



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



Alüminyum alaşımlarına uygulanan alüminyum oksit takviyeli alüminyum/çinko soğuk spreyl kaplamaların morfoloji ve aşınma dayanımına etkisi

Effects of aluminum oxide reinforced aluminum/zinc cold spray coatings on the morphology and wear resistance of aluminum alloys

Yazar(lar) (Author(s)): Rüveyda ŞENEL¹, Rüştü Alper TAŞTEKİN², Canser GÜL³, Nilay ÇÖMEZ⁴, Hülya DURMUŞ⁵

ORCID¹: 0009-0009-8662-5223

ORCID²: 0009-0009-9326-952X

ORCID³: 0000-0002-1339-936X

ORCID⁴: 0000-0002-6432-6582

ORCID⁵: 0000-0002-7270-562X

To cite to this article: Şenel R., Taştekin R. A., Gül C., Çömez N. and Durmuş H., “Effects of aluminum oxide reinforced aluminum/zinc cold spray coatings on the morphology and wear resistance of aluminum alloys”, *Journal of Polytechnic*, 28(6): 1637-1644, (2025).

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz: Şenel R., Taştekin R. A., Gül C., Çömez N. ve Durmuş H., “Alüminyum alaşımlarına uygulanan alüminyum oksit takviyeli alüminyum/çinko soğuk spreyl kaplamalarının morfoloji ve aşınma dayanımına etkileri”, *Politeknik Dergisi*, 28(6): 1637-1644, (2025).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.1650778

Alüminyum Alaşımlarına Uygulanan Alüminyum Oksit Takviyeli Alüminyum/Çinko Soğuk Sprey Kaplamaların Morfoloji ve Aşınma Dayanımına Etkisi

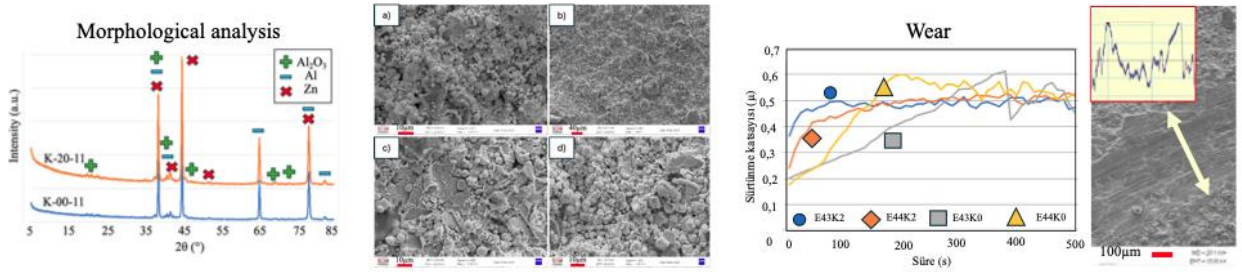
Effects of Aluminum Oxide Reinforced Aluminum/Zinc Cold Spray Coatings on the Morphology and Wear Resistance of Aluminum Alloys

Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Alüminyum alaşımlarının soğuk sprej yöntemi ile aşınmaya dayanıklı kaplanması. / Cold spray coating of aluminum alloys for wear resistance.

Grafik Özet (Graphical Abstract)

Çalışma kapsamında, soğuk sprej kaplama yöntemi kullanılarak kaplamalar uygulanmış ve morfolojik ile mekanik özellikler açısından incelenmiştir. / Within the scope of the study, coatings were applied using the cold spray coating method and analyzed in terms of their morphology and mechanical properties.



Şekil. Soğuk sprej kaplama morfolojisi ve mekanik özellikleri. **Figure.** Cold spray coating morphology and mechanical properties.

Amaç (Aim)

Alüminyum alaşım malzemelerin yüzeyine farklı alüminyum, çinko ve alüminyum oksit içeriğine sahip kaplamalar yapılarak aşınma dayanımlarının artırılması amaçlanmıştır. / The aim was to enhance the wear resistance of aluminum alloy materials by applying coatings with varying contents of aluminum, zinc, and aluminum oxide to their surfaces.

Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Soğuk sprej kaplama ile ticari kodu K-20-11 ve K-00-11 olan tozlar Al alaşım yüzeylerine kaplanarak karakterize edilmiştir. / The powders with commercial codes K-20-11 and K-00-11 were characterized by being coated on aluminum alloys using cold spray coating.

Özgünlük (Originality)

Al-Mg-Zn-Cu alüminyum alaşımlarındaki Zn modifikasyonunun, kaplama öncesi uygulanan kumlama işlemi sonrası yüzey pürüzlülüğüne ve soğuk sprej kaplama özelliklerine etkisini incelenmesi çalışmanın özgünlüğüdür. / The originality of the study is to examine the effect of Zn modification in Al-Mg-Zn-Cu aluminum alloys on the surface roughness and cold spray coating properties after the sandblasting process applied before coating.

Bulgular (Findings)

Aşınma testi sonucunda Hacim kaybı E43K2 numunelerinde E43K0'a kıyasla yaklaşık %25 daha az, E44K2 numunelerinde ise %56,3 daha az olarak ölçülmüştür. / The volume loss from wear test in E43K2 samples was measured to be approximately 25% less compared to E43K0, while in E44K2 samples, it was found to be 56.3% less.

Sonuç (Conclusion)

Aşınma dayanımı geliştirilmiştir. / Wear resistance has been improved.

Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

Alüminyum Alaşımlarına Uygulanan Alüminyum Oksit Takviyeli Alüminyum/Çinko Soğuk Sprey Kaplamaların Morfoloji ve Aşınma Dayanımına Etkisi

Araştırma Makalesi / Research Article

Rüveyda ŞENEL¹, Rüştü Alper TAŞTEKİN¹, Canser GÜL¹, Nilay ÇÖMEZ², Hülya DURMUŞ^{1*}

¹Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Türkiye.

²Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği, Ege Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 05.03.2025 ; Kabul/Accepted : 12.06.2025 ; Erken Görünüm/Early View: 29.06.2025)

ÖZ

Alüminyum alaşımları, düşük yoğunlukları nedeniyle otomotiv bileşenlerinden mutfak gereçlerine, borulardan ambalaj malzemelerine kadar geniş bir uygulama alanına sahiptir. Yaygın kullanımına rağmen, bazı uygulamalarda aşınma dirençleri yetersiz olup, bu direncin artırılması için ısıtma işlemleri, alaşımlandırma ve kaplama uygulamaları gereklidir. Bu çalışmada, alüminyum alaşımlarının aşınma direncini artırmak amacıyla, ticari K-20-11 ve K-00-11 tozları ile soğuk sprej kaplamalar uygulanmıştır. Kaplamaların yüzey pürüzlülüğü, sertlikleri ve aşınma davranışları incelenmiştir. Çinko içeren tozların kullanılması, daha yüksek oranda sert partikül birikmesini sağlamış ve bu durum kaplamaların aşınma kayıplarını azaltmıştır. Al-Zn ve Al₂O₃ bileşik tozları daha yoğun ve homojen kaplamalar oluştururken, yalnızca Zn ve Al₂O₃ içeren tozların daha ince kaplamalar elde ettiği belirlenmiştir. Mikroskopi ve EDS analizleri, kaplamaların homojen dağılımını doğrulamış ve Al₂O₃ sert partiküllerinin mekanik özelliklere katkı sağladığını göstermiştir. Mikro-Vickers sertlik testleri, yüksek sert partikül içeriğine sahip K0 tozları ile kaplanan numunelerin daha yüksek sertlik değerlerine ulaştığını ortaya koymuştur. Ayrıca, çinkonun düşük ergime noktası, sert partiküllerin gömülmesini kolaylaştırarak daha sert kaplamalar elde edilmesini sağlamıştır.

Anahtar Kelimeler: Alüminyum Alaşımı, Aşınma, Kaplama, Soğuk Sprej, Mekanik Özellikler.

Effects of Aluminum Oxide Reinforced Aluminum/Zinc Cold Spray Coatings on the Morphology and Wear Resistance of Aluminum Alloys

ABSTRACT

Aluminum alloys, due to their low densities, have a wide range of applications, from automotive components to kitchen utensils, pipes to packaging materials. Despite their widespread use, their wear resistance is inadequate in some applications, necessitating heat treatments, alloying, and coating applications to enhance their durability. In this study, to improve the wear resistance of aluminum alloys, cold spray coatings were applied using commercial K-20-11 and K-00-11 powders. The surface roughness, thickness, and wear behavior of the coatings were investigated. The use of zinc-containing powders enabled a higher accumulation of hard particles, which helped reduce wear losses in the coatings. Al-Zn and Al₂O₃ composite powders produced denser and more homogeneous coatings, while powders containing only Zn and Al₂O₃ resulted in thinner coatings. Microscopy and EDS analyses confirmed the homogeneous distribution of the coatings, and Al₂O₃ hard particles contributed to the mechanical properties. Micro-Vickers hardness tests revealed that samples coated with high-hard-particle-content K0 powders exhibited higher hardness values. Additionally, the low melting point of zinc facilitated the embedding of hard particles, allowing for the production of harder coatings.

Keywords: Aluminum Alloy, Wear, Coating, Cold spray, Mechanical Properties

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Alüminyum elementi, dünya üzerinde bol miktarda bulunur ve yer kabuğunda yaklaşık %8 oranında yer alır. Toprakta bulunan kil tabakaları, alüminyum silikat bileşikleri içermektedir. Demirin yer kabuğundaki oranı %5 iken, gümüş rengiyle dikkat çeken alüminyum daha fazla bulunmaktadır. Alüminyumun şekil değiştirme kabiliyeti ve işlenebilirliği iyidir. Bu özellikleri, alüminyumun çeşitli endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmasını sağlamaktadır [1] Olumlu özelliklerinin yanında alüminyum alaşımlarının aşınma

dayanımı düşüktür [2,3]. Aşınma, erozyon ve korozyon gibi olumsuz etkiler, makine elemanlarının ömrünü kısaltmakta ve ekonomik kayıplara yol açmaktadır. Bu etkileri azaltmak ve makine parçalarının dayanıklılığını artırmak amacıyla yüzey kaplama ve yüzey işlemleri uygulanmaktadır. Bu uygulamalar, malzemelerin performansını artırarak uzun ömürlü ve ekonomik çözümler sunmayı hedeflemektedir [3].

Termal sprej, metallere veya metal olmayan yüzey kaplama malzemelerinin bir ısı kaynağı kullanılarak eritilmesi ile veya yarı eriyik hale getirilerek önceden

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta :hulya.durmus@cbyu.edu.tr

hazırlanmış bir yüzeye kaplama oluşturacak şekilde uygulanmasını içeren bir grup tekniğin genel adıdır [4]. Termal püskürtme tekniklerinden biri olan soğuk spre y yöntemi, küçük taneciklerin termal spre y yöntemlerinden daha düşük ısı seviyelerinde ana malzeme yüzeyine tutundurulmasına dayanan yenilikçi bir kaplama yöntemidir [5]. Bu yöntemde tanecikler, bir gaz akımı yardımıyla yüksek hızlara ulaştırılarak ana malzemeye yönlendirilmekte ve yüzeyde şekil değişimi yaratarak taneciklerin yüzeye bağlanmasını ve birikmesini sağlamaktadır [6]. Genellikle hafif metaller ve bunlara ait alaşım tozları kaplama materyali olarak tercih edilmektedir. Soğuk püskürtme eknığının temel hedefi, yüzeyde koruyucu bir tabaka oluşturarak ana malzemeyi yıpratıcı aşındırma veya korozyon gibi çevresel etkilerden yalıtımdır [7]. Sprey kaplama yöntemleri, toz kaplama malzemelerinin çelik yüzeye yüksek hızlarda vurularak uygulandığı yüzey işlemleridir. Göreceli olarak kalın kaplamaların elde edildiği spre y kaplama uygulamalarında, kaplama malzemesi olarak refrakter metaller kadar çeşitli malzemeler kullanılabilir [8].

Termal spre y kaplama çeşitlerinden biri olan soğuk spre y kaplama yöntemi, kaplama işlemleri ile alüminyum alaşımlarının yüzey özelliklerini iyileştirmek amacıyla tercih edilmektedir. Bu yöntem, azot veya helyum gibi ısıtılmış gazlar kullanılarak, tozların katı halde ergime olmaksızın çok yüksek hızlarda yüzeye püskürtülmesi ile gerçekleştirilen bir yöntemdir. Açıldırılmış DeLaval nozül, tozların kritik bir püskürtme hızına ulaşmasını sağlar. Proses esnasında yüzeye püskürtülen tozların sıcaklığı çok düşük buna karşın püskürtme hızı çok yüksektir. Daha yüksek hızlarda, kaplama yüzeyine çarpan toz parçacıkları plastik deformasyona uğrar ve yüzeye yapışır [9,10]. Termal kaplamalarda yaşanan ergitme, oksidasyon, buharlaşma, artık gerilme gibi problemler soğuk spre y kaplamada elimine edilmektedir. Bu sayede kalın ve yoğun kaplama yapmak mümkün hale gelmektedir. Yüzeyin, kaplama ile yüzey arasında güçlü bir bağ sağlamak için biraz pürüzlendirilmesi gerekir [11,12].

Gerçekleştirilen çalışmada, soğuk spre y kaplama yöntemi ile farklı alaşım içeriğine sahip E43 ve E44 kodlu alüminyum alaşımları alüminyum altlık malzemelerin yüzeyine farklı alüminyum, çinko ve alüminyum oksit içeriğine sahip kaplamalar yapılmıştır. Kaplanmış numune yüzeyleri pürüzlülük, morfolojik yapı ve mekanik özellik bakımından incelenmiştir.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL and METHOD)

E43 ve E44 kodlu Al alaşım altlık malzemeler, DYMET marka soğuk spre y biriktirme cihazı ve N₂ gazı kullanılarak Alüminyum/Çinko/Al₂O₃ (DK-20-11) ve Zn/Al₂O₃ (DK-00-11) ticari tozlarıyla kaplanmıştır. Kullanılan toz boyutu ortalaması yaklaşık 20 µm'dir. Altlık numunelere ait spektral analizleri Çizelge 1'de verilmiştir. Kullanılan tozların kimyasal kompozisyonu Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 1. E43-E44 Al alaşım numunelerin spektral analiz sonuçları (Spectral analysis results of E43-E44 Al alloy samples)

Element (%ağ)	E43	E44
Si	0,35788	0,25727
Fe	0,31783	0,23908
Cu	1,13408	1,38787
Mn	0,10731	0,08287
Mg	2,10774	1,99226
Zn	4,82832	7,07778
Ti	0,01415	0,01709
Cr	0,20593	0,20727
Ni	0,00250	0,00224
Pb	0,00135	0,01562
Sn	0,00091	0,00106
Na	0,00143	0,00188
Ca	0,00039	0,00048
Zr	0,00150	0,00108
V	0,01205	0,00739
Be	0,00005	0,00003
Sr	0,00007	0,00004
Co	0,00017	0,00019
P	0,00000	0,00006
Al	90,9079	88,7092
Diğer	0,00391	0,00405

Kaplamaların oluşturulabilmesi için ön çalışmalar gerçekleştirilerek gerekli basınç, toz besleme oranı ve sıcaklıklar için optimum değerler belirlenmiştir. Kaplama parametreleri Çizelge 3'te belirtilmiştir.

Çizelge 2. Toz karışımlarının içeriği (%ağ.) (Powder mixture composition (wt.%))

Ticari Toz Adı	Al	Zn	Al ₂ O ₃
K-20-11	33-37	38-42	23-27
K-00-11	-	50-55	45-50

Çizelge 3. Kaplama parametreleri (Coating paramters)

Özellik	Parametre
Gaz	N ₂
Gaz Sıcaklığı	500 °C
Gaz Basıncı (MPa)	4,0-5,0
Püskürtme Açısı	90°
Mesafe (mm)	25
Toz Besleme (rpm)	2,0-3,0
Gaz Akışı (m ³ /saat)	3
Nozül	SiC su soğutmalı DeLaval nozül

E43 ve E44 altlık malzemelerinin yüzeyleri kaplama öncesi Al₂O₃ kullanılarak kumlanmıştır. Kaplanan toz çeşidi kullanılan altlık alaşıma göre belirlenen numune kodları Çizelge 4'te verilmiştir.

Kaplama yapılacak numunelerdeki yüzey pürüzlülüğü kaplamanın malzemeye tutunma oranını artırır ve kaplama karakteristiğine bağlı olarak kaplama tabakası ve altlık malzeme arasında kurulacak olan bağın kuvvetlenmesini sağlar [13]. Bu kapsamda kaplama

Çizelge 4. Numune kodları ve özelliği (Sample codes and property)

Numune Kodu	Altlık	Kaplama Tozu
E43K2	E43	K-20-11
E44K2	E44	K-20-11
E43K0	E43	K-00-11
E44K0	E44	K-00-11

öncesinde gerçekleştirilen kumlama işlemi sonrası numunelerin yüzey pürüzlülükleri ölçülmüştür. Yüzey pürüzlülük ölçümleri Mitutoyo SurfTest SJ-310 modeli yüzey profilometre cihazında ISO 1997 standartlarında verilen değerler ile gerçekleştirilmiştir. Her numune için sekiz ölçüm alarak ortalama pürüzlülük değerleri belirlenmiştir.

Numune kaplama yüzeylerini gözlemek amacıyla Nikon marka mikroskop kullanılmış olup Clemex Vision PE görüntü analiz yazılımı ile çeşitli büyütme ölçeklerinde görüntüler elde edilmiştir. Yapılan yüzey işlemleri kaplama ve yüzey arasındaki ilişkiyi doğrudan etkilediğinden kaplamanın oluşumunun da değişmesine neden olabilmektedir.

Taramalı elektron mikroskopu (SEM) yüzey morfolojisinin detaylı incelemesi için kullanılmıştır. Farklı büyütme ölçeklerinde yüzey görüntüleri alınmış ve hem K-20-11 hem de K-00-11 tozları ile kaplanmış numunelere ait dikey kesitler alınarak incelenmiştir. İncelemelerde ZEISS GEMINI 500 model SEM cihazı ve bu cihaza bağlı enerji dağıtım spektroskopisi (EDS) kullanılmıştır.

X-ışını analizleri kaplama tozlarını incelemek amacıyla gerçekleştirilmiş olup 5-85° tarama aralığında PANalytical EMPYREAN X-ışını kırınımı cihazında CERN patentli XRD dedektör (PIXcel ID) ile gerçekleştirilmiştir.

Sertlik testleri, kaplama tabakasının mekanik özelliklerine yönelik önemli bilgiler verir. Sertlik metodu olarak ASTM E384 e göre HV_{0,3} uygulanmıştır ve HCK-404SXV Dijital Mikro Vickers cihazı ile sertlik ölçümü yapılmıştır. Sertlik sonuçları ve aşınma test sonuçları birlikte değerlendirilmiştir. Matrise ve partiküllere yakın bölgelerden karışık bir şekilde üç adet sertlik ölçümü gerçekleştirilmiş ve matrisin genel sertlik profili oluşturulmuştur.

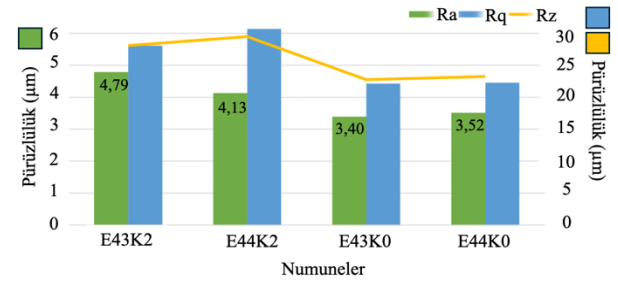
Kaplanmış numunelerin aşınma dayanımları kuru kayma koşulları altında yapılan aşınma testi ile belirlenmiştir. Testlerde 2N yük uygulanmıştır ve aşınma mesafesi 50m olarak belirlenmiştir. Karşı eleman olarak Al₂O₃ aşındırıcı bilye kullanılmıştır. Kayma hızı 10cm/s olacak şekilde aşındırıcı bilye 4 mm yarıçaplı ekseninde numune yüzeylerinde kaydırılmıştır. Test için ASTM G99 a göre Tribometer CSM instruments ball-on- disk aşınma test düzeneği kullanılmıştır. Aşınma testi sonrası aşınan yüzey profilleri, Nikon Stereo Mikroskop ve yüzey profilometre cihazı ile incelenmiştir. Aşınma izinin mikroskop altında genişlikleri ölçülmüştür. Ayrıca aşınma sonucu meydana gelen kayıp, aşınma izinin dört

farklı yerinden alınan ölçümler sonrasında hesaplanmıştır.

Aşınma izi Mitutoyo SurfTest SJ-410 profilometre ile ölçülmüş ve veriler Origin Pro yazılımına aktararak malzeme kaybının gerçekleştiği alan hesaplanmıştır. Sonrasında aşınma izinin oluşturduğu dairenin çevresi ile çarpılarak toplam ortalama hacim kaybı hesapları yapılmıştır. Aşınma sonrası numune yüzeyinde beliren izler optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskopu (SEM) kullanılarak incelenmiştir.

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULT AND DISCUSSION)

Soğuk sprej yöntemiyle yapılan kaplamalar sonucunda yüzey pürüzlülüğünün, kaplama sırasında kullanılan toz karışımlarına bağlı olarak değiştiği gözlemlenmiştir. Numunelerin sahip olduğu kaplama pürüzlülük değerleri Şekil 1’de gösterilmiştir.

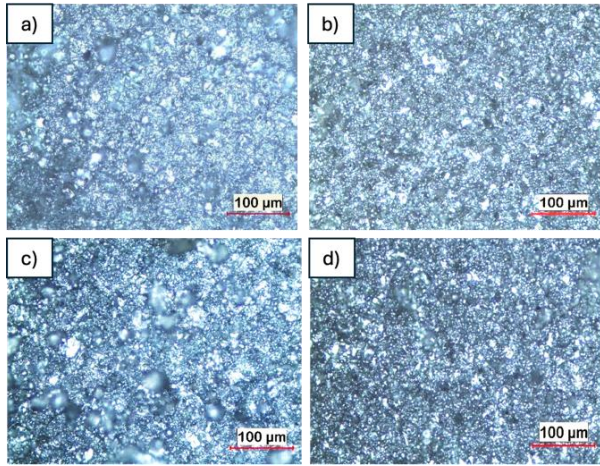


Şekil 1. Numunelerin yüzey pürüzlülükleri (Surface roughness of the samples)

Çalışmada kullanılan tozlardan ilki, Al-Zn ve Al₂O₃ karışımından oluşmakta olup (K-20-11), sert partikül (Al₂O₃) oranı ağırlıkça %23-27 ile metalik matrisi oluşturan Al ve Zn toz partiküllerine göre daha düşüktür. Diğer toz karışımı (K-00-11) ise sadece Zn ve Al₂O₃ içermekte olup, sert partikül oranı ağırlıkça %45-50 ile birinci toza kıyasla daha fazladır. Yapılan yüzey pürüzlülük ölçümlerinde, sert partikül oranı yüksek olan tozla kaplanan numunelerin yüzey pürüzlülüğünün daha düşük olduğu (E43K0 ve E43K0), buna karşılık sert partikül oranı düşük olan numunelerde pürüzlülüğün daha yüksek çıktığı belirlenmiştir (E43K2 ve E44K2). Bu durum, metal partikül içeriği yüksek olan kaplamalarda partiküllerin birikme şeklindeki düzensizliklerden kaynaklanabilir. Al ve Zn gibi fazla sayıda kayma düzlemi içeren metaller, soğuk sprej kaplama işlemi sırasında daha fazla plastik deformasyona uğrayarak yüzeyde düzensiz bir yığılma oluşturabilir. Plastik deformasyon birikme mekanizması olarak sınıflandırılan bu birikme durumunda, soğuk sprej kaplamalarda nispeten düşük sertliğe sahip partiküllerin yüksek oranlarda bulunması düzensiz yığılma sergileyerek yüzeyde dalgalı bir yapı meydana getirebilir [9,10]. Buna karşılık, sert partikül oranı yüksek olan kaplamalarda Al₂O₃ parçacıkları, metal matrisin aşırı şekil değiştirmesini ve düzensiz birikimini sınırlayarak daha homojen bir yüzey oluşumunu destekleyebilir [14]. Fakat

mekanik kilitlenme mekanizması ile biriken Al_2O_3 gibi oksitli sert partiküllerin plastik deformasyon oranı oldukça düşük olduğundan, bu partiküller düşük plastik deformasyon kabiliyetleri nedeni ile kaplama sürecinde yoğun olarak saçılma ile karşılaşılır [9,10]. Ayrıca, bu sert partiküller kaplamanın yoğunluğunu artırarak gözenekli bölgeleri doldurabilir ve mekanik olarak daha mukavim bir yapı sağlayabilir.

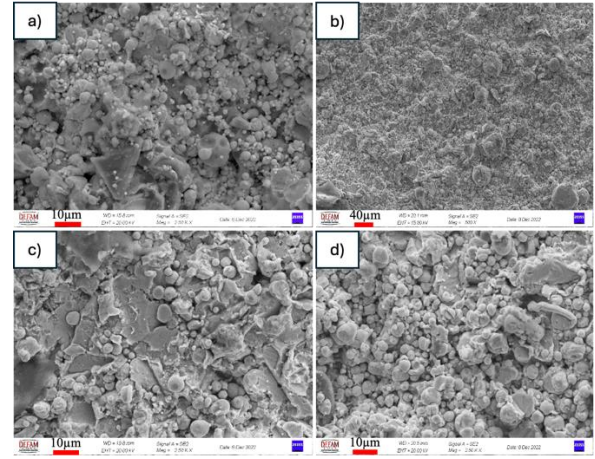
Kaplanmış numune yüzeylerinden alınan mikroskop görüntüleri (Şekil 2) ve SEM görüntüleri (Şekil 3) incelendiğinde, kaplamaların genel olarak homojen bir dağılım gösterdiği gözlemlenmiştir. Özellikle K-20-11 ile kaplanan numunelerde, toz partiküllerinin farklı boyutlarda olması nedeniyle yüzey yapısında daha karmaşık bir görünüm mevcuttur. Bununla birlikte, kaplamaların tüm numune yüzeyinde benzer bir yapı sergilediği söylenebilir. Ayrıca, yüzeye açık belirgin porozitelerin bulunmaması, kaplamanın yeterli yoğunlukta oluştuğunu ve partiküller arası bağlanmanın başarılı bir şekilde gerçekleştiğini göstermektedir.



Şekil 2. Numunelerin kaplama sonrası yüzeyleri: a)E43K2 b)E44K2 c)E43K0 d)E44K0 (Surfaces of the samples after coating: a) E43K2 b) E44K2 c) E43K0 d) E44K0)

K-20-11 bileşimindeki kaplamalarda küreselliğini koruyan, kısmen deforme olmuş veya hiç deforme olmamış büyük boyutlu parçacıklar göze çarparken K-00-11 tozuyla kaplanmış E43K0 numunesi yüzeyinde (Şekil.3c) süpersonik hızlara ulaşmış plastik deformasyon sebebiyle yassılaşılarak yüzey üzerinde biriken tozlar pürüzlülük değerlerini düşürmektedir.

K2 numuneleri, Al içeren tozla kaplandığı için daha yüksek yoğunlukta ve daha homojen bir kaplama oluşturmuştur (Şekil 3-4). Kaplamaların Al içermeyen ve sert partikül oranı daha yüksek olan numune grubuna göre daha kalın olduğu görülmüştür (Şekil 4). Bunun nedeni, Al ve Zn'nin daha iyi yapışması ve düşük sertlikteki partiküllerin kaplama sırasında daha az boşluk bırakmasıdır.

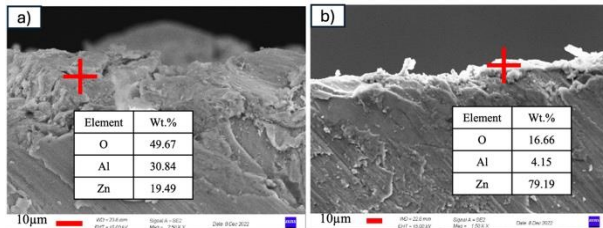


Şekil 3. SEM Yüzey Görüntüleri: a)E43K2 b)E44K2 c)E43K0 d)E44K0 (SEM surface images; a) E43K2 b) E44K2 c) E43K0 d) E44K0)

K0 numunelerinde ($Zn-Al_2O_3$), sert partikül oranı daha yüksek olduğu için kaplamaların daha ince oluştuğu tespit edilmiştir (Şekil 4). Sert partiküllerin fazlalığı, saçılma oranını artırarak daha ince bir yapı oluşturmuştur. Sert partikül ve sertliği düşük bir matris malzemesi içeren toz karışımlarının soğuk sprej kaplama yöntemi ile kaplanmasını inceleyen Gül vd. tarafından daha önce gerçekleştirilmiş bir çalışma literatürde mevcuttur [15]. Çalışma bulgularına göre soğuk sprej kaplama uygulamalarında süpersonik hızlara ulaşan toz partiküller yüzeye çarptıklarında plastik deformasyona uğramaktadır. Sertliği nispeten düşük olan metal partiküller bu deformasyon sonucunda yüzeyde kalırken sert partiküllerin çoğu etrafa saçılmaktadır. Bu durumda kaplama tabakasında kalan sert partikül oranı, toz karışımındaki orandan daha düşük elde edilmektedir. Benzer şekilde sert partikül oranı daha yüksek olan kaplama grubu numunelerde (K0) kaplama kalınlığının daha düşük elde edilmesi bu durum ile açıklanabilir.

Yüzeyi Al_2O_3 ile pürüzlendirilmiş olan numunenin yüksek oranda Al_2O_3 içeren toz ile daha kalın birleşme bölgesi oluşturarak yüksek içerikli alüminyum ve çinko yapısını daha iyi tuttuğu ve bu nedenle daha kalın bir kaplama kalınlığı elde edildiği düşünülmektedir. Yu vd., soğuk sprej kaplamalar üzerine yaptıkları çalışmada, parçacık sıcaklığının parçacıkların deformasyon davranışı üzerindeki etkisini araştırmıştır. Bulgularına göre, sıcaklık arttıkça parçacıkların sıkışma oranı artmakta ve yüzey pürüzlülüğü azalmaktadır. Diğer bir deyişle, daha sıcak parçacıklar yüzeye çarptığında daha fazla deforme olmakta, daha yassı hale gelmekte ve kaplama tabakasının kalınlığını azaltmaktadır [16]. Ayrıca çinko elementi yaklaşık 420 °C'de ergimekte ve bu durum soğuk sprej kaplama sırasında püskürtülürken Zn partiküllerinin kısmen ergiyik durumda olmasını sağlayabilir. Partiküller daha az enerji ile deformasyona uğrayarak kaplama verimliliğini artırıcı rol oynar. Bu durumda çinko, yüzeye daha iyi tutunarak daha kalın ve sertlik değeri daha yüksek bir kaplamanın elde edilmesini sağlamıştır. Literatürde soğuk sprej yöntemi ile oluşacak birikim kritik hız değeri

ile ilişkilendirilmiştir. Artan altlık sıcaklığı, püskürtme sıcaklığı veya parçacığın boyutunun birikme için gerekli kritik hız değerini azalttığı vurgulanmıştır. Ergime sıcaklığı 660°C olan Al için kritik hız değeri 620-660 m/s ve ergime sıcaklığı 420°C olan Zn için kritik hız değeri 360-380 m/s olarak literatürde yer almıştır [14]. Gül vd., yaptıkları çalışmada daha düşük sıcaklıklarda ergiyen çinko elementi için mevcut işlem sıcaklığının plastik deformasyonu kolaylaştıracağı ve düşük poroziteli kaplamalar elde edileceği yönünde bulgulara ulaşmıştır [17]. E43K0 numunesinin yüzeyine ait SEM görüntüsü incelendiğinde yüksek oranda plastik deformasyona uygun element içermektedir ve bu durumda altlık malzemesine gömülmüş, yassı toz parçacıkları görülmektedir. Bu durumda tozların altlık malzeme üzerine yüksek oranda deforme olarak daha iyi tutunduğu söylenebilir. E43 ve E44 numunelerinin toz karışımları göz önünde bulundurulduğunda E43 numune yüzeylerinde birikimin bir miktar daha fazla olduğu görülmektedir. E44 numunesi daha yüksek oranda Zn ve Cu elementlerini içerirken daha düşük Fe ve Si içerir. Bu durumda E44 yüzeyinin daha sünek olması beklenir. Bu nedenle yüzeyde birikme oranı E43 numunesinde bir miktar daha fazla olmuştur.

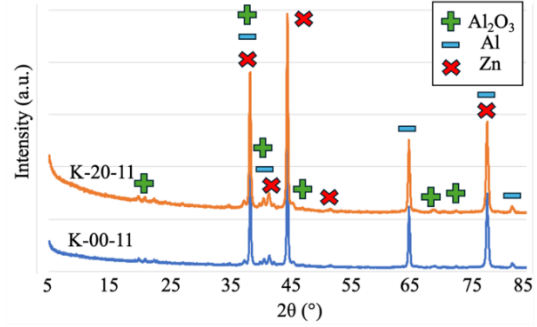


Şekil 4. Kaplamaların SEM-EDS analizleri: a)E44K2 b)E44K0 (SEM-EDS analysis of coatings: a)E44K2 b)E44K0)

Kaplamaların dikey kesitlerinin incelendiği numunelerin EDS analizleri Şekil 4'te verilmiştir. Şekil 4a ve Şekil 4b de E44K2 numunesine ait olup oranlar yaklaşık ortalama ağırlıkça %49.5 oksijen, % 30.8 alüminyum ve %19.5 çinko içermektedir. E44K0 numunesi incelendiğinde yaklaşık ortalama ağırlıkça %16.6 oranında oksijen %4 oranında alüminyum %79 oranında çinko görülmüştür.

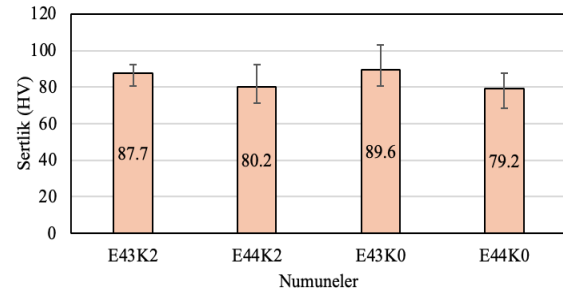
Daha önce bahsedildiği gibi fazla sayıda kayma düzlemi içeren metaller, deformasyon birikme mekanizması ile soğuk sprej sırasında daha fazla plastik deformasyona uğrar. Buna karşın Al_2O_3 mekanik kilitlenme mekanizması ile düşük plastik deformasyon kabiliyetine sahiptir [9,10]. E43K0 numunesine ait EDS analizi incelendiğinde toz bileşimi içerisinde alüminyum olmamasına rağmen analiz sonucunda ağırlıkça %4.15 oranında bir kısmı Al_2O_3 'ten geldiği de düşünülen alüminyum saptanmıştır. Kaplamalardaki Al_2O_3 varlığı XRD analizleri ile doğrulanmıştır.

Numunelere ait XRD analizleri Şekil 5'de gösterilmiştir. Beklendiği şekilde XRD analizleri Al_2O_3 , Zn ve Al piklerini içermektedir. Bu bulgular, malzemenin mikroyapısal karakterizasyonu ile tutarlıdır.



Şekil 5. XRD Analiz Sonuçları (Results of XRD analysis)

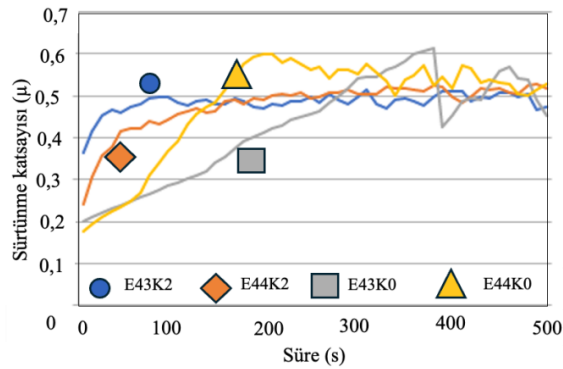
Kaplanmış numunelerin mikro vickers sertlik ölçüm sonuçları Şekil 6'da verilmiştir. Çalışmada, sert partikül oranı yüksek olan tozlarla (K0) kaplanan numunelerin sertliğinin bir miktar daha yüksek olduğu, alüminyum ve çinko içeriği fazla olan ve Al_2O_3 içeriği az olan K2 tozlar ile kaplanan numunelerin ise sertliğinin daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. K2 numunelerinde kaplama kalınlığı daha yüksek, sert partikül oranı düşüktür. Öte yandan, K0 kaplamaların kalınlığı daha düşük olsa da çinko içeriği yüksek olduğu için Al_2O_3 partiküllerin kaplamaya gömülme olasılığı daha fazladır ve kaplamanın sert partikül oranı yüksektir. Bu durum, K0 kaplamaların üretiminde Al_2O_3 partiküllerinin daha az saçılmasına ve dolayısıyla sertliğin artmasına neden olmuştur. Ayrıca E44 numune yüzeyinin daha sünek olmasının beklediği daha önce açıklanmıştır. Bu durum E44 numune üzerindeki birikimi etkilediği ve bu numune grubunda E43 numunelerine göre daha düşük sertlik elde edilmesine neden olduğu düşünülmüştür.



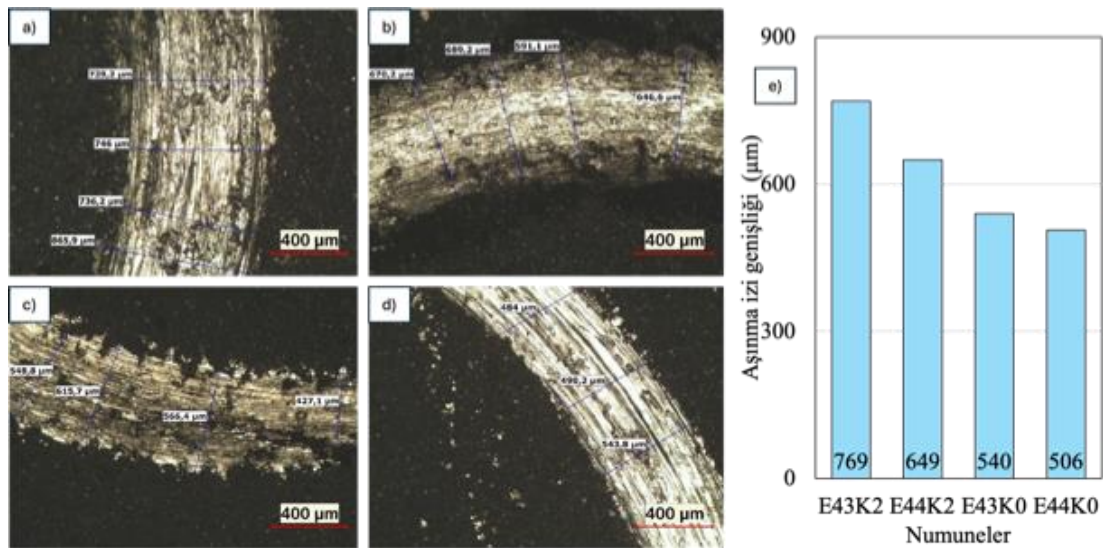
Şekil 6. Kaplanmış numunelerin MikroVickers sertlik ölçüm sonuçları (MicroVickers hardness measurement results of the coated samples)

Sürtünme katsayısı, kaplama malzemesinin yüzey özelliklerine bağlı olarak değişir. Aşınma mesafesi boyunca sürtünme katsayısındaki değişimi gösteren sürtünme katsayısının zamanla değişim grafiği Şekil 7'de verilmiştir. Aşınma testi boyunca sürtünme katsayısı, Zn- Al_2O_3 içeren K-00-11 kaplamalarında daha geniş bir aralıkta dalgalanma sergilemiştir. Gül vd. yaptıkları çalışmada, zamana bağlı değişiklik gösteren sürtünme katsayısı değerinin önce artıp sonra sabit değerlerde seyrettiğini vurgulamışlardır [15]. Sürtünme katsayısının yüksek olduğu numunede kararlı aşınma sürecine daha hızlı ulaşılırken daha düşük sürtünme katsayısı değerlerinde kararsız aşınma durumu daha uzun süre gözlemlenir [18]. E43K0 numunesi uzun süre kararsız aşınma sergilemiştir. Fakat sürtünme katsayısı değerinin

başlangıçta en yüksek olduğu E43K2 numunesi hızlı bir şekilde kararlı aşınma gösterebilmiştir. K-00-11 toz ile kaplanan numunelerde, sürtünme katsayısının zamanla artmaya devam ettiği ve kararlı duruma daha geç ulaştığı gözlemlenmiştir. Bu durum, K-00-11 tozunun daha yüksek sertlik, daha fazla sert partikül içeriği ve iyi gömülme özellikleri sayesinde sürtünme koşullarına karşı daha iyi bir performans gösterdiğini ve yüzeydeki deformasyonun zamanla etkisini sürdürdüğünü göstermektedir. Öte yandan, K-20-11 toz ile kaplanan numunelerin sürtünme katsayısında hızlı bir artış gözlemlenmiştir. Bu durum, K-20-11 tozunun içerdiği daha az sert partikül ve kaplanmış numunelerin nispeten daha düşük sertliğe sahip olması nedenleriyle sürtünme özelliklerinin daha çabuk değiştiğini ve yüzeydeki deformasyonun daha erken meydana geldiğini göstermektedir. K-20-11 tozları kullanılarak kaplanmış numunelerde kaplama kalınlığının yüksek olmasına rağmen, sertliğinin düşük olması ve sert partikül oranının az olması, sürtünme katsayısının hızlı bir şekilde artmasına neden olmuştur. Bu nedenle, K-20-11 kaplamaları, zamanla K-00-11 kaplamalara göre daha hızlı bir sürtünme katsayısı değişimi göstermiştir.



Şekil 7. Aşınma testi sırasında sürtünme katsayısı-Süre Grafiği (Friction Coefficient-Time Graph at wear test)

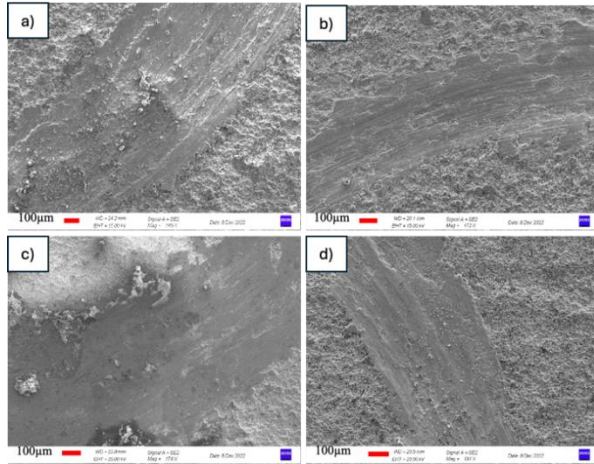


Şekil 8. Numunelerin aşınma iz genişlikleri: a)E43K2 b)E44K2 c)E43K0 d)E44K0 e) aşınma izinin boyutlarının ortalama değerleri (Wear track widths of the samples: a) E43K2 b) E44K2 c) E43K0 d) E44K0 e) average values of wear track dimensions)

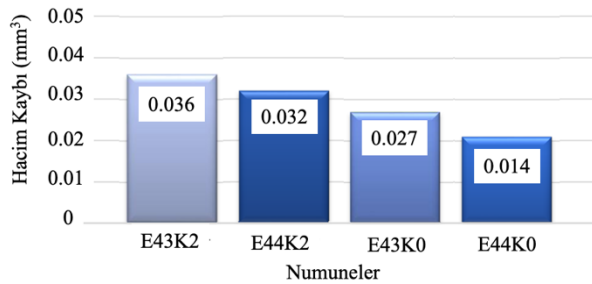
Aşınma sonucunda oluşan izlerden alınan genişlik ölçümleri Şekil 8'de verilmiştir. En geniş iz K-20-11 kaplama grubunda iken en dar iz genişliği K-00-11 kaplama grubunda gözlemlenmiştir. Ayrıca aşınma izlerinin Şekil 9'da verilen SEM aşınma izi görüntüleri daha detaylı bir inceleme imkanı sunmaktadır.

K-20-11 tozu ile kaplanan E43K2 ve E44K2 numunelerinde düşük sertlik değerine sahip matris fazının daha yüksek oranda olması, adheziv karakterde bir aşınmayı tetiklemiştir. Görüldüğü gibi bazı bölgelerde aşınma esnasında kopan parçaların tekrar aşınma bölgesine yapıştığı aşınma izinin çevresinde plastik deformasyondan kaynaklı birikintilerin olduğu ve yapışarak kabuk şeklinde kabarmış pulcukların oluştuğu görülmüştür ve bu gözlemler adhezif aşınma oluşumuna atfedilmiştir. Buna karşın, yapıda bulunan sert Al₂O₃ partikülleri abrazif aşınmaya neden olmuş ve aşınma bölgelerinde kazınma ve çizikler şeklinde gözlemlenmiştir.

Yapılan hesaplamalar sonucunda Şekil 10'de verilen hacim kaybı grafiği oluşturulmuştur. Hacim kayıpları değerlendirildiğinde K-00-11 tozu ile kaplama yapılmış numunelerin hacim kayıplarının K-20-11 tozları ile yapılan kaplamalara göre daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Bunun sebebi K0 grubu numunelerinin sertliği, tutunan sert partikül oranının yüksek olması, ergime derecesi düşük olan Zn için birikme verimliliğinin yüksek olması dolayısıyla kaplama içindeki porozitenin azalması ile açıklanabilir. K2 grubu numunelerde ise sert partikül oranının düşük olması kaplama sertliğinin düşük olmasına neden olmuştur ve ayrıca ergime derecesi daha yüksek olan Al ilavesinin sert parçacıkların matrise gömülme oranını bir miktar azaltarak daha yüksek hacim kaybına neden olduğu düşünülmektedir.



Şekil 9. Aşınma İzi SEM Görüntüleri; a)E43K2 b)E44K2 c)E43K0 d)E44K0 (Wear track sem images; a) E43K2 b) E44K2 c) E43K0 d) E44K0)



Şekil 10. Hacimsel malzeme kaybı grafiği (Volumetric material loss graph)

6. SONUÇ (CONCLUSION)

Mevcut araştırma çalışması kapsamında, E43 ve E44 olmak üzere iki farklı kimyasal kompozisyona sahip alüminyum alaşımı, K-20-11 ve K-00-11 tozları ile soğuk sprej yöntemiyle kaplanmıştır. Örneklerin yüzey morfolojileri, kaplamaların analiz sonuçları ve aşınma dirençleri karşılaştırılmıştır.

Alüminyum alaşımlarının aşınma davranışı incelendiğinde, altlık malzemenin bu davranış üzerinde belirgin bir etkisinin olmadığı, buna karşın aşınma koşullarının daha çok kaplama türünün özelliklerine bağlı olarak değiştiği bulunmuştur. Soğuk sprej kaplama yöntemi, alüminyum alaşımlarının aşınma kayıplarını azaltma potansiyeline sahiptir.

Soğuk sprej kaplamaların yüzey pürüzlülüğünü ve kalınlığını etkileyen parametreler analiz edildiğinde, kaplama işleminde kullanılan toz karışımının yüzey pürüzlülüğünde önemli değişimlere neden olduğu belirlenmiştir. Sert partiküllerin yüksek oranda bulunduğu kaplamalarda homojen bir yüzey yapısı ve minimum pürüzlülük değerleri elde edilirken, yumuşak metal içeriği arttıkça yüzey pürüzlülüğü de artmıştır. Bu durum, kaplama sırasında partiküllerin düzenli bir şekilde birikmemesinden kaynaklanmaktadır. Oluşan

kaplamalar ise toz karışımlarının karakteristik özelliklerine bağlı olarak değişiklik göstermektedir.

Al-Zn/Al₂O₃ karışımları daha yoğun ve homojen kaplamalar sağlarken, yalnızca Zn ve Al₂O₃ içeren kaplamalar çok ince bir kaplamaya sahip olmuştur. SEM-EDS analizleri, homojen kaplama ve bileşen dağılımını doğrulamıştır. Kaplama içerisindeki Al₂O₃ fazı XRD analizleri ile tespit edilmiş olup, bu fazın kaplamanın mekanik davranışına etki ettiği düşünülmektedir. Mikro-Vickers sertlik testleri, en sert K0 tozlarıyla kaplanan numunelerin en yüksek sertlik değerlerine sahip olduğunu göstermiştir.

Yüksek çinko içeren karışım, püskürtme sırasında daha düşük ergime sıcaklığı ile sert partiküllerin gömülmesini sağlayarak daha sert kaplamalar elde edilmesine olanak tanımıştır. Buna karşılık, K-20-11'de daha düşük sert partikül içeriği ve alaşımın eklenmesiyle artan ergime sıcaklığı nedeniyle Al₂O₃'ün daha az sert partikül birikimi teşvik edilmiştir. Bu durum, numunelerin sertlik ve aşınma davranışlarını etkileyerek daha geniş aşınma izleri ve daha büyük hacim kayıplarına yol açmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, hacim kaybı E43K2 numunelerinde E43K0'a kıyasla yaklaşık %25 daha az, E44K2 numunelerinde ise %56,3 daha az olarak ölçülmüştür.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 2209-A proje kategorisi kapsamında finansal olarak desteklenmiştir (Proje no: 1919B012105747). Yazarlar, Üniversite Öğrencileri Araştırma Projeleri Destek Programı kapsamında sağlanan destek için teşekkür eder.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI

(DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarları çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Rüveyda ŞENEL: Deneyleri yapmış ve sonuçlarını analiz etmiştir.

Rüştü Alper TAŞTEKİN: Deneyleri yapmış ve sonuçlarını analiz etmiştir.

Canser GÜL: SEM-EDX incelemelerini ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

Nilay ÇÖMEZ: Makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

Hülya DURMUŞ: Makalenin yazım işlemini ve revizyonlarını gerçekleştirmiştir.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Çakanyıldırım Ç. and Gürü M., “Alüminyum üretim teknolojilerindeki gelişmeler, çevreye etkisi ve uygulama alanları”, *Politeknik Dergisi*, 24(2): 585–592, (2021).
- [2] Akıncıoğlu, G. “Effect of anodic oxidation on tribological behavior of 2017A alloy”, *Journal of Polytechnic*, 27(3), 957–965, (2024).
- [3] Varol Özkavak H. and Şahin, Ş., “Yüksek Hızlı Oksi-Yakıt (HVOF) Yöntemiyle Kaplanmış Çelik ve Alüminyum Alaşımlarının Aşınma Özelliklerinin Taguchi Metoduyla Optimizasyonu”, *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 9(2): 931–942, (2020).
- [4] Durmuş, H., Türkmen, M. and Çalığülü, U. “Wear resistances of X6Cr17 ferritic stainless-steel surfaces coated with Al₂O₃ powders using thermal spray method”, *DUJE (Dicle University Journal of Engineering)*, 11(3), 1167–1173, (2020).
- [5] Tekin, E., Uyum, S., Karahan, B., Tekin, K.C. and Malayoğlu, U. “Soğuk püskürtme teknolojisi ve uygulamaları”. *Mühendis ve Makine*, 62, 702, 106–150, (2021).
- [6] Lua F., Maa K., Lia C., Yasirb M., Luo X. and Lia C. “Enhanced corrosion resistance of cold-sprayed and shot-peened aluminum coatings on LA43M magnesium alloy”, *Surface and Coatings Technology*, 394, 125865, (2020).
- [7] Şüküroğlu E.E. “AZ91 Mg alaşımı üzerine soğuk spreyl kaplama yöntemi ile Al kaplamaların büyüülmesi”, *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 28(3), 1118-1126, (2023).
- [8] Yıldız U.T., Varol T., Purcek G. and Akcay S.B., “A review on the surface treatments used to create wear and corrosion resistant steel surfaces”, *Politeknik Dergisi*, 27(1): 227-236, (2024).
- [9] Raoelison R.N., Verdy C. and Liao H. “Cold gas dynamic spray additive manufacturing today: Deposit possibilities, technological solutions and viable applications”, *Materials & Design*, 133, 266-287, (2017).
- [10] Yin S., Cavaliere P., Aldwell B., Jenkins R., Liao H., Li W. and Lupoi R. “Cold spray additive manufacturing and repair: Fundamentals and applications”, *Additive Manufacturing*, 21, 628-650, (2018).
- [11] Assadi H., Gärtner F., Stoltenhoff T. and Kreye H. “Bonding mechanism in cold gas spraying”, *Acta Materialia*, 51(15), 4379–4394, (2003).
- [12] Winnicki M., Kozerski S., Malachowska C.F., Pawlowski L. and Rutkowska-Gorczyza M. “Optimization of ceramic content in nickel–alumina composite coatings obtained by low pressure cold spraying”, *Surface and Coatings Technology*, 405, Article 126732, (2021).
- [13] Daniel J., Duliškovič J., Skála O., Liška K., Buršíková V., Fořt T., and Houdková Š. “Influence of thickness and surface roughness on impact wear and impact lifetime of HVOF-sprayed coatings”, *Surf. Coat. Technol.*, 488, 131058, (2024).
- [14] Schmidt T., Assadi H., Gärtner F., Richter H., Stoltenhoff T., Kreye H., and Klassen T. “From Particle Acceleration to Impact and Bonding in Cold Spraying”, *Journal of Thermal Spray Technology*, 18(5-6), 794-808, (2009).
- [15] Gül S., Durmuş H., Gül C. and Çömez N. “Improving the wear resistance of the magnesium alloy WE43 by cold sprayed Ni–Al₂O₃ and Ni–Zn–Al₂O₃ coatings”, *Mater. Test.*, 65(7), 1105-1118, (2023).
- [16] Yu M., Li W.Y., Wang F.F., Suo X.K. and Liao H.L. “Effect of particle and substrate preheating on particle deformation behavior in cold spraying”, *Surface and Coatings Technology*, 220, 174-178, (2013).
- [17] Gül C., Albayrak S., Çömez N. and Durmuş H., “WE43 Magnezyum Alaşımının Soğuk Spreyl Kaplama Yöntemi ile Al/Zn/ Al₂O₃ ve Zn/Al₂O₃ Kaplanması ve Aşınma Davranışlarının İncelenmesi”, *Politeknik Dergisi*, 25(4): 1791-1798, (2022).
- [18] Özmen Y. and Jahanmir S. “Ultra low-friction characteristics of nanostructured surfaces on silicon nitride in aqueous medium”, *Pamukkale Univ. Muh. Bilim. Derg.*, 21(8), 337-343, (2015).