



Effect of grain refinement with titanium on the microstructure, mechanical and corrosion properties of Al-25Zn alloy

Ali Paşa Hekimoğlu*^{ID}, Merve Çalış^{ID}

Recep Tayyip Erdogan University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Zihni Derin Campus, Fener, Rize, 53100, Turkey

Highlights:

- Structural and mechanical properties of Al-25Zn-Ti alloys
- Effect of titanium on the microstructure, mechanical and corrosion properties of Al-25Zn-Ti alloy
- Grain refinement with titanium

Keywords:

- Al-25Zn-Ti alloys
- Titanium addition
- Grain refinement
- Mechanical properties
- Corrosion.

Graphical/Tabular Abstract

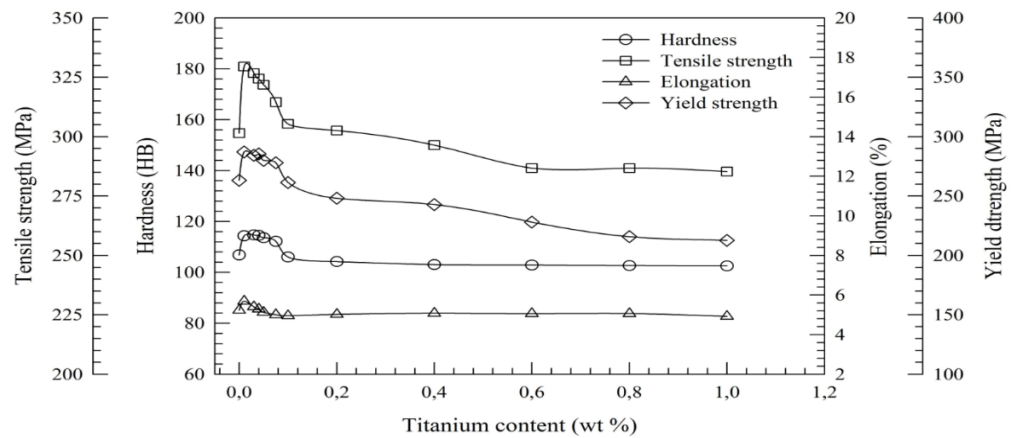


Figure A. The variations in hardness, yield strength, tensile strength, elongation to fracture of Al-25Zn-(0.01-1)Ti alloys with titanium content.

Article Info:

Research Article
Received: 27.09.2018
Accepted: 24.04.2019

DOI:

10.17341/gazimmfd.464676

Acknowledgement:

This work was supported by Research Fund of the Recep Tayyip Erdogan University. (Project Number : FBA-2017-789)

Correspondence:

Author: Ali Paşa Hekimoğlu
e-mail:
ali.hekimoglu@erdogan.edu.tr
phone: +904642237318

Purpose: The main aim of this study is to investigate grain refinement effect of titanium on the microstructural, mechanical and corrosion properties of new alloys produced by adding different ratios of titanium to the Al-25Zn based alloys.

Theory and Methods:

In this study, one binary Al-25Zn and eleven ternary Al-25Zn-Ti alloys were produced by permanent mold casting method. Microstructures of the produced alloys were examined with standard metallographic techniques including SEM examinations and XRD studies. Grain sizes of the alloys were measured by the linear intersection method. Hardness values of the alloys were measured by using Brinell test method. The values of yield strength, tensile strength, and elongation to fracture of the alloys determined with tensile test. Corrosion tests were carried out according to ASTM G5 standard with electrochemical experimental setup.

Results:

Titanium additions significantly reduce grain size of the Al-25Zn alloys. Al₃Ti phase begins to form in the microstructure of the Al-25Zn alloy after 0.01% titanium content. The values of hardness, yield strength, tensile strength, and elongation to fracture of the Al-25Zn-Ti alloys increase up to 0.01%Ti content, but above it these values decrease

Conclusion:

Titanium can be used in the Al-25Zn alloys as a grain refiner. Certain rates titanium addition positively affects the hardness, strength, elongation to fracture, and quality index of the Al-Zn alloys. However, addition of it to Al-25Zn alloys deteriorates corrosion resistance.



Titanyum ile tane inceltmenin Al-25Zn alaşımının mikroyapı, mekanik ve korozyon özelliklerine etkisinin incelenmesi

Ali Paşa Hekimoğlu*^{ID}, Merve Çalış^{ID}

Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Zihni Derin Kampüsü, Fener, Rize, 53100, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Al-25Zn-Ti alaşımlarının yapısal ve mekanik özellikleri
- Titanyumun Al-25Zn alaşımının mikroyapı, mekanik ve korozyon özelliklerine etkisi
- Titanyum ile tane inceltme

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 27.09.2018

Kabul: 24.04.2019

DOI:

10.17341/gazimmfd.464676

Anahtar Kelimeler:

Al-25Zn-Ti alaşımları,
titanyum katkısı,
tane inceltme,
mekanik özellikler,
korozyon

ÖZET

Bu çalışmada, bir adet ikili Al-25Zn alaşımı ve Al-25Zn-0,01Ti, Al-25Zn-0,03Ti, Al-25Zn-0,04Ti, Al-25Zn-0,05Ti, Al-25Zn-0,075Ti, Al-25Zn-0,1Ti, Al-25Zn-0,2Ti, Al-25Zn-0,4Ti, Al-25Zn-0,6Ti, Al-25Zn-0,8Ti ve Al-25Zn-1Ti olmak üzere 11 adet üçlü alüminyum-çinko-titanyum alaşımı kokil kalıba döküm yöntemiyle üretildi. Üretilen alaşımların içyapı, mekanik ve korozyon özellikleri incelendi. İçyapı incelemeleri elektron mikroskobu (SEM) ve X-ışını kırınım (XRD) çalışmalarıyla gerçekleştirildi. Mekanik özellikler ise Brinell sertlik ölçüm yöntemi ve çekme deneyi yardımıyla belirlendi. Korozyon deneyleri elektrokimyasal test düzeneğinde ASTM G5 standardına uygun olarak gerçekleştirildi. Al-25Zn ve Al-25Zn-Ti alaşımlarının içyapılarının ana matris olarak α ve η fazlarından oluştuğu, titanyum oranının %0,01'i aşması durumunda içyapıda Al_3Ti fazının çökelmeye başladığı gözlemlendi. Ayrıca Al-25Zn-Ti alaşımlarındaki dendrit veya tanelerin boyutunun ikili alaşıma göre çok daha küçük olduğu görüldü. Al-25Zn alaşımına %0,01 oranında yapılan titanyum katkısının sertlik, akma ve çekme mukavemeti değerlerini artırdığı bu orandan daha yüksek katkıların ise azalttığı gözlemlendi. Titanyum katkılarının korozyon özelliklerini olumsuz etkilediği görüldü. Farklı oranlardaki titanyum katkıları nedeniyle Al-25Zn alaşımının mekanik ve korozyon özelliklerinde meydana gelen değişimler alaşımların yapısal özelliklerine dayandırılarak açıklandı.

Effect of grain refinement with titanium on the microstructure, mechanical and corrosion properties of Al-25Zn alloy

H I G H L I G H T S

- Structural and mechanical properties of Al-25Zn-Ti alloys
- Effect of titanium on the microstructure, mechanical and corrosion properties of the Al-25Zn alloy
- Grain refinement with titanium

Article Info

Research Article

Received: 27.09.2018

Accepted: 24.04.2019

DOI:

10.17341/gazimmfd.464676

Keywords:

Al-25Zn-Ti alloys,
titanium addition,
grain refinement,
mechanical properties,
corrosion

ABSTRACT

In this study, one binary Al-25Zn alloys and eleven ternary aluminum-zinc-titanium alloys, Al-25Zn-0.01Ti, Al-25Zn-0.03Ti, Al-25Zn-0.04Ti, Al-25Zn-0.05Ti, Al-25Zn-0.075Ti, Al-25Zn-0.1Ti, Al-25Zn-0.2Ti, Al-25Zn-0.4Ti, Al-25Zn-0.6Ti, Al-25Zn-0.8Ti and Al-25Zn-1Ti, were produced by permanent mold casting method. Structural, mechanical, and corrosion properties of the tested alloys were investigated. Structural investigations were carried out with scanning electron microscope (SEM) and X-ray diffraction (XRD) studies. Mechanical properties of the alloys were determined with the Brinell hardness and tensile tests. Corrosion tests were carried out with electrochemical test setup in accordance with ASTM G5 standard. Al-25Zn and Al-25Zn-Ti alloys were composed of α and η phases as the main matrix, and it was observed that Al_3Ti phase began to precipitate in the microstructure when the titanium content exceeded 0.01%. In addition, the size of dendrites or grains of the Al-25Zn-Ti alloys was found to be much smaller than that of binary alloy. The hardness, yield strength, and tensile strength values of the Al-25Zn alloy significantly increased with the 0.01%Ti addition, but when Ti content exceeded 0.01%, these values decreased with increasing titanium content. It was observed that titanium addition had a negative effect on the corrosion properties of the Al-25Zn alloy. The change on the mechanical and corrosion properties of the Al-25Zn alloy due to the titanium addition in different ratios have been explained based on the structural properties of the alloys.

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: ali.hekimoglu@erdogan.edu.tr, merve_calis15@erdogan.edu.tr / Tel: +90 464 223 7318

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Alüminyum (Al) ve çinko (Zn) esaslı alaşımlar Zamak, ZA ve Alzen serileri altında endüstride yaygın bir kullanım alanına sahiptir [1, 2]. Söz konusu alaşımlar ilk kez piyasaya sürüldükleri 1920'li yıllarda ağırlıklı olarak dekoratif amaçlı uygulamalarda kullanılmıştır [3]. İkinci dünya savaşı ve bu savaşı izleyen yıllarda kaymalı yatak uygulamalarında tercih edilmeye başlanan bu alaşımların bronz [4, 5], dökme demir [6], pirinç, gibi geleneksel yatak malzemelerine göre bir takım üstünlüklerinin olduğu görülmüştür [7]. Al ve Zn esaslı alaşımların sanayi uygulamalarında geniş bir yer tutmasını sağlayan üstünlüklerinin başında üretimlerinin kolay ve ekonomik, yoğunluklarının düşük, mukavemetlerinin ve/veya yağsız çalışma koşullarında [8] bile aşınma dirençlerinin daha iyi olması gelmektedir [9, 10]. Bununla birlikte alüminyum-çinko esaslı alaşımların kullanım alanlarını daha da genişletmek bir başka deyişle bazı uygulamalar için yetersiz olan mekanik ve tribolojik özelliklerini geliştirmek için özellikle son yıllarda yoğun araştırma-geliştirme çalışmaları yapılmıştır [3, 11]. Bu çalışmalar sonucunda alüminyum oranının artırılması [12, 13] veya alaşım elementi ilavesi [14, 15] ile alüminyum çinko esaslı alaşımların sertlik, mekanik ve aşınma özelliklerinin geliştirilebildiği görülmüştür [16, 17]. Söz konusu alaşımlarda alüminyum oranının artırılması durumunda mekanik özelliklerindeki iyileşmenin yanı sıra yoğunluklarının düşmesi nedeniyle özgül mukavemet değerlerinin de iyileştiği gözlenmiştir [12, 13]. Alaşım elementlerinin alüminyum çinko esaslı alaşımların sertlik, mukavemet ve/veya aşınma özelliklerine etkilerinin incelendiği çalışmalarda ise bakır [3, 18], silisyum [3, 15], mangan [19], nikel [20], magnezyum [21] ve bor [22, 23] gibi elementlerin söz konusu özelliklerin birini veya birden fazlasını olumlu etkilediği ve genellikle çekme dayanımlarının artmasıyla aşınma dirençlerinin de iyileştiği belirlenmiştir. Bu elementlerin Al-Zn alaşımlarının mukavemet özelliklerine olumlu etkileri katı çözelti sertleşmesi, ikincil faz çökmesi, içyapıda neden oldukları bileşiklerin etkileri veya tane inceltmesi mekanizmalarına dayandırılarak açıklanmıştır. Fakat bu çalışmalarda aynı zamanda bakır, mangan ve nikelin yüksek yoğunlukları nedeniyle söz konusu alaşımların yoğunluğunu artırdığı, dolayısıyla özgül mukavemetlerini olumsuz etkilediği, magnezyum ve silisyumun ise kopma uzaması değerlerini düşürdüğü de görülmüştür [15, 21]. Bu olumsuzlukların yanı sıra bakırın Al-Zn alaşımlarının içyapısında kararsız fazların oluşumuna neden olduğu, silisyumun ise içyapıda çözünmediği, homojen bir dağılım sergilemediği ve sünekliliği olumsuz etkilediği gözlenmiştir [3, 17]. Bor katkılarının ise Al-Zn alaşımlarının sertliğini artırdığı, çekme mukavemetini ise belli katkı oranlarına kadar artırdığı, basma dayanımı ve kopma uzaması değerlerini ise düşürdüğü tespit edilmiştir [22, 23].

Al-Zn esaslı alaşımlarda en uygun alaşım elementi ve katkı oranını belirleme çalışmaları hali hazırda yoğun bir şekilde devam etmektedir. Bu konuda son yıllarda yapılan bazı

çalışmalarda titanyum katkılarının belli oranlarda Zn içeren Al-Zn alaşımlarının yapısal ve mekanik özelliklerine etkileri incelenmiştir. Bu çalışmaların bazılarında kullanılan master alaşımına bağlı olarak titanyumun tane inceltme [24-26] mekanizması sayesinde Al-Zn alaşımlarının bazılarında sadece mukavemet, bazılarında ise hem mukavemet hem de süneklilik özelliklerini [27-29] iyileştirdiği görülmüştür. Ancak hem Al-Zn alaşımlarının bileşim aralığının genişliği hem de kullanılabilir master alaşımlarının çeşitliliği düşünüldüğünde bu çalışmaların henüz yeterli seviyede olduğunu söylemek mümkün değildir. Zira, Al-Zn esaslı alaşımlarda kaymalı yatak uygulamaları için en uygun ikili alaşım bileşiminin belirlenmesine yönelik yapılan bir çalışmada [13] üstün mekanik özellikleri nedeniyle üçlü ve dördü alaşımlar için uygun bir baz olduğu ortaya koyulmuş olan ikili Al-25Zn alaşımının iç yapı, mekanik ve korozyon özelliklerine titanyumun etkisi henüz incelenerek ortaya koyulmamıştır. Bu nedenle bu çalışmada Al-25Zn alaşımının içyapı, mekanik ve korozyon özelliklerine titanyumun etkisinin sistematik olarak incelenip en uygun titanyum oranının belirlenmesi amaçlanmıştır.

2. DENEYSEL METOT (EXPERIMENTAL METHOD)

2.1. Alaşımların Üretimi (Production of the Alloys)

Bu çalışma kapsamında üretilen alaşımların nominal kimyasal bileşimleri Tablo 1'de verilmiştir.

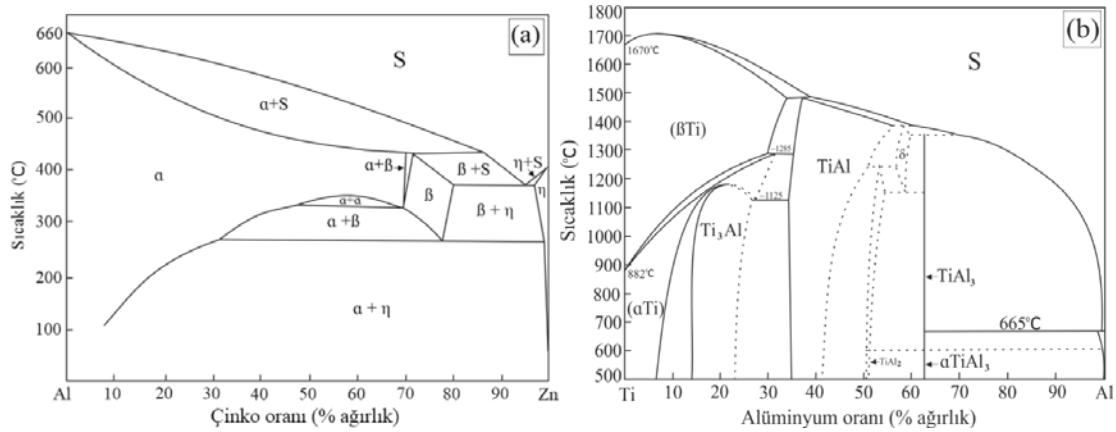
Alaşımların üretiminde ticari saflıkta (%99,8) alüminyum, yüksek saflıkta (%99,9) çinko ve Al-10Ti master alaşımı kullanıldı. Uygun kimyasal bileşimi verecek şekilde 0,1 gram hassasiyetli bir terazide tartılarak hazırlanan alaşım elementleri ve master alaşımı orta frekanslı 20 kg kapasiteli İndemak marka bir induksiyon ocağında ergitildikten sonra ortalama 700 °C civarındaki döküm sıcaklığından oda sıcaklığındaki SAE 8620 çeliğinden üretilmiş olan bir kalıba dökülerek katılaştırıldı. Alaşımların döküm sıcaklığı Şekil 1a ve Şekil 1b'de verilen ikili Al-Zn ve Al-Ti faz diyagramları göz önüne alınarak belirlendi ve döküm öncesi ocaktaki sıvı metalin sıcaklığı Tempstick marka 529 model K tipi bir termoeleman kullanılarak ölçüldü. Döküm sonrası alaşım külçesi oda sıcaklığına soğuyuncaya kadar döküm kalıbında tutuldu. Dökümlerde kullanılan kalıbın teknik resmi ve deney numunelerinin bu kalıpta katılaştırılmış olan külçenin hangi bölgelerinden hazırlandığını şematik olarak gösteren resim Şekil 2'de verilmiştir.

2.2. İçyapı İncelemeleri (Structural Examinations)

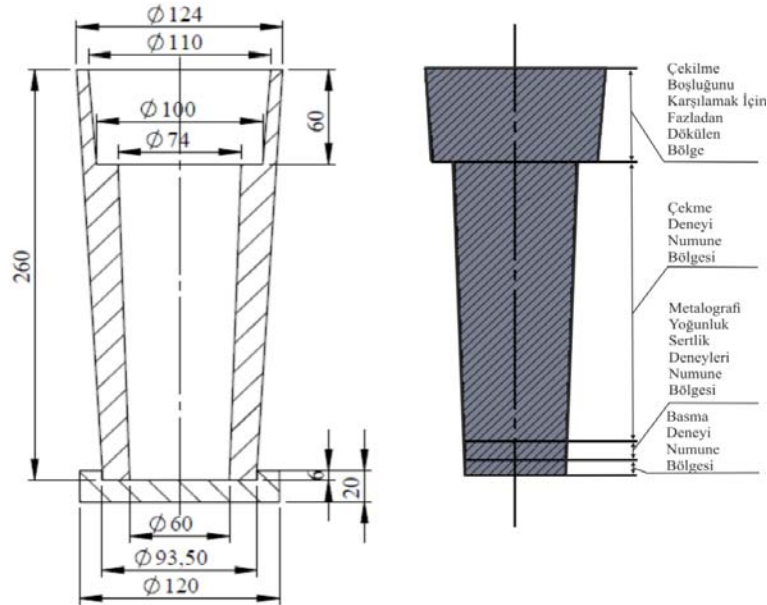
İçyapı incelemeleri için, üretilen alaşım külçelerinden talaşlı imalat yöntemiyle Şekil 3'de teknik resmi verilen numuneler hazırlandı. Hazırlanan bu numuneler standart metalografik yöntemlerle Struers marka zımparalama ve parlatma makinesi kullanılarak hazırlandı. Zımparalama işlemlerinde sırasıyla 320, 600, 1200 ve 2000 numaralı zımparalar kullanıldı. Parlatma işlemlerinde ise sırasıyla 9 ve 3 µm tane boyutlu elmas ve 0,05 µm tane boyutlu kolloidal silika

Tablo1. Üretilen alaşımların nominal kimyasal bileşimleri (Nominal chemical composition of the tested alloys)

Alaşım	Ağırlıkça element oranları (%)		
	Titanyum	Çinko	Alüminyum
Al-25Zn	-	25	Kalan
Al-25Zn-0,01Ti	0,01	25	Kalan
Al-25Zn-0,03Ti	0,03	25	Kalan
Al-25Zn-0,04Ti	0,04	25	Kalan
Al-25Zn-0,05Ti	0,05	25	Kalan
Al-25Zn-0,075Ti	0,075	25	Kalan
Al-25Zn-0,1Ti	0,1	25	Kalan
Al-25Zn-0,2Ti	0,2	25	Kalan
Al-25Zn-0,4Ti	0,4	25	Kalan
Al-25Zn-0,6Ti	0,6	25	Kalan
Al-25Zn-0,8Ti	0,8	25	Kalan
Al-25Zn-1Ti	1,0	25	Kalan



Şekil 1. a) İkili Al-Zn [31] b)Al-Ti [32] faz diyagramı (Binary phase diagram of the (a) Al-Zn (b) Al-Ti)

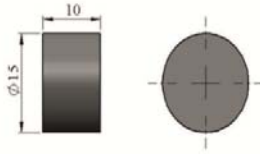


Şekil 2. Alaşımların üretiminde kullanılan kokil kalıbın teknik resmi (Technical drawing of the mould used in casting of the alloys)

süspansiyonlar kullanıldı. Yüzeyi parlatılan numuneler sırasıyla 30 ml etil alkol + 15 ml saf su + 2 ml HCl ve %2

NaOH içeren saf su + NaOH ayıraçlarında yaklaşık olarak 5 saniye dağlandı. Dağlanan numuneler Jeol marka JSM6610

model bir taramalı elektron mikroskobunda (SEM) incelenerek içyapılarını gösteren fotoğraflar çekildi. Alaşımın içyapılarında bulunan fazlar X-ışını kırınım (XRD) çalışmalarıyla incelendi. SEM çalışmaları geri saçılan (backscatter) elektron modunda 15kV'lık hızlandırma voltajında, XRD çalışmaları ise yassı numuneler ile 3 derece/dakika'lık tarama hızında ve dalga boyu 1,54059 °A olan Cu-K α radyasyon kaynağı kullanılarak gerçekleştirildi. Alaşımın tane boyutu ASTM E112-10 standardına göre ikincil elektron modunda çekilen fotoğraflar üzerinde doğrusal kesiştirme yöntemi kullanılarak ölçüldü. Her bir alaşım için farklı kesitlerde en az yüz ölçüm yapılarak elde edilen değerlerin ortalaması tane boyutu olarak verildi.



Şekil 3. İçyapı incelemelerinde kullanılan alaşım numunelerinin teknik resmi
(Technical drawing of the alloy samples used in microstructural examinations)

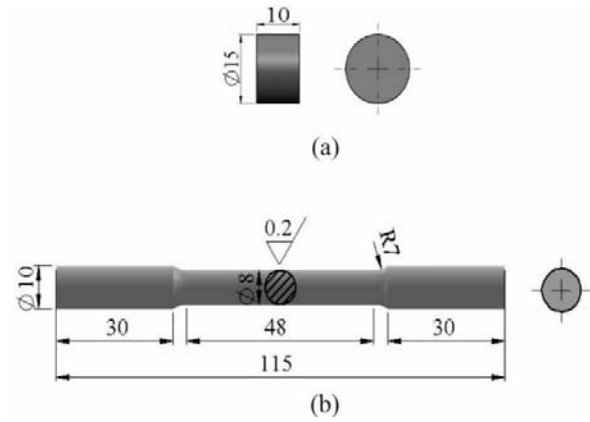
2.3. Mekanik Deneyler (Mechanical Tests)

Sertlik ölçümleri üretilen alaşım külçelerinden Şekil 4a'da verilen geometri ve boyutlarda hazırlanan numuneler üzerinde gerçekleştirildi. Bu ölçümler Qness GmbH marka Q250 model bir ölçüm cihazında Brinell sertlik ölçüm yöntemiyle, 62,5 kg×f yük altında ve 2,5 mm çapında bilye uç kullanılarak gerçekleştirildi. Her bir alaşımın sertliği yapılan onbeş ölçümün ortalaması alınarak belirlendi. Çekme deneylerinde teknik resimleri Şekil 4b'de verilen ve talaşlı imalat ile 8 x 40 TS 138 standardına uygun olarak hazırlanan numuneler kullanıldı. Üretilen numuneler 10⁻³ s⁻¹'lik ortalama deformasyon hızında Instron marka 10 ton kapasiteli bir üniversal test makinesinde deneye tabi tutuldu. Her bir alaşım için en az altı adet çekme deneyi yapıldı ve elde edilen sonuçların ortalaması alınarak alaşımın akma ve çekme dayanımı ile kopma uzaması değerleri belirlendi.

2.4. Korozyon Deneyleri (Corrosion Tests)

Alaşımın korozyon deneyleri Ivium marka Vertex model potansiyostat/galvanostat, Zahner marka KMZ-3 model korozyon hücresi ve verilerin deney boyunca sürekli kaydedilerek işlendiği bilgisayardan oluşan bir elektrokimyasal deney düzeneğinde gerçekleştirildi, (Şekil 5). Bu deney düzeneğinde referans elektrot olarak Sensortechnik Meinsberg marka KE10NSK7 model kalomel, karşı elektrot olarak 20×20 mm boyutlarında %99,98 saflıkta platin levha ve çalışma elektrodu olarak korozyon deney numunesi (alaşım örneği) kullanıldı. Korozyon deney numuneleri alaşım külçelerinden 1cm² yüzey alanına sahip olacak şekilde Şekil 6a'da verilen boyut ve geometride talaşlı işleme üretildi. Üretilen numuneler

korozyona uğrattılacak yüzeyleri açık kalacak şekilde soğuk bakalite alındıktan sonra (Şekil 6b), söz konusu yüzeyler sırasıyla 300, 600 ve 1200 numaralı zımpara ile parlatılma işlemine tabi tutuldu. Bu şekilde hazırlanan numuneler %3,5 oranında NaCl içeren saf su + NaCl çözeltisi içinde korozyon deneyine tabi tutulup, elde edilen Tafel polarizasyon eğrilerinden faydalanılarak korozyon hızları belirlendi. Deneylerde anot (numune) ile katot (referans elektrot) arasındaki fark -0,935V olarak gerçekleşti. Potansiyodinamik polarizasyon çevrimi için başlangıç gerilimi (E_{baş}), -0,25 V, bitiş gerilimi (E_{son}) +0,25 V, gerilim adımı (E_{adım}) 1 mV ve tarama hızı 5 mV/s olarak alındı. Deneyler sonucunda bir yazılım yardımıyla elde edilen Tafel polarizasyon eğrilerinden faydalanılarak her bir alaşımın korozyon hızı belirlendi.

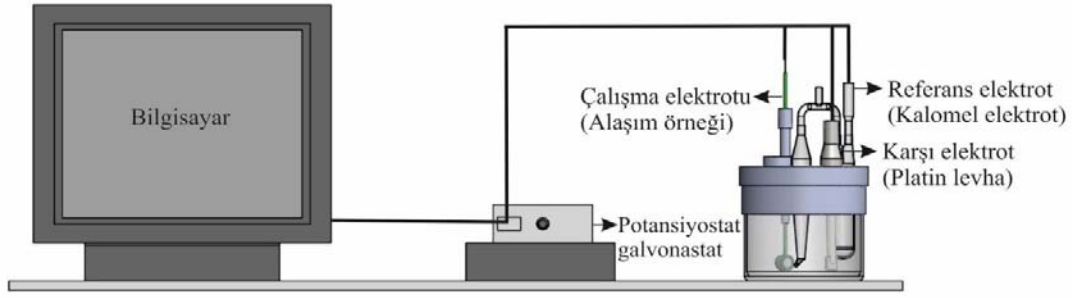


Şekil 4. a) Sertlik ve b) Çekme deneyi numunesinin teknik resmi
(Technical drawing of the a) hardness and b) tensile test samples)

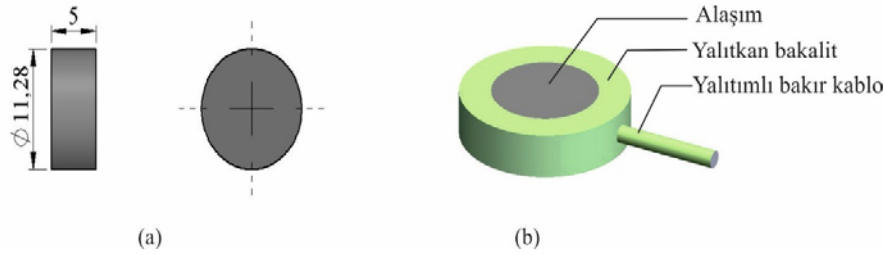
3. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

3.1. İçyapı İncelemeleri (Structural Examinations)

Üretilen ikili Al-25Zn ile üçlü Al-25Zn-0,01Ti, Al-25Zn-0,1Ti ve Al-25Zn-1Ti alaşımının içyapı incelemelerinden elde edilen elektron mikroskobu fotoğrafları Şekil 7'de verilmiştir. Bu fotoğraflar, ikili Al-25Zn alaşımının alüminyumca zengin α dendritleri ile dendritler arası bölgelerde çinkoca zengin η fazının yer aldığı iki fazlı bir içyapıdan oluştuğunu göstermektedir, (Şekil 7a). İkili alaşımında α ve η fazlarının oluşumu döküm sonrası katılaşma davranışına dayandırılarak açıklanabilir. Şöyle ki; ikili faz Al-Zn faz diyagramına (Şekil 1a) göre alüminyum ve çinko sıvı durumda birbiri içerisinde tamamen çözünmektedir. Sıvı metal soğuduğunda ilk olarak katılaşma sıcaklığı çinkodan daha yüksek olan alüminyuma ait çekirdekler oluşmaya başlar. Farklı konumlarda katılaşan bu çekirdekler kristalleşmeye merkezlik yaparlar. Soğuma devam ettikçe bu çekirdekler sıvı metalden öncelikli olarak ergime sıcaklığı yüksek olan metalin atomlarını çeker ve kendi uzay kafesinde farklı yönlerde rastgele büyüyerek dendritik hale gelirler. Söz konusu dendritlerin merkezleri ergime sıcaklığı yüksek olan alüminyumca daha zengin olup, merkezden



Şekil 5. Korozyon deney düzeneğinin şematik resmi
(Schematic illustration of the corrosion testing apparatus)



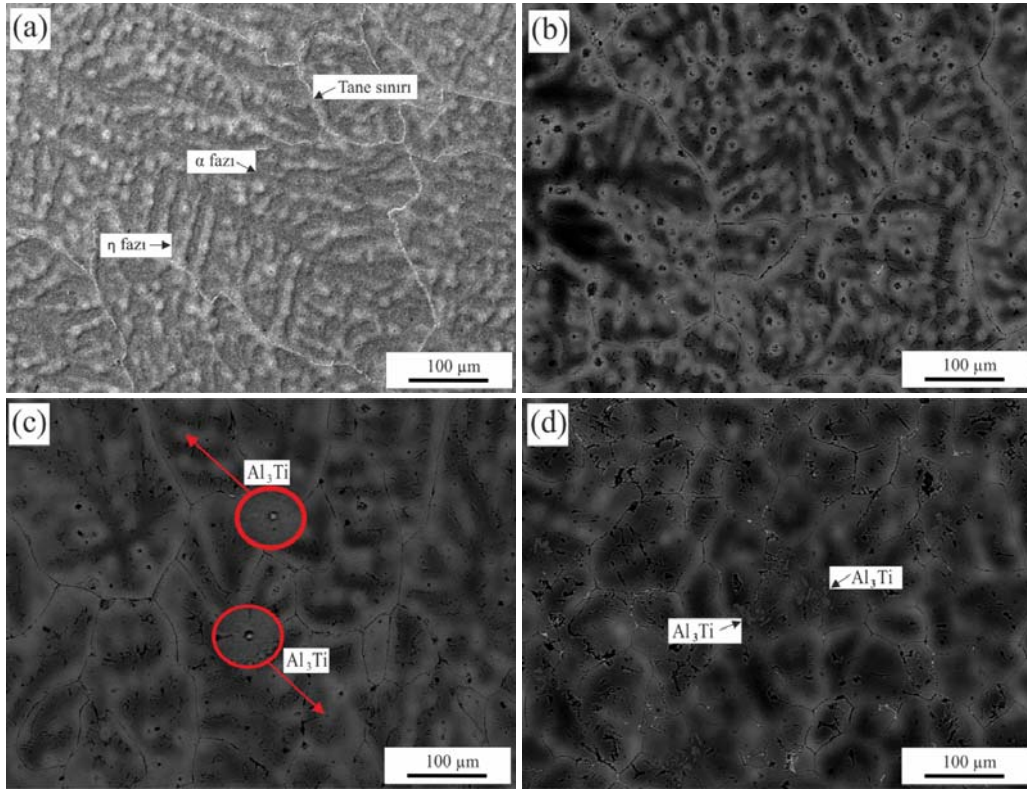
Şekil 6. a) Korozyon deneyi numunesinin ve b) Korozyon deney numunesinin yalıtkan bakalit içine yerleşimini gösteren teknik resim (Technical drawing of the a) corrosion test samples and b) showing the placement of the corrosion test sample in the insulating bakelit)

uzaklaştıkça alüminyum oranı azalır. Soğuma devam ettikçe sıvı metal içindeki alüminyum oranı azalırken, çinko oranı artar. Sıcaklık değeri henüz katılaşmamış durumdaki sıvı metalin katılaşma sıcaklığına düştüğünde çinkoca zengin olan ve dendritler arası bölgede yer alan sıvı metal η fazı olarak katılaşır. Şekil 1a'daki Al-Zn faz diyagramından da görüleceği üzere çinkonun içersinde alüminyumun çözünürlüğü çok düşüktür. Bu nedenle en son katılaşan η fazının içersinde alüminyum oranı çok düşüktür. Diğer taraftan, α çekirdekleri çinkoca aşırı doymuş olup, ikili faz diyagramından da anlaşılacağı gibi alüminyumun içinde çinkonun çözünürlüğü azalan sıcaklıkla azalmaktadır. Bu nedenle, solvüs sıcaklığının altına düşüldüğünde α fazı içersindeki çözünbilirlik limitinin üzerindeki fazlalık çinko α fazından ayrılıp η fazı olarak çöker.

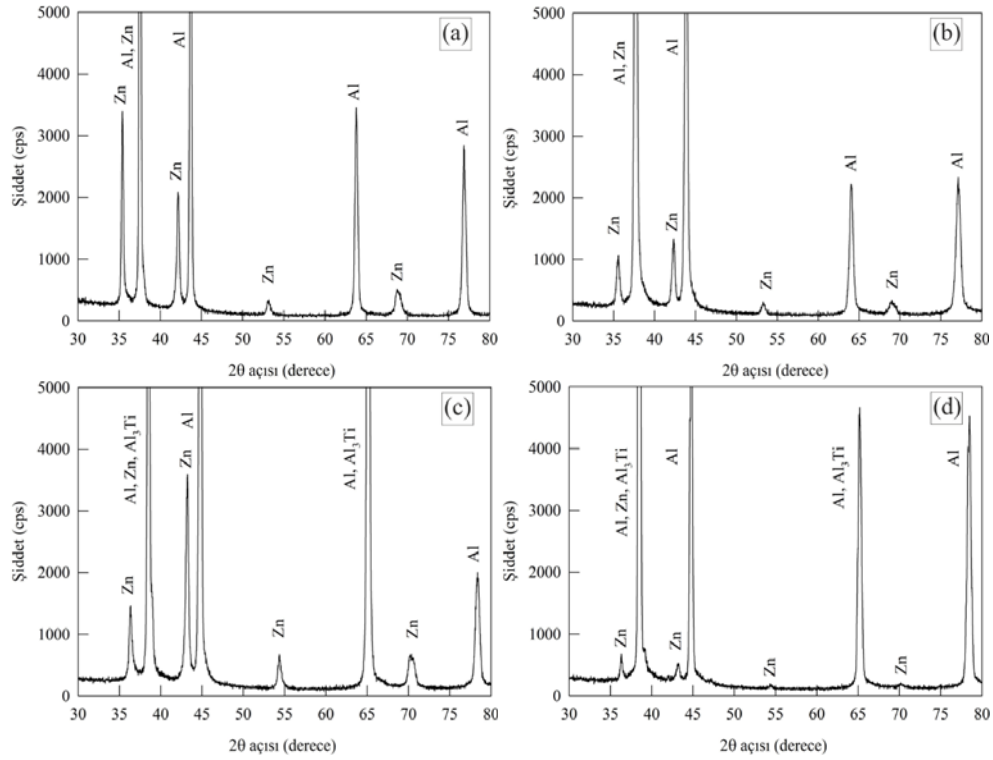
Al-25Zn alaşımına %0,01 oranında titanyum ilave edilmesi durumunda içyapıda ikili alaşımda görülen fazlardan başka bir faz oluşmadığı, ancak α dendritlerinin incelendiği etraflarının yine çinkoca zengin η fazı tarafından sarıldığı görülmektedir, (Şekil 7b). Alaşımın içyapısında yeni bir fazın oluşmaması, bu katkı oranındaki titanyumun alüminyum ve çinkoca zengin fazların içersinde tamamen çözünmesinden kaynaklanmış olabilir. Alaşımın içyapısındaki α fazına ait dendritlerin incelenmesi veya küçülmesi çözünürlük ve heterojen çekirdeklenme ile ilgili olarak Maxweell ve Hellawell [32] tarafından ortaya koyulan büyümeyi kısıtlayıcı faktör bağıntısına dayandırılarak açıklanabilir. Bu bağıntı $Q=C_0m(k-1)$ (Q : büyümeyi kısıtlayıcı faktör, C_0 : çözünen madde oranı, m : likidüs çizgisinin eğimi, k : alaşımın denge bölünme katsayısı) olup, bir fazın içersinde çözünürlüğün artması durumunda büyümeyi kısıtlayıcı faktörün artacağını ve dolayısıyla tane

büyümesinin engelleneceğini ifade etmektedir. Bu nedenle Al-25Zn alaşımında alüminyumca zengin α fazı içersinde titanyumun çözünmesi bu fazın büyümesini engellemiş ve daha ince taneli bir içyapının oluşmasına neden olmuş olabilir. Daha ince taneli bir içyapının oluşması da katılaşmanın daha çok çekirdek etrafında devam etmesine ve tane sayısının artmasına yol açmış olabilir [23, 32]. Bunun yanı sıra, çekirdekler sıvı metalden katılaşma noktası daha yüksek olan alüminyumu çekerek büyüdükleri için katılaşma devam ettikçe sıvı metalin içersindeki alüminyum oranı ikili alaşıma göre daha yüksek sıcaklıkta daha az olur. Sıvı metalin içersindeki alüminyumun azalması da soğuma sırasında α dendritlerinin büyümesini kısıtlamış olabilir [23]. Al-25Zn-Ti alaşımlarında %0,01 titanyum oranından sonra tane boyutundaki küçülme oranının azalması katı çözünürlük mekanizmasına dayandırılarak açıklanmaktadır. Şöyle ki, literatürde [32-34] tane küçülmesinin çözünürlük ile orantılı olarak değiştiği ve çözünürlük sınırına yaklaştıkça azaldığı ifade edilmektedir [35, 36]. Çalışmamızda da %0,01 oranından sonra Al_3Ti fazının oluşmaya başlaması da çözünürlük limitinin bu oranlardan sonra aşıldığını doğrulamaktadır.

Üretilen alaşımların içyapılarını oluşturan fazların analizine yönelik olarak yapılan XRD çalışmalarından elde edilen verileri gösteren grafikler Şekil 8'de verilmiştir. Bu grafiklerde alüminyum piklerinin yaklaşık olarak 38° , 44° , 64° ve 77° 'lik, çinko piklerinin ise yaklaşık 36° , 38° , 42° , 53° ve 69° 'lik 2θ açılarında oluştuğu görüldü. Al-25Zn-0,1Ti ve Al-25Zn-1Ti alaşımlarından elde edilen X-ışını kırınımı desenlerinde ise diğer alaşımlardan farklı olarak 38° ve 65° 'lik 2θ açılarında Al_3Ti piklerinin oluştuğu ve bu piklerin Al ve/veya Zn fazlarına ait piklerle çakıştığı gözlemlendi.



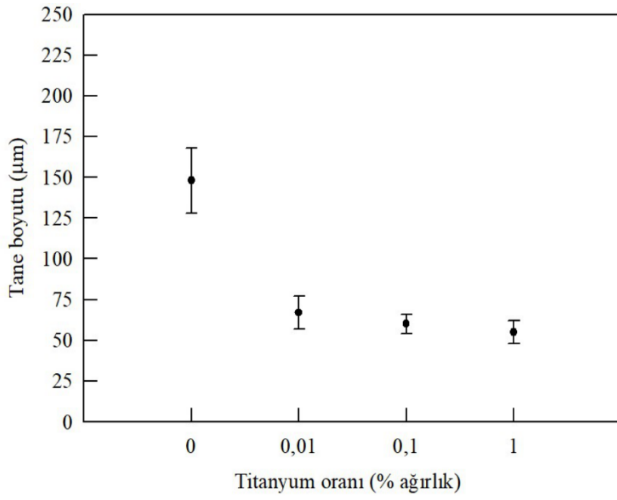
Şekil 7. a) Al-25Zn b) Al-25Zn-0,01Ti c) Al-25Zn-0,1Ti ve d) Al-25Zn-1Ti alaşımlarının içyapısını gösteren SEM fotoğrafları (SEM micrographs showing the microstructures of the (a) Al-25Zn (b) Al-25Zn-0,01Ti (c) Al-25Zn-0,1Ti and (d) Al-25Zn-1Ti alloys)



Şekil 8. a) Al-25Zn b) Al-25Zn-0,01Ti c) Al-25Zn-0,1Ti ve d) Al-25Zn-1Ti alaşımlarının X-ışını kırınım desenlerini gösteren eğriler

(The curves showing the X-ray diffraction pattern of the (a) Al-25Zn (b) Al-25Zn-0,01Ti (c) Al-25Zn-0,1Ti and (d) Al-25Zn-1Ti alloys)

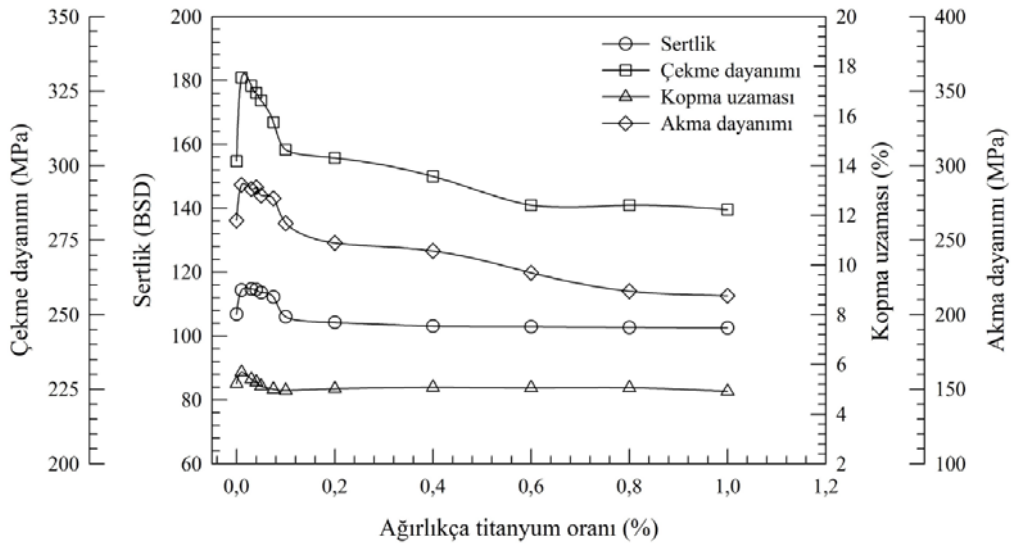
Bu grafiklerde, ayrıca Zn fazına ait piklerin şiddetinde %0,01 oranındaki titanyum katkısının azalmaya, %0,1 oranındaki katkının artışa, %1 oranındaki katkının ise azalmaya neden olduğu görüldü. Söz konusu piklerin şiddetindeki değişimler tane küçülmesi ve çekirdeklenme mekanizmalarına bağlı olarak dendiritler arasındaki bölgelerde katılaştırma η fazının hacimsel oranının değişmesinden kaynaklanmış olabilir. İncelenen alaşımların tane boyutlarının titanyum oranına göre değişimi Şekil 9'daki grafikte verilmiştir. Bu grafik, titanyum katkısıyla Al-25Zn-Ti alaşımlarının tane boyutunun 150 μm seviyelerinden 50-60 μm seviyelerine düştüğünü, bir başka deyişle %60-67 oranlarında bir tane küçülmesi elde edilebildiğini, ancak en fazla tane küçülmesi oranının %0,01 titanyum katkısında ortaya çıktığını göstermektedir.



Şekil 9. Al-25Zn-(0,01-1)Ti alaşımlarının tane boyutunun titanyum oranına göre değişimi
(The variations in grain size of the Al-25Zn-(0.01-1)Ti alloys with titanium content)

3.2. Mekanik Deneyleler (Mechanical Tests)

Şekil 10'da Al-25Zn-(0-1)Ti alaşımlarının sertlik, akma dayanımı, çekme dayanımı ve kopma uzaması değerlerinde artan titanyum katkılarıyla meydana gelen değişimleri gösteren eğriler verilmektedir. Bu eğriler söz konusu değerlerin %0,01 oranına kadar artıp bu orandan sonra azaldığını göstermektedir. Titanyum ilavesiyle Al-25Zn alaşımlarının sertlik, akma ve çekme dayanımı ile kopma uzaması değerlerinin artması tane yapısının inceliyor, tane sınırı sayısının artmasından ve titanyumun α fazında çözünmesiyle oluşan katı çözeltiler sertleşmesinin etkisinden kaynaklanmış olabilir. Bilindiği üzere [37] bu etkiler veya mekanizmalar dislokasyonların önünde engel oluşturarak malzemelerin sertlik ve mukavemet değerlerinde artışa yol açmakta ve deformasyonu zorlaştırmaktadır. Dolayısıyla sayılarının ve/veya miktarlarının artması malzemelerin mukavemet değerlerinde de artışa yol açmaktadır. Söz konusu değerlerin %0,01 titanyum oranından sonra azalması ise içyapıdaki çinkoca çok zengin olan η fazının etkisinden ve Al_3Ti fazının oluşmasından kaynaklanmış olabilir. Şöyle ki, XRD çalışmaları η fazına ait piklerde %0,1 Ti oranında artış olduğunu göstermektedir. Alüminyumca zengin α taneleri bir başka deyişle dendiritleri arasında yer alan çinkoca zengin η fazının hacimsel oranının artması dendirit kolları arasındaki mesafenin artmasına yol açıyor, bu nedenle mukavemet değerlerinde azalmaya neden olmuş olabilir [23, 38]. Ayrıca, katılma sırasında %0,01 Ti oranından sonra çekirdeklenme mekanizmasına katılmayan aşırı miktardaki Al_3Ti parçacıklarının oluşumunun da söz konusu değerlerde azalmaya neden olduğu literatürde [28, 39] ifade edilmektedir. Çinkoca zengin ve α fazına göre daha gevrek olduğu bilinen η fazı bir ağ şeklinde dendiritleri çevrelemektedir. Dendiritler etrafında bir başka deyişle tanelerin sınırlarında bu nispeten gevrek fazın oranının artması mukavemet ve kopma uzamasındaki azalmanın bir diğer sebebi olabilir [16-18, 40].



Şekil 10. Al-25Zn-(0,01-1)Ti alaşımlarında sertlik, akma dayanımı, çekme dayanımı ve kopma uzaması değerlerinin titanyum oranına göre değişimini gösteren eğriler

(The variations in hardness, yield strength, tensile strength, elongation to fracture of Al-25Zn-(0.01-1)Ti alloys with titanium content)

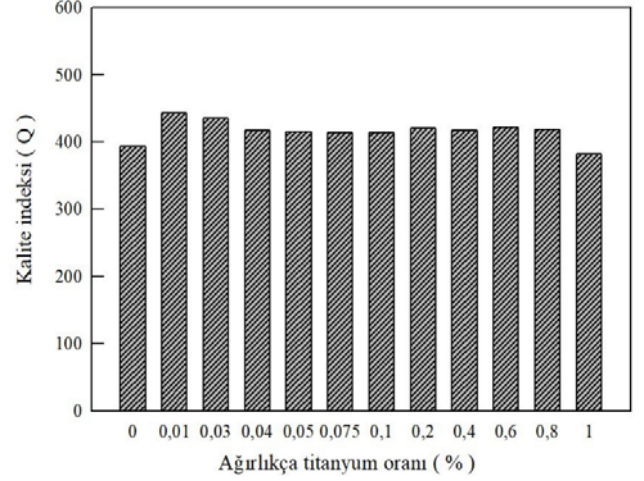
Al-25Zn-Ti alaşımlarının kırılma yüzeyi karakteristiklerini gösteren SEM fotoğrafları Şekil 11'de verilmiştir. Bu fotoğraflardan söz konusu alaşımların yüzeylerinin büyük çatlak, çukurcuk (dimple), oyuk (cavity) ve çıkıntılardan (cusp) oluştuğu ve genel olarak gevrek kırılma karakteristiği sergilediği görülmektedir.

Üretilen alaşımlarının $Q = \sigma_b + k \log \delta$ formülüne göre hesaplanan kalite indeksleri titanyum oranına bağlı olarak Şekil 12'de verilmiştir. Bu formülde; Q; kalite indeksini, σ_b ; Çekme dayanımını (MPa), δ ; kopma uzamasını (%), k; alüminyum alaşımları için belirlenen malzeme sabitini (150) ifade etmektedir. Alaşımların kalite indekslerinin titanyum ilavesi ile genel olarak arttığı görüldü. En yüksek kalite indeksi Al-25Zn-0,01Ti alaşımında belirlendi. Bu artış kullanılan kalite indeksi formülünden ve Şekil 10'daki verilerden anlaşılacağı üzere bu alaşımın çekme dayanımı ve /veya kopma uzaması değerlerinin yüksek olmasından kaynaklanmaktadır.

3.3. Korozyon Deneyleri (Corrosion Tests)

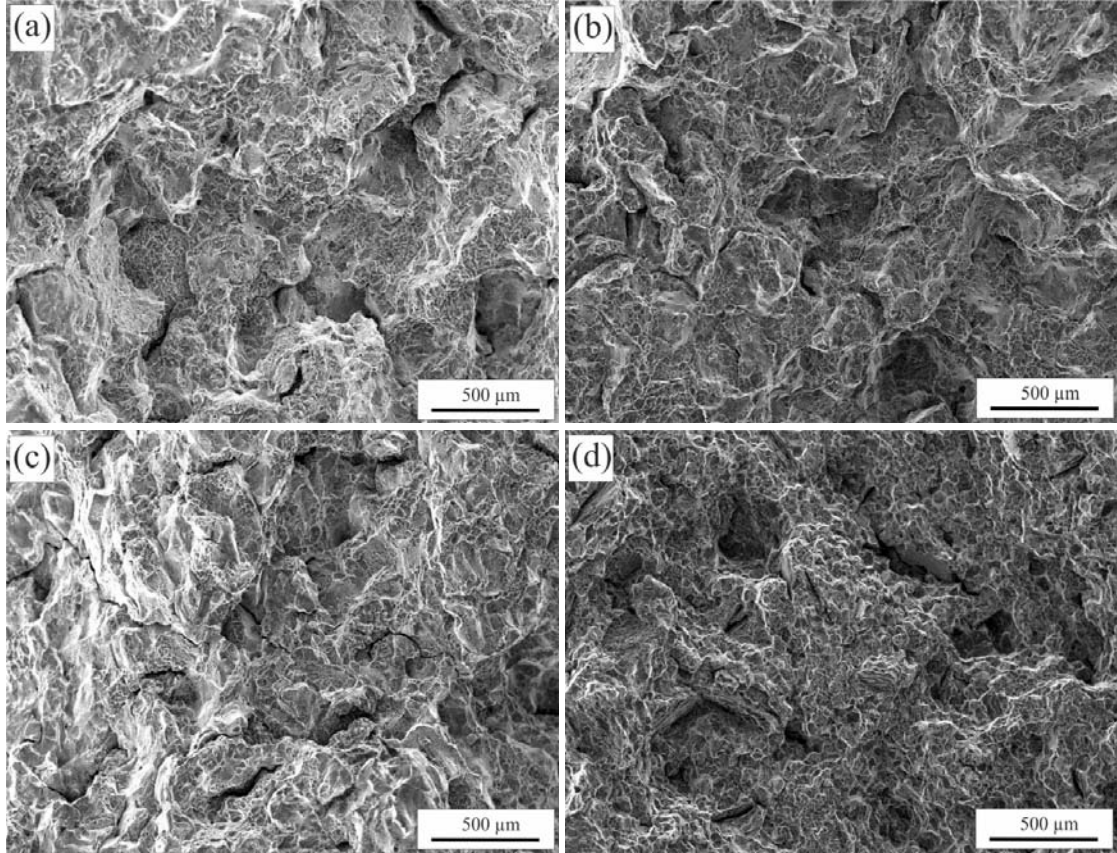
Şekil 13'de incelenen alaşımlardan hazırlanan bir numunenin korozyon deneyi öncesindeki yüzeyinin durumunu gösteren bir fotoğraf verilmektedir. Söz konusu alaşımların korozyon deneyine tabi tutulmuş numunelerinin

yüzey durumunu gösteren SEM görüntüleri ise Şekil 14'de verilmektedir. Bu fotoğraflar Al-25Zn-(0-1)Ti alaşımlarında meydana gelen korozyonun genellikle dendritlerin sınır bölgelerinde veya dendritler arası bölgelerde oluştuğunu göstermektedir.



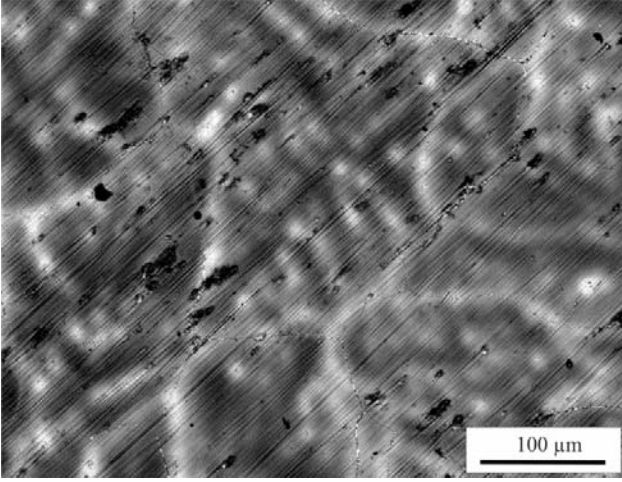
Şekil 12. Al-25Zn-(0-1)Ti alaşımlarında kalite indeksinin titanyum oranına göre değişimi

(The variations in quality index of the Al-25Zn-(0-1)Ti alloys with titanium content)



Şekil 11. a) Al-25Zn b) Al-25Zn-0,01Ti c) Al-25Zn-0,1Ti ve d) Al-25Zn-1Ti alaşımlarının kırılma yüzeylerini gösteren SEM fotoğrafları

(SEM micrographs showing the fracture surfaces of the (a) Al-25Zn (b) Al-25Zn-0,01Ti (c) Al-25Zn-0,1Ti and (d) Al-25Zn-1Ti alloys)

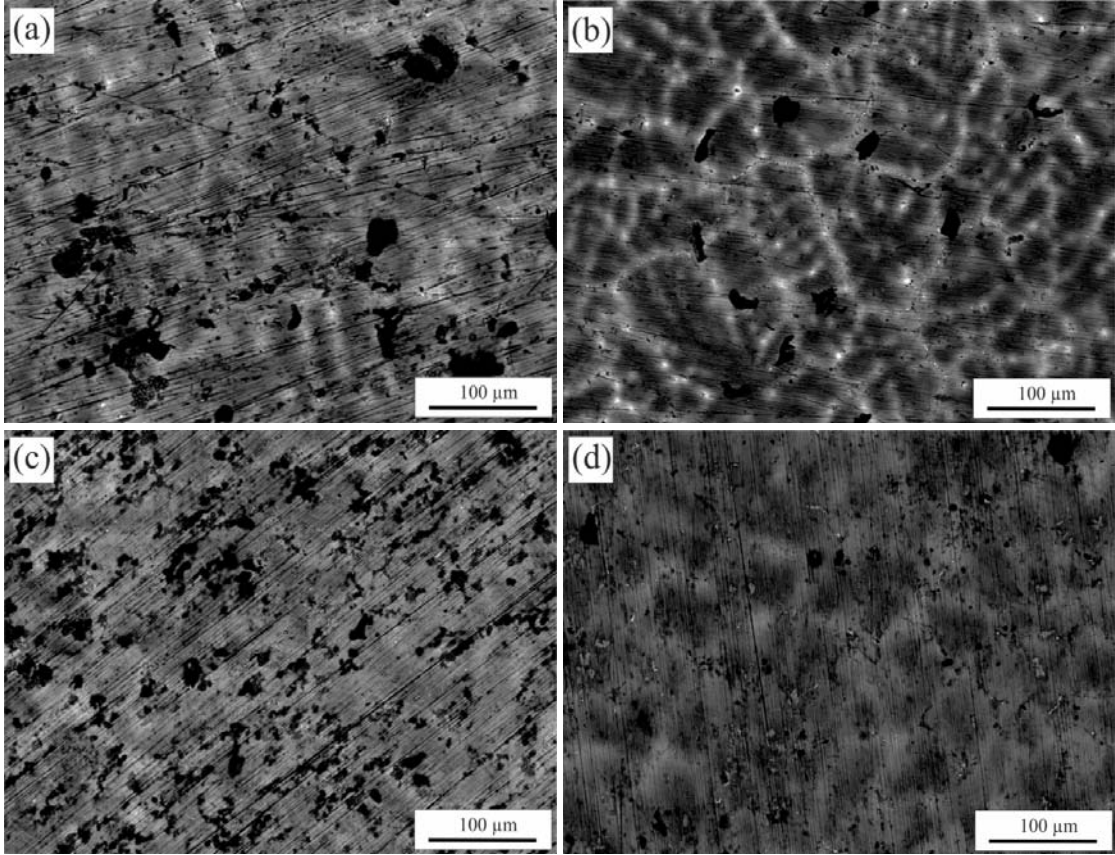


Şekil 13. Korozyon testi öncesinde Al-25Zn-Ti alaşımlarının yüzeyini gösteren bir SEM fotoğrafı
(A SEM photograph showing the surface of Al-25Zn-Ti alloys before the corrosion test)

Bu durum alaşımların yapısal özelliklerine dayandırılarak açıklanabilir. Şöyle ki, metalografik incelemelerde Al-25Zn-(0-1)Ti alaşımlarının iç yapısının alüminyumca zengin α dendritleri ile bu dendritleri çevreleyen çinkoca zengin η fazından oluştuğu görülmüştü. Literatürden [41] bilindiği

üzere galvanik seride çinko alüminyuma göre daha aktif olup korozyona karşı daha duyarlıdır. Bu nedenle korozyon ortamında çinkoca zengin fazların alüminyuma göre daha fazla veya öncelikli olarak korozyona uğraması beklenir.

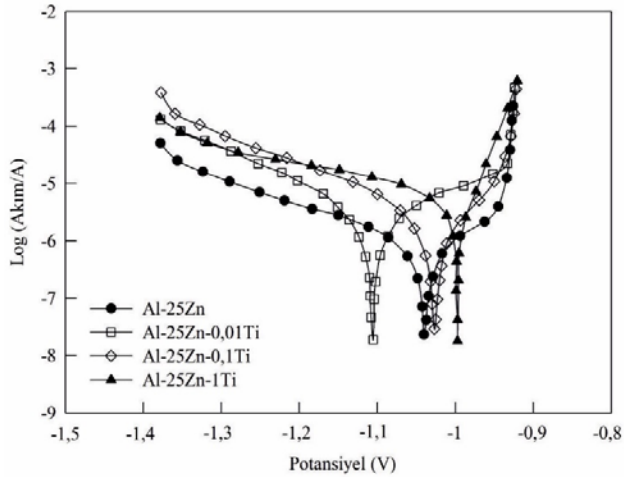
Alaşımların korozyon deneylerinden elde edilen Tafel polarizasyon eğrileri Şekil 15’de, korozyon hızı değerlerinin titanyum oranına göre değişimini gösteren eğriler ise Şekil 16’da verilmiştir. Alaşımların korozyon hızı değerleri İvium yazılımı yardımıyla belirlendi. Söz konusu yazılım korozyon hızını Tafel polarizasyon eğrilerinden elde ettiği korozyon akımı değerini $KH=(3272 \times I_{corr} \times EW)/(d \times A)$ formülünde kullanarak hesaplamaktadır. Bu formülde; KH: Korozyon hızını, I_{corr} : korozyon akımını, EW: malzemeye özgün eşdeğer kütle, d: malzemenin yoğunluğunu, A: korozyon test numunesinin yüzey alanını ifade etmektedir. Deneyler sonucunda elde edilen korozyon hızı değerleri Al-25Zn alaşımlarına yapılan titanyum katkısı ile korozyon hızının önemli ölçüde arttığı, ancak artışın %0,01Ti oranından sonra daha az olduğu görülmektedir. Korozyon hızındaki bu değişimin tane boyutundaki değişime paralel olduğu görülmektedir. Bu veriler ve alaşım örneklerinin korozyona uğramış yüzey fotoğrafları birlikte değerlendirildiğinde üretilen alaşımlardaki korozyon mekanizmasının taneler arası korozyon mekanizmasına benzer olduğu söylenebilir. Bilindiği üzere, alaşımlarda tane sınırları hem farklı fazların



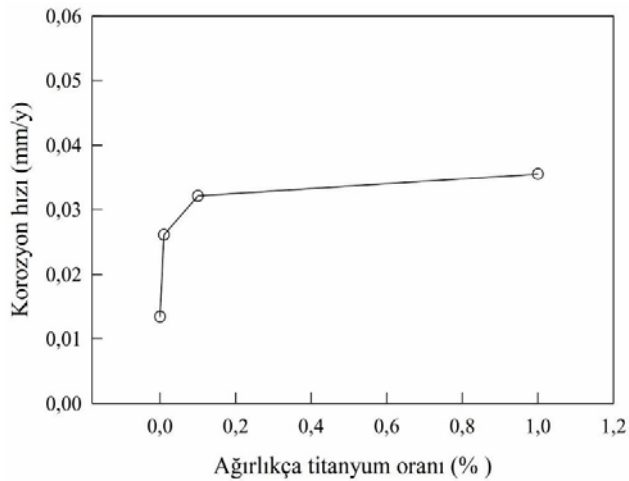
Şekil 14. a) Al-25Zn b) Al-25Zn-0,01Ti c) Al-25Zn-0,1Ti ve d) Al-25Zn-1Ti alaşımlarının korozyona uğramış yüzeylerinin SEM görüntüsü

(SEM micrographs showing the corroded surfaces of the (a) Al-25Zn (b) Al-25Zn-0,01Ti (c) Al-25Zn-0,1Ti and (d) Al-25Zn-1Ti alloys)

ayrıldığı hem de genel olarak safsızlık elementlerinin toplandığı bölgeler olmaları nedeniyle korozyona duyarlıdır [42]. Titanyum katkısı ile içyapıdaki tanelerin boyutunun azalıp, sayılarının artması tane sınırı sayısını artırdığı için taneler arası korozyon miktarında artışa yol açmış olabilir. Titanyum oranının %0,01'i aşması durumunda korozyon hızının artışında meydana gelen azalma da tane boyutlarındaki küçülme oranının azalmasından kaynaklanmış olabilir.



Şekil 15. Al-25Zn-(0-1)Ti alaşımlarının korozyon deneylerinden elde edilen tafel polarizasyon eğrileri (Tafel polarization curves obtained from corrosion tests of the Al-25Zn-(0-1)Ti alloys)



Şekil 16. Al-25Zn-(0-1)Ti alaşımlarında korozyon hızının titanyum oranına göre değişimini gösteren eğriler (Curves showing the variations in corrosion rate of the Al-25Zn-(0-1) Ti alloys with titanium content)

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada titanyum katkılarının Al-25Zn alaşımının yapısal, mekanik ve korozyon özelliklerine etkileri sistematik olarak incelenmiş olup, şu sonuçlar elde edilmiştir:

- Al-25Zn alaşımının içyapısı alüminyumca zengin α ve çinkoca zengin η fazlarından oluşmaktadır. Bu alaşıma %0,01 oranından daha fazla titanyum katılması durumunda içyapıda Al_3Ti fazı çökelmeye başlamaktadır.
- Al-25Zn alaşımlarına yapılan %0,01 titanyum katkısıyla önemli oranda tane küçülmesi elde edilmektedir. Bu orandan daha fazla yapılan titanyum katkıları tane boyutlarında önemli bir değişime yol açmamaktadır.
- Al-25Zn-Ti alaşımlarının sertliği, akma dayanımı, çekme dayanımı ve kopma uzaması değerleri %0,01 titanyum oranına kadar artmakta, bu orandan sonra ise azalmaktadır.
- Al-25Zn-(0-1)Ti alaşımları arasında en yüksek kalite indeksine Al-25Zn-0,01Ti alaşımı sahiptir.
- Titanyum katkısı Al-25Zn alaşımlarının korozyon direncini olumsuz etkilemektedir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENT)

Bu çalışma Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimince Desteklenmiştir. (Proje Numarası: FBA-2017-789)

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Goodwin F.E. ve Ponikvar A.L., Engineering Properties of Zinc Alloys, Cilt 3, International Lead Zinc Research Organization, Research Triangle Park, NC, USA, 1989.
2. Philip P.E. ve Schweitzer A., Metallic Materials: Physical, Mechanical, and Corrosion Properties, Cilt 1, Marcel Dekker Inc., USA, 2003.
3. Savaşkan T. ve Hekimoğlu A.P., Microstructure and mechanical properties of Zn-15Al-based ternary and quaternary alloys, Mater. Sci. Eng., A, 603, 52-57, 2014.
4. Savaşkan T. ve Alemdağ Y., Effects of pressure and sliding speed on the friction and wear properties of Al-40Zn-3Cu-2Si alloy: A comparative study with SAE 65 bronze, Mater. Sci. Eng., A, 496 (1-2), 517-523, 2008.
5. Savaşkan T. ve Hekimoğlu, A.P., Lubricated wear characteristics of Zn-15Al-3Cu-1Si alloy and SAE 660 bronze, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 33(1), 145-154, 2018.
6. Prasad B.K., Sliding wear response of a zinc-based alloy and its composite and comparison with a gray cast iron: influence of external lubrication and microstructural features, Mater. Sci. Eng., A, 392, 427-439, 2005.
7. Lyon R., The properties and applications of ZA alloys, The British Foundryman, August/ September, 344-349, 1986.
8. Savaşkan T. ve Hekimoğlu A.P., Effects of contact pressure and sliding speed on the unlubricated friction and wear properties of Zn-15Al-3Cu-1Si alloy, Tribol. Trans., 59 (6), 1114-1121, 2016.
9. Gervais E., Levert H. ve Bess M., The development of a family of zinc-based foundry alloys, American Foundrymen's Society Transaction, 88, 183-194, 1980.
10. Delneuve P., Tribological behaviour of Zn-Al alloys (ZA27) compared with bronze when used as a bearing

- material with high load and very low speed, *Wear*, 105, 283-292, 1985.
11. Savaşkan T. ve Hekimoğlu A.P., Effect of quench-aging treatment on the microstructure and properties of Zn-15Al-3Cu alloy, *Int. J. Mater. Res.*, 106 (5), 481-487, 2015.
 12. Savaşkan T. ve Hekimoğlu A.P., Structure and mechanical properties of Zn-(5-25) Al alloys, *Int. J. Mater. Res.*, 105 (11), 1084-1089, 2014.
 13. Savaşkan T., Bican O. ve Alemdag Y., Developing aluminium-zinc-based a new alloy for tribological applications, *J. Mater. Sci.*, 44 (8), 1969-1976, 2009.
 14. Türk A., Durman M. ve Kayalı E.S., The effect of manganese on the microstructure and mechanical properties of zinc-aluminium based ZA-8 alloy, *J. Mater. Sci.*, 42, 8298-8305, 2007.
 15. Savaşkan T. ve Bican O., Effects of silicon content on the microstructural features and mechanical and sliding wear properties of Zn-40Al-2Cu-(0-5)Si alloys, *Mater. Sci. Eng., A*, 404, 259-269, 2005.
 16. Prasad B.K., Effects of silicon addition and test parameters on sliding wear characteristics of zinc-based alloy containing 37,5% aluminium, *Materials Transactions*, 38 (8), 701-706, 1997.
 17. Savaşkan T., Hekimoğlu, A.P. ve Pürçek, G., Effect of copper content on the mechanical and sliding wear properties of monotectoid-based zinc-aluminium-copper alloys, *Tribol. Int.*, 37, 45-50, 2004.
 18. Savaşkan T., Pürçek G. ve Hekimoğlu A.P., Effect of copper content on the mechanical and tribological properties of ZnAl27-based alloys, *Tribol. Lett.*, 15 (3), 257-263, 2003.
 19. Türk A., Durman M. ve Kayalı E.S., The effect of manganese on the microstructure and mechanical properties of zinc-aluminium based ZA-8 alloy, *J. Mater. Sci.*, 42 (19), 8298-8305, 2007.
 20. Savaşkan T. ve Alemdağ Y., Effect of nickel additions on the mechanical and sliding wear properties of Al-40Zn-3Cu alloy, *Wear*, 268, 565-570, 2010.
 21. Chemingui M., Khitouni M., Mesmacque G. ve Kolsi A.W., Effect of heat treatment on plasticity of Al-Zn-Mg alloy: microstructure evolution and mechanical properties, *Physics Procedia*, 2 (3), 1167-1174, 2009.
 22. Shin S.S., Yeom G.Y., Kwak T.Y. ve Park I.M., Microstructure and mechanical properties of TiB-containing Al-Zn binary alloys, *J. Mater. Sci. Technol.*, 32 (7), 653-659, 2016.
 23. Hekimoğlu, A.P., Turan T.E., İsmailoğlu İ.İ., Akyol M.E. ve Şen E., Effect of grain refinement with boron on the microstructure and mechanical properties of Al-30Zn alloy, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 34(1), 523-534, 2019.
 24. Krajewski W.K., Greer A.L., Krajewski P.K. ve Piwowarski G., Grain refinement of zinc-aluminium based foundry alloys, 71st World Foundry Congress, Bilbao-Spain, 1286-1297, 19-21 Mayıs, 2014.
 25. Krajewski W.K., Schumacher, P. ve Haberl K., Microstructural features of the grain-refined sand cast AlZn20 alloy, *Arch. Metall. Mater.*, 55 (3), 2010.
 26. Mikuszewski T. ve Michalik R., The influence of molding parameters on the structure of the ZnAl40Cu2Ti alloy, *Solid State Phenomena*, 246, 235-239, 2016.
 27. Krajewski W.K. ve Haberl K., The effect of Ti on high-zinc al cast alloys structure and properties, *Acta Metallurgica Slovaca*, 17 (2), 123-128, 2011.
 28. Buraš J., Szucki M., Piwowarski G., Krajewski W.K. ve Krajewski P.K., Strength properties examination of high zinc aluminium alloys inoculated with Ti addition, *China Foundry*, 14 (3), 211-215, 2017.
 29. Krajewski W., The effect of Ti addition on properties of selected Zn-Al alloys, *Phys. Status Solidi A*, 147 (2), 389-399, 1995.
 30. Presnyakov A.A., Gorban Y.A. ve Chrevyakova V.V., The aluminum-zinc phase diagram, *Russ. J. Phys. Chem.*, 35 (6), 632-633, 1961.
 31. Okamoto H., Schlesinger M.E. ve Mueller M.E., *ASM Handbook Volume 3: Alloy Phase Diagrams*, ASM International, Materials Park OH, ABD, 2016.
 32. Maxweel I. ve Hellawell A., Simple model for grain refinement during solidification, *Acta Metall.*, 23 (2), 229-237, 1975.
 33. Chen Z., Wang T., Gao L., Fu H. ve Li T., Grain refinement and tensile properties improvement of aluminum foundry alloys by inoculation with Al-B master alloy, *Mater. Sci. Eng., A*, 553, 32- 36, 2012.
 34. Chen Z., Kang H., Fan G., Li J., Lu Y., Jie J., Zhang Y., Li T., Jian X. ve Wang T., Grain refinement of hypoeutectic Al-Si alloys with B, *Acta Metall.*, 120, 168-178, 2016.
 35. Johnsson M. ve Backerud L., The influence of composition on equiaxed crystal growth mechanisms and grain size in Al alloys, *Zeitschrift für Metallkunde*, 87, 216-220, 1996.
 36. Spittle J.A ve Sadli S., Effect of alloy variables on grain refinement of binary aluminum-alloys with Al-Ti-B, *Mater. Sci. Technol.*, 11, 533-537, 1995.
 37. Dieter G.E., *Mechanical Metallurgy*, McGraw-Hill Book Company, New York, USA, 1976.
 38. Turhal M.Ş. ve Savaşkan T., Relationships between secondary dendrite arm spacing and mechanical properties of Zn-40Al-Cu alloys, *J. Mater. Sci.*, 38 (12), 2639-2646, 2013.
 39. Çolak M. ve Kayıkçı R., Alüminyum dökümlerinde tane inceltme, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 13 (1), 11-17, 2009.
 40. Alipour M., Azarbarmas M., Heydari F., Houghoughi M., Alidoost M. ve Emamy M., The effect of Al-8B grain refiner and heat treatment conditions on the microstructure, mechanical properties and dry sliding wear behavior of an Al-12Zn-3Mg-2.5Cu aluminum alloy, *Mater. Des.*, 38, 64-73, 2012.
 41. Savaşkan T., *Malzeme Bilimi ve Malzeme Muayenesi*, 8. Baskı, Papatya Bilim, İstanbul, 2017.
 42. Üneri S., *Korozyon ve Önlenmesi*, 3. Baskı, Korozyon Derneği, Ankara, 2011.