



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 22.08.2022
Kabul Tarihi : 24.01.2023

Received Date : 22.08.2022
Accepted Date : 24.01.2023

AZ91 MAGNEZYUM ALAŞIMININ SAF Si TOZU ORTAMINDA KAPLANABİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ

INVESTIGATION OF COATABLE OF AZ91 MAGNESIUM ALLOY IN PURE SI POWDER

*Onur AVCI*¹ (ORCID: 0000-0003-1046-4354)
*Tunahan Hakkı KARACA*¹ (ORCID: 0000-0001-9088-4417)
*Tuna AYDOĞMUŞ*² (ORCID: 0000-0002-8736-2949)
*Bünyamin ÇİÇEK*³ (ORCID: 0000-0002-6603-7178)

¹Hitit Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Çorum, Türkiye

²Hitit Üniversitesi, Elektrik ve Enerji Bölümü, Çorum, Türkiye

³Hitit Üniversitesi, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Çorum, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Bünyamin ÇİÇEK, bunyamincicek@hitit.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmada Mg alaşımlarının kullanım alanlarını desteklemek amacıyla yeni bir yöntem ile kaplama işlemi yapılmıştır. AZ91 Mg alaşımı ile hazırlanan numuneler saf Si tozu içerisinde farklı sıcaklıklarda bekletilmiştir. Mg-Si faz diyagramı esas alınarak sıcaklıklar 400°C, 450°C ve 500°C olarak belirlenmiştir. Numuneler belirlenen sıcaklıklarda 2, 4 ve 6 saat bekletilmiştir. Bu aşamada yüzeyde Mg-Si arasında yeni bir fazın oluşması sağlanmıştır. Yüzeyde oluşan kaplama SEM, EDX ve sertlik testleri ile incelenmiştir. Sonuç olarak AZ91 alaşımına uygulanan kaplama işlemi ile 500°C/6 saat şartlarında yaklaşık 20 µm bir kaplama tabakası oluşmuştur. EDX analizinde fazın ve geçiş bölgelerinin elementel durumları incelenmiştir. Sertlik testi Vickers türünde uygulanmıştır. AZ91 alaşımının kaplamasız numunesine göre sertlik yaklaşık %90 artış göstermiştir. Böylece Mg alaşımlarında yüzeyde fazların oluştuğu kaplama yöntemleri uygulanabilir sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Mg alaşımları, AZ91, sertlik, kaplama.

ABSTRACT

In this study, a new method of coating was carried out in order to support the usage areas of Mg alloys. Samples prepared with AZ91 Mg alloy were kept in pure Si powder at different temperatures. Based on the Mg-Si phase diagram, temperatures were determined as 400°C, 450°C and 500°C. The samples were kept at the determined temperatures for 2, 4 and 6 hours. At this stage, a new phase was formed between Mg-Si on the surface. The coating formed on the surface was examined by SEM, EDX and hardness tests. As a result, with the coating process applied to the AZ91 alloy, a coating layer of approximately 20 µm was formed at 500°C/6 hours. Elemental states of the phase and transition zones were investigated in EDX analysis. Hardness test was applied in Vickers type. Compared to the uncoated sample of the AZ91 alloy, the hardness increased by about 90%. Thus, it was concluded that coating methods in which phases form on the surface can be applied in Mg alloys.

Keywords: Mg alloys, AZ91, hardness, coating.

GİRİŞ

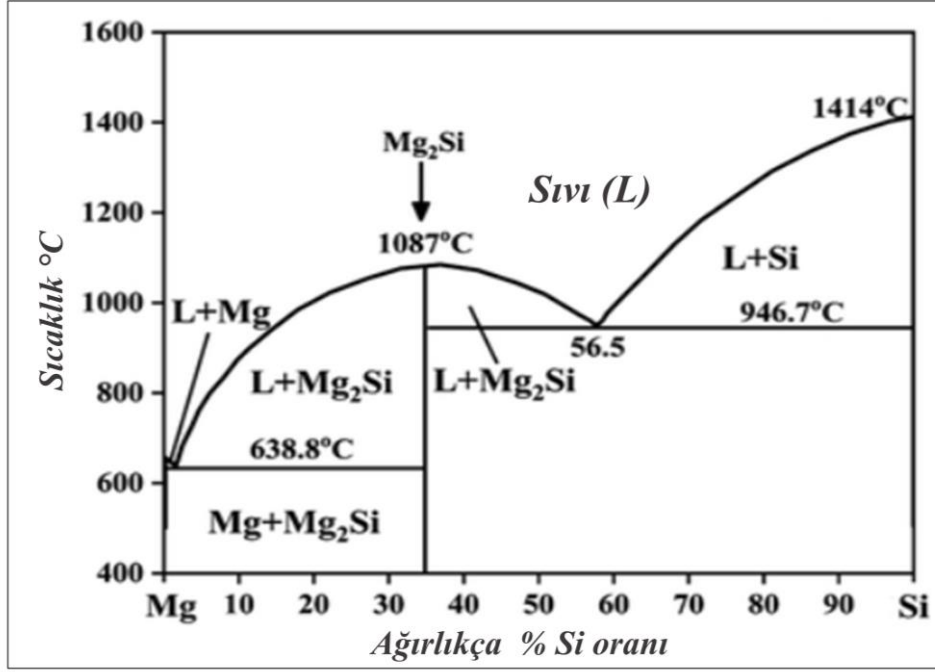
Yenilikçi hafif malzemeler ile ağırlık tasarrufunun kritik olduğu otomotiv, savunma, biyo ve havacılık sektörlerinde kullanılan malzemelerin yapısal özelliklerinden taviz vermeden büyük oranda özellikleri iyileştirilebilmektedir. Magnezyumun (Mg) kullanımında en önemli etken yoğunluğudur. Mg hakkında ilk bilmemiz gereken gerçekten çok hafif bir metal olduğudur. Hatta yapısal uygulamalar için kullandığımız metal ve alaşımlar içinde en hafif olduğu söylenebilir. Mg diğer metaller ile karşılaştırıldığında yoğunluğu oldukça düşük olduğu için çoğu yapısal uygulamalarda tercih edilir. Buna ek olarak mükemmel dökülebilirlik, kaynak yapılabilme, yüksek korozyon direnci (alaşım) ve yüksek ısı iletkenlik özellikleri ise diğer avantajlardır (Froes vd., 1998; Mordike & Ebert, 2001; Bamberger & Dehm, 2008; Asadi vd., 2012; Elen vd., 2019).

Saf Mg diğer saf metaller gibi korozyon, sertlik, çekme gibi testlerde başarılı sonuçlar vermemektedir. Mg bu aşamada yan elementlerle faz diyagramlarına bağlı kalarak alaşım haline getirilmektedir. Mg ile Alüminyum (Al) arasında oluşturulan Mg alaşımları birçok testte kabul edilebilir sonuçlar vermektedir. Bunun yanı sıra üçüncü ve/veya dördüncü elementler eklenerek birçok yönden iyileştirilmiş alaşımlar elde edilmektedir. Mg alaşımına eklenen elementlerin baş harfleri veya bazı kısaltma harfleri kullanılarak Mg alaşımları isimlendirilmektedir. Örneğin %9 Al ve %1 Çinko (Zn) içeren bir Mg alaşımı AZ91 olarak isimlendirilir (Polmear, 1996; Froes vd., 1998; Lee vd., 2000; Atrens vd., 2020).

Mg ile diğer elementler arasında farklı bileşikler oluşabilmektedir. Mg-Al arasında intermetalik yapılar oluşurken Mg ile Silisyum (Si) gibi elementler arasında seramik temelli fazlar oluşabilmektedir. Mg-Al arasında uygun şartlarda ve oranlarda $Mg_{17}Al_{12}$ fazı izlenebilmektedir. Mg_2Si fazı ise Mg-Si arasında oluşabilen seramik bir partiküldür. İntermetalik ve partiküller Mg alaşımlarına ciddi özellikler kazandırmaktadır. Öyle ki intermetalikler korozyon testinde galvanik yapı göstererek alaşımın korozyon direncini yaklaşık 400 kat kadar arttırabilmektedir (Çiçek & Sun, 2012; Kannan vd., 2012). Seramik esaslı yapılar ise Mg alaşımının hacimsel sertliğini 10 kat kadar yukarıya çıkarmaktadır. Böylece alaşımlama sırasında oluşan yeni fazlar Mg alaşımlarının özelliklerini değiştirebilmektedir (Nave vd., 2000; Bamberger & Dehm, 2008; Zhao vd., 2008; Çiçek & Sun, 2012; Çiçek vd., 2013; Zengin vd., 2019; Atrens vd., 2020).

Kaplama malzemelere ciddi özellikler kazandıran bir yüzey işlemidir. Nano seviyede kaplama kalınlığından mm seviyesindeki kaplama kalınlığına kadar birçok kaplama seviyesi türü vardır. Buhar biriktirme, borlama, boya vb. her yüzey işlemi kaplamanın birer alt başlığını oluşturmaktadır. Kaplamalar ana malzeme ile tepkimeye girebilirken bazı kaplamalar sadece yüzeye adhesif olarak yapışabilmektedir. Borlama, nitrüleme gibi kaplama türlerinde kaplama ürünü ile ana malzeme arasında bir kimyasal bağ oluşabilmektedir. Bu kaplama türlerinde kaplama elementleri malzeme içerisine difüze ederek yeni bileşikler meydana getirmektedir. Böylece malzemenin yüzey özelliklerini iyileştirmektedirler (Buchčík vd., 2019; Wei vd., 2021; Akbarzadeh vd., 2022).

Bu çalışmada AZ91 Mg alaşımı daha önce uygulanmayan bir yöntemde Si ile kaplanmaya çalışılmıştır. Alaşım X-Işımları Floresans Spektrometresi (XRF) ile analiz edilmiştir. Kutu borlama veya nitrüleme gibi bir yöntemle benzer şekilde yüzeyi temizlenmiş AZ91 alaşımı saf Si tozu ile doldurulmuş kapalı bir kaptaki belirli sıcaklık ve sürelerde bekletilmiştir. Si tozu saflık ve tane boyutu açısından incelenmiştir. Mg-Si faz diyagramında ortaya çıkan Mg_2Si fazı yüzeyde oluşturulmaya çalışılmıştır. Deneyler sonucunda $500^{\circ}C / 6$ saat şartlarında uygulanan işlemde Mg_2Si fazının varlığı en yüksek düzeyde izlenmiştir. İncelemeler taramalı elektron mikroskopunda (SEM) yapılmıştır. Ayrıca kaplama ve ara yüzey kimyasal yapısı enerji dağıtıcı X-ışını (EDX) ile SEM içerisinde incelenmiştir. Ayrıca malzeme yüzeyine Vickers yöntemi ile (0,25kg) sertlik testi uygulanmıştır. Böylece kaplama sonucunda oluşan fazın temel özelliklere etkisi incelenmiştir. Çalışmanın temel prensibinde yer alan Mg-Si faz denge diyagramı Şekil 1'de verilmiştir (Seth vd., 2020).

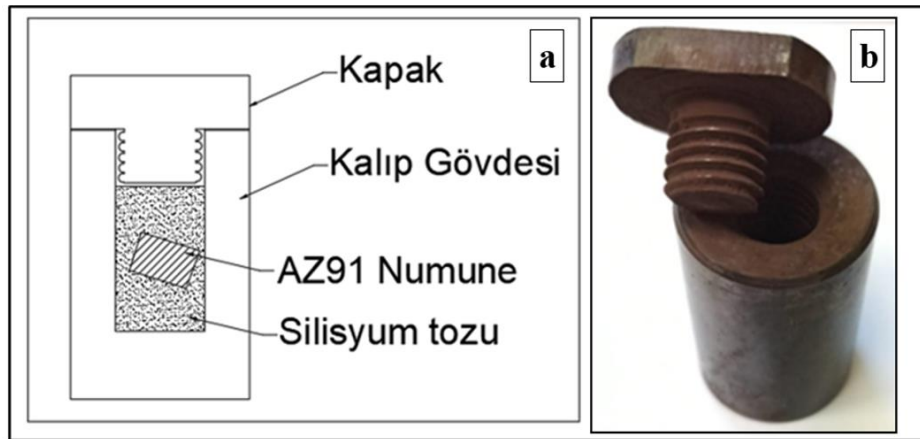


Şekil 1. Mg-Si Faz Denge Diyagramı

MALZEME VE METHOD

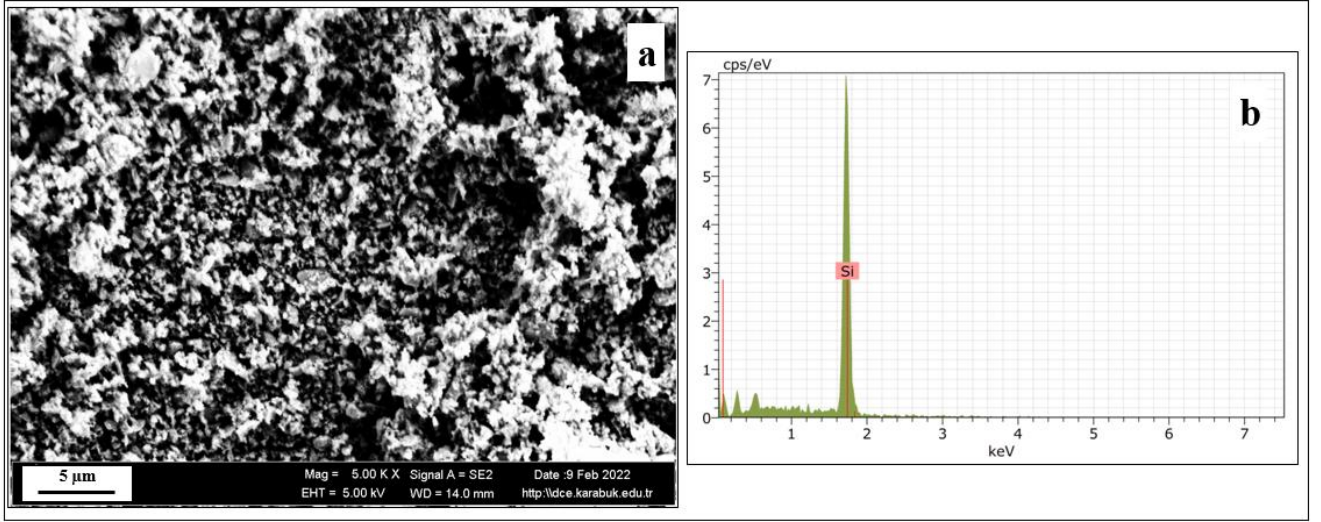
Deneyde kullanılacak AZ91 alaşımı külçe halinde Eczacıbaşı Esan firmasından temin edilmiştir. Deneyler öncesinde külçe malzemelere 350°C/12 saat şartlarında homojenleştirme yapılmıştır. Temel alaşıma deneyler öncesinde doğrulama için XRF analizi uygulanmıştır. XRF deneyi Rigaku Primus II marka cihazda gerçekleştirilmiştir. Ayrıca alaşım deneyler öncesinde SEM (Carl Zeiss Ultra Plus) ortamında inceleme yapılmıştır. SEM incelemesi karbon bant üzerine yapıştırılan malzemelerin yüksek büyütmede görüntülenmesi ile gerçekleştirilmiştir. Toz hammaddenin incelemesinde Kaplama ürünü olarak altın (Au) yüzey kaplaması kullanılmıştır. Yüzey kaplama işlemi Q150R Rotary-Pumped Sputter Coater marka cihazda yapılmıştır. Si kaplama yapılan numunelerin incelenmesinde ise yan yüzey 1200 mesh zımpara ile zımparalanmıştır ve 1 µm alümina süspansiyon ile parlatma yapılmıştır. Herhangi bir dağlama işlemi uygulanmamıştır. EDX (Gemini Fesem) analizinde ise alan tarama yöntemiyle element taraması yapılmıştır.

Alaşım yaklaşık Ø6 x 8 mm silindirler halinde torna tezgâhında numune haline getirilmiştir. Tüm yüzeyler 2000 mesh zımpara ile temizlenmiş ve numuneler metanol ile yıkanmıştır. 100°C sıcaklıkta 24 saat kurutma sonrasında numuneler Şekil 2'de verilen kalıp ile kaplama işlemine alınmıştır. Kaplama sırasında numuneler tamamıyla Si tozu içerisine daldırılmış ve kalıp kapağı kapalı olarak deneyler yapılmıştır. Kaplama sırasında kullanılan kalıp çok kez kullanıldığında ölçüsel bir değişim olmaması için 4140 kalite çelik malzemeden üretilmiştir.



Şekil 2. Fırın Kalıbı Çizimi (a) ve (b) Gerçek Görüntüsü

Deney sırasında kullanılan saf Si tozu Nanografi firmasından satın alınmıştır. Si tozu %99,95 saflıkta olup ortalama 1-3 µm tane büyüklüğüne sahiptir. Si tozuna ait SEM görüntüsü ve EDX analizi Şekil 3'te verilmiştir. EDX analizinde izlenen 1 keV altındaki pikler kaplama ürününden kaynaklanmaktadır.



Şekil 3. Si Tozu SEM Görüntüsü (a) ve (b) EDX Analizi

Kalıp, numuneler ve Si tozu Şekil 2'de gösterilen şekilde Tablo 1'de verilen şartlarda fırında bekletilmiştir. Isıtma hızı 20°C/dakika olarak uygulanmıştır. Variş sıcaklığında tabloda belirtilen sürelerde bekletilmiştir. Deney sonrasında fırın kapatılmış ve oda sıcaklığına kadar serbest soğuması beklenmiştir. Kaplama deneyleri Şekil 4'te verilen ısıl işlem fırınında yapılmıştır. Kaplamalar sırasında çelik kalıp (Şekil 2) kapalı olarak kullanılmıştır. Bu yüzden fırında bir inert ortam kullanılmamıştır. Oksijen temasının minimum seviyede olması için numuneler tamamen Si tozu içerisine hapsedilmiştir.

Kaplama deneyleri sonrasında numuneler hassas kesim ile kesilerek yan yüzeylerinden kaplama kalınlıkları SEM ortamında incelenmiştir. Her deneyde Si tozu yenilenmiş ve kalıp metanol ile temizlenerek kurutulmuştur.

Tablo 1. Kaplama Sıcaklıkları ve Süreleri

Alt Alaşım	Sıcaklık (°C)	Süre (saat)
AZ91	400	2
		4
		6
AZ91	450	2
		4
		6
AZ91	500	2
		4
		6

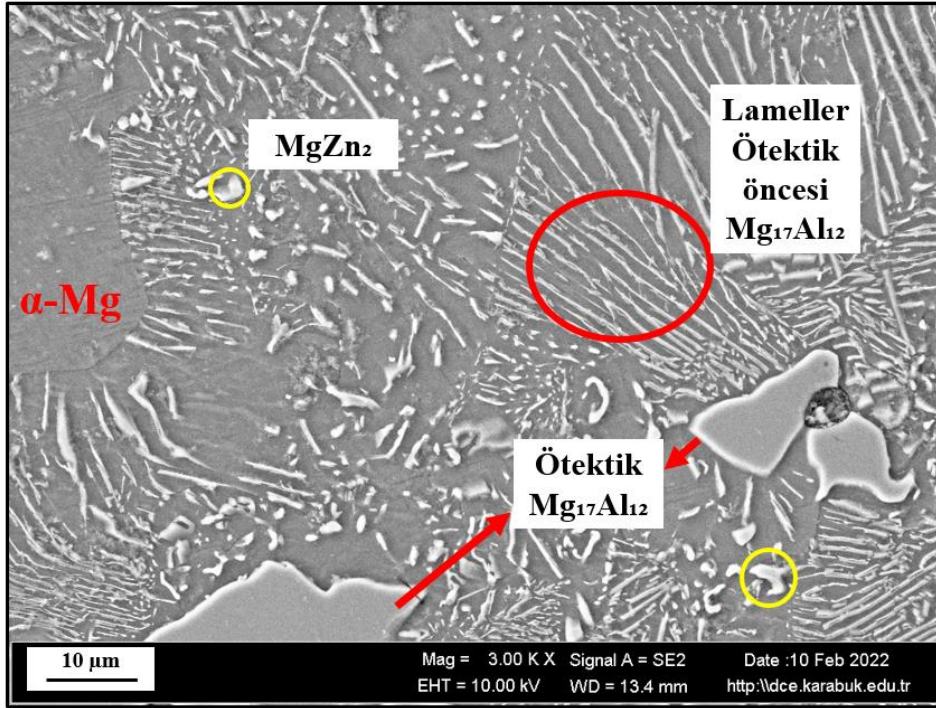
Numuneler kaplama işlemi sonrasında 0,25 kg yük altında mikro sertlik testine tabi tutulmuştur. Baskı süresi 10 sn olarak uygulanmıştır. Ölçümlerde Qness marka Vickers mikro sertlik cihazı kullanılmıştır. Sonuçlar 5 başarılı ölçümün ortalaması alınarak rapor edilmiştir. Ölçüm noktaları arasında en az 5 mm mesafe oranı takip edilmiştir.



Şekil 4. Kaplamada Kullanılan Isıl İşlem Fırını

SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Kaplama sürecinde alt ana malzeme olan AZ91 alaşımına ait temel mikro yapı Şekil 5'te gösterilmiştir.



Şekil 5. Ana Malzeme AZ91 Alaşımının Temel Mikro Yapısı

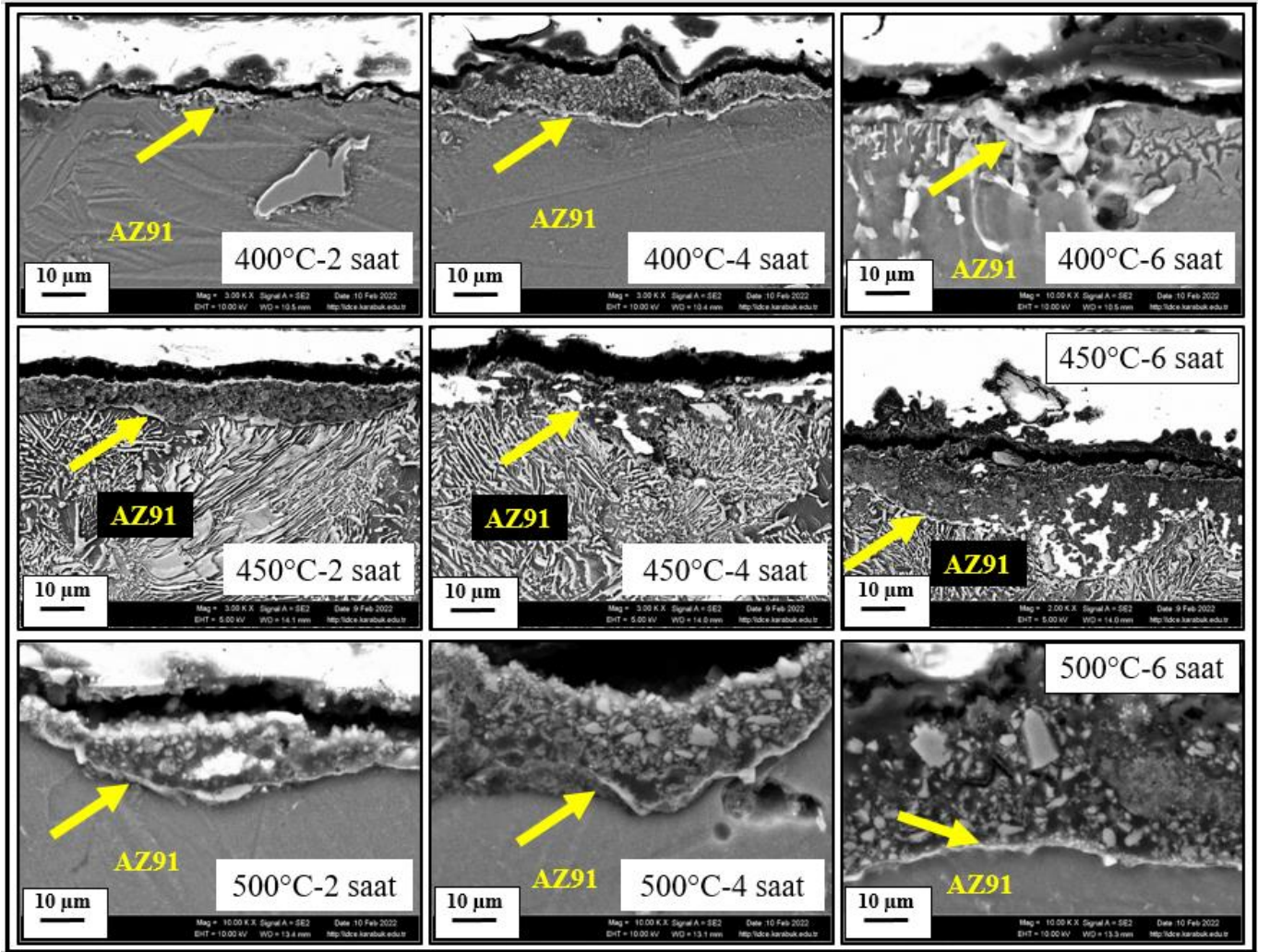
AZ91 alaşımında bulunan Mg ve Al elementleri intermetalik yapılar sergilemektedir. Bu intermetalik yapılar alaşımda tane yapısında bulunmaktadır. Mikro yapıda α -Mg üzerinde lamelli yapıda ötektik öncesi ve partiküller şeklinde ötektik $Mg_{17}Al_{12}$ fazı izlenmektedir. Ayrıca $MgZn_2$ fazının partikül şekli gösterilmiştir. AZ91 alaşımı mikro yapı görüntüsü literatürdeki mikro yapılarıyla tutarlılık göstermektedir (Guangyin vd., 2001; Zhao vd., 2008).

Alaşım XRF analizi ile incelenmiş ve analiz Tablo 2'de verilmiştir. Tablo 2'de verilen değerlere göre Mg-Al-Zn alaşım elementleri % ağırlıkça oranları AZ91 alaşımını karşılayacak miktarda tespit edilmiştir. Mg-Al-Zn dışındaki harici elementlerin oranı ise % ağırlıkça 0,063 seviyesindedir. Harici elementlerin alaşımın döküm yöntemi ile üretimi sırasında hammaddenin ingot yapılarından ve/veya cüruf yapıcı flakslardan kaynaklandığı söylenebilir. Bu oran alaşımın faz dengesi için ihmal edilebilir seviyededir.

Elementler (% ağırlıkça)	N	
AZ91	Al	8,991
	Si	0,001
	Zn	1,052
	Ca	0,025
	Pb	0,001
	Sn	0,021
	Fe	0,015
	Mg	89,894

Bu çalışmada kullanılan saf Si tozu deneyler öncesinde analiz edilmiştir. Şekil 3b grafiğinde saf Si piki yanında düşük oranda pikler izlenmektedir. Si tozundan görüntü alma aşamasında SEM ortamında iletkenliğin artırılması için tutturma aşamasında karbon bant ve yüzey kaplaması kullanılmıştır. EDX analizinde Si dışındaki pikler bahsedilen harici yapılardan meydana gelmiştir.

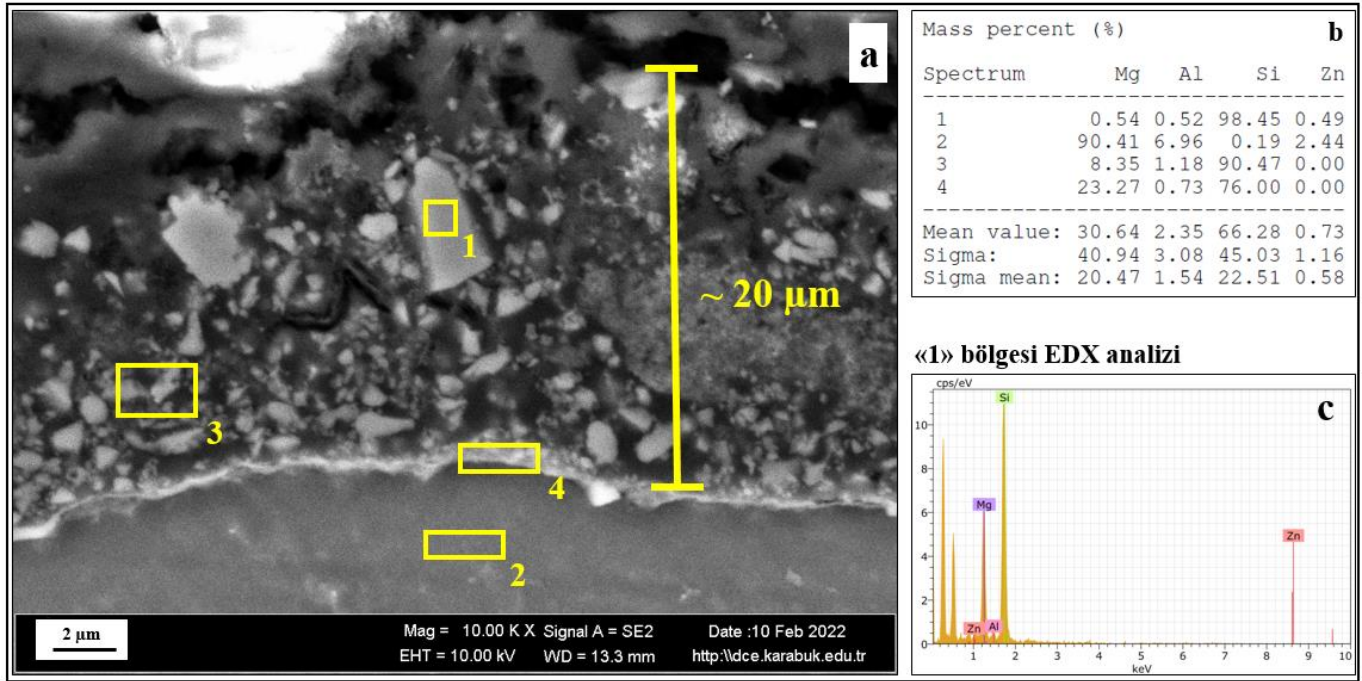
Kaplama sürecinde saf Si tozu içerisinde belirli sürelerde ve farklı sıcaklıklarda bekletilen numunelerden elde edilen SEM resimleri Şekil 6'da izlenmektedir. Resimde AZ91 alaşımı işaretlenmiş ve kaplama-malzeme sınırları sarı oklarla gösterilmiştir.



Şekil 6. Kaplama İşlemi Sonrası Numune Yüzey SEM Görüntüleri

En düşük sıcaklık olan 400°C ve 2 saat numunesinde 1-2 µm kadar bir tabaka izlenmektedir. En yüksek sıcaklık 500°C sıcaklık ve 6 saat şartlarında ise tabaka kalınlığı yaklaşık 20 µm (Şekil 7) olarak görülmektedir. Bu kısımda kaplama kalınlığının en yüksek olduğu numuneden (500°C/6saat) alınan EDX analizleri ise Şekil 7'de verilmiştir.

Kaplama bölgesi, ara sınır ve ana malzeme elementel olarak incelenmiştir. Ana malzemenin % ağırlıkça oranı AZ91 alaşımının elementel miktarlarını karşılamaktadır. Ara yüzeyde ise Mg-Si yoğunluğu izlenmiştir. Kaplama malzemesi ise yüksek oranda Si elementinden oluşmaktadır. Mg-Si arasında oluşan Mg₂Si fazı genelde sert ve keskin köşeli partikül şeklinde oluşmaktadır (Bamberger & Dehm, 2008; Çiçek vd., 2013; Seth vd., 2020). SEM resimleri bu aşamayı desteklemektedir.



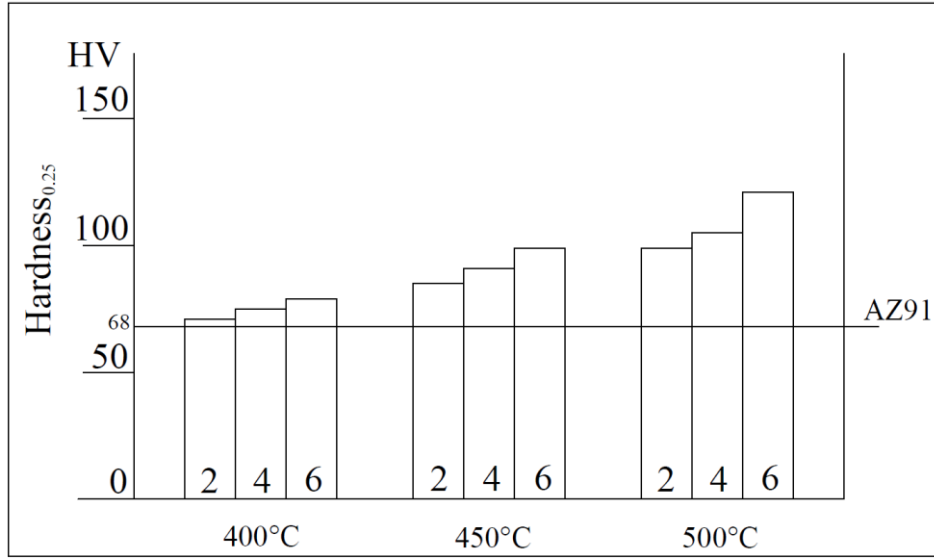
Şekil 7. 500°C / 6 Saat Deney Şartlarında Kaplama Katmanı (A), (B) % Ağırlıkça Oranlar ve (C) EDX Analizi

Mg alaşımı ile Si arasında incelemeler sonucunda yeni fazların oluştuğu görülmektedir. Literatür desteği ile Mg-Si arasındaki fazlar incelendiğinde Mg₂Si fazı köşeli düzensiz prizmatik bir görüntü sergilediği bilinmektedir (Li vd., 2010; Çiçek vd., 2013; Seth vd., 2020; Zhu vd., 2021). Böylece yüzeyde bu fazın oluştuğu söylenebilir. Bu sonuç verilen (Şekil 7b ve 7c) EDX analizi ile desteklenmiştir. EDX analizinde Mg ve Si pikleri haricinde tespit edilen kuvvetli pikler iletkenlik için uygulanan yüzey kaplamasından kaynaklanmaktadır.

Son olarak numune yüzeylerinden alınan sertlik testi sonuçları Tablo 3'te verilmiştir. Ayrıca Tablo 3'te verilen sonuçlar daha iyi takip edilmesi adına grafik olarak Şekil 8'de görselleştirilmiştir.

Tablo 3. Kaplama Sıcaklığı ve Sürelerine Bağlı Sertlik Sonuçları

Alaşım	Sıcaklık (°C)	Süre (saat)	Sertlik HV _{0,25}
AZ91	İşlemsiz		68 ±4
	400	2	71 ±6
		4	75 ±5
		6	79 ±3
AZ91	450	2	85 ±8
		4	91 ±4
		6	99 ±7
	500	2	99 ±6
		4	105 ±8
		6	121 ±5



Şekil 8. Sertlik Sonuçları Grafiği

Sertlik testi sonuçları incelendiğinde ana malzeme sertliği AZ91 alaşımı için bilinen seviyededir (Cáceres vd., 2005; Faraji vd., 2011). Kaplama süreci sonrasında yüzeyde oluşan yeni yapı sertliği artan süre ve sıcaklık etkisiyle arttırmaktadır. Mg₂Si fazının 800-1000 HV seviyesindeki yüksek sertliği alaşımın yüzey sertliğini arttırmıştır (Bamberger & Dehm, 2008; Çiçek vd., 2013). Sertlik yaklaşık %90 kadar artış göstermiştir. Böylece kaplamanın varlığı SEM görüntüleri (Şekil 7) ve sertlik sonuçları (Şekil 8) ile desteklenmiştir.

SONUÇLAR

Bu çalışmada daha önce uygulanmayan bir yöntemle AZ91 Mg alaşımının kaplanabilme durumu incelenmiştir. AZ91 alaşımının saf Si tozunda belirli süre ve sıcaklıkta bekletilmesi ile bir kaplama tabakası elde edilmiştir.

1. Çalışma kapsamında uygulanan şartlarda yaklaşık 20 µm ile en kalın kaplama tabakası 500°C / 6 saat şartlarında gerçekleşmiştir.
2. SEM ve EDX incelemeleri ile yüzeydeki kaplamanın ara sınır bölgesinde Mg₂Si fazının oluştuğu düşünülmektedir. Böylece literatürde bilinen borlama ve nitrürleme gibi yüzey sertleştirme işlemlerine benzer bir süreç ile kaplama elde edilmiştir.
3. Kaplanan AZ91 alaşımının sertliği ise yaklaşık %90 artış göstererek 121 HV seviyesine ulaşmıştır.

Sonuç olarak AZ91 alaşımının yüzey kaplama ürünü olan Si ile tepkimeye girdiği ve yüzeyin sertleştiği görülmüştür. Böylece Mg ile faz oluşturabilen elementlerin faz diyagramları çerçevesinde Mg yüzeyine kaplanabilirliği tespit edilmiştir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma TÜBİTAK 2209-B projeleri kapsamında desteklenmiştir (Proje No: 1139B412100611). Ayrıca 2209-B sanayi destekçisi olarak Hitit Üniversitesi Teknokent Ar-Ge firması 4D Makine ve Teknoloji firmasına teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

- Akbarzadeh, F. Z., Ghomi, E. R., & Ramakrishna, S. (2022). Improving the corrosion behavior of magnesium alloys with a focus on AZ91 Mg alloy intended for biomedical application by microstructure modification and coating. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*, 09544119221105705. doi:<https://doi.org/10.1177/09544119221105705>
- Asadi, P., Givi, M., Rastgoo, A., Akbari, M., Zakeri, V., & Rasouli, S. (2012). Predicting the grain size and hardness of AZ91/SiC nanocomposite by artificial neural networks. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 63(9), 1095-1107. doi:<https://doi.org/10.1007/s00170-012-3972-z>
- Atrens, A., Shi, Z., Mehreen, S. U., Johnston, S., Song, G.-L., Chen, X., & Pan, F. (2020). Review of Mg alloy corrosion rates. *Journal of magnesium and alloys*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jma.2020.08.002>
- Bamberger, M., & Dehm, G. (2008). Trends in the development of new Mg alloys. *Annu. Rev. Mater. Res.*, 38, 505-533. doi:<https://doi.org/10.1146/annurev.matsci.020408.133717>
- Buchtík, M., Krystýnová, M., Másilko, J., & Wasserbauer, J. (2019). The effect of heat treatment on properties of Ni-P coatings deposited on a AZ91 magnesium alloy. *Coatings*, 9(7), 461. doi:<https://doi.org/10.3390/coatings9070461>
- Cáceres, C., Griffiths, J., Pakdel, A., & Davidson, C. (2005). Microhardness mapping and the hardness-yield strength relationship in high-pressure diecast magnesium alloy AZ91. *Materials Science and Engineering: A*, 402(1-2), 258-268. doi:<https://doi.org/10.1016/j.msea.2005.04.042>
- Çiçek, B., Ahlatçı, H., & Sun, Y. (2013). Wear behaviours of Pb added Mg–Al–Si composites reinforced with in situ Mg₂Si particles. *Materials & Design*, 50, 929-935. doi:<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.03.097>
- Çiçek, B., & Sun, Y. (2012). A study on the mechanical and corrosion properties of lead added magnesium alloys. *MATER DESIGN*, 37, 369-372. doi:<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.01.029>
- Elen, L., Türen, Y., & Koç, E. (2019). AZ91 Mg alaşımına farklı oranlarda Sb ilavesi ile katılma hızının mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisi. *International Journal of Engineering Research and Development*, 11(2), 451-463. doi:<https://doi.org/10.29137/umagd.507264>
- Faraji, G., Dastani, O., & Mousavi, S. (2011). Effect of process parameters on microstructure and micro-hardness of AZ91/Al₂O₃ surface composite produced by FSP. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 20(9), 1583-1590. doi:<https://doi.org/10.1007/s11665-010-9812-0>
- Froes, F., Eliezer, D., & Aghion, E. (1998). The science, technology, and applications of magnesium. *The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society (TMS)*, 50(9), 30-34. doi:<https://doi.org/10.1007/s11837-998-0411-6>
- Guangyin, Y., Yangshan, S., & Wenjiang, D. (2001). Effects of bismuth and antimony additions on the microstructure and mechanical properties of AZ91 magnesium alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 308(1-2), 38-44. doi:[https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(00\)02043-8](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(00)02043-8)
- Kannan, M. B., Koc, E., & Unal, M. (2012). Biodegradability of β -Mg₁₇Al₁₂ phase in simulated body fluid. *Materials letters*, 82, 54-56. doi:<https://doi.org/10.1016/j.matlet.2012.05.047>
- Lee, Y., Dahle, A., & St John, D. (2000). The role of solute in grain refinement of magnesium. *Metallurgical and Materials transactions A*, 31A(11), 2895-2906. doi:<https://doi.org/10.1007/BF02830349>
- Li, Q., Zhao, Y.-Z., Luo, Q., Chen, S.-L., Zhang, J.-Y., & Chou, K.-C. (2010). Experimental study and phase diagram calculation in Al–Zn–Mg–Si quaternary system. *Journal of alloys and compounds*, 501(2), 282-290. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2010.04.089>
- Mordike, B., & Ebert, T. (2001). Magnesium: properties-applications-potential. *Mater Sci Eng A*, 302(1), 37-45. doi:[https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(00\)01351-4](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(00)01351-4)
- Nave, M., Dahle, A., & St John, D. (2000). The effect of solidification rate on the structure of magnesium-aluminum eutectic grains. *International Journal of Cast Metals Research*, 13(1), 1-7. doi:<https://doi.org/10.1080/13640461.2000.11819383>
- Polmear, I. (1996). Recent developments in light alloys. *Materials Transactions*, 37(1), 12-31. doi:<https://doi.org/10.2320/matertrans1989.37.12>

Seth, P. P., Parkash, O., & Kumar, D. (2020). Structure and mechanical behavior of in situ developed Mg₂Si phase in magnesium and aluminum alloys—a review. *RSC advances*, 10(61), 37327-37345. doi:<https://doi.org/10.1039/D0RA02744H>

Wei, C., Guangxin, W., & Jieyu, Z. (2021). Design and properties of Al-10Si-xZn-yMg alloy for hot dip coating. *Surface and Coatings Technology*, 416, 127134. doi:<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127134>

Zengin, H., Turen, Y., & Elen, L. (2019). A comparative study on microstructure, mechanical and tribological properties of A4, AE41, AS41 and AJ41 magnesium alloys. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 28(8), 4647-4657. doi:<https://doi.org/10.1007/s11665-019-04223-8>

Zhao, M.-C., Liu, M., Song, G., & Atrens, A. (2008). Influence of the β -phase morphology on the corrosion of the Mg alloy AZ91. *Corrosion Science*, 50(7), 1939-1953. doi:<https://doi.org/10.1016/j.corsci.2008.04.010>

Zhu, L., Qiu, F., Zou, Q., Han, X., Shu, S.-L., Yang, H.-Y., & Jiang, Q.-C. (2021). Multiscale design of α -Al, eutectic silicon and Mg₂Si phases in Al-Si-Mg alloy manipulated by in situ nanosized crystals. *Materials Science and Engineering: A*, 802, 140627. doi:<https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.140627>