

Makalenin Geliş Tarihi : 06.02.2009
Makalenin Kabul Tarihi : 11.08.2009

ISIL İŞLEMİN AKIMSIZ Ni-B KAPLAMANIN MİKRO-YAPISINA, KOROZYON DİRENCİNE VE SERTLİĞİNE ETKİSİ

Mustafa ANIK¹, Erhan KÖRPE², Bedri BAKSAN³

ÖZET: Yüksek bor içeren Ni-B kaplama daha önce optimize edilen banyoda elde edilmiş ve tasarlanan ısıtma işlemi (450 °C de 1 saat) bu kaplamanın mikro-yapısına, korozyon direncine ve sertlik değerine etkisi araştırılmıştır. Ni-B kaplamanın ısıtma işlemi koşullarında büyük ölçüde amorf yapıya sahip olduğu görülmüştür. Isıtma işlemi ile birlikte kaplama yapısında kristalleşme gerçekleşmiş ve beraberinde Ni₃B ile Ni₂B fazları oluşmuştur. Uygulanan ısıtma işlemi kaplamanın korozyon direncini düşürdüğü gözlemlenmiştir. Korozyon direncindeki bu düşüş ısıtma işlemi ile amorf yapının bozulmasına ve yapısal hataların ortaya çıkmasına bağlanmıştır. Isıtma işlemi kaplamanın sertlik değerini ise önemli ölçüde arttırmıştır. Isıtma işlemi koşullarında kaplamanın mikro-sertliği 704 VHN₁₀₀ iken ısıtma işlemi ile mikro-sertlik değeri 1100 VHN₁₀₀ olmuştur. Gerçekleşen faz dönüşümü (Ni-B fazlarının oluşumu) kaplama sertliğindeki artışın temel sebebi olarak görülmüştür. Ancak faz dönüşümüyle ortaya çıkan mikro-çatlakların katkısının da olabileceği düşünülmüştür.

ANAHTAR KELİMELELER : Akımsız Kaplama, Ni-B, Korozyon, Mikro-yapı, Sertlik, Elektrokimyasal Empedans

EFFECT OF HEAT TREATMENT ON THE MICRO-STRUCTURE, CORROSION RESISTANCE AND HARDNESS OF ELECTROLESS Ni-B COATING

ABSTRACT: The electroless Ni-B coating with the high boron content was obtained in the previously optimized bath and the effect of the designed heat treatment (at 450 °C for 1 hr) on the coating micro-structure, corrosion resistance and hardness was investigated. It was observed that the Ni-B electroless coating was mainly amorphous in the as-deposited condition. Upon heat treatment, the coating structure crystallized along with the formation of Ni₃B and Ni₂B phases. After heat treatment the corrosion resistance of the coating was observed to reduce. This reduction in the corrosion resistance was attributed to the destruction of the amorphous structure and appearance of the structural defects. The hardness of the coating increased significantly with the heat treatment. While the micro-hardness of the as-deposited coating was 704 VHN₁₀₀, that of the heat-treated coating was 1100 VHN₁₀₀. The phase transformation (the formation of Ni-B phases) was thought as the main reason for the improvement in the hardness. Accompanied micro-crack formation, however, was also considered to have contribution to the hardness improvement with the applied heat treatment.

KEYWORDS : Electroless Coating, Ni-B, Corrosion, Micro-structure, Hardness, Electrochemical Impedance

^{1,2,3} Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi,
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Meşelik Kampüsü 26480 ESKİŞEHİR

I. GİRİŞ

Akımsız nikel-bor kaplama yüksek sertlik ve aşınma direnci, iyi kayganlık ve lehimlenebilirlik gibi özelliklerinden dolayı havacılık, otomotiv, kimya ve elektrik endüstrilerinde kullanım bulmaktadır [1,2]. Ni-B kaplamaların özelliklerini büyük ölçüde kaplama bileşimindeki bor miktarının belirlediği bilinmektedir [2-5]. Ni-B kaplama ısıtma işlemlerinde mikro-kristal nikel ile amorf Ni-B faz karışımından oluşmaktadır ve bileşimindeki bor miktarı arttıkça yapısındaki amorf faz miktarı da artmaktadır [4-8].

Isıl işlem, kaplama mikroyapısını dolayısı ile de kaplama mekanik özelliklerini önemli ölçüde etkilemektedir [4-11]. Kaplama yapısı bora doygun olduğundan 250°C nin üzerindeki ısıtma işlemlerinde Ni-B fazı oluşmaya başlamaktadır [4-8]. Özellikle 380°C nin üzerindeki ısıtma işlemlerinde kaplama yapısı tamamen kristalize olmaktadır [4-10]. Isıl işlem ile kaplama yapısında görülen bu tür değişimlerin kaplama bileşimindeki bor miktarından da büyük ölçüde etkilendiği rapor edilmiştir [5].

Akımsız Ni-B kaplama sırasında kaplama yapısına element halindeki bor, banyo bileşimindeki bor hidrürün (BH_4^-) yükseltgenmesiyle girmektedir. Bu nedenle kaplama bileşimindeki bor miktarını bor hidrür yükseltgenme reaksiyon kinetiği kontrol etmektedir. Kaplama banyosunda bu reaksiyonun kinetiğini hem bor hidrür derişimi hem de diğer bileşenlerin (kompleks yapıcı ajan, stabilizör) derişimleri ile kaplama parametrelerinin (sıcaklık, pH) etkileyeceği açıktır. Daha önce yapmış olduğumuz çalışmada akımsız Ni-B kaplama banyo bileşenleri olan bor hidrür (indirgeyici), talyum asetat (stabilizör), etilendiamine (kompleks yapıcı) ve sodyum hidroksit (bazikliği sağlayan) derişimindeki değişim ile banyo sıcaklığının kaplama bor miktarına olan etkisi sistematik olarak incelenmiştir [12]. Bu çalışmada bir önceki çalışmada kaplama yapısında yüksek miktarda bor elde edilebilmesine yönelik optimize edilen banyo koşullarında [12] Ni-B kaplama üretilmiş ve bu kaplamanın mikro-yapısına, korozyon direncine ve sertlik değerlerine tasarlanan ısıtma işleminin etkisi araştırılmıştır.

II. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Kaplama altlığı olarak Ereğli Demir Çelik Fabrikasında üretilen düşük karbonlu yumuşak çelik (kupon boyutları 15 mm x 15 mm x 1 mm) kullanılmıştır. Kaplama öncesi ilgili kuponlara uygulanan ön işlemler Çizelge 1 de sunulmuştur. Kaplama işlemi yağ banyolu termostat içine oturtulmuş plexi-glas hücrede (300 ml) gerçekleştirilmiştir. Ni-B kaplama banyo bileşenleri ve kaplama parametreleri Çizelge 2 de verilmiştir.

Çizelge 1. Akımsız Ni-B kaplama ön işlemleri.

İşlem Sırası	İşlem	Süre	Sıcaklık	Amaç
1	1 µm elmas pasta ile parlatma	-	25°C	Mekanik temizleme
2	Aseton içinde ultrasonik temizleme	10 dakika	25°C	yağ ve pas temizliği
3	%10 KOH çözeltisinde temizleme	5 dakika	60°C	yağ ve pas temizliği
4	%10 Sülfürik asit içinde dağlama	30 saniye	25°C	Dağlayarak temizleme
5	Wood Nikel Banyosunda ön nikel kaplama	2 dakika	80°C	Yüzey aktifleştirme

Çizelge 2. Akımsız Ni-B kaplama banyosu bileşenleri ve kaplama parametreleri

Kimyasallar ve parametreler	Miktar
NiCl ₂ .6H ₂ O	30 g / lt
Etilendiamine	100 g / lt
NaOH	100 g / lt
NaBH ₄	1,5 g / lt
Talyum Asetat	15 mg / lt
pH	> 14
Sıcaklık	95±1 °C
Karıştırma	Orta - mekanik

Elektrokimyasal deneylerde kullanılan su çift damıtılmıştır. Çözelti deneylerden önce ve deney sırasında çözünmüş oksijenden Ar gaz yardımı ile temizlenmiştir. Teflon içine gömülü olan elektrotun yüzey alanı 0.8 cm^2 dir. Elektrot 1200 nolu SiC ile hafifçe zımparalanıp $1 \mu\text{m}$ elmas pasta ile parlatıldıktan sonra aseton ile temizlenerek çözeltiye daldırılmıştır. Deneylerde çalışma elektrotu, doygun kalomel referans elektrotu ve platin tel örgü yardımcı elektrottan oluşan standart 3 elektrot sistemi kullanılmıştır. Çalışma elektrotu daha kararlı veri elde edebilmek için EG&G model 616 döner disk elektrot (RDE) sistemi ile döndürülmüştür. Deney hücresi olarak 800 ml cam hücre kullanılmıştır. Aksi belirtilmediği sürece bütün potansiyeller Doygun Kalomel Elektrotuna göre verilmiştir.

Elektrokimyasal empedans spektroskopisi deneyleri EIS 300 korozyon yazılımı ile kontrol edilen Gamry model PC4/300 mA potentiostat/galvanostat ile $100 \text{ kHz} - 0,01 \text{ Hz}$ frekans aralığında ve korozyon potansiyelinde $\pm 5 \text{ mV}$ uyarı aralığında $1000 \text{ devir dakika}^{-1}$ dönme hızında gerçekleştirilmiştir. Potansiyodinamik polarizasyon deneyleri korozyon potansiyelinden $0,25 \text{ V}$ daha negatif potansiyelden başlayıp $0,25 \text{ V}$ daha pozitif potansiyele kadar 1 mV sn^{-1} tarama hızında ve $1000 \text{ devir dakika}^{-1}$ dönme hızında gerçekleştirilmiştir. $0,1 \text{ M NaH}_2\text{PO}_4$ deney çözeltisinde pH tampon olarak kullanılmıştır ve gerektiği kadar KOH eklenerek pH değeri 7 de sabitlenmiştir. Deney çözeltisine ayrıca destek elektroliti olarak $0,1 \text{ M K}_2\text{SO}_4$ eklenmiştir.

Kaplama yapılmış kuponlara ısıtma işlemi vakum/koruyucu gaz kontrollü fırında gerçekleştirilmiştir. Mikrosertlik değerleri Shimadzu marka sertlik cihazında (HMV 2000 model) Vickers batıcı (indenter) ile 100 gr yükün 15 sn uygulanması yoluyla elde edilmiştir.

Taramalı elektron mikroskop (SEM) görüntüleri JEOL 5600 LV SEM cihazı ile elde edilmiştir. Kaplama yapısı Bruker axs D8 marka X – ışını difraktometresi ile (Cu $K\alpha$ radyasyonu kullanılarak) incelenmiştir. Kaplamadaki faz dönüşümleri diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC: Perkin Elmer) cihazı ile $10^\circ\text{C dak}^{-1}$ tarama hızında gözlenmiştir. Kaplama bileşimindeki bor miktarı Perkin Elmer (Optima 2100) Model ICP – OES cihazı ile belirlenmiştir.

III. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

III.1. Ni-B Kaplama Banyo Kimyası ve Kaplama Morfolojisi

Akımsız kaplama sürecinde BH_4^- aşağıda verilen reaksiyonlardaki gibi yükseltgenmektedir:



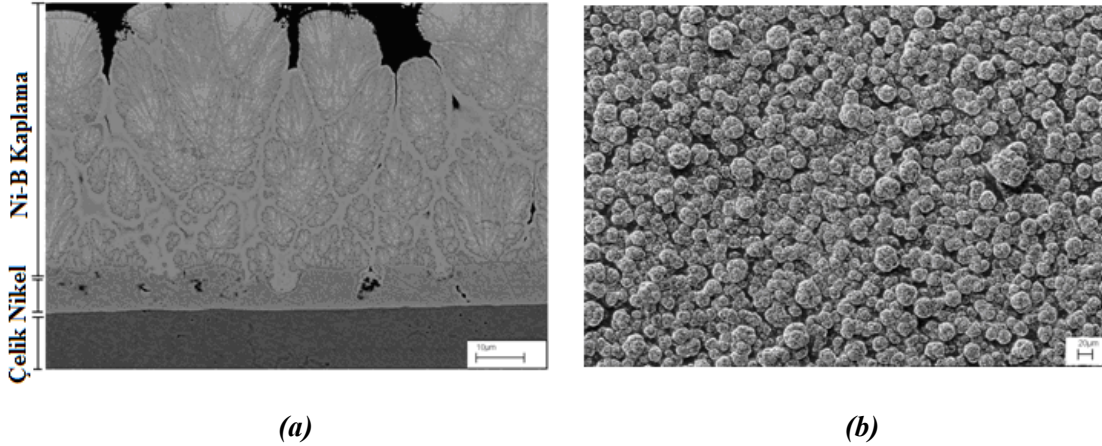
Karşılık olarak da aşağıdaki indirgenme reaksiyonları gerçekleşmektedir:



1. reaksiyonda 2. reaksiyona göre 4 kat fazla elektron açığa çıktığı için nikel kaplamanın, diğer bir ifade ile 3. reaksiyonun büyük ölçüde 1. reaksiyon yardımıyla gerçekleştiğini söylemek yanlış olmayacaktır. Kaplamadaki bor elementi ise 2. reaksiyon uyarınca kaplama bünyesine dahil olmaktadır. Bu nedenle kaplama hızının 1. reaksiyon, kaplamadaki bor miktarının da 2. reaksiyon tarafından kontrol edildiği söylenebilir. Ancak herhangi bir parametre 1. ve 2. reaksiyonlara aynı oranda etki eder ise 1. reaksiyonda 4 kat fazla elektron açığa çıktığı için bu etki sonucu kaplama hızındaki artış kaplamada mevcut olan bor miktarındaki artıştan daha fazla olması gerekir. Hatta her iki reaksiyonda BH_4^- yükseltgenmesi sonucu gerçekleştiğinden 1. ve 2. reaksiyonlar arasında bir rekabet olması gerektiğinden de söz edilebilir. Son olarak 4. reaksiyon da aşırı bazik sulu çözeltilerde yüksek oranda gerçekleşmesi kaçınılmaz olan suyun doğrudan indirgenme reaksiyonudur.

Çizelge 2 de sunulan banyoda elde edilen kaplamanın kesit görüntüsü Şekil 1a da gösterilmiştir. Öncelikle yumuşak çelik yüzeyinde ortalama 8 mikron kalınlığında akım uygulanarak elde edilen nikel kaplama görülmektedir. Yüzeyin akımsız kaplama çekirdeklenmesi için katalitik hale getirilmesi gerektiğinden böyle bir Ni tabakasının oluşturulması şarttır. Nikel tabakası

üzerinde banyo koşullarında (Çizelge 2) elde edilen ortalama 50 mikron kalınlığındaki Ni-B kaplama bölgesi görülmektedir. Kaplama bünyesinde bor homojen dağılmamaktadır. Yüksek miktarda bor içeren bölgeler daha sert olduğu için kaplama kesitinin parlatılması aşamasında farklı sertlik değerine sahip bölgelerde aşınma da farklılık göstermektedir. Aşınmadaki bu farklılıklarda Şekil 1a da ki görünümün oluşumuna sebep olmaktadır. Yüzeydeki bazı lokal bölgeler 1. ve 2. reaksiyonlar gibi yükseltgenme reaksiyonlarının gerçekleştiği (2. reaksiyon ile bor bünyeye dahil olmaktadır), diğer bazı lokal bölgeler ise 3. ve 4. reaksiyonlar gibi indirgenme reaksiyonlarının gerçekleştiği (3. reaksiyon nikel birikimini sağlamaktadır) bölgeler olduğu için sonuçta ortaya çıkan yapının homojen olmaması ve görünümün de Şekil 1a daki gibi olması doğaldır. ICP analizleri bu Ni-B tabakasındaki ortalama bor miktarının ağırlıkça %7 civarında olduğunu göstermektedir. Kaplamanın en dış yüzey görüntüsü de Şekil 1b de sunulmuştur. Görülen yapı “karnı baharımı” yapı olarak adlandırılmaktadır ve esasen Ni-B kaplama yüzeyinin iyi derecede kaygan (lubricious) özelliğe sahip olmasının sebebi bu yapının varlığıdır [4,10].



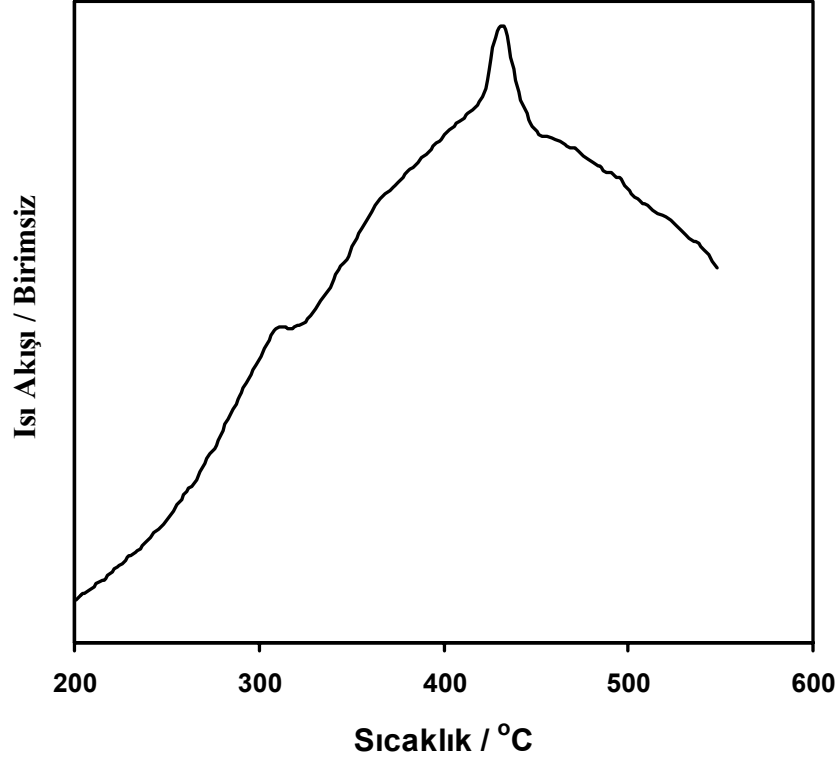
Şekil 1. Akımsız Ni-B kaplamanın (a) kesit ve (b) yüzey SEM resimleri.

III.2. Ni-B Kaplama Yapısına Isıl İşlemin Etkisi

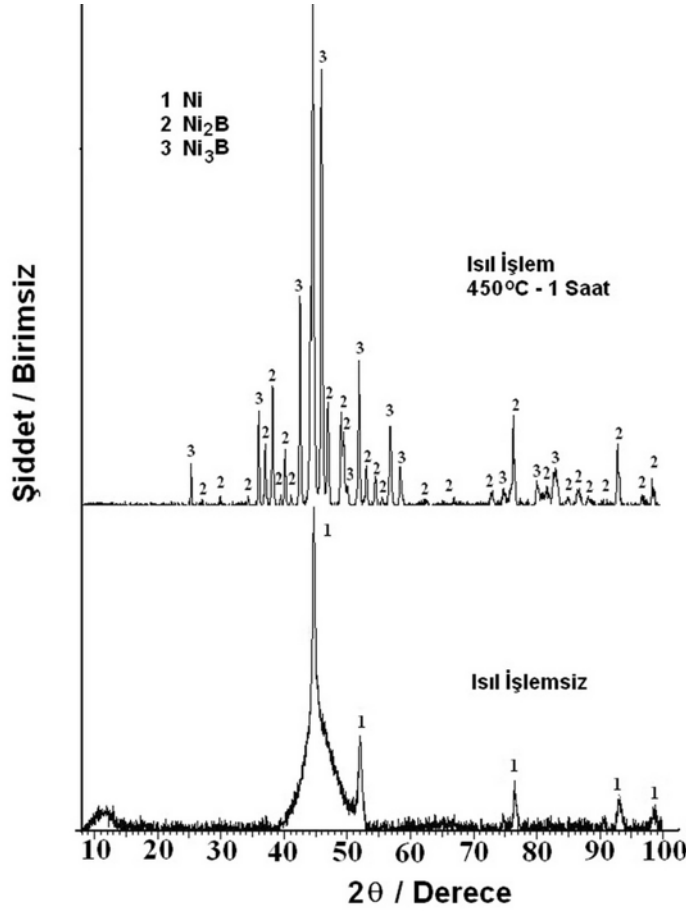
Ni-B filminin dakikada 10°C ısıtılmasıyla elde edilen DSC eğrisi Şekil 2 de verilmiştir. Eğri 310°C ve 433°C de iki ayrı ekzotermik pik göstermektedir. Düşük sıcaklık pikinin Ni₃B fazı yüksek sıcaklık pikinin ise Ni₂B fazının oluşumu ile ilgili olduğu daha önceki çalışmalarda

rapor edilmiştir [7]. Her iki fazın oluşumunu da görebilmek amacıyla 450°C de 1 saatlik ısıl işlem tasarlanmıştır.

Ni-B filminin yapısında ısıl işleme birlikte gerçekleşen değişim Şekil 3 deki X-Işın deseninde gösterilmiştir. Isıl işlemsiz kaplamadaki göreceli geniş nikel piklerinin varlığı elde edilen Ni-B kaplamanın büyük ölçüde amorf yapıda olduğunu göstermektedir. 450°C deki ısıl işlem kaplama yapısında kristalizasyona ve beklendiği gibi Ni₃B ile Ni₂B fazlarının oluşumuna sebep olmaktadır.



Şekil 2. Ni-B kaplamadan 10 °C dakika⁻¹ tarama hızında elde edilen DSC eğrisi.

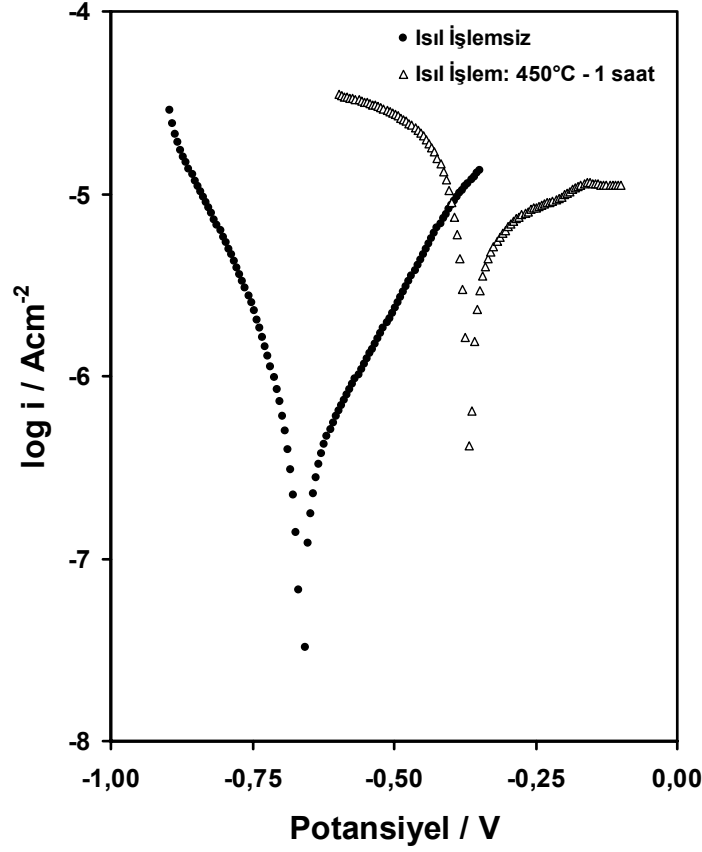


Şekil 3. Isıl işlemsiz ve ısıl işlemlili Ni-B kaplamadan alınan X-Işın desenleri.

III.3. Ni-B Kaplamanın Korozyon Direncine Isıl İşlemin Etkisi

Isıl işlemin Ni-B kaplamanın korozyon davranışına olan etkisi Şekil 4 deki potansiyodinamik polarizasyon eğrileriyle gösterilmiştir. Uygulanan ısıl işlem ile kaplamanın korozyon potansiyeli pozitif potansiyele doğru kaymaktadır. Şekil 4 deki eğrilerden hesap edilen korozyon akım yoğunlukları ısıl işlem uygulanmamış ve ısıl işlem uygulanmış kaplama için sırasıyla $3,6 \times 10^{-7}$ A cm^{-2} ve $8,3 \times 10^{-6}$ A cm^{-2} dir. Açıkça uygulanan ısıl işlem ile kaplamanın korozyon direnci düşmektedir.

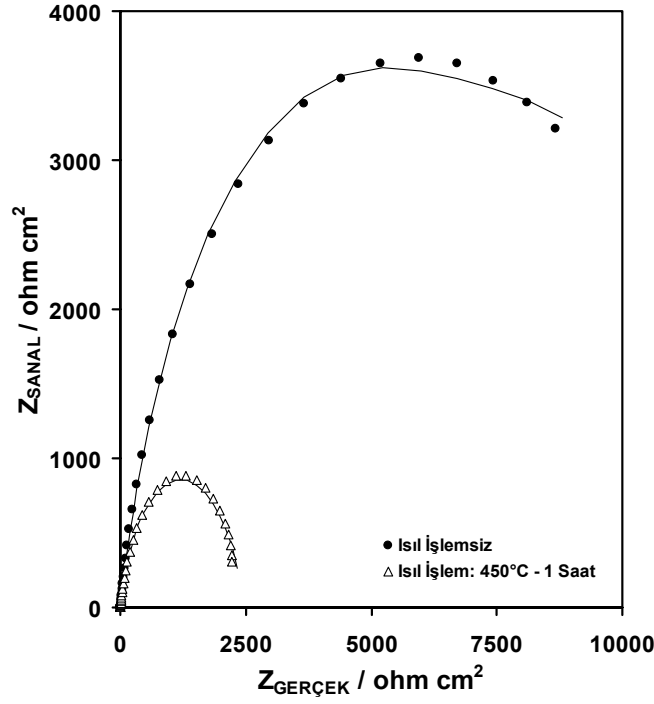
Elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EES) elektrokimyasal süreçlerin mekanizmalarını anlamada kullanılabilen son derece güçlü bir tekniktir. Bu nedenle ısıl işlemsiz ve ısıl işlem



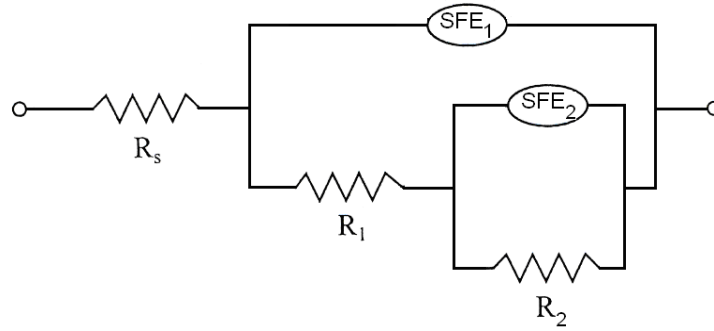
Şekil 4. Isıl işlemsiz ve ısıtılmış Ni-B kaplamanın 1000 devir.dakika⁻¹ dönme hızındaki potansiyodinamik polarizasyon davranışları.

uygulanmış kaplamalardan EES verileri alınmış ve Nyquist eğrileri halinde Şekil 5a da sunulmuştur. Nyquist eğrileri incelendiğinde (Bode eğrileri halinde de incelenmiştir) iç içe geçmiş iki kapasitif lüpanın varlığı gözlemlenmiştir ve elde edilen veriler Şekil 5 b deki eş-değer devre yardımıyla modellenmiştir. Şekil 5a da ki noktalar deneysel verileri, ince çizgiler ise model devre yardımıyla elde edilen değerleri göstermektedir. R_s , R_1 ve R_2 sırasıyla çözelti, birinci kapasitif lüpa ait ve ikinci kapasitif lüpa ait dirençlerdir. SFE_1 ve SFE_2 sırasıyla birinci ve ikinci kapasitif lüpa ait sabit faz elementleridir. Elektrokimyasal sistemlerdeki elektrotlar çok nadir olarak ideal davrandıkları için gerçekleşen süreçlerdeki empedansı tek bir RC (R: direnç,

C: kapasitans) zaman sabiti ile açıklamak oldukça zordur [13]. Yüzey pürüzlülüğü ve homojen olamama gibi sebeplerden



(a)



(b)

Şekil 5. (a) Isıl işlemsiz ve ısıl işlemlili Ni-B kaplamanın 1000 devir.dakika⁻¹ dönme hızındaki elektrokimyasal empedans spektroskopisi eğrileri ve
(b) elektrokimyasal empedans spektroskopisi eğrilerini modellemede kullanılan eş-değer devre.

dolayı genelde zaman sabiti dağılımı görülür ve empedans sabit faz elementi yardımıyla açıklanır. Sabit faz elementi aşağıdaki gibi ifade edilebilir [13]:

$$SFE = \frac{1}{Q(j\omega)^n} \quad (5)$$

Bu eşitlikte Q ve n sabit, ω açısal frekans ve $j = (-1)^{0.5}$ dir. $n = 1$ ise Q kapasitansa, $n = -1$ ise Q indüktansa eşittir. $n = 0.5$ ise gerçekleşen bir difüzyon süreci var demektir.

Şekil 5b de verilen eş-değer devredeki her bir parametrenin sayısal değeri ZSimpWin (Versiyon 3.21) yazılımı yardımıyla ısılsız işlemsiz ve ısılsız işlemlili kaplama için belirlenmiş ve Çizelge 3 de sunulmuştur. Birinci lup sabit faz elementine ait Q_1 ve n_1 değerleri ısılsız işlemde çok fazla etkilenmemektedir ancak direnç değeri (R_1) önemli ölçüde değişmektedir. Q_1 ve n_1 değerlerinin ısılsız işlem sürecinden bağımsız olması yüksek frekans kapasitif lupunun metal elektrot arayüzünde gerçekleşen tipik elektrokimyasal yük transferini temsil ettiğini göstermektedir. Dolayısı ile R_1 direnci de tipik yük transfer direnci olmaktadır. Yük transfer direncindeki keskin düşüş kaplamanın korozyon direncinin ısılsız işlemle önemli ölçüde azaldığını göstermektedir (Potansiyodinamik eğrilerindeki eğilime paralel olarak).

Çizelge 3. Eş-değer devreye göre elektrokimyasal empedans spektroskopisi eğrilerinden elde edilen parametrelerin nümerik değerleri.

	R_s Ohm cm^2	SFE_1 $sn^{n_1} (ohm\ cm^2)^{-1}$		R_1 Ohm cm^2	SFE_2 $sn^{n_2} (ohm\ cm^2)^{-1}$		R_2 Ohm cm^2
		Q_1	n_1		Q_2	n_2	
Isıl İşlemsiz	6,5	180×10^{-6}	0,81	9437	$3,6 \times 10^{-3}$	0,97	2776
Isıl İşlem: 450°C – 1 saat	6,0	190×10^{-6}	0,84	1771	$8,7 \times 10^{-4}$	0,65	700

Düşük frekans kapasitif lupunu temsil eden SFE_2 ' ye ait parametrelerin tamamı (Çizelge 3: Q_2 , n_2 ve R_2) ısı işleminden etkilenmektedir. Muhtemelen bu lup kaplama yüzeyindeki oksit/hidroksit tabakasına aittir ve ısı işlemle gerçekleşen faz dönüşümüyle (Şekil 3) bu ince yüzey tabakasının yapısı da önemli ölçüde değişmektedir. Vurgulanması önemli olan bir husus ısı işleminin vakum/koruyucu gaz atmosferinde gerçekleştirilmiş olmasıdır (oda sıcaklığına kadar soğutma da dahil). Dolayısı ile kaplama yüzeyindeki oksit/hidroksit tabakası yüksek sıcaklıkta değil çözelti içerisinde (elektrolitik olarak) oluşmuştur. Ni-B fazının oluşumu ile yüzey oksit/hidroksit tabakasının direnci de (R_2) düşmektedir.

Isıl işlem ile kaplama korozyon direncinde meydana gelen düşüşün sebebinin X-ışın deseninde (Şekil 3) görülen yapısal değişim açıkça ortaya koymaktadır. Amorf yapısı bozulan ve kristalize olan Ni-B kaplamada tane sınırları ve dislokasyonlar gibi yapısal hataların yoğunluğu aniden artmakta ve bu yapısal hataların negatif etkileri nedeniyle korozyon direnci de azalmaktadır [14]. Isıl işlemle ortaya çıkan Ni-B fazlarının yerel galvanik hücreler oluşturması ve galvanik etkileşimlere bağlı olarak da korozyon direncinin düşmesi beklenebilir [7, 9].

III.4. Ni-B Kaplamanın Mikro-sertlik Değerine Isıl İşlemin Etkisi

Isıl işlemsiz ve ısı işlemli kaplamalardan elde edilen mikro-sertlik değerleri sırasıyla 704 VHN₁₀₀ ve 1100 VHN₁₀₀ dir. Isıl işlem ile kaplama sertliğinde önemli ölçüde artış görülmekte ve sert krom kaplamaların sertlik değerine ulaşabilmektedir. Kaplama sertliğindeki artış Ni-B fazlarının oluşumundan kaynaklanmaktadır. Ayrıca kristalizasyon ile yapıda oluşan mikro çatlaklarında kaplama sertliğine pozitif etki yaptığı rapor edilmiştir [15]. Doğal olarak sertliğe pozitif etki yapan mikro çatlaklar korozyon direncini negatif yönde etkileyecektir. Ancak ara bölgede elde edilen yumuşak elektrolitik nikelin varlığı nedeniyle bu mikro çatlakların altlığa ulaşması ve altlığı şiddetli korozyona uğratması oldukça zordur. Isıl işlemin kaplama korozyon direnci ve sertlik değerine farklı etki yaptığı göz önüne alınır ise korozyon direncinin önem kazandığı kullanımlarda kaplamanın ısı işlemsiz, sertlik ve mekanik aşınma direncinin önem kazandığı kullanımlarda da kaplamanın ısı işlem uygulanarak kullanılması gerektiği ortaya çıkmaktadır.

IV. SONUÇLAR

- Ni-B kaplama ısıl işlemsiz halde büyük ölçüde amorf yapıya sahiptir. Isıl işlem (450°C de 1 saat) ile birlikte kaplama yapısında kristalleşme görülmekte ve Ni₃B ile Ni₂B fazları oluşmaktadır.
- Isıl işlem kaplamanın korozyon direncini düşürmektedir. Bu düşüş ısıl işlem ile amorf yapının bozulmasına ve yapısal hataların ortaya çıkmasına bağlanmıştır.
- Isıl işlem kaplamanın sertlik değerini önemli ölçüde arttırmaktadır. Gerçekleşen faz dönüşümü (Ni-B fazlarının oluşumu) kaplama sertliğindeki artışın temel sebebidir. Ancak faz dönüşümüyle ortaya çıkan mikro-çatlakların katkısının olabileceği de düşünülmektedir.

V. KAYNAKLAR

- [1] G. O. Mallory and J. B. Hadju, “*Electroless Plating: Fundamentals and Applications*”, AESF, Orlando, 1991.
- [2] H. Z. Zhang, X. J. Zhang and Y. K. Zhang, “Structure and properties of electroless nickel-boron alloy”, *Plating Surf. Finish*. Vol. 80, No.1, pp. 80-83, 1993.
- [3] D. Baudrand and J. Brengston, “Electroless plating processes: Developing technologies for electroless nickel, palladium, and gold”, *Met. Finish*. Vol. 93, No.9, pp. 55-57, 1995.
- [4] F. Delaunois and P. Lienard, “Heat treatments for electroless nickel–boron plating on aluminium alloys”, *Surf. Coat. Technol*. Vol.160, No.2-3, pp. 239-248, 2002.
- [5] K. H. Lee, D. Chang and S. C. Kwon, “Properties of electrodeposited nanocrystalline Ni–B alloy films”, *Electrochim. Acta* Vol. 50, No.23, pp. 4538-4543, 2005.
- [6] W. T. Evans and M. Schlesinger, “The effect of solution pH and heat treatment on the properties of electroless nickel boron films”, *J. Electrochem. Soc.* Vol. 141, No.1, pp. 78-82, 1994.
- [7] T. S. N. S. Narayanan and S. K. Seshadri, “Formation and characterization of borohydride reduced electroless nickel deposits”, *J. Alloy. Compd.* Vol. 365, No.1-2, pp. 197-205, 2004.
- [8] C. T. Dervos, J. Novakovic and P. Vassiliou, “Vacuum heat treatment of electroless Ni–B coatings”, *Mater. Lett.* Vol. 58, No.5, pp. 619-623, 2004.

- [9] T. S. N. S. Narayanan, K. Krishnaveni and S. K. Seshadri, "Electroless Ni-P duplex coatings: preparation and evaluation of microhardness, wear and corrosion resistance", *Mater. Chem. Phys.* Vol. 82, No.3, pp. 771-779, 2003.
- [10] K. Krishnaveni, T. S. N. S. Narayanan and S. K. Seshadri, "Electroless Ni-B coatings: preparation and evaluation of hardness and wear resistance", *Surf. Coat. Technol.* Vol. 190, No.1, pp. 115-121, 2005.
- [11] F. Delaunois, J. P. Petitjean, P. Lienard and M. Jacob-Duliere, "Autocatalytic electroless nickel-boron plating on light alloys", *Surf. Coat. Technol.* Vol. 124, No.2-3, pp. 201-209, 2000.
- [12] M. Anik, E. Körpe and E. Şen, "Effect of coating bath composition on the properties of electroless nickel-boron films" *Surf. Coat. Technol.* Vol. 202, No.9, pp.1718-1727, 2008.
- [13] Mark E. Orazem and Bernard Tribollet, "*Electrochemical impedance spectroscopy*" ECS Series, Wiley, New Jersey, 2008.
- [14] M. Anik and E. Körpe, "Effect of alloy microstructure on electroless NiP deposition behavior on Alloy AZ91", *Surf. Coat. Technol.* Vol. 201, No.8, pp. 4702-4710, 2007.
- [15] A. K. Sharma, M. R. Suresh, H. Bhojraj, H. Narayanamurthy and R. P. Sahu, "Electroless nickel plating on magnesium alloy", *Met. Finish.* Vol. 96, No.3, pp. 10-16, 1998.