

Ni-B Alaşım Kaplamaların Kristal Yapı ve Sertlik Özelliklerine Akım Yoğunluğunun Etkisi

Ersin ÜNAL¹ ORCID 0000-0002-3183-9592

Abdulkadir YAŞAR^{*2} ORCID 0000-0002-1548-2386

İsmail Hakkı KARAHAN³ ORCID 0000-0002-8297-3521

¹Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü,
Osmaniye

²Çukurova Üniversitesi, Ceyhan Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Adana

³Mustafa Kemal Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, Hatay

Geliş tarihi: 22.03.2022

Kabul tarihi: 30.06.2022

Atıf şekli/How to cite: ÜNAL, E., YAŞAR, A., KARAHAN, İ.H., (2022). Ni-B Alaşım Kaplamaların Kristal Yapı ve Sertlik Özelliklerine Akım Yoğunluğunun Etkisi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 37(2), 439-447.

Öz

Ni-B alaşım kaplamalar yüksek sertlik, yüksek aşınma direnci ve iyi korozyon direnci gibi üstün özellikleri sayesinde birçok endüstri dalında başarılı bir şekilde uygulanabilmektedir. Bu çalışmada, Ni-B alaşım kaplamalar geleneksel elektrokimyasal kaplama metoduyla paslanmaz çelik altlık üzerine farklı akım yoğunluğu değerlerinde depolanmıştır. Elektrokimyasal depolama işleminde Watts tipi geleneksel nikel banyosu kullanılmıştır. Nikel ana yapısına alaşım malzemesi olarak ilave edilen bor elementi kaynağı olması amacıyla elektrolite trimetilamin boran kompleksi (TMAB) ilave edilmiştir. Üretilen numunelerin kristal yapı, mikrosertlik ve morfoloji özellikleri incelenmiştir. Akım yoğunluğu azalması Ni-B kristal yapısının tane büyüklüğünde azalmaya neden olmuş ve yapının amorf yapıya doğru kaymasına neden olmuştur. Ayrıca, akım yoğunluğu azalması neticesinde Ni-B kaplamanın mikrosertlik değerinde de artış olduğu tespit edilmiştir. Bunun yanında Ni-B alaşım kaplamaların farklı akım yoğunluğu değerlerinde depolanması neticesinde yüzey morfolojisinin de etkilendiği ve numunelerin farklı görünümüne sahip olduğu anlaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Elektrodopolama, Akım yoğunluğu, Mikrosertlik, Kristal yapı, Ni-B alaşım kaplama

The Effect of Current Density on the Crystal Structure and Hardness Properties of Electrochemically Deposited Ni-B Alloy Coatings

Abstract

Ni-B alloy coatings can be successfully applied in many industries thanks to their superior properties such as high hardness, high wear resistance and good corrosion resistance. In this study, Ni-B alloy coatings were deposited on a stainless steel substrate at different current density values by conventional electrochemical coating method. A traditional Watts type nickel bath was used in the electrochemical deposition process. Trimethylamine borane complex (TMAB) was added to the electrolyte in order to be

*Sorumlu (Corresponding author) yazar: Abdulkadir YAŞAR, ayasar@cu.edu.tr

a source of boron element added to the nickel main structure as an alloying material. The crystal structure, microhardness and morphology properties of the produced samples were investigated. The decrease in current density caused a decrease in the grain size of the Ni-B crystal structure and caused the structure to shift towards amorphous. In addition, it was determined that the microhardness value of the Ni-B coating increased as a result of the decrease in current density. In addition, as a result of the Ni-B alloy coatings being deposited at different current density values, it was understood that the surface morphology was also affected and the samples had different appearances.

Keywords: Electrodeposition, Current density, Microhardness, Crystal structure, Ni-B alloy coating

1. GİRİŞ

Çeşitli malzemelerden imal edilen parçaların kaplanması önemli bir endüstriyel prosestir ve fonksiyonel ince filmlerle kaplanmış çok sayıda endüstriyel ürün işlenebilmektedir. Ni-B alaşımlı film, fonksiyonel kaplamalardan biridir ve üstün özellikleri nedeniyle havacılık, otomotiv, kimya ve elektrik gibi birçok endüstrilerde uygulamaları bulunmaktadır [1].

Ni-B alaşımları mükemmel lehimleme, aşınma direnci, korozyon direnci ve yüksek sıcaklık direnci gibi özellikleri sebebiyle büyük ilgi görmektedir. Bu tür süper performanslı alaşım kaplamaları elde etmek için son birkaç on yılda akımsız kaplama tekniği kullanıla gelmiştir. Akımsız kaplama esas olarak, çeşitli malzemelerin yüzeylerinde biriktirmek amacıyla metal iyonlarını, güçlü bir indirgeyici ajan kullanılan ve metal iyonları içeren bir çözeltide metal olarak indirgemek ve yoğun bir kaplama oluşturmak amacıyla, yükseltgeme ve indirgeme ilkesine dayanır. Elektrokaplama ise, elektroliz prensibine dayanır ve elektrik alan kuvvetinin etkisi altında, metal iyonları katottan elektronları alır ve neticede altlık (katot) yüzey üzerine metal olarak depolanır. Bununla birlikte, akımsız kaplama ile hazırlanan kaplama malzemesinde, kaplamanın üst kısımlarındaki kristal hücreler daha büyüktür ve yoğun değildir. Elektro kaplama, akımsız kaplamaya göre daha yüksek üretim verimliliğine sahiptir ve hazırlanan kaplama malzemesinin sertliği ve aşınma direnci, akımsız olarak depolanan kaplama malzemesininkinden daha iyidir. Metal alaşımlı kaplamanın verimli ve ekonomik olması ve metal yüzey modifikasyonunun gerçekleştirilebilmesi için

elektrodepozisyon yönteminin kullanılması özellikle önem arz etmektedir [2].

Bekish ve arkadaşları [3] bor kaynağı olarak sodyum dekahidro-closo-dekaborat içeren bir nikel elektrokaplama banyosunda farklı bor içeriklerine sahip Ni-B alaşım kaplamalar üretmişler ve elde edilen bor içeriklerinin kaplamanın korozyon ve mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Yazarlara göre %4 B içeriğine sahip Ni-B kaplama en iyi korozyon direncini göstermiştir. Bunun yanında yazarlar bor içeriğinin artmasıyla mikrosertlik ve aşınma dayanımının artış gösterdiğini raporlamışlardır. Lopez ve arkadaşları [4] dimetilamin boran (DMAB) içeren sülfamat banyosunda elektrokaplama yoluyla Ni-B alaşım kaplamaları çelik altlık üzerine biriktirmişlerdir. Yazarlar banyodaki bor kaynağı konsantrasyonunun Ni-B kaplamaların özellikleri üzerine etkilerini araştırdıklarını raporlamışlardır. Yazarlar artan sertliğin bor içeriğinden çok azalan kristal tane boyutuna bağlı olduğunu belirtmişlerdir. Yazarlar ayrıca üretilen kaplamalara ısı işlem uygulanması ile birlikte sertlikte artış meydana geldiğini, ayrıca korozyon dayanımında ise kaplamadaki çatlaklardan dolayı düşük performans sergilendiğini ifade etmişlerdir. Matsui ve arkadaşları [5], aralıklı trimetilamin boran kompleksi (TMAB) ilavesi ile Ni-B alaşımı kaplamaları elektrokimyasal olarak depolamışlar ve bu yöntemin daha homojen bor içerikli kaplamalar üretmekte faydalı olduğunu raporlamışlardır. Yazarlar ayrıca bu yöntemle ürettikleri Ni-B alaşım kaplamalarda gerginlik ve çatlak sorunlarının düzeldiğini ve geleneksel olarak üretilen Ni-B alaşımlara göre daha sünek malzemeler elde ettiklerini ifade etmişlerdir. Fang ve arkadaşları [6], farklı DMAB konsantrasyonlarında Ni-B alaşım kaplamaları

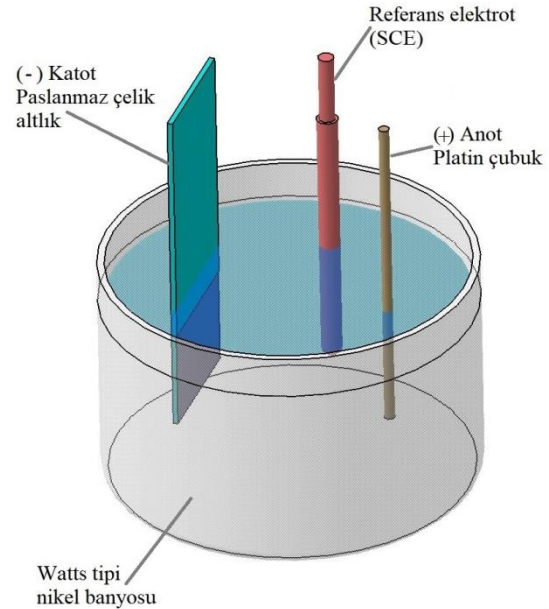
yine elektrokimyasal depolama tekniği ile üretmişler ve elde ettikleri numunelerin kristal yapı ve mekanik özelliklerini irdelemişlerdir. Kristal yapı incelemeleri sonucunda Ni-B alaşım kaplamaların kristal ve amorf fazlardan oluştuğunu, amorf yapı oranının ise artan bor içeriği ile artış gösterdiğini ifade etmişlerdir. Ayrıca Ni-B alaşımların kalıntı basma gerilimlere sahip olduğunu ve bu durumun kristallik ve tane boyutu ile ilgili olduğunu raporlamışlardır.

Elektrikli veya elektriksiz kaplama metodunda nikeli bor ile alaşımla yapabilmek için bor kaynağı olarak kullanılabilir birçok seçenek mevcut olmasına karşın, literatürde genelde TMAB tercih edildiği görülmektedir. Elektrokimyasal depolamada bor kaynağı olarak kullanılabilen DMAB'ın, TMAB'a göre daha yüksek sıcaklıklarda ($> 75\text{ }^{\circ}\text{C}$) çözündüğü ve TMAB'lı kaplama banyosunun diğerine göre daha stabil olduğu Sheu ve arkadaşları [7] tarafından Ni-B ile ilgili çalışmalarında ortaya konmuştur. Bu bilgiler ışığında TMAB'ın elektrokimyasal banyolar için uygun bir bor kaynağı olduğu öne sürülebilir. Elektrodepolama parametreleri elde edilecek filmin yapısal ve mekanik özellikleri üzerine belirleyicidir. Elektrolit pH değeri, ortam sıcaklığı, karıştırma hızı, uygulanan potansiyel, elektrolite ilave edilen kimyasallar ve akım yoğunluğu elde edilecek ürünün nasıl olacağına karar verir. Akım yoğunluğu, parçacık/metal ara yüzünün büyüme hızını ve dolayısıyla aralarındaki fiziksel bağın gücünü etkileyen, elektro-çökeltmiş malzemeler için önemli bir parametredir. Akım yoğunluğu ne kadar büyük olursa, belirli bir parçacığın ortak bir yere yerleştirilme olasılığı o kadar yüksek olur ve parçacıklar katot yüzeyinde o kadar hızlı tutulur. Bu çalışmada Ni-B alaşımı elektrokaplama metodu ile paslanmaz çelik altlık üzerine farklı akım yoğunlukları ile biriktirilmiş ve bor kaynağı olarak TMAB kullanılmıştır. Elde edilen Ni-B alaşım kaplamaların kristal yapı, mikrosertlik ve morfolojik özellikleri üzerine akım yoğunluğunun etkileri incelenmiştir.

2. MATERYAL VE METOT

Ni-B alaşım kaplamalar geleneksel Watts tipi nikel banyosunda elektrokimyasal olarak depolanmıştır.

Elektrolitte nikel kaynağı olarak $240\text{ g/l NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (Nikel (II) sülfat heksahidrat) ve $45\text{ g/l NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (Nikel (II) klorür heksahidrat) kullanılmıştır. Kompleks yapıcı ajan olarak $30\text{ g/l H}_3\text{BO}_3$ (Borik asit) kullanılmıştır. Nikel ana yapısının bor ile alaşımlanması amacıyla banyoya 3 g/l TMAB ilave edilmiştir. Ni-B alaşım kaplamalar 50 mA/cm^2 ve 15 mA/cm^2 olmak üzere iki farklı akım yoğunluğunda depolanmıştır. Banyo sıcaklığı $43 \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ civarlarında sabit tutulmuştur. Elektrolitin pH değeri 4 olarak ayarlanmıştır. Depolama süresi ise 60 dk ile sınırlandırılmıştır. 3 elektrotlu sistemin kullanıldığı depolama süreçlerinde altlık olarak (katot) 304 kalite paslanmaz çelik kullanılmıştır. Anot olarak ise platin tel çubuk kullanılmıştır. Ayrıca referans elektrot olarak ise doygun kalomel elektrot (SCE) kullanılmıştır. Şekil 1'de üç elektrotlu depolama sisteminin şematik gösterimi sunulmuştur. Katot, anot ve referans elektrot banyo içine dikey olarak yerleştirilmiş ve aralarında yaklaşık olarak üçer cm aralık bırakılmıştır. Bütün elektrokimyasal depolama süreçlerinde CH instruments marka ve 608E model cihazdan yararlanılmıştır. Altlık kaplama alanı 4 cm^2 olarak belirlenmiş ve akım yoğunluğu bu alana uygun olarak ayarlanmıştır.



Şekil 1. Üç elektrotlu depolama sisteminin şematik gösterimi

Kaplama işleminden önce altlık malzemesi kabadan inceye doğru bir dizi zımparalama işlemine tabi tutulmuş olup sonrasında %10 HCl (hidroklorik asit) ile karıştırılmış saf su içinde 1-2 dk süreyle dağlanmış ve sonrasında saf su ile durularak oda sıcaklığında kurumaya bırakılmıştır. Ni-B kaplamalar depolandıktan sonra saf su ile durularak oda sıcaklığında kurumaya bırakılmıştır.

Numunelerin XRD desenleri, üretilen Ni-B kaplamaların kristal yapılarının karakterize edilebilmesi için elde edilmiştir. $2\theta=0-100^\circ$ aralığında, 40 kV ve 30 mA değerlerinde $\text{CuK}\alpha$ radyasyonu üreten PANalytical marka, Empyrean model XRD cihazı, X ışını kırınım desenlerini elde etmek amacıyla kullanılmıştır ($\lambda = 1.5418 \text{ \AA}$).

Ni-B kaplamaların ortalama kristal tane büyüklüğü (D), dislokasyon yoğunluğu (δ) ve mikrogerilim (ϵ) değerleri elde edilirken aşağıda verilen formüller kullanılmıştır [8-14].

$$D = \frac{0,94 \lambda}{\beta \cos \theta} \quad (1)$$

(1) numaralı Debye-Scherrer denkleminde λ : X-ışını dalga boyu, β : XRD pikinin yarı maksimumdaki genişliğinin radyan cinsinden değeri (FWHM), θ : ise XRD pikinin Bragg yansıma açısıdır [14].

$$\epsilon = \frac{\beta}{4 \tan \theta} \quad (2)$$

(2) numaralı denklem mikrogerilim hesaplanmasında kullanılmıştır [8].

$$\delta = \frac{1}{D^2} \quad (3)$$

(3) numaralı denklem dislokasyon yoğunluğu hesaplanmasında kullanılmıştır. Burada D: ortalama kristal tane büyüklüğünü temsil etmektedir [8,11-13].

Numune üzerine 500 g yük 10 s boyunca uygulanarak mikro sertlik değerleri ölçülmüştür. Mikro sertlik değeri ölçümleri her numunenin en az 10 farklı bölgesinden ölçümler alınarak ve bu

ölçümlerin ortalaması olarak kabul edilerek gerçekleştirilmiştir. Anormal derecede sapma gösteren sertlik değerleri numunenin ortalama mikro sertlik hesabına katılmamıştır. Future-TECH FM-700e marka ve model cihaz mikro sertlik ölçümleri için kullanılmıştır. Ayrıca, numunelerin yüzey morfolojileri optik mikroskop resimleri üzerinden incenmiş ve görüntüler Olympus BX51 marka ve model cihaz ile edilmiştir.

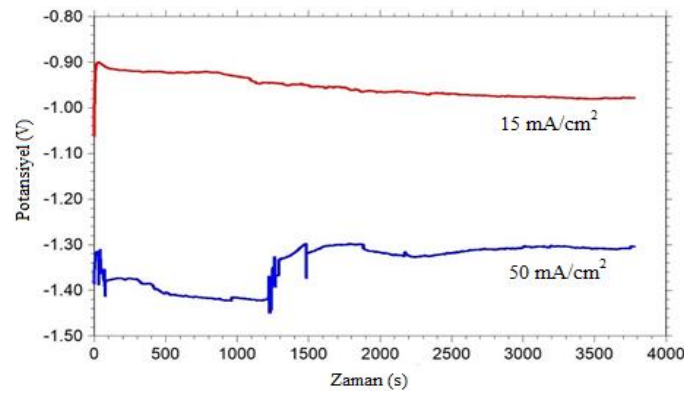
3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Ni-B alaşım kaplamaların depolama esnasında kaydedilen kronopotansiyometri grafikleri Şekil 2'de verilmiştir. Kronopotansiyometri grafikleri sabit akım uygulanması ile birlikte potansiyelin zamanla değişimini veren eğrilerdir. Bu grafikler sayesinde depolama zamanı ile potansiyel değişimleri gözlenebilmekte ve eğrilerin durumuna göre banyolar hakkında yorumlar yapılabilmektedir. Şekil 2 incelendiğinde 15 mA/cm^2 akım yoğunluğunda depolanan numunede depolama potansiyelinin $-0,9 \text{ V}$ civarlarında başladığı ve nispeten yatay bir seyir izlediği görülmektedir. Depolama zamanı sonuna doğru ise potansiyelin $-1,0 \text{ V}$ civarlarına yaklaştığı anlaşılmaktadır. 50 mA/cm^2 akım yoğunluğunda depolanan numuneye ait kronopotansiyometri eğrisini incelediğimizde, akım yoğunluğu artışıyla birlikte depolanma potansiyel değerlerinde de artış olduğu görülmektedir. Depolamanın $-1,4 \text{ V}$ potansiyel civarlarında başladığı ve salınımlı bir seyir izlediği anlaşılmaktadır. Depolama sonuna doğru ise potansiyelin $-1,3 \text{ V}$ civarlarına doğru azaldığı görülmektedir. Kronopotansiyometri eğrilerinden görüleceği üzere, 15 mA/cm^2 akım yoğunluğuna sahip banyonun yatay seyirinden dolayı daha stabil olduğu, aksine 50 mA/cm^2 akım yoğunluğuna sahip banyonun ise salınımlı yapısından dolayı daha dengesiz olduğu ifade edilebilir.

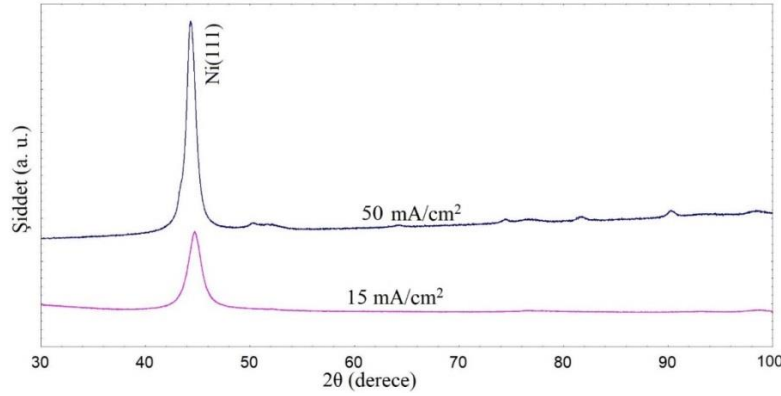
Ni-B alaşımına depolama akım yoğunluğunun etkisini belirlemek amacıyla 50 ve 15 mA/cm^2 değerlerinde kaplamalar üretilmiş ve her iki numunenin XRD desenleri Şekil 3'de verilmiştir. Ayrıca, bu desenlerden elde edilen ortalama kristal tane boyutu, mikrogerilim ve dislokasyon

yoğunluğu değerleri Çizelge 1’de sunulmuştur. Şekil 3’de görüldüğü üzere 44° civarlarında görülen (111) nikel piki haricinde nikelde özgü diğer piklerin desene yansımadağı anlaşılmaktadır. Akım yoğunluğu değerinin 50 ’den 15 mA/cm^2 ’ye azalmasıyla birlikte ana yapı nikelde ait (111) pikinin şiddetinin de ciddi oranda azaldığı görülmektedir. Ayrıca Çizelge 1’de verilen değerler incelendiğinde, ortalama kristal tane boyutunun 8.7 ’den 6 değerine düştüğü

görülmektedir. Daha önceki çalışmalara göre metal matrisli kompozit kaplamalarda yüksek akım yoğunluğu kristalleşmeyi teşvik etmektedir [15-17]. Ortalama kristal tane boyutunun azalmasının yanı sıra, mikrojericim ve dislokasyon yoğunluğu değerlerinin de artış gösterdiği anlaşılmaktadır. Özellikle dislokasyon yoğunluğu değeri yaklaşık iki kat artış göstermiştir. Akım yoğunluğunun azalmasıyla birlikte kristal tane yapısının amorf bir yapıya doğru değişim gösterdiği ifade edilebilir.



Şekil 2. Ni-B alaşım kaplamaların depolama esnasında kaydedilen kronopotansiyometri grafikleri



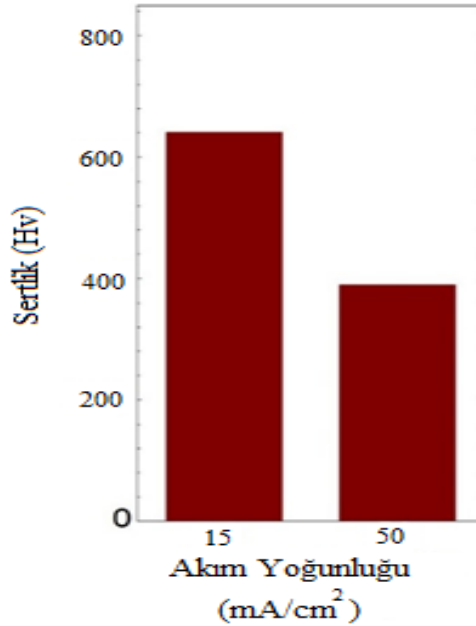
Şekil 3. Ni-B alaşımı kristal yapısına akım yoğunluğunun etkisi (TMAB banyo konsantrasyonu 3 g/l).

Çizelge 1. Farklı akım yoğunluğu değerlerinde depolanan Ni-B alaşım kaplamaların XRD desenlerinden elde edilen parametreler

Akım yoğunluğu	2θ (derece)	FWHM- β (radyan)	Ortalama kristal tane büyüklüğü-D (nm)	Mikrojericim- ϵ	Dislokasyon yoğunluğu- δ (nm^{-2})
15 mA/cm^2	44,7	0,02619	6	$15,9 \times 10^{-3}$	$27,7 \times 10^{-3}$
50 mA/cm^2	44,3	0,01785	8,7	$10,9 \times 10^{-3}$	$13,2 \times 10^{-3}$

Ni-B alaşım kaplamaların mikrosertlikleri üzerinde akım yoğunluğunun etkisini incelemek için iki farklı akım yoğunluğu değerinde numune üretilmiş ve elde edilen numunelerden alınan mikrosertlik sonuçları Şekil 4’de verilmiştir. Üretilen numunelerin TMAB banyo konsantrasyonu 3 g/l’dir. 50 mA/cm² akım yoğunluğunda üretilen Ni-B kaplamada sertlik değeri 390 Hv olarak ölçülürken, 15 mA/cm² akım yoğunluğunda üretilen Ni-B kaplamada ise mikrosertlik değeri 640 Hv olarak ölçülmüştür. Ni-B alaşım kaplamalarda da akım yoğunluğu değeri

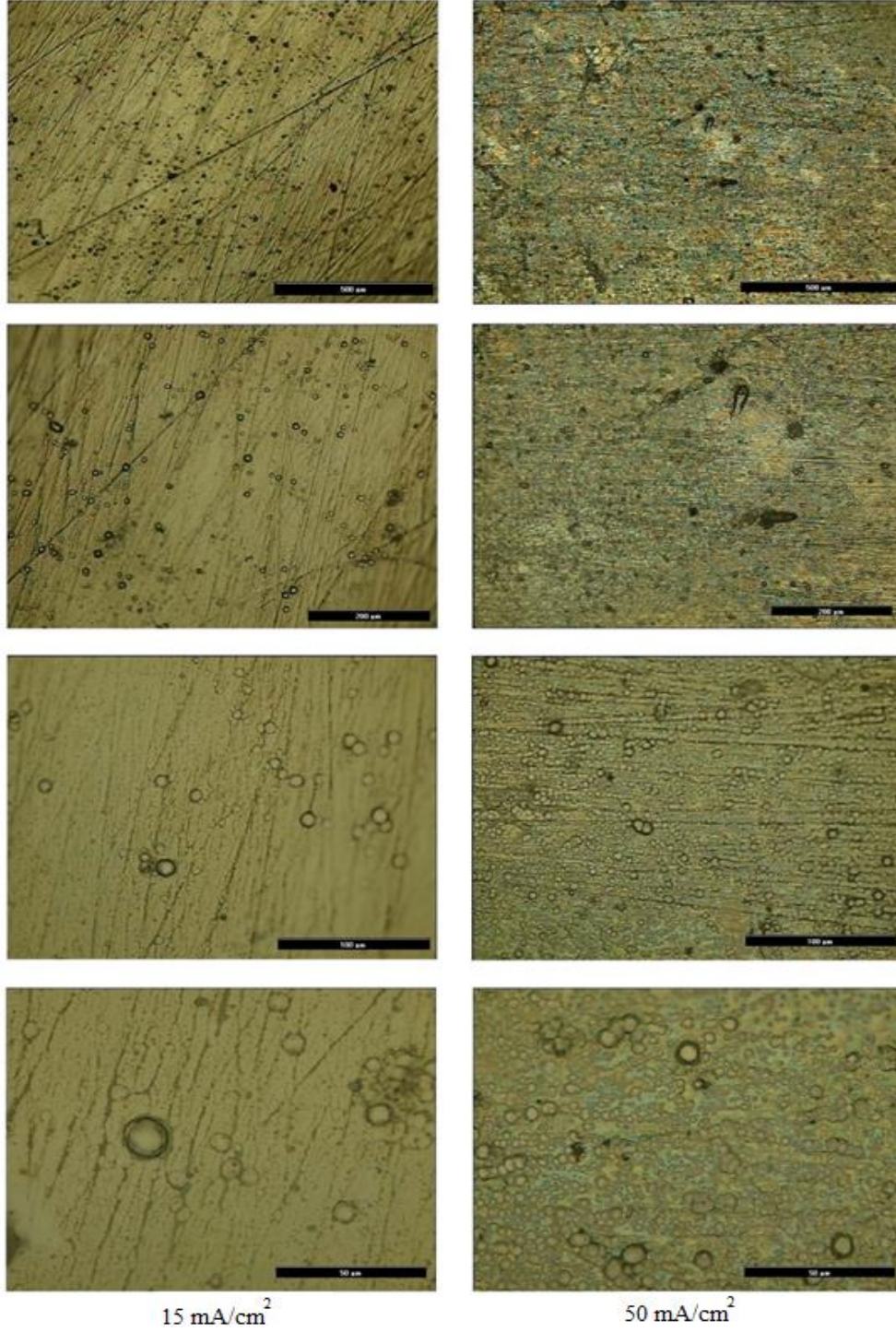
artırıldığında mikrosertlikte azalma meydana geldiği görülmektedir. Yüksek akım yoğunluğu değerlerinde mikrosertlikte meydana gelen bu azalma, nikel metali iyonlarının daha hızlı bir şekilde depolanması neticesinde, elektrolit içindeki bor atomlarının nikel ile birlikte eş depolanma miktarlarında meydana gelebilecek azalma dolayısıyla gerçekleşmiş olabilir. Akım yoğunluğu değeri arttıkça metal iyonları daha hızlı hareket etmekte, daha kısa sürede daha fazla metal depolanması gerçekleşmektedir.



Şekil 4. Ni-B alaşım kaplamaların mikrosertliği üzerinde akım yoğunluğunun etkisi (TMAB banyo kons. 3 g/l)

Şekil 5’te farklı akım yoğunluğu değerlerinde depolanmış Ni-B alaşım kaplamaların optik mikroskop resimleri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Optik resimler yukardan aşağıya sırasıyla 100x, 200x, 500x ve 1000x büyütme oranlarında elde edilmiştir. Sol sütunda 15 mA/cm² değerinde depolanan Ni-B alaşım kaplama, sağ sütunda ise 50 mA/cm² değerinde depolanan Ni-B alaşım kaplama resimleri verilmiştir. Farklı büyütme oranlarında verilen optik resimlerden de görüldüğü üzere akım yoğunluğunun yüzey morfolojisini etkilediği

anlaşılmaktadır. 15 mA/cm² akım yoğunluğu değerinde depolanan kaplamanın yüzey morfolojisi 50 mA/cm² akım yoğunluğunda depolanan kaplamaya göre daha düzgün bir görünüme sahiptir. 50 mA/cm² akım yoğunluğu değerine sahip numunede dairesel tepecikler daha sık ve yoğun görünürken, 15 mA/cm² akım yoğunluğu değerine sahip numunede dairesel tepeciklerin daha seyrek olduğu ve kaplama yüzeyinde yer yer düz alanların olduğu göze çarpmaktadır. Aksine, 50 mA/cm² akım yoğunluklu numunede dairesel tepecikler tüm yüzeyi kaplamaktadır.



Şekil 5. Farklı akım yoğunluklarında depolanan Ni-B alaşım kaplamaların optik mikroskop resimleri (Yukarıdan aşağıya 100x, 200x, 500x ve 1000x büyütme oranlarında)

4. SONUÇLAR

Bor kaynağı olarak TMAB kullanılan Ni ana yapılı elektrokimyasal Ni-B alaşım kaplamalar paslanmaz çelik altlık üzerine başarılı bir şekilde depolanmıştır. 50 ve 15 mA/cm² olmak üzere iki farklı akım yoğunluğunda depolama yapılmış ve banyoya TMAB banyo konsantrasyonu 3 g/l olarak ilave edilmiştir. Üretilen Ni-B kaplamaların kristal yapı özellikleri XRD grafikleri üzerinden incelenmiş ve aynı zamanda kaplamaların mikro sertlik değerleri ölçülmüştür. Bunun yanında kaplamaların yüzey morfolojileri de optik mikroskop resimleri üzerinden analiz edilmiştir. Analiz sonuçlarına göre akım yoğunluğu azaltıldığında Ni-B kristal yapısının tane büyüklüğünün azaldığı ve yapının daha amorf biçimli olmaya meyil gösterdiği anlaşılmaktadır. Ayrıca akım yoğunluk değeri 50 mA/cm² değerinden 15 mA/cm² değerine azaltılmasıyla sertlik değerinin 390 Hv'den 640 Hv değerine yükseldiği görülmüştür. Elde edilen optik mikroskop resimlerinde alınan görüntülere göre akım yoğunluğunun Ni-B alaşım kaplamaların yüzey morfolojisini etkilediği ve akım yoğunluğu artışının yüzeyi çeşitli dairesel tepelikler şeklinde daha kaba bir biçime dönüştürdüğü ifade edilebilir.

5. KAYNAKLAR

1. Ogihara, H., Udagawa, K., Saji, T., 2011. Effect of Boron Content and Crystalline Structure on Hardness in Electrodeposited Ni-B Alloy Films. *Surface&Coatings Technology*, 206, 2933-2940.
2. Zhang, Y., Zhang, S., He, Y., Li, H., He, T., Fan, T., Zhang, H., 2021. Mechanical Properties and Corrosion Resistance of Pulse Electrodeposited Ni-B/B₄C Composite Coatings. *Surface and Coatings Technology*, 421, 127458.
3. Bekish, Y.N., Poznyak, S.K., Tsybulskaya, L.S., Gaevskaya, T.V., 2009. Electrodeposited Ni-B Alloy Coatings; Structure, Corrosion Resistance and Mechanical Properties. *Electrochimica Acta*, 55, 2223-2231.
4. López, J.R., Méndez, P.F., Pérez-Bueno, J.J., Trejo, G., Stremmsdoerfer, G., Meas, Y., 2016. The Effect of Boron Content, Crystal Structure, Crystal Size on the Hardness and the Corrosion Resistance of Electrodeposited Ni-B Coatings. *International Journal of Electrochemical Science*, 11, 4231-4244.
5. Matsui, I., Omura, N., Yamamoto, T., Takigawa, Y., 2018. Electrodeposition with Intermittent Addition of Trimethylamine Borane to Produce Ductile Bulk Nanocrystalline Ni-B Alloys. *Surface & Coatings Technology*, 337, 411-417.
6. Fang, X., Jin, G., Cui, X.F., Liu, J.N., 2016. Evolution Characteristics of Residual Stress in Metastable Ni-B Alloy Coatings Identified by Nanoindentation. *Surface & Coatings Technology*, 305, 208-214.
7. Sheu, H.H., Tzeng, Y.C., Syu, J.H., 2019. Study of the Strengthening Mechanism of Electrodeposited Ni-B Thin Films with Ultra-low Boron Content. *Materials Letters*, 238, 275-277.
8. Boukhoubza, I., Khenfouch, M., Achehboune, M., Mothudi, B.M., Zorkani, I., Jorio, A., 2019. X-ray Diffraction Investigations of Nanostructured ZnO Coated with Reduced Graphene Oxide. *Journal of Physics*, 1292, 012011.
9. Bindu, P., Thomas, S., 2014. Estimation of Lattice Strain in ZnO Nanoparticles: X-Ray Peak Profile Analysis. *Journal of Theoretical and Applied Physics*, 8, 123-134.
10. Saleem, M., Fang, L., Ruan, H.B., Wu, F., Huang, Q.L., Xu, C.L., Kong, C.Y., 2012. Effect of Zinc Acetate Concentration on the Structural and Optical Properties of ZnO Thin Films Deposited by Sol-Gel Method. *International Journal of Physical Sciences*, 7(23), 2971-2979.
11. Bilgin, V., Köse, S., Atay, F., Akyüz, I., 2005. The Effect of Substrate Temperature on the Structural and Some Physical Properties of Ultrasonically Sprayed CdS Films. *Materials Chemistry and Physics*, 94, 103-108.
12. Khan, Z.R., Zulfequar, M., Khan, M.S., 2010. Optical and Structural Properties of Thermally Evaporated Cadmium Sulphide Thin Films on Silicon (100) Wafers. *Materials Science and Engineering B*, 174, 145-149.

13. Williamson, G.B., Smallman R.C., 1956. Dislocation Densities in Some Annealed and Cold-Worked Metals From Measurements on the X-ray Debye-Scherrer Spectrum. Philosophical Magazine A, 8(1), 34-46.
14. Patterson, A.L., 1939. The Scherrer Formula for X-ray Particle Size Determination. Physical Review, 56, 978-982.
15. Usta, M., Karahan, İ.H., 2022. Effect of Current Density on Structural and Radiation Shielding Characteristics of NiCoB/hBN Composites. Radiation Physics and Chemistry, 194, 110027.
16. Krishnaveni, K., Narayanan, T.S.N.S., Seshadri, S.K., 2008, Electrodeposited Ni-B-Si₃N₄ Composite Coating: Preparation and Evaluation of Its Characteristic Properties. Journal of Alloys and Compounds, 466, 412-420.
17. Zhang, D., Cui, X., Jin, G., Cai, Z., Dong, M., 2018. Thermal Stability of Ni-B/La₂O₃ Coatings by Electro-Brush Plating Technique. Surface & Coatings Technology, 349, 1042-1047.

