

## Nano Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Oranının Ni-Co Matrisli Nano Kompozit Kaplamaların Tribolojik Özelliklerine Etkisi

\*Ramazan KARSLIOĞLU(0000-0001-5490-3449)

Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, 06010, Ankara, Turkey  
rkarslioglu@ybu.edu.tr

Geliş Tarihi: 19.02.2017

Kabul Tarihi: 31.05.2018

### Öz

Ni-Co esaslı nanokompozit kaplamaların Mikro Elektro Mekanik Sistemlerde (MEMS) ve Nano Elektro Manyetik Sistemlerde (NEMS) kullanım potansiyelinden dolayı teknolojik gelişmelere paralel olarak önemi gün geçtikçe artmaktadır. Ni-Co esaslı nanokompozit kaplamalar MEMS ve NEMS sistemlerinde karşılaşılan aşınma problemi için çözüm vadetmektedir. Bu bağlamda Ni-Co alaşımı ve Ni-Co/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kompozit kaplamalar Doğru Akım (DC) akım türünde, 7 A/dm<sup>2</sup> akım şiddetinde ve dört farklı oranda Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> banyo konsantrasyonuna ilave edilerek modifiye edilmiş Watt tipi kaplama banyosu ile bakır altlıklar üzerine kaplanmıştır. Banyo bileşimine Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ilavesi ve oranın kaplama tabakasının fiziksel ve mekanik özelliklerine etkileri incelenmiştir. Üretilen kaplamaların yapısal özellikleri taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve X-ışınları difraksiyonu (XRD) metodu kullanılarak karakterize edilmiştir. Kaplamaların mekanik özellikleri Vickers yöntemi ile ölçülmüştür. Sürtünme ve aşınma davranışları ise ball on disk metodu ve reciprocating yöntemi kullanılarak ortaya çıkarılmıştır. Yapılan inceleme ve karakterizasyonlar sonucunda Ni-Co kaplama banyo bileşimine 1 g/l Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ilavesinin en iyi mekanik ve tribolojik özellikleri sağladığı tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Ni-Co, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Nanokompozit, elektrolitik kaplama

## Effect of Nanosize Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Concentration on Tribological Behavior of Ni-Co based Nanocomposite Coatings

Ramazan KARSLIOĞLU

Ankara Yıldırım Beyazıt University, Faculty of Engineering & Natural Sciences, Metallurgical and Materials Engineering Department, 06010, Ankara, Turkey  
rkarslioglu@ybu.edu.tr

### Abstract

Due to the micro-electrical mechanical system (MEMS) and Nano-electrical mechanical system (MEMS) usage potential, Ni-Co based nanocomposite coatings have been remarkable. Especially, they are promises to solve tribological problem of MEMS and NEMS system. Therefore, Ni-Co alloy and Ni-Co/ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite coatings were prepared from a modified Watt's type electrolyte by Direct Current (DC) with 7A/dm<sup>2</sup> current density and four different amounts of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> added to electrolyte concentration. Effect of amount of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> in the Ni-Co matrix on mechanical and physical properties were investigated. Produced composite coating layers structure were characterized with scanning electron microscopy (SEM) and X-ray diffraction (XRD). Mechanical properties were determined with Vickers microhardness test method. Tribological properties was carried out with reciprocating pin on disk system. As a result of investigation and characterization best mechanical and tribological properties were achieved with 1 g/l Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> addition into electrolyte and at PRC current type.

**Keywords:** Ni-Co, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Nanocomposite, electrodeposition

**Sorumlu Yazar:** Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği 06010, Ankara, TURKEY E-mail: rkarslioglu@ybu.edu.tr Tel: +90 0312 906 22 49

## 1. GİRİŞ

Nikel ve nikel esaslı alaşımlar günümüzde uzay, havacılık, enerji üretimi, korozyondan koruma, yüksek sıcaklık uygulamaları gibi birçok alanda kullanılmaktadır [1–3]. Özellikle iyi aşınma direnci ve yüksek sıcaklık oksidasyonu gereken uygulamalarda geniş bir kullanım alanı bulmaktadır. Ni alaşımları arasında, Ni-Co alaşımı mükemmel fonksiyonel özellikleri, korozyon direnci gibi özellikler sergilemelerinden dolayı öne çıkmaktadırlar [4–7]. Son yıllarda teknolojinin gelişmesi ile birlikte yeni uygulamalar ortaya çıkmıştır. Ortaya çıkan bu yeni uygulamalar yeni malzemeler ve özelliklere ihtiyaç duymaktadır. Günümüzdeki birçok yeni uygulama MEMS ve NEMS sistemlerine ihtiyaç duymaktadır [8–10]. Bu sistemlerde karşılaşılan en büyük problem; büyük sistemler ile karşılaştırıldığında, yüzey atomlarının içteki atomlara oranının yüksek olması nedeni ile yüzey karalılığının düşük olmasıdır. Bu durum MEMS ve NEMS sistemlerinde kullanılan malzemenin kolayca çevre ile reaksiyona girebilme eğilimini arttırmakla beraber hareketli sistemlerde aşınma direncinin ciddi oranda düşmesine neden olmaktadır [11–13].

Ni-Co alaşımları yukarıda belirtildiği gibi birçok üstün özelliklere sahiptir. Ancak yapı içerisine nano boyutta ikinci faz ilavesi ile oluşturulan nano kompozit kaplamaların mukavemet, aşınma direnci, korozyon direnci, biyolojik ve kimyasal uyumluluk gibi özellikleri daha da geliştirdiği çeşitli kaynaklarda belirtilmektedir [2], [14]. Nikel-kobalt alaşım kaplamaların üçüncü bir faz ilavesiyle özelliklerinin gelişmesine elverişli olduğu literatürde belirtilmiştir [15–17].

Parçacık takviyeli metal matrisli kompozitleri hazırlamak için birçok metot vardır. Ekonomik ve kolay uygulanabildiğinden dolayı en yaygın kullanılan elektrodepozisyonudur. Elektrodepozisyon ile kompozit kaplama işleminde takviye fazı ile matris malzemesi aynı anda altlık üzerinde biriktirilmektedir [18]. Elektrodepozisyon metodu kullanılarak yapı içerisine SiC, WC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CNT, SiO<sub>2</sub>, vb. gibi inert parçacıklar ilave edilebilmektedir. Parçacık ilave edilmiş yapı, saf metal yapı ile kıyaslandığında yüksek korozyon ve aşınma direnci gibi daha iyi fiziksel ve mekanik özellik göstermektedir. Bahsedilen özelliklerin sağlanabilmesi için ilave edilen parçacıkların metal matris içerisine homojen dağılması gerekmektedir. Elektrodepozisyon tekniğinde yüksek sıcaklık ve yüksek basınca gerek duyulmadığından dolayı dağılım ve konsantrasyon kolayca kontrol edilebilmektedir [15].

Bu çalışmada temel amacı son yıllarda önemi artan mikro elektromekanik sistemler (MEMS) ve nano elektromekanik sistemler (NEMS) için yüksek aşınma direncine, üstün mekanik özelliklere ve iyi elektriksel özelliklere sahip Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ile takviye edilmiş Ni-Co esaslı nano kompozit kaplamalar üretmektir. Üretilen kaplamaların kompozisyon-özellik ilişkisi incelenmiştir.

## 2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Nanokompozit kaplama prosesinde altlık olarak 20 x 30 x 2 mm boyutlarında yüksek saflıkta Cu levhalar kullanılmıştır. Kaplama öncesi Cu yüzeyler, homojen ve düşük yüzey pürüzlülüğüne sahip olması için sırası ile 120, 240, 400, 800 mesh lik zımpara kullanılarak mekanik olarak temizlenmiş ve yüzey pürüzlülüğü düşürülmüştür. Daha sonrasında Cu yüzeyleri %10 HCL çözeltisi ile kimyasal temizleme işlemine tabi tutulmuştur. Anot malzemesi olarak 25 x 40 x 2 mm boyutlarında yüksek saflıkta Ni kullanılmıştır. Kaplama banyosunda nikel kaynağı olarak 250 g/l NiSO<sub>4</sub>.6H<sub>2</sub>O, kobalt kaynağı olarak 50 g/l CoSO<sub>4</sub>.7H<sub>2</sub>O ve Ph dengeleyici olarak H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> kullanılmıştır. Nano kompozit yapıyı oluşturabilmek için kaplama banyosuna dört farklı oranda (0.5, 1.0, 2.0, 4.0 g/l) 80 nm parçacık boyutuna sahip α-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ilave edilmiştir. Kaplama öncesi 30 dk boyunca ultrasonik homojenizetör kullanılarak Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> partiküllerinin elektrolit içerisine homojen dağılması sağlanmıştır. Kaplama akım şiddeti 7 A/dm<sup>2</sup> seçilmiştir. Banyo sıcaklığı hassas bir şekilde kontrol edilerek 55°C (±0.5) ye pH ise 4-4.5'e kaplama işlemi başlamadan önce sabitlenmiştir. Kaplama esnasında da pH ve sıcaklık kontrol altında tutulmuştur. Homojen bir kaplama tabakası elde edebilmek için elektrolit kaplama esnasında manyetik karıştırıcı ile 50 rpm hızla karıştırılmıştır.

Farklı Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> banyo konsantrasyonları ile üretilen nano kompozit kaplamalar Taramalı Elektron Mikroskobu (Hitachi SU3500) kullanılarak kaplama tabakalarının yüzey ve tane yapıları, Enerji Dağılım Spektrometresi (EDS) kullanılarak kaplamaların elementel dağılımı incelenmiştir. X-ışınları difraktometresi (XRD) ile 1.54059Å dalga boyunda CuK<sub>α</sub> ışını kullanılarak kristal yapı karakterize edilmiştir. Ni-Co ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> katkılı Ni-Co kaplama tabakasının kristal yapı karakterizasyonu için 2θ, 20° ile 100° arasındaki bölge taranmıştır. XRD analizi sonucunda elde edilen piklerin çözümü bilgisayar yazılım yardımı ile yapılmıştır. Çözümlemede kullanılan JPDS kart no: 00-004-0850 dir. Ayrıca Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ilavesinin büyüme yönlerinde ve tane boyutuna etkileri XRD yardımı ile irdelenmiştir.

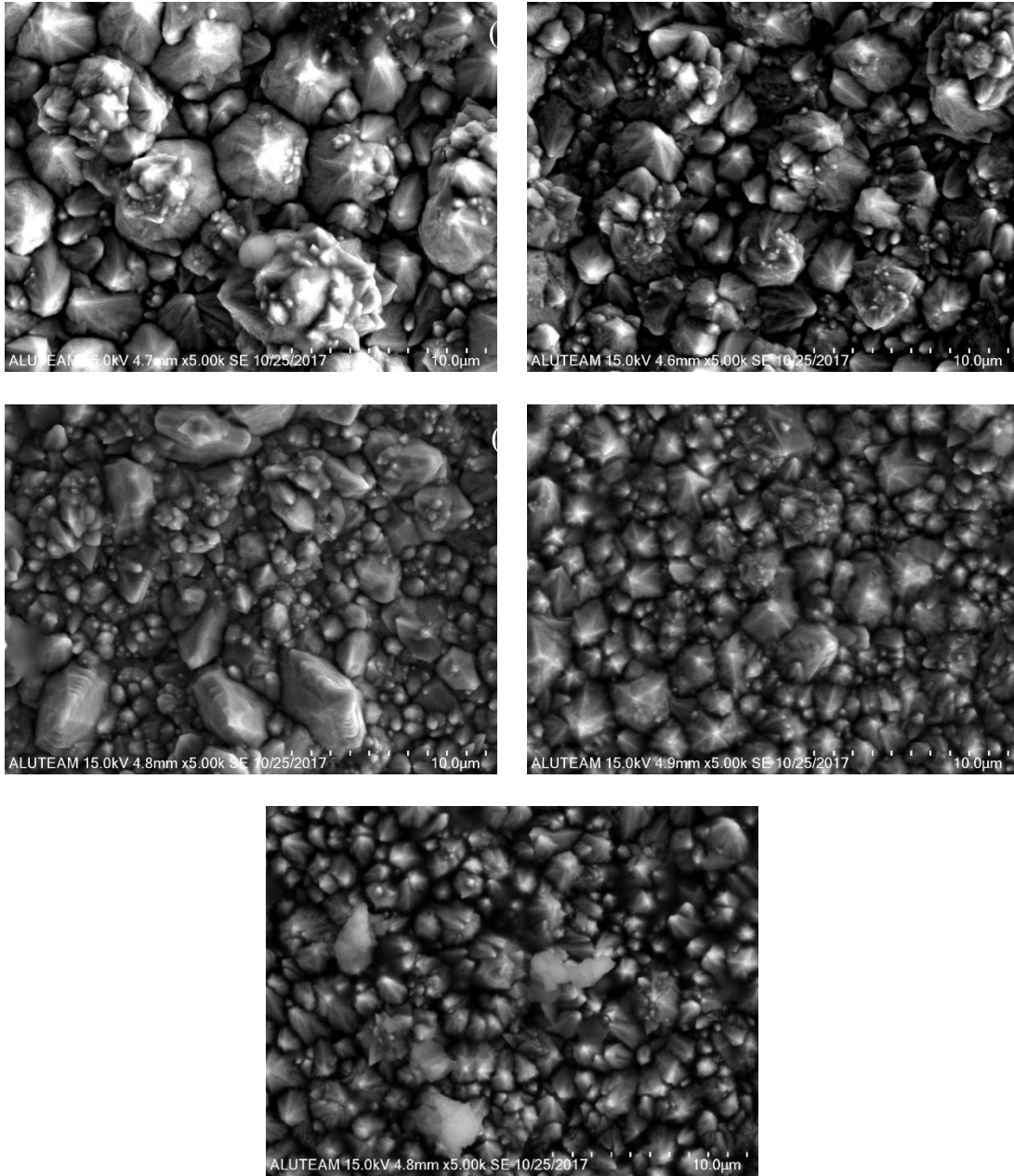
Kaplama tabakasının mekanik özellikleri mikro sertlik cihazı (Shimadzu HMV-G) kullanılarak ölçülmüştür. Sertlik testi 50 g yük altında 10 sn süre ile tatbik edilmiştir. Her bir numune için en az 5 sertlik ölçümü yapılarak ortalamaları alınmıştır. Kaplamaların aşınma tesisleri 1 N yük altında aşınma testleri için özel üretilmiş, düşük yüzey pürüzlülüğüne sahip 10 mm Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> bilye ile reciprocating yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Aşınma testi 250 metre mesafede ve 12 mm spam aralığında yapılmıştır. Aşınma izleri SEM ve optik mikroskop kullanılarak incelenmiştir. Optik mikroskop yardımı ile aşınma iz genişlikleri ölçülmüş ve matematiksel metot kullanılarak aşınma hacim kayıpları hesaplanmıştır. SEM ile aşınma mekanizmaları irdelenmiştir.

### 3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Watt tipi banyo kullanılarak  $7.0 \text{ A/dm}^2$  akım şiddetinde farklı  $\text{Al}_2\text{O}_3$  konsantrasyonunda banyo bileşimine sahip nano kompozit kaplamaların SEM yüzey görüntüleri Şekil 1'de verilmiştir. Şekil 1'a banyo bileşimine  $\text{Al}_2\text{O}_3$  katılmaksızın, 1b de  $0.5 \text{ g/l}$   $\text{Al}_2\text{O}_3$  katılarak üretilmiş, kaplamaların tane yapıları incelendiğinde banyo bileşimine  $\text{Al}_2\text{O}_3$  katkısının Ni-Co tanelerinin küçülmesine sebep olduğu görülmüştür. Kaplama esnasında yapı içerisine giren  $\text{Al}_2\text{O}_3$  heterojen çekirdeklenmeye sebep olmuş ve birim alandaki çekirdeklenme miktarını artırması sonucunda birim alandaki tane sayısını artırmış dolayısı ile yapının daha ince taneli olmasına neden olmuştur. Diğer bir neden

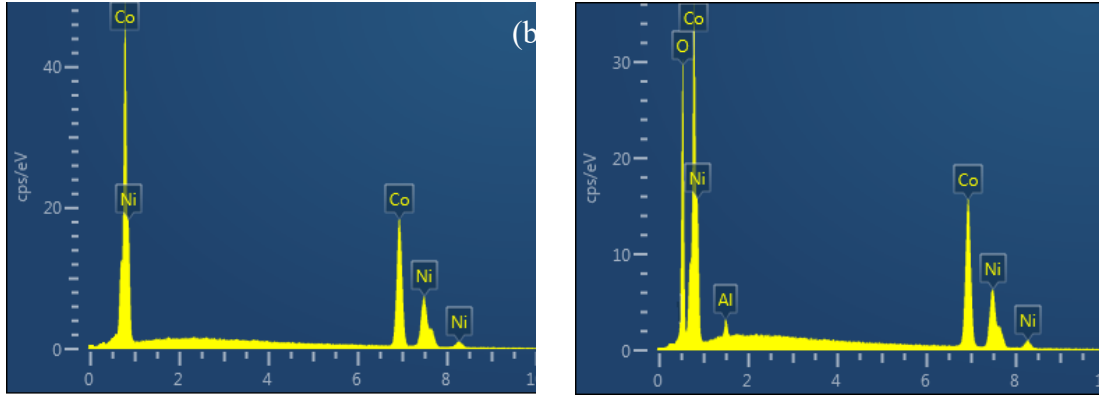
ise taneler arasına yerleşen  $\text{Al}_2\text{O}_3$  parçacıkların tane büyümesini engellemesidir [19]. Şekiller 1b-e incelendiğinde, kaplama banyosu içerisine ilave edilen  $\text{Al}_2\text{O}_3$  miktarının artmasıyla birlikte tane yapısının küçüldüğü görülmektedir. Bu durumun başlıca nedeni banyo içeriğindeki  $\text{Al}_2\text{O}_3$  miktarının artması ile birlikte kaplama tabakası içerisine gömülen  $\text{Al}_2\text{O}_3$  miktarının artmasıdır. Ayrıca banyo bileşimine ilave edilen dolayısı ile kaplama tabakası içerisine gömülen  $\text{Al}_2\text{O}_3$  miktarının artışı tane yapısını polihedrondan küresele kaymasına neden olmuştur. Yapı içerisindeki ikinci faz ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) tanelerin farklı yönlere dolayısı ile farklı morfolojilerde büyümesine neden olmuştur [1].



Şekil 1. Banyo bileşimine a) 0.0, b) 0.5, c) 1.0, d) 2.0, ve 4.0 g/l oranında  $\text{Al}_2\text{O}_3$  katkısı ile üretilmiş nano kompozit yapıların SEM görüntüleri.

Şekil 2 de banyo bileşimine  $\text{Al}_2\text{O}_3$  katkısız ve 1 g/l  $\text{Al}_2\text{O}_3$  katkılı kaplama tabakası EDS analizi verilmektedir. EDS analizi sonuçları karşılaştırıldığında katkılı kaplamanın EDS analizi Ni-Co piklerinin yanında fazladan  $\text{Al}_2\text{O}_3$

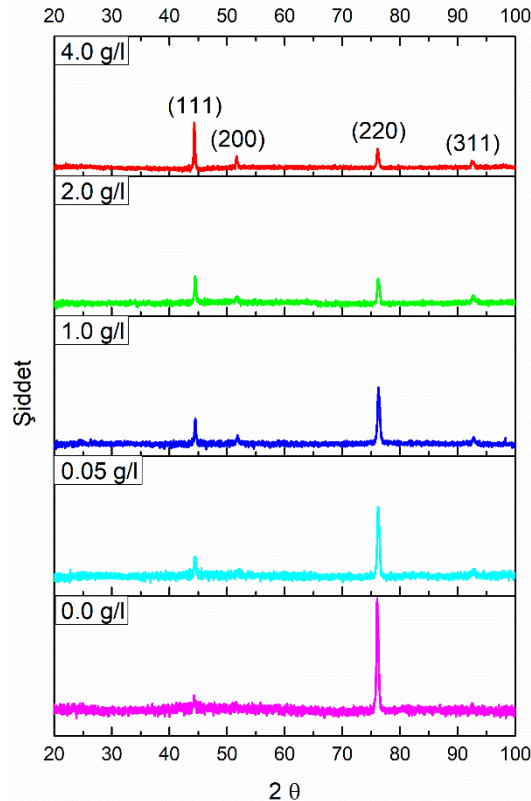
bileşiminde bulunan Al ve O pikleri verdiği görülmektedir. Dolayısıyla EDS sonuçları  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ün yapı içerisine yerleştiği ve arzu edilen nanokompozit yapının üretildiğini kanıtlamaktadır.



Şekil 2. Banyo bileşimine a) 0.0 ve b) 1 g/l  $\text{Al}_2\text{O}_3$  katkılı kaplama tabakası EDS analizi sonuçları

Farklı oranlarda banyo bileşimine  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ilavesinin kristal yapı üzerindeki etkileri Şekil 3 teki XRD sonuçlarında görülmektedir. XRD sonuçlarından  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ilavesinin pik şiddetinin düşmesine ve genişlemesine neden olduğu tespit edilmiştir. Pik şiddetinin düşmesi tane boyutunun küçülmesinden, genişlemesi de kristaloğrafik simetrisinin değişmesinden kaynaklanmaktadır. Ni-Co içerisine ikinci faz ilavesi katot yüzeyine birikme esnasında yapı içerisine giren  $\text{Al}_2\text{O}_3$  tane büyümesini durdurarak yeni çekirdekleşme

alanları oluşturduğu için proses esnasında daha fazla çekirdek oluşumu söz konusu olmuştur, bu durum da tane boyutunda küçülmeye neden olmuştur [17].  $7 \text{ A/dm}^2$  akım şiddetinde üretilen Ni-Co kaplama tabakasının ağırlıklı büyüme düzlemi (220) dır. Banyo içerisine 0.5 g/l  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ilavesi (111) yönünde büyümeyi çekirdeklediği şekil 3'ten görülmektedir. Banyo içerisine katılan  $\text{Al}_2\text{O}_3$  miktarının artması ile birlikte ağırlıklı büyüme düzlemi (220) dan (111) düzlemine kaydığı ortaya çıkmıştır.



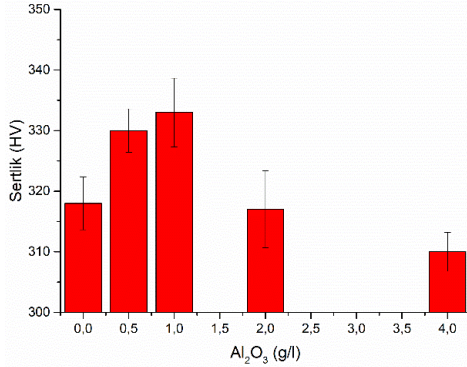
Şekil 3. Ni-Co ve Ni-Co/ $\text{Al}_2\text{O}_3$  kaplama tabakalarının XRD analiz sonuçları

Üretilen kaplamaların mekanik özellikleri Vickers sertlik yöntemi kullanılarak ölçülmüştür. Elde edilen sertlik değerleri şekil 4'te grafik olarak verilmiştir. Sertlik testi 50 g yük altında 10 sn süre ile yüzeye tatbik edilmiştir.

Sertlik sonuçları incelendiğinde kaplama banyosuna  $Al_2O_3$  ilavesinin 1 g/l ye kadar sertliği artırdığı görülmüştür. Bunun nedeni olarak da ikinci faz parçacıklarının tane inceltici olarak davranması ve matris fazı üzerine gelen yükü, ikinci faza ( $Al_2O_3$ ) başarılı bir şekilde transferi şeklindedir [13].

Banyo bileşimine 1g/l üzerindeki  $Al_2O_3$  ilavesinin ise sertlikte düşüşe neden olduğu gözlenmiştir. Banyo içerisine ilave edilen fazla miktardaki  $Al_2O_3$  yapı içerisinde ikinci fazın aglomerasyonuna neden olmaktadır.

Aglomere olan parçacıklar arasında oluşan boşluklar nedeni ile mekanik özelliklerin zayıflamasına neden olabilmektedir. Aynı zamanda aglomere olan parçacıklar ile matris birleşme kabiliyetinin düşmesi de mekanik özellikleri kötü yönde etkilemektedir[1].

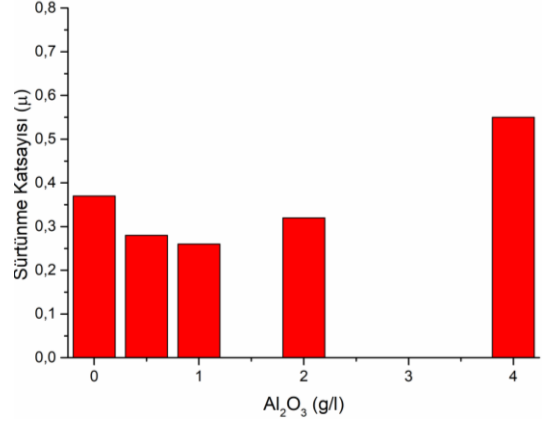


**Şekil 4.** Ni-Co ve Ni-Co/ $Al_2O_3$  kaplama tabakalarının sertlik değişimleri

Ni-Co ve Ni-Co/ $Al_2O_3$  kaplamaların sürtünme ve aşınma testleri 1 N yük altında 25 mm/sn hızda reciprocating (gitmeli gelmeli) aşınma yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Aşınma hareket mesafesi numune boyutları göz önünde bulundurularak + yönde 6 mm ve - yönde 6 mm olmak üzere 12 mm seçilmiştir. Aşındırıcı olarak aşınma testlerinde kullanılmak üzere özel üretilmiş 10 mm çapa sahip  $Al_2O_3$  bilye kullanılmıştır. Aşınma cihazından elde edilen sürtünme katsayıları şekil 5'de verilmiştir.

Aşınma testi sonrası numune üzerinde oluşan iz genişlikleri optik mikroskop yardımı ile ölçülmüştür. Ölçülen iz genişlik değerleri kullanılarak aşınma hacim kayıpları

hesaplanmıştır. Kaplama tabakalarında oluşan iz genişlikleri Şekil 6'da verilmiştir. Şekil 6 a- b incelendiğinde, banyo çözeltisine 0.5 g/l  $Al_2O_3$  ilavesi kaplama tabakası üzerinde oluşan aşınma iz genişliğini 647 $\mu$ m den 459  $\mu$ m düşürmüştür. Aşınma hacim kaybında keskin bir düşüş olduğu şekil 6 f'den görülmektedir.

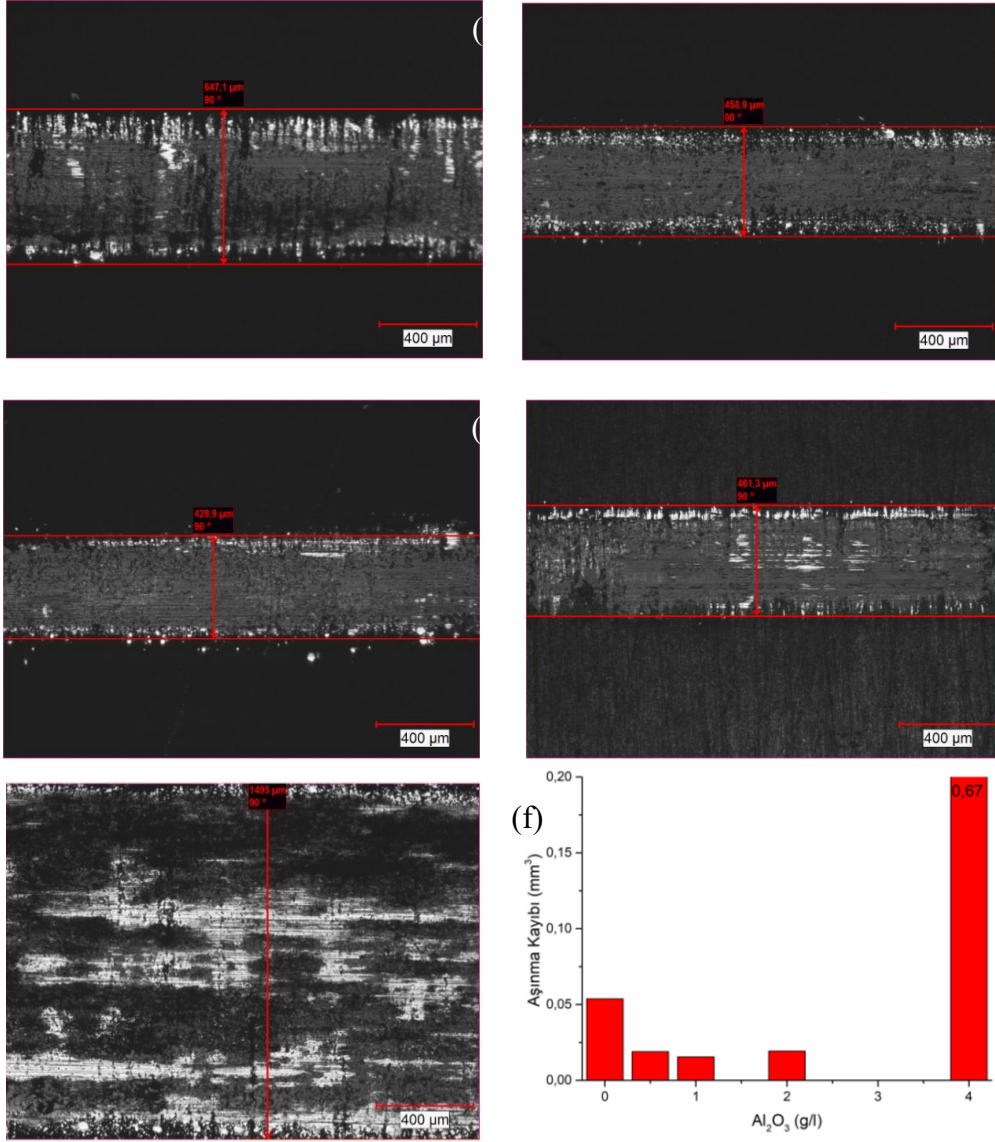


**Şekil 5.**  $Al_2O_3$  ilavesinin sürtünme katsayısına etkisi

En düşük iz genişliği ve aşınma hacim kaybı banyo çözeltisine 1.0 g/l  $Al_2O_3$  ilave edilerek yapılmış kaplamadan elde edilmiştir. Banyo bileşimine 1 gr/l nin üzerinde  $Al_2O_3$  ilavesi aşınma iz genişliğini ve hacim kaybını artırmıştır. Aşınma direncini düşürdüğü şekil 6 d-f den görülmektedir.

Aşınma testi sonrasında aşınma mekanizmasını daha iyi ortaya çıkarabilmek için aşınma izleri SEM ile yüksek çözünürlükte incelenmiştir. Aşınma izlerinin yüksek çözünürlüklü fotoğrafları Şekil 7'de verilmektedir. Katkısız kaplamanın yüksek çözünürlüklü SEM fotoğrafı incelendiğinde ağır abrasif ve kısmi ahdensif deformasyon izleri görülmektedir. Yapı içerisine nano  $Al_2O_3$  girmesi ile birlikte aşınma mekanizması abrasiften delemantasyon türüne geçmektedir. Delemantasyon aşınması yüzeye etkiyen kuvvetler neticesinde oluşan plastik deformasyon, bu plastik deformasyon sonucu yüzeyde oluşan mikro çatlaklar ve bu mikro çatlakların birleşmesi sonucunda yüzeyden kopması şeklinde meydana gelmektedir [1]. SEM fotoğrafı incelendiğinde delemantasyon bölgeleri ve delemantasyon öncesi oluşan çatlaklar açıkça görülmektedir. Banyo içerisine katılan  $Al_2O_3$  miktarının artması ile birlikte yüzeyde oluşan delemantasyon deformasyonunun azaldığı görülmektedir. Yüksek miktarlarda  $Al_2O_3$  ilavesinin (1.0 g/l nin üzerinde), oluşan deformasyonu artırdığı ve aşınma mekanizmasını delemantasyon artı adezyona dönüştürdüğü görülmektedir.

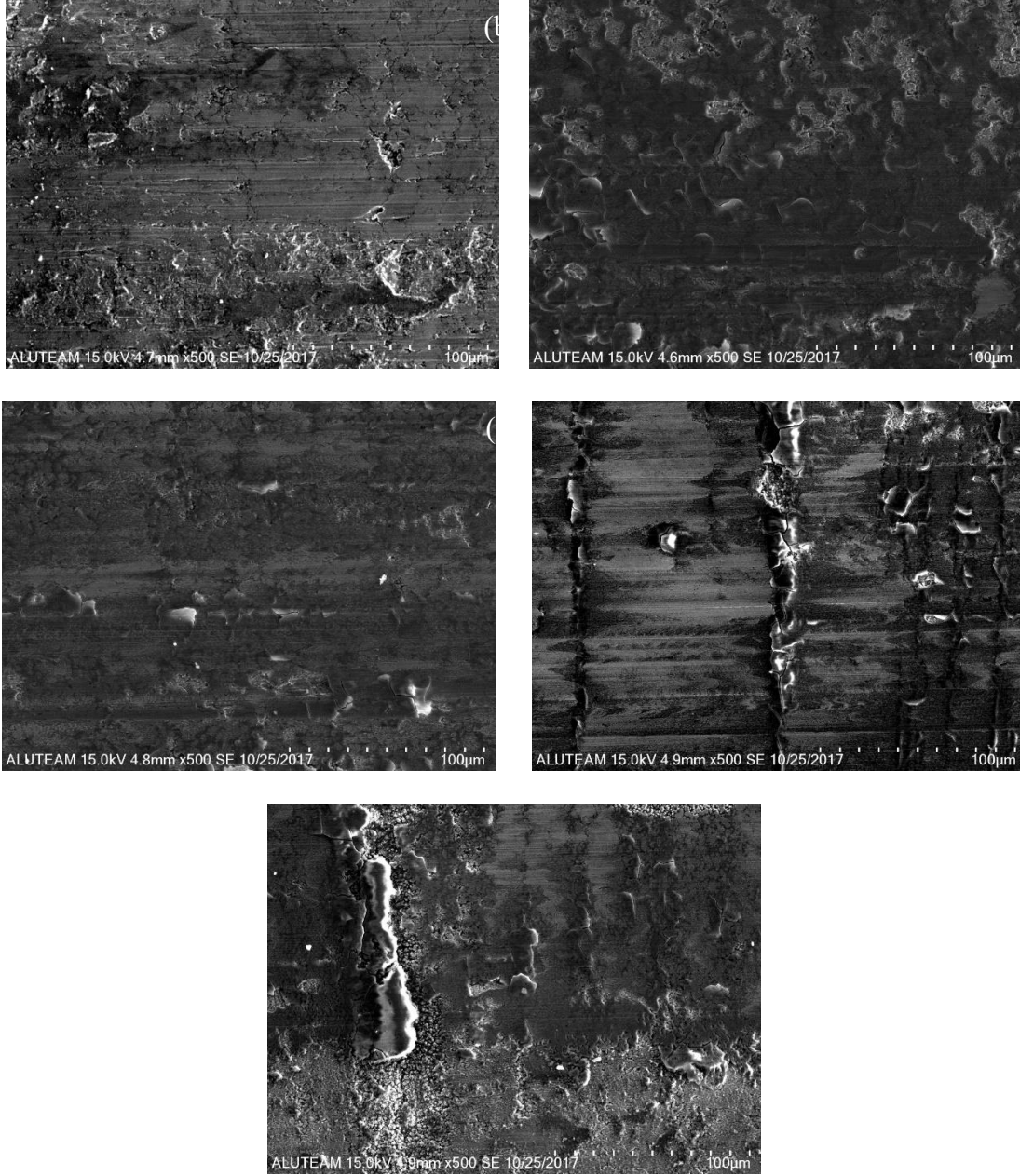




Şekil 6. Banyo çözeltisine a) 0.0, b) 0.5, c) 1.0, d) 2.0, e) 4.0 gr/l Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ilave edilmiş numunelerde aşınma testi sonrası oluşan iz genişlikleri ve f) hesaplanmış aşınma kayıpları

Sürtünme katsayıları, aşınma miktar ve mekanizmaları birlikte incelendiğinde mikro sertlik sonuçlarında olduğu gibi banyo bileşimine 1.0 g/l ye kadar Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ilavesi aşınma direncini artırmakta sürtünme özelliklerini iyileştirmektedir. Kompozit yapıdan beklenen mukavemet artış mekanizmalarının etkileri görülmektedir. Ancak, banyo 1.0 g/l nin üzerinde Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ilavesi setlik ölçüm

sonuçlarından da anlaşılacağı üzere mekanik özellikleri düşürdüğü tespit edilmiştir. Dolayısı ile aşınma esnasında kaplama tabakası yüzeyinden ayrılan malzeme miktarı artmıştır. Ayrılan bu parçacıklar aşındırıcı ile kaplama tabakası arasında girerek sürtünme katsayısının, aşınma hacim kaybının ve oluşan deformasyonun artmasına neden olmuştur.



Şekil 7. Banyo çözeltisine a) 0.0, b) 0.5, c) 1.0, d) 2.0 ve e) 4.0 gr/l  $Al_2O_3$  ilave edilmiş numune aşınma izleri yüksek çözünürlüklü SEM fotoğrafları

#### 4. GENEL SONUÇLAR

Bakır altlıklar üzerine Ni-Co alaşım ve Ni-Co/ $Al_2O_3$  nano kompozit kaplamalar elektrodepozisyon yöntemi kullanılarak başarılı bir şekilde üretilmiştir.

Banyo bileşimindeki  $Al_2O_3$  miktarı arttıkça kaplama tane boyutu küçülmüştür. Banyo bileşimine  $Al_2O_3$  ilavesi ağırlıklı büyüme yönünü (220) dan (111) yönüne kaydırmıştır.

En yüksek mekanik özellikler ve aşınma direnci kaplama banyosuna 1.0 g/l  $Al_2O_3$  eklenmesi ile elde edilmiştir. 1.0 g/l üzerinde  $Al_2O_3$  ilavesi, mekanik özellikleri ve aşınma

direncinin düşmesine neden olmuştur. Banyo bileşimine  $Al_2O_3$  ilavesi aşınma mekanizmasının ağır abrazif ten delemantasyon türü aşınma mekenizmasına geçmesine neden olmuştur.

#### KAYNAKLAR

- [1] R. Karslioglu and H. Akbulut, "Comparison microstructure and sliding wear properties of nickel-cobalt/CNT composite coatings by DC, PC and PRC current electrodeposition," *Appl. Surf. Sci.*, vol. 353, pp. 615–627, Oct. 2015.
- [2] D. P. Weston, P. H. Shipway, S. J. Harris, and M. K. Cheng, "Friction and sliding wear behaviour of

electrodeposited cobalt and cobalt–tungsten alloy coatings for replacement of electrodeposited chromium,” *Wear*, vol. 267, no. 5, pp. 934–943, Jun. 2009.

[3] M. Surender, B. Basu, and R. Balasubramaniam, “Wear characterization of electrodeposited Ni–WC composite coatings,” *Tribol. Int.*, vol. 37, no. 9, pp. 743–749, Sep. 2004.

[4] Y. Shacham-Diamand and Y. Sverdlov, “Electrochemically deposited thin film alloys for ULSI and MEMS applications,” *Microelectron. Eng.*, vol. 50, no. 1–4, pp. 525–531, Jan. 2000.

[5] C. Lupi and D. Pilone, “Electrodeposition of nickel–cobalt alloys: the effect of process parameters on energy consumption,” *Miner. Eng.*, vol. 14, no. 11, pp. 1403–1410, Nov. 2001.

[6] N. E. Fenineche, R. Hamzaoui, and O. El Kedim, “Structure and magnetic properties of nanocrystalline Co–Ni and Co–Fe mechanically alloyed,” *Mater. Lett.*, vol. 57, no. 26–27, pp. 4165–4169, Sep. 2003.

[7] W. E. G. Hansal, B. Tury, M. Halmdienst, M. L. Varsányi, and W. Kautek, “Pulse reverse plating of Ni–Co alloys: Deposition kinetics of Watts, sulfamate and chloride electrolytes,” *Electrochimica Acta*, vol. 52, no. 3, pp. 1145–1151, Nov. 2006.

[8] N. V. Myung, D.-Y. Park, B.-Y. Yoo, and P. T. A. Sumodjo, “Development of electroplated magnetic materials for MEMS,” *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 265, no. 2, pp. 189–198, Sep. 2003.

[9] S. E. Lyshevski, *MEMS and NEMS: Systems, Devices, and Structures*. CRC Press, 2002.

[10] M. P. Q. Argañaraz et al., “The chemistry and structure of nickel–tungsten coatings obtained by pulse galvanostatic electrodeposition,” *Electrochimica Acta*, vol. 72, pp. 87–93, Jun. 2012.

[11] B. Bhushan, “Nanotribology and nanomechanics

of MEMS/NEMS and BioMEMS/BioNEMS materials and devices,” *Microelectron. Eng.*, vol. 84, no. 3, pp. 387–412, Mar. 2007.

[12] N. S. Tambe and B. Bhushan, “Scale dependence of micro/nano-friction and adhesion of MEMS/NEMS materials, coatings and lubricants,” *Nanotechnology*, vol. 15, no. 11, p. 1561, 2004.

[13] L. Shi, C. Sun, P. Gao, F. Zhou, and W. Liu, “Mechanical properties and wear and corrosion resistance of electrodeposited Ni–Co/SiC nanocomposite coating,” *Appl. Surf. Sci.*, vol. 252, no. 10, pp. 3591–3599, Mar. 2006.

[14] L. Shi, C. F. Sun, F. Zhou, and W. M. Liu, “Electrodeposited nickel–cobalt composite coating containing nano-sized Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 397, no. 1, pp. 190–194, Apr. 2005.

[15] G. Wu, N. Li, D. Zhou, and K. Mitsuo, “Electrodeposited Co–Ni–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite coatings,” *Surf. Coat. Technol.*, vol. 176, no. 2, pp. 157–164, Jan. 2004.

[16] X. Li, T. Ono, R. Lin, and M. Esashi, “Resonance enhancement of micromachined resonators with strong mechanical-coupling between two degrees of freedom,” *Microelectron. Eng.*, vol. 65, no. 1–2, pp. 1–12, Jan. 2003.

[17] L. Shi, C. F. Sun, P. Gao, F. Zhou, and W. M. Liu, “Electrodeposition and characterization of Ni–Co–carbon nanotubes composite coatings,” *Surf. Coat. Technol.*, vol. 200, no. 16–17, pp. 4870–4875, Apr. 2006.

[18] “D. EMİRKESEN, E., ‘Kompozit Malzemeler’, İTÜ Kimya Fakültesi, 1. Baskı s.1-5, 1991.”

[19] L. M. Chang, M. Z. An, and S. Y. Shi, “Microstructure and characterization of Ni–Co/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite coatings by pulse reversal electrodeposit,” *Mater. Chem. Phys.*, vol. 100, no. 2–3, pp. 395–399, Dec. 2006.