



Ni-BW Kaplamalarında W Konsantrasyonunun Sertlik ve Aşınma Özelliklerine Etkisi

Erhan Duru^{1*}, Abdullah Öztürk², Mehmet Uysal³, Hatem Akbulut⁴, Serdar Aslan⁵

^{1*} Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Sakarya, Türkiye, (ORCID: 0000-0002-6205-6566), erhanduru@sakarya.edu.tr

² Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Sakarya, Türkiye, (ORCID: 0000-0001-8300-598X), abdullah.ozturk11@ogr.sakarya.edu.tr

³ Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Sakarya, Türkiye, (ORCID: 0000-0002-9396-7450), mehmetu@sakarya.edu.tr

⁴ Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Sakarya, Türkiye, (ORCID: 0000-0002-6299-136X), akbulut@sakarya.edu.tr

⁵ Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Sakarya, Türkiye, (ORCID: 0000-0001-5061-6338), saslan@sakarya.edu.tr

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

(DOI: 10.31590/ejosat.1083763)

ATIF/REFERENCE: Duru, E., Öztürk, A. Uysal, M., Akbulut, H & Aslan, S. (2022). Ni-BW Kaplamalarında W Konsantrasyonunun Sertlik ve Aşınma Özelliklerine Etkisi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (34), 610-616.

Öz

Bu çalışmada farklı konsantrasyonlarda tungsten (W) kaynağı içeren banyolarda elektrobiriktirme yöntemi ile kaplamalar üretilmiştir. Tungsten kaynağı konsantrasyonu 10, 20 ve 40 g/L'den oluşturulmuştur ve kaplamaların üretiminde kesikli akım yöntemi (PC) tercih edilmiştir. Üretilen kaplamaların yüzey morfolojisi, kaplama kalınlığı, kimyasal analizi taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve X-ışını kırınımı (XRD) yöntemi ile karakterize edilmiştir. Mikrosertlik yöntemiyle (Vickers) sertlikleri ölçülmüştür. Son olarak sürtünme katsayısı ve aşınma oranını tespit etmek için aşınma testlerine tabi tutulmuştur. Yapılan çalışmalar sonucunda 20 g/L W kaynağı içeren banyodan elde edilen kaplamanın 859 HV ile en yüksek sertliğe sahip kaplama olduğu görülmüştür. Yine, 20 g/L konsantrasyonlu kaplamada aşınma testi sonrasında en düşük sürtünme katsayısı ve aşınma oranı değerleri görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Sert kaplamalar, Tungsten, Ni-B-W, Aşınma, Triboloji

Effect of W Concentration on Hardness and Wear Properties of Ni-BW Coatings

Abstract

In this study, coatings were produced at different tungsten (W) sources concentrations in plating baths by the electrodeposition method. The concentration of sodium tungstate was 10, 20, 40 g/L, and the pulse current (PC) method was preferred for prepared of the coatings. The surface morphology, coating thickness, phase analysis of the coatings were characterized by scanning electron microscopy (SEM) and X-ray diffraction (XRD) methods. The hardness of coatings were measured by the microhardness (Vickers) method. Finally, the coatings were subject to wear tests to determine the coefficient of friction and wear rate. As a result of the studies, it was seen that the coating obtained from the sodium tungstate concentration of 20 g/L had the highest hardness with 859 HV. Wear tests also showed that the lowest friction coefficient and wear rate were seen for coating produced at this concentration.

Keywords: Hard coatings, Tungsten, Ni-B-W, Wear, Tribology

* Sorumlu Yazar: erhanduru@sakarya.edu.tr

1. Giriş

Günümüzde sanayicilerin en büyük sorunlarından biri ekonomik ve tedarigi kolay metal hammadedir. Özellikle paslanmaz çeliklerin tedariginde büyük zorluklar yaşanmaktadır. Bu durum üretimi kolay ama vasıfsız çeliklerin ilave işlemler ile özelliklerinin artırılması yoluna gidilmesine yol açmıştır. Üretimi nispeten kolay, ekonomik ve ulaşılabilirlik açısından diğer çeliklerden daha avantajlı olan düşük karbonlu çeliklere yüzey işlemeyle mekanik, tribolojik ve korozyon dirençlerini iyileştirmek mümkündür. Çeliklerin yüzey sertliğini borlama, nitrürleme ve karbürleme ile yapmak mümkün ancak bu işlemler ile korozyon dirençlerinden çok ciddi iyileşmeler olmayacaktır (Baycik, 2002; Delikanlı K, Çalık A, 2003; Topuz, 2016). Çeliğin hem aşınma hem de korozyon dirençlerini artırmanın en etkili ve en ekonomik yöntemi kaplama yapmaktır. Çeliklerin yüzeyine PVD, CVD, termal sprey kaplamalar ve elektrokimyasal kaplamalar yapmak mümkündür (Karaoglanlı & Turk, 2017; Li et al., 2022; Yang et al., 2022). Endüstriyelmiş elektrokimyasal kaplamalar içerisinde sertliği, aşınma direnci en yüksek ve en fazla uygulama alanı bulabilen kaplamalardan biri sert krom kaplamadır. Ancak sert krom kaplamanın da en büyük dezavantajlarından biri insan ve çevre sağlığı üzerindeki olumsuz etkileridir. Kaplama işlemi esnasında ortaya çıkan altı değerlikli krom iyonu kanserojen bir maddedir. Bu durum son yıllarda sert krom kaplamaya alternatif kaplamalar konularının en aktif çalışmalar arasına girmesine yol açmıştır (Harachai et al., 2020; Nemane & Chatterjee, 2021).

Nikel esaslı kaplamalar sert kroma alternatif olabilme kapasiteleri en yüksek kaplamalardır. Nikelin yanında ilave edilen P, B, W ve Mo gibi ikinci elementler ile Ni-P, Ni-B, Ni-W ikili alaşımlar ve Ni-P-W, Ni-B-W gibi üçlü alaşımlar yapmak mümkündür. Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı Araştırma ve Geliştirme Ofisi, akımlı kaplama yöntemiyle üretilen Ni-B-W kaplamaları sert krom kaplama alternatif olarak önermiştir (Steffani & Meltzer, 1995). Bu durum, Ni-B-W kaplamaların insan ve çevre sağlığı üzerinde sert krom kaplamadan daha az zararlı olduğu anlamına gelmektedir. Bunun yanında bu kaplamaların üstün fiziksel, kimyasal, mekanik ve tribolojik özelliklere sahip olduğu bilinmektedir. Birkaç bilim insanı tarafından yapılan araştırmalar Ni-B-W kaplamaların sert kroma kaplamaya alternatif olabileceği gösterilmiştir. (Brooman, 2000; Liqun et al., 2001; Nagai et al., 2014).

Bu çalışmada farklı konsantrasyonlarda tungsten elementi içeren Ni-B-W kaplamalar üretilmiştir. Üretilen kaplamaların kaplama morfolojisi, mekanik ve tribolojik özellikleri incelenmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen sonuçlar sert kroma alternatif çalışmalara katkı sağlayacağına inanıyoruz. Bu çalışmalar aynı zaman bu kaplamaların endüstriyel çalışmalar için bir zemin oluşturacaktır. Bu kaplamalar havacılıktan gıda sektörüne kadar, tekstil sanayisinden kimya endüstrisine kadar birçok endüstriyel uygulamalarda kendine yer bulabilir.

2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada düşük karbonlu çelik altlık üzerine elektro biriktirme yöntemlerinde biri olan kesikli akım yöntemiyle kaplama yapılmıştır. Bu kaplamalar farklı oranlarda tungsten kaynağı içeren banyolardan üretilmiştir. Kaplama çalışmaları; kaplama öncesi hazırlık, kaplamaların eldesi ve kaplama karakterizyonları olmak üzere üç aşamadan oluşmaktadır. Kaplama öncesi hazırlıklar altlığın zımparalanması, e-ISSN: 2148-2683

polisajlanması, alkali temizleme ve asidik temizlemeden oluşmaktadır. Kaplama öncesi hazırlıklar; altlık ile kaplama arasında yapışma mukavemetini olumsuz etkileyecek durumların ortadan kaldırılması amacıyla yapılmaktadır.

Kaplama için kurulan banyolar farklı işlevler gören kimyasallardan oluşmaktadır. Bu banyolar nikel iyon kaynağı nikel sülfat, bor iyon kaynağı trimetilamin boran (TMAB), W kaynağı sodyum tungstat ve kompleks oluşturucu görevi gören sodyum sitrattan oluşmaktadır. Üç farklı sodyum tungstat miktarı içeren üç kaplama banyosu kurulmuştur, sodyum tungstat konsantrasyonu hariç geri kalan bütün parametreler sabit tutulmuştur. Kullanılan sodyum tungstat miktarları 10, 20 ve 40 g/L'dir. Banyolarda kullanılan kimyasallar ve miktarları Tablo 1'de verilmiştir. Kaplama banyosunun sıcaklığı 70°, pH 11 ve kaplama süresi 50 dakikadır. Kaplamalarda kullanılan akım türü kesikli akımdır. Kaplama parametreleri Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 1. Kaplama banyosunun bileşenleri ve miktarları.

Kimyasal	Miktar (g/L)
Nikel Sülfat ($\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)	30
Trimetilamin-Boran (TMAB)	11
Sodium tungstate ($\text{Na}_2\text{WO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)	10, 20, 40
Trisodyum Sitrata Hidrat ($\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)	110
Sodyum Dodesil Sülfat (SDS)	0.2
Glisin ($\text{H}_2\text{NCH}_2\text{COOH}$)	1

Tablo 2. Kaplama prosesi şartları ve değerleri.

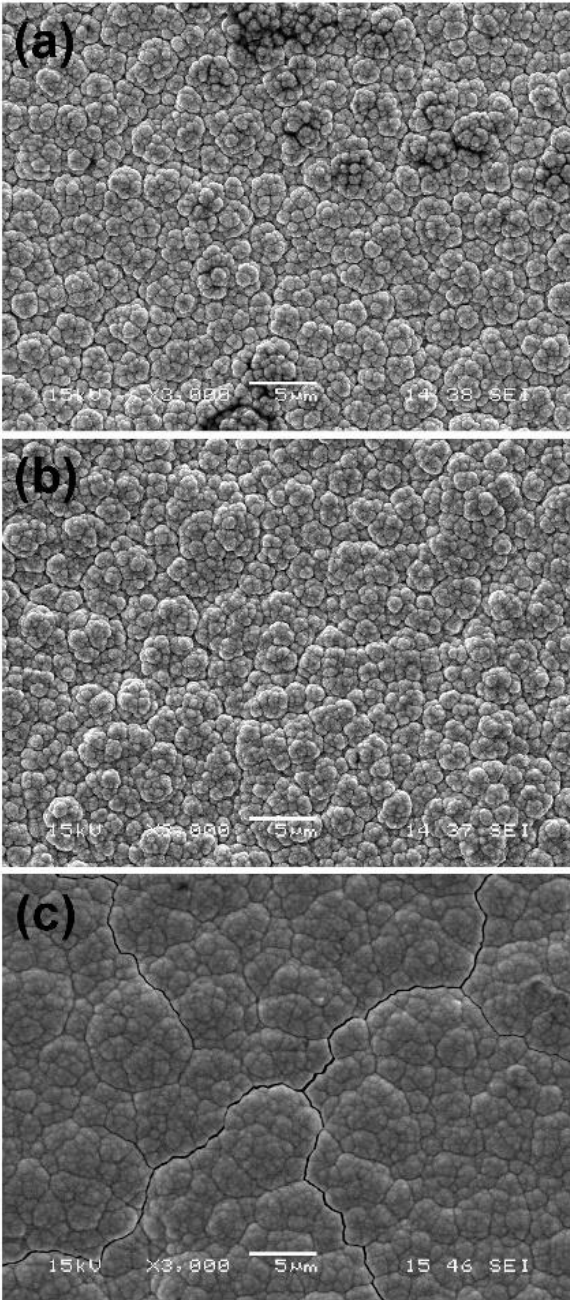
Şartlar	Değerler
Akım Yoğunluğu	15 A/dm ²
İş Çevrimi	%20
Sıcaklık	70 °C
pH	11
Karıştırma Hızı	350 rpm
Süre	50 dk

Üretilen kaplamaların yüzey görüntüleri ve kesit görüntüleri taramalı elektron mikroskobu (SEM), kimyasal bileşimi enerji dağıtıcı spektroskopisi (EDS) ile yapılmıştır. Kaplamanın içerdiği fazları tespit etmek amacıyla X-Işını Kırınımı (XRD) analizi yapılmıştır. XRD analizinde 1,54 Å dalga boyuna sahip Cu K α radyasyonu kullanılmıştır, analiz 10-90° arasında 2°/dk hızında yapılmıştır. Tungsten konsantrasyonunun sertlik üzerine etkisini görmek amacıyla mikro sertlik yöntemi olan Vickers sertlik ölçüm cihazıyla sertlikler ölçülmüştür. Sertlikler için numune uygun boyutlarda kesilmiş, sıcak bakelite alınmış ve zımparalama, parlatma işlemlerine tabi tutulmuştur. Sertlik ölçümlerinde 50-gram yük 10 saniye boyunca uygulanarak yapılmıştır. Her bir numune için 5 adet sertlik alınmış ve ortalamaları, standart sapmaları hesaplanmıştır. Kaplamaların tribolojik özelliklerini karşılaştırmak için aşınma testleri yapılmıştır. Aşınma testleri oda sıcaklığında, kuru ortamda ve ball on disc yöntemiyle yapılmıştır. Aşınma testlerin karşıt malzeme

olarak 10 mm çapında alümina (Al_2O_3) bilye kullanılmıştır. Aşınma testleri 20 cm/s hızında, 2N yük altında ve 300 m kayma mesafesinde yapılmıştır.

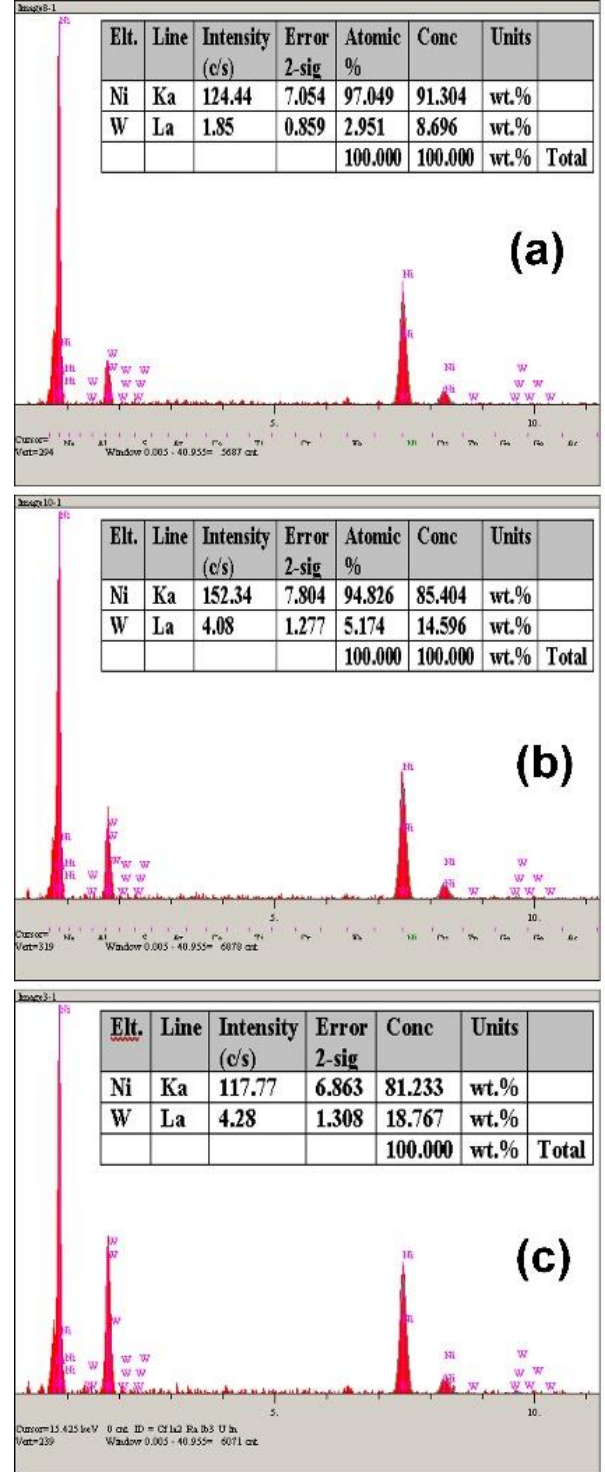
3. Araştırma Sonuçları ve Tartışma

Şekil 1’de üç farklı konsantrasyonla üretilen Ni-B-W kaplamaların yüzey SEM görüntüleri verilmiştir. Sodyum tungstat konsantrasyonu 10 ve 20 g/L olan kaplamalarda yüzey morfolojisi karnabahar yapısına benzemektedir. Kaplama banyosundaki sodyum tungstat konsantrasyonu 40 g/L artırıldığında karnabahar morfolojisi çok değişmemiştir ancak yüzeyden derinlere nüfuz eden büyük ve sürekli çatlaklar gözlemlenmiştir. Sodyum tungstat konsantrasyonunun artması kaplama içerisindeki W miktarını da arttırmıştır ve yapıda iç gerilmeleri artırarak çatlaklara sebep olmuştur.



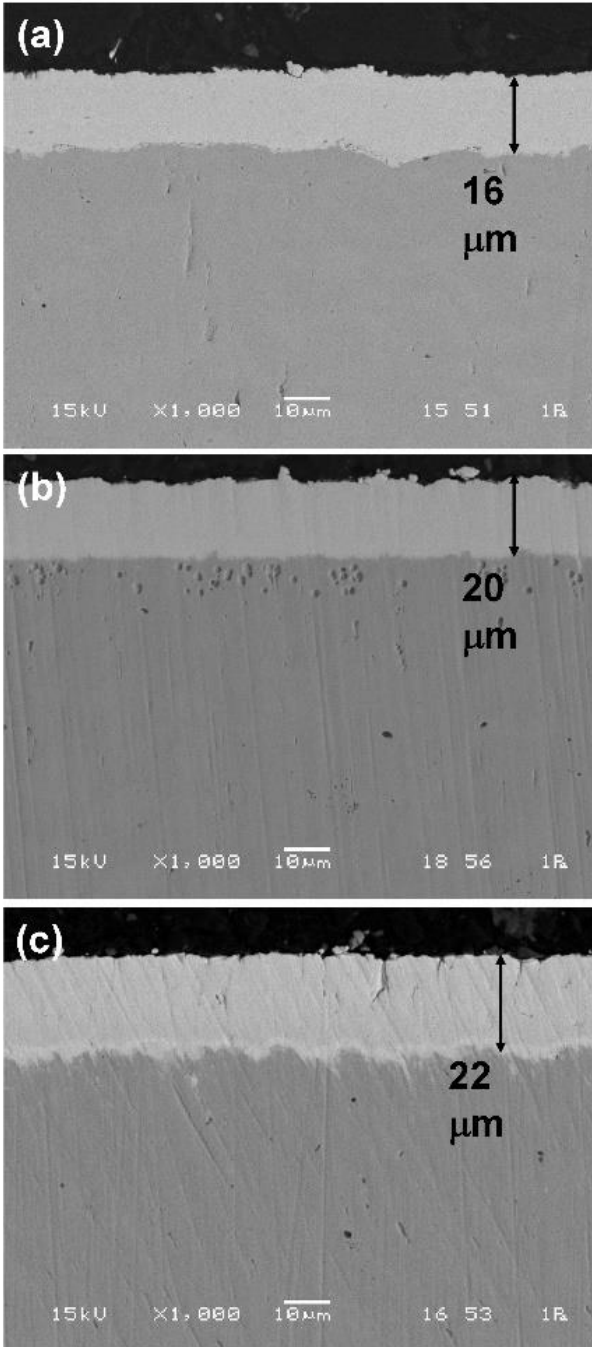
Şekil 1. Farklı sodyum tungstat konsantrasyonlu kaplamaların yüzey SEM görüntüleri: (a) 10 g/L, (b) 20 g/L ve 40 g/L.

Farklı oranlarda tungsten kaynağı içeren kaplamaların yüzeyinden yapılan EDS analizlerin sonucu Şekil 2’de verilmiştir. Kaplama banyolarına ilave edilen sodyum tungstat miktarı arttıkça kaplama içerisindeki ağırlıkça W miktarı da artmıştır. Sodyum tungstat konsantrasyonu 10g/L olan banyodan üretilen kaplamaların W oranı ağırlıkça %8,6 iken, 20 g/L’de %14,5 olmuştur, 40 g/L’de ise %18,7 ile en yüksek W oranı sahip kaplamalar üretilmiştir.



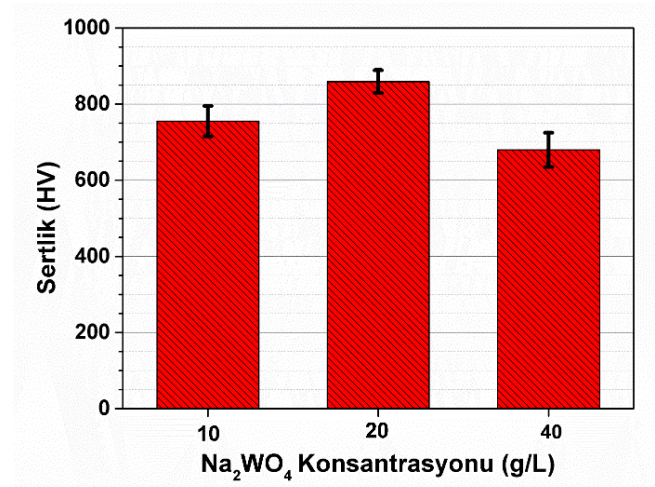
Şekil 2. Farklı sodyum tungstat konsantrasyonlu kaplamaların EDS analiz sonuçları: (a) 10 g/L, (b) 20 g/L ve 40 g/L.

Farklı tungstat konsantrasyonlarına sahip kaplamaların kesit SEM görüntüleri Şekil 3’de verilmiştir. Kaplama banyolarındaki sodyum tungstat miktarı arttıkça kaplamaların kalınlıkları da artmıştır. 10, 20 ve 40 g/L konsantrasyonların kaplama kalınları sırasıyla 16, 20 ve 22 μm ’dur. Konsantrasyondaki artış kaplama banyosu içerisindeki iyon miktarını arttırmıştır, bu da altlık yüzeyinde daha fazla birikmelere yol açmıştır. Ancak kaplama kalınlığı ve kaplama içerisindeki tungsten konsantrasyonunun artması kaplamadaki iç gerilmeleri de arttırmıştır. Sodyum tungstat konsantrasyonu 40 g/L olan banyolardan üretilen kaplamada yüzeydeki çatlaklar kesitten de görülmektedir. Bu üç kaplama içerisinde tungsten miktarı yüksek olması, kaplama kalınlığının çok düşük olmaması ve çatlaksız bir kaplama olması açısından 20 g/L konsantrasyonlu banyolardan üretilen kaplamaların en optimum kaplamalar olduğu söylenebilir.



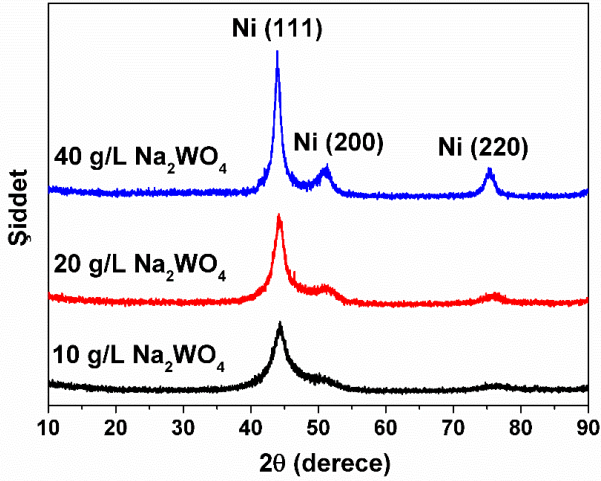
Şekil 3. Farklı sodyum tungstat konsantrasyonlu kaplamaların kesit SEM görüntüleri: (a) 10 g/L, (b) 20 g/L ve (c) 40 g/L.

Şekil 4’de farklı konsantrasyonlardan elde edilen kaplamaların ortalama mikro sertlik değerleri verilmiştir. Sodyum tungstat miktarı 10 g/L olan banyodan çıkan kaplamaların sertliği 756 ± 41 HV, 20 g/L’de 859 ± 29 HV ve 40 g/L’de 680 ± 44 HV olarak ölçülmüştür. Banyo içerisindeki sodyum tungstat konsantrasyonu arttıkça kaplama içerisindeki ağırlıkça W miktarı da artmaktadır. Kaplama içerisindeki tungsten miktarı sertliği doğrudan etkileyecektir. Dolayısıyla konsantrasyonun 10 g/L’den 20 g/L’ye çıkarılmasıyla kaplamaların içerisindeki W miktarını etkisiyle kaplamaların sertliğinde ciddi bir artış olmuştur. Konsantrasyonun 40 g/L’ye çıkarılmasıyla kaplamadaki W miktarı artmasına rağmen kaplamaların sertliğinde artış olmamış aksine büyük bir düşüş olmuştur. Bunun sebebi kaplamada iç gerilmenin etkisiyle oluşan çatlaklar ve porozitlerdir (Doğan et al., 2022; Gültekin et al., 2021; Uysal et al., 2021).



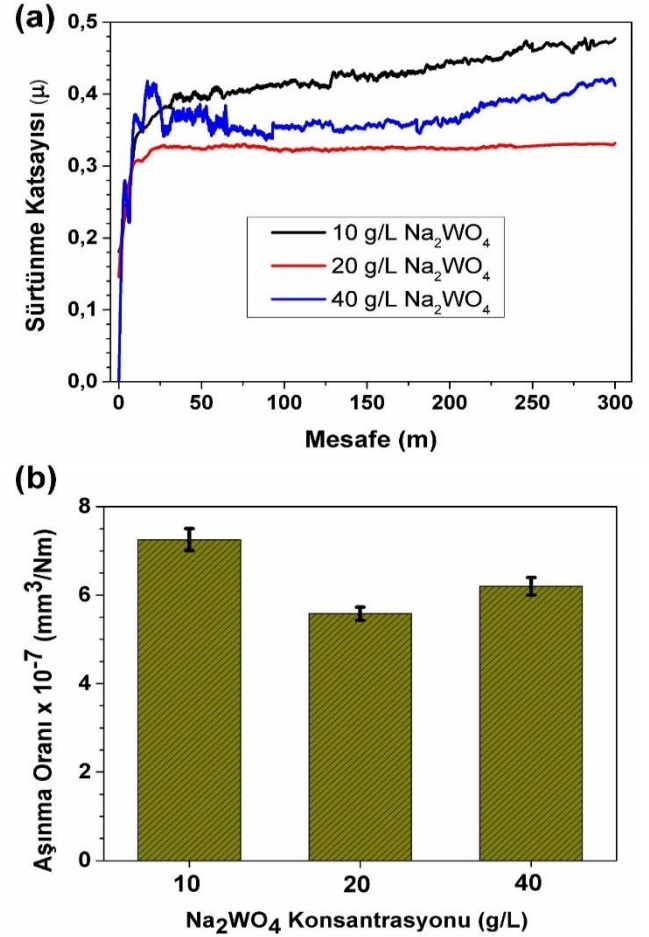
Şekil 4. Farklı sodyum tungstat konsantrasyonlu kaplamaların ortalama mikro sertlik sonuçları.

Farklı sodyum tungstat konsantrasyonlarında üretilen Ni-B-W alaşım kaplamaların XRD analiz sonuçları Şekil 5’de verilmiştir. XRD analiz sonuçlarına göre bütün kaplamalar yüzey merkezli kristal yapıya sahip ve nikel fazın (111), (200) ve (220) düzlemlerine karşılık gelen $2\theta=44^\circ$, 51° ve 76° pikleri göstermektedir. Ni içinde B ve W’ın katı çözelti oluşturması nedeniyle XRD grafiklerinde sadece nikel piki görülmüştür. Sodyum tungstat konsantrasyonu arttıkça pik genişliği daralmakta, nikel fazın (111) düzleminde ait pikin daha keskin olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca sodyum tungstat konsantrasyonu artmasıyla (111) düzlemindeki Nikel pik şiddetinin arttığı görülmüştür. 10 g/L konsantrasyonunda elde edilen kaplamaların XRD grafiği incelendiğinde (200) ve (220) düzleminde nikelin pik şiddetinin çok az olduğu, sodyum tungstat konsantrasyonunun artmasıyla (200) ve (220) düzlemindeki nikel pik şiddetinin ciddi oranda arttığı belirlenmiştir (Doğan, Uysal, Algül, et al., 2020; Doğan, Uysal, Duru, et al., 2020; Duru et al., 2021).



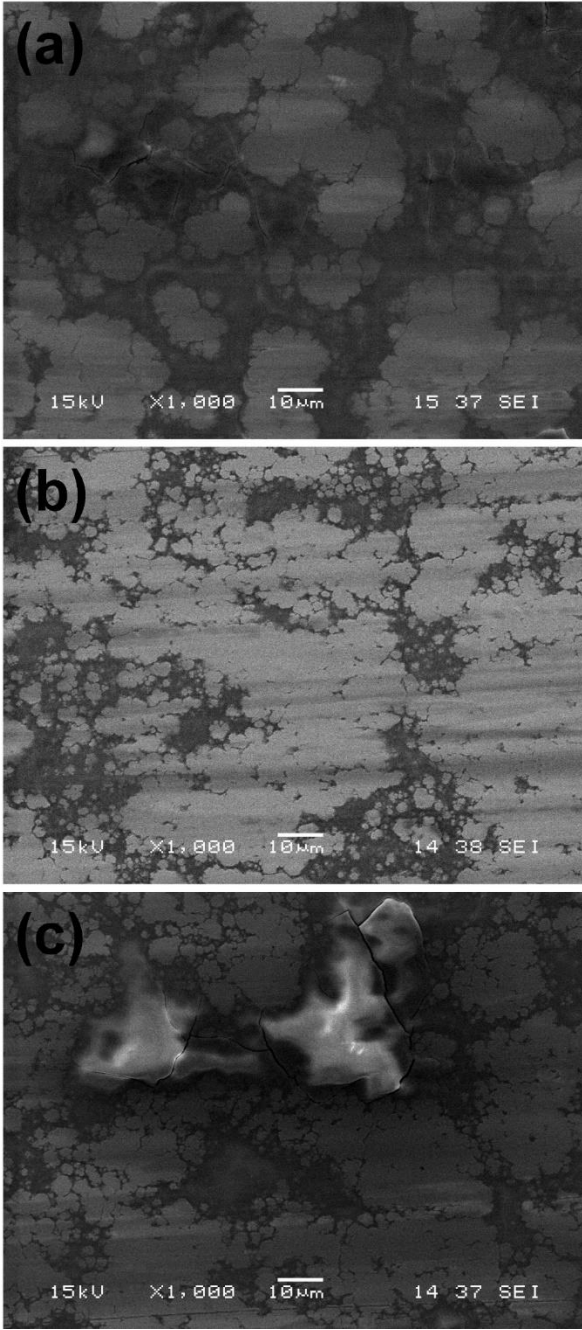
Şekil 5. Kaplamaların XRD analizi sonuçları.

2 N yük için kuru kayma koşulu altında M10 alümina bilyeye karşı farklı sodyum tungstat konsantrasyonlarında üretilen Ni-B-W alaşım kaplamaların sürtünme katsayısı değişimi ve aşınma oranları sonuçları Şekil 6'da verilmiştir. Şekil 6a'dan görüldüğü gibi 10-20- 40 g/L sodyum tungstat konsantrasyonlarında üretilen kaplamalarda sürtünme katsayısı sırasıyla yaklaşık 0.46, 0.32 ve 0.39 μ 'dur. En düşük sürtünme katsayısı değeri 20 g/L konsantrasyonunda üretilen kaplamada elde edilmiştir. Sürtünme katsayısının hızla belirli bir değere yükseldiği, stabilize olduğu ve daha sonra aşınma testi bitene kadar sabit bir değerde karalılığını koruduğu görülmüştür. 10 g/L ve 40 g/L konsantrasyonunda üretilen kaplamaların dalgalı sürtünme katsayısı eğrilerinin dalgalı olduğu ve aşınma testi boyunca kararsız bir şekilde devam ettiği görülmüştür. Bunun sebebi ara yüzeyde oluşan kararsız oksitlerin kırılıp tekrar oluşmasından dolayı olduğu düşünülmektedir. 20 g/L sodyum tungstat konsantrasyonunda üretilen kaplamanın sürtünme katsayısı eğrisi dalgasız ve aşınma testi boyunca sabit 0.32 μ değerinde devam ettiği belirlenmiştir. Sonuçlar uygun miktarda sodyum tungstat ilavesinin, sürtünme katsayısının azaltılmasında önemli bir rol oynadığını gösterir. Şekil 6b'den görüldüğü gibi 10, 20 ve 40 g/L konsantrasyonlarında üretilen kaplamalarda aşınma oranları sırasıyla yaklaşık 7.25, 5.58 ve 6.20 mm^3/Nm 'dir. En iyi aşınma performansını 20 g/L sodyum tungstat konsantrasyonunda üretilen kaplama göstermiştir. 20 g/L sodyum tungstat konsantrasyonunda üretilen Ni-B-W alaşım kaplamada en düşük aşınma oranı çıkmasının sebebi birkaç mekanizmadan dolayı olabilir. İlk olarak W ilavesi ile kaplamanın sertliğindeki artış, aşınma sırasında meydana gelen plastik deformasyona karşı direnç oluşturmaktadır. Bu durum Archard'ın teorisiyle uyumludur. Archard'ın teorisine göre bir malzemenin aşınma hızı, o malzemenin sertliği ile ters orantılıdır ve bu yüzden, artan sertlik ile kaplamanın aşınma direnci önemli ölçüde gelişmiştir. İkinci olarak yüzeyde oluşan karalı oksit tabakasında dolayı kaplamanın aşınma direnci artmıştır. Karşılıklı çalışan iki yüzey arasından oluşan kararlı bir oksit tabakası metal-metal temasını azaltarak malzemenin sürtünme özelliklerini iyileştirebilir (Mukhopadhyay et al., 2016; Ürdem et al., 2021; Vitry et al., 2011).



Şekil 6. Kaplamaların; (a) sürtünme katsayısı ve (b) aşınma oranları grafikleri.

Farklı sodyum tungstat konsantrasyonlarında üretilen Ni-B-W alaşım kaplamaların aşınma sonrası elde edilen aşınma izlerinin SEM yüzey görüntüleri Şekil 7'de verilmiştir. 10 g/L sodyum tungstat konsantrasyonunda üretilen Ni-B-W alaşım kaplamanın aşınma yüzeyleri incelendiğinde mikro çatlak oluşumun söz konusu olduğu görülmektedir. Aşınma sırasında yüzeyin büyük bir plastik deformasyona maruz kaldığı görülmekte olup yanal ve dikey olarak görülen mikro çatlakların yorulma aşınması ile birleşerek delemantasyon oluşumuna neden olacağı bilinmektedir. Sodyum tungstat konsantrasyonun artırılmasının, kaplamalar üzerindeki plastik deformasyon miktarını azalttığı, yüzeyde herhangi bir çatlak oluşumunu engellediği görülmektedir. Yüzeyde bulunan asperiteler plastik olarak deforme olduğu ve aşınma yüzeyine sıvanarak kaplamaya gelen plastik deformasyona karşı bir direnç oluşturduğu düşünülmektedir. 20 g/L sodyum tungstat konsantrasyonunda üretilen kaplamanın aşınma yüzeyini incelediğimizde, diğer kaplamaların aşınma yüzeyi ile karşılaştırıldığında malzemenin yüzeyinde plastik deformasyonun çok az olduğu, görülmüştür. Ayrıca aşınma yüzeyinde herhangi bir mikro çatlak oluşmadığı ve düzgün bir aşınma yüzeyi elde edildiği belirlenmiştir. Şekil 7b'de görüldüğü gibi, aşınma yüzeyinde çok az derin olmayan abrazyif çizgilerin oluştuğu görülmüştür. 40 g/L sodyum tungstat konsantrasyonunda üretilen kaplamanın aşınma yüzeyinde ise büyük çatlakların oluştuğu ve bu çatlakların birleşmeye başladığı görülmüştür. Burada hâkim olan aşınma mekanizması ise yorulma aşınması-abrazyif aşınma olarak düşünülmektedir (Aslan & Duru, 2021; Zhang et al., 2021).



Şekil7. Farklı sodyum tungstat konsantrasyonlu kaplamaların aşınma sonrası yüzey SEM görüntüleri: (a) 10 g/L, (b) 20 g/L ve 40 g/L.

4. Sonuç

Akımlı kaplama yöntemiyle farklı sodyum tungstat konsantrasyonu içeren banyolardan Ni-B-W kaplamalar başarılı bir şekilde üretilmiştir. Kaplama sonrası elden edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

10, 20 g/L Sodyum tungstat konsantrasyonlu kaplamaların yüzey SEM görüntülerine bakıldığında karnabahar yapısı görülmüştür. 40 g/L konsantrasyonlu kaplamada ise derin ve yayılan çatlaklar görülmüştür.

10, 20 ve 40 g/L sodyum tungstat konsantrasyonlu kaplamaların kesitleri SEM ile incelenmiş ve kaplama kalınlıkları sırasıyla 16, 20 ve 22 μm 'dir.

Üç farklı konsantrasyonlu kaplamalar içerisinde en yüksek sertlik değeri 859 HV ile 20 g/L sodyum tungstat içeren banyolardan üretilen kaplamada görülmüştür.

Aşınma sonrası 20 g/L sodyum tungstat içeren kaplamalarda en düşük aşınma oranı ve sürtünme katsayısı değerleri görülmüştür. Bu kaplamanın sürtünme katsayısı 0,32 μ , aşınma oranı ise 5.58 mm^3/Nm 'dir. Aşınma direnci açısından bu üç kaplamada karşılaştırıldığında en iyi performans 20 g/L konsantrasyonlu kaplamada görülmüştür.

5. Teşekkür

Bu çalışma, Sakarya Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Projeleri Koordinatörlüğü tarafından desteklenmiştir. (Proje No: 2019-6-22-257)

Kaynakça

- Aslan, S., & Duru, E. (2021). Microstructure and Wear Properties of Electrodeposited Ni-B-Al₂O₃ Composite Coating on Low Carbon Steel at Elevated Temperature. *Journal of Materials Engineering and Performance*, Ref 8. <https://doi.org/10.1007/s11665-021-06290-2>
- Baycik, H. (2002). Ion Nitriding and the Influence of the Properties of the Steel. 19–25.
- Brooman, E. W. (2000). Corrosion behavior of environmentally acceptable alternatives to cadmium and chromium coatings: Cadmium. Part I. *Metal Finishing*, 98(4), 42–50. [https://doi.org/10.1016/s0026-0576\(00\)81602-5](https://doi.org/10.1016/s0026-0576(00)81602-5)
- Delikanlı K, Çalık A, U. H. A. (2003). Sade Karbonlu Bir Çeliğin Borlama Özelliklerinin İncelenmesi. *BAÜ Fen Bil. Enst. Derg.* (2003), 5(1), 99–110. <https://dergipark.org.tr/en/pub/baunfbed/issue/24784/261855>
- Doğan, F., Duru, E., Uysal, M., Akbulut, H., & Aslan, S. (2022). Tribology Study of Pulse Electrodeposited Ni-B-SWCNT Composite Coating. *Jom*, 74(2), 574–583. <https://doi.org/10.1007/s11837-021-05070-6>
- Doğan, F., Uysal, M., Algül, H., Duru, E., Akbulut, H., & Aslan, S. (2020). Optimization of pulsed electro co-deposition for Ni-B-TiN composites and the variation of tribological and corrosion behaviors. *Surface and Coatings Technology*, 400(June), 126209. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126209>
- Doğan, F., Uysal, M., Duru, E., Akbulut, H., & Aslan, S. (2020). Pulsed electrodeposition of Ni-B/TiN composites: effect of current density on the structure, mechanical, tribological, and corrosion properties. *Journal of Asian Ceramic Societies*, 8(4), 1271–1284. <https://doi.org/10.1080/21870764.2020.1840704>
- Duru, E., Doğan, F., Uysal, M., Akbulut, H., & Aslan, S. (2021). Fabrication and characterization of graphene oxide reinforced Ni B composite coating by pulsed electrodeposition technique. *Diamond and Related Materials*, 120(October), 108688. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2021.108688>
- Gültekin, D., Duru, E., & Akbulut, H. (2021). Improved wear behaviors of lead-free electrodeless Ni[sbnd]B and Ni-B/CeO₂ composite coatings. *Surface and Coatings Technology*, 422(July). <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127525>
- Harachai, K., Kothanam, N., Qin, J., Boonyongmaneerat, Y., & Jaroenapibal, P. (2020). Hardness and tribological properties of co-electrodeposited Ni-W-B/B coatings. *Surface and*

- Coatings Technology, 402(June), 126313. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126313> 18539. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.03.176>
- Karaoglanli, A. C., & Turk, A. (2017). Isothermal oxidation behavior and kinetics of thermal barrier coatings produced by cold gas dynamic spray technique. *Surface and Coatings Technology*, 318, 72–81. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.12.021>
- Li, B., Li, H. J., Yao, X. Y., Tian, X. F., Jia, Y. J., & Feng, G. H. (2022). Ablation behavior of (ZrC/SiC)₃ alternate coating prepared on sharp leading edge C/C composites by CVD. *Journal of Materials Science and Technology*, 115, 129–139. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2021.10.049>
- Liquan, Z., Qunpeng, Z., & Jianhua, L. (2001). Amorphous nickel-tungsten-boron composite electrodeposits with zirconium oxide particles. *Metal Finishing*, 99(7), 28–30. [https://doi.org/10.1016/S0026-0576\(01\)81109-0](https://doi.org/10.1016/S0026-0576(01)81109-0)
- Mukhopadhyay, A., Duari, S., Kumar, T., & Prasanta, B. (2016). Tribological Performance Optimization of Electroless Ni – B Coating under Lubricated Condition using Hybrid Grey Fuzzy Logic. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series D*, 97(2), 215–231. <https://doi.org/10.1007/s40033-015-0098-0>
- Nagai, T., Hodouchi, K., & Matsubara, H. (2014). Relationship between film composition and microhardness of electrodeposited Ni-W-B films prepared using a citrate-glycinate bath. *Surface and Coatings Technology*, 253, 109–114. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.05.022>
- Nemane, V., & Chatterjee, S. (2021). Evaluation of microstructural, mechanical, and tribological characteristics of Ni-B-W-SiC electroless composite coatings involving multi-pass scratch test. *Materials Characterization*, 180(February), 111414. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2021.111414>
- Steffani, C., & Meltzer, M. (1995). Electrodeposited tungsten-nickel-boron: A replacement for hexavalent chromium. <http://www.osti.gov/servlets/purl/72974-QMzJhC/webviewable/>
- Topuz, P. (2016). DIN 1.2842 çeliğinin borlanması ile oluşan borür tabakası üzerine borlama sıcaklık ve süresinin etkileri. 1(1), 15–19.
- Ürdem, Ş., Duru, E., Algül, H., Uysal, M., & Akbulut, H. (2021). Evaluation of high temperature tribological behavior of electroless deposited NiB–Al₂O₃ coating. *Wear*, 482–483(June), 203960. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.203960>
- Uysal, M., Algül, H., Duru, E., Kahraman, Y., Alp, A., & Akbulut, H. (2021). Tribological properties of Ni–W–TiO₂–GO composites produced by ultrasonically–assisted pulse electro co–deposition. *Surface and Coatings Technology*, 410(February), 126942. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.126942>
- Vitry, V., Kanta, A. F., & Delaunois, F. (2011). Mechanical and wear characterization of electroless nickel-boron coatings. *Surface and Coatings Technology*, 206(7), 1879–1885. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2011.08.008>
- Yang, J., Fu, H., He, Y., Gu, Z., Fu, Y., Ji, J., Zhang, Y., & Zhou, Y. (2022). Investigation on friction and wear performance of volcano-shaped textured PVD coating. *Surface and Coatings Technology*, 431(September 2021), 128044. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.128044>
- Zhang, H., Wang, J., Li, Q., Chen, S., & Ma, C. (2021). Microstructure and performance of magnetic field assisted, pulse-electrodeposited Ni–TiN thin coatings with various TiN grain sizes. *Ceramics International*, 47(13), 18532–18539. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.03.176>