



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



# Nitrokarbürizasyon sonrası oksidasyon işlemlerinin AISI 4140 çeliğinin tribolojik özelliklerine etkisi

## *The effect of oxidation process after nitrocarburation on tribological properties of AISI 4140 steel*

*Yazar(lar) (Author(s)):* Yavuz KAPLAN<sup>1</sup>, Abdalbaki YILDIRIM<sup>2</sup>, Sinan AKSÖZ<sup>3</sup>

*ORCID<sup>1</sup>:* 0000-0002-3144-9332

*ORCID<sup>2</sup>:* 0000-0002-1913-6616

*ORCID<sup>3</sup>:* 0000-0003-4324-5043

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Kaplan Y., Yıldırım A. ve Aksöz S., "Nitrokarbürizasyon sonrası oksidasyon işlemlerinin AISI 4140 çeliğinin tribolojik özelliklerine etkisi", *Politeknik Dergisi*, 23(4): 1357-1362, (2020).

**Erişim linki (To link to this article):** <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

**DOI:** 10.2339/politeknik.585031

# Nitrokarbürizasyon Sonrası Oksidasyon İşlemlerinin AISI 4140 Çeliğinin Tribolojik Özelliklerine Etkisi

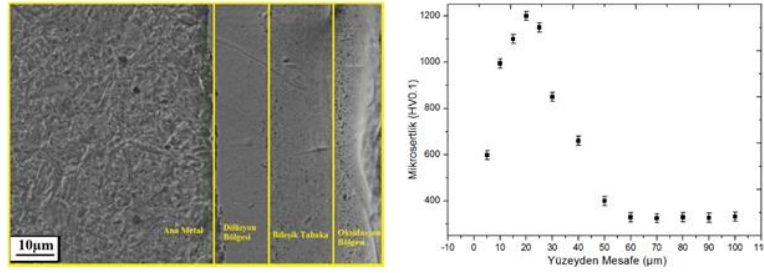
## The Effect of Oxidation Process After Nitrocarburization on Tribological Properties of AISI 4140 Steel

### Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ NK+O işlemi ile malzemenin en dış yüzeyinde yaklaşık  $10\mu\text{m}$  kalınlığında, 600HV sertliğinde demir oksit tabakası elde edilmiştir. / NK + O process provides an iron oxide layer approximately  $10\mu\text{m}$  thickness and 600HV hardness on the outer surface of the material.
- ❖ Oksit tabakasının hemen altında demir nitrit ve demir karbürler içeren yaklaşık  $10\mu\text{m}$  kalınlığında, 1200HV sertliğinde bileşik tabaka elde edilmiştir. / Composite layer containing iron nitride and iron carbides was obtained under the oxide layer approximately  $10\mu\text{m}$  thick and 1200HV hardness.
- ❖ Ana metal ile bileşik tabaka arasında ise karbürce zengin  $50\mu\text{m}$ 'ye kadar uzanan sertliği ana metalden daha yüksek difüzyon bölgesi oluşmuştur. / A carbide rich diffusion zone between the base metal and the composite layer was formed with higher hardness than the base metal up to  $50\mu\text{m}$ .

### Grafik Özet (Graphical Abstract)

Bu çalışmada, karbon ve azot atomlarının eşzamanlı difüzyonu temeline dayanan nitrokarbürizasyon sonrası oksidasyon işlemlerinin AISI 4140 çeliğinin mikroyapı, mikrosertlik ve tribolojik özelliklerine etkileri incelenmiştir. / In this study, microstructure, microhardness and tribological properties were investigated after nitrocarburization process (on the AISI 4140 steel) which was the oxidation processes based on simultaneous diffusion of carbon and nitrogen atoms.



Şekil. Tabakalar ve mikrosertlik değerleri / Figure. Layers and microhardness values

### Amaç (Aim)

Nitrokarbürizasyon sonrası oksidasyon işleminin mikroyapı, mikrosertlik ve tribolojik davranışına etkileri. / The effect of oxidation process after nitrocarburization on microstructure, microhardness and tribological behavior.

### Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

İlk olarak ıslah edilen numunelere sırasıyla; nitrokarbürizasyon ve oksidasyon işlemleri uygulanmıştır. / Nitrocarburization and oxidation processes were applied to the samples after firstly quenched and tempered.

### Özgünlük (Originality)

Geleneksel yöntemlere nazaran nitrokarbürizasyon ile kısa sürede istenilen derinliklere ulaşılabilmektedir. The desired depths can be reached in a short time in the nitrocarburizing process compared to traditional methods.

### Bulgular (Findings)

NK + O işleminin aşınma direncini arttırdığı ve sürtünme katsayısını düşürdüğü belirlenmiştir. / It was determined that NK + O processes increased the wear resistance and decreased the friction coefficient.

### Sonuç (Conclusion)

Tüm veriler analiz edildiğinde NK + O işleminin AISI 4140 çeliğinin mekanik ve tribolojik özelliklerini olumlu etkilediği belirlenmiştir. / When all data were analyzed, it was determined that NK + O process provide positive effects on mechanical and tribological properties of AISI 4140 steel.

### Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

# Nitrokarbürizasyon Sonrası Oksidasyon İşlemlerinin AISI 4140 Çeliğinin Tribolojik Özelliklerine Etkisi

*Araştırma Makalesi / Research Article*

**Yavuz KAPLAN<sup>1</sup>, Abdulkaki YILDIRIM<sup>1</sup>, Sinan AKSÖZ<sup>2\*</sup>**

<sup>1</sup>Teknoloji Fakültesi, Makine ve İmalat Mühendisliği Bölümü Pamukkale Üniversitesi, , Denizli, Türkiye,

<sup>2</sup>Teknoloji Fakültesi, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Pamukkale Üniversitesi, , Denizli, Türkiye,

(Geliş/Received : 01.07.2019 ; Kabul/Accepted : 16.01.2020)

## ÖZ

Bu çalışmada, karbon ve azot atomlarının eşzamanlı difüzyonu temeline dayanan nitrokarbürizasyon sonrası oksidasyon işlemlerinin AISI 4140 çeliğinin mikroyapı, mikrosertlik ve tribolojik özelliklerine etkileri incelenmiştir. Nitrokarbürizasyon işleminin birçok avantajı olmasına rağmen özellikle malzemelerin korozyon ve tribolojik özelliklerini iyileştirilmek için işlem sonrası farklı ısıtım tekniklerine ihtiyaç duyulmaktadır. Nitrokarbürizasyon + oksidasyon işlemleri sonucunda malzeme yüzeyinin en dışında yaklaşık 5µm kalınlığında oksit tabakası, hemen altında nitür ve karbürlerden oluşan yaklaşık 5µm kalınlığında bileşik tabaka ve karbürce zengin difüzyon bölgesi olmak üzere 3 farklı bölge oluşmuştur. Ana fazdan daha sert difüzyon bölgesi, nitrokarbürizasyon ve oksidasyon katmanları sayesinde malzemenin tüm yüzeyinde aşınma davranışları iyileştirilmiştir. Böylece aşınma direnci ile birlikte aynı zamanda sürtünme katsayısı da iyileştirilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Nitrokarbürizasyon, oksidasyon, triboloji, aşınma.

## The Effect of Oxidation Process After Nitrocarburization on Tribological Properties of AISI 4140 Steel

### ABSTRACT

In this study, microstructure, microhardness and tribological properties were investigated after nitrocarburisation process (on the AISI 4140 steel) which was the oxidation processes based on simultaneous diffusion of carbon and nitrogen atoms. Although the nitrocarburisation process has many advantages, different post-treatment heat treatment techniques are needed to improve the corrosion and tribological properties of the materials in particular. As a result of the nitrocarburization + oxidation processes, 3 different zones were formed on the outermost surface of the material. These zones were obtaining of respectively as; about 5 mm thick oxide layer, just below it, about 5 mm thick compound layer consisting of nitride and carbides and diffusion zone rich in carbide. Wear behavior on the entire surface of the material was improved by means of a harder diffusion zone, nitrocarburization and oxidation layers than the main phase. Thus, the wear resistance is also improved, as well as the coefficient of friction.

**Keywords:** Nitrocarburization, oxidation, tribology, wear.

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

AISI 4140 (42CrMo4) ıslah çeliği alaşımındaki krom (Cr) ve Molibden (Mo) elementleri nedeniyle su verme ve temperleme işlemleri sonrası yüksek mukavemet, süneklik ve tokluk gibi mekanik özellikleri bir arada sunan bir çeliktir. Üstün mekanik özellikleri sebebiyle dişli çark, krank mili, aks mili gibi dönen parçalarda ve yataklamalarda tercih edilmektedir [1-4].

Günümüzde makine elemanlarından beklenen yüksek aşınma ve korozyon direnci, yorulma dayanımı gibi mekanik özellikleri geliştirmek için birçok ısıtım işlemi kullanılmaktadır. Özellikle yorulma dayanımı arttırılmak için ısıtım teknikleriyle yüzeyde bası gerilmesi oluşturulması gerektiği bilinmektedir [4-5].

Termokimyasal bir yüzey işlemi olan Nitrokarbürizasyon (NK) mühendislik malzemelerinin aşınma, korozyon ve

yorulma hasarlarını önlemek için tercih edilen bir ısıtım işlemi tekniğidir [6-8]. Karbon ve azot atomlarının eşzamanlı difüzyonu temeline dayanan NK işlemi, malzeme yüzeyinde 10-20µm kalınlığında beyaz bir tabaka oluşturur. Karbür ve nitürler içeren bu tabaka malzemelerin mekanik özelliklerinde iyileşmeler sağlar. Beyaz tabakanın hemen altında da bir difüzyon bölgesi meydana gelir [9-12].

Fakat çoğu zaman oluşan tabakanın gözenekli yapısından dolayı NK işlemi tek başına yeterli olmamaktadır. NK sonrası oksidasyon işlemi (NK+O) uygulamak malzemenin aşınma ve korozyon direnci arttıracak iyi bir seçenek olarak görülmektedir [13]. Oksidasyon işlemi oksijence zengin gaz veya gaz karışımı atmosferinde, 350-500°C sıcaklık aralığında gerçekleştirilmektedir. İşlem sonrası malzeme yüzeyinde 0.5-3.5µm kalınlığında demir oksit tabakası oluşmaktadır [14-16].

Aşınma, mekanik etkilerle sürtünme halindeki yüzeylerden parçacıkların kopup ayrılması olarak

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)  
e-posta : saksoz@pau.edu.tr

tanımlanmaktadır [17]. DIN 50320'de aşınma, malzeme yüzeylerinden mekanik etkilerle küçük parçacıkların ayrılması sonucu, arzu edilmeyen şekilde meydana gelen değişiklik olarak tanımlanmaktadır. Aşınma sebebiyle yüzeyler ilk şekillerini kaybederler, parçalar arasındaki boşluklar artar ve istenilen işlevi gerektiği şekilde gerçekleştiremez [18,19].

Bu çalışmada, düşük aşınma direncine sahip AISI 4140 çeliğine ileri teknoloji ve uygulama alanına sahip NK+O işlemleri uygulanarak aşınma direnci geliştirilmeye çalışılmıştır. Bu amaçla gaz NK işlemi sonrası uygulanan oksidasyon işleminin AISI 4140 çeliğin tribolojik özellikleri üzerine etkisi mikroyapı analizi, mikrosertlik ölçümleri ve aşınma testleriyle detaylı olarak incelenmiştir. Bu çalışma ile, endüstride aşınma direnci istenen parçalarda NK+O ısıl işlemlerinin tercih edilebilir olduğu gösterilmiştir.

## 2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL and METHOD)

Deneyisel çalışmalarda kullanılan AISI 4140 ıslah çeliğinin kimyasal bileşimi Çizelge 1.'de yer almaktadır.

**Çizelge 1.** AISI 4140 çeliğinin kimyasal kompozisyonu (Chemical Composition of AISI 4140 Steel)

C	Si	Mn	Pmax	Smax	Cr	Mo	Fe
0.40	0.20	0.60	0.020	0.030	0.95	0.20	Kalan

### 2.1. Islah, Nitrokarbürizasyon ve Oksidasyon İşlemleri (Quenching and Tempering, Nitrocarburisation and Oxidation Processes)

Çalışmada aşınma özelliklerinin incelenebilmesi amaçlı Ø10x25mm boyutlarında aşınma test numunesi hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelere ilk olarak 850°C'de 60dk bekletilen ıslah işlemine tabi tutularak yağda su verme işlemi gerçekleştirilmiştir. Islah işlemi uygulanan numuneler 500°C'de 1 saat fırında bekletilerek çıkarılmış ve havada kendiliğinden soğuma işlemine tabi tutulmuştur. Islah etme işlemi sonrası numunelere sırasıyla; nitrokarbürizasyon ve oksidasyon işlemleri uygulanmıştır. Nitrokarbürizasyon (NK) işlemi için karbondioksit (CO<sub>2</sub>), amonyak (NH<sub>3</sub>) ve azottan (N<sub>2</sub>) oluşan karışım gaz atmosferinde, 570°C sıcaklıkta 18 saat süreyle bekletilmiştir. Oksidasyon işlemi (O) ise 400°C sıcaklıkta 60 dakika saf oksijen (O<sub>2</sub>) gazı ortamında gerçekleştirilmiştir.

### 2.2 Mikrosertlik, Mikroyapı ve Aşınma Deneyleri (Microhardness, Microstructure and Wear Experiments)

Mikrosertlik ölçümleri için ise en dış katmandan başlayarak (Oksidasyon bölgesi) 30 µm'ye kadar (difüzyon bölgesine kadar) her 5 µm'de beşer ölçüm alınarak ortalama değerleri (hata çubukları eklenerek) verilmiştir. Difüzyon bölgesinden (DB) sonra ise her 10 µm'de üçer ölçüm alınarak ortalama değerleri verilmiştir. Mikroyapı görüntülerinin elde edilmesi için numune yüzeyleri 200-1200'lük zımpara aralığında

zımparalanmış ve sonrasında ise sırasıyla 6µm ve 3µm'lik keçelerde parlatma işlemleri uygulanmıştır. Parlatılan yüzeyler %5 Nital çözeltisiyle dağlanarak mikroyapı incelemeleri gerçekleştirilmiştir.

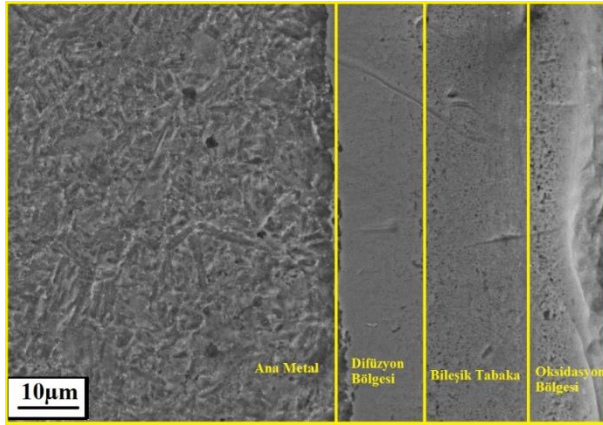
Mikroyapı incelemeleri için sırasıyla; Optik Mikroskop (OM), Alan Taramalı Elektron Mikroskobu (FESEM) ve Element Dağılım Spektrometresi (EDS) analizleri gerçekleştirilmiştir. OM görüntüleri için NIKON marka ECLIPSE-LV150NL model optik mikroskop ve FESEM görüntüleri ve EDS analizleri için Zeiss marka SUPRA 40VP model cihaz kullanılmıştır. Mikrosertlik testlerinde HARDWAY marka DV-1AT-4.3 model mikrosertlik cihazı kullanılmıştır.

Aşınma deneyleri ASTM G99 standardına uygun olarak pin-on-disk aşınma deney cihazında gerçekleştirilmiştir. Ø10x25mm ölçülerindeki numuneler pim, AISI 52100 malzeme ise disk olarak kullanılmıştır. Kullanılan disk malzemesinin sertliği, su verme işlemi sonucu 60 HRC olarak tespit edilmiştir.

## 3. BULGULAR ve TARTIŞMA (RESULTS and DISCUSSION)

### 3.1. Mikroyapı Analizi (Analysis of Microstructure)

Şekil 1'de NK+O uygulanan AISI 4140 çeliğinin FESEM görüntüsü, Çizelge 2'de EDS analiz sonuçları verilmiştir. Isıl işlemler sonrası malzeme yüzeyinde 3 farklı bölge oluştuğu belirlenmiştir. EDS analizi sonuçları incelendiğinde, AISI 4140 çeliğinin en dış kısmında oksijence zengin bir tabakanın oluştuğu görülmektedir. Atomal olarak ağırlıkça %26.37 Fe ve %41.33 O tespit edilmiştir. Bu oranlar en dış katmanda oksit tabakasının varlığını kanıtlamaktadır. Tabakanın 400°C'de 1 saat saf oksijen ortamında gerçekleştirilen oksidasyon işlemiyle oluştuğu söylenebilir. Oksidasyon bölgesinin hemen altındaki bileşik tabaka üzerinden alınan EDS incelendiğinde ise oksijen miktarının azaldığı görülmektedir. Bununla birlikte tabaka içerisinde atomal olarak ağırlıkça %20.42 N ve %17.24 C bulunmaktadır. Bu elementlerin varlığı, bu bölgenin malzemelerin mekanik özelliklerinin iyileşmesine katkı sağlayan, demir nitrür ve demir karbürler içeren bir tabakadan oluştuğunu gösterir niteliktedir. Difüzyon bölgesinde ise atomal olarak ağırlıkça %45.81 Fe ve %41.13 C'dan oluşan karbonca zengin bir alanın oluştuğu EDS analiziyle belirlenmiştir. Bu sonuçlar ile difüzyon bölgesinin ağırlık olarak demir karbürlerden oluşan bir tabaka olduğu söylenebilir. Sonuç olarak nitrokarbürizasyon işlemi ile azot ve karbon elementlerinin difüzyonu sağlanarak karbon atomunun atomik boşlukları doldurması ve azotun yüzeyde birikmesini sağlamıştır.



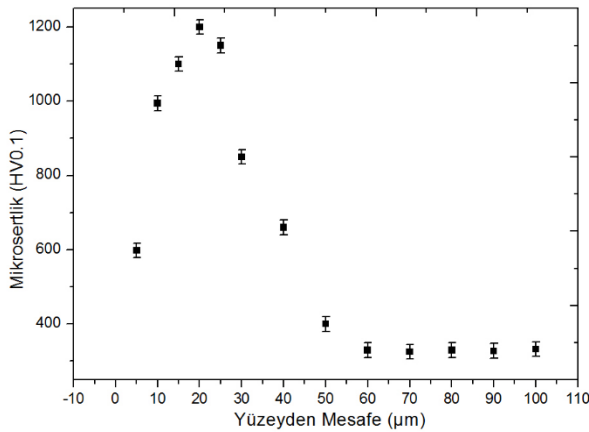
**Şekil 1.** NK+O işlemi sonrası oluşan tabakanın ayrıntılı FESEM görüntüsü (Detailed FESEM image of the layer formed after NK+O process)

**Çizelge 2.** FESEM görüntüsündeki bölgelere ait EDS analiz sonuçları (EDS analysis results of the regions in the FESEM image)

Elementler (% at.)	Oksidasyon Bölgesi	Bileşik Tabaka	Difüzyon Bölgesi
Fe	26.37	58.65	45.81
O	41.33	3.69	7.63
C	19.26	17.24	41.13
N	13.04	20.42	5.43

### 3.2. Mikrosertlik Sonuçları (Microhardness Results)

Numunelerin uygulanan NK ve O ısıt işlemleri sonrası elde edilen mikrosertlik ölçüm sonuçları Şekil 2’de yer almaktadır.



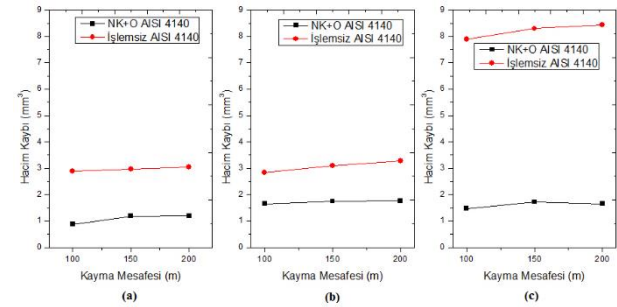
**Şekil 2.** NK+O işlemi sonrası AISI 4140 çeliğinin sertlik profili (Hardness profile of AISI 4140 steel after NK+O process)

AISI 4140 çeliğinin ısıt işlem öncesi en yüksek sertlik değeri 270 HV iken, uygulanan NK+O ısıt işlemleri neticesinde çekirdek sertliği en yüksek değeri 338 HV sertliğe ulaştığı görülmüştür (Şekil 2). Bununla birlikte en dış katmanda yer alan oksit bölgesinin en yüksek sertliği 620 HV olarak ölçülmüştür. Dış katmandan (O

bölgesi), nitrokarbürizasyon bölgesine doğru (NK) gidildikçe sertlik değerinin arttığı belirlenmiştir. NK bölgesinde ölçülen en yüksek sertlik değerinin 1250HV’ye kadar ulaştığı tespit edilmiştir. Numunenin NK bölgesinden DB doğru gidildikçe sertliğin kademeli olarak düştüğü ve bu bölgenin 50µm’ye kadar uzandığı tespit edilmiştir. 50µm’den sonra sertlik çekirdek sertliğine eşitlenmiştir.

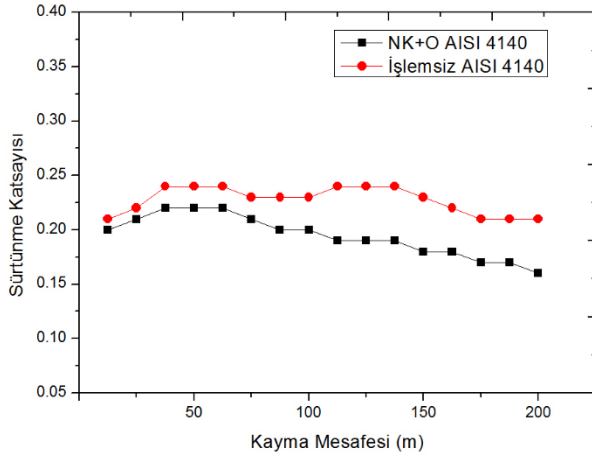
### 3.3. Aşınma Test Sonuçları (Wear Test Results)

Şekil 3’de AISI 4140 çeliğine uygulanan NK+O ısıt işlemleri sonrası, farklı yüklerdeki ve kayma mesafelerindeki hacim kaybı grafikleri yer almaktadır.



**Şekil 3.** NK+O uygulanmış ve işlemsiz (herhangi bir ısıt işlem uygulanmamış) AISI 4140 çeliğinin hacim kaybı grafikleri (a) 5N (b) 10N ve (c)15N (Volume loss graphs of NK+O applied and untreated AISI 4140 steel (a) 5N (b) 10N (c) 15N )

Şekil 3 incelendiğinde, NK+O ısıt işlemlerinin AISI 4140 çeliğinin aşınma direncini arttırdığı söylenebilir. Uygulanan tüm yük ve kayma mesafelerinde işlemsiz (herhangi bir ısıt işlem uygulanmamış) AISI 4140 çeliğinin hacim kaybı ısıt işlem uygulanan numunelerden daha fazladır. NK+O uygulanan numunelerde üç yükte de (Şekil 3 a-b-c) kayma mesafeleri 100m’den 150m’ye çıkarken bir hacim kaybı gerçekleştiği, fakat 150m’den 200m’ye geçişlerde hacim kaybının azaldığı hatta hacim kaybı yaşanmadığı görülmüştür. Bunun sebebinin en dıştaki oksit tabakasının 100m mesafeye kadar dayanması, daha sonra yüzeyden kaybolarak daha sert bir tabaka olan bileşik tabakanın ortaya çıkması olduğu düşünülmektedir. İşlemsiz AISI 4140 numunesinde ise böyle bir durumla karşılaşmamış kayma mesafesinin artmasıyla 3 yük altında da hacim kaybında artış meydana gelmiştir. Bununla birlikte işlemsiz numunede 5N ve 10N yük altında hacim kayıpları birbirine yakınken 15N yük altında hızlı bir şekilde yükselmektedir. Bunun nedeni ise, artan yükte birlikte yüzeyde oluşan aşırı deformasyon, yüzeyde kopma ve kırılma gibi etkenleri oluşturarak, yüksek hacim kayıplarının meydana gelmesine sebep olmaktadır [20]. Genel literatür çalışmaları incelendiğinde görülmektedir ki, artan yükte birlikte hacim ve veya ağırlık kaybında artış olacağı aşıkardır ve bu çalışma verilerini destekler niteliktedir [21, 22]. Şekil 4’de NK+O uygulanan ve işlemsiz AISI 4140 çeliğinin 10 N yük altındaki sürtünme katsayısı grafiği verilmiştir.



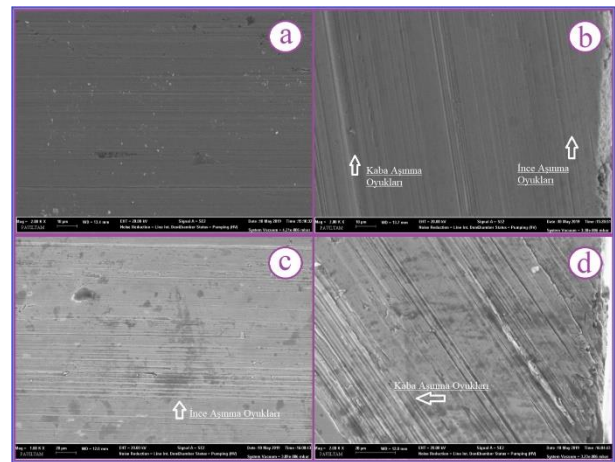
**Şekil 4.** NK+O uygulanmış ve işlemsiz AISI 4140 sürtünme katsayısı grafiği (10N yük altında) (Friction coefficient of AISI 4140 with NK+O applied and untreated (Under 10N load))

Şekil 4 incelendiğinde, AISI 4140 çeliğine uygulanan NK+O işlemlerinin sürtünme katsayısını düşürdüğü açıkça görülmektedir. Bununla birlikte 100m kayma mesafesine kadar ısıtılmış ve ısıtılmamış numunelerin sürtünme katsayısı değerleri birbirine daha yakinken, 100m'den sonra NK+O ısıtılmış işlemleri uygulanmış numunenin sürtünme katsayısında fark edilir derecede bir düşüş gözlenmiştir. Bunun sebebinin 100m'den sonra yüzeydeki oksit tabakasının kalkmaya başlaması ve böylece sürtünmenin doğrudan karbür ve nitrürlerden oluşan çok daha sert bir katmanla sürtünmeye başlaması olarak söylenebilir. Ayrıca, artan sürtünme mesafesine bağlı olarak yüzeyde oluşan deformasyonla birlikte yüzey sertliğinde bir artış meydana geleceği bilinmektedir [23]. Yapılan literatür çalışmaları incelendiğinde, artan mesafeye bağlı olarak sünek yüzeyler (aşınmanın olduğu daha sünek çekirdek yapı) aşınmaya bağlı olarak termomekanik olarak etkilenmektedir. Oluşan bu termomekanik ve termal nedenlerden dolayı yüzeyde bir oksit tabakası meydana gelebilmektedir. Yapıda oluşması muhtemel oksit film tabakaları yüzeyde yağlayıcı görevi görerek, sürtünme katsayısını doğrudan etkilemektedir [24, 25]. Bu sonuçlarla birlikte, deneysel çalışma verileri göstermektedir ki, yüzeyde oluşturulan kaplama ile birlikte sürtünme katsayısı iyileştirilmiştir.

### 3.4. Aşınmış Yüzey FESEM Görüntüleri (FESEM Images of the Worn Surfaces)

Şekil 5-a ve b'de NK+O işlemleri uygulanmış numunenin 15 N yük altındaki aşınmış yüzey görüntüleri yer almaktadır. Şekil 5-c ve d'de ise işlem görmemiş numunelerin aşınmış yüzey FESEM görüntüleri yer almaktadır. Bu görüntüler sayesinde aşınmış yüzeyde oluşan oyukların oluşumu ve aşınma davranışları etkileri incelenebilmektedir [26]. Görüntüler incelendiğinde uygulanan aşınma mesafesi arttıkça aşınma izlerinin daha belirgin hale geldiği ve Şekil 5 b 'de görüldüğü gibi, ince aşınma oyukları belirgin hale gelmeye başladığı

görülebilmektedir. Şekil 5-d'de yer alan FESEM görüntüsü incelendiğinde, aşındırılmış yüzeylerde sürekli kaba aşınma oyuk çizgilerinin meydana gelmesi ve oluşan yorulma mekanizması ile birlikte mikro boyutlu çatlaklara neden olmuş, böylece hem abrasif aşınma mekanizmasının hem de adhesif aşınma mekanizmasının oluşması ile sonuçlanmıştır [27]. Şekil 5-b'de FESEM görüntüsü incelendiğinde, kenar bölgelerde yer alan kaplamalar ile birlikte (NK+O) ince aşınma oyukları meydana gelirken, çekirdek bölgede ise çok daha derin kaba aşınma oyuklarının meydana geldiği görülmektedir. Bu sonuç ise, uygulanan kaplamanın istenildiği gibi yapıda aşınma direncini arttırdığını göstermektedir. Ayrıca aşınma sonrası herhangi bir dökülme ve çatlak oluşmaması (NK+O numunesi için), istenilen kaplama katmanlarının oluştuğunu göstermektedir.



**Şekil 5.** 15N yük altında aşınmış yüzey görüntüleri a) 100m kayma mesafesinde NK+O, b) 200m kayma mesafesinde NK+O, c) 100m kayma mesafesinde işlem görmemiş, d) 200m kayma mesafesinde işlem görmemiş (Worn surface images under 15N load a) NK + O at 100m sliding distance, b) NK + O at 200m sliding distance, c) untreated at 100m sliding distance, d) untreated at 200m sliding distance)

## 4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

NK+O işlemi uygulanan AISI 4140 çeliğinin mikroyapı, mikrosertlik ve aşınma davranışının incelendiğinde aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir;

- NK+O işlemi ile malzemenin en dış yüzeyinde yaklaşık 5µm kalınlığında, 600HV sertliğinde demir oksit tabakası, oksit tabakasının hemen altında demir nitrür ve demir karbürler içeren yaklaşık 5µm kalınlığında, 1100HV-1200HV sertlik aralığında bileşik tabaka, ana metal ile bileşik tabaka arasında ise karbürce zengin 50µm'ye kadar uzanan sertliği ana metalden yüksek difüzyon bölgesi oluşmuştur.
- Karbür ve nitrürlerden oluşan bileşik tabakanın (NK) aşınma direncinin oksit tabakasından yüksek olduğu ve bileşik tabakanın sürtünme katsayısının oksit tabakasından daha düşük olduğu belirlenmiştir.

- Aşınma testleri sonucunda NK+O işleminin AISI 4140 malzemenin aşınma direncini arttırdığı ve sürtünme katsayısını düşürdüğü belirlenmiştir. Bu sonuçlar ışığında NK+O işlemi AISI 4140 çeliğinin aşınmaya maruz kaldığı çalışma şartlarında tercih edilebilecek bir ısıtma işlemi tekniği olduğu tespit edilmiştir.
- Aşınma sonrası ısıtma işlemi uygulanmayan yapılar kaba aşınma oyukları görülürken, NK+O sonrası ısıtma işlemleri sayesinde ince aşınma oyuklarının oluştuğu gözlemlenmiştir. Ayrıca aşınma işleminde NK+O uygulanan numunelerde dış katmanlara doğru gidildikçe yapıdaki artan sertlikle birlikte aşınma hızlarının incelendiği gözlemlenmiştir.
- Sonuç olarak AISI 4140 çeliğine uygulanan NK+O işlemlerinin malzemenin aşınma direncinin olumlu olarak etkilediği gözlemlenmiştir.

Çalışmada sonunda tüm veriler analiz edildiğinde, AISI 4140 çeliklerinde olumlu sonuçlar ile karşılaşılmış ve bu çalışma ile NK ve O işlemlerinin farklı malzeme türlerinde de olumlu etkiler oluşturacağı kanaatine ulaşılmıştır. Çalışma verilerinden sağlanan etkiler ile birlikte, daha kapsamlı çalışmalara, yeni araştırma alanlarına ve yeni projelere öncülük yapacağı düşünülmektedir.

#### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Çalışma IMSMATEC 2019’da sunumu yapılan “The Effect Of Nitrocarburization on Microstructure and Microhardness Of AISI 4140 Steel After Oxidation Process” isimli çalışma geliştirilerek yapılmıştır. Bu sunumun yapılmasında, katkılarından dolayı Pamukkale Üniversitesi BAP birimine ait 2019KRM004-048 kodlu projeye yazarlar teşekkürlerini iletmektedir.

#### ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Avner S. H., “Introduction to Physical Metallurgy”, *McGraw Hill Book Company*, ISBN: 978-0070024991, New York, (1986).
- [2] Park H., Lee H., Moon K. and Lee B., “Wear Properties of a Sulfnitrided Layer Formed on AISI 4140 Steel by Using Plasma Treatments”, *Journal of the Korean Physical Society*, 74(9): 880-884, (2019).
- [3] Medina A., Aguilar C., Béjar L., Oseguera J., Ruiz A. and Huape E., “Effects of post-discharge nitriding on the structural and corrosion properties of 4140 alloyed steel”, *Surface and Coatings Technology*, 366: 248-254, (2019).
- [4] Kızılkaya E., Ovalı İ., “AISI 4140 Çeliğine Uygulanan Sığ Kriyojenik İşleminin Mekanik Özellikler Üzerindeki

- [5] Doğançan Ç., “SAE 4340 çeliğinde ısıtma işlem parametrelerinin yorulma ve mikro yapı üzerine etkisi”, *Yüksek Lisans Tezi*, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2018).
- [6] Karakan M., “Plazma nitrokarbürülen AISI 4140 ve 1020 çeliklerinin yapısal, mekanik ve tribolojik özelliklerinin araştırılması”, *Doktora Tezi*, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2004).
- [7] Sun H. Z., Zheng J., Song Y., Chi J. and Fu Y. D., “Effect of the deformation on nitrocarburizing microstructure of the cold deformed Ti-6Al-4V alloy”, *Surface and Coatings Technology*, 362:234-238, (2019).
- [8] Fontes M. A., Scheid V. H. B., Machado D. D. S., Casteletti L. C. and Nascente P. A. D. P., “Morphology of the DIN 100Cr6 Case Hardened Steel after Plasma Nitrocarburizing Process”, *Materials Research*, 22(3): 1-6, (2019).
- [9] Altakan C., “AISI 1010 ve 1040 Çeliklerine Nikel ve Krom Yayındırılarak Yüzey Özelliklerin Geliştirilmesi”, *Yüksek Lisans Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, (2011).
- [10] Wang L., Lu J. ve Lu K., “Chromizing Behaviors of a Low Carbon Steel Processed by Means of Surface Mechanical Attrition Treatment”, *Acta Materialia*, 53: 2081-2089, (2005).
- [11] Xi W., Ding W., Yu S., Lin N., Meng T., Guo Q. and Liu X., “Corrosion behavior of TaC/Ta composite coatings on C17200 alloy by plasma surface alloying and CVD carburizing”, *Surface and Coatings Technology*, 359: 426-432, (2019).
- [12] Chen G., Wang J., Fan H., Wang D., Li X. and Dong H., “Combat molten aluminum corrosion of AISI H13 steel by low-temperature liquid nitrocarburizing”, *Journal of Alloys and Compounds*, 776: 702-711, (2019).
- [13] Sicoe G. M., “Researches on the Diffusion Phenomena in the Thermo-Chemical Treatment of Oxy-nitrocarburizing of Some Grey Cast Irons”, *Revista de Chimie*, 69(12): 3367-3371, (2018).
- [14] Bell T., Sun Y. and Suhadi A., “Environmental and technical aspects of plasma nitrocarburizing”, *Vacuum*, 59: 14-23, (2000).
- [15] Sun Y., “Structures and properties of oxide films formed on plasma nitrocarburized steels by post-oxidation treatments”, *Heat Treatment of Metals*, 15-19, (2002).
- [16] Esfahani A., Sohi M. H., Rassizadehghani J. and Mahboubi F., “Effect of treating atmosphere in plasma post-oxidation of nitrocarburized AISI 5115 steel”, *Vacuum*, 82: 346-351, (2008).
- [17] Ludema C. K., “Friction, Wear, Lubrication: A Textbook in Tribology”, *CRC Press*, ISBN: 9781482210170, 107-108, (1996).
- [18] Owsalou R. G., “Aşınmaya maruz parçaların aşınma dayanımlarının araştırılması”, *Yüksek Lisans Tezi*, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2012).
- [19] Kaplan Y., “İmplant yapımında kullanılan Ti6Al4V titanyum alaşımının mekanik özelliklerine ve biyoyumluluğuna borlama işleminin etkisi” *Doktora Tezi*, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2017).

- [20] Sudarshan, Surappa M. K., “Dry Sliding Wear of Fly Ash Particle Reinforced A356 Al Composites”, *Wear*, 265: 349-360, (2008).
- [21] Şimşek İ., Yıldırım M., Özyürek D. and Tunçay T., “AA7075 Alaşımının T6 Isıl İşleminde Yaşlandırma Süresinin Aşınma Davranışı Üzerine Etkisi”, *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi*, 7: 42-49, (2018).
- [22] Aksöz S., Bostan B. “AA2014/B4C MMK yapının döküm ve döküm sonrası sinterleme işlemleri ile üretiminin aşınma davranışlarına etkileri”, *Boron*, 3(2): 132 - 137, (2018).
- [23] Aksöz S., “Wear Behavior of Hot Forged NiTi Parts Produced by PM Technique”, *Trans Indian Inst Met*, 72: 1949-1957, (2019).
- [24] Şimşek İ., Yıldırım M., Özyürek D., Şimşek D., “Basıncısız infiltrasyon yöntemiyle üretilen SiO<sub>2</sub> takviyeli alüminyum kompozitlerin aşınma davranışlarının incelenmesi”, *Politeknik Dergisi*, 22(1): 81-85, (2019).
- [25] Saka N., Eleiche A. M., Suh N. P., “Wear of metals at high sliding speeds”, *Wear*, 44(1): 109-125, (2003).
- [26] Aksöz S., Bican O., Çalın R., Bostan B., “Effect of T7 heat treatment on the dry sliding friction and wear properties of the SiC-reinforced AA 2014 aluminium matrix composites produced by vacuum infiltration”, *Journal of Engineering Tribology*, 228(3): 312–319 (2014).
- [27] Özyürek D., Çiftçi İ., Tunçay T., “The effect of aging and sliding speed on wear behaviour of Cu-Cr-Zr alloy”, *Materials Testing*, 55(6): 468-471, (2013)