



ANADOLU ÜNİVERSİTESİ



**BİLECİK ŞEYH EDEBALI
ÜNİVERSİTESİ**

Fen Bilimleri Enstitüsü

Kimya Anabilim Dalı

**AKIMSIZ KAPLAMA TEKNİĞİ KULLANILARAK ASTM
A105 KALİTEDE ÇELİĞİN NİKEL KAPLANMASI;
MİKRO YAPISINA, KOROZYON DİRENCİNE VE
SERTLİĞİNE ISIL İŞLEM ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

Mahmut Sami ÇAPKIN

Yüksek Lisans Tezi

Danışman

Doç.Dr. Erdal EREN

Bilecik, 2014

Referans No : 10041496



ANADOLU ÜNİVERSİTESİ



**BİLECİK ŞEYH EDEBALI
ÜNİVERSİTESİ**

Fen Bilimleri Enstitüsü

Kimya Anabilim Dalı

**AKIMSIZ KAPLAMA TEKNİĞİ KULLANILARAK ASTM
A105 KALİTEDE ÇELİĞİN NİKEL KAPLANMASI;
MİKRO YAPISINA, KOROZYON DİRENCİNE VE
SERTLİĞİNE ISIL İŞLEM ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

Mahmut Sami ÇAPKIN

Yüksek Lisans Tezi

Danışman

Doç.Dr. Erdal EREN

Bilecik, 2014



ANADOLU UNIVERSITY



**BILECIK SEYH EDEBALI
UNIVERSITY**

**Graduate School of Sciences
Department of Chemistry**

**NICKEL PLATING OF ASTM A105 STEEL USING
ELECTROLESS PLATING TECHNIQUE:
INVESTIGATION OF HEAT TREATMENT ON MICRO-
STRUCTURE, CORROSION RESISTANCE AND
HARDNESS**

Mahmut Sami CAPKIN

Master's Thesis

Thesis Advisor

Assoc. Prof. Dr. Erdal EREN

Bilecik, 2014



BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS

JÜRİ ONAY FORMU

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimler Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 02/05/2014 tarih ve 19/2 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 29.05.2014 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Mahmut Sami ÇAPKIN'ın "Akımsız Kaplama Tekniği Kullanılarak ASTM A105 Kalitede Çeliğin Nikel Kaplanması; Mikro Yapısına, Korozyon Direncine ve Sertliğine Isıl İşlem Etkisinin İncelenmesi" başlıklı tez çalışması Kimya Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak oy birliği ile kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE
(TEZ DANIŞMANI) : Doç. Dr. Erdal EREN

ÜYE : Doç. Dr. Murat ERDEM

ÜYE : Yrd. Doç. Dr. Arslan ÜNAL

ONAY

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimler Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
..... tarih ve sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

TEŞEKKÜR

Öncelikle tüm öğrenim hayatım süresince, özellikle de bu tez çalışmasının yürütülmesinde ve sosyal yaşantımdaki katkı ve desteklerinden dolayı danışmanım Doç. Dr. Erdal EREN'e teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca kimya bölümü araştırma görevlilerine, XRD ve SEM analiz çalışmalarında yardımcı olan Ferhat BAYDAROĞLU'na ve bu tez çalışmasının tüm aşamalarında destek olan KURVALF MAKİNA firmasına ve iş arkadaşlarıma, desteklerini esirgemeyen aileme ve dostlarıma teşekkür ederim.

Mahmut Sami ÇAPKIN

Nisan - 2014

ÖZET

Yüzeylerin metaller ile kaplanması üzerine yapılan çalışmalar büyük ilgi görmektedir. Kaplama tipi, kaplama yapılacak altlıkların özellikleri ve korozyona karşı olan mukavemetleri kaplama teknolojisinin geliştirilmesi için önemli parametrelerdir.

Metalik kaplamalar akımlı ve akımsız kaplama olmak üzere ikiye ayrılır. Kaplama yapılacak altlık kaplama süreçlerinin karakterizasyonu ve kontrolü için önemlidir.

Akımsız kaplamalar kompleks ve karmaşık alt yüzeylere uygulanabilmesi ve kaplama prosesi sonrası homojen bir yüzeye sahip olması nedeniyle tercih edilir. Akımsız nikel kaplamanın homojenliği mükemmeldir.

Bu tezin amacı ASRTM A 105 kalitede çeliğin akımsız nikel-fosfor kaplama sonrası yapılan ısıtıl işlemin kaplama morfolojisine etkisinin incelenmesidir. Yüzeylerdeki değişiklikler XRD, SEM, tuz testi, kalınlık ölçümü gibi yöntemlerle incelenmiştir. Deneysel çalışmalar, yeni bir akımsız nikel-fosfor kaplama banyosunun kurulması, çelik malzemelerin kaplanması, 450°C de 1 saatlik ısıtıl işlemin gerçekleştirilmesi ve gerekli testleri yapılmasını kapsamaktadır.

Bu tez çalışması ile ısıtıl işlem sonrası akımsız nikel-fosfor kaplama tabakasının daha sıkı ve daha sert bir yapıya sahip olduğu, yüzey morfolojisinin amorf yapıdan kristal yapıya döndüğü, kaplama kalınlığının ve korozyon direncinin azaldığı gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Akımsız nikel kaplama, ısıtıl işlem, korozyon, sertlik.

ABSTRACT

There is a tremendous interest on the studies related with the metal coating of surfaces. The coating type, properties of substrates and intervention against corrosion are the most important parameters for the development of coating technology.

Metallic coatings are divided into current and electroless plating. the substrate to be coated and used area is checked and characterized in the coating processes.

Electroless plating are preferred due to its easily application for the complicated and complex structures and also homogenous surface obtained after plating process. Uniformity of electroless nickel plating is excellent.

The aim of this thesis is to investigate the effects on the heat treatment on the ASTM A105 steel surface coated with nickel by electroless plating. The changes on the surfaces were investigated by using the XRD, SEM, salt test, measure of thickness techniques. Experimental study includes the establishment of a new plating bath (Ni-P), the analysis process, the coating of steel material, the heat treatment (450 ° C for 1 hour) and testing process.

It was observed that a more rigid structured nickel layer occurred, the corrosion resistance of that reduced, the surface morphology shifted from amorphous to crystalline structure and the thickness of the coating layer decreased after heat treatment.

Keywords: Electroless nickel plating, heat treatment, corrosion, hardness.

İÇİNDEKİLER

JÜRİ ONAY SAYFASI	
TEŞEKKÜR	
ÖZET	I
ABSTRACT	II
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	III
ŞEKİLLER DİZİNİ	VI
ÇİZELGELER DİZİNİ	IX
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	X
1.GİRİŞ	1
2.AKIMSIZ NİKEL KAPLAMA	5
2.1. Akımsız Nikel Kaplamanın Gelişimi.....	5
2.2. Akımsız Nikel Kaplamanın Genel Özellikleri.....	6
2.3. Akımsız Nikel Kaplama Banyosunda Değişkenlerin Önemi	10
2.3.1.Nikel Kaynağı.....	11
2.3.2.İndirgeyici.....	11
2.3.2.1. Sodyum Hipofosfit Kullanılan Banyolar.....	11
2.3.2.2. Bor Hidrür Kullanılan Banyolar.....	14
2.3.3.Enerji.....	15
2.3.4. pH Etkisi.....	16
2.3.5.Kompleks Ajanlar.....	18
2.4. Akımsız Nikel Kaplamanın Mikro Yapısı.....	19

2.5. Akımsız Nikel Kaplamanın Kullanım Alanları.....	22
2.6. Akımsız Nikel Kaplamanın Sertliği.....	22
2.7. Akımsız Nikel Kaplama ve Korozyon.....	24
2.7.1. Korozyondan Korunma Teknikleri.....	24
2.7.2. Akımsız Nikel Kaplamanın Korozyon Dayanımı.....	25
2.8. Akımsız Nikel Kaplama ve Isıl İşlem.....	27
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	28
3.1. Deney Aşamaları.....	28
3.1.1. Numune malzemelerinin hazırlanması.....	28
3.1.2. Akımsız nikel-fosfor banyosunun hazırlanması.....	29
3.1.2.1. Saf Su.....	30
3.1.2.2. Sıcak Yağalma Banyosunun Hazırlanması.....	30
3.1.2.3. Akımsız Nikel-Fosfor Banyosunun Kurulumu.....	33
3.1.2.3.a. Nikel Analizi.....	35
3.1.2.3.b. Sodyum Hipofosfit Analizi.....	36
3.1.2.3.c. pH Kontrolü.....	36
3.1.3. Akımsız Nikel Kaplama Banyosu Basamakları.....	36
3.1.4. Kaplama Sonrası Kalınlık Ölçümlerinin Yapılması.....	39
3.1.5. Kaplama Sonrası Isıl İşlemin Uygulanması Ve Sertlik Analizlerinin Yapılması.....	41
3.1.6. Korozyon Testlerinin Yapılması.....	43
3.1.7. X-Işınları Difraksiyonu (XRD) Analizleri Ve Diyagramları.....	46

4. SONUÇLAR ve YORUMLAR.....	52
6. KAYNAKLAR.....	55
Ek-1. Akımsız nikel kaplamanın uygulama alanları	62

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Metallerin üretimi, işlenmesi ve korozyonu.....	1
Şekil 1.2. Korozyona uğramış çapa örneği.....	2
Şekil 1.3. Akımsız ve akımlı nikel kaplanan parçaların kaplama homojenliğinin karşılaştırılması.....	3
Şekil 1.4. Akımsız nikel kaplamanın çeşitli uygulamaları,	
(a) Otomotiv uygulamalarında diferansiyel kutularında.....	4
(b) Elektronik endüstrisinde bilgisayar hard disklerinde.....	4
(c) Vana sektöründe	4
Şekil 2.1. Fosfor oranı ve yoğunluk arasındaki ilişki.....	7
Şekil 2.2. Fosfor oranının erime noktası üzerindeki etkisi.....	8
Şekil 2.3. Fosfor oranının kaplamanın mikrosertliği üzerine etkisi.....	9
Şekil 2.4. Nikel sülfatın kimyasal yapısı.....	11
Şekil 2.5. Örnek bir akımsız nikel kaplama tesisi.....	13
Şekil 2.6. Kaplama hızına çözelti sıcaklığının etkisi.....	16
Şekil 2.7. Çözelti pH'ının kaplama hızına ve fosfor oranına etkisi.....	17
Şekil 2.8. Akımsız nikel kaplama çözeltisinde ortofosfitin çözünürlük limitleri	19
Şekil 2.9. Nikel-fosfor kaplamada nikel derişiminin etkisi.....	21
Şekil 2.10. Akımsız nikel kaplama üzerinde hipofosfit derişiminin etkisi.....	22
Şekil 2.11. %10,5 fosfor içeren akımsız nikel kaplamada ısıl işlemin kaplamanın sertliğine etkisi.....	23
Şekil 2.12. Isıl işlem fırın örnekleri.....	27
Şekil 3.1. Kullanılan numunelerin kalınlıklarının kumpas yardımıyla ölçümü.....	28

Şekil 3.2 Saf su üretim cihazı ve iletkenlik ölçümü.....	30
Şekil 3.3. SurTec 179 yüksek alkali yağ giderici.....	31
Şekil 3.4. Sıcak yağ alma banyosu.....	32
Şekil 3.5. Akımsız nikel-fosfor banyo kurulumu için gerekli ürünler.....	33
Şekil 3.6. Akımsız nikel naplama banyosu.....	34
Şekil 3.7. Akımsız nikel kaplama banyosu, ısıtıcı ve karıştırıcı sistemi.....	35
Şekil 3.8. Korozyon testine tabi tutulacak parçanın kaplanması.....	38
Şekil 3.9. Test ve analizleri yapılacak parçaların kaplanması.....	39
Şekil 3.10. Korozyona testine (tuz testi) tabi tutulacak olan parçaların kaplama kalınlık ölçümü.....	40
Şekil 3.11. Test ve analizleri yapılacak parçaların kalınlık ölçümleri.....	41
Şekil 3.12. Isıl işlem sonrası kaplama kalınlık ölçümünün yapılması.....	42
Şekil 3.13. Akımsız nikel kaplamanın ısıl işlemsiz 400× büyütmede mikrofotografı....	42
Şekil 3.14. Akımsız nikel kaplamanın ısıl işlemlili 400× büyütmede mikrofotografı....	43
Şekil 3.15. Tipik bir tuz sprej (püskürtme) korozyon testi cihazı.....	44
Şekil 3.16. Isıl işlemsiz numunenin tuz püskürtme korozyon testi sonrası.....	45
Şekil 3.17. Isıl işlemlili numunenin tuz püskürtme korozyon testi sonrası.....	45
Şekil 3.18. Isıl işleme tabi tutulmayan akımsız nikel kaplı numunenin X-Işını kırınım deseni.....	47
Şekil 3.19. Isıl işleme tabi tutulan akımsız nikel kaplı numunenin X-Işını kırınım deseni.....	47
Şekil 3.20. Isıl işlemlili akımsız nikel kaplama numunesinin SEM görüntüsü.....	48

Şekil 3.21. Isıl İşlemsiz akımsız nikel kaplama numunesinin SEM görüntüsü	48
Şekil 3.22. Isıl işlemlili akımsız nikel kaplamanın SEM görüntüsü	49
Şekil 3.23. Isıl işlemsiz akımsız nikel kaplamanın SEM görüntüsü	49
Şekil 3.24. 450°C de 1 saat ısııl işleme tabi tutulan akımsız nikel kaplamalı numunenin SEM görüntüsü	50
Şekil 3.25. Isıl işleme tabi tutulamayan akımsız nikel kaplamalı numunenin SEM görüntüsü	50
Şekil 3.26. 450°C de 1 saat ısııl işleme tabi tutulan akımsız nikel kaplamalı numunenin EDX element analiz haritası.....	51
Şekil 3.27. Isıl işleme tabi tutulmayan akımsız nikel kaplamalı numunenin EDX element analiz haritası	51

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Fosforlu akımsız nikel kaplama ve borlu akımsız nikel kaplamanın özelliklerinin karşılaştırılması.....	10
Çizelge 2.2. Alkali akımsız nikel kaplama ve asitli akımsız nikel kaplamanın çalışma koşullarının karşılaştırılması.....	13
Çizelge 2.3. Sodyum borhidrürün kimyasal ve fiziksel özellikleri.....	15
Çizelge 2.4 Banyo pH'nın kaplama görünümüne etkisi.....	18
Çizelge 2.5. Akımsız nikel kaplama tiplerinin özellikleri.....	20
Çizelge 2.6. Korozyona karşı korunma yöntemleri, önlemler ve prosedürleri.....	24
Çizelge 2.7. Çeşitli ortamlarda akımsız nikel kaplamanın korozyon.....	26
Çizelge 2.8. %10'luk hidroklorik asit içerisindeki %10,5 fosfor oranlı bir akımsız nikel kaplamanın korozyonuna ısıtılmanın etkisi.....	27
Çizelge 3.1. Numunelerin kimyasal analizleri.....	29
Çizelge 3.2. Numunelerin fiziksel özellikleri.....	29
Çizelge 3.3. Akımsız nikel kaplama proses akım şeması.....	37
Çizelge 3.4. Isıtılmamış numunenin XRD sonuç tablosu.....	46
Çizelge 3.5 Isıtılmış numunenin XRD sonuç tablosu.....	46

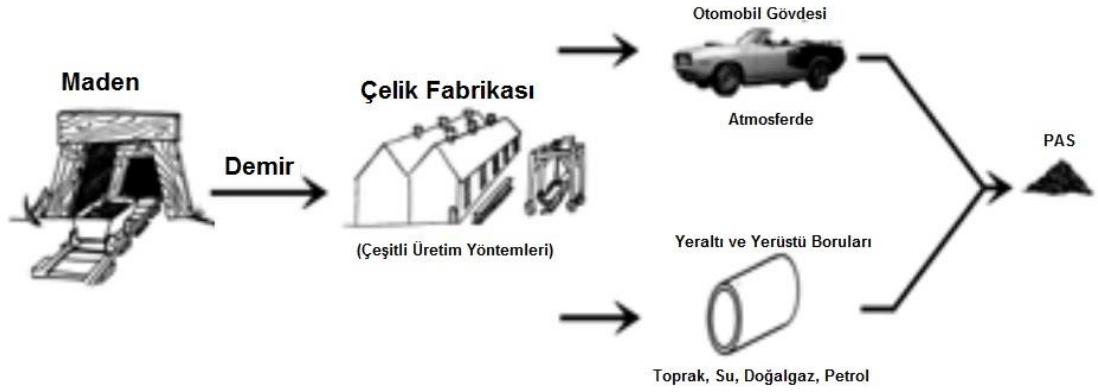
SİMGELER ve KISALTMALAR

- ENP** : Electroless Nickel Plating (Akımsız Nikel Kaplama)
- ANP** : Akımsız Nikel Kaplama
- pH** : Power of Hydrogen (Hidrojenin Gücü)
- °C** : Centigrade (Santigrat)
- µm** : Mikrometre (Kalınlık ölçüm birimi)
- h** : Saat (Hour)
- g/L** : gram/litre
- kgmm²** : kilogram × milimetre kare
- DIN** : Deutsches Institut für Normung (Alman Standartlar Enstitüsü)
- HV** : Vickers Sertliği
- HRc** : Rockwell Sertliği
- HB** : Brinell Sertliği
- ASTM** : American Society for Testing and Materials (Test ve Materyaller İçin Amerikan Standartları)
- DNC** : Durni-Coat (Kaplama kimyasalının özel ismi)
- µS** : Mikro Siemens
- EDTA** : Ethylene daimine tetra acetic acide
- EDX** : Energy Dispersive X-Ray (Enerji dağılımlı X ışınları analizi)
- SEM** : Taramalı elektron mikroskobu
- TSE** : Türk Standartları Enstitüsü
- XRD** : X-Işınları Kırınımı

1. GİRİŞ

Korozyon, metallerin hava ve su ile etkileşimi sonucu yüzeyinde meydana gelen değişimlerdir. Temel olarak metalik malzeme ile ilişkili olsa da, tüm malzeme tipleri bozunmaya hassastırlar (Barbara ve Robert, 2006).

Termodinamik temeller ışığında bakılacak olursa, korozyon ile ilişkili maliyetlerin oldukça yüksek olduğu görülür. Son 30 yıldır yapılan çeşitli çalışmalar ülke ekonomisine korozyonun yıllık maliyeti yaklaşık ülkenin Gayri Safi Milli Hasıla'sının (GSMH) % 3,1'i olduğunu göstermiştir. Amerika Birleşik Devletleri'nde, bu değer yıllık 276 milyar Amerikan Doları tutarındadır (NACE International Stand., 2002).



Şekil 1.1. Metallerin üretimi, işlenmesi ve korozyonu (Barbara ve Robert, 2006).

Şekil 1.1 de görüleceği gibi hemen hemen tüm metallerin (metallerden yapılmış mühendislik bileşenlerinin) üretimi enerji isteyen bir süreçtir. Şekilde görülen yokuş yukarı bir termodinamik mücadelenin sonunda metal düşük enerjili oksit durumuna (pas) geri dönmek için çok kuvvetli bir itici güce sahiptir. Pas oluşum süreci kaçınılmaz olsa da korozyon bariyerleri sayesinde gerekli önlemler alınabilmektedir (Barbara ve Robert, 2006).

Korozyonun çok ciddi problemlere neden olduğu Şekil 1.2'de görülebilmektedir.



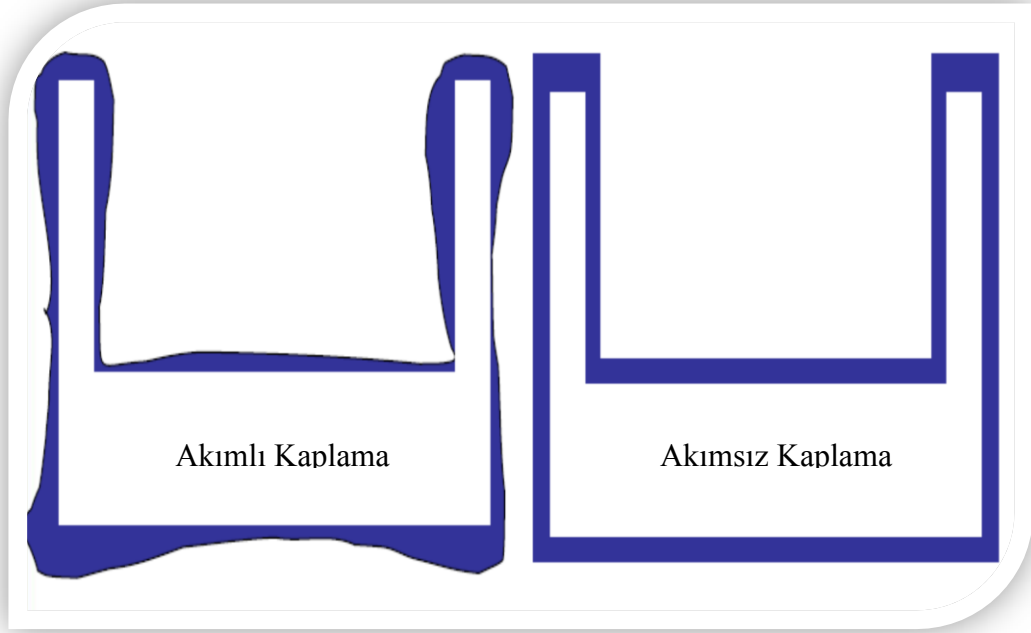
Şekil 1.2. Korozyona uğramış çapa örneği (www.milesforsmilesdental.net, erişim tarihi; 15.04.2014, saat: 16:14).

Akımsız nikel kaplama elektrik akımı kullanılmadan bir yüzeyin nikel kaplanması işlemidir ve hipofosfit, aminoboran veya borhidrid gibi indirgeyici ajanlarla nikel iyonunun metalik nikel şeklinde kaplama yapılacak yüzeyde biriktirilmesi şeklinde yürür (Donald vd., 1994). İlk defa 1946 yılında Brenner ve Riddel tarafından geliştirilmiştir (Krishnan vd., 2006). Yukarıda saymış olduğumuz kullanılan indirgeyici çeşitleri bağlı olarak nikel-fosfor, nikel-bor veya saf nikel kaplamalar elde edilebilmektedir (Zhu vd., 2008).

Nikel-fosfor alaşımları, mükemmel aşınma direnci, korozyon direnci, lehimlenebilirlik, parlatılabilirlik, manyetik özellikleri nedeniyle kimya, havacılık, otomotiv ve tekstil sanayinde sıklıkla kullanılmaktadırlar (Matsubara vd, 2002).

Akımsız nikel kaplama yöntemi belirtmiş olduğumuz mükemmel korozyon ve aşınma dirençlerinin yanı sıra malzeme yüzeyi ne olursa mükemmel bir uniformluk yani homojen kaplama kalınlığı sağlamaktadır (Riedel, 1991; Fields vd., 1984).

Elektrik akımı kullanılan kaplamalarda ise dışarıdan uygulanan elektrik akımı nedeniyle kaplama malzeme yüzeyine homojen dağılmamaktadır (Moonir vd., 2003). Şekil 1.3’de akımlı ve akımsız nikel kaplanan parçaların kaplama homojenliklerinin karşılaştırılması şematik olarak gösterilmiştir. Burada akımsız nikel kaplama ile sağlanan homojen kaplama net olarak görülebilmektedir.



Şekil 1.3. Akımsız ve akımlı nikel kaplanan parçaların kaplama homojenliğinin karşılaştırılması (www.alufingroup.com, erişim tarihi: 09 Nisan 2014, saat: 09:07).

Akımsız nikel kaplamalar, malzemeye sağladığı bu üstün özellikler nedeniyle petrol, plastik, optik, baskı ve dericilik, havacılık, otomotiv, elektronik, bilgisayar, tekstil, kâğıt ve gıda sanayileri/endüstrileri başta olmak üzere çeşitli alanlarda uygulanırla. (Donald vd., 1994).

Elektronik, bilgisayar ve vana bileşenleri de üstün kullanım özellikleri sebebiyle akımsız nikel kaplanmaktadır. Şekil 1.4’de akımsız nikel kaplamaların kullanım alanlarından sadece bir kaçı gösterilmiştir. Günümüzde mikro elektronikte akımsız nikel kaplama önemli bir rol oynamaktadır (Shacham-Diamond vd., 2003). Şekil 1.4.b’de ki resim bu uygulamalara bir örnektir.



(a)

(b)

(c)

Şekil 1.4. Akımsız nikel kaplamanın çeşitli uygulamaları

(a) Otomotiv uygulamalarında diferansiyel kutularında
(<http://www.pfonline.com/articles/electroless-nickel-beyond-elv> / erişim tarihi :
09 Nisan 2014, saat: 09:12)

(b) Elektronik endüstrisinde bilgisayar hard disklerinde
(<http://www.pfonline.com/articles/electroless-nickel-beyond-elv> / erişim tarihi :
09 Nisan 2014, Saat: 09:12)

(c) Vana sektöründe (www.kurvalf.com / erişim tarihi: 09 Nisan 2014, Saat: 09:11)

2. AKIMSIZ NİKEL KAPLAMA

1946 yılında Brenner ve Riddel tarafından geliştirilen akımsız nikel kaplama elektrik akımı kullanmadan nikel iyonlarının otokatalitik olarak bir indirgeyici ajan tarafından indirgenmesi ile yapılan kaplama türüdür (Véronique vd., 2012).

2.1. Akımsız Nikel Kaplamanın Gelişimi

Onsekizinci yüzyılda İtalyan bilim adamı Giovanni Galvani elektrik akımının iyon hareketi ile iletildiği tespit etmiş ve buradan yola çıkarak metal iyonlarını iki elektrot arasında transfer etmeyi başarmıştır. Bu nedenle Galvani'nin metal kaplamanın temelini bulduğu varsayılmaktadır. Birçok yerde adı geçen Galvaniz kelimesi bu bilim adamından gelmektedir. Bu konu hakkında temel teoriyi daha sonra Faraday detaylandırılmıştır (Saraç, 1995).

Metal kaplamanın sanayide kullanılması yirminci yüzyılda olmuştur. Yukarıda da belirttiğimiz üzere metallerin elektrokimyasal yolla kaplaması çok sayıda metal işleme yöntemlerinde kullanılır (Saraç, 1995).

Esas olarak Brenner ve Riddell (1946) tarafından bulunan akımsız nikel kaplamalar (Agarwala ve Agarwala 2003).

- (i) alaşımlı kaplamalar,
- (ii) kompozit kaplamalar ve
- (iii) metalik kaplamalar şeklinde üç ana sınıfa ayrılabilir.

Akımsız nikel kaplama bir nikel fosfor çözeltisiyle yürütülür ve herhangi bir harici elektrik akımına muhtaç olmadan kaplama yapılmak istenen yüzeyde nikel tabakasının kimyasal reaksiyon ile oluşması temeline dayanır. Reaksiyon, nikel çözeltisinin yüzeyle temas ettiği her yerde gerçekleşir (Ploof,2008).

Kullanılan indirgeyici ajana bağlı olarak akımsız nikel kaplama yöntemi ile nikel-fosfor, nikel-bor ve saf nikel tabakaları oluşturulur. Hipofosfitli akımsız nikel kaplamaların düşük maliyeti, kontrol kolaylığı ve iyi korozyon direnci nedeniyle kullanımı ve ticari başarısı daha fazladır (Balaraju vd., 2003).

2.2. Akımsız Nikel Kaplamanın Genel Özellikleri

Akımsız kaplamalar, benzersiz fizikokimyasal ve mekanik özellikleri bulunan uygulamalardır. Akımsız uygulamalar altlığa sağladıkları aşınma ve korozyon dirençleri sebebiyle tercih edilirler. Akımsız kaplamaları kullanışlı kılan özelliklerinden bazıları şunlardır;

- ❖ Homojenlik,
- ❖ Mükemmel korozyon direnci,
- ❖ Aşınmaya ve aşındırmaya karşı direnç,
- ❖ Lehimlenebilirlik,
- ❖ Yüksek sertlik,
- ❖ Amorf ve mikrokristal katman,
- ❖ Düşük sürtünme katsayısı,
- ❖ Parlaklık,
- ❖ Özdirenç,
- ❖ Manyetik özellikler (Agarwala ve Agarwala 2003).

Kaplanacak olan yüzey banyo çözeltisi ile temas ettiği sürece veya nikel iyonları tükenene kadar kaplama devam eder (Agarwala ve Agarwala 2003).

Kimyasal indirgeme yöntemi ile kaplama işleminden farklı olarak başka iki yöntem daha rapor edilmiştir. Bunlar nikel klorür ve borik asit çözeltisine çeliğin daldırılması ve çelik tabakası üzerinden nikel karbonil buharının ayrışmasını içerir (Parker, 1972; Gaurilow, 1979). Otokatalitik indirgeme reaksiyonunun kullanılmasının avantajı kaplama tabakasının mükemmel bir homojenliğe sahip olmasıdır (Agarwala ve Agarwala 2003).

Akımsız nikel kaplama birçok sanayi tarafından kullanılan fonksiyonel bir kaplama türüdür çünkü bu kaplama hem korozyon direnci hem aşınma direnci sebebiyle benzersiz özellikleri barındırır. (Weil ve Parker, 1990).

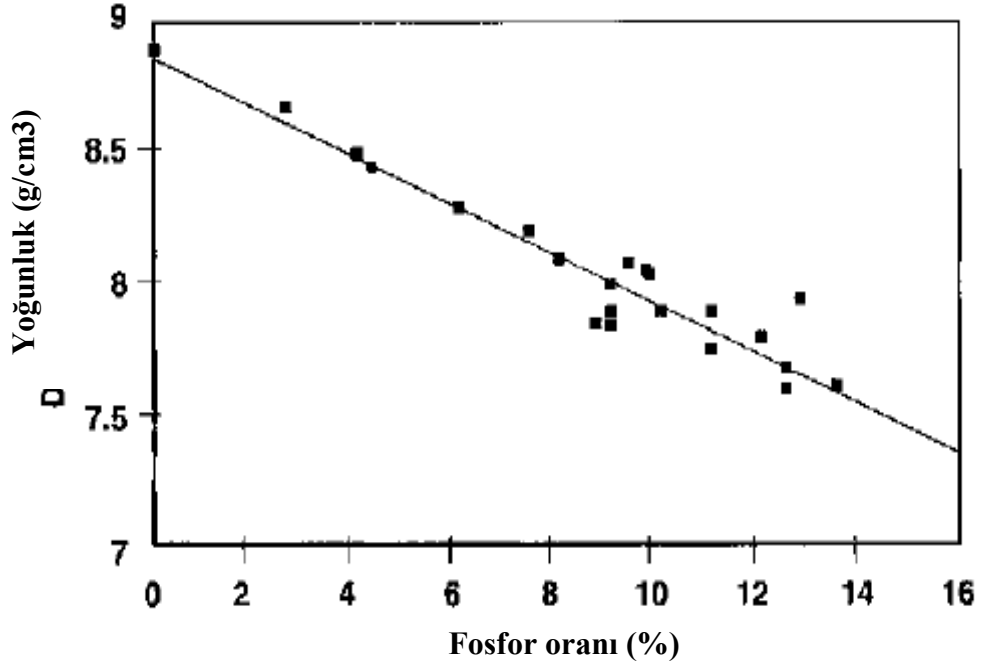
Kullanılan fosfor içeriğine göre akımsız nikel banyoları;

- ❖ **Düşük fosfor içerikli; yaklaşık % 2 – 7 fosfor**
- ❖ **Orta fosfor içerikli; yaklaşık % 7 – 12 fosfor**

❖ **Yüksek fosfor içerikli; yaklaşık % 13 – 18 fosfor** olmak üzere üçe ayrılır (Jiaqiang vd., 2005).

Saf nikelin yoğunluğu $8,9 \text{ g/cm}^3$ dür. Birçok kalite kontrol testleri kaplamanın kalınlığı belirlemek için yoğunluğu kullanır ve doğru yoğunluk değeri doğru bir kalınlık tespiti için gereklidir (NACE Publication,1987).

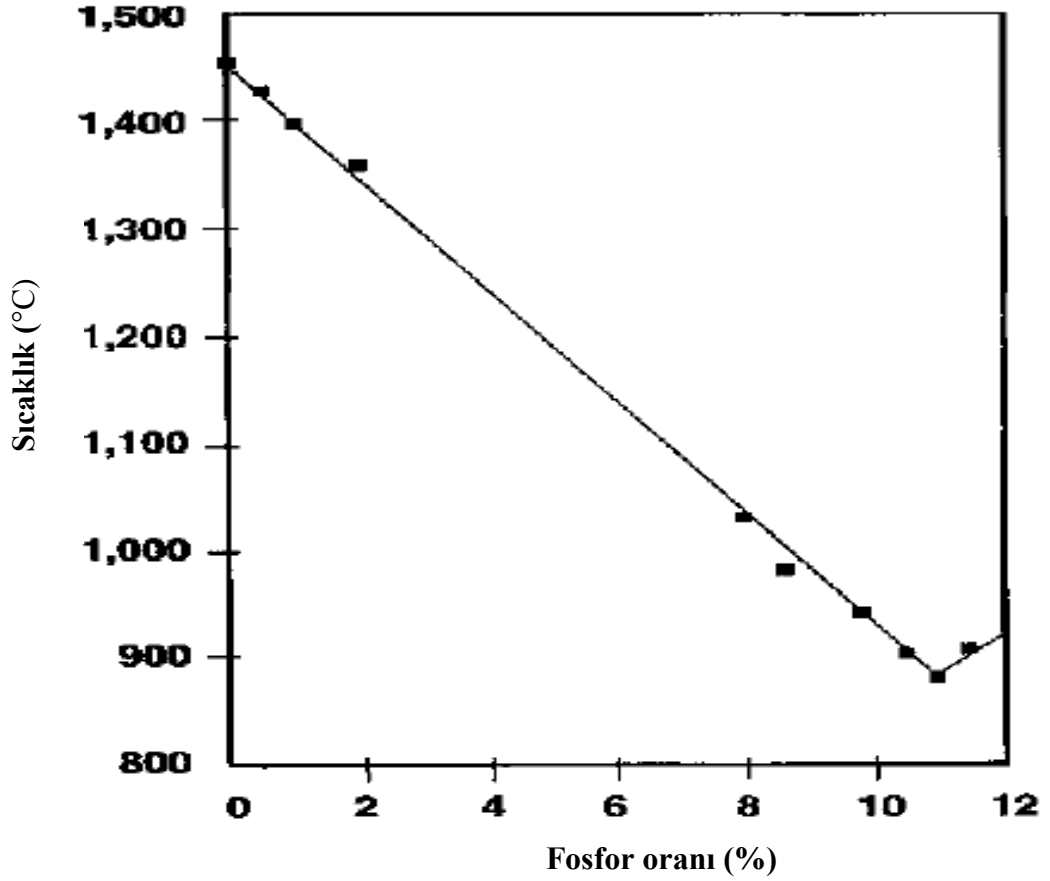
Akımsız nikel kaplamanın yoğunluğu sabit kalmaz ve artan fosfor oranı ile birlikte azalmaktadır. Örneğin %3'lük fosfor içeren bir banyonun yoğunluğu $8,52 \text{ g/cm}^3$ iken fosfor oranı %11 olunca yoğunluk $7,75 \text{ g/cm}^3$ olmaktadır. Akımsız nikel kaplamanın fiziksel özellikleri kaplama tabakasının fosfor oranına göre değişiklik gösterir. Şekil 2.1 bu değişimi ve akımsız nikel kaplamada artan fosfor oranı ile yoğunluğun azaldığını göstermektedir (NACE Publication,1987).



Şekil 2.1. Fosfor oranı ve yoğunluk arasındaki ilişki (NACE Publication, 1987).

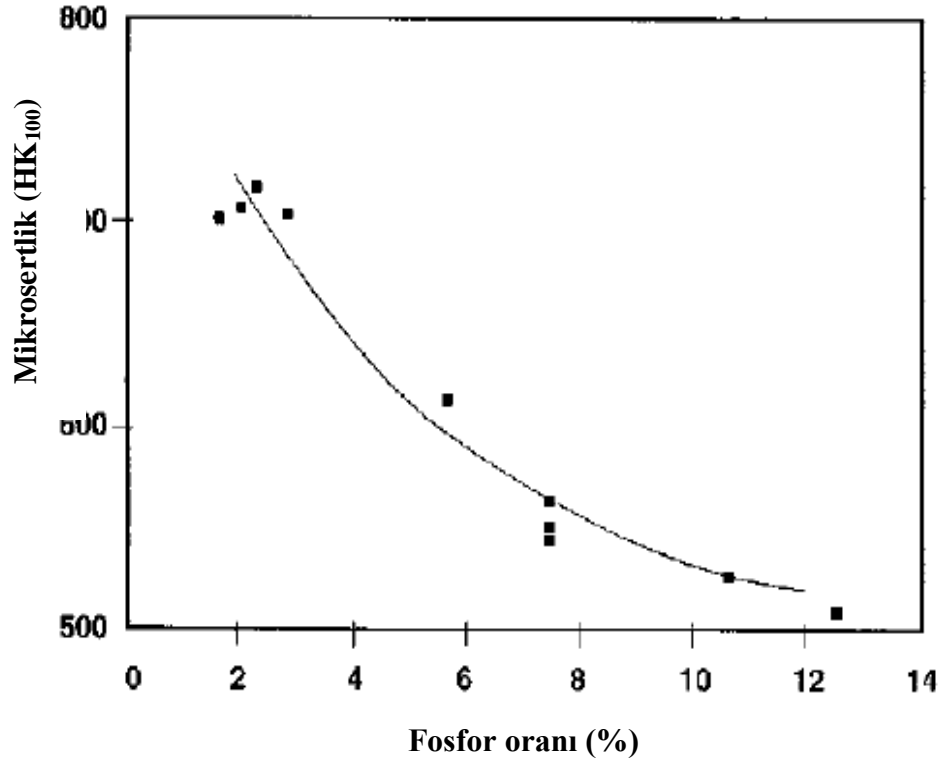
Akımsız nikel fosforun erime sıcaklığı saf nikelin erime sıcaklığından daha düşük bir değere sahiptir. Saf nikelin erime sıcaklığı 1455°C iken, akımsız nikel fosforun erime sıcaklığı 890°C dir (Parkinson, 2011; Donald vd., 1994).

Şekil 2.2’de görülebileceği gibi akımsız nikel kaplamanın fosfor içeriği erime noktası üzerinde çok önemli bir etkiye sahiptir. Erime noktası eğrisi %11 fosfor ihtiva eden kaplama için 1455°C den 880°C ye doğru hemen hemen doğrusal olarak azalmaktadır (Şekil 2.2) (Parkinson, 2011).



Şekil 2.2. Fosfor oranının erime noktası üzerindeki etkisi (Parkinson, 2011).

Çoğu başarılı uygulamalarda akımsız nikel kaplamanın sertliği önemli bir faktördür. Fosfor oranının sertlik üzerine etkisi Şekil 2.3 te görülebileceği gibi fosfor oranındaki artışla birlikte kaplama tabakasının sertliğinin artması şeklindedir. (Parkinson, 2011).



Şekil 2.3. Fosfor oranının kaplamanın mikrosertliği üzerine etkisi (Parkinson, 2011).

Akımsız nikel kaplamanın iki önemli uygulaması fosforlu akımsız nikel kaplama ile borunlu akımsız nikel kaplamanın özelliklerinin karşılaştırılması ise Çizelge 2.1'de yapılmıştır.

Çizelge 2.1. Fosforlu akımsız nikel kaplama ve borlu akımsız nikel kaplamanın özelliklerinin karşılaştırılması (Donald vd., 1994).

Özellik	Akımsız Nikel-Bor Kaplama (%5 Bor)	Akımsız Nikel-Fosfor Kaplama (Yüksek Fosforlu)
Yoğunluk g/cm ³ (lb/in. ³)	8,25 (2,98)	7,75 (2,8)
Erime noktası, °C (°F)	1080 (1980)	890 (1630)
Elektriksel özdirenç, µΩ· cm	89	90
Termal iletkenlik, W/m · K (cal/cm · s · °C)	-	4 (0.01)
Termal genişleme katsayısı, (22-100 °C, or 72-212 °F), µm/m · °C (µin./in. · °F)	12,6 (7,1)	12 (6,7)
Manyetik özellikler	Çok zayıf Ferromanyetik	Manyetik değil
İç gerilim, MPa (ksi)	110 (16)	0
Gerilme direnci	110 (16)	700 (100)
Süneklik,% uzama	0,2	1,0
Elastiklik modül, GPa (10 ⁶ psi)	120 (17)	200 (29)
Isıl işlem görmüş sertlik, 400 °C (750 °F) 1 saat, HV100	1200	1100
Aşınma direnci, Taber döngüleri mg/1000	9	18
Aşınma direnci, (400°C de 1 saat ısıl işlemlili), Taber döngüleri mg/1000	3	9

2.3. Akımsız Nikel Kaplama Banyosunda Değişkenlerin Önemi

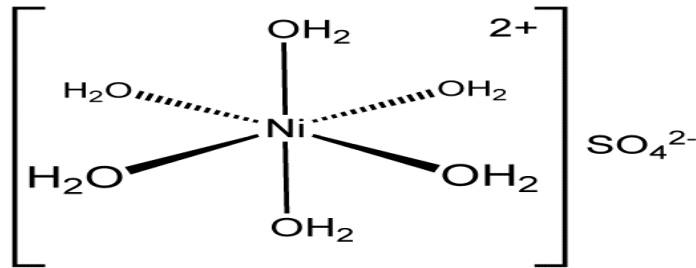
Bir akımsız nikel kaplama banyosunun bileşenleri şu şekilde sıralanabilir (Donald vd., 1994).

- a) Nikel kaynağı
- b) İndirgeyici
- c) Enerji kaynağı
- d) pH etkisi
- e) Kompleks ajanlar

2.3.1. Nikel kaynağı

Brennel ve Riddell otokatalitik olarak ilerleyen akımsız nikel kaplama reaksiyonunun optimum çalışma sıcaklığını 90°C ve pH'sında 4-6 civarında bulmuştur. Gutzeit ve Krieg yaptıkları çalışmalarda optimum kaplama koşulları elde etmek için, hipofosfitin sınırlı bir derişim aralığının gerekli olduğu söylemektedirler (Mallory, 1990).

En çok kullanılan endüstriyel uygulamalar için akımsız nikel kaplamalarda nikelin derişimi 6,5g/L ± 1g/L dir (Mallory, 1990). Nikel sülfatın kimyasal yapısı Şekil 2.4'te görülebilmektedir.



Şekil 2.4. Nikel sülfatın kimyasal yapısı

2.3.2. İndirgeyici

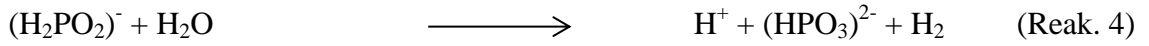
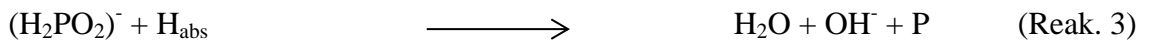
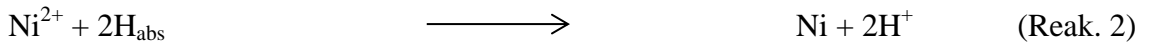
Akımsız nikel kaplamanın başarısı için indirgeyicilerin önemi büyüktür. İndirgeyici olarak farklı kimyasallar kullanılabilmektedir. En sık kullanılan indirgeyici bileşikler; sodyum hipofosfit ($\text{NaH}_2\text{PO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$), sodyum borhidrit (NaBH_4), dimetilamin borhidrit ($(\text{CH}_3)_2\text{NH} \cdot \text{BH}_3$), dietilamin borhidrit ($(\text{C}_2\text{H}_5)_2\text{NH} \cdot \text{BH}_3$), hidrazin ($\text{H}_2\text{N} \cdot \text{NH}_2$) dir (Riedel, 1991).

2.3.2.1. Sodyum hipofosfit kullanılan banyolar

Ticari olarak kullanılan akımsız nikel kaplamaların çoğunluğu sodyum hipofosfit ile indirgeme yöntemine göre çalışır. Boron bileşikleri ya da hidrazin bileşikleri de kullanılsa da hipofosfitli banyoların düşük maliyeti, daha fazla kontrol

kolaylığı ve daha iyi korozyon direnci onları daha kullanışlı yapmaktadır (Donald vd., 1994).

Hipofosfit indirgeyicili akımsız nikel kaplamalar için önerilen çeşitli reaksiyonlar bulunmaktadır. En yaygın olarak kabul edilen reaksiyonlar aşağıdaki gibi sıralanmıştır.



Katalitik yüzey ve yeterli enerji varlığında hipofosfit iyonları ortofosfite oksitlenir. Dışarı verilen oksijenin bir kısmı katalitik yüzey üzerine adsorplanır (Reak. 1). Katalizatörün yüzeyindeki nikel iyonu, adsorblanan hidrojen tarafından indirgenir (Reak. 2). Aynı zamanda adsorblanan hidrojenin bir kısmı hipofosfitin küçük bir miktarını katalitik yüzeyde su, hidroksil iyonu ve fosfora indirger (Reak. 3). Mevcut olan hipofosfitin çoğu katalitik ortofosfite yükseltgenir ve hidrojen gazı oluşur (Reak. 4). Genellikle kullanılan 5 kg sodyum hipofosfit, 1 kg nikel iyonunu indirger ve %37 oranında bir verimlilik sağlar (Gutzeit, 1959) (Brenner ve Riddell, 1947).

İlk önceleri akımsız nikel kaplama süreçleri amonyak katkılı olarak ve yüksek pH değerlerinde yapılmaktaydı. Daha sonra ise asit çözeltilerinin alkali çözeltilere göre daha avantajlı olduğu görüldü. Bu avantajlar arasında yüksek kaplama hızı, daha yüksek kararlılık, daha kolay kontrol edilebilme ve korozyona karşı daha fazla direnç vardır. Bu nedenle akımsız nikel kaplama süreçlerinde genellikle pH 4 ile 5,5 arasında çalışılmaktadır.

Alkali ve asit kaplamaların çalışma koşullarının karşılaştırılması Çizelge 2.2 de yapılmıştır (Brenner ve Riddell, 1947) (Mallory, 1979)

Çizelge 2.2. Alkali akımsız nikel kaplama ve asitli akımsız nikel kaplamanın çalışma koşullarının karşılaştırılması (Donald vd., 1994)

Çalışma Koşulları	Alkali Akımsız Nikel Kaplama	Asitli Akımsız Nikel Kaplama
pH	8,5-10	4,3-4,6
Sıcaklık, °C	90-95	88-95
Kaplama Hızı, µm/saat	10	10-14

Akımsız nikel kaplama reaksiyonu esnasında nikel ve hipofosfit derişiminin azalması kaplama hızının da azalmasına yol açmaktadır (Agarwala ve Agarwala, 2003). Şekil 2.5’de örnek bir akımsız nikel kaplama tesisinin fotoğrafı bulunmaktadır.



Şekil 2.5. Örnek bir akımsız nikel kaplama tesisi (Kurvalf San. Tic. Ltd. Şti. Kaplama Tesisi).

2.3.2.2. Bor hidrür kullanılan banyolar

Bor hidrür iyonu akımsız nikel kaplama için mevcut olan en güçlü indirgeyici maddelerden biridir. Sodyum bor hidrür tercih edilmesine rağmen, herhangi bir suda çözünür bor hidrür de kullanılabilir (Donald vd., 1994).

Asidik ya da nötr çözeltilerde, bor hidrür iyonlarının hidrolizi çok hızlıdır. Nikel iyonlarının varlığında, nikel borit kendiliğinden oluşturabilmektedir. Eğer kaplama çözeltisinin pH değeri 12 ile 14 arasında tutulabilirse, nikel borit oluşumu engellenir ve reaksiyon ürünü esas olarak element haldeki nikel olur. Sodyum borhidrürün bir molü yaklaşık olarak bir mol nikel (II) iyonunu indirgeyebilir ve nikel (II) iyonunun 1 kg'ının indirgenmesi için 0,6 kg sodyum borhidrür gerekir. Sodyum borhidrür sağlanmış akımsız nikel kaplama ürünüde yaklaşık olarak % 3 ile % 8 arasında bor bulunur (Donald vd., 1994).

Nikel hidroksitin çökmesini önlemek amacıyla pH 12 ile 14 etilen diamin kompleks yapıcı ajanları kullanılabilir. Fakat bu tür kompleks yapıcı ajanlar kaplama birikim hızını azaltmaktadırlar. Çalışma sıcaklığı 90-95°C olduğu zaman kaplama hızı saatte 25-30 µm olur.

Reaksiyon boyunca pH azaldığından ve kaplama çözeltisinin pH'ı 12 nin altına düşmemesi gerektiğinden süreç sırasında bir alkalinin çözeltiye ilavesi gerekebilir. Yüksek pH larda çalışıldığından dolayı borhidrür kullanılan reaksiyonlarda alüminyum nikel kaplamak mümkün değildir (Gorbunova ve Nikiforova, 1960).

Sanayide hali hazırda kullanılan indirgeyici türlerinden %50 'sinden fazlasını sodyum borhidrür oluşturmaktadır. Katı haldeki sodyum borhidrürün kimyasal ve fiziksel özellikleri Çizelge 2.3 'de verilmiştir (Bilici, 2004).

Çizelge 2.3. Sodyum borhidrürün kimyasal ve fiziksel özellikleri (Bilici, 2004).

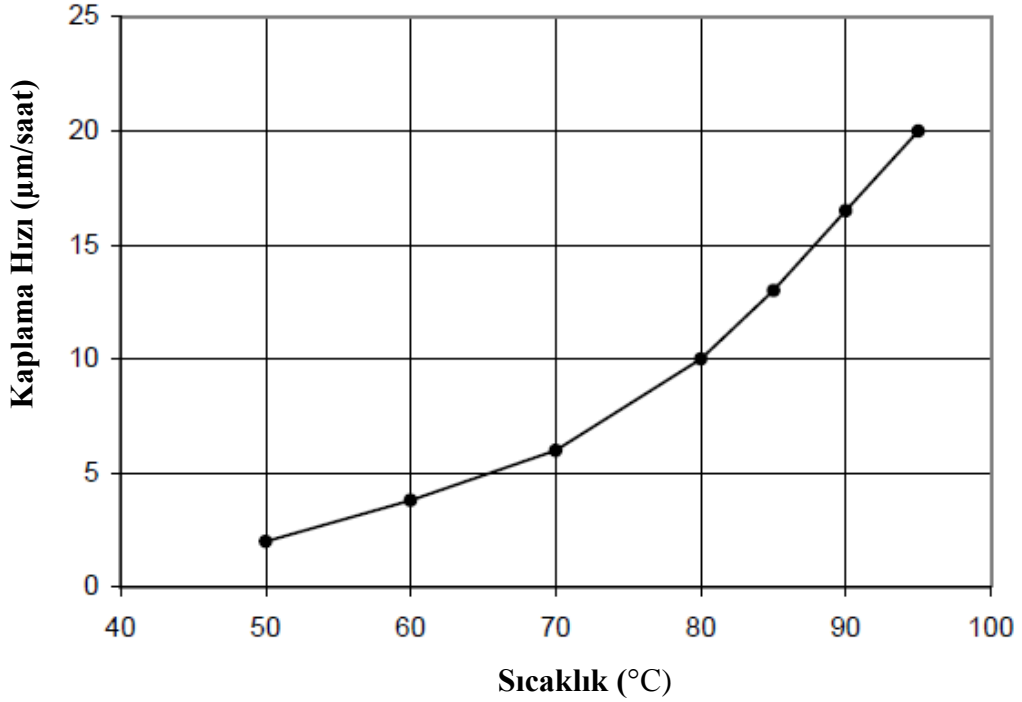
Kimyasal formülü	NaBH ₄
Mol kütlesi	37,84 g/mol
Teorik hidrojen içeriği (kütlece)	% 10,60
Erime noktası (2-6 atm. H₂ basıncında)	500°C
Bozunma sıcaklığı (vakum altında)	400°C
Kristal yapısı	Yüzey merkezli kübik (a=6,15Å)
Oluşum entalpisi, 25°C	-188,6 kJ mol ⁻¹
Oluşum Gibbs enerjisi, 25°C	-123,9 kJ mol ⁻¹
Entropi (S°)	101,3 J mol ⁻¹ K ⁻¹
Isı kapasitesi (C) 25°C	86,8 J mol ⁻¹ K ⁻¹ h

2.3.3. Enerji

Akımsız nikel kaplamalarda enerji, kaplama reaksiyon hızını belirleyen değişken özelliklerdendir. Bir akımsız nikel kaplamada sıcaklık enerjinin bir ölçüsüdür (Donald vd., 1994).

Sıcaklık, asidik hipofosfit indirgemeli reaksiyonun hızında önemli bir etkiye sahiptir. Kaplama hızı genellikle 65°C sıcaklığın altında çok düşüktür fakat artan sıcaklık ile birlikte bu hız da artmaktadır (Mallory, 1979). Bor indirgeyicili reaksiyonlar için de benzer durum söz konusudur.

Akımsız nikel kaplamanın en iyi performans sağladığı sıcaklık aralığı 85 - 95 °C aralığıdır (Donald vd., 1994). Kaplama hızının sıcaklıkla değişimi Şekil 2.6'da gösterilmiştir.

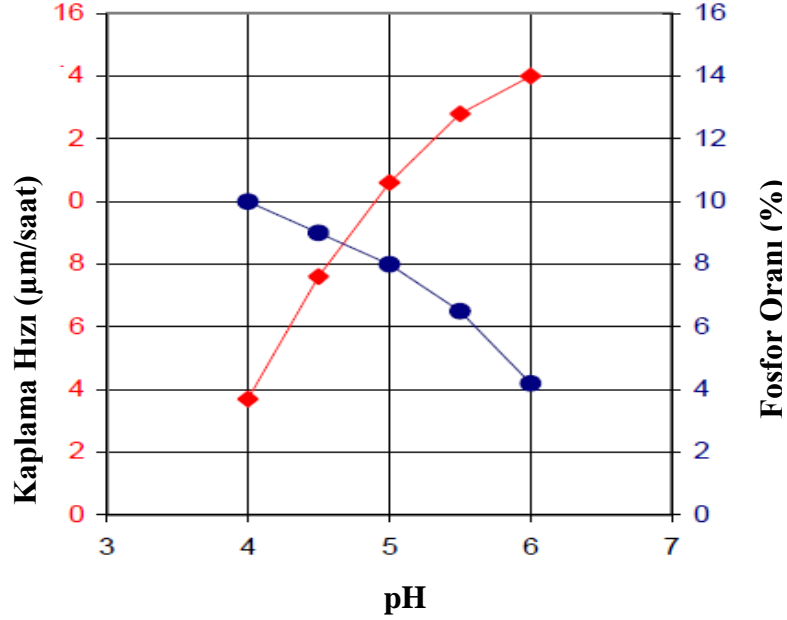


Şekil 2.6. Kaplama hızına çözelti sıcaklığının etkisi (Donald vd., 1994).

2.3.4. pH etkisi

Akımsız nikel kaplama reaksiyonlarından bir çoğu pH değişimine duyarlı olup söz konusu süreçlerde indirgeme reaksiyonları pH'ın artırılması ile hızlandırılır.

Şekil 2.7, çözelti pH'ının fosfor oranına ve kaplama hızına etkisini göstermektedir (Fields ve Zickearff, 1984).



Şekil 2.7. Çözelti pH'nın kaplama hızına ve fosfor oranına etkisi (Fields ve Zickearff, 1984).

Banyo pH'nın yükseltilmesinin aşağıdaki etkileri vardır (Reidel, 1997)..

- 1- Yaklaşık doğrusal bir şekilde kaplama hızı artar.
- 2- Nikel çözeltisinin deki Nikel (II) iyonlarının metalik nikelde indirgenerek kendiliğinden ayrışması söz konusu olabilir.
- 3- Yüksek pH değerlerinde pürüzlü kaplama olabilir ve istenmeyen birikimler gerçekleşebilir.
- 4- Kaplamadaki fosfor oranı azalır.

Banyo pH'ını düşürmek ise şunlara yol açabilir (Reidel, 1997).

- 1- Bazik tuzların ve hidroksitlerin çökmesinin önlenmesi,
- 2- Hipofosfitin indirgeyici gücünün azalması,
- 3- Banyodaki türlerin daha etkin tamponlanması.

Moniruzzaman ve Roy'un 2011 yılında yapmış oldukları çalışmada pH'ın akımsız nikel-fosfor kaplama üzerine etkisini araştırmışlardır. Bu çalışmada çelik

üzerine 70°C de farklı pH değerlerinde kaplamalar yapılmış ve kaplamaların görünümleri Çizelge 2.4'te özetlenmiştir (Moniruzzaman ve Subrat, 2011).

Çizelge 2.4. Banyo pH'ının kaplama görünümüne etkisi (Moniruzzaman ve Roy, 2011).

Banyo pH'sı	Kaplama Görünümü
5,5	Dağınık ince kaplama
6,5	Uygun / makul kaplama
7,5	Çok iyi kaplama
8,5	İyi
9,5	İyi
10,5	Uygun / makul kaplama
11,5	İyi
12,5	Dağınık ince kaplama
13,0	Çok dağınık ince kaplama

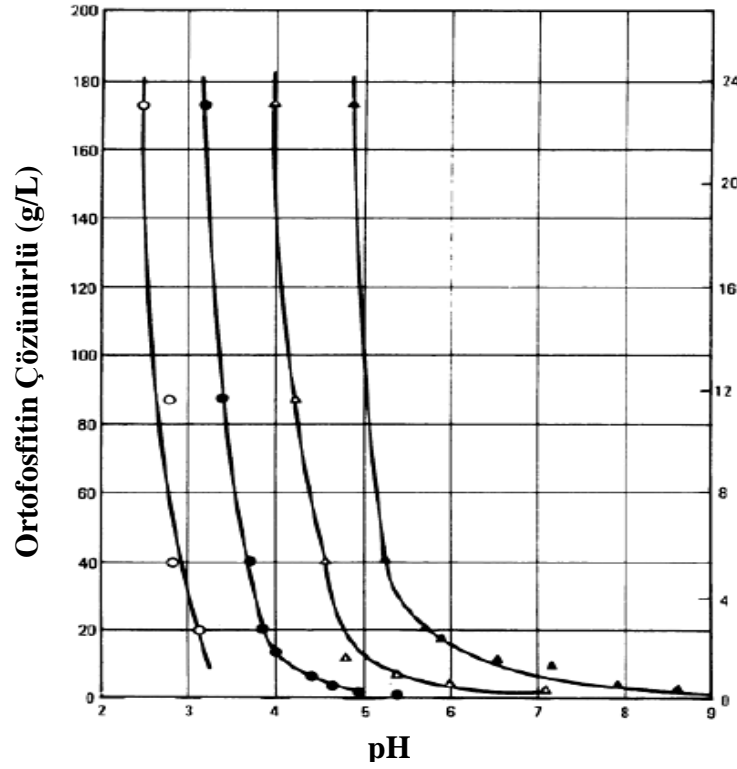
2.3.5. Kompleks ajanlar

Akımsız nikel kaplamalarda çözeltilerin kendiliğinden ayrışmasını önlemek ve katalitik yüzey üzerinde gerçekleşen reaksiyonunun kontrolünü sağlamak amacıyla kompleksleştirici ajanlar kullanılmaktadır. Kompleksleştirici ajanlar organik tuzlardır. Bunlar çözeltiyi kararlı yaparak nikel fosfitin çökmesini engellerler (Donald vd., 1994).

Hidronyum iyonlarının indirgenme reaksiyonu ile üretilmesine bağlı olarak hızla azalan çözelti pH'ı kompleks ajanların çalışmasını engeller. Bundan dolayı hidronyum iyonlarının nötralize edilmesi için kontrollü olarak amonyak, hidroksit veya karbonatlar ilave edilmelidir (Donald vd., 1994).

Akımsız nikel kaplamada banyo çözeltileri genellikle glikolik, sitrik, ya da asetik asitlerin tuzları ile oluşturulur. Diğer yandan süksinik, glutarik, laktik, propyonik ve aminoasetik asitler gibi asitlerde de kullanılır. Tek bir asidin kompleksleme yeteneğini ile asit gruplarının kompleksleme yetenekleri değişiklik gösterir (Mallory, 1974). pH'ın bir fonksiyonu olarak sitrik ve glikolik asitler ile üretilen akımsız nikel kaplama banyo çözeltisinin içerisindeki ortofosfatın çözünürlüğünü gösteren grafik

Şekil 2.8’de verilmiştir (deMinjer ve Brenner, 1957). Kaplama çözeltisi içinde kullanılan kompleksleştirici madde aynı zamanda iç stres, emicilik, fosfor oranı ve kaplamanın kalitesi üzerinde de önemli etkilere sahiptir (Mallory, 1974).



Şekil 2.8. Akımsız nikel kaplama çözeltisinde ortofosfitin çözünürlük limitleri. Çözelti 30g/L NiCl_2 , 10 g/L NaH_2PO_2 içerir. ▲ 78g/L glikolik asit ile, ● 15g/L sitrik asit ile, ○ kompleks ajan olmadan, △ 39 g/L glikolik asit ile. (Donald vd., 1994)

2.4. Akımsız Nikel Kaplamanın Mikro Yapısı

Ticari olarak kullanılan akımsız nikel-fosfor kaplamalarda kaplama çözeltisine bağlı olarak, kaplamada % 6-12 fosfor ve % 0,25 kadar da diğer elementler bulunmaktadır. Uygulandığı şekliyle, bu kaplamaların çoğu amorf yapıdır, kristal yapı veya bir faz yapı değildir. Süreklilikleri/akıcılıkları ancak kaplamanın bileşimine bağlıdır. % 10 dan daha fazla fosfor ve % 0,05 den daha az yabancı madde ihtiva eden kaplamalar genellikle süreklidir/akıcıdır (Metzger, 1959; Parker, 1981).

Düşük fosfor içeriğine sahip kaplamalar genellikle gözeneklidirler. Bu tür gözenekli yapıların sebep olduğu çatlak ve delikler korozyon direncini ve sürekliliği etkiler (Donald vd., 1994).

Akımsız nikel kaplamaların 220-260°C de yapılması, kaplamanın mikro yapısında değişmelere neden olur. Bu sıcaklıktan daha yüksek sıcaklıklara çıkılması ile amorf yapı yerini kristal yapıya bırakmaktadır. Isıtma işleminin daha da yükseklere çıkması ile nikel fosfitin yığılması ile iki farklı faz oluşumu sağlanır (Duncan, 1981) (Parker, 1981). Çizelge 2.5'te akımsız nikel kaplama tiplerinin özellikleri verilmiştir (Ploof, 2008).

Akımsız nikel kaplama morfolojisi ile ilgili var olan literatürlerdeki bazı karşıt sonuçlara rağmen genel düşünce kaplamadaki morfolojinin düşük fosforlu kaplamada kristal, orta fosforlu kaplamada kristal/amorf karışımı (yarı kristal) ve yüksek fosforlu kaplamada amorf olduğu şeklindedir (Allen ve VanderSande, 1982).

Çizelge 2.5. Akımsız nikel kaplama tiplerinin özellikleri (Ploof , 2008).

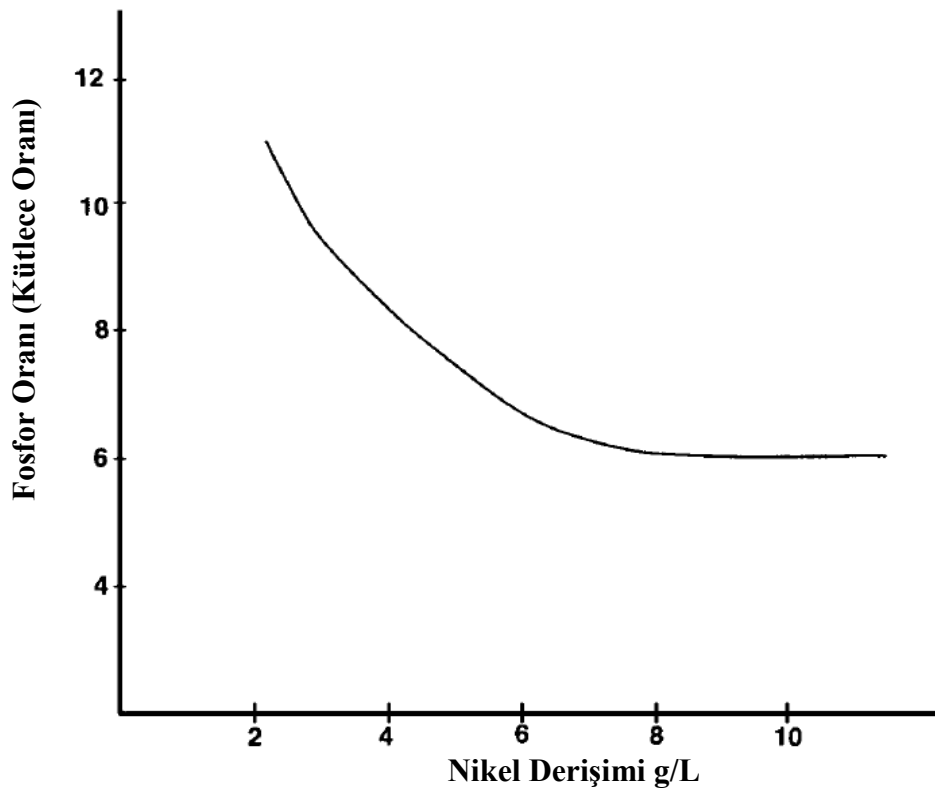
Kaplama Tipi	Fosfor Oranı (Ağırlıkça %)	Korozyon Dayanımı, Nötr Tuz Püskürtme	Gerilme Tipi	Kaplama Sertliği, Rc	Yapı
<i>Düşük Fosforlu</i>	1-4	Orta	Gerilebilir veya Sıkıştırılabilir	53-63	Kristal
<i>Orta Fosforlu</i>	4-10	Orta	Gerilebilir	44-49	Kristal-Amorf
<i>Yüksek Fosforlu</i>	>10,5	Çok İyi	Sıkıştırılabilir	42-48	Amorf

Kaplamanın mikro yapısını doğru analiz etmek kaplamanın mekanizmasını anlamakta ve kaplamanın özelliklerini değerlendirmekte yardımcı olur. Nikel-fosfor faz diyagramı 1908, yılında akımsız nikel kaplamanın keşfinden önce, Konstantinov

tarafından oluşturulmuştur. Yıllar sonra ise nikel-fosfor faz diyagramı modifiye edilmiştir (Koeneman ve Metcalfe, 1958).

Gutzeit ve Krieg optimum kaplama koşulları elde etmek için hipofosfit oranının dar ve daha sınırlı bir derişim aralığında olması gerektiğini ifade etmişlerdir (Mallory,1990).

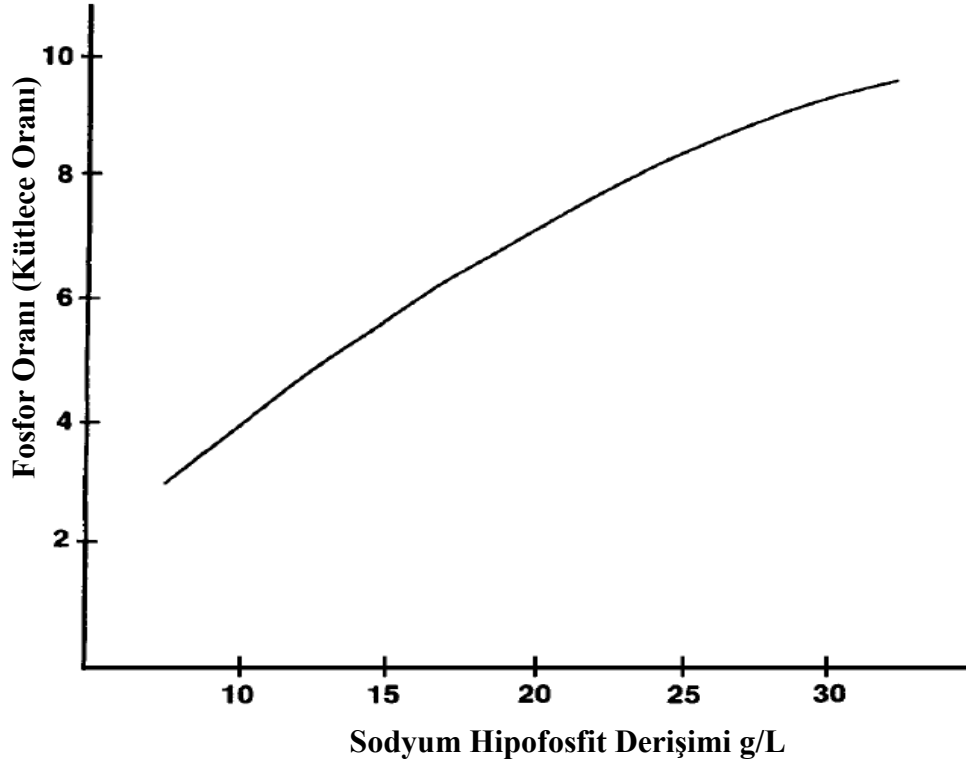
Şekil 2.9 akımsız nikel-fosfor kaplamada nikel derişiminin etkisini göstermektedir (Mallory,1990).



Şekil 2.9. Nikel-fosfor kaplamada nikel derişiminin etkisi (Mallory,1990).

Lee, nikel-fosfor kaplamaların fosfor içeriği üzerinde reaksiyona girenlerin etkisini incelemiştir. Şekil 2.9'da da görülebileceği gibi genellikle akımsız nikel kaplamada fosfor oranının artmasıyla hipofosfit oranını artar (Mallory,1990).

Akımsız nikel kaplama üzerinde hipofosfit derişiminin etkisi Şekil 2.10'da gösterilmektedir (Mallory,1990).



Şekil 2.10. Akımsız nikel kaplama üzerinde hipofosfit derişiminin etkisi (Mallory,1990).

2.5. Akımsız Nikel Kaplamanın Kullanım Alanları

Akımsız nikel kaplama uygulamaları neredeyse her sektörde karşımıza çıkar. Akımsız nikel kaplamanın sertlik, aşınma direnci, korozyon direnci, kaplama homojenliği gibi avantajlı özellikleri bu kaplama yöntemini çok tercih edilen bir yöntem haline getirmiştir (Colaruotolo ve Tramontana, 1990).

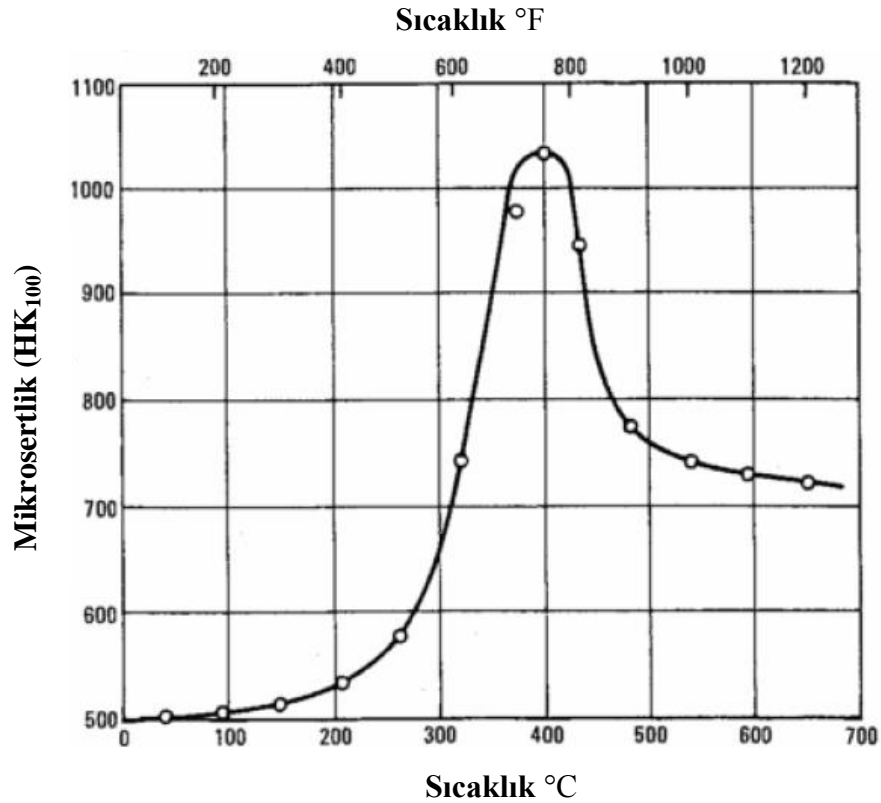
Akımsız nikel kaplamaların üst düzey ve etkili özellikleri bu kaplamaların geniş bir kullanım alanında çok kullanışlı bir kaplama türü olmasını sağlamaktadır. Çoğu uygulama akımsız nikel kaplamanın sağladığı sertlik, yoğunluk, yağlama, korozyon direnci gibi özelliklerinden faydalanmak için yapılır (Ploof, 2008). Ek-1 de akımsız nikel kaplamaların uygulama alanları ve tercih edilen kaplama kalınlığı aralıkları verilmiştir.

2.6. Akımsız Nikel Kaplamanın Sertliği

Sertlik bir malzemenin kalıcı direnci olarak tanımlanır ve malzeme mukavemeti ile doğrudan bağlantılı olmamasına rağmen aşınma direnci için güvenilir bir göstergedir. Knoop veya Vickers'un batıcı uç kullanılarak belirlendiği gibi nikel-fosfor kaplamanın sertliği 550 kgmm^{-2} 'ye (58-52 HRC) yakındır. Artan fosfor oranı ile sertliğin azaldığı gözlenir (Mordechay, 2010).

Sertlik ve aşınma direnci birçok uygulama için son derece önemli özelliklerdir. Akımsız nikel kaplamalarda ısıl işlem ile kaplama tabakasının sertliğinde artış gözlenir ve neredeyse sert krom kaplama kadar sert bir tabaka oluşur (Gawrilov, 1979) (Duncan,1981).

Şekil 2.11'de bir saatlik ısıl işlem ile akımsız nikel kaplamanın mikrosertliğindeki değişim görülebilmektedir.



Şekil 2.11. % 10,5 fosfor içeren akımsız nikel kaplamada ısıl işlemin kaplamanın sertliğine etkisi (Gawrilov, 1979).

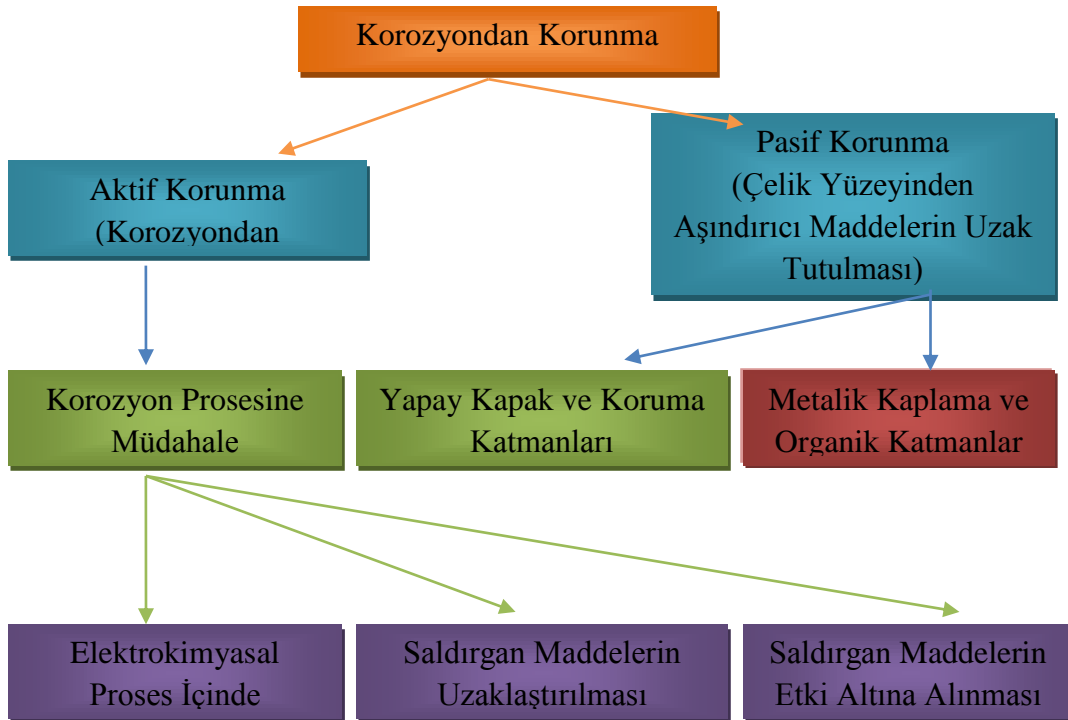
2.7. Akımsız Nikel Kaplama ve Korozyon

Korozyon metal ile atmosferik koşullardaki oksijen arasında gerçekleşen yıkıcı bir kimyasal veya elektrokimyasal reaksiyondur (Jones, 1996; Winston, 2008). Pratik kullanımda metalik malzemeler normal atmosferik ve sulu ortamlarda aşınmaya maruz kalmakta, gaz ve sulu ortamlarda da bu korozyon görülebilmektedir. Metalik korozyon sanayileşmiş toplumlarda sık sık karşılaşılan sorunların başında gelir ve 18. yüzyıldaki sanayi devriminden bu yana sıklıkla çalışılan bir konudur (Sato, 2012).

2.7.1. Korozyondan korunma teknikleri

Korozif saldırılardan korunmak için çeşitli aktif ve pasif uygulama teknikleri mevcuttur ve bu süreçler Çizelge 2.6'de özetlenmiştir (Peter, 2011; Heim ve Schwenk., 1997).

Çizelge 2.6. Korozyona karşı korunma yöntemleri, önlemler ve prosedürleri (Peter, 2011).



Metalik kaplama ile pasif koruma işlemi, korozyondan korunmanın kaplama metali tarafından sağlandığı bir süreçtir (Heim ve Schwenk, 1997).

2.7.2 Akımsız nikel kaplamanın korozyon dayanımı

Akımsız nikel kaplama ile korozif etkilere karşı korunacak olan altlık koruyucu metalik nikel bariyeri ile kaplanır. Bu nedenle bu kaplamada gözenek olmamalı ve kusursuz olmalıdır. Amorf kaplama morfolojisi nedeniyle akımsız nikel kaplamanın korozyon direnci mükemmeldir, bu nedenle saf nikel veya krom kaplamalardan çoğu uygulama için üstün bir kaplama türüdür. Amorf alaşımların dayanımı eşdeğer polikristal materyallere göre daha yüksektir (Donald vd., 1994).

Farklı uygulamalarda korozyon hızı değerleri Çizelge 2.7 de verilmiştir.

Çizelge 2.7. Çeşitli ortamlarda akımsız nikel kaplamanın korozyon; ^a %10.5 P oranlı akımsız nikel-fosfor kaplama, ^b %5 B oranlı akımsız nikel-bor kaplama, ^c Çok hızlı (Donald vd., 1994)

Ortam	Sıcaklık	Korozyon Hızı			
		Nikel Fosfor ^a		Nikel Bor ^b	
	°C	µm/yıl	mil/yıl	µm/yıl	mil/yıl
Asetik asit	20	0,8	0,03	84	3,3
Aseton	20	0,08	0,03	0	0
Alüminyum sülfat, %27	20	5	0.2	-	-
Amonyak, %25	20	16	0,6	40	1,6
Amonyum nitrat, %20	20	15	0,6	-	-
Amonyum sülfat	20	3	0,1	3,5	0,14
Benzen	20	0	0	0	0
NaCl çözeltisi, %3,5	95	5	0,2	-	-
Kalsiyum klorür %42	20	0,2	0,008	-	-
Karbon tetraklorür	20	0	0	0	0
Sitrik asit	20	7	0,3	42	1,7
Etilen glikol	20	0,6	0,02	0,2	0,008
Ferrik klorür %1	20	200	8	-	-
Formik asit	20	13	0,5	90	3,5
Hidroklorik Asit %5	20	24	0,9	-	-
Laktik asit %85	20	1	0,004	-	-
Nitrik asit	20	25	2	-	-
Okzalik asit	20	3	0,1	-	-
Fenol %90	20	0,2	0,008	0	0
Fosforik asit %85	20	3	0,1	-	-
Sodyum karbonat	20	1	0,04	0	0
Sodyum hidroksit %45	20	0	0	0	0
Sodyum sülfat %10	20	0,8	0,03	11	0.4
Sülfürik asit %65	20	9	0,4	-	-
Saf su (pH 3,3)	100	0	0	0	0

2.8. Akımsız Nikel Kaplama ve Isıl İşlem

Akımsız nikel kaplamada korozyon dayanımına en önemli etkenlerden birisi ısıl işlemdir. Nikel-fosfor kaplama 220°C nin üzerine ısıtıldığında korozyona karşı olan direncini bir miktar kaybeder. Bu süreç, partiküllerde küçük aktif/pasif korozyon hücreleri oluşturarak kaplama tabakasının bozulmasını hızlandırır. Tabaka sertliği artarken kalınlık azalarak çatlaklar oluşur. %10'luk hidroklorik asit içerisindeki %10,5 fosfor oranlı bir akımsız nikel kaplamanın korozyonuna ısıl işlemin etkisi Çizelge 2.8'da verilmiştir (Donald vd., 1994).

Çizelge 2.8. %10'luk hidroklorik asit içerisindeki % 10,5 fosfor oranlı bir akımsız nikel kaplamanın korozyonuna ısıl işlemin etkisi (Donald vd., 1994).

Isıl İşlem	Sertlik HV100	Korozyon Hızı	
		µm/yıl	mil/yıl
Yok	480	15	0,6
190 °C de 1,5 saat	500	20	0,8
290 °C de 6 saat	900	1900	75
290 °C de 10 saat	970	1400	55
340 °C de 4 saat	970	900	35
400 °C de 1 saat	1050	1200	47

Isıl işlem fırın örnekleri Şekil 2.12 de görülebilir.



Şekil 2.12. Isıl işlem fırın örnekleri (www.aksanforging.com, erişim tarihi 17.04.2014 Saat: 12:18) (alruqee.com, 17.04.2014 Saat:12:21).

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu bölümde;

- Numunelerin hazırlanması,
- Akımsız nikel kaplama işlemi öncesinde numunelere yapılan ön işlemler,
- Akımsız nikel-fosfor banyosunun kurulumu ve analizleri,
- Banyoda yapılan hazırlık çalışmaları,
- Kaplama işleminin öncesi ve sonrası numunelere uygulanan analizler yer almaktadır.

3.1. Deney Aşamaları

3.1.1. Numunelerin hazırlanması

Numune olarak iki adet 15×15×1 mm ebatlarında ASTM A 105 kalite çelik kullanılmıştır. Ayrıca korozyon testinin yapılabilmesi için yine iki adet 60mm ve 73mm ebatlarında ASTM A 105 kalite çelik numunesi kullanılmıştır (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. Kullanılan numunelerin kalınlıklarının kumpas yardımıyla ölçümü.

Malzemelerin kimyasal analizleri malzeme sertifikasından alınarak Çizelge 3.1 de gösterilmiştir. Malzemelerin fiziksel özellikleri ise Çizelge 3.2 de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1. Numunelerin kimyasal analizleri (Sertifika No: 24005422011, Heat No: 45FR5397).

% C	% Mn	% Si	% Ni	% Cr	% S	% P
0,31	1,05	0,27	0,4	0,02	0,008	0,007
% Cu	% Mo	% Ti	% V	% Nb	% N	
0,05	0,045	0,012	0,007	0,002	0,08	

Çizelge 3.2. Numunelerin fiziksel özellikleri (Sertifika No: 24005422011, Heat No: 45FR5397).

Akma Sınırı (Rm N/mm ²)	Kopma Sınır (Rm N/mm ²)	Sertlik (HB)	Uzama (%A)	Kesit Daralması (%Z)	Ortalama Çentik Değeri (-20°C de)
319	524	164	38	46	56

Bu çalışmada ASTM A 105 kalitede çelik numunesinin seçilmesinin sebebi çoğu endüstriyel uygulamalarda, özellikle doğalgaz ve petrol sanayinde bu malzemelerin oldukça sık kullanılmasıdır. Başta küresel vanaların ana parçaları olan küre, ring, gövde, kapak ve küre milleri çoğunlukla ASTM A 105 kalitede dövme çelikten üretilmekte ve akımsız nikel kaplama yapılmaktadır.

3.1.2. Akımsız nikel-fosfor banyosunun hazırlanması

Bu çalışmada nikel kaynağı olarak nikel sülfat hekza hidrat ($\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) ve fosfor kaynağı olarak sodyum hipofosfit mono hidrat ($\text{NaH}_2\text{PO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) kullanılmıştır. Kurulum kimyasalları Dede Kimya (İstanbul)'dan temin edilmiş ve aşağıdaki şekilde sıralanabilirler;

- Deiyonize su (iletkenliği 5 μS değerinden düşük olmalı)
- DNC 520-9 Make up Solution
- DNC 520-9 Replenisher 1
- Stabiliser 10

3.1.2.1. Saf su

Banyo kurulumu için gerekli olan saf su ters osmos su arıtma sistemi ile üretilmiş ve iletkenliği kontrol edilmiştir. İletkenlik $3.69 \mu S$ olarak bulunmuş ve bu değer kurulumun yapılması için uygun bir değer olduğundan banyo kurulumunda bu üretilen saf su kullanılmıştır (Şekil 3.2).



Şekil 3.2. Saf Su üretim cihazı ve iletkenlik ölçümü.

3.1.2.2. Sıcak yağ alma banyosunun hazırlanması

Akımsız nikelin kaplamanın korozyon direncini belirleyen en önemli faktörler şunlardır.

- Yüzey bileşimi,
- Temiz ve homojen bir kaplama elde etmek için altlığın **iyi bir ön işleme** tabi tutulması,
- Koroziye şartlara maruz kalma şiddeti ve süresi için yeterli derecede bir kalınlık,
- Kaplama çözeltisinin pH'ının kontrolü (Rolf ve Parker, 1990).

Yukarıda sayılan parametrelerden yola çıkarak akımsız nikel-fosfor kaplama öncesinde **iyi bir ön hazırlık** şarttır. Bu ön hazırlık şu şekilde yapılır.

- Kaplanacak olan malzemelerin reaksiyonu etkileyebilecek kum, toz ve çeşitli kirletici unsurlar hava püskürtme ile temizlenmelidir.
- Çelik yüzeylerde hızlı bir şekilde korozyon ile birlikte paslanmalar meydana geldiği için bu pasların HCl veya çok ince zımparalar vasıtası ile temizlenmesi gerekir.
- Malzeme yüzeyinde koruyucu yağ tabakası var ise bu tabaka soğuk yağ alma ve/veya sıcak yağ alma süreçleri ile temizlenmelidir.
- Yüzey temizliğinde en önemli faktörlerden biri de, temizlenmiş olan malzeme yüzeyine, çıplak el ile dokunulmamasıdır. Dokunma ile çelik yüzey üzerine yapışabilecek yağ tabakası bu bölgedeki kaplamayı olumsuz etkileyebilmektedir.

Bu bilgiler çerçevesinde, kaplanacak malzemelerin üzerinde bulunan kirlilikler, yağ tabakaları ve pas giderilir.

Bu çalışmada sıcak yağ giderme işlemi SurTec 179 yüksek alkali temizleyici kullanılarak yapılmıştır (Şekil 3.3).

Bu ürünün özellikleri yüksek alkalilik, daldırma temizleme ve elektrolitik yağ alma özelliği, iyi iletkenlik, demir ve çelik için uygunluğudur (SurTec 179).

Bu ürün anyonik yüzey aktif maddeler, fosfatlar, silikatlar, karbonatlar, sodyum hidroksit ve organik asitlerin tuzlarını ihtiva etmektedir (SurTec 179).



Şekil 3.3. SurTec 179 yüksek alkali yağ giderici.

Sur-Tec 179 isimli yüksek alkali yağ gidericinin kurulumu için 1 tonluk su banyosu gereklidir. 1 tonluk su banyosunun içerisine 75 kg SurTec179 ilave edilir ve mekanik karıştırıcı ve hava karıştırıcı vasıtasıyla, toz halinde olan bu yağ giderici ürün su içerisinde çözülür.

SurTec179 sıcak yağ giderici 70-80°C de çalışan bir üründür. Bu yağ giderici ile çalışırken mutlaka eldiven ve maske kullanılmalıdır, zira vücuda çok ciddi zararlar verdiği tespit edilmiştir.

Kurulum işlemi sonrası aşağıdaki analiz yapılmıştır.

SurTec 179' un titrasyon ile analizi;

- ✓ 10 ml banyo çözeltisinden alınmış ve 250 ml'lik erlene konulmuş,
- ✓ 100 ml saf su eklenmiş,
- ✓ Spatül ucu kadar metil kırmızısı indikatörü ilave edilmiş,
- ✓ 1,0N HCl ile titre edilmiştir.

Harcanan asit $\times 0,8 = \% \text{ SurTec 179 (SurTec 179)}$

9 ml 1 N HCl harcanmış ve böylece banyo içerisinde **% 7.2 SurTec 179** olduğu bulunmuştur.



Şekil 3.4. Sıcak yağ alma banyosu.

3.1.2.3. Akımsız nikel-fosfor banyosunun kurulumu

Kurulum için ihtiyaç duyulan kimyasallar; saf su, DNC 520-9 Make up Çözeltisi, DNC 520-9 Replenisher 1 ve Stabiliser 10'dur (Şekil 3.5).

Kurulum şu şekilde yapılır; (DNC 520-9)

Banyo çözeltisinin % 75'i saf su, % 18'i DNC 520-9 make up solution, % 42'si DNC 520-9 replenisher 1 ve % 7'si stabiliser 10 şeklindedir. (Şekil 3.5)



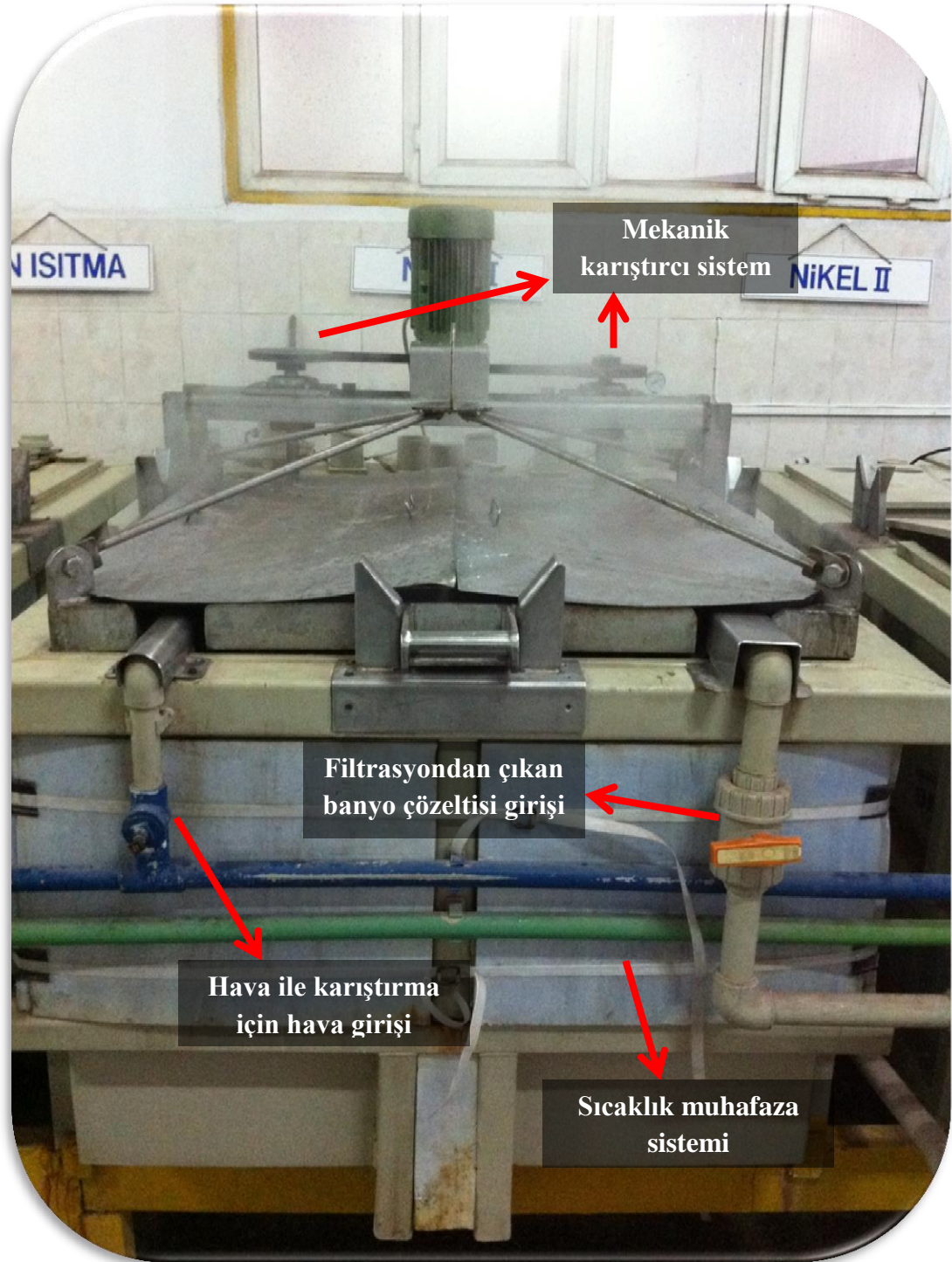
Şekil 3.5. Akımsız nikel-fosfor banyo kurulumu için gerekli ürünler.

Kurulum bir tonluk Polipropilen bir banyoya yapıldığı için;

750 Litre Saf Su, 180 Litre DNC 520-9 Make up Solution, 42 Litre DNC 520-9 Replenisher 1 ve 70 Litre Stabiliser 10 kullanılarak banyo kurulumu yapıldı.

Kurulumu yapılmış olan Akımsız Nikel Kaplama Banyosu Şekil 3.6 ve Şekil-3.7 de görülebilir. Kullanılan banyonun özellikleri şöyledir;

- ✓ Hava ile veya mekanik karıştırma imkânı,
- ✓ Filtrasyon sistemine bağlantı ve filtrasyon kolaylığı,
- ✓ Teflon ısıtıcılar sayesinde ısıtma,
- ✓ Otomasyon sistemi ve sıcaklık ölçer probu sayesinde sıcaklık kontrolünün kolaylığı,
- ✓ Taşıma sistemi sayesinde 1 ton ağırlığındaki malzemelerin taşınması,
- ✓ İç hacminin genişliği sayesinde yüksek yüzey alanlı malzemelerin kaplanabilmesi,
- ✓ Sıcaklık koruyucu cam yün ve straforlar sayesinde sıcaklık muhafazası.

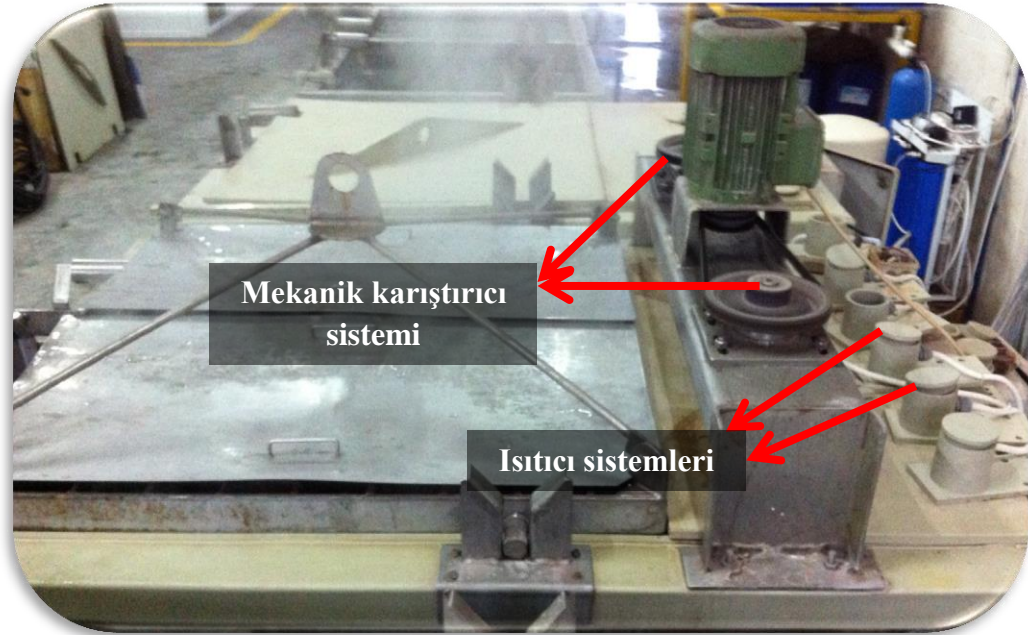


Şekil 3.6. Akımsız nikel kaplama banyosu.

Banyo çözeltisinin özellikleri ve çalışma koşulları şöyledir; (DNC 520-9)

- ✓ Nikel içeriği; $5,0 \pm 1,0$ g/L
- ✓ İndirgeme ajanı; 40 ± 3 g/L
- ✓ pH; 4,4 – 4,8 (20°C'de)

- ✓ Çalışma sıcaklığı; 88 – 94 °C
- ✓ Kaplama hızı; 10 – 14 µm/h



Şekil 3.7. Akımsız nikel kaplama banyosu ısıtıcı ve karıştırıcı sistemi.

Banyo kurulumu sonrası yapılan analizler şu şekilde sıralanabilir;

- Nikel analizi,
- Sodyum hipofosfit analizi,
- pH kontrolü.

3.1.2.3.a. Nikel analizi

Banyo çözeltisindeki nikel derişiminin bulunması için titrimetrik analiz yapılmıştır.

- 5 ml banyo çözeltisinden alınmış ve 250 ml'lik erlene konulmuş, (20°C)
- 10 ml amonyak ilavesi yapılmış,
- 150 ml saf su ilave edilmiş,
- Spatül ucu kadar müreksit ilave edilmiş,
- 0,1 M EDTA ile çözelti rengi sarıdan mora dönene kadar titrasyon yapılmıştır.

Titrasyon sonucunda 4,5 ml EDTA çözeltisinden harcanmıştır (DNC 520-9).

Harcanan EDTA hacmi $\times 1.174 = 4,5 \times 1,174 = 5,3$ g/L Ni^{2+} bulunmuştur. Bu değer banyo çalışma koşullarına uymaktadır.

3.1.2.3.b. Sodyum hipofosfit analizi

Sodyum hipofosfit analizi için 2 ml banyo numunesi 250 ml'lik erlene konulmuş ve 5 ml derişik HCl ilave edilerek iyice karıştırılmıştır. Daha sonra 25 ml 0,1 N iyodür çözeltisi ilave edilmiş ve tekrar iyice karıştırılarak 30 dakika karanlık bölgede ağzı kapalı bir biçimde bekletilmiştir. Nişasta indikatörü beraberinde 0,1 N sodyum tiyosülfat çözeltisi ile titre edilmiştir.

Sonuç: $(25 - 0,1N \text{ sodyum tiyosülfat sarfiyatı}) \times 2,65 = \text{Sodyum Hipofosfit (g/L)}$ (DNC 520-9).

Harcanan $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ hacmi 9,5 mL'dir. Yukarıdaki hesaplama ile 41,075 g/L sodyum hipofosfit bulunmuştur. Bu değer banyonun optimum çalışma koşulları içerisinde olduğu tespit edilmiştir.

3.1.2.3.c. pH kontrolü

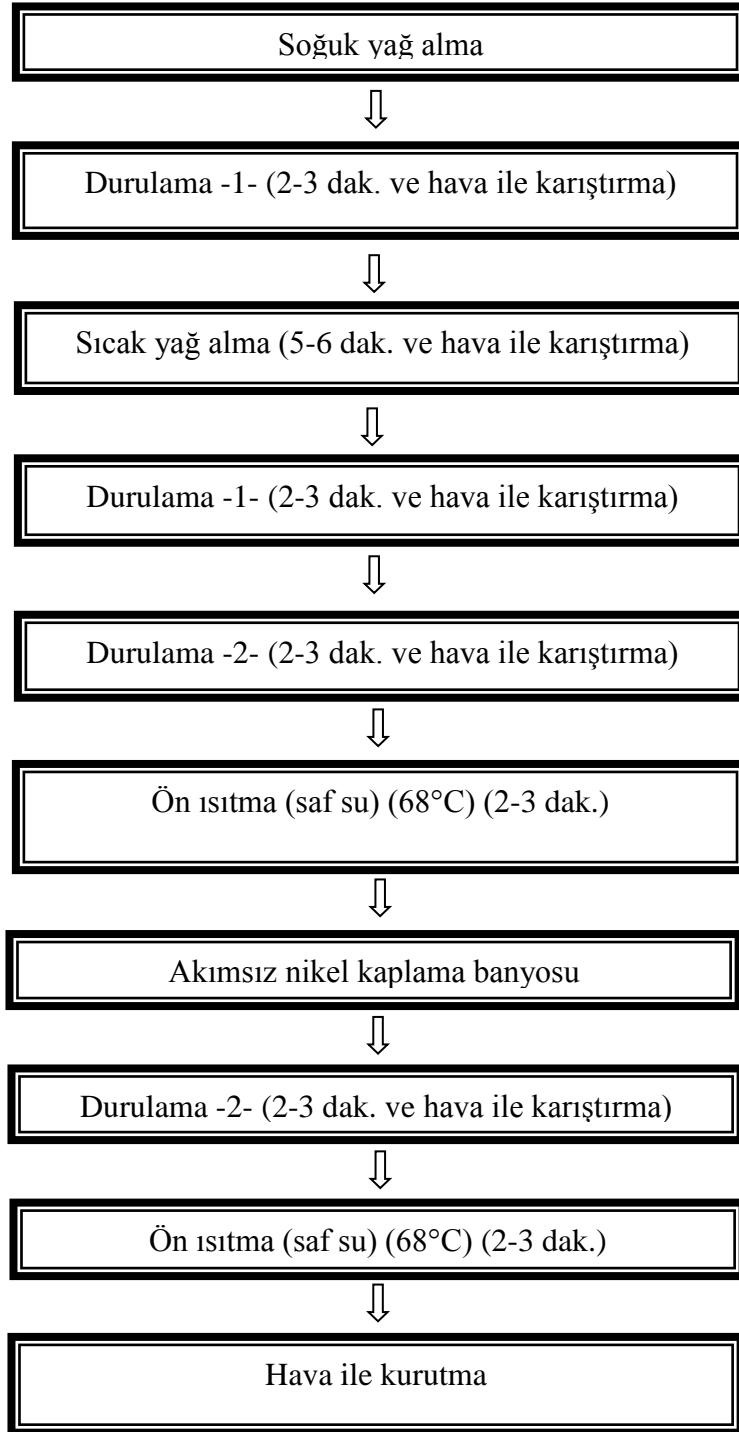
Banyo çözeltisinin kurulumundan sonra yapılan pH ölçümü sonucu bulunan değer 4,7 dir. pH kontrolü banyonun çalışması esnasında da yapılarak pH'ın 4,6 ile 4,8 arasında kalması sağlanmıştır.

Bulunan değerlerin akımsız nikel kaplama banyosunun optimum çalışma koşulları içerisinde olduğu görülmüştür.

3.1.3. Akımsız nikel kaplama sürecinin basamakları

Akımsız nikel kaplama için kurulumu yapılan banyonun analizleri sonrası kaplama işlemine geçilmiştir. Banyonun sıcaklığı 88-90°C sabitlenerek Çizelge 3.3 de sıralanmış olan işlemler uygulanmıştır.

Çizelge 3.3. Akımsız nikel kaplama süreci akım şeması.

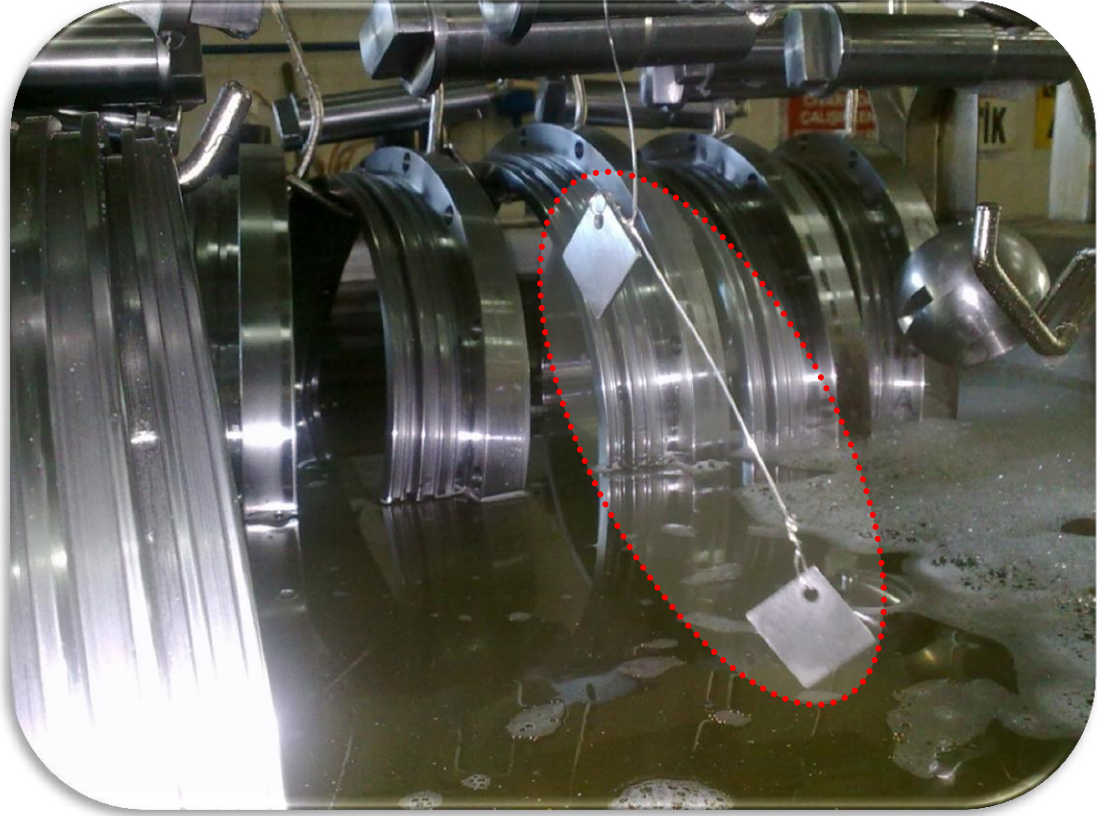


Kaplama işlemi için hazırlanmış olan parçalara yukarıda sıralanmış olan işlemler uygulanmıştır.



Şekil 3.8. Korozyon testine tabi tutulacak parçanın kaplanması (Sıcak yağ alma işleminde).

Parçaların kaplama süreci esnasında çekilmiş fotoğrafları Şekil 3.8 ve Şekil 3.9 da görülebilir.



Şekil 3.9. Test ve analizleri yapılacak parçaların kaplanması (Sıcak yağ alma işleminde).

3.1.4. Kaplama sonrası kalınlık ölçümlerinin yapılması

Korozyon testine tabi tutulacak olan parçalar banyo çözeltisinde yaklaşık olarak 4 saat kaldıktan sonra sırasıyla, durulama, ön ısıtma ve hava ile kurutma işlemlerine tabi tutulmuştur. Parçaların kaplama kalınlık ölçümleri yapılmış, ısıtma işlemine tabi tutulmamış numune için kaplama kalınlığı $43 \mu\text{m}$ bulunmuş, ısıtma işlemine tabi tutulmuş numunede ise bu değer $35 \mu\text{m}$ olarak belirlenmiştir. Kalınlık ölçümlerine ait fotoğraflar Şekil 3.10'da görülmektedir. Kalınlık ölçüm cihazı dijitaldir ve malzemelerin her yerinde eşit kaplama olduğu görülmüştür. Kaplama homojenliği bu sayesinde kontrol edilmiştir.



Şekil 3.10. Korozyon testine (tuz testi) tabi tutulacak olan parçaların kaplama kalınlık ölçümleri.

Enerji dağılımlı X-ışını spektrofotometrik ölçümleri (EDX) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizleri yapılacak olan numunelerin akımsız nikel kaplama sonrası kaplama kalınlık değerleri 50 µm olarak bulunmuştur. Bu numunelerin kaplama kalınlık ölçümlerinin yapılması sırasında çekilmiş fotoğrafı Şekil 3.11’de verilmiştir.



Şekil 3.11. Test ve analizleri yapılacak parçaların kalınlık ölçümleri.

3.1.5. Kaplama sonrası ısıt işlemin uygulanması ve sertlik analizlerinin yapılması

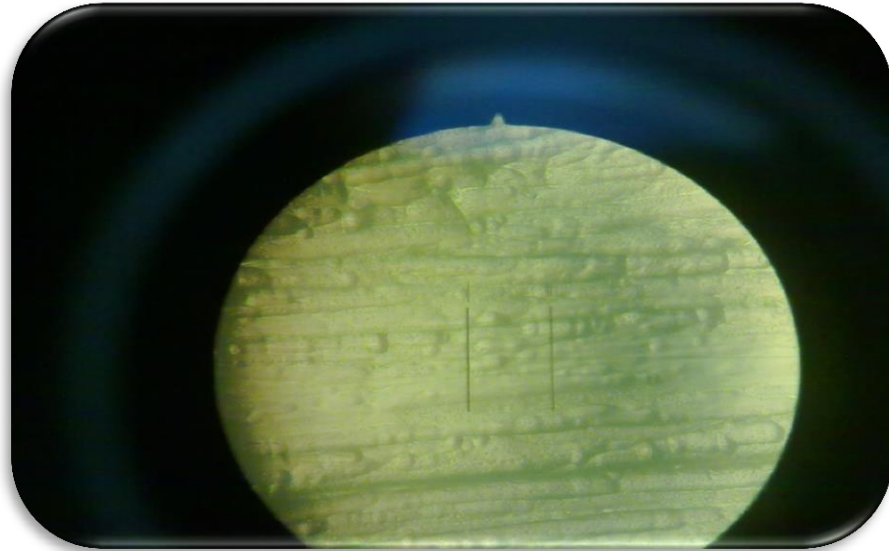
Isıt işlem 450°C de bir saat olacak şekilde yapılmıştır. Yapılan ısıt işlem sonucunda kaplama kalınlık ölçümü tekrar yapılmış ve 17 μm olarak bulunmuştur.

Akımsız nikel kaplamada yapılan ısıt işlem ile birlikte kaplama kalınlığında çok ciddi bir azalmanın olduğu görülmüştür. Şekil 3.12'de ısıt işlem sonrası yapılan kaplama kalınlık ölçümü görülmektedir.

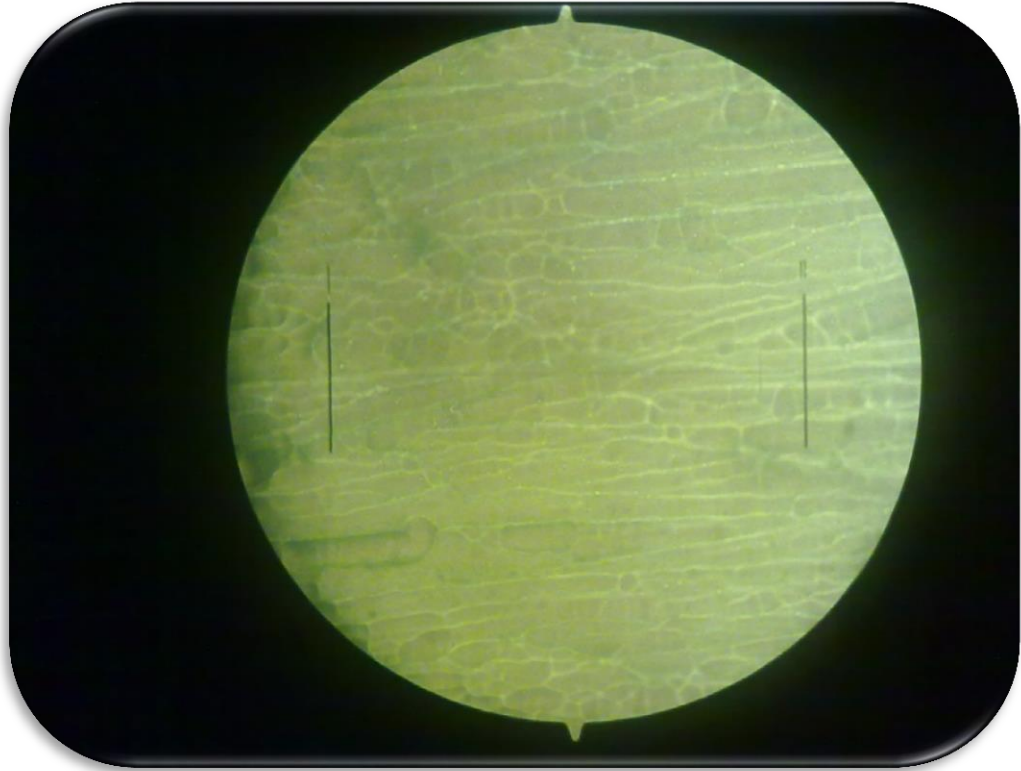


Şekil 3.12. Isıl işlem sonrası kaplama kalınlık ölçümünün yapılması.

Isıl işlem öncesinde yapılan sertlik testinde çıkan sonuç **350HV0.5 (35 HRC)** dir. Isıl işlem sonrasında ise bu değer **526HV0.5 (50 HRC)** dir. Görüldüğü gibi ısıl işlem ile akımsız nikel kaplama tabasının sertlik değeri 15 birim birden artarak 35 HRC den 50 HRC ye çıkmıştır. Akımsız nikel kaplama ve ısıl işlem sonrasında alınan mikro fotoğraflarda malzemelerin yüzeylerindeki sıkılaşıma çok net bir şekilde görülebilmektedir (Şekil 3.13 ve Şekil 3.14).



Şekil 3.13. Akımsız nikel kaplamanın ısıl işlemsiz 400× büyütmede mikrofotografı



Şekil 3.14. Akımsız nikel kaplamanın ısıtılmış 400× büyütmede mikrofotografı

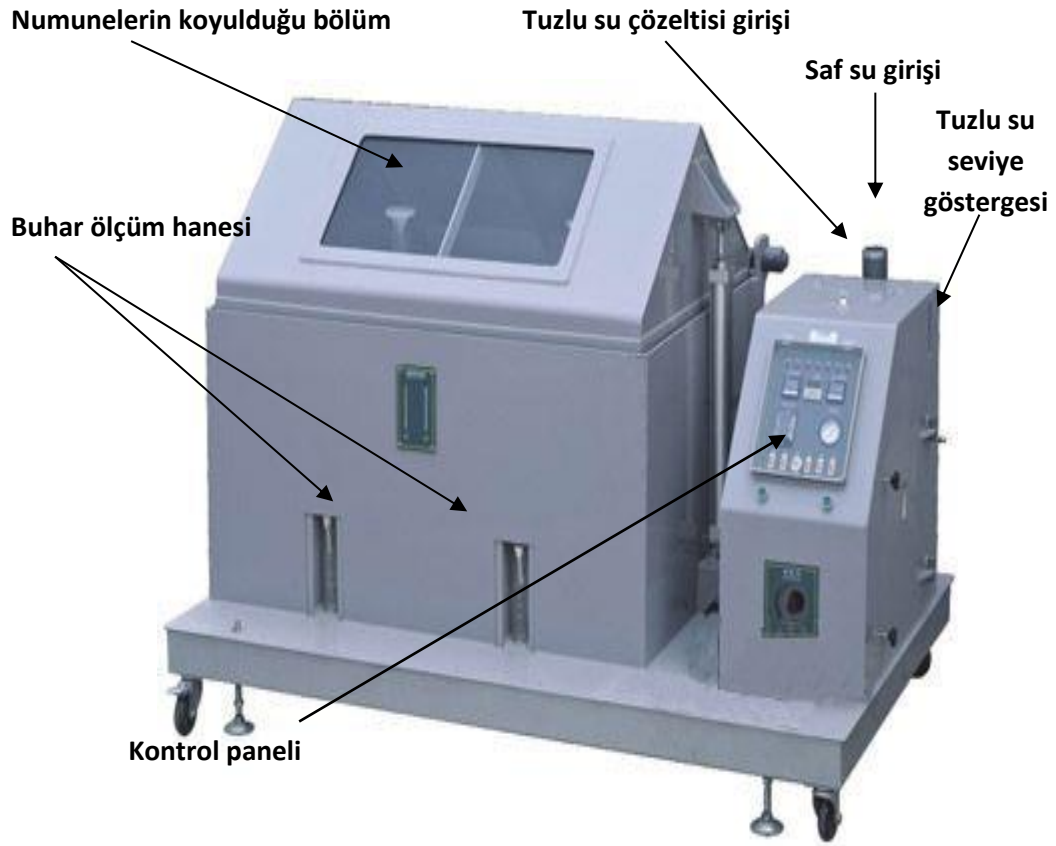
Şekil 3.13 ve Şekil 3.14 'te görüldüğü gibi kaplama yapısı ısıtılmış ile birlikte sıkılaşmakta ve kısmi oyuklar ısıtılmış ile birlikte kapatılabilmektedir. Bu ise kaplama tabakasının sertliğinin artmasına yol açmaktadır.

3.1.6. Korozyon testlerinin yapılması

Tuz püskürtme testi

Korozyon testleri kaplama teknolojisinde genel olarak tuz püskürtme yöntemi ile yapılır. Tuz püskürtme testi ASTM B117-11 (ASTM B117 – 11:Standard Practice for Operating Salt Spray (Fog) Apparatus) veya ISO 9227 standardına göre uygulanmaktadır.

Şekil 3.15 te tipik bir tuz püskürtme test cihazı görülmektedir.



Şekil 3.15. Tipik bir tuz sprey (püskürtme) korozyon testi cihazı (www.weicetesting.com, erişim tarihi: 17.04.2014, saat: 14:08).

ASTM B117 standardına göre test sırasında sıcaklık 35°C olmalıdır. Tuz çözeltisi ise sulu %5 lik sodyum klorür çözeltisidir. Çözeltide kullanılan suyun önemi çok büyük olup iletkenliği $10\ \mu\text{S}$ 'in altında olmalıdır (ASTM B117). Deney boyunca tuz püskürtme cihazı numuneler üzerinde tuzlu su çözeltisi püskürtür. Tuz püskürtme korozyon testi sonrasında; ısıtılma tabii tutulmayan numunede 72 saatte kırmızı pas gözlenmiş, ısıtılma tabii tutulan diğer numunede ise aynı oluşum 24 saatte gerçekleşmiştir. Şekil 3.16 ve Şekil 3.17'de korozyon testinin sonuçları görülmektedir.



Şekil 3.16. Isıl işlemsiz numunenin tuz püskürtme korozyon testi sonrası.



Şekil 3.17. Isıl işlemlili numunenin tuz püskürtme korozyon testi sonrası.

3.1.7. X-Işınları kırınımı (XRD) analizleri ve desenleri

Isıl işlemlili ve ısıl işlemsiz numunelerin XRD sonuçları Çizelge 3.4 ve Çizelge 3.5'de görülmektedir. Akımsız nikel kaplama tabakası üstünde ısıl işleminden sonra nikel elementinin kütlece yüzdesinde bir azalma olduğu görülmektedir. Çizelge 3.4 de nikel %87,24 iken Çizelge 3.5 de yani ısıl işlemlili numunede nikel elementi %85,58 dir. Azalma %1,66 dir.

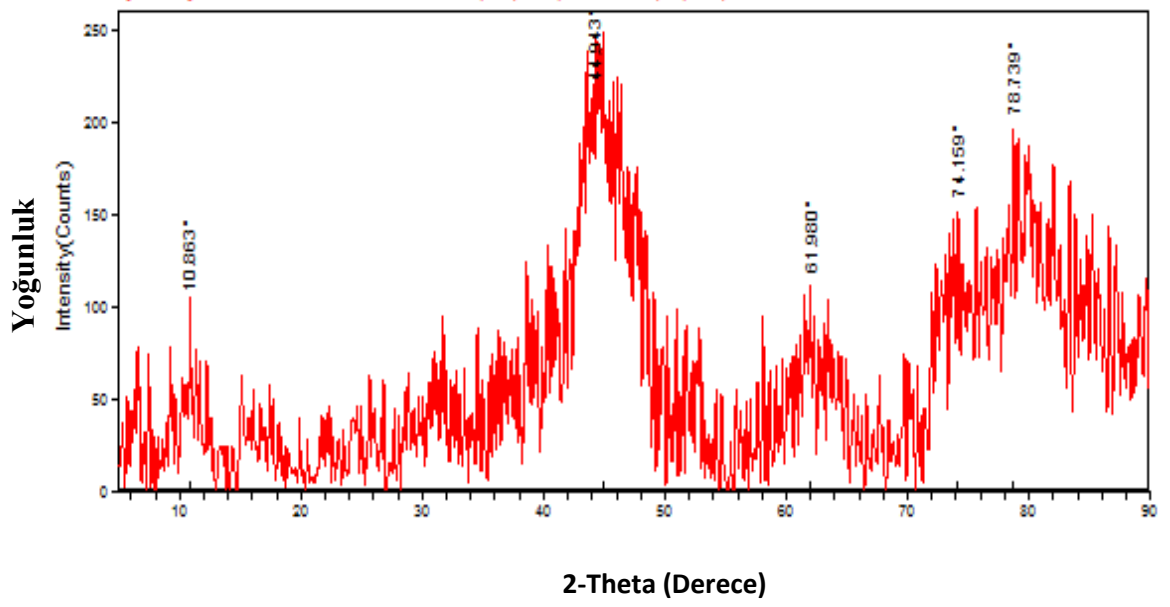
Çizelge 3.4. Isıl işlemsiz numunenin XRD sonuç tablosu.

ELEMENT	WEIGHT %	ATOMIC %	NET INT.
O	0,89	2,87	26,32
P	11,87	19,91	1064,46
Ni	87,24	77,21	5251,06

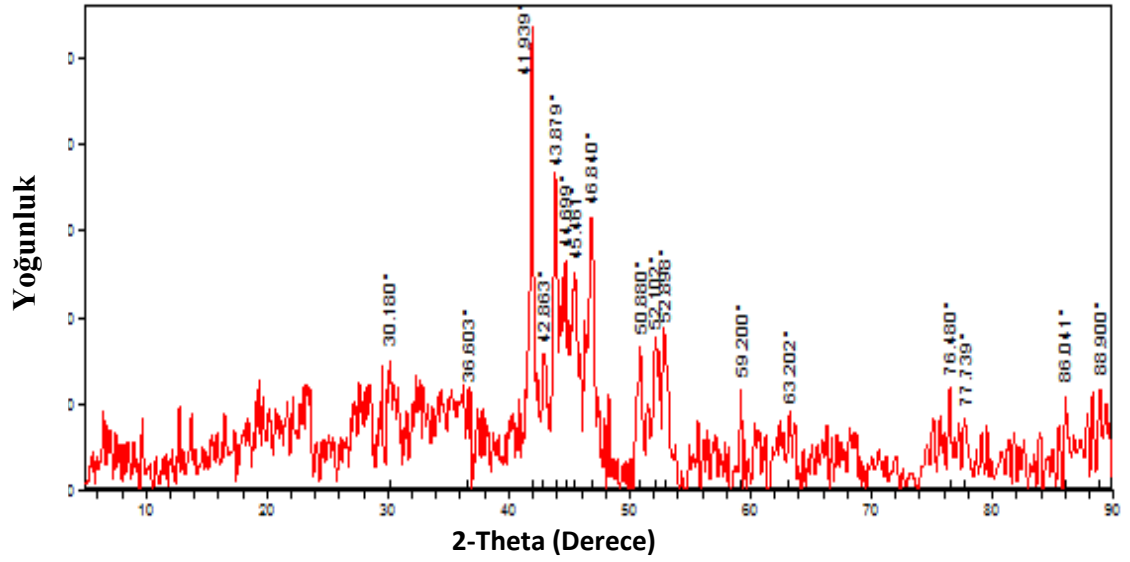
Çizelge 3.5. Isıl işlemlili numunenin XRD sonuç tablosu.

ELEMENT	WEIGHT %	ATOMIC %	NET INT.
O	2,55	7,96	74,02
P	11,87	19,17	1038,98
Ni	85,58	72,87	4983,79

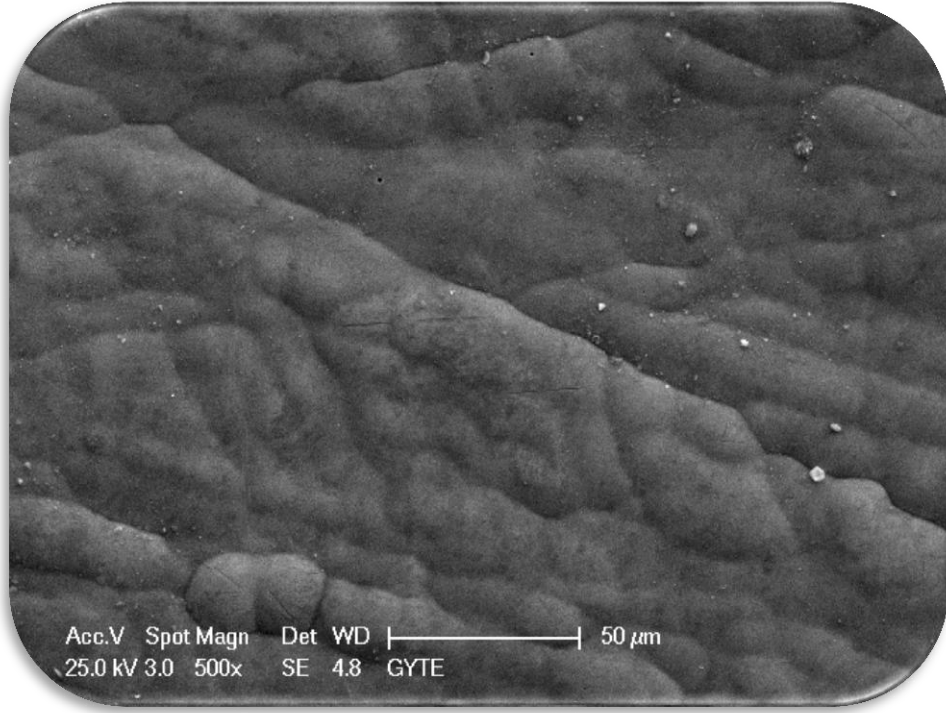
450°C de 1 saat ısıl işleme tabi tutulan akımsız nikel kaplama numunesinin ve ayrıca ısıl işleme tabi tutulmayan akımsız nikel kaplama numunesinin XRD desenleri sırasıyla Şekil 3.18 ve Şekil 3.19 'da verilmiştir. Bu desenler akımsız nikel kaplama tabakasının ısıl işlem ile amorf yapıdan kristal yapıya geçiş yaptığını göstermektedir.



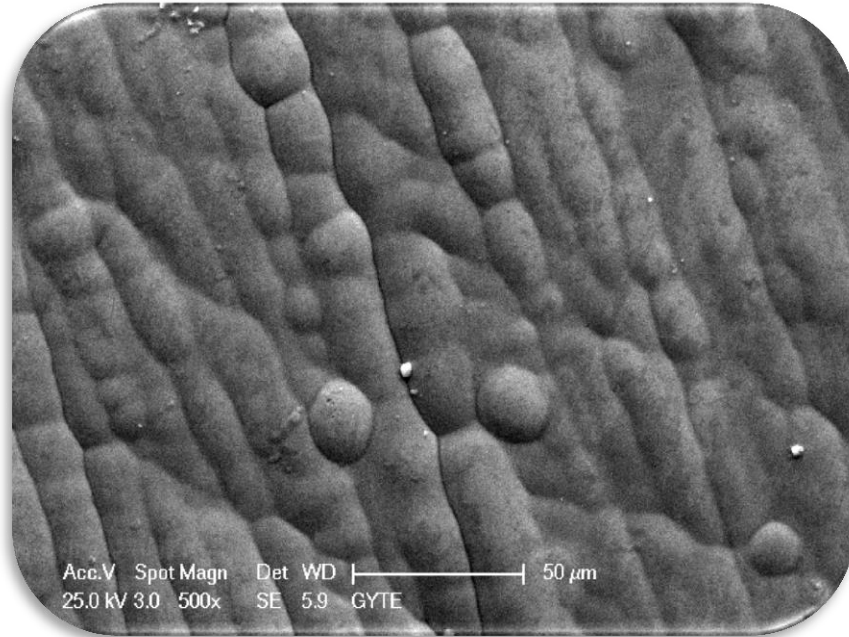
Şekil 3.18. Isıl işleme tabi tutulmayan akımsız nikel kaplı numunenin X-ışını kırınım deseni



Şekil 3.19. Isıl işleme tabi tutulan akımsız nikel kaplı numunenin X-ışını kırınım deseni.



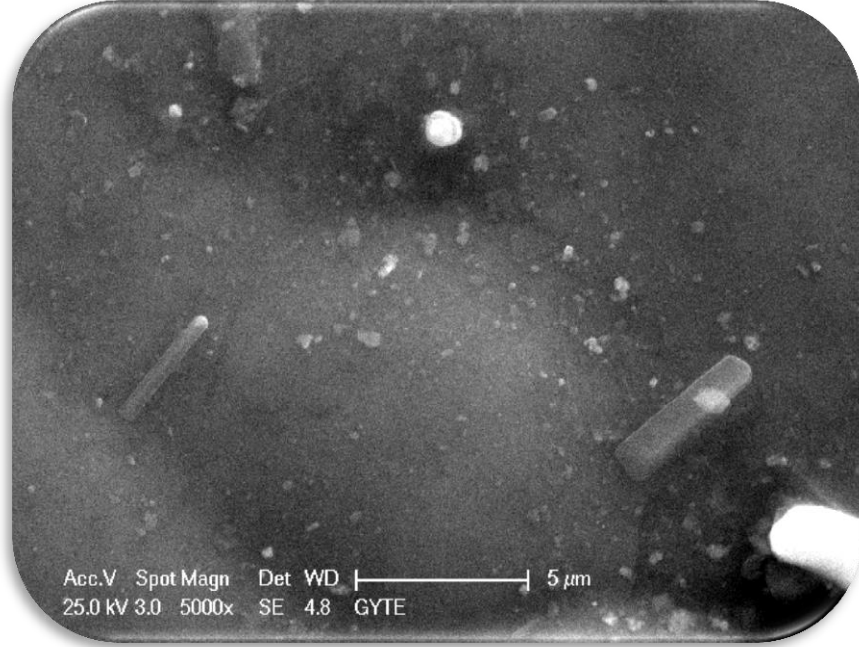
Şekil 3.20. Isıl işlemlı akımsız nıkel kaplama numunesının SEM görüntüsü.



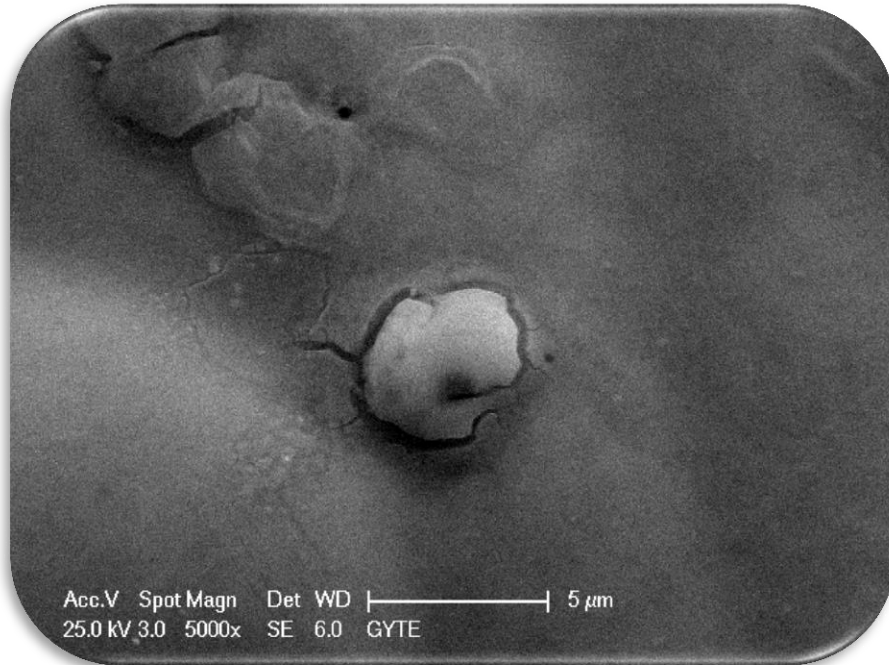
Şekil 3.21. Isıl işlemsız akımsız nıkel kaplama numunesının SEM görüntüsü.

Şekil 3.20 ve Şekil 3.21 'de görüleceğı gibi ısıl işlem sonrasında akımsız nıkel kaplama tabakasının sıkılaştığı görülebilmektedir.

Bu SEM görüntüleri ile numunenin kaplama tabakasının sıkıştığı görülürken Şekil 3.22 ve Şekil 3.23 de de 450°C de ısıl işleme tabi tutulan akımsız nikel kaplamanın tabaka yapısının yine sıkı bir yapıya döndüğü görülebilmektedir.

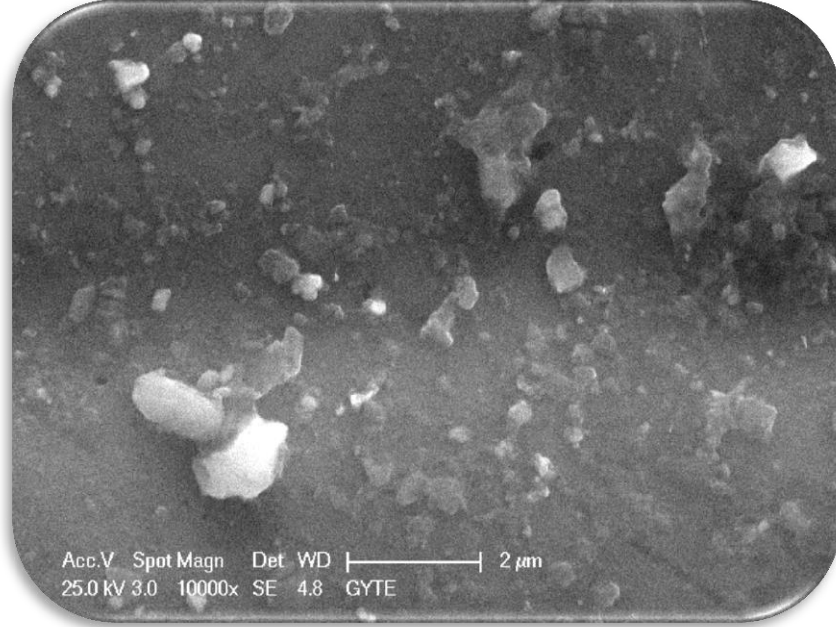


Şekil 3.22. Isıl işlemlili akımsız nikel kaplamanın SEM görüntüsü.

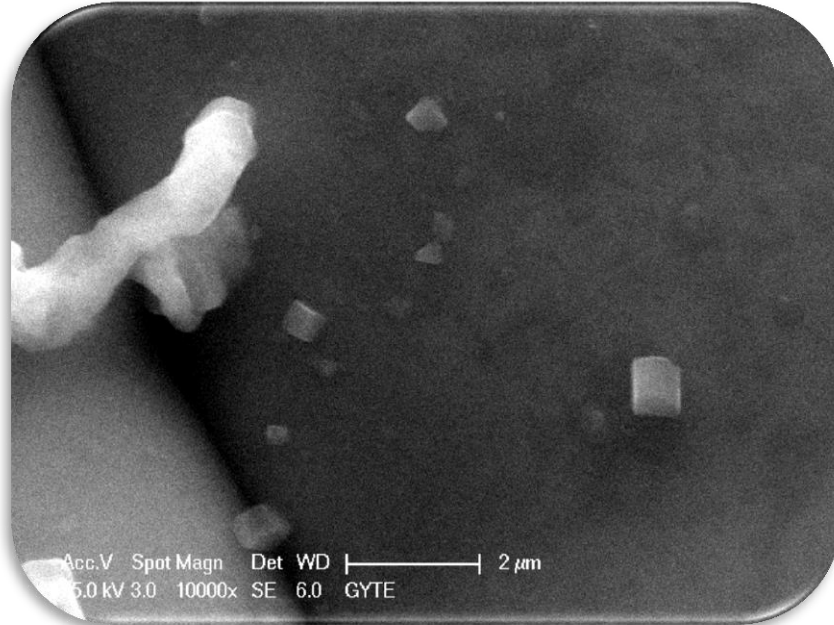


Şekil 3.23. Isıl işlemsiz akımsız nikel kaplamanın SEM görüntüsü.

Aynı şekilde ısıtılma tabii tutulan akımsız nikel kaplı numunenin ısıtılma işlem sonrasında kaplama tabakasının yapısındaki değışim Şekil 3.24 ve Şekil 3.25’de görülebilmektedir.

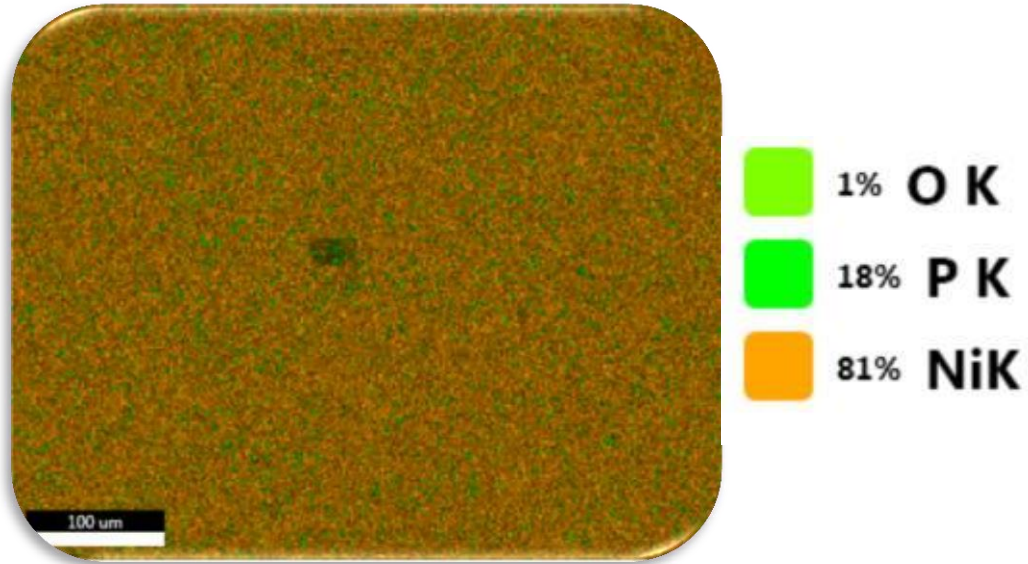


Şekil 3.24. 450°C de bir saat ısıtılma tabii tutulan akımsız nikel kaplamalı numunenin SEM görüntüsü.

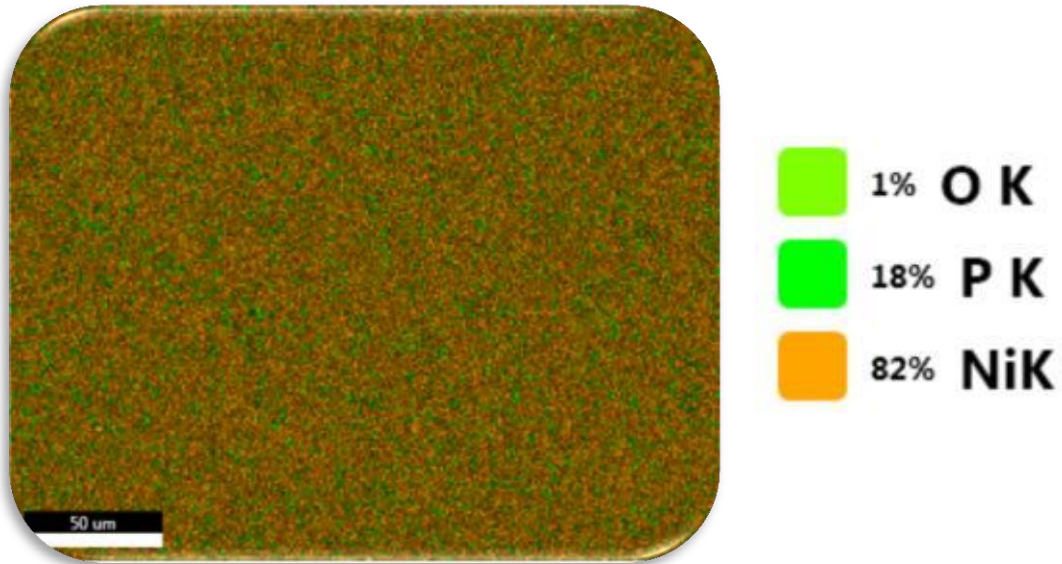


Şekil 3.25. ısıtılma tabii tutulamayan akımsız nikel kaplamalı numunenin SEM görüntüsü.

Şekil 3.26 ve Şekil 3.27’de ısıtılmış numune ile ısıtılmamış numunenin yapılarında bulunan nikel ve fosforun kütlece yüzde oranları noktasal olarak gösterilmiş, şekillerden de görüleceği gibi ısıtılmış numune yapısındaki nikel oranının azalmasına neden olmuştur.



Şekil 3.26. 450°C de 1 saat ısıtılmış tutulan akımsız nikel kaplamalı numunenin EDX element analiz haritası (O; Oksijen, P: Fosfor, Ni; Nikel).



Şekil 3.27. Isıtılmamış tutulmayan akımsız nikel kaplamalı numunenin EDX element analiz haritası (O; Oksijen, P: Fosfor, Ni; Nikel).

4. SONUÇLAR VE YORUMLAR

Bu çalışmada ASTM A105 kalitede bir çelik numunesinin akımsız nikel kaplanması ve ısıl işlemin bu kaplama tabakasına etkisinin araştırılmasıdır. Bu tip çelik numunesinin seçilmesinin nedeni sanayi üretiminde bu standarttaki dövme çeliğin çok fazla kullanılmasıdır. Çalışma sürecindeki önemli noktalar aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

15×15×1mm ebatlarındaki çelik numunesi hazırlanırken (kesimi yapılırken), kesim esnasında ortaya çıkan ısının kaplamaya olumsuz etkisi olabileceğinden kesim için özel lazer kesim makinesi kullanılmıştır. Çelik numunesinin işlenmesi esnasında CNC gibi işleme tezgâhlarında elmas uç kullanımıyla çeliğin işlenen bölgelerinin ısıl işleme tabi tutulmuş gibi ısındığı tecrübe edilmiştir. Bu durumda bu bölgelere uygulanan akımsız nikel kaplamanın başarılı olamama ihtimali söz konusudur.

Bir başka önemli husus saf suyun üretimidir. Zira saf su akımsız nikel kaplama için çok önemli bir faktördür. Akımsız nikel kaplama süreci bir kimyasal reaksiyon ile meydana geldiğinden kullanılan suyun iletkenlik değerinin çok düşük olması zorunludur. Su, iyonlarından arındırılmış olmalıdır. Eğer kullanılan saf suyun iletkenlik değeri 10 μ S'den yüksek olursa ihtiva ettiği iyonların çok fazla olması sebebiyle akımsız nikel kaplama oldukça olumsuz yönde etkilenmektedir. Bu istenmeyen iyonlar kaplama tabakasının üstünde kalıcı toz şeklinde birikmektedirler. Bundan dolayı saf suyun iletkenlik değerinin en fazla 5 μ S olması gerekmektedir.

Yine bir başka önemli nokta ise akımsız nikel kaplama kimyasalının filtrasyon işlemidir. Bu filtrasyon işleminde kullanılan kartuşlar 10 μ m çapta gözenekli yapıya sahip olmalı ve sıklıkla değiştirilmelidir. Akımsız nikel kaplama kimyasalı haftada bir kez en az 24 saat boyunca filtre edilmelidir. Çünkü filtrasyon işleminde akımsız nikel kaplama kimyasalı içerisinde biriken parçacıklar kartuşlar sayesinde tutularak kimyasal temizlenmektedir.

Akımsız nikel kaplama banyosunun kurulumu yapılmış ve tüm aşamalar takip edilmiştir. Kurulum talimatı kimyasalların satın alındığı firma tarafından verilen kontrol talimatına göre yapılmıştır. Akımsız nikel kaplama, çalışma koşullarına uyularak yapılmıştır. Ayrıca akımsız nikel kaplama yapılırken çözeltinin sürekli karıştırılması

için mekanik karıştırıcı sistem kullanılmıştır. Zira hava karıştırıcı sistemin çözeltinin sıcaklığını düşürdüğü ve bunun da kaplama hızına negatif yönde etki ettiği görülmüştür.

Akımsız nikel kaplama çözeltisinin tüm kimyasal analizleri yapılmış ve olması gereken optimum koşullar sağlanmıştır. Hazırlanan numunelerin tümü bu optimum koşullar sağlanarak istenilen kalınlıkta kaplama yapılmıştır. Kurulan akımsız nikel kaplama banyosunun kaplama hızı 8-10 $\mu\text{m/saat}$ olduğu tespit edilmiştir.

Akımsız nikel kaplanmış iki adet çelik numunesinden kaplama kalınlığı 35 μm olan numune 450°C de 1 saat ısıtılma tabi tutulmuştur. Isıl işlem sonrasında kaplama kalınlığının 17 μm ye yani neredeyse yarı yarıya düştüğü gözlenmiştir. Böylelikle ısıtılmanın akımsız nikel kaplama tabakasının kalınlığını azalttığı gözlenmiştir.

Isıl işlemsiz ve ısıtılmalı akımsız nikel kaplama numunelerinin sertlik analizleri yapılmış, ısıtılmalı numunenin ısıtılmalı numuneye göre çok daha sert bir kaplama tabakasına sahip olduğu gözlenmiştir. Şöyle ki; ısıtılmalı numunenin sertlik değeri 35 HRC iken ısıtılmalı numunenin sertlik değeri ise 50HRC olarak bulunmuştur.

Tuz püskürtme korozyon testine tabi tutulan numunelerin korozyon etkilerine karşı dirençleri incelenmiş, ısıtılmalı numunenin ısıtılmalı numuneye göre çok daha dayanıklı olduğu görülmüştür. Isıl işlemsiz numunede paslanma 72 saatte, ısıtılmalı numunede ise 24 saatte görülmüştür.

15×15×1 mm ebatlarında iki adet numuneden biri 450°C de 1 saat ısıtılma tabi tutulmuş ve ısıtılmalı numune ile birlikte 400 büyütmede mikro görüntüleri alınmıştır. Isıl işlemle birlikte yüzeydeki kabarık ve dağınık görüntünün ortadan kaybolduğu, morfolojinin iyileştiği görülmüştür.

15×15×1 mm ebatlarında iki adet numunenin XRD analizleri ile birlikte kaplama tabakasında bulunan nikel elementinin ısıtılma işlemi ile birlikte kütlece %1,66 oranında azaldığı görülmüştür. Isıl işlem akımsız nikel kaplama tabakasındaki nikel elementini azaltmaktadır.

Yine bu numunelerin XRD ve SEM görüntüleri ile birlikte akımsız nikel kaplama tabakasının mikro yapısının ısı ile birlikte sıkılaştığı ve amorf yapıdan kristal yapıya döndüğü görülmüştür.

Akımsız nikel kaplamaya eğer ısı ile işlem yapılmak isteniyorsa, ısı ile işlem öncesinde kaplama kalınlığının oldukça yüksek tutulması gerekmektedir. Örneğin ısı ile işlenmiş bir kaplamanın kalınlığı 30 µm isteniyorsa, ısı ile işlem öncesinde kalınlığın en az 60 µm tutulması gerekmektedir. Ayrıca, ısı ile işlenmiş numunenin ısı ile işlenmemiş numuneye göre korozyona karşı çok dayanıksız bir yapıya sahip olduğu göz önünde bulundurulmalıdır.

Bundan sonraki çalışmalarda akımsız nikel kaplama hızının artırılması için katalizör hazırlanması hedeflenebilir. Zira 20 µm kalınlıkta istenilen bir kaplama için en az 2 saat beklenmektedir. Bu sürenin daha aşağı çekilmesi için ortama bir katalizör ajan katılarak reaksiyonun hızlandırılması ile mümkün olabilir. Bu şekilde daha fazla ürünün kaplanması ve enerji sarfiyatlarının daha az indirilmesi sağlanabilecektir.

5. KAYNAKLAR

- Agarwala R.C. ve Agarwala V., “Electroless alloy/composite coatings: A review”, *Sadhana*, 475-493 (2003).
- AHC Surface, “DNC 520-9 ‘un özellikleri”, http://www.ahc-surface.com/pdf_downloads/Sales%20of%20Chemicals%20%20Instructions/Electroless%20Nickel/Electroless%20Nickel%201111/DNC%20520-9_E.pdf , 04.07.2012 Saat 13:47.
- Alruqee Metal Cutting, “Isıl İşlem Fırını Görseli-1”, <http://www.alruqee.net/PMenuContent.aspx?mid=546&did=3>, 17.04.2014 Saat 12:18.
- Aksan Forging, “Isıl İşlem Fırını-2 Görseli”, <http://www.aksanforging.com/TR,88/isil-islem.html> , 17.04.2014 Saat 12:21.
- Alufin Group, “Akımsız ile Akımlı kaplanın karşılaştırılması görseli”, http://www.alufingroup.com/electroless_nickel_plating.htm , 09.04.2014 Saat 09:07.
- Allen R. M. ve VanderSande J. B., Structure Of Electroless Ni-P Films As a Function of Composition, *Scripta Metall.*,1161-1164(1982).
- ASTM B117 Standardı, Standard Practice for Operating Salt Spray (Fog) Apparatus, American National Standards Institute, 2011.
- Balaraju J.N., Sankara Narayan T.S.N. ve Seshadri S.K., “Electroless Ni–P Composite Coatings”, *Journal of Applied Electrochemistry*, 807 (2003).
- Barbara A. ve Robert G., “What is Corrosion?”, *The Electrochemical Society Interface*, 24-25 (2006).
- Brenner A. ve G. Riddell, “Deposition of Nickel and Cobalt by Chemical Reduction”, The Journal of Research of the National Bureau of Standards, 385 (1947).
- Bilici M.S., “Sodyum Borhidrür Üretim Yöntemleri”, *II. Uluslararası Bor Sempozyumu*, Eskişehir-Türkiye,119 (2004).
- C.E. deMinjer and A. Brenner, “Studies on Electroless Nickel Plating”, *Plating*, 1297 (1957).

- Colaruotolo J. ve Tramontana D., “Engineering Applications of Electroless Nickel”, *William Andrew Publishing*, 207 (1990).
- Donald W. Baudrand vd,” MacDermid Inc.”, *ASM Metal Handbook*, 954-1010 (1994).
- Fields W. D., Duncan, R. N. ve Zickgraf, J. R., “Electroless Nickel Plating”, *Plating and Electropolishing*, 219-243 (1984).
- Fields W. ve Zickearff J.R., “Electroless Publication of ASM committee on EN plating”, *The Associated Students of Madiso* ,1984.
- G.G. Gawrilov, “Chemical (Electroless) Nickel Plating”, *Portcullis Press, Redhill, İngiltere* ,1979.
- G. Jiaqiang, W. Yating, L. Lei, S. Bin ve H. Wenbin, “Crystallization temperature of amorphous electroless nickel– phosphorus alloys”, *Materials Letters*, 1665-1669 (2005).
- G.O. Mallory, “The Electroless Nickel Plating Bath: Effect of Variables on the Process”, *Willim Andrew Publishing*, 62 (1990).
- G. Gutzeit, “An Outline of the Chemistry Involved in the Process of Catalytic Nickel Deposition from Aqueous Solution”, *Plating Surface Finish*, 1158 (1959) .
- G.O. Mallory, “The Electroless Nickel Plating Bath”, *Electroless Nickel Conference, Cincinnati*, 57-100 (1979).
- G.O. Mallory, “Influence of the Electroless Plating Bath on the Corrosion Resistance of the Depositsn”, *Plating*, 1005 (1974).
- Gardner Business Media, Products Finishing Staff, “Akımsız Nikel Kaplama Otomatik Uygulaması Görseli”, <http://www.pfonline.com/articles/electroless-nickel-beyond-elv>, 09.04.2014 Saat 09:12.
- Gaurilow G.G., “Chemical (electroless) nickel plating”, *Redhill: Porticullis* (1979)
- Heim G. ve Schwenk W., “Coatings for Corrosion Protection”, *Handbook of Cathodic Corrosion Protection*, 153 (1997).
- Jones D., “Principles and Prevention of Corrosion”, *Upper Saddle River, NJ, Prentice Hall*, 572 (1996).

- K.M. Gorbunova ve A.A. Nikiforova, “Physicochemical Principles of Nickel Plating”, *Izdatel'stvo Akademii Nauk SSSR*, Moskova ,1960.
- K. Parker, “Effects of Heat Treatment on th Properties of Electroless Nickel Deposits”, *Plating Surface Finish*, 12: 71 (1981).
- Koeneman J. ve Metcalfe A. G., “Transactions of the Metallurgical Society of AIME”, *American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers*, , 571 (1958).
- Krishnan, K.Hari, John, S., Srinivasan, K.N., Praveen, J., Ganesan, M., Kavimani, “An Overall Aspect of Electroless Ni-P Depositions-A Review Article”, *Metallurgical and Materials Transactions*, 1917-1918 (2006).
- Kurvalf Makina, “Akımsız Nikel Kaplama Gaz Sektörü Uygulaması Görseli”, www.kurvalf.com , 09.04.2014 Saat 09:11.
- M. Moniruzzaman ve Subrata Roy, “Effect of pH on Electroless Ni-P Coating of Conductive and Nonconductive Materials”, *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, Malezya, 481-489 (2011).
- M. Peter, “Corrosion and Corrosion Protection”, *Handbook of Hot-dip Galvanization*, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, Germany, 7 (2011).
- Matsubara, H., Yonekawa, T., Ishino, Y., Nishiyama, H., Saito, N. and Inoue, Y., “Observation of initial deposition process of electroless nickel plating by quartz crystal microbalance method and microscopy”, *Electrochim ACTA*, 2002.
- Miles of Smiles, “Korozyona Uğramış Çapa Örneği”, <http://www.milesofsmilesdental.net/1248/risks-of-corrosion-with-titanium-dental-implants/> , 15.04.2014 Saat; 16:14.
- Moonir VagheÀ , S.M., Saatchi, A., Ebrahimian-Hosseiniabadi, M., , “Deposition and Properties of Electroless Ni-P-B4C Composite Coatings”, *Department of Materials Science, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran*, 262 (2003).
- Mordechay Schlesinger, “Electroless Deposition of Nickel”, *Modern Electroplating*, Fifth Edition Edited, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA., 455 (2010).

- NACE Publication 6A287, “Electroless Nickel Coatings”, *National Association of Corrosion Engineers*, Houston, Texas, 1987.
- NACE International, “Historic Congressional Study: Corrosion Costs and Preventative Strategies in the United States”, *a Supplement to Materials Performance*, Houston ,2002.
- Wikimedia.org, “Nikel Sülfatın Formülasyonu”, <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/f8/N9%28H2O%296SO4.png>, 15.04.2014 Saat 17:17.
- Parkinson R., Properties and applications of electroless nickel, *Nickel Development Institute*, 5-7 (2011).
- Ploof L. “Electroless Nickel Composite Coatings”, *Sirius Technology, Inc. Oriskany*, New York ,2008.
- Rolf Weil ve Konrad Parker, “The Properties of Electroless Nickel; Electroless Plating”, *William Andrew Pupliching*, 111-137 (1990).
- Riedel W., “Electroless Nickel Plating, Metals Park Ohio”, *U.S.A./Fnishing Publications L.T.D*, Stevenage, Hertfordshire, England ,1991.
- R.N. Duncan, “Properties and Applications of Electroless Nickel Deposits”, *Finish Manage*, 5 (1981).
- R. Winston, Corrosion and Corrosion Control, *A John Wiley ve Sons. Inc Puplication*, Dördüncü Baskı, Kanada, 1 (2008).
- Sato N., Basics of Corrosion Chemistry, *Green Corrosion Chemistry and Engineering: Opportunities and Challenges*, First Edition, Wiley-VCH Verlag ,2012.
- SurTec International, “SurTec 179 Malzeme Özellikleri”, <http://www.surtec.com/!PIB/01%20Reinigen%20waessrig/Englisch/179E.pdf> , 04.07.20142 Saat 13:40.
- Shacham-Diamond, Y., Inberg, A., Sverdlov, Y., Croitoru, N., Moscovich, H. ve Freeman, A. “Electroless processes for micro- and nanoelectronics”. *Electrochim ACTA*, 48: 2987-2996 (2003).
- Saraç, A.S., “Metal Kaplama ve Elektrokimyasal Teknolojiler”, *Çağlayan Kitabevi*, İstanbul, 1995.

Weice Testing Instrument Co., Limited., “Tuz Sprey Cihazı Görseli”, [http : // www.weicetesting.com / Products/ Premium – Salt - Spray-Chambers/WTP-Premium-Salt-Spray-Chambers- WTP60-WTP90-WTP120-WTP160-WTP200.htm](http://www.weicetesting.com/Products/Premium-Salt-Spray-Chambers/WTP-Premium-Salt-Spray-Chambers-WTP60-WTP90-WTP120-WTP160-WTP200.htm), 17.04.2014 Saat 14:08.

Véronique Vitry, Abdoul-Fatah Kanta, and Fabienne Delaunois, “Evolution of Reactive Concentration during Borohydride-Reduced Electroless Nickel-Boron Plating and Design of a Replenishment Procedure”, *American Chemical Society*, 9227 (2012).

W.H. Metzger, “Characteristics of Deposits”, *Symposium on Electroless Nickel Plating*, American Society for Testing Materials, 18-19 (1959).

Zhu, X., Dong H., Lu, K., “Coating Different Thickness Nickel–Boron Nanolayers onto Boron Carbide Particles”, *Surface & Coatings Technology*, 2927-2934 (2008).

6. ÖZGEÇMİŞ



Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : Mahmut Sami ÇAPKIN

Doğum Tarihi ve Yeri : 16.11.1987 / Bursa

Eğitim

Lisans : Ondokuz Mayıs Üniversitesi

Fen Edebiyat Fakültesi Kimya Bölümü / 2004-2008

Lise : Emirsultan Lisesi / 2001-2004

İlk ve Orta Öğretim : Cavit Çağlar İlköğretim Okulu / 1994-1999

Mustafa Kemal Paşa İlköğretim Okulu / 1999-2001

Deneyim

- Bursa Kurvalf Makina San. / Kalite Güvence Sorumlusu - Kimyager / Haziran 2010 – Halen
- Samsun LENA Tanıtım Tasarım / Tasarım ve Müşteri Sorumlusu / Şubat 2009 – Haziran 2009
- Bursa Hisarlı Dershaneleri / Kimya Öğretmeni / Aralık 2008- Şubat 2009

Projeler

- Küre Taşlama Makinesi Prototip İmalatı(KOSGEB) / Aralık 2010-Aralık 2011
(12 Ay)
Görev; Kaplama , Kuşlama ve Boya gibi yüzey işlemlerinin gerçekleştirilmesi ve takip edilmesi.

Akademik Çalışmalar

- Makalenin Adı : Akımsız Nikel Fosfor (Ni-P) Kaplama ve Isıl İşlem
Makale Yayını : Paint & Surface Dergisi / Şubat/Mart/Nisan Sayısı / 8. Sayı /
Sayfa 38 / (Dili; Türkçe ve İngilizce)

İletişim

Adres : İhsaniye Mah. Bayır Sok. Şahin-6 Ap. No:2/4 Nilüfer / BURSA
Tel : +90 543 486 15 03
E'mail : samicpkn@hotmail.com

EK-1. Akımsız nikel kaplamanın uygulama alanları (Agarwala ve Agarwala, 2003).

Uygulama Alanları	Parçalar	Kalınlık (µm)
Otomotiv	Isı alıcıları, karbüratör parçaları, yakıt püskürtme, yuvarlak başlı vidalar, diferansiyel pinyon milleri, disk fren pistonları, transmisyon boşluk ayar pulları, sessiz kavramalı dişli düzenleri, mafsal pimleri, egzoz manifoldları ve boruları, susturucu, amortisörler, kilit parçaları, esnek boru bağlantıları, vites ve parçaları, benzin pompalı motorlar, alüminyum teker kapakları, su pompa parçaları, direksiyon parçaları ve milleri, hava yastığı donanımları, klima kompresörü parçaları, dekoratif plastikler ve kayan flanşlar.	2-38
Hava Araçları ve Uzay	Muylu yatakları, servo-vanalar, kompresör kanatları, sıcak ortam donanımları, piston kafaları, motor ana mil ve çarkları, hidrolik tahrik yayları, sızdırmaz contalar, iniş takım parçaları, otomatik pilot parçaları, motor süspansiyonları, yağ meme parçaları, türbin ön yatak kovanları, motor süspansiyon izolasyon gömlekleri, flanşlar, ayna dişlileri, sürgüler, civatalar, motor yağı besleme boruları, esnek yatak destekleri, kanat bağlantıları.	10-50
Petrol ve Kimya	Basınçlı kaplar, reaktörler, karıştırıcı miller, pompalar ve pervaneler, ısı değiştiriciler, filtreler, türbin kanatları, kompresör kanatları ve pervaneleri, sprej nozülleri ve vanaları, kelebek ve paslanmaz çelik vanalar, kapılar, jigleler, kontrol vanaları.	25-125
Elektrik	Motor milleri, rotor kanatları, stator ringleri.	12-25
Elektronik	Bilgisayar çalıştırma düzenleri, bağlayıcılar, diotlar, transistör muhafazası, iç kilitler, bağlantı yerleri ve PCB	2-25
Yiyecek	Pnömatik konserve makineleri, pişirme tavaları,	12-25

	kalıpları, ızgara ve dondurucular, karıştırma louts, topuz ısıtıcıları ve yem vida ve ekstruderler	
Denizcilik	Denizcilik donamları, pompalar ve ekipmanlar	25-50
Malzeme Taşıma	Hidrolik silindirler ve miller, ekstrüder, tranmisyon kayış bağlantıları, dişliler, kavramalar	12-75
Tıp ve İlaç Sanayii	Bir defa kullanımlık ameliyat araç ve gereçleri, tablet ayırıcılar, besleme vidaları ve ekstrüderler	12-25
Askeri	Füze bağlantıları, tank yatakları, radar dalga kılavuzları, aynalar, motorlar, füyeler, ateşli silahlar	8-75
Madencilik	Hidrolik sistemler, enjektör kafaları, maden motor parçaları, boru bağlantıları, bağlantı donanımları	30-60
Kalıplar	Çinko kalıplar, dökme kalıplar, plastik ekstrüzyon kalıplarının plastik enjeksiyon ve cam kalıpları	15-50
Yazıcılar	Yazıcı araçları ve baskı yatakları	~ 38
Demiryolu	Vagon rezervuarları, dizel motor milleri, vagon donanımları.	20-90
Tekstil	Kumaş bıçakları, eğrici, dokuma tezgâhı kilit mandalları, örgü iğnesi	12-50
Ağaç ve Kağıt	Bıçak tutucu kapak plakaları, aşındırıcı plakalar ve makine parçaları	~ 30
Çeşitli	Zincir testere makinesi	~ 25
	Matkaplar ve musluklar	~ 12
	Hassas aletler	~ 12
	Tükenmez kalemler	~ 5