

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**YÜKSEK ORANDA ALÜMİNYUM İÇEREN ÇİNKO-ALÜMİNYUM ESASLI ALAŞIMLARIN
YORULMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mak. Müh. Hamza ÇOLAK

**OCAK 2020
TRABZON**



**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**YÜKSEK ORANDA ALÜMİNYUM İÇEREN ÇİNKO-ALÜMİNYUM ESASLI
ALAŞIMLARIN YORULMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

Mak. Müh. Hamza ÇOLAK

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce
"MAKİNA YÜKSEK MÜHENDİSİ"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 27 / 12 / 2019

Tezin Savunma Tarihi : 17 / 01 / 2020

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Murat AYDIN

Trabzon 2020

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**Makina Mühendisliği Anabilim Dalında
Hamza ÇOLAK tarafından hazırlanan**

**YÜKSEK ORANDA ALÜMİNYUM İÇEREN ÇİNKO-ALÜMİNYUM ESASLI
ALAŞIMLARIN YORULMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

**başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 31 / 12 / 2019 gün ve 1834 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


.....

.....

.....

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

ÖNSÖZ

Kullanım alanı giderek genişleyen çinko-alüminyum (Zn-Al) esaslı alaşımlar kaymalı yatak imalatı başta olmak üzere günümüzde birçok alanda kullanılmaktadır. Ancak yüksek miktarda Al içeren Zn-Al alaşımlarının yorulma davranışları hakkında literatürde herhangi bir bilgi bulunmamaktadır. Bu nedenle, bu çalışmada yüksek oranda alüminyum içeren bazı Zn-Al alaşımlarının yorulma davranışları incelenmiştir. Elde edilen veriler göz önüne alınarak yapılan değerlendirmeler sonucunda, yüksek oranda alüminyum ($Al \geq \%85$) içeren ikili çinko-alüminyum alaşımlarında alüminyum oranı arttıkça yorulma dayanımı ve yorulma ömrü değerlerinin düştüğü belirlenmiştir.

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde değerli fikir ve yardımlarını esirgemeyen danışman hocam Prof. Dr. Murat AYDIN 'a teşekkürü borç bilirim. Ayrıca çalışmaya katkılarından dolayı KTÜ Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'nde görev yapmakta olan Prof. Dr. Hamdullah ÇUVALCI hocama, RTE Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünde görev yapmakta olan Dr. Öğr. Üyesi Ali Paşa HEKİMOĞLU'na, Ar. Gör. Sadun KARABIYIK'a, Ar. Gör. Yaşar SERT'e ve desteklerinden dolayı Makine Mühendisi Mustafa ZENGİN ve eşi Makine Yüksek Mühendisi Hale ZENGİN'e teşekkür ederim.

Hamza ÇOLAK

Trabzon 2020

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Yüksek Oranda Al İçeren Çinko-Alüminyum Esaslı Alaşımların Yorulma Davranışlarının İncelenmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. MURAT AYDIN ‘ın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri kendim topladığımı, deneyleri 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. 17/01/2020

Hamza ÇOLAK

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XI
SEMBOLLER DİZİNİ	XII
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş	1
1.2. İkili Zn-Al ve Üçlü Zn-Al-Cu Faz Diyagramları	2
1.2.1. İkili Zn-Al Alaşımlarının Faz Diyagramı	2
1.2.2. Üçlü Çinko-Alüminyum-Bakır Faz Diyagramı	3
1.3. Zn-Al Alaşımlarının Yapı ve Mekanik Özellikleri.....	4
1.3.1. Zn-Al Alaşımlarının Yorulma Özellikleri	8
1.4. Literatür Özeti ve Çalışmanın Amacı	10
2. DENEYSEL ÇALIŞMA.....	11
2.1. Alaşımların Üretimi	11
2.2. Metalografik İncelemeler	12
2.3. Mekanik Deneyler	12
2.3.1. Çekme, Sertlik ve Darbe Deneyleri	12
2.3.2. Yorulma Deneyleri	13
3. BULGULAR	16
3.1. Alaşımların Kimyasal Bileşimleri	16

3.2.	Yapısal İncelemelerden Elde Edilen Bulgular.....	16
3.3.	Mekanik Deneylerden Elde Edilen Bulgular.....	22
3.3.1.	Sertlik, Çekme ve Darbe Deneylerinden Elde Edilen Bulgular	22
3.3.2.	Yorulma Deneylerinden Elde Edilen Bulgular.....	22
3.3.2.1.	Yorulma Deneylerinden Elde Edilen Verilerin Korelasyonu.....	23
3.3.2.2.	Yorulma Örneklerinin Kırılma Yüzeylerinin İncelenmesinden Elde Edilen Bulgular	25
4.	İRDELEME.....	33
5.	SONUÇLAR.....	35
6.	ÖNERİLER	36
7.	KAYNAKLAR.....	37
ÖZGEÇMİŞ		

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

YÜKSEK ORANDA ALÜMİNYUM İÇEREN ÇİNKO-ALÜMİNYUM ESASLI
ALAŞIMLARIN YORULMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Hamza ÇOLAK

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Murat AYDIN
2020, 40 Sayfa

Bu çalışmada yüksek oranda alüminyum içeren Zn-(%85,90,95)Al ve Zn-85Al-2Cu alaşımları kokil kalıba döküm yöntemi kullanılarak üretilmiştir. Söz konusu alaşımların yapı ve mekanik özellikleri ile yorulma davranışları ayrıntılı bir biçimde incelendi.

İkili çinko-alüminyum alaşımları içerisinde en yüksek yorulma ömrü, en yüksek sertlik ve mukavemet değerlerine sahip olan Zn-85Al alaşımından elde edilirken, en düşük yorulma ömrü Zn-95Al alaşımından elde edildi. Bu çalışmada ayrıca, Zn-85Al alaşımına %2’lik bakır katkısının sertlik ve mukavemet değerlerini önemli ölçüde artırdığı, ancak yorulma ömrü ve yorulma dayanımı değerlerinde beklenen artışı sağlamadığı görüldü. Bundan başka, yorulma çatlaklarının genellikle porozitelerde başladığı ve tane sınırları boyunca ilerlediği belirlendi.

Yapılan korelasyonlar sonucunda incelenen ikili Zn-Al ve üçlü Zn-Al-Cu alaşımlarının yorulma davranışlarının Basquin bağıntısı ile ifade edilebileceği belirlendi.

Anahtar Kelimeler: Çinko-Alüminyum Alaşımları, Yorulma Ömrü, Yorulma Dayanımı, Yüksek Oranda Alüminyum, Bakır katkısı, Basquin Bağıntısı

Master Thesis

SUMMARY

INVESTIGATION OF FATIGUE BEHAVIOR OF ZINC-ALUMINUM BASED ALLOYS CONTAINING HIGH AMOUNT OF ALUMINUM

Hamza ÇOLAK

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Mechanical Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. Murat AYDIN
2020, 40 Pages

In this study, Zn - (%85,90,95)Al and Zn-85Al-2Cu alloys containing high percentage of aluminum were produced by permanent mould casting. The microstructure and mechanical properties and fatigue behavior of the alloys were determined in detail.

Among the binary Zn-Al alloys, the highest fatigue life was obtained from Zn-85Al alloy having the highest hardness and strength values and the lowest fatigue life was obtained from Zn-95Al alloy. In this study, it was also observed that 2% copper additive to Zn-85Al alloy significantly increased the hardness and strength values but did not provide the expected increase in fatigue life and fatigue strength value. Furthermore, it was determined that the fatigue cracks generally initiated at the porosities and propagated along the grain boundaries.

As a result of the correlations, it was determined that the fatigue behavior of the alloys can be expressed by Basquin's law.

Keywords: Zinc-Aluminum Alloys, Fatigue Life, Fatigue Strength, High Aluminum Ratio, Addition of Copper, Basquin's Law

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1. İkili Zn-Al faz diyagramı	2
Şekil 2. Üçlü Zn-Al-Cu alaşım sistemine ait faz diyagramının 350 °C'deki izotermal kesiti [12].....	4
Şekil 3. Metallerde yorulma kırılmasının genel görünümü	8
Şekil 4. Ergitme işleminin yapıldığı elektrikli pota fırını.....	11
Şekil 5. Talaşlı imalat ile elde edilen (a) çekme,(b) darbe ve (c) sertlik deneyi numunelerinin şekli ve boyutlar	13
Şekil 6. Yorulma numunesinin şekli ve boyutları	13
Şekil 7. Dönel eğmeli yorulma deney düzeneği	14
Şekil 8. Kırılmış bir numunenin resmi	15
Şekil 9. Zn-85Al alaşımının dökülmüş durumdaki içyapısı	17
Şekil 10. Zn-85Al alaşımına ait bölgesel EDS analizi	17
Şekil 11. Zn-90Al alaşımının dökülmüş durumdaki içyapısı	18
Şekil 12. Zn-90Al alaşımına ait bölgesel EDS analizi	18
Şekil 13. Zn-95Al alaşımının dökülmüş durumdaki içyapısı	19
Şekil 14. Zn-95Al alaşımına ait bölgesel EDS analizi	19
Şekil 15. Zn-85Al-2Cu alaşımının dökülmüş durumdaki içyapısı	20
Şekil 16. Zn-85Al-2Cu alaşımına ait bölgesel EDS analizi	20
Şekil 17. Zn-85Al-2Cu alaşımında oluşan θ fazına ait noktasal EDS analizi	21
Şekil 18. Zn-85Al-2Cu alaşımında oluşan $\alpha+\theta$ fazına ait noktasal EDS analizi	21
Şekil 19. Alaşımların gerilme-çevrim sayısı eğrileri.....	23
Şekil 20. Alaşımların $\log \sigma - \log N$ eğrileri sayısı eğrileri.....	24
Şekil 21. 142 MPa'lık gerilmede yorulma deneyine tabi tutulmuş olan Zn-85Al alaşımının yorulma numunesinin kırık yüzeyinin genel SEM görüntüsü	26
Şekil 22. 146 MPa'lık gerilmede yorulma deneyine tabi tutulmuş olan Zn-90Al alaşımının yorulma numunesinin kırık yüzeyinin genel SEM görüntüsü	26
Şekil 23. 64 MPa'lık gerilmede yorulma deneyine tabi tutulmuş olan Zn-95Al alaşımının yorulma numunesinin kırık yüzeyinin genel SEM görüntüsü	27
Şekil 24. 146 MPa'lık gerilmede yorulma deneyine tabi tutulmuş olan Zn-85Al-2Cu alaşımının yorulma numunesinin kırık yüzeyinin genel SEM görüntüsü	27
Şekil 25. 142 MPa'lık gerilmede yorulma deneyine tabi tutulmuş olan Zn-85Al alaşımının yorulma numunesinin kırık yüzeyinin SEM görüntüsü.....	28

Şekil 26. 142 MPa’lık gerilmede yorulma deneyine tabi tutulmuş olan Zn-85Al alaşımasının yorulma numunesinin kırık yüzeyi detayının SEM görüntüsü	28
Şekil 27. 146 MPa’lık gerilmede yorulma deneyine tabi tutulmuş olan Zn-90Al alaşımasının yorulma numunesinin kırık yüzeyinin SEM görüntüsü	29
Şekil 28. 146 MPa’lık gerilmede yorulma deneyine tabi tutulmuş olan Zn-90Al alaşımasının yorulma numunesinin kırık yüzeyi detayının SEM görüntüsü	29
Şekil 29. 64 MPa’lık gerilmede yorulma deneyine tabi tutulmuş olan Zn-95Al alaşımasının yorulma numunesinin kırık yüzeyinin SEM görüntüsü	30
Şekil 30. 64 MPa’lık gerilmede yorulma deneyine tabi tutulmuş olan Zn-95Al alaşımasının yorulma numunesinin kırık yüzeyi detayının SEM görüntüsü	30
Şekil 31. 146 MPa’lık gerilmede yorulma deneyine tabi tutulmuş olan Zn-85Al-2Cu alaşımasının yorulma numunesinin kırık yüzeyinin SEM görüntüsü	31
Şekil 32. 146 MPa’lık gerilmede yorulma deneyine tabi tutulmuş olan Zn-85Al-2Cu alaşımasının yorulma numunesinin kırık yüzeyi detayının SEM görüntüsü	31
Şekil 33. Yorulma deneyine tabi tutulmuş olan Zn-85Al alaşımına ait örneğin yorulma çatlağının detayını gösteren fotoğraf	32

TABLÖLAR DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 1. Zn-Al alaşıım sistemindeki faz dönüşümleri.....	3
Tablo 2. Üçlü Zn-Al-Cu alaşıım sistemindeki faz dönüşümleri.....	4
Tablo 3. Bazı ticari ve Zn-Al esaslı alaşımların mekanik özellikleri	5
Tablo 4. Farklı kimyasal bileşime sahip, gerek dökülmüş gerekse ısıı işlem görmüş durumdaki çinko-alüminyum esaslı bazı alaşımların mekanik özellikleri	7
Tablo 5. Bazı ticari ve Zn-Al esaslı alaşımların yorulma dayanımı değeri.....	9
Tablo 6. Alaşımların kimyasal bileşimleri	16
Tablo 7. İkili Zn-85Al, Zn-90Al, Zn-95Al ve üçlü Zn-85Al-2Cu alaşımlarının mekanik özellikleri	22
Tablo 8. İkili Zn-85Al, Zn-90Al, Zn-95Al ve üçlü Zn-85Al-2Cu alaşımlarının k ve A değeri ile c (korelasyon katsayısı) sabiti	25

SEMBOLLER DİZİNİ

BSD	:Brinell sertlik değeri
C	: Korelasyon katsayısı
SEM	:Taramalı elektron mikroskobu (Scanning electron microscope)
σ_{φ}	:Çekme Dayanımı
$\sigma_{\max}$	:Maksimum gerilme
$\sigma_{\min}$	:Minimum gerilme
$\Delta\sigma$	:Gerilme aralığı
$\sigma_{eğ}$	:Eğme gerilmesi
K	:Gerilme şiddet faktörü
N_f	:Yorulma ömrü
$M_{eğ}$	:Eğme momenti
$W_{eğ}$	:Eğme için mukavemet momenti
d	:Numune çapı
l	:Moment kolu

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

1930'lu yıllardan itibaren geliştirilmeye başlanan çinko-alüminyum (Zn-Al) alaşımları günümüzde pek çok mühendislik alanında kullanılmaktadır [1]. Bu alaşımlar dekoratif döküm parçalarından, çeşitli otomobil parçalarının üretimine kadar geniş bir uygulama alanı bulmuştur. Genel olarak; iş makineleri, vites kutusu, torna tezgâhı, taş kırma makinası, madencilikte kullanılan düşük hızlı araçların kaymalı yatakları, hidrolik kaldırma silindirleri, su pompaları, matbaa makinaları, kapı kolu imalatı ve süs eşyaları bu uygulama alanlarına örnek olarak verilebilir [2].

2. Dünya Savaşı başlamadan önce ve savaş sırasında bakır teminindeki problemler nedeniyle bakır ve alaşımları yerine kokil döküm ile üretilen çinko alaşımları kullanılmıştır. Nitekim 1939 ile 1943 yılları arasında Almanya'daki alaşımların kullanımı 7 kat artarak 49000 tona çıkmıştır. Ayrıca Almanya'da 2. Dünya Savaşı sırasında, bronzun yerine yatak malzemesi olarak çinko alaşımları geliştirilmiş ve yaygın olarak kullanılmıştır [3].

Zn-Al alaşımları, diğer demir dışı metallere kıyasla yüksek özgül mukavemet, mükemmel yatak ve aşınma direnci, iyi döküm özellikleri, uzun kullanım ömrü ve daha düşük maliyet gibi avantajlar sağlar [4]. Bununla birlikte, söz konusu alaşımların mukavemet değerlerinin, özellikle yüksek sıcaklıklarda yetersiz kaldığı ve boyutsal kararsızlık probleminin olduğu bilinmektedir [5]. Bu gibi dezavantajları ortadan kaldırmak ve bu alaşımların özelliklerini geliştirmek için son yıllarda kapsamlı araştırmalar yapılmıştır. Bu araştırmalar, özellikle başta bakır olmak üzere alaşım elementi katkısı ve ısıl işlem üzerinde yoğunlaşmıştır [6-8].

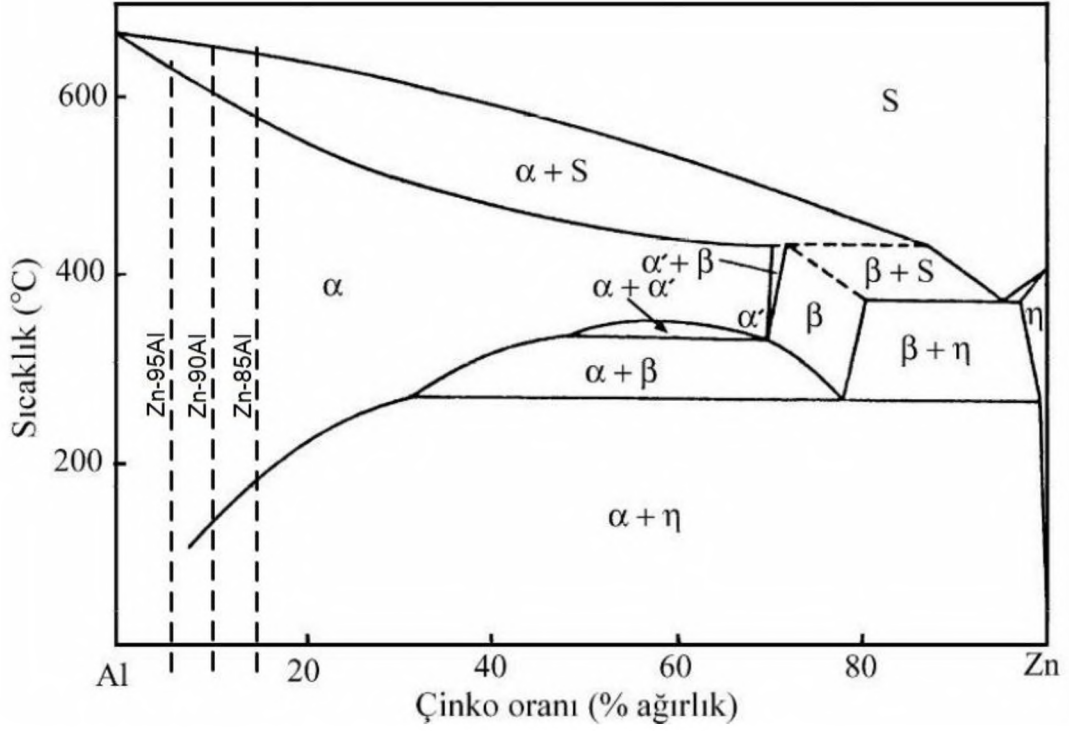
Literatürde her ne kadar bazı bileşimlere sahip alaşımlar üzerine yapılmış çalışmalar mevcut olsa da yüksek oranda alüminyum içeren (>%85 Al) alaşımların çok az çalışıldığı görülmüştür. Ayrıca, söz konusu alaşımların yorulma davranışları hemen hemen hiç incelenmemiştir. Bu durumun literatürde önemli bir eksiklik oluşturmasının yanı sıra, bu alaşımlardan üretilen parçaların kullanım şartlarının belirlenmesinde de kısıtlayıcı bir etkiye neden olduğu ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle bu çalışmada yüksek oranda alüminyum içeren (%85,90,95 Al) bir dizi alaşımın yorulma davranışları incelenecektir. Böylelikle, sözü edilen

alaşımlardan üretilen parçaların kullanım süreleri, tasarım ve mukavemet değerleri hakkında daha net öngörülerde bulunulabilecektir.

1.2. İkili Zn-Al ve Üçlü Zn-Al-Cu Faz Diyagramları

1.2.1. İkili Zn-Al Alaşımlarının Faz Diyagramı

Zn-Al alaşım sistemini en doğru biçimde temsil eden ikili faz diyagramı Şekil 1’de verilmiştir [9].



Şekil 1. İkili Zn-Al faz diyagramı

Diyagramı kısaca özetlemek gerekirse; α alaşımdaki alüminyum miktarının, η alaşımdaki çinko miktarının zengin olduğu faz bölgeleridir. Çinkonun alaşımdaki katı çözünürlüğü ağırlıkça %83 oranına kadar artarak α , α' ve β olmak üzere üç değişik faz bölgesi oluşturmaktadır. Bu faz bölgelerinin hepsi yüzey merkezli kübik (YMK) yapıya sahiptirler. Burada α ve α' fazlarının kafes parametreleri birbirlerine çok yakın olduklarından, aralarındaki faz sınırı tam olarak belirlenememiştir [6]. Bunun yanı sıra diyagramdan da görüleceği üzere, %32-78 çinko oranları arasında $\alpha + \alpha'$ olarak ifade edilen

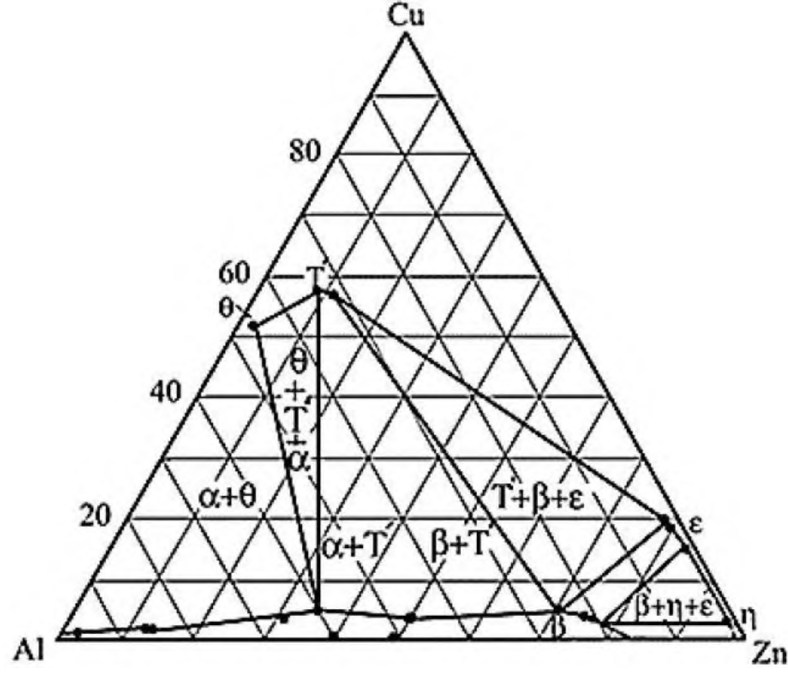
bir karışmazlık bölgesi oluşmuştur [10]. İkili Zn-Al faz diyagramında, dengeli soğuma sırasında ortaya çıkan faz dönüşümleri Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1.Zn-Al alaşım sistemindeki faz dönüşümleri [11].

Dönüşüm	Dönüşüm Formülü	Bileşim oranı (%Zn)	Sıcaklık (°C)
Ötektik	$S \leftrightarrow \beta + \eta$	95	382
Ötektoid	$\beta \leftrightarrow \alpha + \eta$	78	276
Monotektoid	$\alpha / \alpha' \leftrightarrow \alpha + \beta$	52	340
Peritektik	$\alpha + S \leftrightarrow \beta$	72	443

1.2.2. Üçlü Çinko-Alüminyum-Bakır Faz Diyagramı

Üçlü çinko-alüminyum-bakır (Zn-Al-Cu) faz diyagramı henüz tamamıyla belirlenememiştir, ancak yapılan bir çalışmada sistemin düşük oranlarda bakır içeren bölümü ayrıntılı biçimde incelenerek denge diyagramının 350 °C’deki izotermal kesiti belirlenmiştir [12]. Şekil 2’de söz konusu izotermal kesit izotermal kesit, Tablo 2’de bu sistemde meydana gelen katı hal dönüşümleri verilmiştir [13, 14]. Bu tablodaki α alüminyumca zengin fazı, η çinkoca zengin fazı, ϵ bakırca zengin kararsız dengeli (metastabil) dfazı, θ ve T' ise bakırca zengin kararlı fazları göstermektedir [1, 5, 15]. Döküm anında oluşan ve metastabil bir yapıya sahip ϵ fazı, dördü faz reaksiyonu ile kararlı T' ve η fazlarına dönüşür [16]. Bu dönüşümün gerçekleşmesi ile boyutsal kararsızlık problemi ortaya çıkar [17]. Söz konusu problem Zn-Al alaşımlarında Al oranının arttırılması ile giderilebilir [17].



Şekil 2. Üçlü Zn-Al-Cu alaşım sistemine ait faz diyagramının 350 °C'deki izotermal kesiti [12].

Tablo 2. Üçlü Zn-Al-Cu alaşım sistemindeki faz dönüşümleri. [13, 18].

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. Zn-Al Alaşımlarının Yapı ve Mekanik Özellikleri

Dökülmüş durumdaki Zn-Al esaslı birçok alaşımın göbekli dentritik bir içyapı sergilediği bilinmektedir [19]. Dökülmüş durumda ötektoid ve monotektoid bileşimdeki ikili Zn-Al alaşımlarının içyapılarında genel olarak alüminyumca zengin dentritler ve bu dentritlerin etrafında oluşan çinkoca zengin fazlar bulunmaktadır. Artan alüminyum oranı ile birlikte bu dentritlerin büyüklükleri artmaktadır [20]. Ancak alüminyum yüzdesi %60-80 değerlerine ulaştığında dentritik döküm yapısının taneli bir yapıya dönüştüğü gözlemlenmiştir [6, 21, 22].

Düşük ergime noktasına sahip Zn-Al alaşımlarının geniş katılaşma aralıkları, içyapıda gözeneklerin oluşmasına yol açar. Katılaşma sırasında, içyapıda oluşan gözeneklerin, alaşımların mukavemet değerlerini önemli ölçüde düşürdüğü belirlenmiştir [23, 24]. Bu sebeple, döküm sonrası katılaşmayı etkileyen döküm sıcaklığı, kokil sıcaklığı ve katılaşma hızı gibi faktörleri kontrol ederek gözeneklerin oluşumunu önlemek ve en aza indirmek gerekir

Zn-Al alaşımlarının mukavemet değerleri birçok demir dışı alaşımdan ve dökme demirden daha yüksektir. Alaşımın ana bileşenlerinden biri olan alüminyum bu alaşımların mukavemet değerlerini, çinko ise döküm özelliklerini iyileştirmektedir [3]. Çekme dayanımı değeri 400 MPa'ı aşan farklı bileşimlerde birçok Zn-Al esaslı alaşım üretilmiştir. Tablo 3'te bazı ticari alaşımların mekanik özellikleri verilmiştir [3].

Tablo 3. Bazı ticari ve Zn-Al esaslı alaşımların mekanik özellikleri

Alaşım	Özellikler					
	Çekme Dayanımı (MPa)	%0,2'lik Akma Dayanımı (MPa)	Kopma Uzaması %	Sertlik (BSD)	Darbe Enerjisi (J)	Young Modülü (GPa)
ZA-8 (Kum Döküm)	263	198	1,7	87	20	85,5
ZA-8 (Kokil Döküm)	240	208	1,3	87	-	85,5
ZA-8 (Basınçlı Döküm)	374	290	8	103	42	85,5
ZA-12 (Kum Döküm)	299	211	1,5	94	25	82,7
ZA-12(Kokil Döküm)	328	268	2,2	89	-	82,7
ZA-12 (Basınçlı Döküm)	404	320	5	100	29	82,7
ZA-27 (Kum Döküm)	421	371	4,6	113	48	77,9
ZA-27(Kokil Döküm)	441	376	2,5	114	-	77,9
ZA-27 (Basınçlı Döküm)	426	371	2,5	119	13	77,9
ZA-27 (Kum Döküm)*	318	257	9,4	94	58	89,6

(*321 °C sıcaklıkta 3 saat tutulmuş ve fırında soğutulmuş)

Başta Cu olmak üzere alaşım elementi katkısı ve uygun ısıtım işlemi ile sözü edilen alaşımların mekanik özellikleri iyileştirilmektedir [25]. Değişik oranlarda farklı alaşım

elementleri içeren dökülmüş ve ısıtıl işlem görmüş durumdaki bazı Zn-Al esaslı alaşımların mekanik özellikleri Tablo 4’te verilmiştir [26, 27]. Tablodan dökülmüş durumdaki ikili Zn-40Al alaşımına ısıtıl işlem uygulandığında sertlik ve çekme dayanımının arttığı, buna karşılık kopma uzaması değerinin düştüğü görülmektedir. Ayrıca ikili alaşımlarda artan alüminyum oranlarına bağlı olarak sertlik, çekme dayanımı ve kopma uzaması değerlerinin arttığı, dökülmüş durumdaki üçlü Zn-Al-Si alaşımlarında ise artan Si oranının mekanik özellikleri çok fazla etkilemediği görülmektedir [22, 27-29]. Ancak söz konusu alaşımların sertlik ve çekme dayanımı değerlerinin ısıtıl işlemle arttığı belirlenmiştir [27]. Ayrıca üçlü Zn-Al-Cu alaşımlarında, artan Cu oranıyla sertlik değerinin sürekli arttığı, buna karşın %2 Cu oranına kadar çekme dayanımının arttığı, bu değer üzerindeki Cu oranlarında ise azaldığı dikkat çekmektedir. Kopma uzaması değerlerinin %3 Cu oranına kadar arttığı, daha sonrasında ise çekme dayanımında olduğu gibi azaldığı görülmektedir. Bu durum, Cu katkısıyla sertlik ve mukavemet değerlerinde meydana gelen artış, katı çözelti sertleştirme mekanizmasına dayandırılarak açıklanmıştır [26, 30, 31]. %2 Cu oranından sonra mukavemet düşüşünün alaşımdaki bakır oranının belirli bir değeri aşması sonucu çinko ve bakırca zengin intermetalik fazların (T' , θ , ϵ) oluşması ve bakırın büyük bir kısmının bu fazlar için kullanılması sonucu katı çözelti sertleşmesi mekanizmasının etkisinin azalmasından kaynaklandığı ileri sürülmüştür. Sertlik değerinin artan bakır oranıyla sürekli olarak artması bu tespiti doğrulamaktadır. Yani sertliği yüksek olan intermetalik fazların oluşması bakır katkısıyla sertlikte elde edilen artışı sağlamıştır [8, 26]. Ayrıca, ısıtıl işlemin, Zn-40Al-Cu alaşımlarında sertlik ve mukavemet değerlerini bir miktar artırdığı, kopma uzaması değerini ise az da olsa düşürdüğü görülmektedir [26].

Tablo 4. Farklı kimyasal bileşime sahip, gerek dökülmüş gerekse ısıtıl işlem görmüş durumdaki Zn-Al esaslı bazı alaşımların mekanik özellikleri

Alaşımlar	Özellikler			
	İşlem	Sertlik (BSD)	Çekme Dayanımı (MPa)	Kopma Uzaması %
Zn-40Al	A	94	273	4,9
Zn-40Al	B	138	461	3,9
Zn-60Al	A	101	302	8,0
Zn-80Al	A	105	307	9,5
Zn-40Al-1Si	A	118	291	3,3
Zn-40Al-1Si	B	153	478	2,3
Zn-40Al-2Si	A	125	300	3,1
Zn-40Al-2Si	B	159	485	1,9
Zn-40Al-3Si	A	124	295	2,9
Zn-40Al-3Si	B	158	479	1,9
Zn-40Al-4Si	A	123	286	3,0
Zn-40Al-4Si	B	157	471	2,0
Zn-40Al-1Cu	A	107	330	3,3
Zn-40Al-1Cu	B	159	415	1,5
Zn-40Al-2Cu	A	111	356	4,0
Zn-40Al-2Cu	B	169	455	1,5
Zn-40Al-3Cu	A	113	346	5,0
Zn-40Al-4Cu	A	116	344	3,5
Zn-40Al-5Cu	A	117	340	2,3

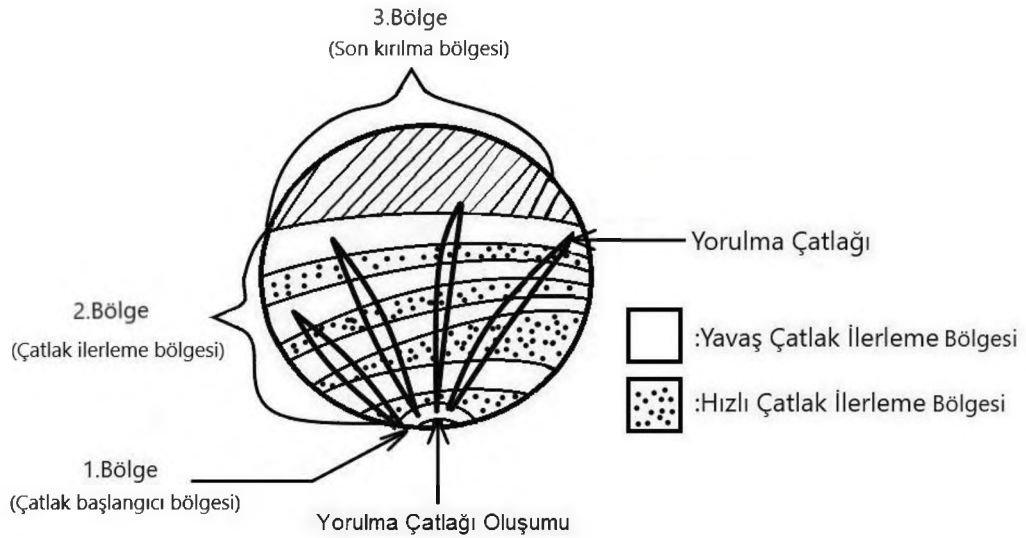
A: Dökülmüş

B: Sıcak işlemten sonra soğutulmuş ve yapay yaşlanma ile sertleştirilmiş

Bütün bu veriler dikkate alındığında söz konusu alaşımların mekanik özellikleri üzerinde başta Cu olmak üzere alaşım elementi katkısının ısıtıl işlemten daha etkili olduğunu söylemek mümkündür.

1.3.1. Zn-Al Alaşımlarının Yorulma Özellikleri

Makine parçaları kullanım sırasında tekrarlanan gerilmelerin etkisi altında çalışmaktadır. Bu gerilmeler normal koşullar altında parçanın statik mukavemet değerlerinden daha düşük olmasına rağmen, belirli sayıda tekrarlamayı aşması sonucunda metal yüzeyinin çatlamasına ve bu çatlamanın bir sonucu olarak parçanın kopmasına ya da kırılmasına neden olur. Bu olaya yorulma denir. Örneğin, dönen bir şafta etki eden statik yükün oluşturduğu gerilme tamamen değişkendir. Kullanım sırasında tekrarlanan gerilmeler malzemenin hasara uğramasına neden olur [20]. Şekil 3'e metallerde yorulma sonunda kırılan tipik bir yüzey şematik olarak gösterilmiştir. Bu şekilden görüldüğü gibi yorulma sonunda kırılan parçanın yüzeyi üç farklı bölgeden oluşur. Şekildeki; 1. bölge çatlak başlangıcı bölgesi veya orijin, 2. bölge çatlak ilerleme bölgesi olup eş eksenli bantlar veya bilezikler şeklindedir ve parlak bir görünüme sahiptir. Bu bölge çatlak ilerlemesinin hızlı ve yavaş olduğu kısımlardan oluşur. 3. bölge ise son kırılma bölgesidir. Bu bölgede parça artık uygulanan yükü taşıyamaz ve aniden kırılır. Bu bölgenin büyüklüğü uygulanan gerilme arttıkça artar [32].



Şekil 3. Metallerde yorulma kırılmasının genel görünümü

Bazı ticari Zn-Al esaslı alaşımların farklı döküm yöntemleri uygulanmış durumdaki yorulma dayanımı değerleri Tablo 5'te verilmiştir [3]. Bu değerler incelendiğinde alaşımların yorulma dayanımının döküm yöntemiyle yakından ilişkili olduğu görülmektedir.

Şöyle ki; basınçlı döküm yöntemiyle üretilen ZA-8 alaşımının yorulma dayanımı değerinin, kokil döküm yöntemi ile üretilen alaşımın yorulma dayanımı değerinin yaklaşık iki katına eşit olduğu, ZA-12 alaşımında, basınçlı döküm yönteminin kum döküm yöntemine göre malzemenin yorulma dayanımını az da olsa artırdığı görülmektedir. Ayrıca, kum döküm yöntemiyle üretilen ZA-27 alaşımının yorulma dayanımının, basınçlı döküm yöntemiyle üretilen alaşımın yorulma dayanımından daha yüksek olduğu görülmektedir [3].

Tablo 5. Bazı ticari ve Zn-Al esaslı alaşımların yorulma dayanımı değerleri

Alaşım	Döküm Yöntemi	Yorulma Dayanımı (MPa)
ZA-8	Kokil döküm	52
	Basınçlı döküm	103
ZA-12	Kum döküm	103
	Basınçlı döküm	117
ZA-27	Kum döküm	172
	Basınçlı döküm	145
Dökme demir (alm.graf.)	-	97
Bronz (SAE)	Kum döküm	110

Alaşımların yorulma performansının döküm yöntemine göre farklılık göstermesi en genel anlamda kullanılan döküm yöntemiyle oluşan gözenek miktarına dayandırılarak açıklanmıştır [33]. Şöyle ki; kokil döküm yönteminde basınçlı döküm yöntemine göre daha fazla gözenek olduğu bilinmektedir [33]. Bu gözenekler malzemede yorulma çatlaklarının oluşmasında önemli bir etkiye sahip olduğundan malzemenin yorulma ömrünü düşürmektedir [34].

Zn-Al esaslı alaşımların yorulma davranışlarına, alaşımı oluşturan bileşenlerin oranlarının, alaşım elementi katkısının ve çalışma ortamının da etkileri olduğu yapılan çalışmalarla belirlenmiştir [6, 21, 26, 35]. Nitekim yapılan çalışmalarda alüminyum oranı %20'den %80'e kademeli olarak çıkarıldığında yorulma dayanımının ve ömrünün artan alüminyum oranı ile arttığı görülmüştür [22, 26, 28]. Ayrıca, bakır katkısının Zn-40Al alaşımının sertlik ve çekme dayanımı gibi mekanik özelliklerinin yanı sıra yorulma

performansının da iyileştiği belirlenmiştir [26, 29]. Bu durum katı çözelti sertleştirmesi mekanizmasına dayandırılarak açıklanmıştır [26, 30, 31].

1.4. Literatür Özeti ve Çalışmanın Amacı

Zn-Al esaslı alaşımlar demir dışı çoğu metal ve alaşıma göre üstün mekanik ve tribolojik özelliklere sahiptir. Bununla birlikte bu alaşımların mukavemet değerlerinin bazı uygulamalarda yetersiz kalması ve boyutsal kararsızlık gibi dezavantajları da mevcuttur. Bu dezavantajları ortadan kaldırmak için başta Cu olmak üzere alaşım elementi katkısı ve ısıtıl işlem uygulanması gibi çeşitli yöntemlerin uygulandığı pek çok çalışma yapılmıştır. Ancak, Zn-Al alaşımları üzerine yapılan çalışmaların daha çok aşınma davranışları üzerine yoğunlaştığı ve sözü edilen alaşımların yorulma davranışlarının incelenmesine yönelik çalışmaların oldukça sınırlı kaldığı ve özellikle de yüksek oranda alüminyum içeren alaşımların yorulma davranışlarının hemen hemen hiç incelenmediği yapılan literatür araştırmasından ortaya çıkmaktadır. Bu alaşımların kullanımının büyük oranda kaymalı yatak üretimiyle sınırlı kalmasına neden olan bu durum, makine elemanı ve parça tasarımlarında bir eksiklik olarak ortaya çıkmakta söz konusu alaşımların kullanım alanlarının genişlemesine engel olmaktadır. Bu nedenle, bu çalışmada yüksek oranda alüminyum içeren Zn-%85-90-95Al alaşımlarının yorulma davranışlarının incelenmesi amaçlanmıştır. Ayrıca, Cu katkısının yüksek oranda alüminyum içeren ikili Zn-Al alaşımlarının yapı ve mekanik özellikleri ile yorulma davranışlarına etkisi incelenecektir. Böylelikle, bu alaşımların çeşitli mühendislik uygulamalarında kullanımının yaygınlaştırılmasına ve literatürde önemli bir boşluğun doldurulmasına katkıda bulunulacaktır.

2. DENEYSEL ÇALIŞMA

2.1. Alaşımların Üretimi

Bu çalışmada, yüksek oranda alüminyum içeren bir dizi ikili Zn-Al alaşımı (Zn-85Al, Zn-90Al, Zn-95Al) ve üçlü Zn-85Al-2Cu alaşımı kokil döküm yöntemi ile üretildi. Alaşımların üretilmesinde ticari saflıkta (%99,9) çinko ve yüksek saflıkta (%99,8) alüminyum kullanıldı. Ergitme işlemi, ısı kontrollü elektrikli pota fırını ile yapıldı. Ergitilen alaşımlar 680-700°C'den oda sıcaklığındaki 60x110x260 mm boyutlarında bir kokil kalıba dökülerek katılaştırıldı. Sıcaklık kontrolü bir termokupl kullanılarak gerçekleştirildi. Alaşımların üretiminde kullanılan elektrikli pota fırını, kalıp, sıcaklık kontrol ünitesi, termokupl gibi elemanlardan oluşan döküm ünitesinin fotoğrafı Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4. Ergitme işleminin yapıldığı elektrikli pota fırını

Döküm sonrası elde edilen külçelerin çekme boşluğu olarak bırakılan 60 mm’lik üst kısımları dökümün ardından kesilerek atıldı. Üretilen alaşımların kimyasal bileşimleri spektral analiz yöntemiyle belirlendikten sonra tornalama, frezeleme gibi talaşlı imalat yöntemleri kullanılarak çekme, yorulma, sertlik ve metalografi numuneleri üretildi.

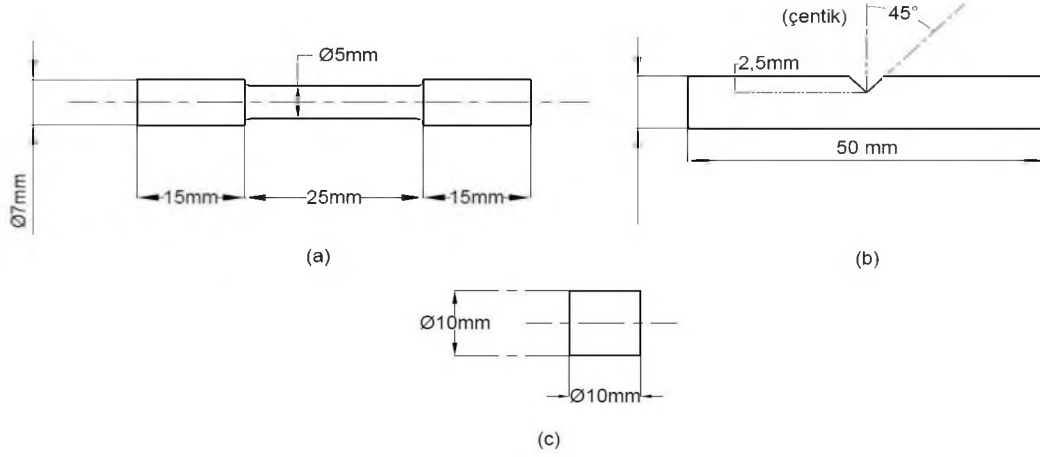
2.2. Metalografik İncelemeler

İçyapı incelemeleri için dökülmüş alaşımlardan standart metalografi yöntemiyle alınan ikili Zn-(%85,90,95)Al alaşımları hacimce %3 HCl ve %97 saf su içeren, üçlü Zn-85Al-2Cu alaşımı ise %4 NaOH ve %96 saf su içeren dağlama ile dağlandı. Hazırlanan numuneler stereo ışık mikroskopunda incelendi ve içyapılarını gösteren fotoğrafları uygun ölçeklerde çekildi. Numunelerin kırılma yüzeyleri ise bir taramalı elektron mikroskopu (SEM) kullanılarak incelendi. Ayrıca yorulma deneylerinde kırılan numunelerin dik kesiti alınarak standart metalografi yöntemiyle hazırlandıktan ve dağlandıktan sonra SEM yardımıyla incelendi.

2.3. Mekanik Deneyler

2.3.1. Çekme, Sertlik ve Darbe Deneyleri

Her alaşımın çekme deneyleri için üçer adet TS EN ISO 6892-1, darbe deneyleri üçer adet TS EN ISO 14556 ve sertlik deneyleri için ise bir adet TS EN ISO 6506-1 standartlarına uygun numune hazırlandı. Hazırlanan numunelerin şekil ve boyutları Şekil 5’te verilmiştir.

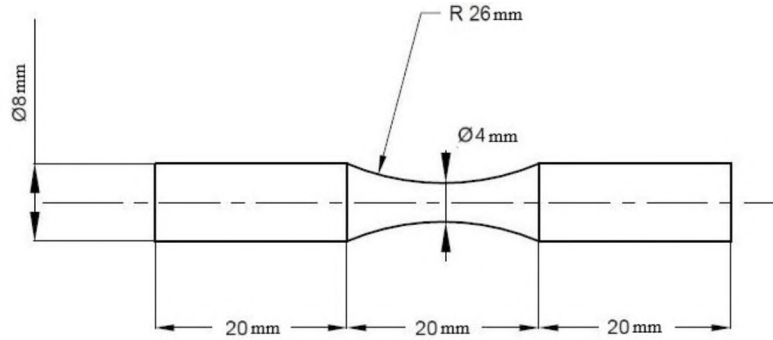


Şekil 5. Talaşlı imalat ile elde edilen (a) çekme,(b) darbe ve (c) sertlik deneyi numunelerinin şekli ve boyutları

Çekme deneyleri 0,25 mm/s çene hızıyla üniversal bir çekme makinesinde, darbe deneyleri maksimum darbe enerjisi 500 kg.cm ($\pm 0,5$ kg.cm) olan bir Charpy deney düzeneğinde gerçekleştirildi. Her bir deney en az üç kez tekrarlanarak alaşımlara ait akma dayanımı, çekme dayanımı, kopma uzaması ve darbe dayanımı değerleri belirlendi. Sertlik ölçümleri Brinell sertlik ölçme yöntemi kullanılarak 31,25 kg yük altında ve 2,5 mm çaplı bilye uç ile gerçekleştirildi. Numunelere ait ortalama sertlik değeri numune üzerinden 5 farklı sertlik ölçümü yapılarak ve bu ölçümlerin aritmetik ortalaması alınarak belirlendi.

2.3.2. Yorulma Deneyleri

Yorulma numuneleri, talaşlı imalat ile yüzeyleri hassas olacak şekilde hazırlandı. Yorulma numunesinin şekil ve boyutları Şekil 6’da verilmiştir.



Şekil 6. Yorulma numunesinin şekli ve boyutları

Üretilen alaşımların yorulma davranışlarının incelenmesi için dönel eğmeli yorulma deney düzeneği kullanılmıştır. Bu yorulma düzeneği 2 kW'lık bir elektrik motoru, numuneleri sabitlemek için 2 adet örnek tutucu, 2 adet mil, milleri sabitlemek için gerekli hassasiyete sahip 2 tane ana yatak, yük askı kolu ve kumanda ünitesi gibi elemanlardan oluşmaktadır. Deney düzeneğinin genel görünümü Şekil 7'deki fotoğrafta verilmiştir.

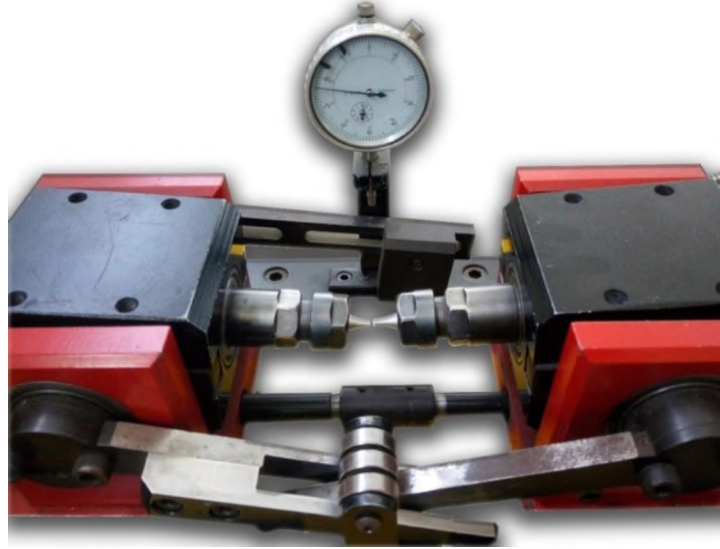


Şekil 7. Dönel eğmeli yorulma deney düzeneği

Deney düzeneğinde oluşabilecek açısal sapmalar iki mil arasına kardan kavraması yerleştirilerek engellenmiştir. Böylece sisteme açısal ve eksenel hareket serbestliği kazandırılarak dengeli çalışması sağlanmıştır. Eksenel hareketler sonsuz vida ile motorun hareket ettirildiği bir sistemle sağlanmaktadır. Kumanda sistemi ünitesi güç şalteri, devir ayarı şalteri ve devir sayacından oluşmaktadır. Deney düzeneği opsiyonel olarak iki sabit devir sayısında (1500 dev/d ve 3000 dev/d) çalışabilmektedir. Numuneye uygulanması istenilen eğme gerilmesi yük hücresi ile otomatik olarak veya gerekli ağırlık yük askı koluna asılmak suretiyle elde edilmektedir.

Talaşlı imalat ile hazırlanmış yorulma örneği farklı boyutlar için uygun olan örnek tutuculara sabitlenmektedir. Numuneye yük askı koluna ağırlık asılarak eğme yükü uygulanmakta ve bu eğme yükü, yükleme kolları arasında sabit bir eğme momenti oluşturmaktadır. Sürekli olarak döndürülen örneğin en dar kesitinde maksimum eğilme

gerilmesi oluşmakta ve böylece her noktaya ortalama gerilme değeri sıfır olacak şekilde sinüzoidal bir değişim sergileyen çekme ve basma gerilmeleri etkimektedir.



Şekil 8. Kırılmış bir numunenin resmi

Yorulma deney düzeneğinin numune kırıldığı andaki görünümü Şekil 8'deki fotoğrafta verilmiştir.

Söz konusu deney düzeneğinde asılan yükle (P) numunenin orta noktasında oluşan maksimum eğme gerilmesi ($\sigma_{eğ}$) arasındaki ilişki aşağıda bulunan denklem kümesi ile verilmiştir.

$$\sigma_{eğ} = M_{eğ} / W_{eğ}$$

$$\sigma_{eğ} = P.l / (\pi d^3 / 32) \quad (1)$$

$$\sigma_{eğ} = 18,6P \quad (2)$$

Denklem kümesinde, P'nin birimi [N], $\sigma_{eğ}$ 'nin birimi ise [MPa]'dır. $\sigma_{eğ}$ eğilme gerilmesini, $M_{eğ}$ eğme momentini, $W_{eğ}$ eğme için mukavemet momentini ifade etmektedir. Belirtilen denklem takımında Numune çapı $d=4$ mm ve moment kolu $l=117$ mm olarak alındı. Deneyde uygulanan devir sayısı ise 3000 dev/d'dır.

Yorulma deneyleri, Zn-85Al alaşımı için 105-219 MPa, Zn-90Al alaşımı için 82-173 MPa, Zn-95Al alaşımı için 59-110 MPa ve Zn-85Al-2Cu alaşımı için 105-219 MPa arasında değişen farklı gerilme değerlerinde yapıldı. Deneylerden elde edilen veriler kullanılarak her bir alaşım için gerilme-çevrim sayısı (S-N) eğrileri çizildi.

3. BULGULAR

3.1. Alaşımların Kimyasal Bileşimleri

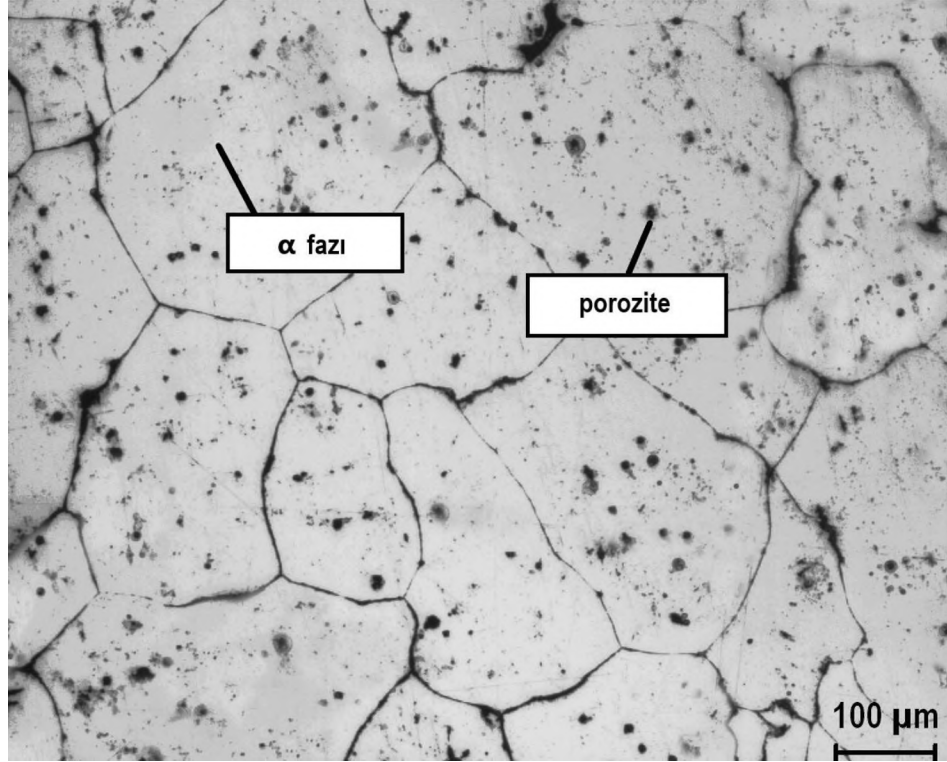
Üretilen alaşımların (Zn-85Al, Zn-90Al, Zn-95Al ve Zn-85Al-2Cu) kimyasal bileşimleri Tablo 6’da verilmiştir.

Tablo 6. Alaşımların kimyasal bileşimleri

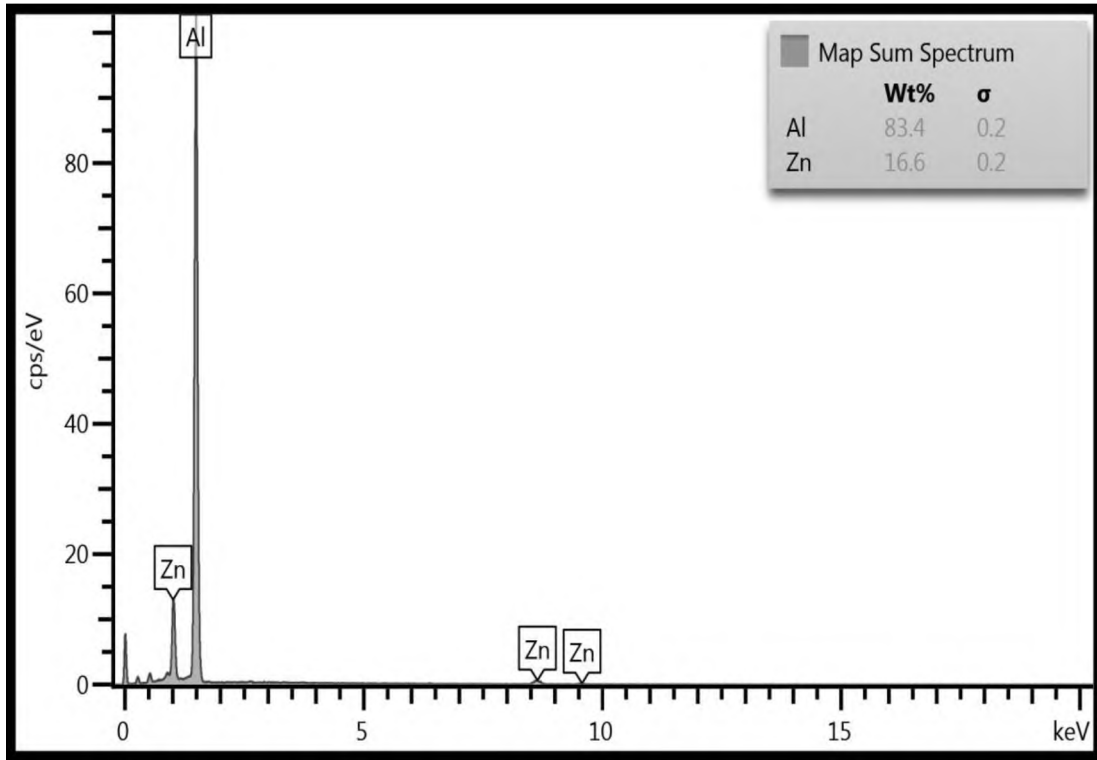
Alaşım	Kimyasal Bileşim (% ağırlık)				
	Al	Zn	Si	Cu	Fe
Zn-85Al	84,6	15,2	0,1	0,1	-
Zn-90Al	90,1	9,9	-	-	-
Zn-95Al	95,1	4,8	-	-	0,1
Zn-85Al-2Cu	84	13,8	-	2,1	0,1

3.2. Yapısal İncelemelerden Elde Edilen Bulgular

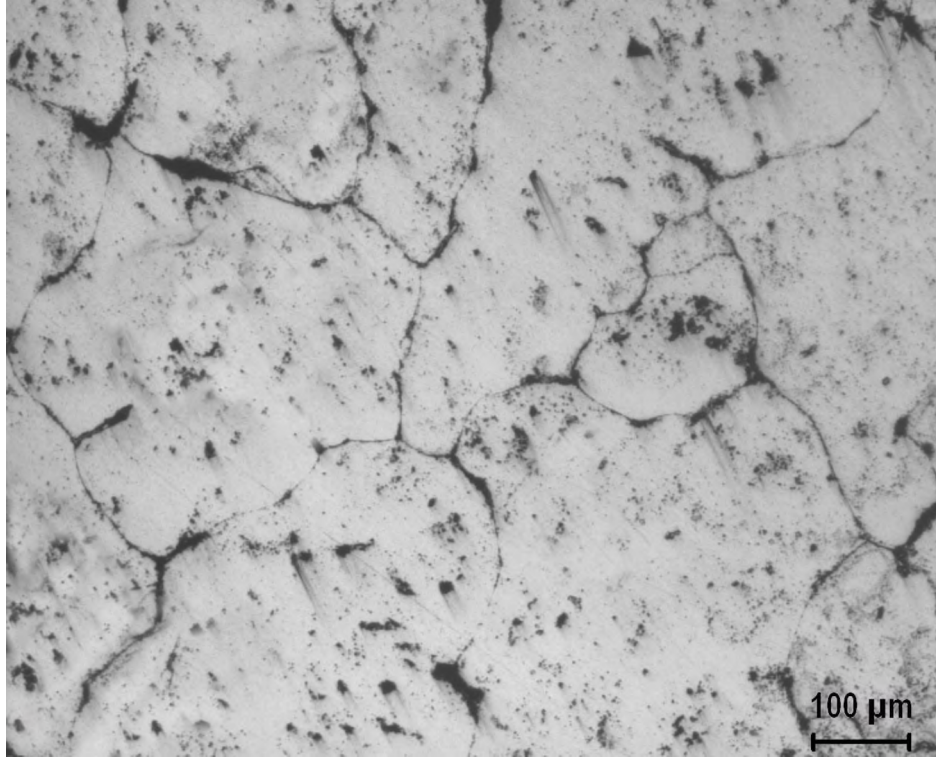
Döküm yöntemi ile üretilen ikili Zn-85Al, Zn-90Al, Zn-95Al alaşımları ile üçlü Zn-85Al-2Cu alaşımının içyapısı ve içyapısındaki fazları gösteren optik fotoğraflar Şekil 9-11-13-15’te verilmiştir. Bu fotoğraflardan, söz konusu alaşımların geniş α tanelerinden oluşan bir içyapı sergilediği ve tane sınırlarının artan Al oranı ile belirginliğini kaybettiği görülmektedir. Ayrıca ikili Zn-Al alaşımlarının mikro gözenekler içerdiği ve mikro gözenek miktarının artan Al oranı ile arttığı, bakır katkısı yapılmış Zn-85Al-2Cu alaşımında ise minimum olduğu gözlemlenmektedir. Zn-85Al-2Cu içyapısının ötektoid dönüşüm sonucu oluşan geniş α taneleri, tane sınırlarını çevreleyen $\alpha+\theta$ fazlarından ve daha çok tane sınırlarında çökelen bakırca zengin θ fazından oluştuğu görülmektedir. Görüntülerin alındığı bölgelerin X-ışını kırınım desenleri Şekil 10-12-14-16’da verilmiştir. Şekil 17-18’de ise θ ve $\alpha+\theta$ fazlarından elde edilen noktasal X-ışını kırınım desenleri verilmiştir. Bu şekillerden, söz konusu alaşımlarda oluşan fazların kimyasal bileşimlerinin, ikili Zn-Al ve üçlü Zn-Al-Cu faz diyagramlarında gösterilenlerle uyumlu olduğu görülmektedir.



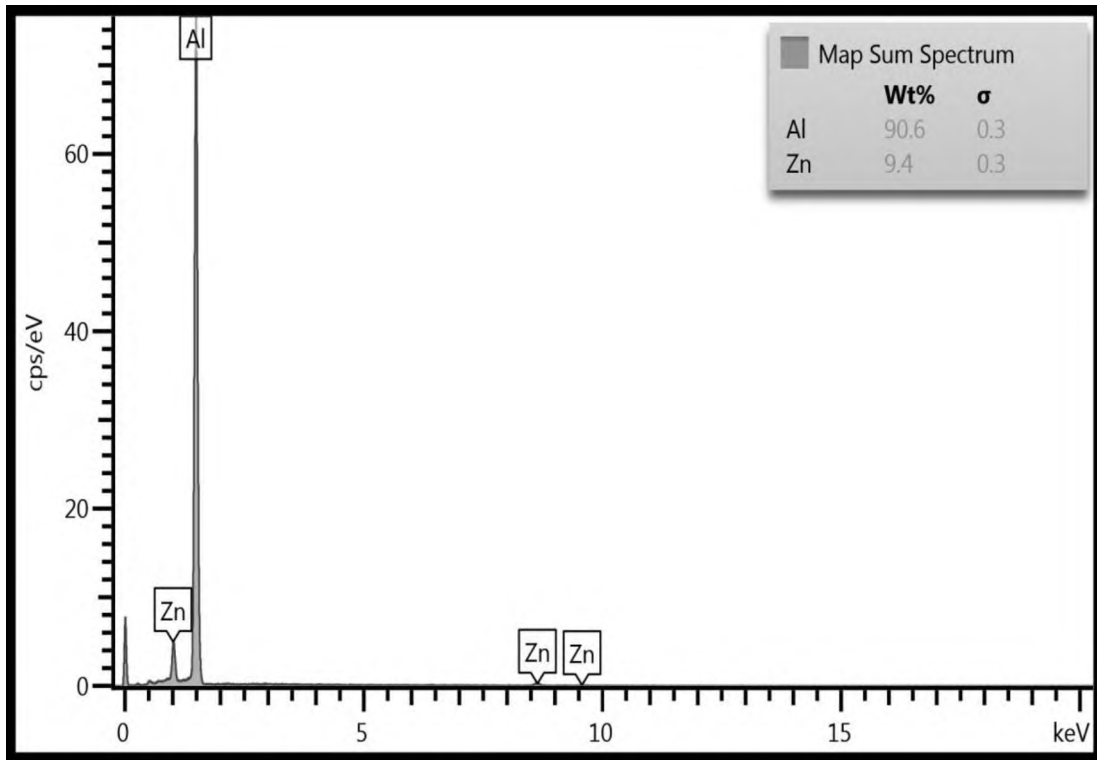
Şekil 9. Zn-85Al alaşımlının dökülmüş durumdaki içyapısı



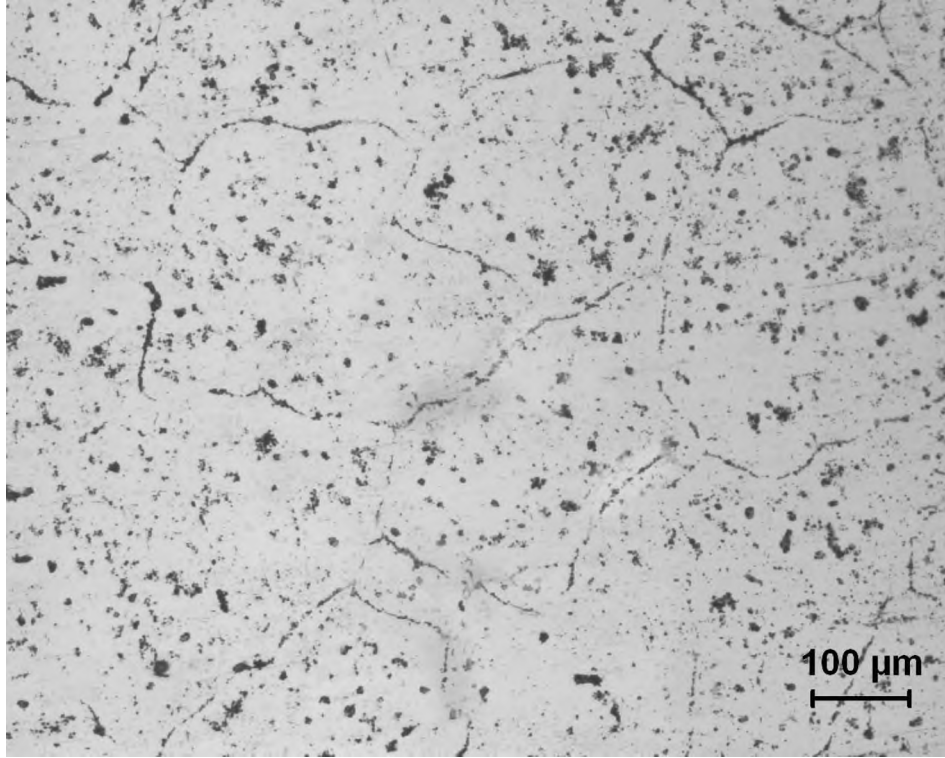
Şekil 10. Zn-85Al alaşımına ait bölgesel EDS analizi



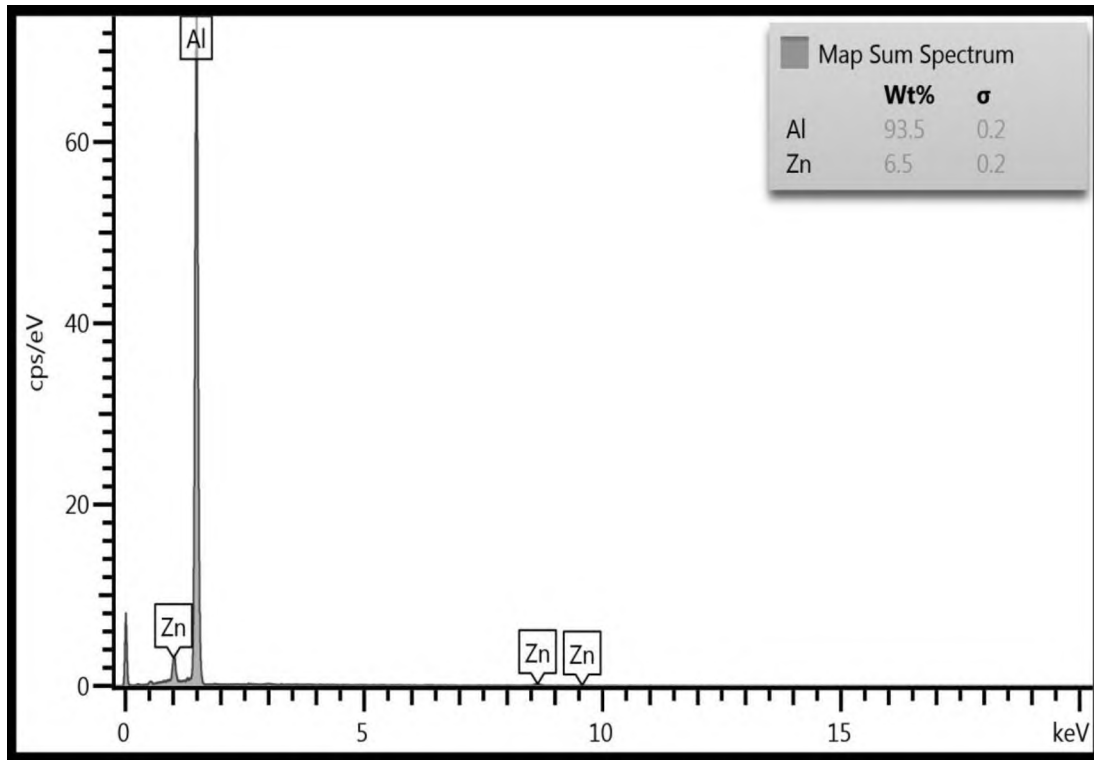
Şekil 11. Zn-90Al alaşımlının dökülmüş durumdaki içyapısı



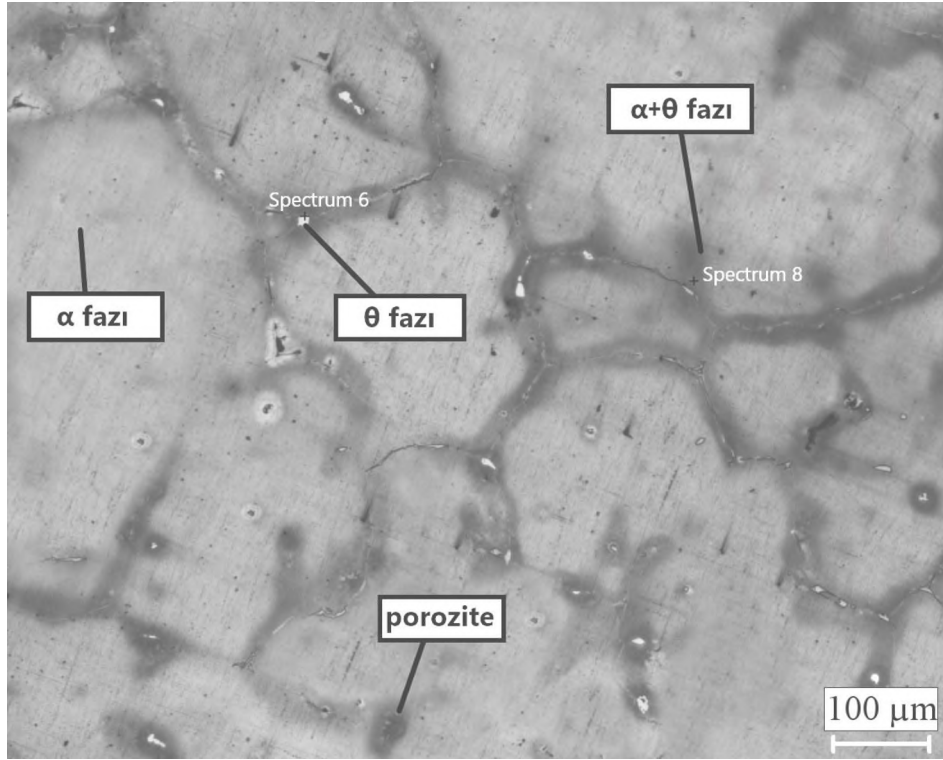
Şekil 12. Zn-90Al alaşımına ait bölgesel EDS analizi



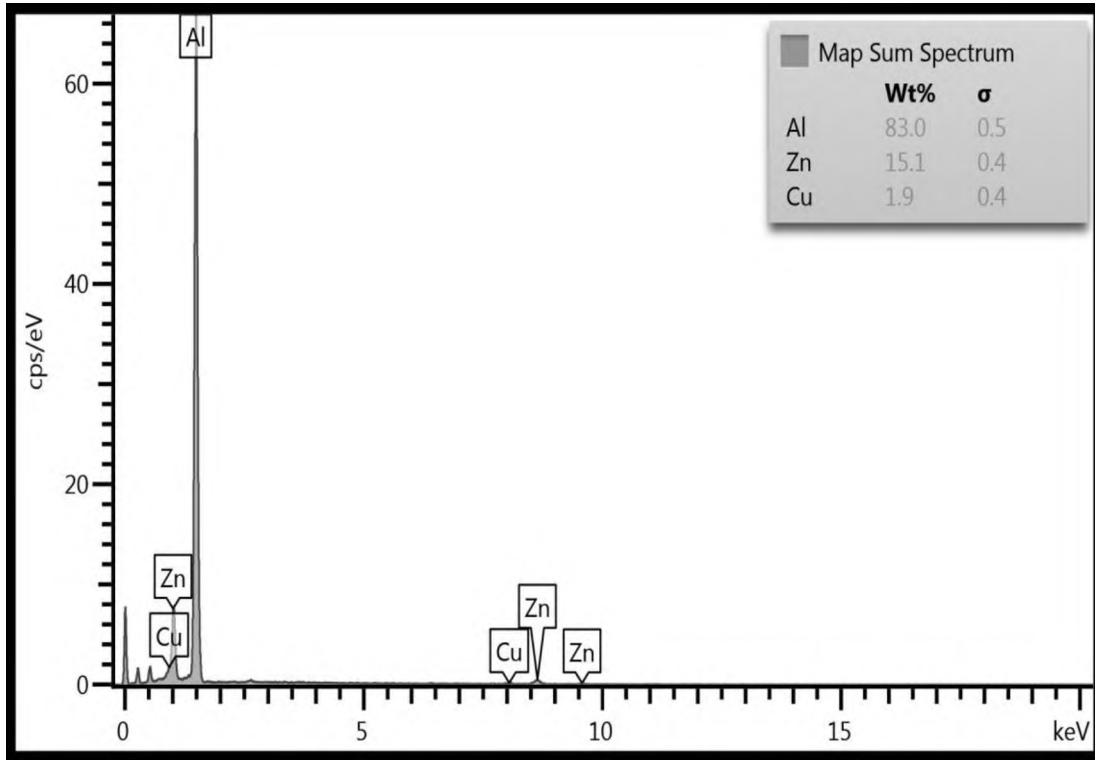
Şekil 13. Zn-95Al alaşımlının dökülmüş durumdaki içyapısı



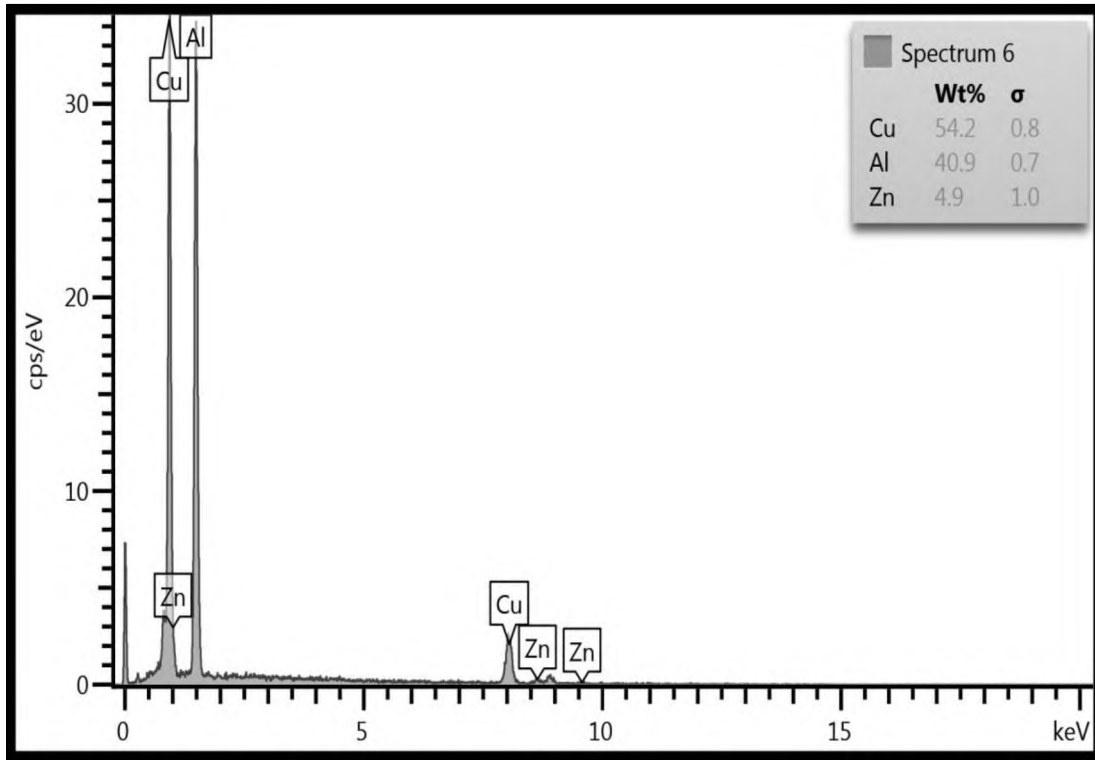
Şekil 14. Zn-95Al alaşımına ait bölgesel EDS analizi



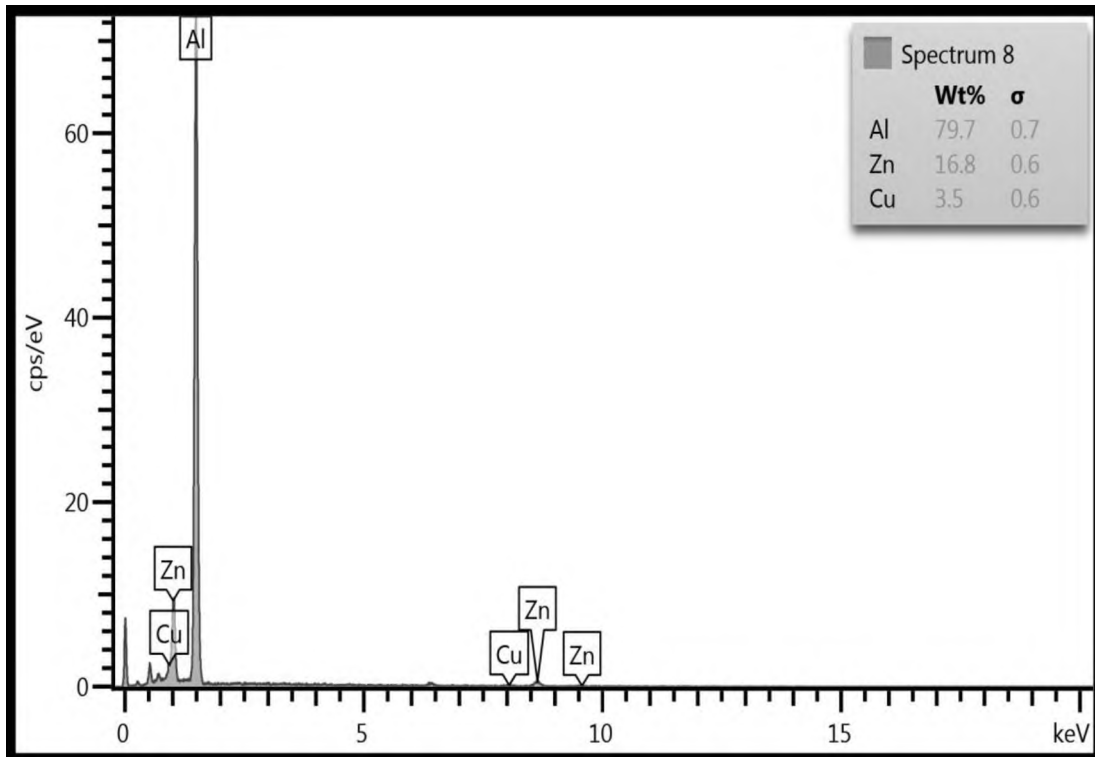
Şekil 15. Zn-85Al-2Cu alaşımlarının dökülmüş durumdaki içyapısı



Şekil 16. Zn-85Al-2Cu alaşımına ait bölgesel EDS analizi



Şekil 17. Zn-85Al-2Cu alaşımında oluşan θ fazına ait noktasal EDS analizi



Şekil 18. Zn-85Al-2Cu alaşımında oluşan $\alpha+\theta$ fazına ait noktasal EDS analizi

3.3. Mekanik Deneylerden Elde Edilen Bulgular

3.3.1. Sertlik, Çekme ve Darbe Deneylerinden Elde Edilen Bulgular

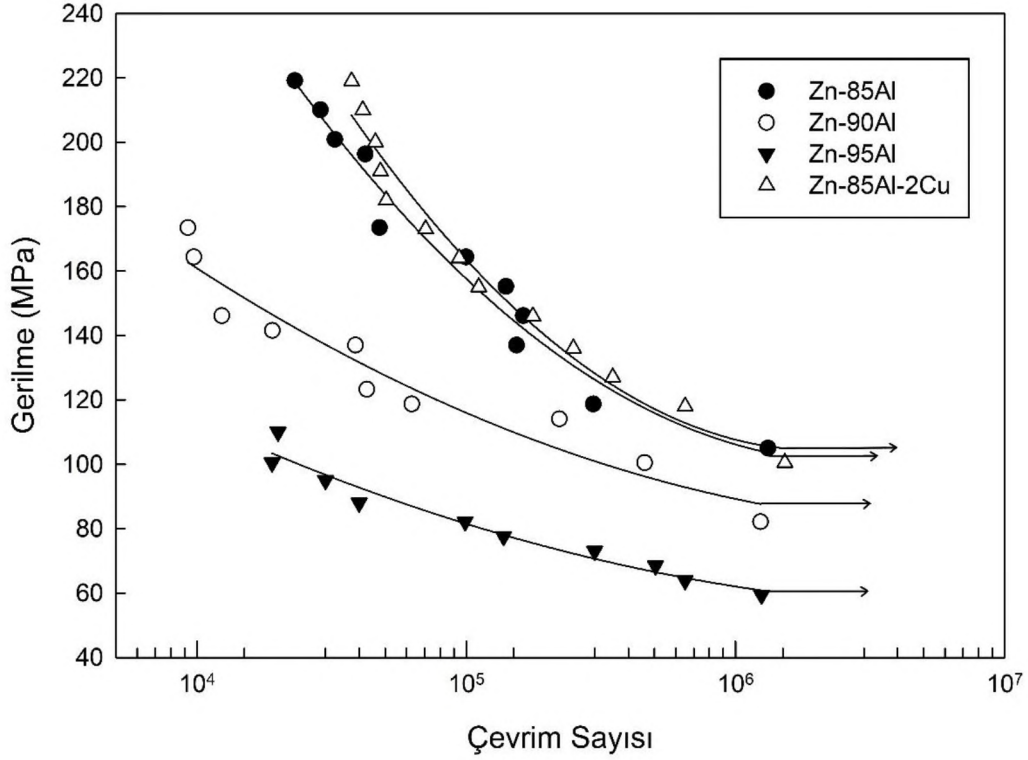
Zn-85Al, Zn-90Al, Zn-95Al ve Zn-85Al-2Cu alaşımlarının dökülmüş durumdaki sertlik, çekme dayanımı, akma dayanımı, kopma uzaması ve darbe dayanımı değerleri Tablo 7’de verilmiştir. Tablodan, ikili Zn-Al alaşımlarının sertlik, akma dayanımı ve çekme dayanımı değerlerinin artan Al oranı ile azaldığı, kopma uzaması ve darbe dayanımının ise arttığı görülmektedir. Alaşımlar içerisinde en yüksek sertlik ve mukavemet değerleri Zn-85Al alaşımından elde edildiğinden söz konusu alaşıma %2 oranında Cu katılarak, Cu katkısının mekanik özelliklerde ortaya çıkardığı değişim incelenmiştir. Bu incelemelerin sonucunda %2’lik Cu ilavesiyle sertlik, akma dayanımı ve çekme dayanımı değerlerinin önemli ölçüde arttığı, kopma uzaması ve darbe dayanımı değerlerinin ise azaldığı görülmüştür.

Tablo 7. İkili Zn-85Al, Zn-90Al, Zn-95Al ve üçlü Zn-85Al-2Cu alaşımlarının mekanik özellikleri

Alaşımlar	Sertlik (BSD)	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Kopma Uzaması, %	Darbe Enerjisi (J)
Zn-85Al	64,5	168	258	9	5,8
Zn-90Al	41	115	178	20	12,6
Zn-95Al	26	92	134	32	14,1
Zn-85Al-2Cu	77	202	534	7	4,6

3.3.2. Yorulma Deneylerinden Elde Edilen Bulgular

Dökülmüş durumdaki ikili Zn-(85,90,95)Al ve üçlü Zn-85Al-2Cu alaşımlarının yorulma deneylerinden elde edilen verilerle çizilen gerilme-çevrim sayısı (S-N) eğrilerini gösteren grafik Şekil 19’da verilmiştir.



Şekil 19. Alaşımların gerilme-çevrim sayısı eğrileri

Şekil 19'dan, bu alaşımlardan elde edilen gerilme-çevrim sayısı eğrilerinin literatürde demir dışı metaller için verilen eğrilerle uyumlu olduğu [26, 29] ve alaşımlara uygulanan gerilme değeri düştükçe çevrim sayısı değerlerinin parabolik bir şekilde arttığı görülmektedir. Bu eğrilerden ayrıca, ikili Zn-Al alaşımları içerisinde en yüksek yorulma dayanımı ve en uzun yorulma ömrü değerlerinin Zn-85Al alaşımından elde edildiği, yani söz konusu değerlerin artan Al oranı ile azaldığı görülmektedir. Ayrıca, %2'lik bakır katkısının Zn-85Al alaşımının yorulma performansını az da olsa iyileştirdiği görülmektedir.

3.3.2.1. Yorulma Deneylerinden Elde Edilen Verilerin Korelasyonu

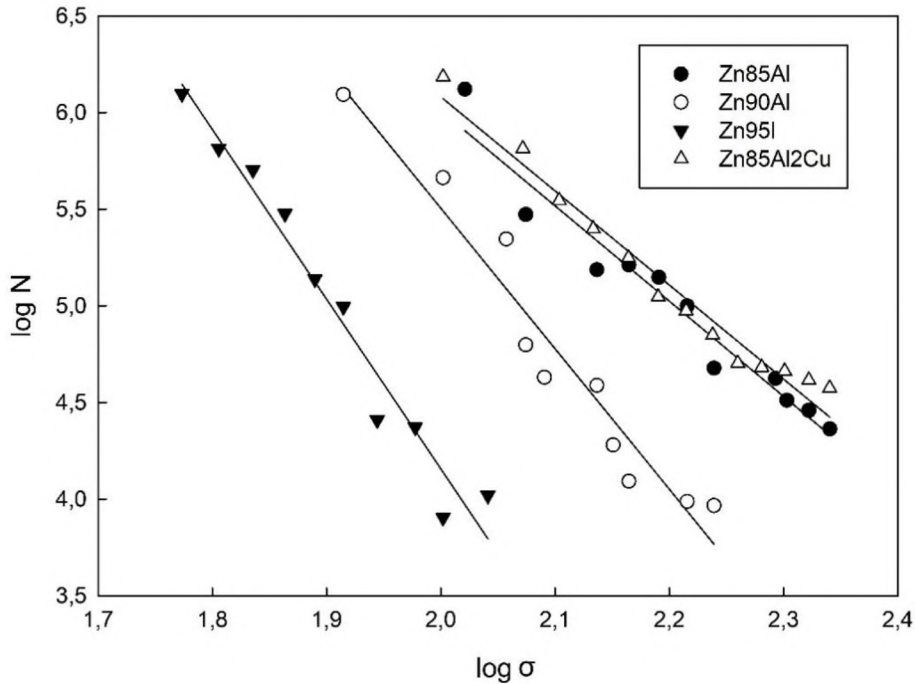
Aşağıdaki formülle ifade edilen Basquin bağıntısının ortalama gerilmenin sıfır olduğu uzun ömürlü yorulma durumunda, malzemelerin yorulma dayanımı ve yorulma ömrü arasında geçerli olduğu bilinmektedir. [36].

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

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

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

şeklinde ifade edilebilir. Basquin bağıntısının bir malzeme için geçerli olması durumunda ise $\log N$ 'nin $\log \sigma$ 'ya göre değişiminin lineer ve bu doğrunun eğiminin de k olması gerekir [37]. Yapılan bazı çalışmalarda, Zn-Al alaşımlarının değişik korozyon ortalarındaki (kuru hava, NaCl ve HCl sulu çözeltisi) yorulma davranışının [29] ve farklı rota ve paso sayılarında EKAE yöntemi uygulanmış Zn-60Al ve Zn-80Al alaşımlarının yorulma davranışlarının Basquin bağıntısı ile ifade edilebileceği belirlenmiştir [22]. Bu çalışmada ise Zn-85Al, Zn-90Al, Zn-95Al ve Zn-85Al-2Cu alaşımlarından yorulma deneylerinden elde edilen veriler kullanılarak çizilen ve yorulma ömrünün ($\log N$) gerilme genliğine ($\log \sigma$) göre değişimini gösteren doğruları içeren grafik Şekil 20'de verilmiştir. En küçük kareler yöntemi kullanılarak çizilen bu doğruların korelasyon katsayılarının (r) 1'e çok yakın olduğu görülmüştür. Bu nedenle, söz konusu alaşımların yorulma davranışlarının Basquin bağıntısı ile ifade edilebileceği sonucuna varılmıştır.



Şekil 20. Alaşımların $\log \sigma - \log N$ eğrileri sayısal eğrileri

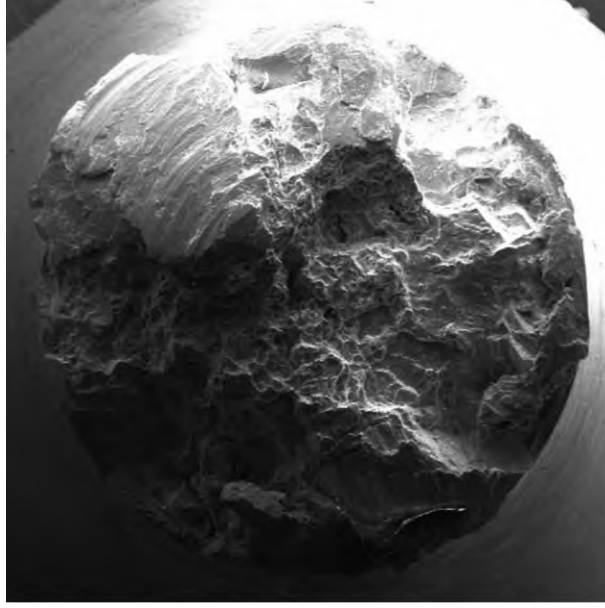
İkili Zn-(%85,90,95)Al alaşımların k ve A değerleri ve c (korelasyon katsayısı) sabiti belirlenmiş ve bu değerler Tablo 8’de verilmiştir. Bu tablodan söz konusu alaşımların en yüksek k ve A değerlerinin Zn-95Al, en düşük değerlerinin ise Zn-85Al-2Cu alaşımından elde edildiği görülmektedir.

Tablo 8. İkili Zn-85Al, Zn-90Al, Zn-95Al ve üçlü Zn-85Al-2Cu alaşımlarının k ve A değerleri ile c (korelasyon katsayısı) sabiti

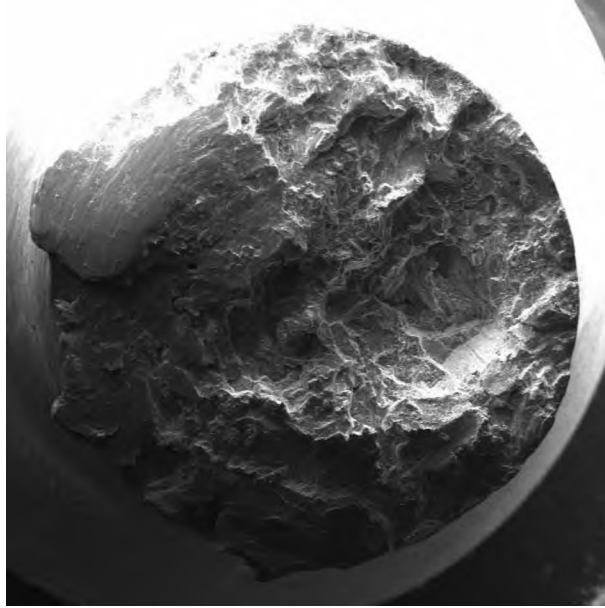
Alaşım	k	A	c
Zn-85Al	4,92	15,86	0,97
Zn-90Al	7,26	20,03	0,97
Zn-95Al	8,77	21,71	0,98
Zn-85Al-2Cu	4,87	15,80	0,99

3.3.2.2. Yorulma Örneklerinin Kırılma Yüzeylerinin İncelenmesinden Elde Edilen Bulgular

Dökülmüş durumdaki Zn-85Al, Zn-90Al, Zn-95Al ve Zn-85Al-2Cu alaşımlarına ait yorulma örneklerinin kırık yüzeylerini gösteren SEM fotoğrafları Şekil 21-24’te verilmiştir. Şekillerden kırılma yüzeylerinin tipik yorulma yüzeyine benzer olup gevrek bir davranış sergilediği görülmektedir. Şekil 21-24’ten ikili alaşımlarda alüminyum oranı arttıkça daha pürüzsüz kırık yüzeylerin elde edildiği, bakır katkısının ise daha pürüzlü bir kırık yüzeyine neden olduğu görülmektedir. Söz konusu alaşımların yorulma çatlaklarını gösteren SEM fotoğrafları Şekil 25-32’de verilmiştir. Zn-85Al alaşımının yorulma sonucu kırılan kırık yüzeyini gösteren SEM fotoğrafı Şekil 25’te, detayı ise Şekil 26’da verilmiştir. Burada, yorulma çatlağının poroziteden başlayarak tane sınırı boyunca ilerlediği görülmektedir. Benzer durum Zn-90Al, Zn-95Al ve Zn-85Al-2Cu alaşımlarına ait kırık yüzeylerde de görülmüştür. Söz konusu alaşımların kırık yüzeylerini gösteren fotoğraflar Şekil 27-29-31’de, detayları ise Şekil 28-30-32’de görülmektedir. İkili Zn-Al ve üçlü Zn-85Al-2Cu alaşımlarının yorulma deneyi sonucu oluşan kırılma yüzeylerinde çatlak oluşumunun ve oluşan kırılmanın hangi faz bölgelerinde meydana geldiğini belirlemek amacıyla alaşımların kırık yüzeylerinin dikey kesiti alınarak bu bölgelerin içyapıları standart metalografi yöntemiyle incelenmiştir. Yorulma çatlaklarının tane sınırları boyunca ilerlediği içyapı fotoğrafı Şekil 33’te verilmiştir.



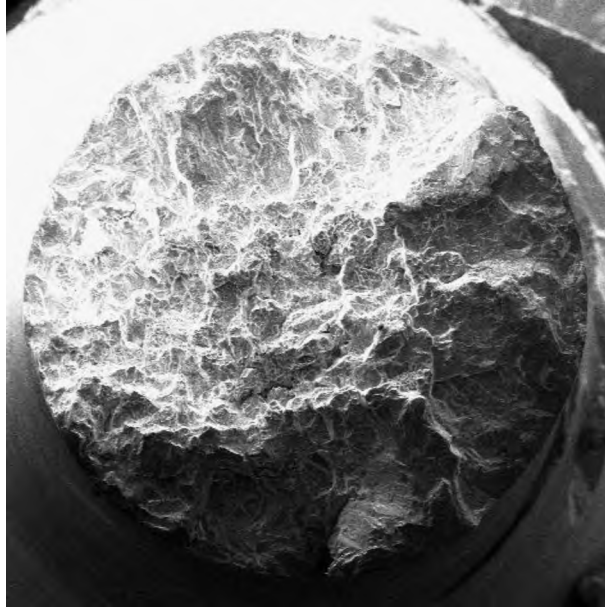
Şekil 21. 142 MPa'lık gerilmede yorulma deneyine tabi tutulmuş olan Zn-85Al alaşımının yorulma numunesinin kırık yüzeyinin genel SEM görüntüsü



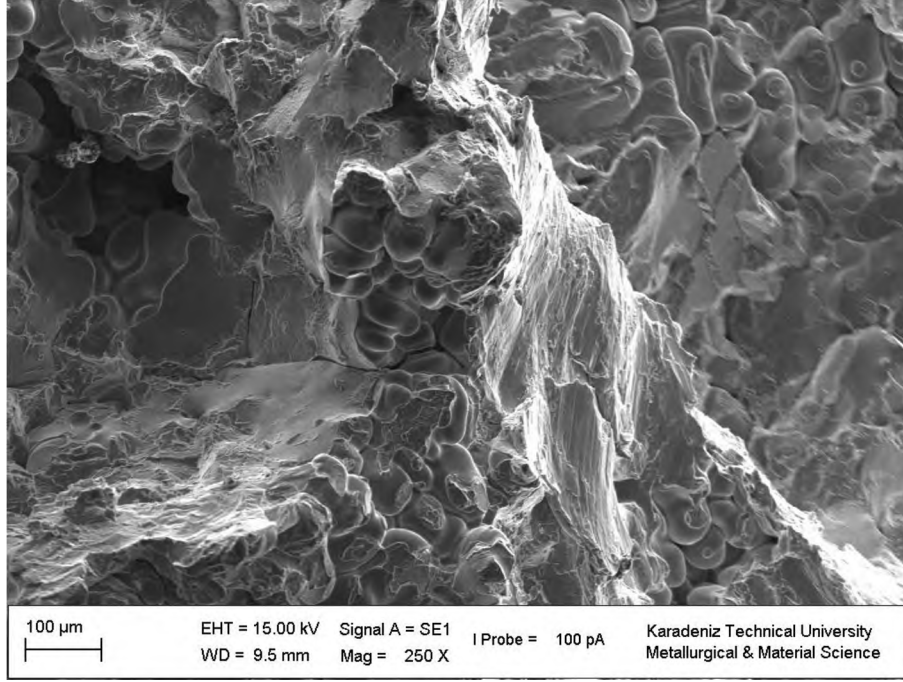
Şekil 22. 146 MPa'lık gerilmede yorulma deneyine tabi tutulmuş olan Zn-90Al alaşımının yorulma numunesinin kırık yüzeyinin genel SEM görüntüsü



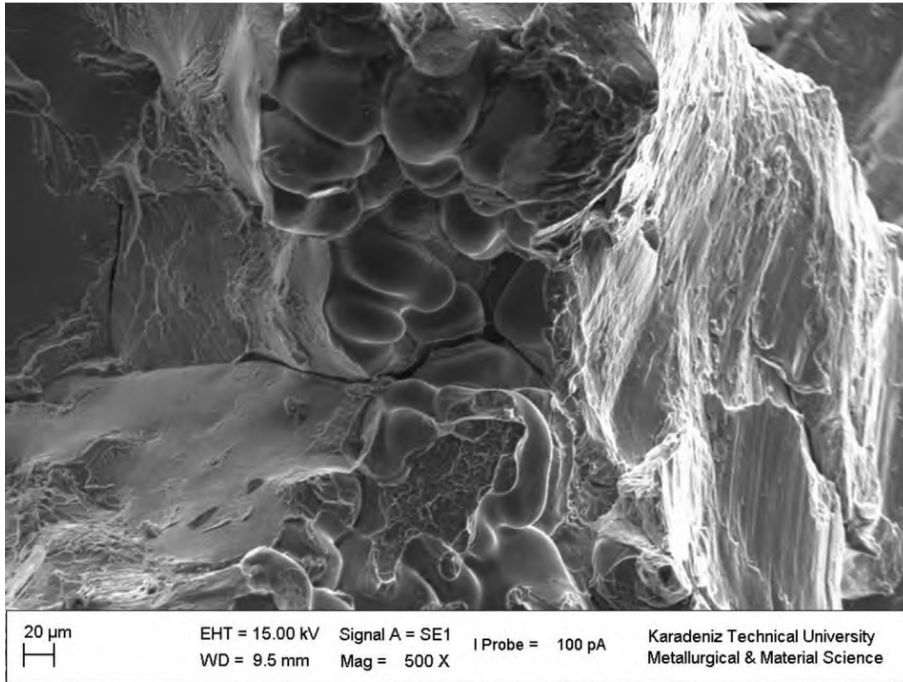
Şekil 23. 64 MPa’lık gerilmede yorulma deneyine tabi tutulmuş olan Zn-95Al alaşımasının yorulma numunesinin kırık yüzeyinin genel SEM görüntüsü



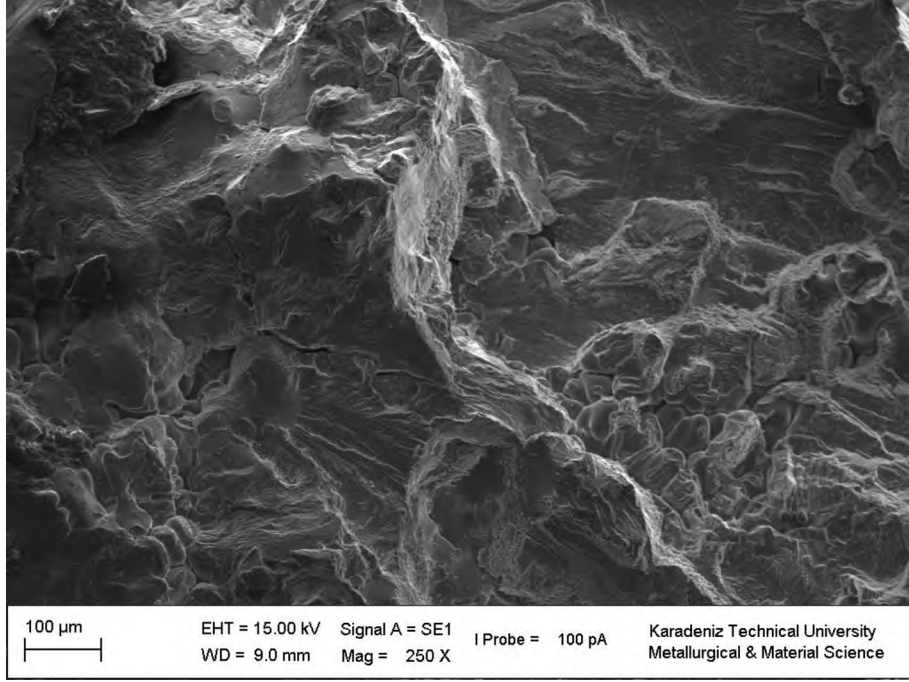
Şekil 24. 146 MPa’lık gerilmede yorulma deneyine tabi tutulmuş olan Zn-85Al-2Cu alaşımasının yorulma numunesinin kırık yüzeyinin genel SEM görüntüsü



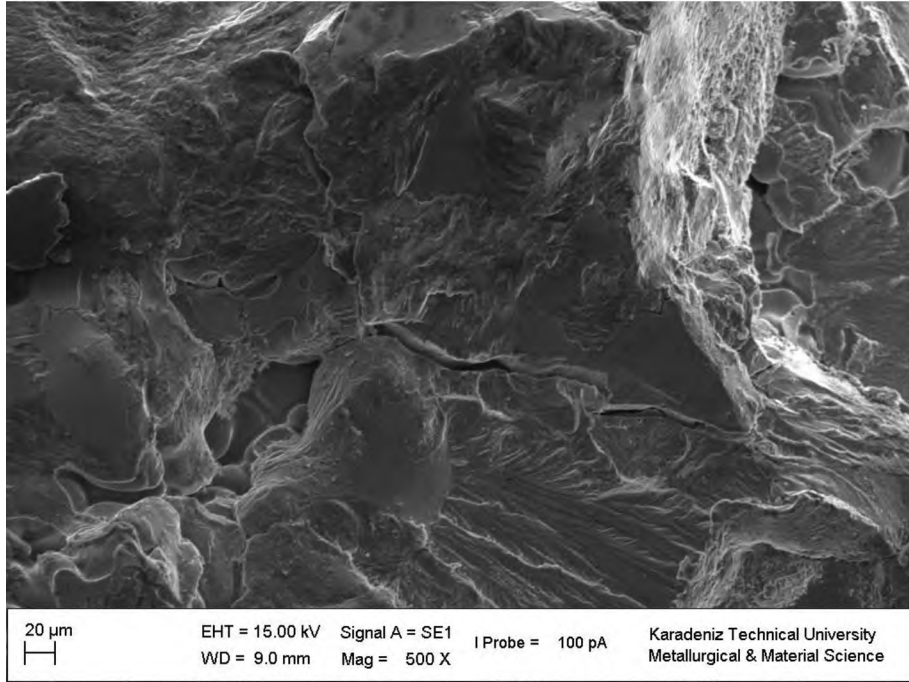
Şekil 25. 142 MPa'lık gerilmede yorulma deneyine tabi tutulmuş olan Zn-85Al alaşımının yorulma numunesinin kırık yüzeyinin SEM görüntüsü



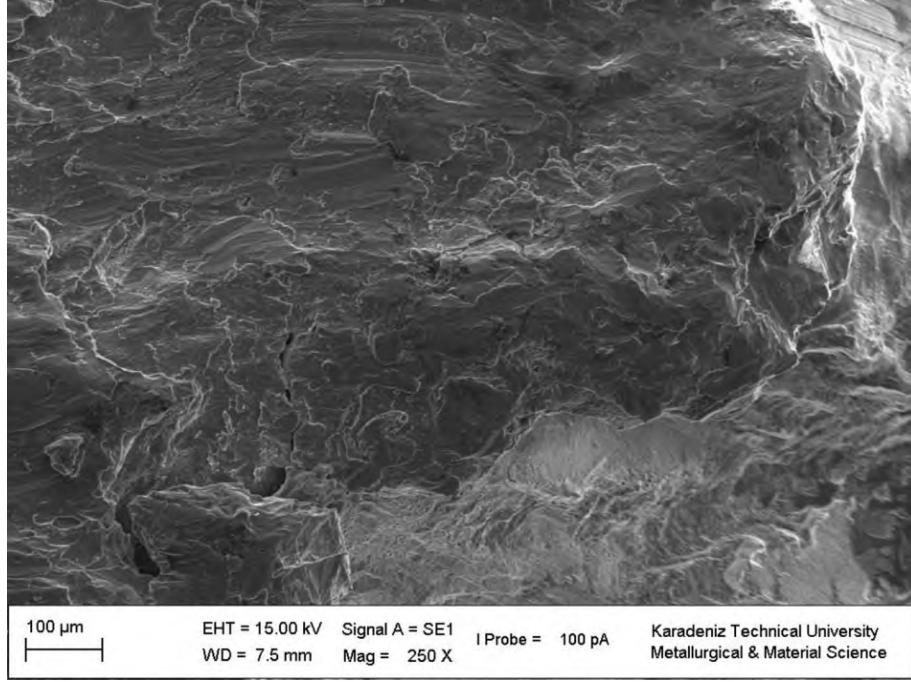
Şekil 26. 142 MPa'lık gerilmede yorulma deneyine tabi tutulmuş olan Zn-85Al alaşımının yorulma numunesinin kırık yüzeyi detayının SEM görüntüsü



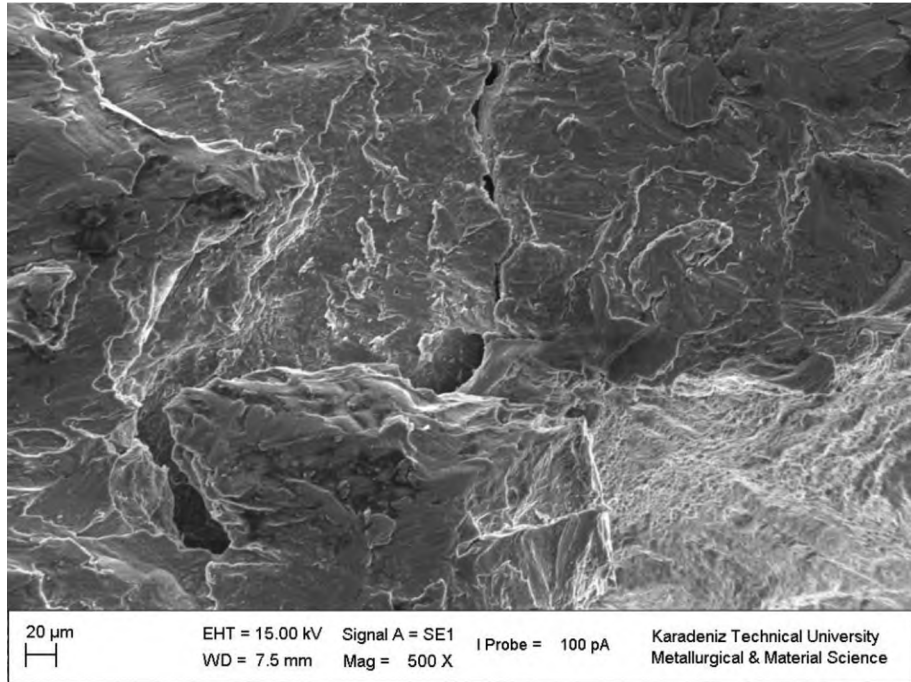
Şekil 27. 146 MPa’lık gerilmede yorulma deneyine tabi tutulmuş olan Zn-90Al alaşımının yorulma numunesinin kırık yüzeyinin SEM görüntüsü



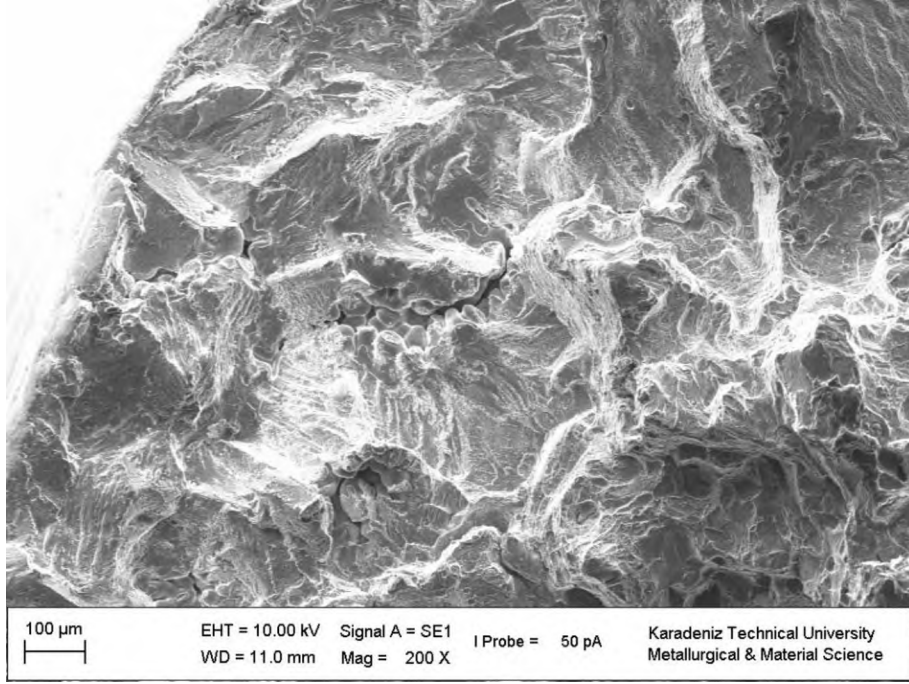
Şekil 28. 146 MPa’lık gerilmede yorulma deneyine tabi tutulmuş olan Zn-90Al alaşımının yorulma numunesinin kırık yüzeyi detayının SEM görüntüsü



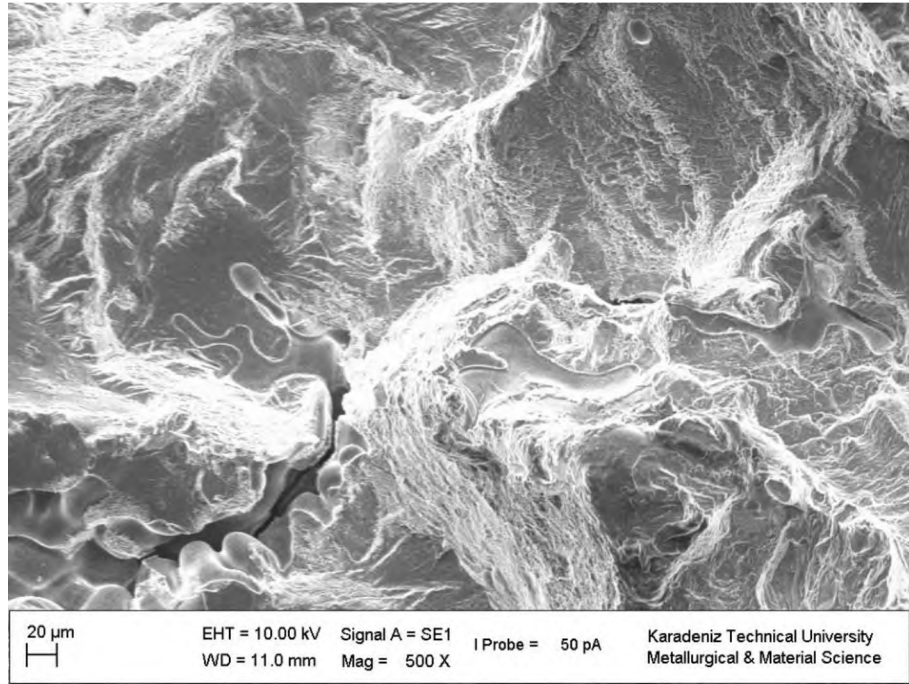
Şekil 29. 64 MPa’lık gerilmede yorulma deneyine tabi tutulmuş olan Zn-95Al alaşımının yorulma numunesinin kırık yüzeyinin SEM görüntüsü



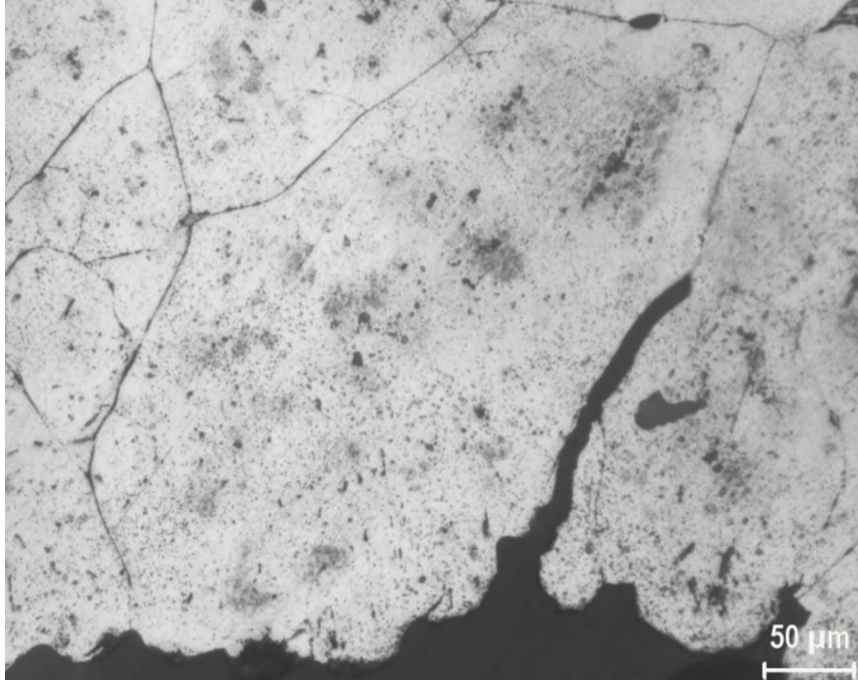
Şekil 30. 64 MPa’lık gerilmede yorulma deneyine tabi tutulmuş olan Zn-95Al alaşımının yorulma numunesinin kırık yüzeyi detayının SEM görüntüsü



Şekil 31. 146 MPa'lık gerilmede yorulma deneyine tabi tutulmuş olan Zn-85Al-2Cu alaşımasının yorulma numunesinin kırık yüzeyinin SEM görüntüsü



Şekil 32. 146 MPa'lık gerilmede yorulma deneyine tabi tutulmuş olan Zn-85Al-2Cu alaşımasının yorulma numunesinin kırık yüzeyi detayının SEM görüntüsü



Şekil 33. Yorulma deneyine tabi tutulmuş olan Zn-85Al alaşımına ait örneğin yorulma çatlağının detayını gösteren fotoğraf

İRDELEME

Bu çalışmada incelenen ikili Zn-85Al, Zn-90Al ve Zn-95Al alaşımlarının içyapısının alüminyumca zengin geniş α tanelerinden oluştuğu görülmüştür. Nitekim literatürde yüksek oranda Al içeren alaşımlardaki tek fazlı yapıların geniş α tanelerinden oluştuğunu destekleyen bazı araştırmalar mevcuttur [21, 38]. Ayrıca, alüminyum oranı arttıkça tane sınırlarının kaybolma eğiliminde olduğu görülmüştür [38]. Tablo 6'dan ikili alaşımlar içerisinde en yüksek sertlik ve mukavemet değerlerinin Zn-85Al alaşımından elde edildiği görülmektedir. Tane sınırlarının Zn-85Al alaşımında daha belirgin olması dislokasyon hareketinin bu alaşımda daha fazla engellediği sonucunu doğurduğundan, Zn-85Al alaşımının diğer ikili alaşımlara göre sertlik ve mukavemet değerlerinin daha yüksek ve daha gevrek olduğu düşünülmektedir. Ayrıca, Al oranı arttıkça mikro boşluk miktarının da arttığı görülmüştür. Bu durumun, sıvı alüminyum yüzeyinde Al_2O_3 oksit tabakasının çok kısa süre içerisinde oluşmasından ve gerek potada gerekse kalıplara döküm esnasında türbülans sebebi ile bu oksit tabakasının parçalanıp sıvı içerisine kolaylıkla girebilmesinden kaynaklandığına ilişkin çalışmalar mevcuttur [39, 40]. Böylelikle, artan Al oranı ile porozite miktarının artmasının literatür ile uyumlu olduğu görülmüştür. Ayrıca, %2'lik Cu katkısının Zn-85Al alaşımındaki mikro boşluk oranını azalttığı gözlemlenmiştir. Tane sınırlarının dislokasyon hareketlerini zorlaştırması ve porozite miktarının azalması nedeniyle ikili Zn-Al alaşımları içerisindeki en yüksek mukavemet değerlerinin Zn-85Al alaşımından elde edildiği ve bakır katkısının söz konusu değerleri artırdığı sonucuna varılmıştır. Nitekim, yorulma çatlaklarının mikro boşluklarda (porozite) başladığı SEM fotoğraflarından açıkça görülmektedir, Şekil 25-27-29-31.

Alaşım elementi katkı maddesinin, çinko-alüminyum alaşımlarının mukavemet değerlerini arttırmak için uygulanan yöntemlerden biri olduğu bilinmektedir [17, 41]. Yapılan bazı çalışmalardan, Zn-Al alaşımlarının mekanik özelliklerini en çok iyileştiren alaşım elementinin bakır olduğu tespit edilmiştir. [42, 43]. Bu nedenle bu çalışmada, en iyi mukavemet değerlerini sergileyen Zn-85Al alaşımına daha önceki çalışmalarda en iyi performansı sağlayan %2 oranında bakır katılmıştır. Zn-85Al-2Cu alaşımının içyapısının geniş α taneleri, tane sınırlarını çevreleyen $\alpha+\theta$ fazları ve daha çok tane sınırlarında çökelen bakırca zengin θ fazından oluştuğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, Cu katkısının sertlik ve mukavemet değerlerini önemli ölçüde iyileştirdiği görülmüştür. Sertlik ve mukavemet

değerlerindeki artış, katı çözelti sertleştirmesi mekanizmasına dayandırılmıştır [26, 30, 31]. Ayrıca, %2'lik bakır katkısının porozite miktarını azaltmış olmasının bu artışa katkı sağladığı düşünülmektedir. Nitekim, literatürde porozite miktarının yorulma performansını olumsuz etkilediğini ifade eden çalışmalar mevcuttur [7, 29].

Yorulma deneylerinden elde edilen veriler kullanılarak çizilen gerilme-çevrim sayısı eğrilerinin (Şekil 19) literatürdeki demir dışı alaşımların Wöhler eğrileri ile benzerlik gösterdiği gözlemlenmiştir [17, 22, 44, 45]. Şekil 19'daki bu eğrilerden, alaşımların yorulma dayanımı ve yorulma ömrü değerlerinin artan Al oranı ile azaldığı görülmüştür. Başka bir deyişle, ikili alaşımlar içerisinde en iyi yorulma performansını en yüksek sertlik ve mukavemet değerlerine sahip olan Zn-85Al alaşımı sergilemiştir. Yani bu durum, sertlik ve mukavemet değerleriyle ilişkilidir. Ayrıca, artan alüminyum oranı ile porozite miktarının da artmış olmasının yorulma performansını olumsuz etkilediği düşünülmektedir. Nitekim literatürde bu tespiti doğrulayan çalışmalar mevcuttur [6, 21, 22]. Öte yandan, bakır katkısının da Zn-85Al alaşımının mukavemet değerlerini önemli ölçüde artırdığı, ancak yorulma özelliklerini aynı oranda iyileştirmediği görülmüştür. Yani her ne kadar yorulma dayanımı ve yorulma ömrü bakır katkısıyla artmış olsa da yorulma davranışlarında beklenen iyileşme elde edilememiştir. Bu durumun söz konusu alaşımın özellikle tokluk değerinin Cu katkısıyla artmaktan ziyade az da olsa düşmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Nitekim, yapılan bazı çalışmalarda yorulma özelliklerinin kırılma tokluğuna önemli ölçüde bağlı olduğu vurgulanmıştır [6, 28]. Cu katkısıyla yorulma performansında beklenen iyileşmenin elde edilemeyişi Zn-85Al-2Cu alaşımında tane sınırlarında çökelen θ fazından kaynaklanmış olabilir. Yani mukavemet değerlerindeki artış katı çözelti sertleştirmesi mekanizmasıyla açıklanırken, tane sınırlarında çökelen θ fazının malzemeyi gevreklettiği ve çatlak başlaması ve ilerlemesini hızlandırdığı düşünülmektedir. Nitekim, bakırca zengin θ fazının tane sınırlarında çökeldiği ve yorulma çatlaklarının tane sınırları boyunca ilerlediği içyapı ve SEM fotoğraflarından açıkça görülmektedir, Şekil 15 ve 33.

Bu çalışmada incelenen Zn-(%85,90,95)Al ve Zn-85Al-2Cu alaşımlarının yorulma deneylerinden elde edilen veriler kullanılarak her bir alaşım için çizilen $\log N - \log \sigma$ doğrusu Şekil 20'deki grafikte verilmiştir. En küçük kareler yöntemi kullanılarak çizilen doğruların korelasyon katsayılarının (c) 1'e çok yakın olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle, söz konusu alaşımların yorulma davranışlarının Basquin bağıntısı ile ifade edilebileceği sonucuna varılabilir. Nitekim yapılmış bazı çalışmalardan da bu duruma benzer sonuçlar elde edilmiştir [22, 26, 29].

5. SONUÇLAR

Yüksek oranda alüminyum içeren ($\%Al \geq 85$) Zn-Al alaşımlarının yorulma davranışlarının incelendiği bu çalışmada aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

1. Bu çalışmada incelenen ikili Zn-Al alaşımlarının içyapısı geniş α taneleri içeren tek bir fazdan, üçlü Zn-85Al-2Cu alaşımının içyapısı ise ötektoid dönüşüm sonucu oluşan geniş α taneleri, tane sınırlarını çevreleyen $\alpha+\theta$ fazlarından ve daha çok tane sınırlarında çökelen bakırca zengin θ fazından oluşmaktadır. Ayrıca, ikili alaşımlarda artan Al oranı ile tane sınırları kaybolma eğilimindedir.
2. İkili Zn-Al alaşımlarındaki porozite miktarı artan Al oranı ile birlikte artmakta, ancak %2'lik Cu katkısı ile azalmaktadır.
3. Yüksek oranda alüminyum içeren ($\%Al \geq 85$) ikili Zn-Al alaşımlarında Al oranı azaldıkça sertlik ve mukavemet değerleri artarken, kopma uzaması ve darbe dayanımı değerleri azalmaktadır. Zn-85Al alaşımına katılan bakır alaşımının sertlik ve mukavemet değerlerini önemli ölçüde artırırken, kopma uzaması ve darbe dayanımı değerlerini az da olsa düşürmüştür.
4. İkili alaşımlar içerisinde en iyi yorulma performansını, en yüksek sertlik ve mukavemet değerlerine sahip olan Zn-85Al alaşımı sergilemiştir. %2'lik Cu katkısı ile Zn-85Al alaşımının yorulma dayanımı ve yorulma ömrü değerleri az da olsa artmıştır.
5. Yüksek oranda alüminyum ($Al \geq \%85$) içeren ikili çinko-alüminyum alaşımlarında alüminyum oranı arttıkça yorulma dayanımı ve yorulma ömrü değerlerinin düştüğü belirlenmiştir.
6. İkili Zn-(%85,90,95) ve üçlü Zn-85Al-2Cu alaşımlarının yorulma davranışları Basquin bağıntısı ile ifade edilebilir.

6. ÖNERİLER

1. Literatürde Zn-60Al ve Zn-80Al alaşımlarında eş kanalda açısai ekstrüzyon yönteminin söz konusu alaşımların yorulma performansını önemli ölçüde iyileştirdiğı belirlenmiştir [46]. EKAE yönteminin bu çalışmada incelenen alaşımların mekanik özellikleri ve yorulma davranışları üzerindeki etkileri araştırılabilir.
2. Bu çalışmada incelenen alaşımların çok geniş katılaşma aralığına sahip olması nedeniyle döküm sıcaklığı, kalıp sıcaklığı ve soğuma hızı gibi parametrelerin söz konusu alaşımların yapı ve mekanik özellikleri üzerindeki etkileri araştırılabilir.

7. KAYNAKLAR

1. Zhu, Y.H. ve Goodwin, F.E., Influence of rare earth element additions on phase transformations in the Zn-27% Al alloy, Journal of Materials Research, 8,12 (1993) 3043-3049.
2. Gervais, E., J. Barnhurst, R. ve A. Loong, C., An Analysis of Selected Properties of ZA Alloys, JOM- J. Min. Met. Mat. S., 37, 1985.
3. Goodwin, F. ve Ponikvar, A., Engineering properties of zinc alloys, Intern. lead zinc research organization Research Triangle Park (NC), 1988.
4. Savaskan, T., The structure and properties of zinc-aluminium based bearing alloys, PHD, Aston University, 1980.
5. Murphy, S. ve Savaskan, T., Comparative wear behaviour of Zn-Al-based alloys in an automotive engine application, Wear, 98 (1984) 151-161.
6. Aydin, M. ve Heyal, Y., Mechanical Properties of Equal-Channel Angular Extrusion-Processed Al-20Zn Alloy, Advanced Materials Research 2012, 445, 195-200.
7. Aydin, M. ve Savaşkan, T.J.I.j.o.f., Fatigue properties of zinc-aluminium alloys in 3.5% NaCl and 1% HCl solutions, 26,1 (2004) 103-110.
8. Aydin, M. ve Şenaslan, F.J.I.J.o.M.R., The effect of quench-aging on the mechanical properties of Zn-27Al-1Cu alloy, International Journal of Materials Research 109,8 (2018) 699-707.
9. Presnyakov, A.A., Gorban, Y.A., Chernyakova, V.V. and Russ J. Phys. Chem, Russ. J. Physical Chemistry, (1961) 632.
10. Zhu, Y.H. ve Goodwin, F.E., Microstructures of thermomechanically treated eutectoid Zn-Al alloy (II), Journal of Materials Research, 10,8 (1995) 1927-1932.
11. Perry, C.C., Fatigue Testing in Materials Laboratory Courses, Fatigue Dynamics Inc., USA, (1988).
12. Murphy, S.J.Z.f.M., Solid-phase reactions in the low-copper part of the Al-Cu-Zn system, Zeitschrift fuer Metallkunde 71,2 (1980) 96-102.
13. Zhu, Y.H.J.J.o.m.S., Phase transformations of eutectoid Zn-Al alloys, J. Mater. Res., 36,16 (2001) 3973-3980.
14. Durman, M. ve Murphy, S.J.A.m.e.m., Precipitation of metastable ϵ -phase in a hypereutectic zinc-aluminium alloy containing copper, Acta metallurgica et materialia, 39, 10 (1991) 2235-2242.

15. Gervais, E., ZA alloys--a challenge to the metals industry, Ilzic Silver Jubilee Conference. Lead, Zinc and Cadmium Into the 90's 1988, 51.
16. Hekimoğlu, A.P., Bakır Katkısının Cu-Al Alaşımlarının Sürtünme ve Aşınma Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği, 2012.
17. Savaşkan, T., Tan, H.J.M.S. ve Technology, Fatigue behaviour of Al-25Zn-3Cu alloy, Materials Science and Technology, 30,8 (2014) 938-943.
18. Zhu, Y., Goodwin, F.J.J.o.M.S. ve Technology, Microstructures of thermomechanically treated eutectoid Zn-Al alloy, Journal of Materials Sciences and Technology, 10,2 (2009) 121-126.
19. Murphy, S. ve Savaskan, T.J.P.M., Metallography of Zinc-25% Aluminium Based Alloys in the As-Cast and Aged Conditions, Wear, 24,5 (1987) 204-221.
20. Lee, P.P., Savaskan, T. ve Laufer, E.J.W., Wear resistance and microstructure of Zn-Al-Si and Zn-Al-Cu alloys, Wear, 117,1 (1987) 79-89.
21. Heyal, Y., Eş kanalda açısıl ekstrüzyon yönteminin zn-60al ve zn-80al alaşımlarının yorulma özelliklerine etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, 2011.
22. 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.
23. Durman, M., Çinko-Alüminyum Esaslı Basınçlı Döküm Alaşımlarının %0-%30 Bileşim Aralığında Mekanik ve Mikroyapısal Özelliklerinin İncelenmesi, Bildiriler Kitabı, (1993) 177-191.
24. Barnhurst, R., Gervais, E. ve Bayles, F.J.T.o.t.A.F.s.S., Gravity Casting of Zinc--Aluminum Alloys--Solidification Behavior of ZA-8, ZA-12 and ZA-27.(Retroactive Coverage), Jom, 91 (1983) 569-584.
25. Erdöl, M.Ş., Çinko-Alüminyum Esaslı Alaşımlarda Mukavemet Artırma Yöntemlerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği, 1994.
26. Aydın, M., Çinko-Alüminyum Esaslı Alaşımların Değişik Ortamlardaki Yorulma Davranışlarının İncelenmesi, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği, 2001.
27. Aydiner, A., Silisyum Katkısının Monotektoid Çinko-Alüminyum Alaşımlarının Tribolojik Özelliklerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği, 2002.

28. 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.
29. Aydın, M. ve Savaşkan, T., Fatigue properties of zinc–aluminium alloys in 3.5% NaCl and 1% HCl solutions, International Journal of Fatigue, 26,1 (2004) 103-110.
30. Turhal, M.Ş. ve Savaşkan, T.J.U.T., Çinko-Alüminyum Alaşımları İçin Mukavemet Artırma Yöntemleri, Mühendis ve Makine, 32.
31. Savaşkan, T., Murphy, S.J.M.S. ve Technology, Decomposition of Zn–Al alloys on quench–aging, Materials Science and Technology, 6,8 (1990) 695-704.
32. Lynch, S., Some fractographic contributions to understanding fatigue crack growth, International Journal of Fatigue, 104 (2017) 12-26.
33. 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
34. 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.
35. Savaşkan, T. ve Aydın, A.J.W., Effects of silicon content on the mechanical and tribological properties of monotectoid-based zinc–aluminium–silicon alloys, Wear, 257,3-4 (2004) 377-388.
36. Nagarjuna, S., Srinivas, M., Balasubramanian, K. ve Sarmat, D.J.I.j.o.f., Effect of alloying content on high cycle fatigue behaviour of Cu-Ti alloys, International journal of fatigue, 19,1 (1997) 51-57.
37. Purcek, G., Altan, B.S., Miskioglu, I. ve Ooi, P.H.J.J.o.M.P.T., Processing of eutectic Zn–5% Al alloy by equal-channel angular pressing, Journal of Materials Processing Technology, 48,3 (2004) 279-287.
38. Hekimoğlu, A. ve Savaşkan, T., Structure and mechanical properties of Zn-(5–25) Al alloys, International Journal of Materials Research, 105,11 (2014) 1084-1089.
39. Dispınar, D. ve Campbell, J., Porosity, hydrogen and bifilm content in Al alloy castings, Materials Science and Engineering: A, 528,10 (2011) 3860-3865.
40. Dispınar, D., Akhtar, S., Nordmark, A., Di Sabatino, M., Arnberg, L.J.M.S. ve A, E., Degassing, hydrogen and porosity phenomena in A356, Materials Science and Engineering: A, 527,16-17 (2010) 3719-3725.
41. Savaşkan, T. ve Aydın, A., Effects of silicon content on the mechanical and tribological properties of monotectoid-based zinc–aluminium–silicon alloys, Wear, 257 (2004) 377-388.

42. Savaşkan, T., Pürçek, G. ve Hekimoğlu, A.J.T.L., Effect of copper content on the mechanical and tribological properties of ZnAl27-based alloys, Tribology Letters, 15,3 (2003) 257-263.
43. Alemdağ, Y. ve Savaşkan, T.J.T.L., 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.
44. Theodore, N., High cycle fatigue: a mechanics of materials perspective, Elsevier (2006) 193-194.
45. Khan, Z., Younas, M. ve Zuhair, G., A fatigue-life prediction methodology for notched aluminum-magnesium alloy in gulf seawater environment, Journal of Materials Engineering and Performance, 4,5 (1995) 159-167.
46. Tottenham, G.J.A.M. ve Processes, Fatigue crack propagation, Adv Mater Processes , 166,5 (2008) 39.

ÖZGEÇMİŞ

Hamza ÇOLAK; 1991 yılında Trabzon’da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini bu ilde tamamladı. Tevfik Serdar Anadolu Lisesinden mezun olduktan sonra KTÜ Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği bölümünde lisans eğitimine başladı. 2016 yılında mezun olduktan sonra aynı yıl öğrenimine malzeme anabilim dalında yüksek lisans öğrencisi olarak devam etti. Şu an yüksek lisans öğrencisi olarak devam etmekte ve orta derecede İngilizce bilmektedir.