

**DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ÇELİK MALZEME YÜZEYİNE ELEKTROLİTİK
YOLLA KAPLANAN Zn-Ni-Co ALAŞIMININ
MEKANİK VE YAPISAL ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ**

Tuncay DİKİCİ

Haziran, 2009

İZMİR

**ÇELİK MALZEME YÜZEYİNE ELEKTROLİTİK
YOLLA KAPLANAN Zn-Ni-Co ALAŞIMININ
MEKANİK VE YAPISAL ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ**

**Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı**

Tuncay DİKİCİ

Haziran, 2009

İZMİR

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

TUNCAY DİKİCİ, tarafından **DOÇ. DR. MUSTAFA TOPARLI** yönetiminde hazırlanan “**ÇELİK MALZEME YÜZEYİNE ELEKTROLİTİK YOLLA KAPLANAN Zn-Ni-Co ALAŞIMININ MEKANİK VE YAPISAL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

.....

Doç. Dr. Mustafa TOPARLI

Yönetici

.....

Doç. Dr. Erdal ÇELİK

Jüri Üyesi

.....

Doç. Dr. Cesim ATAŞ

Jüri Üyesi

Prof. Dr. Cahit HELVACI

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Bu alıőma da araőtırmalarımın büyük bir titizlikle ve azimle yürütülmesinde, örnek bir tez çalıőması olma hedefinde, her türlü bilgi, tecrübe ve motivasyon gibi desteklerinden ötürü Sayın Doç. Dr. MUSTAFA TOPARLI hocama sonsuz teőekkürlerimi sunarım.

Aynı zamanda deneysel çalıőmalarım, laboratuarda yapılan testleri ve sonuçların yorumlanması noktasında baőta Araő. Gör. OSMAN ÇULHA olmak üzere diğer Araőtırma Görevlilerine teşekkür ederim.

Son olarak, hayatım boyunca eğitimim için büyük fedakarlıklar gösteren desteklerini hiçbir zaman benden ayırmayan aileme de bu vesileyle teőekkürü bir borç bilirim.

Tuncay DİKİCİ

ÇELİK MALZEME YÜZEYİNE ELEKTROLİTİK YOLLA KAPLANAN Zn-Ni-Co ALAŞIMININ MEKANİK VE YAPISAL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

ÖZ

Bu çalışmanın amacı, çelik malzeme yüzeyine elektrolitik yöntemle kaplanan Zn-Ni-Co (çinko-nikel-kobalt) alaşımlı kaplamanın mekanik ve yapısal özelliklerinin araştırılmasıdır. Akım yoğunluğu, pH ve sıcaklık gibi banyo değişkenlerinin kaplamanın yüzey morfolojisi ve kimyasal kompozisyonu üzerindeki etkisi belirlenmiştir. Farklı akım yoğunluğunda ve değişen kalınlıklarda çökertilen Zn-Ni-Co alaşımlı kaplamaların mekanik ve yapısal özellikleri incelenmiştir. Zn-Ni-Co alaşımlı kaplamanın yüzey görüntüsünün ve mekanik özelliklerinin Zn-Ni ve Zn-Co alaşımlı kaplamaya göre daha iyi olduğu gözlemlenmiştir. Aynı zamanda, Ni-Co alaşımlı kaplamanın mekanik özellikler açısından diğer kaplamalara göre daha iyi bir performansa sahip olduğu görülmüştür.

Anahtar sözcükler: Zn-Ni-Co alaşımlı kaplama, mekanik ve yapısal özellikler, yüzey morfolojisi, Zn-Ni, Zn-Co ve Ni-Co alaşımlı kaplama

**MECHANICAL AND STRUCTURAL PROPERTIES OF
ELECTRODEPOSITED Zn-Ni-Co TERNARY ALLOY COATING ON
STEEL**

ABSTRACT

The main purpose of this study is to investigate the mechanical and structural properties of electrodeposited Zn-Ni-Co (zinc-nickel-cobalt) ternary alloy coating on steel substrates. The influence of bath variables such as pH, current density and temperature on the surface morphology and chemical composition of coatings was determined. Microstructural and mechanical properties of Zn-Ni-Co ternary alloy coatings deposited at different current densities and various thickness were investigated. It was observed that the Zn-Ni-Co ternary alloy coatings exhibited more preferred surface appearance and mechanical properties as compared to Zn-Ni and Zn-Co alloy coatings electroplated at the same conditions. In addition, it was indicated that Ni-Co alloy coating showed greater mechanical performance than other alloy coatings.

Keywords: Zn-Ni-Co alloy coating, mechanic and structural properties, surface morphology, Zn-Ni, Zn-Co ve Ni-Co alloys coating

İÇİNDEKİLER

| | Sayfa |
|--|-----------|
| YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU | ii |
| TEŞEKKÜR | iii |
| ÖZ..... | iv |
| ABSTRACT..... | v |
| | |
| BÖLÜM BİR - GİRİŞ | 1 |
| | |
| BÖLÜM İKİ - ELEKTROLİTİK METAL KAPLAMA | 4 |
| | |
| 2.1 Elektrolitler | 4 |
| 2.2 Elektrolit Çözeltileri..... | 4 |
| 2.3 İyonik Eriyikler..... | 5 |
| 2.4 Elektrokimyasal Depositleme..... | 5 |
| 2.5 Kaplama Banyosunun (Elektrolitinin) Özellikleri | 6 |
| 2.5.1 Kaplama Banyosu..... | 6 |
| 2.5.2 Elektrolitik İletkenlik..... | 7 |
| 2.5.3 Kaplama Elektrolitinin Direnci | 8 |
| 2.5.4 Kaplama Elektrolitinde pH (Hidrojenin gücü)..... | 9 |
| 2.5.5 Akım Yoğunluğu..... | 10 |
| 2.5.6 Ortalama Akım Yoğunluğu..... | 10 |
| 2.5.7 Anot Akım Yoğunluğu..... | 11 |
| 2.5.8 Akım Verimi | 12 |
| 2.5.9 Anot ve Katot Verimlerinin Belirlenmesi..... | 12 |
| 2.5.10 Kaplama Banyosunda Polarizasyon..... | 13 |
| 2.5.11 Metal Kaplamanın Oluşumu..... | 15 |
| 2.5.12 Kaplamada Kristal Çekirdek Büyüklüğünü Kontrol Yöntemler..... | 18 |
| | |
| BÖLÜM ÜÇ - METAL KAPLAMA ÖZELLİKLERİ..... | 23 |
| | |
| 3.1. Kaplama Yüzeyinin Geometrik Parametreleri..... | 23 |

| | |
|---|-----------|
| 3.1.1 Kalınlık..... | 23 |
| 3.1.2 Yüzeyin Üç Boyutlu Yapısı..... | 24 |
| 3.1.3 Yüzey pürüzlülüğü..... | 24 |
| 3.1.4 Yüzey Morfolojisi..... | 24 |
| 3.2 Kaplama Yüzeyinin Mekaniksel Özellikleri..... | 25 |
| 3.2.1 Sertlik | 25 |
| 3.2.2 Adhezyon..... | 25 |
| 3.2.3 Artık Gerilme..... | 26 |
| 3.2.4 Elastiklik..... | 26 |
| BÖLÜM DÖRT - METALİK KAPLAMALAR..... | 27 |
| 4.1 Çinko Kaplama..... | 27 |
| 4.2 Nikel Kaplama..... | 27 |
| 4.3 Krom Kaplama..... | 28 |
| 4.4 Değerli Metal Kaplamalar..... | 28 |
| 4.5 Alaşımli Kaplamalar..... | 28 |
| 4.6 Kompozit Kaplamalar..... | 29 |
| 4.7 Anodik Kaplamalar..... | 29 |
| BÖLÜM BEŞ - ELEKTROLİTİK METAL KAPLAMA SİSTEMLERİ..... | 30 |
| 5.1 Askı sistemi..... | 30 |
| 5.2 Dolap Sistemi..... | 31 |
| 5.3 Otomatik Kaplama Sistemleri..... | 32 |
| BÖLÜM ALTI - KAPLAMA ÖNCESİ MALZEME YÜZEY TEMİZLİĞİ..... | 34 |
| 6.1 Alkali Yağ Alma..... | 36 |
| 6.2 Elektrikli Yağ Alma..... | 38 |
| 6.2.1 Katodik Temizleme | 39 |
| 6.2.2 Anodik Temizleme | 39 |

| | |
|---|-----------|
| 6.3 Asidik Temizleme..... | 40 |
| 6.4 Ultrasonik Temizleme..... | 41 |
| 6.5 Kumlama İşlemiyle Yüzey Temizleme..... | 42 |
| BÖLÜM YEDİ - DENEYSEL ÇALIŞMALAR | 44 |
| 7.1 Deneyin Amacı..... | 44 |
| 7.2 Kaplama Numunesi Özellikleri..... | 44 |
| 7.3 Kaplama Sisteminin Hazırlanması..... | 45 |
| 7.4 Kaplama Banyosu (Elektrolit) | 45 |
| 7.5 Kaplanacak Malzemenin Temizliği..... | 46 |
| 7.6 Zn-Ni-Co Alaşımli Kaplama İçin Optimum Çalışma Parametrelerinin Saptanması..... | 47 |
| 7.7 Farklı Akım Yoğunluğu Uygulanmış Zn-Ni-Co Alaşımli Kaplamalar..... | 47 |
| 7.8 Farklı Kaplama Kalınlığına Sahip Zn-Ni-Co Alaşımli Kaplamalar..... | 48 |
| 7.9 Zn-Ni-Co ve Diğer (Zn-Co, Zn-Ni ve Ni-Co) Alaşımli Kaplamalar..... | 48 |
| 7.10 Mekanik ve Yapısal Özelliklerin Analizi..... | 49 |
| 7.10.1 Karakterizyon Çalışmaları..... | 49 |
| 7.10.2 Mekanik Özelliklere Ait Çalışmalar..... | 49 |
| BÖLÜM SEKİZ - DENEYSEL SONUÇLAR | 51 |
| 8.1 Zn-Ni-Co Alaşımli Kaplamaya Ait Optimum Çalışma Parametreleri | 51 |
| 8.1.1 Farklı pH Değerleri..... | 51 |
| 8.1.2 Farklı Akım Değerleri..... | 52 |
| 8.1.3 Farklı Sıcaklık Değerleri..... | 54 |
| 8.1.4 Zn-Ni-Co Alaşımli Kaplama İçin Çalışma Parametrelerine Ait Genel Sonuç..... | 55 |
| 8.2 Farklı Akım Yoğunluğunda ki Zn-Ni-Co Alaşımli Kaplamalara Ait Sonuçlar..... | 57 |
| 8.2.1 XRD Sonuçları..... | 57 |
| 8.2.2 SEM ve EDS Analizi | 57 |

| | |
|---|------------|
| 8.2.3 AFM Görüntüleri..... | 60 |
| 8.2.4 Dinamik Ultra Mikro Sertlik (DUH) Testi | 61 |
| 8.2.4.1 Sonuç..... | 70 |
| 8.2.5 Çizik Testi (Scratch)..... | 71 |
| 8.3 Farklı Kaplama Kalınlığına Sahip Zn-Ni-Co Alaşımli Kaplamalara Ait Sonuçlar..... | 72 |
| 8.3.1 XRD Sonuçları..... | 72 |
| 8.3.2 SEM ve EDS Analizi | 73 |
| 8.3.3 Dinamik Ultra Mikro Sertlik (DUH) Testi | 75 |
| 8.3.3.1 Sonuç..... | 83 |
| 8.4 Zn-Ni-Co ve Diğer (Zn-Co, Zn-Ni ve Ni-Co) Alaşımli Kaplamalar..... | 84 |
| 8.4.1 XRD Sonuçları..... | 86 |
| 8.4.2 SEM ve EDS Analizi | 85 |
| 8.4.3 AFM Görüntüleri..... | 90 |
| 8.4.4 Dinamik Ultra Mikro Sertlik (DUH) Testi | 92 |
| 8.4.4.1 Sonuç..... | 100 |
| 8.4.5 Çizik Testi (Scratch)..... | 101 |
| BÖLÜM DOKUZ – SONUÇLAR VE YORUMLAR..... | 102 |
| KAYNAKLAR..... | 107 |
| EKLER..... | 110 |

BÖLÜM BİR

GİRİŞ

Günümüz de elektro kaplama olarak bildiğimiz konulara ait ilk deneyler 1805 yılında, geniş çevreler tarafından bilinen İtalyan kimyacı, Luigi Brugnatelli tarafından yapılmıştır. Bu yıllara yakın zamanda keşfedilen elektrik pilini altın kaplama işleminde kullanmıştır. Proses, altın ve gümüş kaplama için daha faydalı bir elektrolit olan, aynı zaman da iyi bir yapışma ve kaplama kalınlığı sağlayan potasyum siyanürü kullanan John Wright tarafından geliştirilmiştir. 19. yüzyılın ortalarına kadar, mücevharat ve dekoratif amaçlı kullanılan parçaların parlatılması için elektro depositeleme uygulaması temel kullanım alanı olmuştur (Endres, MacFarlane, ve Abbott, 2007).

R. Boettper, banyo terkibi nikel sülfat ve amonyum sülfat olan ilk nikel kaplamayı yapmıştır. 1849 yılında da ilk olarak ticari anlamda nikel kaplamacılığı başlar (Berk, 2004). 1850'li yıllarda elektrokimya alanındaki gelişmelere paralel olarak, çinko, nikel, kalay, pirinç gibi metallerin kullanımı yayılmaya başlamıştır. Her ne kadar elektro kaplama işlemi üretim endüstrisiyle yaygınlaşmaya başlasa da, 100 yıl içinde elektro depositelemeyi içeren fiziksel prosesler de çok büyük gelişmeler olmamıştır. 20. yüzyılın başlarında elektronik sanayisindeki kullanılan parçalara yapılan uygulamalar, kaplama solüsyonun kimyası ve malzemede ki gelişmelerle kendini göstermiştir. Daha sonra, savaş yıllarında elektronik komponentler için yapılan altın kaplama da bir artış söz konusu olmuştur. Daha az zararlı kaplama solüsyonları kullanılmaya başlamıştır. Bu eğilim, çevreye zararlı malzemelerin kontrol edilmesindeki artış ile devam etmiştir. Gelişen solüsyon kompozisyonu ve güç kaynağı teknolojisi kaplama alanındaki uygulamaların çoğalmasına ve hızlı bir gelişmeye meydan vermiştir. Krom, nikel ve kadmiyum gibi metaller için alternatif araştırmalar devam etmiştir. Anti –korozyon ve aşınmaya dirençli kaplamalar elektro kaplama sektöründe üstün pazara sahip olmaya başlamıştır (Endres ve diğer., 2007).

Ticari anlamda depositelebilen metallerin başlıcaları; Cr, Ni, Au, Ag, Zn, Cd, Cu ve değişik alaşımlı (Zn-Ni, Zn-Co, Zn-Fe v.b.) kaplamalardır. Bütün elektro kaplama

sektörünün üretim alanı sulu çözeltilere dayanmaktadır. Bazı organik solventlerin kullanıldığı pazarlar da vardır. Fakat bunlar sulu çözeltiler kadar yaygın değildir. Metallerden başka bu grupta genellikle plazma veya kimyasal buhar depositleme teknikleri kullanılarak kaplama işlemi yapılır (PVD ve CVD). Bu metotlar sadece metaller değil aynı zamanda alaşımlar veya bileşiklerin (oksit, nitrit, karbür v.b.) çevreye zarar vermeksizin birçok yüzeye (metal, plastik, cam, seramik v.b.) kaplanmasına olanak sağlar.

Sulu çözeltileri kullanmada ki avantajları sıralayacak olursak;

- Maliyet
- Yanıcı olmayışı
- Elektrolitin yüksek çözünürlüğü
- Yüksek iletkenlik
- Metal tuzlarının yüksek çözünürlüğü
- Yüksek kütle transferi

Bu sebeplerden dolayı sulu çözeltiler, metal kaplama sektörünün başlıca kullanım alanı olarak tercih edilmeye devam etmektedir (Endres ve diğer., 2007).

Günümüz de, malzeme yüzey işlemlerinden biri olan metal kaplama uygulaması geniş bir sahayı kapsamaktadır. Metali korozyona, aşınmaya karşı koruyan, dekoratif v.b. amaçlı birçok saf ve alaşımlı metal kaplama türleri mevcut olup, bunlar müşteri talep ve isteğine cevap vermektedir. Bu uygulamalardan biri olan çinko kaplama; otomotiv, makine yedek parça ve birçok ev eşyası gibi değişik alanlarda tercih edilen kaplama türlerinden biridir. Çinko kaplamanın korozyon ve aşınma direnci açısından yeterli olmadığı durumlarda, Zn-Ni, Zn-Co v.b. alaşımlı kaplama türleri bu alanda tercih edilen alaşımlı kaplamalardandır.

Bu çalışmada, üç ayrı metalin (Zn, Ni ve Co) elektrolitik yöntemle çelik malzeme yüzeyine birlikte depositlenmesi ve farklı parametrelerde yapılan Zn-Ni-Co alaşımlı kaplama uygulamalarının sonucu olarak yüzeyde oluşan kaplama tabakasının özelliklerinin incelenmesi hedeflenmiştir. Metal kaplama sektöründe, özellikle otomotiv yedek parçaları için tercih edilen Zn-Ni ve Zn-Co alaşımlı kaplama

türlerinin yanı sıra, Zn-Ni-Co alaşımlı kaplamanın kendine has özellikleri ile sektörde uygulama alanı bulabilecek alternatif bir kaplama türü olarak üretilmesi temel amaç olarak alınmıştır.

Buna ek olarak, aynı çalışma parametrelerinde çelik malzeme yüzeyine kaplanan Zn-Ni, Zn-Co ve Ni-Co alaşımlı kaplamalar ile Zn-Ni-Co alaşımlı kaplamanın yapısal ve mekanik özellikleri deneysel veriler yardımıyla karşılaştırılması planlanmıştır.

BÖLÜM İKİ

ELEKTROLİTİK METAL KAPLAMA

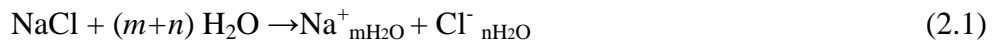
2.1 Elektrolitler

İletkenlik bir metal içindeki elektronların serbest hareketine dayanmaktadır, fakat bazı maddeler serbest elektronlar olmaksızın da elektriği iletmektedirler. Bunun yerine, serbest hareketli iyonlar akımı iletir ve bu yüzden iyonik iletkenler olarak adlandırılırlar. İlk iyonik iletkenler sulu elektrolitlerdi. Sonra, polimer ve katı elektrolitler keşfedildi ve bu isimdeki elektrolitler iyonik iletkenler için bir eşanlamlık olmuştur (Pelieth, 2008).

Elektrolitler, katı, sıvı ve çözelti hâlinde, ikinci sınıftan iletkenlerdir. Bunlara iyonik iletkenler denildiğini yukarıda belirtmiştik. Katı elektrolite, RbAg5I6 bileşiğini; sıvı elektrolite, alüminyumun eldesin de kullanılan takriben 1000°C'de erimiş kriyolit (Na₃AlF₆) ve florit (CaF₂) karışımını; çözelti hâlindeki elektrolite, sodyum klorürün (NaCl) sulu çözeltisini örnek olarak verebiliriz.

2.2 Elektrolit Çözeltileri

Su içindeki bir tuzun çözünmesi, Arrhenius tarafından, negatif ve pozitif iyonların serbest hareketini içeren bir tuzun çözünmeye uğraması olarak tarif edilmiştir. Bu aslında başlangıçta, tuzun kararlı bir yapıda olmasından ötürü kabul edilmesi zor olan bir öneriydi. Bu yüzden, uzun bir zaman için teori Arrhenius'un çözünme hipotezi olarak adlandırılmıştır. Sonra, prosesin iyonlar ile çözücü suyun bir reaksiyonu olduğu anlaşılmıştır. İyon-dipol etkileşimi güçlü latis enerjilerinin dengelenmesi için gerekli enerjiyi sağlamıştır. Örnek olarak, prosesi NaCl için yazarsak;



Çözelti prosesi ile ilişkili entalpi oldukça küçüktür, çünkü bu sadece anyonların ve kationların çözünme entalpisi ve latis entalpisi arasında ki farktır (Pelieth, 2008).

2.3 İyonik Eriyikler

İyonik bir sıvıdaki iyonların ayrılması termal enerjiyle mümkündür. Yüksek sıcaklıklar da kristaller erir ve belli bir miktarda serbest hareketli iyonlar meydana gelir. Saf tuzlar yüksek erime sıcaklıklarına sahipken, farklı tuzların karışımı düşük erime noktalarıyla ötektik sistemler oluşturur. Bir iyonik kristalin erimesi bir çok değişik kompleksliği içeren komplike bir sistemdir.

İyonik sıvılarda iyonik eriyiklerin oda sıcaklığında ki bir sınıfıdır. Bunlar organik iyonları veya organik – inorganik iyonların bir karışımını ihtiva eder. Oda sıcaklığı ve 100°C arasında sıvıdırlar. Yanıcıdır ve yüksek termal stabiliteye sahiptirler. İhmal edilebilir bir buhar basıncına sahiptirler. Büyük elektrokimyasal penceresi, sulu çözeltiler içinde depositlenemeyen metallerin depositlenmesi gibi sulu çözeltiler içinde mümkün olmayan elektrokimyasal proseslere imkan tanır (Pelieth, 2008).

2.4 Elektrokimyasal Depositleme

Metal ve alaşımların elektrokimyasal depozitlenmesi su, organik ve erimiş su elektrolitlerinden, metal iyonlarının redüksiyonunu içermektedir. Metal iyonlarının sulu çözeltilerde indirgenmesi ;



Elektrodepositleme prosesi dış bir güç kaynağı yardımıyla sağlanır (Paunovic, 2006). Kaplama çözeltisi içinde akım anyon ve katyonlarla taşınır. Bu iletkenlerden akım geçtiği zaman elektrotlar üzerinde görülen olaylar haricinde bir madde taşınması söz konusudur. Elektrolitle akımın taşınmasında rol alan anyonlar negatif yüke sahip, katyonlarda pozitif yüke sahip atom veya atom gruplarıdır.

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|--|----|----|----|----|----|----|----|
| 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | 18 | | |
| H | 2 | | | | | | | | | | | | | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | He |
| Li | Be | | | | | | | | | | | | | B | C | N | O | F | Ne |
| Na | Mg | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | | Al | Si | P | S | Cl | Ar | |
| K | Ca | Sc | Ti | V | Cr | Mn | Fe | Co | Ni | Cu | Zn | | Ga | Ge | As | Se | Br | Kr | |
| Rb | Sr | Y | Zr | Nb | Mo | Tc | Ru | Rh | Pd | Ag | Cd | | In | Sn | Sb | Te | I | Xe | |
| Cs | Ba | La | Hf | Ta | W | Re | Os | Ir | Pt | Au | Hg | | Tl | Pb | Bi | Po | At | Rn | |
| Fr | Ra | Ac | | | | | | | | | | | | | | | | | |

| | | | | | | | | | | | | | |
|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| Ce | Pr | Nd | Pm | Sm | Eu | Gd | Tb | Dy | Ho | Er | Tm | Yb | Lu |
| Th | Pa | U | Np | Pu | Am | Cm | Bk | Cf | Es | Fm | Md | No | Lr |

| | |
|--|------------------------|
| | Metal olarak |
| | Alaşım olarak |
| | Metal ve alaşım olarak |

Şekil 2.1 Metal veya alaşım olarak depositelebilen elementlerin zeti (Endres ve diğer., 2007)

Şekil 2.1'de periyodik tabloda bulunan elementlerin iyonik sıvılarda depositelebilirliğini görmekteyiz.

2.5 Kaplama Banyosunun (Elektrolitinin) zellikleri

2.5.1 Kaplama Banyosu

Elektrolitik kaplama; elektrik enerjisi yardımıyla kimyasal bir ortamdan bir malzeme yüzeyine yapılan metal depositeleme işlemidir. Kaplama banyosu znmş metal tuzu veya bileşiği bulunduran bir zltidir. Elektriği ileten znmş metal tuzu veya bileşiğinin yanı sıra elektrik enerjisini zltiye iletmek içinde; anot ve katot olmak üzere iki elektrot mevcuttur.

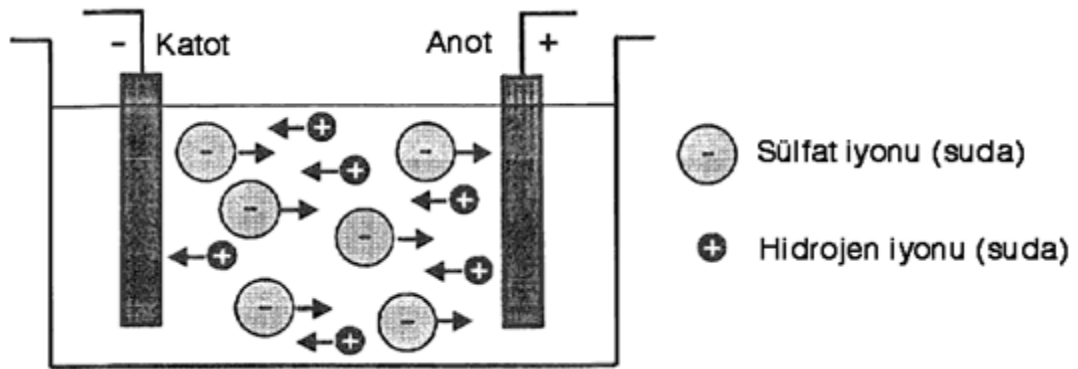
Burada anot; kaplanan malzeme, yani aşınan taraftır ve enerji kaynağının artı (+) kutbuna bağlanan elektrottur. Katot ise; kaplanan taraftır, yani kaplanan malzemedir.

Enerji kaynağının eksi (-) kutbuna bağlanmaktadır (Elektrometal Kaplamanın Temel Prensipleri, Bölüm 1, s.27).

2.5.2 Elektrolitik İletkenlik

İyonlar sulu çözeltilerde taşınabildiği sürece üzerlerine etkiyen kuvvetlerle elektrik yüklü plakalara doğru taşınırlar. Sülfürik asitte olduğu gibi hidrojen iyonları katota, sülfat iyonları da anota doğru ilerler. Bu iyonların her biri elektrik yükü taşırlar. Yüklü parçaların hareketi elektrik akımını meydana getirir. Elektrik çözelti üzerinden taşınmış olur. Elektrik taşıyan bu çözeltileri elektrolit olarak adlandırılır (Elektrometal Kaplamanın Temel Prensipleri, Bölüm 1, s.36).

Suda çözünen bakır sülfat örneğini alacak olursak (Şekil 2.2), bakır sülfatın iyonlaşma denklemi; bir molekül bakır sülfat suya bir bakır iyonu ve bir de sülfat iyonu verir. Eğer bu çözeltinin içine anot ve katot olarak iki plaka konursa bakır iyonları katota, sülfat iyonları anota doğru giderler.



Şekil 2.2 Elektroliz mekanizmasının şematik gösterimi (Elektrometal Kaplamanın Temel Prensipleri, Bölüm 1, s.36).

Katottaki her bir bakır iyonu iki elektron içerir ve eski metalik formuna geri döner ve katotta katı metal olarak birikir. Bu kaplamanın ilkesidir. Metal bileşiği suda çözününce iyonlaşır ve bu yolla elektrik iletilir. Böylelikle kaplama işi gerçekleşebilir. Bakır iyonları kaybettikleri iki iyonu tekrar geri kazanmak isterler. Böylelikle tekrar metalik bakır olurlar, fakat bunu yapamazlar. Çünkü bunun için

gerekli olan enerji asit içinde çözüldükleri zaman harcanmıştır (Enerji açığa çıkar). Bakır sülfat çözeltisine elektrik kaynağına bağlı iki metal plaka bağlanarak transfer yapacak enerjiyle bakır iyonları elde edebiliriz. (+) yüklenen bakır iyonları katoda, iki elektronlarını bırakarak bakır metali olarak biriktikleri yere giderler. Anotta ya da başka bir deyişle pozitif yüklü plakada, sülfat radikalleri tarafından taşınan iki ekstra elektron bakır anottan giden bakır iyonlarıyla elektriksel olarak dengelenir. Anottan bakır iyonları çözeltidedir. Bununla birlikte onlar katoda gider. Sülfat iyonlarından koparır ve sistem çalışır (Elektrometal Kaplamanın Temel Prensipleri, Bölüm 1, s.36).

2.5.3 Kaplama Elektrolitinin Direnci

Kaplama banyosunun direncinin düşük olması, gerek kaplama verimliliği gerekse de maliyet açısından önemlidir. Banyo direncinde meydana gelen artış harcanan gücün artmasına ve ekonomik olarak ta olumsuz bir sonuca yol açacaktır.

Kaplama elektroliti 1cm^3 lük bir kaba konulursa, birbirinden 1 cm uzaklıkta ki iki elektrot arasındaki çözeltinin elektriksel direnci elektrolitin özgül direncini verir. Kaplama banyolarında, dirençten ziyade, iletkenlikten bahsedilir. Özgül iletkenlik özgül direncin tersidir ve bunun formüle edilmiş hali; $C=1/R$ şeklindedir.

Burada, C; özgül iletkenlik ve R; özgül direnci temsil etmektedir.

Kaplama çözeltisi içinde fazla miktarda çözülmüş madde bulunması çözelti konsantrasyonunu artırmasının yanı sıra iyon sayısı da artar. Dolayısıyla çözelti direncinin düştüğü ve iletkenliğin yükseldiği görülür. Sıcaklık yükseldikçe de enerjide meydana gelen artışla birlikte iyonizasyon için gerekli enerjinin artmasıyla daha çok iyon oluşmaktadır. Aynı zamanda, çoğu metal tuzlarının düşük iletkenliğe sahip olmalarından dolayı, çözeltiye iletkenliğin artması için başka madde ilaveleri de yapılır.

2.5.4 Kaplama Elektrolitinde pH (Hidrojenin gücü)

Bileşiklerin su içinde çözünmesi sonucu elde edilen bütün çözeltiler bir miktar hidrojen iyonu içerirler. Çünkü su iki hidrojen ve bir oksijen atomundan oluşur. Hidrojenin oksijene çok sıkı bağlı oluşundan ötürü iyonizasyona neden olan kuvvetler çok az etkilidir. Bu sebeple saf su çok az sayıda serbest hidrojen iyonu bulundurur. Bunu bir değerle izah edecek olursak, 10 bin litre suda 1 gram hidrojen iyonu bulunmaktadır. Saf suyun kötü bir iletken oluşunun nedeni de budur. Asitler kolayca iyonize olur ve çok sayıda hidrojen iyonu suda çözünür. Hidroklorik asit için bir değer verecek olursak, 1 litre suda 1 grama kadar hidrojen iyonu miktarı artış gösterir.

Asitlerin çoğu (hidrojenin özel bileşikleri) kolayca iyonize olur ve çok sayıda hidrojen iyonu suda çözünür. Eğer bu hidroklorik asit ise (HCl, hidrojen ve klordan oluşur) hidrojen iyonu konsantrasyonu bir litre suda bir grama kadar yükselir.

Baz olarak adlandırılan ve hidroksil kökü içeren maddeler (OH⁻) hidrojen iyonlarıyla reaksiyona girerek su (H₂O) meydana getirirler. Bazların çoğu kuvvetli şekilde iyonize olurlar ve bu nedenle de suda çözündüklerinde iyi iletkenlerdir. Sodyum hidroksit sodyum ile hidroksil kökünden oluşur (Elektrometal Kaplamanın Temel Prensipleri, Bölüm 2, s.5, 6, 7).



Asitler sahip oldukları hidrojen iyonlarına göre, bazlar da hidroksil iyonlarına göre sınıflandırılırlar. pH'ın 7 olması (ör; saf su) nötr olarak adlandırılır. pH'ın 7'den düşük olması asidik, pH'ın 7'den büyük olması da bazik (alkali) olarak adlandırılır. Kaplama banyosunun pH'ı banyoya asidik madde eklenerek düşürülür, alkali veya bazik madde eklenerek yükseltilir. Tamamıyla iyonize olan asitler kuvvetli asit, çok daha az iyonize olanlar zayıf asit olarak adlandırılırlar. Sülfürik, nitrik ve hidroklorik asitler suda çözüldüğünde çok yüksek oranda iyonize olduklarından kuvvetli asit sayılırlar. Asetik asit (sirke de bulunur) ve borik asit

(gözyaşında bulunur) daha az iyonize olurlar ve zayıf asit olarak mütalaa edilirler (Elektrometal Kaplamanın Temel Prensipleri, Bölüm 2, s.8).

2.5.5 Akım Yoğunluğu

Akım yoğunluğunun bilinmesi katotta gerçekleşen kaplamanın miktarını ve özelliğini etkilediğinden dolayı çok önemlidir. Kaplamada önemli olan desimetrekare başına uygulanan amper büyüklüğüdür (A/dm^2). Amperin yüzey alanına bölünmesi akım yoğunluğu olarak ifade edilir. Kaplamada, hesaplamalar yüzey alanı ile yapılır. Aynı yüzey alanına sahip iki eşit parçadan, birine uygulanan akım değeri, diğerine uygulanan akımın iki katı olduğunu varsayarsak, burada üzerine uygulanan akım değeri yüksek olan parça yüzeyine diğerine göre iki kat metal kaplanmış olur. Birim alana saniyede uygulanan elektrik miktarını veren akım yoğunluğu, kaplamada kullanılan akımın büyüklüğünü tanımlamak için en uygun yoldur ;

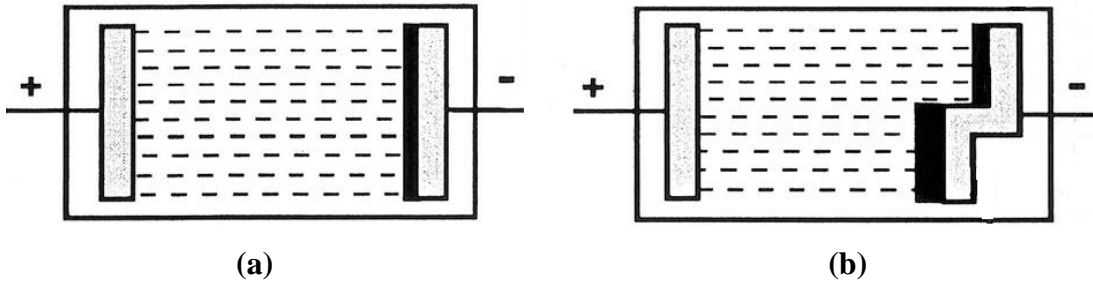
$$C = \frac{I}{A} \quad (2.4)$$

Burada, C ; akım yoğunluğu, I ; uygulanan akım (A) ve A ; toplam alan (dm^2)'ı oluşturmaktadır.

Uygulamada alan hesabı nadiren tam doğru olarak yapılabilir, mümkün olan en yakın hesaplama yapılmaya çalışılmalıdır (Elektrometal Kaplamanın Temel Prensipleri, Bölüm 2, s.13, 14).

2.5.6 Ortalama Akım Yoğunluğu

Akım yoğunluğu, hatları ve çıkıntıları çok fazla olmayan parçalar için yalnızca ortalama yüzey alanına bağlı olarak değerlendirilir. Şekli parçaların banyo içinde kaplanması esnasında anoda olan mesafenin bir sonucu olarak farklı kaplama kalınlıklarının oluşması Şekil 2.3' de anlatılmıştır.



Şekil 2.3 Ortalama akım yoğunluğu (a) düz parça, (b) şekilli parça (Elektrometal Kaplamanın Temel Prensipleri, Bölüm 2, s.17).

Yukarıda ki şekilde de görüldüğü gibi, anoda eşit mesafede olan (Şekil 2.3 a) katot iş parçası yüzeyinde eşit bir kaplama kalınlığı gözlemlenmektedir. Diğer şekilli parçaya bakacak olursak (Şekil 2.3 b), anoda daha yakın olan kısım, enerjinin doğası gereği akımın en az direnç gösteren yolu tercih ettiğinden akımın çoğu, parçanın gerideki kısmı yerine öne çıkmış kısmına doğru akar. Sonuçta ileri çıkık kısımdaki akım yoğunluğu, gerideki kısma nazaran daha yüksek olur ve bu ikisinin ortalaması ortalama akım yoğunluğunu verir. İleri çıkık kısımda yanık, gerideki kısımda eksik kaplama yapılmış olur. Bu durumda ya öne çıkık kısımdaki ortalama akım yoğunluğu normal sınırı aşmayacak şekilde toplam akımı düşürülmeli ya da tüm parçanın akım yoğunluğunu eşit hale getirmek için bazı düzenlemeler yapılmalıdır (Elektrometal Kaplamanın Temel Prensipleri, Bölüm 2, s.17, 18).

2.5.7 Anot Akım Yoğunluğu

Anot yüzeyinde de, tıpkı katotta olduğu gibi müsaade edilen bir sınır akım yoğunluğunun değeri vardır. Bu sınır değerini üzerine çıkılırsa anottaki metal çözünmesi durabilir ve anot çözünmez hale gelir. Kaplamacılıkta bu durum anot polarize olmuş şeklinde ifade edilir. Buna dayanarak anottaki akım yoğunluğunun kabul edilebilir maksimum değerini bilmeniz, bu sınırı aşıp anodun polarize olmasının önüne geçmeniz bakımından önemlidir (Elektrometal Kaplamanın Temel Prensipleri, Bölüm 2, s.18).

2.5.8 Akım Verimi

Faraday' ın ilk kanunu bir doğa kanunudur. Bir çözültiden belli miktarda elektrik geçirilirse belli miktarda madde çözünmüş halden katı hale geçer, tersi de doğrudur.

$$\text{Katot verimi} = \frac{\text{Gerçekte kaplanan metal miktarı} \times 100}{\text{Teorik olarak kaplanabilecek metal miktarı}} \quad (2.5)$$

veya,

$$e_c = \frac{\text{Gerçekte kaplanan metal miktarı} \times 100}{\text{Faradayın ilk kanuna göre metal miktarı}} \quad (2.6)$$

$$\text{Anot verimi} = \frac{\text{Gerçekte kaplanan metal miktarı} \times 100}{\text{Teorik olarak çözülebilecek metal miktarı}} \quad (2.7)$$

veya,

$$e_c = \frac{\text{Gerçekte çözünen metal miktarı} \times 100}{\text{Faradayın ilk çözülebilecek göre metal miktarı}} \quad (2.8)$$

Katot ve anot verimi her çalışma şartında aynı değildir. Bir asitli bakır banyosunda katot verimi pratikte %100' e ulaşabilir, fakat standart bir krom banyosunda %14 gibi düşük bir değer alır. Yani verim, kaplanan veya çözünen metalin cinsine bağlıdır. Verimi etkileyen diğer büyüklükler ise banyonun; sıcaklığı, kimyasal bileşimi, kullanılan akım yoğunluğu ve elektrolitin karıştırılmasıdır. Daha verimli katot daha az elektrik enerjisi kaybı ve verilen işi belirli bir akımda daha çabuk bitirme anlamına gelir. Bir başka önemli nokta anot ve katot veriminin mümkün olduğunca birbirine yakın olması gereğidir (Elektrometal Kaplamanın Temel Prensipleri, Bölüm 2, s.20, 21, 22).

2.5.9 Anot ve Katot Verimlerinin Belirlenmesi

Çalışan kaplama banyosunun anot veya katot verimini belirlemenizi gerektiren bir durum varsa en basit yöntem anodun veya katodun tartılması, sonra da belli bir

akımda ve belli bir sürede kaplama yapılmasıdır. Kaplama boyunca her beş dakikada bir akım değerleri ölçülür ve sonunda bunların ortalaması alınır. Kaplama tamamlandığında anot veya katot durulanır, kurutulur ve tekrar tartılır. Anot verimini test ederken anodun üzerine yapışmış olabilecek metal parçacıklarını da tarttığınızdan emin olun. Bu anot verimini belirlerken en çok karşılaşılan hata unsurudur. Tartımdan sonra;

$$\text{Katot verimi} = \frac{(\text{Katodun ilk ağırlığı}) - (\text{Katodun son ağırlığı})}{(\text{Ortalama akım}) \times (\text{zaman, h}) \times (\text{Faraday sabiti})} \times 100 \quad (2.9)$$

$$\text{Anot verimi} = \frac{(\text{Anotun ilk ağırlığı}) - (\text{Anotun son ağırlığı})}{(\text{Ortalama akım}) \times (\text{zaman, h}) \times (\text{Faraday sabiti})} \times 100 \quad (2.10)$$

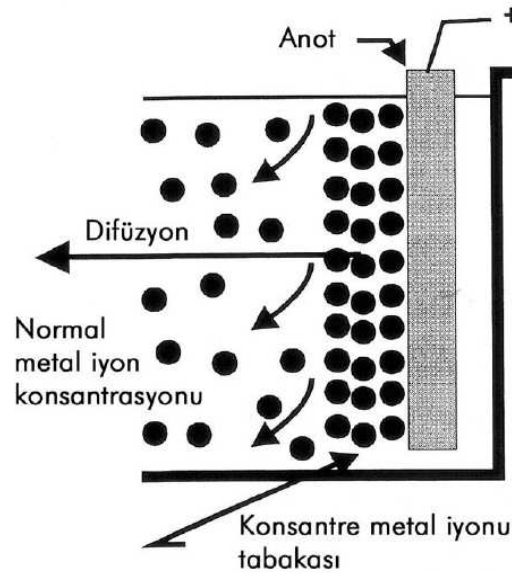
(Elektrometal Kaplamanın Temel Prensipleri, Bölüm 2, s. 22, 23).

2.5.10 Kaplama Banyosunda Polarizasyon

Bir kaplama banyosunda elektrik akışı esnasında meydana gelen dirence hem anot hem de katodun yakınındaki çözeltide rastlanabilir. Anot veya katot polarizasyonu şeklinde ifade edilir. Katot polarizasyonu kaplamanın yapısını etkilediğinden anot polarizasyonundan daha önemlidir. Bir örnekle açıklanacak olursa, sıradan bir nikel banyosunda çalıştığınızı ve elektrik potansiyel serileri tablosuna göre katotta 0,22 Voltluk gerilimin nikel kaplanmasına yeterli olduğunu varsayalım. Ayrıca anodun mükemmel anot olduğunu, çözeltiye göre daima sıfır potansiyelde ve sıfır dirençte bulunduğunu farz edelim. Bu durumda 0,22 Volt uyguladığımızda biraz nikel kaplanacaktır. Fakat gerçekte bu olmaz. Gerilim 0,40 Volt' a yükseldiğinde bir akım ölçülmeye ve nikel kaplanmaya başlar. Fazladan uygulanan bu gerilim teorik olarak kaplama için kullanılır ve bu polarizasyon olarak adlandırılır. Bizim örneğimiz için bu gerilimin büyüklüğü $0,40 - 0,22 = 0,18$ Volt veya 180 mV' tur.

Metal iyonları anottan çözündükçe anodun etrafında çözeltinin diğer kısımlarına göre metal iyonlarınca daha zengin olan bir film tabakası oluşur. Difüzyon ile çözeltinin geri kalanıyla eşit hale gelmeye çalışır. Eğer difüzyon ile bu iş

yapılamıyorsa fazla iyonların anoda geri kaplanma eğilimi vardır. İyon basıncı çözelti basıncını aşar ve zıt yönde bir potansiyel oluşur. Akım yoğunluğu arttıkça ve anotta daha çok iyon çözünür ve iyon konsantrasyonu kaplama oluşumuna yetecek kadar yükselir. Başka bir deyişle, çözeltideki metal tuzları arttıkça bir kısmı çözeltide kalsa bile bir kısmı da kaplanır. Bu tıpkı yalıtkan filmin oluşmasına benzer bir durumdur ve anotta polarizasyon oluşmasına neden olur (Şekil 2.4). Diğer yandan gerilim yükseldikçe elektrik akımı da yükselir, yalıtkan bir film oluşumuna neden olan yeni bir anodik reaksiyon meydana gelir. Bu olay meydana geldiğinde gerilim yükselecek fakat uygulamada akım akmayacak ve metal çözünmeyecektir. Bu durumda anot polarize olacaktır.



Şekil 2.4 Anot polarizasyonu (Elektrometal Kaplamanın Temel Prensipleri, Bölüm 2, s. 22, 23).

Aşırı yüklenmiştir ve duraklamıştır. Belli miktarda polarizasyon her kaplama işleminde meydana gelen bir durumdur. Yüksek polarizasyonda yapılan kaplamanın yüzey yapısı ve görünüşü (tozlu ve yanık) kötüdür. Polarizasyonun optimum çalışma değerleri arasındaki dengenin iyi kurulmasını gerektiren sebeplerden birisi de budur. Bu nedenle polarizasyona etki eden çeşitli etkenlerin bilinmesi önemlidir. Bunlar;

Akım yoğunluğu: Akım yoğunluğunu artırmak genelde polarizasyonu artırır. Katot tabakası daha çabuk fakirleşmesine neden olur.

Sıcaklık: Kaplama banyosunun sıcaklığının artırılması polarizasyonu düşürür, çünkü yüksek sıcaklıklarda difüzyon işlemi daha hızlıdır.

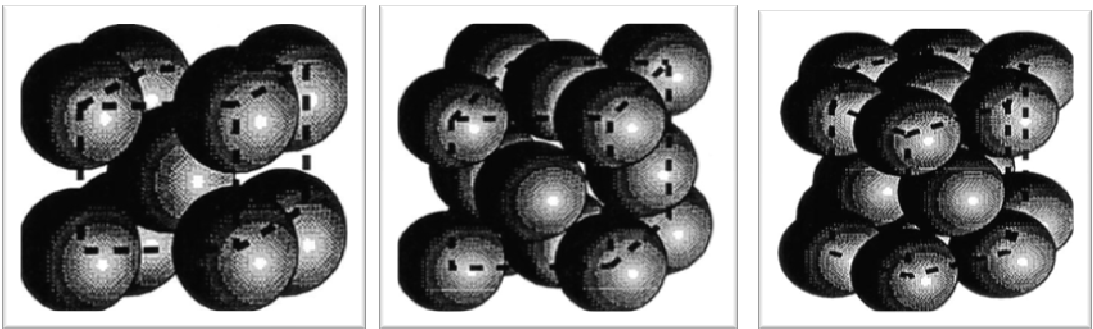
Karıştırma: Kaplama banyosunun hareketli şekilde karıştırılması doğal difüzyon işlemi hızlandırır. Eğer hava karıştırması uygulanıyorsa hava kabarcıkları nedeniyle kaplama çözeltisinin toplam direnci biraz yükselir.

Elektrolitin (banyonun) yapısı: Elektrolitte yüksek konsantrasyonlar da metal iyonlarının bulunması polarizasyonu düşürür. Bazı bileşiklerde metaller diğerlerine nazaran daha hızlı çözülürler. Bu nedenle nikel kaplama banyosu saf nikel sülfattan hazırlanır ve nikel anot çözünmez. Eğer sofran tuzu (sodyum klorür) formunda biraz klor eklenecek olursa, banyoya elektrik uygulandığında nikel anot çözülmeye başlar.

Yüzeyin yapısı: Bazı yüzeyler kaplamayı diğerlerinden daha aktif olarak kabul ederler. Bu durumda polarizasyona daha fazla eğilim vardır (Elektrometal Kaplamanın Temel Prensipleri, Bölüm 2, s. 25, 25, 27).

2.5.11 Metal Kaplamanın Oluşumu

Metaller kristal yapılardan oluşur. Bu kristal yapılarda üç boyutlu atomların dizilmelerinden meydana gelir. Metal atomları aralarında bağ yaparken düzenli bir şekilde sıralanırlar. Genellikle çoğu metalin atomsal yapısı hacim merkezli kübik veya yüzey merkezli kübik olmak üzere iki türdür.



(a)

(b)

(c)

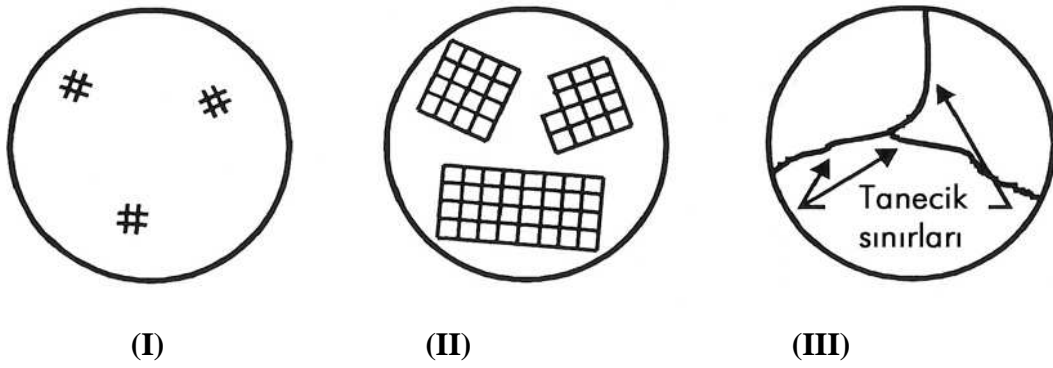
Şekil 2.5 Kristal kafes yapıları (a) Hacim merkezli kübik; Fe, Cr, (b) Yüzey merkezli kübik; Cu, Ni, Ag ve (c) Hekzagonal sıkı paket; Cd, Zn (Elektrometal Kaplamanın Temel Prensipleri, Bölüm 2, s. 37).

Hacim Merkezli Kübik (HMK) diziliş demir ve kromu örnek verebiliriz (Şekil 2.5 a). Ortadaki bir krom atomunun etrafında bir kübün köşelerine yerleşmiş şekilde krom atomları bulunur. Bu diziliş uzayda üç boyutlu olarak devam eder. Yüzey Merkezli Kübik (YMK) diziliş ise, kübün yan yüzeylerinin tam ortasında ve köşelerinde bulunacak şekilde dizilmiş bakır, altın, gümüş ve nikel atomları örnek verilebilir (Şekil 2.5 b). Daha nadir rastlanmakla beraber çinko ve kadmiyum gibi bazı metallerde hekzagonal sıkı diziliş görülebilir (Şekil 2.5 c). Bu dizilişte kübün üst ve alt kısımlarında merkezdeki bir atomun etrafında altı atom yerleşmiştir ve aralarında da üç atom bulunmaktadır. Bu yapıya hekzagonal prizma denir.

Metal kristali (taneciği) ortalama tanecik çapına göre ölçülür. Birim hacimdeki (veya alandaki) tanecik sayısı fazla ise tanecik boyutu küçük, az ise tanecik boyutu büyüktür denir. Uygulamada kapladığımız metalin tanecik boyutu çok önemlidir, çünkü kaplamanın çoğu özelliğini etkiler. Bu özellikler; sertlik, pürüzlülük, parlaklık, aşınma, kuvvet, gerilme ve korozyondur. Dekoratif kaplama için en önemli özellik kuşkusuz parlaklıktır. Metali oluşturan kristal tanecikleri büyük olursa genellikle metal daha yumuşak ve kolay çekilir. Ayrıca donuk ve pürüzlü görünüşlüdür. Eğer tanecikler daha ince olursa metal daha sert, genellikle daha kırılğan, pürüzsüz ve parlak olacaktır. Gözeneklilik (porozite) de endüstriyel kaplamada önemlidir. Daha ince kristal yapılı kaplamalar, kaba yapıllara göre daha az gözeneklidir (Elektrometal Kaplamanın Temel Prensipleri, Bölüm 2, s. 36, 37).

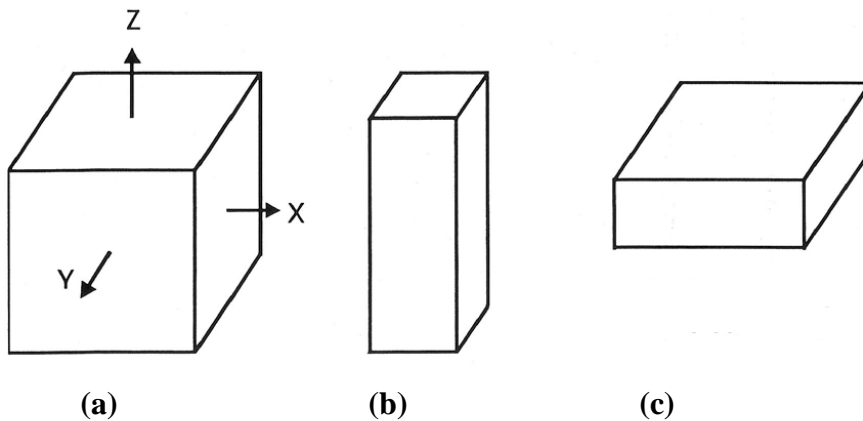
Şekil 2.6'da gösterildiği gibi elektrolitik kaplama işlemi esnasında kristal oluşumu iki adımdan meydana gelir:

1. Temel metalin üzerinde kristal çekirdekleri oluşur.
2. Bu çekirdekler gelişir ve büyür.



Şekil 2.6 Kristal çekirdeği oluşumu ve büyümesi (I) çekirdek oluşur, (II) çekirdekler büyür ve (III) tanelerin oluşumu (Elektrometal Kaplamanın Temel Prensipleri, Bölüm 2, s. 38).

Bir kaplamacı olarak bu işlem sürecini kontrol edebilir. Kristal çekirdeğinin oluşumu sırasında, bunların büyümesinin ve birbirleriyle çakışmasının istenmediği, yani üstün bir kristal yüzeyi elde etmekle sınırlanmış olduğunuz şartlarda çalışmanız gerekebilir. Bundan başka, eğer çekirdeklerin gelişmesinin istendiği (2. adım) şartlarda çalışıyorsanız kristal çekirdeği yapısı daha büyük olacaktır çünkü bu durumda az sayıda çekirdekten başlayıp bunlar yüzeyleri birbirleriyle temas edene kadar iyice genişleyeceklerdir. Belli bir çevrede kristallerin gelişme şekline habit denir. Belli şartlarda oluşan kristalin habitü çalışma şartları değiştiğinde artık aynı olmayacaktır. Şekil 2.7'de bazı kristal büyüme habitleri gösterilmiştir. Kristalin böyle değişik yönlere doğru büyümesinin nedeni, farklı çevresel şartlarda farklı yönlere doğru büyümeye zorlanmasıdır.



Şekil 2.7 Kübik kristallerin büyüme habitleri (a) x,y ve z doğrultusunda büyüme, (b) x ve y doğrultusunda büyüme bastırılmış ve (c) z doğrultusunda büyüme bastırılmış (Elektrometal Kaplamanın Temel Prensipleri, Bölüm 2, s. 38).

Elektro kaplamada genelde büyüme habiti sütun şeklindedir. Yani yanlara doğru büyüme hızı dikey büyüme hızından daha düşüktür. Bu tip kristal oluşumu alan yönlendirmeli büyüme (elektrik alanının yönünde büyüme) olarak adlandırılır. Bazen levha tipi kristal gelişimi gözlenir (genelde banyoya kimyasal etmenler eklenerek elde edilir). Buna taban yönelmeli büyüme denir. Bazen de iğne yapılı kristaller görülür fakat genellikle yanık, kusurlu ve dallanmış kaplamalardır (iğne şekilli büyüme ağaç gibi dallanır) (Elektrometal Kaplamanın Temel Prensipleri, Bölüm 2, s. 36, 37, 38).

2.5.12 Kaplamada Kristal Çekirdek Büyüklüğünü Kontrol Yöntemleri

Kristalde çekirdekleşme doğru sayıda atom kısa bir zaman dilimi içinde aynı yere ulaştığında başlar. Çekirdek yapısı oluşurken dışarıdan enerji alır çünkü artık yeni bir yüzey oluşmaktadır.

Temel metalin yüzey yapısı çekirdek yapısına etki eder. Çünkü çekirdek oluşumunu işlemini etkiler. Temel metal ince çekirdekli ve/veya iyice parlatılmış ise atomların düzensiz olduğu çok sayıda bölge bulunur. Bu düzensiz bölgeler çekirdeklenmenin başlaması için çok elverişlidir. Çünkü kaplama çözeltilisinden gelen atomlar buralara kolaylıkla tutunabilirler. Yüzeyde daha fazla sayıda düzenli atom bulunması diğerine göre çekirdek oluşumunu zorlaştıracaktır. Bu da çekirdek oluşum hızını biraz yavaşlatacak ve sonuçta ince çekirdekli kristal yapı oluşacaktır. Bununla beraber bu durum kaplama neticesine tek başına yön vermez çünkü belli bir kaplama kalınlığına ulaşıldığında çekirdek yapılarında büyüme eğilimi baş gösterir. Bazı çekirdekler diğerlerini baskı altına veya içerisine alır.

Çekirdek boyutunu kontrol etmenin bir diğer yolu da kaplanan atomların sahip olduğu enerjiyi artırmaktır. Eğer daha fazla enerjiye sahip olurlarsa yerleşecekleri yeni yüzeyden çok fazla bir enerji almalarına ihtiyaç kalmaz. Sonuçta temel metalin birim yüzeyinde oluşan çekirdekler daha küçük ve daha fazla sayıda olacaktır.

Bu durum kaplama çözeltisiyle ve çalışma şartlarıyla ilgilidir. Değişik metallerin birbiri üzerine kaplanabilmesi için bir minimum denge potansiyeli vardır. Bu minimum değerde akım yoğunluğu çok küçük, dolayısıyla katot yüzeyine ulaşan metal iyonları oranı da oldukça düşüktür. Ayrıca yüzeye ulaşan her bir atomun enerjisi de benzer şekilde düşük olacaktır.

Gerilimin dolayısıyla akım yoğunluğunun belirsiz miktarda artırılması ince kristal yapı oluşumuna yol açmaz. Çoğu işlemin olduğu gibi bu işlemin de bir sınırı vardır. Belli bir akım yoğunluğuna kadar diğer değişkenler eşit davranırlar, bu aşıldığında kaplama ince çekirdekli olmadığı gibi, banyodaki yabancı maddelerin kaplama yüzeyine metal atomlarıyla beraber taşınması nedeniyle yanık, koyu ve bozuk renkli olur.

Bunun meydana gelmesinin sebebi belli şartlarda belli bir çözeltide akan metal iyonları belli miktarda akım taşıyabilirler. Eğer potansiyel çok fazla artırılırsa metal iyonları da diğer iyonlar gibi bu durumu koruyamazlar. Büyük oranda hidrojen kaplanmaya başlanır ve katot verimi düşer. Hidrojen iyonları tüketildiğinden katot yakınlarında pH artar (birim hacimde daha az hidrojen iyonu) ve kaplama bazik yapılar içermeye başlar.

Her akım yoğunluğu için (gerilimle ayarlanır) diğer koşulların sabit kalması sağlanırsa kristal boyutu dengeli bir büyüklükte olur. Yüksek akım yoğunluklarında bu denge büyüklüğü düşük akım yoğunluklarındakine göre bir dereceye kadar küçüktür.

Bu üçüncü hususa göre, katottaki metal atomları ciddi şekilde tüketilmeden atomların enerjisinin artmasına izin verilen bir durumda kristal denge büyüklüğüne erişecek kadar küçük çekirdek oluşma imkanı vardır. Kaplama banyosunun direncinin düşürülmesi ve diğer değişkenlerin sabit tutulması küçük kristal boyutu elde etmek için size yardımcı olacaktır. Çünkü yüksek akım yoğunlukları banyonun uçtan uca geriliminin artırılmasıyla mümkün olur, bir başka açıdan bakarsak bu durumda katottaki potansiyel düşümü daha büyük olacaktır.

Çözeltideki metal iyonu konsantrasyonunun artırılması çözeltinin iletkenliğini de belli oranda artıracaktır. Bu da belli bir gerilimde yüksek akım yoğunluklarına ulaşılmasına, böylece birim zamanda katoda ulaşan atom sayısının artırılmasına imkan verir.

Bundan başka katoda ulaşan metal atomlarının enerjisi ve sayısı artırılarak daha küçük çekirdek boyutu elde edilebilir. Enerjinin içeriği ile birim alana saniyede ulaşma miktarı arasında doğrusal (lineer) ve doğrudan bir ilişki yoktur. Kısaca açıklamak gerekirse, katot yüzey tabakasında kaplanmaya hazır çok sayıda metal iyonu bulunmalıdır. Bu metal iyonları çok miktarda enerjiye sahiptir.

Burada kaplama banyosunun iletkenliğini artırmak yardıma koşar. Yani gerilim düşmelerinin çoğu katot ile kaplama çözeltisi arasındaki yüzeyde olur, belli bir enerjiye sahip metal iyonları katot yüzeyine çarparlar. Başka deyişle belli bir ortalama gerilimde enerjinin çoğu ara yüzeyde olur.

Basit metal iyonları yerine karmaşık (kompleks) olanlarının kullanılması da yardımcı olur. Bakır sülfatın bakır iyonu gibi bir basit metal iyonu katoda doğru göçer ve deşarj olur. Bu olay çok fazla enerji gerektirmez. Bakır iyonu kendi başına basit iyon olarak kalmaz, bakır siyanür gibi bir karmaşık metal iyonu oluşturur. Karbon ve azot iyonları birbirine güçlü bir bağ ile bağlanmıştır. Kaplama esnasında bakır, azot ve karbon ile arasındaki bağı koparır ve serbestçe kaplanabilecek hale geçer. Bu işlem bakır iyonlarını doğrudan sülfat iyonlarından ayırmaktan daha fazla enerjiye mal olur. Bu bakırı enerji eşiğinden geçirecek bir etkiye denktir ve tekrar aşağı inmeye başladığında (enerjisi boşalırken) basit asitli bakır iyonu olsa idi sahip olacağı enerjiden daha fazla enerjiye sahip olur.

Öte yandan, eğer kaplama oranını (akım yoğunluğu) yükseltmek istiyorsanız katot yüzey tabakasında kaplanmaya hazır çok sayıda metal iyonu bulunmalıdır. Basit metal iyonu kullanıyorsanız (diyelim ki asitli bakır) banyodaki konsantrasyonlarını iki katına çıkarmak ve önceden kullanılan akım yoğunluğunda devam etmek suretiyle daha büyük kristaller olacaktırlar. Banyoya daha fazla bakır iyonu ilave

ederek banyonun iletkenliğini artırmış, o yüzden de daha önce belli bir akım yoğunluğu elde etmek için belli bir gerilim uygularken artık daha az gerilim uygulamak yeterli olacaktır. Bu, metal iyonlarına ara yüzü geçmeleri için verilen enerjinin önceden olduğundan görece olarak daha az olacağı anlamına gelir. Bu nedenle çekirdek oluşturmak için daha fazla sayıda iyon kullanılır.

Karıştırma yani metal iyonlarını çözeltinin ortalarından alarak katot filminde kullanılanların yerine getirme de benzer bir etki yapacaktır. Difüzyon direncini azaltacaktır. Buraya kadar iyi ama eğer gerilim de aynı anda yükseltilmezse (akım yoğunluğunda da eşdeğer bir yükselme meydana getirir) kristal boyutu daha küçük olacağına büyük olur. Karıştırma uygulanıyorsa katoda ulaşan bakır iyonları düşük serbest enerjilidir, diğer hallerde aynıdır.

Banyo sıcaklığını düşürmek ters etki yapar. Atomları yavaşlatarak katot filme doğru difüzyon direncini yükseltir. Bunun anlamı sınırı geçmeleri için daha fazla enerji verilmelidir. Banyo sıcaklığını düşürmek direnci artırır, öyleyse daha öncekiyle aynı akım yoğunluğu istiyorsanız gerilimi artırmanız gerekir. Bu artışın bir kısmı bakır atomlarının sınırı geçmeleri için ihtiyaç duydukları enerjidir.

Çoğu durumda kristal elektrik akımının yönünde katot yüzüne dik açılı şekilde daha hızlı büyür. Daha konsantre bir çözeltide ve daha yüksek akım yoğunluklarında birim yüzeye giden metal iyon sayısı artar. Metal döküm bu yöntemle çok benzer şekilde yapılır. Kristaller soğuk döküm duvarlardan sıcak bölgelere doğru gelişir.

Kaplama banyosuna ilave kimyasallar eklenerek bazı kristal yüzlerini absorbe ederler, biz de büyümenin o yüzlerle bitmesini umuyoruz. Bu parlaticıların temel ilkesidir. Kristalin çok fazla büyümesini engelleyerek kristal boyutunun küçük olmasını ve böylece parlaklığı sağlarlar, ama asıl önemlisi, kristal yüzeylerinden başlayarak değişik yönlerde doğru üniform büyüme olmasını ve böylece daha pürüzsüz ve üniform yüzey sonuçları elde etmemizi sağlar.

Belli bir çözelti belli bir akım yoğunluğunda iyi kaplama sonucu veriyorsa, katot yüzey alanındaki şartların sabit kalmasının sağlanması koşuluyla daha yüksek akım yoğunluklarında da iyi sonuç verecektir (Bancroft Prensibi). Diğer bir deyişle bir banyodan güzel kaplama elde ediyorsanız akım yoğunluğunu yükseltebilirsiniz (yani kaplama süresini kısaltabilirsiniz) ve katot yüzeyindeki koşulları düşük akımda çalışırken mevcut olan koşullarda tutarsanız hala güzel kaplama elde edersiniz. Bunu yapmak her zaman mümkün olmayabilir ama çoğu durumda mümkündür. Kaplama üretimini artırma şansı her zaman vardır (Elektrometal Kaplamanın Temel Prensipleri, Bölüm 2, s. 39, 40, 41).

Kaplama esnasında kristal boyutunu küçültmek ve artırmak için gerekli işlemleri özetleyecek olursak;

*** Kristal boyutunu küçültmek için**

1. Akım yoğunluğunun artırılması,
2. Kaplama banyosunun direncinin düşürülmesi,
3. Banyo sıcaklığını düşürülmesi,
4. İlave kimyasalların kullanılması ve
5. Metal yüzeyinin parlatılması ve karmaşık metal iyonlarının kullanılması gibi işlemler yapılır.

*** Kristal boyutunu büyütmek için**

1. Akım yoğunluğunun düşürülmesi,
2. Kaplama banyosunun direncini artırılması,
3. Kaba taneli metal yüzeyine kaplama yapılması,
4. Basit metal iyonları kullanımı ve
5. Karıştırma işleminin uygulanmasıdır.

Yukarıdaki tavsiyeler her durumda sonuç vermeyebilir. Burada biraz karmaşık bir durum söz konusudur. Bazı zorluklarla karşılaşılmasının nedeni bir büyüklükte değişiklik yapıldığında diğerlerinin de bundan etkilenmesindedir. Bu öneriler genel bir fikir vermesi amacıyla verilmiştir (Elektro metal Kaplamanın Temel Prensipleri, Bölüm 2, s. 38, 39).

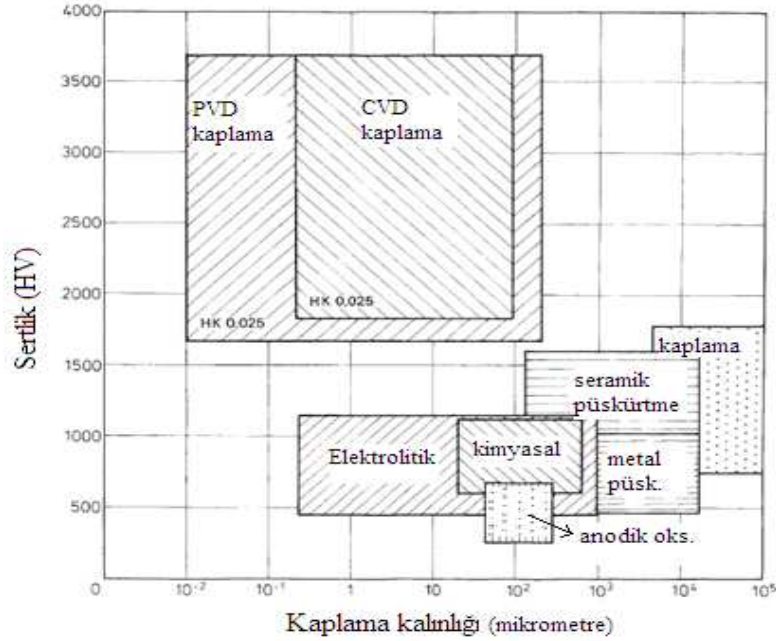
BÖLÜM ÜÇ

METAL KAPLAMA ÖZELLİKLERİ

3.1. Kaplama Yüzeyinin Geometriksel Parametreleri

3.1.1 Kalınlık

Kaplama kalınlığı koruma özelliklerini, dekoratif ve tekniksel özellikleri önemli ölçüde belirleyen temel parametrelerden biridir. Porozite, sızdırmazlık, korozyon direnci ve mekanik dayanım uygun kaplama kalınlığına bağlıdır. Bunun yanı sıra kaplamanın farklı tipleri için, bu kalınlık kullanılabilir özellikler üzerinde farklı bir etkiye sahiptir. Örneğin, kaplamanın artışı ile aşınma direncine benzer olarak kaplamanın koruma özelliği de artar. Fakat kalınlık; esneklik, darbe direnci ve bazen de adhezyon üzerinde ters bir etkiye sahiptir (ör; 0,5 mm kalınlıkta ki sert macun kaplama 0,1 mm kalınlıktakinden daha düşük bir yapışma direncine sahiptir.) Bazı kaplamalar için kalınlık oranları ile onların sertlik oranlarının eşitlikleri Şekil 3.1’de gösterilmektedir (Burakowski ve Wierzchon, 1999).



Şekil 3.1 Bazı kaplama türlerinin “kaplama kalınlığı - sertlik grafiği” (Burakowski ve Wierzchon, 1999).

3.1.2 Yüzeyin Üç Boyutlu Yapısı

Kaplama yüzeyindeki üç boyutlu yapı kullanılan teknik ve metotlara bağlı olarak yüzeyde gelişen kaplama işleminin bir sonucudur. Yüzey pürüzlülüğü ve depositleme esnasında oluşan kusurlar üzerinde etkili olan üç boyutlu yapının oluşumu kontrol edilmelidir (Burakowski ve Wierzchon, 1999).

3.1.3 Yüzey pürüzlülüğü

Malzeme yüzeyinde, aşınma veya çeşitli işlemler sonucu, yüzey üzerinde oluşan düzgün olmayan yapılar veya pikler ve çukurlar şeklinde yüzey pürüzlülükleri oluşur (Burakowski ve Wierzchon, 1999).

Kaplamanın yüzey pürüzlülüğü yüzey tabakalarının tanımlanmasında kullanılan benzer parametreler ile açıklanır. Kaplamalar işlem aşamasında bozulmaya meyledebilir. (Daldırma veya elektrolitik kaplamalar v.b.) Kaplamaların çoğunluğu için özellikle dekoratif kategori de küçük yüzey pürüzlülüğü, diğer manada yüksek yüzey düzgünlüğünün elde edilmesi önemlidir.

3.1.4 Yüzey Morfolojisi

Yüzeydeki morfolojik yapılar, makro ve mikro seviyede malzemeyi aşınma ve korozyona karşı koruyan önemli faktörlerdir. Makro seviyede yüzeyin genel topografyası, yüzey morfolojisi için indeks olarak kabul edilmektedir. Mikroskobun kullanımı, yüzey özelliklerini direk etkileyen, daha ince detayların (tane, tane sınırı, farklı fazlar, hatalar, poroziteler, vs.) incelenmesi imkanını artırmıştır (Özkan, 2006).

3.2 Kaplama Yüzeyinin Mekaniksel Özellikleri

3.2.1 Sertlik

Sertlik, küçük yüzey alanı içerisinde, malzemenin plastik deformasyona karşı gösterdiği direnç olarak tanımlanabilir. Sertlik genel anlamda, malzemenin yüzey hasarlarına karşı direnci ifade eden bir karakteristiktir (Burakowski ve Wierzchon, 1999). Yüzey tabakasında yüksek sertlik, yüzey kompozisyonu ve mikro yapısını kontrol etmekle oluşturulur. Yüzeyin sertliği aşınma oranı ile ters orantılıdır (Özkan, 2006).

Kaplamaların sertliği çok sık saptanan parametrelerden biridir. Sertlik farklı kaplama uygulamaları için uygulanan kaplama cinsine göre değişiklik göstermekle birlikte, kaplanan malzemeye ve yapıya göre de farklılık gösterir.

Elektrolitik kaplamalarda sertlik genellikle metalurjik manada metallerde, benzer metallerde gözlemlenen değerlerden daha yüksektir. Kaplama esnasındaki akım yoğunluğundaki artış, bunun yanı sıra organiklerin varlığı, kristalizasyonu yavaşlatıcı inhibitörleri içeriği gibi bütün bunlar sertliği artırıcı nedenlerdir. Depositlenme esnasında ki sıcaklığın artışı da sertliğin düşüşüne nedendir. Elektrolitik olarak kaplanmış alaşımlı kaplamalar veya kimyasal amorf kaplamalar ısı ile artırılabilir. Bu özellikle aşırı doymuş çözeltiler için doğrudur (Burakowski ve Wierzchon, 1999).

3.2.2 Adhezyon

Adhezyon, iki farklı maddenin molekülleri arasındaki çekim kuvveti olarak tanımlanabilir. Kaplamaların yüzeye iyi yapışma göstermesi için gerekli şart yüzeyin yüksek saflıkta, temizlikte olmasıdır. Yüzeydeki temizlikten sadece yağ, pas ve diğer kontaminantlar anlaşılmalıdır, bunun yanı sıra metalik karakterde olmayan, oksitler, sülfidler ve diğer korozyon ürünleri gibi tabakalar ve absorplanmış bileşikler de yüzeyden giderilmelidir. Kaplamanın yüzeye yapışmasını yüzey temizliğinin yanında, artık gerilmeler, yüzeydeki oluşumların derecesi (yüksek pürüzlülük), yüzey sünekliliğinin de ki farklılıkların yanı sıra altlık malzemeside etkiler. Bu durum

özellikle kaplanmış malzemenin sert bir mekanik deformasyona maruz bırakılmasında kendini gösterir. Kaplamanın iyi yapışması mekanik karakter ve artık gerilmelerin güçlü iç etkileşimine, sıcaklığa bağlı olarak kaplamanın çıkmasını ve kalkmasını da önler (Burakowski ve Wierzchon, 1999).

3.2.3 Artık Gerilme

Artık gerilmeler kaplama malzemesi ve yüzeyin termal genişleme katsayılarındaki farklılığın sonucu olarak kaplama sırasında şekillenir. Bu artık gerilmeler karakterine bağlı olarak pozitif veya negatif rol oynayabilir. Genellikle basma gerilmeleri olumludur, uygundur. Bunun yanında çekme gerilmeleri sakıncalıdır. Artık gerilmeleri, uygun malzeme seçimi ve proses parametreleri ile azaltılabilir. Elektrolitik kaplamalarda artık gerilmeler banyonun tipine, hidrojen iyonu konsantrasyonuna, komponentlerin konsantrasyonuna, akım yoğunluğuna, sıcaklığa ve parlaticıların, kontaminantların miktarına bağlıdır. Krom kaplı kaplamalar da, örneğin artık gerilmeler 800 MPa'dan 1000 MPa'a kadar değişiklik göstermektedir (Burakowski ve Wierzchon, 1999).

3.2.4 Elastiklik

Boyanmış kaplamaların elastikliğiyle eşdeğer olan metal kaplamaların sünekliği, kohezyen kaybı olmaksızın (katmanlara ayrılma, çatlak v.b.) plastik deformasyonlara kaplama malzemelerinin duyarlılığı olarak anlaşılır. Düşük sertlikteki kaplamalar ve az gevrek kaplamalar genellikle sünektir. Yüzey tabakalarında ve kaplamalarda gevreklik istenmeyen bir özelliktir. Genellikle, ama her zaman değil, gevreklik sertlikle bağlantılıdır; tabakalar yüksek sertlik değerlerinde yüksek gevreklik değeri alırlar (Burakowski ve Wierzchon, 1999).

BÖLÜM DÖRT

METALİK KAPLAMALAR

4.1 Çinko Kaplama

Çinko, elektrokimyasal özelliği ve ekonomik olması bakımından, demir ve çeliği korozyona karşı korumada yaygın olarak kullanılan bir elementtir. Çözünme hızı yaklaşık olarak sabittir, yani zamanla değişmez. Bu sebeple çinko kaplamaların koruma ömürleri genel olarak kalınlıkları ile doğru orantılı olmaktadır. Yapılan araştırmalarda 0.06-0.012 mm arasındaki çinko kaplamanın paslanmaya karşı, nemli veya endüstriyel ortamlarda ise 0.024-0.048 mm kalınlığın korozyona karşı yeterli olduğu tespit edilmiştir (Hasçalık, 2002).

Günümüz sanayisinde, endüstriyel makinelerde, iş makinelerinin birçok yedek parçalarında, otomotiv sektöründe, boya altı olarak korozyon direncini artırmak gibi değişik alanlarda kullanılan bir kaplama türüdür. Kaplama sonrası yüzeye pasivasyon işlemi olarak Cr (III) işlemi uygulanır. Beyaz, sarı, yeşil, siyah gibi değişik pasivasyon renkleri vardır. Asitli, alkali ve siyanürlü banyolar mevcuttur. Asitli çinko kaplamalar parlak bir görünüme sahipken, alkali çinko banyolardan elde edilen kaplamalarda daha homojen bir kaplama kalınlığı mevcuttur. Alkali Çinko banyoların bu özelliği de son yıllarda ki kullanım oranında artışa sebep olmaktadır.

4.2 Nikel Kaplama

Nikel kaplamalar, günümüzde yaygın olarak kullanılan korozyon direnci yüksek kaplama türlerinden biridir. Bu özelliğinin yanı sıra görsel olarak parlak görünümlü oluşu da, dekoratif anlamda tercih nedenlerinden biridir. Bu bağlamda; endüstriyel birçok değişik parçalarda, otomotiv sektöründe, ev eşyalarının da kullanım alanı mevcuttur. Bunun yanı sıra plastik üzeri nikel kaplamalarda, parçaların metal görünümlü olması, yansıtıcılık ve hafif olması gibi değişik özellikleri de beraberinde getirmektedir. Aynı zamanda, elektrolizle biçimlendirmede de nikel kaplamalar, daha

yüksek sertlik, aşınma ve korozyon direnci nedeniyle de geniş kullanımı söz konusudur (Kanani, 2004).

4.3 Krom Kaplama

Elektrolitik krom kaplamalar, düşük sürtünme katsayısının yanı sıra, yüksek sertliğe ve aşınma direncine sahip oluşu ve korozyona karşı gösterdiği direnç önemli özelliklerindedir. Aynı zamanda, 0,2 – 0,6 μm 'lik kalınlıkta ve gümüş bir görünümü ile dekoratif anlamda yüzey işlemlerinde kullanılır. Örneğin nikel kaplama sonrası yapılan krom kaplama işlemi bu uygulamaya bir örnek olarak verilebilir. Dekoratif anlamda kullanılan krom kaplama uygulamasına karşın, sert krom depozitleme işlemi 10 μm 'dan 500 μm 'ye kadar daha fazla kalınlıklarda uygulanan bir işlemdir. Yine bu tip krom kaplamalarında çok değişik alanlarda uygulama alanları mevcuttur (Kanani, 2004). Görüntü, renk ve parlaklık dekoratif uygulamalar için önemlidir (Shreir ve Jarman, 2000). Nikel üzeri krom kaplamalarında bu sebepten ötürü günümüzde dekoratif amaçlı kullanım alanı oldukça geniştir.

4.4 Değerli Metal Kaplamalar

Değerli metal kaplama türleri, ince bir kaplama kalınlığına sahip olsalar bile yüksek bir etkiye sahip olabilirler. Bu tip metallerin depozitlenmesi sahip olduğu özelliklerden ötürü, elektrik, elektronik, optik, uzay endüstrisi ve değişik kimyasal aparatlarda kullanılmaktadır. Altın, gümüş v.b. kaplamalar gibi değişik uygulamalar mevcuttur. Yine paladyum kaplamalar, dekoratif bir kaplama olmasının yanı sıra, düşük sürtünme katsayısı ve yüksek sertlik gibi özellikleriyle elektrik parçalarında kullanılmaktadır (Kanani, 2004).

4.5 Alaşımli Kaplamalar

Talep edilen bir metal kaplama gereksinimi saf bir metal ile karşılanamayabilir. Böylesi durumlarda böylesi istekleri alaşımli bir kaplama karşılayabilir. Nitekim,

altın-bakır-kadmium alaşımlı kaplamalar mükemmel korozyon direnci göstermektedir. Nikel – kobalt alaşımları elektroliz yoluyla şekillendirilmede yüksek dayanımından dolayı tercih edilmektedir. % 8-15 arasında değişen oranlarda fosfor içeren akımsız nikel kaplamalar da aşınma direnci, mükemmel korozyon direnci sağlayan kompleks şekilli parçaların üniform olarak kaplanmasında kullanılan kaplamalardır. Kalay-kobalt kaplamalar parlak görünümü ve yine parlak kroma alternatif olarak koruyucu olarak kullanılır. Çinko-nikel, çinko-kobalt ve çinko-demir kaplamalarda saf çinkoya göre çok daha iyi korozyon direnci gösterir. Bu sebepten ötürü özellikle otomotiv endüstrisinde bu tür kaplamaların kullanımı artarak devam etmektedir (Kanani, 2004).

4.6 Kompozit Kaplamalar

Metal matriksli veya metalik olmayan yabancı maddeleri içeren elektrolitik yolla kaplanan kompozit kaplamalar yüksek aşınma direnci gibi iyi özellikler gösteren bir kaplama türüdür. % 8-10 arasında SiC içeren nikel kaplamalar içten yanmalı motorların silindirlerinde kullanım ömrünü artırmak için kullanılmaktadır. Kobalt bir matriks içinde krom karbür bazlı kompozit kaplamalar gaz türbinlerinde aşınma dirençli kaplamalar olarak yüksek sıcaklıklarda gösterdiği performanstan ötürü kullanılırlar (Kanani, 2004).

4.7 Anodik Kaplamalar

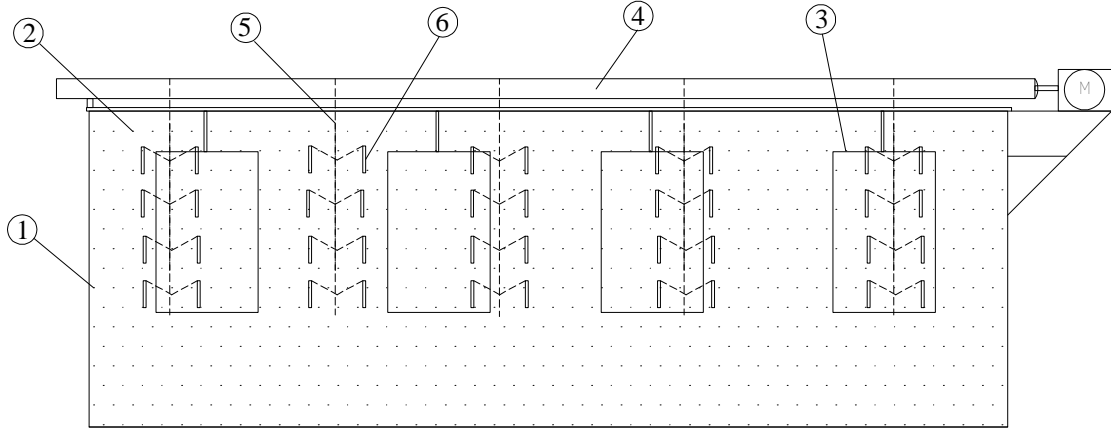
Alüminyum ve alüminyum alaşımlı kaplamalardan yapılan parçaların korozyon ve aşınma direnci yüzeyde yapılan anodik oksitleme işlemiyle (eloksal kaplama) önemli derecede artar. Anotlanmış tabaka 5-25 μm 'lik kalınlıkla kullanılabilir ve değişik renklendirme işlemleri de yapılabilir. Bunun için birçok teknik mevcuttur. Alüminyum üzeri eloksal kaplamalar; elektronik, bilgisayar gibi değişik sektörlerde, farklı makinelerin yedek parçalarında bunların yanı sıra optik ve medikal ekipmanlarda kullanılmaktadır (Kanani, 2004).

BÖLÜM BEŞ

ELEKTROLİTİK METAL KAPLAMA SİSTEMLERİ

5.1 Askı Sistemi

Askı sistemleri; büyük boyutlara sahip değişik parçaların kaplanması için kullanılan bir metal kaplama sistemidir. Bazen de küçük boyutlu malzemelerde kaplama yüzeyinin daha düzgün çıkması istenildiği durumlarda da askı kaplama sistemleri tercih edilir. Çünkü dolap içinde, parçalar birbiri ile temas halinde olduğundan kaplama yüzeyinde çizikler gözlenebilir. Örnek bir askı banyo düzeneği Şekil 5.1 de verilmiştir.



- | | |
|-----------------|--|
| 1. Askı Banyosu | 4. Bara (iş parçasının asıldığı bakır lama) |
| 2. Elektrolit | 5. Askı aparatı |
| 3. Anot | 6. Kaplanan parçalar |

Şekil 5.1 Askı Kaplama Banyosu

Bu sistemler de kaplanacak olan parçalar, şekilde de görüldüğü üzere, kaplama tankının ortasından geçen ve hareketli olan bakır lamaya (bara) asılır. Bu bakır lamanın, parça asılan kısmı oksitlenmeden ötürü, sık sık temizlenmelidir. Aksi takdirde iletkenlik oksit oluşumundan dolayı olumsuz etkilenecektir. Anotlar ise, tankın çevresini saran bakır lamaya asılır. Burada anot malzemenin bakır lamaya

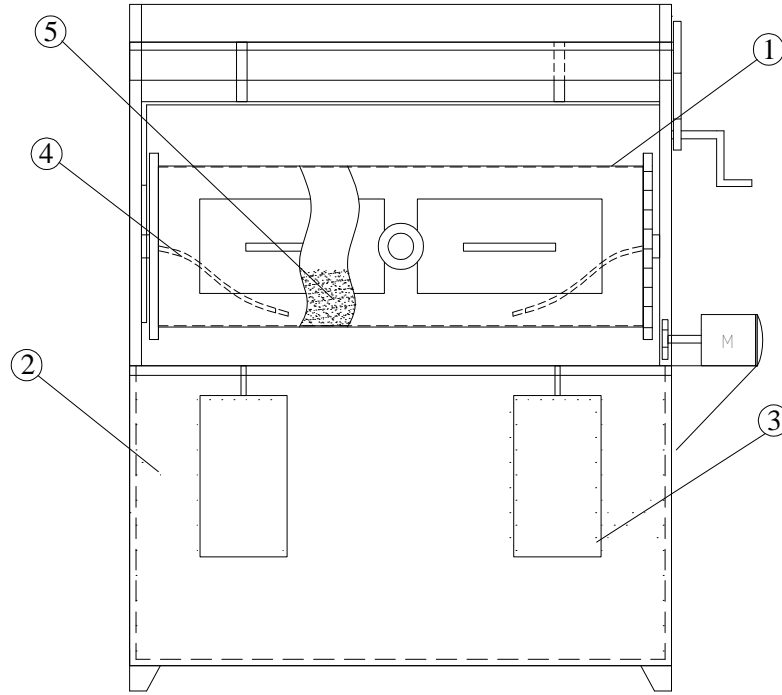
asılmasında genellikle titanyum çubuklar kullanılır. Bilindiği üzere titanyum korozyon direnci çok iyi, fakat pahalı bir malzemedir.

Sağlıklı bir kaplama yüzeyi elde etmek için, malzeme asılan baraya hareket verilir. Bu hareket genellikle bir redüktör vasıtasıyla sağlanır. Aynı zamanda parçanın sabit olduğu durumlarda vardır. Bu durumda da elektrolite banyo içine döşenmiş hava sistemiyle hareket kazandırılır. Bu sistem özellikle ağır parçaların kaplanmasında baranın hareketinin zorlaşacağı ve/ya parçanın düşmesi halinde kaplama tankında delinme, aşınma gibi durumların çıkabilme riskine karşı daha uygundur. Ancak hava ile verilen harekette, elektrolit çözeltisinin altına çökmüş bir takım kirliliklerin hareket kazanacağı ve bu kir zerreciklerinin kaplama yüzeyine yapışma durumu da bu sistemin dezavantajlarından biridir.

Askı kaplama sistemi, donanım olarak çelik konstrüksiyondan yapılmakta olup, yapı polimer bazlı bir malzeme ile tamamen normal çevre ile temas etmeyecek şekilde kaplanır. Bu amaçla da genellikle polipropilen malzeme kullanılmaktadır.

5.2 Dolap Sistemi

Genellikle küçük boyutlu, adetli parçalar (somun, civata, vida, rondela v.b) dolap adı verilen sistemlerde kaplanır. Örnek bir dolap kaplama sistemi Şekil 5.2’de verilmiştir. Dolap kaplama sistemi; silindirik veya köşeli bir tambur ve kaplama tankından meydana gelir. Kaplanacak olan parçalar tambur içine konulur. Tambur içinde bakır kablolar kaplama malzemesi (katot) ile temas halindedir. Anot ise askı kaplama sisteminde olduğu gibi, kaplama tankının çevresinde bakır veya pirinç lamaya, titanyum miller yardımıyla asılır. Kaplama malzeme dolu tambur, tank içine daldırılır ve yine redüktör aracılığıyla dairesel olarak tamburun hareketi sağlanır.



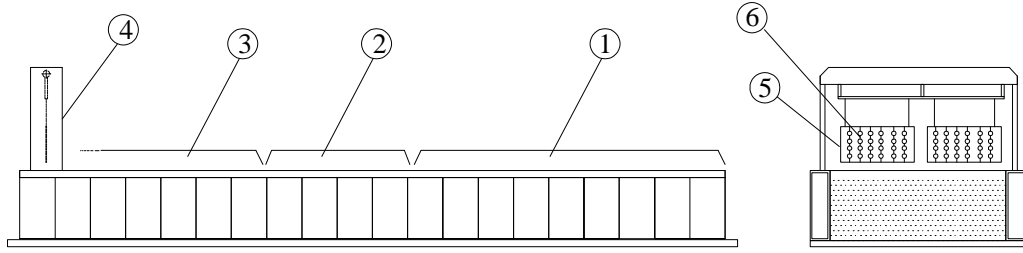
1. Tambur 3. Anot 5. Kaplanan Parçalar (Katot)
 2. Elektrolit 4. Katot kabloları

Şekil 5.2 Dolap (tambur) kaplama sistemi

Tambur yüzeyinde istenilen çapta birçok delik mevcuttur. Son yıllarda yüzeydeki deliklerin konik şekline getirilerekten kaplama verimini artırıcı bir takım uygulamalarda gözlemlenmektedir. Buda bir anlamda şunu göstermektedir; kaplama işleminin verimi sadece elektrolit solüsyonunun bir sonucu değil, donanımın da bunda etkili bir rol oynadığıdır. Dolap kaplama sisteminde, tambur, elektrolit tankı genellikle polipropilen malzemeden yapılıdır.

5.3 Otomatik Kaplama Sistemleri

Yıllardır manuel sistemlerle yapılan kaplama işlemleri, artık günümüzde yerini, yaygın olarak kullanılan otomatik veya yarı otomatik kaplama sistemlerine bırakmıştır (Şekil 5.3). Birçok sektörde olduğu gibi teknolojik gelişmeler kendini bu sektörde de göstermiştir. Dolap ve askı olarak ayrı ayrı kurulan bu sistemler oldukça verimli ve kontrollü bir iş akışı sağlamaktadır.



- | | |
|------------------------|----------------------|
| 1. Ön işlem banyoları | 4. Vinç |
| 2. Kaplama Banyoları | 5. Askı aparatı |
| 3. Son işlem Banyoları | 6. Kaplanan Parçalar |

Şekil 5.3 Otomatik Kaplama Sistemi

Otomatik kaplama sistemleri, iş gücünü azaltmakla birlikte, kaplama sürelerinin ayarlanmasından, kimyasal ilavesine kadar birçok işlem programlanabilmekte ve kaliteli ürün çıkmasına olanak sağlamaktadır. Elektrolitik kaplama işinde en önemli faktörlerden biri olan zamanın verimli kullanılması, otomatik kaplama sistemlerinin tercih nedenlerinden biridir. Bu sistemler mekanik ve elektronik bileşenlerden meydana gelen donanımlardır. Dolayısıyla, ray üzerinde hareket eden vinç sisteminin arızası tüm sistemin durması anlamında geleceğinden sistem sık sık kontrol edilmeli ve gerekli bakımları yapılmalıdır.

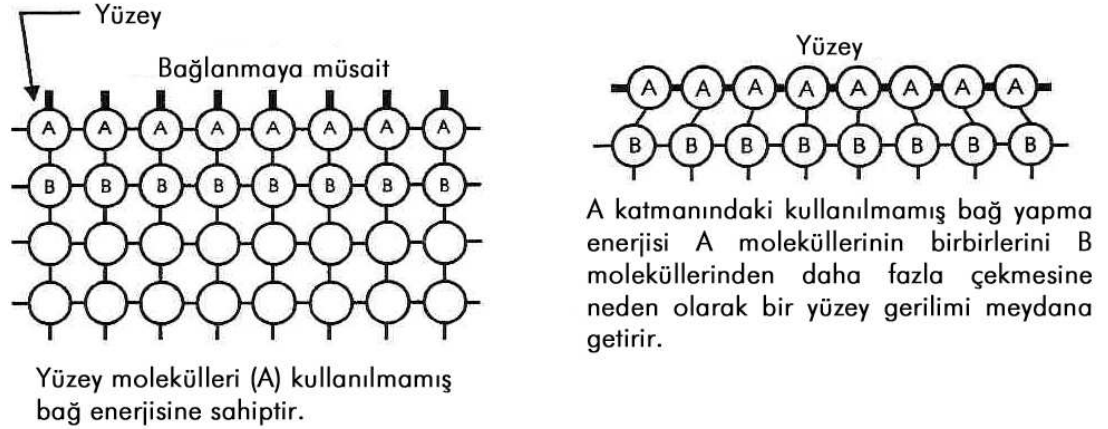
BÖLÜM ALTI

KAPLAMA ÖNCESİ MALZEME YÜZEY TEMİZLİĞİ

Metal kaplama işleminin en önemli aşamalarından biri hiç kuşku yoktur ki kaplama öncesi malzeme yüzeyinin temizliğidir. Kaplama öncesi parça yüzeyi temiz olmalıdır. Kirli bir yüzeye sahip parçaya yapılan kaplama, yapışma mukavemeti açısından ciddi olumsuzluklara yol açmaktadır.

Tam anlamıyla kusursuz temizlikte bir parça yüzeyi elde etmek mümkün değildir. Kusursuz temizlik derken, hem kimyasal hem de fiziksel temizlikten söz edildiği anlaşılmalıdır. Kaplamanın kusursuz bir temizliğe bağlı olması herhangi bir şeyin kaplanmasını imkansız kılabilir.

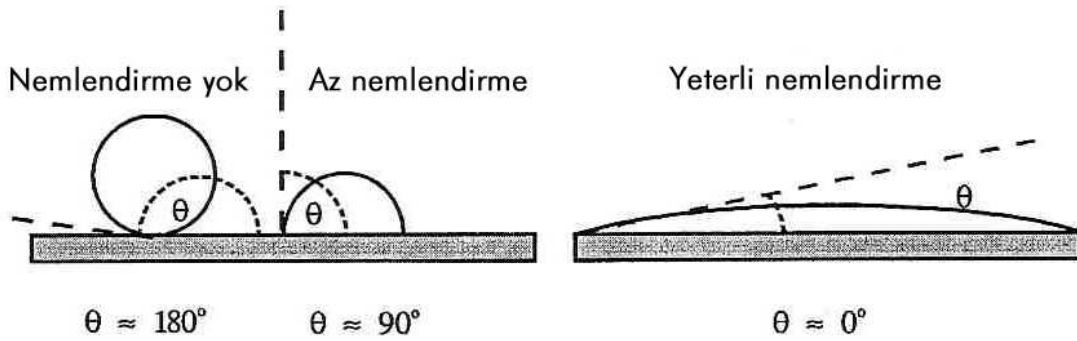
Yüzey enerjisi maddenin atomları veya moleküllerinden kaynaklanır. Bu atom veya moleküller komşularıyla bağlanmak için sahip oldukları enerjinin bir kısmını kullanırlar fakat içeridekilerle aynı sayıda komşu atom veya moleküle sahip olmadıklarından bir kısım enerji artar (Şekil 6.1).



Şekil 6.1 Yüzey enerjisi ve yüzey gerilimi (Elektrometal Kaplamanın Temel Prensipleri, Bölüm 4, s.3)

Cismin dış yüzeyinde belli bir miktarda serbest enerji oluşur. Su gibi akışkanlarda ise moleküller daha hareketlidir ve bu yüzey enerjisini gözlemlemek daha kolaydır. Yağlı bir levha üzerine biraz su döktüğünüzde su molekülleriyle yağ molekülleri arasında çok az bir çekim kuvveti olması nedeniyle su neredeyse küre şeklini alır

(Şekil 6.2). Çünkü küre şeklini almış bir madde, yüzey alanının en küçük olacağı durumdadır. Maddenin bu şekil değişikliği serbest enerjisini de minimuma indirir. Öte yandan bir damla su temiz cam yüzeye damladığında ince bir tabaka şeklinde yüzeye yayılabilir. Çünkü su molekülleri ile cam molekülleri arasında kuvvetli bir çekim kuvveti vardır. Dışarıdaki su molekülleri sahip oldukları fazla enerjilerini cam moleküllerine bağlanmak için kullanırlar. Bu nedenle su molekülleri serbest enerjilerini kullanmak için yüzeye olabildiğince yayılırlar (Elektrometal Kaplamanın Temel Prensipleri, Bölüm 4, s.3,4).



Şekil 6.2 Yüzey gerilimi ve nemlendirme (Elektrometal Kaplamanın Temel Prensipleri, Bölüm 4, s.3)

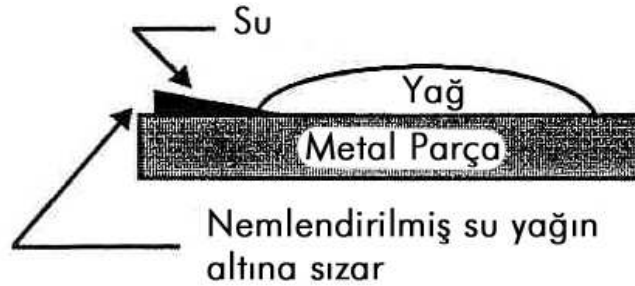
Metal yüzeyinde ise, benzer şekilde fazladan bağ enerjisine sahip atomlar gelirse bunlar sıvı molekülleri gibi hareket edemezler. Serbest enerjilerini azaltmanın tek yolu vardır, yüzeydeki diğer atomlarla bağ yapmaktır. Havadaki oksijen molekülü için de durum böyledir. Diğer bir deyişle yüzeye bulaşan moleküllerle yüzey arasında belli bir çekim kuvveti vardır. Bu nedenle metal yüzeyinin kirli olduğunun düşünülmesi normaldir. Sadece birkaç Angström kalınlığındaki yağ tabakası (film) yapışmayı engellemeye ve kaplama işini bozmaya yeterlidir. Temizleme ne kadar iyi olursa çekim kuvveti o kadar artar, temel metal atomları ile krom atomları arasındaki çekim kuvveti $3,5 \text{ ton/cm}^2$ ye kadar çıkabilir. Bir çelik parçayı fosfatlarken parçanın temizlenmesinin o kadar iyi olması gerekmez. Çok az miktarda yağ veya diğer yüzey kirliticilerin varlığı demir fosfat kristallerinin yüzeye daha ince yayılmasını sağlar, yani bazen imalata yardımcı olur.

Kaplayacağımız metal genellikle yağlı, kirli, oksitlenmiş, lekeli veya kararmış olacaktır. Yüzeyinde boya kimyasalları, yağ, is, çamur, kum veya metal parçacıkları

olabilir. Cilalanmış ve parlatılmış ise yüzeyde aşındırıcılar ve parlatma için kullanılan bileşikler kalmış olabilir (Elektrometal Kaplamanın Temel Prensipleri, Bölüm 4, s.3,4).

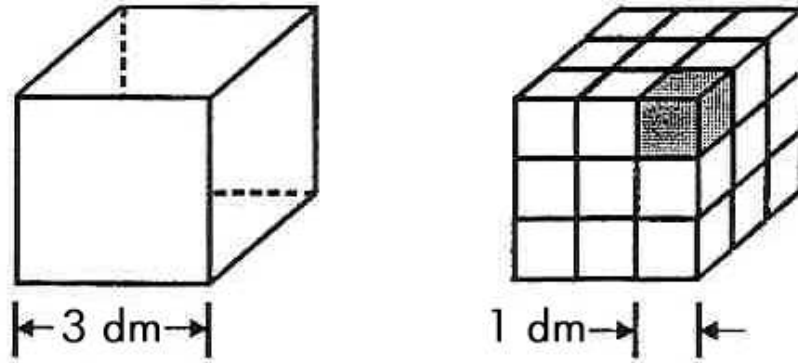
6.1 Alkali Yağ Alma

Alkali yağ alma ile temizleme işlemlerinde, sodyum hidroksit, sodyum karbonat, sodyum metasilikat gibi kimyasallar kullanılır. Bu kimyasallarla hazırlanmış banyolar ısıtılarak çalışılır. Gres yağı gibi birikintileri, diğer yağlı yüzeyleri ve kirli zerrecikleri temizlemede kullanılan etkili bir temizleme yöntemlerinden biridir.



Şekil 6.3 Yüzey aktifin etkisi (Elektrometal Kaplamanın Temel Prensipleri, Bölüm 4, s.8)

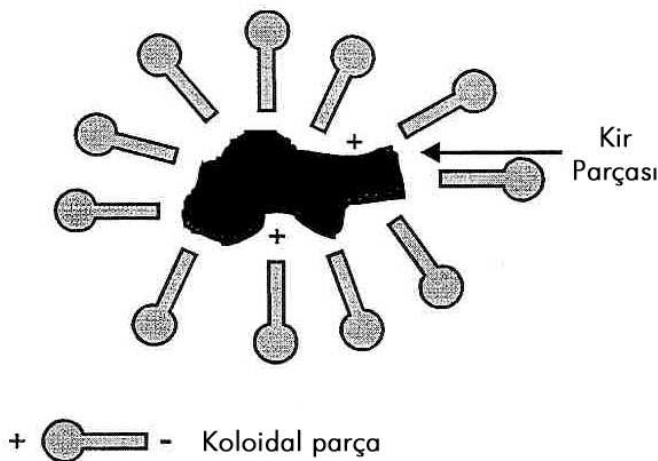
pH'ın yediden den büyük olduğu ($\text{pH} > 7$) bu banyoların önemli bir etkisi yağları sabunlaştırmasıdır. Bitkisel ve hayvansal bu yağlar kostik veya başka alkali madde ile tepkimeye girerek sıcak suda çözünebilir sabun şeklini alır. Mineral yağları veya gresleri mevcutsa bunlar sabunlaşmazlar. Emülsifikasyon adı verilen, yüzey temizlemede kullanılan bir başka işlem uygulamak gerekir. Bu işlemde mineral yağı veya gres minik küresel parçacıklara bölünür ve etrafları suyla dolar, böylece tekrar bir araya gelme ve daha büyük bir parça oluşturmazlar. Yağ parçacıkları bu şekilde süspansiyonda asılı kalır ve temizlenen yüzeye tekrar yerleşemez. Emülsifikasyon işlemi sabunlar ve bazen ıslatıcı da denen ve gerçekten de çözüldüğünde yüzey gerilimini düşürmek suretiyle suyu daha kaygan hale getiren diğer yüzey aktif kimyasalların kullanımını da beraberinde getirir.



Şekil 6.4 Yüzey alanının etkisi (Elektrometal Kaplamanın Temel Prensipleri, Bölüm 4, s.9)

Yağ ile su birbirine karışmamakla birlikte ıslatıcının etkisiyle su mümkün olduğunca çok yağlı yüzeyi ıslatmaya çalışır ve böylece büyük yağ parçacıklarını küçük parçacıklar haline getirir (Şekil 6.4).

Deflokülasyon denen bir başka işlemle de iyi bir temizleme etkisi sağlanır. Flokülasyon küçük parçacıkların bir araya gelerek bir yumru oluşturması demektir. Deflokülasyon bunun zıttı olup yumrunun küçük parçacıklara bölünmesidir. Bu ikinci durum kolloidler kullanılarak sağlanır. Kolloidal madde olarak adlandırılan maddeler bir çözeltide tam olarak çözünmezler fakat çözülmüş gibi etki ederler. Diğer bir deyişle büyük parçacıklı haldeyken hiç çözünmez ama iyice ufalanıp küçük parçacıklı hale getirildiğinde, örneğin mikron seviyesinde ufak parçacıklara



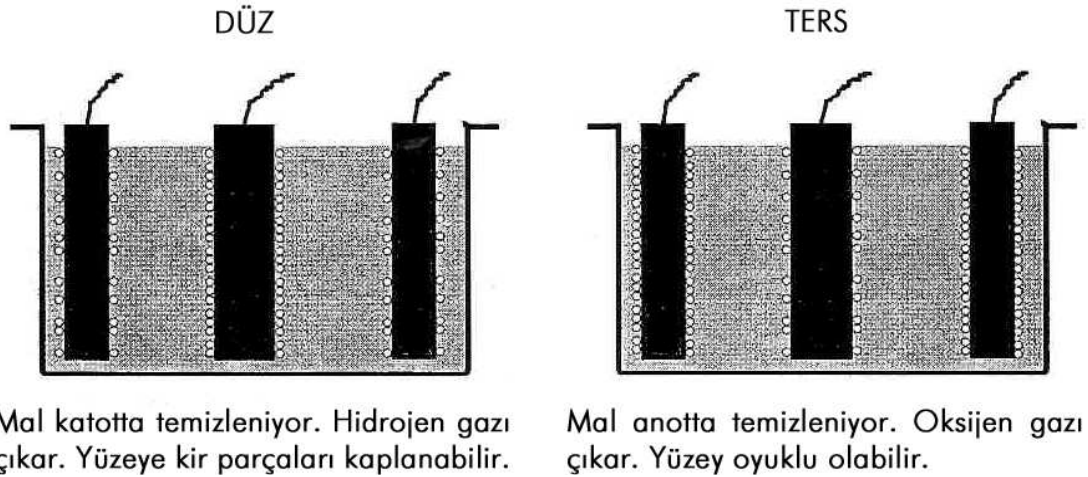
ayrıldığında çözeltide neredeyse tamamen çözünür. Buna iyi bir örnek altın ile sudur. Altın büyük parçacıklı halde iken suda çözünmez fakat yaklaşık 0,1 mikron seviyesine kadar ufalanarak toz haline getirilirse çözülmeye başlar, morumsu veya mavimsi renkte bir sıvı meydana gelir.

Şekil 6.5 Misel formu (Elektrometal Kaplamanın Temel Prensipleri, Bölüm 4, s.9)

Kolloidal parça yüzeyinde elektrik yükü taşır ve bir sıvıya konulduğu zaman Brownian Hareketi denilen gelişigüzel bir şekilde hareket eder. Elektriksel yüklerinden dolayı kir parçalarını kuvvetli şekilde çekerler. Eğer bu çekim kuvveti kir parçası ile metal yüzey arasındaki çekim kuvvetini aşarsa kirin yüzeyden sökülmesini sağlar. Daha da önemlisi bir grup kolloidal parça kir parçasının etrafını sarar ve Şekil 6.5' de görüldüğü gibi içeride hapseder, bu Misel formu diye bilinir. Bu durumda iken diğer kir parçalarından yalıtılmış haldedir ve metal yüzeyine tekrar yapışamaz. Kir parçalarını hapsedme ve böylece yüzeye yapışmasını önleme işlemi deflokülasyon olarak bilinir (Elektrometal Kaplamanın Temel Prensipleri, Bölüm 4, s.8,9).

6.2 Elektrikli Yağ Alma

Metalleri temizlemede kullanılan bir diğer yöntemde elektrikli yağ alma işlemidir. Elektrikli yağ alma kaplamadan önce uygulanan temizleme yöntemleri arasında en çok kullanılanıdır. Genellikle çelik veya demirden bir tank kullanılır.



Şekil 6.6 Elektrolitik temizleme (Elektrometal Kaplamanın Temel Prensipleri, Bölüm 4, s.12)

Tankın kendisi anot veya katot olarak davranır. Duruma göre ayrı çelik levhalar da kullanılabilir. Bu proseste kullanılan sıvıda bir bazik çözeltiyi teşkil etmektedir. Temizlenecek parçayı anot veya katot olarak kullanarak çözeltiden elektrik akımı geçirilir. Banyo buhar, gaz veya elektrikle ısıtılır. Buradaki temizleme işleminde

sabunlaştırma, emülsiyon oluşturma ve alkali banyoda akımsız yapılan deflokülasyon, ayrıca anotta veya katotta oluşan (hidrojen ve oksijen) gaz kabarcıklarının ovarak temizleme etkisi rol oynar (Elektrometal Kaplamanın Temel Prensipleri, Bölüm 4, s.12).

6.2.1 Katodik Temizleme

Katodik ve anodik temizleme birbirine göre ters mantıkla çalışır. Katodik temizlemede iş parçası banyoya katot olarak asılır. Banyo çözeltisi alkali bir sıvıdır. İş parçası yüzeyinde hidrojen gazı kabarcıkları oluşur ve bu kabarcıklar yüzeyde ovma ve karıştırma etkisi yaparaktan yüzey temizliğinin sağlanmasını gerçekleştirir. Katot olarak kullanılan iş parçası yüzeyinde çok az bir kimyasal aşınma olur.

Katodik temizleyiciler çok temiz tutulmalıdır, çünkü metal yüzeyindeki kir birikintilerinin çözeltiyi kirletme ihtimali yüksektir. Çözeltide ki metalik kirlilik parça yüzeyine kaplanabilir. Bunun sonucu olarak ta, temizliği yapılan malzeme yüzeyin de oluşan leke ve renk bozukluğu, hem temizliği hem de hem de kaplamayı olumsuz olarak etkileyebilir. Aynı zamanda bazı durumlar da metalik olmayan parçacıklar bile elektrik yüklenerek katotta temizlenen parçanın üzerine yapışabilir.

6.2.2 Anodik Temizleme

Anodik temizlemede ise temizlenecek olan iş parçası anot olarak asılır. Burada da yüzeyi belli oranda karıştıran bir gaz oluşumu (oksijen) vardır fakat oluşan gaz miktarı daha azdır. Bu gaz oluşumuyla birlikte metal yüzeyine doğrudan kimyasal etki olur. Temizlenmekte olan parça anot gibi davranmakta ve anottan metal çözülüp katotta kaplanmaktadır. Bu elektrokimyasal etki metal yüzeyinde film tabakası mevcut olması gibi bazı durumlarda yararlıdır. Bu çeşit temizleme film tabakasının sökülmesinde yardımcı olur. Öte yandan pirinç gibi hassas metaller çoğu ters temizleyicide temizlenemezler çünkü kötü lekelenmeler ve karıncalanmalar meydana gelir. Benzer şekilde nikel gibi kolayca pasive edilen bir metale anodik temizleme uygulanmamalıdır.

Bu tip temizlemelerde değişik reçeteler kullanılabilir, bunların bazıları anodik temizlemede bazıları ise katodik temizlemede kullanıldığında daha uygundur. Bazı reçeteler çelik üzerinde uzun ömürlü temizlemede daha uygundur, diğerlerinin ise etkisi azdır ve çinko, pirinç, alüminyum gibi hassas metallerin temizlenmesinde daha uygundur.

İster anodik isterse katodik temizleme kullanılsın işin doğru yapılabilmesi için doğru akım yoğunluğu uygulanması önemlidir. Çelik gibi bazı metaller için anodik temizlemede akım yoğunluğu 11 A/dm² ye kadar yükseltilebilir, çinko soğuk dökümde akım yoğunluğu 3,3 A/dm² den daha düşük olacaktır.

Çok önemli olan bir nokta da şudur ki, temizlenecek parçanın asıldığı askıdaki akım yoğunluğu dağılımı düzgün olmalıdır. Eğer bazı noktalar yeterince akım çekemezse buralarda yeterli temizleme sağlanamaz ve bu nedenle doğru bir kaplama elde edilemeyecektir. Temizleme çözeltisinde eşit sıcaklık dağılımını sağlamak için termostatik kontrol cihazı kullanılması da iyi olur (Elektrometal Kaplamanın Temel Prensipleri, Bölüm 4, s.12, 13).

6.3 Asidik Temizleme

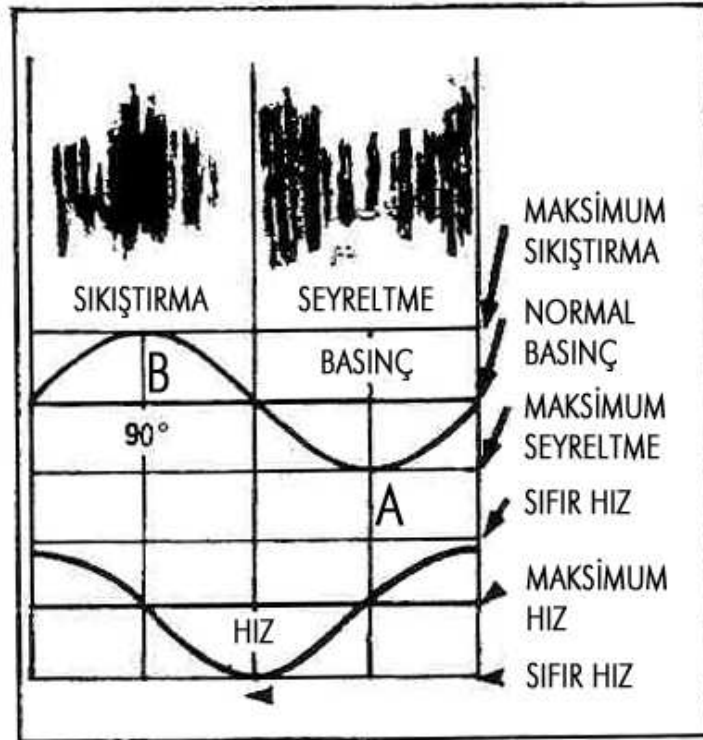
Kaplama öncesi yapılan temizlik işlemlerinden biri de parça yüzeyinde bulunan pas, tufal gibi kalıntıların giderilmesi işlemidir. Demir, çelik gibi metallerde sıkça karşılaştığımız bu birikintilerin dikkatle ve özenle yüzeyden giderilmesi için asidik ortamda temizleme işlemi yapılır. Bu işlem için seyreltilmiş hidroklorik asit (HCl) ve sülfürik asit (H₂SO₄) solüsyonları bu tip temizlemede kullanılan başlıca asitlerdendir. İş parçaları, hazırlanmış bu seyreltik asitli sıvılara daldırılır ve yüzeydeki kalıntıların giderilmesi sağlanır. Ancak bu işlemin parça yüzeyine zarar vermemesi için, yüzeydeki birikintilerden sonra parça yüzeyinin aşınmasını önlemek için de inhibitör kullanımı gibi bir takım tedbirler almak gerekir. Ayrıca, yüksek sertliğe sahip çelik malzemelerin temizliğinde bu işlemin önemi daha büyük bir önem kazanmaktadır. Çünkü bu tip parçalarda, hidrojen gevrekliği riski oldukça yüksektir. Dolayısıyla

böylesi parçalarının, kaplama öncesi paslanmamasını önleyici tedbirler almak bu riski azaltmak adına en önemli adımlardan biridir.

6.4 Ultrasonik Temizleme

Ultrasonik titreşimler, işitilebilen ses frekansından daha yüksek frekanslı (insan kulağının duyamadığı) ses dalgalarıdır. Ultrasonik güç çeviricisi (**transducer**) elektrik enerjisini ses enerjisine çeviren ve kulağın duyma sınırının çok üzerinde ses dalgaları üreten bir cihazdır. Yine de bunların etkileri görülebilir ve hissedilebilir. Bir transducer sıvı ile temas halindeyse sıvı aynı frekans ile titreşecektir. Titreşim sıvının içinde karıştırma etkisine neden olur. Sıvının içerisine temizlenmek üzere konmuş olan parçanın yüzeyinin temizlenmesini sağlar.

Ses dalgaları sıvının içinde hareket ederken dalgalanan genişleme-sıkışma bölgeleri meydana getirir. Kavitasyon adı verilen genişleme esnasında sıvıda patlayan minik kabarcıklar ve boşluklar oluşur. Kirliliğin üzerindeki etkisi Şekil 6.7' te gösterilmiştir.



Şekil 6.7 Basınç dalgaları (Elektrometal Kaplamanın Temel Prensipleri, Bölüm 4, s.21)

Temizleme sıvısındaki kavitasyon çok tesirli bir karıştırma sağlar. Çünkü temizlenecek yüzeydeki kir parçaları hava kabarcıklarının toplanması için esas teşkil eder. Bu kabarcıkların sıkışmasıyla kir parçası patlar.

Ultrasonik temizleme çok etkili yöntemlerden biridir. Katı parçacıklardan oluşan kirliliğin giderilmesinde mükemmeldir. Ulaşılamayan yerlerin temizlenmesine yardım eder. Başka bir yolla temizlenemeyecek kadar narin parçaların temizlenmesi için uygundur. Çoğu durumda temizleme işini son derece hızlandırır. Gerekli görüldüğü hallerde daha fazla temizleme yapılmasını sağlar. Yumuşak fırçayla veya bezle parlatılmış yüzeylerin temizlenmesinde ve mükemmel yakın temizlik gerektiren elektronik uygulamalarında çok iyi iş görür.

Bu çeşit temizlemede bazı kısıtlamalar vardır. Örneğin, uygun olmayan çalışma şartlarında temizlenecek parça ile tankın yüzeyi pütürlü bir hal alabilir ve ciddi şekilde aşınabilir (kavitasyon aşınması). İyi sonuç almak için doğru titreşim frekansı seçilmelidir. Frekans aralığı saniyede 20.000 ile 100.000 arasındadır. Daha düşük frekanslar kavitasyon oluşumu açısından daha etkilidir fakat gürültü üretir. Frekans arttıkça daha fazla enerjiye gereksinim duyulur. Eğer geniş şekilli parçalar geniş tanklarda temizlecekse tesisat ve kullanılacak elektrik gücü aşırı miktarda artar. Buna ek olarak eğri hatı büyük parçalar yüksek frekanslı ses dalgalarıyla iyi şekilde temizlenemezler çünkü tüm kısa dalgalarda olduğu gibi düz bir hat şeklinde ilerler ve köşelerin etrafından dönemezler. Eğer büyük parçalar bu iş için özel olarak dizayn edilmiş bir tankta ve özel bir transducer düzeneğiyle temizlenmezse lekeli ve benekli bir temizleme elde edilir (Elektrometal Kaplamanın Temel Prensipleri, Bölüm 4, s.21, 22).

6.5 Kumlama işlemiyle yüzey temizleme

Kumlama işlemi, günümüzde yaygın olarak metal yüzeylerine uygulanan yüzey işlemlerinden biridir. Farklı boyutlara ve şekle sahip çelik bilyaların yüksek hızda malzeme yüzeyine çarpmasıyla (bombardıman) yüzeyde meydana gelen aşınma

sonucu, pas, boya, apak v.b. kirlilik ve kalıntılar temizlenir. Daha temiz bir yüzey elde edilir.

BÖLÜM YEDİ

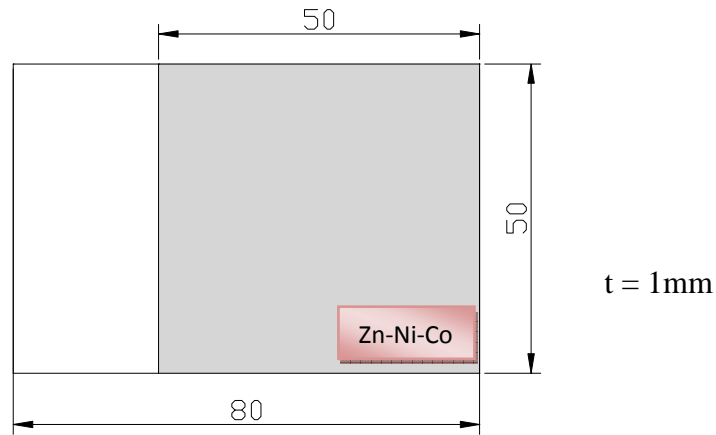
DENEYSEL ÇALIŞMALAR

7.1 Deneyin Amacı

Bu çalışmamızın amacı, çelik malzeme yüzeyine elektrolitik metal kaplama yöntemiyle Zn-Ni-Co alaşımlı kaplamanın uygulanması ve bu işlem sonucu oluşan kaplama tabakasının, mekanik ve yapısal özelliklerinin incelenmesidir. Bunun yanı sıra Zn-Ni-Co alaşımlı kaplamaya ait bu özelliklerin diğer kaplama türleri olan Zn-Ni, Zn-Co ve Ni-Co alaşımlı kaplamalar ile karşılaştırılması hedeflenmiştir.

7.2 Kaplama Numunesi Özellikleri

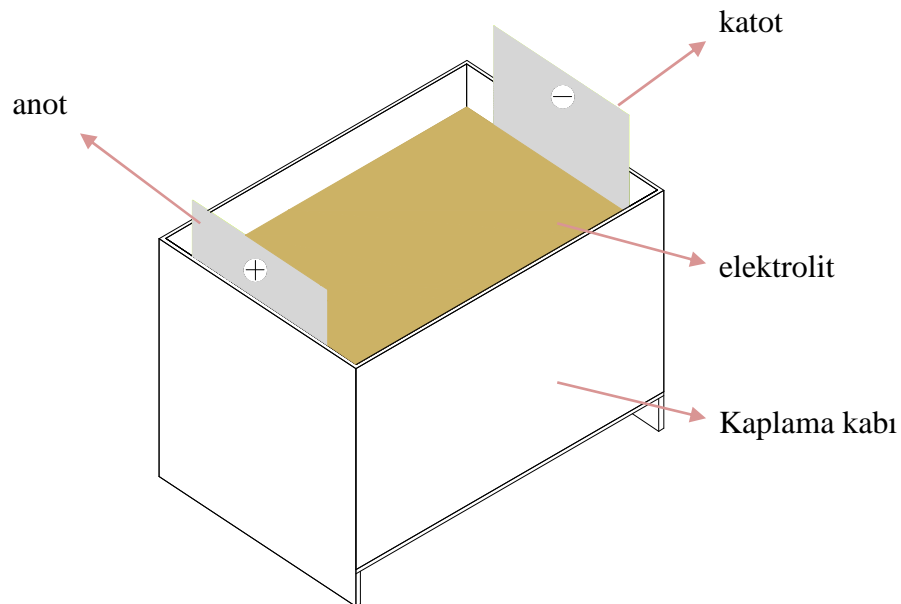
Çalışmamız için kullanılan numune, 1 mm kalınlığında DKP (soğuk haddelenmiş yassı çelik) malzemedir. Bu malzemedен 50 x 80 mm ölçülerine sahip kaplama numuneleri kesilip hazırlanmıştır (Şekil 7.1). Çelik sac numunelerin 0,25 dm² 'lik kısmı kaplama banyosuna temas edecek şekilde hazırlanmış olup, kaplanan yüzeyde bu alanı teşkil etmektedir. Seçilen parçaların yüzey düzgünlüğüne ve aynı zamanda temizleme işlemi sonrası yüzeyde pürüzlülük oluşturma kaynağı açısından sakıncalı olan pas, tufal gibi kalıntıların olmamasına dikkat edilmiştir.



Şekil 7.1 Kaplama numunesi

7.3 Kaplama Sisteminin Hazırlanması

Zn-Ni-Co alaşımlı kaplama banyosu için asidik ortama dayanıklı polipropilen (pp) malzemeden yapılmış olan bir kap dizayn edilmiştir (Şekil 7.2). Kaplama kabının hacmi 0,4 lt' dir. Anot olarak paslanmaz çelik, katot olarak ta DKP sac kullanılmıştır. Akım kaynağı olarak çıkış gerilimi 30 volt, çıkış akımı 10 amper olan ve ince ayar yapılabilen bir redresör kullanılmıştır. Kaplama çözeltisinin hareketi için hızı ayarlanabilir mekanik bir karıştırıcı önce tasarlanıp ardından imal edilmiştir.



Şekil 7.2 Kaplama banyosu

7.4 Kaplama Banyosu (Elektrolit)

Zn-Ni-Co alaşımlı kaplama işlemi için hazırlanan kaplama banyosunda kullanılan kimyasallar ve değerleri Tablo 7.1' de verilmiştir. (Molarite (M), bir litre çözücünde çözülmüş halde bulunan maddenin mol sayısıdır). Kaplama çözeltisinin hazırlanmasında saf su kullanılmıştır.

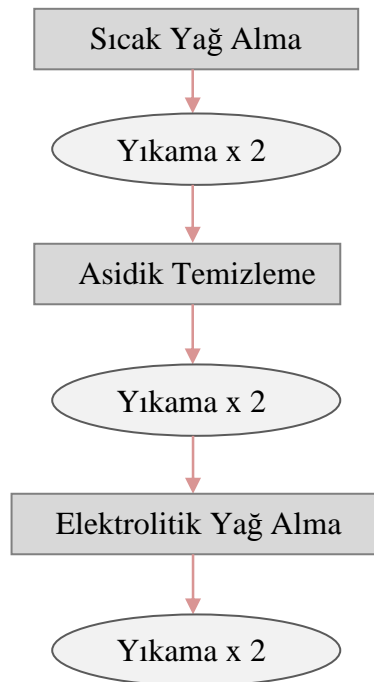
Tablo 7.1 Zn-Ni-Co kaplama banyosunun kompozisyonu

| Kimyasallar | Konsantrasyon |
|-----------------------------|---------------|
| Çinko sülfat ($ZnSO_4$) | 0,3 M |
| Nikel sülfat ($NiSO_4$) | 0,2 M |
| Kobalt sülfat ($CoSO_4$) | 0,1 M |
| Sodyum sülfat ($NaSO_4$) | 0,2 M |
| Borik Asit ($B(OH)_3$) | 0,2 M |
| Sülfürik Asit (H_2SO_4) | * |

* Elektrolitin pH'ı, sülfürik asitle gerekli çalışma değeri için çok küçük miktarlarda dikkatli bir şekilde ilave edilerekten ayarlanır.

7.5 Kaplanacak Malzemenin Temizliği

Bütün kaplama işlemlerinde olduğu gibi, Zn-Ni-Co alaşımlı kaplama öncesi de, kaplama numunelerine bir takım işlemler uygulanmıştır. Malzeme yüzey temizliğini kapsayan bu prosesin akış şeması Şekil 7.3'de verilmiştir.



Şekil 7.3 Kaplama öncesi numunelere uygulanan” ön işlem akış şeması”

Şekil 7.3 de görüldüğü üzere numune yüzeyine yapılan ilk işlem, sıcak yağ alma adını verdiğimiz temizleme prosesidir. Bu uygulama, sac numunemizin yüzeyinde olabilecek katı yağ birikintilerini giderme adına 50- 60 °C ‘ de yapılan bir temizleme işlemidir. Sıcak yağ alma sonrası yapılan durulama işleminin ardından, numune parçası seyreltik sülfürik asit (%25 H₂SO₄) içine bırakılmıştır. Burada ki amaç yüzeyde ki muhtemel olabilecek pas, tufal gibi kalıntıların giderilmesidir. Bu adımında ardından, deney numunemizin yüzeyi, elektrikli yağ alma prosesiyle temizlenmiş ve kaplama öncesi durulama + nötrleme (%25 HCl) + duruluma işlemlerine tabii tutularaktan kaplamaya hazır hale getirilmiştir.

7.6 Zn-Ni-Co Alaşımli Kaplama İçin Optimum Çalışma Parametrelerinin Saptanması

Zn-Ni-Co alaşımli kaplama ile ilgili olarak yaptığımız çalışmaların önceliğini, banyo çalışma parametrelerinin saptanması oluşturmaktadır. Bu amaçla farklı pH, akım yoğunluğu ve sıcaklık değerlerinde 4’er adet numune kaplamalar yapıp, incelenmiştir. Yapılan kaplamalara ait sonuçlar makro (gözle) ve mikro boyutta analiz edilmiştir. Kaplama filmine ait SEM, EDS analizlerinin sonuçları değerlendirilmiştir.

7.7 Farklı Akım Yoğunluğu Uygulanmış Zn-Ni-Co Alaşımli Kaplamalar

Akım yoğunluğu, elektrolitik metal kaplama uygulamalarında önemli parametrelerden biridir. Bu çalışmamızda, farklı akım yoğunluğu değerlerinin kaplama tabakasının özelliklerinde ne gibi değişikliklere yol açtığı araştırılmıştır. Tablo 7.2’ de verilen “A1, A2, A3 ve A4” kodları, farklı akım yoğunluğu altında kaplanmış numuneleri ifade etmektedir.

Tablo 7.2 Farklı akım yoğunluğuna ait numune veri tablosu

| Numune No: | A1 | A2 | A3 | A4 |
|---------------------------|----|----|----|----|
| Akım (A/dm ²) | 2 | 3 | 4 | 5 |

- Diğer çalışma parametreleri: T= 25 °C, pH=3, t=20dk.

7.8 Farklı Kaplama Kalınlığına Sahip Zn-Ni-Co Alaşımli Kaplamalar

Kaplama tabakasının kalınlığı korozif dayanım açısından önemli olduğu gibi, mekanik özellikler bakımından da önemlidir. Bu amaçla dört ayrı kaplama kalınlığına sahip kaplama tabakası elde edilmiştir. Tablo 7.3' de gösterildiği gibi; **K1, K2, K3** ve **K4** kodları farklı kaplama kalınlığına sahip numuneleri ifade etmektedir.

Tablo 7.3 Kaplama kalınlığına ait numune veri tablosu

| Numune No: | K1 | K2 | K3 | K4 |
|---------------|----|----|----|----|
| Kalınlık (µm) | 5 | 10 | 15 | 20 |
| Zaman (dk.) | 10 | 20 | 30 | 40 |

- Diğer çalışma parametreleri: T= 25 °C, pH=3, I=3A/dm²

7.9 Zn-Ni-Co ve Diğer (Zn-Co, Zn-Ni ve Ni-Co) Alaşımli Kaplamalar

Tablo 7.4 Alaşımli kaplamalara ait banyo kompozisyonları

| Kimyasallar | Zn-Ni-Co | Zn-Ni | Zn-Co | Ni-Co |
|---------------|----------|-------|-------|-------|
| Çinko sülfat | 0,3M | 0,3M | 0,3M | - |
| Nikel sülfat | 0,2 M | 0,2 M | | 0,2 M |
| Kobalt sülfat | 0,1 M | - | 0,1 M | 0,1 M |
| Sodyum sülfat | 0,2 M | 0,2 M | 0,2 M | 0,2 M |
| Borik Asit | 0,2 M | 0,2 M | 0,2 M | 0,2 M |
| Sülfürik Asit | * | * | * | * |

* Elektrolitin pH'ı, sülfürik asitle gerekli çalışma değerine göre çok küçük miktarlarda ilave edilerekten ayarlanır.

* Çalışma parametreleri: $T= 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\text{pH}=3$, $I=3\text{A}/\text{dm}^2$

Zn-Ni-Co alaşımlı kaplamadan farklı olarak, Zn-Co, Zn-Ni ve Ni-Co gibi bu tür diğer alaşımlı kaplamaların özelliklerinin incelenmesi bizlere daha ayrıntılı bilgi vermesi açısından önemlidir. Tablo 7.4 de, farklı kaplama türleri için banyo (elektrolit) kimyasallarının kurulum değerleri verilmiştir.

7.10 Mekanik ve Yapısal Özelliklerin Analizi

7.10.1 Karakterizasyon Çalışmaları

Kaplama tabakasına ait faz yapıları, X-ışınları difraktometresi (XRD) kullanılarak incelenmiştir (Rigaku, D/Max-2200/PC). Her kristal yapılı malzeme, X ışını kaynağı tarafından radyasyona maruz bırakıldığında, kendine has farklı bir X ışını difraksiyon yapısı oluşturur. Oluşan yapı, literatürdeki yapılarla karşılaştırarak numunenin kristal yapısı tanımlanır. Yüzey morfolojisi, mikro yapı enerji dağılım spektrometre dedektörü (EDS) olan bir taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak analiz edilmiştir (JEOL JSM-6060, Japan). EDS, numuneden çıkan karakteristik X ışınlarının enerjilerinin toplanması ve değerlendirilmesine dayalı bir tekniktir. Bu amaçla SEM'e takılan ve sıvı azot ile soğutulan bir detektör kullanılır. Bunun yanı sıra kaplama yüzeyinde ki tepelikler, çukurlar gibi yüzey topografyası da atomik kuvvet mikroskobu (AFM) ile incelenmiştir. Kaplama tabakalarının kalınlığı da magnetik alan prensibi ile çalışan bir mikron ölçme cihazı ile ölçülmüştür.

7.10.2 Mekanik Özelliklere Ait Çalışmalar

Mekanik özelliklere ilişkin olarak, sertlik testi; mukavemet ve malzemelerin karakteristik özellikleri hakkında yararlı bilgiler sağlar. Sertlik deneyleri bir malzemeyi karakterize etmek amacıyla çok önemlidir. Zn-Ni-Co alaşımlı kaplamaların sertlik ölçümleri Shimadzu DUH-W201S model mikro sertlik cihazı ile mikro sertlik taramaları gerçekleştirilmiştir. Değişen yük miktarınca, test malzemesi

elastik ve plastik deformasyona tabi tutulur. Sertlik (H), elastisite modülü (E), iz temas alanı (A_{max}) ve akma gerilmesi (σ_y) değerleri aşağıdaki formüllerle hesaplanır:

$$h_c = D_3 \quad (8.1)$$

$$A_{max} = h_c^2 \quad (8.2)$$

$$H = \frac{F}{A_{max}} \quad (8.3)$$

$$\sigma_y = \frac{H}{3,3} \quad (8.4)$$

Zn-Ni-Co alaşımli kaplama tabakasının yüzeye yapışma mukavemetini bulmak için çizik testi (Scratch) yapılmıştır.

Kaplama yapışma mukavemeti aşağıdaki formül yardımıyla hesaplanır;

$$F = \frac{H}{\left[\frac{\pi R^2 H - W_c}{W_c} \right]^{1/2}} \quad (8.5)$$

Burada;

F: Yapışma mukavemeti, W_c : Kritik kuvvet ve R: Batıcı uç yarıçapı ($15\mu m$)

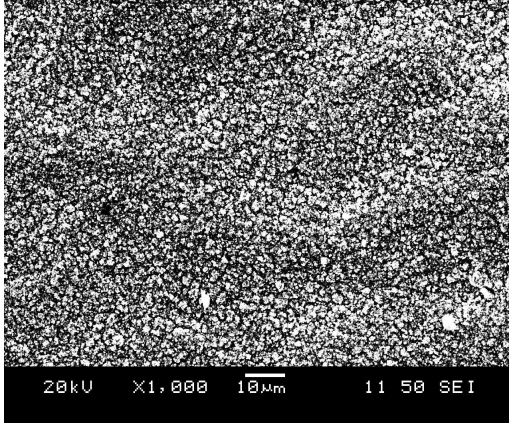
BÖLÜM SEKİZ

DENEYSEL SONUÇLAR

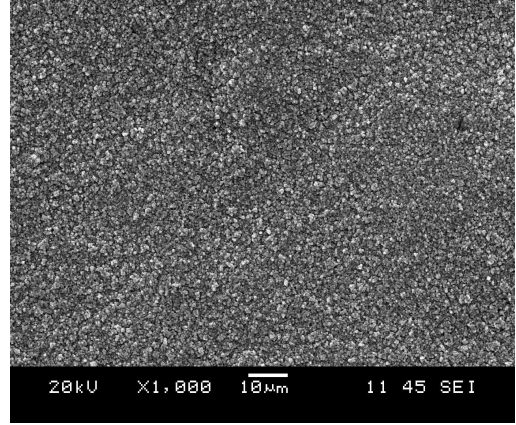
8.1 Zn-Ni-Co Alaşımli Kaplamaya Ait Optimum Çalışma Parametreleri

8.1.1 Farklı pH Değerleri

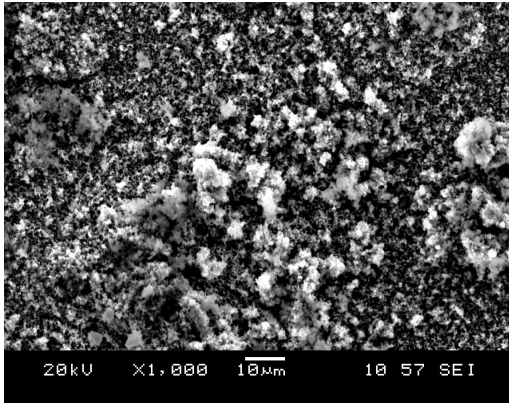
Zn-Ni-Co alaşımli kaplama için optimum çalışma parametrelerinin belirlenmesine ilişkin olarak, farklı pH değerlerinde yapılan kaplama tabakalarına ait SEM görüntüleri Şekil 8.1' de verilmiştir.



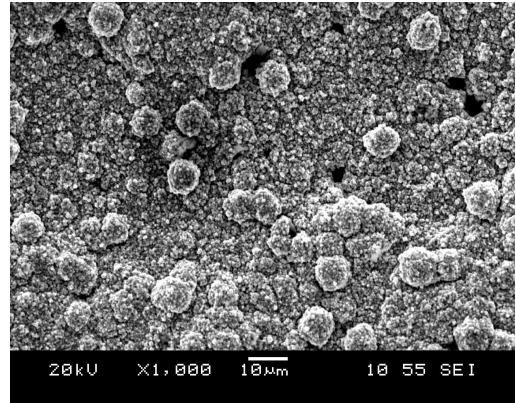
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 8.1 Farklı pH değerlerinde ki kaplamamalara ait SEM görüntüleri (a) pH=2,6 (b) pH=3,2 (c) pH=3,8 ve (d) pH=4,2

2,6 ve 4,2 arasında değişen pH değerlerinde yapılan kaplamalarda gerek mikro gerekse de makro düzeyde farklı yüzey görüntüleri çıkmıştır. Dört farklı pH değerinde yapılan Zn-Ni-Co alaşımlı kaplama için mikro görüntülere bakıldığında (Şekil 8.1), düşük pH'lar da kaplama yüzeyi parlak, beyazımsı bir görüntü verirken, pH miktarı artıkça yüzey gri bir renk almaya başlamıştır. Aynı zamanda pH değerinde ki artış yüzeyin daha taneli ve gözenekli bir yapı almasına neden olmuştur. Yüzeyde topaklanmış yapılar ve poroziteler gözlemlenmiştir.

Yapılan EDS analizi sonucu Zn, Ni ve Co elementlerinin yüzeye depositlenme yüzdeleri ve kimyasal kompozisyonda ki değişim Tablo 8.1 de verilmiştir. pH değeri artıkça Ni ve Co metalinin yüzeye depositlenme miktarı artmıştır. Buna karşın kaplama tabakasında ki Zn miktarı gittikçe azalma göstermiştir.

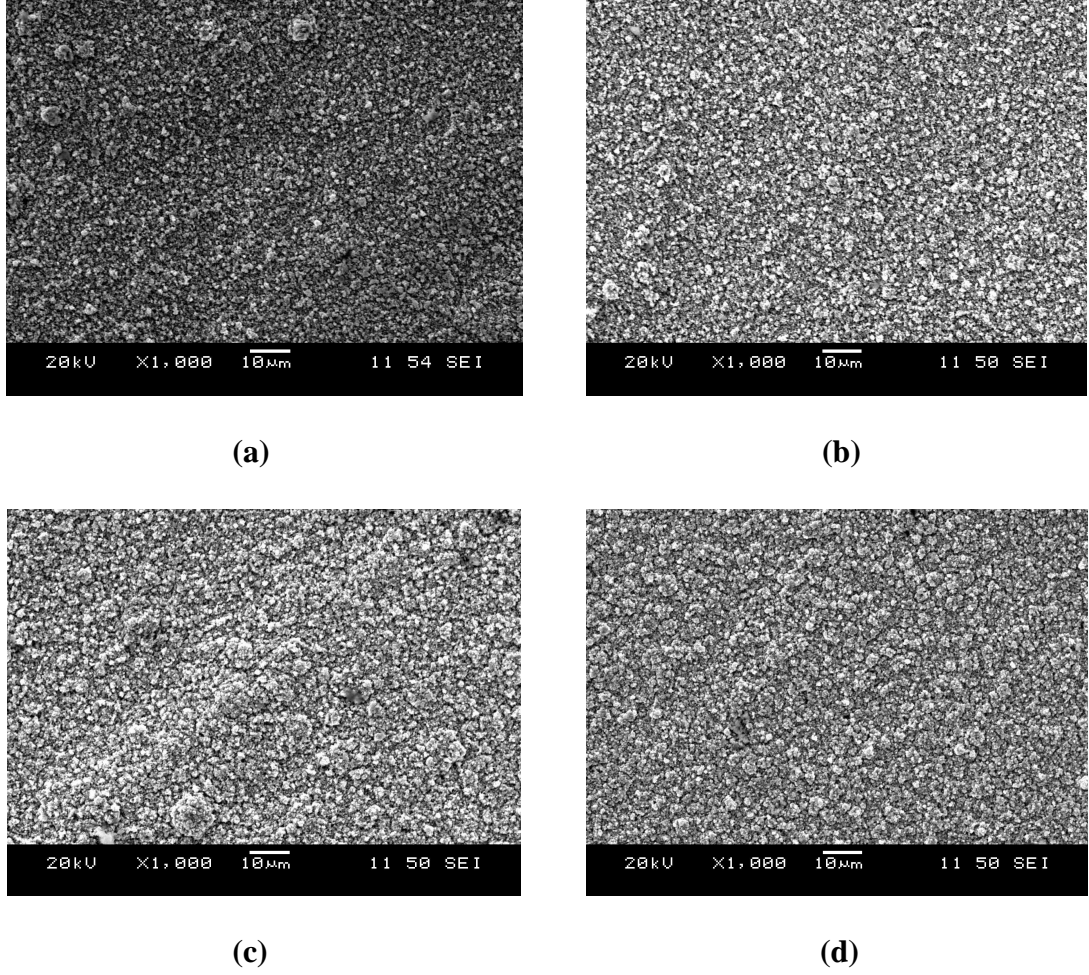
Tablo 8.1 Farklı pH değerlerine ait EDS sonuçları

| Elementler | pH=2,6 | pH=3,2 | pH=3,8 | pH=4,2 |
|-------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Zn | % 95,660 | % 94,540 | % 93,781 | % 85,850 |
| Ni | % 2,355 | % 2,575 | % 3,249 | % 3,795 |
| Co | % 0,678 | % 0,751 | % 1,179 | % 3,083 |
| Diğer | % 1,307 | % 2,134 | % 1,791 | % 7,272 |

8.1.2 Farklı Akım Değerleri

1 A/dm² lik akım yoğunluğunda yapılan çalışmada, Zn-Ni-Co alaşımlı kaplamanın yüzeyde oldukça uzun bir sürede oluştuğu ve düşük akım bölgelerinde kaplama kalınlığının azlığından dolayı altlık yüzeyinin yeterli miktarda kaplanamadığı görülmüştür. Bunun sonucu olarak en düşük akım yoğunluğu değeri 2 A/dm² seçilmiştir.

Dört farklı akım yoğunluğunda yapılan Zn-Ni-Co alaşımlı kaplamalara ait SEM görüntüleri Şekil 8.2' de verilmiştir.



Şekil 8.2 Farklı akım yoğunluğunda yapılan kaplamamalara ait SEM görüntüleri (a) $I=2 \text{ A/dm}^2$, (b) $I=3 \text{ A/dm}^2$, (c) $I=4 \text{ A/dm}^2$ ve (d) $I=5 \text{ A/dm}^2$

Akım miktarı arttıkça, yüksek akım bölgelerinde pürüzlü bir kaplama gözlemlenmiştir. Akım yoğunluğunda ki artış aynı zaman da tanelerin büyümesine ve genel anlamda yüzeyde dalgalı bir yapının oluşmasına neden olmuştur (Şekil 8.2).

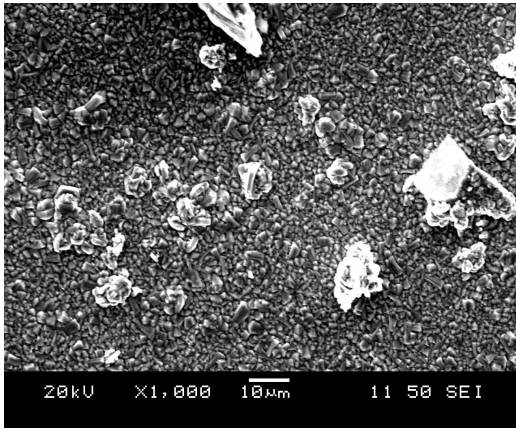
Akım yoğunluğunda ki farklılığa bağlı olarak, kaplama kompozisyonunda ki değişim miktarı da yapılan EDS analiziyle Tablo 8.2 de verilmiştir. Akım yoğunluğunda ki artış ile birlikte Zn elementinin miktarı azalış gösterirken, Ni ve Co miktarlarında bir artış durumu hakimdir.

Tablo 8.2 Farklı akım değerlerine ait EDS sonuçları

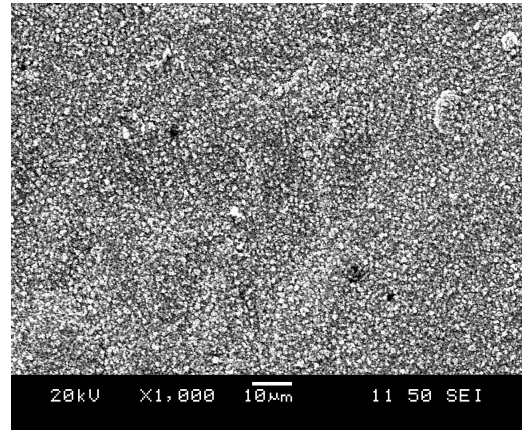
| Elementler | I=2 A/dm ² | I=3 A/dm ² | I=4 A/dm ² | I=5 A/dm ² |
|------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Zn | % 97,596 | % 96,633 | % 95,674 | % 94,637 |
| Ni | % 0,461 | % 0,566 | % 0,586 | % 0,657 |
| Co | % 0,296 | % 0,437 | % 0,494 | % 0,650 |
| Diğer | % 1,647 | % 2,364 | % 3,246 | % 4,056 |

8.3.1 Farklı Sıcaklık Değerleri

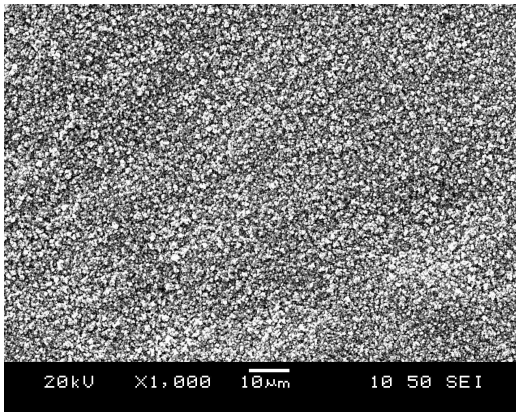
Farklı sıcaklıklarda yapılan Zn-Ni-Co alaşımlı kaplamalara ait SEM görüntüleri;



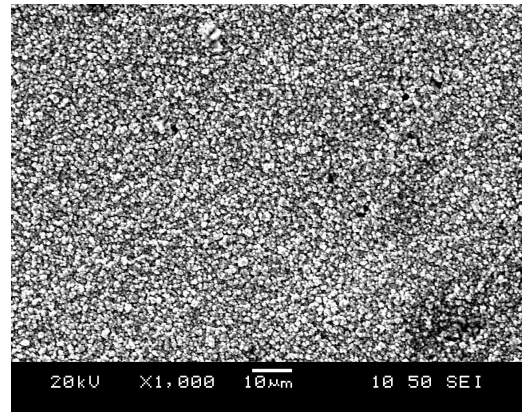
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 8.3 Farklı sıcaklık değerlerinde yapılan kaplamalara ait SEM görüntüleri (a) T=20 °C, (b) T=30 °C, (c) T=40 °C ve (d) T=50 °C

Düşük sıcaklıkta ($T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$) yapılan kaplamaya ait yüzeyin bozuk olduğu dikkat çekmektedir (Şekil 8.3 a). Aynı zamanda 20°C ' de kaplama yüzeyinde homojen görüntü kaybolmuştur. Diğer sıcaklıklar da yüzey morfolojisi benzer bir yapı sergilemiştir.

Farklı sıcaklık değerlerinde yapılan Zn-Ni-Co alaşımlı kaplama numunelerine ait EDS analizi sonucu incelenecek olursa (Tablo 8.3), $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ den sonraki numunelerde Zn, Ni ve Co miktarlarında artış görülmüştür. Yalnız $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de yapılan kaplamaya ait numune de diğer sıcaklıklara göre daha yüksek oranda olan Ni miktarı yüzeye depositlenmiştir.

Tablo 8.3 Farklı sıcaklık değerlerine ait EDS sonuçları

| Elementler | T=20 °C | T=30 °C | T=40 °C | T=50 °C |
|--------------|----------|----------|----------|----------|
| Zn | % 93,251 | % 93,454 | % 94,289 | % 95,318 |
| Ni | % 4,294 | % 1,569 | % 2,030 | % 2,565 |
| Co | % 0,373 | % 0,228 | % 0,454 | % 0,793 |
| Diğer | % 2,082 | % 4,749 | % 3,227 | % 1,324 |

8.1.4 Zn-Ni-Co Alaşımlı Kaplama İçin Çalışma Parametrelerine Ait Genel Sonuç

Düşük akım yoğunluğun da parlak gri bir deposit tabakası gözlenmekle beraber, yüksek akım yoğunluğunda pürüzlü mat bir kaplama filmi oluşmaktadır. Sıcaklığın artması ile birlikte kaplama depositinin görüntüsünde belirgin bir değişme olmamaktadır. Bir diğer özellik olan düşük pH değerinde, yüzeyde ince parlak bir film tabakası oluşmaktadır. Banyo konsantrasyonun da ki kobalt ve çinkonun artışıyla birlikte, yüksek akım yoğunluğundakine benzer bir kaplama tabakası oluşmaktadır (R. K. Shukla, S. C. Srivastava, 1983).

Farklı çalışma parametrelerin de yaptığımız kaplama sonuçları, yukarıda ki yorumu doğrulamaktadır. Özellikle Zn-Ni-Co alaşımlı kaplamaya ait parlaklık ve

renk noktasında bire bir benzer sonuçları yansıtmaktadır. Parlak bir kaplama elde etmek için, ilk seçiminiz düşük pH değerinde çalışmak olabilir. Ancak düşük pH oranında Ni ve Co miktarlarında bir azalma görülmektedir. Diğer yandan, Ni ve Co elementinin miktarlarını artırmak için pH değerini artırabiliriz. Fakat bu durumda da kaplama tabakasının süngerimsi ve koyu bir görüntü aldığını görmekteyiz.

Dolayısıyla kaplama yapısının gerek kompozisyon, gerekse de görüntü açısından en iyi sonucu verecek bir pH değerini çalışma değeri olarak seçmemiz gerekmektedir.

Değişen akım yoğunluğu da kaplama tabakasının görünümü, oluşan tane yapısı ve element kompozisyonunda belirleyici bir rol oynamaktadır. Düşük akım yoğunluğunda gözlemlenen parlak film tabakası, artan akım değeriyle yerini koyu ve pürüzlü bir kaplama filmine bırakmıştır. Aynı şekilde, artan akım miktarıyla birlikte, özellikle makro görüntü de yüksek akım bölgelerinde renk değişimi kaplama tabakasının homojen görüntüsünü bozmuştur.

Bir diğer değişken olan sıcaklık parametresinde ki farklılık, kaplama depositinde ki elementlerin miktarlarında değişime sebep olurken, yüksek sıcaklıktaki kaplamalarda oluşan film tabakası mat bir görünüm kazanmaktadır. Düşen sıcaklık değeriyle birlikte Co, Ni ve Zn miktarı azalmıştır.

Farklı pH, akım yoğunluğu ve sıcaklıklarda yapılan deneyler sonucu, Zn-Ni-Co alaşımli kaplama uygulamalarında kullanmak üzere optimum çalışma değerleri aşağıda ki Tablo 8.4' de verilmiştir.

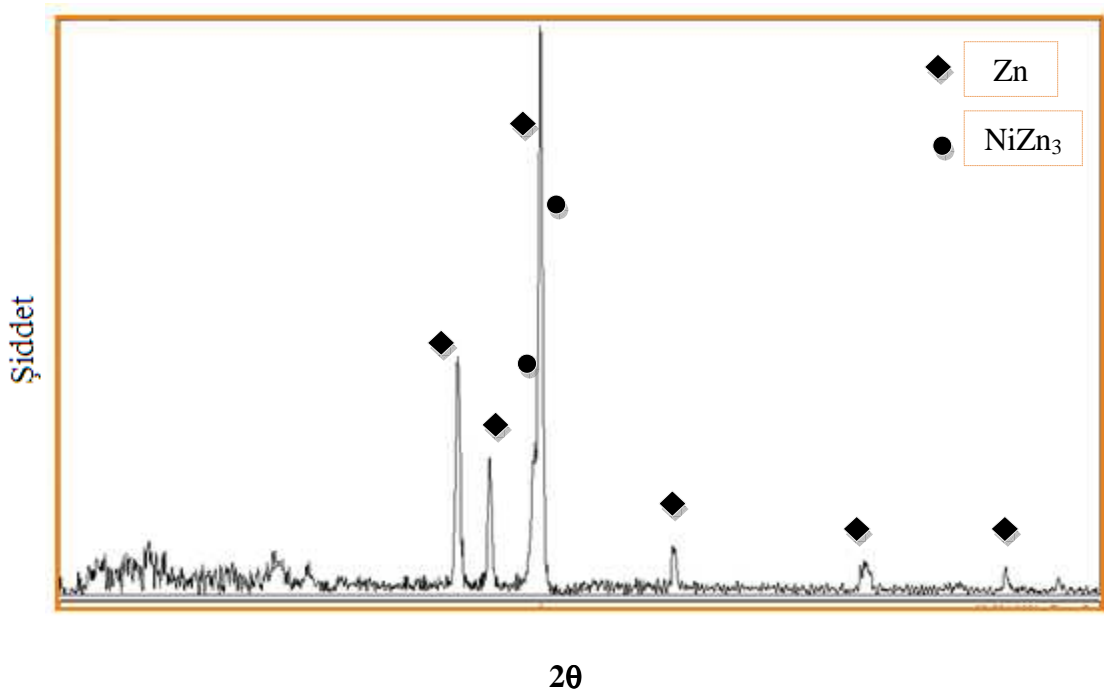
Tablo 8.4 Zn-Ni-Co alaşımli kaplama için çalışma değerleri

| Çalışma parametleri | Değerler |
|----------------------------|---------------------|
| pH | 3-3,2 |
| Akım yoğunluğu | 3 A/dm ² |
| Sıcaklık | 25-35 °C |

8.2 Farklı Akım Yoğunluğu Uygulanmış Zn-Ni-Co Alaşımli Kaplamalara Ait Sonuçlar

8.2.1 XRD Sonuçları

Farklı akım yoğunluklarında yapılan Zn-Ni-Co alaşımli kaplamaya ait XRD sonucu Şekil 8.4'te verilmiştir. Çelik malzeme yüzeyine uygulanan Zn-Ni-Co alaşımli kaplamayla ilgili olarak kaplama tabakasında Zn ve NiZn₃ faz yapılarının oluştuğu görülmüştür. Co elementi çok az miktarda tespit edilmiştir.

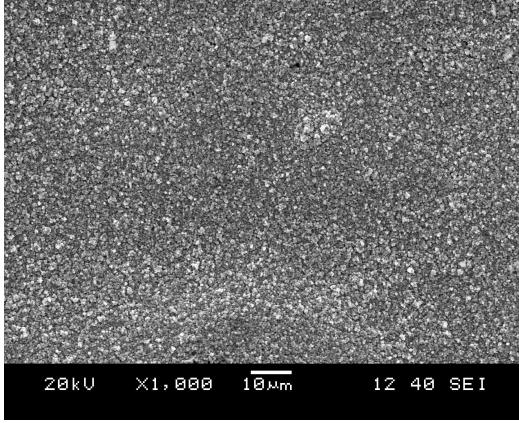


Şekil 8.4 Farklı akım yoğunluğunda yapılan Zn-Ni-Co alaşımli kaplamaların XRD analiz sonucu

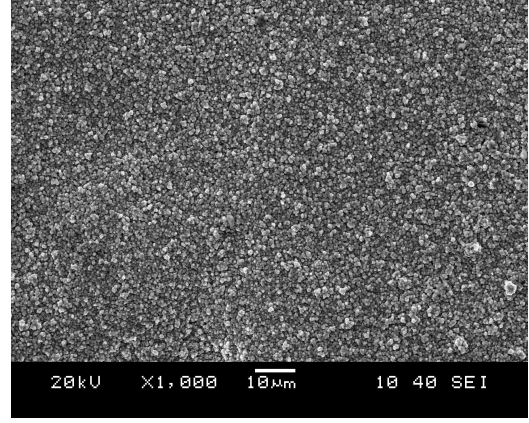
8.2.2 SEM ve EDS Analizi

Dört farklı akım değerinde yapılan Zn-Ni-Co alaşımli kaplamaya ait SEM görüntüleri Şekil 8.8'de verilmiştir. Düşük akım yoğunluğunda daha düzgün bir yüzey yapısı varken, artan akım yoğunluğu miktarıyla yüzey görüntüsünün bozulmaya başladığı görülmüştür. Bu yüzey bozukluğu özellikle kendini makro görüntüde de göstermiştir. Her ne kadar artan akım yoğunluğu değeriyle kaplama hızı artsa da, bunun sonucu olarak oluşan bozuk yüzey görüntüsü arzu edilen bir

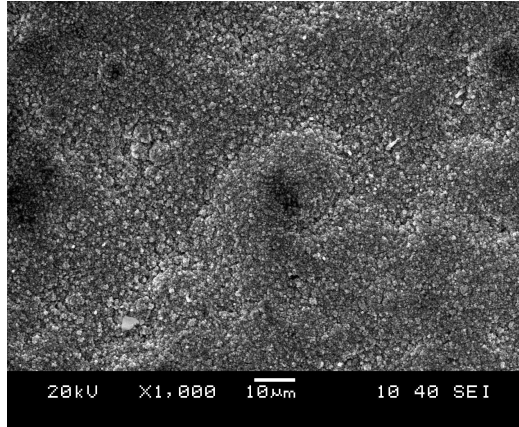
durum değildir. Özellikle $3\text{A}/\text{dm}^2$ 'lik akım yoğunluğundan sonra mikro görüntülerde bozulmalar görülmüştür (Şekil 9.5 c, d).



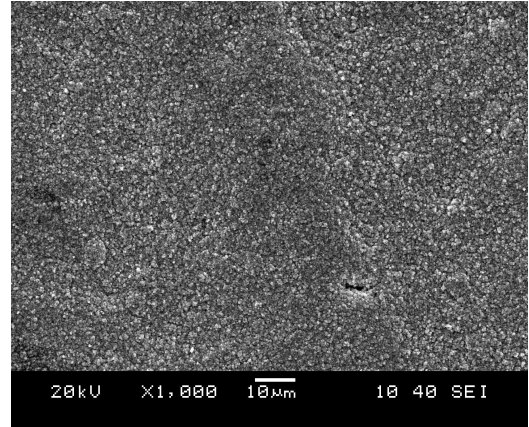
(a)



(b)



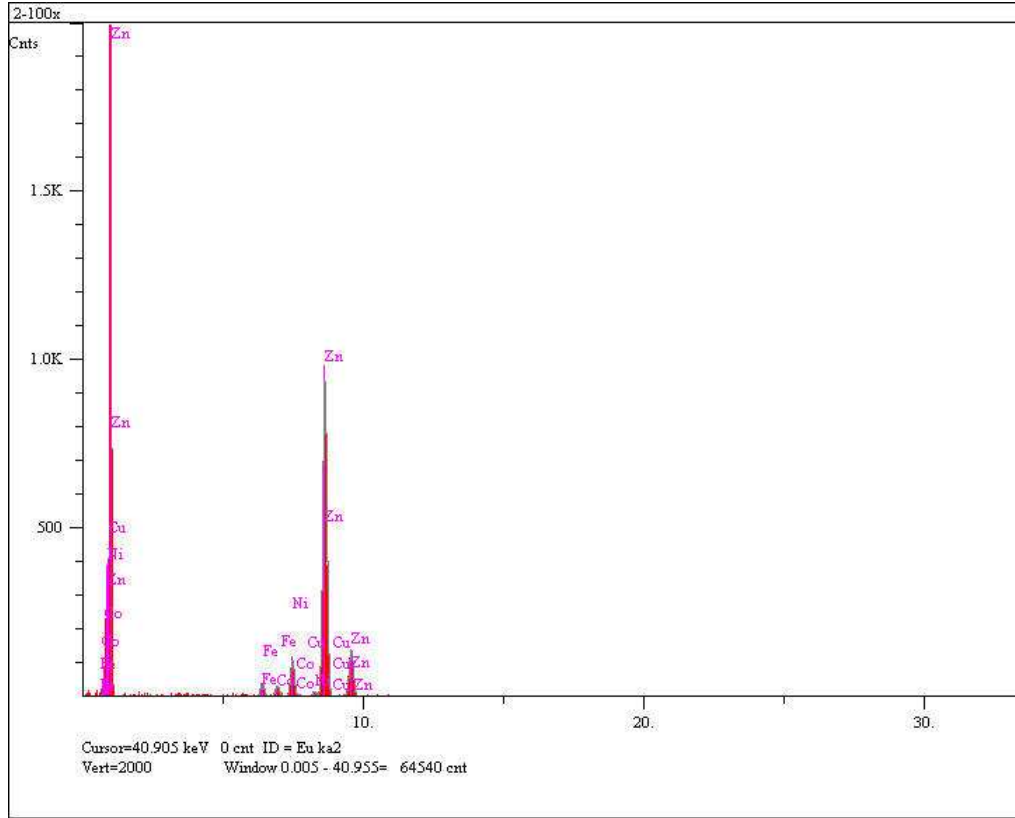
(c)



(d)

Şekil 8.5 Farklı akım yoğunluğunda yapılan kaplamalara ait SEM görüntüleri (a) $I=2\text{ A}/\text{dm}^2$ (A1), (b) $I=3\text{ A}/\text{dm}^2$ (A2), (c) $I=4\text{ A}/\text{dm}^2$ (A3) ve (d) $I=5\text{ A}/\text{dm}^2$ (A4)

Zn-Ni-Co alaşımlı kaplamaya ait dört farklı akım yoğunluğunda yapılan çalışmaların elementel analiz (EDS) sonuçları Tablo 8.5 te verilmiştir. Artan akım yoğunluğu ile birlikte, Zn miktarında azalma olurken, Ni ve Co miktarlarında artış görülmüştür.



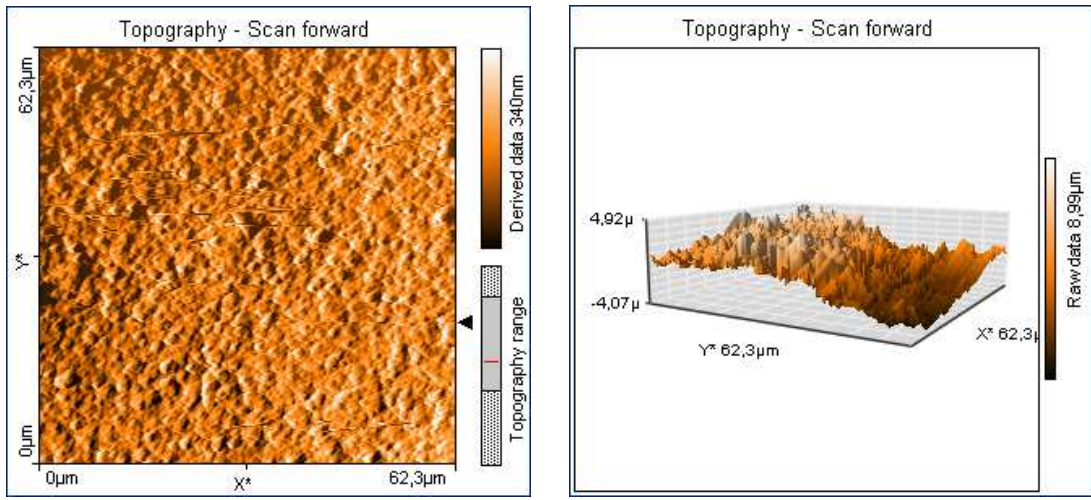
Şekil 8.6 Farklı akım yoğunluğunda yapılan Zn-Ni-Co alaşımlı kaplamamalara ait EDS analizi

Tablo 8.5 Farklı akım yoğunluğunda yapılan kaplamalara ait EDS sonuçları

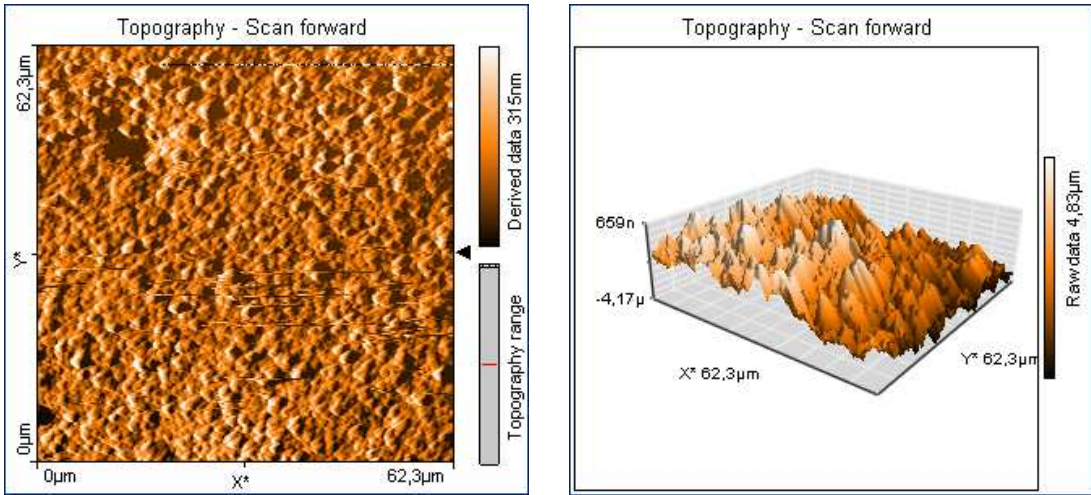
| Elementler | A1 (I=2 A/dm ²) | A2 (I=3 A/dm ²) | A3 (I=4 A/dm ²) | A4 (I=5 A/dm ²) |
|------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| Zn | % 95,517 | % 95,059 | % 94,645 | % 93,534 |
| Ni | % 2,433 | % 2,463 | % 2,786 | % 3,971 |
| Co | % 0,591 | % 0,442 | % 0,671 | % 1,066 |
| Diğer | % 1,459 | % 2,036 | % 1,898 | % 1,429 |

8.2.3 AFM Görüntüleri

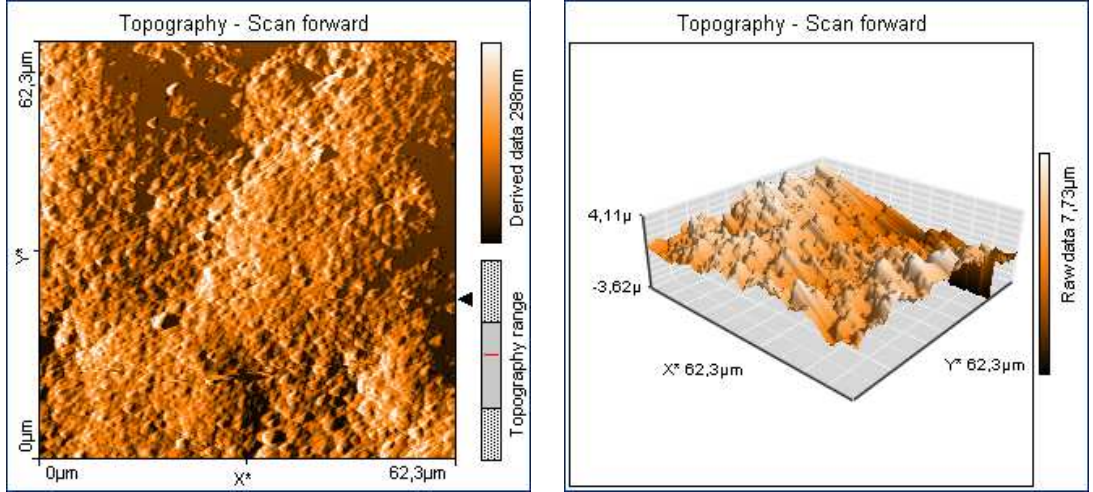
Farklı akım yoğunluklarında yapılan Zn-Ni-Co alaşımlı kaplama numunelerine ait olan, Şekil 8.7’de verilen yüzey görüntüleri AFM cihazı ile $62,3\mu\text{m}^2$ ’lik bir alanda yapılan tarama işleminin sonucudur. Birbirinden çokta farklı olmayan, fakat o kadar da birbirine benzerlik göstermeyen farklı yüzey topografya görüntüleri mevcuttur. $+4,92\ \mu\text{m}$ ve $-4,54\ \mu\text{m}$ gibi maksimum ve minimum girinti ve çıkıntılarının olduğu dağılım genel anlamda yaygın olmayıp, bölgesel olarak kendini göstermektedir.



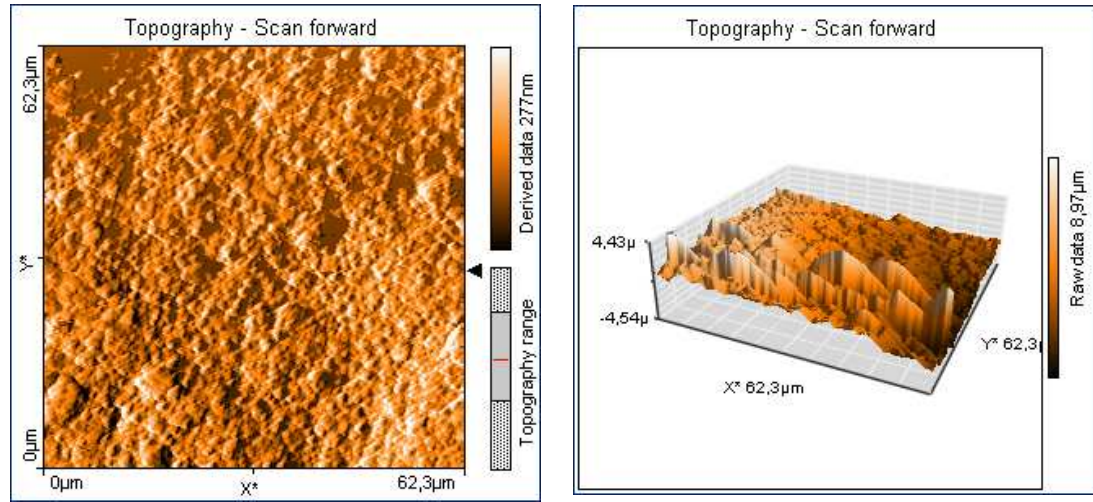
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 8.7 Farklı akım yoğunluğunda yapılan kaplamamalara ait AFM görüntüleri (a) $I=2 \text{ A/dm}^2$ (A1), (b) $I=3 \text{ A/dm}^2$ (A2), (c) $I=4 \text{ A/dm}^2$ (A3), ve (d) $I=5 \text{ A/dm}^2$ (A4)

8.2.4 Dinamik Ultra Mikro Sertlik (DUH) Testi

Zn-Ni-Co alaşımlı kaplama tabakasının mekanik özellikleri (sertlik, elastisite modülü, akma mukavemeti) ultra-mikro sertlik testi kullanılarak iz ve load-unload eğrilerinden elde edilmiştir.

F : Uygulanan yük

D_1 : Maksimum derinlik

D_2 : Görünür derinlik

D_3 : Elastisite modülünün hesaplanmasında kullanılan derinlik

$A_{max.}$: Oluşan izin alanı

H : Sertlik

σ_y : Akma mukavemeti

E : Elastisite modülü

Üç farklı yükte yapılan mikro sertlik testi sonucu, numunelere ait (**A1, A2, A3, A4**) yüzeyde oluşan iz derinliği, iz alanı ve kaplama tabakasına ait sertlik, akma gerilmesi ve elastisite modülü sonuçları tablo ve grafiklerle özetlenmiştir.

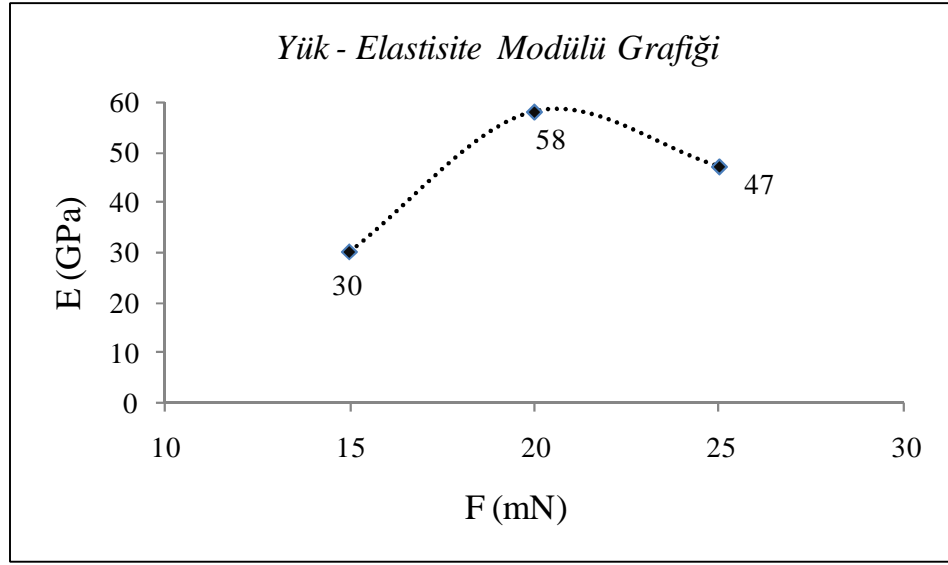
A1 kodlu numune için yapılan dinamik sertlik ölçümü sonucu çıkan değerler Tablo 8.6 ve Tablo 8.7 de verilmiştir. Artan yük miktarına bağlı olarak kaplama tabakasına ait sertlik, elastisite modülü ve akma mukavemetinde değişimler meydana gelmiştir. Özellikle sertlik değeri, 682 N/mm^2 'den 933 N/mm^2 'ye yükselmiştir. Elastisite modülü ise 30 GPa ile 58 GPa arasında değerler almıştır. Fakat bu artış lineer değildir. Kapsama depositine ait akma mukavemeti değeri de 207 N/mm^2 ve 317 N/mm^2 arasında değişmiştir.

Tablo 8.6 Birinci numune (**A1**) yüzeyine uygulanan yük ve oluşan derinlik değerleri

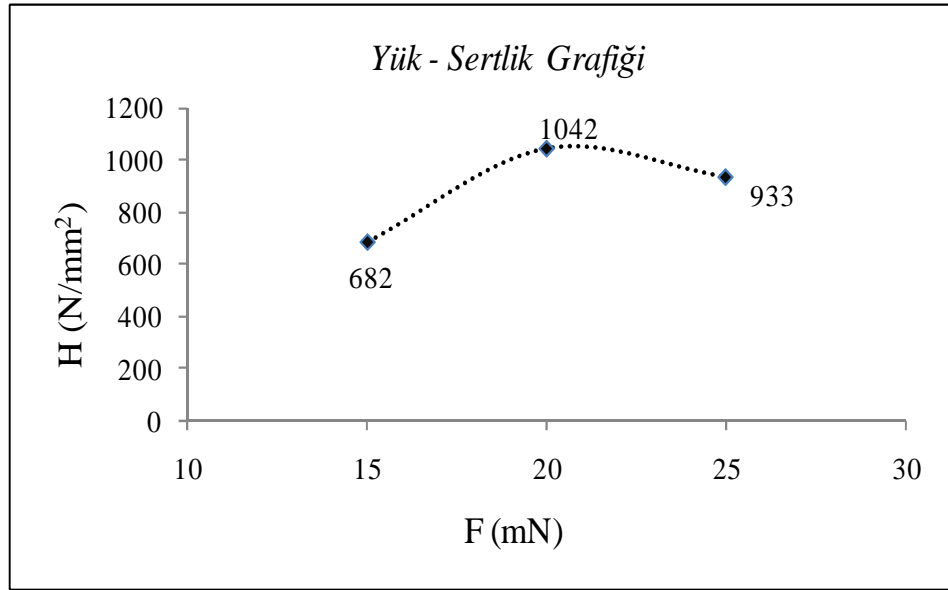
| F_1 (mN) | D_1 (μm) | D_2 (μm) | D_3 (μm) |
|------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 15 | 0,914 | 0,891 | 0,912 |
| 20 | 0,910 | 0,860 | 0,852 |
| 25 | 1,103 | 1,012 | 1,008 |

Tablo 8.7 Birinci numuneye (**A1**) ait sertlik, akma gerilmesi ve elastisite modülü değerleri

| F_1 (mN) | $A_{max.}$ (mm^2) | H (N/mm^2) | σ_y (N/mm^2) | E (GPa) |
|------------|------------------------------|-------------------------|--------------------------------|-----------|
| 15 | $2,2 \times 10^{-5}$ | 682 | 207 | 30 |
| 20 | $1,92 \times 10^{-5}$ | 1042 | 316 | 58 |
| 25 | $2,68 \times 10^{-5}$ | 933 | 281 | 47 |



(a)



(b)

Şekil 8.8 Zn-Ni-Co alaşımlı kaplama yapılan A1 ($I=2A/dm^2$) numunesine ait;

(a) Kuvvet-elastisite modülü grafiği ve (b) Kuvvet-sertlik grafiği

A1 numunesine “ait yük - elastisite modülü” ve “yük - sertlik” grafiği Şekil 8.8’de verilmiştir. Her iki grafikteki eğrilerin değişimi birbirine benzerdir.

İkinci numuneye (A2) yapılan dinamik sertlik testi sonuçlarına bakacak olursak, artan yük miktarına bağlı olarak; sertlik, elastisite modülü ve akma mukavemeti değerlerinde artış meydana gelmiştir. 20 mN'luk yükte batma derinliği, 15 mN' luk yükte oluşan batma derinliğine göre daha azdır (Tablo 8.8).

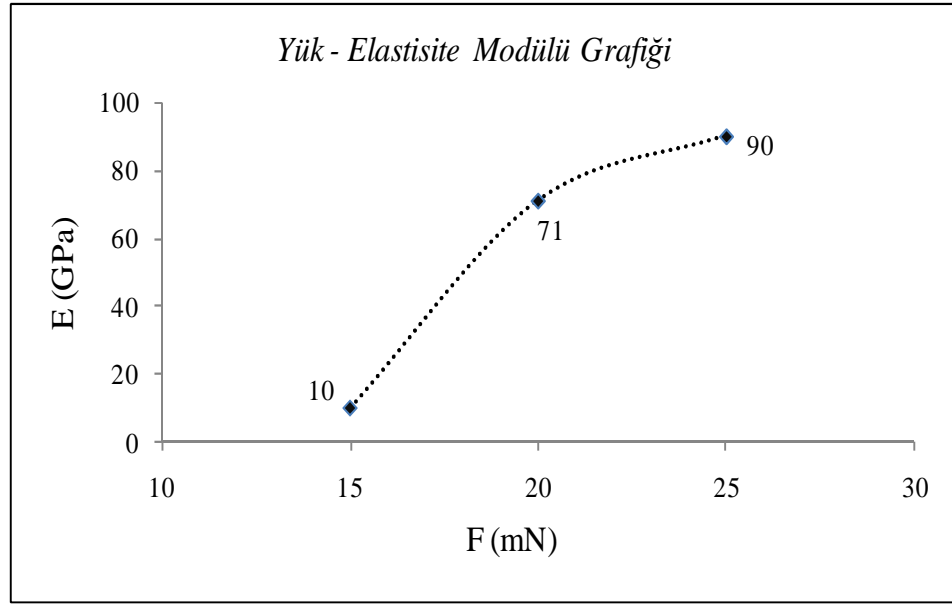
Tablo 8.8 İkinci numune (A2) yüzeyine uygulanan yük ve oluşan derinlik değerleri

| F₂ (mN) | D₁ (μm) | D₂ (μm) | D₃ (μm) |
|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 15 | 1,049 | 1,020 | 1,199 |
| 20 | 0,825 | 0,783 | 0,772 |
| 25 | 0,851 | 0,798 | 0,793 |

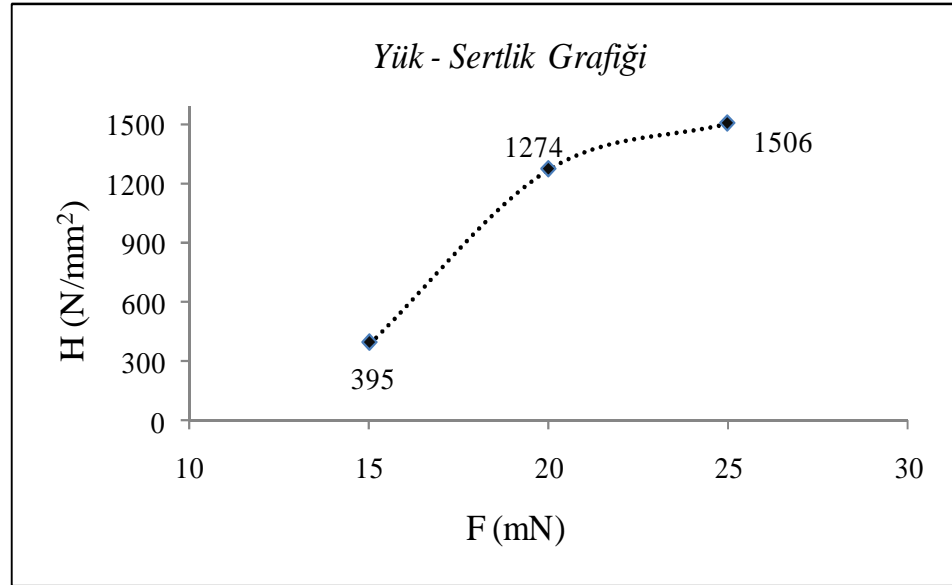
Tablo 8.9 İkinci numuneye (A2) ait sertlik, akma gerilmesi ve elastisite modülü değerleri

| F₂ (mN) | A_{max.} (mm ²) | H (N/mm ²) | σ_y (N/mm ²) | E (GPa) |
|---------------------------|---|-------------------------------|---|----------------|
| 15 | 3,8 x 10 ⁻⁵ | 395 | 120 | 10 |
| 20 | 1,57 x 10 ⁻⁵ | 1274 | 386 | 71 |
| 25 | 1,66 x 10 ⁻⁵ | 1506 | 456 | 90 |

En yüksek elastisite modülü ve sertlik miktarı uygulanan 25 mN'luk yükte oluşmuştur. İlk yükte (15mN) çıkan elastisite modülü değeri oldukça küçük olup, batıcı ucun yüzeydeki homojen olmayan bir yere gelmiş olma ihtimalini ön plana çıkarmaktadır. Artan elastisite modülü ile kaplama tabakasına ait akma mukavemetinde de bir artış söz konusu olmuştur. Yüzeye ait ölçülen en yüksek sertlik değeri ise 1506 N/mm²'dir. Aynı şekilde A2 numunesi için kaplama tabakasına ait en yüksek akma mukavemeti değeri de 456 N/mm²' olarak hesaplanmıştır.



(a)



(b)

Şekil 8.9 Zn-Ni-Co alaşımlı kaplama yapılan A2 ($I=3A/dm^2$) numunesine ait;

(a) Kuvvet-elastisite modülü grafiği ve (b) Kuvvet-sertlik grafiği

Şekil 8.9' da görüldüğü üzere, A2 kodlu numuneye ait sertlik ve elastisite modülü değerlerinde ki artış birbirine benzer paralel bir eğri izlemiştir. Sertlik ve elastisite modülü eğrileri artarak devam etmiştir.

A3 kodlu numune için yapılan dinamik sertlik testine ilişkin çıkan sonuçlar, Tablo 9.11 ve 9.12 'de verilmiştir. Uygulanan yük miktarına bağlı olarak gerek elastisite modülü gerekse de sertlik ve akma mukavemeti değerinde meydana gelen değişimler diğer numunelere nazaran daha yakın ve sapmalar daha azdır.

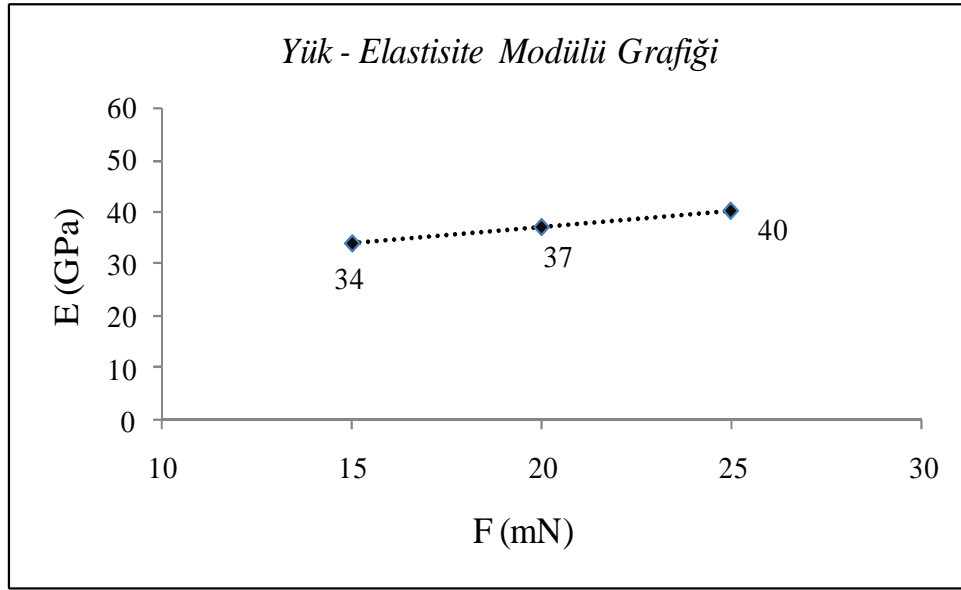
Tablo 8.10 Üçüncü numune (A3) yüzeyine uygulanan yük ve oluşan derinlik değerleri

| F₃ (mN) | D₁ (μm) | D₂ (μm) | D₃ (μm) |
|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 15 | 0,894 | 0,788 | 0,826 |
| 20 | 0,992 | 0,875 | 0,884 |
| 25 | 1,033 | 0,917 | 0,933 |

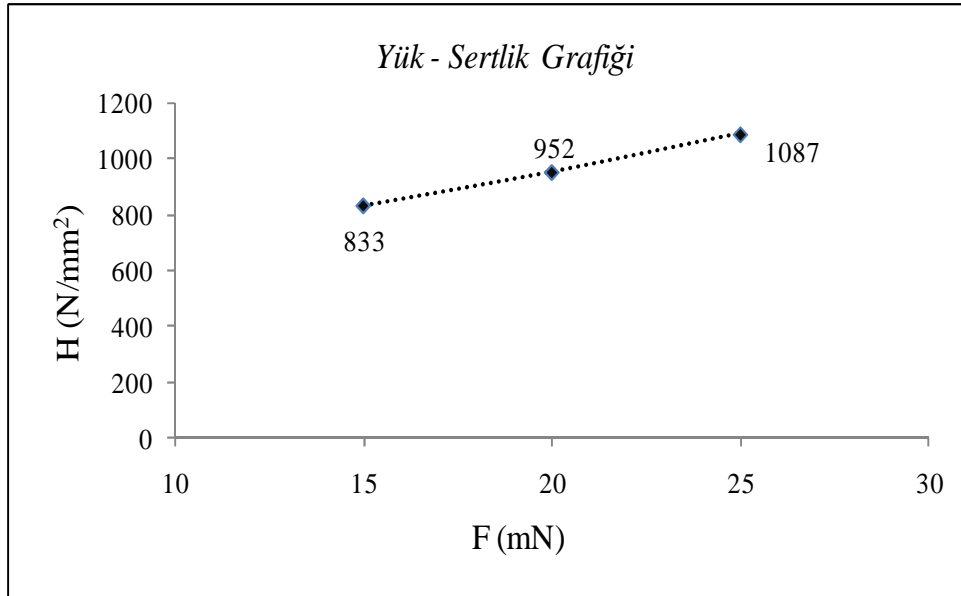
Tablo 8.11 Üçüncü numuneye (A3) ait sertlik, akma gerilmesi ve elastisite modülü değerleri

| F₃ (mN) | A_{max.} (mm ²) | H (N/mm ²) | σ_y (N/mm ²) | E (GPa) |
|---------------------------|---|-------------------------------|---|----------------|
| 15 | 1,8 x 10 ⁻⁵ | 833 | 252 | 34 |
| 20 | 2,1 x 10 ⁻⁵ | 952 | 288 | 37 |
| 25 | 2,3 x 10 ⁻⁵ | 1087 | 329 | 40 |

Artan yük miktarıyla birlikte batma derinliğinde de bir artış söz konusudur. Yüzeyle ait en yüksek sertlik (1087 N/mm²) ve en yüksek elastisite modülü değeri (40 GPa) 25mN'luk yükte gözlemlenmiştir. Kaplama tabakasına ait akma gerilmesi ise 252 N/mm² ve 329 N/mm² arasında bir değişim göstermiştir.



(a)



(b)

Şekil 8.10 Zn-Ni-Co alaşımlı kaplama yapılan A3 ($I=3A/dm^2$) numunesine ait;

(a) Kuvvet-elastisite modülü grafiği (b) Kuvvet-sertlik grafiği

A3 numunesine ait “yük - elastisite modülü” ve “yük - sertlik” grafiği Şekil 8.10’da verilmiştir. Her iki grafikteki eğriler lineer bir artış sergilemiştir.

Bu kategoride son çalışma olan A4 kodlu numune için yapılan dinamik ultra sertlik ölçümü sonucu çıkan değerler Tablo 8.12 ve Tablo 8.13'te verilmiştir. Kaplama tabakasına ait sertlik değeri 1250 N/mm^2 'den 1436 N/mm^2 'na doğru artış göstermiştir. Aynı şekilde artış eğiliminde ki değişim elastisite modülü içinde geçerlidir (Şekil 8.11).

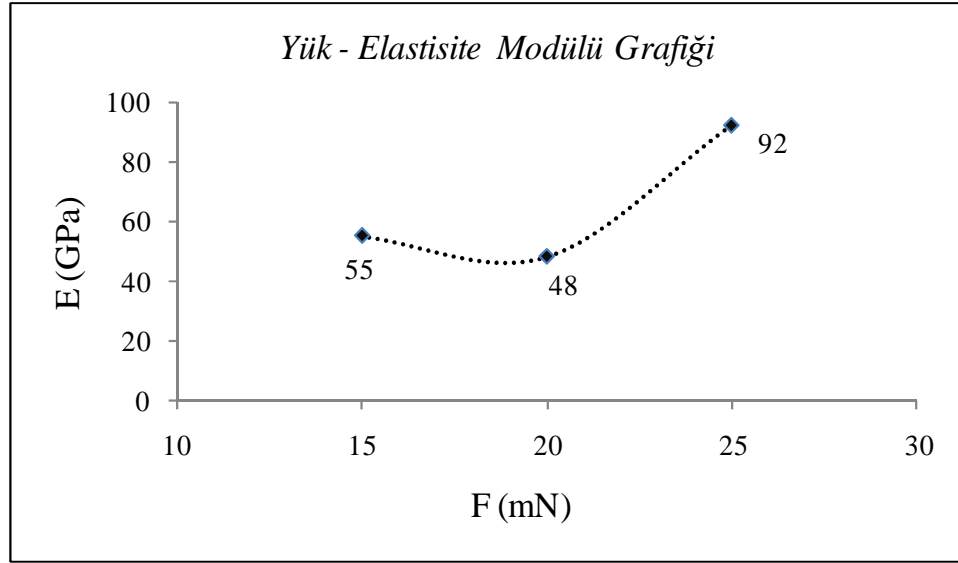
Tablo 8.12 Dördüncü numune (A4) yüzeyine uygulanan yük ve oluşan derinlik değerleri

| F₄ (mN) | D₁ (μm) | D₂ (μm) | D₃ (μm) |
|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 15 | 0,714 | 0,656 | 0,675 |
| 20 | 0,942 | 0,894 | 0,868 |
| 25 | 0,869 | 0,821 | 0,812 |

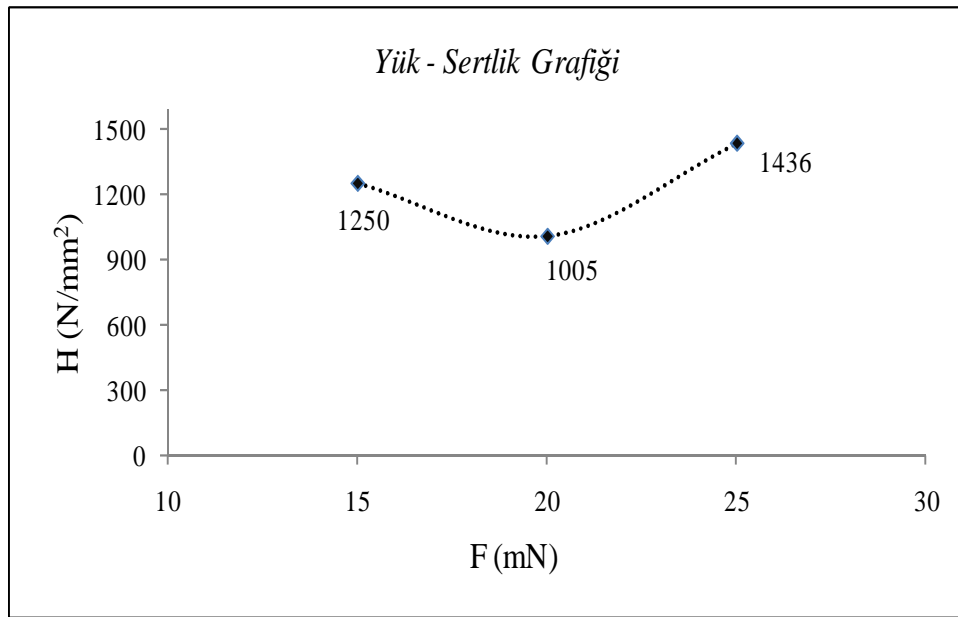
Tablo 8.13 Dördüncü numuneye (A4) ait sertlik, akma gerilmesi ve elastisite modülü değerleri

| F₄ (mN) | A_{max.} (mm ²) | H (N/mm ²) | σ_y (N/mm ²) | E (GPa) |
|---------------------------|--|-------------------------------|---|----------------|
| 15 | $1,2 \times 10^{-5}$ | 1250 | 379 | 55 |
| 20 | $2,0 \times 10^{-5}$ | 1005 | 305 | 48 |
| 25 | $1,74 \times 10^{-5}$ | 1436 | 435 | 92 |

A4 kodlu numunede ki kaplama filmine ait akma gerilmesinde ki değişim, sertlik ve elastisite modülünde olduğu gibi artan yük miktarıyla bir artış göstermiştir. Bu numuneye ait kaplama filminde 1000 N/mm^2 'nin altında bir sertlik değeri göstermemiştir. Aynı şekilde elastisite modülünde de en düşük değer 50 GPa 'ın üzerindedir. Kaplama tabakasına ait akma mukavemeti değerleri içinde, değişen yük oranlarında yapılan hesaplamalar sonucu en düşük 305 N/mm^2 , en yüksek 435 N/mm^2 'e bulunmuştur.



(a)



(b)

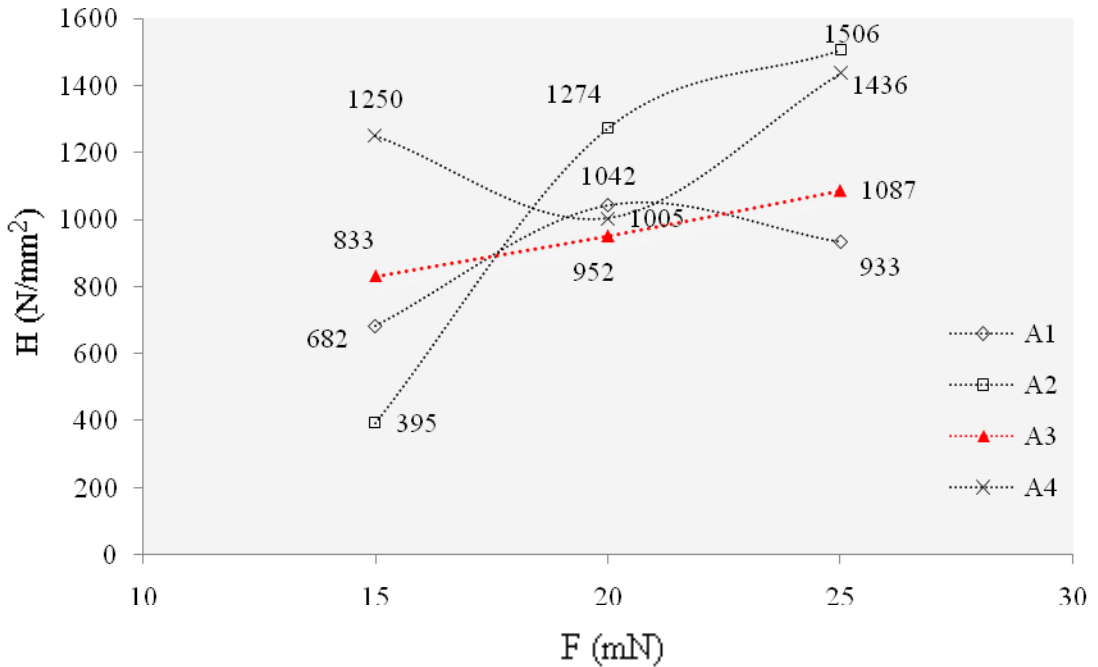
Şekil 8.11 Zn-Ni-Co alaşımlı kaplama yapılan A4 ($I=5A/dm^2$) numunesine ait;
 (a) Kuvvet-elastisite modülü grafiği (b) Kuvvet-sertlik grafiği

Şekil 8.11 incelendiğinde de, 20 mN'luk yükten 25 mN'luk yüke doğru sertlik ve elastisite modülünde ani bir artış görülmüştür. Bunun nedeni artan yük miktarıyla birlikte cihazın batıcı ucunun yüzeye batma derinliğindeki mesafe ikinci yüke göre az olmasından kaynaklanmaktadır.

8.2.4.1 Sonuç

Dört farklı akım yoğunluğunda gerçekleştirilen Zn-Ni-Co alaşımlı kaplama numunelerine ait dinamik sertlik ölçümü sonucu oluşan değerlerin dağılımı Şekil 8.12’te ki grafikte verilmiştir. 15mN’luk yük uygulamasında çıkan en yüksek sertlik değeri A4 kodlu numuneye aittir. 20 mN’da ise maksimum sertlik miktarına A2 kodlu numune sahip olmakla birlikte, bu yük miktarında çıkan sertlik değerleri diğer numuneler için yakın sonuçları verdiği görülmüştür. 25 mN’luk yükte oluşan sertlik sonuçlarına bakıldığında minimum sertlik değerinin A1 kodlu numuneye, maksimum sertlik değerinin de A2 kodlu numuneye ait olduğu belirlenmiştir.

Şekil 8.12’de A3 kodlu numunedeki sertlik miktarı diğerlerinden farklı olarak lineer bir artış izlemiştir. A1 numunesinde sertlik değerinde önce bir artış sonra azalma, A4 numunesinde ise önce azalma sonrada bir artış gözlenmiştir. A2 numunesinde ise artan yüke bağlı olarak sertlik değerinde sürekli bir artış söz konusudur.



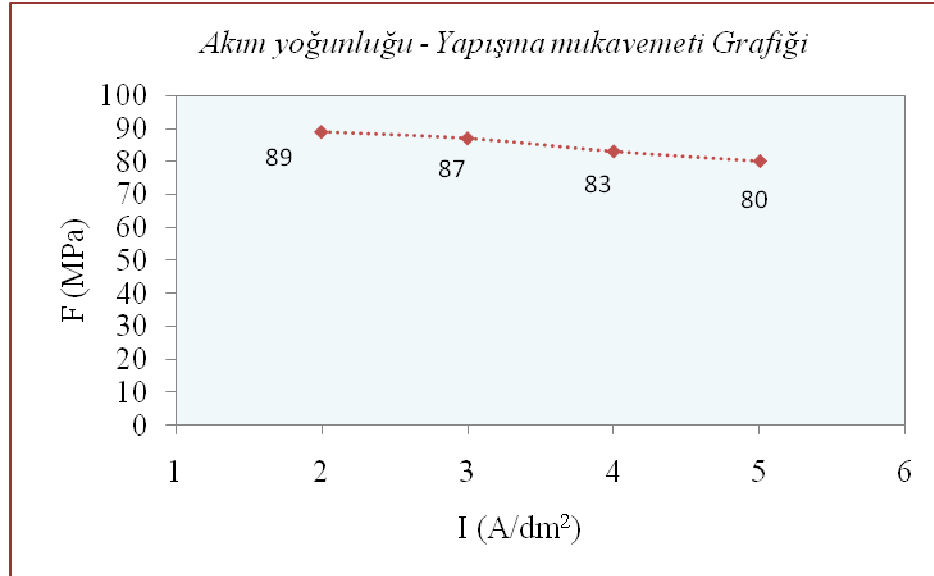
Şekil 8.12 Farklı akım yoğunluğunda kaplanan numunelere (A1, A2, A3,A4) ait “Yük - Sertlik Grafiği”

8.2.5 Çizik Testi (Scratch)

Dört farklı akım yoğunluğunda yapılan Zn-Ni-Co alaşımlı kaplama tabakalarının yapışma mukavemeti ile ilgili olarak yapılan çizik testinin sonuçları Tablo 8.14'te verilmiştir. Çıkan değerlere bağlı olarak çizilen Şekil 8.13'te ki grafiğe baktığımızda, yapışma mukavemeti artan akım yoğunluğu ile bir azalma göstermiştir. En yüksek yapışma mukavemetinin 89 MPa olarak A1 kodlu numuneye, en düşük yapışma mukavemeti değerinin de 80 MPa olarak A4 kodlu numuneye ait olduğu bulunmuştur. Artan akım yoğunluğu ile tanelerin hızla büyümesi yapışma mukavemeti direncini düşürmüştür. İnce taneli bir yapı yüzeye daha iyi yapışma göstermiştir.

Tablo 8.14 Farklı akım yoğunluğundaki numunelere ait çizik testi sonuçları

| | A1 (2 A/dm ²) | A2 (2 A/dm ²) | A3 (2 A/dm ²) | A4 (2 A/dm ²) |
|--------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| W _c (N) | 3,10 x 10 ⁻² | 30,25 x 10 ⁻³ | 28,6 x 10 ⁻³ | 27,51 x 10 ⁻³ |
| F (MPa) | 89 | 87 | 83 | 80 |

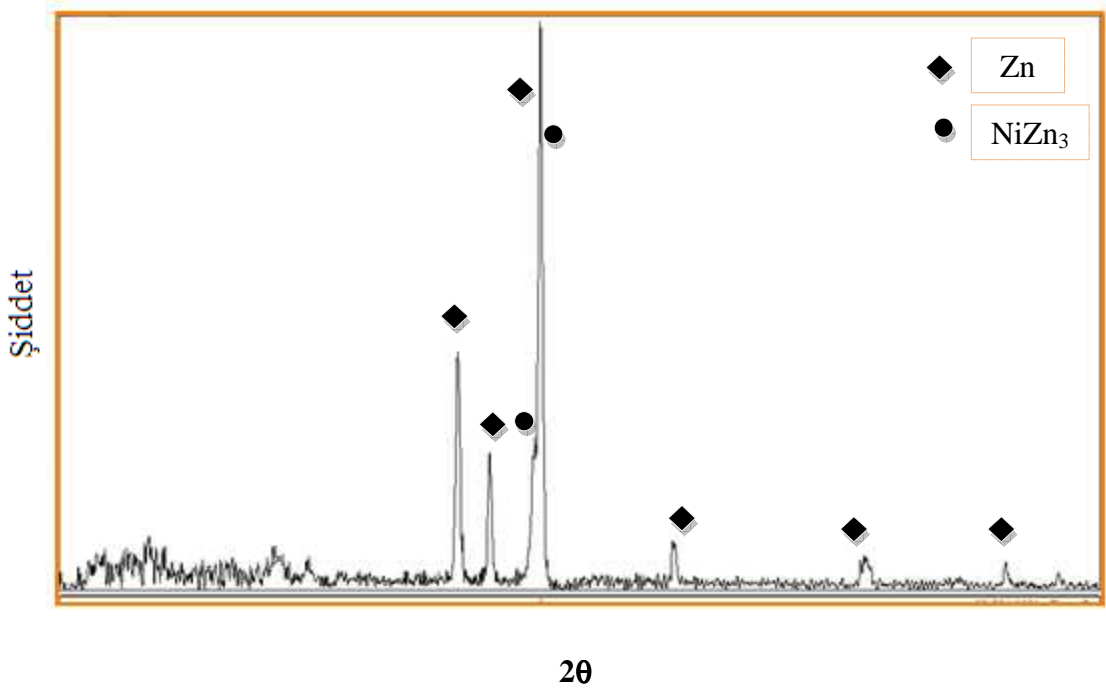


Şekil 8.13 Farklı akım yoğunluğuna bağlı Zn-Ni-Co alaşımlı kaplamanın; akım yoğunluğu- yapışma mukavemeti grafiği

8.3 Farklı Kaplama Kalınlığına Sahip Zn-Ni-Co Alaşımli Kaplamalara Ait Sonuçlar

8.3.1 XRD Analizi

Zn-Ni-Co alaşımli kaplamaya ilişkin farklı kaplama kalınlıklarına sahip numunelere ait XRD sonuçları benzerlik göstermiş olup, Şekil 8.14'te de görüldüğü üzere Zn ve NiZn₃ faz yapıları görülmüştür.

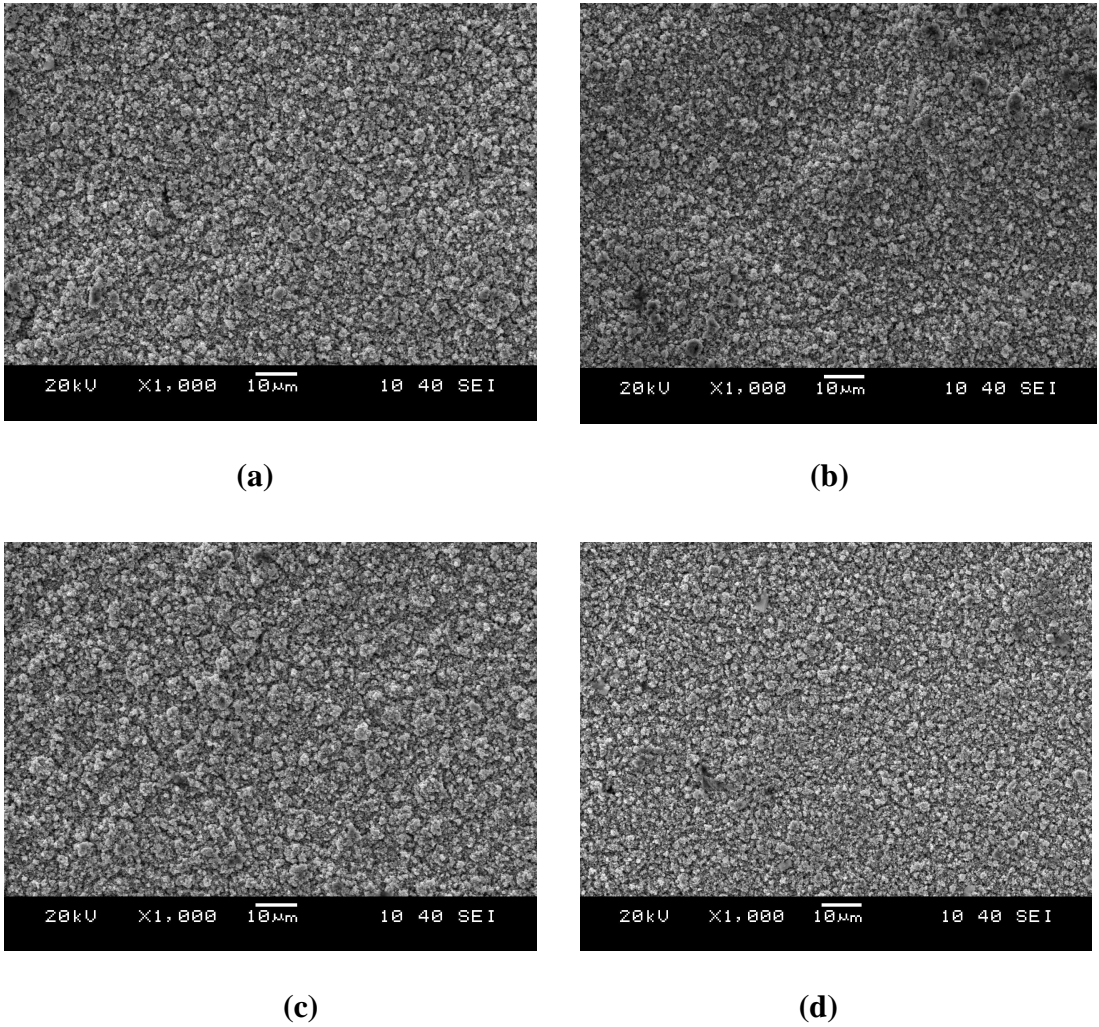


Şekil 8.14 Farklı kaplama kalınlığında oluşan Zn-Ni-Co alaşımli kaplamanın XRD sonuçları

Farklı kaplama kalınlıklarında ki deney numunelerine ait kaplama tabakasında oluşan faz yapısı, artan akım yoğunluğunda gözlemlenen faz yapılarıyla da aynıdır.

8.3.2 SEM ve EDS Analizi

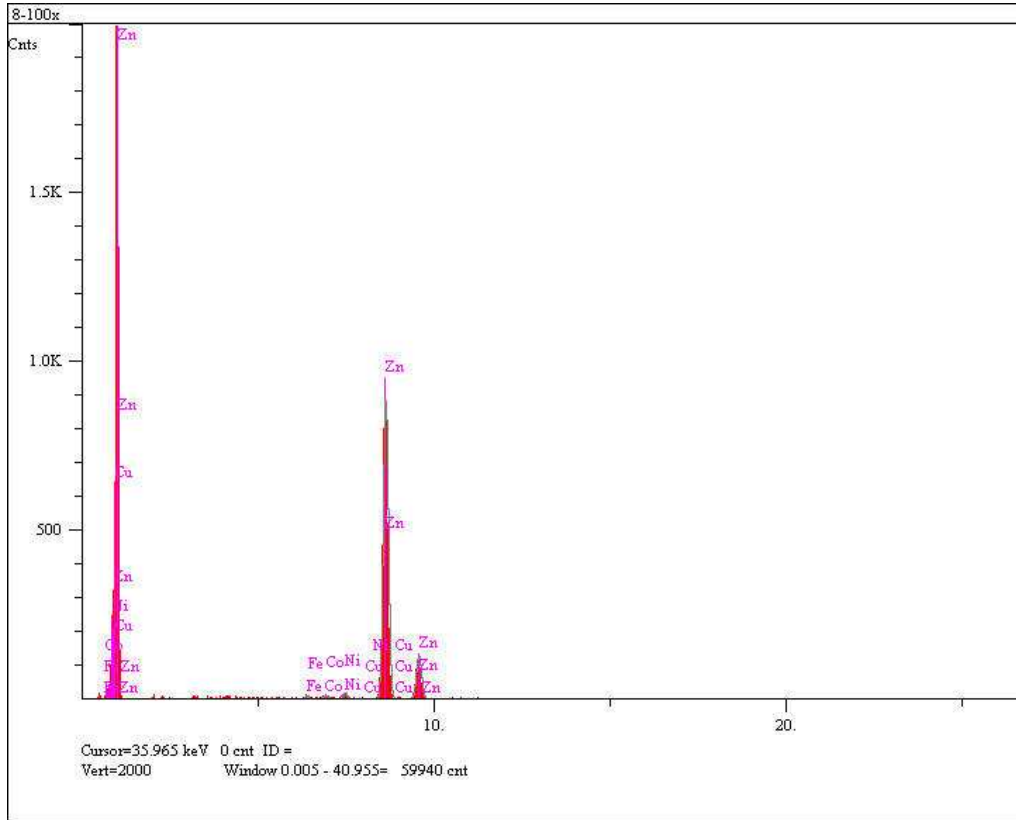
Dört farklı kaplama kalınlığına sahip **K1**, **K2**, **K3** ve **K4** kodlu, Zn-Ni-Co alaşımlı kaplamalara ait SEM görüntüleri Şekil 8.15 te verilmiştir. Aynı çalışma parametrelerinde yapılan bu çalışmanın sonucu olarak, kaplamalara ait yüzey morfolojileri genel anlamda bir benzerlik göstermiştir.



Şekil 8.15 Farklı kaplama kalınlığında ki numunelere ait SEM görüntüleri (a) 5 µm (K1), (b) 10 µm (K2), (c) 15 µm (K3) ve (d) 20 µm (K4)

Farklı kaplama kalınlıklarına sahip Zn-Ni-Co alaşımlı kaplama filminin SEM görüntülerine bakıp, kalınlığa bağlı yüzey morfolojisinde önemli derece de değişimler gözlemlenmiştir demek oldukça zordur.

Dört farklı kaplama kalınlığındaki Zn-Ni-Co alaşımlı kaplama numunelerine ait EDS analizinin sonuçları Tablo 8.15 te verilmiştir. Artan kaplama kalınlığı ile, Zn miktarında bir artış görülmüştür. Ni ve Co miktarlarının ise birbirine yakın değerler aldığı gözlemlenmiştir ve artan kaplama kalınlığı ile her iki element için tam anlamıyla bir artış veya azalma görüldü diyemeyiz. Gerek Ni gerekse de Co elementi ortalama olarak % 0,5 lik bir depositlenme miktarı sergilemiştir.



Şekil 8.16 Farklı kaplama kalınlığına sahip numunelerin EDS analizi

Tablo 8.15 Farklı kaplama kalınlığına sahip numunelerin EDS sonuçları

| Elementler | K1 (5 μ m) | K2 (10 μ m) | K3 (15 μ m) | K4 (20 μ m) |
|------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Zn | % 96,245 | % 97,622 | % 97,759 | % 98,398 |
| Ni | % 0,501 | % 0,454 | % 0,625 | % 0,585 |
| Co | % 0,617 | % 0,397 | % 0,578 | % 0,400 |
| Diğer | % 2,637 | % 1,527 | % 1,038 | % 0,617 |

8.3.3 Dinamik Ultra Mikro Sertlik (DUH)

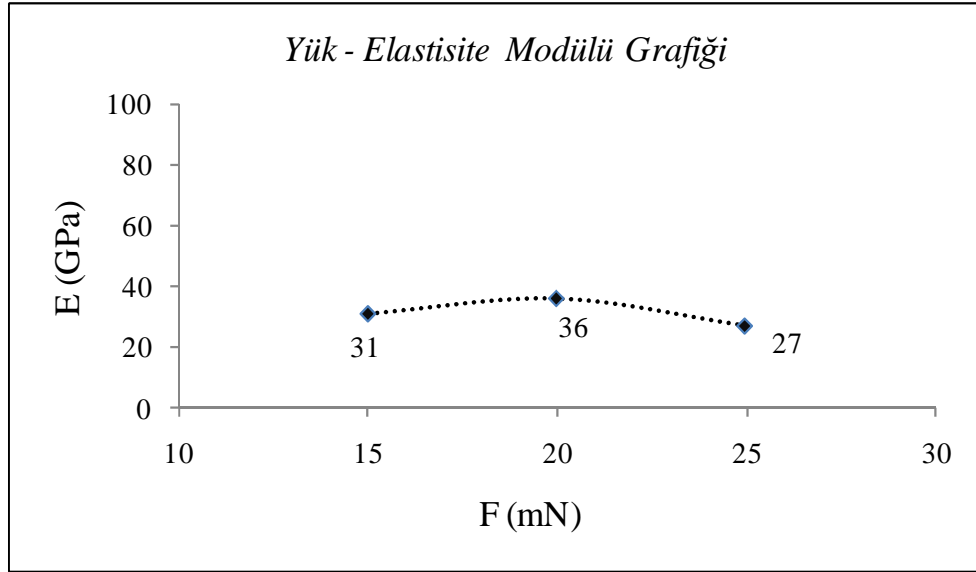
Üç farklı yükte yapılan **K1**, **K2**, **K3**, **K4** kodlu numunelere ait dinamik mikro sertlik testinin, 5µm kalınlığa sahip kaplama tabakasına ait sonuçları, aşağıda ki Tablo 8.16 ve Tablo8.17’ de verilmiştir. K1 numunesine ait dinamik mikro sertlik ölçümünde, artan yük miktarıyla birlikte batma derinliğinde de artış gözlemlenmiş olup, elastisite modülünde önce bir artış, sonrada 25 mN’luk yük değerinde bir azalma görülmüştür. 36 GPa’lık en yüksek elastisite modülü ikinci uygulanan yük olan 20mN’da gözlemlenmiştir. Artan yüke bağlı olarak ta kaplama tabakasının sertliğinde lineer bir azalma vardır (Şekil 8.17-b). 442 N/mm²’lik en düşük sertlik değeri, uygulanan en büyük yük değerinde tespit edilmiştir. Bu numuneye ait akma mukavemetinde ki en yüksek değer 180 N/mm² ile 15 mN’luk yükte görülmüştür.

Tablo 8.16 Beşinci numune (**K1**) yüzeyine uygulanan yük ve oluşan derinlik değerleri

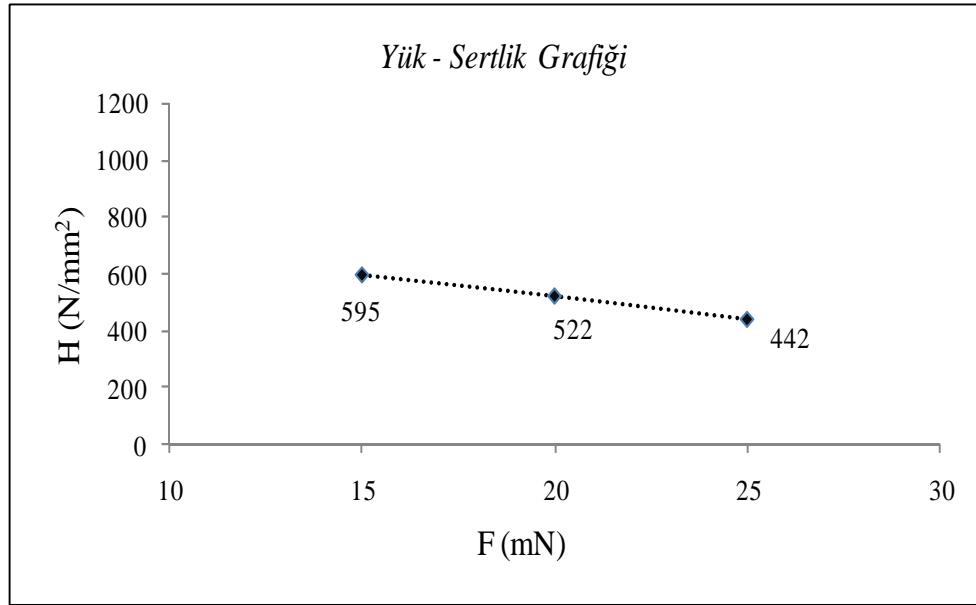
| F₅ (mN) | D₁ (µm) | D₂ (µm) | D₃ (µm) |
|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 15 | 1,035 | 0,944 | 0,978 |
| 20 | 1,277 | 1,212 | 1,205 |
| 25 | 1.571 | 1,460 | 1,463 |

Tablo 8.17 Beşinci numuneye (**K1**) ait sertlik, akma gerilmesi ve elastisite modülü değerleri

| F₅ (mN) | A_{max.} (mm ²) | H (N/mm ²) | σ_y (N/mm ²) | E (GPa) |
|---------------------------|---|-------------------------------|---|----------------|
| 15 | 2,52 x 10 ⁻⁵ | 595 | 180 | 31 |
| 20 | 3,83 x 10 ⁻⁵ | 522 | 158 | 36 |
| 25 | 5,65 x 10 ⁻⁵ | 442 | 134 | 27 |



(a)



(b)

Şekil 8.17 Zn-Ni-Co alaşımlı kaplama yapılan K1 ($t=5\mu\text{m}$) numunesine ait;

(a) Kuvvet-elastisite modülü grafiği ve (b) Kuvvet-sertlik grafiği

Şekil 8.17 a' da ki "yük-sertlik" grafiği incelenecek olursa, artan yük miktarına bağlı olarak ölçülen sertlik değerinde lineer bir azalmanın olduğunu söyleyebiliriz.

K2 numunesine ait dinamik sertlik sonuçları Tablo 8.18 ve Tablo 8.19'da verilmiştir. 96 GPa gibi yüksek bir elastisite modülü değerinin 15 mN'luk yük uygulamasında çıkmıştır. Sonrasında uygulanan yüklerde ise elastisite modülü değerleri birbirine yakındır.

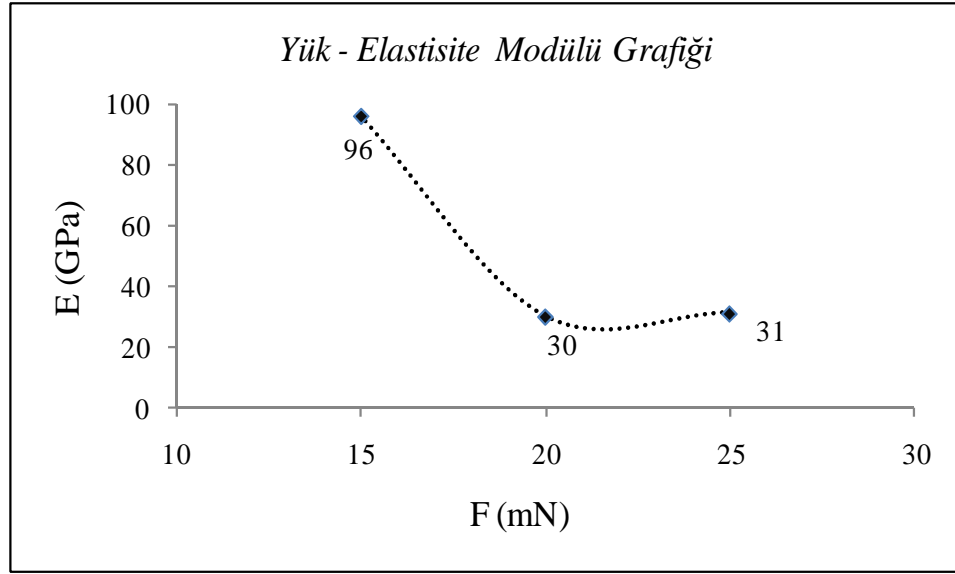
Tablo 8.18 Altıncı numune (**K2**) yüzeyine uygulanan yük ve oluşan derinlik değerleri

| F₆ (mN) | D₁ (μm) | D₂ (μm) | D₃ (μm) |
|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 15 | 1,390 | 1,321 | 1,321 |
| 20 | 1.374 | 1.332 | 1.304 |
| 25 | 1.523 | 1.442 | 1.446 |

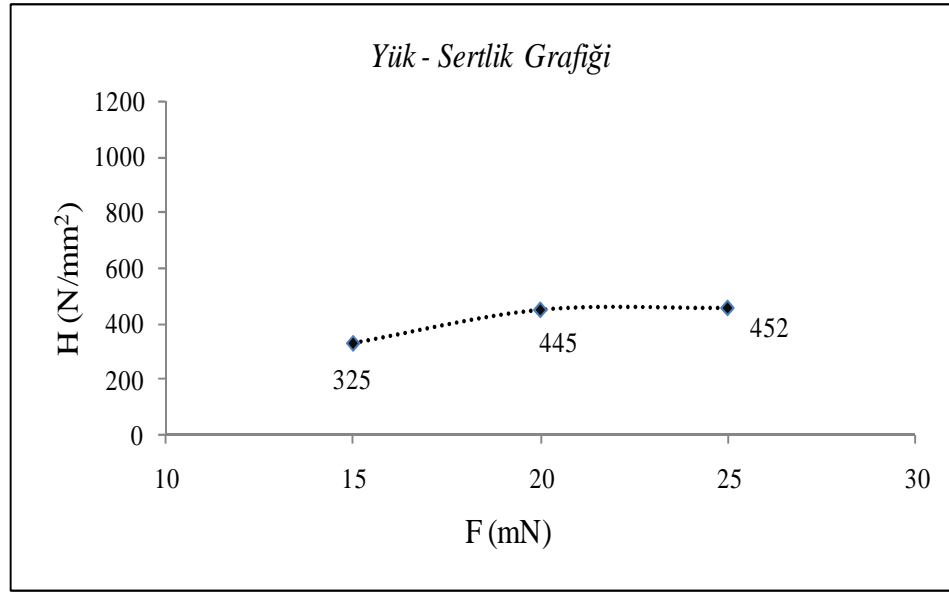
Tablo 8.19 Altıncı numuneye (**K2**) ait sertlik, akma gerilmesi ve elastisite modülü değerleri

| F₆ (mN) | A_{max.} (mm ²) | H (N/mm ²) | σ_y (N/mm ²) | E (GPa) |
|---------------------------|---|-------------------------------|---|----------------|
| 15 | 4,61 x 10 ⁻⁵ | 325 | 99 | 96 |
| 20 | 4,49 x 10 ⁻⁵ | 445 | 135 | 30 |
| 25 | 5,53 x 10 ⁻⁵ | 452 | 137 | 31 |

Kaplama tabakasına ait sertlik değeri, artan yük miktarıyla bir artış göstermiştir. Bu artış kaplama tabakasına ait akma mukavemetinde de kendini göstermiştir. 15 mN ve 25 mN'luk yüklerde ki akma mukavemeti dayanımı birbirine yakındır.



(a)



(b)

Şekil 8.18 Zn-Ni-Co alaşımlı kaplama yapılan K2 ($t=10\mu\text{m}$) numunesine ait;
 (a) Kuvvet-elastisite modülü grafiği ve (b) Kuvvet-sertlik grafiği

Şekil 8.18 a'da grafikte ki eğri incelenecek olursa, ilk bakışta elastisite modülündeki düşüş göze çarpmaktadır. İlk yükte uygulanan yük miktarıyla meydana gelen batma derinliği, diğer artan yük miktarlarında oluşan batma derinliğinden fazladır.

K3 numunesine ait mikro sertlik testinde uygulanan yüke bağlı olarak çıkan sonuçlar Tablo 8.20 ve Tablo 8.21’de verilmiştir. Elastisite modülü 12 GPa’ dan 52 GPa’a bir artış göstermiştir. Farklı kaplama kalınlığında yapılan kaplamaların elastisite modülüne bakıldığında en düşük elastisite modülü değeri 12 GPa ile K3 numunesinde tespit edilmiştir.

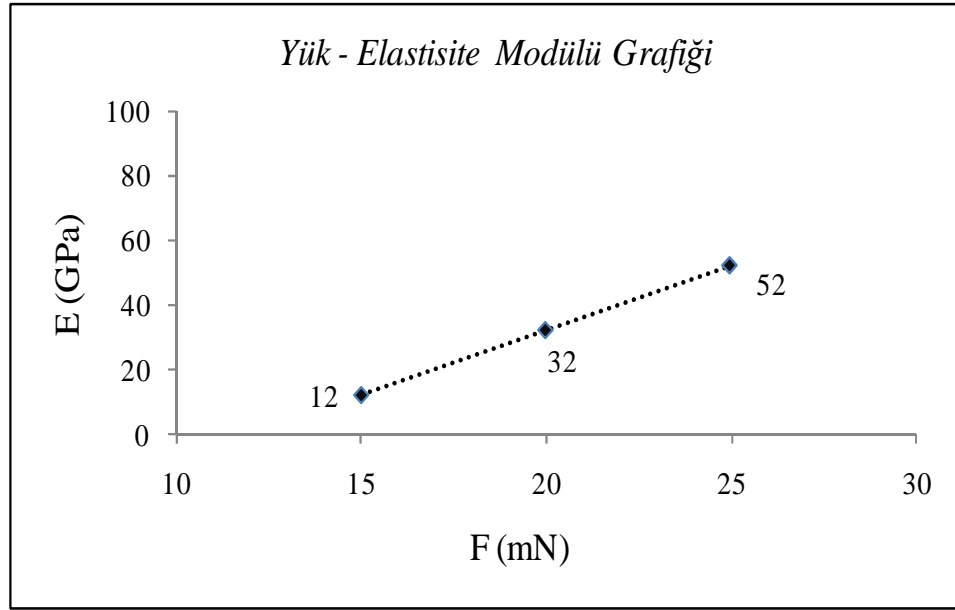
Tablo 8.20 Yedinci numune (**K3**) yüzeyine uygulanan yük ve oluşan derinlik değerleri

| F₇ (mN) | D₁ (μm) | D₂ (μm) | D₃ (μm) |
|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 15 | 1.627 | 1.572 | 1.513 |
| 20 | 1.754 | 1.728 | 1.696 |
| 25 | 1.481 | 1.415 | 1.423 |

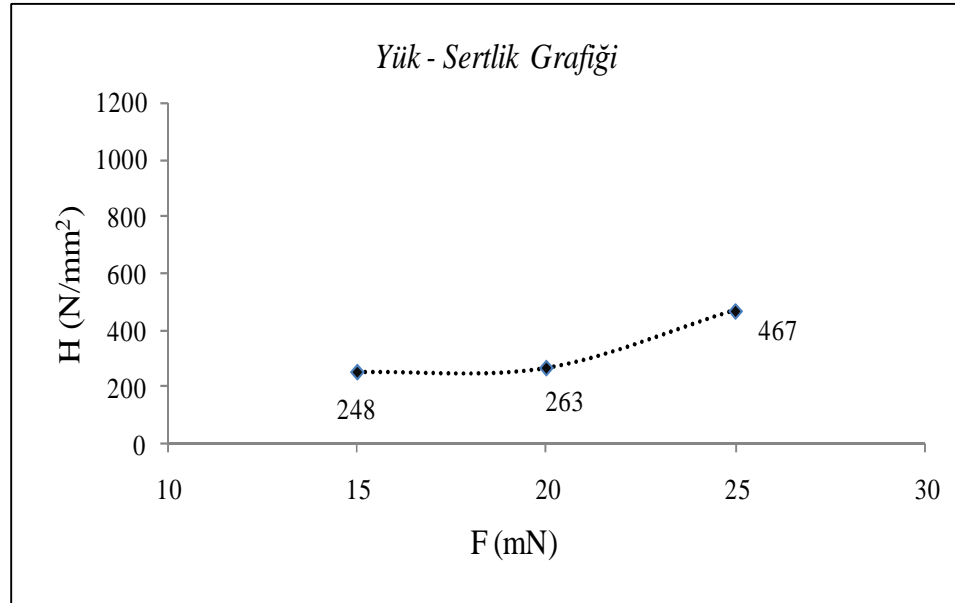
Tablo 8.21 Yedinci numuneye (**K3**) ait sertlik, akma gerilmesi ve elastisite modülü değerleri

| F₇ (mN) | A_{max.} (mm ²) | H (N/mm ²) | σ_y (N/mm ²) | E (GPa) |
|---------------------------|---|-------------------------------|---|----------------|
| 15 | 6,05 x 10 ⁻⁵ | 248 | 75 | 12 |
| 20 | 7,60 x 10 ⁻⁵ | 263 | 80 | 32 |
| 25 | 5,35 x 10 ⁻⁵ | 467 | 142 | 52 |

K3 numunesindeki sertlik değerleri analiz edildiğinde, ilk iki yük değerinde kaplama tabakasına ait sertlik değeri birbirine yakın olmakla birlikte, son uygulanan yüklerden olan 25 mN’da sertlik değeri diğerlerine göre iki katlık bir artış sergilemiştir. Aynı duruma benzer bir sonuç kaplama tabakasına ait (K3) akma mukavemeti değeri içinde geçerlidir.



(a)



(b)

Şekil 8.19 Zn-Ni-Co alaşımlı kaplama yapılan K3 ($t=15\mu\text{m}$) numunesine ait;

(a) Kuvvet-elastisite modülü grafiği (b) Kuvvet-sertlik grafiği

Yük – elastisite modülü grafiğine bakılacak olursa (Şekil 8.19 a), artan yük miktarına bağlı olarak elastisite modülünde ki değişim lineer bir artış sergilemiştir.

Aynı durumun yük-sertlik grafiğindeki (Şekil 8.19 b) eğri için aynı olduğunu söyleyemeyiz.

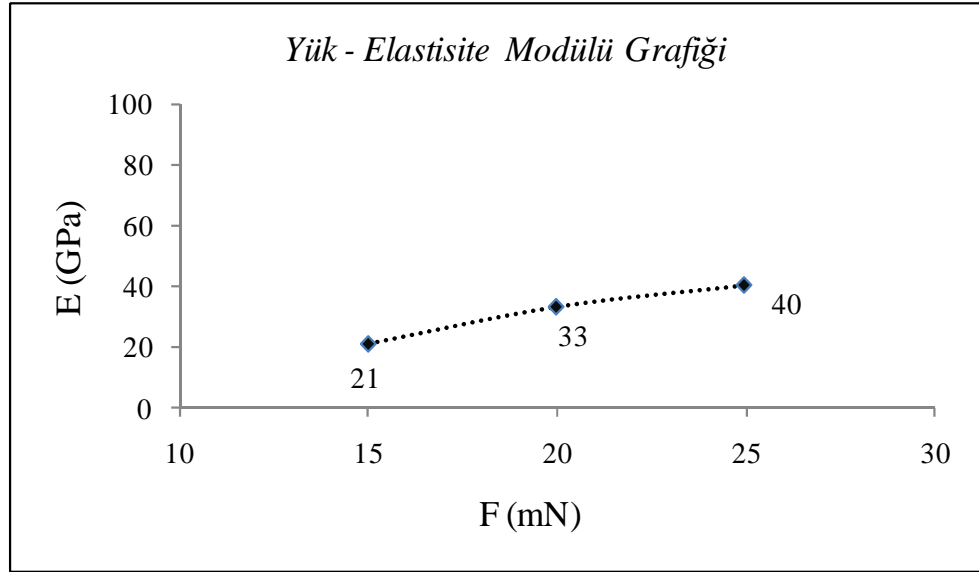
20 μm 'lik kaplama kalınlığına sahip Zn-Ni-Co alaşımlı kaplama kalınlığına sahip K4 numunesi için yapılan dinamik sertlik ölçümü sonucu çıkan değerler Tablo 8.22 ve Tablo 8.23'te verilmiştir. Yüke bağlı olarak değişen elastisite modülünde sürekli bir artış olup, sertlik değeri de önce bir artış gösterip sonrasında azalmıştır. Çünkü son uygulanan yükte meydana gelen derinlik miktarı ikinciye göre fazla bir artış göstermiştir. Kaplama tabakasına ait akma mukavemeti de 120 N/mm^2 - 163 N/mm^2 arasında değerler almıştır.

Tablo 8.22 Sekizinci numune (K4) yüzeyine uygulanan yük ve oluşan derinlik değerleri

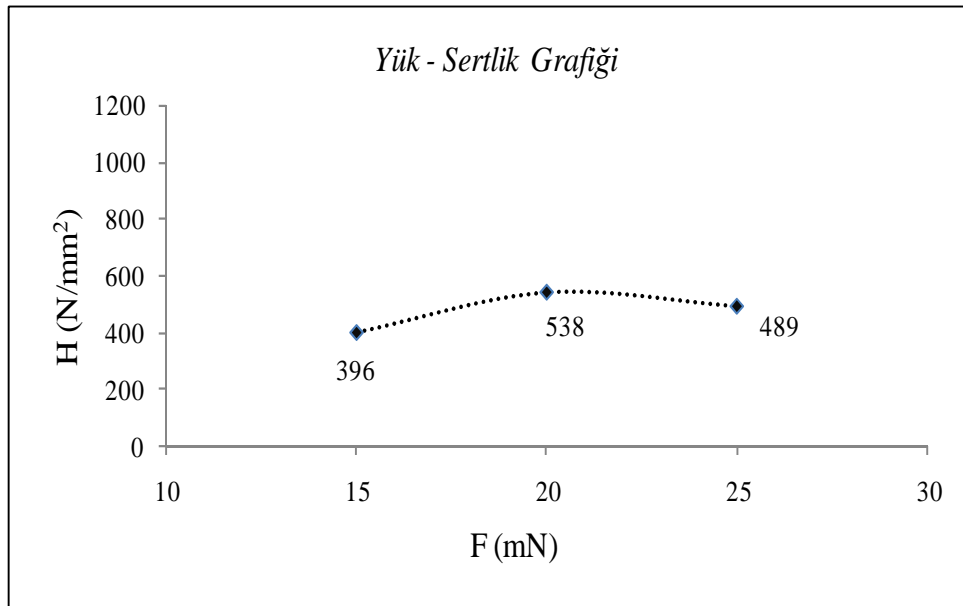
| F_8 (mN) | D_1 (μm) | D_2 (μm) | D_3 (μm) |
|------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 15 | 1.260 | 1.208 | 1.198 |
| 20 | 1.280 | 1.224 | 1.187 |
| 25 | 1.452 | 1.424 | 1.391 |

Tablo 8.23 Sekizinci numuneye (K4) ait sertlik, akma gerilmesi ve elastisite modülü değerleri

| F_8 (mN) | $A_{\text{max.}}$ (mm^2) | H (N/mm^2) | σ_y (N/mm^2) | E (GPa) |
|------------|-------------------------------------|-------------------------|--------------------------------|-----------|
| 15 | 3,79 | 396 | 120 | 21 |
| 20 | 3,72 | 538 | 163 | 33 |
| 25 | 5,11 | 489 | 148 | 40 |



(a)



(b)

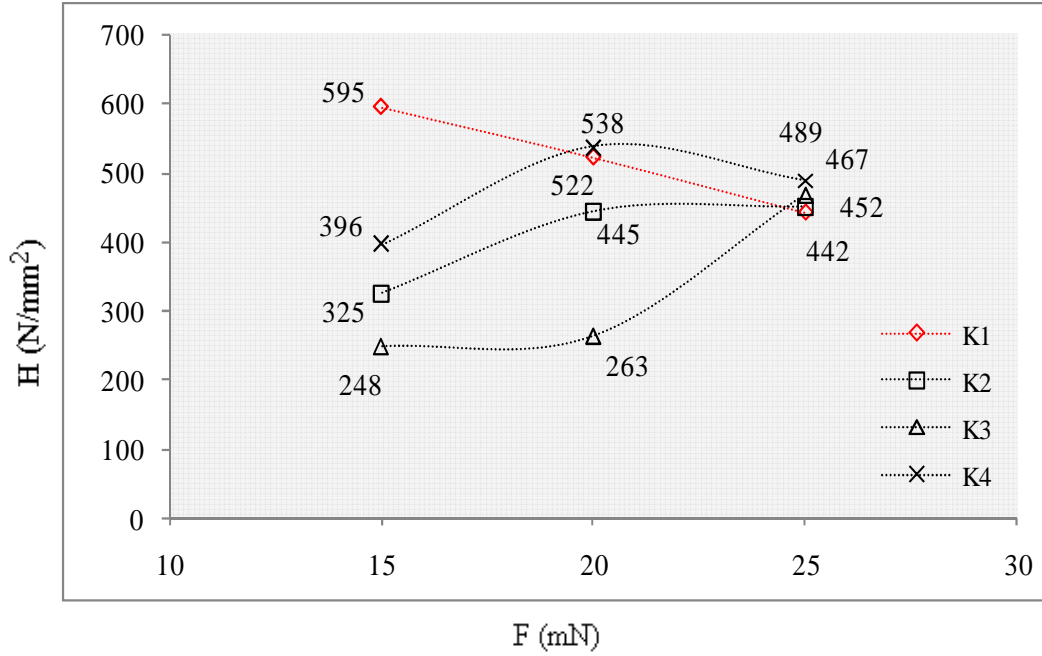
Şekil 8.20 Zn-Ni-Co alaşımlı kaplama yapılan K4 ($t=20\mu\text{m}$) numunesine ait;

(a) Kuvvet-elastisite modülü grafiği (b) Kuvvet-sertlik grafiği

K4 numunesine ait “yük – elastisite modülü” ve “yük – sertlik” grafikleri Şekil 8.20’de verilmiştir. Elastisite modülünde ki değişim eğrisi lineere yakın bir artış şekli göstermiştir.

8.3.3.1 Sonuç

Farklı kaplama kalınlığına bağlı olarak Zn-Ni-Co alaşımlı kaplama yapılmış numunelere ait dinamik sertlik ölçüm sonuçları Şekil 8.21’de verilmiştir. 15mN’luk yükte kaplama numunelerinin sertlik değerleri birbirinden farklı çıkmıştır. Fakat 25 mN’luk yükte numunelerin sertlik değerleri oldukça birbirine yakın olduğu belirlenmiştir. K1 numunesi incelendiğinde, sertlik lineer bir azalma göstermiştir. K2 ve K4 numuneleri birbirine paralel bir sertlik artışı sergilerken, K3 numunesinde ise diğerlerinden farklı olarak sertlik değerinde sürekli bir artış gözlenmiştir.

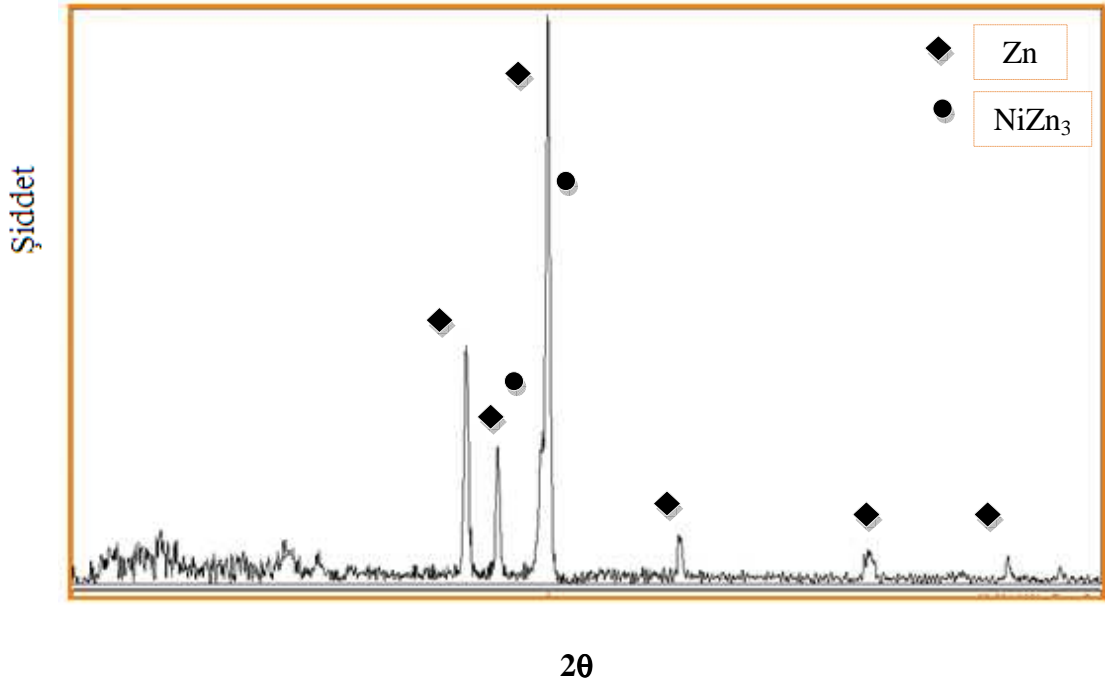


Şekil 8.21 Farklı kaplama kalınlığına sahip numunelerin (K1, K2, K3, K4) Yük-Sertlik Grafiği

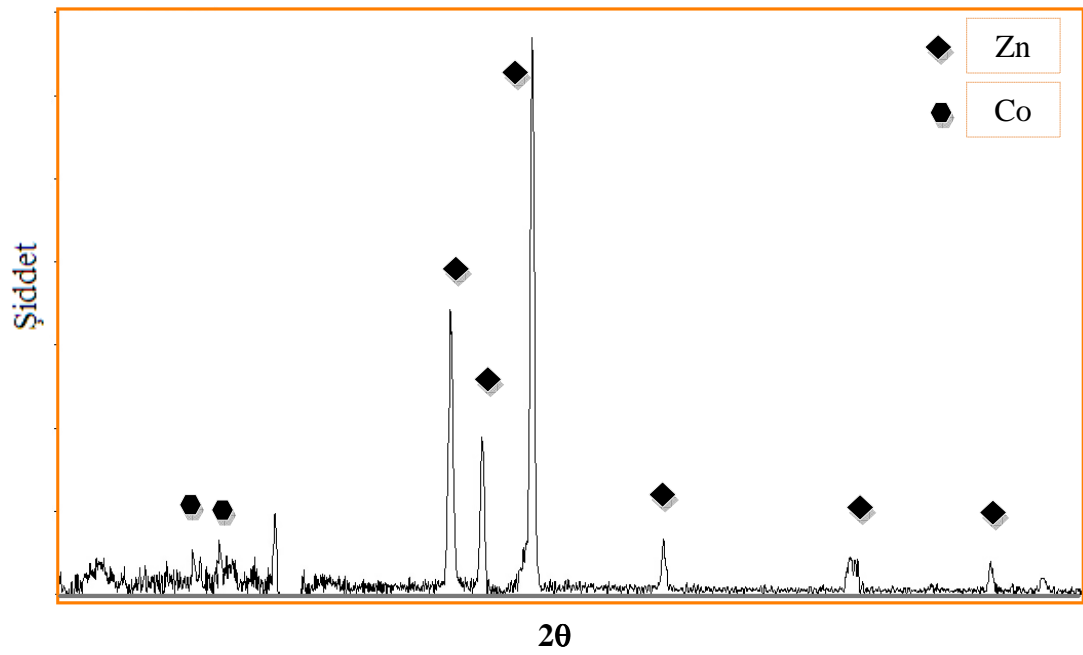
8.4 Zn-Ni-Co ve Diğer (Zn-Co, Zn-Ni ve Ni-Co) Alaşımli Kaplamalar

8.4.1 XRD Analizi

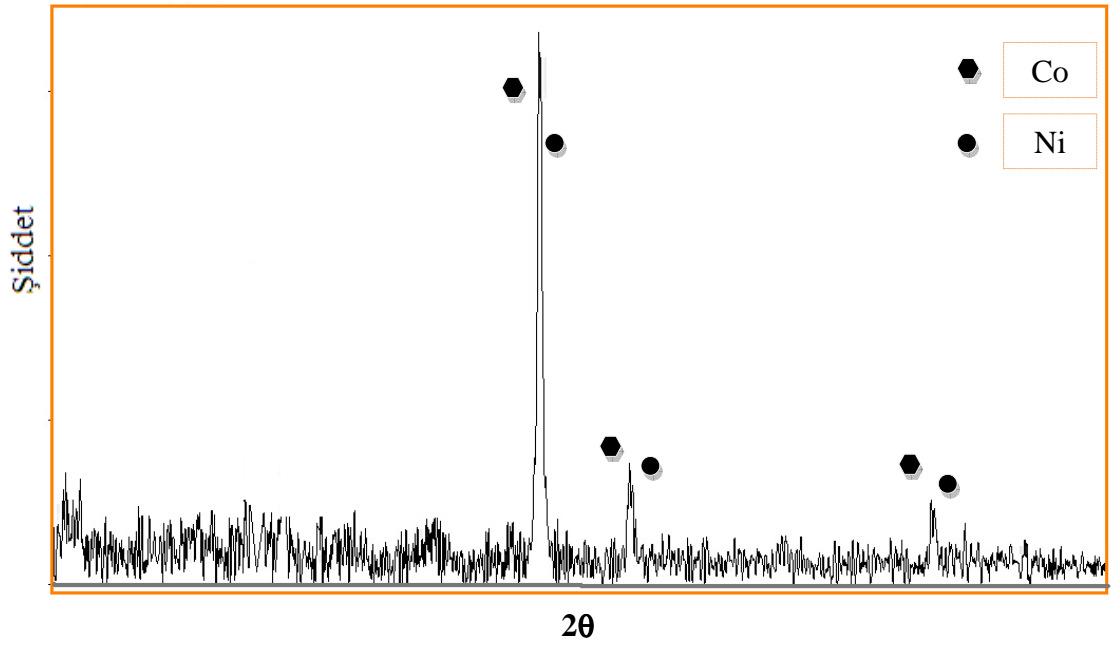
Farklı kaplama türlerine ait XRD analiz sonuçları;



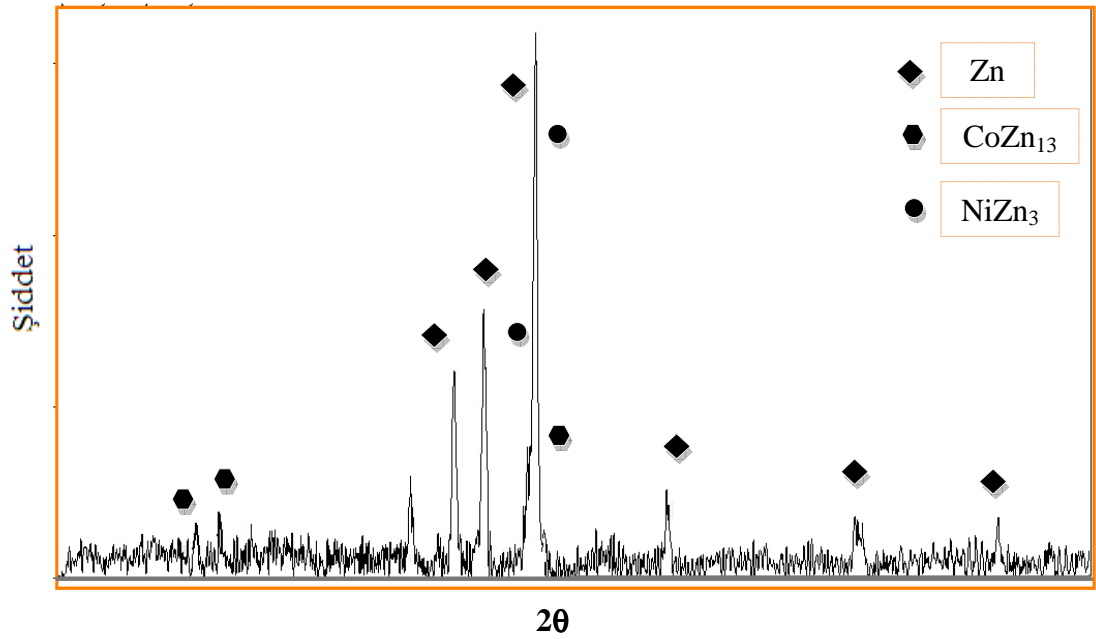
Şekil 8.22 Zn-Ni alaşımli kaplamanın XRD sonuçları



Şekil 8.23 Zn-Co alaşımli kaplamanın XRD sonuçları



Şekil 8.24 Ni-Co alaşımlı kaplamanın XRD sonuçları

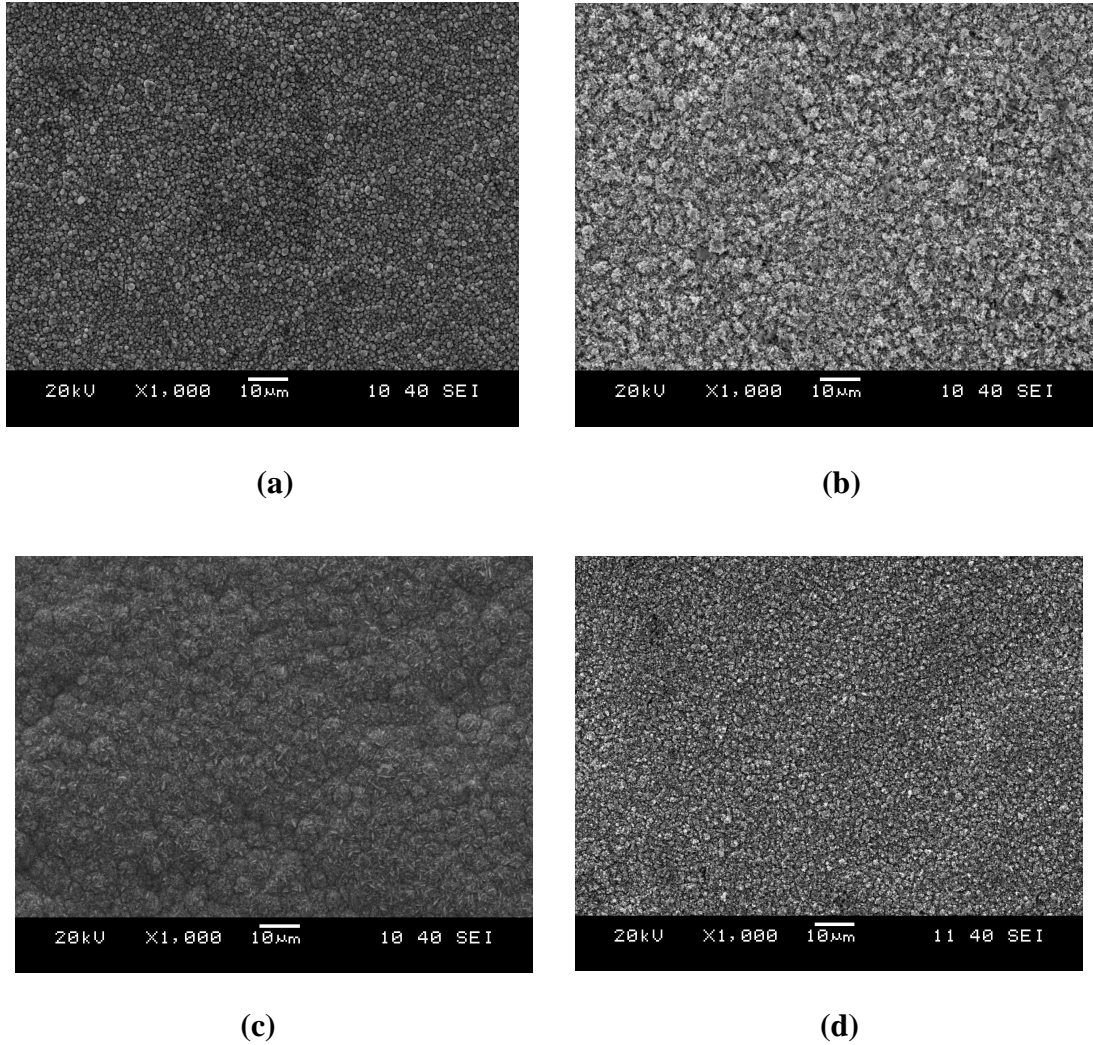


Şekil 8.25 Zn-Ni-Co alaşımlı kaplamanın XRD sonuçları

Dört farklı alaşımlı kaplama türüne ait (Zn-Ni, Zn-Co, Ni-Co ve Zn-Ni-Co) XRD sonuçları sırasıyla Şekil 8.21, Şekil 8.22, Şekil 8.23 ve Şekil 8.24'te verilmiştir.

Zn-Ni alaşımlı kaplama da Zn ve NiZn₃ kristal fazlarının olduğunu grlmştir (şekil 8.22). Zn-Co alaşımlı kaplama için yapılan analizde ise Zn ve Co fazları kaplama depositin de tespit edilmiştir (şekil 8.23). Bir diğer alaşımlı kaplama türü olan Ni-Co alaşımına ait kaplama filminde Ni ve Co olmak üzere iki ayrı faz yapısı oluşmuştur. Son kaplama trmz olan Zn-Ni-Co alaşımlı kaplama için yapılan XRD analiz sonucunu inceleyecek olursak Zn, NiZn₃ ve CoZn₁₃ fazları kaplama tabakasında tespit edilmiştir (şekil 8.25).

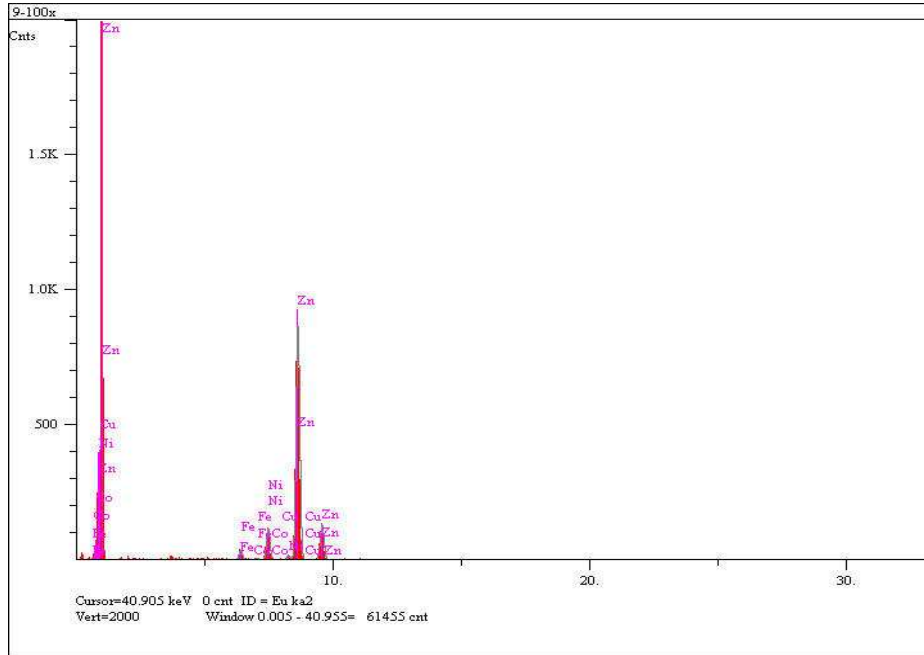
8.4.2 SEM ve EDS Analizi



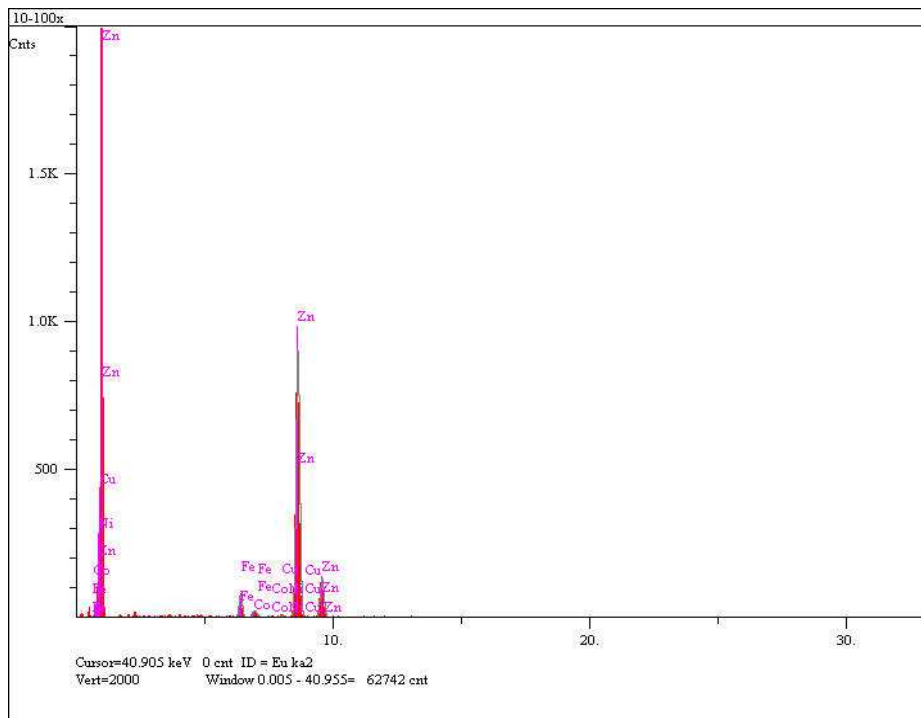
şekil 8.26 Farklı kaplama tiplerine ait SEM görüntüleri **(a)** Zn-Ni, **(b)** Zn-Co, **(c)** Ni-Co ve **(d)** Zn-Ni-Co

Farklı kaplama türlerine ait SEM görüntüleriyle ilgili olarak; Zn-Ni kaplama tabakasında makro düzeyde homojen olmayan yüzey görüntüsünün, mikro düzeyde bunu pek belli etmediği ve kum tanelerini andıran yüzey morfolojisine sahip olduğu görülmüştür (Şekil 8.26-a). Zn-Co alaşımlı kaplamanın (Şekil 8.26-b), yüzeyin de süngerimsi yapıyı andıran bir görüntü mevcuttur. Ni-Co alaşımlı kaplamanın mikro anlamda yüzey morfolojisi incelendiğinde ise, diğer kaplama türlerine göre daha kaba taneli (topaklanmış) bir yüzeye sahiptir (Şekil 8.26-c). Ni-Co alaşımlı kaplama makro görüntü anlamında da diğer kaplama türlerine göre iyi bir performans sergilememiştir. Zn-Ni-Co alaşımlı kaplama için SEM görüntüsü incelendiğinde (Şekil 8.26-d), diğer kaplama türlerine göre daha ince ve sıkı taneli, homojen bir yüzey görüntüsü hakimdir.

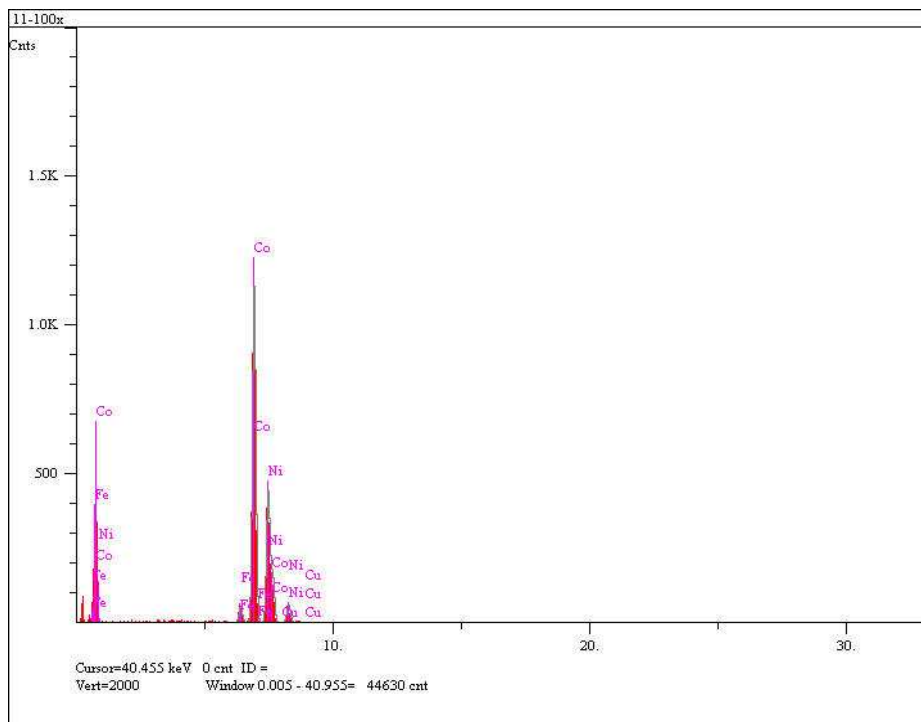
Tablo 8.24'te farklı kaplama türlerine ait Zn, Ni ve Co elementlerinin yüzeye depositlenme yüzdeleri verilmiştir. Zn-Ni ve Zn-Co alaşımlı kaplamalarda Zn miktarı % 95 civarındadır. Ni-Co alaşımlı kaplamada Co miktarı Ni miktarının iki katından fazladır. Zn-Ni alaşımlı kaplamada Ni yüzeye ~%5 civarında depositlenmiştir.



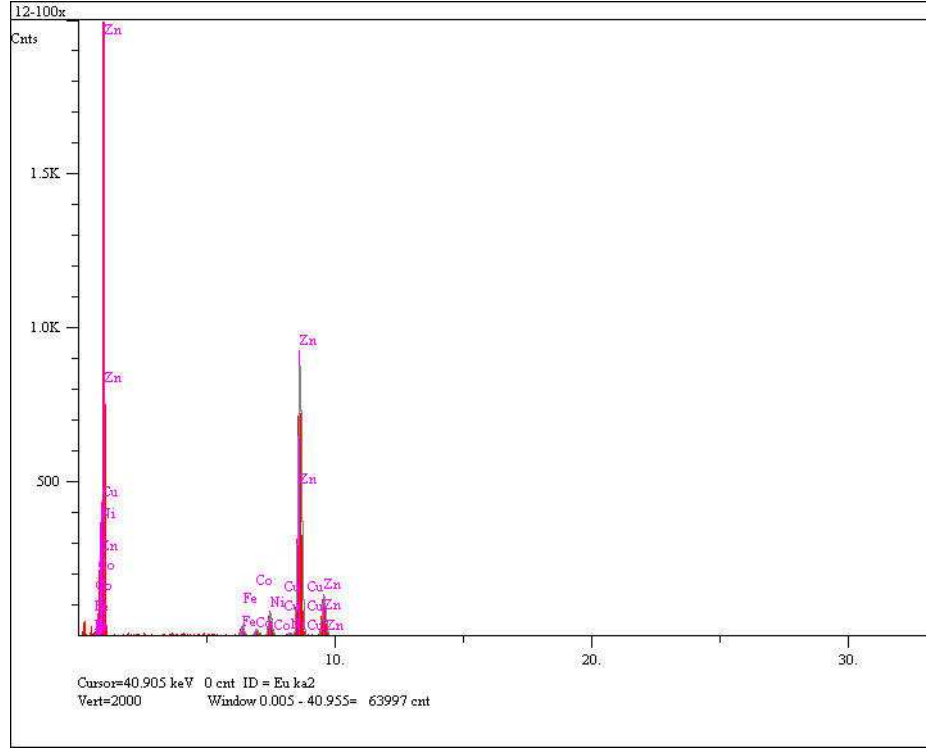
(a)



(b)



(c)



(d)

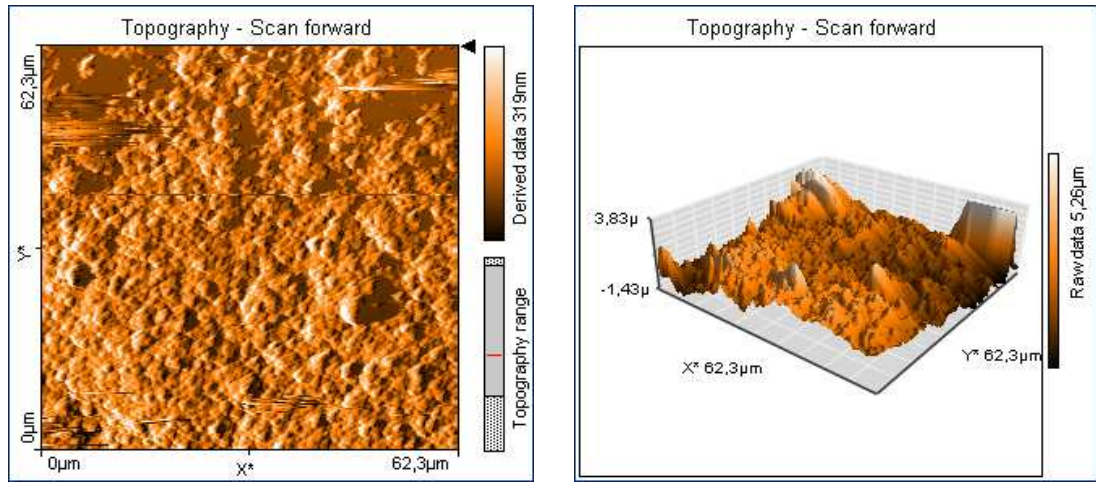
Şekil 8.27 Farklı kaplama türlerine ait numnelerin EDS analizi (a) Zn-Ni (b) Zn-Co (c) Ni-Co (d) Zn-Ni-Co

Tablo 8.24 Farklı kaplama türlerine ait EDS sonuçları

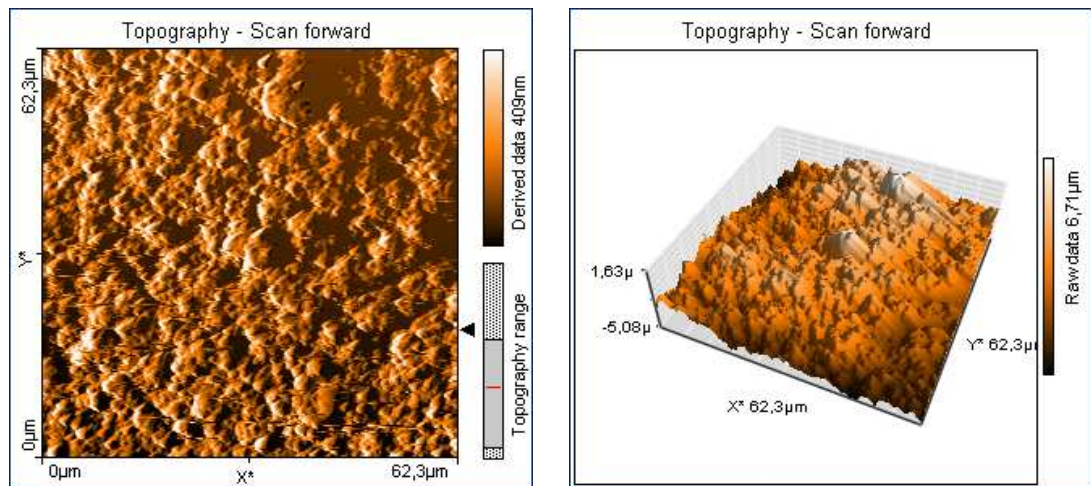
| Elementler | Zn-Ni | Zn-Co | Ni-Co | Zn-Ni-Co |
|--------------|----------|----------|----------|----------|
| Zn | % 94,086 | % 95,876 | - | % 95,303 |
| Ni | % 4,518 | - | % 30,826 | % 2,787 |
| Co | - | % 1,454 | % 66,702 | % 0,744 |
| Diğer | % 1,396 | % 2,670 | % 2,472 | % 1,166 |

8.4.3 AFM Görüntüleri

Farklı kaplama türlerine (Zn-Ni, Zn-Co, Ni-Co ve Zn-Ni-Co) ait AFM görüntüleri Şekil 8.28’de verilmiştir. Kaplamaların ait yüzey topografyasını yansıtan görüntüler $(62\ \mu\text{m})^2$ ’lik bir alanda yapılan tarama sonucunu yansıtmaktadır. Zn-Ni alaşımlı kaplamanın yüzey topografyasında bölgesel olarak $3,83\ \mu\text{m}$ boyutunda bazı yüksekliklerin olduğu görülmüştür (Şekil 8.28-a). Zn-Co alaşımlı kaplamaya ait yüzey topografyasını yansıtan AFM görüntüsünde girinti ve çıkıntılar daha homojen bir dağılım göstermiştir (Şekil 8.28-b).

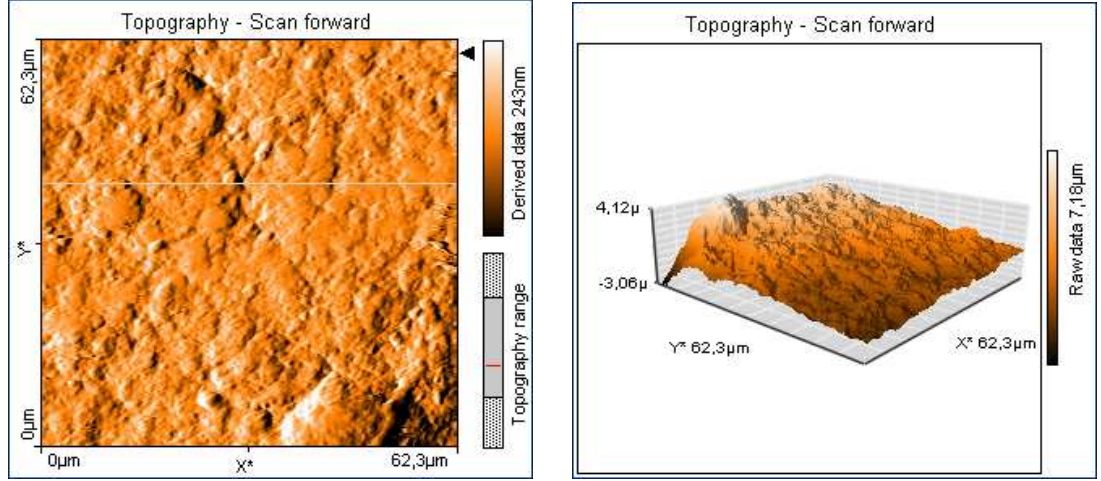


(a)

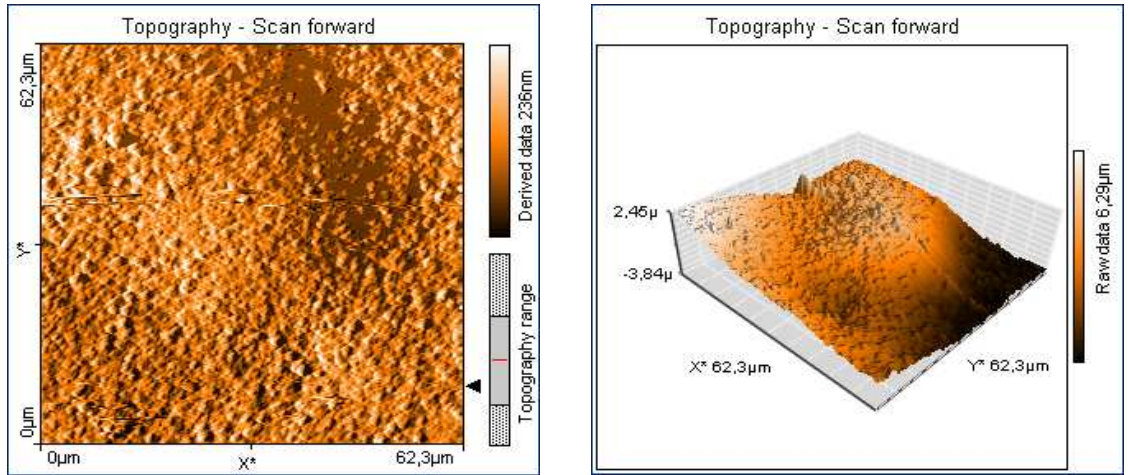


(b)

Ni-Co alaşımlı kaplama ile ilgili yüzey topografyası $4,12 \mu\text{m}$ 'lik yükseltilerin olduğu daha sıkı bir yüzey profili yansıtmıştır (Şekil 8.28-c). Zn-Ni-Co alaşımlı kaplama numunesinin yüzey topografyasına ilişkin olarak yüzeyde genel anlamda bir dalgalanmanın olduğu fark edilmektedir (Şekil 8.28-d). Fakat bu kaplamaya ait yüzey topografyasını bölgesel olarak kendi içinde incelediğimizde girinti ve çıkıntılar arasındaki fark diğer kaplama türlerine göre daha azdır.



(c)



(d)

Şekil 8.28 Farklı kaplama tiplerine ait AFM görüntüleri (a) Zn-Ni, (b) Zn-Co, (c) Ni-Co ve (d) Zn-Ni-Co

8.4.4 Dinamik Ultra Mikro Sertlik (DUH)

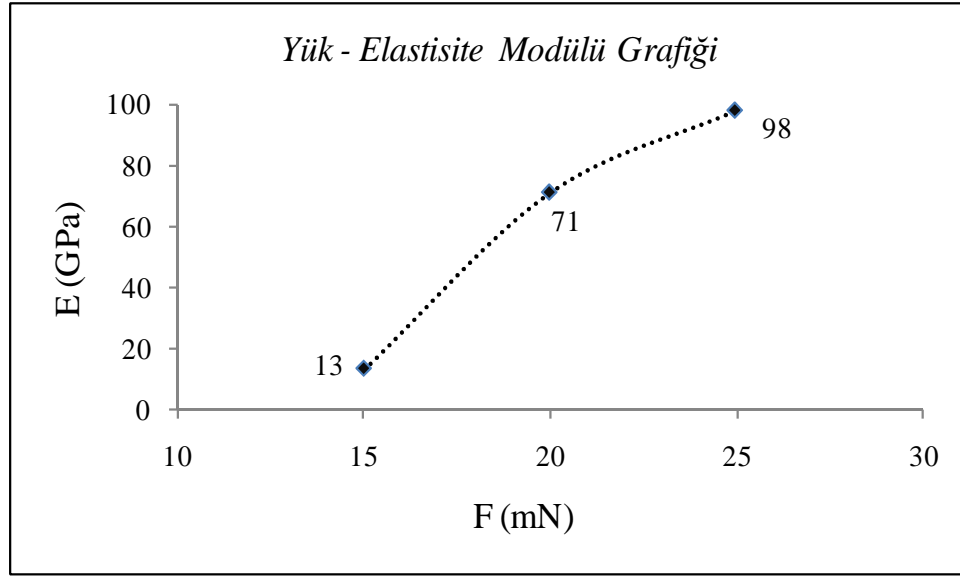
Zn-Ni alaşımlı kaplama numunesine ait dinamik mikro sertlik ölçüm sonuçları Tablo 8.25 ve Tablo 8.26'da verilmiştir. Zn-Ni alaşımlı kaplama ile ilgili olarak yapılan mikro sertlik testinde, farklı yüklerde değişik elastisite modülü, sertlik ve akma mukavemeti değerleriyle karşılaştırılmıştır. Artan yük miktarıyla, elastisite modülünde bir artış söz konusu olup, sertlik değerinde ki artış aynı paralellikte değildir. 15 mN'luk yükte batma derinliğinin yüksek oluşu sertlik değerinin oldukça küçük bir değer almasına neden olmuştur. Aynı şekilde elastisite modülü ve akma mukavemeti sonuçları da oldukça düşük çıkmıştır. 20 mN'luk yük miktarında sertlik maksimum değere ulaşırken, son uygulanan yükte bu değer azalma göstermiştir.

Tablo 8.25 Dokuzuncu numune (Zn-Ni) yüzeyine uygulanan yük ve oluşan derinlik değerleri

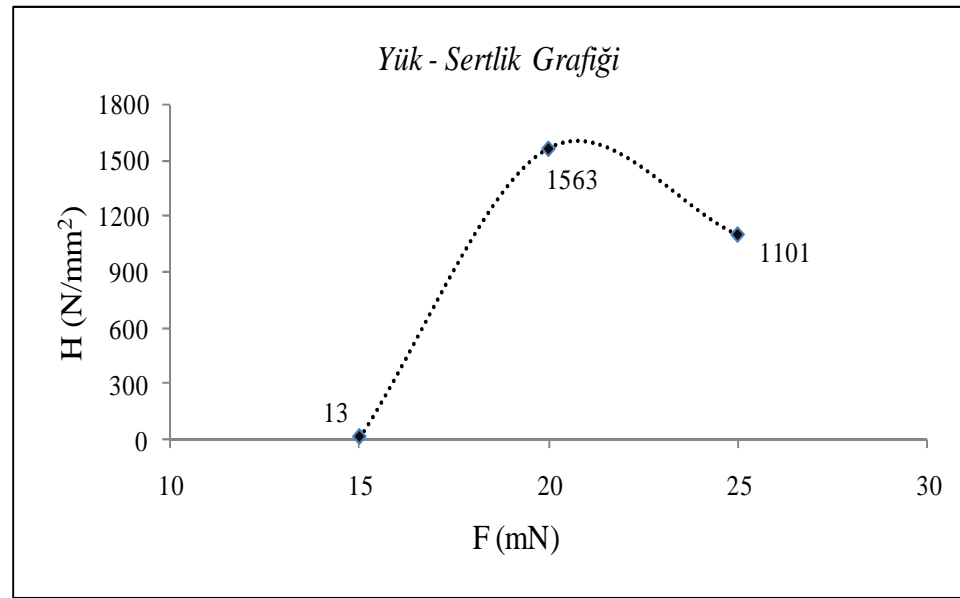
| F₉ (mN) | D₁ (μm) | D₂ (μm) | D₃ (μm) |
|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 15 | 4.248 | 3.508 | 4.129 |
| 20 | 0.752 | 0.701 | 0.696 |
| 25 | 0.968 | 0.902 | 0.927 |

Tablo 8.26 Dokuzuncu numuneye (Zn-Ni) ait sertlik, akma gerilmesi ve elastisite modülü değerleri

| F₉ (mN) | A_{max.} (mm ²) | H (N/mm ²) | σ_y (N/mm ²) | E (GPa) |
|---------------------------|--|-------------------------------|---|----------------|
| 15 | 4,5 x 10 ⁻⁴ | 33 | 10 | 13 |
| 20 | 1,28 x 10 ⁻⁵ | 1563 | 474 | 71 |
| 25 | 2,27 x 10 ⁻⁵ | 1101 | 334 | 98 |



(a)



(b)

Şekil 8.29 Zn- Co alaşımlı kaplama yapılan numuneye ait; **(a)** Kuvvet-elastisite modülü grafiği ve **(b)** Kuvvet-sertlik grafiği

Zn-Ni alaşımlı kaplama numunesine ait “yük-elastisite modülü” ve “yük-sertlik” grafikleri Şekil 8.29’ da verilmiştir. Elastisite modülünde ki değişim lineere yakın bir eğri verirken, sertlikte oluşan eğri öncesinde bir artış, son uygulanan yükte ise bir azalma göstermiştir.

Zn-Co alaşımlı kaplama ile ilgili olarak elastisite modülü ve sertlik değerlerinin farklı yüklerde değişimlerini görmekteyiz (Tablo 8.27 ve Tablo 8.28). Elastisite modülü, uygulanan son iki yükte aynı değeri göstermiştir. Bunun yanı sıra Zn-Co alaşımlı kaplamaya ait sertlik değerleri de yine aynı şekilde yakın değerler sergilemiştir. Bu kaplama tabakasına ait akma mukavemeti değeri incelendiğinde; 15 mN ve 25 mN’da çıkan sonuçlar aynıdır. 20 mN’da daki değer ise diğer akma mukavemeti değerlerine oldukça yakın bir değer göstermiştir.

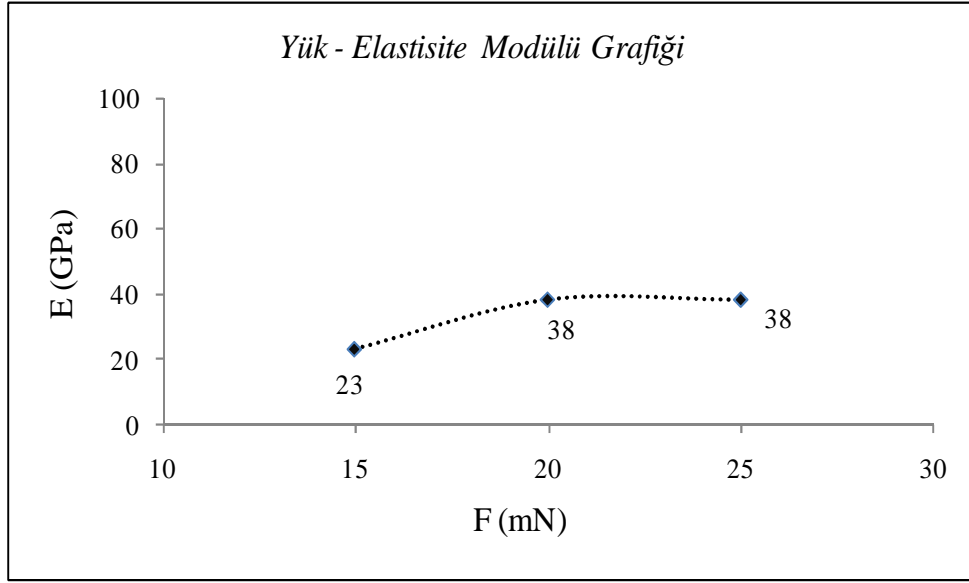
Tablo 8.27 Onuncu numune (**Zn-Co**) yüzeyine uygulanan yük ve oluşan derinlik değerleri

| F₁₀ (mN) | D₁ (μm) | D₂ (μm) | D₃ (μm) |
|----------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 15 | 1.343 | 1.286 | 1.289 |
| 20 | 1.565 | 1.531 | 1.509 |
| 25 | 1.717 | 1.645 | 1.659 |

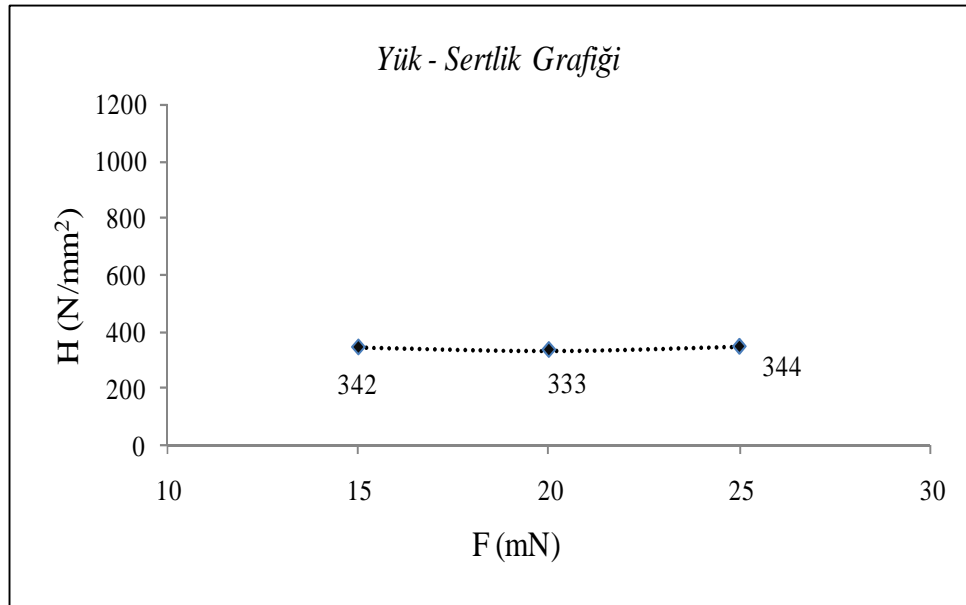
Tablo 8.28 Onuncu numuneye (**Zn-Co**) ait sertlik, akma gerilmesi ve elastisite modülü değerleri

| F₁₀ (mN) | A_{max.} (mm ²) | H (N/mm ²) | σ_y (N/mm ²) | E (GPa) |
|----------------------------|--|-------------------------------|---|----------------|
| 15 | 4,39 x 10 ⁻⁵ | 342 | 104 | 23 |
| 20 | 6,0 x 10 ⁻⁵ | 333 | 101 | 38 |
| 25 | 7,27 x 10 ⁻⁵ | 344 | 104 | 38 |

Zn-Co alaşımlı kaplama tabakasında diğer kaplama türlerine göre sertlik açısından daha homojen bir yapı hakimdir.



(a)



(b)

Şekil 8.30 Zn-Co alaşımlı kaplama yapılan numuneye ait; (a) Kuvvet-elastisite modülü grafiği ve (b) Kuvvet-sertlik grafiği

Zn-Co alaşımlı kaplama numunesine ait “yük-elastisite modülü” ve “yük-sertlik” grafikleri Şekil 8.30’ da verilmiştir. Üç farklı yükte ölçülen sertlik değerindeki yakın değerler yatay bir eğrinin çıkmasına neden olmuştur (Şekil 8.30 b).

Ni-Co alaşımlı kaplama ile ilgili olarak yapılan mikro sertlik testi sonuçları ve hesaplamalardan çıkan sertlik-elastisite modülü değerleri diğer alaşımlı kaplama türlerine göre oldukça farklı ve dikkat çekmektedir. Uygulanan farklı yüklerde oluşan batma derinliğine ait mesafeler diğer kaplama türlerine göre oldukça azdır. 20 mN'luk yükte kaplama tabakasına ait elastisite modülü değeri 189 GPa'dır. Aynı yükte sertlik değeri, ~20 GPa gibi oldukça yüksek bir değer çıkmıştır. Farklı yüklerde farklı sertlik sonuçları gösteren bu kaplama türü, sertlik değeri açısından diğer kaplama türlerine nazaran oldukça yüksek performans göstermiştir.

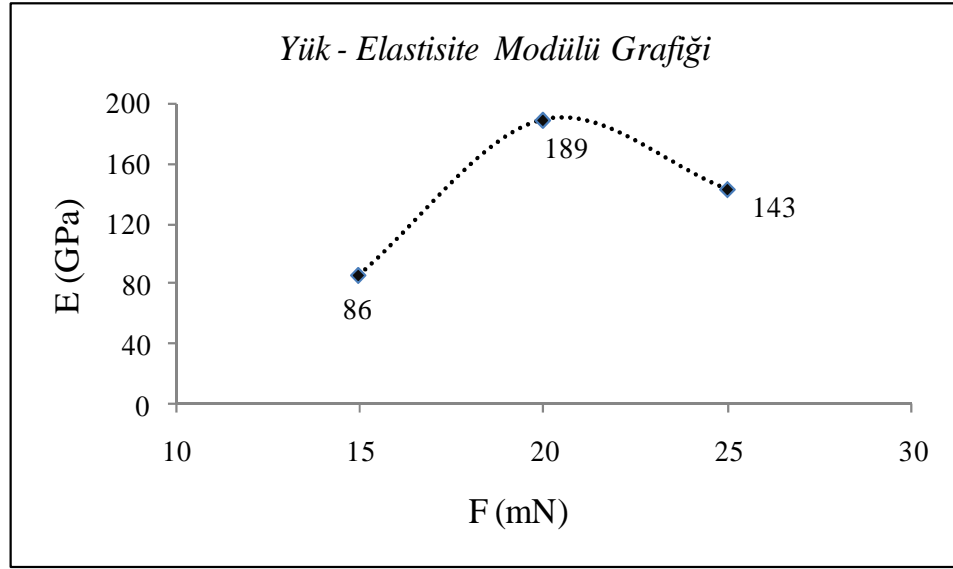
Tablo 8.29 On birinci numune (Ni-Co) yüzeyine uygulanan yük ve oluşan derinlik değerleri

| F_{11} (mN) | D_1 (μm) | D_2 (μm) | D_3 (μm) |
|---------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 15 | 0.350 | 0.266 | 0.237 |
| 20 | 0.281 | 0.184 | 0.197 |
| 25 | 0.437 | 0.344 | 0.354 |

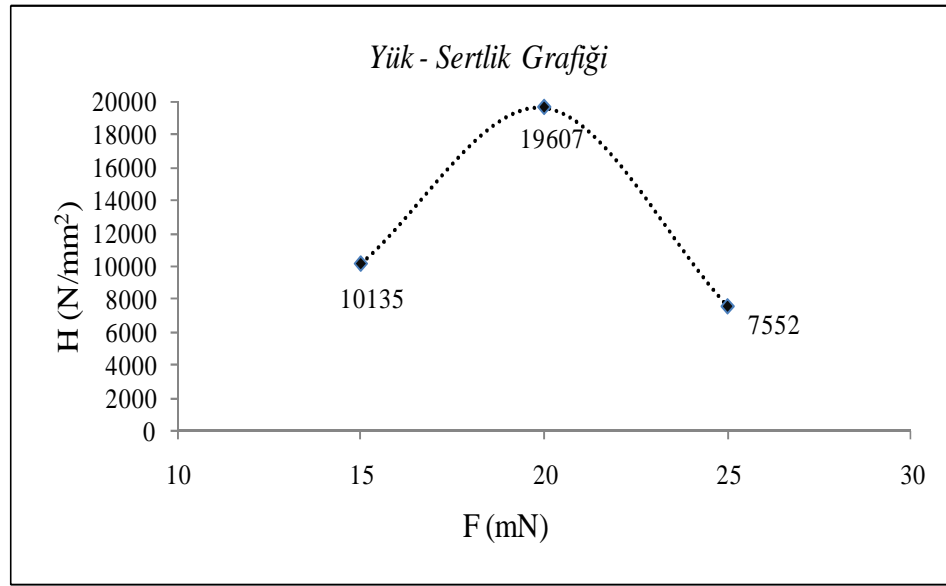
Tablo 8.30 On birinci numuneye (Ni-Co) ait sertlik, akma gerilmesi ve elastisite modülü değerleri

| F_{11} (mN) | $A_{\text{max.}}$ (mm^2) | H (N/mm^2) | σ_y (N/mm^2) | E (GPa) |
|---------------|-------------------------------------|--------------------------------|---------------------------------------|-----------|
| 15 | $1,48 \times 10^{-6}$ | 10135 | 3071 | 86 |
| 20 | $1,02 \times 10^{-6}$ | 19607 | 5942 | 189 |
| 25 | $3,31 \times 10^{-6}$ | 7552 | 2288 | 143 |

Ni-Co alaşımlı kaplama filminde görülen en düşük sertlik değeri $7552 \text{ N}/\text{mm}^2$ 'dir. Aynı şekilde kaplama filmine ait en yüksek akma mukavemeti değeride $5952 \text{ N}/\text{mm}^2$ ile 20mN'luk yük uygulamasında hesaplanmıştır.



(a)



(b)

Şekil 8.31 Ni-Co alaşımlı kaplama yapılan numuneye ait; (a) Kuvvet-elastisite modülü grafiği ve (b) Kuvvet-sertlik grafiği

Ni-Co alaşımlı kaplama numunesine ait “yük-elastisite modülü” ve “yük-sertlik” grafikleri Şekil 8.31’ da verilmiştir. Yüke bağlı olarak değişen sertlik ve elastisite modülü değerlerine ait eğriler şekil olarak birbirine benzemektedir.

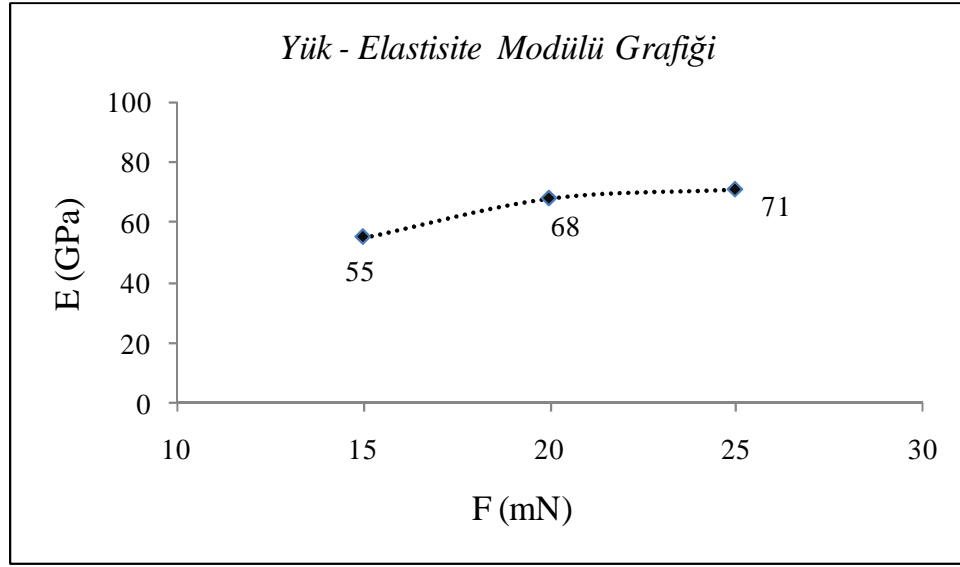
Temel çalışma konumuz olan Zn-Ni-Co alaşımlı kaplama numunesine uygulanan dinamik serlik testi sonuçlarına baktığımızda (Tablo 8.31 ve Tablo 8.32), elastisite modülü değeri uygulanan farklı yüklerde 55 GPa'dan 71 GPa'a bir artış göstermiştir. Zn-Ni-Co alaşımlı kaplamaya ait en yüksek sertlik değeri 1510 N/mm^2 olup, artan yük miktarına bağlı olarak bu değer önce bir azalma, sonrasında da artış eğilimi göstermiştir. Fakat kaplama tabakasına ait sertlik 1000 N/mm^2 'nin altına düşmemiştir. Aynı zaman da akma mukavemeti değeri de 380 N/mm^2 ile 458 N/mm^2 arasında değişmiştir.

Tablo 8.31 On ikinci numune (Zn-Ni-Co) yüzeyine uygulanan yük ve oluşan derinlik değerleri

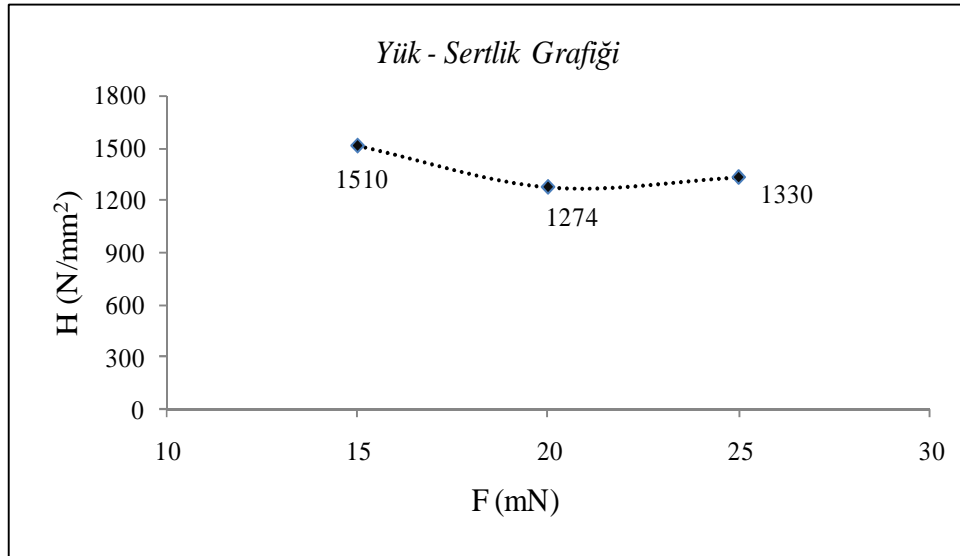
| F_{12} (mN) | D_1 (μm) | D_2 (μm) | D_3 (μm) |
|---------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 15 | 0.674 | 0.609 | 0.613 |
| 20 | 0.830 | 0.786 | 0.771 |
| 25 | 0.904 | 0.840 | 0.845 |

Tablo 8.32 On ikinci numuneye (Zn-Ni-Co) ait sertlik, akma gerilmesi ve elastisite modülü değerleri

| F_{12} (mN) | $A_{\text{max.}}$ (mm^2) | H (N/mm^2) | σ_y (N/mm^2) | E (GPa) |
|---------------|-------------------------------------|-------------------------|--------------------------------|-----------|
| 15 | $9,93 \times 10^{-6}$ | 1510 | 458 | 55 |
| 20 | $1,57 \times 10^{-5}$ | 1274 | 386 | 68 |
| 25 | 1,88 | 1330 | 403 | 71 |



(a)



(b)

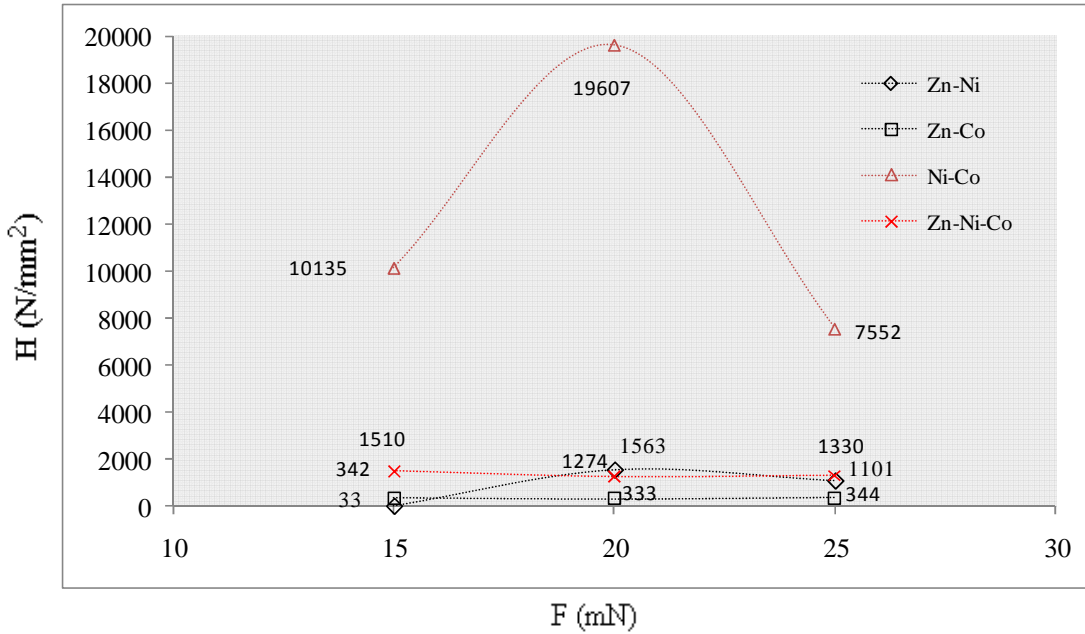
Şekil 8.32 Zn-Ni-Co alaşımlı kaplama numunesine ait; (a) Kuvvet-elastisite modülü grafiği ve (b) Kuvvet-sertlik grafiği

Zn-Ni-Co alaşımlı kaplama numunesine ait “yük-elastisite modülü” ve “yük-sertlik” grafikleri Şekil 8.32’ de verilmiştir. Elastisite modülü eğrisinde sürekli bir artış varken, sertlik değerinde ki eğri önce bir azalma, sonrasında artış şeklinde bir yol izlemiştir.

8.4.4.1 Sonuç

Dört farklı kaplama türüne ait yük- sertlik grafiği Şekil 8.33'te verilmiştir. Grafikte ilk göze çarpan ve diğerleri ile aynı bölge içinde bulunmayan eğri, diğer kaplamalara göre oldukça yüksek bir sertlik değerine sahip olan Ni-Co alaşımlı kaplamaya aittir. Bu alaşımlı kaplamada ölçülen en yüksek sertlik değeri 20 mN'luk yükte ölçülen 19607 N/mm^2 'dir. Aynı zamanda Ni-Co alaşımlı kaplama tabakasına ait ölçülen en düşük sertlik değeri, diğer kaplama türlerinde ki en yüksek sertlik değerinden dahi oldukça büyüktür.

Diğer kaplama türlerinden 15 mN'luk yükte ölçülen sertlik değerine ilişkin en yüksek sonuca Zn-Ni-Co alaşımlı kaplama sahiptir. 25 mN'luk yük parametresinde ise bulunan en yüksek sertlik bu üç kaplama türü arasından yine Zn-Ni-Co alaşımlı kaplamada tespit edilmiştir.



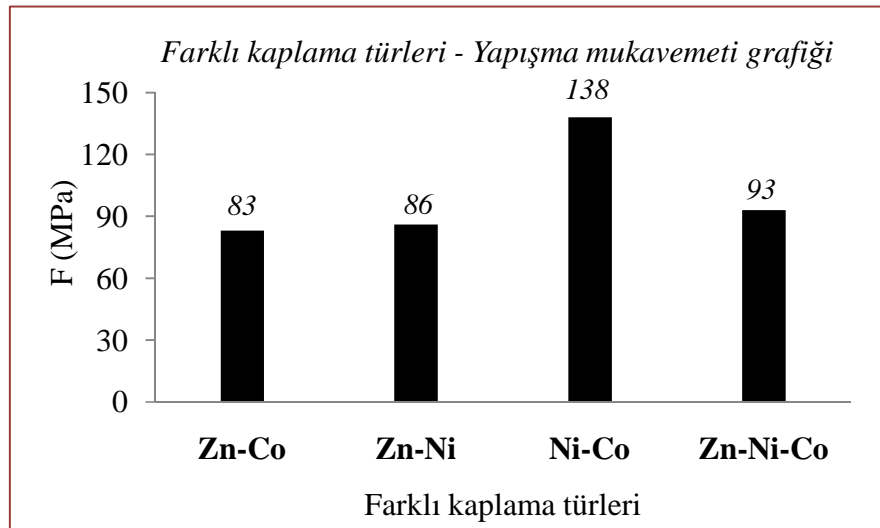
Şekil 8.33 Farklı kaplama türlerine ait numunelerin (Zn-Ni, Zn-Co, Ni-Co ve Zn-Ni-Co) Yük-Sertlik Grafiği

8.4.5 Çizik Testi (Scratch)

Zn-Ni, Zn-Co, Ni-Co ve Zn-Ni-Co alaşımlı kaplama numunelerine uygulanan çizik testi sonucu bulunan yapışma mukavemeti değerleri Tablo 8.33 verilmiş olup, birbirleri arasında ki karşılaştırma Şekil 8.34’de özetlenmiştir.

Tablo 8.33 Farklı tipte ki kaplamalara ait çizik testi sonuçları

| | Zn-Ni | Zn-Co | Ni-Co | Zn-Ni-Co |
|----------------|--------------------------|-----------------------|--------------------------|--------------------------|
| Wc (N) | 28,32 x 10 ⁻³ | 30 x 10 ⁻³ | 46,90 x 10 ⁻³ | 32,54 x 10 ⁻³ |
| F (MPa) | 83 | 86 | 138 | 93 |



Şekil 8.34 Farklı akım yoğunluğuna bağlı Zn-Ni-Co alaşımlı kaplamanın; “akım yoğunluğu- yapışma mukavemeti” grafiği

Zn-Ni-Co alaşımlı kaplamanın yapışma mukavemeti Zn-Ni ve Zn-Co alaşımlı kaplamaya göre daha iyidir. Dört farklı kaplama türünden en fazla yapışma mukavemeti ise Ni-Co alaşımlı kaplamaya aittir.

BÖLÜM DOKUZ

SONUÇLAR VE YORUMLAR

Zn-Ni-Co alaşımlı kaplamanın çelik bir malzeme yüzeyine elektrolitik yöntemle kaplanması ve oluşan kaplama tabakasının mekanik ve yapısal özelliklerinin incelenmesinden önce yapılan ilk işlem, sağlıklı bir çalışma yürütmek ve verimli sonuçlar elde etmek adına optimum çalışma parametrelerinin saptanması olmuştur. Kaplama tabakasının mekanik, yapı ve korozyon özellikleri üzerinde etkili olan faktörlerden; pH, akım yoğunluğu ve sıcaklık değerlerinin tespiti noktasında, her bir parametre için dört farklı değerde numunelere kaplama işlemi uygulanmıştır.

* Optimum çalışma parametrelerinin belirlenmesine ilişkin sonuçlar;

Zn-Ni-Co alaşımlı kaplama elektroliti asidik bir solüsyon olup, dört farklı pH değerinde yapılan çalışmalarda; artan pH oranıyla birlikte Co ve Ni miktarlarında artış gözlemlenmiştir. Fakat bunun yanı sıra yüzey görüntüsünde makro ve mikro boyutta bozulmalar görülmüştür. Düşük pH değerlerinde ise parlak, beyazımsı bir yüzey görüntüsüne karşı, Ni ve Co miktarı yüzeye oldukça az depositlenme göstermiştir.

Zn-Ni-Co alaşımlı kaplama parametrelerinden bir diğeri olan akım yoğunluğu ile ilgili olarak yapılan deneylerde, yüksek akım yoğunluğunda kaplama tabakasında Co ve Ni miktarları artmıştır. Aynı zamanda numune parçaların uç kısımlarında farklı yüzey görüntüleri oluşmuştur. Düşük akım yoğunluğunda ise, pH faktöründe olduğu gibi Ni ve Co'ın depositlenme yüzdelerinde düşüşler gözlemlenmiştir.

Son çalışma parametresi olan sıcaklık faktörüne ilişkin olarak ta yapılan deneyler de özellikle 25°C'den sonra yüzey morfolojisinde pek bir değişiklik olmayıp, Zn ve Ni miktarlarına göre Co metali kaplama kompozisyonunda belirgin bir artış göstermiştir. Bunun sonucu olarak ta oda sıcaklığına yakın ve kontrol altında tutulması daha kolay olan bir sıcaklık değeri seçilmiştir.

Optimum çalışma parametrelerinin belirlenmesine yönelik yapılan çalışmalar neticesinde Zn-Ni-Co alaşımlı kaplama ile ilgili gerekli çalışma parametreleri ($I=3A/dm^2$, $T= 255-30^{\circ}C$, $pH=3-3,2$) belirlenmiştir. Yüksek pH ve akım yoğunluğunun kaplama tabakasında Ni ve Co metal miktarını artırmasının yanı sıra, yüzey görüntüsünü bozduğu ve pürüzlü bir kaplamanın oluştuğu unutulmamalıdır.

Zn-Ni-Co alaşımlı kaplamanın mekanik ve yapısal özelliklerinin analizi içinde, farklı akım yoğunluğu ve kaplama kalınlığı uygulamalarının ne gibi etkilere yol açtığı araştırılmıştır.

*** Farklı akım yoğunluğunda yapılan Zn-Ni-Co alaşımlı kaplamalara ait sonuçlar;**

Karakterizasyon çalışmalarından biri olan, XRD analizi sonucu, dört ayrı numunede de benzer Zn ve $NiZn_3$ faz yapılarının oluştuğu tespit edilmiştir. Yapılan EDS analiziyle numunelere ait kaplama filminde % 0,5-1 civarında Co metali görülmüştür.

SEM/EDS analizlerinde, artan akım yoğunluğu ile Ni ve Co miktarlarının yüzdelere meydana gelen artışın yanı sıra, yüzeyde bir takım homojensizlikler görülmüştür. Akım yoğunluğunda ki artış tane boyutunun artışına neden olmuş ve yüzeyde bölgesel olarak iri taneler görülmüştür.

AFM görüntülerine bakıldığında, kaplama numuneleri genel anlamda benzer yüzey topografyasına sahip olsalar da, birbiri içinde bölgesel olarak farklılık gösteren yerler mevcuttur.

Dinamik mikro sertlik (DUH) testinde, uygulanan farklı yüklere göre kaplama tabakasında kendi içinde değişken sertlik değerleri çıkmıştır. En yüksek ($1506 N/mm^2$) ve en düşük ($395 N/mm^2$) sertlik değeri; birim alana (mm^2), 3 amperlik akım uygulanan numuneye aittir (A_2). Bunun yanı sıra $4 A/dm^2$ 'lik akım

yoğunluğuna maruz bırakılan numunede ise artan yük miktarıyla birlikte lineer olarak sertlik değerinde de bir artış görülmüştür (A3).

Kaplama tabakasıyla ilgili bir diğer mekanik test yöntemi olan “çizik testi” (Scratch) sonuçlarına bakıldığında, artan akım yoğunluğuyla birlikte, yapışma mukavemeti de düşmüştür.

*** Farklı kaplama kalınlığına sahip Zn-Ni-Co alaşımlı kaplamalara ait sonuçlar;**

Zn-Ni-Co alaşımlı kaplama ile ilgili olarak yapılan bir diğer deneyde, farklı kaplama kalınlığına sahip numunelere ait özelliklerin incelenmesi olmuştur. Günümüzde elektrolitik kaplama alanında tercih edilen kaplama kalınlıklarına yakın değerler seçilerekten deneyler yapılmıştır.

Yapılan XRD analizi sonucu, kaplama tabakalarında Zn ve NiZn₃ faz yapıları görülmüştür. Co fazı da yapılan EDS analizinde mevcuttur.

Karakterizasyon çalışmalarının bir diğeri olan, SEM/EDS analizlerinde, farklı kaplama kalınlığına sahip tabakalarda birbirine yakın oranlarda Zn, Ni, ve Co metali ölçülmüş olup, yüzey morfolojisi açısından da birbirlerine benzer yapılar oluşmuştur. Bu parametrede yapılan numunelerde Ni miktarının ~%0,5 gibi düşük oranda çıkmış olması, banyonun pH değerinin normal çalışma değerinden daha düşük olma ihtimalini ön plana çıkarmaktadır.

Dinamik mikro sertlik ölçümünde (DUH), en yüksek ve en düşük kaplama sertliği değerleri 5µm kalınlığa sahip kaplama numunesinde ölçülmüştür (K1). Uygulanan son yük olan 25 mN’da bütün kaplama numunelerine ait sertlik değeri ~ 500 N/mm² civarındadır. En düşük kaplama kalınlığına sahip numunede yapılan ölçümlerde sertlik değeri lineer bir azalma göstermiştir.

*** Farklı kaplama türlerine ait çalışma sonuçları;**

Çalışmamızın son bölümünde; Zn-Ni-Co alaşımlı kaplama özelliklerine, daha iyi bir bakış açısı kazandırmak adına, diğer alaşımlı kaplama türleri ile, karşılaştırılmıştır. Zn-Ni, Zn-Co ve Ni-Co alaşımlı kaplamalar aynı çalışma parametrelerinde gerçekleştirilmiştir.

XRD analizinde; Zn-Ni alaşımlı kaplamada Zn ve NiZn₃ faz yapıları, Zn-Co alaşımlı kaplamada Zn ve Co fazları, Ni-Co alaşımlı kaplamada Ni ve Co fazları ve son olarak ta Zn-Ni-Co alaşımlı kaplamada Zn, NiZn₃ ve çok küçük şiddette pik veren CoZn₁₃ fazı tespit edilmiştir.

SEM/EDS analizinde ise, farklı yüzey morfolojilerine sahip kaplama yüzeyleri ile karşılaşılmıştır. Zn-Ni alaşımlı kaplama koyu renkli ve çokta homojen olmayan bir yüzey görüntüsüne sahiptir. Zn-Co alaşımlı kaplamada ise süngerimsi yapıyı andıran bir yüzey yapısı olmakla birlikte, Ni-Co alaşımlı kaplamada ise sık yapılı ancak topaklanmış tane yapıları görülmüştür. Zn-Ni-Co alaşımlı kaplama yapısı diğer kaplama türlerine göre daha ince taneli ve homojen bir yapı sergilemiştir. Element analizinde Ni-Co alaşımlı kaplamada Co metali yüzeye Ni metale oranla daha çok kaplanmış olup, diğer kaplama türlerinde ise Zn metalinin yüzeydeki depositlenme oranı %90'ı geçmektedir.

Mekanik testlerden biri olan dinamik mikro sertlik ölçümünde (DUH), en yüksek performansı Ni-Co alaşımlı kaplama sergilemiştir. Artan yük miktarına bağlı olarak değişen sertliklerde Zn-Ni-Co alaşımlı kaplama türü, diğer Zn-Ni ve Zn-Co alaşımlı kaplamalara göre daha homojen ve yüksek bir sertlik değerine sahiptir.

Yapılan çizik testinde (Scratch), en iyi yapışma mukavemeti gösteren tür Ni-Co alaşımlı kaplama olmuştur. Zn-Ni-Co alaşımlı kaplama ise, Zn-Ni ve Zn-Co alaşımlı kaplamalara göre daha iyi yapışma mukavemeti göstermiştir.

* Gelecek Planı

Tez konumuz olan Zn-Ni-Co alaşımlı kaplama uygulaması sonuçları göstermiştir ki, kaplama tabakasına ait mekanik ve yüzey özellikleri yüzeyde homojen dağılım gösterme anlamında Zn-Ni ve Zn-Co alaşımlı kaplama türlerine göre daha iyidir. Özellikle otomotiv yedek parçası olmak üzere, bir çok değişik alanda tercih edilen Zn-Ni (%2,5 Ni) ve Zn- Co (%0,5 Co) alaşımlı kaplama türlerine, Zn-Ni-Co alaşımlı kaplama (%2,5 Ni, %0,5 Co ve %95 Zn) yeni bir alternatif yüzey işlem uygulaması olabilir.

Çalışmamız bünyesinde yapılan, diğer bir kaplama türü olan Ni-Co alaşımı, mekanik özellikler anlamında oldukça büyük bir performans sergilemiş olup, bu alaşımlı kaplama türü Zn alaşımlı kaplamalardan deneysel anlamda oldukça farklı sonuçlar yansıtmıştır. Ni-Co alaşımlı kaplamaya ait sertlik ve yapışma mukavemeti sonuçları üzerinde titizlikle çalışılması gereken bir kaplama türü olduğunu göstermiştir.

KAYNAKLAR

- Abou-Krishna, M.M., Rageh, H.M., & Matter E.A. (2008). Electrochemical studies on the electrodeposited Zn–Ni–Co ternary alloy in different media. *Surface & Coatings Technology*. 202, 3739–3746.
- Alkire, R. C., & Kolp, D. M., (2002). *Advances in electrochemical science and engineering, Volume 8*. Weinheim: WILEY-VCH.
- Barcelo, G., Sarret M., Müller C., & Pregonas J. (1997). Corrosion resistance and mechanical properties of zinc electrocoatings. *Electrochimica Acta.*, 43 (1-2), 13-20.
- Basker, V. S. (2004). *Electrodeposition of alloys and composites with superior corrosion and electrocatalytic properties*. India, Chemical and Electrochemical Engineering Central Electrochemical Research Institute.
- Berk, V. (2004). *Yüzey işlemler teknolojileri*. 2008, <http://www.galvanoteknik.org/form/dosyalar>
- Bieleman, J. (2000). *Additives for coatings*. Weinheim: WILEY-VCH.
- Burakowski, T.V., & Wierzchon, T. (1999). *Surface engineering of metals: principles, equipments, Technologies*. (498-507). New York: CRC Pres.
- Byk, T.V., Gaevskaya, T.V., & Tsybul'skaya L.S. (2008). Effect of electrodeposition conditions on the composition, microstructure, and corrosion resistance of Zn–Ni alloy coatings. *Surface & Coatings Technology*. Retrieved 2008, from <http://www.sciencedirect.com>
- Cao, Y. (2000). *Cobalt electrocrystallization and codeposition with zinc*. School of Arts and Sciences, Columbia University.

- Elektrometal kaplama tekniği*, (b.t). 2008, <http://www.galvanoteknik.org/form/dosyalar>
- Endres, F., Abbott, A. P., & MacFarlane, D. R., (2008). *Electrodeposition from ionic liquids*. (1-3). Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Go´mez, E., Alcobe, X., & Valle´s, E. (2001). Characterisation of zinc+cobalt alloy phases obtained by electrodeposition. *Journal of Electroanalytical Chemistry* 505, 54–61.
- Hanse, P. L. & Jessen, C. Q. (1983). The microstructure of electrodeposition zn-ni coatings. 23, 1387-1390.
- Hillier, E.M.K ., & Robinson., M.J. (2004) Hydrogen embrittlement of high strength steel electroplated with zinc-cobalt alloys. *Corrosion Science*, 46 (3), 715-727.
- Kanani, N. (2006). *Electroplating- basic principles, processes and practice* (3rd ed.). (9-12) Oxford: Elsevier Ltd.
- Lehmberg, C.E., Lewis, D.B., & Marshall, G.W. (2005). Composition and structure of thin electrodeposited zinc–nickel coatings. *Surface & Coatings Technology*. 192, 269– 277.
- Mortaga M., & Abou-Krisha. (2005). Electrochemical studies of zinc–nickel codeposition in sulphate bath. *Applied Surface Science*. 252 (2005) 1035–1048.
- Özkan, İ. (2006). *Nanoteknolojik yöntemler ile malzemenin yüzey özelliklerinin iyileştirilmesi*, Yüksek lisans tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Dokuz Eylül Üniversitesi
- Paunovic M., & Schlesinger, M., (2006). *Fundamentals of electrochemical deposition*. (2 nd.). New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.

- Philip, A. & Schweitzer, P. E. (2003). *Metallic materials physical, mechanical, and corrosion properties*. New York: Marcel Dekker, Inc.
- Plieth, W., (2008). *Electrochemistry for materials science*. Oxford: Elsevier B.V.
- Poyner, J. (1991). *Electroplating* (3rd ed.). England : Argus Books Ltd.
- Rashwan., S.M. (2005). Study on the behaviour of Zn–Co–Cu alloy electroplating. *Materials Chemistry and Physics*. 89, 192–204.
- Shreir L L., Jarman R A. & Burstein G T. (2000). *Corrosion control* (3rd ed.). England. Reed Educational and Professional Publishing Ltd.
- Shukla, R. K., & Srivastava, S. C. (1984). Studies of electrodeposition of ni-co alloys. *Surface Technology*, 21, 11 – 17.
- Yundong L., Hui J., Weihua H., & Hui Tian. (2008). Effects of peak current density on the mechanical properties of nanocrystalline Ni–Co alloys produced by pulse electrodeposition. *Applied Surface Science*. 254 6865–6869.

EKLER**TABLO LİSTESİ**

| | Sayfa |
|--|--------------|
| Tablo 7.1 Zn-Ni-Co kaplama banyosunun kompozisyonu..... | 46 |
| Tablo 7.2 Farklı akım yoğunluğuna ait numune veri tablosu..... | 47 |
| Tablo 7.3 Kaplama kalınlığına ait numune veri tablosu..... | 48 |
| Tablo 7.4 Alaşımlı kaplamalara ait banyo kompozisyonları..... | 48 |
| Tablo 8.1 Farklı pH değerlerine ait EDS sonuçları | 52 |
| Tablo 8.2 Farklı akım değerlerine ait EDS sonuçları..... | 54 |
| Tablo 8.3 Farklı sıcaklık değerlerine ait EDS sonuçları..... | 55 |
| Tablo 8.4 Zn-Ni-Co alaşımlı kaplama için çalışma değerleri..... | 56 |
| Tablo 8.5 Farklı akım yoğunluğunda yapılan kaplamalara ait EDS sonuçları..... | 59 |
| Tablo 8.6 Birinci numune (A1) yüzeyine uygulanan yük ve oluşan derinlik değerleri..... | 62 |
| Tablo 8.7 Birinci numuneye (A1) ait sertlik, akma gerilmesi ve elastisite modülü değerleri..... | 62 |
| Tablo 8.8 İkinici numune (A2) yüzeyine uygulanan yük ve oluşan derinlik değerleri..... | 64 |
| Tablo 8.9 İkinici numuneye (A2) ait sertlik, akma gerilmesi ve elastisite modülü değerleri..... | 64 |
| Tablo 8.10 nc numune (A3) yüzeyine uygulanan yük ve oluşan derinlik değerleri..... | 66 |
| Tablo 8.11 nc numuneye (A3) ait sertlik, akma gerilmesi ve elastisite modülü değerleri..... | 66 |
| Tablo 8.12 Dördüncü numune (A4) yüzeyine uygulanan yük ve oluşan derinlik değerleri..... | 68 |
| Tablo 8.13 Dördüncü numuneye (A4) ait sertlik, akma gerilmesi ve elastisite modülü değerleri..... | 68 |
| Tablo 8.14 Farklı akım yoğunluğundaki numunelere ait çizik testi sonuçları..... | 71 |

| | |
|--|----|
| Tablo 8.15 Farklı kaplama kalınlığına sahip numunelerin EDS sonuçları..... | 74 |
| Tablo 8.16 Beşinci numune (K1) yüzeyine uygulanan yük ve oluşan derinlik değerleri..... | 75 |
| Tablo 8.17 Beşinci numuneye (K1) ait sertlik, akma gerilmesi ve elastisite modülü değerleri | 75 |
| Tablo 8.18 Altıncı numune (K2) yüzeyine uygulanan yük ve oluşan derinlik değerleri..... | 77 |
| Tablo 8.19 Altıncı numuneye (K2) ait sertlik, akma gerilmesi ve elastisite modülü değerleri..... | 77 |
| Tablo 8.20 Yedinci numune (K3) yüzeyine uygulanan yük ve oluşan derinlik değerleri..... | 79 |
| Tablo 8.21 Yedinci numuneye (K3) ait sertlik, akma gerilmesi ve elastisite modülü değerleri..... | 79 |
| Tablo 8.22 Sekizinci numune (K4) yüzeyine uygulanan yük ve oluşan derinlik değerleri..... | 81 |
| Tablo 8.23 Sekizinci numuneye (K4) ait sertlik, akma gerilmesi ve elastisite modülü değerleri..... | 81 |
| Tablo 8.24 Farklı kaplama türlerine ait EDS sonuçları..... | 89 |
| Tablo 8.25 Dokuzuncu numune (Zn-Ni) yüzeyine uygulanan yük ve oluşan derinlik Değerleri..... | 92 |
| Tablo 8.26 Dokuzuncu numuneye (Zn-Ni) ait sertlik, akma gerilmesi ve elastisite modülü değerleri..... | 92 |
| Tablo 8.27 Onuncu numune (Zn-Co) yüzeyine uygulanan yük ve oluşan derinlik değerleri..... | 94 |
| Tablo 8.28 Onuncu numuneye (Zn-Co) ait sertlik, akma gerilmesi ve elastisite modülü değerleri..... | 94 |
| Tablo 8.29 On birinci numune (Ni-Co) yüzeyine uygulanan yük ve oluşan derinlik değerleri..... | 96 |
| Tablo 8.30 On birinci numuneye (Ni-Co) ait sertlik, akma gerilmesi ve elastisite modülü değerleri..... | 96 |
| Tablo 8.31 On ikinci numune (Zn-Ni-Co) yüzeyine uygulanan yük ve oluşan derinlik değerleri..... | 98 |

| | |
|--|-----|
| Tablo 8.32 On ikinci numuneye (Zn-Ni-Co) ait sertlik, akma gerilmesi ve elastisite modülü değerleri..... | 98 |
| Tablo 8.33 Farklı tipte ki kaplamalara ait çizik testi sonuçları..... | 101 |

ŞEKİL LİSTESİ**Sayfa**

| | |
|--|----|
| Şekil 2.1 Metal veya alaşım olarak depositlenebilen elementlerin özeti..... | 6 |
| Şekil 2.2 Elektroliz mekanizmasının şematik gösterimi..... | 7 |
| Şekil 2.3 Ortalama akım yoğunluğu (a) düz parça, (b) şekilli parça | 11 |
| Şekil 2.4 Anot polarizasyonu..... | 14 |
| Şekil 2.5 Kristal kafes yapıları (a) Hacim merkezli kübik; Fe, Cr (b) Yüzey merkezli kübik; Cu, Ni, Ag (c) Hekzagonal sıkı paket; Cd, Zn..... | 15 |
| Şekil 2.6 Kristal çekirdeği oluşumu ve büyümesi (I) çekirdek oluşur, (II) çekirdekler büyür ve (III) tanelerin oluşumu | 17 |
| Şekil 2.7 Kübik kristallerin büyüme habitleri (a) x,y ve z doğrultusunda büyüme, (b) x ve y doğrultusunda büyüme bastırılmış ve (c) z doğrultusunda büyüme bastırılmış | 17 |
| Şekil 3.1 Bazı kaplama türlerinin “kaplama kalınlığı - sertlik grafiği”..... | 23 |
| Şekil 5.1 Askı Kaplama Banyosu..... | 30 |
| Şekil 5.2 Dolap (tambur) kaplama sistemi | 32 |
| Şekil 5.3 Otomatik Kaplama Sistemi..... | 33 |
| Şekil 6.1 Yüzey enerjisi ve yüzey gerilimi..... | 34 |
| Şekil 6.2 Yüzey gerilimi ve nemlendirme..... | 35 |
| Şekil 6.3 Yüzey aktifin etkisi..... | 36 |
| Şekil 6.4 Yüzey alanının etkisi..... | 37 |
| Şekil 6.5 Misel formu..... | 37 |
| Şekil 6.6 Elektrolitik temizleme..... | 38 |
| Şekil 6.7 Basınç dalgaları..... | 41 |
| Şekil 7.1 Kaplama numunesi..... | 44 |
| Şekil 7.2 Kaplama banyosu..... | 45 |
| Şekil 7.3 Kaplama öncesi numunelere uygulanan” ön işlem akış şeması”..... | 46 |
| Şekil 8.1 Farklı pH değerlerinde ki kaplamamalara ait SEM görüntüleri (a) pH=2,6 (b) pH=3,2 (c) pH=3,8 ve (d) pH=4,2 | 51 |
| Şekil 8.2 Farklı akım yoğunluğunda yapılan kaplamamalara ait SEM görüntüleri | |

- (a) $I=2 \text{ A/dm}^2$, (b) $I=3 \text{ A/dm}^2$, (c) $I=4 \text{ A/dm}^2$ ve (d) $I=5 \text{ A/dm}^2$ 53
- Şekil 8.3 Farklı sıcaklık değerlerinde yapılan kaplamamalara ait SEM görüntüleri
 (a) $T=20 \text{ }^\circ\text{C}$, (b) $T=30 \text{ }^\circ\text{C}$, (c) $T=40 \text{ }^\circ\text{C}$ ve (d) $T=50 \text{ }^\circ\text{C}$ 54
- Şekil 8.4 Farklı akım yoğunluğunda yapılan Zn-Ni-Co alaşımlı kaplamaların XRD analiz sonucu57
- Şekil 8.5 Farklı akım yoğunluğunda yapılan kaplamamalara ait SEM görüntüleri
 (a) $I=2 \text{ A/dm}^2$ (A1), (b) $I=3 \text{ A/dm}^2$ (A2), (c) $I=4 \text{ A/dm}^2$ (A3) ve
 (d) $I=5 \text{ A/dm}^2$ (A4).....58
- Şekil 8.6 Farklı akım yoğunluğunda yapılan Zn-Ni-Co alaşımlı kaplamamalara ait EDS analizi.....59
- Şekil 8.7 Farklı akım yoğunluğunda yapılan kaplamamalara ait AFM görüntüleri
 (a) $I=2 \text{ A/dm}^2$ (A1), (b) $I=3 \text{ A/dm}^2$ (A2), (c) $I=4 \text{ A/dm}^2$ (A3), ve
 (d) $I=5 \text{ A/dm}^2$ (A4).....61
- Şekil 8.8 Zn-Ni-Co alaşımlı kaplama yapılan A1 ($I=2\text{A/dm}^2$) numunesine ait;
 (a) Kuvvet-elastisite modülü grafiği ve (b) Kuvvet-sertlik grafiği.....63
- Şekil 8.9 Zn-Ni-Co alaşımlı kaplama yapılan A2 ($I=3\text{A/dm}^2$) numunesine ait;
 (a) Kuvvet-elastisite modülü grafiği ve (b) Kuvvet-sertlik grafiği.....65
- Şekil 8.10 Zn-Ni-Co alaşımlı kaplama yapılan A3 ($I=3\text{A/dm}^2$) numunesine ait;
 Kuvvet-elastisite modülü grafiği (b) Kuvvet-sertlik grafiği.....67
- Şekil 8.11 Zn-Ni-Co alaşımlı kaplama yapılan A4 ($I=5\text{A/dm}^2$) numunesine ait;
 (a) Kuvvet-elastisite modülü grafiği (b) Kuvvet-sertlik grafiği.....69
- Şekil 8.12 Farklı akım yoğunluğunda kaplanan numunelere (A1, A2, A3,A4) ait
 “Yük - Sertlik Grafiği”70
- Şekil 8.13 Farklı akım yoğunluğuna bağlı Zn-Ni-Co alaşımlı kaplamanın; akım yoğunluğu- yapışma mukavemeti grafiği71
- Şekil 8.14 Farklı kaplama kalınlığında oluşan Zn-Ni-Co alaşımlı kaplamanın XRD sonuçları.....72
- Şekil 8.15 Farklı kaplama kalınlığında ki numunelere ait SEM görüntüleri (a) $5 \mu\text{m}$ (K1), (b) $10 \mu\text{m}$ (K2), (c) $15 \mu\text{m}$ (K3) ve (d) $20 \mu\text{m}$ (K4).....73
- Şekil 8.16 Farklı kaplama kalınlığına sahip numunelerin EDS analizi.....74
- Şekil 8.17 Zn-Ni-Co alaşımlı kaplama yapılan K1 ($t=5\mu\text{m}$) numunesine ait;
 (a) Kuvvet-elastisite modülü grafiği ve (b) Kuvvet-sertlik grafiği.....76

| | |
|---|-----|
| Şekil 8.18 Zn-Ni-Co alaşımlı kaplama yapılan K2 ($t=10\mu\text{m}$) numunesine ait; | |
| (a) Kuvvet-elastisite modülü grafiği (b) Kuvvet-sertlik grafiği..... | 78 |
| Şekil 8.19 Zn-Ni-Co alaşımlı kaplama yapılan K3 ($t=15\mu\text{m}$) numunesine ait; | |
| (a) Kuvvet-elastisite modülü grafiği (b) Kuvvet-sertlik grafiği..... | 80 |
| Şekil 8.20 Zn-Ni-Co alaşımlı kaplama yapılan K4 ($t=20\mu\text{m}$) numunesine ait; | |
| (a) Kuvvet-elastisite modülü grafiği (b) Kuvvet-sertlik grafiği..... | 82 |
| Şekil 8.21 Farklı kaplama kalınlığına sahip numunelerin (K1, K2, K3, K4) | |
| Yük - Sertlik Grafiği..... | 83 |
| Şekil 8.22 Zn-Ni alaşımlı kaplamanın XRD sonuçları..... | 84 |
| Şekil 8.23 Zn-Co alaşımlı kaplamanın XRD sonuçları..... | 84 |
| Şekil 8.24 Ni-Co alaşımlı kaplamanın XRD sonuçları..... | 85 |
| Şekil 8.25 Zn-Ni-Co alaşımlı kaplamanın XRD sonuçları..... | 85 |
| Şekil 8.26 Farklı kaplama tiplerine ait SEM görüntüleri (a) Zn-Ni, (b) Zn-Co, | |
| (c) Ni-Co ve (d) Zn-Ni-Co..... | 86 |
| Şekil 8.27 Farklı kaplama türlerine ait numunelerin EDS analizi (a) Zn-Ni (b) | |
| Zn-Co (c) Ni-Co (d) Zn-Ni-Co..... | 89 |
| Şekil 8.28 Farklı kaplama tiplerine ait AFM görüntüleri (a) Zn-Ni, (b) Zn-Co, | |
| (c) Ni- Co ve (d) Zn- Ni-Co..... | 91 |
| Şekil 8.29 Zn- Co alaşımlı kaplama yapılan numuneye ait; (a) Kuvvet-elastisite | |
| modülü grafiği ve (b) Kuvvet-sertlik grafiği..... | 93 |
| Şekil 8.30 Zn-Co alaşımlı kaplama yapılan numuneye ait; (a) Kuvvet-elastisite | |
| modülü grafiği ve (b) Kuvvet-sertlik grafiği..... | 95 |
| Şekil 8.31 Ni-Co alaşımlı kaplama yapılan numuneye ait; (a) Kuvvet-elastisite | |
| modülü grafiği ve (b) Kuvvet-sertlik grafiği..... | 97 |
| Şekil 8.32 Zn-Ni-Co alaşımlı kaplama numunesine ait; (a) Kuvvet-elastisite modülü | |
| grafiği ve (b) Kuvvet-sertlik grafiği | 99 |
| Şekil 8.33 Farklı kaplama türlerine ait numunelerin (Zn-Ni, Zn-Co, Ni-Co ve | |
| Zn-Ni-Co) Yük- Sertlik Grafiği..... | 100 |
| Şekil 8.34 Farklı akım yoğunluğuna bağlı Zn-Ni-Co alaşımlı kaplamanın; | |
| “akım yoğunluğu- yapışma mukavemeti” grafiği..... | 101 |