



**CFUBMS-HİPİMS TEKNİĞİ KULLANILARAK Ta/TaN
ÇOK TABAKALI KOMPOZİT İNCE FİLM
SENTEZLENMESİ: YAPISAL, MEKANİK VE
TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

Muhammed Alperen POLAT

Yüksek Lisans Tezi

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Prof. Dr. İhsan EFEOĞLU

2023

(Her hakkı saklıdır.)

T.C
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİMDALI

**CFUBMS-HiPIMS TEKNİĞİ KULLANILARAK Ta/TaN ÇOK TABAKALI
KOMPOZİT İNCE FİLM SENTEZLENMESİ: YAPISAL, MEKANİK VE
TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**
(Synthesis of Ta/TaN Multilayer Composite Thin Film Using CFUBMS-HiPIMS Technique:
Investigation of Structural, Mechanical and Tribological Properties)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Muhammed Alperen POLAT

Danışman: Prof. Dr. İhsan EFEOĞLU

Erzurum
Nisan, 2023



FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Graduate School of Natural and
Applied Sciences

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü
TEZ KABUL VE ONAY TUTANAĞI

CFUBMS-HİPIMS TEKNİĞİ KULLANILARAK Ta/TaN ÇOK TABAKALI KOMPOZİT İNCE FİLM SENTEZLENMESİ: YAPISAL, MEKANİK VE TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Prof. Dr. İhsan EFEOĞLU danışmanlığında, Muhammed Alperen POLAT tarafından hazırlanan bu çalışma, 14/04/2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Konstrüksiyon ve İmalat Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak **oybirliği /oy çokluğu (3./3.)** ile kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı:	Prof. Dr. Yaşar TOTİK <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
Danışman:	Prof. Dr. İhsan EFEOĞLU <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
Jüri Üyesi:	Doç. Dr. Ebru Emine DEMİRCİ ŞÜKÜROĞLU <i>Gümüşhane 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. Saltuk Buğrahan CEYHUN

Enstitü Müdürü

Aslı Islak İmzalıdır

ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Yüksek Lisans Tezi olarak *Prof. Dr. İhsan Efeoğlu* danışmanlığında sunulan “ CFUBMS-HİPİMS TEKNİĞİ KULLANILARAK Ta/TaN ÇOK TABAKALI KOMPOZİT İNCE FİLM SENTEZLENMESİ: YAPISAL, MEKANİK VE TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ” 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	2	30
Kuramsal Temeller	4	30
Materyal ve Metot	4	35
Araştırma Bulguları ve Tartışma	0	20
Sonuçlar	4	20
Tezin Geneli	11	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.

Beyan edilen bilgilerin doğru olduğunu, aksi halde doğacak hukuki sorumlulukları kabul ve beyan ederiz.

Tez Yazarı (Öğrenci)	Tez Danışmanı
Muhammed Alperen Polat	Prof. Dr. İhsan Efeoğlu
14.4.2023	14.4.2023
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

Bu alıŐma sũresi boyunca kıymetli bilgi ve tecrũbelerini benimle paylaŐan, her tũrlũ imkũnı sağlayan, çalışma ve mũhendislik disipliniని Ȕğreten değerli danışman hocam Sayın Prof. Dr. İhsan EFEOĞLU'na teŐekkũrlerimi sunarım.

ÇalıŐmalarım sırasında her zaman benden yardım ve bilgisini esirgemedен paylaŐan ve tezimi hazırlamamda yol gȔsteren Sayın ArŐ. GȔr. GȔkhan GũLTEN'e, ArŐ. GȔr. Banu YAYLALI'ya ve Makine Mũhendisliđi BȔlũm Başkanı Sayın Prof. Dr. Yaşar TOTİK baŐta olmak üzere Atatũrk Őniversitesi Makine Mũhendisliđi personellerine teŐekkũrlerimi sunarım.

Bana akademik anlamda yol gȔsteren ve akademi ile erken yaŐlarda tanıŐmama vesile olan her tũrlũ maddi ve manevi imkũnı bana sunan geçtiğimiz yıl kaybettiğim kıymetli babam Prof. Dr. Fazlı POLAT' a ve benden desteklerini esirgemeyen annem Nejla POLAT'a ve kardeŐlerime teŐekkũrlerimi sunarım.

Muhammed Alperen POLAT

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

CFUBMS-HiPIMS TEKNİĞİ KULLANILARAK Ta/TaN ÇOK TABAKALI KOMPOZİT İNCE FİLM SENTEZLENMESİ: YAPISAL, MEKANİK VE TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Muhammed Alperen POLAT

Danışman: Prof. Dr. İhsan EFEOĞLU

Amaç: Bu çalışmada, 52100 çeliği üzerine çok tabakalı Ta/TaN ince filmi CFUBMS-HiPIMS hibrit sistemi ile sentezlenerek, mekanik ve tribolojik özelliklerin iyileştirilmesi amaçlanmıştır.

Yöntem: Bu çalışmada, Kapalı Alan Dengesiz Manyetik Alanda Sıçratma (CFUBMS) ve Yüksek Güç Darbeli Manyetik Alanda Sıçratma (HiPIMS) hibrit sistemi kullanılarak, 52100 taban malzeme yüzeylerine Ta/TaN çok tabakalı kompozit yapıda ince filmler sentezlenmiştir. Sentezlenen Ta/TaN çok tabakalı ince filmlerin yapısal-mekanik ve tribolojik özellikleri incelenmiştir. Yapısal özelliklerin karakterizasyonunda Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM), X-Işını Difraksiyonu (XRD) teknikleri, mekanik özelliklerin analizinde Mikro-sertlik, Çizik testleri ve son olarak tribolojik özelliklerin karakterizasyonunda ise pin-on-disk aşınma testi kullanılmıştır.

Bulgular: CFUBMS+HiPIMS hibrit sistemiyle çok tabakalı Ta/TaN ince filmler başarılı bir şekilde sentezlenmiştir. En yüksek sertlik değeri, 5 sccm N₂ akışı uygulanan R1 (~28 GPa) elde edilmiştir. En yüksek kritik yük değeri, R3 filminde 45 N olarak, en düşük kritik yük değeri ise R1 ince filminde 18N olarak belirlenmiştir. R2 ve R3 filmlerinde ise 40N değerlerine kadar herhangi bir kenar hasarı tespit edilmemiştir. Tribo-test sonuçlarına göre AISI 52100 taban malzemesinin ve Ta/TaN çok tabakalı kompozit yapıdaki ince filmlerin R1, R2 ve R3 için sürtünme katsayısı (CoF) değerleri sırasıyla 0.36, 0.27, 0.13 ve 0.094 olarak ölçülmüştür.

Sonuç: CFUBMS+HiPIMS hibrit sistemiyle çok tabakalı bir şekilde sentezlenen Ta/TaN ince filmleri mekanik ve tribolojik açıdan oldukça umut verici bir kaplama olduğu ortaya konulmuştur.

Anahtar Kelimeler: CFUBMS, HiPIMS, Ta/TaN, Triboloji

Nisan 2023, 58 sayfa

ABSTRACT

MASTER THESIS

SYNTHESIS OF Ta/TaN COATINGS with CFUBMS-HIPIMS TECHNOLOGY and INVESTIGATION OF MECHANICAL-TRIBOLOGICAL PROPERTIES

Muhammed Alperen POLAT

Supervisor: Prof. Dr. İhsan EEFEÖĞLU

Objective: In this study, it was aimed to improve the mechanical and tribological properties by depositing multilayer Ta/TaN thin film on 52100 steel with CFUBMS-HiPIMS hybrid system.

Method: In this study, Ta/TaN multilayer composite thin films were deposited on 52100 substrate substrates by using a hybrid system of Closed Field Unbalanced Magnetic Field Sputtering (CFUBMS) and High Power Pulsed Magnetic Field Sputtering (HiPiMS). The structural-mechanical and tribological properties of the synthesized Ta/TaN multilayer thin films were investigated. Scanning Electron Microscopy (SEM), X-Ray Diffraction (XRD) techniques were used in the characterization of the structural properties, Micro-hardness and Scratch tests were used in the analysis of the mechanical properties, and finally, the pin-on-disc wear test was used in the characterization of the tribological properties.

Results: Multilayer Ta/TaN thin films were successfully synthesised by CFUBMS+HiPIMS hybrid system. The highest hardness value was obtained for R1 (~28 GPa) with 5 sccm N₂ flow. The highest critical load value was 45 N in R3 film and the lowest critical load value was 18 N in R1 thin film. According to the tribo-test results, the coefficient of friction (CoF) values for R1, R2 and R3 of AISI 52100 base material and thin films in Ta/TaN multilayer composite structure were measured as 0.36, 0.27, 0.13 and 0.094, respectively.

Conclusion: Ta/TaN thin films synthesized in a multilayered manner by CFUBMS+HiPIMS hybrid system have been shown to be a very promising coating in terms of mechanical and tribology.

Keywords: CFUBMS, HiPIMS, Ta/TaN, Tribology

April 2023, 58 pages

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONATY 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	x
GİRİŞ.....	1
KURAMSAL TEMELLER.....	4
Sert Kaplamalar	4
Geçiş Metali Nitrür Kaplamalarının Avantajları	7
Yaygın Kullanılan Geçiş Metali Nitrür Kaplamalar	8
Titanyum nitrür kaplamalar	8
Krom nitrür kaplamalar	9
Zirkonyum nitrür kaplamalar	10
Tantal nitrür kaplamalar.....	11
Biriktirme Yöntemleri.....	12
Fiziksel buhar biriktirme yöntemi (PVD).....	13
Manyetik alanda sıçratma tekniği	14
Dengesiz manyetik alanda sıçratma tekniği.....	16
Kapalı alan dengesiz manyetik alanda sıçratma tekniği (CFUBMS)	17
Yüksek güçte darbeli manyetik alan sıçratma (HiPIMS)	19
MATERYAL ve METOD	22
Materyal	22
Kaplama Prosesi	22
Ta/TaN çok tabakalı kompozit yapıda ince filmlerin sentezlenmesi.....	24
Mikroyapısal Özelliklerin Araştırılması	24
Mekanik Özelliklerin Araştırılması	27
Mikrosertlik ölçümleri	27
Scratch (çizik) testi	27
Sürtünme-Aşınma (Triboloji) Özelliklerinin Araştırılması	28
ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA	30
SEM Analiz Sonuçları ve Tartışma	30

XRD Analiz Sonuçları ve Tartışma	31
Mikro Sertlik Testi Sonuçları ve Tartışma.....	33
Çizik (Scratch) Testi Sonuçları ve Tartışma.....	33
Tribo-Test Bulguları ve Tartışma	36
SONUÇLAR ve ÖNERİLER	39
KAYNAKLAR.....	41
ÖZGEÇMİŞ.....	46



TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. AISI 52100 Çeliğinin Kimyasal Kompozisyonu (% wt.).....	22
Tablo 2. Ta/TaN Çok Tabakalı Kompozit Yapıda İnce Film Biriktirme Parametreleri.....	23
Tablo 3. Tribotest Deney Parametreleri.....	28



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Kaplama malzemesi seçiminde önemli kriterler	7
Şekil 2. Yüzey kaplama yöntemlerinin şematik gösterimi.....	13
Şekil 3. Manyetik alanda sıçratma tekniği	15
Şekil 4. Geleneksel ve dengelenmemiş manyetik alanda sıçratma yöntemlerindeki plazma oluşumunun gösterimi	16
Şekil 5. CFUBMS sistemini manyetik alan tasarımının şematik gösterimi	18
Şekil 6. PVD sistemi (Teer Coating Ltd.)	23
Şekil 7. CFUBMS sisteminin şematik gösterimi ve elde edilen filmlerin mikroyapı mimarisi	23
Şekil 8. Optik mikroskop	25
Şekil 9. Profilmetre cihazı	25
Şekil 10. Taramalı elektron mikroskobu	26
Şekil 11. XRD cihazı.....	26
Şekil 12. Mikrosertlik cihazı	27
Şekil 13. CSM çizik test cihazı	28
Şekil 14. CSM yüksek sıcaklık tribotest cihazı.....	29
Şekil 15. Ta/TaN çok tabakalı kompozit yapıda ince filmlerin SEM görüntüleri	30
Şekil 16. Ta/TaN çok tabakalı filmlerden elde edilen EDS sonuçları.....	31
Şekil 17. AISI 52100 ve Ta/TaN çok tabakalı kaplama mimarisinden elde edilen XRD yansıma pikleri.....	32
Şekil 18. AISI 52100 Taban malzeme ve Ta/TaN çok tabakalı kaplamaların sertlik değerleri	33
Şekil 19. R1, R2 ve R3 filmlerinin kritik yük değerleri ve çeşitli yük değerlerinde görülen hasarları	35
Şekil 20. R1 için, a) sürtünme katsayısı (CoF) değeri, b) Al ₂ O ₃ pin de meydana gelen aşınmanın temizlenmiş hali c) Al ₂ O ₃ pin de meydana gelen aşınmanın temizlenmemiş hali ve d) numune yüzeyinde meydana gelen aşınma izi	37

KISALTMALAR ve SİMGELER DİZİNİ

Kısaltmalar

CFUMBS	: Kapalı Alan Dengelenmemiş Manyetik Alanda Sıçratma
CVD	: Kimyasal Buhar Biriktirme
DC	: Doğru Akım
HiPIMS	: Yüksek Güç Darbeli Manyetik Alanda Sıçratma
HK	: Knoop Sertlik Değeri
HV	: Vickers Sertlik Değeri
Lc	: Kritik Yük Değeri
PVD	: Fiziksel Buhar Biriktirme
RF	: Radyo Frekansı
sccm	:Standart kübik santimetre/dakika
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
XRD	: X-Işınları Difraksiyonu

Simgeler

°C	: Santigrat derece
Ar	: Argon
cm	:Santimetre
eV	:Elektrovolt
GPa	: Gigapaskal
N₂	: Azot
Ra	: Yüzey pürüzlülüğü
V	: Volt
W	: Watt
μ	:Sürtünme Katsayısı

GİRİŞ

Relatif hareket halindeki temas eden yüzeylerde meydana gelen sürtünme, aşınma ve yağlama olaylarıyla ilgilen bilim ve teknoloji dalına Triboloji adı verilmektedir. 'Triboloji', sürtünme veya kayma anlamına gelen Yunanca bir kelime olan 'tribos' kelimesinden türetilmiştir. Triboloji, tarihin kaydedildiği ilk dönemlerden bu yana var olan bir bilim dalıdır. İlk medeniyetler, büyük ve ağır nesnelere taşımak için sürtünme katsayısını azaltan yüzeyler geliştirerek önemli gelişmeler kaydetmişlerdir. Bu konuda kaydedilmiş birçok örnek bulunmaktadır. Tribolojinin sistematik çalışmalarının gerçekleşmesinde Osborne Reynolds, Charles Augustin de Coulomb, Sir Isaac Newton, Phillip Bowden ve David Tabor, Beauchamp Tower, Leonardo da Vinci, Guillaume Amontons, Richard Stribeck ve Arnold Sommerfeld gibi önemli bilim insanları katkı sunmuşlardır. Sürtünme ve aşınma gibi tribolojik problemler malzeme ve mekanik performans kaybının başlıca nedenleridir.

Sanayileşmiş ülkelerde, makine elemanlarının ve çeşitli biyomalzemelerin ömürlerini uzatmak, motor ve cihazlarının verimini artırmak, mevcut olan yetersiz materyal kaynaklarını korumak, enerji tüketimini azaltmak ve güvenilirliği artırmak gibi nedenlerle sürtünme ve aşınma gibi tribolojik olayları kontrol altına almak büyük önem arz etmektedir. Tarihsel olarak tribolojistler, yukarıda bahsedilen tribolojik problemleri kontrol altına almak amacıyla malzeme türlerinde, üretim tekniklerinde ve yağlama teknikleri gibi alanlarda gelişmeler ve değişimler gerçekleştirmişlerdir. Malzeme yüzeylerinin birçok mühendislik elemanın içerisinde en önemli nokta olmasının bilinmesiyle birlikte, yüzey teknolojileri konusunda atılımlar gerçekleşmiş ve yüzey mühendisliği adıyla yeni bir disiplin ortaya çıkmıştır. Yüzey mühendisliği adı altında, yeni teknik ve teknolojiler kullanılmakta ve makine elemanlarında oluşan aşınma, sürtünme, yorulma ve korozyon gibi hasarların birçoğu ortadan kaldırılmaya veya azaltılmaya çalışılmaktadır. Bu tekniklerin başında ise yüzey kaplama teknikleri gelmektedir (Holmberg and Matthews 1994). İnce filmler olarak da adlandırılan yüzey kaplamaları, üretim takımları, uzay sanayii, savunma sanayii, biyomedikal ve elektronik sistemlerde birbiriyle temasta olan ve izafi hareket halindeki yüzeylere sahip tüm makine elemanları uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu kaplamalar, genellikle birkaç

nanometreden birkaç mikrometre kalınlığa kadar değişmektedir. Elde edilen kaplamaların performanslarının, oluşturulan mikroyapısı ve kaplama film-taban malzeme arayüzündeki adezyon ile yakından ilişkili olduğu bilinmektedir. Kaplamaların mikro yapısı ise proses parametrelerine bağlı olarak elde edilmektedir.

Son yıllarda, TiN, TiAlN, TiAlSiN vb. geçiş metali nitrür kaplamalar, sahip oldukları yüksek sertlik, iyi aşınma direnci, düşük sürtünme katsayısı ve iyi oksidasyon dirençleri nedeniyle büyük ilgi görmüş ve üretimde en yaygın kullanılan kesici takımlarda geniş uygulama alanı bulmuştur. Geçiş metali nitrür bazlı kaplamaların genel performansını daha da geliştirmek ve işleme-mikroyapı-özellikleri arasındaki ilişkiyi daha iyi anlamak için sürekli Ar&Ge çalışmaları yapılmaktadır.

Bu tip kaplamaların gerçekleştirilmesinde ise yaygın olarak kimyasal/fiziksel buhar biriktirme teknikleri kullanılmaktadır. Günümüzde ise bu teknikler içerisinde, bileşimin ve yapısal olarak daha rahat kontrol sağlanabilmesi nedeniyle aynı zamanda zararlı olan gazların kullanılmaması, kaplama işleminin düşük taban malzeme sıcaklığında yapılabilmesi ve kaplanacak olan taban malzeme yüzeyi ile kaplama malzemesi arasında iyi bir adezyon elde edilmesi gibi özelliklere sahip olması nedeniyle, manyetik alanda sıçratma adı verilen fiziksel buhar biriktirme tekniği yaygın olarak kullanılmaktadır. Manyetik alanda sıçratma tekniğinde ise DC, darbeli-DC, RF, HiPIMS olmak üzere farklı güç kaynakları kullanılmaktadır. DC güç kaynağı ile yalıtkan hedef malzemelere uygulanamazken, RF güç kaynağı ise yalıtkan malzemelere uygulanabilmektedir. Ancak RF manyetik alanda sıçratma tekniği ise düşük biriktirme oranlarına sahip olduğundan kullanım alanı genellikle sınırlıdır. Darbeli-DC manyetik alanda sıçratma yalıtkan hedef malzemelere uygulanmakta ancak düşük sıçratma oranı sağlamaktadır. HiPIMS ise mevcut manyetik alanda sıçratma tekniklerine göre yeni bir teknolojidir. HiPIMS tekniğinde, düşük görev döngüleri ve yüksek güç yoğunluğu ile hedef malzemede ısınma oluşturmadan çok yüksek kinetik enerjiye ve yoğunluğa sahip plazma oluşturulmaktadır. HiPIMS tekniğinin, kararlı ve yoğun bir plazmaya sahip olması, kolay kontrol edilebilir mikroyapısal özellikler nedeniyle, daha yoğun, pürüzsüz ve taban malzeme ile film arasındaki bağı (adezyon) ise oldukça güçlü filmler elde edilmesini sağlamaktadır. Ancak, HiPIMS tekniğini diğer kaplama tekniklerine göre daha pahalıdır. Bu, yüksek voltajlı ekipmanların kullanımı, daha özel kaplama malzemelerinin gerektiği ve daha sık bakım gerektirdiği için daha yüksek bir maliyetle sonuçlanabilir (Gariba 2021).

Bu çalışmada, CFUBMS + HiPIMS hibrit sistemi kullanılarak, soğuk iş takım çeliği (AISI 52100) taban malzeme yüzeylerine Ta/TaN çok tabakalı kompozit yapıda ince filmler sentezlenmiştir. Sentezlenen Ta/TaN çok tabakalı ince filmlerin tribolojik, mekanik ve yapısal özellikleri araştırılarak incelenmiştir. Yapısal özelliklerin karakterizasyonunda taramalı elektron mikroskobu (SEM), X-ışını difraksiyonu (XRD) teknikleri, mekanik özelliklerin analizinde mikro-sertlik, çizik testi ve son olarak tribolojik özelliklerin karakterizasyonunda ise pin-on-disk aşınma testi kullanılmıştır.



KURAMSAL TEMELLER

Sert Kaplamalar

İnce film sert kaplamalar, yüzeylerin sertliğini, aşınma direncini, korozyona karşı dayanıklılığını ve sürtünme özelliklerini artırmak için kullanılan bir kaplama türüdür. Bu kaplamalar, malzemelerin performansını artırmak ve ömürlerini uzatmak için çeşitli endüstrilerde kullanılmaktadır. İnce film sert kaplamalar, genellikle birkaç nanometreden 50 mikrometre kalınlığa sahip ince filmlerdir. Kaplama malzemeleri arasında titanyum nitrit (TiN), titanyum karbonitrit (TiCN), alüminyum titanit (AlTiN), krom nitrit (CrN) ve elmas benzeri karbon (DLC) gibi malzemeler yer alır. Bu kaplamalar genellikle fiziksel buhar biriktirme (PVD), kimyasal buhar biriktirme (CVD) gibi yöntemlerle uygulanır. PVD yöntemi, kaplama malzemesinin bir vakum odasında buharlaştırma veya sıçratma teknikleriyle gerçekleştirilirken, CVD yöntemi, gaz halindeki bir kaplama malzemesinin kimyasal reaksiyonlarla yüzeyde biriktirilmesiyle gerçekleştirilir. İnce film sert kaplamalar, yüzeylerin aşınma direncini, korozyona karşı dayanıklılığını ve sürtünme özelliklerini artırdığı için birçok endüstride kullanılmaktadır. Örneğin, otomotiv sektöründe, kesici aletlerde, medikal cihazlarda ve elektronik cihazlarda yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Sonuç olarak, ince film sert kaplamalar, yüzeylerin sertliğini, aşınma direncini, korozyona karşı dayanıklılığını ve sürtünme özelliklerini arttırmak için kullanılan bir kaplama türüdür. Bu kaplamalar, farklı kaplama malzemeleri, kaplama yöntemleri ve kalınlıkları ile birçok endüstriyel alanda kullanılmaktadır (Khlyustova et al 2020).

"Sert kaplamalar" terimi genel olarak geniş bir malzeme yelpazesini kapsasa da özellikle geçiş metali nitrürleri, karbürler, borürler ve DLC gibi kaplama malzemeleri en büyük ilgiyi görmüştür. Bu, elbette, son derece yüksek sertlikleri ve yüksek kimyasal inertliklerinden kaynaklanmaktadır. Düşük sürtünme katsayısı ile yüksek sertlik, kaplanmış bileşenin aşındırma aşınma oranını azaltırken, kimyasal inertlik, örneğin kaplanmış bir takım ile iş parçası arasındaki kimyasal etkileşimi azaltır. Sert kaplamaların artan ticari önemine ve geniş bir bilimsel literatürün mevcudiyetine rağmen, biriktirme parametreleri ile film mikrokimyası ve mikroyapısı arasındaki ilişki tam olarak ortaya konulamamıştır. Bu kısmen, yukarıda bahsedildiği gibi biriktirme işleminin karmaşıklığından ve aynı zamanda kaplamaların çoğu durumda yetersiz veya yeterince karakterize edilememesinden

kaynaklanmaktadır. İnce filmlerin, özellikle bileşiklerin kantitatif kimyasal ve yapısal analizlerinin gerçekleştirilmesi genellikle oldukça zor ve zahmetlidir. Örneğin, "dökme" malzemeler için kullanılan birçok teknik, yalnızca birkaç µm kalınlığında bir filmde bulunan sınırlı miktarda malzeme nedeniyle kimyasal ince film analizine uygulanamaz. Küçük tane boyutları ve büyük kusur içerikleri, faz tanımlamayı, kafes parametrelerinin doğru bir şekilde belirlenmesini ve kusur tipi ve karakterinin kantitatif olarak belirlenmesini zorlaştırır. Ancak, modern malzeme bilimi ve mühendisliği teknikleri, bu zorlukların üstesinden gelmek için çeşitli yöntemler sunar. Küçük tane boyutları ve büyük kusur içerikleri, malzemelerin karakterizasyonunu zorlaştırırsa da modern teknikler ile bu zorlukların üstesinden gelinebilir. Faz tanımlama, kafes parametrelerinin belirlenmesi ve kusur tipi ve karakterinin kantitatif olarak belirlenmesi, malzemelerin mekanik ve fiziksel özelliklerinin belirlenmesine yardımcı olur (Kelly and Knowles 2020).

Kaplama malzemelerinin yüksek mekanik özelliklere sahip olması, özellikle zorlu çalışma koşullarında takımların daha iyi korunması için önemli bir faktördür. Ancak, iyi mekanik özelliklerin yanı sıra, kaplama malzemesinin taban malzemesiyle iyi bir etkileşim içinde olabilmeye kabiliyeti gibi diğer özellikler de kaplama tasarımı sırasında dikkate alınmalıdır. Bu nedenle, kaplama malzemesi seçimi, zorlu çalışma koşullarına fonksiyonlarını yerine getirebilmeleri açısından büyük önem taşır.

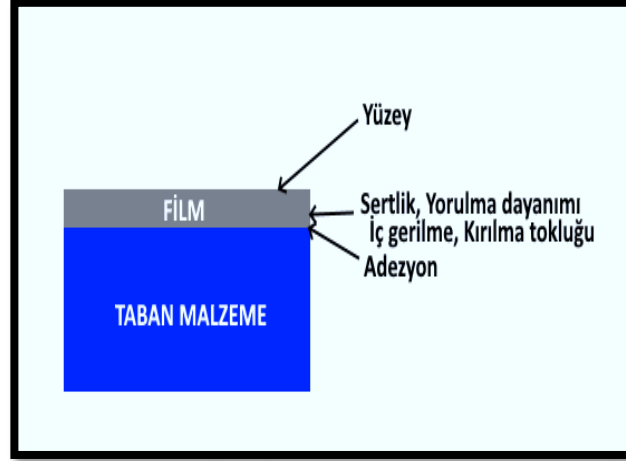
Kaplama malzemelerinin mekanik özelliklerinin belirlenmesinde hem tanelerin kimyasal bileşimi, kristal yapısı, tane boyutu, tane şekli ve tane dağılımı hem de kaplamanın kalınlığı, pürüzlülüğü, yüzey alanı gibi faktörler tarafından belirlenir. Bu yüzden, Kaplama malzemelerinin mükemmel mekanik özelliklere sahip olması, çalışma koşullarında takımların daha iyi korunması için önemli bir faktördür. Ancak sadece iyi mekanik özellikler yeterli değildir, kaplama malzemesinin taban malzemesi ile uyumlu olması ve iyi etkileşime girebilme kabiliyeti gibi diğer özellikleri de dikkate alınmalıdır. Bu nedenle, kaplama tasarımı sırasında kaplama malzemesinin seçimi özenle yapılmalıdır. Böylece zorlu çalışma koşullarında takımlar daha iyi korunabilir ve performansları artırılabilir. Farklı bölgelere göre sert kaplama gereksinimleri aşağıdaki gibi özetlenebilir (Holmberg and Matthews 2009).

1) Kaplama ve taban malzeme ara yüzeyinde, kaplama ile taban malzeme arasındaki adezyon derecesine dikkat edilmelidir. Kaplama malzemesinin taban malzeme ile olan adezyon

seviyesi, işlem sırasında oluşan gerilimlere ve servis sırasında oluşacak ısıya dayanabilecek kadar yeterli olmalıdır. Bu, kaplama tasarımı sırasında dikkate alınması gereken önemli bir faktördür. Yeterli adezyon seviyesi, kaplamanın taban malzemeye sağlam bir şekilde bağlanmasını ve uzun ömürlü bir koruma sağlamasını garanti eder. Ancak, yetersiz adezyon seviyesi, kaplamanın taban malzemeden ayrılmasına ve takımın işlevsiz hale gelmesine neden olabilir. Bu nedenle, kaplama malzemesi seçilirken, yeterli adezyon seviyesi sağlayacak uygun bir kaplama malzemesi seçmek önemlidir. Bu arada, kaplama ve taban malzeme arasındaki etkileşim, taban malzemeden kaynaklanan herhangi bir etkinin oluşumunu azaltmak için sınırlandırılmalıdır. Kaplamaların soğumaya bırakılması durumunda sıcaklık değişiminden dolayı meydana gelen büyük termal gerilmenin oluşumunu önlemek için kaplama ile taban malzeme arasındaki herhangi bir termal genişleme uyumsuzluğunun boyutu da dikkate alınmalıdır. Bu nedenden dolayı kaplama malzemesinin termal genişleme katsayısı, taban malzemenin termal genişleme katsayısına benzer malzemeler seçilmelidir. Bazen dereceli bir arayüz oluşturularak, taban malzeme ve kaplama malzemesi arasındaki termal genişleme ve termal iletkenlikteki eşitsizlik azaltılabilir, bu nedenle biriktirme işleminde mükemmel adezyon özelliği elde edilebilir.

2) Taban malzemenin iyi korunabilmesi için, kaplama malzemesinin korunacak olan yüzeye yüksek sertlik, iyi kırılma tokluğu ve makul aşınma direnci sağlamalıdır. Genellikle sertlik en önemli özelliktir ve kaplama malzemesinin sertliği kullanılacak olan parçanın veya makine elemanının yüzeyinden daha sert olmalıdır.

3) Kaplama işlemi sırasında kullanılan teknik ve çevresel faktörler, kaplanacak malzeme üzerinde önemli bir etkiye sahip olabilir. Bu nedenle, kaplama malzemesinin özellikleri ile kaplanacak ortamın özellikleri arasındaki etkileşimler dikkate alınmalıdır. Özellikle kaplama malzemesinin kimyasal ve korozyona karşı direnci, kaplanacak ortamın özellikleri ile uyumlu olmalıdır. Bu, kaplama malzemesinin etkinliğini ve dayanıklılığını artırarak takımların daha iyi korunmasını sağlayabilir (Wang *et al.* 2017).



Şekil 1. Kaplama malzemesi seçiminde önemli kriterler

Kaplama tasarımı sırasında, mekanik özelliklerin yanı sıra optik davranış, elektriksel direnç gibi diğer özellikler de göz önünde bulundurulmalıdır. Bu kaplamaların sadece makine mühendisliği uygulamaları için değil, aynı zamanda elektronik, optik, biyomedikal, kimyasal ve diğer mühendislik uygulamalarında da kullanıldığı göz önüne alındığında oldukça önemlidir. Örneğin elektriksel iletkenlik kaplamaları, elektronik ve elektroteknik endüstrilerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu tür kaplamalar, yüksek hassasiyetli devre kartları, yarı iletken cihazlar ve diğer elektronik bileşenlerin üretiminde kullanılmaktadır (Lotus et al. 2011).

Geçiş Metali Nitrür Kaplamalarının Avantajları

Giderek artan teknolojik talepleri karşılayabilmek için çeşitli kaplama malzemeleri tasarlanmış ve test edilmiştir. Genel olarak kimyasal bağlanma durumuna göre en sık kullanılan kaplama malzemeleri üç farklı gruba ayrılabilir:

- 1) Metalik sert malzemeler (TiN, ZrC, TiB₂);
- 2) Kovalent sert malzemeler (B₄C, cBN);
- 3) İyonik sert malzemeler (TiO₂, Al₂O₃, MgO)

Her bir malzeme türü göreceli avantajlar ve dezavantajlar sergilese de geçiş metali nitrürler, karbürler ve borürler dahil olmak üzere metalik malzemelerin çok çeşitli durumlarda sert kaplama uygulamaları için çok uygun olduğu görülmektedir. Geçiş metali nitrürleri, önemli özellikleri nedeniyle birçok uygulamada sert kaplama malzemeleri olarak ilgi

çekmiştir. Geçiş metali nitritler, hem metal-metal atom çiftleri hem de metal-ametal atom çiftleri arasındaki eşzamanlı metalik, kovalent ve iyonik bağ katkılarından faydalanarak yüksek tokluk, kusursuz estetik görünüm ve mükemmel iletkenlik gibi ilgi çekici kombinasyonlara sahip olabilirler. Ayrıca, dirençleri 10 ila 30 $\mu\Omega\text{cm}$ arasında değişmektedir (Eklund *et al.* 2016). Geçiş metali nitrürleri, sıklıkla kullanılan paslanmaz çelik ve titanyum alaşımları gibi birçok taban malzemesiyle benzer termal genişleme katsayılarına sahiptir. Bu kaplama, taban malzeme ile iyi bir adezyon sağlar ve termal genişleme uyumsuzluklarından kaynaklanan artık termal gerilimlerin neden olduğu delaminasyon, çatlama veya diğer istenmeyen olumsuz etkilerin oluşumunu azaltır. (Holmberg and Matthews 2009).

Yaygın Kullanılan Geçiş Metali Nitrür Kaplamalar

Titanyum nitrür kaplamalar

Titanyum nitrür (TiN), tüm geçiş metali nitrür kaplamaları arasında en yaygın olarak çalışılan ve uygulanan kaplamadır. TiN, bir fcc (yüz merkezli küp) yapısına sahip olan NaCl (sodyum klorür) benzeri bir yapıya sahiptir. Ayrıca estetik açısından da altın sarısı bir renk sergilemektedir. Özellikle banyo armatürleri gibi uygulama alanlarında sıkça kullanılırlar (Zhang *et al.* 1993). 1960'lardan bu yana TiN, CVD ve PVD teknikleri aracılığıyla birçok uygulamada koruyucu bir kaplama olarak kullanılmaktadır. TiN kaplamalar, yüksek sertlik, iyi aşınma direnci, düşük sürtünme katsayısı, düşük bakım gereksinimi ve uygun maliyet gibi birçok üstün özelliğe sahiptir. Ancak, TiN'in temel dezavantajı, yüksek sıcaklıkta düşük oksidasyon direncine sahip olmasıdır (Barshilia 2010). Araştırmalar, TiN kaplamalarda sıcaklığın yaklaşık 500 °C'den yüksek olduğu derecelerde kolaylıkla oksitlenebildiğini ve yumuşayabileceğini göstermektedir (Zhang *et al.* 2000). Ayrıca, nitrürde oksit oluşumu, kaplamanın aşınma direncini önemli ölçüde düşüğe neden olabilir. Sert kaplamalar, yüksek sıcaklık ve zorlu çalışma ortamlarında makine parçalarının aşınma, korozyon ve yorulma direncini artırabilir. Ancak, bazı kaplamaların yüksek sürtünme katsayısı, makinenin performansını azaltabilir ve yapısal arızalara neden olabilir. TiN kaplamalarının yüksek sıcaklık performansını artırmak için genellikle alüminyum ile birleştirilerek TiAlN üçlü sistemi oluşturulur. Bu yöntem, TiN kaplamanın dayanıklılığını ve aşınmaya karşı direncini artırarak makinenin ömrünü uzatabilir (Zhang *et al.* 2020). Alüminyumun kaplama bileşenleri arasına katılması ile, TiAlN sadece 800°C'de oksijen ile birkaç kez reaksiyona girmeye başlar

(Barshilia *et al.* 2011). TiAlN kaplamalar, aynı zamanda TiN kaplamalara göre daha yüksek sertlik ve daha üstün aşınma direnci gösterir (Aouadi *et al.* 2021). Normalde, kaplanan makine elemanları üzerinde biriken TiN kaplamaların kalınlığı 2 µm ile 10 µm arasındadır (Zhang *et al.* 1993). Bununla birlikte, TiN kaplamalarının özellikleri, mikro yapıları ve stokiyostrileri gibi faktörlerden büyük ölçüde etkilenebilir. Kaplamaların sertliği, artan boşluk ve safsızlık konsantrasyonu ile azalabilir. Ayrıca, TiN kaplamalar genellikle biriktirme yönüne paralel uzatılmış taneler ile sütunlu bir yapı sergiler. Kaplamaların sertliği, tane dokusunun anizotropisinden dolayı kaplama yüzeyi ve enine kesiti arasında belirgin farklılıklar gösterebilir (Dabees *et al.* 2022). TiN kaplamalarının sertliği ve aşınma direnci, N/Ti atomik oranı azaldıkça artmaktadır. Yani N/Ti atomik oranı azaldıkça TiN kaplamalarının sertliği ve aşınma direnci artmaktadır. Azalan N/Ti atomik oranı, TiN kaplamalarının özelliklerini olumlu yönde etkilemektedir (Bobzin *et al.* 2022). Genel olarak, TiN kaplamaların genellikle bildirilen sertlik değerleri 20-30 GPa arasında değişmektedir. TiN kaplamalar, yüksek sertlikleri nedeniyle çeşitli endüstriyel uygulamalarda kullanılmaktadır. Özellikle kesme ve aşınma direnci gerektiren yerlerde, örneğin kesme takımları, yatak yüzeyleri, kesici aletler ve yarı-iletken endüstrisinde daha yaygın olarak kullanılmaktadır. (Sundgren *et al.* 1985).

Krom nitrür kaplamalar

Bir diğer ilgi çekici özelliklere sahip olan geçiş metal nitrür kaplama ise krom nitrür (CrN) kaplamalardır. CrN kaplamaları için PVD tekniği, yüksek kaliteli, dayanıklı ve aşınmaya karşı dirençli kaplamalar üretmek için ideal bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu kaplamalar, birçok endüstriyel uygulama için uygun olup, yüzeylerin ömrünü uzatarak, bileşenlerin daha uzun süre ve daha güvenilir bir şekilde çalışmasını sağlar (Patel *et al.* 2022). CrN'nin daha yüksek sıçratma verimi, biriktirme işlemi sırasında daha fazla kaplama malzemesinin yüzeylere püskürtülmesini ve daha hızlı kaplama oluşumunu sağlar, böylece seri üretim için daha uygun hale gelmektedir (Han *et al.* 2003). Bununla birlikte, Cr'nin nitrojene karşı düşük afinitesi nedeniyle aralarında güçlü bir bağ oluşur ve kristal yönelmesi genellikle kübik yapıda CrN ve hegzagonal yapıda Cr₂N şeklinde oluşur (Sundgren and Hentzell 1986). CrN filmi ortalama 25 GPa gibi yüksek bir sertlik sergiler (Ni *et al.* 2004). Altıgen Cr₂N, fcc CrN'den daha sert olduğundan, CrN bazlı kaplamalar, artan Cr₂N içeriği ile sertlikte artış gösterir (Hones *et al.* 2003). CrN kaplamaları, TiN kaplamalara kıyasla çeşitli avantajlara

sahiptir. Özellikle, CrN kaplamaları, TiN'den daha iyi korozyon direncine sahiptir ve özellikle termal oksidasyona karşı daha dayanıklıdır (Milosva 1997; Liu 2001). CrN, yüksek sıcaklıklarda bile kararlı bir faz bileşimi ve iyi bir adezyon özelliği göstererek taban malzeme ile iyi bir bağlantı oluşturabilir. Ayrıca, CrN'nin tribolojik özellikleri TiN'ye kıyasla daha iyidir. Örneğin, CrN'nin sürtünme katsayısı TiN'inkinden daha düşüktür, bu da daha iyi bir aşınma direnci sağlar (Su 1997; Pareja 2006). Bu, abrasif aşınma altında çatlama olma ihtimalinin azalmasına neden olur. CrN kaplamalarının aşınma hızı, TiN kaplamalardan yaklaşık %40 daha yavaştır. Bu özellik, CrN kaplanmış takımların verimliliğini ve kullanım ömrünü önemli ölçüde artırabileceği anlamına gelir. Ayrıca, CrN kaplamaları TiN kaplamalara göre daha iyi kırılma tokluğuna sahiptir. Bu da CrN kaplamalarındaki çatlakların ilerlemesi için daha fazla enerjiye ihtiyaç duyulduğu anlamına gelir. Sonuç olarak, CrN kaplamaları takım ömrünü uzatmak ve performansını artırmak için tercih edilen bir seçenek haline gelir (Su *et al.* 1997). CrN kaplamaları, genellikle biriktirme sırasında çok ince bir tane boyutuna sahiptirler. Bu özellikleri, CrN kaplamalarının geleneksel TiN kaplamalara kıyasla daha büyük kalınlıklar elde etmesine olanak tanır (Urbano 2018; Li *et al.* 2023). CrN kaplamaların maksimum kalınlığı, kullanılan ekipman ve uygulama tekniklerine bağlıdır. Bununla birlikte, genellikle CrN kaplamaların maksimum kalınlığı 10-12 µm civarındadır. Ancak, bazı PVD ekipmanları ve proseslerinde daha kalın CrN kaplamaların üretilebildiği rapor edilmiştir. 50 µm'ye kadar kalın CrN kaplamaların oluşturulması mümkün olabilir, ancak bu durum, kaplama ekipmanının özellikleri, işlem parametreleri ve kaplama malzemelerinin özellikleri gibi faktörlere bağlıdır (Liang *et al.* 2020). Bu, CrN'nin farklı çalışma koşulları için geniş bir kaplama kalınlığı oluşturma seçeneği sunduğu anlamına gelir. Bu da makine elemanlarının ömrünü uzatabilir.

Zirkonyum nitrür kaplamalar

ZrN, TiN gibi geçiş metal nitritleri arasında yer alır ve dolayısıyla ZrN kaplamaları, TiN kaplamalarına benzer yapı ve özelliklere sahiptir. (Lei *et al.* 2018). ZrN kaplamaları da TiN kaplamaları gibi ticari olarak kullanılmaktadır. Özellikle kesici takımlar ve takım tezgâhları gibi alanlarda koruyucu kaplama olarak sıklıkla tercih edilmektedir. (He *et al.* 2017). Normalde, ZrN kaplamalar, sıçratma, lazer biriktirme, iyon ışını destekli biriktirme gibi PVD işlemleriyle biriktirilir (Liu 2004; He *et al.* 2017). Düşük elektriksel öz direnç (13,6 µΩ

cm) ve mükemmel termal kararlılık ($\Delta H = -87,3$ kcal/mol), ZrN'yi entegre devre teknolojisinde difüzyon bariyerleri için umut verici bir aday yapmaktadır. Ayrıca, ZrN kaplamalar iyi bir biyouyumluluğa sahiptir ve biyomedikal uygulamalarda kullanılabilir. Yapılan araştırmalar göstermektedir ki ZrN kaplamaları, proton değişim membranlı yakıt hücrelerinin korozyonuna karşı direnç gösterme konusunda başarılıdır. Ayrıca, kaplamalar anot ve katot potansiyellerinde korozyon akımı yoğunluğu gereksinimlerini karşılamaktadır. (Liu *et al.* 2003).

Tantal nitrür kaplamalar

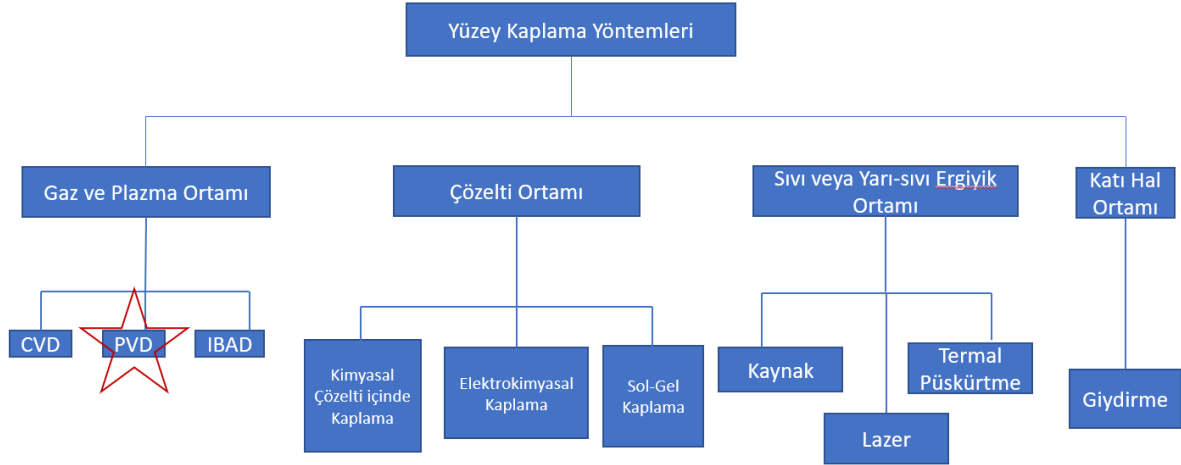
Titanyum, krom ve zirkonyum bazlı nitrürlerin aksine, tantal nitrür bir kaplama malzemesi olarak daha az dikkat çekmektedir. Bunun nedeni, muhtemelen, bu malzeme için gerekli olan yüksek maliyet ve tantal nitrür kaplamalarının üretimi sırasında daha dikkatli ve özenli bir şekilde işlem görmesidir. Bu malzeme için üretim koşulları, diğer nitrür kaplamalarına kıyasla daha hassas ve titizdir (Liu *et al.* 2011). Buna rağmen, tantal nitrür, yüksek sıcaklık dayanımı, kimyasal dirençlilik ve düşük difüzyon oranı gibi özellikleri sayesinde difüzyon bariyeri kaplamalar için uygun bir malzeme olarak dikkat çekmektedir (Elangovan *et al.* 2011). Ayrıca, yapılan bazı çalışmalar, tantal nitrür bazlı kaplamaların, yaygın olarak kullanılan bazı biyomedikal titanyum alaşımlarından daha iyi doku uyumluluğuna ve kan uyumluluğuna sahip olduğunu göstermiştir, bu da onları tıbbi uygulamalar için umut verici adaylar haline getirmektedir (Leng *et al.* 2001). Bu tür kaplamalar, DC/RF magnetron sıçratma, iyon ışını destekli biriktirme, elektron demeti ile buharlaştırma, manyetik alanda sıçratma, kapalı alan dengesiz manyetik alanda sıçratma gibi bir dizi biriktirme yöntemiyle hazırlanmaktadır. Bu yöntemler, kaplama malzemesinin özelliklerine, kaplama kalınlığına, kaplama yüzeyinin homojenliğine ve kaplama hızına bağlı olarak seçilir. (Abegunde *et al.* 2019; Shiri *et al.* 2019). Tantal nitrür kaplamaların mekanik özellikleri bir dizi çalışmada incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, bu kaplamaların mekanik özelliklerinin büyük ölçüde kullanılan biriktirme yöntemine ve biriktirme parametrelerine bağlı olduğunu, tantal nitrür kaplamalar için sertlik değerlerinin normalde 20 GPa ila 45 GPa arasında değiştiğini ve elastik modülün 350 GPa ile 450 GPa arasında olduğunu göstermiştir (Grosser *et al.* 2010; Dai *et al.* 2021). Yaygın olarak, tantal nitrür kaplamalar için magnetron püskürtme biriktirme yöntemi kullanılarak biriktirilir. Bu durumda, TaN kaplamalarının faz

değişimleri nitrojen kısmi basıncındaki değişimlere oldukça duyarlıdır. Genellikle, düşük nitrojen kısmi basıncı koşullarında (örneğin, 0,2-0,4 Pa arasında), TaN kaplamaları kristal bir yapıya sahiptir ve bu yapı genellikle β -TaN olarak adlandırılır. Ancak, nitrojen kısmi basıncı arttıkça, kaplamaların yapısı α -TaN yapıya dönüşebilir. Bununla birlikte, bu dönüşüm koşulları, kaplama işlemi sırasında kullanılan işlem parametrelerine, özellikle de sıçratma, gaz akış hızına, taban malzeme sıcaklığına ve kaplama süresine bağlıdır. Kaplama işlemi sırasında bu parametreler kontrol edilerek, istenen faz değişimi elde edilebilir. Özetle, nitrojen kısmi basıncındaki değişimler TaN kaplamalarının faz değişimlerini etkiler ve uygun işlem parametreleri seçilerek istenen faz yapısı elde edilebilir (Klimashin *et al.* 2016; Dai and Shi 2021; Li *et al.* 2021).

Biriktirme Yöntemleri

Yüzey mühendisliği, kaplanacak yüzey üzerine biriktirme, kimyasal yüzey işlemleri, iyon bombardımanı gibi birçok yüzey modifikasyon tekniklerini konu alır. Makine elemanlarının performansını iyileştirmek için yüzey ve yüzeye yakın bölgenin özelliklerini değiştirerek malzemenin ömrünü artırmayı ve istenmeyen etkileri önlemeyi amaçlar. Bu istenmeyen etkiler arasında korozyon, aşınma ve yorgunluk gibi mekanik hasarlar, kimyasal reaksiyonlar ve termal şoklar yer alabilir. Yüzey mühendisliği, malzeme ile çalışma ortamı arasında oluşacak bu istenmeyen etkileri azaltmak için geliştirilen bir yöntemdir. Bu amaçla, yüzeylerin kaplanması, kaplama malzemelerinin seçimi, yüzey ısıtma işlemi ve yüzey kimyasal işlemi gibi yöntemler kullanılır. Böylece, yüzey mühendisliği, makine elemanlarının performansını artırarak, onların daha uzun süreli ve güvenilir kullanımını sağlar (Pillai 2023). Örnek olarak, talaşlı imalat için kullanılan makine elemanlarının istenilen yüksek sertliğe, tokluğa ve yüksek aşınma direncine, ulaşabilmek için genellikle malzeme yüzeylerini koruyabilmek için sert ince filmler ile kaplama yapılır. Bunun yansıya üretilen kaplamaların taban malzemeden hiçbir şekilde ayrılmadan geniş çalışma sıcaklık aralığına dayanabilmelidir. Bu mekanik özellikler ince film ile kaplanmış makine elemanlarının dayanıklılıkları için büyük önem arz etmektedir. Özellikle otomotiv, uzay ve havacılık gibi endüstriyel alanlarda daha yüksek verim ve performans artışı sağlamaktadır. Her geçen gün gelişmekte olan teknoloji nedeniyle ince film kaplamalara duyulan ihtiyaç ve talep artmaktadır. Makine elemanlarının

çeşitli kullanım alanlarına göre kaplanmaları makine parçalarının ömrünü uzatacaktır ve böylece malzeme maliyetleri büyük miktarda azalacaktır (Holmberg and Matthews 1994).



Şekil 2. YüzeY kaplama yöntemlerinin şematik gösterimi (Rickerby and Matthews 1991)

Çeşitli kaplamalar sentezleyebilmek için kullanılan teknikleri Biriktirme ve YüzeY modifikasyonu olmak üzere iki kategoride incelenebilir (Sundgren and Hentzell 1986). Bu çalışmada PVD yönteminin genel prensipleri anlatılmaktadır.

Fiziksel buhar biriktirme yöntemi (PVD)

Fiziksel buhar biriktirme (PVD) yönteminde belirlenen bir malzemenin yüzeY özelliklerini değiştirerek istenilen mekanik kullanılan bir yöntemdir. Günümüz de ise ince film kaplamaların büyük kısmı kaplama süreci sırasında hedef malzeme atomlarının sıçratılarak ve iyonize edilerek kaplama filmini düşük sıcaklıktaki taban malzeme yüzeYine biriktirilerek üretilmektedir. PVD yöntemi, kaplanan malzemelerin çeşitli özelliklerini iyileştirmek için kullanılan bir yüzeY mühendisliği teknolojisidir. Bu teknoloji, kaplama malzemesinin kimyasal, termal, optik, elektronik, manyetik ve mekanik özelliklerini değiştirerek, kaplanan malzemelerin yüzeY özelliklerini iyileştirebilir (Greene 2017). Özellikleri elde edebilmek için kaplanacak taban malzemenin yüzeYine genel olarak sert ince film kaplamak için kullanılan bir yüzeY mühendisliği yöntemidir. Daha kusursuz bir kaplama yapabilmek için PVD işleminin vakumlu veya çok düşük bir basınç altında gerçekleştirilir. PVD tekniğinde elde edilebilir film kalınlıkları birkaç nanometre ile birkaç mikron aralığına kadar filmlerin büyütülmesi için

Temel olarak PVD işleminde, sıçratma ve buharlaştırma olmak üzere iki teknik kullanılmaktadır. Buharlaştırma tekniğinde hedef malzemeye termal ısı kaynağı kullanarak buharlaştırılır ve taban malzeme yüzeyinde biriktirilir. Buharlaştırma tekniğini 5 gruba ayırmak mümkündür:

- ⇒ İndüksiyon akımı ile buharlaştırma
- ⇒ Elektron demeti yöntemi ile buharlaştırma
- ⇒ Lazer ışını yöntemi ile buharlaştırma
- ⇒ Katodik ark yöntemi ile buharlaştırma
- ⇒ Rezistans yöntemi ile buharlaştırma

Sıçratma tekniği ise, hedef malzemeye katodik bağlantı yoluyla Ar^+ iyonlarıyla bombardıman yaparak atomlarının yüzeyinden sıçramasını sağlar ve bu sıçrayan atomlar taban malzeme yüzeyinde birikir. Bu yöntem, buharlaştırma tekniğinden farklı olarak, hedef malzemede ısı kullanılmaksızın sadece momentum transferi yoluyla sıçratılan atomların taban malzemesinin üzerinde toplanması prensibine dayanmaktadır (Holmberg and Matthews 1994).

Sıçratma tekniğini dört başlık altında incelenebilir;

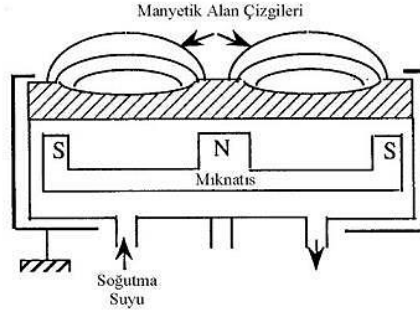
- ⇒ DC Triot Sıçratma
- ⇒ DC Diyot Sıçratma
- ⇒ Manyetik Alanda Sıçratma
- ⇒ Rf Sıçratma

Bu tezde, PVD teknikleri arasında en çok tercih edilen yöntem manyetik alan sıçratma tekniği kullanılarak çok tabakalı Ta/TaN ince filmleri sentezlenmiştir.

Manyetik alanda sıçratma tekniği

Yaygın kullanılan PVD süreçleri vakum buharlaştırma ve sıçratma teknikleridir. Sıçratma birkaç keV enerjili aktif Ar iyonlarının katı hedef malzemenin yüzeyine çarpması ile yüzeyinden atomların sıçratılması ile taban malzeme üzerine ince film biriktirilmesi ile elde edilen termal olmayan fiziksel bir tekniktir. Yıllardır kullanılan sıçratma tekniği temel olarak, birçok malzemenin başarılı biriktirme işlemlerinin gerçekleştirilmesine olanak sağlamaktadır.

Fakat, bu teknik çeşitli dezavantajlara sahiptir. Bu dezavantajlar, düşük biriktirme oranı, yüksek maliyet ve düşük seviyede iyonlaşma enerjisidir. Bu dezavantajlar, konvansiyonel manyetik alanda sıçratma ve dengesiz manyetik alanda sıçratma tekniklerinin kullanımı sayesinde başarılı bir şekilde giderilmiştir.



Şekil 3. Manyetik alanda sıçratma tekniği (Monaghan and Arnell 1992)

Sistemde kullanılan magnetronlar, hedef malzemeye paralel bir manyetik alan oluşturmak ve ikincil elektronların hareketlerini hedef malzemeye yakın alanlarda kısıtlamak için kullanılır. Magnetronlar, hedef malzemenin merkez eksenine birinci kutbu, hedef malzemenin dış kenarı tarafına ise ikinci kutbu ile bir mıknatıs halkası oluşturacak şekilde düzenlenmiştir. Bu yöntemle elektronları tuzağa düşürerek iyonizasyon veriminin yükselmesi ile hedefin yakın yerlerde yoğun şekilde bir plazma oluşmuş olur. Böylelikle hedef malzemeye iyon bombardımanının artması sağlanarak, daha yüksek sıçratma oranlarına aynı zamanda taban malzeme yüzeyinde yüksek biriktirme sağlanmış olur (Arnell and Kelly 1999).

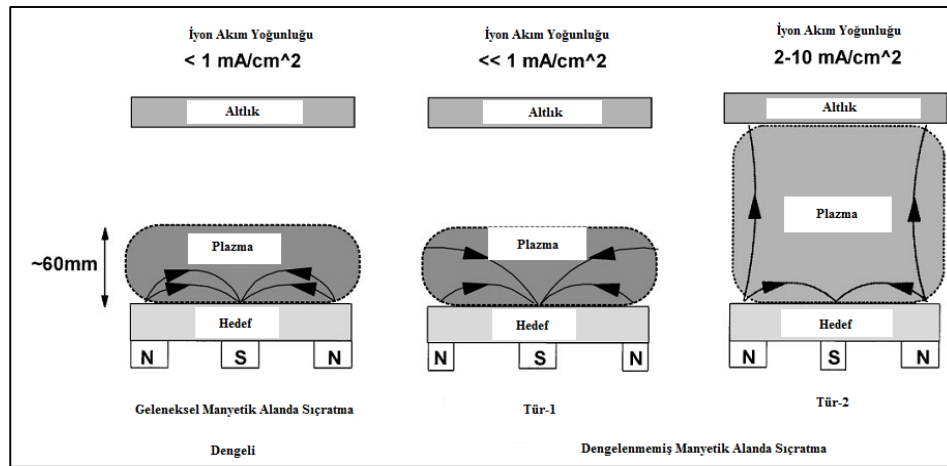
Geleneksel manyetik alanda sıçratma tekniği ve dengesiz manyetik alanda sıçratma tekniği tasarımsal olarak birbirlerine benzerken, performans açısından önemli farklılıklar gösterebilirler. Geleneksel manyetik alanda sıçratma tekniği, homojen ve kontrol edilebilir bir kaplama kalınlığı ve bileşimi sağlar. Bu nedenle, üretilen kaplamaların bileşimi ve özellikleri daha tutarlıdır. Ayrıca, bu yöntem, kaplama işlemi boyunca daha az gaz akışı ve sıçratma akışı değişimi gerektirir, bu da daha düşük gaz tüketimi ve daha yüksek kaplama verimliliği ile sonuçlanır. Diğer yandan, dengesiz manyetik alanda sıçratma tekniği, yüzey özelliklerinde belirli farklılıklar elde etmek için kullanılabilir. Bu yöntem, kaplama işlemi boyunca daha yüksek gaz akışı ve sıçratma akışı değişimi gerektirir ve kaplama kalınlığı ve bileşiminde yüzeyde farklılıklar oluşturabilir. Bu nedenle, üretilen kaplamaların bileşimi ve özellikleri, geleneksel manyetik alanda sıçratma tekniğine kıyasla daha heterojen olabilir. Sonuç olarak,

her iki yöntemin de kendi avantajları ve dezavantajları vardır ve performans, uygulamanın gereksinimlerine ve kaplama işleminin amaçlarına bağlı olarak değişebilir (Arnell and Kelly 1999).

Dengesiz manyetik alanda sıçratma tekniği

Şekil 4’de şematik olarak verilen dengesiz manyetik alanda sıçratma yöntemlerindeki plazma oluşumunun görüleceği üzere, bu teknikte kullanılan magnetronların dış çemberi, merkez kutbuna oranla daha fazla güçlendirilmiştir. Bu nedenle, tüm manyetik alan çizgileri mıknatısın dış kutbu ile merkezi arasında kapalı bir döngü oluşturacak şekilde değil, bazıları doğrudan taban malzemeye yönelir ve bazı ikincil elektronlar da bu manyetik alan çizgileri boyunca hareket ederler. Böylelikle, plazma hedef bölge ile kısıtlandırılmamış ve taban malzemeye doğru bir plazma akışı sağlanmış olur. Böylelikle, plazmadan yüksek iyon akımı çekilebilir ve harici bir bias voltajı uygulamaya da gerek kalmaz (Monaghan and Arnell 1992).

Dengesiz manyetik alanda sıçratma tekniğinin gelişmiş özelliklerinin kullanılması ile yüksek enerjili iyon akımlarının taban malzeme yüzeyine iletilmesi sağlanır. Fakat tek magnetron kaynağı kullanarak karmaşık yapıdaki bileşikler üzerinde üniform kaplamalar biriktirmek oldukça zordur. Bu nedenden bu teknolojidten ticari bir fayda sağlayabilmek için birden çok magnetron kaynağı kullanılmıştır (Arnell 1999).



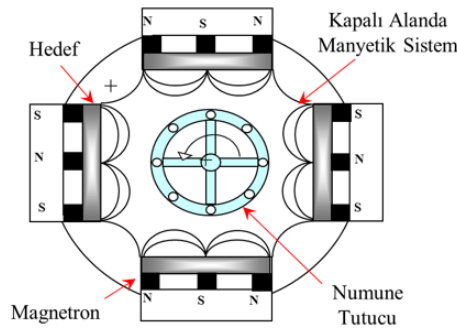
Şekil 4. Geleneksel ve dengelenmemiş manyetik alanda sıçratma yöntemlerindeki plazma oluşumunun gösterimi (Kelly and Arnell, 2000)

Kapalı alan dengesiz manyetik alanda sıçratma tekniği (CFUBMS)

Kapalı alan dengesiz manyetik alanda sıçratma tekniğinde (CFUBMS) nanoyapılı seramik veya kompozit yapıya sahip tek veya çok tabakalı ince filmlerin büyütülmesinde sıkça tercih edilen en önemli Fiziksel Buhar Biriktirme (PVD) tekniklerinden bir tanesidir. Bu teknik ile büyütülen filmlerin mekanik, tribolojik, mikro ve nano yapısal özellikleri, kaplamanın mikro yapısı ve morfolojisi ile yakından ilişkilidir. Bu özellikler kapalı alan manyetik alanda sıçratma proses parametrelerinin seviyelerindeki değişikliklere bağlı kontrol edilmektedir (Kelly and Arnell 2000). Dengesiz manyetik alanda sıçratma tekniği (UBMS), geleneksel manyetik alanda sıçratma yöntemine göre bazı önemli avantajlar sağlamaktadır. Bununla beraber, tek UBMS konfigürasyonu kullanmak, karmaşık bileşenleri standart biriktirme oranında kaplayabilmek için yeterince verimli değildir. Bu durum, kapalı alan dengesiz manyetik alanda sıçratmanın (CFUBMS) geliştirilmesine neden olmuştur. Bu düzenleme ile taban malzemeyi saran manyetik alan bağlantısı oluşmasına ve böylece hedef malzemedan sıçratılan elektronlar için kapalı bir tuzak oluşturularak elektron kaybının azalmasına sebep olmaktadır. Sonuç olarak, iyon akımındaki yoğunluk etkili bir biçimde artmakta böylece plazma alanını güçlendirmekte ve yüksek birikme oranı elde edilmektedir (Kelly ve Arnell 2000). Dengesiz manyetik alan tekniklerinin sağlamış olduğu faydalara rağmen, karmaşık olan kaplamalar tek bir kaynak olarak kabul edilebilir oranda homojen kaplamanın zor olması sebebi ile çoklu mıknatıs tekniği kullanılmıştır. Çoklu mıknatıs tekniğinde mıknatısların dizilimleri bitişik ve mıknatısların kutupları aynı olacak şekilde yerleştirilir ise aynalı, zıt kutuplar yerleştirilirse kapalı alan oluşur.

Aynalı konfigürasyonda ise alan çizgileri haznenin duvarlarına doğru yönelirler ve alan çizgilerini takip eden ikinci elektronlar ise kaybolurlar bunun neticesinde ise düşük plazma yoğunluğu elde edilmiş olur. Kapalı alanda, manyetik alan hatları mıknatıslar arasında tutularak hazne duvarlarındaki kayıplar azaltılır ve daha yoğun bir plazma oluşturulur. Aynı şartlar altında kapalı alan, aynalı veya tek dengesiz mıknatıs konfigürasyonlarından iki veya üç daha kat daha fazla iyon -atom oranına sahip olur. Kapalı alan teknikleri, çift sayıda mıknatıs kullanılarak yapılandırılabilirler. Birden çok mıknatısın dönen bir taban malzeme tutucusu ile beraber kullanılması ile bileşen hedeflerden bileşik filmlerin ve ayrıca temel veya bileşik hedeflerden dolayı oluşan farklı fazların çok katmanlı filmlerinin reaktif sıçratma tekniği ile biriktirilmesine olanak tanır (Arnell and Kelly 1997). CFUBMS tekniği, diğer

sıçratma tekniklerine göre birçok avantaj sunar. Ayrıca, daha yüksek iyon yoğunluğu sağlayarak daha yüksek kaplama hızlarına ve daha iyi kaplama kalitesine olanak tanır. Manyetik alanın etkili bir şekilde kullanılması sayesinde, kaplama malzemesinin homojen bir şekilde kaplanmasını sağlar. Bu, yüzeyde kaplama kalitesinin daha homojen ve daha iyi olmasını sağlar. CFUBMS tekniği, kaplama malzemelerinin gradyanlı yapısını kontrol edebilme yeteneği ile diğer kaplama yöntemlerinden farklıdır. Bu, birbirinden farklı malzemelerin farklı oranlarda karıştırılmasını ve homojen bir şekilde kaplanmasını sağlar. Yüksek sıcaklık ve basınç uygulamalarında da kullanılabilen ince, sert ve dayanıklı kaplamalar elde etmek için kullanılabilir. Bu teknik, TiN, CrN, AlTiN, ZrN, TiAlN, TiSiN, TiCN, TaN gibi ikili ve üçlü metal nitrür kaplamalar için yaygın olarak kullanılmaktadır. Tüm bu avantajları nedeniyle CFUBMS, diğer kaplama tekniklerine göre daha fazla tercih edilir hale gelmektedir (Kim *et al.* 2008; Biswas *et al.* 2018). Şekil 5'te Teer Coating Limited şirketi tarafından patentlenen bir CFUBMS sisteminin şematik görünümü verilmiştir.



Şekil 5. CFUBMS sistemini manyetik alan tasarımının şematik gösterimi (Teer 1991)

CFUBMS tekniğinde, mıknatısların arasında oluşan manyetik alan çizgileri sayesinde plazma içerisindeki elektronlara kapalı şekilde bir tuzak oluşturur. CFUBMS tekniğinde, elektronların dışarıya doğru kaçabilme ihtimalleri çok zayıf bir ihtimal olduğu için taban malzemenin tarafında yoğun plazma elde edilmektedir. Böylelikle büyüyen filmin maruz kalacağı iyon bombardımanını arttırmaktadır. CFUBMS tekniğinde taban malzemeye negatif bir potansiyel uygulanarak, bu malzeme üzerine kaplama yapılmaktadır. Bu yöntemle kaplama yapılan malzemenin özellikleri, uygulanan potansiyel değiştirilerek kontrol edilebilir. Örneğin, bu yöntemle sert, aşınmaya dayanıklı ve yüzey kalitesi çok iyi bir kaplama filmleri oluşturulabilir (Arnell and Kelly 1999).

Yüksek güçte darbeli manyetik alan sıçratma (HiPIMS)

HiPIMS tekniği son yıllarda yüzey mühendisliği uygulamalarında popüler bir ince film kaplama yöntemi olarak ortaya çıkmıştır. HiPIMS, sıçratma yönteminin bir türüdür ve malzemelerin iyonize edilmesi için yüksek güç darbelerini kullanmaktadır. Bu darbeler, malzemelerin yüzeyinden yüksek yoğunluklu plazma tabakaları oluşturarak malzemelerin iyonize olmasını sağlar. HiPIMS tekniği ilk olarak Profesör Michael Stüber tarafından 1998 yılında İsviçre'deki Paul Scherrer Enstitüsü'nde geliştirilmiştir. Daha sonra, 1999 yılında Chemfild Ar-Ge şirketi ile Kouznetsov ve meslektaşları tarafından patentlenmiştir (Kouznetsov 1999). HiPIMS'in en önemli avantajlarından biri, kaplanan malzemelerin yüzeyinde daha yüksek bir yoğunluk ve daha homojen bir bileşim sağlamasıdır. Bununla birlikte, HiPIMS'in diğer geleneksel kaplama yöntemlerine göre daha yüksek bir enerji verimliliği sağlaması, daha iyi kaplama kalitesi, daha yüksek sertlik ve daha iyi yüzey pürüzlülüğü gibi diğer avantajları da vardır. Bu nedenle, HiPIMS teknolojisi, ince film kaplama uygulamalarında çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. Bununla birlikte, HiPIMS tekniği, yüksek güç yoğunluğuna ve malzemelerin yüksek voltajlı darbelerle işlem görmesine bağlı olarak bazı zorluklar da içerir. Bu zorluklar arasında malzeme erozyonu, düşük kaplama hızları ve işlem sırasında oluşabilecek termal hasarlar gibi faktörler bulunur. Bu nedenle, HiPIMS teknolojisi, kaplama işleminin özelliklerine uygun olarak özenli bir şekilde kullanılması gereken gelişmiş bir tekniktir (Gudmundsson *et al.* 2012).

HiPIMS tekniği, hedef malzemeyi yüksek düzeyde iyonize hale getirerek droplet içermeyen ve oldukça yoğun bir plazma üretir. Bu avantajı sayesinde, HiPIMS ince film kaplama uygulamalarında sıklıkla kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra, HiPIMS teknolojisi, herhangi bir geleneksel magnetron tabanlı biriktirme sistemiyle doğrudan eklenebileceği gibi, en az yapılandırma gerektiren bir şekilde de eklenmesi mümkündür. Bu sayede, büyük ölçekli endüstriyel uygulamalarda büyük avantajlar sağlar. (Cada *et al.* 2020). HiPIMS yöntemi, yüksek yoğunluklu bir plazma oluşturarak büyük miktarda hedeften sökülmüş atomları bir taban malzeme üzerine biriktirir. Bu yöntem, geleneksel magnetron püskürtme yöntemlerine kıyasla daha yüksek verimlilik ve kaplama kalitesi sağlar ve düşük sıçratma verimine sahip metaller için de uygulanabilir bir tekniktir. HiPIMS yöntemi, film oluşturucu iyonlar üretmek için özel olarak tasarlanmıştır. Bu iyonlar, taban malzeme ve film arayüzü mikro-yapısını daha

etkili bir şekilde etkileyerek kaplama kalitesini artırır. Ayrıca manyetik alanlar kullanılarak, akıların daha iyi taşınması sağlanabilir (Anders 2017).

HiPIMS tekniği, kaplama endüstrisinde diğer tekniklere göre birçok üstünlük sunmaktadır. Bunlar arasında daha yüksek film kalitesi, daha yüksek sıçratma verimi, daha geniş malzeme yelpazesi, daha az enerji tüketimi ve daha az proses gazı tüketimi sayılabilir. HiPIMS tekniği, birden fazla malzemenin bir arada kaplanmasını sağlayarak çok bileşenli kaplamaların üretilmesine olanak tanır. Bu, malzemelerin daha yüksek bir işlevsellik sağlaması için önemlidir. Bu teknik ayrıca, mevcut magnetron tabanlı kaplama sistemlerine doğrudan veya minimum yapısal değişikliklerle kolayca entegre edilebilir. Bu avantajlar, kaplama endüstrisi için daha çevre dostu ve daha verimli bir teknoloji seçeneği sunar (Anders 2017).

HiPIMS tekniği, birçok avantajı olmasına rağmen, bazı dezavantajları da beraberinde getirir. Bunların başında yüksek maliyet gelir. HiPIMS teknolojisi, diğer kaplama tekniklerine göre daha yüksek bir maliyetle gelir. Bu nedenle, küçük ölçekli işletmeler ve araştırma laboratuvarları için uygun olmayabilir. Ayrıca, HiPIMS teknolojisi, diğer tekniklere göre daha karmaşık ekipman gerektirir. Bu, ekipman kurulumu ve işletmesinin daha zor olmasına neden olabilir. Bununla birlikte, daha fazla bakım gerektirir ve bu nedenle işletme maliyetleri daha yüksek olabilir. HiPIMS tekniğinin bir diğer dezavantajı, katot yüzeyinde ark oluşumunun meydana gelmesidir. Bu durum, genellikle iki farklı şekilde gerçekleşir: hafif ark ve ağır ark. Hafif ark, hedef malzemenin üzerinde küçük kıvılcımlar oluşturur ancak plazmaya kadar yayılmaz. Bu durum, genellikle küçük bir problem olarak değerlendirilir ve fazla endişe verici değildir. Ancak ağır ark, ciddi bir sorun olarak karşımıza çıkar. Bu durumda kıvılcımlar daha yoğun ve daha büyük boyutlardadır ve plazmaya kadar yayılır. Bu durum, hedefin ısınmasına ve mikrodropletlerin oluşmasına neden olabilir. Bu da malzeme işleme işleminin etkinliğini azaltabilir ve istenmeyen sonuçlara yol açabilir. Bu nedenle, ağır ark genellikle önemli bir sorun olarak kabul edilir ve işlem sırasında dikkatli bir şekilde yönetilmesi gerekmektedir. Bu durum, film özelliklerinin olumsuz etkilenmesine neden olur. Ark oluşumunun kaynağı tam olarak araştırılmamış olsa da hedef malzemenin saflığı ve yüzey morfolojisi ile ilişkili olduğu düşünülmektedir. Yani, hedef malzeme ne kadar saf ve yüzeyi ne kadar pürüzsüz olursa, ark oluşma olasılığı da o kadar azalır. Ti, Ta ve Cr gibi nispeten yüksek erime noktasına sahip hedef malzemeler, düşük bir ark oluşum eğilimine sahiptir. Diğer yandan, Cu ve Al gibi

nispeten düşük erime noktasına sahip malzemeler ise daha yüksek bir ark oluşum eğilimine sahip olabilir. Yani, hedef malzemenin erime noktası, ark oluşum eğilimi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir ve yüksek erime noktasına sahip malzemeler genellikle düşük ark oluşumuna yol açar. (Bugaev 1996).



MATERYAL ve METOD

Materyal

Ta/TaN çok tabakalı kompozit yapıda ince filmler endüstriyel uygulamalarda (uçak motorlarında, havacılık ve uzay uygulamalarında, kesici aletlerde, dişlilerde ve ayrıca biyomedikal implantlarda) geniş uygulama alanı olan AISI 52100 çelik üzerine sentezlenmiştir. Mekanik ve tribolojik özelliklerin belirlenmesi için AISI 52100 taban malzemeleri üzerine biriktirilen filmler kullanılırken, mikroyapı analizleri için ise silikon ve cam taban malzemeleri üzerine biriktirilen filmler kullanılmıştır. Tablo 1’de AISI 52100 çeliğinin kimyasal kompozisyonu verilmiştir.

Tablo 1. AISI 52100 Çeliğinin Kimyasal Kompozisyonu (% wt.)

Taban Malzeme	C	Si	Cr	Mn	P	S
AISI 52100	0.98-1.1	0.15-0.35	1.3-1.6	0.25-0.45	0.025	0.025

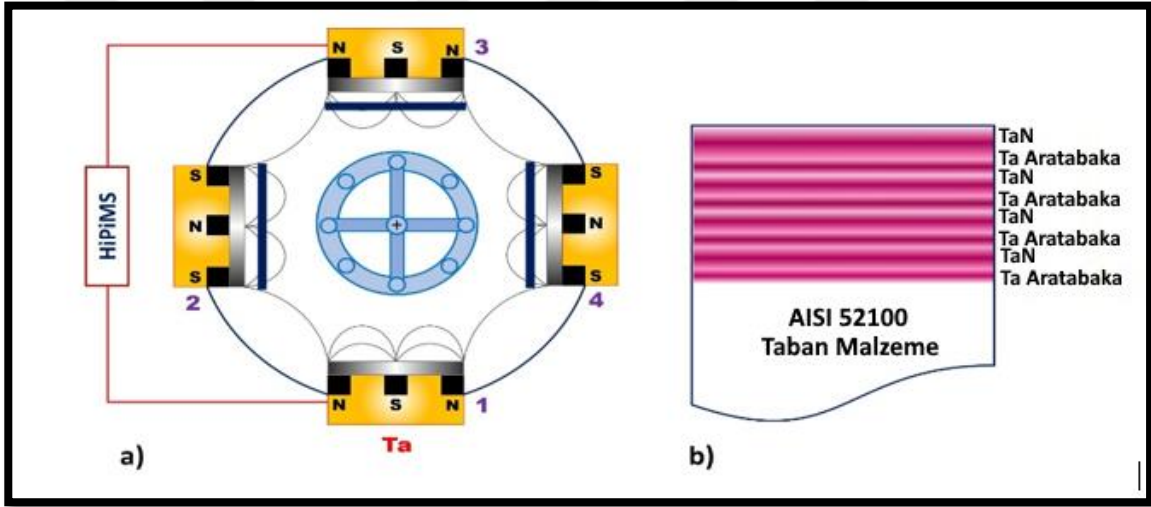
Kaplama işlemi gerçekleştirilmeden önce AISI 52100 taban malzemelerinin yüzey pürüzlülük değeri $Ra \approx 0,1$ μm değerine getirilmiştir. Bu işlem için çeşitli zımpara kademeleri (400, 600, 800 ve 1200 SiC taneleri içeren zımparalar) kullanılarak parlatma işlemi gerçekleştirilmiştir. Daha sonra taban malzemeler etil alkol ile ultrasonik banyoda 15 dakika boyunca yıkandıktan sonra kurutulmuştur. Kaplama prosesinden önce kullanılan AISI 52100 taban malzemesi ve film arasındaki adezyonu arttırmak ve olası kirlilikleri ortadan kaldırmak amacıyla taban malzemeler %5 nital solüsyonu kullanılarak dağlanmıştır.

Kaplama Prosesi

Ta/TaN çok tabakalı kompozit yapıda ince filmlerin sentezi için Şekil 6’da verilen, Teer Coating Ltd. firması tarafından üretilen/patentlenen CFUBMS+ HiPiMS hibrit sistemi kullanılmıştır. Kaplama prosesinin parametreleri ise Tablo 2’de detaylı olarak verilmiştir.



Şekil 6. PVD sistemi (Teer Coating Ltd.)



Şekil 7. CFUBMS sisteminin şematik gösterimi ve elde edilen filmlerin mikroyapı mimarisi

Tablo 2. Ta/TaN Çok Tabakalı Kompozit Yapıda İnce Film Biriktirme Parametreleri

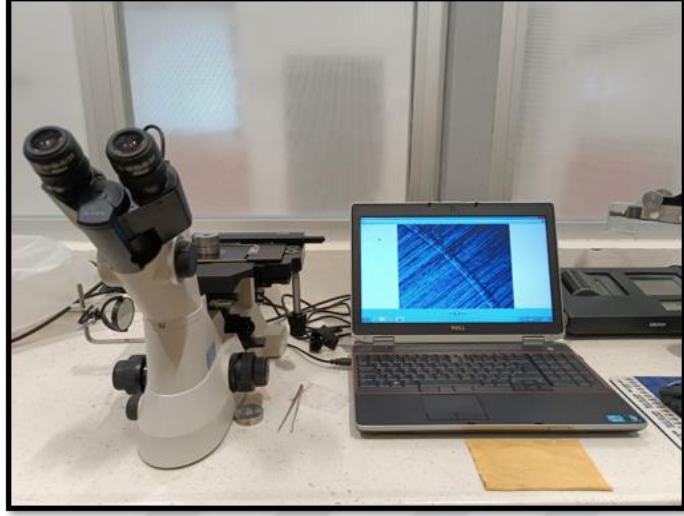
Değişken parametreler	R1	R2	R3
N ₂ Miktarı (sccm)	5	7	9
Ar Miktarı (sccm)	20	20	20
Sabit Parametreler			
Ta Hedef Voltajı (V)		600	
Frekans (Hz)		500	
Çalışma Basıncı (Pa)		0.26	
Görev Döngüsü (µs)		90	
İyon Temizleme (dak.)		30	
Kaplama Süresi (dak.)		80	
Ta Ara Tabaka Süresi (dak.)		5	
TaN Ara Tabaka Süresi (dak.)		5	

Ta/TaN çok tabakalı kompozit yapıda ince filmlerin sentezlenmesi

Ta/TaN çok tabakalı kompozit yapıda ince filmlerin sentezi için bir adet Ta hedef kullanılmıştır. Filmlerin sentezlenmesinde kullanılan sistemin şematik yapısı Şekil 7'de verilmiştir. Ta hedefe HiPiMS güç kaynağı bağlanmıştır. Plazmanın oluşturulması ve Ta hedef malzemesinin sıçratılması amacıyla yüksek saflıkta argon gazı kullanılmıştır. Taban malzemeler sisteme, kendi eksenini etrafında dönebilen bir numune tutucuya sabitlenmiştir. Taban malzeme ile hedef arasındaki uzaklık 70 mm olarak ayarlanmıştır. Sentezleme işlemine başlamadan önce sistem basıncı $3,0 \times 10^{-5}$ torr değerine düşmesi sağlanmıştır. Sistem basıncı istenen değere düşürüldükten sonra argon gazı sisteme verilmiş ve iyon temizleme işlemine başlanabilmesi için taban malzemeye uygulanan negatif voltaj kademeli olarak (0-800V) arttırılmaya başlanmıştır. İyon temizleme işlemi 30 dakika boyunca sürdürülmüştür. Bu işlemin amacı, taban malzemelerde var olan atomik seviyedeki kirliliği ortadan kaldırarak, taban malzeme ile oluşan film arasındaki adezyonu iyileştirmektir. İyon temizleme işleminden sonra Şekil 7'de verilen mikroyapı mimarisinin oluşturulması amacıyla, ilk olarak Ta hedef 600V gerilim 5 dakika boyunca uygulanmıştır. Ardından sisteme reaktif yüksek saflıkta (%99,95) nitrojen gazı verilerek 15 dakika boyunca TaN tabakası sentezlenmiştir. Bu kademeler dört kez tekrarlanarak çok tabakalı Ta/TaN ince filmleri elde edilmiştir.

Mikroyapısal Özelliklerin Araştırılması

AISI 52100 çeliği taban malzemelerin yüzeyleri hazırlanırken kademeler arasında Şekil 8'de verilen optik mikroskop ile topografi kontrol edilmiştir. Yüzey pürüzlülük değerleri ($R_a \sim 0.1 \mu\text{m}$) ise Şekil 9'da verilen Mitutoyo tarafından üretilen profilmetre cihazı ile ölçülmüştür.

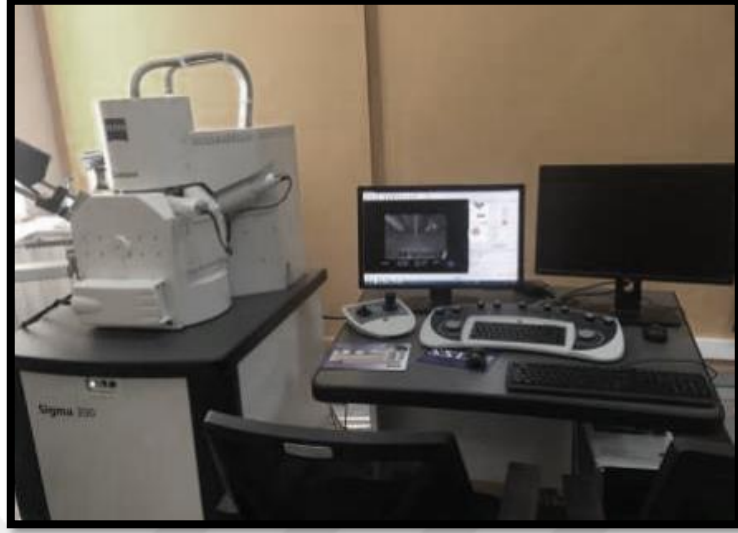


Şekil 8. Optik mikroskop



Şekil 9. Profilmetre cihazı

Ta/TaN çok tabakalı kompozit yapıda ince film kalınlığı, filmlerin mikroyapısı ve elementel analizi için Şekil 10'daki Doğu Anadolu Yüksek Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi (DAYTAM)'nde bulunan Zeiss Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) kullanılmıştır.



Şekil 10. Zeiss Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

AISI 52100 çelik taban malzemeler üzerine biriktirilen Ta/TaN çok tabakalı kompozit yapıda ince filmlerinin XRD analizleri $\lambda=1,5405 \text{ \AA}$ dalga boyunda Cu K α radyasyon kaynaklı geniş aralıklı difraktometre cihazı (Şekil 11) kullanılmıştır. Elde edilen ham veriler Origin çizim programı kullanılarak grafik hale dönüştürülmüştür.



Şekil 11. XRD cihazı

Mekanik Özelliklerin Araştırılması

Mikrosertlik ölçümleri

AISI 52100 çelik numuneler üzerine sentezlenen Ta/TaN çok tabakalı kompozit ince filmlerin mikro sertlik ölçümleri Şekil 12’de verilen Buehler Micromet 2001 mikro sertlik cihazı kullanılarak elde edilmiştir. Mikrosertlik ölçümleri Knoop uç ($172^{\circ} 30'$ tepe açısına sahip) kullanılarak 10 gf yük altında 15 sn batma süresinde yapılmıştır. Knoop ucun film yüzeyinde oluşturduğu izin uzun köşegeni (d) hesaplanarak, $HK=14229 \times P/d^2$ denklemi yardımıyla Knoop cinsinden sertlik değeri (HK) hesaplanmıştır. Elde edilen Knoop sertlik değeri, $HV \approx 0,986 \times HK$ denklemi yardımıyla Vickers cinsinden sertlik değerine (HV) dönüştürülmüştür. Son olarak elde edilen Vickers sertlik değeri 0,009807 katsayısı ile çarpılarak sertlik değerinde yaygın olarak kullanılan GPa cinsinden değer belirlenmiştir.



Şekil 12. Buehler Micromet 2001 Mikrosertlik cihazı

Scratch (çizik) testi

Ta/TaN çok tabakalı kompozit yapıda ince filmlerin, film ile taban malzeme arasındaki yapışmayı (adezyonu) belirlemek amacıyla çizik testi gerçekleştirilmiştir. Çizik testlerinde Şekil 13’te verilen CSM Instruments patentli Revetest Scratch Cihazı kullanılmıştır. Bu testlerde filmin taban malzemedan ayrıldığı yük değeri (Kritik Yük Değeri-Lc) belirlenmektedir. Lc değerini belirlemek için Rockwell-C elmas uç ($200 \mu\text{m}$) kullanılmıştır. Test, 10 mm/dakika (çizme hızı) hızında ve 100 N/dakika (yükleme oranı) parametreleri altında gerçekleştirilmiştir.



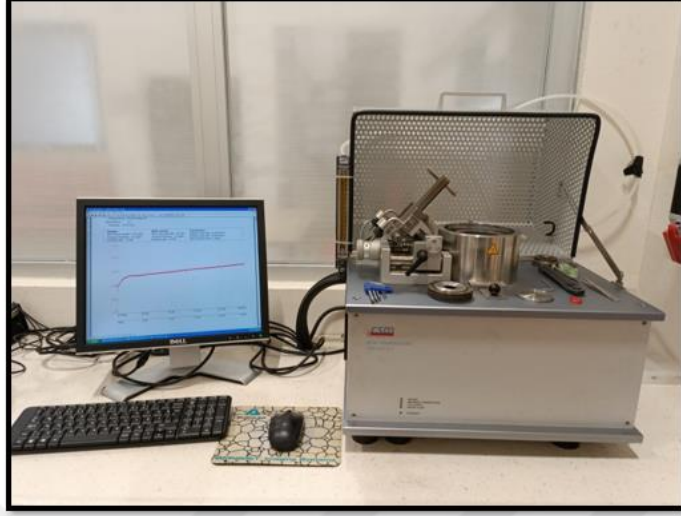
Şekil 13. CSM çizik test cihazı

Sürtünme-Aşınma (Triboloji) Özelliklerinin Araştırılması

AISI 52100 çelik taban malzemelerinin yüzeyleri üzerine biriktirilen Ta/TaN ince filmlerin sürtünme katsayısı (CoF) değerlerinin analizi için Şekil 14’te verilen CSM Yüksek Sıcaklık Tribotest cihazı kullanılmıştır. Deney sırasında kullanılan parametreler Tablo 3’te verilmiştir.

Tablo 3. Tribotest Deney Parametreleri

Parametreler	Deney Şartları
Uygulan yük, N	1
Hız, rpm	95
İz Çapı, mm	5
Test Ortamı	Hava
Ortam Sıcaklığı °C	18-22
İzafi Nem, %RH	45-55
Test Süresi, s	300
Pin çapı (Al ₂ O ₃), mm	5

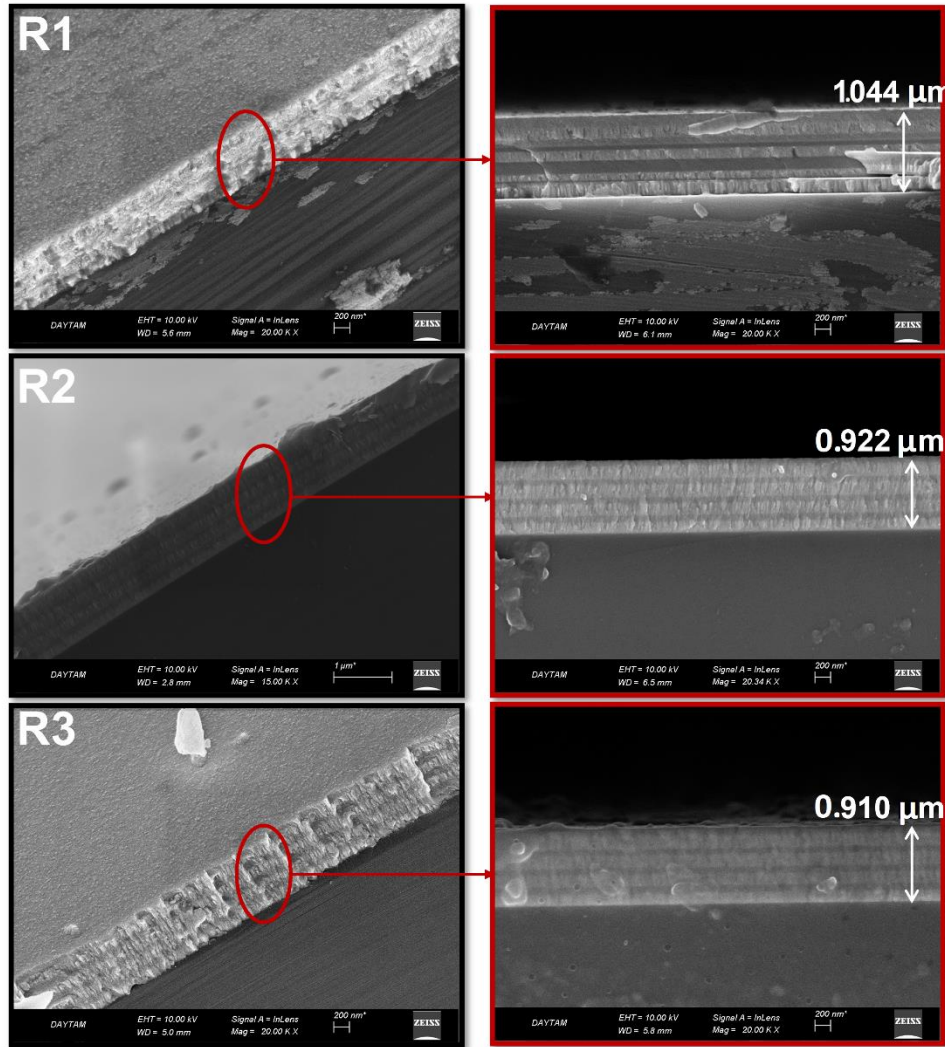


Şekil 14. CSM yüksek sıcaklık tribotest cihazı

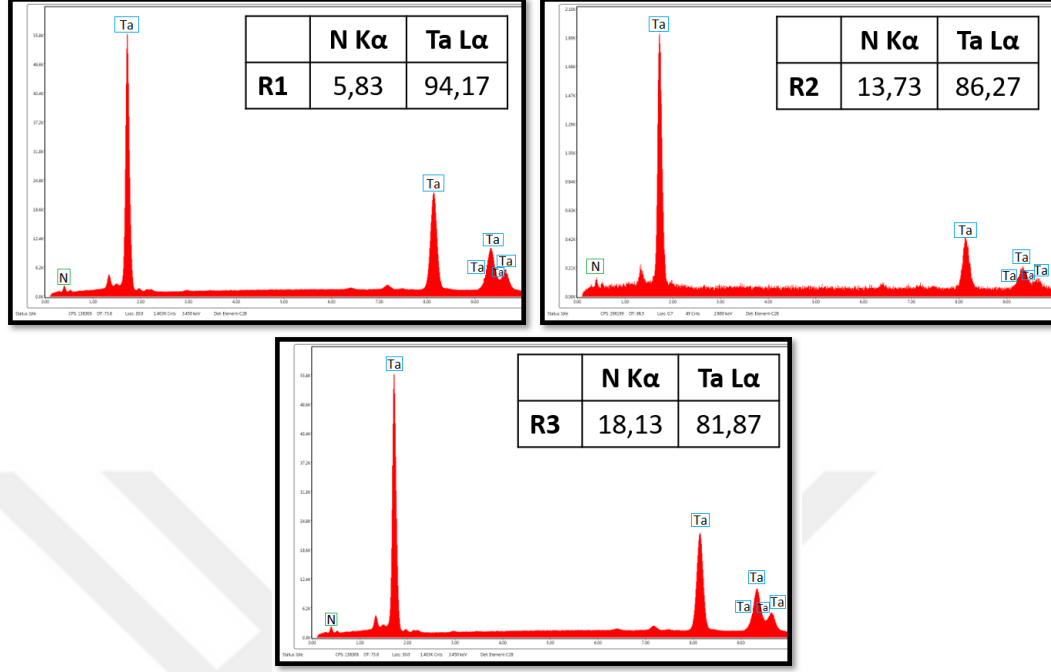
ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

SEM Analiz Sonuçları ve Tartışma

Silisyum taban malzemeler üzerine büyütülen Ta/TaN çok tabakalı kompozit yapıda ince filmlerinin mikroyapısal özelliklerinin belirlenmesi amacıyla tek kristal yapıya sahip silisyum kırılarak taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak kesit görüntüleri analiz edilmiştir. Elde edilen ince filmlerinin SEM görüntüleri Şekil 15'te, filmlerin elementel analiz sonuçları ise Şekil 16'da verilmiştir.



Şekil 15. Ta/TaN çok tabakalı kompozit yapıda ince filmlerin SEM görüntüleri



Şekil 16. Ta/TaN çok tabakalı filmlerden elde edilen EDS sonuçları

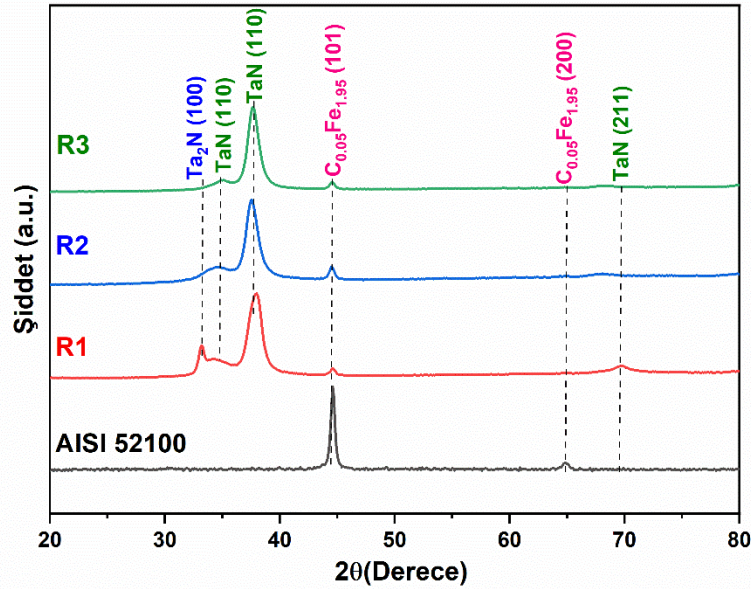
Şekil 15’te verilen film mikroyapısı incelendiğinde tüm filmlerin kolonsal bir yapıya sahip olduğu görülmektedir. Ta/TaN kompozit yapısı belirgin şekilde görülmektedir. Elde edilen mikroyapı Thornton’un yapı bölgesi modeline göre ‘Zone 1’de olduğu görülmektedir (Thornton 1977). Film kalınlıkları incelendiğinde ise en yüksek film kalınlığı 1044 nm olarak en az N₂ miktarının uygulandığı R1’de elde edilmiştir. N₂ miktarı arttıkça chamber içerisindeki reaktif gazın kullanılan hedef yüzeylerinde nitrür fazı (TaN) oluşturması nedeniyle biriktirme oranı düşmüş ve film kalınlıklarında azalma görülmüştür. Ayrıca, N₂ gazının Ar gazına göre daha düşük sızdırma oranına sahip olması da birikme oranını düşürerek, film kalınlığının azalmasına neden olmaktadır (Ding *et al.* 2017). Şekil 16’da verilen EDS sonuçlarının ise, uygulanan proses ile uyumlu olduğu görülmektedir. N₂ gaz akışı arttıkça, film kompozisyonundaki nitrür içeriği sırasıyla R1, R2 ve R3 için %5,83, %13,73 ve %18,13 olarak artış göstermiştir.

XRD Analiz Sonuçları ve Tartışma

AISI 52100 çeliği üzerine HiPIMS ile farklı N₂ miktarlarında biriktirilen çok tabakalı Ta/TaN kaplamaların XRD yansıma pik sonuçları Şekil 17’de verilmiştir. AISI 52100 taban malzemesinin XRD sonuçlarına bakıldığında, 44,183°’de C_{0.05}Fe_{1.95} (101) [JCPDS Kart: 044-

1290] ve $65,222^\circ$ 'de $C_{0,05}Fe_{1,95}$ (200) [JCPDS Kart: 044-1290] pikleri açık bir şekilde görülmektedir.

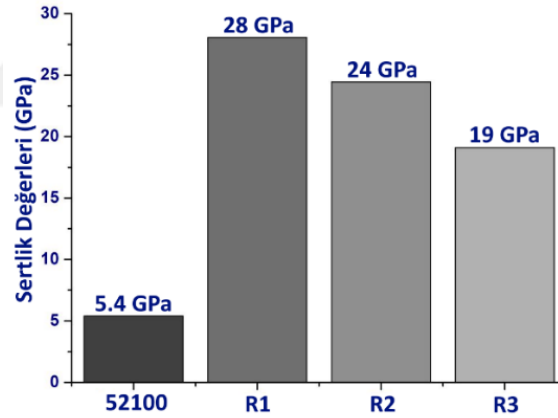
5 sccm N_2 akışı uygulanan R1'de pik yansımaları, $33,969^\circ$ 'de hegzagonal yapıda Ta_2N (100) [JCPDS Kart: 029-1321], $34,528^\circ$ 'de hegzagonal yapıda TaN (110) [JCPDS Kart: 074-0226], $37,735^\circ$ 'de kübik yapıda TaN (110) [JCPDS Kart: 025-1278] ve $68,142^\circ$ 'de ise kübik yapıda TaN (211) [JCPDS Kart: 029-1321] olarak belirlenmiştir. 7 sccm N_2 akışı uygulanan R2'de pik yansımaları, $34,528^\circ$ 'de hegzagonal yapıda TaN (110) [JCPDS Kart: 074-0226], $37,735^\circ$ 'de kübik yapıda TaN (110) [JCPDS Kart: 025-1278] ve $68,142^\circ$ 'de ise kübik yapıda TaN (211) [JCPDS Kart: 029-1321] olarak belirlenmiştir. 9 sccm N_2 akışı uygulanan R3'de pik yansımaları, $34,528^\circ$ 'de hegzagonal yapıda TaN (110) [JCPDS Kart: 074-0226], $37,735^\circ$ 'de kübik yapıda TaN (110) [JCPDS Kart: 025-1278] ve $68,142^\circ$ 'de ise kübik yapıda TaN (211) [JCPDS Kart: 029-1321] olarak belirlenmiştir. En yüksek sertlik değerinin elde edildiği R1 ince filminde, hegzagonal yapıda Ta_2N (100) varlığı sertlik değerini olumlu yönde etkilediği görülmektedir.



Şekil 17. AISI 52100 ve Ta/TaN çok tabakalı kaplama mimarisinden elde edilen XRD yansıma pikleri

Mikro Sertlik Testi Sonuçları ve Tartışma

Çok tabakalı kompozit yapıda Ta/TaN ince filmler, 52100 çelik, cam ve silikon taban malzeme yüzeylerine CFUBMS-HiPIMS hibrit sistemi ile farklı N₂ miktarlarında (5, 7 ve 9 sccm) kaplanan Ta/TaN ince filmlerin sertlik değeri R1, R2 ve R3 filmler için sırasıyla ~28, ~24 ve ~19 GPa olarak elde edilmiştir (Şekil 18). Tüm filmler kaplanmamış 52100 taban malzemedan (~5.4 GPa) çok daha serttir. En yüksek sertlik (~28 GPa) 5 sccm N₂ miktarında (N₂/Ar: 5/20) sentezlenen film için elde edilmiştir. R1'in XRD kırınımlarına bakıldığında diğerlerinden farklı olarak, sıkı düzlem hegzagonal yapıda Ta₂N (100) bir büyümenin olduğu görülmektedir. TaN filmlerinde oluşan bu tercihli yönelmenin sertliği olumlu yönde etkilediği, ayrıca film içerisinde nitrür oranı %5'in üzerinde olduğunda tercihli yönelmenin hegzagonal-Ta₂N yapısından kübik-TaN yapısına döndüğü ve sertliğin düştüğü rapor edilmiştir (Hsieh et al. 2022).



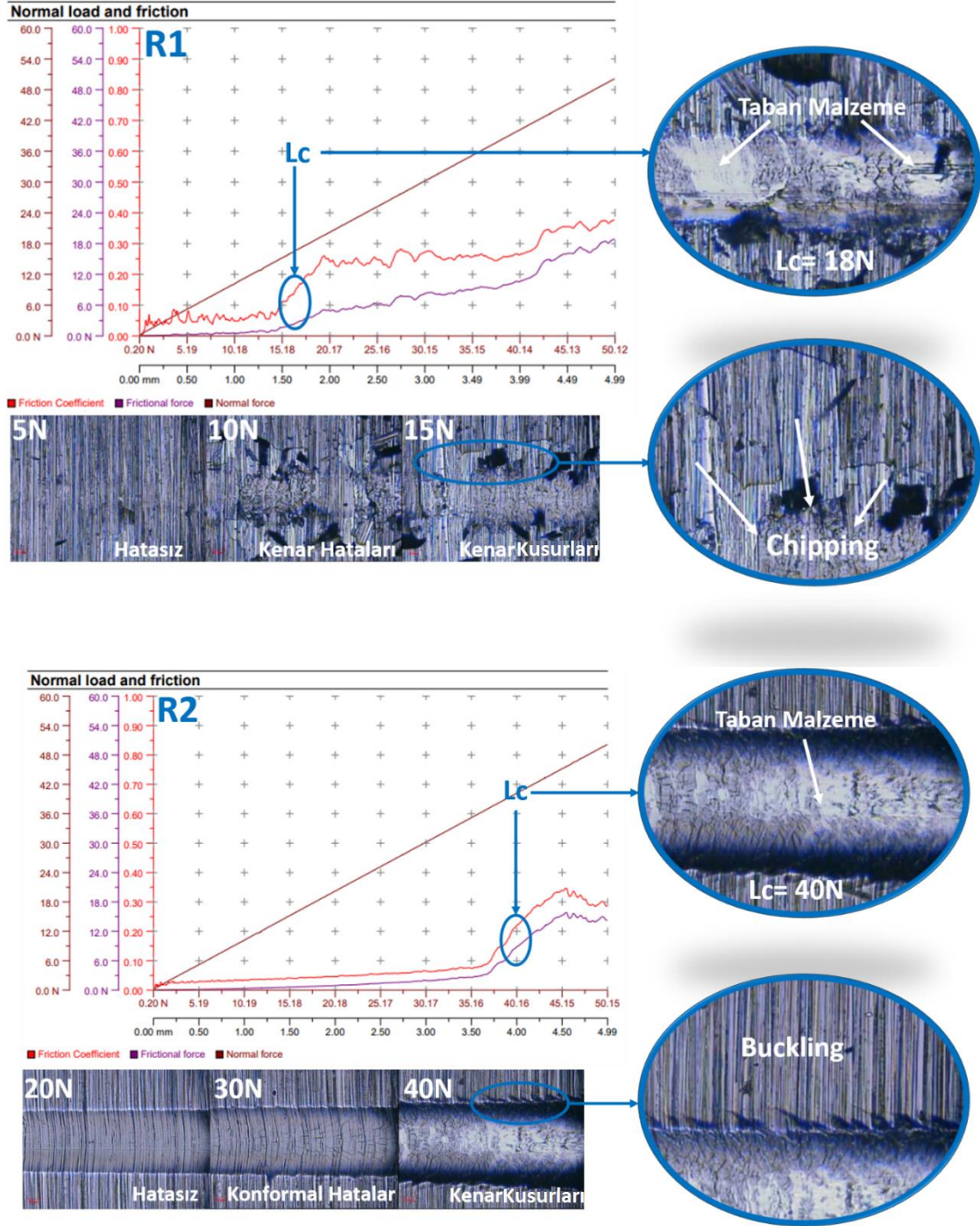
Şekil 18. AISI 52100 Taban malzeme ve Ta/TaN çok tabakalı kaplamaların sertlik değerleri

Çizik (Scratch) Testi Sonuçları ve Tartışma

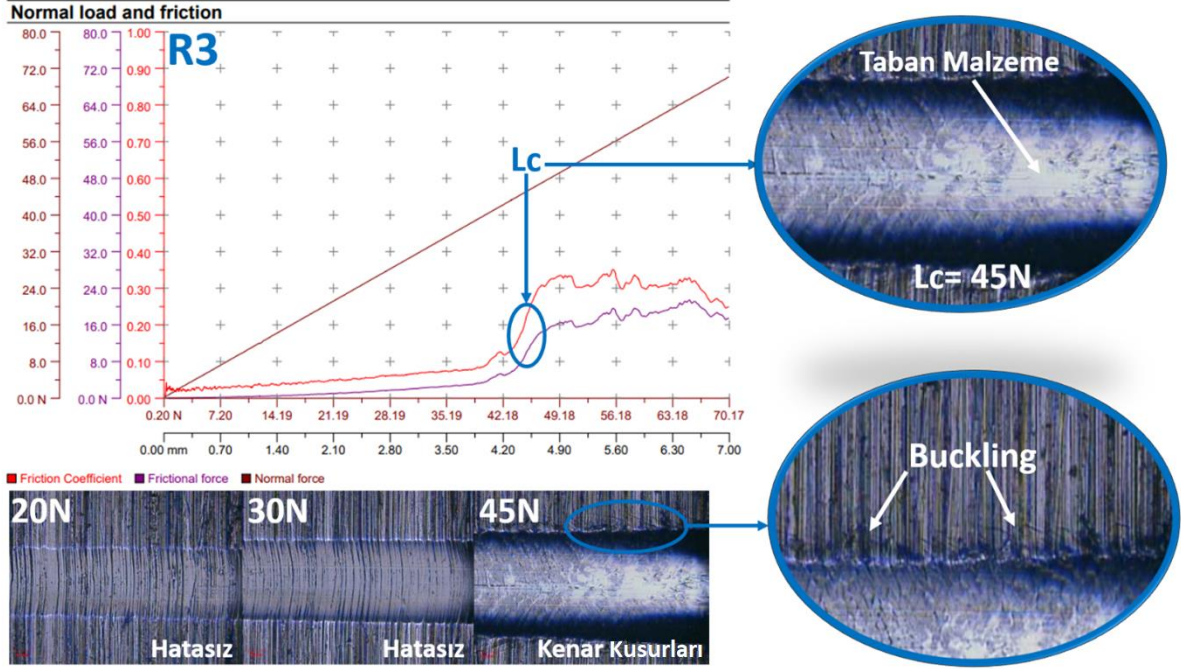
Çok tabakalı kompozit yapıda kaplanan Ta/TaN ince filmlerin taban malzeme ile film arasındaki adezyon özellikleri (kritik yük değerleri) CSM Instruments çizik test cihazı ile analiz edilmiştir. En yüksek kritik yük değeri, en düşük sertlik değerine sahip olan R3 filmde, 45 N olarak elde edilmiştir. En yüksek sertlik 5 sccm nitrojen miktarında (N₂/Ar: 5/20) sentezlenen R1 kaplamalarda elde edilirken, en düşük adezyon elde edilmiştir. Ayrıca 10N yük değerinden sonra kaplamada basma gerilmesinden kaynaklanan, chipping/pullanma

görülmeye başlamıştır. Pullanma, filmin kenarlarında veya yüzeyinde meydana gelen küçük parçaların kopmasıdır. Bu durum, filmin yüzeyinde düzensiz ve pürüzlü alanlara neden olmaktadır. Pullanma, genellikle yüksek gerilmeye maruz kalan bölgelerde adezyon yetersiz kaldığında meydana gelir ve filmin performansını ve dayanıklılığını etkilemektedir (Burnett and Rickerb, 1987).

18 N yük değerine ulaşıldığında ise adezif kopmaların miktarı artmış ve sonuç olarak kaplama taban malzemedan ayrılmaya başlamıştır. Öte yandan R2 ve R3 ince filmlerinde ise, R1'den farklı olarak kritik yük değerlerine kadar herhangi bir pullanma/chipping görülmemiştir. R2 ve R3 ince filmlerinde 30 N yük değerinden sonra konformal çatlaklar görülmeye başlamıştır. Bu tür hasar, film ve taban malzeme arasındaki gerilimin bir sonucu olarak oluşur. Konformal çatlaklar, filmin yüzeyinde düzensiz ve genellikle taban malzemesine paralel çatlaklar şeklinde görülür. Bu tip çatlaklar, filmin esnekliğini azaltır ve mekanik özelliklerini etkilemektedir (Burnett and Rickerb, 1987). R2 ve R3 ince filmlerinde, 40N değerlerinde, Şekil 19'da gösterilen buckling/burkulma kenar hasarları görülmeye başlamıştır. R2 ince filminde bu hasar daha belirgin bir şekilde görülürken, R3 ince filminde ise daha az miktarda görülmüştür. Burkulma hasarları genellikle, hareket eden ucun önünde meydana gelen basma gerilmeleri nedeniyle oluşmaktadır ve filmin mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkilemektedir (Burnett and Rickerb, 1987).



Şekil 19. R1, R2 ve R3 filmlerinin kritik yük değerleri ve çeşitli yük değerlerinde görülen hasarlar

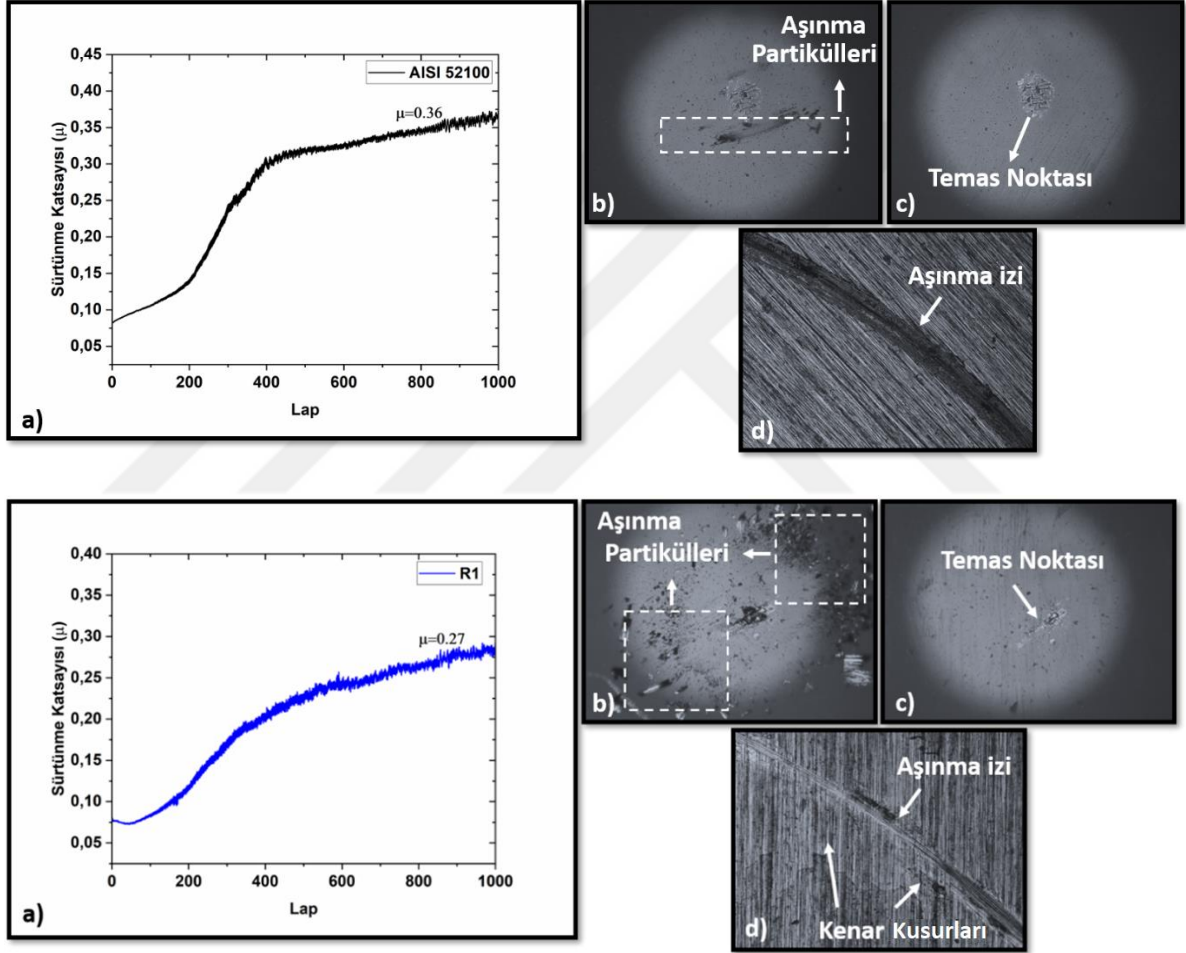


Şekil 19. R1, R2 ve R3 filmlerinin kritik yük değerleri ve çeşitli yük değerlerinde görülen hasarlar

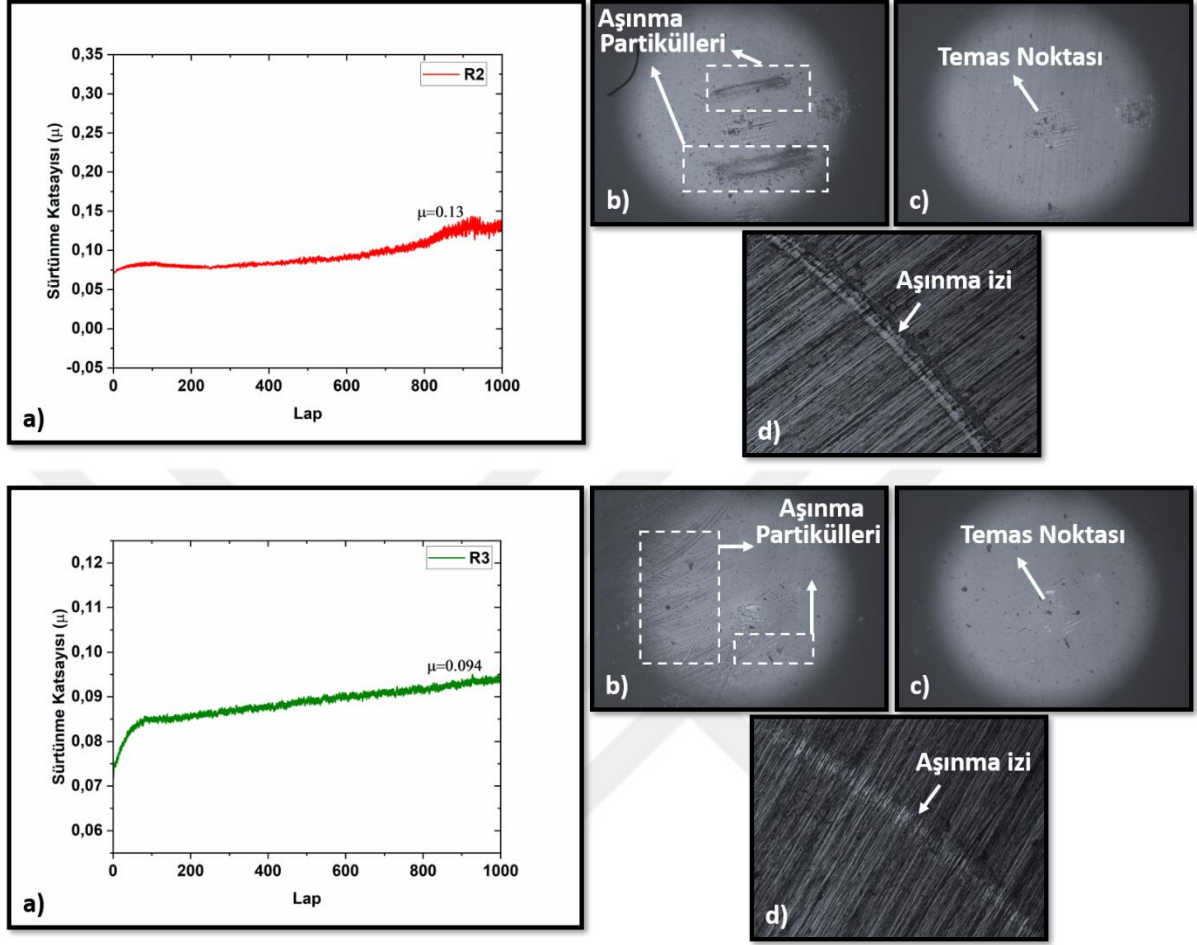
Tribo-Test Bulguları ve Tartışma

Çok tabakalı kompozit yapıda kaplanan Ta/TaN ince filmlerin ve AISI 52100 taban malzemesinin sürtünme katsayısı analizleri yapılmıştır. Sürtünme katsayısı grafikleri ve örnek aşınma izleri-aşındırıcı top görüntüleri Şekil 20’de verilmiştir. AISI 52100 taban malzemesinin sürtünme katsayısı 0.36 olarak belirlenirken, R1, R2 ve R3 ince filmlerin sürtünme katsayısı değerleri ise sırasıyla 0.27, 0.13 ve 0.094 olarak belirlenmiştir. Taban malzemeye göre çok tabakalı kompozit yapıda kaplanan Ta/TaN ince filmlerin tribolojik özelliklerinin önemli ölçüde iyileştiği açık bir şekilde görülmektedir. R1’de görülen sürtünme katsayısı Şekil 19’da verilen adezyon özellikleri incelendiğinde tutarlıdır. Ayrıca, R1 ince filminin Şekil 20’de verilen pin ve aşınma yüzeylerinden alınan optik mikroskop görüntüleri incelendiğinde, test sırasında oluşan aşınma partiküllerinin temas noktasında yoğun bir şekilde oluştuğu görülmektedir. Bu aşınma partikülleri, temas noktasında abrazif aşınmaya neden olarak sürtünme katsayısında yükselişe neden olmuştur. Ayrıca R1 ince filminin diğer filmlere oranla daha sert ve adezyonun zayıf olması da temas noktasındaki sürtünme ve aşınma

özellikleri olumsuz etkileyen diğer bir nedendir (Sahariah *et al.* 2018). R2 ve R3 ince filmlerinde ise, kararlı bir sürtünme katsayısı eğrisi görülmüş ve Şekil 20’de verilen optik mikroskop görüntüleri incelendiğinde temas noktasında aşınma partiküllerinin azlığı dikkat çekmektedir. En düşük sürtünme katsayısı, en yüksek adezyon değerinin elde edildiği R3 ince filmde görülmüştür. R2 ve R3 ince filmlerinde elde edilen bu sürtünme katsayısı değerleri literatür ile kıyaslandığında umut vericidir.



Şekil 20. R1 için, a) sürtünme katsayısı (CoF) değeri, b) Al₂O₃ pin de meydana gelen aşınmanın temizlenmiş hali c) Al₂O₃ pin de meydana gelen aşınmanın temizlenmemiş hali ve d) numune yüzeyinde meydana gelen aşınma izi



Şekil 20. R1 için, a) sürtünme katsayısı (CoF) değeri, b) Al₂O₃ pin de meydana gelen aşınmanın temizlenmemiş hali c) Al₂O₃ pin de meydana gelen aşınmanın temizlenmiş hali ve d) numune yüzeyinde meydana gelen aşınma izi (devamı)

SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Sonuçlar

Kapalı alan dengesiz manyetik alanda sıçratma (CFUBMS) ve yüksek güç darbeleri manyetik sıçratma (HiPIMS) hibrit sistemi kullanılarak Ta/TaN çok tabakalı kompozit yapıda ince filmler AISI 52100 taban malzemesi üzerine biriktirilmiştir. Daha sonra bu filmlerin yapısal, mekanik ve tribolojik olarak incelenerek sonuçları aşağıdaki gibi belirlenmiştir.

✓ CFUBMS ve HiPIMS hibrit sistemi kullanılarak biriktirilen Ta/TaN çok tabakalı kompozit yapıda ince filmlerinden elde edilen SEM analizine göre oluşturulan Ta/TaN film katmanları belirgin şekilde görülmektedir. En yüksek ince film kalınlığı olan 1044 nm, en düşük N₂ miktarının kullanıldığı R1 ince filmde elde edilmiştir. Artan N₂ miktarı ile birlikte, chamberdaki reaktif gazın hedef yüzeyinde nitrür fazı (TaN) oluşturması, biriktirme hızını düşürmüştü ve sonuç olarak film kalınlıkları azalmıştır. Ayrıca, N₂ gazının argon (Ar) gazına kıyasla daha düşük sıçratma oranına sahip olması, birikme hızını azaltarak film kalınlığının düşmesine yol açmıştır.

✓ En yüksek sertlik değeri, 5 sccm N₂ akışı uygulanan R1 (~28 GPa) elde edilmiştir. R1 ince filminin XRD analizi incelendiğinde, diğer filmlerden farklı olarak hegzagonal yapıda Ta₂N (100) yapısı görülmüştür. Bu tercihli yönelme, sertliğin artmasına neden olmuştur.

✓ Ta/TaN çok tabakalı kompozit yapıda ince filmlerin adezyon özellikleri çizik test cihazı ile analiz edilmiştir. En yüksek kritik yük değeri, R3 filmde 45 N olarak, en düşük kritik yük değeri ise R1 ince filmde 18N olarak belirlenmiştir. R2 ve R3 filmlerinde ise 40N değerlerine kadar herhangi bir kenar hasarı tespit edilmemiştir.

✓ Tribo-test sonuçlarına göre AISI 52100 taban malzemesinin ve Ta/TaN çok tabakalı kompozit yapıdaki ince filmlerin R1, R2 ve R3 için sürtünme katsayısı (CoF) değerleri sırasıyla 0.36, 0.27, 0.13 ve 0.094 olarak ölçülmüştür. Taban malzemeye göre çok tabakalı kompozit yapıda kaplanan Ta/TaN ince filmlerin tribolojik özelliklerinin önemli ölçüde iyileştiği açık bir şekilde görülmektedir. En düşük sürtünme katsayısı, en yüksek adezyon değerinin elde edildiği R3 ince filmde görülmüştür. R2 ve R3 ince

filmlerinde elde edilen bu sürtünme katsayısı değerleri literatür ile kıyaslandığıında umut vericidir.

neriler

Bu çalışmada gerçekleştirilen Ta/TaN çok tabakalı kompozit yapıda ince filmlerin yapısal, mekanik ve tribolojik özellikleri agresif ortam koşullarında çalışan parçalar için umut vermektedir. Bu ince film, taguchi deney tasarımı kapsamında optimize edilerek mekanik ve tribolojik özellikleri iyileştirilebilir. Ayrıca, biyomedikal uygulamalarda da çeşitli implant malzemeleri yüzeylerine uygulanabilir. Çünkü TaN, doku ve vücut sıvılarıyla etkileşime girdiğinde düşük toksisite ve iyi biyouyumluluk özellikleri sergilemektedir. Ayrıca TaN, yüksek korozyon direncine sahip olduğu için biyolojik ortamlarda uzun süreli kullanıma uygundur. Korozyon direnci, implantların ve cihazların ömrünü uzaatır ve malzeme yorgunluğunu azaltır. TaN ince filmler ayrıca, yüksek elektriksel iletkenliğe ve düşük elektriksel dirence sahip oldukları için mikro-elektronik devrelerde ve yarı iletken endüstrisinde bariyer katmanları ve difüzyon bariyerleri olarak kullanılma alanları araştırılabilir.

KAYNAKLAR

- Abegunde, O. O., Akinlabi, E. T., Oladijo, O. P., Akinlabi, S., & Ude, A. U. (2019). Overview of thin film deposition techniques. *AIMS Materials Science*, 6(2), 174-199.
- Anders, A. (2017). "Tutorial: Reactive high power impulse magnetron sputtering (R-HiPIMS)." *Journal of Applied Physics* 121(17): 171101.
- Aouadi, K., Nouveau, C., Besnard, A., Tlili, B., Montagne, A., & Chafra, M. (2021). The effect of bilayer periods and their thickness in magnetron sputtering protective multilayer coatings for tribological applications. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 30, 2526-2535.
- Arnell, R. D., & Kelly, P. J. (1999). Recent advances in magnetron sputtering. *Surface and Coatings Technology*, 112(1-3), 170-176.
- Arnell, R. D., & Kelly, P. J. (1999). Recent advances in magnetron sputtering. *Surface and Coatings Technology*, 112(1-3), 170-176.
- Barshilia, H. C., Deepthi, B., & Rajam, K. S. (2010). Transition metal nitride-based nanolayered multilayer coatings and nanocomposite coatings as novel superhard materials. *Nanostructured Thin Films and Coatings. Mechanical Properties*, first ed., CRC Press, Boca Raton, 427-480.
- Bernoulli, D., Müller, U., Schwarzenberger, M., Hauert, R., & Spolenak, R. (2013). Magnetron sputter deposited tantalum and tantalum nitride thin films: An analysis of phase, hardness and composition. *Thin Solid Films*, 548, 157-161.
- Biswas, B., Purandare, Y., Sugumaran, A., Khan, I., & Hovsepian, P. E. (2018). Effect of chamber pressure on defect generation and their influence on corrosion and tribological properties of HIPIMS deposited CrN/NbN coatings. *Surface and coatings technology*, 336, 84-91.
- Bobzin, K., Kalscheuer, C., Carlet, M., & Schulze, C. (2022). From cathode to substrate: Plasma diagnostics on high power pulsed magnetron sputtering deposition of titanium nitride. *Thin Solid Films*, 755, 139331.
- Brostow, W., Fałtynowicz, H., Gencel, O., Grigoriev, A., Lobland, H. E. H., & Zhang, D. (2020). Mechanical and tribological properties of polymers and polymer-based composites. *Chem Chem Tech*, 14, 514-520.
- Bugaev, S. P., Koval, N. N., Sochugov, N. S., & Zakharov, A. N. (1996, July). Investigation of a high-current pulsed magnetron discharge initiated in the low-pressure diffuse arc plasma. In *Proceedings of 17th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (Vol. 2, pp. 1074-1076)*. IEEE.
- Dai, W., & Shi, Y. (2021). Effect of bias voltage on microstructure and properties of tantalum nitride coatings deposited by RF magnetron sputtering. *Coatings*, 11(8), 911.
- Dai, W., & Shi, Y. (2021). Effect of bias voltage on microstructure and properties of tantalum nitride coatings deposited by RF magnetron sputtering. *Coatings*, 11(8), 911.

- Datta, S., Das, M., Balla, V. K., Bodhak, S., & Murugesan, V. K. (2018). Mechanical, wear, corrosion and biological properties of arc deposited titanium nitride coatings. *Surface and Coatings Technology*, 344, 214-222.
- 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.
- Eklund, P., Kerdsonpanya, S., & Alling, B. (2016). Transition-metal-nitride-based thin films as novel energy harvesting materials. *Journal of Materials Chemistry C*, 4(18), 3905-3914.
- Elangovan, T., Murugesan, S., Mangalaraj, D., Kuppusami, P., Khan, S., Sudha, C., ... & Mohandas, E. (2011). Synthesis and high temperature XRD studies of tantalum nitride thin films prepared by reactive pulsed dc magnetron sputtering. *Journal of alloys and compounds*, 509(22), 6400-6407.
- Gariba, A. M. M. (2021). Fonksiyonel derecelendirilmiş ti-b4c kompozit malzemelerin mekanik ve korozyon özellikleri (Doktora Tezi, Kastamonu Üniversitesi).
- Greene, J. E. (2017). Tracing the recorded history of thin-film sputter deposition: From the 1800s to 2017. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 35(5), 05C204.
- Grosser, M., Münch, M., Brenner, J., Wilke, M., Seidel, H., Bienert, C., ... & Schmid, U. (2010). Study on microstructural, chemical and electrical properties of tantalum nitride thin films deposited by reactive direct current magnetron sputtering. *Microsystem technologies*, 16, 825-836.
- Gudmundsson, J. T., Brenning, N., Lundin, D., & Helmersson, U. (2012). High power impulse magnetron sputtering discharge. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 30(3), 030801.
- Han, Z., Tian, J., Lai, Q., Yu, X., & Li, G. (2003). Effect of N₂ partial pressure on the microstructure and mechanical properties of magnetron sputtered CrN_x films. *Surface and Coatings Technology*, 162(2-3), 189-193.
- He, N., Li, H., Ji, L., Liu, X., Zhou, H., & Chen, J. (2017). Reusable chromium oxide coating with lubricating behavior from 25 to 1000° C due to a self-assembled mesh-like surface structure. *Surface and Coatings Technology*, 321, 300-308.
- Holmberg, K., & Matthews, A. (2009). *Coatings tribology: properties, mechanisms, techniques and applications in surface engineering*. Elsevier.
- Holmberg, K., Matthews, A., & Ronkainen, H. (1998). Coatings tribology—contact mechanisms and surface design. *Tribology international*, 31(1-3), 107-120.
- Hones, P., Martin, N., Regula, M., & Lévy, F. (2003). Structural and mechanical properties of chromium nitride, molybdenum nitride, and tungsten nitride thin films. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 36(8), 1023.
- Hsieh, J. H., Li, C., Wu, W., & Liu, S. L. (2022). Structural and Mechanical Properties of Fluorine-Containing TaC_xN_y Thin Films Deposited by Reactive Magnetron Sputtering. *Coatings*, 12(4), 508.

- Kelly, A., & Knowles, K. M. (2020). *Crystallography and crystal defects*. John Wiley & Sons.
- Kelly, P. J., & Arnell, R. D. (1997). Characterization studies of the structure of Al, Zr, and W coatings deposited by closed-field unbalanced magnetron sputtering. *Surface and Coatings Technology*, 97(1-3), 595-602.
- Kelly, P. J., & Arnell, R. D. (2000). Magnetron sputtering: a review of recent developments and applications. *Vacuum*, 56(3), 159-172.
- Khlyustova, A., Cheng, Y., & Yang, R. (2020). Vapor-deposited functional polymer thin films in biological applications. *Journal of Materials Chemistry B*, 8(31), 6588-6609.
- Kim, Y. J., Byun, T. J., Lee, H. Y., & Han, J. G. (2008). Effect of bilayer period on CrN/Cu nanoscale multilayer thin films. *Surface and Coatings Technology*, 202(22-23), 5508-5511.
- Klimashin, F. F., Koutná, N., Euchner, H., Holec, D., & Mayrhofer, P. H. (2016). The impact of nitrogen content and vacancies on structure and mechanical properties of Mo–N thin films. *Journal of Applied Physics*, 120(18), 185301.
- Kouznetsov, V., Macak, K., Schneider, J. M., Helmersson, U., & Petrov, I. (1999). A novel pulsed magnetron sputter technique utilizing very high target power densities. *Surface and coatings technology*, 122(2-3), 290-293.
- Lei, Z., Zhang, Q., Zhu, X., Ma, D., Ma, F., Song, Z., & Fu, Y. Q. (2018). Corrosion performance of ZrN/ZrO₂ multilayer coatings deposited on 304 stainless steel using multi-arc ion plating. *Applied Surface Science*, 431, 170-176.
- Leng, Y. X., Sun, H., Yang, P., Chen, J. Y., Wang, J., Wan, G. J., ... & Chu, P. K. (2001). Biomedical properties of tantalum nitride films synthesized by reactive magnetron sputtering. *Thin Solid Films*, 398, 471-475.
- Li, Q., Guo, T., Liu, L., Wang, X., Gao, K., & Pang, X. (2023). Orientation controlled microstructure and mechanical properties of TiN-Cu nanocomposite films. *Surface and Coatings Technology*, 452, 129112.
- Li, Q., Yang, W., Liu, C., Wang, D., & Liang, J. (2017). Correlations between the growth mechanism and properties of micro-arc oxidation coatings on titanium alloy: Effects of electrolytes. *Surface and Coatings Technology*, 316, 162-170.
- Li, Z., Zhang, Y., Wang, Y., Li, J., & Zhao, H. (2021). Effect of Nitrogen Flow Ratio on Degradation Behaviors and Failure of Magnetron Sputter Deposited Tantalum Nitride. *Coatings*, 11(9), 1133.
- Liang, H., Luo, Z., Liu, X., Wang, B., Qin, C., Lei, W., & Lu, A. (2020). Effect of F/O ratio on up-conversion and down-conversion luminescence properties of Er³⁺/Yb³⁺ co-doped SiO₂–Al₂O₃–AlF₃–Gd₂O₃–Na₂O glass. *Journal of Alloys and Compounds*, 827, 154274.
- Liu, C. P., & Yang, H. G. (2003). Systematic study of the evolution of texture and electrical properties of ZrN_x thin films by reactive DC magnetron sputtering. *Thin Solid Films*, 444(1-2), 111-119.

- Liu, C. P., & Yang, H. G. (2004). Deposition temperature and thickness effects on the characteristics of dc-sputtered ZrN_x films. *Materials chemistry and physics*, 86(2-3), 370-374.
- Liu, C., Bi, Q., & Matthews, A. E. I. S. (2001). EIS comparison on corrosion performance of PVD TiN and CrN coated mild steel in 0.5 N NaCl aqueous solution. *Corrosion Science*, 43(10), 1953-1961.
- Liu, X., Ma, G. J., Sun, G., Duan, Y. P., & Liu, S. H. (2011). Effect of deposition and annealing temperature on mechanical properties of TaN film. *Applied surface science*, 258(3), 1033-1037.
- Lotus, A. F., Tacastacas, S. N., Pinti, M. J., Britton, L. A., Stojilovic, N., Ramsier, R. D., & Chase, G. G. (2011). Fabrication and characterization of TiO₂-ZnO composite nanofibers. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 43(4), 857-861.
- Milošev, I., Strehblow, H. H., & Navinšek, B. (1997). Comparison of TiN, ZrN and CrN hard nitride coatings: Electrochemical and thermal oxidation. *Thin solid films*, 303(1-2), 246-254.
- Monaghan, D., & Arnell, R. D. (1992). Novel PVD films by unbalanced magnetron sputtering. *Vacuum*, 43(1-2), 77-81.
- Moody, N. R., Medlin, D., Boehme, D., & Norwood, D. P. (1998). Film thickness effects on the fracture of tantalum nitride on aluminum nitride thin film systems. *Engineering Fracture Mechanics*, 61(1), 107-118.
- Ni, W., Cheng, Y. T., Lukitsch, M. J., Weiner, A. M., Lev, L. C., & Grummon, D. S. (2004). Effects of the ratio of hardness to Young's modulus on the friction and wear behavior of bilayer coatings. *Applied physics letters*, 85(18), 4028-4030.
- Olaya, J. J., Rodil, S. E., Muhl, S., & Sánchez, E. (2005). Comparative study of chromium nitride coatings deposited by unbalanced and balanced magnetron sputtering. *Thin solid films*, 474(1-2), 119-126.
- Ovcharenko, V. D., Kuprin, A. S., Tolmachova, G. N., Kolodiy, I. V., Gilewicz, A., Lupicka, O., ... & Warcholinski, B. (2015). Deposition of chromium nitride coatings using vacuum arc plasma in increased negative substrate bias voltage. *Vacuum*, 117, 27-34.
- Pareja, R. R., Ibáñez, R. L., Martín, F., Ramos-Barrado, J. R., & Leinen, D. (2006). Corrosion behaviour of zirconia barrier coatings on galvanized steel. *Surface and Coatings Technology*, 200(22-23), 6606-6610.
- Patel, P., Roy, A., Sharifi, N., Stoyanov, P., Chromik, R. R., & Moreau, C. (2022). Tribological Performance of High-Entropy Coatings (HECs): A Review. *Materials*, 15(10), 3699.
- Pillai, R. R., & Thomas, V. (2023). Plasma Surface Engineering of Natural and Sustainable Polymeric Derivatives and Their Potential Applications. *Polymers*, 15(2), 400.
- Sahariah, B. J., Vashishtha, N., & Sapate, S. G. (2018). Effect of abrasive particle size on friction and wear behaviour of HVOF sprayed WC-10Co-4Cr coating. *Materials Research Express*, 5(6), 066424.
- Sánchez-Urbano, F., Paz-Gómez, G., Rodríguez-Alabanda, Ó., Romero, P. E., Cabrerizo-Vilchez, M., Rodríguez-Valverde, M. Á., & Guerrero-Vaca, G. (2018). Non-stick

- coatings in aluminium molds for the production of polyurethane foam. *Coatings*, 8(9), 301.
- Shiri, S., Odeshi, A., Chen, N., Feng, R., Sutarto, R., & Yang, Q. (2019). FCC tantalum thin films deposited by magnetron sputtering. *Surface and Coatings Technology*, 358, 942-946.
- Su, Y. L., Yao, S. H., Leu, Z. L., Wei, C. S., & Wu, C. T. (1997). Comparison of tribological behavior of three films—TiN, TiCN and CrN—grown by physical vapor deposition. *Wear*, 213(1-2), 165-174.
- Sundgren, J. E., & Hentzell, H. G. (1986). A review of the present state of art in hard coatings grown from the vapor phase. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 4(5), 2259-2279.
- Thornton, J. A. (1977). High rate thick film growth. *Annual review of materials science*, 7(1), 239-260.
- Wang, E., Ge, F., Zhu, P., Li, P., Meng, F., Shu, R., ... & Huang, F. (2017). Age hardening of a magnetron sputtered V-Al-Si-N quaternary coating. *Surface and Coatings Technology*, 324, 429-437.
- Zhang, S., & Zhu, W. (1993). TiN coating of tool steels: a review. *Journal of Materials Processing Technology*, 39(1-2), 165-177.
- Zhang, W. H., & Hsieh, J. H. (2000). Tribological behavior of TiN and CrN coatings sliding against an epoxy molding compound. *Surface and Coatings Technology*, 130(2-3), 240-247.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı:	Muhammed Alperen POLAT
Eğitim	
Lise:	Tevfik İleri Anadolu Lisesi (2011)
Lisans:	Atatürk Üniversitesi Makine Mühendisliği (2018)
Yüksek lisans:	Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı (2020-Devam ediyor)
Yabancı Dil Bilgisi	
İngilizce:	Orta
Tezden Üretilmiş Yayınlar	