

T.C.
ERZİNCAN BİNALİ YILDIRIM ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

AISI 4140 ÇELİĞİ YÜZEYİNE AlTiCrSiN, TiCrN, CrN,
KAPLANMASI; MİKROYAPI, TRİBOLOJİK VE AŞINMA
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Mehmet Nejat KUTLUDİL

Danışman: Doç. Dr. Levent KARA

TEZ JÜRİ ÜYELERİ

Prof. Dr. Özlem BARAN ACIMERT

Doç. Dr. Levent KARA

Dr. Öğrt. Üyesi Yaşar SERT

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ERZİNCAN, 2024

© 2024 Mehmet Nejat KUTLUDİL. Tüm hakları saklıdır.

**Her Hakkı Saklıdır.
Kabul ve Onay Sayfası**

Dr. Levent KARA danışmanlığında, Mehmet Nejat KUTLUDDİL tarafından hazırlanan bu çalışma 30/09/2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Makine Mühendisliği Anabilim Dalın'da Yüksek Lisans olarak kabul oybirliği ile kabul edilmiştir.

Başkan: Prof. Dr. Özlem BARAN ACIMERT İmza:

Üye: Doç. Dr. Levent KARA İmza:

Üye: Dr. Öğrt. Üyesi Yaşar SERT İmza:

Yukarıdaki sonuç Enstitü Yönetim Kurulunun / / 20.... tarih ve/..... sayılı kararı ile onaylanmıştır.

Doç. Dr. Kemal Volkan ÖZDOKUR
Enstitü Müdür V.

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

Bilimsel Etiğe Uygunluk Sayfası

“AISI 4140 eliği Yüzeyine AlTiCrSiN, TiCrN, CrN, Kaplanması; Mikroyapı, Tribolojik ve Aşınma Özelliklerinin İncelenmesi” isimli “Yüksek Lisans” tezim tarafımca intihal tespit programı ile incelenmiştir. Buna göre tezimde bilimsel etik ihlali ve intihal olarak nitelendirilebilecek herhangi bir durum olmadığını taahhüt ederim.

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir biçimde elde edildiğini; aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiğı gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi beyan ederim.
30/09/2024

(İmza)

Mehmet Nejat KUTLUDİL

ÖZET

AISI 4140 ÇELİĞİ YÜZEYİNE AlTiCrSiN, TiCrN, CrN, KAPLANMASI: MİKROYAPI TRIBOLOJİK VE AŞINMA ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Mehmet Nejat KUTLUDİL

**Yüksek Lisans Tezi, Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi, Fen Bilimleri
Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Danışman: Doç. Dr. Levent KARA
2024, 81 sayfa**

İslah çelikleri içinde bulunan AISI 4140 çeliği bileşiminde bulundurduğu karbon miktarından dolayı yüksek bir sertliğe sahiptir. Bunun yanında diğer çeliklere göre daha iyi bir çekme mukavemetine ve ıslah edilerek sertleştirilmeye uygun çeliklerdendir. Yüksek sertlik değerlerine sahip bu çeliklerin kullanıldığı alanlar incelendiğinde krank mili, aks mili, kovan gibi sünekliği yüksek olması gereken ve otomobil, uçak yapımı, ziraat makineleri, takım tezgâhları ve makine parçalarında kullanıldığı görülmektedir. Günümüzde bu çeliğin kullanımında en büyük engellerden birisi temas halinde olan yüzeyinin aşınması ve aşınmadan kaynaklı olarak yüzeyden kalkan tabaka nedeniyle malzeme kaybı oluşacak ve makine elemanı kullanılmaz hale gelecektir. Bu nedenle hem aşınma direncinin artırılması hem de mukavemet değerlerinin geliştirilmesi için, bu çelik yüzeyine çeşitli ısıl işlemler uygulanmaktadır. Teknolojik gelişmelerle birlikte elde edilmiş olunan çalışma sonuçları ve çeşitli yöntemler ile yüzey özellikleri geliştirilmeye ve verimli bir kullanım sunmaya çalışılmaktadır. Malzemelerin yüzey özelliklerinin daha da geliştirilmesi için günümüzde vakum teknolojilerindeki gelişmeler sonucunda elde edilen vakum kaplama teknikleri alternatif yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu yöntemlerden fiziksel buhar kaplama yöntemleri sanayide yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu çalışmada geniş bir kullanım alanına sahip olan AISI 4140 çeliğinin uzun yıllardan beri kullanılan fiziksel buhar biriktirme yöntemi ile yüzey üzerinde ince bir film oluşturularak sertlik, tribolojik ve aşınma dayanımı artırılmaya çalışılacaktır. Bu çalışmada, AISI 4140 çeliği üzerine AlTiCrSiN, TiCrN ve CrN kaplamaları uygulanmış ve bu kaplamaların sürtünme özellikleri, tribolojik özellikleri ve aşınma dayanıklılığı, ilgili deneyler aracılığıyla değerlendirilmiştir.

2024,80 Sayfa

Anahtar Kelimeler: AISI 4140 çeliği, PVD kaplama, sertlik, sürtünme.

ABSTRACT

AlTiCrSiN, TiCrN and CrN COATING ON THE SURFACE OF AISI 4140 STEEL: INVESTIGATION OF MICROSTRUCTURE, TRIBOLOGICAL AND WEAR PROPERTIES

Mehmet Nejat KUTLUDİL

**Master's Thesis, Erzincan Binali Yıldırım University, Institute of Science and
Technology, Department of Mechanical Engineering**

**Supervisor Associate Professor Levent KARA
2024, 81 pages**

AISI 4140 steel, which is found in tempered steels, has a high hardness due to the amount of carbon it contains in its compound. In addition, it is one of the steels that has a better tensile strength than other steels and is suitable for hardening by reclamation. When the areas where these steels with high hardness values are used, it is seen that they are used in automobiles, aircraft construction, agricultural machinery, machine tools and machine parts, which need to have high ductility such as crankshaft, axle shaft, barrel. Today, one of the biggest obstacles in the use of this steel is the wear of the surface in contact and material loss will occur due to the layer shielded from the surface due to abrasion and the machine element will become unusable. For this reason, various heat treatments are applied to this steel surface in order to increase both wear resistance and improve strength values. With the results of the work obtained with technological developments and various methods, it tries to improve the surface properties and to offer an efficient use. In order to further improve the surface properties of materials, vacuum coating techniques obtained as a result of developments in vacuum technologies are an alternative method. Of these methods, physical vapor coating methods are widely used in industry. In this study, it will be tried to increase the hardness, tribological and abrasion resistance of AISI 4140 steel, which has a wide range of uses, by forming a thin film on the surface with the physical vapor deposition method used for many years. In this study, AlTiCrSiN, TiCrN and CrN coatings were applied on AISI 4140 steel and the friction properties, tribological properties and wear resistance of these coatings were evaluated through related experiments.

2024,80 Pages

Keywords: AISI 4140 steel, PVD coating, wear, friction.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim sürecinde destek ve yardımlarını esirgemeyen, başta sayın hocam ve danışmanım olan Doç. Dr. Levent KARA ve Prof. Dr. Çağrı ÇIRAK ve Dr. Öğrt. üyesi Yaşar SERT'e teşekkürlerimi ve minnettarlığımı sunarım. Ayrıca laboratuvar çalışmalarında desteklerini esirgemeyen Tugay SONSUZSERT'e teşekkürlerimi borç bilirim.

Başta KUTLUDİL ve ODABAŐI ailelerine, çalışmaların devam edebilmesi ve tamamlanmasında emekleri olan METİSTEC firması, başta Koray ARSLAN bey ve şirket çalışanlarına, yüksek lisans eğitimim sürecinde desteklerinden dolayı ALTEK METAL firmasına ve çalışma arkadaşlarıma, teşekkürlerimi sunarım.

Mehmet Nejat KUTLUDİL
HAZİRAN,2024

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ	vi
TABLolar LİSTESİ	ix
SİMGELER ve KISALTMALAR	x
1. GİRİŞ	1
2. ÇELİKLERİN SINIFLANDIRILMASI	3
2.1.Çelik Tanımı ve Özellikleri.....	3
2.2.Düşük Alaşımli Çelikler.....	7
2.2.1.Düşük Karbonlu Çelikler	7
2.2.2.Orta Karbonlu Çelikler.....	9
2.2.3.Yüksek Karbonlu Çelikler.....	10
2.3.Alaşımli Çelikler	11
2.4.Düşük Alaşımli Cr-Mo Çeliği.....	14
2.4.1 AISI 4140 çeliği	15
3. KURAMSAL ÇERÇEVE	17
3.1.Yüzey Özelliklerinin İyileştirilmesi	17
3.2.PVD Kaplama	19
3.2.1.Buharlaştırma yöntemi	22
3.2.2.Sıçratma yöntemi	23
3.2.3.Katodik Ark Yöntemi.....	24
3.3.PVD Kaplama Türleri	26
3.3.1.Krom nitrür (CrN) kaplama	26
3.3.2.Titanyum krom nitrür (TiCrN) kaplama	29
3.3.3.Alüminyum titanyum krom silikon nitrür (AlTiCrSiN) kaplama	31
3.4.Literatür Taraması	31
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	36

4.1	Taban Malzeme Özellikleri.....	36
4.2	Kaplama İşlemi	36
4.3	Yapısal İncelemeler.....	37
4.4	Çizik Testi	37
4.5	Tribolojik Testler	37
4.6	AFM Analizi	38
5.	BULGULAR TARTIŞMA	38
5.1	Film Kalınlığı ve Yüzey Morfolojisi.....	38
5.2	EDS Analizi	38
5.3	XRD Analizi	42
5.4	AFM Analizi	43
5.5	Artan Yük Çizik Testi.....	46
5.6	Atmosfer ve Vakum Ortamında Aşınma Deneyi.....	50
5.	SONUÇLAR.....	74
	KAYNAKLAR	76

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1 Çeliklerin sınıflandırılması.	3
Şekil 2.2 AISI normunda adlandırılmış çeliklerin alaşımlarına uygun bir şekilde sınıflandırılması.	5
Şekil 2.3 Küresel çelik standartları	6
Şekil 2.4 Düşük karbonlu çelikler	7
Şekil 2.5 Orta karbonlu çeliklerden yapılan araç, gereç ve malzemeler	9
Şekil 2.6 Yüksek karbonlu çelikten üretilen otomotiv parçaları.....	10
Şekil 2.7 Alaşımlı çelik.	12
Şekil 2.8 AISI 4140 çeliğinin mekanik özellikleri.....	16
Şekil 3.1 Yüzey kaplama yöntemlerinin sınıflandırılması	18
Şekil 3.2 PVD kaplama yöntemleri.....	20
Şekil 3.3 PVD kaplamaların fiziksel özellikleri.....	21
Şekil 3.4 İyon destekli buharlaştırma.....	22
Şekil 3.5 Sıçratma yöntemi	23
Şekil 3.6 Yöntemin manyetik alanda kullanımı	24
Şekil 3.7 CrN kaplamanın özellikleri.....	27
Şekil 3.8 CrN fiziksel ve mekanik özellikler	28
Şekil 3.9 CrN kaplama	29
Şekil 3.10 TiCrN kaplama örnekleri	30
Şekil 5.1 AISI 4140 çeliği EDS analizi.....	39
Şekil 5.2 AlTiCrSiN çeliği EDS analizi.....	39
Şekil 5.3 AlTiCrSiN çeliği EDS analizi.....	40
Şekil 5.4 CrN EDS analizi	40
Şekil 5.5 TiCrN EDS analizi.....	41
Şekil 5.6 İnce film yapılarının XRD sonuçları ve kristalografik yapıları.	42
Şekil 5.7 İşlemsiz AISI 4140 çeliği AFM görüntüsü.....	44
Şekil 5.8 AlTiCrSiN çeliği AFM görüntüsü.	44
Şekil 5.9 CrN çeliği AFM görüntüsü	45
Şekil 5.10 TiCrN çeliği AFM görüntüsü	45

Şekil 5.11 a) AlTiCrSiN, b) TiCrN ve c) CrN kaplamalarını Lc2 mikroskop görüntüleri.	47
Şekil 5.12 AlTiCrSiN kaplamasının Lc1 noktası SEM ve mikroskop altındaki görüntüleri.	47
Şekil 5.13 AlTiCrSiN kaplamasının 90N maksimum yük noktası SEM ve mikroskop altındaki görüntüleri.	48
Şekil 5.14 Şekil 5. 15 TiCrN kaplamasının Lc1 noktası SEM ve mikroskop altındaki görüntüleri.	48
Şekil 5.15 TiCrN kaplamasının 90N maksimum yük noktası SEM ve mikroskop altındaki görüntüleri.	48
Şekil 5.16 CrN kaplamasının Lc1 noktası SEM ve mikroskop altındaki görüntüleri.	49
Şekil 5.17 CrN kaplamasının 90N maksimum yük noktası SEM ve mikroskop altındaki görüntüleri.	49
Şekil 5.18 AISI 4140 Çelik Numunesi Sürtünme Katsayısı grafiği	50
Şekil 5.19 AlTiCrSiN Numunesi Sürtünme Katsayısı grafiği	51
Şekil 5.20 CrN Numunesi Sürtünme Katsayısı grafiği.	51
Şekil 5.21 TiCrN Numunesi Sürtünme Katsayısı grafiği.	52
Şekil 5.22 AISI 4140 çeliği atmosfer ortamında aşınma izi optik profilometre görüntüsü.	53
Şekil 5.23 AISI 4140 çeliği atmosfer ortamında aşınma izi SEM görüntüsü.	54
Şekil 5.24 AlTiCrSiN kaplaması atmosfer ortamında aşınma izi optik profilometre görüntüsü.	54
Şekil 5.25 AlTiCrSiN kaplaması atmosfer ortamında aşınma izi optik SEM görüntüsü.	55
Şekil 5.26 TiCrN kaplaması atmosfer ortamında aşınma izi optik profilometre görüntüsü.	55
Şekil 5.27 TiCrN kaplaması atmosfer ortamında aşınma izi SEM görüntüsü.	56
Şekil 5.28 CrN kaplaması atmosfer ortamında aşınma izi optik profilometre görüntüsü.	56
Şekil 5.29 CrN kaplaması atmosfer ortamında aşınma izi SEM görüntüsü.	57
Şekil 5.30 AISI 4140 çeliği atmosfer ortamında triboloji testi sonrası oluşan maksimum derinlik.	58

Şekil 5.31 AlTiCrSiN kaplaması atmosfer ortamında triboloji testi sonrası oluşan maksimum derinlik.	59
Şekil 5.32 TiCrN kaplaması atmosfer ortamında triboloji testi sonrası oluşan maksimum derinlik.	60
Şekil 5.33 CrN kaplaması triboloji testi sonrası oluşan maksimum derinlik.	61
Şekil 5.34 AISI 4140 çeliği vakum ortamında sürtünme katsayısı.	62
Şekil 5.35 AlCrTiSiN çeliği vakum ortamında sürtünme katsayısı.	62
Şekil 5.36 CrN çeliği vakum ortamında sürtünme katsayısı.	63
Şekil 5.37 TiCrN çeliği vakum ortamında sürtünme katsayısı.	63
Şekil 5.38 Atmosfer ortamında gerçekleştirilen sürtünme katsayısı sonuçları.	64
Şekil 5.39 Vakum ortamında gerçekleştirilen sürtünme katsayısı sonuçları.	64
Şekil 5.40 AISI 4140 çeliği vakum ortamında aşınma izi optik profilometre görüntüsü.	66
Şekil 5.41 AISI 4140 çeliği vakum ortamında aşınma izi SEM görüntüsü.	66
Şekil 5.42 AlTiCrSiN kaplaması vakum ortamında aşınma izi optik profilometre görüntüsü.	67
Şekil 5.43 AlTiCrSiN kaplaması vakum ortamında aşınma izi SEM görüntüsü.	67
Şekil 5.44 CrN kaplaması vakum ortamında aşınma izi optik profilometre görüntüsü.	68
Şekil 5.45 CrN kaplaması vakum ortamında aşınma izi SEM görüntüsü.	68
Şekil 5.46 TiCrN kaplaması vakum ortamında aşınma izi optik profilometre görüntüsü.	69
Şekil 5.47 TiCrN kaplaması vakum ortamında aşınma izi SEM görüntüsü.	69
Şekil 5.48 AISI 4140 çeliği vakum triboloji testi sonrası oluşan maksimum derinlik. ..	70
Şekil 5.49 AlTiCrN kaplı çeliğin vakum triboloji testi sonrası oluşan maksimum derinlik.	71
Şekil 5.50 CrN kaplı çeliğin vakum triboloji testi sonrası oluşan maksimum derinlik. .	72
Şekil 5.51 TiCrN kaplı çeliğin vakum triboloji testi sonrası oluşan maksimum derinlik.	73

TABLULAR LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Tablo 2-1 AISI 4140 çeliği alaşım elementlerinin bileşik içindeki oranları	16
Tablo 4-1 AISI 4140 çeliği alaşım elementlerinin bileşik içindeki oranları.....	36
Tablo 5-1 AlTiCrSiN EDS analizi kütlece ve atomik yüzde oranları.....	40
Tablo 5-2 CrN EDS analizi kütlece ve atomik yüzde oranları.....	41
Tablo 5-3 TiCrN EDS analizi kütlece ve atomik yüzde oranları	41
Tablo 5-4 Yapılan aşınma testlerinden elde edilen Lc_2 değerleri.....	46
Tablo 5-5 Yapılan aşınma testlerinden elde edilen Lc_2 ve sertlik değerleri.....	46

SİMGELER ve KISALTMALAR

Simgeler

AFM:	Atomik Kuvvet Mikroskopy
AISI:	Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü
AlTiCrSiN:	Alüminyum titanyum krom silisyum nitrür
CVD:	Kimyasal Buhar Biriktirme
CrN:	Krom Nitrür
EDS:	Enerji Dispersiv Spektrumu
GPa :	Gigapascal
HB:	Brinell Sertlik Birimi
Lc:	Kritik yük
MPa:	Megapascal
N:	Newton
PVD:	Fiziksel Buhar Biriktirme
SEM:	Taramalı Elektron Mikroskopy
TiCrN:	Titanyum krom nitrür
XRD:	X-ışını Difraktometresi
μ:	mikro
μm:	mikrometre

1. GİRİŞ

Mühendislik alanında kullanılan önemli malzemelerden olan metal ve metal alaşımların genel olarak karakteristik özelliklerini incelediğimizde, kristal yapıda olduğu görülmektedir. Aynı zamanda metal ve metal alaşımlar yüksek dayanıklılığa sahip olan malzemelerdir. Ayrıca kolay şekillendirilebilir özelliği sayesinde hem tüketicilere hem de üreticilere önemli kazanımlar sağlamaktadır (Callister ve Rerhwich,2018). Mühendislik alanındaki temel malzemelerin başında gelen metaller son derece geniş bir aileye sahiptir. Temel olarak demir alaşımları ve demir dışı alaşımlar olarak ikiye ayrılır. Demir alaşımları ise dökme demirler ve çelikler şeklinde, demir dışı metaller ise alüminyum, titanyum magnezyum, çinko olarak sınıflandırılır.

Sade karbonlu çelikler incelendiğinde yüksek dayanımlara sahip olamamakta, sertleşme kabiliyetleri düşük ve korozyon dayanımları düşük olduğu görülmektedir. Bu nedenle alaşımlama yapılarak bu özellikler iyileştirilmektedir. Alaşımlama metalleri incelendiğinde Si, Ni, Mo, V, W, Al elementler görülmektedir. Her alaşım elementi bileşim oranına göre çeliklerin kullanım özelliklerini ve imalat özelliklerini değiştirmektedir (Kesti,2009).

İslah çelikleri arasında yer alan “AISI 4140” çeliği bileşiminde bulundurduğu karbon miktarından ötürü oldukça yüksek bir sertliğe sahip olan çeliklerden biridir. AISI 4140 bunlara ek olarak, diğer çeliklerle kıyaslandığında son derece elverişli bir çekme mukavemetine sahip olan ve ıslah edilerek sertleştirilme açısından da uygun olan çeliklerden biridir. Yüksek sertlik değerlerine sahip bu çeliklerin kullanıldığı alanlar incelendiğinde krank mili, aks mili, kovan gibi sünekliliği yüksek olması gereken ve otomobil, uçak yapımı, ziraat makineleri, takım tezgâhları ve makine parçalarında kullanılmaktadır (Gülgen2008).

Günümüzde bu çeliğin kullanımında karşılaşılan en büyük problemlerin başında çalışma koşulları altında temas yüzeylerinde meydana gelen aşınma ve buna bağlı olarak kullanım ömrünün yeterli olmamasıdır. Bu nedenle aşınma direncinin artırılması için, bu çelik yüzeyine çeşitli ısıl işlemler uygulanmaktadır. Ancak yapılan ısıl işlemler ile de malzemenin aşınma direnci belirli seviyelere kadar çıkartılabilmektedir. Artan ihtiyaçlar ile birlikte aşınma direncini ve buna bağlı kullanım ömrünü artırmak için çeşitli kaplama

yöntemleri dikkate değer yöntemler olarak bilimsel çalışmalarda ve sanayide kullanılmaktadır. Bu çalışmada incelenecek olan AlTiCrSiN, TiCrN, CrN, kaplamalar ile aşınma direncini artırılması ve kullanılan malzemenin ömrünün uzatılması hedeflenmiştir. Teknolojik gelişmelerle birlikte elde edilmiş olunan çalışma sonuçları ve çeşitli yöntemler ile yüzey özellikleri geliştirilmeye ve verimli bir kullanım sunmaya çalışmaktadır. Ancak halen istenilen değerlere ulaşamamış ve çalışmaya açık bir konu haline gelmiştir (Callister ve Rerhwisch,2018).

Malzemelerdeki aşınma ve benzer durumları önlemek için birçok yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemlerden PVD olarak adlandırılan fiziksel buhar biriktirme yöntemi 20. yüzyılın ilk çeyreğinden beri bilinmesine rağmen çok uzun zaman boyunca verimli bir şekilde kullanılamamıştır. Bunun nedenlerinin en önemlisi vakum teknolojisinin yeteri kadar gelişmemiş olmasıdır. 21. yüzyıl ile birlikte yeniden popüler olmaya başlayan PVD teknolojisi ülkemizde ise, batı ülkelerine kıyasla çok sonraları popüler olmuş ve yeteri kadar önemi anlaşılamamıştır (Dikeç, 2010).

Yüzey mühendisliği bu yüzyılın başlarında sert kaynak, alevle sertleştirme, gaz karbürleme ve nitrüleme ile oldukça gelişmiş ve PVD (fiziksel buhar çöktürme), CVD (kimyasal buhar çöktürme) teknikleri ve iyon implantasyon ile büyük ilerleme göstermiştir (Yahyaoğlu,2021). İnce, sert, aşınma ve korozyona dirençli kaplamalar kesici takımlarda ve kalıba alma parçalarında önemli bir uygulama alanı bulmuştur. Düşük işlem sıcaklıklarında uygulanan PVD yönteminin keşfi, taban malzemenin mukavemeti değiştirilmeksizin genellikle takım çelikleri üzerine kaplama yapma olanağını sağlamıştır (Denktaş, 2009).

PVD yöntemi ile hedef malzeme olarak çeşitli malzemeler kullanılabilir. Bu hedef malzemeleri incelediğimizde alüminyum, titanyum, krom, bakır, nikel ve niyobyum gibi elementler karşımıza çıkmaktadır. Bu elementler ile gerek saf olarak gerekte birden farklı kombinasyonlar ile kompozit bir kaplama elde edilebilir. Bu kaplamalar ile birçok yüzey özelliğinin iyileştirilmesi mümkündür. Yaygın olarak kullanılan elementlere baktığımızda, titanyum, krom ve bakır kaplamaların daha çok sürtünme ve aşınma özelliklerinin iyileştirmek için kullanıldığını görmekteyiz.

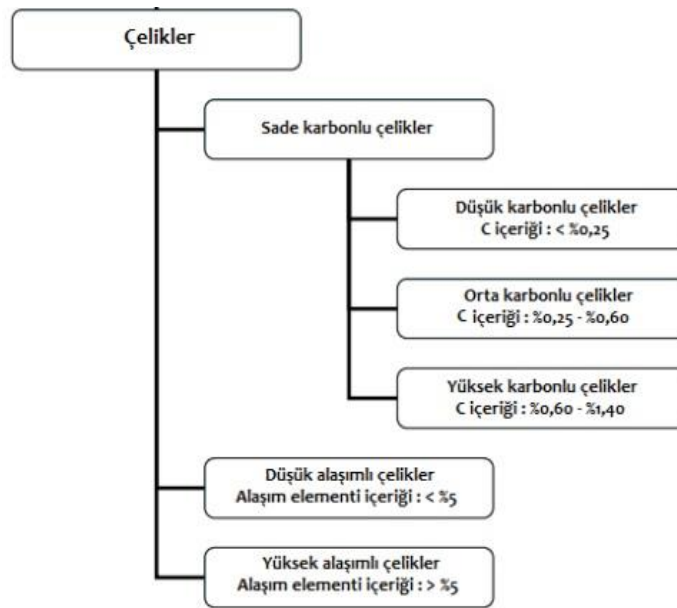
Bu tez kapsamında öncelikle AISI 4140, dolayısıyla çelik ile ilgili konular üzerinde durulduktan sonra, PVD kaplama yöntemlerinden olan katodik ark yöntemi ve bu yöntemlerin AISI 4140 çeliği üzerinde başta sertlik ve mikro yapı olmak üzere aşınma ile ilgili özellikleri de incelenecektir.

2. ÇELİKLERİN SINIFLANDIRILMASI

2.1. Çelik Tanımı ve Özellikleri

Çelik, genellikle %0,02 ile %2,1 arasında değişen, demir elementi ve karbon içeriğinden oluşan bir alaşımdır. Alaşımli çeliğin karbon içeriği çeliğin sınıflandırılmasında rol oynamaktadır. Günümüzde inşaat sektöründen havacılığa, otomotivden silah endüstrisine kadar uzanan çelik malzeme kullanımı insan hayatında çok önemli bir role sahiptir. Doğada birçok malzeme hammadde şeklinde bulunması, işlenebilmesi ve gelişen teknolojilerle yeni malzemeler keşfedilmesine rağmen çeliklerin yerini tamamlayıcı özellikler ve ekonomik boyutlarına erişememiştir. Bu durum birçok sektörün çeliklerin kullanıldığı makine parçaları ve makinelere ihtiyaç duymasına sebep olmuştur (Singh, 2016)

Çelikler belirli ölçülere ve işlemlere göre belirli gruplara ayrılmaktadır. Aşağıdaki Şekil 2.1'de çeliklerin sınıflandırılmasına yer verilmiştir.



Şekil 2. 1Çeliklerin sınıflandırılması (Sarı ve Kaluç, 1999).

Çeliklerin kullanıldığı alanların çok geniş bir yelpazeye ayrılmasındaki en büyük neden birden çok çelik çeşidinin bulunmasıdır. Endüstriyel olarak ağır çalışma koşullarında kullanılan çelikler uzun ömürlü, yüksek mukavemetli, korozyon dayanımı iyi olan malzemelerdir. Tüm bu özelliklerinden ötürü günümüzde çeliğin kullanım alanı son derece geniştir (Dikeç, 2010)

Hem Türkiye’de hem de diğer dünya ülkelerinin birçoğunda, her yıl birçok makine parçası başta sürtünme olmak kaydıyla, makinenin bulunduğu ortamın şartları, makinenin bakımsız bırakılması ve makinenin ömür kriterlerinden ötürü hurdaya ayrılmaktadır. Bu durum işletmelerin hem maliyetlerini artırmakta hem gelirlerinin düşmesine yol açmakta hem de son kullanıcıya, yani tüketicilere ekonomik olarak bir yük olarak göze çarpmaktadır (Yahyaoglu, 2021). Tüm bu olumsuzluklara ek olarak, makinenin üretim sürecinde harcanan enerji, hammadde ve iş gücünün boşa harcanması doğaya ve insana zarar vermektedir. Bileşenlerine göre üç ana kategoride inceleyebileceğimiz çelikler sade, orta ve yüksek karbonlu çeliklerdir. Bu üç kategori yüzde karbon miktarına göre belirlenmektedir (Balıkçı,2016).

Karbon bileşenine göre %0-0,2 oranında karbon içerenlere düşük karbonlu, %0,2-0,60 oranında karbon içerenlere orta karbonlu ve %0,60’dan fazla karbon içeren çelikler yüksek karbonlu çelikler olarak adlandırılmaktadır (Dikeç,2010). Bileşenlerine göre ayrılmış olan çeliklerin kullanım alanlarını detaylı olarak incelersek, düşük karbonlu çelikler Cıvata, somun, ıslah edilebilir makine parçaları imalatı, yapı ve inşaat sektöründe, orta karbonlu çelikler, makine, cıvata, somun, dingil, gemi şaftı, uskur mili, dişli çark, transmisyon mili, frezeli mil, yük kancası, manivela kolu, ray, kovan, aks, krank milleri ve yüksek karbonlu çelikler ise Mil, şaft, cıvata, somun, spiral ve yaprak yaylar, makaslar, kesici basit takımlar, zımba, kepçe dişlisi gibi alanlarda sıklıkla kullanılmaktadırlar (Çelik vd, 2008).

Çelikler ülkelere ve çeşitli normlara göre standartlaştırılmış bir adlandırma ile ifade edilebilmektedir. Örneğin bu çalışma kapsamında incelenecek olan AISI (Amerikan demir ve çelik enstitüsü) ABD ’normunda standartlaştırılmış olan çeliklerden biri olarak karşımıza çıkmaktadır (Callister ve Rerhwich,2018).

Aşağıda yer alan şekil2.2’de AISI standartlarında adlandırılmış olan çeliklerin bileşiklerindeki alaşım elementleri ve örnekleri görülmektedir.

Sınıf	Alaşım Elementi	Benimsenmiş örnek
10XX	C	1020, 1040, 1060
11XX	C,S (otomat)	1120
2XXX	Ni	2130
3XXX	Ni + Cr	3140
4XXX	Mo + Cr + Ni	4140, 4340
5XXX	Cr	5160
6XXX	V	6150
7XXX	W	7230
86XX	Ni + Cr + Mo	86,8660
92XX	SI	9260

Şekil 2. 2 AISI normunda adlandırılmış çeliklerin alaşımlarına uygun bir şekilde sınıflandırılması (Callister ve Rehwhisch,2018).

AISI 4140 çeliği içerisinde bulundurduğu elementler sayesinde yüksek sertlik, aşınma direnci ve darbe dayanımı özellikleri kazanmıştır. Bu özelliklerinden dolayı makine çelikleri, türbin motorları, soğuk çekme mil ve çubukları, yaylar, fren halka ve kolları, gemi zincir ve demirlerin yapımında, turbo jeneratörlerin, demir yol tekerlekleri ve millerinde, starter dişlileri gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Metal malzemelerin %90’ı demir elementi içermektedir (Gülgen, 2008)

İçerik olarak demir içeren bu malzemeler içinde bulundukları karbon miktarına göre çelik ya da dökme demir olarak adlandırılmaktadır. Çelikler %C 0,05-2,11 dökme demirler ise %C 2,11-4,5 karbon içermektedirler. Çelikler demir/karbon alaşımları olduğundan, yapısında bulundukları demir dışı elementler sayesinde çelikler çeşitli kullanım özellikleri kazanabilmektedir. Ancak alaşım bulundurmeyen yani sade karbonlu çeliklerde bulunmaktadır (Callister ve Rehwhisch,2018). Çelik kullanım alanının fazla olması, hayati öneme sahip alanlarda kullanılmasından ötürü belirli standartlara uygun

olması gerekmektedir. Aşağıdaki Şekil2.3'te küresel çelik standartları ve açılımları görülmektedir.

Kısaltma	Açılımı
AFNOR	Fransız Standartları Enstitüsü
AISI	Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü
ASTM	Amerikan Malzeme Test Birliği Standartları
BS	İngiltere Standartları
DIN	Alman Standartları Enstitüsü
EURONORM	Avrupa Standartları
GOST	Rusya Standartları Enstitüsü
ISO	Uluslararası Standartlar Organizasyonu
JIS	Japonya Standartları
SAE	Otomotiv Mühendisleri Birliği
TSE	Türk Standartları Enstitüsü

Şekil 2. 3 Küresel çelik standartları (Yahyaoğlu, 2021)

Kompleks veya basit bir makede birbiri üzerinde yani makine parçalarının birbirleriyle temas halinde olduğu birçok eleman bulunmaktadır. Bu elemanlar birbiri ile temas ettiğinden malzeme yüzeylerinde istenmeyen durumlar meydana getirebilmektedir. Optimum şartlarda çalışan bir makine parçası yani aşırı yükler altında çalışmayan, istenilen sıcaklarda, yeterli yağlama vb. parametreleri sağlasa bile bir zaman sonra bu elemanların yüzeyinde deformasyonlar, talaş kalkmaları hatta çatlaklar oluşabilecektir (Singh, 2016)

Yukarıda söz edilen durumlarla karşı karşıya kalınması durumunda kullanılan makine elemanlarının ömürlerinde kısalmanın olabileceğini ve belirli bir zaman sonra ise kullanılmayacak hale geleceğini söylemek mümkündür. Ancak ilerleyen teknolojiler sayesinde ve çelik üretiminin ileri teknoloji ile işlendiğini dikkate aldığımızda, çelik endüstrisinde kullanılan malzemelerin yüzey özelliklerinin iyileştirilmesi sayesinde gerek

makine elemanlarının gerekse de bu makinelerin parçalarının kullanılabilirliğinin arttığı çok açık bir şekilde görülmektedir (Yahyaoglu, 2021).

Çalışmanın bu bölümünde çeliklerin sınıflandırılmasına izleyen başlıklarda ayrıntılı şekilde yer verilecektir.

2.2. Düşük Alaşımli Çelikler

Alaşimsız çelikler az miktarda mangan, silisyum, oksijen, azot ve kükürt içeren, alaşım katkısı olmayan element bulunduran karbon çelikleridir (Kesti,2009; Gülgen, 2008)

2.2.1. Düşük Karbonlu Çelikler

Düşük karbonlu çelikler sac ve şerit halinde bulunan düz haddelenmiş ürünlerdir. Bileşimlerinde %0,25 oranında karbon içermektedir. Düşük karbonlu çelikler çok kolay şekillendirilebilme özelliğine sahiptir. Diğer çelik türlerine göre en fazla üretilen ve tercih edilen çelik türü düşük karbonlu çeliklerdir. Düşük karbonlu çelikler düşük dayanımlı diğer çeliklerle kıyaslandığında, daha yumuşak, sünek ve yüksek tokluk özellikleri vardır (Singh, 2016).

Aşağıdaki Şekil 2.4’de işlenmiş durumdaki düşük karbonlu çelik borularla ilgili bir örnek görülmektedir.



Şekil 2. 4 Düşük karbonlu çelikler (Ekinci ve Akdemir, 2011)

Düşük karbonlu çelik, düşük karbon içeriğiyle (genel olarak %0,05- %0,32 aralığında) karakterize edilen bir çelik türüdür. Bu özellik, düşük karbonlu çelikleri daha dövülebilir ve sünek, ancak daha az dayanıklı hale getirir. Bu tür çeliğin en büyük avantajlarından biri, daha az karbon ve diğer alaşım elementleri gerektirmesi nedeniyle uygun maliyetli olmasıdır, bu da onu genellikle daha ucuz bir seçenek haline getirebilmektedir.

Yukarıdakilere ek olarak, düşük karbonlu çelikler kolay bir şekilde temin edilebilir olmalarından ve işlenmesi kolay olduğundan çeşitli uygulamalar açısından tercih edilir duruma gelmiştir (Balıkçı, 2016).

Birçok özelliğe ve türe sahip olan düşük karbonlu çelik türleri ve özellikleri aşağıda sıralanmaktadır:

- AISI 1018: AISI 1018, %0,18 karbon içeriğine sahip, mükemmel işlenebilirlik ve kaynaklanabilirliğe sahip, düşük karbonlu genel amaçlı bir çeliktir. Yapı parçalarının, otomobil parçalarının ve mekanik parçaların üretiminde yaygın olarak kullanılır.
- AISI 1020: AISI 1018'e göre %0,20 oranında biraz daha yüksek karbon içeriğine sahip olan bu çelik, iyi kaynaklanabilirliğe ve şekillendirilebilirliğe sahiptir. Dişli, aks ve diğer mekanik parçaların imalatında sıklıkla tercih edilir.
- AISI 1045: AISI 1045, %0,45 karbon içeriğine sahip, yüksek mukavemet ve sertlikte, düşük alaşımlı, orta karbonlu bir çeliktir. Yüksek mukavemet ve aşınma direnci gerektiren mil, dişli gibi parçaların imalatında yoğun bir şekilde kullanılan çeliklerden biridir.
- AISI 1117: AISI 1117, geliştirilmiş işlenebilirliğe sahip, düşük karbonlu, yeniden sülfürlenmiş bir çeliktir. Ancak kükürt içeriği sünekliği ve kaynaklanabilirliği azaltır ancak işlenebilirliği artırır. Bu tip çelik burçlar, bağlantı parçaları ve işlenmiş parçaların imalatında kullanılır (Dikeç, 2016).

Düşük karbonlu çelik aşınma ve korozyona duyarlıdır. Nem ya da oksijenle teması olduğunda, kimyasal reaksiyon meydana gelir ve pas adı verilen demir oksit oluşur. Pas

Orta karbonlu çelik, martenzitik bir yapıya sahip olduğundan, düşük sıcaklıktaki sıvı ve gazlara yönelik tankların üretiminde kullanılamaz, bu da kırılabilirliğe ve çatlama riskine neden olur. Bu işler için genel olarak paslanmaz çelik kullanılmaktadır (Davis, 2015).

2.2.3. Yüksek Karbonlu Çelikler

Yüksek karbonlu çelikler bileşiminde %0,56-2 oranında karbon içermektedirler. Alt sınır olan %0,56 oranında %2 karbon oranına kadar, karbon miktarına bağlı olarak sertlik artmaktadır ve hem oldukça sert hem de düşük alaşımlı çelikler arasında en dayanıklı çeliklerdir (Singh, 2016). Yüksek karbonlu çelikler 700°C'de uzun süre tavlandığında küresel karbürler oluşmaktadır. Küreselleştirme işlemine uygun bir şekilde sertliği azalabilmektedir. Fakat çelik üzerine yapılan kalıplama sonrasında su ilavesiyle yeniden sertleşebilmektedir. Otomotiv, inşaat, perakende ve imalat sektörlerinde yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Aşağıdaki şekil 2.6'da otomotiv sektöründe yoğun şekilde kullanılan yüksek karbonlu çelikten üretilmiş olan parçalar görülmektedir.



Şekil 2. 6 Yüksek karbonlu çelikten üretilen otomotiv parçaları (Denktaş, 2009)

Yüksek karbonlu çeliklerin birçok olumlu özelliği vardır. Aşağıdaki şıklarda yüksek karbonlu çeliklerin özellikleri sıralanmaktadır:

- **Normal karbon çeliği:** Karbon içeriği %0,6- %1,5 arasında farklılık gösteren çelik türlerinden biridir. Bu çelikler yüksek sertlik ve mukavemet elde etmek için ısıtma ve soğutma yoluyla işlenmektedir. Bu tür çelikler, çatal-bıçak takımı ve gibi ürünlerin yapımında olarak kullanılmaktadır.

- **Yüksek karbonlu takım çeliği:** Karbon içeriği %0,7- %1,4 arasında farklılık gösteren çelik türlerinden biridir. Genel olarak yüksek sıcaklık dayanımı ve aşınma direncine sahip alet ve kalıpların yapımında yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Yüksek karbonlu takım çeliği, matkaplar, bıçaklar, üretim sektöründe makinelerin kullandığı döner bıçaklar ve freze bıçaklarının yapımında da kullanılmaktadır.
- **Yüksek karbonlu çelik:** Karbon içeriği %0,8 ile %1,2 arasında değişen, aynı zamanda krom gibi alaşım elementlerini de içeren çelik türlerinden biridir. Bu çelikler yorulma mukavemeti ve sünekliği yüksek olan taşıyıcı yapılarda kullanılır. Bilyeli rulmanlar, makaralı rulmanlar ve iğneli rulmanlar gibi ürünlerin üretiminde yüksek karbonlu rulman çeliği kullanılmaktadır.
- **Yüksek karbonlu yay çeliği:** Karbon içeriği %0,6 ile %1 arasında değişen, aynı zamanda silikon gibi alaşım elementlerini de içeren bir çelik türüdür. Bu çelikler elastikiyeti ve çekme mukavemeti yüksek olan yayların yapımında otomobil yayları, tramvay yayları ve saat yayları gibi ürünlerin imalatında kullanılan çelik türlerindedir.

2.3. Alaşımli Çelikler

Düşük alaşımli çeliklerin herhangi bir işlem uygulanmadan gösterdiği özellikleri iyileştirmek için bileşiminde belirli miktarda alaşım elementi bulduran çeliklere alaşımli çelikler denmektedir (Balıkçı, 2016). Alaşımli çelikler bileşimlerinde buldukları elementler ile özelliklerini iyileştirmektedirler. Hangi özelliğin hangi element ve oranla iyileştirildiğini bilmek çok önemli bir konudur (Yahyaoglu, 2021).

Çeliğin bileşimine farklı alaşım elementleri eklemek her zaman bir iyileştirme sağlamamaktadır. Alaşım elementleri, belirli mekanik ve fiziksel özellikleri iyileştirebilirken, bazı durumlarda bu özelliklerin değişmesine veya önceki değerlere kıyasla daha düşük seviyelerde gözlemlenmesine neden olabilmektedir.. Özetleyecek olursak; bir alaşımlama işleminde hangi özelliğin iyileştirilmesi gerektiğinin uygulayıcılar tarafından çok iyi bilinmesi gerekmektedir (Balıkçı, 2016). Alaşımlama

işlemi çeşitli özelliklerin iyileştirilmesi için yapılmaktadır. Bunlarla ilgili örnekler aşağıda sıralanmaktadır:

- Çekme dayanımını artırmak
- Sertleşebilme kabiliyetini artırmak
- Tokluğu artırmak
- Yüksek korozyon dayanımı
- Aşınma direncini artırma
- Mukavemet özelliğini yüksek sıcaklıklarda koruyabilme (Davis,2015)



Şekil 2. 7 Alaşımli çelik (Sarıdemir ve Çakmak, 2016).

Alaşımli çeliklerin üretim sürecinde çeşitli elementler kullanılmakta olup, bu elementlerin her biri aşağıda belirtilen spesifik katkıları sağlamaktadır.

- Nikel: Bu element çeliğin korozyon direnci dışında hem düşük sıcaklık performansını hem de tokluğu artırmada kullanılır. Krom içeriği ortalama olarak %2- %30 arasında değişim göstermektedir.
- Vanadyum: Bu element, çeliğin başta sertliği olmak üzere hem yüksek sıcaklık hem de aşınma direncini artırmaktadır. Çelik alaşımlarında genel olarak %0,1- %5 arasında değişen konsantrasyonlarda bulunur.
- Molibden: Bu element, çeliğin yüksek sıcaklığa ve darbeye dirençli olmasını sağlamaktadır. %0,25- %8 arasında değişen konsantrasyonlarda kullanılır.

- Krom: Bu element, çeliğin hem korozyon direncini hem de sertliğini artırmasını sağlamakta, genel olarak paslanmaz çeliklerde kullanılmaktadır ve krom içeriği %10- %30 arasında değişim göstermektedir.
- Manganez: Bu element, çeliğin sertliğini artırmanın yanı sıra, aşınmaya karşı dirençli olmasını sağlamaktadır. Çelikte sünekliği de arttıran manganez elementi, çelik üretiminde sülfür ve oksijenin negatif etkilerini azaltmak açısından katkı sağlamaktadır. Manganez içeriği genel olarak çelikte %0,5- %10 arasında bir değişim göstermektedir.
- Tungsten: Bu element, çeliğin sertlik ve aşınma direncini artırmaktadır. Bilhassa yüksek sıcaklık uygulamalarında yoğun şekilde kullanılan elementlerden biridir. Konsantrasyonları genel olarak %1- %20 civarındadır.
- Bor: Bu element, çeliğin kırılma direncini artırabilmektedir. Genel olarak düşük düzeydeki konsantrasyonlarda ortalama %0,001- %0,1 arasında kullanılır.
- Kalsiyum: Kalsiyum, çeliğin sülfür ve oksijen içeriğini azaltarak, kirliliklerin çeliğin özelliklerine olan olumsuz etkilerini azaltır. Kalsiyum konsantrasyonları genellikle %0,001 ila %0,05 arasında değişir.
- Zirkonyum: Bu element, çeliğin korozyon direncini ve sünekliğini arttırmaktadır. Ayrıca çelik üretiminde oksijen ve azotun negatif etkilerini azaltır. Zirkonyum konsantrasyonları genellikle %0,005 ila %0,3 arasında değişir.
- Silisyum: Bu element, çeliğin mukavemetini, elastikiyetini ve manyetik özelliklerini iyileştirme amaçlı kullanılmaktadır. Çelik üretim sürecinde oksijenden kaynaklı olarak ortaya çıkan negatif etkileri azaltabilmektedir. Bu elementin içeriği ortalama olarak %0,5- %5 civarında bir değişim göstermektedir.
- Kobalt: Bu element, çeliğin ısıya karşı mukavemetini güçlendirmenin yanı sıra, çeliğin manyetik özelliklerinde iyileştirme yapmaktadır. Ayrıca çeliğin aşınma direncine katkı sağlamaktadır. Kobalt oranı genellikle %0,1-10 arasındadır.

- Alüminyum: Bu element, çeliğin oksidasyon ve sünekliğini artırmaktadır. Ayrıca azot ile reaksiyona girerek, çelikteki nitritlerin oluşumunu sağlamakta ve böylece çeliğin sertleşme özelliğini iyileştirebilmektedir. Alüminyum konsantrasyonları genel olarak %0,005- %1,2 civarındadır.
- Titanyum: Bu element, sünekliliği artırmanın yanı sıra korozyon direncini de artırmaktadır. Ayrıca çelik endüstrisinde oksijen, azot ve karbondan kaynaklanan negatif etkileri de asgari düzeye indirebilecek özelliklere sahiptir. Titanyum konsantrasyonları ortalama olarak %0,005- %0,5 arasında bir değişim söz konusudur.
- Bakır: Bu element, bilhassa çeliği atmosferik korozyona karşı iyileştirir. Ayrıca çeliğin elektriksel iletkenliğini artırır. Bakır konsantrasyonları genel olarak %0,1- %1,5 civarındadır.
- Niobyum: Bu element, çeliğin darbe direncini ciddi anlamda artırmaktadır. Aynı zamanda sünekliliği de arttıran niobyum, yüksek sıcaklık uygulamalarında mukavemeti ve korozyon direncini iyileştirmeyi sağlamaktadır. Niobyum konsantrasyonları genel olarak %0,01 ila %0,5 arasında bir değişim göstermektedir. (Kesti,2009; Dikeç, 2010; Denктаş,2009; Singh,2016; Sarı,1999; Çelik,2008; Davis, 2015; Biresaw,2017; Sarıdemir, 2016).

Bu elementler, alaşımlı çeliklerin özelliklerini ve performansını değiştirerek, geniş bir endüstri yelpazesinde kullanılacak şekilde uyarlanmasını sağlar. Bu nedenle, alaşımlı çelikler otomotiv, havacılık, enerji üretimi, yapısal uygulamalar ve alet üretimi gibi alanlarda yaygın olarak kullanılır (Balıkçı, 2016)

2.4. Düşük Alaşımlı Cr-Mo Çeliği

Krom-molibden çelikleri bileşimlerinde karbon, molibden ve krom bulundurmaktadır. Alaşımlamada kullanılan element oranları farklı oranlarda olabilmektedir. Bu sebepten dolayı birçok farklı özellikte Cr-Mo çeliği bulunmaktadır. Krom molibden çelikleri AISI standartlarında 41XX olarak ifade edilmektedir (Kesti,2009).

Cr-Mo çeliklerinin temel alaşımlarından biri krom elementidir. Krom katkısı çeliğin kritik soğuma hızını düşürürken yüksek sertlik ve aşınma dayanımı sağlayan karbürler oluşturur. Korozyon direnci %12 krom katkısı ile kazanılacaktır. Korozyon direncinin yanında aynı zamanda asitlere karşı dirençte kazanmış olacaktır. Krom oranı %17'yi geçtiğinde ısıya ve yüksek sıcaklıklara dayanıklı bir çelik elde edilecektir. Fakat krom oranı arttıkça çeliğin kaynak edilebilirlik değerleri düşecektir. Her %1 krom artışı akma sınırında ve çekme dayanımında artış gösterecek fakat çentik darbe tokluğunda düşüşe neden olacaktır (Singh, 2016).

Cr-Mo çeliklerinde temel olarak kullanılan bir diğer element molibdendir. Çeliğe molibden katkısı ile aşınma dayanımı sertleşme derinliği, kesme yeteneği katmakta ve temper sıcaklığını düşürmektedir. Molibden alaşımında sırasında güç bir karbür oluşturur. Alaşım içinde sınırlı miktarlarda çözünmektedir (Dikeç, 2010)

2.4.1. AISI 4140 çeliği

Bu tez konusunun temel aldığı orta karbonlu çeliklerden AISI 4140 çeliğine yakından baktığımızda, %0,38-0,45 oranında karbon miktarı ihtiva etmektedir. Bilindiği üzere çelikler birden çok alaşımlama elementi içermektedirler. AISI 4140 çeliği de bileşeninde krom (Cr) ve molibden (Mo) elementini içermektedir. AISI 4140 çeliği içerisinde bulundurduğu krom ve molibden içeriğinden dolayı krom-molibden çeliği olarak da adlandırılmaktadırlar. Krom-molibden çeliği krom katkısı sayesinde korozyon ve oksidasyon dayanımı sağlamakta ve hem sertleştirilebilirlik hem de aşınma direnci kazandırmaktadır. Molibden katkısı ise temper sonra darbe dayanımlarında önemli artışlar kazandırır (Yahyaoglu, 2021).

AISI 4140 çeliği, düşük alaşımlı çelikler arasında en çok kullanılan çeliklerden bir tanesidir. AISI 4140 çeliğinin diğer Cr-Mo çelikleri ile karşılaştırıldığında orta derecede sertleştirilebilir ama diğerlerine göre daha iyi dayanım ve tokluk değerleri göstermektedir (Singh, 2016).

Günümüzün çağdaş mekanik sistemleri, kullanım alanına uygun bir şekilde hem yüksek hız hem de fazla yük olmak üzere birçok zorlu şartlar altında işlevlerini sürdürmektedir. Bu bağlamda gerek bu alanda yapılan bilimsel çalışmalar, gerekse de endüstri alanındaki

çalışmalar, mevcut malzemelerden beklenen özellikleri sürekli iyileştirme ve geliştirme anlayışına uygun bir şekilde ilerlemektedir (Biresaw ve Mittal, 2017).

Çalışmanın başlığını oluşturan AISI (Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü) 4140 çeliği kullanım alanı bir hayli fazla olan çeliklerdendir. AISI 4140 karbon miktarı dikkate alındığında, sertleştirilme açısından son derece elverişli ve ıslah işleminin yapılmasından sonra belirli yükler altında yüksek tokluk sergileyen alaşımly yapı çelikleridir (Sarı ve Kaluç, 1999).

AISI 4140 birçok alanda kullanılmaktadır. Ancak yoğun olarak AISI 4140 çeliği, aks mili-kovanı, yivli mil, krank mili ve benzeri sürekliliğe sahip yüksek parçalar ile dişli çark yapımında kullanılmaktadır (Ekinci ve Akdemir, 2011).

Tablo 2.1'te AISI 4140 çeliğinin alaşım elementlerinin oranları verilmişken, Şekil 2.8'de ise bu çeliğin mekanik özellikleri gösterilmektedir.

Tablo 2-1 AISI 4140 çeliği alaşım elementlerinin bileşik içindeki oranları (Sarı ve Kaluç, 1999).

Element	C	Mn	P	S	Si	Cr	Mo
% ağırlık	0,38- 0,45	0,75- 1,00	Max 0,035	Max 0,04	0,15- 0,30	0,80- 1,10	0,15- 0,25

Özellikler		Koşullar	
Yoğunluk (g/cm ³)	7,7-8,03	T(°C)	İŞLEM 815°C 'de tavlanmış
Poisson oranı	0,27-0,30	25	
Elastite modülü (GPa)	190-210		
Çekme dayanımı (MPa)	655,0		
Akma dayanımı (MPa)	417,1		
% Uzama	25,7		
% Kesit daralması	56,9		
Sertlik (HB)	197		
Darbe dayanımı (J)	54,5		

Şekil 2. 8 AISI 4140 çeliğinin mekanik özellikleri (Ekinci ve Akdemir, 2011).

3. KURAMSAL ÇERÇEVE

3.1. Yüzey Özelliklerinin İyileştirilmesi

Makinelere ortaya çıkan arızaların ve yapı elemanlarının kullanım dışı kalmasının en önemli sebeplerinden birisi malzemelerde meydana gelen aşınmalardır (Denktaş, 2009). Makine parçalarında ortaya çıkan başlıca hasarlar, insana bağlı nedenler ve teknik esaslara bağlı nedenlerin oransal dağılımı aşağıda sıralanmaktadır:

- %38'lik kısmı teknik esaslara bağlı nedenler,
- %11'lik kısmı yıpranma,
- %21'lik kısmı makinenin aşırı çalışması,
- %6'lık kısmı diğer nedenler şeklinde olup,
- %11'lik kısmı yıpranma aşınması, korozyon ve diğer etkenler (Çelik vd, 2008)

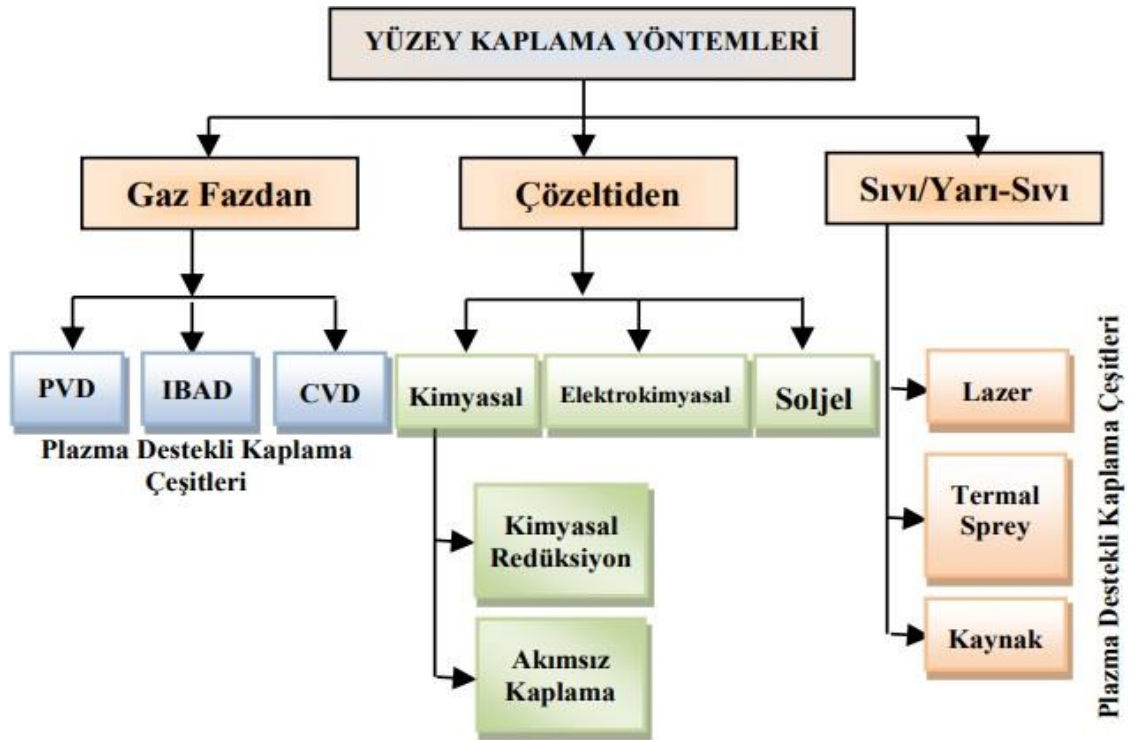
Sürtünme nedeniyle ABD ekonomisinde kayıpları gayri safi milli hâsılanın yaklaşık %6'sı olduğu tahmin edilmektedir (Davis,2015). Dünyada ise bu miktar ortalama olarak yaklaşık 200 milyar dolar civarındadır (Çelik vd,2008). Aşınma, geri kazanılamayan madde kaybı olarak da tanımlanabilir. Bundan ötürü aşınmaya karşı malzemelerin daha dirençli hale getirilmesinin önemi büyüktür (Denktaş, 2009).

Mekanik özellikler, malzeme açısından belirleyici bir niteliğe sahip olduğundan, çeliklerde bu özelliklerin artırılması amacıyla genel olarak karbon miktarını artırma yöntemine başvurulmaktadır. Karbon miktarını artırmanın dışında, alaşımlama ve ısıtım işleminden de yararlanılmaktadır (Davis, 2015).

Çalışmanın başlığını oluşturan AISI-4140 çeliği, içerdiği Cr ve Mo alaşım elementlerinden ötürü, ısıtım işleminden sonra süreçte sert martenzitik bir yapı oluşturabilmekte ve hem süneklilik hem tokluk hem de mukavemet gibi mekanik özelliklerin bağdaşmasını sağlamaktadır (Sarıdemir ve Çakmak, 2016). İyiyapı açısından, malzemenin solidus sıcaklığının altında belirli bir süreye ve sıraya uygun şekilde ısıtılıp soğutulması “ısıtım işlem” olarak tanımlanmaktadır. Isıtım işlemler; “*tavlama*” ve

“sertleştirme” şeklinde iki farklı gruba ayrılmaktadır. Tavlama yardımıyla içyapının yavaş bir soğutma ile birlikte kararlı denge durumuna gelebilmektedir. Sertleşebilirlik durumunda, ısıl işlem özelliği olan elemanlarda kullanılan çeliklerin seçimi üzerinde etkisi olan başlıca özellik olarak göze çarpmaktadır. (Davis, 2015). Isıl işlemlerdeki bir diğer grup olan sertleştirmede ise östenitik çeliğin bileşimine paralel şekilde en düşük hızın altına düşmemek kaydıyla soğutulmakta ve böylece yarı kararlı özelliğe sahip olan bir içyapının oluşturulması sağlanmaktadır (Aytaç vd, 2018).

Yüzey özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla birçok yüzey kaplama yöntemlerinden yararlanılmaktadır. Aşağıdaki Şekil 3.1’de bu yöntemler ve sınıflandırılması görülmektedir.



Şekil 3. 1 Yüzey kaplama yöntemlerinin sınıflandırılması (Şenocak ve Yiğit, 2022).

Yüzeylerin birbiriyle temas etmesi aşınmayı ortaya çıkarmaktadır. Aşınma düzeyi arttıkça malzeme kaybı ortaya çıkabilmektedir. Böylece yüzeyler üzerinde hasar meydana gelebilmektedir. Malzemelerdeki aşınmaya karşı mukavemetin artırılması amacıyla yapılan yüzey işlemler türüne uygun bir şekilde aşağıdaki gibi üç başlık altında toplamak mümkündür (Yoo vd, 2008).

- Difuzif yöntem doğrultusunda hem yüzeydeki yapı hem de kompozisyonunu tamamen değiştirerek, yüzeyde farklı bir bileşik oluşturmaktadır. Karbürleme, borlama ve nitrüleme bu işleme verilebilecek en uygun örneklerdir.
- Yüzeydeki mikro yapıyı farklı türden ısıl işlem yöntemleriyle değiştirmektir. Alevle sertleştirme ve indüksiyonla sertleştirme en uygun örneklerdir.
- PVD ve CVD yöntemleriyle malzemelerin yüzeyinde sert seramik kaplamalar oluşturmaktır (Köksal vd, 2004).

Günümüz endüstriyel uygulamalarında genel olarak iki tür buhar biriktirme yöntemi yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bunlardan ilki “Kimyasal Buhar Biriktirme (CVD)” ve bu çalışmada kapsamlı şekilde incelenecek olan “Fiziksel Buhar Biriktirme (PVD)” yöntemleridir (Türküz, 2006).

İnce seramik film kaplamalar ise, kullanım alanı çok geniş olmakla birlikte, üzerinde en fazla durulan kaplamalardan biridir. İnce seramik film kaplamalar, hem tok bir yapıya sahip olmanın dışında oldukça sert yapısıyla sürtünmeye ve aşınmaya karşı güçlü mukavemete sahiptir. Bu özellikleri gelişmiş malzeme üretiminde boy gösteren ince seramik film kaplamaları, aynı zamanda malzemeye dekoratif bakımdan da özellikler kazandırmaktadır. PVD yöntemi, CVD kaplamaların işlem sıcaklığına (850-1250 °C) uygun bir şekilde, taban malzemenin mikro yapı üzerinde olası negatif etkileri de ortadan kaldıracak özelliklere sahip olduğunu belirtmekte yarar vardır (Köksal vd, 2004)

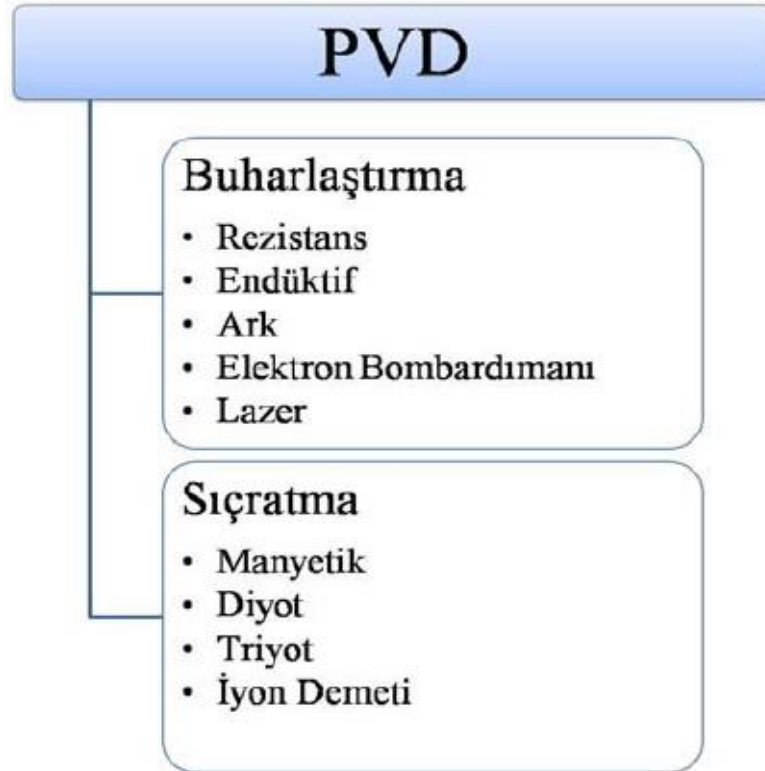
3.2. PVD Kaplama

Fiziksel Buhar Biriktirme (PVD), yüzey kaplama teknolojilerinde önemli bir yöntem olarak son yıllarda dikkat çekmektedir. PVD, bir malzemenin buharlaştırılması yoluyla, hedef yüzeyde ince film tabakaları oluşturma sürecini içerir. Bu yöntem, genellikle metal, seramik ve polimer kaplamalarda kullanılır.

PVD işlemi, genellikle üç ana aşamadan oluşur: buharlaştırma, gaz fazı yayılımı ve kaplama. İlk olarak, kaplanacak malzeme, yüksek sıcaklıkta buharlaştırılır. Ardından, bu buhar, vakum ortamında hedef yüzeye doğru hareket eder. Son aşamada, bu buhar, yüzeye çarparak yoğunlaşır ve ince bir film oluşturur.

PVD, birçok avantaj sunar; bunlar arasında yüksek kaplama kalitesi, iyi yapışma özellikleri ve çevre dostu olması sayılabilir. Ayrıca, kaplama kalınlığı ve bileşimi üzerinde hassas kontrol imkanı sağlar. Bu özellikleri, PVD'yi otomotiv, elektronik ve tıbbi cihazlar gibi çeşitli endüstriyel uygulamalarda tercih edilen bir yöntem haline getirmiştir. Hatta gelecekteki kaplamaların büyük bir kısmının PVD kaplama yöntemleriyle yapılabileceğini belirtmekte yarar vardır (Avunduk,2021). Türkçe' deki karşılığı "Fiziksel Buhar Biriktirme Yöntemi" olan bu yöntem ile yüzeye yapılan kaplama işlemleri atomik düzeydedir. Fiziksel buhar biriktirme yöntemiyle akışkan (sıvı) ve katı haldeki kaplama malzemesi moleküler düzeyde buharlaştırma yapılmakta ve vakum ya da düşük basınç altındaki yüzeye biriktirilme yolu ile yapılmaktadır (Riedel, 2000).

Temel olarak bu yöntem, buharlaştırma ve sıçratmayı esas alan bir yöntemdir. Örneğin kaplanacak olan malzemenin çelik olduğunu varsaydığımızda, çeliğin yüzeyine atomsal ya da iyonik bir şekilde biriktirme esasına dayanmaktadır (Bunshatta,1980) Bu yöntemin unsurları ise aşağıda yer alan Şekil 3.2.'de görülmektedir.



Şekil 3. 2 PVD kaplama yöntemleri (Bunshatta,1980).

Yukarıdaki Şekil 3.2’de görüldüğü üzere, PVD kaplama yöntemleri buharlaştırma ve sıçratma olarak ikiye ayrılmaktadır. PVD işlemleri yüksek vakum koşullarında yapılabilmektedir. Ti, Cr, Zr ve AlCr, AlTi, TiSi gibi alaşımların nitrürler, karbürler ve karbonitridlerden oluşan kaplamalar, çok çeşitli alet ve bileşenler üzerinde ince film biriktirilmesi için kullanılır. Son birkaç yılda sert seramik filmle kaplama uygulamalarında büyük ilerleme kaydedildi. Malzemelerin kırılma yapısı dolgu malzemesi olarak kullanılmasını engellemektedir (Türküz, 2006). Aşağıdaki Şekil3.3’de bazı PVD kaplama uygulamalarının fiziksel özellikleri gösterilmektedir.

Kaplama	Kaplama Kalınlığı (µm)	Micro Sertlik (HV 0.05)	Sürtünme Katsayısı	Çalışma Sıcaklığı (°C)	Biriktirme Sıcaklığı (°C)
TiN	2 - 4	2800	0.55	450	425
TiCN	2 - 4	2800	0.15 - 0.3	300	425
TiCrN	4 - 6	2200	0.55	500	425
AlTiN	2 - 4	3500	0.55	700	450
AlTiCrN	3 - 8	3200	0.55	850	450 - 550
AlCrN	2 - 4	3000	0.55	1050	450 - 550
CrN	4 - 6	2300	0.55	700	150 - 400
Cr ₂ N	2 - 5	1500 - 2800	0.55	700	150 - 400
CrWN	5 - 8	3000 - 3200	0.3	800	350
a-C:H:W	4 - 6	1600	0.2	350	160-250
a-C:H:W + a-C:H	3 - 5	2000 - 2800	0.1	300	160-250
CrN + a-C:H	2 - 5	2000 - 2800	0.1	300	200-250
a-C:H	1 - 3	2000 - 2800	0.1	300	160-250
B ₄ C	1 - 3	3400	0.55	800	200
TiCN + MoS ₂	2 - 4	3000 + 2000	0.06	500	425 / 150

Şekil 3. 3 PVD kaplamaların fiziksel özellikleri (Yoo vd, 2008).

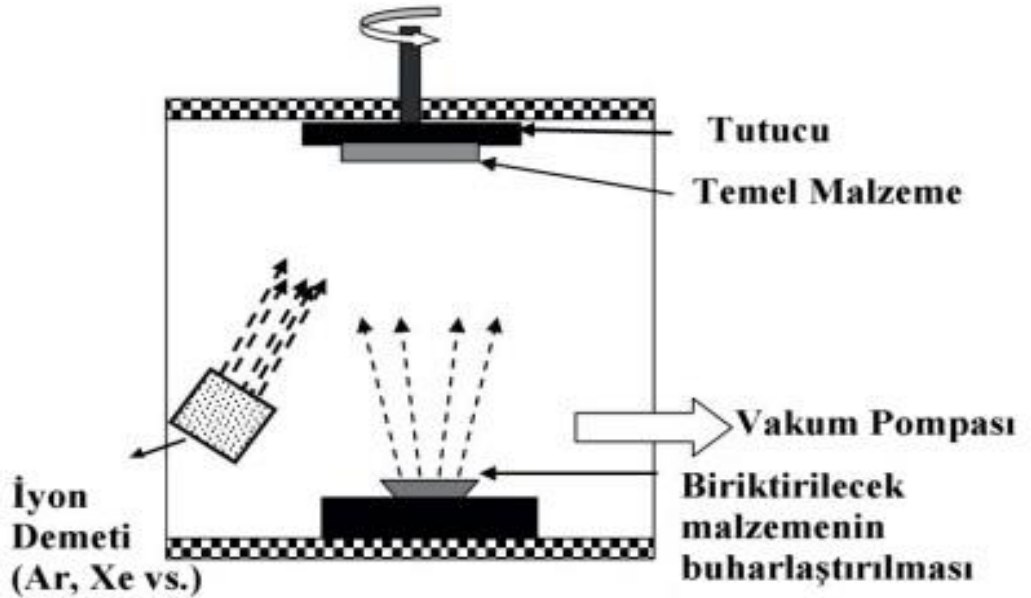
Kaplamalar için işlem sıcaklığı ortalama olarak 250-450 °C civarında olduğundan, bu sıcaklık aralığı, PVD kaplamaların çok katmanlı bir yapıda uygulanmasına olanak tanır. Yüksek sıcaklıklar, kaplama sürecinde malzeme atomlarının yüzeyde daha iyi dağılmasını ve yapışmasını sağlarken, çok katmanlı kaplama imkânı da farklı malzeme ve özelliklerin bir araya getirilerek kaplamaların performansını artırmasına katkıda bulunur. Kaplamanın kalınlığı ise ortalama olarak 2-5 m civarındadır ve birkaç yüz nanometre kadar ince de olabilmektedir (Souto, Alanyalı, 2000). PVD yöntemleri kendi içerisinde buharlaştırma ve sıçratma yöntemleri olarak iki grupta incelenmektedir.

3.2.1. Buharlaştırma yöntemi

Bu yöntemde hedef malzemenin buharlaşması, temel malzemeye (örneğin AISI çeliği) yüksek düzeyde uygulanmış olan negatif potansiyel (2-5 kV) ve gazın vakum odasına yayılması sonucunda ortaya çıkan ve ışıltılı boşalma etkisinden kaynaklanan “iyonize” durum ve malzeme üzerindeki iyonların biriktirilmesi ile elde edilmiş olan kaplamalar “iyon kaplama” olarak tanımlanmaktadır. Bu işlem yardımıyla yapılan PVD kaplamalar indüksiyon, rezistans, elektron bombardımanı, ark ve lazer ile buharlaştırma olarak gruplandırılmaktadır.

Uygulanan malzemenin çelik olduğu dikkate alındığında iyon kaplama, malzemenin yüzeyine eşzamanlı ya da periyodik olarak bombardımana tutmaktadır ve filmi atomik boyuttaki enerjik parçacıklarla çökertebilmektedir. Yüzeyi temizlemek amacıyla yüzey kısmı depolama öncesi bombardımana tutulmaktadır. Prosesin temizleme ve biriktirme kısımları arasında bombardımanın kesintisiz bir şekilde uygulanması son derece önemlidir (Çeğil, Kılınç, Şaduman, 2014).

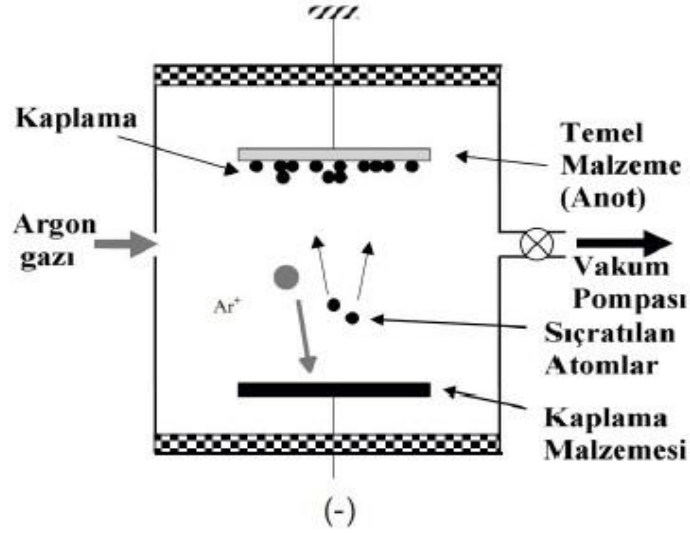
Bu durumun daha iyi anlaşılabilmesi açısından aşağıdaki Şekil 3.4’te iyon destekli buharlaştırma ile ilgili bir örnek görülmektedir.



Şekil 3. 4 İyon destekli buharlaştırma (Bunshatta,1980).

3.2.2. Sıçratma yöntemi

Sıçratma yöntemi şekil 3.5'deki gibi, malzeme yüzeyinin atomik büyüklükteki yüksek enerjili gaz iyonları ile bombardıman edilmesi, daha sonrasında ise atomların yüzeyden püskürtülmesi ve yüzeyden uzaklaştırılan atomların buhar fazına geçerek biriktirilmesi prensibine dayanmaktadır. Temel maddenin yüzeye püskürtme işleminde genel olarak pozitif yüklü gaz iyonlarından yararlanılmaktadır. Sıçratma yöntemi ve sıçratma mekanizması şematik olarak gösterilmiştir. Özetleyecek olursak; sıçratma yöntemi, ısı kullanılmadan momentum aktarımını kullanmada oldukça elverişli bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır (Bunshatta,1980).



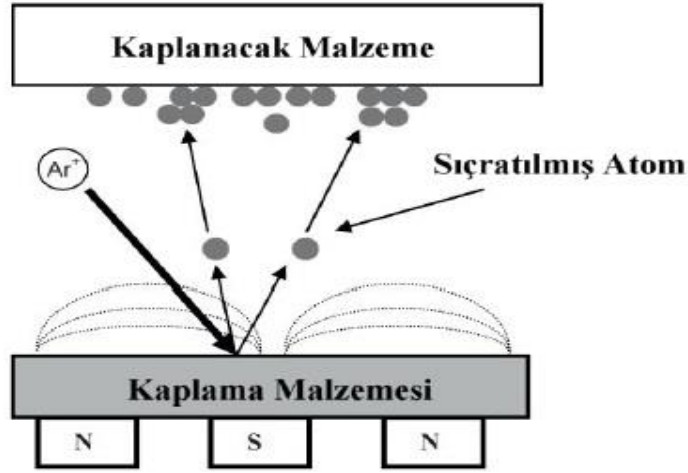
Şekil 3. 5 Sıçratma yöntemi (Holmberg ve Matthews, 1998).

Bu yöntemde endüstriyel bakımdan kaplama hızını ve özelliklerini direkt olarak etkileyen bazı ayrıntılar vardır. Bu ayrıntılar arasında öne çıkanlar ise aşağıda sıralanmaktadır:

- Uygulama alanının ve ortamın temizliği
- Sistemin geometrisi
- Uygulanacak malzemenin sıcaklığı
- Kaynak-hedef uzaklığı
- Kullanılan soy gazın saflık düzeyi.

Sıçratma amacıyla kullanılan enerjinin yalnızca %1'inin hedefe ulaşması bu yöntemin dikkati çeken en büyük dezavantajıdır. Bu dezavantajın önlenmesi amacıyla iyonun hedefe çarpma açısı 70 derecenin altında tutulmaktadır.

Sıçratma yöntemi; triyot, diyot, manyetik alan ve iyon ışını olmak kaydıyla dört ayrı grup altında incelenmektedir. Düşük iyonizasyon etkisi ve plazma biriktirme hızının haricinde, işlem sırasında temel maddenin yüksek sıcaklıklara ısıtılması, boşaltma tekniğinin uygulama alanını 1970'lerin ortalarına kadar sınırlamış, bu etkiler büyük ölçüde ortadan kaldırılmıştır. Manyetik alandaki sıçratma yönteminde, elektrik enerjisinin etkisi ile kaplanan malzemenin önünde bir plazma oluşturulur. Mıknatısın yarattığı manyetik alan, malzemenin yüzeyine yakın elektronların toplanmasına neden olarak iyonlaşma oranını artırmasını sağlamaktadır. Plazmadaki hızlandırılmış iyonlar, atomların ve moleküllerin temel malzeme üzerinde birikmesine yol açmaktadır. Aşağıdaki Şekil 3.6'da manyetik alanda sıçratma yönteminin prensibi görülmektedir.



Şekil 3. 6 Yöntemin manyetik alanda kullanımı (Türküz,2006)

3.2.3. Katodik Ark Yöntemi

Katodik ark yöntemi vakum ortamında kaplanacak taban malzemenin anot, kaplamam malzemesi olarak kullanılan malzemenin ise katot olarak kullandığı bir yöntemdir. Bu yöntemde buharlaştırma ark etkisi ile yapılmaktadır (Duruk,2006). Ark buharlaştırma yöntemi diğer yöntemlere göre daha yeni bir yöntemdir. İlk olarak 70'li yıllarda Rusya'da

geliştirilmiştir. Bu teknik ile metal malzemelerin refrakter bileşikler ile kaplanması mümkün olmuştur.

Bu yöntem, malzemelerin buharlaştırılması için ısı kaynağı olarak yüksek akım ile bir ark oluşturma mantığına dayanmaktadır. Bu yöntem ile ilk olarak ticari TiN kaplamalar elde edilmiştir (Şireli, 2005). Çalışma prensibine bakıldığında, buharlaştırılmak istenen katot yüksek akım, düşük potansiyel ile çalışan bir güç kaynağına bağlanır. Sistem vakuma alınır ve anlık bir tetikleme ile ark başlar. Burada vakum ortamına alınan sistemin, vakum kalitesi çok önemlidir. Vakum ortamında bulunan artık gazlar iyonlar ile reaksiyona girerek yüzeyi oksidasyona uğratabilirler. Oluşan bu oksit tabakası yüzey ile kaplama arasında düşük yapışma kabiliyeti ve film yoğunluğunun düşük olmasına neden olacaktır (Candemir, 1995).

Ark'ın oluştuğu katot yüzeylerde sıcaklık yüksek (2300-2500°C) değerlere ulaşmaktadır. Bu yüksek sıcaklıklarda katot yüzeyler hızlıca buharlaşmaktadır. Buharlaşan bu atom veya moleküller anot tarafına doğru yani yüksek yoğunluklu bölgelere geçerler. Diğer biriktirme yöntemleri ile kıyaslandığında katodik ark yöntemi, yüksek kaplama oranları, yüksek adezyon direnci ve düşük taban malzeme sıcaklığı gibi avantajlarına sahiptir. Katodik ark yönteminin genel avantajlarını özetlemek gerekirse;

- Yüksek verimlilikte buharlaşma,
- Biriktirme hızı, sıçratma yöntemine göre daha yüksektir,
- Düşük taban malzeme sıcaklığında daha iyi mekanik özellikler,
- Âtıl oranı düşüktür,
- Yatırım maliyetlerinin diğer yöntemlere göre daha düşük olmasıdır.

Katodik ark yönteminin en büyük dezavantajlarından biri buharlaşma sırasında katot malzemenin sıvı faza geçmesidir. Sıvı faza geçen malzemeler taban malzeme üzerine yapışarak kaplama kalitesini bozmaktadır. Bu sıvılaştıran malzemelere, makro partiküllere, droplet adı verilmektedir. Dezavantajlarını özetleyecek olursak;

- Sadece iletken malzemelerin buharlaştırılabilir olması,

- Dropletlerin varlığının yüzey kalitesini bozması;
- Kaplama hızının yüksek olmasından dolayı optik uygulamalarda süreksizlikler yaratması nedeniyle kullanılamaması (Öncel,2022)

3.3. PVD Kaplama Türleri

Kaplama türleri incelendiğinde, pek çok farklı türün olduğu görülmektedir. PVD kaplama teknolojisi, atmosfere kapalı ortamda, ortamın atmosfer basıncı altında, çeşitli gazlar ile kaplama malzemesinden atomların koparılmasının ardından, kapalı alan içerisinde oluşturulan plazma ile hızlandırılıp kaplanacak malzeme üzerine kaplama malzemesinin biriktirilmesi temeline dayanmaktadır (Bunshatta,1980). Kaplama işlemi sırasında vakum basıncı, sıcaklık, bias voltaj, süre ve güç çok önemli parametrelerden bir kaçıdır. Kaplama sırasında optimum parametreler kullanılmalıdır aksi taktirde yüzeyde biriken kaplama dökülebilir, homojen kaplamalar elde edilemeyebilir veya istenilen kaplama kalınlığı yakalayabilir (Pişken,2007) Çalışmanın izleyen başlıklarında PVD kaplama türleri üzerinde durulacaktır.

3.3.1. Krom nitrür (CrN) kaplama

Metal şekillendirme açısından çok popüler bir kaplamalardan bir diğeri de krom nitrür (CrN) kaplamalardır. Bilhassa alçı kalıplarda, metal ve plastik enjeksiyon kalıplarında son derece elverişli ve olumlu sonuçlar elde edilebilmektedir. Kaplama düşük sıcaklıklarda yapıldığından kalıpta herhangi bir şekilde deformasyon oluşumu söz konusu değildir. Termoform ve alçı kalıp kaplamaları yüksek sertliğe ve düşük yüzey pürüzlülüğüne sahip olduğundan, parçalara ve kalıplara verilen zararın asgari düzeye indirilmesini sağlamaktadır (Pak, 2021).

CrN kaplamalar, iç gerilmelerinin düşük olması sebebiyle, 10 µm kalınlığa kadar yapılabilir. Genel olarak kaplamanın özelliğine bağlı bir şekilde yüzey pürüzlülüğü, TiN kaplamadan daha azdır. Yüksek mukavemet göstermesinden ve kalın kaplanabilmesinden dolayı TiN ile kıyaslandığında korozyon direncinin daha iyi düzeyde olduğunu belirtmek gereklidir (Aydıngülü,1998). CrN kaplamaların başlıca ve dikkat çeken yapısal özellikleri aşağıdaki şekil3.7 de görülmektedir.

Kimyasal Bileşimi	CrN
Oksidasyon Sıcaklığı (°C)	700
Sertlik (HV 0,05)	2800 ± 400
Pürüzlülük (Ra µm)	0,2
Sürtünme Katsayısı	0,55
Kalınlık (µm)	3-5
Renk	Gri (metalik)

Şekil 3.7 CrN kaplamanın özellikleri (Witit ve Teekhaboot, 2016)

Diğer klasik krom kaplamalara kıyasla CrN kaplamaların sertlik düzeyinin 2-3 kat daha fazla olduğunu belirtmek gereklidir. Bu kaplamanın diğer özellikleri olan, düşük sürtünme katsayısı ve düşük kalıcı gerilme seviyeleri bir araya gelince, yüzeylerde her türlü aşındırıcı etkiye karşı koruma sağlanmış olur (Aydınöülü, 1998).

Kaplama kalınlığı aşındırıcı etkilerin olduğu endüstrilerde büyük öneme sahiptir. Örneğin tekstil, metal, kâğıt ve plastik endüstrilerinde aşındırıcı etkilerin fazlalığı dikkate alındığında, kaplamanın kalınlığının önemi daha fazla öne çıkmaktadır (Yılmaz ,2016). CrN kaplamalarla ilgili yapılan araştırmaların büyük bir çoğunluğunda, TiN kaplama ile kıyaslama ve karşılaştırmanın olduğunu belirtmekte yarar vardır (Konak, 2022).

CrN kaplamaların kullanıldığı birçok alan olsa da yoğun şekilde kullanıldığı alanlar aşağıda sıralanmaktadır:

- Metal enjeksiyon üretiminde,
- Sıvama kalıplarında,
- Farklı türden boru (bakır boru, pirinç boru, demir boru) üretiminde kullanılan çekme kalıplarında,

- Kesme amaçlı olarak birçok sektörde (bilhassa kâğıt ve plastik sektörü) kullanılmakta hem yüksek performans hem de cazip bir verimlilik sergilemektedir.
- Ağır metallerin şekillendirilmesinde,
- Parça şekillendirmede (tel şeklindeki parçalarda),
- Dekoratif amaçlı kullanımlarda. (Li vd, 2012)

Krom metali ve nitrürlerinin hem fiziksel hem de mekanik özellikleri aşağıdaki şekil3.8’de görülmektedir.

Özellik	Cr	β -Cr ₂ N	CrN
Kristal yapı	hmk	hegzagonal	ymk
Yoğunluk	7,14	6,54	6,18
Lineer genleşme katsayısı	6,6	9,41	2,3
Bozunma sıcaklığı	-	1500-1650	1083-1500
Mikrosertlik	800-1000	1600	1100

Şekil 3.8 CrN fiziksel ve mekanik özellikler (Li vd, 2012).

TiN kaplama kalınlığı 5 μ m’yi aştığında iç gerilim artmakta ve kalınlığı ortalama olarak 5-7 μ m düzeyine bile çıkabilmektedir. CrN kaplamada durum farklıdır. CrN kaplamanın kalınlığı iç gerilimin düşük olmasından ötürü 10 μ m düzeyine çıkabilmektedir. Sertlik durumu karşılaştırıldığında ise, CrN kaplamalarda 2400-2800 Hv’dir. Bu bağlamda CrN, TiN kaplamaya kıyasla üstün yüzey pürüzlülüğüne sahip olduğunun altı çizilerek belirtilmesinde yarar vardır (Li vd, 2012).

CrN kaplamalarda ortalama olarak 700°C civarına kadar çalışma sıcaklıklarında herhangi bir stabilite kaybının yaşanması söz konusu değildir. Ayrıca CrN kaplamaların kimyasal stabilitelerinin TiN kaplamalara kıyasla çok daha yüksek olduğunu da belirtmek gereklidir. Ayrıca CrN kaplamaların gerek asidik ortamlarda gerekse de bazik ortamlarda

çözünme durumu söz konusu değildir (Ayhan, 2018) Otomotiv sektöründe de CrN kaplamalar yoğun şekilde kullanılmaktadır. Aşağıdaki Şekil 3.9'da CrN ile kaplanmış otomotiv parçası görülmektedir.



Şekil 3. 9CrN kaplama (Chang, Yang ve Weng, 2020).

Sonuç olarak düşük sıcaklıklarda CrN katmanının bağ mukavemeti TiN ile kıyaslandığında belirgin bir şekilde daha düşük olduğunu söylemek mümkündür. Yukarıda belirtilenlere ek olarak, CrN kaplamaların aşınmaya karşı yüksek dirence sahip olduğu endüstride kabul görmüş durumlardan biridir ve CrN kaplamanın kalın bir şekilde kaplanması durumunda TiN'e kıyasla daha iyi korozyon direnci sergileyebileceğini de belirtmek gerekmektedir (Pişken, 2007).

3.3.2. Titanyum krom nitrür (TiCrN) kaplama

Titanyum krom nitrür (TiCrN) kaplamalar, titanyum ve nitrojenin vakum ortamında yüksek sıcaklıklarda birleştirilmesiyle üretilen son derece sert ve dayanıklı kaplamalar olarak tanımlanmaktadır (Kösen, 2023). Bu kaplamanın hedef malzeme üzerinde başta aşınma, korozyon ve yüksek sıcaklıklardan korumak amacıyla uygulanmaktadır. Kaplama yapılacak parçanın özel bir temizleme işleminden sonra vakumlu kaplama sistemine yerleştirilmesiyle işlem gerçekleştirilir (Nalbant, 2018). CrN kaplama ile sürtünme katsayıları benzer özelliklere sahiptir. Ancak TiCrN hem sertlik hem aşınma

direnci bakımından CrN ile kıyaslandığında çok daha yüksek düzeye sahip olduğunu belirtmekte yarar vardır. Özetleyecek olursak; bilhassa kalın endüstriyel işlemlerde ve ağır sıvama işlemlerinde TiCrN oldukça verimli bir kaplama olarak göze çarpmaktadır (Türküz, 2006). Bu duruma yönelik olarak TiCrN ile ilgili kaplama örnekleri aşağıdaki Şekil 3.10'da görülmektedir.



Şekil 3. 10 TiCrN kaplama örnekleri (Li, 2012)

TiCrN kaplamaların özellikleri, diğer kaplamalarda benzer özelliklere sahiptir. Bu özellikler aşağıda sıralanmaktadır:

- Hem yüksek sertliğe hem de düşük sürtünme özelliğine sahiptir,
- Sert ya da kalın sacların hem sıvama hem de derin çekme kalıplarına uygunluk,
- Aşınma, yapışma ve sarma aşınmasına karşı mukavemeti güçlüdür (Kaya, 2022).

Gerek TiN gerekse de CrN kaplamalar, aşınma dayanımının yüksek olması ve dayanıklılığından ötürü uzun zamandan beri endüstride uygulanan kaplamalardır. (Duruk, 2006) Ancak TiN ve CrN bileşenli kaplamaların tribolojik özelliklerinin iyileştirilmesi ihtiyacından dolayı, başka bileşenlerinde kaplamalara eklenme fikri ortaya çıkmıştır. Örneğin CrN ve kaplamalarına alternatif bir şekilde TiCrN, AlCrN, TiCN ve AlTiN gibi üçlü kaplamalar geliştirilmiştir (Pişken, 2007)

3.3.3. Alüminyum titanyum krom silikon nitrür (AlTiCrSiN) kaplama

Nitritler, karbürler ve oksitler gibi çok bileşenli seramik kaplamaların biriktirilmesi ve nano yapıları sert kaplamalar elde etmek için Si eklenmesi geliştirilmiştir. Örneğin, çok bileşenli AlTiCrN, AlCrSiN, AlTiSiN, ZrSiN ve ZrAlSiN'yi oluşturmak için TiN, CrN ve ZrN'ye Al ve Si 'nin eklenmesiyle birlikte, termal stabilite açısından TiN, CrN, ZrN, TiAlN ve CrAlN'ye kıyasla daha üstün mekanik özelliklere sahip olan kaplamalar elde edilmiştir (Nalbant, 2018).

AlTiCrSiN kaplamalar; işleme ve şekillendirme endüstrileri açısından son derece elverişli bir niteliğe sahiptir ve hem yüksek sıcaklığa hem yüksek sertliğe hem de pürüzsüz yüzeye sahip olan kaplamalardan biridir. AlTiCrSiN çok katmanlı bir yapıya sahip olduğundan, yüksek performans ve dayanıklılığa sahiptir. (Şireli, 2015) AlTiCrSiN, geçiş nitrürlerine sahip sert kaplamalardan olduğu için, toplu malzeme mukavemetinden ödün vermeden, belirli işlem ortamında ve belirli özelliklerin gerekli olduğu uygulamalarda başarıyla kullanılmaktadır (Konak, 2022).

3.4. Literatür Taraması

İlgili literatür incelendiğinde gerek yurt içi gerekse de yurt dışında yapılmış birçok çalışma bulunmaktadır. Çalışmanın bu kısmında ilgili literatürdeki bazı örneklere yer verilecektir. Bu bağlamda öncelikle AISI 4140 çeliği ile ilgili literatür incelendikten sonra, PVD kaplamalarla ilgili literatür incelenecektir. AISI 4140 sahip olduğu özelliklerden dolayı kullanım alanları her geçen gün artmaktadır. Artan bu talep ile birlikte bu malzemenin özelliklerinin iyileştirilmesi üzerine yapılan çalışmalarda artış göstermektedir.

Bu kapsamda; Denктаş (2009) tarafından yapılan çalışmada, plazma Nitrokarbürleme AISI 4140 çeliğinin tribolojik ve korozyon davranışı üzerine post-oksidasyon işleminin etkisinin araştırılması için, AISI 4140 çeliği öncelikle 570 ve 700°C sıcaklığında toplamda 4 saat süreyle 60%N₂+37%H₂+3%CO₂ gaz karışımında plazma Nitrokarbürleme işlemine tabi tutulmuştur. Yapılan çalışmanın neticesinde, beyaz tabakanın üzerinde hematit ve magnetit fazlarından oluşan oksit tabakası meydana gelmiştir. Daha iyi tribolojik ve korozyon özelliklerine nitrokarbürleme sonrası yapılan postoksidasyon işlemi ile ulaşılmıştır. Korozyon özelliklerine ferritik nitrokarbürleme

sonrası yapılan post-oksidasyon işlemi östenitik koşullarda sağlananlara kıyasla daha cazip olduğu saptanmıştır. Ek olarak daha iyi korozyon özelliklerine ulaşılabilme amacıyla oksidasyon işleminde hidrojen gazı kullanılmış ve daha iyi korozyon özelliklerine ulaşılmıştır.

Özdemir (2022) tarafından yapılan başka bir çalışmada, bilyeli dövme sonrası nitrürlemenin AISI 4140 çeliğinin aşınma direnci üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Çalışmada silindirik formda tedarik edilen AISI 4140 çeliğinden aşınma ve metalografik numuneler üretilmiştir. Numunelerin bir kısmı talaşlı imalata tabi tutulmamış, geri kalanı ise belirlenen parametrelerle dövülüp nitrürlenmiştir. Nitrürlenmiş ve nitrülenmemiş AISI 4140 çeliğinin aşınma davranışı incelenmiştir. Deneyler disk üzerinde bilyeli aşınma cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Numune içinde meydana gelen hacim kaybını ölçmek için optik mikroskopi kullanıldı. Ayrıca aşınmış numunelerin yüzey morfolojisi SEM (taramalı elektron mikroskobu) kullanılarak incelenmiştir. Özdemir (2022) tarafından yapılan çalışmanın neticesinde, bilyeli dövme işleminin AISI 4140 çeliğinin adeziv aşınma özelliklerini olumlu bir şekilde etkilediği gözlemlenmiştir.

Çakmak (2015) tarafından yapılan çalışmada ise, AISI 4140 çeliğinin işlenmesinde kesici uç geometrisinin talaş kırmaya ve yüzey pürüzlülüğüne etkisi incelenmiştir. İşleme prosesi sırasında kesme geometrisi, ilerleme hızı ve kesme derinliği talaş kırılmasını ve yüzey pürüzlülüğünü etkilediği saptanmıştır. AISI 4140 çeliği kaplamalı karbür kesici takım (TAEGUTEC marka) kullanılarak CNC torna tezgâhında işlenmiştir. Deneylerde farklı uç geometrilerine sahip kaplamalı uçlar kullanılmıştır. Kesici takımın kesici şeklinin yüzey pürüzlülüğü ve talaş şekli üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Talaşlı imalatta en büyük sorunlardan biri talaşların kırılmamasından ötürü bu çalışmada talaş kırılması üzerine bir araştırma yapılmıştır. CNC torna tezgâhında farklı kesme parametreleriyle bir dizi deney yapılmıştır. Yapılan çalışmanın neticesinde, genel olarak ilerleme hızı arttıkça talaşların kırılmasının kolaylaştığı ancak yüzeydeki pürüzlülüğünde bu duruma paralel bir şekilde arttığı gözlemlenmiştir.

Kösen (2023) tarafından yapılan çalışmada da AISI 4140 çeliğinin grafit takviyeli vanadyum karbür tozlarıyla kaplanabilirliği araştırılmıştır. Yapılan çalışmanın neticesinde, göz önüne alındığında kaplamanın sertliğin artmasına önemli ölçüde katkı

sağladığı gözlemlenmiştir. Enerji girişinin bir fonksiyonu olarak katman kalınlığı sonuçları, N3 numunesi için 720 J/mm enerji girişinde 932 katman kalınlığının elde edildiğini, N6 numunesi için ise 2000 J/mm enerji girişinde katman kalınlığının elde edildiğini göstermektedir. 150 metre aşınma sonrasında N6 numunesi için sürtünme katsayısının en düşük değeri 0,2 ve N1 numunesi için maksimum sürtünme katsayısı 0,6 olarak saptanmıştır. Sonuç olarak C ilavesi kaplamanın mikro sertliğini iyileştirmiş ve aynı zamanda aşınma direncini de arttırdığı gözlemlenmiştir. Kaplama yüzeyi metalurjik olarak pürüzsüz bir yapı sergilemiştir ve herhangi bir gözenek oluşumu tespit edilememiştir.

Nalbant (2018) tarafından yapılan çalışmada, derin kriyojenik işlemin AISI 4140 çeliğinin aşınma davranışı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Yapılan çalışmanın neticesinde, yapılan kriyojenik işlemde sonra malzemenin mikroyapısal incelemesi yapılmış ve mikro sertliği ölçülmüştür. Kriyojenik işlem, dakikada 2 °C soğutma hızıyla -196 °C'ye kadar soğutulmuş ve bu sıcaklıkta belirtilen süre boyunca tutularak gerçekleştirilmiştir. Kriyojenik işlem gören tüm numunelerin aşınma oranının, işlem görmemiş numunelere kıyasla daha fazla arttığı ve bu duruma paralel olarak sertliğinde arttığı saptanmıştır. 5N yük ile yapılan aşınma testinde 12 saat kriyojenik sıcaklıkta işlem gören numunenin aşınma direncinde %66,4 oranında iyileşme olduğu tespit edilmiştir.

Kaya (2022) tarafından yapılan çalışmada, plazma nitrüleme işleminin düşük alaşımlı AISI 4140 çeliğinin hem yapı hem de mekanik özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Kaya (2022) tarafından yapılan çalışmanın neticesinde, iç yapının büyük bir kısmının martenzite ve artık östenite dönüştüğü tespit edilmiştir. Plazma nitrüleme işlemine tabi tutulan çelik yüzeyinin kimyasal yapısının değiştiği, yüzeyde demir nitrid bileşiklerini içeren beyaz bir tabaka ve alaşım nitridleri içeren bir difüzyon tabakasının oluştuğu gözlemlenmiştir. Azot difüzyonunun etkisiyle çelik yüzeyin efektif sertlik derinliği 0,25-0,30 mm olduğu tespit edilirken, en yüksek sertlik, çekme mukavemeti ve tokluk değerleri plazma Nitrülenmiş çeliklerle elde edilmiştir. Ayrıca söz konusu çeliğin plazma nitrüleme koşullarında en iyi yorulma davranışını sergilediği tespit edilmiştir.

Konak (2017) tarafından yapılan çalışmada, melonite işlemi uygulanmış olan AISI 4140 çeliklerinin içyapı, mekanik ve tribolojik özellikleri incelenmiştir. Yapılan çalışmanın

neticesinde hem kaplamalı hem de kaplamasız AISI 4140 çeliğinin sertlik değerleri laboratuvarında bulunan mikro sertleştirme ekipmanları kullanılarak ölçülmüştür. Aşınma performansı laboratuvarında mevcut aşınma test ekipmanı kullanılarak ölçülmüştür. Aşınma testine tabi tutulan malzemelerin içyapısı ve aşınmış yüzeyi SEM kullanılarak gözlemlenmiştir. Sonuç olarak melonit kaplı malzemelerin kaplamasız malzemelere göre aşınma direncinin arttığı ve sürtünme katsayısının azaldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca kaplanmış malzemelerin sertlik değerlerinin kaplanmamış malzemelere göre 2-3 kat arttığı tespit edilmiştir.

Aydınğülü (1998) tarafından yapılan çalışmada, statik hava koşulları altında TiN ve ON bazlı seramik kaplamaların oksidasyon davranışı araştırılmıştır. Alüminyum oksit paneller katodik ark PVD işlemi kullanılarak kaplanmış ve yatay tüp fırında oksidasyona tabi tutulmuştur. Araştırmada kullanılan toplamda 18 örnek araştırmacı tarafından oksitlenmiştir. Oksitlenmiş olan numunelerin oksit yapısı daha sonra X-ışını spektroskopisi kullanılarak incelenmiştir. Aydınğülü (1998) tarafından yapılan çalışmanın sonuçları incelendiğinde, TiN ve CrN kaplamaların belirlenen deneysel sıcaklık ve sürelerde oksitlenmesine rağmen tamamen stabil bir oksit yapısına ulaşamadığı tespit edilmiştir.

Pak (2021) tarafından yapılan çalışmada, frezelemede köşe yuvarlama ve PVD kaplamaların kesici takım performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Yapılan çalışmanın neticesinde, mikro geometrilerin ve kaplamanın takım aşınması ve performansı doğrudan etki ettiği görülmüştür. Daha sonra aynı kaplamanın yüksek dereceli karbon malzeme üzerindeki performansını değerlendirmek için test GG25 malzemesi kullanılarak tekrarlanmıştır. Mikro geometrilerde en iyi performans şelale tipi köşe yuvarlamada elde edilmiştir. Kaplama türleri değerlendirildiğinde ise en iyi performans tüm malzemelerde AlCrN kaplamalarda elde edilmiştir.

Işık (2010) tarafından yapılan çalışmada, biyomedikal uygulamalarda PVD kaplama yöntemiyle hazırlanan ince filmlerin temel karakteristikleri incelenmiştir. Yapılan çalışmanın neticesinde, kaplamalı kemerlerin sürtünme katsayısı değerlerinin kaplamasız kemerlere göre önemli ölçüde azaldığı ve β -Ti ve Ni-Ti kemerlerin daha düşük sürtünmeye sahip olduğu tespit edilmiştir. İki seviyeli, dört faktörlü, tam uyumlu bir deney tasarımı (L16) oluşturmak için elde edilen sürtünme katsayısı değerleri kullanılarak

parametrik etkileşimler ortaya çıkarılmıştır. Braket ve ark teli kombinasyonları arasında kaplamalı ark teli ve kaplamasız braket kombinasyonunun en düşük sürtünme katsayısına sahip olduğu tespit edilmiştir.

Aykan (2018) tarafından yapılan çalışmada, AZ91 magnezyum alaşımının aşınma davranışı, farklı malzemeler ile deneysel karşılaştırmalar ve üzerine yapılan ark PVD kaplamaların korozyon dayanımına etkisi incelenmiştir. Yapılan çalışmanın neticesinde, yüzey morfolojisi, sürtünme katsayısı, sürtünme kuvveti ve aşınma izi büyüklüğü ile birlikte ölçülmüş ve cam elyaf takviyeli FR-4 epoksi kompozitin diğer malzemelere göre daha iyi tribolojik özelliklere sahip olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, serbest havada oksitlenen MgO'lu AZ91-Mg alaşımının tribolojik özellikleri, cam elyaf takviyeli FR-4 epoksi kompozitinkine yakındır; en yüksek sürtünme katsayısı ve kütle kaybı Etial 150 için gözlemlenmiştir.

Kulkarni ve arkadaşları (2013) tarafından yapılan çalışmada, AISI 304 östenitik paslanmaz çeliklerin nanokristalin AlTiCrN kaplamalı sementite karbür uç ile kuru yüksek hızda tornaladığında gözlenen deneysel sonuçları sunmaktadır. Yüksek güçlü darbeli magnetron püskürtme (HPPMS) ve katodik ark buharlaştırma (CAE) teknikleri kullanılarak ince taneli K sınıfı sementite karbür üzerine nanokristalin AlTiCrN kaplama uygulanmıştır. Kaplamaların bileşimi ve mikroyapısı, SEM kullanılarak analiz edilmiş ve yapışma ve mikrosertlik değerlendirilmiştir. HPPMS ile biriktirilen kaplamaların ince taneli yapıya sahip olduğu gözlemlenmiştir ve mikrosertlik değerleri 4,2 mm kalınlık için 35 ve 37 GPa olarak ölçülmüştür. Ayrıca, kesme hızı ve ilerlemenin takım aşınması üzerindeki etkisi incelenmiştir ve HPPMS kaplamalı takımın daha uzun bir takım ömrü sergilediği bulunmuştur. CAE kaplamalı takımın takım ömrü ise aynı koşullarda daha kısa sürede sona ermiştir.

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1. Taban Malzeme Özellikleri

Bu çalışmada yüzey sertliğinin, tokluk ve mukavemetin ön planda olduğu dingil, mil, dişliler ve kanat gibi birçok endüstriyel alanda kullanılan AISI 4140 çeliği kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan deney numuneleri kalınlık 6mm ve çap ise 35mm olacak şekilde üretilmiştir. Kullanılan AISI 4140 çeliği alaşım elementleri Tablo4.1' de verilmiştir.

Tablo 4-1 AISI 4140 çeliği alaşım elementlerinin bileşik içindeki oranları.

Element	C	Mn	P	S	Si	Cr	Mo
% ağırlık	0,38- 0,45	0,75- 1,00	Max 0,035	Max 0,04	0,15- 0,30	0,80- 1,10	0,15- 0,25

Çalışmada kullanılan numuneler, kaplama sırasında, kaplanacak filmler ve taban malzeme ile yüksek adezyon özellikleri göstere bilmek, yüzeyde oluşan kir, pas ve istenmeyen oluşumlar için SiC abrasif kağıtlar ile zımparalanmıştır. Zımparalama işlemi sırasıyla 80-220-400-600-800-1200-2000 mesh zımpara kağıtları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Zımparalama işleminden sonra numuneler etil alkol içerisinde ultrasonik temizleme işlemine tabii tutulmuştur. Ardından kaplama işlemine geçilmiştir.

4.2 Kaplama İşlemi

Çalışmada yapılan kaplamalar ticari bir kuruluş olan Metistec firması ile ortak bir çalışma ile gerçekleştirilmiştir. Öncelikle kaplama işlemleri için hazırlanmış olan AISI 4140 numuneleri kaplama odasına yerleştirilmiş ve kaplama işlemi öncesinde argon gazı ile iyon temizleme işleminde tabii tutulmuştur. Homojen bir kaplama işlemi gerçekleştirebilmek için taban malzemeler belirli bir hızda döndürülmüştür. Literatür incelendiğinde tek bir çalışmada aynı taban malzeme üzerine aynı kalınlıkta biriktirilen ince film yapıları bulanmamıştır. Bu sebeple kaplama işlemi, aynı taban malzeme üzerine aynı kalınlıkta farklı ince filmler büyütülerek tamamlanmıştır. Biriktirilen ince filmler AISI4140 çeliği üzerine AlTiCrSiN, CrN, TiCrN, olarak belirlenmiştir. Buna göre

kalınlık üç mikron seçilerek bütün deney numunelerine aynı kalınlıkta filmler büyütülmüştür.

4.3 Yapısal İncelemeler

AISI 4140 taban malzeme üzerine biriktirilen ince filmlerin kristalografik yapılarının incelenmesi için XRD cihazından faydalanılmıştır. İncelenecek olan kristalografik yapılar için cihaz özellikleri, $\lambda=1,5406 \text{ \AA}$ dalga boyunda, CuK_α radyasyon kaynaklı XRD cihazı kullanılmıştır. Cihaz parametreleri ise, $2\theta=5-99^\circ$ tarama aralığında, 1,5 derece/dakika tarama hızında ve 0,53 derece adımında incelenmiştir. Elde edilen grafikler literatür ile karşılaştırılmış ve kristalografik yapıları belirlenmiştir.

Kaplamaların kimyasal, EDS analizleri ve aşınma sırasında oluşan yüzeylerin incelenmesi için FEI-QUANTA FEG 450 taramalı elektron cihazı kullanılmıştır.

4.4 Çizik Testi

AISI 4140 çeliği üzerine biriktirilen ince filmlerin tabana malzemeye olan yapışma özelliklerinin yani, film ve taban malzeme arasında oluşan adezyon kabiliyetinin belirlenmesi için çizik testi uygulanmıştır. Çizik testi lineer olarak 0N'dan başlayarak 90N'a kadar uygulanmıştır. Çizik testinde kullanılan uç, 200 μm çapında Rockwell tipi elmas tipinde uçtur. Elmas uç 6mm/dakika hızla ilerlemiştir. Yapılan test sonuçları, gerçeğe yakın doğruluğu sağlamak için aynı numune üzerinde üç farklı konumda yapılmıştır.

4.5 Tribolojik Testler

AISI 4140 çeliği üzerine büyütülen AlTiCrSiN, TiCrN, CrN, filmlerin sürtünme ve aşınma dayanımlarının incelenmesi için tribolojik testler gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneyler tek bir çevre koşulunda, atmosfere açık ve vakum ortamında gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneyler 10 N yük altında, 150 rpm dönme hızı ve 5000 çevrim olarak gerçekleştirildi. Aşındırıcı olarak 6 mm çaplı Al₂O₃ bilye kullanıldı. ATM ve 5×10^{-3} mbar vakum ortamında deneyler gerçekleştirildi. Aynı zamanda tribolojik testler sonucunda elde edilen yüzey morfolojilerinin incelenmesi için optik profilometre ve SEM

incelemeleri gerçekleştirildi. Optik profilometre görüntüleri ile yüzeyin üç boyutlu olarak modellenmesi ve topografik görüntülerinin elde edilmesi sağlandı.

4.6 AFM Analizi

Büyütülen ince filmlerin kaplama topografyasını görüntülemek için AFM cihazından faydalanılmıştır. Atomik kuvvet mikroskopu mikron mertebelerinde bulunan uç ile yüzey arasındaki kuvvet sayesinde değişikliklerin kaydedilmesi ile ölçüm gerçekleştiren bir cihazdır. Uç ile yüzey arasında oluşan bu kuvvet etkileşimi Van der Waals, kapiler ve sürtünme kuvvetinden meydana gelmektedir. Kaplamaların 2 ve 3 boyutlu olarak yüzey topografyasının çıkarılmasını ve yüzey pürüzlülüğünü özelliklerinin belirlenmesinde rol oynamıştır.

5. BULGULAR TARTIŞMA

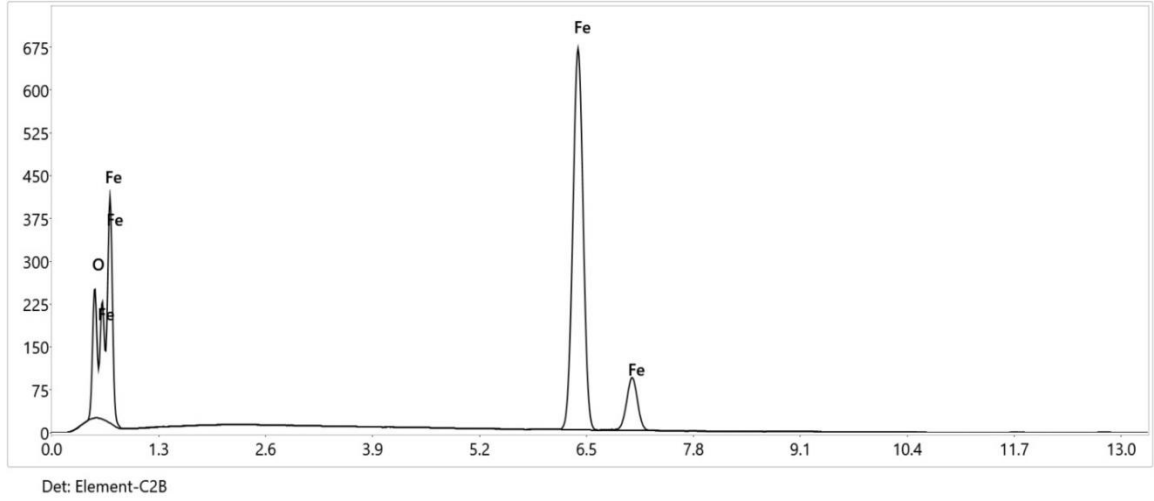
5.1 Film Kalınlığı ve Yüzey Morfolojisi

AISI 4140 çeliği üzerine kaplanan üç farklı filmin kaplama kalınlıkları sonuçların güvenilirliği için aynı kalınlıkta kaplanmıştır. Buna göre kalınlık 3μ olacak şekilde biriktirilmiştir. Elde edilen kaplamalar, gümüş grisi, koyu gri ve altın sarısı yüzey görünümündedirler. Yapılan mikrosertlik testlerinde işlemsiz numune ve kaplama uygulanmış numunelerin yüzey sertliklerinin ölçümü gerçekleştirildi. Testler Struers duramin marka vickers tipi mikrosertlik ölçüm cihazı ile yapıldı. Deney parametreleri ise, 245,3mN altında 10 saniye olacak şekilde uygulandı. Alınan sonuçlar incelendiğinde AISI4140 çeliği 294,75 HV mertebesindedir. Büyütülen AlTiCrSiN, TiCrN, CrN filmlerin sertlik değerleri sırasıyla 1857.25, 1602, 1041 HV sertlik değerleri elde edilmiştir. Büyütülen filmler yüksek sertlik mertebelerine ulaşıldığını göstermektedir.

5.2 EDS Analizi

AlTiCrSiN, TiCrN, CrN ince filmlerin ve AISI 4140 çeliği kimyasal bileşimleri EDS analizi ile belirlenmiştir. EDS analizi kaplama yüzeyinden alınan bir analiz olduğundan biriktirilen filmlerin kimyasal yapıları hakkında bilgi sahibi olmamızı sağlamıştır. EDS analizleri Şekil5.1,2,3,4 ve 5’de belirtildiği gibidir. EDS analizlerini incelediğimizde,

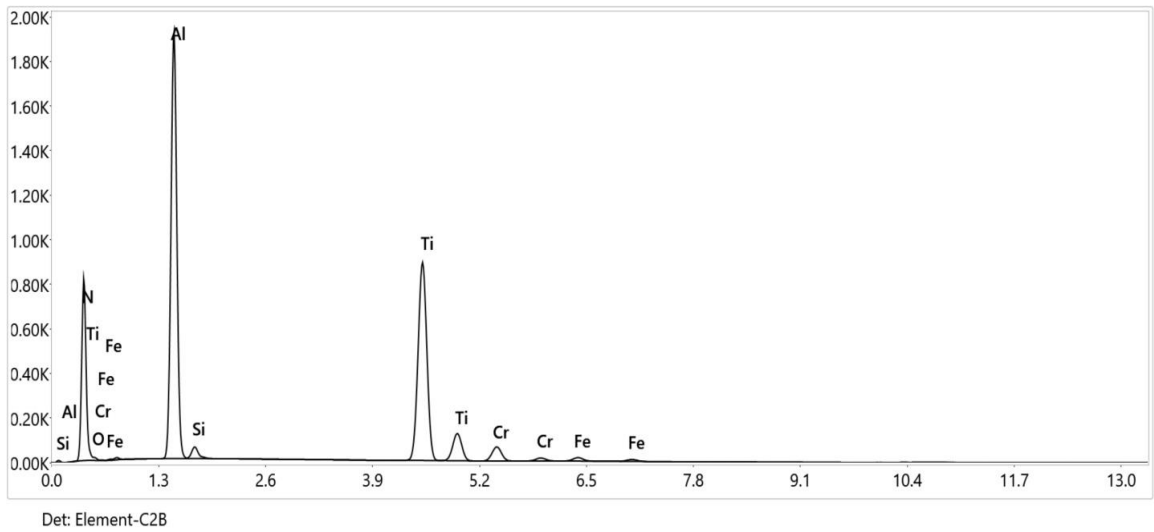
Tablo5-1,2,3 ve 4'te yer alan, biriktirilmiş ince film yapılarının ve AISI4140 çeliğinin kütlece ve atomik olarak EDS analiz sonuçlarını göstermektedir. EDS analizler incelendiğinde üç kaplamada da demir elementinin varlığı göze çarpmaktadır. Demir elementi taban malzeme olarak kullanılan AISI 4140 çeliği içerisinde bulunan element varlığından kaynaklanmaktadır.



Şekil 5. 1 AISI 4140 çeliği EDS analizi.

Tablo 5-1 AISI 4140 çeliği EDS analizi kütlece ve atomik yüzde oranları.

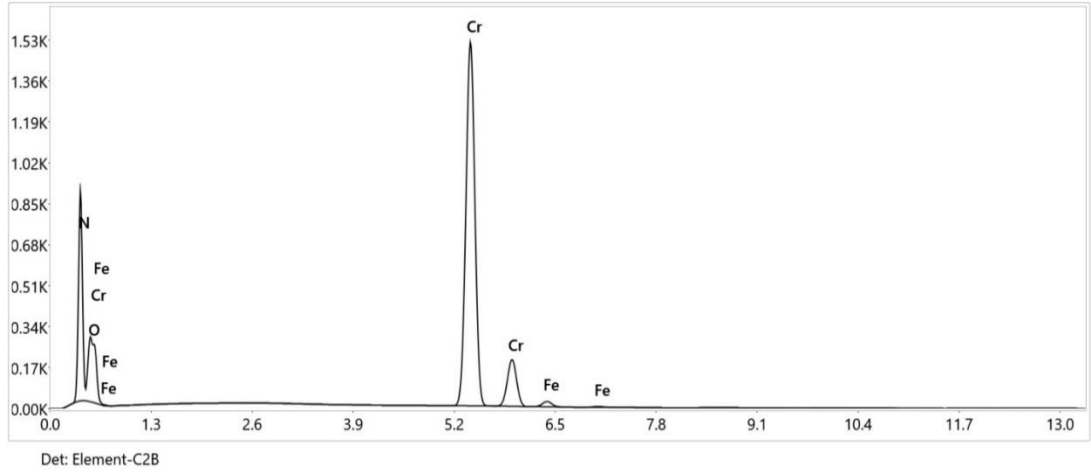
AlTiCrSiN	% Kütlece	% Atomik
Fe	90.11	72.30



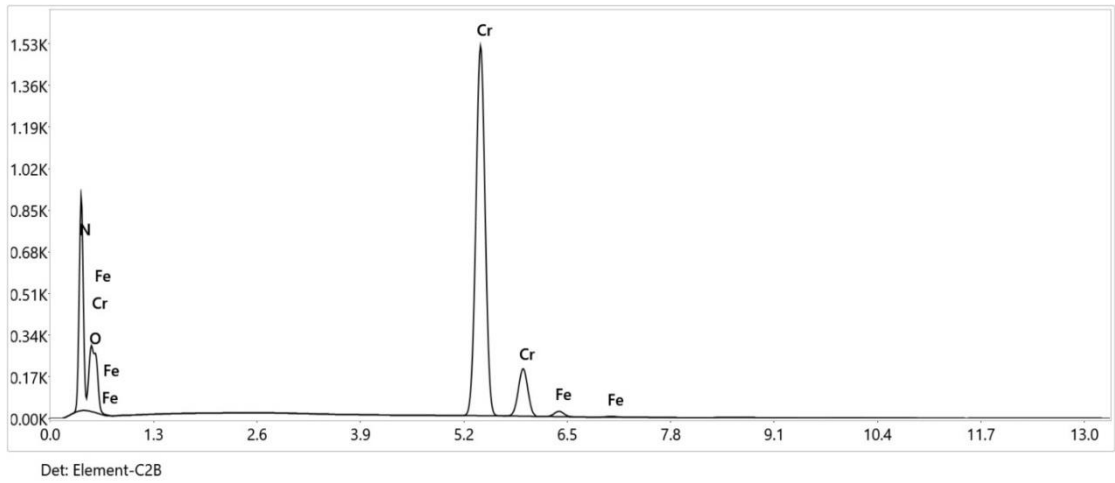
Şekil 5. 2 AlTiCrSiN çeliği EDS analizi.

Tablo 5-2 AlTiCrSiN EDS analizi kütlece ve atomik yüzde oranları.

AlTiCrSiN	% Kütlece	% Atomik
N	35.64	58.04
Al	27.15	22.96
Si	0.91	0.74
Ti	30.80	14.68
Cr	3.24	1.42
Fe	1.05	0.43



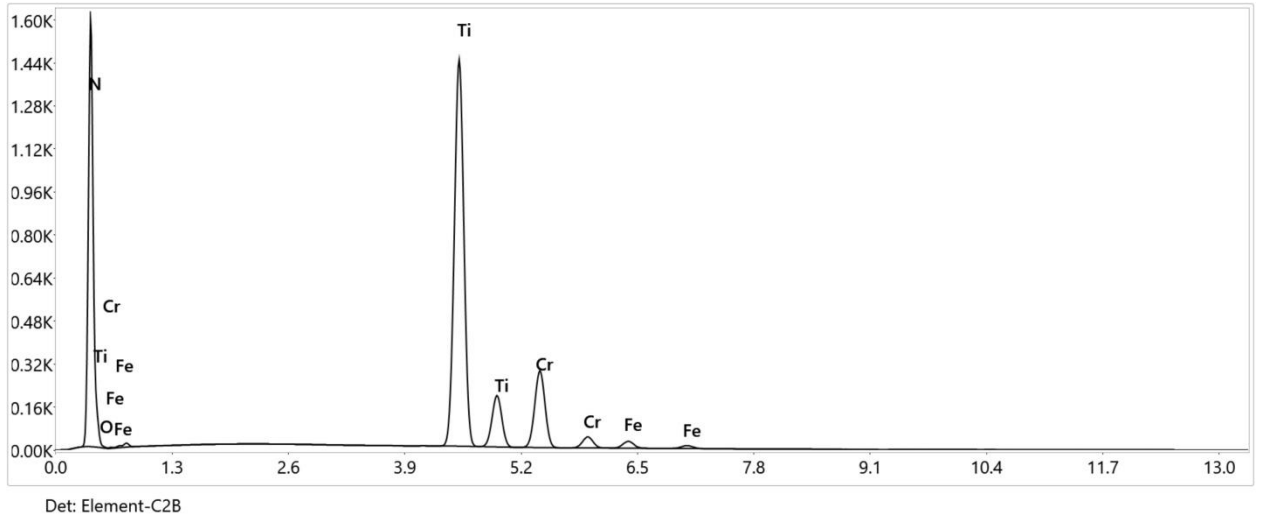
Şekil 5. 3 AlTiCrSiN çeliği EDS analizi.



Şekil 5. 4 CrN EDS analizi

Tablo 5-3 CrN EDS analizi kütlece ve atomik yüzde oranları.

CrN	% Kütlece	% Atomik
N	25.51	51.73
Cr	66.76	36.47
Fe	1.52	0.77



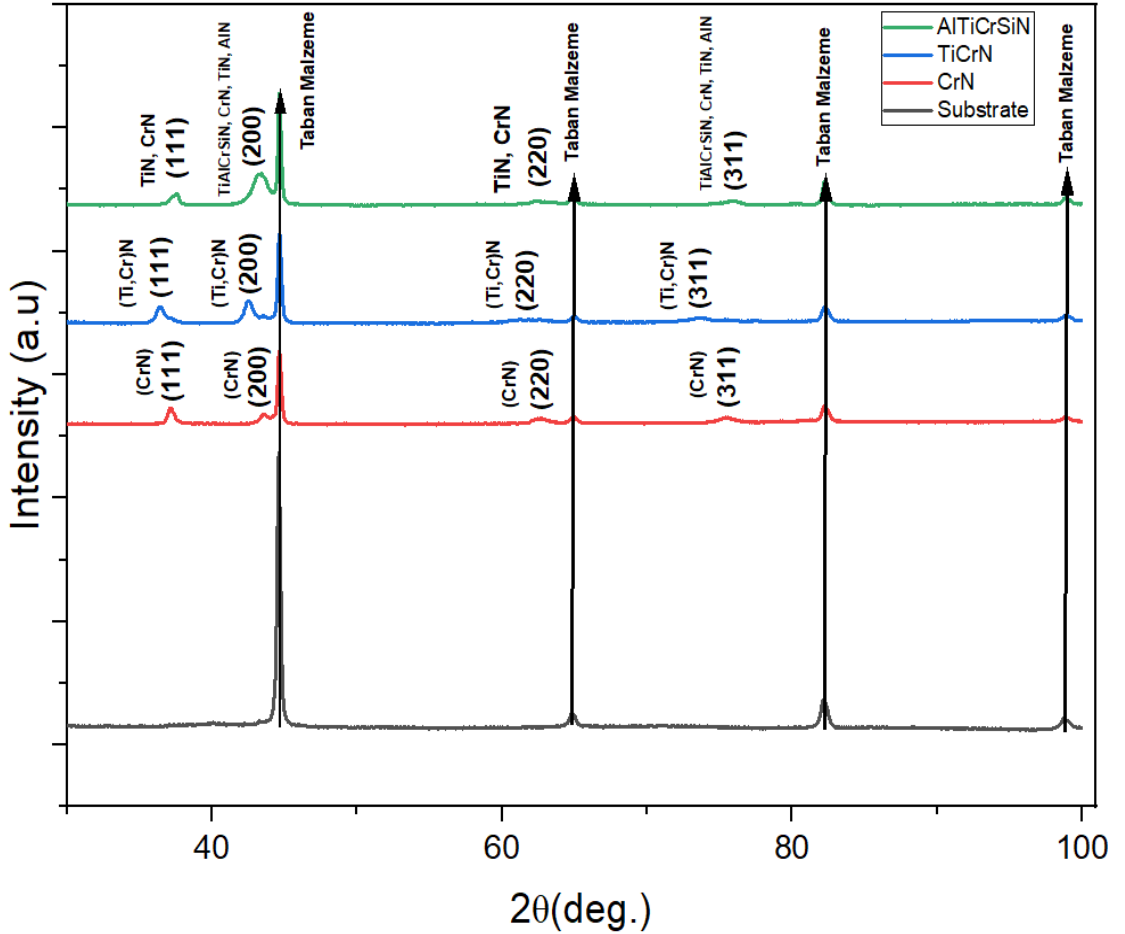
Şekil 5. 5 TiCrN EDS analizi

Tablo 5-4 TiCrN EDS analizi kütlece ve atomik yüzde oranları.

TiCrN	% Kütlece	% Atomik
N	36.91	67.15
Ti	46.72	24.87
Cr	14.59	7.15
Fe	1.75	0.8

5.3 XRD Analizi

Deneylerde AISI 4140 çeliği üzerine uygulanan CrN, AlTiCrSiN ve TiCrN kaplamalarının yapısal özellikleri XRD yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Yapılan XRD deneylerindeki bulgular Şekil 5.6'de verildiği gibi tespit edilmiştir.



Şekil 5. 6 İnce film yapılarının XRD sonuçları ve kristalografik yapıları.

CrN kaplamasının XRD eğrisi incelendiğinde 44.5, 64.807, 82.1 ve 99.1 2θ açılarında taban malzemedan kaynaklanan pikler görülürken, 37.1, 43.5, 62.612 2θ açılarında (111), (200), 220 CrN piki, 75.4 açısında 311 CrN piki 82.4'te CrN pikleri elde edilmiştir. Benzer pikler farklı araştırmacılar tarafından da literatürde elde edilmiştir (Liu,2024). Elde edilen pikler NaCl B1 yapıda olduğu düşünülmektedir (Chen,2020).

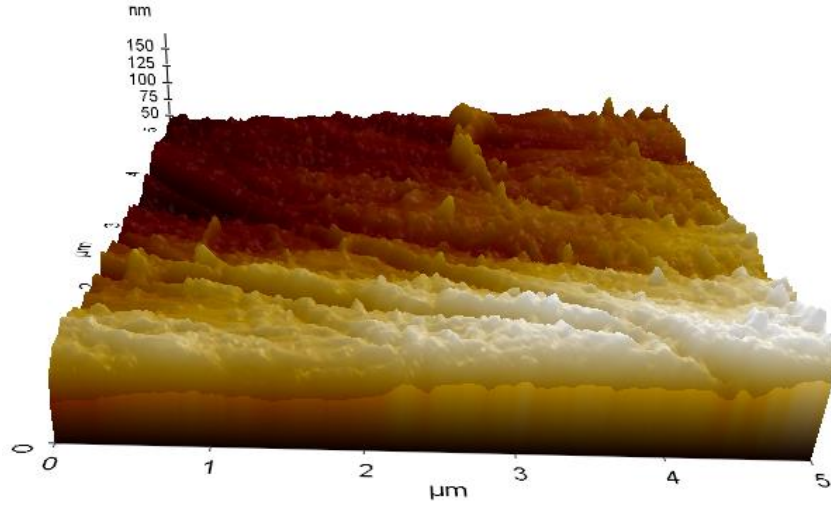
TiCrN kaplamasının XRD eğrisi incelendiğinde, baskın bir şekilde (Ti, Cr)N (111) ve (Ti, Cr)N (200) piklerinin katı çözelti şeklinde meydana geldiği görülmektedir

(Aouadi,2004). Yine aynı eğride (Ti, Cr)N (220) ve (Ti, Cr)N (311) piklerinin düşük yoğunlukta da olsa oluştuğu literatürle uyumlu olarak görölmektedir (Paksunchai,2012). CrN eğrisine göre bütün piklerin düşük açuya doğru kaydığı görölmektedir. Piklerde meydana gelen bu değişimin yapıya eklenen Ti atomları ile beraber kafes yapısının genişlemesi ile ilişkili olduğu düşünölmektedir (Gong,2023).

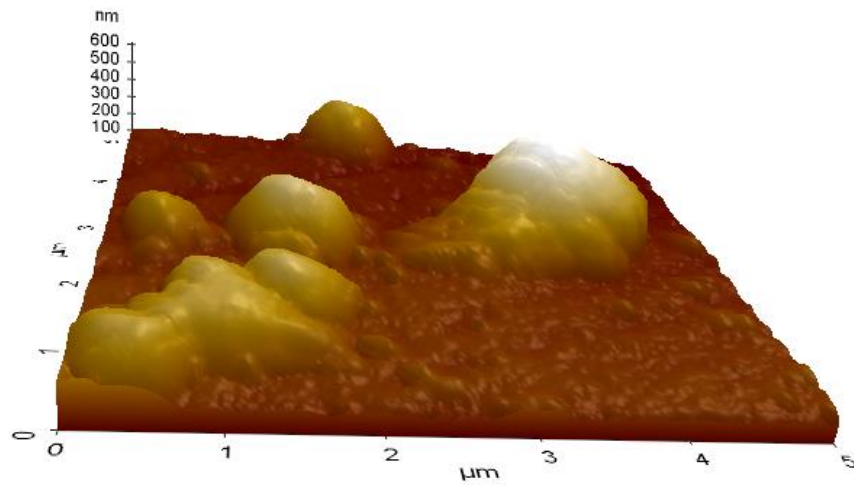
AlTiCrSiN kaplamasının XRD grafiği incelendiğinde 37,5°'de TiN ve CrN (111) piklerinin oluştuğu düşünölmektedir (Zhang vd, 2015). Aynı grafikte 43,5° açısında ise TiAlCrSiN . (Duruk, 2006), CrN, TiN ve AlN piklerinin üst üste binmesiyle oluşan yüzey merkezli kübik yapıda (200) pikinin oluştuğu düşünölmektedir (Chen ,2015) (Alhafian,2023). Aynı grafikte 64,8° açısında (220) TiAlN oluştuğu, 75,7°'de CrN ve TiN fazlarının meydana geldiği düşünölmektedir. Benzer sonuçların literatürde de elde edildiği görölmektedir (ALhafian,2023) (Meghdari vd,2023).

5.4 AFM Analizi

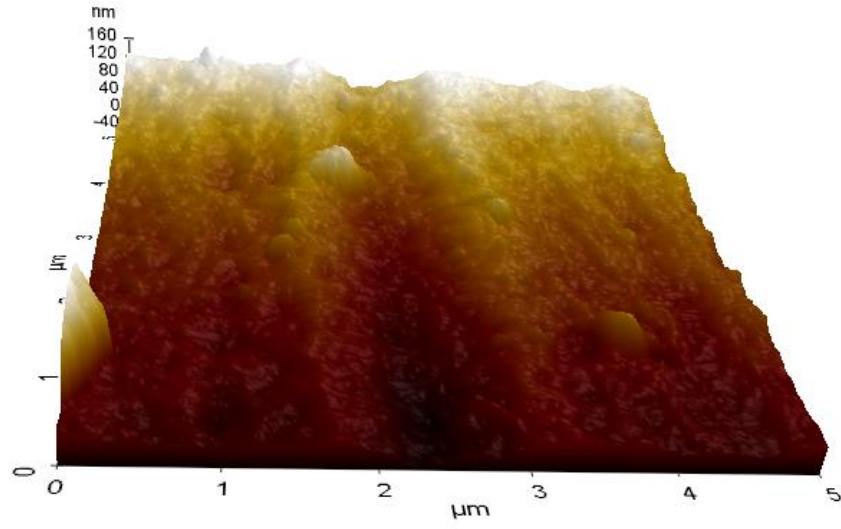
AISI 4140 çeliği üzerine kaplanan ince filmlerin yüzey topografyaları AFM cihazı ile yapılmıştır. şekil5.7'de kaplama uygulanmamış AISI 4140 çeliğinin topolojik görüntüsü verilmiştir. Elde edilen verilere göre Ra değeri 21.83nm olarak ölçölmüştür. Yüzey üzerinde olan en yüksek konum ile en düşük konum arasında oluşan Rz değeri ise 138,0 olarak ölçölmüştür. Kaplama uygulanmış yüzeylerden elde edilen sonuçlar ise, şekil5.8'de AlTiCrSiN filminin Ra değeri 80.88nm Rz değeri 578.2nm, şekil5.9'de CrN filminin Ra değeri 38.43nm ve Rz değeri 230nm son olarak şekil5.10'da TiCrN filminde Ra değeri 37.95nm ve Rz değeri 665.27nm olarak bulunmuştur.



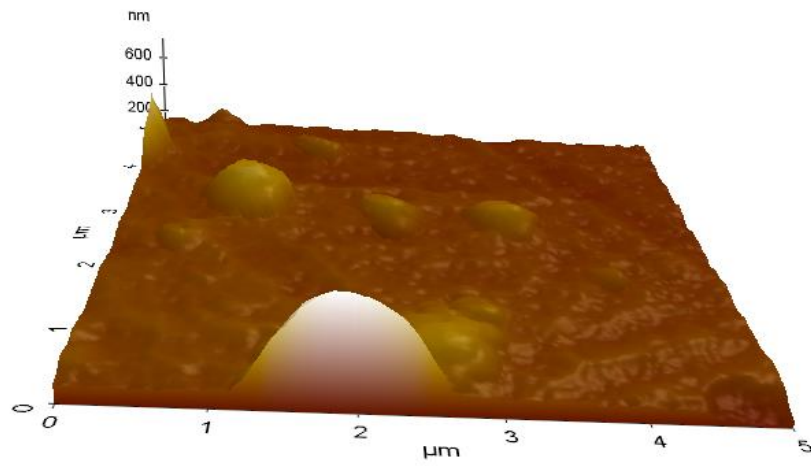
Şekil 5. 7 İşlemsiz AISI 4140 çeliği AFM görüntüsü



Şekil 5. 8 ALTiCrSiN çeliği AFM görüntüsü.



Şekil 5. 9 CrN çeliği AFM görüntüsü



Şekil 5. 10 TiCrN çeliği AFM görüntüsü

5.5 Artan Yük Çizik Testi

Çalışmada yapılan kaplamaların amacı malzemelerin yüzeylerindeki aşınma dirençlerini artırmaktır. Kaplamaların aşınma dirençleri üzerine etki eden önemli parametrelerden biri adezyon dayanımıdır. Yapılan bu kaplamaların adezyon dayanımlarını belirlemek için uygulanan en etkili yöntem ise çizik testidir. Bu test ile kaplamaların taban malzeme yüzeyinden ayrılma direncini belirlemektedir. Yapılan bir kaplamanın adezyon değerlerinin belirlenmesinde kritik yük değerlerine bakılmaktadırlar. Kritik yük değerleri kaplamanın taban malzemeye olan adezyon değerlerini belirlemektedir. Başlıca iki adet kritik yük değeri vardır. Bunlardan ilki olan Lc_1 kritik yükü kaplamanın ilk çatlama belirtisinin ortaya çıktığı yük değeridir. Diğer bir yük değeri ise Lc_2 taban malzemedeki kaplamanın soyulmaya başladığı kritik yük değeridir.

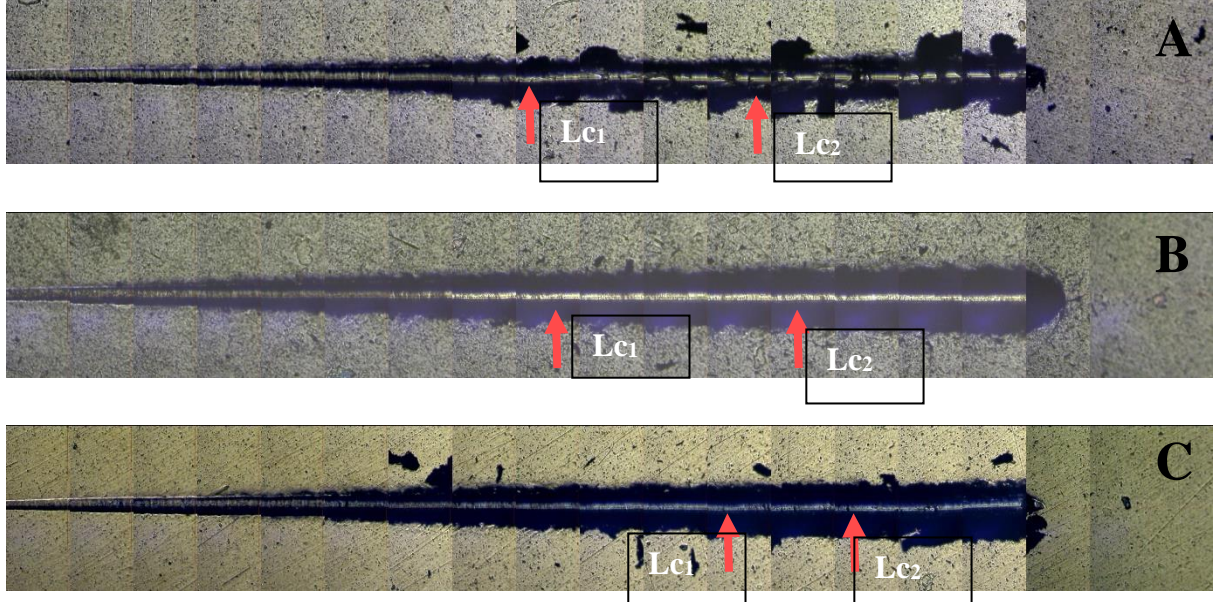
Biriktirilen üç farklı kaplamanın üç farklı noktasından alınan çizik testlerine göre, Lc_2 noktalara karşılık gelen yükler Tablo 5-5’de verilmiştir. Yapılan ölçümlerde en yüksek Lc_2 değeri CrN kaplamasında ve 46,7 N değerinde edilirken. En düşük Lc_2 değeri AlTiCrSiN kaplamasında 36,6N olarak elde edilmiştir. Bu değerler göz önünde bulundurularak, en yüksek sertliğe TiCrN kaplaması ve en düşük sertliğe ise CrN kaplaması sahiptir.

Tablo 5-5 Yapılan aşınma testlerinden elde edilen Lc_2 ve sertlik değerleri.

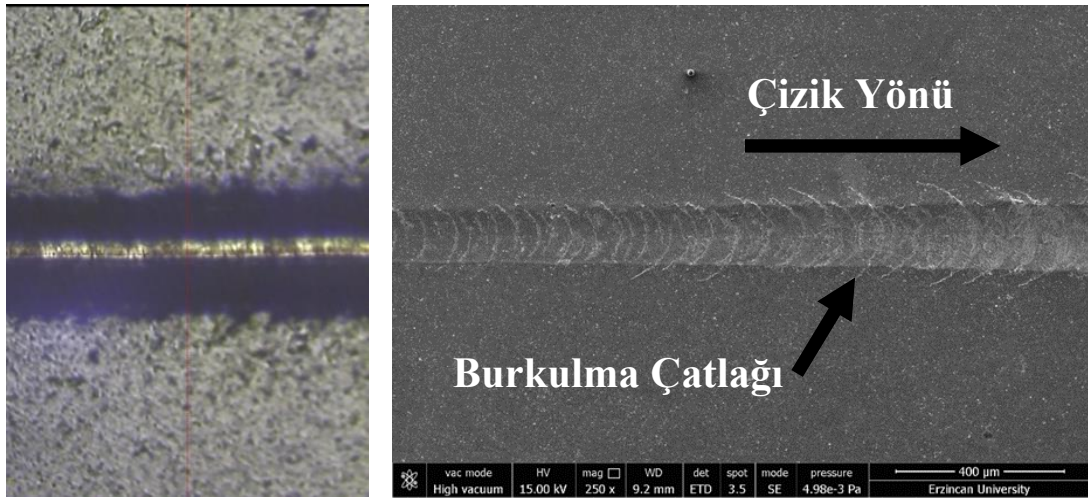
	Mikrosertlik	Adezyon Lc_2
AISI 4140	294.75HV	
CrN	1041HV	46,7
TiCrN	1602 HV	39,9
AlTiCrSiN	1875.2HV	36,6

AlTiCrSiN, TiCrN ve CrN biriktirildiği yüzeylerden alınan mikroskop görüntülerine göre Lc_2 ve Lc_1 noktaları Şekil 5.11’de gösterildiği gibi gerçekleşmiştir. Şekil 5.12’de biriktirilen AlTiCrSiN artan yük çizik testinde Lc_2 noktasına ait SEM ve mikroskop görüntüleri bulunmaktadır. Şekil 5.11’de ki görüntüler incelendiğinde ortalama olarak 36,7N değerinde ilk adeziv kırılmalar başlamıştır. Diğer bir kaplama olan TiCrN Lc_1 görüntüleri Şekil 5.13’deki gibidir. SEM ve mikroskop görüntüleri Şekil 5.14’de ki gibi olup ortalama 39,9N değerinde ilk defa adeziv kırılmalar başlamıştır. Son olarak Şekil 5.16’de CrN kaplamasının Lc_1 noktasına ait SEM ve mikroskop görüntülerine yer

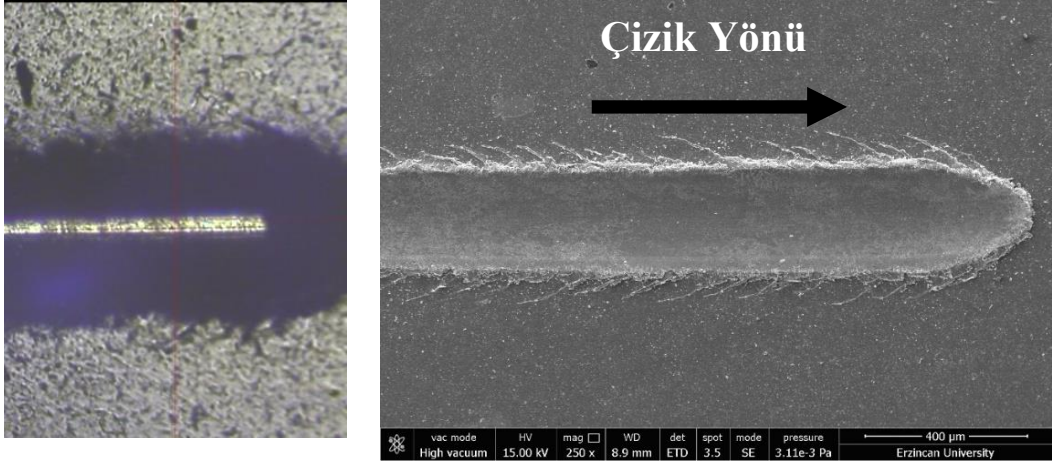
verilmiştir. CrN kaplamasının adeziv kırılma başlangıcı yaklaşık olarak 46,7N mertebelerinde başlamıştır. Şekil 5.13,15 ve 17 incelendiğinde, üç farklı kaplamının da 90N olarak belirlenen maksimum test kuvvetine dayanamadığı ve neredeyse çelik yüzeyden tamamen ayrıldığı görülmektedir.



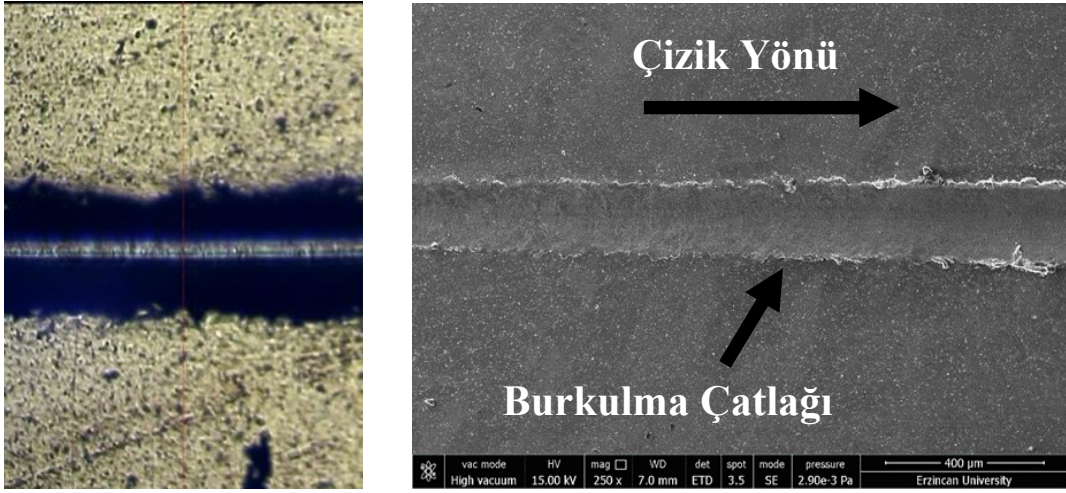
Şekil 5. 11 a) AlTiCrSiN, b) TiCrN ve c) CrN kaplamalarını Lc2 mikroskop görüntüleri.



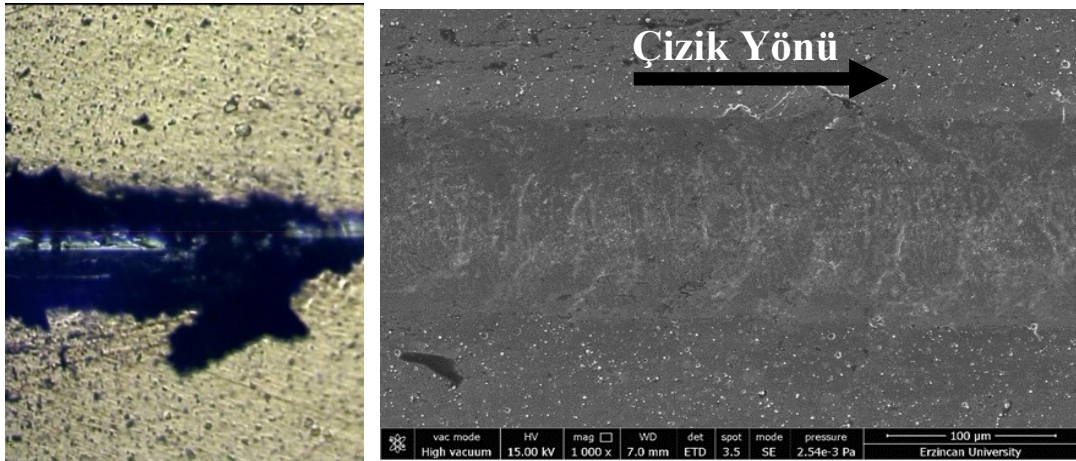
Şekil 5. 12 AlTiCrSiN kaplamasının Lc1 noktası SEM ve mikroskop altındaki görüntüleri.



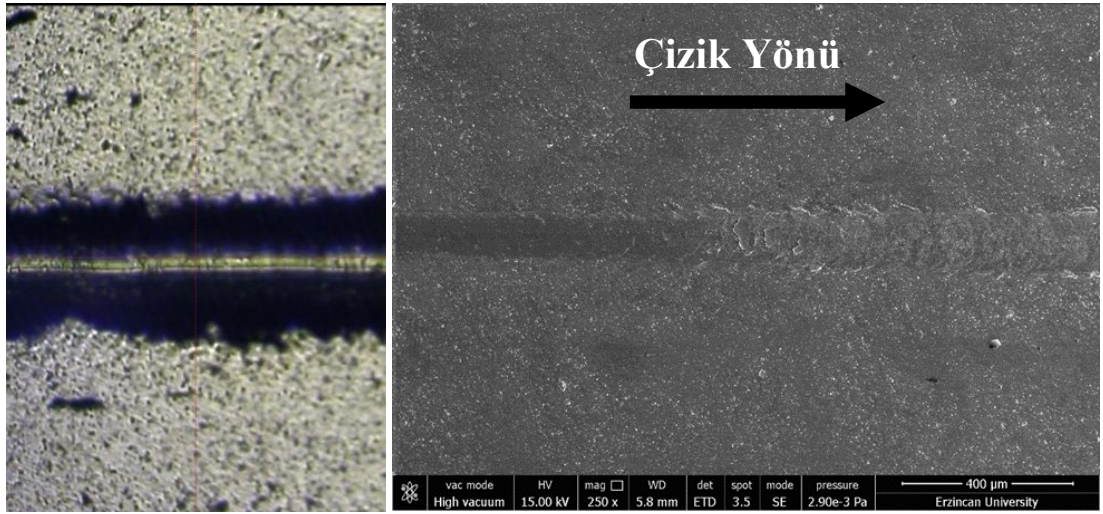
Şekil 5. 13 AlTiCrSiN kaplamasının 90N maksimum yük noktası SEM ve mikroskop altındaki görüntüleri.



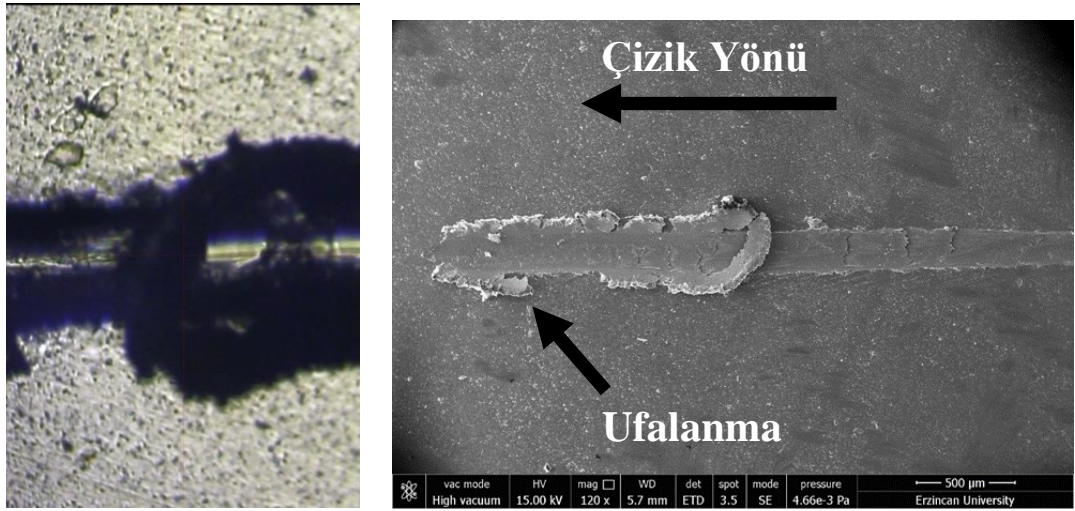
Şekil 5. 14 TiCrN kaplamasının Lc1 noktası SEM ve mikroskop altındaki görüntüleri.



Şekil 5. 15 TiCrN kaplamasının 90N maksimum yük noktası SEM ve mikroskop altındaki görüntüleri.



Şekil 5. 16 CrN kaplamasının Lc1 noktası SEM ve mikroskop altındaki görüntüleri.

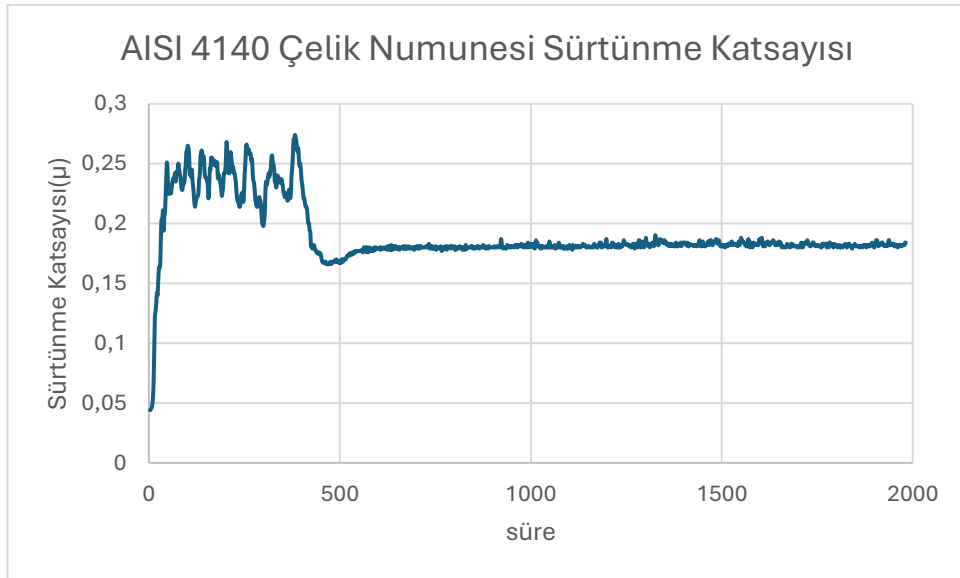


Şekil 5. 17 CrN kaplamasının 90N maksimum yük noktası SEM ve mikroskop altındaki görüntüleri.

Yapılan SEM görüntülemelerde özellikle AlTiCrSiN kaplamasına uygulanan çizik testinde burkulma çatlakları görülmüştür. Diğer bir kaplama olan CrN kaplamasında ise özellikle maksimum çizik yükünün olduğu 90N değerinde ufalanmalar ve malzeme birikmeleri meydana gelmiştir. Bu ufalanma yani toparlanmanın nedeni kaplamanın taban malzemedeki plastik deformasyona bağlı olarak batıcı ucun her iki yandan veya tek taraflı olarak soymasıdır.

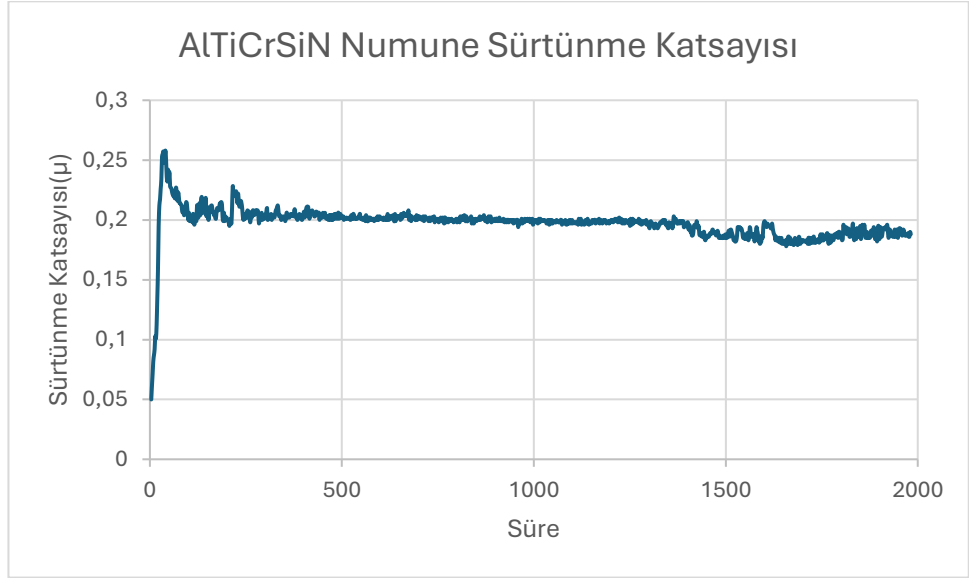
5.6 Atmosfer ve Vakum Ortamında Aşınma Deneyi

Yapılan atmosfer ortamında ki bütün aşınma deneylerinde bir rodaj kısmı bulunmaktadır. Bu süre zarfında sürtünme katsayısı çok ani olarak artış göstermiş, dalgalı olarak artış ve azalışlar gösterdikten sonra değişimin frekansının azaldığı ve neredeyse sabitlendiği görülmüştür. Bu durum CrN kaplama için söz konusu değildir. CrN kaplamasında sürtünme kuvvetinde sürekli bir artış söz konusudur. Literatür incelendiğinde bu durum diğer araştırmalarda söz konusudur (Chang,2021 ve Paksunchai,2019). Vakum ortamında yapılan deneylerde, atmosfer şartlardaki parametreler sabit tutulmuştur ancak vakum ortamının oluşması için ortam 8×10^{-6} mbar basınç altında deneyler yapılmıştır. Şekil 5.18’de, atmosfer ortamında yapılan, kaplama işlemi olmamış AISI4140 çeliğinin aşınma deneyi sonuçlarına yer verilmiştir. Grafik incelendiğinde başlangıçta ani bir artış ile sürtünme katsayısının arttığı daha sonrasında rodaj süresi boyunca büyük boyutlu artış ve azalışlar meydana geldiği görülmektedir. 500. Saniyeden sonra artık sürtünme kuvvetinin sabitlendiği ve $0,18 \mu$ değerine ulaşmıştır. AlTiCrSiN, CrN ve TiCrN kaplanmış olan deney numunelerini yüzeylerden elde edilen sürtünme katsayıları sırasıyla $0,2\mu$, $0,18\mu$ ve $0,18\mu$ değerleri elde edilmiştir. Aşınma testleri sonucunda oluşan aşınma hacmi AISI 4140 çeliği üzerinde 62071.1cm^3 olarak ölçülmüştür. AlTiCrSiN, TiCrN, CrN ince filmlerinde oluşan aşınma hacmi ise sırasıyla, 36974.7cm^3 , 5363.2cm^3 ve 39.2cm^3 olarak ölçülmüştür.

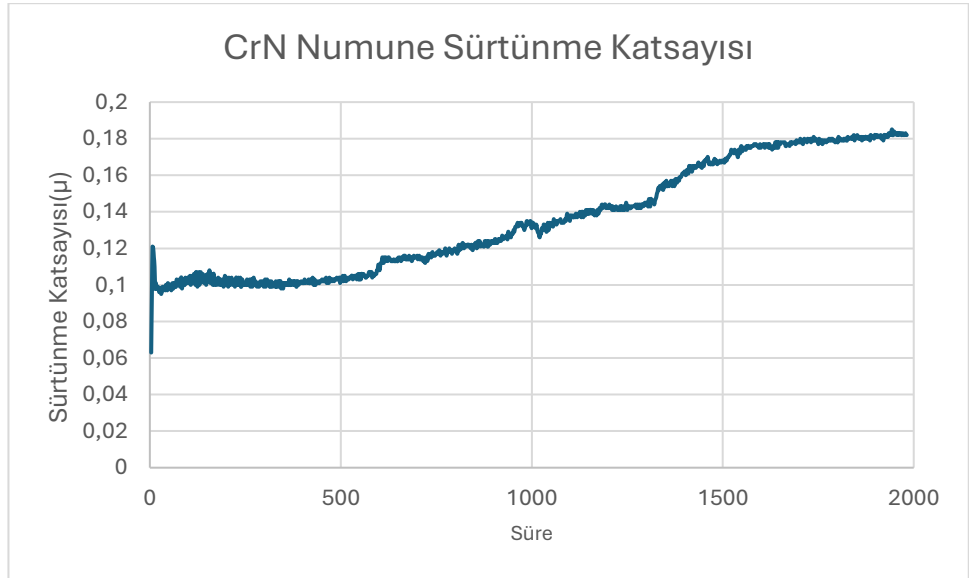


Şekil 5. 18 AISI 4140 Çelik Numunesi Sürtünme Katsayısı grafiği

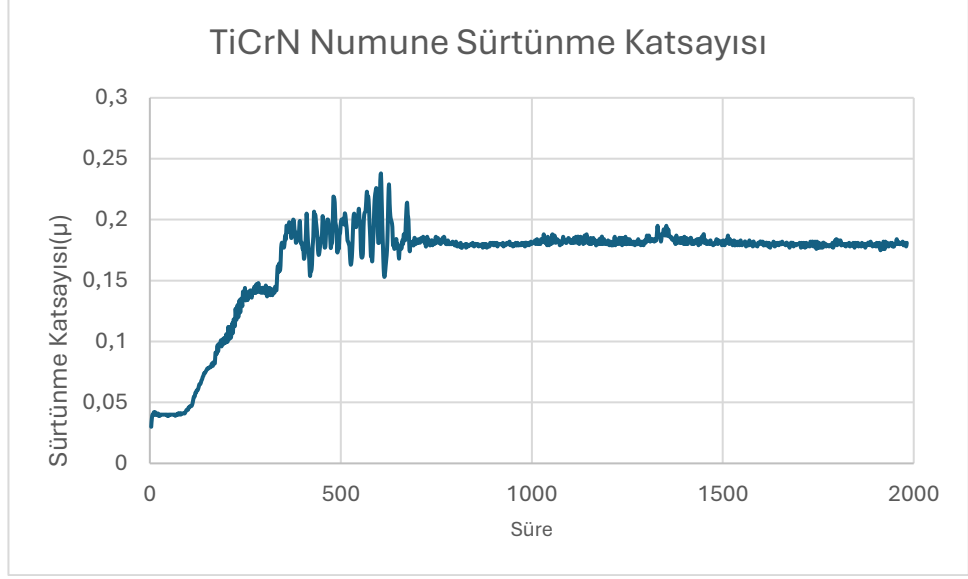
Taban malzeme üzerine ince film yapısının biriktirilği atmosfer ortamındaki deney numuneleri şekil5.19, şekil5.20 ve şekil 5.21’de ki gibidir.



Şekil 5. 19 AlTiCrSiN Numunesi Sürtünme Katsayısı grafiği



Şekil 5. 20 CrN Numunesi Sürtünme Katsayısı grafiği.

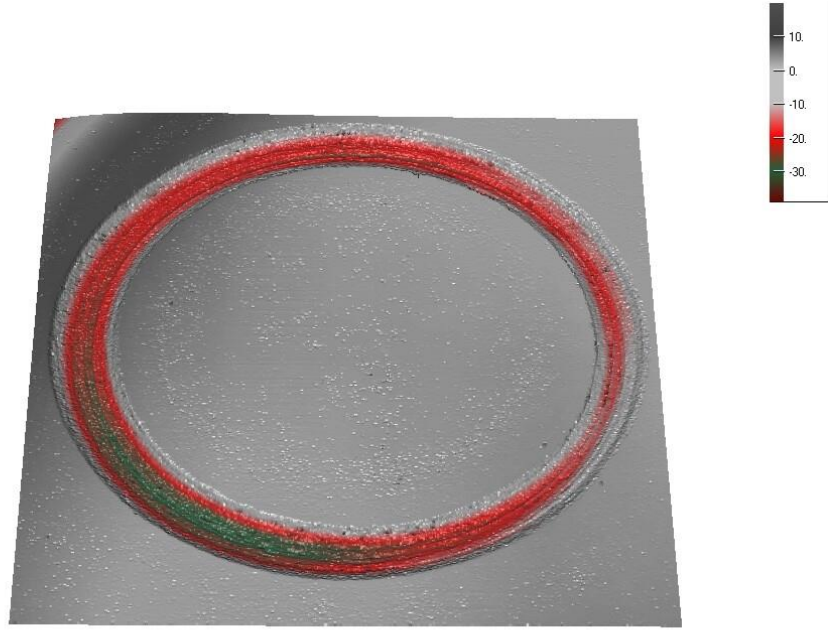


Şekil 5. 21 TiCrN Numunesi Sürtünme Katsayısı grafiği.

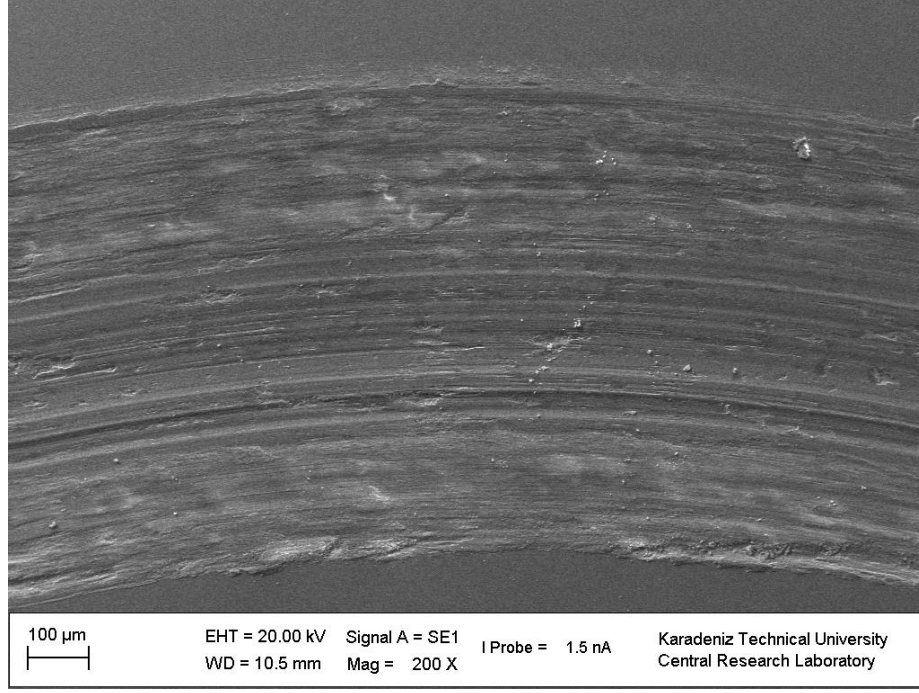
Şekil5.19 incelendiğinde AlTiCrSiN ince filmi, dört grafikteki gibi ani bir pik ile başlamış daha sonrasında rodaj süresinin kısa sürede tamamlayıp yaklaşık olarak 0,2μ değerine düşmüştür. Deney sonuna doğru bu sonuç 0,2μ altına düşmüştür. Şekil5.20 incelendiğinde CrN kaplaması diğer testlere göre farklı bir eğri ortaya çıkarmıştır. Rodaj süresi sürekli olarak devam etmiştir. Bu eğrinin başlangıcında görülen pik, yüzeylerin birbirine temas etmesi sırasında ortaya çıkan yüzey pürüzlülüklerinin etkisiyle ilişkilidir. Bu pürüzlülükler, yüzeylerin kaynaşmasını ve dolayısıyla mekanik etkileşimlerini etkileyen kritik bir faktördür. Başlangıçta, yüzeylerin birbirine soğuk kaynak yapması, bu pürüzlülüklerin bir araya gelerek birleşmesine yol açar.

Zamanla, bu kaynaklar izafi hareket halinde kırılmaya başlar ve bu kırılma esnasında sürtünme katsayısında bir pik meydana gelir. Bu pik, yüzeylerin mikro yapısındaki değişiklikler ve kırılma süreçlerinin dinamikleriyle yakından ilişkilidir. Yüzeylerin deformasyonları, temasta olan parçaların sürtünme koşullarını etkileyerek, belirli bir noktada artış gösterir. Kaplama olamayan deney numunesi ile kıyaslandığında çok da az sürtünme kuvvetlerine ulaşmıştır. Şekil5.21’da TiCrN numunesi ait sonuçlara yer verilmiştir. Rodaj süresinin uzunluğu dışında AlTiCrSiN numunesi ile benzer grafik değerleri çıkarmıştır ve yaklaşık olarak 0,18μ sürtünme kuvveti değeri ortaya koymuştur. Aşınma testleri yapılmış yüzeylerde meydana gelen aşınma izlerini optik profilometre görselleri şekil 5.22,24,26 ve 28’de verilmiştir.

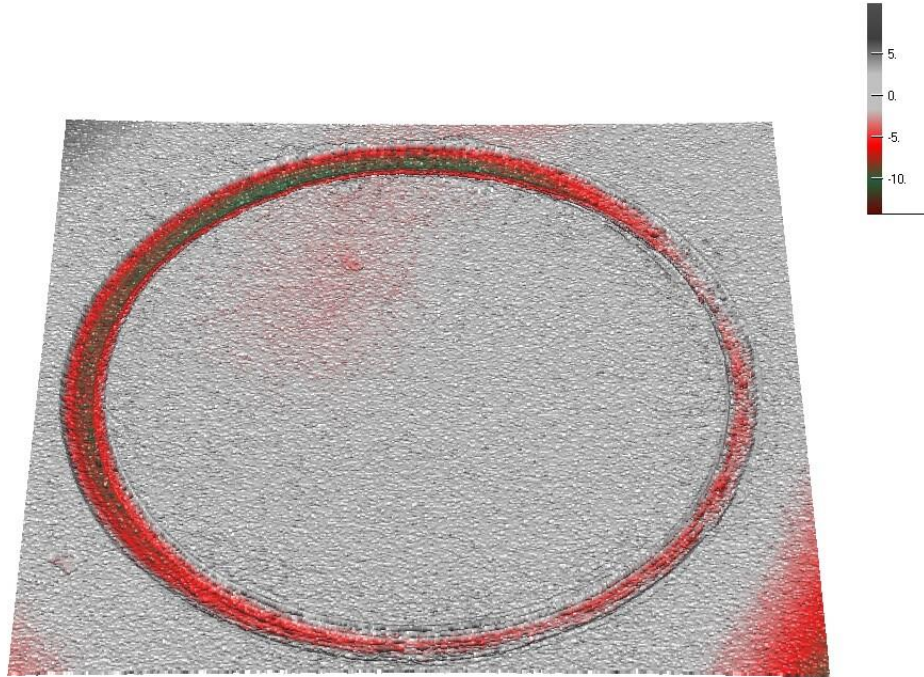
Şekil5.23’ de yer alan SEM görüntüsünde AISI 4140 çeliğinin sürtünme testi sonuçları görmekteyiz yüzeyi üzerinde bulunan noktasal görüntüler test anında yüzeyden kopan parçaların olduğunu ve çatlakların oluştuğunu göstermektedir. Şekil5.25’ü incelediğimizde yüzeyde oluşan çatlakları ve sürtünme sırasında meydana gelen partükülleri görmekteyiz. Bu partiküller kaplanmanın yıpranması sonucunda alt tabakadan ayrılan kalıntılardır. Alt tabakadan kalkan ayrılan partiküller sonucunda taban malzeme yüzeyide ortaya çıkmış ve SEM görüntüsünde görülmüştür. Aynı zamanda TiCrN kaplamasına ait olan Şekil5.27 de incelendiğinde kaplama taban malzeme yüzeyinden ayrılmış taban malzeme yüzeyi ortaya çıkmıştır. SEM görüntüleri incelendiğinde AlTiCrSiN ve TiCrN kaplamalarının tribolojik testler sırasında malzeme yüzeyinden ayrıldığı ve taban malzeme yüzeyinin ortaya çıktığını görmekteyiz. Ancak Şekil5.29 incelendiğinde CrN kaplamasının taban malzeme yüzeyinden ayrılmadığını, diğer iki kaplamada oluşan düzensiz alanlar ve çizikler oluşturmadığını ve yüzeyde meydana gelen her hangi bir deformasyona uğramadığının göstergesidir.



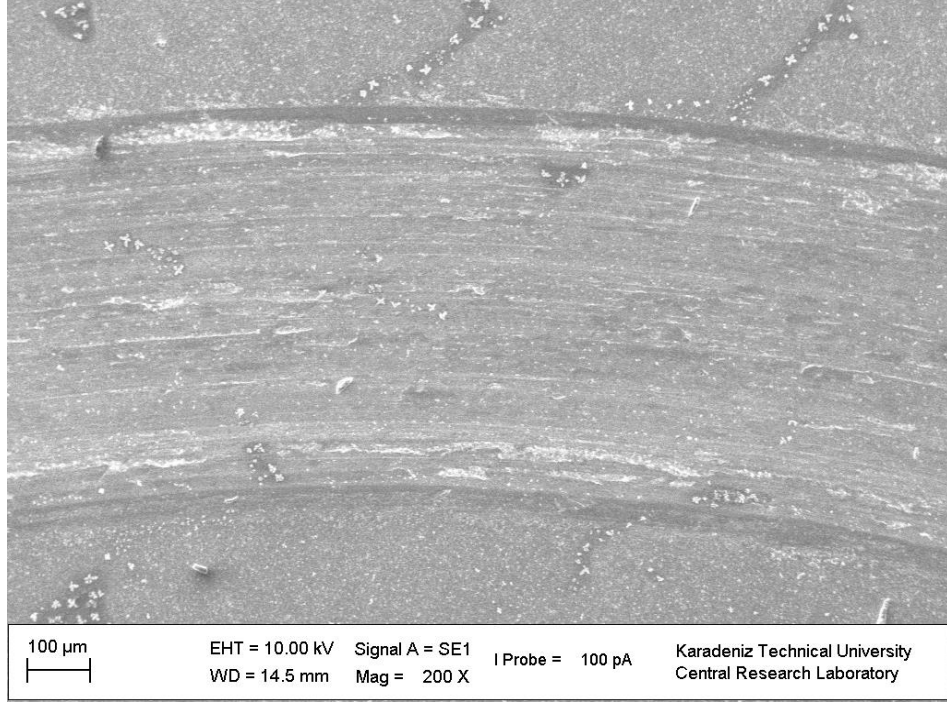
Şekil 5. 22 AISI 4140 çeliği atmosfer ortamında aşınma izi optik profilometre görüntüsü.



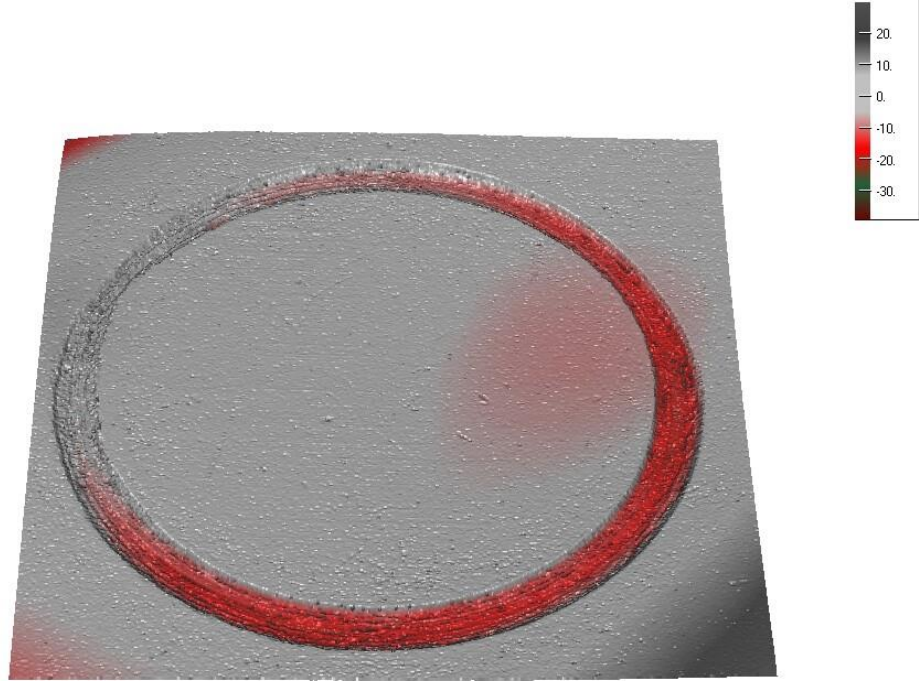
Şekil 5. 23 AISI 4140 çeliği atmosfer ortamında aşınma izi SEM görüntüsü.



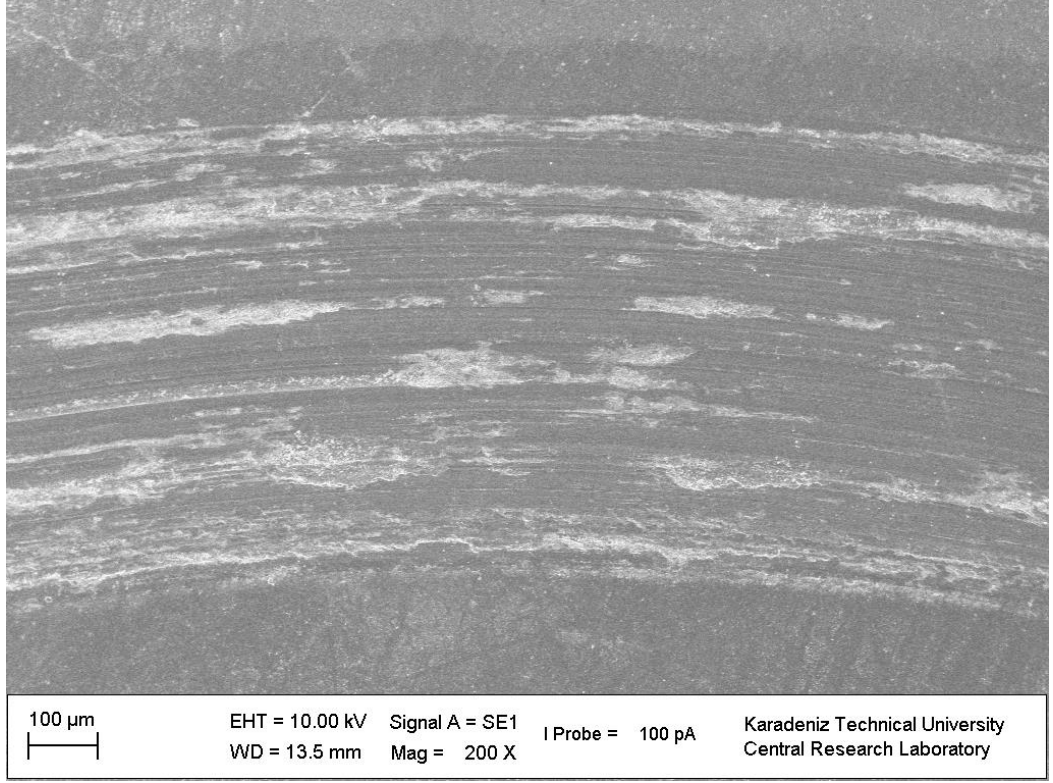
Şekil 5. 24 AlTiCrSiN kaplaması atmosfer ortamında aşınma izi optik profilometre görüntüsü.



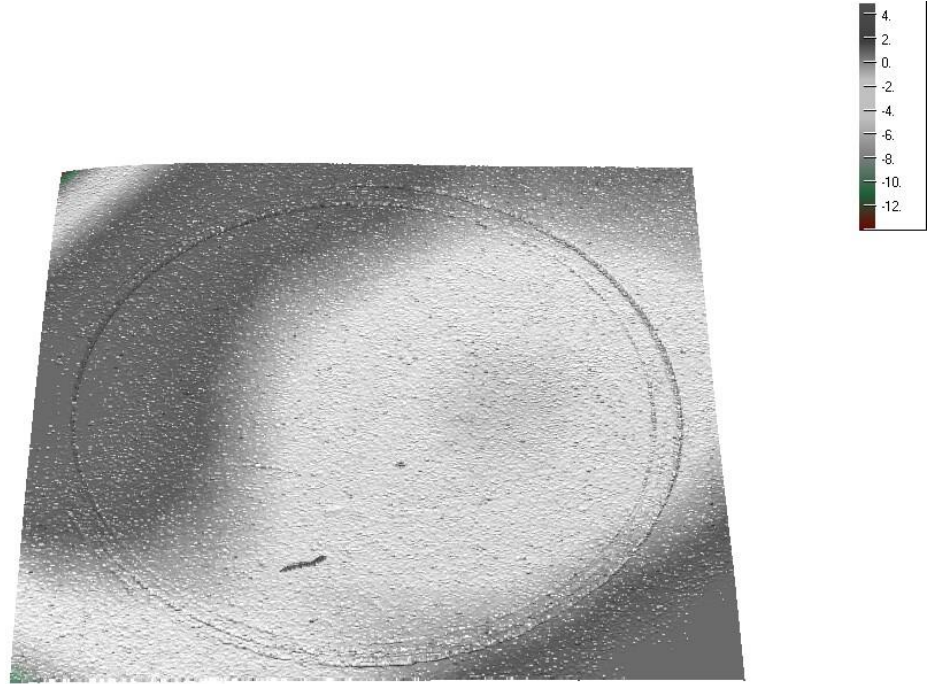
Şekil 5. 25 AlTiCrSiN kaplaması atmosfer ortamında aşınma izi optik SEM görüntüsü.



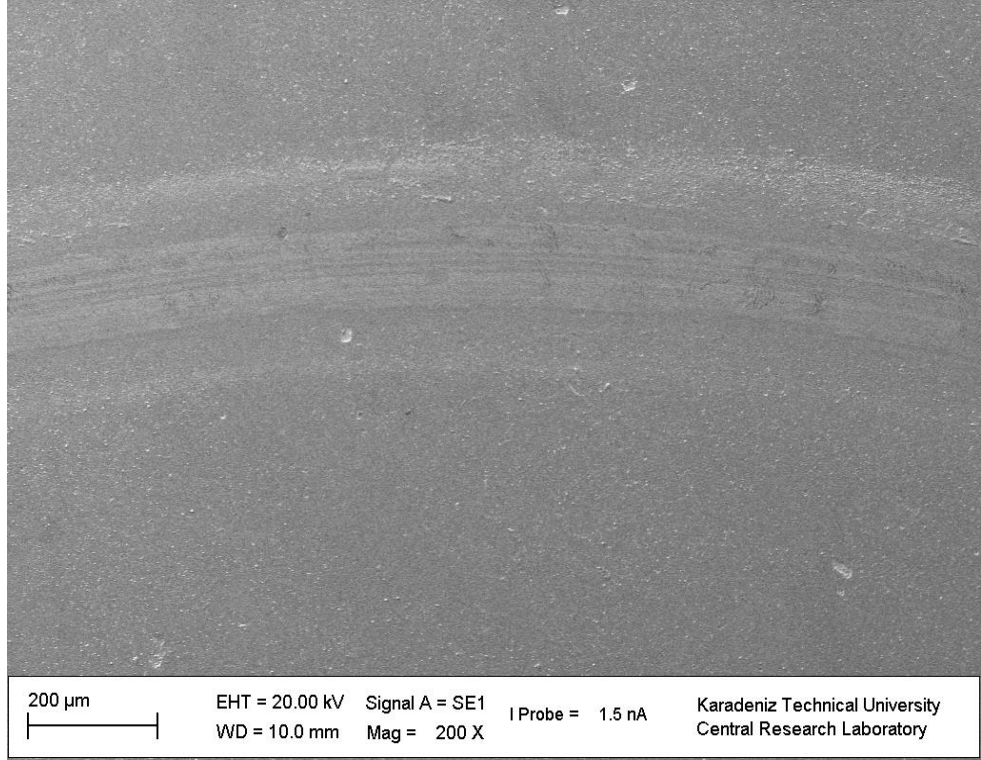
Şekil 5. 26 TiCrN kaplaması atmosfer ortamında aşınma izi optik profilometre görüntüsü.



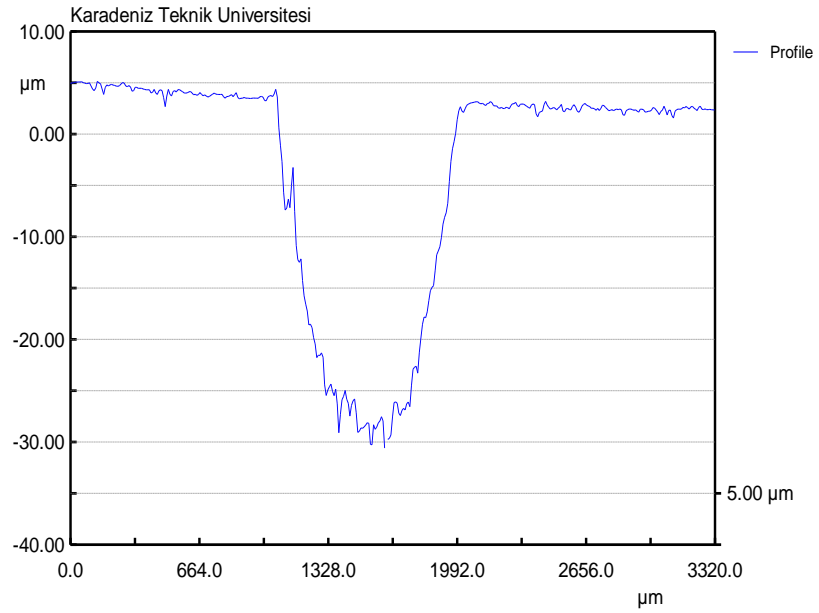
Şekil 5. 27 TiCrN kaplaması atmosfer ortamında aşınma izi SEM görüntüsü.

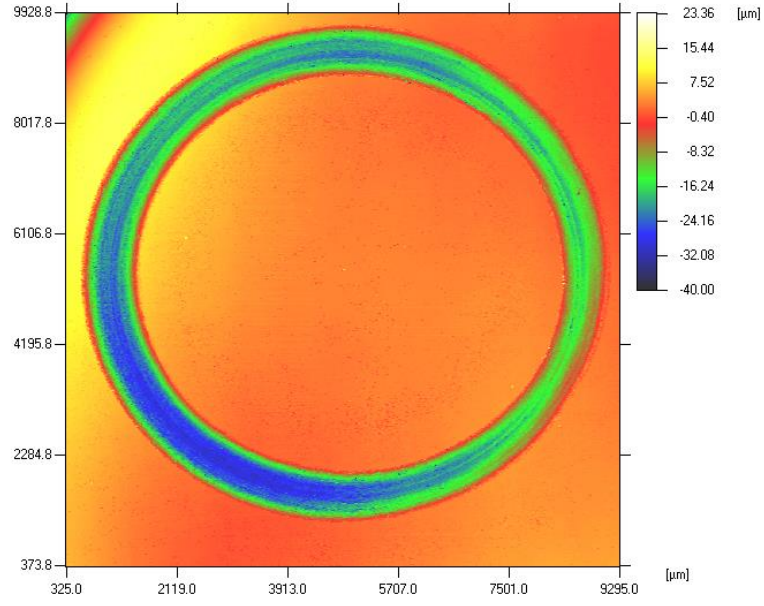


Şekil 5. 28 CrN kaplaması atmosfer ortamında aşınma izi optik profilometre görüntüsü.



Şekil 5. 29 CrN kaplaması atmosfer ortamında aşınma izi SEM görüntüsü.

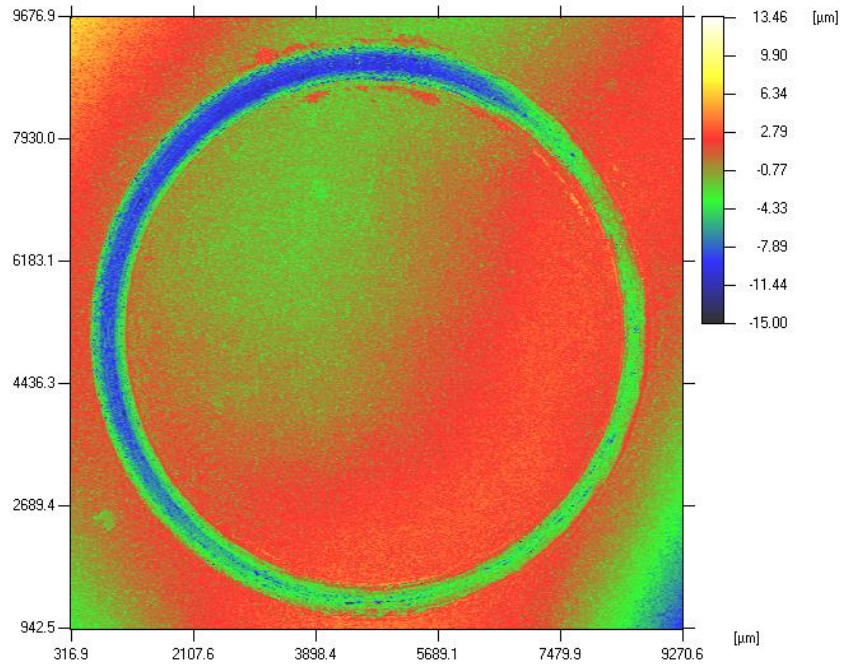
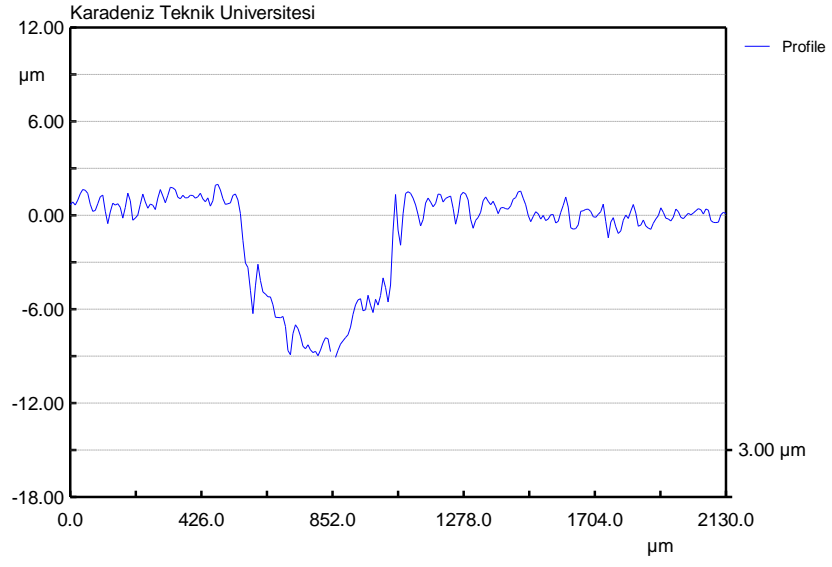




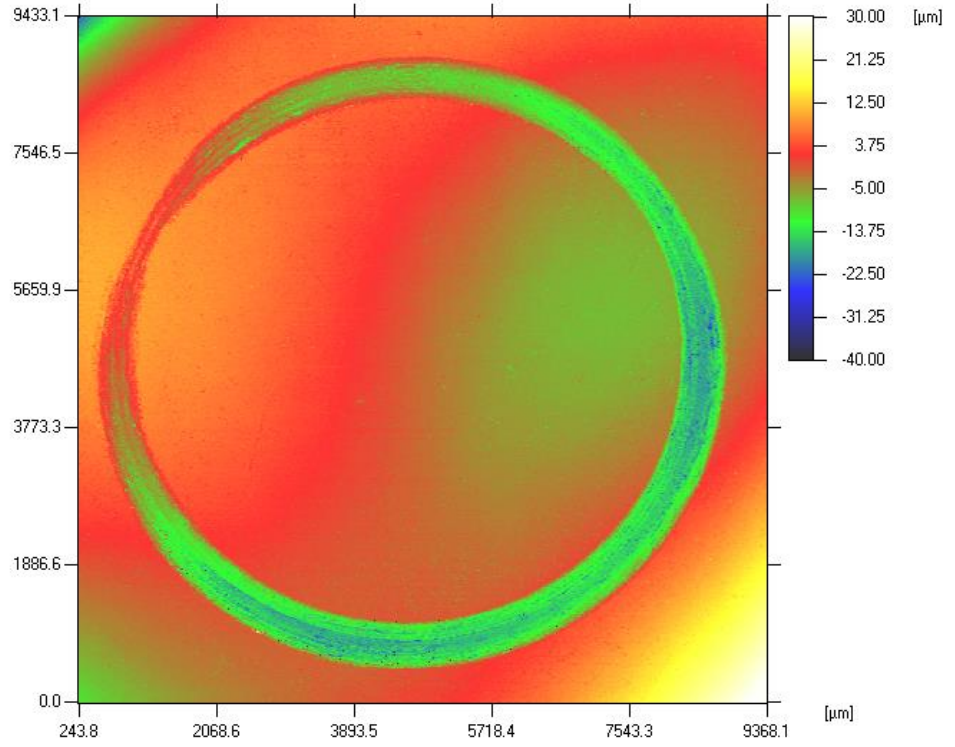
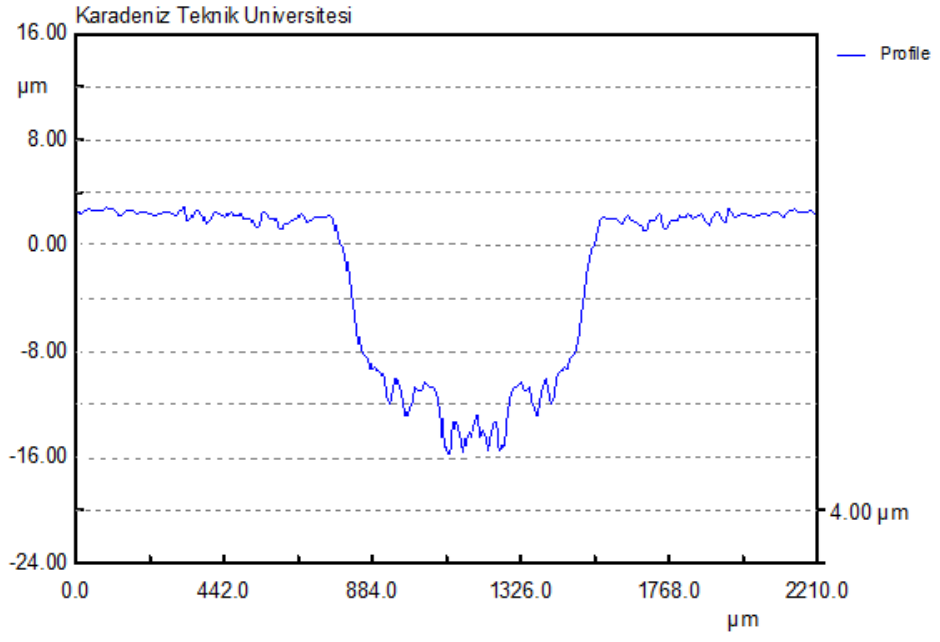
Şekil 5. 30 AISI 4140 çeliği atmosfer ortamında triboloji testi sonrası oluşan maksimum derinlik.

Aşınma testlerinden alınan optik profilometre görselleri incelendiğinde film kaplı numunelerin aşınma dayanımlarının daha iyi olduğu görülmektedir. İşlemsiz AISI 4140 çeliği üzerinde yapılan deneylerde ince film kaplı numulere göre daha fazla aşınma meydana gelmiştir. Bu sonuca Şekil 5.30'de verilen grafikte doğrulamıştır. Bu grafiğe göre yüzeyinde herhangi bir kaplama olmayan işlemsiz numune çevrim sonucunda maksimum 30µm yüzey derinliğine ulaşmıştır.

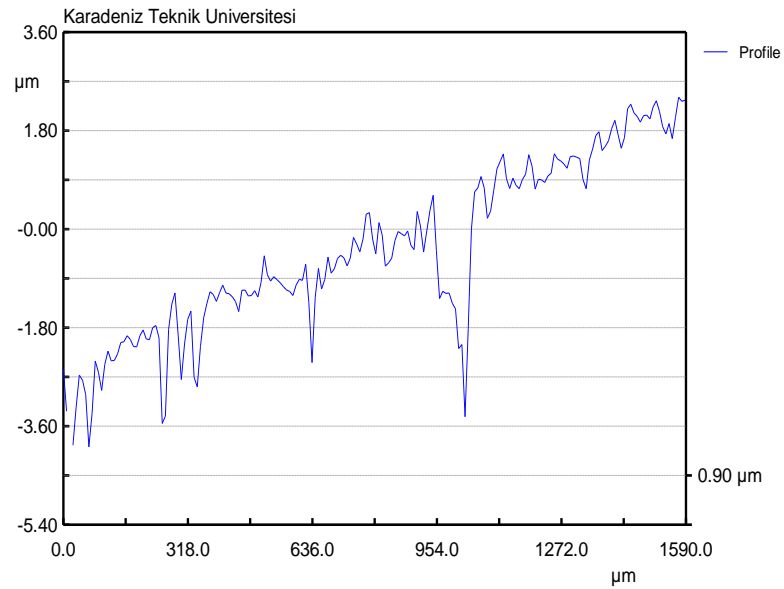
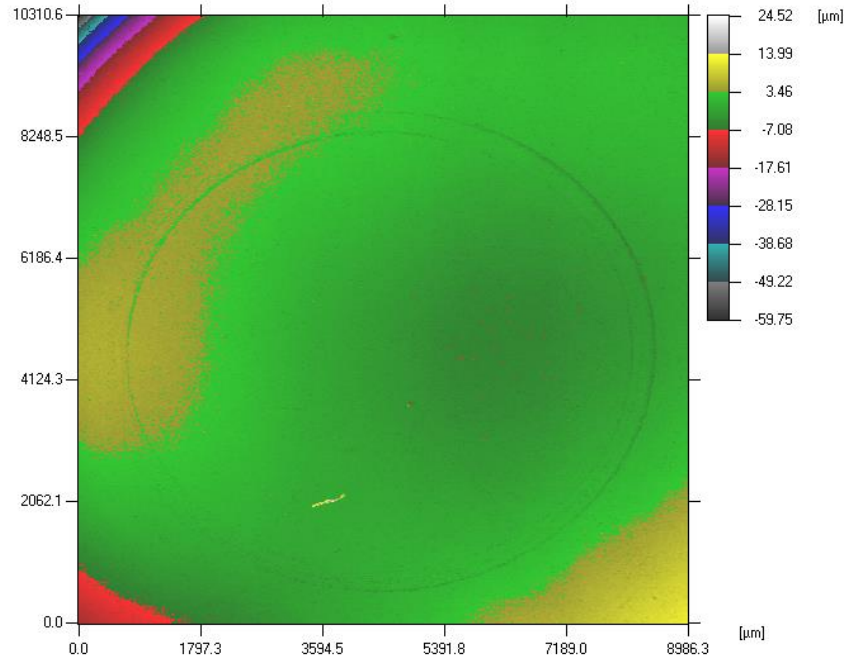
Diğer numuneler incelediğinde Şekil5.31,32 ve 33'de görüldüğü gibi AlTiCrSiN kaplamasında maksimum 9µm, TiCrN kaplamasında maksimum 16µm ve CrN kaplamasında -3,6µm derinlik elde edilmiştir.



Şekil 5. 31 AlTiCrSiN kaplaması atmosfer ortamında triboloji testi sonrası oluşan maksimum derinlik.

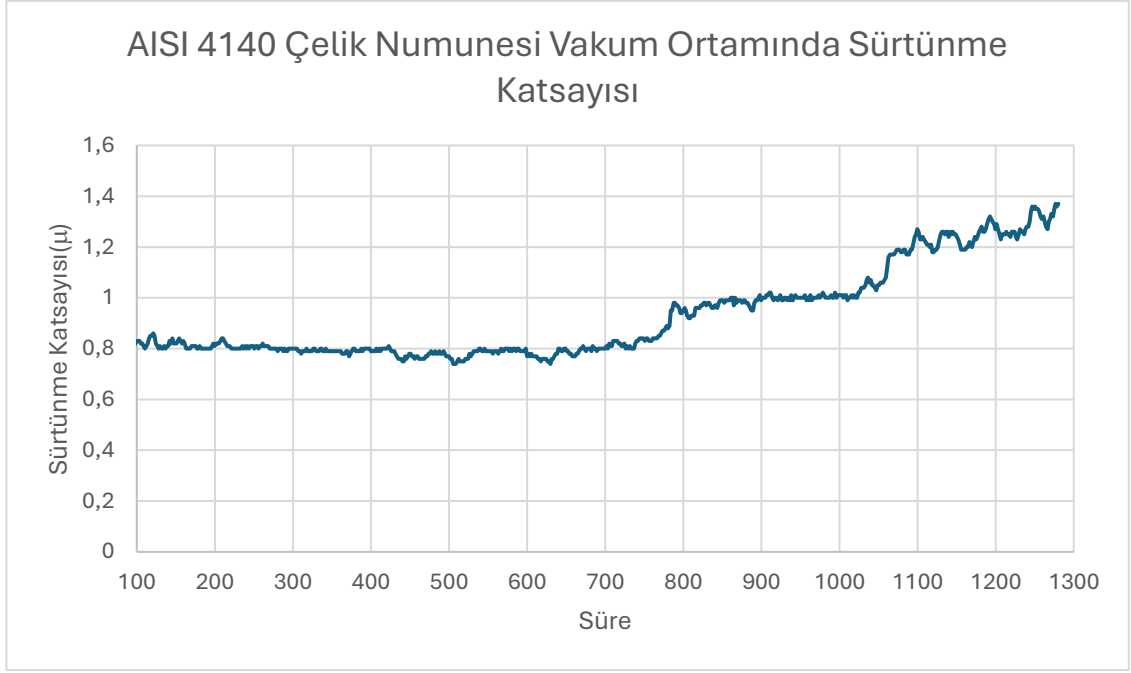


Şekil 5. 32 TiCrN kaplaması atmosfer ortamında triboloji testi sonrası oluşan maksimum derinlik.



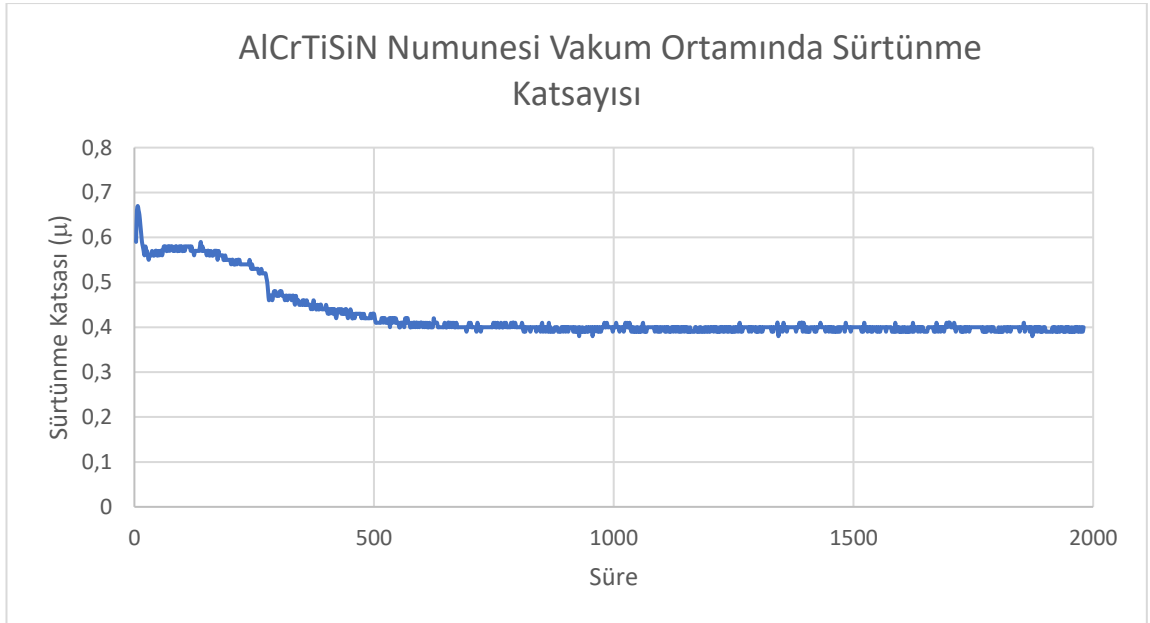
Şekil 5. 33 CrN kaplaması triboloji testi sonrası oluşan maksimum derinlik.

Vakum ortamında yapılan aşınma değerleri incelendiğinde atmosfer ortamında yapılan sürtünme değerlerinde daha yüksek sürtünme katsayıları elde edilmiştir. Şekil 5.34'ü incelediğimizde başlangıç sürtünme değerlerinin ortalamasının üstünde olduğu 700. Saniyedenen itibaren sürtünme katsayısında artış meydana gelmiştir. Çevrim süresi bitiminde ise sürtünme katsayısı değeri yaklaşık olarak 1,4μ değerine ulaşmıştır.



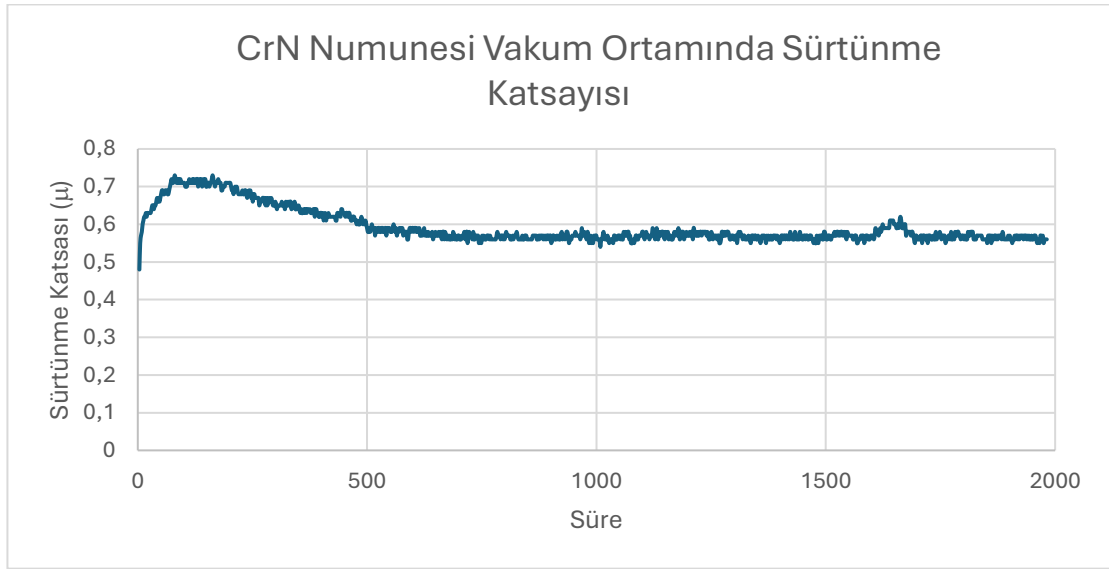
Şekil 5. 34 AISI 4140 çeliği vakum ortamında sürtünme katsayısı

Kaplama uygulanmış numuneler üzerinde yapılan deneyleri incelediğimizde şekil 5.35’de AlCrTiSiN kaplamasını vakum ortamında yapılan deneyini görmekteyiz. Grafiği incelediğimizde başlangıçta ortalamanın üzerinde bir sürtünme kuvveti elde edildiğini daha sonrasında ortalama olarak 0,4 mertebelerinde bir değer elde edildiğini ve görmekteyiz.

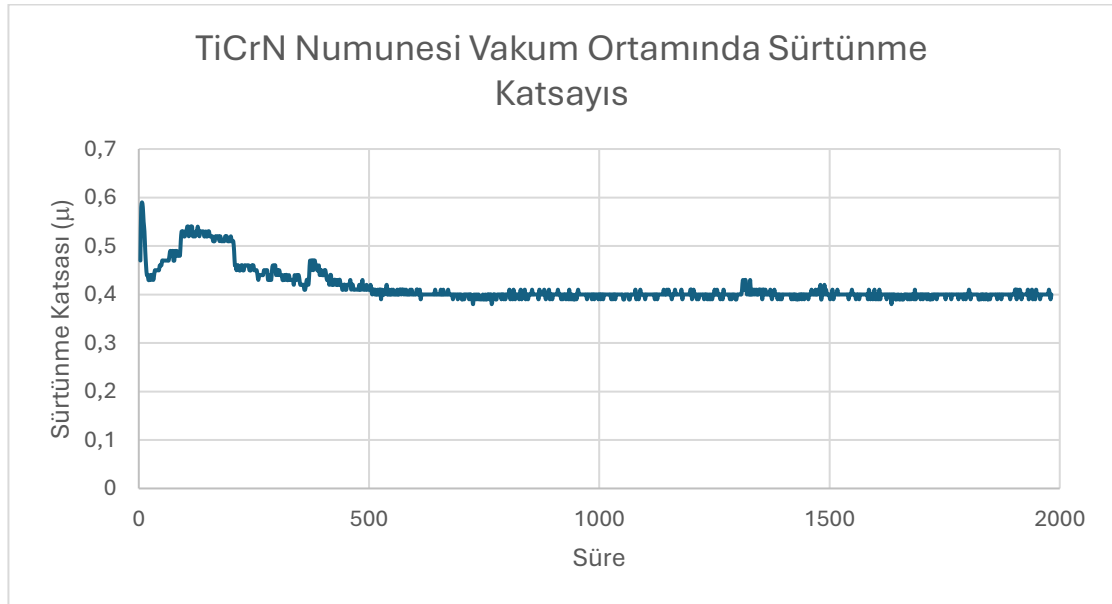


Şekil 5. 35 AlCrTiSiN çeliği vakum ortamında sürtünme katsayısı

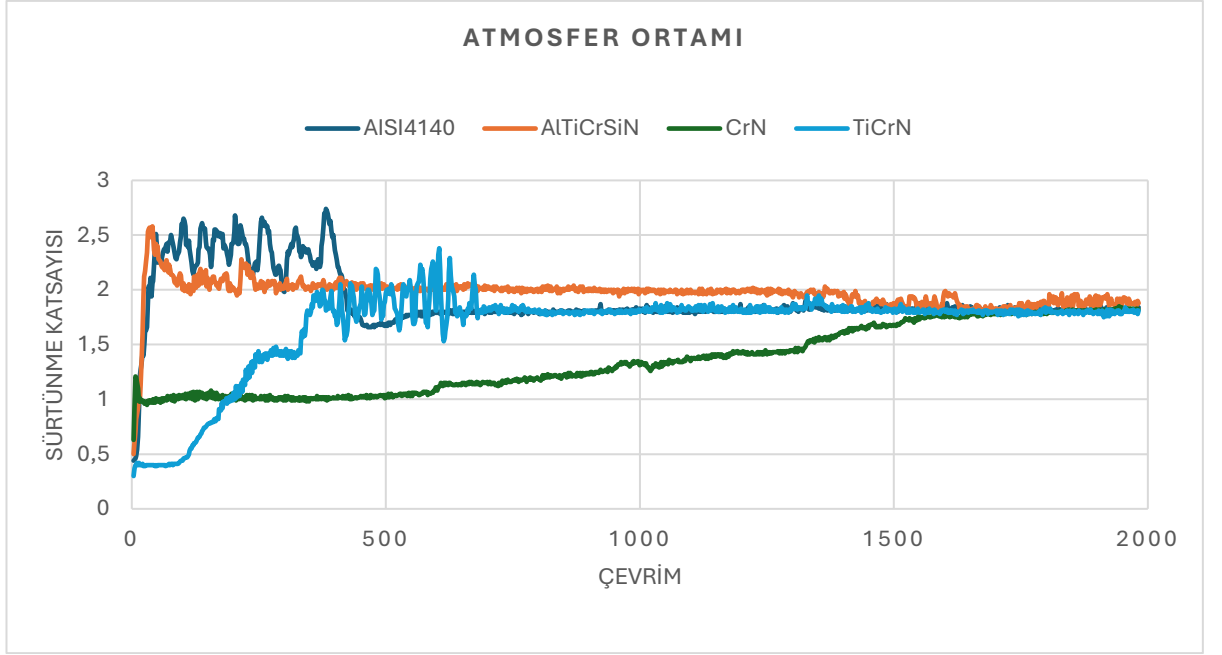
Şekil 5.36'da CrN kaplamasına ait vakum ortamında yapılan sürtünme deneyinin grafiğini göstermektedir. Başlangıçta sert bir yükseliş ile 0,7 katsayı değerlerine ulaşan ancak çevrim süresi 500'e ulaştığında daha dengeli bir grafik oluşturmuştur. CrN kaplamasının sürtünme katsayısı ortalama olarak 0,58 olarak ölçülmüştür. Şekil 5.37'de ise TiCrN kaplamasına ait vakum ortamında yapılan sürtünme deneyinin grafiği bulunmaktadır. 500 çevrim sonucunda dengeli bir grafik oluşturan TiCrN kaplamasında ortalama olarak 0,4 değerinde sürtünme katsayısı elde edilmiştir.



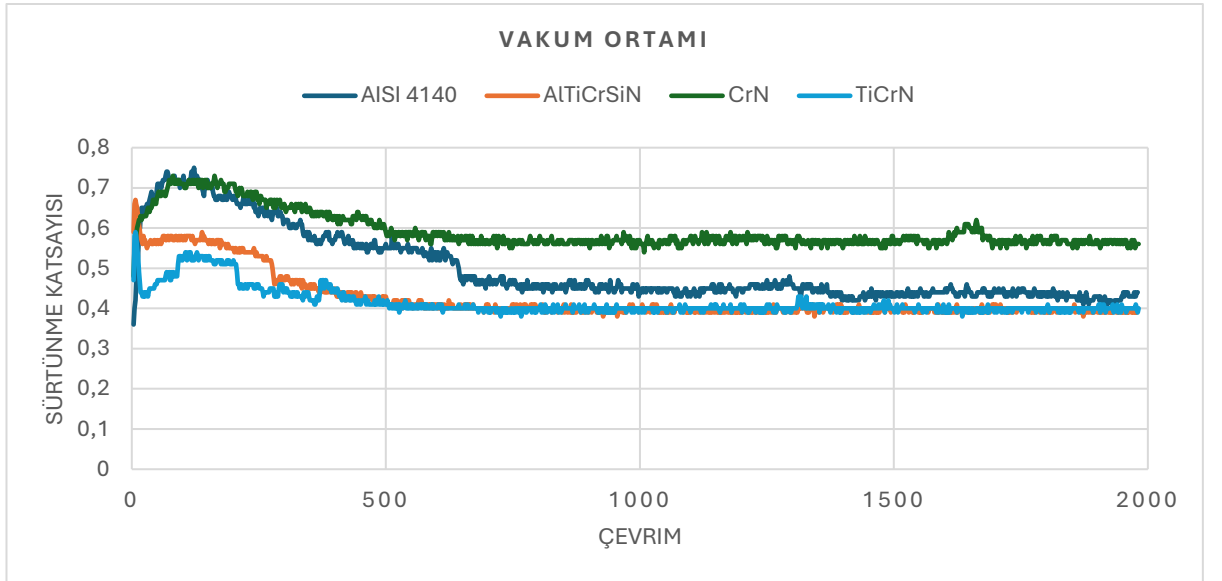
Şekil 5. 36 CrN çeliği vakum ortamında sürtünme katsayısı



Şekil 5. 37 TiCrN çeliği vakum ortamında sürtünme katsayısı



Şekil 5. 38 Atmosfer ortamında gerçekleştirilen sürtünme katsayısı sonuçları.



Şekil 5. 39 Vakum ortamında gerçekleştirilen sürtünme katsayısı sonuçları.

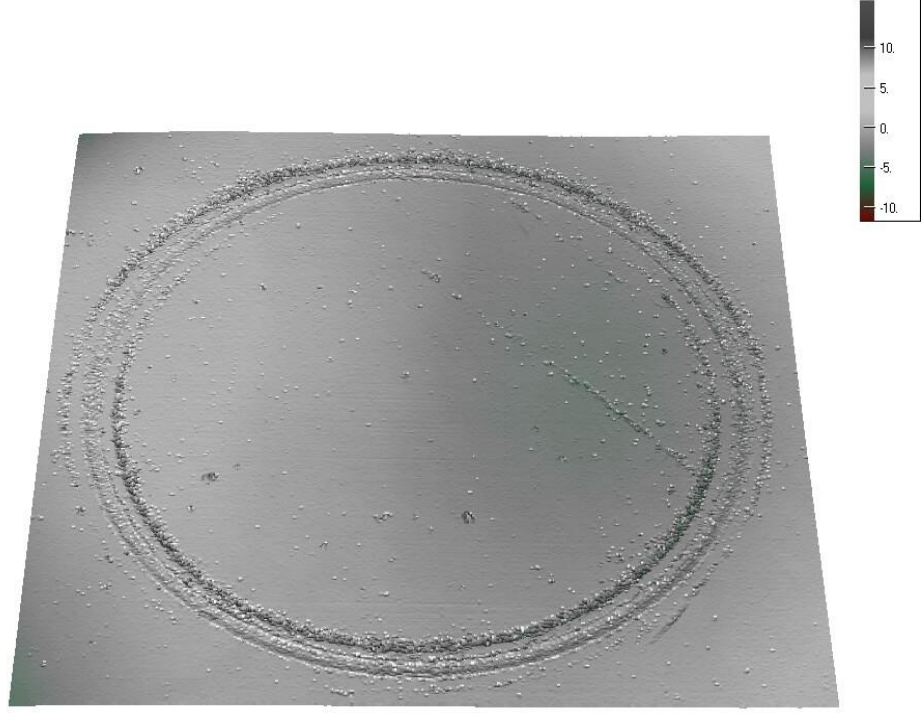
Atmosfer ve vakum ortamında gerçekleştirilen sürtünme deneyleri, malzeme yüzeylerinin tribolojik performansını değerlendirmek açısından önemli farklılıklar sergiler. Bu farklılıklar, çevresel koşullara ve malzeme yüzeylerinin kimyasal ve mekanik etkileşimlerine dayanır. Her iki ortamda da malzemelerin sürtünme davranışı, aşınma mekanizmaları, yüzey morfolojisi ve performans parametreleri farklı şekillerde etkilenir ve bu durum, çeşitli endüstriyel ve araştırma alanlarında kritik sonuçlar doğurur.

Vakum ortamında gerçekleştirilen sürtünme testleri, özellikle uzay uygulamaları, yüksek hassasiyet gerektiren cihazlar ve gazların bulunmadığı özel koşullar altında çalışan sistemler için kritik öneme sahiptir. Uzay ortamı gibi yerlerde atmosferik gazlar bulunmadığı için vakum koşullarında malzemelerin sürtünme ve aşınma davranışlarını anlamak, bu tür sistemlerin güvenilirliğini ve uzun ömürlülüğünü sağlamak açısından hayati önemdedir.

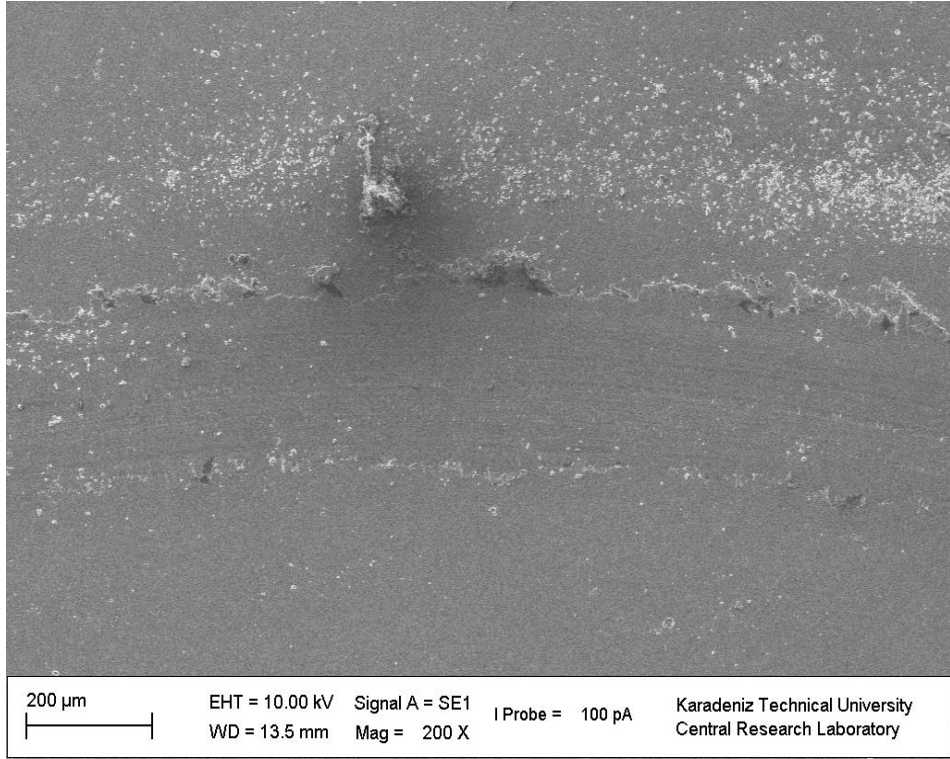
Atmosferik sürtünme testleri ise, günlük yaşamda kullanılan birçok makine, motor, endüstriyel ekipman ve diğer sistemlerin performansını değerlendirmek için kullanılır. Özellikle oksidasyon ve nemin etkileri göz önünde bulundurularak yapılan bu testler, malzemelerin tribolojik performansını optimize etmek için gereklidir.

Atmosfer ve vakum ortamlarında gerçekleştirilen sürtünme deneyleri, malzemelerin tribolojik davranışını anlamak açısından farklı perspektifler sunar. Atmosferik koşullarda oksidasyon, nem ve tribokimyasal reaksiyonlar, malzemelerin sürtünme ve aşınma performansını olumlu yönde etkileyebilir. Buna karşın, vakum ortamında bu etkiler ortadan kalkar ve yüzeylerin daha sert mekanik etkileşimlere maruz kalmasına yol açar. Bu farklılıklar, malzeme seçimi ve performans optimizasyonu açısından kritik bilgiler sağlar ve farklı endüstriyel uygulamalarda malzemelerin dayanıklılığını artırmak için temel bir yol gösterici olabilir.

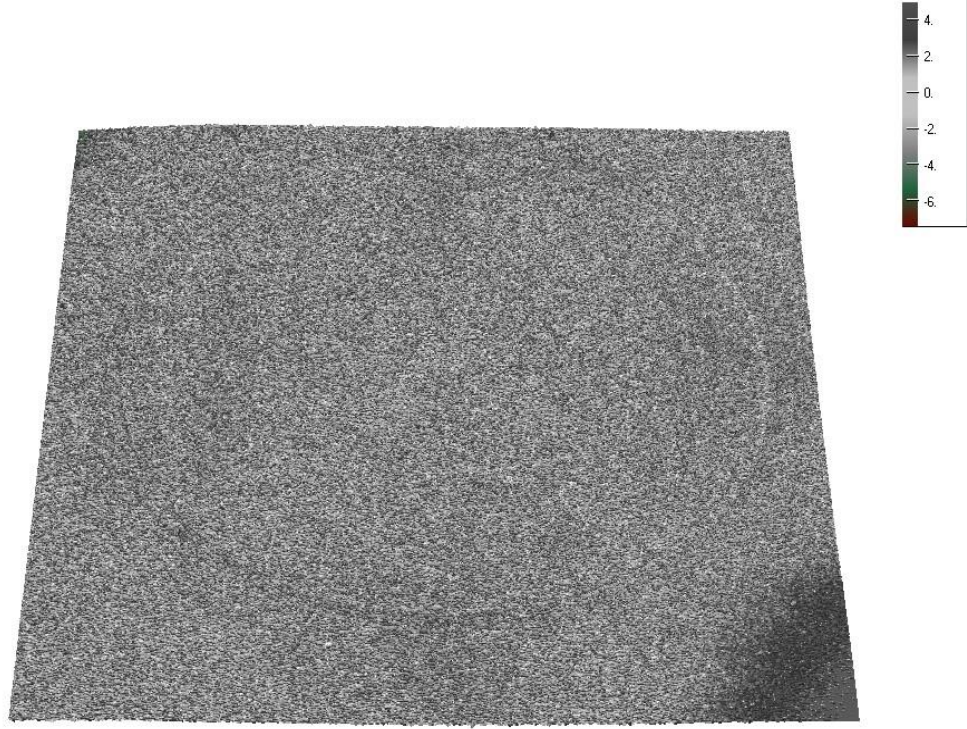
Vakum ortamında yapılan deneylerden elde edilen optikprofilometre görüntüleri Şekil5.40'dan itibaren verilmiştir. Şekil5.40'da AISI 4140 çeliğine ait profilometre görüntüsü verilmiştir. Şekil5.41'de AISI 4140 çeliğine ait SEM görüntüsüne yer verilmiştir. Atmosfer ortamında yapılan deneyler ile kıyaslandığında aşınma, vakum ortamında çok daha düşük değerlerdedir. Bu durum film kaplı numularda da geçerlidir. Şekil5.42 AlTiCrSiN film kaplı vakum ortamında yapılmı triboloji deneyinin çelik numuneye ait görüntü bulunmaktadır. Şekil5.43'de AlTiCrSiN çeliğine ait SEM görüntüsüne yer verilmiştir. Şekil5.44 ve 46'da vakum ortamında yapılan CrN ve TiCrN kaplamasına ait optikprofilometre görüntüleri yer almaktadır.



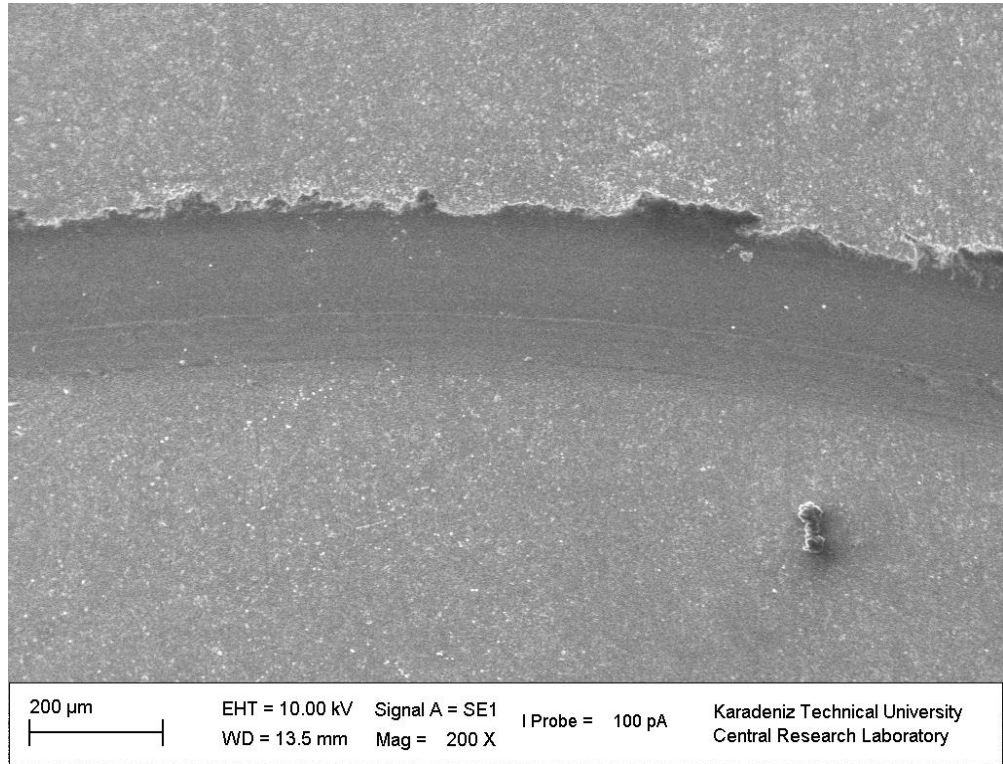
Şekil 5. 40 AISI 4140 çeliği vakum ortamında aşınma izi optik profilometre görüntüsü.



Şekil 5. 41 AISI 4140 çeliği vakum ortamında aşınma izi SEM görüntüsü.

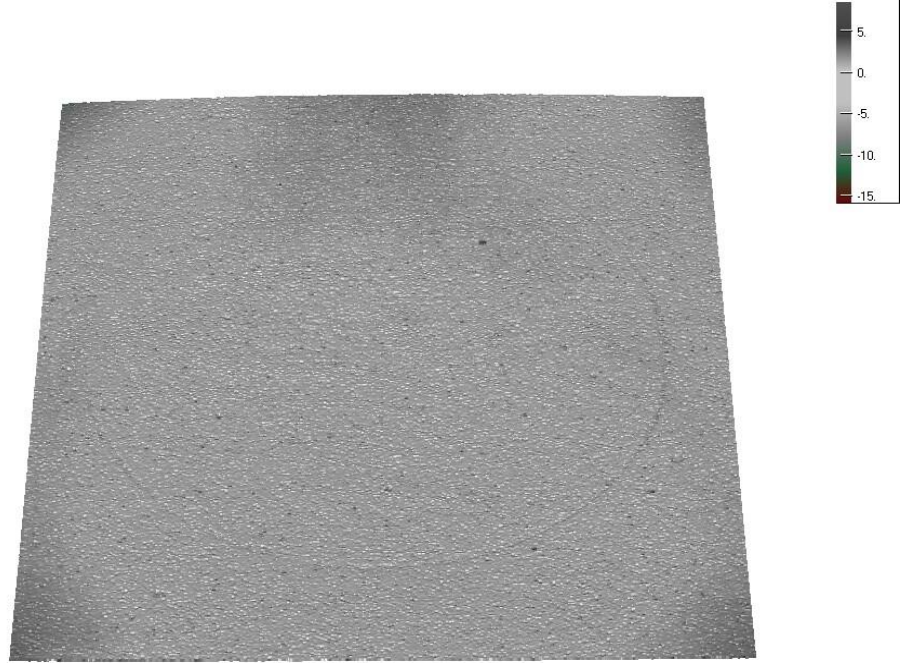


Şekil 5. 42 AlTiCrSiN kaplaması vakum ortamında aşınma izi optik profilometre görüntüsü.

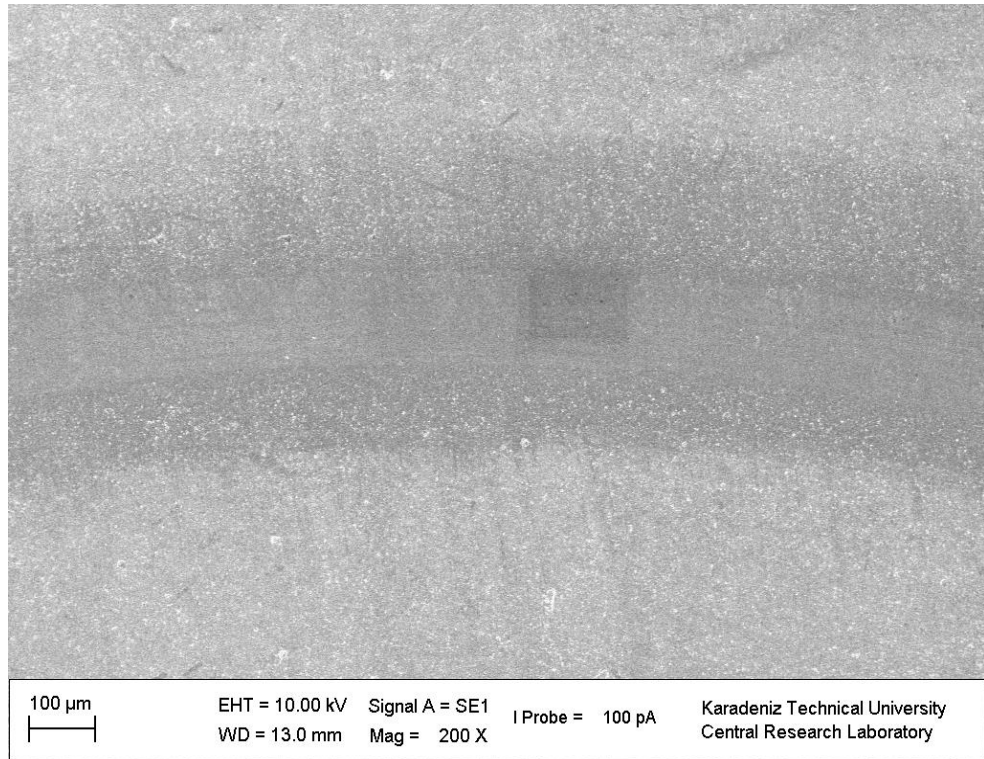


Şekil 5. 43 AlTiCrSiN kaplaması vakum ortamında aşınma izi SEM görüntüsü.

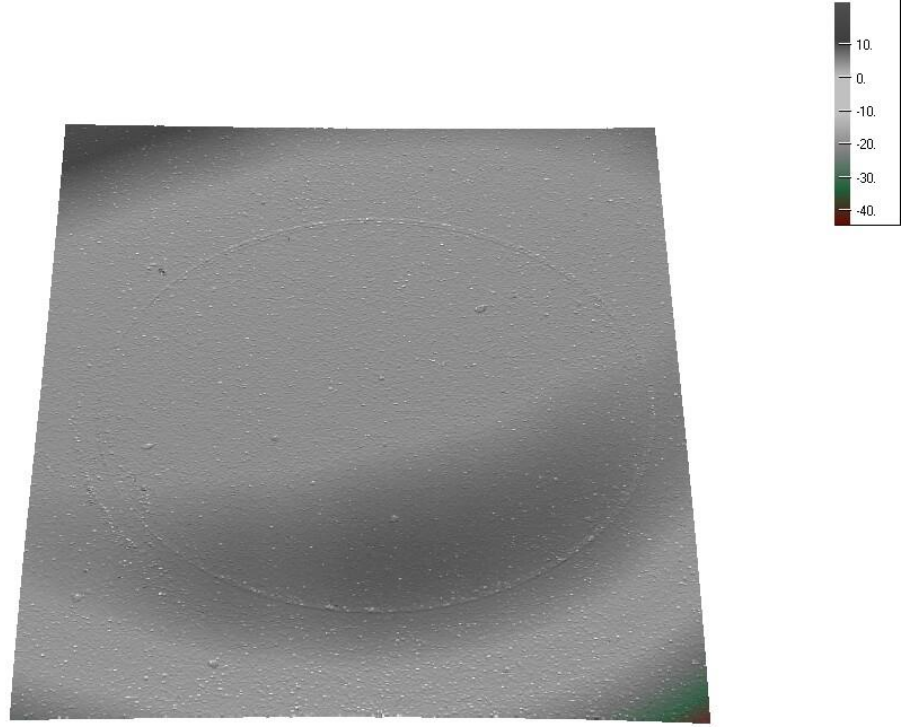
Şeki 5.45 ve 46'da kaplama işlemi uygulanmış olan CrN ve TiCrN kaplamasının SEM görüntülerine yer verilmiştir.



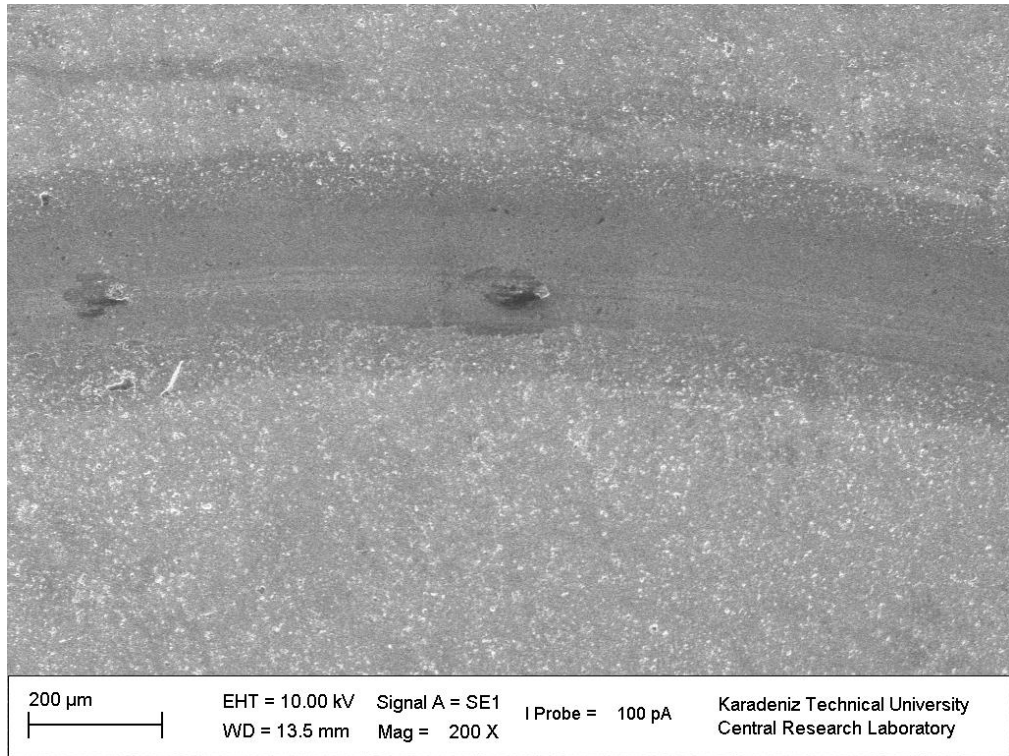
Şekil 5. 44 CrN kaplaması vakum ortamında aşınma izi optik profilometre görüntüsü



Şekil 5. 45CrN kaplaması vakum ortamında aşınma izi SEM görüntüsü.

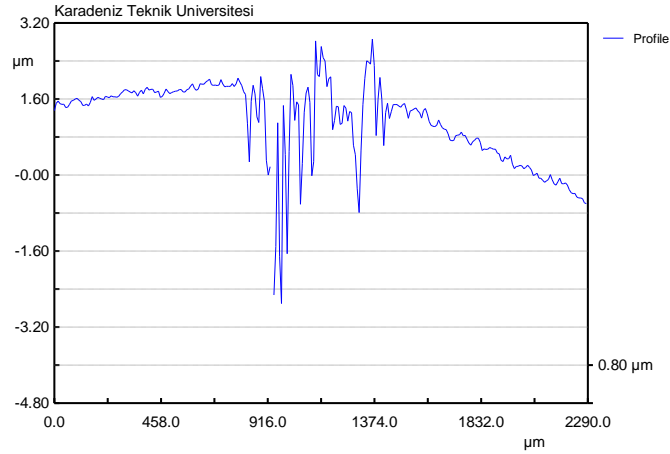
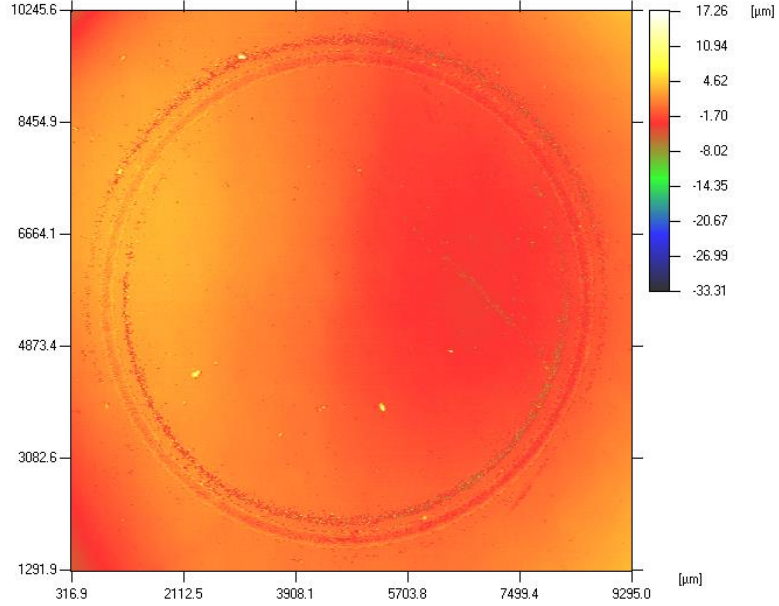


Şekil 5. 46 TiCrN kaplaması vakum ortamında aşınma izi optik profilometre görüntüsü.



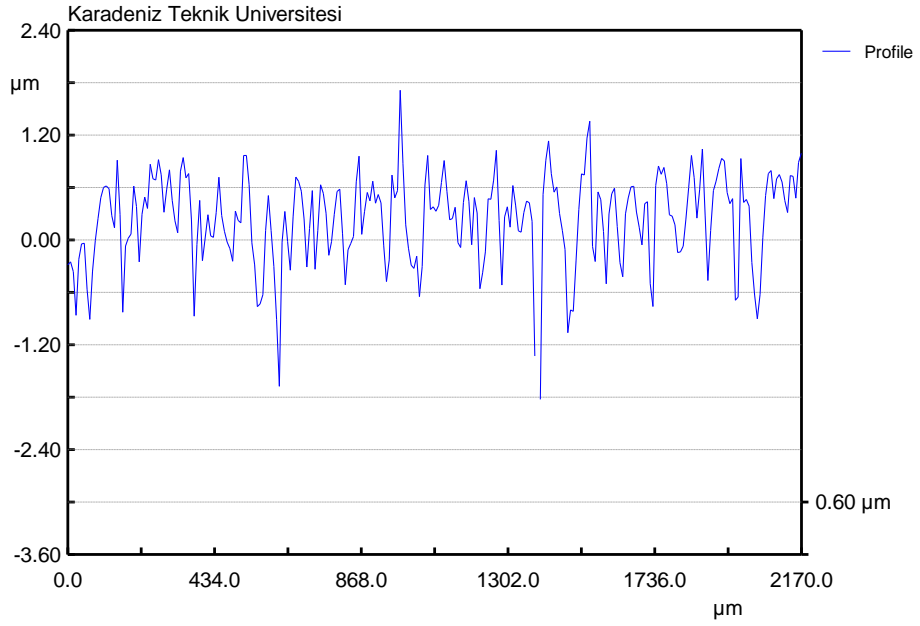
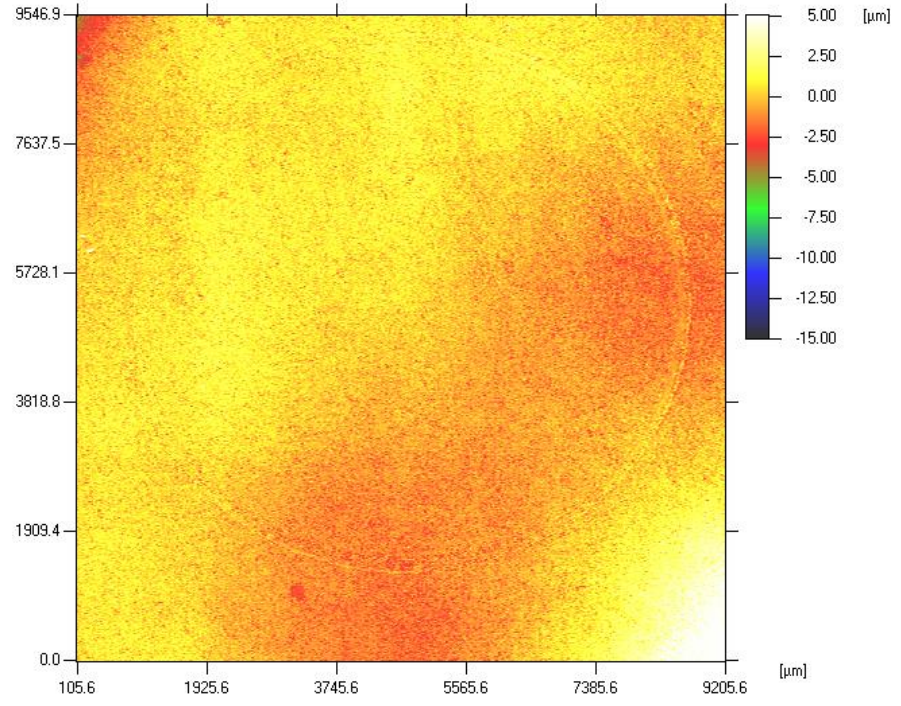
Şekil 5. 47 TiCrN kaplaması vakum ortamında aşınma izi SEM görüntüsü.

Optikprofilometre görüntüleri incelendiğinde atmosfer ortamında yapılan testlere göre daha az aşınmalar meydana gelmiştir. Ancak atmosfer basıncı altında alınan veriler gibi kaplama uygulanmayan AISI 4140 çeliğinde, kaplama uygulanan numunelere göre daha fazla aşınmalar meydana gelmiştir. Kaplama uygulaması olmayan AISI 4140 malzemesinin aşınma derinliği görüntüsü Şekil5.48’de görünmektedir.

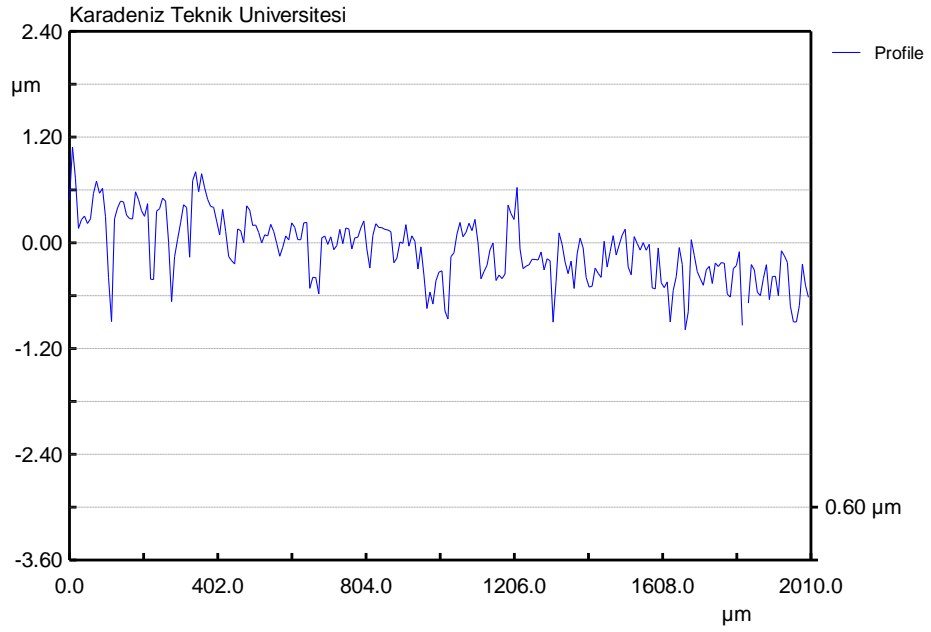
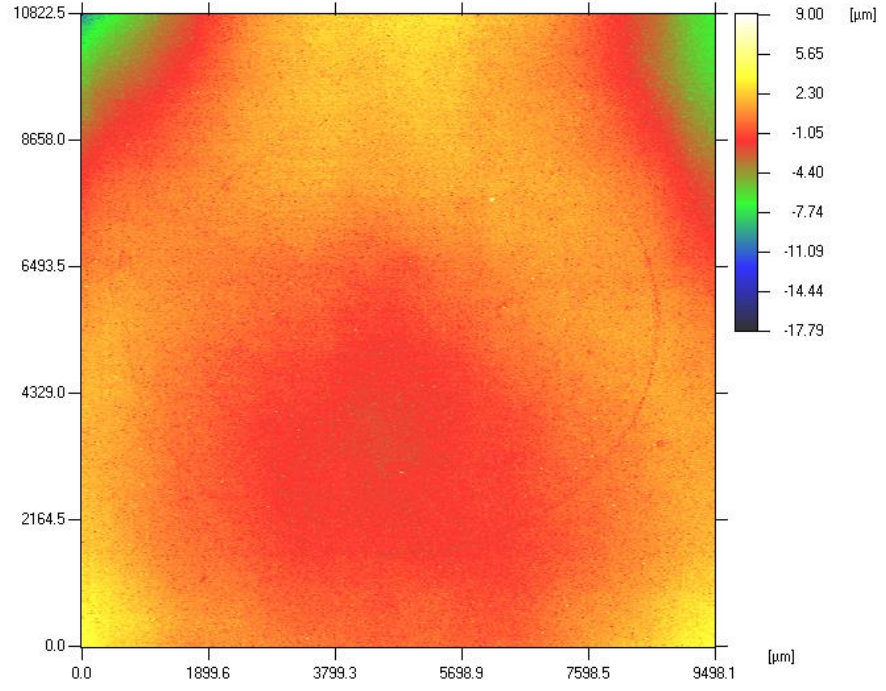


Şekil 5. 48 AISI 4140 çeliği vakum triboloji testi sonrası oluşan maksimum derinlik.

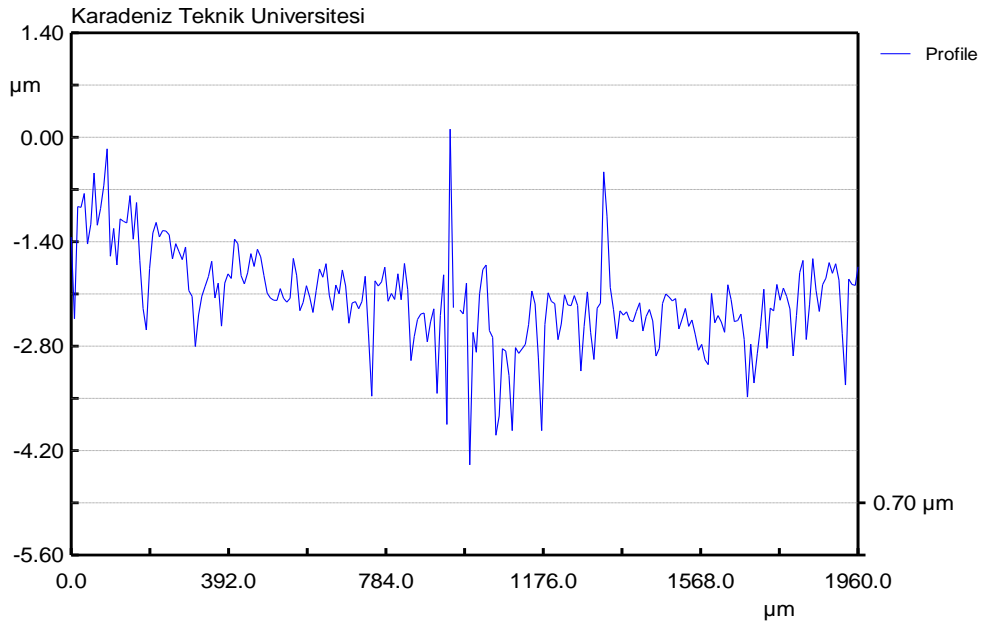
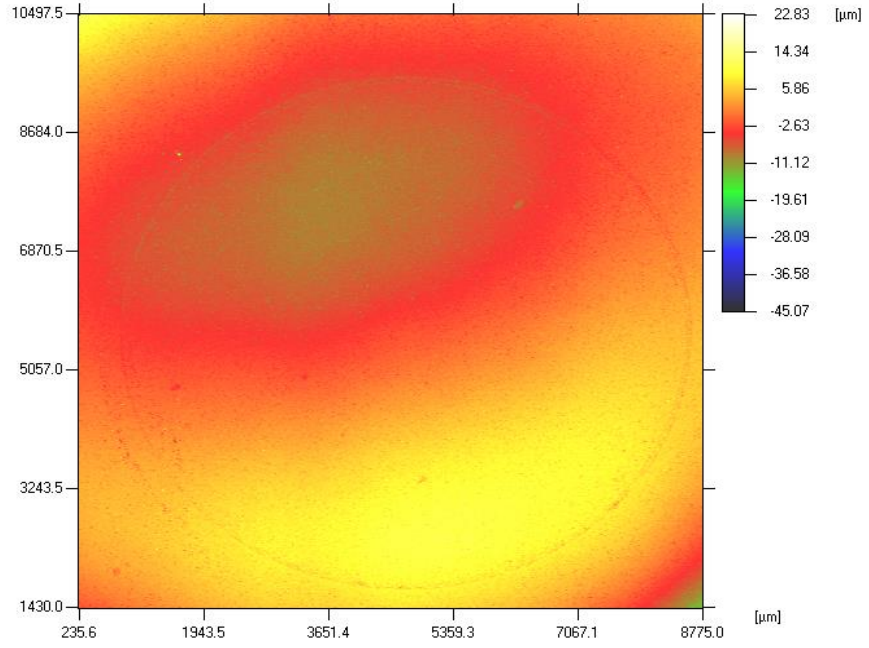
Şekil5.49, 50 ve 41’de ise kaplama uygulanmış, sırasıyla AlTiCrN, CrN ve TiCrN, vakum ortamında yapılan tribolojik testlerinin sonuçları yer almaktadır.



Şekil 5. 49 AlTiCrN kaplı çeliğin vakum triboloji testi sonrası oluşan maksimum derinlik.



Şekil 5. 50 CrN kaplı çeliğin vakum triboloji testi sonrası oluşan maksimum derinlik.



Şekil 5. 51 TiCrN kaplı çeliğin vakum triboloji testi sonrası oluşan maksimum derinlik. Vakum ortamında yapılan tribolojik deneyler incelendiğinde, atmosfer ortamında oluşan hacimler vakum ortamında gerçekleşmemiştir. Buna göre elde edilen deneylerde

maksimum derinlik TiCrN kaplamasında elde edilmiştir. En az derinlik ve en stabil olan grafik atmosfer ortamında da olduğu gibi CrN kaplamasında elde edilmiştir.

5. SONUÇLAR

Bu tez çalışması kapsamında AISI 4140 çeliğinin yüzeyine sürtünme ve aşınma özelliklerini iyileştirmek için AlTiCrSiN, TiCrN ve CrN kaplamaları katodik ark buharlaştırma yöntemi ile uygulanmıştır. Kaplamaların yapısal, sertlik, adezyon, sürtünme ve aşınma özellikleri incelenmiştir

- CrN kaplamasının XRD eğrisi incelendiğinde 44.5, 64.807, 82.1 ve 99.1 2θ açılarında taban malzemedeki kaynaklanan pikler görülürken, 37.1, 43.5, 62.612 2θ açılarında (111), (200), 220 CrN piki, 75.4 açısında 311 CrN piki 82.4'te CrN pikleri elde edilmiştir.
- TiCrN kaplamasının XRD eğrisi incelendiğinde, baskın bir şekilde (Ti, Cr)N (111) ve (Ti, Cr)N (200) piklerinin katı çözeltili şeklinde meydana geldiği görülmektedir. Yine aynı egride (Ti, Cr)N (220) ve (Ti, Cr)N (311) piklerinin düşük yoğunlukta da olsa oluştuğu literatürle uyumlu olarak görülmektedir.
- AlTiCrSiN kaplamasının XRD grafiği incelendiğinde 37,5°'de TiN ve CrN (111) piklerinin oluştuğu düşünülmektedir. Aynı grafikte 43,5° açısında ise AlTiCrSiN, CrN, TiN ve AlN piklerinin üst üste binmesiyle oluşan yüzey merkezli kübik yapıda (200) pikinin oluştuğu düşünülmektedir.
- Artan yük çizik testinde maksimum Lc2 noktası CrN kaplamasında meydana gelmiştir.
- Elde edilen ince filmlerin yapıların kristal yapıda olup literatür ile örtüşmektedir.
- AlTiCrSiN, CrN ve TiCrN ince filmlerinden elde edilen Lc2 kritik yükleri sırasıyla 36.6N,46.7N ve 39.9N olarak ölçülmüştür.
- AlTiCrSiN kaplamasındaki adezyon yapısı burkulma çatlakları şeklindedir.
- CrN kaplamasında Lc1 kritik noktasından sonra sürekli olmamakla beraber ufalanma mekanizması etkindir.
- Yapılan atmosfere açık tribolojik deneylerinde işlemsiz AISI4140 çeliği ortalama 0,18 olarak ölçülmüş. En büyük sürtünme katsayısı AlTiCrSiN ince filmi yaklaşık

0,2, CrN ince filmi ise sürekli bir artış ile en düşük 0,18 sürtünme katsayısı sonucu elde edilmiştir.

- Yapılan mikrosertlik testlerinde işlemsiz AISI 4140 çeliği 294,75 HV mertebesindedir. Büyütülen AlTiCrSiN, TiCrN, CrN filmlerin sertlik değerleri sırasıyla 1857, 1602, 1041 HV sertlik değerleri elde edilmiştir.
- Aşınma testleri sonucunda en küçük hacim CrN ince filmlerinde 39.2cm³ olarak ölçülmüştür. En büyük hacim ise AlTiCrSiN ince filmde 36974.7cm³ olarak ölçülmüştür.
- Vakum ortamında yapılan aşınma testleri sonucunda en yüksek sürtünme katsayısı 0.58 değeri ile CrN kaplamasında elde edilmiştir.

KAYNAKLAR

Alhafian, M. R., Valle, N., Chemin, J. B., Bourgeois, L., Penoy, M., Useldinger, R., & Choquet, P. (2023). Influence of Si addition on the phase structure and oxidation behavior of PVD AlTiN and AlTiCrN coatings using high-resolution characterization techniques. *Journal of Alloys and Compounds*, 968, 171800.

Aouadi, S. M., Wong, K. C., Mitchell, K. A. R., Namavar, F., Tobin, E., Mihut, D. M., & Rohde, S. L. (2004). Characterization of titanium chromium nitride nanocomposite protective coatings. *Applied surface science*, 229(1-4), 387-394.

Avunduk, İ. A. (2004). Ark PVD yöntemiyle biriktirilen NbN kaplamalar ve özellikleri (Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).

Aydınçülü, M. (1998). Ti-N ve Cr-N esaslı PVD kaplamaların oksidasyon davranışları (Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).

Aydınçülü, M. (1998). Ti-N ve Cr-N esaslı PVD kaplamaların oksidasyon davranışları (Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).

Aykan, E. (2018). AZ91 magnezyum alaşımının aşınma davranışının farklı malzemelerle deneysel karşılaştırılması ve üzerine yapılan ark PVD kaplamaların korozyon dayanımına etkisi (Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).

Aytaç, A., Işık, M.S., Çanakçı, B., Özdemir, T., Aztekin, K. ve Hüseyin, P.E.K. (2018). AISI 1008 1040 ve 4140 Çeliklerinde Isıl İşlem, Karbon Oranı ve Alaşım Elementlerinin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklere Etkisinin İncelenmesi. *Savunma Bilimleri Dergisi*, 17(2), 139-165.

Balıkçı, G. (2016). AISI 4140 çeliğinin sıcak dövme karakteristiğinin incelenmesi (Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).

Biresaw, G. ve Mittal K. L. (2017). *Surfactants in Tribology*, CRC Press

Bobzin, K., Brögelmann, T., Kruppe, N. C., & Carlet, M. (2020). HPPMS TiAlCrSiN-influence of substrate bias and pulse frequency on cutting performance. *Surface and Coatings Technology*, 397, 126056.

Bunshatta R.F. (1980). High rate physical vapour deposition processes. Agard Lecture Series No: 106, *Material Coating Techniques*, Hardford House, London, ss.21-26.

Callister, W., Rerhwich, D. (2018). *Materials science and engineering: an introduction*.USA NJ: Wiley Sons.

Candemir, L. (1995). Katodik ark PVD yöntemi ile üretilmiş tain ve tin kaplamaların korozyon özellikleri (Doctoral dissertation, Fen Bilimleri Enstitüsü).

Chang, Y. Y., & Chao, L. C. (2021). Effect of substrate bias voltage on the mechanical properties of AlTiN/CrTiSiN multilayer hard coatings. *Vacuum*, 190, 110241.

Chang, Y.Y., Yang, Y.J. ve Weng S.Y. (2020). Effect of interlayer design on the mechanical properties of AlTiCrN and multilayered AlTiCrN/TiSiN hard coatings. *Surf. Coating Technologies*, 389(26), 125-137.

Chen, W., Zheng, J., Lin, Y., Kwon, S., & Zhang, S. (2015). Comparison of AlCrN and AlCrTiSiN coatings deposited on the surface of plasma nitrocarburized high carbon steels. *Applied Surface Science*, 332, 525-532.

Chen, Y., Wang, S., Hao, Y., Pu, J., Jiang, X., Huang, L. F., & Wang, L. (2020). Friction and wear behavior of CrN coating on 316L stainless steel in liquid sodium at elevated temperature. *Tribology International*, 143, 106079.

Çeğil, Ö., Kılınç, B. ve Şaduman, Ş. E. N. (2014). AISI D2 Yüzeyinde Oluşturulan TiN Kaplamanın Aşınma Özellikleri. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 14(3), 291-296.

Çelik, O. N., Akbayır, Ö., Gaşan, H., Ümit, E. R., & Aydınbeyli, N. (2008). Borlanmış AISI 1030 Çeliğinin Abrazif Aşınma Özellikleri. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 21(1), 71-85.

Davis, J. (2015). *Metals Handbook, Desk Edition (2nd Edition)*. ASM International.s203 s215.

Denktaş, Ö. (2009). Plazma nitrokarbürlenen AISI 4140 çeliğinin tribolojik ve korozyon davranışı üzerine post-oksidasyon işleminin etkisinin araştırılması (Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).

Dikeç, G. (2010). *Malzeme Bilgisi ve İmal Usulleri*. İstanbul: T.C. Gedik Üniversitesi Yayınları. S 72 s48 s47 s46.

Duruk, B. (2006). Enjeksiyon Döküm Kalıplarında CrN Uygulamasının Kalıp Ve Parça Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi.

Ekinci, Ş. ve Akdemir, A. (2011). Nitrürlenmiş AISI 4140 çeliğine uygulanan yükün aşınma hızına etkisi, Selçuk Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Konya.

Gong, F., Wang, Y., Zhang, W., Ren, H., Li, J., & Xie, Z. (2023). Understanding the effect of Pt doping on the microstructure, mechanical and tribological properties of CrN coating. *Ceramics International*, 49(13), 22332-22339.

Gülgen, İ. S. (2008). İş makineleri tırnakları üretiminde kullanılan az alaşımlı çeliklerin ısıtılma işlemi (Master's thesis, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).

Holmberg, K., Matthews, A. 1998. Coatings tribology properties, techniques and applications in surface engineering. Elsevier, Amsterdam.

Kesti, E. (2009). Ç-4140 çeliğinin, mikro yapı ve mekanik özelliklerine su verme ortamının etkilerinin araştırılması (Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü).

Konak, Y.A. (2022). Melonite işleme uygulanan AISI 4140 çeliklerinin içyapı, mekanik ve tribolojik özelliklerinin incelenmesi (Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).

Köksal, N. S., Uzku, M. ve Ünlü, B. S. (2004). Farklı Karbon İçerikli Çeliklerin Mekanik Özelliklerinin Isıl İşlemlerle Değişimi. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, 6(2), 95-100

Kulkarni, A. P., Joshi, G. G., & Sargade, V. G. (2013). Performance of PVD AlTiCrN coating during machining of austenitic stainless steel. Surface Engineering, 29(5), 402-407.

Li, Z., Munroe, P., Jiang, Z.T., Zhao, X., Xu, J., Zhou, Z.F., Jiang J.Q., Fang F. ve Xie Z.H. (2012). Designing superhard, self-toughening CrAlN coatings through grain boundary engineering. Acta Materials, 60(12), 5735–5744.

Liu, Y., Yang, Y., Liu, X., Zheng, J., & Zhang, S. (2024). Tribocorrosion of CrN coatings on different steel substrates. Surface and Coatings Technology, 484, 130829.

Meghdari, M., Rahmanifard, R., & Elmkhah, H. (2023). The effect of Ti and Si on the mechanical and electrochemical behaviors of the AlCrN coating deposited by CAPVD on 304SS. International Journal of Applied Ceramic Technology, 20(3), 1887-1898.

Ni, L., Yang, T., Xiong, J., & Fei, Y. (2020). Structure and mechanical properties of TiAlCrSiN coatings deposited on Ti (C, N)-NbC-Ni cermets with varied Mo₂C contents. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 86, 105083.

Öncel, S. (2002). Katodik ark FBB yöntemi ile dekoratif amaçlı Cr-ON kaplamaların üretilmesi (Doctoral dissertation, Fen Bilimleri Enstitüsü).

Özdemir, S. (2022). Bilyalı dövme işleminin ardından nitürlemenin AISI 4140 çeliğinin kuru kayma aşınma direncine etkisi (Yüksek Lisans Tezi, Bartın Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü).

Pak, B. (2021). Frezelemede köşe yuvarlama ve PVD kaplamaların kesici takım performansına etkisi (Yüksek Lisans Tezi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü).

Paksunchai, C., Chantharangsi, C., Denchitharoen, S., Chaiyakun, S., & Limsuwan, P. (2019). Structure and morphology study of very thin TiCrN films deposited by unbalanced magnetron co-sputtering. *Key Engineering Materials*, 798, 152-157.

Paksunchai, C., Denchitharoen, S., Chaiyakun, S., & Limsuwan, P. (2012). Effect of sputtering current on structure and morphology of (Ti_{1-x}Cr_x)N thin films deposited by reactive unbalanced magnetron co-sputtering. *Procedia Engineering*, 32, 875-881.

Pişken, M. (2007). Titanyum ve alaşımlarının termal oksidasyon özelliklerine TiN Kaplamanın Etkilerinin İncelenmesi (Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).

Qu, S. J., Huang, S. Q., Guo, C. Q., Dai, M. J., Lin, S. S., Shi, Q., ... & Chekan, N. M. (2023). Chromium arc plasma characterization, structure and properties of CrN coatings prepared by vacuum arc evaporation. *Vacuum*, 209, 111796.

Riedel, R., 2000. Handbook of ceramic hard materials, Wiley-VCH, UK, 23-25.

Sarı, N.Y., Kaluç, E. (1999). "Karbonlu çeliklerin abrasif aşınması", *Mühendis ve Makine*, 443(37), 19-32.

Sarıdemir, S. ve Çakmak, S. (2016). AISI 4140 çeliğinin işlenmesinde kesici uç geometrisinin talaş kırmaya ve yüzey pürüzlülüğüne etkisi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 4(2), 765-771.

Singh, R. (2016). Radiography In: *Applied Welding Engineering*.

Souto, R.M., Alanyali, H., 2000. Electro chemical characteristics of steelcoated with TiN and TiAlN coatings. *Corrosion Science*, 42, 2201-2211

Şenocak, T. Ç., & Yiğit, O. Manyetik Alanda Sıçratma Tekniğiyle Co-Cr-Mo Alaşımı Yüzeyinde Büyütülen TiN, NbN ve VN Kaplamasının, Yapısal ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması. *International Journal of Innovative Engineering Applications*, 6(2), 255-262.

Şireli, M. E. (2005). Katodik ark fiziksel buhar biriktirme yöntemi ile krom kaplanmış düşük karbonlu çeliğe uygulanan krom iyonu bombardımanının etkileri (Doctoral dissertation, Fen Bilimleri Enstitüsü).

Türküz, M. C. (2006). Fiziksel buhar biriktirme yöntemi ile yapılan zirkonyum nitrür ince film kaplamanın kaplama parametrelerinin incelenmesi ve optimizasyonu (Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).

Türküz, M.C. (2006). Fiziksel buhar biriktirme yöntemi ile yapılan zirkonyum nitrür ince film kaplamanın kaplama parametrelerinin incelenmesi ve optimizasyonu (Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).

Witit-Anun, N., & Teekhaboot, A. (2016). Effect of Ti sputtering current on structure of TiCrN thin films prepared by reactive DC magnetron co-sputtering. *Key Engineering Materials*, 675, 181-184.

Yahyaoglu, İ. (2021). Düşük Alaşımli Çeliklerin Mekanik Özelliklerine Kimyasal Bileşimin Ve Isıl İşlemin Etkisi (Doktora Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).

Yılmaz, U. (2016). Gaz Ortamında Nitrürleme ve Nitrokarbürleme Yüzey Sertleştirme İşlemlerinin 1.8550 Çeliklerinin Aşınma, Mekanik ve Mikroyapı Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi (Yüksek Lisans Tezi, Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü)

Yoo, Y.H., Le, D.P., Kim, J.G., Kim, S.K., Vinh, P.V., 2008. Corrosion behavior of TiN, TiAlN, TiAlSiN thin films deposited on toolsteel in the 3.5 wt.% NaCl solution. *Thin Solid Films*, 516, 3544-3548.