



Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/yyufbed>



Araştırma Makalesi

Al 2024 Alaşımı Üzerine Mikro Ark Oksidasyon Yöntemiyle B₄C İlaveli Kompozit Kaplamaların Büyütülmesi

Süleyman ŞÜKÜROĞLU

Gümüşhane Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Fakültesi, İş Sağlığı ve Güvenliği Bölümü, 29100, Gümüşhane, Türkiye

Süleyman ŞÜKÜROĞLU, ORCID No: 0000-0003-4291-6378

Sorumlu yazar e-posta: ssukuroglu@gumushane.edu.tr

Makale Bilgileri

Geliş: 17.04.2023
Kabul: 05.06.2023
Online Aralık 2023

DOI:10.53433/yyufbed.1284780

Anahtar Kelimeler

Al alaşımı,
B₄C,
Mikro ark oksidasyon yöntemi (MAO)

Öz: Al alaşımı üzerinde Mikro ark Oksidasyon (MAO) yöntemiyle büyütilen kaplamaların yapısı ve özellikleri üzerine Bor karbür (B₄C) katılmasının etkisi, sodyum fosfat, sodyum silikat ve potasyum hidroksitten oluşan bir çözelti içerisinde gerçekleştirilerek araştırılmıştır. MAO, B₄C parçacıkları eklenmiş ve eklenmemiş çözeltilerde Al 2024 alaşımı üzerine uygulanmıştır. MAO kaplamalarının faz bileşimi ve mikro yapısı X-ışını kırınımı difraktometresi (XRD) ve taramalı elektron mikroskopu (SEM) kullanılarak değerlendirilmiştir. Ayrıca kaplamaların, mikrosertlik değerleri mikrosertlik test cihazı kullanılarak tespit edilmiştir. Al alaşımı üzerindeki oksit kaplamaların birincil olarak γ -Al₂O₃'ten oluştuğu gözlenmiştir. Solüsyona ilave edilen B₄C partiküllerinin eklenmesi, MAO kaplamalarının Al alaşımına üzerindeki oluşum hızını ve kompaktlığını iyileştirdiği ve X-ışını kırınımı yoluyla kaplamalarda B₄C varlığı tespit edilmiştir. Yüksek sertlik ve iyi kimyasal stabiliteye sahip B₄C parçacıkları, MAO kaplamalarında eşit olarak dağıldığı gözlenmiştir. Bu nedenle, B₄C takviyeli MAO kaplamaların sertlik değeri, Al alaşımına üzerindeki B₄C ilave edilmeyen oksit kaplamalardan belirgin şekilde yüksek olduğu gözlenmiştir.

Deposition of B₄C Doped Composite Coatings on Al 2024 Alloy by Micro-Arc Oxidation Method

Article Info

Received: 17.04.2023
Accepted: 05.06.2023
Online December 2023

DOI:10.53433/yyufbed.1284780

Keywords

Al alloy,
B₄C,
Micro arc oxidation method (MAO)

Abstract: The effect of boron carbide (B₄C) addition on the structure and properties of coatings grown by the Microarc Oxidation (MAO) method on Al alloy was investigated by performing it in a solution consisting of sodium phosphate, sodium silicate and potassium hydroxide. MAO was applied on Al 2024 alloy in solutions with and without added B₄C particles. The phase composition and microstructure of the MAO coatings were evaluated using X-ray diffraction diffractometry (XRD) and scanning electron microscopy (SEM). In addition, the microhardness values of the coatings were determined using a microhardness tester. It has been observed that the oxide coatings on the Al alloy are primarily composed of γ -Al₂O₃. The addition of B₄C particles to the solution improved the formation rate and compactness of MAO coatings on Al alloys, and the presence of B₄C in the coatings was detected by X-ray diffraction. B₄C particles with high hardness and good chemical stability were observed to be evenly dispersed in MAO coatings. Therefore, it has been observed that the hardness value of B₄C reinforced MAO coatings is significantly higher than that of oxide coatings without B₄C on Al alloys.

1. Giriş

Mikro ark oksidasyon (MAO), sıradan anodizasyona dayalı bir yüzey kaplama yöntemidir. Anodizasyonun Faraday bölgesi, yüksek voltajlı deşarj bölgesine dahil edilerek Al, Mg, Ti ve diğer metaller üzerinde seramik benzeri bir oksit kaplama oluşturmaktadır (Yerokhin ve ark., 1999; Dou ve ark., 2017; Yang ve ark., 2019; Guo ve ark., 2020). MAO işleminde, anot yüzeyindeki erimiş madde ve çözelti bileşenleri plazma boşaltma kanalına girmekte ve bir dizi karmaşık fiziksel-kimyasal reaksiyon meydana gelmektedir. Bu süreç, MAO kaplamalarının oluşturulmasında çok önemlidir ve kaplamaların fazını, bileşimini ve mikro yapısını belirlemektedir (Clyne & Troughton, 2019; Mojsilovi'c ve ark., 2021). Bu nedenle, MAO kaplamaları esas olarak oksitlerden oluşmaktadır. Çözelti bileşimi ve elektriksel parametreler değiştirilerek, uygulama gereksinimlerini karşılamak için farklı kimyasal bileşimlere, fazlara, renklere ve özelliklere sahip MAO kaplamaları büyütülebilmektedir (Fattah-Alhosseini ve ark., 2016 ve 2018; Simchen ve ark., 2017; Vakili-Azghandi & Fattah-Alhosseini, 2017; Vakili-Azghandi ve ark., 2018; Clyne & Troughton, 2019; Kaseem ve ark., 2021). MAO yöntemi taban malzemeler üzerine sürekli ve homojen bir kaplama büyüttüğü için son dönem çalışmaları metal matrisli kompozit (MMK) büyütme odaklanmaktadır. Daha önceki çalışmalarda, SiC/2024, SiC/A356 (Bahador ve ark., 2021), SiC/AZ31 (Cui ve ark., 2007; Arrabal ve ark., 2010), ve SiC/AZ91 (Wang ve ark., 2005) gibi MMK ilgili taban malzemelere başarıyla büyütülmüştür. Alüminyum matris kompozitler (AMK), hafif, yüksek mukavemet ve iyi termal iletkenlik gösterdikleri için havacılık sanayisinde, silahlar, optik aletler, elektronik paketleme gibi alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Sahin, 2003; Xue ve ark., 2007; Kumar & Dhiman, 2013; Idrisi & Mourad, 2019; Jiang ve ark., 2022; Zhu ve ark., 2023).

MAO yöntemi AMK için uygulanabilir bir yüzey işleme teknolojisi haline gelen, yüksek oksidasyon voltajı altında hafif metalik malzemeler (Al, Mg, Ti, vb.) üzerinde koruyucu kaplamalar hazırlamak için etkili bir yöntemdir (Zhang ve ark., 2010; Feng ve ark., 2017; Li ve ark., 2017; Wu ve ark., 2020; Zhu ve ark., 2022a ve 2022b). MAO yöntemi ile yüzeyde büyütülen seramik kaplamalar, hafif metalik malzeme ve alaşımlarının yük taşıma kapasitesinin artmasına, yüzey özelliklerinin optimum düzeye çıkmasına, nispeten daha düşük olan sürtünme, aşınma ve korozyon dirençlerinin de gelişmesini sağlamaktadır (Fattah-Alhosseini ve ark., 2020; Küçükosman ve ark., 2021). Bunun yanında MAO yönteminin doğasından kaynaklı olarak taban malzeme yüzeyinde büyütülen seramik kaplamaların yüzeylerinde yer yer mikro çatlakların oluşması ve kaplama yüzeyinin oldukça porlu bir yapıya sahip olması bu metalik malzemelerin agresif ortamlarda yeteri kadar korozyon direnci gösterememelerine neden olabilmektedir (Fattah-Alhosseini ve ark., 2020). Bu nedenle hem yüzeyde büyütülen seramik kaplamaların mekanik ve tribolojik özelliklerini geliştirmek hem de korozyon dirençlerini iyileştirebilmek amacıyla kaplama çözeltisi içerisine takviye katkı maddeleri eklenmektedir. İlave edilen takviye maddeler kıvılcım deşarjını ve MAO kaplamasının büyümesini büyük ölçüde etkileyebilen yarı iletken parçacıklar olup kaplama işlemi sırasında mikro çatlakların oluşumunu azaltmaktadır. Ayrıca ilave edilen maddeler yüzeyde oluşan porların içerisine girip oluşan boşlukların kapanmasını sağlayarak kaplamanın mekanik ve tribolojik özellikleri geliştirmekte, korozyona karşı direnci de arttırmaktadır (Atapour ve ark., 2019; Fattah-Alhosseini ve ark., 2020; Zhu ve ark., 2023).

MAO yönteminde kaplama çözeltisi içerisine taban malzemenin kullanım şartlarına bağlı olarak istenilen mekanik ve tribolojik özellikleri kazandırabilmek ve/veya korozyon direncini iyileştirebilmek amacıyla ZnO, GO, TiO₂, CeO₂, ZrO₂, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, Grafen, MgO, MoS₂, h-BN ve B₄C gibi farklı tür ve özellikte takviye katkı maddeleri ilave edilebilmektedir (Fattah-Alhosseini ve ark., 2020). Bu takviye katkı maddeleri içerisinden bor karbür (B₄C) ise sahip olduğu düşük yoğunluk, yüksek darbe aşınma dayanımı, yüksek ısı iletkenlik ve sönümleme kapasitesi gibi üstün fiziksel ve mekanik özellikler göstermesi nedeni ile tercih edilmektedir (Alizadeh ve ark., 2011; Ravindranath ve ark., 2017).

Buradaki amaç B₄C nin sahip olduğu üstün özelliklerinin MAO yöntemi ile büyütülen kaplamalara kazandırılma isteğidir.

Bu çalışmada; Al alaşımı üzerinde MAO yöntemiyle büyütülen kaplamaların yapısı ve özellikleri üzerine B₄C katılmasının etkisi, sodyum fosfat, sodyum silikat ve potasyum hidroksitten oluşan bir çözelti içerisinde gerçekleştirilerek araştırılmıştır. MAO, B₄C parçacıkları eklenmiş ve eklenmemiş çözeltilerde Al 2024 alaşımı üzerine uygulanmıştır. MAO kaplamalarının faz bileşimi ve mikro yapısı X-ışını kırınımı difraktometresi (XRD) ve taramalı elektron mikroskopu (SEM) kullanılarak değerlendirilmiştir. Ayrıca kaplamaların, mikrosertlik değerleri mikrosertlik test cihazı kullanılarak tespit edilmiştir. Al alaşımı üzerindeki oksit kaplamaların birincil olarak γ -Al₂O₃'ten oluştuğu gözlenmiştir. Solüsyona ilave edilen B₄C partiküllerinin eklenmesi, MAO kaplamalarının Al alaşımları üzerindeki oluşum hızını ve kompaktlığını iyileştirdiği ve X-ışını kırınımı yoluyla kaplamalarda B₄C varlığı tespit edilmiştir. Yüksek sertlik ve iyi kimyasal stabiliteye sahip B₄C parçacıkları, MAO kaplamalarında eşit olarak dağıldığı belirlenmiştir. Bu nedenle, B₄C takviyeli MAO kaplamaların sertlik değeri (400 HV), Al alaşımları üzerindeki B₄C ilave edilmeyen oksit kaplamaların sertlik değerinden (250 HV) belirgin bir şekilde yüksek olduğu gözlemlenmiştir.

2. Materyal ve Yöntem

MAO için taban malzeme olarak Al 2024 alaşımı (20 mm x 20 mm x 2 mm) plakalar kullanılmıştır. Numuneler, sırasıyla 800, 1000 ve 1200 mesh SiC aşındırıcı kâğıt kullanılarak art arda parlatılmış ve alkolle temizlenerek soğuk hava üfleme suretiyle kurutulmuştur.

MAO kaplama işlemi, 4 g/l Na₂SiO₃, 2 g/l KOH, 6 g/l Na₂PO₄ ve 3 g/l NaAlO₂ dan oluşan elektrolit içerisinde gerçekleştirilmiştir. AMK kaplamalar için ise 2–3 µm boyutunda 6 g/l B₄C partikülleri aynı elektrolite ilave edilerek Al2024 taban malzemeler üzerine büyütülmüştür.

MAO cihazı esas olarak bir güç kaynağı, bir elektrolitik hücre, bir karıştırıcı, sirkülasyonlu soğutma sistemi ve diğer bileşenleri içerir. MAO güç kaynağı (Faraday Elektronik Ltd.), MAO sürecinde sabit voltaj kontrol yönteminde kullanılmıştır. Oksidasyon işlemi 40 dakika süreyle 550 V voltaj değerinde, %25 görev çevriminde ve 300 Hz frekansında gerçekleştirilmiştir.

MAO kaplamasının faz yapıları, bir X-ışını difraktometresi (XRD) kullanılarak analiz edilmiştir. Kaplama morfolojilerini incelemek ve element analizini gerçekleştirmek için 20 kV ivme voltajında taramalı elektron mikroskopu (SEM) kullanılmıştır.

MAO yöntemi ile kaplanan örneklerin mikrosertlik değerleri vickers sertlik yöntemi uygulanarak belirlenmiştir. Kaplanmış örneklerin mikrosertliği; 10 saniye boyunca 136° Vickers batıcı uca 0,5 N yük uygulayan mikrosertlik test cihazı yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Mikrosertlik test cihazı ile uygulanan yükün örnek yüzeyinde oluşturulan deformasyon izlerinin belirlenmesi ile kaplamaların mikrosertlik değerleri belirlenmiştir.

3. Bulgular ve Tartışma

MAO işlemi doğası gereği; içerisinde elektrolit sıvı çözeltisi bulunan paslanmaz çelik tank katot, Al 2024 taban malzeme ise anodu temsil etmektedir. Kaplama işlemi sırasında uygulanan bir potansiyel farkın etkisi ile anot ve katot arasında elektrik alan meydana gelmektedir. Meydana gelen elektrik alanına bağlı olarak elektroliti oluşturan iyonlardan pozitif yüklü olanlar elektrik alan yönünde, negatif yüklü olanlar ise elektrik alanına zıt yönde ayrılarak hareket etmektedirler. Meydana gelen bu ayrışma elektroliz yöntemine benzemektedir. Çözelti içerisinde serbest hale geçen oksijen gazı ise metal oksidasyonunun anodik düzeyde olmasını sağlamaktadır. Bunun yanında kaplama işleminin gerçekleştiği elektrolitik çözeltinin kimyasal içeriğine bağlı olarak gerçekleşen oksidasyon reaksiyonu taban malzeme yüzeyinde çözümlere veya seramik yapıdaki oksit film tabakasının oluşmasına neden

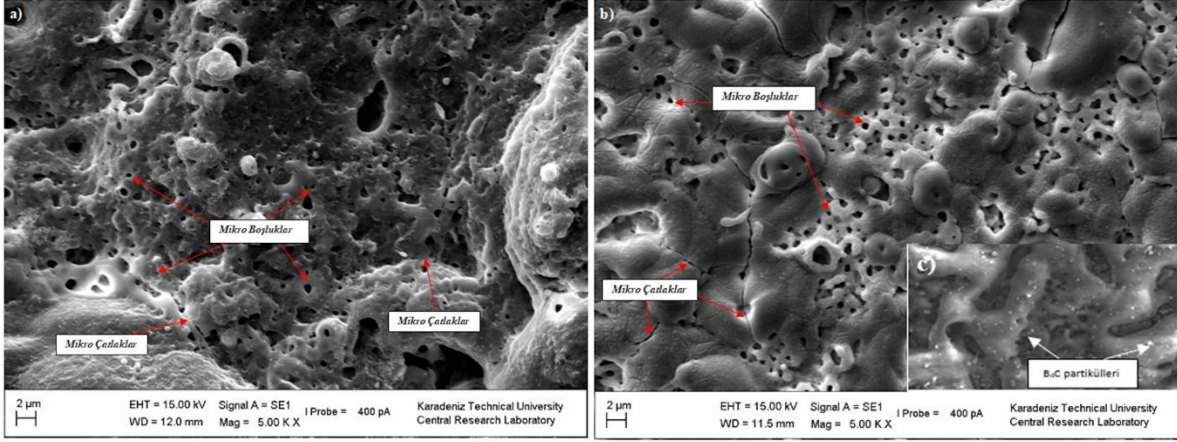
olmaktadır. Ayrıca elektrolitik çözelti içerisinde gaz formunda bulunan hidrojenin de serbest kalması ile katodik yüzeyde katyon redüksiyonu oluşmaktadır. Polarizasyon parametrelerine bağlı olarak elektrolitik sıvı çözelti ile Al 2024 taban malzemenin kombinasyonu sonucu çözelti içerisinde anot görevi gören Al 2024 taban malzeme yüzeyinde uniform dağılım gösteren sürekli parıltılar oluşmaktadır. Oluşan bu parıltılar ise zamanın bir fonksiyonu olarak kısa süreli mikro boşalmalara dönüşmektedir (Yerokhin ve ark., 1999).

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde özellikle alüminat bazlı elektrolitlerde yaklaşık 300 s'nin üzerindeki kaplanmış numunelerin zamana karşı voltaj değişimlerinin üç ayrı adımda gerçekleştiğini vurgulamaktadır (Lv ve ark., 2006; Monfort ve ark., 2007a ve 2007b; Lee ve ark., 2011; Wang ve ark., 2013; Molaeipour ve ark., 2022). Anotlama işlemiyle aynı olan ilk adımda, voltajın zamanla doğrusal bir ilişkisinin olduğu ve alkalın alüminat elektrolit üzerinde ince bir oksit film tabakası oluştuğu söylenebilir. Çözelti içerisine ilave edilen negatif yüklü bor karbür partiküller anoda elektrostatik olarak adsorbe edilmektedir. Numunenin yüzeyinde ince bir koruyucu oksit tabakası oluşumu sırasında, bazı partiküller kaplamanın içinde hapsolmaktadır. İkinci aşamada, voltajın yükseltilmesi ve dielektrik bozulma voltajına ulaşılmasına neden olmaktadır. Kıvılcım deşarjları ile birlikte yalıtım filmi üzerinde bazı zayıf saçılmış alanlarda dielektrik arıza meydana gelmekte ve çok sayıda küçük ve üniform gözenek üretimine yol açmaktadır (Hussein ve ark., 2010; Molaeipour ve ark., 2022). Mikro ark deşarjları, elektroforetik kuvvetle birlikte partiküllerin birikmesine katkıda bulunarak, partiküllerin kaplamalarda tutulmasının yanı sıra kaplamaların büyümesine de yol açmaktadır. Sonuç olarak, kaplamanın orta kısımları diğer kısımlara göre daha fazla partikül içermektedir. Üçüncü aşamada ise mikro deşarj aşaması olarak, gerilimin zamana göre değişimi düşüktür ve voltaj artık belirlenen sabit durum değerine ulaşmaktadır. Bu adımdaki son gerilim, kaplama kalınlığı artışıyla yoğunlaşan son gerilim olarak kabul edilmektedir. Buna göre, MAO işleminin üçüncü adımı, önceki aşamalara kıyasla daha az kıvılcım oluşmasını ancak daha yüksek yoğunlukta olduğunu göstermektedir. Bu, bir dış gözenekli tabakanın oluşmasını sağlamakta, bu da elektrolitteki partiküllerin gözeneklerin içinde hapsolabildiği anlamına gelmektedir. Son olarak, elektrolitteki parçacıklar, ağırlıklı olarak elektroforetik kuvvet ve erimiş oksit tabakasında hapsolma ile üretilen bir kompozit kaplama oluşturmaktadır.

Farklı iyonların ve partiküllerin, kaplamanın oluşum mekanizmasını ciddi ölçüde etkilediği bilinmektedir (Becerik ve ark., 2012). B₄C partikül ilaveli elektrolitlerle üretilen kompozit kaplamaların yüzey morfolojileri incelendiğinde (Şekil 1), kaplamaların yüzeyinde bulunan gözenek çaplarının azalarak sayılarının arttığı gözlemlenmektedir. MAO işleminde kullanılan elektrolitlere ilave edilen katkı maddelerinin kaplama sürecini büyük ölçüde etkilediği ve bunun kaplamaların farklı morfolojik özellikler sergilemesi ile sonuçlandığı görülmektedir. Bu durumun büyük ölçüde elektrolitin iletkenliğinin artmasına bağlı olarak ortaya çıktığı düşünülmektedir. Elektrolitin iletkenliğinin artmasının dielektrik bozulma potansiyelinin azalmasına ve bunun da mikro gözenek sayısının azalmasına sebep olduğu destekleyici bulgulara sahip çalışmalar mevcuttur (Aliofkhazraei & Rouhaghdam, 2012; Li ve ark., 2018; Fattah-Alhosseini ve ark., 2020).

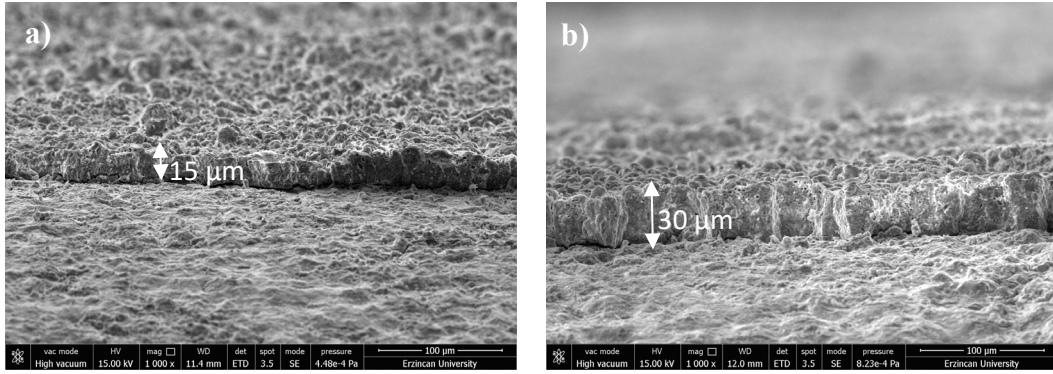
B₄C partikül ilave edilen örnekler için yüzey gözenekliliği partikül ilave edilmeden kaplanan örneklerle kıyasla daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Bu durumun partikülün adsorbe edilmiş olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir (Molaeipour ve ark., 2022). Elektrolitten gelen partiküllerin, yüzey gözeneklerinin içine, gözeneklerin duvarlarının içine ve kaplamanın dış yüzeyine yerleştiği bilinmektedir (Lv ve ark., 2006; Cui ve ark., 2007; Monfort ve ark., 2007a; Arrabal ve ark., 2010; Wang ve ark., 2015; Mingo ve ark., 2017; Bahador ve ark., 2021; Molaeipour ve ark., 2022). Başka bir deyişle, partiküller, gözeneklerin kenarlarına ve içlerine elektroforetik kuvvetle veya çok sayıda mikro ark deşarjının meydana gelmesiyle erimiş oksitle adsorbe edilebilmektedir. Bazı partiküller, herhangi bir dalgalanma ve agresif elektrolite maruz kalmanın onları yüzeyden

çıkartılabileceği yüzeye güçlü bir yapışma olmadan MAO tabakasının yüzeyinde birikebildiği Şekil 1 de gösterilen SEM görüntülerinden anlaşılabilir.



Şekil 1. Yüzey SEM görüntüleri a) MAO b) B₄C/MAO ve c) B₄C/MAO kaplamaların yakından görüntüsü.

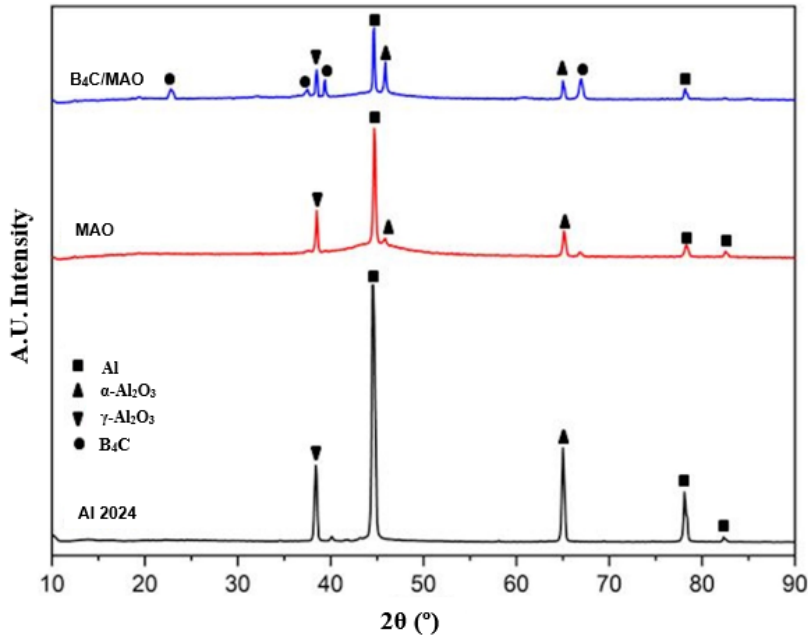
MAO kaplamaların büyütülmesi için kullanılan voltaj ne kadar yüksek olursa, kıvılcıkların enerjisi de o kadar yüksek olmaktadır. Bu nedenle, yüzey gözeneklerinin boyutu artmaktadır (Xia ve ark., 2016). Bu aynı zamanda, elektroforetik kuvveti artırarak partiküllerin adsorpsiyon oranını artırabilmekte ve bu da yüzey gözeneklerinin yoğunluğunu azaltabilir (Shokouhfar & Allahkaram, 2016; Molaeipour ve ark., 2022). Elektrolite ilave edilen partiküller ilk önce kaplamanın elektroforetik kuvveti ile yüzeye adsorbe olmakta, daha sonra ya yüksek sıcaklıktaki kıvılcıklarla kısmen eritilmiş ya da erimiş malzeme ile birleşebilmektedir. Bu nedenle, orijinal boyutlarından daha büyük çaplı partiküllerin yüzeyde bulunduğu tespit edilmiştir.



Şekil 2. Kesit SEM görüntüleri a) MAO ve b) B₄C/MAO.

MAO kaplamaların kesit görüntüleri Şekil 2' de gösterilmiştir ve kalınlık ölçümlerinin sonuçları belirtilmiştir. MAO kaplamaların kesit morfolojilerinin literatürde üç ana bölgeden oluştuğu bilinmektedir (Haghighat-Shishavan ve ark., 2019). Bu bölgeler; geçiş bölgesi, fonksiyonel bölge ve gözenekli dış bölge olarak belirtilmektedir (Darband ve ark., 2017; Haghighat-Shishavan ve ark., 2019). Taban malzeme üzerinde bulunan ilk bölge geçiş bölgesidir. İnce ve yoğun bir yapıdadır. Bu tabakanın üzerinde fonksiyonel bölge olarak adlandırılan mekanik özelliklerin iyi olduğu ve orta yoğunlukta olan bir bölge takip etmektedir. Son ve en dış kısımda olan bölge ise yoğun olmayan gözenekli bir tabakadır. Fonksiyonel bölge kaplama kalınlığının %70-80' ini oluşturmaktadır (Darband ve ark., 2017). Kaplama esnasında oluşan yüksek sıcaklık değerlerinin fonksiyonel bölgenin üzerinde etkili olduğu, daha kararlı

ve daha yoğun fazlardan oluşmaktadır. Dielektrik bozulma voltaj değerinin düşmesi yüzeydeki arkların yoğunlaşmasına sebep olmaktadır. Yoğunlaşan arklar ise yüzeydeki deşarj kanallarının daha fazla malzemenin tahliyesine izin vererek yüzey pürüzlülüğünü artırmakla birlikte kaplama kalınlığını da artırmaktadır (Şekil 2) (Haghighat-Shishavan ve ark., 2019). Elektrolit içerisinde B₄C partiküllerinin varlığının sadece yüzeysel gözenekliliğin azalmasında rol oynamamakta ayrıca kaplama kalınlığı üzerinde de etkisi bulunmaktadır. Partiküllerin elektrolite dahil edilmesi nedeniyle kaplama kalınlığının değiştiğini gösteren benzer çalışmalar bulunmaktadır (Zhao ve ark., 2016; Kaplan ve ark., 2021). Kaplama kalınlığı; taban malzemenin içeriği, katkı maddesinin içeriği, oksidasyon süresi ve frekans, akım, voltaj gibi elektriksel parametreler gibi çeşitli faktörler tarafından etkilenmektedir (Yerokhin ve ark., 1999; Roknian ve ark., 2018; Li ve ark., 2019). Elektrolitin içerisindeki serbest iyon miktarının artmasıyla kaplama kalınlığının belirli oranlarda artmış olduğu çalışmalar da mevcuttur (Kaplan ve ark., 2021).

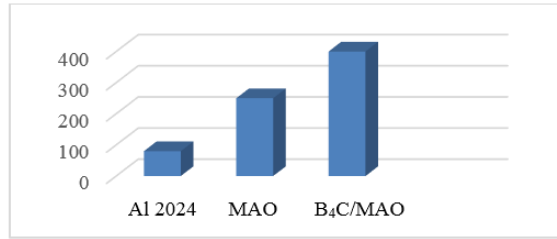


Şekil 3. XRD analizi sonuçları.

Şekil 3' de ise Al 2024 alaşımı üzerine büyütülen kaplamaların XRD grafikleri gösterilmektedir. Şekil 3' de büyütülen B₄C ilaveli MAO ve ilavesiz MAO kaplamaların ana yapısında Al, α -Al₂O₃, γ -Al₂O₃ fazları görülmektedir. Al pikleri, X-ışınının kaplama boyunca nüfuz etmesine ve taban malzemeden yansıma almasına bağlanmaktadır (Ma ve ark., 2022a). Literatürden bilindiği üzere MAO yöntemi ile büyütülen kaplamaların ana yapısında oluşan α -Al₂O₃ ve γ -Al₂O₃ fazları, kaplama yüzeyindeki soğuma hızlarının farklı olmasından dolayı oluşmaktadır. Kaplama yüzeyinin dış katmanında yüksek soğuma hızından kaynaklı yoğun olmayan, sert ve kırılğan γ -Al₂O₃ fazı oluşmakta olup, dış katmana göre nispeten daha düşük soğuma hızına sahip olan iç katmanda ise daha yoğun ve yüksek sertliğe sahip α -Al₂O₃ fazı oluşmaktadır. α -Al₂O₃ fazı γ -Al₂O₃ fazından daha yoğun ve adezif bir yapı sergilemektedir (Xue ve ark., 2000; Xin ve ark., 2006; Haghighat-Shishavan ve ark., 2019; Matin ve ark., 2020). Çözeltiyi oluşturan diğer elementlerin de kaplamalar üzerinde faz oluşturabileceği literatürden bilinmektedir ancak bu çalışmada çözeltiden gelebilecek faz yapılarına rastlanmamıştır (Yerokhin ve ark., 1999; Chen ve ark., 2006; Gu ve ark., 2012; Yang ve ark., 2020). Literatürde, kaplamanın yoğun iç tabakasının esas olarak α -Al₂O₃ içerdiği, γ -Al₂O₃ ün ise tercihen Al ve elektrolit arasındaki reaksiyonlardan dolayı dış tabakada oluştuğu bildirilmiştir (Hussein ve ark., 2013). Al fazının pikleri; X-ışınlarının gözenekli mikro yapı yoluyla nüfuz etmesine atfedilebilir (Darband ve ark., 2017).

B₄C partikülü ilave edilen elektrolitte büyütülen kaplamaların ilavesiz kaplamalara nazaran daha yüksek şiddetlerde pikler içerdiği tespit edilmiştir. İlave olarak bu kaplamalarda B₄C piklerine de rastlanmıştır. B₄C ilaveli kaplamalarda pik şiddetlerinin fazla olması bu şartta büyütülen oksit kaplamalarının kalınlığının fazla olmasından da kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca B₄C ilavesi ile dielektrik bozunma voltaj değerinin kaplama yapısı üzerinde oldukça etkili olduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte dielektrik bozunma voltaj değerinin azalmasıyla plazma deşarjının elde edilmesinin daha kolay meydana geldiği ve böylece α -Al₂O₃ fazının oluşumunun kolaylaştığı da söylenebilmektedir (Ma ve ark., 2022b).

Büyütülen kaplamalara ait Vickers mikro sertlik değeri Şekil 4'te sunulmaktadır. Tüm B₄C ilaveli MAO kaplamalar, MAO kaplamadan daha yüksek mikro sertlik sergilemektedir. B₄C kompozit kaplamanın Vickers mikrosertliği 400 HV olarak tespit edilmiştir. Ancak MAO kaplamanın mikrosertliği ise 250 HV olarak tespit edilmiştir. B₄C parçacıkları eklendikten sonra kaplamanın mikrosertliğinin arttığı yani B₄C parçacıkları kaplamaların mikro sertliğini önemli ölçüde artırabildiği söylenebilmektedir.



Şekil 4. Mikro sertlik değerleri.

Bu sonucu açıklamanın iki olası nedeni vardır: biri, büyütülen kaplamalardaki B₄C parçacıklarının matris tane sınırı kaymasını ve dislokasyon hareketini engellemesinden kaynaklandığı söylenebilir (Zhu ve ark., 2022b), diğeri ise homojen bir şekilde dağılmış B₄C partiküllerinin kristal taneleri dispersiyon güçlendirici etki (Singh ve ark., 2015) ile birleştiğinde, kaplamaların sertliğinin artmasıyla sonuçlandığı düşünülmektedir.

4. Sonuç

Bu çalışmada; Al 2024 taban malzeme üzerine aynı şartlarda MAO kaplama ve B₄C ilave edilmiş MAO kaplamaları büyütülmüştür. Büyütülen kaplamaların yapısal ve morfolojik özellikleri incelenmiş ve sertlik değerleri tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar özetlenmiştir.

- B₄C partikülleri ilaveli elektrolitlerle üretilen kompozit kaplamaların yüzey morfolojileri incelendiğinde, kaplamaların yüzeyinde bulunan gözenek çaplarının azalarak sayılarının arttığı gözlemlenmiştir.
- B₄C ilaveli elektrolitin iletkenliğinin artmasının dielektrik bozulma potansiyelinin azalmasına ve bunun da mikro gözenek sayısının azalmasına sebep olduğu tespit edilmiştir.
- B₄C partikül ilave edilen örnekler için yüzey gözenekliliği partikül ilave edilmeden kaplanan örneklere kıyasla daha düşük olduğu tespit edilmiştir.
- Elektrolit içerisinde B₄C partiküllerinin varlığının sadece yüzeysel gözenekliliğin azalmasında rol oynamamakta ayrıca kaplama kalınlığı üzerinde de etkisi bulunmaktadır.
- B₄C partikülü ilave edilen elektrolitte büyütülen kaplamaların ilavesiz kaplamalara nazaran oldukça yüksek şiddetlerde bulunduğu tespit edilmiştir.
- İşlem görmemiş Al 2024 taban malzemenin Vickers mikrosertliği yaklaşık 50 HV iken MAO kaplamanın Vickers mikrosertliği 250 HV, B₄C kompozit kaplamanın Vickers mikrosertliği ise 400 HV olarak tespit edilmiştir. B₄C parçacıklarının elektrolitik çözeltiliye ilave edilmesi ile kaplamaların mikro sertliğinde önemli ölçüde artış sağlandığı tespit edilmiştir.

Kaynakça

- Aliofkhazraei, M., & Rouhaghdam, A. S. (2012). Tribological behaviour of mechanically synthesized titanium-boron carbide nanostructured coating. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 12, 6840-6844. doi:10.1166/jnn.2012.4535
- Alizadeh, A., Taheri-Nassaj, E., & Baharvandi, H.R. (2011). Preparation and investigation of Al4wt.%B₄C nanocomposite powders using mechanical milling. *Bulletin of Materials Science*, 34, 1039-1048. doi:10.1007/s12034-011-0158-5
- Arrabal, R., Pardo, A., Merino, M. C., Mohedano, M., Casajús, P., Matykina, E., Skeldon, P., & Thompson, G. E. (2010). Corrosion behaviour of a magnesium matrix composite with a silicate plasma electrolytic oxidation coating. *Corrosion Science*, 52, 3738–3749, doi:10.1016/j.corsci.2010.07.024
- Atapour, M., Blawert, C., & Zheludkevich, M.L. (2019). The wear characteristics of CeO₂ containing nanocomposite coating made by aluminate-based PEO on AM 50 magnesium alloy. *Surface and Coatings Technology*, 357, 626-637. doi:10.1016/j.surfcoat.2018.10.033
- Bahador, R., Hosseinabadi, N., & Yaghtin, A. (2021). Effect of power duty cycle on plasma electrolytic oxidation of A356-Nb₂O₅ metal matrix composites. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 30, 2586–2604. doi:10.1007/s11665-021-05597-4
- Becerik, D. A., Ayday, A., Kumruoğlu, L. C., Kurnaz, C., & Özel, A. (2012). The effects of Na₂SiO₃ concentration on the properties of plasma electrolytic oxidation coatings on 6060 aluminum alloy. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 21, 1426-1430. doi:10.1007/s11665-011-0022-1
- Chen, J., Shi, Y., Wang, L., Yan, F., & Zhang, F. (2006). Preparation and properties of hydroxyapatite-containing titania coating by micro-arc oxidation. *Materials Letters*, 60, 20, 2538-2543. doi:10.1016/j.matlet.2006.01.035
- Clyne, T. W., & Troughton, S. C. (2019). A review of recent work on discharge characteristics during plasma electrolytic oxidation of various metals. *International Materials Reviews*, 64, 127–162. doi:10.1080/09506608.2018.1466492
- Cui, S., Han, J., Du, Y., & Li, W. (2007). Corrosion resistance and wear resistance of plasma electrolytic oxidation coatings on metal matrix composites. *Surface and Coatings Technology*, 201, 5306–5309. doi:10.1016/j.surfcoat.2006.07.126
- Darband, G. B., Aliofkhazraei, M., Hamghalam, P., & Valizade, N. (2017). Plasma electrolytic oxidation of magnesium and its alloys: Mechanism, properties and applications. *Journal of Magnesium and Alloys*, 5, 1, 74-132. doi:10.1016/j.jma.2017.02.004
- Dou, J., Chen, Y., Yu, H., & Chen, C. (2017). Research status of magnesium alloys by micro-arc oxidation: a review. *Surface Engineering*, 33, 731-738. doi:10.1080/02670844.2017.1278642
- Fattah-Alhosseini, A., Vakili-Azghandi, M., & Keshavarz, M. K. (2016). Influence of concentrations of KOH and Na₂SiO₃ electrolytes on the electrochemical behavior of ceramic coatings on 6061 Al alloy processed by plasma electrolytic oxidation. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 29, 274-281. doi:10.1007/s40195-016-0384-3
- Fattah-Alhosseini, A., Gashti, S. O., & Molaie, M. (2018). Effects of disodium phosphate concentration (Na₂HPO₄·2H₂O) on microstructure and corrosion resistance of plasma electrolytic oxidation (PEO) coatings on 2024 Al alloy. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 27, 825-834. doi:10.1007/s11665-018-3124-1
- Fattah-Alhosseini, A., Chaharmahali, R., & Babaei, K. (2020). Effect of particles addition to solution of plasma electrolytic oxidation (PEO) on the properties of PEO coatings formed on magnesium and its alloys: A review. *Journal of Magnesium and Alloys*, 8, 3, 799-818. doi:10.1016/j.jma.2020.05.001
- Feng, X., Shi, R., Lu, X., Xu, Y., Huang, X., & Chen, D. (2017). The corrosion inhibition efficiency of aluminum tripolyphosphate on carbon steel in carbonated concrete pore solution. *Corrosion Science*, 124, 150–159. doi:10.1016/j.corsci.2017.05.018
- Gu, Y., Bandopadhyay, S., Chen, C. F., Guo, Y., & Ning, C. (2012). Effect of oxidation time on the corrosion behavior of micro-arc oxidation produced AZ31 magnesium alloys in simulated body fluid. *Journal of Alloys and Compounds*, 543, 109–117. doi:10.1016/j.jallcom.2012.07.130

- Guo, Q., Xu, D., Yang, W., Guo, Y., Yang, Z., Li, J., & Gao, P. (2020). Synthesis, corrosion, and wear resistance of a black microarc oxidation coating on pure titanium. *Surface and Coatings Technology*, 386, 125454. doi:10.1016/j.surfcoat.2020.125454
- Haghighat-Shishavan, B., Azari-Khosrowshahi, R., Haghighat-Shishavan, S., NazarianSamani, M., & Parvini-Ahmadi, N., (2019). Improving wear and corrosion properties of alumina coating on AA7075 aluminum by plasma electrolytic oxidation: effects of graphite absorption. *Applied Surface Science*, 481, 108-119. doi:10.1016/j.apsusc.2019.03.069
- Hussein, R., Nie, X., Northwood, D., Yerokhin, A., & Matthews, A. (2010). Spectroscopic study of electrolytic plasma and discharging behaviour during the plasma electrolytic oxidation (PEO) process. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 43, 105203. doi:10.1016/j.surfcoat.2011.06.031
- Hussein, R. O., Nie, X., & Northwood, D. O. (2013). An investigation of ceramic coating growth mechanisms in plasma electrolytic oxidation (PEO) processing. *Electrochimica Acta*, 112, 111-119. doi:10.1016/j.electacta.2013.08.137
- Idrisi, A. H., & Mourad, A. H. I. (2019). Conventional stir casting versus ultrasonic assisted stir casting process: mechanical and physical characteristics of AMCs. *Journal of Alloys and Compounds*, 805, 502–508. doi:10.1016/j.jallcom.2019.07.076
- Jiang, C., Wang, Y., Wang, S., Li, Y., Zou, Y., Ouyang, J., Jia, D., & Zhou, Y. (2022). Achieving high-efficiency electrically insulating ceramic layer formed on SiCp/Al composite by bipolar pulsed PEO for novel integrated strategy. *Surface and Coatings Technology*, 444. doi:10.1016/j.surfcoat.2022.128692
- Kaplan, E., Şüküroğlu, E. E., & Çuvalcı, O. (2021). Investigation of characterization and tribological behavior of composite oxide coatings doped with h-BN and graphite particles on ZA-27 alloy by micro-arc oxidation. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 35, 12, 1305-1319. doi:10.1080/01694243.2020.1843315
- Kaseem, M., Fatimah, S., Nashrah, N., & Ko, Y. G. (2021). Recent progress in surface modification of metals coated by plasma electrolytic oxidation: principle, structure, and performance. *Progress in Materials Science*, 117, 100735. doi:10.1016/j.pmatsci.2020.100735
- Kumar, R., & Dhiman, S. (2013). A study of sliding wear behaviors of Al-7075 alloy and Al-7075 hybrid composite by response surface methodology analysis. *Materials & Design*, 50, 351-359. doi:10.1016/j.matdes.2013.02.038
- Küçükosman, R., Şüküroğlu, E. E., Totik, Y., & Şüküroğlu, S. (2021). Effects of graphene oxide addition on wear behaviour of composite coatings fabricated by plasma electrolytic oxidation (PEO) on AZ91 magnesium alloy. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 35, 242-255. doi:10.1080/01694243.2020.1800289
- Lee, K. M., Ko, Y. G., & Shin, D. H. (2011). Incorporation of multi-walled carbon nanotubes into the oxide layer on a 7075 Al alloy coated by plasma electrolytic oxidation: coating structure and corrosion properties. *Current Applied Physics*, 11, 55–59. doi:10.1016/j.cap.2011.07.009
- Li, H., Lu, S., Qin, W., & Wu, X. (2017). In-situ grown MgO-ZnO ceramic coating with high thermal emittance on mg alloy by plasma electrolytic oxidation. *Acta Astronautica*, 136, 230-235. doi:10.1016/j.actaastro.2017.03.021
- Li, X., Dong, C., Zhao, Q., Pang, Y., Cheng, F. & Wang, S. (2018). Characterization of microstructure and wear resistance of PEO coatings containing various microparticles on Ti6Al4V alloy. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 27, 1642-1653. doi:10.1007/s11665-018-3249-2
- Li, Z., Cai, Z., Cui, Y., Liu, J. & Zhu, M. (2019). Effect of oxidation time on the impact wear of micro-arc oxidation coating on aluminum alloy. *Wear*, 426-427, 285-295. doi:10.1016/j.wear.2019.01.084
- Lv, G., Gu, W., Chen, H., Feng, W., Khosa, M. L., Li, L., Niu, E., Zhang, G., & Yang, S. Z. (2006). Characteristic of ceramic coatings on aluminum by plasma electrolytic oxidation in silicate and phosphate electrolyte. *Applied Surface Science*, 253, 2947-2952. doi:10.1016/j.apsusc.2006.06.036
- Ma, X., Jin, S., Wu, R., Ji, Q., Hou, L., Krit, B., & Betsofen, S. (2022a). Influence alloying elements of Al and Y in Mg-Li alloy on the corrosion behavior and wear resistance of microarc oxidation coatings. *Surface and Coatings Technology*, 432, 128042. doi:10.1016/j.surfcoat.2021.128042

- Ma, X., Jin, S., Wu, R., Zhang, S., Hou, L., Krit, B., Betsofen, S., & Liu, B. (2022b). Influence of combined B₄C/C particles on the properties of microarc oxidation coatings on Mg-Li alloy. *Surface and Coatings Technology*, 438, 128399. doi:10.1016/j.surfcoat.2022.128399
- Matin, R., Totik, Y., Sukuroglu, E. E., Efeoglu, I., & Santos, T. G. (2020). Effects of voltage on the components of surface integrity of Al₂O₃ ceramic coatings on AA2024 by plasma electrolytic oxidation. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 34, 18, 1971-1981. doi:10.1080/01694243.2020.1742970
- Mingo, B., Arrabal, R., Mohedano, M., Pardo, A., & Matykina, E. (2017). Corrosion and wear of PEO coated AZ91/SiC composites. *Surface and Coatings Technology*, 309, 1023-1032. doi:10.1016/j.surfcoat.2016.10.041
- Mojsilovi'c, K., Bo'zovi', N., Stojanovi'c, S., Damjanovi'c-Vasili'c, L., Serdechnova, M., Blawert, C., Zheludkevich, M. L., Stojadinovi'c, S., & Vasili', R. (2021). Zeolite-containing photocatalysts immobilized on aluminum support by plasma electrolytic oxidation. *Surfaces and Interfaces*, 26, 101307. doi:10.1016/j.surfin.2021.101307
- Monfort, F., Berkani, A., Matykina, E., Skeldon, P., Thompson, G., Habazaki, H., & Shimizu, K. (2007a). Development of anodic coatings on aluminium under sparking conditions in silicate electrolyte. *Corrosion Science*, 49, 672-693. doi:10.1016/j.corsci.2006.05.046
- Monfort, F., Matykina, E., Berkani, A., Skeldon, P., Thompson, G., Habazaki, H., & Shimizu, K. (2007b). Species separation during coating growth on aluminium by spark anodizing. *Surface and Coatings Technology*, 201, 8671-8676. doi:10.1016/j.surfcoat.2006.05.044
- Molaeipour, P., Allahkaram, S. R., & Akbarzadeh, S. (2022). Corrosion inhibition of Ti6Al4V alloy by a protective plasma electrolytic oxidation coating modified with boron carbide nanoparticles. *Surface and Coatings Technology*, 430, 127987. doi:10.1016/j.surfcoat.2021.127987
- Ravindranath, V.M., Shiva Shankar, G.S., Basavarajappa, S., & Siddesh Kumar, N.G. (2017). Dry sliding wear behavior of hybrid aluminum metal matrix composite reinforced with boron carbide and graphite particles. *Materials Today: Proceedings*, 4(10), 11163-11167. doi:10.1016/j.matpr.2017.08.082
- Roknian, M., Fattah-Alhosseini, A., Gashti, S. O., & Keshavarz, M. K. (2018). Study of the effect of ZnO nanoparticles addition to PEO coatings on pure titanium substrate: Microstructural analysis, antibacterial effect and corrosion behavior of coatings in Ringer's physiological solution. *Journal of Alloys and Compounds*, 740, 330-345. doi:10.1016/j.jallcom.2017.12.366
- Sahin, Y. (2003). Wear behaviour of aluminium alloy and its composites reinforced by SiC particles using statistical analysis. *Materials & Design*, 24, 95-103. doi:10.1016/s0261-3069(02)00143-7
- Shokouhfar, M., & Allahkaram, S. (2016). Formation mechanism and surface characterization of ceramic composite coatings on pure titanium prepared by micro-arc oxidation in electrolytes containing nanoparticles. *Surface and Coatings Technology*, 291, 396-405. doi:10.1016/j.surfcoat.2016.03.013
- Simchen, F., Sieber, M., & Lampke, T. (2017). Electrolyte influence on ignition of plasma electrolytic oxidation processes on light metals. *Surface and Coatings Technology*, 315, 205-213. doi:10.1016/j.surfcoat.2017.02.041
- Singh, D. K., Tripathi, M. K., & Singh V. B. (2015). Electrolytic preparation of Ni-B₄C composite coating and its characterization. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 24, 1213-1219. doi:10.1007/s11665-015-1396-2
- Vakili-Azghandi, M., & Fattah-Alhosseini, A. (2017). Effects of duty cycle, current frequency, and current density on corrosion behavior of the plasma electrolytic oxidation coatings on 6061 Al alloy in artificial seawater. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 48, 4681-4692. doi:10.1007/s11661-017-4205-8
- Vakili-Azghandi, M., Fattah-Alhosseini, A., & Keshavarz, M. K., (2018). Optimizing the electrolyte chemistry parameters of PEO coating on 6061 Al alloy by corrosion rate measurement: response surface methodology. *Measurement*, 124, 252-259. doi:10.1016/j.measurement.2018.04.038
- Wang, Y. Q., Zheng, M. Y., & Wu, K. (2005). Microarc oxidation coating formed on SiCw/AZ91 magnesium matrix composite and its corrosion resistance. *Materials Letters*, 59, 1727-1731. doi:10.1016/j.matlet.2005.01.050

- Wang, Y. Q., Wang, X. J., Gong, W. X., Wu, K., & Wang, F. H. (2013). Effect of SiC particles on microarc oxidation process of magnesium matrix composites. *Applied Surface Science*, 283, 906-913. doi:10.1016/j.apsusc.2013.07.041
- Wang, Y., Zhou, Q., Li, K., Zhong, Q., & Bui, Q. B. (2015). Preparation of Ni-W-SiO₂ nanocomposite coating and evaluation of its hardness and corrosion resistance. *Ceramics International*, 41, 79-84. doi:10.1016/j.ceramint.2014.08.034
- Wu, T., Blawert, C., & Zheludkevich, M. L. (2020). Influence of secondary phases of AlSi9Cu3 alloy on the plasma electrolytic oxidation coating formation process. *Journal of Materials Science & Technology*, 50, 75-85. doi:10.1016/j.jmst.2019.12.031
- Xia, Q., Wang, J., Liu, G., Wei, H., Li, D., Yao, Z., & Jiang, Z. (2016). Effects of electric parameters on structure and thermal control property of PEO ceramic coatings on Ti alloys. *Surface and Coatings Technology*, 307, 1284-1290. doi:10.1016/j.surfcoat.2016.07.073
- Xin, S. G., Song, L. X., Zhao, R. G., & Hu, X. F. (2006). Composition and thermal properties of the coating containing mullite and alumina. *Materials Chemistry and Physics*, 97(1), 132-136. doi:10.1016/j.matchemphys.2005.07.073
- Xue, W., Deng, Z., Chen, R., & Zhang T. (2000). Growth regularity of ceramic coatings formed by microarc oxidation on Al-Cu-Mg alloy. *Thin Solid Films*, 372(1-2), 114-117. doi:10.1016/S0040-6090(00)01026-9
- Xue, W., Wang, C., Tian, H., & Lai, Y. (2007). Corrosion behaviors and galvanic studies of microarc oxidation films on Al-Zn-Mg-Cu alloy. *Surface and Coatings Technology*, 201, 8695-8701. doi:10.1016/j.surfcoat.2006.10.029
- Yang, X., Chen, L., Jin, X., Du, J., & Xue, W. (2019). Influence of temperature on tribological properties of microarc oxidation coating on 7075 aluminium alloy at 25°C-300°C. *Ceramics International*, 45, 12312-12318. doi:10.1016/j.ceramint.2019.03.146
- Yang, Z., Zhang, X. Z., Wu, Y. K., Wang, D. D., Liu, X. T., Wu, G. R., Nash, P., & Shen, D. J. (2020). Plasma electrolytic oxidation ceramic coatings proceed by porous anodic film. *Journal of Alloys and Compounds*, 812, 152098. doi:10.1016/j.jallcom.2019.152098
- Yerokhin, A. L., Nie, X., Leyland, A., Matthews, A., & Dowey, S. J. (1999). Plasma electrolysis for surface engineering. *Surface and Coatings Technology*, 122(2-3), 73-93. doi:10.1016/S0257-8972(99)00441-7
- Zhang, P., Nie, X., Henry, H., & Zhang, J. (2010). Preparation and tribological properties of thin oxide coatings on an Al₃Si/SiO₂ metallic matrix composite. *Surface and Coatings Technology*, 205, 1689-1696. doi:10.1016/j.surfcoat.2010.09.031
- Zhao, D., Lu, Y., Wang, Z., Zeng, X., Liu, S., & Wang, T. (2016). Antifouling properties of micro arc oxidation coatings containing Cu₂O/ZnO nanoparticles on Ti6Al4V. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 54, 417-421. doi:10.1016/j.ijrmhm.2015.10.003
- Zhu, M., Song, Y., Dong, K., Shan, D., & Han, E. H. (2022a). Correlation between the transient variation in positive/negative pulse voltages and the growth of PEO coating on 7075 aluminum alloy. *Electrochimica Acta*, 411, 140056. doi:10.1016/j.electacta.2022.140056
- Zhu, M., Song, Y., Liu, Z., Xu, D., Dong, K., & Han, E. H. (2022b). Optimization of thermal control and corrosion resistance of PEO coatings on 7075 aluminum alloy by frequency alteration. *Surface and Coatings Technology*, 446, 128797. doi:10.1016/j.surfcoat.2022.128797
- Zhu, M., Song, Y., Xu, J., Dong, K., & Han, E. H. (2023). Effect of boron carbide reinforcements on the PEO process of B₄C/Al matrix composite. *Surface and Coatings Technology*, 457, 129334. doi:10.1016/j.surfcoat.2023.129334