

HİDROLİK ENDÜSTRİSİ İÇİN ÇEVRECİ VE YÜKSEK PERFORMANSLI ÇÖZÜM: AKIMSIZ NİKEL BOR KAPLAMA

Kamil BABACAN
Mustafa KOCABAŞ

ÖZET

Hidrolik sistemlerde yaygın olarak kullanılan çelik ve dökme demir esaslı bileşenler, yüksek basınç ve sürtünmeye bağlı olarak ciddi aşınma ve korozyon riskleriyle karşı karşıyadır. Bu nedenle yüzey mühendisliği çözümleri, sistem performansını arttırmak ve bakım maliyetlerini azaltmak açısından kritik rol oynamaktadır. Geleneksel olarak kullanılan sert krom kaplama, çevreye olan olumsuz etkileri nedeniyle REACH gibi düzenlemeler kapsamında kısıtlanmakta ve bu durum, daha çevre dostu alternatiflerin önemini arttırmaktadır. Bu çalışmada, akımsız nikel bor (Ni-B) kaplamaların özellikle çelik ve dökme demir esaslı hidrolik sistem bileşenlerinde sunduğu tribolojik ve korozyon direnci özellikleri değerlendirilmiştir. Kaplama sonrasında yapılan ısıl işlem ile yaklaşık 1100 HV'ye ulaşabilen sertlik, ardıl işlem olmaksızın elde edilebilen düşük sürtünme katsayısı, homojen kaplama kalınlığı ve yüksek korozyon dayanımı gibi özelliklerle Ni-B kaplamaların sektörde valf, piston, silindir ve manifold gibi kritik parçalar için güçlü bir kaplama alternatifi olduğu ortaya konulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Akımsız kaplama, Nikel-bor, Aşınma, Korozyon, Hidrolik sistemler, Yüzey mühendisliği.

ABSTRACT

In hydraulic systems, steel and cast iron components are commonly exposed to severe mechanical stress, wear, and corrosion. Surface engineering solutions are thus essential to increase performance and reduce maintenance costs. Conventional hard chromium coatings are being restricted under REACH regulations due to their environmental hazards, increasing the demand for more eco-friendly alternatives. This study focuses on the tribological and anticorrosive performance of electroless nickel-boron (Ni-B) coatings on ferrous substrates used in hydraulic systems. The Ni-B coatings can reach up to 1100 HV after heat treatment, -even without any post process- exhibit low friction coefficients, homogenous electroless coating layer thickness and provide excellent corrosion resistance. These features make Ni-B coatings an efficient and sustainable solution for critical hydraulic parts such as valves, pistons, cylinders, and manifolds.

Key Words: Electroless plating, Nickel-boron, Wear, Corrosion, Hydraulic systems, Surface engineering.

1. GİRİŞ

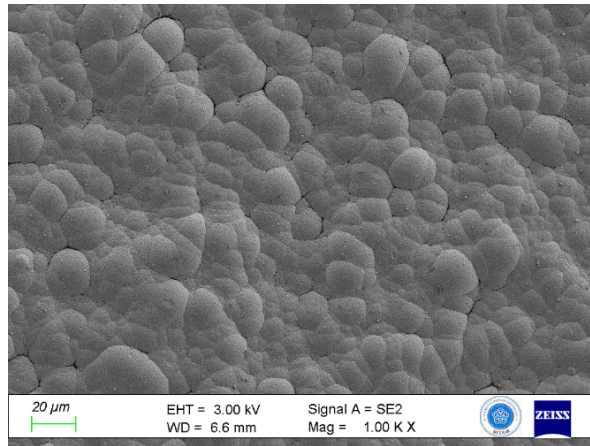
Hidrolik sistemlerde kullanılan malzemeler, sistem içindeyken yüksek basınçlı akışkanla temasta olup sürtünme, kavitasyon ve -sistem dışındayken yağ koruması olmadığında korozyon gibi olumsuz

etkilere maruz kalmaktadır. Uzun süreli performans ve düşük bakım maliyeti hedeflendiği durumlarda, bu bileşenlerin yüzey özelliklerinin iyileştirilmesi kaçınılmazdır. Sert krom kaplamalar geçmişte bu amaçla yaygın olarak kullanılsa da çevresel kaygılar ve regülasyonlar nedeniyle günümüzde yerini alternatif teknolojilere bırakmaktadır. Avrupa Birliği tarafından sert krom kaplamanın yakın bir tarihte kullanımdan kaldırılması kararlaştırılmıştır. Bu bağlamda birçok sektörde alternatif kaplama teknolojileri arayışları başlamıştır. En olası alternatif çözümlerden biri olan akımsız nikel bor kaplamalar özellikle Amerika Birleşik Devletleri'nde yaygın olarak kullanılmaktadır, ayrıca birçok araştırma grubu tarafından sert krom kaplamanın yerini alabilecek en iyi alternatif olarak gösterilmektedir [1, 2]. Bu çalışmada, akımsız Ni-B kaplama teknolojisinin hidrolik bileşenler üzerindeki potansiyel uygulamaları ele alınmaktadır. Hidrolik sektöründe, akımsız nikel bor kaplamaların özellikle aşağıdaki bileşenlerde kullanımı büyük potansiyel vaat etmektedir:

- Hidrolik Silindirler ve Pistonlar: Yüksek aşınma direnci (ısıl işlem sonrası geleneksel kromdan daha yüksek) ve 1100 HV'yi aşabilen sertlikleri sayesinde, akımsız nikel bor kaplamalar silindir ve pistonların ömrünü uzatmakta ve bakım maliyetlerini azaltmaktadır.
- Valfler ve Pompa Bileşenleri: Korozyon direnci ve düşük sürtünme özellikleri, valf ve pompa parçalarının performansını artırmakta ve arıza riskini azaltmaktadır.
- Hidrolik Dağıtıcılar: Karmaşık geometrilere sahip dağıtıcı parçalarında homojen kaplama sağlayarak, aşınma ve korozyona karşı üstün koruma sunmaktadır.

2. AKIMSIZ NİKEL BOR KAPLAMA TEKNOLOJİSİ

Akımsız nikel-bor kaplama yüksek sertlik ve aşınma direnci, iyi kayganlık ve lehimlenebilirlik gibi özelliklerinden dolayı havacılık, otomotiv, kimya ve elektrik endüstrilerinde kullanım bulmaktadır [3, 4]. Nikel-bor kaplamaların özelliklerini büyük ölçüde kaplama bileşimindeki bor miktarının belirlediği bilinmektedir [5, 6]. Nikel-bor kaplama ısıl işlemsiz koşullarda mikro-kristalin nikel ile amorf nikel-bor faz karışımından oluşmaktadır ve bileşimindeki bor miktarı arttıkça yapısındaki amorf faz miktarı da artmaktadır. Üstün özelliklerinden bazıları karakteristik olan karnabahar benzeri yapısıyla kazanmaktadır. Bu çalışma için gerçekleştirilen kaplama üretiminde, kaplama sonrasında elde edilen karakteristik mikroyapı görüntüsü Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Akımsız nikel-bor kaplamanın karakteristik karnabahar mikroyapısı

Nikel-bor kaplamalar, ısıl işlem ile sertlikleri arttırabilen bir kaplama türüdür. Domínguez-Ríos ve arkadaşları, çelik altlıklar üzerinde yapılan nikel-bor kaplamalarda ısıl işlem sonrası 1100 HV sertlik değerine ulaşmışlardır. Bu değer, sert krom kaplamaya denk veya daha yüksek olup, özellikle valf ve piston gibi dinamik yük altındaki parçalar için büyük avantaj sunmaktadır. Ayrıca ısıl işlemsiz hali bile

doğası gereği sahip olduğu düşük sürtünme katsayısı sayesinde hidrolik sistemin çalışma verimliliği artmakta, sistem daha düşük enerjiyle çalışabilmektedir [7]. Akımsız nikel-bor kaplamalar, yüksek sertlikleri ve mükemmel aşınma dirençleri nedeniyle yüzey mühendisliği alanında özellikle tercih edilmektedir. Bu kaplamalar, borhidrür indirgen maddesi ile alkali ortamda uygulanan otokatalitik bir proses esasına dayanmakta olup, dış akım uygulanmaksızın metal yüzeyler üzerinde homojen ve yoğun bir kaplama elde edilmesini mümkün kılar. Yüksek bor içeriğine sahip nikel-bor kaplamalar düşük borlu kaplamalara kıyasla daha yüksek sertlik ve aşınma dayanımı sunmaktadır [8]. Kaplandığı haliyle nikel-bor kaplamalar 600-800 HK (Knoop) yüzey sertliği gösterirken, uygun ısıtım işlem sonrasında bu değerler 1000 HK'nin üzerine çıkabilmektedir [8, 9].

Nikel-bor kaplamalar, özellikle bor içeriği %5 ve üzerinde olduğunda, sert krom ve takım çeliği gibi geleneksel kaplama ve malzemelerle karşılaştırılabilir veya bu malzemelerin aşınma direncinden daha yüksek değerler sunmaktadır [10, 11]. Ayrıca nikel-bor kaplamaların yüksek sıcaklıklarda bile aşınmaya karşı dirençli olması ve düşük sürtünme katsayısı (yaklaşık 0,15-0,65) göstermesi, bu kaplama türünü özellikle hareketli parçalarda ideal hale getirmektedir [12, 13].

Akımsız nikel-bor kaplamalar, yüksek sertlik ve aşınma direncinin yanı sıra belirli koşullarda iyi bir korozyon direncine sahip olması nedeniyle otomotiv, havacılık ve genel mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak bu dayanım, kaplamanın bor içeriği, yapısı ve ısıtım işlem geçmişi gibi çeşitli parametrelerden etkilenmektedir. Kaplamadaki bor içeriği, korozyon direnci açısından kritik bir parametredir. Düşük bor içeriğine (örneğin %1-2) sahip kaplamalar genellikle nanokristalin bir kristal yapıya sahiptir. Bu durum mikroyapıda daha çok sayıda tane sınırı bulunması nedeniyle daha fazla sayıda korozyon hücrelerinin oluşumuna yol açmaktadır. Buna karşın, bor oranı %5-10 aralığında olan kaplamalarda, amorf yapı hâkim olmakta ve tane sınırlarının daha az olması nedeniyle korozyon direnci artmaktadır [14]. Amorf yapılar, özellikle klor iyonları içeren ortamda, daha düşük iyon difüzyonu nedeniyle daha kararlı davranış sergilemektedir.

Nikel-bor kaplamaların mekanik özelliklerini iyileştirmek amacıyla uygulanan ısıtım işlemler, genellikle kaplamanın amorf yapısının kristalleşmesine neden olarak korozyon direncini olumsuz etkileyebilmektedir. Yapılan çalışmalar, 250-350 °C arasında uygulanan ısıtım işlemlerin Ni₃B ve Ni₂B gibi intermetalik fazların oluşumuna yol açtığını ve bu fazların oluşturduğu faz sınırlarının korozyon için giriş noktaları oluşturduğunu göstermiştir. Delaunois ve arkadaşlarının ısıtım işlem çalışmaları, amorf yapının korunmasının korozyon dayanımı açısından önemli bir faktör olduğunu vurgulamaktadır. Yine aynı çalışmada, 400 °C ve üzerindeki sıcaklıklarda yapılan işlemlerde kaplamanın tamamen kristalleştiği ve bu durumun galvanik korozyon oluşumuna izin veren yeni mikroyapılar oluşturduğu rapor edilmiştir. Bu nedenle, sadece mekanik dayanım hedeflenmeyip aynı zamanda korozyon direncinin önemli olduğu durumlarda, ısıtım işlemlerin sıcaklık ve süre açısından optimize edilmesi gerekmektedir.

Akımsız nikel-bor kaplamalar birçok varyasyonda yapılabilmektedir. Bunlardan bir tanesi de bu çalışmada da kullanılan Bematek firmasına ait BoraPlate[®] prosesidir. Bu prosesin bazı özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Akımsız Ni-B (BoraPlate[®]) kaplamanın özellikleri.

Bor oranı	%7,5
Yoğunluk	8,49 g/cm ³
Isıtım İşlemsiz Sertlik	730 HV _{0,1}
Isıtım İşlem Sonrası Sertlik	1100 HV _{0,1}
Tuz Püskürtme Testi (NSS) *	192 Saat
Açık Devre Potansiyeli (OCP)	-193 mV
Aşınma Dayanımı	2,86 10 ⁻⁵ mm ³ /N.m
Ergime Noktası	1080 °C
Maksimum Kaplama Kalınlığı	< 150 µm

3. HİDROLİK SEKTÖRÜNDEN BİR VAKA ÖRNEĞİ

Bematek Malzeme Teknolojileri Ltd. Şti. ve Kayahan A. Ş. firmaları tarafından karmaşık geometrili 305 dm² yüzey alanına sahip hidrolik dağıtıcılarda noktada 50 µm kaplama kalınlığıyla Ni-B kaplamalar başarılı bir şekilde uygulanmıştır. Bahsi geçen hidrolik/pnömatik dağıtıcılara, öncelikle hidrolik sektörde yaygın olarak kullanılmakta olan sert krom kaplama uygulanmaktaydı. Ancak kaplama yapılan hidrolik dağıtıcı parçanın karmaşık geometriye sahip olması nedeniyle akımlı bir yöntem olan sert krom kaplama tüm yüzeyleri homojen olarak kaplayamamıştır. Buna karşılık Ni-B kaplamanın akımsız bir yöntem olması ve çözelti ile temas eden her bir noktanın ortalama 1-2 µm hassasiyetle uygulanabilmesi nedeniyle homojen bir kaplama elde edilebilmiştir. Bununla birlikte elde edilen Ni-B kaplama ortalama 1100 HV sertliğiyle sert krom kaplama ile benzer bir davranışa sahiptir. Bu uygulama, Ni-B kaplamanın büyük yüzey alanlarına sahip hidrolik parçalar için de uygunluğunu ve etkinliğini kanıtlamaktadır. Mevcut durumda farklı altlık cinsi, geometri vb. sahip hidrolik parçalarda da Ni-B kaplamalar yapılmaktadır. Bu çalışma için bahsi geçen parçanın kaplama sonrası hali Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Nikel bor kaplama uygulanan karmaşık geometrili dağıtıcı parçalar

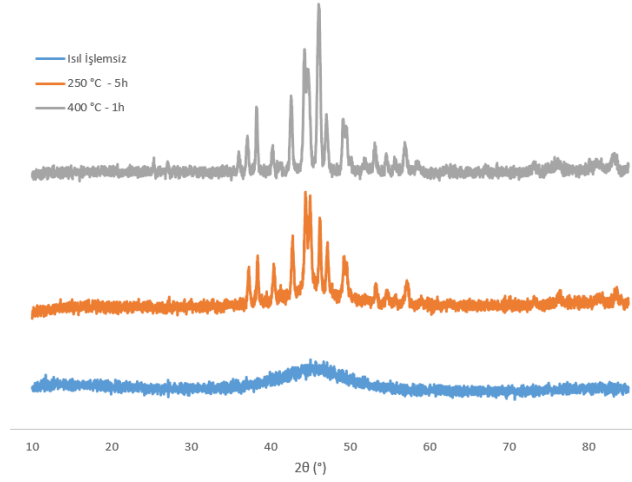
Akımsız nikel-bor kaplama sıcaklık ve indirgeyici ajanın banyoya sağladığı elektronlar yoluyla ilerleyen bir kaplama prosesidir. Bu nedenle tüm kaplama üretimi 90±2°C'de gerçekleştirilmektedir. Kaplama öncesinde parça yüzeyde bulunan istenmeyen maddeleri uzaklaştırmak ve parçayı kaplamaya hazır hale getirmek için bir seri ön işlem uygulanmaktadır. Bu işlemlerden ilki, yağ alma işlemidir. Bu işlemin amacı yüzeyde bulunan yağ, kir pas gibi bileşenleri altlık malzeme yüzeyinden uzaklaştırmaktır. Yağ alma işlemi; ağı. %10'luk ticari yağ alma kimyasalında, 60-80°C sıcaklıkta ve minimum 10 dakika süre ile uygulanmıştır. Bu işlemi hacimce %10 HCl içeren asidik ortamda ve bu işlemi takiben hacimce %2 H₂SO₄ çözeltilerinde yüzey aktifleştirme işlemleri takip etmektedir. Ön işlemlerin tamamı oda sıcaklığında yapılmıştır.

Metallerin, faz diyagramlarına bağlı olarak ergime sıcaklığının altındaki sıcaklıklarda uygulanan farklı işlemlerle istenilen mekanik özellik ve iç yapıların elde edilmesine ısıl işlem denir. Uygulan bu ısıl işlemler kaplanmış malzemeler için de uygulanabilmektedir. Kaplama özelinde kaplanmış parçalara uygulanan ısıl işlemlerin uygulanma amaçları aşağıda listelenmiştir :

1. Yapışma mukavemeti arttırma
2. Sertlikte artış
3. Aşınma direncinde artış
4. Hidrojen giderme
5. Altlık malzeme için gerilim giderme

Bu çalışmada akımsız nikel-bor kaplanan parçalar i) 250°C – 5 saat ii) 400 °C-1 saat şeklinde iki farklı koşulda ısıl işleme tabi tutulmuştur. Şekil 3'te ısıl işlemsiz ve iki farklı koşulda ısıl işlem yapılmış

numunelerin XRD grafikleri verilmiştir. Isıl işlem uygulanmayan kaplama amorf özellik gösterirken, ısıl işlemlenmiş numuneler kristalleşerek nanokristalin faz yapısına dönüşmüşlerdir. Isıl işlem ile kazanılan diğer özellikler göz önüne alındığında her iki koşulun da endüstriyel koşullardaki servis ömrünün fazla olması beklenmektedir.



Şekil 3. İki farklı ısıl işlem uygulanan ve ısıl işlemsiz akımsız nikel bor kaplamaya ait XRD grafikleri

Hidrolik sistemlerde kullanılan parçalar, yüksek basınç, aşırı yük ve zorlu çevresel koşullar nedeniyle ciddi aşınma ve korozyon riskleriyle karşı karşıyadır. Avrupa Birliği'nin kısa vadede sert krom kaplamaların kullanımını yasaklama kararı ve bazı parça geometrilerinde krom kaplamanın zorlukları ve homojen kaplamaya olan talepler gibi nedenlerden dolayı alternatif kaplama teknolojilerine olan ihtiyaç daha da artmıştır. Bu bağlamda, akımsız nikel-bor kaplamalar, hidrolik sektöründe öne çıkan yenilikçi ve krom kaplamaya kıyasla daha çevre dostu bir çözüm olarak dikkat çekmektedir. Nikel-bor kaplamaların düşük sürtünme katsayısı, hidrolik sistemlerde enerji verimliliğini de arttırmaktadır. Bu özellik, hareketli parçalar arasındaki sürtünmeyi azaltarak sistemin genel performansını iyileştirmekte ve enerji tüketimini düşürmektedir. Nikel-bor kaplanmış parçaların hidrolik sektördeki kullanım yüzdesinin her geçen gün artması öngörülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] VITRY, V., "Recent Advances in Electroless Nickel-Boron Coatings" Surface and Coatings Technology, 2022.
- [2] WAWARE, U.S., A.M.S. Hamouda, and N.P. Wasekar, "Mechanical properties, thermal stability and corrosion behavior of electrodeposited Ni-B/AlN nanocomposite coating" Surface and Coatings Technology, 2018
- [3] MALLORY, G.O. and J.B. Hajdu, "Electroless Plating: Fundamentals and Applications", 1990: William Andrew.
- [4] ANIK, M., E. KORPE, and ŞEN, E., "Effect of Coating Bath Composition on the Properties of Electroless Nickel-Boron Films" Surface and Coatings Technology, 2008.
- [5] Baudrand, D. and J. Bengston, Electroless plating processes: Developing technologies for electroless nickel, palladium, and gold. Metal Finishing, 1995.
- [6] Delaunois, F. and P. Lienard, Heat Treatments for Electroless Nickel-Boron Plating on Aluminium Alloys. Surface and Coatings Technology, 2002.
- [7] Wear, L., A Textbook in Tribology. 1996, CRC Press, mc, Boca Raton.

- [8] RIDDLE, Y.W. and C.E. MCCOMAS, “Advances in electroless Nickel-Boron coatings: Improvements to lubricity and wear resistance on surfaces of automotive components” 2005, SAE Technical Paper.
- [9] Delaunois, F., et al., Autocatalytic Electroless Nickel-Boron Plating on Light Alloys. Surface and Coatings Technology, 2000.
- [10] Kanta, A.F., et al., Nickel–boron electrochemical properties investigations. Journal of Alloys and Compounds, 2010.
- [11] SRİNIVASAN, K.N., et al., Studies on Development of Electroless Ni-B Bath for Corrosion Resistance and Wear Resistance Applications. Surface Engineering, 2010.
- [12] SONI, A., A. KUMARASWAMY, and B. PRAVEEN KUMAR, Microstructural and Tribomechanical Characterization of NiB Coated 4150 Steel. Journal of Materials Engineering and Performance, 2024
- [13] DOMÍNGUEZ-RÍOS, C., R. Torres-Sánchez, and A. AGUILAR-ELGUEZABAL, Wear behavior of Ni-B electroless films on a steel S7.
- [14] MUKHOPADHYAY, A., T.K. BARMAN, and P. SAHOO, Corrosion Resistance of Electroless Ni-B-W-Mo Coatings using Electrochemical Impedance Spectroscopy. Port. Electrochim. Acta, 2019. 37(3): p. 193-203.

ÖZGEÇMİŞ

Kâmil BABACAN

1977 Konya doğumludur. 1998 yılında İTÜ Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü'nden mezun olmuştur. Profesyonel iş hayatına atılınca kadar babasının yedek parça satışı yapan işinde boş zamanlarında çalışagelmıştır. 1998'de Aselsan'da test mühendisi olarak profesyonel çalışma hayatına başlamış ve 2 yıl çalışmıştır. Askerliğini Mardin'de piyade asteğmen olarak yapmıştır. Akabinde 2001 yılında Kayahan'da bakım mühendisi olarak çalışmaya başlamıştır. 2003 yılında bir taraftan da, Genel Müdüre ve Atölye Korrdatörüne asistanlık yapmaya başlamıştır. 2012'de Bakım Onarımdan tamamen çekilmiş ve Teknik İşlerden Sorumlu Genel Müdür Yardımcısı olmuştur ve halen bu görevi ifa etmektedir. Hakim olduğu konular; krom kaplama prosesleri ve ekipmanları, talaşlı imalat prosesleri ve makineleri, kalite yönetim sistemi, fayda maliyet analizleri, ERP, MES v.b.dir. Kaplama konusundaki tecrübesi ve birikimi Kayahan'da olmuştur. Maalesef bu konuda bir üniversite eğitimi yoktur.

Mustafa KOCABAŞ

1986 Beyşehir/Konya doğumludur. 2010 yılında Selçuk Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'nde araştırma görevlisi olarak akademik hayatına başlamış, 2011 yılında ise aynı görevine yine aynı bölümde Yıldız Teknik Üniversitesi'nde başlayarak 2017 yılına kadar bu göreve devam etmiştir. Yükseköğrenimi süresince “Korozyon ve Korunma”, “Yüzey İşlemler” ve “Kaplama Teknolojileri” alanlarında ulusal ve uluslararası çalışmalar yapmıştır. 2015-2016 yıllarında ziyaretçi araştırmacı olarak bulunduğu Manchester Üniversitesi'nde metalik kaplamalar ve karakterizasyonu konuları üzerine araştırmalar gerçekleştirmiştir. 2018 yılında Selçuk Üniversitesi (şu anki ismiyle Konya Teknik Üniversitesi) Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'nde başladığı öğretim üyeliğine doçent olarak devam etmektedir.