

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**





KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce

Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : / /

Tezin Savunma Tarihi : / /

Tez Danışmanı :

Trabzon

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**Makina Mühendisliği Anabilim Dalında
Hale ZENGİN Tarafından Hazırlanan**

BAKIR KATKISININ Zn-27Al ALAŞIMININ YORULMA DAVRANIŞINA ETKİSİ

**başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 10 / 09 / 2019 gün ve 1818 sayılı
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda
YÜKSEK LİSANS TEZİ
olarak kabul edilmiştir.**

Jüri Üyeleri

Başkan : Prof. Dr. Murat AYDIN

Üye : Doç. Dr. Yasin ALEMDAĞ

Üye : Doç. Dr. Osman BİCAN

Murat Aydın
Yasin Alemdağ
Osman Bican

**Prof. Dr. Asim KADIOĞLU
Enstitü Müdürü**

ÖNSÖZ

Zn-Al esaslı alaşımlar üzerine yapılan çalışmalar incelendiğinde bu alaşımların genel olarak bronz ve dökme demir gibi demir dışı metallere göre daha iyi performans gösterdiği görülmüştür. Özellikle yatak malzemesi olarak kullanılan diğer demir dışı metal ve alaşımlarla karşılaştırıldığında, kolay temin edilebilme ve ekonomiklik, ideal döküm kabiliyeti, iyi işlenebilme özelliği, ısı işleme elverişli olması, özgül mukavemetlerinin yüksek olması, yüksek sönümlenme kapasitesi gibi önemli avantajlara sahip olan bu alaşımlar geçmişten günümüze pek çok alanda kullanılmaktadır. Yukarıda belirtilen avantajlarının yanında çinko-alüminyum esaslı alaşımların, boyutsal kararsızlık, düşük süneklik, sınırlı çalışma sıcaklığı ve nispeten düşük mukavemet gibi dezavantajları da mevcuttur. Söz konusu dezavantajları tamamen ortadan kaldırmak veya en aza indirmek için çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Örneğin; alaşım elementi katma ve ısı işleme uygulama gibi yöntemler, sözü edilen alaşımların mekanik özelliklerinde önemli iyileşmeler sağlamıştır. Bu nedenle bu çalışmada Zn-27Al alaşımına farklı oranlarda Cu katılarak, bakır katkısının sözü edilen alaşımların yapı ve mekanik özelliklerini, özellikle de yorulma davranışı üzerindeki etkilerini belirlemek amaçlanmıştır. Bu bağlamda Zn-27Al-2Cu, Zn-27Al-3Cu, Zn-27Al-4Cu, Zn-27Al-5Cu alaşımları kokil döküm yöntemi ile üretilerek yapı ve mekanik özellikleri ayrıntılı bir biçimde incelenmiştir. Ayrıca dönel eğmeli yorulma deneyleri yapılarak, alaşımların yapı ve mekanik özellikleri ile yorulma davranışları arasındaki ilişki ortaya konulmuştur.

Bu çalışmada tecrübeleri ile yol gösteren ve yardımlarını esirgemeyen sayın danışmanım Prof. Dr. Murat AYDIN'a teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca çalışmalarımda yardımcı olan KTÜ Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Malzeme Bilimleri Laboratuvarında ve Metalürji ve Malzeme Mühendisliğinde çalışan tüm araştırma görevlilerine, RTEÜ Merkezi Araştırma Laboratuvarı çalışanlarına teşekkür ederim.

Son olarak, meslektaşım olan her türlü yardımını benden esirgemeye sevgili eşime teşekkür ederim.

Hale ZENGİN
Trabzon 2019

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Bakır Katkısının Zn-27Al Alaşımının Yorulma Davranışına Etkisi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Murat AYDIN’ın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 27/09/2019

Hale ZENGİN

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET.....	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XI
SEMBOLLER DİZİNİ	XII
1. ÇİNKo – ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI İLE İLGİLİ GENEL BİLGİLER....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Çinko-Alüminyum Esaslı İkili ve Üçlü Alaşımların Faz Diyagramları	3
1.2.1. İkili Çinko-Alüminyum Faz Diyagramları	3
1.2.2. Üçlü Çinko-Alüminyum-Bakır Faz Diyagramları	5
1.3. Çinko-Alüminyum Esaslı Alaşımların Özellikleri.....	7
1.3.1. Çinko-Alüminyum Esaslı Alaşımların Yapısal Özellikleri	7
1.3.2. Çinko-Alüminyum Esaslı Alaşımların Fiziksel Özellikleri	8
1.3.3. Çinko-Alüminyum Esaslı Alaşımların Mekanik Özellikleri	9
1.3.4. Çinko-Alüminyum Esaslı Alaşımların Yorulma Özellikleri	13
1.4. Literatür Özeti ve Çalışmanın Amacı	16
2. DENEYSEL ÇALIŞMA	18
2.1. Alaşımların Üretimi	18
2.2. Yapısal ve Fiziksel Özelliklerin İncelenmesi.....	18
2.3. Mekanik Özelliklerin İncelenmesi	19

2.3.1.	Çekme, Darbe ve Sertlik Deneyleri	19
2.3.2.	Yorulma Deneyi	20
3.	BULGULAR	24
3.1.	Alaşımın Kimyasal Bileşimi	24
3.2.	Yapısal İncelemelerden Elde Edilen Bulgular	24
3.3.	Mekanik Deneylerden Elde Edilen Bulgular	27
3.3.1.	Sertlik, Çekme ve Darbe Deneylerinden Elde Edilen Bulgular	27
3.3.2.	Yorulma Deneylerinden Elde Edilen Bulgular	29
3.3.2.1.	Yorulma Deneylerinden Elde Edilen Verilerin Korelasyonu	31
3.3.2.2.	Yorulma Örneklerinin Kırılma Yüzeylerinin İncelenmesinden Elde Edilen Bulgular	35
4.	İRDELEME	43
5.	SONUÇLAR	46
6.	ÖNERİLER	47
7.	KAYNAKLAR	48

ÖZGEÇMİŞ

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

BAKIR KATKISININ Zn-27Al ALAŞIMININ YORULMA DAVRANIŞINA ETKİSİ

Hale ZENGİN

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Murat AYDIN
2019, 51 Sayfa

Bu çalışmada bir dizi Zn-Al-(%2-5)Cu alaşımları kokil kalıba döküm yöntemi ile üretildi. Üretilen alaşımların yapı ve mekanik özellikleri ile yorulma davranışları ayrıntılı bir biçimde incelenerek bakır katkısının sözü edilen alaşımların mekanik özellikleri ve özellikle de yorulma performansı üzerindeki etkisi ortaya konuldu. Yapılan incelemeler sonucunda, bu alaşımlarının içyapısının alüminyumca zengin α dendritleri ile bunları çevreleyen çinkoca zengin η ve ötektoid $\alpha + \eta$ fazları ile bakırca zengin ε fazından oluştuğu belirlendi. Ayrıca, bakır oranının artmasıyla alaşımın kopma uzaması ve tokluk değerlerinin azalarak sertlik ve çekme dayanımının arttığı gözlemlendi. En yüksek sertlik ve çekme dayanımı değerleri Zn-27Al-5Cu alaşımından elde edilirken, en yüksek kopma uzaması ve tokluk değerlerini Zn-27Al-2Cu alaşımı sergiledi. Buna ilave olarak, en yüksek yorulma ömrü Zn-27Al-5Cu alaşımından elde edildi ve ayrıca bütün yorulma örneklerinin gevrek kırılma davranışı sergilediği görüldü. Yorulma verilerinin korelasyonu sonucunda Zn-27Al-(%2-5)Cu alaşımının yorulma davranışlarının Basquin bağıntısı ile ifade edilebileceği belirlendi.

Anahtar Kelimeler: Çinko-alüminyum esaslı alaşımlar, bakır katkısı, yorulma davranışı, mekanik özellikler, Basquin kanunu

Master Thesis

SUMMARY

THE EFFECT OF COPPER CONTENT ON FATIGUE BEHAVIOR OF Zn-27Al
ALLOY

Hale ZENGİN

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Mechanical Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. Murat AYDIN
2019, 51 Pages

In this study, a series of Zn-27Al-(2-5%)Cu alloys were produced by permanent mould casting. The effect of copper additive on the mechanical properties and especially the fatigue performance of the alloys was revealed by examining the structural and mechanical properties commensurate with fatigue behavior of the alloys in detail. As a result of the investigations, it was determined that the microstructure of the alloys consisted of aluminum rich α dendrites and surrounding zinc rich η and eutectoid $\alpha + \eta$ phases and copper rich ϵ phase. In addition, it was observed that the hardness and tensile strength of the alloy increased while the percentage elongation and toughness values decreased with increasing copper content. The Zn-27Al-2Cu alloy exhibited the highest percentage elongation and toughness values, while the highest hardness and tensile strength were obtained from Zn-27Al-5Cu alloy. In addition, the highest fatigue life was obtained from Zn-27Al-5Cu alloy and it was also observed that all fatigue samples exhibited brittle fracture behavior. As a result of correlation of fatigue data, it was determined that fatigue behavior of Zn-27Al(2-5%) alloy can be expressed by Basquin's law.

Keywords: Zinc-aluminum based alloys, copper content, fatigue behavior, mechanical properties, Basquin's law

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. İkili çinko-alüminyum faz diyagramı	4
Şekil 2. Üçlü Zn-Al-Cu alaşım sistemine ait faz diyagramının 350 °C sıcaklıktaki izotermal kesiti	6
Şekil 3. Ergitme işlemi için elektrikli pota fırını (b) Kokil kalıp (c) Üretilen alaşımın fotoğrafı	18
Şekil 4. Alaşımlara ait (a) çekme (b) darbe ve (c) sertlik deney örneklerinin şematik resmi.....	20
Şekil 5. Dönel Eğmeli Yorulma Deney Numunesi.....	21
Şekil 6. Yorulma deney makinesine manuel olarak ağırlık asılması.....	22
Şekil 7. Yorulma deney numunesinin şekli ve boyutu	23
Şekil 8. Zn-27Al-2Cu alaşımının içyapısı	25
Şekil 9. Zn-27Al-3Cu alaşımının içyapısı.....	25
Şekil 10. Zn-27Al-4Cu alaşımının içyapısı	26
Şekil 11. Zn-27Al-5Cu alaşımının içyapısı	26
Şekil 12. Zn-27Al-5Cu alaşımının içyapısının detayını gösteren geri saçılım (back-scatter) görüntüsü	27
Şekil 13. Alaşımların mekanik özelliklerinin bakır katkısı ile değişimini gösteren grafik ..	29
Şekil 14. Zn-27Al-2Cu, Zn-27Al-3Cu, Zn-27Al-4Cu, Zn-27Al-5Cu alaşımlarının gerilme-çevrim sayısı eğrileri.....	31
Şekil 15. Alaşımların yorulma dayanımı, çekme dayanımı, kopma uzaması ve tokluk değerlerinin bakır katkısına göre değişimi	32
Şekil 16. Alaşımların yorulma ömrü, çekme dayanımı, kopma uzaması ve tokluk değerlerinin bakır katkısına göre değişimi	32
Şekil 17. Zn-27Al-(%2-5) alaşımlarının $\log\sigma - \log N$ eğrileri.....	34

Şekil 18.	132 MPa gerilme değerinde yorulma deneyine tabi tutulan Zn-27Al-2Cu alaşımına ait numunenin kırılma yüzeyini gösteren SEM fotoğrafı.....	36
Şekil 19.	132 MPa gerilme değerinde yorulma deneyine tabi tutulan Zn-27Al-2Cu alaşımına ait numunenin kırılma yüzeyinin detayını gösteren SEM fotoğrafı.....	37
Şekil 20.	132 MPa gerilme değerinde yorulma deneyine tabi tutulan Zn-27Al-3Cu alaşımına ait numunenin kırılma yüzeyini gösteren SEM fotoğrafı.....	37
Şekil 21.	187 MPa gerilme değerinde yorulma deneyine tabi tutulan Zn-27Al-3Cu alaşımına ait numunenin kırılma yüzeyini gösteren SEM fotoğrafı.....	38
Şekil 22.	132 MPa gerilme değerinde yorulma deneyine tabi tutulan Zn-27Al-4Cu alaşımına ait numunenin kırılma yüzeyinin detayını gösteren SEM fotoğrafı.....	38
Şekil 23.	187 MPa gerilme değerinde yorulma deneyine tabi tutulan Zn-27Al-4Cu alaşımına ait numunenin kırılma yüzeyini gösteren SEM fotoğrafı.....	39
Şekil 24.	132 MPa gerilme değerinde yorulma deneyine tabi tutulan Zn-27Al-5Cu alaşımına ait numunenin kırılma yüzeyinin detayını gösteren SEM fotoğrafı.....	39
Şekil 25.	Zn-27Al-3Cu alaşımına ait renkli EDS analizi	40
Şekil 26.	Zn-27Al-5Cu alaşımına ait renkli EDS analizi	40
Şekil 27.	Yorulma deneyine tabi tutulan Zn-27Al-3Cu alaşımına ait örneğin yorulma çatlığının detayını gösteren fotoğrafı.....	41
Şekil 28.	Yorulma deneyine tabi tutulan Zn-27Al-3Cu alaşımına ait örneğin yorulma çatlığının detayını gösteren fotoğrafı.....	41
Şekil 29.	Yorulma deneyine tabi tutulan Zn-27Al-2Cu alaşımına ait örneğin yorulma çatlığının detayını gösteren fotoğrafı.....	42

TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. Çinko-alüminyum esaslı bazı alaşımların kimyasal bileşimleri	1
Tablo 2. İkili çinko-alüminyum alaşım sisteminde meydana gelen faz dönüşümleri.....	5
Tablo 3. Çinko-alüminyum-bakır alaşım sisteminde meydana gelen katı hal dönüşümleri	7
Tablo 4. Çinko-alüminyum esaslı bazı alaşımların kimyasal bileşimleri	8
Tablo 5. Çinko-alüminyum esaslı alaşımlar ve geleneksel yatak malzemelerinin fiziksel özellikleri	9
Tablo 6. Çinko-alüminyum esaslı alaşımlar ile bazı ticari alaşımların mekanik özellikleri	11
Tablo 7. Bazı ikili Zn-Al alaşımlar için çekme mukavemeti (σ_c) ve ikincil dentritik kol aralığı (d) arasındaki bağıntı.....	12
Tablo 8. Çinko-alüminyum esaslı alaşımlar ile bazı ticari alaşımların yorulma özellikleri	15
Tablo 9. Üretilen alaşımların kimyasal bileşimi	24
Tablo 10. Üretilen alaşımların sertlik, çekme dayanımı kopma uzaması ve tokluk değerleri	28
Tablo 11. Söz konusu alaşımlara ait yorulma deney sonuçları.....	30
Tablo 12. Söz konusu alaşımların k A sabitleri ve c (kolerasyon katsayısı) değerleri	34

SEMBOLLER DİZİNİ

YMK	: Yüzey merkezli kübik
$\sigma_{\text{ç}}$: Çekme mukavemeti
d	: ikincil dentritik kol aralığı
EKAE	: Eş kanalda açısız ekstrüzyon
BSD	: Brinell sertlik deneyi
SEM	: Scanning electron microscope (taramalı elektron mikroskobu)
EDS	: Energy dispersive spektrometry (enerji dispersif spektrometresi)
$\sigma_{\text{eğ}}$: Eğme gerilmesi
$M_{\text{eğ}}$: Eğme momenti
$W_{\text{eğ}}$: Eğme için mukavemet momenti
P	: Örneğe uygulanan kuvvet
N	: Çevrim sayısı
σ	: Gerilme genliği
c	: Korelasyon katsayısı

1. ÇİNKO – ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI İLE İLGİLİ GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Çinko – alüminyum esaslı alaşımların temeli, ZA8, ZA12, ZA27, ILZRO, Zamak, Alzen gibi bir takım ticari isimlerle anılan bileşimlere dayanır [1]. Bu alaşım grubu içerisinde ilk defa 1920’li yıllarda Zamak-2, Zamak-3 ve Zamak-5 ticari isimleriyle geliştirilen alaşımlar halen kullanılmaktadır [2]. İkinci Dünya Savaşı sırasında, çinko-alüminyum esaslı alaşımlar malzeme tedarikinde karşılaşılan problemler nedeniyle bronzun yerine üretilmeye başlanmıştır [2-4] 1962 yılında International Lead-Zinc Research Organization tarafından, ILZRO-12(ZA12) ve ILZRO-16(ZA16) alaşımları üretilmiş, 1970’li yıllarda ise Noranda Araştırma Merkezi tarafından ZA-8, ZA-27 alaşımları geliştirilmiştir [2-4]. Yine bu yıllarda Vöest-Alpina firması tarafından ALZEN305 ve ALZEN 501 olarak bilinen ticari alaşımlar geliştirilmiştir [2, 5] Bu alaşımlardan bazılarının kimyasal bileşimleri Tablo 1’de verilmiştir [5].

Tablo 1. Çinko-alüminyum esaslı bazı alaşımların kimyasal bileşimleri

Alaşım	Kimyasal bileşim oranı (% ağırlık)						
	Al	Cu	Mg	Fe	Pb	Ni	Zn
Zamak 2	3,5-4,3	2,6-2,9	0,025-0,05	0,1	0,004	-	Kalan
Zamak 3	3,5-4,3	0,25	0,02-0,05	0,1	0,005	-	Kalan
Zamak 5	3,5-4,3	0,75-1,25	0,03-0,08	0,07	0,005	-	Kalan
Zamak 7	3,5-4,3	0,25	0,005-0,02	0,1	0,003	0,005-0,02	Kalan
ZA-8	8,0-8,8	0,08-1,3	0,015-0,03	0,07	0,004	-	Kalan
ZA-12	10,5-11,5	0,5-1,25	0,015-0,03	0,1	0,004	-	Kalan
ZA-27	25,0-28,0	2,0-2,5	0,01-0,02	-	0,004	-	Kalan
Alzen-305	32	5	-	-	-	-	Kalan

Zn-Al esaslı alaşımlar üzerine yapılan çalışmalar daha çok, ötektik (Zn-5Al), ötektoid (Zn-22Al) ve monotektoid (Zn-40Al) bileşimler üzerinde yoğunlaşmıştır [2, 6]. Bu alaşımlar, genel olarak daha önce kullanılan bronz ve dökme demir gibi demir dışı metallere göre daha iyi performans göstermiştir [6, 7]. Özellikle de monotektoid bileşime sahip alaşımlar diğerlerine göre daha üstün özelliklere sahiptir [1, 6]. Özellikle yatak malzemesi olarak kullanılan diğer demir dışı metal ve alaşımlarla karşılaştırıldığında, kolay temin edilebilme ve ekonomiklik, ideal döküm kabiliyeti, iyi işlenebilme özelliği, ısı işleme elverişli olması, özgül mukavemetlerinin yüksek olması, yüksek sönümlenme kapasitesi gibi önemli avantajlara sahip olan bu alaşımlar geçmişten günümüze pek çok alanda kullanılmaktadır [2-5, 8]. Bu denli geniş kullanımları, bu avantajlarının yanında söz konusu alaşımların demir dışı metallerin çoğundan daha üstün fiziksel, mekanik ve tribolojik özelliklere sahip olmalarından kaynaklanmaktadır [9]. Şöyle ki; otomobillerde kullanılan karbüratör parçaları, dişli kutusu kapakları, motor ayakları, biyel kolu ve jant gibi parçalar kullanışlı olmaları ve düşük yoğunlukları nedeniyle bu alaşımlardan üretilmektedir [10]. Bunların dışında, torna tezgâhında, taş kırma makinelerinde, spor aletleri, madencilik, hırdavat, dekoratif parçalar, elektrikli ev aletleri gibi birçok parçanın [2, 3] ve özellikle küçük bileşenlerin üretiminde ve kaymalı yataklarda sıklıkla kullanılmaktadır [8]. Bu alaşımların özellikle kaymalı yatak üretiminde yoğun bir şekilde kullanılması, üstün tribolojik özellikler sergilemelerine, alaşımların içyapılarına ve yüzeylerde oluşan çinko-alüminyum oksit film yapılarına dayanmaktadır [11]. Çinko oksidin yumuşak bir faz olması yağlayıcı bir özellik kazandırırken; alüminyumun sert bir faz olması da, aşınma direncinin yüksek olmasını sağlamaktadır [12, 13]. Çinko-alüminyum döküm alaşımları içerisinde ötektoid bileşime sahip ticari ZA-27 alaşımı, diğerlerine oranla daha iyi tribolojik, fiziksel ve mekanik özellikler sergilemektedir [14]. ZA-27 özellikle basınçlı kalıp döküm formunda, oda sıcaklığında, 450 MPa değerine kadar yüksek mukavemet değerine sahip olduğundan kullanım alanları oldukça yaygınlaşmıştır [15, 16].

Yukarıda belirtilen avantajlarının yanında çinko-alüminyum esaslı alaşımların kullanımını kısıtlayan bazı dezavantajları da mevcuttur. Bunlar, arasında boyutsal kararsızlık, düşük süneklik, sınırlı çalışma sıcaklığı ve nispeten düşük mukavemet sayılabilir [2]. Boyutsal kararsızlık; sıvı metalin katılaşması esnasında oluşan kararsız dengeli (metastabil) ϵ gibi fazların zamanla kararlı hale dönüşmesinden, düşük süneklik; çinko ve bakırca zengin gevrek fazların yapıda bulunmasından, sınırlı çalışma sıcaklığı ise; bu alaşımların düşük ergime sıcaklığına sahip olmasından kaynaklanmaktadır [2, 4, 5, 17, 18].

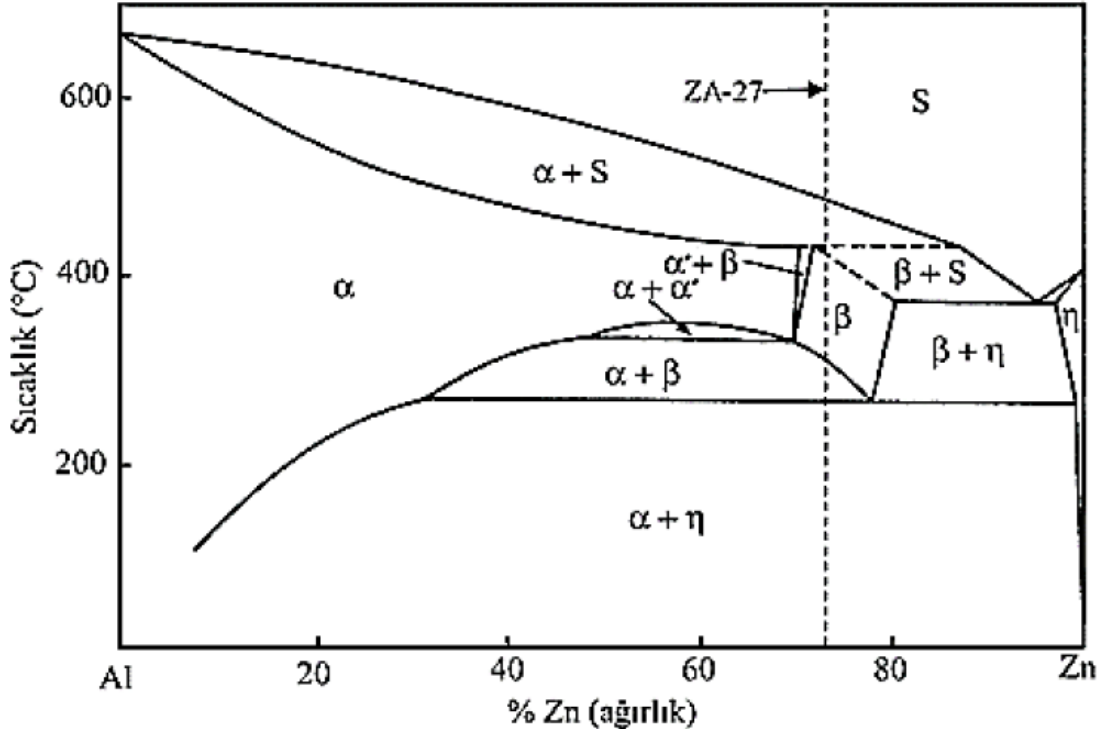
Bu gibi dezavantajlar sözü edilen alaşımların kullanımını kısıtlayan bir faktör olarak ortaya çıkmaktadır. Bu dezavantajları en aza indirmek ve bu alaşımların kullanım alanlarını yaygınlaştırmak için çeşitli yöntemler uygulanmıştır. Bunlardan, alaşım elementi katma ve ısıtma işlemi uygulama en başta gelenleridir [2-4, 11, 17]. İkili çinko-alüminyum alaşımlarının mekanik ve tribolojik özelliklerini iyileştirmek için bu alaşımlara Cu ve Si gibi alaşım elementleri katılarak üçlü (Zn-27Al-3Cu, Zn-40Al-2Cu, vb.) ve dördü (Zn-40Al-2Cu-2Si, Zn-80Al-2Cu-2Si, vb.) alaşımlar geliştirilmiştir [19, 20]. Nitekim, Zn-Al alaşımlarının dayanımlarını arttırmak için en etkili yöntemlerden biri Cu ve Si gibi alaşım elementleri ilavesi olduğu yapılan bazı çalışmalarda belirlenmiştir [21]. Bakırın Zn-Al alaşımlarının mekanik ve tribolojik özelliklerini en çok iyileştiren, [22-24] silisyumun ise, aşınma direncini en çok arttıran alaşım elementi olduğu anlaşılmıştır [24]. Cu katkısının özellikle monotektoid bileşime sahip alaşımların mekanik özelliklerini önemli ölçüde iyileştirdiği görülmüştür [24]. Ayrıca, yaşlandırma ve stabilizasyon gibi ısıtma işlemlerin monotektoid ve ötektoid bileşimler üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Ancak, gerek alaşım elementi katma gerekse ısıtma işlemi uygulama ötektoid bileşime sahip Zn-27Al alaşımının mekanik özelliklerine etkisi üzerine yapılan çalışmalar oldukça sınırlı kalmıştır. Kimyasal bileşim ve ısıtma işleminin söz konusu alaşımın özellikle yorulma davranışına etkileri sistematik bir şekilde incelenmemiştir. Bu durum literatürde önemli bir eksiklik oluşturmaktadır. Bu nedenle, bu çalışmada Cu katkısının ticari Zn-27Al alaşımının yorulma davranışına etkilerinin incelenmesi amaçlanmıştır.

1.2.Çinko-Alüminyum Esaslı İkili ve Üçlü Alaşımların Faz Diyagramları

1.2.1. İkili Çinko-Alüminyum Faz Diyagramları

Bazı araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalar sonunda elde edilen ikili çinko-alüminyum faz diyagramı Şekil 1'de verilmiştir. Bu diyagramda yer alan α alüminyumca zengin, η ise çinkoca zengin faz bölgelerini göstermektedir [1, 3-5, 17, 22, 25, 26]. Bu diyagramdan ayrıca, çinkonun alüminyum içerisinde %83 oranına kadar çözünerek yüzey merkezli kübik (YMK) yapılı α , α' ve β olarak adlandırılan farklı faz bölgeleri oluşturduğu görülmüştür. Bu fazlar, yavaş (dengeli) soğutma işlemi sonunda kararlı çinko ve alüminyum fazlarına dönüşmekte olup tümü yüzey merkezli kübik (YMK) yapıya sahiptir. Hızlı

soğutma işleminde ise çinkonun aşırı doymuş α çözeltisi içerisinde hapsolmasına ve yaşlandırma işlemi sonunda geçiş fazlarının oluşmasına neden olmaktadır [3, 4]. Kafes parametrelerinin birbirine yakın olmaları nedeniyle α ve α' fazları arasındaki faz sınırı tam olarak belirlenememiş ve $\alpha + \alpha'$ olarak adlandırılan karışmazlık bölgesi oluşmuştur [4].



Şekil 1. İkili çinko-alüminyum faz diyagramı [1, 3-5, 17, 22, 25, 26]

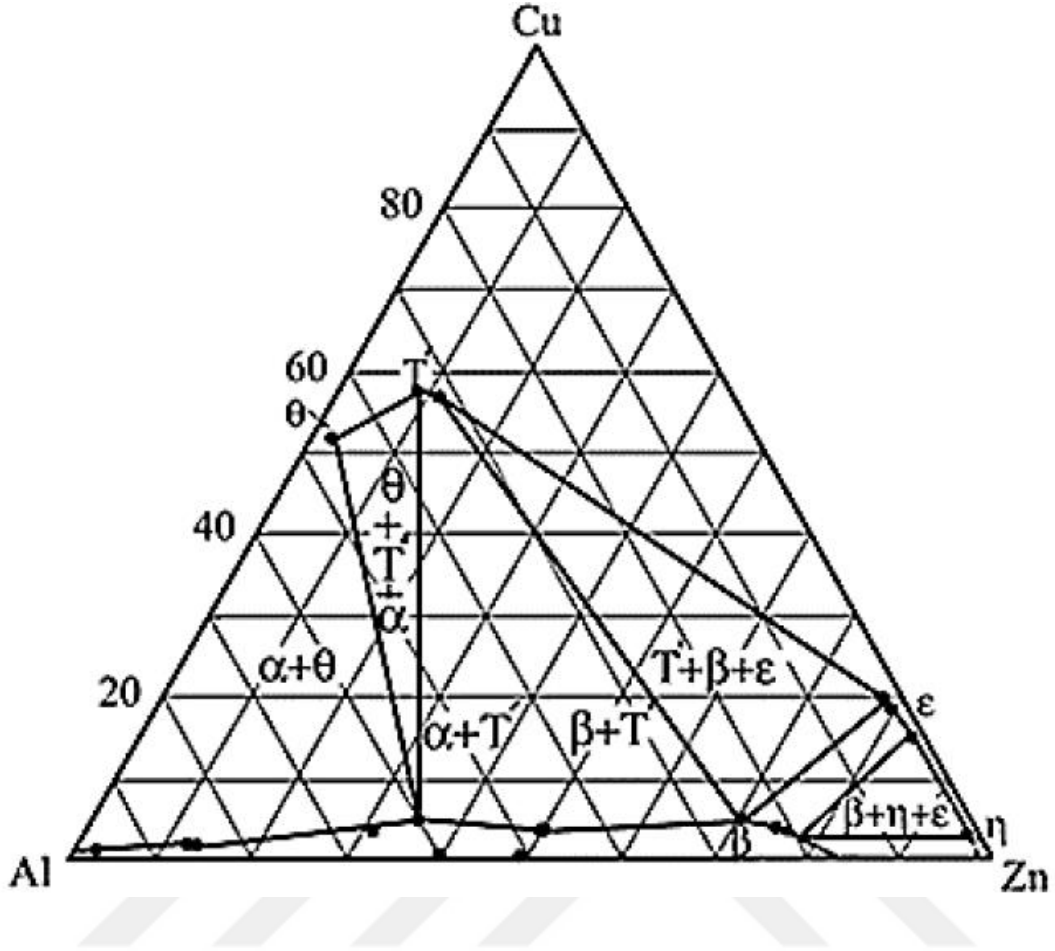
Çinko-Alüminyum faz diyagramında 382 °C sıcaklık ve %5 Al oranında ötektik, 276 °C sıcaklıkta ve %22 Al oranında ötektoid dönüşüm gerçekleşir. Ötektik dönüşüm sonucunda, yüzey merkezli kübik β ve sıkı düzenli hegzagonal yapılı η fazları oluşur. β fazı ise 276 °C sıcaklıkta ötektoid dönüşümle alüminyumca zengin α ve çinkoca zengin η fazlarına dönüşür [4]. İkili çinko-alüminyum alaşım sisteminde gerçekleşen önemli faz dönüşümleri Tablo 2’de verilmiştir [5, 17].

Tablo 2. İkili çinko-alüminyum alaşım sisteminde meydana gelen faz dönüşümleri [17].

Dönüşüm	Dönüşüm formülü	Dönüşüm noktası	
		Alüminyum oranı (%)	Sıcaklık (°C)
Ötektik	$S \leftrightarrow \beta + \eta$	5	382
Ötektoid	$\beta \leftrightarrow \alpha + \eta$	22	276
Peritektik	$\alpha + S \leftrightarrow \beta$	28	443

1.2.2. Üçlü Çinko-Alüminyum-Bakır Faz Diyagramları

Üçlü alaşımların faz diyagramları tam olarak belirlenmemiş olmakla birlikte yapılan bir çalışmada [27] Zn-Al-Cu alaşımının faz diyagramının 350 °C sıcaklıktaki izotermal kesiti Şekil 2' de, oluşan katı hal dönüşümleri Tablo 3'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Üçlü Zn-Al-Cu alaşım sistemine ait faz diyagramının 350 °C sıcaklıktaki izotermal kesiti [2, 3, 17].

Bu faz diyagramında α , alüminyumca zengin fazları, η , çinkoca zengin fazları, ϵ (CuZn_4), θ (CuAl_2) ve T' ($\text{Al}_4\text{Cu}_3\text{Zn}$) ise bakır içeren bileşikler göstermektedir. ϵ bileşiği yarı kararlı (metastabil), θ ve T' bileşikler ise kararlı yapıya sahiptir [2, 4, 5, 17]. ϵ fazı dördü faz reaksiyonu ile kararlı T' ve η fazlarına dönüşür [4]. Bu gerçekleşen dönüşüm ile boyutsal kararsızlık problemi ortaya çıkar [18]. Bu problem çinko-alüminyum alaşımlarda alüminyum oranının artırılması ile giderilebilir [18]. Bu durum, çinko esaslı alaşımlar da metastabil ϵ fazının yerine alüminyum esaslı stabil θ fazının oluşmasıyla ilgilidir [18].

Tablo 3. Çinko-alüminyum-bakır alaşım sisteminde meydana gelen katı hal dönüşümleri [2-5, 17].

Dönüşüm	Dönüşüm Sıcaklığı (°C)
$T' + \beta \leftrightarrow \alpha + \varepsilon$	288
$\beta \leftrightarrow \alpha + \eta$	275
$\beta + \varepsilon \leftrightarrow \alpha + \eta$	276
$\alpha + \varepsilon \leftrightarrow T' + \eta$	268

1.3. Çinko-Alüminyum Esaslı Alaşımların Özellikleri

1.3.1. Çinko-Alüminyum Esaslı Alaşımların Yapısal Özellikleri

Çinko-alüminyum esaslı alaşımların dentritik yapıları, çinko bakımından zengin peritektik β fazıyla çevrili dentrit çekirdeği ve interdentritik bölgede çinko bakımından zengin η fazı ile alüminyum bakımından zengin α fazından oluşur [26]. Zn-Al alaşımları özellikle dökülmüş durumdaki dentritik yapıları nedeniyle düşük süneklığe ve homojen olmayan bir içyapıya sahiptir [13]. Bu nedenle alaşımların içyapılarını iyileştirmek için birtakım çalışmalar yapılmıştır. Örneğin; döküm sırasında geniş bir dentritik aralık elde etmek için tek yönlü katılaşma deney düzeneğinde, düşük karbonlu çelikten yapılmış bir döküm kalıbı kullanılmıştır [16].

Piyasada kullanılan bazı ticari alaşımların kimyasal bileşimleri Tablo 4'te gösterilmiştir. Bunlardan ZA-8 ötektik, ZA-27 ötektoid, ZA-35 monotektoid noktaya yakındır. Zamak-3 dışındaki alaşımlar %5' den daha az bakır içerir. ZA-35 hariç diğer alaşımlar az miktarda magnezyum içerir. Yine ZA-35 alaşımı diğerlerinden farklı olarak %0,5-1 oranında silisyum içerir [2, 4].

Tablo 4. Çinko-alüminyum esaslı bazı alaşımların kimyasal bileşimleri [2, 4].

Alaşım	Kimyasal bileşim (%)				
	Al	Mg	Cu	Si	Zn
Zamak-3	3,8-4,3	0,03-0,06	-	-	Kalan
Zamak-5	3,8-4,3	0,03-0,06	0,75-1,25	-	Kalan
ZA-8	8,0-8,8	0,01-0,03	0,8-1,3	-	Kalan
ZA-12	11,0-11,5	0,01-0,03	0,5-1,5	-	Kalan
ZA-27	25,0-28,0	0,01-0,02	2,0-2,5	-	Kalan
ZA-35	30,0-35,0	-	3 - 5	0,5-1,0	Kalan

1.3.2. Çinko-Alüminyum Esaslı Alaşımların Fiziksel Özellikleri

Çinko-alüminyum esaslı alaşımların yoğunluk ve ergime sıcaklığı gibi fiziksel özellikleri, içerisinde bulunan alüminyum oranına göre değişiklik gösterir [28]. Bu alaşımların yoğunluğu, alüminyum oranı arttıkça azalmakta, bakır oranı arttıkça da artmaktadır [24]. Ayrıca alüminyum oranı arttıkça ergime sıcaklığı ve ısıl genleşme sıcaklığı artmakta, katılma aralığı ise daralmaktadır [24, 28].

Çinko-alüminyum esaslı alaşımlar, geleneksel yatak alaşımları ile karşılaştırıldığında yoğunlukları daha düşüktür ve bu alaşımların alüminyum oranı arttıkça yoğunluğu da aynı oranda azalmaktadır [5]. Tablo 5'te bazı çinko-alüminyum esaslı alaşımlar ve geleneksel yatak malzemelerinin fiziksel özellikleri karşılaştırılmalı olarak verilmiştir.

Tablo 5. Bazı çinko-alüminyum esaslı alaşımlar ve geleneksel yatak malzemelerinin fiziksel özellikleri [2].

Fiziksel Özellikler	Alaşımlar					
	ZA-8	ZA-12	ZA-27	SAE-40 Pirinci	SAE-660 Bronzu	Kır Dökme Demir
Yoğunluk (g/cm ³)	6,30	6,03	5,00	8,50	8,83	6,94
Katılma Sıcaklık Aralığı (°C)	404-375	430-480	490-380	1010-855	975-855	1232
Katılma Büzülmesi (%)	1,0	1,2	1,3	-	-	1,0
Isıl Genleşme Katsayısı (μm/mk)	23,2	24,1	26,0	18,0	18,0	11,9

1.3.3. Çinko-Alüminyum Esaslı Alaşımların Mekanik Özellikleri

Çinko-alüminyum esaslı alaşımlar, demir olmayan birçok metalden ve dökme demirden daha iyi mekanik özellikler sergiler [2]. Bazı ticari çinko-alüminyum esaslı alaşımlar ve bazı geleneksel yatak malzemelerinin mekanik özellikleri Tablo 6' da verilmiştir [2]. Tablodan, ZA-27 alaşımının, ZA-8 ve ZA-12 alaşımlarına göre yüksek kopma uzaması, sertlik, mukavemet ve süneklik değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Çinko-alüminyum esaslı alaşımların mekanik özellikler üzerinde alüminyum oranının da etkisi vardır [17]. Şöyle ki, alüminyum oranı arttıkça sertlik ve mukavemet değeri de artmaktadır. Örneğin, monotektoid bileşime sahip ZnAl40 alaşımı, ötektik ZnAl5 ve ötektoid ZnAl22 bileşimlerden daha iyi mukavemet özellikleri sergiler [17]. Bu durum monotektoid alaşımlarda katılma ve yaşlandırma sırasında metastabil fazların α matrisinin kafes yapısını çarpıtmasından kaynaklandığı düşünülmektedir [17]. Ayrıca, döküm yöntemlerinin alaşımların mekanik özellikleri üzerinde etkileri olduğu anlaşılmaktadır. Şöyle ki, basınçlı

döküm ile üretilen alaşımlar, kum döküm ve kokil dökümle üretilen alaşımlara göre daha iyi mekanik özellikler sergilediği görülmektedir. Bunun sebebi, basınçlı döküm yöntemiyle üretilen alaşımların tane boyutunun daha küçük ve gözenek miktarının daha az olmasıdır [29]. Ayrıca, kokil döküm yöntemi ile üretilmiş alaşımlarda, Al oranı arttıkça kopma uzaması artarken, basınçlı döküm yöntemi ile üretilmiş alaşımlarda, Al oranı arttıkça kopma uzaması azalmaktadır. Ayrıca bu alaşımların kopma uzaması artan sıcaklıkla artmaktadır [30].

Mekanik özellikleri pek çok demir dışı metal ve alaşımdan daha iyi olsa da sözü edilen alaşımların mukavemet, süneklik gibi özellikleri bazı mühendislik uygulamalarında yetersiz kalmaktadır. Bu özellikleri iyileştirmek amacıyla söz konusu alaşımlara başta Cu olmak üzere birtakım alaşım elementi katılmıştır [2, 3]. Örneğin bir çalışmada [7] Al-40Zn-Cu alaşımlarının sertliği bakır içeriğinin artması ile artmış, kopma uzaması ise azalmıştır.

ZnAl₂₇ alaşımına katılan bakır mekanik özelliklerde önemli iyileşmeler sağlamıştır [2, 22]. Bakır oranının alaşımın sertlik ve mukavemet değerlerine etkileri yapılan bir çalışmada verilmiştir [22]. Bu çalışmada, ZnAl₂₇Cu₂ alaşımı en yüksek mukavemet değeri sergilemektedir. En yüksek yoğunluk ve sertlik ZnAl₂₇Cu₅' ten elde edilmiştir. Bakır katkısı %2' ye kadar alaşımın mukavemet değerlerini arttırmakta, bu oranın üzerinde sertlik ve yoğunluk artarken mukavemet düşmektedir. Mukavemet değerinin %2'lik Cu katkısından sonra düşmesi, gerçekleşen katı çözeltili sertleşmesi mekanizmasının etkisinin azalmasından kaynaklanmaktadır [2]. Alaşımın, bakır oranının %2' yi aşması durumunda, ε, T' ve θ gibi intermetalik fazlar oluşur. Katı çözeltili sertleşmesi için kullanılan bakır bu yapıları oluşturmak için harcandığından söz konusu mekanizmanın etkisi azalır ve bunun sonucunda mukavemet de düşer [2, 22]. Ancak, söz konusu intermetalik bileşenlerin oluşması, sertliğin artan bakır oranıyla artmasına neden olmaktadır.

Tablo 6. Çinko-alüminyum esaslı alaşımlar ile bazı ticari alaşımların mekanik özellikleri [2].

Mekanik Özellikler	ZA-8				ZA-12				ZA-27				Dökme demir	Bronz
	Kum döküm	Kokil döküm	Basinçlı döküm	Kum döküm	Kum döküm	Kokil döküm	Basinçlı döküm	Kum döküm	Kum döküm	Kokil döküm	Basinçlı döküm	* Kum döküm	Lamel grafitli	SAE 660
Çekme dayanımı	263	240	374	299	328	404	421	441	426	318	214	241		
%0,2'lik akma	198	208	290	211	268	320	371	376	371	257	124	124		
Kopma dayanımı (%)	1,7	1,3	8	1,52	2,2	5	4,6	2,5	2,5	2,5	9,4	20		
Sertlik (BSD)	85	87	103	94	89	100	113	114	119	94	170-269	65		
Darbe enerjisi (J)	20	-	42	25	-	29	48	-	13	58	-	100		
Young modülü	85,3	85,3	85,3	82,7	82,7	82,7	77,9	77,9	77,9	89,6	100	77,9		

(* Döküm sonrası 321 °C sıcaklıkta 3 saat tavlandıktan sonra fırında soğutulmuş)

Çinko-alüminyum alaşımların mekanik özelliklerini soğuma hızı da etkilemektedir. Alaşımların sertliği, mukavemeti, kopma uzaması, tokluğu, soğuma hızı arttıkça artmıştır [1]. Sertlik ve mukavemet değerlerinin artan soğuma hızıyla artmasının nedeni ikincil dentritik kol aralığının azalması ve bunu sonunda gözenek oranının düşmesidir [1, 31]. Nitekim dökülmüş durumdaki alaşımların ikincil dentritik kol aralığı küçüldükçe, çekme mukavemetinin (σ_c) arttığı belirlenmiştir [32]. Yapılan çalışmalar sonucunda, bazı ikili alaşımların çekme mukavemeti (σ_c) ve ikincil dentritik kol aralığı (d) arasındaki bağıntılar Tablo 7’ de verilmiştir [32].

Tablo 7. Bazı ikili Zn-Al alaşımlar için çekme mukavemeti (σ_c) ve ikincil dentritik kol aralığı (d) arasındaki bağıntı [32].

Alaşım	Bağıntı
ZA-8	$\sigma_c=49+857d^{-1/2}$
ZA-12	$\sigma_c=240+400d^{-1/2}$
ZA-27	$\sigma_c=370+200d^{-1/2}$

Çinko-alüminyum esaslı alaşımlarda mekanik özellikleri iyileştirmedeki bir diğer yöntem ısıtıl işlem uygulamaktır. Alaşımların sertlik ve mukavemet değerlerini artırmak, daha homojen ve kararlı bir içyapı elde etmek için alaşımlara, çözündürme, su verme ve yapay yaşlandırma (T6, T7 ve T9) içeren çökeltme sertleştirilmesi uygulanmaktadır [2]. Su verme sonrası uygulanan yaşlandırma ile alaşımın sertlik ve mukavemet değerlerinde artış görülmesi çökeltme sertleştirilmesine dayandırılmaktadır [17]. Öte yandan, bazı ısıtıl işlemlerin sözü edilen alaşımların sertlik ve mukavemet gibi mekanik özelliklerini olumsuz etkilediği belirlenmiştir. Örneğin, uygulanan stabilizasyon (T5) işlemi sonrasında alaşımların sertlik ve mukavemet değerleri düşmekte, kopma uzaması ise artmaktadır [2]. Bu durum, yapı içerisindeki kalıntı gerilmelerin ve metastabil fazların kararlı fazlara dönüşmesinden kaynaklanmaktadır [33].

İkili Zn-Al alaşımlarına uygulanan alaşım elementi katma ve ısıtıl işlem uygulama, alaşımların mekanik özelliklerini sınırlı şekilde iyileştirmektedir [34]. Bu nedenle yapılan farklı çalışmalarda aşırı plastik deformasyon yöntemlerinden biri olan eş kanal açılal ekstrüzyon (EKAE) yöntemi kullanılarak, ötektik, ötektoid ve monotektoid bileşime sahip

Zn-Al esaslı alaşımlarda mekanik özellikler iyileştirilmeye çalışılmıştır [8, 21, 34]. EKAE yöntemiyle alaşımların tane boyutunda önemli oranda küçülme sağlanmakta, taneler yeniden yapılanmakta ve böylelikle mekanik özelliklerde önemli iyileşmeler elde edilmektedir [34]. Genelde gevrek kırılma sergileyen alaşımlar, EKAE yöntemi uygulandıktan sonra daha sünek bir kırılma davranışı sergilemiştir [8]. Bu yöntem kullanılarak alaşımların hem mukavemet hem süneklik değerleri birlikte artmaktadır [21]. Oysa diğer yöntemlerde alaşımların mukavemet değerleri artarken süneklik değerleri düşmektedir.

1.3.4. Çinko-Alüminyum Esaslı Alaşımların Yorulma Özellikleri

Bazı makine parçaları ve yapı elemanları tekrarlı yükler altında çalışmaktadır. Bu yüklere maruz kalan malzemelerde zamanla meydana gelen hasara yorulma denir [35]. Tekrarlı gerilmeler etkisi altında çalışan yani dinamik yüklere maruz kalan makine parçalarında oluşan hasarların yaklaşık %80' inin yorulmadan kaynaklandığı bilinmektedir [35]. Malzemelerde oluşan hasarın yorulmadan kaynaklanması, malzemelerin yorulma davranışlarının önemini ortaya koymaktadır.

Farklı döküm yöntemi ile üretilen ticari (ZA-8, ZA-12 ve ZA-27) Zn-Al alaşımların yorulma özellikleri Tablo 8' de verilmiştir [36]. Tablodan, alüminyum oranı arttıkça yorulma dayanımının arttığı görülmektedir. Ayrıca, ZA-27 alaşımının diğerlerine göre daha yüksek yorulma dayanımı sergilediği, döküm yönteminin yorulma davranışı üzerinde oldukça etkili olduğu gözlenmektedir. Şöyle ki; basınçlı döküm yöntemi ile üretilen ZA-8 alaşımı, kum döküm yöntemi ile üretilen ZA-8 alaşımından yaklaşık iki kat fazla yorulma dayanımı sergilediği ve yine basınçlı döküm yöntemi ile üretilen ZA-27 alaşımı aynı yöntemle üretilen ZA-8 ve ZA-12 alaşımlarından daha yüksek yorulma dayanımına sahip olduğu görülmektedir. Bu farklılıklar şöyle açıklanabilir. Basınçlı döküm yöntemi ile üretilen alaşımlar, kokil döküm yöntemi ile üretilen alaşımlara göre daha düşük tane boyutu ve gözenek oranına sahiptir [37]. Alaşımların tane boyutu azaldığında akma ve çekme dayanımları artmakta ve buna bağlı olarak yorulma dayanımları da artmaktadır [17]. Aynı zamanda, gözenek oranının azalması yorulma dayanımı ve diğer mukavemet değerlerinde artışa neden olmaktadır [17]. Çünkü gözenekler gerilme yığılmalarına ve dolayısıyla çatlak oluşumuna neden olduğu için alaşımların yorulma dayanımını azaltmaktadır [38]. Yapılan bir çalışmada Zn-Al alaşımlarında yorulma dayanımı çekme dayanımı ile ilişkilendirilmiştir [39]. Şöyle ki; söz konusu alaşımların çekme dayanımı arttıkça yorulma dayanımları da

artmaktadır [39]. Alaşımların çekme dayanımı, Cu gibi alaşım elementi katma, alüminyum oranı gibi kimyasal bileşimlerine bağlı olduğundan, yorulma davranışı üzerinde etkili olduğu sonucuna varılabilir. Nitekim bazı çalışmalarda ikili çinko-alüminyum alaşımlarının yorulma dayanımının artan alüminyum oranı ile arttığı belirlenmiştir [24, 40]. Bu alaşımlara bakır katıldığında ise yorulma dayanımı daha da artmıştır [40]. Öte yandan, Zn-40Al-(1-5)Cu alaşımlarının yorulma dayanımı artan bakır oranı ile arttığı ancak bakır oranının %2'yi aştığı durumda bu değer azaldığı görülmüştür. Bu durum alaşımların yapı ve mekanik özellikleri ile ilgilidir. İkili Zn-Al alaşımların sertlik ve mukavemet değerleri arttıkça yorulma dayanımının arttığı, yorulma dayanımı ise çekme dayanımı ile ilişkili olduğu görülmüştür [18, 25, 36]. Şöyle ki; ikili alaşımlardan en yüksek yorulma dayanımı en yüksek sertlik ve mukavemete sahip olan Zn-80Al alaşımından, üçlü Zn-Al-Cu alaşımlar içerisinde ise en yüksek yorulma dayanımı yine en yüksek mukavemete sahip olan Zn-40Al-2Cu alaşımından elde edildiği ileri sürülmüştür [36]. İkili Zn-(20-80)Al alaşımları incelendiğinde en yüksek yorulma dayanımı, en yüksek alüminyum oranı ve mukavemet değeri gösteren Zn-80Al alaşımında olduğu belirlenmiştir [36]. Ayrıca, çalışma ortamının da çinko-alüminyum esaslı alaşımların yorulma davranışları üzerinde etkilerini incelemek amacıyla, ikili Zn-(20-80)Al ve üçlü Zn-40Al-(1-5)Cu alaşımların hava ve değişik ortamlardaki yorulma deneyleri yapılmıştır [24, 25, 36, 40]. Bu deneyler sonucunda söz konusu alaşımların kuru hava ortamında en yüksek, tuzlu su (% 3.5 NaCl) çözeltisinde daha düşük, asit (% 1 HCl) çözeltisinde ise en düşük yorulma dayanımı sergilediği görülmüştür. Bu durum, çinko-alüminyum esaslı alaşımların yorulma davranışları üzerinde asitli ortamın, tuzlu su ortamından daha etkili olduğunu göstermektedir. İkili çinko-alüminyum alaşımlarının yorulma dayanımı ve yorulma ömrü her iki korozyon ortamında da artan alüminyum oranı ile düştüğü belirlenmiştir [24]. Ayrıca korozyon ortamın bu alaşımların yorulma dayanımı üzerindeki etkisi düşük gerilme değerlerinde daha etkili olduğu görülmüştür. Yapılan bir başka çalışmada [40], monotektik bileşime sahip üçlü Zn-40Al-Cu alaşımlarının içerdiği bakır oranı bu alaşımların korozyon ortamdaki yorulma davranışlarını etkilediği ileri sürülmüştür. Şöyle ki; bakır katkısı söz konusu alaşımın tuzlu su ve asitli ortamlardaki yorulma ömrünü özellikle yüksek gerilmelerde az da olsa arttırdığı ancak belirli bir değer üzerindeki bakır katkısı söz konusu alaşımın düşük gerilmelerdeki yorulma ömrünü fazla etkilemediği belirlenmiştir.

Tablo 8. Çinko-alüminyum esaslı alaşımlar ile bazı ticari alaşımların yorulma özellikleri [36].

Alaşım	Döküm yöntemi	Yorulma dayanımı (MPa)
ZA-8	Kum döküm	
	Kokil döküm	52
	Basınçlı döküm	103
ZA-12	Kum döküm	103
	Kokil döküm	-
	Basınçlı döküm	117
ZA-27	Kum döküm	172
	Kokil döküm *	103
	Basınçlı döküm	145
Dökme demir (lam.graf)	-	97
Bronz (SAE660)	Kum döküm	110

(* Isıl işlem görmüş durumda)

Zn-Al esaslı alaşımların yorulma performansını arttırmak amacıyla son yıllarda geliştirilen eş kanalda açısız ekstrüzyon (EKAE) yöntemi bu alaşımlara uygulanmış ve alaşımların yorulma dayanımında artış elde edilmiştir [8, 21]. Bu çalışmalarda özellikle yüksek oranda Al içeren (%60 ve %80) alaşımlarına EKAE yöntemi uygulanmış ve %60 Al içeren alaşımda %82,5, %80 Al içeren alaşımda 1 paso sonunda %74 ve 2 paso sonunda %89'luk artışlar elde edilmiştir. Yorulma dayanımındaki bu sıra dışı artış, EKAE işlemiyle elde edilen yapısal değişime bağlı olarak alaşımların mukavemet, süneklik ve özellikler de tokluk değerlerindeki artışa dayandırılarak açıklanmıştır. EKAE yöntemi ile alaşımların gözeneklik gibi döküm kusurları ve dentritik yapısı ortadan kalkarak, alüminyumca zengin α ve çinkoca zengin $\alpha+\eta$ fazlarından oluşan ince uzun bir mikro yapı oluşmuştur [34]. Bu yapısal değişimin alaşımların mukavemet değerlerini arttırmakla birlikte yorulma performansını da önemli oranda iyileştirmiştir.

Yapılan literatür araştırmalarından, çinko-alüminyum esaslı alaşımların mekanik özellikleri üzerinde yoğun çalışmalar yapılmış olmakla birlikte, yorulma özelliklerinin yeterli düzeyde incelenip ortaya konulmadığı anlaşılmıştır. Ayrıca, diğer ticari Zn-Al alaşımlarıyla kıyaslandığında $ZnAl_{27}$ alaşımı daha üstün fiziksel, mekanik ve tribolojik özellikler sergilediği bilinmektedir. Ancak Cu katkısının bu alaşımın yorulma özelliklerine etkisi hakkında literatürde herhangi bir çalışmaya rastlanamamıştır. Bu nedenle bu çalışmada

kokil döküm yöntemi ile üretilmiş Zn-27Al-(2-5)Cu alaşımlarının yorulma davranışları incelenerek Cu katkısının yorulma performansına etkisi araştırılacaktır.

1.4. Literatür Özeti ve Çalışmanın Amacı

Kaymalı yatak üretimi gibi bazı mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılan bronz, pirinç ve dökme demir gibi geleneksel malzemeler hem pahalı hem de fiziksel, mekanik ve tribolojik özellikleri açısından yetersiz kalmaktadır. Bu yüzden başta kaymalı yatak imalatı olmak üzere çeşitli mühendislik uygulamalarında kullanılmak amacıyla pek çok çinko-alüminyum esaslı alaşım (ZA-5, ZA-8, ZA-12, ZA-27, Zn-40Al-2Cu, Zn-40Al-2Cu-2Si, Al-25Zn-3Cu, Al-40Zn-3Cu-2Si vb.) geliştirilmiştir. Bu alaşımlar içerisinde en iyi mekanik özellikler monotektoid (Zn-40Al) ve ötektoid bileşime sahip (ZA-27) alaşımından elde edilmiştir. Yapılan çalışmalar, çinko-alüminyum esaslı alaşımların geleneksel yatak alaşımlarından çok daha üstün fiziksel, mekanik ve tribolojik özellikler sergilediğini göstermektedir. Bu üstünlüklerin başında alaşım elementlerinin kolay ve ucuza temin edilmesi, üretim maliyetlerinin düşük olması, yüksek özgül mukavemete sahip olmaları, ısı işleme elverişli olmaları ve yüksek sönümlenme kapasitesine sahip olmaları gelmektedir. Bu üstünlüklerin yanı sıra, özellikle bakır içeren alaşımlarda boyutsal kararsızlık, düşük süneklik ve bazı uygulamalarda yetersiz kalan sertlik ve mukavemet gibi önemli sorunlarla da karşılaşmıştır. Bu sorunları ortadan kaldırmak, yapı ve mekanik özellikleri iyileştirmek için araştırmacılar bazı çalışmalar yapmış ve olumlu sonuçlar elde etmişlerdir. Şöyle ki; uygun döküm yönteminin seçimi ve döküm parametrelerinin (döküm sıcaklığı, katılaşma hızı, kalıp sıcaklığı) optimizasyonu ile sertlik ve mukavemet artırılmış, gözenek miktarı ise azaltılmıştır. Alaşım elementi katkısı ile aynı şekilde sertlik ve mukavemet değerlerinde artış elde edilmiştir. Isıl işlem yöntemiyle ise alaşımın sertlik ve mukavemet değerleri artırılmış aynı zamanda kararlı ve homojen bir içyapı elde edilmiştir. Bu çalışmaların yanında mekanik özelliklerde daha iyi sonuçlar elde etmek için eş kanalda açısız ekstrüzyon yöntemi (EKAE) ile de alaşımların mikro gözeneklik ve dentrik içyapısı ortadan kaldırılarak, mukavemet, süneklik ve yorulma performansında önemli artışlar elde edilmiştir. Yapılan çalışmalarda EKAE sonrası yapısal değişimlere bağlı olarak mekanik özelliklerin iyileştirilmesi ile söz konusu alaşımların yorulma performansı ve tribolojik özelliklerinde çok önemli iyileşmeler elde edilmiştir.

Yapılan bu çalışmalarda monotektoid esaslı (Zn-40Al) alaşımlarda bakır katkısının yorulma performansına etkisi detaylı bir şekilde incelenmesine rağmen ötektoid Zn-27Al alaşımının Cu katkısının yorulma davranışına etkisi incelenmemiştir. Bu durum, bu alaşımlardan üretilen parçaların ve makine elemanlarının tasarımında önemli bir eksiklik olarak kendini göstermekte ve kullanım alanlarının genişletilmesine engel teşkil etmektedir. Bu nedenle, bu çalışmanın amacı; diğer ticari alaşımlara göre üstün mekanik özellikler sergileyen ticari Zn-27Al alaşımına farklı oranlarda bakır katılarak, bakır katkısının bu alaşımın yapı, mekanik özellikleri ile özellikle de yorulma davranışına etkisi incelenecek ve en uygun bakır oranı belirlenecektir. Böylelikle, hem literatürdeki önemli bir eksiklik ortadan kaldırılmış olacak hem de bu alaşımların endüstriyel alandaki kullanımının yaygınlaştırılmasına katkıda bulunmuş olunacaktır.

2. DENEYSEL ÇALIŞMA

2.1. Alaşımların Üretimi

Bu çalışmada üçlü Zn-27Al-2Cu, Zn-27Al-3Cu, Zn-27Al-4Cu ve Zn-27Al-5Cu alaşımları kokil kalıba döküm yöntemiyle üretildi. Alaşımların üretiminde yüksek saflıkta (%99.99) çinko, ticari saflıkta (%99.80) alüminyum ve elektrolitik (99,99) bakır kullanıldı. Söz konusu alaşımların üretimi için gerekli olan bakır, intermetalik alüminyum-bakır (Al-50Cu) alaşımından karşılandı. Ergitme işlemi elektrikli bir pota fırını içerisinde gerçekleştirildi (Şekil3-a). Ergitilen alaşımlar yaklaşık 580 °C sıcaklıktan, oda sıcaklığında tutulan 60x110x260 mm boyutlarındaki bir kokil kalıba dökülerek katılaştırıldı (Şekil3-b) Döküm sonrası, külçelerin üst kısmında çekilme boşluğu içeren yaklaşık 60 mm' lik kısmını kesilip atıldı (Şekil3-c). Üretilen alaşımların kimyasal bileşimi atomik absorpsiyon spektrometri yöntemi ile belirlendi. Dökülmüş durumlardaki külçelerin her birinden talaşlı imalat yöntemi ile 1 adet metalografi ve sertlik, 3'er adet çekme ve darbe örneği ile 30 adet yorulma örneği hazırlandı.



(a)Elektrikli pota fırını

(b)Kokil kalıp

(c)Alaşım

Şekil 3. Ergitme işlemi için elektrikli pota fırını (b) Kokil kalıp (c) Üretilen alaşımların fotoğrafı

2.2. Yapısal ve Fiziksel Özelliklerin İncelenmesi

İçyapı incelemeleri için alaşımlardan alınan örnekler, standart metalografi yöntemiyle hazırlandıktan sonra sodyum hidroksit çözeltisi (10gr NaOH +90ml saf su)

içerisinde dağıldı. Gerek metalografi numuneleri, gerekse yorulma örneklerinin kırık yüzeyleri hem ışık mikroskobu hem de taramalı elektron mikroskobu (SEM) yardımıyla incelendi ve içyapılarını gösteren fotoğraflar çekildi. Diğer taraftan, alaşımların yorulma örneklerinin kırık yüzeyleri, SEM cihazında geri saçılım elektronları (backscattered elektrons) yöntemiyle incelendi ve içyapısında bulunan fazlar enerji dispersif spektrometresi (EDS) yöntemiyle analiz edildi.

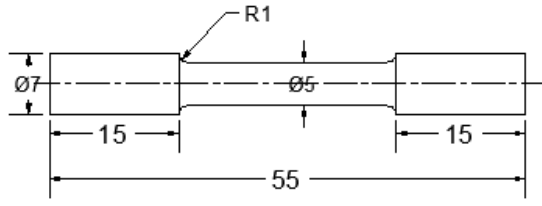
2.3. Mekanik Özelliklerin İncelenmesi

2.3.1. Çekme, Darbe ve Sertlik Deneyleri

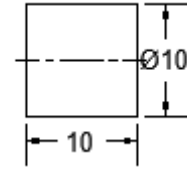
Çekme deneyleri için, Zn-27Al-2Cu, Zn-27Al-3Cu, Zn-27Al-4Cu ve Zn-27Al-5Cu alaşımlarından talaşlı işlem ile çapı 7 mm ve ölçü uzunluğu 55 mm olan TS EN ISO 6892-1 standardına uygun örnekler hazırlandı. Çekme deney örneğinin şematik resmi Şekil 4(a)'da verilmiştir. Hazırlanan örnekler universal bir çekme deney makinesinde 0,02 mm/s' lik çekme hızında çekme deneyine tabi tutuldu. Her bir durum için 3 örnek kullanıldı. Alaşımın çekme dayanımı ve kopma uzaması değerleri bu üç örnekten elde edilen verilerin ortalaması alınarak belirlendi.

Darbe deneyleri için, her bir alaşımdan talaşlı işlemle çapı 8 mm ve uzunluğu 50 mm ölçülerinde olan TS EN ISO 14556 standardına uygun örnekler hazırlandı. Örneklerin tam orta bölümünde derinliği 2 mm olan 45° açığa sahip çentik açılmış olup, çentiğin uç kısmı yarıçapı 0,25 mm olacak şekilde işlendi. Söz konusu darbe deney örneğinin şematik resmi Şekil 4(b)'de verilmiştir. Darbe deneylerinde her bir alaşım için üç adet numune kullanılmış olup deneyler maksimum darbe enerjisi 500 kg.cm ($\pm 0,5$ kg.cm) olan bir Charpy deney düzeneğinde yapılmıştır.

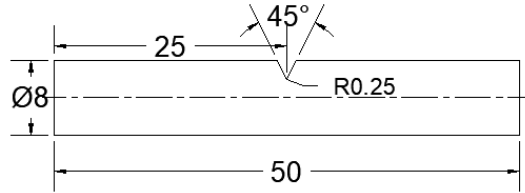
Sertlik deneyleri için, söz konusu alaşımlardan TS EN ISO 6506-1 standardına uygun alınan örnekler talaşlı imalat yöntemi ile yüzeyleri paralel olacak şekilde işlendi ve parlatıldı. Sertlik deneyi örneğinin şematik resmi Şekil 4(c)'de verilmiştir. Sertlik ölçümleri; Brinell sertlik ölçme yöntemi ile 31,25 kg yük altında ve 2,5 mm çaplı bilye uç kullanılarak gerçekleştirildi. Her örnek üzerinde beş ölçüm yapılarak elde edilen değerlerin ortalaması alındı.



(a) Çekme deney örneği



(c) Sertlik deney örneği



(b) Darbe deney örneği

Şekil 4. Alaşımlara ait (a) çekme (b) darbe ve (c) sertlik deney örneklerinin şematik resmi

2.3.2. Yorulma Deneyi

Alaşımların yorulma davranışı laboratuvarında imal edilen dönel eğmeli bir yorulma deney düzeneği yardımıyla incelendi. Şekil 5'te genel görünümü verilen bu deney düzeneği; 2 kW gücünde bir elektrik motoru, iki adet mil, millerin yataklanmasında kullanılan iki adet ana yatak, motor çıkış milinden aldığı hareketi ana yatak miline ileten bir kardan kavrama, örnek tutucuları, yük askı kolu, otomatik kumanda ünitesi, anahtar ve devir sayacı gibi temel elemanlardan oluşmaktadır.



Şekil 5. Dönel eğmeli yorulma deney makinası

Deney makinesinin dönme hareketi yanında açısal hareket serbestliğini de sağlayabilmesi için özel bir yataklama sistemi tasarlanmıştır. Motor ile deney düzeneği mili arasındaki bağlantıyı sağlayan özel bir kardan kavraması sisteme açısal ve eksenel hareket serbestliği kazandırmaktadır. Ayrıca, deney sistemindeki eksenel hareketi sağlayabilmek için bir sonsuz vida mekanizması kullanılmış ve motor hareketli bir tabla üzerine yerleştirilmiştir. Deney örneğinin kırılmasına kadar geçen çevrim sayısını belirlemek için bir elektronik devir sayacı, örnek kırıldığında düzeneğin otomatik olarak durmasını sağlamak için de bir anahtar kullanılmıştır. İki farklı devir sayısında (1500 ve 3000 d/d) çalışabilen deney makinesi opsiyonel yük uygulama seçeneği sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. Şöyle ki; yükleme işlemi yük hücresi yardımıyla otomatik olarak veya ağırlık asmak suretiyle manuel olarak gerçekleştirilebilmektedir (Şekil 6).



Şekil 6. Yorulma deney makinesine manuel olarak ağırlık asılması

Talaşlı yöntemle yüzeyi hassas bir şekilde işlenerek hazırlanan yorulma örneği iki ucundan yorulma makinasının örnek tutucularına bağlanarak sabitlenmektedir. Yük askı koluna ağırlık asılarak veya yük hücresi ve kontrol ünitesi kullanılarak örneğe eğme yükü uygulanmakta, bu eğme yükü iki yükleme kolu arasında sabit bir eğme momenti ve bu eğme momenti de örneğin en dar kesiti olan orta noktasında maksimum eğme gerilmesi oluşturmaktadır. Söz konusu örnek elektrik motoru ile sürekli olarak döndürülmekte ve örneğin en dar kesiti üzerindeki her bir nokta ortalama gerilme sıfır olacak şekilde sinüzoidal bir değişim gösteren çekme ve basma gerilmelerinin etkisi altında kalmaktadır. Yorulma numunesine etkiyen eğme gerilmesi aşağıdaki bağıntı yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$\sigma_{eğ} = \frac{M_{eğ}}{W_{eğ}} \quad \rightarrow \quad \sigma_{eğ} = \frac{P.l}{\frac{\pi.d^3}{32}} \quad (1)$$

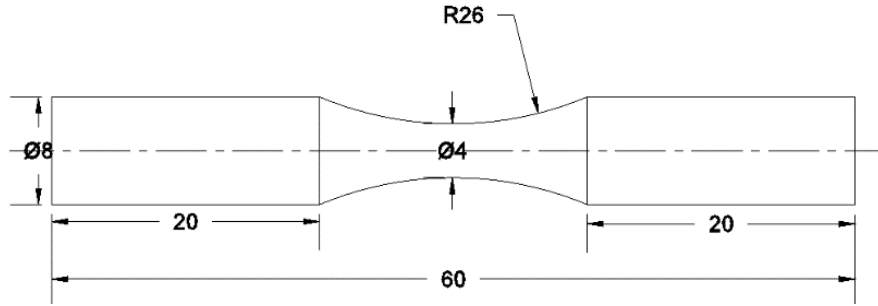
Burada $\sigma_{eğ}$ eğme gerilmesini, $M_{eğ}$ eğme momentini, $W_{eğ}$ ise mukavemet momentini göstermektedir. Örneğin çapı $d=4$ mm ve moment kolu uzunluğu $l=117$ mm olan büyüklükler (1) bağıntısında yerine konulup hesaplandığında, örneğe uygulanan yük (P) ile

örneğin en dar kesitinde oluşan eğme gerilmesi ($\sigma_{eğ}$) arasında aşağıdaki bağıntı ile ifade edilebilen bir ilişkinin olduğu belirlendi.

$$\sigma_{eğ} = 18,6P \quad (2)$$

Burada P'nin birimi N, $\sigma_{eğ}$ 'nin birimi ise MPa'dır.

Zn-27Al-2Cu, Zn-27Al-3Cu, Zn-27Al-4Cu ve Zn-27Al-5Cu alaşımlarından ASTM E-466 standardına uygun ve ortalama yüzey pürüzlülüğü 0,4 μm olan yorulma örnekleri talaşlı imalat yöntemiyle (CNC tezgâhında) üretildi. Temsili bir yorulma örneğinin teknik resmi Şekil 7'de verilmiştir. Bu örnekler, sözü edilen deney düzeneğinde 3000 dev/dak'lık sabit bir devir sayısında ve farklı gerilmeler altında yorulma deneyine tabi tutuldu. Yorulma deneyleri 105 - 214 MPa arasında değişen farklı gerilmelerde yapıldı. Her bir gerilme değeri için üç yorulma deneyi yapıldı ve örneklerin kırılmasına kadar geçen çevrim sayıları bu değerlerden elde edilen verilerin ortalaması alınarak belirlendi. Elde edilen verilerden yararlanılarak alaşımların gerilme-çevrim sayısı (S-N) eğrileri çizildi.



Şekil 7. Yorulma deney numunesinin şekli ve boyutu

3. BULGULAR

3.1. Alaşımın Kimyasal Bileşimi

Üretilen alaşımların kimyasal bileşimleri Tablo 9' da verilmiştir.

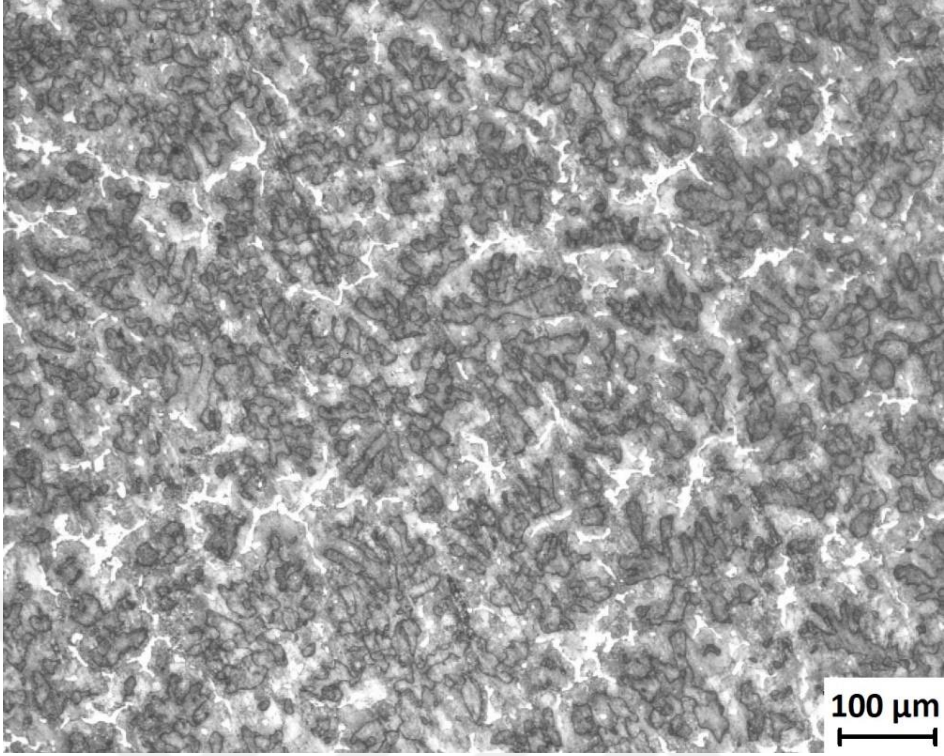
Tablo 9. Üretilen alaşımların kimyasal bileşimi

Alaşım	Kimyasal Bileşim(%)		
	Zn	Al	Cu
Zn-27Al-2Cu	70,1	27,6	2,3
Zn-27Al-3Cu	69,5	27,5	3
Zn-27Al-4Cu	67,9	27,9	4,2
Zn-27Al-5Cu	67,1	27,7	5,2

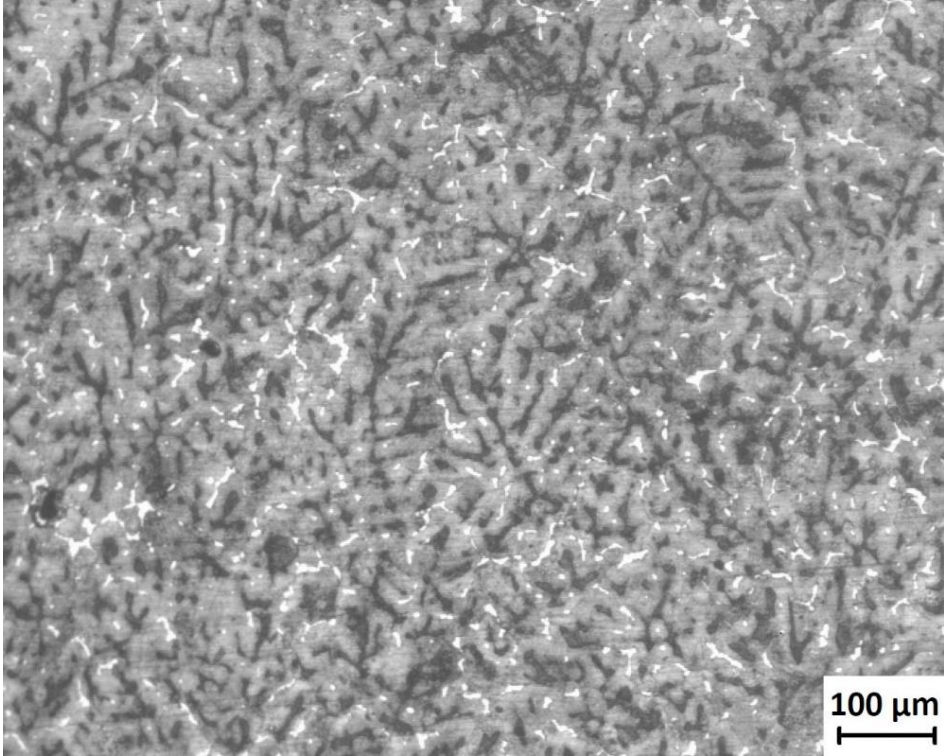
3.2. Yapısal İncelemelerden Elde Edilen Bulgular

Üçlü Zn-27Al-2Cu, Zn-27Al-3Cu, Zn-27Al-4Cu ve Zn27Al5Cu alaşımlarının içyapılarını gösteren fotoğraflar Şekil 8-11'de verilmiştir. Şekiller incelendiğinde alaşımın içyapısı alüminyumca zengin α dendritleri ile bunları çevreleyen çinkoca zengin η fazından oluşmaktadır. Zn27Al5Cu alaşımını oluşturan fazların detaylı görünümü Şekil 12' de verilmiştir. Fotoğraf incelendiğinde ötektoid dönüşüm sonucu lamelli yapıdaki α ve $\alpha+\eta$ ile çinkoca zengin η fazı ve bakırca zengin ϵ fazı görülmektedir.

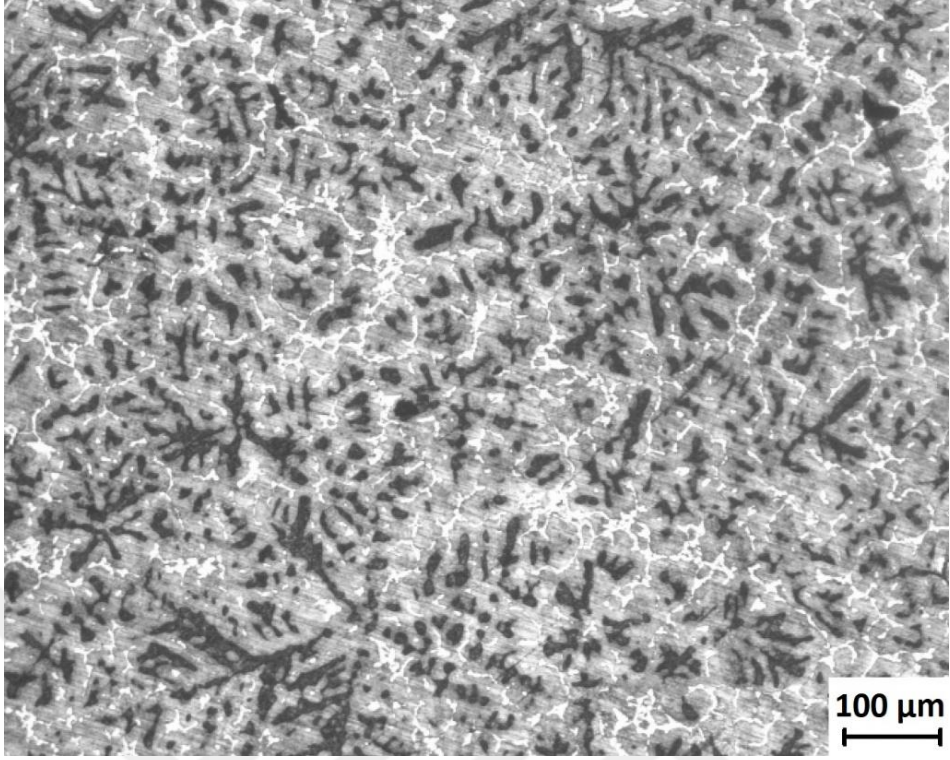
Optik mikroskoptan elde edilen Şekil 8-11 incelendiğinde bakır katkısının artmasıyla içyapı görüntüsünün farklılaşması dentritik kol aralığına dayandırılarak açıklanabilir. Şekil 11'de Zn-27Al-5Cu alaşımının alüminyumca zengin α fazındaki dentritik kol aralığı kısalmakta ve mukavemet artmaktadır. Dentritik kolun kısalması ile mukavemet arasındaki ilişki Tablo 7'de verilmiştir. Daha önce yapılan bir çalışma da bunu desteklemektedir [30].



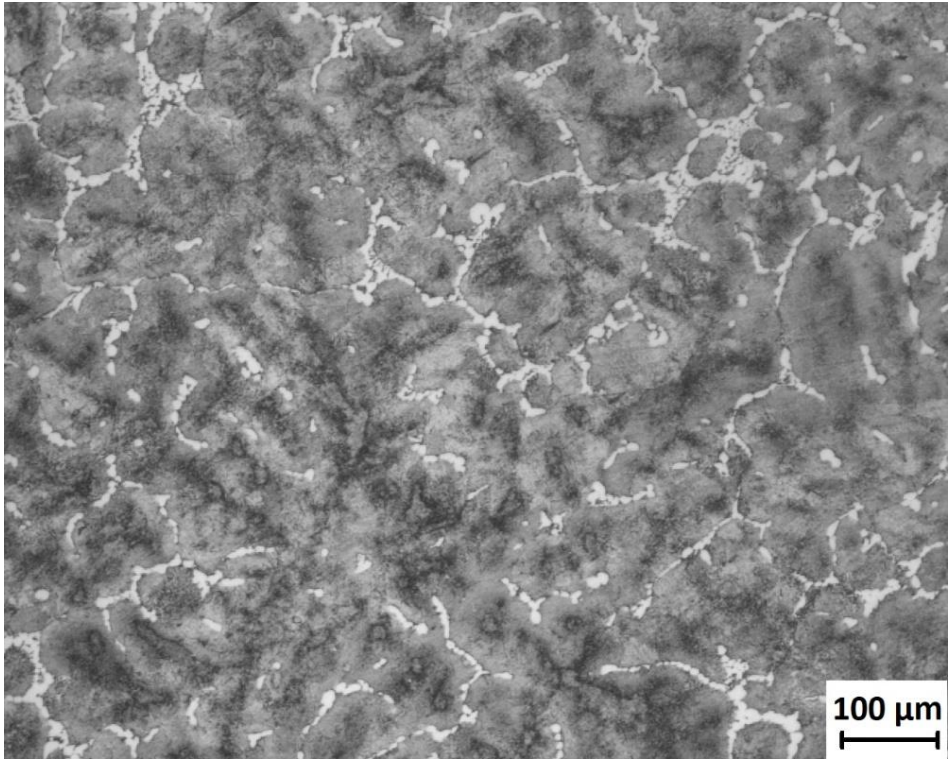
Şekil 8. Zn-27Al-2Cu alaşımının içyapısı



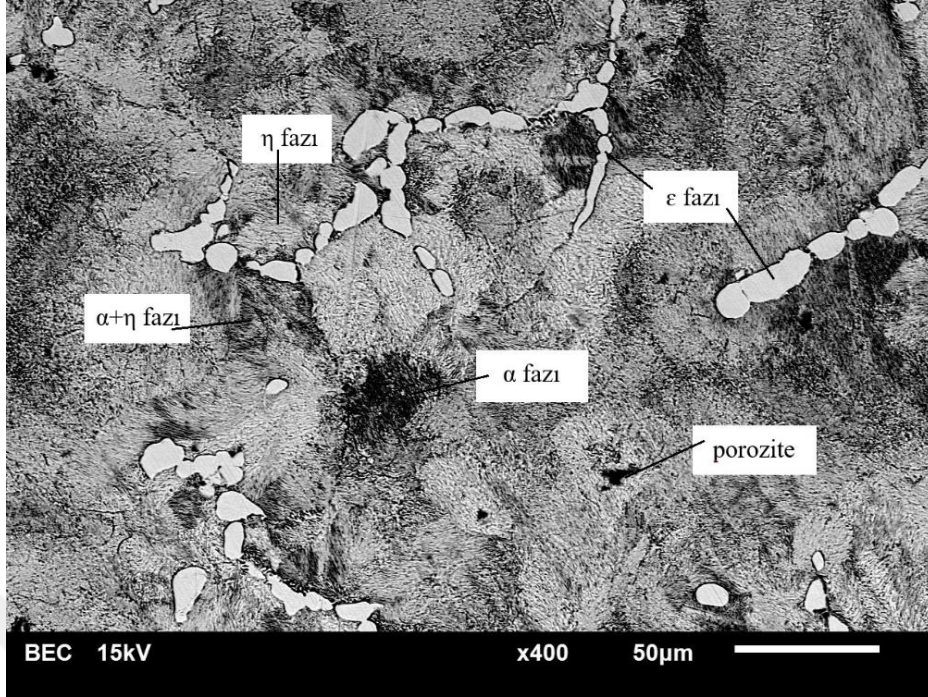
Şekil 9. Zn-27Al-3Cu alaşımının içyapısı



Şekil 10. Zn-27Al-4Cu alaşımının içyapısı



Şekil 11. Zn-27Al-5Cu alaşımının içyapısı



Şekil 12. Zn-27Al-5Cu alaşımının içyapısının detayını gösteren geri saçılım (backscatter) görüntüsü

3.3. Mekanik Deneylerden Elde Edilen Bulgular

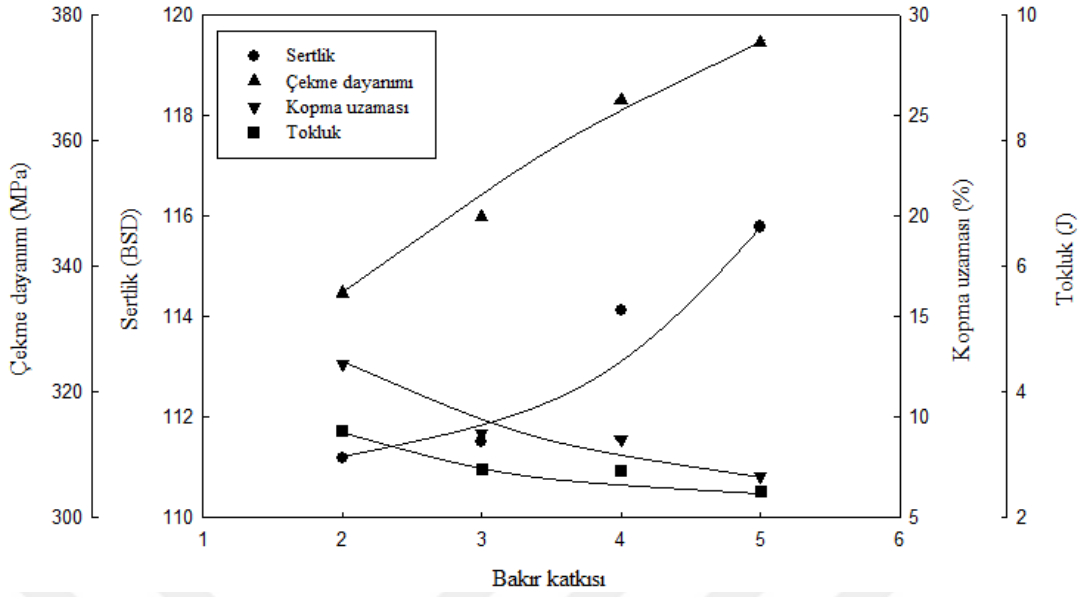
3.3.1. Sertlik, Çekme ve Darbe Deneylerinden Elde Edilen Bulgular

Üretilen alaşımların, yapılan deneyler sonucunda belirlenen sertlik, çekme dayanımı, kopma uzaması ve tokluk değerleri Tablo 10' da verilmiştir. Bu tabloda, alaşımın bakır katkısı arttıkça, sertlik ve çekme dayanımının arttığı, kopma uzaması ve tokluk değerlerinin azaldığı görülmektedir.

Tablo 10. Üretilen alaşımların sertlik, çekme dayanımı kopma uzaması ve tokluk değerleri

Alaşım	Sertlik (BSD)	Çekme Dayanımı (MPa)	Kopma Uzaması (%)	Tokluk [Darbe Enerjisi] (J)
Zn-27Al-2Cu	111,2	335,7	12,6	3,38
Zn-27Al-3Cu	111,5	347,9	9,2	2,78
Zn-27Al-4Cu	114,1	366,5	9	2,74
Zn-27Al-5Cu	115,8	375,7	7,1	2,43

Söz konusu alaşımların bazı mekanik özelliklerinin bakır katkısına göre değişimi Şekil 13’ deki grafikte verilmiştir. Söz konusu grafikte Zn-27Al alaşımına (% 2-5) oranında bakır katılmasıyla alaşımlardaki çekme dayanımı, sertlik, kopma uzaması ve tokluk değerlerinin değişimi görülmektedir. Grafik incelendiğinde, bakır oranının artmasıyla, alaşımın çekme dayanımı ve sertlik değerlerinin arttığı, kopma uzaması ve tokluk değerlerinin azaldığı görülmektedir. ZnAl₂₇Cu₅ alaşımı en yüksek çekme dayanımı ve sertlik özelliği gösterdiği, ZnAl₂₇Cu₂ alaşımının ise en yüksek kopma uzaması ve tokluk değeri gösterdiği anlaşılmıştır. Alaşımların kopma uzaması değerleri incelendiğinde bakır katkısı arttıkça kopma uzaması azalmıştır. Yani bakır katkısı ile alaşım bir miktar daha gevrekleşmiş buna bağlı olarak alaşımın kopma uzaması azalmış aynı doğrultuda tokluk da azalmıştır. Ancak kopma uzamasında ciddi bir farka ulaşılamamıştır. Yine bazı çalışmalarda bakır katkısı ile çinko-alüminyum alaşımlarının mekanik özelliklerinin iyileştiği ve bu durumun da katı çözelti sertleştirme mekanizmasına dayandığı bilinmektedir [36, 41]. Bu çalışmada da bakır katkısı ile alaşımlardaki katı çözelti sertleştirme mekanizması arttığı için çekme dayanımı ve sertlik artmıştır.



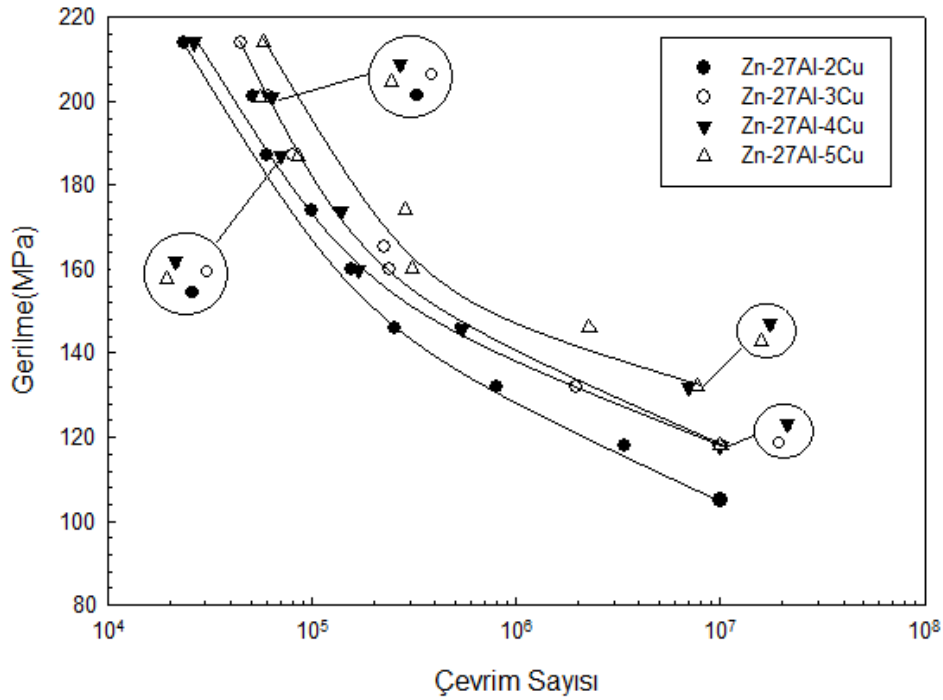
Şekil 13. Alaşımların mekanik özelliklerinin bakır katkısı ile değişimini gösteren grafik

3.3.2. Yorulma Deneylerinden Elde Edilen Bulgular

Zn-27Al-2Cu, Zn-27Al-3Cu, Zn-27Al-4Cu ve Zn-27Al-5Cu alaşımlarının farklı gerilmeler altında yapılan yorulma deneylerinden elde edilen bulgular Tablo 11’de verilmiştir. Bu tabloda yorulma örneklerine uygulanan gerilmeler ile söz konusu örneklerin kırılmasına kadar geçen çevrim sayıları yer almaktadır. Tabloda verilen (>) işareti çevrim sayısının 10.000.000’ u aşmasına karşın örneklerin kırılmadığını göstermektedir. Yorulma deneylerinden elde edilen verilerden yararlanılarak çizilen gerilme-çevrim sayısı (S-N) eğrileri ise Şekil 14’te verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi alaşıma uygulanan gerilme değeri düştükçe, alaşımın kırılana kadar geçen çevrim sayısı artmaktadır.

Tablo 11. Söz konusu alaşımlara ait yorulma deney sonuçları

Gerilme (MPa)	Çevrim Sayısı			
	Zn-27Al-2Cu	Zn-27Al-3Cu	Zn-27Al-4Cu	Zn-27Al-5Cu
105	>10x10 ⁶	-	-	-
118	3411140	>10x10 ⁶	>10x10 ⁶	>10x10 ⁶
132	805820	1950750	7565800	7656600
146	251970	538800	542370	2274510
160	154520	240690	168440	309750
174	98960	345765	137370	285020
187	59410	79980	70420	84910
201	51535	61036	63050	55420
214	23560	44360	26360	57190



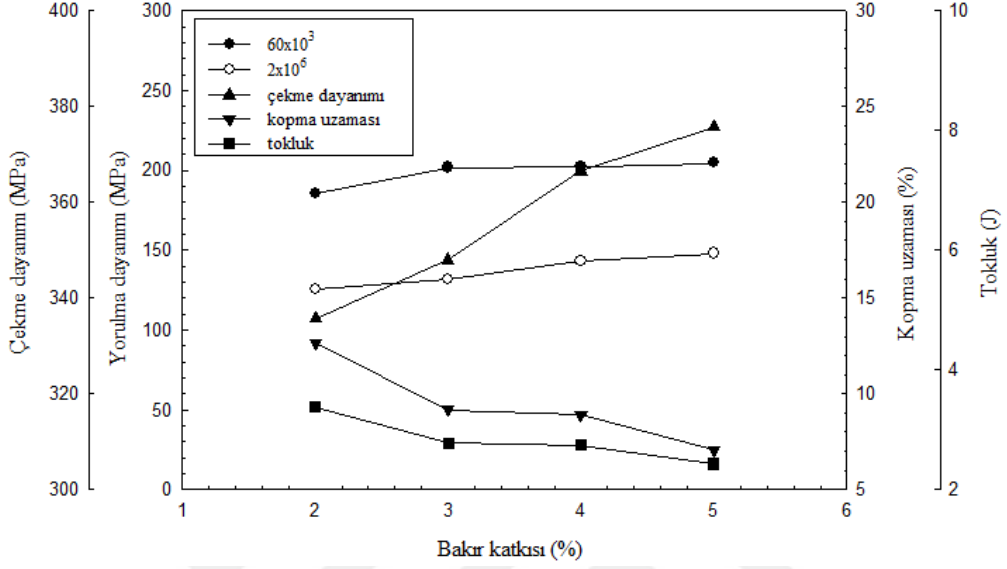
Şekil 14. Zn-27Al-2Cu, Zn-27Al-3Cu, Zn-27Al-4Cu, Zn-27Al-5Cu alaşımlarının gerilme-çevrim sayısı eğrileri

3.3.2.1. Yorulma Deneylerinden Elde Edilen Verilerin Korelasyonu

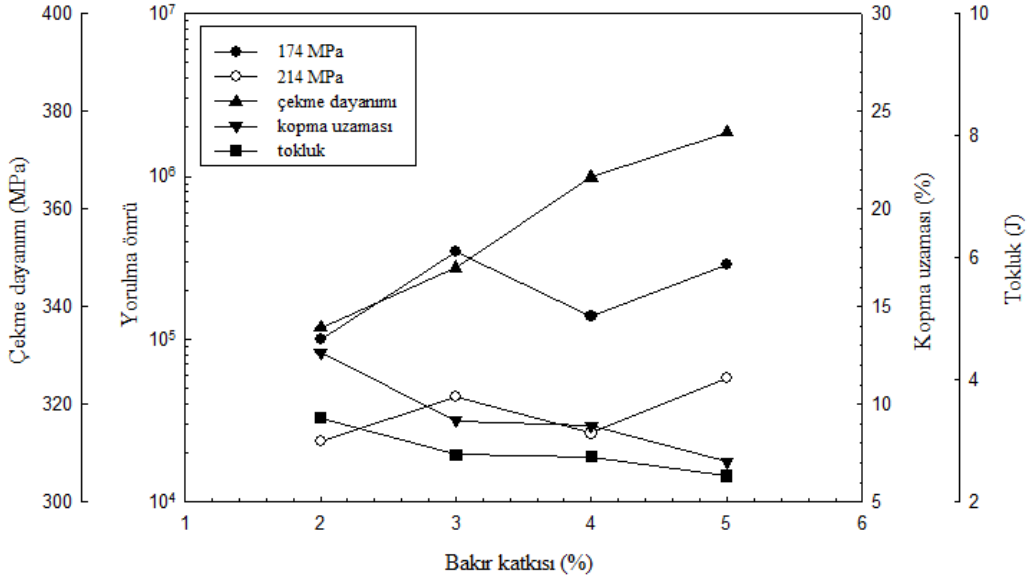
Bakır katkısının alaşımların yorulma özelliklerine etkisini incelemek amacıyla, yorulma deneylerinden elde edilen verilerden yararlanılarak, bakır katkısının yorulma ömrü ve yorulma dayanımına göre değişimini gösteren eğriler Şekil 15 ve Şekil 16'da çizilmiştir. Ayrıca mekanik özelliklerle ilişkileri ortaya koymak amacıyla, çekme dayanımı, kopma uzaması ve tokluk değerlerinin bakır oranının artışına göre değişimini gösteren eğriler de bu grafiklere eklenmiştir. Şekil 15 alaşımların düşük ($N_f \leq 60 \times 10^3$) ve yüksek ($N_f \geq 2 \times 10^6$) çevrim sayısında gerçekleştirilen yorulma deneylerinden elde edilen yorulma dayanım değerlerinin, Şekil 16 ise bu alaşımın farklı gerilme seviyelerindeki (174 ve 214 MPa) yorulma ömrü değerlerinin bakır oranına göre değişimini göstermektedir.

Şekillerden en yüksek yorulma dayanımı ve yorulma ömrü değerlerinin Zn-27Al-5Cu alaşımından, en düşük değerlerin ise Zn-27Al-2Cu alaşımından elde edildiği, yani yorulma dayanımı ve yorulma ömrünün artan bakır oranıyla az da olsa arttığı görülmektedir. Ancak, yorulma ömrünün %4 bakır oranında bir miktar azaldığı göze çarpmaktadır. Ayrıca, çekme dayanımı değerlerinin bakır oranı arttıkça arttığı, kopma uzaması ve tokluk

değerlerinin ise artan bakır katkısıyla azaldığı görülmektedir. Bu verilere göre yorulma dayanımı ve yorulma ömrü değerlerinin çekme dayanımı ile doğru orantılı, kopma uzaması ve tokluk değerleri ile ters orantılı olarak değiştiği sonucuna varılabilir.



Şekil 15. Alaşımların yorulma dayanımı, çekme dayanımı, kopma uzaması ve tokluk değerlerinin bakır katkısına göre değişimi



Şekil 16. Alaşımların yorulma ömrü, çekme dayanımı, kopma uzaması ve tokluk değerlerinin bakır katkısına göre değişimi

Uzun ömürlü yorulmada, ortalama gerilmenin sıfır olması durumunda malzemelerin yorulma dayanımı ve yorulma ömrü arasında aşağıdaki formülle ifade edilen Basquin bağıntısının geçerli olduğu bilinmektedir [42].

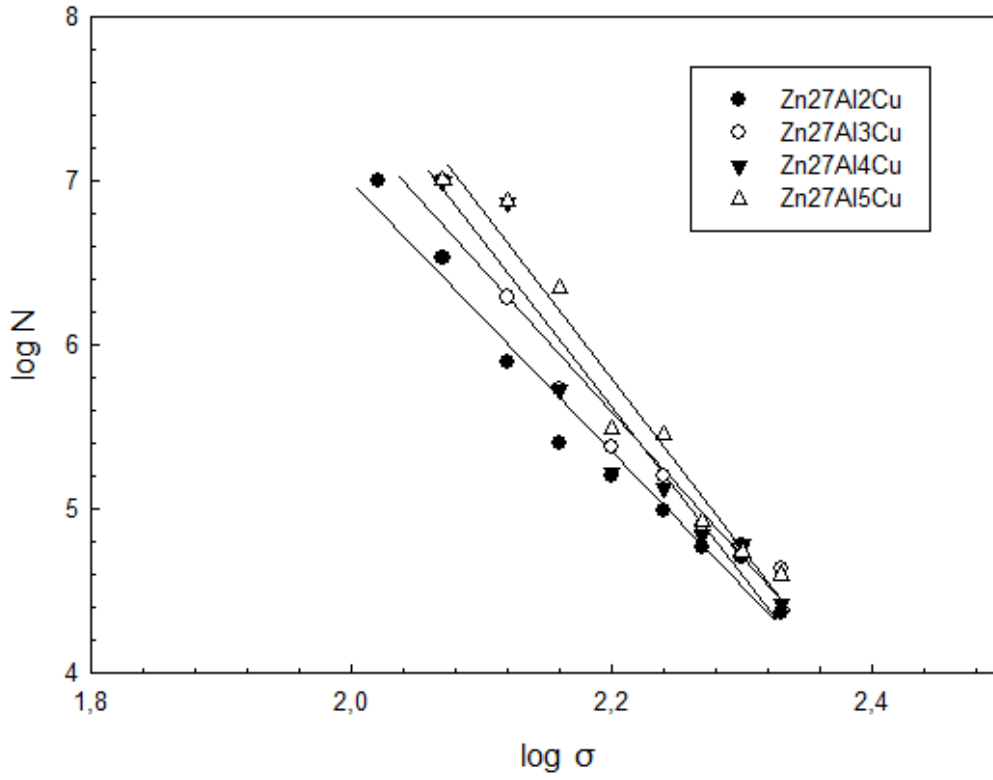
$$N=A \sigma^{-k} \quad (3)$$

Burada σ gerilme genliği, N örnek kırılıncaya kadar dayanabildiği çevrim sayısı yani yorulma ömrü, k ve A sabitlerdir. Bu bağıntının logaritması alındığında söz konusu bağıntı,

$$\log N = -k \log \sigma + \log A \quad (4)$$

şeklinde ifade edilebilir. Eğer Basquin bağıntısı bir malzeme için geçerli ise $\log N$ 'nin $\log \sigma$ 'ya göre değişiminin lineer yani doğru biçiminde olması ve bu doğrunun eğiminin de k olması gerekir [21]. Daha önce yapılan çalışmalarda, Zn-Al alaşımlarının gerek kuru hava, gerekse NaCl ve HCl gibi değişik korozyon ortamlarındaki yorulma davranışının [36, 40] ve ayrıca eş kanalda açısız ekstrüzyon yöntemi uygulanmış Zn-60Al ve Zn-80Al alaşımlarının yorulma davranışlarının [21] Basquin bağıntısı ile ifade edilebileceği belirlenmiştir. Bu çalışmada ise Zn₂₇Al₂Cu, Zn₂₇Al₃Cu, Zn₂₇Al₄Cu, Zn₂₇Al₅Cu alaşımlarının yorulma deneylerinden elde edilen veriler kullanılarak çizilen ve yorulma ömrünün ($\log N$) gerilme genliğine ($\log \sigma$) göre değişimini gösteren doğruları içeren grafik Şekil 17'de verilmiştir. En küçük kareler yöntemi kullanılarak elde edilen bu doğruların korelasyon katsayılarının (c) 1'e çok yakın olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle, alaşımların yorulma davranışının Basquin bağıntısı ile ifade edilebileceği sonucuna varılmıştır.

Söz konusu alaşımların k ve A sabitleri ile c (korelasyon katsayısı) değerleri belirlenmiş ve bu değerler Tablo 12'de verilmiştir. Bu tablodan, söz konusu alaşımların en yüksek k ve A değerleri Zn-27Al-5Cu, en düşük değerler ise Zn-27Al-2Cu alaşımında görülmüştür.



Şekil 17. Zn-27Al-(%2-5) alaşımlarının $\log \sigma - \log N$ eğrileri

Tablo 12. Söz konusu alaşımların k A sabitleri ve c (kolerasyon katsayısı) değerleri

Alaşım	k	A	c
Zn-27Al-2Cu	5,6388	17,643	0,92
Zn-27Al-3Cu	8,6559	24,693	0,90
Zn-27Al-4Cu	10,032	27,907	0,90
Zn-27Al-5Cu	10,280	28,26	0,95

3.3.2.2. Yorulma Örneklerinin Kırılma Yüzeylerinin İncelenmesinden Elde Edilen Bulgular

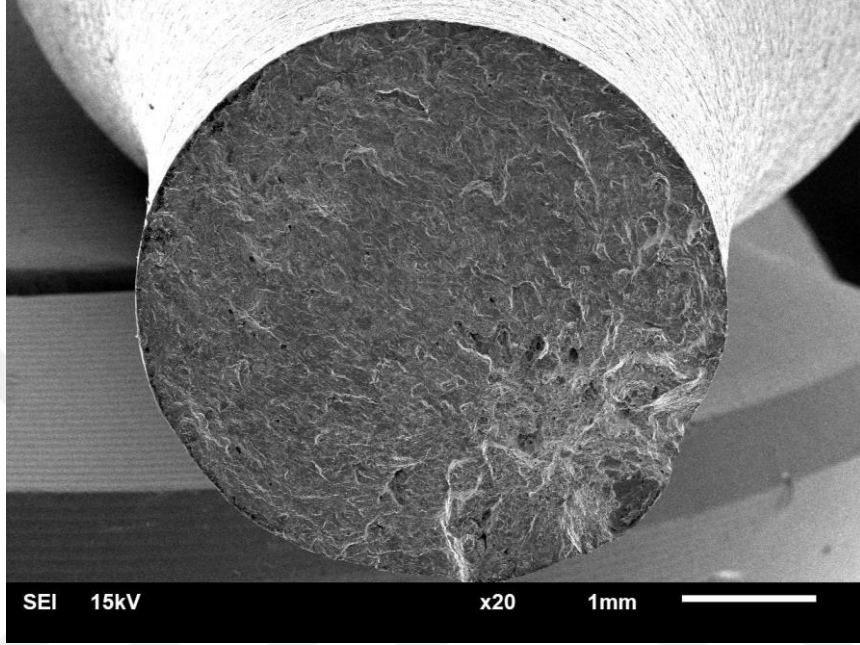
Zn-27Al-2Cu, Zn-27Al-3Cu, Zn-27Al-4Cu, Zn-27Al-5Cu alaşımlarına ait yorulma örneklerinin kırık yüzeylerini gösteren SEM fotoğrafları Şekil 18-24'de verilmiştir. Alaşımların kırılma yüzeyleri incelendiğinde genelde pürüzlü bir yüzeye sahip olduğu ve porozite içerdiği gözlenmiş ve alaşımların tümü gevrek kırılma davranışı sergilemiştir.

Şekil 18'da 132 MPa gerilme değerinde yorulma deneyine tabi tutulan Zn-27Al-2Cu alaşımının kırılma yüzeyi görülmektedir. Şekil 24'de aynı gerilme değerinde yorulma deneyine tabi tutulan Zn-27Al-5Cu alaşımının kırılma yüzeyini göstermektedir. Bu iki şekildeki fotoğraflar karşılaştırıldığında Zn-27Al-2Cu alaşımında mikro boşlukların daha fazla olduğu görülmektedir. Şekil 20 ve Şekil 21'de Zn-27Al-3Cu alaşımının 132 MPa ve 187 MPa gerilme değerinde yorulma deneyinin sonucunda kırılma yüzeyi görülmektedir. Alaşıma uygulanan gerilme değerleri arttıkça alaşım daha gevrek bir kırılma davranışı sergilemektedir. Şekil 22, 132 MPa gerilme değerinde yorulma deneyine tabi tutulan Zn-27Al-4Cu alaşımının kırılma yüzeyini göstermektedir. Şekil 23'de 187 MPa gerilme değerinde yorulma deneyine tabi tutulan Zn-27Al-4Cu alaşımının kırılma yüzeyinin detayı verilmiştir. Burada yorulma çatlakları poroziteden başlayıp tane sınırı boyunca ilerlemektedir.

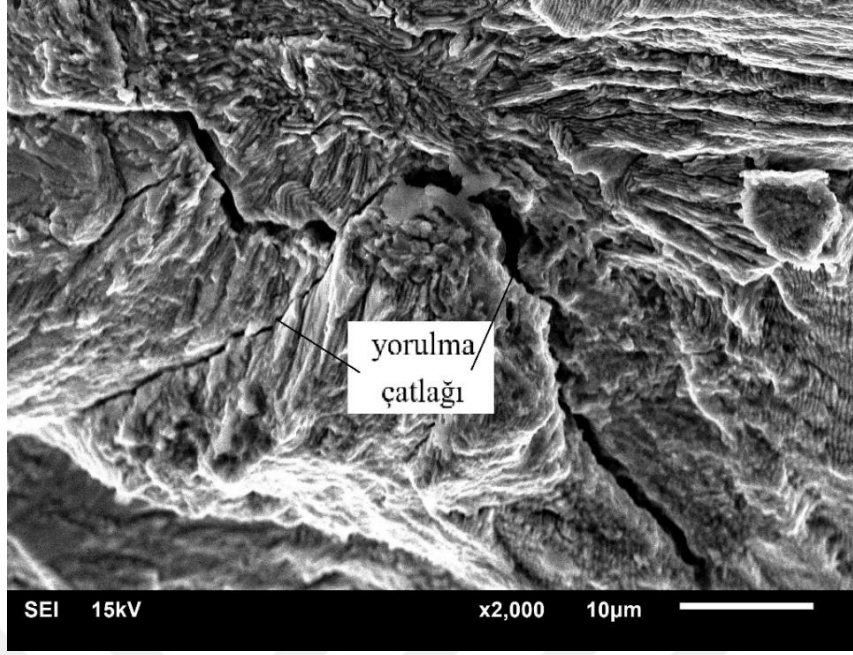
Bakır katkısı ile alaşımların fazlarını belirlemek için alaşımlarının renkli EDS analizleri yapılmış ve bu analiz fotoğrafları arasından Zn-27Al-3Cu ve Zn-27Al-5Cu alaşımlarının EDS analiz sonuçları Şekil 25 ve Şekil 26'de verilmiştir. Bu şekiller incelendiğinde Zn-Al esaslı alaşımlara katılan bakır katkısı arttıkça bakırca zengin ϵ fazının miktarlarında önemli bir değişiklik olmadığı görülmüştür. Hatta bakırca zengin ϵ fazının miktarının artan Cu katkısı ile bir miktar azaldığı görülmektedir.

Zn-27Al-(2-5)Cu alaşımlarının yorulma deneyi sonucu oluşan kırılma yüzeylerinde meydana gelen kırılmanın ve çatlak oluşumunun hangi faz bölgelerinde gerçekleştiğini belirlemek amacıyla alaşımların kırık yüzeylerinin boyuna kesiti alınarak söz konusu bölgelerin standart metalografi yöntemiyle içyapıları incelenmiştir. Bu numunelere ait kırılma yüzeylerinin yorulma çatlakları içeren detaylı görüntüleri Şekil 27-29'da verilmiştir. Zn-27Al-3Cu alaşımının kırılma yüzeyini gösteren fotoğraf Şekil 27'de verilmiştir. Burada yorulma çatlaklarının yüzeyden başlayarak iç kısımlara doğru ilerlediği görülmektedir. Şekil 28'da Zn-27Al-3Cu alaşımına ait yorulma çatlakları yüzeyden başlayıp bakırca zengin ϵ fazına doğru ilerlediği, ϵ fazına ulaştıktan sonra çatlakların ilerlemesinin durduğu görülmektedir. Yani ϵ fazının çatlak ilerlemesini engelleyici bir etki yaptığı sonucuna

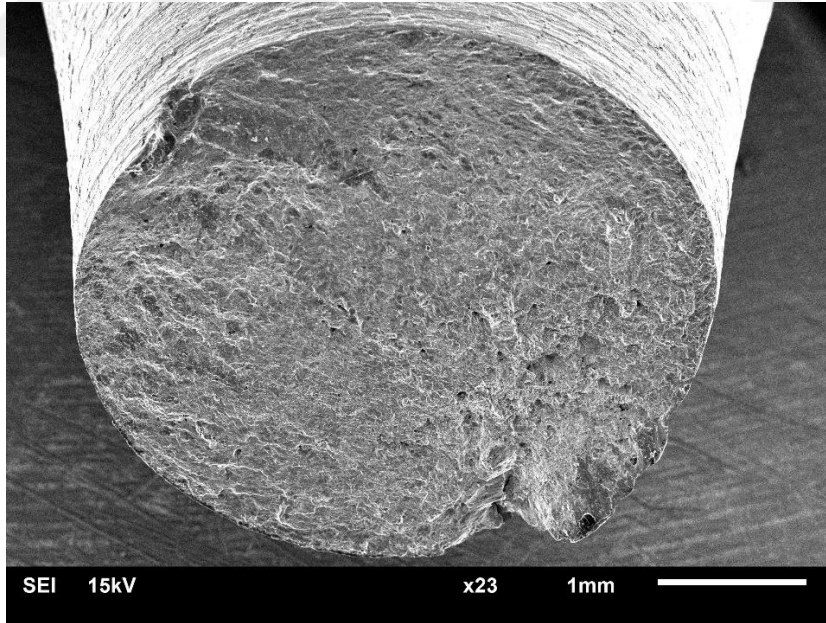
ulaşılmaktadır. Şekil 29’da Zn-27Al-2Cu alaşımındaki kırılma yüzeyleri incelenmiştir ve kırılma genelde çinkoca zengin $\alpha + \eta$ fazlarının bulunduğu bölgelerde gerçekleşmiş, bakırca zengin ϵ fazında çatlak görülmemiştir.



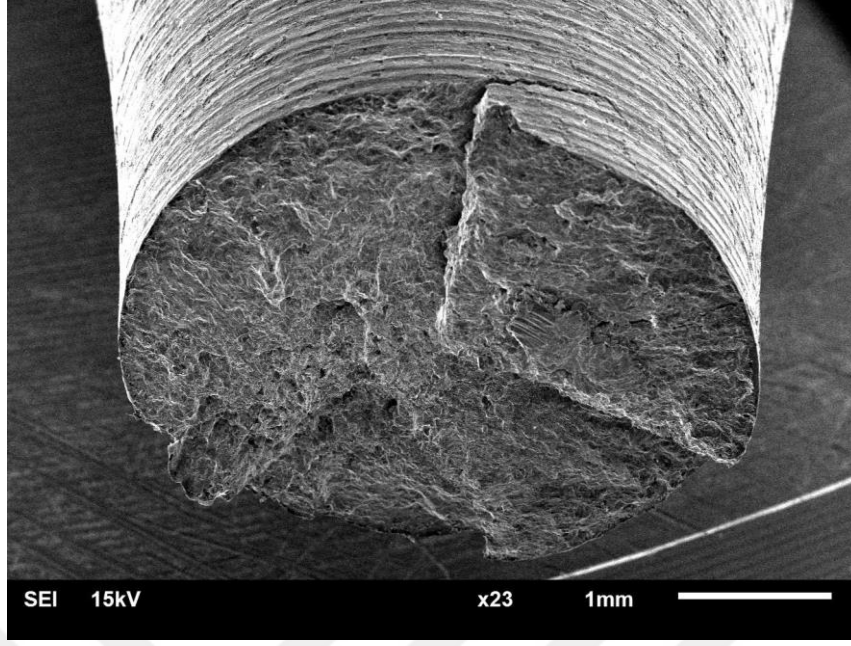
Şekil 18. 132 MPa gerilme değerinde yorulma deneyine tabi tutulan Zn-27Al-2Cu alaşımına ait numunenin kırılma yüzeyini gösteren SEM fotoğrafı



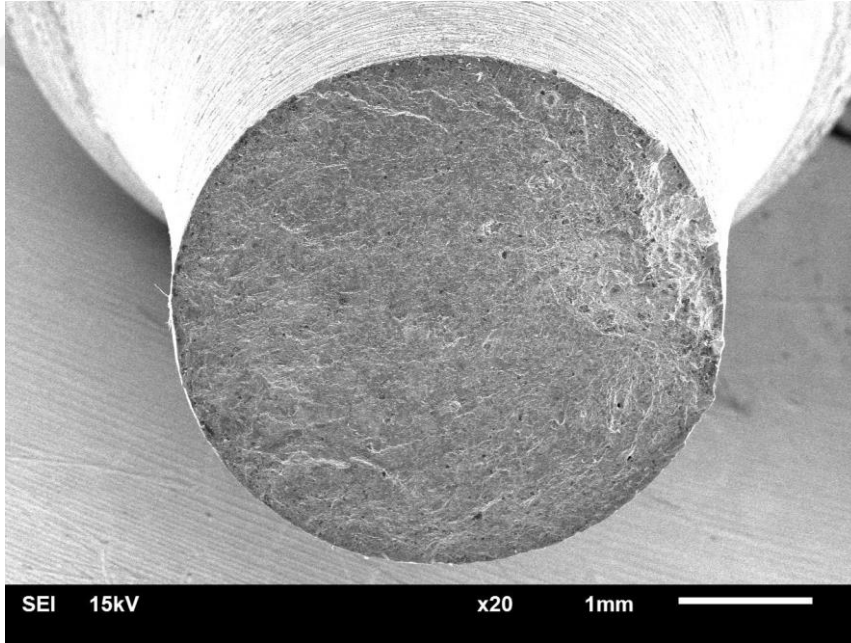
Şekil 19. 132 MPa gerilme değerinde yorulma deneyine tabi tutulan Zn-27Al-2Cu alaşımına ait numunenin kırılma yüzeyinin detayını gösteren SEM fotoğrafı



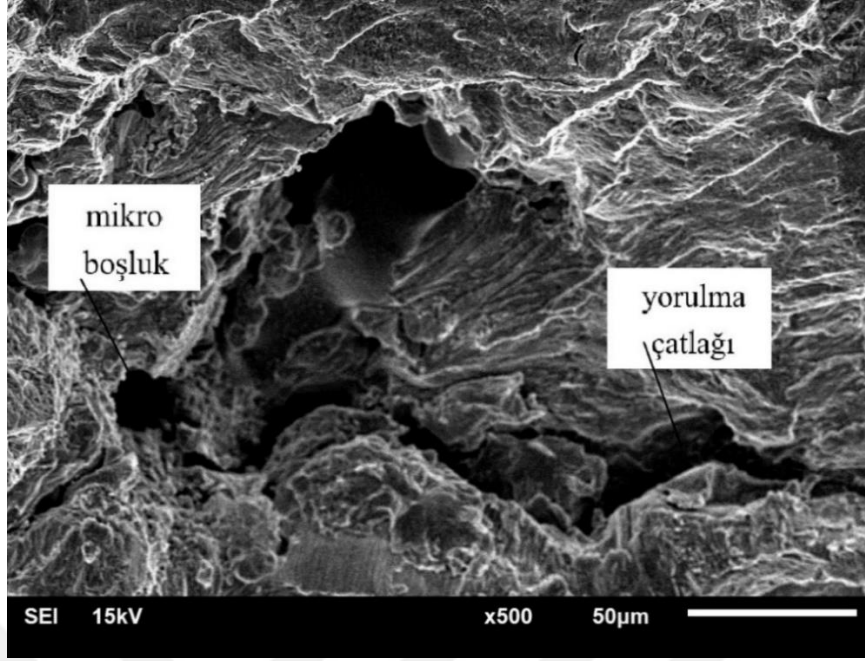
Şekil 20. 132 MPa gerilme değerinde yorulma deneyine tabi tutulan Zn-27Al-3Cu alaşımına ait numunenin kırılma yüzeyini gösteren SEM fotoğrafı



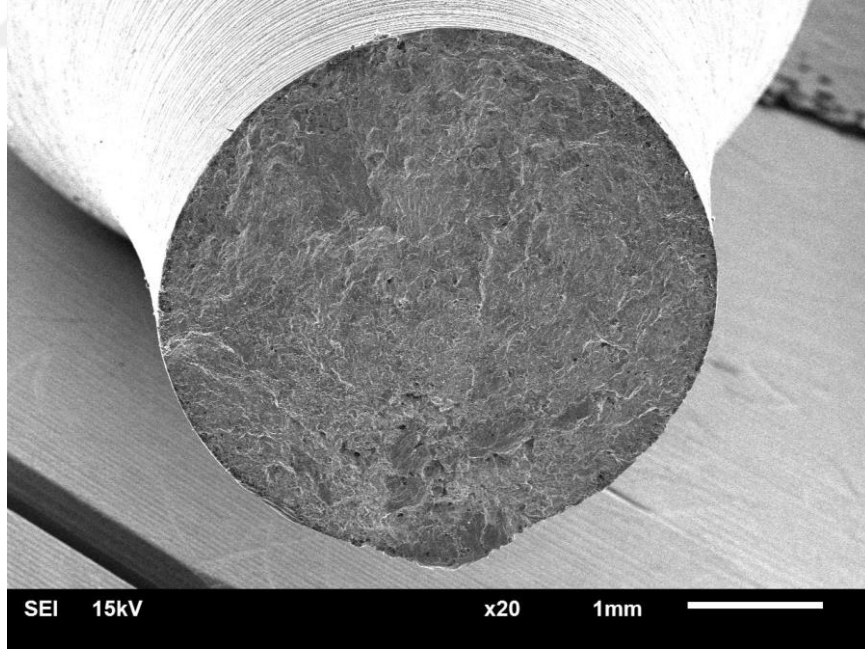
Şekil 21. 187 MPa gerilme değerinde yorulma deneyine tabi tutulan Zn-27Al-3Cu alaşımına ait numunenin kırılma yüzeyini gösteren SEM fotoğrafı



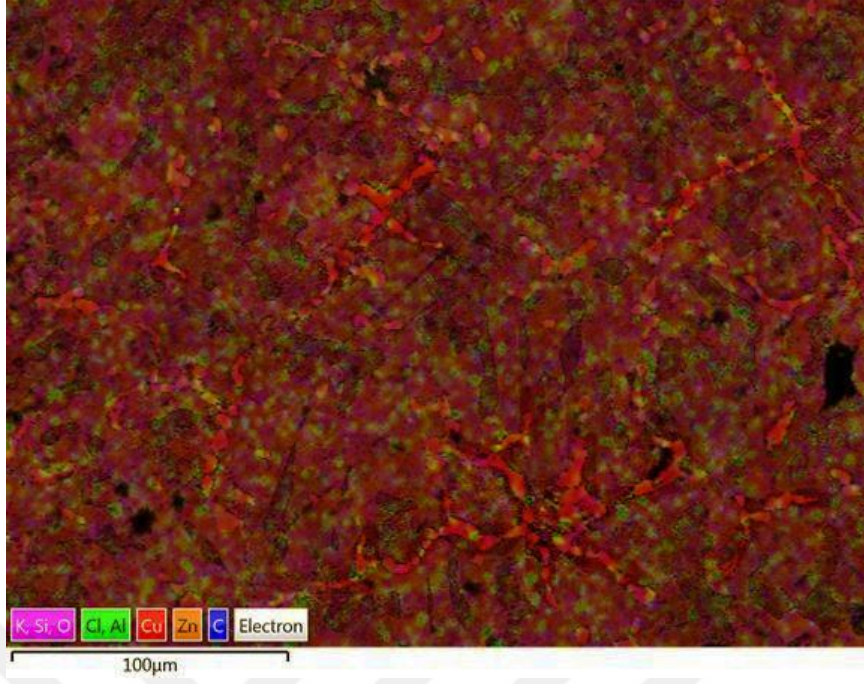
Şekil 22. 132 MPa gerilme değerinde yorulma deneyine tabi tutulan Zn-27Al-4Cu alaşımına ait numunenin kırılma yüzeyini gösteren SEM fotoğrafı



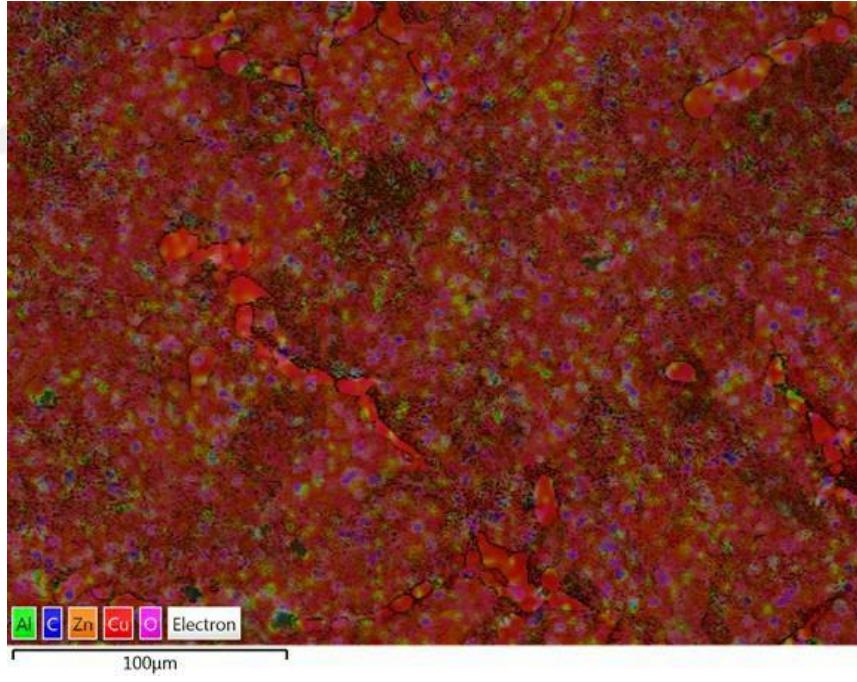
Şekil 23. 187 MPa gerilme değerinde yorulma deneyine tabi tutulan Zn-27Al-4Cu alaşımına ait numunenin kırılma yüzeyinin detayını gösteren SEM fotoğrafı



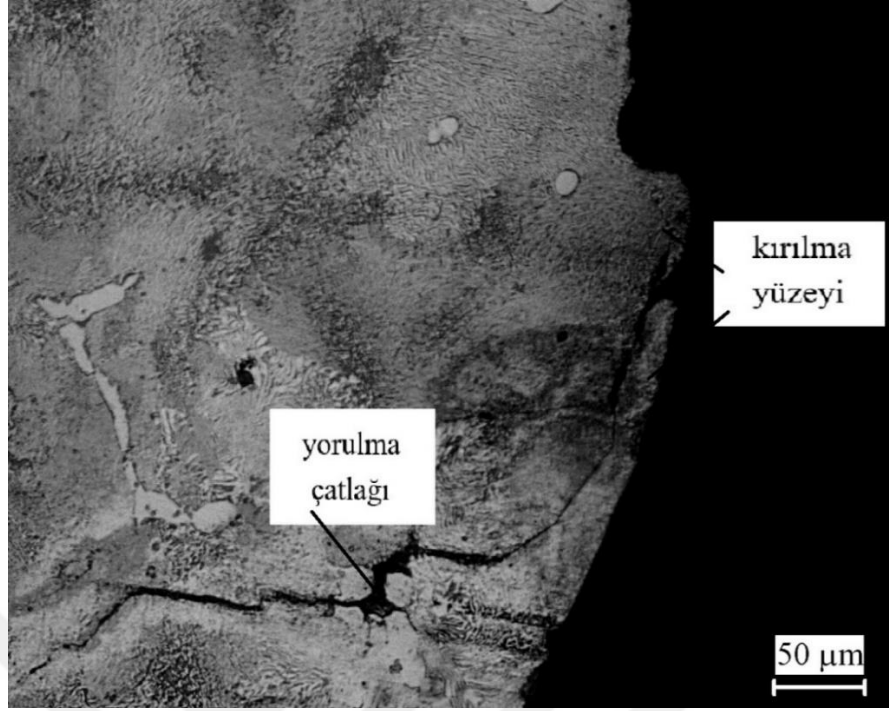
Şekil 24. 132 MPa gerilme değerinde yorulma deneyine tabi tutulan Zn-27Al-5Cu alaşımına ait numunenin kırılma yüzeyini gösteren SEM fotoğrafı



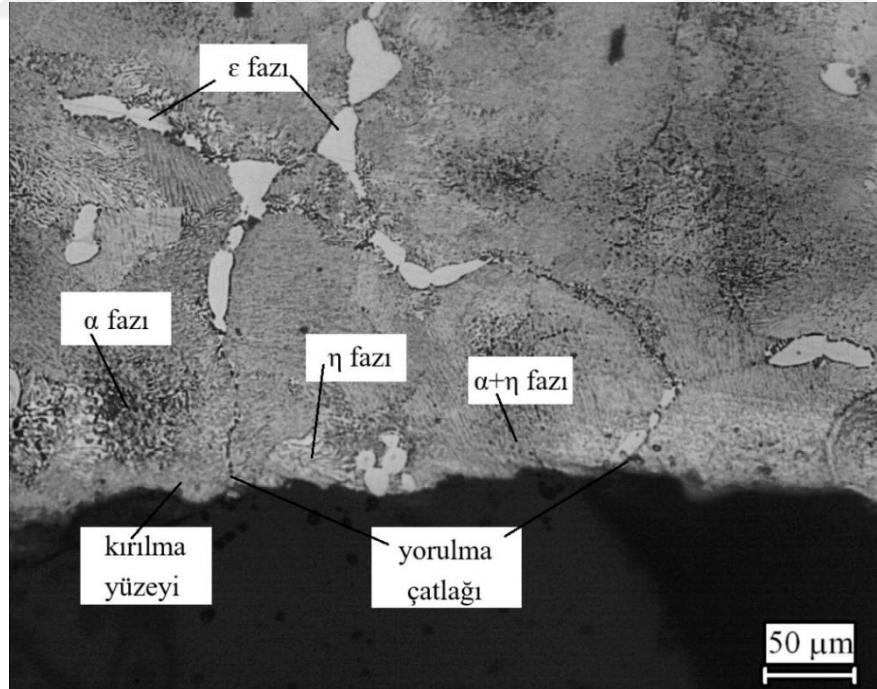
Şekil 25. Zn-27Al-3Cu alaşımına ait renkli EDS analizi



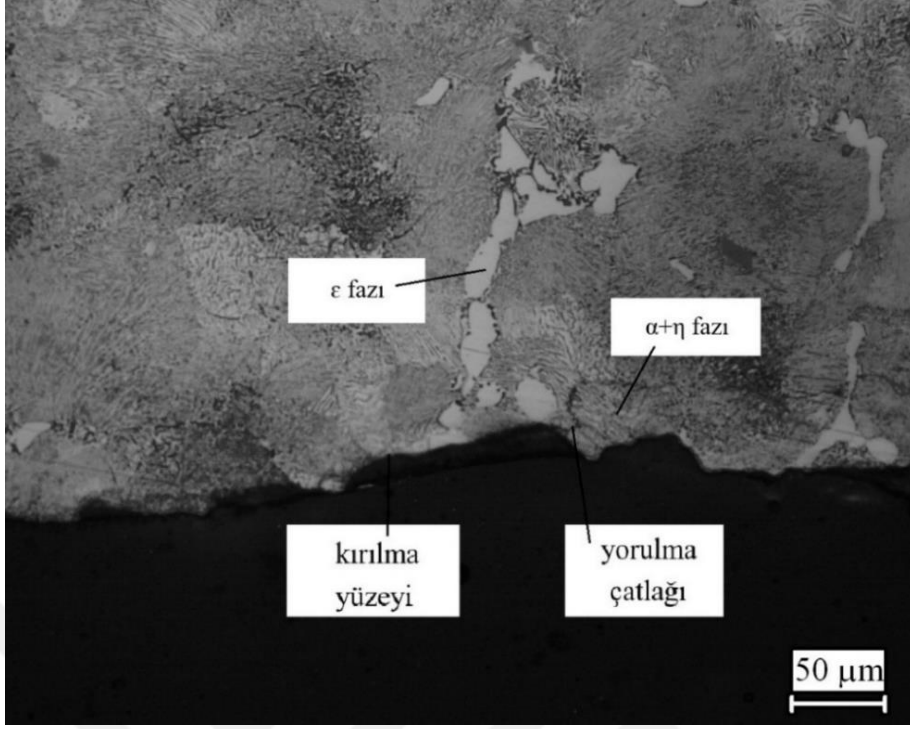
Şekil 26. Zn-27Al-5Cu alaşımına ait renkli EDS analizi



Şekil 27. Yorulma deneyine tabi tutulan Zn-27Al-3Cu alaşımına ait örneğin yorulma çatlağının detayını gösteren fotoğrafı



Şekil 28. Yorulma deneyine tabi tutulan Zn-27Al-3Cu alaşımına ait örneğin yorulma çatlağının detayını gösteren fotoğrafı



Şekil 29. Yorulma deneyine tabi tutulan Zn-27Al-2Cu alaşımına ait örneğin yorulma çatlağının detayını gösteren fotoğraf

4. İRDELEME

Bu çalışmada incelenen Zn-27Al-2Cu, Zn-27Al-3Cu Zn-27Al-4Cu Zn-27Al-5Cu alaşımlarının içyapısının alüminyumca zengin α dendritleri ile bunları çevreleyen çinkoca zengin η ve ötektoid $\alpha + \eta$ fazlarından oluştuğu (Şekil 9-12) ve dendritler arası bölgelerde bakırca zengin ε (CuZn₄) fazının yer aldığı (Şekil 13) görüldü. Ayrıca, Zn-27Al alaşımına katılan Cu oranının arttırılmasıyla, alüminyumca zengin α fazının ikincil dentritik kol aralığının küçüldüğü görüldü. İkincil dentritik kol aralığının küçülmesinin ise daha sonra açıklanacağı üzere alaşımın mukavemetinde meydana gelen artışa neden olduğu düşünülmektedir. Literatürde bu tespiti doğrulayan bazı araştırmalara rastlanmıştır [30, 32].

Çinko-alüminyum alaşımlarının mukavemet değerlerini arttırmak için uygulanan yöntemlerin başında alaşım elementi katkısının geldiği bilinmektedir [4, 5, 22, 23, 26, 41, 43]. Bu çalışmada Zn-27Al alaşımına farklı oranlarda (%2-5) Cu katılarak, bakır katkısının ikili Zn-27Al alaşımının mekanik özelliklerine etkisi incelenmiş ve Cu katkısıyla mukavemet değerlerinde önemli artışlar elde edilmiştir. Şöyle ki; alaşıma %2-5 oranlarında katılan bakırın alaşımın sertlik ve çekme dayanımını arttırdığı görülmektedir, Tablo11. Öte yandan, kopma uzaması ve tokluk değerlerinin ise azaldığı belirlenmiştir. En yüksek sertlik ve çekme dayanımı Zn-27Al-5Cu alaşımından, en yüksek kopma uzaması ve tokluk değerleri ise Zn-27Al-2Cu alaşımından elde edilmiştir. Daha önce yapılan bazı çalışmalarda [22, 23, 32, 36] Zn-Al esaslı alaşımlara bakır katkısı ile mukavemet değerlerinin artması katı çözelti sertleşmesi mekanizmasına dayandırılarak açıklanmıştır. Bu çalışmalarda bakır katkısı ile alaşımların mukavemet değerlerinin arttığı ancak %2 Cu katkısından sonra alaşımların mukavemetinin azaldığı görülmüştür. Bu durum şöyle açıklanmıştır; Zn-Al alaşımlarına Cu katıldığında yapıda ε , θ ve T' gibi intermetalik fazlar oluşur. %2'ye kadar bakır katkısında yapıda katı çözelti sertleşmesi mekanizması etkin olduğu için mukavemeti arttırmıştır. Ancak bakır oranı arttıkça (>%2) bakırın çoğu intermetalik fazların oluşumuna harcandığından katı çözelti sertleşmesi mekanizması için gerekli olan bakırın azalmasıyla söz konusu mekanizmanın etkisini kaybettiği ileri sürülmüştür. Bu çalışmalarda bakır katkısı ile sertliğin sürekli arttığı tespit edilmiştir. Bunun nedeninin ise bakır oranının artması ile alaşımda oluşan yüksek sertliği sahip intermetalik fazların olduğu ifade edilmiştir. Yine bu çalışmalarda alaşımlara katılan bakır ile alaşımların kopma uzaması ve tokluk değerlerinin azaldığı görülmüştür. Bu durumun ise bakır katkısı ile yapının daha gevrek bir hale gelmiş olmasından kaynaklandığı ve buna bağlı olarak alaşımda bakır oranı arttıkça kopma uzaması

ve tokluk değerinin azaldığı ileri sürülmüştür. Ancak bu çalışmada mukavemet değerlerinin bakır katkısı ile sürekli arttığı görülmüştür. Bu nedenle daha önceki çalışmaların aksine katı çözelti sertleşmesi mekanizmasının etkinliğinin, artan bakır oranı ile azalmadığı söylenebilir. Nitekim, yapılan EDS analizleri sonunda (Şekil 26,27) bakır oranının artması ile yapıda oluşan bakırca zengin ϵ fazının miktarında önemli bir değişiklik olmadığı, hatta bu fazların bir miktar azaldığı belirlenmiştir. Bu sonuç yapıda bulunan bakırın katı çözelti sertleşmesi için kullanıldığı anlamına gelmektedir. Yani mukavemetin, artan bakır ile sürekli artmasının nedeninin katı çözelti sertleşmesi mekanizmasının etkinliğinin devam etmesi olduğu sonucuna varılabilir. Ayrıca mukavemet artışının bir başka nedeninin yapıda oluşan mikro boşlukların azalması olduğu düşünülmektedir. Nitekim, alaşıma ait örneklerin kırık yüzeyleri üzerinde yapılan SEM incelemeleri sonunda bu tespiti doğrulayan verilere ulaşılmıştır. Şöyle ki; Şekil 19'da Zn-27Al-2Cu alaşımına ait yorulma örneklerinin kırık yüzeylerinde, Zn-27Al-5Cu alaşımına ait yorulma örneklerinin kırık yüzeylerinden daha fazla mikro boşluk olduğu tespit edilmiştir (Şekil 19,25). Mikro boşlukların oranının azalması mukavemet değerini bir miktar arttırmıştır. Nitekim, yapıda oluşan mikro boşlukların mukavemeti olumsuz etkileyen bir unsur olduğu bilinmektedir [44].

Şekil 15'teki gerilme-çevrim sayısı (S-N) eğrileri incelendiğinde, yorulma deneyi için uygulanan gerilme değeri düştükçe alaşımların kırılmasına kadar geçen çevrim sayısı değerlerinin arttığı görülmektedir. Bu durum bu alaşımlardan elde edilen verilerin literatürde verilen Wöhler eğrileri ile uyumlu olduğunu göstermektedir. Ayrıca, Şekil 15'teki eğrilerden en uzun yorulma ömrünün veya en yüksek yorulma dayanımının, en yüksek mukavemet değerlerine sahip olan Zn-27Al-5Cu alaşımından elde edildiğini göstermektedir. Bu nedenle bakır katkısı ile çinko-alüminyum alaşımlarının sertlik ve mukavemet değerlerinde elde edilen artışın, bu alaşımların yorulma davranışlarını da iyileştirdiği söylenebilir.

Zn-27Al-(2-5)Cu alaşımlarında oluşan yorulma çatlaklarının nasıl ilerlediğini belirlemek için yorulma numunelerinin kırık yüzeyleri boyuna kesilerek elde edilen numunelere standart metalografi yöntemi uygulanmıştır. Söz konusu yüzeyin optik mikroskopta çekilen fotoğrafları Şekil 29 ve 30'da verilmiştir. Bu fotoğraflardan yorulma çatlaklarının, kırılma yüzeyindeki $\alpha+\eta$ fazında başladığı ve bakırca zengin ϵ fazına ulaştığında ise çatlak ilerlemesinin durduğu görülmektedir, Şekil 29. Yani ϵ fazının çatlak ilerlemesini engelleyici bir etki yarattığı söylenebilir. Şekil 30'da ise yorulma çatlağının, kırılma yüzeyinde bulunan bakırca zengin ϵ fazında değil de, çinkoca zengin $\alpha+\eta$ fazında ortaya çıktığı görülmektedir. Bu da yorulma çatlaklarının mukavemeti daha düşük olan

bölgelerde başladığını göstermektedir. Ayrıca yorulma çatlakları, iç yapıda oluşan porozite de başladığı, bu mikro boşlukların çatlak ilerlemesini hızlandırdığı bilinmektedir [2, 21, 41]. Bu çalışmada da benzer bulgulara rastlanmıştır. Şöyle ki; 187 MPa gerilme değerinde yorulma deneyine tabi tutulan Zn-27Al-4Cu alaşımında yorulma çatlağı poroziteden başlayıp tane sınırı boyunca ilerlediği belirlenmiştir, Şekil 24.

Bu çalışmada incelenen Zn-27Al-2Cu, Zn-27Al-3Cu, Zn-27Al-4Cu, Zn-27Al-5Cu alaşımlarının yorulma deneylerinden elde edilen veriler kullanılarak her bir numune için $\log N - \log \sigma$ grafikleri çizilmiştir, Şekil 18. En küçük kareler yöntemi kullanılarak elde edilen doğruların korelasyon katsayılarının (c) 1'e çok yakın olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle, bu alaşımların yorulma davranışının Basquin bağıntısı ile ifade edilebileceği sonucuna varılabilir. Nitekim literatürdeki bazı çalışmalarda buna benzer sonuçlar elde edilmiştir [2, 8, 36, 39, 41].

5. SONUÇLAR

Bakır katkısının Zn-27Al alaşımının yapı, mekanik ve yorulma özelliklerine etkisinin incelendiği bu çalışmadan elde edilen genel sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

1. Zn-27Al-2Cu, Zn-27Al-3Cu, Zn-27Al-4Cu, Zn-27Al-5Cu alaşımlarının içyapısı, alüminyumca zengin α dendritleri ile bunları çevreleyen çinkoca zengin η ve ötektoid $\alpha + \eta$ fazlardan oluşur. Ayrıca dendritler arası bölgelerde bakırca zengin ε fazı yer alır.
2. Zn-27Al alaşımına bakır katkısı ile alaşımın içyapısında bulunan alüminyumca zengin α fazının ikincil dentritik kol aralığının küçüldüğü ve bu sebeple mukavemet arttığı söylenebilir.
3. Zn-27Al-(2-5)Cu alaşımlarının bakır oranı arttıkça, sertlik ve çekme dayanımı artar, kopma uzaması ve tokluk değerleri ise azalır.
4. Bu çalışmada incelenen alaşımlar içerisinde en yüksek sertlik ve çekme dayanımı Zn-27Al-5Cu alaşımından, en yüksek kopma uzaması ve tokluk değerleri Zn-27Al-2Cu alaşımından elde edilmiştir.
5. Bakır katkısıyla Zn-27Al-(2-5)Cu alaşımlarında elde edilen sertlik ve mukavemet artışı katı çözelti sertleşmesi mekanizmasına dayandırılır.
6. Cu oranı arttıkça üçlü Zn-27Al-Cu alaşımlarının yorulma dayanımı artar. En yüksek yorulma dayanımı Zn-27Al-5Cu alaşımından, en düşük yorulma dayanımı ise Zn-27Al-2Cu alaşımından elde edilmiştir.
7. Üçlü Zn-Al-Cu alaşımlarının yorulma davranışları mekanik özellikleriyle doğrudan ilişkilidir. Bakır katkısı arttıkça, alaşımın mukavemet ve sertliği artar ve buna bağlı olarak yorulma davranışı da iyileşir.
8. Cu oranı arttıkça söz konusu alaşımlardaki porozite miktarının azaldığı ve yorulma performansının iyileştiği belirlenmiştir.
9. Yorulma çatlakları, çinkoca zengin η fazı ile ötektoid $\alpha+\eta$ fazının yoğun olduğu bölgelerde ve ayrıca içyapıda bulunan porozitelerde başlar ve tane sınırı boyunca ilerler. Ayrıca, bakırca zengin ε fazının yorulma çatlaklarının ilerlemesini engelleyici bir etki yaptığı söylenebilir.
10. Üçlü Zn-27Al-(%2-5)Cu alaşımlarının yorulma davranışları Basquin bağıntısı ile ifade edilebilir.

6. ÖNERİLER

1. Sıcaklık ve süre gibi yaşlandırma parametrelerinin Zn-27Al-(2-5)Cu alaşımlarının yorulma davranışına etkisi incelenebilir.
2. Eş kanal açısal ekstrüzyon yöntemi (EKAE) ötektoid bileşime sahip Zn-27Al-(2-5)Cu alaşımlarına uygulanarak, alaşımların mekanik ve yorulma özellikleri incelenebilir.



7. KAYNAKÇA

1. Savaşkan, T. ve Turhal, M.Ş., Relationships between cooling rate, copper content and mechanical properties of monotectoid based Zn–Al–Cu alloys, Materials Characterization, 51,4 (2003) 259-270.
2. Şenaslan, F., Yaşlandırma Süresinin Zn-27Al-1Cu Alaşımının Yapı ve Mekanik Özelliklerine Etkisi, Yüksek Lisans, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2016.
3. Aydın, M., Çinko-Alüminyum Alaşımların Yorulma Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, KTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 1995.
4. Hekimoğlu, A.P., Bakır Katkısının Cu-Al Alaşımlarının Sürtünme ve Aşınma Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, KTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2002.
5. Azaklı, Z., Zn-40Al-2Cu-2Si Alaşımının Yetersiz ve Sürekli Yağlama Durumundaki Sürtünme ve Aşınma Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, KTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2005.
6. Elzanaty, H., The effect of different copper content on microstructure and mechanical properties Of Zn–40al and Al–40zn alloys, International Journal of Research in Engineering & Technology, 2,7 (2014) 55-62.
7. Alemdağ, Y. ve Savaşkan, T., Mechanical and tribological properties of Al–40Zn–Cu alloys, Tribology international, 42,1 (2009) 176-182.
8. Aydın, M., High-cycle fatigue behavior of severe plastically deformed binary Zn–60Al alloy by equal-channel angular extrusion, Journal of Materials Processing Technology, 212,8 (2012) 1780-1789.
9. Calayag, T., The practicality of using zing aluminum-alloys for friction-type bearings, CIM Bulletin 1986, 79: 86-86.
10. Ataç, A.M. ve Ahmet, G., Çinko-Alüminyum (ZA) alaşımlarının mekanik alaşımlama yöntemiyle üretilebilirliği üzerine bir çalışma, Politeknik Dergisi, 16,4 (2013) 147-154.
11. Bektaşoğlu, A. ve Savaşkan, T., Zn-60Al-(1-5) Cu alaşımlarının kuru sürtünme durumundaki aşınma özelliklerinin incelenmesi. Mühendis ve Makina, 46,544.
12. Güler, O., Mekanik Alaşımlama Yöntemi İle ZA27 Esaslı Kompozit Malzemelerin Üretilmesi Ve Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, KTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2015.
13. Babic, M., Mitrovic, S. ve Jeremic, B., The influence of heat treatment on the sliding wear behavior of a ZA-27 alloy, Tribology international, 43,1-2 (2010) 16-21.

14. Sastry, S., Krishna, M. ve Uchil, J., Effect of thermal stresses on the thermal expansion and damping behavior of ZA-27/aluminite metal matrix composites, Journal of materials engineering and performance, 10,2 (2001) 220-224.
15. Durman, M. ve Murphy, S., An electron metallographic study of pressure die-cast commercial zinc–aluminium-based alloy ZA27, Journal of materials science, 32,6 (1997) 1603-1611.
16. Santos, G.A., de Moura Neto, C., Osório, W.R. ve Garcia, A., Design of mechanical properties of a Zn27Al alloy based on microstructure dendritic array spacing, Materials & design, 28,9 (2007) 2425-2430.
17. Tan, H.O., Al-2Zn-3Cu Alaşımının Yorulma Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, KTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2013.
18. Savaşkan, T. ve Tan, H., Fatigue behaviour of Al–25Zn–3Cu alloy, Materials Science and Technology, 30,8 (2014) 938-943.
19. Lee, P.P., Savaskan, T. ve Laufer, E., Wear resistance and microstructure of Zn-Al-Si and Zn-Al-Cu alloys, Wear, 117,1 (1987) 79-89.
20. Savaşkan, T., Pürçek, G. ve Murphy, S., Sliding wear of cast zinc-based alloy bearings under static and dynamic loading conditions, Wear, 252,9-10 (2002) 693-703.
21. Heyal, Y., Eş Kanalda Açısal Ekstrüzyon Yönteminin Zn-60Al ve Zn-80Al Alaşımının Yorulma Özelliklerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, KTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2011.
22. Savaşkan, T., Pürçek, G. ve Hekimoğlu, A., Effect of copper content on the mechanical and tribological properties of ZnAl27-based alloys, Tribology Letters, 15,3 (2003) 257-263.
23. 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, Tribology international, 37,1 (2004) 45-50.
24. Alemdağ, Y. ve Savaşkan, T., Effects of silicon content on the mechanical properties and lubricated wear behaviour of Al–40Zn–3Cu–(0–5) Si alloys, Tribology Letters, 29,3 (2008) 221-227.
25. Savaskan, T., Aydın, M. ve Odabasioglu, H.A., Fatigue behaviour of Zn-Al casting alloys, Materials Science and Technology, 17,6 (2001) 681.
26. Mojaver, R. ve Shahverdi, H.R., Relationship between cooling rate, microstructure features and wear behavior in end-chill cast Zn–27% Al alloys containing more than 2% Cu, Wear, 271,11-12 (2011) 2899-2908.

27. Murphy, S., Solid-phase reactions in the low-copper part of the Al-Cu-Zn system, Zeitschrift fuer Metallkunde, 71,2 (1980) 96-102.
28. Lyon, R., The Properties and Applications ZA Alloys, The British Foundryman, (1986) 344-349.
29. Durman, M., Çinko-Alüminyum Esaslı Basınçlı Döküm Alaşımlarının %0-%30 Bileşim Aralığında Mekanik ve Mikro Yapısal Özelliklerinin İncelenmesi. Bildiriler Kitabı,177-191 (1993).
30. Çay, F., Kokil ve Basıçlı Döküm Yöntemiyle Üretilen Çinko Alüminyum Alaşımların Özelliklerinin İncelenmesi. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 7,1 (2013).
31. Mojaver, R. ve Shahverdi, H., The relationship between the wear behavior and microstructure features in end-chill cast Zn–27% Al alloy, Wear, 268,3-4 (2010) 605-611.
32. Skenazi, A.F., Pelerin, J., Coutsouradis, D., Magnus, B. ve Meeus, M., Some recent developments in the improvement of the mechanical properties of zinc foundry alloys, Metall, 34,9 (1988) 898-902.
33. Savaşkan, T. ve Turhal, M.Ş., Çinko-Alüminyum Alaşımlar İçin mukavemet Arttırma Yöntemleri. Mühendis ve Makine, 38,450 (1997) 32-38.
34. Aydın, M. ve Heyal, Y., Effect of equal channel angular pressing on microstructural and mechanical properties of as cast Al–20 wt-% Zn alloy, Materials Science and Technology, 29,6 (2013) 679-688.
35. Savaşkan, T., Malzeme Bilgisi ve Muayenesi, Beşinci Baskı, Trabzon, 2009.
36. Aydın, M., Çinko-Alüminyum Esaslı Alaşımların Değişik Ortamlardaki Yorulma Davranışlarının İncelenmesi, Doktora Tezi, KTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2001.
37. Ashrafizadeh, F., Young, J.M. ve Kondic, V., Solidification structures and mechanical properties of Zn–27Al alloy cast in metal moulds, Materials Science and Technology, 3,8 (1987) 665-670.
38. Ruiz, J. ve Elices, M., The role of environmental exposure in the fatigue behaviour of an aluminium alloy, Corrosion science, 39,12 (1997) 2117-2141.
39. Cay, F. ve Kurnaz, S.C., Hot tensile and fatigue behaviour of zinc–aluminum alloys produced by gravity and squeeze casting, Materials & design, 26,6 (2005) 479-485.
40. Savaşkan, T. ve Aydın, M., Fatigue behaviour of monotectoid-based Zn–Al–Cu alloys in 3.5% NaCl and 1% HCl solutions, Materials Characterization, 52,4-5 (2004) 269-278.

41. Aydın, M. ve Şenaslan, F., The effect of quench-aging on the mechanical properties of Zn-27Al-1Cu alloy, International Journal of Materials Research, 109,8 (2018) 699-707.
42. Nagarjuna, S., Srinivas, M., Balasubramanian, K. ve Sarmat, D., Effect of alloying content on high cycle fatigue behaviour of Cu-Ti alloys, International journal of fatigue, 19,1 (1997) 51-57.
43. Erdöl, M.Ş., Çinko-Alüminyum Esaslı Alaşımlarda Mukavemet Artırma Yöntemlerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, KTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 1989.
44. Çuvalcı, H., Çinko-Alüminyum Esaslı Yatak Alaşımlarının İy Yapı ve Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, KTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 1989.



ÖZGEÇMİŞ

Hale ZENGİN; 1990 yılında Trabzon'da doğdu. 2009 yılında Aksu 15 Temmuz Şehitler Anadolu Lisesi'ni bitirdi. 2013 yılında Gümüşhane üniversitesi Mühendislik-Doğa Bilimleri Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nden Makine Mühendisi unvanı ile mezun oldu. 2014 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans öğrenimine başladı. Halen yüksek lisansa devam eden Hale ZENGİN orta derecede İngilizce bilmektedir.

