



Ni-B-CeO₂ Kompozit Akımsız Kaplamanın Mekanik ve Tribolojik Özelliklerine Isıl İşlem ve Yükün Etkisi

Deniz Gültekin^{1*}, Erhan Duru², Hatem Akbulut³

^{1*} Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Sakarya, Türkiye (ORCID: 0000-0002-6941-7539), dkurt@sakarya.edu.tr

² Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Sakarya, Türkiye (ORCID: 0000-0002-6205-6566), erhanduru@sakarya.edu.tr

³ Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Sakarya, Türkiye (ORCID: 0000-0002-6299-136x), akbulut@sakarya.edu.tr

(2nd International Conference on Applied Engineering and Natural Sciences ICAENS 2022, March 10-13, 2022)

(DOI: 10.31590/ejosat.1083546)

ATIF/REFERENCE: Gültekin, D., Duru, E. & Akbulut, H. (2022). Ni-B-CeO₂ Kompozit Akımsız Kaplamanın Mekanik ve Tribolojik Özelliklerine Isıl İşlem ve Yükün Etkisi . *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (34), 573-578.

Öz

Seryum oksit (CeO₂) partikül takviyeli Ni-B kompozit kaplama CeO₂ partikülleri içeren bir Ni-B kaplama banyosundan akımsız kaplama yöntemi ile üretilmiştir. Akımsız kaplama banyosunda nikel kaynağı olarak nikel sülfat heksahidrat ((NiSO₄.6H₂O)), indirgeyici ajan olarak dimetilamin boran ((CH₃)₂NHBH₃), stabilizatör olarak tiyüre (CH₄N₂S) ve kompleks oluşturucu olarak da sodyum asetat (CH₃COONa) kullanılmıştır. Çalışmanın temel amacı, CeO₂ partikül takviyeli kaplamanın yapısal karakterizasyonu ve aşınma deney şartlarının tribolojik özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmaktır. Kaplamanın yüzey morfolojisi taramalı elektron mikroskobu (SEM) cihazı, faz yapısı analizi ise X-ışını kırınımı (XRD) cihazı ile yapılmıştır. Nanosertlik ölçümleri nanoindenter cihazı ve aşınma testleri disk üzerinde bilye test cihazı ile gerçekleştirilmiştir. 3D profilometre kullanılarak aşınmış yüzey analizleri yapılmıştır. Deneysel sonuçlar, kaplamanın sertliğinin ısı işlem ile arttığını, bununla birlikte farklı yüklere bağlı olarak tribolojik davranışının değişim gösterdiği anlaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Akımsız kaplama, Ni-B kaplama, Kompozit, Aşınma, Triboloji.

Effect of Heat Treatment and Applied Load on Mechanical and Tribological Properties of Ni-B-CeO₂ Composite Electroless Coating

Abstract

Cerium oxide (CeO₂) particle reinforced Ni-B composite coating was produced by electroless coating method from a Ni-B coating bath containing CeO₂ particles. In the electroless plating bath, nickel sulfate hexahydrate ((NiSO₄.6H₂O)) was used as nickel source, dimethylamine borane ((CH₃)₂NHBH₃) as reducing agent, thiourea (CH₄N₂S) as stabilizer and sodium acetate (CH₃COONa) as complexing agent. The aim of the study is to investigate the structural characterization of CeO₂ particle reinforced coating and the effects of wear test conditions on its tribological properties. The surface morphology of the coating was performed by scanning electron microscope (SEM), and phase structure analysis was performed by X-ray diffraction (XRD). Nanohardness measurements were carried out with a nanoindenter device, and wear tests were done with a ball-on-disk test device. Worn surface analyzes were made using a 3D profilometer. Experimental results showed that the hardness of the coating increased with heat treatment; however, its tribological behavior changed depending on different loads.

Keywords: Electroless coating, Ni-B coating, Composite, Wear, Tribology.

1. Giriş

Akımsız kaplamalar ilk olarak Brenner ve Riddell'in çalışmalarından ortaya çıkmış ve on yıllar boyunca çok daha fazla geliştirme fırsatı bulmuştur (V. Å. Vitry & Delaunois, 2015). Akımsız nikel kaplama yöntemi yüksek sertlik, aşınma ve korozyon direncine sahip kaplamalar üretmek için uygun bir tekniktir ve süneklik, yağlama, lehimleme ve elektriksel özellikler gibi üstün özellikleri nedeniyle mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanım alanı bulmuştur (Krishnaveni et al., 2005; Sudagar et al., 2013a). Akımsız Ni-B kaplamalar ise üstün tribolojik özellikleri ve sertliği ile sert krom kaplamalara umut verici alternatiflerdir (Barati & Hadavi, 2020). Ni-B kaplamalar mekanik özellikleri ve kimyasal kararlılığı saf nikel kaplamalardan daha iyidir. Malzemelerin sertliği ve aşınma direnci birbirleriyle önemli ölçüde ilişkilidir. Saf nikel kaplamaların sertliği 450 HV iken Ni-B kaplamaların sertliği özellikle ısıtılardan sonra yaklaşık 1100 HV'ye ulaşabilmektedir.

Kullanılan kimyasallara göre kaplamaların mekanik özelliklerinde bazı farklılıklar olsa da akımsız Ni-B kaplamaların yüksek sertlik, yüksek aşınma direnci ve yüksek korozyon direnci gibi özellikleri iyileştirmek için parçacık takviyeleri kullanılarak güçlendirilmiş nikel kompozit kaplamalar geliştirilmektedir (Qu et al., 2006; V. Å. Vitry & Delaunois, 2015). Bu takviye parçacıklı kaplamada bir bariyer görevi görür ve Ni-B matrisinde plastik bir deformasyona neden olarak kaplama sertliğinin artmasına neden olur (Barati & Hadavi, 2020). Georgiza ve diğerleri (Georgiza et al., 2017), nikel-bor akımsız kaplamaların mikrosertliğini iyileştirmek için SiC takviye kullanmış, kaplamanın artan sertliğinin, SiC partiküllerinin ilave edilmesinden dolayı morfoloji değişikliğine sebep olmasından dolayı olduğunu bildirmişlerdir. Ayrıca Eraslan ve diğerleri (Eraslan & Ürgen, 2015), TiO₂ nanopartiküllerinin akımsız kaplamanın sertliği üzerindeki etkilerini araştırdıkları çalışmalarında tane modifikasyonu nedeniyle kaplamanın sertliğinin takviye parçacıklara bağlı olarak arttığını bulmuşlardır.

Takviye partikülleri arasında en çekici nadir toprak oksitlerinden biri olan CeO₂, metalik kaplamaları güçlendirmek, sertlik, aşınma direnci ve korozyon direnci özelliklerini geliştirmek için kullanılmaktadır. CeO₂ partikül takviyesi kullanan çoğu araştırmacının, akımsız kaplama yerine akımlı kaplama (elektrodepozisyon) yöntemini kullandıkları görülmüştür (Radu et al., 2015; Shakoore et al., 2016). Qu ve diğerleri (Qu et al., 2006), elektrodepozisyon ile ürettikleri Ni-CeO₂ kompozitlerinin daha yüksek mikrosertlik, daha iyi aşınma direnci, gelişmiş korozyon ve yüksek sıcaklıkta oksidasyon direnci sağladığını bildirmişlerdir.

Ni-B akımsız kaplamaların yapısal özelliklerini etkileyen bir diğer önemli parametre kaplamaya uygulanan ısıtıl işlemidir (Delaunois et al., 2000). 250-400 °C'de uygulanan ısıtıl işlem prosesi, yarı kararlı nikel boridlerin oluşumu ve ardından kristalleşmesi nedeniyle Ni-B kaplamaların sertliğini önemli ölçüde artırır (Mindivan et al., 2017; Sudagar et al., 2013a). Maksimum sertlik genellikle 400 °C'de yapılan ısıtıl işlemden sonra elde edilir. Bununla birlikte 400 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda Ni₃B partikül kümelenmesi nedeniyle sertlikte azalma gözlenir (Delaunois & Lienard, 2002; Mindivan et al., 2017).

Bu çalışmada, akımsız kaplama banyosu kullanılarak üretilen Ni-B-CeO₂ kompozit kaplamanın yapısal ve tribolojik özellikleri incelenmiştir. Kaplamaların üretiminde nikel sülfat heksahidrat, DMAB, sodyum asetat ve tiyoüre bileşimi içeren kurşunsuz banyo kullanılmıştır. Bu banyolar ile üretilen kaplamalar, yüksek sertlik gerektiren uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Shakoore et al., 2016). Daha da önemlisi kurşun ve talyum gibi ağır metaller içeren stabilizatörler tercih edilmemiş, kaplamalar çevre dostu bir kaplama banyosunda üretilmiştir. CeO₂, nispeten düşük maliyeti, kimyasal kararlılığı, iyi mekanik özellikleri, yüksek teknoloji uygulamalarında kullanım potansiyeli nedeniyle takviye olarak seçilmiştir. Literatür analizleri dikkate alınarak kristalizasyon ve sertlikteki değişimleri değerlendirmek için kaplamaya 400 °C'de 2 saat ısıtıl işlem uygulanmıştır. Kaplamaya uygulanan ısıtıl işlemin mekanik özelliklere etkisinin yanı sıra aşınma testinde uygulanan yükün tribolojik özelliklere etkileri de incelenmiştir.

2. Materyal ve Metot

2.1. Altlık Hazırlama

Kaplama işleminde altlık malzeme olarak kullanılmak üzere düşük karbonlu St 42 çelik tercih edilmiştir. Altlıklar kaplama banyosuna daldırılmadan önce sırasıyla mekanik temizleme, alkali temizleme ve asit banyosuna daldırma işlemlerine tabi tutulmuştur. Mekanik temizleme işleminde yüzey SiC zımpara kâğıdı ile temizlenmiştir. Daha sonra alkali banyoda 10 dakika durulanmış ve son olarak 10 sn %50 HCl içeren asidik bir çözelti içinde daldırılarak yüzey aktif hale getirilmiştir.

2.2. Kaplama Banyosunun Hazırlanması

Kaplama banyosunda nikel kaynağı olarak nikel sülfat heksahidrat (NiSO₄.(H₂O)₆) kullanılmıştır. İndirgeyici ajan olarak dimetilamin boran ((CH₃)₂NHBH₃), stabilizatör olarak tiyoüre (CH₄N₂S) ve kompleks yapıcı ajan olarak sodyum asetat (CH₃COONa) kullanılmıştır. CeO₂ partikülleri (12 g/l) akımsız kaplama banyosuna eklenmeden önce 0,15 g/l sodyum dodesil sülfat (SDS) ile 100 ml distile su içinde ultrasonik bir karıştırıcı ile karıştırılmış, ardından kaplama banyosuna ilave edilmiştir. Yüzey aktif maddeler ikinci faz partiküllerinin ilave edilmesinde önemli bir rol oynadığından, takviye partiküllerinin homojen dağılımını arttırmak için SDS kullanılmıştır. Toplam banyo miktarı 250 ml, pH'ı 6, kaplama süresi 1 saat ve banyo sıcaklığı 70 °C olarak belirlenmiştir.

2.3. Isıtıl İşlem

Kaplamanın mekanik özelliklerini geliştirmek için numune bir tüp fırında 5 °C/dk hızında oda sıcaklığından 400 °C'ye ısıtıldıktan sonra 2 saat Argon atmosferi altında ısıtıl işleme tabi tutulmuş ve sonra kendiliğinden soğumaya bırakılmıştır.

2.4. Karakterizasyon İşlemleri

Ni-B-CeO₂ kompozit kaplamanın yüzey morfolojisi ve kesit incelemeleri Enerji Dağılımlı Spektroskopi (EDS) donanımlı Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) cihazı (Jeol JSM 6060LV) ile yapılmıştır. Isıtıl işlem önce ve sonrası kaplamada oluşabilecek kristal yapı değişikliklerini incelemek ve tanımlamak için XRD (Rigaku D / Max 2200 / PC) (Cu Ka radyasyonu ile 10° ila 90° (2θ açısı) aralığında) cihazı kullanılmıştır. Kaplamanın ısıtıl işlem öncesi ve sonrası sertlik ölçümleri nanoindenter (Anton Paar Nanoindentasyon Test Cihazı: NHT3) cihazı kullanılarak yapılmıştır. Ölçümler, 10

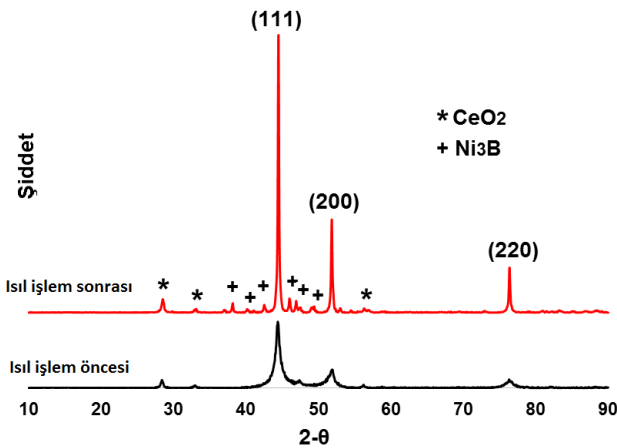
saniye boyunca 50 mN yükte, girintili derinlik kontrollü Berkovitch uç kullanılarak ısıtılma işlem öncesi ve sonrası kaplama kesitinden elde edilmiştir. Ayrıca aşınmış yüzey analizleri, 3D yüzey profilometresi (KLA Tencor P6) kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

2.4. Aşınma Testi

Kaplamanın tribolojik özelliklerinin incelenmesi amacıyla disk üzeri bilye tribometre (CSM Instruments Tribometer) cihazı kullanılmıştır. Tribolojik testlerde kimyasal ve termal kararlılığı nedeniyle 6 mm çapında alümina karşı bilye malzemesi kullanılmıştır. Kayma mesafesi 400 m, kayma hızı 0,4 m/s ve genlik 20 mm olarak belirlenmiştir. Uygulanan yükün etkisinin incelenmesi amacıyla 2, 5 ve 7 N yükler kullanılmıştır. Testler tamamlandıktan sonra SEM ve EDS ile aşınmış yüzeylerin analizleri gerçekleştirilmiştir.

3. Araştırma Sonuçları ve Tartışma

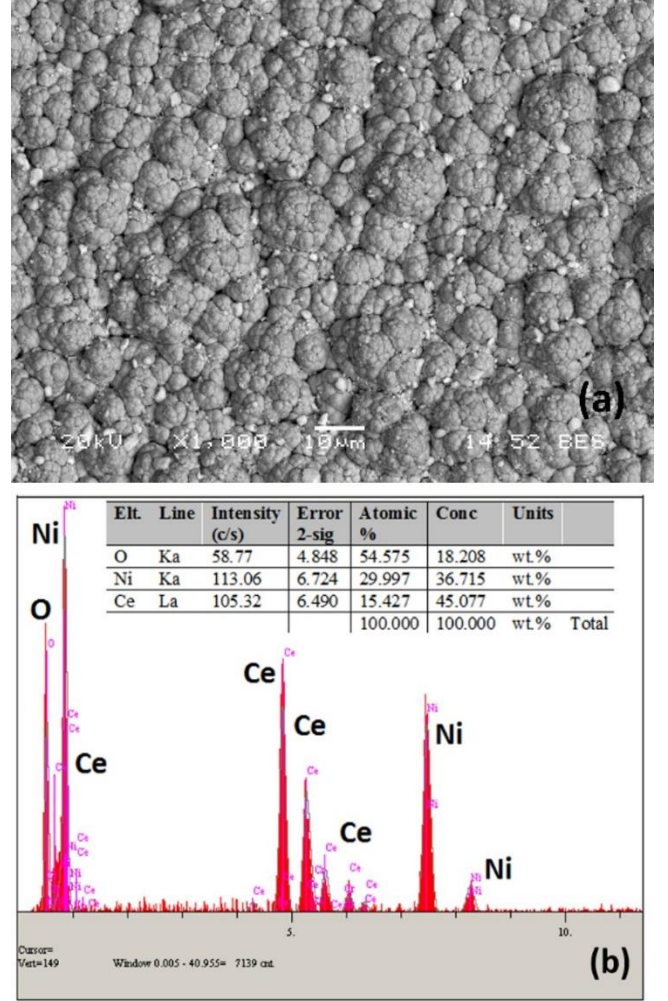
Şekil 1'de verilen Ni-B-CeO₂ kaplamanın ısıtılma işlem öncesi ve sonrası elde edilen XRD sonuçları görülmektedir. Isıtılma işlem öncesi kaplama mikrokristalin nikel ve amorf Ni-B fazlarının karışımı durumundadır. Pik konumları, Ni (JCPDS 01-087-0712) ve CeO₂ (JCPDS 03-065-5923) pikleriyle örtüşmektedir. Ni kırınım pikleri (111), (200) ve (220)'ye karşılık gelen üç tepe noktası literatürle uyumludur (Kasturibai & Kalaignan, 2014). Ayrıca, (*) simgesi ile belirtilen ~28° ve ~33°deki pikler CeO₂ ile bağlantılıdır. Isıtılma işlem sonrası elde edilen kırınım grafiğine bakıldığında, Ni ve Ce₂O₃ fazlarının varlığını doğrulayan piklerin yanı sıra Ni₃B'ye ait pikler de görülmektedir ve bu pikler (+) simgesi ile belirtilmiştir. Ni₃B birçok araştırmacı tarafından bildirilen ve Ni-B kaplamalarda ısıtılma işleminden sonra oluşması beklenen bir intermetaliktir (Chen et al., 2016; Madah et al., 2015; Yu et al., 2000). Isıtılma işlem sonrası Ni (111) kırınım değerleri Scherrer formülüne yerleştirilmiş ve hesaplanan tane boyutu 25 nm olarak elde edilmiştir.



Şekil 1. Ni-B-CeO₂ kaplamanın ısıtılma işlem öncesi ve sonrası X-ışını kırınım analiz sonuçları

Ni-B-CeO₂ kompozit kaplamanın SEM yüzey morfoloji görüntüsü ve EDS analiz sonuçları Şekil 2'de sunulmuştur. Genel olarak kaplama çatlaksız bir yapıya sahiptir. Takviyesiz Ni-B kaplamaların karakteristik morfolojisi yoğun karnabahar benzeri bir yapıya sahiptir (Sudagar et al., 2013b). Bununla

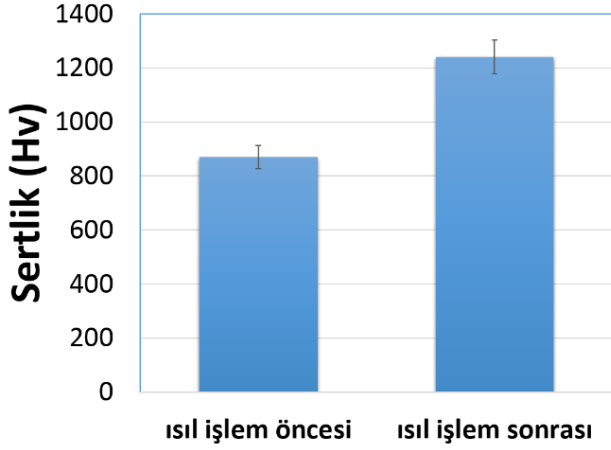
birlikte, matrise dahil edilen takviye partikülleri kaplamaların yüzey morfolojileri üzerinde dikkate değer etkilere sahiptir. Şekil 2(a)'da verilen SEM görüntüsü incelendiğinde, takviye partikül varlığına bağlı olarak karakteristik karnabahar benzeri yapının kısmen elde edildiği görülmektedir. Sisteme eklenen mikron altı parçacıklar akımsız proses için çekirdeklenme merkezi olarak görev yapan aktif bölgeleri artırarak depoziyon prosesini etkiler ve çekirdeklenmeyi artırarak ince taneli yapı oluşumuna katkı sağlar. Şekil 2 (b)'de verilen EDS analiz sonuçlarına bakıldığında kaplama yapısında istenmeyen elementlere rastlanmamıştır.



Şekil 2. Ni-B-CeO₂ kaplamanın a) Taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüsü, b) EDS analizi

Kaplamanın sertlik değerleri, altlık malzemenin etkisinden kaçınmak için nanoindentasyon tekniği kullanılarak ölçülmüştür. Isıtılma işleminden önce ve sonra sertlik değerlerindeki değişimi belirlemek için metalografik olarak hazırlanmış kaplama kesitinden Berkovich uç kullanılarak tarafından ölçülen sertlik sonuçları Şekil 3'te verilmiştir. Sertlik ölçümü 50 mN yük altında yapılmıştır. Şekil 3'de görüldüğü gibi Ni-B-CeO₂ kompozit kaplamada 400 °C'de uygulanan ısıtılma işlem sonrası sertlik değerinin arttığı tespit edilmiştir. Bu sertlik artışının ısıtılma işlemi ile artan kristalinite ve Şekil 1'de verilen XRD sonuçları ile doğrulanan intermetalik Ni₃B varlığı nedeniyle meydana geldiği düşünülmektedir. Pek çok araştırmacı, nikel borürlerin çökmesi nedeniyle sertliğin arttığına dair benzer

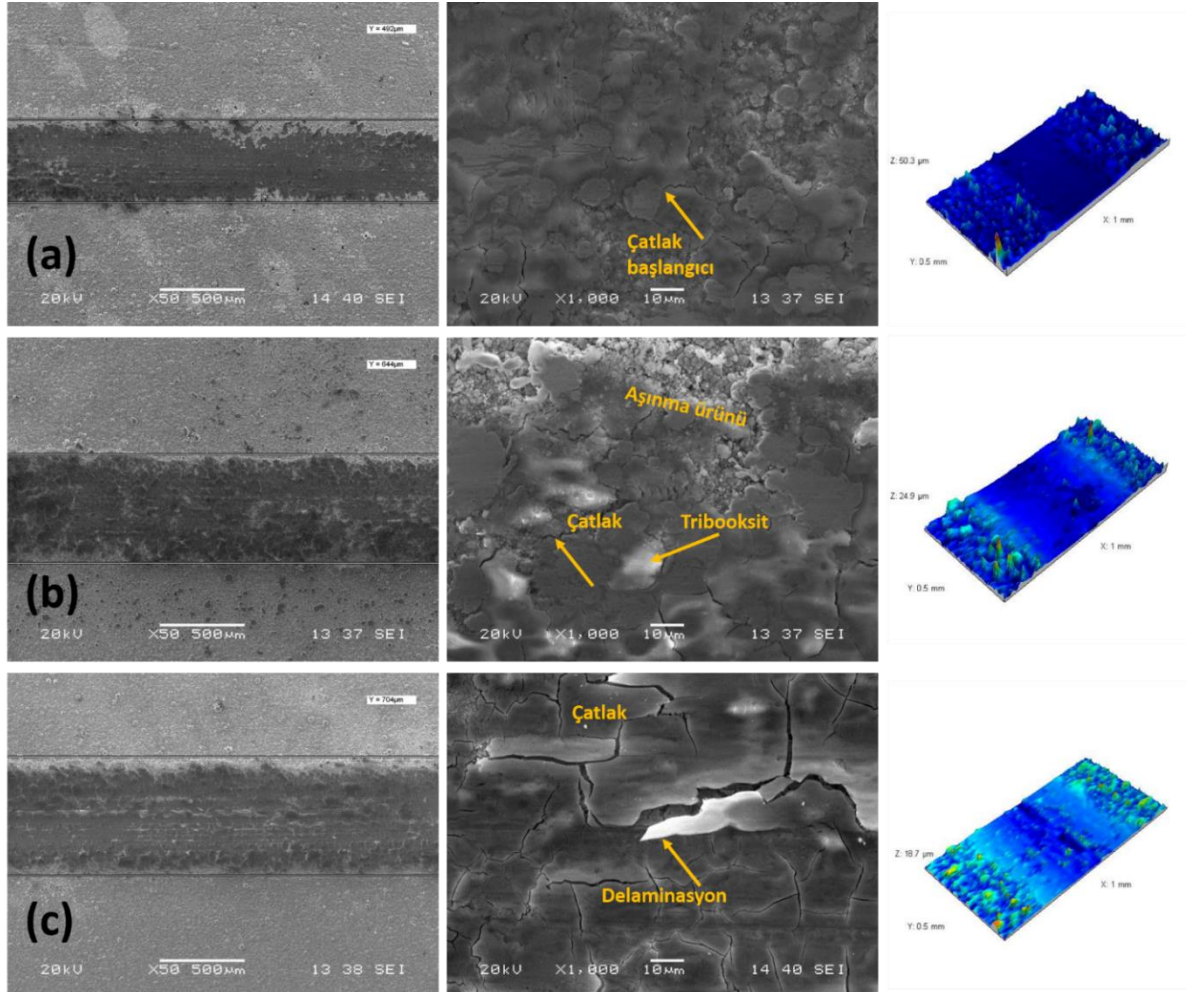
sonuçlar bildirmiştir (Krishnaveni et al., 2005; V. Vitry et al., 2008). Kompozit kaplamada Ni_3B 'nin sertleştirme etkisinin yanı sıra, takviye partiküllerinin akımsız kaplama banyosuna ilave edilmesi ile tane boyutu azaltır ve tane sınırlarını artırarak dislokasyon hareketini engeller. Böylece, Hall-Petch denklemine dayalı olarak kompozit kaplamalarda yüksek sertlik değerleri elde edilir (Dilek et al., 2021).



Şekil 3. Ni-B-CeO₂ kaplamanın ısıl işlem öncesi ve sonrası sertlik analiz sonuçları.

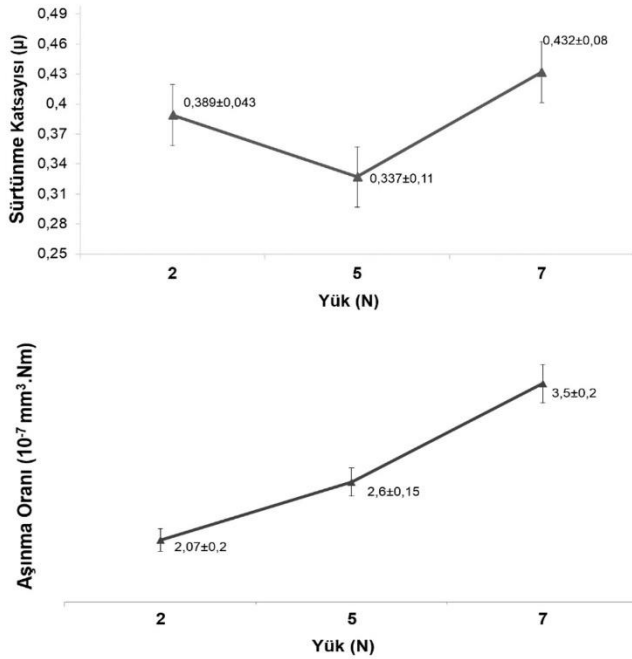
sıra,

400 °C'de 2 saat ısıl işleme tabi tutulmuş ve farklı yüklerde test edilmiş kaplamanın aşınma izlerinin düşük ve yüksek büyütme SEM görüntüleri ile 3D profilometre analiz sonuçları Şekil 4'te görülmektedir. Genel olarak uygulanan yükün artmasına bağlı olarak aşınma iz genişliğinin ve yüzey deformasyonunun arttığı görülmektedir. Kayma sırasında oluşan abrazyif aşınma çizgileri ve kayma yönü boyunca uzanan çatlaklar baskın aşınma mekanizmasının abrazyif aşınma olduğunu göstermektedir. Şekil 4(a)'da verilen 2N yük kullanılarak yapılan aşınma testinden elde edilen sonuçlara bakıldığında, özellikle yüksek büyütmede alınan aşınma yüzey görüntüsünde karnabahar benzeri yapının tepe noktalarının aşındığı, lokal olarak da karşı yüzey ile temas etmeden kalan ve aşınmaya uğramamış yerlerin olduğu görülmektedir. Yükün 5N'a artırılmasıyla kayma yüzeyinde plastik deformasyona bağlı oluşan yüzey altı çatlaklarının birleşerek yüzey çatlak yoğunluğunu arttırdığı ve aşınma ürünlerinin oluştuğu görülmektedir (Şekil 4(b)). Yük 7N'a çıkarıldığında ise yüzeyden madde kaybına sebep olan delaminasyonun meydana gelerek aşınma hasarını arttırdığı görülmektedir. 7N yük uygulanarak aşındırılan numunenin aşınma izi (Şekil 4c) diğer izlere göre daha fazladır. Uygulanan yükün artmasıyla temas yüzey alanı ve böylece kaplamanın aşınma iz genişliği de artar.



Şekil 4. Ni-B-CeO₂ kaplamanın uygulanan farklı yüklerle elde edilen sürtünme katsayısı ve aşınma oranı değerleri.

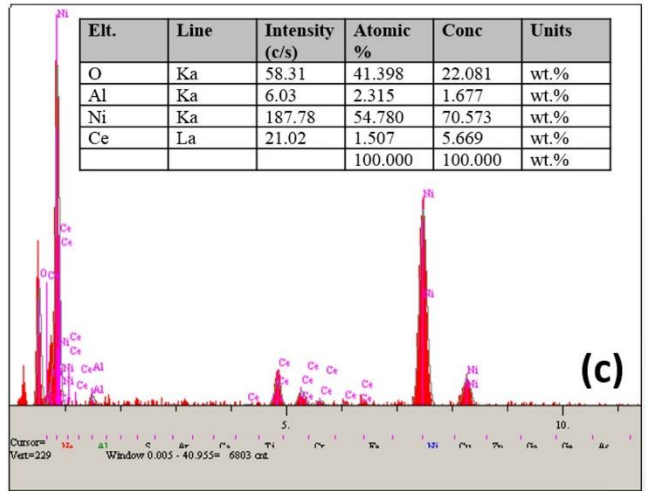
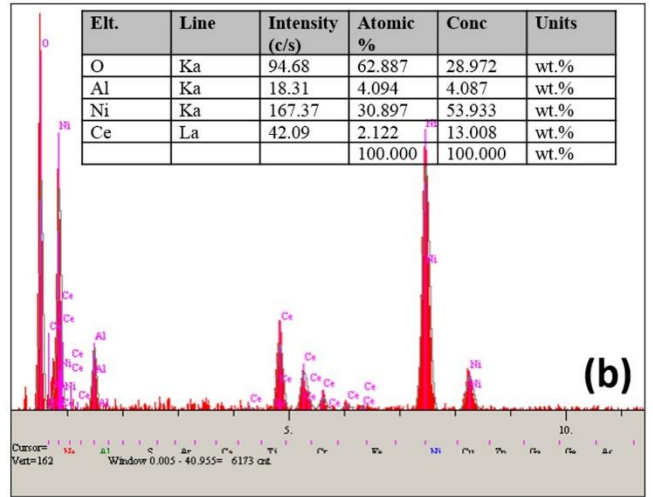
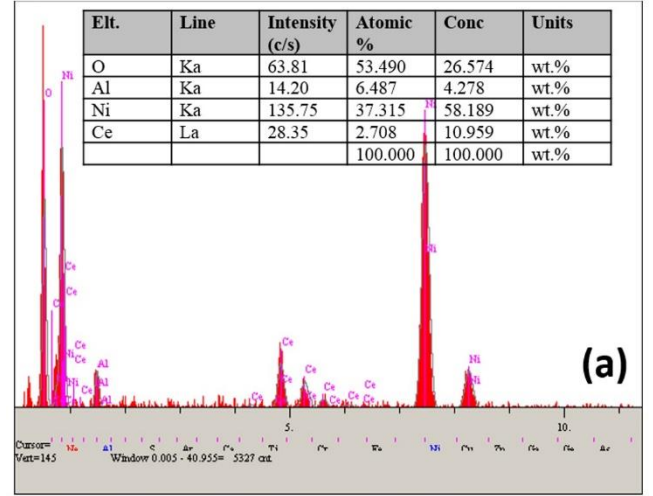
Şekil 5'te verilen sürtünme katsayısı ve aşınma oranı değerleri Şekil 4' te verilen aşınmış yüzey görüntüleri ve iz genişlikleri dikkate alınarak incelendiğinde, uygulanan yükün artmasının sürtünme katsayısında değişime ve aşınma oranında artışa sebep olduğu anlaşılmaktadır. Uygulanan yükün artmasıyla yüksek temas basıncı ve sürtünme ısıyla tribooksit oluşumu gözlenir ve bu durum sürtünme katsayısının azalmasında etkilidir. Ancak yükün artışına bağlı olarak yüzeyde oluşan koruyucu tribooksit tabakası hasara uğradığında, kompozit malzeme yüzeyinin yük taşıma kapasitesi düşerek yüzeyde ağır abrazif aşınmaya bağlı delaminasyon tabakaları meydana gelir ve kalkarak arayüzeyde birikir. Kaplama içerisindeki sert takviye partikülleri de içeren ve 3 boyutlu aşındırıcı olarak davranan bu aşınma ürünleri arayüzeyde hem sürtünme katsayısının hem de aşınma oranının artmasına yol açmaktadır. Kaplama yüzeyinde oluşan oksit tabakası, temas alanının azaltılmasında önemli rol oynar. Şekilde görüldüğü gibi kompozit kaplamada uygulanan yük 7N'ye çıkarıldığında sürtünme kuvvetine bağlı aşınma oranı ve sürtünme katsayısı artışı daha şiddetli olmaktadır. Böylece yükün artması koruyucu tribooksit tabakasının kırılmasına, çatlakların oluşmasına ve sürtünmenin artmasına neden olur.



Şekil 5. Ni-B-CeO₂ kaplamanın uygulanan farklı yüklere bağlı olarak elde edilen sürtünme katsayısı ve aşınma oranı değerleri.

Şekil 6'da görüldüğü gibi, aşınma izlerindeki EDS analizi, aşınan parçalarda Ni, O, Ce ve Al elementlerinin bulunduğunu göstermektedir. Al elementi karşı yüzey olan aşındırıcı bilyeden gelmektedir. 5N yük uygulanan numune, aşınma yüzeyinde diğerlerine göre daha fazla O elementine sahiptir. Uygulanan yükün 7N'ye çıkarılmasıyla oksit miktarının düştüğü tespit edilmiştir. 7N'lük yük kullanıldığında tribooksit tabakasının hasara uğraması ve yüzeyden kalkarak arayüzeyde aşınma ürünü olarak davranması sonucu sürtünme katsayısında ve aşınma miktarında artış meydana gelir. 7N yükte koruyucu oksit tabakasının kırılmaya başlaması, kayganlaştırıcı özellikli kristal borürlerin ve takviye CeO₂ partiküllerinin uygulanan yüke karşı yeterince direnç göstermemesi nedeniyle kaplama yüzeyi ile

karşı yüzey arasındaki temas alanı artmakta ve yüksek aşınmaya neden olmaktadır.



Şekil 6. Ni-B-CeO₂ kaplamanın uygulanan farklı yüklere bağlı olarak aşınmış yüzeylerden elde edilen EDS analizleri a) 2N, b) 5N, c) 7N

4. Sonuç

Ni-B-CeO₂ kompozit kaplamalar, çevre dostu ve uygun maliyetli bir süreçle akımsız kaplama yöntemiyle üretilmiştir. Kaplamanın yapısal, mekanik özelliklerinin ısıl işlem ile

değişimi ve aşınma deney şartlarının tribolojik özellikler üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Yapılan elementer analiz sonucunda Ni, Ce ve O elementlerinin tespiti kompozit kaplamanın başarıyla üretildiğini göstermiştir. Kaplama morfolojisinin yüzey görüntü analizi ile Ni-B kaplamadaki tipik karnabahar benzeri yapıya benzer bir morfolojinin elde edildiği görülmüştür. Isıl işlem öncesi ve sonrası yapılan sertlik ölçümlerinde kaplamanın sertliğinin ısıl işlem ile arttığı tespit edilmiştir. XRD sonuçlarında ısıl işlem sonrası oluştuğu gözlenen Ni₃B varlığı yanı sıra homojen olarak dağılmış takviye partiküllerinin tane inceltme etkisi ile sertlik artışı gerçekleşmiştir.

Kompozit kaplama yüzeyi farklı yükler altında aşınma deneyine tabi tutulmuş, uygulanan yüke bağlı olarak tribolojik davranışının değişim gösterdiği anlaşılmıştır. Kaplama yüzeyi 2N yük ile aşındığında, nikel borürler ve aşınma sırasında temasbasıncı nedeniyle artan sıcaklıkla oluşan Ni-O tabakası ile iyi bir aşınma dayanımı ve nispeten düşük sürtünme değerleri elde edilmiştir. Uygulanan yükün 5N'ye yükseltilmesiyle, kaplama yüzeyinde oluşan tribooksit miktarı artarak en düşük sürtünme katsayı değerine ulaşılmıştır. Yükün 7N'ye çıkarılmasıyla tribooksitlerin parçalanarak arayüzeye aktarılması abrazif aşınmaya sebep olmuş ve kaplamanın aşınma hızı ile sürtünme katsayısını artırdığı tespit edilmiştir.

5. Teşekkür

Bu çalışma, Türkiye Ulusal Bor Araştırma Enstitüsü (Hibe No: 2017-31-07-25-001) ve Sakarya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi (Hibe No. 2016-50-02-007) tarafından desteklenmiştir.

Kaynakça

Barati, Q., & Hadavi, S. M. M. (2020). Electroless Ni-B and composite coatings: A critical review on formation mechanism, properties, applications and future trends. *Surface and Interfaces*, 21(September), 100702. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2020.100702>

Chen, Z., Ma, Z., Song, J., Wang, L., & Shao, G. (2016). A novel approach for the preparation of Ni-CeO₂ composite cathodes with enhanced electrocatalytic activity. *RSC Advances*, 6(65), 60806–60814. <https://doi.org/10.1039/C6RA14667H>

Delaunois, F., & Lienard, P. (2002). Heat treatments for electroless nickel – boron plating on aluminium alloys. *Surface & Coatings Technology*, 160, 239–248.

Delaunois, F., Petitjean, J. ., Lienard, P., & Jacob-Duliere, M. (2000). Autocatalytic electroless nickel-boron plating on light alloys. *Surface and Coatings Technology*, 124(2–3), 201–209. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(99\)00621-0](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(99)00621-0)

Dilek, S., Algül, H., Akyol, A., Alp, A., Akbulut, H., & Uysal, M. (2021). Pulse electro co-deposition of submicron-sized TiC reinforced Ni-W coatings: tribological and corrosion properties. *Journal of Asian Ceramic Societies*, 00(00), 1–13. <https://doi.org/10.1080/21870764.2021.1911058>

Eraslan, S., & Ürgen, M. (2015). Surface & Coatings Technology Oxidation behavior of electroless Ni – P , Ni – B and Ni – W – B coatings deposited on steel substrates. *Surface & Coatings Technology*, 265, 46–52. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2015.01.064>

Georgiza, E., Gouda, V., & Vassiliou, P. (2017). Surface & Coatings Technology Production and properties of composite electroless Ni-B-SiC coatings. *Surface & Coatings Technology*, 325, 46–51. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.06.019>

Kasturibai, S., & Kalaigian, G. P. (2014). Characterizations of electrodeposited Ni-CeO₂ nanocomposite coatings. *Materials Chemistry and Physics*, 147(3), 1042–1048. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2014.06.057>

Krishnaveni, K., Sankara Narayanan, T. S. N., & Seshadri, S. K. (2005). Electroless Ni-B coatings: Preparation and evaluation of hardness and wear resistance. *Surface and Coatings Technology*, 190(1), 115–121. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2004.01.038>

Madah, F., Dehghanian, C., & Amadeh, A. A. (2015). Investigations on the wear mechanisms of electroless Ni-B coating during dry sliding and endurance life of the worn surfaces. *Surface and Coatings Technology*, 282, 6–15. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2015.09.003>

Mindivan, F., Mindivan, H., & Darcan, C. (2017). Electroless Ni-B Coating of Pure Titanium Surface for Enhanced Tribocorrosion Performance in Artificial Saliva and Antibacterial Activity. *Tribology in Industry*, 39(2), 270–276. <https://doi.org/10.24874/ti.2017.39.02.15>

Qu, N. S., Zhu, D., & Chan, K. C. (2006). Fabrication of Ni-CeO₂ nanocomposite by electrodeposition. *Scripta Materialia*, 54(7), 1421–1425. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2005.10.069>

Radu, T., Dunarea, U., Galati, D. J., Vlad, M., Dunarea, U., Galati, D. J., Istrate, G. G., Dunarea, U., & Galati, D. J. (2015). Preparation and characterization of electroless Ni – P – Al₂O₃ nanocomposite coatings. *Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures*, 10(September), 1055–1065. https://www.researchgate.net/profile/Maria-Vlad/publication/281861968_Preparation_and_characterization_of_electroless_Ni-P-Al2O3_nanocomposite_coatings/links/5601be9a08aeb30ba73555ac/Preparation-and-characterization-of-electroless-Ni-P-Al2O3-nanocomposite

Shakoor, R. A., Kahraman, R., Gao, W., & Wang, Y. (2016). Synthesis , Characterization and Applications of Electroless Ni-B Coatings-A review. *International Journal of ELECTROCHEMICAL SCIENCE*, 11, 2486–2512. <http://www.electrochemsci.org/papers/vol11/110302486.pdf>

Sudagar, J., Lian, J., & Sha, W. (2013b). Electroless nickel , alloy , composite and nano coatings – A critical review. *Journal of Alloys and Compounds*, 571, 183–204. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2013.03.107>

Vitry, V. Ä., & Delaunois, F. (2015). 7. Nanostructured electroless nickel-boron coatings for wear resistance. In *Anti-Abrasive Nanocoatings*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/B978-0-85709-211-3.00007-8>

Vitry, V., Delaunois, F., & Dumortier, C. (2008). Mechanical properties and scratch test resistance of nickel-boron coated aluminium alloy after heat treatments. *Surface and Coatings Technology*, 202(14), 3316–3324. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2007.12.001>

Yu, X., Wang, H., Yang, Z., Yin, P., & Xin, X. (2000). XPS and AES investigation of two electroless composite coatings. *Applied Surface Science*, 158(3), 335–339. [https://doi.org/10.1016/S0169-4332\(00\)00114-8](https://doi.org/10.1016/S0169-4332(00)00114-8)