



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

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

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



WE43 magnezyum alaşımının soğuk spreyle kaplama yöntemi ile Al/Zn/Al₂O₃ ve Zn/Al₂O₃ kaplanması ve aşınma davranışlarının incelenmesi

Al/Zn/Al₂O₃ and Zn/Al₂O₃ coatings by cold spray coating method of WE43 magnesium alloy and investigation of its wear behaviors

Yazar(lar) (Author(s)): Canser GÜL¹, Sevda ALBAYRAK², Nilay ÇÖMEZ³, Hülya DURMUŞ¹

ORCID¹: 0000-0002-1339-936X

ORCID²: 0000-0002-1504-8061

ORCID³: 0000-0002-6432-6582

ORCID⁴: 0000-0002-7270-562X

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Gül C., Albayrak S., Çömez N. ve Durmuş H., "WE43 Magnezyum Alaşımının Soğuk Spreyle Kaplama Yöntemi ile Al/Zn/Al₂O₃ ve Zn/Al₂O₃ Kaplanması ve Aşınma Davranışlarının İncelenmesi", *Politeknik Dergisi*, *(*) : *, (*).

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

DOI: 10.2339/politeknik.1128114

WE43 Magnezyum Alaşımının Soğuk Sprey Kaplama Yöntemi ile Al/Zn/Al₂O₃ ve Zn/Al₂O₃ Kaplanması ve Aşınma Davranışlarının İncelenmesi

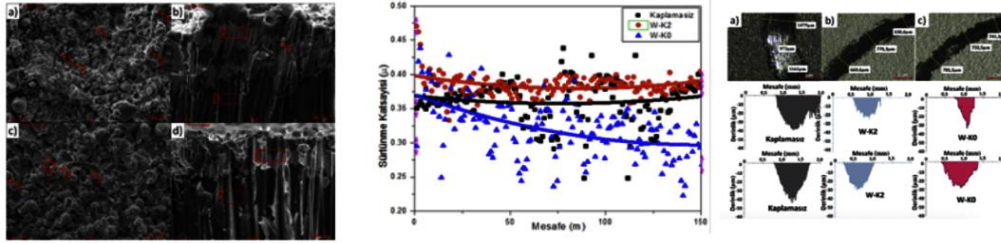
Al/Zn/Al₂O₃ and Zn/Al₂O₃ Coatings by Cold Spray Coating Method of WE43 Magnesium Alloy and Investigation of Its Wear Behaviors

Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Soğuk Sprey yöntemi ile WE43 Mg alaşımlarına kaplamaların yapılması / Making coatings on WE43 Mg alloys with the Cold Spray method
- ❖ Kaplamaların pürüzlülük, sürtünme katsayısı ve aşınma davranışı/ Roughness, coefficient of friction and wear behavior of coatings
- ❖ Kaplamaların karakterizasyonu/ Characterization of coatings

Grafik Özet (Graphical Abstract)

WE43 Mg alaşımları üzerine yapılan farklı içerikteki Al/Zn/Al₂O₃ ve Zn/Al₂O₃ kaplamaların SEM-EDX incelemeleri, sürtünme katsayısı ve aşınma özellikleri incelenmiştir.



Şekil. WE43 yüzeyine Al/Zn/Al₂O₃ ve Zn/Al₂O₃ kaplamaların SEM incelemeleri, sürtünme katsayısı ve aşınma testi sonuçları/ **Figure.** SEM examinations, friction coefficient and wear test results of Al/Zn/Al₂O₃ and Zn/Al₂O₃ coatings on WE43 surface)

Amaç (Aim)

WE43 Mg alaşımlarının aşınma dayanımını arttırabilecek kaplamaların, endüstride de kolaylıkla uygulanabilecek bir yöntem kullanarak geliştirilmesidir./ It is the development of coatings that can increase the wear resistance of WE43 Mg alloys by using a method that can be easily applied in the industry.

Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

WE43 Mg alaşımından alıtık malzemeler, soğuk sprej yöntemi kullanılarak Alüminyum/Çinko/Al₂O₃ ve Zn/Al₂O₃ ticari tozlarıyla kaplanmıştır. Aşınma testi, SEM-EDX ve XRD analizleri gerçekleştirilmiştir. / Base materials of WE43 Mg alloy were coated with commercial powders of Aluminum/Zinc/Al₂O₃ and Zn/Al₂O₃ using cold spray method. Wear test, SEM-EDX and XRD analyzes were performed.

Özgünlük (Originality)

WE43 Mg alaşımlarının aşınma dayanımını arttırabilmek için soğuk sprej kaplama yöntemi kullanılarak kaplamalar yapılmış çalışma bulunmamaktadır. / In order to increase the wear resistance of WE43 Mg alloys, there are no studies on coatings using the cold spray coating method.

Bulgular (Findings)

Aşınma dayanımı oluşturulan kaplamalar sayesinde artmıştır. / Wear resistance has increased thanks to the coatings created.

Sonuç (Conclusion)

Sonuç olarak, soğuk sprej kaplamalar sayesinde, kaplamasız duruma göre WE43 alaşımlarının aşınma hacim kaybı yaklaşık %40 oranında azalmıştır. /As a result, the wear volume loss of WE43 alloys was reduced by approximately 40% compared to the uncoated condition, thanks to the cold spray coatings.

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.

WE43 Magnezyum Alaşımının Soğuk Sprey Kaplama Yöntemi ile Al/Zn/Al₂O₃ ve Zn/Al₂O₃ Kaplanması ve Aşınma Davranışlarının İncelenmesi

Arařtırma Makalesi / Research Article

Canser GÜL¹, Sevda ALBAYRAK², Nilay ÇÖMEZ³, Hülya DURMUŞ¹

¹ Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Müh. Bölümü, Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Türkiye.

² Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Müh. Bölümü, Gazi Üniversitesi, Türkiye.

³ Mühendislik Fakültesi, Makine Müh. Bölümü, Ege Üniversitesi, Türkiye.

(Geliř/Received : 08.06.2022 ; Kabul/Accepted : 05.07.2022 ; Erken Görünüm/Early View : 06.09.2022)

ÖZ

Mg alaşımları otomotiv, uçak, uzay ve haberleşme sektörlerinde düşük özgül ağırlıkları ve yüksek mukavemetli olması nedenleriyle tercih edilmektedir. WE serisi, Mg, Y, Nd, nadir toprak elementlerini içeren Mg alaşımları serisidir. Bu alaşım serisi için sürünme dayanımı iyi olsa da aşınma dayanımı gelişmeye açıktır. Bu çalışmada amaç, özgül ağırlıkları nedeni ile kullanım potansiyeli yüksek olan WE43 Mg alaşımlarının aşınma dayanımını arttıracak kaplamaların, endüstride de kolaylıkla uygulanabilecek bir yöntem kullanarak geliştirilmesidir. Bu amaçla soğuk sprej kaplama yöntemi kullanılarak aynı zamanda yüzeyleri fazlasıyla aktif olan magnezyum alaşımlarının oksitlenmeden kaplanması sağlanmış ve aşınma dayanımı geliştirilmiştir. Yüzeyleri ince kumlama işlemiyle pürüzlendiren WE43 Mg alaşımları soğuk sprej yöntemi kullanılarak Al/Zn/Al₂O₃ ve Zn/Al₂O₃ içerikli ve ticari isimleri sırasıyla DYMET K-20-11 ve DYMET K-00-11 olan tozlar kullanılarak 500°C sıcaklıkta N₂ koruyucu gaz atmosferi altında süpersonik hızlardaki tozlar için 6 g/dak. toz besleme hızıyla altlıklar üzerine püskürtülmüştür. Farklı içerikli tozlarla kaplanmış ve kaplanmamış numunelerin morfolojik analizleri SEM ve XRD yöntemleri ile incelenmiş, kaplama kalınlıkları kesitten alınan SEM görüntülerinden ölçülmüş, EDS analizleri ile elementlerin yüzde oranları tespit edilmiştir. Ayrıca aşınma performansının incelenmesi için ball-on disk aşınma testlerinden hacim kayıpları değerlendirilmiştir. Sonuç olarak, soğuk sprej kaplamalarla, kaplamasız duruma göre WE43 alaşımlarının aşınma kaybı yaklaşık %40 oranında azalmıştır.

Anahtar Kelimeler: WE43, magnezyum alaşımı, soğuk sprej kaplama, aşınma.

Al/Zn/Al₂O₃ and Zn/Al₂O₃ Coatings by Cold Spray Coating Method of WE43 Magnesium Alloy and Investigation of Its Wear Behaviors

ABSTRACT

Mg alloys are preferred in automotive, aircraft, aerospace and communication industries due to their low specific gravity and high strength. WE series is a series of Mg alloys containing Mg, Y, Nd, rare earth elements, and although the creep strength is good for this alloy series, the wear resistance is open to improvement. The aim of this study is to develop coatings that can increase the wear resistance of WE43 Mg alloys, which have a high potential for use due to their specific gravity, by using a method that can be easily applied in the industry. For this purpose, using the cold spray coating method, magnesium alloys, whose surfaces are highly active, are provided to be coated without oxidation and wear resistance is improved. In the study carried out, WE43 Mg alloys, which roughen the surfaces by fine sandblasting process, were used with cold spray method, using powders containing Al/Zn/Al₂O₃ and Zn/Al₂O₃ and trade names DYMET K-20-11 and DYMET K-00-11, respectively, using N₂ shielding gas at 500°C. 6 g/min for powders delivered to supersonic speeds under the atmosphere. The powder was sprayed onto the substrates using the feed rate. Morphological analysis of the coated and uncoated samples with different contents were examined by SEM, XRD methods, the coating thicknesses were measured with SEM images taken from the section, and the percentages of the elements were determined by EDS analysis. In addition, ball-on disc wear tests were performed to examine the wear performance and volume losses were evaluated. As a result, the wear loss of WE43 alloys was reduced by approximately 40% compared to the uncoated condition, thanks to the cold spray coatings.

Keywords: WE43, magnesium alloy, cold spray coating, wear.

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

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

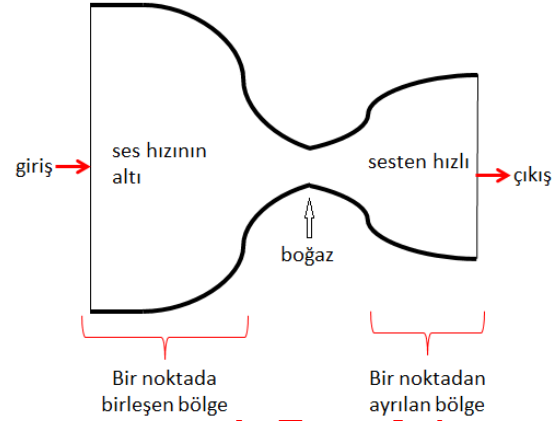
Magnezyum ve alaşımları, yüksek özgül dayanımları ve düşük yoğunlukları nedeniyle otomotiv ve havacılık endüstrisinde yaygın olarak kullanılmakla birlikte,

düşük aşınma ve korozyon direncine sahip olması bu malzemenin endüstriyel kullanımını sınırlandırmaktadır [1, 2]. Magnezyum alaşımlarının korozyon ve aşınma direnci, yüzey modifikasyonları ile geliştirilebilmektedir. Bu amaçla magnezyum alaşımlarının yüzeyi, organik kaplamalar, anodik oksidasyon, elektrolizle kaplama ve buhar biriktirme gibi yöntemlerle aşınmaya ve/veya korozyona dirençli hale getirilmektedir. Bununla birlikte, magnezyumun yüzeyindeki oksit/hidroksit bileşikleri kaplamanın yüzeye adezyonunu zorlaştırmaktadır. Magnezyumun yüzeyindeki oksit/hidroksit bileşiklerinin giderilmesi için kaplama uygulamasından önce bazı ön hazırlık işlemlerinin yerine getirilmesi gerekmektedir. Süper ses hızlara (300–1200 m/s) ulaşan mikro boyutlu parçacıkların bir noktada birleşen ve bir noktadan ayrılan geometriye sahip bir nozul (Şekil 1) ile yüzeye püskürtülmesini içeren soğuk sprej kaplama yönteminde, çarpan parçacıkların meydana getirdiği darbe ile yüzeydeki oksit tabakası temizlenir ve parçacıkların eş zamanlı olarak altlık malzemesine adezyonu gerçekleşir [2, 3]. Püskürtülen parçacıkların üzerindeki kinetik enerji çarpmanın etkisiyle mekanik enerjiye dönüşür ve böylece altlık ile parçacıklar arasında oluşan temas, termal deformasyonla yüzeyde kaplama olarak birikerek istenilen sonuca ulaşılmış olur. Soğuk sprej kaplamalarda bu sebeple yoğun ve yüksek yapışma sağlanır [4]. Geleneksel termal püskürtme yönteminde oksidasyon, artık termal stres ve faz dönüşümü gibi yüksek sıcaklıkta karşılaşılabilecek problemler ortadan kaldırılarak ulaşılamayan kaplama özellikleri soğuk sprej kaplama işlemiyle elde edilebilir. Termal sprejin aksine soğuk sprej işleminde, kaplama alt tabaka malzemesini yüksek sıcaklıklara maruz bırakmadan ve özellikle püskürtülen partiküller biriktirme işlemi boyunca katı halde kalarak gerçekleştirilebilir. Böylece oksidasyon ve diğer istenmeyen reaksiyonlar önlenir. Püskürtülen parçacıklar, çarpma anında yüksek kinetik enerjileri nedeniyle plastik deformasyona uğrayarak alt tabakaya yapışır [5-8].

Seramik-metal kompozit kaplamalar, aşındırıcı ve korozif ortamlarda mühendislik bileşenlerinin yüzey özelliklerini, aşınma direncini ve performansını artırmak için yaygın olarak kullanılmaktadır [10-13]. Ayrıca soğuk sprej yönteminde kullanılan tozların plastik deformasyon kabiliyetlerinin yüksek olması istenir [14]. Eğer kullanılacak malzeme düşük süneklik özelliği taşıyorsa bu malzemenin başka bir malzeme üzerinde tutunması zor olacaktır, soğuk sprej püskürtme işleminde altlık üzerine tutunamayıp istenilen sonuçları vermeyecektir. Bu sebeple kırılabilirliği yüksek malzemelerden istenilen verimi alabilmek için yumuşak malzemelerle karıştırıp altlık üzerine püskürtmek uygun olacaktır [15].

Bu çalışma ile düşük uygulama sıcaklığında yüzeyi kumlama ile pürüzlendirilen WE43 altlıklar üzerine Al/Zn/Al₂O₃ ve Zn/Al₂O₃ içerikli soğuk sprej

kaplamalar uygulanarak aşınma performansının geliştirilmesi hedeflenmiştir.



Şekil 1. Soğuk sprej uygulamalarında kullanılan nozul geometrisinin şematik gösterimi [9] (Schematic representation of nozzle geometry used in cold spray applications [9])

2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL and METHOD)

Bu çalışmada WE43 Mg alaşımından altlık malzemeler, 0,6 MPa basınçta ince kumlama işlemi ile yüzeyleri pürüzlü hale getirdikten sonra soğuk sprej yöntemi kullanılarak Alüminyum/Çinko/Al₂O₃ (DYMET K-20-11) ve Zn/Al₂O₃ (DYMET K-00-11) ticari tozlarıyla kaplanmıştır. Kullanılan tozlara ait içerik bilgisi Çizelge 1'de verilmiştir. Toz boyut ölçümleri Mastersizer 3000 cihazı ile gerçekleştirilmiş olup, dağılımları Çizelge 2'de verilmiştir. Soğuk sprej kaplamalar, DYMET 423 soğuk sprej cihazında 500 °C sıcaklıkta ve N₂ koruyucu gaz atmosferi altında tozların 6 g/dak. toz besleme hızıyla püskürtülmesi ile elde edilmiştir. K-20-11 tozu ile kaplanan numuneler W-K2 kodlu iken, K-00-11 tozu kullanılarak kaplanmış numuneler W-K0 olarak kodlandırılmıştır.

Çizelge 1. Toz Karışımlarının İçeriği (%ağ.) (Content of Powder Mixtures (%w))

Ticari toz adı	Numune kodu	Al	Zn	Al ₂ O ₃
K-20-11	W-K2	33-37	38-42	23-27
K-00-11	W-K0	-	50-55	45-50

Çizelge 2. Toz Boyut dağılımları (µm) (Powder Size distributions (µm))

Ticari toz adı	Numune kodu	D10	D50	D90
K-20-11	W-K2	1,04	24,1	79,0
K-00-11	W-K0	2,25	17,5	43,1

2.2. Kaplamaların Karakterizasyonu (Characterization of Coatings)

Kaplamaların kalınlıkları ve morfolojik incelemeleri taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile gerçekleştirilmiştir. SEM-EDS analizi ile kaplamaların elementel içerikleri belirlenmiştir. Kaplamalarda oluşan fazların tespiti için X-ışını kırınımı (XRD) analizi uygulanmıştır. Kumlama uygulanmış durumdaki altlık malzemesinin ve soğuk sprej kaplama uygulanmış numunelerin yüzey pürüzlülük ölçümleri Mitutoyo SurfTest SJ-410 profilometre cihazı ile gerçekleştirilmiştir.

2.3. Aşınma Testi (Wear Test)

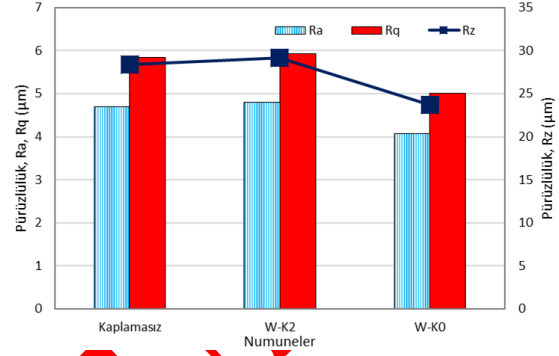
Soğuk sprej kaplama yapılan numuneler ile kıyaslanan WE43 Mg alaşımından altlık malzemesinin kumlanmış durumuna aşınma testi uygulanmıştır. Kaplamaların tribolojik davranışı kuru ortamda kaymalı sürtünme (ball-on-disc) aşınma testi ile belirlenmiştir. Aşınma testleri 2N yük ile 150 m mesafede 10 cm/s kayma hızında gerçekleştirilmiştir. Aşındırıcı karşı eleman olarak 6 mm çapa sahip Al_2O_3 bilyeler kullanılmış ve kayma yarıçapı 7,5 mm olarak belirlenmiştir. Aşınma sonrası meydana gelen izin genişliği Nikon stereo mikroskop ile ölçülmüştür. Aşınma izinin topoğrafyası Mitutoyo SurfTest SJ-410 profilometre ile elde edilerek yüzey profilinin grafiği Origin Pro yazılımına aktarılmıştır ve malzeme kaybının gerçekleştiği kesit alanı belirlenmiştir. Bu değerler kullanılarak ortalama hacim kaybı hesaplanmıştır.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

3.1. Kaplamaların Pürüzlülüğü ve Morfolojisi (Roughness of Coatings and Morphologies)

Numunelerin kaplama öncesi ve sonrası yüzey pürüzlülük değerlerini gösteren grafik Şekil 2'de verilmiştir. En düşük ortalama pürüzlülük değeri (R_a) çinko ve Al_2O_3 içeren kaplamada elde edilmiştir. Çizelge 2'de verildiği gibi W-K0 kodlu kaplamanın üretiminde kullanılan toz boyutu W-K2 kodlu numunenin kaplamasında kullanılan toz boyutundan daha küçüktür. Küçük parçacık boyutu sebebiyle soğuk sprej işlemi sırasında kritik hızın arttığı ve altlık malzemesinin yüzeyine çarpma hızının daha yüksek olması sebebiyle adezyonun arttığı düşünülmektedir. Palodhi ve diğerleri (2021), küresel parçacıklar için kritik hızın parçacık boyutuna bağlı olduğunu ve artan parçacık boyutuyla azalma eğilimi sergilediğini bildirmişlerdir [16]. Benzer şekilde Helfritch ve Champagne (2008), küçük parçacıkların soğuk püskürtme işleminde daha yüksek hızlara ulaştığını, böylece iyi bir biriktirme verimliliği sağladığını

bildirmiştir[17]. Ayrıca soğuk sprej işleminde kullanılan tozların çapının 4-8 μm aralığında olması darbe hızını artırdığını ifade etmişlerdir. Dolayısıyla daha küçük parçacık boyutuna sahip W-K0 kaplamasında tozların yüzeye daha hızlı çarptığı düşünülmektedir. Soğuk sprej kaplama işleminde yüksek hızla yüzeye çarpan toz parçacıklarının, yüzeyde oluşan W-K0 kaplamasında daha fazla deforme olarak toz parçacıklarının yassı hale geldiği ve oluşan kaplama tabakasının pürüzlülük değerlerini azalttığı görülmüştür (Şekil 2).

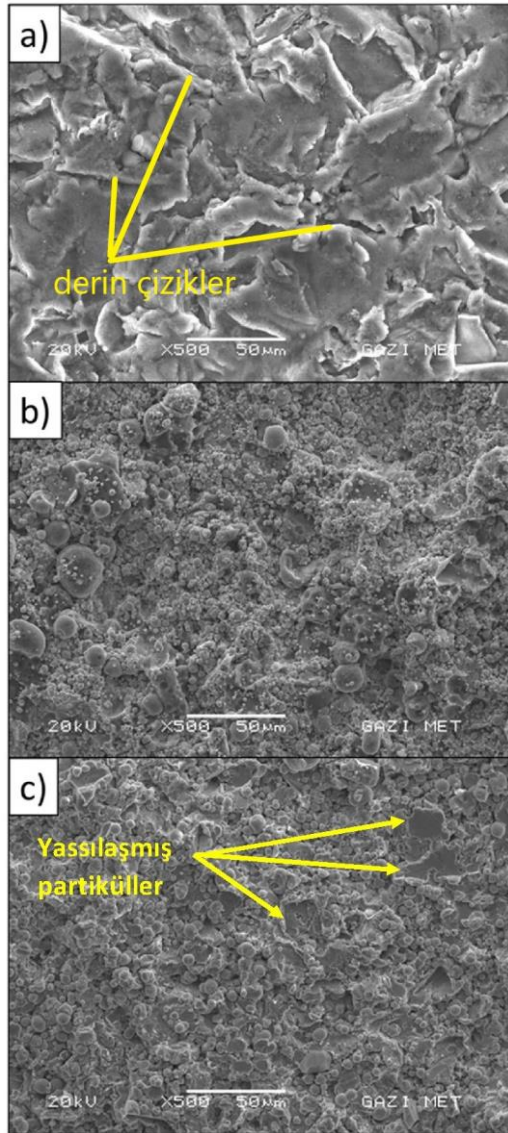


Şekil 2. Numunelerin kaplama işlemi öncesi (kaplamasız) ve sonrasında (W-K2; W-K0) yüzey pürüzlülük değerleri grafiği (Graph of the surface roughness values of the samples before (non-coating) and after the coating process (W-K2; W-K0))

Kumlanmış WE43 Mg alaşımına ait kaplamasız yüzeylerin ve kaplanmış W-K2 ve W-K0 numunelerine ait SEM görüntüleri Şekil 3'te verilmiştir. Kaplamasız ve kumlama işlemi yapılmış WE43 Mg alaşımının yüzeyinde, kumlama etkisiyle oluşan deformasyon ve derin çizikler gözlenmiştir. W-K2 kaplamasında küreselliğini koruyan, kısmen deforme olduğu düşünülen büyük boyutlu parçacıklar göze çarpmaktadır. Bununla birlikte W-K0 kaplamasında çarpmanın etkisiyle yassılaştırmış parçacıklar Şekil 3c'de belirgin bir şekilde gözlenebilmektedir.

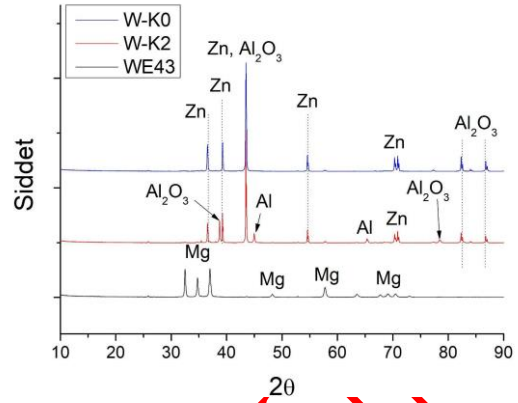
WE43 altlık malzemesine ve kaplanmış numunelere ait XRD grafikleri Şekil 4'te ve kaplanmış numunelerin yüzeylerinden ve dikey kesitlerinden alınan EDS analizlerinin bölgelerini gösteren SEM görüntüleri Şekil 5'te verilmiştir. Alınan EDS analizlerine ait veriler Çizelge 4'te mevcuttur. EDS analizleri incelendiğinde, toz karışımının bünyesinde bulunan alüminyum, alüminyum-oksit ve çinko yüzdeleri ile (Çizelge 1) kaplama sonrası EDS analizleri arasında bir fark söz konusudur. Alüminyum ve çinko gibi yumuşak ve saf metallere göre daha kolaydır. Soğuk sprej kaplama yönteminde yüksek hızlarda altlığa püskürtülen tozlardan özellikle sert ve plastik deformasyon kabiliyeti düşük olanlar saçılma yapabilmekte ve kaplamalarda tutunabilirlikleri düşük olmaktadır. Bu sert partiküllerin yüzeye tutunabilirliğini arttırmak için

yapılan farklı çalışmalarda parçacık boyutunu küçültmek ve kolay deforme olabilen metal içerikli bağlayıcılar ile prosesi desteklemek, bu yöntemi geliştirebilecek öneriler arasında sunulmuştur [18]. Bu çalışmada da alüminyum ve çinko ile sert partiküllerin yüzeye daha iyi tutunmasına çalışılmıştır. EDS analizleri incelendiğinde Al_2O_3 parçacıklarının metal içerikli matriste az da olsa tutulumlarının mevcut olduğu gözlemlenmektedir. Kaplama öncesi alüminyum yüzdesi ağırlıkça %33-37 arasında ölçülen WK-2 numunesinde EDS analizlerinde %45 oranında Al tespit edilmiştir. WK-0 numunesinde Al metal bağlayıcı kullanılmamasına rağmen kaplama içinde genel EDS analiz sonucunda yaklaşık %3 oranında Al tespit edilmiştir. Bu durum Al_2O_3 tutulumunun mevcut olduğunun ve EDS analizinde görülen alüminyumun Al_2O_3 'ten geldiğinin bir göstergesidir. Kaplamalarda Al_2O_3 varlığı Şekil 4'te verilen XRD analizinde de tespit edilmiştir.



Şekil 3. a) Kaplamasız, b)W-K2 ve c)W-K0 numunelerine ait 500X büyütmeye sahip SEM görüntüleri (SEM images of a)

Uncoated, b) W-K2 and c) W-K0 samples with 500X magnification)



Şekil 4. WE43 altlık malzemesine ve kaplamalara ait XRD grafikleri (XRD plots of WE43 substrate and coatings)

Şekil 5b ve Şekil 5d'de kaplama kesitine ait görüntüler verilmiştir. Kaplama kalınlığının alüminyum içeren toz karışımıyla üretilen W-K2 kaplamasında daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Kaplamalar aynı parametrelerde üretilmesine rağmen toz içeriğinin kaplama kalınlığını değiştirmesi toz özellikleriyle ilişkilendirilebilir. Alüminyum içeren toz karışımının parçacık boyutu daha büyük olduğundan çarpma hızını azalttığı ve parçacık deformasyon oranını azaltarak daha kalın bir kaplama meydana getirdiği düşünülmektedir. Bununla birlikte çinkonun ergime noktası alüminyuma kıyasla daha düşüktür. Dolayısıyla işlem sıcaklığında toz karışımı içerisindeki çinkonun yarı katı halde yüzeye püskürtülmesi söz konusudur. Bu durumda çinko plastik deformasyon için çok yüksek darbe enerjisine ihtiyaç duymayacağı için mevcut durumda yüksek oranda deforme olarak daha ince bir tabaka halinde içerisinde Al_2O_3 tozlarını barındıran bir matris fazı haline gelmiştir. Diğer taraftan alüminyum içeren toz karışımında hem büyük toz boyutu nedeniyle ortaya çıkan düşük çarpma hızı hem de nispeten yüksek ergime noktası nedeniyle plastik deformasyon için daha yüksek darbe enerjisine ihtiyaç duyan alüminyum parçacıklarının plastik deformasyonla yüzeye biriktirilmesi daha kalın bir kaplama meydana getirmiştir. Yu ve diğerleri (2013), soğuk spreycaplamalarda parçacık sıcaklığının parçacığın deformasyon davranışına etkisini incelemiştir [19]. Çalışmalarında artan parçacık sıcaklığının sıkışma oranını ve yüzeyin düzleşmesini artırdığını ifade etmişlerdir. Artan sıkışma oranıyla, partiküllerin deforme olarak yassı hale gelmesi ve tabaka kalınlığını azaltması beklenmektedir. 500 °C işlem sıcaklığı çinko ve alüminyum için değerlendirilecek olursa, çinkonun alüminyuma kıyasla daha düşük ergime sıcaklığına sahip olması nedeniyle daha yüksek sıkışma ve düzleşme oranına sahip olacağı beklenmelidir. Bulgular bu olguyu destekler niteliktedir. Matris fazı olarak sadece çinko içeren toz karışımının meydana getirdiği kaplamada artan sıkışma oranına bağlı azalan tabaka

kalınlığı ve artan düzleşme oranına bağlı azalan yüzey pürüzlülüğü elde edilmiştir (Şekil 2 ve Şekil 5).

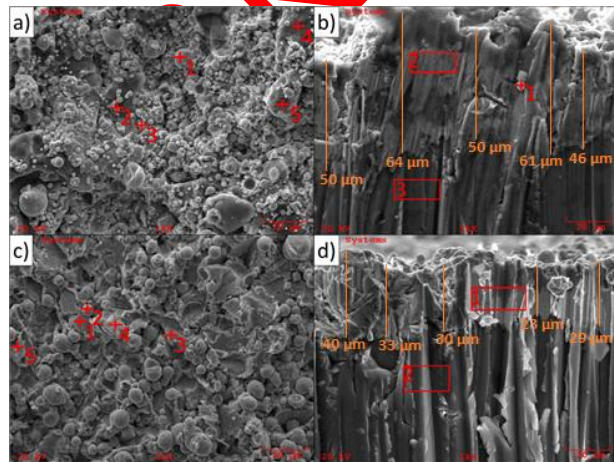
Soğuk püskürtme durumunda, kaplama yapısı ve biriktirme verimliliği açısından kritik hız (v_{cr}), belirleyici bir parametredir. Çünkü bu parametre, yüzeyin aşınmasını en aza indirirken aynı zamanda etkili tortular elde etmek için gereken minimum hızdır [20]. Parçacık parametreleri ile bir parçacığın önceden biriktirilmiş bir katmana yapışması için gereken kritik hız ampirik olarak hesaplanabilir [17]. Assadi vd. (2003), tarafından geliştirilen kritik hız formülünde (Denklem 1), kritik hızın artan akma gerilimi ve erime sıcaklığı ile arttığı, artan yoğunluk ve partikül sıcaklığı ile azaldığı görülmektedir [21].

$$v_{cr} = 667 - 14\rho_p + 0,08 T_m + 0,1 \sigma_u - 0,4 T_i \quad (\text{Denklem1})$$

Burada ρ_p parçacık yoğunluğu (g/cm^3), T_m ergime sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$), σ_u : çekme dayanımı (MPa), T_i : parçacığın çıkış sıcaklığını ifade etmektedir. Denklem 1 kullanılarak hesaplanan kritik parçacık hızları Çizelge 3'te verilmiştir. Hesaplanan ampirik kritik hız değerlerine göre kullanılan toz bileşenlerinden birikme verimliliği yaklaşık olarak 400 m/s ile çinko için en yüksek ve yaklaşık olarak 600 m/s kritik hız ile Al_2O_3 için en düşük olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 3. Toz karışımında yer alan malzemelerin parçacıkları için Denklem 1'e göre hesaplanan kritik hız değerleri (Critical velocity values calculated according to Equation 1 for the particles of the materials in the powder mixture)

Malzeme	Yoğunluk (g/cm^3)	Ergime sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	Çekme Dayanımı (MPa)	Çıkış sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	Hesaplanan kritik hız (v_{cr} m/s)
Alüminyum	2,7 [22]	657 [22]	89,6 [24]	500	490,72
Çinko	7,1 [22]	417 [22]	37,0 [24]	500	404,66
Al_2O_3	3,986 [22]	2037 [23]	200 [24]	500	594,16



Şekil 5. Numunelerin yüzey ve dikey kesitlerinden alınan EDS analiz görüntüleri a) W-K2 yüzey, b) W-K2 kesit, c) W-K0 yüzey, d) W-K0 kesit (EDS analysis images taken from the

surface and vertical sections of the samples a) W-K2 surface, b) W-K2 section, c) W-K0 surface, d) W-K0 section)

Çizelge 4. Numunelerin EDS analizleri (ağ.%) (EDS analysis of samples (wt%))

	Mg	Y	Nd	Al	Zn	O
a(genel)	-	-	-	45,1	53,45	1,45
a1	-	-	-	2,76	96,11	1,13
a2	-	-	-	90,22	8,77	1,01
a3	-	-	-	2,13	96,22	1,65
a4	-	-	-	96,84	2,06	1,1
a5	-	-	-	96,87	1,29	1,84
b1	6,11	-	-	2,79	90,73	0,37
b2	8,74	-	-	5,9	83,8	1,52
b3	81,06	0,56	7,07	-	-	11,31
c(genel)	-	-	-	3,05	95,42	1,53
c1	-	-	-	0,36	99,19	0,45
c2	-	-	-	0,53	98,48	0,99
c3	-	-	-	0,01	99,53	0,46
c4	-	-	-	0,23	99,34	0,43
c5	-	-	-	0,17	99,39	0,44
d1	-	-	-	0,11	99,66	0,23
d2	97,32	0,12	1,59	-	-	0,97

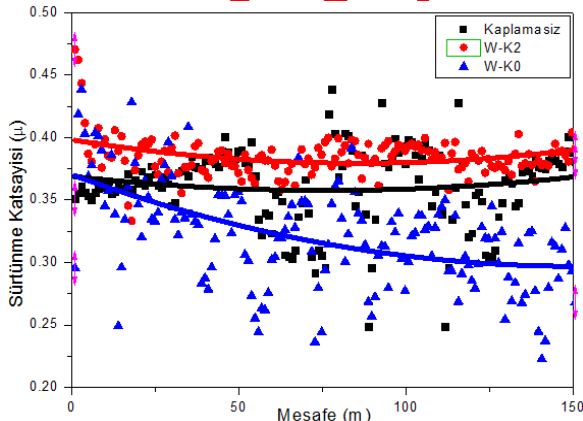
3.2. Kaplamaların Aşınma Davranışı (Wear Behaviour of Coatings)

Aşınma mesafesi boyunca sürtünme katsayılarındaki değişimi gösteren grafik Şekil 6'da verilmiştir. Aşınma testi boyunca sürtünme katsayısı, alüminyum içeren kaplamada 0,4-0,35 μ aralığında değişim gösterirken kaplamasız numunede ve çinko- Al_2O_3 içeren W-K0 kaplamasında daha geniş bir aralıkta dalgalanma sergilemiştir. Kaplamasız numuneye ait sürtünme katsayısı grafiği incelendiğinde, sürtünme katsayısının ilk 50 metre kararlı durumda olduğu görülmektedir. Kumlama etkisiyle deformasyona uğrayan yüzey tabakası kaldırılana kadar sürtünme katsayısının kararlı fakat artış eğiliminde olduğu düşünülmektedir. Deformasyona uğrayan tabakanın hasara uğraması ile magnezyum ana malzemesi ile temas başlamıştır ve sürtünme katsayısı, oluşan aşınma ürünlerinin de etkisiyle geniş bir aralıkta dalgalanma sergilemiştir.

Liang vd. (2018), ilk kararlı aşınmaya geçiş sürecinde R_a ve R_q pürüzlülük değerlerinin artmasıyla ortalama sürtünme katsayısının arttığını, aşınmanın ilerleyen süreçlerinde bu durumun tam tersinin gözlemlendiğini

bildirmişlerdir [25]. Bu çalışmada da pürüzlülük değerlerinde bu durum gözlenmiştir. Şekil 6'daki sürtünme katsayısı grafiklerinin başlangıç değerlerine bakıldığında aşınma öncesi ölçülen pürüzlülük değerinin en yüksek olduğu numunede sürtünme katsayısı değeri de en büyük değerdedir. Özetle hem pürüzlülük hem de sürtünme katsayısı değerleri şu sırayı izlemektedir: W-K2 > kaplamasız magnezyum > W-K0. Ortalama sürtünme katsayısı değerleri, W-K2, kumlanmış durumdaki altlık malzeme ve W-K0 için sırasıyla 0,38; 0,36 ve 0,32'dir. Sürtünme katsayısının en düşük değerine W-K0 numunesinde rastlanmıştır.

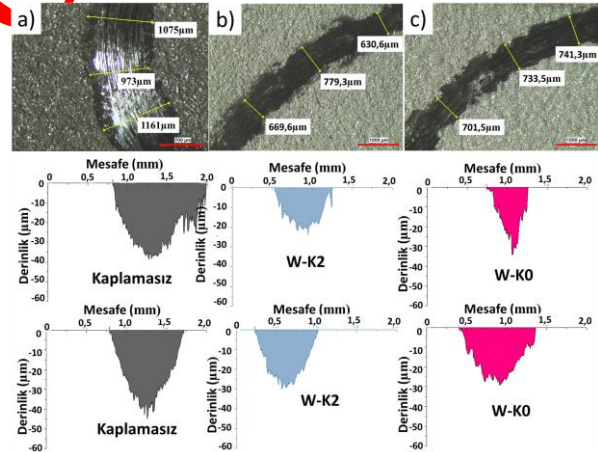
Sürtünme katsayısı ne kadar düşüğe kararlı aşınmaya geçiş süreci o kadar uzun olacaktır [25]. Aşınmanın başlangıcında meydana gelen alıştırma (rodaj) periyodunda sürtünme katsayısı kararsızdır ve daha büyük genliğe sahiptir. Geçiş süreci alıştırma periyodundan kararlı aşınma durumuna ulaşılan kadarki süreci kapsar [26]. Bu nedenle W-K0 numunesinin test aşınma mesafesi boyunca geçiş bölgesinde olduğu ve kararlı bölgeye geçemediği için geniş bir aralıkta sürtünme katsayısının dalgalandığı düşünülmektedir. Benzer durum kaplamasız durumdaki numunede de gözlenmiştir. Ancak sürtünme katsayısı başlangıç durumunda da en yüksek değerde olan W-K2 numunesi sürtünme katsayısının kararlı bölgesine ulaşabilmiştir. Numunelerin içeriğinde bulunan elementlere göre literatürdeki çalışmalarda incelendiğinde sürtünme katsayısı değerleri kendi arasında Al_2O_3 (0,9) > Al (0,35) > Zn (0,22-0,33) şeklinde sıralanabilir [27-29]. En düşük sürtünme katsayısına sahip çinko için aşınma testi sırasında oluşan çinko oksit yağlayıcı bir etki yaptığı (çinko oksit tabakası ise yağlayıcı özelliğinden dolayı kaymayı kolaylaştırmaktadır) ve kaplanmış (dolayısıyla alüminyum ve çinko oksit içermeyen) numuncye göre, aşınmada ortaya çıkan hacim kaybını azalttığı söylenebilir [30].



Şekil 6. Mesafe-sürtünme katsayısı grafiği (Distance-friction coefficient graph)

Aşınma testi sonrası izlerden alınan stereo mikroskop görüntüleri ve aşınma izlerine ait derinlik profilleri Şekil 7'de verilmiştir. En geniş aşınma izi kaplamasız numunede gözlenirken en dar aşınma izi W-K2

kaplamasında elde edilmiştir. Şekil 5'te verilen SEM görüntülerindeki ölçüğe göre kaplama kalınlıkları W-K0 ve W-K2 numuneleri için sırasıyla ortalama olarak 31 μm ve 54 μm 'dir. Kaplamasız numunede karşı elemanın altlık malzemeye ulaştığı anlaşılmaktadır. Buna karşın W-K2 numunesinde karşı eleman henüz altlık malzemeye temas edebilecek derinliğe kadar kaplamadan malzeme kaldıramamıştır. W-K0 kaplaması ise bünyesindeki çinko ve çinko oksit etkisi ve oluşturduğu yağlayıcı etki ile daha yüzeysel aşınmış ve bu durum aşınma izinin daha geniş olmasına neden olmuştur (Şekil 8). Aşınma izi genişlikleri ile hacim kayıpları üç numune için de paralellik göstermektedir. Bununla birlikte her iki soğuk sprey kaplama için değerlendirildiğinde, kaplamasız duruma göre aşınma sonrası hacim kaybı yaklaşık %40 oranında azalmıştır. Yapıda bulunan çinko ve oluşturduğu çinko oksit sürtünme ve aşınma özelliklerine etkisi, sahip olduğu c/a oranı yüksek sıkı düzenli hegzagonal kafes yapısının ve sürtünen yüzeylerde oluşmasına yol açtığı bilinen çinko oksitlerin kaymayı kolaylaştırıcı bir başka deyişle sürtünme kuvvetini azaltıcı etkisine bağlı olarak açıklanmaktadır [31]. W-K0 kaplamasında bulunan toplam çinko ve Al_2O_3 miktarı W-K2 kaplamasına kıyasla yüzdesel olarak daha yüksektir (Çizelge 1). İçerdiği çinko ve çinkonun kaymayı kolaylaştırıcı etkisi sebebi ile W-K0 kaplaması, alüminyum içeren W-K2 kaplamasına göre aşınma dayanımında daha etkili olmuştur.

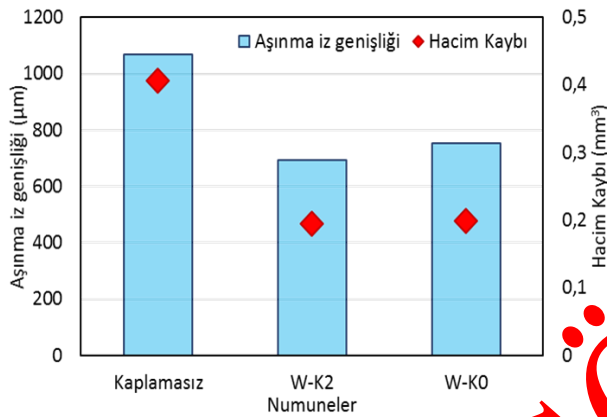


Şekil 7. Aşınma sonrası numunelere stereo mikroskop görüntüleri ve iz genişlik ölçümleri ve aşınma izlerine ait derinlik profilleri: a) kaplamasız numune, b) W-K2 kaplaması, c) W-K0 kaplaması (Stereo microscope images and trace width measurements and depth profiles of the wear traces of the post-abrasion samples: a) uncoated sample, b) W-K2 coating, c) W-K0 coating)

W-K2 kaplama numunesinde daha kalın bir kaplama tabakası elde edilmesine rağmen, bu numunede W-K0 kaplaması ile yakın hacim kayıpları elde edilmiştir. Bu durumun sebebi W-K2 numunesinin yüzey pürüzlülüklerindeki değişim ve kaplama sonrası yüzey pürüzlülüklerinin fazla olması ve çinko içeriği daha fazla olan W-K0 numunesinde aşınmanın derine

inmekten çok yan bölgelere doğru yayılması ile açıklanabilir. Benzer bir durum Ren vd. (2020) çalışmalarında da gözlemlenmiş olup çalışmada ZnO içerikli yağlayıcıların boyut ve şekillerine ve sahip olduğu yüksek yüzey enerjisine bağlı olarak geniş bir alanda yayılım sergilediğini ve bu durumun malzemenin aşınma dayanımına katkı sunduğunu vurgulamışlardır [32].

Aşınma testinden sonra hacim kaybı hesabı her numune için pürüzlülük test cihazından çıkan aşınma iz profiline göre hesaplanmıştır (Şekil 7). Profilometre ile elde edilen aşınma izi kesiti ve aşınma mesafesine göre her üç ölçüm sonucuna göre hacim hesaplamaların ortalaması alınarak her numunenin hacimsel kaybı hesaplanmıştır. Hacimsel kayıplar Şekil 8’de verilmiştir.



Şekil 8. Toplam hacim kaybı ve iz genişliklerini gösteren grafik (Graph showing total volume loss and trace widths)

4. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada, farklı oranlarda alüminyum, çinko ve alüminyum oksit bileşenleri içeren iki farklı toz kullanılarak soğuk sprey kaplama yöntemi ile WE43 magnezyum alaşım yüzeyleri kaplanmıştır. Aynı koşullarda hazırlanan altlık malzemeler için, kullanılan yöntem ve kaplama parametreleri değiştirilmeden kaplamalar uygulanmış ve elde edilen numuneler için, numune yüzey morfolojileri, kaplama kalınlıkları ve kesit morfolojileri değerlendirilmiş ve aşınma dayanımları incelenmiştir.

Kaplanmış numunelerde, çinko içeriği fazla olan numunede soğuk sprey yönteminde elde edilmesi gereken kritik hız değerleri daha yavaş olarak hesaplanmış ve bu durum çinko tozlarının yüzeyde birikme verimliliğini arttırmıştır. Sert ve kırılğan bir yapıya sahip olan Al₂O₃ için ise tam tersi bir durum söz konusu olmuş ve plastik deformasyonu zor olan ve gerekli kritik hıza ulaşamayan parçacıklar daha düşük birikme verimliliği ile kaplama tabakası içinde yer almıştır.

Kaplama bünyesinde bulunan alüminyum, alüminyum-oksit ve çinko yüzdeleri, yüzey morfolojisine yönelik gerçekleştirilen SEM-EDS ve XRD analizleri ve hesaplanan kritik hız değerleri ile değerlendirildiğinde tutarlılık göstermektedir. Kullanılan kaplama yöntemi ve parametreleri ile homojen kaplama tabakaları elde

edilmiştir. Her ne kadar sert partiküllerin soğuk sprey yöntemi ile kaplanan tabakalarda yer alması düşük plastik deformasyon kabiliyetleri nedeni ile sınırlı olsa da, çalışmada kaplama yapısının içinde Al₂O₃ mevcut olduğu da gösterilmiştir.

Alüminyum içeren toz kullanılarak kaplanmış numunede alüminyum parçacık boyutunun daha büyük olması çarpma hızını azaltmış ve parçacık deformasyon oranını azaltarak daha kalın bir kaplama meydana gelmesine neden olmuştur.

Numunelerin pürüzlülük ve sürtünme katsayısı değerleri incelendiğinde değerler, alüminyum içerikli numunede en yüksek ve çinko içerikli numunede ise en düşük olarak elde edilmiştir. Bunun sebebi çinko ve aşınma sırasında sağladığı geniş yayılmadır. Yapıda bulunan çinko oksit kaymayı kolaylaştırıcı etkisi ile aşınma dayanımının geliştirilmesinde etkin rol oynamıştır. Sadece Zn ve Al₂O₃ karışımı kaplama tozu kullanılarak aşınmaya dayanıklı ve daha ince kaplamalar üretilebileceği görülmüştür.

Hacim kayıpları değerlendirildiğinde her iki kaplama katmanının da, WE43 Mg alaşımlarının aşınma dayanımını geliştirdiği tespit edilmiştir. Çinko içeriği daha fazla olan numunede diğer numuneye kıyasla daha ince bir kaplama tabakası elde edilmesine rağmen, yüzey pürüzlülüklerindeki değişim ve farklı oranlardaki çinko içeriği, farklı mekanizmaların etkili olmasına neden olmuştur. Çinko içerikli numunede aşınmanın derine inmekten çok yan bölgelere doğru yayılması ile gerçekleşmiştir. Sonuç olarak, soğuk sprey kaplamalar sayesinde, kaplamsız duruma göre WE43 alaşımlarının aşınma hacim kaybı yaklaşık %40 oranında azalmıştır.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (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.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Canser Gül: Deneyleri yapmış ve sonuçlarını analiz etmiştir. / Performed the experiments and analyse the experimental results.

Sevda Albayrak: Deneyleri yapmış ve sonuçlarını analiz etmiştir. / Performed the experiments and analyse the experimental results.

Nilay Çömez: Makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir. / Wrote the manuscript.

Hülya Durmuş: Sonuçları analiz etmiş, makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir. / Analyse the experimental results, wrote the manuscript.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur. / There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1]. Malayoğlu, U. & Tekin, K. C. Wear behaviour of plasma electrolytic oxide coatings on E21 and WE43 Mg alloys. *Surface Engineering*, 31(7), 526-533, (2015)..
- [2]. Wei, Y. K., Li, Y. J., Zhang, Y., Luo, X. T., & Li, C. J. Corrosion resistant nickel coating with strong adhesion on AZ31B magnesium alloy prepared by an in-situ shot-peening-assisted cold spray. *Corrosion Science*, 138, 105-115, (2018).
- [3]. Moridi, A., Hassani-Gangaraj, S. M., Guagliano, M., & Dao, M. Cold spray coating: review of material systems and future perspectives. *Surface Engineering*, 30(6), 369-395, (2014).
- [4]. Yin, S., Jenkins, R., Yan, X. & Lupoi, R. Microstructure and mechanical anisotropy of additively manufactured cold spray copper deposits. *Materials Science and Engineering A*, 734, 67-76, (2018).
- [5]. Gärtner, F., Stoltenhoff, T., Schmidt, T., & Kreye, H. The cold spray process and its potential for industrial applications. *Journal of Thermal Spray Technology*, 15(2), 223-232, (2006).
- [6]. Assadi, H., Kreye, H., Gärtner, F. & Klassen, T. Cold spraying of materials: a perspective. *Acta Materialia*, 116, 382-407, (2016).
- [7]. Raelison, R. N., Xie, Y., Sapanathan, T., Planche, M.P., Kromer, R., Costil, S. & Langlade, C. Cold gas dynamic spray technology: A comprehensive review of processing conditions for various technological developments till to date. *Additive Manufacturing*, 19, 134-159, (2018).
- [8]. Rokni, M. R., Nutt, S. R., Widener, C. A., Champagne, V. K. & Hrabec, R. H. Review of Relationship Between Particle Deformation, Coating Microstructure, and Properties in High-Pressure Cold Spray. *Journal of Thermal Spray Technology*, 26, 1308-1355, (2017).
- [9]. Shariatzadeh, O. J., Abrishamkar, A., & Jafari, A. J. Computational Modeling of a Typical Supersonic Converging-Diverging Nozzle and Validation by Real Measured Data. *Journal of Clean Energy Technologies*, 3(3), 220-225, (2015).
- [10]. Selcuk, C. & Kennedy, A. R. (2006). Al-TiC composite made by the addition of master alloys pellets synthesized from reacted elemental powders. *Materials Letters*, 60, 3364-3366, (2006).
- [11]. Barış M., Şimşek T. ve Akkurt A., "Co2B nanokristalleri kaplanmış S235JRC karbon çelik malzemelerin farklı kesme yöntemleri ile işlenebilirlik özelliklerinin araştırılması", *Politeknik Dergisi*, 22(1): 169-177, (2019).
- [12]. Yazar, M. , Kul, M. , Alp, A. K. & Talaş, Ş. The use of NiAl Coating Deposited by ESD Against the Wear of Sliding Wire in GMAW Contact Tips. *Politeknik Dergisi* , 1-1, (2021).
- [13]. Karakoç, H. Toz Metal Al7075/B4C/Si3N4 Kompozit Malzemelerin Üretimi ve Aşınma Özelliklerinin İncelenmesi . *Politeknik Dergisi* , 23 (4) , 1141-1151, (2020).
- [14]. Prabhu, B., Suryanarayana, C., An, L. & Vaidyanathan, R. Synthesis and characterization of high volume fraction Al-Al2O3 nanocomposite powders by high-energy milling. *Materials Science and Engineering A*, 425, 192-200, (2006).
- [15]. Villafuerte, J. Considering Cold Spray for Additive Manufacturing. *Advanced Materials and Processes*, 50-52, (2014).
- [16]. Palodhi, L., Das, B., & Singh, H. Effect of Particle Size and Morphology on Critical Velocity and Deformation Behavior in Cold Spraying. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 30(11), 8276-8288, (2021).
- [17]. Helfrich D. and Champagne V. (2008). A model study of powder particle size effects in cold spray deposition. 26th Army Science Conference Proceedings, <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA504175.pdf>
- [18]. Shinoda, K., Gaertner, F., Lee, C., Dolatabadi, A., & Johnson, S. Kinetic Spraying of Brittle Materials: From Layer Formation to Applications in Aerosol Deposition and Cold Gas Spraying. *Journal of Thermal Spray Technology*, 30, 471-479, (2021).
- [19]. Yu, M., Li, W. Y., Wang, F. F., Suo, X. K., & Liao, H. L. Effect of particle and substrate preheating on particle deformation behavior in cold spraying. *Surface and Coatings Technology*, 220, 174-178, (2013).
- [20]. Liao, T. Y., Biesiekierski, A., Berndt, C. C., King, P. C., Ivanova, E. P., Thissen, H., & Kingshott, P. Multifunctional cold spray coatings for biological and biomedical applications: A review. *Progress in Surface Science*, 100654, (2022).
- [21]. Assadi, H., Gärtner, F., Stoltenhoff, T., & Kreye, H. Bonding mechanism in cold gas spraying. *Acta materialia*, 51(15), 4379-4394, (2003).
- [22]. Electrical Engineer's Reference Book, Sixteenth edition M. A. Laughton CEng., FIEE D. J. Warne CEng., FIEE, Newnes An imprint of Elsevier Science Linacre House, **Jordan Hill, Oxford**, 2003.
- [23]. Piconi, C. 1.5 Alumina. *Comprehensive biomaterials II*, 1, 92-121, (2017).
- [24]. İnternet: <https://www.matweb.com/>
- [25]. Liang, G., Schmauder, S., Lyu, M., Schneider, Y., Zhang, C., & Han, Y. An investigation of the influence of initial roughness on the friction and wear behavior of ground surfaces. *Materials*, 11(2), 237, (2018).
- [26]. Azad, K., Rasul, M. G., Khan, M. M. K., & Sharma, S. C. (2019). Ecofuel and its compatibility with different automotive metals to assess diesel engine durability. In *Advances in Eco-Fuels for a Sustainable Environment* (pp. 337-351). Woodhead Publishing.
- [27]. Wang, W., Zhou, H., Wang, Q., Jin, J., Sun, Y., & Wang, K. High-temperature tribological behavior of the Ti-22Al-25Nb (at.%) orthorhombic alloy with lamellar O microstructures. *Metals*, 9(1), 5, (2018).
- [28]. Soy, U., Demir, A., & Findik, F. Friction and wear behaviors of Al-SiC-B4C composites produced by pressure infiltration method. *Industrial lubrication and tribology*, 63(5), 387-393, (2011).
- [29]. Tseluikin, V. N., & Koresheva, A. A. Deposition of zinc-carbon nanotube composite coatings in the pulse-reverse mode. *Russian Journal of Applied Chemistry*, 87(9), 1251-1253, (2014).
- [30]. Savaşkan, T., & Pürçek, G. Wear Behaviour Of Zinc-Aluminium Alloys And The Bearings Produced From These Alloys. *Turkish Journal Of*

Engineering And Environmental Sciences, 24(1), 25-36, (2000).

- [31]. Hekimođlu, A. P., Hacısmanođlu, M., & Baki, M. Effect of zinc contents on the structural, mechanical and tribological properties of EN AC-48100 (Al-17Si-4Cu-Mg) alloy. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 35(4), 1799-1814, (2020).
- [32]. Ren, B., Gao, L., Xie, B., Li, M., Zhang, S., Zu, G., Ran, X. Tribological properties and anti-wear mechanism of ZnO@graphene core-shell nanoparticles as lubricant additives, *Tribology International*, 144, 106114, (2020).

ERKEN GÖRÜNÜM