



**BİLYELİ DÖVME VE DUBLEKS KAPLAMA İŞLEMİ
UYGULANMIŞ Al7075 ALAŞIMININ YAPISAL,
MEKANİK VE YÜZEY ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ**

Behzad GHASEMI PARVIN

Danışman: Prof. Dr. Yaşar TOTİK

Doktora Tezi

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

2025

(Her hakkı saklıdır.)

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**BİLYELİ DÖVME VE DUBLEKS KAPLAMA İŞLEMİ UYGULANMIŞ Al7075
ALAŞIMININ YAPISAL, MEKANİK VE YÜZEY ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ**

(Investigation of Structural, Mechanical and Surface Properties of Shot Peening and Duplex
Surface Coating Processed Al7075 Alloy)

DOKTORA TEZİ

Behzad GHASEMI PARVIN

Danışman: Prof. Dr. Yaşar TOTİK

Erzurum
Mayıs, 2025

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü

TEZ KABUL VE ONAY TUTANAĞI

Bilyeli Dövme ve Dupleks Kaplama İşlemi Uygulanmış Al7075 Alaşımının Yapısal, Mekanik ve
Yüzey Özelliklerinin İncelenmesi

Prof. Dr. Yaşar TOTİK danışmanlığında, Behzad GHASEMI PARVIN tarafından hazırlanan bu çalışma, 15/05/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Konstruksiyon ve İmalat Bilim Dalı'nda Doktora tezi olarak **oybirliği / oy çokluğu (.../...)** ile kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı:	Prof. Dr. Recep SADELER <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
Danışman:	Prof. Dr. Yaşar TOTİK <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
Jüri Üyesi:	Prof. Dr. Burak DİKİCİ <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
Jüri Üyesi:	Prof. Dr. Ebru Emine ŞÜKÜROĞLU <i>Gümüşhane Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
Jüri Üyesi:	Prof. Dr. Hikmet ÇİÇEK <i>Erzurum Teknik Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır

Enstitü Yönetim
Kurulunun .../.../.... tarih
ve sayılı kararı.

Bu tezin Atatürk Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili maddelerinde belirtilen şartları yerine getirdiğini onaylarım.

Prof.Dr. Alper NUHOĞLU

Enstitü Müdürü

Aslı Islak İmzalıdır

Bu çalışma Atatürk Üniversitesi BAP projeleri kapsamında desteklenmiştir.
Proje No: FDK-2021-9586

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**Graduate School of Natural and
Applied Sciences**T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ REKTÖRLÜĞÜ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ****ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU**

Doktora Tezi olarak Prof. Dr. Yaşar TOTİK danışmanlığında sunulan “Bilyeli Dövme ve Dubleks Kaplama İşlemi Uygulanmış Al7075 Alaşımının Yapısal, Mekanik ve Yüzey Özelliklerinin İncelenmesi” başlıklı çalışmanın tarafımızdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını, yararlanılan eserlerin kaynakçada gösterildiğini, Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından belirlenmiş olan Turnitin Programı benzerlik oranlarının aşılmadığını ve aşağıdaki oranlarda olduğunu beyan ederiz.

Tez Bölümleri	Tezin Benzerlik Oranı (%)	Maksimum Oran (%)
Giriş	1	30
Kuramsal Temeller	3	30
Materyal ve Metot	13	35
Araştırma Bulguları ve Tartışma	2	20
Sonuçlar ve Öneriler	0	20
Tezin Geneli	5	25

Not: Yedi kelimeye kadar benzerlikler ile Başlık, Kaynakça, İçindekiler, Teşekkür, Dizin ve Ekler kısımları tarama dışı bırakılabilir. Yukarıdaki azami benzerlik oranları yanında tek bir kaynaktan olan benzerlik oranlarının %5'den büyük olmaması gerekir.

Sunulan bilgilerin doğru olduğunu, aksi halde doğacak hukuki sorumlulukları kabul ettiğimizi beyan ederiz.

Tez Yazarı (Öğrenci)	Tez Danışmanı
Behzad GHASEMI PARVIN	Prof. Dr. Yaşar TOTİK
15.5.2025	15.5.2025
İmza: Aslı Islak İmzalıdır	İmza: Aslı Islak İmzalıdır

* Tez ile ilgili YÖKTEZ’de yayınlamasına ilişkin bir engelleme var ise aşağıdaki alanı doldurunuz.

☐ Tezle ilgili patent başvurusu yapılması / patent alma sürecinin devam etmesi sebebiyle Enstitü Yönetim Kurulunun/....../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 2 (iki) yıl süreyle engellenmiştir.

☐ Enstitü Yönetim Kurulunun/....../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 6 (altı) ay süreyle engellenmiştir.

TEŞEKKÜR

Tezimin bu aşamaya gelmesinde büyük katkıları bulunan değerli hocam Prof. Dr. Yaşar TOTİK'e en içten teşekkürlerimi sunarım. Tezimin her aşamasında göstermiş olduğu destek, sabır ve rehberlik için kendisine minnettarım.

Ayrıca, Mühendislik Fakültesi Dekanlığı görevini yürüten ve tezimin gerçekleştirilmesi sürecinde desteğini esirgemeyen Prof. Dr. İhsan EFEOĞLU'na teşekkür ederim.

Bu çalışmanın yürütülmesinde sağladığı katkı ve desteklerinden dolayı Dr. Öğr. Üyesi Gökhan GÜLTEN'e de ayrıca teşekkür ederim.

Çalışmalarım süresince değerli bilgi ve imkanlarını benimle paylaşan, aynı zamanda manevi destekleriyle yanımda olan Sayın Prof. Dr. Ebru Emine ŞÜKÜROĞLU'na, Prof. Dr. Burak DİKİCİ'ye, Arş. Gör. Dr. Banu YAYLALI'ya, Dr. Öğr. Üyesi Taha Alper YILMAZ ve Mustafa YEŞİLYURT'a en içten şükranlarımı sunarım.

Deneysel çalışmalarım süresince ihtiyaç duyulan teknik altyapının sağlanmasındaki katkılarından dolayı Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümüne ve Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümüne teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışması, Atatürk Üniversitesi Bilimsel Araştırma Koordinatörlüğü tarafından “FDK-2021-9586” proje koduyla desteklenen “Mekanik ve Dubleks Yüzey İşlemine Tabi Tutulmuş Al7075 Alaşımının Fiziksel, Mekanik ve Yüzey Özelliklerinin Araştırılması” başlıklı proje kapsamında gerçekleştirilmiştir.

Son olarak, hayatım boyunca yanımda olan, desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen ve varlıklarıyla bana güç veren sevgili anneme, babama, abime ve özellikle değerli ablam Leila Ghasemi Parvin'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Behzad GHASEMI PARVIN

ÖZET

DOKTORA TEZİ

BİLYELİ DÖVME VE DUBLEKS KAPLAMA İŞLEMİ UYGULANMIŞ Al7075 ALAŞIMININ YAPISAL, MEKANİK VE YÜZEY ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Behzad GHASEMI PARVIN

Danışman: Prof. Dr. Yaşar TOTİK

Amaç: Bu çalışmada, Al 7075 tabanlı malzeme önce bilyeli dövme işlemine tabi tutulmuş, ardından sırasıyla Plazma Elektrolitik Oksidasyon (PEO) ve fiziksel buhar kaplama yöntemlerinden (PVD) kapalı alan dengesiz magnetron sıçratma tekniği (CFUBMS) kullanılarak dubleks yapıda bir kaplama oluşturulmuştur. Uygulanan bu yüzey işlemleriyle, numunelerin mekanik, tribolojik ve korozyon davranışlarının iyileştirilmesi amaçlanmıştır.

Yöntem: Bu çalışmada, Al 7075 tabanlı malzeme yüzeylerine, S110 ve S230 olmak üzere iki farklı bilye çapı ile 8A ve 10A Almen şiddetlerinde bilyeli dövme işlemi uygulanmıştır. Ardından, Taguchi ortogonal dizisine göre belirlenen farklı kaplama parametreleri kullanılarak, bilyeli dövme işlemine tabi tutulmuş numunelere kapalı alan dengesiz magnetron sıçratma tekniği (CFUBMS) TiN ve PEO ile CFUBMS yöntemleri kullanarak Al₂O₃/TiN tabakası büyütülmüştür. Elde edilen numunelerin yapısal, mekanik, tribolojik ve korozyon özellikleri detaylı bir şekilde incelenmiştir.

Bulgular: Bilyeli dövme işlemine tabi tutulmuş Al7075 alaşımı üzerinde, Taguchi ortogonal dizisine göre belirlenen farklı kaplama parametreleriyle büyütülen TiN ve dubleks PEO/TiN kaplamaların; mekanik, tribolojik ve korozyon özellikleri üzerinde etkili olduğu gözlemlenmiştir. S230 bilye çapı ve 10A Almen şiddeti ile gerçekleştirilen (N4+R3) dubleks yüzey kaplama işleminde, maksimum sertlik değeri 3122 HV olarak elde edilmiştir. Aynı işlem parametreleri altında (N4+R3) bilyeli dövme sonrası uygulanan TiN kaplamada ise en iyi sürtünme katsayısı değeri 0,18 olarak ölçülmüştür. Ayrıca, S230 bilye çapı ve 10A Almen şiddeti ile uygulanan (N4+R3) dubleks kaplama, maksimum 37 N adezyon kuvvetine ulaşmıştır. Öte yandan, S110 bilye çapı ve 8A Almen şiddeti ile uygulanan (N1+R3) dubleks kaplamada, en düşük korozyon akım yoğunluğu 4.68×10^{-8} $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ olarak elde edilmiş ve en yüksek düzeyde korozyon direnci sağladığı tespit edilmiştir. Dubleks kaplama (SP+PEO/TiN) işlem görmüş numunelerin, SP+PVD işlem görmüş numunelere kıyasla korozyon direncinin önemli ölçüde daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

Sonuç: Yapılan analizler ve deneyler sonucunda, tasarlanan yüzey işlemlerinin mekanik, tribolojik ve korozyon direncini belirgin bir şekilde iyileştirdiği gözlemlenmiştir. Optimize edilen yüzey kaplama parametreleri ile geliştirilen bilyeli dövme + PEO/TiN dubleks kaplama işleminin, özellikle havacılık, otomotiv ve enerji gibi kritik sektörlerdeki uygulamalar için umut verici olduğu ortaya konmuştur.

Anahtar Kelimeler: Al 7075, Bilyeli dövme, PEO, CFUBMS, Korozyon, Aşınma, İnce film

Mayıs 2025, 159 sayfa

ABSTRACT

DOCTORAL DISSERTATION

INVESTIGATION OF STRUCTURAL, MECHANICAL AND SURFACE PROPERTIES OF SHOT PEENING AND DUPLEX SURFACE COATING PROCESSED AL7075 ALLOY

Behzad GHASEMI PARVIN

Supervisor: Prof. Dr. Yaşar TOTIK

Purpose: In this study, the Al 7075 substrate was first subjected to shot peening. Then, a duplex coating was formed using the closed field unbalanced magnetron sputtering technique (CFUBMS) from Plasma Electrolytic Oxidation (PEO) and physical vapor deposition methods (PVD), respectively. These surface treatments aim to improve the mechanical, tribological, and corrosion behaviours of the samples.

Method: In this study, two different ball diameters, S110 and S230, and 8A and 10A Almen intensities were applied to the Al 7075 based material surfaces. Then, using different coating parameters determined according to the Taguchi orthogonal array, Al₂O₃/TiN layer was grown on the shot peened samples using closed field unbalanced magnetron sputtering technique (CFUBMS) TiN and CFUBMS methods with PEO. The structural, mechanical, tribological and corrosion properties of the obtained samples were investigated in detail.

Findings: TiN and duplex PEO/TiN coatings grown on Al7075 alloy subjected to shot peening process with different coating parameters determined according to Taguchi orthogonal array were observed to be effective on mechanical, tribological and corrosion properties. In the (N4+R3) duplex surface coating process performed with S230 shot diameter and 10A Almen intensity, the maximum hardness value was obtained as 3122 HV. Under the same process parameters, the best friction coefficient value was measured as 0.18 in TiN coating applied after (N4+R3) shot peening. In addition, (N4+R3) duplex coating applied with S230 shot diameter and 10A Almen intensity reached a maximum adhesion force of 37 N. On the other hand, the lowest corrosion current density of $4.68 \times 10^{-8} \mu\text{A}/\text{cm}^2$ was obtained in the (N1+R3) duplex coating applied with S110 shot diameter and 8A Almen intensity and was found to provide the highest level of corrosion resistance. It was found that the corrosion resistance of the duplex coating (SP+PEO/TiN) treated samples was significantly higher compared to the SP+PVD treated samples.

Results: As a result of the analyses and experiments, it was observed that the designed surface treatments significantly improved the mechanical, tribological and corrosion resistance. It was revealed that the shot peening + PEO/TiN duplex coating process developed with the optimised surface coating parameters is promising for applications in critical sectors such as aerospace, automotive and energy.

Keywords: Al 7075, Shot peening, PEO, CFUBMS, Corrosion, Wear, Thin film

May 2025, 159 pages

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY TUTANAĞI.....	i
ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TABLolar DİZİNİ.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ	xiv
GİRİŞ.....	1
KURAMSAL TEMELLER.....	7
Yaygın Olarak Kullanılan Alüminyum Alaşımları	8
Alüminyum alaşımlarının önemi ve kullanım alanları.....	10
Korozyon.....	11
Korozyon türleri.....	14
Korozyon oluşumunu önleme yöntemleri	18
Aşınma	19
Aşınma test yöntemleri	23
Adezyon	25
Adezyon türleri.....	26
Adezyon test yöntemleri	29
Alüminyum Alaşımlarının Yüzey Modifikasyonu İçin Yapılan İşlemler.....	32
Bilye cilalama (Ball Burnishing)	33
Lazer şok işleme (LSP)	33
Soğuk genleşme tekniği	34
Bilyeli Dövme İşlemi (Shot Peening)	35
Bilyeli dövme makinaları ve yöntemleri.....	37
Bilyeli dövme işleminde kullanılan bilyelerin çeşitleri ve özellikleri	38
Bilyeli dövme işleminde etkili parametreler	39
Bilyeli dövme yönteminin ana parametreleri.....	39
Almen şiddeti	40
Plazma Elektrolit Oksidasyonu (PEO).....	43
Plazma elektrolit oksidasyonu (PEO) yönteminin kullanım alanları.....	46
Plazma elektrolit oksidasyonu (PEO) yönteminin avantajları	48

Fiziksel Buhar Biriktirme (PVD)	49
Fiziksel buhar biriktirme (PVD) kaplama yöntemleri	51
Manyetik alanda sıçratma tekniği	55
Kapalı alan dengesiz manyetik alanda sıçratma tekniği (CFUBMS).....	56
Dubleks Kaplama	59
Dubleks kaplamaların özellikleri ve uygulamaları	60
Dubleks kaplama yöntemlerinin ortak mekanizmaları	61
Taguchi Deneysel Tasarım Metodu	61
Taguchi yönteminin temel prensipleri	62
Taguchi yönteminin uygulama alanları.....	62
MATERYAL VE METOD	64
Numunelerin Metalografik Olarak Hazırlanması.....	64
Bilyeli Dövme İşlemi	65
PEO Yöntemi ile Al_2O_3 ara Tabakasının Büyütülmesi.....	65
CFUBMS Yöntemi ile TiN Kaplamanın Büyütülmesi	67
Yapısal Özelliklerin Araştırılması.....	70
XRD analizi.....	71
SEM analizi.....	71
Mekanik Özelliklerin Araştırılması	72
Sertlik deneyi	72
Sürtünme-Aşınma (Triboloji) deneyi.....	73
Scratch (Çizik) deneyi.....	74
Korozyon Deneyi	74
ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	76
Bilyeli Dövme İşlemine Tabi Tutulmuş Al7075 Alaşımının ve CFUBMS Yöntemi ile Büyütülen TiN Kaplamaların Fiziksel, Mekanik ve Yüzey Özelliklerinin Araştırılması.....	76
Mikroyapı Test Bulguları ve Tartışma.....	76
Yüzey topografi ve pürüzlülüğü.....	81
Sertlik test sonuçları.....	84
Triboloji test sonuçları	85
Çizik (Scratch) test sonuçları	90
Korozyon test sonuçları.....	93

Bilyeli Dövmeye İşlemine Tabi Tutulmuş Al7075 Alaşımının Yüzeyinde Büyütülen Dubleks PEO/TiN Kaplamaların Fiziksel, Mekanik ve Yüzey Özelliklerinin Araştırılması.....	100
Mikroyapı Test Bulguları ve Tartışma	101
Yüzey topografi ve pürüzlülüğü.....	102
Sertlik test sonuçları.....	107
Triboloji test sonuçları	109
Çizik (Scratch) Testi Sonuçları	114
Korozyon test sonucu.....	116
SONUÇLAR VE ÖNERİLER	123
Öneriler	130
KAYNAKÇA	132
ÖZGEÇMİŞ.....	142

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Bilye Standartları (Unal, 2016)	38
Tablo 2. Almen Şeritlerinin Standartlaştırılmış Özellikleri.....	41
Tablo 3. Al7075 Alüminyum Alaşımının Kimyasal Kompozisyonu	64
Tablo 4. Paslanmaz Çelik Bilye Sertifika Bilgileri.....	65
Tablo 5. Bilyeli Dövme Parametreleri	65
Tablo 6. PEO İşlemi İçin Kaplama Parametreleri ve Seviyeleri	67
Tablo 7. PEO Yöntemi Kullanılarak Kaplanan Al7075 Numunelerin Scratch (Çizik) Test Sonuçlar	67
Tablo 8. Tin İnce Film Biriktirme Parametreleri.....	69
Tablo 9. Tin İnce Film Biriktirme İşleminde Kullanılan Deney Tasarımı	69
Tablo 10. Ortalama Tane Boyutu Ölçümü.....	79
Tablo 11. İşlemsiz ve Bilyeli Dövme İşlemi Uygulanmış Al 7075 Numunelerin Korozyon Test Sonuçları	94
Tablo 12. İşlemsiz ve SP+PVD İşlemi Uygulanmış Al 7075 Numunelerin Korozyon Test Sonuçları	97
Tablo 13. İşlemsiz ve SP+PEO İşlemi Uygulanmış Al 7075 Numunelerin Korozyon Test Sonuçları	117
Tablo 14. İşlemsiz ve SP+Dubleks Kaplama İşlemi Uygulanmış Al 7075 Numunelerin Korozyon Test Sonuçları	119

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Al 7075 alaşımının farklı endüstrilerdeki uygulamaları (Maity et al., 2024)	10
Şekil 2. Korozyona uğramış alüminyum alaşımı (Z. Xie et al., 2023).....	14
Şekil 3. En yaygın korozyon türleri (Farooq et al., 2022).....	14
Şekil 4. Üniform korozyon.....	16
Şekil 5. Galvanik korozyon ve şematik gösterimi (Anonymous, 2024)	16
Şekil 6. Çukurcuk korozyonu ve şematik gösterimi (Anonymous, 2022)	17
Şekil 7. Taneler arası korozyon ve şematik gösterimi (Anonymous, 2021)	18
Şekil 8. Aşınma türleri (Anonymous, 2020)	20
Şekil 9. Pin-on-Disk testi (Morshed et al., 2021).....	24
Şekil 10. Ball-on-Disk testi (Morshed et al., 2021)	24
Şekil 11. Taber aşınma test cihazı (Karkimya, 2023)	25
Şekil 12. Mekanik adezyon mekanizmasını gösteren mikroyapı (Ebnesajjad and Ebnesajjad, 2013)	27
Şekil 13. Kimyasal adezyon mekanizmasını gösteren mikroyapı (Ebnesajjad and Ebnesajjad, 2013)	28
Şekil 14. Difüzyon adezyon mekanizmasını gösteren mikroyapı (Ebnesajjad and Ebnesajjad, 2013)	28
Şekil 15. Elektrostatik adezyon mekanizması (Ebnesajjad and Ebnesajjad, 2013)	29
Şekil 16. Çekme testi mekanizması (Anonymous, 2023)	30
Şekil 17. Bant testi mekanizması (Anonymous, 2023)	30
Şekil 18. Çizik testi mekanizması (Demirci, 2014).....	32
Şekil 19. Bilye cilalama işlemi (Alshareef et al., 2020).....	33
Şekil 20. Lazer şok işleme prensibinin şematik gösterimi (C. Zhang et al., 2021).....	34
Şekil 21. Bölünmüş soğuk genleşme işlemi (J. Li & Zhao, 2012).....	35
Şekil 22. Bilyeli dövme için kullanılan düzeneğin şematik gösterimi	36
Şekil 23. Bilyeli dövme işleminin temsili gösterimi (Wagner, 2003).....	37
Şekil 24. Bilyeli dövme makinaları kategorileri	37
Şekil 25. Bilye çeşitleri (Unal, 2016)	38
Şekil 26. Almen şiddetinin ölçüm sistemi (Karahana & İnce, 2015)	41
Şekil 27. C, N ve A şerit kalınlıkları (Brooks, 2016).....	42
Şekil 28. Almen testi sonrasında şeritte meydana gelen deformasyon (Brooks, 2016).....	42

Şekil 29. PEO sistem ünitesinin şematik gösterimi (Yılmaz et al., 2016)	44
Şekil 30. PEO kaplamasının kesit görüntüsü	46
Şekil 31. PEO kaplamasının gözenekli yüzeyi.....	46
Şekil 32. PEO kaplama yönteminin kullanım alanları	47
Şekil 33. PVD kaplama yöntemi ve uygulama alanları.....	50
Şekil 34. En yaygın PVD kaplama türleri	51
Şekil 35. PVD buharlaştırma kaplama mekanizması (Y. Zhang et al., 2022).....	52
Şekil 36. PVD sıçratma kaplama mekanizması (Y. Zhang et al., 2022)	52
Şekil 37. İyon kaplama mekanizması (Anonymous, 2018).....	53
Şekil 38. Katodik ark deşarj biriktirme mekanizması (El-Awadi, 2023).....	54
Şekil 39. Moleküler iyon kaplama mekanizması (G. Wu et al., 2022)	54
Şekil 40. Manyetik alanda sıçratma tekniğın gösterimi (Oktay, 2007).....	56
Şekil 41. Kapalı alan dengesiz manyetik alanda sıçratma (CFUBMS) sistemi	59
Şekil 42. Dubleks kaplama PEO/TiN görüntüsü.....	60
Şekil 43. Dubleks kaplama mekanizması.....	61
Şekil 44. Taghuchi deney tasarım aşamaları	62
Şekil 45. Al7075 numune boyutları	64
Şekil 46. Kesme cihazı	64
Şekil 47. Bilyeli dövme işleminden sonra numune yüzeyi	65
Şekil 48. PEO işleminde kullanılan sistem	66
Şekil 49. Teer Coatings Ltd. Şirketi (PLASMAG 550) sistemi.....	68
Şekil 50. a) Kapalı alan dengesiz manyetik sıçratma (CFUBMS) kaplama ünitesinin şematik gösterimi b) bilyeli dövme işlemine tabi tutulmuş daha sonra PVD yöntemi ile kullanarak TiN kaplanmış c) Bilyeli dövme işlemine tabi tutulmuş ardından dubleks Al ₂ O ₃ /TiN kaplama şematik gösterimi	68
Şekil 51. Al 7075 numune yüzeyine tasarlanan işlem sıralaması	69
Şekil 52. Numune yüzeyleri a) Al 7075 b) Bilyeli dövme c) Bilyeli dövme işlemi uygulanmış daha sonra TiN kaplanmış d) Bilyeli dövme işlemi uygulanmış daha sonra PEO yöntemi kullanılarak kaplanmış e) Bilyeli dövme işlemi uygulanmış daha sonra dubleks PEO/TiN kaplanmış.....	70
Şekil 53. Optik mikroskop	70
Şekil 54. Profilmetre cihazı	70
Şekil 55. XRD cihazı.....	71
Şekil 56. ZEISS EVO LS10 SEM cihazı	72
Şekil 57. JEOL JSM-6060LV SEM cihazı.....	72

Şekil 58. Sertlik deney cihazı	73
Şekil 59. CSM yüksek sıcaklık tribometre cihazı	73
Şekil 60. Scratch (Çizik) test cihazı	74
Şekil 61. Versa-Stat korozyon test cihazı.....	75
Şekil 62. a) Bilyeli dövme işlemi uygulanmış numunelerin XRD sonuçları ve b) Bilyeli dövme işlemi uygulanmış daha sonra TiN kaplanmış numunelerin XRD sonuçları	77
Şekil 63. R1–R4, TiN ince filmlerin SEM görüntüleri	79
Şekil 64. TiN ince filmlerden elde edilen EDS sonuçları	80
Şekil 65. İşlem görmemiş Al 7075 taban malzeme ve bilyeli dövme işlemi uygulanmış numunelerin yüzey topoğrafı görüntüleri	81
Şekil 66. Bilyeli dövme işlemi uygulanmış ve TiN ile kaplanmış Al 7075 numunelerin yüzey topoğrafı görüntüleri, a) R1- SP+PVD, b) R2-SP+PVD, c) R3-SP+PVD, d) R4-SP+PVD	82
Şekil 67. İşlem görmemiş, bilyeli dövme işlemi uygulanmış ve TiN kaplanmış Al 7075 numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri, a) R1-SP+PVD, b) R2-SP+PVD, c) R3-SP+PVD, d) R4-SP+PVD	83
Şekil 68. İşlem görmemiş, bilyeli dövme işlemi uygulanmış ve TiN kaplanmış Al7075 numunelerin mikrosertlik (HV) değerleri, a) R1-SP+TiN, b) R2-SP+TiN, c) R3-SP+TiN, d) R4-SP+TiN	84
Şekil 69. Bilyeli dövme işlemi uygulanmış Al7075 numunelerin pin-on-disk test sonuçları, a) sürtünme katsayısı grafikleri, b) numunelerin yüzey topografisi, c) aşınma izi, d) temizlenmemiş pin OM görüntüleri	86
Şekil 70. Bilyeli dövme işlemi uygulanmış ve daha sonra TiN (R1-R4) kaplanmış numunelerin pin-on-disk test sonuçları, a) sürtünme katsayısı grafikleri, b) numunelerin yüzey topografisi, c) aşınma izi, d) temizlenmemiş pin OM görüntüleri	88
Şekil 71. Bilyeli dövme işlemi uygulanmış ve daha sonra TiN (R1-R4) kaplanmış numunelerin scratch (Çizik) test sonuçları.....	93
Şekil 72. İşlemsiz ve bilyeli dövme işlemi uygulanmış Al 7075 numunelerin potansiyodinamik polarizasyon eğrileri	94
Şekil 73. a) İşlemsiz, b) bilyeli dövme işlemi uygulanmış (N2), c) bilyeli dövme işlemi uygulanmış (N3) Al 7075 numunelerin EDS elementel analiz sonuçları	94

Şekil 74. İşlemsiz ve SP+PVD işlemi uygulanmış Al 7075 numunelerin potansiyodinamik polarizasyon eğrileri, a) R1-SP+PVD, b) R2-SP+PVD, c) R3- SP+PVD, d) R4-SP+PVD	96
Şekil 75. SP+PVD işlemi uygulanmış Al 7075 numunelerin EDS elemental analiz sonuçları	98
Şekil 76. Bilyeli dövme işlemi uygulanmış ve ardından dubleks PEO/TiN kaplamaların şematik görüntüsü	100
Şekil 77. a) Bilyeli dövme işlemi uygulanmış ardından PEO ile kaplanmış numunelerin XRD sonuçları ve b) Bilyeli dövme işlemi uygulanmış daha sonra dubleks PEO/TiN kaplanmış numunelerin XRD sonuçları	101
Şekil 78. Al7075 numunelerin yüzeyine PEO yöntemi kullanılarak kaplama uygulanmış SEM görüntüleri, a) SP+PEO, b) SP+ Dubleks kaplama	102
Şekil 79. SP+MAO numunelerin yüzey optik mikroskop topoğrafi görüntüleri	105
Şekil 80. Bilyeli dövme işlemi uygulanmış ve dubleks PEO/TiN kaplanmış Al 7075 numunelerin yüzey topoğrafi görüntüleri, a) R1- SP+Dubleks kaplama, b) R2-SP+ Dubleks kaplama, c) R3-SP+ Dubleks kaplama, d) R4-SP+ Dubleks kaplama ...	105
Şekil 81. İşlem görmemiş, bilyeli dövme (N1-N4) ve bilyeli dövme ve ardından PEO yöntemi kullanılarak kaplama yapılmış Al 7075 numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri	106
Şekil 82. İşlem görmemiş, bilyeli dövme işlemi uygulanmış ve ardından dubleks PEO/TiN kaplanmış Al 7075 numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri, a) R1-SP+Dubleks kaplama, b) R2-SP+Dubleks kaplama, c) R3-SP+Dubleks kaplama, d) R4-SP+Dubleks kaplama	106
Şekil 83. İşlem uygulanmamış, bilyeli dövme (N1-N4) ve bilyeli dövme işlemi ardından PEO yöntemi kullanılarak kaplanan Al 7075 numunelerin mikrosertlik (HV) değerleri	107
Şekil 84. İşlem görmemiş, bilyeli dövme işlemi uygulanmış ve ardından dubleks PEO/TiN kaplanmış Al7075 numunelerin mikrosertlik (HV) değerleri, a) R1-SP+ Dubleks kaplama, b) R2-SP+ Dubleks kaplama, c) R3-SP+ Dubleks kaplama, d) R4-SP+ Dubleks kaplama.....	108
Şekil 85. Bilyeli dövme işlemi uygulanmış daha sonra PEO yöntemi kullanılarak kaplanmış Al7075 numunelerin pin-on-disk test sonuçları, a) sürtünme katsayısı grafikleri, b) aşınma izi, c) temizlenmemiş pin OM, d) temizlenmiş pin OM görüntüleri ...	109
Şekil 86. Bilyeli dövme işlemi uygulanmış daha sonra dubleks kaplama PEO/TiN kaplanmış Al7075 numunelerin pin-on-disk test sonuçları, a) sürtünme katsayısı	

grafikleri, b) aşınma izi, c) temizlenmemiş pin OM, d) temizlenmiş pin OM görüntüleri	111
Şekil 87. Bilyeli dövme işlemi uygulanmış ve daha sonra PEO/TiN (R1-R4) dubleks kaplanmış numunelerin scratch (Çizik) test sonuçları	115
Şekil 88. İşlemsiz ve bilyeli dövme işleminden sonra PEO yöntemi ile kaplanmış numunelerin potansiyodinamik polarizasyon eğrileri.....	117
Şekil 89. İşlemsiz ve SP+Dubleks kaplama işlemi uygulanmış Al 7075 numunelerin potansiyodinamik polarizasyon eğrileri, a) R1-SP+Dubleks kaplama, b) R2-SP+Dubleks kaplama, c) R3-SP+Dubleks kaplama, d) R4-SP+Dubleks kaplama	118
Şekil 90. SP+Dubleks kaplama işlemi uygulanmış Al 7075 numunelerin EDS elemental analiz sonuçları	120

KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ

Kısaltmalar

CFUMBS	: Kapalı Alan Dengelenmemiş Manyetik Alanda Sıçratma
SP	: Bilyeli dövme
PVD	: Fiziksel Buhar Biriktirme
DC	: Doğru Akım
HV	: Vickers Sertlik Değeri
Lc	: Kritik Yük Değeri
RF	: Radyo Frekansı
sccm	: Standart santimetre küp/dakika
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
XRD	: X-Işınları Difraksiyonu
AC	: Alternatif Akım
MAO	: Mikro Ark Oksidasyon
PEO	: Plazma Elektrolitik Oksidasyon
CoF	: Sürtünme katsayısı

Simgeler

A	: Akım Birimi, Amper
<i>f</i>	: Frekans
V	: Gerilim birimi, Volt
λ	: Dalga boyu
T	: Periyot
Ra	: Yüzey pürüzlülüğü
GPa	: Gigapaskal
μm	: Mikronmetre
μ	: Sürtünme Katsayısı
cm	: Santimetre
ml	: Mililitre
I_{corr}	: Korozyon akımı
E_{corr}	: Korozyon potansiyeli

GİRİŞ

Günümüz teknolojisinde başta otomotiv, uzay-havacılık, iletişim ve savunma sanayi sektörleri olmak üzere birçok farklı sektörde daha hafif metaller tercih edilmeye başlanmıştır. Özellikle otomobil, havacılık, uzay endüstrilerinde Alüminyum, Titanyum, Magnezyum alaşımları hafif metallerin kullanım alanlarını genişletmektedir. Hafif metaller arasında alüminyum, düşük yoğunluğuna rağmen yüksek mukavemet, daha düşük sıcaklıklarda bile işlenebilir olmasını sağlayan süneklik ve korozyon dayanımı gibi özelliklerinden dolayı endüstride artan bir kullanım alanına sahiptir.

Alüminyum ve onun türevi alaşımlar, modern endüstrilerde büyük bir öneme sahip hafif yapısal metalik malzemeler arasında yer almaktadır. Otomotiv, havacılık, mimari ve elektrik-elektronik sektörlerinde, demir dışı tercih edilen metalik malzemeler arasında öne çıkmaktadırlar. Bu malzemeler, pek çok mühendis ve tasarımcı için vazgeçilmezdir. Alüminyumun en belirgin özelliklerinden biri hafif olmasıdır. Bu, özellikle otomotiv ve havacılık endüstrilerinde yakıt verimliliği ve performansı artırmak amacıyla büyük bir avantaj sağlamaktadır. Aynı zamanda alüminyumun iyi bir ısı ve elektrik iletkenliği sağlaması, elektrik-elektronik uygulamaları için önemli bir yere sahiptir. Alüminyum alaşımlarının mukavemet özelliklerini istenilen seviyelere çıkarmak amacıyla, yapısına çeşitli alaşım elementleri eklenebilir. Bu sayede, alüminyumun dayanıklılığı artırılarak daha zorlu koşullara uyum sağlamaları mümkün hale gelir. Ayrıca, alüminyum alaşımlarının doğal korozyon direnci, agresif ortamların olumsuz etkilerine karşı önemli koruma sağladığı bilinmektedir (Başer 2012; Pasha and Mohamed, 2017)

Endüstrideki ilerlemeler, beraberinde çevresel sorunları da getirmiş ve çevre sorunlarının ciddiyeti ise hayatımızı önemli şekilde etkilemiştir. Enerji kaynaklarının sürdürülebilirliği ve ekolojik dengeyi koruma çabaları, enerji tüketiminin optimize edilmesini gerektirmektedir. Bu amaçla, hafif ve geri dönüşümlü malzemelerin kullanımı, çevre dostu bir metal olarak kabul edilen alüminyum ve alaşımlarıyla giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Hem yaşam kalitesini artırma hem de enerji tasarrufunu sağlama açısından alüminyumun kullanım oranı sürekli olarak artmaktadır. Bu talep, kullanım alanlarına göre hafifliği, yüksek mukavemeti, tekrar kullanılabilirliği, şekillendirilebilirliği, işlenebilirliği, yüksek ısı ve elektriksel iletkenliği, ışık ve ısı yansıtma özelliklerinden kaynaklanan avantajları sayesinde gerçekleşmektedir. Ayrıca, yeni alaşımların sunduğu avantajlarla birlikte, alüminyum alaşımlarının endüstrinin birçok sektöründe giderek daha fazla tercih edilmektedir. Tüm bu

özelliklere rağmen hareket halindeki parçalarda kullanılan alüminyum alaşımlarında, aşırı yükte tribolojik yeteneklerinin yetersizliği, aşırı agresif ortamlarda korozyona karşı dayanımlarının yetersiz olduğu sürtünme katsayısının ise yüksek olduğu görülebilmektedir. Bu durumlar oldukça kullanışlı olan alüminyum alaşımlarının endüstrideki kullanım alanlarını sınırlamaktadır. Ayrıca aşınma ve korozyon gibi malzemenin yapısını etkileyen durumlar, rezervleri sınırlı olan bu malzemelerin kullanım ömürlerini kısaltmakta ve ekonomiye yük oluşturmaktadır.

Bu olumsuz özellikleri iyileştirerek alüminyum alaşımlarının sanayideki kullanım alanlarının ve ömürlerinin arttırılmasına yönelik araştırmalar önem kazanmaktadır. Sürtünme, korozyon ve aşınma özelliklerini iyileştirmek, tasarım farklılığı, yüzey modifikasyonları veya çeşitli yağlama yöntemleriyle sağlanabilmektedir. Bu kapsamda, alüminyum ve alaşımlarının korozyon, tribolojik ve mekanik sorunlarını kontrol etmek veya azaltmak için, mekanik, termokimyasal işlemler ile kaplama yöntemlerinin kullanımının etkin çözüm yöntemleri olduğu görülmektedir. Alüminyum alaşımlarının yüzey özelliklerini iyileştirmek için literatürde farklı yüzey işlemleri uygulanmaktadır.

Mekanik yüzey işlemleri, en yaygın kullanılan yüzey modifikasyon yöntemlerinden biridir. Bu işlemler, malzeme yüzeyine mekanik kuvvet veya enerji uygulanarak plastik deformasyon ve artık gerilimler oluşturulmasını sağlar. Böylece malzemenin yorulma direnci, korozyon dayanımı ve genel mekanik performansı artırılmış olur. Mekanik yüzey işlemleri arasında bilye cilalama (Ball Burnishing), lazer şok işleme (Laser Shock Peening) ve bilyeli dövme işlemi (Shot Peening) gibi yöntemler öne çıkmaktadır. Bu yöntemlerin ortak amacı, yüzeyde plastik deformasyon oluşturarak artık gerilimleri artırmak ve böylece malzemenin yorulma direncini, korozyon dayanımını ve genel mekanik performansını iyileştirmektir.

Bu üç yöntem arasında bilyeli dövme (Shot Peening), diğer mekanik yüzey işlemlerine kıyasla sunduğu avantajlar nedeniyle yaygın olarak tercih edilmektedir. Uygulama kolaylığı, düşük maliyetli endüstriyel ölçeklenebilirlik ve özellikle alüminyum alaşımlarında yüzey sertliği ile mikro yapıyı iyileştirme konusundaki üstün performansı, bilyeli dövmenin öne çıkmasını sağlamaktadır. Bilyeli dövme işlemi, belirli parametreler (çarpma açısı, basınç, mesafe, süre, bilye çapı/türü) kullanılarak sert ve küresel bilyelerin malzeme yüzeyine çarpmasıyla gerçekleştirilir. Bu çarpma, yüzeyde ve yüzeyin alt katmanlarında kalıcı artık gerilmeler oluşturarak malzemenin mekanik dayanımını artırır (Trško et al., 2014; Gopi et al., 2020)

Bir diğer yüzey iyileştirme yöntemi ise yüzey kaplama teknikleridir. Bu teknikler, malzeme yüzeylerine fiziksel, kimyasal veya elektrokimyasal yöntemlerle ince film tabakaları

sentezleyerek yapısal, mekanik, tribolojik ve kimyasal özellikleri geliştirmeyi amaçlar. Öne çıkan kaplama yöntemleri arasında elektrokaplama, termal sprey kaplama, kimyasal buhar biriktirme (Chemical Vapor Deposition – CVD), fiziksel buhar biriktirme (Physical Vapor Deposition – PVD) ve plazma elektrolitik oksidasyon (Plasma Electrolytic Oxidation – PEO) yer almaktadır (Pasinli and Köksal, 2004). Son yıllarda, özellikle alüminyum ve alaşımlarının yüzey özelliklerini iyileştirmek amacıyla düşük maliyetli PEO yöntemi yaygın olarak tercih edilmektedir (Rao et al., 2020). PEO yöntemi; yüksek adezyon kuvveti sağlaması, çevre dostu alkali elektrolitlerin kullanılması, gözeneksiz oksit filminin büyütülebilmesi, çarpılma oluşturmaması ve alternatif akım güç kaynağı sayesinde özgün avantajlar sunması nedeniyle ön plana çıkmaktadır. Ayrıca, mekanik ve tribolojik özellikler açısından da diğer yöntemlere kıyasla üstün performans göstermektedir (Szkodo et al., 2021). Ancak, prosesin doğasından kaynaklanan pürüzlü oksit tabakası, yüksek sürtünme katsayısına ve abrazyon aşınmaya neden olarak tribolojik performansı olumsuz etkileyebilmektedir. Bu sorunu gidermek amacıyla PVD kaplama yöntemi, önemli bir alternatif olarak değerlendirilmektedir (Mattox, 2010).

PVD yöntemlerinden biri olan manyetik alanda sıçratma (Magnetron Sputtering – MS), özellikle metal ve alaşımlarında yaygın olarak tercih edilen bir tekniktir. Bu yöntemde argon iyonları, plazma içinde hızlandırılarak hedef yüzeyine bombardıman edilir ve hedef atomlarını sıçratır. Sıçratılan atomlar, taban malzeme yüzeyine birikerek ince, homojen ve yüksek saflıkta bir kaplama tabakası oluşturur. Manyetik alanda sıçratmanın başlıca avantajları; düşük taban malzeme sıcaklıklarında daha yüksek yoğunluklu kaplamalar üretmesi, çok bileşenli alaşımların kontrollü biriktirilmesine olanak tanınması ve tekrarlanabilir proses parametreleriyle endüstriyel uyumluluk sağlamasıdır (Kelly and Arnell, 2000). Manyetik alanda sıçratmanın gelişmiş bir modeli olan Kapalı Alan Dengesiz Manyetik Alanda Sıçratma (Closed-Field Unbalanced Magnetron Sputtering – CFUBMS), özellikle yüksek sertlik, aşınma ve korozyon direnci gibi üstün yüzey özellikleri gerektiren endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. CFUBMS yöntemiyle üretilen TiN ve CrN gibi ince ($\sim 2-5 \mu\text{m}$) ancak yüksek sertlikteki kaplamalar, tribolojik uygulamalarda alüminyum alaşımlarının performans sınırlarını genişletmiştir (Gali et al., 2014). Bu bağlamda, PEO yöntemi ile oluşturulan gözenekli kaplama üzerine CFUBMS yöntemi uygulanması, korozyon direncinin artırılmasında kritik bir yöntem olarak öne çıkmaktadır. PEO tabakasının doğal olarak gözenekli ve poroz yapısı, elektrolit nüfuzuna karşı zayıf noktalar oluşturabilmektedir. Ancak, CFUBMS yöntemiyle uygulanan TiN gibi kaplamalar, bu gözeneklere nüfuz ederek boşlukları doldurmakta, yüzeyin kompaktlığını artırmakta ve korozyon sürecinin başlangıç aşamasında ilerlemesini engellemektedir (Cui et al., 2017).

Literatürde, Al 7075-T6 alaşımlarının yüzeyine PVD yöntemiyle uygulanan TiN kaplamasının, yüksek sıcaklıklarda çekme dayanımında belirgin değişikliğe açtığı belirtilmektedir. Oskouei ve Ibrahim (2011) tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, kaplama sonrası malzemenin akma dayanımında %78, çekme dayanımında ise %54 oranında değiştiği gözlemlenmiştir. Ancak, T6 ısıtılmasının tekrar uygulanmasıyla bu kayıpların sırasıyla %243 ve %77 oranında iyileştirilebildiği rapor edilmiştir. Bu bulgular, yüzey modifikasyonlarının mekanik özellikler üzerindeki etkisini vurgulamakta ve TiN kaplamalı Al 7075-T6 alaşımlarının yüksek sıcaklık koşullarında performansını artırmak için ısıtılma süreçlerinin kritik önem taşıdığını göstermektedir (Oskouei and Ibrahim, 2011). Ayrıca, literatürde plazma destekli PVD yöntemiyle Al 7075 yüzeyine uygulanan TiCN kaplamaların aşınma ve korozyon direnci üzerindeki etkileri üzerine yapılan çalışmalar dikkat çekmektedir. Srinath ve Prasad (2020) tarafından yürütülen bir araştırmada, 1 saat ve 12 saat süren ısıtılma uygulamalarının karşılaştırılması sonucunda, 12 saatlik işlemin 1 saatlik işleme kıyasla daha yüksek aşınma ve korozyon oranlarına neden olduğu belirlenmiştir. Çalışmada, ısıtılma süresi arttıkça tribo-korozyon bozulmasının da arttığı sonucuna varılmıştır (Srinath & Prasad, 2020).

Bunun yanı sıra, Al 7075-T6 alaşımına manyetik alanda sıçratma yöntemiyle uygulanan titanyum nitrid (TiN) kaplamanın parametreleri (sıcaklık, DC bias voltajı, azot oranı, DC güç) Taguchi L₁₆ yöntemi kullanılarak optimize edilmiştir. S/N analizi ile belirlenen en iyi parametreler sonucunda, yüzey sertliğinde %14, adezyonda %4,15 ve yüzey pürüzlülüğünde %9,43 oranında iyileşme sağlanmıştır (Zalnezhad et al., 2013). Bu çalışmalar, yüzey modifikasyonlarının Al 7075-T6 alaşımlarının mekanik ve tribolojik performansı üzerindeki etkisini ortaya koymakta ve optimal kaplama parametrelerinin belirlenmesinin kritik önem taşıdığını vurgulamaktadır.

Malzemelerin yüzey özelliklerini iyileştirmek için geliştirilen bir diğer yöntem ise dubleks yüzey işlemleridir. Bu işlemlerde, birden fazla mekanik veya farklı kaplama yöntemi bir arada kullanılarak yüzey özellikleri iyileştirilmeye çalışılır. Dubleks işlem mekanik, tribolojik ve korozyon direncini artırmak amacıyla geliştirilen iki aşamalı bir yüzey modifikasyon yöntemidir. Bu süreçte, genellikle ilk aşamada yüzeyin mikrosertliğini ve mekanik dayanımını artıran bir işlem uygulanırken, ikinci aşamada ise yüzeyin korozyon ve aşınma direncini artıran bir kaplama gerçekleştirilir. Bu yöntem, özellikle yüksek performans gerektiren mühendislik uygulamalarında alüminyum alaşımlarının kullanım ömrünü uzatmak ve çevresel etkilere karşı daha dayanıklı hale getirmek için tercih edilmektedir.

Bu kapsamda, bilyeli dövme işlemi gibi mekanik yüzey işlemi ile, yüzeyde plastik deformasyon oluşturarak artık gerilimleri artırır ve böylece yorulma dayanımı ile mikrosertlik

gibi mekanik özellikleri iyileştirir. İkinci aşamada, mekanik işlem görmüş yüzeyin fonksiyonel özelliklerini daha da geliştirmek amacıyla plazma elektrolitik oksidasyon (PEO) yöntemi uygulanarak Al_2O_3 esaslı bir seramik tabaka oluşturulur. Bu tabaka, yüksek sertlik, termal stabilite ve korozyon direnci sağlarken, gözenekli yapısı sayesinde üst katman kaplamalar için uygun bir zemin hazırlar. Son aşamada ise, PVD veya CVD yöntemleri kullanılarak TiN, CrN ve AlTiN gibi seramik esaslı sert kaplamalar sentezlenerek yüzeyin aşınma direnci ve tribolojik performansı artırılır (Zhou et al., 2009).

Literatürde, çeşitli dubleks kaplama çalışmalarının alüminyum ve diğer metal alaşımlarının performansını önemli ölçüde artırdığı gösterilmiştir. Zhang ve ark. (2021), MAO yöntemiyle kaplanmış TC17 titanyum alaşımına HiPIMS yöntemiyle TiN ve Ti/TiN çok katmanlı kaplamalar uygulamış ve çok katmanlı yapıların korozyon direncini belirgin şekilde iyileştirdiğini rapor etmiştir (Y. Zhang et al., 2021). Benzer şekilde, Cui ve ark. (2017), AZ31B magnezyum alaşımı üzerine MAO ve çok arklı iyon kaplama (M-AIP) tekniklerini kullanarak MAO/TiN kaplamalar oluşturmuş ve TiN kaplamanın korozyon direncini artırmasına rağmen, gözenek ve çatlak oluşumunun kaplama performansını olumsuz etkilediğini tespit etmiştir (Cui et al., 2017).

Bu tez çalışmasında, alüminyum alaşımlarının mekanik, tribolojik ve korozyon özelliklerini iyileştirmek amacıyla üç farklı yüzey modifikasyon tekniğinin kombinasyonuyla tripleks bir yüzey işlemi geliştirilmiştir. Çalışmanın temel amacı, bilyeli dövme (Shot Peening), plazma elektrolitik oksidasyon (PEO) ve kapalı alan dengesiz manyetik alanda sıçratma (CFUBMS) yöntemlerini birleştirerek, optimize edilmiş kaplama parametreleriyle malzeme performansını en üst seviyeye çıkarmaktır.

Bu kapsamda:

- Birinci aşamada, Al 7075-T6 taban malzeme üzerine bilyeli dövme işlemi ile mekanik yüzey işlemi uygulanmıştır. Bu işlemde, S110 ve S230 olmak üzere iki farklı bilye çapı ve 8A ile 10A olmak üzere iki farklı Almen şiddeti kullanılmıştır.
- İkinci aşamada, mekanik işlem görmüş yüzeylere, Taguchi L_9 ortogonal deney tasarımı kullanılarak optimize edilmiş Al_2O_3 kaplamalar PEO tekniğiyle büyütülmüştür.
- Üçüncü aşamada, mekanik ön işlem uygulanmış numunelere, Taguchi L_4 ortogonal deney tasarımıyla belirlenen üç farklı parametre ve iki farklı seviye altında TiN ince filmleri CFUBMS yöntemiyle kaplanmıştır.
- Son olarak, PEO ve PVD tekniklerinin kombinasyonu kullanılarak dubleks kaplamalar oluşturulmuş ve bu kaplamaların yapısal, mekanik ve tribolojik özellikleri detaylı olarak incelenmiştir.

Bu tez çalışmasıyla, yüzey modifikasyon yöntemlerinin optimizasyonu ve bu yöntemlerin kombinasyonu sayesinde Al 7075-T6 alaşımının aşınma direnci, tribolojik performansı ve korozyon dayanımı nasıl geliştirilebileceği kapsamlı bir şekilde araştırılmıştır.



KURAMSAL TEMELLER

Alüminyum ve alaşımları, otomotiv, havacılık, mimari ve elektrik-elektronik endüstrilerinde yaygın olarak kullanılan ve demir dışı metaller arasında öncelikli tercih edilen yapısal malzemelerdendir. Bu alaşımlar, hafiflikleri, üstün ısı ve elektrik iletkenlikleri, mekanik mukavemetlerinin artırılabilir olması ve korozyona karşı yüksek dirençleri sayesinde mühendisler ve tasarımcılar için önemli bir malzeme konumundadır (Başer, 2012; Pasha and Mohamed, 2017). Alüminyum alaşımları, yüksek spesifik statik dayanımları sayesinde havacılık sektöründe geniş bir kullanım alanına sahiptir. Yüksek mukavemet özellikleri, özel dayanım değerleri ve üstün yorulma dayanımı ile yalnızca otomotiv endüstrisinde değil, aynı zamanda uçak endüstrisinde de yaygın olarak tercih edilmektedir (Jin et al., 2015; Bayazid et al., 2016).

Alüminyum ve alaşımları, üstün mekanik ve fiziksel özelliklerine rağmen, yüzeylerinde doğal olarak oluşan pasif oksit tabakasının agresif koşullarda kararlı olmaması nedeniyle korozyon ve aşınma dirençlerini kaybetme eğilimindedir. Özellikle aşırı yük altında ve agresif ortamlarda bu malzemelerin kullanım alanları sınırlı kalmaktadır (Şüküroğlu, 2016). Bu soruna rağmen, alüminyum ve alaşımlarının sunduğu avantajlardan vazgeçmek istemeyen araştırmacılar, çeşitli yüzey işlemleri uygulayarak bu malzemelerin yüzey özelliklerini iyileştirme çalışmaları yürütmüşlerdir. Bu yüzey iyileştirme yöntemleri arasında: bilyeli dövme gibi mekanik işlemler, Isıl işlem, vakum kaplama, toz boya, fiziksel buhar biriktirme (PVD), kimyasal buhar biriktirme (CVD), darbeli elektrot kaplama gibi teknikler bulunmaktadır (Bhushan and Gupta, 1991; Treglio et al., 1993; Nie et al., 1999; Gencer et al., 2010; Şüküroğlu, 2016).

Alüminyum alaşımlarının termal kararlılığı konusu, özellikle havacılık ve otomotiv gibi sektörlerde kritik bir öneme sahiptir. Bunun nedeni, yapısal malzemelerin yüksek sıcaklık koşullarında stabil kalmasının gerekliliği ve aynı zamanda alaşımların mikro yapısal değişimlere yatkın olmasıdır. Termal iletkenlik, aşırı doymuş katı çözeltinin düşük sıcaklık aralığında (70-100 °C) kararlılığı, katı çözeltinin tükenme etkisi ve oluşan yeni fazların mekanik ve fiziksel özellikler üzerindeki etkileri, alüminyum alaşımlarının yüksek sıcaklıklardaki performansını doğrudan etkileyen faktörlerdir. Özellikle havacılık uygulamalarında termal kararlılık gereksinimleri oldukça sınırlayıcıdır. Ancak, alüminyum alaşımlarında katı çözelti sabit değildir ve zamanla sertleşme ve yapay yaşlanma gibi süreçlere bağlı olarak düşük aşırı doygunluktan sonra bile kolayca ayrışabilir (Shneider, 1998). Bu nedenle, mühendislik uygulamalarında alüminyum alaşımlarının termal kararlılığını, aşınma ve

korozyon dirençlerini artırmak için alaşım bileşimleri, ısı işlemleri ve yüzey modifikasyon teknikleri üzerinde kapsamlı araştırmalar yürütülmektedir.

Yaygın Olarak Kullanılan Alüminyum Alaşımları

Alüminyum, hafifliği, yüksek mukavemeti ve dayanıklılığı sayesinde pek çok endüstriyel uygulamada vazgeçilmez bir malzeme olarak öne çıkmaktadır. Bu üstün özelliklerini daha da artırmak ve özel gereksinimlere uyum sağlamak amacıyla farklı alaşımlar geliştirilmiştir. Yaygın olarak kullanılan bazı alüminyum alaşımları:

Alüminyum Alaşımı 2024 (AA2024): Bu alaşım, hafiflik ve yüksek mukavemet arasındaki mükemmel denge nedeniyle özellikle havacılık endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. AA2024, bakır içeriği sayesinde yüksek dayanım ve yorulma direnci sunar, ancak korozyon direnci düşüktür. Bu nedenle genellikle koruyucu kaplamalar veya anodizasyon işlemi ile korunur. Uçak kanatları, gövdeleri ve diğer yüksek mukavemet gerektiren yapısal bileşenler için uygundur (Huda et al., 2009).

Alüminyum Alaşımı 3003 (AA3003): Bu alaşım, düşük mukavemetine karşın mükemmel korozyon direnci ve kolay işlenebilirlik özellikleri sunmaktadır. Mangan katkısı sayesinde daha iyi mekanik özelliklere sahiptir ve kaynaklanabilirliği yüksektir. Bu nedenle, yiyecek ve içecek ambalajları, mutfak eşyaları, çatı kaplamaları, soğutma cihazları ve kimya endüstrisi gibi uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Ferrasse et al., 1997).

Alüminyum Alaşımı 5052 (AA5052): Bu alaşım, yüksek korozyon direnci ve mükemmel kaynaklanabilirliği ile bilinir. Özellikle deniz suyu ve kimyasal ortamlara karşı dayanıklılığı sayesinde denizcilik endüstrisinde, gemi gövdelerinde, deniz araçlarında ve yakıt tanklarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca, mukavemeti ve şekillendirilebilirliği nedeniyle depolama kapları, basınçlı kaplar ve otomotiv yakıt tankları gibi uygulamalarda da tercih edilmektedir (Mahabunphachai & Koç, 2010).

Alüminyum Alaşımı 5083 (AA5083): Bu alaşım, mükemmel korozyon direnci ve yüksek mukavemeti sayesinde denizcilik ve ağır sanayi uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle gemi gövdeleri, sualtı ekipmanları, basınçlı kaplar ve kriyojenik tanklar gibi zorlu koşullara maruz kalan yapılar için idealdir. Aynı zamanda iyi kaynaklanabilirlik özelliği ile gemi yapımı ve deniz araçlarında tercih edilmektedir (Paik, 2009).

Alüminyum Alaşımı 6061 (AA6061): 6061 alaşımı, yüksek mukavemet, mükemmel kaynaklanabilirlik ve iyi korozyon direnci sunan çok yönlü bir malzemedir. Otomotiv endüstrisi, havacılık ve inşaat mühendisliği gibi birçok sektörde yaygın olarak kullanılır. Bu

alaşım, özellikle bisiklet çerçeveleri, uçak gövdeleri, gemi yapımı, yapı elemanları ve çeşitli teknik ekipmanlarda tercih edilir. 6061, aynı zamanda iyi işlenebilirlik özellikleri sayesinde geniş bir kullanım yelpazesinde uygulanabilir (Mahabunphachai & Koç, 2010).

Alüminyum Alaşımı 6063 (AA6063): 6063 alaşımı, özellikle ekstrüzyon işlemleri için ideal olan bir alaşımdır. Yüksek işlenebilirliği ve iyi korozyon direnci ile dikkat çeker. İnşaat sektöründe geniş bir kullanım alanına sahiptir ve genellikle kapı ve pencere çerçeveleri, inşaat iskeleleri ve mobilya gibi ürünlerin üretiminde kullanılır. Ayrıca, bu alaşım, estetik görünümü ve dayanıklılığı sayesinde mimari uygulamalarda da tercih edilmektedir (Sato et al., 2002).

Alüminyum Alaşımı 7075 (AA7075): 7075 alaşımı, yüksek mukavemet ve dayanıklılığı ile tanınan bir alüminyum alaşımdır. Genellikle havacılık ve savunma sanayii gibi yüksek performans gerektiren uygulamalarda kullanılır. Bu alaşım, özellikle uçak yapıları, askeri araçlar, yüksek dayanım gerektiren elemanlar ve diğer mühendislik uygulamalarında tercih edilir. 7075 alaşımı aynı zamanda titanyumun yerine daha ekonomik bir seçenek olarak düşünülmektedir (Zhao & Jiang, 2008). AA7075, yüksek mukavemetine rağmen iyi işlenebilirlik ve kaynaklanabilirlik sunar, ancak korozyon direnci diğer alaşımlara göre biraz daha düşüktür, bu nedenle korozyon önleyici yüzey işlemleri kullanılabilir.

Alüminyum 7075, yüksek mukavemet-ağırlık oranı ile öne çıkan ve mühendislik dünyasında geniş bir kullanım alanına sahip bir alaşımdır. Havacılık, uzay, savunma, otomotiv ve spor ekipmanları gibi sektörlerde sıkça tercih edilmektedir. Kimyasal bileşimi; %87.1-%91.4 alüminyum, %5.1-%6.1 çinko, %2.1-%2.9 magnezyum, %1.2-%2.0 bakır ve %0.18-%0.28 krom gibi elementlerden oluşur. Ayrıca, demir, silisyum ve manganez gibi iz elementler de düşük oranlarda bulunur. Bu bileşim, Alüminyum 7075'i çelik ile kıyaslanabilir bir mukavemete ulaştırır. Örneğin, T6 temper durumunda:

- Çekme mukavemeti: 570-590 MPa,
- Akma mukavemeti: 500-520 MPa.

Buna karşın, yoğunluğu yalnızca 2.81 g/cm^3 olup çeliğin yaklaşık üçte biri ağırlığındadır. Bu özelliği, onu hafiflik ve dayanıklılığın kritik olduğu uygulamalar için ideal bir malzeme haline getirmektedir.

Alüminyum 7075'in mekanik özellikleri, onu birçok uygulama için cazip kılan temel faktörler arasındadır. Yüksek çekme ve akma mukavemetine sahip olmasının yanı sıra, makul bir süneklik de sunar. Örneğin, T6 durumunda uzama oranı yaklaşık %11'dir, bu da şekillendirme işlemleri için belirli bir esneklik sağlar. Yorulma direnci, genel olarak iyidir ancak 2024 gibi diğer yüksek mukavemetli alüminyum alaşımlarına kıyasla biraz daha

düşüktür. İşlenebilirlik açısından ise, frezeleme, tornalama, dövme ve ekstrüzyon gibi talaşlı imalat teknikleriyle kolayca işlenebilir. Ancak, kaynak kabiliyeti sınırlıdır. Direnç kaynağı ve sürtünme karıştırma kaynağı gibi yöntemler uygulanabilir olsa da kaynak sırasında mukavemet kaybı riski bulunmaktadır. Bu kayıp, genellikle yeniden ısıl işlem uygulanarak telafi edilir. Bu nedenle, tasarımcılar genellikle kaynak gerektirmeyen tasarımlarda 7075 alaşımını tercih etmektedir. Alaşımın sertliği ve aşınma direnci, yüzey işlemlerine olan ihtiyacı artırabilir. Örneğin, sert anodizasyon uygulaması hem korozyon direncini hem de aşınma dayanımını artırmak için yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Al 7075'in kullanım alanları, Şekil 1'de gösterilmekte olup, detaylı açıklamalar aşağıdaki bölümde ele alınmıştır.



Şekil 1. Al 7075 alaşımının farklı endüstrilerdeki uygulamaları (Maity et al., 2024)

Bu alaşımlar, alüminyumun çeşitli endüstriyel ve teknolojik uygulamalarda kullanımını mümkün kılarak, mühendislik alanındaki gelişmelere önemli katkılar sağlamaktadır. Her bir alaşımın kendine özgü mukavemet seviyesi, korozyon direnci ve mekanik özellikleri farklıdır. Bu nedenle, belirli bir uygulama için en uygun alaşımın seçilmesi büyük önem taşımaktadır.

Alüminyum alaşımlarının önemi ve kullanım alanları

Alüminyum, hafifliği, yüksek mukavemeti ve korozyon direnci gibi üstün özellikleri sayesinde modern endüstrilerde yaygın olarak kullanılan temel mühendislik malzemelerinden biridir. Bu özellikleri, alüminyum ve alaşımlarını çeşitli sektörlerde vazgeçilmez kılmaktadır.

Havacılık ve Uzay: Alüminyum alaşımları, düşük yoğunlukları ve yüksek mekanik dayanımları sayesinde havacılık ve uzay endüstrisinde geniş bir kullanım alanına sahiptir. Uçak gövdeleri, kanatlar ve uzay araçları, bu malzemenin sağladığı avantajlardan faydalanarak üretilmektedir (Duan et al., 2023; Huda et al., 2009).

Otomotiv Endüstrisi: Alüminyumun düşük yoğunluğu, yakıt verimliliğini artırarak otomotiv sektöründe önemli bir avantaj sağlamaktadır. Yakıt tankları, jantlar, motor bileşenleri

ve şasi yapıları, alüminyum alaşımlarının sıklıkla kullanıldığı başlıca otomotiv parçaları arasındadır (Başer, 2012).

Denizcilik ve Su Altı Uygulamaları: Denizcilik sektörü, tuzlu su kaynaklı korozyona karşı yüksek direnç gerektiren bir alandır. Alüminyum alaşımları, yüzeyinde oluşturduğu pasif oksit tabakası sayesinde gemi yapımında, su altı ekipmanlarında ve diğer denizcilik uygulamalarında yaygın olarak tercih edilmektedir (Deyab et al., 2020).

İnşaat Sektörü: Alüminyum, hafifliği, montaj kolaylığı ve dayanıklılığı sayesinde inşaat sektöründe önemli bir malzeme olarak kullanılmaktadır. Pencere çerçeveleri, kapılar, çatı kaplamaları ve yapısal bileşenler, alüminyum alaşımlarının inşaat projelerindeki başlıca kullanım alanları arasındadır (Davis, 1993).

Askeri Uygulamalar: Yüksek mukavemet ve hafiflik, askeri ekipman tasarımında kritik bir faktördür. Alüminyum alaşımları, askeri araçlar, zırh sistemleri, silah bileşenleri ve hava taşıtlarında yaygın olarak kullanılmakta olup, hareket kabiliyeti ve dayanıklılığı artırarak operasyonel avantajlar sağlamaktadır (Davis, 1993).

Ambalaj Endüstrisi: Alüminyum alaşımları, yiyecek ve içecek ambalajlarında, alüminyum folyo, konserve kapakları ve içecek kutularında yaygın olarak kullanılmaktadır. Hafifliği, geri dönüştürülebilir olması ve gıda ürünlerini dış etkenlerden koruma özelliği, bu sektördeki tercih edilme nedenlerindendir (Kores et al., 2023).

Elektrik ve Elektronik: Alüminyumun yüksek ısı iletim katsayısı ve elektriksel iletkenliği, onu elektrik kablolarında, güç iletim hatlarında, soğutucu bileşenlerde ve elektronik cihaz kasalarında ideal bir malzeme haline getirir. Ayrıca, hafifliği sayesinde ağır bakır kabloların yerine tercih edilebilmektedir (Davis, 1993).

Korozyon

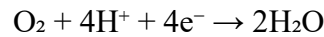
Korozyon, malzemelerin çevresel etkileşimler sonucunda kimyasal veya elektrokimyasal reaksiyonlarla bozunmasına neden olan bir süreçtir (Guan et al., 2020). Bu süreç, malzemenin fiziksel ve kimyasal özelliklerinde geri dönüşü olmayan değişikliklere yol açarak yapısal bütünlüğünü ve işlevselliğini olumsuz etkileyebilir. Korozyon, doğada kendiliğinden gerçekleşen bir olgudur ve termodinamik açıdan metallerin daha kararlı bileşikler (örneğin oksitler, hidroksitler veya tuzlar) oluşturma eğiliminden kaynaklanır. Metallerin oksijen, su veya diğer reaktif türlerle etkileşime girerek bozunması, onların zamanla mekanik dayanımını ve performansını düşürmektedir. Endüstriyel uygulamalardan günlük yaşama kadar geniş bir alanda etkili olan korozyon, yalnızca ekonomik kayıplara yol açmakla kalmaz, aynı zamanda güvenlik ve sürdürülebilirlik açısından da ciddi mühendislik problemleri doğurur.

Özellikle altyapı, ulaşım, enerji üretimi ve havacılık gibi kritik sektörlerde korozyon yönetimi, uzun ömürlü ve güvenli kullanım için büyük önem taşımaktadır (Deyab et al., 2020). Koroziif reaksiyonlar, genel olarak kimyasal korozyon ve elektrokimyasal korozyon olmak üzere iki ana kategoriye ayrılır. Kimyasal korozyon, metallerin oksijen, sülfür veya karbon içeren gazlarla doğrudan reaksiyona girmesiyle meydana gelir ve elektrokimyasal hücre oluşumuna gerek duymadan gerçekleşir. Bu tür korozyon özellikle yüksek sıcaklık ortamlarında, örneğin sanayi fırınlarında, türbin kanatlarında ve yanma odalarında yaygındır. En sık karşılaşılan mekanizmalardan biri oksidasyon korozyonu olup, metalin oksijenle reaksiyona girerek metal oksit oluşturmasıyla ilerler. Örneğin, demirin oksijenle tepkimesi sonucu Fe_2O_3 (pas) oluşumu gözlenir. Sülfürizasyon, sülfür içeren ortamlarda gerçekleşerek metal sülfür bileşikleri oluşturur ve özellikle petrokimya endüstrisinde yaygın olarak görülür. Karburizasyon ise karbon açısından zengin gazlarla etkileşim sonucu meydana gelir; bu süreç metalin sertleşmesini sağlarken aynı zamanda kırılganlık riskini artırabilir. Kimyasal korozyonu önlemek amacıyla; yüksek sıcaklığa dayanıklı oksit kaplamalar (örneğin, Al_2O_3 ve Cr_2O_3 içeren alaşımlar), seramik kaplamalar, reaktif gazların konsantrasyonunu azaltan ortam kontrolü gibi yöntemler yaygın olarak kullanılmaktadır.

Korozyonun temel mekanizması korozyon, elektrokimyasal bir süreç olup, metal yüzeyinde anot ve katot bölgelerinin oluşmasıyla meydana gelir. Anot bölgesinde, metal oksidasyona uğrayarak elektron kaybeder ve iyonize olur:



Katot bölgesinde, ortamdaki bir tür (genellikle oksijen veya hidrojen iyonları) elektronları alarak redüksiyona uğrar:



Bu iki reaksiyon arasındaki elektron transferi, bir elektrolit varlığında (su, nem veya iyonik çözeltiler) gerçekleşerek korozyon devresini tamamlar. Elektrokimyasal korozyonun hızı, malzemenin yapısal özellikleri, çevresel koşullar (nem, sıcaklık, pH, tuz konsantrasyonu), elektrolitin iletkenliği gibi faktörlere bağlıdır: Korozyon türleri arasında: üniform korozyon, tüm yüzey boyunca eşit ilerler. Çukurcuk (pitting) korozyonu, metal yüzeyinde lokalize ve agresif bir şekilde derin oyuklar oluşturur. Özellikle Al7075 gibi yüksek mukavemetli alaşımlarda, klor iyonlarının varlığında yaygın olarak gözlemlenir. Elektrokimyasal korozyonu önlemek için şu yöntemler; katodik koruma (örneğin, çinko anot kullanımı), ince film kaplamalar (PEO, PVD), uygun alaşım seçimi örnek olarak verilebilir. Özellikle havacılık ve otomotiv endüstrilerinde, Al7075 gibi alaşımların çukurcuk korozyonuna karşı korunması büyük önem taşımaktadır.

Korozyon hızı hem malzemenin iç yapısına hem de çevresel koşullara bağlıdır. Bu nedenle, korozyonu etkileyen faktörler iki ana kategoriye ayrılmaktadır:

1. Malzeme Kaynaklı Faktörler:

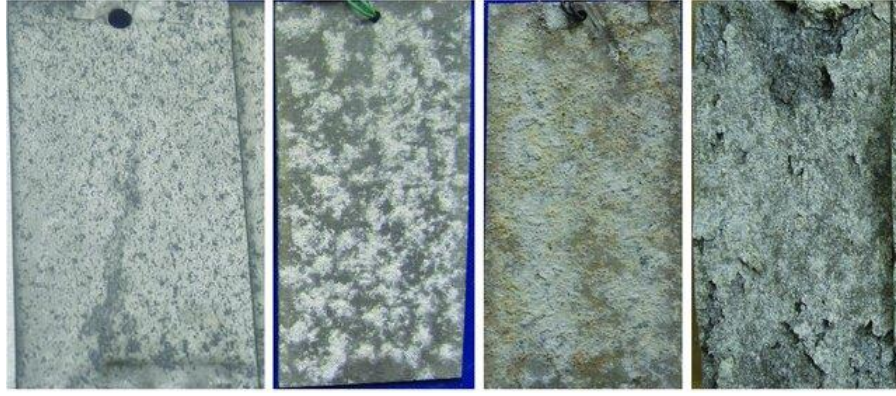
- Malzeme ve alaşımlarındaki potansiyel fark
- Anot ve katot yüzey alanlarının oranı
- Malzemenin saflık derecesi
- Oluşan korozyon ürünlerinin özellikleri
- Malzemenin pasifleşme davranışı
- Gerilim kaynaklı etkiler

2. Çevresel Faktörler:

- Ortamın pH seviyesi ve iletkenliği
- Nem miktarı ve oksijen mevcudiyeti
- Korozyona neden olan iyonların (örneğin klorür iyonları) konsantrasyonu
- Sıcaklık, akış hızı ve oksidasyon maddelerinin varlığı
- Polarizasyon etkileri

Özellikle klorlu çözeltiler, alüminyumun korozyon direncini olumsuz yönde etkileyebilir. Ancak saf alüminyum, belirli koşullarda yüksek kararlılık göstermektedir (Deyab et al., 2020).

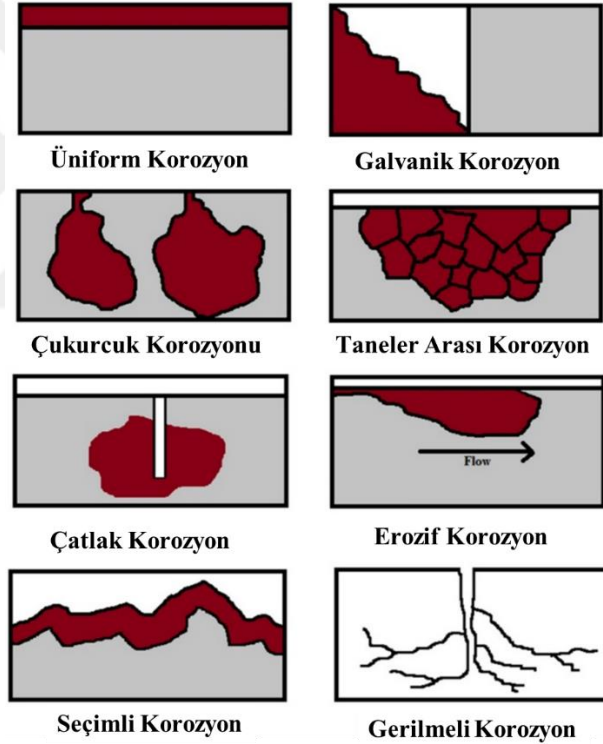
Genel olarak alüminyum, korozyona karşı yüksek direnç sergilemektedir. Bu dayanıklılığın temel sebebi, yüzeyinde hızla oluşan alümina (Al_2O_3) tabakasıdır. Alüminyum, suyla temas ettiğinde oksit-hidroksit tabakası oluşturarak kendini koruma mekanizması geliştirmektedir. Bununla birlikte, havacılık ve uzay gibi stratejik sektörlerde, uzun ömürlü ve ekonomik kullanım sağlamak için ek korozyon önleyici önlemler alınması gerekmektedir (Deyab et al., 2020). Şekil 2' de korozyona uğramış alüminyum alaşımları örnekleri gösterilmektedir.



Şekil 2. Korozyona uğramış alüminyum alaşımı (Z. Xie et al., 2023)

Korozyon türleri

Yukarıda bahsedildiği gibi korozyon, kimyasal korozyon ve elektrokimyasal korozyon olmak üzere iki ana kategoriye ayrılır. Şekil 3’te korozyon türleri şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3. En yaygın korozyon türleri (Farooq et al., 2022)

Kimyasal Korozyon: Kimyasal korozyon, metalin çevresel faktörlerle doğrudan reaksiyona girerek kimyasal değişime uğraması sonucu meydana gelir. Bu süreçte, metal yüzeyi oksijen, sülfür, karbon dioksit, asitler veya bazlarla etkileşime girerek bozunur. Elektrolit içermeyen ortamlarda gerçekleşen bu tür korozyon, genellikle yüksek sıcaklıklarda hızlanır. Kimyasal korozyonun yaygın örnekleri şunlardır:

Oksidasyon Korozyonu: Metalin oksijenle reaksiyona girerek metal oksit tabakası oluşturmasıdır. Örneğin, alüminyumun yüzeyinde Al_2O_3 (alümina) tabakası oluşarak koruyucu

bir bariyer görevi görürken, demirin Fe_2O_3 (pas) oluşturarak bozunması zararlıdır (Duret-Thual, 2014).

Sülfürizasyon: Yüksek sıcaklıklarda sülfür içeren gazlarla metalin reaksiyona girmesiyle metal sülfür bileşikleri oluşur. Bu tür korozyon, özellikle petrokimya ve enerji üretim sektörlerinde yaygındır.

Karburizasyon: Karbon açısından zengin gazlarla metalin etkileşime girmesi sonucu yüzey sertleşmesi sağlansa da gevrekleşmeye yol açabilir. Bu durum, özellikle yüksek sıcaklıkta çalışan türbin kanatları ve ısı eşanjörlerinde görülür.

Kimyasal korozyonu önlemek için ısıya dayanıklı kaplamalar, seramik yüzeyler ve özel alaşımlar kullanılır.

Elektrokimyasal Korozyon: Elektrokimyasal korozyon, metalin elektrokimyasal hücreler oluşturarak korozyona uğraması sürecidir. Bu süreçte, metal yüzeyindeki anodik bölgelerde (aktif bölgeler) oksidasyon gerçekleşirken, katodik bölgelerde (pasif bölgeler) redüksiyon gerçekleşir. Bu redoks reaksiyonları, elektrolitik bir ortamda gerçekleşir. Elektrolitik ortam, genellikle su veya tuzlu su içeren bir çözelti veya nemli bir ortam olabilir. Elektrokimyasal korozyon süreci, galvanik korozyon, çukurcuk korozyonu ve taneler arası korozyon gibi çeşitli alt türleri içerir (Duret-Thual, 2014).

Üniform Korozyon (Uniform Corrosion): Şekil 4’de gösterilen üniform korozyon, metal yüzeyinin tamamında homojen olarak ilerleyen ve metalin eşit oranda aşınmasına neden olan bir korozyon türüdür. Bu süreç, genellikle metalin oksijen ve nem ile etkileşime girmesi sonucunda metal oksit veya pas tabakasının oluşmasıyla karakterizedir. Demirin hava ve suyla reaksiyona girerek demir oksit (Fe_2O_3) oluşturması, en yaygın örneklerden biridir. Üniform korozyonun en büyük avantajı, tahmin edilebilir ve yönetilebilir olmasıdır. Yavaş ve kontrollü ilerlediği için uygun önlemler alındığında ciddi bir yapısal risk oluşturmaz. Bu tür korozyonun önlenmesi veya yavaşlatılması için aşağıdaki yöntemler uygulanabilir; koruyucu kaplamalar, katodik koruma, paslanmaz çelik veya alaşımların kullanımı, kimyasal inhibitörler.

Üniform korozyon, köprüler, binalar, boru hatları ve otomobil gövdeleri gibi birçok metal yapıda yaygın olarak karşılaşılan bir sorundur. Uygun koruma yöntemleri ile metalin servis ömrü uzatılabilir ve maliyetli bakım süreçleri minimize edilebilir (Schweitzer, 2009).



Şekil 4. Üniform korozyon

Galvanik Korozyon (Galvanic Corrosion): Şekil 5’te gösterilen galvanik korozyon, farklı elektrokimyasal özelliklere sahip iki metalin bir elektrolit (genellikle su veya nemli ortam) içinde temas etmesi sonucu oluşan bir korozyon türüdür. Bu süreçte, daha aktif olan metal (anot) elektron kaybederek oksidasyona uğrar, yani korozyona maruz kalır. Öte yandan, daha az aktif olan metal (katot) korunur ve korozyon hızı azalır. Bu tür korozyonun en yaygın örneklerinden biri, demir ve bakırın bir arada kullanılmasıdır. Eğer demir (Fe) ve bakır (Cu) doğrudan temas ederse, elektrokimyasal potansiyel farkı nedeniyle demir anot olarak davranarak korozyona uğrar, bakır ise katot olarak daha uzun süre korunur. Galvanik korozyonun özellikle denizcilik, boru hatları, otomotiv ve havacılık gibi sektörlerde büyük bir problem teşkil ettiği bilinmektedir. Özellikle tuzlu su gibi yüksek iletkenliğe sahip ortamlar, korozyon hızını önemli ölçüde artırabilir. Galvanik korozyonu önleme yöntemleri; farklı metallerin doğrudan temasını önlemek, elektrokimyasal olarak uyumlu metaller seçmek, katodik koruma uygulamak ve çevresel koşulları kontrol altına almak

Galvanik korozyon, doğru malzeme seçimi ve uygun koruma yöntemleriyle önlenabilir. Özellikle gemi gövdeleri, köprü yapıları, uçak parçaları ve su altı boru hatları gibi uzun ömürlü metal yapılar için ciddi bir mühendislik problemidir (Schweitzer, 2009).



Şekil 5. Galvanik korozyon ve şematik gösterimi (Anonymous, 2024)

Çukurcuk Korozyonu (Pitting Corrosion): Şekil 6’da gösterilen çukurcuk korozyonu, metal yüzeyinde küçük, lokalize ve derin çukurların (pitting) oluşmasıyla karakterize edilen bir korozyon türüdür. Bu çukurlar, malzemenin yüzeyinde gözle görülür şekilde delikler oluşturabilir ve zamanla yapısal bütünlüğü ciddi şekilde zayıflatabilir. Bu tür

korozyon, özellikle paslanmaz çelikler, alüminyum alaşımları ve alaşımlı çelikler gibi malzemelerde yaygın olarak görülür. Çukurcuk korozyonunun en büyük tehlikesi, genellikle yüzeyin genelinde belirgin bir bozulma olmadan, gizli bir şekilde ilerlemesidir. Bu da malzemenin ani mekanik arızalarına yol açabilir. Çukurcuk korozyonunun mekanizmaları; başlangıç evresi, lokal anot-katot oluşumu ve asidik ortamın gelişmesi olarak ifade edilebilir. Klor iyonlarının varlığı, düşük oksijen konsantrasyonu, yüksek sıcaklık, mikroçatlaklar ve kusurlar çukurcuk korozyonuna neden olan faktörler olarak sıralanabilir. Çukurcuk korozyonunu önleme yöntemleri olarak, daha yüksek korozyon direncine sahip alaşımlar kullanmak, katodik koruma uygulamak, koruyucu kaplamalar kullanmak, düzenli temizlik ve bakım verilebilir.

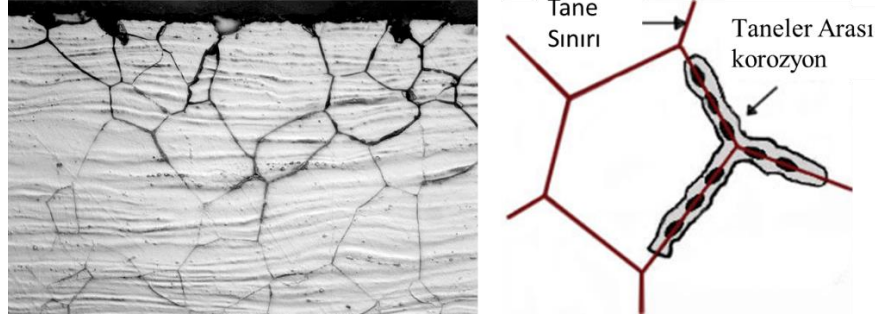
Çukurcuk korozyonu, özellikle denizcilik, havacılık, kimya ve enerji sektörlerinde büyük bir problem teşkil etmektedir. Paslanmaz çelik tanklar, gemi gövdeleri, petrol boru hatları ve uçak gövdeleri gibi yapılar bu tür korozyona karşı özel olarak korunmalıdır (Davis, 2000).



Şekil 6. Çukurcuk korozyonu ve şematik gösterimi (Anonymous, 2022)

Taneler Arası Korozyon (Intergranular Corrosion): Şekil 7’de taneler arası korozyon, metal içyapısındaki tane sınırlarında meydana gelen bir korozyon türüdür. Bu tür korozyon, genellikle tane sınırlarında belirli elementlerin çökmesi veya belirli alaşım bileşenlerinin tükenmesi nedeniyle oluşur. Bu durum, malzemenin mekanik dayanımını ciddi şekilde azaltabilir ve zamanla çatlak oluşumuna neden olabilir. Taneler arası korozyonun mekanizması, düşük krom bölgelerinde, alüminyum ve nikel alaşımlarında düşük anodik bölgelerinde ortaya çıkan bir durumdur. Taneler arası korozyona neden olan faktörler; yüksek sıcaklıkta ısıtılma veya kaynak sonrası krom tükenmesi, alaşımdaki belirli elementlerin (C, Ti, Nb) çökme eğilimi, asidik ve tuzlu ortamların varlığı ve uzun süreli yüksek sıcaklık maruziyeti (sensitizasyon) şeklinde sıralanabilir. Taneler arası korozyonun önlenmesi için düşük karbonlu paslanmaz çelikler (316L, 304L), stabilize edici elementler (Ti, Nb) içeren alaşımlar, çökelmeleri dağıtmak için hızlı soğutma uygulamak ve kaynak sonrası uygun ısıtılma işlemleriyle tane sınırlarını stabilize etmektir.

Taneler arası korozyon, havacılık, nükleer enerji, kimya ve gemi inşa sektörlerinde ciddi bir problem teşkil edebilir. Özellikle kaynaklı paslanmaz çelik yapılar, yüksek sıcaklıkta çalışan parçalar ve agresif ortamlara maruz kalan malzemeler için büyük bir risk oluşturur (Schweitzer, 2009).



Şekil 7. Taneler arası korozyon ve şematik gösterimi (Anonymous, 2021)

Korozyon oluşumunu önleme yöntemleri

Metallerin korozyona uğraması, malzemelerin dayanıklılığını azaltabilir ve çeşitli endüstriyel uygulamalarda ciddi problemlere yol açabilir. Korozyonu önlemek veya en aza indirmek için bir dizi etkili yöntem bulunmaktadır:

Yüzey Kaplama: Metal yüzeylerin korunması için çeşitli kaplama teknikleri kullanılabilir. Bunlar arasında galvanizasyon, elektrokaplama, boyama, toz kaplama ve metalik kaplamalar gibi yöntemler bulunur. Bu kaplamalar, metal yüzeyleri çevresel etkilere karşı korur ve korozyon direncini artırır. Metallerin yüzeyine uygulanan metal kaplamalar, korozyona karşı etkili bir bariyer oluşturur.

Katodik Koruma Yöntemi: Bu yöntemde, korunması gereken metal bir katot olarak kullanılır ve bir anotik metal veya akım kaynağı ile birlikte bir elektrolitik hücre oluşturulur. Bu şekilde, korunması gereken metal yüzeyi katodik olarak polarize edilir ve korozyonun oluşumu önlenir. Burada elektron transferini kontrol ederek metalin korozyona uğramasını önler. Çinko veya magnezyum gibi daha

Anodik Koruma Yöntemi: Anodik koruma, metal yüzeylerin korozyona karşı korunmasında etkili bir yöntemdir. Bu teknikte, korunması gereken metal yüzey anot olarak kullanılır ve bir anodik akım uygulanarak metalin korozyona uğraması engellenir. Anodik koruma, elektrokimyasal reaksiyonları değiştirerek metalin korozyona karşı dayanıklılığını artırır. Bu yöntem genellikle su arıtma tesisleri, gemi gövdeleri ve denizaltı boru hatları gibi çevresel olarak agresif ortamlarda kullanılır. Anodik koruma, metal yüzeylerin uzun ömürlü ve güvenilir kalmasını sağlayarak maliyetli korozyon hasarlarının önlenmesine yardımcı olur.

Pasif film tabakası oluşturarak metal yüzeyinin korunmasını sağlar. Özellikle paslanmaz çelik ve alüminyum gibi metallerde kullanılır.

Malzeme Seçimi: Korozyona dayanıklı malzemelerin seçilmesi, korozyonun önlenmesinde etkili bir yöntemdir. Özellikle paslanmaz çelik, alüminyum, titanyum gibi korozyona dirençli malzemeler tercih edilir. Malzeme seçimi, uygulama gereksinimleri, çevresel koşullar ve maliyet gibi faktörler dikkate alınarak yapılmalıdır.

Korozyon İnhibitörleri: Kimyasal maddeler kullanılarak metal yüzeyinde koruyucu bir tabaka oluşturulur. Su ve yağ bazlı inhibitörler, agresif ortamların etkisini azaltarak korozyon hızını düşürür.

Kontrollü Ortam: Metal malzemelerin saklanması veya kullanılması sırasında, nem, tuzlu su ve asit gibi korozyona neden olan etkenlerin kontrol altında tutulması önemlidir. Kontrollü ortamlar, metal yüzeylerin korozyona karşı daha uzun süre dayanmasını sağlar. Nem ve sıcaklık kontrolü, pH dengesinin ayarlanması ve oksijen miktarının azaltılması gibi çevresel faktörlerin düzenlenmesiyle korozyonun ilerlemesi yavaşlatılabilir.

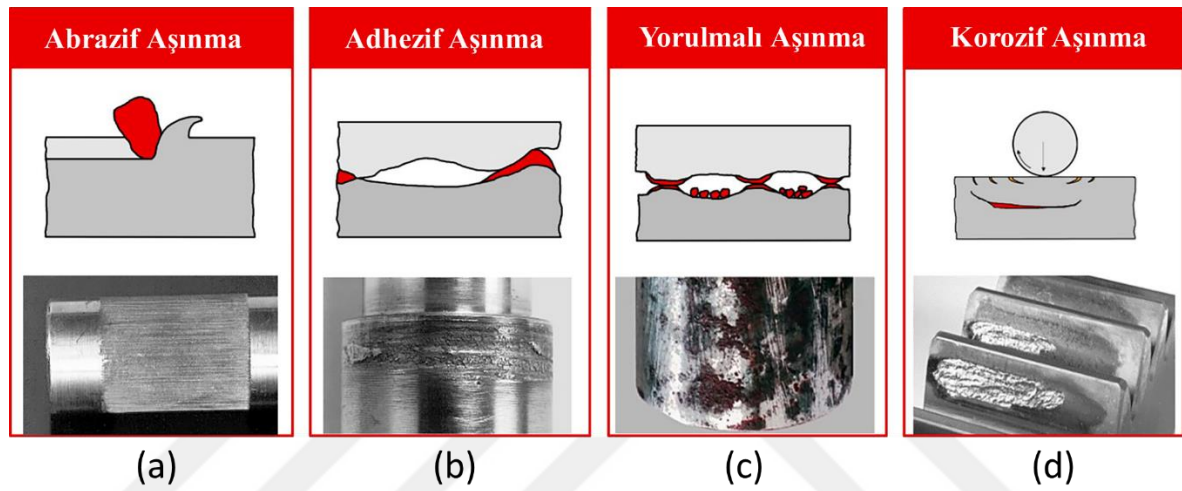
Korozyonu önleme yöntemleri, malzeme seçiminden yüzey kaplamasına kadar geniş bir yelpazeyi kapsar. Bu yöntemlerin uygun bir şekilde uygulanması, metal malzemelerin dayanıklılığını artırır ve korozyonla mücadelede etkili olur. Bu yöntemler, metalin kullanım alanına ve çevresel koşullara bağlı olarak farklı şekillerde uygulanabilir. Özellikle havacılık, denizcilik ve kimya endüstrilerinde korozyon önleme teknikleri büyük önem taşır. Metallerin ve alaşımlarının çevresel etkileşimler sonucunda bozunmasına neden olan ciddi bir mühendislik problemi olan korozyonun etkilerini en aza indirmek için metal kaplama yöntemleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu kaplamalar, metallerin yüzeyinde koruyucu bir bariyer oluşturarak oksijen, su, tuz ve diğer aşındırıcı maddelerin doğrudan temasını önler. Metal kaplamaların korozyonu önlemedeki etkisi, koruyucu bariyer, elektrokimyasal koruma, kimyasal dayanıklılığı artırma, estetik ve mekanik güçlendirme şeklinde ortaya çıkmaktadır.

Aşınma

Aşınma hasarı, sanayi ve endüstride makine ve ekipmanların performansını doğrudan etkileyen kritik bir faktördür. Özellikle yüksek sıcaklık, sürtünme, kimyasal etkileşimler ve darbeye maruz kalan yüzeylerde malzeme kaybı meydana gelerek üretim süreçlerinde verimlilik düşüşüne, bakım maliyetlerinin artmasına ve ekipman ömrünün kısalmasına yol açar. Metal işleme, madencilik, otomotiv, havacılık ve enerji sektörlerinde aşınmaya karşı dirençli malzemelerin ve koruyucu kaplamaların kullanımı hem güvenlik hem de ekonomik açıdan büyük önem taşımaktadır. Uygun malzeme seçimi, yüzey işlemleri ve yenilikçi kaplama

teknolojileri ile aşınma hasarı en aza indirilerek işletmelerin sürdürülebilirliği sağlanabilir (Kato & Adachi, 2000; Stachowiak, 2006).

Aşınma, malzemelerin temas ve hareketi sonucu yüzeylerinin zamanla kademeli olarak bozulması ve kaybıdır. Bu durum, endüstriyel ekipmanlarda, makine parçalarında, taşıma sistemlerinde ve birçok diğer uygulamada yaygın olarak görülür. Aşınma süreci, sürtünme kuvvetleri ve yüzeyler arasındaki temas nedeniyle oluşur. Yüzeylerin teması ve hareketi sırasında, malzeme partikülleri birbirine sürtünür ve bu sürtünme enerjisi yüzeylere aktarılır. Bu, malzeme yüzeylerinin yavaşça kademeli olarak bozulmasına ve aşınmasına yol açar. Aşınma türleri şekil 8’de verilmiştir.



Şekil 8. Aşınma türleri (Anonymous, 2020)

Aşınma, iki yüzeyin birbiriyle temas etmesi sonucu malzeme kaybı yaşanmasıdır ve genellikle aşağıdaki ana türlere ayrılır:

Abrasif Aşınma: Abrasif aşınma, endüstride özellikle madencilik, tarım makineleri ve aşındırıcı ortamlarda çalışan ekipmanlarda sıkça karşılaşılan bir aşınma türüdür. Şekil 8-a’de gösterildiği gibi, bu aşınma türü, bir yüzeyin daha sert bir malzeme veya sert partiküller tarafından çizilmesi, kesilmesi ya da kazınmasıyla oluşur. Relatif hareket sırasında, sert partiküller (örneğin kum, toz, çakıl) veya keskin kenarlı bir yüzey, diğer yüzeyi aşındırarak malzeme kaybına yol açar. Abrasif aşınma genellikle iki alt türe ayrılır:

İki cisimli aşınma, sert bir yüzeyin doğrudan daha yumuşak bir yüzeyi aşındırmasıdır (örneğin, metal yüzey üzerinde kaydırılan bir bıçak).

Üç cisimli aşınma, iki yüzey arasında bulunan serbest sert partiküllerin yuvarlanarak veya kayarak aşındırma etkisi oluşturduğu durumdur (örneğin, bir makinenin içindeki kir ve toz partiküllerinin aşındırıcı etkisi).

Bu aşınma türü, yüzeyde çizikler, oyuklar ve derin izler gibi belirgin işaretler bırakır. Aşındırıcı malzemenin, aşınan yüzeyden daha sert olması, bu aşınma türünün temel koşuludur. Abrasif aşınmanın önlenmesi veya azaltılması için yüzey sertleştirme işlemleri, aşınmaya dayanıklı kaplamalar, uygun yağlama teknikleri ve partiküllerin sistemden uzaklaştırılmasını sağlayan filtreleme sistemleri gibi yöntemler kullanılabilir (Bhushan, 2000).

Adhezif Aşınma: Adhezif aşınma, endüstride özellikle yüksek yük altında çalışan makine parçalarında sıkça karşılaşılan bir aşınma türüdür. Şekil 8-b'de gösterildiği gibi, iki yüzey temas ettiğinde, mikroskobik düzeyde yapışma meydana gelir ve hareket sonucunda bu yapışan bölgeler koparak malzeme kaybına neden olur. Yüksek basınç ve kayma hareketi, yüzeylerin mikro çıkıntılarının birbirine soğuk kaynak yapmasına ve geçici bağlar oluşturmaya yol açar. Hareket devam ettiğinde bu bağlar kopar ve yüzeyden malzeme ayrılır. Bu süreç, yüzeylerde yırtılma izleri, malzeme transferi ve pürüzlü bir doku bırakırken, genellikle yağlama eksikliği veya yetersizliği ile tetiklenir. Ayrıca, sürtünme katsayısının yüksek olması ve artan sıcaklık, aşınma hızını daha da artırır. Adhezif aşınmanın kontrol altına alınması için uygun yağlama sistemleri, yüzey kaplamaları ve malzeme seçimi gibi önlemler alınarak ekipman ömrü uzatılabilir (Bhushan, 2000).

Yorulmalı Aşınma: Yorulmalı aşınma, özellikle rulmanlar, dişliler, raylar ve benzeri dönen veya kayma hareketine maruz kalan makine parçalarında yaygın olarak görülen bir aşınma türüdür. Şekil 8-c'de gösterildiği gibi, bu aşınma mekanizması tekrarlanan mekanik gerilimler veya döngüsel yüklemeler sonucunda yüzeyde mikro çatlakların oluşması ve ilerleyerek malzemenin kopmasıyla gerçekleşir.

Yüzey, sürekli basınç, kayma gerilimi veya tekrarlayan yükleme koşullarına maruz kaldığında, malzeme içinde mikro çatlaklar meydana gelir. Zamanla bu çatlaklar birleşerek daha büyük çatlaklara dönüşür ve yüzeyden küçük parçacıkların kopmasına neden olur. Yorulmalı aşınma, özellikle yuvarlanan temasın olduğu sistemlerde (örneğin, rulmanlar, dişli çarkları ve tren rayları) belirgin hale gelir. Bu aşınma türünü önlemek veya geciktirmek için yüzey sertleştirme işlemleri (örneğin, indüksiyonla sertleştirme, nitrürleme), malzeme seçimi ve uygun ısı işlem uygulamaları, yağlama ve yüzey pürüzlülüğünü azaltıcı kaplamalar, aşırı yüklerin ve titreşimlerin kontrol edilmesi gibi yöntemler kullanılabilir.

Bu önlemler, yorulmalı aşınmanın neden olduğu erken ekipman arızalarını önleyerek makine bileşenlerinin ömrünü uzatmada kritik bir rol oynar (Bhushan, 2000).

Korozif Aşınma: Korozif aşınma, hem kimyasal/elektrokimyasal hem de mekanik aşınma süreçlerinin birleşimiyle meydana gelen karmaşık bir aşınma türüdür. Şekil 8-d'de gösterildiği gibi, bu tür aşınma genellikle agresif çevresel koşullar (nem, asidik/bazik ortamlar,

tuzlu su, yüksek sıcaklık) nedeniyle metal yüzeylerin korozyona uğramasıyla başlar. Oluşan korozyon ürünleri (örneğin oksit tabakaları), mekanik yükleme veya sürtünme nedeniyle yüzeyden uzaklaştırılır ve alttaki taze metal tekrar korozyona maruz kalır. Bu döngü, malzeme kaybını hızlandırarak ekipmanların ömrünü ciddi şekilde kısaltabilir.

Korozif aşınmanın yaygın görüldüğü alanlar arasında denizcilik, kimya endüstrisi, enerji santralleri ve otomotiv sektörü yer almaktadır. Özellikle yüksek sıcaklıkta çalışan motor parçaları, su buharı içeren sistemler ve kimyasal tesislerdeki borular bu tür aşınmaya karşı savunmasızdır. Korozif aşınmayı azaltmak için korozyona dayanıklı malzemeler (paslanmaz çelik, titanyum, nikel alaşımları) kullanmak, koruyucu kaplamalar (PVD, CVD, anodizasyon, seramik kaplamalar) uygulamak, yağlama ve kapalı sistemler kullanarak çevresel etkileşimi azaltmak, katodik koruma (örneğin çinko anotlar) uygulamak, pH kontrolü ve inhibitörler kullanarak korozyon hızını düşürmek gibi önlemler alınabilir. Bu yöntemler hem korozyonu hem de aşınmayı kontrol altına alarak makinelerin ve yapıların uzun ömürlü olmasını sağlar (Bhushan, 2000).

Malzeme bilimi, aşınma sürecini anlamak ve kontrol altına almak için bir dizi yenilikçi teknik geliştirmiştir. Bu teknikler, aşınmaya karşı dayanıklılığı artırmak ve malzemelerin ömrünü uzatmak için uygulanmaktadır.

Malzeme Seçimi: Aşınma direnci yüksek olan malzemelerin tercih edilmesi, aşınmayı minimize etmenin temel yollarından biridir. Seramikler, sert metal alaşımları ve yüzeyi sertleştirilmiş çelikler gibi malzemeler, yüksek sertlik ve dayanıklılık sağlayarak aşınmaya karşı daha dirençli hale gelir.

Tasarım Optimizasyonu: Parça geometrisinin, yüzey pürüzlülüğünün ve yük dağılımının optimize edilmesi, aşınma etkilerini azaltır. Örneğin, daha geniş temas yüzeyleri, gerilimin tek bir noktada yoğunlaşmasını engelleyerek aşınmayı yavaşlatabilir.

Yüzey İşlemleri: Yüzey sertleştirme (örneğin, nitrürleme, karbonitrürleme, plazma kaplama) ve ince film kaplamalar (PVD, CVD gibi yöntemler) aşınma direncini artırır. Bu işlemler, yüzeyin mekanik ve kimyasal dayanıklılığını güçlendirerek malzemenin ömrünü uzatır.

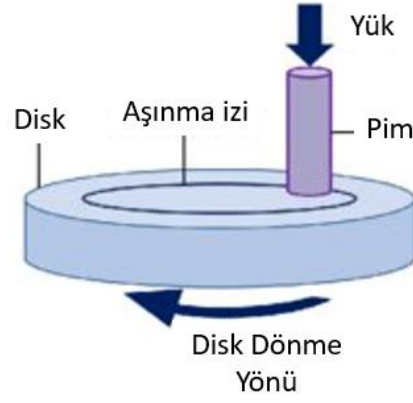
Yağlama ve Yağlayıcılar: Yağlayıcılar, yüzeyler arasındaki sürtünmeyi azaltarak aşınmayı en aza indirir. Katı yağlayıcılar (örneğin, MoS₂, grafit) ve sıvı yağlayıcılar, yüzeyler arasında ince bir film oluşturarak doğrudan temasın ve malzeme kaybının önüne geçer.

Bu yöntemlerin etkin bir şekilde uygulanması, endüstriyel makinelerin, taşıt bileşenlerinin ve mühendislik yapılarının aşınmaya karşı korunmasını sağlayarak daha uzun ömürlü ve verimli kullanım imkânı sunar (Kato & Adachi, 2000; Stachowiak, 2006).

Aşınma test yöntemleri

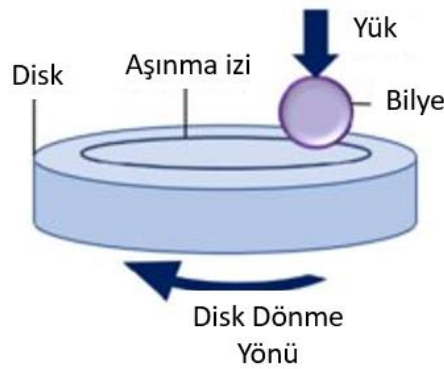
Aşınma test yöntemleri, malzemelerin sürtünme ve aşınma direncini belirlemek için kullanılan deneysel tekniklerdir. Bu testler, farklı aşınma mekanizmalarını analiz ederek malzemelerin performansını değerlendirmeye ve uygun malzeme seçimlerine yardımcı olur. Yaygın aşınma testleri arasında Pin-on-Disk (Pim-Disk), Taber Aşınma, Blok-on-Ring (Blok-Halka), Ball-on-Flat (Bilya-Düzlem), Erichsen Aşınma, Kavitatif Aşınma, Dry Sand-Rubber Wheel (Kuru Kum-Kauçuk Tekerlek) testleri bulunur. Her test yöntemi, belirli aşınma türlerini simüle ederek farklı çalışma koşullarında malzemelerin dayanıklılığını ölçmeye olanak tanır. Özellikle otomotiv, madencilik, havacılık ve makine mühendisliği gibi endüstrilerde, aşınmaya karşı dayanıklı malzemelerin geliştirilmesi ve değerlendirilmesi için kritik bir rol oynar.

Pin-on-Disk Testi (Disk Üzerinde Bilye Testi): Pin-on-Disk testi, malzemelerin sürtünme ve aşınma performansını değerlendirmek için yaygın olarak kullanılan bir tribolojik test yöntemidir. Bu testte, belirli bir normal yük altında bulunan bir bilye (küresel veya silindirik uçlu), belirlenen hızda dönen bir diskin yüzeyine temas ettirilerek sürtünme kuvveti ve aşınma davranışı incelenir. Test sırasında bilye ile disk arasındaki sürtünme katsayısı (μ) ve aşınma oranı, yük, hız ve çevresel koşullar gibi parametreler doğrultusunda ölçülerek hesaplanır. ASTM G99 ve ISO 20808 gibi uluslararası standartlara göre gerçekleştirilen bu test, otomotiv, havacılık, biyomalzeme ve kaplama teknolojileri gibi birçok endüstride yaygın olarak kullanılır. Kaplama teknolojilerinde (örneğin, TiN, DLC veya oksit kaplamalar) aşınma direncini belirlemek ve farklı malzeme çiftlerinin sürtünme özelliklerini karşılaştırmak için kritik bir yöntemdir. Aşınma testi sonrası optik mikroskop, taramalı elektron mikroskobu (SEM) veya profilometre kullanılarak aşınma izleri analiz edilir ve malzemenin tribolojik performansı değerlendirilir. Kuru veya yağlı ortamda uygulanabilmesi sayesinde farklı çalışma koşullarına uygun malzeme seçimi yapılmasına olanak tanır ve mühendislik uygulamalarında aşınma dayanımı yüksek malzemelerin geliştirilmesine katkı sağlar.



Şekil 9. Pin-on-Disk testi (Morshed et al., 2021)

Ball-on-Disk Testi (Disk Üzerinde Bilye Testi): malzemelerin aşınma direncini ve sürtünme özelliklerini değerlendirmek için kullanılan temel bir tribolojik analiz yöntemidir. Bu testte, genellikle çelik veya seramik gibi sert bir malzemeden üretilen bir bilya, belirli bir normal yük altında dönen bir disk yüzeyine temas ettirilir. Disk, test edilen malzemeden yapılmıştır ve sistem, rulmanlar, dişliler veya yapay eklemler gibi bileşenlerdeki hem kaymalı hem de yuvarlanmalı temas koşullarını simüle eder. Test parametreleri arasında uygulanan yük (malzeme yüzeyindeki temas basıncını belirler), kayma hızı, test süresi ve ortam koşulları (sıcaklık, nem, yağlayıcı varlığı) yer alır. Sürtünme katsayısı, dinamik olarak ölçülerek malzemelerin etkileşim davranışı izlenir. Test sonunda, disk üzerindeki aşınma izi veya bilyedeki aşınma lekesi profilometri, taramalı elektron mikroskobu (SEM) veya optik mikroskopi gibi yöntemlerle analiz edilerek aşınma mekanizmaları (abrazyon, adhezyon, yorulma) ve aşınma oranları belirlenir.



Şekil 10. Ball-on-Disk testi (Morshed et al., 2021)

Taber Aşınma Testi: malzemelerin aşınma direncini belirlemek için kullanılan standart bir test yöntemidir ve özellikle plastik, metal, ahşap, seramik ve kaplamalı yüzeylerin dayanıklılığını değerlendirmek amacıyla uygulanır. ASTM D4060, ISO 9352 ve DIN 53754 gibi uluslararası standartlara uygun olarak gerçekleştirilen bu testte, dairesel bir numune yatay düzlemde belirli bir hızda dönerken, üzerine belirli bir yük ile basınç uygulayan iki aşındırıcı

tekerlek temas eder. Tekerleklerin aşındırıcı etkisi, yüzeyin mekanik aşınmaya karşı direncini ölçmeye olanak tanır. Test sürecinde belirli bir döngü sonunda numunenin kütle kaybı veya yüzey aşınma derinliği ölçülerek aşınma oranı hesaplanır. Otomotiv, mobilya, tekstil, elektronik ve yapı malzemeleri gibi birçok endüstride yaygın olarak kullanılan bu test, malzeme ve kaplama seçiminde kritik bir değerlendirme yöntemi olarak önemli rol oynar.



Şekil 11. Taber aşınma test cihazı (Karkimya, 2023)

Ball-on-Flat (Bilya-Düzlem) Testi:

- Sabit bir bilye, düz bir yüzeye belirli bir kuvvetle bastırılır ve doğrusal ya da dairesel hareket uygulanır.
- Mikro aşınma mekanizmalarının incelenmesinde kullanılır.

Erichsen Aşınma Testi:

- Kaplamalı yüzeylerin aşınma dayanımını belirlemek için uygulanır.
- Döner fırçalar, zımparalar veya diğer aşındırıcı malzemeler kullanılarak test gerçekleştirilir.

Kavitatif Aşınma Testi:

- Malzeme yüzeyine yüksek hızlı sıvı veya gaz kabarcıklarının çarpması sonucu oluşan aşınma incelenir.
- Pompa, türbin ve denizcilik uygulamalarında kullanılan malzemelerin değerlendirilmesinde tercih edilir.

Adezyon

Adezyon, malzeme biliminde oldukça önemli bir kavram olup, birçok endüstriyel uygulama için kritik bir rol oynar. İki farklı malzeme yüzeyinin bir araya gelmesiyle gerçekleşen bu durum, yüzeyler arasında güçlü bir bağ oluşturur ve malzemelerin birbiri

üzerine yapışmasını sağlar. Bu yapışma, yüzeyler arasındaki kimyasal ve fiziksel etkileşimlerin bir sonucu olarak ortaya çıkar ve yüzeylerin kaynaşmasıyla karakterize edilir.

Adezyonun gücü, çok sayıda faktöre bağlı olarak değişir. Yüzeylerin temizliği, düzgünlüğü ve hazırlanma şekli, bu gücü önemli ölçüde etkileyen temel unsurlardır. Özellikle yüzeylerin kir ve yabancı maddelerden arındırılmış olması, adezyonun etkinliğini artırır. Ayrıca yüzeyler, kimyasal aktivasyon işlemlerine tabi tutulduğunda daha güçlü bir bağ oluşur. Yüzey hazırlığının yanı sıra, malzeme seçimi, yüzey kaplama teknikleri ve uygulama parametreleri de adezyonun gücünü etkileyen diğer belirleyici faktörlerdendir.

Kaplama malzemeleri, özellikle yüzeylerin korunması ve estetik amaçlarla dekorasyonu için adezyon prensiplerini temel alır. Kaplamalar, yüzeyin hem dayanıklılığını artırır hem de fiziksel ve kimyasal etkileşimlerle uyumlu hale gelmesini sağlar. Ayrıca, baskı işlemleri, etiketleme ve ambalaj endüstrisi gibi çeşitli alanlarda adezyonun kullanımı son derece yaygındır. Bu endüstrilerde, malzemelerin birbirine tutunması ve uzun süreli dayanıklılık göstermesi için adezyonun doğru bir şekilde kontrol edilmesi gerekmektedir.

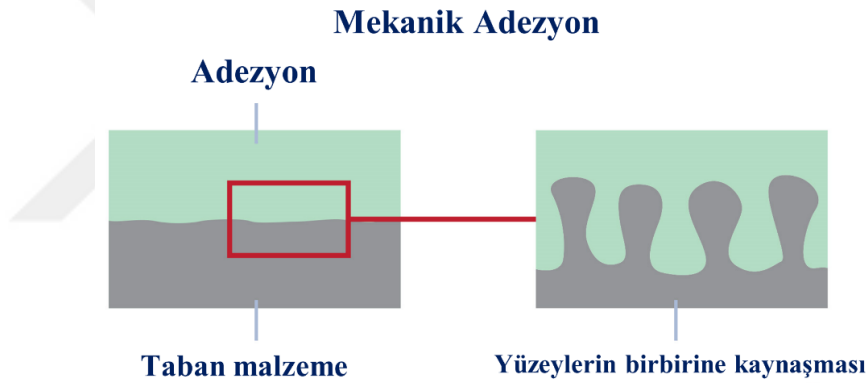
Adezyonun kontrolü ve optimizasyonu, malzeme biliminin ve mühendisliğinin en önemli araştırma alanlarından biridir. Yüzey işleme teknikleri, yapıştırıcı formülasyonları, kaplama teknikleri ve uygulama parametrelerinin iyileştirilmesi sürekli olarak araştırılan konulardandır. Bu süreçlerin iyileştirilmesi, adezyonun gücünü artırarak daha verimli ve dayanıklı malzeme birleşimleri elde edilmesini sağlar.

Ayrıca, adezyonun temel mekanizmalarının anlaşılması ve modellenmesi, malzeme bilimindeki ilerlemelere önemli katkılar sağlar ve endüstriyel uygulamaların geliştirilmesinde kilit rol oynar. Bu alandaki araştırmalar, daha etkili malzeme tasarımları ve üretim süreçleri için yol gösterici olmaktadır (Marshall et al., 2010; Da Silva et al., 2011; Lee, 2013).

Adezyon türleri

Kaplamaların adezyonu, yüzeylerin korunması, dayanıklılığının artırılması ve estetik görünümünün sağlanmasında kritik bir rol oynar. Yüzey kaplamalarının başarıyla yapılabilmesi için, kaplama malzemesinin yüzeye güçlü bir bağ kurması gerekir. Kaplama malzemesinin, yüzeye yeterli kimyasal veya fiziksel etkileşim kurabilmesi için yüzey öncesinde uygun hazırlık işlemleri yapılmalıdır. Kaplama malzemesinin ve yüzeyin uyumu, çevresel faktörlere karşı dirençli olmasını, aşınma ve kimyasal etkilere karşı da dayanıklı olmasını sağlar. Bu nedenle, kaplamaların başarılı bir adezyon sağlaması hem estetik hem de fonksiyonel açıdan büyük önem taşır. Uygulamada karşılaşılan adezyon türleri aşağıda verilmiştir.

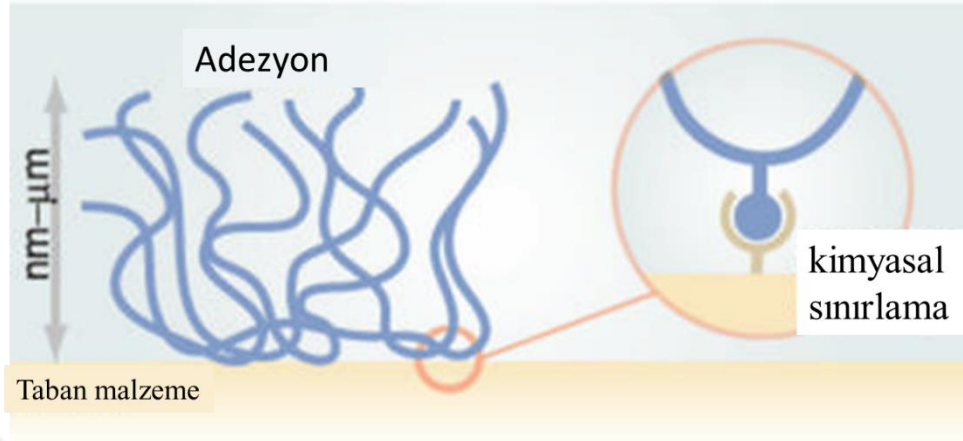
Mekanik Adezyon: Şekil 12’de gösterilen mekanik adezyon, bir malzemenin başka bir yüzeye fiziksel olarak tutunmasıyla gerçekleşir. Bu tür adezyon, yüzeydeki pürüzlülük, çatlaklar veya boşluklar gibi mikro yapılar sayesinde malzemenin diğer yüzeye "kenetlenmesini" sağlar. Mekanik adezyon, yüzeyin şekli ve yapısı ile doğrudan ilişkilidir. Bu tür adezyon, özellikle beton, ahşap ve metal gibi sert yüzeylerde yaygın olarak kullanılır. Yüzeyin pürüzlülüğü, mekanik adezyonun etkinliğinde kritik bir rol oynar, çünkü pürüzlü yüzeyler, kaplama malzemesinin daha fazla alana temas etmesine olanak tanır ve bağlanma gücünü artırır. Ancak, yüzey aşındığında, pürüzlülük kaybolursa veya yüzeydeki mikro yapılar zayıflarsa, tutunma gücü azalabilir. Bu nedenle, mekanik adezyonun dayanıklılığı, yüzeyin bakımı ve korunması ile doğrudan ilişkilidir. Ayrıca, bu tür adezyon, genellikle kaplama malzemesinin fiziksel özelliklerine, özellikle viskozitesine ve akışkanlık durumuna da bağlıdır. Sonuç olarak, mekanik adezyon, fiziksel bağlanma yoluyla güçlü bir tutunma sağlasa da yüzeydeki değişiklikler ve dış etkenler bu bağın gücünü zamanla zayıflatabilir (Bhushan, 2000; Ebnesajjad and Ebnesajjad, 2013).



Şekil 12. Mekanik adezyon mekanizmasını gösteren mikroyapı (Ebnesajjad and Ebnesajjad, 2013)

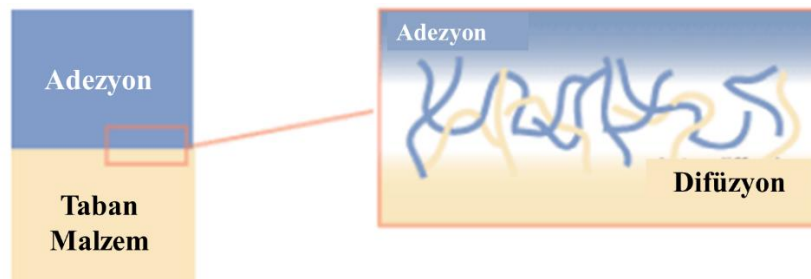
Kimyasal Adezyon: Şekil 13’te gösterilen kimyasal adezyon, iki yüzey arasında moleküler düzeyde kimyasal bağların oluşmasıyla meydana gelir. Bu tür adezyon, bir yapıştırıcının, yüzeyle hidrojen bağları, kovalent bağlar veya iyonik bağlar kurarak güçlü bir şekilde yapışmasını sağlar. Kimyasal bağlar, yüzeyler arasındaki etkileşimi önemli ölçüde güçlendirir ve bu bağların sağlamlığı, bağlanacak malzemelerin kimyasal özelliklerine göre değişir. Örneğin, epoksi kaplamalar, güçlü yapıştırıcılar ve bazı metal kaplamalar bu tür adezyondan yararlanır. Kimyasal adezyon, yüzeylerin kimyasal uyumuna ve reaksiyon yeteneğine bağlı olarak farklılık gösterir. Yüzeylerin temizliği, reaktivitesi ve kimyasal bileşimi, bu bağların güçlü olmasında anahtar rol oynar. Ayrıca, çevresel faktörler de bu bağların dayanıklılığını etkiler; örneğin nemli ortamlar, kimyasal bağların zayıflamasına neden olabilir, çünkü su molekülleri bağların yerini alabilir veya bağları bozabilir. Sıcaklık da önemli

bir etkendir; yüksek sıcaklıklar bazı kimyasal bağları zayıflatabilirken, düşük sıcaklıklar da bağların sertleşmesine ve kırılmasına yol açabilir. Kimyasal adezyon, özellikle dayanıklı yapıştırıcıların ve kaplamaların kullanımında kritik bir rol oynar, çünkü kalıcı ve güçlü bağlar oluşturulmasını sağlar (Bhushan, 2000; Ebnesajjad and Ebnesajjad, 2013).



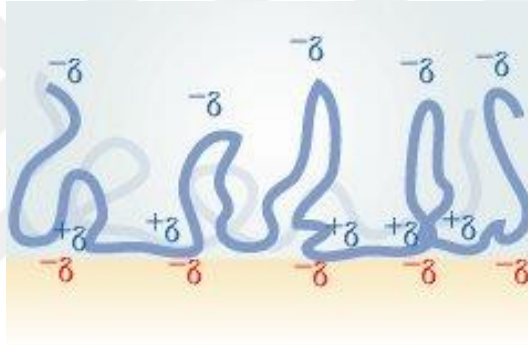
Şekil 13. Kimyasal adezyon mekanizmasını gösteren mikroyapı (Ebnesajjad and Ebnesajjad, 2013)

Difüzyon Adezyon: Şekil 14’de gösterilen difüzyon adezyonu, iki malzemenin moleküllerinin birbirine karışarak birleşmesiyle meydana gelir. Bu süreç, özellikle benzer polimerlerin ısıtılmasıyla gerçekleşir; ısıtıldığında polimerlerin molekülleri birbirine kaynar ve birleşir, böylece tek bir yapı gibi davranmaya başlar. Bu tür adezyon, plastik kaynakları ve polimer kaplamalar gibi uygulamalarda yaygın olarak kullanılır. Difüzyon, yüzeylerin moleküler düzeyde birbirine kaynaşmasını sağlar ve bu kaynaşma, kaplama ve yapıştırma işlemlerinin dayanıklılığını artırır. Ancak, difüzyon adezyonu, farklı malzemeler arasında genellikle zor bir süreçtir. Örneğin, metal ve plastik gibi malzemelerin birleşmesi, moleküllerin uyumsuzluğu nedeniyle difüzyon yoluyla gerçekleşmesi oldukça zordur. Bu tür durumlarda, genellikle ek bağlayıcılar veya özel işlem teknikleri kullanılarak tutunma sağlanır. Difüzyon adezyonunun etkinliği, malzemelerin kimyasal yapısına, yüzey sıcaklığına ve basınca bağlı olarak değişir. Ayrıca, bu tür adezyonun etkili olabilmesi için yüzeylerin temiz ve düzgün olması gerekir (Bhushan, 2000; Ebnesajjad & Ebnesajjad, 2013).



Şekil 14. Difüzyon adezyon mekanizmasını gösteren mikroyapı (Ebnesajjad and Ebnesajjad, 2013)

Elektrostatik Adezyon: Şekil 15'te gösterilen elektrostatik adezyon, zıt elektrik yüklerinin çekimiyle tutunma sağlar. Bu tür adezyon, yüklenmiş yüzeyler arasında meydana gelir ve genellikle toz boya uygulamalarında kullanılır. Örneğin, pozitif yüklü toz boya parçacıkları, negatif yüklü bir yüzeye tutunur. Bu şekilde, elektrostatik kuvvetler, boya partiküllerinin yüzeyde homojen bir şekilde dağılmasını ve tutunmasını sağlar. Elektrostatik adezyonun avantajı, uygulama sırasında malzeme kaybını en aza indirmesi ve daha verimli bir kaplama sağlamasıdır. Ancak, bu tür adezyon genellikle zayıf bir kuvvet olduğundan, uzun süreli dayanıklılık ve güçlü bağlar elde etmek için diğer adezyon türleriyle desteklenmesi gerekir. Örneğin, elektrostatik adezyon, kimyasal veya mekanik adezyon ile birleşerek daha güçlü ve kalıcı bir yapışma sağlar. Ayrıca, elektrostatik adezyon, özellikle toz kaplama, plastik kaplama ve boya uygulamalarında, yüzeyin şekli ve yüzey temizliği gibi faktörlere bağlı olarak değişkenlik gösterebilir. Çevresel koşullar, özellikle nem ve sıcaklık, elektrostatik kuvvetin etkinliğini etkileyebilir (Ebnesajjad and Ebnesajjad, 2013)



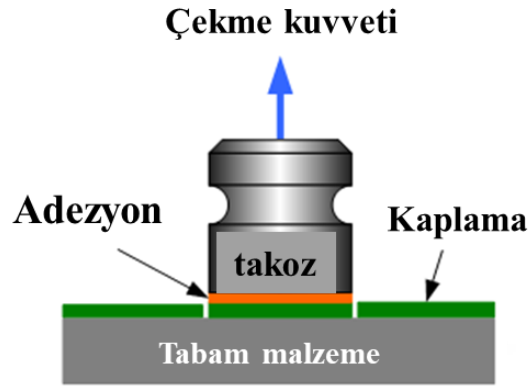
Şekil 15. Elektrostatik adezyon mekanizması (Ebnesajjad and Ebnesajjad, 2013)

Adezyon test yöntemleri

Adezyonun gücünü ölçmek, kaplamaların ve malzemelerin performansını değerlendirmek için oldukça önemlidir. Adezyon testi, malzemelerin birbirine tutunma kabiliyetini anlamak ve ürünlerin uzun ömürlü ve dayanıklı olup olmadığını belirlemek için kullanılır. Yöntemler, uygulama alanına, malzeme türüne ve testin amacına göre değişiklik gösterebilir. Aşağıda yaygın kullanılan adezyon test yöntemleri verilmiştir.

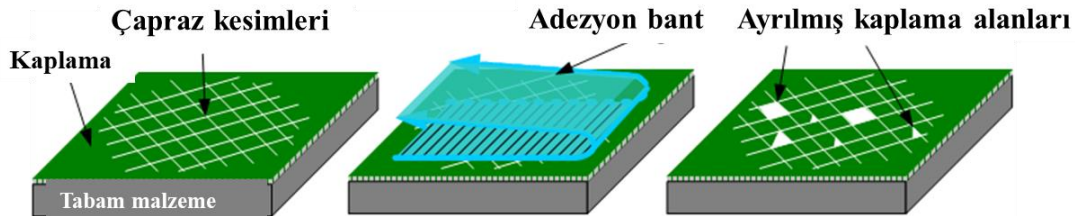
Çekme Testi (Pull-Off Test): Çekme testi, kaplamanın yüzeyden ayrılma direncini ölçen etkili bir test yöntemidir. Bu testte, kaplamaya bir dolly (test aparatı) yapıştırılır ve ardından bir çekme aletiyle kuvvet uygulanarak kaplama yüzeyden ayrılana kadar çekilir. Çekme sırasında uygulanan kuvvet arttıkça, kaplamanın yüzeye olan bağının zayıflama noktası belirlenir. Bu testin sonuçları genellikle megapaskal (MPa) cinsinden ifade edilir ve yüzeydeki tutunma gücünü nicel olarak gösterir. Çekme testi, kaplamaların veya yapıştırıcıların adezyon gücünü test etmek için yaygın olarak kullanılır. Yüksek doğruluk sağlar ve kaplamaların

dayanıklılığı hakkında kesin veriler sunar. Ancak, bu test yıkıcı bir testtir çünkü test sırasında yüzeyde bir hasar oluşabilir ve kaplama tamamen çıkarılabilir. Bu nedenle, genellikle kalıcı bir iz bırakmak istenmeyen durumlarda kullanılmaz. Yine de, özellikle inşaat ve otomotiv sektörlerinde, malzeme dayanıklılığı ve performansı hakkında güvenilir bilgiler elde etmek için ideal bir yöntemdir.



Şekil 16. Çekme testi mekanizması (Anonymous, 2023)

Bant Testi (Tape Test): Bant testi, kaplamanın tutunma gücünü hızlı ve pratik bir şekilde kontrol etmeye yarayan bir test yöntemidir. Bu testte, yüzey üzerine belirli büyüklükte kareler çizilir ve ardından bu alanlara bir bant yapıştırılır. Bant daha sonra hızlı bir şekilde çıkarılır ve yüzeydeki kaplamanın ne kadarının yerinde kaldığı gözlemlenir. Kalan kaplama miktarı, adezyonun ne kadar güçlü veya zayıf olduğunu gösterir. Eğer kaplama büyük ölçüde yerinde kalmışsa, adezyon güçlüdür; ancak kaplamanın çoğu bantla birlikte çıkarsa, adezyon zayıftır. Bu test, genellikle ASTM D3359 standardına göre derecelendirilir ve özellikle ince kaplamaların ve boyaların tutunma gücünü test etmek için yaygın olarak kullanılır. Bant testi, hızlı ve basit bir yöntem olup, pratikte oldukça kullanışlıdır. Ancak, kaba ve yüzeyin sadece genel tutunma durumunu gösteren bir testtir. Detaylı ve derinlemesine analizler için daha hassas yöntemlere başvurulması gerekebilir. Bu nedenle, bant testi daha çok başlangıç aşamalarında veya yüzeylerin genel durumunu hızlıca değerlendirmek için tercih edilir.



Şekil 17. Bant testi mekanizması (Anonymous, 2023)

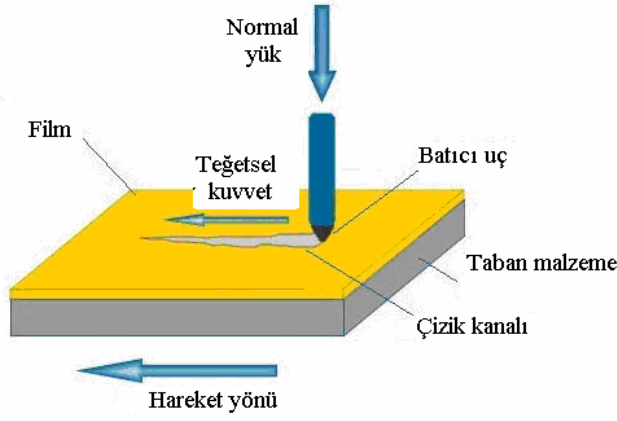
Kesme Testi (Shear Test): Kesme testi, yapıştırıcıların kayma direncini ölçen bir yöntemdir. Bu testte, iki yüzey zıt yönlerde doğru çekilir ve bu hareketle yüzeyler arasındaki bağın dayanıklılığı test edilir. Kaplama veya yapıştırıcı, bu hareket sırasında yüzeyler arasında

kayma kuvvetine karşı direnç gösterir. Kesme testi, genellikle yüksek doğruluk sağlar ve yapıştırıcının etkinliğini tam anlamıyla ortaya koyar. Test sırasında uygulanan kayma kuvveti, bağın kopma veya deformasyon noktasını belirler. Bu testin kesin sonuçlar sunması, özellikle inşaat ve otomotiv endüstrilerinde, yapısal bağlantıların güvenliğini sağlamak için kritik bir rol oynar. Ayrıca, kesme testi, farklı malzemeler ve yüzeyler arasındaki bağların kalitesini ölçmek için de yaygın bir şekilde kullanılır.

Çizik Testi (Scratch Test): Çizik testi, kaplamaların yüzeydeki adezyon gücünü ve dayanıklılığını ölçmek için geliştirilmiş ve malzeme bilminde yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Özellikle ince film kaplamaların (örneğin, metal yüzey üzerindeki seramik veya polimer tabakalar) performansını değerlendirmede oldukça etkilidir. Bu testte, genellikle elmas uç (stylus), kaplamalı yüzey üzerinde kontrollü bir şekilde hareket ettirilir. Uygulanan kuvvet sabit tutularak ya da kademeli olarak (örneğin, 0'dan 100 N'a kadar) artırılarak kaplamanın çatlama, soyulma veya çizilme noktası tespit edilir.

Test, numune temizlendikten ve pürüzsüzlüğü kontrol edildikten sonra başlatılır. Çizik testinde özel bir cihazda, 200 μm çapında ve 120° açığa sahip bir elmas uç, 1-10 mm/s hızla yüzeyi çizerken kuvvet, sürtünme ve akustik emisyon gibi veriler sensörlerle kaydedilir. Bu veriler, kaplamanın gösterdiği tepkiyi (çatlama, soyulma veya çizilme) analiz etmek için kullanılır. Çatlama, malzemenin kırılma eğilimini; soyulma, adezyon zayıflığını; çizilme ise dayanıklılığın bir işareti olarak kabul edilir. Kaplamanın tepkileri, optik mikroskop ya da taramalı elektron mikroskopu (SEM) gibi cihazlarla detaylı bir şekilde incelenebilir.

Çizik testinin avantajları arasında hem adezyon hem de kohezyon hakkında bilgi sağlama ve özellikle ince kaplamalar (1-20 μm) için hassas sonuçlar sunması yer alır. Bu yöntem, kaplamaların dayanıklılığını ve performansını doğrulamak için etkili bir testtir. Ancak, test sırasında numune üzerinde zarar oluşabileceği ve kalın kaplamalarla yapılan testlerin etkinliği azalabilmektedir. Ayrıca, testin sonuçları operatörün deneyimine bağlı olarak değişebilir, bu nedenle testin doğru ve güvenilir bir şekilde yapılabilmesi için uzmanlık gereklidir.



Şekil 18. Çizik testi mekanizması (Demirci, 2014)

Alüminyum Alaşımlarının Yüzey Modifikasyonu İçin Yapılan İşlemler

Mühendislik yapılarındaki hasarların büyük bir kısmı, yorulma, kırılma, aşınma ve korozyon gibi sorunlardan kaynaklanır. Bu tür hasarlar genellikle malzemelerin yüzeylerinde veya dış katmanlarında meydana gelir. Özellikle aşınma, bu sorunlar arasında önemli bir yer tutar ve doğrudan malzeme yüzeyinin durumu ile ilişkilidir (Palacios et al., 2014). Aşınma, malzeme yüzeyinin fiziksel aşındırılması veya deformasyonu sonucunda meydana gelir ve malzemenin uzun ömürlülüğünü doğrudan etkiler. Bu nedenle, mühendislik tasarımlarında aşınma direncini artırmak kritik bir öneme sahiptir.

Malzemelerin mekanik özelliklerini ve aşınma performansını geliştirmek için çeşitli yüzey modifikasyon yöntemleri kullanılmaktadır. Bu yöntemler arasında yüzey sertliğini artırma, yüzeyde kalıcı gerilmeler oluşturma, tane boyutunu küçültme ve sert fazlar/katmanlar oluşturma gibi teknikler öne çıkar. Bu teknikler, malzemenin dış yüzeyini iyileştirerek, aşınma ve mekanik yıpranma gibi olumsuz etkileri azaltmaya yardımcı olur (Hassani-Gangaraj et al., 2014).

Ayrıca, malzeme yüzeyine uygulanan modifikasyonlar, malzemenin korozyon direncini artırabilir, termal dayanıklılığını iyileştirebilir ve estetik görünüm kazandırabilir. Yüzey modifikasyonları, sadece mekanik özellikleri artırmakla kalmaz, aynı zamanda malzemenin çevresel etkilere karşı daha dirençli hale gelmesini sağlar.

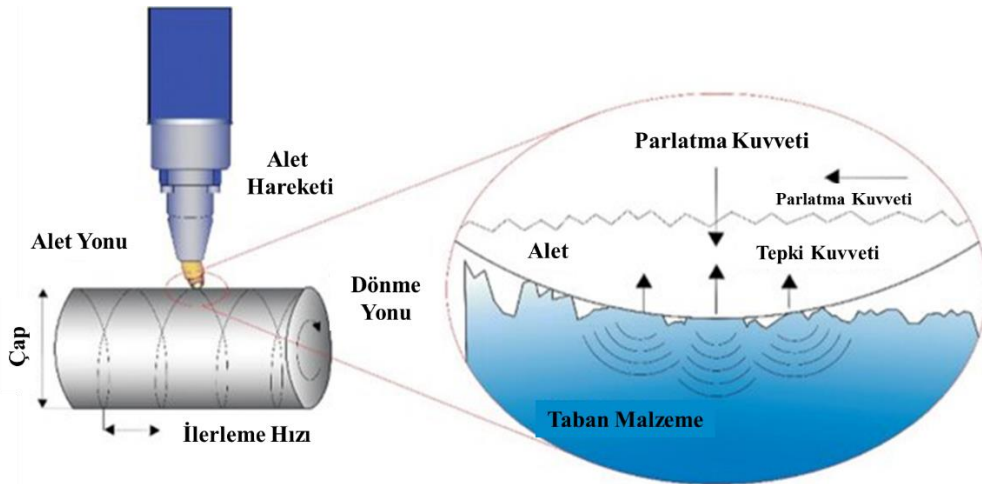
Alüminyum alaşımlarında da, iç yapıyı değiştirmeden yüzeydeki problemlerin çözülmesi için benzer yöntemler kullanılır. Alüminyum, hafifliği ve dayanıklılığı ile birçok mühendislik uygulamasında tercih edilen bir malzemedir. Ancak, aşınma ve korozyon gibi sorunlar alüminyumun kullanım ömrünü kısıtlayabilir. Bu sebeple, alüminyum yüzeylerinin modifiye edilmesi, özellikle aşınma direncini artırmak amacıyla çeşitli yöntemlerle yapılır. Yaygın olarak kullanılan yöntemler şunlardır

Bilye cilalama (Ball Burnishing)

Bilye cilalama, yüzeyin mikro yapısını iyileştirmek ve pürüzlülüğü azaltmak amacıyla uygulanan bir işleme yöntemidir. Bu işlemde, serbest dönen bir bilye, bir cihaz tarafından parçanın yüzeyine bastırılır ve bilye yüzeyin mikro tepelerini, mikro vadilerini plastik deformasyonla düzleştirir. Şekil 19'da gösterilen cihazlarda olduğu gibi, bilye, yüzeyin üst kısmındaki pürüzleri etkili bir şekilde düzelterek homojen bir yüzey oluşturur.

Bilye cilalama, özellikle torna tezgahlarında kullanılarak yüksek yüzey kalitesi ve boyutsal tutarlılık sağlar. Bu yöntem, malzemenin yüzeyini oldukça düzgün hale getirir ve genellikle son işlem (finishing) olarak kullanılır. Araştırmalar, bu yöntemin yüzey özelliklerini önemli ölçüde iyileştirdiğini, yüzey pürüzlülüğünü azalttığını ve genellikle aşınma direncini artırdığını göstermektedir (El-Axir, 2000). Ayrıca, bilye cilalama, yüzey sertliğini artırarak, malzemenin ömrünü uzatabilir.

Bu işlem, özellikle alüminyum, çelik ve titan gibi malzemelerde yaygın olarak uygulanmaktadır. Bilye cilalama, sıcaklık ve korozyon gibi çevresel etkilere karşı dayanıklılığı artırma açısından da önemli faydalar sağlar. Yüzeyde oluşan mikroskobik düzleştirme, malzemenin dış etkilerden daha az zarar görmesine yardımcı olur. Sonuç olarak, bilye cilalama, aerospace (havacılık), otomotiv ve makine endüstrisi gibi birçok mühendislik alanında yaygın bir yüzey iyileştirme tekniğidir.



Şekil 19. Bilye cilalama işlemi (Alshareef et al., 2020)

Lazer şok işleme (LSP)

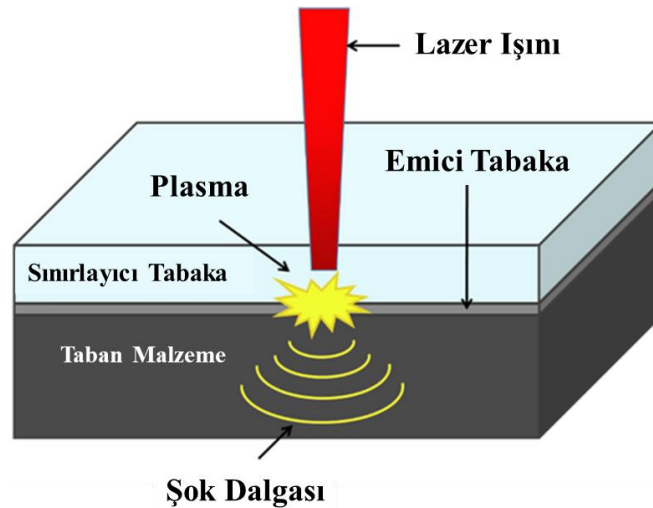
Lazer şok işleme (LSP), yorulma ve korozyon direncini artırmak amacıyla yüzeyde basınçlı artık gerilmeler oluşturan oldukça etkili bir yöntemdir. Bu yöntem, malzemenin yüzeyine yoğun bir lazer ışını gönderilerek yüksek basınçlı şok dalgaları oluşturulmasını sağlar.

LSP işlemi, lazer ışınının malzeme yüzeyine vurması sonucu oluşan şok dalgalarının, yüzeydeki yapıyı değiştiren ve gerilmeler oluşturan bir mekanizmayı kullanır. Bu işlem, özellikle yüzeydeki mikro yapıyı ve mekanik özellikleri iyileştirme konusunda oldukça etkilidir.

LSP işlemi, malzeme yüzeyinin lazer ışını ile etkileşerek yüksek basınçlı şok dalgaları tarafından işlenmesi prensibine dayanır. Bu süreç, yüzey sertliğini artırabilir, aşınma direncini yükseltebilir ve özellikle yorulma ömrünü uzatabilir. Şekil 9'da gösterildiği gibi, lazer ışınının etkisiyle yüzeydeki malzeme, şok dalgalarının mekanik etkisiyle modifiye edilir (Rubio-González et al., 2004). Bu işlem sonucunda, yüzeyde plastik deformasyon meydana gelir ve malzeme yüzeyine mikro yapısal değişiklikler eklenir.

Lazer şok işleminin en büyük avantajlarından biri, yüzeyde kalıcı gerilmeler oluşturarak, malzemenin çatlama ve yorulma gibi olumsuz etkilerine karşı dayanıklılığını artırmasıdır. Bu teknik, özellikle metal malzemelerin yüzeylerinde uygulandığında, korozyon ve aşınma direncini önemli ölçüde iyileştirebilir.

Ancak, lazer şok işleminin bazı sınırlamaları da bulunmaktadır. Bu işlemin yüksek maliyetli olması ve üretim sürecinin istikrarsızlığı, yaygın olarak uygulanmasının önündeki engeller arasında yer alır. LSP işlemi genellikle özel endüstriyel uygulamalarda, örneğin havacılık, otomotiv ve enerji santralleri gibi alanlarda tercih edilir. Bunun yanı sıra, yüksek teknoloji gereksinimi ve karmaşık ekipman kullanımı da, işlemin daha geniş bir yelpazede kullanılmasını sınırlamaktadır (King et al., 2006).



Şekil 20. Lazer şok işleme prensibinin şematik gösterimi (C. Zhang et al., 2021)

Soğuk genleşme tekniği

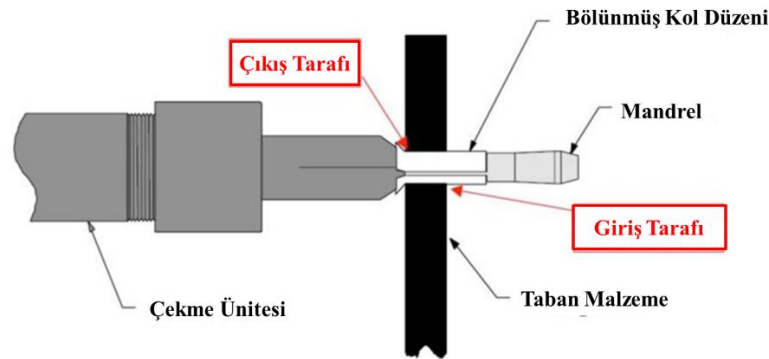
Soğuk genleşme tekniği, malzeme yüzeyinde plastik deformasyon oluşturmak amacıyla uygulanan etkili bir yüzey modifikasyon yöntemidir. Bu işlemde, büyük bir konik mandren,

malzemenin delik kısmından geçirilerek delik etrafında sıkıştırıcı artık gerilmeler meydana getirir. Bu gerilmeler, yüzeyde gerilim konsantrasyonunu azaltarak, yorulma çatlaklarının oluşumunu ve ilerlemesini geciktirir. Yani, malzeme üzerinde kompresyon gerilmeleri oluşturulması, yorulma ömrünü uzatır ve çatlakların yayılmasını engeller (Papanikos & Meguid, 1998).

Soğuk genleşme tekniği, özellikle yüksek gerilim altındaki ve ağır yük taşıyan yapıların üretiminde tercih edilen bir yöntemdir. Bu işlem, metal malzemelerin yorulma dayanımını artırır, aynı zamanda sıcaklık dalgalanmalarına karşı da direnç sağlar. İşlem sırasında, mandrenin delikten geçirilmesi sonucu, malzemenin iç yapısında mükemmel bir sıkıştırma gerilmesi oluşur. Bu sıkıştırma, malzemenin yüzeyinin daha dayanıklı hale gelmesini sağlar.

Soğuk genleşme işlemi, özellikle yüksek hassasiyetli parçalar ve aerojenik uygulamalar gibi alanlarda kullanılır. Örneğin, havacılık sanayi ve otomotiv endüstrisi gibi sektörlerde, yüksek gerilme altında çalışan malzemelerin dayanıklılığını artırmak amacıyla bu teknik sıkça uygulanmaktadır.

Bir diğer önemli avantajı, soğuk genleşme tekniğinin düşük maliyetli olması ve basit ekipmanlarla gerçekleştirilebilmesidir. Bu, daha geniş bir uygulama alanı bulmasını sağlar. Bununla birlikte, işlem yalnızca düzgün şekilli ve belirli geometrik özelliklere sahip malzemelere uygulanabilir. Ayrıca, işlem sırasında elde edilen sıkıştırma gerilmelerinin, malzemenin tüm yüzeyine düzgün bir şekilde dağılmasına dikkat edilmelidir.



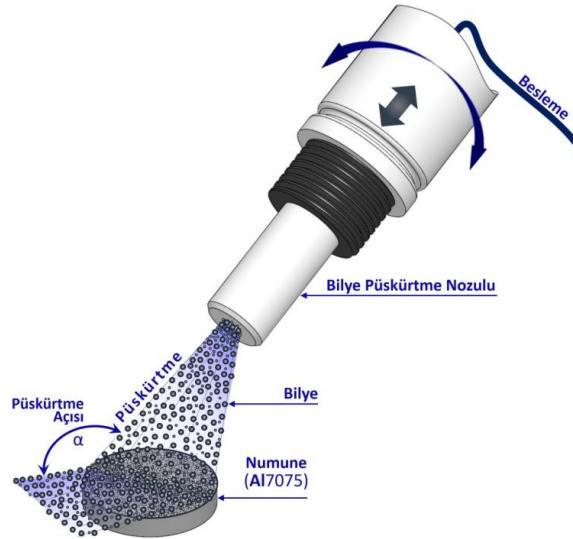
Şekil 21. Bölünmüş soğuk genleşme işlemi (J. Li & Zhao, 2012).

Bilyeli Dövme İşlemi (Shot Peening)

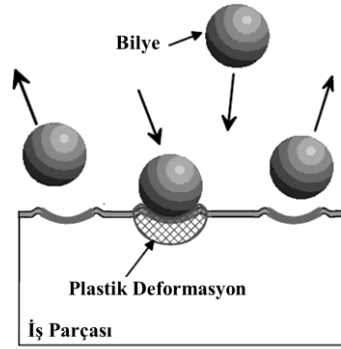
Sert bilyelerin küresel yapıda olduğu bilyeli dövme işlemi, belirli işlem parametreleri kullanılarak hedef malzemenin yüzeyinde ve yüzey altı bölgelerinde kalıcı basma gerilmeleri oluşturulmasını sağlar. Bu parametreler arasında çarpma açısı, basınç, püskürtme mesafesi, süre, bilye çapı ve bilye türleri yer alır (Marteau et al., 2015); Bilyeli dövme işlemi, bilyelerin malzeme yüzeyine neredeyse küçük çekiç darbeleriyle vurmasıyla gerçekleşir ve bu da plastik

deformasyon oluşumuna neden olur. Sonuç olarak, oluşan kalıcı basma gerilmeleri, malzemenin yorulma dayanımını ve gerilmeli korozyon karşısındaki dayanıklılığını artırmayı hedefler (Oguri, 2011; Trško et al., 2014), Ayrıca, bu işlem yüzey pürüzlülüğü, mikro sertlik profilleri ve mikro yapı değişiklikleri üzerinde etki yaparak aşınma direncini iyileştirir (Xie et al., 2013; Ganesh et al., 2014).

Bilyeli dövme işlemi, metallerin yorulmaya karşı dayanıklılığını artırmak amacıyla, bilye darbeleriyle metal yüzeyinde çıkıntılar ve oyuklar oluşturarak gerçekleşir. Bu işlem, Şekil 22 ve 23’de şematik olarak gösterilen bilyeli dövme düzeneğiyle yapılmaktadır. Bu düzeneğin içinde, bilye püskürtme basıncı, bilye boyutu, numune yüzeyi ile nozül arasındaki mesafe, bilye çarpma açısı ve dövme süresi gibi parametreler kontrol edilebilir. Sistem, bilyelerin püskürtülmesini sağlayan bir hava kompresörü ve hava kurutucu, bilyelerin beslendiği besleme ünitesi, püskürtme nozulu, basınçlı havanın ve bilyelerin iletimi için kullanılan bağlantı elemanları ile numune tutucudan oluşur. Nozul yardımıyla, bilyeler numune yüzeyine yönlendirilir ve tekrarlanan bir şekilde çarparak işlemi tamamlar. Bilyeli dövme işleminde kullanılan bilyeler, çelik, dökme demir, seramik veya paslanmaz çelik gibi malzemelerden yapılabilir. Bilye malzemesi, hedef malzemenin kullanım koşullarına ve özelliklerine bağlı olarak seçilir (Döleker, 2015).



Şekil 22. Bilyeli dövme için kullanılan düzeneğin şematik gösterimi



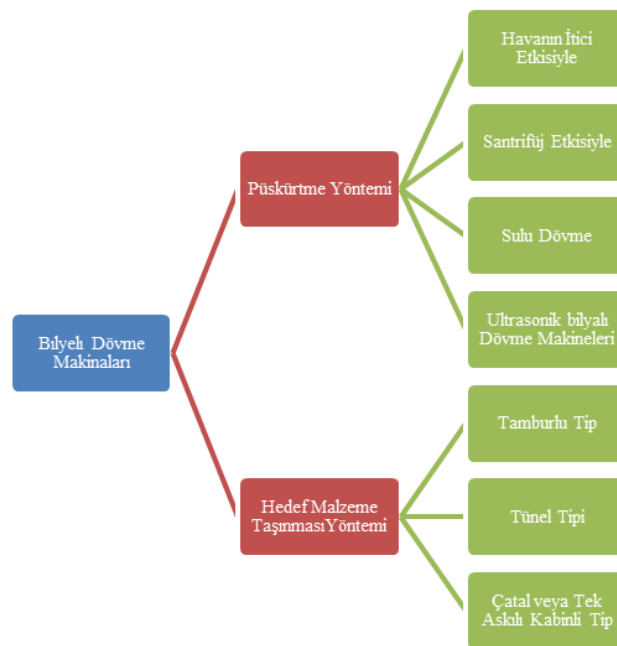
Şekil 23. Bilyeli dövme işleminin temsili gösterimi (Wagner, 2003)

Bilyeli dövme makinaları ve yöntemleri

Bilyeli dövme makineleri, işlevlerine ve yapılarına göre iki ana gruba ayrılmaktadır. İlk grup, püskürtme yöntemi ile çalışan makineleri kapsar. Bu makinelerde, bilyeler yüksek hızda hedef malzemeye püskürtülerek, yüzeyde istenilen deformasyon ve kalıntı gerilmesi sağlanır. İkinci grup ise hedef malzemenin taşınmasına dayalı makinelerden oluşur. Bu makinelerde, hedef malzeme sabit kalırken bilyeler hareket ettirilir ve yüzeyde istenilen etkiyi oluşturur.

Bilyeli dövme makineleri ayrıca, manuel ve otomatik olmak üzere iki alt kategoriye de ayrılabilir. Manuel makinelerde, operatörler bilyelerin yönünü, hızını ve hareketini kontrol eder. Otomatik makinelerde ise bu parametreler tamamen otomatik sistemlerle kontrol edilir, bu da daha yüksek üretim verimliliği ve tekrarlanabilirlik sağlar.

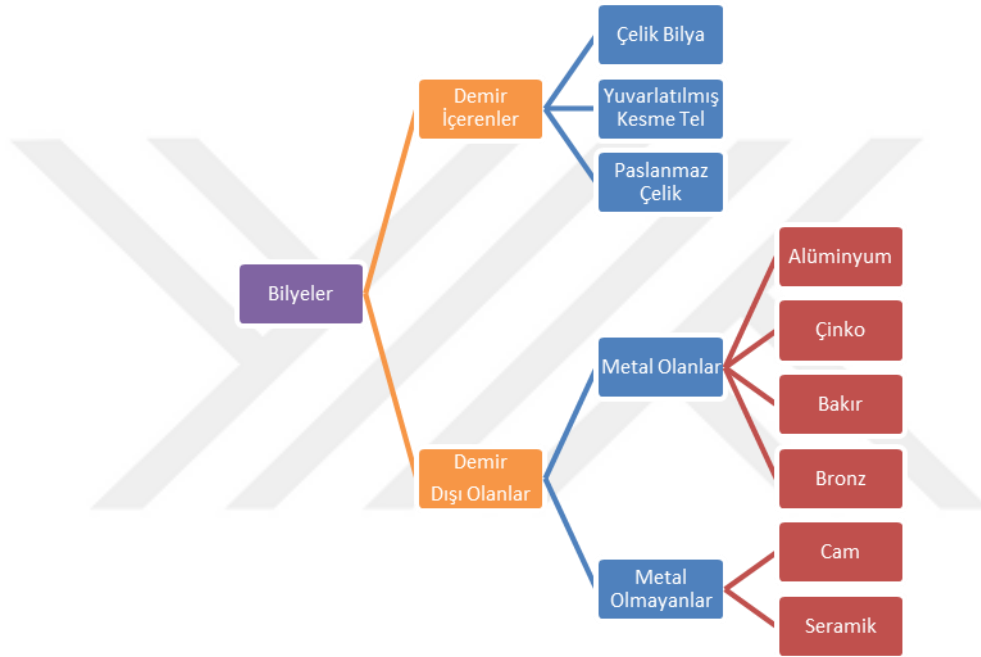
Şekil 24'te, bilyeli dövme makinelerinin sınıflandırılması ayrıntılı bir şekilde gösterilmektedir.



Şekil 24. Bilyeli dövme makinaları kategorileri

Bilyeli dövme işleminde kullanılan bilyelerin çeşitleri ve özellikleri

Bilyeler, bilyeli dövme sürecinin ana aracıdır ve bu nedenle bilyelerin şekli ve malzemesi, işlem kalitesini doğrudan etkiler. Bilyeler, demir içeren ve demir dışı olmak üzere iki ana gruba ayrılır. Bilyelerin malzemenin yüzeyine etkili olabilmesi için, yüksek basınçla yüzeye püskürtülmesi gerekmektedir. Bu, bilyeli dövme işlemindeki en önemli parametrelerden biridir. Dövme işlemi sırasında, bilyeler kırılabilir veya deforme olabilir. Bu tür durumlar, işlem sırasında istenmeyen sonuçlara yol açabileceği için, bilyeler değiştirilmelidir veya sadece yüzey temizleme amacıyla kullanılmalıdır (Yalçinkaya, 2019). Şekil 25'te bilyeli dövme işleminde kullanılan bilye tipleri göstermektedir (Unal, 2016) .



Şekil 25. Bilye çeşitleri (Unal, 2016)

Bilyeli dövme işleminde, bilyeler, Society of Automotive Engineers (SAE) tarafından belirlenen standartlara göre sınıflandırılmış ve şu anda bu standartlar doğrultusunda kullanılmaktadır. Tablo 1'de, SAE bilye standartlarına ilişkin detaylı bilgiler verilmiştir. SAE standardında, "S" harfi, bilye malzemesinin çelik olduğunu belirtmek için kullanılır. SAE standardına göre, S grubu bilyeler, S70'ten başlayarak S1320'ye kadar sınıflandırılmıştır (Balyalı, 2015).

Tablo 1. Bilye Standartları (Unal, 2016)

Bilye Tipi	Uluslararası Standartı	Sertlik Derecesi
Çelik Bilye	AMS 2431/1 veya AMS 2431/2	45-52 HRC veya 55-62 HRC
Tel Kesme Bilye	AMS 2431/3 veya AMS 2431/8	45-52 HRC veya 55-62 HRC
Cam Bilye	AMS 2431/6	48-52 HRC
Seramik Bilye	AMS 2431/7	58-63 HRC

Bilyeli dövme işlemlerinde, malzeme yüzeyine çarpan bilyeler, sonraki püskürtme aşamalarında tekrar kullanılmak üzere toplanır. Bu süreçte, püskürtme basıncının sabit tutulabilmesi için bilyelerin dönüş yoluna bir ayırıcı yerleştirilir (Whinney, 1979; Kirk, 1999). Ayırıcı, kırık veya deforme olmuş bilyeleri döngüden çıkararak yerine yeni bilyeler ekler ve böylece keskin kenarlı kırık bilyelerin yüzeyde çizik ve çatlak oluşturma riskini ortadan kaldırır (Whinney, 1979).

Standartlara göre, bilyeli dövme işlemi sırasında iyi boyutlu ve mükemmel küreselliğe sahip bilye oranı %85'in altında olmamalıdır. Bu oranı sağlamak için, tüm bilyeler tankta ayırıldıktan sonra, ayrı bir cihazda şekil ve boyutlarına göre dikkatlice (Whinney, 1979).

Bilyeli dövme işleminde etkili parametreler

Bilyeli dövme işleminin etkinliği, birçok faktöre bağlıdır. Bu faktörler arasında bilye özellikleri (çap, malzeme, sertlik), işlem parametreleri (atış hızı, açısı, süresi), malzeme özellikleri (sertlik, kalınlık), çevresel koşullar (sıcaklık, nem) ve ekipman tasarımı (nozul, hava basıncı) yer alır. Özellikle bilye çapı ve Almen şiddeti, yüzeyde oluşan deformasyonun derinliği ve şiddetini belirlerken, malzeme sertliği ve kalınlığı ise deformasyonun yüzeyde veya iç kısımlarda nasıl dağılacakını etkiler.

Çevresel faktörler ve ekipman tasarımı da işlemin homojenliği ve verimliliği üzerinde önemli bir rol oynar. Örneğin, sıcaklık ve nem gibi çevresel koşullar, bilyelerin malzeme yüzeyine etkisini değiştirebilir. Aynı şekilde, nozul tasarımı ve hava basıncı, işlem sırasında bilyelerin yüzeye nasıl çarptığını ve gerilim dağılımını etkileyebilir.

Bu parametrelerin doğru bir şekilde optimize edilmesi, yüzey sertliğini artırma, yorulma ömrünü uzatma ve kalıntı gerilimlerini azaltma gibi hedeflere ulaşmak için kritik öneme sahiptir (Miao et al., 2010; Bagherifard and Guagliano, 2012)

Bilyeli dövme yönteminin ana parametreleri

Yoğunluk: Yoğunluk, kinetik enerji miktarını ifade eder ve püskürtme işlemi ile doğrudan ilişkilidir. Bilyelerin malzeme yüzeyine çarptığında transfer ettiği enerji miktarını belirler. Bu transfer edilen kinetik enerji, bilyenin kütlesi ve hızı ile doğrudan ilişkilidir. Bilyeli dövme işlemi sırasında, yoğunluk Almen şeridi tarafından kontrol edilir.

Genel olarak, yoğunluğun etkili olduğu parametreler şu şekildedir:

- Bilye çapı: Bilyenin boyutu, yüzeye çarpma enerjisinin büyüklüğünü etkiler. Daha büyük çaplı bilyeler, daha fazla enerji ile çarparak derin deformasyonlar oluşturur.

- Bilye şekli: Bilyenin küresellik miktarı ve yüzey pürüzlülüğü, çarpma sırasında yüzeye iletilen enerjinin etkinliğini etkiler. Düzgün küresel şekil, daha homojen bir enerji transferi sağlar.
- Bilye kütlesi: Bilyenin kütlesi, çarpma sırasında iletilen enerjinin miktarını belirler. Daha ağır bilyeler, daha fazla enerji transferi yapar.
- Bilye yoğunluğu: Bilyenin yoğunluğu, çarpma sırasında malzemeye iletilen enerjinin miktarını etkileyebilir. Yoğun bilyeler, daha fazla enerji ile yüzeye çarpar.
- Bilye yüzey sertliği: Bilyenin sertliği, yüzeye çarptığında ne kadar plastiklik ve deformasyon yaratacağını belirler. Sert bilyeler, daha güçlü deformasyonlar yaratabilir.
- Bilye malzeme yüzeyine çarpma hızı: Çarpma hızı, iletilen enerjinin büyüklüğünü ve etkisini doğrudan etkiler. Yüksek hızda çarpan bilyeler, daha fazla enerji transfer eder ve daha derin deformasyonlara yol açar.

Bu parametreler arasında, hız parametresi en önemli etkiye sahip olan faktördür. Bilyenin malzeme yüzeyine çarpma hızı, iletilen enerjinin büyüklüğünü belirler ve deformasyonun derinliğini etkiler.

Doygunluk: Doygunluk terimi, malzeme yüzeyinin maksimum bası kalıntı gerilmesi değerine ulaştığı ve bu gerilmenin optimize edildiği durumu ifade eder. Doygunluk, doğrudan püskürtme süresi ile ilişkilidir ve malzeme yüzeyine çarpan bilye sayısına bağlıdır. Püskürtme süresi iki katına çıkarıldığında, Almen şeridi üzerindeki eğriliğin artışı genellikle %10'u geçmez. Bu durum, göreceli doyumluğa ulaşıldığını ve ek süre ile daha fazla fayda sağlanamayacağını gösterir (Stephens et al., 2000).

Alan Kapsama: Belirli bir seviyedeki darbe homojenliğinin derecesini nicel olarak ifade eder ve görsel olarak kontrol edilir. Normalde standart kapsam %100'dür (Shivpuri et al., 2009; Whinney, 1979).

Çarpma Açısı: Bilyeli dövme işleminde, bazı yüzey geometrileri nedeniyle bilyelerin dik açıyla püskürtülmesi mümkün olmayabilir. Araştırmalar, çarpma açısının 50 derecenin altına düşmesinin, püskürtme yoğunluğu ve kalıntı gerilme üzerinde olumsuz bir etkisi olduğunu göstermektedir. Özellikle dişliler gibi karmaşık geometrilere sahip yüzeylerde, 60 derece gibi bir açıyla çarpma sağlanamayabilir. Bu durumda, püskürtme yoğunluğunu artırmak amacıyla bilye hızı ve bilye boyutu artırılabilir (Hill, 1981).

Almen şiddeti

Almen şiddeti, dövme uygulamalarında maliyeti düşük bir şekilde tüm parametrelerin birleşik etkisini temsil eden yaygın bir proses kontrol yöntemidir. Almen şeritleri, özel olarak

tasarlanmış bir Almen şeridi tutucusuna bağlanır ve bu Almen şeridi, önceden tanımlanmış dövme süresi boyunca bilyeli dövme işlemine tabi tutulur. Dövme işlemi sona erdiğinde, Almen şeridi tutucudan çıkartılır. Bu aşama sonucunda, Almen şeridinde plastik deformasyon meydana geldiğinden, bir miktar deformasyon ortaya çıkar. Bu deformasyon, Almen ölçü aleti kullanılarak Almen şeridinin yay yüksekliği eğrilik ölçüsü olarak ölçülür (Gariépy et al., 2013; Karahan & İnce, 2015). Şekil 26, Almen testini ölçüm cihazı ve standart numuneleri gösteren bir görseli içermektedir.

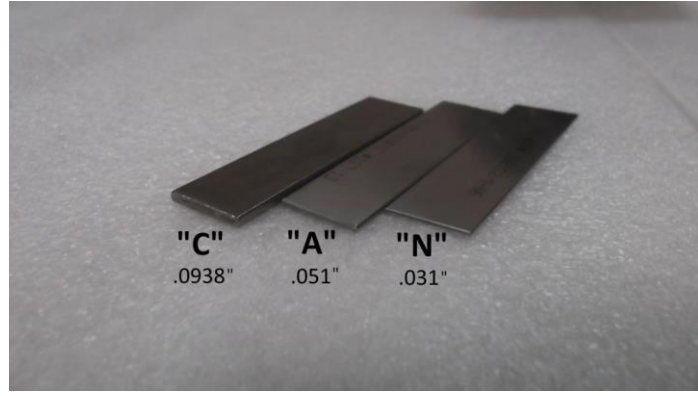


Şekil 26. Almen şiddetinin ölçüm sistemi (Karahan & İnce, 2015)

Almen şeritleri, şerit kalınlığına göre C, N ve A şeklinde adlandırılır (Şekil 27). SAE 1070 malzemesinden üretilen şeritlerin ilgili bilgileri Tablo 2'de sunulmuştur. Bu malzeme özelliklerine ve tablodaki ölçülere sahip olan şeritler, dövme işlemi sırasında tek bir yüzeyde gerilim oluşturmak amacıyla dört noktadan Almen şerit tutucusuna sabitlenir.

Tablo 2. Almen Şeritlerinin Standartlaştırılmış Özellikleri

Şerit Adı	Standart	Düzelsellik	Sertlik	Kalınlık
C	AMS-S-13165	+/- 0.038 mm	44-50 HRC	2.39 mm
A	SAE J442	+/- 0.025 mm	44-50 HRC	1.29 mm
N	SAE AMS 2432	+/- 0.013 mm	45-58 HRC	0.76 mm



Şekil 27. C, N ve A şerit kalınlıkları (Brooks, 2016)

Bilyeli dövme işlemine tabi tutulan bir plaka yüzeyi, püskürtülen bilyelerin neden olduğu toplam enerjiden kaynaklanan kalıntı gerilmelerle birlikte plastik deformasyonla ilişkili şekil değişimine uğrar. Plakada simetri sağlamak ve tüm yüzeyin aynı parametrelerle dövülmesini temin etmek amacıyla, çapı sabit bir yay benzeri bir deformasyon meydana gelir. Şekil 28, bir Almen şeridinde gerçekleşen bu deformasyonu göstermektedir.



Şekil 28. Almen testi sonrasında şeritte meydana gelen deformasyon (Brooks, 2016)

Püskürtme Debisi: Bilyeli dövme işleminde püskürtme debisi, oldukça önemli bir faktördür ve malzeme yüzeyi üzerinde önemli etkilere sahiptir. Püskürtme debisi, malzeme yüzeyine fırlatılan bilyelerin hızını ve yoğunluğunu belirler. Bu, malzeme yüzeyine çarpan bilyelerin kinetik enerjisinin ve darbe yoğunluğunun miktarını etkiler. Yüksek bir püskürtme debisi, daha fazla kinetik enerji ile sonuçlanır ve bu, yüzeyde daha fazla plastik deformasyon ve kalıntı gerilmelerin oluşmasına yol açar. Bu, malzeme yüzeyinin sertliğini artırarak aşınma direncini geliştirir. Aynı zamanda püskürtme debisi, işlem süresini ve etkinliğini de etkileyebilir. Düşük debi, işlemin daha uzun sürmesine neden olabilir, bu da maliyeti ve işlem süresini artırabilir. Sonuç olarak, püskürtme debisi, bilyeli dövme işleminin başarısı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir ve malzeme yüzeyinin mekanik özelliklerini iyileştirmek için dikkatle ayarlanmalıdır (Bozkurt & Demirer, 2023).

Püskürtme Basıncı: Bilyeli dövme işleminde püskürtme basıncı, malzeme yüzeyi üzerinde belirleyici bir faktördür ve işlemin sonuçları üzerinde önemli etkilere sahiptir.

Püskürtme basıncı, bilyelerin nozul çıkış basıncını kontrol eder. Düşük bir püskürtme basıncı, bilyelerin yüzeye düşmesi için daha az enerjiye sahip olmalarına neden olur (Lu et al., 2024).

Püskürtme Mesafesi: Almen testi, dövme işlemi sırasında malzemeye iletilen toplam enerjiyi ölçmek amacıyla kullanılır ve bu enerji, belirli bir hızla püskürtülen bilyelerin yüzeye çarptığı ve geri püskürtülme işlemi için bir havuza düştüğü noktayla ilişkilidir. Bu nedenle, debi ve bilye çapıyla orantılı bir püskürtme mesafesi seçimi, bu testin amaçlarına ulaşmak için kritik öneme sahiptir (Lu et al., 2024).

Püskürtme Açısı: Püskürtme işleminde, nozulun konumlandığı açıya "Püskürtme açısı" adı verilir ve bu açı, yüzey normali ile parça yüzeyi arasındaki alanda belirlenir. İdeal durumda, enerjinin maksimum verimlilikle aktarılabilmesi için püskürtme açısının dik bir açıda olması öngörülmektedir. Ancak, bilyelerin yüzeyden geriye sekmesi ve birbirleriyle minimum temas gerekliliği gibi faktörler göz önüne alındığında, bu açı yaklaşık 80 ila 85 derece arasında tercih edilir. Bu, enerjinin etkili bir şekilde parça yüzeyine iletilmesini sağlar ve püskürtme işleminin başarılı bir şekilde gerçekleşmesine yardımcı olur (Lu et al., 2024).

Plazma Elektrolit Oksidasyonu (PEO)

Mikro ark oksidasyon (MAO) olarak da bilinen plazma elektrolitik oksidasyon (PEO), valf metalllerinin yüzeylerini güçlendirmek için kullanılan ileri seviye bir yüzey işlem tekniğidir. Plazma destekli anodik oksidasyon süreciyle çalışan bu yöntem, metal yüzeyinde koruyucu oksit tabakaları oluşturarak malzemenin mekanik ve kimyasal dayanıklılığını artırır. Özellikle aşınmaya ve korozyona karşı etkili bir koruma sağlarken, yüksek sıcaklıklara karşı da direnç kazandırır. Geniş endüstriyel kullanım alanına sahip olan PEO, valf metalllerinin performansını önemli ölçüde iyileştiren bir kaplama tekniğidir (Narayanan et al., 2014).

Valf metaller, anodizasyon işleminden sonra elektriksel olarak yalıtkan oksit filmleri içeren metalik malzemelerdir. Bu gruba alüminyum, tantal, niyobyum, titanyum ve zirkonyum gibi metaller dahildir (Kinard et al., 1998). PEO yöntemi, özellikle hafif alaşımlar üzerinde yüksek sertlik ve mükemmel yapışma mukavemeti sağlayabilen etkili bir seramik kaplama üretme yöntemidir. Alüminyum, magnezyum ve titanyum gibi malzemelerde uygulandığında, bu kaplama malzemenin ömrünü uzatarak dayanıklılığını artırır (Wheeler et al., 2010).

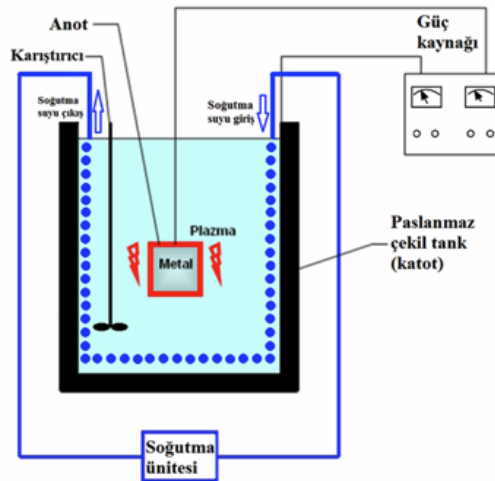
Son yıllarda PEO yöntemi üzerine önemli ilerlemeler kaydedilmiş olsa da, kaplama sürecinde meydana gelen oksidasyon mekanizması hâlâ tam olarak açıklığa kavuşturulamamıştır. Bununla birlikte, PEO yöntemiyle elde edilen sert ve gözenekli kaplamalar, genellikle yüksek sürtünme katsayısına sahip olma eğilimindedir. Bu durum, temas

eden malzemeler arasında çift malzeme aşınmasını artırarak, bazı uygulamalarda sürtünme ve aşınma sorunlarına yol açabilir (Vargel, 2020).

PEO yöntemi, özellikle alüminyum ve alaşımlı metallerin yüzeylerini güçlendirmek içinde kullanılan etkili bir kaplama prosesidir. Yüksek voltajlı bir elektrik akımı uygulanarak gerçekleştirilen bu işlem, aşağıdaki adımlardan oluşmaktadır:

- **Elektrolit Hazırlığı:** Metal parça, uygun bir elektrolit çözeltisi içerisine yerleştirilerek elektrot görevi görmesi sağlanır. Elektrolit genellikle alkali ve silikat bazlı çözeltilerden oluşur.
- **Yüksek Voltaj Uygulaması:** İşlem sırasında, metal parçaya anot olarak bağlanırken, bir karşı elektrot (katot) yardımıyla yüksek voltajlı elektrik akımı uygulanır.
- **Plazma Mikro-Deşarjlarının Oluşumu:** Yüksek voltaj sayesinde metal yüzeyinde plazma mikro-deşarjları meydana gelir. Budeşarjlar, yüksek sıcaklık ve basınç etkisiyle yüzeyde seramik oksit tabakası oluşmasını sağlar.
- **Kaplamanın Yapısal Değişimi:** Kaplama sırasında meydana gelen mikro-patlamalar, yüzeyin sert, gözenekli ve dayanıklı bir oksit tabakası kazanmasına neden olur.
- **Son İşlemler:** Kaplama tamamlandıktan sonra, yüzeyin özelliklerini iyileştirmek için ısıtma işlemi veya mekanik polisaj gibi ek işlemler uygulanabilir.

Bu süreç, metal yüzeyinde yüksek sertlikte, korozyona dayanıklı ve estetik görünüme sahip bir kaplama oluşturur. PEO kaplamalar, havacılık, otomotiv, biyomedikal ve savunma sanayii gibi birçok sektörde yaygın olarak kullanılmaktadır (Demirci, 2014). Şekil 29'da PEO kaplama prosesinin temel bileşenleri gösterilmektedir. Bu süreçte anot ve katot elektrotları, elektrolit çözeltisi, plazma mikro-deşarjları ve oluşan oksit kaplama tabakası yer almaktadır.



Şekil 29. PEO sistem ünitesinin şematik gösterimi (Yılmaz et al., 2016)

PEO ile kaplanmış numunenin kesit görüntüsü incelendiğinde, üç farklı bölge belirgin bir şekilde gözlemlenmektedir. Bu bölgelerin mikroyapıları ve fiziksel özellikleri, kullanılan kaplama parametrelerine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. PEO kaplamanın şematik kesit görüntüsü, Şekil 30'de verilmiştir. Şematik kesit görüntüsünde, aşağıdan yukarıya doğru incelendiğinde şu yapılar gözlemlenmektedir:

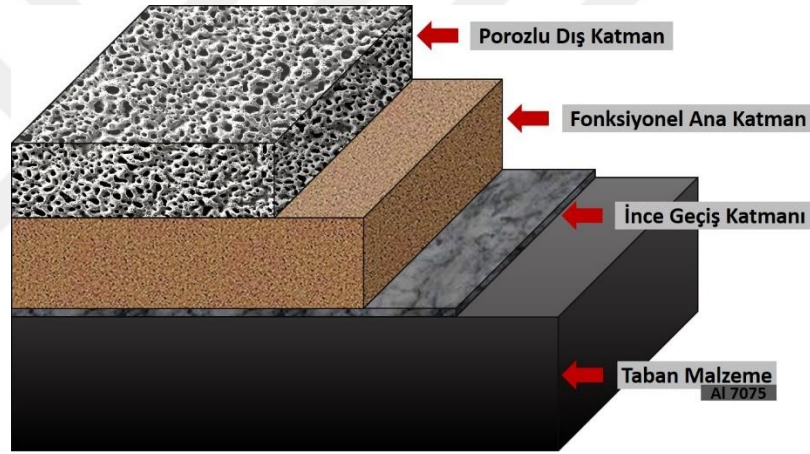
- ✓ **Alt Bölge (İnce Yoğun Tabaka):** En altta bulunan bölge, ince ancak yoğun bir tabakadan oluşmaktadır. Bu tabaka, genellikle kaplamanın temelini oluşturur ve alt tabakanın yapısı üzerinde mekanik bir dayanıklılık sağlar. PEO işleminin uygulandığı metal veya alaşımı içerir. Kaplamanın mekanik dayanıklılığı ve yapışma performansı açısından kritik bir rol oynar.
- ✓ **Orta Bölge (Orta Yoğunlukta Ara Tabaka):** Alt tabakanın hemen üzerinde yer alan bölge, mekanik özelliklerin iyi olduğu orta yoğunlukta bir ara tabakadır. Bu tabaka, genellikle kaplamanın dayanıklılığını artıran ve yüzeyin özelliklerini iyileştiren bir rol oynar. Ana metal ile kaplama arasındaki bağlanma bölgesidir ve genellikle yoğun ve daha az gözenekli bir yapı sergiler. Kaplamanın yapışmasını güçlendiren oksitlerin ve difüzyon bölgelerinin bulunduğu bir ara yüzeydir.
- ✓ **Üst Bölge (Gözenekli Tabaka):** En üstteki bölge, yoğun olmayıp gözenekli bir tabakadan oluşur. Bu tabaka genellikle kaplamanın yüzey özelliklerini belirler ve genellikle poroziteye ve gözenekliliğe sahiptir. Yüksek sıcaklık ve plazma mikro-deşarjlarının etkisiyle oluşur. Yüzey morfolojisi, işlem süresi ve elektrolit bileşimi gibi parametrelere bağlı olarak değişir. Mekanik aşınmaya karşı dirençli olup, koruyucu bir bariyer görevi görür.

Bu bölgeler, PEO kaplamasının dayanıklılık, aşınma direnci ve korozyon performansı gibi temel özelliklerini belirleyen kritik bileşenlerdir. Şekil 30'da gösterilen şematik kesit görüntüsü, bu bölgelerin yapısını daha net bir şekilde açıklamaktadır.

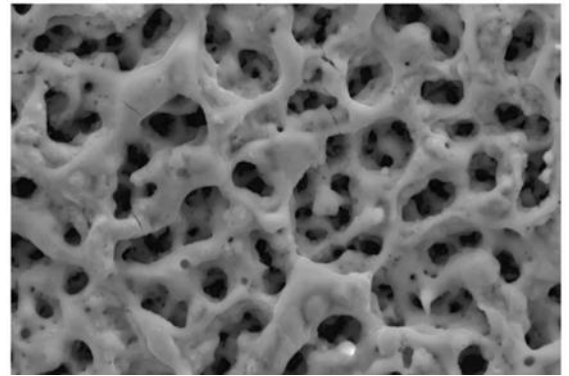
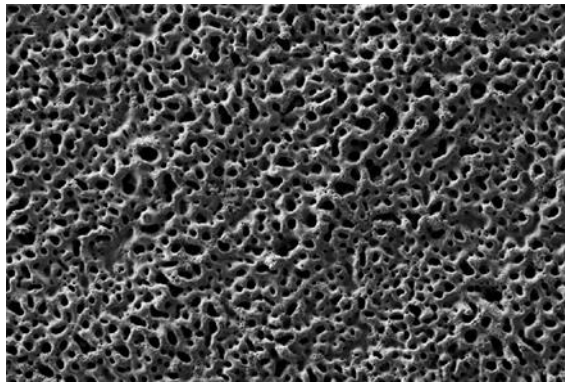
PEO kaplamada oluşan tabakaların yapısı ve özellikleri, kaplama sürecinde kullanılan parametrelere bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Elektrolit bileşimi, uygulanan voltaj, akım yoğunluğu, frekans ve işlem süresi gibi faktörler, kaplamanın nihai fiziksel ve mekanik özelliklerini belirleyen temel unsurlardır. Özellikle elektrolit bileşimi, kaplamanın fiziksel özelliklerini doğrudan etkileyen kritik bir faktördür. Elektrolitin pH seviyesi, kaplamanın porozitesini, bileşim dağılımını ve korozyon direncini önemli ölçüde değiştirebilir. Kaplama işleminde yaygın olarak alüminalar, silikatlar, fosfatlar ve hidroksitler gibi bileşenler kullanılır.

Bunun yanı sıra, akım-voltaj karakteristikleri de kaplamanın yapısal özelliklerini şekillendiren önemli parametrelerdir. Doğru akım ve voltaj değerlerinin belirlenmesi, istenen

kaplama kalitesinin elde edilmesi açısından kritik rol oynar. Bu parametrelerin dengeli bir şekilde optimize edilmesi, yüksek dayanımlı, düşük gözenekli ve uzun ömürlü PEO kaplamalarının elde edilmesini sağlar (Yerokhin et al., 2004; Friedrich and Mordike, 2006). PEO kaplamaların yapısal özelliklerinden (Şekil 31) biri de gözeneklilik derecesidir. Kaplama sürecinde oluşan gözenekler, elektrolitin bileşimi, işlem süresi, voltaj ve akım yoğunluğu gibi parametrelere bağlı olarak değişkenlik gösterir. Genellikle yüksek voltaj ve uzun işlem süresi, kaplama yüzeyinde daha fazla gözenek oluşumuna neden olur. Gözeneklerin boyutu ve dağılımı, kaplamanın mekanik dayanımı, aşınma direnci ve korozyon performansı üzerinde doğrudan etkilidir. Düşük gözenek oranına sahip kaplamalar genellikle daha yüksek mekanik mukavemet ve korozyon direnci sağlarken, fazla gözenek içeren kaplamalar belirli uygulamalarda, örneğin yağ tutma veya kaplama içi malzeme infiltrasyonu gibi alanlarda avantaj sağlayabilir. Bu nedenle, PEO kaplamalarda gözeneklilik kontrolü, uygulama alanına uygun özelliklerin elde edilmesi açısından büyük önem taşır.



Şekil 30. PEO kaplamasının kesit görüntüsü



Şekil 31. PEO kaplamasının gözenekli yüzeyi

Plazma elektrolit oksidasyonu (PEO) yönteminin kullanım alanları

PEO (Plazma Elektrolit Oksidasyonu) yöntemi, geniş bir endüstriyel yelpazeye sahip ve çok çeşitli yüzey işleme uygulamalarında kullanılmaktadır. Bu yöntem, farklı sektörlerde

kullanılan malzemelerin yüzey özelliklerini iyileştirmek ve dayanıklı koruyucu kaplamalar oluşturmak amacıyla yaygın bir şekilde tercih edilmektedir. PEO yönteminin kullanım alanlarına dair örnekler, Şekil 32'de sunulmuştur.



Şekil 32. PEO kaplama yönteminin kullanım alanları

Otomotiv Endüstrisi: PEO yöntemi, otomobil parçalarının aşınma direncini artırmak için kullanılır. Motor blokları, pistonlar ve şanzıman kutuları gibi parçalar, bu yöntemle koruyucu kaplamalarla güçlendirilir. Ayrıca, araçların yakıt verimliliğini artırmak amacıyla da tercih edilebilir (Fernández-López et al., 2024).

Havacılık ve Uzay Endüstrisi: Uçak ve uzay mekiklerinin parçaları, roket motorları ve diğer uzay aracı bileşenleri PEO yöntemi ile kaplanabilir. Bu sayede yüksek sıcaklık, aşınma ve korozyon gibi zorlu koşullara dayanıklı kaplamalar elde edilir (Fernández-López et al., 2024).

Denizcilik: Gemi parçaları, pervaneler, zincirler ve gemi bölmelerinin bağlantı elemanları, deniz suyunun neden olduğu korozyona karşı korunmak amacıyla PEO yöntemiyle kaplanabilir.

Medikal Cihazlar: PEO yöntemi, medikal cihazların yüzeylerini steril tutmak ve korozyona karşı korumak için kullanılabilir (Fernández-López et al., 2024).

Savunma Sanayisi: Askeri araçlar, silahlar ve askeri teçhizatlar, PEO kaplamaları ile güçlendirilerek dayanıklılıkları artırılabilir (Fernández-López et al., 2024).

Enerji Sektörü: PEO yöntemi, enerji üretiminde kullanılan türbin kanatları, dişliler ve diğer bileşenlerin ömrünü uzatmak amacıyla uygulanabilir.

Elektrik ve Elektronik : Elektrik iletimi ve yarıiletken cihazların yüzeylerinin yalıtımı için PEO kaplamaları tercih edilebilir (Fernández-López et al., 2024).

Mimari Uygulamalar: PEO ile kaplanmış malzemeler, mimari detaylar ve yapı elemanları için hem dekoratif hem de koruyucu kaplamalar sağlar.

Plazma elektrolit oksidasyonu (PEO) yönteminin avantajları

- **Numune Hazırlığı ve Zaman Tasarrufu:** PEO yöntemi, yüzey hazırlık süresini minimize eden bir tekniktir. Geleneksel kaplama yöntemlerinde, numunelerin hazırlanması için daha fazla işlem yapılması gerekebilir (örneğin, kumlama, asidik temizleme vb.). Ancak PEO yönteminde, yalnızca parlatma ve dağlama işlemleri ile numune hazır hale getirilir, bu da işlem süresini önemli ölçüde kısaltır. Bu özellik, üretim hattında zaman tasarrufu sağlar ve maliyetleri düşürür. Çevre Dostu ve Ekonomik Elektrolitler: PEO yönteminde kullanılan elektrolitler, genellikle su bazlı ve çevreye zararsızdır. Ayrıca, bu elektrolitler ekonomik açıdan uygun olup, çevre dostu olmaları nedeniyle "yeşil" teknolojiler arasında yer alır. Bu, hem çevre koruma standartlarını karşılamayı sağlar hem de işlem maliyetlerini düşürür.
- **Malzeme Çeşitliliği ve Anodik Oksidasyonun Mümkün Olmadığı Durumlar:** PEO yöntemi, alüminyum, magnezyum ve titanyum gibi malzemelerin yanı sıra, silisyum ve bakır içeren alaşımlar gibi geleneksel anodik oksidasyon yöntemlerinin verimli olamadığı malzemelere de uygulanabilir. Bu, geniş bir malzeme yelpazesi üzerinde işlem yapılmasını sağlar ve mühendislik malzemeleri için daha fazla tasarım esnekliği sunar.
- **Dekoratif Kaplamalar:** PEO yöntemi ile oluşturulan oksit kaplamalar, estetik amaçlarla da kullanılabilir. Yüzeyler, renk değiştirme yeteneğine sahip olup, farklı renkler elde edilebilir. Bu özellik, özellikle dekoratif parçaların üretimi için çok avantajlıdır. Ayrıca, kaplama yüzeyleri yüksek parlaklıkta ve estetik açıdan çekici olabilir.
- **Yüksek Sertlik ve Aşınma Direnci:** PEO yöntemiyle elde edilen oksit kaplamalar, oldukça serttir. Bu kaplamalar, malzemelerin aşınma direncini artırarak uzun ömürlü hale getirir. Özellikle mekanik parçalarda, sürtünmeye ve aşınmaya karşı yüksek direnç gösterir. Bu, otomotiv, savunma sanayi gibi yüksek aşınma koşullarına maruz kalan endüstriler için büyük avantaj sağlar.

- **Yüksek Sıcaklık, Aşınma ve Korozyon Dayanıklılığı:** PEO yöntemiyle oluşturulan kaplamalar, yüksek sıcaklık, kimyasal etkileşimler ve çevresel faktörlere karşı oldukça dayanıklıdır. Bu kaplamalar, denizcilik, havacılık ve savunma endüstrisi gibi zorlu koşullarda çalışan parçalarda kullanıma uygundur. Kaplamalar, korozyona karşı dirençli olup, su buharı, asidik veya alkalın çözeltilere karşı bile uzun süre dayanıklılık gösterir.
- **Düşük Güç Tüketimi ile Kalın Kaplama:** PEO yöntemi, kaplama sırasında düşük enerji tüketimi sağlar. Bu, enerji maliyetlerini düşürür ve çevresel etkileri en aza indirir. Ayrıca, bu yöntemle kalın kaplamalar oluşturulabilir. Kalın kaplamalar, daha fazla koruma sağlar ve malzemenin dayanıklılığını artırır, böylece parçaların ömrü uzar.
- **Büyük Parçaların Bölgesel Kaplanması:** PEO yöntemi, büyük parçaların belirli bölgelerine kaplama yapmayı mümkün kılar. Bu, özellikle karmaşık şekilli veya büyük boyutlu parçaların sadece kritik alanlarını kaplamak isteyen üreticiler için faydalıdır. Bu şekilde, kaplama işlemi daha verimli ve ekonomik hale gelir. Ayrıca, büyük parçaların yüzey alanlarını homojen bir şekilde kaplamak da mümkündür.

Fiziksel Buhar Biriktirme (PVD)

Fiziksel Buhar Biriktirme (PVD), yüzey mühendisliğinde kullanılan bir kaplama teknolojisidir. Bu teknoloji, vakum ortamında hedef malzemeden atom veya iyonların, termal buharlaştırma veya sıçratma (sputtering) gibi fiziksel yöntemlerle ayrıştırılarak, taban malzeme üzerine kontrollü bir şekilde biriktirilmesini sağlar (Glocker et al., 1995; Mattox, 2010).

PVD işleminde, hedef malzeme yüksek enerjili iyon bombardımanına (sıçratma) veya yüksek sıcaklıkta buharlaştırılarak gaz fazına geçirilir. Vakum ortamı sayesinde, bu parçacıklar taban malzeme yüzeyine taşınır ve burada, nano-metrik hassasiyetle (birkaç nm'den µm seviyelerine kadar) ince bir film tabakası oluşturur. Bu ince filmler, taban malzemenin yüzeyinde yüksek saflıkta, mükemmel yapışma (adezyon) özelliklerine sahip ve oksidasyondan arındırılmış olarak bulunur. PVD'nin en önemli avantajlarından biri, CVD (Kimyasal Buhar Biriktirme) gibi yüksek sıcaklık gerektiren yöntemlerin aksine, daha düşük sıcaklıklarda çalışabilmesidir. Bu özellik, PVD'nin termal olarak hassas malzemelerde (plastik, belirli alaşımlar gibi) kullanılmasını mümkün kılar (Kelly & Arnell, 2000).

PVD'nin en büyük avantajlarından biri de çevre dostu olmasıdır. Çünkü toksik atık üretmemesi, onu "yeşil teknoloji" olarak sınıflandırılmasına olanak tanır (Baptista et al., 2018). Ayrıca, PVD ile üretilen kaplamalar, çok yüksek saflıkta ve homojen yapıya sahiptir, bu da onları birçok endüstriyel uygulama için ideal hale getirir. Endüstriyel kesici takımların aşınma

direncinin artırılması, tıbbi implantların biyouyumluluğunun sağlanması, elektronik cihazlarda iletken katmanlar ve dekoratif yüzeyler gibi geniş bir uygulama yelpazesinde kullanılır.

Bununla birlikte, PVD'nin bazı sınırlamaları da bulunmaktadır. Yüksek vakum sistemlerinin maliyeti, enerji tüketimi ve karmaşık geometrilerde üniform kaplama yapılması konusundaki zorluklar, bu teknolojinin bazı engelleridir (Mattox, 2010).

PVD'nin geniş uygulama alanları (Şekil 33), bu teknolojinin endüstriyel üretimde kritik bir rol oynamasına olanak tanır. Özellikle yüksek performanslı kaplamaların üretimi, malzeme bilimi ve mühendislik alanlarında önemli gelişmelere zemin hazırlamaktadır. Günümüzde, dayanıklı ve aşınmaya karşı dirençli kaplamaların üretiminde en yaygın olarak PVD yöntemleri tercih edilmektedir. PVD kaplamaları, başlangıçta kesici takımlar, soğuk şekil verme takımları, plastik enjeksiyon kalıpları ve toz sıkıştırma takımları gibi alanlarda aşınmayı engellemek amacıyla kullanılmaktadır.



Şekil 33. PVD kaplama yöntemi ve uygulama alanları

Fiziksel Buhar Biriktirme (PVD) yöntemiyle üretilen kaplamalar, malzemelere çok katmanlı performans iyileştirmeleri kazandırarak endüstriyel uygulamalarda kritik bir rol oynamaktadır. Bu kaplamalar, özellikle mikrosertlik değerleriyle dikkat çeker. Örneğin, TiN (tungsten nitrür) kaplamalar, 2000-2500 HV arasında mikrosertlik değerine sahiptir (Mattox, 2010), Bu yüksek sertlik, aşınma direncini artırarak kesici takımların, rulman yüzeylerinin ve diğer endüstriyel bileşenlerin servis ömrünü uzatır.

PVD işlemi, yüzey pürüzlülüğünün atomik seviyede kontrol edilebilmesine olanak tanır. $R_a < 0.1 \mu m$ gibi düşük yüzey pürüzlülük değerleri, optik bileşenlerde ışık yansıma verimliliğini optimize etmenin yanı sıra, dekoratif ürünlerde renk homojenliğini sağlar (Kelly & Arnell, 2000). Bu özellik, estetik ve fonksiyonel açıdan büyük bir avantaj sağlar.

Kaplanan malzemelerin kimyasal inertlik özellikleri, asidik ve bazik ortamlarda (pH 2-12 aralığında) korozyon direnci sağlayarak, bu kaplamaların kimya endüstrisi gibi zorlu ortamlarda kullanımını mümkün kılar. Ayrıca, PVD kaplamaların yüksek termal kararlılıkları

(>600°C), gaz türbin kanatları veya egzoz sistemleri gibi yüksek sıcaklıklara maruz kalan bileşenlerde oksidasyonu engeller ve malzemelerin performansını artırır. PVD işlemindeki kalınlık kontrolü, 5 nm ile 5 µm arasında hassas bir şekilde yapılabilir, bu da mikroelettronik cihazlarda iletken katmanların veya tıbbi stentlerde nanokompozit kaplamaların üretimine olanak tanır. Böylece, farklı endüstriyel ve medikal uygulamalar için özelleştirilmiş kaplama çözümleri sunulur. Kaplamaların tribolojik dayanımı da oldukça yüksektir. Aşınma katsayısının <0.2 olması, makine elemanlarında sürtünme kayıplarını azaltarak enerji verimliliğini artırır(Baptista et al., 2018). Bu özellik, endüstriyel makinelerin daha verimli çalışmasına ve daha uzun süre dayanmasına olanak tanır.



Şekil 34. En yaygın PVD kaplama türleri

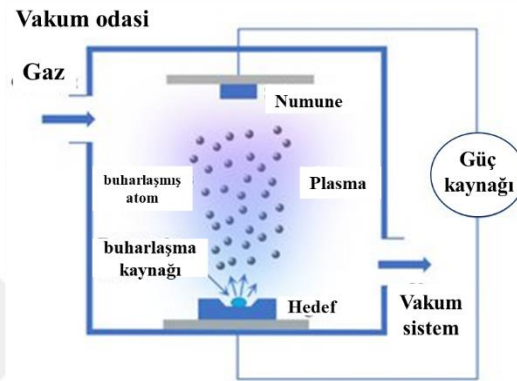
Sonuç olarak, PVD kaplamaları, performans iyileştirmeleri sağladığı geniş uygulama yelpazesiyle modern endüstriyel üretimde kritik bir rol oynamaktadır. Yüksek sertlik, mükemmel yüzey pürüzlülüğü kontrolü, kimyasal inertlik, termal kararlılık ve düşük tribolojik kayıplar gibi özellikler, bu kaplamaların endüstriyel alandaki önemini pekiştirmektedir.

Fiziksel buhar biriktirme (PVD) kaplama yöntemleri

Fiziksel Buhar Biriktirme (PVD) kaplama yöntemleri, malzemelerin yüzeylerine ince film tabakaları yerleştirmek için kullanılan vakum temelli kaplama teknolojileridir. Bu yöntemler, hedef malzemenin fiziksel yollarla (buharlaştırma veya sıçratma gibi) ayrıştırılmasını ve bu parçacıkların hedef malzeme yüzeyine birikmesini sağlar. PVD kaplama yöntemleri, malzemelere yüksek sertlik, dayanıklılık, korozyon direnci, düşük sürtünme gibi çeşitli özellikler kazandırır. PVD'nin beş ana yöntemi bulunmaktadır:

1. Buharlaştırma (Evaporasyon)

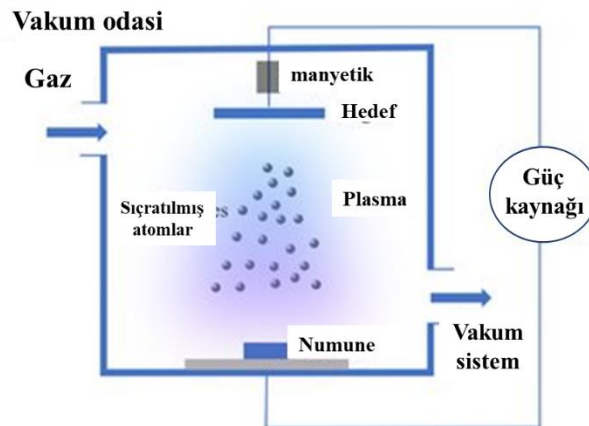
Buharlaştırma, PVD'nin en eski ve yaygın kullanılan yöntemlerinden biridir. Bu yöntemde, hedef malzeme (genellikle metal veya alaşımlar) yüksek sıcaklıkta buharlaştırılır. Hedef malzeme buharlaştıktan sonra, vakum odasında buharlaşan atomlar veya moleküller, taban malzemesinin yüzeyine yönlendirilir ve burada ince bir kaplama tabakası oluşturur. Avantajları Basit sistemler, homojen kaplama elde etme, düşük sıcaklıklarda çalışabilme. Dezavantajları ise kaplama kalınlığı genellikle sınırlıdır (genellikle 1-5 mikrometre), kalın kaplamalar için ek yöntemlere ihtiyaç olabilir.



Şekil 35. PVD buharlaştırma kaplama mekanizması (Y. Zhang et al., 2022)

2. Sıçratma (Sputtering)

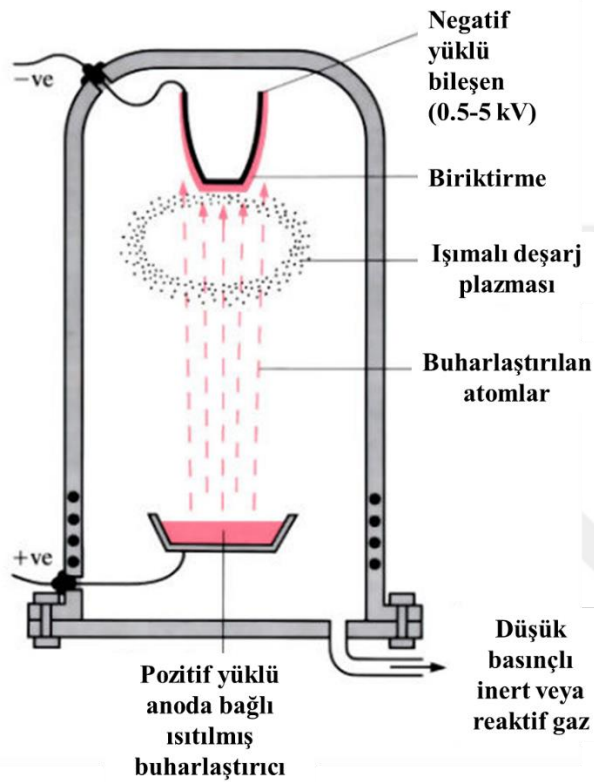
Sıçratma, PVD'nin bir diğer önemli yöntemidir. Bu yöntemde, yüksek enerjili iyonlar (genellikle argon iyonları) hedef malzemeye çarptığında, hedeften atomlar kopar ve bu atomlar vakum ortamında taban malzemeye yönlendirilir. Sıçratma işlemi, atomların yüzeye çarpmasıyla ince, homojen ve güçlü kaplamalar oluşturur. Avantajları Yüksek kaplama hızları, farklı malzemelerle çalışabilme, kalın kaplamalar elde etme yeteneği, çok çeşitli yüzeylerde kullanılabilir. Dezavantajları ise Daha karmaşık sistemler, daha fazla enerji tüketimi, bazı hedef malzemeler için düşük verimdir.



Şekil 36. PVD sıçratma kaplama mekanizması (Y. Zhang et al., 2022)

3. İyon Kaplama (Ion Plating)

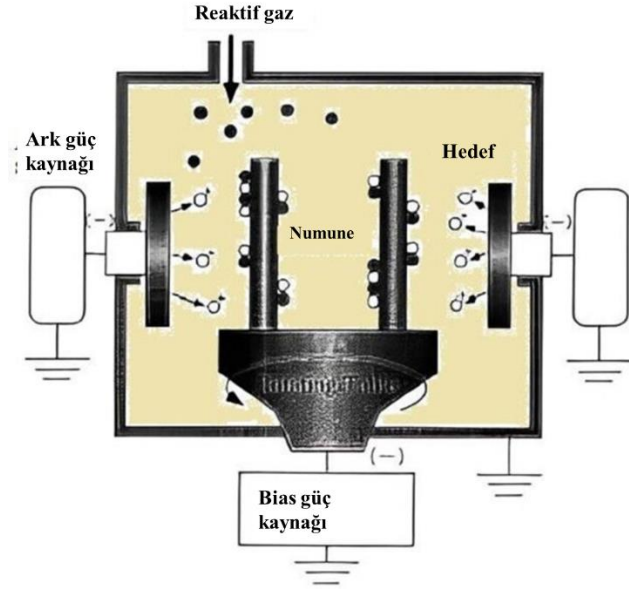
İyon kaplama, buharlaştırma ve sıçratma yöntemlerinin birleşimidir. Bu yöntemde, hedef malzeme önce buharlaştırılır, ardından oluşturulan buhar, iyonize edilir ve iyonlar, kaplanacak yüzeye yönlendirilir. Bu işlem sırasında yüzeydeki atomlar yüksek enerjili iyonlarla etkileşime girer, bu da kaplama kalitesini artırır. Avantajları yüksek bağlanma gücü, homojen kaplama, ince film tabakaları elde etme, iyi mekanik özellikler. Dezavantajları ise yüksek vakum gereksinimi, ekipman maliyetinin yüksekliği.



Şekil 37. İyon kaplama mekanizması (Anonymous, 2018)

4. Katodik Ark Deşarj Biriktirme (CAD)

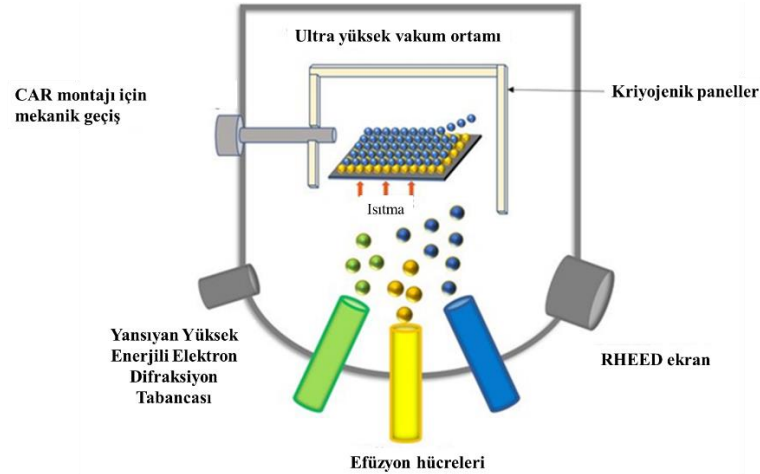
Katodik Ark Deşarj Biriktirme (CAD) yöntemi, sıçratma ve iyon kaplama arasındaki bir tekniktir. Burada, hedef malzeme katot olarak kullanılır ve bu malzemeden çıkan iyonlar vakum ortamında biriktirilir. Bu işlemde, genellikle düşük sıcaklıklarda çalışılabilir. Avantajları düşük sıcaklıkla çalışabilme, yüksek kaplama kalitesi. Dezavantajları ise yüksek enerji tüketimi ve vakum gereksinimleridir.



Şekil 38. Katodik ark deşarj biriktirme mekanizması (El-Awadi, 2023)

5. Moleküler İyon Kaplama (Molecular Beam Epitaxy - MBE)

MBE, çok ince ve yüksek kaliteli kristal kaplamaların üretildiği bir PVD yöntemidir. Bu yöntemde, atomlar veya moleküller, bir moleküler ışın (molecular beam) şeklinde hedef malzemeye doğru yönlendirilir. Yüksek hassasiyetle katmanlar biriktirilir ve bu yöntem, özellikle yarı iletken malzemeler için kullanılır. Avantajları yüksek kristal kalite, atomik düzeyde kontrol edilebilir kaplama. Dezavantajları ise karmaşık ve pahalı ekipman, düşük kaplama hızı.



Şekil 39. Moleküler iyon kaplama mekanizması (G. Wu et al., 2022)

PVD Yöntemlerinin Kullanım Alanları

PVD kaplama yöntemleri, çok geniş bir uygulama yelpazesinde kullanılır. Bunlar arasında:

- Kesici takımlar: Aşınma direncini artıran kaplamalar kullanılır.

- Elektronik cihazlar: İletken katmanların üretimi.
- Otomotiv endüstrisi: Metal parçaların korozyona karşı korunması.
- Tıbbi cihazlar: Biyouyumluluk ve koruyucu kaplamalar.
- Dekoratif kaplamalar: Estetik amaçlı metal ve plastik yüzeyler.

Sonuç olarak PVD kaplama yöntemleri, malzeme bilimi ve mühendislik alanlarında önemli gelişmelere olanak tanır. Bu yöntemler, endüstriyel üretimlerde dayanıklılığı artırmak, malzeme performansını iyileştirmek ve çevresel etkiyi azaltmak için yaygın bir şekilde kullanılır. Farklı PVD tekniklerinin avantajları ve sınırlamaları, hangi yöntemin kullanılacağına karar verirken dikkate alınmalıdır.

Manyetik alanda sıçratma tekniği

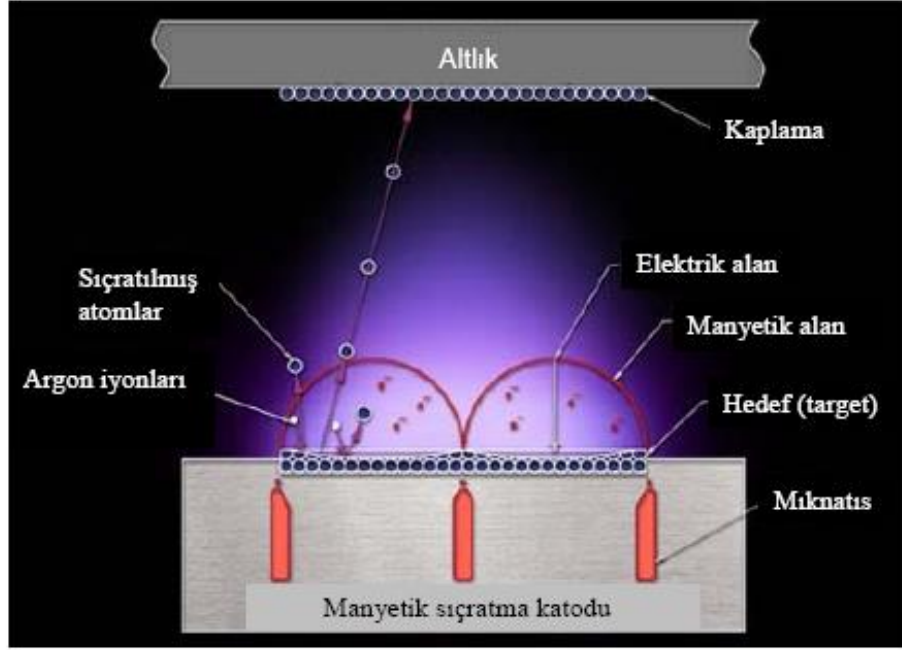
Manyetik alanda sıçratma, ince film biriktirme tekniklerinden biridir ve genellikle magnetronlar olarak bilinen kaynaklar kullanılarak gerçekleştirilir. Şekil 33'te bu tekniğin çalışma prensibi verilmiştir. Bu teknik, yüzeylere ince bir film tabakası uygulamak için kullanılır ve çeşitli endüstriyel ve bilimsel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Magnetronlar, bir hedef malzemesini (genellikle bir metal veya bileşik) iyonize eden bir katot ile negatif yüklü bir elektrot arasında bir elektrik alanı kullanarak malzeme atomlarını taban malzeme yüzeyine sıçratmak için manyetik alanı kullanan cihazlardır.

Manyetik alandaki bu yönlendirme, sıçratılan hedef malzemenin daha homojen bir şekilde taban malzeme yüzeyine biriktirilmesini sağlar. Magnetronlar genellikle dengeli ve dengesiz tipler olarak sınıflandırılır. Dengeli magnetronlar, düzgün ve homojen kaplamalar sağlamak için tercih edilirken, dengesiz magnetronlar ile elde edilen kaplamalar daha güçlü bir adezyon kuvvetine sahip olup aşınmaya dayanıklı ve dekoratif kaplamalar için daha uygundur.

Magnetronlar, düzlemsel veya döner olabilir. Düzlemsel magnetronlar, taban malzemelerin hedeflerin yanından doğrusal olarak geçtiği daha büyük ölçekli sistemlerde kullanılırken, döner magnetronlar farklı bağlamlarda tercih edilir. Döner hedefler, malzeme tüketimini azaltabilir ve kaplama süresini uzatarak üretim verimliliğini artırabilir. Ayrıca, döner magnetronlar, hedef malzemenin daha verimli bir şekilde kullanılmasını sağlayarak, sistemin genel verimliliğini artırır.

Magnetron tabanlı sıçratma teknikleri, yüksek hızda çalışabilme ve düşük işleme sıcaklıklarında malzeme biriktirme yeteneği sağlar. Bu, taban malzemelere minimum zarar verilmesini sağlar ve özellikle mikroelektronik kaplamalar ve dekoratif filmler gibi hassas uygulamalar için önemlidir. Bu özellikler, PVD teknolojisinin çevre dostu ve düşük enerji tüketen bir seçenek olarak öne çıkmasını sağlar.

Özetle, hem dengeli hem de dengesiz magnetronlar, farklı ihtiyaçları karşılamak için kullanılabilirken, düzlemsel veya döner magnetronlar, farklı sistemlerde ve uygulamalarda çeşitli avantajlar sağlar. Bu teknik, malzeme bilimi alanındaki araştırmalarda ve endüstriyel üretimde önemli bir rol oynamaya devam etmektedir (Arnell & Kelly, 1999; Gudmundsson & Lundin, 2020; Kelly & Arnell, 2000).



Şekil 40. Manyetik alanda sıçratma tekniğinin gösterimi (Oktay, 2007)

Kapalı alan dengesiz manyetik alanda sıçratma tekniği (CFUBMS)

Sıçratma (sputtering), PVD (Fiziksel Buhar Biriktirme) yöntemlerinden biri olup, ince film kaplamalarının üretiminde yaygın olarak kullanılır. Kapalı Alan Dengesiz Manyetik Alanda Sıçratma (CFUBMS), sıçratma yönteminin geliştirilmiş bir versiyonudur ve yüksek kaliteli ince film kaplamalar üretmek için optimize edilmiş sofistike bir fiziksel buhar biriktirme teknolojisidir. CFUBMS, yüksek performanslı kaplamalar sağlamak için, plazmayı hedef malzemenin yakınında hapsedmek amacıyla kullanılan benzersiz manyetik alan konfigürasyonları ile öne çıkar. Bu, sıçratılan atomların yüksek derecede iyonlaşmasını ve böylece daha homojen ve dayanıklı kaplamaların elde edilmesini sağlar (Monaghan and Arnell, 1992; Kelly & Arnell, 2000).

CFUBMS tekniği, geleneksel sıçratma yöntemlerinden daha yüksek bir biriktirme oranı ve geliştirilmiş film özellikleri sağlar. Bu teknik, manyetik alanın tasarımındaki dengesizlik sayesinde taban malzeme üzerindeki plazma yoğunluğunu artırarak, film biriktirme hızını ve kaplama kalitesini iyileştirir. Bu da kaplama sürecinde daha az enerji tüketimi ve düşük sıcaklıklarda çalışabilme imkanı sunar (Mattox, 2010).

CFUBMS'un Özellikleri ve Avantajları

Yüksek Biriktirme Hızı ve Gelişmiş Film Kalitesi: CFUBMS, dengesiz manyetik alanlar kullanarak, hedef malzemenin sıçratılması sırasında plazma yoğunluğunu artırır. Bu sayede, geleneksel sıçratma yöntemlerine göre daha yüksek bir kaplama hızına ulaşılır. Ayrıca, film kalitesi artırılır; kaplamalar daha homojen, daha güçlü ve daha dayanıklıdır (Kelly and Arnell, 2000; Gudmundsson and Lundin, 2020).

Çeşitli Malzemeler Üzerinde Kaplama Yapabilme: CFUBMS, metalik malzemeler, alaşımlar, seramikler ve bileşikler gibi geniş bir malzeme yelpazesinde kaplama yapabilme esnekliğine sahiptir. Ayrıca, bu yöntem, farklı taban malzemeleri ve şekilleri üzerinde işlem yapılabilmesini sağlar. Bu özellik, CFUBMS'i endüstriyel bileşenlerden, mikro-elektronikte kullanılan ince filmlere kadar çok çeşitli uygulamalar için ideal kılar (Arnell and Kelly, 1999).

Düşük Basınçta Çalışma ve Kirlenme Azaltma: CFUBMS, daha düşük vakum basınçlarında çalışabilme yeteneğine sahiptir, bu da sistemde kirlenme riskini önemli ölçüde azaltır. Düşük basınçta çalışmak, ayrıca daha yüksek saflıkta ve stokiometrik (doğal bileşim) kaplamaların elde edilmesine olanak tanır. Bu özellik, özellikle optik filmler ve yarı iletken cihazlar gibi hassas üretim süreçlerinde büyük avantaj sağlar (Baptista et al., 2018; Mattox, 2010).

Filmlerin Özellikleri Üzerinde Doğal Kontrol: CFUBMS süreci, kaplamaların kalınlık, bileşim, mikro yapı ve kristalin özelliklerinin hassas bir şekilde kontrol edilmesini sağlar. Bu, belirli performans kriterlerine uygun kaplamalar tasarlamayı mümkün kılar. Araştırmacılar ve mühendisler, bu kontrollü süreç ile çeşitli özelliklere sahip kaplamalar üretip, uygulamalara özel tasarımlar yapabilirler (Kelly and Arnell, 2000).

Yüksek Performanslı Uygulamalar İçin İdeal: CFUBMS, enerji dönüşümü ve depolama, mikro-elektronik, biyomedikal uygulamalar, optik teknolojiler gibi alanlarda yüksek performanslı ve uzun ömürlü kaplamaların üretiminde kullanılır. Ayrıca, bu teknik, ince film teknolojilerinin geliştirilmesinde kritik bir rol oynar ve özellikle yenilikçi çözümler geliştirilmesi gereken alanlarda ön plana çıkar (Baptista et al., 2018; Gudmundsson and Lundin, 2020).

CFUBMS'un Uygulama Alanları

Endüstriyel Uygulamalar:

- **Aşınmaya Dayanıklı Kaplamalar:** Metal işleme makineleri, uçak parçaları, kesici takımlar ve soğuk şekil verme takımları gibi endüstriyel bileşenlerin aşınmaya karşı korunmasında kullanılır (Kelly and Arnell, 2000).

- Biyomedikal Uygulamalar: Tıbbi implantlar, biyouyumlu kaplamalar ve koruyucu yüzeyler üretiminde önemlidir (Baptista et al., 2018).

Mikro-elektronik ve Yarı İletken Uygulamaları:

- Yarı İletken Üretimi: Yüksek saflıkta ve doğru bileşimde kaplamalar, mikro-elektronik devreler, sensörler ve entegre devreler üretmek için kullanılır (Mattox, 2010).
- Optik Filmler: Yansıma verimliliğini artıran ve ışık iletimi sağlayan optik kaplamalar (Gudmundsson and Lundin, 2020).

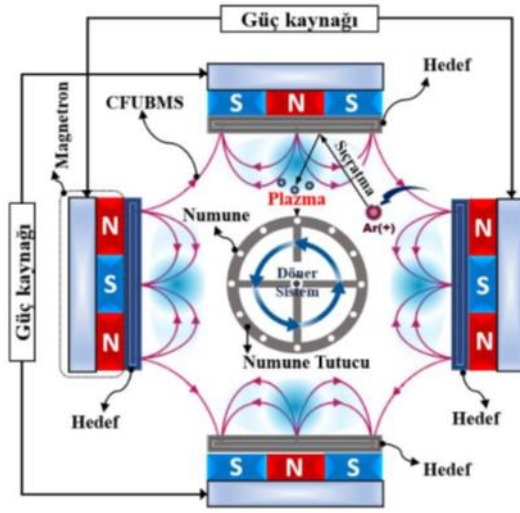
Enerji Dönüşümü ve Depolama:

- Güneş Panelleri: Yüksek verimli fotovoltaik hücreler üretmek için kullanılan kaplamalar.
- Batarya ve Kapasitörler: Enerji depolama sistemlerinin performansını artıran kaplamalar (Baptista et al., 2018).

Dekoratif Uygulamalar:

- Döşeme ve Yüzey Kaplamaları: Estetik ve dayanıklı yüzey kaplamaları, dekoratif ürünlerde renk homojenliği ve görsel kalitenin artırılması için kullanılır (Kelly & Arnell, 2000).

Sonuç olarak Şekil 41’ de gösterilen Kapalı Alan Dengesiz Manyetik Alanda Sıçratma (CFUBMS), özellikle yüksek kaliteli ve homojen kaplamalar üretme kapasitesi ile modern malzeme bilimi ve mühendisliğinde önemli bir rol oynamaktadır. Bu tekniğin gelişen teknolojilere adaptasyonu hem akademik araştırmalarda hem de endüstriyel üretim süreçlerinde kritik bir yer edinmesini sağlamaktadır. CFUBMS’in çok yönlülüğü, düşük maliyetli yüksek verimli üretim süreçlerinin kapılarını aralarken, gelişen teknoloji ve yeni uygulama alanları, bu tekniğin gelecekte daha geniş bir kullanım alanına sahip olmasına olanak tanıyacaktır (Arnell and Kelly, 1999; Kelly and Arnell, 2000; Mattox, 2010).



Şekil 41. Kapalı alan dengesiz manyetik alanda sıçratma (CFUBMS) sistemi

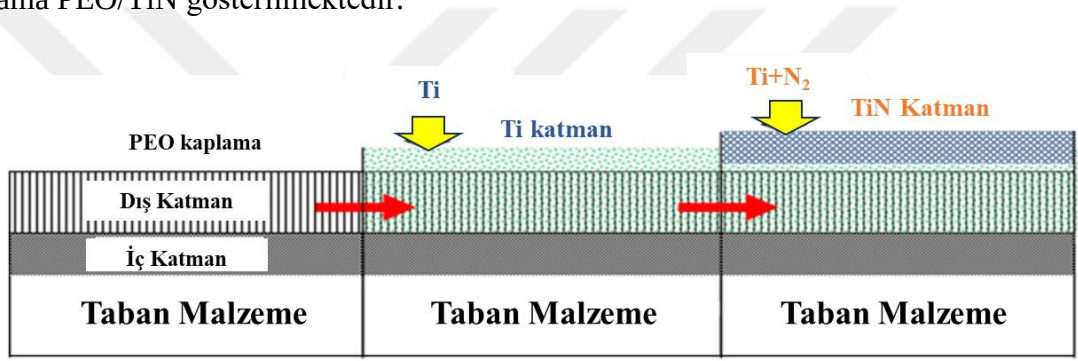
Dubleks Kaplama

Yüzey mühendisliği teknolojileri son yıllarda büyük gelişmeler kaydetmiş olsa da kaplama teknolojilerinin pazara hâkim olmaya devam etmesi beklenmektedir. Bunun birinci nedeni, gelişmiş işlemlerin genellikle yüksek maliyetli olmasıdır. Diğer bir neden ise, ekonomik açıdan daha uygun olan malzemeler, örneğin alüminyum alaşımları gibi, gelişmiş yüzey mühendisliğinin genellikle uygun olmamasıdır. Endüstriyel uygulamalarda yüzey özelliklerinin istenen kombinasyonunu elde etmek için tek bir işlemin yetersiz kaldığı veya yüzey özelliklerinin iyileştirilmesindeki mükemmel performanslarına rağmen pazar potansiyelinin sınırlı olduğu malzemeler ve koşullar mevcuttur. Bu zorluklar, dubleks yüzey işlemleri ile aşılabılır. Son yıllarda, endüstriyel parçaların ve şekillendirme araçlarının tribolojik (sürtünme ve aşınma) performansını ve yük kapasitesini artırmak için yüzey modifikasyon yöntemleri geliştirilmiştir. Bu kaplama yöntemlerinin taban malzemeye sağladığı adezyon ve bazı kesici aletlerin performansı üzerinde olumlu etkiler gözlemlenmiştir (Rie & Broszeit, 1995; Yasumaru et al., 1993).

Dubleks kaplama işlemleri, ilk kez 1980 yılında uygulanmaya başlanmış ve iki veya daha fazla yüzey teknolojisinin birleştirilmesiyle elde edilen yüzey kompozitlerini oluşturmayı amaçlamaktadır. Bu dubleks kaplamalar, tek başına elde edilemeyen özellikler sunar. İki genel grup tanımlanmıştır. İlk grupta, iki ayrı işlem birbirini tamamlar ve birleştirilmiş etkiler her iki işlemten de kaynaklanır. İkinci grupta ise bir işlem diğerini tamamlar ve güçlendirir, genellikle bir ısıtım işlem öncesi veya sonrası olarak işlev görür ve sonuçta ortaya çıkan özellikler bir işlemle ilişkilidir (Rie & Broszeit, 1995).

Dubleks kaplamaların özellikleri ve uygulamaları

Yüksek yoğunluklu yüklere maruz kalan birçok kaplama sisteminde, plastik deformasyon genellikle kaplama ve taban malzeme ara yüzeyine yakın alt tabakada başlar ve plastik deformasyon kaplama içinde belirgin hale gelene kadar alt tabakada başlamaz. Kaplama-taban malzeme sistemlerinin yük taşıma kapasiteleri, büyük ölçüde taban malzemesinin özelliklerine bağlıdır. Derin yüzey sertleştirme, kaplama-taban malzeme sistemlerinin yük taşıma kapasitesini önemli ölçüde artırabilir. Örneğin, yüzey nitrüleme ve oksidasyonu gibi işlemler bu kapasiteyi artırabilir (Kessler et al., 2002). Ancak bazı uygulamalarda, bu derin sertleştirilmiş tabakalar, birçok seramik ince film kaplamadan daha yüksek sürtünme ve aşınma oranlarına sahip olabilir. Bu yeni zorluklar yalnızca dubleks kaplama yöntemleri gibi karmaşık çözümlerle aşılabılır (Bell et al., 1998). Şekil 42'de dubleks kaplama PEO/TiN gösterilmektedir.



Şekil 42. Dupleks kaplama PEO/TiN görüntüsü

Dubleks veya Hibrit Yüzey Mühendisliği: Dupleks veya hibrit yüzey mühendisliği, ardışık olarak iki veya daha fazla yerleşik yüzey teknolojisinin kullanılmasıyla, bireysel yüzey teknolojileri ile elde edilemeyen birleşik özelliklere sahip bir yüzey kompoziti oluşturmayı amaçlar (Bell et al., 1994).

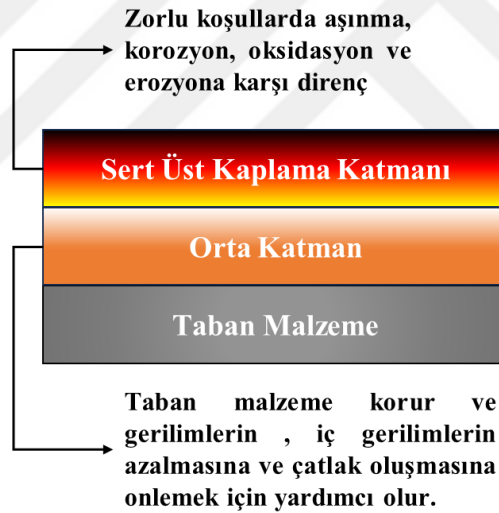
Ti/TiAlN çok katmanlı kaplamaların, tek katmanlı kaplamalara göre daha küçük tane boyutlarına sahip olduğu ve daha kararlı ve sert bir film yapısına sahip olduğu gözlemlenmiştir. Çok katmanlı kaplamaların seramik yapısı nedeniyle korozyona ve tribokorozyona karşı koruyucu bir özellik sergilediği tespit edilmiştir (Çomaklı, 2021). Ti/TiAlN çok katmanlı kaplamalar, tek katmanlı kaplamaya kıyasla daha yüksek bir plastiklik, çatlama direnci ve yük taşıma kapasitesi kombinasyonu sergilediği belirtilmiştir (Shuai et al., 2020).

Yüzey teknolojileri ve dupleks yüzey teknolojilerinin olası kombinasyonları sonsuz olabilir; bununla birlikte, bugüne kadar sadece sınırlı sayıda dupleks iyileştirme yöntemi geliştirilmiş ve gerçek uygulamalarda kullanılmıştır (Bell and Sun, 1990; Staines, 1990; Sun and Bell, 1992; Van Stappen et al., 1993).

Dubleks kaplama yöntemlerinin ortak mekanizmaları

Dubleks kaplama işlemlerinin etkinliğini artırmak için aşağıdaki mekanizmalar özetlenebilir (Fu et al., 2000):

- ✓ İnce Sert Kaplamalarda Tane Büyümeleri İçin Yapısal Uyum Sağlamak: İnce sert kaplamaların dayanıklılığını artırmak için tane büyümlerini engellemek ve yapısal uyum sağlamak önemlidir.
- ✓ Sertleştirilmiş Difüzyon Tabakası ile Sert Kaplama İçin Mükemmel Bir Destek Katmanı Üretmek: Sertleştirilmiş bir tabaka, ince kaplamaların uzun ömürlü olmasını sağlayacak şekilde güçlü bir destek katmanı işlevi görür ve bu da sertleşme derinliğini artırarak denge sağlar (Fu et al., 2000; Kaestner et al., 2001).
- ✓ Aşınmaya Dayanıklı ve Düşük Sürtünmeli Yüzeyler Üretmek: İnce sert kaplamalar, aşınmaya dayanıklı ve düşük sürtünmeli yüzeyler üreterek, pürüzsüz yüzey gerilimlerini ve ara yüzey gerilimlerini etkili bir şekilde azaltır, böylece iyi tribolojik davranış sağlanır (Bailey and Sayles, 1991).



Şekil 43. Dupleks kaplama mekanizması

Taguchi Deneysel Tasarım Metodu

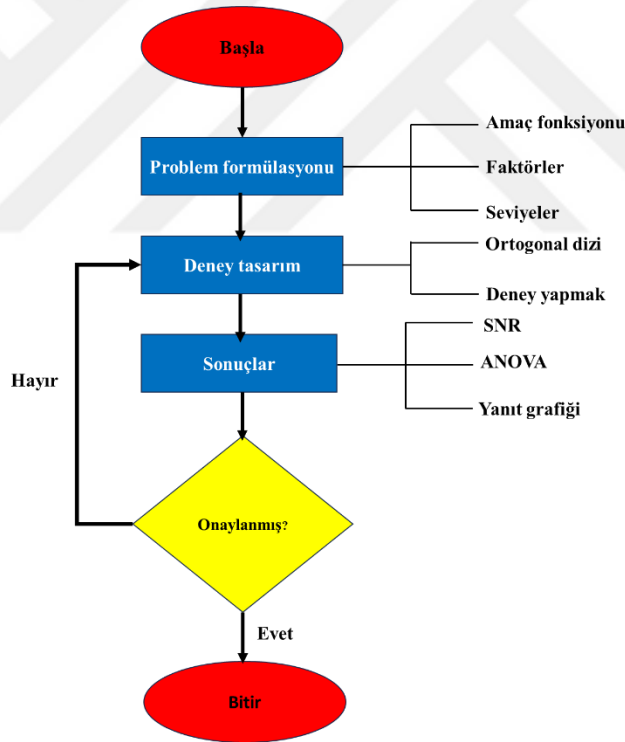
Taguchi Deneysel Tasarım Metodu, kalite kontrolü ve ürün geliştirme süreçlerinde kullanılan önemli bir istatistiksel deney tasarım tekniğidir. Bu yaklaşım, özellikle ürün tasarımı ve üretim süreçlerinin geliştirilmesinde etkili bir araç olarak kabul edilir. Taguchi'nin geliştirdiği bu yöntem, ürünlerin performansını artırmak, hataları azaltmak ve üretim maliyetlerini en aza indirmek amacıyla uygulanır. Taguchi, çoklu faktörlerin ürün veya süreç performansı üzerindeki etkilerini sistematik bir şekilde değerlendirmek için tasarlanmış deneylerin anahtar noktalarını vurgular (Taguchi et al., 2002)

Taguchi yönteminin temel prensipleri

Taguchi Deneysel Tasarımı, faktörlerin (parametrelerin) belirli seviyelerde nasıl ayarlanacağına dair kapsamlı bir deney matrisi kullanır. Bu matris, her bir faktörün etkilerini izlemeyi ve istenen sonuçlara ulaşmak için optimal faktör ayarlarını belirlemeyi sağlar. Yöntem, deneylerin sistematik ve tekrarlanabilir olmasını sağlayarak, eksiksiz deney tasarımı ve veri analizi yapar. Taguchi'nin bu metodu, kaliteyi artırmayı ve maliyetleri düşürmeyi hedefleyen bir yaklaşımdır. Ayrıca, bu metodoloji, üretim süreçlerinde yüksek verimlilik ve düşük hata oranları elde edilmesine yardımcı olur (Bement, 1989; Ross, 1987).

Taguchi yönteminin uygulama alanları

Taguchi Deneysel Tasarım Metodu, birçok endüstride kullanılmaktadır. Otomotiv, üretim makineleri, elektronik ve gıda üretimi gibi farklı alanlarda, iş süreçlerinin iyileştirilmesi, ürün kalitesinin artırılması ve maliyetlerin düşürülmesi gibi hedeflere ulaşmak için bu yöntem yaygın olarak uygulanmaktadır (Montgomery, 2017).



Şekil 44. Taghuchi deney tasarım aşamaları

Bu çalışmada, Al7075 alaşımının yüzey sertliği, tribolojik özellikleri ve korozyon direncini artırmak amacıyla üç aşamalı bir yüzey mühendisliği stratejisi uygulanmıştır. İlk aşamada, bilyeli dövme işlemi yapılmış ve S110 ile S230 bilye çapları ile 8A ve 10A Almen şiddeti parametreleri kullanılarak yüzeydeki plastik deformasyon ve artık basma gerilmeleri ile malzemenin mikrosertliği optimize edilmiştir. Bu işlem, alaşımın yüzeyinde meydana gelen

deformasyonların, malzemenin dayanıklılığını ve sertliğini artırmasını sağlamıştır (S. Zhang et al., 2005).

İkinci aşamada, plazma elektrolitik oksidasyon (PEO) işlemi kullanılarak Al_2O_3 tabakası oluşturulmuştur. Bu aşamada, Taguchi L_9 deneysel dizileri ile belirlenen parametreler kullanılarak yüksek saflıkta ve gözenekli morfolojiye sahip Al_2O_3 kaplama yapılmış ve böylece aşınma direnci ile termal kararlılık iyileştirilmiştir (Kessler et al., 2002).

Son aşamada ise, kapalı alan dengesiz magnetron sıçratma (CFUBMS) yöntemiyle TiN ince filmler biriktirilmiştir. Bu işlem, Taguchi L_4 deneysel dizileri ile belirlenen parametreler doğrultusunda gerçekleştirilmiş ve yüzeyin tribomekanik performansı daha da geliştirilmiştir. CFUBMS tekniği, sıçratma işlemi sırasında manyetik alanların kullanılmasıyla daha homojen ve yüksek kaliteli ince filmlerin üretilmesini sağlar (Fu et al., 2000).

Bu üç aşamalı yüzey mühendisliği stratejisi, Al7075 alaşımının performansını önemli ölçüde artırmış ve tribolojik özelliklerin yanı sıra yüzeyin korozyon direncini de iyileştirmiştir. Taguchi Deneysel Tasarım Metodu'nun kullanılması, bu işlemlerin her birinde optimal parametrelerin belirlenmesini sağladı ve yapılan iyileştirmeler sonucunda daha verimli ve dayanıklı yüzeyler elde edilmiştir.

Çalışmada, üçlü yüzey modifikasyonunun etkileri, çeşitli karakterizasyon teknikleri ve testlerle kapsamlı bir şekilde değerlendirilmiştir. Bu analizler, modifikasyonun Al7075 alaşımının mikro-yapısal özellikleri, faz yapısı, yüzey pürüzlülüğü, sertlik, aşınma direnci ve korozyon direnci üzerindeki etkilerini belirlemeye yöneliktir. Analizlerde, üçlü yüzey modifikasyonunun etkisi; SEM-EDS ile mikro-yapısal karakterizasyon, XRD ile faz analizi, 3D profilometre ile yüzey pürüzlülüğü ölçümü, Vickers mikrosertlik testi (HV), oda sıcaklığı koşullarında pin-on-disk tribometre ile aşınma direnci ve potansiyodinamik polarizasyon testleri ile korozyon direnci üzerinden değerlendirilmiştir.

MATERYAL VE METOD

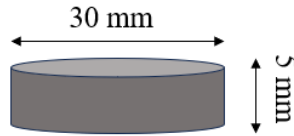
Numunelerin Metalografik Olarak Hazırlanması

Al7075 alüminyum alaşımı, yüksek mukavemeti, düşük yoğunluğu, dayanıklılığı ve işlenebilirliği sayesinde havacılık, uzay, otomotiv ve savunma sanayilerinde yaygın olarak kullanılan önemli bir malzemedir. Bu alaşımın kimyasal bileşimi Tablo 3’de verilmiştir.

Tablo 3. Al7075 Alüminyum Alaşımının Kimyasal Kompozisyonu

Kimyasal kompozisyon						
Elementler	Al	Zn	Mg	Cu	Fe	Si
Kütlece%	87,1-91,4	5,1-6,1	2,1-2,9	1,2-2	En fazla 0,5	En fazla 0,4

Şekil 45’te çubuk şeklindeki numuneler belirlenen boyutlarda hazırlanmış, ardından Şekil 46’da gösterildiği üzere numuneler Mikro Kesme Mecatome T 255/300 cihazında kesilmiştir. Kesim işleminin ardından numuneler, sırasıyla 120, 320, 400, 800 ve 1200 SiC taneli zımparalarla $R_a \approx 0.26$ yüzey pürüzlülüğü değerine ulaşıncaya kadar zımparalanmıştır. Daha sonra numuneler etil alkol içerisinde ultrasonik banyoda 20 dakika süreyle yıkanmış ve basınçlı hava ile kurutulmuştur.



Şekil 45. Al7075 numune boyutları



Şekil 46. Kesme cihazı

Bilyeli Dövmeye İşlemi

Bilyeli dövmeye işlemleri, 8A ve 10A Almen şiddetleri altında; 0,3 mm (S110) ve 0,6 mm (S230) çaplarında iki farklı boyutta paslanmaz çelik bilye kullanılarak gerçekleştirilmiştir. İşlem, Sigma Shot Peening Sistemleri'nde uygulanmıştır. Kullanılan bilyelerin özellikleri Tablo 4'te verilmiştir. Tüm bilyeli dövmeye işlemleri, 90° bilye çarpma açısıyla ve numune yüzeyinin merkezine sabit olacak şekilde gerçekleştirilmiş olup, işlem parametreleri Tablo 5'te sunulmuştur.

Tablo 4. Paslanmaz Çelik Bilye Sertifika Bilgileri

Ticari adı	Chronital S110, Chronital S230						
Tanımı	Paslanmaz çelik bilye (Atomizasyon işlemi ile dökülmüş paslanmaz yuvarlak çelik bilya)						
Mikro yapısı	Östenitik						
Kimyasal Bileşenleri	C	Cr	Si	Mn	Ni	S	P
Ağırlık %	0,10-0,13	18,0-19,0	<3,0	<2,0	8,0-10,0	<0,03	<0,04

Tablo 5. Bilyeli Dövmeye Parametreleri

Numune No	Bilye tipi	Bilye türü	Almen şiddeti
N1	Çelik	S110	8A
N2	Çelik	S110	10A
N3	Çelik	S230	8A
N4	Çelik	S230	10A

Bilyeli dövmeye işleminden sonra numune yüzeyi Şekil 36'de resmi verilmiştir.



Şekil 47. Bilyeli dövmeye işleminden sonra numune yüzeyi

PEO Yöntemi ile Al₂O₃ ara Tabakasının Büyütülmesi

Al7075 alaşımlarının üzerine Al₂O₃ ara tabakası Şekil 48'de gösterilen Plasma Technology Ltd. tarafından üretilen PEO-15 sisteminde PEO işlemi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 48. PEO işleminde kullanılan sistem

PEO yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen Al_2O_3 kaplama işlemi, Taguchi Deney Tasarımı yöntemlerinden L9 (3^3) deney planı kullanılarak uygulanmıştır. Kaplama özellikleri üzerinde etkili olan frekans, voltaj ve kaplama süresi, proses parametreleri olarak seçilmiş; görev döngüsü (duty cycle) ise %15 olarak sabit tutulmuştur. Al7075 taban malzemeleri üzerine Al_2O_3 tabakası oluşturmak amacıyla, her bir numune için ayrı ayrı hazırlanan elektrolit çözeltileri kullanılmıştır. Elektrolit bileşimi; 2 g/2 L KOH, 6 g/2 L Na_2HPO_4 ve 8 g/2 L Na_2SiO_3 olacak şekilde 32 litre saf su içerisinde hazırlanmıştır. Kimyasallar hassas terazi (0,0001 g duyarlılıkla) ile tartılmış ve homojen bir karışım elde etmek amacıyla Heidolph MR Hei-Standard model karıştırıcı kullanılmıştır.

Kaplama işlemi, sulu çözeltide AC güç kaynağı kullanılarak bipolar modda gerçekleştirilmiştir. Tüm deneylerde numune anot, paslanmaz çelikten oluşan banyo duvarı ise katot olarak kullanılmıştır. Proses süresince banyo sıcaklığının $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'nin üzerine çıkmaması için banyo duvarları içerisinde şebeke suyu geçirilerek soğutma sağlanmıştır. PEO prosesi üzerinde etkili parametrelerin optimizasyonu amacıyla, Taguchi L9 (3^3) deney planına göre seçilen üç farklı parametre ve bunların üçer seviyesinde toplam dokuz farklı deney gerçekleştirilmiştir. Seçilen proses parametreleri ve seviyeleri Tablo 6'da, uygulanan Taguchi deney planı ise Tablo 7'de sunulmuştur. PEO işlemi sonrasında kaplanan numuneler saf su ve etil alkol ile yıkanarak kurutulmuştur.

Tablo 6. PEO İşlemi İçin Kaplama Parametreleri ve Seviyeleri

Parametreler	Seviyeler		
	1	2	3
Frekans (Hz)	200	250	300
Voltaj (V)	450/-45	500/-50	550/-55
Kaplama Süresi(dk)	10	15	20

Al 7075 taban malzeme yüzeyine PEO yöntemiyle uygulanmış kaplamaların adezyon özelliklerini belirlemek için çizik testi yapılmıştır. Taguchi deney planına $L_9 (3^3)$ PEO kaplamaları farklı parametrelerle büyütülerek çizik testinden elde edilen adezyon kuvvetleri analiz edilmiştir. Tablo 7'de PEO yöntemiyle kaplanmış Al 7075 taban malzeme üzerine çizik test sonuçları verilmiştir. Deneylerde belirlenen en düşük adezyon kuvveti 18 N iken en yüksek adezyon kuvveti 28 N olarak ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlara göre en iyi adezyon kuvveti PEO yöntemi kullanılarak kaplanan Al7075, R9 deney parametrelerinde elde edilmiştir. Bu deney şartlarında elde edilen numuneler üzerine Taguchi deney planına $L_4(2^3)$ göre TiN kaplamalar büyütülmüştür.

Tablo 7. PEO Yöntemi Kullanılarak Kaplanan Al7075 Numunelerin Scratch (Çizik) Test Sonuçları

No.	Frekans (Hz)	Voltaj (V)	Süre (dk)	Adezyon (Deneysel değerler (N))
R1	200	450	10	18
R2	200	500	15	20
R3	200	550	20	22
R4	250	450	20	18
R5	250	500	10	21
R6	250	550	15	25
R7	300	450	15	19
R8	300	500	20	19
R9	300	550	10	28

CFUBMS Yöntemi ile TiN Kaplamanın Büyütülmesi

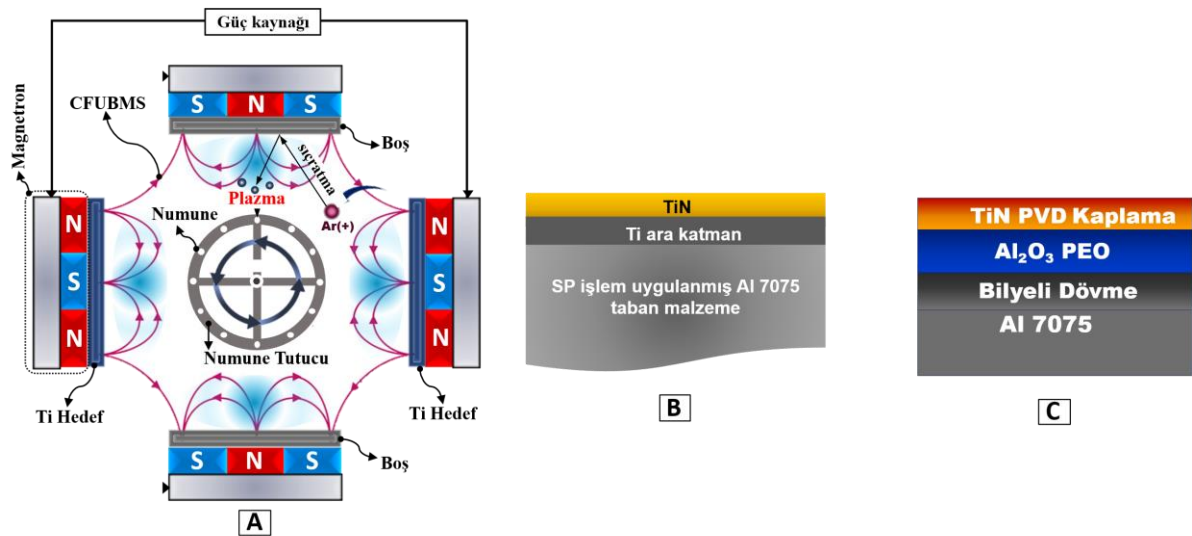
Teer Coatings Ltd. tarafından geliştirilen fiziksel buhar biriktirme PVD (PLASMAG 550) sistemi (Şekil 49) kullanılarak, bilyeli dövme işlemi uygulanmış yüzeylere ilk olarak kapalı alan dengesiz manyetik alanda sıçratma (CFUBMS) yöntemiyle TiN kaplaması uygulanmıştır. Ardından, bilyeli dövme işlemi sonrası yüzeyde dubleks kaplama elde etmek amacıyla, önce PEO yöntemiyle Al_2O_3 kaplaması, ardından tekrar CFUBMS yöntemiyle darbeli doğru akım (pulsed-DC) modunda TiN kaplaması gerçekleştirilmiştir.

Ayrıca, yapısal analizlerde kullanılmak üzere silisyum ve cam (SiO_2) taban malzemeler üzerinde de TiN kaplamaları oluşturulmuştur. TiN kaplama işlemi, Şekil 50’de şematik olarak gösterilen sistem kullanılarak gerçekleştirilmiştir. CFUBMS tekniği ile TiN kaplaması oluşturmak amacıyla, bilyeli dövme uygulanmış Al7075 taban malzeme üzerinde %99,95 saflıkta iki adet titanyum hedef malzeme kullanılmıştır.

Al7075 numune yüzeyine uygulanan yüzey işlemlerinin sıralaması Şekil 51’de şematik olarak sunulmuştur. Şekil 52’de ise bu işlemler sonucunda elde edilen yüzey örnekleri gösterilmiştir.



Şekil 49. Teer Coatings Ltd. Şirketi (PLASMAG 550) sistemi



Şekil 50. a) Kapalı alan dengesiz manyetik sıçratma (CFUBMS) kaplama ünitesinin şematik gösterimi b) bilyeli dövme işlemine tabi tutulmuş daha sonra PVD yöntemi ile kullanarak TiN kaplanmış c) Bilyeli dövme işlemine tabi tutulmuş ardından dubleks $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiN}$ kaplama şematik gösterimi

Kapalı alan dengesiz manyetik alanda sıçratma (CFUBMS) tekniğiyle gerçekleştirilen TiN kaplama işlemi, Taguchi Deney Tasarımı yöntemlerinden $L_4 (2^3)$ deney planı kullanılarak uygulanmıştır. Kaplama özellikleri üzerinde etkili olan frekans, taban malzeme gerilimi ve titanyum hedef akımı, proses parametreleri olarak belirlenmiştir.

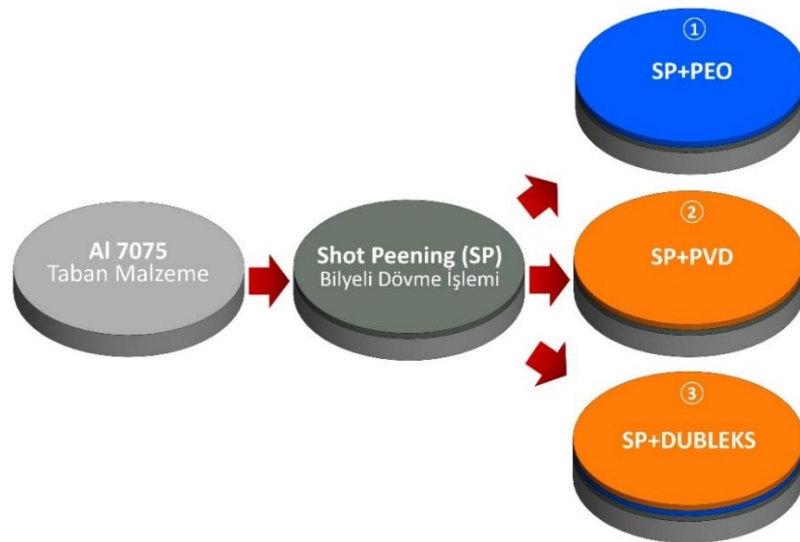
Taguchi $L_4 (2^3)$ deney planına göre, seçilen proses parametrelerinin farklı seviyelerinde dört ayrı deney yapılmıştır. Kullanılan proses parametreleri ve seviyeleri Tablo 8’de, uygulanan deney planı ise Tablo 9’da sunulmuştur.

Tablo 8. Tin İnce Film Biriktirme Parametreleri

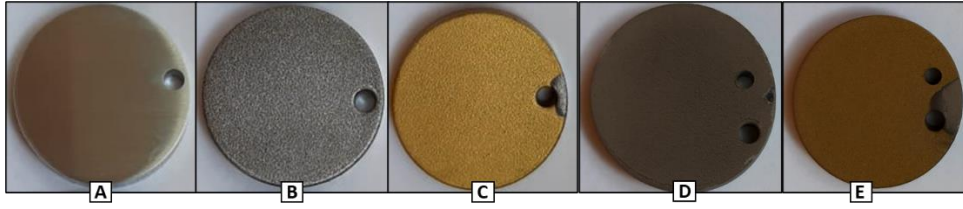
Değişken Parametreler	Level 1	Level 2
Ti Hedef Akımı (A)	2	3
N ₂ Akışı oranı (sccm)	5	7
Görev Döngüsü (%)	70	85
Sabit Parametreler		
İyon Temizleme		-800 V (20 dak)
Ti Ara Tabaka		Hedef Akım: 2.5 A (10 dak.) Taban Malzeme Gerilimi: -250 V
Kaplama Süresi (dak.)		85
Ti Ara Tabaka Gerilim (-V)		100
Çalışma Basıncı (Pa)		0.33

Tablo 9. Tin İnce Film Biriktirme İşleminde Kullanılan Deney Tasarımı

	Ti hedef akımı (A)	N ₂ Akışı oranı (sccm)	Görev Döngüsü (%)
R1	2	5	70
R2	2	7	85
R3	3	5	85
R4	3	7	70



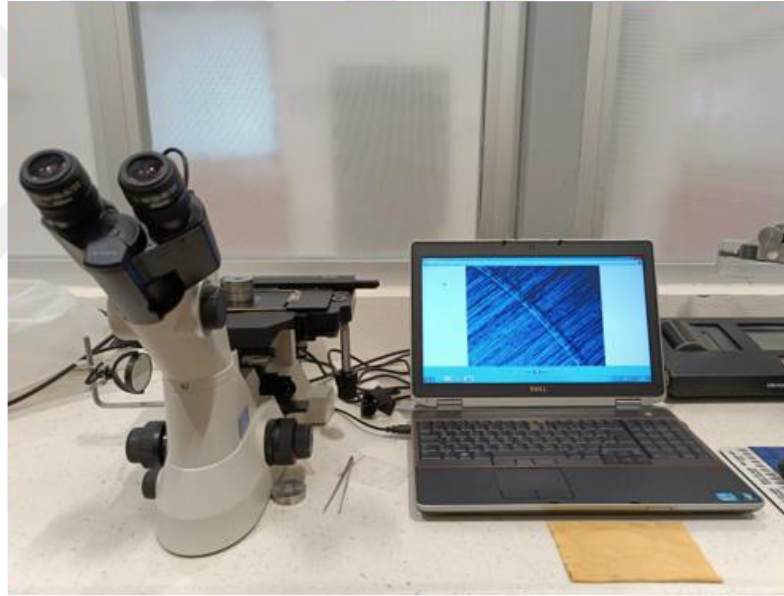
Şekil 51. Al 7075 numune yüzeyine tasarlanan işlem sıralaması



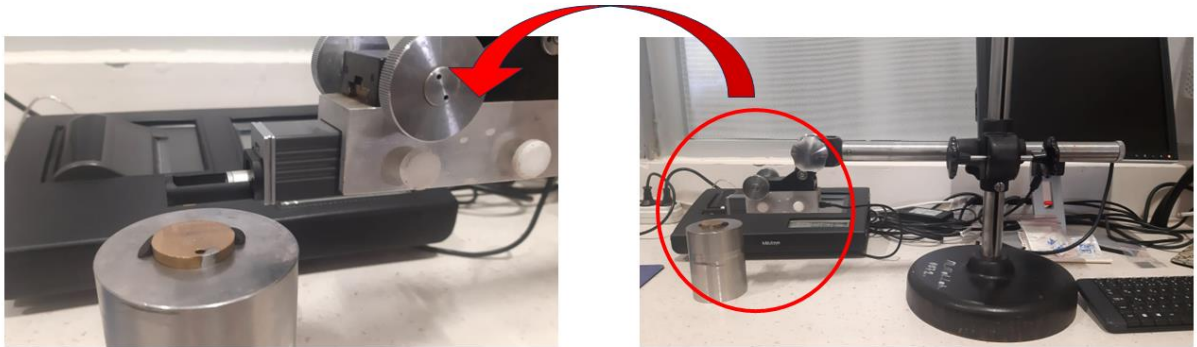
Şekil 52. Numune yüzeyleri **a)** Al 7075 **b)** Bilyeli dövme **c)** Bilyeli dövme işlemi uygulanmış daha sonra TiN kaplanmış **d)** Bilyeli dövme işlemi uygulanmış daha sonra PEO yöntemi kullanılarak kaplanmış **e)** Bilyeli dövme işlemi uygulanmış daha sonra dubleks PEO/TiN kaplanmış

Yapısal Özelliklerin Araştırılması

Bilyeli dövme, SP+PEO, SP+PVD ve SP+Dubleks işlemleri öncesi ve sonrasında elde edilen yüzey topoğrafyaları, Şekil 53'te gösterilen Nikon Eclipse MA100 model optik mikroskop ile incelenmiştir. Ayrıca, numunelere ait yüzey pürüzlülük değerleri ise Şekil 54'te gösterilen Mitutoyo profilometre cihazı kullanılarak ölçülmüştür.



Şekil 53. Optik mikroskop



Şekil 54. Profilmetre cihazı

XRD analizi

Al 7075 taban malzeme, SP, SP+PEO, SP+TiN ve SP+Dubleks film ile kaplanmış numunelerin kırınım modellerini belirlemek için X-ışını kırınım spektrometresi Rigaku-2200D/Max (Şekil 55) kullanılmıştır. 40 kV/20 mA'da Cu-K α radyasyonu ($\lambda = 1.5405$) 20-110° aralığında incelenmiştir. XRD verileri daha sonra OriginPro programı ile grafik hale dönüştürülerek analiz edilmiştir.



Şekil 55. XRD cihazı

SEM analizi

Al Al7075 taban malzeme üzerine uygulanan SP, SP+PEO, SP+TiN ve SP+Dubleks film kaplama işlemlerinden sonra, numunelerin film kalınlığına ait kesit görüntüleri, yüzey topografyası ve yapıda bulunan elementlerin analizi gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, Şekil 56'da gösterilen Doğu Anadolu Yüksek Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi (DAYTAM)'nde bulunan ZEISS EVO LS10 marka Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile; ayrıca Şekil 57'de gösterilen Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'ndeki JEOL JSM-6060LV cihazı kullanılmıştır.



Şekil 56. ZEISS EVO LS10 SEM cihazı



Şekil 57. JEOL JSM-6060LV SEM cihazı

Mekanik Özelliklerin Araştırılması

Sertlik deneyi

Al 7075 taban malzeme üzerine uygulanan SP, SP+PEO, SP+TiN ve SP+Dubleks kaplama işlemleri sonrasında, numunelerin sertlik dağılımı Şekil 58’de gösterilen Vickers mikrosertlik cihazı (Hardware MHVD 1000 IS) kullanılarak belirlenmiştir. Ölçümler, bilyeli dövme ve SP+PVD numuneler için 10 gram ve SP+PEO ile SP+PEO/TiN numuneler için 200 gram yük altında ve 10 saniye süreyle yapılmıştır. Her bir numune için üç farklı noktadan ölçüm gerçekleştirilmiş ve sonuçların doğruluğunu sağlamak amacıyla bu değerlerin ortalaması alınarak değerlendirme yapılmıştır.



Şekil 58. Sertlik deney cihazı

Sürtünme-Aşınma (Triboloji) deneyi

Al 7075 taban malzeme üzerine sırasıyla uygulanan SP (bilyeli dövme), SP+PEO, SP+TiN ve SP+Dubleks kaplama işlemlerinin ardından, numunelerin tribolojik özellikleri CSM marka tribometre cihazı (Şekil 59) kullanılarak incelenmiştir. Testler sırasında ortam sıcaklığı 25 °C, bağıl nem oranı ise %45 olarak ölçülmüştür. Karşıt eleman olarak 6,25 mm çapında alüminyum oksit (Al_2O_3) bilyeler kullanılmıştır. Testler, 1 N uygulama yükü ve 10 metre sürtünme mesafesi altında gerçekleştirilmiş; numune yüzeyinde 3 mm çapında dairesel aşınma izleri oluşturulmuştur.

Test tamamlandıktan sonra, hem karşıt bilye hem de numune yüzeyinde oluşan aşınma izleri optik mikroskop ile incelenmiş; elde edilen sürtünme katsayısı verileri ile birlikte değerlendirilmiştir.



Şekil 59. CSM yüksek sıcaklık tribometre cihazı

Scratch (Çizik) deneyi

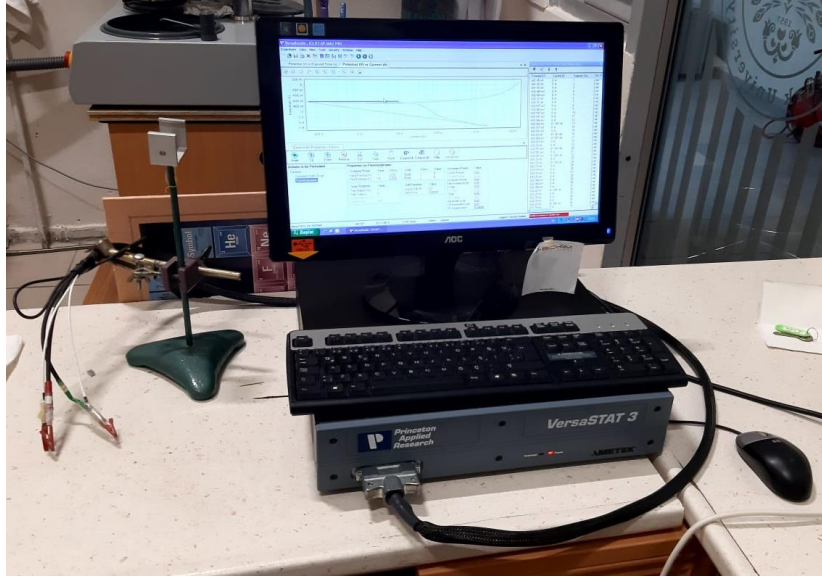
Al7075 alaşımına uygulanan bilyeli dövme işlemi sonrasında, PVD yöntemiyle oluşturulan TiN ince filmler ile PEO/TiN dubleks kaplamaların adezyon (yapışma) özellikleri incelenmiştir. Kaplamaların yapışma dayanımı, CSM Instruments Revetest çizik testi cihazı (Şekil 60) kullanılarak, Rockwell-C tipi elmas uç ile belirlenmiştir. Deneyler, 10 mm/dakika kayma hızı ve 100 N/dakika yükleme oranı ile gerçekleştirilmiş; böylece kaplamaların mekanik stabilitesi ve yüzeye tutunma performansı değerlendirilmiştir.



Şekil 60. Scratch (Çizik) test cihazı

Korozyon Deneyi

Al7075 taban malzeme üzerinde sırasıyla uygulanan SP (bilyeli dövme), SP+PEO, SP+TiN ve SP+Dubleks kaplama işlemlerinden sonra, numunelerin korozyon davranışları Versa-Stat marka cihaz (Şekil 61) kullanılarak potansiyodinamik polarizasyon testi ile incelenmiştir. Testler, %3,5 NaCl çözeltisi içerisinde ve atmosferik koşullarda, üç elektrotlu sistem kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Numuneler, açık devre potansiyeline (OCP) ulaşıncaya kadar yaklaşık 30 dakika bekletilmiş, ardından -1000 mV ile +1600 mV potansiyel aralığında, 1 mV/sn tarama hızıyla potansiyodinamik olarak polarize edilmiştir.



Şekil 61. Versa-Stat korozyon test cihazı

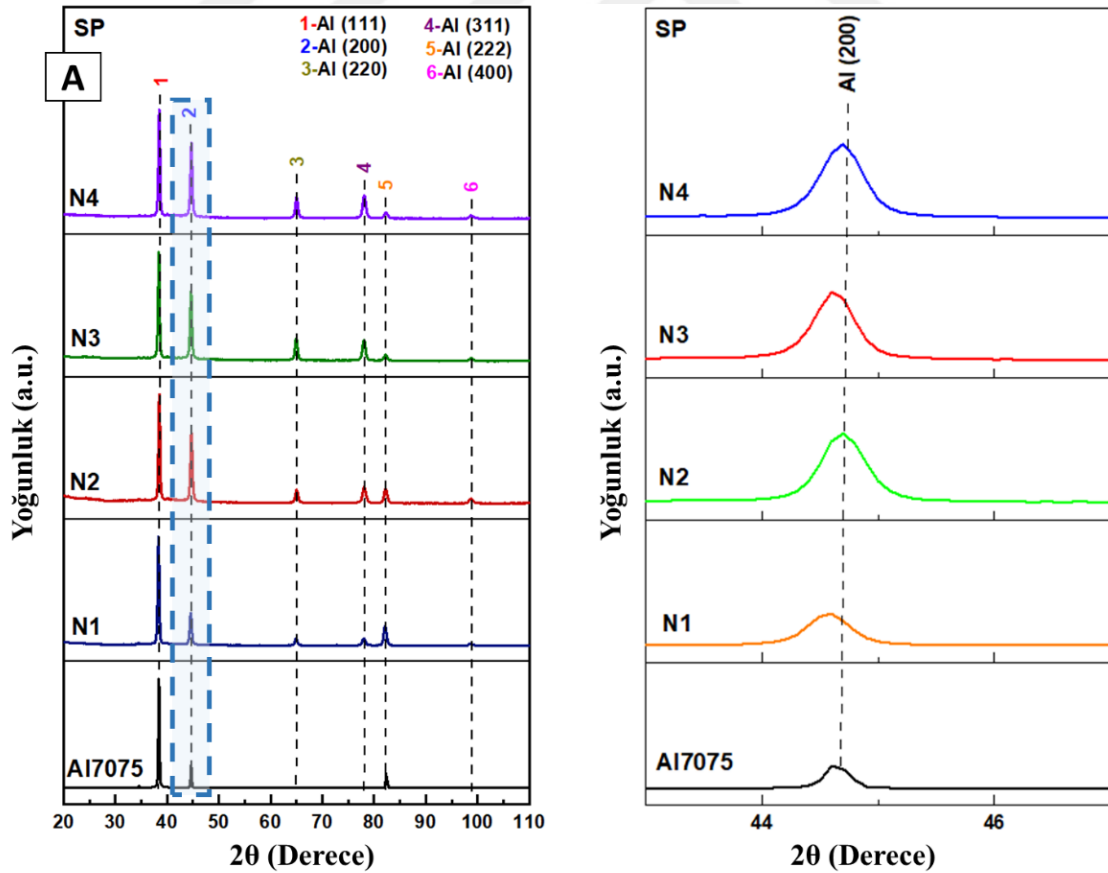
ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Bilyeli Dövme İşlemine Tabi Tutulmuş Al7075 Alaşımının ve CFUBMS Yöntemi ile Büyütülen TiN Kaplamaların Fiziksel, Mekanik ve Yüzey Özelliklerinin Araştırılması

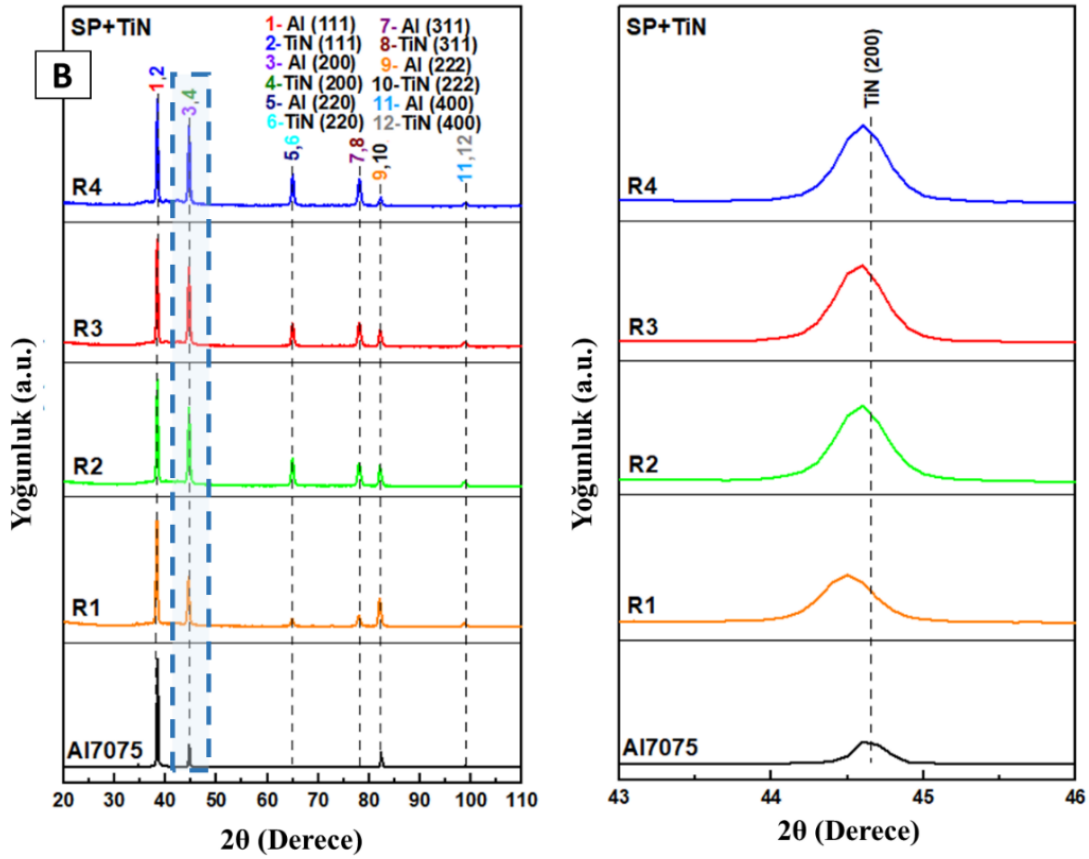
Mikroyapı Test Bulguları ve Tartışma

XRD analizi

Al7075 taban malzeme üzerine, iki farklı bilye çapı (S110 ve S230) ve iki farklı Almen şiddeti (8A ve 10A) kullanılarak bilyeli dövme işlemi uygulanmıştır. Bu işlemin ardından, Taguchi L₄ (2³) deney planına göre dört farklı deney tasarımı ile (R1–R4), bilyeli dövme uygulanmış yüzeylere PVD yöntemiyle TiN kaplamalar numunelerin XRD pikleri Şekil 62'de gösterilmiştir. Al7075 taban malzeme ile SP uygulanmış N1, N2, N3 ve N4 numunelerine ait difraksiyon desenleri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Analizler, malzemenin kristal yapısında meydana gelen deformasyonlar ve faz bileşimi değişimleri hakkında önemli bilgiler sağlamaktadır.



Şekil 62. a) Bilyeli dövme işlemi uygulanmış numunelerin XRD sonuçları ve **b)** Bilyeli dövme işlemi uygulanmış daha sonra TiN kaplanmış numunelerin XRD sonuçları



Şekil62. a) Bilyeli dövme işlemi uygulanmış numunelerin XRD sonuçları ve **b)** Bilyeli dövme işlemi uygulanmış daha sonra TiN kaplanmış numunelerin XRD sonuçları (Devamı)

Şekil 62 (a)'de sunulan XRD pikleri, farklı kristal düzlemlerine karşılık gelen karakteristik alüminyum piklerini göstermektedir. Bilyeli dövme işlemi sonrasında yeni faz oluşumuna ya da anormal piklerin ortaya çıkmasına dair herhangi bir bulguya rastlanmamıştır. Ancak, XRD pikleri incelendiğinde, uygulanan bilyeli dövme parametrelerine bağlı olarak tüm numunelerdeki karakteristik Al piklerinde belirgin bir kayma gözlemlenmiştir. Bu kayma, piklerin daha düşük Bragg açısı yönünde gerçekleştiğini göstermektedir. (Pandey et al., 2017). Bu kaymalar, kafes yapısını bozan ve pik kaymasına neden olan bilyeli dövme işleminin neden olduğu mikro gerilme ve tane incelmeleri etkilerine bağlanabilir (Bao et al., 2022; Efe et al., 2020). Literatürde de belirtildiği üzere, XRD grafiklerinde yalnızca pik kaymaları değil, aynı zamanda pik genişlemesi veya daralması da gözlemlenebilir. Bu durum, büyük ölçüde tane boyutundaki küçülmeye veya kristal yapıda meydana gelen bozulmalara bağlanmaktadır. Tane boyutunun küçülmesi, pik genişlemesine neden olurken; kristal yapının değişmesi veya artan gerilmelerin durumunda piklerde daralma meydana gelebilir. Bu bulgular, bilyeli dövme işleminin Al 7075 alaşımı üzerinde belirgin mikroyapısal değişiklikler oluşturduğunu açıkça ortaya koymaktadır. Sonuç olarak, XRD analizleri SP işleminin Al7075 alaşımının kristal yapısında önemli mikroyapısal değişimlere neden olduğunu açıkça ortaya koymaktadır. Pik

genişlemeleri ve genlik değişimleri, yüzeyde oluşan deformasyon sertleşmesinin yapısal bir kanıtı niteliğindedir. Bu mikroyapısal değişikliklerin, önceki sertlik analizleriyle de uyumlu olarak, malzemenin mekanik özelliklerinde kayda değer iyileşmeler sağladığı değerlendirilmektedir.

Şekil 62 (b), bilyeli dövme işlemi uygulanmış numuneler üzerindeki TiN kaplamaların XRD piklerini göstermekte ve YMK yapısının tüm numunelerde baskın kristal fazı olduğunu doğrulamaktadır. Bu durum (111), (200), (220), (311), (222) ve (400) kristal düzlemlerine karşılık gelen ve saf TiN için standart XRD desen verileriyle (JCPDS-no. 00-038-1420) mükemmel uyum gösteren iyi tanımlanmış altı kırınım pikinden anlaşılmaktadır. XRD piklerindeki kaymanın tespit edilmesi için belirlenmesi gereken ortalama tane boyutu Scherrer matematiksel Eşitliği (1) kullanılarak hesaplanmıştır (Langford & Wilson, 1978).

$$D = \frac{K\lambda}{\beta \cos\theta} \quad (1)$$

Eşitlik (1)'de; D tane boyutu (nm), K = 0,89 (scherrer sabiti), $\lambda = 0,15406$ nm (X-ışını kaynaklarının dalga boyu), β =FWHM (radyan), θ =tepe konumu (radyan).

Bilyeli dövme işleminde tane boyutu ile yüzeydeki plastik deformasyon arasında önemli bir korelasyon olduğu tespit edilmiştir. Bilyeli dövme işlemine tabi tutulmuş TiN kaplama yapılmış, kaplama yapılmamış ve tabi tutulmamış Al7075 numunelerinden elde edilen tane boyutları sırasıyla Tablo 10'da verilmiştir. FWHM değeri, bilyeli dövme uygulanan tüm numunelerde her bir pik için artış göstermiştir. Bu artış, yukarıda da bahsedildiği üzere, bilyeli dövme işleminden sonra tane yapısında meydana gelen değişikliklerden kaynaklanmaktadır.

İşlem görmüş Al 7075 taban malzeme N1'den N4'e kadar olan numune süreçleri karşılaştırıldığında, sırasıyla 0.3 mm ve 0.6 mm bilye çaplarına sahip olan S110 ve S230 bilyeleri ile gerçekleştirilen işlemler için numunelerdeki tane boyutunda önemli bir değişiklik olduğu görülmektedir. S110 ve S230 bilyeleri için ortalama tane boyutu sırasıyla 17,66 nm ve 18,05 nm olarak belirlenmiştir. TiN ile kaplanmış SP işlemleri numunelerde, daha geniş kırınım pikleri tane boyutundaki azalmaya ve taneler içinde heterojen mikro gerilmelerin varlığına bağlanabilir. XRD analizinde gözlemlenen yüksek (222) ve (111) oranı, bu pik genişlemesinin tek başına küçük tane boyutlarından ziyade ağırlıklı olarak homojen olmayan gerilmeden kaynaklandığını göstermektedir. Bu homojen olmayan gerilim muhtemelen kaplama işlemi sırasında azot ve/veya argon iyonlarının interstisyel kafes bölgelerinde denge dışı konumlarda hapsolması yoluyla iç gerilmeleri ürettiği bilinen iyon bombardımanından kaynaklanmaktadır.

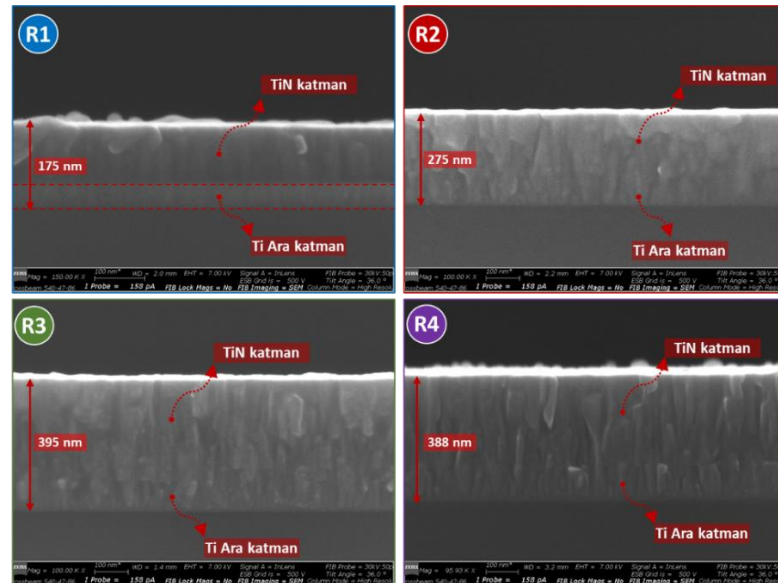
Tablo 10. Ortalama Tane Boyutu Ölçümü

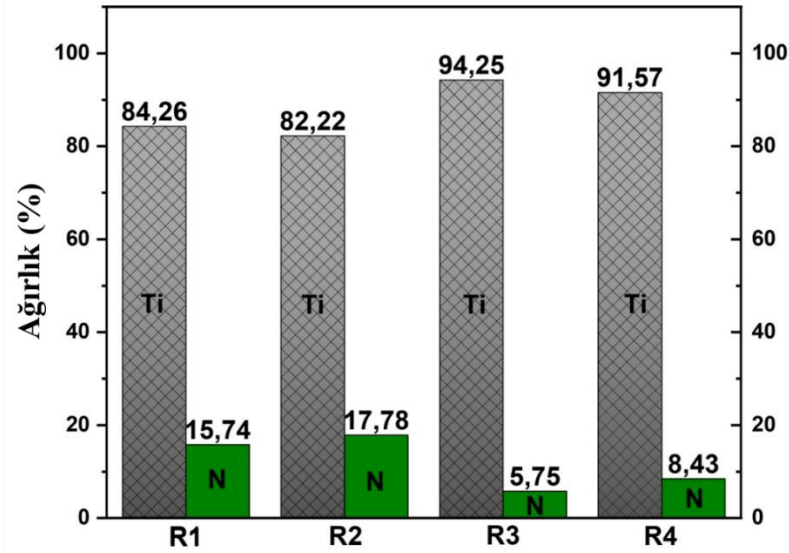
Numuneler		FWHM	D (nm)
Al7075		0.516	22.75
N1	SP (S110, 8A)	0.525	18.42
N2	SP (S110, 10A)	0.543	17.91
N3	SP (S230, 8A)	0.544	17.86
N4	SP (S230, 10A)	0.557	17.33
R1	SP + PVD	0.633	14.90
R2	SP + PVD	0.639	14.74
R3	SP + PVD	0.634	14.88
R4	SP + PVD	0.727	13.25

Tablo 10'da sunulan veriler bu bulguları daha da desteklemekte olup, bilye çapı ile Almen şiddeti arttıkça, özellikle SP ve PVD işlemlerinin kombinasyonunda, tane boyutunda karşılık gelen bir azalma olduğunu ve en küçük tane boyutunun 13,25 nm ile R4 numunesinde gözlemlendiğini göstermektedir. Bu eğilim, bilyeli dövme parametrelerinin ve daha sonra TiN kaplamanın malzemenin mikroyapısı üzerindeki önemli etkisini vurgulamaktadır.

SEM analizi

Al 7075, Si ve Cam (SiO₂) lamel taban malzemeler üzerine CFUBMS yöntemi kullanılarak TiN ince filmler kaplanmıştır. Deneysel süreç, Taguchi L₄(2³) tasarım yöntemi çerçevesinde gerçekleştirilmiştir. Film kalınlıklarının belirlenmesi amacıyla Cam (SiO₂) taban malzemeler üzerinde oluşturulan TiN ince filmler kullanılmıştır. Cam taban malzemesinin tercih edilme nedeni, tek kristal yapıya sahip olması sayesinde düzgün bir radyal kırık oluşturulabilmesidir. TiN ince filmlerin kesit görüntüleri ve ölçülen kalınlık değerleri Şekil 63'te ve EDS sonuçları Şekil 64'te verilmiştir.

**Şekil 63.** R1–R4, TiN ince filmlerin SEM görüntüleri



Şekil 64. TiN ince filmlerden elde edilen EDS sonuçları

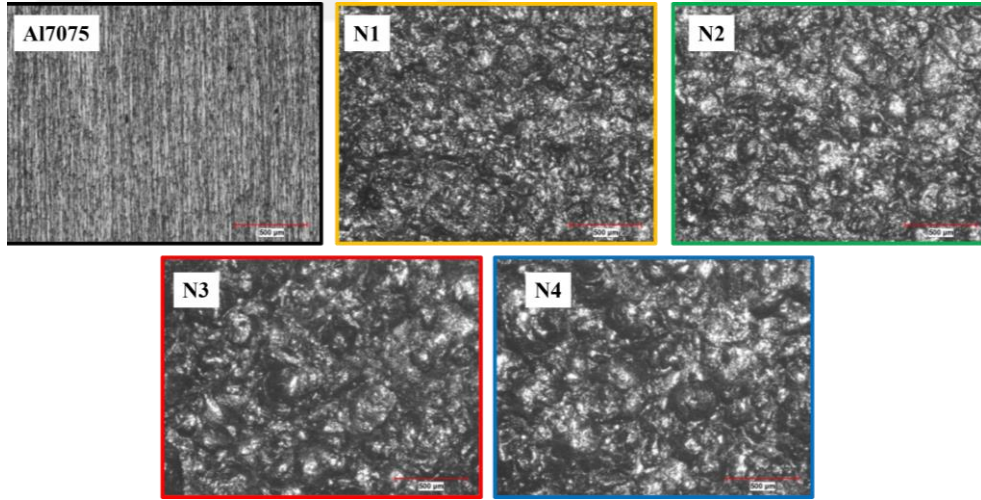
Şekil 63'te SEM görüntüleri incelendiğinde tüm kaplamaların kolonlu bir mikro yapı sergilediğini ortaya koymaktadır. Kolonlar, kaplama büyüme yönü boyunca uzanmakta olup, yüzeye dik yönde hizalanmış tanelerden oluşmaktadır. Kaplamanın kolonlu morfolojisi, esas olarak taban malzeme yüzey pürüzlülüğü, tanelerinin tercihli büyümesi ve yoğunlaşan atomların yüzey hareketliliği tarafından belirlenmektedir (Mattox, 2010). Kolonlu mikro yapı, birbirine yakın taneler arasındaki kristal çekirdeklenme ve büyüme bir sonucudur. Geometrik gölgeleme etkisi (shadow effect) nedeniyle, daha hızlı büyüyen kolonlar, daha yavaş olanların büyümesini engellemektedir. Ancak mikro yapı, kaplama kalınlığı boyunca homojen bir şekilde devam etmemekte, yeni tanelerin yeniden çekirdeklenmesi (renükleasyon) nedeniyle değişiklik göstermektedir. Çekirdeklenme sırasında, çarpan iyonlar tarafından oluşturulan yüzey kusurlarında meydana gelen renükleasyon, kolonlu mikro yapıyı bozarak yeni tanelerin oluşmasına yol açmaktadır. Yeniden oluşan taneler daha küçük ve daha eş eksenli olup, yine de büyüme yönünde uzamaktadır. TiN kaplamanın kesiti SEM görüntüsü kolonların küçük tanelerden oluştuğunu ortaya koymaktadır.

Yapısal analizlerde, ince filmlerin mikroyapısal özelliklerinin Thornton'un yapısal zone modelinde tanımlanan Zone 2 karakteristiği sergilediği tespit edilmiştir (Thornton, 1986). Kalınlık ölçüm verileri incelendiğinde, en düşük azot gazı akışının uygulandığı R3 numunesinde 395 nm'lik maksimum film kalınlığına ulaşıldığı gözlenmiştir. Proses parametrelerindeki azot gazı konsantrasyonunun artışıyla birlikte, reaktif ortamda titanyum nitrür (TiN) fazlarının yoğun şekilde oluşumu birikim kinetiğini önemli ölçüde etkilemiştir. Bu durum, azotun argon gazına kıyasla daha düşük saçınım verimliliğine sahip olmasının birikim dinamiklerini olumsuz etkilemesiyle de ilişkilendirilmiştir (Ding et al., 2017). Şekil 64'deki EDS sonuçlarınıza göre, Ti hedef akımı, N₂ akış oranı ve görev döngüsünün kaplama bileşimi

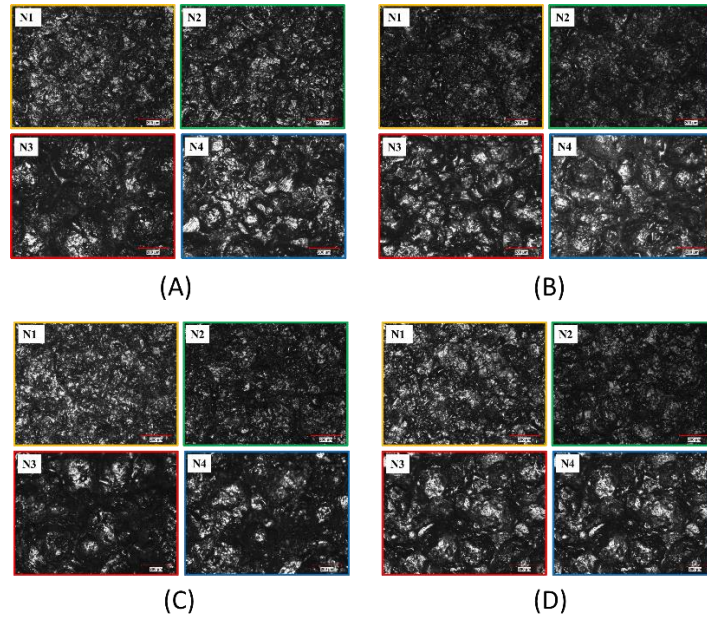
üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Düşük Ti hedef akımı (2A) ve yüksek N₂ akış oranı (7 sccm) kullanılan R2 numunesinde Ti/N oranı daha dengeli (Ti %82,22, N %17,78) iken, yüksek Ti hedef akımı (3A) ve düşük N₂ akışı (5 sccm) uygulanan R3 numunesinde Ti oranının belirgin şekilde arttığı (Ti %94,25, N %5,75) gözlemlenmiştir. Bu durum, Ti hedef akımının artmasıyla birlikte Ti atomlarının birikiminin arttığını, ancak düşük N₂ akış oranının TiN oluşumunu sınırlayarak kaplamada daha fazla metalik Ti fazının bulunmasına neden olabileceğini göstermektedir. Benzer şekilde, görev döngüsü arttığında (R2 ve R3) daha fazla reaktif gazın plazma ortamında kalmasına bağlı olarak N yüzdesinin nispeten arttığı görülmektedir. Sonuçlar, Ti/N oranının, Ti hedef akımı ve N₂ akış oranının hassas kontrolü ile optimize edilebileceğini ve kaplamanın sertlik, aşınma direnci ve korozyon performansına doğrudan etki edebileceğini ortaya koymaktadır.

Yüzey topografi ve pürüzlülüğü

Al7075 taban malzeme üzerine, iki farklı bilye çapı (S110 ve S230) ve iki farklı Almen şiddeti (8A ve 10A) kullanılarak bilyeli dövme işlemi uygulanmıştır. İşlem sonrası elde edilen yüzey topoğrafisi görüntüleri Şekil 65'e sunulmuştur. Bilyeli dövme işlemine tabi tutulan numunelere, sonrasında CFUBMS yöntemi ile dört farklı parametrede TiN kaplaması uygulanmıştır. Bu kaplamalara ait yüzey topoğrafisi görüntüleri ise Şekil 66'da verilmiştir.



Şekil 65. İşlem görmemiş Al 7075 taban malzeme ve bilyeli dövme işlemi uygulanmış numunelerin yüzey topoğrafisi görüntüleri

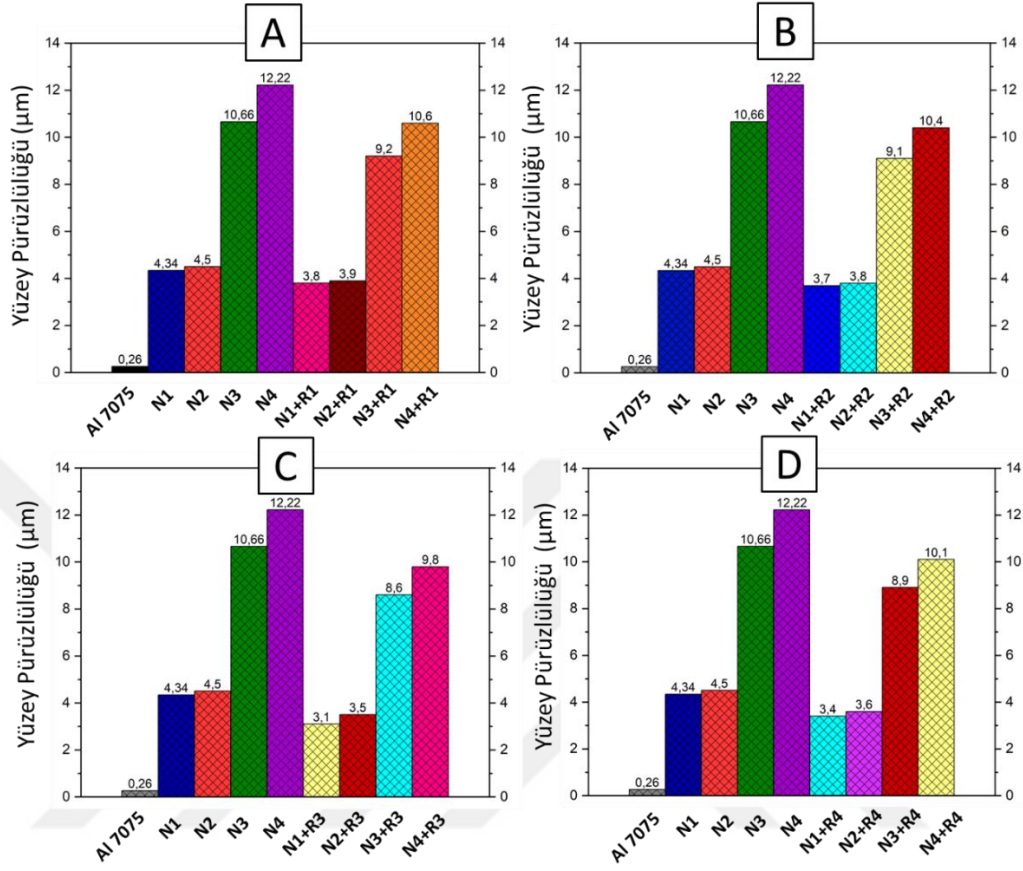


Şekil 66. Bilyeli dövme işlemi uygulanmış ve TiN ile kaplanmış Al 7075 numunelerin yüzey topoğrafı görüntüleri, **a)** R1- SP+PVD, **b)** R2-SP+PVD, **c)** R3-SP+PVD, **d)** R4-SP+PVD

Şekil 66 incelendiğinde, işlem görmemiş (referans) taban malzeme ile bilyeli dövme işlemi uygulanmış numunelerin yüzey topografyalarının karşılaştırılması sonucunda, her iki yüzey arasında dikkate değer morfolojik farklılıklar gözlemlenmiştir. Bilyeli dövme işleminin, yüzeyde daha yoğun plastik deformasyonlara neden olarak topografyada düzensizlikleri artırdığı ve daha pürüzlü bir yüzey yapısı oluşturduğu görülmektedir. S110 bilyesiyle gerçekleştirilen bilyeli dövme işlemlerinde (N1 ve N2 numuneleri), S230 bilyesiyle işlenen numunelere (N3 ve N4) kıyasla yüzeyde daha küçük çukurlar oluştuğu gözlemlenmiştir. Bu durum, kullanılan bilye çapının yüzeyde meydana gelen deformasyon karakteristiği üzerinde doğrudan etkili olduğunu ortaya koymaktadır. Özellikle daha büyük çapa sahip S230 bilyeleri ve buna bağlı olarak uygulanan daha yüksek Almen şiddeti değerleri, yüzeyde daha derin ve daha belirgin çukurların oluşmasına neden olmuştur. Bu farklılıklar, yüzey topografisinde oluşan değişim derecesini ve plastik deformasyon seviyesini önemli ölçüde etkilemiştir (Frija et al., 2006; Unal et al., 2022). Oluşan bu yapısal değişikliklerin, Al 7075 alaşımının hem yüzey sertliği hem de artık iç gerilme dağılımı üzerinde etkili olduğu değerlendirilmiştir. Dolayısıyla, bilyeli dövme işleminde kullanılan bilye boyutunun ve işlem parametrelerinin, elde edilecek yüzey özelliklerinin optimizasyonu açısından kritik bir rol oynadığı söylenebilir.

Şekil 67’de optik mikroskopla TiN kaplanmış numunelerden alınan görüntüleri yüzey topografisinde belirgin bir farklılık gözlemlenmemiştir. Bununla birlikte, çeşitli bilyeli dövme koşullarının ve TiN kaplanmış numunelerin daha kapsamlı bir karşılaştırması için bir yüzey pürüzlülüğü testi gerçekleştirilmiştir ve bu konu aşağıda daha ayrıntılı olarak ele alınmıştır.

İşlem görmemiş, bilyeli dövme işlemi uygulanmış ve ardından bilyeli dövme işlemi uygulanmış numunelerin TiN dört farklı parametrede kaplanmış numunelerin ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra) Şekil 68'de verilmiştir.



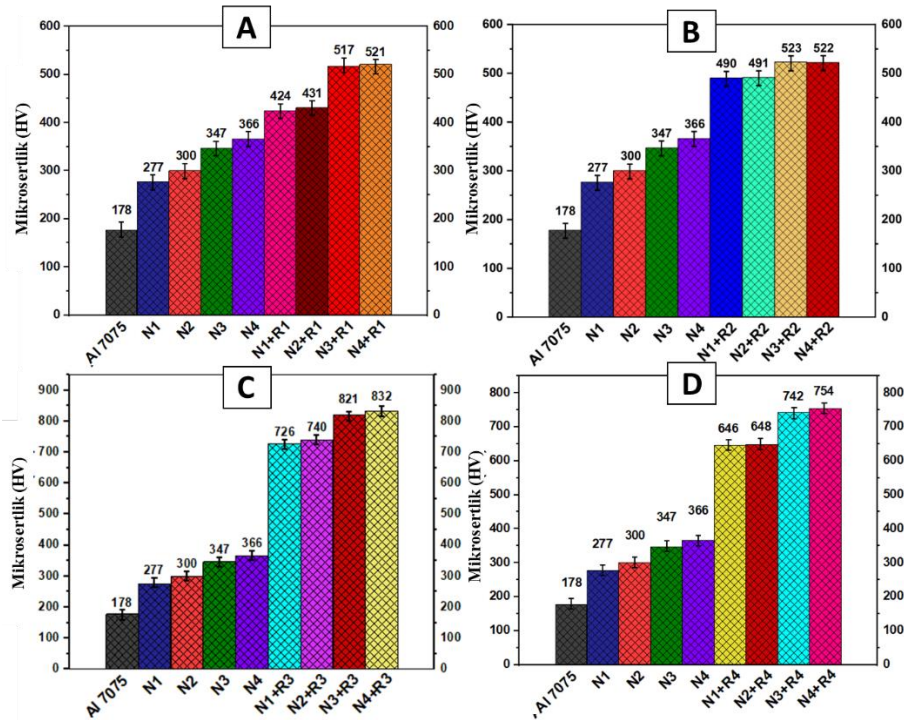
Şekil 67. İşlem görmemiş, bilyeli dövme işlemi uygulanmış ve TiN kaplanmış Al 7075 numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri, **a)** R1-SP+PVD, **b)** R2-SP+PVD, **c)** R3-SP+PVD, **d)** R4-SP+PVD

Şekil 67’de sunulan yüzey pürüzlülüğü değerlerine göre, S230 bilyeleri kullanılarak gerçekleştirilen bilyeli dövme işleminin, S110 bilyelerine kıyasla daha yüksek bir yüzey pürüzlülük profili ile sonuçlandığı gözlemlenmiştir. S110 bilyeleriyle işlem görmüş numunelerde ise daha düşük Ra (ortalama yüzey pürüzlülüğü) değerleri elde edilmiştir. Bu durum, kullanılan bilye çapının küçülmesiyle birlikte yüzeyde oluşan deformasyonların daha sınırlı ve homojen olmasına bağlanabilir. Daha büyük çaplı S230 bilyeleri ile uygulanan işlem, yüzeyde daha derin çukurlar oluşturmakta ve bu da pürüzlülük değerlerinde anlamlı bir artışa neden olmaktadır (Ongtrakulkij et al., 2022). Bilyeli dövme işleminin ilerleyen aşamalarında, başlangıçta oluşan büyük çukurların üzerinde yeni, daha küçük çukurların meydana geldiği gözlemlenmiştir. Bu durum, uygulanan bilye türünün ve Almen şiddeti seviyesinin yüzey topografisi üzerindeki etkisini açıkça ortaya koymaktadır. Özellikle, yüzeydeki ilk çarpma sonucu oluşan çukurlar, takip eden çarpmalarla birlikte daha da genişlemiş ve böylece yüzey deformasyonu artmıştır. Bu etkileşim, ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra) değerlerinde belirgin

bir artışa yol açmıştır (Ontrakulkij et al., 2022). Ayrıca, yüzey topografyası ve pürüzlülüğünde meydana gelen değişikliklerin, bilyeli dövme işlemi sırasında oluşan plastik deformasyonla doğrudan ilişkili olduğu ve bu deformasyonun, artık gerilmelerin artışına önemli ölçüde katkı sağladığı belirlenmiştir (J. Wu, Liu, Wei, Lin, et al., 2020; J. Wu, Liu, Wei, Zhu, et al., 2020). Bu bulgular, bilyeli dövme işleminin yüzey topografyasının değişimi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Gerçekleştirilen deneysel çalışmalar sonucunda, bilyeli dövme işleminin yüzey pürüzlülüğünde belirgin bir artışa yol açtığı gözlemlenmiştir. Öte yandan, SP+PVD işlemi uygulanan numunelerde, PVD kaplamanın yüzey üzerinde kısmi bir düzleştirici etkisi olduğu ve bu sayede yüzey pürüzlülüğü değerlerinde yalnızca sınırlı bir azalma sağlandığı tespit edilmiştir. Bu durum, PVD kaplamanın yüzey morfolojisi üzerindeki etkisinin sınırlı düzeyde kaldığını ve bilyeli dövme ile oluşan derin topografik izleri tam anlamıyla gideremediğini göstermektedir.

Sertlik test sonuçları

Al7075 taban malzeme üzerine, iki farklı bilye çapı (S110 ve S230) ve iki farklı Almen şiddeti (8A ve 10A) kullanılarak bilyeli dövme işlemi uygulanmıştır. Bu işlemin ardından, Taguchi L₄ (2³) deney planına göre dört farklı deney tasarımı ile (R1–R4), bilyeli dövme uygulanmış yüzeylere PVD yöntemiyle TiN kaplamalar yapılmıştır. Yüzey sertliğindeki değişimleri değerlendirmek için karşılaştırmalı analizler yapılmıştır ve Şekil 68’de verilmiştir.

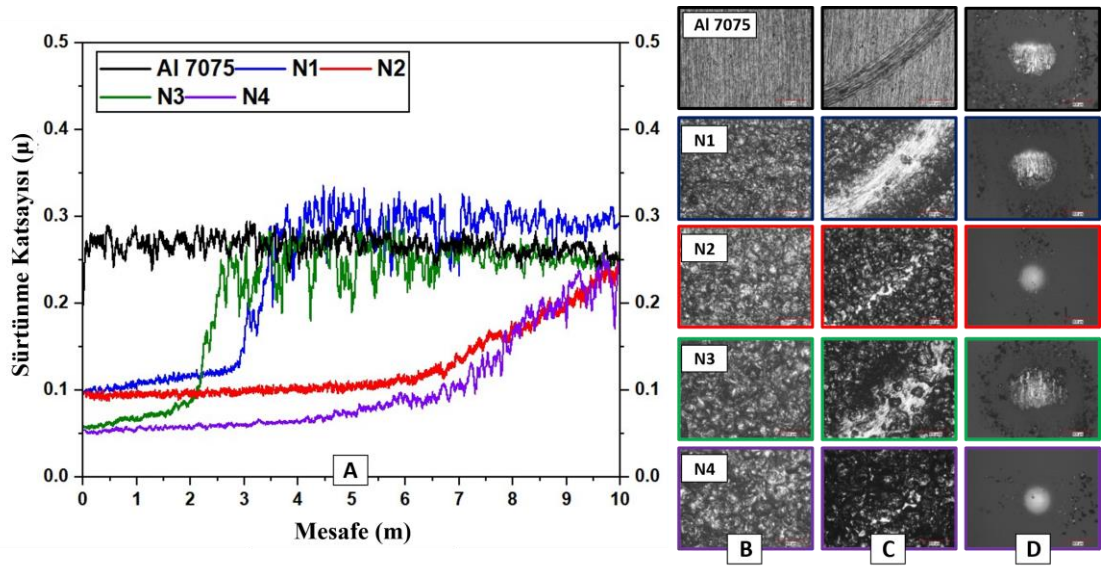


Şekil 68. İşlem görmemiş, bilyeli dövme işlemi uygulanmış ve TiN kaplanmış Al7075 numunelerin mikrosertlik (HV) değerleri, **a)** R1-SP+TiN, **b)** R2-SP+TiN, **c)** R3-SP+TiN, **d)** R4-SP+TiN

Şekil 68 incelendiğinde, bilyeli dövme işlemi uygulanmış numunelerin yüzey mikroyapılarında meydana gelen deformasyonların, mikrosertlik dağılımını belirgin şekilde etkilediği görülmektedir. Bu işlem sonucunda, yüzey tabakasında oluşan yoğun plastik deformasyonun etkisiyle mikrosertlik değerlerinde anlamlı bir artış kaydedilmiştir.(Y. Li et al., 2022; Maleki et al., 2023; H. Zhang, Cao, et al., 2023). Bu bulgular, bilyeli dövme işleminin Al 7075 alaşımının mekanik özellikleri üzerindeki etkisine dair önemli bilgiler sunmaktadır. Her bir yüzey için mikrosertlik ölçümleri üç farklı noktadan gerçekleştirilmiştir. S110-S230 bilye çapları ve 8A-10A aralığındaki Almen şiddeti koşullarında işlem görmüş numuneler, işlem görmemiş Al 7075 taban malzemeye kıyasla yüzey sertliğinde kayda değer iyileşmeler göstermiştir. Özellikle daha büyük bilye çaplarının kullanıldığı durumlarda, yüksek darbe enerjisine bağlı olarak oluşan plastik deformasyon sonucunda dislokasyon yoğunluğunun arttığı ve bunun da yüzey sertliğinde önemli bir artışa yol açtığı belirtilmiştir (Bagheri & Guagliano, 2009; Vázquez et al., 2012; H. Zhang, He, et al., 2023). İşlem görmemiş yüzeyin yaklaşık 178 HV olan sertliği, bilyeli dövme işlemi sonrasında 277 HV ile 366 HV arasında değişen değerlere ulaşmıştır. Bu artışın, uygulanan bilye çapı ve Almen şiddeti ile doğrudan ilişkili olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, SP uygulanmış ve PVD yöntemiyle TiN kaplaması yapılmış R3 ve R4 deney gruplarında, Şekil 63'te gösterildiği üzere en yüksek film kalınlıklarının elde edilmesiyle birlikte daha yüksek sertlik değerleri ölçülmüştür. Bu numunelerde sertlik değerleri 424 HV ile 832 HV arasında değişmektedir. Bu sonuçlar, Al 7075 alaşımına uygulanan kombine TiN kaplaması ve bilyeli dövme işleminin yüzey sertliğini önemli ölçüde artırarak malzemeyi aşınmaya karşı daha dirençli hale getirdiğini ortaya koymaktadır. Elde edilen bulgular hem SP işleminin hem de TiN kaplamasının Al7075 alaşımının yüzey sertliğini artırmada etkin yöntemler olduğunu göstermektedir. Özellikle bu iki yöntemin kombine uygulanması, malzemenin mekanik dayanımı ve aşınma direncini artırarak yüksek performanslı mühendislik uygulamaları için uygun bir yüzey modifikasyon stratejisi sunmaktadır.

Triboloji test sonuçları

Al7075 taban malzeme üzerine, iki farklı bilye çapı (S110 ve S230) ve iki farklı Almen şiddeti (8A ve 10A) kullanılarak bilyeli dövme işlemi uygulanmıştır. Hesaplanan bilyeli dövme işlemi sonrası Al7075 numunelerin sürtünme katsayısı değerleri Şekil 69'da verilmiştir.

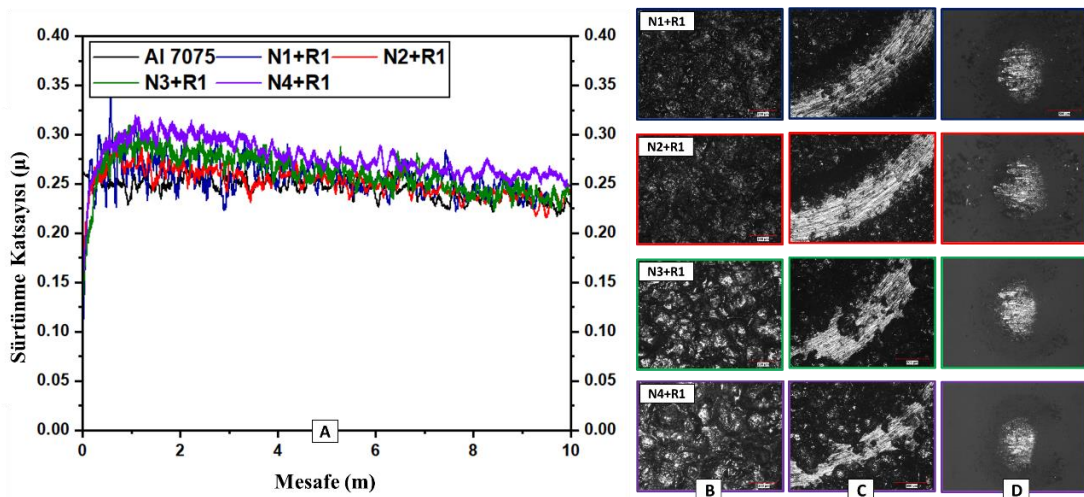


Şekil 69. Bilyeli dövme işlemi uygulanmış Al7075 numunelerin pin-on-disk test sonuçları, **a)** sürtünme katsayısı grafikleri, **b)** numunelerin yüzey topografisi, **c)** aşınma izi, **d)** temizlenmemiş pin OM görüntüleri

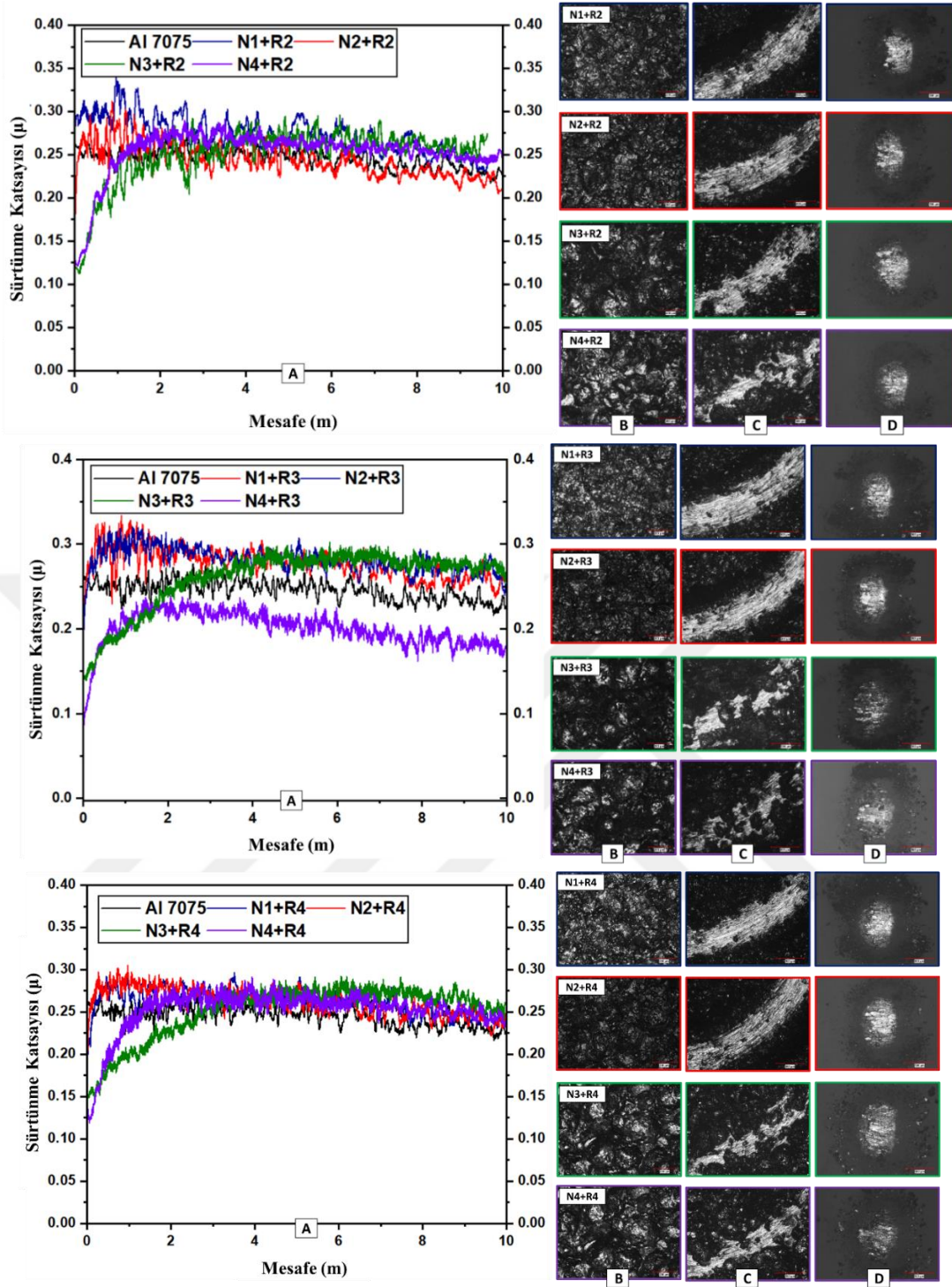
Şekil 69'e göre bilyeli dövme işlemi sonrasında, en yüksek sürtünme katsayısı N1 numunesi için gözlemlenmiştir. Bu gözlem, yüzey pürüzlülüğü, tane boyutu ve sertlik gibi yüzey özelliklerinde meydana gelen önemli değişikliklerle birlikte değerlendirilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü, temas geriliminin oluşumu üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Şekil 69'da Al7075 alüminyum alaşımlarına uygulanan bilyeli dövme işlemi öncesi ve sonrası elde edilen aşınma topografisine ait optik mikroskop (OM) görüntüleri sunulmuştur. Bazı çalışmalar, alüminyum alaşımında meydana gelen şiddetli plastik deformasyonun adhezif (adhesive) aşınmaya neden olduğunu belirtmiştir (Amanov et al., 2012; Takagi et al., 2001). Tüm numunelerin aşınmış yüzeylerinde, aşınma yönüyle paralel hizalanmış çizikler gözlemlenmiştir; bu durum, kayma yönünü işaret etmektedir. Aşınma izi kenarlarında biriken aşınma kalıntıları ve bu kalıntılar/partüküler aşınmış yüzeye yeniden transferi, 1 N'luk sürtünme yükü altında işlem görmemiş numunede abrezif (abrasive) aşınmaya yol açmıştır. Bu aşındırıcı aşınma, yüzeyde yayılma (smearing) ve aşınma parçacıklarının varlığı gibi çeşitli belirtilerle kendini göstermiştir (Efe et al., 2020). Bilyeli dövme uygulanmış ve yüzey işlemi görmüş numunelerin incelenmesinde, aşınma mekanizmasının adhezif (adhesive) aşınma ile yorulma (fatigue) aşınmasının bir kombinasyonundan oluştuğu belirlenmiştir. Mikroyapı içerisindeki parçacıkların dizilimi, aşınma kalıntılarının oluşumu ve döküntülerin varlığı, abrezif (abrasive) aşınmanın meydana geldiğini göstermektedir. Abrezif aşınma, kısmen aşınma bilyesi ile malzeme arasındaki temasın bir sonucu olarak ortaya çıkmıştır (Cho et al., 2015). Bu durum, özellikle yumuşak ve sünek yüzeylerde daha şiddetli deformasyonlara neden olmakta; ayrıca, nispeten yumuşak aşınma kalıntıları zaman zaman kayma hızını değiştirmektedir. Bu hız değişimi, bilyenin numune yüzeyinde aynı yönde hareket etmesini engelleyerek aşınma etkisini

artırmaktadır (Bao et al., 2022). Bunun sonucunda, aşınma izi boyunca hem dar hem de geniş bölgelerde adhezion-kayma (adhesion-sliding) desenlerinin oluşumu gözlemlenmiştir. Yüksek yüzey pürüzlülüğü, önemli ölçüde delaminasyona neden olmuştur. Özellikle, yüksek temas kuvvetleri ve gerilmeleri nedeniyle parçacıkların ezilmesi ve parçalanması meydana gelmiştir. Yüzey modifikasyonları, artık gerilmelerin oluşumuna neden olarak, sürtünme katsayısını azaltmakta, sertliği artırmakta ve yüzeyin mekanik özelliklerini değiştirerek aşınma davranışı üzerinde önemli bir etki yaratmaktadır (Efe et al., 2020). Şekil 69'da görüldüğü üzere, bilyeli dövme uygulanmış yüzeylerde bir düzleşme sağlanmış olsa da N3 ve N4 aşınma yükleri için bilyeli dövme izleri hâlâ gözlemlenebilmektedir. Buna karşılık, N1 ve N2 numunelerinde bilyeli dövme etkisi tamamen ortadan kalkmıştır. Ayrıca, bilyeli dövme işleminin numuneler üzerinde oluşturduğu sertleşme etkisi, işlem görmemiş numuneye kıyasla daha iyi aşınma davranışı ve daha düşük aşınma derinliği ile sonuçlanmıştır; bu etki özellikle S230 çapındaki çelik bilye kullanıldığında belirginleşmiştir. Bilyeli dövme uygulanmış tüm numuneler, işlem görmemiş Al 7075 taban malzeme kıyasla bir iyileşme göstermiş ve sürtünme katsayılarında azalmaya neden olmuştur.

Al7075 taban malzeme üzerine, iki farklı bilye çapı (S110 ve S230) ve iki farklı Almen şiddeti (8A ve 10A) kullanılarak bilyeli dövme işlemi uygulanmıştır. Bu işlemin ardından, Taguchi L₄ (2³) deney planına göre dört farklı deney tasarımı ile (R1–R4), bilyeli dövme uygulanmış yüzeylere PVD yöntemiyle TiN kaplamalar yapılmıştır. Bilyeli dövme işlemi üzerine TiN kaplama sonrası Al7075 alaşımlarının Sürtünme katsayısı (CoF) değerleri Şekil 70'te verilmiştir.



Şekil 70. Bilyeli dövme işlemi uygulanmış ve daha sonra TiN (R1-R4) kaplanmış numunelerin pin-on-disk test sonuçları, **a)** sürtünme katsayısı grafikleri, **b)** numunelerin yüzey topografisi, **c)** aşınma izi, **d)** temizlenmemiş pin OM görüntüleri



Şekil 70. Bilyeli dövme işlemi uygulanmış ve daha sonra TiN (R1-R4) kaplanmış numunelerin pin-on-disk test sonuçları, **a)** sürtünme katsayısı grafikleri, **b)** numunelerin yüzey topografisi, **c)** aşınma izi, **d)** temizlenmemiş pin OM görüntüleri (Devamı)

Şekil 70'e göre bilyeli dövme işlemi; yüzeyin mekanik özelliklerini değiştirerek, artık gerilme oluşumuna neden olarak, sürtünme katsayısını azaltarak, sertliği artırarak aşınma davranışı üzerinde kayda değer bir etkiye sahip olmuştur (Efe et al., 2020). Sürtünme katsayısı (CoF) davranışı, bilyeli dövme (SP) uygulanmış daha sonra TiN kaplanmış ve Al 7075 taban malzeme numuneleri üzerinde, 1N yük uygulanarak ve 10 m toplam işlem mesafesi koşulları altında normal oda şartlarında kuru ortamda testler gerçekleştirilerek incelenmiştir. Hesaplanan

CoF değerleri Şekil 70 (a)'de gösterilmiştir. Numune yüzeylerinin, aşınma izlerinin ve Al_2O_3 bilye üzerindeki aşınma izlerinin optik mikroskop görüntüleri Şekil 70 (b), (c) ve (d)'de gösterilmektedir. Gözlemlenen bu yüzey pürüzlülüğüne, tane boyutu ve sertlikteki değişiklikler de dahil olmak üzere önemli yüzey değişiklikleri etki etmiştir. Yüzey pürüzlülüğünün yüzeylerde oluşan temas gerilmelerinin meydana gelmesi üzerinde önemli bir etkisi olmuştur. Bazı çalışmalar, alüminyum alaşımının şiddetli plastik deformasyonunun adezif aşınmaya neden olduğunu göstermiştir (Amanov et al., 2012; Takagi et al., 2001). Tüm numuneler benzer kayma davranışı sergilemiş, testlerin başında Hertzian teması nedeniyle sürtünme katsayılarında başlangıçta hızlı bir artış olmuş, daha sonra Şekil 70 (a)'de gösterildiği gibi kaymaya dirençli pürüzlülük tepeleri kademeli olarak aşındıkça stabilize olmuştur. Bilyeli dövme ve TiN kaplama işleminden sonra yüzey sertliği artmış ve kayma direnci azalmıştır. Bununla birlikte, alüminyum oksit bilye ucunun penetrasyon derinliğinin azalmasına rağmen, bilyeli dövme artı TiN kaplamalı numunelerdeki daha yüksek yüzey pürüzlülüğü, Al7075 taban malzeme numunelere kıyasla daha yüksek bir sürtünme katsayısı ile sonuçlanmıştır. Tüm numunelerin aşınma izleri, aşınma yönüne paralel olan kayma yönünü gösteren hizalanmış çizikler sergilemiştir. Bilyeli dövme artı TiN numunelerde aşınma kalıntılarının aşınma izinin kenarında toplanması ve daha sonra bu parçacıkların aşınmış yüzeye aktarılması abrazif aşınmaya yol açmıştır. Oluşan abrazif aşınma, kaplama hasarı ve aşınma partiküllerinin varlığının gözlemlenmiş olması ile ortaya konulmuştur (Efe et al., 2020). Ayrıca, aşınmış yüzeyde küçük bir delaminasyon tespit edilmiştir. Bu delaminasyon, numunenin yüzeyindeki önemli bası gerilmelerinin varlığına bağlanabilir ve bu durum da potansiyel olarak hasarlı bölgede yüksek yoğunluklu yorulma çatlaklarına neden olabilir (Zeng et al., 2020). Bilyeli dövme işlemi uygulanmış numunelerin sürtünme-aşınma testleri çalışmasında, aşınma mekanizması adezif aşınmanın ve yorulma aşınmasının bir kombinasyonunu içerdiği görülmektedir. Mikroyapıdaki parçacıkların düzeni, aşınma kalıntılarının oluşumu ve döküntülerin varlığı, işlem görmüş yüzeylerde abrazif aşınmanın meydana geldiğini göstermektedir (Cho et al., 2015). Yumuşak ve sünek yüzeylerde daha şiddetli deformasyon meydana gelir ve nispeten daha yumuşak aşınma kalıntıları zaman zaman kayma hızını değiştirir. Bu değişiklik, bilye ile numune yüzeyi arasında bir ters etki-tepki kuvveti oluşturarak numunenin dönmesini zorlaştırır ve aşınma etkisini artırır (Bao et al., 2022). En çok bilye çapındaki, Almen şiddetindeki ve kaplama parametresine görev süresi artış, sürtünme katsayısının değerinde etki etmektedir. Sonuç olarak, bu durum hem dar hem de geniş bölgelerde aşınma izi boyunca bilye ile numune yüzeyi pürüzleri ya da 3 elemanlı abrazif aşınma partikülleri arasında yapışma-kayma modellerinin oluşmasına yol açmıştır. Yüksek yüzey pürüzlülüğü önemli miktarda delaminasyona neden olmuştur. Özellikle, yüksek temas

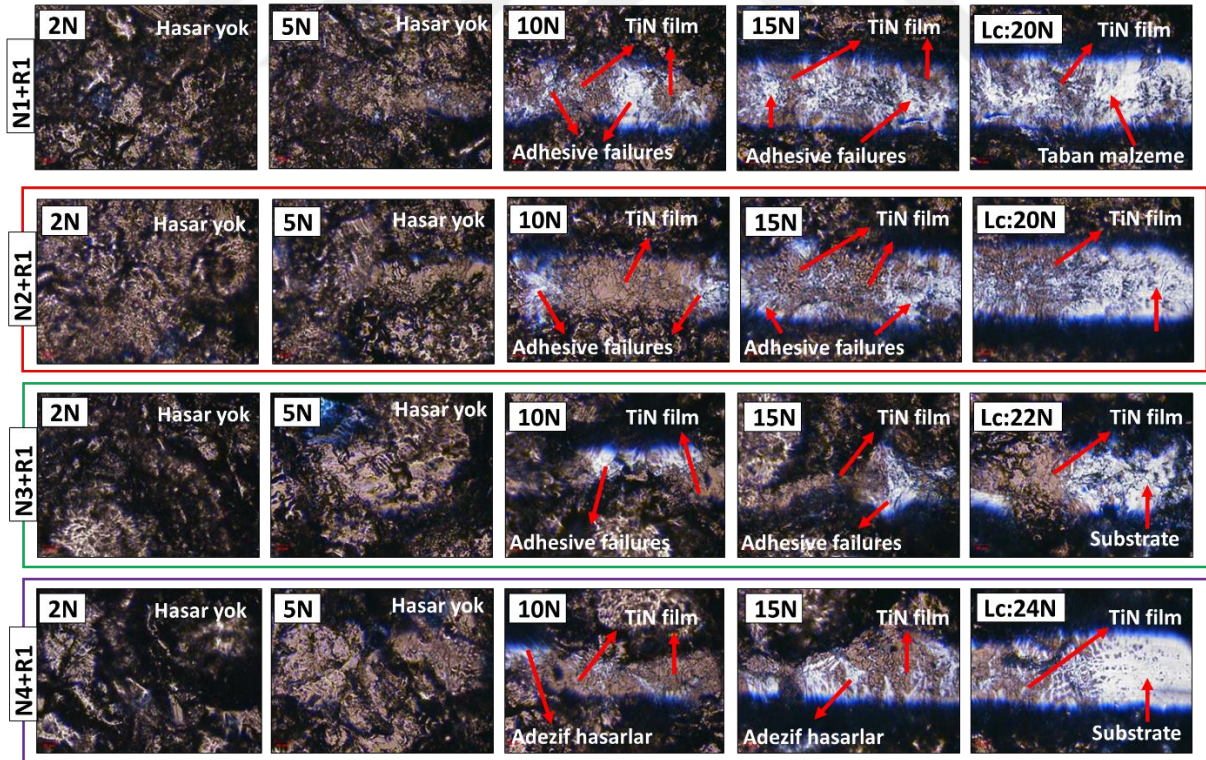
kuvvetleri ve bilyeli dövme alt tabaka üzerindeki TiN kaplama partiküllerinin kırılması ve gerilmeler nedeniyle aşınma partiküllerinin ezilmesi ve tekrar tekrar parçalanması meydana gelmiştir (Efe et al., 2020). Aşınma analizleri kapsamında elde edilen bulgular, TiN kaplamasının özellikle R3 parametresiyle uygulandığında, bilyalı dövme işlemine tabi tutulmuş yüzeyler üzerinde önemli iyileşmeler sağladığını ortaya koymuştur. Şekil 63'te görüldüğü üzere, R3 parametresi ile elde edilen TiN kaplaması, diğer örneklerle kıyaslandığında en kalın kaplama tabakasını sunmuştur. Bu durum, kaplamanın yüzeyde daha etkili bir koruyucu tabaka oluşturduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, Şekil 71'de yer alan adezyon analizine göre, R3 parametresiyle kaplanmış N4 numunesi (R3+N4) en yüksek adezyon değerine sahip olmuştur. Bu da kaplamanın yüzeye daha güçlü bir şekilde tutunduğunu ve olası delaminasyon ya da kaplama tabakasının ayrılma riskinin minimum düzeyde olduğunu göstermektedir. Kaplama kalınlığı ve adezyon performansına ek olarak, aşınma testleri sonucunda da en düşük aşınma oranı R3-N4 numunesinde gözlemlenmiştir. Bu durum, yüzeyin hem mekanik dayanım hem de tribolojik özellikler açısından optimize edildiğini ve kaplama-bilyalı dövme sinerjisinin olumlu etkisini açıkça ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak, R3 parametresi ile TiN kaplaması uygulanmış ve N4 seviyesinde shot peening işlemine tabi tutulmuş numune (R3+N4), hem yapısal hem de yüzey özellikleri bakımından en iyi performansı sergilemiştir. Bu bulgu, R3+N4 kombinasyonunun aşınma direnci açısından en uygun yüzey modifikasyon yöntemi olduğunu göstermektedir. Kaplama kalınlığı, yüksek adezyon kabiliyeti ve düşük sürtünme katsayısı gibi parametreler bir araya geldiğinde, bu kombinasyon tribolojik uygulamalar açısından oldukça avantajlı bir yapı sunmaktadır.

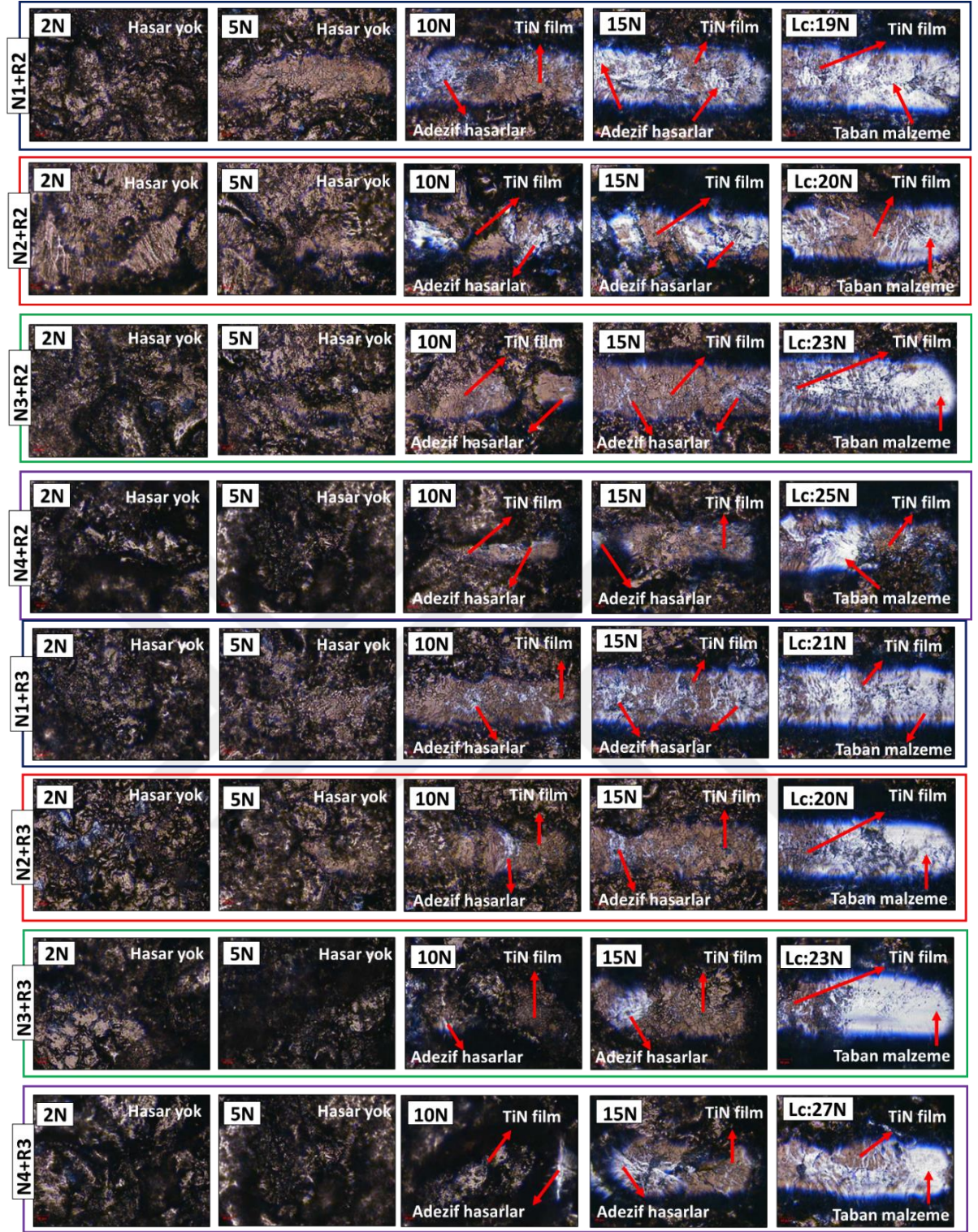
Çizik (Scratch) test sonuçları

Al 7075 numunelerinin dört farklı bilyeli dövme parametresi ve ardından dört farklı TiN kaplamaların çizik testi sonuçları Şekil 71'de gösterilmektedir. Bu kaplamaların kritik yük değerleri yaklaşık 20-27 N aralığında belirlenmiş olup, 10 N yüke kadar herhangi bir hasar gözlenmemiştir. Bu yükün ötesinde, adezyon hasarları kaplama delaminasyonunun başladığını göstermiştir. Daha yüksek yüzey pürüzlülüğüne sahip numuneler, diğer çalışmalardaki bulgulara benzer şekilde nispeten daha yüksek adezyon mukavemeti göstermiştir (C. Zhang et al., 2019). Artan yüzey pürüzlülüğü, kaplama ve taban malzeme arasındaki mekanik kenetlenmeyi artırabilir ve böylece adezyon mukavemetini geliştirebilir (Wang et al., 2023). Bilyeli dövme, kontrollü yüzey pürüzlülüğü sağlayarak, muhtemelen TiN kaplama ve taban malzeme arasında daha iyi bağlanmayı kolaylaştıran mikro-asperiteler yaratmıştır (C. Zhang et al., 2019). Bu durum, daha pürüzlü yüzeylerin daha fazla bağlanma alanı sağlayarak, özellikle

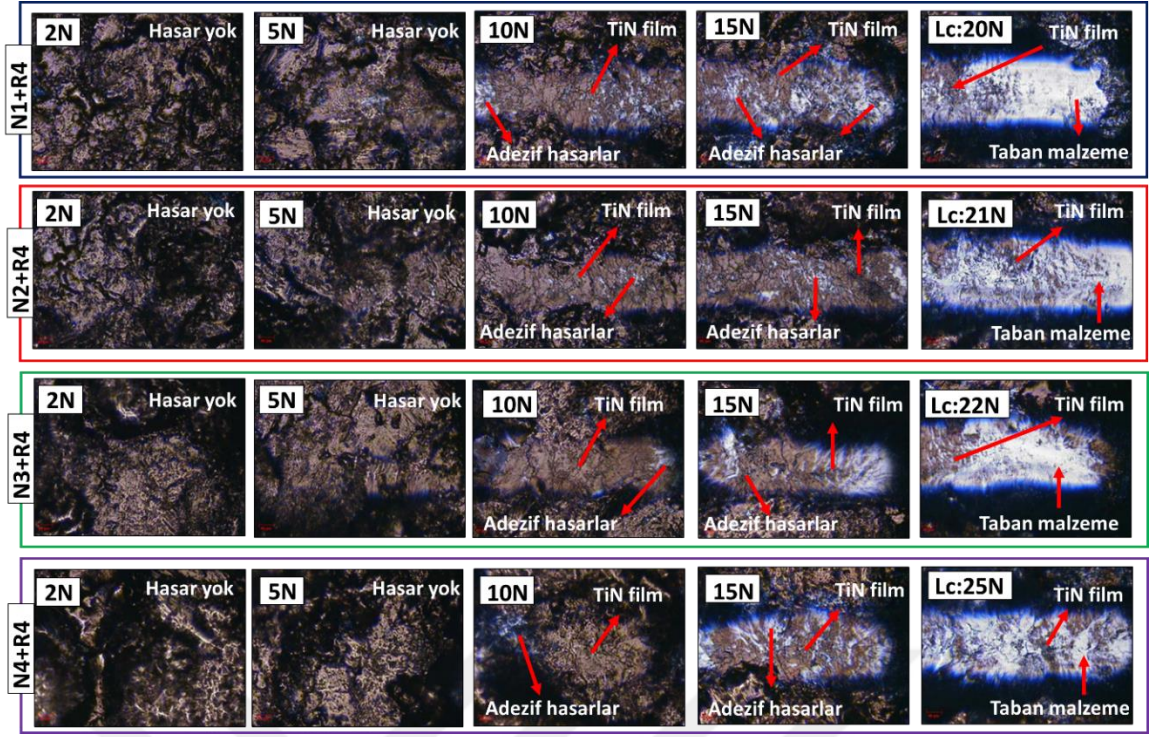
TiN gibi sert kaplamalarda kaplama yapışmasını iyileştirdiğini öne süren önceki çalışmalarla uyumludur (Jiang et al., 2021; Miletić et al., 2014). Ek olarak, 27 N en yüksek adezyon değeri, TiN kaplama biriktirme sırasında en yüksek hedef akım ve görev süresi (açık kalma süresi) parametreleri ile işlem gören numunede gözlenmiştir. Hedef akımın artırılması tipik olarak püskürtme işleminin iyonizasyon oranını artırarak daha yoğun ve daha homojen bir kaplamaya yol açar (Bhaduri et al., 2010; Gulten et al., 2024). Daha yoğun bir mikro yapı, delaminasyon için yaygın başlangıç bölgeleri olan boşluklar ve mikro çatlaklar gibi kusurları en aza indirir. Daha uzun bir görev döngüsü (açık kalma süresi), daha sürekli bir biriktirme sürecine olanak tanıyarak gelişmiş mekanik özelliklere sahip daha kalın kaplamalar elde edilmesini sağlar (Liu et al., 2022). Bu faktörler, çizik testi sonuçlarında gözlemlendiği gibi daha güçlü adezyona katkıda bulunur. Özet olarak, bilyeli dövmenin neden olduğu yüzey pürüzlülüğü ve optimize edilmiş TiN kaplama parametreleri (daha yüksek hedef akım ve daha uzun çalışma süresi) Al 7075 taban malzeme yapışmayı artırmada önemli rol oynamaktadır. Çalışmamız bu parametrelerin uygun şekilde kontrol edilmesinin mekanik gerilme altında kaplamaların performansını önemli ölçüde artırabileceğini doğrulayarak, bilyeli dövme ve TiN kaplamanın kombinasyonunu zorlu uygulamalarda Al7075'in dayanıklılığını artırmak için etkili bir yaklaşım haline getirmektedir.



Şekil 71. Bilyeli dövme işlemi uygulanmış ve daha sonra TiN (R1-R4) kaplanmış numunelerin scratch (Çizik) test sonuçları



Şekil 71. Bilyeli dövme işlemi uygulanmış ve daha sonra TiN (R1-R4) kaplanmış numunelerin scratch (Çizik) test sonuçları (Devamı)

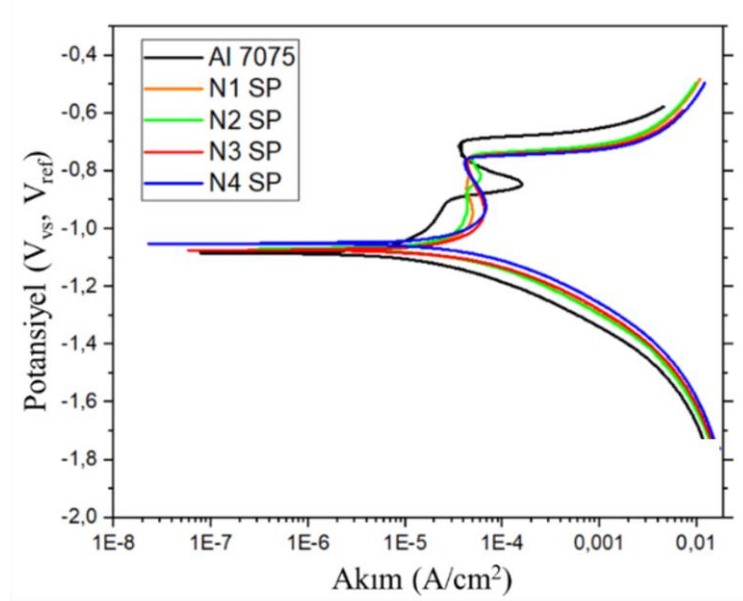


Şekil71. Bilyeli dövme işlemi uygulanmış ve daha sonra TiN (R1-R4) kaplanmış numunelerin scratch (Çizik) test sonuçları (Devamı)

Korozyon test sonuçları

Al7075 taban malzeme üzerine, iki farklı bilye çapı (S110 ve S230) ve iki farklı Almen şiddeti (8A ve 10A) kullanılarak bilyeli dövme işlemi uygulanmıştır. Bu işlemin ardından, Taguchi L₄ (2³) deney planına göre dört farklı deney tasarımı ile (R1–R4), bilyeli dövme uygulanmış yüzeylere PVD yöntemiyle TiN kaplamalar yapılmıştır. Alaşımların korozyon davranışları, %3,5 NaCl içeren çözelti ortamında incelenmiştir. Elde edilen potansiyodinamik polarizasyon (PDS) eğrilerinden Tafel ekstrapolasyon yöntemi kullanılarak korozyon potansiyeli (E_{corr}) ve korozyon akım yoğunluğu (I_{corr}) değerleri hesaplanmıştır.

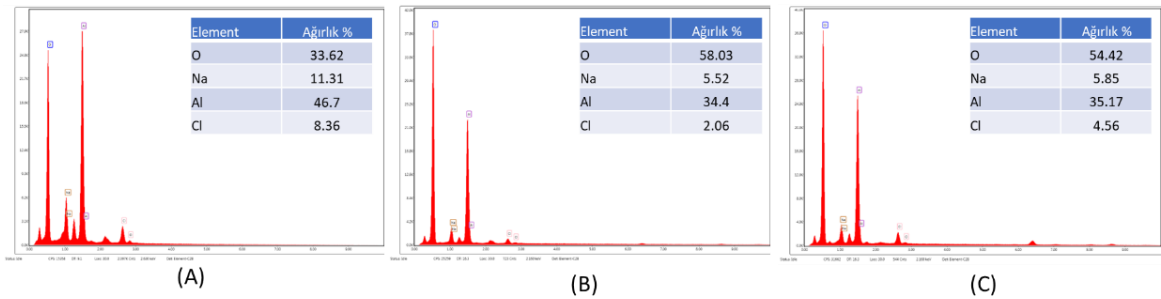
Bilyeli dövme işlemi uygulanmış kaplanmamış Al7075 alaşımlarının PDS eğrileri Şekil 72’de bu eğrilerden elde edilen korozyon sonuçları ise Tablo 11 ve EDS element analiz sonuçları Şekil 73’te sunulmuştur.



Şekil 72. İşlemsiz ve bilyeli dövme işlemi uygulanmış Al 7075 numunelerin potansiyodinamik polarizasyon eğrileri

Tablo 11. İşlemsiz ve Bilyeli Dövme İşlemi Uygulanmış Al 7075 Numunelerin Korozyon Test Sonuçları

Numune	İşlem	Ecorr(v)	Icorr(mA/cm ²)
Al 7075		-1.083	8.269
N1	SP(S110,8A)	-1.066	20.616
N2	SP(S110,10A)	-1.064	18.028
N3	SP(S230,8A)	-1.071	26.057
N4	SP(S230,10A)	-1.049	24.699



Şekil 73. a) İşlemsiz, b) bilyeli dövme işlemi uygulanmış (N2), c) bilyeli dövme işlemi uygulanmış (N3) Al 7075 numunelerin EDS elementel analiz sonuçları

Şekil 72 ve Tablo 11'e göre, işlemsiz Al7075 numunesinin korozyon potansiyeli (Ecorr) -1.087 V ve korozyon akım yoğunluğu (Icorr) 8.269 mA/cm² olarak ölçülmüştür. Bu değerler, malzemenin %3,5 NaCl içeren ortamla etkileşiminde orta düzeyde bir korozyon eğilimi gösterdiğini ortaya koymaktadır. Bilyeli dövme işlemi uygulanan numunelerde ise Ecorr değerlerinde kısmi olarak daha pozitif yönde kaymalar gözlenirken, Icorr değerlerinde önemli artışlar meydana gelmiştir. Bu artış, özellikle S230 çapında çelik bilye ve yüksek Almen şiddeti (10A) ile yapılan uygulamalarda daha belirgindir. Nitekim N3 ve N4 numunelerinde Icorr

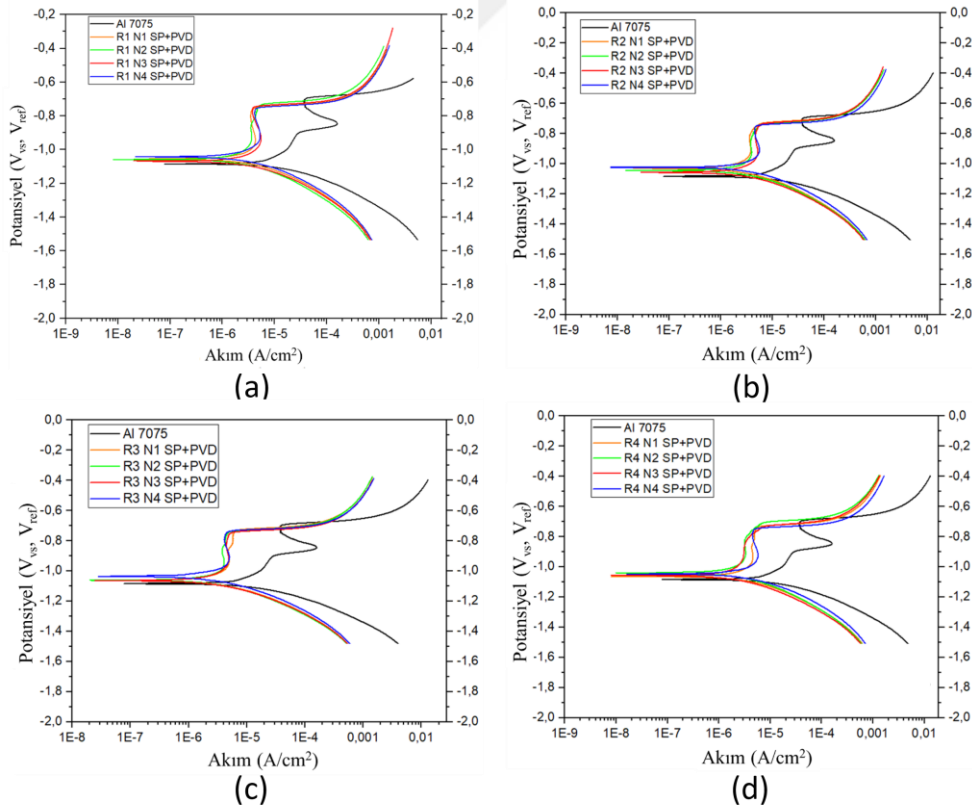
değerlerinin sırasıyla 26.057 ve 24.699 mA/cm²'ye kadar yükselmiş olması, bu işlem parametrelerinin yüzeyde daha fazla deformasyona ve dolayısıyla korozyon hızını artırıcı mikroyapısal değişimlere yol açtığını düşündürmektedir.

Literatürde de belirtildiği üzere, bilyeli dövme işlemi yüzeyde plastik deformasyona bağlı olarak pürüzlülüğü artırmakta ve bu durum aktif korozyon alanını genişleterek korozyon hızında artışa neden olabilmektedir. Ayrıca, işlemin doğal alüminyum oksit (Al₂O₃) tabakasında bozulmalara yol açarak bu pasif tabakanın koruyucu etkisini azaltması da korozyon davranışını olumsuz yönde etkileyebilir. Özellikle büyük bilye çapı (S230) ve yüksek Almen şiddeti (10A) kombinasyonu, yüzeyde daha yoğun çentik etkisi ve mikro çatlak oluşumu ile korozyon hızını artırıcı yönde etkide bulunmuş olabilir. Bu bağlamda, yüzey modifikasyonunun sebep olduğu kalıntı/artık gerilmeler ve buna bağlı yüzeyde oluşan mikrojeometri farklılıkları ile koruyucu oksit tabakasının yapısal bütünlüğü, bilyeli dövme sonrası korozyon performansında belirleyici rol oynamaktadır. Bu bağlamda, bilyeli dövme işlemi sırasında oluşan kuvvet ve ısıнын etkisi, yüzeyde mikroçatlaklar, mikroyapı değişiklikleri ve yüzeyin hemen altında kalıcı gerilme tabakaları oluşturarak, yüzeyin mekanik ve elektrokimyasal özelliklerinin ana işlemsiz malzemeye kıyasla belirgin şekilde farklılaşmasına neden olmuştur. Tüm bu faktörler, bilyeli dövme uygulanmış numunelerde gözlemlenen korozyon direncindeki düşüşü açıklayan temel nedenler arasında yer almaktadır (Prakash et al., 2012; Q. Sun et al., 2018; Huang et al., 2022).

Şekil 73'göre korozyon deneyleri sonrasında yapılan EDS (Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi) analizleri, Al7075 alaşımı ve bilyeli dövme işlemine tabi tutulmuş numunelerin yüzeylerinde meydana gelen kimyasal bileşen değişikliklerini ortaya koymuştur. EDS sonuçları incelendiğinde, yüzeyde özellikle oksijen (O), sodyum (Na), alüminyum (Al) ve klor (Cl) elementlerinin yoğunluklarında farklılıklar gözlemlenmiştir. Bu farklar hem uygulanan bilye çapının hem de Almen şiddetinin korozyon davranışı üzerinde belirleyici olduğunu göstermektedir. İşlem görmemiş Al7075 alaşımında EDS analizi sonucunda %46.7 Al, %33.62 O, %11.31 Na ve %8.36 Cl tespit edilmiştir. Bu değerler, doğal yüzey pasivasyonu ve deney ortamından kaynaklı kirliliklerin varlığını işaret etmektedir. Yüzeydeki oksijen varlığı, alüminyum oksit tabakasının varlığına işaret ederken, Cl ve Na gibi iyonların varlığı, numunenin klorür içeren bir ortamda korozyona maruz kaldığını göstermektedir. N2 numunesi (S110 bilye çapı, 10A Almen şiddeti) üzerinde yapılan EDS analizinde oksijen oranının %58.03'e yükseldiği, Na oranının %5.52'ye düştüğü ve Cl oranının %2.06'ya kadar azaldığı görülmektedir. Bu değişim, yüzeyde daha kalın ve koruyucu bir oksit tabakası oluştuğunu ve Cl iyonlarının yüzeye tutunmasının azaldığını göstermektedir. Ayrıca bu numunede Icorr değeri

(18.028 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$), işlenmemiş numuneye göre daha yüksek olsa da, Cl oranının düşmesi korozyonun daha lokalize ilerlediğini ve genel yüzeyde daha az etkili olduğunu düşünülmektedir. N3 numunesinde (S230 bilye çapı, 8A Almen şiddeti) ise oksijen oranı %54.42, Al oranı %35.17 ve Cl oranı %4.56 olarak ölçülmüştür. Bu numunede Icorr değeri en yüksek seviyede (26.057 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$) olup, Cl oranının yeniden arttığı ve buna bağlı olarak korozyonun daha şiddetli seyrettiği değerlendirilmektedir. Yüzeydeki yüksek oksijen oranı her ne kadar oksitlenmeye işaret etse de bu durum yüzeyin pasif bir hale geldiğini değil, aktif korozyon ürünlerinin birikmiş olduğunu göstermektedir. EDS sonuçlarına göre, daha düşük Cl ve Na içeriğine sahip N2 numunesi, daha stabil bir yüzey karakteristiği sergilemiştir. Bu durum, daha küçük bilye çapı (S110) ve daha yüksek Almen şiddeti (10A) kombinasyonunun yüzeyde daha homojen bir deformasyon ve dolayısıyla daha kompakt bir oksit film oluşturduğunu göstermektedir. Buna karşılık, daha büyük bilye (S230) ile uygulanan işlem (N3), yüzeyde daha fazla hasara yol açarak Cl tutulumunu artırmış ve korozyon eğilimini yükseltmiştir.

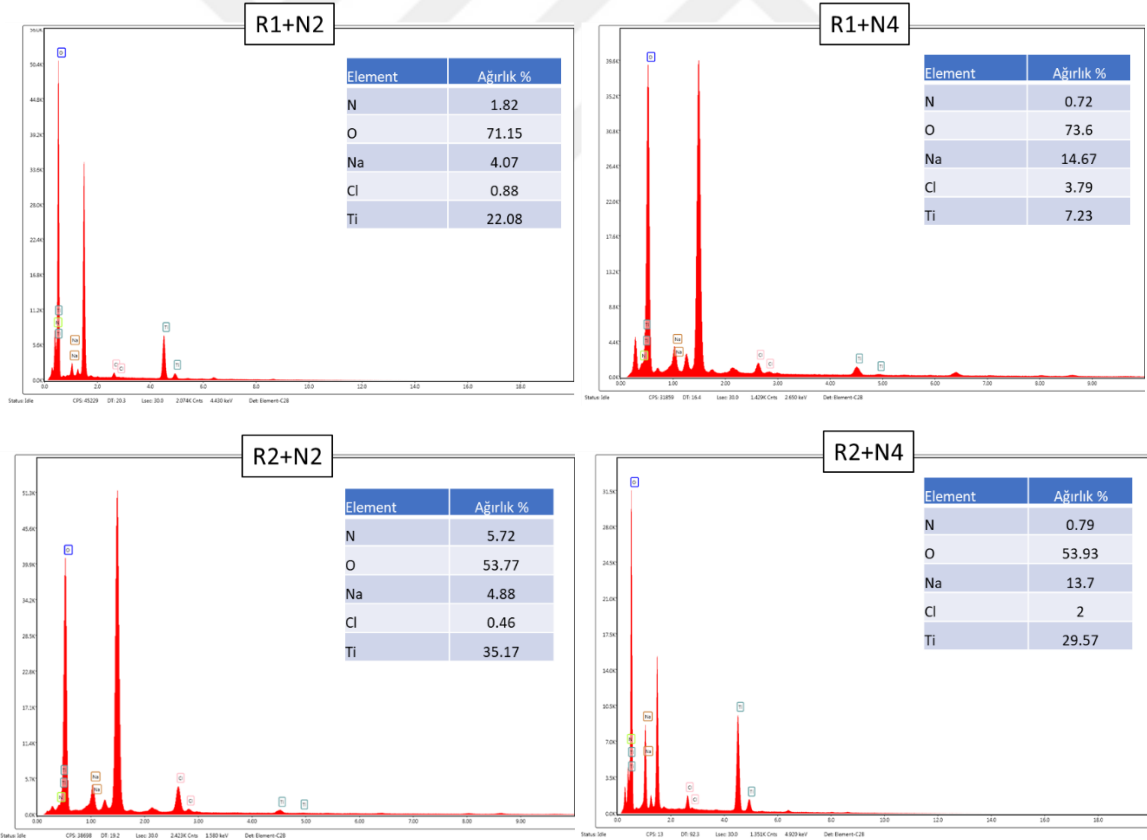
Şekil 74'te bilyeli dövme işlemi uygulanmış ve ardından PVD yöntemi kullanılarak dört farklı deney tasarımı ile (R1–R4) TiN kaplanmış Al7075 alaşımların PDS eğrileri verilmiştir. Bu eğrilerden elde edilen korozyon parametreleri ise Tablo 12'de ve EDS element analiz sonuçları Şekil 75'te verilmiştir.



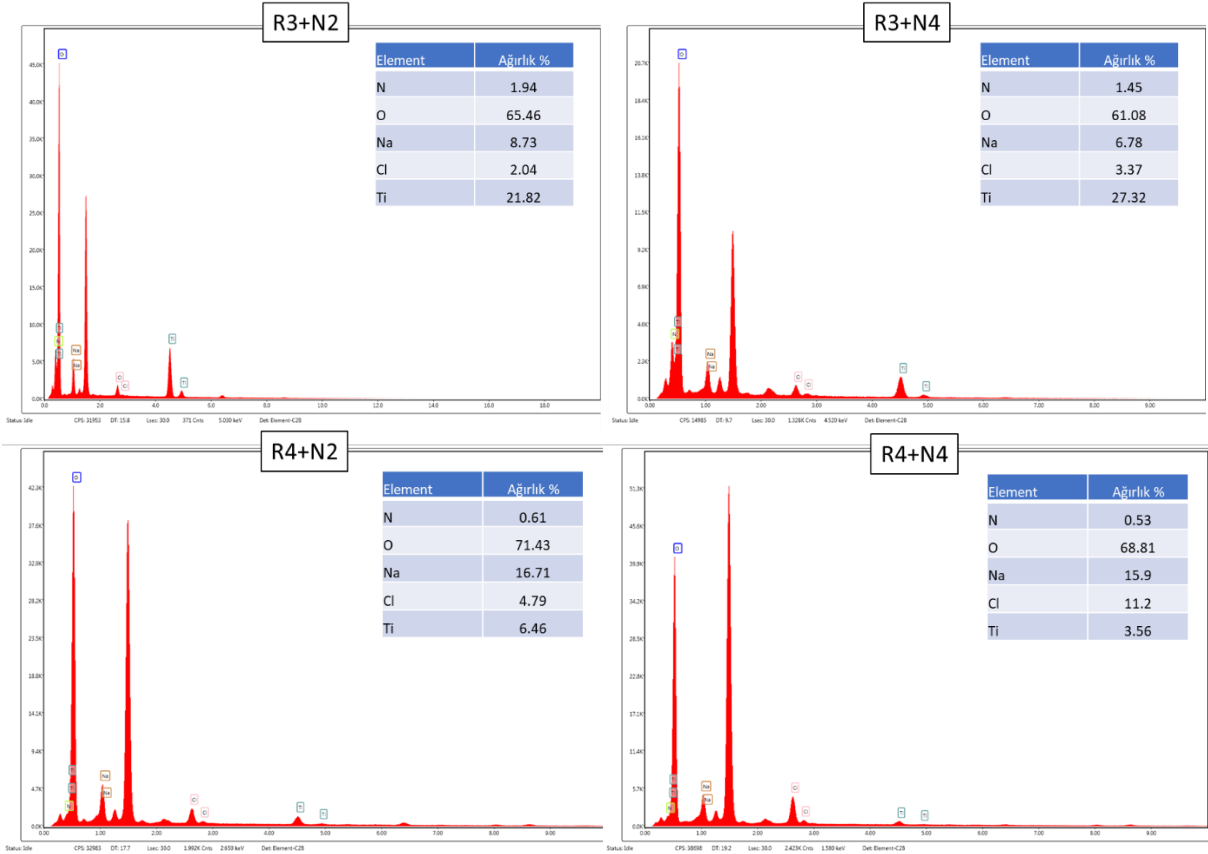
Şekil 74. İşlemsiz ve SP+PVD işlemi uygulanmış Al 7075 numunelerin potansiyodinamik polarizasyon eğrileri, **a)** R1-SP+PVD, **b)** R2-SP+PVD, **c)** R3- SP+PVD, **d)** R4- SP+PVD

Tablo 12. İşlemsiz ve SP+PVD İşlemi Uygulanmış Al 7075 Numunelerin Korozyon Test Sonuçları

Numune	İşlem	$E_{corr}(V)$	$I_{corr}(\mu A/cm^2)$
Al 7075		-1.087	8269
N1+R1	SP+PVD(S110,8A)	-1.049	2.794
N2+R1	SP+PVD(S110,10A)	-1.053	2.231
N3+R1	SP+PVD(S230,8A)	-1.054	2.543
N4+R1	SP+PVD(S230,10A)	-1.042	3.982
N1+R2	SP+PVD(S110,8A)	-1.032	2.948
N2+R2	SP+PVD(S110,10A)	-1.042	2.076
N3+R2	SP+PVD(S230,8A)	-1.055	2.390
N4+R2	SP+PVD(S230,10A)	-1.023	2.980
N1+R3	SP+PVD(S110,8A)	-1.062	1.340
N2+R3	SP+PVD(S110,10A)	-1.064	1.024
N3+R3	SP+PVD(S230,8A)	-1.067	1.732
N4+R3	SP+PVD(S230,10A)	-1.035	1.895
N1+R4	SP+PVD(S110,8A)	-1.041	3.807
N2+R4	SP+PVD(S110,10A)	-1.063	3.735
N3+R4	SP+PVD(S230,8A)	-1.055	3.889
N4+R4	SP+PVD(S230,10A)	-1.044	2.179



Şekil 75. SP+PVD işlemi uygulanmış Al 7075 numunelerin EDS elemental analiz sonuçları



Şekil 75. SP+PVD işlemi uygulanmış Al 7075 numunelerin EDS elemental analiz sonuçları (Devamı)

Tablo 12'ye göre, bilyeli dövme işleminin ardından dört farklı deney tasarımı (R1–R4) ile TiN kaplama uygulanan Al7075 numunelerin korozyon davranışları önemli ölçüde iyileşmiştir. Tüm kaplanmış numunelerde korozyon akım yoğunluğu (I_{corr}) değerleri düşmüş; bu da kaplamanın alaşımın korozyon direnci üzerindeki olumlu etkisini açıkça göstermektedir. Özellikle R3 deney tasarımında elde edilen sonuçlar dikkat çekicidir. Bu grupta en düşük I_{corr} değeri $1.024 \mu A/cm^2$ ile N2+R3 numunesinde (S110, 8A) ölçülmüş, bunu $1.340 \mu A/cm^2$ ile N1+R3 (S110, 8A) numunesi takip etmiştir. Benzer şekilde, E_{corr} değerlerinde de nispeten daha pozitif kaymalar gözlemlenmiş, bu da pasif davranışa geçişi işaret etmektedir. Bu durum Şekil 74'te görülmektedir. Deney tasarımları arasında R2 ve R3 gruplarının genel olarak daha düşük I_{corr} değerleri sunması, bu parametre kombinasyonlarının kaplama ile birlikte sinerjik bir koruyucu etki oluşturduğunu göstermektedir.

Kaplanmış numunelerin sonuçları, yalnızca bilyeli dövme işlemi uygulanmış fakat kaplanmamış numuneler ile karşılaştırıldığında korozyon direncindeki iyileşme çok daha belirgin hale gelmektedir. Örneğin, kaplamasız N3 ve N4 numunelerinde I_{corr} değerleri sırasıyla 26.057 ve 24.699 mA/cm^2 gibi oldukça yüksek seviyelerde iken, aynı işlem parametrelerine sahip ve kaplama uygulanmış N3+R3 ve N4+R3 numunelerinde bu değerler sırasıyla yalnızca 1.895 ve $1.732 \mu A/cm^2$ olmuştur. Bu, PVD yöntemiyle TiN kaplamanın,

bilyeli dövme sonrası oluşabilecek yüzey pürüzlülüğü, mikroyapı bozulmaları ve pasif tabaka hasarının korozyon üzerindeki olumsuz etkilerini etkin şekilde bastırabildiğini göstermektedir.

Bu olumlu etki muhtemelen kaplama sonrası oluşan 175–395 nm kalınlığında büyütülen TiN yüzey tabakası nedeniyle (Şekil 63). Ayrıca, Tablo 10’da verilen FWHM (Full Width at Half Maximum) değerleri, kaplama tanelerinin işlem görmemiş numuneye kıyasla daha büyük kristal boyutuna sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Şekil 74’te görüldüğü üzere, alt taneler içeren bu yüzey yapısı, kaplamanın yapısal sürekliliğini ve bariyer özelliğini artırmakta; böylece bilyeli dövmenin korozyon üzerindeki bozucu etkilerini baskılamaktadır. Bu mikroyapısal düzen, kaplamanın sadece fiziksel bir örtü değil, aynı zamanda işlenmiş yüzeyle etkileşime girerek fonksiyonel bir koruyucu tabaka oluşturduğunu göstermektedir. Dolayısıyla, bilyeli dövme işleminin yüzey özelliklerini iyileştirici mekanik etkileri, kaplamanın mikroyapısal ve kimyasal koruyuculuğu ile birleştiğinde, Al7075 alaşımının korozyon direncinde önemli bir artış sağlanabilmektedir.

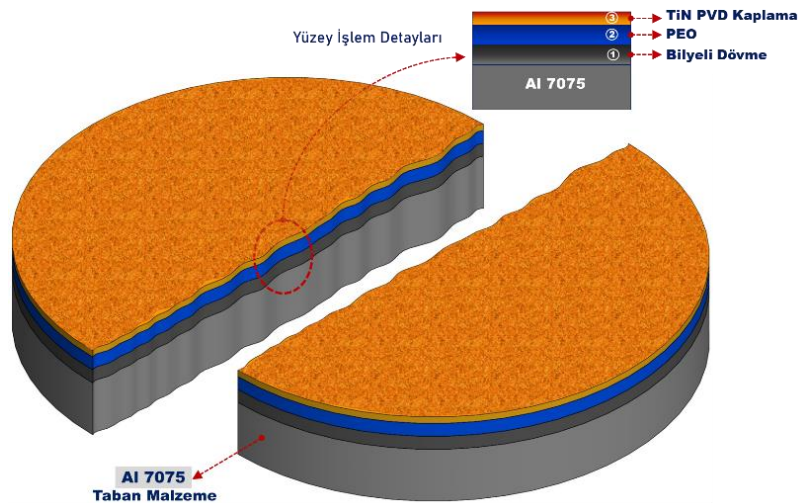
Şekil 75’ göre R1 parametresiyle kaplanmış numunelerde, EDS analizlerine göre Ti içeriği düşüktür (örneğin N2+R1’de %7.23 Ti), buna karşın O ve Na oranları oldukça yüksektir (sırasıyla %73.61 ve %14.67). Bu durum, kaplamanın yeterli kalınlığa ve yoğunluğa ulaşamadığını göstermektedir. Aynı zamanda Cl elementinin de yüksek oranlarda (%3.79) bulunması, kaplama geçirgenliğinin fazla olduğunu ve dış ortamdan kontaminantların difüzyonuna olanak sağladığını göstermektedir. Bu nedenle R1 ile kaplanmış numunelerde Icorr değerlerinin yüksek ($3.2\text{--}3.9\ \mu\text{A}/\text{cm}^2$) seyretmesi, zayıf korozif direncin göstergesidir. R2 parametresiyle kaplanmış numunelerde, Ti içeriği önemli ölçüde artmaktadır (örneğin N2+R2’de %35.17 Ti). Bu durum, kaplamanın daha iyi yapıştığını ve homojenliğinin arttığını göstermektedir. Ayrıca N oranı da yükselmiştir (%5.72), bu da TiN fazının oluşumunu desteklemektedir. R1’e kıyasla Cl ve Na oranlarında belirgin bir azalma gözlenmiştir. Bununla birlikte, Icorr değerlerinin R1’e göre ciddi oranda düştüğü (örneğin N2+R2’de $2.076\ \mu\text{A}/\text{cm}^2$) görülmektedir. Bu durum, R2 parametresinin kaplama kalitesi açısından daha etkili olduğunu göstermektedir. R3 ile elde edilen kaplamalar, çalışmada en yüksek kalınlığa sahip olarak değerlendirilmiştir. N2+R3 ve N4+R3 numunelerinde Ti oranları sırasıyla %21.82 ve %27.32 olarak tespit edilmiştir. Bununla birlikte O ve Na içerikleri de düşme eğilimindedir. Özellikle N3+R3 numunesinde Icorr değeri $1.895\ \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ile oldukça düşüktür. Ayrıca R3 ile kaplanan N2 numunesinde Icorr değeri $1.024\ \mu\text{A}/\text{cm}^2$ olup, en iyi korozif performanslardan biridir. N içeriği ortalama %1.5 civarında seyretmektedir. Bu veriler, kaplamanın yeterli kalınlığa ve kompozisyonel dengeye ulaştığını, dolayısıyla koruyucu bir bariyer oluşturduğunu ortaya koymaktadır. R3 parametresi, hem EDS sonuçlarına hem de korozyon verilerine göre en başarılı

kaplama şartı olmuştur. R4 ile kaplanan numunelerde Ti içeriği belirgin şekilde düşmektedir (örneğin N4+R4'te sadece %3.56 Ti). N oranları da oldukça düşüktür (örneğin %0.53). Buna karşın Na (%15.9) ve Cl (%11.2) oranlarının yüksek olması, bu kaplamaların geçirgenliğinin fazla olduğunu ve çevresel etkilere karşı zayıf kaldığını göstermektedir. Bu durum korozyon verilerine de yansımış, Icorr değerleri tekrar artış göstermiştir (örneğin N4+R4'te 2.179 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$). R4 ile elde edilen kaplama kalınlığı R3 kadar yüksek olsa da, içerdiği Na ve Cl gibi iyonik kirleticiler nedeniyle performans düşmüştür.

Sonuç olarak Ti ve N içeriği kaplamanın etkinliğini doğrudan etkilemektedir. Yüksek Ti ve N oranı, TiN fazının etkin şekilde oluştuğunu ve bu fazın metal yüzeyini daha iyi koruduğunu göstermektedir. Na ve Cl gibi kontaminantların yüksekliği, kaplamanın geçirgen olduğunu ve dış ortamdan iyonik difüzyonun kolaylıkla gerçekleştiğini göstermektedir. Bu da korozyon direncini olumsuz etkiler. R3 parametresi, en kalın kaplama ve en düşük Icorr değerleriyle en başarılı kaplama şartı olarak öne çıkmaktadır. R4 ise kalın olmasına rağmen içerdiği kirleticiler nedeniyle performans olarak R3'ün gerisinde kalmaktadır.

Bilyeli Dövme İşlemine Tabi Tutulmuş Al7075 Alaşımının Yüzeyinde Büyütülen Dupleks PEO/TiN Kaplamaların Fiziksel, Mekanik ve Yüzey Özelliklerinin Araştırılması

Al7075 taban malzeme yüzeyine bilyeli dövmeli işlemi uygulanmış ve sonra PEO kaplama yöntemi ile Al_2O_3 oksit tabaka ile kaplanmış ve daha sonra CFUBMS yöntemini kullanarak yüzeyine TiN kaplanmış numunelerin şematik olarak görüntüsü Şekil 76'da verilmiştir.

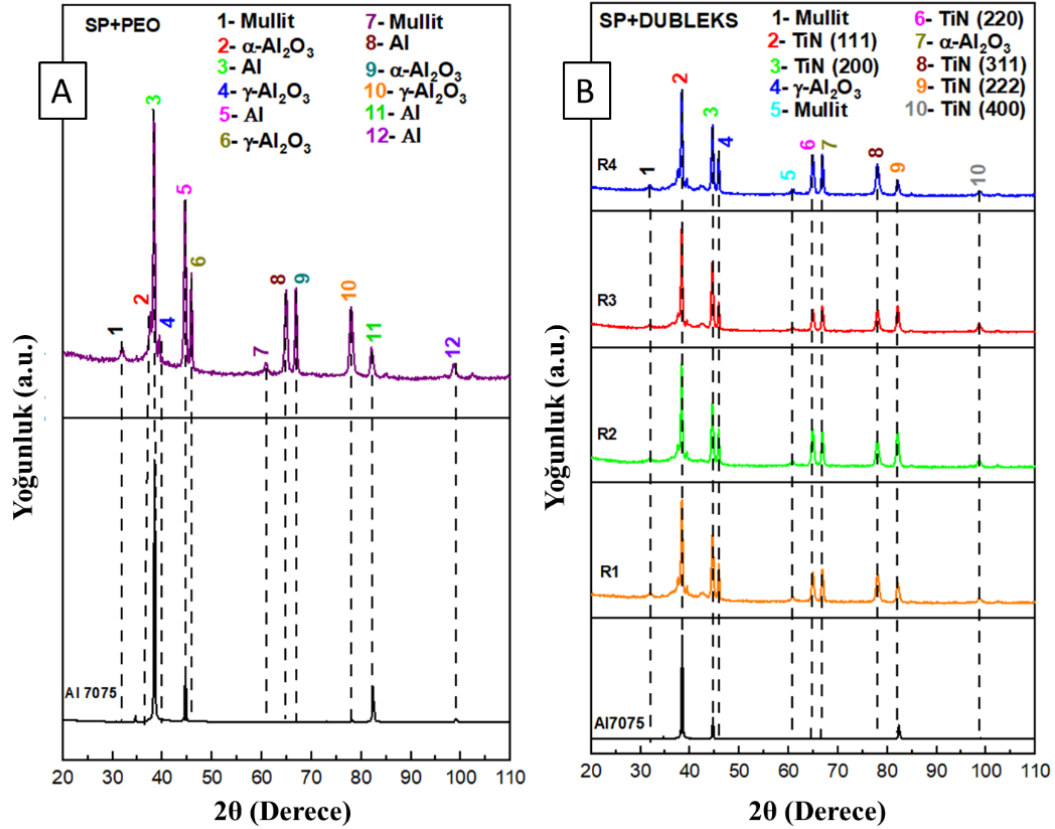


Şekil 76. Bilyeli dövmeli işlemi uygulanmış ve ardından dupleks PEO/TiN kaplamaların şematik görüntüsü

Mikroyapı Test Bulguları ve Tartışma

XRD analizi

Al 7075 taban malzeme numunelerin ve bilyeli dövme işlemine tabi tutulmuş daha sonra PEO yöntemi ile kaplama yapılmış ve sonraki aşamada TiN kaplanmış numunelerin XRD pikleri Şekil 77 (a-b)'de gösterilmiştir.



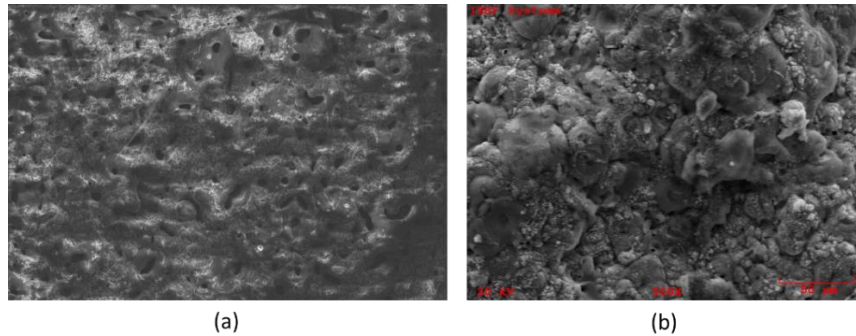
Şekil 77. a) Bilyeli dövme işlemi uygulanmış ardından PEO ile kaplanmış numunelerin XRD sonuçları ve **b)** Bilyeli dövme işlemi uygulanmış daha sonra dubleks PEO/TiN kaplanmış numunelerin XRD sonuçları

Şekil 77'e göre grafikler farklı düzlemlerdeki alüminyum piklerini göstermektedir. Bilyeli dövme işlemlerinden sonra yeni pikler veya anormal pik oluşumları gözlenmemiştir. Şekil 77'de tüm SP+PEO ve SP+ PEO/TiN numunelerdeki üretilen kaplamaların faz bileşimini değerlendirmek için XRD analizi yapılmıştır; XRD analizinden sonra, çeşitli bilyeli dövme işlemlerine tabi tutulan numunelerin sola ve daha düşük bir Bragg derecesine kaydığını sergilemektedir (Pandey et al., 2017). Bu kaymalar, kafes yapısını bozan ve pik kaymasına neden olan bilyeli dövme işleminin neden olduğu mikro gerilme ve tane inceltme etkilerine bağlanabilir (Bao et al., 2022; Efe et al., 2020). Ek olarak, literatürde daha önce belirtilmiş olduğu gibi, XRD grafiklerinde pik genişlemesi veya daralması da görülebilir. Piklerin daralması veya genişlemesinin nedeni esas olarak tane boyutunun küçülmesi veya kafes yapısındaki değişikliklerden kaynaklanmaktadır. Şekil 77 (a), incelendiğinde kaplamalarda α-

Al_2O_3 , $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ fazları tespit edilmiştir: X-ışını radyasyonunun farklı absorbansı nedeniyle pik yoğunluklarında küçük değişiklikler gözlenmiştir, bu da homojen olmayan bir fabrikasyon yüzeye atfedilebilir. Beklendiği gibi, iki alüminyum oksit fazı tespit edilmiş ve bunlar kaplamanın iç ve dış katmanları olarak adlandırılmıştır. Alüminyum fazları, X-ışınlarının yüksek penetrasyon derinliği nedeniyle alt tabakadan tanımlanmıştır. Ayrıca, genellikle elektrolit ayrışmasından kaynaklanan safsızlıklar içermeyen saf bir oksit kaplamanın oluşumuna işaret eden başka faz bulunmamıştır. Şekil 77 (b), SP+ PEO/TiN kaplama, XRD analiz sonuçları incelendiğinde, TiN kaplamaya ait karakteristik piklerin (111), (200), (220) ve (311) kristalografik düzlemlerinde net bir şekilde gözlemlenmesi, kaplamanın yüksek kristalite ve hedef faz saflığı ile oluşturulduğunu doğrulamaktadır. Özellikle $2\theta \approx 36.7^\circ$ konumunda belirginleşen (111) pikinin yoğunluğu, TiN kaplamanın tercihli yönlenme sergilediğine işaret etmektedir. Bu durum, PEO tabakasının sağladığı düşük yüzey pürüzlülüğü ve bilyeli dövmenin oluşturduğu artık gerilme alanının, TiN kaplama sürecinde kaplama aderansını ve kristal yapıyı optimize ettiğini sonucuna varılmıştır. XRD spektrumunda Al_2O_3 gibi ikincil faz piklerinin gözlemlenmemesi, TiN kaplamanın yüksek saflıkta sentezlendiği düşünülmektedir.

Yüzey topografi ve pürüzlülüğü

Al 7075 taban malzeme üzerine uygulanan bilyeli dövme (Shot Peening - SP) işlemine tabi tutulmuş numunelerin yüzey özellikleri, plazma elektrolitik oksidasyon (PEO) yöntemi ile kaplama işleminden sonra detaylı olarak incelenmiştir. Bu numunelerin yüzey topografyası, taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak analiz edilmiş ve elde edilen görüntüler Şekil 76'da verilmiştir. Şekil 78 (a) kısmında sadece SP+PEO yöntemi ile kaplanmış numunelerin SEM görüntüleri yer alırken, Şekil 78 (b) kısmında ise SP işleminin ardından ilk önce PEO daha sonra CFUBMS yöntemi kullanarak TiN ile kaplama gerçekleştirilen dubleks kaplama (SP+Dubleks) numunelerin SEM görüntüleri verilmiştir.



Şekil 78. Al7075 numunelerin yüzeyine PEO yöntemi kullanılarak kaplama uygulanmış SEM görüntüleri, **a)** SP+PEO, **b)** SP+ Dubleks kaplama

Şekil 78 (a) göre, Al 7075 alaşımı yüzeyine uygulanan bilyeli dövme işlemi ardından uygulanan Plazma Elektrolitik Oksidasyon (PEO) prosesi sayesinde yüzeyde, alüminyum oksit (Al_2O_3) esaslı seramik bir tabaka oluşmuştur. SEM analizleri sonucunda, bu oksit tabakanın karakteristik olarak gözenekli ve poroz bir mikroyapıya sahip olduğu tespit edilmiştir. Bu yapı, PEO işleminin doğasında bulunan plazma deşarjlarının etkisiyle oluşan mikrogözeneklerin ve krater benzeri yapılarının varlığıyla açıklanabilir.

Devamında uygulanan TiN kaplaması, fiziksel buhar biriktirme (PVD) yöntemiyle gerçekleştirilmiş ve bu süreç, dubleks (PEO/TiN) kaplama yapısını oluşturmıştır. Şekil 78 (b) göre PVD yöntemi ile yüzeye TiN kaplama, gözenekli PEO tabakasının yüzeyine nüfuz ederek, mikrogözeneklerin önemli bir kısmını doldurmuş ve yüzeyin daha kompakt ve homojen bir yapı kazanmasına katkı sağlamıştır. Bu infüzyon etkisi sayesinde, yüzeydeki porozite azaltılmış, potansiyel korozyon noktaları minimize edilmiş ve yüzeyin genel koruyuculuğu iyileştirilmiştir.

SP+Dubleks kaplama uygulanmış numunelerin yüzey özellikleri hem mekanik hem de tribolojik performansı iyileştirmek amacıyla geliştirilmiştir. Bu numunelerin yüzeyindeki çok katmanlı yapının, daha yüksek aşınma direnci ve korozyon dayanımı sağlayacak şekilde optimize edildiği görülmüştür. Ayrıca, yüzey kaplama işlemleri sonrasında numunelerin yüzey mikroyapıları optik mikroskop ile analiz edilmiş ve sonuçlar Şekil 79 ve Şekil 80'de verilmiştir. Şekil 79'da SP+PEO yöntemi ile kaplanmış numunelerin yüzey optik mikroskop görüntüleri yer alırken, Şekil 80'de SP işleminin ardından dubleks kaplama uygulanmış numunelerin yüzey mikroskop görüntüleri verilmiştir. Bu görüntüler, kaplama sonrası yüzeyde meydana gelen değişiklikleri, malzemenin yüzey pürüzlülüğünü ve kaplama katmanlarının bütünlüğünü detaylı bir şekilde değerlendirmek için kullanılmıştır.

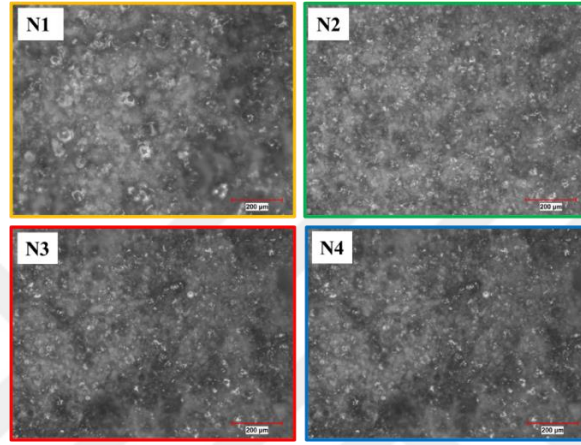
Bilyeli döve işleminden sonra yüzey pürüzlüğünde artış gözlemlenmiştir, bu işlemten sonra PEO yöntemi ile kaplanan numunelerin yüzeyinde oluşan çukurlar oksit tabaka ile dolmuş ve buda yüzey pürüzlüğünde değerlerinde bir azalma neden olmuştur, SP+PEO ve dubleks kaplama yüzey pürüzlülüğü değerleri şekil 81 ve 82'de verilmiştir. SP+PEO numunelerinin yüzey incelemeleri sonucunda, yüzeylerin karakteristik olarak mikro gözenekli bir yapıya sahip olduğu tespit edilmiştir. Plazma elektrolitik oksidasyon (PEO) işlemi sonrası yüzeyde oluşan bu gözenekler, kaplamanın fonksiyonel özelliklerini önemli ölçüde etkileyebilmektedir. PEO yöntemiyle yapılan kaplamalarda her zaman kaplamaların nispeten zayıf konumunda deşarjı gerçekleşir ve kaplamaların kırılmasından sonra orijinal kısımda yeni oksit tabaka kaplamaları oluşur, böylece kırılma noktası diğer nispeten zayıf alanlara aktarılacak ve böylece kaplamalar kalınlaşmaya devam edecek ve sonunda metal yüzeyinde

düzgün bir oksit kaplamalar oluşturacaktır (Gao et al., 2017). İşlem ilerledikçe ve kaplama süresinin uzamasıyla kaplamalardaki gözenek sayısında azalma, gözenek boyutlarının büyümesinde artış, gözeneklerin kaplamalar boyunca homojen dağılımı ve daha az pürüzsüz hale geldiği görülebilir. Kaplamaların yüzeyinde farklı sayıda mikro çatlakların ortaya çıktığı görülebilir ve kaplama süresinin uzamasıyla kaplamadaki mikro çatlak sayısı kademeli olarak düşünülmektedir. Bunun nedeni, akım yoğunluğu artarken numune yüzeyindeki voltajın da artmasıdır ve daha fazla enerji sağlanır ve PEO işlemi reaksiyonu artar. Bu gelişmiş reaksiyon kabiliyeti, kaplamayı daha etkili bir şekilde kırarak kaplamalarda daha fazla sayıda kırılmaya neden olur. Bu nedenle, kaplamalarda daha büyük çaplara sahip gözenek ve bu gözeneklerin sayısı kademeli olarak azalır (Demirci, 2014).

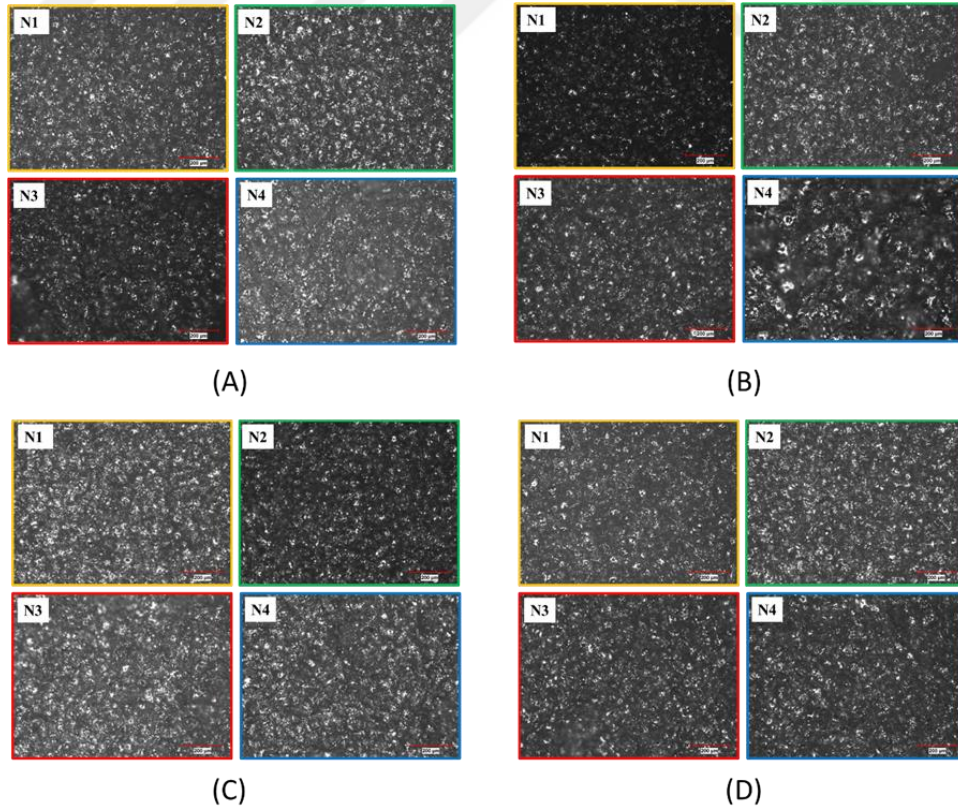
Bilyeli dövme işlemi sonrasında Al 7075 alaşımı yüzeyinde önemli bir pürüzlülük artışı gözlemlenmiştir. Bu durum, işlemin yüzeye uyguladığı tekrarlı plastik deformasyonun bir sonucu olarak, yüzey topografyasında düzensizliklerin ve mikro çıkıntıların artmasıyla ilişkilidir. Ölçümler, bilyeli dövme işlemi sonrası yüzey pürüzlülüğünün maksimum 12,22 μm seviyesine ulaştığını ortaya koymaktadır. Bu yüksek pürüzlülük değeri, yüzeyin mekanik olarak işlenmiş ve yoğun şekilde şekillendirilmiş olduğunu göstermektedir. Ancak, bu işlemin ardından uygulanan Plazma Elektrolitik Oksidasyon (PEO) yöntemi sayesinde yüzey pürüzlülüğünde kayda değer bir azalma meydana gelmiştir. PEO işlemi sırasında oluşan Al_2O_3 esaslı seramik tabaka, yüzeydeki mikro pürüzlülüklerin bir kısmını doldurarak ve yeniden yapılandırarak yüzeyin daha homojen bir hale gelmesini sağlamıştır. PEO işlemi sonrası yüzey pürüzlülüğü maksimum 4,1 μm seviyesine düşmüştür. Bu, yaklaşık üç kata varan bir azalma anlamına gelmekte olup, yüzey morfolojisinde belirgin bir iyileşme sağlandığını göstermektedir. Ancak PEO yüzeylerin karakteristik olarak mikro gözenekli varlığı, yüzeydeki pürüzlülüğün artmasına neden olmakta ve bu durum tribolojik performansı, aşınma direncini ve korozyon dayanımını sınırlayabilmektedir. Bu nedenle, PEO işlemi sonrası yüzeylerdeki mikro gözeneklerin uygun bir yöntemle kapatılması ve doldurulması gerekliliği ortaya çıkmıştır.

SP+PEO işleminden sonra yüzeyde oluşan mikro gözeneklerin kapatılması ve yüzeyin daha homojen bir yapıya kavuşturulması amacıyla, CFUBMS yöntemi kullanılarak TiN kaplama işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu işlem sonucunda, TiN kaplama malzemesi PEO işlemiyle oluşan gözenekli yapıya başarıyla nüfuz ederek mikro gözenekleri doldurmuş ve yüzeyin bütünlüğünü artırmıştır. Böylece, yüzeyde daha kompakt, düzgün ve mekanik olarak kararlı bir yapı elde edilmiştir. TiN kaplamanın bu infüzyon etkisi, hem yüzey porozitesini azaltmış hem de yüzey pürüzlülüğünde iyileşme sağlamıştır. Şekil 81'de yüzey pürüzlülük

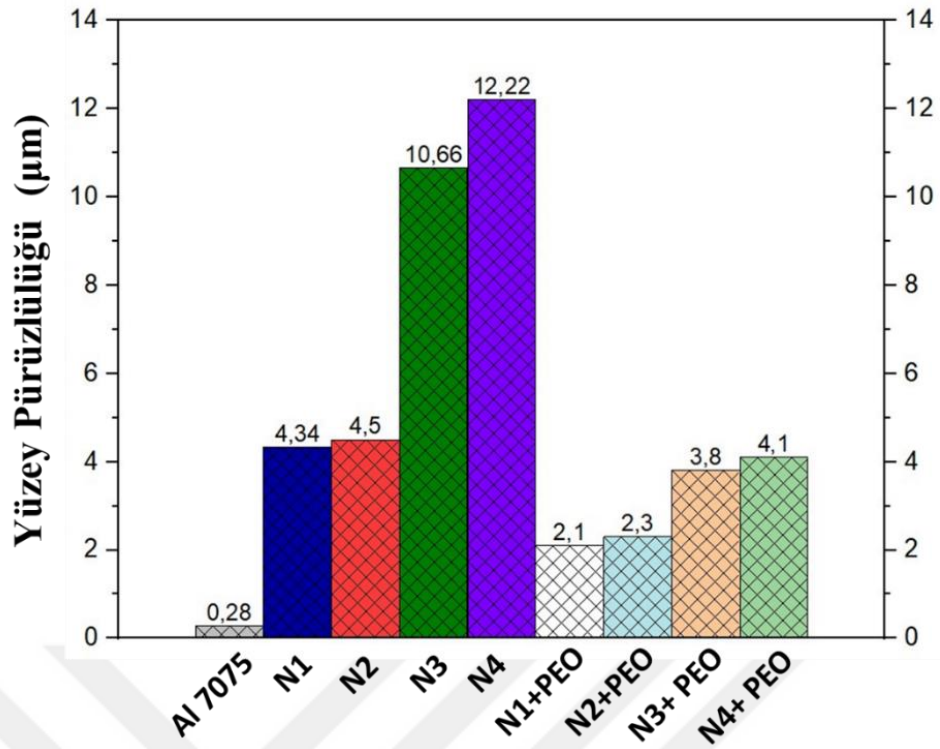
değerleri incelendiğinde, maksimum pürüzlülük $3.6 \mu\text{m}$ ile N4+R1 parametre kombinasyonunda elde edilmiştir. Öte yandan, en düşük yüzey pürüzlülüğü değeri ise N1+R3 parametrelerinde ölçülmüştür. Bu bulgular, R3 parametresinin TiN kaplama kalitesi ve yüzey morfolojisi üzerinde belirleyici bir etkisi olduğunu göstermektedir. Şekil 63'te verilen SEM görüntüleri incelendiğinde de bu bulgular doğrulanmakta; R3 parametresinde en yüksek film kalınlığının elde edildiği görülmektedir. Artan film kalınlığı, kaplamanın mikro yapıyı daha etkili şekilde doldurmasını sağlayarak, yüzeyin daha düzgün hale gelmesine katkıda bulunmuştur.



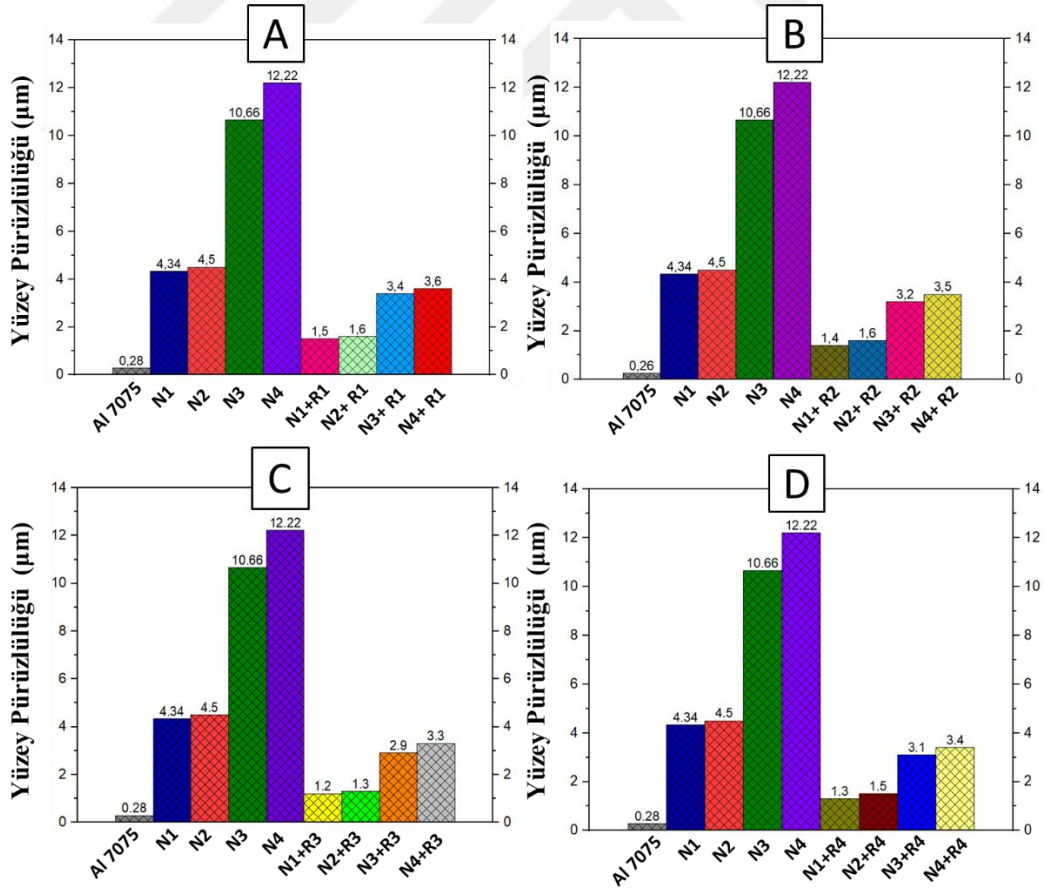
Şekil 79. SP+MAO numunelerin yüzey optik mikroskop topoğrafi görüntüleri



Şekil 80. Bilyeli dövme işlemi uygulanmış ve dubleks PEO/TiN kaplanmış Al 7075 numunelerin yüzey topoğrafi görüntüleri, **a)** R1- SP+Dubleks kaplama, **b)** R2-SP+ Dubleks kaplama, **c)** R3-SP+ Dubleks kaplama, **d)** R4-SP+ Dubleks kaplama



Şekil 81. İşlem görmemiş, bilyeli dövme (N1-N4) ve bilyeli dövme ve ardından PEO yöntemi kullanılarak kaplama yapılmış Al 7075 numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri

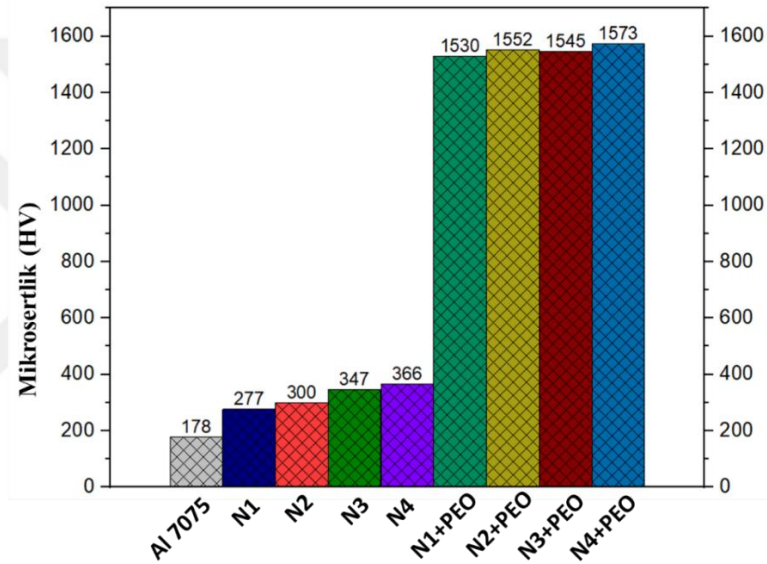


Şekil 82. İşlem görmemiş, bilyeli dövme işlemi uygulanmış ve ardından dubleks PEO/TiN kaplanmış Al 7075 numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri, **a)** R1-SP+Dubleks kaplama, **b)** R2-SP+Dubleks kaplama, **c)** R3-SP+Dubleks kaplama, **d)** R4-SP+Dubleks kaplama

Sertlik test sonuçları

Al7075 taban malzeme üzerine, iki farklı bilye çapı (S110 ve S230) ve iki farklı Almen şiddeti (8A ve 10A) kullanılarak bilyeli dövme işlemi uygulanmıştır. Bu işlemin ardından, Taguchi L₉ (3³) deney planına göre Tablo 7’de belirtilen R9 deney parametreleri ile bilyeli dövme uygulanmış yüzeylere PEO işlemi uygulanmıştır. Daha sonra PEO yüzeyleri daha önce belirtildiği gibi, Tablo 9’da belirtilen dört farklı deney tasarımı ile (ekil R1–R4), alaşım yüzeylerine PVD yöntemiyle TiN kaplamalar yapılmıştır. Benzer şekilde alaşımların Vickers mikrosertlik değerleri incelenmiştir.

Bilyeli dövme işlemi üzerine PEO kaplama sonrası Al7075 alaşımlarının mikrosertlik değerleri Şekil 83’te verilmiştir.

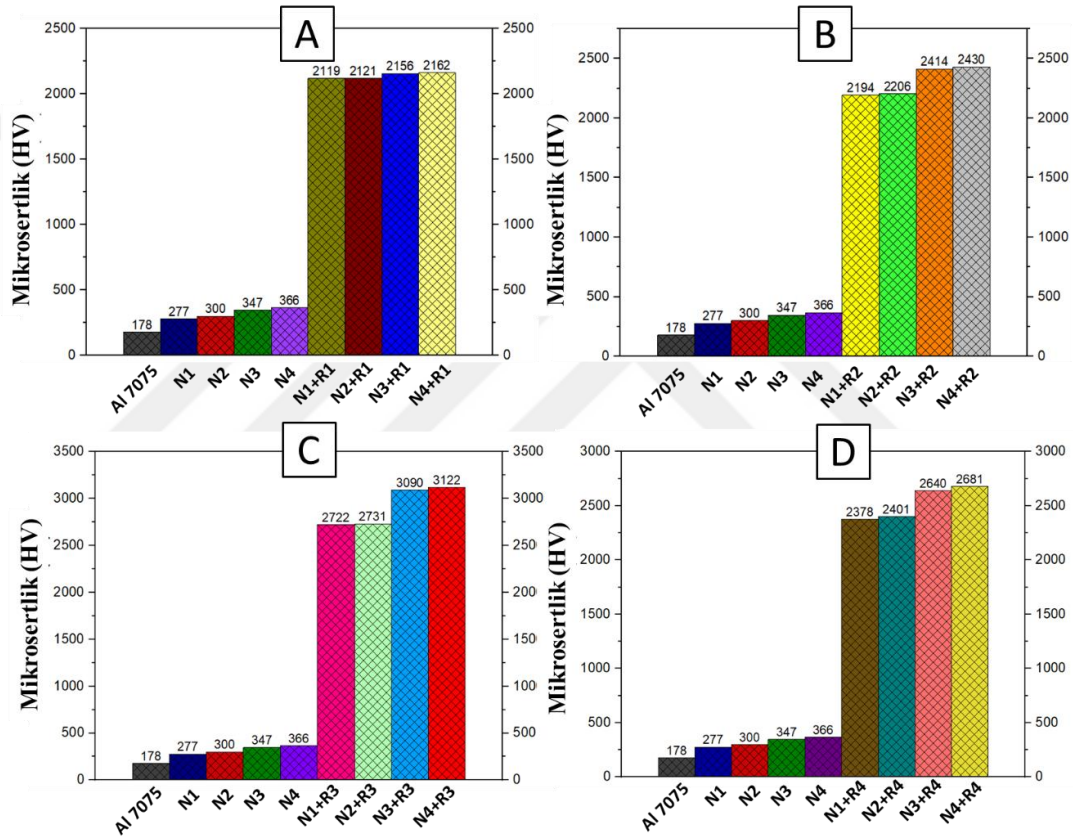


Şekil 83. İşlem uygulanmamış, bilyeli dövme (N1-N4) ve bilyeli dövme işlemi ardından PEO yöntemi kullanılarak kaplanan Al 7075 numunelerin mikrosertlik (HV) değerleri

Şekil 83’e göre tüm bilyeli dövme SP+PEO işlemi uygulanmış numunelerin sertlik değerleri, hem yalnızca bilyeli dövme uygulanmış numunelere hem de taban malzemeye kıyasla istatistiksel olarak anlamlı bir artış göstermiştir. Özellikle, bilyeli dövme sonrası PEO kaplaması uygulanan numunelerde, sertlik değerlerinde önemli bir artış tespit edilmiştir. Bu artış, sabit ve yüksek voltaj, daha uzun oksidasyon süresi gibi PEO işlem parametrelerinin yanı sıra, bilyeli dövme işleminin yüzeyde oluşturduğu plastik deformasyon ve dislokasyon yoğunluğunun etkisiyle açıklanabilir. Dövme sonrası artan dislokasyon yoğunluğu, PEO kaplama sürecinde iyonik difüzyonu teşvik ederek daha kompakt, homojen ve kristal yapı bir oksit tabakasının oluşumunu desteklemektedir. Buna ek olarak, PEO kaplamanın yüksek sertlikteki α -Al₂O₃ fazlarını içermesi, elde edilen toplam sertlik artışını daha da belirgin hâle getirmiştir. En dikkat çekici sonuç ise, 10 Almen şiddetinde ve S230 bilye tipiyle işlenen N4

numuneye PEO kaplaması uygulanmasıyla elde edilmiştir. Bu numunede ölçülen 1573 HV sertlik değeri, tüm SP+PEO kaplama içerisinde en yüksek değeri temsil etmektedir. Bu bulgular, uygun bilye tipi ve işlem şiddeti kombinasyonunun ardından gerçekleştirilen PEO kaplamanın, yüzey sertliğini artırma açısından sinerjik bir etki oluşturduğunu ve çok aşamalı yüzey işlemlerinin mekanik özellikler üzerinde güçlü bir iyileştirici etkisi olduğunu açıkça ortaya koymaktadır.

Şekil 84’te bilyeli dövme işlemi uygulanmış ardından PEO yöntemi ile kaplanmış numunelerin üzerine PVD yöntemi kullanılarak dört farklı deney tasarımı ile (R1–R4) TiN kaplanmamış Al7075 alaşımların dubleks kaplama mikrosertlik değerleri sunulmuştur.



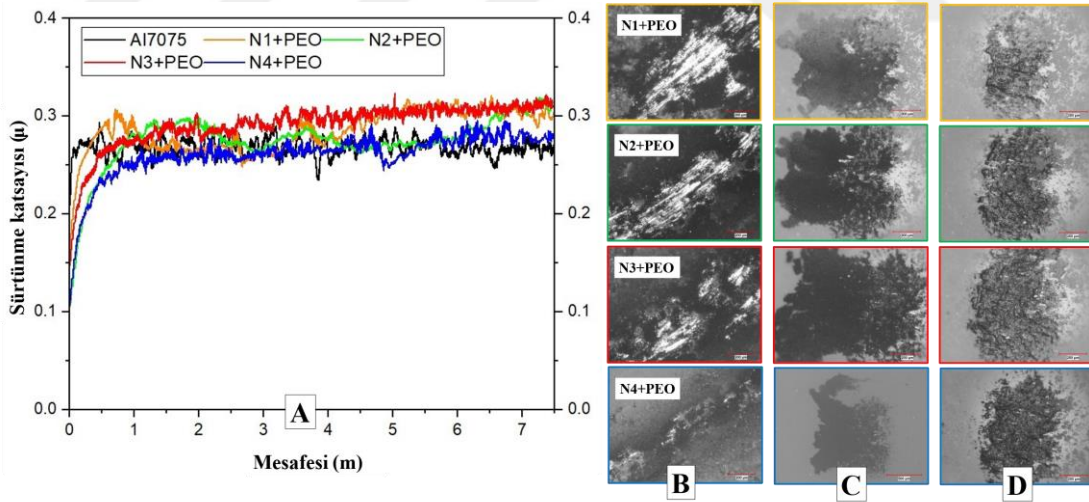
Şekil 84. İşlem görmemiş, bilyeli dövme işlemi uygulanmış ve ardından dubleks PEO/TiN kaplanmış Al7075 numunelerin mikrosertlik (HV) değerleri, **a)** R1-SP+ Dubleks kaplama, **b)** R2-SP+ Dubleks kaplama, **c)** R3-SP+ Dubleks kaplama, **d)** R4-SP+ Dubleks kaplama

Şekil 84’e göre PEO/TiN kaplamanın sertlik değeri, tek başına PEO kaplamaya kıyasla daha yüksek olup, bu artış öncelikle Ti tabakasının faz dönüşümü ve yapısal kompaktlığıyla ilişkilendirilmektedir. Başlangıçta, Ti ara katmanının sünek doğası nedeniyle sertlik değeri görece düşük kalmış, ayrıca kaplama kusurlarına bağlı olarak zayıf kompaktlık gözlemlenmiştir. Ancak, kaplama sürecine azot gazı eklendiğinde, Ti tabakasının kompaktlığı artmış ve faz yapısı TiN’e dönüşerek mekanik dayanımı önemli ölçüde artırmıştır (Cui et al., 2017). Bu nedenle, çok katmanlı sert kaplamalarda, özellikle PEO gibi seramik tabakalarla

birlikte, ara katman olarak Ti kullanımı ve bunu TiN'e dönüştürmek üzere azot katkısı uygulanması yaygın ve etkili bir strateji olarak öne çıkmaktadır. Sertlik sonuçları incelendiğinde, en yüksek değerlere R3'deki numunelere uygulanan dubleks kaplama (PEO/TiN) sahip olmuştur. Şekil 63'te verilen SEM görüntüleri incelendiğinde, en kalın kaplama tabakasının da yine R3 numunesinde olduğu gözlemlenmiştir. Bu bulgular, kaplama kalınlığı ile mekanik özellikler arasındaki doğrudan ilişkiyi desteklemekte ve kaplama kalınlığının sertlik üzerinde belirleyici bir rol oynadığını ortaya koymaktadır. Özellikle R3 numunesine ek olarak, ön işlem olarak N4 kodlu bilyeli dövme uygulanmış R3+N4 numunesinde ölçülen sertlik değeri 3122 HV ile tüm numuneler arasında en yüksek değere ulaşmıştır. Bu önemli artış, bilyeli dövmenin yüzeyde oluşturduğu plastik deformasyon ve artan dislokasyon yoğunluğunun, ardından uygulanan TiN ve PEO katmanlarıyla sinerjik etki yaratarak, yüzeyin sertliğini çarpıcı biçimde artırdığını göstermektedir.

Triboloji test sonuçları

Tüm numunelerin aşınma davranışları, 1 N yük altında, toplam 10 m işlem mesafesi boyunca, normal oda sıcaklığında ve kuru ortam koşullarında gerçekleştirilen testlerle incelenmiştir. Bilyeli dövme işlemi sonrasında, PEO kaplama uygulanmış Al 7075 alaşımının sürtünme katsayısı (CoF) değerleri Şekil 85'te sunulmuştur.



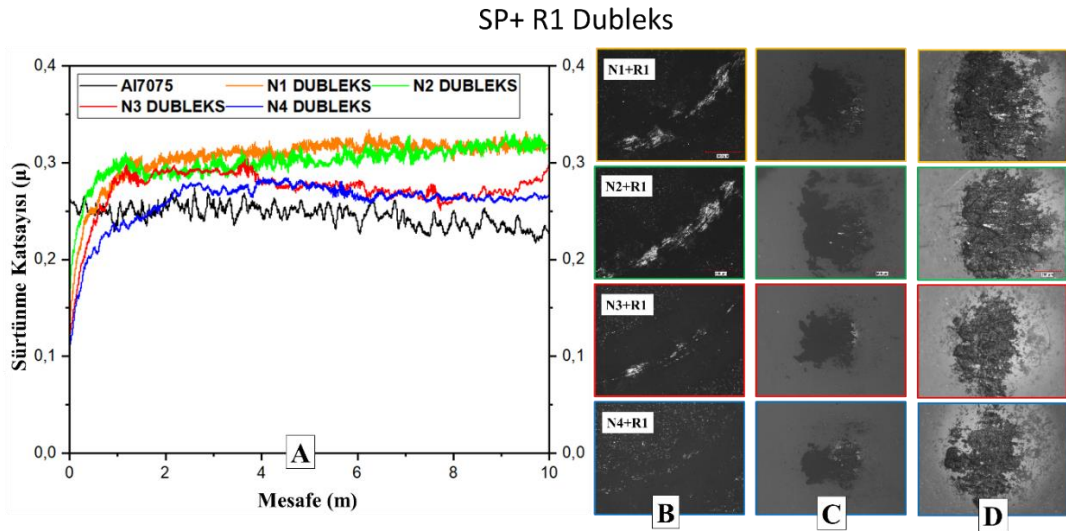
Şekil 85. Bilyeli dövme işlemi uygulanmış daha sonra PEO yöntemi kullanılarak kaplanmış Al7075 numunelerin pin-on-disk test sonuçları, **a)** sürtünme katsayısı grafikleri, **b)** aşınma izi, **c)** temizlenmemiş pin OM, **d)** temizlenmiş pin OM görüntüleri

Şekil 85'e bilyeli dövme işlemiyle oluşturulan pürüzlü yüzey, SP+PEO işlemine tabi tutulan numunelerin sürtünme eğrilerinde, özellikle aşınma testinin başlangıç aşamasında belirgin değişikliklere neden olmuştur. Bu numunelerin aşınma eğrileri karşılaştırıldığında, SP+PEO uygulanmış örneklerin aşınmanın erken dönemlerinde nispeten daha yüksek sürtünme katsayısı sergilediği, ancak aşınma sürecinin ilerleyen aşamalarında bu değerlerin istikrar

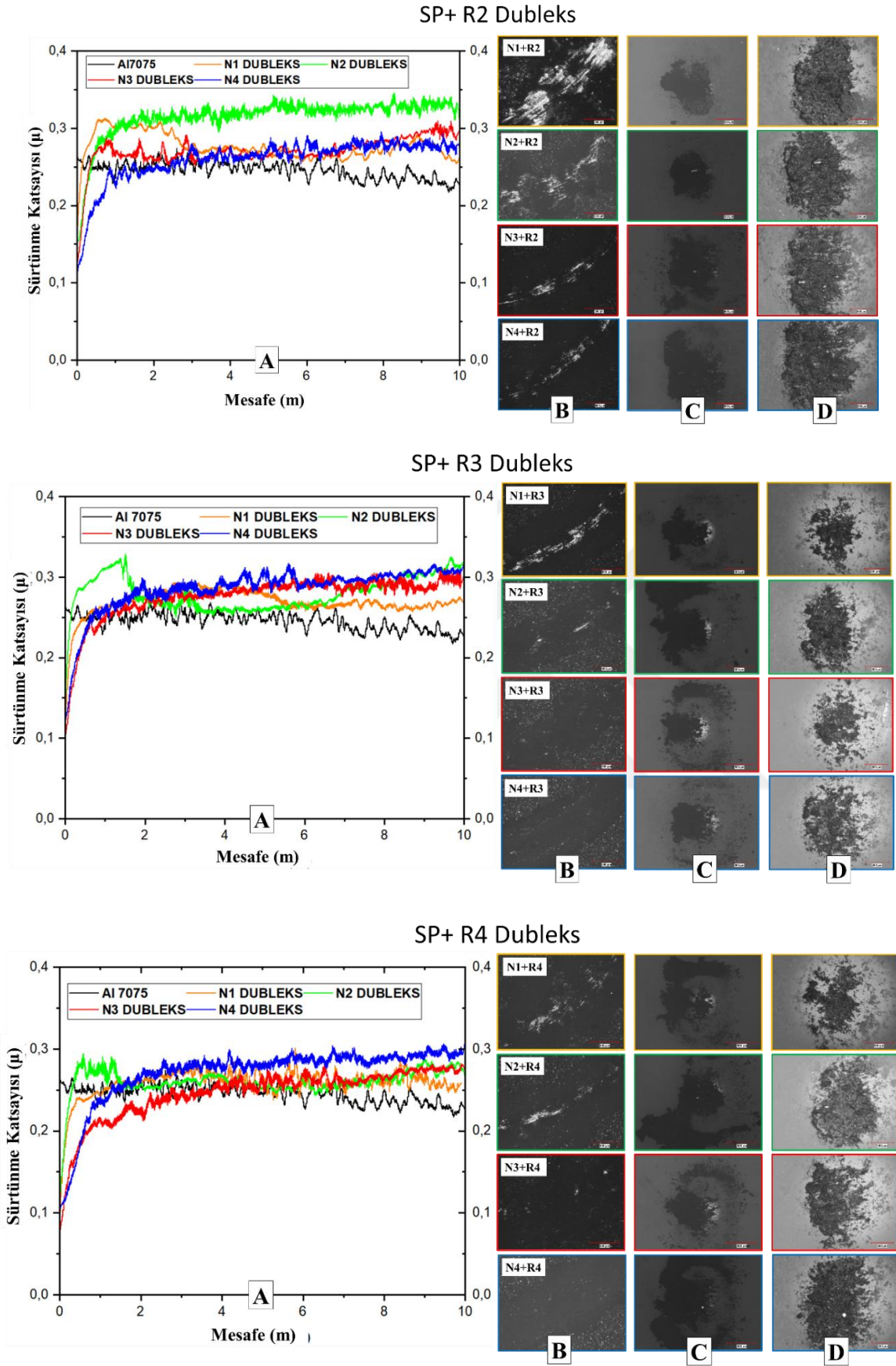
kazandığı görülmektedir (Y. Li et al., 2023). Şekil 85-a'da, PEO ile yüzeyleri kaplanmış numunelerin 10A Almen şiddetinde uygulanan bilyeli dövme işlemi sonucunda S110 ve S230 bilye tipleri ile elde edilen yüzeyler, 8A Almen şiddetiyle karşılaştırıldığında daha üstün bir performans sergilemiştir. Bu durum, daha yüksek Almen şiddetinin yüzeyde daha fazla plastik deformasyon oluşturduğunu ve bunun sonucunda yüzey sertliğinin arttığını göstermektedir. Şekil 85-b'de gözlemlenen aşınma izi SP+PEO işleminden sonra numunelerde daha homojen bir yüzey oluştuğuna işaret etmektedir. Bu iyileşmenin, bilyeli dövme sonrası yüzeyde oluşan boşlukların PEO kaplaması ile doldurulması ve yüzey pürüzlülüğünün azaltılmasıyla ilişkili olduğu değerlendirilmektedir. Şekil 85-c'de, bilye yüzeyinde biriken oksit tabakası açıkça gözlenmektedir. Bu durum, bilye ile oksit kaplama arasında üç elemanlı (tribolojik) bir aşınma mekanizmasının geliştiğini düşündürmektedir. Benzer şekilde, Şekil 85-d'de, bilye yüzeyinin ciddi şekilde aşınmaya uğradığı da net bir şekilde görülmektedir.

Numunelerin sürtünme katsayıları karşılaştırıldığında ise, SP+PEO işlemi uygulanmış numuneler aşınma direnci bakımından belirgin bir fark gözlenmiştir. Ancak PEO kaplaması, yüzey morfolojisini iyileştirmiş, pürüzlülüğü azaltmış ve aşınma izi genişliğini daraltarak, yüzeyin uzun vadeli stabilitesini artırmıştır. Bu da PEO kaplamanın mekanik etkilere karşı ilave bir direnç katmanını sağladığını göstermektedir.

Bilyeli dövme işlemi üzerine PEO üzerine PVD yöntemi kullanılarak dört farklı deney tasarımı ile (R1–R4) TiN kaplanmamış Al7075 alaşımların dubleks kaplama CoF değerleri Şekil 86'da verilmiştir.



Şekil 86. Bilyeli dövme işlemi uygulanmış daha sonra dubleks kaplama PEO/TiN kaplanmış Al7075 numunelerin pin-on-disk test sonuçları, **a)** sürtünme katsayısı grafikleri, **b)** aşınma izi, **c)** temizlenmemiş pin OM, **d)** temizlenmiş pin OM görüntüleri



Şekil 86. Bilyeli dövme işlemi uygulanmış daha sonra dupleks kaplama PEO/TiN kaplanmış Al7075 numunelerin pin-on-disk test sonuçları, **a)** sürtünme katsayısı grafikleri, **b)** aşınma izi, **c)** temizlenmemiş pin OM, **d)** temizlenmiş pin OM görüntüleri (Devamı)

Şekil 86'e göre Al 7075 taban malzeme yüzeyin bilyeli dövme işlemi uygulanmış daha sonra PEO/TiN dubleks kaplama sürtünme katsayısı, bütün dubleks R1, R2, R3, R4 kaplamalarda ilk 0,5 m aşınma mesafesi 0,2 ile 0,25 şeklinde değişmektedir. Sürtünme katsayısı eğrileri R1, R2, R3, R4 başlangıçta aynı eğilimi göstermiştir ve ardından sürekli olarak yükselmiştir ve süresinin uzamasıyla sürtünme katsayısı daha küçük ve daha kararlı hale gelmiştir. Bu artış, Al 7075 taban malzeme üzerindeki TiN filminin PEO oksit tabaka düşük yapışma ve yüzey pürüzlülüğünden daha yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Aşınma süresinin uzamasıyla film kademeli olarak düşmekte ve sürtünme katsayısı kademeli olarak artmaktadır. Bu sonuç, TiN filmlerinin hafif kayma davranışına etkiye bulunduğunu ortaya koymaktadır. Şekil 86(a)'de Al7075 yüzeylerindeki PEO/TiN dubleks kaplama spesifik aşınma oranını göstermektedir. Al7075 alaşımı üzerine bilyeli dövme işleminden sonra uygulanan dubleks kaplama PEO/TiN sonrası sürtünme katsayısı değerleri, yüzey modifikasyonunun tribolojik performans üzerindeki etkisini açıkça ortaya koymaktadır. R1 serisi numunelerde, başlangıçta N1, N2, N3 ve N4 numunelerinde sürtünme katsayısı 0,5 m kayma mesafesinde 0,20 civarında seyretmiş; bu noktadan sonra ise mesafe arttıkça sürtünme katsayısı kademeli olarak yükselerek yaklaşık 0,26 seviyesine ulaşmıştır. Bu durum, kaplama yüzeyinin ilk temasta daha düşük sürtünme sağladığını, ancak ilerleyen kayma mesafesiyle birlikte artan yüzey etkileşimi sonucu sürtünmenin yükseldiğini göstermektedir. Aşınma oranları incelendiğinde, her biri farklı bilye tipi ve Almen şiddetinde işlenmiş olan numuneler arasında belirgin farklar gözlemlenmiştir. R1 serisinde, en yüksek aşınma oranı S110 tipi bilye ve 8A–10A Almen şiddetinde işlenmiş N1 ve N2 numunelerinde 0,32 olarak ölçülürken, en düşük oran S230 tipi bilye ve yine 8A–10A Almen şiddetinde işlenmiş N3 ve N4 numunelerinde 0,28 olarak belirlenmiştir. Benzer şekilde, R2 serisinde 0,5 m kayma mesafesinde en yüksek aşınma oranı N2 numunesinde 0,33, en düşük ise N3 ve N4 numunelerinde 0,26 olarak kaydedilmiştir. R3 serisinde de bu eğilim korunmuş; N1 ve N2 numunelerinde 0,30 ile daha yüksek aşınma oranları elde edilirken, N3 ve N4 numunelerinde oran 0,26'ya kadar düşmüştür. R4 serisinde ise en yüksek aşınma oranı N2 numunesinde 0,29, en düşük oran ise N3 numunesinde yine 0,26 olmuştur.

Şekil 86-b'de sürtünme testinden sonra Al 7075 alaşımının ve PEO/TiN kaplamanın aşınma izi göstermektedir. Yapılan analizler sonucunda, R3 ve R4 numuneleri, R1 ve R2 numunelerine kıyasla daha düşük sürtünme katsayısı değerleri sergilemiştir. Bu durum, Al7075 alaşımı üzerine uygulanan bilyeli dövme (SP) sonrası PEO/TiN dubleks kaplama işleminin yüzey performansını önemli ölçüde iyileştirdiğini göstermektedir. R3 ve R4 numunelerinin sürtünme testleri sonrasında elde edilen mikroskop görüntüleri incelendiğinde, yüzeylerin oldukça düzgün olduğu ve taban malzemenin yüzeye çıkmadığı görülmüştür. Aşınma

bölgesinde yalnızca oksit tabakanın gözlemlenmesi, dubleks kaplamanın yüksek yüzey koruması sağladığını ve tribolojik etkilere karşı dayanım kazandırdığını ortaya koymaktadır. Buna karşın R1 ve R2 numunelerinde hem taban malzeme belirgin şekilde yüzeye çıkmış hem de yüzeydeki düzensizlikler daha fazla gözlenmiştir. Bu da söz konusu numunelerin daha yüksek sürtünme katsayısı ve dolayısıyla daha düşük aşınma direncine sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca R3 ve R4 numunelerinin yalnızca tribolojik olarak değil, mekanik özellikler açısından da üstün performans sergilediği belirlenmiştir. Bu numuneler, hem daha yüksek sertlik değerlerine sahip olmalarıyla hem de TiN tabakasının daha kalın olmasıyla öne çıkmaktadır. Şekil 63'te verilen SEM görüntülerinde, R3 ve R4 numunelerinde TiN kaplamanın diğer numunelere kıyasla en kalın yapıda olduğu açıkça görülmektedir. Kalın ve homojen TiN tabakasının, aşınma sırasında koruyucu bir bariyer oluşturarak taban malzemeye zarar gelmesini önlediği düşünülmektedir. Sürtünme testi sonrasında kullanılan bilye uçlarının mikroskop görüntüleri de yüzey karakterizasyonuna destek sağlamıştır.

Şekil 86-c'de, test sonrası temizlenmemiş bilye uçlarında, özellikle R1 ve R2 numuneleri ile yapılan temaslarda, daha fazla oksit ve aşınma partikülü birikimi tespit edilmiştir. Bu birikim, yüzeydeki kaplamanın yetersizliği ve taban malzemenin açığa çıkmasıyla ilişkilidir. Buna karşın R3 ve R4 numuneleriyle yapılan testlerde, bilye uçlarında daha az partikül birikimi gözlemlenmiştir.

Şekil 86-d'de ise sürtünme testinden sonra temizlenmiş bilye uçlarının mikroskop görüntüleri sunulmuştur. Bu görüntülerde, R3 ve R4 numuneleri ile temas eden bilye uçlarının daha düzgün bir yüzeye sahip olduğu ve minimum düzeyde aşınma izleri taşıdığı açıkça görülmektedir. R1 ve R2'ye ait bilyelerde ise yüzey aşınması daha belirgin ve dağınık partikül izleri daha fazladır bunun nedeninse bilye ile PEO/TiN kaplama arasındaki aşınma çok fazla olmuştur.

Numunelerin sürtünme katsayıları karşılaştırıldığında, SP+PEO (Şekil 85) işlemi uygulanmış numuneler ile dubleks kaplama (PEO/TiN) uygulanmış numuneler arasında aşınma direnci bakımından belirgin bir fark gözlemlenmiştir. Dubleks kaplama uygulanan numuneler, özellikle R3 ve R4 örneklerinde, aşınma izleri açısından dikkat çekici bir performans sergilemiştir. Bu numunelerdeki aşınma izleri incelendiğinde, taban malzemenin dahi görünmediği, yani aşınmanın kaplama tabakasını bile tamamen aşmadığı görülmektedir. Bu durum, dubleks kaplamanın yüzeyi hem fiziksel olarak koruduğunu hem de mekanik aşınmaya karşı yüksek direnç sağladığını açıkça ortaya koymaktadır.

Çizik (Scratch) Testi Sonuçları

Al 7075 numunelerinin dört farklı bilyeli dövme parametresi ve ardından dört farklı PEO/TiN dubleks kaplama sentezine bağlı çizik testi sonuçları Şekil 87'de gösterilmektedir.



Şekil 87. Bilyeli dövme işlemi uygulanmış ve daha sonra PEO/TiN (R1-R4) dubleks kaplanmış numunelerin scratch (Çizik) test sonuçları



Şekil87. Bilyeli dövme işlemi uygulanmış ve daha sonra PEO/TiN (R1-R4) dubleks kaplanmış numunelerin scratch (Çizik) test sonuçları (Devamı)

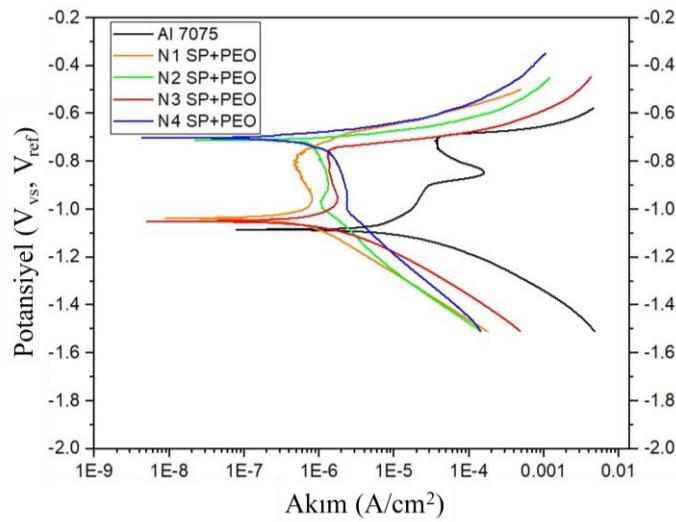
$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiN}$ dubleks kaplamaların çizik testi (scratch test) sonuçları, bu çok katmanlı yapının Al 7075 alaşımı üzerinde yüksek adezyon mukavemeti sağladığını göstermektedir. Kaplamaların kritik yük değerleri yaklaşık 29–37 N aralığında belirlenmiş ve bu değerler, yüzeye uygulanan yük 15 N seviyesine kadar çıktığında herhangi bir yapısal hasarın gözlenmemesiyle desteklenmiştir. Bu durum, $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiN}$ kaplamanın bilyeli dövme uygulanmış yüzeye güçlü bir şekilde bağlandığını/tutunduğunu ve yüksek yüzey dayanımı sağladığını

göstermektedir. Adezif hasarların başladığı kritik yük seviyelerinden sonra, kaplama delaminasyonları tespit edilmiştir. Ancak bu durum, yalnızca yüksek mekanik gerilim altında ve belirli bir yük eşiği aşıldığında meydana gelmiştir. Al_2O_3/TiN gibi dubleks kaplamalarda, her iki katmanın birlikte çalışması adezyon direncine katkı sunar. TiN üst tabakası, iyi bir adezyon katmanı olarak görev görürken, Al_2O_3 ara tabakası, yüksek sertlik ve oksidasyon direnci sağlayarak aşınma performansını iyileştirir. Bununla birlikte, bilyeli dövme işlemi sonrası oluşan yüzey pürüzlülüğü, dubleks kaplamanın taban malzemeye tutunmasını artırmada önemli bir rol oynamaktadır. İşlem sonucunda elde edilen mikro-asperiteler, Al_2O_3/TiN kaplamanın yüzeye daha iyi mekanik kenetlenme ile bağlanmasını kolaylaştırmıştır. Literatürde de belirtildiği gibi, yüksek yüzey pürüzlülüğü, kaplama ile yüzey arasında bağlanma alanını artırarak adezyon mukavemetini önemli ölçüde yükseltebilir (C. Zhang et al., 2019; Wang et al., 2023). Ayrıca, çizik testi sırasında 27 N ile en yüksek adezyon değeri, TiN kaplama aşamasında uygulanan yüksek hedef akım ve uzun görev süresi parametrelerine sahip numunelerde elde edilmiştir. Bu parametrelerin, kaplamanın yoğunluğunu artırarak kusurları azaltması ve kaplamanın daha homojen bir şekilde birikmesini sağlaması, delaminasyona karşı direnci güçlendirmiştir (Bhaduri et al., 2010; Liu et al., 2022). Sonuç olarak, bilyeli dövme ile ön işlem görmüş Al 7075 yüzeyine uygulanan Al_2O_3/TiN dubleks kaplama hem yüksek yüzey sertliği hem de güçlü yapışma özellikleri sergileyerek, bu kaplamanın yüksek aşınma ve mekanik dayanım gerektiren uygulamalarda etkin bir yüzey modifikasyonu yöntemi olduğunu kanıtlamıştır.

Korozyon test sonucu

Bilyeli dövme işleminden sonra PEO yöntemi ile kaplanmış ve SP+Dubleks kaplama işlemi uygulanmış numunelerin korozyon davranışları bu bölümde araştırılmıştır. Numunelerin korozyon davranışları, %3,5 NaCl içeren çözelti ortamında incelenmiştir. Elde edilen potansiyodinamik polarizasyon (PDS) eğrilerinden Tafel ekstrapolasyon yöntemi kullanılarak korozyon potansiyeli (E_{corr}) ve korozyon akım yoğunluğu (I_{corr}) değerleri hesaplanmıştır.

Bilyeli dövme işlemi üzerine PEO kaplama sonrası Al7075 alaşımlarının PDS eğrileri Şekil 88’de verilmiştir, bu eğrilerden elde edilen korozyon parametreleri ise Tablo 13’da sunulmuştur.



Şekil 88. İşlemsiz ve bilyeli dövme işleminden sonra PEO yöntemi ile kaplanmış numunelerin potansiyodinamik polarizasyon eğrileri

Tablo 13. İşlemsiz ve SP+PEO İşlemi Uygulanmış Al 7075 Numunelerin Korozyon Test Sonuçları

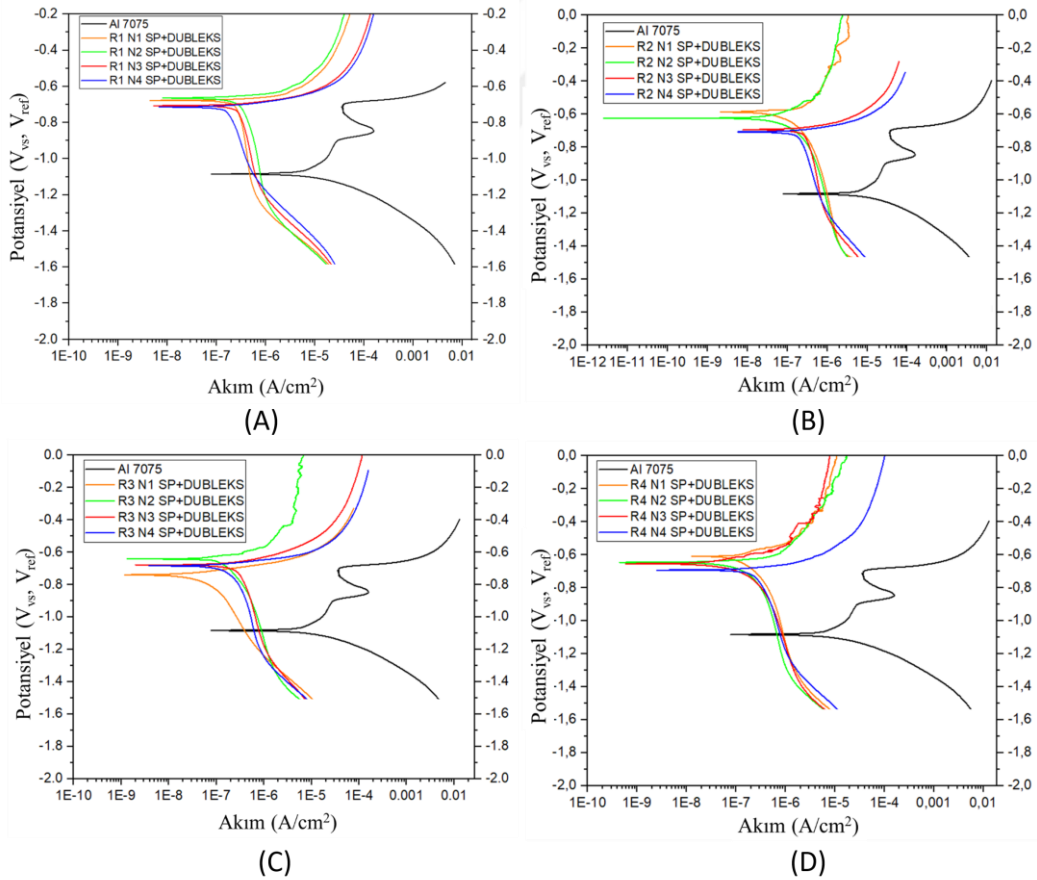
Numune	İşlem	$E_{corr}(mV)$	$I_{corr}(\mu A/cm^2)$
Al 7075		-1087	8269
N1+PEO	SP+ PEO(S110,8A)	-1033	5.173
N2+ PEO	SP+ PEO (S110,10A)	-704.080	6.740
N3+ PEO	SP+ PEO(S230,8A)	-1012	1.052
N4+ PEO	SP+ PEO(S230,10A)	-706.463	1.048

Tablo 13'te göre, bilyeli dövme işleminin ardından PEO yöntemiyle kaplanan Al7075 numunelerde, korozyon davranışında belirgin bir iyileşme gözlemlenmiştir. İşlemsiz referans numunenin I_{corr} değeri $8269 \mu A/cm^2$ iken, PEO uygulanan tüm numunelerde bu değer anlamlı şekilde düşmüştür. Özellikle S230 bilye çapı ile yapılan uygulamalarda (N3+PEO ve N4+PEO), I_{corr} değerlerinin sırasıyla 1.052 ve $1.048 \mu A/cm^2$ gibi oldukça düşük seviyelere inmiş olması dikkat çekicidir. E_{corr} değerlerinin de -1012 mV (N3+PEO) ve -706 mV (N4+PEO) arasında geniş bir aralıkta dağılması, kaplama kalitesinin işlem parametrelerine duyarlılığını ortaya koymaktadır. Buna karşılık, S110 bilye çapı ile yapılan uygulamalarda (N1+PEO ve N2+PEO) I_{corr} değerleri daha yüksek (5.173 ve $6.74 \mu A/cm^2$) olup, nispeten daha düşük bir korozyon direnci sunmuştur.

Bu durum, yüzey morfolojisinin kaplama performansı üzerindeki belirleyici rolünü ortaya koymaktadır. Daha büyük bilye çapı (S230) ile işlem görmüş yüzeylerde, pürüzlülüğün artmasına rağmen PEO kaplamanın bu girintili-çıkıntılı yapıyı doldurarak daha kalın ve geçirimsiz bir tabaka oluşturduğu düşünülmektedir. Bu sonuçlar, PEO kaplamanın özellikle büyük bilye çapı (S230) ile birlikte uygulandığında, Al7075 alaşımının korozyon dayanımını önemli ölçüde artırdığını göstermektedir.

Tablo 11’de yer alan kaplamasız PEO uygulanmamış ancak bilyeli dövme yapılmış numuneler ile karşılaştırıldığında, bu numunelerden N3 ve N4’ün I_{corr} değerleri sırasıyla 26.057 ve 22.12 mA/cm² gibi oldukça yüksek seviyelerdeyken, aynı işlem parametrelerine sahip ve PEO uygulanmış N3+PEO ve N4+PEO numunelerinde bu değerler 1.052 ve 1.048 μ A/cm²’ye kadar düşmüştür. Benzer şekilde, N1 ve N2 numunelerinde de I_{corr} değerleri kaplama sonrası yaklaşık dörtte bir seviyesine gerilemiştir. Bu fark, PEO kaplamanın yüzeyde oluşturduğu seramik karakterli oksit tabakasının, bilyeli dövme sonrası oluşan yüzey bozulmalarını ve mikroçatlakları kapatarak etkin bir bariyer görevi gördüğünü göstermektedir. Böylece, bilyeli dövmenin oluşturduğu mikroyapısal bozulmaların korozyon üzerindeki olumsuz etkileri PEO kaplama ile büyük oranda bastırılmıştır. Bu sonuç, PEO kaplamanın özellikle agresif ortam koşullarında Al7075 alaşımının servis performansını artırmada etkili bir yüzey koruma yöntemi olduğunu göstermektedir.

Şekil 89 ve Tablo 14’de, PEO üzerine PVD yöntemi kullanılarak dört farklı deney tasarımı ile SP+Dubleks kaplamaların (R1–R4) PDS eğrileri ve bu eğrilerden hesaplanan korozyon parametreleri sunulmuştur.



Şekil 89. İşlemsiz ve SP+Dubleks kaplama işlemi uygulanmış Al 7075 numunelerin potansiyodinamik polarizasyon eğrileri, **a)** R1-SP+Dubleks kaplama, **b)** R2-SP+Dubleks kaplama, **c)** R3-SP+Dubleks kaplama, **d)** R4-SP+Dubleks kaplama

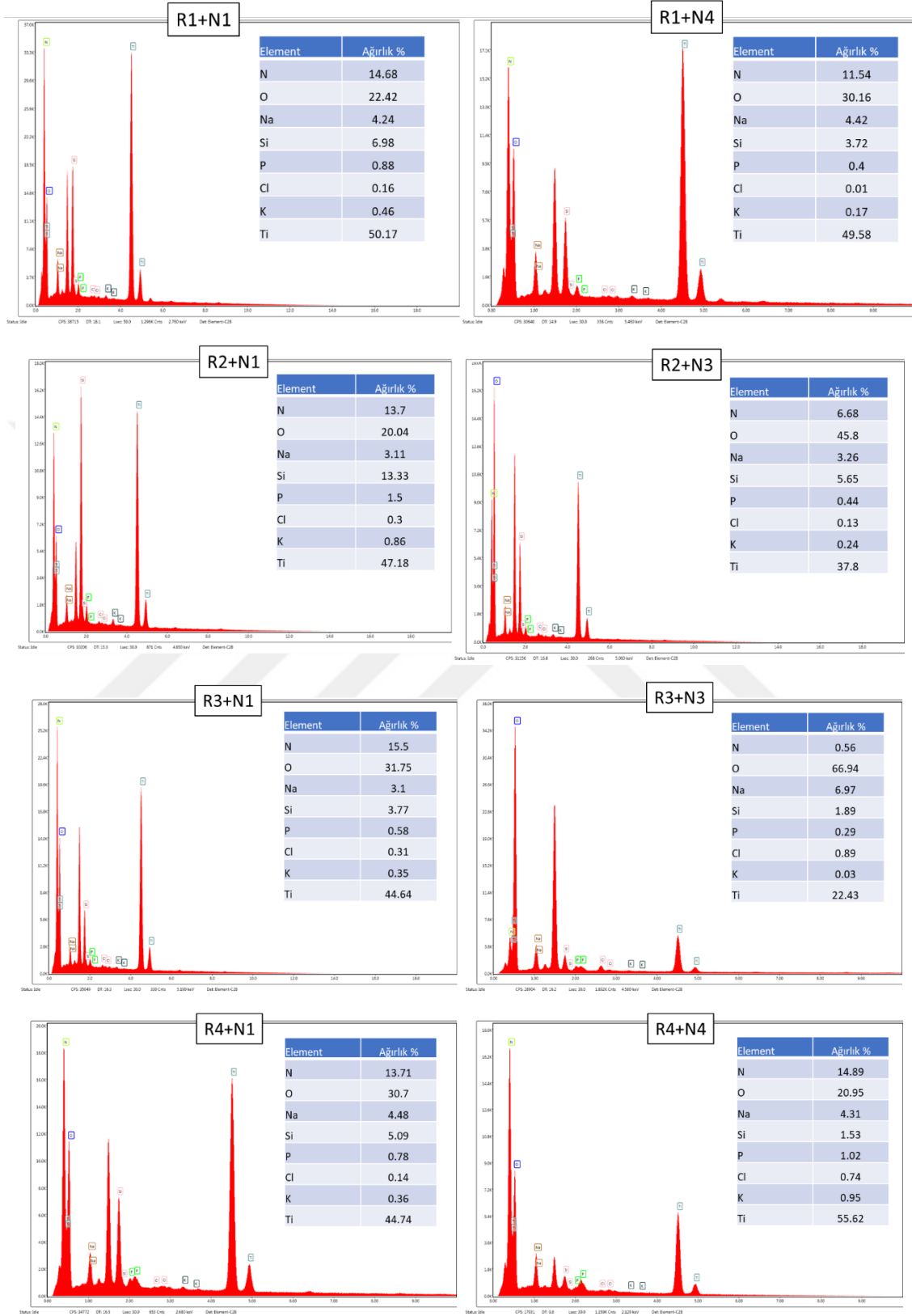
Tablo 14. İşlemsiz ve SP+Dubleks Kaplama İşlemi Uygulanmış Al 7075 Numunelerin Korozyon Test Sonuçları

Numune	İşlem	Ecorr(mV)	Icorr($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)
Al 7075		-1083	8269
N1+R1	SP+Dubleks(S110,8A)	-683.798	2.067
N2+R1	SP+Dubleks(S110,10A)	-666.471	2.54
N3+R1	SP+Dubleks(S230,8A)	-716.742	2.385
N4+R1	SP+Dubleks(S230,10A)	-618.372	2.728
N1+R2	SP+Dubleks(S110,8A)	-608.804	0.559
N2+R2	SP+Dubleks(S110,10A)	-622.436	0.759
N3+R2	SP+Dubleks(S230,8A)	-694.523	2.595
N4+R2	SP+Dubleks(S230,10A)	-712.382	2.555
N1+R3	SP+Dubleks(S110,8A)	-739.905	4.68E-08
N2+R3	SP+Dubleks(S110,10A)	-647.31	0.267
N3+R3	SP+Dubleks(S230,8A)	-684.059	1.854
N4+R3	SP+Dubleks(S230,10A)	-713.558	1.834
N1+R4	SP+Dubleks(S110,8A)	-609.324	0.598
N2+R4	SP+Dubleks(S110,10A)	-649.911	0.932
N3+R4	SP+Dubleks(S230,8A)	-660.921	1.589
N4+R4	SP+Dubleks(S230,10A)	-696.224	1.769

Tablo 14'e göre, bilyeli dövme sonrası PEO işlemi uygulanmış yüzeylere TiN PVD kaplama da ilave edilerek elde edilen dubleks kaplamalar, Al7075 alaşımının korozyon direncini belirgin şekilde iyileştirmiştir. Tüm dubleks kaplamalı numunelerde Icorr değerleri $2.7 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 'nin altında kalmış, bazı örneklerde bu değer $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 'nin altına inmiştir. Özellikle N1+R3 (S110, 8A) numunesi, neredeyse sıfıra yakın Icorr değeri ($4.68\text{E}-08 \mu\text{A}/\text{cm}^2$) ile önemli bir korozyon direnci göstermiştir. Bunu N2+R3 ($0.267 \mu\text{A}/\text{cm}^2$) ve N1+R2 ($0.559 \mu\text{A}/\text{cm}^2$) takip etmektedir. Ecorr değerleri de referans numuneye göre oldukça pozitif yönde kayma göstermiştir (örneğin -608 mV ile N1+R2), bu da yüzeyin pasif karakter kazandığını göstermektedir. Deney tasarımları arasında özellikle R2 ve R3 grupları öne çıkmakta, bu parametre kombinasyonlarının PEO + PVD kaplamayla birlikte daha etkili bir koruyucu yapı oluşturduğu anlaşılmaktadır.

Dubleks kaplamaların yalnızca PEO uygulanmış numunelerle karşılaştırılması ile TiN PVD kaplamanın ek koruyucu etkisini açıkça görülmektedir. Sadece PEO uygulanmış S230 bilyeli numunelerde (N3+PEO ve N4+PEO), Icorr değerleri 1.052 ve $1.048 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ seviyelerindeyken, aynı işlem parametrelerine sahip dubleks numunelerde (örneğin N3+R4 ve N4+R4) bu değerler 1.589 ve $1.769 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ olmuştur. Burada belirgin bir iyileşme olmasa da, S110 bilye ile işlem gören numunelerde TiN kaplama etkisi çok daha net bir şekilde görülmektedir. Örneğin, N1+PEO numunesinde Icorr $5.173 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ iken, aynı işlem görmüş dubleks kaplamalı N1+R2 ve N1+R4 numunelerinde bu değer sırasıyla 0.559 ve 0.598

$\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 'ye kadar düşmüştür. Bu büyük fark, PVD kaplamanın, PEO sonrası yüzeyin gözenekli yapısını kapatarak elektrolit geçişini ciddi şekilde engellediğini göstermektedir.



Şekil 90. SP+Dubleks kaplama işlemi uygulanmış Al 7075 numunelerin EDS elemental analiz sonuçları

Şekil 90'e göre R1 parametresi ile kaplanan numuneler EDS verilerine göre, N1+R1 numunesinde %50,17 Ti ve %14,68 N bulunmuştur. Bu değerler, yüzeyde yüksek oranda TiN fazının oluştuğunu göstermektedir. Aynı zamanda %22,42 oranında O elementi bulunması, PEO ile oluşturulan Al₂O₃ matrisinin kaplama yüzeyinde korunduğunu ve PVD ile kaplanan TiN filmin bu yapıyla bütünleştiğini göstermektedir. N1+R1 numunesinin Icorr değeri 2.067 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ iken, bu değer N4+R1 için 2.728 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 'dir. Bu artış, N4+R1 numunesinde EDS ile tespit edilen daha düşük N içeriği (%11.54) ve daha yüksek O içeriği (%30.16) ile ilişkilendirilebilir. Bu durum, R1 parametresinde N4 numunesinin TiN kaplamasında süreksizlik ya da zayıf nitrürleşme olduğunu düşündürmektedir. R2 parametresi ile kaplanan numuneler, N1+R2 numunesinde %47,18 Ti ve %13,7 N içeriği ile oldukça dengeli ve yoğun bir TiN kaplaması tespit edilmiştir. Ayrıca Si oranının (%13,33) yüksek olması, PEO sırasında oluşan Al₂O₃ kaplamanın yapısal katkısını göstermektedir. Bu kombinasyon, N1+R2 numunesinde oldukça düşük bir Icorr değeri (0.559 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$) ile yüksek korozyon direncine katkıda bulunmuştur. Buna karşılık, N3+R2 numunesinde %6,68 N ve %37,8 Ti içerikleri daha zayıf bir TiN oluşumuna işaret etmekte ve bu numunede Icorr değeri 2.595 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 'ye yükselmektedir. Bu fark, özellikle dövme parametrelerinin kaplama sonrası yapının kalitesi üzerindeki etkisini göstermektedir. R3 parametresi ile en kalın TiN kaplaması ile kaplanan numunelerde (en kalın kaplama), N1+R3 numunesi, %44,64 Ti ve %15,5 N oranı ile yüksek kalitede bir TiN kaplamaya sahip olup, ayrıca O (%31,75) ve Si (%3,77) oranları ile PEO kaynaklı katkıların varlığını sürdürdüğü görülmektedir. Bu numune, 4.86 nA (4.68E-08 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$) ile en düşük Icorr değerine sahiptir ve mükemmel korozyon direnci sergilemektedir. Buna karşın N3+R3 numunesinde Ti (%22,43) ve N (%0,56) oranları oldukça düşüktür; buna paralel olarak O oranı %66,94 seviyesindedir. Bu, PVD kaplamasının yetersiz olduğunu, yüzeyde esas olarak PEO katmanının kaldığını ve kaplamanın yeterli TiN yapısı oluşturmadığını göstermektedir. Bu numunenin Icorr değeri 1.854 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ olup, R3 parametresine rağmen düşük performans sergilemiştir. R4 parametresiyle kaplanan N1+R4 ve N4+R4 numunelerinde sırasıyla %44,74 ve %55,62 oranlarında Ti tespit edilmiştir. N oranlarının da %13,71 ve %14,89 düzeylerinde olması, R4 parametresinin güçlü bir TiN yapısı oluşturduğunu göstermektedir. Bu yapıların Icorr değerleri de düşük seviyelerdedir (N1+R4: 0.598 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$, N4+R4: 1.769 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$), ancak R3 kadar etkili değildir.

Özetle, dubleks kaplama ile elde edilen yapı; hem PEO'nun oluşturduğu seramik karakterli bariyerin hem de TiN kaplamanın kompakt ve yoğun tabakasının birleşimiyle, Al7075 alaşımı için optimum korozyon koruması sağlamaktadır. Bu etki, özellikle düşük pürüzlülüğe sahip S110 numunelerde daha belirgin hale gelmiştir. Özellikle R3 parametresi ile uygulanan kalın TiN kaplamanın, PEO tabakasının gözeneklerini fiziksel olarak kapatarak

yüzeyi daha kompakt hale getirdiği, S110 bilye çapı ve 8A Almen şiddeti ile birlikte uygulandığında (N1+R3) ise korozyon akım yoğunluğunu dūřürerek ($4.68 \times 10^{-8} \mu\text{A}/\text{cm}^2$) maksimum koruma sağladığı gözlemlenmiştir.



SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, Al 7075 tabanlı malzeme yüzeylerine, S110 ve S230 olmak üzere iki farklı bilye çapı ile 8A ve 10A Almen şiddetlerinde bilyeli dövme işlemi uygulanmıştır. Ardından, Taguchi ortogonal dizisine göre belirlenen farklı kaplama parametreleri kullanılarak, bilyeli dövme işlemine tabi tutulmuş numunelere kapalı alan dengesiz magnetron sıçratma tekniği (CFUBMS) ile TiN ve PEO ile CFUBMS yöntemleri kullanarak Al_2O_3/TiN tabakası büyütülmüştür. Elde edilen numunelerin yapısal, mekanik, tribolojik ve korozyon özellikleri araştırılmış ve aşağıda özetlenen temel sonuçlara ulaşılmıştır

1. Bilyeli dövme (Shot Peening) (SP) işlemi;

- ✓ Bilyeli dövme (Shot Peening) işlemi sonrasında elde edilen mikrosertlik değerlerinde, işlem uygulanmamış Al7075 numunelere kıyasla belirgin ve önemli bir artış gözlemlenmiştir. Bu artışın temel nedeni, yüzeye uygulanan tekrarlı bilye çarpışmaları sonucu meydana gelen plastik deformasyon sonucu oluşan deformasyon sertleşmesi ve artık gerilmeler olarak açıklanabilir. Uygulanan farklı bilye çapları (S110 ve S230) ve Almen şiddetleri (8A ve 10A) arasında yapılan karşılaştırmalar sonucunda, özellikle S230 bilye çapı ve 10A Almen şiddeti ile gerçekleştirilen bilyeli dövme işlemi (N4 numune), yüzeyde daha derin etki ve yoğun deformasyon oluşturarak en yüksek mikrosertlik değerine ulaşmıştır (yaklaşık 366 HV). Bu sonuç, daha büyük çaplı bilyelerin daha geniş temas yüzeyi ve daha fazla kinetik enerji transferi nedeniyle yüzeye daha fazla plastik şekil değiştirme enerjisi aktardığını ortaya koymaktadır.
- ✓ Bilyeli dövme (SP) işlemi sonrasında gerçekleştirilen optik mikroskop ve profilometre analizleri, yüzeyde plastik deformasyona bağlı olarak mikro girinti ve çıkıntıların oluştuğunu, dolayısıyla yüzey topografyasının düzensiz bir hâl aldığını göstermiştir. Bilyeli dövme işlemi, yüzey pürüzlülüğünde anlamlı bir artış sağlamış olup, bu artışın şiddeti kullanılan bilye çapı ve Almen şiddetine bağlı olarak değişmiştir. S110 bilyesi ile yapılan işlemlerde yüzey deformasyonu daha sınırlı ve pürüzlülük daha düşük seviyelerde gerçekleşmişken, S230 bilyesi ile yapılan işlemlerde yüzeyde daha derin çukurlar ve daha karmaşık bir yapı oluşmuş, buna bağlı olarak pürüzlülük değerleri daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.
- ✓ Bilyeli dövme (SP) işlemi uygulanan Al7075 numunelerinde yapılan XRD analizleri, yüzeyde ve yüzey altı bölgelerde belirgin mikroyapısal değişimler olduğunu göstermiştir. İşlemsiz numunelere kıyasla, bilyeli dövme sonrası

difraksiyon piklerinde genişlemeler ve kırınım açılarında kaymalar tespit edilmiştir. Bu değişimler, yüksek iç gerilmeler, tane boyutu küçülmesi ve dislokasyon yoğunluğunun arttığını işaret etmektedir. XRD verileri, bilyeli dövme ile tane boyutunun küçüldüğünü, bu sayede sertlik ve tribolojik performansın arttığını ortaya koymuştur. Ayrıca, pik kaymaları kristal kafes yapısında elastik deformasyon ve kalıcı iç gerilmelerin geliştiğini göstermiştir. Bu kaymalar özellikle (111) ve (200) düzlemlerinde belirginleşmiş, yüzeydeki gerilim dağılımının değiştiğini desteklemiştir.

- ✓ Bilyeli dövme (SP) işlemi sonrasında Al7075 alaşımı yüzeyinde oluşan plastik deformasyon tabakası, yüzeyde daha sıkı, yoğun ve homojen bir mikro yapı meydana getirerek sertlik artışı ve yük taşıma kapasitesinde iyileşme sağlamıştır. Yapılan Pin-on-Disk testleri, Bilyeli dövme uygulanmış numunelerde, işlemsiz numunelere göre daha dar, yüzeysel ve düzenli aşınma izleri oluştuğunu göstermiştir. Bilyeli dövme işlemi ile artan dislokasyon yoğunluğu ve tane küçülmesi, plastik deformasyon kapasitesini sınırlamış ve aşınma direncini artırmıştır. Özellikle S230 bilye çapı ve 10A Almen şiddeti ile işlem gören N4 numunesi, en yüksek deformasyon derinliğini ve en düşük hacimsel aşınma oranını göstermiştir. Aşınma sonrası yüzey analizlerinde, Bilyeli dövme uygulanmış numunelerde aşınma kalıntılarının daha az olduğu ve yüzey bütünlüğünün daha iyi korunduğu belirlenmiştir.
- ✓ Bilyeli dövme (SP) işlemi uygulanan Al7075 numunelerinin korozyon davranışı, işlemsiz numuneye kıyasla olumsuz etkilenmiştir. Yapılan testlerde, işlemsiz numunede $E_{corr} = -1.083$ V ve $I_{corr} = 8.269$ mA/cm² değerleri elde edilirken, Bilyeli dövme işlemi uygulanan numunelerde E_{corr} değerleri daha pozitif, ancak I_{corr} değerleri belirgin şekilde daha yüksek bulunmuştur. Özellikle S230 bilyesi ve 8A Almen şiddeti ile işlem gören N3 numunesi, 26.057 mA/cm² I_{corr} değeriyle en düşük korozyon direncini göstermiştir. Bu durum, bilyeli dövme ile yüzeyde oluşan mikro çukurların ve düzensiz topografyanın elektrolit penetrasyonunu artırarak korozyon hızını yükselttiğini göstermektedir. Sonuç olarak, bilyeli dövme işlemi yüzeyde mekanik özellikleri iyileştirirken, artan pürüzlülük nedeniyle korozyon direncini olumsuz etkilemiştir.

2. SP + PVD (TiN) yüzey kaplaması;

- ✓ Bilyeli dövme işlemi sonrası Al7075 alaşımı yüzeyinde oluşan girinti-çıkıntı yapısı, yüzey morfolojisinde belirgin düzensizlikler ve mikro çukurlar meydana getirmiştir. TiN kaplama uygulaması, bu düzensiz topografya üzerinde daha

kompakt ve nispeten homojen bir yüzey oluşturmuş; mikro çukurları kısmen doldurarak yüzeyi daha dengeli hâle getirmiştir. Ancak, bilyeli dövme kaynaklı deformasyon izleri tamamen giderilememiş, yüzeyde yerel düzensizlikler devam etmiştir. Yüzey pürüzlülüğü ölçümlerine göre, bilyeli dövme sonrası artan Ra değerleri (4.34–12.22 μm), TiN kaplama sonrası 3.1–10.6 μm aralığına düşerek pürüzlülükte anlamlı bir azalma sağlamıştır. Bu sonuçlar, kaplamanın yüzeydeki düzensizlikleri kısmen iyileştirdiğini ancak tam bir düzleşme sağlamadığını göstermektedir.

- ✓ Bilyeli dövme (SP) işlemi sonrasında gerçekleştirilen PVD ile TiN kaplama işlemi, yüzeydeki mekanik avantajı daha da geliştirerek yüksek sertlikte nitrür esaslı bir seramik film kazandırmıştır. PVD yöntemiyle oluşturulan kolonlu ve yoğun mikro yapıya sahip TiN kaplama, aşınma ve plastik deformasyona karşı üstün direnç göstermiş ve yüzey altındaki SP kaynaklı deformasyon yapısı ile bütünleşerek mekanik dayanımı güçlendirmiştir. SP + PVD uygulanan numunelerde, elde edilen sertlik değerleri işlemsiz yüzeylere kıyasla belirgin şekilde artmış; özellikle R3 parametreleri ile kaplanan numunelerde sertlik 832 HV seviyesine ulaşmıştır. Sertlikteki bu çarpıcı artış, hem TiN kaplamanın yüksek sertliğe sahip olmasından hem de bilyeli dövme işlemiyle oluşturulan yoğun ve sıkı mikro yapının, kaplamanın yük taşıma kapasitesine önemli katkı sağlamasından kaynaklanmaktadır.
- ✓ Bilyeli dövme işlemi uygulanmış yüzeylerde CFUBMS yöntemi ile elde edilen TiN filmler, homojen, yoğun ve kolonlu mikro yapıya sahip ince tabakalardan oluşmuştur. Bu işlemin Al7075 alaşımının yüzey özellikleri üzerinde önemli iyileşmelerin sağladığı belirlenmiştir. SEM analizleri, özellikle R3 parametresinde kolonlar arası boşlukların en aza indirildiğini ve film yoğunluğunun maksimuma ulaştığını göstermiştir. R3 kaplama parametresiyle oluşturulan TiN filminin, ortalama kaplama kalınlığı ~395 nm ve ideal bir kompozisyona sahip olduğu belirlenmiştir ve bu kompozisyonun yüzey mekanik özelliklerine doğrudan katkı sağladığı tespit edilmiştir.
- ✓ XRD analizleri sonucunda, Bilyeli dövme işlemi uygulanmış ve ardından CFUBMS yöntemiyle TiN kaplaması yapılmış Al7075 numunelerde, TiN kaplamaya özgü kristal fazlara ait piklerin belirgin şekilde tespit edilmiştir. Özellikle (111), (200) ve (220) düzlemlerine karşılık gelen difraksiyon pikleri, TiN kaplamanın kristalin yapıda oluştuğunu açıkça göstermektedir. Bu kristal düzlemler, kübik yapıya sahip TiN'in tipik kırınım düzlemleridir ve kaplama

işleminin başarılı şekilde gerçekleştiğinin doğrudan bir göstergesidir. Ayrıca bu piklerin yüksek yoğunluklu, net ve keskin biçimde gözlemlenmesi, kaplamanın yüksek kristallik oranına ve yoğun bir film yapısına sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

- ✓ Scratch testleri sonucunda elde edilen veriler, R3 parametre ile gerçekleştirilen TiN kaplamada, kritik yük (Lc) değeri 27 N olarak ölçülmüştür. Bu değer, PVD yöntemiyle oluşturulan TiN filmin, bilyeli dövme (SP) işlemi sonrası oluşan yüzey topografyasına yüksek düzeyde mekanik adezyon sağladığını göstermektedir. 27 N gibi yüksek bir Lc değeri, özellikle PVD ile uygulanan seramik kaplamalar için son derece olumlu bir sonuç olup, bilyeli dövme işleminin sadece yüzey sertliğine değil, kaplama-kararlılığına da doğrudan katkı sunduğunu göstermektedir. Ayrıca bu sonuç, bilyeli dövme işleminden sonra PVD kaplama uygulanmasının, ara yüzey bağ kuvvetini artırarak kaplamanın maruz kalacağı tribolojik karşısında daha dayanıklı kalmasını sağladığını doğrulamaktadır.
- ✓ Tribolojik testler, SP + PVD (TiN) yüzey işlem kombinasyonunun Al7075 alaşımının aşınma davranışında belirgin bir iyileşme sağladığını göstermiştir. Bu işlem, hem yüzeyin mekanik bütünlüğünü artırmış hem de sürtünme altındaki temas performansını optimize etmiştir. SP + TiN kaplanmış numunelerde, bilyeli dövme işlemi uygulanmış numunelere göre daha düşük aşınma hacmi, daha düzgün aşınma izleri ve daha stabil aşınma davranışları gözlemlenmiştir. TiN kaplama, yüksek sertliğiyle aşınmaya karşı direnci artırmış ve yüzeydeki mikrokopma, mikroçatlak ve bozulma gibi hasarları sınırlamıştır. SP + TiN numunelerinde ortalama sürtünme katsayısı 0.18 olarak bulunmuş, bu değer işlem görmemiş ve sadece bilyeli dövme uygulanmış numunelere göre anlamlı şekilde daha düşük olmuştur. Bu sayede, bilyeli dövme sonrası oluşan pürüzlü yapı, TiN kaplama ile düzeltilerek yüzeyin kayganlık ve aşınma direnci artırılmıştır.
- ✓ Korozyon test sonucunda, Al7075 numunesinde ölçülen Icorr değeri 8269 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ve Ecorr değeri -1.087 V olarak kaydedilmiş olup, bu değerler alaşımın korozi ortamda oldukça düşük dayanım gösterdiğini açıkça ortaya koymaktadır. Buna karşın, SP+PVD uygulanan numunelerde Icorr değerleri 1.024–3.982 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ aralığına kadar gerilemiş; Ecorr değerleri ise -1.062 V ile -1.023 V aralığında ölçülerek daha pozitif değerlere kaymıştır. Özellikle R3 parametresinde kaplanan numuneler, en düşük korozyon akım yoğunluklarına

ulaşmıştır. Bu bağlamda, N2+R3 numunesi (S110-10A + PVD-R3) için $I_{corr} = 1.024 \mu A/cm^2$ ve $E_{corr} = -1.064 V$ değerleri elde edilmiş, bu da yüzeyin daha stabil ve inert bir karakter kazandığını ortaya koymuştur. Bu üstün performans, R3 parametresi ile elde edilen TiN filmin yoğun, gözeneksiz ve yapısal bütünlüğü yüksek bir morfolojiye sahip olmasından kaynaklanmaktadır. R3 altında uygulanan kaplama, hem bilyeli dövme ile oluşturulan sıkı mikro yapı ile uyum sağlamış hem de elektrolit penetrasyonuna karşı etkili bir koruyucu yüzey oluşturmuştur.

3. SP+ PEO yüzey işlemi;

- ✓ SEM analizleri, PEO ile kaplanmış yüzeyin karakteristik olarak gözenekli, yapılardan oluştuğunu ve düzensiz morfolojiler sergilediğini ortaya koymuştur ve bu durum kaplama parametreleriyle değiştiği gözlenmiştir. Bu yapılar tabakanın korozyon direncini sınırlayabilmektedir. Ancak, sonraki TiN kaplamalar yüzeye tutulmasında önemli avantajlar sunmaktadır. Tabakanın yüzeyinde amorf ve kristalin fazlar birlikte yer almakta; $\gamma-Al_2O_3$ ve $\alpha-Al_2O_3$ gibi fazların varlığı XRD analizleriyle tespit edilmiştir.
- ✓ Plazma Elektrolitik Oksidasyon (PEO) işlemi sonucunda, Al7075 alaşımı üzerinde oluşan yüzeyin morfolojisinde belirgin bir değişim gözlemlenmiştir. Bilyeli dövme işlemine kıyasla, PEO işlemi ile elde edilen yüzeyler daha homojen ve karakteristik mikrogözenekli yapıya sahip bir form kazanmıştır. Yapılan yüzey pürüzlülüğü analizleri sonucunda, PEO uygulanan numunelerde ortalama R_a değerlerinin $2.1-4.1 \mu m$ aralığında değiştiği belirlenmiş; bu değerler, PEO işleminin oluşturduğu seramik oksit tabakanın yüzeyde dalgalı ancak düzenli bir yapıyla yayıldığını göstermektedir.
- ✓ PEO işlemi sonucunda, Al7075 alaşımı yüzeyinde oluşan Al_2O_3 esaslı seramik tabaka, yüksek sertlik değerleriyle dikkat çekmiştir. PEO işlemi sırasında oluşan yerel plazma deşarjları ve yüksek sıcaklık etkisiyle, yüzeyde hem kristalin hem de amorf fazların karışımından oluşan bir seramik tabaka meydana gelmiştir. Yapılan mikrosertlik testleri, bu tabakanın $1530-1573 HV$ aralığında sertlik değerlerine sahip olduğunu ortaya koymuş, bu da alaşımın doğal sertlik düzeyine kıyasla önemli bir artış anlamına gelmektedir.
- ✓ Pin-on-disk testleri sonucunda, SP + PEO işlemine tabi tutulan Al7075 numunelerin hem yalnızca SP uygulanmış numunelere hem de işlemsiz referans numunelere kıyasla daha düşük aşınma hacmi ve daha stabil sürtünme davranışı sergilediği belirlenmiştir. Bilyeli dövme işlemi ile yüzeyde oluşturulan plastik

deformasyon ve artan sertlik aşınma direncini artırırken, üzerine entegre edilen Al_2O_3 esaslı PEO tabakası (~1530–1573 HV sertlik), yüzeye ilave koruma sağlamış ve temas sırasında oluşabilecek mikropplastik deformasyonları sınırlamıştır. Bu yapı sayesinde aşınma izleri daha dar, yüzeysel ve düzgün kalmış, yüzeyin tribolojik yükler altında yapısal kararlılığını koruduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, SP + PEO işlemine tabi tutulan numunelerde sürtünme katsayısı (CoF) daha düşük ve daha kararlı bir seyir izlemiş, yüzeydeki sert ve gözenekli yapı, mikro kilitlenmeleri azaltarak daha kontrollü bir sürtünme mekanizması oluşturmuştur.

- ✓ PEO kaplı numunelerde gerçekleştirilen potansiyodinamik polarizasyon testleri, işlemsiz numunelere kıyasla ciddi bir korozyon direnç ortaya koymuştur. Özellikle SP+PEO örneklerinde korozyon akım yoğunluğu ($I_{corr} \approx 1.048 \mu A/cm^2$) seviyelerine düşmüş; bu, işlemsiz numunelere göre önemli oranda bir iyileşme anlamına gelmektedir. Ancak, tabakanın gözenekli yapısı nedeniyle PEO işlemi tek başına yeterli koruma sağlayamamış, fakat dubleks yapıda uygulanacak TiN kaplamaya yönelik etkili bir ara yüzey olarak değerlendirilmiştir.

4. SP+ PEO/TiN (Dubleks) İşlemi;

- ✓ PEO işlemi sonrası mikrogözenekli yapıya sahip yüzeye TiN kaplama işlemi sayesinde gözenekler kısmen doldurarak daha kompakt bir yapı oluşturmuştur. SEM ve EDS analizleri, TiN tabakasının Al_2O_3 matrise güçlü şekilde entegre olduğunu ve gözenekleri doldurarak karalı bir bariyer dubleks tabakası oluştuğu gözlenmiştir. Ortalama yüzey pürüzlülüğü, PEO/TiN sonrası $Ra \approx 1.2 - 3.6 \mu m$ seviyesine kadar düşmüştür.
- ✓ Bilyeli dövme (SP) işlemi sonrası oluşturulan PEO ara tabakasının üzerine CFUBMS yöntemiyle uygulanan TiN ince film kaplama, yüzeyde yüksek mekanik dayanım ve mükemmel bir seramik-metal arayüzü sağlamıştır. SP + PEO + TiN kombinasyonuna sahip dubleks kaplamalı numunelerde, sertlik değeri 3122 HV seviyesine ulaşmış ve bu değer, işlemsiz, yalnızca SP veya SP + PEO uygulanan numunelere kıyasla önemli bir mekanik iyileşmeyi temsil etmiştir. Elde edilen bu yüksek sertlik, çok katmanlı yapının sinerjik etkisinden kaynaklanmaktadır. SP işlemi ile yüzeyde plastik deformasyon ve sıkı mikroyapı oluşturulurken, PEO işlemi seramik karakterli sert bir ara tabaka kazandırmış; TiN kaplama ise aşınmaya dayanıklı, sert ve tribolojik olarak stabil bir dış yüzey

sağlamıştır. Bu yapı, yüzeyin yük taşıma kapasitesini artırmış ve dış mekanik etkilere karşı üstün direnç kazandırmıştır.

- ✓ Bilyeli dövme (SP), Plazma Elektrolitik Oksidasyon (PEO) ve PVD-TiN kaplama işlem dizisinden oluşan dubleks yüzey modifikasyonu, malzemenin tribolojik performansını önemli ölçüde iyileştirmiştir. Pin-on-disk testlerinde, özellikle R3 ve R4 parametreleriyle elde edilen dubleks kaplamalı numunelerde sürtünme katsayısı düşük ve kararlı, aşınma izleri ise sığ ve düzgün olmuştur. Bu numunelerde, kaplama tabakası aşınma sırasında etkin bir bariyer görevi görmüş ve taban malzeme açığa çıkmamıştır. Ayrıca, R3 ve R4 numunelerindeki daha kalın ve homojen TiN kaplamalar, aşınmaya karşı daha iyi koruma sağlamış ve karşı yüzeyle etkileşimleri sınırlamıştır. Mikroskobik incelemeler, R1 ve R2 numunelerine kıyasla daha düşük partikül birikimi ve daha az yüzey hasarı göstermiştir.
- ✓ XRD analizinde SP+PEO/TiN kaplamasında TiN'in karakteristik piki olan (111), (200), (220) ve (311) düzlemlerindeki net pikler, kaplamanın yüksek kristaliteye sahip olduğunu doğrulamıştır. Özellikle (111) pikinin belirginleşmesi, TiN kaplamanın tercihli yönlenme gösterdiğini işaret etmektedir. Sonuçlar, PEO tabakasının sağladığı düşük yüzey pürüzlülüğü ve bilyeli dövme işleminin oluşturduğu mikro gerilme alanlarının, TiN kaplamanın adhezyonunu ve kristal yapısını optimize ettiğini ortaya koymaktadır.
- ✓ Çizik testi sonuçları, Al_2O_3 /TiN dubleks kaplamaların Al 7075 alaşımında yüksek adezyon mukavemeti sağladığını göstermektedir. Kaplamaların kritik yük değerleri 29–37 N arasında belirlenmiş, 15 N seviyesine kadar yapısal hasar gözlemlenmemiştir. Bu, kaplamanın bilyeli dövme uygulanmış yüzeye güçlü bir şekilde bağlandığını ve yüksek yüzey dayanımı sağladığını gösterir. Kritik yük sonrası delaminasyonlar tespit edilmiş ancak yalnızca yüksek mekanik gerilim altında ve belirli bir yük eşiği aşıldığında meydana gelmiştir. TiN üst katmanı iyi bir adezyon sağlarken, Al_2O_3 ara katmanı aşınma direncini artırmaktadır. Bilyeli dövme işlemi sonrası yüzey pürüzlülüğü, kaplamanın taban malzemeye tutunmasını artırmıştır. Sonuçlar, Al_2O_3 /TiN dubleks kaplamaların yüksek aşınma ve mekanik dayanım gerektiren uygulamalarda etkili bir yüzey modifikasyonu olduğunu ortaya koymaktadır.
- ✓ Bilyeli dövme sonrası PEO işlemi uygulanarak elde edilen Al7075 yüzeylerine TiN PVD kaplama ilavesi, korozyon direncini belirgin şekilde iyileştirmiştir. Dubleks kaplamaların Icorr değerleri $2.7 \mu A/cm^2$ 'nin altına inmiş, bazı

numunelerde bu değer $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 'nin altına düşmüştür. Özellikle N1+R3 numunesi, $4.68 \times 10^{-8} \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ile önemli korozyon direnci sergilemiştir. SP+PEO/TiN kaplama ile Icorr değerlerinde belirgin bir iyileşme gözlemlenmiş, TiN kaplamanın elektrolit geçişini engelleyerek yüzeyin pasifleşmesini sağladığı görülmüştür. EDS analizleri, kaplama yüzeyinde yüksek oranda TiN fazı bulunduğunu, PEO ile oluşturulan Al_2O_3 kaplama yüzeyinde korunduğunu göstermektedir. R2 ve R3 parametre kombinasyonlarının, TiN kaplamanın koruyucu yapısını güçlendirdiği ve korozyon direncini arttırdığı belirlenmiştir. Sonuçlar, TiN PVD kaplamanın, PEO işlemi sonrası yüzeye eklenen önemli bir koruyucu etki sunduğunu ve Al7075 alaşımının korozyon direncini iyileştirdiğini ortaya koymaktadır.

Tüm sonuçlar değerlendirildiğinde, Öncelikle bilyeli dövme işlemi ile yüzeyde artık gerilmeleri oluşturulmuş ve tane boyutu küçültülmüş, dislokasyon yoğunluğu artırılmış ve bu sayede yüzey sertliği ve aşınma direnci yükseltilmiştir. Ardından uygulanan PEO işlemiyle yüzeyde mikrogözenekli seramik karakterli Al_2O_3 ara tabakası elde edilmiş, bu yapı hem kaplamaya sertlik kazandırmış hem de TiN için bağlanmayı kolaylaştıran pürüzlü bir yüzey sunmuştur. Son aşamada CFUBMS yöntemiyle yüksek saflıkta ve kolonlu morfolojiye sahip TiN ince film tabakası başarıyla uygulanmış; bu sayede yüzeyde yüksek sertlik ($\sim 3122 \text{ HV}$), düşük sürtünme katsayısı (~ 0.18) ve üstün korozyon dayanımı ($\text{Icorr} = 4.68 \times 10^{-8} \mu\text{A}/\text{cm}^2$) sağlanmıştır. Tek başına SP+PVD uygulamasında aşınma ve sertlik açısından olumlu sonuçlar elde edilmiş olsa da, uzun vadeli korozyon dayanımı dubleks yapının gerisinde kalmıştır. bunun sonucunda SP+PEO/TiN işlem dizisi, her katmanın fonksiyonel katkısını optimize ederek, özellikle agresif çevresel koşullarda kullanılabilecek, yüksek performanslı ve çok amaçlı bir yüzey tasarımı ortaya koymuştur. Elde edilen bulgular, Al7075 alaşımının havacılık, otomotiv ve denizcilik gibi sektörlerde daha güvenilir, dayanıklı ve uzun ömürlü kullanımını mümkün kılan yeni nesil yüzey mühendisliği çözümlerine bilimsel bir temel sağlamaktadır.

Öneriler

Bu çalışmada elde edilen bulgular ışığında aşağıdaki öneriler geliştirilmiştir:

- ✓ **PEO ve TiN Kaplama Parametrelerinin Daha Detaylı Optimizasyonu;** R2 ve R3 parametreleri etkili sonuçlar vermiş olsa da, Ti hedef akımı ve N_2 gaz akış oranının daha hassas kontrol edildiği, daha fazla deneysel grup içeren detaylı optimizasyon çalışmaları yapılabilir.

- ✓ **PEO Ara Tabakasının Modifikasyonu;** PEO ile oluşturulan Al_2O_3 tabakasının içine farklı katkı fazlarının (örneğin SiC, ZrO_2 , MgO) entegre edilerek elde edilen tabakanın daha geçirimsiz, daha sert ve daha stabil hale getirilmesi üzerine yeni çalışmalar yapılabilir.
- ✓ **Farklı Kaplama Kombinasyonları;** Sadece TiN yerine, TiAlN, CrN veya DLC (Diamond-Like Carbon) gibi alternatif üst katman kaplamaların da denenmesi ve dubleks yapılarla karşılaştırmalı analizlerinin yapılması, kaplama teknolojilerinin genişletilmesi açısından faydalı olacaktır.
- ✓ **Kaplama Kalınlığının Artırılması;** CFUBMS yöntemi ile oluşturulan TiN kaplamaların kalınlığı artırılarak yüzeyin korozyona karşı koruyuculuğu ve aşınma dayanımı daha da geliştirilebilir. Bu bağlamda, hedef-substrat mesafesi, kaplama süresi ve güç parametreleri üzerinde sistematik çalışmalar yapılmalıdır.
- ✓ **Kaplamalı Numunelerin Yüksek Sıcaklık Altında Davranışı;** Özellikle havacılık ve otomotiv sektörlerinde önem arz eden yüksek sıcaklık koşullarında (400–600 °C) TiN ve dubleks kaplamaların oksidasyon, termal şok ve sürtünme özelliklerinin incelenmesi tavsiye edilir.

KAYNAKÇA

- Alshareef, A. J., Marinescu, I. D., Basudan, I. M., Alqahtani, B. M., & Tharwan, M. Y. (2020). Ball-burnishing factors affecting residual stress of AISI 8620 steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 107, 1387–1397.
- Amanov, A., Cho, I. S., Pyoun, Y. S., Lee, C.-S., & Park, I. G. (2012). Micro-dimpled surface by ultrasonic nanocrystal surface modification and its tribological effects. *Wear*, 286, 136–144. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2011.06.001>
- Anonymous. (2018). *Physical vapour deposition (PVD)*. The Open University.
- Anonymous. (2020). wear types. Oerlikon Balzers. <https://www.oerlikon.com/balzers/tr/tr/infopoint/press-releases/technical-articles/extending-the-life-of-precision-components/>
- Anonymous. (2021). *Intergranular Corrosion*. Steel Fabrication Services. <https://steelfabservices.com.au/intergranular-corrosion/>
- Anonymous. (2022). *Pitting Corrosion*. AMARINE-BLOG. <https://amarineblog.com/2020/11/02/what-is-pitting-mechanism-and-prevention/>
- Anonymous. (2023). *Adhesion tests*. Substech. https://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=adhesion_tests
- Anonymous. (2024). *Galvanic Corrosion*. KDM Fabrication. <https://kdmfab.com/galvanic-corrosion/>
- Arnell, R. D., & Kelly, P. J. (1999). Recent advances in magnetron sputtering. *Surface and Coatings Technology*, 112(1–3), 170–176.
- Bagheri, S., & Guagliano, M. (2009). Review of shot peening processes to obtain nanocrystalline surfaces in metal alloys. *Surface Engineering*, 25(1), 3–14. <https://doi.org/10.1179/026708408X334087>
- Bagherifard, S., & Guagliano, M. (2012). Fatigue behavior of a low-alloy steel with nanostructured surface obtained by severe shot peening. *Engineering Fracture Mechanics*, 81, 56–68.
- Bailey, D. M., & Sayles, R. S. (1991). *Effect of roughness and sliding friction on contact stresses*.
- Balyalı, H. A. (2015). *Metalik Malzemelerin Bilyalı Dövme Uygulaması Sonrası Tribolojik Davranışının DeneySEL Olarak İncelenmesi* [Yüksek Lisans Tezi]. İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Bao, L., Li, K., Zheng, J., Zhang, Y., Zhan, K., Yang, Z., Zhao, B., & Ji, V. (2022). Surface characteristics and stress corrosion behavior of AA 7075-T6 aluminum alloys after different shot peening processes. *Surface and Coatings Technology*, 440, 128481. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.128481>
- Baptista, A., Silva, F., Porteiro, J., Míguez, J., & Pinto, G. (2018). Sputtering physical vapour deposition (PVD) coatings: A critical review on process improvement and market trend demands. *Coatings*, 8(11), 402.
- Başer, T. A. (2012). Alüminyum Alaşımları ve Otomotiv Endüstrisinde Kullanımı. *Mühendis ve Makina Dergisi*, 53(635), 51–58.
- Bayazid, S. M., Farhangi, H., Asgharzadeh, H., Radan, L., Ghahramani, A., & Mirhaji, A. (2016). Effect of cyclic solution treatment on microstructure and mechanical properties of friction stir welded 7075 Al alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 649, 293–300.

- Bell, T., Dong, H., & Sun, Y. (1998). Realising the potential of duplex surface engineering. *Tribology International*, 31(1–3), 127–137.
- Bell, T., Morton, P. H., & Bloyce, A. (1994). Towards the design of dynamically loaded titanium engineering components. *Materials Science and Engineering: A*, 184(2), 73–86.
- Bell, T., & Sun, Y. (1990). Load bearing capacity of plasma nitrided steel under rolling–sliding contact. *Surface Engineering*, 6(2), 133–139.
- Bement, T. R. (1989). *Taguchi techniques for quality engineering*. Taylor & Francis.
- Bhaduri, D., Ghosh, A., Gangopadhyay, S., & Paul, S. (2010). Effect of target frequency, bias voltage and bias frequency on microstructure and mechanical properties of pulsed DC CFUBM sputtered TiN coating. *Surface and Coatings Technology*, 204(21–22), 3684–3697. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2010.04.047>
- Bhushan, B. (2000). *Modern tribology handbook, two volume set*. CRC press.
- Bhushan, B., & Gupta, B. K. (1991). *Handbook of tribology: materials, coatings, and surface treatments*.
- Bozkurt, M., & Demirer, A. (2023). AA5754 Alüminyum Alaşımının Bilyeli Dövme Prosesi ile Mekanik Özelliklere Etkisi ve Dövme Üzerine Cr+ 6 Kaplamanın Korozyon Özelliklerine Bakış. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Uluslararası Mühendislik Teknolojileri ve Uygulamalı Bilimler Dergisi*, 6(2), 118–131. <https://doi.org/10.53448/akuumbd.1295992>
- Brooks, R. E. (2016). An introduction to shot peening for increasing gear fatigue life. *Gear Solut Mag*.
- Cho, I.-S., Amanov, A., Kwak, D.-H., Jeong, B.-J., & Park, I.-G. (2015). The influence of surface modification techniques on fretting wear of Al–Si alloy prepared by gravity die casting. *Materials & Design* (1980-2015), 65, 401–409. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.09.036>
- Çomaklı, O. (2021). Improved structural, mechanical, corrosion and tribocorrosion properties of Ti45Nb alloys by TiN, TiAlN monolayers, and TiAlN/TiN multilayer ceramic films. *Ceramics International*, 47(3), 4149–4156.
- Cui, X.-J., Ping, J., Zhang, Y.-J., Jin, Y.-Z., & Zhang, G.-A. (2017). Structure and properties of newly designed MAO/TiN coating on AZ31B Mg alloy. *Surface and Coatings Technology*, 328, 319–325.
- Da Silva, L. F. M., Öchsner, A., & Adams, R. D. (2011). *Handbook of adhesion technology*. Springer Science & Business Media.
- Davis, J. R. (1993). *Aluminum and aluminum alloys*. ASM international.
- Davis, J. R. (2000). *Corrosion: Understanding the basics*. Asm International.
- Demirci, E. E. (2014). *Manyetik Sıçratma (Cfubms) ve Mikro Ark Oksidasyon (MAO) Teknikleri ile Ti6Al4v Alaşımının Dupleks Yüzey Modifikasyonu* [Doktora Tezi]. Atatürk Üniversitesi.
- Deyab, M. A., Abd El-Rehim, S. S., Hassan, H. H., & Shaltot, A. M. (2020). Impact of rare earth compounds on corrosion of aluminum alloy (AA6061) in the marine water environment. *Journal of Alloys and Compounds*, 820, 153428.
- Ding, J., Zhang, T., Mei, H., Yun, J. M., Jeong, S. H., Wang, Q., & Kim, K. H. (2017). Effects of negative bias voltage and ratio of nitrogen and argon on the structure and properties of NbN coatings deposited by HiPIMS deposition system. *Coatings*, 8(1), 10.

- Döleker, K. M. (2015). *Bilyalı Dövme İşleminin Termal Bariyer Kaplamaların Oksidasyon Davranışı Üzerine Etkisi*. [Yüksek Lisans Tezi]. Bartın Üniversitesi.
- Duan, Z., Li, C., Zhang, Y., Yang, M., Gao, T., Liu, X., Li, R., Said, Z., Debnath, S., & Sharma, S. (2023). Mechanical behavior and semiempirical force model of aerospace aluminum alloy milling using nano biological lubricant. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 18(1), 4. <https://doi.org/10.1007/s11465-022-0720-4>
- Duret-Thual, C. (2014). Understanding corrosion: basic principles. *Understanding Biocorrosion: Fundamentals and Applications*, 3–32.
- Ebnesajjad, S., & Ebnesajjad, C. (2013). *Surface treatment of materials for adhesive bonding*. William Andrew.
- Efe, Y., Karademir, I., Husem, F., Maleki, E., Karimbaev, R., Amanov, A., & Unal, O. (2020). Enhancement in microstructural and mechanical performance of AA7075 aluminum alloy via severe shot peening and ultrasonic nanocrystal surface modification. *Applied Surface Science*, 528, 146922. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.146922>
- El-Awadi, G. A. (2023). Review of effective techniques for surface engineering material modification for a variety of applications. *AIMS Materials Science*, 10(4), 652–692.
- Farooq, S. A., Raina, A., Ul Haq, M. I., & Anand, A. (2022). Corrosion behaviour of engineering materials: a review of mitigation methodologies for different environments. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series D*, 103(2), 639–661.
- Fernández-López, P., Alves, S. A., San-Jose, J. T., Gutierrez-Berasategui, E., & Bayón, R. (2024). Plasma Electrolytic Oxidation (PEO) as a Promising Technology for the Development of High-Performance Coatings on Cast Al-Si Alloys: A Review. *Coatings*, 14(2), 217. <https://doi.org/10.3390/coatings14020217>
- Ferrasse, S., Hartwig, K. T., Goforth, R. E., & Segal, V. M. (1997). Microstructure and properties of copper and aluminum alloy 3003 heavily worked by equal channel angular extrusion. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 28, 1047–1057.
- Friedrich, H. E., & Mordike, B. L. (2006). Technology of magnesium and magnesium alloys. *Magnesium Technology: Metallurgy, Design Data, Applications*, 219–430.
- Frija, M., Hassine, T., Fathallah, R., Bouraoui, C., Dogui, A., & de Génie Mécanique, L. (2006). Finite element modelling of shot peening process: Prediction of the compressive residual stresses, the plastic deformations and the surface integrity. *Materials Science and Engineering: A*, 426(1–2), 173–180. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.03.097>
- Fu, Y., Wei, J., Yan, B., & Loh, N. L. (2000). Characterization and tribological evaluation of duplex treatment by depositing carbon nitride films on plasma nitrided Ti-6Al-4V. *Journal of Materials Science*, 35, 2215–2227.
- Gali, O. A., Shafiei, M., Hunter, J. A., & Riahi, A. R. (2014). The tribological behavior of PVD coated work roll surfaces during rolling of aluminum. *Surface and Coatings Technology*, 260, 230–238.
- Ganesh, B. K. C., Sha, W., Ramanaiah, N., & Krishnaiah, A. (2014). Effect of shotpeening on sliding wear and tensile behavior of titanium implant alloys. *Materials & Design (1980-2015)*, 56, 480–486.
- Gao, Y., Jie, M., & Liu, Y. (2017). Mechanical properties of Al₂O₃ ceramic coatings prepared by plasma spraying on magnesium alloy. *Surface and Coatings Technology*, 315, 214–219.
- Gariépy, A., Larose, S., Perron, C., Bocher, P., & Lévesque, M. (2013). On the effect of the orientation of sheet rolling direction in shot peen forming. *Journal of Materials Processing Technology*, 213(6), 926–938.

- Gencer, Y., Tarakçı, M., Cengiz, S., & Alkan, S. (2010). *5052 Al Alaşımının Mikroark Oksidasyon Tekniği İle Kaplanması Ve Karakterizasyonu*.
- Glocker, D. A., Shah, S. I., & Morgan, C. A. (1995). *Handbook of thin film process technology* (Vol. 2). Institute of Physics Bristol, UK.
- Gopi, R., Saravanan, I., Devaraju, A., & Loganathan, G. Babu. (2020). Investigation of shot peening process on stainless steel and its effects for tribological applications. *Materials Today: Proceedings*, 22, 580–584. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.08.215>
- Guan, F., Duan, J., Zhai, X., Wang, N., Zhang, J., Lu, D., & Hou, B. (2020). Interaction between sulfate-reducing bacteria and aluminum alloys—Corrosion mechanisms of 5052 and Al-Zn-In-Cd aluminum alloys. *Journal of Materials Science & Technology*, 36, 55–64.
- Gudmundsson, J. T., & Lundin, D. (2020). Introduction to magnetron sputtering. In *High power impulse magnetron sputtering* (pp. 1–48). Elsevier.
- Gulten, G., Yaylali, B., Efeoglu, I., Totik, Y., Kelly, P., & Kulczyk-Malecka, J. (2024). Effect of Nb and V doped elements on the mechanical and tribological properties of CrYN coatings. *Surface and Coatings Technology*, 477, 130297. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2023.130297>
- Hassani-Gangaraj, S. M., Moridi, A., Guagliano, M., Ghidini, A., & Boniardi, M. (2014). The effect of nitriding, severe shot peening and their combination on the fatigue behavior and micro-structure of a low-alloy steel. *International Journal of Fatigue*, 62, 67–76.
- Hill, E. J. (1981). Air Blast Power Units for Shot Peening Applications. *First International Conference on Shot Peening*, 115–120.
- Huang, H., Niu, J., Xing, X., Lin, Q., Chen, H., & Qiao, Y. (2022). Effects of the shot peening process on corrosion resistance of aluminum alloy: A Review. *Coatings*, 12(5), 629.
- Huda, Z., Taib, N. I., & Zaharinie, T. (2009). Characterization of 2024-T3: An aerospace aluminum alloy. *Materials Chemistry and Physics*, 113(2–3), 515–517.
- Jiang, Y., Ding, J., Yin, X., Yan, J., Yang, L., Zhu, S., Zeng, R., Lu, C., Yin, A., & Xian, X. (2021). The influence of U-Nb substrate roughness on the service performance of Ti/TiN multilayer coatings. *Surface and Coatings Technology*, 405, 126571. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126571>
- Jin, Y., Cai, P., Wen, W., Nagaumi, H., Xu, B., Zhang, Y., & Zhai, T. (2015). The anisotropy of fatigue crack nucleation in an AA7075 T651 Al alloy plate. *Materials Science and Engineering: A*, 622, 7–15.
- Kaestner, P., Olfe, J., He, J.-W., & Rie, K.-T. (2001). Improvement in the load-bearing capacity and adhesion of TiC coatings on TiAl6V4 by duplex treatment. *Surface and Coatings Technology*, 142, 928–933.
- Karahan, B., & İnce, U. (2015). Bilya püskürtmenin (Shot Peening) teknik-teknolojideki yolculuğu ve soğuk dövme prosesine adaptasyonu. *Derin Ekim*, 74–90.
- Karkimya. (2023). *Taber Aşındırıcısı*. <https://www.karkimya.com.tr/tr/urunler/surtunme-ovalama-dayanimi/taber-asindiricisi-rotary-abraser>
- Kato, K., & Adachi, K. (2000). Wear mechanisms. In *Modern tribology handbook: volume one: principles of tribology* (pp. 273–300). CRC press.
- Kelly, P. J., & Arnell, R. D. (2000). Magnetron sputtering: a review of recent developments and applications. *Vacuum*, 56(3), 159–172.

- Kessler, O., Surm, H., Hoffmann, F., & Mayr, P. (2002). Enhancing surface hardness of titanium alloy Ti-6Al-4V by combined nitriding and CVD coating. *Surface Engineering*, 18(4), 299–304.
- Kinard, J., Melody, B., & Lessner, P. (1998). *Electrolyte for anodizing valve metals* (Patent 5935408).
- King, A., Steuwer, A., Woodward, C., & Withers, P. J. (2006). Effects of fatigue and fretting on residual stresses introduced by laser shock peening. *Materials Science and Engineering: A*, 435, 12–18.
- Kirk, D. (1999). Shot Peening. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 17(4).
- Kores, S., Strmšek, S., Vončina, M., & Medved, J. (2023). Innovative Approaches in Development of Aluminium Alloys for Packaging Industry. *TMS Annual Meeting & Exhibition*, 535–541.
- Langford, J. Il, & Wilson, A. J. C. (1978). Scherrer after sixty years: a survey and some new results in the determination of crystallite size. *Journal of Applied Crystallography*, 11(2), 102–113. <https://doi.org/10.1107/S0021889878012844>
- Lee, L.-H. (2013). *Fundamentals of adhesion*. Springer Science & Business Media.
- Li, J., & Zhao, Y. (2012). Biocompatibility and antibacterial performance of titanium by surface treatment. *Journal of Coatings Technology and Research*, 9, 223–228.
- Li, Y., Liu, X., Wang, F., Du, C., Zhou, W., Yu, Z., & Ren, X. (2023). The effect of ultrasonic shot peening on micro-arc oxidation results of Ti-6Al-4V alloy. *Materials Today Communications*, 37, 107557.
- Li, Y., Shang, X., Zhai, M., Yu, L., Wang, L., & Zhao, S. (2022). Surface characteristics and microstructure evolution of a nickel-base single crystal superalloy treated by ultrasonic shot peening. *Journal of Alloys and Compounds*, 919, 165761. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.165761>
- Liu, Y., Ding, J. C., Zhang, B. R., Chen, J. J., Tang, C. R., Zhu, R. Y., & Zheng, J. (2022). Effect of duty cycle on microstructure and mechanical properties of AlCrN coatings deposited by HiPIMS. *Vacuum*, 205, 111409. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2022.111409>
- Lu, S.-Q., Chiu, L.-H., Chang, P.-J., & Lin, C.-K. (2024). Effects of Shot Peening Pressure, Time, and Material on the Properties of Carburized Steel Shafts. *Materials*, 17(16), 4124. <https://doi.org/10.3390/ma17164124>
- Mahabunphachai, S., & Koç, M. (2010). Investigations on forming of aluminum 5052 and 6061 sheet alloys at warm temperatures. *Materials & Design (1980-2015)*, 31(5), 2422–2434.
- Maity, P., Majumdar, S., Karmakar, A., Sinha, A., & Das, A. (2024). An investigation on laser machining of 7075 T6 aluminium alloy and effect of thermal treatment on its mechanical property. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series D*, 1–16.
- Maleki, E., Bagherifard, S., Astaraee, A. H., Sgarbazzini, S., Bandini, M., & Guagliano, M. (2023). Application of gradient severe shot peening as a novel mechanical surface treatment on fatigue behavior of additively manufactured AlSi10Mg. *Materials Science and Engineering: A*, 881, 145397.
- Marshall, S. J., Bayne, S. C., Baier, R., Tomsia, A. P., & Marshall, G. W. (2010). A review of adhesion science. *Dental Materials*, 26(2), e11–e16.
- Marteau, J., Bigerelle, M., Mazeran, P.-E., & Bouvier, S. (2015). Relation between roughness and processing conditions of AISI 316L stainless steel treated by ultrasonic shot peening. *Tribology International*, 82, 319–329.

- Mattox, D. M. (2010). *Handbook of physical vapor deposition (PVD) processing*. William Andrew.
- Miao, H. Y., Demers, D., Larose, S., Perron, C., & Lévesque, M. (2010). Experimental study of shot peening and stress peen forming. *Journal of Materials Processing Technology*, 210(15), 2089–2102.
- Miletić, A., Terek, P., Kovačević, L., Vilotić, M., Kakaš, D., Škorić, B., & Kukuruzović, D. (2014). Influence of substrate roughness on adhesion of TiN coatings. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 36, 293–299. <https://doi.org/10.1007/s40430-013-0102-2>
- Monaghan, D., & Arnell, R. D. (1992). Novel PVD films by unbalanced magnetron sputtering. *Vacuum*, 43(1–2), 77–81.
- Montgomery, D. C. (2017). *Design and analysis of experiments*. John Wiley & sons.
- Morshed, A., Wu, H., & Jiang, Z. (2021). A comprehensive review of water-based nanolubricants. *Lubricants*, 9(9), 89.
- Narayanan, T. S. N. S., Park, I. S., & Lee, M. H. (2014). Strategies to improve the corrosion resistance of microarc oxidation (MAO) coated magnesium alloys for degradable implants: Prospects and challenges. *Progress in Materials Science*, 60, 1–71.
- Nie, X., Leyland, A., Song, H. W., Yerokhin, A. L., Dowey, S. J., & Matthews, A. (1999). Thickness effects on the mechanical properties of micro-arc discharge oxide coatings on aluminium alloys. *Surface and Coatings Technology*, 116, 1055–1060.
- Oguri, K. (2011). Fatigue life enhancement of aluminum alloy for aircraft by Fine Particle Shot Peening (FPSP). *Journal of Materials Processing Technology*, 211(8), 1395–1399. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2011.03.011>
- Oktay, G. (2007). *Katodik Ark Fbb Yöntemi İle Ti6al4v Altlık Malzemesi Üzerine Kaplanmış Magnezyumun Morfolojisine Bias Geriliminin Etkisi*. İstanbul Teknik Üniversitesi .
- Ongrakulkij, G., Khantachawana, A., Kajornchaiyakul, J., & Kondoh, K. (2022). Effects of the secondary shot in the double shot peening process on the residual compressive stress distribution of Ti–6Al–4V. *Heliyon*, 8(1), e08758. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e08758>
- Oskouei, R. H., & Ibrahim, R. N. (2011). Restoring the tensile properties of PVD-TiN coated Al 7075-T6 using a post heat treatment. *Surface and Coatings Technology*, 205(15), 3967–3973.
- Paik, J. K. (2009). Mechanical properties of friction stir welded aluminum alloys 5083 and 5383. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 1(1), 39–49.
- Palacios, M., Bagherifard, S., Guagliano, M., & Fernández Pariente, I. (2014). Influence of severe shot peening on wear behaviour of an aluminium alloy. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 37(7), 821–829.
- Pandey, V., Singh, J. K., Chattopadhyay, K., Srinivas, N. C. S., & Singh, V. (2017). Influence of ultrasonic shot peening on corrosion behavior of 7075 aluminum alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 723, 826–840.
- Papanikos, P., & Meguid, S. A. (1998). Three-dimensional finite element analysis of cold expansion of adjacent holes. *International Journal of Mechanical Sciences*, 40(10), 1019–1028.

- Pasha, B. A. M., & Mohamed, K. (2017). Taguchi approach to influence of processing parameters on erosive wear behaviour of Al7034-T6 composites. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 27(10), 2163–2171.
- Pasinli, A., & Köksal, N. S. (2004). Alüminyum kaplanan çelik malzemelerde yüzey özelliklerinin incelenmesi. *Mühendis ve Makina Dergisi*, 536, 42–45.
- Prakash, N. A., Gnanamoorthy, R., & Kamaraj, M. (2012). Surface nanocrystallization of aluminium alloy by controlled ball impact technique. *Surface and Coatings Technology*, 210, 78–89. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.08.069>
- Rao, Y., Wang, Q., Oka, D., & Ramachandran, C. S. (2020). On the PEO treatment of cold sprayed 7075 aluminum alloy and its effects on mechanical, corrosion and dry sliding wear performances thereof. *Surface and Coatings Technology*, 383, 125271. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.125271>
- Rie, K.-T., & Broszeit, E. (1995). Plasma diffusion treatment and duplex treatment—recent development and new applications. *Surface and Coatings Technology*, 76, 425–436.
- Ross, P. J. (1987). *Taguchi Techniques for Quality Engineering*. McGraw-Hill.
- Rubio-González, C., Ocaña, J. L., Gomez-Rosas, G., Molpeceres, C., Paredes, M., Banderas, A., Porro, J., & Morales, M. (2004). Effect of laser shock processing on fatigue crack growth and fracture toughness of 6061-T6 aluminum alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 386(1–2), 291–295.
- Sato, Y. S., Urata, M., & Kokawa, H. (2002). Parameters controlling microstructure and hardness during friction-stir welding of precipitation-hardenable aluminum alloy 6063. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 33, 625–635.
- Schweitzer, P. A. (2009). *Fundamentals of corrosion: Mechanisms, causes, and preventative methods*.
- Shivpuri, R., Cheng, X., & Mao, Y. (2009). Elasto-plastic pseudo-dynamic numerical model for the design of shot peening process parameters. *Materials & Design*, 30(8), 3112–3120.
- Shuai, J., Zuo, X., Wang, Z., Guo, P., Xu, B., Zhou, J., Wang, A., & Ke, P. (2020). Comparative study on crack resistance of TiAlN monolithic and Ti/TiAlN multilayer coatings. *Ceramics International*, 46(5), 6672–6681.
- Srinath, M. K., & Prasad, M. S. G. (2020). Wear and corrosion resistance of titanium carbo-nitride coated Al-7075 produced through PVD. *Bulletin of Materials Science*, 43, 1–11.
- Stachowiak, G. W. (2006). *Wear: materials, mechanisms and practice*.
- Staines, A. M. (1990). Trends in plasma-assisted surface engineering processes. *Heat Treatment of Metals*, 17(4), 85–92.
- Stephens, R. I., Fatemi, A., Stephens, R. R., & Fuchs, H. O. (2000). *Metal fatigue in engineering*. John Wiley & Sons.
- Şüküroğlu, E. E. (2016). Mikro Ark Oksidasyon (MAO) Yöntemi ile Al2014 Alaşımı Üzerine Büyütülmüş Oksit Kaplamanın Adezyon Özelliklerinin İncelenmesi. *Ordu Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 6(2), 232–242.
- Sun, Q., Han, Q., Xu, R., Zhao, K., & Li, J. (2018). Localized corrosion behaviour of AA7150 after ultrasonic shot peening: Corrosion depth vs. impact energy. *Corrosion Science*, 130, 218–230.
- Sun, Y., & Bell, T. (1992). Combined plasma nitriding and PVD treatments. *Transactions of the IMF*, 70(1), 38–44.

- Szkodo, M., Stanisławska, A., Komarov, A., & Bolewski, Ł. (2021). Effect of MAO coatings on cavitation erosion and tribological properties of 5056 and 7075 aluminum alloys. *Wear*, 474, 203709. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.203709>
- Taguchi, G., Taguchi, G., & Jugulum, R. (2002). *The Mahalanobis-Taguchi strategy: A pattern technology system*. John Wiley & Sons.
- Takagi, M., Ohta, H., Imura, T., Kawamura, Y., & Inoue, A. (2001). Wear properties of nanocrystalline aluminum alloys and their composites. *Scripta Materialia*, 44(8–9), 2145–2148. [https://doi.org/10.1016/S1359-6462\(01\)00766-7](https://doi.org/10.1016/S1359-6462(01)00766-7)
- Thornton, J. A. (1986). The microstructure of sputter-deposited coatings. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 4(6), 3059–3065.
- Treglio, J. R., Trujillo, S., & Perry, A. J. (1993). Deposition of TiB₂ at low temperature with low residual stress by a vacuum arc plasma source. *Surface and Coatings Technology*, 61(1–3), 315–319.
- Trško, L., Bokůvka, O., Nový, F., & Guagliano, M. (2014). Effect of severe shot peening on ultra-high-cycle fatigue of a low-alloy steel. *Materials & Design*, 57, 103–113.
- Unal, O. (2016). Optimization of shot peening parameters by response surface methodology. *Surface and Coatings Technology*, 305, 99–109.
- Unal, O., Maleki, E., Karademir, I., Husem, F., Efe, Y., & Das, T. (2022). Effects of conventional shot peening, severe shot peening, re-shot peening and precised grinding operations on fatigue performance of AISI 1050 railway axle steel. *International Journal of Fatigue*, 155, 106613. <https://doi.org/10.1016/J.IJFATIGUE.2021.106613>
- Van Stappen, M., Kerkhofs, M., Quaeyhaegens, C., & Stals, L. (1993). Introduction in industry of a duplex treatment consisting of plasma nitriding and PVD deposition of TiN. *Surface and Coatings Technology*, 62(1–3), 655–661.
- Vargel, C. (2020). *Corrosion of aluminium*. Elsevier.
- Vázquez, J., Navarro, C., & Domínguez, J. (2012). Experimental results in fretting fatigue with shot and laser peened Al 7075-T651 specimens. *International Journal of Fatigue*, 40, 143–153.
- Wagner, L. (2003). *Shot peening*. John Wiley & Sons.
- Wang, X., Pang, K., Huang, X., Yang, J., Ye, J., & Hou, X. (2023). Insights into the micromechanical response of adhesive joint with stochastic surface micro-roughness. *Engineering Fracture Mechanics*, 277, 108954. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2022.108954>
- Wheeler, J. M., Collier, C. A., Paillard, J. M., & Curran, J. A. (2010). Evaluation of micromechanical behaviour of plasma electrolytic oxidation (PEO) coatings on Ti–6Al–4V. *Surface and Coatings Technology*, 204(21–22), 3399–3409.
- Whinney, C. D. (1979). What you have always wanted to know about shot peening. *Society of Manufacturing Engineers*, 8.
- Wu, G., Wang, Y., Gong, Q., Li, L., & Wu, X. (2022). An intelligent temperature control algorithm of molecular beam epitaxy system based on the back-propagation neural network. *Ieee Access*, 10, 9848–9855.
- Wu, J., Liu, H., Wei, P., Lin, Q., & Zhou, S. (2020). Effect of shot peening coverage on residual stress and surface roughness of 18CrNiMo7-6 steel. *International Journal of Mechanical Sciences*, 183, 105785. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2020.105785>

- Wu, J., Liu, H., Wei, P., Zhu, C., & Lin, Q. (2020). Effect of shot peening coverage on hardness, residual stress and surface morphology of carburized rollers. *Surface and Coatings Technology*, 384, 125273.
- Xie, L., Jiang, C., & Lu, W. (2013). The influence of shot peening on the surface properties of (TiB+ TiC)/Ti-6Al-4V. *Applied Surface Science*, 280, 981–988.
- Xie, Z., Shu, C., Fu, Y., Zhou, J., & Chen, D. (2023). Balanced loss function for accurate surface defect segmentation. *Applied Sciences*, 13(2), 826.
- Yalçınkaya, A. (2019). *Bilyalı dövme prosesi uygulanan tank palet pimlerinin yorulma analizi* [Yüksek Lisans Tezi]. Milli Savunma Üniversitesi.
- Yasumaru, N., Tsuchida, K., Saji, E., & Ibe, T. (1993). Mechanical properties of type 304 austenitic stainless steel coated with titanium nitride after ion-nitriding. *Materials Transactions, JIM*, 34(8), 696–702.
- Yerokhin, A. L., Snizhko, L. O., Gurevina, N. L., Leyland, A., Pilkington, A., & Matthews, A. (2004). Spatial characteristics of discharge phenomena in plasma electrolytic oxidation of aluminium alloy. *Surface and Coatings Technology*, 177, 779–783.
- Yılmaz, M. S., T.Clare, A., & Şahin, O. (2016). Mikro Ark Oksidasyon (MAO) Prosesinin, Eklemeli Üretim (AM) Metodu ile Uyumluluğunun Araştırılması. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 16, 36–41.
- Zalnezhad, E., Sarhan, A. A. D., & Hamdi, M. (2013). Optimizing the PVD TiN thin film coating's parameters on aerospace AL7075-T6 alloy for higher coating hardness and adhesion with better tribological properties of the coating surface. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 64, 281–290.
- Zeng, D., Xu, T., Liu, W., Lu, L., Zhang, J., & Gong, Y. (2020). Investigation on rolling contact fatigue of railway wheel steel with surface defect. *Wear*, 446, 203207. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2020.203207>
- Zhang, C., Dong, Y., & Ye, C. (2021). Recent developments and novel applications of laser shock peening: a review. *Advanced Engineering Materials*, 23(7), 2001216.
- Zhang, C., Zheng, M., Wang, Y., Gao, P., & Gan, B. (2019). Effect of high energy shot peening on the wear resistance of TiN films on a TA2 surface. *Surface and Coatings Technology*, 378, 124821. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.07.045>
- Zhang, H., Cao, S., Li, C., He, N., & Wang, F. (2023). Revealing the relationship between the shot type and fatigue performance of laser powder bed fused 304L steel following shot peening. *Materials Science and Engineering: A*, 883, 145477.
- Zhang, H., He, Z., & Gao, W. (2023). Effect of surface severe plastic deformation on microstructure and hardness of Al alloy sheet with enhanced precipitation. *Materials Letters*, 333, 133632. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2022.133632>
- Zhang, S., Sun, D., Fu, Y., & Du, H. (2005). *Surface and Coatings Technology. Toughness Measurement of Thin Films: A Critical Review*, 198(1–3), 74–84.
- Zhang, Y., Chen, F., Liu, M., Pang, Y., & Du, C. (2021). Microstructure and corrosion resistance of duplex coatings deposited on TC17 alloys by MAO and HiPIMS. *Materials Letters*, 303, 130506.
- Zhang, Y., Wang, Q., Ramachandran, C. S., Guo, P., & Wang, A. (2022). Microstructure and performance of high-velocity oxygen-fuel coupled physical vapor deposition (HVOF-PVD) duplex protective coatings: a review. *Coatings*, 12(10), 1395.

- Zhao, T., & Jiang, Y. (2008). Fatigue of 7075-T651 aluminum alloy. *International Journal of Fatigue*, 30(5), 834–849.
- Zhou, F., Wang, Y., Liu, F., Meng, Y., & Dai, Z. (2009). Friction and wear properties of duplex MAO/CrN coatings sliding against Si₃N₄ ceramic balls in air, water and oil. *Wear*, 267(9–10), 1581–1588.



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı:	Behzad GHASEMI PARVIN
Doğum tarihi:	
Doğum Yeri:	
Uyruğu:	
Eğitim	
Ön Lisans:	Tabriz Ulusal 2 No'lu Mesleki Yeterlilik Yüksekokulu, Bilgisayar-Yazılımı (2007)
Lisans:	Tabriz Daneshvaran Kar Amacı Gütmeyen Yükseköğretim Kurumu, Bilgisayar Yazılım Teknolojisi Mühendisliği (2011)
Yüksek lisans:	İslami Azad Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği (2014)
Doktora:	Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı (2025)
Yabancı Dil Bilgisi	
İngilizce:	İyi
Farsça:	İyi
Azeriçe:	İyi