

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**AKIMSIZ NİKEL FOSFOR/NİKEL BOR DUBLEKS KAPLAMALARIN
KOROZYON VE AŞINMA DİRENÇLERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Gökçe DİL

Disiplinler Arası Programlar Anabilim Dalı

Savunma Teknolojileri Programı

KASIM 2012

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**AKIMSIZ NİKEL FOSFOR/NİKEL BOR DUBLEKS KAPLAMALARIN
KOROZYON VE AŞINMA DİRENÇLERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Gökçe DİL

514101005

**Disiplinler Arası Programlar Anabilim Dalı
Savunma Teknolojileri Programı**

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Ali GÖKŞENLİ

KASIM 2012

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 514101005 numaralı Yüksek Lisans öğrencisi **Gökçe DİL**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**Akımsız Nikel Fosfor/Nikel Bor Doubleks Kaplamaların Aşınma ve Korozyon Dirençlerinin İncelenmesi**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Ali GÖKŞENLİ

Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Barlas ERYÜREK

Prof. Dr. Hanzade AÇMA

Teslim Tarihi : 4 Eylül 2012

Savunma Tarihi : 7 Kasım 2012

Aileme ,

ÖNSÖZ

Yüksek lisans tez çalışmamı yönlendiren, bilgi ve deneyimleri ile bana yol gösteren değerli danışman hocam Yard. Doç. Dr. Ali Gökşenli'ye,

Deneylerim sırasında bana manevi destek olan, hem arkadaşlıklarıyla hem de mühendis bakış açılarıyla fikirlerini benden esirgemeyen başta Ar. Gör. Ali Taner Kuzu, Umut Karagüzel ve Esin Çakır olmak üzere bütün malzeme bölümü asistanlarına

Bu çalışmanın temelini oluşturan tezi, yardımlarıyla ve arkadaşlığıyla Ar. Gör. Ahmed Yıldız'a,

Laboratuarda ve atölyede numunelerimin hazırlığı için her zaman yardım eden Osman Çelebi ve Erdal Dinç'e,

Ben vazgeçtiğimde benden vazgeçmeyen, her zaman varlıklarıyla güç olan, bitirmemi yazmakta birebir emekleri olan ve beni bugünlere getiren sevgili aileme ve teyzeme çok teşekkürler.

Eylül 2012

Gökçe Dil
(Makina Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET.....	xix
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ	1
1.1 Tarihçe ve Gelişim	1
1.2 Çalışmanın Amacı.....	1
1.3 Çalışmanın Kapsamı	2
2. YÜZEY İYİLEŞTİRME İŞLEMLERİ.....	5
2.1 Giriş.....	5
2.2 Karbürleme.....	5
2.2.1 Katı karbürleme.....	5
2.2.2 Gaz karbürleme	6
2.2.3 Vakum karbürleme.....	6
2.2.4 Sıvı karbürleme	6
2.3 Karbonitrürleme	6
2.3.1 Sıvı karbonitrürleme	7
2.4 Nitrürleme	7
2.4.1 Sıvı nitrürleme.....	7
2.4.2 Gaz nitrürleme.....	7
2.5 Borürleme.....	8
2.6 Yüzey kaplama yöntemleri	8
2.6.1 Elektrolitik kaplama	8
2.6.2 Akımsız kaplama.....	9
2.6.3 Sıcak daldırma.....	10
2.6.4 Isıl püskürtme.....	10
2.6.5 Difüzyon kaplaması	10
2.6.6 Giydirmeye	11
2.6.7 Kaynak kaplaması	11
2.6.8 Buhar yoğunlaştırma kaplaması.....	11
2.7 Mekanik Sertleştirme Yöntemleri	11
2.7.1 Bilya püskürtme	11
2.7.2 Yüzey haddeleme	11
2.7.3 Patlama ile Sertleştirme	12
2.8 Yüzeysel Isıtmayla Sertleştirme.....	12
2.8.1 İndüksiyonla sertleştirme	12
2.8.2 Alevle sertleştirme	13
2.8.3 Lazer ve elektron ışınlarıyla sertleştirme	14

3. AKIMSIZ NİKEL KAPLAMA.....	15
3.1 Giriş	15
3.2 Avantajları	15
3.3 Sınırlamaları	16
3.5 Banyo Bileşimi	18
3.5.1 Nikel kaynağı	19
3.5.2 İndirgeyiciler	20
3.5.2.1 Sodyum hipofosfit banyosu.....	21
3.5.2.2 Aminboron	21
3.5.2.3 Hidrazin	22
3.5.2.4 Sodyum Borohidrit	22
3.5.3 Kompleks oluşturmalar	23
3.5.4 Hızlandırıcılar.....	24
3.5.5 Dengeleyiciler	24
3.5.6 Enerji	24
3.5.7 Akımsız nikel kaplanacak numune	25
3.5.8 Banyo yükleme faktörü	25
3.6 Kaplamaya Etki Eden Faktörler	26
3.7 Uygulama Alanları	28
3.7.1 Otomotiv.....	28
3.7.2 Elektrik- Elektronik.....	28
3.7.3 Uçak Uzay.....	29
3.7.4 Petrol ve Gaz	29
4. AKIMSIZ NİKEL FOSFOR ÖZELLİKLERİ.....	31
4.1 Yapısı.....	31
4.2 Uniformluk	32
4.3 Yapışma.....	33
4.4 İç Gerilme.....	33
4.5 Mekanik Özellikler.....	34
4.6 Sertlik	34
4.7 Aşınma.....	36
4.8 Korozyon	36
4.9 Fiziksel Özellikler	37
5. AKIMSIZ NİKEL BOR ÖZELLİKLERİ.....	39
5.1 Yapısı.....	39
5.2 Fiziksel Özellikler	40
5.3 Mekanik Özellikler.....	41
5.3.1 Aşınma	41
5.3.2 Sertlik	42
5.3.3 Korozyon.....	42
6. AKIMSIZ DUBLEKS KAPLAMALAR.....	45
7. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	47
7.1 Numune Malzemesi.....	47
7.2 Ön İşlemler.....	47
7.2.1 Çeliğe uygulanan ön işlemler	48
7.3 Kaplama Prosesi	49
7.3.1 Ni-P banyosunun hazırlanması.....	49
7.3.2 Ni-B banyosu.....	50
7.3.2.1 Banyonun kurulumu	51
7.4 Deneysel İşlemler	53

7.4.1 Kalınlık ölçümü.....	53
7.4.2 Sertlik	53
7.4.3 Korozyon testleri.....	53
7.4.4 Aşınma	57
7.4.4.1 Adhezif aşınma.....	57
7.4.4.2 Abrazif aşınma	58
Düzlem üzeri top aşınma deney cihazı	58
7.4.5 XRD Analizi	60
8. DENEY SONUÇLARI VE İRDEMELER	61
8.1 Akımsız Kaplamaların Faz Analizlerinin İncelenmesi ve Kimyasal Bileşimlerinin Tespiti	61
8.2 Akımsız Kaplama Kalınlıklarının ve Yüzey Morfolojisinin İncelenmesi	63
8.3 Kaplama Sertliklerinin İncelenmesi	67
8.4 Kaplamaların Sürtünme ve Aşınma Özelliklerinin İncelenmesi.....	68
8.4.1 Sürtünme kuvvetlerinin ve sürtünme katsayısının tespit edilmesi.....	68
8.4.2 Aşınma deneyi sonrası aşınma yüzeylerin analizi	71
8.5 Kaplamaların Korozyon Dayanım Özelliklerinin İncelenmesi.....	78
8.5.1 Daldırma deneyleri.....	78
8.5.2 Polarizasyon deneyleri	80
9. GENEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA	85
10. KAYNAKÇA	89

KISALTMALAR

AN :	Akımsız Nikel
CVD :	Kimyasal Buhar Çökeltmesi
DEAB :	Dietilamin Bor
DMAB :	Dimetilamin Bor
EDA :	Etilen Diamin
E_{kor}:	Korozyon potansiyeli
HVN :	Vickers Sertlik Değeri
I_{kor}:	Korozyon akımı
Ni – B :	Nikel Bor
Ni – P :	Nikel Fosfor
Ni – P/Ni – B:	Nikel Fosfor-Bor Dupleks
PVD :	Fiziksel Buhar Çökeltmesi
XRD:	X Işını Difraksiyonu

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 4.1: Kaplama çeşitlerinin aşınma değerleri.	36
Çizelge 5.1: Sıcaklığın ve uygulanan kuvvetin spesifik aşınma oranına etkisi.	41
Çizelge 5.2: Ni-B ve Ni-P Kaplamaların Karşılaştırılması.....	43
Çizelge 8.1: Akımsız Kaplamaların Kimyasal Bileşimleri.....	61
Çizelge 8.2: Farklı Ni kaplamalarının kaplama kalınlıkları	66
Çizelge 8.3: Kaplama ve farklı sıcaklıklarda gerçekleştirilen ısıt işlemler sonrası kaplamaların Mikrosertlik değerleri	67
Çizelge 8.4: Aşınma deneyleri sonucu elde edilen ortalama sürtünme katsayıları	72
Çizelge 8.5: Al ₂ O ₃ top ile gerçekleştirilen aşınma deneyi sonucu elde edilen aşınma izlerinin değerleri	73
Çizelge 8.6: Aşınma Deneyi Sonucunda Oluşan Aşınma İzlerinin 500-1000 Büyütmede Taramalı Elektron Mikroskopunda Görünüşü	74
Çizelge 8.7: Al ₂ O ₃ top ile gerçekleştirilen aşınma deneyi sonucu aşınma izlerinde EDS yardımıyla tespit edilen Al (%) oranları	77
Çizelge 8.8: H ₂ SO ₄ çözeltisinde kütle kayıpları	79
Çizelge 8.9: HCl çözeltisinde kütle kayıpları	80
Çizelge 8.10: Polarizasyon deneyi sonucunda oluşan akım ve gerilim değerleri.....	82

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1 : Elektrolitik kaplama	9
Şekil 2.2 : Isıl Püskürtme Şeması.	10
Şekil 2.3 : İndüksiyonla Sertleştirme	13
Şekil 2.4 : Alevle Sertleştirme Prensibi	13
Şekil 3.1 : Sodyum hipofosfitin kimyasal yapısı	21
Şekil 3.2 : Dimetilamin boron	22
Şekil 3.3 : Sodyum borohidritin kimyasal yapısı.....	22
Şekil 3.4 : Dengeleyici derişiminin kaplamaya etkisi	25
Şekil 4.1 : Ni-P faz diyagramı	31
Şekil 4.2 : 25 µm kalınlığında uniform Ni-P kaplaması	32
Şekil 4.3 : Fosfor içeriğinin iç gerilmeye etkisi	33
Şekil 4.4 : Fosfor içeriğinin dayanım ve kırılmadaki birim uzama üzerine etkisi	34
Şekil 4.5 : Sıcaklığın sünekliğe etkisi	35
Şekil 4.6 : Isıl işlemin sertliğe etkisi.....	35
Şekil 5.1 : Ni-B faz diyagramı	40
Şekil 5.2 : Sıcaklığın sertliğe ve aşınma direncine etkisi	41
Şekil 7.1: Deney numuneleri	47
Şekil 7.2: Metkon zımpara ve taşlama makinası	49
Şekil 7.3: Nikel Bor banyosu.....	52
Şekil 7.4: Gömülmüş numune	53
Şekil 7.5: Metapress marka gömme makinası	54
Şekil 7.6: Shimadzu marka MikroVickers cihazı	54
Şekil 7.7: Korozyon banyoları (a) %5'lik H ₂ SO ₄ (b)%10'luk HCl.....	55
Şekil 7.8:Polarizasyon deney şeması.....	56
Şekil 7.9: Tribotechnic marka aşınma testi cihazı	59
Şekil 7.10:Perthen Stylo marka profilometre	59
Şekil 7.11: XRD ölçüm cihazı	60
Şekil 8.1: Akımsız Ni-B kaplamalarının farklı sıcaklıklarda gerçekleştirilen ısııl işlemler sonrası elde edilen XRD grafikleri	62
Şekil 8.2: Akımsız Ni-P kaplamalarının farklı sıcaklıklarda gerçekleştirilen ısııl işlemler sonrası elde edilen XRD grafikleri	62
Şekil 8.3: Akımsız Ni-P/Ni-B kaplamalarının farklı sıcaklıklarda gerçekleştirilen ısııl işlemler sonrası elde edilen XRD grafikleri	63
Şekil 8.4: Akımsız Ni-P kaplamasının ısııl işlem görmemiş (a) kesit görüntüsü, (b) yüzey morfolojisi, ısııl işlem sonucu (c) kesit resmi ve (d) yüzey morfolojisi	64
Şekil 8.5: Akımsız Ni-B kaplamasının ısııl işlem görmemiş (a) kesit görüntüsü, (b) yüzey morfolojisi, ısııl işlem sonucu (c) kesit resmi ve (d) yüzey morfolojisi	65

Şekil 8.6: Akımsız Ni-P/Ni-B kaplamasının ısıt işleml görmemiş (a) kesit görüntüsü, (b) yüzey morfolojisi, ısıt işleml sonucu (c) kesit resmi ve (d) yüzey morfolojisi.....	66
Şekil 8.7: Uniform kaplama kalınlığı	66
Şekil 8.8: Kaplama sertliklerinin tav sıcaklığı ile değışimi	67
Şekil 8.9: Çeliğın Al ₂ O ₃ top ile gerçekleştirilen aşınma deneyi sonucu elde edilen sürtünme katsayısı ve sürtünme kuvvetlerinin zamana bağı değışimi	69
Şekil 8.10: Isıt işleml görmüş Ni-P kaplamasının Al ₂ O ₃ top ile gerçekleştirilen aşınma deneyi sonucu elde edilen sürtünme katsayısı ve sürtünme kuvvetlerinin zamana bağı değışimi.....	69
Şekil 8.11: Ni-B kaplamasının Al ₂ O ₃ top ile gerçekleştirilen aşınma deneyi sonucu elde edilen sürtünme katsayısı ve sürtünme kuvvetlerinin zamana bağı değışimi (a) ısıt işleml görmemiş, (b) ısıt işleml görmüş	70
Şekil 8.12: Ni-P/Ni-B kaplamasının Al ₂ O ₃ top ile gerçekleştirilen aşınma deneyi sonucu elde edilen sürtünme katsayısı ve sürtünme kuvvetlerinin zamana bağı değışimi (a) ısıt işleml görmemiş, (b) ısıt işleml görmüş	71
Şekil 8.13: a) Kaplamasız, b)Ni-P, c)ısıt işleml görmemiş Ni-B, d) ısıt işleml görmüş Ni-B, e) ısıt işleml görmemiş Ni-P/Ni-B ısıt işleml görmemiş f) ısıt işleml görmüş Ni-P/Ni-B kaplamaların Aşınma Deneylerinde Karşı Malzeme Olarak Kullanılan Al ₂ O ₃ Toplardaki Etil Alkol	76
Şekil 8.14: H ₂ SO ₄ çözeltisinde kütle kayıp grafiğı	79
Şekil 8.15: HCl çözeltisindeki kütle kayıplarının grafiğı	80
Şekil 8.16: Polarizasyon deneyi sonrası ortaya çıkan Tafel eğrileri.....	81
Şekil 8.17: Ni-P kaplamalarının Polarizasyon deneyleri sonrası (a) yüzey kesidinin ve (b) yüzey morfolojisinin görünümleri	82
Şekil 8.18: Ni-B kaplamalarının Polarizasyon deneyleri sonrası (a) yüzey kesidinin ve (b) yüzey morfolojisinin görünümleri (x1500 ve x3000 büyütmede)	83
Şekil 8.19: Ni-P/Ni-B kaplamalarının polarizasyon deneyleri sonrası a) yüzey kesidinin ve b) yüzey morfolojisinin görünümleri	84

AKIMSIZ NİKEL FOSFOR/NİKEL BOR DUBLEKS KAPLAMALARIN KOROZYON VE AŞINMA DİRENÇLERİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Son 60 yılda ortaya çıkan akımsız kaplamalar, alışıldık elektrolitik kaplamalara alternatif oluşturmaktadır. Dışarıdan herhangi bir elektrik ihtiyacına gerek duymadan gerçekleşen otokatalitik akımsız kaplamalar, içeriğindeki bileşenlerin değişmesiyle sonuçta elde edilen özelliklerin de değişmesini sağlamaktadır. Yüksek sertlik, iyi korozyon ve aşınma dirençleri, yorulmaya etkileri gibi gelişen malzeme teknolojisinde önemli özelliklerin sağlanmasıyla akımsız kaplamalar günümüzde geleceği açık bir yüzey mühendisliği konusudur. Sağladığı üstün mekanik ve elektrokimyasal özelliklerin yanı sıra elektrolitik kaplamalara göre bir diğer avantajı da yüzey geometrisinden bağımsız kaplama yapılabilmesidir. Yarı kapalı geometriler, borular ve karmaşık yüzey şekillerinin kaplama kalınlıkları her yüzeyde aynı olmaktadır. Bunun yanında uygun ön işlemler kullanıldığında sadece metallere değil plastiklere, ametallere ve farklı malzeme çeşitlerine de uygulanabilmektedir. Uygulama alanları uçak-uzay teknolojisinden dekorasyona kadar geniş bir yelpazeye yayılmıştır.

En geniş kullanımlı olan akımsız kaplama çeşitleri Ni-P ve Ni-B kaplamalarıdır. Ni-P ticari şekilde yaygın kullanılsa da Ni-B üstün sertliğiyle krom kaplamaların alternatifi olarak gözükmektedir. Ni-B kaplamaların ticari bir bileşimi piyasada bulunmamasına rağmen malzeme mühendisliği alanında çok çeşitli indirgeyicilerle hazırlanan kaplama banyoları Ni-B kaplamaları her zaman göz önünde ve geliştirilmeye hazır tutmuştur. Her iki kaplamanın özellikleri alaşımlandırma yoluyla daha da iyileştirilebilir. Bunun yanında dubleks kaplama denilen iki farklı kaplama birbirinin üzerine de yapılabilir. Dubleks kaplama çok çeşitli şekillerde yapılabilir. İki farklı akımsız kaplama yöntemi birbirinin üstüne yapılabilirken farklı yüzdelik oranlarda yanı kaplama türü de üst üste kaplanabilir. Alternatif olarak püskürtmeli kaplama, akımsız kaplamanın üstüne yapılabilir. Olasılıkların çok olması, kaplamanın istenen özelliklerde olması ihtimalini daha da yükseltmektedir.

Bu çalışmada akımsız Ni-P, Ni-B ve dubleks hazırlanan Ni-P/Ni-B kaplamalar incelenmiştir. Üç kaplamanın ayrı ayrı ve karşılaştırılmalı olarak sertlik, aşınma ve korozyon dirençleri araştırılmıştır. Kaplamalar faz değişimleri için çeşitli sıcaklıklarda tavlansmıştır ve boş çelik üzerine gerçekleştirilen kaplamalarla tavlansmış ve tavlansmamış numuneler deneylerde karşılaştırılmıştır. Ni-B kaplama banyosu literatürde belirtilen özelliklerde hazırlanmış, Ni-P banyosu ise ticari bir firmadan satın alınmıştır.

Kaplama sonucunda korozyon deneyleri yapılmıştır. Kaplamaların korozyon dirençlerini tespit etmek amacıyla iki farklı deney uygulanmıştır. İlki asidik iki ayrı çözeltide (hacimce %10'luk HCl ve %5'lik H₂SO₄) numunelerin bekletilmesi, diğeri ise polarizasyon deneyleridir. Daldırma banyolarında 7 gün bekletilen numunelerin ağırlık kaybı üzerinden deney sonuçlanmıştır. Polarizasyon deneyinde ise iletilen akım miktarının değişimi korozyon direncini göstermektedir. İki deneyin sonucunda da çeliğe göre çok daha iyi koruma sağlayan kaplamalar kendi aralarında da mukayese edilmiştir.

Aşınma deneyleri düzlem üzeri alümina topla aşındırılarak gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerde önceden belirlenen parametrelerle sürtünme katsayıları ve aşınma tipleri incelenmiştir. Sonuçlar alümina topun aşınma yüzeyi, numunelerin üzerinde oluşan aşınma profilleri, EDS analizi ile sürtünme yüzeylerinin kimyasal analizi ve ortalama sürtünme katsayıları ile değerlendirilmiştir. Isıl işlemin etkileri yine aşınma deneylerinde de incelenmiş ve en iyi aşınma direncini gösteren kaplama çeşidi ve sıcaklık değeri bulunmuştur.

CORROSION AND WEAR RESISTANCE OF ELECTROLESS DUPLEX NI-P/NI-B COATINGS

SUMMARY

An alternative way to conventional electrolytic coatings, electroless coatings has been in the industry for nearly 60 years. Without the need of outer source of electricity, electroless coatings happen autocatalytical. The ingredients of coatings baths affect almost all of the resulting coating specialties. High hardness, good wear and corrosion resistance, high fatigue life makes this coating type very popular amongst developing material science as a new branch in the surface engineering. Another advantage of electroless coatings over electrolytic ones is ability to coat the surfaces independent of surface geometry. Semi-closed shapes, pipes and complex surfaces can be coated as equal thickness. Also providing suitable pretreatment, electroless coating can be applied not only metals but plastics, ametals and other kind of materials. Wide area of application spreads from space-aircraft technologies to decoration.

The most wide spread used electroless coatings are Ni-P and Ni-B types. Ni-P coatings are commercially used in the industry for its high corrosion resistance, shiny appereance and much more stable bath composition while Ni-B is preferred for its very high hardness values and due to this high hardness, its high wear resistance specialties. Even though there is no commercial coating bath of Ni-B, various types of reducing agents make it very popular to experiment at the material sciences area. Reducing agents let nickel ions to enter the reaction and insure the ions to becaome nickel element. These reducing agents create different types of baths and coating characteristics such as allowing different types of base material's coatings or different pH values for baths which provides particular magnetic and electromagnetic properties. Also different reducing agents' coating bath working temperatures are highly different, too. Because the Ni-B bath is quite meta-stable, there should be added some chemicals like complexing agents, stabilizers and speeding agents. Complexing agents can be various but mainly its purpose is to provide to keep the bath from decomposing and protects it from nickel's subsiding. Stabilizers also inhibit some homogenous reactions that causes the collapsing of the bath.

Both types of coatings can be varied with adding extra metals resulting development in some specifications. Another way to vary these coatings is making two coatings on top of the other which is called duplex coating. Different kinds of electroless coatings can be duplex, as well as same type with varied ingredients are also possible. Moreover, sprayed coating can be included in to duplex coatings. More possibilities mean that more improved and innovative coatings can be achieved. To generate a duplex coating, at first Ni-P coating bath is used to form the first layer. Then the coated base material is put inside a Ni-B bath for the second layer. The coating thicknesses are managed by time because it is possible to predict the coating speed beforehand if necessary experiments were conducted. Both of the layers' adhesion is good with each other and in addition, their thermal elongation coefficients are similar so that applying heat treatment brings no obvious problems. Using Ni-B on the upper layer gives high hardness and wear resistance and Ni-P at the lower layer obtains high corrosion protection. Also Ni-B protects Ni-P at the first rate thus giving more protection.

In this work, electroless Ni-P, Ni-B and duplex coatings of these are investigated and compared between each other and base steel material. Wear resistance, corrosion and hardness properties are studied with examining annealing at different temperatures for phase transformations. Plain steel was compared with annealed and as coated specimen. Ni-B coating bath was prepared according to previous studies and Ni-P was bought from a commercial brand. Coating thickness is approximately 20 μ m for single coating and 10+10 μ m for duplex coatings. Coating time was arranged according to these thicknesses.

Hardness values were obtained by microvickers. As before studies, very high hardness values can be achieved by electroless nickel coatings and the best result was Ni-B, then duplex coatings, Ni-P and lastly steel. After annealing, hardness values shows a peak at a certain temperature and when the coating is annealed higher values, then the hardness starts to decrease. The reason of this is while the coating is amorphous as it is, by annealing coatings they become crystalline. But after the peak temperature, the grain sizes get too big so the coatings' hardness get lower.

Corrosion experiments were held after coating process. Two type of corrosion analyses was carried out. First type of the experiment was putting specimens into 2 different acidic corrosion baths which are %10 HCl and %5 H₂SO₄. This experiment lasted 7 days and before and after weight loss was measured. Other type of experiment was polarization which showed corrosion resistance according to current passed through of the specimens. Both experiments' results showed that coatings provided high protection from corrosion as well as different types of coatings can be

compared to each other. To boot, both experiments support each other. The results showed that the highest corrosion protection is provided by Ni-P and duplex coatings. What is important at polarization experiment is potential difference between N-P and Ni-B at the duplex coatings should be more than 100mV because this difference gives galvanic protection from corrosion. In this study the difference is 130mV. In addition none of the coatings are worn through by corrosion. Ni-P coatings show uniform and planar progress besides at the Ni-B surfaces the progress is like pitting and vertical through coating.

Wear resistance experiments were done on “ball on plate” system. By this experiments, friction coefficient and forces were obtained and both alumina ball’s and specimen’s surfaces scratch geometry was analyzed to identify wear mechanism and wear resistance. When the scratches of alumina ball investigated at optical microscope it is seen that the smallest wear tracks are on the surface of duplex coatings without heat treatments. Also the same specimen has the highest wear resistance. Although the expected specimen should be heated duplex coating, the reason of this difference is most probably taking not enough track area for experiment. When the number of examined area is increased it is possible to see wear resistance gets higher. This conclusion is supported by heated duplex coating’s friction coefficient has is the least one. Ni-P coating surfaces show that there is abrasive wear because of its lower hardness. On the other hand Ni-B and duplex coating surfaces shows there is slicking traces.

1. GİRİŞ

1.1 Tarihçe ve Gelişim

Akımsız kaplama terimi Brenner tarafından ortaya atılmıştır. Buradaki olay kimyasal indirgeyiciyle bir metal bileşiğinin bir malzeme üzerine kaplanmasıdır. 1845'te Wurtz, nikel tuzu çözeltilerinden, hipofosfit ile indirgeme yaparak metalik nikeli ayırdı. Bundan sonra çok defa bu reaksiyonla uğraşıldı, ama çoğunlukla bu tür reaksiyonlarda sadece toz şeklinde çökelekler elde edildi. Breteau ve Roux gibi araştırmacılar aynı kaplamaları elde ettiler. Bu kaplamalar, nikel tuzu çözeltisine indirgeyici ilavesinden sonra istenen şekilde olan yüzeylerde kendiliğinden oluştu. İlk defa Brenner ve Ridder 1946 yılında, iki yılı aşan bir çalışmadan sonra hiposfit bazlı akımsız bir nikel kaplama metodunu hayata geçirdiler. Bu yöntem belirli yüzeylerin katalitik aktivasyonuna göre istenilen nikel kaplamasını mümkün kılıyordu. Daha sonraki zamanlarda bir ok metot geliştirildi. 1952 yılında Kanigen metodu sürekli gelişim gösterdi, birçok alanda kullanılmaya başladı. Bir diğer hiposfit yöntemi 1968 yılında Ourni COAT yöntemi olarak kullanılan yöntemdir. Hipofosfit yönteminin gelişmesiyle akımsız nikel kaplaması için uygun indirgeyiciler arandı. 1965'te "Borhidrür yöntemleri" ismiyle anılan yöntem geliştirildi. 1967'den itibaren çok fazla gelişen ve artan kullanım alanlarıyla büyüyen bir pazar alanı oluştu. Nibodür yöntemi Almanya'da birçok tesiste nikel kaplamasında kullanılmaktadır [1].

1.2 Çalışmanın Amacı

Akımsız kaplama türleri arasında en geniş kullanım alanına sahip olan Ni-P ve Ni-B kaplamaları ve bu ikisinin üst üste kaplandığı dubleks yöntemi bu çalışmada incelenmiştir. Literatürde pek çok örneği bulunan çelik (St 37) taban malzeme olarak kullanılmıştır.

Kaplamaların mekanik ve elektrokimyasal özelliklerinin incelenmesi bu çalışmanın esas amacıdır. Ni-P, Ni-B ve Ni-P/Ni-B dubleks kaplamanın aşınma özellikleri, korozyon dayanımları ve mikro sertlikleri belirlenen banyo birleşimleri

araştırılmıştır. Ardından, kaplamaların çeşitli ısıtım işlem sıcaklıklarında tavlansarak mekanik özelliklerin nasıl değıştiğı ve dubleks kaplamanın tek katlı kaplamaya göre avantajları incelenmiştir.

1.3 Çalışmanın Kapsamı

Akimsız Ni-B, Ni-P ve Ni-P/Ni-B kaplamaların çok büyük kısmı çelik taban üzerine uygulanmaktadır. Bu kaplamanın sağladığı en büyük yarar korozyon dayanımının gelişmesi, yüksek sertlik seviyelerine çıkılması, aşınma direncinin artırılması başta olmak üzere çeşitli mekanik ve magnetik özelliklerinin değıştirilebilmesidir. Çok geniş uygulama alanı bulunan bu kaplama yönteminde çelik taban üzerine kaplamalar özellikle otomotiv sanayinde, raylarda, uçak-uzay teknolojilerinde kullanılmaktadır.

Bu çalışmanın kapsamında St37 çeliğı üzerine yapılan kaplamalar ilk önce altı farklı sıcaklıkta ısıtım işleme tabi tutulmuştur. Kaplanmış haliyle amorf yapıda olan akimsız nikel kaplamalar, farklı sıcaklıklarda tavlandıktan sonra kristalize olmaya başlar. Bu şekilde farklı sıcaklıklarda tavlansan kaplamaların mekanik özellikleri birbiriyle karşılaştırılmıştır.

Kaplamaların ilk önce sertlikleri incelenmiştir. Sertlikler mikrovickers cihazında ölçülmüş ve çeşitli tav sıcaklıklarında sertliğın nasıl değıştiğı incelenmiştir.

Aşınma deneyleri düzlem üzeri alümina topla aşındırılarak gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerde önceden belirlenen parametrelerle sürtünme katsayıları ve aşınma tipleri incelenmiştir. Sonuçlar alümina topun aşınma yüzeyi, numunelerin üzerinde oluşan aşınma profilleri ve ortalama sürtünme katsayıları ile değerlendirilmiştir. Isıtım işlemin etkileri yine aşınma deneylerinde de incelenmiş ve en iyi aşınma direncini gösteren kaplama çeşidi ve sıcaklık değeri bulunmuştur.

Korozyon deneyleri ise iki farklı yöntemle incelenmiştir. İlki asidik banyolara daldırarak yapılan ağırlık kaybı hesabına dayanan korozyon testi, ikincisi ise numunelerin iletkenliğinin sınanması anlamına gelen polarizasyon deneyleridir. Daldırma testleri de iki farklı çözeltide yapılmıştır: HCl ve H₂SO₄. Daldırma deneyleri sonucunda ilk ağırlıklarına göre numunelerin ne hızla korozyona uğradığı, özellikle dubleks katmanlarda kaplamanın etkisinin ne olduğu karşılaştırılmıştır. Polarizasyon deneylerinde ise Tafel eğrileri çıkartılarak numuneler birbiriyle karşılaştırılmış ve hangi kaplamanın özellikle korozyona daha dayanıklı olduğu bulunmuştur.

XRD incelemesiyle de kaplamaların içyapıları incelenmiş, tavlama sıcaklıklarında oluşan fazlar belirlenmiş ve bu fazların mekanik özelliklere etkisi tartışılmıştır.

2. YÜZEY İYİLEŞTİRME İŞLEMLERİ

2.1 Giriş

Yüzey sertleştirmede ana amaç aşınma ve yorulma dayanımlarını yükseltmektir. Nitrüleme gibi bazı uygulamalar da malzemenin korozyon dayanımını artırabilir. Aşınmayı azaltıcı önlemlerin başında sertleştirme gelir. Örneğin çelikler için çoğunlukla $RC > 60$ mertebesinde olmalıdır. Ancak parçanın tümü, yani kütsel sertliği bu düzeyde olursa gevrek kırılma tehlikesi ortaya çıkar. Dolayısıyla yalnız sürtünme yüzeylerinin yeterli kalınlıkta bir tabaka olarak böyle aşırı sertleştirilmesi yoluna gidilir [2].

2.2 Karbürleme

%0,10-0,25 C'lu alaşımlı veya alaşımsız çeliklerin yüzeyine yüksek sıcaklıkta ostenit fazında yapılan karbon yayındırma işlemidir. Böylece yüzeydeki karbon oranı %0,8-1,2 düzeyine yükseltilir [2].

2.2.1 Katı karbürleme

İş parçaları odun kömürü ve %10-20 karbonat ($BaCO_3$, Na_2CO_3) karışımına gömülerek kapaklı çelik kutular içinde fırında ısıtılır. Kömür tükenene kadar kömürden elde edilen karbon ortamdan malzemeye verilmiş olur ve bu karbondioksit tekrar reaksiyona girer.

Sıcaklık çoğunlukla $815-950^{\circ}C$ arasında seçilir. Alt sınıra ökteoit kabuk elde etmek için gidilebilir. Bu yöntemde ortamın karbon potansiyelini değiştirmek güçtür. Üst sınıra yönelme ise işlemi hızlandırır. Bu işlemin sakıncası ökteoid üstü çelik yapısı ile kutuların aşırı oksitlenmesi, işlem gören parçaların gevşemesi (tane büyümesi), parçada çarpılma olması ihtimalinin ortaya çıkmasıdır. Bunun için kutular alüminyum kaplı çelik veya Cr-Ni çeliklerinden yapılarak bu sorunların önüne geçilebilir. Yeni gelişmelerde $1050^{\circ}C$ 'a kadar taneleri irileşmeyen çelikler ince taneli üretilmektedir [2].

Kullanılacak malzemenin kömüre gömülmeden önce yüzeyinin temizlenmesi gerekir (yağ, tufa ve kir). Yüzeyler istenen kaplama şekli için bakır veya başka nötr maddelerle örtülebilir.

Bu yöntemle 3 mm karbürleme derinliğine (kabuk kalınlığına) ulaşılabilirdiği gözlemlenmiştir [2].

2.2.2 Gaz karbürleme

Karbon verici olarak karbon hidrojenlerinden yararlanılır. Sızdırmaz şekilde yapılmış fırında, dışarıda hazırlanan taşıyıcı gaz + %5-10 metan (CH_4) veya propan (C_3H_8) karışımı gönderilir. Taşıyıcı gaz eksik yanma ürünü olarak CO , H_2 , H_2O , CO_2 , N_2 gibi bileşenlerden oluşur. Seyreltme yapılmadığı takdirde fırın içerisinde ve malzeme üzerinde aşırı karbon is olarak birikir ve karbürleme işleminin homojenliği bozulur. Aynı zamanda fırının metal parçalarına ve refrakterlerine zararlıdır.

Sıcaklık 900-980°C arasında genellikle 925°C seçilir. Bu ısı yüksekliği hızlı bir karbürlemeye rağmen fırının donanımına zarar vermeyen bir ısı yüksekliğidir, aynı zamanda malzemenin kendisine zarar vermeyen sıcaklıktır [2].

2.2.3 Vakum karbürleme

Yüksek sıcaklık (980–1050°C) ve vakumda yapılan gaz karbürlemedir. 0,1 torr vakumda parçalar ısıtılır. Bu sırada parçanın yüzeyi de temizlenmiş olur. Basınç 300 torr'a çıkacak şekilde metan veya propan veya doğal gaz verilir. Zorunlu olmamak koşulu ile N_2 kullanılabilir [2].

2.2.4 Sıvı karbürleme

Erimiş tuz banyoları içinde gerçekleştirilir. Isı iletimi daha da iyi olduğu için istenen sıcaklığa erişme ve buna bağlı olarak işlem süresi gaz karbürlemeden daha kısadır [2].

2.3 Karbonitrürleme

Bu işlemle çeliğe karbürlemeden daha az karbon (~%0,60-0,70), bununla birlikte önemli miktarda azot verilir (~%0,20-0,30). Burada oluşan nitrürlerin de katkısıyla su vermeden sonra ege sertliğindeki kabuk genellikle karbürlemeden daha düşük sıcaklık ve daha kısa sürede elde edilir [2].

2.3.1 Sıvı karbonitrürleme

Sıvı nitrürlemenin düşük ısıda yapılanına benzer, ancak siyanat oranı artırılmak suretiyle azot miktarı yükseltilir. %30 oranında siyanür içeren (miktar artırılabilir) taze banyo 700°C’de 12 saat yaşlandırılır. Karbon da 12 saat yaşlandırılır. Bundan sonra asıl işlem 760-850°C’de gerçekleştirilir. Düşük sıcaklıklarda karbon miktarı azalır [2].

2.4 Nitrürleme

400-570°C arasında çeliklere yalnız azot veya az miktarda karbonla yayındırma işlemidir. Gevrek olan demir nitrürler azota kimyasal ilgisi fazla olan ince nitrür oluşturan elementlerle alaşımlandırma yapılır. Bunların sıralandırmaları; Al, Cr, Mo, V’dir.

Sürtünmeli çalışan paslanmaz çeliklerin korozyona karşı dayanıklılığında ödün verilerek dökme demir ve uygun takım çelikleri ile aşınma ve yorulma dayanımını artırmak için nitrürleme yapılır. Karbürlemeye göre, nitrürleme malzemeye sertlik kazandırır (1000-1200 VS); ancak daha ince bir kabuk oluşmasını sağlar (<1 mm). Çelikleri nitrürlemeden önce göbek çekirdek dayanımını artırmak için ıslah etmek zorunludur.

Nitrürlemede, düşük ısıda işlem yapıldığı ve su verme işlemine gerek olmadığından iş parçalarında çarpılma karbürlemedeki kadar olmaz. Nitrürleme parçalar son boyutunda işlendikten sonra yapılabilir [2].

2.4.1 Sıvı nitrürleme

Burada işlem sıvı karbonitrürlemedekine benzer, bu işlem en az %30 NaCN içeren banyolarda gerçekleştirilir. Çeliğin karbon alması, 500-570°C’de +FeC alanının da bulunması nedeniyle yüksek miktarda siyanür oranı kullanılmadıkça önemsizdir. İşlemden önce ~12 saat süreyle 500-600°C’de yaşlandırma yapılır [2].

2.4.2 Gaz nitrürleme

500-570°C sıcaklıkta çeliğin yüzeyinde amonyak gazı reaksiyonuna göre ayrışmasıyla gerçekleştirilir [2].

2.5 Borürleme

İş parçaları toz halinde B_4C (bor karbür) aktivatör (KBF_4) karışımı içinde 800-1050°C, ortalama 900°C’de yaklaşık 5 saat bekletilir. Demir alaşımlarında meydana gelen demir borürler (FB, Fe_2B) nitrürlemeden daha yüksek sertliklere erişebilir (1700- 2000 VS). Elde edilen tabaka ince (0,1 mm) olmasına rağmen çok üstün aşınma dayanımına sahip olurlar [2].

2.6 Yüzey kaplama yöntemleri

Yüzey kaplama, ana malzemeden bağımsız ve iş parçası yüzeyine yeterli kuvvetle bağlanan, yani bileşimi tümüyle farklı veya ana malzemenin bir bölümü olarak bileşimi büyük ölçüde (%10’lar mertebesinde) değişmiş bir tabaka oluşmaktadır

Kaplamalar esas olarak şu amaçlarla yapılmaktadır:

- Özellikle çelik ve dökme demirlerin korozyona karşı dayanıklılığını artırmak
- Elektriksel özellikleri iletkenlik ve yalıtkanlığı geliştirmek
- Işığı yansıtma veya emme gibi optik özellikleri geliştirmek
- Sürtünme ve aşınma özelliklerini geliştirmek
- Dekoratif olarak yani görünüm bakımından iyileştirme sağlamak [2].

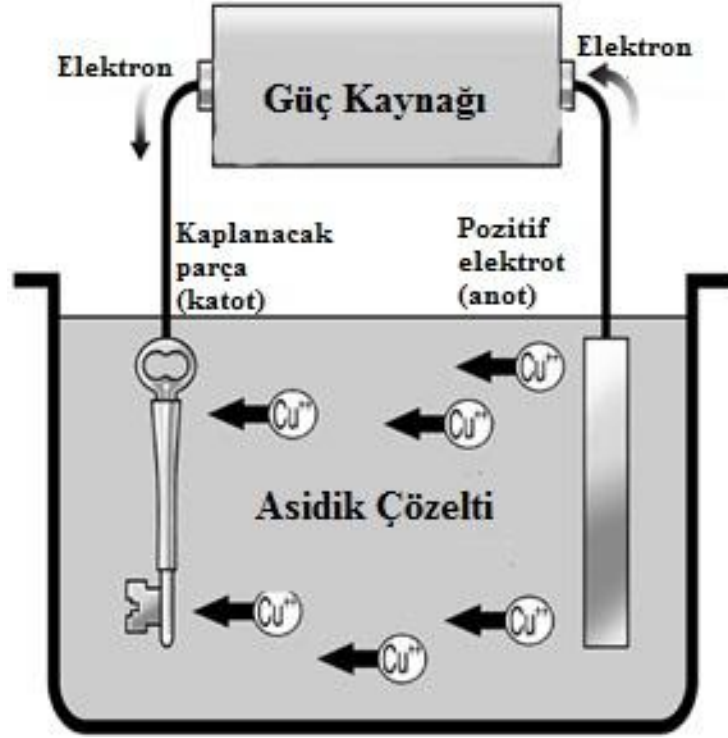
2.6.1 Elektrolitik kaplama

Bu kaplamada elektroliz olayı kullanılır. Uygun tuzların çözeltileri elektrolitik olarak kaplama metaline uygulanmasıyla yapılır.

Şekil 2.1’de gözüktüğü gibi M^+ katoda bağlı iş parçasına metal iyonları giderek parçanın yüzeyini kaplar. Kaplama metali olan katot aynı zamanda eksilen iyonları tamamlar. Bazı durumlarda çözünmeyen farklı metal de anot olarak kullanılabilir. Böyle durumlarda sürekli elektrolit eklenmelidir. Doğru akım devresinin tamamlaması için iş parçasının iletken olması gereklidir. Kaplama kalınlığı banyo bileşimi, banyo sıcaklığı, pH derecesi gibi etkenlere bağlıdır. Bu etkenlere parça yüzeyi ve süre de dahildir [2].

Elektrolitik yolla pek çok metal (Zn, Cd, Sn, Cu, Ni, Cr, Pb, Ag, Au vb.) ile bazı alaşımlar (pirinç, bronz, Sn-Bp, Au-Cu vb.) parçaların üzerine kaplanır. Hidrojene göre elektro-negatif metaller (örneğin Al) katotda kuvvetli hidrojen ayrışmasından dolayı sulu çözelti ile kaplanamaz. Böyle durumlarda erimiş tuzların karışımı

elektrolit olarak kullanılır. Bu yöntem güç olduğu için diğer yöntemler tercih nedenidir (püskürtme, sıcak daldırma vb.) [2].



Şekil 2.1 : Elektrolitik kaplama [3].

Kaplama yüzeyinin iyi bağlanması, parçanın her yerinde kalınlığın aynı olması ve gözeneksiz olması, alaşım kaplaması gibi istekler çok karmaşık banyo bileşimlerinin kullanılmasını gerektirebilir (siyanür bileşimleri gibi). Böyle durumlarda kaplama hızı düşer. İnce taneli, parlak kaplama elde etmek için organik katkılardan faydalanılır.

Dekoratif parlak kaplamada yüzeye bakır-nikel veya yalnız nikel kaplanır. Bunlar korozyona dayanıklılığı ve görüntüyü iyileştirir. İş parçasının aşınma dayanımını artırmak için parçanın yüzeyine doğrudan sert krom kaplama uygulanır [2].

2.6.2 Akımsız kaplama

Bazı metalleri az asal olan metal üzerine uygun çözeltilerle akım kaynağı kullanmadan kaplamak mümkündür. Çelik üzerine Al veya Sn; alüminyum üzerine Zn gibi. Karmaşık çözeltilerle asallık sırası değişebilir. Buna örnek olarak bakır üzerine su kaplanabilir [2].

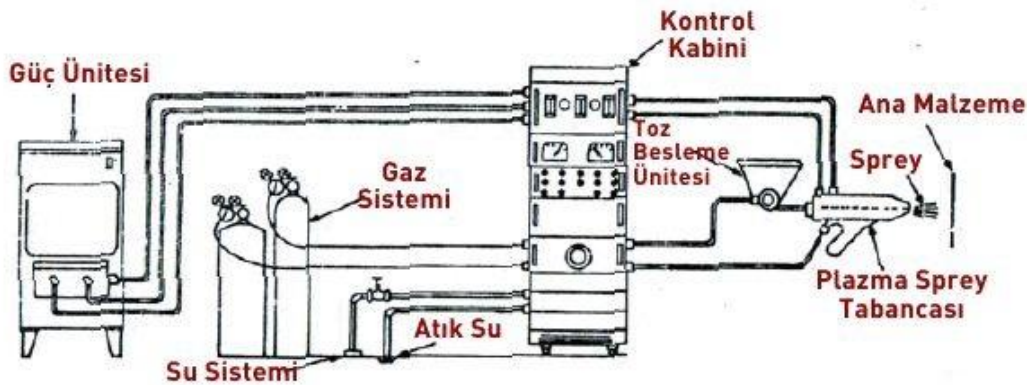
2.6.3 Sıcak daldırma

Çelik parçalar erimiş metal banyosuna (Zn, Sn, Al, Pb) daldırılıp soğumaya bırakılır. Bazen dökme demir de aynı işleme tabi tutulur. Bu yöntem daha kalın, üniformluğu daha az yöntemdir. Ancak elektrolitik kaplamaya göre çok hızlıdır. Tabakanın dışında saf kaplama metali içinde metaller arası bileşikler bulunur [2].

2.6.4 Isıl püskürtme

İş parçasının yüzeyine eritilmiş, sürekli tel çubuk veya toz halindeki malzemenin tabanca denen bir donanım yardımıyla püskürtülme işlemidir. Al, Zn, Sn, Cu, Pb, pirinç gibi metaller veya seramik (oksit, silikat karbür gibi) kaplama malzemesi olabilir. Eritme, elektrik arkı yardımıyla gerçekleştirilir. Yüksek sıcaklıkta eriyen malzemeler için plazma arkı uygulanır.

Mekanik kenetlenmenin tam verimli olabilmesi için iş parçasını yüzeyi kum vs püskürtülmek suretiyle pürüzlendirilmelidir [2].



Şekil 2.2 : Isıl Püskürtme Şeması [4].

2.6.5 Difüzyon kaplaması

Çinko, alüminyum veya krom gibi metallerin saf veya bileşik halindeki tarzları içine çelik iş parçasının gömülmesi ile oluşur. Uygun bir sıcaklıkta nötr veya redükleyici atmosfer altında ısıtılır. Kaplama malzemeleri doğrudan veya bir gaz fazından geçerek iş parçasını yüzeyine yayılarak iş parçasını alaşımlandırır. Böylece yeni alaşım tabakası içeriden dışarıya doğru %50 oranında artan Al, Zn veya Cr içerir [2].

2.6.6 Giydirme

İş parçasının malzemesiyle kaplama malzemesinin birlikte haddelenmesi ile elde edilir. Buna örnek karbon çeliğinin paslanmaz çelikle, yüksek dayanımlı alüminyum alaşımının saf alüminyum giydirilerek korozyona karşı mukavemeti sağlanır [2].

2.6.7 Kaynak kaplaması

Gaz veya ark kaynağı yöntemiyle iş parçası yüzeyine dolgu yapılmak suretiyle oluşur. Bu yöntemle elde edilen sert ve korozyona dayanıklı tabaka 1,5 mm'nin altına inemez [2].

2.6.8 Buhar yoğunlaştırma kaplaması

Kaplama malzemesi buhar halindeyken iş parçasının üzerine yoğunlaştırılır. Çok çeşitli metallerden olduğu (Al, Cu, Ti, Mo, W, V) gibi; oksit, karbür, nitrür, silür gibi seramik bileşikler de kaplama malzemesi olarak kullanılırlar [2].

2.7 Mekanik Sertleştirme Yöntemleri

Yüzeyde plastik (kalıcı) şekil değişimi meydana getirerek, buna bağlı olarak sertleşme (pekleşme) ve basınç iç gerilmeleri yaratılması ilkesine dayanılması başlıca yöntemdir [2].

2.7.1 Bilya püskürtme

0.1-5 mm çaplı çelik veya dökme demir bilya basınçlı hava ile parçanın yüzeyine püskürtülerek yapılır. 1 mm kalınlığa kadar bir tabaka plastik şekil değiştirebilir [2].

2.7.2 Yüzey haddeleme

Yüzey haddeleme işlemi uygulayarak yüzeyde plastik şekil değişimi buna bağlı olarak da yüzeyde basma artık gerilmeleri oluşturulması ile parçanın yüzeyinin sertleştirilmesi işlemidir [2].

2.7.3 Patlama ile Sertleştirme

Parça yüzeyine yayılan patlayıcının tutuşturulmasıyla 2-3 sn'de 350.000 atü'ye ulaşan bir basınç dalgası etki eder. Böylece parçanın boyutlarında önemli bir değişiklik olmadan çok büyük sertleşmeler elde edilir [2].

2.8 Yüzeysel Isıtmayla Sertleştirme

İş parçasına yoğun, yani birim zamanda içeri doğru iletilenden daha fazla ısı vererek yüzeyde bir ısı yığılması yaratılabilir. Böylece kısa sürede ostenit alanına ısınan belli kalınlıktaki bir tabaka hızlı soğutma sonucu martenzite dönüşür.

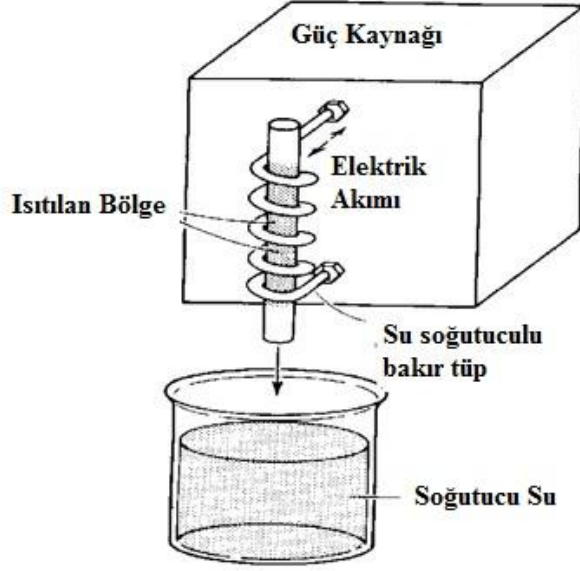
Bu tür işlemler bileşimi değiştirilmeden suverme yoluyla yeterince sertleşebilen, çeliklere ve dökme demirlere uygulanır. Örneğin; %0,35-%0,6 C içeren alaşımsız veya alaşımlı ıslah çelikleri ile martenzitik paslanmaz çeliklerde elde edilen sertlik karbon miktarına göre 50–64HRC arasında değişir. Kır, temper ve sfero dökme demirlerde 45–50HRC arası sertliğe ulaşır. Isıtma süresinin kısalığından dolayı ostenitleme sıcaklığı fırında ısıtmaya göre alaşımsız çeliklerde 25°C, alaşımlılarda 50°C–100°C daha yüksek seçilir.

Ostenitlemeyi kolaylaştırmak bakımından en uygun başlangıç içyapısı temperlenmiş martenzittir. Yüzeysel ısıtma çok küçük parçalar dışında ancak bölge bölge yapılabilir. Bu arada sertleşmesi istenmeyen yerleri işlem dışı bırakmak mümkündür [2].

2.8.1 İndüksiyonla sertleştirme

Değişken manyetik alan içerisinde bulunan bir iletken parçada elektrik akımı indüklenir. Şekil 2.3'te görüldüğü gibi parça elektrik direncinden ötürü ısınır. Frekans yükseldikçe söz konusu akım parçanın yüzeyine yaklaşır. Böylece malzemeye bağlı olmayan frekansı değiştirerek ve yeterli güç vererek bir parçanın tüm kesitte veya sadece yüzeysel olarak ısıtılması mümkündür [2].

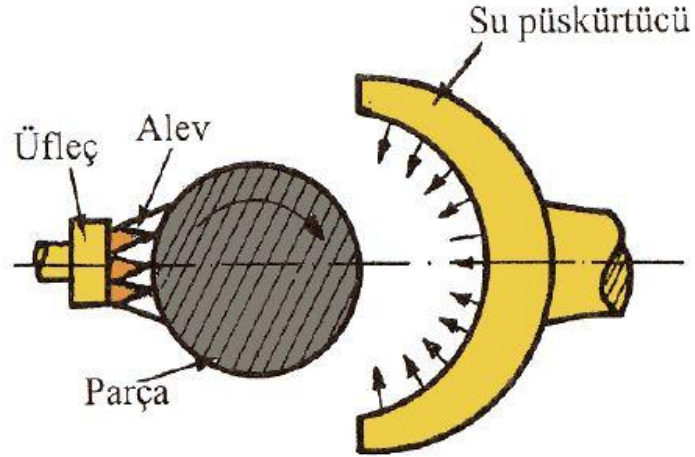
Frekans seçimi kabuk kalınlığı yanında ısıtma verimi bakımından da önemlidir. İnce parçaları düşük frekansla ısıtma verimli olmaz. Sertleştirilen parçalar ikinci düşük güçlü bir bobinle veya fırında temperlenebilir. İndüksiyonla sertleştirme otomatik kontrole elverişli bir yöntemdir [2].



Şekil 2.3 : İndüksiyonla Sertleştirme [5].

2.8.2 Alevle sertleştirme

Alevle sertleştirmenin, indüksiyonla sertleştirmeden önemli farkı ısıtmanın yüksek, güçlü yakıcı (oksijen, hava) yanıcı gaz (asetilen, propan doğalgaz, vb) üfleçleriyle yapılmasıdır. Aşağıdaki Şekil 2.4.'te alevle sertleştirmenin genel prensibi gösterilmiştir [2].



Şekil 2.4 : Alevle Sertleştirme Prensibi [6].

Isıtma süresi genellikle 10-60sn, kabuk kalınlığı 1-6 mm arasında değişir.(1mmden ince kabuklar için elverişli değildir.) Yatırım maliyeti indüksiyonla sertleştirmeye göre çok düşüktür.

2.8.3 Lazer ve elektron ışınlarıyla sertleştirme

Lazer ve elektron ışınlarıyla elde edilebilen ısı yoğunluğu indüksiyonun da çok üstündedir. Dolayısıyla çok küçük bölgelerde yüzey sertleştirilmesi yapılabilir. Aynı nedenle sıcaklık gradyanı da çok dikleşir. Böylece küçük parçalarda bile “kendiliğinden su verme” yani ısınmamış bölgelerin çok hızlı ısı çekme olayı meydana çıkar. Böylece suda veya yağda su verme işlemine gerek kalmaz [2].

3. AKIMSIZ NİKEL KAPLAMA

3.1 Giriş

Akımsız nikel kaplamalar bu çalışma boyunca Ni-P kaplama, Ni-B kaplama ve çift katmanlı (dublex) Ni-P/Ni-B kaplamalar olarak ayrıca ele alınacaktır. Fakat öncelikle akımsız nikel kaplamaların genel özellikleri incelenmelidir.

Akımsız nikel kaplamaların özellikleri elektrolizle kaplamalardan oldukça farklıdır. Bunun sebeplerinden biri kaplama mekanizmasının farklı oluşu, diğeri de fosfor veya borun kaplamada bulunmasıdır.

Ni-P veya Ni-B kaplamaların işlevleri banyonun bileşimine ve kaplamanın durumuna bağlıdır. Özellikle süneklik, iç gerilmeler gibi yapıya bağlı özellikler, elastiklik modülü veya yoğunluk gibi yapısal özelliklerden daha değişkendir. Ayrıca porozite ve korozyon gibi bazı özellikler sadece kaplamaya değil ayrıca ana malzemeye ve ön işleme de bağlıdır.

Özellikleri belirlemede bazı önemli noktalar şunlardır:

- Akımsız nikel kaplamaların özellikleri kaplama koşullarına, atomik yapıya ve mikro yapıya bağlıdır.
- Akımsız nikel kaplamaların özellik sayısı oldukça fazladır; ısıtıl işleminden sonra daha da fazlalaşır.
- Kaplama sonucu oluşan yapı aslında ana malzemeden ve kaplamadan oluşan kompozit bir yapıdır. Kaplamaya adanan pek çok özellik aslında ana malzeme ve kaplamanın bileşiminden oluşur [7].

3.2 Avantajları

Akımsız nikel kaplamaların avantajları genellikle diğerkaplama yöntemlerinin en iyi özelliklerinin bir arada olmasından kaynaklanmaktadır. Bu avantajlar şöyle sıralanabilir:

- Parçanın şekil ve boyutlarından etkilenmeksizin her yerde eşit kalınlıkta kaplama yapılabilmesi
- İstenilen kalınlıkların kontrol edilebilmesi

- Kaplama sertliğinin artırılabilmesi
- Lehimlenebilirlik
- Yağlayıcılık
- İyi manyetik özellikler
- Yüksek korozyon ve aşınma dirençleri
- Yüksek elektrik direnci
- Düşük sıcaklıkta uygulamanın malzemeye zarar vermemesi
- Ucuz işçilik maliyeti
- Pek çok malzeme çeşidine kaplama yapılabilme imkanı

3.3 Sınırlamaları

Akımsız nikel kaplamaların üstün özelliklerinin yanı sıra bazı sınırlamaları da bulunmaktadır. Bunlar;

- Kullanılan kimyasalların yüksek maliyetleri
- Gevreklik
- Yavaş kaplanma hızları
- Düşük kaynak kabiliyeti
- Bazı malzemelerin ön işlemlerinin uzun olması

3.4 Mekanik Özellikler

3.4.1 Korozyon dayanımı

Akımsız nikel kaplamalar en başından beri çok kullanılan metal yüzeylerde aşınma dayanımının yanında korozyon dayanımını da artırmak amacıyla kullanılmıştır. Korozyon dayanımı düşük kaplama porozitesi ve nikelin pek çok sıvıya ve atmosferik duruma olan dayanımıyla sağlanır. Akımsız nikel metali plastikleştiricilerden, solventlerden, yağlardan, glikolden ve gazlardan korur. Paslanmaz çelik yerine sıradan çelik üstüne akımsız nikel kaplamasıyla belirgin bir mali tasarruf sağlanabilir. Akımsız nikelle kaplanmış paslanmaz çeliklerde de klor iyonlarıyla oluşabilecek çukurlaşma engellenir [8].

Akımsız nikelin korozyon dayanımını etkileyen en önemli faktörler şunlardır:

- Parçanın bileşimi, yapısı ve yüzey pürüzlülüğü

- Parçanın yüzeyinin temiz ve üniform olması için yapılan ön işlemler
- Korozi ortamda kalış süresine ve yoğunluğuna göre yeterli miktarda kaplama kalınlığı
- Kaplamanın özellikleri (bileşimi, porozitesi, iç gerilmeleri)
- Kaplama sonrası pasifleştirme ve tavlama işlemleri
- Korozi ortamın saldırganlığı

Akımsız nikel kaplamaların akımlı kaplamalara göre daha az poroziteleri ve daha üniform kalınlıkları olduğu için korozyon dayanımları da daha yüksektir. Akımsız kaplamanın korozyon dayanımının iyi olması için kaplama öncesi işlemlerinin ve kaplama şartlarının iyi yapışmayı sağlaması ve devamlılığının olması şarttır [8].

3.4.2 Aşınma dayanımı

Akımsız nikel kaplamaların kullanılma sebeplerinden biri de aşınma dayanımının artırılmasıdır. Aşınma, birbirine değen yüzeylerin zamanla mekanik parçalanmasıdır.

Yağlama yüzeyler arasında sürtünme ve aşınmayı engeller. Akımsız nikel oksitler, karbidler ve elmas gibi sert parçacıklar eklenirse bunlar birleşme alanının önceliğini oluştururlar. Bu parçacıklar çok sert olduğu için adhesiv aşınmayı azaltacaklardır. Fakat eğer bu parçalar matriksten çıkarılırlarsa abrasiv aşınmaya sebep olabilir.

Abrasiv aşınma özellikleri akımsız kaplamada ısı işlemleriyle geliştirilebilir. Fakat bu işlemle korozyon dayanımı düşebilir. Genellikle ince akımsız nikel kaplamalar sadece hafif aşınma durumlarında etkilidir. Aşırı veya ani yüklemelerden kaçınılmalıdır. Aşınma performansının verimi ancak iyi yapışmayla ortaya çıkar. Alüminyum gibi yumuşak malzeme üstüne sert kaplama kolayca bozulup kırılabilir. Bu sebeple ana malzemenin sert olması daha iyi bir sonuç verir.

Akımsız nikelin sürtünme katsayısı elektrolizle kaplanan kromdan daha yüksektir.

29 µm kalınlığında %6'lık fosfor üstüne 40 µm kalınlığında daha tok %12'lik Ni-P dubleks kaplama deneylerde hidrolik parçaları aşırı aşınmaya ve korozyona karşı korumuştur [8].

Aşınma ve sürtünme uygulamaları akımsız kaplamada şöyle özetlenebilir:

- Kaplamalar 800 HV sertliğine erişilinceye kadar ısı işleme tabi tutulmalıdır.

- Dönen parçalardaki kaplamaların yüzey sertliği karşı yüzeyden daha fazla olmalıdır.
- Fosfor oranı %10'dan yüksek olmalıdır.
- Karşılıklı değen yüzeyler pürüzsüz ve iyi yağlanmış olmalıdır.
- Akımsız nikel kaplamalar yüksek kayma ve yükleme şartlarına uygun değillerdir [9].

3.4.3 Sertlik

Sertlik, akımsız nikel kaplamalarda en çok incelenen özelliklerden biridir. Genellikle aşınma direnci hakkında genel bilgi verse de dayanım özellikleri hakkında doğrudan bir bilgi vermez. Kaplandığı gibi Ni-P kaplaması Knoop veya 100g Vickers sertliğinde 500-600 kg/mm² aralığında ölçülür. Vickers sertliği çoğunlukla Knoop sertliğinden daha yüksek çıkmaktadır. Daha yüksek sertlikleri elde etmek için birkaç özel kaplama çözeltisi vardır. Fosfor içeriğinin artışıyla sertliğin düşüşü gözlemlenmiştir. Kaplandığı gibi Ni-B 700 civarı Knoop sertliği ölçülmüştür. Ni-B kaplamalarda kaplama içeriğinin sertliğe büyük bir katkısı olmasa da Ni-P kaplamalarından –özellikle uzun ısıl işleminden sonra– daha sert olduğu ortadadır [8]. Bunun en açık sebebi 300°C'de Ni₃B ve kristal nikel oluşumudur [10,11].

3.4.4 Görünüm ve parlaklık

Elektrolizle kaplanan nikelin hafif sarı renginin aksine genellikle Ni-P ve Ni-B kaplamaları parlak çelik ya da gümüşü bir renktedir. Renk dayanımı sebebiyle parlaklığını uzun süre korurlar. Yine de renk açısından daha tercih edilebilir bir seçenek diye bir şey yoktur. Kaplamanın parlaklığı, yanında tutulabilecek bir nesnenin yansımasıyla ölçülebilir. Bunu ölçen alete yansımaölçer denir.

Ni-B kaplamaların yansıtma katsayısı, Ni-P kaplamalara göre daha düşüktür [7].

3.5 Banyo Bileşimi

Akımsız nikel kaplamalar, katalitik bir yüzeye indirgeyicilerin varlığıyla biriktirilmesi olarak tanımlanmaktadır. Kaplamanın kendisi katalitik indirgemedir ve banyoda metal iyonları bulunduğu sürece bu katalitik yüzey kaplanmaya devam eder.

Böylece yüzey şeklinden bağımsız olarak oto katalitik indirgeme sayesinde kaplama her yerde aynı kalınlıkta olacaktır [9].

Farklı akımsız kaplama çeşitleri için banyo içerikleri değişebilecek olsa da genel anlamda banyo içeriğindeki kimyasal çeşitleri aynıdır. Bunlar:

- Nikel iyonlarının kaynağı olarak nikel sülfat veya nikel klorür
- İndirgeyici
- Kompleks oluşturucular
- pH kontrolünü sağlayan kimyasallar
- Hızlandırıcılar
- Dengeleyiciler

Bunların dışında kaplamanın gerçekleşebilmesi için gereken ısıyı üreten bir enerji kaynağı da bulunmak zorundadır.

Pek çok akımlı kaplamanın tersine akımsız kaplamalar belirli ortak özellikler taşımaktadırlar [7]:

- Banyoda nikel iyonları ve indirgeyici yarı kararlı halde bulunmaktadır. Kaplama sıcaklığına erişildiğinde bu iki bileşenin rastgele reaksiyona girmemesi banyonun dengesi için önemlidir.
- Banyonun nikel içeriği oldukça düşüktür (2-8g/l).
- Kaplama hızı ortalama 10-25 µm aralığındadır –ki bu da düşük bir hızdır.
- Banyo bileşiminin dışında kaplama hızı esasen sıcaklık ve pH'a ve bir noktaya kadar banyo yaşına bağlıdır.
- Metal birikiminin başlatılması bir katalizörle sağlanmaktadır. Katalizörün çıkarılması da reaksiyonu durdurur.
- Kaplanacak yüzeyin kendisi katalizör görevi görmektedir. Yüzeyin ya kendisi aktif katalizördür ya da gerekli işlemlerle aktif hale getirilmelidir.

3.5.1 Nikel kaynağı

Akımsız nikel kaplamalarda nikel iyon kaynağı olarak en çok nikel sülfat ve bunun yanında sınırlı kullanımlarıyla nikel asetat ve nikel klorür bulunmaktadır. Nikel sülfat yerine nikel asetat kullanımının banyo kalitesinde herhangi bir üstünlüğü olmadığı gibi aradaki fiyat farkı da nikel asetatı daha tercih edilebilir kılacak kadar değildir [9].

3.5.2 İndirgeyiciler

Akımsız kaplama banyolarında kullanılan nikel iyonları kaynaklarıyla reaksiyona girerek nikelin elde edilmesini sağlayan en önemli bileşenlerden biri de indirgeyicilerdir.

Banyolarda kullanılabilecek çeşitli kimyasal indirgeyiciler vardır. En yaygın olanlar sodyum hipofosfit, aminboron, borohidrit ve hidrazin indirgeyicileridir.

Bu indirgeyicilerin kimyasal özellikleri Çizelge 3.1.'deki gibidir.

Çizelge 3.1. Nikel indirgeyiciler.

İndirgeyiciler	Moleküler Ağırlığı	Eşdeğer Ağırlık	pH Aralığı
Sodyum Hipofosfit	106	53	4-6 / 7-10
Sodyum Borohidrit	38	4.78	12-14
Aminboron	59	9.8	6-10
Hidrazin	32	8.0	8-11

Genellikle banyoların sınıflandırılması aşağıdaki gibi yapılmaktadır [7]:

- İndirgeyici tipi
- Banyo pH'ı
- Kaplama sıcaklığı

Fakat bu üçü arasında ilki en önemlisidir çünkü indirgeyiciler banyoların sadece kimyasal özelliğini değil ayrıca alaşımın tipini ve bileşimini de etkilemektedir [7].

İndirgeme reaksiyonu hakkında bazı genel bilgiler şöyledir:

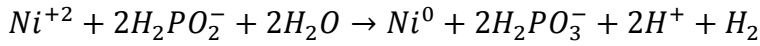
1. Kimyasal reaksiyon sonrası mutlaka hidrojen gazı çıkacaktır.
2. Akımsız nikel kaplamalar asla saf nikel kaplama olmaz. İndirgeyicinin içeriğinden gelen bor veya fosfor da kaplamanın içinde olacaktır.
3. İndirgeme reaksiyonu sadece belirli metallerin yüzeyinde gerçekleşir.
4. İndirgeyicinin tamamı reaksiyonda kullanılmaz [12].

3.5.2.1 Sodyum hipofosfit banyosu

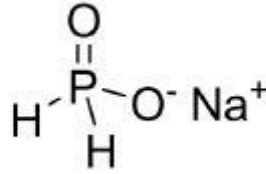
Ticari akımsız nikel banyolarının pek çoğu sodyum hipofosfiti indirgeyici olarak kullanır. Diğer indirgeyicilere oranla avantajları şöyle sıralanabilir:

- Düşük maliyet
- Kolay kontrol edilebilmesi
- Daha iyi korozyon direnci

İndirgeme reaksiyonu denklemde gösterildiği gibidir:



Hipofosfit, su ve nikel iyonları beraber reaksiyona girip aktif numune yüzeyine indirgenir. Hipofosfitin çoğu ortofosfit ve hidrojen gazına yükseltgenir. Bu da banyo verimini düşürmektedir. Bu düşüşün oranı %37 verimlilikteki 1 kg nikeli indirmek için 5 kg hipofosfitin gerekmesi olarak özetlenebilir. Şekil 3.1.'de sodyum hipofosfitin kimyasal yapısı görülmektedir [9].

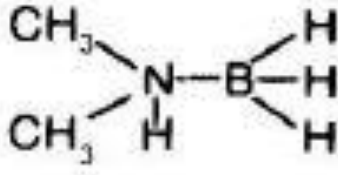


Şekil 3.1 : Sodyum hipofosfitin kimyasal yapısı [12].

3.5.2.2 Aminboron

Akımsız nikel kaplama banyolarında kullanılan iki çeşit aminboron bulunmaktadır. Bunlar N–dimetilamin boron (DMAB) $(CH_3)_2 NHBH_3$ ve H – dietilamin boron (DEAB) $(C_2H_5)_2 NHBH_3$. DEAB Avrupa standartlarında, DMAB ise Amerika standartlarında kullanılmaktadır [12].

Aminboron içeren banyoların pH aralığı 6-9 aralığında ve operasyon sıcaklığı 50-80°C arasındadır. Plastik ve ametal gibi katalitik yüzeyi olmayan malzemelerin kaplanmasında uygundur. Genellikle kaplama hızı 7-12µm/sa civarında olmakla beraber bu değerler banyo sıcaklığı, pH gibi değişkenlere bağlı olarak değişmektedir. Kaplamanın bor içeriği ağırlıkça %0,4-5 arasında değişmektedir. Şekil 3.2.'de dimetilamin boron'un kimyasal yapısı görülmektedir.



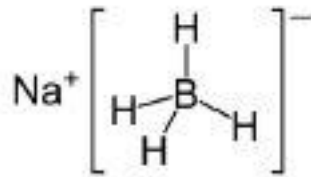
Şekil 3.2 :Dimetilamin boron [12].

3.5.2.3 Hidrazin

Hidrazin ilk olarak 1947 yılında akımsız nikel kaplama amacıyla kullanılmış ve patenti alınmıştır. Banyoların operasyon sıcaklığı 90°C civarında ve 10-11 pH aralığındadır. Biriken nikel miktarı %97-99 oranında olmasına rağmen parlak bir metalik görünüşü yoktur. Kaplamanın mekanik özellikleri kırılgan, yüksek için gerilmeli ve korozyona yatkın özellikler taşımaktadır. Üstelik sıcak işlem sonrası sertliği de artırılamaz. Bu olumsuz sebeplerden ötürü hidrazin banyoları günümüzde ticari anlamda çok az yer tutmaktadır [13].

3.5.2.4 Sodyum Borohidrit

Periodik sistemin 8 grup elementlerinin tuzları ile alkali borhidrürleri arasındaki reaksiyonlar uzun zamandır bilinmekte idi. Günümüzdeki bor kimyasının kurucularından Alfred Stock 80 yıl önce potasyumhiporat (KOBH_3) ile sulu nikel çözeltisinin reaksiyonu aracılığı ile nikel boridin üretileceğini belirtti. Sodyum borohidritin kimyasal yapısı Şekil 3.3'te gösterilmiştir.



Şekil 3.3 : Sodyum borohidritin kimyasal yapısı [12].

H.J. Schlesinger ilk defa 1942 yılında sodyum borhidrür (NaBH_4) üretti ve NaBH_4 bileşiğinin özelliklerini incelediğinde, anorganik metal tuzlarının bir sırasını metallere indirgediğini, nikel olması halinde uygun borid oluştuğunu gördü. 1954 yılında çelik kaplamasında nikel-bor fazı ileri sürüldü [14].

Günümüzde sodyum borhidrür akımsız nikel kaplamalarda en kuvvetli indirgen olarak kullanılmaktadır. Çözeltinin içinde nikel iyonlarının varlığı nikel boritin oluşmasına yeterlidir. Bunu engellemek için çözelti pH'ını 12-14 arasında tutmak gerekir, böylece nikel borit yerine nikel elementi oluşur. Bunun yanında kaplama sırasında banyoların pH'ı düşmeye eğilimlidir ve 12'nin altında banyolar bozulur. Bunu engellemek için alkali hidroksit ilavesi gerekli görülmektedir [12].

Nikel hidroksitin çökmesini engellemek için uygun bir kompleks oluşturucu kullanılmalıdır. Bu pH aralığında çalışan etilendiamin uygun olmakla beraber kompleks oluşturucular reaksiyon hızıyla birlikte birikme oranını da düşürmektedir. Optimum çalışma ortamında (90-95°C, 12-14 pH) kaplama hızı 25-30 µm/sa arasında değişir [9].

Bir mol sodyum borhidrür yaklaşık olarak bir mol nikeli redükleyebilir. Diğer bir deyişle, 1 kg nikelin redüklenmesi için 0,6 kg sodyum borhidrür gereklidir. Sodyum borhidrür kullanılarak elde edilen kaplamalar ağırlıkça %3-8 oranında bor içerir [12].

3.5.3 Kompleks oluşturucular

Kompleks oluşturucular, akımsız nikel kaplama banyolarının kendi kendine çözülmesini engellemek ve kaplamanın katalitik yüzeyde oluşmasını sağlamak için banyolara eklenen kimyasal katkı maddeleridir. Akımsız nikel kaplama banyolarında kompleks oluşturucular olarak bilinen katkı maddeleri, bazı istisnalar dışında organik asitler veya tuzlarıdır.

Kompleks oluşturucular reaksiyon sırasında serbest nikeli azaltarak kontrol eder, nikel tuzlarının çökmesini engeller, tampon etkisiyle pH'ın düşmesini engeller ve banyoyu kararlı bir halde tutar [13].

İlk dönemlerde kullanılan kompleks oluşturucular glikolik asit, sitrik asit ve asetik asitlerdir. Daha sonraki çalışmalarda farklı asitlerle çalışmalar yapılmıştır. Akımsız nikel çözeltilerinde yaygın olarak kullanılan kompleks oluşturucuların bir kısmı şunlardır [12]:

- Asetat (CH_3COOH),
- Propionate ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{COOH}$),
- Succinate ($\text{HOOCCH}_2\text{CH}_2\text{COOH}$),
- Hydroxyacetate (HOCH_2COOH),
- α -hydroxypropionate ($\text{CH}_3\text{CH}(\text{OH})\text{COOH}$),

- Aminoacetate ($\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOH}$),
- Etilendiamin ($\text{H}_2\text{NCH}_2\text{CH}_2\text{NH}_2$),
- β – aminopropionate ($\text{NH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{COOH}$),
- Malonate ($\text{HOOCCH}_2\text{CH}_2\text{COOH}$),
- Pyrophosphate ($\text{H}_2\text{O}_3\text{POPO}_3\text{H}_2$),
- Malate ($\text{HOOCCH}_2\text{CH}(\text{OH})\text{COOH}$),
- Sitrat ($\text{HOOCCH}_2(\text{OH})\text{C}(\text{COOH})\text{COOH}$)

3.5.4 Hızlandırıcılar

Kompleks oluşturmaların kaplama banyolarına yararları olsa da kaplama hızını aşırı düşürücü etkisi de bulunmaktadır. Bu hız düşüşünü dengelemek için banyoya hızlandırıcı adı verilen organik kimyasallar eklenir. En çok kullanılan hızlandırıcı süksinit asittir. Bunun yanında karbonik asitler, çözülebilir flüoritler ve bazı solventler de kullanılabilir [9].

3.5.5 Dengeleyiciler

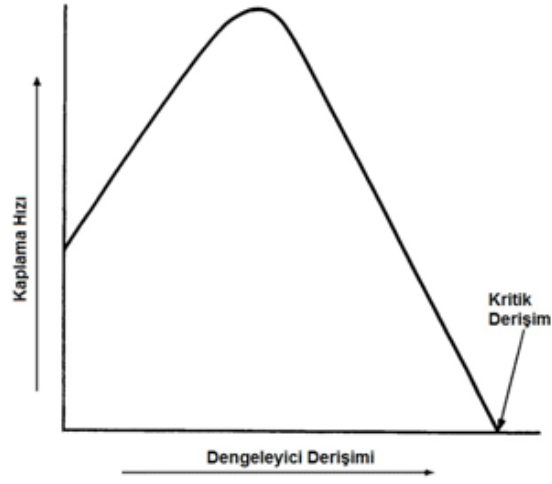
Akımsız nikel kaplama banyolarının en önemli sorunu kararlılığın kontrol edilebilmesidir. Dengeleyiciler, tüm banyonun bozulmasını tetikleyen homojen reaksiyonları engellemeye yarar. Bu kimyasalları etkin biçimde kullanabilmek için banyo için uygun dengeleyici belirlenmelidir. Ayrıca dengeleyicinin banyonun çalışma koşullarıyla da uyumlu olup olmaması önemlidir.

Dengeleyiciler kaplamayı olumlu yönde etkileşeler de bazen banyoya olumsuz etkileri olabilir. Nadir de olsa bazı dengeleyiciler kaplama hızını artırırken bazıları iç gerilmeleri ve poroziteyi artırabilir [1]. Bunun yanında dengeleyici derişimi de kaplama hızını önce artırırken fazlası hızda düşüşe sebep olmaktadır.

3.5.6 Enerji

Kaplamanın gerçekleşebilmesi için bir enerji kaynağına ihtiyaç vardır ve bu enerji sıcaklıkla sağlanır. aynı zamanda bu enerji banyonun kaplama hızına da etkilidir.

Genellikle kaplama banyosunun sıcaklığı 65°C 'nin altındayken kaplama hızı çok düşüktür, 100°C üzerinde kararsızlık baş göstermeye başlar, optimum sıcaklık aralığı borhidrüllü banyolarda $80\text{-}95^\circ\text{C}$, aminoborlu banyolarda $60\text{-}70^\circ\text{C}$ aralığındadır [1].



Şekil 3.4 : Dengeleyici derişiminin kaplamaya etkisi [12].

3.5.7 Akımsız nikel kaplanacak numune

Akımsız kaplanacak numunenin kaplanabilmesi için yüzey katalitik özellikte aktif olmalıdır. Eğer öyle değilse uygun bir metalle ön kaplama yapılmalı ve ardından akımsız nikel kaplanmalıdır. İlk kaplama gerçekleştikten sonra banyodaki nikel bitene kadar veya numune banyodan çıkana kadar nikel kaplanmaya devam eder. Numuneler bu sebeple aktifliklerine göre iki gruba ayrılırlar [12]:

- Aktif malzemeler: Akımsız biriktirme işlemini kendi başına başlatabilen metallerdir. Kobalt, Rutenyum, Paladyum, İridyum gibi elementlerin yanında Nikel de bu gruba girmektedir.
- Kataliz edilen malzemeler: Bu malzemeler akımsız kaplamayı kendi kendine başlatabamazlar yani aktif değildirler, banyoya koyulduklarında nikel birikmesi görülmez. Kaplamanın gerçekleşmesi için malzeme önce aktif başka bir metalle kaplanmalıdır.

3.5.8 Banyo yükleme faktörü

Banyo yüklemesi banyo hacminin koyulan malzemenin yüzey alanına oranıdır. Kaplama hızı ve kaplamanın bor veya fosfor içeriği bu yükleme faktörüne bağlıdır.

3.6 Kaplamaya Etki Eden Faktörler

Kaplamaya birçok faktör etki etmektedir. İyi bir kaplama yapabilmek için bu faktörlerin iyi bilinmesi ve incelenmesi gerekmektedir. Sonuçlara en etkili faktör dengeleyiciler olmuştur. Bunun yanında diğer faktörlerin incelenmesi pek çok deneyin yapılabilmesi anlamına gelmektedir [14].

Akımsız nikel kaplamaya etki eden faktörler şöyle sıralanabilir:

- Stabilizatör
- Sıcaklık
- Konsantrasyon
- pH
- Çözeltinin hacmi
- Kaplanacak toplam alan
- Malzeme cinsi
- Yardımcı malzemelerin etkisi
- Kaplama zemini
- Banyonun yaşı

Kaplama hızı ısı ile orantılıdır. Sıcaklık düştükçe kaplama hızı düşmektedir. Çizelge 4.2.'de NaBH_4 kullanılan banyoda kaplama hızının sıcaklık ve zamanla değişimi verilmiştir [14].

Çizelge 4.2. Sıcaklığın NaBH_4 banyolarına etkisi.

	30 dk.	60 dk.	90 dk	120 dk
90°C	1.4 μ	2 μ	2,5 μ	3.1 μ
80°C	0.5 μ	0.6 μ	0.8 μ	Veri yok
70°C	0.3 μ	0.6 μ	0.65 μ	Veri yok
60°C	Çok az	0.2 μ	0.3 μ	0.7 μ

Kaplama çözeltisinin içinde çeşitli konsantrasyonda çeşitli kimyasal maddeler vardır. Bu maddelerin bir kısmının konsantrasyonu azalırken bir kısmının ise artabilir, yani kimyasal reaksiyon nedeniyle yeni ürünler oluşabilir.

Nikelin konsantrasyonu kaplama veya çökme nedeniyle azalır, bazı verilere göre nikelin konsantrasyonu %50 oranında azalınca çözeltiyi tazelandirmek gerekmektedir. Bu arada dengeleyicilerin konsantrasyonu azalır ve çökeltiyi stabilize edemez hale gelirler. Ayrıca dengeleyici yeterli gelmediği durumlarda çökme başlayacak ve nikel, nikel hidroksit şeklinde dipte toplanacaktır [14].

Sodyum borohidritli banyolarda pH değerinin 12–14 civarında olması istenir. Aksi takdirde pH'ın düşmesi çözeltideki sodyum borohidritin hidroliz olmasına sebep olur. Sonuç olarak NaBH_4 'in hidroliz olması kaplamayı durdurur ve proses sona erer. Onun için pH sık sık ölçülüp kontrol edilmeli ve pH düştüğünde tampon kimyasallar banyoya eklenmelidir. Hidroksitler, karbonat çözeltileri veya amonyak gibi alkali malzemeler periyodik olarak ilavesi kaplama süresince oluşan asitliği nötrleştirir [12].

Kaplama çözeltisine, kaplama için malzeme konması gerekir. Bu rastgele bir işlem değildir. Sanayide maliyetin düşük tutulması istenen bir olaydır. Büyük tanklara küçük parçalar koymak ekonomik olmadığı gibi çok fazla metaryelle doldurmak da ekonomik değildir. Bunun sakıncası aşırı yüklemeyle prosesin olumsuz etkilenmesidir [1]. Burada asıl mesele kaplanması istenen metaryalin toplam alanıdır. Banyonun yüklemesi arttığında kaplama hızı artar. Kritik yükleme faktörünün üzerinde çözelti tamamen bozunur [9].

Kaplama proseslerinde zaman önemli faktörlerden biridir. Kaplama hızıyla zaman arasında logaritmik bir bağıntı vardır. Yani geçen zaman süresinde kaplama hızının artışı logaritmiktir. Örneğin: 30 dk'da 2 mikron bir kaplama oluyorsa zaman iki kat yani 60 dk olduğunda kaplama 4 mikron olmaz, daha az olur. Kaplanacak malzeme banyo çözeltisine daldırıldığında kaplama prosesi çok hızlı ve şiddetli bir şekilde başlar, bunu gözle açıkça görmek mümkündür. Gaz habbeciklerinin çıkışı ile belli olur. Zamanla reaksiyon hız düşer, gaz habbeciklerinin azalmasıyla bu görülür. Hidrojen gazının çıkmasının durması kaplamanın olduğunu gösterir. Reaksiyon kendi kendine durur, bu iki sebebi vardır: NaBH_4 miktarının azalması veya bitmesi veya kaplanan tabakanın yeni bir metal atomu kabul etmemesidir. En fazla kaplama ilk 30 dakikada olur, daha sonra kaplama azalır [14].

3.7 Uygulama Alanları

Akımsız nikel kaplamaların ticari piyasada kendine yer edinmesi son 50 yılda gerçekleşmiştir. Getirdiği üstün mekanik özellikler ve pek çok malzemeye uygulanabilmesi diğer kaplama çeşitlerine karşı akımsız nikel avantaj sağlamıştır.

Akımsız kaplamanın diğer kaplamalara göre tercih nedenleri şöyle sıralanabilir:

- Yalıtkan ve ametal malzemelerin de çeşitli amaçlarla (mekanik özellikler, dekoratif amaçlar vb.) kaplanabilmesi
- Kolay reaksiyon veren malzemelerin (alüminyum gibi) kaplanabilmesi
- Yumuşak alt malzemelerin kaplamayla sertleştirilebilmesi, aşınma direncinin artırılabilmesi

3.7.1 Otomotiv

Otomotiv endüstrisi akımsız nikel kaplamanın sağlamış olduğu avantajları kullanır. Kaplama homojenliği, korozyon direnci, kayganlık ve aşınma direnci gibi özellikler otomotiv endüstrisinde kullanımını artırmıştır. Bu yöntemle parçalara fonksiyonellik kazandırılırken aynı zamanda dekoratif özellik de kazandırılabilir.

Kaplama korozyon direncinin artması alüminyum yağ filtrelerinde ve hava alma valflerinde kullanılmasını sağlar. Diferansiyel piyon dişli milleri ve çeşitli miller ve contaların akımsız nikel kaplaması, bu kaplamanın kayganlık, aşınma direnci ve parçaların birbirine yapışmasını önleyici nitelikler sağlaması yaygın şekilde kullanılma nedenidir [1].

3.7.2 Elektrik- Elektronik

Elektrik sektörünün akımsız nikel kaplamanın kullanıldığı en geniş ve en farklı ürün yelpazesine sahip olduğu bir gerçektir. Uygulama alanları her geçen gün artmaktadır. Elektronik alanda kullanılması artmıştır, çünkü korozyona dayanıklılık, lehimlenebilirlik, manyetik özellikler bu uygulama alanında büyük bir kullanım alanı oluşturmuştur. Elektronikte bilgisayar depolama aygıtlarının birçoğunda alan hafıza disklerinin yapımında bu kaplamadan faydalanılır.

Son yıllarda mikrodalga bileşenlerinin kaplanması da oldukça önem kazanmış bir uygulamadır. Derin girintili ve kompleks şekilli bileşenlerde, alüminyum üzerine elektronik gümüş yada kalay ile kaplanmış üst katmanların altına akımsız nikel

kaplamayla yüksek korozyon direncine sahip koruyucu bir film tabakası elde edilir [1].

3.7.3 Uçak Uzay

Jet motorlarının kompresör ve stator bileşenlerinde akımsız nikel kaplama tekniği yıllardır başarılı bir şekilde kullanılmaktadır. Kaplanan bileşenlerin çoğu kaplamanın bu alanda güvenilir ve kabul edilir şekilde uygulamalarının gerçekleştirilmesi için kapsamlı testler uygulanmalıdır.

Akımsız nikel kaplamanın uçak-uzay sektörlerindeki kullanımında avantaj sağlayan bir diğer özelliği de sert krom kaplamanın aksine, basma gerilmeli yüksek fosforlu kaplamaların bu sektörde kullanılan kritik bileşenlerin yorulma gerilmeleri üzerinde olumsuz etkide bulunmamasıdır [1].

3.7.4 Petrol ve Gaz

Daha ucuz malzemelerden üretilen küresel vanalar, ısı dönüştürücüleri, pompalar vb. malzemelerin yüksek fosforlu içerikli akımsız nikel kaplamasıyla istenilen özelliklere ulaşılmıştır [1].

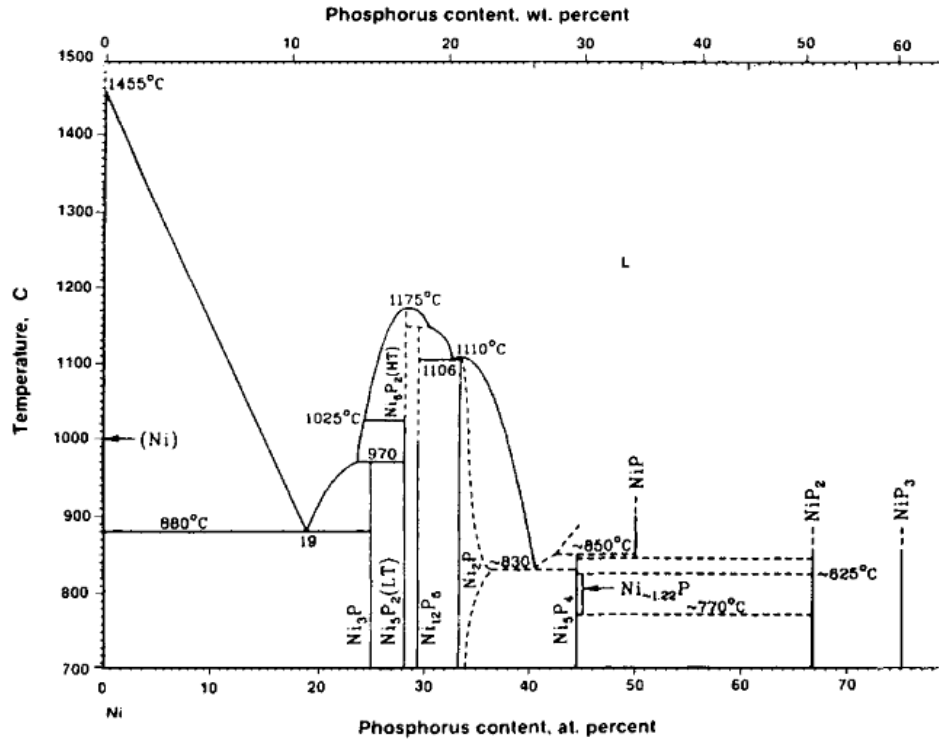
4. AKIMSIZ NİKEL FOSFOR ÖZELLİKLERİ

Hipofosfitle indirgenmiş akımsız Ni-P, mühendislik malzemesi olarak kullanılan az sayıda camsı metallere biridir. Kaplama banyosuna bağlı olarak ticari kaplamalar %5-12 oranda fosfor, %0,25 oranında başka element içeriğine sahiptir.

Kaplandığı haliyle Ni-P kaplamalar uniform, sert, görece kırılkan, yağlayıcı özelliğe sahip ve çok yüksek korozyon dayanımı gösterir. Çökelme sertleşmesi yoluyla düşük ısı işlem sıcaklıklarında ticari krom kaplamaların ulaştığı aşınma dayanımı özelliklerine sahip olabilmektedir [9].

4.1 Yapısı

Düşük alaşımlı akımsız kaplamaların mikrokristal yapıda oldukları bilinmektedir. %7'den az fosfor içerikli Ni-P kaplamalarının tane boyutunun 2µm civarında olduğu görülmüştür. Daha yüksek fosfor içerikli kaplamaların amorf yapıda olduğu düşünülür. Şekil 4.1.'de Ni-P faz diyagramı görülmektedir [8].



Şekil 4.1 : Ni-P faz diyagramı [8].

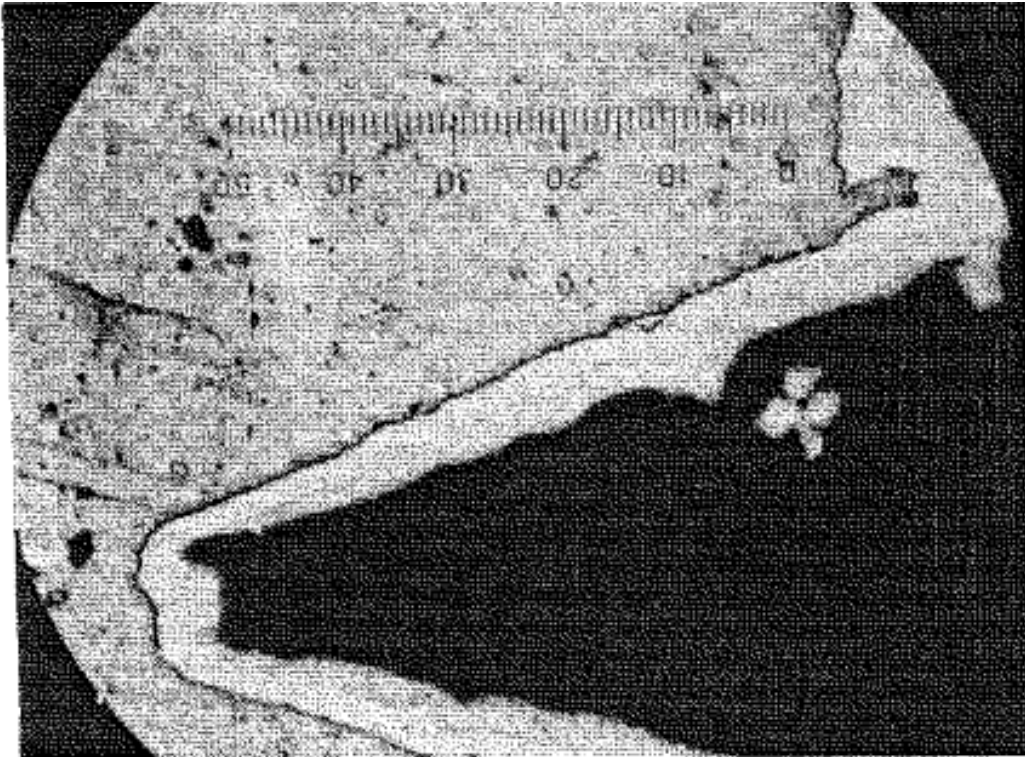
Amorf yapıdaki akımsız nikel kaplamaların yapısal değişimleri 300°C'nin üzerinde tavlanmaya başladığında ortaya çıkmaktadır. İlk önce amorf yapı kristalleşmeye başlar, bunun yanında kristalleşmenin ortaya çıkarttığı sıcaklık değişimi de gözlenir. Tane boyutu daha da artar fakat yine de oldukça küçük kalmaktadır.

Bu değişiklikler kaplamanın sertliğini artırmakta fakat korozyon direnci ve sünekliğinde azalmaya neden olmaktadır [8].

4.2 Uniformluk

Akımsız kaplamanın en önemli özelliklerinden biri de uniform kaplanma kalınlığıdır. Akımlı kaplamada kaplama kalınlığı parçanın duruşuna ve anoda yakınlığına bağlıyken akımsız kaplamada böyle bir durum söz konusu değildir.

Akımsız kaplamada kaplama hızı ve kalınlığı banyoya maruz kalan bütün yüzey alanlarında yanıdır. Delikler, oyuklar, kör noktalar ve hatta boru içleri dahil olmak üzere bütün yüzeyler aynı kalınlıkta kaplanacaktır. Aşağıdaki Şekil 4.2.'de eşit miktarda kaplama kalınlığı açıkça görülmektedir [15].



Şekil 4.2 : 25 µm kalınlığında uniform Ni-P kaplaması [15].

Uniformluk sayesinde son yüzey işlemi adına akımlı kaplamaya göre hiçbir gerek kalmaz.

4.3 Yapışma

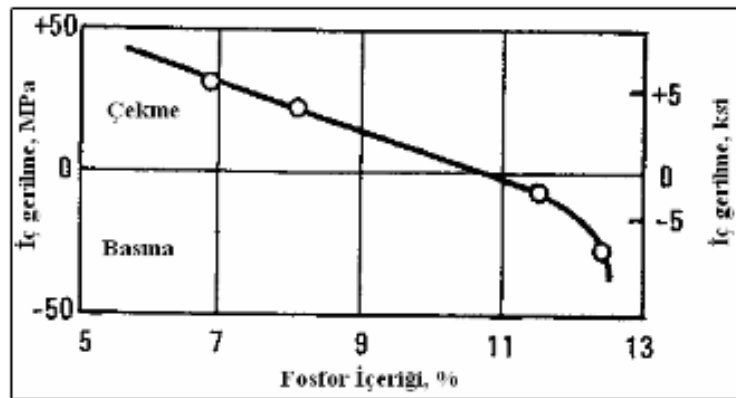
Akımsız Ni-P kaplamanın pek çok metale yapışma özelliği mükemmeldir. İyi temizlenmiş katalitik bir yüzeyde gerçekleşen ilk kaplamanın başlangıcıyla parçaya hem metalik hem de mekanik olarak kaplama yapışmaya başlar. Böyle bir parçada kaplamanın bağ kuvveti 400 MPa civarındadır. Alüminyum ve alaşımlarında bu miktar biraz daha azdır ama yine de 300 MPa'dan fazladır.

Paslanmaz çelik gibi katalitik olmayan veya pasif metallerde ilk kaplama başlamaz ve yapışma olmaz. Uygun ön işlemlerle kaplama yapıldığında da en az 140 MPa bağlanma kuvveti görülmektedir.

Alüminyum gibi malzemelerde ise kaplama sonrası 1-4 saat arası 130-200°C ısıtma işlemi yapışmayı artırıcı etki gösterir. Bu işlemle parçadaki hidrojen dışarı atılır ve bir miktar kaplamanın parçaya yayınması sağlanır [15].

4.4 İç Gerilme

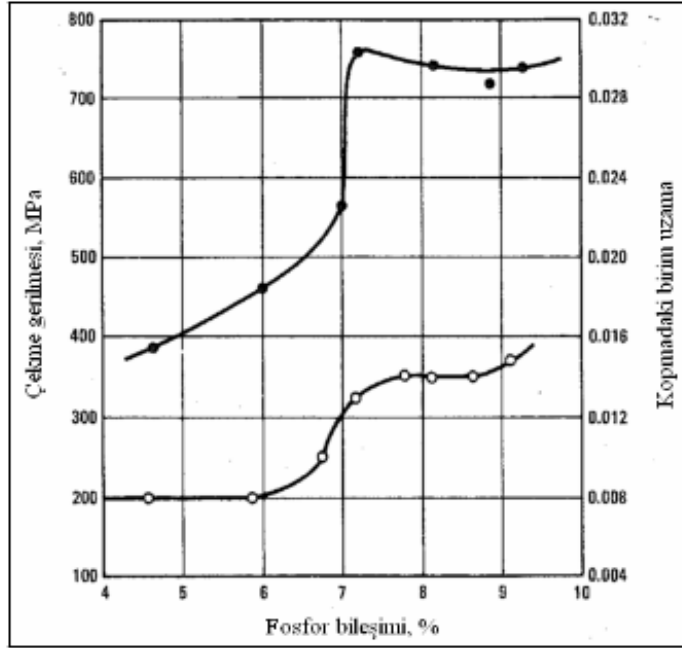
Akımsız nikel kaplamalarda iç gerilmeler iki özelliğin fonksiyonudur: kaplamayla numune arasındaki ısı genleşme farkından doğan ısı gerilme ve heterojen kaplamadan kaynaklanabilecek yapısal gerilmeler. Bu durumlar da kaplamanın kendi özellikleriyle ortaya çıkacaktır. Şekil 4.3.'te fosfor içeriğiyle iç gerilmenin nasıl değiştiği görülmektedir. Düşük fosfor içerikli kaplamalarda 15-45 MPa civarında çekme gerilmesi görülmektedir. Yüksek seviyelerdeki gerilmeler sonucunda da çatlamlar ve porozite ortaya çıkmaktadır [15].



Şekil 4.3 : Fosfor içeriğinin iç gerilmeye etkisi [9].

4.5 Mekanik Özellikler

Akımsız nikel kaplamaların mekanik özellikleri camlarınkine çok benzemektedir. Yüksek dayanım, düşük süneklik ve yüksek elastisite modülüne sahiptirler. Çekme gerilmesi yaklaşık 700 MPa'ın üzerindedir. Bu pek çok çelik türünün üstünde bir değerdir ve kaplamanın ciddi hasarlar karşısında dayanıklılığını göstermektedir. Fosfor içeriğinin de dayanım üzerinde Şekil 4.4.'te görüldüğü gibi etkisi vardır.



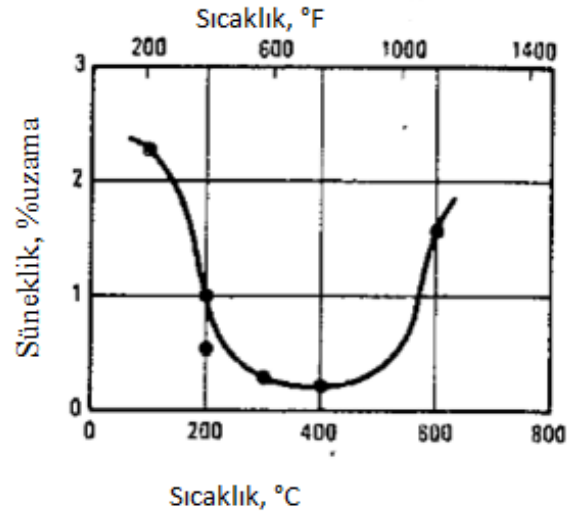
Şekil 4.4: Fosfor içeriğinin dayanım ve kırılmadaki birim uzama üzerine etkisi [9].

Kaplamanın içeriği sünekliği etkiler. Uzama oranı %1-1,5 civarındadır. Bu her ne kadar pek çok metalden düşük olsa da kaplama çeşitleri arasında önemli bir değerdir. Yaylar ve körüklerde kullanılabilir. Fakat yine de akımsız kaplama sürekli eğilip bükülecek parçalarda tercih edilmemelidir. Aşırı deformasyon sonucunda çatlama ve ardından korozyon dayanımında ve aşınma dayanımında düşüş gözlemlenebilir.

Şekil 4.5.'te görüldüğü üzere sertleştirme amacıyla yapılacak ısıtıl işlemler sünekliği ve dayanımı düşürmektedir. 220°C'nin üzerindeki ısıtıl işlemler %80-90 arasında dayanımı düşürmekte ve bunun sonucunda muhtemelen sünekliği yok etmektedir, özellikle de düşük fosfor içeriğinde bu durum çok etkilidir.

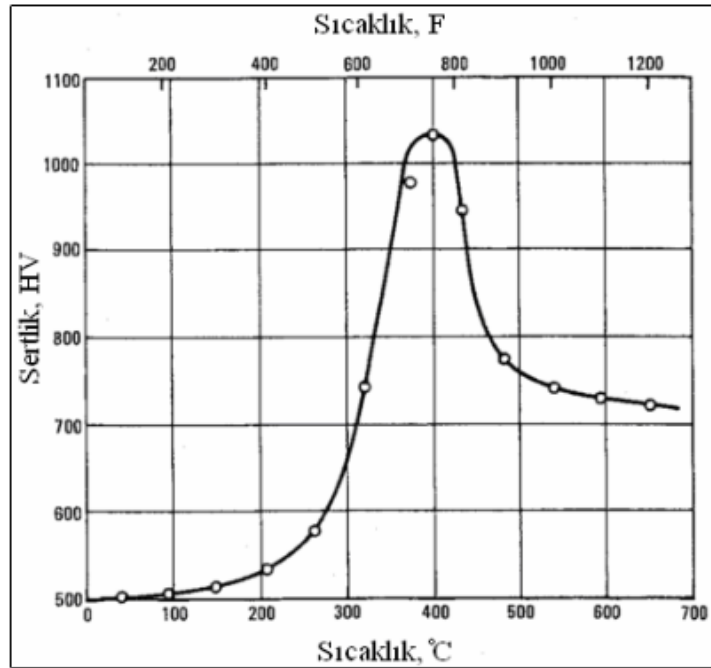
4.6 Sertlik

Kaplandığı gibi Ni-P kaplamanın sertliği 500-600 VHN₁₀₀ civarındadır. Isıl işlemlerle kaplama yaşlandırılabilir ve bunun sonucunda 1100 VHN₁₀₀ mertebelerine



Şekil 4.5 : Sıcaklığın sünekliğe etkisi [12]

ulaşılabilir. Bu da pek çok krom kaplamanın sertliğine yakın bir değerdir. Aşağıdaki Şekil 4.6.'da %10,5 fosfor içerikli kaplamanın 1 saatlik ısıtılma işlemi sonucunda sertlik değişimi verilmiştir. [16] Sertliğe etkisi olan unsur ise fosfor içeriğidir. Fosfor içeriği %8,3 olduğunda sertlik atomsal yapının değişmesiyle beraber en yüksek değere ulaşmaktadır [17]. Ayrıca kaplama zamanı arttıkça sertlik de artmaktadır [18].



Şekil 4.6 : Isıl işlemin sertliğe etkisi [12].

4.7 Aşınma

Yüksek sertliğinden dolayı akımsız Ni-P kaplamaların hem ısıtılmalı hem de kaplanıldığı haliyle üstün bir aşınma direnci vardır. Laboratuvar deneylerinin sonucunda anlaşılmıştır ki aşınma dayanımı sert kromla hem kuru hem de ıslak ortamda aynıdır. Mükemmel aşınma direnci sayesinde artık akımsız nikel kaplamalar yüksek alaşımlı malzemeler ve sert kromun yerine kullanılmaktadır. Aşağıdaki Çizelge 4.1.'de sert krom, çeşitli oranlardaki Ni-P kaplamaları Taber aşınma deneyinde karşılaştırılmıştır [15]. Yine de iyi bir aşınma direnci isteniyorsa fosfor oranının %10 ve üstü olması tercih edilmelidir [19].

Çizelge 4.1: Kaplama çeşitlerinin aşınma değerleri [9].

Kaplama	Isıl İşlem 1 saat için		Taber Aşınma Değerleri, mg/1000
	oC	F	
Watts nikel	yok	yok	25
Akımsız Ni-P %9	yok	yok	17
Akımsız Ni-P %9	300	570	10
Akımsız Ni-P %9	500	930	6
Akımsız Ni-P %9	650	1200	4
Akımsız Ni-B %5	yok	yok	9
Akımsız Ni-B %5	400	750	3
Sert Krom	yok	yok	2

4.8 Korozyon

Akımsız nikel kaplama kaplandığı yüzey için dış etkilere koruyan bir duvar gibidir. Amorf yapısı ve pasifliğinden dolayı korozyon dayanımı çok iyidir ve pek çok ortamda saf nikel ya da krom alaşımlarından daha iyi korozyon direnci gösterir.

İyi bir kaplama sonucunda akımsız Ni-P alkalilere, tuzlu çözeltilere, kimyasal ve petrolü ortamlara, her tür hidrokarbon ve solvente karşı neredeyse tamamen dayanıklıdır.

Korozyon dayanımı çoğunlukla kaplamanın pasifliğinden ötürüdür ve pasifliği de fosfor içeriğinden doğrudan etkilenmektedir. %10 fosfor içeriğinden daha fazlasına

sahip alařımlar genellikle daha dūřuk olanlara göre daha çok korozyona dayanıklıdır [7].

4.9 Fiziksel  zellikler

Akımsız nikel kaplamaların yoęunluęu fosfor içerięinden ters oranda etkilenmektedir. Yoęunluk dūřuk fosforlu kaplamalarda $8,5 \text{ g/cm}^3$ iken %10-11 fosfor i eriklilerde $7,75 \text{ g/cm}^3$ civarına dūřer.

Termal ve elektrik özellikleri de kaplamanın bileşiminden etkilenir. Kaplamaların iletkenliği bakır gibi geleneksel iletkenlere göre dūřuktur. Buna rağmen ısıl işlemlerle kaplamaların iletkenliği 3-4 kat artırılabilir [9].

5. AKIMSIZ NİKEL BOR ÖZELLİKLERİ

Borohidrit veya aminoborla indirgenen Ni-B banyolarının özellikleri bazı istisnalar dışında birbirine oldukça benzerdir. En önemli fark sertlik değerlerinde ortaya çıkmaktadır. Kaplanmış halde Ni-B kaplamalarının sertliği sert kromun daha üstünde değerlere ulaşabilir. Ayrıca çok belirgin bir aşınma direncine de sahip olduğu söylenebilir. Bununla beraber Ni-P kaplamaların amorf yapısından kaynaklanan üstün korozyon direnci özelliği, Ni-B kaplamaların tamamen amorf yapıda olmaması sebebiyle daha yüksektir [9].

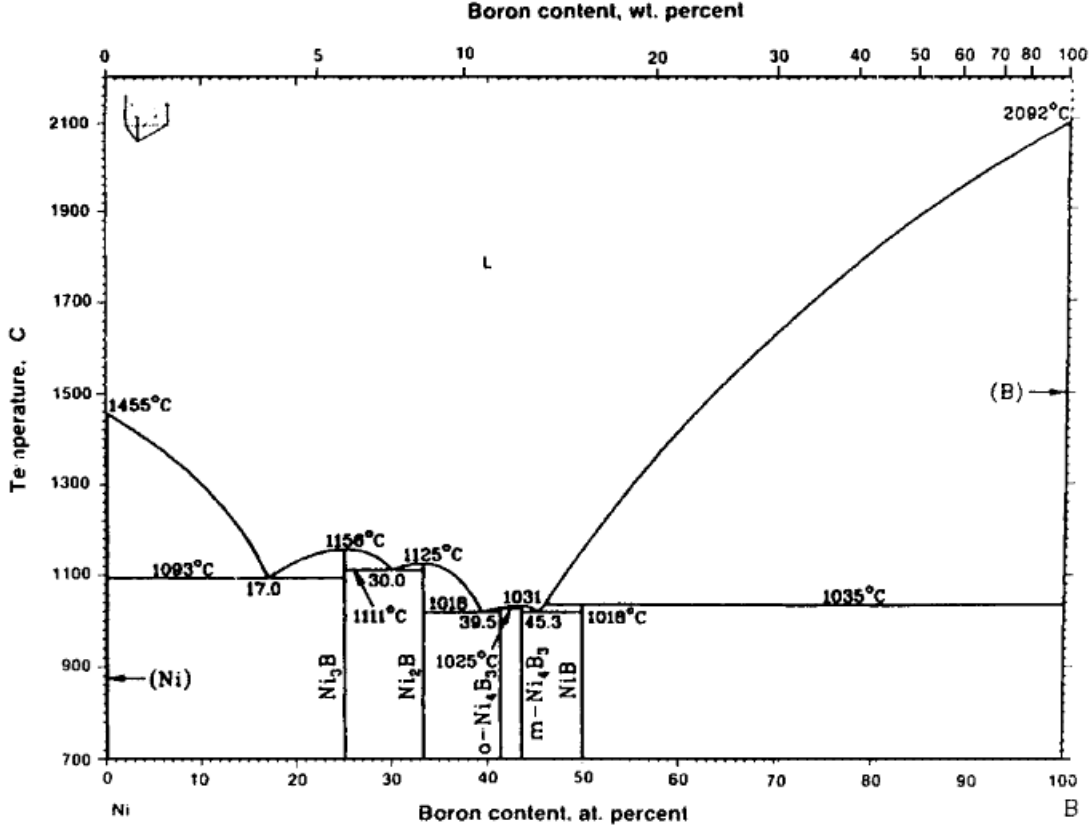
Akımsız nikel-bor kaplama yüksek sertlik ve aşınma direnci, iyi kayganlık ve lehimlenebilirlik gibi özelliklerinden dolayı havacılık, otomotiv, kimya ve elektrik endüstrilerinde kullanım bulmaktadır [20].

Bor en önemli amorf elementlerden biri olduğu için bor içerikli alaşımlar uzun zamandır üstün özellikleri için araştırılmaktadır. Her ne kadar amorf likit çözelti yapmak zor olsa da akımsız nikel bor çözeltisi buna çok iyi bir alternatif oluşturmaktadır. Akımsız Ni-B alaşımlarında sodyum borohidrit veya aminobor gibi bor içerikli indirgeyiciler kullanılmaktadır. Sodyum borhidritin indirgeme oranı aminobor ve sodyum hipofosfitten daha yüksektir, böylece maliyet de düşük olabilir. Bununla birlikte borhidrit iyonları asidik veya nötr çözeltide kolayca hidrolize olur ve kendiliğinden nikel borüre dönüşür. Bu sebeple pH kontrolü, ani banyo bozulmalarına karşı bu banyolarda çok önemlidir [11].

5.1 Yapısı

Nikelin yüzey merkezli kübik yapısı sebebiyle 12 komşu atomu vardır. Bu sebeple borun (ya da fosforun) kafese girmesi, bu atom düzeninin geniş yüzeylere yayılmasını engellemektedir. yüzey merkezli kübik sağlanamazsa yapı likit sayılır ve amorf kabul edilir.

Kaplanmış haliyle akımsız nikel bor, yarı dengeli ve aşırı doymuş bir alaşımdır. Ni-B faz diyagramlarından da anlaşılacağı gibi oda sıcaklığında herhangi bir katı çözelti durumu yoktur [8].



Şekil 5.1: Ni-B faz diyagramı [8].

Ni-B akımsız kaplamaların mikro yapısı, Ni-P kaplamalarinkinden çok daha heterojen bir yapıya sahiptir. Kaplama düzlemine dik inklüzyonlar ve çatlaklar bulunmaktadır.

Ayrıca Ni-B kaplamaların bir farkı da yüzey dokusunun Ni-P kaplamalara göre daha düzensiz ve karnabahar görünümünde olmasıdır [7].

5.2 Fiziksel Özellikler

Akımsız nikel borun yoğunluğu yaklaşık Ni-P kaplamalarinkine eşittir ($8,25 \text{ g/cm}^3$). Erime noktası $1075\text{-}1080^\circ\text{C}$ arasında içerdiği bor miktarına göre değişmektedir. Çeliğe yapışma özelliğinin Ni-P'dan daha düşük olduğu bilinmektedir. %5 bor içerikli Ni-B kaplamaların ferromanyetik özelliği düşüktür. Bununla beraber ısıl işlemle manyetikliğin arttığı gözlenmiştir. Hidrazin banyolarından çıkan kaplamaların özellikle nsaf nikel kadar manyetik özellik sağladığı bulunmuştur. Kaplamaların elektriksel direnci $89 \mu\text{Ohm-cm}$ (kaplama sonrası) ile $43 \mu\Omega\text{-cm}$ arasında olmaktadır.

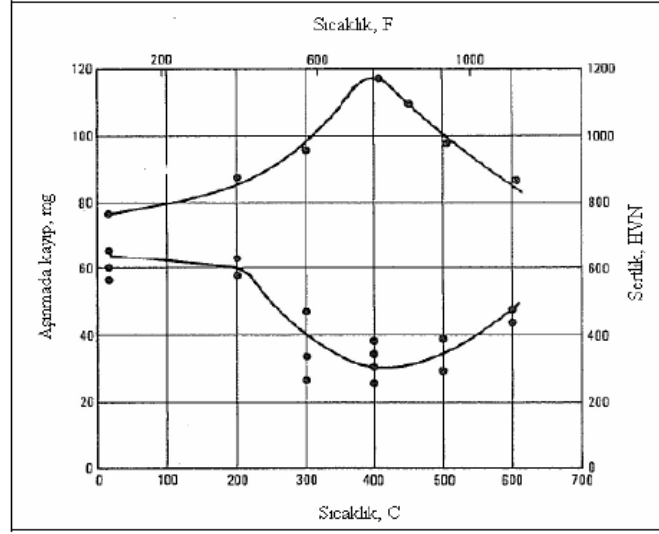
Elastiklik modülü kaplandığı haliyle 120 GPa , 400°C 'de 1 saat tutulduktan sonra 180GPa 'dır. %5 B içeren Ni-B kaplamaların dayanım ve sünekliği yüksek fosforlu

birikintilerin beşte biridir. Borohidrit ile indirgenmiş akımsız nikelin maksimum uzaması sadece %0,2' dir ve hipofosfitin indirgediği kaplamalardan farklı olarak ısı işlemin süneklik üzerinde çok az etkisi vardır [7].

5.3 Mekanik Özellikler

5.3.1 Aşınma

Aşınma direnci özellikle ısı işlemden çok etkilenmektedir. %5 bor içerikli kaplandığı gibi Ni-B kaplamanın Taber Aşınma İndeksi 9 olarak ölçülmüştür.



Şekil 5.2 : Sıcaklığın sertliğe ve aşınma direncine etkisi [9].

Uygulanan bütün kuvvetler göz önüne alındığında spesifik aşınma oranı Çizelge 5.1.'deki gibi ısı işlemlerden sonra düşmüştür. Bunun nedeni de ısı işlemden dolayı sert nikel borid fazlarının oluşmasıdır [11].

Çizelge 5.1: Sıcaklığın ve uygulanan kuvvetin spesifik aşınma oranına etkisi [11].

Uygulanan Kuvvet (N)	Spesifik aşınma oranı ($\text{kgN}^{-1}\text{m}^{-1}\times 10^{-10}$)		
	Kaplandığı gibi	350°C/1 saat	450°C/1 saat
20	0,52	0,39	0,3
30	1,36	0,68	0,59
40	2,4	1,72	1,04

5.3.2 Sertlik

Akımsız nikel-borun en büyük özelliği yüksek kaplama sertliğidir. Kaplamanın sertliği 650-750 HV₁₀₀ değerlerinde belirtilse de 1170 gibi daha yüksek değerlere çıkabilen kaplamalar da görülmüştür. 1 saat 300°C’de tutulan bu değerdeki kaplama sertliği 1400 HV₁₀₀ değerine kadar çıkmaktadır. Bunun yanında daha yüksek sıcaklıklardaki tavlamalarda Şekil 5.2.’de görüldüğü gibi sertliğin hızla düştüğü de gözlemlenmiştir [16].

Kaplama sertliğinin ısıtıl işlemlerle artmasının ardındaki sebep Ni-B fazlarının oluşması olarak gösterilmiştir. Ayrıca kristalizasyon ile yapıda oluşan mikro çatlakların sertliği artırıcı etkisi olduğu bildirilmiştir [11].

Ni-B kaplamaların sertliğini artıran bir diğer unsur da bor miktarıdır. Bor arttıkça sertlik de artmaktadır fakat bu artış lineer değildir ve çok yüksek bor miktarlarında sertlik sabitlenmektedir [21].

5.3.3 Korozyon

Ni-P kaplamaların korozyon direnciyle Ni-B’un direnci hemen hemen aynıdır. Ni-B akımsız kaplamanın yüksek korozyon direncinin sebeplerinden birisi düşük porozitedir. Bunun yanında oksitleyici ortamda (heksavalent krom çözeltilerinde) 60°C’de 10 dk. bekletilmesinin korozyon direncini geliştirdiği gözlenmiştir [16]. Isıl işlem uygulandığında ise kaplamanın korozyon direnci ortaya çıkan tane sınırları ve dislokasyonlar sonucu düşmektedir [15].

Çizelge 5.2: Ni-B ve Ni-P Kaplamaların Karşılaştırılması [12].

Özellik	Akımsız Ni – B (Ağırlıkça %5 B içeren)	Akımsız Ni – P (Ağırlıkça %10,5 P içeren)
Yoğunluk [g/cm ³]	8,25	7,75
Erime noktası [°C]	1080	890
Elektriksel direnç [$\mu\Omega\cdot\text{cm}$]	89	90
Isı iletim katsayısı [W/mK]	-	4
Isıl uzama katsayısı 22 – 100 °C arasında [$\mu\text{m}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$]	12.6	12
Manyetik özellikler	Çok zayıf, ferromanyetik	Manyetik değil
İç gerilmeler [MPa]	110	0
Çekme dayanımı [MPa]	110	700
Süneklik (% uzama)	0.2	1
Elastiklik modülü [GPa]	120	200
Kaplama sonrası sertlik [HV0.1]	700	500
Isıl işlem sonrası sertlik	1200	1100
Sürtünme katsayısı (Çeliğe karşı)	0.12	0.13

6. AKIMSIZ DUBLEKS KAPLAMALAR

Akımsız nikel kaplamaların çift katmanlı uygulanması ve araştırılması 1960'lı yıllara kadar dayanmaktadır [8]. Çift katlarda uygulanan çeşitler farklı alaşımların üst üste yapılması şeklinde olabileceği gibi aynı tip kaplamaların farklı alaşım yüzdeleri de dubleks kaplama olarak da uygulanabilir. Yani Ni-P kaplama üzerine yapılabilecek Ni-B-W kaplamanın yanı sıra %6'lık fosfor içerikli Ni-P kaplamanın üzerine %10 fosfor içerikli Ni-P da kaplanabilmektedir. Bu çalışmada yapılan dubleks kaplama Ni-P/Ni-B olmuştur. Çift kat akımsız nikel kaplama yapmanın yanı sıra akımsız nikel üzerine farklı kaplama çeşitleri de yapmak mümkündür [22].

Dubleks kaplamaların en önemli kullanım alanı aşınma, yorulma ve korozyon gibi önemli mekanik ve kimyasal hasara uğrayabilecek parçaların korunması için yapılmasıdır. Üst kata koyulabilecek gerekli üstün özelliğe sahip bir kaplama türü hem alttaki kaplamayı koruyabilir hem de bulunduğu ortama uygun bir direnç sağlayabilir. Mekanik ve kimyasal özelliklerinin yanı sıra elektriksel ve manyetik özellikleri de geliştirmek için dubleks kaplamalar kullanılmaktadır [23].

Nikel fosfor kaplamaların korozyon direnci daha önce de bahsedildiği gibi çok iyidir. Özellikle fosfor içeriğinin artması korozif ortamlara dayanıklılığını artırmaktadır. Ayrıca yüzeye yapışmasının nikel bordan daha iyi olduğu ve böylece yorulma dayanımını artırıcı etkisi olduğu bilinmektedir. Bunun yanında ticari kullanımının yaygın olması nikel fosforu akımsız kaplama çeşitleri arasında oldukça gözde bir konuma sokmuştur. Fakat nikel fosforla elde edilebilen sertlik değerleri 500 HV₁₀₀ civarında kalırken nikel borla sağlanan 700 HV₁₀₀ ve ısıt işlemlerle bu değer çok daha üzerine çıkılabilmektedir. Ek olarak nikel borun aşınma direncinin neredeyse iki kat fazla oluşu da nikel borun önemli özellikleri olarak ortaya çıkmaktadır, bu aşınma değerleri özellikle sert krom kaplamaların aşınma direncinden daha yüksektir ve elektronik alanında altının yerine geçebilecek düzeydedir [24].

Bu üstün özelliklerin hepsini bir arada sağlamanın en kolay yolu dubleks kaplama uygulamasıdır. Akımsız nikel borla sağlanabilecek bir özellik, yarı kalınlıkta nikel bor altına koyulabilecek nikel fosfor sayesinde hem ekonomik olarak daha elverişli elde edilecektir hem de nikel fosforun sağladığı özellikler de kullanılmış olacaktır.

Bahsi geçen özelliklerin bir arada olması için hazırlanan Ni-P-B alaşım kaplama banyoları da mevcuttur. Bu banyolarda her iki kaplama için aynı indirgeyici kullanılmaktadır. Borohidritin sadece alkalın ortamda dengeli olması sebebiyle

borohidrit indirgeyicili Ni-P-B alaşım kaplama banyolarına hipofosfit eklenmektedir. Borohidritin hipofosfitten daha güçlü bir indirgeyici olması ve banyonun da alkalın özellikler taşıması sebebiyle sonuçta ortaya çıkan alaşım kaplamanın içerdiği fosfor oranı düşük olmaktadır. Aynı sebeplerden Ni-Cu-P, Ni-W-P alaşım kaplamaların içeriklerindeki fosfor oranı da düşüktür. Bu sebepten özellikle korozyon dayanımı konusunda kaplama bir gelişim sağlamaz [24]. Alaşım kaplamalar yerine dubleks kaplamaların tercih edilmesinin sebebi de budur.

Dubleks kaplamaların oluşturulmasının en uygun yolu çiftli banyolar hazırlanmasıdır. Yani alt kat için farklı, üst kat için farklı banyolar kullanılmalıdır. Hazırlanan banyolar, tek katlı kaplama için kullanılan banyolarla aynıdır. Alt malzeme için uygulanan ön temizlik ve hazırlık işlemleri yine uygulanır fakat ikinci kat kaplama yapılırken geçerli değildir.

Bu tez çalışmasında ilk katın yüksek korozyon dayanımı sağlaması ve daha iyi yapışma özellikleri göstermesi dolayısıyla Ni-P kaplaması, üst katın da çok daha iyi aşınma ve sertlik değerleri veren Ni-B kaplaması olması kararlaştırılmıştır. Bunun yanında Ni-B zerine Ni-P dubleks kaplama da denenmiştir. Kaplama kalınlıkları önceden belirlenen sreler göz önüne alınarak istenilen miktarlarda olabilir. Kaplama sonrası Ni-P ve Ni-B katmanları amorf yapıdayken 450°C’de 1 saat ısıl işleme tabi tutulan dubleks kaplamaların kristalleştikleri ve nikel, nikel fosfit ve nikel borid içerdiği önceki çalışmalarda belirtilmiştir. Oluşturulan dubleks kaplamalar uniform özellikte ve birbirine uyumludurlar.

7. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Deneysel çalışmalar birkaç basamaktan oluşmaktadır. Bunlar önce numunenin çok iyi yüzey temizliğinin yapılması, ardından gerekli kaplamaların yapılması, tavlama ve sonunda korozyon, aşınma ve sertlik deneylerinin de gerçekleştirilmesinden oluşmaktadır.

7.1 Numune Malzemesi

Numune malzemesi olarak çelik (St 37) kullanılmıştır. Şekil 7.1.'de görüldüğü üzere sertlik, korozyon (polarizasyon ve ağırlık kaybı deneyleri) ve aşınma için ayrı boyutlarda deney numuneleri hazırlanmıştır.



Şekil 7.1: Deney numuneleri.

7.2 Ön İşlemler

Her türlü yüzey işlemi çok özenli bir yüzey temizliği gerektirir ve akımsız nikel kaplamalarda da bu kural geçerlidir. Ayrıca ek temizlik şartları da gerekmektedir.

Son işleme gelinceye kadar imalatçıdan gelen her malzeme kirli olarak bakılmalıdır. Tekli parçaların fabrikalardan yağlı çıktığı düşünülür. Böyle bir kirlenmenin dışında

ayrıca depolama veya işleme sırasında demir esaslı malzemelerde pas oluşacağı da aşıkardır.

Kaplamanın oluşması için en önemli unsurlardan biri de bağ kuvvetinin yüksek olması ve buna bağlı olarak yapışmanın iyi olmasıdır. Yüzeydeki kirlerin giderilmesi de yapışmanın daha iyi olmasını sağlayacaktır [7].

Bazı yüzey kirleri şunlardır:

- Hidrokarbonlar
- Yağlar
- Pasif Tabakalar
- Yabancı Metaller
- Kaplama Banyosu Artıkları
- Diğer Kirler

Bunlara ek olarak yüzeyde bulunabilecek soğuk şekillendirmeye oluşabilecek yüzey çizgileri, inklüzyonlar, çatlaklar, gözenekler gibi yüzey hataları da kaplama öncesi temizliğine dahil edilmelidir.

İyi bir ön işlem ve temizlik için büyük yüzey kusurları, oksitler ve yüzeyin ilk birkaç atomik tabakası temizlenmelidir. Ancak bu şekilde kaplama yüzeye iyice yapışabilir. Deneylerde çelik (St37) kullanılmıştır. Kullanılan çeliğe uygun ön işlemler bir sonraki bölümde anlatılmıştır [8].

7.2.1 Çeliğe uygulanan ön işlemler

Çelik malzemeler en fazla kaplanan numunelerdir. Çelik yüzeyleri kaplayabilmek için şu üç işlemin başarıyla tamamlanması gereklidir: Kirleticilerin temizlenmesi, oksijen giderme ve yüzey aktivasyonu. Bu işlemleri gerçekleştirebilmek için çelik numunelere sırasıyla aşağıdaki ön işlemler uygulanmıştır:

1. Şekil 7.2.'de görülen Metkon Forcipol marka zımpara ve parlatma ünitesinde sırasıyla 400, 600, 1000, 1200'lük zımpara kağıtları ile zımparalama
2. Etil alkol ile temizleme
3. Durulama
4. Sıcak yağ alma (70⁰C'de 5 dakika boyunca deterjan temizleyicisinde ısıtma)
5. Durulama
6. %30 HCl (Hidroklorik asit) çözeltisinde 1 dakika bekletme
7. Durulama
8. Trikloretilen ile temizleme

9. Saf suda durulama



Şekil 7.2: Metkon zımpara ve taşlama makinası.

Kaplanan numunelerin özellikleri düşük alaşımlı çeliktir, ön işlemler bu malzemeye göre seçilmiştir. Farklı çelik tiplerine (örneğin dökme demir, yüksek alaşımlı çelik) uygulanması önerilen ön işlemler de ayrıca bulunmaktadır [7].

Dubleks kaplama yapmak için kaplanmış numunenin banyoya ikinci kez girmesinden önce temizlenmesi şarttır. Bu temizlik için son 2 adım yağ alma için uygulanarak ikinci katmanın temiz bir yüzeye yapışması sağlanır.

7.3 Kaplama Prosesi

Kaplama prosesi Ni-P ve Ni-B banyoları için ayrı ayrı anlatılmıştır. Banyo bileşimlerinin farklı olması sebebiyle banyoların hazırlanması da farklıdır. Bununla beraber banyo bileşimleri için verilen reçetelerin hazırlanma aşamasında dikkatli olunması ve reçetelere sadık kalınması banyonun kalitesini artıracaktır.

7.3.1 Ni-P banyosunun hazırlanması

Akımsız nikel fosfor banyosu ticari bir firmadan temin edilmiştir. Bu banyonun özellikleri metallerin, alaşımların ve iletken olmayan malzemelerin üzerine yarı parlak nikel fosfor kaplama yapılabilmesidir.

Banyonun diğer özellikleri ve işletme parametreleri şöyle sıralanabilir:

Fosfor içeriği: %7-8

İç gerilme: hafif

Manyetik özellikler: hafif

Kaplama hızı: 15-25 μ /saat

Sıcaklık: 85-92°C

pH: 4,6-5,2

Banyo yükü: 0,75-2,45 dm²/lt

Banyonun kuruluşu firmanın teknik veri kağıdında belirttiği üzere 0,33 lt Ni-P banyosu kuruluş çözeltisine 0,67 lt saf su eklenmesiyle yapılmaktadır. Su eklemesi yapıldıktan sonra karışım tamamen homojen oluncaya kadar karıştırılır ve pH değeri 4,6-5,2 (optimum 4,8) olarak ayarlanır. Banyo pH'ını belirtilen seviyelerde tutturmak için 1/1 sulandırılmış teknik amonyak veya %25'lik sülfürik asit çözeltisi kullanılmalıdır [25].

7.3.2 Ni-B banyosu

Daha önceden de belirtildiği gibi nikel bor banyolarında indirgeyici olarak dört farklı kimyasal kullanılmaktadır. Bu indirgeyicilerin arasında en çok kullanılan, suda çözünürlüğü diğerlerine göre daha iyi olan ve verdiği üstün mekanik özellikler sebebiyle sodyum borohidrit bu tezin kapsamında kullanılmıştır.

Sodyum borohidritin kullanılmasıyla pH değeri de buna göre ayarlanır ve 12-14 pH değerleri arasında bir banyo hazırlanır. Bu değer aralığında tutulan banyonun en iyi sonuçlar elde edilir.

Kaplama banyosunun yüksek pH değerinin olması kompleks oluşturucuları banyoda zorunlu kılmaktadır. Çünkü bazik banyoda nikel ve diğer metallerin hidroksitleri veya basit tuzlar gibi metal iyonlarının çökmesini engellemek, serbest nikel iyonlarının konsantrasyonunu düşürmek ve metal iyonlarının reaktivitesini düşürmek kompleks oluşturucuların görevidir [9,8]. Kaplama için kullanılan bor banyosunda etilen daimin kompleks oluşturucu olarak kullanılmıştır.

Borohidritin indirgeme özelliği banyo için elzem olsa da malzemenin yüksek reaktivitesi sebebiyle kaplama banyosunun dengede tutulması sorunu ortaya çıkmıştır. Bu sebeple banyoya dengeleyiciler eklenmesi gerekmektedir, aksi takdirde banyonun özellikle de asidik banyoların bozulma riski vardır. Burada dengeleyicinin miktarı çok önemlidir. Banyoya yani borohidrite göre çok dengeleyici koyulması banyonun hızını istenilenden fazla yavaşlatır, az koyulması da banyo hızını çok

artırır, banyoda kaplama çekirdeklenecek çökelir. Bunun anlamı da nikelin numune üzerinde birikmesi değil banyo içinde birikmesidir [9].

7.3.2.1 Banyonun kurulumu

Bir litrelik sodyum borohidrit indirgeyiciler için akımsız nikel bor banyosunun kurulumu aşağıdaki gibi yapılmaktadır [9].

Ana çözelti:

1. 600 ml saf su, beherin içine koyulur.
2. 24 gr nikel klorür tuzu, nikel kaynağı olarak saf suya eklenir ve manyetik karıştırıcıda iyice karıştırılır.
3. Etilen diamin, kompleks oluşturucu olarak 60 gr kullanılır ve nikel klorür su karışımına eklenerek karıştırılır.
4. Optimum banyo pH'ı 12,5 için 26.5 gr potasyum hidroksit banyoya eklenir.
5. Banyo 1 litreye saf suyla tamamlanır.

İndirgeme çözeltisi:

1. 400 ml saf su 1 litrelik beherin içine konulur.
2. 100 gr sodyum borohidrit saf suya eklenir ve mekanik karıştırıcı ile iyice karıştırılır. Oda sıcaklığına soğuyuncaya kadar karıştırmaya devam edilir.
3. Yukarıdaki çözeltiye yaklaşık olarak 200 gr sodyum hidroksit eklenir. Gene aynı şekilde oda sıcaklığına soğuyuncaya kadar karıştırmaya devam edilir.
4. Saf su ile tamamlayarak tüm çözeltinin seviyesinin 834 ml olması sağlanır.

Dengeleyici çözeltisi:

1. 750 ml saf su behere koyulur.
2. 13 gr sodyum hidroksit eklenir.
3. Hazırlanan banyoya 2.6 gr kurşun tungstat eklenir. 10 dk boyunca manyetik karıştırıcıyla karıştırılır.
4. 40 ml etilen diamin ve 13 ml etilen diamin tetra asetat çözeltiye eklenir ve karıştırılır.
5. Çözelti berrak bir hal alınca 1 litreye saf su ile tamamlanır.

Kaplama ana çözeltisi ısıtıcının üzerine konulur ve termokupl kullanılarak banyo sıcaklığı 88-92°C arasında tutulur. Banyo çalışma sıcaklığına gelinceye kadar manyetik karıştırıcıyla karıştırılır. Şekil 7.3'te nikel bor banyosunun sıcaklık ve pH kontrolü görülmektedir.



Şekil 7.3: Nikel Bor banyosu.

Kaplama banyosuna numuneleri koymadan önce çalışma sıcaklığına vardığında 2.6ml/l indirgeme çözeltisinden, 2,6 ml/l banyo dengeleyicisi eklenir. Kaplama banyosundaki kimyasal reaksiyonların devamı için bu çözeltilerle yarım saatte bir banyoya yükleme yapılır. Dengeleyici ve indirgeyici banyoya koyulduktan sonra numuneler banyoya daldırılır ve istenilen kaplama kalınlığına ulaşıncaya veya banyodaki metal iyonları bitene kadar banyoda tutulur. Kaplama hızı banyo yüküne, pH'a, sıcaklığa, metal iyonları konsantrasyonuna yani işlem koşullarına bağlı olarak 2,5µm/saat ile 30µm/saat arasında değişmektedir [9].

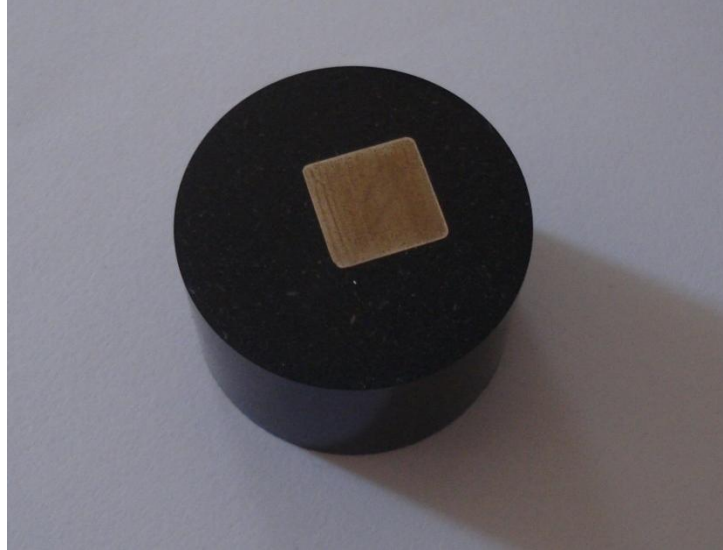
Hazırlanan ve kullanılan kaplama banyosu birden fazla defa kullanılabilir. Fakat tekrar kullanırken banyonun tortularından arındırılması, pH'ının kontrol edilmesi, içeriğindeki iyon yükünün yeterli olup olmadığının incelenmesi gerekmektedir. Aksi takdirde kaplama istenilen kalınlıklarda ve özelliklerde oluşmayabilir [9].

Kaplama kalınlığının yeterli olduğu düşünülen zamanda numuneler banyodan çıkartılıp saf suda durulanır ve kurutulur.

7.4 Deneysel İşlemler

7.4.1 Kalınlık ölçümü

Kaplama banyosuna kalınlık ölçümü için koyulan kare kesitli numune önce ikiye kesilir. Ardından bakalite gömülür ve yüzeyi optik mikroskopta incelenmek üzere zımparalanır ve parlatılır. Parlatma işleminin ardından yüzey kaplamanın rahatça görülebilmesi amacıyla hafifçe dağlanır. Çeşitli saat aralıklarında banyodan çıkarılarak optik mikroskopta incelenen numuneler sayesinde kaplama hızları belirlenir ve kaplamanın uniformluğu gözlenebilir. Böylece özellikle dubleks kaplamalar için önemli olan ilk ve son kat kaplama kalınlıkları için gerekli olan kaplama süresi bulunmuştur. Şekil 7.4 ve 5'te bakalite alınmış ölçüme hazır numune ve Metapress markalı bakalit cihazı görülmektedir.



Şekil 7.4: Gömülmüş numune.

7.4.2 Sertlik

Sertlik ölçümü mikrovikers cihazıyla ölçülmüştür. Şekil 7.6'da görülen Shimadzu markalı Mikrovikers sertlik ölçüm cihazında 100 gr ağırlık kullanılarak bir yüzeyden 5 ölçüm alınmış, bu değerlerin ortalaması alınmıştır.

Ölçüm yapılmadan önce numuneler hafifçe parlatılıp görüntü almaya uygun hale getirilmiştir.

7.4.3 Korozyon testleri

Üç farklı korozyon testi yapılmıştır: %5'lik sülfürik asit çözeltisinde, %10'luk hidroklorik asit çözeltisinde ve polarizasyon cihazında olmak üzere.

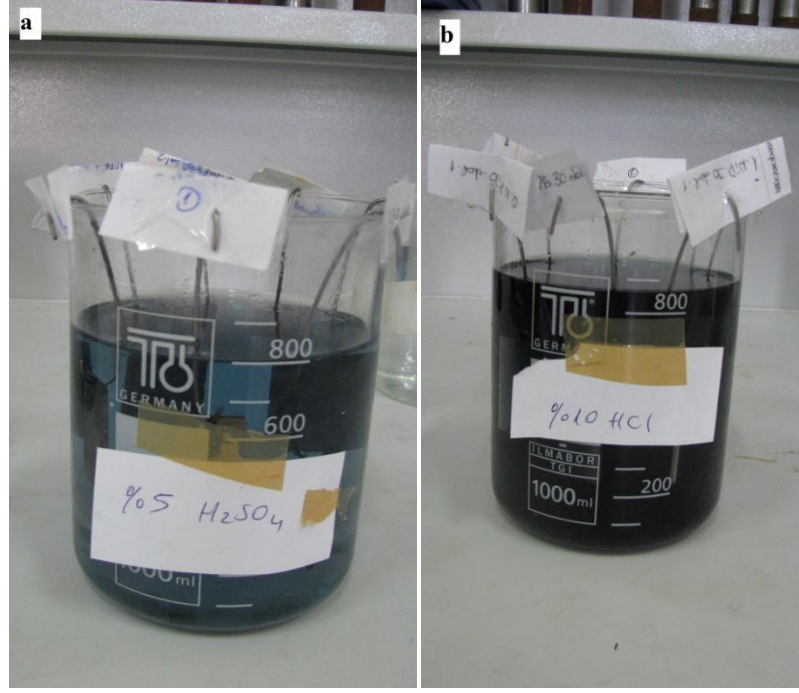


Şekil 7.5: Metapress marka gömme makinası.

Asit çözeltilerinde tutulacak korozyon numuneleri öncelikle 0,1 mg hassasiyetli hassas terazide ölçülmüştür. 7 gün boyunca sürdürülen deneyde her gün aynı saatte teraziden ölçüm alınarak günlük korozyon miktarı belirlenmiştir. %5'lik sülfürik asit çözeltisinin belirlenen pH'ı 0,85, %10'luk hidroklorik asit çözeltisinininkisi ise 0,45'tir. Numuneler çelik askılarla banyoya asılmış ve gerekli görüldükleri zaman değiştirilmişlerdir.



Şekil 7.6: Shimadzu marka MikroVickers cihazı.



Şekil 7.7: Korozyon banyoları (a) %5’lik H_2SO_4 (b)%10’luk HCl .

Tafel polarizasyon yöntemiyle ise çok küçük korozyon hızları ölçülebilmektedir. Katodik ve anodik polarizasyon eğrilerinin korozyon potansiyeline ekstrapole edilmesiyle korozyon hızı bulunmaktadır. Yani korozyon potansiyelinden başlayarak galvanostatik ve potansiyostatik yöntemle anodik ve katodik yönde çizilen yarı logaritmik akım yoğunluğu-potansiyel eğrilerinin çizgisel bölgelerinin korozyon potansiyeline ekstrapole edilmesiyle korozyon hızları belirlenmektedir [26]. Korozyon hücresinin katot reaksiyonu hidrojen iyonu indirgenmesi, anot reaksiyonu da metalin oksidasyonu şeklinde olmaktadır. Korozyonun başlaması ile katot potansiyeli negatif yöne, anot potansiyeli pozitif yöne ilerleyerek E_{corr} olarak belirlenen bir denge potansiyeline erişirler. Deneyin en önemli parametresi önceden belirlenmesi gereken gerilim miktarıdır. Gerilim miktarı aralığı doğru ayarlanmalıdır ki anodik ve katodik eğriler birbirlerini bir noktada kesebilecek şekilde deney gerçekleştirilmelidir. Kullanılan malzemenin içeriği de bu gerilim aralığını etkilemektedir. Örneğin nikel kaplamalar tek bir örnek gibi gözüксе de parlak, yarı parlak ve mat nikel kaplamaların arasında fark vardır. Sülfür oranının belirlediği bu farkın sonucunda parlak nikel kaplamayla yarı parlak kaplama arasında 50mV’den daha fazla potansiyel farkı vardır [27]. Kullanılan her malzeme için Bu deney ile kaplamaların korozyon hızları karşılaştırılarak korozyon direnci incelenmiştir.

Deney numunelerinin (çalışma elektrotu) iletkenliği sağlayabilmek için arka yüzeyine 1.5 mm çapında 300 mm uzunluğunda bakır tel lehimlenmiş ve yalnızca elektrolit ile temasta olan yüzeyleri (yüzey alanı $0,5cm^2$) açıkta kalacak şekilde

epoksi ile kaplanmıştır. Numunelerin yüzeyleri, ağırlık kaybı deneylerinde olduğu gibi hazırlanmıştır.

Korozyon incelemelerinde DC105 Korozyon Analiz yazılımına sahip Şekil 7.8’de verilen bilgisayar kontrollü Gamry model PC4/300 mA potansiyostat/galvonostat kullanılmıştır. Deney hücresi olarak 400 ml beher kap kullanılmıştır. Deney hücresi içerisine, çalışma elektrotu olarak deney numuneleri, karşı elektrot görevini yapan 6 mm çapında karbon elektrot ve referans elektrot olarak da doygun kalomel elektrot (SCE) yerleştirilmiştir. Deney çalışmalarının tümünde, öncelikle sistemden akım geçmeksizin, %3,5 NaCl çözeltisinin içine çalışma elektrotunun ve referans elektrotunun daldırılmasından itibaren ikisi arasındaki korozyon potansiyellerinin mV olarak değişimi ilk 45 dk süreyle, zamana karşı küçülmüştür. Denge potansiyeline (E_{corr}) ulaştıktan sonra potansiyodinamik polarizasyon eğrileri, -2 V’dan 0 V’a kadar 1 mVs^{-1} tarama aralığında katodikten anodik yöne doğru kaydedilmiştir. Tüm deneyler, her bir numune çeşidi için en az ikişer defa olmak üzere polarizasyon eğrileri birbirlerini doğrulayınca kadar tekrar edilmiştir. Tafel eğrilerinden korozyon potansiyeli (E_{corr}) ve korozyon akım yoğunluğu (I_{corr}) hesaplanmıştır.



Şekil 7.8:Polarizasyon deney şeması.

7.4.4 Aşınma

Standartların tanımına göre aşınma “malzeme yüzeyinden mekanik nedenlerle ufak parçacıkların ayrılması sonucu istenmeyen şekilde oluşan değişiklik” olarak belirtilmiştir (DIN 50320). Talaşla işleme, parlatılma gibi kontrollü işlemler aşınma olarak sayılmamaktadır. Bunun yanında eskimeye neden olan kimyasal, fiziksel, elektriksel etkenlerle yüzeyden büyük parçaların kırılması da aşınmaya girmez. Korozyonun aşınma olarak kabul edilmemesinin sebebi de mekanik bir hareket olmamasından ve kimyasal veya elektrokimyasal bir bozulma olmasıdır.

Aşınma olayında 5 parametre bulunur:

- Ana malzeme (aşınan)
- Aşındıran
- Ara malzeme
- Hareket
- Yük

Aşınma çiftini oluşturan ana cisim ve karşı cisim aralarında belli bir ara malzeme varken az veya çok yük altında hareket ettiklerinde aşınma başlar. Ana malzeme metal, mineral, plastik, kauçuk, ağaç gibi aşınma karakteristiğine önem verilen katı cisim; metal, mineral, plastik, çeşitli sıvı veya gazlar da aşındırıcı malzeme olabilir. Ara malzeme katı, sıvı, gazdan biri veya karışımı olabilir. Hareket kaymalı, yuvarlanmalı veya darbe şeklinde; yük ise sabit, değişken, artan, azalan olabilir.

Aşınma işlemleri aşınma izinin görünüşüne göre malzeme kaldırılmasının veya hasarın olduğu fiziksel mekanizmaya göre ve aşınmanın gerçekleştiği koşullara göre üç ayrı grupta sınıflandırılabilir. Aşınma izi çukurlanma, pullanma, çizilme, parlama, oyulma, kemirilme ve kazılma şeklinde olabilir. Fiziksel mekanizma adhezyon, abrazyon ve oksidasyon olarak sınıflanabilir. Aşınma ortamı da yağlı, yağsız aşınma, metal-metal kayma aşınması, yuvarlanma aşınması, yüksek gerilmeli kayma aşınması ve yüksek sıcaklık metalik aşınması şeklinde sınıflandırılabilir.

Aşınma çeşitlerine endüstride %50 abrazif aşınma, %15 adhezif aşınma, %8 erozif aşınma, %8 yenme aşınması, %5 kimyasal aşınma ve %14 diğerleri oranlarında karşılaşılır. Genellikle de aşınma olayında birkaç değişik aşınma mekanizması aynı anda rol oynar [28].

7.4.4.1 Adhezif aşınma

Adhezyon, temas halindeki yüzeyler arasındaki çekim kuvvetlerinden oluşur. Bu çekim kuvvetleri iyonik, kovalent, metalik veya Van der Waals kuvvetleri olabilir.

Karşılıklı yüzeyler ne kadar düzgün işlenmiş veya parlatılmış olursa olsun hiçbir zaman moleküler seviyede düzgün olmayacaktır. Böyle teknik düzgünlükteki yüzeylerde görünüşteki temas alanından çok daha az olan gerçek değme noktalarında, taşınmakta olan yükün etkisi ile malzemenin akma sınırı aşılmakta ve gerçek temas alanı bu yükü taşıyabilecek genişliğe ulaşınca kadar artmaktadır. Böyle bir plastik deformasyonla birlikte yüzeysel kaynamalar meydana gelmektedir [28].

7.4.4.2 Abrazif aşınma

Bir yüzey üzerinde ve yüzeye eğik bir kuvvetin etkisinde olan abrazif taneciğin hareketiyle oluşan aşınma türüne abrazif aşınma denir. Bu kuvvetin dik bileşeni sert taneciğe etki ederek yüzeyin etkilenmesine neden olur.

Aşındırıcılarla temas halinde olan araçlar için abrazif aşınma önemli bir zarar türüdür. Özellikle toprakla temas eden saban, greyder, buldozer bıçakları ile mineral ve maden kazıyıcılar için abrazif aşınmayla çok sık karşılaşılır.

Abrazif aşınmada iki çeşit vardır: 2 cisimli yani pürüzlü bir yüzeyin veya sabit aşındırıcı taneciklerin hareketi ile yüzeyden malzeme kaldırılması; 3 cisimli yani iki kayan yüzey arasında serbest taneciklerin oluşmasıyla malzemenin aşınması. 2 cisimli aşınmaya örnek kaya matkabı verilebilir [28].

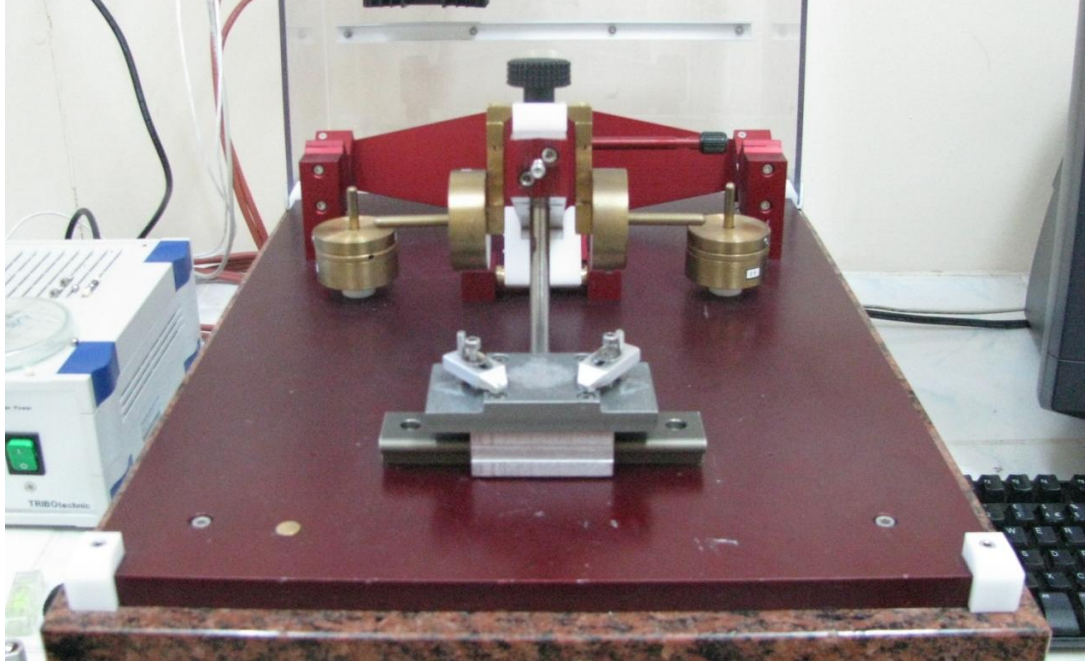
Düzlem üzeri top aşınma deney cihazı

Bu deney lineer olarak ileri geri hareket eden düz bir numune yüzeyine belirli bir yük ile temas ettirilen kürenin kayması esasına dayanmaktadır. Ayrıca aşınma deneyi ile birlikte sürtünme kuvveti deneyleri de yapılabilmektedir. Bu deney cihazının çalışma prensibi motordan alınan dairesel hareket ile kızak üzerinde bulunan kayıt lineer olarak ileri geri hareket ettirilmektedir. Kayıt üzerine bağlama aparatları ile bağlanan numune yüzeyine belirli ölçülerdeki bir kürenin belirlenen yük ile temasına dayanmaktadır. Bu deneydeki önemli parametreler uygulanan yük, numunenin hareket uzunluğu, hareket sıklığı ve hızı, test sıcaklığı, test süresi [29].

Bu tez için kullanılan test düzeneği şekil 7.9'daki Tribotechnic markalı düzlem üzeri top düzeneğidir. Düzenekte kullanılan parametreler şunlardır:

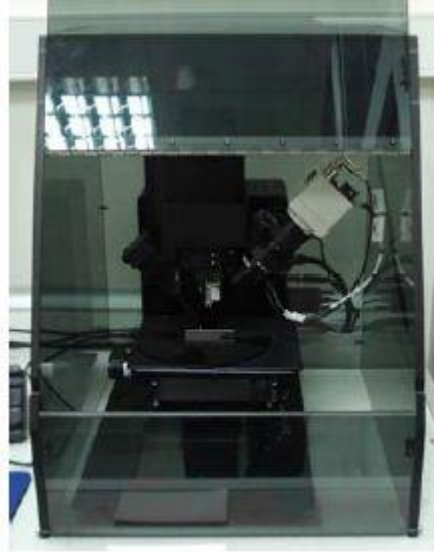
- Yük: 5N
- Kayma hızı: 10mm/s
- İz uzunluğu: 10 mm
- Toplam mesafe: 100 m
- Sıcaklık: 24°C
- Nem:%35

- Top: Alümina (Al_2O_3), 1170 Hv
- Süre: 2,5 saat



Şekil 7.9: Tribotechnic marka aşınma testi cihazı.

Aşınma testinin başından sonuna dek bilgisayar yardımıyla sürtünme katsayısı ve kuvvetin zaman ile değişimi kayıt altına alınmıştır. Aşınma deneyinin bitiminden sonra yüzey profilleri Şekil 7.10.'da görülen Perthen Stylo marka profilometre ile incelenmiştir. Bunun yanında karşı malzeme olarak kullanılan alümina topun optik mikroskopta resimleri de incelenmiştir.



Şekil 7.10:Perthen Stylo marka profilometre.

7.4.5 XRD Analizi

Yüksek çözünürlüklü elektron mikroskopları ile bir malzemenin atomik yapısını görüntülemek mümkündür. Bununla birlikte atomik yapıda bilinmeyen fazları ve yapısal parametreleri belirlemek için farklı bir yöntem olan kırılım teknikleri kullanılmaktadır. Doğada bulunan katı malzemelerin %95'inin kristal yapıda olduğu düşünülürse bu yapıların içerisindeki fazları ve yapıları belirlemek için en çok kullanılan yöntem X-ışını kırılımı (X-ray Diffraction) yöntemidir. Özellikle ince film analizi için çok uygun bir yöntemdir. Bunun başlıca sebebi x ışınlarının dalga boyları atomik mesafelerin ölçümü için çok uygundur ve böylece yapısal araştırmalarda yarar sağlamaktadır. Bunun yanında da x-ışını saçılım teknikleri hasarsız bir tekniktir. Ölçüm sonrası malzeme veya filmde herhangi bir zarar oluşmaz. Kullanılan X-ışınlarının dalga boyları genellikle $0.5\text{\AA}$ ile $2.5\text{\AA}$ arasında değişmektedir [30].

Kaplamaların faz analizi şekil 7.11'de bir örneği görülen XRD cihazında 35 kV ve 28.5 mA değerlerinde Cu $K\alpha$ radyasyonu ($\lambda = 0.154\text{ nm}$) tarama aralığı $30-60^\circ$ arasında 0.020° birim ilerleyerek ve $1^\circ/\text{dak}$ tarama hızında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 7.11: XRD ölçüm cihazı.

8. DENEY SONUÇLARI VE İRDEMELER

8.1 Akımsız Kaplamaların Faz Analizlerinin İncelenmesi ve Kimyasal Bileşimlerinin Tespiti

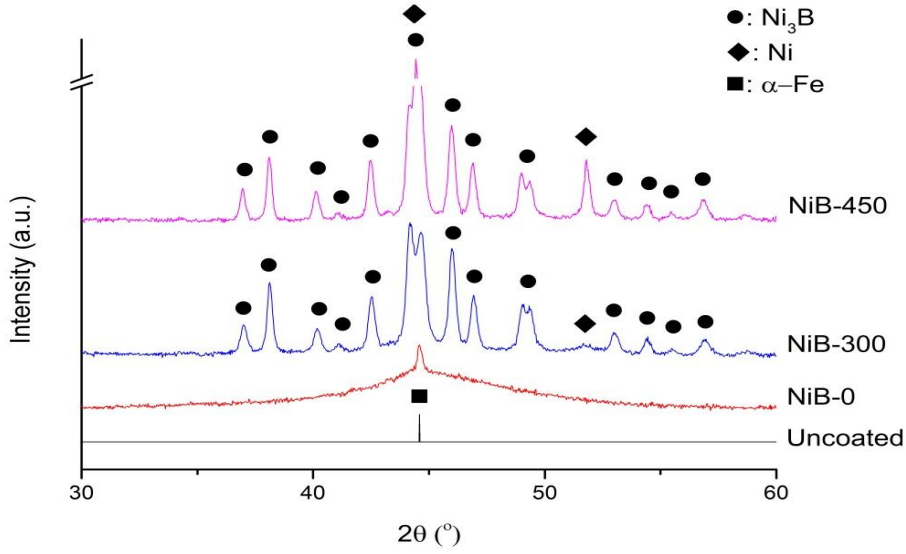
Kaplamaların kimyasal bileşimine karar vermede SEM’ de yapılan EDS analizlerinin sonuçlarından yararlanılmıştır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 8.1’de görülmektedir.

Çizelge 8.1: Akımsız Kaplamaların Kimyasal Bileşimleri.

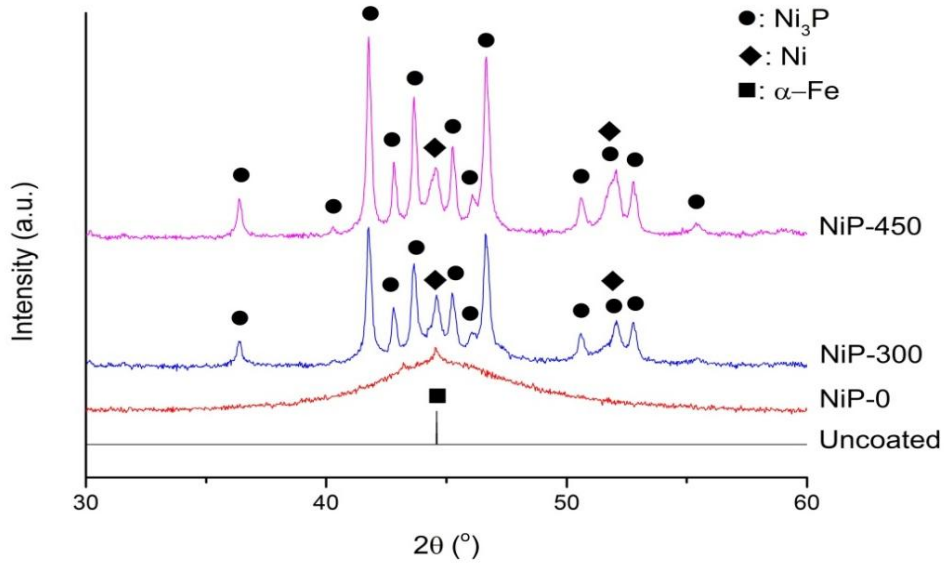
Kaplama Cinsi	Nikel içeriği (wt.%)	Fosfor içeriği (wt.%)	Bor içeriği (wt.%)
Ni-P	92.5	7.5	-
Ni-B	94.9	-	5.1

Elde edilen akımsız Ni-P, Ni-B ve Ni-P/Ni-B kaplamaların XRD grafikleri incelendiği zaman her üç kaplama için de karşımıza amorf bir yapı çıkmaktadır. Kaplama yapılarının sıcaklıkla değişimini incelemek amacıyla kaplamalara 300 ve 450°C sıcaklıklarda bir saat süreyle ısıtıl işlem uygulanmıştır. Şekil 8.1, 8.2 ve 8.3’de görüldüğü gibi, ısıtıl işlem uygulanmamış yapılar incelendiğinde, amorf yapının varlığı ve bu yapıdaki yüksek şiddetli olarak yer alan (1 1 1) Ni piki, kaplamadaki baskın yönelmenin [1 1 1] doğrultusunda olduğunu göstermektedir. Bu da sıkı paket (1 1 1) düzlemlerinin numune yüzeyine paralel şekilde yer aldığı anlamı taşımaktadır. Bu sonuç daha önce gerçekleştirilen birçok çalışmada elde edilen sonuçlarla paraleldir [31].

Akımsız kaplamaların kristalin bir yapıya dönüşebilmesi için farklı sıcaklıklarda isteğe bağlı olarak çeşitli ısıtıl işlem uygulamaları gerçekleştirilir. Bu ısıtıl işlem sayesinde yapının kristalin bir faza dönüşmesi aynı zamanda oluşabilecek ara



Şekil 8.1: Akımsız Ni-B kaplamalarının farklı sıcaklıklarda gerçekleştirilen ısıt işlemler sonrası elde edilen XRD grafikleri.

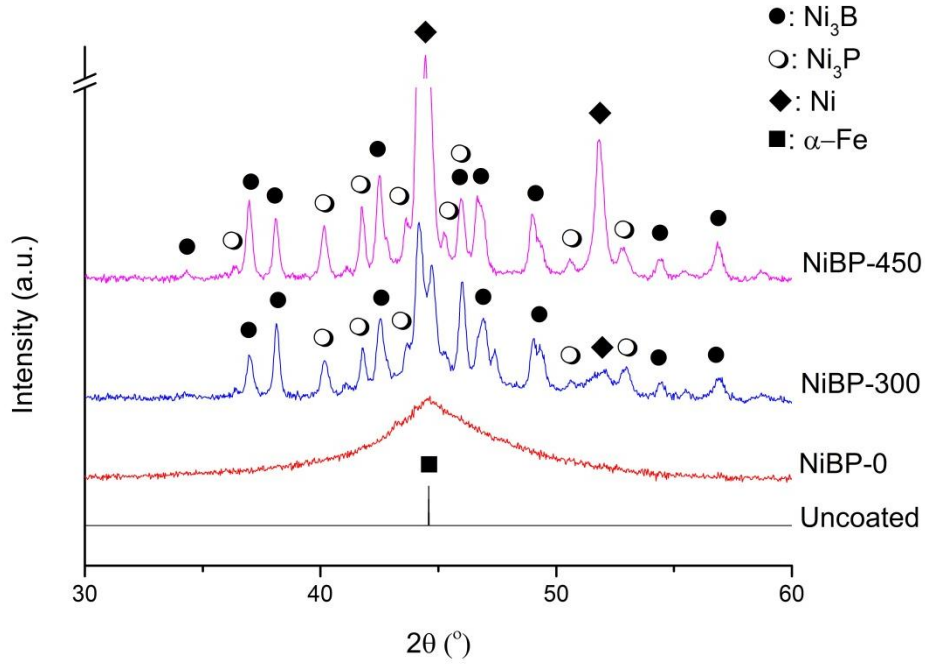


Şekil 8.2: Akımsız Ni-P kaplamalarının farklı sıcaklıklarda gerçekleştirilen ısıt işlemler sonrası elde edilen XRD grafikleri.

bileşikler sonucunda sertlik değerlerinde artış göstermesi beklenir. Çalışmada sırasıyla 300 ve 450°C sıcaklıklarda birer saat süreyle uygulanan ısıt işlemler sonucunda elde edilen XRD grafikleri Şekil 8.1, 2 ve 3’de yer almaktadır. Akımsız Nikel kaplamalara 300°C ’ de uygulanan ısıt işlem sonucunda amorf yapının

korunduğu, bunun yanında $(1\ 1\ 1)$ pikinin şiddetinin arttığı ve nikelin $(2\ 0\ 0)$, $(2\ 2\ 0)$ ve $(3\ 1\ 1)$ yönlerindeki piklerinin daha belirgin hale geldiği görülmektedir.

450°C’de gerçekleştirilen ısıtıl işlem sonucu ortaya çıkan piklerde ise Ni tamamen kristalin bir fazda karşımıza çıkmaktadır. Ni-P kaplamalarda Ni_3P piklerine, Ni-B kaplamalarında ise Ni_3B piklerine rastlanmıştır. Bu da NiB katmanının kristalleştiğinin kanıtı olarak görülebilir. Artan ısıtıl işlem sıcaklığı ile birlikte bu fazların çökmesi beklenen bir durumdur.

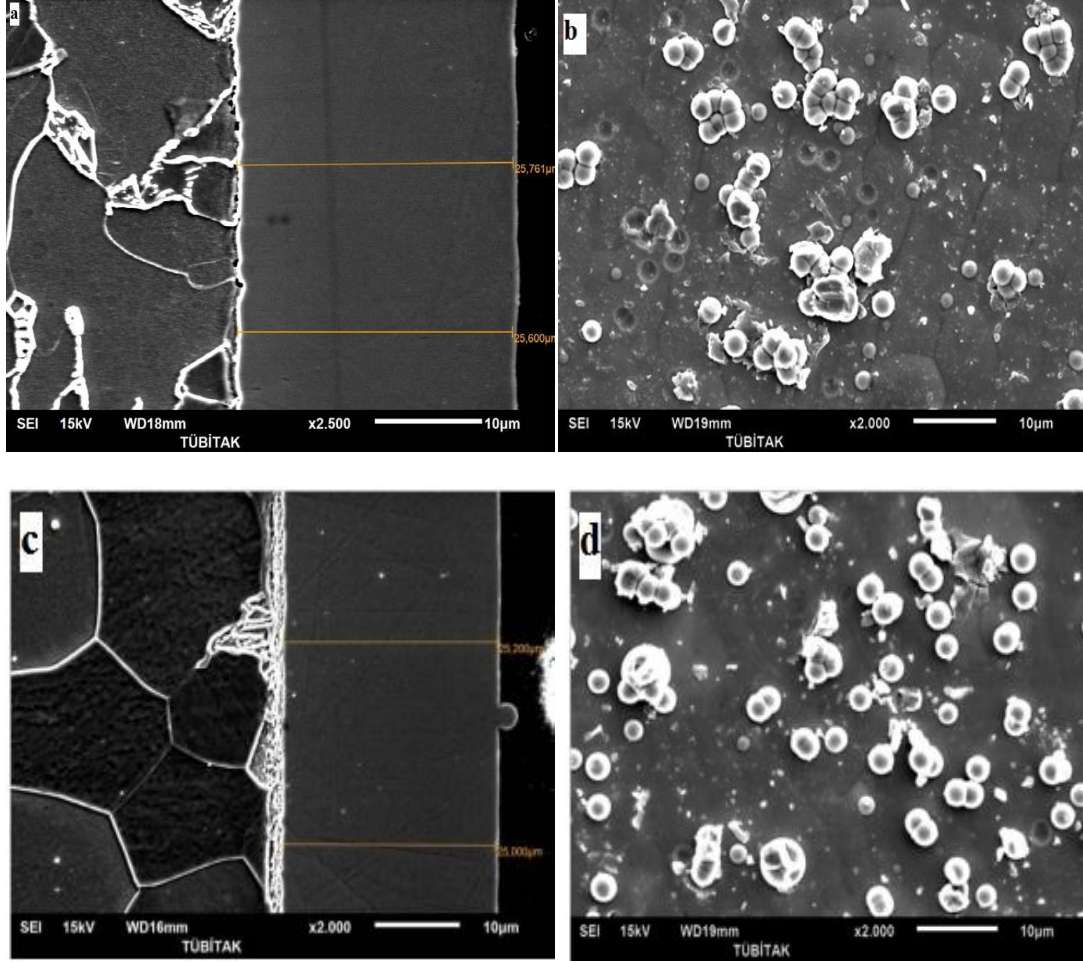


Şekil 8.3: Akımsız Ni-P/Ni-B kaplamalarının farklı sıcaklıklarda gerçekleştirilen ısıtıl işlemler sonrası elde edilen XRD grafikleri.

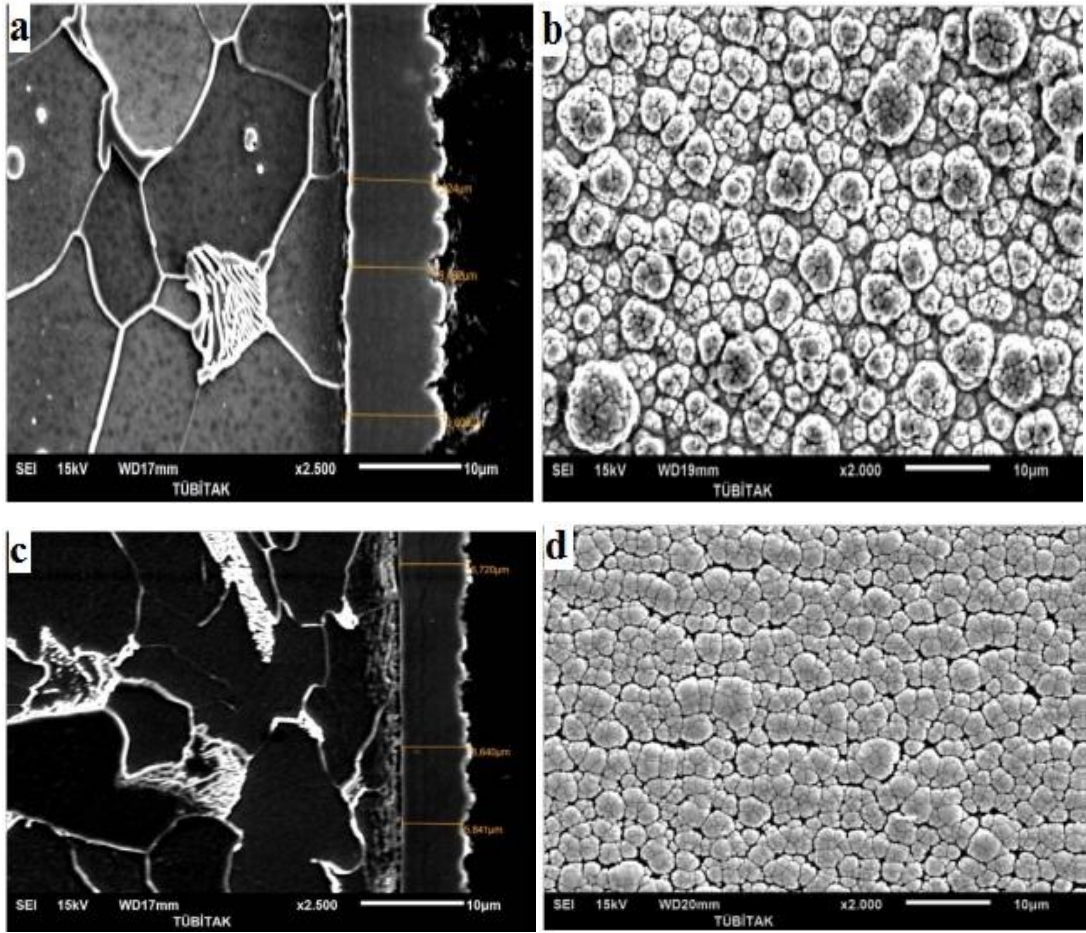
8.2 Akımsız Kaplama Kalınlıklarının ve Yüzey Morfolojisinin İncelenmesi

Akımsız Nikel kaplamalarının kalınlıklarını ve kaplama kalitesini tespit etmek amacıyla numunelerin kesitleri SEM yardımıyla incelenmiştir. Şekil 8.4, 5 ve 6’da farklı kaplamaların kesitleri görülmektedir. Her üç kaplama kesitlerinin incelenmesi sonucu kaplama kalitesinin iyi olduğu, kaplama içersinde herhangi bir gözenekli yapının olmadığı tespit edilmiştir. Kaplama yüzeylerinin yapısını incelemek için de yüzey morfolojisi incelenmiştir. Akımsız Ni-B kaplamalarda sütunsal tane gelişiminden dolayı kaplamanın dış yüzeyinin noduler yapıda olduğu görülmektedir.

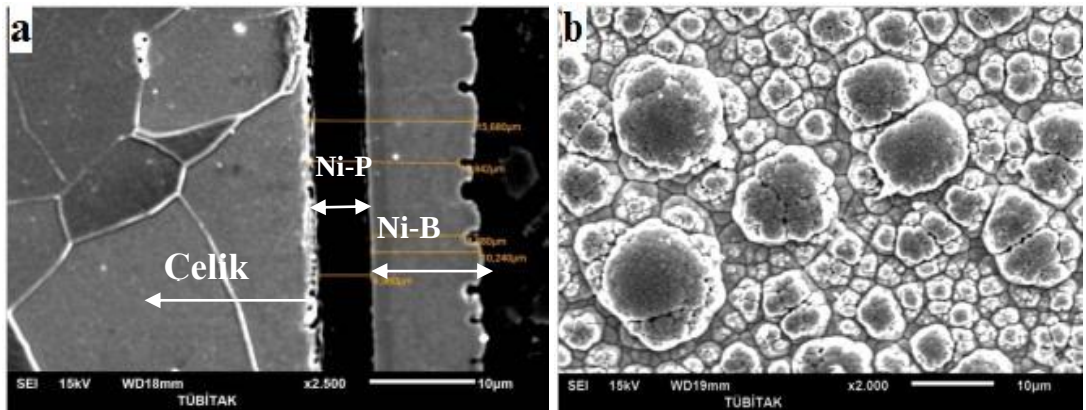
Uygulanan ısıtıl işlem sonucu bu sütunsal yapının oluşturduğu noduler yapının daha sıklaştığı görülmektedir. Bu yapı Ni-P kaplamalarda görülmemektedir.



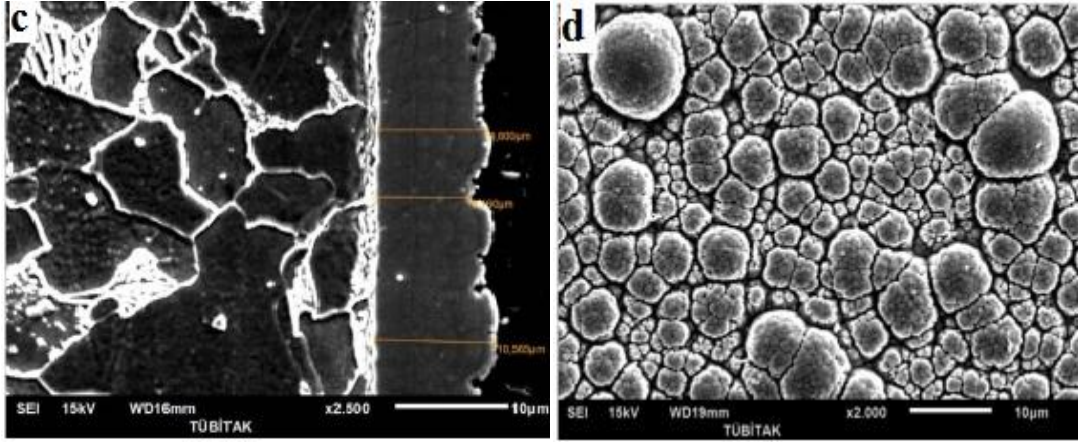
Şekil 8.4: Akımsız Ni-P kaplamasının ısıtıl işlem görmemiş (a) kesit görüntüsü, (b) yüzey morfolojisi, ısıtıl işlem sonucu (c) kesit resmi ve (d) yüzey morfolojisi.



Şekil 8.5: Akımsız Ni-B kaplamasının ısıt işlem görmemiş (a) kesit görüntüsü, (b) yüzey morfolojisi, ısıt işlem sonucu (c) kesit resmi ve (d) yüzey morfolojisi.



Şekil 8.6.a: Akımsız Ni-P/Ni-B kaplamasının ısıt işlem görmemiş (a) kesit görüntüsü, (b) yüzey morfolojisi.

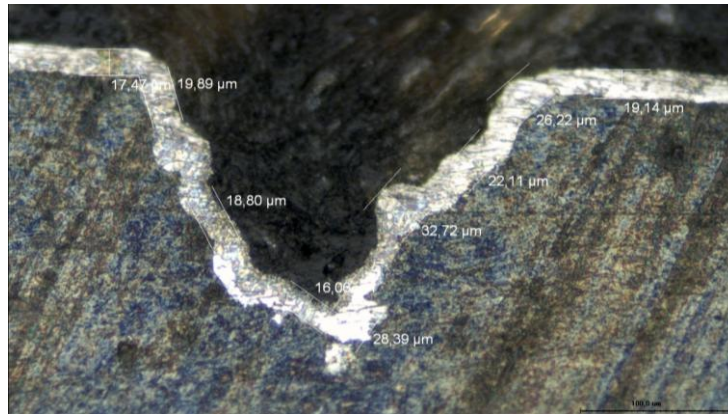


Şekil 8.6.b : Akımsız Ni-P/Ni-B kaplamasının ısıtıl işlem sonucu (c) kesit resmi ve (d) yüzey morfolojisi.

Akımsız kaplamalar sonucu elde edilen kaplama kalınlıkları Çizelge 8.2.’de ve uniform kaplama Şekil 8.7’de görülmektedir.

Çizelge 8.2: Farklı Ni kaplamalarının kaplama kalınlıkları.

Kaplama Türü	Kalınlık (µm)
Ni-P	25
Ni-B	10
Ni-P/Ni-B	5 + 10



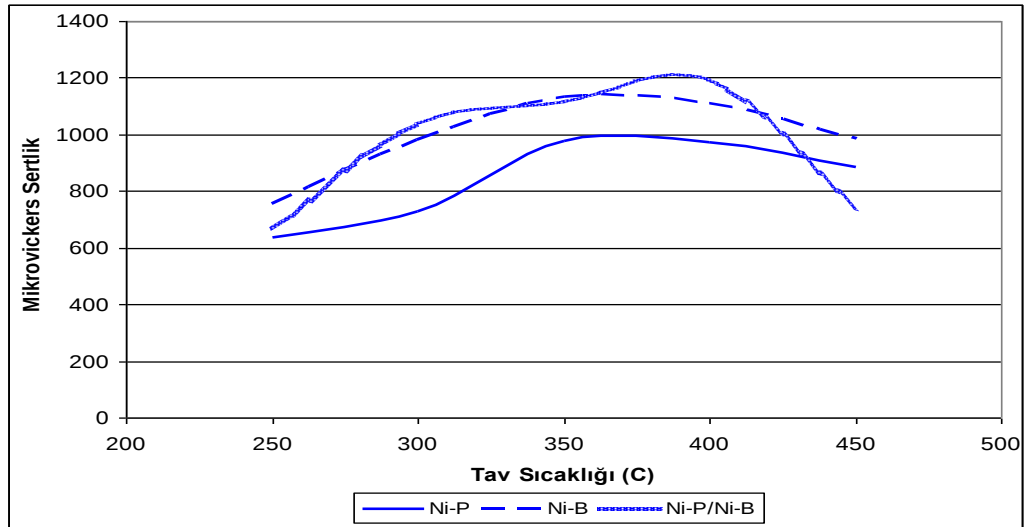
Şekil 8.7: Uniform kaplama kalınlığı.

8.3 Kaplama Sertliklerinin İncelenmesi

MikroVickers ile 100 g yük altında ısıtıl işlem öncesi ve sonrası kaplamaların sertlik ölçümleri yapılmıştır. Kaplanan her bir numuneden alınan beş ölçüm ve bir banyodan kaplanan en az 3 numunenin sertlik değerlerinin ortalaması alınarak Çizelge 8.3 ve Şekil 8.8.'de oluşturulmuştur.

Çizelge 8.3: Kaplama ve farklı sıcaklıklarda gerçekleştirilen ısıtıl işlemler sonrasıkaplamların Mikrosertlik değerleri.

Sıcaklık (°C)	Ni-P	Ni-B	Ni-P/Ni-B
Kaplandığı gibi	570	655	678
250	635	757	666
300	729	979	1038
350	977	1131	1115
400	974	1109	1192
450	886	987	739



Şekil 8.8: Kaplama sertliklerinin tav sıcaklığı ile değişimi.

Çizelge 8.3.' de verilen sertlik değerleri incelendiğinde her üç kaplama tipinde de ısıtıl işlem sonrası sertlik değerlerinin arttığı tespit edilmiştir. Ni-P ve Ni-B kaplamalarında en yüksek sertlik değerleri 350⁰C değerinde elde edilirken, dubleks kaplamada 400⁰C değerinde en yüksek sertlik değerine ulaşmaktadır. Her üç kaplama tipi birbirleriyle karşılaştırıldığında ise, dubleks kaplamanın 1192 VHN sertlik değeri ile en yüksek değere ulaştığı görülmektedir.

8.4 Kaplamaların Sürtünme ve Aşınma Özelliklerinin İncelenmesi

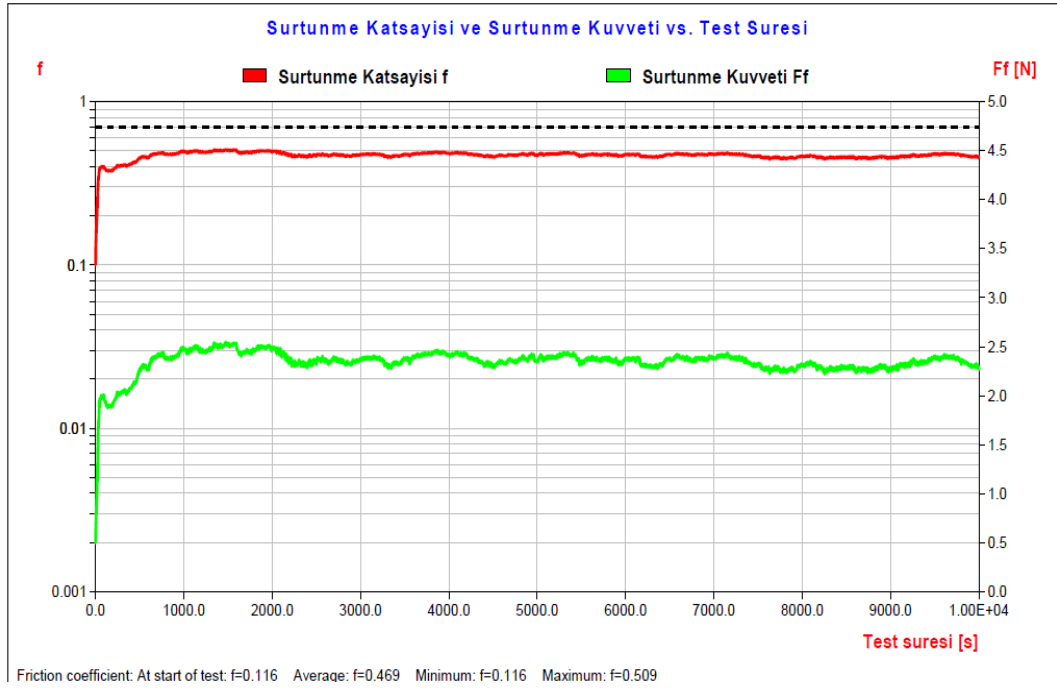
Kaplamaların tribolojik davranışlarını incelemek için disk üzeri top deneyleri yapılmıştır. Al₂O₃ top kullanılarak gerçekleştirilen deneyler sonrası aşağıda belirtilen analizler gerçekleştirilmiştir:

- Aşınma deneyi esnasında zamana bağlı olarak sürtünme kuvvetlerinin ve sürtünme katsayısının tespit edilmesi.
- Aşınma yüzeylerinin optik profilometre ile analizi.
- Aşınma yüzeylerinin EDS yardımıyla kimyasal bileşim analizi.
- Aşındırıcı Al₂O₃ topun aşınma yüzeyinin analizi

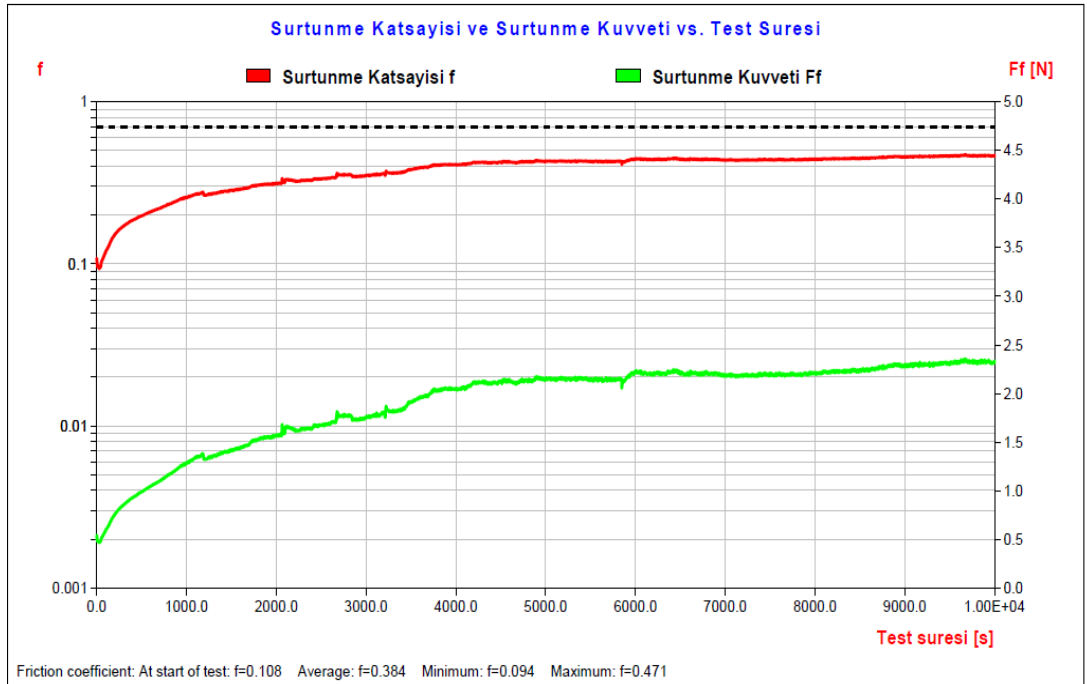
Bu analizler sonucu amaç, kaplama sonucu çeliğin aşınma dayanımında iyileşme olup olmadığının incelenmesi ve farklı kaplamaların aşınma özelliklerini (kaplama aşınma dayanımı, aşınma mekanizması) tespit edilmesi ve birbirleriyle karşılaştırılmasıdır.

8.4.1 Sürtünme kuvvetlerinin ve sürtünme katsayısının tespit edilmesi

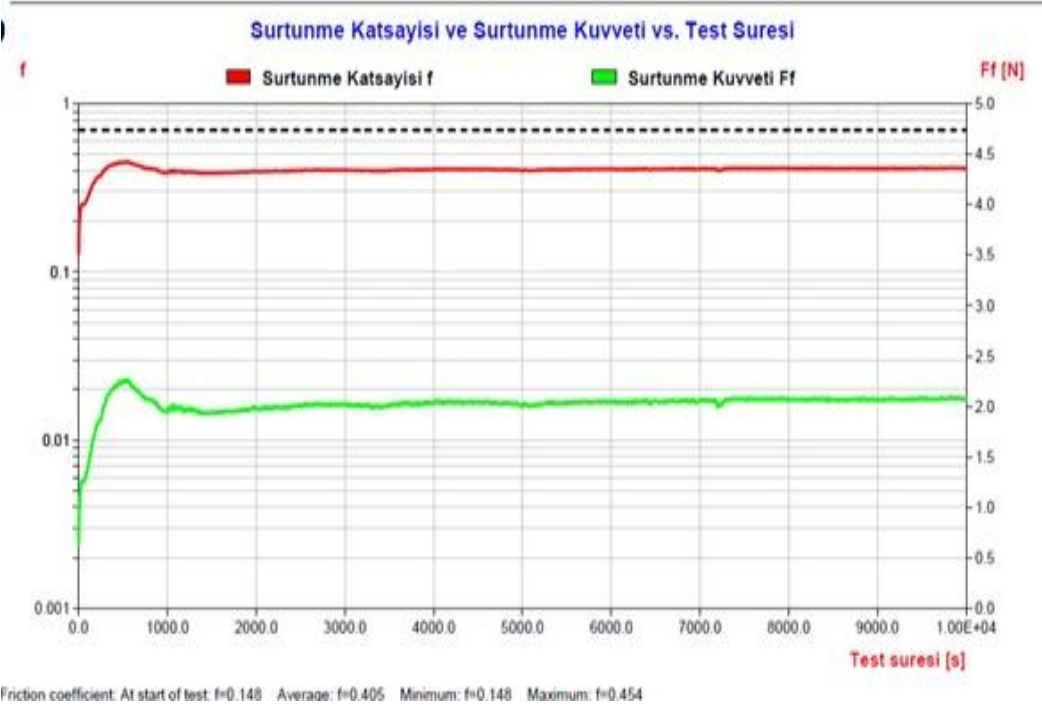
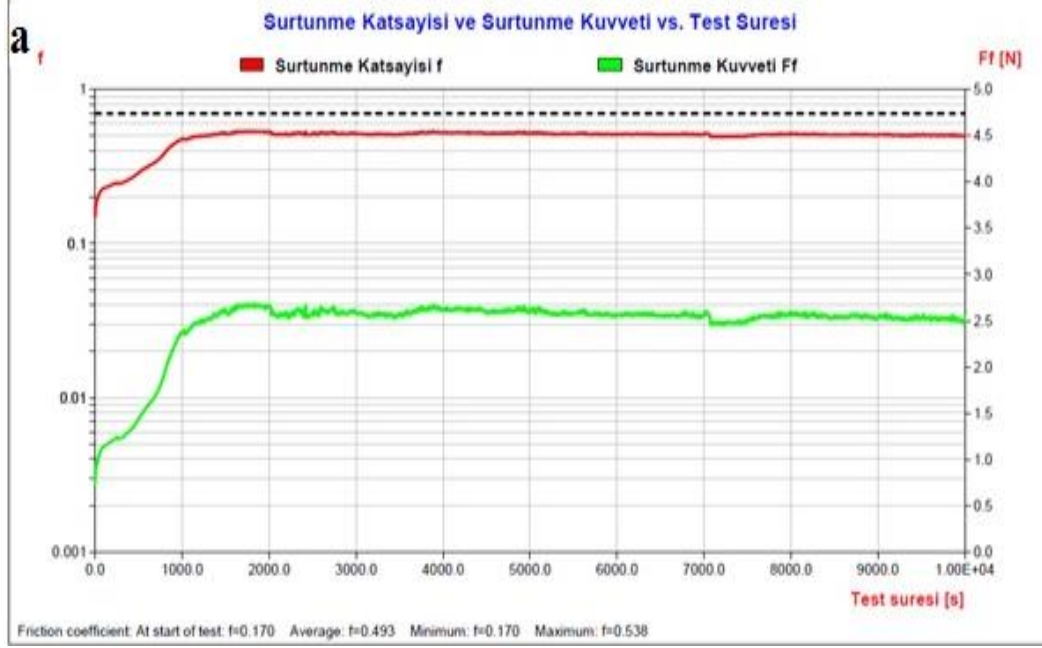
Çeliğin ve farklı kaplamalı numunelerin, Al₂O₃ top ile gerçekleştirilen disk üzeri top aşınma deneyleri sonucu elde edilen sürtünme katsayısı ve sürtünme kuvvetlerinin değerlerinin zamana göre değişimi Şekil 8.9 – 8.12 arası görülmektedir. Ni-B ve Ni-P/Ni-B kaplamaların ısıtıl işlem görmemiş numuneleri de analiz edilmiştir.



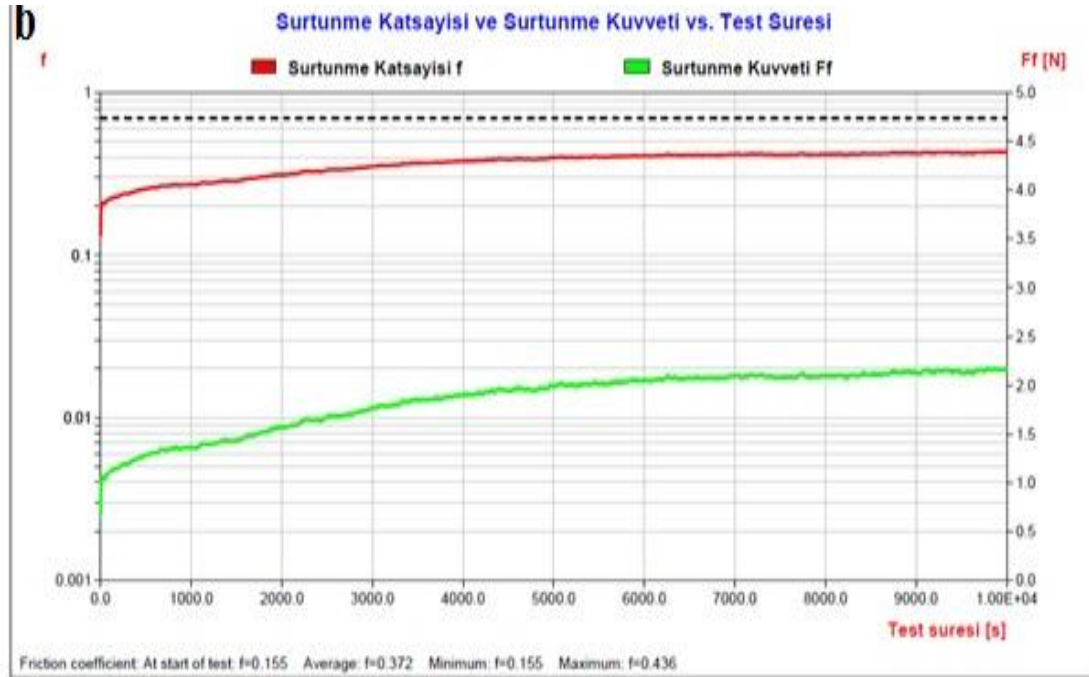
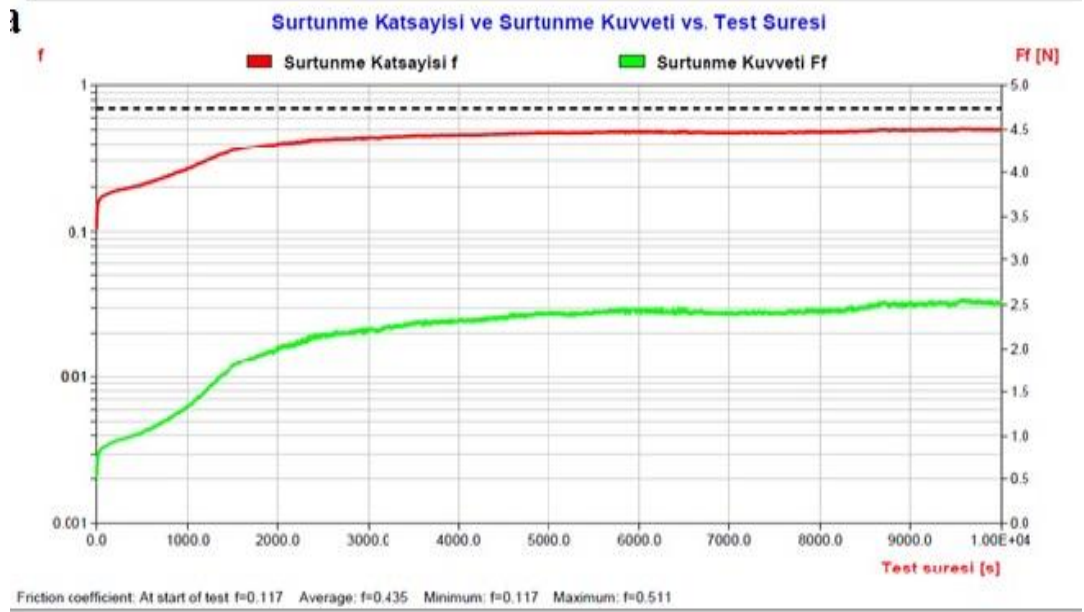
Şekil 8.9: Çeliğin Al_2O_3 top ile gerçekleştirilen aşınma deneyi sonucu elde edilen sürtünme katsayısı ve sürtünme kuvvetlerinin zamana bağlı değişimi.



Şekil 8.10: Isıl işlem görmüş Ni-P kaplamasının Al_2O_3 top ile gerçekleştirilen aşınma deneyi sonucu elde edilen sürtünme katsayısı ve sürtünme kuvvetlerinin zamana bağlı değişimi.



Şekil 8.11: Ni-B kaplamasının Al_2O_3 top ile gerçekleştirilen aşınma deneyi sonucu elde edilen sürtünme katsayısı ve sürtünme kuvvetlerinin zamana bağlı değişimi (a) ısıtılmış, (b) ısıtılmamış.



Şekil 8.12: Ni-P/Ni-B kaplamasının Al_2O_3 top ile gerçekleştirilen aşınma deneyi sonucu elde edilen sürtünme katsayısı ve sürtünme kuvvetlerinin zamana .ağıl değişimi (a) ısıt işlem görmemiş, (b) ısıt işlem görmüş.

8.4.2 Aşınma deneyi sonrası aşınma yüzeylerin analizi

Aşınma sonrası oluşan izlerin derinlikleri ve genişlikleri, yüzey profilometresi kullanılarak her bir izden yapılan 3 ölçümün ortalaması alınarak belirlenmiştir ve iz alanları hesaplanarak Çizelge 8.5’de verilmiştir.

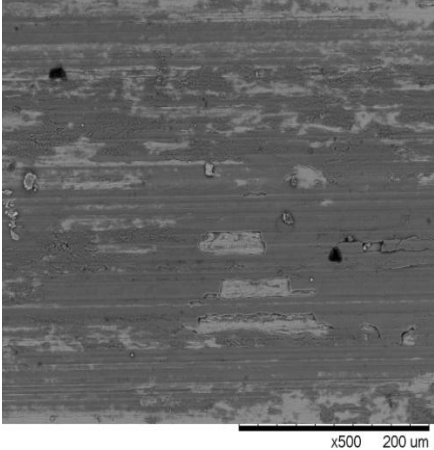
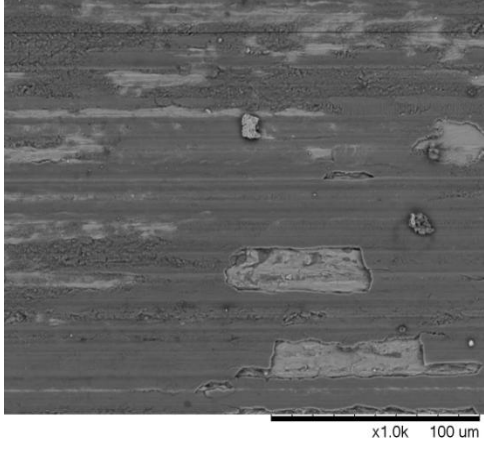
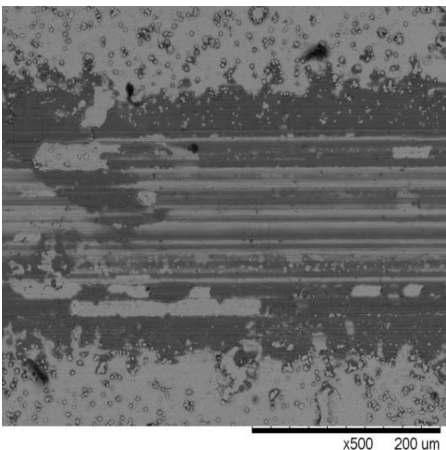
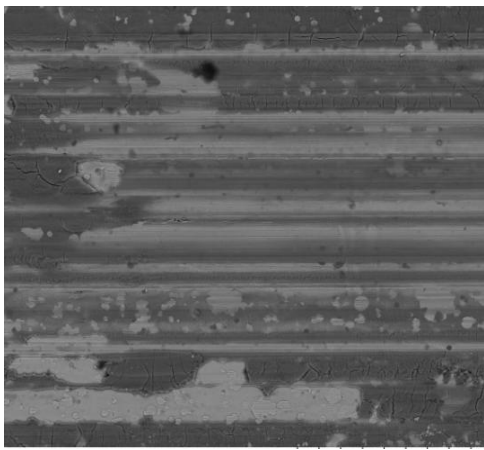
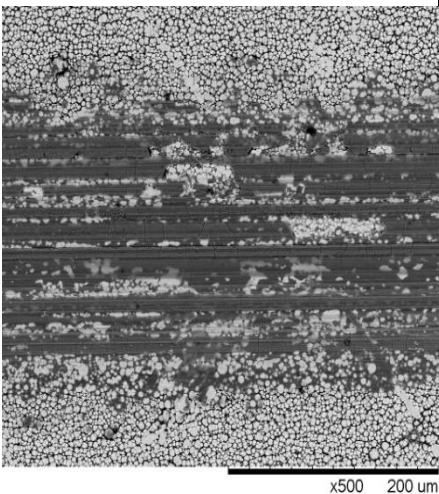
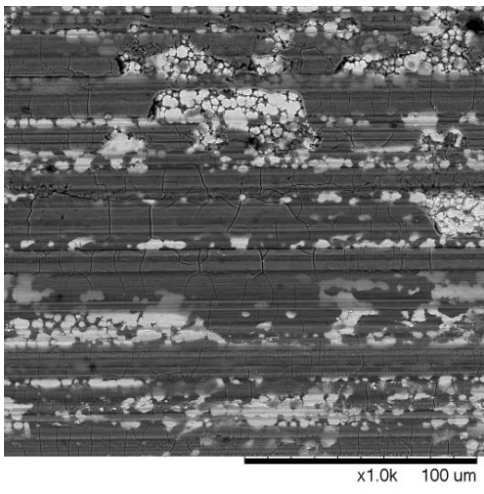
Çizelge 8.4: Aşınma deneyleri sonucu elde edilen ortalama sürtünme katsayıları.

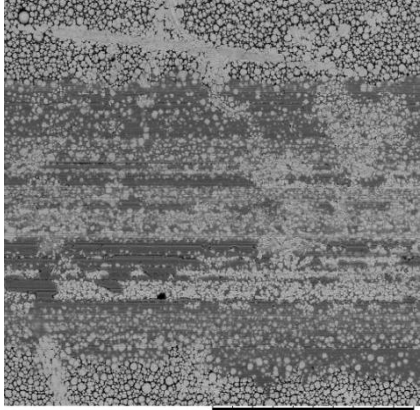
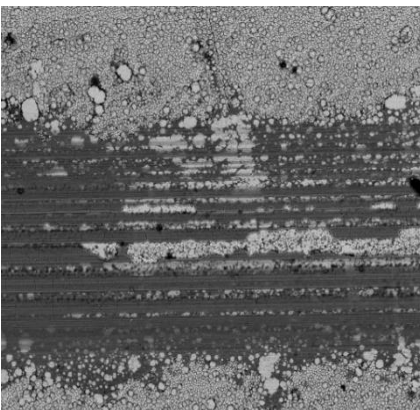
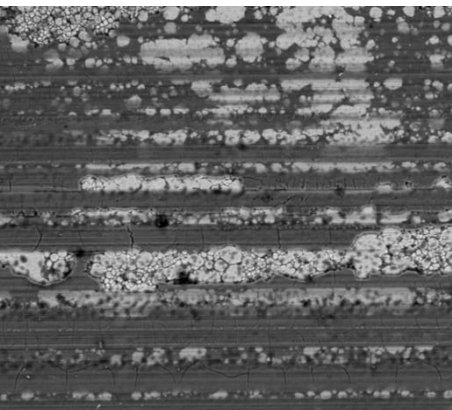
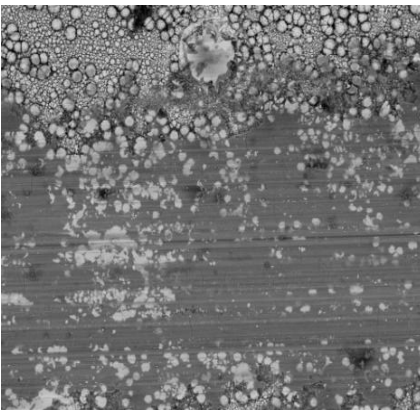
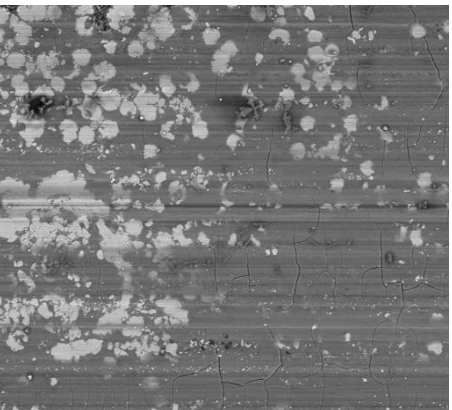
Numune	Ortalama Sürtünme Katsayısı
St-bos	0,47
Ni-P (Isıl işlem görmüş)	0,38
Ni-B (Isıl işlem görmemiş)	0,49
Ni-B (Isıl işlem görmüş)	0,41
Ni-P/Ni-B (Isıl işlem görmemiş)	0,45
Ni-P/Ni-B (Isıl işlem görmüş)	0,37

Çizelge 8.5: Al₂O₃ top ile gerçekleştirilen aşınma deneyi sonucu elde edilen aşınma izlerinin değerleri.

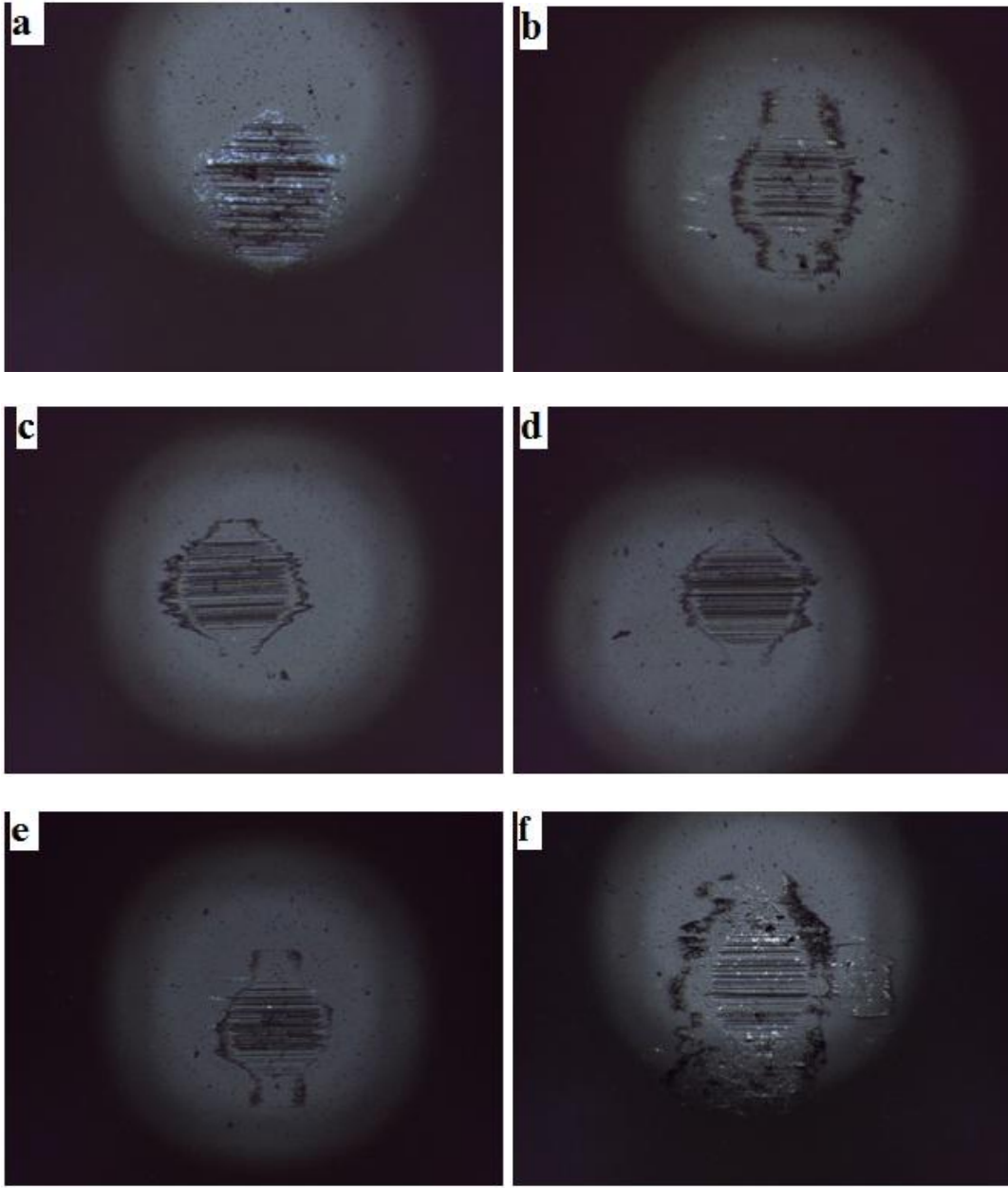
Numune	Ortalama Sürtünme Katsayısı	İşlem	İz Genişliği (µm)	İz Derinliği (µm)	İz Uzunluğu (mm)	İz Alanı (µm ²)	Rölatif Aşınma Direnci
St-bos	0,47		397.667	3.250	5.000	1014.547	1.000
Ni-P/Ni-B	0,37	Isıl işlem görmüş	270.333	1.220	5.000	258.898	3.919
Ni-B	0,41	Isıl işlem görmüş	302.333	1.037	5.000	246.034	4.124
Ni-P	0,38	Isıl işlem görmüş	255.000	1.200	5.000	240.210	4.224
Ni-B	0,49	Isıl işlem görmemiş	288.667	1.277	5.000	289.297	3.507
Ni-P/Ni-B	0,45	Isıl işlem görmemiş	278.667	1.080	5.000	236.254	4.294

Çizelge 8.6: Aşınma Deneyi Sonucunda Oluşan Aşınma İzlerinin 500-1000
Büyütmede Taramalı Elektron Mikroskobunda Görünüşü.

	Büyütme miktarı	
	X 500	X 1000
Çelik		
Ni-P (Isıl işlem görmüş)		
Ni-B (Isıl işlem görmemiş)		

Ni-B (Isıl işlem görmüş)		
Ni-P/Ni-B (Isıl işlem görmemiş)		
Ni-P/Ni-B (Isıl işlem görmüş)		

Aşınma deneyleri sonucu Al_2O_3 top üzerinde meydana gelen izlerin optik mikroskopi incelemesi sonucunda elde edilen görüntüler Şekil 8.13 de verilmiştir.



Şekil 8.13: Aşınma Deneylerinde Karşı Malzeme Olarak Kullanılan Al_2O_3 topraklarında meydana gelen aşınma izleri, a) Kaplamasız, b) Ni-P, c) ısıtılmış işlem görmemiş Ni-B, d) ısıtılmış işlem görmüş Ni-B, e) ısıtılmış işlem görmemiş Ni-P/Ni-B ısıtılmış işlem görmemiş f) ısıtılmış işlem görmüş Ni-P/Ni-B kaplamalarıyla yapılan deney sonucu.

Aşınma deneyleri sonucu hangi aşınma mekanizmasının etkin olduğunu anlamak amacıyla, aşınma deneyleri sonucu kaplama aşınma yüzeyinin kimyasal analizi Çizelge 8.7’de verildiği gibi EDS yardımıyla gerçekleştirmiştir.

Çizelge 8.7: Al₂O₃ top ile gerçekleştirilen aşınma deneyi sonucu aşınma izlerinde EDS yardımıyla tespit edilen Al (%) oranları.

Kaplama Türü	Al (%)
St37	0
Ni-P (Isıl işlem görmüş)	3,8
Ni-B (Isıl işlem görmemiş)	0
Ni-B (Isıl işlem görmüş)	1,5
Ni-P/Ni-B (Isıl işlem görmemiş)	0,7
Ni-P/Ni-B (Isıl işlem görmüş)	1,7

Kimyasal analizde aşınma yüzeyinde araştırılan asıl element alüminyumdur. Bunun nedeni ise aşınma deneyi sonucu aşındırıcı Al₂O₃ toptan kaplama yüzeyine herhangi bir Alüminyum'un transferinin olup olmadığının incelenmesidir.

Aşınma deneyleri sonucu elde edilen verilerin incelenmesi sonucu şu sonuçlara varılmıştır:

- Ni-B ve Ni-P/Ni-B kaplamalarının ısıtıl işlem görmesiyle birlikte sürtünme katsayıları düşmüştür.
- Ni-B ve Ni-P/Ni-B kaplamalarının ısıtıl işlem görmesiyle birlikte sürtünme kuvvetlerinin değeri düşmüştür.
- En düşük sürtünme katsayısı değeri Ni-P/Ni-B kaplamasında elde edilmiştir (0,37).
- Isıl işlem görmüş Ni-B ve Ni-P/Ni-B kaplamalarının zamana bağlı olarak sürtünme katsayısındaki değerinin değişim, çeliğe ve diğer kaplamalara göre değerindeki değişime göre daha azdır, yani daha az dalgalanma göstermektedir.
- Kaplama işlemi sonucu çeliğin aşınma dayanımı artmıştır.
- Meydana gelen aşınma izlerinin derinliği, hiçbir kaplamada kaplama kalınlığına ulaşmamıştır.
- En yüksek aşınma dayanımı, ısıtıl görmemiş Ni-P/Ni-B kaplamasında elde edilmiştir.

- Aşınma sonrasında aşındırıcı Al_2O_3 top üzerinde meydana gelen izleri optik mikroskop incelemesi sonucunda Ni-P/Ni-B kaplamalarda yapılan aşınma sonucu topta meydana gelen aşınma alanının en küçük olduğu tespit edilmiştir.
- Isıl işlem görmüş Ni-P/Ni-B kaplamaların en yüksek aşınma dayanımı göstermemesinin nedeni, aşınma deneyi sonucu aşınma iz alanının esas alınmış olmasıdır. Bu iz alanının tespit edilmesinde 3 noktanın aşınma kesidinin alanı incelenmektedir. Bu rakamın arttırılmasıyla kesit alan değerinin düşmesi, böylece aşınma dayanım değerinin artması muhtemeldir. Nitekim bu kaplama en düşük sürtünme katsayısına ve en düşük Al_2O_3 topun aşınma alanına sahiptir.
- Ni-P kaplamada oluşan aşınma izi incelendiğinde kazımalı aşınmanın var olduğu görülmektedir. Bunun sebebi ise Ni-P kaplamanın sertliğinin düşük olmasıdır.
- Ni-B ve Ni-P/Ni-B kaplamalarında oluşan aşınma izleri SEM' de incelendiğinde aşınmanın kaplama yüzeyinde sadece parlatma etkisi oluşturduğu tespit edilmiştir.
- Aşınma yüzeylerinin EDS yardımıyla kimyasal analizlerinin incelenmesi sonucu, Ni-P kaplamada alüminyuma rastlanmıştır. Bu da Ni-P kaplamada yapılan aşınma deneyinde abrazif aşınma dışında adhezif aşınmanın da etkili olduğu görülmüştür. Nitekim Ni-P kaplamalı numunenin aşınma sonucu oluşan zamana bağlı sürtünme kuvveti ve sürtünme katsayısının dalgalı değişimi de adhezif aşınma mekanizmasını desteklemektedir. Dalgalı ve heterojen akışın nedeni, aşınma esnasında slip-stick mekanizmasının etkin olmasıdır.
- Ni-B ve Ni-P/Ni-B kaplamalarda ise alüminyum oranı çok çok düşük olup, burada abrazif aşınmanın etkin olduğunu göstermektedir.

8.5 Kaplamaların Korozyon Dayanım Özelliklerinin İncelenmesi

8.5.1 Daldırma deneyleri

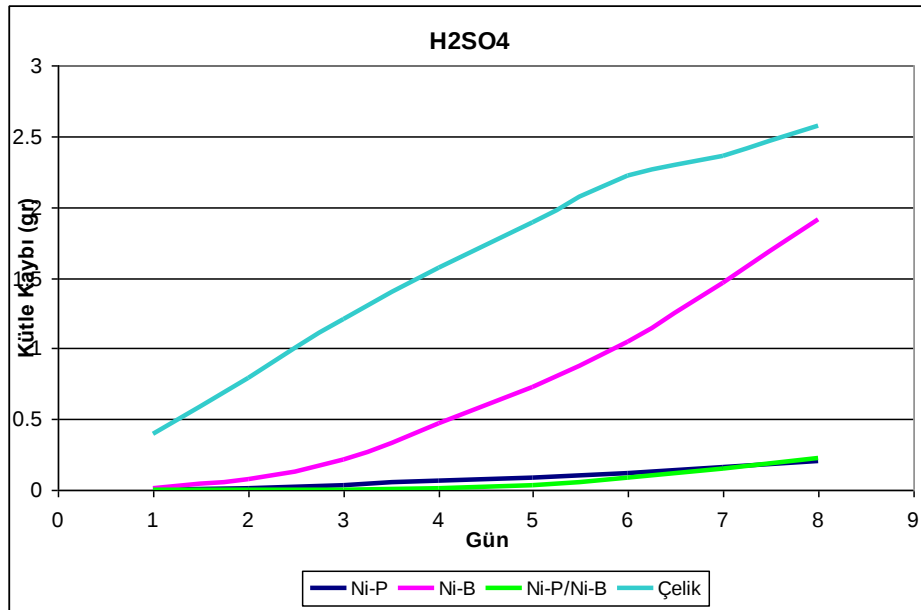
Kaplanan numunelerin öncelikle hassas teraziyle ağırlıkları ölçülmüştür. İlk başta 18 gr olarak ölçülen numuneler sırasıyla çengellere asılarak korozyon banyolarına daldırılmışlardır. Her gün aynı saatte yapılan hassas ağırlık ölçümleri kayıt altına alınarak kaplamaların korozyona dayanımları ortaya çıkmıştır.

Daldırma deneyleri iki farklı asidik korozyon banyosunda gerçekleştirilmiştir. İlki hacimce %5'lik H_2SO_4 çözeltisi diğeri de hacimce %10'luk HCl çözeltisidir. Toplam 7 gün süren deneyde kütle kayıpları Çizelge 8.7, 8.'de ve Şekil 8.14., 15'da verilmiştir.

Sonuçlar incelendiğinde en iyi korozyon dayanımını dubleks Ni-P/Ni-B, ikincinin de Ni-P kaplamanın verdiği gözükmemektedir. Ni-P kaplamaların korozyon dayanımının çok daha iyi olduğu bilinmektedir fakat dubleks kaplamayla beraber ortaya çıkan iyileştirilmiş sonuçların potansiyel düşük korozyon potansiyeli olan katmanın (Ni-B) alt katmanın korozyona uğramasını geciktirdiği yani bir anlamda kurtarma görevi gördüğü anlamına gelir [32].

Çizelge 8.8: H_2SO_4 çözeltisinde kütle kayıpları.

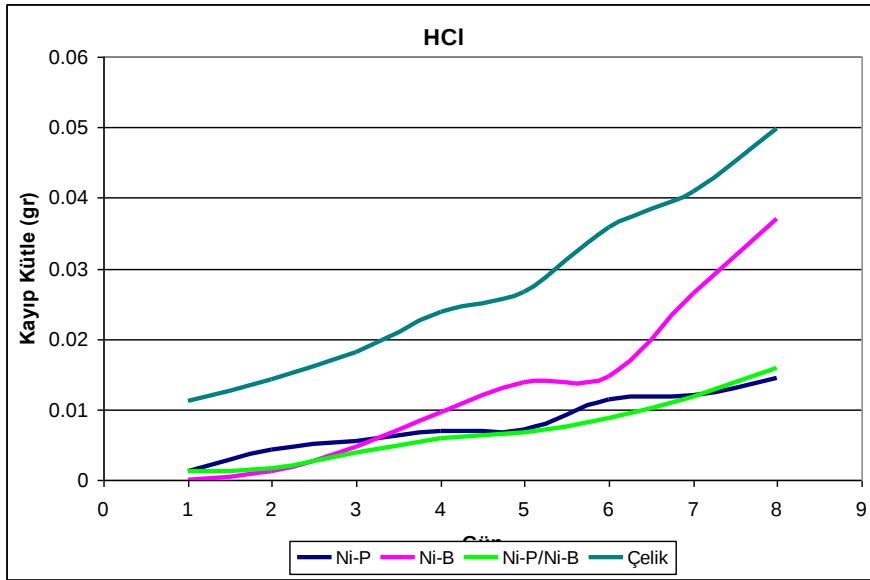
H_2SO_4	1	2	3	4	5	6	7	8
Ni-P	0.0019	0.0121	0.0354	0.0609	0.0898	0.1215	0.1649	0.2019
Ni-B	0.0129	0.0767	0.2091	0.4724	0.7298	1.0496	1.4600	1.9124
Ni-P/Ni-B	0.0007	0.002	0.0025	0.0141	0.0363	0.0887	0.1465	0.2196
Çelik	0.3906	0.7914	1.2015	1.5643	1.8905	2.2195	2.3575	2.5713



Şekil 8.14: H_2SO_4 çözeltisinde kütle kayıp grafiği.

Çizelge 8.9: HCl çözeltisinde kütle kayıpları

HCl	1	2	3	4	5	6	7	8
Ni-P	0.0012	0.0042	0.0055	0.007	0.0072	0.0113	0.0121	0.0145
Ni-B	1E-04	0.0012	0.0046	0.0096	0.0138	0.0147	0.0265	0.0370
Ni-P/Ni-B	0.0013	0.0017	0.0038	0.0058	0.0068	0.0087	0.0117	0.0159
Çelik	0.0111	0.0142	0.0181	0.0237	0.0266	0.0357	0.0408	0.0498

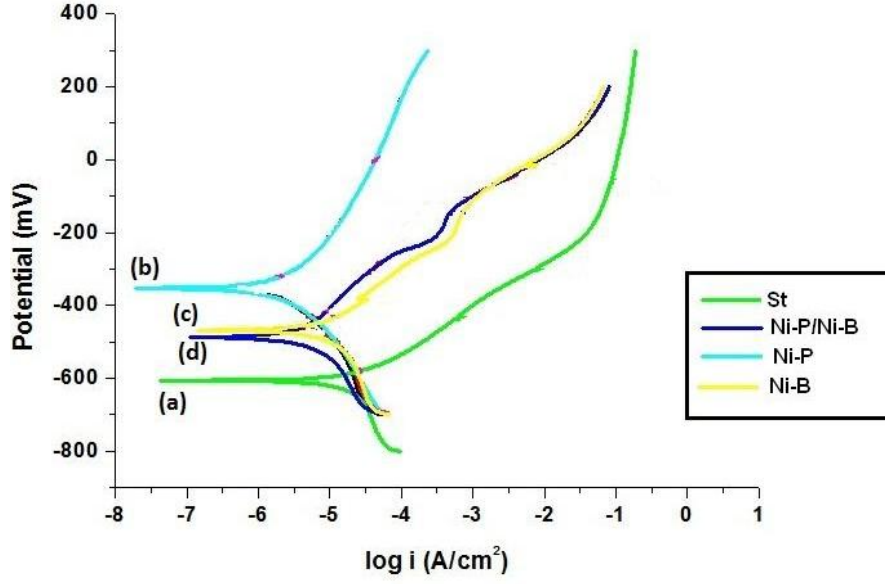


Şekil 8.15: HCl çözeltisindeki kütle kayıplarının grafiği.

8.5.2 Polarizasyon deneyleri

%3,5 NaCl korozif çözeltisi ortamına maruz bırakılan kaplanmamış ve elektrolitik olarak Ni-P, Ni-B ve Ni-P/Ni-B ile kaplanmış çelik malzemelerin potansiyodinamik polarizasyon ölçümlerinden elde edilen polarizasyon diyagramları, sırasıyla Şekil 8.16 ve Çizelge 8.10'da görülmektedir. Kaplanmamış ve nikel kaplanmış malzemelerin potansiyodinamik polarizasyon diyagramları, karşılaştırma yapılabilmesi amacıyla aynı eksen takımı üzerinde verilmiştir. Şekillerde aynı polarizasyon potansiyellerindeki akım yoğunlukları incelendiğinde, taban malzemeler üzerinde elektrolitik olarak oluşturulan nikel kaplamaların çözünme

akımını önemli derecede azalttığı gözlenmektedir. Şekil 8.16, Ni-P, Ni-B ve Ni-P/Ni-B ile kaplanmış çelik malzemelerin polarizasyon diyagramlarını göstermektedir.



Şekil 8.16: Polarizasyon deneyi sonrası ortaya çıkan Tafel eğrileri

Kaplanmamış ve kaplanmış pirinç malzemelerin korozyon potansiyelleri (E_{kor}) karşılaştırıldığında, kaplanmamış durumdaki çelik malzemesinin korozyon potansiyeli yaklaşık -611 mV iken, bu değer Ni-P/Ni-B kaplamada -491 mV, Ni-B kaplamada -473 mV iken en yüksek değere Ni-P kaplamada -357 mV ile elde edilmektedir. Ni-P kaplamada korozyon potansiyellerinde daha pozitif değerlere doğru elde edilen bu artış, elektrolitik olarak uygulanan Ni-P kaplamanın taban malzemenin de korozyon dayanımını artırdığını göstermektedir. Korozyon akım yoğunluğu (i_{kor}) da korozyon çalışmalarında önemli bir parametre olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır. Korozyon hızı, polarizasyon sırasında ölçülen korozyon akım yoğunluğu ile doğru orantılıdır. Kaplama öncesi çelik taban malzemelerden elde edilen korozyon akım yoğunluğu değerleri sırasıyla yaklaşık 23,08 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ iken, yapılan nikel kaplamalar ile korozyon akım yoğunlukları daha küçük değerlere düştü. Ni-B kaplamada elde edilen korozyon akım yoğunluğu değeri yaklaşık 16,43 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ve Ni-P/Ni-B kaplamadan elde edilen korozyon akım yoğunluğu değeri ise yaklaşık 8,72 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ olarak belirlenmiştir. En düşük akım yoğunluğu ise Ni-P kaplamada elde edilmiştir (16,43 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$)

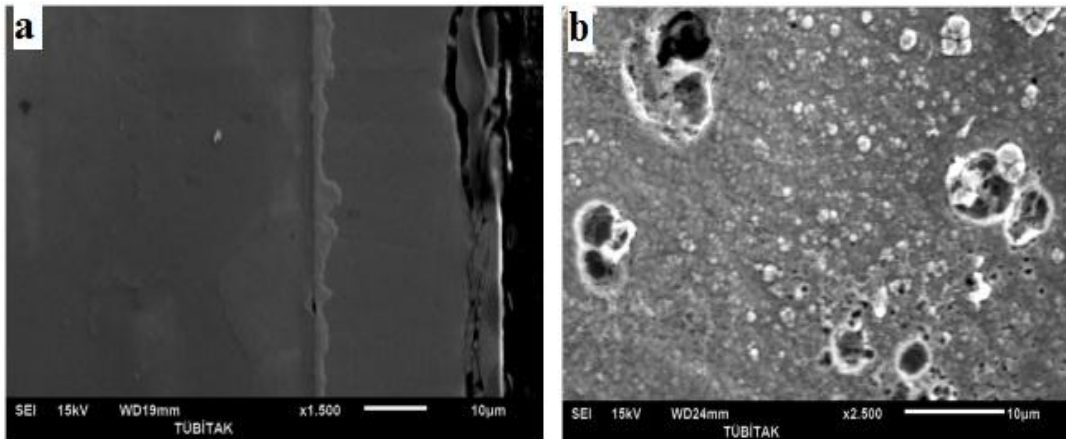
Çizelge 8.10: Polarizasyon deneyi sonucunda oluşan akım ve gerilim değerleri.

Numune No	E _{corr} (mV)	i _{corr} (μA/cm ²)
St-	-611	23,08
Ni-P/Ni-B	-491	8,72
Ni-P	-357	4,07
Ni-B	-473	16,43

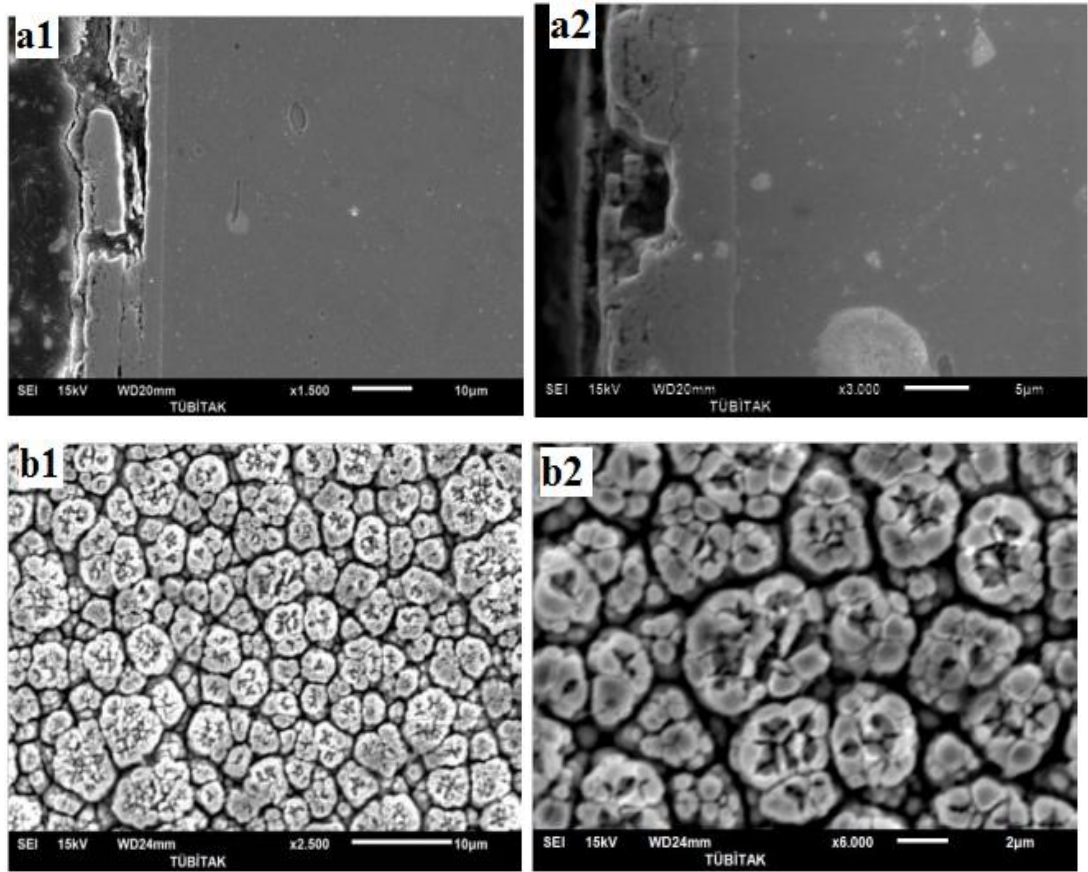
Numunelerin polarizasyon eğrileri incelendiğinde, korozyon açısından en kötü performansın kuşkusuz kaplamasız yüzeye ait olduğu görülmektedir. Yüzeye uygulanan işlemler genel olarak taban malzemenin korozyon direncini arttırmıştır. Bu artış hem korozyon potansiyelinin daha pozitif değerlere kayışı yönünde olmuş hem de korozyon akım yoğunluğunun azalması yönünde olmuştur.

Kaplamanın korozyona karşı bir bariyer olduğu açıktır. Ni-P kaplamanın daha iyi bir sonuç vermesinin sebeplerinden biri kaplamanın kimyasal stabilitesinin yüksek olması söylenebilir [33]. Ayrıca iki katman arasında kaplama sırasında bir arayüz oluşarak porozitenin ilerlemesinin engellemesi de mümkündür [34].

Şekil 8.17-19 arası korozyona uğramış nikel kaplamaların polarizasyon testinden sonraki SEM kesit ve yüzey morfoloji görüntüleri görülmektedir.



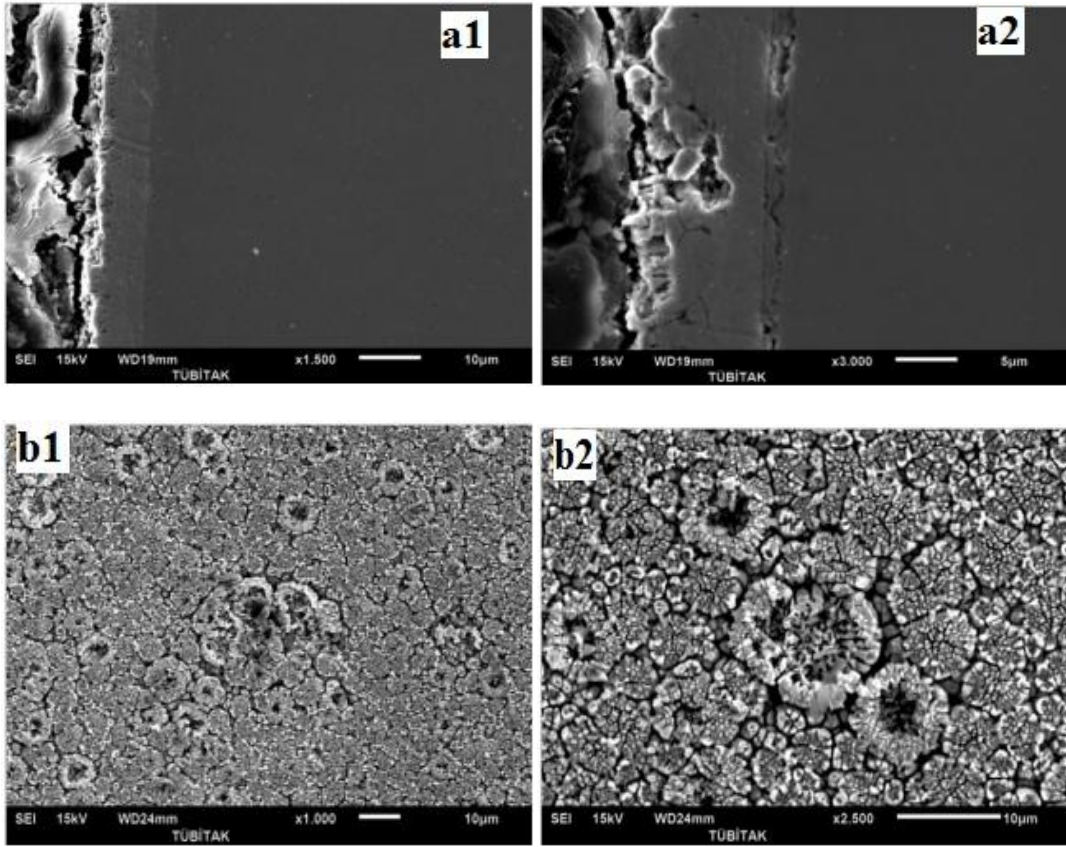
Şekil 8.17: Ni-P kaplamalarının Polarizasyon deneyleri sonrası (a) yüzey kesidinin ve (b) yüzey morfolojisinin görüntüleri.



Şekil 8.18: Ni-B kaplamalarının Polarizasyon deneyleri sonrası (a) yüzey kesidinin ve (b) yüzey morfolojisinin görünümleri (x1500 ve x3000 büyütmede).

Polarizasyon deneyleri neticesinde şu sonuçlara varılmıştır:

- Kullanılan taban malzemelerin korozyon dayanımlarının, üzerlerine uygulanan nikel kaplamalar ile artırıldığını ve dolayısıyla korozyon hızlarının azaltıldığını göstermektedir.
- En yüksek korozif koruma Ni-P kaplamalarında elde edilmiştir.
- Dikkat edilmesi gereken konu, Ni-P ve Ni-P/Ni-B kaplamaları arasında korozyon potansiyelleri arasındaki farkın 134 mV olmasıdır. Literatür araştırmaları sonucu bu değerin 100'ün üzerinde olması durumunda korozif koruma artmaktadır [31]. Bu durumda Ni-P/Ni-B kaplamaları korozif koruma açısından uygundur.
- Polarizasyon deneyleri sonucu Ni-P, Ni-B ve Ni-P/Ni-B kaplamaları incelendiğinde hiçbir kaplamada korozyonun asıl metal olan çeliğe ulaşmadığı görülmüştür.



Şekil 8.19: Ni-P/Ni-B kaplamalarının polarizasyon deneyleri sonrası a) yüzey kesidinin ve b) yüzey morfolojisinin görünimleri

- Polarizasyon deneyleri sonucu Ni-P/Ni-B kaplamaları incelendiğinde korozyonun Ni-B kaplamada pitting şeklinde noktasal olarak ilerlediği, ancak Ni-P tabakasına ulaştığında ise üniform bir yayılma izlediği görülmüştür. Bu da korozyon süresini arttıran bir mekanizmadır.

9. GENEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

1. Bu çalışmada, akımsız metal kaplama yapılabilecek yeni bir düzenek kurulmuştur. Kurulan bu düzenek kullanılarak çelik numuneler üzerinde akımsız Ni-P kaplaması oluşturulmuş ve elde edilen kaplamaların özellikleri literatürdeki değerlerle karşılaştırılarak banyoda kullanılan donanımların çalışabilirliğini ve güvenilirliğini test edilmiştir. Yapılan deneylerde kaplama hızı yaklaşık olarak 10–15 $\mu\text{m/saat}$ arasında değişmektedir. Taramalı elektron mikroskopunda yapılan inceleme sonucunda mikro yapısının camsı olduğu ve EDS analizleri sonucunda kaplamanın ağırlıkça %7,5 P içerdiği görülmüştür.

2. Bu çalışma kapsamında, ticari hazır formülasyonu piyasada olmayan, ülkemizde uygulaması bulunmayan akımsız Ni-B banyosu oluşturulmuştur. Bu akımsız Ni-B banyosunda farklı malzemelerden yapılmış numuneleri; çelik başarıyla kaplanmıştır. Numunelerin tüm yüzeylerinde homojen kaplama tabakası elde edilmiştir. Taramalı elektron mikroskopunda yapılan mikro yapı incelemeleri sonucunda Riddle ve Bailer'in iddia ettiği gibi sütunsal birikmeden dolayı kaplamanın dış yüzeyinin noduler yapıda olduğu görülmüştür [35]. Geleneksel akımsız Ni-B yöntemlerinde ağırlıkça %2–3 B elde edilmekte iken, bu çalışmada oluşturulan yeni Ni-B banyosuyla ağırlıkça % 5 B içeren akımsız Ni-B kaplama elde edilmiştir [9].

3. Bu çalışmada Ni-P kaplama üzerine Ni-B kaplama işlemi gerçekleştirilmiştir. Ni-P kaplama kalınlığı 5 μm , Ni-B kaplama kalınlığı ise 15 μm 'dir. SEM analizleri sonucu iki tabakanın homojen bir şekilde oluştuğu, kaplama yüzeylerinin düzgün olduğu ve porozite içermediği görülmektedir.

4. Ni-P, Ni-B ve Ni-P/Ni-B kaplama örneklerinin oda sıcaklığı, 300 ve 450 $^{\circ}\text{C}$ 'lerde gerçekleştirilen ısıtıl işlem uygulamaları ile kaplamaların kristalizasyon davranışları incelenmiştir. Isıtıl işlem uygulanmamış haldeki her 3 kaplamanın da XRD analizleri sonucunda amorf yapıda olduğu gözlenmiştir. Akımsız kaplamalara 300 $^{\circ}\text{C}$ 'de uygulanan ısıtıl işlem sonucunda amorf yapının korunduğu, bunun yanında Ni (1 1 1) pikinin şiddetinin arttığı ve diğer Ni piklerinin daha belirgin hale geldiği görülmektedir. 450 $^{\circ}\text{C}$ 'de gerçekleştirilen ısıtıl işlemler sonucu ortaya çıkan piklerde

ise Ni tamamen kristalin bir fazda karşımız çıkarken bunun yanında Ni_3P ve Ni_3B oluşumları da gözlenmiştir.

5. 450°C'ye kadar artan sıcaklıkla birlikte değişimi gözlenen bir diğer özellik kaplamaların sertlik değerleridir. Kaplama sonrası akımsız Ni-P kaplamalarda 635 HV₁₀₀, akımsız Ni-B kaplamalarda ise 757 HV₁₀₀ sertlik değerlerine, akımsız Ni-P/Ni-B kaplamalarda ise 666 HV₁₀₀ sertlik değerlerine ulaşılmıştır. 450°C'de 1 saat yapılan ısıtıl işlem sonrası akımsız Ni-P 977 HV₁₀₀, akımsız Ni-B kaplamalarda 1131 HV₁₀₀ sertlik değerlerine ve akımsız Ni-P/Ni-B kaplamalarda ise ortalama 1192 HV₁₀₀ olarak elde edilmiştir. Isıl işlem bütün kaplamaların sertliğini artırmıştır. En yüksek sertliğe ise ısıtıl işlem görmüş Ni-P/Ni-B kaplamasında ulaşılmıştır. Sertlik değerlerinde görülen bu artışlar, oluşan Ni_3P ve Ni_3B fazlarının etkisi olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu fazların oluşum XRD analizleri ile de gösterilmiştir. 450 °C de sertlik değerinin azalmasına, artan ısıtıl işlemle birlikte Ni_3P ve Ni_3B parçacıklarının büyümesi ve kristalize tane boyutunun büyümesi gösterilebilmektedir.

6. Isıl işlem görmüş Ni-B ve Ni-P/Ni-B kaplamalarının zamana bağlı olarak sürtünme katsayısındaki değerinin değişim, çeliğe ve diğer kaplamalara göre değerindeki değişime göre daha azdır, yani daha az dalgalanma göstermektedir. Kaplama işlemi sonucu çeliğin aşınma dayanımı artmıştır. Meydana gelen aşınma izlerinin derinliği, hiçbir kaplamada kaplama kalınlığına ulaşmamıştır. En yüksek aşınma dayanımı, ısıtıl görmemiş Ni-P/Ni-B kaplamasında elde edilmiştir. Aşınma sonrasında aşındırıcı Al_2O_3 top üzerinde meydana gelen izleri optik mikroskop incelemesi sonucunda Ni-P/Ni-B kaplamalarda yapılan aşınma sonucu topta meydana gelen aşınma alanının en küçük olduğu tespit edilmiştir. Isıl işlem görmüş Ni-P/Ni-B kaplamaların en yüksek aşınma dayanımı göstermemesinin nedeni, aşınma deneyi sonucu aşınma iz alanının esas alınmış olmasıdır. Bu iz alanının tespit edilmesinde 3 noktanın aşınma kesidinin alanı incelenmektedir. Bu rakamın arttırılmasıyla kesit alan değerinin düşmesi, böylece aşınma dayanım değerinin artması muhtemeldir. Nitekim bu kaplama en düşük sürtünme katsayısına ve en düşük Al_2O_3 topun aşınma alanına sahiptir. Ni-P kaplamada oluşan aşınma izi incelendiğinde kazımalı aşınmanın var olduğu görülmektedir. Bunun sebebi ise Ni-P kaplamanın sertliğinin düşük olmasıdır. Ni-B ve Ni-P/Ni-B kaplamalarında oluşan aşınma izleri SEM' de incelendiğinde aşınmanın kaplama yüzeyinde sadece parlatma etkisi oluşturduğu tespit edilmiştir. Aşınma yüzeylerinin EDS yardımıyla kimyasal analizlerinin incelenmesi sonucu, Ni-P kaplamada alüminyuma rastlanmıştır. Bu da

Ni-P kaplamada yapılan aşınma deneyinde abrazyon aşınma dışında adhezyon aşınmanın da etkili olduğu görülmüştür. Nitekim Ni-P kaplamalı numunenin aşınma sonucu oluşan zamana bağlı sürtünme kuvveti ve sürtünme katsayısının dalgalı değişimi de adhezyon aşınma mekanizmasını desteklemektedir. Dalgalı ve heterojen akışın nedeni, aşınma esnasında slip-stick mekanizmasının etkin olmasıdır. Ni-B ve Ni-P/Ni-B kaplamalarda ise alüminyum oranı çok çok düşük olup, burada abrazyon aşınmanın etkin olduğunu göstermektedir.

7. Hem HCl, hem de H₂SO₄ asitlerinde gerçekleştirilen daldırma deneyleri sonucu, kaplamaların, çeliğin korozyona direncini arttırdığı görülmüştür. En yüksek korozyon koruma, ısıtılma işlem görmemiş ve amorf haldeki Ni-P ve Ni-P/Ni-B kaplamaları ile elde edilmiştir.

8. Kullanılan taban malzemelerin korozyon dayanımlarının, üzerlerine uygulanan nikel kaplamalar ile artırıldığını ve dolayısıyla korozyon hızlarının azaltıldığını göstermektedir. En yüksek korozyon koruma Ni-P kaplamalarında elde edilmiştir. Dikkat edilmesi gereken konu, Ni-P ve Ni-B kaplamaları arasında korozyon potansiyelleri arasındaki farkın 134 mV olmasıdır. Literatür araştırmaları sonucu bu değerin 100 mV'un üzerinde olması durumunda korozyon koruma artmaktadır. Bu durumda Ni-P/Ni-B kaplamaları korozyon koruma açısından uygundur. Polarizasyon deneyleri sonucu Ni-P/Ni-B kaplamaları incelendiğinde hiçbir kaplamada korozyonun asıl metal olan çeliğe ulaşmadığı görülmüştür. Polarizasyon deneyleri sonucu Ni-P/Ni-B kaplamaları incelendiğinde korozyonun Ni-B kaplamada pitting şeklinde noktasal olarak ilerlediği, ancak Ni-P tabakasına ulaştığında ise üniform bir yayılma izlediği görülmüştür. Bu da korozyon süresini arttıran bir mekanizmadır.

10. KAYNAKÇA

- [1] **Eraslan, S.** (2010). Akımsız Ni-B Kaplama Sistemlerine W İlavesinin Kaplama Özellikleri Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi, İstanbul, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü,.
- [2] **Güleç, Ş. ve Çapa, M.** (1995). Metallerin Yüzey İşlemleri ve Özel İmalat yöntemleri, İstanbul, İTÜ Makine Fakültesi.
- [3] Url – 1< <http://chemistry58.wikispaces.com/file/view/electro.jpg>> alındığı tarih: 03 05 2012.
- [4] **Tafraı, M.** (2006). Isıl Püskürtme Yöntemleri,.
- [5] Url – 2<<http://info.lu.farmingdale.edu/depts/met/met205/induction.JPG>> alındığı tarih: 03 05 2012.
- [6] **MEGEP,** (2006). Metal Teknolojisi Yüzey Sertleştirme.
- [7] **Riedel, W.** (1991). Electroless Nickel Plating, ASM International.
- [8] **Mallory, G. O. ve Hadju, J. B.** (1990). Electroless Plating, American Electroplaters and Surface Finishers Society, pp. 111-195.
- [9] **Kaya, Beril** (2007). Nano Kompozit Kaplama, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [10] **Baskaran. I., Sakthi, K. ve Sankara, N.** (2005). Formation of electroless Ni–B coatings using low temperature bath and evaluation of their characteristic properties, Surface & Coatings Technology.
- [11] **Sankara, N., Baskaran, T.S.N. ve Krishnaveni, K.** (2005). Electroless Ni–B coatings: preparation and evaluation of hardness and wear resistance, cilt 190,.
- [12] **Yıldız, A.** (2012). Akımsız Ni-B Kaplamaların 7075 Al Alaşımının Yorulma Davranışına Etkisinin İncelenmesi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- [13] **Matik, U.** (2010). Akımsız Ni-P Kaplamalarda Kaplama Parametrelerinin Belirlenmesi Ve Mekanik Özelliklerine Etkisi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara
- [14] **Halimoğlu, Ş.** (1998). Sodyum borhidrür indirgeyicisiyle akımsız metal kaplamaların incelenmesi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [15] **ASM,** ASM Metals Handbook Vol. 5, Surface Engineering, Ohio, ASM Materials Park.
- [16] **Oraon, B., Majumdar G., ve Ghosh, B.** (2007). Improving hardness of electroless Ni-B coatings using optimized deposition conditions and annealing, cilt 29.
- [17] **Xuetao, Y., Dongbai, S., Hongying, Y. ve Huimin, M.** (2008). Structure and mechanical properties of Ni-P electrodeposited coatings, Applied Surface Science.
- [18] **Ashassi-Sorkhabi, H.; Rafizadeh, S.H.** (2003).Effect of coating time and heat treatment on structures and corrosion characteristics of electroless Ni-P alloy deposits, Surface and Coatings Technology.
- [19] **Weil, R. ve Parker, K.** The Properties of Electroless Nickel, Electroless Plating.
- [20] **Anık, M.; Körpe, E. ve Baksan, B..** (2009). Isıl İşlemin Akımsız Ni-B Kaplamanın Mikro-Yapısına, Korozyon Direncine Ve Sertliğine Etkisi, cilt 22, no. 2.
- [21] **Şen, E.** (2009). Banyo Bileşenlerinin Akımsız Ni-B Kaplamanın Kaplanma Hızı, Bor Miktarı ve Sertlik Değerlerine Etkisi, Eskişehir: Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [22] **Jokinen, P.; Korpiola, K.; Mahiout, A.** (1999). Duplex Coating of Electroless Nickel and HVOF Sprayed WC-Co, ASM International.
- [23] **Ivanov, M. V.** (2000). Electroless Nickel-Boron-Phosphorus Coatings: Protective and Functional Properties, Protection of Metals.
- [24] **Narayanan, S., Krishnaveni K. ve Seshadri, S.** (2003). Electroless Ni-P/Ni-B duplex coatings: preparation and evaluation of microhardness, wear and corrosion resistance, Materials Chemistry and Physics, no. 82.
- [25] **Atılım Kimya Sanayi ve Tic. A.Ş.,** Yarı Parlak Akımsız Nikel Kaplama.

- [26] **Gerengi, H.** (2008). Tafel Polarizasyon (TP), Lineer Polarizasyon (LP), Harmonik Analiz (HA) ve DEIS Yöntemleriyle AISI 1026, Pirinç-MM55 ve Nikalium-118 Alaşımlarının Yapay Deniz Suyunda Korozyon Davranışları ve Pirinç Alaşımlarına Benzotriazol'ün İnhibitör Etkisi, Eskişehir.
- [27] **Schweitzer, P. A.** (2010). Fundamentals of Corrosion.
- [28] **Sarı, N.** (1998). Klasik Isıl İşlemler ve Modern Yüzey İşlemleri Uygulanmış Ç 1050 Çeliğinin Abrazif+Erozif Aşınma Davranışının İncelenmesi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [29] **Karabaşoğlu, M.** (2008). Aşınma Deney Cihazı Tasarımı ve İmalatı, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- [30] **Arslan, T.** (2010). X-Işınları Kullanım Alanları, Ankara.
- [31] **Hsien-Chung, H., Sung-Ting, C. P., Szu-Jung, T. Wen-Ta ve L. Chao-Sung.** (2010). Microstructure evolution and hardening mechanisms of Ni-P electrodeposits, Surface & Coatings Technology.
- [32] **W.X., Zhang; Z.H., Jiang; G.Y., Li; Q., Jiang; J.S.** (2008). Electroless Ni-P/Ni-B duplex coatings for improving the hardness and the corrosion resistance of AZ91D magnesium alloy, Applied Surface Science.
- [33] **T. Sha-wei, W. Cui-ju ve J. H. Ya-Li Sun,** (2010). A study of corrosion resistance and formation characteristics of electroless Ni-P alloy coatings on Al composite with a simple surface pre-treatment, Surface & Coatings Technology.
- [34] **Vitry, V.; Sens, A., Kanta, A., Delaunois, F.** (2012) Wear and corrosion resistance of heat treated and as-plated Duplex NiP/NiB coatings, Surface & Coatings Technology.
- [35] **Riddle, Y.W.; Bailer, T.O.** (2005). Friction and Wear Reduction via an Ni-B Electroless Bath Coating for Metal Alloys,.
- [36] Url – 3< http://media.noria.com/sites/Uploads/2011/11/1/2296fd4f-3309-423c-b651-520afea9fe49_fig1.jpeg. alındığı tarih: 04 06 2012.
- [37] Url – 4< <http://ars.els-cdn.com/content/image/1-s2.0-S0169433207010616-gr2.jpg>. alındığı tarih: 06 2012

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: Gökçe Dil

Doğum Yeri ve Tarihi: İstanbul, 04.10.1987

Adres: İTÜ Gümüşsuyu Kampüsü, Makina Mühendisliği
Bölümü, Malzeme ve İmalat Teknolojileri Anabilim Dalı

E-Posta: dil.gokce@gmail.com

Lisans: İTÜ, Makina Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü

TEZDEN TÜRETİLEN SUNUMLAR

Dil G., Goksenli A., Yuksel B., Calli C, 2012. Electroless Ni-B-W Coatings for Improving Hardness, Wear, And Corrosion Resistance. *20th Conference On Materials And Technology*, October 17-19, 2012 Portoroz, Slovenia