li, Y., Wu, H., Zhu, H., & Xie, Z. (2021). Synergistic strengthening of FeCrNiCo high entropy alloys via micro-TiC and nano-SiC particles. *Materials Today Communications*, 26, 101729. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.101729>
- Singh, H., Kumar, M., & Singh, R. (2022). An overview of various applications of cold spray coating process. *Materials Today: Proceedings*, 56, 2826-2830. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.10.160>
- Song, M. S., Huang, B., Zhang, M. X., & Li, J. G. (2009). Study of formation behavior of TiC ceramic obtained by self-propagating high-temperature synthesis from Al-Ti-C elemental powders. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 27(3), 584-589. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2008.09.009>
- Tekin, E., Uyum, S., Karahan, B., Tekin, K. C., & Malayoğlu, U. (2021). Soğuk püskürtme teknolojisi ve uygulamaları. *Mühendis ve Makina*, 62(702), 106-150. <https://doi.org/10.46399/muhendismakina.801291>
- Testa, V., Morelli, S., Bolelli, G., Bosi, F., Puddu, P., Colella, A., ... & Lusvarghi, L. (2022). Corrosion and wear performances of alternative TiC-based thermal spray coatings. *Surface & Coatings Technology*, 438, 128400. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.128400>
- Upadhyaya, G. S. (2002). *Powder Metallurgy Technology*. Cambridge International Science Publishing.
- Wang, C., Yu, Y., Yu, J., Zhang, Y., Zhao, Y., & Yuan, Q. (2020). Microstructure evolution and corrosion behavior of dissimilar 304/430 stainless steel welded joints. *Journal of Manufacturing Processes*, 50, 183-191. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.12.015>
- Wang, X. H., Song, S. L., Zou, Z. D., & Qu, S. Y. (2006). Fabricating TiC particles reinforced Fe-based composite coatings produced by GTAW multi-layers melting process. *Materials Science and Engineering: A*, 441(1-2), 60-67. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.06.015>
- Wang, Z., Dirrenberger, J., Lapouge, P., & Dubent, S. (2022). Laser treatment of 430 ferritic stainless steel for enhanced mechanical properties. *Materials Science and Engineering A*, 831, 142205. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.142205>
- Wei, Y., Zhang, W., Zhang, J., Wang, Y., Chu, X., Qi, S., ... & Liu, S. (2023). Preparation of highly dense Ti-based coatings with enhanced corrosion protection performance via cold spray. *Surface and Coatings Technology*, 473, 130002. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2023.130002>

- Xiang, M., Ding, W., Dong, Q., & Zhu, Q. (2024). Synthesis methods and powder quality of titanium monocarbide. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 72, 10-18. <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2024.03.019>
- Xie, X., Chen, C., Xie, Y., Aubry, E., Ren, Z., Ji, G., & Liao, H. (2019). Comparative investigation of microstructure and properties of Ni-coated FeSiAl soft magnetic composite coatings produced by cold spraying and HVOF. *Surface and Coatings Technology*, 371, 224-234. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.12.067>
- Yin, S., Aldwell, B., & Lupoi, R. (2017). Cold spray additive manufacture and component restoration. *Cold-Spray Coatings: Recent Trends and Future Perspectives* (pp. 195-224). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-67183-3_6
- Yin, S., Cavaliere, P., Aldwell, B., Jenkins, R., Liao, H., Li, W., & Lupoi, R. (2018). Cold spray additive manufacturing and repair: Fundamentals and applications. *Additive manufacturing*, 21, 628-650. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.04.017>



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Olcay KAYA

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2013, Sakarya Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Fizik
- **Lisans** : 2023, Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği
- **Yükseklisans** : 2014, Marmara Üniversitesi, İşletme, Yönetim ve Organizasyon

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2012 yılında kurucusu olduğu Neon Makina Ürünleri ve Kaplama Teknolojileri San. Tic. Ltd. Şti.'de Genel Müdür olarak görev yapmaktadır.

TEZDEN TÜRETİLEN ESERLER:

- Kaya O., Ercenk E., (2025, 30-31, Mart). Yüksek Basınçlı Soğuk Sprey İle 430 Paslanmaz Malzeme Ve Titanyum Karbür Takviyeli 430 Paslanmaz Malzeme Tozlarının Metal Yüzey Kaplamasında Kullanımı: Mikroyapı-Sertlik İncelemesi. *9. Uluslararası Mühendislik Bilimleri ve Multidisipliner Yaklaşımlar Kongresi*, Istanbul, Turkey.