

T.C.
ERZİNCAN BİNALİ YILDIRIM ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ENDÜSTRİYEL UYGULAMALARDA KULLANILAN TİSİN VE ALTIN KAPLI 316L
VE SÜPER DUBLEKS PASLANMAZ ÇELİKLERDE TRİBOLOJİK
ÖZELLİKLERİN BELİRLENMESİ**

Hasan GÜRER

Danışman: Doç. Dr. Mevra ASLAN ÇAKIR

TEZ JÜRİ ÜYELERİ
Doç. Dr. Mevra ASLAN ÇAKIR
Doç. Dr. Onur ÇOMAKLI
Doç. Dr. Muhammet Taha ACAR

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ERZİNCAN, 2026

© 2026 [Hasan GÜRER]. Tüm hakları saklıdır.

Kabul ve Onay Sayfası

Doç. Dr. Mevra ASLAN ÇAKIR danışmanlığında, Hasan GÜNERER tarafından hazırlanan bu çalışma 18/06/2026 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Makine Mühendisliği Anabilim Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak kabul oybirliği (3/3) ile kabul edilmiştir.

Başkan : Doç. Dr. Mevra ASLAN ÇAKIR İmza:

Üye : Doç. Dr. Muhammet Taha ACAR İmza:

Üye : Doç. Dr. Onur ÇOMAKLI İmza:

Yukarıdaki Yüksek Lisans/Doktora Tezi Enstitü Yönetim Kurulunun / / 20.... tarih ve/..... sayılı kararı ile onaylanmıştır.

Doç. Dr. Kemal Volkan ÖZDOKUR
Enstitü Müdür V.

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildirişlerin, şekil ve tabloların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

Bilimsel Etięe Uygunluk Sayfası

“Endüstriyel Uygulamalarda Kullanılan TiSiN ve AlTiN Kaplı 316L ve Super Dupleks Paslanmaz Çeliklerde Tribolojik Özelliklerin Belirlenmesi” isimli “Yüksek Lisans” tezini tarafımda intihal tespit programı ile incelenmiştir. Buna göre tezimde bilimsel etik ihlali ve intihal olarak nitelendirilebilecek herhangi bir durum olmadığını taahhüt ederim.

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir biçimde elde edildiğini; aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiğı gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi beyan ederim.

18/06/2026

Hasan GÜNER

ÖZET

ENDÜSTRİYEL UYGULAMALARDA KULLANILAN TiSiN VE AlTiN KAPLI 316L VE SÜPER DUBLEKS PASLANMAZ ÇELİKLERDE TRIBOLOJİK ÖZELLİKLERİN BELİRLENMESİ

Hasan GÜNER

Yüksek Lisans Tezi, Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Mevra ASLAN ÇAKIR

2026, 58 sayfa

Yüksek korozyon direnci ve mekanik özellikleri nedeniyle yaygın olarak kullanılan paslanmaz çeliklerin yüzey performansını artırmak amacıyla, bu çalışmada 316L ve süper dubleks paslanmaz çelik altlıklar üzerine katodik ark PVD tekniği kullanılarak TiSiN ve AlTiN seramik kaplamalar biriktirilmiştir. Kaplama uygulanmış ve uygulanmamış numunelerin faz ve mikroyapı incelemeleri, XRD, SEM ve EDS yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilmiş, yüzey morfolojileri ile pürüzlülük özellikleri AFM analizleri aracılığıyla değerlendirilmiştir. Yüzeylerin ıslanma karakteristikleri, temas açısı ölçümleriyle, mekanik performansları ise nanoindentasyon ve mikrosertlik analizleri yardımıyla belirlenmiştir. Kaplamaların tribolojik davranışlarını ortaya koymak amacıyla pin-on-disk sürtünme ve aşınma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, kaplama uygulamasının yüzey sertliğini artırdığını ve aşınmaya karşı direnci önemli ölçüde geliştirdiğini göstermiştir. TiSiN kaplamaların yüksek sertlik ve güçlü aderans özellikleri sergilediği, AlTiN kaplamaların ise düşük sürtünme katsayısı ve daha homojen yüzey morfolojisi sağladığı belirlenmiştir. Ayrıca süper dubleks paslanmaz çelik altlıklar üzerinde yapılan kaplamaların 316L altlıklara göre daha yüksek mekanik ve tribolojik performans sergilediği belirlenmiştir. Bu sonuçlar, yüksek sıcaklık, aşınma ve korozyon koşullarında çalışan uygulamalarda TiSiN ve AlTiN kaplamalı paslanmaz çeliklerin yüzey performansını önemli ölçüde artırdığını göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: 316L Paslanmaz Çelik, Süper Dubleks Çelik, TiSiN, AlTiN, PVD, Yüzey Kaplama, Triboloji

ABSTRACT

DETERMINATION OF TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF TiSiN AND AlTiN COATED 316L AND SUPER DUPLEX STAINLESS STEELS USED IN INDUSTRIAL APPLICATIONS

Hasan GÜRER

Master's Thesis, Erzincan Binali Yıldırım University, Institute of Science and Technology,

Department of Mechanical Engineering

Advisor: Doç. Dr. Mevra ASLAN ÇAKIR

2026, 58 pages

In order to improve the surface performance of stainless steels, which are widely used due to their high corrosion resistance and mechanical properties, TiSiN and AlTiN ceramic coatings were deposited on 316L and super duplex stainless steel substrates using cathodic arc PVD technique in this study. Phase and microstructural characterizations of both coated and uncoated specimens were carried out using X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM), and energy-dispersive spectroscopy (EDS), while surface morphology and roughness characteristics were evaluated by atomic force microscopy (AFM). The wettability behavior of the surfaces was determined through contact angle measurements, whereas their mechanical performance was assessed by nanoindentation and microhardness analyses. To investigate the tribological behavior of the coatings, pin-on-disk friction and wear tests were conducted. The obtained results demonstrated that the coating process significantly increased surface hardness and improved wear resistance. TiSiN coatings exhibited high hardness and strong adhesion characteristics, while AlTiN coatings provided lower friction coefficients and a more homogeneous surface morphology. Furthermore, coatings deposited on super duplex stainless steel substrates exhibited superior mechanical and tribological performance compared to those deposited on 316L substrates. These findings indicate that TiSiN- and AlTiN-coated stainless steels can substantially enhance surface performance in applications operating under severe conditions involving high temperatures, wear, and corrosion.

Keywords: 316L Stainless Steel, Super Duplex Steel, TiSiN, AlTiN, PVD, Surface Coating, Tribology

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının hazırlanması sürecinde bilgi, tecrübe ve yönlendirmeleriyle bana her zaman destek olan değerli tez danışmanımın Doç. Dr. Mevra ASLAN ÇAKIR'a, en içten teşekkürlerimi sunarım. Araştırmanın yürütülmesi sırasında sunduğu destek ve sağladığı çalışma ortamı için Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölüm Başkanı Sayın Prof. Dr. Özlem BARAN ACIMERT'e en içten teşekkürlerimi sunarım. Tezimin deneysel çalışmalarında her türlü ilgi ve yardımı gösteren sayın Abdulaziz GÜNEŞ ve Harun ASLANER hocalarıma teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca tezimin kaplama sürecinde desteğini sağlayan TİTANİT ULTRA SERT KAPLAMALAR SAN. TİC. LTD. ŞTİ.'nde Ar-Ge Mühendisi ve Üretim Müdürü sayın Cihan ERDEM'e teşekkürlerimi sunarım. Bu süreçte her daim sabır, anlayış ve manevi destekleriyle yanımda olan aileme ve dostlarıma minnettarlığımı ifade ederim.

Hasan GÜRER

Haziran, 2026

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
TABLOLAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	viii
1. GİRİŞ	1
1.1. Araştırmanın Amacı	4
1.2. Araştırmanın Önemi	5
1.3. Varsayımlar	5
1.4. Sınırlılıklar	6
2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE VE İLGİLİ ÇALIŞMALAR	6
2.1. Paslanmaz Çelikler	6
2.1.1. 316 L paslanmaz çelikler	8
2.1.2. Süper Dupleks paslanmaz çelikler	10
2.2. Fiziksel Buhar Biriktirme (PVD) Yöntemi	12
2.2.1. Katodik ark PVD yöntemi	13
2.3. Tribolojik Davranış ve Aşınma Mekanizmaları	15
2.3.1. Adezif aşınması	15
2.3.2. Abrasif aşınması	16
2.3.3. Yorulma aşınması	16
2.3.4. Korozyonla bileşik aşınma	16
2.3.5. Erozyon aşınması	17
2.3.6. Oksidatif aşınma	17
2.4. TiSiN ve AlTiN Kaplamalar	17
2.4.1. TiSiN kaplamalar	18
2.4.2. AlTiN kaplamalar	18
2.5. TiSiN ve AlTiN kaplamalar üzerine yapılmış literatür çalışmaları	19
3. YÖNTEM	20
3.1. Materyal	20
3.2. Kaplama İşlemi	21

3.3. Yapısal ve Mikroyapısal Karakterizasyon Çalışmaları	23
3.4. Mikrosertlik Ölçümleri	24
3.5. Aşınma ve Sürtünme Testleri	25
3.6. Islanabilirlik Analizleri	26
4. BULGULAR	26
4.1. XRD Analizleri	26
4.2. Morfolojik Karakterizasyon Sonuçları	29
4.3. Tribolojik Test Sonuçları	36
4.4. Temas Açısı Ölçümleri	44
5. TARTIŞMA VE SONUÇ	46
KAYNAKÇA	49
EKLER	55

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. 316L paslanmaz çelik numunesine ait kimyasal içerik değerleri (ağırlık %) ...	20
Tablo 2. S32760 süper dubleks paslanmaz çeliğine ait elementel bileşim (% ağırlık) ...	21
Tablo 3. Katodik Ark PVD işlem koşulları	22
Tablo 4. Tribolojik testlerde kullanılan deney koşulları.....	25
Tablo 5. İşlemsiz ve kaplamalı numunelere ait kalınlık, sertlik ve pürüzlülük sonuçları	33
Tablo 6. Kaplama tabakalarının EDS analizlerinden elde edilen element dağılımları....	35
Tablo 7. İşlemsiz, TiSiN ve AlTiN kaplı 316L ve süper dubleks paslanmaz çelik numunelere ait elde edilen aşınma testi sonuçları	38

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. 316L Paslanmaz çelik faz diyagramı.....	9
Şekil 2. Süper dubleks paslanmaz çelik faz diyagramı	11
Şekil 3. PVD tekniğinin çalışma prensibini gösteren şematik diyagram	13
Şekil 4. CA-PVD ünitesinin şematik gösterimi.....	14
Şekil 5. Katodik Ark PVD kaplama işlemlerinde kullanılan Platit PL-1011 sistemi.	22
Şekil 6. Faz analizlerinde kullanılan Panalytical Empyrean XRD cihazı	23
Şekil 7. SEM cihazı, Fei Quanta Feg 450	24
Şekil 8. Mekanik test cihazı Bruker UMT-2	24
Şekil 9. Nikon ECLIPSE MA200 optik mikroskobu	26
Şekil 10. İslanabilirlik ölçümlerinde kullanılan temas açısı analiz cihazı.....	26
Şekil 11. İşlemsiz, TiSiN ve AlTiN kaplı 316L paslanmaz çelik numunelere ait XRD grafikleri	27
Şekil 12. İşlemsiz, TiSiN ve AlTiN kaplı Süperdubleks UNS S32760 paslanmaz çelik numunelere ait XRD grafikleri.....	29
Şekil 13. a) AlTiN kaplı 316L, b) TiSiN kaplı 316L SS, c) AlTiN kaplı SDSS ve d) TiSiN kaplı SDSS numunelere ait yüzey SEM görüntüleri	31
Şekil 14. a) AlTiN kaplı 316L, b) TiSiN kaplı 316L, c) AlTiN kaplı SDSS ve d) TiSiN kaplı SDSS numunelere ait kesit SEM görüntüleri	34
Şekil 15. a) TiSiN/SDSS, b) AlTiN/SDSS, c) TiSiN/316L ve d) AlTiN/316L numunelerine ait EDS spektrumları	34
Şekil 16. 2 N yük altında numunelerin sürtünme katsayısındaki zamana bağlı değişimi.....	36
Şekil 17. 5 N yük altında sürtünme katsayısının zamana göre değişimi	36
Şekil 18. İşlemsiz, TiSiN ve AlTiN kaplı 316L ve süper dubleks paslanmaz çelik numunelerden elde edilen aşınma oranı grafikleri	37
Şekil 19. 2 N yük altında oluşan aşınma izlerine ait optik mikroskop görüntüleri	40
Şekil 20. 5 N yük altında oluşan aşınma izlerine ait optik mikroskop görüntüleri ...	42
Şekil 21. Farklı yüzey koşullarına sahip 316L ve SDSS numunelerinin ıslanabilirlik davranışlarını gösteren temas açısı sonuçları	44

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

α	Ferrit fazı
γ	Östenit fazı
σ	Sigma fazı
χ	Chi fazı
$^{\circ}\text{C}$	Santigrat derece
%	Yüzde
GPa	Gigapascal
μm	Mikrometre
Cr	Krom
Fe	Demir
Mo	Molibden
N	Azot
Nb	Niyobyum
Ni	Nikel
Si	Silisyum
Ti	Titanyum
Zr	Zirkonyum
Al_2O_3	Alüminyum Oksit
Cr_{23}C_6	Krom Karbür
Cr_2N	Krom Nitrür
Si_3N_4	Silisyum Nitrür

AFM	Atomik Kuvvet Mikroskobu
AlCrN	Alüminyum Krom Nitrür
AlTiN	Alüminyum Titanyum Nitrür
CA-PVD	Katodik Ark Fiziksel Buhar Biriktirme
CVD	Kimyasal Buhar Biriktirme
EDS	Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi
FCC	Yüzey Merkezli Kübik Kristal Yapı
HAZ	Isıdan Etkilenen Bölge
HV	Vickers Sertliği
PVD	Fiziksel Buhar Biriktirme
PREN	Çukurlaşma Direnci Eşdeğer Sayısı
SCC	Gerilim Korozyonu Çatlağı
SDSS	Süper Dupleks Paslanmaz Çelik
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
TiAlN	Titanyum Alüminyum Nitrür
TiCrN	Titanyum Krom Nitrür
TiN	Titanyum Nitrür
TiSiN	Titanyum Silisyum Nitrür
TNZ	Titanyum-Niyobyum-Zirkonyum Alaşımı
UNS	Birleşik Numaralandırma Sistemi
XRD	X-Işınları Kırınımı

1. GİRİŞ

Endüstriyel üretim süreçlerinde kullanılan malzemelerin mekanik dayanım, aşınma direnci ve korozyon performansı, sistemlerin verimliliğini ve ekonomik ömrünü doğrudan etkilemektedir. Özellikle yüksek sıcaklık, sürtünme ve kimyasal etkileşimlerin yoğun olduğu ortamlarda, malzemelerin yüzey özellikleri genel performanstan çok daha belirleyici hale gelmektedir. Bu nedenle, yüzey mühendisliği ve kaplama teknolojileri, son yıllarda metalik malzemelerin ömrünü uzatmak ve dayanıklılığını artırmak amacıyla geniş bir uygulama alanı kazanmıştır (Holmberg ve Matthews, 2009).

Metalik malzemeler genel olarak demir esaslı (ferrous) ve demir dışı (non-ferrous) olmak üzere iki ana sınıfta incelenir. Demir esaslı malzemeler; çelikler, dökme demirler ve paslanmaz çelikler gibi geniş bir ürün grubunu kapsar ve mühendislik uygulamalarında yüksek mukavemet, süneklik ve şekillendirilebilirlik avantajları nedeniyle yaygın kullanıma sahiptir. Demir dışı metalik malzemeler ise alüminyum, titanyum, magnezyum, bakır, nikel ve kobalt esaslı alaşımlar gibi daha hafif veya yüksek sıcaklık dayanımı gerektiren uygulamalarda tercih edilen malzemelerden oluşur (Callister ve Rethwisch, 2020).

Paslanmaz çelikler, sahip oldukları yüksek korozyon direnci, mekanik mukavemet ve şekillendirilebilirlik özellikleri nedeniyle gıda, kimya, enerji, savunma, inşaat ve tıp sanayi gibi çok çeşitli endüstriyel alanda kullanılmaktadır. Bu malzemeler, temel alaşım elementleri olan demir (Fe), krom (Cr) ve nikel (Ni) sayesinde oksidasyona ve paslanmaya karşı direnç gösterir. Paslanmaz çelikler; kimyasal bileşim ve mikro yapı farklılıklarına bağlı olarak östenitik, ferritik, martensitik, dubleks ve süper dubleks olmak üzere beş ana grupta sınıflandırılmaktadır. Östenitik çelikler iyi şekillendirilebilirlik ve üstün korozyon direnci ile öne çıkarken, ferritik çelikler manyetik özellikleri ve orta düzey korozyon dirençleri ile bilinir. Martensitik çelikler ısıtılma ile sertleştirilebilirken, dubleks çelikler ferrit ve östenit fazlarının birleşimi sayesinde yüksek mukavemet ve klorür ortamlarına karşı üstün direnç sunar. Daha yüksek Cr, Mo ve N içeriğine sahip süper dubleks çelikler ise ağır hizmet koşullarında tercih edilen en dayanıklı paslanmaz çelik sınıfıdır (Davis, 1994; Sedriks, 1996).

316L östenitik paslanmaz çelik, düşük karbon içeriği (%0,03'ün altında) sayesinde kaynak işlemleri sırasında tane sınırı karbür çökmesini azaltarak kaynak kabiliyetini ve korozyon direncini artırır. Bu özelliklerinden dolayı özellikle petrokimya, medikal cihazlar ve denizcilik

gibi ortamlarda yaygın şekilde kullanılmaktadır (Sedriks, 1996). Buna karşın süper dubleks paslanmaz çelikler (örneğin UNS S32750 ve S32760), yüksek krom (%24–26 Cr), molibden (%3–4 Mo) ve azot içeriğiyle çift fazlı (östenit + ferrit) mikro yapıya sahiptir. Bu yapı, hem yüksek mekanik dayanım hem de klorür kaynaklı gerilim korozyonu çatlağına (SCC) karşı üstün direnç sağlar. Dolayısıyla süper dubleks çelikler, deniz suyuna maruz pompa ve vana sistemleri, petrol platformları, ısı eşanjörleri ve kimyasal proses ekipmanları gibi ağır hizmet koşullarında tercih edilmektedir (Francis ve Byrne, 2021). Her iki çelik türü de yapısal dayanım ve korozyon direnci açısından önemli avantajlara sahip olmasına rağmen, sürtünme ve aşınma gibi yüzey kaynaklı hasarlara karşı sınırlı direnç göstermektedir. Bu durum, malzeme yüzeylerinde mikro çatlak oluşumu, pürüzlenme, kütle kaybı ve aşınma–korozyon etkileşimi nedeniyle servis ömrünün azalmasına yol açabilmektedir (Leyland ve Matthews, 2000; Holmberg ve Matthews, 2009). Bu nedenle, yüzey mühendisliği yaklaşımlarıyla çeliklerin yüzey özelliklerinin geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır.

Yüzey modifikasyon yöntemleri arasında fiziksel buhar biriktirme (PVD), kimyasal buhar biriktirme (CVD), plazma püskürtme, sol-jel ve elektro-kaplama gibi farklı teknikler yer almakta olup, bunlar arasında PVD yöntemi yüksek yapışma kabiliyeti, düşük işlem sıcaklığı ve çevre dostu yapısıyla öne çıkmaktadır (Mattox, 2010). PVD yönteminde, kaplama malzemesi genellikle metalik veya seramik bir hedef üzerinden atomik veya iyonik biçimde buharlaştırılarak altlık yüzeye taşınır. Vakum ortamında gerçekleşen bu süreç; buharlaşma, taşınım, biriktirme ve gerekirse tavlama adımlarından oluşur. Katodik ark PVD, buharlaştırma kaynağı olarak ark plazmasını kullanan özel bir PVD türüdür ve yüksek iyonizasyon oranı sayesinde altlık yüzeyine yoğun, sert ve iyi yapışmış kaplamalar elde edilmesini sağlar (Santecchia vd., 2015). Bu nedenle TiN, CrN, AlTiN, TiSiN gibi nitrür esaslı kaplamalar hem takım çeliklerinde hem de paslanmaz çelik altlıklarda yaygın olarak uygulanmaktadır (Mattox, 2010).

Son yıllarda, TiSiN ve AlTiN kaplamalar, üstün termal kararlılıkları, yüksek sertlikleri ve oksidasyon dirençleri nedeniyle dikkat çekmektedir. Bu kaplamalar, yüksek sıcaklıklarda yapısal stabiliteyi koruyabilmekte ve altlık malzemeyi aşınma, difüzyon ve oksidasyondan korumaktadır. TiSiN kaplamalar, amorf Si₃N₄ fazı içeren nanokompozit yapıları sayesinde yüksek sertlik (30-40 GPa) ve oksidasyon kararlılığı sunarken, AlTiN kaplamalar yüksek sıcaklıklarda Al₂O₃ tabakası oluşturarak oksidasyon direncini artırır (Claver vd., 2021). Bu özellikler, her iki kaplama türünü de kesici takımlar, kalıplar, türbin parçaları ve otomotiv

bileşenleri gibi aşınmaya maruz uygulamalar için uygun hale getirir (Claver vd., 2021; Kucharska vd., 2022).

Literatürde, paslanmaz çelik yüzeylerinin PVD kaplamalarla geliştirilmesine yönelik çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Claver (2021) tarafından yapılan araştırma, AlTiN–TiSiN çok katmanlı kaplamaların tribolojik performansının tek katmanlı kaplamalara göre daha yüksek olduğunu göstermiştir. Leyens ve Peters (2003) tarafından yapılan çalışmada TiN gibi sert seramik kaplamaların Ti-Nb-Zr esaslı titanyum alaşımları üzerine uygulanmasının yüzey sertliğini belirgin şekilde artırdığı ve aşınma direncini iyileştirdiği göstermiştir. Bu bulgular, kaplama malzemesi seçimi ve altlık türü arasındaki etkileşimin yüzey performansını doğrudan etkilediğini ortaya koymaktadır.

Rajaguru ve Arunachalam (2017), süper dubleks paslanmaz çeliğin kuru tornalanması sırasında farklı kaplamalı kesici takımların performansını incelemiş ve PVD kaplamaların takım aşınmasını azalttığını, yüzey bütünlüğünü ise belirgin şekilde iyileştirdiğini rapor etmiştir. Benzer şekilde Parsi ve ark. (2020), AlTiN ve AlCrN kaplamalı karpür uçların süper dubleks çeliklerin işlenebilirliği üzerindeki etkilerini karşılaştırarak AlTiN kaplamaların daha uzun takım ömrü ve daha düşük sürtünme katsayısı sağladığını bildirmiştir. Locks ve ark. (2024) ise, AlCrN, AlCrN/TiSiN ve AlTiN kaplamalı takımlar kullanılarak işlenen süper dubleks paslanmaz çeliğin yüzey bütünlüğü ve gerilim korozyon çatlağı davranışını incelemiş; PVD kaplamaların yüzeyde oluşan kalıntı gerilmeleri azaltarak korozyon direncini artırdığını göstermiştir. He ve ark. (2024) tarafından yapılan çalışmada, süper dubleks paslanmaz çeliklerin diş açma işlemlerinde AlCrN ve AlTiSiN çok katmanlı PVD kaplamaların tribolojik performansı değerlendirilmiştir. Araştırma sonuçları, bu çok katmanlı kaplamaların yüksek sıcaklıkta daha iyi yapışma mukavemeti, düşük sürtünme katsayısı ve üstün yüzey kalitesi sağladığını göstermiştir.

Movassagh-Alanagh ve Mahdavi (2020)'de (AISI 304 paslanmaz çelik yüzeyine uyguladıkları çok katmanlı Ti/TiN/TiSiN kaplamalarla, aşınma direncinde yaklaşık 19 kat artış ve korozyon dayanımında belirgin iyileşme elde etmişlerdir. Komarov, Konstantinov ve Pilko (2014), reaktif magnetron püskürtme yöntemiyle üretilen TiAlN, TiCrN ve TiSiN kaplamaların nanoyapısal özelliklerini incelemiş; Si katkısının amorf Si₃N₄ fazı oluşturarak tane sınırlarını stabilize ettiğini ve kaplama sertliğini artırdığını belirtmiştir. Petkov ve ark. (2017), katodik ark PVD yöntemiyle üretilen AlSiN kaplamaların yüzey morfolojisini, mekanik dayanımını

ve tribolojik özelliklerini araştırmış; 39 GPa sertlik ve yüksek yapışma mukavemetiyle bu kaplamaların yüksek sıcaklıkta dahi yüzey stabilitesini koruduğunu bildirmiştir. Beake ve ark. (2017) tarafından yapılan yüksek sıcaklık mikro-çizik testlerinde, AlTiN kaplamaların 500 °C'ye kadar mekanik bütünlüğünü koruyarak aşınma direncinde anlamlı bir artış sağladığı tespit edilmiştir. Borgioli ve ark. (2024), paslanmaz çeliklerin yüksek korozyon direnci ve mekanik dayanımları sayesinde enerji, kimya, denizcilik ve diğer endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak tercih edildiğini vurgulamaktadır. Bununla birlikte, bu malzemelerin yüzey kaynaklı aşınma ve sürtünme hasarlarına karşı sınırlı performans sergilediği, servis koşullarında ilave yüzey mühendisliği çözümlerini gerekli kıldığı belirtilmektedir.

Elde edilen bulgular, özellikle TiSiN ve AlTiN gibi kaplamaların farklı paslanmaz çelik türlerinde yüzey sertliği, aşınma dayanımı ve tribolojik performansı önemli ölçüde iyileştirdiğini göstermektedir. Ancak mevcut literatürde, bu iki kaplama türünün 316L ve süper dubleks paslanmaz çelikler üzerindeki etkilerini doğrudan karşılaştıran kapsamlı bir çalışma bulunmamaktadır. Bu kapsamda yürütülen çalışma, hem kaplama malzemesi (TiSiN–AlTiN) hem de altlık yapısı (316L–Süper Dubleks) açısından literatürde sınırlı olarak ele alınan bir kombinasyonu inceleyerek yüzey mühendisliği alanına katkı sağlamaktadır. Bu nedenle bu tez, söz konusu kaplama-altlık kombinasyonlarını çok boyutlu analizlerle değerlendirerek literatürdeki bu boşluğu doldurmayı hedeflemiştir.

1.1. Araştırmanın Amacı

Bu araştırmanın temel amacı, 316L östenitik paslanmaz çelik ile süper dubleks paslanmaz çelik yüzeylerinin katodik ark (CA-PVD) yöntemi ile kaplanması sonucu elde edilen TiSiN ve AlTiN kaplamaların mikroyapısal, mekanik ve tribolojik özelliklerini karşılaştırmalı olarak incelemektir.

Bu kapsamda çalışmanın özel amaçları şunlardır:

- 316L ve süper dubleks çelik altlıkların yüzey özelliklerini belirlemek,
- TiSiN ve AlTiN kaplamaların yapısal özelliklerini (SEM, EDS, XRD) analiz etmek,
- Kaplamaların sertlik (HV) değerlerini karşılaştırmak,
- Tribolojik davranışlarını pin-on-disk testleri ile değerlendirmek,
- 316L ve Süper dubleks altlık malzemelerinin kaplama özelliklerine olan etkisini karşılaştırmalı olarak değerlendirmek.

- TiSiN ve AlTiN kaplamaların performansını mekanik ve aşınma davranışları açısından kıyaslamak.

Bu amaç doğrultusunda elde edilen sonuçlar, paslanmaz çelik yüzeylerinde kullanılacak kaplama türü ve altlık seçimi için bilimsel veri sağlayacaktır.

1.2. Araştırmanın Önemi

Sanayide kullanılan paslanmaz çelik yüzeyler, aşınma, korozyon ve yüksek sıcaklık etkileri altında zamanla performans kaybına uğramaktadır. Bu nedenle yüzey kaplama teknolojileri, özellikle PVD yöntemleri günümüzde kritik bir öneme sahiptir.

Bu araştırmanın önemi şu noktalarda ortaya çıkmaktadır:

- TiSiN ve AlTiN kaplamalar son yıllarda yaygınlaşmasına rağmen 316L ve Süper Dupleks çelik üzerinde karşılaştırmalı çalışmalar sınırlıdır.
- Kaplama-altlık etkileşimi, yapışma, mikro yapı, aşınma direnci gibi parametreler uygulamada büyük önem taşımaktadır.
- Çalışmadan elde edilecek bulgular, endüstride kesme takımları, kalıp üretimi, yüksek sıcaklık uygulamaları ve korozyon ortamlarında tercih edilecek kaplama malzemeleri için referans oluşturacaktır.
- Ayrıca, artan üretim maliyetleri düşünüldüğünde kaplama performansının doğru belirlenmesi ekonomik açıdan da önemlidir.
- Bu araştırma, PVD kaplama teknolojisinin paslanmaz çelik aplikasyonlarında optimizasyonuna bilimsel katkı sağlayacaktır.

1.3. Varsayımlar

Bu çalışmada aşağıdaki varsayımlar kabul edilmiştir:

- Kullanılan 316L ve süper dupleks paslanmaz çelik numuneler standart kimyasal bileşime sahiptir.
- Kaplama işlemi sırasında CA-PVD parametreleri (akım, voltaj, basınç, reaktif gaz, sıcaklık) üretici firma tarafından stabil tutulmuştur.
- TiSiN ve AlTiN kaplamalar numune yüzeyine homojen ve kararlı şekilde uygulanmıştır.

- Yapılan sertlik, SEM/EDS, XRD ve triboloji testleri uluslararası standartlara uygun biçimde gerçekleştirilmiştir.
- Test cihazları doğru kalibrasyon değerlerine sahiptir.
- Elde edilen veriler kaplamaların gerçek performansını yansıtmaktadır.

1.4. Sınırlılıklar

Araştırma aşağıdaki sınırlılıklar çerçevesinde yürütülmüştür:

- Çalışma yalnızca 316L ve süper dubleks paslanmaz çelik altlıkları kapsamaktadır.
- Kaplamalar TiSiN ve AlTiN türleri ile sınırlıdır; diğer PVD kaplamalar incelenmemiştir.
- Kaplama tekniği olarak yalnızca katodik ark PVD (CA-PVD) yöntemi kullanılmıştır.
- Aşınma testleri belirli bir yük, hız ve mesafe parametreleri ile sınırlıdır.
- Mikroyapı incelemeleri SEM, EDS ve XRD analizleri ile sınırlıdır.
- Kaplama kalınlığı ve yüzey pürüzlülüğü yalnızca kullanılan cihazların ölçüm hassasiyeti çerçevesinde değerlendirilmiştir.
- Deneysel çalışmada kullanılan ekipman ve laboratuvar koşulları sonuçları etkileyecek şekilde değiştirilememiştir.

2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE VE İLGİLİ ÇALIŞMALAR

2.1. Paslanmaz Çelikler

Paslanmaz çelikler genel olarak beş farklı sınıfta değerlendirilmektedir: östenitik, ferritik, martensitik, dubleks ve çökelmeyle sertleştirilebilen alaşımlar. Bu sınıflar içerisinde en yaygın kullanılan grup östenitik paslanmaz çelikler olup, toplam paslanmaz çelik üretiminin yaklaşık üçte ikisini oluşturmaktadır. Bu çelikler östenit esaslı bir mikroyapı sergilemektedir. Söz konusu mikroyapı, yeterli miktarda nikel, mangan ve azot ilavesi sayesinde elde edilmekte olup, kriyojenik sıcaklıklardan ergime sıcaklığına kadar östenitik karakterini koruyabilmektedir. Bu nedenle, östenitik paslanmaz çelikler geniş sıcaklık aralığında aynı faz yapısını muhafaza ettiklerinden ısıtılma işlemi yoluyla sertleştirilememektedir. Her ne kadar soğuk şekillendirme ile dayanımları artırılabilse de, bu durum ince saclar ve küçük kesitli çubuklarla sınırlı kalmaktadır. Östenitik mikroyapı, bu çeliklere yüksek şekillendirilebilirlik ve üstün kaynak kabiliyeti sağlamakta, ayrıca genellikle manyetik özellik göstermemektedirler. Bu çelikler kriyojenik sıcaklıklarda dahi sünekliklerini korurlar. Östenitik paslanmaz çelikler, 200 ve 300 serisi olmak üzere iki alt gruba ayrılır.

300 serisi paslanmaz çelikler, östenitik yapılarını büyük ölçüde nikel katkısı sayesinde kazanırken, 200 serisi paslanmaz çeliklerde daha düşük nikel miktarına rağmen nikelin bir kısmı mangan ve azot ile ikame edilmektedir. 300 serisi, östenitik fazın oluşumunu esas olarak nikel ilavesiyle sağlayan krom-nikel esaslı alaşımlardan oluşmaktadır. Ayrıca, bu seri paslanmaz çelikler arasında en yaygın kullanılan ve en geniş üretim hacmine sahip grubu oluşturmaktadır. En bilinen kalite olan Tip 304, yaklaşık %18 krom ve %8–10 nikel içermesi nedeniyle 18/8 veya 18/10 kalite olarak da adlandırılmaktadır. Östenitik paslanmaz çelikler arasında yaygın olarak kullanılan bir diğer kalite ise Tip 316'dır. Yaklaşık %2 molibden içeren bu alaşım, asidik ortamlara ve klorür kaynaklı bölgesel korozyona karşı daha yüksek dayanım göstermektedir. Düşük karbonlu türleri olan 316L ve 304L, kaynak işlemleri sonrasında oluşabilecek korozyon problemlerini azaltmak amacıyla tercih edilmektedir. "L" ifadesi, karbon oranının %0,03'ün altında olduğunu belirtmekte olup kaynak sırasında meydana gelen krom karbür çökelmelerini sınırlandırmaktadır (Dutta, 2018).

200 serisi paslanmaz çelikler ise nikel kullanımını azaltmak amacıyla mangan ve azot miktarının artırıldığı krom-mangan-nikel esaslı alaşımlar olarak tanımlanmaktadır. Azot

katkısı sayesinde, 300 serisine kıyasla yaklaşık %50 oranında daha yüksek akma dayanımı elde edilebilmektedir. Tip 201 soğuk şekillendirme işlemleriyle sertleştirilebilirken, Tip 202 genel kullanım amaçlı geliştirilen bir paslanmaz çelik türüdür. Bununla birlikte, nikel miktarının azaltılıp mangan oranının yükseltilmesi korozyon dayanımında belirli bir azalmaya neden olmaktadır. Dupleks paslanmaz çelikler, östenit ve ferrit fazlarının birlikte bulunduğu iki fazlı bir mikroyapıya sahiptir. Bu çeliklerde hedeflenen yapı genellikle yaklaşık eşit oranlarda (%50 ferrit-%50 östenit) faz dağılımı sağlamak olmakla birlikte, ticari alaşımlarda bu oran %40–60 aralığında değişebilmektedir. Yüksek krom (%19–32) ve molibden (%5'e kadar) içerikleri ile birlikte, östenitik paslanmaz çeliklere kıyasla daha düşük nikel oranlarıyla karakterize edilmektedirler (Dutta, 2018).

Dupleks paslanmaz çelikler, östenitik paslanmaz çeliklere kıyasla yaklaşık iki kat daha yüksek dayanım gösterebilmektedir. İki fazlı mikroyapıları sayesinde, 304 ve 316 kalite östenitik paslanmaz çeliklerle karşılaştırıldığında klorür kaynaklı korozyona ve gerilmeli korozyon çatlamasına karşı üstün direnç sergilemektedirler. Bunun yanı sıra, dupleks paslanmaz çelikler yüksek mekanik dayanım ile birlikte başarılı bir korozyon performansı sunmaktadır. Sahip oldukları yüksek korozyon direnci, karbon çelikleri ve geleneksel paslanmaz çeliklere göre daha uzun servis ömrü sağlamaktadır. Ayrıca, yüksek mukavemet özellikleri sayesinde daha ince kesitlerin kullanılmasına, sistemlerin daha kompakt tasarlanmasına ve kaynak gereksiniminin azaltılmasına katkıda bulunmaktadır (Dutta, 2018)

2.1.1. 316L paslanmaz çelikler

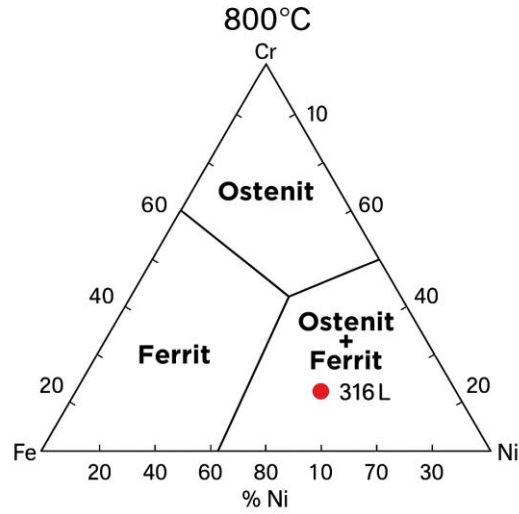
316L paslanmaz çelik, temel bileşimi Fe–Cr–Ni–Mo sistemine dayanmaktadır ve yaklaşık olarak %16–18 Cr, %10–14 Ni ve %2–3 Mo içerir. Düşük karbon içeriği (%0,03'ün altında), özellikle kaynak sonrası tane sınırlarında krom karbür çökmesini engelleyerek intergranüler korozyona karşı önemli avantaj sağlar (Davis, 1994).

316L, özellikle klorürlü ortamlarda üstün korozyon direnciyle bilinen, 316 paslanmaz çeliğin düşük karbonlu bir versiyonudur. 316L, yüzey merkezli kübik (FCC) kristal yapıya sahip östenitik bir paslanmaz çeliktir. Molibden ilavesi, çukurlaşma ve çatlak korozyonuna karşı direncini artırır. Östenitik faz tüm sıcaklıklarda stabil kalır. Tavlanmış halde manyetik değildir, ancak soğuk işleme sonrasında hafif bir manyetizma gösterebilir. 316L paslanmaz çelik yaygın olarak şu alanlarda kullanılır:

- Tıbbi cihazlar ve implantlar (yüksek biyouyumluluk nedeniyle)
- Gıda ve ilaç işleme ekipmanları
- Kimya ve petrokimya endüstrileri
- Deniz yapıları ve bileşenleri
- Kıyı ortamlarına maruz kalan mimari cepheler (Davis, 1994).

316L paslanmaz çelik, Fe–Cr–Ni üçlü faz diyagramında tamamen östenitik (γ) faz bölgesinde yer alan bir alaşımdır. Bu çeliğin karakteristik östenitik mikro yapısı, kimyasal bileşiminde bulunan yüksek nikel (Ni %10–14) ve yeterli krom (Cr %16–18) miktarından kaynaklanır. Fe–Cr–Ni sistemine ait faz diyagramlarında, Ni miktarı arttıkça γ -faz bölgesinin genişlediği, buna karşılık Cr oranı yükseldikçe α -ferrit fazının stabil hale geldiği bilinmektedir (Reed-Hill ve Abbaschian, 1992). 316L'nin bileşimi, bu diyagramın tamamen östenit bölgesine denk geldiğinden, alaşım oda sıcaklığından ergime sıcaklığına kadar FCC kristal yapısını korur ve martensite dönüşmez. Bu nedenle 316L, ısıtılma işlemle sertleştirilemeyen bir paslanmaz çelik türüdür (Davis, 1994).

316L'nin tipik kimyasal bileşimi %16–18 Cr, %10–14 Ni, %2–3 Mo ve en fazla %0.03 C'dir. Nikel, güçlü bir austenit stabilizatörü olup Fe–Cr–Ni faz diyagramında γ -fazını genişleterek paslanmaz çeliğin tamamının östenitik yapıda kalmasını sağlar (Lippold ve Kotecki, 2005). Krom ise paslanma direncini artıran temel alaşım elementidir ancak miktarı ferrit oluşumuna yol açacak seviyeye ulaşmadığı için 316L'de ferritik faz oluşumu sınırlıdır (Sedriks, 1996). Ayrıca Mo, hem çukurlaşma direncini artırır hem de faz diyagramında γ -fazının stabilitesine katkı sağlar (Davis, 1994). 316L Paslanmaz çelik faz diyagramı Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. 316L paslanmaz çelik faz diyagramı (Reed-Hill ve Abbaschian, 1992).

316L paslanmaz çelik, normal servis sıcaklıklarında tamamen östenitik fazdan oluşmasına rağmen, belirli sıcaklık aralıklarında istenmeyen ikinci fazlar oluşabilir. 400–900 °C sıcaklık aralığında kırılğan bir intermetalik faz olan sigma (σ) fazı çökelmeye başlayabilir. Sigma fazı, Cr ve Mo bakımından zengin olup korozyon direncini ve tokluğu ciddi şekilde düşürmektedir (Sedriks, 1996). Ayrıca 600–800°C sıcaklık aralığında, tane sınırlarında Cr_{23}C_6 krom karbürlerinin çökmesi sonucu “tane sınırı korozyonu” meydana gelebilir. 316L’nin düşük karbon içeriği (%0.03’ten az), Cr-karbür çökmesini azaltarak bu olumsuzluğu büyük ölçüde engeller (Davis, 1994).

Fe–Cr–Ni üçlü faz diyagramı incelendiğinde, 316L’in konumu açıkça görülmektedir. Diyagramın Cr–Ni ekseninde, %16–18 Cr içeren alaşımlar α/γ ara bölgesine yakınken, %10–14 Ni içeren alaşımlar γ bölgesine doğru çekilir. Dolayısıyla 316L, bu bileşimle tamamen östenitik faz alanında bulunur ve mikro yapısında ferrit veya martensit görülmez. Bu davranış hem faz diyagramı hem de termodinamik denge prensipleri ile uyumludur (Reed-Hill ve Abbaschian, 1992).

2.1.2. Süper dubleks paslanmaz çelikler

Dupleks paslanmaz çelikler hem ferritik hem de ostenitik paslanmaz çeliklerden daha iyi korozyon direnci gösterir. Isıl işlemle daha fazla sertleştirilemezler. Uygun olmayan ısıl işlem veya termal işleme tabi tutulduklarında, çeşitli zararlı fazları çökeltirler. Petrol ve gaz endüstrisinde yaygın olarak kullanılırlar (Papavinasam, 2013).

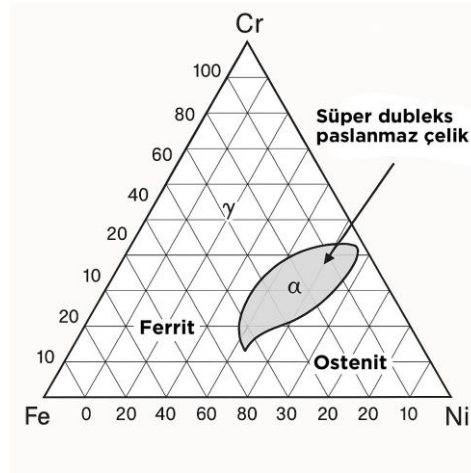
Süper dubleks paslanmaz çelikler, ferritik (α) ve östenitik (γ) fazların yaklaşık eşit oranlarda (%40–60) bir arada bulunduğu, yüksek alaşımlı paslanmaz çelik sınıfıdır. Bu çelikler, dubleks paslanmaz çeliklerin geliştirilmiş bir formu olup özellikle yüksek krom (Cr), molibden (Mo) ve azot (N) içerikleri sayesinde hem mekanik özellikler hem de korozyon dayanımı açısından üstün performans gösterirler (Gunn, 1997). Ferrit ve östenit fazlarının kombinasyonu, süper dubleks paslanmaz çeliklere hem ferritik çeliklerin yüksek dayanımını hem de östenitik çeliklerin sünekliğini kazandırır. Bu nedenle süper dubleks paslanmaz çelikler, deniz suyu ortamları, kimyasal proses tesisleri ve petrol–gaz endüstrisi gibi yüksek korozyon riskinin bulunduğu birçok alanda yaygın şekilde tercih edilmektedir (Sedriks, 1996).

Süper dubleks paslanmaz çeliklerin kimyasal bileşimleri genellikle %24–26 Cr, %6–8 Ni, %3–4 Mo ve %0,24–0,32 aralığında azot içerir. Bu alaşım bileşenleri, faz dengelerini doğrudan etkiler. Cr ve Mo ferrit fazının stabilitesini artırırken, Ni ve N östenitik fazı stabilize eder. Elde edilen iki fazlı mikro yapı, yüksek dayanım ile iyi tokluk düzeyinin bir arada bulunmasını sağlar. Oda sıcaklığında süper dubleks paslanmaz çeliklerde genellikle %40–60 ferrit ve %40–60 östenit fazları bulunur (Lippold ve Kotecki, 2005). Bu mikro yapı, hem çatlak ilerlemesine karşı direnç hem de dayanım-tokluk dengesi açısından optimum özellik sunar.

Mekanik özellikler açısından süper dubleks paslanmaz çelikler, klasik östenitik paslanmaz çeliklere kıyasla çok daha yüksek değerlere sahiptir. Örneğin, süper dubleks paslanmaz çeliklerin akma dayanımı genellikle 550–650 MPa aralığında olup, bu değer 316L paslanmaz çeliğin yaklaşık iki katıdır. Çekme dayanımı da 750–850 MPa aralığında gerçekleşir (Davis, 1994). Bu özellikleri sayesinde süper dubleks paslanmaz çelikler hem basınçlı kaplar hem de ağır yük altındaki yapısal uygulamalar için uygun bir malzeme sınıfıdır. Süper dubleks paslanmaz çeliklerin en önemli avantajlarından biri de korozyon direncidir. Krom, molibden ve azot katkılarının yüksek olması, bu çeliklerin çukurlaşma ve aralık korozyonu gibi lokal korozyon türlerine karşı üstün performans göstermesini sağlar. Korozyon dayanımı, özellikle PREN (Pitting Resistance Equivalent Number) değeri üzerinden değerlendirilir. Süper dubleks paslanmaz çeliklerin PREN değerleri genellikle 40'ın üzerindedir, bu da onları 316L gibi östenitik paslanmaz çeliklerden çok daha üstün kılar (Sedriks, 1996). Ayrıca ferrit fazının varlığı, klorür kaynaklı gerilim korozyonu çatlağına (SCC) karşı direnci artırırken, östenit fazı malzeme sünekliğini korur. Bu nedenle süper dubleks çelikler, sıcak klorür çözeltilerinde

alışması gereken ekipmanlar için ideal bir seçimdir (Gunn, 1997). Bununla birlikte süper dubleks paslanmaz çeliklerde yüksek sıcaklıklarda (600–1000°C) istenmeyen fazlar oluşabilir. Sigma (σ), chi (χ) ve Cr₂N fazları bu çeliklerde en sık rastlanan zararlı fazlardır. Bu fazlar, özellikle ısı etkisi altındaki bölgelerde (HAZ) sertliğı artırırken tokluğu ve korozyon direncini düşürür. Özellikle sigma fazının oluşumu, çukurlaşma korozyon direncini ciddi şekilde zayıflatır (Sedriks, 1996). Bu nedenle süper dubleks paslanmaz çeliklerin kaynak işlemlerinde ısı girdisinin kontrolü büyük önem taşır.

Süper dubleks paslanmaz çelikler, sahip oldukları yüksek mekanik dayanım ve mükemmel korozyon direnci sayesinde geniş bir uygulama alanına sahiptir. Bunlar arasında deniz suyu arıtma sistemleri, petrol ve doğal gaz platformları, kimyasal proses ekipmanları, basınçlı kaplar, ısı eşanjörleri, pompa ve vana bileşenleri gibi kritik mühendislik uygulamaları bulunmaktadır (Gunn, 1997). Özellikle klorürlü ortamlarda çalışan ekipmanlarda süper dubleks paslanmaz çeliklerin sunduğı yüksek performans, bu malzemeleri endüstride vazgeçilmez hale getirmiştir. Süper dubleks paslanmaz elik faz diyagramı Şekil 2’de gösterilmiştir.



Şekil 2. Süper dubleks paslanmaz elik faz diyagramı

(Gunn, 1997; Lippold ve Kotecki, 2005).

Süper dubleks paslanmaz çeliklerin faz davranışı, Fe–Cr–Ni üçlü faz diyagramı ve Fe–Cr–Mo–N gibi çok bileşenli alt diyagramlar üzerinden incelenmektedir. Bu eliklerin kimyasal bileşimi (yaklaşık %24–26 Cr, %6–8 Ni, %3–4 Mo ve %0,24–0,32 N), onların tipik dubleks paslanmaz çeliklere göre daha geniş bir ferrit (α) + östenit (γ) iki faz bölgesinde yer almasını sağlar. Süper dubleks çelikler, oda sıcaklığında yaklaşık %40–60 oranlarında ferrit ve östenit

fazlarını içeren dengeli bir mikro yapı sergiler. Bu mikro yapı hem ferritin yüksek dayanımını hem de östenitin sünekliğini aynı anda sağlayarak malzemenin mekanik ve korozyon özelliklerini optimize eder (Gunn, 1997; Lippold ve Kotecki, 2005).

Faz diyagramının yorumlanması açısından Cr ve Mo içeriği arttıkça ferrit faz alanı genişlerken Ni ve N ilavesi östenit alanını genişletir. Örneğin UNS S32750 (2507) bileşimi, Fe–Cr–Ni ternary faz diyagramında $\alpha + \gamma$ çift faz bölgesinde konumlanmakta olup, ferrit fazının ağırlıklı olarak baskın olduğu yüksek sıcaklıklarda, soğutma sırasında östenit fazı yeniden çökerek iki fazlı dengeli bir yapı oluşturur (Gunn, 1997).

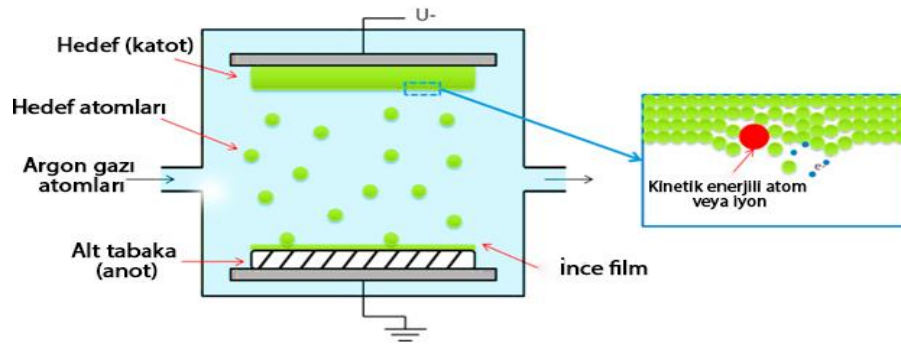
2.2. Fiziksel Buhar Biriktirme (PVD) Yöntemi

Fiziksel Buhar Biriktirme (PVD) yöntemi, malzeme yüzeylerini geliştirmek amacıyla vakum ortamında gerçekleştirilen bir kaplama teknolojisidir. Bu yöntem, kaplama malzemesinin buharlaştırılarak ya da iyonlaştırılarak alt tabaka yüzeye biriktirilmesini esas alır. PVD yöntemiyle elde edilen kaplamalar, yüksek sertlik, düşük sürtünme katsayısı ve iyi yapışma özellikleri sayesinde aşınma, oksidasyon ve korozyona karşı direnç sağlar (Mayrhofer vd., 2006). PVD teknolojisi, özellikle kesici takımlar, kalıplar, medikal implantlar ve tribolojik uygulamalarda yaygın şekilde kullanılmaktadır. En çok tercih edilen kaplama türleri arasında TiN, TiAlN, AlTiN ve TiSiN gibi nitrür esaslı seramik kaplamalar yer alır (Mayrhofer vd., 2006).

Fiziksel buhar biriktirme (PVD), ince filmler elde etmek için yaygın olarak kullanılan bir teknikler grubudur. Genellikle, bir PVD işlemi sırasında biriktirilecek malzeme katı veya sıvı bir kaynaktan (hedef) buharlaştırılır ve plazma formunda alt tabakaya taşınır ve burada yoğunlaşır. Hedef malzemenin buharlaşmasını elde etmek için uygulanan yönteme göre, en yaygın PVD teknikleri aşağıdaki gibi sınıflandırılır:

- Püskürtme Biriktirme
- Katodik Ark Biriktirme (CA-PVD)
- Elektron Demeti ile Gerçekleştirilen Fiziksel Buhar Biriktirme (EB-PVD)
- Darbeli Lazer Çöktürme Yöntemi (PLD)
- İyon Işını Yardımlı Biriktirme Tekniği (IBAD)

Ek olarak, plazma destekli veya geliştirilmiş fiziksel buhar biriktirme yöntemleri, alaşım bileşiminin kontrol edilebilmesi ve kaplama özelliklerinin film kalınlığı boyunca ayarlanabilmesi gibi avantajlar sunması nedeniyle geleneksel PVD tekniklerine göre ön plana çıkmaktadır. Bu yöntemler sayesinde işlevsel özellikleri geliştirilmiş kaplamalar elde edilebilmektedir. PVD yöntemine ait çalışma prensibini açıklayan şematik diyagram Şekil 3'te verilmiştir.



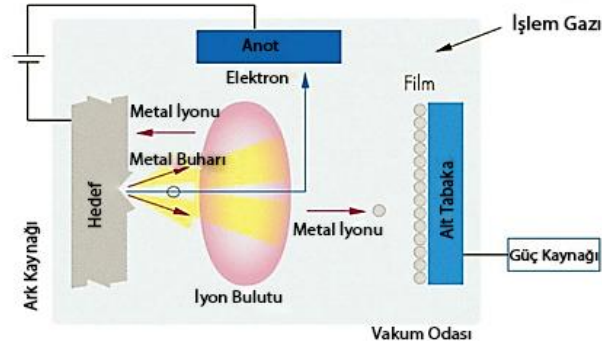
Şekil 3. PVD tekniğinin çalışma prensibini gösteren şematik diyagram (Santecchia vd. 2015).

2.2.1. Katodik ark PVD yöntemi

PVD yöntemleri arasında katodik ark PVD yöntemi, bilinen en eski vakum kaplama tekniklerinden biridir. Bu teknikle kaplama özelliklerinde sağlanan iyileştirmeler, bileşik kaplamalar için geliştirilmiş yapışma, yoğunluk ve bileşim stokiyo-metrisine sahip ince filmler sağlayan yüksek miktarda iyon üretimiyle bağlantılıdır. Biriktirme, sürekli (DC) biriktirme veya darbeli biriktirme kullanılarak gerçekleştirilebilir. Ticari olarak, DC modunda katodik ark biriktirme en yaygın kullanılan yöntemdir ve çok yüksek biriktirme oranlarına sahip olduğu için özellikle geniş alanlar ve nispeten kalın filmlerin yüksek verimli biriktirilmesi için uygundur. Öte yandan, darbeli biriktirme, biriktirilen filmlerin özelliklerini ve kontrol edilebilirliğini artırır. Dahası, darbeli biriktirme çok daha az soğutma gerektirir çünkü ortalama güç 1 kW'ın altında tutulabilir ve ortaya çıkan biriktirme oranları nispeten küçüktür (Santecchia vd., 2015; Faraji vd., 2018).

Katodik ark fiziksel buhar biriktirme (CA-PVD) ünitesinin şematik gösterimi Şekil 4'de verilmiştir. Katot arkı, düşük voltajlı, yüksek akımlı bir plazma deşarjıdır. İşlem, argon plazmasına reaktif bir gaz ile (örneğin azot), sokularak reaktif hale getirilebilir. Ark akımı, katotta, ~1–10 µm boyutunda katot noktaları adı verilen ayrı noktalarda yoğunlaşır. Bir katot

noktası tarafından taşınan akım 1–10 A'ya ulaşır. Birkaç 100 A'lık tipik bir ark deşarj akımı, katot malzemesinin yoğun bir plazmasına yol açar. CA-PVD çok yüksek enerjili bir işlem olduğundan (ark sıcaklığı 15000 °C'ye yakın olacaktır) yoğunlaşan atomların çoğu iyonik formda olacaktır (%60 – 90) ve dolayısıyla alt tabakaya küçük bir önyargı uygulanarak maksimum yapışma mukavemeti elde edilebilir. Ayrıca, alt tabaka sapması, hedef gücü, reaktif gaz vb. gibi biriktirme parametrelerinin optimizasyonu ile, istenen mikro yapı veya özellik elde edilebilir (Roy vd. 2020).



Şekil 4. CA-PVD ünitesinin şematik gösterimi (Roy vd. 2020).

PVD prosesi genel olarak alt tabaka yüzeyinin hazırlanması, vakum ortamının oluşturulması, kaplama hedefinin enerjilendirilmesi, reaktif gaz kullanımı ve film oluşumu aşamalarından oluşmaktadır. Kaplama öncesinde alt tabaka yüzeyleri, yüzeydeki kir, oksit ve yağ kalıntılarını gidermek amacıyla kumlama, ultrasonik yıkama ve kurutma gibi yöntemlerle temizlenmektedir. Bu yüzey hazırlığı, kaplamanın alt tabakaya yapışmasını doğrudan etkileyen kritik bir adımdır. Kaplama işlemi genellikle 10^{-4} – 10^{-6} mbar seviyelerinde oluşturulan düşük basınçlı vakum ortamında gerçekleştirilmekte olup, bu sayede iyonlaşma verimi artırılmakta ve kirleticilerden arındırılmış bir plazma ortamı sağlanmaktadır. PVD sürecinde kaplama malzemesi, katodik ark veya manyetik alan destekli sputtering yöntemleriyle iyonlaştırılarak plazma haline getirilmekte ve yüksek enerjili iyonlar alt tabaka yüzeyine yönlendirilerek kaplama oluşumu sağlanmaktadır. Reaktif PVD uygulamalarında ise metal buharı ile birlikte azot gibi reaktif gazlar kullanılarak TiN, AlTiN veya TiSiN gibi nitrür esaslı kaplamalar elde edilmektedir. Oluşturulan ince filmlerin kalınlığı genellikle 1–5 μm aralığında olup, bu değer aşınma direncini artırmak ve alt tabakanın mekanik özelliklerini olumsuz etkilemeden yüzey modifikasyonu sağlamak için yeterli kabul edilmektedir (Mattox, 2010).

2.3. Tribolojik Davranış ve Aşınma Mekanizmaları

Triboloji, sürtünme, yağlama ve aşınma mekanizmalarını konu alan disiplinler arası bir bilim ve mühendislik alanıdır. Bu alan; rulmanlar, hareketli makine elemanları, tıbbi implantlar, talaşlı imalat takımları, motor sistemleri ve nanoteknolojik uygulamalar başta olmak üzere geniş bir kullanım yelpazesine sahiptir. Malzemelerin yorulma dayanımı, yoğunluğu, mukavemeti, kırılma tokluğu, sertliği, aşınma direnci, kimyasal stabilitesi, ısı iletkenliği, termal genleşme davranışı ve termal şok direnci, tribolojik performansı etkileyen temel malzeme parametreleri olarak kabul edilmektedir (Açıkbaş vd., 2009).

Aşınma mekanizmaları, iki yüzeyin birbiriyle temas edip göreceli hareket etmesi sonucu malzemenin yüzeyinden malzeme kaybına neden olan fiziksel ve/veya kimyasal süreçleri ifade eder. Triboloji alanında genellikle altı ana başlıkta incelenir:

2.3.1. Adezif (Yapışma) aşınma

Adezif aşınma, iki yüzeyin temas etmesiyle başlar; yüzeylerdeki mikroskobik çukurluklar (asperiteler) yüksek basınç altında birbirine kaynak olur. Yüzeyler kaymaya başladığında bu kaynak olmuş mikro bölgeler kopar ve bir yüzeyden diğerine malzeme transferi gerçekleşir. Bu süreçte yüzeyde malzeme kaybı olurken karşı yüzeyde malzeme birikimi görülebilir olur (Hutchings ve Shipway, 2017). Adezif aşınmanın şiddeti özellikle yağlamanın yetersiz olduğu, basıncın ve sıcaklığın yüksek olduğu ortamlarda artar (Rabinowicz, 1995). Benzer metallere sahip yüzeyler (ör. çelik-çelik) arasında bu mekanizma çok daha hızlı gelişir, çünkü atomlar arasında bağlanma eğilimi yüksektir (Hutchings ve Shipway, 2017). Motor piston-segmanlarında, yağ filmi bozulduğunda veya rulmanlarda yağ eksildiğinde bu tür aşınma çok sık görülür (Rabinowicz, 1995).

2.3.2. Abrasif (çizilme / kesme) aşınma

Abrasif aşınma, sert bir yüzeyin veya ortamda bulunan sert parçacıkların, daha yumuşak bir yüzey üzerinde çizik ve oluklar oluşturarak malzeme kaldırması sonucu meydana gelen bir aşınma mekanizmasıdır. Bu mekanizmada oluşan malzeme kaybı, temas eden yüzeyler arasındaki sertlik farkı ile doğrudan ilişkilidir; sertlik farkının artması aşınma hızını önemli ölçüde artırmaktadır. Abrasif aşınma iki ana gruba ayrılmaktadır: iki cisimli aşınmada sert yüzey doğrudan karşı yüzeyi çizerken, üç cisimli aşınmada serbest halde bulunan parçacıklar iki yüzey arasında hareket ederek malzeme kaldırmaktadır. Parçacıkların boyutu, şekli ve keskinliği aşınma şiddetini belirleyen temel parametreler olup, özellikle köşeli ve keskin taneler daha yüksek malzeme kaybına neden olmaktadır. Tarım makineleri, madencilik ekipmanları ile taşıma ve zımpara işlemleri abrasif aşınmanın yaygın olarak gözlemlendiği uygulamalara örnek teşkil etmektedir (Zum Gahr, 1987).

2.3.3. Yorulma aşınması (Pitting, Spalling)

Yorulma aşınması, tekrarlayan mekanik yükler altında yüzeyin hemen altında çatlakların oluşmasıyla başlar. Bu çatlaklar her yükleme çevriminde büyüyerek yüzeye ulaşır ve yüzeyden küçük parçacıkların kopmasına yol açar. Malzemenin tokluğu, sertliği, yüzey pürüzlülüğü ve temas gerilmeleri bu aşınma mekanizmasını doğrudan etkileyen faktörlerdir. Yorulma aşınması özellikle rulmanlarda, dişli çarklarda ve tren raylarında uzun süreli yükleme altında sık karşılaşılan bir mekanizmadır (Bhushan, 2013).

2.3.4. Korozyonlabirleşik aşınma (Tribokorozyon)

Tribokorozyon, yüzeyde meydana gelen kimyasal veya elektrokimyasal reaksiyonlar sonucu zayıflayan koruyucu tabakaların, mekanik sürtünme ve aşınma etkisiyle sürekli olarak kaldırılmasıyla gerçekleşen karmaşık bir hasar mekanizmasıdır. Sürtünme hareketi sırasında yüzeyde oluşan oksit veya pasif tabakalar koparılmakta, bu durum metal yüzeyin tekrar aktif hale gelmesine ve korozyon hızının artmasına neden olmaktadır. Tribokorozyon olgusu özellikle iyonik çözeltiler, deniz suyu ve biyomedikal ortamlar gibi agresif koşullarda daha şiddetli şekilde gözlemlenmektedir. Bu mekanizmanın şiddeti ortamın pH değeri, sıcaklığı, iyon konsantrasyonu ve malzemenin pasif film oluşturma yeteneği gibi parametrelere doğrudan bağlıdır. Deniz suyunda çalışan pompa çarkları, boru hatları ve kalça protezi gibi

biyomedikal implantlar tribokorozyonun tipik olarak görüldüğü uygulama alanları arasında yer almaktadır (Mischler, 2008).

2.3.5. Erozyon aşınması

Erozyon aşınması, yüksek hızda hareket eden akışkan içindeki katı parçacıkların veya sıvı damlacıklarının yüzeye çarpmasıyla meydana gelir. Çarpma açısı, akışkanın hızı, parçacık yoğunluğu ve büyüklüğü bu aşınmayı doğrudan belirler. Süneklik gösteren metallerde en yüksek aşınma genellikle 30–45° çarpma açılarında gözlenirken, kırılgen seramiklerde maksimum aşınma 90° dik çarpmada oluşur. Erozyon aşınması, türbin kanatlarında, uçak motorlarında ve boru hatlarında çok sık karşılaşılan bir problemdir (Levy, 1995).

2.3.6. Oksidatif aşınma

Oksidatif aşınma, yüzeyde sürtünme nedeniyle sıcaklık yükseldiğinde ince bir oksit tabakasının oluşmasıyla başlar. Bu oksit tabakası sürtünme sırasında kırılarak yüzeyden ayrılır ve malzeme kaybı meydana gelir. Daha sonra tabaka yeniden oluşur ve bu döngü sürekli devam ederek yüzeyin zamanla incelmeye yol açar. Bazı durumlarda ince ve yapışkan oksit tabakaları koruyucu olabilir, fakat yüksek sıcaklık ve basınç altında tabaka kırılgen hale gelir ve koruyucu etkisini kaybeder. Oksidatif aşınma, fren disklerinde ve yüksek sıcaklıkta çalışan motor parçalarında sıkça görülür (Zum Gahr, 1987).

2.4. TiSiN ve AlTiN Kaplamalar

TiSiN ve AlTiN kaplamalar, yüksek sıcaklık dayanımı, aşınma direnci ve üstün tribolojik performansları nedeniyle endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılan ileri seviye nitrür esaslı PVD kaplamalar arasında yer almaktadır. Bu kaplamalar özellikle kesici takımlar, kalıplar, otomotiv parçaları ve yüzey dayanımının kritik olduğu metalik altlıklar üzerinde tercih edilmektedir. TiSiN ve AlTiN kaplamaların yapısal ve mekanik özellikleri, kaplama elementlerinin kimyasal bileşimi, oluşan faz yapısı ve nanokompozit karakteri ile doğrudan ilişkilidir. Bu nanoyapılı tasarım yaklaşımı, kaplamaların yüksek sıcaklık kararlılığı ve aşınma direncinin artırılmasında belirleyici bir rol oynamaktadır (Mayrhofer vd., 2006).

2.4.1. TiSiN kaplamalar

TiSiN kaplamalar, titanyum nitrür (TiN) nanokristallerinin amorf silisyum nitrür (Si_3N_4) matrisi içerisinde homojen olarak dağılmasıyla oluşan nanokompozit yapıya sahiptir. Bu nanokompozit mimari, tane sınırlarının stabilize edilmesini sağlayarak kaplamanın mekanik dayanımını, aşınma direncini ve oksidasyon davranışını önemli ölçüde iyileştirmektedir. Silisyum içeriğinin artmasıyla birlikte TiN tane boyutunun nano ölçeğe kadar küçüldüğü ve buna bağlı olarak sertlik değerlerinin belirgin şekilde yükseldiği literatürde rapor edilmiştir. TiSiN kaplamalar yüksek sertlik değerleri (yaklaşık 30–40 GPa), yüksek sıcaklıklarda yapısal kararlılık ve gelişmiş oksidasyon direnci sergilemektedir. Amorf Si_3N_4 fazı, difüzyon süreçlerini baskılayarak kaplamanın yüksek sıcaklıklarda stabil kalmasına katkı sağlamaktadır. Bu özellikleri sayesinde TiSiN kaplamalar, özellikle yüksek yük ve yüksek sürtünme koşulları altında çalışan kesici takımlar, kalıplar ve metal yüzeylerde TiN kaplamalara kıyasla daha üstün performans göstermektedir (Vepřek ve Vepřek-Heijman, 2008).

2.4.2. AlTiN kaplamalar

AlTiN kaplamalar, titanyum–alüminyum nitrür (Ti–Al–N) sistemine dayanan ve özellikle yüksek sıcaklık uygulamalarında gösterdiği üstün performans ile bilinen sert PVD kaplamalardır. Bu kaplamalarda alüminyum içeriğinin artmasıyla birlikte, yüksek sıcaklıklarda kaplama yüzeyinde kararlı ve yoğun bir Al_2O_3 oksit tabakası oluşmakta ve bu tabaka oksijen ile metal atomlarının difüzyonunu engelleyerek etkili bir koruyucu bariyer görevi görmektedir. Bu mekanizma, AlTiN kaplamaların oksidasyon direncinin ve termal kararlılığının belirgin şekilde artmasına neden olmaktadır.

AlTiN kaplamalar yüksek sertlik değerleri sergilemekte, yaklaşık 900–1200 °C sıcaklık aralığında yapısal bütünlüğünü koruyabilmekte ve yüksek sıcaklıklarda dahi aşınma direncini muhafaza etmektedir. Oluşan Al_2O_3 bariyer tabakası sayesinde kaplamanın oksidasyon davranışı iyileşmekte, bu durum özellikle yüksek hızlı kesme (HSC) operasyonlarında ve termal yüklerin yoğun olduğu uygulamalarda önemli bir avantaj sağlamaktadır.

Bu özellikleri nedeniyle AlTiN kaplamalar; karbür kesici uçlar, sıcak iş kalıpları ve yüksek sıcaklık oksidasyonunun kritik olduğu endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak tercih

edilmektedir. Yüksek sıcaklıklarda kararlılığını koruyabilmesi, AlTiN kaplamaları TiN ve TiCN gibi geleneksel nitrür kaplamalara kıyasla daha üstün bir alternatif haline getirmektedir (Hörling vd., 2005).

2.5. TiSiN ve AlTiN Kaplamalar Üzerine Yapılmış Literatür Çalışmaları

TiSiN, AlTiN ve benzeri PVD kaplamalar üzerine yapılan çalışmalar, özellikle paslanmaz çeliklerin aşınma ve tribolojik performansını iyileştirmek amacıyla yoğun bir şekilde araştırılmıştır. Komarov, Konstantinov ve Pilko (2014), TiSiN kaplamaların nanokompozit yapısında TiN kristalleri ve amorf Si₃N₄ matrisi bulunduğunu, bu yapının sertliği ve aşınma direncini belirgin şekilde artırdığını bildirmiştir. Petkov, Kolev ve Kandeve (2017), AlTiN ve AlSiN kaplamaların ark-PVD yöntemi ile üretildiğinde 30–35 GPa sertlik seviyelerine ulaşabildiğini ve özellikle yüksek sıcaklık aşınma koşullarında üstün performans gösterdiğini rapor etmiştir. Beake, Gassner ve Fox-Rabinovich (2017) yaptıkları çalışmada, AlTiN kaplamaların 500 °C üzeri sıcaklıklarda oksidasyona karşı yüksek direnç sağladığını ve yüzeyde oluşan Al₂O₃ tabakasının kaplamanın mekanik bütünlüğünü koruduğunu belirtmiştir. Movassagh-Alanagh ve Mahdavi'nin (2020) çalışmasında, Ti/TiN/TiSiN çok katmanlı kaplamaların tek katmanlı kaplamalara göre 10–20 kat daha yüksek aşınma direnci sunduğunu ve paslanmaz çelik altlıklarda kaplama performansının belirgin şekilde arttığını ifade etmiştir. Claver (2021), TiSiN–AlTiN çok katmanlı kaplamaların tek katmanlı PVD kaplamalara kıyasla daha düşük sürtünme katsayısı sağladığını ve yüksek hız kesme uygulamalarında daha stabil bir tribolojik davranış sergilediğini göstermiştir. Mayrhofer ve arkadaşları (2006), yüksek performanslı PVD kaplamaların mikro yapısal tasarımının (örneğin nanokompozit ve çok katmanlı yapı) sertlik ve oksidasyon dayanımı üzerinde belirleyici etkiler taşıdığını ortaya koymuştur.

Katodik ark PVD tekniği üzerine yapılan bir çalışmada, Rajaguru ve Arunachalam (2017), süper dubleks paslanmaz çeliğin işlenebilirliğinin kaplama türüne bağlı olarak değiştiğini, AlTiN kaplamalı takımların daha düşük takım aşınması sunduğunu rapor etmiştir. Locks ve çalışma arkadaşları (2024), süper dubleks paslanmaz çeliğin işlenmesi sırasında AlCrN/TiSiN çok katmanlı kaplamalı takımların yüzey bütünlüğünü artırdığını ve stres korozyon çatlaklarına (SCC) karşı daha iyi performans gösterdiğini ifade etmiştir. Nanokompozit TiSiN kaplamalarda ise TiN nanokristallerinin amorf Si₃N₄ matrisi içerisinde dağılması sayesinde sertlik değerlerinin 30–40 GPa aralığına ulaşabildiği ve bu yapının oksidasyon direncini

önemli ölçüde artırdığı rapor edilmiştir (Vepřek ve Vepřek-Heijman, 2008). Bobzin (2017) tarafından yapılan çalışmalarda, PVD kaplamalarının metal altlıklar üzerinde aşınma, oksidasyon ve sürtünme davranışlarını belirgin biçimde iyileştirdiği; Ti-Al-Si esaslı kaplamaların kesici takımlar ve endüstriyel uygulamalarda yaygın şekilde tercih edildiği ifade edilmiştir.

Bu çalışmalar genel olarak TiSiN ve AlTiN kaplamaların; yüksek sertlik, gelişmiş oksidasyon dayanımı, düşük sürtünme katsayısı ve üstün tribolojik performans sağladığını göstermekte; özellikle paslanmaz çelik altlıklarda çok katmanlı yapıların performansı daha da artırdığı vurgulanmaktadır.

3. YÖNTEM

3.1. Materyal

Bu tez kapsamında kaplama altlığı olarak 316L östenitik paslanmaz çelik ve süper dubleks paslanmaz çelik numuneler tercih edilmiştir. Çalışmada kullanılan numuneler aşağıdaki boyutlarda hazırlanmıştır:

- 316L paslanmaz çelik numuneler: $15 \times 15 \times 5$ mm
- Süper dubleks paslanmaz çelik numuneler: $15 \times 15 \times 8$ mm

Her iki malzemeye ait kimyasal kompozisyonlar Tablo 1 ve Tablo 2'de sunulmuştur. Kaplama uygulaması öncesinde numune yüzeyleri 80, 200, 400, 600, 800 ve 1200 grit SiC zımpara kâğıtları kullanılarak kademeli olarak taşlanmıştır. Daha sonra, yüzey kalitesini iyileştirmek ve pürüzlülüğü en aza indirmek amacıyla $1 \mu\text{m}$ ve $3 \mu\text{m}$ tane boyutuna sahip alümina süspansiyonları ile parlatma işlemi gerçekleştirilmiştir. Son aşamada ise numuneler, etil alkol, saf su ve aseton kullanılarak temizlenmiş ve kurutularak kaplamaya hazır hale getirilmiştir.

Tablo 1. 316L paslanmaz çelik numunesine ait kimyasal içerik değerleri (ağırlık %)

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	N	Fe
0.03	1.5	0.75	0.045	0.03	16-18	10-14	2-3	0.1	Kalan

Tablo 2. S32760 süper dubleks paslanmaz çeliğine ait elementel bileşim (% ağırlık)

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	N	Fe
0.02	1.2	0.5	0.03	0.02	24-26	6-8	3-4	0.24-0.32	Kalan

3.2. Kaplama İşlemi

Bu tez çalışmasında numunelerin kaplanması, endüstriyel ortamda Titanit Ultra Sert Kaplamalar San. Tic. Ltd. Şti. (Güngören, İstanbul) tesislerinde gerçekleştirilmiştir. Kaplama işlemleri, Platit PL-1011 katodik ark fiziksel buhar biriktirme (CA-PVD) sistemi kullanılarak uygulanmıştır (Şekil 5). Kullanılan sistem, yüksek iyonizasyon kabiliyeti sayesinde altlık yüzey ile kaplama arasındaki yapışmayı artırmakta ve yüksek sertlikte kaplamalar elde edilmesine olanak sağlamaktadır.

Kaplama öncesinde numuneler tutucu döner mekanizmaya, ön yüzeyleri katotlara bakacak şekilde yerleştirilmiş ve vakuma alma süreci başlatılmıştır. Kaplama işlemi dört temel adımdan oluşmaktadır: ısıtma, metal iyon bombardımanı, kaplama veson ısıtma. Bu adımlar hem TiSiN hem de AlTiN kaplamaları için benzer şekilde uygulanmıştır.

Kaplama parametreleri Tablo 3'te ayrıntılı olarak verilmiştir. İşlem süresince odanın sıcaklığı 450–480 °C, basınç değerleri $(2-4) \times 10^{-3}$ mbar ile $(1-4) \times 10^{-2}$ mbar arasında tutulmuştur. Metal iyon bombardımanı aşamasında 80–120 A aralığında katot akımı kullanılmış ve altlık yüzeyleri 300–800 V aralığında negatif önyargı voltajına maruz bırakılmıştır. Bu adımda argon (Ar) gazı kullanılarak yüzeydeki kir, oksit ve gevşek partiküllerin uzaklaştırılması sağlanmıştır.

Her iki kaplama türü için uygulanan işlem sırası aşağıdaki gibidir:

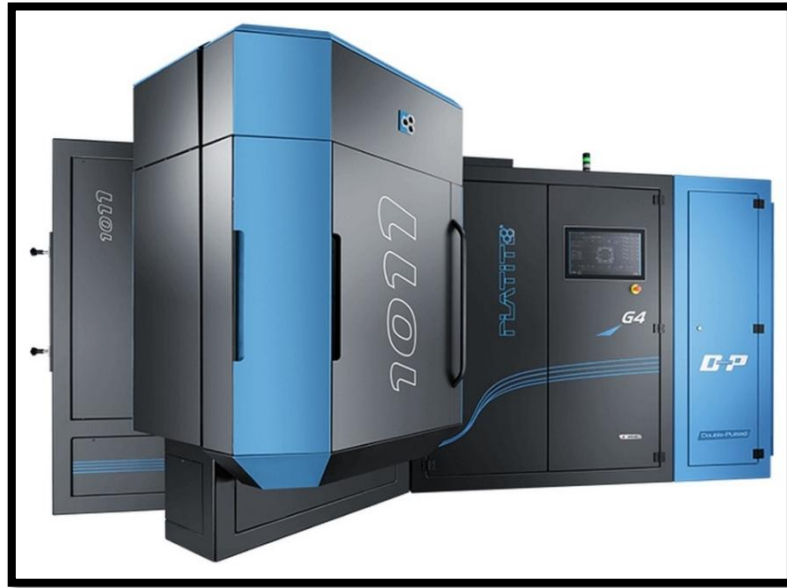
- 450–480 °C'de ısıtma
- Argon gazı altında metal iyon bombardımanı (80–120 A, 300–800 V, $2-4 \times 10^{-3}$ mbar)
- Azot gazı altında kaplama biriktirme (120–180 A, 40–120 V, $1-4 \times 10^{-2}$ mbar)
- Son ısıtma
- Aynı döngünün tekrarlanması (TiSiN / AlTiN için)

Bu çalışma kapsamında kaplanmış numuneler tanımlanırken şu kısaltmalar kullanılmıştır:

- TiSiN kaplı 316L numune: TiSiN/316L
- TiSiN kaplı Süper Dupleks numune: TiSiN/SDSS
- AlTiN kaplı 316L numune: AlTiN/316L
- AlTiN kaplı Süper Dupleks numune: AlTiN/SDSS

Tablo 3. Katodik Ark PVD işlem koşulları

Kaplamalar	Adımlar	Sıcaklık (°C)	Katot Akımı	Bias (volt)	Basınç Değeri (mbar)	Kullanılan Gazlar
AlTiN	Isıtma	450-800	-	-	-	-
	Metal İyon					
	Bombardımanı	450-800	80-120	300-800	$(2-4) \cdot 10^{-3}$	Argon
	Kaplama	450-800	120-180	40-120	$(1-4) \cdot 10^{-2}$	Azot
TiSiN	Isıtma	450-800	-	-	-	-
	Metal İyon					
	Bombardımanı	450-800	80-120	300-800	$(2-4) \cdot 10^{-3}$	Argon
	Kaplama	450-800	120-180	40-120	$(1-4) \cdot 10^{-2}$	Azot



Şekil 5. Katodik Ark PVD kaplama işlemlerinde kullanılan Platit PL-1011 sistemi (Demirbükten, 2025).

3.3. Yapısal ve Mikroyapısal Karakterizasyon Çalışmaları

Kaplama uygulanmış numunelerde bulunan fazların tanımlanması, kaplama bileşiminin belirlenmesi ve kristal yapının karakterize edilmesi amacıyla X-Işını Kırınımı (XRD) analizlerinden yararlanılmıştır. XRD ölçümleri, EUTAM'da bulunan Panalytical marka Empyrean model XRD cihazı ile yapılmıştır (Şekil 6). Analizler sırasında kaplama tabakasına

ait karakteristik piklerin doğru şekilde tespit edilebilmesi için uygun tarama parametreleri seçilmiştir.



Şekil 6. Faz analizlerinde kullanılan Panalytical Empyrean XRD cihazı (Demirbükten, 2025).

Kaplama tabakalarının faz bileşimini ve kristalografik özelliklerini belirlemek amacıyla X-Işını Kırınımı (XRD) analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla EUTAM laboratuvarında bulunan Panalytical Empyrean marka XRD cihazından yararlanılmıştır.

Numunelerin yüzey morfolojisi, kaplama kalınlığı ve kesit yapılarının karakterizasyonunda ise FEI Quanta FEG 450 model SEM cihazı kullanılmıştır. Elde edilen görüntüler yardımıyla kaplama tabakalarının morfolojik özellikleri ve altlık ile olan ara yüzey ilişkileri detaylı şekilde incelenmiştir.



Şekil 7.SEM cihazı, Fei Quanta FEG 450(Demirbükten, 2025).

3.4. Mikrosertlik Ölçümleri

Yüzey pürüzlülüğü analizleri, kaplamalı ve kaplamasız numuneler üzerinde Mahr M1 cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Mikrosertlik ölçümleri ise Bruker UMT Universal Mechanical Tester cihazı ile yapılmıştır (Şekil 8). Kaplama tabakalarının mekanik özelliklerini değerlendirmek amacıyla Vickers mikrosertlik yöntemi tercih edilmiş olup, deneyler 100 g yük altında ve 15 saniye bekleme süresi uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Her numune için farklı bölgelerden toplam on ölçüm alınmış ve ortalama değerler değerlendirmelerde kullanılmıştır.



Şekil 8. Bruker UMT Universal Mechanical Tester cihazı(Demirbükten, 2025).

3.5. Aşınma ve Sürtünme Testleri

Numunelerin tribolojik performanslarının değerlendirilmesi amacıyla aşınma deneyleri, EUTAM laboratuvarında bulunan Bruker UMT-2 mekanik test sistemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 8). Aşınma davranışının incelenmesinde hem kütle kaybı yöntemi hem de Archard aşınma modeli esas alınmıştır. Archard eşitliği; $V=k(w \cdot s/H)$ şeklinde ifade edilmekte olup, burada V aşınma hacmini, k aşınma katsayısını, W uygulanan normal yükü, s toplam kayma mesafesini ve H malzeme sertliğini temsil etmektedir. Elde edilen aşınma verilerinin doğrulanabilmesi amacıyla, numunelerin deney öncesi ve sonrası kütleleri hassas terazi ile ölçülmüş, aşınma hacmi ise bu ölçümler arasındaki fark esas alınarak hesaplanmıştır.

Aşınma deneyleri, oda sıcaklığında ve kuru kayma koşullarında, doğrusal ters hareketli düzlem-pin (reciprocating ball-on-flat) düzeneği kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Karşı

malzeme olarak 6 mm çapında Al_2O_3 (alümina) bilye tercih edilmiştir. Deneyler, 2 N ve 5 N olmak üzere iki farklı yük seviyesinde uygulanmıştır. Aşınma testlerinde kullanılan çalışma koşulları ve deney parametreleri Tablo 4'te sunulmuştur.

Tablo 4. Tribolojik testlerde kullanılan deney koşulları

Uygulanan yükler	2 N ve 5N
Aşınma izi çapı	5 mm
Sıcaklık	20+/- 2 °C
Aşındırma süresi	5000 s
Aşındırma mesafesi	100 m

Aşınma deneyleri sonrasında numune yüzeylerinde oluşan aşınma izleri, aşınma mekanizmalarının değerlendirilmesi amacıyla Nikon marka ECLIPSE MA200 optik mikroskobu kullanılarak incelenmiş olup, çalışmada kullanılan cihaza ait görüntü Şekil 9'da sunulmuştur.



Şekil 9. Nikon ECLIPSE MA200 optik mikroskobu

3.6. Islanabilirlik Analizleri

Numunelerin ıslanabilirlik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla statik temas açısı deneyleri uygulanmıştır. Bu amaçla EUTAM bünyesinde yer alan Attension Theta Lite tensiyometre cihazından yararlanılmıştır (Şekil 10). Deneylerde prob sıvısı olarak ultra saf su kullanılmış ve yüzey heterojenliğinin etkisini azaltmak için her numunenin farklı noktalarından ölçümler

gerçekleştirilmiştir. Elde edilen verilerin aritmetik ortalaması alınarak ilgili numuneye ait temas açısı değeri belirlenmiştir. Ölçümler sessile drop tekniği kullanılarak yürütülmüştür.



Şekil 10.İslanabilirlik ölçümlerinde kullanılan temas açısı analiz cihazı

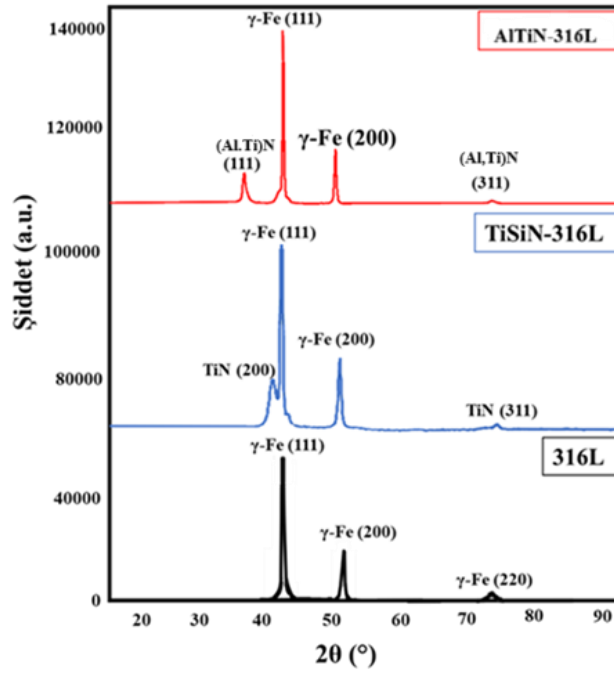
4. BULGULAR

4.1. XRD Analizleri

Şekil 11’da işlemsiz, TiSiN kaplı ve AlTiN kaplı 316L paslanmaz çelik numunelere ait XRD grafiği verilmiştir. İşlemsiz 316L paslanmaz çelik numunesine ait XRD grafiğinde , östenitik yapıyı temsil eden γ -Fe fazına ait (111) ve (200) düzlemlerinden kaynaklanan karakteristik pikler belirgin şekilde gözlenmektedir. Bu durum, 316L paslanmaz çeliğin yüzey merkezli kübik (FCC) kristal yapıya sahip tam östenitik bir malzeme olduğunu doğrulamaktadır. Literatürde de 316L paslanmaz çelikte baskın fazın γ -östenit olduğu ve XRD analizlerinde en yüksek yoğunluklu piklerin γ -Fe (111) ve γ -Fe (200) düzlemlerine karşılık geldiği rapor edilmiştir (Gontijo vd., 2006).

TiSiN kaplı 316L paslanmaz çelik numunede, altlığa ait γ -Fe (111) ve γ -Fe (200) piklerinin büyük ölçüde korunduğu, buna ek olarak kaplamaya ait TiN fazına karşılık gelen (200) ve (311) düzlemlerine ait yeni difraksiyon piklerinin ortaya çıktığı görülmektedir. Bu durum, TiSiN kaplamaların literatürde rapor edildiği üzere TiN esaslı FCC kristal yapıya sahip nanokompozit kaplamalar olduğunu göstermekte olup, elde edilen XRD sonuçları literatür verileri ile uyumludur (Guha vd., 2018).

AlTiN kaplı 316L paslanmaz çelik numunede ise, altlık malzemeye ait γ -Fe piklerinin korunduğu, buna ek olarak kaplamaya özgü karakteristik piklerin daha yüksek difraksiyon açılarında ortaya çıktığı gözlenmektedir. AlTiN kaplamaya ait faz yapısı GIXRD analizi ile incelenmiş olup, (111), (200) ve (220) düzlemlerine karşılık gelen piklerin varlığı belirlenmiştir. Tespit edilen faz bileşimi, literatürde bildirilen AlTiN kaplamalarına ait kristalografik verilerle örtüşmektedir (Li vd., 2023).



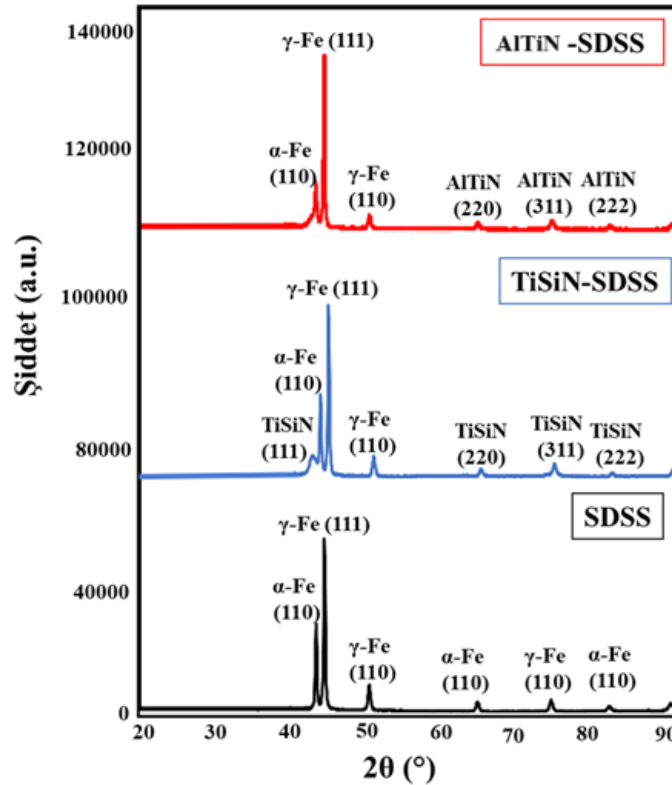
Şekil 11. İşlemsiz, TiSiN ve AlTiN kaplı 316L paslanmaz çelik numunelere ait XRD grafikleri

Şekil 12’da işlemsiz, TiSiN kaplı ve AlTiN kaplı süper dubleks paslanmazçelik numunelere ait XRD grafiği verilmiştir. İşlemsiz SDSS numunesine ait XRD deseninde, α -Fe (110) ferrit fazı ile γ -Fe (111) ve γ -Fe (110) östenit fazlarına ait karakteristik pikler belirgin şekilde gözlenmektedir. γ -Fe (111) pikinin desen içerisinde yüksek şiddetli olması, östenit fazının XRD deseninde baskın olarak temsil edildiğini göstermektedir. Bununla birlikte α -Fe (110) pikinin varlığı, malzemenin iki fazlı (ferrit + östenit) yapısını açıkça ortaya koymaktadır. Gözlenen bu faz dağılımı, süper dubleks paslanmaz çeliklerin tipik mikro yapısını oluşturan ferrit ve östenit fazlarının dengeli birlikteliğini doğrulamakta olup, literatürde SDSS malzemeler için rapor edilen mikro yapı ve faz dengesi ile uyumludur (Paulraj ve Garg, 2015).

TiSiN kaplama uygulanmış SDSS numunesinde, altlık malzemeye ait γ -Fe ve α -Fe fazlarına karşılık gelen piklerin büyük ölçüde korunduğu, buna ek olarak kaplama bünyesinde bulunan TiN fazına ait (111), (220) ve (311) düzlemlerine karşılık gelen karakteristik difraksiyon piklerinin ortaya çıktığı gözlenmektedir. XRD analizinde tespit edilen bu pikler, TiSiN kaplamaların literatürde rapor edildiği üzere TiN nanokristallerinin amorf Si_3N_4 matrisi içerisinde dağılmış olduğu nanokompozit bir nitrit yapıya sahip olduğunu göstermekte olup, elde edilen bulgular TiSiN kaplamalara ilişkin literatür verileri ile uyumludur (Guha vd., 2018).

AlTiN kaplı SDSS numunesinde ise, ferrit ve östenit fazlarına ait piklerin korunmasının yanı sıra, kaplamaya özgü (Al,Ti)N fazına ait (220), (311) ve (222) düzlemlerine karşılık gelen yüksek açılı difraksiyon piklerinin açıkça belirlendiği görülmektedir. AlTiN kaplamaların XRD analizlerinde bu düzlemlerden difraksiyon vermesi, TiN esaslı yüzey merkezli kübik (FCC, NaCl-tipi) kristal yapıya sahip katı çözelti karakterini doğrulamakta olup, bu bulgular literatürde rapor edilen AlTiN kristal difraksiyon davranışı ile uyumludur (Li vd., 2023). Ayrıca kaplama sonrası α -Fe (110) pikinde gözlenen hafif yer değiştirme, kaplama işlemi sırasında oluşan termal ve/veya kalıntı gerilmelerin bir göstergesi olarak değerlendirilebilir.

Elde edilen tüm bu sonuçlar hem TiSiN hem de AlTiN kaplamaların SDSS yüzeyine başarılı bir şekilde yapıştığını ve kaplama tabakası içerisinde XRD ile tanımlanabilir kristal fazların oluştuğunu göstermektedir. Bununla birlikte XRD desenlerinde δ -Fe fazına ait herhangi bir pikin gözlenmemesi, oda sıcaklığında süper dubleks paslanmaz çeliklerde yalnızca α -Fe(ferrit)vey-Fe (östenit) fazlarının kararlı olduğunu bildiren literatür ile tam uyum içerisinde (Paulraj ve Garg, 2015).



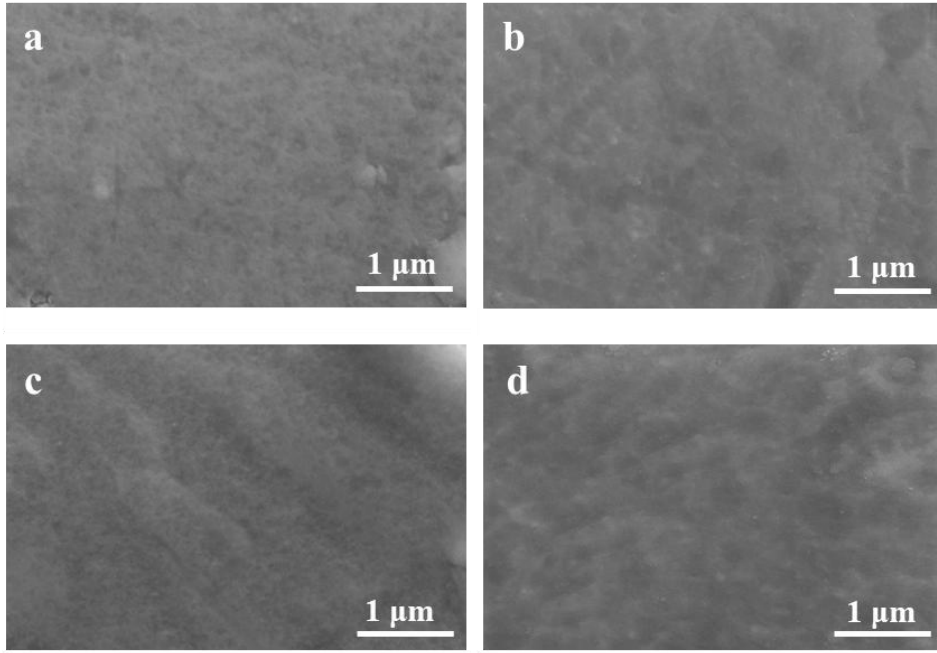
Şekil 12. İşlemsiz, TiSiNve AlTiN kaplı Süperdubleks UNS S32760 paslanmaz çelik numunelere ait XRD grafikleri

4.2. Morfolojik Karakterizasyon Sonuçları

Şekil 13’de verilen SEM görüntüleri incelendiğinde, 316L ve SDSS taban malzemeler üzerine uygulanan AlTiN ve TiSiN kaplamaların yüzeylerinde genel olarak homojen, yoğun ve sürekliliği yüksek bir film yapısının oluştuğu görülmektedir. Tüm numunelerde kaplama tabakasının yüzeyi boyunca herhangi bir çatlak, delaminasyon, gözenek veya makro-damlacık yapısına rastlanmamış olup, kaplamaların yüzey bütünlüğünü koruyan kompakt bir morfoloji sergilediği anlaşılmaktadır.

Şekil 13 (a)’da AlTiN kaplı 316L ve Şekil 13(b)’de TiSiN kaplı 316L numunelere ait yüzey SEM görüntülerinde, her iki kaplamanın da oldukça düzgün ve yoğun bir yüzey morfolojisi sergilediği, tanecik boyutlarının mikron altı (nanokristalin) ölçekte olduğu ve SEM çözünürlüğü dâhilinde taneler arası sınırların belirgin şekilde ayırt edilemediği kompakt bir film yapısının oluştuğu gözlemlenmektedir. TiSiN kaplamanın, AlTiN kaplamaya kıyasla daha ince taneli ve homojen bir yüzey yapısı sergilemesi, Si katkısının TiN esaslı kaplamalarda tane büyümesini sınırladığına dair literatür bulguları ile uyumludur (Li vd., 2016; Musil, 2000). Şekil 13(c)’de AlTiN kaplı SDSS ve Şekil 13(d)’de TiSiN kaplı SDSS numunelerde de benzer şekilde yoğun, düzgün ve sürekliliği yüksek film morfolojilerinin elde edildiği görülmektedir. SDSS altlığın α -ferrit ve γ -östenit fazlarından oluşan iki fazlı yapısı nedeniyle altlık topoğrafyasındaki mikroskobik farklılıklar yüzeyde hafif tekstürel değişimlere yol açmakla birlikte, kaplama tabakasının bütünlüğünü olumsuz etkileyecek belirgin bir kusur SEM incelemelerinde tespit edilmemiştir. Bu durum, AlTiN ve TiSiN kaplamaların SDSS yüzeyine başarılı şekilde tutunduğunu ve kompakt bir film tabakası oluşturduğunu göstermektedir.

Genel olarak elde edilen yüzey SEM görüntülerine bakıldığında, tüm numunelerde elde edilen yüzey morfolojilerinin nanotaneli, yoğun ve düşük kusurlu bir yapı sergilediği, bunun da kaplamaların tribolojik performansları ve mekanik dayanımları üzerinde olumlu etkiler sağlamanın beklendiği söylenebilir. Literatürde de PVD yöntemiyle elde edilen TiN, AlTiN ve TiSiN kaplamaların benzer şekilde kompakt ve homojen yüzey yapıları oluşturduğu, bunun aşınma direnci ve yüzey sertliği açısından avantaj sağladığı bildirilmektedir (Musil, 2000; Li vd., 2016).



Şekil 13. a) AlTiN kaplı 316L, b) TiSiN kaplı 316L SS, c) AlTiN kaplı SDSS ve d) TiSiN kaplı SDSS numunelere ait yüzey SEM görüntüleri

Şekil 14’de verilen kesit SEM görüntüleri, AlTiN ve TiSiN kaplamaların hem 316L hem de SDSS altlıklar üzerinde sürekli, yoğun ve iyi yapışmış bir film tabakası oluşturduğunu göstermektedir. Tüm numunelerde kaplama–altlık ara yüzeyinin düzgün bir hat boyunca ilerlediği ve kaplamanın altlığa mekanik olarak sağlam bir şekilde bağlandığı gözlemlenmektedir.

Şekil 14 (a)’da AlTiN kaplı 316L numunesinde, kaplama tabakasının yaklaşık 1.8-2.0 µm kalınlığında olduğu ve film boyunca herhangi bir soyulma, boşluk veya ayrışma bölgesinin bulunmadığı görülmektedir. Kaplama kalınlığının homojen olması, PVD sürecinde plazma yoğunluğunun ve iyon bombardımanının yüzeye dengeli biçimde dağıldığını göstermektedir. Şekil 14 (b)’de TiSiN kaplı 316L numunesinde ise kolon benzeri büyüme yapısının daha belirgin olduğu ve TiSiN kaplamalara özgü kolonsal mikro yapının kesit SEM görüntüsünde net biçimde seçilebildiği görülmektedir. Lin vd. (2016), TiSiN kaplamaların PVD ve HIPIMS yöntemleriyle biriktirilmesi sırasında yüksek iyonizasyon oranına bağlı olarak yoğun, ince taneli ve kolonsal bir mikro yapı geliştirdiğini rapor etmiştir. Bu çalışmada gözlenen kolonsal yapı ve film sürekliliği, Lin vd. (2016) tarafından bildirilen TiSiN kaplamaların tipik büyüme davranışı ile uyumludur.

Şekil 14 (c)'de AlTiN kaplı SDSS numunesinde, film tabakasının 316L üzerindeki kaplamaya benzer şekilde 1.8-2.0 μm aralığında olduğu ve altlık ile kaplama arasında keskin ve süreklilik arz eden bir ara yüzey hattı bulunduğu gözlenmektedir. SDSS'nin α -ferrit ve γ -östenit fazlarından oluşan iki fazlı yapısı, altlık yüzeyinde mikroskobik topoğrafik farklılıklara yol açmakla birlikte, bu durum kaplama kalınlığında veya bütünlüğünde belirgin bir bozulmaya neden olmamıştır. Şekil 14 (d)'de TiSiN kaplı SDSS numunesinde de kaplama kalınlığının benzer aralıkta olduğu ve film tabakasının oldukça kompakt, yoğun ve bütünlüklü bir yapı sergilediği görülmektedir. Ara yüzeyde herhangi bir boşluk veya yapışma kusurunun gözlenmemesi, TiSiN kaplamanın SDSS altlık üzerinde yüksek aderans oluşturduğunu göstermektedir. Genel olarak elde edilen kesit SEM görüntüleri değerlendirildiğinde, Şekil 14'de sunulan görüntülerde gözlenen yoğun, sürekliliği yüksek ve kusursuz film yapıları, TiSiN ve AlTiN kaplamaların nanokompozit karakteri ve PVD sürecine özgü büyüme mekanizmaları ile açıklanabilmektedir. Bu bulgular, nanokompozit TiSiN kaplamalarda Si katkısının mikro yapıyı rafine ederek mekanik bütünlüğü ve tribolojik performansı artırdığına ilişkin literatür verileriyle tam uyum içerisinde (Veprek ve Veprek-Heijman, 2008; Lin vd., 2016).

Tablo 5 incelendiğinde, AlTiN ve TiSiN kaplama işlemlerinin hem 316L hem de SDSS numunelerin yüzey mekanik özelliklerini belirgin şekilde iyileştirdiği görülmektedir. İşlemsiz 316L paslanmaz çelik numunesinin yüzey sertliği 180–240 HV aralığında iken, AlTiN ve TiSiN kaplama sonrası sertlik değerleri sırasıyla 2400–2600 HV ve 3000–3200 HV seviyelerine yükselmiştir. Benzer şekilde, işlemsiz SDSS numunesinin yüzey sertliği 250–320 HV aralığında ölçülmüş olup, AlTiN kaplama sonrası bu değer 2600–2800 HV, TiSiN kaplama sonrası ise 3300–3500 HV seviyelerine ulaşmıştır.

Kaplama sonrasında sertlik değerlerinde yaklaşık 10–12 katlık bir artışın meydana gelmesi, kaplama tabakasının yoğunluğu, kimyasal bileşimi ve PVD kaplama mekanizmasının yüzey özellikleri üzerindeki belirgin etkisini ortaya koymaktadır. AlTiN ve TiSiN kaplamalarda gözlenen bu yüksek sertlik değerleri, kaplama bünyesinde bulunan TiN ve (Al,Ti)N esaslı sert nitrür fazlarının varlığı ile ilişkilendirilmektedir.

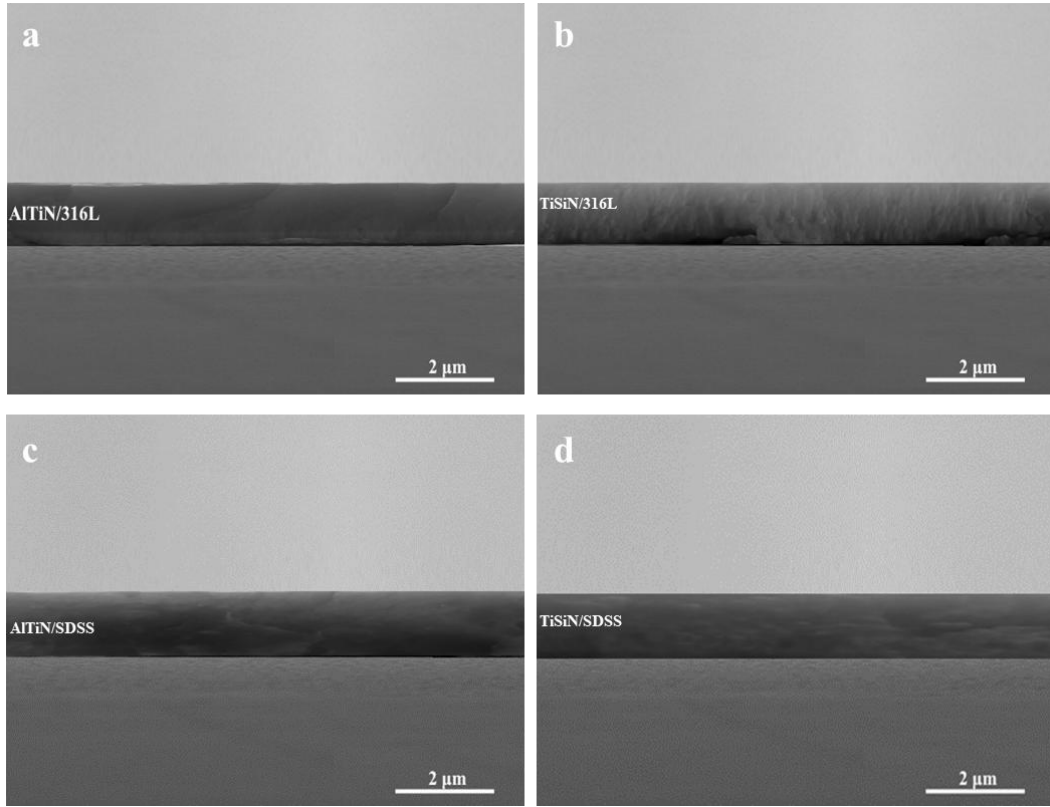
TiSiN kaplamalarda elde edilen sertlik değerlerinin AlTiN kaplamalara kıyasla daha yüksek olması, literatürde rapor edilen nanokompozit sertleşme mekanizması ile uyumludur. Veprek ve Veprek-Heijman (2008), TiSiN gibi nanokompozit kaplamalarda TiN nanokristallerinin

amorf Si_3N_4 matrisi içerisinde dağılmış yapısının, tane büyümesini sınırlandırarak çok yüksek sertlik değerlerinin elde edilmesini sağladığını bildirmiştir. Benzer şekilde Lin vd. (2016), TiSiN kaplamalarda Si katkısının nanokristalin yapı oluşumunu teşvik ederek film yoğunluğunu ve sertliği artırdığını rapor etmiştir.

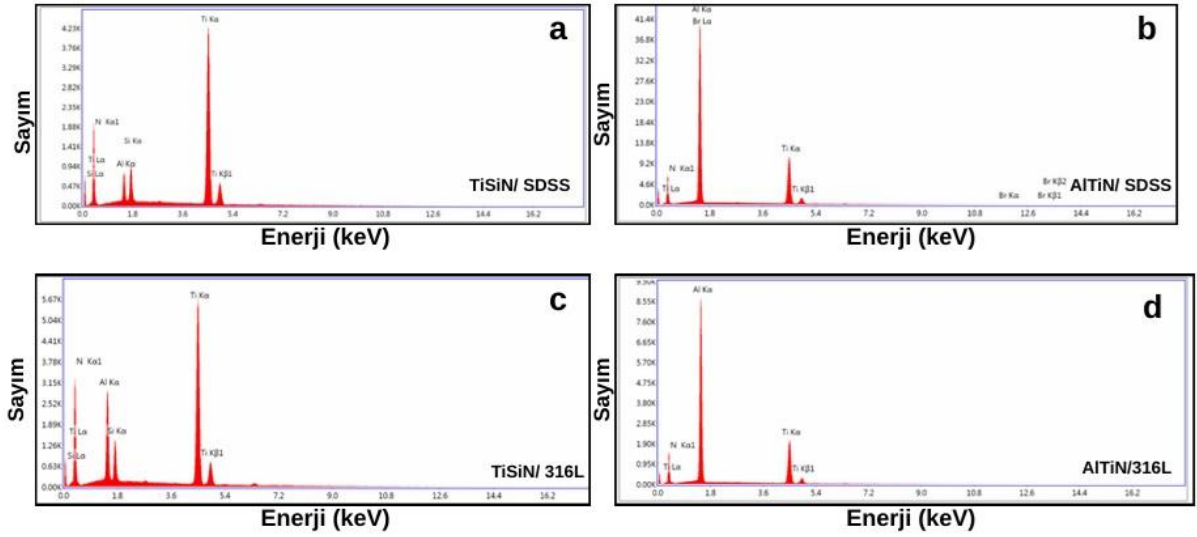
Yüzey pürüzlülüğü değerleri değerlendirildiğinde, kaplama sonrası Ra değerlerinde hafif bir artış gözlenmektedir. İşlemsiz numunelerde 0.15–0.20 μm aralığında olan pürüzlülük değerleri, kaplama sonrasında 0.20–0.45 μm aralığına yükselmiştir. Bu artış, PVD süreçlerine özgü iyon bombardımanı ve mikro damlacık oluşumu gibi etkilerden kaynaklanan yüzey topoğrafyasındaki ince değişimlerle ilişkilendirilmektedir. Bununla birlikte elde edilen pürüzlülük değerleri, kaplama bütünlüğünü olumsuz etkilemeyecek ve tribolojik uygulamalar açısından kabul edilebilir sınırlar içerisinde yer almaktadır.

Tablo 5. İşlemsiz ve kaplamalı numunelere ait kalınlık, sertlik ve pürüzlülük sonuçları

Deney Parametreleri	Tabaka Kalınlığı (μm)	Yüzey Sertlik Değeri ($\text{HV}_{0,1}$)	Yüzey Pürüzlülük Değeri ($\text{Ra}-\mu\text{m}$)
İşlemsiz 316L	-	180–240	0,15–0,20
AlTiNkaplı 316L	1,8-2,0	2400–2600	0,20–0,30
TiSiNkaplı 316L	1,8–2,0	3000–3200	0,30–0,40
İşlemsiz SDSS	-	250–320	0,15–0,20
AlTiNkaplı SDSS	1,8-2,0	2600–2800	0,20–0,30
TiSiNkaplı SDSS	1,8–2,0	3300–3500	0,20–0,45



Şekil 14. a) AlTiN kaplı 316L, b) TiSiN kaplı 316L, c) AlTiN kaplı SDSS ve d) TiSiN kaplı SDSS numunelere ait kesit SEM görüntüleri



Şekil 15. a) TiSiN/SDSS, b) AlTiN/SDSS, c) TiSiN/316L ve d) AlTiN/316L numunelerine ait EDS spektrumları

Tablo 6. Kaplama tabakalarının EDS analizlerinden elde edilen element dağılımları

Deney Parametreleri	Element	% Ağırlık Oranı	% Atomik ağırlık
TiSiN/SDSS	N	19,57	44,44
	Si	4,57	5,17
	Ti	75,86	50,39
AlTiN/SDSS	N	22,94	44,72
	Al	39,95	34,12
	Ti	37,11	21,16
TiSiN/316L	N	25,04	52,28
	Si	4,56	4,75
	Ti	70,40	42,97
AlTiN/316L	N	24,06	43,55
	Al	39,64	37,24
	Ti	36,3	19,21

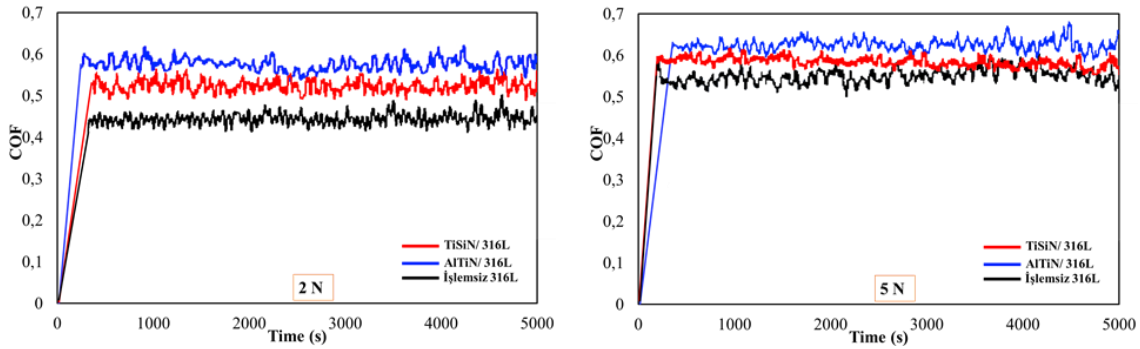
TiSiN ve AlTiN ile kaplanmış SDSS ve 316L paslanmaz çelik numunelerine ait EDS elemental analiz sonuçları Tablo 6’da sunulmuştur. Elde edilen veriler, her iki kaplama sisteminde de hedeflenen kimyasal bileşimlerin başarıyla elde edildiğini göstermektedir.

TiSiN kaplı SDSS numunesinde Ti elementinin ağırlıkça %75,86 ve atomik olarak %50,39 oranında baskın olduğu belirlenmiştir. N elementi %19,57 ağırlık (%44,44 atomik) oranında tespit edilirken, Si elementi %4,57 ağırlık (%5,17 atomik) oranında ölçülmüştür. Benzer şekilde TiSiN kaplı 316L numunesinde Ti (%70,40 ağırlık, %42,97 atomik) ve N (%25,04 ağırlık, %52,28 atomik) elementlerinin baskın olduğu, Si’nin %4,56 ağırlık (%4,75 atomik) oranında kaplama yapısına dahil olduğu belirlenmiştir. Literatürde TiSiN kaplamalarda Si katkısının, nanokristalin TiN taneleri arasında amorf Si₃N₄ fazı oluşturarak tane büyümesini sınırlandırdığı ve daha yoğun, kompakt bir mikroyapı meydana getirdiği bildirilmektedir (Musil, 2000; Vepřek ve Vepřek-Heijman, 2008). SEM görüntülerinde gözlenen ince taneli ve homojen morfoloji, EDS analizlerinde doğrulan Si varlığı ile uyumludur.

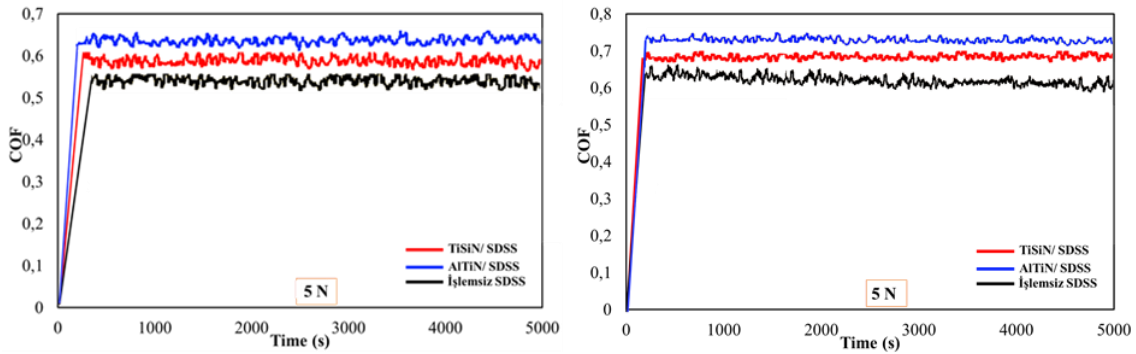
AlTiN kaplı SDSS numunesinde Ti (%37,11 ağırlık, %21,16 atomik), Al (%39,95 ağırlık, %34,12 atomik) ve N (%22,94 ağırlık, %44,72 atomik) elementleri kaplamanın ana bileşenleri olarak tespit edilmiştir. AlTiN kaplı 316L numunesinde ise Al oranının belirgin şekilde arttığı ve %39,64 ağırlık (%37,24 atomik) değerine ulaştığı görülmektedir. Bu numunede Ti ve N elementleri sırasıyla %36,30 ve %24,06 ağırlık oranlarında ölçülmüştür. Literatürde AlTiN

kaplamalarda Al içeriğinin artmasıyla birlikte yüksek sıcaklıklarda koruyucu Al_2O_3 tabakasının oluştuğu, bunun da kaplamanın termal kararlılığı ve oksidasyon direncini önemli ölçüde artırdığı rapor edilmiştir (PalDey ve Deevi, 2003). Altlık türünün kaplama bileşimi üzerindeki etkisi değerlendirildiğinde, 316L altlık üzerine kaplanan AlTiN numunesinde Al oranının SDSS altlığa kıyasla daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum, ostenitik yapıdaki 316L paslanmaz çeliğin daha homojen yüzey enerjisine sahip olması nedeniyle Al atomlarının yüzeye daha etkin bir şekilde tutunmasıyla ilişkilendirilmektedir. Benzer şekilde literatürde, altlık mikroyapısının kaplama büyüme mekanizması, elementel dağılım ve yüzey morfolojisi üzerinde belirleyici bir rol oynadığı bildirilmektedir (Lin vd., 2016).

4.3. Tribolojik Test Sonuçları



Şekil 16. 2 N yük altında numunelerin sürtünme katsayısındaki zamana bağlı değişimi

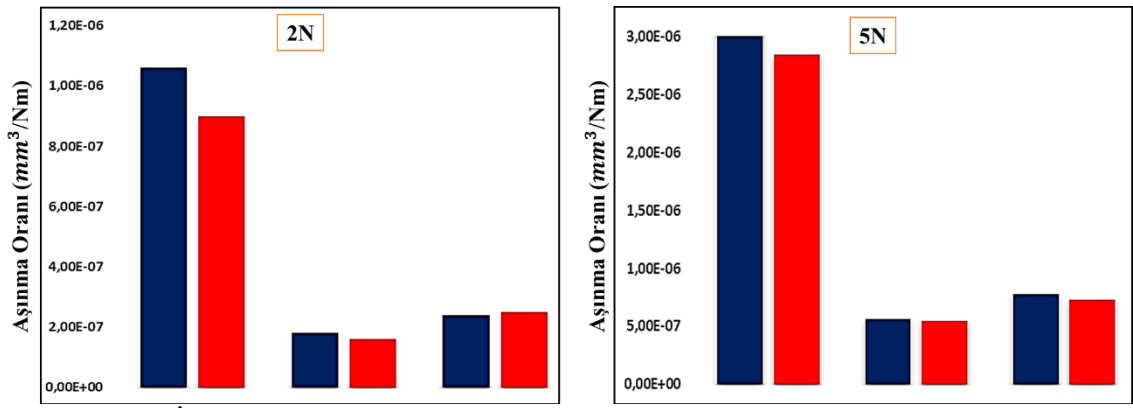


Şekil 17. 5 N yük altında sürtünme katsayısının zamana göre değişimi

İşlemsiz, TiSiN ve AlTiN kaplı 316L ve süper dubleks UNS S32760 paslanmaz çelik numunelerin tribolojik performansı, 2 N ve 5 N normal yükler altında gerçekleştirilen doğrusal zıt yönlü ball-on-flat aşınma testleri sonucunda elde edilen sürtünme katsayısı (COF)-zaman eğrileri (Şekil 14 ve Şekil15) ve hesaplanan ortalama aşınma oranları (Tablo 7.) dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Şekil 16.'de 2 N yük altında 316L ve SDSS

numuneleri için elde edilen COF–zaman eğrileri sunulmaktadır. Tüm numunelerde testin başlangıç evresinde kısa süreli bir “alışma (running-in)” rejimi gözlenmiş, bunu takiben yaklaşık 5000 s boyunca kararlı bir sürtünme rejimine geçilmiştir. Bu davranış, temas yüzeylerinde ilk temas asperitelerinin kırılması ve yüzeylerin karşılıklı uyumlanması sonrasında tribolojik sistemin kararlı bir dengeye ulaştığını göstermektedir. Literatürde, kuru sürtünme koşullarında gerçekleştirilen ball-on-flat testlerinde benzer running-in ve kararlı rejim davranışlarının yaygın olarak rapor edildiği bilinmektedir (Holmberg ve Matthews, 2009; Blau, 2001).

İşlemsiz 316L numunesinin 2N yük altında yapılan aşınma testi sonrası ortalama COF değerinin 0,45 seviyesinde olduğu, AlTiN ve TiSiN kaplı 316L numunelerinde ise bu değer sırasıyla 0,57 ve 0,55’e yükseldiği belirlenmiştir (Tablo 7.). Benzer şekilde SDSS numunelerinde de kaplama sonrası COF değerlerinin arttığı gözlenmiştir. Şekil 16.’de gösterilen 2N yük altında SDSS numunelerine yapılan aşınma testi sonrası grafiklerde görüldüğü gibi, en düşük sürtünme katsayısı değeri (0,50) işlemsiz SDSS numunesinde elde edilirken, en yüksek sürtünme katsayısı (0,65) AlTiN kaplı SDSS numunesinden elde edilmiştir. Sert seramik esaslı PVD kaplamaların, sünek metal altlıklara kıyasla daha yüksek kesme direncine sahip olması ve temas sırasında plastik uyumlanmanın sınırlı kalması, kuru sürtünme koşullarında sürtünme katsayısının artmasına yol açabilmektedir (Voevodin ve Zabinski, 2000). Şekil 17.’de 5 N yük altında elde edilen COF–zaman eğrileri incelendiğinde, tüm numunelerde COF değerlerinin 2N yük altındaki değerlere kıyasla arttığı görülmektedir. Yük artışı ile birlikte gerçek temas alanının büyümesi ve ara yüzeyde oluşan üçüncü cisim tabakasının daha yoğun bir şekilde kesmeye maruz kalması, sürtünme katsayısındaki artışı açıklayan temel mekanizmalardır (Blau, 2001). Bununla birlikte, kaplamalı numunelerde sürtünme katsayısının zamanla daha kararlı bir plato göstermesi, kaplamaların temas sırasında yüzey bütünlüğünü koruduğunu ve ani adeziv kopmaların sınırlı kaldığını düşündürmektedir.



Şekil 18. İşlemsiz, TiSiN ve AlTiN kaplı 316L ve süper dubleks paslanmaz çelik numunelerden elde edilen aşınma oranı grafikleri

Tablo 7. İşlemsiz, TiSiN ve AlTiN kaplı 316L ve süper dubleks paslanmaz çelik numunelere ait elde edilen aşınma testi sonuçları

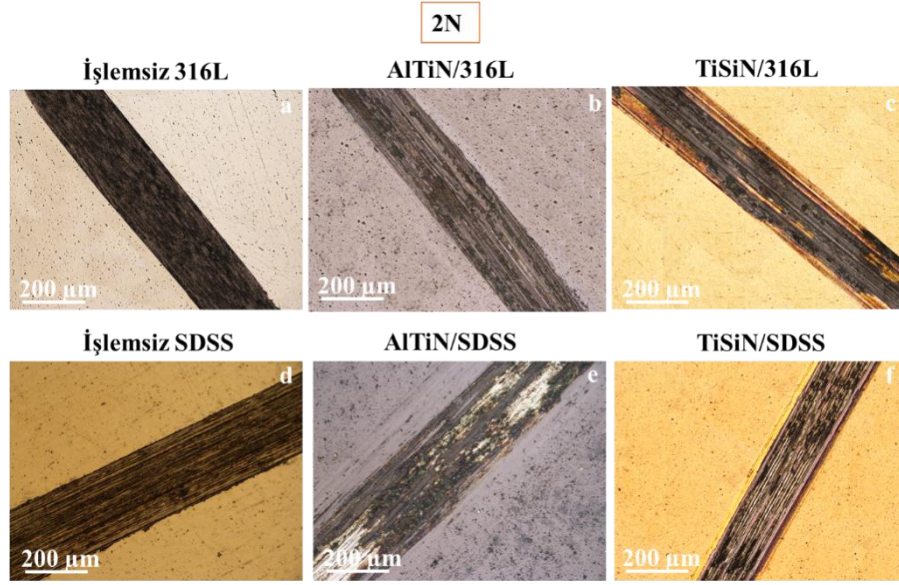
Parametreler	Ortalama COF (μ)		Ortalama Aşınma Oranı ($\times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{Nm}$)	
	2N	5N	2N	5N
İşlemsiz 316L	0,45	0,57	1,06	3,45
AlTiN kaplı 316L	0,57	0,65	0,18	0,56
TiSiN kaplı 316L	0,55	0,62	0,24	0,78
İşlemsiz SDSS	0,50	0,64	0,90	2,85
AlTiN kaplı SDSS	0,65	0,73	0,16	0,55
TiSiN kaplı SDSS	0,62	0,70	0,25	0,73

İşlemsiz, TiSiN ve AlTiN kaplı 316L ve süper dubleks paslanmaz çelik (SDSS) numunelere ait aşınma oranları, 2 N ve 5 N normal yükler altında elde edilmiş olup sonuçlar Şekil 18 ve Tablo 7.'de sunulmuştur. Şekil 18.'da elde edilen sonuçlara göre genel olarak kaplama işlemi uygulanmış her iki altlık malzeme için, aşınma oranları kaplı numunelerde belirgin biçimde düşmüştür. 316L numuneleri için işlemsiz durumda 2N yük altında ölçülen aşınma oranı $1,06 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ iken, AlTiN kaplama sonrasında bu değer $0,18 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ 'ye, TiSiN kaplama sonrasında ise $0,24 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ 'ye düşmüştür (Tablo 7.). Şekil 18.'da 2 N yük altında elde edilen grafikler incelendiğinde, her iki kaplamanın da işlemsiz numuneye kıyasla aşınma oranını yaklaşık 4-6 kat azalttığı açıkça görülmektedir. Benzer şekilde, 5 N yük altında elde edilen aşınma oranları, işlemsiz 316L numunesinde $3,45 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ olarak belirlenirken, AlTiN kaplama ile bu değer $0,56 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ 'ye, TiSiN kaplama ile ise $0,78 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ 'ye gerilemiştir. Şekil 16.'da 5 N yük altında elde edilen sütun grafikler, yük artışına bağlı olarak tüm numunelerde aşınma oranının yükseldiğini, ancak kaplamalı

numunelerde bu artışın işlemsiz numunelere kıyasla belirgin ölçüde daha sınırlı kaldığını göstermektedir.

Bu sonuçlar, AlTiN ve TiSiN kaplamaların altlık malzemelere kıyasla çok daha yüksek sertlik ve yük taşıma kapasitesine sahip olmaları sayesinde aşınma mekanizmasını etkin bir şekilde baskıladığını ortaya koymaktadır. Archard aşınma modeline göre aşınma hacmi uygulanan normal yük ile doğru orantılı, malzemenin sertliği ile ters orantılıdır (Archard, 1953). Buna göre kaplamaların yüksek sertliği ve elastik modülü, temas bölgesinde oluşan plastik deformasyonu sınırlayarak gerçek temas alanını küçültmekte ve böylece birim kayma mesafesi başına oluşan aşınma hacmini önemli ölçüde azaltmaktadır. Literatürde PVD esaslı sert kaplamaların, özellikle nitrür bazlı kaplamaların, aşınma direncini altlık malzemeye kıyasla 4 ile 10 kat artırabildiği yaygın olarak rapor edilmektedir (Holmberg ve Matthews, 2012; Bobzin, 2017). Bu çalışmada elde edilen bulguların söz konusu literatür ile yüksek düzeyde uyumlu olduğu görülmektedir. SDSS numuneleri için elde edilen sonuçlar da benzer bir eğilim sergilemektedir. İşlemsiz SDSS numunesi 2 N yük altında $0,90 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ aşınma oranı gösterirken, AlTiN kaplama sonrası bu değer $0,16 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ 'ye, TiSiN kaplama sonrası ise $0,25 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ seviyesine düşmüştür (Tablo 7.). Şekil 18'da SDSS için verilen grafikler, SDSS altlığının mekanik olarak 316L'e kıyasla daha yüksek dayanım sergilemesine rağmen, kaplama uygulanmasıyla aşınma oranının ilave olarak önemli ölçüde düşürülebildiğini ortaya koymaktadır. Bu durum, kaplamaların yalnızca yüzey sertliğini artırmakla kalmayıp, aynı zamanda altlık malzeme üzerinde mekanik bir bariyer oluşturarak yük aktarımını daha homojen hale getirdiğini göstermektedir. Normal yükün 2 N'den 5 N'e yükseltilmesi, Şekil 18.'da açıkça görüldüğü üzere tüm numunelerde aşınma oranlarının artmasına neden olmuştur. Ancak bu artışın işlemsiz numunelerde oldukça keskin olduğu, kaplamalı numunelerde ise daha sınırlı kaldığı görülmektedir. Bu durum, kaplamaların artan temas gerilmeleri altında dahi yükü daha homojen dağıtarak altlık malzemede meydana gelebilecek şiddetli plastik deformasyon ve adeziv aşınma mekanizmalarını baskıladığını göstermektedir. Sert kaplamaların yüksek elastik modülü ve yük taşıma kapasitesi sayesinde temas bölgesinde oluşan gerilme yoğunlaşmaları azalmaktadır (Voevodin ve Zabinski, 2000). AlTiN ve TiSiN kaplamaların aşınma davranışına bakıldığında, Şekil 18. ve Tablo 7. birlikte değerlendirildiğinde, her iki kaplamanın da tribolojik performansı anlamlı ölçüde iyileştirdiği, ancak AlTiN kaplamanın TiSiN kaplamaya kıyasla sistematik olarak daha düşük aşınma oranları sağladığı görülmektedir. AlTiN kaplamaların daha yüksek sertliği, oksidasyon direnci ve yük taşıma kapasitesi, temas sırasında oluşan mikro çatlakların ilerlemesini sınırlandırarak

daha kararlı bir aşınma davranışı sunmasına katkı sağlamaktadır (Bobzin, 2017). TiSiN kaplamalarda ise Si ilavesi ile oluşan amorf SiN_x fazının tribofilm oluşumuna katkı sağlayarak sürtünme davranışını stabilize ettiği; ancak mekanik dayanım açısından AlTiN kaplamalara kıyasla nispeten daha düşük bir yük taşıma kapasitesi sergilediği bilinmektedir. Bu farklılık, kaplamaların mikroyapısal özellikleri, tane boyutu ve bağlayıcı faz morfolojileri ile ilişkilendirilebilir (Chengve ark., 2019).



Şekil 19. 2 N yük altında oluşan aşınma izlerine ait optik mikroskop görüntüleri

Şekil 19’de, 2 N normal yük altında gerçekleştirilen aşınma testleri sonrasında işlemsiz, AlTiN ve TiSiN kaplı 316L ile SDSS numunelerine ait optic mikroskop görüntüleri verilmiştir. Görüntüler genel olarak değerlendirildiğinde, tüm numunelerde aşınma yönüne paralel uzanan çizik ve olukların oluştuğu görülmekte olup, baskın aşınma mekanizmasının abrasive aşınma olduğu anlaşılmaktadır. Bununla birlikte aşınma izlerinin genişliği, yüzey bütünlüğü ve malzeme transferi belirtileri numuneler arasında önemli farklılıklar göstermektedir.

Şekil 19(a)’da verilen işlemsiz 316L paslanmaz çelik numunesine ait aşınma izi incelendiğinde, aşınma yolunun nispeten geniş olduğu ve yüzey boyunca düzensiz malzeme kaldırılmasının meydana geldiği görülmektedir. Aşınma yönüne paralel derin olukların varlığı abrasive aşınma mekanizmasını işaret ederken, aşınma izi kenarlarında gözlenen düzensiz birikmeler yerel plastic deformasyonun da etkili olduğunu göstermektedir. 316L

paslanmaz çeliğin nispeten düşük sertliğe sahip olması nedeniyle karşı yüzeyden kaynaklanan mikro kesme etkileri daha belirgin hale gelmiştir.

Şekil 19(b)'de yer alan AlTiN kaplı 316L numunesinde aşınma izinin daha dar ve düzenli bir morfoloji sergilediği görülmektedir. Kaplamanın yüksek sertliği sayesinde yüzeyde meydana gelen malzeme kaybı önemli ölçüde sınırlandırılmıştır. Aşınma izi içerisinde gözlenenince çizgisel izler abrasiv aşınmanın devam ettiğini göstermesine rağmen, işlemsiz numuneye kıyasla daha düşük seviyede yüzey hasarı meydana gelmiştir. Bu durum AlTiN kaplamanın yük taşıma kapasitesinin yüksek olduğunu ve yüzeyi aşınmaya karşı etkin biçimde koruduğunu göstermektedir.

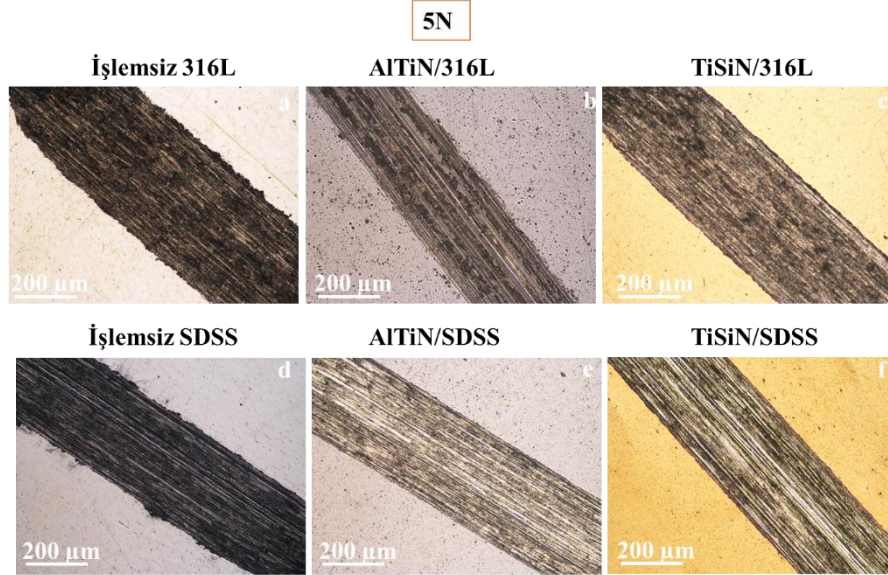
Şekil 19(c)'de verilen TiSiN kaplı 316L numunesinde aşınma izinin işlemsiz 316L numunesine kıyasla daha dar olduğu görülmektedir. Bununla birlikte aşınma izi boyunca yer yer parlak bölgelerin ve yüzey düzensizliklerinin olduğu dikkati çekmektedir. Bu durum abrasiv aşınmanın yanı sıra sınırlı ölçüde oksidatif aşınma ve tribofilm oluşumunun etkili olabileceğini göstermektedir. TiSiN kaplamanın yüzeyi koruduğu açık olmakla birlikte, aşınma izi morfolojisi AlTiN kaplamaya göre bir miktar daha düzensiz görünmektedir.

Şekil 19(d)'de sunulan işlemsiz SDSS numunesi incelendiğinde, aşınma izinin işlemsiz 316L numunesine göre daha dar olduğu görülmektedir. SDSS'nin ferrit-östenit fazlarından oluşan çift fazlı yapısı ve daha yüksek sertliği nedeniyle aşınma direncinin arttığı anlaşılmaktadır. Aşınma yolu boyunca belirgin oluklar bulunmasına rağmen yüzeyde meydana gelen malzeme kaldırılması daha sınırlı düzeydedir.

Şekil 19(e)'de verilen AlTiN kaplı SDSS numunesi, incelenen numuneler arasında en düşük yüzey hasarını gösteren örneklerden biri olarak değerlendirilebilir. Aşınma izi boyunca yüzey bütünlüğünün büyük ölçüde korunduğu ve ciddi bir kaplama hasarının oluşmadığı görülmektedir. Yer yer gözlenen parlak bölgeler sıkışmış aşınma partikülleri veya oksit tabakaları ile ilişkilendirilebilir. Bu sonuç, AlTiN kaplamanın yüksek sertliğiyle SDSS altlığının yüksek mekanik dayanımının birlikte çalışması sonucu oluşan sinerjik etkinin bir göstergesidir.

Şekil 19(f)'de yer alan TiSiN kaplı SDSS numunesinde ise aşınma izinin oldukça düzenli ve süreklilik gösteren bir morfolojiye sahip olduğu görülmektedir. Aşınma doğrultusuna paralel

ince çiziklerin varlığı abrasive aşınmanın baskın mekanizma olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte yüzeyde belirgin bir kaplama soyulması, çatlak oluşumu veya delaminasyon gözlenmemiştir. Bu durum TiSiN kaplamanın aşınma sırasında yapısal bütünlüğünü koruduğunu ve altlık yüzeyi etkin biçimde koruduğunu göstermektedir.



Şekil 20. 5 N yük altında oluşan aşınma izlerine ait optik mikroskop görüntüleri

Şekil 20’de, 5 N normal yük altında gerçekleştirilen aşınma testleri sonrasında işlemsiz ve kaplamalı 316L ile SDSS numunelerine ait optik mikroskop görüntüleri sunulmaktadır. 2 N yük altında elde edilen görüntülerle karşılaştırıldığında, uygulanan normal yükün artmasına bağlı olarak tüm numunelerde aşınma iz genişliklerinin belirgin şekilde arttığı ve yüzey hasarının daha şiddetli hale geldiği görülmektedir. Aşınma izleri boyunca gözlenen yoğun paralel oluklar, yüksek yük altında da baskın aşınma mekanizmasının abrasif aşınma olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte bazı numunelerde plastik deformasyon, malzeme yığılması ve üçüncü cisim etkisinin daha belirgin hale geldiği gözlenmiştir.

Şekil 20(a)’da verilen işlemsiz 316L paslanmaz çelik numunesine ait aşınma izi incelendiğinde, aşınma yolunun oldukça genişlediği ve yüzeyde ciddi miktarda malzeme kaybının meydana geldiği görülmektedir. Aşınma izi boyunca oluşan derin oluklar ve kenarlarda meydana gelen malzeme yığılmaları, yüksek yük altında abrasif aşınmanın yanında plastik deformasyonun da etkin rol oynadığını göstermektedir. İşlemsiz 316L numunesinde gözlenen bu yoğun yüzey hasarı, Tablo 7’de verilen en yüksek aşınma oranı değerleri ile uyumlu bir sonuç ortaya koymaktadır.

Şekil 20(b)'de sunulan AlTiN kaplı 316L numunesinde aşınma izinin işlemsiz numuneye kıyasla daha dar ve daha düzenli olduğu görülmektedir. Aşınma yönüne paralel ince çizgisel izler mevcut olmakla birlikte, yüzey bütünlüğünün büyük ölçüde korunduğu dikkati çekmektedir. Bu durum, AlTiN kaplamanın yüksek sertliği ve yük taşıma kapasitesi sayesinde temas bölgesinde oluşan plastik deformasyonu sınırlandırdığını göstermektedir. Ayrıca aşınma izi boyunca belirgin bir kaplama soyulması veya delaminasyonun gözlenmemesi, kaplamanın altlığa güçlü şekilde tutunduğunu ortaya koymaktadır.

Şekil 20(c)'de verilen TiSiN kaplı 316L numunesinde, aşınma izinin işlemsiz numuneye göre önemli ölçüde daraldığı görülmektedir. Bununla birlikte aşınma izi boyunca oluşan düzensiz parlak bölgeler ve yerel yüzey değişimleri, aşınma sırasında oluşan oksit tabakalarının ve sıkışmış aşınma parçacıklarının yüzey davranışına katkı sağladığını düşündürmektedir. Aşınma mekanizmasının esas olarak abrasif karakterde olduğu, ancak tribolojik temas sırasında oluşan tribofilm tabakasının da yüzey davranışını etkilediği değerlendirilmektedir.

Şekil 20(d)'de verilen işlemsiz SDSS numunesi incelendiğinde, aşınma izinin işlemsiz 316L numunesine göre daha dar kaldığı görülmektedir. SDSS'nin yüksek mukavemetli ferrit-östenitmikroyapısı sayesinde aşınmaya karşı daha yüksek direnç gösterdiği anlaşılmaktadır. Bununla birlikte yük artışına bağlı olarak aşınma izi kenarlarında belirgin malzeme taşınması ve plastik akma izleri meydana gelmiştir. Bu durum yüksek temas gerilmeleri altında yüzey deformasyonunun arttığını göstermektedir.

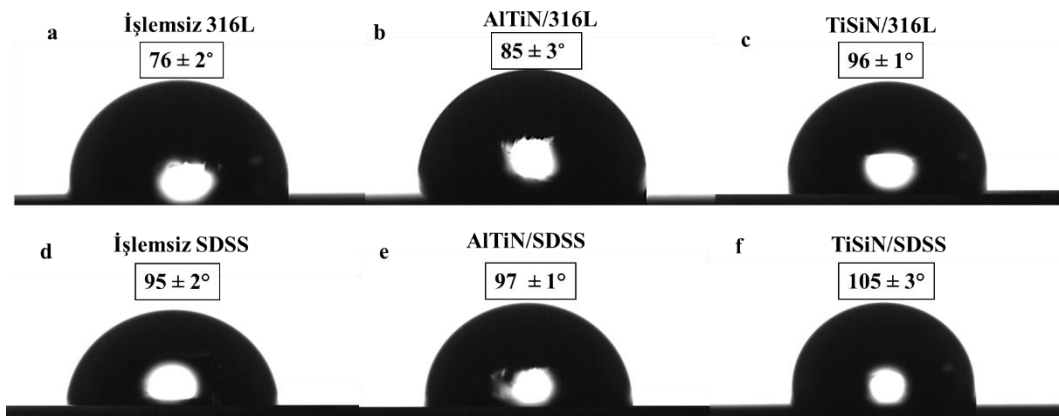
Şekil 20(e)'de sunulan AlTiN kaplı SDSS numunesinde aşınma izi boyunca yüzey bütünlüğünün büyük ölçüde korunduğu görülmektedir. Aşınma izi içerisinde yer yer gözlenen parlak bölgeler, sıkışmış aşınma parçacıkları ve oksidatif ürünlerin varlığına işaret etmektedir. Bununla birlikte aşınma izi genişliğinin oldukça sınırlı olması ve kaplama bütünlüğünün korunması, AlTiN kaplamanın SDSS altlığı üzerinde yüksek aşınma direnci sağladığını göstermektedir. Optik mikroskop görüntüleri, bu numunenin tribolojik performans açısından en başarılı yüzeylerden biri olduğunu ortaya koymaktadır.

Şekil 20(f)'de verilen TiSiN kaplı SDSS numunesinde ise aşınma izinin oldukça düzenli bir morfoloji sergilediği görülmektedir. Aşınma doğrultusuna paralel uzanan ince çiziklerin baskın olması, abrasif aşınma mekanizmasının etkinliğini göstermektedir. Bununla birlikte aşınma izi içerisinde belirgin kaplama kırılması, soyulma veya delaminasyon gözlenmemiştir.

Bu durum TiSiN kaplamanın yüksek yük altında dahi yapısal bütünlüğünü koruyabildiğini ve aşınma sırasında etkin bir koruyucu bariyer görevi üstlendiğini göstermektedir.

Genel olarak aşınma testi sonrası elde edilen optik mikroskop görüntüleri değerlendirildiğinde, normal yükün 2 N'den 5 N'e artmasıyla tüm numunelerde aşınma iz genişliğinin arttığı ve yüzey hasarının şiddetlendiği görülmektedir. Buna karşın AlTiN ve TiSiN kaplamaların her iki altlık malzeme üzerinde de aşınma iz genişliğini önemli ölçüde azalttığı ve yüzey bütünlüğünü koruduğu belirlenmiştir. Özellikle AlTiN kaplı numunelerde daha düşük aşınma oranları ve daha sınırlı yüzey hasarı gözlenmesi, Tablo 7'de verilen tribolojik sonuçlarla uyumlu olup AlTiN kaplamanın yüksek yük koşullarında daha etkin bir aşınma direnci sağladığını göstermektedir. SDSS altlığın ise hem işlemsiz hem de kaplamalı durumda 316L altlığa kıyasla daha yüksek aşınma dayanımı sergilediği anlaşılmaktadır. Bu sonuçlar, yüzey sertliği yüksek PVD kaplamalarının ve SDSS altlığın birlikte kullanılması durumunda tribolojik performansın önemli ölçüde iyileştirilebildiğini ortaya koymaktadır.

4.4. Temas Açısı Ölçüm Sonuçları



Şekil 21. Farklı yüzey koşullarına sahip 316L ve SDSS numunelerinin ıslanabilirlik davranışlarını gösteren temas açısı sonuçları

Şekil 21'de verilen statik su temas açısı sonuçları incelendiğinde, işlemsiz ve kaplanmış numunelerin yüzey ıslanabilirlik davranışlarının kaplama türüne ve altlık malzemeye bağlı olarak belirgin şekilde değiştiği görülmektedir. İşlemsiz 316L paslanmaz çelik numunesinin temas açısı $76 \pm 2^\circ$ olarak ölçülmüş olup, bu değer literatürde 316L için rapor edilen hidrofilik yüzey karakteri ($65-80^\circ$) aralığı ile uyum göstermektedir (Kwok ve Neumann, 1999). Bu durum, östenitik paslanmaz çelik yüzeyinin yüksek yüzey enerjisine sahip metalik

bağ yapısından kaynaklanmaktadır. AlTiN kaplı 316L numunesinde temas açısının $85 \pm 3^\circ$ seviyesine yükseldiği belirlenmiştir. Bu artış, nitrür esaslı seramik kaplamaların metalik altlıklara kıyasla daha düşük yüzey enerjisine sahip olmasıyla ilişkilidir. Literatürde AlTiN kaplamaların yüzey enerjisini düşürerek ıslanabilirliği azalttığı ve temas açısını artırdığı rapor edilmiştir (PalDey ve Deevi, 2003; Musil, 2000). Ayrıca PVD yöntemi sırasında oluşan iyon bombardımanı ve mikro damlacık etkileri sonucu yüzey topografyasında meydana gelen değişimlerin de bu artışa katkı sağladığı düşünülmektedir. TiSiN kaplı 316L numunesinde temas açısının $96 \pm 1^\circ$ değerine ulaşması, yüzeyin belirgin şekilde hidrofobik karakter kazandığını göstermektedir. Bu durum, TiSiN kaplamaların nanokompozit yapısı (TiNnanokristalleri + amorf Si_3N_4 matrisi) sayesinde yüzey enerjisinin önemli ölçüde azalması ile açıklanmaktadır. Si katkısının yüzeydeki polar etkileşimleri zayıflatarak temas açısını artırdığı literatürde açıkça belirtilmiştir (Vepřek ve Vepřek-Heijman, 2008).

İşlemsiz süper dubleks paslanmaz çelik (SDSS) numunesinde ölçülen $95 \pm 2^\circ$ temas açısı, 316 numunesine kıyasla daha yüksek olup, bu durum SDSS'nin iki fazlı (ferrit + östenit) mikro yapısından kaynaklanan yüzey enerji heterojenliği ile ilişkilendirilmektedir. Ferritik fazın daha düşük yüzey enerjisine sahip olması, toplam yüzeyin daha hidrofobik davranmasına neden olmaktadır (Paulraj ve Garg, 2015). AlTiN ve TiSiN kaplı SDSS numunelerde temas açılarının sırasıyla $97 \pm 1^\circ$ ve $105 \pm 3^\circ$ değerlerine yükselmesi, kaplama işleminin yüzey ıslanabilirliğini önemli ölçüde azalttığını açıkça ortaya koymaktadır. Özellikle TiSiN kaplı numunede elde edilen 105° temas açısı, yüzeyin belirgin hidrofobik karakter kazandığını göstermektedir. Bu durum yalnızca kimyasal bileşim değişimi ile değil, aynı zamanda kaplama sonrası artan yüzey pürüzlülüğü ile de ilişkilidir. Nitekim Tablo 5'te verilen pürüzlülük değerlerinde gözlenen artış, temas açısındaki yükselmenin topografik katkısını desteklemektedir.

Yüzey pürüzlülüğünün temas açısı üzerindeki etkisi, Wenzel ve Cassie–Baxter modelleri ile açıklanabilmektedir. Wenzel modeline göre, hidrofobik eğilim gösteren yüzeylerde pürüzlülüğün artması temas açısını daha da yükseltmektedir (Wenzel, 1936). Benzer şekilde Cassie–Baxter yaklaşımı, yüzeyde hapsolan hava ceplerinin sıvı-katı temasını azaltarak temas açısını artırdığını ifade etmektedir (Cassie ve Baxter, 1944). Buna göre özellikle TiSiN kaplamalarda gözlenen daha yüksek temas açısı değerleri hem düşük yüzey enerjisi hem de mikro/nano ölçekli yüzey pürüzlülüğünün birleşik etkisi ile açıklanabilir. Sonuç olarak hem AlTiN hem de TiSiN kaplamaların 316L ve SDSS altlıklar üzerinde yüzey enerjisini

düşürerek ıslanabilirliği azalttığı, TiSiN kaplamaların ise nanokompozit yapısı ve yüzey topografyası etkileri nedeniyle daha belirgin hidrofobik davranış sergilediği belirlenmiştir.

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışmada, 316L östenitik paslanmaz çelik ve Süper Dupleks paslanmaz çelik (UNS S32760) yüzeylerine Katodik Ark Fiziksel Buhar Biriktirme (CA-PVD) yöntemi kullanılarak TiSiN ve AlTiN kaplamalar uygulanmış, elde edilen kaplamaların yapısal, mikroyapısal ve tribolojik özellikleri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda aşağıdaki bulgular elde edilmiştir.

- XRD analizleri sonucunda TiSiN ve AlTiN kaplamaların her iki altlık malzeme üzerinde başarıyla oluşturulduğu belirlenmiştir. 316L paslanmaz çelik numunelerde γ -Fe fazlarının korunduğu ve bunlara ilave olarak TiSiN ve AlTiN kaplamalara ait karakteristik piklerin oluştuğu tespit edilmiştir. Süper dupleks paslanmaz çelik numunelerde ise ferrit (α -Fe) ve östenit (γ -Fe) fazlarının korunduğu, kaplama sonrasında ilave olarak TiSiN ve AlTiN fazlarının oluştuğu belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, uygulanan CA-PVD parametrelerinin başarılı bir kaplama oluşumu sağladığını göstermiştir.
- SEM yüzey görüntüleri incelendiğinde TiSiN ve AlTiN kaplamaların her iki altlık üzerinde homojen, yoğun ve süreklilik gösteren bir yapı oluşturduğu belirlenmiştir. Kaplama yüzeylerinde Katodik Ark PVD yöntemine özgü damlacık oluşumları gözlenmiş olmakla birlikte kaplamalarda çatlak, soyulma veya ayrılma gibi kritik kusurlara rastlanmamıştır. Bu durum kaplama işleminin başarılı şekilde gerçekleştirildiğini göstermektedir.
- Kesit SEM görüntülerinden elde edilen sonuçlara göre tüm kaplamaların yaklaşık 1,8–2,0 μm kalınlığa sahip olduğu belirlenmiştir. Kaplama-altlık ara yüzeylerinde belirgin boşluk, çatlak veya süreksizlik gözlenmemesi, kaplamaların altlık yüzey üzerinde bütüncül ve sürekli bir yapı oluşturduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca kaplama tabakalarının altlık yüzeye düzenli şekilde tutunduğu gözlenmiştir.
- EDS analizleri sonucunda TiSiN kaplamalarda Ti, Si ve N elementlerinin, AlTiN kaplamalarda ise Al, Ti ve N elementlerinin baskın olarak bulunduğu belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar kaplamaların hedeflenen kimyasal bileşimlere sahip olduğunu doğrulamış ve kaplama üretim sürecinin başarıyla gerçekleştirildiğini göstermiştir.
- Mikrosertlik ölçümleri sonucunda kaplama işleminin her iki altlık malzemenin yüzey sertliğini önemli ölçüde artırdığı belirlenmiştir. Özellikle TiSiN kaplamaların AlTiN kaplamalara kıyasla daha yüksek sertlik değerleri sergilediği görülmüştür.

Bu durumun TiSiN kaplamalarda Si katkısı ile oluşan nanokompozit yapıdan ve tane büyümesinin sınırlandırılmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

- Tribolojik test sonuçları incelendiğinde kaplama uygulanmayan numunelerin daha yüksek aşınma oranlarına sahip olduğu belirlenmiştir. TiSiN ve AlTiN kaplamalar aşınma direncini önemli ölçüde artırmış ve yüzeyden uzaklaştırılan malzeme miktarını azaltmıştır. Bu sonuç, sert seramik kaplamaların yüzey deformasyonunu sınırlandırdığını ve yük taşıma kapasitesini artırdığını göstermektedir.
- Sürtünme katsayısı sonuçları değerlendirildiğinde AlTiN kaplamaların TiSiN kaplamalara kıyasla daha düşük sürtünme katsayısı sergilediği belirlenmiştir. Bu durum AlTiN kaplamaların daha kararlı bir tribolojik davranış göstermesine ve yüzey temasındaki enerji kayıplarının azalmasına katkı sağlamıştır.
- Aşınma izi incelemelerinde işlemsiz numunelerde daha belirgin plastik deformasyonlar, oluk oluşumları, malzeme transferleri ve yüzey hasarları gözlenmiştir. Buna karşılık kaplanmış numunelerde aşınma iz genişliklerinin önemli ölçüde azaldığı ve yüzey bütünlüğünün daha iyi korunduğu belirlenmiştir. Bu durum kaplamaların aşınmaya karşı etkin bir koruma sağladığını göstermektedir.
- Süper Dupleks paslanmaz çelik altlık üzerine uygulanan kaplamaların, 316L altlık üzerine uygulanan kaplamalara göre daha yüksek aşınma direnci gösterdiği belirlenmiştir. Bu durum Süper Dupleks paslanmaz çeliğin daha yüksek mekanik dayanımı ve yük taşıma kapasitesi ile ilişkilendirilmektedir.
- Genel olarak değerlendirildiğinde TiSiN kaplamalar yüksek sertlik ve aşınma direnci açısından daha üstün performans sergilerken, AlTiN kaplamalar daha düşük sürtünme katsayıları sayesinde tribolojik açıdan avantaj sağlamıştır. Her iki kaplama türünün de 316L ve Süper Dupleks paslanmaz çeliklerin yüzey performansını önemli ölçüde geliştirdiği belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, TiSiN ve AlTiN kaplamaların aşınma ve sürtünmenin kritik olduğu mühendislik uygulamalarında önemli bir potansiyele sahip olduğunu göstermektedir.

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar doğrultusunda, gelecekte gerçekleştirilecek araştırmalarda TiSiN ve AlTiN kaplamaların yüksek sıcaklık koşullarındaki tribolojik davranışlarının incelenmesi önerilmektedir. Ayrıca bu kaplamaların yalnızca aşınma performansları değil, korozyon ve tribokorozyon davranışları da detaylı olarak araştırılabilir. Farklı kaplama kalınlıklarının mekanik ve tribolojik özellikler üzerindeki etkilerinin belirlenmesi, optimum kaplama parametrelerinin ortaya konulmasına katkı sağlayacaktır.

Bununla birlikte, çok katmanlı TiSiN/AlTiN kaplama sistemleri geliştirilerek tek katmanlı kaplamalarla performans karşılaştırmaları yapılabilir. Kaplamaların altlık malzemeye tutunma davranışlarının daha ayrıntılı değerlendirilmesi amacıyla çizik (scratch) testleri uygulanabilir. Ayrıca endüstriyel çalışma koşullarına daha yakın sonuçlar elde edebilmek için farklı yük, hız ve sıcaklık değerlerinde aşınma deneylerinin gerçekleştirilmesi, bu kaplamaların kullanım alanlarının genişletilmesine yönelik önemli bilgiler sağlayacaktır.

KAYNAKÇA

- Açıkbaş, N. Ç., Kara, F., Mandal, H., Kumar, R., & Basu, B. (2009). Tribolojik uygulamalara yönelik SiAlON seramiklerinin geliştirilmesi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9(3), 197–202.
- Archard, J. (1953). Contact and rubbing of flat surfaces. *Journal of applied physics*, 24(8), 981-988.
- Beake, B. D., Endrino, J. L., Kimpton, C., Fox-Rabinovich, G. S., & Veldhuis, S. C. (2017). *Elevated temperature repetitive micro-scratch testing of AlCrN, TiAlN and AlTiN PVD coatings. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 69, 215–226.
- Beake, B. D., Endrino, J. L., Kimpton, C., Fox-Rabinovich, G. S., & Veldhuis, S. C. (2017). *Elevated temperature repetitive micro-scratch testing of AlCrN, TiAlN and AlTiN PVD coatings. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 69, 215–226.
- Bhushan, B. (2013). *Introduction to tribology* (2nd ed.). Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- Blau, P. J. (2001). The significance and use of the friction coefficient. *Tribology International*, 34(9), 585-591.
- Bobzin, K. (2017). High-performance coatings for cutting tools. *CIRP journal of manufacturing science and technology*, 18, 1-9.
- Borgioli, F. (2024). The expanded phases formed in stainless steels by means of low-temperature thermochemical treatments: a corrosion perspective. *Metals*, 14(12), 1371.
- Callister Jr., W. D., & Rethwisch, D. G. (2020). *Materials science and engineering: An introduction*. John Wiley & Sons.
- Cassie, A. B. D., & Baxter, S. (1944). Wettability of porous surfaces. *Transactions of the Faraday Society*, 40, 546–551.
- Cheng, Y. H., Browne, T., Heckerman, B., & Meletis, E. I. (2010). Mechanical and tribological properties of nanocomposite TiSiN coatings. *Surface and Coatings Technology*, 204(14), 2123-2129.
- Claver, A., Randulfe, J. J., Palacio, J. F., Fernández de Ara, J., Almandoz, E., Montalá, F., ... García, J. A. (2021). Improved adhesion and tribological properties of AlTiN–TiSiN coatings deposited by DCMS and HiPIMS on nitrided tool steels. *Coatings*, 11(10), 1175.

- Claver, A., Randulfe, J. J., Palacio, J. F., Fernández de Ara, J., Almandoz, E., Montalá, F., ...
García, J. A. (2021). Improved adhesion and tribological properties of AlTiN–TiSiN
coatings deposited by DCMS and HiPIMS on nitrided tool steels. *Coatings*, 11(10),
1175.
- Davis, J. R. (Ed.). (1994). *Stainless steels*. ASM International.
- Davis, J. R. (Ed.). (1994). *Stainless steels*. ASM international.
- Demirbüken, Ö. F. (2025). Biyomedikal uygulamalarda kullanılan CoCrMo ve CP-Ti
alaşımları üzerine farklı nitrür kaplamaların tribolojik ve yüzey özellikleri üzerine
etkilerinin incelenmesi. Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi.
- Dutta, S. (2018). Different types and new applications of stainless steel. *Stainless Steel*, 62(5),
86–91.
- Faraji, G., Goodarzi, M., Khosroshahi, R. A., & Zarei-Hanzaki, A. (2018). Effect of pulsed
cathodic arc deposition parameters on microstructure and mechanical properties of
TiSiN coatings. *Surface and Coatings Technology*, 344, 602–612.
- Francis, R., & Byrne, G. (2021). Duplex stainless steels—alloys for the 21st century. *Metals*,
11(5), 836.
- Gontijo, L. C., Machado, R., Miola, E. J., Casteletti, L. C., Alcântara, N. G., & Nascente, P.
A. D. P. (2006). Study of the S phase formed on plasma-nitrided AISI 316L stainless
steel. *Materials Science and Engineering: A*, 431(1-2), 315-321.
- Guha, S., Bandyopadhyay, A., Das, S., & Swain, B. P. (2018, June). Synthesis and
characterization of titanium silicon nitride (TiSiN) thin film: A review. In *IOP
Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 377, No. 1, p. 012181).
IOP Publishing.
- Gunn, R. N. (1997). *Duplex stainless steels: Microstructure, properties and applications*.
Cambridge: Woodhead Publishing.
- Holmberg, K., & Matthews, A. (2009). Coating tribology: properties, mechanisms, techniques
and applications in surface engineering (Vol. 56). Elsevier.
- Holmberg, K., & Matthews, A. (2009). Coating tribology: properties, mechanisms,
techniques and applications in surface engineering (Vol. 56). Elsevier.
- Holmberg, K., Andersson, P., & Erdemir, A. (2012). Global energy consumption due to friction
in passenger cars. *Tribology International*, 47, 221-234.
- Hörling, A., Hultman, L., Odén, M., Sjöln, J., & Karlsson, L. (2005). *Thermal stability of arc
evaporated high aluminium-content Ti–Al–N thin films*. *Journal of Vacuum Science &
Technology A*, 23(4), 847–852.

- Hutchings, I., & Shipway, P. (2017). *Tribology: Friction and wear of engineering materials*. Oxford, UK: Butterworth-Heinemann.
- Komarov, F. F., Konstantinov, S. V., & Pilko, V. V. (2014). Formation of nanostructured TiAlN, TiCrN, and TiSiN coatings using reactive magnetron sputtering. *Journal of Friction and Wear*, 35, 215–223.
- Komarov, F. F., Konstantinov, S. V., & Pilko, V. V. (2014). *Formation of nanostructured TiAlN, TiCrN, and TiSiN coatings using reactive magnetron sputtering*. *Journal of Friction and Wear*, 35, 215–223.
- Kucharska, B., Czarniak, P., Kulikowski, K., Krawczyńska, A., Roźniatowski, K., Kubacki, J., ... Sobiecki, J. R. (2022). Comparison study of PVD coatings: TiN/AlTiN, TiN and TiAlSiN used in wood machining. *Materials*, 15(20), 7159.
- Kwok, D. Y., & Neumann, A. W. (1999). Contact angle measurement and contact angle interpretation. *Advances in Colloid and Interface Science*, 81(3), 167–249.
- Levy, A. V. (1995). *Solid particle erosion and erosion-corrosion of materials*. Materials Park, OH: ASM International.
- Leyens, C., & Peters, M. (2003). *Titanium and titanium alloys: Fundamentals and applications*. Wiley-VCH.
- Leyland, A., & Matthews, A. (2000). On the significance of the H/E ratio in wear control: A nanocomposite coating approach to optimized tribological behaviour. *Wear*, 246(1–2), 1–11.
- Li, B., Xu, Y., Rao, G., Wang, Q., Zheng, J., Zhu, R., & Chen, Y. (2023). Tribological properties and cutting performance of AlTiN coatings with various geometric structures. *Coatings*, 13(2), 402.
- Lin, J., Wei, R., Bitsis, D. C., & Lee, P. M. (2016). Development and evaluation of low friction TiSiCN nanocomposite coatings for piston ring applications. *Surface and Coatings Technology*, 298, 121–131.
- Lippold, J. C., & Kotecki, D. J. (2005). *Welding metallurgy and weldability of stainless steels*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- Locks, B. M., da Silva, L. R. R., Klocke, F., & Denkena, B. (2024). Surface integrity and corrosion behavior of super duplex stainless steel machined with multilayer AlCrN/TiSiN coated tools. *Wear*, 538–539, 205064.
- Locks, E., He, Q., DePaiva, J. M., Guimaraes, M., Arif, A. F., Veldhuis, S. C., & Kish, J. R. (2024). Investigating the impact of physical vapour deposition (PVD)-coated cutting

- tools on stress corrosion cracking susceptibility in turning super duplex stainless steel. *Coatings*, 14(3), 290.
- Mattox, D. M. (2010). *Handbook of physical vapor deposition (PVD) processing*. William Andrew.
- Mattox, D. M. (2010). *Handbook of physical vapor deposition (PVD) processing*. William Andrew.
- Mayrhofer, P. H., Mitterer, C., Hultman, L., & Clemens, H. (2006). Protective hard coatings. *Progress in Materials Science*, 51(8), 1032–1114.
- Mischler, S. (2008). Triboelectrochemical techniques and interpretation methods in tribocorrosion. *Tribology International*, 41(7), 573–583.
- Movassagh-Alanagh, F., & Mahdavi, M. (2020). Improving wear and corrosion resistance of AISI 304 stainless steel by a multilayered nanocomposite Ti/TiN/TiSiN coating. *Surfaces and Interfaces*, 18, 100428.
- Movassagh-Alanagh, F., & Mahdavi, M. (2020). Improving wear and corrosion resistance of AISI 304 stainless steel by a multilayered nanocomposite Ti/TiN/TiSiN coating. *Surfaces and Interfaces*, 18, 100428.
- Musil, J. (2000). Hard and superhard nanocomposite coatings. *Surface and coatings technology*, 125(1-3), 322-330.
- Musil, J. (2000). Hard nano composite coatings: Thermal stability, oxidation resistance and toughness. *Surface and Coatings Technology*, 125(1–3), 322–330.
- PalDey, S. C. D. S., & Deevi, S. C. (2003). Single layer and multilayer wear resistant coatings of (Ti, Al) N: a review. *Materials Science and Engineering: A*, 342(1-2), 58-79.
- PalDey, S. C. D. S., & Deevi, S. C. (2003). Single layer and multilayer wear resistant coatings of (Ti, Al) N: a review. *Materials Science and Engineering: A*, 342(1-2), 58-79.
- Papavinasam, S. (2013). *Corrosion control in the oil and gas industry*. Oxford, UK: Elsevier
- Paulraj, P., & Garg, R. (2015). İntermetalik fazların dubleks paslanmaz çelik ve süper dubleks paslanmaz çeliğin korozyon davranışı ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisi. *Bilim ve Teknolojideki Gelişmeler. Araştırma Dergisi*, 9 (27).
- Paulraj, P., & Garg, R. (2015). Effect of intermetallic phases on corrosion behavior and mechanical properties of duplex stainless steels: A review. *Materials Science and Engineering: A*, 634, 1–10.
- Petkov, N., Bakalova, T., Cholakova, T., Bahchedzhiev, H., Louda, P., Ryšánek, P., & Kejzlar, P. (2017). Study of surface morphology, structure, mechanical and tribological

- properties of an AlSiN coating obtained by the cathodic arc deposition method. *Superlattices and Microstructures*, 109, 402–413.
- Petkov, N., Bakalova, T., Cholakova, T., Bahchedzhiev, H., Louda, P., Ryšánek, P., & Kejzlar, P. (2017). Study of surface morphology, structure, mechanical and tribological properties of an AlSiN coating obtained by the cathodic arc deposition method. *Superlattices and Microstructures*, 109, 402–413.
- Rabinowicz, E. (1995). *Friction and wear of materials* (2nd ed.). New York, NY: John Wiley & Sons.
- Rajaguru, J., & Arunachalam, N. (2017). Coated tool performance in dry turning of super duplex stainless steel. *Procedia Manufacturing*, 10, 601–611.
- Parsi, P. K., Kotha, R. S., Parsi, P. K., Routhu, T., Pandey, S., & Dwivedy, M. (2020). Machinability evaluation of coated carbide inserts in turning of super-duplex stainless steel. *SN Applied Sciences*, 2, 1–19.
- Rajaguru, J., & Arunachalam, R. (2017). Performance of PVD-coated carbide tools during machining of super duplex stainless steel. *Journal of Manufacturing Processes*, 28, 348–357.
- Reed-Hill, R. E., & Abbaschian, R. (1992). *Physical metallurgy principles* (3rd ed.). Boston, MA: PWS-Kent.
- Roy, M., Saha, S., & Valleti, K. (2020). Microstructure and Wear of Cathodic Arc Physical Vapour Deposited on TiAlN, TiCrN and n-TiAlN/ α -Si₃N₄ Films. *Defence Science Journal*, 70(6).
- Santecchia, E., Hamouda, A. M. S., Musharavati, F., Zalnezhad, E., Cabibbo, M., & El Mehtedi, M. (2015). *Wear resistance investigation of physical vapor deposition (PVD) coatings on different substrates*. *Ceramics International*, 41(9), 10349–10379.
- Santecchia, E., Hamouda, A. M. S., Musharavati, F., Zalnezhad, E., & Cabibbo, M. (2015). A review on the wear behaviour of TiAlSiN coatings. *Ceramics International*, 41(9), 10349–10379.
- Sedriks, A. J. (1996). *Corrosion of stainless steels*. John Wiley & Sons.
- Sedriks, A. J. (1996). *Corrosion of stainless steels*. John Wiley & Sons.
- Vepřek, S., & Vepřek-Heijman, M. G. J. (2008). *Industrial applications of superhard nanocomposite coatings*. *Surface and Coatings Technology*, 202(21), 5063–5073.
- Veprek, S., & Veprek-Heijman, M. J. (2008). Industrial applications of superhard nanocomposite coatings. *Surface and Coatings Technology*, 202(21), 5063–5073.

- Vepřek, S., & Vepřek-Heijman, M. G. J. (2008). Industrial applications of superhard nano composite coatings. *Surface and Coatings Technology*, 202(21), 5063–5073.
- Voevodin, A. A., & Zabinski, J. S. (2000). Super tough wear-resistant coatings with ‘chameleon’ surface adaptation. *Thin Solid Films*, 370(1-2), 223-231.
- Wenzel, R. N. (1936). Resistance of solid surface to wetting by water. *Industrial & Engineering Chemistry*, 28(8), 988–994.
- Zum Gahr, K. H. (1987). *Microstructure and wear of materials*. Amsterdam: Elsevier.

EKLER

Ek-1. Tez Çalışması Süresince Yapılan Akademik Çalışmalar

Aslan Çakır, M., & Gürer, H. (2025). Seçici lazer ergitme yöntemi ile üretilen metalik biyomalzemelerin korozyon özellikleri. İçinde S. Bardak (Ed.), *Makine mühendisliği alanında araştırmalar ve değerlendirmeler* (Bölüm 1, ss. 1–22). Ankara: Gece Kitaplığı. ISBN: 978-625-388-238-9

Gürer, H., & Aslan Çakır, M. (2026, Mayıs). *[Bildirinizin tam başlığı]*. 25th International Istanbul Scientific Research Congress on Life, Engineering, Architecture and Mathematical Sciences, İstanbul, Türkiye. İçinde *Proceedings Book* (ss. xx-xx). BZT Turan Publishing House. DOI: 10.30546/19023.978-9952-610-58-1.2026.100.1118.