



AKIMSIZ KAPLAMA YÖNTEMİYLE NİKEL ESASLI METALİK KAPLAMALARIN ÜRETİMİ

Gülşen TOPAL^{1*}, Banu ESENCAN TÜRKASLAN¹

¹ Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye

Anahtar Kelimeler

*Metal Kaplama,
Akımsız Kaplama,
Nikel Esaslı,
Korozyon Direnci,
Kompozit.*

Öz

Endüstriyel ortamda ve zorlu çevre koşullarında çalışan metal malzemelerin yüzeyleri zamanla ortamdaki etkenlere bağlı olarak bozulmaktadır. Yüzeyi bozulan metal malzemeler hem korozyon direnci hem de mekanik özelliklerini kaybetmiş olur. Yüzey özelliklerinin geliştirilmesinde tercih edilen yöntemlerden biri metal kaplama uygulamasıdır. Metal kaplamalar, hem mekanik özellikleri iyileştirmek hem de korozyon nedeniyle malzeme kaybını önlemek amacıyla uygulanmaktadır. Metal kaplama yöntemlerinden olan akımsız kaplama, elektrik akımı olmadan bir indirgeme maddesiyle sulu çözeltiden metalik iyonun katalitik olarak indirgenip metalin yüzeyinde biriktirilmesine dayanan kimyasal indirgeme işlemidir. Akımsız kaplama yöntemiyle; altın, nikel, bakır, gümüş gibi birçok metal kaplanabilmektedir. Endüstride en yaygın tercih edilen kaplama türü sahip olduğu kimyasal, fiziksel ve mekanik özelliklerinden dolayı akımsız nikel kaplamadır. Ayrıca bu yöntem metal kaplama çalışmalarında çoklu alaşım ve kompozit kaplamaların üretilmesini popüler hale getirmektedir. Bu çalışmayla, alüminyum malzeme yüzeyine akımsız nikel kaplama işlemi uygulanmış olup kaplama prosesi için belirlenen çalışma parametrelerinin kaplama kalınlığına, yapışma mukavemetine ve korozyon direncine etkisi incelenmiştir.

PRODUCTION OF NICKEL BASED METALLIC COATINGS BY ELECTROLESS COATING METHOD

Keywords

*Metal Coating,
Electroless Coating,
Nickel-based,
Corrosion Resistance,
Composite.*

Abstract

The surfaces of metal materials working in industrial environments and harsh environmental conditions deteriorate over time depending on the factors in the environment. Metal materials whose surface deteriorates lose both their corrosion resistance and mechanical properties. One of the preferred methods for improving surface properties is metal coating application. Metal coatings are applied both to improve mechanical properties and to prevent material loss due to corrosion. Electroless plating, which is one of the metal plating methods, is a chemical reduction process based on the catalytic reduction of the metallic ion from the aqueous solution with a reducing agent without electric current and its deposition on the surface of the metal. Many metals such as gold, nickel, copper, silver can be coated with electroless plating method. Electroless nickel plating is the most commonly preferred type of plating in the industry due to its chemical, physical and mechanical properties. In addition, this method makes the production of multi-alloy and composite coatings popular in metal coating works. In this study, electroless nickel plating process was applied to the aluminum material surface and the effects of the working parameters determined for the coating process on the coating thickness, adhesion strength and corrosion resistance were investigated.

Alıntı / Cite

Topal, G., Esencan Türkaslan, B., (2023). Akımsız Kaplama Yöntemiyle Nikel Esaslı Metalik Kaplamaların Üretimi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 11(3), 1001-1008

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

G. Topal, 0000-0003-4588-253X
B. Esencan Türkaslan, 0000-0003-3948-6207

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	14.05.2023
Revizyon Tarihi / Revision Date	01.06.2023
Kabul Tarihi / Accepted Date	02.06.2023
Yayın Tarihi / Published Date	28.09.2023

* İlgili yazar / Corresponding author: yl2230151901@ogr.sdu.edu.tr

PRODUCTION OF NICKEL BASED METALLIC COATINGS BY ELECTROLESS COATING METHOD

Gülşen TOPAL^{1†}, Banu ESENCAN TÜRKAŞLAN¹

¹ Süleyman Demirel University, Faculty of Engineering, Department of Chemical Engineering, Isparta, Türkiye

Highlights

- In this study, nickel plating was applied to the metal material surface by electroless plating method.
- This method is applied to provide corrosion resistance to the material against corrosive effects.
- Nickel plating is preferred because of its mechanical effects and easy applicability.

Purpose and Scope

The purpose of the paper is to improve the mechanical properties of aluminum materials, electroless nickel plating was applied and the effects of working parameters on the material were investigated.

Design/methodology/approach

In this study, electroless nickel plating method, which is one of the metal plating methods, was used. Uniform coating was applied on aluminum with optimum parameter conditions used in this method. Thanks to the improvements made in the mechanical properties of aluminum, a pioneering work has been presented to the studies to be done in the coating industry.

Findings

In the study, the corrosion resistance of the material was increased by electroless nickel plating applied to the aluminum material and improvements were made in the adhesion strength.

Research limitations/implications

With the processing methods used in this study, the use of electroless nickel plating will be effective in composite coatings to be made on metal materials in the coating industry.

Originality

Since the adhesion strength of the coatings on aluminum is low, it is not preferred in the coating area. Thanks to this study, optimum conditions were determined in the parameters of bath concentration, bath temperature, coating time and its applicability on aluminum material was proven.

1. Giriş (Introduction)

Alüminyum malzemeler, hafif, dayanıklı ve korozyona karşı dirençli olmaları nedeniyle birçok endüstriyel uygulamada yaygın olarak kullanılmaktadır. Alüminyum metali, doğal olarak havadaki oksijenle reaksiyona girmesi sonucu yüzeyinde alüminyum oksit tabakası oluşturur. Bu tabaka, alüminyum yüzeyini çevresel etkenlere karşı korur ve paslanmasını geciktirir (Paz Martínez-Viademonte vd., 2020). Ancak, bazı durumlarda alüminyum yüzeyinde bozulma veya paslanma meydana gelebilir. Alüminyum yüzeyindeki bozulma; kimyasal kirlilik, fiziksel hasar, elektrokimyasal reaksiyonlar sonucu oluşmaktadır (Burleigh, 2003). Bu etkenlere bağlı olarak alüminyum oksit tabakası hasar görür ve metal yüzeyinde deformasyon başlar. Metal malzemenin ömrünü ve kalitesini arttırmak, çalışma ortamında olumsuz çevre şartlarından etkilenmemesi ve mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi için alüminyum yüzeylere metal kaplama uygulaması tercih edilmektedir (Tracon, 2007).

Günümüzde, birçok endüstriyel uygulamada metal yüzeylerin kaplanması yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu kaplamalar, malzeme ömrünü uzatmak, yüzey koruması sağlamak, estetik görünümünü ve işlevselliği arttırmak gibi birçok avantaj sağlamaktadır. Bu nedenle, kaplama teknolojileri her geçen gün daha da önem kazanmaktadır. Metal kaplama birçok farklı yöntemle gerçekleştirilebilir. En yaygın kullanılan yöntemler; elektro kaplama, sprey kaplama, vakum kaplama, kimyasal kaplama ve daldırma kaplamadır (Krishnan vd., 2006). Bu yöntemlerden her biri, farklı malzemeler ve uygulama gereksinimleri için idealdir. Kaplama malzemesi seçimi, kaplama işleminin amacına, malzeme özelliklerine ve kullanım koşullarına bağlıdır.

[†] Corresponding author: yl2230151901@ogr.sdu.edu.tr

Mühendislik uygulamalarında akımsız yöntemle yapılan kaplamalarda metal yüzeyinin iletken hale getirilmesi önemli bir uygulama alanı bulmuştur. Metal malzemenin kullanılacağı yere ve yüzeyden istenen özelliğe bağlı olarak çeşitli akımsız kaplama uygulamaları ile karşılaşmaktadır (Krishnan vd., 2006). Akımsız kaplama yöntemi, yüzeyin elektrokimyasal olarak kaplanması yerine kimyasal olarak kaplanması işlemidir. Bu yöntemde tercih edilecek alaşım türü metal yüzeyinden istenen özelliğe bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Nikel esaslı metal kaplamalar hem akımsız yöntemle uygulanan hem de alüminyum metalinin yüzey koruması ve özelliklerinin iyileştirilmesi için sıklıkla tercih edilen bir kaplama yöntemidir. Nikel kaplama, alüminyum malzemelerin oksidasyonuna karşı direnç sağlamakta, aynı zamanda yüzey sertliğini ve aşınma direncini arttırmaktadır (Sharma vd., 2002).

Metal kaplama sektöründe yaygın olarak kullanılan nikel esaslı akımsız kaplamalar Ni-P kaplamalar olarak da bilinmektedir. Bu kaplama türü elektrolitik kaplamaya kıyasla birçok avantaj sunar ve çeşitli endüstrilerde kullanılır (Hashmi, 2014). Akımsız Ni-P kaplamalar, elektrolitik kaplamaya göre daha homojen ve daha kaliteli kaplama yüzeyi sunar (Vaghefi vd.,2003). Akımsız kaplama yönteminde, kaplama malzemesi sulu bir çözelti içerisinde metalik iyonların elektrostatik yükler kullanılarak yüzeye tutunması esasına dayanır. Bu yöntemde kullanılan kimyasalların atık miktarları daha azdır ve çevre dostu bir kaplama yöntemi sağlar. Akımsız Ni-P kaplamaların kullanım alanları oldukça geniştir. Otomotiv, havacılık, savunma, tıbbi cihazlar, elektronik ve yarı iletken endüstrilerinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Matsubara vd.,2002). Bu kaplamalar yapısı gereği aşınma, korozyon dayanımı, yüksek sıcaklıklara stabilitesi ve oksidasyona koruma sağlayarak parça ömrünü artırır ve maliyeti azaltır (Yan vd., 2008). Bu yöntem, yüzey işlem teknolojisindeki çalışmalarda çoklu alaşım ve kompozit kaplamaların üretilmesini popüler hale getirmektedir (Jena vd.,2022). Bu çalışmada, akımsız kaplama yöntemiyle alüminyum malzemeye nikel esaslı kaplamaların uygulanması ve kaplama parametrelerinin yüzey morfolojisi, kaplama kalınlığı ve korozyon dayanımına etkisinin incelenmesi amacıyla yapılan bir araştırmaya odaklanmaktadır.

2. Kaynak Araştırması (Literature Survey)

Akımsız nikel kaplamalar, elektrokimyasal olarak nikel iyonlarının indirgenmesiyle otokatalitik bir kaplama prosesiyle elde edilir (Brenner, 1963). Bu kaplama yöntemi, ilk olarak 1950'de Riddell ve Brenner tarafından geliştirilerek patentlenmiştir (Brenner ve Riddell, 1934). Kaplama sırasındaki elektrokimyasal indirgeme işlemi ve sonrasındaki ısı işlem süreci, kaplamanın kristalizasyon ve faz dönüşüm davranışını belirleyerek malzeme özelliklerinde değişikliklere sebep olmaktadır. Bu yapısal özellikler fosfor miktarı, ısı işlem sıcaklığı gibi faktörlere bağlı olarak değişiklik gösterir ve kaplamanın özelliklerinin geliştirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. 6061 alüminyum malzeme üzerine nikel kaplamanın elektriksiz olarak biriktirilmesi yöntemi, indirgeyici madde sodyum hipofosfit miktarından, sıcaklıktan ve kaplama süresinden etkilenir. Akımsız nikel kaplamalarda sodyum hipofosfit konsantrasyonu arttıkça kaplama tabakasında % fosfor oranında buna karşılık gelen bir artış olur. Ayrıca, işlem görmemiş bir numune baskın bir amorf yapıya sahipken, ısı işlem sonrası nikel kristal fazlarındaki artıştan dolayı sertlikte artış görülmektedir. Kaplama süresinin artmasıyla ise tabakadaki fosfor yüzdesi, amorfizasyon ve kaplama kalınlığı artar (Akyol vd., 2019). Akımsız nikel kaplamanın taban malzemeye yapışması genellikle ısı işlem sırasında oluşan kimyasal bağlanmalar ile daha iyi hale gelmektedir. Bu bağlanma taban malzeme ile kaplama arasındaki difüzyon işlemi ile gerçekleşir. Kaplama sonrası ısı işlem yapışma mukavemetinin artmasını sağlamaktadır. Çoklu alaşım kaplamalarda ısı işlem sıcaklığı malzemelerin tribolojik özelliklerini etkilemektedir. Isıl işlem sıcaklığının artmasıyla birlikte nikelin kristalliğinin arttığı ve nikel fazlarının oluştuğu görülmektedir (Wang vd., 2016).

Kimyasal yöntemle biriktirilen kaplamalar daha kalın kaplamalardır ve mekaniksel, elektriksel özelliklerin ihtiyaç duyulduğu alanlarda sıklıkla kullanılırlar. Akımsız kaplama prosesinde, kaplama metali yüzeyde biriktirilirken indirgeyici kaynağın ayrışmasıyla oluşan fosfor ve bor gibi çökeltiler elde edilmektedir. Birden fazla metal aynı kaplama içerisinde işlem görebilir. Akımsız kaplama metoduyla nikel, bakır, krom gibi çok sayıda farklı kompozisyonda kaplama çalışmaları yapılmıştır (Omidvar vd., 2015). Krom kaplamaların elektriksiz nikel-bor kaplamalarla değiştirilmesinin, zararlı etkiler oluşturmayan bir koruma tabakası ile sonuçlandığı kaydedilmiştir. Bu yöntem aynı zamanda istenen mekanik özelliklerin elde edilmesini sağlar. Nikel oranı arttıkça kaplama reaksiyonları da artmakta ve indirgenmiş metal iyonlarının artmasıyla nikel-bor fazlarının sayısı da artmaktadır. Bu da aşınmaya karşı daha dirençli ve daha sert yüzeylerin oluşmasına neden olur (Ulu, 2019). Akımsız nikel-fosfor/nikel-bor kompozit kaplama çalışmalarında kaplamanın yapısının amorf olduğu görülmektedir. Isıl işlemlerin sert faz oluşumunu tetiklediği ve bu oluşumun aşınma direncinde artışa neden olduğu belirlenmiştir. Ayrıca çoklu alaşım kaplamalar daha iyi korozyon dayanımı göstermektedir (Matik, 2020).

Kaplama sonrası uygulanan ısı işlem gibi akımsız nikel kaplamanın yapısal özelliklerini geliştiren bir diğer etkense kaplama çözeltisine ilave edilen metalik veya metalik olmayan parçacıklardır (Khodaei vd.,2021). Parçacıkların kaplamayla biriktirilmesi, parçacıkların boyutuna, şekline, içeriğine, dispersiyon yöntemine bağlıdır.

Akımsız nikel matrisli kompozit kaplama yapısını oluşturan bu parçacıklar sayesinde kaplamanın mekanik ve tribolojik özelliklerindeki değişim çalışmalarına ilgi artmıştır. SiC, Al₂O₃, TiO₂, GO (grafen oksit), Karbon nanofiber (KNF) çalışmalarda kullanılan öne çıkan parçacıklardır. Al₂O₃, SiC ve karbon nanotüp takviyeli kompozit akımsız nikel kaplamalar geliştirilmiş ve bu yapıların metal yüzeye etkisi araştırılmıştır. Elektrokimyasal deneyler için tuz testi tercih edilmektedir. Kaplama çözeltisinde indirgeyici miktarındaki değişim kaplamanın fosfor miktarını ve korozyon özelliklerini etkilemektedir. Orta fosforlu kaplamaların yüksek fosforlu kaplamalara göre korozyon direncinin daha yüksek olduğu tespit edilmiştir (Islam vd., 2013). Kompozit kaplamalar her grup metale uygulanmaktadır. Akımsız kaplama yöntemi ile Karbon Nanotüp (KNT) takviyeli kompozit kaplamaların alüminyum altlık malzeme üzerine yapılan çalışmalarda kaplama çözeltisindeki KNT konsantrasyonunun kaplamanın mikroyapısal ve korozyon özelliklerine etkileri araştırılmaktadır. Üretilen kompozit kaplamaların karakterizasyon test sonucuna göre korozyon dayanımının arttığı tespit edilmiştir (Akyol vd., 2018).

3. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

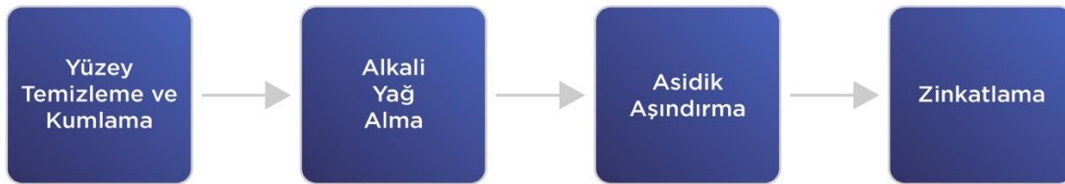
3.1. Yüzey Hazırlığı (Surface Preparation)

Çalışmada, Tablo 1’de kimyasal özellikleri verilen AA6061 T6 serisi alüminyum alaşımlı altlık malzeme 25x25x5 mm boyutlarında kullanılmıştır. Hazırlanan plakalar, akımsız kaplama banyosuna daldırılmadan önce 90 grit boyutunda cam küre kumu ile kumlanmıştır. Yapılan yüzey hazırlıklarından sonra farklı sürelerde (60dk, 90dk, 120dk) akımsız nikel banyosunda alüminyum yüzeyinde kaplama biriktirilmiş ve kaplama sonrası yapışma mukavemeti, kaplama kalınlığı ve korozyon direnci özellikleri yorumlanmıştır.

Tablo 1. Alüminyum alaşım (AA6061 T6) kimyasal özellikleri (Chemical properties of aluminum alloy (AA6061 T6))

Elementler	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Diğer	Al
Kütlece (%)	0.68	0.44	0.24	0.14	0.94	0.18	0.06	0.04	0.03	Kalan

Akımsız nikel kaplama prosesinde, kaplanacak malzemenin yüzey özelliği, kaplamanın taban malzemeye yapışmasını etkileyen en önemli parametrelerden birisidir. Bu yüzden kaplanacak plakaların kaplama banyosuna daldırılmadan önce yüzey temizliğinin çok iyi yapılması gerekmektedir (Yin vd.,2013). Uygulanacak ön işlemler Şekil 1’de gösterilmiştir.



Şekil 1. Kaplama öncesi alüminyum numune ön hazırlığı (Preparation of aluminum sample before coating)

Yüzey temizleme uygulamasının ilk aşaması olan alkali yağ alma banyosu, kaplanacak yüzeyin yağ, kir, pas, oksit ve diğer yabancı maddelerden tamamen arındırılması gerektiği için önemli bir ön hazırlık adımıdır. Yağ alma işleminin iyi yapılamaması durumunda yağ, kaplanacak yüzeyin yüzey gerilimini azaltarak kaplama metalinin yüzeye tutunmasını zorlaştırır. Yağlı yüzeylerde kaplama malzemesi çizilmeye, aşınmaya ve soyulmaya yatkın olabilir, bu da kaplamanın dayanıklılığını ve ömrünü azaltabilir. Yağ alma prosesi için kullanılan yöntemler; mekanik yağ alma, kimyasal yağ alma, ultrasonik yağ alma ve pasivasyon işlemleridir.

Asidik temizleme aşamasının hedefi ise yağ alma prosesinde temizlenemeyen oksitlenmiş tabakaları gidererek yüzeyi aktifleştirmektir. Bu işlem metal yüzeyinin pürüzlendirilmesi ve yüzey kusurlarının giderilmesi için de kullanılır. Pürüzlü yüzeyler, kaplama metalinin yüzeye tutunmasını kolaylaştırır ve kaplamanın dayanıklılığını arttırmaktadır.

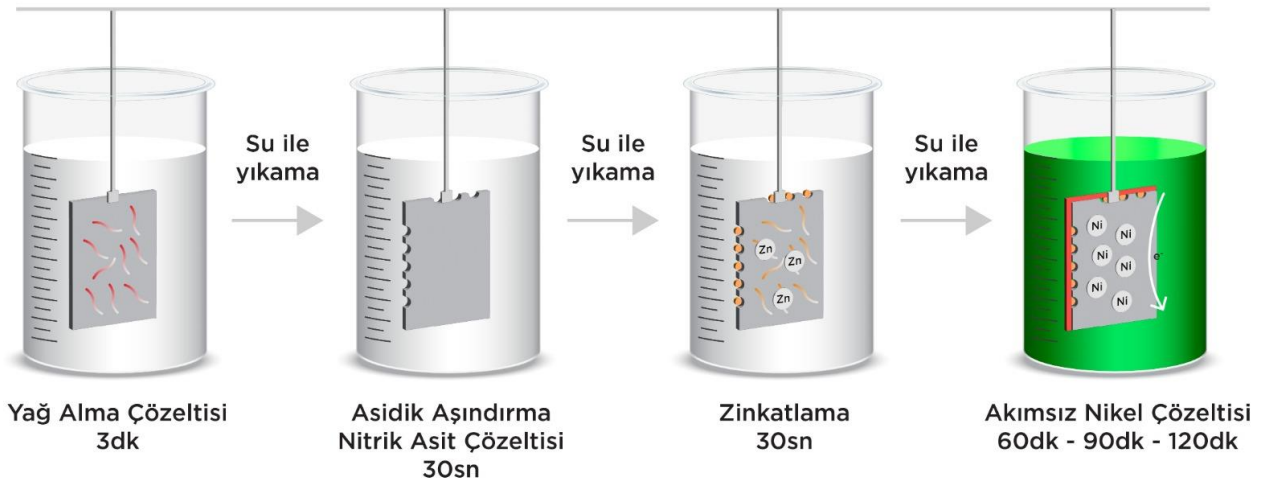
Kaplama altlığının iyi hazırlanmaması durumunda oksit katmanlarının oluşması mutlaka engellenmelidir. Bunu engellemenin en iyi yolu zinkatlama işlemidir (Takács vd.,2007). Yapılan zinkatlama işleminde, alüminyum altlık malzemesi yüzeyinde zinkat çözeltisi içerisinde bulunan çinko elementinin alüminyum ile yer değiştirerek yüzeyde çinko tabakası oluşturmasıdır. Oluşan çinko tabakası kaplama solüsyonu içerisinde çözünerek yüzeyin nikel ile kaplama prosesini başlatmış olur.

3.2. Akımsız Nikel Kaplama Prosesi (Electroless Nickel Plating Process)

Çalışmada, sıcaklık $85 \text{ }^\circ\text{C} \pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ ve pH 4.5-5.2 optimum koşul kabul edilerek sabitlenmiştir. Nikel kaplama prosesi 60dk, 90dk, 120dk sürelerle alüminyum yüzeyine indirgenmiştir. Çalışmada nikel kaynağı olarak nikel sülfat, fosfor kaynağı olarak sodyum hipofosfit kullanılmıştır. Kurulum kimyasalları Doğu Kimya (Ankara)'dan temin edilmiştir. Çalışmada yağ alma işlemi için ANADOL DA 5 alkali temizleyici kullanılmıştır. Yağ alma banyosunun kurulumu için yarı seviyeye kadar su dolu 1 L hacime sahip beher içerisine 100 gr Anadol DA 5 kimyasalı ilave edildi ve kalan hacim su ile tamamlandıktan sonra manyetik karıştırıcı yardımıyla katı formdaki ürün çözdürüldü. İkinci aşama olan asidik aşındırma banyosu için %38'lik Nitrik Asit (HNO_3) kimyasalı yarı seviyeye kadar su dolu 1 L hacime sahip beher içerisine 500 mL eklenip kalan hacim su ile tamamlandı. Akımsız nikel kaplama banyosu kurulumu için Niklad 787 kimyasalının A ve B komponentleri ile kurulum yapılmış, C komponenti ile besleme yapılmıştır. Kurulum için banyo hacminin %60'ı su ile doldurularak 65 mL Part 121A eklenerek karıştırıldı. Daha sonrasında 170 mL Part 122B kimyasalı eklendikten sonra kalan hacim su ile tamamlandı ve pH'ı 4.5-5.2 aralığında olması için %50 (v/v) amonyak çözeltisi kullanılmıştır. Kaplama prosesi başladıktan 1 saat sonra banyo çözeltisine 90 mL C komponenti eklenmiştir. İlave edilen C komponenti kaplama banyosunda kompleks yapıcı madde olarak kullanılmıştır. Kurulumdan sonra eklenmesinin sebebi indirgenen nikel metali ile bileşik yaparak nikel konsantrasyonunu azaltarak banyoda oluşacak çökeltme riskini ortadan kaldırmaktadır. İlgili çalışma parametreleri Tablo 2'de verilmiştir. Akımsız nikel kaplama prosesinde pH ve sıcaklık önemli değişkenlerdir. Düşük pH, düşük sıcaklık kaplama hızını düşürmektedir. Bu sebeple proses boyunca pH ve sıcaklık düzenli olarak kontrol edilmiştir. Gerçekleştirilen kaplama işlemi Şekil 2'de belirtilmiştir.

Tablo 2. Akımsız Nikel kaplama banyosu konsantrasyonu ve parametreleri
(Electroless nickel plating bath concentration and parameters)

Banyo Bileşenleri	Bileşen Türü / Kullanım Amacı	Konsantrasyon
Part 121 A	Nikel Sülfat/ Metalik Nikel Kaynağı	65 mL
Part 122 B	Sodyum Hipofosfit/ İndirgen Madde Kaynağı	170 mL
Part 151 C	Disodyum Tetraborat Dekahidrat/ Kompleksleştirici Ajan	90 mL
Amonyak	pH Yükseltgeni	1 mL
Parametreler	Değerler	
pH	4.5-5.2	
Banyo Sıcaklığı	$85 \text{ }^\circ\text{C} \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$	
Kaplama Süresi	60 dk, 90 dk, 120 dk	

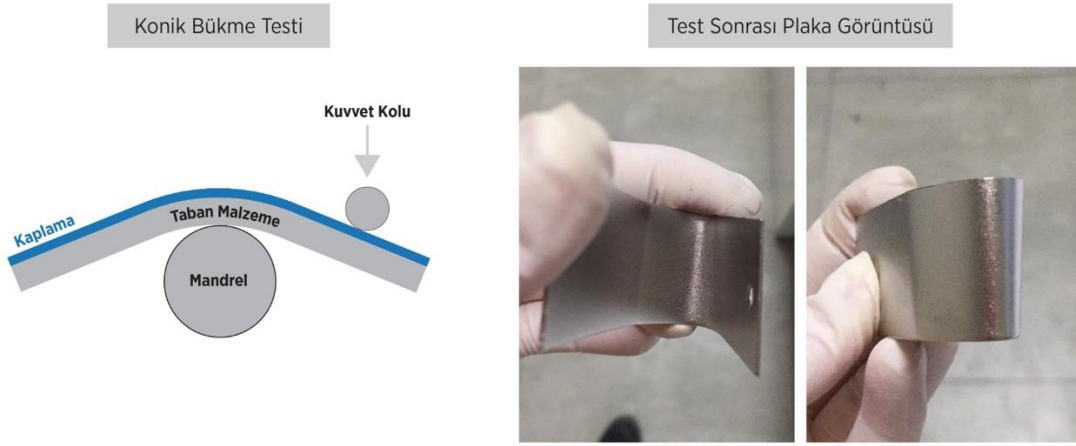


Şekil 2. Akımsız kaplama yöntemiyle nikel kaplama üretim akışı
(Production flow of nickel plating using electroless plating method)

4. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

4.1. Konik Bükme Testi Deneyleri (Conical Bend Tests)

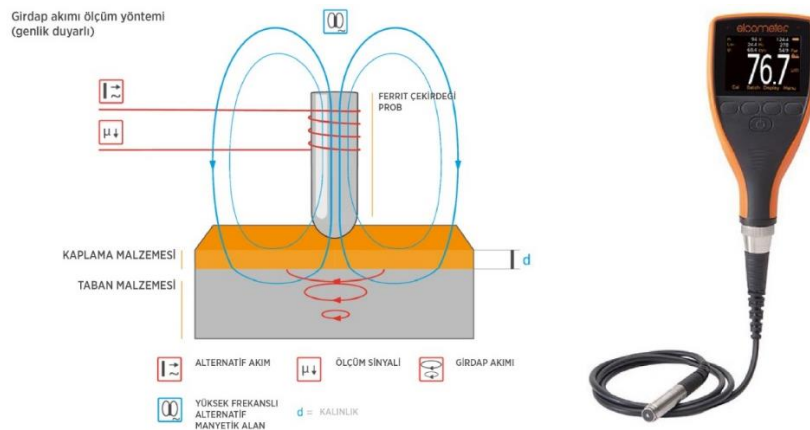
Test numunelerine kaplama kalitesini değerlendirmek amacıyla konik bükme testi uygulanmıştır. Kaplama yüzeyinde istenmeyen ve kalitesini doğrudan etkileyen gözeneklerin sebebiyet vereceği çatlamları tespit etmek ve yapışma mukavemetini değerlendirmek için ASTM D522 (D522, 2010) konik bükme testi standardı esas alınarak kaplama kalitesi değerlendirilmesi yapılmıştır. Test numunesi çalıştırma kolu yatay konumdayken plakanın bitiş tarafı çekme çubuğuna doğru olacak şekilde mandrel ile çekme çubuğu arasına yerleştirilir. Panel her zaman mandrelin dar ucuna ayarlanacak şekilde uzun kenarı sıkıştırma çubuğunun arkasına yerleştirilerek panel mandrelle bitişik dikey bir konumda kuvvet uygulayarak sıkıştırılır. Çekme kolu tekdüze bir hızda 180°C hareket ettirilir ve 1sn süreyle bükme işlemi gerçekleştirilir. Şekil 3’de konik bükme testinin yapıış yöntemi ve test sonrası görselleri verilen ‘U’ şeklini alan plakalarda kaplamada çatlama, soyulma, pullanma gibi durumlar görülmemiştir.



Şekil 3. Konik Bükme Testi uygulama metodu ve bükme testi uygulanan plaka görüntüleri
(Cone bending test application method and images of bending tests applied to plates)

4.2. Kaplama Kalınlık Testi (Coating Thickness Test)

Kaplama sonrası yüzeyde biriktirilen kaplama kalınlığının ölçümü için tahribatsız muayenelerden Eddy-Current yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde ön koşul, alt malzemenin elektriksel olarak iletken olması fakat mıknatıslanabilir olmamasıdır. Alüminyum yüzeylerde tercih edilen yöntemlerdendir. Eddy akımı yöntemiyle ölçüm yapmak için problemler ferrit çekirdeğine sahiptir. Çekirdek etrafındaki bobinden yüksek frekanslı alternatif akım akar ve bobin etrafında manyetik alan oluşur. Prob metal yüzeyinde gezdirildiğinde, metal yüzeyinde alternatif bir akım indüklenir. Bu da farklı bir manyetik alan oluşturur. İkinci oluşan manyetik alan birincinin tersi olup, orijinal manyetik alan zayıflar. Zayıflama boyutu, kutup ile metal arasında mesafe oluşturur. Kaplanmış parça için bu mesafe kaplama sonrası oluşan katman kalınlığını verir. Ölçüm cihazı olarak Elcometer 456 tip kaplama kalınlığı ölçüm cihazı kullanılmıştır. Şekil 4’de verilen Eddy-Current yöntemiyle çalışan kaplama cihazından alınan kaplama kalınlıkları Tablo 3’de verilmiştir. Kaplama süresinin artmasıyla yüzeyde biriken film tabakasının kalınlığı artmaktadır.



Şekil 4. Eddy Current yöntemi çalışma mekanizması ve kalınlık ölçüm cihazı
(Eddy current method working mechanism and thickness measurement device)

Tablo 3. Kaplama kalınlık ölçüm değerleri (Coating thickness measurement values)

Kaplama Süresi	1.plaka ölçümü	2.plaka ölçümü	3. plaka ölçümü
60 dk	15.5 µm	15.7 µm	15.8 µm
90 dk	20.2 µm	20.5 µm	20.6 µm
120 dk	25.8 µm	25.9 µm	26.1 µm

4.3. Tuz Sisi Testi (Salt Mist Test)

Akımsız Ni-P kaplamalarda korozyon direncini etkileyen birden fazla sebep vardır. Kaplama kalınlığı, banyo bileşimi, kaplamanın gözenekliliği bunlara örnek olarak verilebilir. Kaplamanın korozyon direncini belirlemek için tuz sisi testleri uygulanmaktadır. Yapılan yüzey işlemin korozyon direncine etkisini incelemek için C&W Specialist SF/200A Modeli tuz sisi testi kabini kullanılmıştır. Deney sisteminde, ASTM B117 (B117, 2010) standardına bağlı olarak pH değeri 6.5-7.2 arasında olan deiyonize su içinde %5 sodyum klorür (NaCl) çözeltisi kabin içerisine püskürtülerek deniz atmosferi benzeri bir korozif ortam oluşturulmuştur. Kabin test boyunca kapalı tutulmuş ve kapak oturma kanalı temiz su ile doldurulmuştur. Bu suyun görevi doğal conta görevi görerek kapak kenarlarından sis çıkışı ve sıcaklık kaybını engellemektir. Kabin içi test ortamı sıcaklığı $35\pm 2^{\circ}\text{C}$ 'de sabit tutulmuştur. Plakalar teste koyulmadan önce, plakaların keskin köşelerinde kaplama hassasiyeti olacağı kabul edilerek sızdırmaz bant ile 1mm kalınlığında arkalı önlü kapatılmıştır. ASTM B733 (B733, 2022) Akımsız Nikel-Fosfor kaplama standardına göre yüzey işlem yapılan plakalar kesintisiz 96 saat boyunca tuz sisi testine maruz bırakılmıştır. Test sonrası plakaların yüzeyde kalan tuz kalıntıları su ile yıkanarak yüzeyden temizlenmiştir. Büyüteç ile yüzey kontrolü yapılan tüm plakalarda 72 saat sonunda beyaz pas oluşumu görülmüştür.

5. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Hazırlanan alüminyum altlık malzeme üzerine belirlenen optimum koşullarda akımsız nikel kaplama işlemi uygulanmıştır. Kaynak araştırmasında bazı çalışmalarda benzer çözeltiler kullanılmasına rağmen gerek banyo bileşenleri gerekse kaplama koşulları bu çalışmaya özgüdür.

Kaplama sonrası bükme testi yapılan plakalarda kaplamanın yüzeyden kalkmadığı ve pul pul dökülmediği gözlemlenmiştir. Yapılan yüzey hazırlık aşamaları kaplamayı olumlu yönde etkilemiştir. Kumlama işlemiyle plakaların yüzey pürüzlülüğünün artırılması kaplamanın yüzeye daha iyi tutunmasını sağlamıştır. Yüzey hazırlığın son aşaması olan çinko içeren zinkat çözeltisinin kaplamanın yapışma mukavemetine etti ettiği ve daha fazla kaplama birikmesi sağladığı görülmüştür.

Kaplanan plakalarda tüm optimum koşullar sağlanarak istenilen kalınlıkta kaplama yapılmıştır. Akımsız nikel kaplama banyosunun kaplama hızının 15-18 µm/saat olduğu tespit edilmiştir. Kaplama kalınlığı arttıkça kaplama hızının düştüğü görülmüştür. Kaplama süresinin arttıkça kaplama kalınlığının arttığı ve en yüksek kaplama kalınlığı 26.1 mikron ile 120 dk'ya ait 3.plakada elde edilmiştir.

Tuz püskürtme yöntemiyle korozyon testi yapılan plakaların korozif etkilere karşı dirençleri incelenmiştir. Kaplama banyosunda biriken ağırlıkça % fosfor oranı kaplama süresinin artmasıyla artış göstermektedir. Fosfor miktarındaki artış tuz çözeltisinde korozyon dayanımında pozitif yönde iyileşme sağlamaktadır. 72 saat sonunda tüm kaplanmış plakaların yüzeylerinde beyaz pas oluşumu görülmüştür. Fakat kaplama süresi 120 dk olan plakaların yüzeyinde, 60 dk kaplanmış plakalara göre daha az beyaz pas oluşumu görülmüştür.

Yapılan çalışmada belirlenen işlem yöntemleriyle akımsız nikel kaplama, diğer alüminyum alaşımları ve metal gruplarına (çelik, paslanmaz çelik vb.) uygulanabilme potansiyeline sahiptir. Akımsız nikel kaplamaların yüzeye üniform kaplanması ve uygulanabilir malzeme seçeneklerinin olması farklı sektörlerde kullanılmasına avantaj sağlamaktadır. Yeni teknolojik çalışmalarda, malzemelerin korozyon direncinin ve mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi için kaplama banyosuna partikül ilaveleriyle yapılacak kompozit çalışmalar önem kazanmaktadır. Savunma ve havacılık sektörü başta olmak üzere bu malzemelere yönelik yapılacak teknolojik gelişmeler de kompozitlerin, akımsız kaplama teknolojisiyle kullanımı yaygın hale gelecektir.

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışmayı yapmamıza fırsat veren Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Kimya Mühendisliği bölümüne teşekkür ederiz.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar (References)

- Akyol, A., Algül, H., Bilaç, O., Ulu, S., Gül, H., Uysal, M., ... & Alp, A. 6061 Serisi Alüminyum Altık Üzerine Akımsız Kaplama Yöntemi ile KNT Takviyeli Alaşım Matrisli Ni-P-KNT Kompozit Kaplamaların Korozyon Davranışının İncelenmesi.
- Akyol, A., Algül, H., Bilaç, O., Seda, U. L. U., Harun, G. Ü. L., UYSAL, M., ... & Ahmet, A. L. P. (2019). Elektrolitik Sert Metal Kaplamaya Alternatif Çevreye Duyarlı Ni-P Kaplamaların 6061 Serisi Alüminyum Altık Üzerine Akımsız Yöntemle Biriktirilmesinde Sodyum hipofosfit, Sıcaklık ve Zamanın Etkisi. *Academic Platform-Journal of Engineering and Science*, 7(3), 442-448.
- A. Brenner, G.E. Riddell, Nickel plating on steel by chemical reduction, *J. Res. Natl. Bur. Stand.*, 37, 31 – 34, 1934.
- Brenner A., *Electrodeposition of Alloys: Principles and Practice*, 2.Baskı, New York: Academic, Newyork, 589-590, 1963.
- Burleigh, T. D. (2003). Corrosion of aluminum and its alloys. In *Handbook of aluminum* (pp. 421-463). CRC Press.
- B117, "Standard Practice for Operating Salt Spray (Fog) Apparatus", <https://www.astm.org/b0117-19.html>, December 31, 2010.
- B733, "Standard Specification for Autocatalytic (Electroless) Nickel-Phosphorus Coatings on Metal", <https://www.astm.org/b0733-22.html>, May 05, 2022.
- D522, "Standard Test Methods for Mandrel Bend Test of Attached Organic Coatings", <https://www.astm.org/standards/d522>, December 31, 2010.
- Hashmi, M. S. J. (2014). *Comprehensive materials processing*. Newnes.
- Islam, M., Azhar, M. R., Fredj, N. ve Burleigh, T. D., (2013). "Electrochemical Impedance Spectroscopy and Indentation Studies of Pure and Composite Electroless Ni-P Coatings", *Surface and Coatings Technology*, 236:262-268.
- Jena, G., & Philip, J. (2022). A review on recent advances in graphene oxide-based composite coatings for anticorrosion applications. *Progress in Organic Coatings*, 173, 107208.
- Khodaei, M., & Gholizadeh, A. M. (2021). SiC nanoparticles incorporation in electroless NiP-Graphene oxide nanocomposite coatings. *Ceramics International*, 47(18), 25287-25295.
- Krishnan K.H., John S., Srinivasan K.N., Praveen J., Ganesan M., Kavimani P.M., An overall aspect of electroless Ni-P depositions— A review article. *Metall. Mater. Trans. A.*, 37, 1917 – 1926, 2006.
- Matik, U. (2020). Effect of crystallization on wear and corrosion behavior of electroless Ni-P/Ni-B duplex coating on ferrous PM compacts. *Kovove Mater*, 58, 247-254.
- Matsubara, H., Yonekawa, T., Ishino, Y., Nishiyama, H., Saito, N., & Inoue, Y. (2002). Observation of initial deposition process of electroless nickel plating by quartz crystal microbalance method and microscopy. *Electrochimica acta*, 47(25), 4011-4018.
- M. Yan, H. G. Ying, and T. Y. Ma, "Improved microhardness and wear resistance of the as-deposited electroless Ni-P coating," *Surf. Coatings Technol.*, vol. 202, no. 24, pp. 5909-5913, 2008.
- Omidvar H., Sajjadnejad M., Stremsoerfer G., Meas Y., Mozafari A., Characterization of NiBP-graphite composite coatings deposited by dynamic chemical plating. *Anti-Corrosion Methods Mater.*, 62, 116 – 122, 2015.
- Paz Martínez-Viademonte, M., Abrahami, S. T., Hack, T., Burchardt, M., & Terryn, H. (2020). A review on anodizing of aerospace aluminum alloys for corrosion protection. *Coatings*, 10(11), 1106.
- Sharma, S. B., Agarwala, R. C., Agarwala, V., & Satyanarayana, K. G. (2002). Characterization of carbon fabric coated with Ni-P and Ni-P-ZrO₂-Al₂O₃ by electroless technique. *Journal of materials science*, 37, 5247-5254.
- Takács, D., Sziráki, L., Török, T. I., Sólyom, J., Gácsi, Z., & Gál-Solymos, K. (2007). Effects of pre-treatments on the corrosion properties of electroless Ni-P layers deposited on AlMg2 alloy. *Surface and Coatings Technology*, 201(8), 4526-4535.
- Tracon, A. A. (2007). *Coatings Technology-Fundamentals, Testing, and Processing techniques*. Coatings Technology-Fundamentals, Testing, and Processing techniques, 238-284.
- Ulu, S. (2019). Alüminyum alaşımlarının akımsız kaplama yöntemiyle nikel bor kaplanması (Master's thesis, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi).
- Vaghefi, S. M., Saatchi, A., & Ebrahimian-Hoseinabadi, M. (2003). Deposition and properties of electroless Ni-P-B4C composite coatings. *Surface and Coatings Technology*, 168(2-3), 259-262.
- Yin, Z., & Chen, F. (2013). Effect of nickel immersion pretreatment on the corrosion performance of electroless deposited Ni-P alloys on aluminum. *Surface and Coatings Technology*, 228, 34-40.
- Q. Wang et al., "Evolution of structural, mechanical and tribological properties of Ni- P/MWCNT coatings as a function of annealing temperature," *Surf. Coatings Technol.*, vol. 302, pp. 195-201, 2016.