



ZrN İnce Film Kaplamasının 1.2379 Soğuk İş Takım Çeliğindeki Aşınma Özelliğine Etkisinin İncelenmesi

Yaşar Sert^{1*}, Hüccet Kahramanzade¹, Tevfik Küçükömeroğlu¹

^{1*} Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Trabzon, Türkiye, (ORCID: 0000-0001-7742-0335), yasarsert@ktu.edu.tr

¹ Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Tabzon, Türkiye (ORCID: 0000-0002-9078-1933), h.kahramanzade@ktu.edu.tr

¹ Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Tabzon, Türkiye (ORCID: 0000-0002-4392-9966), tkomer@ktu.edu.tr

(1st International Conference on Engineering and Applied Natural Sciences ICEANS 2022, May 10-13, 2022)

(DOI: 10.31590/ejosat.1091504)

ATIF/REFERENCE: Sert, Y., Kahramanzade, Hüccet. & Küçükömeroğlu, T. (2022). ZrN İnce Film Kaplamasının 1.2379 Soğuk İş Takım Çeliğindeki Aşınma Özelliğine Etkisinin İncelenmesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (36), 1-5.

Öz

Bu çalışmada katodik ark buharlaştırma yöntemi kullanılarak üretilen ZrN kaplamaların morfolojik, yapısal, sertlik ve sürtünme-aşınma özellikleri incelenmiştir. Kaplama işlemi için endüstride soğuk iş takım çeliği olarak sıklıkla kullanılan 1.2379 (AISI D2), taban malzeme olarak seçilmiştir. Üretilen ZrN kaplamasının yüzey özellikleri optik mikroskop ile tespit edilmiştir. Kaplamada oluşan fazlar ve yönelmeler X-Işını difraksiyonu kullanılarak analiz edilmiştir. Hem taban hem de kaplanmış malzemenin sertlikleri Vickers tipi mikrosertlik cihazı kullanılarak belirlenmiştir. Aşınma deneyleri ise bilye-disk tipi aşınma test cihazında 2 N sabit yük altında 2500 ve 5000 çevrimlerde Al₂O₃ aşındırıcı yüzey kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Oluşan aşınma oranları, aşınma izlerinin optik profilometre incelemeleri neticesinde belirlenmiştir. Aşınma mekanizmaları ise, oluşan aşınma izlerinin SEM'den elde edilen görüntüleri vasıtasıyla karakterize edilmiştir. ZrN kaplamada, NaCl tipi kübik kristal kafese sahip ZrN (111) fazının baskın yoğunlukta olduğu görülmüştür. ZrN kaplamasının sertliği yaklaşık 1882 HV_{0,01} değerinde olduğu ve taban malzemenin sertliği 448 HV_{0,01} değerinde olduğu görülmüştür. Bu durumda ZrN kaplanmış malzemenin sertlik değerinin taban malzemeye nazaran yaklaşık %300 daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Her iki çevrimde ZrN kaplamanın aşınma performansı taban malzemeye göre daha yüksek olduğu görülmüştür. İşlemsiz malzemede baskın aşınma mekanizması plastik deformasyon ve adeziv aşınma iken, ZrN kaplanmış malzemede pullanma kaynaklı soyulmaların baskın mekanizma olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Katodik ark buharlaştırma, 1.2379, ZrN, Sertlik, Aşınma.

Investigation of the Effect of ZrN Thin Film Coating on the Wear Properties of 1.2379 Cold Work Tool Steel

Abstract

In this study, the morphological, structural, hardness and friction-wear properties of ZrN coatings produced by the cathodic arc evaporation method were investigated. 1.2379 (AISI D2), which is frequently used as a cold work tool steel in the industry, was chosen as the substrate material for coating process. The surface properties of the ZrN coating were determined using optical microscope. The phases and orientations of the coating were analyzed by X-Ray diffraction. The hardness of both the substrate and the coated material was determined using a Vickers type microhardness tester. Wear tests were carried out using Al₂O₃ ceramic abrader at 2500 and 5000 cycles under 2 N constant load in ball-disc type tribometer. The wear rates of materials were determined as a result of optical profilometer examinations of the wear tracks. The wear mechanisms were characterized by SEM images of the wear tracks. In the ZrN coating, it was observed that the ZrN (111) phase with a NaCl type cubic crystal lattice was dominant. It was observed that the hardness value of the ZrN coating was approximately 1882 HV_{0,01} and the hardness value of the substrate material was 448 HV_{0,01}. In this case, it has been determined that the hardness value of the ZrN coated material is approximately 300% higher than the substrate material. It was observed that the wear performance of ZrN coatings was higher than the untreated material in both cycles. While the dominant wear mechanism in the untreated material was plastic deformation and adhesive wear, the flaking-induced peeling was the dominant wear mechanism in the ZrN coating.

Keywords: Cathodic arc evaporation, 1.2379, ZrN, Hardness, Wear.

* Sorumlu Yazar: yasarsert@ktu.edu.tr

1. Giriş

Endüstriyel uygulamalarda kullanılan kesici takımlar, zimbalar, derin sıvama ve soğuk ekstrüzyon kalıpları gibi mekanik bileşenlerin iş parçası ile temas eden yüzeyleri, sürtünme nedeniyle süreç içerisinde aşınmaya maruz kalmaktadır [1], [2]. Aşınma mekanizmalarına ve aşınmayı azaltmak amacıyla alınacak önlemlere ayrıntılı bir bakış açısı, temas halindeki parçaların servis ömrünü ve çıktı kalitesini artıracak, bunun yanında bakım maliyetlerini ise azaltacaktır. Literatüre bakıldığında yüzey işlemleri malzemelerin aşınma performanslarının geliştirilmesi amacıyla uygulanan en başarılı yöntem olarak dikkat çekmektedir [3], [4]. Söz konusu yüzey işlemlerine örnek olarak nitrürleme, borlama ve özellikle vakum teknolojisi ile uygulanan yüzey kaplamaları göze çarpmaktadır. Literatürde bu yüzey işlemleriyle ilgili birçok çalışma olmasına rağmen, yıllar içerisinde vakum teknolojilerindeki gelişmelerle bağlantılı olarak Fiziksel Buhar Biriktirme (FBB) yöntemi ile oluşturulan yüzey kaplamaları aşınmaya karşı sergilediği etkin koruma sayesinde endüstriyel uygulamalardaki cazibesini artırmıştır [5] - [7]. FBB yüzey kaplamaları arasında geçiş metal hedefleri kullanılarak oluşturulan nitrür esaslı kaplamalar oldukça popülerdir. Literatürdeki ilgili çalışmalara bakıldığında, düşük sürtünme katsayısı, yüksek plastik deformasyon direnci, başarılı kimyasal stabilite ve altını andıran etkileyici rengi nedeniyle TiN ikili geçiş metal kaplamaları endüstride çeşitli alanlarda kullanılmaya başlanarak öncü olmuştur [8] - [10]. TiN kaplamalı takımların süreç içerisindeki devam eden başarısıyla birlikte, artan üretim ihtiyacı ve piyasa rekabeti ve günden güne gelişen vakum teknolojisi, TiN kaplamalardan daha yüksek sürtünme ve aşınmaya karşı koruyuculuk verimliliği sunan ikinci nesil FBB kaplamaların (CrN, ZrN, NbN) ticari olarak geliştirilmesine yol açmıştır [11]. Bu kaplamalar arasında ZrN, TiN kaplamalara kıyasla daha yüksek sertlik (%30 daha sert), düşük sürtünme katsayısı ve yüksek aşınma performansı sayesinde çeşitli uygulamalar için ilgiyi üzerine çekmiştir. Bununla birlikte literatür çalışmalarına bakıldığında, ZrN kaplamasının özellikle kesici takım uygulamalarındaki performansının araştırıldığı ve etkileyici sonuçlar alındığı raporlanmıştır. Jianxin ve çalışma arkadaşlarının gerçekleştirdiği bir çalışmada, YG6 sementit karbür kesici takım malzemesi üzerine kaplanan ZrN tabakasının aşınma performansı yüksek hızlı blok bilezik (block on ring) aşınma test cihazı kullanılarak belirlenmiştir [12]. Çalışma sonucunda ZrN kaplı takımların, büyük sertlik artışı ve yüksek aşınma direnci ile bağlantılı olan YG6 kaplamasız takımlara kıyasla çok daha yüksek kesme performansı gösterdiği rapor edilmiştir. Bu temel faktörler, kaplamalı takımlar için takım yan aşınma oranını engellemekte ve işleme sırasında takım aşınmasının azaltılmasına katkıda bulunmaktadır. Bununla birlikte ilgili çalışmada, ZrN kaplamalarda taban malzemeye yapılaşma kritik yük değerinin ise 70 N olduğu tespit edilmiştir. Bir diğer çalışmada, yine kesici takım malzemesi (YT15 sementit karbür) üzerine kaplanan ZrN kaplamaların aşınma performansı taban malzemeyle karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Elde edilen bulgulara bakıldığında, ZrN kaplı takımların YT15 taban malzemesine göre daha yüksek sıyrılma ve yan aşınma dayanımı sergilediği belirlenmiştir [13]. ZrN kaplamalarda küçük oranda meydana gelen adezif aşınmanın eşlik ettiği abrasif aşınmaların baskın aşınma mekanizması olduğu vurgulanmıştır. Yukarıdaki çalışmalardan da görüleceği üzere ZrN kaplamaların uygulama alanı olarak kesici takımlar üzerinde yoğunlaştığı görülmektedir. Endüstrideki diğer uygulama alanlarında (özellikle soğuk dövme

veya ekstrüzyon) söz konusu kaplamanın uygulanabilirliği üzerinde durulması gereken, literatürdeki bir eksiklik olarak tespit edilmiştir. Bu eksikliği sistematik bir çalışmayla giderebilmek için endüstride soğuk iş takım çeliği olarak sıklıkla kullanılan 1.2379 (AISI D2) çelik malzemeler, katodik ark FBB yöntemi kullanılarak ZrN tabakası ile kaplanmıştır. Oluşturulan kaplamanın, morfolojik ve yapısal özellikleri için taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve X-ışını difraktometresi (XRD) kullanılmıştır. Elde edilen kaplamanın sertlik değeri Vickers tipi mikrosertlik test cihazı kullanılarak belirlenmiştir. Son olarak malzemelerin aşınma performansları Al₂O₃ seramik karşı yüzeyler kullanılarak bilye disk esaslı aşınma test cihazı ile belirlenmiştir. Elde edilen aşınma izleri ise SEM ile karakterize edilerek oluşan aşınma mekanizmaları detaylandırılmıştır.

2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada, 30 mm çapındaki AISI D2 (C ~ 1,5 - Mn ~ 0,6 - Si ~ 0,6 - Co ~ 1,00 - Cr ~ 12,00 Mo ~ 1,00 - V ~ 1,1) çelik malzemeleri katodik ark buharlaştırma kaplama işlemi için taban malzeme olarak kullanılmıştır. Kaplama işlemi öncesinde taban malzeme yüzeyleri 400, 800, 1500, 2000 numara SiC zımparalar kullanılarak yüzeyindeki talaşlı imalattan kaynaklı kesme izleri ve istenmeyen kirlilikler giderilmiştir. Sonrasında malzemeler 1 µm Al₂O₃ solüsyonu kullanılarak parlatma işlemine tabi tutulmuştur. Metalografik işlemlerden sonra taban malzemeler etanol ile temizlenip kurularak kaplama işlemine hazır hale getirilmiştir. ZrN kaplama tabakası, Şekil 1'de görülen ve endüstriyel olarak kullanılan Platit π411 Plus (İsviçre) katodik ark buharlaştırma düzeneği kullanılarak, endüstriyel olarak uygulanan kaplama parametrelerine müdahale edilmeden kaplanmıştır.



Şekil 1. Katodik ark buharlaştırma kaplama düzeneği

ZrN kaplamasının yapısal, topografik ve kristalografik analizleri sırasıyla optik mikroskop (Zeiss, Almanya), optik profilometre (NANOFOCUS, µscan Custom, Almanya) ve XRD (Panalytical X'Pert3, Birleşik Krallık) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca Vickers tipi Struers Duramin 3 (Danimarka) marka mikrosertlik test cihazında 10 gr yük ve 10 saniye batma süresi uygulanarak malzemelerin sertlik değerleri belirlenmiştir. Malzemelerin aşınma performansları DUCOM (TR-2001, Hindistan) marka bilye disk tipi aşınma test düzeneği kullanılarak belirlenmiştir. Aşınma testlerinde, karşı yüzey olarak ise 6 mm çapında Al₂O₃ seramik bilye kullanılmıştır. Bununla birlikte, aşınma testleri 2 N sabit yük altında 2500 ve 5000 çevrim olmak üzere 2 farklı çevrim sayısında gerçekleştirilmiştir. Aşınma testleri sonucunda, malzemelerin yüzeylerinde meydana gelen aşınma yollarının, optik profilometre kullanılarak incelenmesiyle

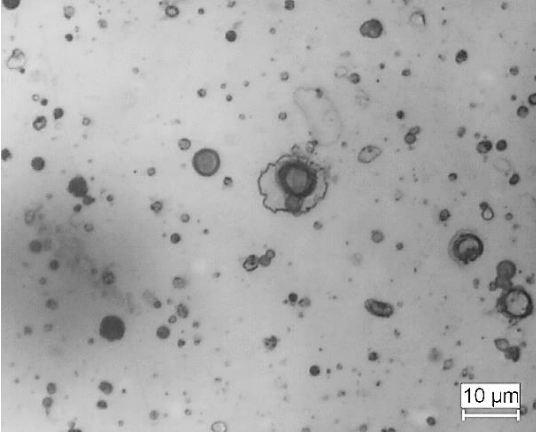
birlikte malzemelerde oluşan aşınma hacimleri tespit edilmiştir. Elde edilen aşınma hacimleri ve aşınma test parametreleri dikkate alınarak, aşağıda verilen Archard denklemi vasıtasıyla aşınma oranları belirlenmiştir.

$$\text{Archard Denklemi: } W = V / (P \cdot d) \quad (1)$$

Bu denklemde, W: Aşınma oranı (mm³/N.m), V: Aşınma hacmi (mm³), P: uygulanan yük (N) ve d: kayma mesafesi (m) olarak ifade edilmektedir. Ayrıca malzemelerde oluşan aşınma yollarının SEM incelemeleriyle birlikte, meydana gelen aşınma mekanizmaları karakterize edilmiştir.

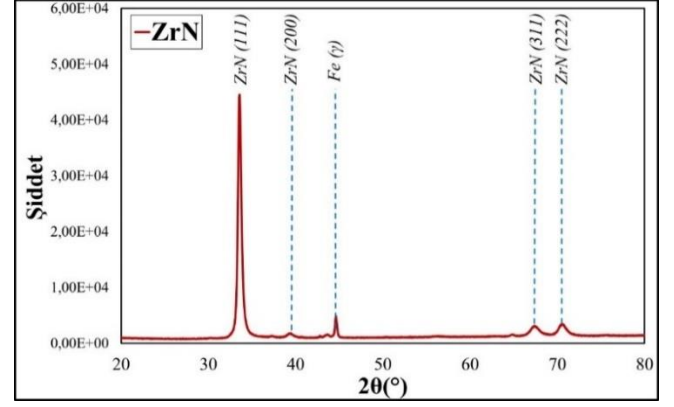
3. Araştırma Sonuçları ve Tartışma

AISI D2 çelik malzemeleri yüzeyine kaplanan ZrN kaplamasının yüzey morfolojisi Şekil 2’de görülmektedir. Şekilde görüldüğü üzere, katot noktalarından yayılan mikro damlacıklar olarak adlandırılan erimiş Zr kürecikleri, kaplama işlemi sırasında yüzeyde oluşmaktadır. Literatüre göre söz konusu mikro damlacıkların oluşumu, kaplama işlemi sırasında ortamdaki azot ile yeterince reaksiyona giremeyen Zr hedef malzemesinin buharlaşması ve sonrasında yüzeye birikmesinden kaynaklanmaktadır [14]. Kaplama tabakasının taban malzeme yüzeyine büyüme mekanizması göz önüne alındığında, mikro damlacıklar altlık ile çarpışıp yüzeye tutunduklarında, gölgeleme adı verilen iyon akışının etkisiyle damlacıkların altında delikler veya çukurlar oluşmuştur. Kaplama yüzeyinde oluşan bu yapıların, katodik ark buharlaştırma tekniğinin en önemli kusurlarından biri olduğu literatürce ortaya konulmuştur [15].



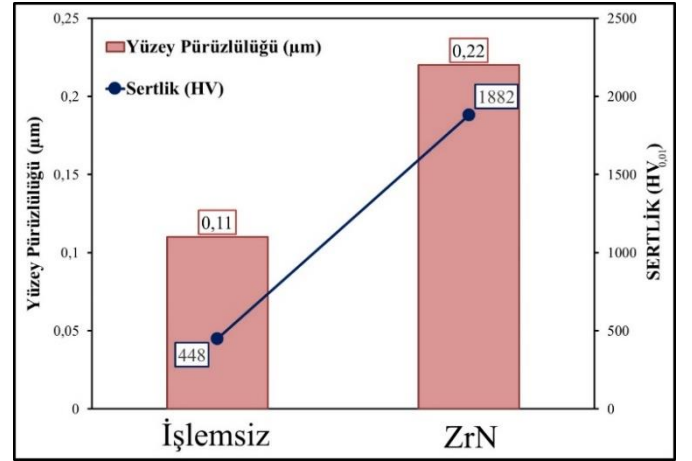
Şekil 2. ZrN kaplamasının yüzey görünümü

Üretilen ZrN kaplama tabakasının XRD analizi sonuçları Şekil 3’te görülmektedir. Şekilde, ZrN kaplamada, 33° açısında elde edilen NaCl tipi kübik kristal kafese sahip ZrN (111) fazının baskın yoğunlukta olduğu görülmektedir [16]. Yüksek yoğunluklu (111) kırınımının varlığı, ICDD 35-0753 standardına denk gelmektedir (Ref 14). (111) oryantasyonunda görülen fazın yanı sıra 40° açısında (200), 67° açısında (311) ve 71° açısında (222) oryantasyonunda ZrN fazları tespit edilmiştir. Aynı ZrN fazındaki (111) oryantasyon ile diğer oryantasyonlar arasındaki şiddet farkı, atom düzlemindeki paketlenen atom yoğunluğundan kaynaklandığı vurgulandığı literatürce bilinmektedir [14]. Bu çalışmada, ZrN kaplamasında, (111) oryantasyonu (200), (311) ve (222) oryantasyonlara göre daha yoğun atom konumuna sahip olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, taban malzeme etkisiyle oluşan Fe fazı ise 45° açısında görülmüştür.



Şekil 3. ZrN kaplama tabakasının XRD grafiği

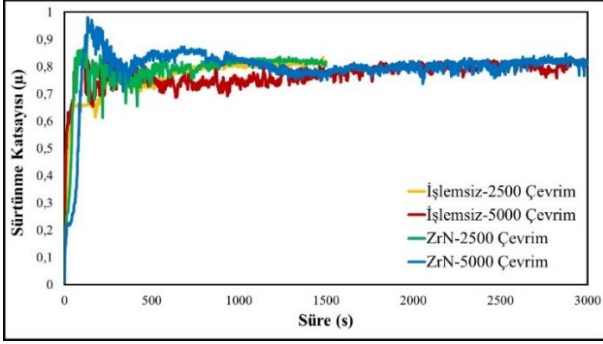
AISI D2 taban malzemesi ve ZrN kaplamasının yüzey pürüzlülük ve sertlik değerleri Şekil 4’te görülmektedir. Şekilde görüldüğü üzere kaplama işlemi öncesinde taban malzemenin yüzey pürüzlülük değeri 0,11 µm iken, kaplama işlemi sonrasında bu değer 0,22 µm seviyelerine yükselmiştir. Katodik ark buharlaştırma yöntemi ile geçiş metal nitürlerinden üretilen kaplama tabakalarının tipik bir özelliği olan mikro partikül (damlacık) ve çukurların oluşması nedeniyle yüzey pürüzlülük değerinde gözle görülür bir artış meydana gelmiştir. Malzemelerin mikrosertlik değerlerine bakıldığında, ZrN kaplama tabakası sayesinde sertliğin yaklaşık %300 seviyelerinde artış sergilediği belirlenmiştir.



Şekil 4. Taban malzeme ve ZrN kaplamasından elde edilen yüzey pürüzlülüğü ve sertlik değerleri

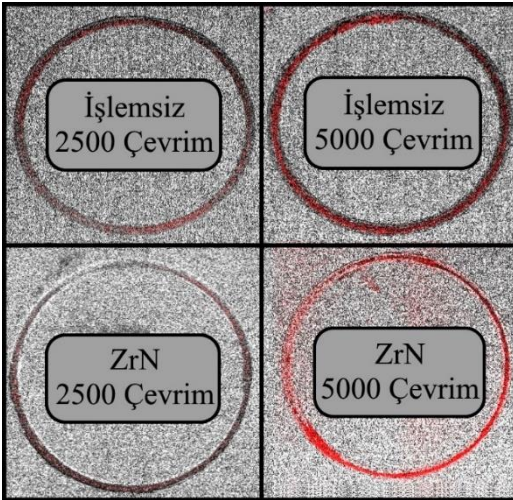
Malzemelerin aşınma testleri sonucunda elde edilen sürtünme katsayısı grafikleri Şekil 5’te verilmiştir. İşlemsiz ve ZrN kaplamasının aşınma deneylerinin rodaj bölümü olarak adlandırılan sürtünen yüzeylerin birbirine alışma süresine (250. saniyesine) kadar sürtünme katsayısında artış meydana geldiği, yaklaşık 500. saniyeden sonra ise eğrilerin stabil davranışa geçtiği görülmektedir. Bununla birlikte, kaplanmış malzemenin rodaj bölümünde sürtünme katsayısı değerlerinin işlemsiz malzemeye nazaran daha yüksek olduğu görülmektedir. Bunun sebebi ise kaplanmış malzemenin yüzeyindeki mikro damlacıklar ve çukurların varlığı sebebiyle yüzey pürüzlülük değerinin daha yüksek olmasıdır. Deneyin ilk bölümlerinde karşı yüzeyin, kaplamanın sert karakterdeki pürüzlerini ezmesi sonucunda sürtünme katsayısı değeri işlemsiz malzemeye kıyasla daha yüksek olduğu görülmektedir. Ayrıca grafik dalgalanmaları stabil

bölgeye ulaştığında, işlemsiz ve ZrN kaplamasının 2500 ve 5000 çevrim sayılarında sürtünme katsayısı değerlerinin yakın olduğu görülmektedir.

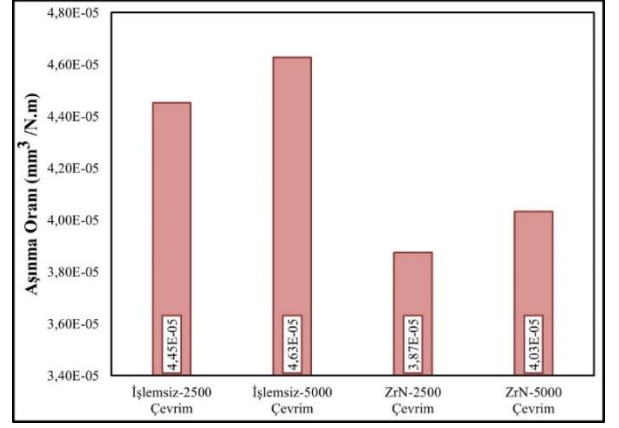


Şekil 5. Numunelerden elde edilen sürtünme katsayısı grafiği

Aşınma testleri sonucunda malzeme yüzeylerinde meydana gelen aşınma izlerinin optik profilometre görselleri Şekil 6'da verilmiştir. İlgili görselde, ZrN kaplanmış malzemesinin 2500 ve 5000 çevrimdeki aşınma izlerinin derinlik ve genişlik farkları net bir şekilde görülmektedir. İşlemsiz 1.2379 çeliğinin, ZrN kaplanmış malzemeye kıyasla daha fazla aşınmaya maruz kaldığı görülmektedir. Ayrıca, işlemsiz malzemede meydana gelen homojen ve daha yüksek aşınmanın varlığı, sürtünme katsayısı grafiğindeki farklılıkları ve dalgalanmaları açıklamaktadır. Şekil 6'da optik profilometre görüntüleri kullanılarak oluşan aşınma oranları hesaplamalarından elde edilen grafik Şekil 7'de verilmiştir. ZrN kaplanmış malzemenin her iki çevrim sayısında işlemsiz malzemeye kıyasla daha yüksek aşınma dayanımı sergilediği görülmektedir. Bunun sebebi ise ZrN kaplaması sayesinde işlemsiz malzemenin plastik deformasyona karşı dayanımının artırılmasına dayandırılmaktadır. Sertliği yüksek olan mekanik parçalarda aşınma performanslarının yüksek olması, literatüre Archard'ın kazandırdığı aşınma formülüne uymaktadır. Ayrıca 5000 çevrimde meydana gelen aşınma oranı değerleri ise 2500 çevrime göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

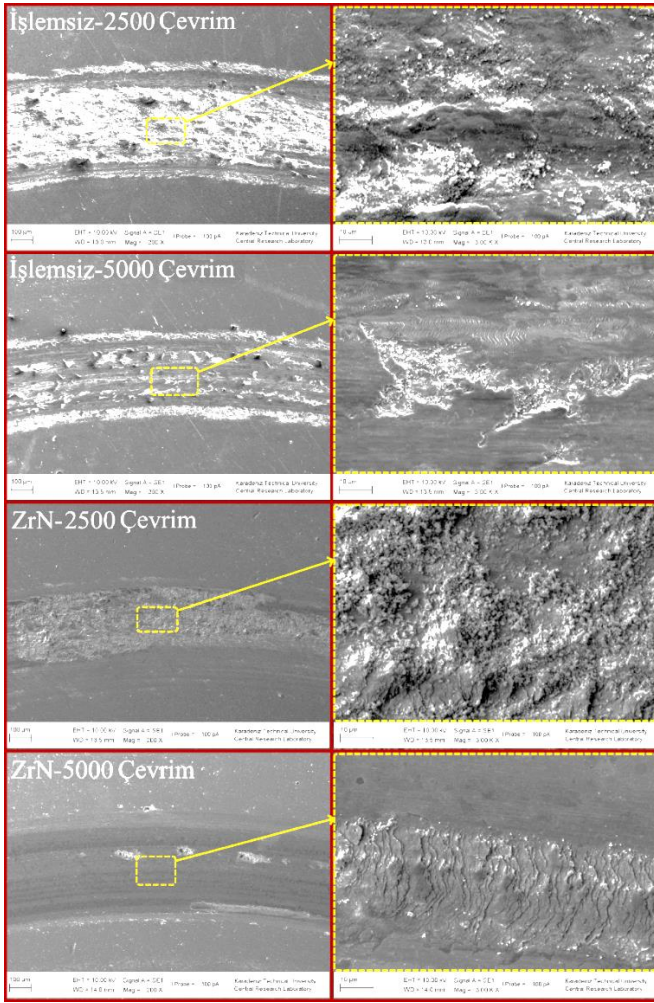


Şekil 6. Numunelerin aşınma izlerinin optik profilometre görüntüleri



Şekil 7. Numunelerden elde edilen aşınma oranı değerleri

Malzemelerin aşınma testleri sonucunda elde edilen aşınma izlerinin SEM görüntüleri Şekil 8'de görülmektedir. İşlemsiz malzemenin iki çevrime gerçekleştirilen aşınma deneylerinden elde edilen aşınma izi görüntüleri incelendiğinde, baskın mekanizmanın plastik deformasyon olduğu görülmektedir. Bunun yanı sıra, detay görüntülerine bakıldığında adeziv bağlanmaların olduğu ve 5000 çevrimde ise mikro kaynak bağlantılarının koştugu ve sürtünen yüzeyler arasında sıkışarak yüzeyde plastik deformasyon haricinde abrazif çiziklerin de meydana geldiği görülmektedir. İşlemsiz malzeme yüzeyinde oluşan aşınma izleri kaplanmış malzeme yüzeyinde oluşan aşınma izleriyle kıyaslandığında, işlemsiz malzemede plastik deformasyon dayanımının daha düşük olması sebebiyle düzgünlüklerin olduğu gözlemlenmiştir. ZrN kaplanmış malzemede ise yüksek sertlik nedeniyle aşınma izinin işlemsiz malzemeye göre daha pürüzsüz ve düzgün olduğu görülmektedir. Kaplanmış malzeme yüzeyinde aşınma iz genişliğinin ise daha düşük olduğu tespit edilmiştir. 2500 çevrimde gerçekleştirilen aşınma testinde ZrN kaplanmış malzeme yüzeyinde sert pürüzlerin ezildiği ve sürtünme ısısının da etkisiyle oksijenle reaksiyon sonucunda, ZrO₂ parçacıklarının aşınma izi içerisine dağıldığı görülmektedir. 5000 çevrimde gerçekleştirilen aşınma testinde ise oksit parçacıkların aşınma izi kenarlarına taşındığı temas eden yüzeyler arasına sıkışan parçacıkların ise ince abrazif çizgilere neden olduğu görülmektedir. Detay görüntüler incelendiğinde, mikro kırılmaların neden olduğu pullanma sebepli soyulmaların olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 8. Numunelerin aşınma izlerinin SEM görüntüleri

4. Sonuç

Bu çalışmada, katodik ark buharlaştırma yöntemi kullanılarak 1.2379 soğuk iş takım çeliği yüzeyine ZrN ince film tabakası kaplanmıştır. Kaplamanın yapısal, sertlik ve aşınma özelliklerinin incelemeleri neticesinde elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- ZrN kaplamanın yüzeyinde katodik ark PVD yönteminin karakteristik özelliği olan mikro damlacıklar (droplet) ve çukurlar gözlenmiştir.
- ZrN kaplamada, NaCl tipi kübik kristal kafese sahip ZrN (111) fazının baskın yoğunlukta olduğu tespit edilmiştir.
- Kaplanmış malzemenin yüzey pürüzlülüğü, yüzeylerindeki damlacıklar ve çukurlardan dolayı işlemsiz malzemeye nazaran daha yüksektir.
- Mikrosertlik değeri açısından ZrN kaplanmış malzemenin çelik malzemesine nazaran yaklaşık %300 oranında artış gösterdiği tespit edilmiştir.
- 2500 ve 5000 çevrim sayılarında gerçekleştirilen aşınma deneylerinde, ZrN kaplanmış malzemesinin aşınma dayanımı işlemsiz malzemedenden daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.
- İşlemsiz malzemede baskın aşınma mekanizması plastik deformasyon iken, ZrN kaplamalarda kısmi abrazif çiziklerle birlikte pullanma kaynaklı soyulmalar gözlenmiştir.

Kaynakça

- [1] Javari, A., Dehgani, K., Bahaaddini, K., Hataie, A. B., Experimental comparison of abrasive and erosive wear *e-ISSN: 2148-2683*

characteristics of four wear-resistant steels, *Wear*. 416-417: 14-26, (2018).

- [2] Yang, Y., Huang, L., Shi, Y., Adhesion suppresses atomic wear in single-asperity sliding, *Wear*. 352-353: 31-41, (2016).
- [3] Hacısalihoğlu, I., Kaya, G., Ergüder, O. T., Mandev, E., Manay, E., Yıldız, F. Tribological and thermal properties of plasma nitrided Ti45Nb alloy, *Surf. and Inter.* 22: 100893, (2021).
- [4] Fernandez-Valdes, D., Meneses-Amador, A., Lopez-Lievano, A., Ocampo-Ramirez, A., Sliding wear analysis in borided AISI 316L steels, *Mater. Lett.* 285: 129138, (2021).
- [5] Azim, S., Gangopadhyay, S., Mahapatra, S. S., Mittal, R. K., Singh, R. K., Role of PVD coating on wear and surface integrity during environment-friendly micro-drilling of Ni-based superalloy, *J. Cleaner Prod.* 272: 122741, (2020).
- [6] Chowdhury, M. S. I., Bose, B., Yamamoto, K., Shuster, L. S., Paiva, J., Fox-Rabinovich, G. S., Veldhuis, S. C., Wear performance investigation of PVD coated and uncoated carbide tools during high-speed machining of TiAl6V4 aerospace alloy, *Wear*. 446-447: 203168, (2020).
- [7] Sert, Y., Küçükömeroğlu, T., Ghahramanzadeh Asl, H. The Effect of Al and Ti Transition Metals on the Wear Resistance of Ceramic Based CrN Coatings; Investigation under Ambient Air and Vacuum Conditions, *Proc. Inst. Mech. Eng., Part L: J. Mater: Design and App.* 236: 455-472, (2022).
- [8] Movassagh-Alanagh, F., Mahdavi, M., Improving wear and corrosion resistance of AISI 304 stainless steel by a multilayered nanocomposite Ti/TiN/TiSiN coating, *Surf. and Inter.* 18: 100428, (2020).
- [9] Chou, W.-J., Yu, G.-P., Huang, J.-H., Corrosion behavior of TiN-coated 304 stainless steel, *Corr. Sci.* 43: 2023-2035, (2001).
- [10] Kumar, S., Maity, S. R., Patnaik, L., Effect of heat treatment and TiN coating on AISI O1 cold work tool steel, *Mater. Today: Proc.* 26: 685-688, (2020).
- [11] Gonzalez-Carmona, J., Trivino, J. D., Gomez-Ovalle, A., Ortega, C., Alvarado-Orozco, J. M., Sanchez-Sthepa, H., Avila, A., Wear mechanisms identification using Kelvin probe force microscopy in TiN, ZrN and TiN/ZrN hard ceramic multilayers coatings, *Ceram. Int.* 46: 24592-24604, (2020).
- [12] Jianxin, D., Jianhua, L., Jinlong, Z., Wenlong, S., Ming, N., Friction and wear behaviors of the PVD ZrN coated carbide in sliding wear tests and in machining processes, *Wear*. 264: 298-307, (2008).
- [13] Jianxin, D., Jianhua, L., Jinlong, Z., Wenlong, S., Wear mechanisms of PVD ZrN coated tools in machining, *Int. J. of Ref. Metals and Hard Mater.* 264: 164-172, (2008).
- [14] Kuznetsova, T., Lapitskaya, V., Khabarava, A., Chiznik, S., Warcholinski, B., Gilewicz, A., The influence of nitrogen on the morphology of ZrN coatings deposited by magnetron sputtering, *Appl. Surf. Sci.* 522: 146508, (2020).
- [15] Feng, Y.-P., Zhang, L., Ke, R.-X., Wan, Q.-L., Wang, Z., Lu, Z.-H., Thermal stability and oxidation behavior of AlTiN, AlCrN and AlCrSiWN coatings, *Int. J. Ref. Metals Hard Mater.* 43: 241-249, (2014).
- [16] Maksakova, O. V., Simoes, S., Pogrebnyak, A. D., Bondar, O. V., Kravchenko, O., Koltunowicz, T. N., Shaimardanov, Zh. K., Multilayered ZrN/CrN coatings with enhanced thermal and mechanical properties, *J. Alloys and Comp.* vol. 776: 679-690, (2019).