

316L İMPLANT MALZEMESİNİN AŞINMA VE MANYETİK ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE PLAZMA NİTRÜRLEME SICAKLIĞININ ETKİSİ

Mustafa YAZICI ^{*1}, Fatih YILDIZ ², Ali Fatih YETİM ², Ayhan ÇELİK ³

¹ Atatürk Üniversitesi, Nanobilim ve Nanomühendislik Anabilim Dalı, Erzurum, Türkiye

² Erzurum Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Erzurum, Türkiye

³ Atatürk Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Erzurum, Türkiye

Anahtar Kelimeler:

316L Paslanmaz Çelik
SBF
Aşınma
Manyetizasyon
Plazma Nitürleme

Özet

Paslanmaz çeliklerin aşınma ve manyetizasyon özellikleri çoğu biyomekanik uygulamalarda önemli bir bileşendir. Düşük sıcaklıklarda nitürleme işlemi paslanmaz çeliklerin aşınma direncini geliştirmek için dizayn edilmiş bir termokimyasal işlemdir. Bu çalışmada 316L paslanmaz çeliğin hem aşınma hem de manyetik özellikleri X-ray diffraction, scanning electron microscopy (SEM), pin-on-disc tribotester ve VSM (Vibrating sample magnetometer) cihazları kullanılarak araştırıldı. 316L paslanmaz çeliğin plazma nitürleme işlemi %50H₂-%50N₂ gaz karışımında, 2 saat ve 350, 400, 450°C sıcaklıkta yapıldı. Aşınma deneyleri ve manyetik ölçümler 37°C'de ve (SBF) yapay vücut sıvısı içerisinde gerçekleştirilmiştir. XRD analizlerinden modifiye tabaka içerisinde CrN, γ'-Fe₄N ve S-fazı oluşumları tasdiklenmiştir. Sıcaklığın artışıyla nitrojene doymuş s-fazının oluşumu aşınma direncini artırır ve plastik deformasyona karşı direncini artırdığından dolayı aynı zamanda adezyona karşı azalma eğilimindedir. Artan nitürleme sıcaklığı ile 316L paslanmaz çeliğin manyetik özelliği yumuşak bir ferromanyetik davranış sergilediği analiz edilmiştir. Nitürleme sıcaklığının artışı ile nitrojen atomlarının aktivasyonu artmakta ve nitrojen atomları Fe-Fe atomları arasındaki mesafeyi artırmasından dolayı kafes yapısının genişlemesine yol açmaktadır ve buda manyetik etkileşimleri etkilemiştir.

THE EFFECT OF TEMPERATURE PLASMA NITRIDING ON WEAR AND MAGNETIC PROPERTIES OF 316L IMPLANT MATERIAL

Keywords

316L stainless steel
SBF
Wear
Magnetization
Plasma Nitriding

Abstract

The tribological and magnetic properties of stainless steels components are important in many biomechanical applications. Low temperature plasma nitriding is a thermochemical treatment designed so as to improve of wear resistance in stainless steels. In this work, the influence of temperature plasma nitriding on both wear and magnetic properties of 316L stainless steel was investigated by using X-ray diffraction, scanning electron microscopy (SEM), pin-on-disc tribotester and VSM (Vibrating sample magnetometer). Plasma nitriding treatment of 316L stainless steel has been performed in 50%H₂-50%N₂ gas mixture, for treatment times of 2 h at the temperatures of 350, 400 and 450°C. The wear tests and magnetic analysis were carried out in SBF at 37 °C. XRD analyses confirm the formation of CrN, γ'-Fe₄N and S-phases in the modified layer. The wear resistance increases, due to the formation of the nitrogen-supersaturated S-phase with the temperature increase, and it was improved, due to increased resistance to plastic deformation, as well as to decreased tendency towards adhesion. It was analyzed that the soft (ideal) ferromagnetic of the magnetic properties of 316L stainless steel increased with increasing treatment temperature during nitriding process. Activation of nitrogen atoms increases with increasing nitriding temperature and nitrogen atoms leads to lattice expansion and magnetic interactions are influenced because of increasing Fe-Fe distance

* İlgili yazar: mustafa.yazici@ogr.atauni.edu.tr

1. Giriş

Östenit paslanmaz çelikler, askeri, otomotiv endüstrisi, kimyasal prosesler ve özellikle biyomedikal mühendisliği gibi alanlarda korozyon direnci ve manyetik özelliklerinden dolayı oldukça yaygın olarak kullanılır. Ancak bu çeliklerin sürtünme katsayısı, sertlik ve aşınma dirençleri genellikle yetersizdir. Bu tür problemleri çözmek için ion implantasyon, plazma nitrüleme, fiziksel buhar kaplama, kimyasal buhar kaplama gibi birçok yüzey modifikasyon işlemi geliştirilmiştir. Bu metotlar arasında plazma nitrüleme işlemi diğer metotlardan daha kolay, daha ucuz maliyet ve daha hızlı uygulanabilir olduğundan dolayı büyük bir avantaja sahiptir. Plazma nitrüleme işleminde önemli birkaç parametre mevcuttur bunlar; gaz karışım oranı, işlem sıcaklığı ve işlem süresidir. Bunlar arasında en önemlisi işlem sıcaklığıdır. Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde Borgiol vd. (2005) yaptıkları nitrüleme işlemi sonrası oluşan tabakanın sertlik değerinin matris ile tabakayı ayıran hattın hemen altında taban malzemenin sertliğine düştüğü belirlemiş ve tabaka içerisinde ise sertlik değerinin sabit kaldığını ifade etmişlerdir. S-fazının sertliği Fe_4N+CrN çift fazlı yapının sertliğinden düşük olmasına rağmen, Jeong vd. (2004) yaptıkları çalışmada N'nin etkisi ile oluşan kafes distorsiyonunun ve bası artık gerilmelerin s-fazı sertliğinin oldukça artmasına sebep olduğunu belirlemişlerdir. Borgioli vd. (2004) yaptıkları çalışmanın birinde $430^{\circ}C$ 'nin altındaki sıcaklıklarda CrN oluşabileceğini ancak çok uzun işlem süreleri gerekeceğini (30saat ile 60saat) belirlemişlerdir. Bu yüzden düşük sıcaklıklarda ve çok uzun olmayan işlem sürelerinde CrN oluşturmadan, 316L paslanmaz çeliklerin sertliğini ve aşınma direncini artırmak için kullanılabileceğini gözlemlemişlerdir.

2. Materyal ve Yöntem

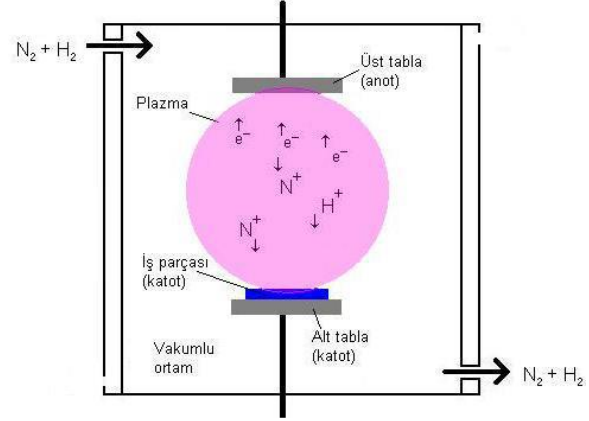
Yapılan bu çalışmada, aşağıda kimyasal kompozisyonu Çizelge 1'de verilen 316L paslanmaz çelik kullanılmıştır.

Çizelge 1. Paslanmaz çeliğin kimyasal kompozisyonu

| Yüzde Bileşimi (%) - Çelik Tipi : 316L | | | | | |
|--|-------|--------|-------|------|------|
| C | Mn | Si | Cr | Ni | Mo |
| 0,01 | 1,76 | 0,21 | 17,2 | 15,3 | 2,7 |
| Cu | Nb | Ti | Al | Co | Fe |
| 0,51 | 0,061 | 0,0081 | 0,016 | 0,18 | 68,5 |
| 4 | 8 | 4 | 3 | 6 | 6 |

Plazma ile nitrüleme işlemi Atatürk Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünde üretilen ve Şekil 1'de şematığı gösterilen iyon nitrüleme deney sisteminde yapılmıştır. Vakum pompası, gaz dağıtım sistemi, enerji kaynağı ve paslanmaz çelikten imal edilmiş vakum odasından oluşmaktadır. Vakum ortamına anot ve katot yerleştirilip numune tutucuda katot olarak

kullanılmaktadır. Katotta sıcaklığı ölçmek için termokupul bağlanmıştır. Numuneler silindirik bir anotta çevrilidir. Anottun yuvarlak olmasının nedeni oluşturulan plazmanın numunelere homojen olarak dağıtılması sağlamaktır.



Şekil 1. Nitrüleme Prosesi (Tosun vd., 2012)

Plazma ile nitrüleme işlemi aşağıdaki adımlarla gerçekleştirilmiştir.

- ❖ 15 mm çaplı numuneler 5 mm yüksekliğinde kesildikten sonra sırasıyla 80-1200 numaralı zımparalarla parlatıldıktan sonra sırasıyla 5 ve 3 μm 'lik alimüna tozları iyice parlatma işlemine tabii tutuldu.
- ❖ Numuneler hazır hale getirildikten sonra etil alkol ile temizlendikten sonra numuneler tutucuya yerleştirildi ve vakum 5×10^{-2} mbar'a düşürüldü.
- ❖ İyon nitrüleme işlemine başlamadan önce hazırlanan numuneler üzerinde bulunabilecek kirlilikleri gidermek için, 375 V gerilim altında, 20 dakika süre ile ortalama H_2 gazı ile saçılma işlemi yapıldı.
- ❖ H_2 gazı ortama verildikten sonra tekrardan vakuma alınır.
- ❖ Vakum ortamına %50 H_2 ve %50 N_2 gazları gönderilerek deneye devam edildi.
- ❖ Vakum odasının basıncı 500 Pa'la sabitlemiştir.
- ❖ Elektriksel boşalma güç kaynağının açılmasıyla başlamıştır.
- ❖ Numunelerin sıcaklığı önceden belirlenen değerlerde sabitlendi bu sabitlemede ± 5 sıcaklık farkı olabilir.
- ❖ Belirlenen sıcaklığa ulaştığımız anda deney zamanı başlatılmıştır.
- ❖ Deneyi, belirlenen sürede işleme tabii tuttukten sonra enerji kaynağı kesildi fakat vakum ortamı, sıcaklık oda sıcaklığına ulaşana kadar vakum ortamı devam ettirildi.

Yapılan çalışmada 350, 400 ve $450^{\circ}C$ sıcaklıklarında ve her bir sıcaklık değeri içinde 2 saatlik sürelerde

plazma nitrüleme işlemi yapılmıştır. Deneyden sonra vakum devam ettirilip sıcaklığın, oda sıcaklığına düşmesi beklenmiştir.

Plazma ile nitrülenen 316L paslanmaz çelikler $\lambda=1,5405\text{\AA}$ dalga boyuna sahip Cu - K α katot kullanılarak Rigaku Geigerflex XRD cihazı vasıtası ile belirlenmiştir. Cihazdan alınan sonuçlar Match programı ile karşılaştırılarak oluşan fazların bileşimleri (kompozisyonları) tespit edilmiştir. Numunelerin yüzeyden görünümü, içyapıları, aşınma izleri görüntüleri Jeos 6400 ve Zeiss Evo-LS-10 markalı SEM (Taramalı elektron mikroskobu) kullanılarak gözlemlenmiştir. Metalurjik incelemeler yapabilmek için dağlama işlemi yapıldı. Bu işlemde 316L paslanmaz çelik için kullanılan kimyasal bileşimler şöyledir. 3 br Gliserin, 2br HCl, 1br HNO₃ kullanıldı. Dağlama esnasında istenilen yapının oluşup oluşmadığı Metkon optik mikroskobu ile incelenmiştir.

2.1. Aşınma Deneyleri

Kontakt halinde bulunan iki yüzeyde, malzemenin yüzeyinde malzemenin kopup ayrılması olayına aşınma denir. Bu durumda her iki yüzeyde ilk şekillerini kaybederler. Aşınma, adezif, abrazif, yorulma, korozif, fretting, katı partikül, akışkan veya kaviteasyon sonucu oluşan erozyon şeklinde meydana gelir. Tribolojik özellikleri belirlemek için Turkyus PODTW&RWT pim-disk aşınma cihazı kullanılmıştır. 13 mm çapında 5 mm yüksekliğindeki taban malzeme, 6 mm çapında alimüna bilyeye karşı SBF solüsyonu içerisinde aşındırılmıştır. Uygulanan pim-disk aşınma deney şartları Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 2. Aşınma deney şartları

| Parametreler | Değerler |
|--------------------|------------|
| Uygulanan Yük | 1 N |
| Aşınma izi çapı | 13mm |
| Sıcaklık | 22°C |
| Nem | %50 |
| Aşındırma hızı | 4.85 m/dak |
| Aşındırma süresi | 1740 s |
| Aşındırma mesafesi | 141 m |

Yapılan deneylerde sürtünme katsayısı, cihaz tarafından otomatik olarak verilmektedir. Deneyden sonra yüzey pürüzlülüğü, Mahr marka yüzey profilometre ile ölçülmüştür. Kaplamanın aşınma oranı aşağıdaki formül yardımı ile hesaplanmıştır.

$$\text{Kaplama Aşınma Oranı} = \frac{\text{Aşınılan hacim}}{\text{Uygulanan Yük} \times \text{Aşınma Mesafesi}} \quad (1)$$

$$\text{Aşınma Mesafesi} = \text{Aşınma izinin çevresi} \times \text{Devir sayısı} \times \text{Aşınmanın zamanı} \quad (2)$$

2.2 Manyetizasyon Deneyleri

Hazırlanan numuneler biyomalzeme olarak kullanılacağından vücut sıcaklığı olan 36°C'de, manyetik mıknatıslanma ölçümleri alınmıştır. Bu ölçümler Hacettepe Üniversitesi Fizik Mühendisliği Bölümünde bulunan, Quantum Design Fiziksel Özellikler Ölçüm Sistemi (PPMS) kullanılmıştır. 2-400 K arasındaki sıcaklıklarda ölçüm alabilen PPMS cihazı, sıvı azot soğutmalı ve sıvı helyum tankı ile birlikte, Quantum Design Model 6000 kontrolcü, ölçüm problemleri ve manyetik alan kaynağından oluşmaktadır (Şekil 2.)



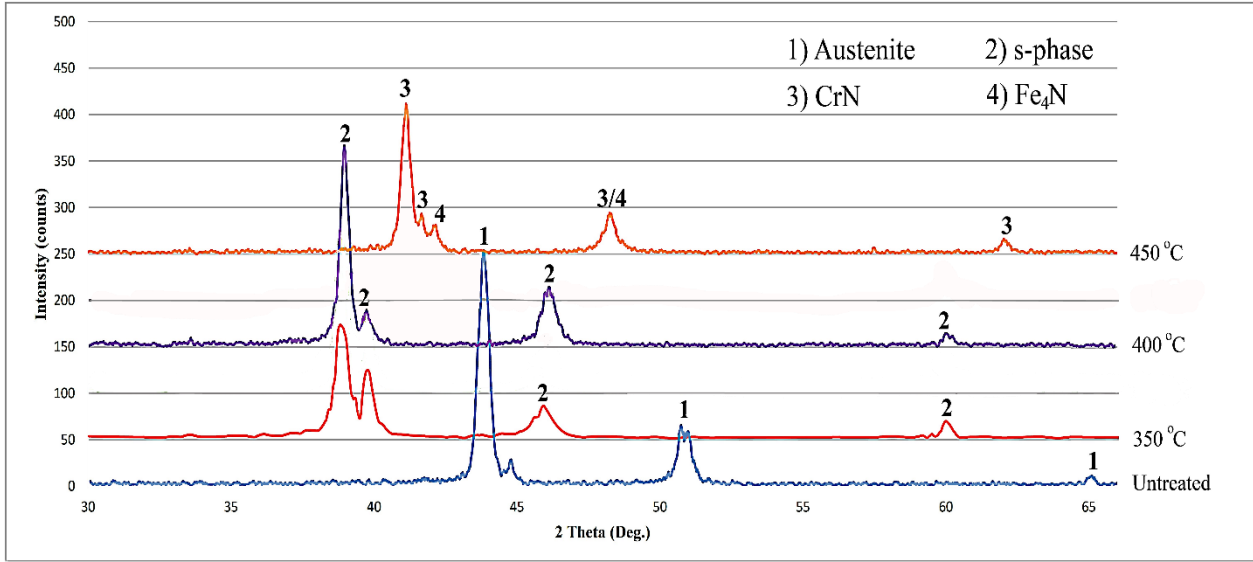
Şekil 2. Fiziksel özellikler ölçüm sistemi (Yazıcı 2013)

3. Araştırma Bulguları

3.1. XRD analizleri

İşlem görmemiş ve farklı işlem sıcaklıklarında 2 saat süre ile nitrülenmiş numunelere ait XRD grafikleri Şekil 3'de verilmiştir. XRD grafiklerinde, işlem görmemiş 316L paslanmaz çelikte yapının tamamen ostenit fazından oluştuğu görülmüştür. Plazma ile nitrülenmiş numunelerde ise işlem parametrelerine bağlı olarak modifiye olmuş tabaka içerisinde s-fazı, CrN ve $\gamma\text{-Fe}_4\text{N}$ fazları meydana gelmiştir.

İşlemsiz 316L paslanmaz çeliği ostenitik paslanmaz çeliklerden olup, Şekil 3 incelendiğinde işlemsiz numunelerin yalnızca yüzey merkezli kübik (YMK) ostenit demire ait pikler verdiği tespit edilmiştir. Plazma ile nitrüleme sonrasında ise 350 ve 400°C sıcaklıklarında yapıda s-fazı olarak isimlendirilen bir fazın oluştuğu, 450°C sıcaklıkta ise yapıda azot atomlarının Cr atomları ile bağ yapmasından dolayı CrN fazının oluştuğu gözlemlenmiştir. Şekil 3 detaylı bir şekilde incelendiğinde, düşük sıcaklıklarda (350 ve 400°C) yapılan nitrüleme sonucu oluşan s-fazının piklerin aslında daha düşük açılarda yansıyan ostenit pikleri olduğu görülmektedir.



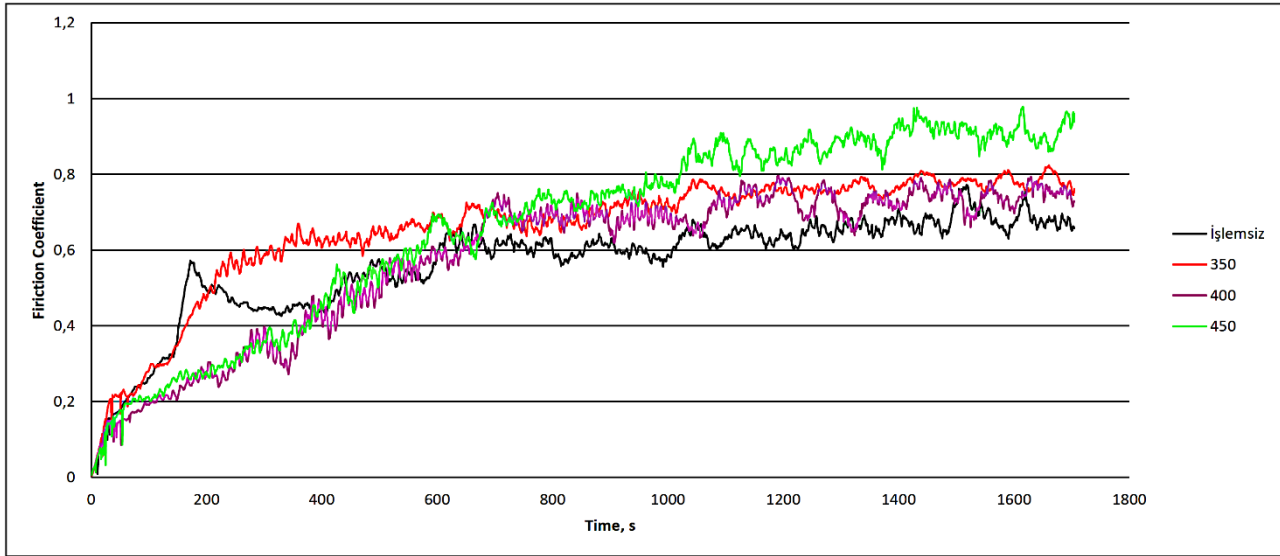
Şekil 3. İşlemsiz ve farklı sıcaklıklarda nitrülenmiş 316L paslanmaz çeliğinin XRD grafikleri

400°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda yapılan nitrüleme işlemlerinde yapıda γ' -Fe₄N ve CrN fazlarının oluştuğu görülmüştür. İşlem sıcaklığının artması ile birlikte azot atomları yapıdan ayrılmaya başlar ve ortamdaki krom atomları ile birleşerek CrN çekirdeklerinin oluşmasına sebep olur.

3.2. Sürtünme Katsayısı ve Aşınma Analizleri

İşlemsiz ve farklı sıcaklıklarda nitrülenmiş 316L çeliğinin tribolojik özellikleri pim-disk aşınma cihazı kullanılarak belirlenmiştir. Aşınma testi sonrası elde edilen sürtünme katsayısı-zaman grafikleri Şekil 4'de verilmiştir. İşlemsiz numunenin ortalama sürtünme katsayısı 0.6 iken nitrüleme sonucu işlem parametrelerine göre yüzey pürüzlülüğündeki artışa

paralel olarak sürtünme katsayısı ortalama 0.65-0.85 değerleri arasında değişmiştir. Şekil 4 incelendiğinde, işlemsiz numunelerin run-in period olarak isimlendirilen sürtünme davranışı sergilediği görülmüştür. Bu tip sürtünme davranışında, sürtünme katsayısı testin başında hızlı bir şekilde artmakta, daha sonra azalma eğilimine girmekte ve daha sonra ise kararlı bir şekilde testin sonuna kadar devam etmektedir. Şekil 4'deki işlemsiz numunenin sergilediği sürtünme katsayısı-zaman grafiğine göre, sürtünme katsayısı testin ilk 200 saniyesinde hızlı bir artış göstermiş, 200-400 saniye arasında azalma eğilimine girmiş ve daha sonra testin sonuna kadar ortalama 0.6 değeri civarında kararlı halde devam etmiştir. Plazma ile nitrülenmiş numunelerde ise böyle bir davranış tespit edilmemiştir.



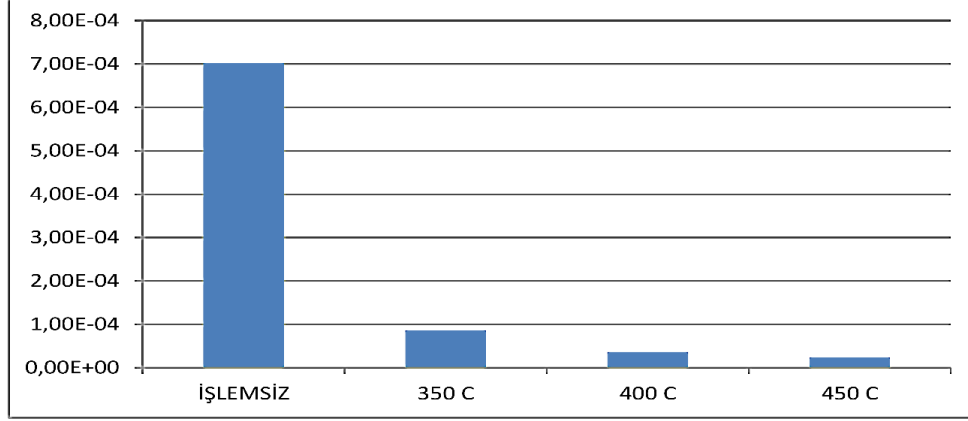
Şekil 4. İşlemsiz ve nitrülenmiş 316L çeliğinin sürtünme katsayısı-zaman grafiği

Aşınma testi sonrası, işlemsiz ve plazma ile nitrülenmiş numunelerin hesaplanan aşınma oranları Şekil 5'de verilmiştir. 316L paslanmaz

çeliğinin aşınma direncinin nitrüleme işlemi ile arttığı gözlemlenmiştir. Genel olarak düşük işlem sıcaklıklarında (350 ve 400°C) nitrülenmiş

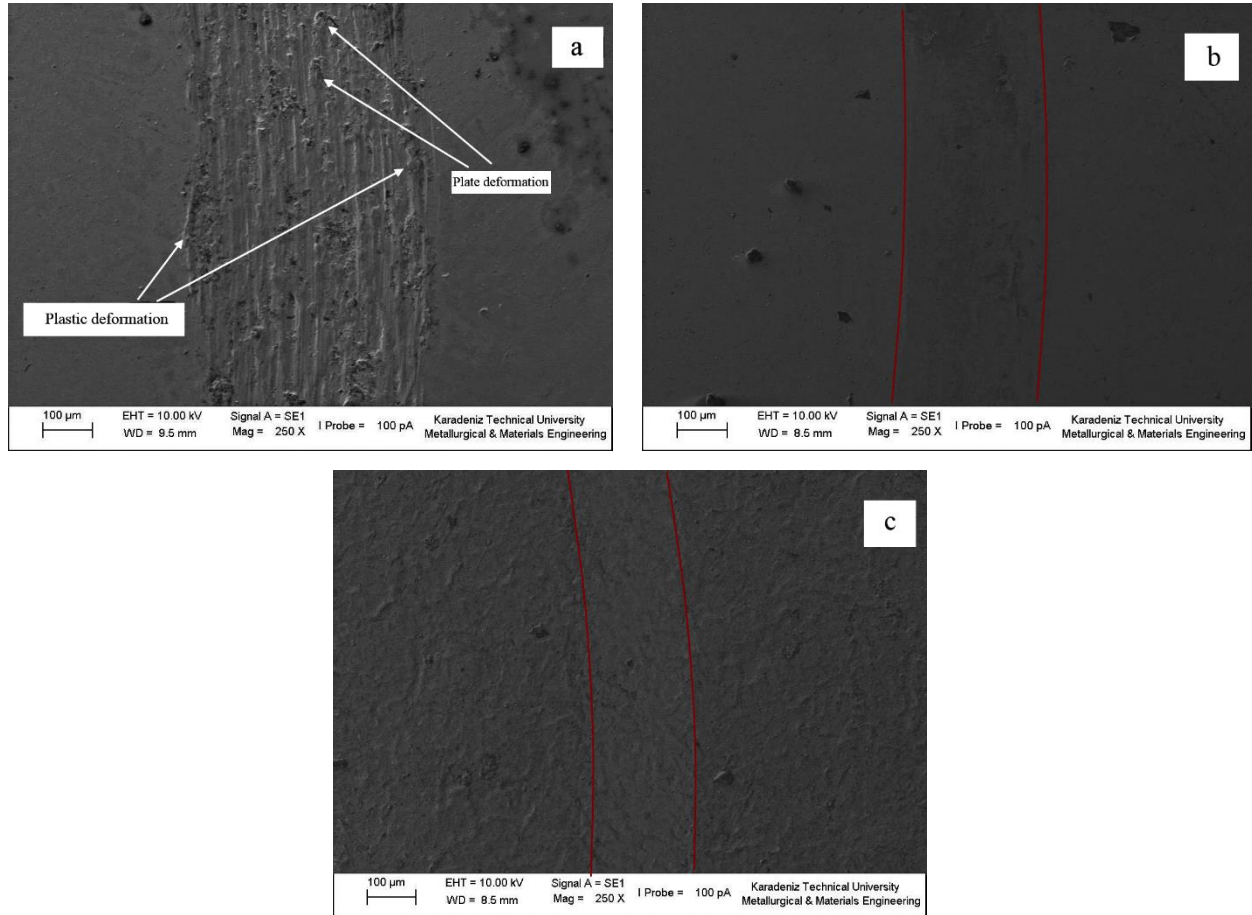
numunelerde aşınma oranının, yüksek sıcaklıklarda (450°C) nitrürlenmiş olan numunelere göre yüksek çıktığı, ancak işlem görmemiş numunelere göre ise azaldığı görülmektedir. Düşük sıcaklıklarda oluşan s-fazının 316L paslanmaz çeliğinin aşınma özelliklerini iyileştirdiği açıkça görülmektedir. Ancak s-fazının tabaka içerisinde baskın faz olduğu numunelerde elde

edilen tabaka kalınlığı ve sertliğinin nispeten düşük olması yüksek sıcaklıklarda nitrürlenmiş numunelere kıyasla aşınma direncindeki artışın az olmasına sebep olmuştur. İşlem sıcaklığı arttıkça yapıda görülen sert CrN ve Fe₄N çift fazlı yapı ve tabaka kalınlığının artışı aşınma miktarının azalmasına neden olmuştur.



Şekil 5. İşlemsiz ve farklı parametrelerde nitrürlenmiş 316L paslanmaz çeliğinin aşınma oranları

Şekil 6'da işlemsiz ve farklı sıcaklıklarda nitrürlenmiş numunelerin aşınma testi sonrası SEM görüntüleri verilmiştir.



Şekil 6. Aşınma izlerinin SEM görüntüleri; a) İşlemsiz b) 350°C c) 450°C'de nitrürlenmiş

İşlem görmemiş numunelerin aşınma davranışı şiddetli adezif aşınma ile birlikte, abrazyon ve plastik

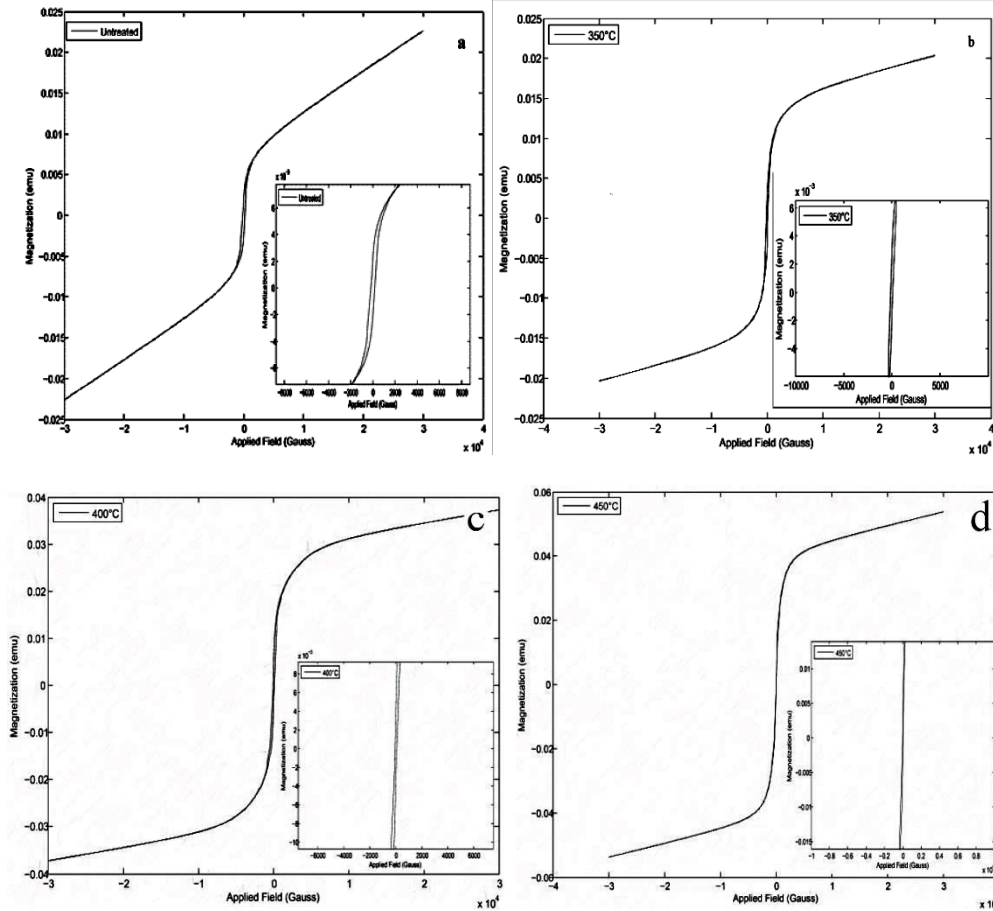
deformasyon mekanizmalarının birleşimi şeklinde açıklanabilir (Yetim 2009). Aşınma izi üzerindeki

plaka şeklindeki aşınma ürünleri adeziv aşınmanın bir göstergesidir. Bu durumun aşınma testi sırasında transfer olmuş malzeme veya aşınma ürünlerinin aşındırıcı bilye ile taban malzeme arasındaki sürtünme hareketinden dolayı plastik deformasyona uğraması sonucu oluştuğu söylenebilir. Aşındırıcı bilye ile numune arasında sıkışarak sertleşen aşınma ürünleri aşınma esnasında bilyenin kayma hareketi ile birlikte 316L paslanmaz çelik yüzeyi üzerinde abrasif kanallar oluşumuna sebep olmaktadır. İşlem görmemiş 316L paslanmaz çeliğinin aşınmış yüzeylerinde dikkat çeken diğer bir önemli nokta, aşınma sırasında meydana gelen aşırı plastik deformasyondur. Plastik deformasyon belirtileri aşınma iz kenarlarında açıkça görülmektedir. İz kenarlarında görülen yığılmalar yumuşak olan paslanmaz çeliğin sert aşındırıcı bilye vasıtasıyla deforme edildiğini göstermektedir.

3.3. Manyetik Ölçümler

Şekil 7’de hem işlem görmemiş hem de farklı işlem şartlarında plazma ile nitrürlenmiş 316L paslanmaz

çeliğine ait manyetik alınganlık analizi verilmiştir. İşlemsiz halde, yüzey merkezli kübik yapıya sahip olan 316L ostenitik paslanmaz çelik, 450°C’lik sıcaklığa kadar bu kafes yapısını koruduğu yapılan XRD analizlerinden belirlenmiştir. Nitrüleme işleminde uygulanan voltaj gerilimi nedeniyle enerji kazanan N atomları difüzyon yöntemiyle çok yoğun bulunduğu ortamdan az bulunan ortam olan çeliğin içerisine yerleşmektedir. Difüzyon olan N atomları YMK yapıdaki kafes atomlarının arasına konumlanır. Burada Fe atomları ile bağ yapmadığı XRD sonuçlarından elde edilmiştir. Sonuç olarak bu N atomları Fe-Fe atomları arasındaki uzaklığı artırmaktadır. Bunun sonucu olarak kafes yapısı genişlemektedir. Mıknatıslığı etkileyen parametreler arasında, atomlar arası mesafe büyük önem taşımaktadır (Öztürk vd.,2009). Bunun nedeni ise mıknatıslığa sebep olan 3d ve 4s yörüngelerindeki çiftlenmemiş elektronların varlığıdır. Bu yörüngelerde bulunan çiftlenmemiş elektron sayısı ne kadar çoksa malzeme o kadar kuvvetli mıknatıslık özelliği gösterir.



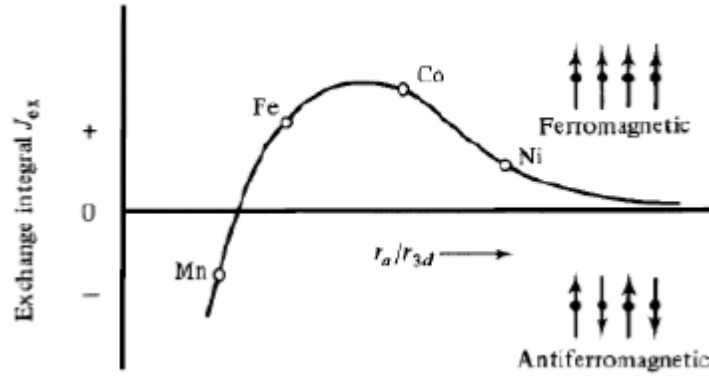
Şekil 7. Farklı sıcaklıklara bağlı olarak 316L paslanmaz çeliğin manyetiklik alınganlığı a) İşlemsiz b) 350 c) 400 d) 450°C

Atomlar arası uzaklığa bağlı olarak manyetizasyon değişimi ilk kez Bethe-Slater tarafından tanımlanmış ve değişim grafiğinin aşağıdaki gibi olduğunu göstermiştir. Yaptığımız çalışmada N atomları kafes yapısının içerisine girip atomlar arası mesafeyi artırmıştır. İşlem sıcaklığı artırıldıkça kafese difüze

olan N atomlarının sayısı da artmaktadır. Böylece atomlar arası uzaklık mıknatıslanmaya katkıda bulunacak olan optimum değere doğru yaklaşmıştır. Hazırlanan numunelerin paralel olarak yönelen manyetik momentlerinin sayısı işlem sıcaklığı ile birlikte artış göstermiştir. Şekil 7’de işlem sıcaklığı

arttıkça malzeme daha kuvvetli ferromanyetik özellik göstermektedir. Ayrıca numunelerimiz daha yüksek değerlerde manyetik doygunluğa ulaşmıştır. Buna neden olarak atomlar arası mesafenin artması

gösterilebilir (Şekil 8). İmplant ve protez olarak kullanılan malzemelerde yüksek değerlerde manyetik doygunluğa ulaşması istenilen bir durumdur.



Şekil 8. Demir ve bazı element atomları arası uzaklığın, 3d ve 4s yörüngelerinin uzaklıkla değişiminin mıknatıslanmaya etkisi (Henry vd.,1999)

4. Tartışma ve Sonuçlar

Sanayide, tıpta, savunmada vb. yerlerde kullanılan malzemelerin mekaniksel ve fiziksel özelliklerini, uygun duruma göre kullanmak için çeşitli işlemler yapılmıştır. Bu işlemlerden biri de plazma ile nitrüleme işlemidir. Bu işlem genelde demir esaslı malzemelerde tercih edilir. Son zamanlarda ise nitrüleme biyomalzemelerin üretiminde de kullanılmaya başlanmıştır. Yapılan bu çalışmada 316L paslanmaz çelik kullanılmıştır. Elde ettiğimiz numunelerin aşınma, içyapı ve manyetik özellikleri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır;

- Plazma ile nitrüleme işlemi sonrası malzeme yüzeyinde, yapısındaki faz içeriği işlem parametrelerine göre değişiklik gösteren modifiye olmuş tabaka elde edilmiştir. İşlem sıcaklığımız düşük sıcaklıklar olduğu için oluşan bu tabakadaki ağırlıklı faz s-fazıdır.
- İşlemsiz numunede görülen ostenit pikleri, düşük sıcaklıklarda plazma ile nitrürasyon sonucu azot difüzyonu etkisi ile daha düşük yansıma açılarında kaydıği ölçülmüştür.
- 316L paslanmaz çeliğinin aşınma direnci yapılan nitrüleme işlemi ile arttığı tespit edilmiştir. Nitrüleme işleminde işlem sıcaklığının artması ile aşınma direncinin de arttığı görülmüştür.
- Sürtünme katsayısı dikkate alındığında nitrüleme işleminden sonra numunenin yüzey pürüzlülüğü artmasından dolayı sürtünme katsayısı da artmıştır.
- Normal halde ferromanyetik özellik gösteren 316L paslanmaz çeliğin, nitrülenme işleminden sonra daha ideal ferromanyetik özelliğe sahip olduğu ve daha yüksek değerlerde manyetik doygunluğa ulaştığı gözlemlenmiştir.

Bu çalışmaya ek olarak detaylı korozyon çalışmaları ve 316L paslanmaz çeliğin vücut içerisinde kullanılacağı *in vitro* ve *in vivo* şartlarda biyoyumluluk testlerinin incelenmesi gerekmektedir.

Conflict of Interest

No conflict of interest was declared by the authors.

5. Kaynaklar

- Borgioli, F., Fossati, A., Galvanetto, E., Bacci, T., 2005. Glow-discharge nitriding AISI 316L austenitic stainless steel: influence of treatment temperature, Surface and Coating Technology, 200, 7, 2474-2480
- Borgioli, F., Fossati, A., Galvanetto, E., Bacci, T., Pradelli, G., 2006. Glow-discharge nitriding of AISI 316L austenitic stainless steel: influence of treatment pressure, Surface and Coating Technology, 200, 18-19, 5505-5513
- Jeong, B., Kim, M., 2001. Effects of pulse frequency and temperature of the nitride layer and surface characteristics of plasma nitrided stainless steel, 137, 249-254
- Gallagher, K. A., Willard, M. A., Zabenkin, V. N., Laughlin, D. E., McHenry, M. E., 1999. Distributed Exchange Interactions and Temperature Dependent Magnetization in Amorphous Fe88-xCoxZr7B4Cu1 Alloys. Journal of Applied Physics 85, 5130-5132
- Öztürk, O., 2009. Structural and magnetic characterization of plasma ion nitrided layer on 316L stainless steel alloy. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B. 267, 1540-1545
- Tosun, M., 2012. Micro and Nano Effects of Plasma Nitridation on Material Properties of 316L Austenitic

Stainless Steel. 20-21 Ekim 2011 tarihlerinde Makina Mühendisleri Odası tarafından İstanbul'da düzenlenen Geleceğin Teknolojileri Sempozyumu'nda sunulan bildiri.

Yazıcı, M., 2013. S-Fazının kristolografik yapısı, elektriksel, manyetik ve mekanik özelliklerinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.

Yetim, A.F., 2009. Biyomalzeme olarak kullanılan AISI316L paslanmaz çelik ve Ti6Al4V alaşımının plazma ile nitrüleme davranışı, Ti-DLC ince film kaplama ile karşılaştırılması. Doktora Tezi. Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.