

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**EŞ KANALDA AÇISAL EKSTRÜZYON YÖNTEMİNİN Zn-60Al VE Zn-80Al
ALAŞIMLARININ YORULMA ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Yakup HEYAL

**MAYIS 2011
TRABZON**

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**EŞ KANALDA AÇISAL EKSTRÜZYON YÖNTEMİNİN Zn-60Al VE Zn-80Al
ALAŞIMLARININ YORULMA ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

Yakup HEYAL

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
“MAKİNA YÜKSEK MÜHENDİSİ”
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 18.05.2011
Tezin Savunma Tarihi : 09.06.2011**

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Murat AYDIN

Trabzon 2011

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalında

Yakup HEYAL tarafından hazırlanan

**EŞ KANALDA AÇISAL EKSTRÜZYON YÖNTEMİNİN Zn-60Al VE Zn-80Al
ALAŞIMLARININ YORULMA ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

**başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 24 / 05 / 2011 gün ve 1406 sayılı
kararıyla oluşturulan jüri tarafından 09 / 06 / 2011 tarihinde yapılan sınavda**

YÜKSEK LİSANS TEZİ




olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan : Prof. Dr. Temel SAVAŞKAN

Üye : Prof. Dr. Ragıp ERDÖL

Üye : Yrd. Doç. Dr. Murat AYDIN


.....

.....

.....

Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ

Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

Geleneksel yöntemlerle üretilen çinko-alüminyum esaslı alaşımların başta yorulma olmak üzere mekanik özellikleri bazı uygulamalarda yetersiz kalmaktadır. Bu durum, ekonomiklik, hafiflik ve kolay temin edilebilme gibi diğer malzemelere göre birçok üstünlüklere sahip olan çinko-alüminyum esaslı alaşımların kullanımını kısıtlayıcı bir faktör olarak ortaya çıkmaktadır. Bu eksikliğin giderilmesi amacıyla, son yıllarda kullanılmaya başlanan ve malzemelerin mukavemet ve süneklik değerlerini birlikte artıran eş kanalda açısız ekstrüzyon (EKAE) yöntemi, yüksek alüminyum içeren bazı Zn-Al alaşımlarına başarılı bir şekilde uygulanmıştır. EKAE yönteminin sözü edilen alaşımların yapı ve başta yorulma olmak üzere mekanik özelliklerine etkisi incelenmiştir. Bu incelemeler sonucunda, söz konusu yöntemin alaşımların yorulma performansını önemli ölçüde iyileştirdiği belirlenmiştir. Yorulma performansında elde edilen bu iyileşme, yapı ve mekanik özelliklere dayandırılarak açıklanmıştır.

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde her türlü yardım ve fedakârlığı esirgemeyen, değerli fikir ve tecrübeleriyle bana yol gösteren sayın hocam Yrd. Doç. Dr. Murat AYDIN'a teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışma, 2008.112.003.7 kod nolu ve "Aşırı Plastik Deformasyona Uğratılan Çinko-Alüminyum Esaslı Alaşımların Yorulma Davranışlarının İncelenmesi" adlı proje kapsamında K.T.Ü. BAP tarafından desteklenmiştir. Bu nedenle, adı geçen fon yetkililerine teşekkür ederim.

Yakup HEYAL
Trabzon 2011

TEZ BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Eş Kanalda Açısal Ekstrüzyon Yönteminin Zn-60Al ve Zn-80Al Alaşımlarının Yorulma Özelliklerine Etkisi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Yrd. Doç. Dr. Murat AYDIN‘ın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri kendim topladığımı, deneyleri ilgili laboratuarlarda 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.

18/05/2011

Yakup HEYAL

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	IX
TABLolar DİZİNİ	XI
SEMBOLLER DİZİN	XII
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Çinko-Alüminyum Alaşımlarının Faz Diyagramları	2
1.3. Çinko-Alüminyum Esaslı Alaşımların Mekanik Özellikleri	3
1.3.1. Çinko-Alüminyum Esaslı Alaşımların Yorulma Özellikleri	5
1.4. Eş Kanalda Açısal Ekstrüzyon (EKAE) Yöntemi.....	6
1.4.1. EKAE Yönteminin Çinko-Alüminyum Esaslı Alaşımların Mekanik ve Yorulma Özelliklerine Etkisi	9
1.5. Literatür Özeti ve Çalışmanın Amacı	11
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR	13
2.1. Alaşımın Üretimi.....	13
2.2. EKAE Deneyleri	13
2.3. Metalografik İncelemeler	15
2.4. Mekanik Deneyler.....	15
2.4.1. Çekme, Sertlik ve Darbe Deneyleri	15
2.4.2. Yorulma Deneyi.....	17
3. BULGULAR.....	20
3.1. Alaşımların Kimyasal Bileşimi.....	20
3.2. Alaşımların İç Yapısı	20
3.3. Mekanik Deneylerden Elde Edilen Bulgular	26
3.3.1. Çekme, Sertlik ve Darbe Deneylerinden Elde Edilen Bulgular.....	26
3.3.2. Yorulma Deneylerinden Elde Edilen Bulgular	27

3.3.2.1.	Yorulma Deneylerinden Elde Edilen Verilerin Korelasyonu	29
3.3.2.2.	Yorulma Örneklerinin Kırılma Yüzeylerinin İncelenmesinden Elde Edilen Bulgular	35
4.	İRDELEME	41
5.	SONUÇLAR	45
6.	ÖNERİLER.....	47
7.	KAYNAKLAR	48
ÖZGEÇMİŞ		

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

EŞ KANALDA AÇISAL EKSTRÜZYON YÖNTEMİNİN Zn-60Al VE Zn-80Al
ALAŞIMLARININ YORULMA ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

Yakup HEYAL

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Murat AYDIN
2011, 53 Sayfa

Bu çalışmada, yüksek oranda alüminyum içeren ikili Zn-60Al ve Zn-80Al alaşımları kokil döküm yöntemiyle üretildi. Dökülmüş durumdaki alaşımlara, son yıllarda geliştirilen ve aşırı plastik deformasyon yöntemlerinden biri olan eş kanalda açisal ekstrüzyon (EKAE) işlemi uygulandı. Alaşımların gerek dökülmüş gerekse farklı rota ve paso sayılarında proses edilmiş durumdaki sertlik, mukavemet ve süneklik değerleri ölçüldü. Bu çalışma için tasarlanarak imal edilen dönel eğmeli bir yorulma deney makinası yardımıyla söz konusu alaşımların her durumdaki gerilme-çevrim sayısı eğrileri elde edildi. Ayrıca, paso sayısı ve proses rotası gibi EKAE parametrelerinin bu alaşımların başta yorulma olmak üzere yapı ve mekanik özellikleri üzerindeki etkileri araştırıldı. Yapılan incelemeler sonucunda, (EKAE) işleminin alaşımların porozite içeren tipik dendritik döküm yapısını tamamen ortadan kaldırdığı, bunun yerine rota-A'da ince ve şerit gibi uzamış, rota-B_C'de ise daha iri taneli ve birbiri içerisine geçmiş bileşenlerden oluşan bir yapının ortaya çıktığı belirlendi. Bu yapısal değişime bağlı olarak alaşımların başta yorulma performansı olmak üzere, mukavemet ve süneklik değerlerinde önemli iyileşmeler elde edildi. EKAE işlemi sonucunda Zn-60Al alaşımının yorulma dayanım sınırındaki artış yaklaşık olarak %82,5 gibi çok yüksek bir orana ulaşırken, Zn-80Al alaşımının yorulma dayanım sınırında ise 1 paso sonunda %74 ve 2 paso sonunda %89'luk artışlar elde edildi. Ayrıca, EKAE işleminin dökülmüş durumdaki alaşımların doğal yorulma kırılması karakteristiğini değiştirerek, gevrek kırılma modundan kısmen sünek kırılma moduna dönüştürdüğü gözlemlendi.

Anahtar Kelimeler: Eş-kanalda açisal ekstrüzyon (EKAE), Zn-Al alaşımları, yorulma.

Master Thesis

SUMMARY

EFFECT OF EQUAL-CHANNEL ANGULAR EXTRUSION ON FATIGUE
PROPERTIES OF Zn-60Al AND Zn-80Al ALLOYS

Yakup HEYAL

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Mechanical Engineering Graduate Program

Supervisor: Assist. Prof.Dr. Murat AYDIN
2011, 53 Pages

Aluminium-rich binary Zn-60Al ve Zn-80Al alloys were produced by permanent mould casting. The as-cast alloys were subjected to equal-channel angular extrusion (ECAE) which is one of the severe plastic deformation techniques. The hardness, strength and ductility values of the alloys in as-cast and ECAE processed conditions were measured. The stress amplitude versus number of cycles to failure (S-N) curves of the alloys in all states were determined by using the rotating bending fatigue machine which is designed and manufactured for this work. In addition, the effects of ECAE parameters such as pass number and processing routes on the mechanical properties especially the fatigue performance of the alloys were investigated. The ECAE almost completely eliminated as-cast dendritic microstructure including casting defects such as micro porosities. A refined microstructure consisting of elongated micro constituents in route A and, more equiaxed and mixed micro-constituents in route-B_C formed after multi-pass ECAE. As a result of this microstructural change, the significant improvement was obtained in fatigue performance, strength and ductility of the ECAP processed alloys. While the rate of increase in fatigue endurance limit of the ECAE processed Zn-60Al alloy is approximately 82.5%, in Zn-80Al alloy the rates of increase in endurance limit are approximately 74 % after one pass and 89 % after two passes. It was also observed that the ECAE relatively changed the nature of fatigue fracture characteristics of the as-cast Zn-60Al and Zn-80Al alloys from brittle to a ductile fracture mode.

Key Words: Equal-channel angular extrusion (ECAE), Zn-Al alloys, fatigue.

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. İkili çinko-alüminyum faz diyagramı	2
Şekil 2. EKAE kalıbı ve yöntemin şematik gösterimi	8
Şekil 3. Literatüre geçmiş başlıca EKAE rotaları	9
Şekil 4. EKAE kalıbının şematik resmi	14
Şekil 5. Kalıp gövdesi ve etrafına sarılan sac şeklinde rezistansın görünümü	14
Şekil 6. EKAE işlemi uygulanan numunelerden elde edilen yorulma, çekme ve darbe deney numunelerinin şematik görünümü	16
Şekil 7. Dönel eğmeli yorulma deney makinesi	18
Şekil 8. Deney örneğinin kırılması durumunda yorulma makinesinin görünümü	19
Şekil 9. Yorulma deney numunesinin şekli ve boyutları	19
Şekil 10. Zn-60Al alaşımının dökülmüş durumdaki içyapısı	21
Şekil 11. Zn-80Al alaşımının dökülmüş durumdaki içyapısı	21
Şekil 12. Zn-60Al alaşımının 1 paso EKAE işlemi uygulanmış durumdaki içyapısı	22
Şekil 13. Zn-80Al alaşımının 1 paso EKAE işlemi uygulanmış durumdaki içyapısı	22
Şekil 14. Rota-A kullanılarak 2 paso EKAE işlemi uygulanmış Zn-60Al alaşımının içyapısı	23
Şekil 15. Rota-A kullanılarak 2 paso EKAE işlemi uygulanmış Zn-80Al alaşımının içyapısı	24
Şekil 16. Rota-A kullanılarak 4 paso EKAE işlemi uygulanmış Zn-60Al alaşımının içyapısı	24
Şekil 17. Rota-B _C kullanılarak 2 paso EKAE işlemi uygulanmış Zn-60Al alaşımının içyapısı	25
Şekil 18. Rota-B _C kullanılarak 4 paso EKAE işlemi uygulanmış Zn-60Al alaşımının içyapısı	25
Şekil 19. Dökülmüş, farklı rota ve paso sayılarında EKAE işlemi uygulanmış Zn-60Al alaşımına ait gerilme-çevrim sayısı eğrileri	28
Şekil 20. Dökülmüş ve EKAE işlemi uygulanmış Zn-80Al alaşımına ait gerilme-çevrim sayısı eğrileri	28
Şekil 21. Zn-60Al alaşımının yorulma dayanımı, çekme dayanımı ve kopma uzaması değerlerinin paso sayısına göre değişimi	30
Şekil 22. Zn-60Al alaşımının yorulma ömrü, çekme dayanımı ve kopma uzaması değerlerinin paso sayısına göre değişimi	30

Şekil 23.	Zn-80Al alaşımının yorulma dayanımı, çekme dayanımı ve darbe dayanımı değerlerinin paso sayısına göre değişimi	31
Şekil 24.	Zn-80Al alaşımının yorulma ömrü, çekme dayanımı ve darbe dayanımı değerlerinin paso sayısına göre değişimi	32
Şekil 25.	Farklı rota ve paso sayılarında EKAE işlemi uygulanan Zn-60Al alaşımının log N – log σ eğrileri	33
Şekil 26.	EKAE işlemi uygulanan Zn-80Al alaşımının log N – log σ diyagramı	35
Şekil 27.	92 MPa gerilme değerinde yorulma deneyine tabi tutulan, dökülmüş durumdaki Zn-60Al alaşımına ait numunenin kırılma yüzeyini gösteren SEM fotoğrafı	36
Şekil 28.	174 MPa gerilme değerinde yorulma deneyine tabi tutulan, rota-A ile 4 paso EKAE işlemi uygulanmış Zn-60Al alaşımına ait numunenin kırılma yüzeyini gösteren SEM fotoğrafı	36
Şekil 29.	105 MPa gerilme değerinde yorulma deneyine tabi tutulan, dökülmüş durumdaki Zn-80Al alaşımına ait numunenin kırılma yüzeyini gösteren SEM fotoğrafı	37
Şekil 30.	174 MPa gerilme değerinde yorulma deneyine tabi tutulan, rota-A ile 2 paso EKAE işlemi uygulanmış Zn-80Al alaşımına ait numunenin kırılma yüzeyini gösteren SEM fotoğrafı	37
Şekil 31.	105 MPa gerilme değerinde yorulma deneyine tabi tutulan, dökülmüş durumdaki Zn-80Al alaşımına ait numunenin kırılma yüzeyinin detayını gösteren SEM fotoğrafı.....	38
Şekil 32.	92 MPa gerilme değerinde yorulma deneyine tabi tutulan, dökülmüş durumdaki Zn-60Al alaşımına ait numunenin kırılma yüzeyinin detayını gösteren SEM fotoğrafı.....	39
Şekil 33.	174 MPa gerilme değerinde yorulma deneyine tabi tutulan, rota-A ile 2 paso EKAE işlemi uygulanmış Zn-80Al alaşımına ait numunenin kırılma yüzeyi detayını gösteren SEM fotoğrafı	39
Şekil 34.	146 MPa gerilme değerinde yorulma deneyine tabi tutulan, rota-B _C ile 4 paso EKAE işlemi uygulanmış Zn-60Al alaşımında sünek kırılma modunu gösteren SEM fotoğrafı	40
Şekil 35.	146 MPa gerilme değerinde yorulma deneyine tabi tutulan, rota-B _C ile 4 paso EKAE işlemi uygulanmış Zn-60Al alaşımında yorulma sonucunda oluşan duraklama çizgilerinin SEM görüntüsü	40

TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. İkili çinko-alüminyum alaşım sisteminde meydana gelen önemli faz dönüşümleri	3
Tablo 2. Alaşımın kimyasal bileşimi	20
Tablo 3. Zn-60Al alaşımının dökülmüş ve farklı rota ve paso sayılarında proses edilmiş durumdaki sertlik, çekme dayanımı, akma sınırı ve kopma uzaması değerleri	26
Tablo 4. Zn-80Al alaşımının dökülmüş ve EKAE işlemi uygulanmış durumdaki sertlik, çekme dayanımı, akma sınırı, kopma uzaması, darbe dayanımı değerleri	27
Tablo 5. Farklı rota ve paso sayılarında EKAE işlemi uygulanan Zn-60Al alaşımının k ve A sabitleri ile korelasyon katsayısı c değerleri.....	34
Tablo 6. EKAE işlemi uygulanan Zn-80Al alaşımının k ve A sabitleri ile korelasyon katsayısı c değerleri.....	35

SEMBOLLER DİZİNİ

BSD	: Brinell sertlik değeri
c	: Korelasyon katsayısı
EKAE	: Eş kanalda açısal ekstrüzyon
ECAP	: Equal channel angular pressing (eş kanalda açısal basma)
ECAE	: Equal channel angular extrusion (eş kanalda açısal ekstrüzyon)
P	: Örneğe uygulanan yük
SEM	: Scanning electron microscope (taramalı elektron mikroskobu)
YMK	: Yüzey merkezli kübik
SPD	: Severe plastic deformation (aşırı plastik deformasyon)
N_f	: Çevrim sayısı
Φ	: L formundaki eş kesitli giriş ve çıkış kanalları arasındaki açı
ψ	: L formundaki kanalın dış köşe açısı
$\sigma_{eğ}$: Eğme gerilmesi
σ	: Gerilme genliği
$M_{eğ}$: Eğme momenti
$W_{eğ}$: Eğme için mukavemet momenti

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

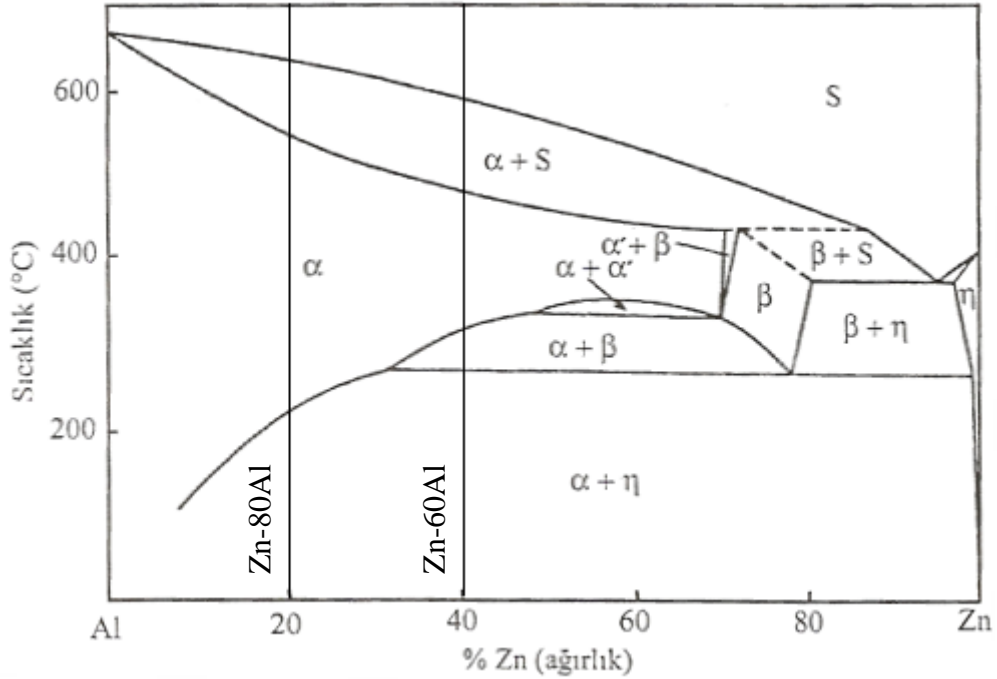
Günümüzde pek çok mühendislik alanında yaygın bir şekilde kullanılmakta olan çinko-alüminyum esaslı alaşımlar 1930'lu yıllarda geliştirilmeye başlanmıştır [1-3]. O tarihlerden günümüze kadar değişik kimyasal bileşimlerde pek çok çinko-alüminyum esaslı alaşım geliştirilmiş ve söz konusu alaşımların yapı ve mekanik özellikleri detaylı bir şekilde incelenmiştir [1,4,5]. Zn-Al esaslı alaşımların yaygın bir şekilde kullanılmasının nedeni, demir olmayan bazı metallere göre pek çok üstünlüklere sahip olmalarıdır [1,2,6]. Bu üstünlüklerinin başında ideal döküm özelliklerine ve düşük ergime noktasına sahip olmaları, ısı işleme elverişli olmaları, döküm sonrası az bir ilave işlem gerektirmeleri, özgül mukavemetlerinin (mukavemet/yoğunluk) ve aşınma dayanımlarının yüksek olması, alaşım elementlerinin kolay ve ucuza temin edilebilmesi yani ekonomik olmaları gelmektedir [2,6].

Bu üstünlükleri sayesinde çinko-alüminyum esaslı alaşımlar genel olarak iş makineleri, vites kutusu, torna tezgâhı, taş kırma makinesi ve madencilikte kullanılan düşük hızlı araçların kaymalı yataklarında, hidrolik kaldırma silindirlerinde, su pompalarında, matbaa makinelerinde, kapı kolu imalatı ve süs eşyaları yapımında, tekstil ve otomobil sanayi gibi birçok mühendislik alanında kullanılmaktadır [6,7]. Bununla birlikte dökülmüş durumdaki mukavemet, darbe dayanımı, süneklik gibi değerlerinin bazı uygulamalar için yetersiz kalması, çalışma sıcaklığının sınırlı olması ve düşük ergime noktası nedeniyle yüksek sıcaklıklardaki mukavemet değerlerinin de düşük olması bu alaşımların kullanımını kısıtlayan etkenlerin başında gelmektedir [6]. Bu ve buna benzer olumsuzlukların ortadan kaldırılabilmesi için, günümüze kadar söz konusu alaşımlar üzerine yoğun çalışmalar yapılmış ve halen de yapılmaktadır. Bu bağlamda söz konusu alaşımların değişik ortamlardaki yorulma davranışları incelenmiş olup, kimyasal bileşim ve ortamın bu alaşımların yorulma performansına etkileri ortaya konulmuştur [8-13]. Ancak son yıllarda geliştirilen ve aşırı plastik deformasyon yöntemlerinin başında gelen eş kanalda açısız ekstrüzyon (EKAE) yönteminin söz konusu alaşımların yorulma davranışları üzerindeki etkileri hiç incelenmemiştir. Birçok metal ve alaşıma başarılı bir şekilde uygulanmış olan bu yöntemin sözü edilen alaşımların yorulma performansını

önemli ölçüde iyileştireceği ve böylelikle bu alaşımların kullanım alanlarının genişletilmesine katkıda bulunulacağı düşünülmektedir.

1.2. Çinko Alüminyum Alaşımlarının Faz Diyagramları

İkili çinko-alüminyum faz diyagramı Şekil 1’de verilmiştir [14]. Bu diyagramdaki α alüminyumca zengin, η ise çinkoca zengin faz bölgelerini göstermektedir. Çinko, alüminyum içerisinde % 83 oranına kadar çözünerek yüzey merkezli kübik (YMK) yapıya sahip α , α' ve β olarak adlandırılan üç değişik faz bölgesi oluşturmaktadır. Bu fazların her birinin hızlı soğuması sonucunda aşırı doymuş katı çözeltiler elde edilmekte ve sonradan uygulanan yaşlandırma işlemi sırasında bir takım geçiş fazları oluşmaktadır [4,15,16]. İkili çinko-alüminyum alaşım sisteminde dengeli soğuma sırasında meydana gelen faz dönüşümleri Tablo 1’de verilmiştir.



Şekil 1. İkili çinko-alüminyum faz diyagramı [13].

Tablo 1. İkili çinko-alüminyum alaşım sisteminde meydana gelen önemli faz dönüşümleri [17].

Dönüşüm	Dönüşüm formülü	Dönüşüm noktası	
		Kimyasal bileşim (%Zn)	Sıcaklık (°C)
Ötektik	S $\beta + \eta$	95	382
Ötektoid (I)	B $\alpha + \eta$	78	276
Ötektoid (II)	$\alpha/\acute{\alpha}$ $\alpha + \beta$	52	340
Peritektik	$\alpha + s$ β	72	443

1.3. Çinko Alüminyum Esaslı Alaşımların Mekanik Özellikleri

Çinko-alüminyum esaslı alaşımlar, demir olmayan birçok metalden ve dökme demirden daha yüksek mukavemete sahiptir [18]. Çinko-alüminyum esaslı alaşımların akma ve çekme dayanımı ile sertliğinin artan sıcaklıkla azaldığı, kopma uzamasının ise arttığı görülmüştür [15]. Çinko-alüminyum esaslı alaşımların mukavemet, darbe dayanımı ve süneklik vb. değerlerinin birçok metal ve alaşımdan daha yüksek olmasına rağmen bazı mühendislik uygulamaları için yetersiz kaldığı bilinmektedir [13]. Bu nedenle, söz konusu alaşımların bu özelliklerinin iyileştirilmesi için alaşım elementi katma, ısıl işlem, yaşlandırma vb. yöntemler uygulanmış ve bu değerlerde önemli artışlar elde edilmiştir [13,19,20]. Çeşitli iyileştirme yöntemlerinin denendiği bu araştırmalar sonucunda, çinko-alüminyum esaslı alaşımların sertlik ve mukavemetini artırmak için uygulanabilecek en uygun yöntemin alaşım elementi katma olduğu belirlenmiştir [19,20]. Nitekim bu alaşımların sertlik ve çekme dayanımının artan alüminyum oranı ile büyük oranda arttığının belirlenmiş olması bu tespiti doğrulamaktadır [6,13,21,22]. Alüminyum oranının artmasıyla sözü edilen alaşımların sertlik ve mukavemet değerlerinde meydana gelen bu artış, katı çözelti sertleşmesi mekanizmasına dayandırılarak açıklanmıştır [23]. Öte yandan bakır katkısının da söz konusu alaşımların mekanik özelliklerini önemli ölçüde iyileştirdiği görülmüştür. Nitekim yapılan bir çalışmada, üçlü çinko-alüminyum-bakır alaşımlarının ikili çinko-alüminyum alaşımlarından daha yüksek sertlik ve çekme dayanımına sahip oldukları belirlenmiştir [13]. Özellikle %2 oranına kadar katılan bakır, ikili alaşımların mukavemet, korozyon, aşınma ve sürünme dayanımını büyük ölçüde artırmakla birlikte

boyutsal karasızlık probleminde de yol açmaktadır [24-26]. % 2 değerinin üzerindeki bakır katkısının bu alaşımların mukavemetini artırmadığı, aksine düşürdüğü görülmüştür [26]. Bu nedenle, bakır katkısının % 3 değerinin altında tutulması tavsiye edilmektedir [24,25].

Çinko-alüminyum esaslı alaşımların ergime sıcaklıklarının düşük ve katılaşma aralıklarının oldukça geniş olması, dökülmüş durumda içyapıda gözeneklerin (mikro boşluk) oluşmasına neden olmaktadır [5,27]. Bu da mekanik özellikleri olumsuz etkilemektedir. Bu nedenle, döküm sırasında katılaşmaya etki eden döküm sıcaklığı, kalıp sıcaklığı ve katılaşma hızı gibi faktörlerin kontrol edilerek gözenek oluşumunun önlenmesi ya da en aza indirilmesi tezinden yola çıkılarak yapılan bir çalışmada, çinko-alüminyum esaslı alaşımların katılaşma sırasındaki ortalama soğuma hızının, döküm ve kalıp sıcaklıkları arttıkça azaldığı, bu sıcaklıkların azalması durumunda ise arttığı belirlenmiştir [28]. Ayrıca bu çalışmada, kokil döküm yöntemiyle üretilen çinko-alüminyum esaslı alaşımlarda değişik oranlarda gözenek oluştuğu ve bu gözeneklerin daha çok külçenin merkezi ile üst bölgelerinde yoğunlaştığı ifade edilmektedir [28]. Bunun yanında, monotektoid esaslı alaşımlarda ötektoid esaslı alaşıma göre daha fazla gözenek oluştuğu belirlenmiş olup bu durumun monotektoid esaslı alaşımların katılaşma aralığının daha geniş olmasından kaynaklandığı bilinmektedir [20,28]. Gözenek oranı arttıkça, çinko-alüminyum esaslı alaşımların sertlik, çekme dayanımı, kopma uzaması ve kırılma enerjisi değerlerinin azaldığı ancak, gözenek oranının bu alaşımların çekme dayanımı, kopma uzaması ve kırılma enerjisine etkisinin sertliğine olan etkisinden daha fazla olduğu ileri sürülmektedir [20,24]. Çinko-alüminyum esaslı alaşımların katılaşma sırasındaki soğuma hızı arttıkça yoğunluk, sertlik, çekme dayanımı, kopma uzaması ve kırılma enerjisi değerlerinin arttığı belirlenmiş olup bu durumun büyük oranda, söz konusu alaşımlardaki gözenek oranının artan soğuma hızı ile azalmasından kaynaklandığı rapor edilmektedir [28].

Bütün bu çalışmalardan sonra elde edilen olumlu gelişmelere rağmen söz konusu alaşımların özellikle dökülmüş durumdaki mukavemet, süneklik, darbe dayanımı, yorulma dayanımı vb. mekanik özellikleri halen bazı uygulamalar için yetersizdir. Bu nedenle söz konusu özelliklerin iyileştirilmesi için yeni nesil üretim yöntemlerinin uygulanması kaçınılmazdır.

1.3.1. Çinko-Alüminyum Esaslı Alaşımların Yorulma Özellikleri

Tekrarlı gerilmelerin etkisi altında yani dinamik yükleme durumunda çalışan makine parçaları ve yapı elemanlarında çalışma sırasında meydana gelen hasarların %80 veya daha fazlasının yorulmadan kaynaklandığı bilinmektedir [17,29,30]. Bu durum, tekrarlı gerilme etkisi altında çalışan parçaların tasarımında yorulma olayının dikkate alınması gerektiğini açık bir şekilde ortaya koymaktadır.

Çinko-alüminyum esaslı alaşımların yorulma özellikleri hakkında literatürde geniş bilgi yer almamaktadır. Bazı ticari ZA-8, ZA-12 ve ZA-27 alaşımlarının değişik döküm şartlarındaki yorulma dayanımı yorulma ömrü değerleri verilmiş ancak, yorulma eğrileri belirlenmemiştir [18]. Bu verilerden, alüminyum oranı arttıkça sözü edilen alaşımların yorulma dayanımı değerlerinin arttığı ve döküm yönteminin bu alaşımların yorulma davranışlarını büyük ölçüde etkilediği anlaşılmaktadır [18]. Şöyle ki; basınçlı döküm yöntemiyle üretilen ZA-8 alaşımının yorulma dayanımı kokil döküm yöntemiyle üretilen ZA-8 alaşımının yorulma dayanımının hemen hemen iki katına eşit olup, kum döküm yöntemiyle üretilen ZA-27 alaşımı basınçlı döküm yöntemiyle üretilen ZA-27 alaşımından daha yüksek yorulma dayanımına sahiptir. Kokil döküm yöntemiyle üretilen çinko-alüminyum esaslı alaşımlarda, basınçlı döküm yöntemiyle üretilen alaşımlara göre daha fazla gözenek oluştuğu bilinmektedir [31]. Söz konusu gözenekler, yorulma çatlaklarının oluşmasında önemli bir etken olarak ortaya çıkmakta ve alaşımların yorulma ömürlerini düşürmektedir [8].

Bu konuda daha önce yapılan çalışmalarda kokil döküm yöntemiyle üretilen bazı ikili Zn-Al ve üçlü Zn-Al-Cu alaşımlarının hava, tuzlu su ve HCl çözeltisi gibi değişik ortamlardaki yorulma özellikleri incelenmiştir [9-12]. Bu incelemeler sonucunda kimyasal bileşim ve deney ortamının alaşımların yorulma davranışlarını önemli ölçüde etkilediği görülmüştür. Şöyle ki; ikili çinko-alüminyum alaşımlarının yorulma dayanımı ve yorulma ömrü değerlerinin artan alüminyum oranı ve ayrıca bakır katkısı ile arttığı tespit edilmiştir. Yorulma dayanımının artan alüminyum oranı ile doğru orantılı olarak artarken, yorulma ömrünün ise belirli bir gerilme değerinin üzerinde artan alüminyum oranı ile doğru orantılı olarak arttığı belirlenmiştir [13]. Bakır katkısının bu alaşımların yorulma dayanımı ve yorulma ömrünü artırdığı ancak, bakır oranının % 2'yi aşması durumunda söz konusu alaşımların yorulma davranışlarının olumsuz etkilendiği görülmüş, alaşım elementi katkısıyla yorulma performansında ortaya çıkan iyileşmenin genel olarak sözü edilen

alaşımların sertlik, mukavemet ve süneklik değerlerindeki artışlardan kaynaklandığı rapor edilmektedir [13]. Kuru hava ortamında yüksek yorulma dayanımı sergileyen bazı alaşımların diğer ortamlarda nispeten düşük yorulma dayanımı sergiledikleri belirlenmiştir [13]. Bununla birlikte, kuru hava ortamında düşük yorulma dayanımı sergileyen bazı alaşımların da diğer ortamlarda daha yüksek yorulma dayanımı sergiledikleri gözlemlenmiştir. Diğer taraftan alaşımların yorulma dayanımı hava ortamında alüminyum oranı ile doğru orantılı olarak artarken, diğer ortamlarda buna ters bir davranış sergilediği ve bazı deney şartlarında kimyasal bileşimden bağımsız bir değişim gösterdiği belirlenmiştir [13]. İkili çinko-alüminyum alaşımlarının tuzlu su ve asit çözeltisi içerisindeki yorulma ömrünün, özellikle düşük gerilme değerlerinde alüminyum oranı ile ters orantılı olarak değiştiği, başka bir deyişle yorulma ömrünün artan alüminyum oranı ile azaldığı görülmüştür. Diğer taraftan, bakır katkısının monotektoid esaslı ZnAl40 alaşımının tuzlu su ve asit çözeltisi ortamlarındaki yorulma ömrünü özellikle yüksek gerilmelerde az da olsa arttırdığı ancak belirli bir değerin üzerindeki bakır katkısının söz konusu alaşımın düşük gerilmelerdeki yorulma ömrünü fazla etkilemediği tespit edilmiştir [13]. Ayrıca asit ortamının tuzlu su ortamına göre bu alaşımların yorulma performansı üzerinde daha fazla etkili olduğu ifade edilmektedir [13]. Bütün bu verilerden faydalanılarak, sözü edilen alaşımların değişik ortamlardaki mukavemet değerleri ve kimyasal bileşimleri ile yorulma dayanımı ve yorulma ömrü arasındaki ilişkileri ifade eden matematiksel bağıntılar geliştirilerek kullanıma sunulmuştur [9-12].

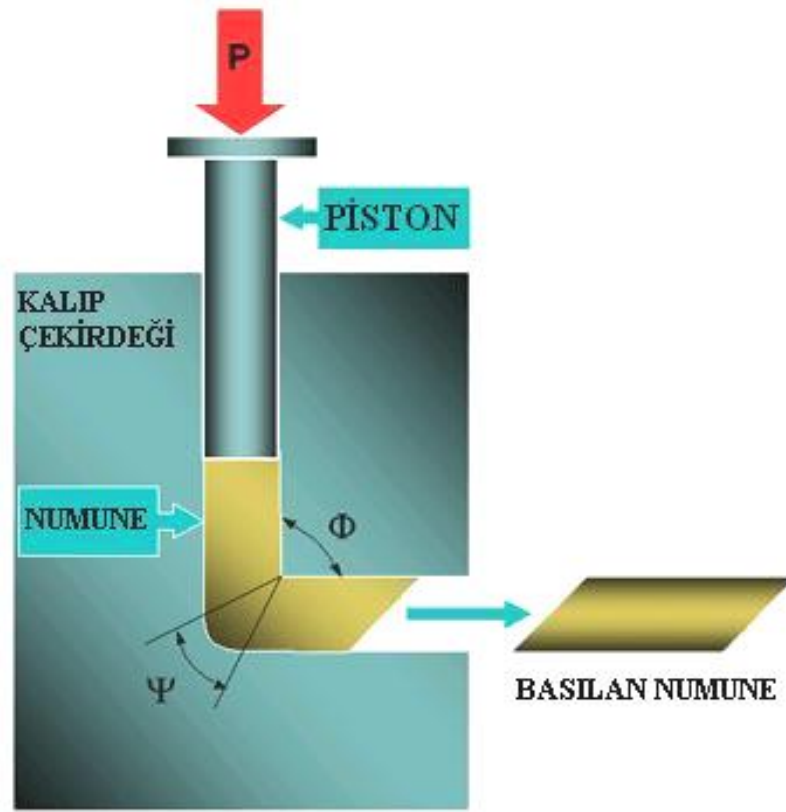
Klasik döküm yöntemleriyle üretilen çinko-alüminyum alaşımlarının döküm yapısına bağlı olarak mukavemet ve süneklik değerlerinin yeterince yüksek olmaması nedeniyle söz konusu alaşımlar istenilen düzeyde bir yorulma performansı sergileyememektedir. Bu nedenle yeni üretim teknikleri kullanılarak bu alaşımların yeniden yapılandırılması ve böylece mukavemet ve süneklik değerlerinin iyileştirilmesi ile yorulma dayanımı ve yorulma ömrü değerlerinin de önemli ölçüde artırılacağı düşünülmektedir.

1.4. Eş Kanalda Açısal Ekstrüzyon (EKA) Yöntemi

Son yıllarda, özellikle gelişmiş ülkelerde yeni nesil malzemelerin üretiminde kullanılan yöntemlerin başında aşırı plastik deformasyon (severe plastic deformation-SPD) metotları gelmekte olup bu sayede geleneksel malzemelere göre pek çok üstünlüklere sahip

olan baskı formunda (bulk production) süper ince taneli (ultrafine grained) malzemeler üretilmekte ve bu alanda yoğun çalışmalar sürdürülmektedir [32-34]. Günümüzde aşırı plastik deformasyon yöntemi süper ince taneli üstün mekanik özellikleri olan malzemelerin üretimi için etkin bir süreç olarak ortaya çıkmıştır. Yapılan bir çalışmada, aşırı plastik deformasyon yöntemiyle üretilen süper ince taneli malzemelerin optimum tane boyutu aralığında yüksek mukavemet ve iyi süneklik özelliklerinin her ikisini de aynı anda sergilediği vurgulanmaktadır [35]. Malzemelerin mukavemet ve süneklik değerlerinin birlikte artırılması nadiren karşılaşılan bir durumdur. Bu yöntem sayesinde diğer bazı mekanik özellikler gibi darbe dayanımı ve yorulma performansının da önemli ölçüde iyileştiği belirlenmiştir [36,37]. Başka bir çalışmada, tüm aşırı plastik deformasyon yöntemleri içerisinde, eş kanalda açısız ekstrüzyon (equal channel angular extrusion - ECAE) yönteminin en başta gelen ve en etkin plastik deformasyon yöntemi olduğu ortaya konulmuştur [38].

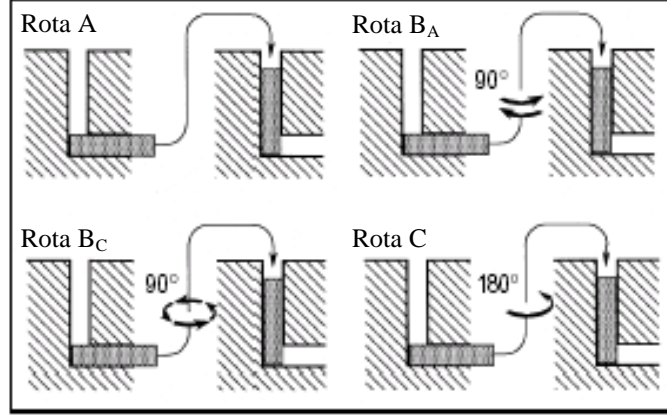
Eş kanalda açısız basma (equal channel angular pressing –ECAP) olarak da bilinen eş kanalda açısız ekstrüzyon (EKAE) yöntemi dünyada birçok araştırmacı tarafından çeşitli metal ve alaşımlara başarılı bir şekilde uygulanmış ve mekanik özelliklerde çok önemli iyileşmeler elde edilmiştir [39,40]. Söz konusu yöntem malzemelerin aşırı oranda plastik deformasyona tabi tutularak tane boyutunun küçültülmesi, bir başka deyişle yeniden yapılandırılması ve böylece mekanik özelliklerinin büyük ölçüde iyileştirilmesi esasına dayanır [41,42]. Bu yöntemde katı durumdaki malzeme L formundaki eş kesitli, aralarında belirli bir açı olan iki kanaldan oluşan bir kalıptan (EKAE kalıbı) geçirilir. Tipik bir EKAE kalıbının şematik resmi Şekil 2’de verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi giriş ve çıkış kanallarının kesitleri birbirinin aynı olan kalıbın giriş kanalından giren malzeme, iki kanal arakesitinden geçerken basit kayma mekanizmasıyla aşırı oranda plastik deformasyona uğratılmakta ve bu sayede tane kırılarak inceltilmektedir. Numunenin kesitinde herhangi bir değişime neden olmadığı için bu yöntem haddeleme ve ekstrüzyon gibi geleneksel plastik deformasyon yöntemlerinden farklıdır. Bu yöntemde, aynı numune birçok defa aynı prosese tabi tutularak, kesit alanı değiştirilmeden şekil değiştirme miktarı oldukça artırılabilir. Ayrıca, birbiri peşine yapılan proseslerde numunenin kanala giriş rotası (processing route) da değiştirilerek yapı ve mekanik özelliklerde değişiklik sağlanabilmektedir.



Şekil 2. EKAE kalıbı ve yöntemin şematik gösterimi

Bu güne kadar yapılan çalışmalarda ortaya konulan dört temel EKAE rotası vardır [43] (Şekil 3). Bunlar;

- 1- *rota-A* (numune her pasoda aynı pozisyonda kanala girmektedir),
- 2- *rota-B_A* (numune her pasoda bir önceki pozisyonuna göre $\pm 90^\circ$ açı yapacak şekilde döndürülerek kanala girmektedir),
- 3- *rota-B_C* (numune bir önceki pozisyonu ile sürekli $+90^\circ$ lik açı yapacak şekilde döndürülerek kanala girmektedir),
- 4- *rota-C* (numune her pasoda aynı yönde 180° çevrilerek kanala girmektedir)



Şekil 3. Literatüre geçmiş başlıca EKAE rotaları [33].

Ayrıca son zamanlarda, bunlardan birkaç tanesinin bir arada uygulandığı yeni rotalar da geliştirilmiştir [44].

1.4.1. EKAE Yönteminin Çinko-Alüminyum Esaslı Alaşımların Mekanik ve Yorulma Özelliklerine Etkisi

Yapılan literatür araştırmaları, bu yöntemin değişik amaçlar için pek çok mühendislik malzemelerine uygulandığını ve bir çok malzeme grubundan da oldukça başarılı sonuçlar alındığını göstermektedir. Bu yöntemin en çarpıcı özelliklerinden biri, süper ince taneli hale getirilen malzemelerin hem mukavemet hem de süneklik değerlerinin birlikte artırılabilmesidir [45-47]. Geleneksel üretim yöntemleriyle malzemelerde bu özelliği elde etmek hemen hemen imkânsızdır. Bu bağlamda bilinen temel prensip; mukavemet ve süneklik değerlerinin birbirleriyle ters orantılı olarak değiştiğidir. Başka bir deyişle, bir malzemenin herhangi bir işlemle mukavemet değerleri arttırıldığında süneklik değerlerinin azaldığı, süneklik değerleri arttırıldığında ise mukavemet değerlerinin azaldığıdır. Önerilen bu yeni yöntemle malzemelerin mukavemet ve süneklik değerleri birlikte arttırılabilmekte, özellikle deformasyonu zor olan gevrek yapılı malzemelerin şekillendirilebilirlik özellikleri de büyük ölçüde iyileştirilebilmektedir. Nitekim, Ti ve Mg alaşımları yüksek sıcaklıklarda bu yöntemle proses edildiklerinde mukavemet değerleri önemli ölçüde artarken, süneklik değerlerinde de çok önemli iyileşmeler görülmüştür [48,49]. Yapılan bir çalışmada, EKAE yöntemiyle üretilen nano yapılı malzemelerin genellikle porozite içermediği bu nedenle yüksek mukavemet ve iyi süneklik değerlerinin elde edildiği tespit edilmiştir [35]. Bir başka çalışmada ise EKAE yöntemiyle üretilen bazı

malzemelerin yüksek mukavemet ve yüksek süneklik değerleri arasında olağanüstü bir kombinasyon olduğu tespit edilmiştir [50]. Bu olağanüstü kombinasyonun havacılık, otomobil ve spor aletleri vb. gelişmiş yapısal uygulama alanları için çok çekici bir özellik olduğu vurgulanmaktadır [51]. Fakat söz konusu kombinasyonu sağlayan mekanizmalar bazı sınırlı açıklamalar dışında henüz tam olarak ortaya konulamamıştır [52]. Bu mekanizmaları açıklamak için EKAE yöntemi halen çok çeşitli metal ve alaşımlara uygulanmaktadır [52].

Öte yandan, yapılan literatür çalışmaları EKAE yöntemiyle üretilmiş olan süper ince taneli malzemelerin yorulma davranışlarının henüz yeterli ölçüde incelenip ortaya konulmadığını göstermektedir [53,54]. Bazı araştırmacılar tarafından belirli malzemeler incelenmiş olup bu yöntemin malzemelerin yorulma özellikleri üzerindeki etkileri tam olarak belirlenememiş ve yorulma mekanizmaları açıklanamamıştır [53-56]. Nitekim, yapılan literatür araştırmaları sonucunda söz konusu yöntemin bazı malzemelerin yorulma davranışlarını iyileştirirken [53,55,56], bazı malzemelerin yorulma davranışları üzerinde çok fazla etkili olmadığı, bazı malzemelerin yorulma performansını ise olumsuz etkilediği belirlenmiştir [54,57,58]. Bu durumun malzemelerin mikro yapıları ile sertlik, mukavemet ve süneklik gibi temel mekanik özelliklerine bağlı olduğu bilinmektedir [58,59].

EKAE yöntemi dökülmüş durumdaki bazı çinko-alüminyum alaşımlarına uygulanmış olup mukavemet ve süneklik değerlerinde önemli iyileşmeler elde edilmiştir [59-61]. Ötektik [62] ve ötektoid [63] bileşimlerindeki çinkoca zengin bazı çinko-alüminyum alaşımları ile, ticari ZA-8 [64], ZA-12 [65] ve ZA-27 [66] alaşımları EKAE yöntemiyle başarılı bir şekilde proses edilmiştir. Bu çalışmalar sonucunda, EKAE yöntemiyle proses edilen alaşımların oda sıcaklığındaki süneklik ve mukavemet değerlerinin çarpıcı bir biçimde arttığı, ancak mukavemet değerlerindeki artışın süneklik değerlerindeki artıştan daha düşük olduğu gözlemlenmiştir [64]. EKAE yöntemiyle proses edilen ZA-8 alaşımının mukavemet ve süneklik değerlerinde elde edilen iyileşmelere paralel olarak aşınma direncinin de önemli ölçüde arttığı belirlenmiştir [64]. İkili ZnAl60 alaşımı ile yapılan bir çalışmada, dört paso ECAE işlemi sonunda dökümden kaynaklanan mikro gözeneklerin (porozite) büyük ölçüde giderildiği ve mikro yapının tamamen değiştiği gözlenmiştir [51]. Şöyle ki; dendritik döküm yapısının tamamen ortadan kalktığı bunun yerine, ince şerit şeklinde uzanan alüminyumca zengin α taneleri ile çinkoca zengin ötektik fazları içeren bileşenlerden oluşan bir yapının ortaya çıktığı görülmüştür [51]. Benzer sonuç başka bir çalışmada üçlü Al-40Zn-2Cu alaşımından da elde edilmiştir [67]. Alaşımların mukavemet

ve süneklik değerlerinde EKAE ile elde edilen önemli iyileşmeler bu yapısal değişimlere dayandırılarak açıklanmıştır. Ayrıca, rota ve paso sayısı gibi işlem parametrelerinin de söz konusu alaşımların içyapı ve mekanik özellikleri üzerinde oldukça etkili olduğu belirlenmiştir. Mekanik özelliklerin genel olarak artan paso sayısı ile iyileştiği ve mekanik özelliklerin iyileştirilmesinde bazı özel durumlar hariç rota-A'nın rota-B_C'ye göre daha etkin olduğu sonucuna varılmıştır [51,67].

Literatürde EKAE yönteminin Zn-Al esaslı alaşımların yorulma davranışına etkisini ortaya koyan herhangi bir çalışmaya rastlanılmamıştır. EKAE sonrası ortaya çıkan yapısal değişimler neticesinde mukavemet ve süneklik değerlerinde elde edilen iyileşmenin söz konusu alaşımların yorulma performansını da önemli ölçüde iyileştireceği düşünülmektedir. Bu sayede kolay ve ucuza temin edilebilen bu alaşımların, düşük süneklik ve mukavemetleri ile yetersiz yorulma performansları vb. nedenlerle sınırlı olan kullanım alanları genişleyecek ve geleneksel olarak kullanılan pek çok mühendislik malzemesinin yerine potansiyel bir malzeme olarak sunulabilecektir.

1.5. Literatür Özeti ve Çalışmanın Amacı

Geleneksel yöntemlerle üretilen çinko-alüminyum esaslı alaşımların başta yorulma olmak üzere mekanik özellikleri bazı uygulamalarda yetersiz kalmaktadır. Bu durum, ekonomiklik, hafiflik ve kolay temin edilebilme gibi diğer malzemelere göre pek çok üstünlüğe sahip olan çinko-alüminyum alaşımlarının kullanımını kısıtlayıcı bir faktör olarak ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle bu alaşımların çeşitli mühendislik uygulamalarında tercih edilebilmeleri için, söz konusu alaşımların mekanik özelliklerinin ve özellikle yorulma performansının iyileştirilmesi gerekmektedir. Bunun için bu alaşımlar üzerine yoğun çalışmalar yapılmış ve halen yapılmaktadır. Bu çalışmada, son yıllarda kullanılmaya başlanan ve malzemelerin mekanik özelliklerini, süneklik değerlerini düşürmeden büyük ölçüde iyileştiren EKAE yönteminin bazı ikili Zn-Al alaşımlarının yorulma davranışlarına etkileri araştırılacaktır. Sözü edilen alaşımların yorulma davranışları hakkında literatürde yeterli bilgi bulunmayışı ve özellikle EKAE yöntemiyle üretilmiş Zn-Al esaslı alaşımların yorulma davranışlarının hiç incelenmemiş olması nedeniyle bu çalışmanın literatürdeki önemli bir boşluğu dolduracağı öngörülmektedir. Bunun yanında, elde edilecek olan sonuçların direkt olarak uygulamaya yönelik olması çalışmanın teknolojik anlamda da önemini artırmaktadır.

Bu nedenlerle bu çalışmanın amacı aşırı plastik deformasyon tekniklerinden biri olan eş-kanalda açısız ekstrüzyon (EKAE) yöntemi ile bazı ikili çinko-alüminyum alaşımlarının yeniden yapılandırılması ve böylelikle söz konusu alaşımların yorulma performansının iyileştirilmesidir.

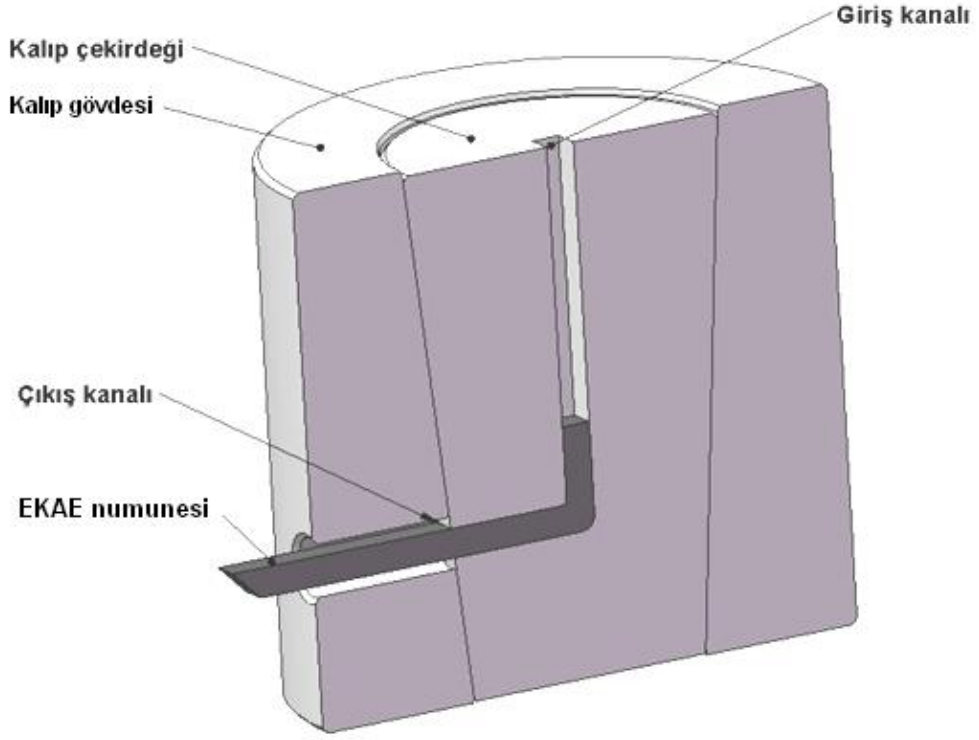
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. Alaşımların Üretimi

Bu çalışmada iki adet ikili çinko-alüminyum (Zn-60Al, Zn-80Al) alaşımı kokil döküm yöntemiyle üretildi. Alaşımların üretiminde yüksek saflıkta (%99,9) çinko ve ticari saflıkta (%99,8) alüminyum kullanıldı. Ergitme işlemi elektrikli bir pota fırını içerisinde gerçekleştirildi. Ergitilen alaşımlar kimyasal bileşim oranlarına göre belirlenen ve ergime sıcaklıklarının yaklaşık olarak 50 °C üzerindeki sıcaklıklara karşılık gelen, sırasıyla 660 °C (Zn-60Al) ve 680 °C (Zn-80Al) sıcaklıklardan oda sıcaklığındaki bir kokil kalıba dökülerek katılaştırıldı. Dökülmüş durumdaki külçelerden talaşlı imalat yöntemiyle 1 metalografi, 1 sertlik, 3 çekme, 20 yorulma ve farklı rota ve paso sayılarında proses edilmek üzere, her bir paso ve rota için 20'şer adet EKAE numunesi hazırlandı. Ayrıca, Zn-80Al alaşımından gerek dökülmüş gerekse 1 ve 2 pasoda proses edilmiş durumda 3'er adet darbe numunesi hazırlandı. Üretilen alaşımların kimyasal bileşimleri atomik absorpsiyon yöntemi ile belirlendi.

2.2. EKAE Deneyleri

EKAE deneyleri için kalıp çekirdeği, kalıp gövdesi ve ısıtıcı gibi elemanlardan oluşan bir EKAE kalıbı tasarlanarak imal edildi. Soğuk iş takım çeliğinden imal edilmiş, konik bir şekle sahip olan kalıp çekirdeği iki parçadan oluşmaktadır (Şekil 4). Çekirdeğin bir parçasına L formunda 10mmx10mm kare kesitli giriş ve çıkış kanalları açılmıştır. Kalıp çekirdeği, L formundaki eş kesitli giriş ve çıkış kanalları arasındaki açı (Φ) 90°, dış köşe açısı (ψ) ise 20° olacak şekilde tasarlanmıştır. Kalıp, kalıp gövdesi etrafına sarılan sac şeklindeki rezistans yardımıyla ısıtılmıştır (Şekil 5). Giriş kanalına bitişik olacak şekilde kalıp gövdesi içerisine yerleştirilmiş olan iki adet termokupul yardımıyla kalıp sıcaklığı deney süresince sürekli olarak ölçülmüş ve bir sıcaklık kontrol ünitesi yardımıyla istenilen değerde sabitlenmesi sağlanmıştır.



Şekil 4. EKA kalıbının şematik resmi



Şekil 5. Kalıp gövdesi ve etrafına sarılan sac şeklinde rezistansın görünümü

EKAE deneyleri, dökülmüş külçelerden kesilerek 10mm x 10mm x 110mm³ boyutlarında talaşlı işleme hazırlanan EKAE numuneleri kullanılarak gerçekleştirildi. Söz konusu deneyler, numunede herhangi bir çatlama veya kırılmaya meydan vermeyecek şekilde Zn-60Al alaşımı için 80 ±5 °C ve Zn-80Al alaşımı ise 90 ±5 °C sıcaklıkta proses edildi. Bütün EKAE deneylerinden önce numuneler ve kalıp kanal yüzeyleri sürtünmelere karşı MoS₂ katı yağlayıcı ile ince bir film tabakası oluşturacak şekilde yağlandı. Kalıp ve numune arasındaki ısıl dengenin sağlanabilmesi için EKAE numuneleri ilk pasodan önce 10 dakika ve takip eden pasolardan önce ise 5 dakika kalıp içerisinde bekletildi. EKAE numuneleri 1000 kN kapasiteli bir hidrolik press yardımıyla 1 mm/s'lik sabit hızda kalıp içinden geçirildi. Zn-60Al alaşımından hazırlanan numuneler iki farklı rotada (rota-A ve rota-B_C) 4 pasoya, Zn-80Al alaşımından hazırlanan numuneler ise rota-A'da 2 pasoya kadar proses edildi. Literatürde belirtildiği gibi, EKAE numuneleri rota-A'da her pasoda aynı doğrultuda, rota-B_C'de ise her bir pasoda bir önceki pasoya göre aynı yönde 90° döndürülerek kalıba yerleştirildi.

2.3. Metalografik İncelemeler

İç yapı incelemeleri için hem dökülmüş ve hem de farklı rota ve paso sayılarında proses edilmiş durumdaki alaşımlardan alınan örnekler standart metalografi yöntemi ile hazırlandı. Hazırlanan numuneler 100 ml saf su + 3,4 gr NaOH'den oluşan dağlama ayracı ile dağlandı. Ayrıca, yorulma deneyi sonucunda kırılan örneklerin kırık yüzeylerine dik kesitlerinin incelenmesi için kullanılan metalografi örnekleri de aynı şekilde hazırlandı.

2.4. Mekanik Deneyler

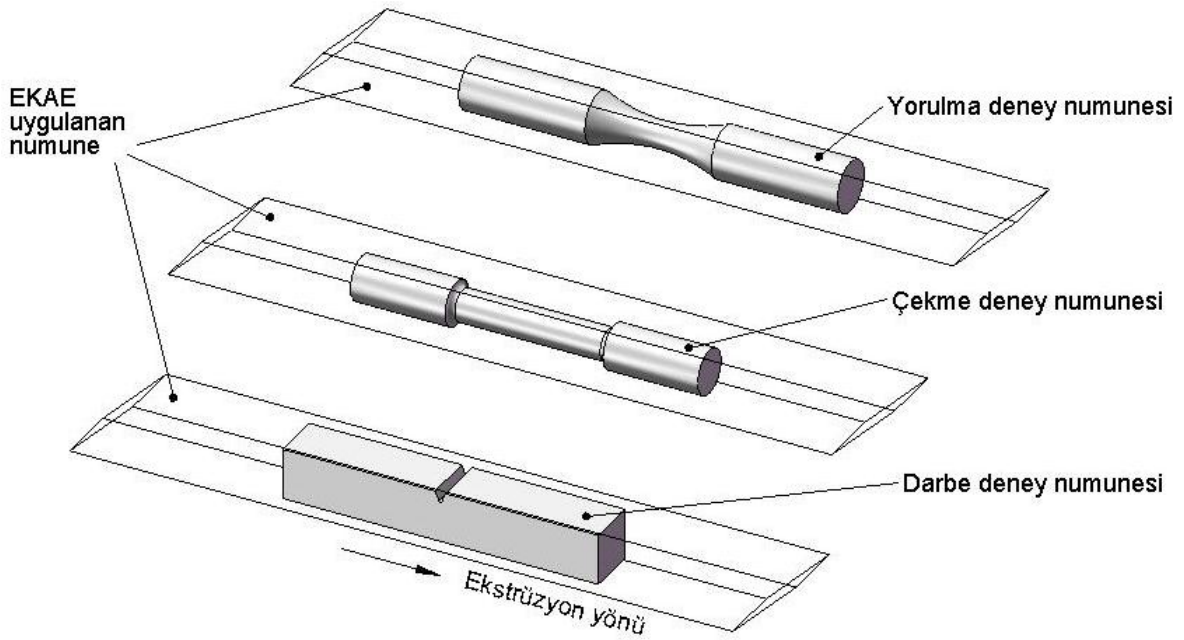
2.4.1. Çekme, Sertlik ve Darbe Deneyleri

Çekme deneyleri için, gerek dökülmüş gerekse farklı rota ve paso sayılarında proses edilmiş durumdaki alaşımlardan talaşlı işleme çapı 5 mm, ölçü uzunluğu 25 mm olan 5x25 TS 138A standardına uygun örnekler hazırlandı. EKAE ile proses edilmiş numuneden üretilen çekme deney numunesinin şematik resmi Şekil 6'da verilmiştir. Hazırlanan örnekler universal bir çekme deneyi makinesinde 0,25 mm/s'lik çekme hızında

çekme deneyine tabi tutuldu. Her bir durum için üç örnek kullanıldı. Alaşımların her durumdaki çekme dayanımı, akma sınırı ve kopma uzaması değerleri bu üç örnekten elde edilen verilerin ortalaması alınarak belirlendi.

Sertlik deneyi için alaşımlardan alınan örnekler talaşlı imalat yöntemi ile yüzeyleri paralel olacak şekilde işlendikten sonra parlatıldı. Sertlik ölçümleri; Brinell sertlik ölçme yöntemi ile 31,25 kg yük altında ve 2,5 mm çaplı bilya uç kullanılarak gerçekleştirildi. Her örnek üzerinde beş ölçüm yapılarak elde edilen değerlerin ortalaması alındı.

Darbe deneyleri için gerek dökülmüş gerekse 1 paso ve 2 paso rota-A'da proses edilmiş durumdaki Zn-80Al alaşımından talaşlı işleme $8 \times 8 \times 50 \text{ mm}^3$ ölçülerinde numuneler hazırlandı. Numunenin tam orta bölümünde derinliği 2 mm olan 45° açığa sahip kanal açılmış olup, kanalın uç kısmı yarıçapı 0,25 mm olacak şekilde işlendi. EKAE işlemi uygulanmış numuneden üretilen darbe deney numunesinin şematik resmi Şekil 6'da verilmektedir. Darbe deneylerinde her bir durum için üç adet numune kullanılmış olup deneyler maksimum darbe enerjisi 500 kg.cm ($\pm 0.5 \text{ kg.cm}$) olan bir düzenekte yapılmıştır.



Şekil 6. EKAE işlemi uygulanan numunelerden elde edilen yorulma, çekme ve darbe deney numunelerinin şematik görünümü

2.4.2. Yorulma Deneyi

Alaşımların yorulma davranışlarını incelemek amacıyla dönel eğmeli bir yorulma deney düzeneği tasarlanarak imal edildi. Şekil 7’de genel görünümü verilen bu deney düzeneği; 2 kW gücünde bir elektrik motoru, iki adet mil, millerin yataklanmasında kullanılan iki adet ana yatak, yük askı kolu, kavrama, örnek tutucuları, otomatik kumanda sistemi, anahtar ve devir sayacı gibi elemanlardan oluşmaktadır.

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. Deney makinesi iki farklı devir sayısında (1500 ve 3000 d/d) ve farklı boyutlarda numuneler kullanılarak deney yapmaya elverişli olacak şekilde tasarlanmıştır. Yük uygulama işlemi opsiyonel olarak hem yük hücresi yardımıyla otomatik, hem de ağırlık asmak suretiyle manuel olarak gerçekleştirilebilmektedir.

Talaşlı yöntemle yüzeyi hassas bir şekilde işlenerek hazırlanan yorulma örneği iki ucundan yorulma makinesinin 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 deneyine tabi tutulan numunenin kırıldıktan sonraki durumunu gösteren resim Şekil 8’de verilmiştir. Yapılan hesaplamalar sonucunda, söz konusu deney düzeneğinde örneğe uygulanan yük (P) ile örneğin en dar kesitinde oluşan maksimum eğme gerilmesi ($\sigma_{eğ}$) arasında $\sigma_{eğ}$ (MPa)= 18,6 P (N) bağıntısı ile ifade edilebilen bir ilişkinin bulunduğu belirlendi. Bu bağıntının elde edilişi aşağıda kısaca verilmiştir.

$$\sigma_{e\ddot{g}} = \frac{M_{e\ddot{g}}}{W_{e\ddot{g}}} \rightarrow \sigma_{e\ddot{g}} = \frac{P.l}{\frac{\pi.d^3}{32}} \rightarrow \sigma_{e\ddot{g}} = 18,6 P \quad (1)$$

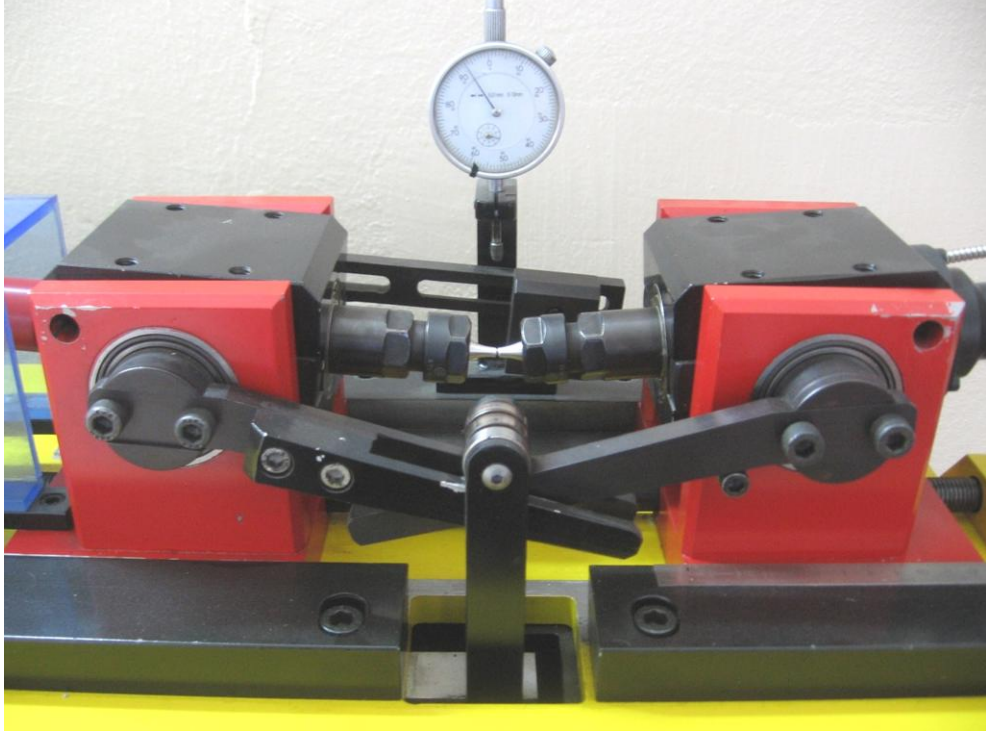
Burada $M_{e\ddot{g}}$ eğme momenti, $W_{e\ddot{g}}$ eğme için mukavemet momenti olmak üzere örneğin çapı $d=4$ mm ve moment kolu $l=117$ mm olarak alınmıştır.



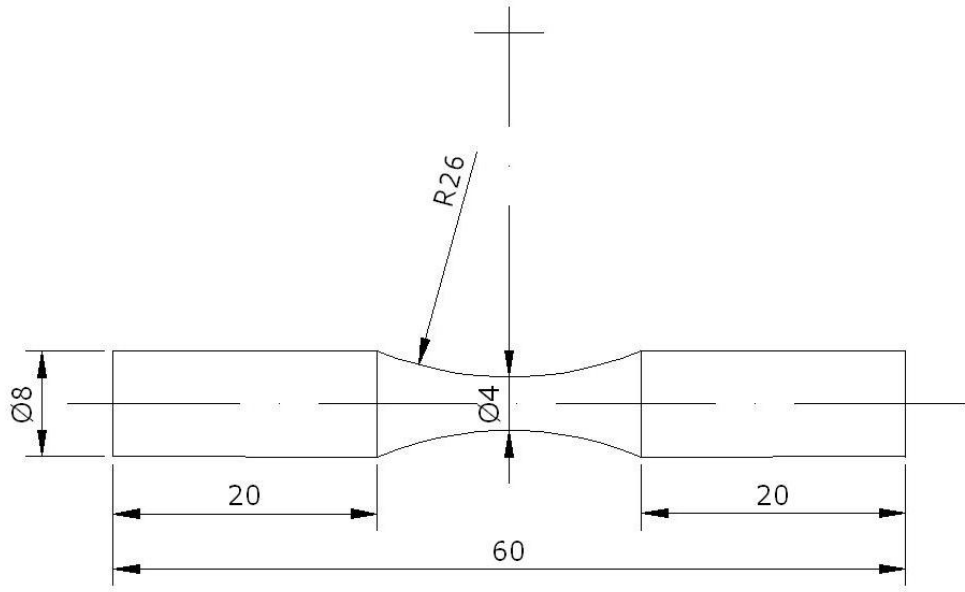
Şekil 7. Dönel eğmeli yorulma deney makinesi

Bu çalışma için üretilen gerek dökülmüş gerekse farklı rota ve paso sayılarında proses edilmiş durumdaki çinko-alüminyum esaslı alaşımlardan talaşlı yöntemle yüzeyi hassas bir şekilde işlenerek hazırlanan yorulma örneklerinin şekli ve boyutları Şekil 9'da, EKAE işlemi uygulanmış numunelerden üretilen yorulma deney numunesinin şematik resmi de şekil 6'da 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 Zn-60Al alaşımı için 80 - 244 MPa ve Zn-80Al alaşımı için 92 - 244 MPa arasında değişen farklı gerilmelerde yapıldı. Her deney sonunda örneğin

kırılmasına kadar geçen çevrim sayısı belirlendi ve elde edilen verilerden yararlanılarak alaşımların gerilme-çevrim sayısı (S-N) eğrileri çizildi.



Şekil 8. Deney örneğinin kırılması durumunda yorulma makinesinin görünümü



Şekil 9. Yorulma deney numunesinin şekli ve boyutları

3. BULGULAR

3.1. Alaşımların Kimyasal Bileşimi

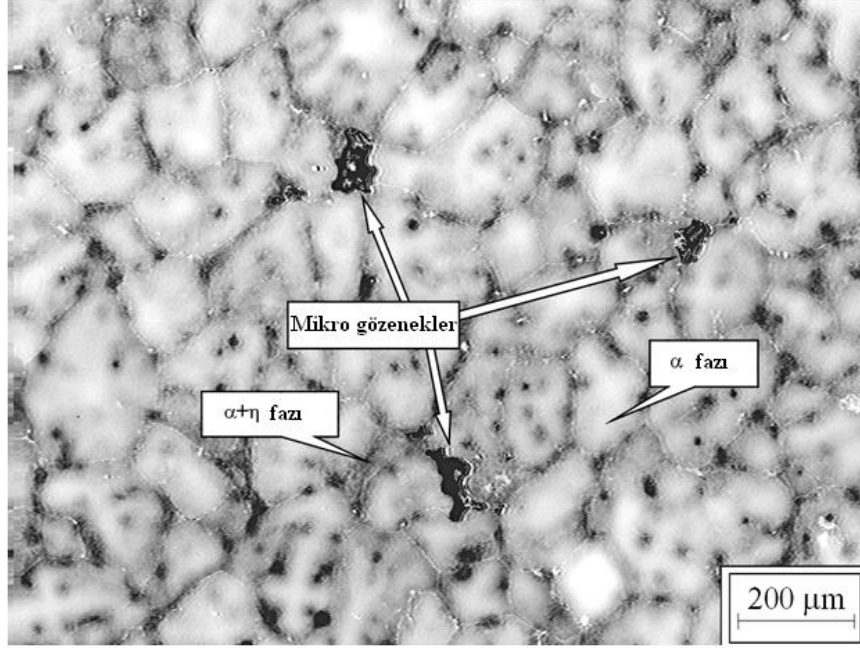
Üretilen alaşımların kimyasal bileşimleri Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Alaşımların kimyasal bileşimi

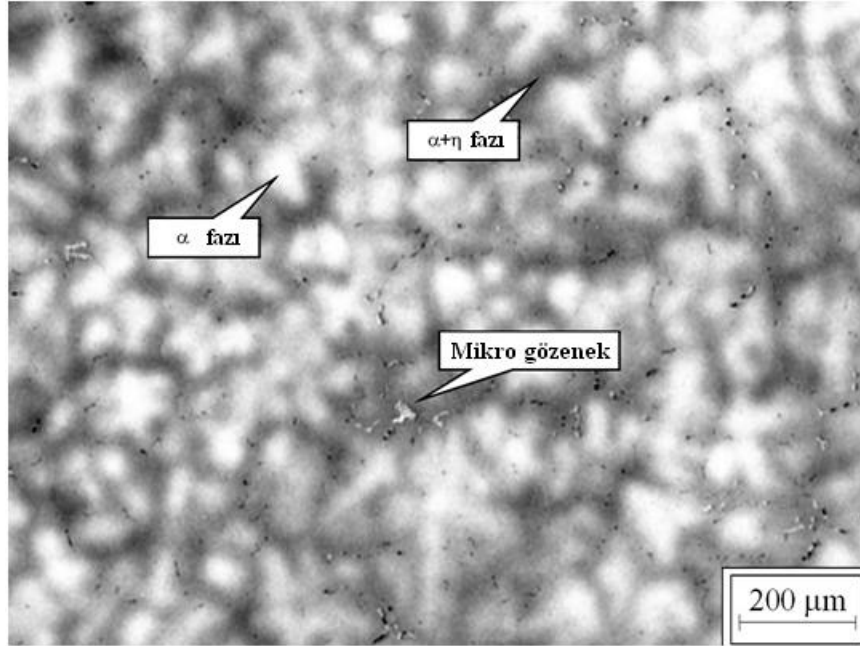
Alaşım	Kimyasal bileşim (% ağırlık)	
	Zn	Al
Zn-60Al	39,2	60,8
Zn-80Al	18,9	81,1

3.2. Alaşımların İç Yapısı

İkili Zn-60Al ve Zn-80Al alaşımlarının dökülmüş durumdaki içyapılarını gösteren fotoğraflar sırasıyla Şekil 10 ve 11’de verilmiştir. Bu fotoğraflardan, alaşımların içyapılarının tipik döküm yapısı olan alüminyumca zengin α dendritleri ile bunları çevreleyen çinkoca zengin $\alpha+\eta$ ötektoid lamellerinden oluştuğu görölmektedir. Ayrıca tam belirgin olmayan tane sınırları alaşımlarda alüminyum oranının belirli bir değeri aşması halinde dentritik yapının taneli yapıya dönüşme eğiliminde olduğunu göstermektedir. Bu durum bu alaşımlar üzerine daha önce yapılan çalışmalarda da gözlenmiştir [13]. Ayrıca bu fotoğraflardan geniş katılaşma aralığına sahip döküm alaşımlarının karakteristik özelliği olan mikro gözeneklerin (porozite, döküm boşluğu) de oluştuğu görölmektedir [68].



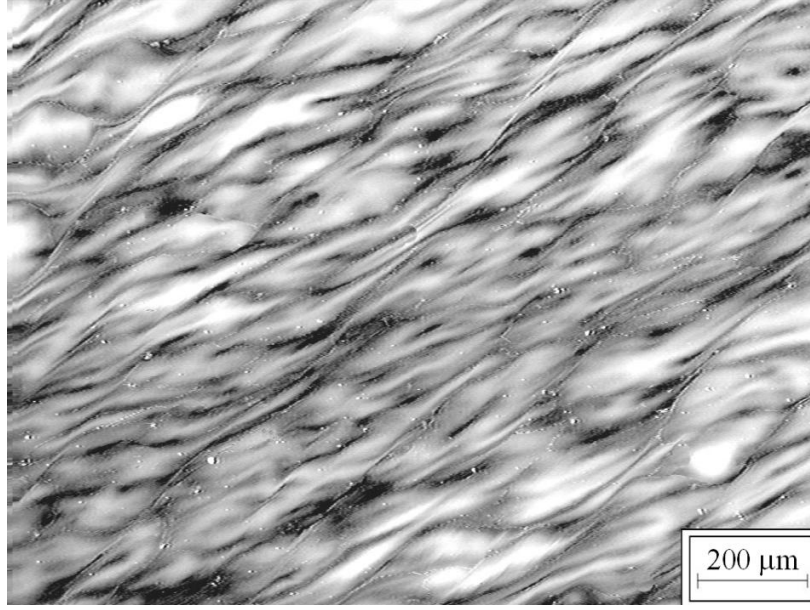
Şekil 10. Zn-60Al alaşımının dökülmüş durumdaki içyapısı



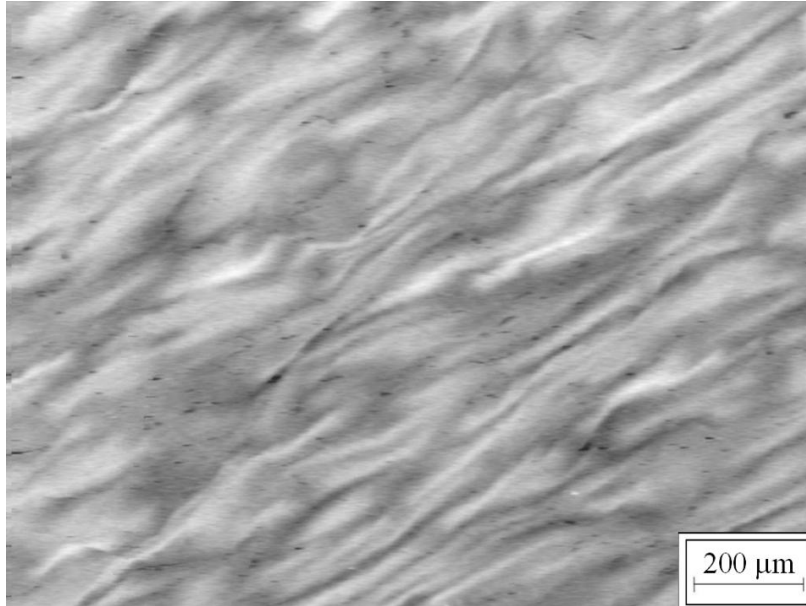
Şekil 11. Zn-80Al alaşımının dökülmüş durumdaki içyapısı

Yapılan içyapı incelemeleri sonucunda EKAE işleminin dökülmüş durumdaki alaşımların mikro yapılarını önemli ölçüde etkilediği belirlenmiştir. EKAE işlemi uygulanan Zn-60Al ve Zn-80Al alaşımlarının 1 paso sonrasında oluşan içyapılarını

gösteren fotoğraflar sırasıyla Şekil 12 ve 13’de verilmiştir. Bu fotoğraflardan, 1 pasodan sonra proses esnasında oluşan kayma gerilmesi etkisiyle dentritik yapının kaybolduğu, bunun yerine ekstrüzyon doğrultusuyla belli açı yapacak şekilde uzamış (yönlenmiş), ince taneli bir yapının oluştuğu görülmektedir.

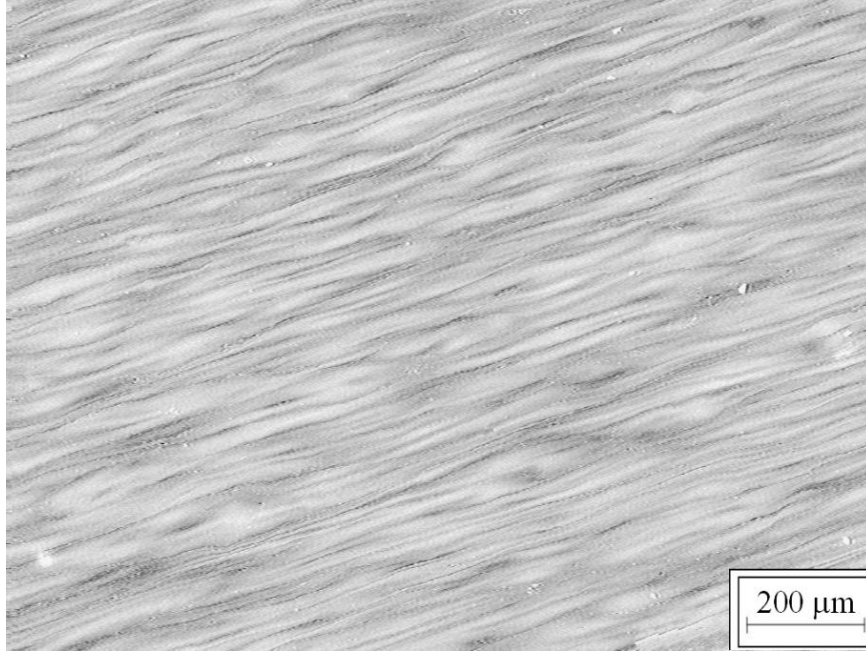


Şekil 12. Zn-60Al alaşımının 1 paso EKAE işlemi uygulanmış durumdaki içyapısı

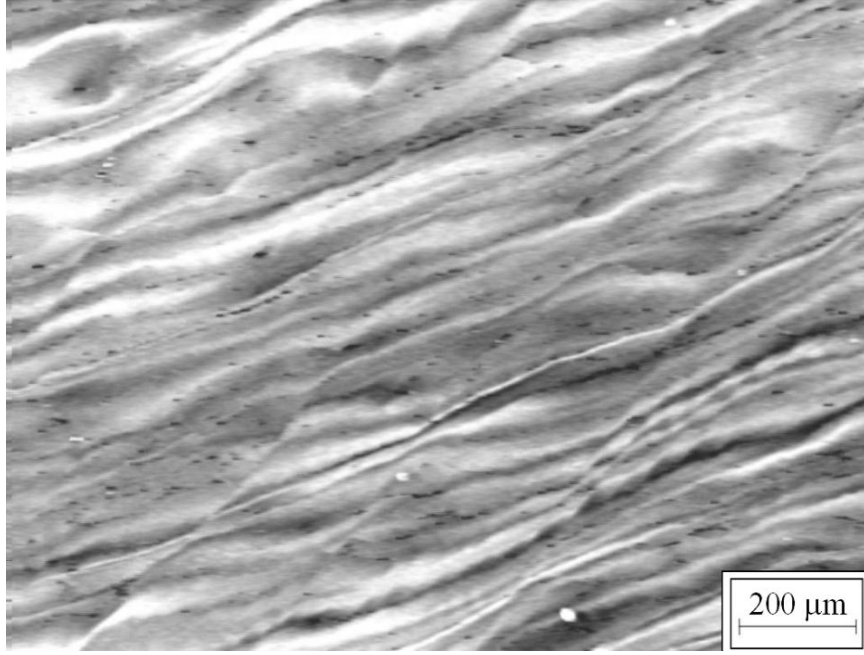


Şekil 13. Zn-80Al alaşımının 1 paso EKAE işlemi uygulanmış durumdaki içyapısı

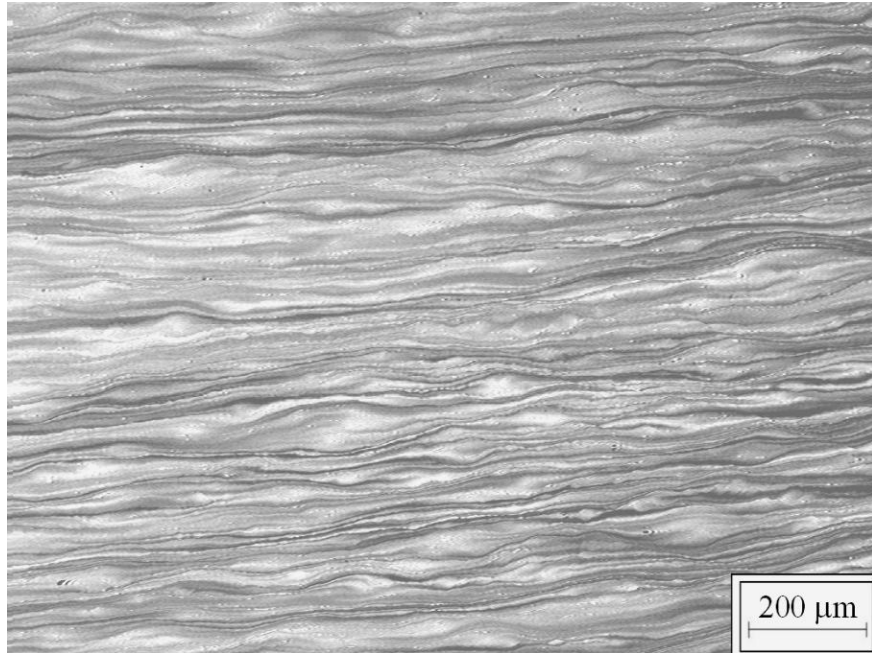
Rota-A kullanılarak 2 paso EKAE işlemi uygulanan Zn-60Al ve Zn-80Al alaşımlarının içyapısını gösteren fotoğraflar sırasıyla Şekil 14 ve 15’de, rota-A kullanılarak 4 paso EKAE işlemi uygulanmış Zn-60Al alaşımının içyapısını gösteren SEM fotoğrafı ise Şekil 16’da verilmiştir. Bu fotoğraflardan görüldüğü gibi 2 paso sonunda dentritik yapı tamamen kaybolmuş, 1 pasoda oluşan yapıya göre daha ince ve şerit gibi uzamış bileşenlerden (alüminyumca zengin α ve çinkoca zengin $\alpha+\eta$ fazları) oluşan eğim (yönlenme) açısı daha küçük bir yapı ortaya çıkmıştır. 4 paso sonunda ise daha da incelmış, uzamış ve eğim açısı daha da azalmış yani ekstrüzyon doğrultusuna daha da yaklaşmış bileşenlerden oluşan bir içyapı elde edilmiştir (Şekil 16). Bu sonuçlar, paso sayısı arttıkça tane incelmesinin arttığını ve eğim açısının azaldığını yani ekstrüzyon doğrultusuna yaklaştığını göstermektedir.



Şekil 14. Rota-A kullanılarak 2 paso EKAE işlemi uygulanmış Zn-60Al alaşımının içyapısı



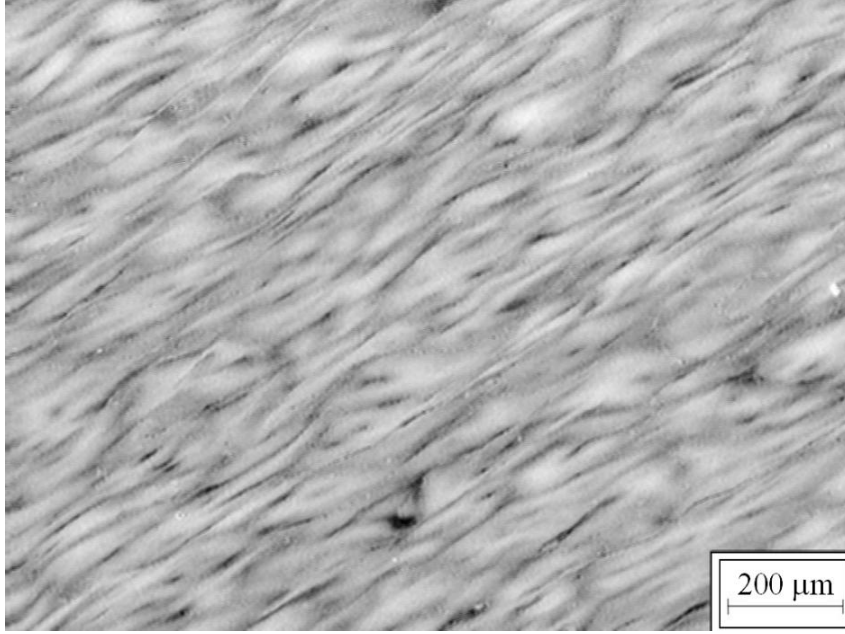
Şekil 15. Rota-A kullanılarak 2 paso EKAET işlemi uygulanmış Zn-80Al alaşımının içyapısı



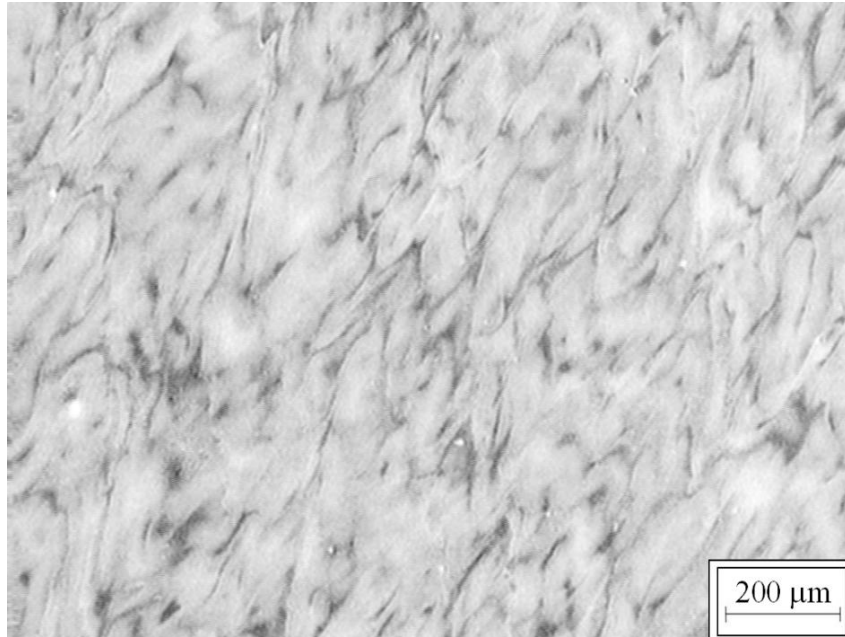
Şekil 16. Rota-A kullanılarak 4 paso EKAET işlemi uygulanmış Zn-60Al alaşımının içyapısı

Zn-60Al alaşımının Rota-B_C kullanılarak 2 ve 4 paso EKAET işlemi uygulanmış durumlardaki içyapılarını gösteren SEM fotoğrafları sırasıyla Şekil 17 ve 18'de verilmiştir.

Bu fotoğraflardan, özellikle de 4 paso EKAE işlem sonrasında daha eş eksenli iri tanelerden oluşan, karışık mikro bileşenlere sahip ve tane sınırları tam belirgin olmayan bir içyapının oluştuğu görülmektedir.



Şekil 17. Rota- B_C kullanılarak 2 paso EKAE işlemi uygulanmış Zn-60Al alaşımının içyapısı



Şekil 18. Rota- B_C kullanılarak 4 paso EKAE işlemi uygulanmış Zn-60Al alaşımının içyapısı

3.3. Mekanik Deneylelerden Elde Edilen Bulgular

3.3.1. Çekme, Sertlik ve Darbe Deneylelerinden Elde Edilen Bulgular

Üretilen alaşımların gerek dökülmüş gerekse farklı rota ve paso sayılarında proses edilmiş durumdaki sertlik, çekme dayanımı, akma sınırı, kopma uzaması ve darbe dayanımı değerleri Zn-60Al alaşımı için Tablo 3’de ve Zn-80Al alaşımı için ise Tablo 4’de verilmiştir. Tablo 3’den görüldüğü gibi 1 paso EKAE işlemi sonucunda Zn-60Al alaşımının sertlik, çekme dayanımı, akma sınırı ve kopma uzaması değerleri aynı anda artmıştır. Rota-A ve rota-B_C ile 2 paso EKAE işlemi sonucunda, 1 pasoya göre sertlik ve mukavemet değerlerinde azalma olurken kopma uzaması değerinde küçük bir artış olmuştur. Ayrıca bu tablodan, rota-A kullanılarak yapılan 4 paso EKAE işlemi sonucunda alaşımın sertlik ve mukavemet değerlerinin tekrar artarken, rota-B_C ile 4 paso sonucunda söz konusu değerlerin azaldığı görülmektedir. Alaşımın kopma uzaması değeri her iki rota ile artan paso sayısı ile artmış, en yüksek değer ise rota-A kullanılarak 4 paso sonucunda elde edilmiştir.

Tablo 3. Zn-60Al alaşımının dökülmüş ve farklı rota ve paso sayılarında proses edilmiş durumdaki sertlik, çekme dayanımı, akma sınırı ve kopma uzaması değerleri

EKAE rotası	Paso sayısı	Sertlik (BSD)	Çekme dayanımı (MPa)	Akma sınırı (MPa)	Kopma uzaması (%)
	0	89	285	249	16
	1	93	315	281	18
Rota-A	2	91	305	270	21
	4	96	316	283	28
Rota-B _C	2	86	307	284	22
	4	84	302	272	23

Dökülmüş ve 1 paso EKAE işlemi uygulanmış Zn-80Al alaşımı ile yapılan deneyler sonucunda elde edilen sertlik, çekme dayanımı, akma sınırı ve darbe dayanımı değerleri karşılaştırıldığında, söz konusu değerlerin 1 paso EKAE işlemi sonucunda aynı anda arttığı, kopma uzaması değerinin ise azaldığı görülmektedir (Tablo 4). Zn-80Al alaşımına rota-A kullanılarak 2 paso EKAE işlemi uygulandığında, 1 pasoya göre alaşımın

sertlik değeriinde azalma olurken kopma uzaması, çekme dayanımı, akma sınırı ve darbe dayanımı değerlerinde artış elde edilmiştir.

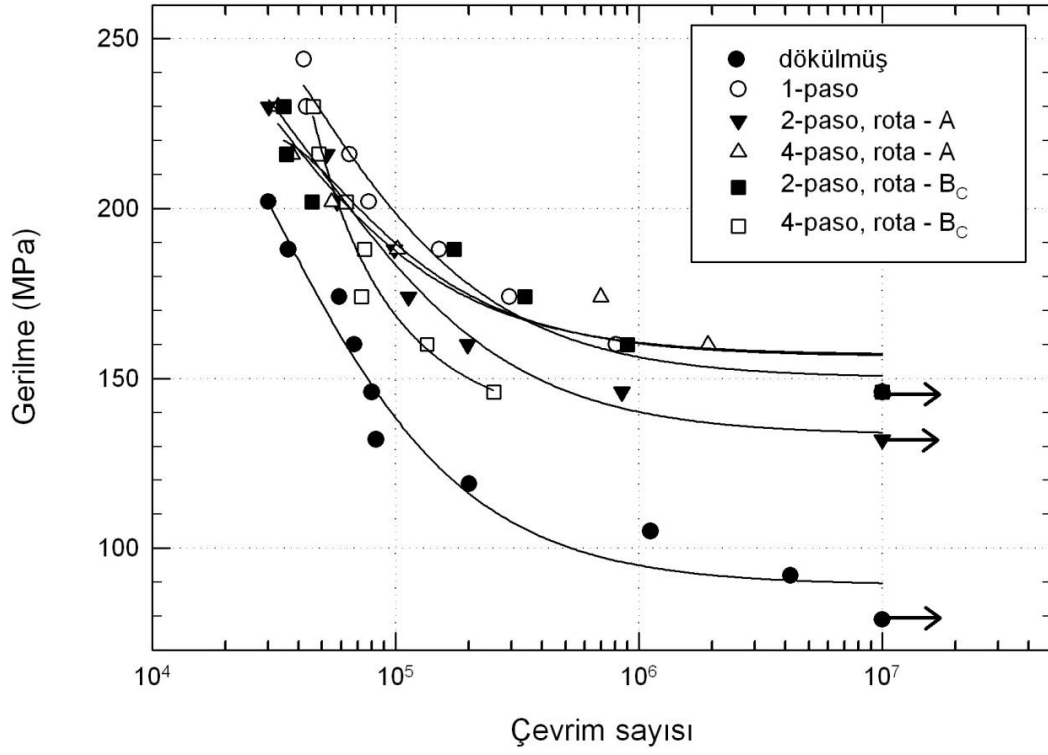
Tablo 4. Zn-80Al alaşımının dökülmüş ve EKAE işlemi uygulanmış durumdaki sertlik, çekme dayanımı, akma sınırı, kopma uzaması, darbe dayanımı değerleri

EKAE rotası	Paso sayısı	Sertlik (BSD)	Çekme dayanımı(MPa)	Akma sınırı(MPa)	Kopma uzaması(%)	Darbe dayanımı (J/cm ²)
	0	113	299	249	5.6	2.14
	1	124	361	344	3.5	2.98
Rota-A	2	120	368	353	8.3	4.82

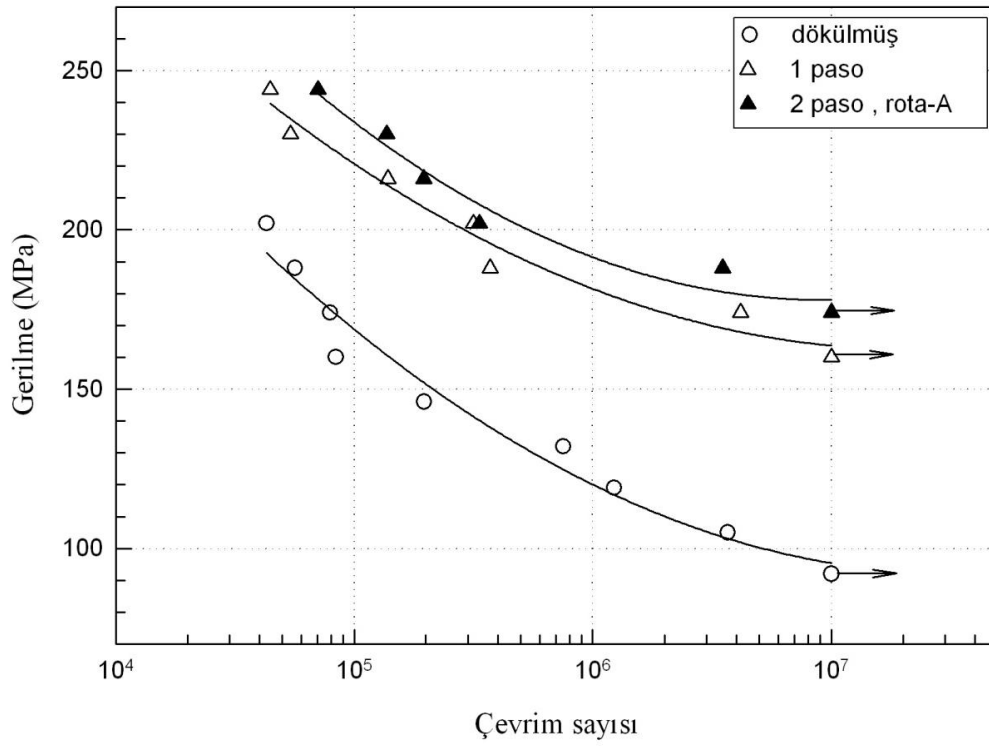
3.3.2. Yorulma Deneylerinden Elde Edilen Bulgular

Dökülmüş ve farklı rota ve paso sayılarında EKAE işlemi uygulanmış durumdaki Zn-60Al alaşımının yorulma deneylerinden elde edilen sonuçlar kullanılarak çizilen gerilme-çevrim sayısı (S-N) eğrileri Şekil 19’da, Zn-80Al alaşımına ait eğriler ise Şekil 20’de verilmiştir.

Şekil 19 ve 20’deki grafiklerden görüldüğü gibi EKAE işlemi dökülmüş durumdaki alaşımların yorulma performansını önemli ölçüde iyileştirmektedir. Alaşımların yorulma dayanımı ve yorulma ömrü değerleri değişik rota ve paso sayılarında uygulanan EKAE işlemi sonucunda büyük oranda artmıştır. Şöyle ki; Zn-60Al alaşımının yorulma dayanım sınırı dökülmüş durumda 76 MPa iken farklı rota ve paso sayıları kullanılarak uygulanan EKAE işlemi sonucunda 146 MPa ‘lık gerilme seviyesine yükselmiştir. Yorulma dayanım sınırındaki artış %82.5 gibi çok yüksek bir orana karşı gelmektedir. Benzer şekilde, dökülmüş durumdaki Zn-80Al alaşımının yorulma dayanım sınırı 92 MPa gerilme değerinden, 1 paso EKAE işlemi sonrasında 160 MPa ve 2 paso EKAE işlemi sonrasında 174 MPa gerilme değerine ulaşmıştır. Bu alaşımın yorulma dayanım sınırındaki artış oranları ise 1 paso ve 2 paso için sırasıyla %74 ve %89’dur. Burada yorulma dayanım sınırı 10⁷ lik çevrim sayısına karşılık gelen gerilme değeri olarak alınmıştır.



Şekil 19. Dökülmüş, farklı rota ve paso sayılarında EKAE işlemi uygulanmış Zn-60Al alaşımına ait gerilme-çevrim sayısı eğrileri

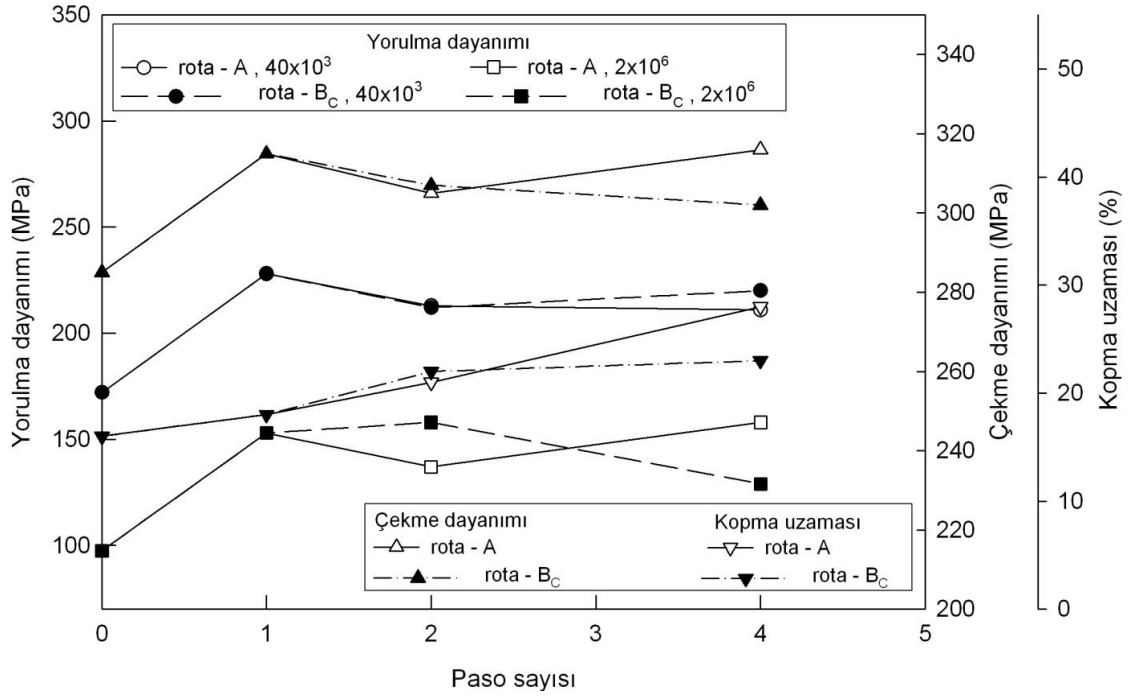


Şekil 20. Dökülmüş ve EKAE işlemi uygulanmış Zn-80Al alaşımına ait gerilme-çevrim sayısı eğrileri

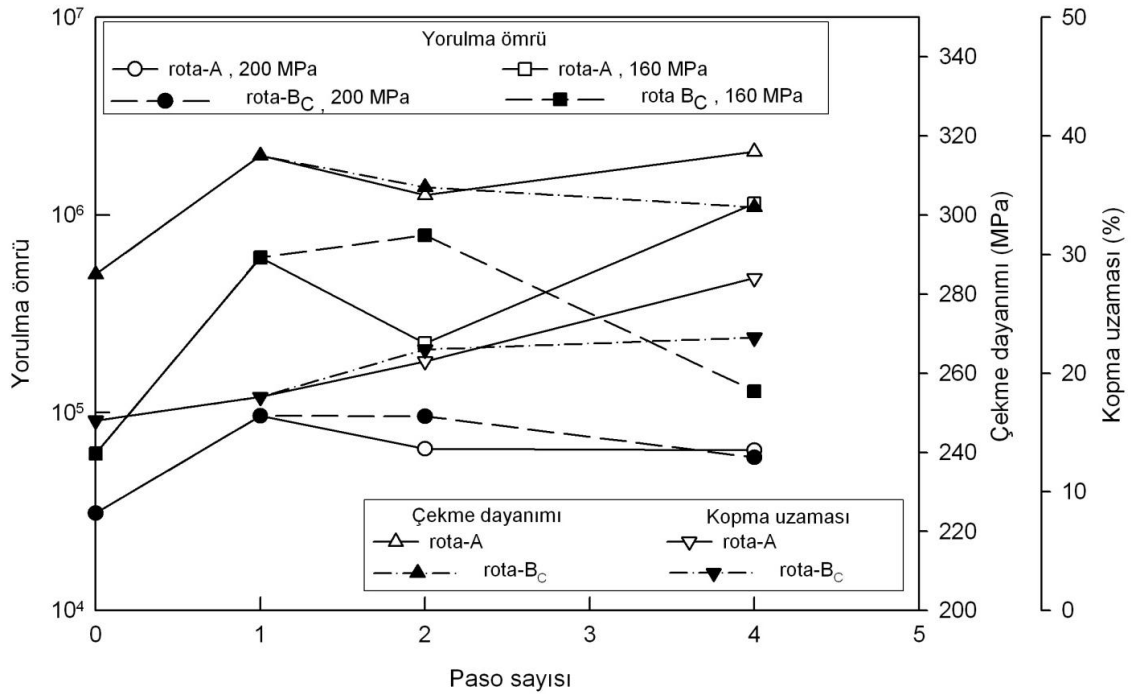
Zn-60Al alaşımıyla yapılan deneyler sonucunda en uzun yorulma ömrü ve en yüksek yorulma dayanım değeri, rota-A kullanılarak 4 paso sonunda elde edilmiştir (şekil 19). Başka bir deyişle, yorulma performansı açısından uygulanan EKAE işlem rotaları karşılaştırıldığında, rota-A'da rota- B_C'ye oranla daha yüksek değerler elde edilmiştir.

3.3.2.1. Yorulma Deneylerinden Elde Edilen Verilerin Korelasyonu

Proses parametrelerinin alaşımların yorulma özellikleri üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla, yorulma deneylerinden elde edilen verilerden yararlanılarak uygulanan işlem rotası ve paso sayısının yorulma özelliklerine etkilerini ortaya koyan grafikler çizilmiştir. Zn-60Al alaşımının yorulma dayanımı ve yorulma ömrünün paso sayısına göre değişimini gösteren grafikler sırasıyla şekil 21 ve 22'de verilmiştir. Karşılaştırma amacıyla, bu grafiklere çekme dayanımı ve kopma uzaması eksenleri de eklenmiştir. şekil 21, Zn-60Al alaşımı ile rota-A ve rota-B_C kullanılarak yapılan yorulma deneylerinden düşük ($N_f \leq 40 \times 10^3$) ve yüksek ($N_f \geq 2 \times 10^6$) evrim sayısında elde edilen dayanım değerlerinin, şekil 22 ise aynı alaşımın farklı gerilme seviyelerindeki (160 ve 200 MPa) yorulma ömrü değerlerinin paso sayısına göre değişimini göstermektedir. Bu iki grafikten (şekil 21 ve 22) görüldüğü gibi dökülmüş durumdaki alaşımının yorulma dayanımı ve yorulma ömrü değerlerinde 1 paso EKAE işlemi sonrasında belirgin bir artış elde edilmiştir. Ayrıca bu grafiklerden, alaşımın yorulma özelliklerinin uygulanan EKAE rotası ve paso sayısına bağlı olarak değiştiği grlmektedir. Rota-A kullanılarak 2 paso EKAE işlemi uygulanan alaşımın yorulma dayanımı ve yorulma değerlerinde 1 pasoya göre azalma meydana gelmiştir. Öte yandan rota-B_C ile 2 paso EKAE işlemine tabi tutulan ZnAl60 alaşımının, yorulma mekanizmasının etkin olduğu yüksek çevrim sayılarında ($N_f \geq 2 \times 10^6$) yorulma dayanımında ve benzer şekilde düşük gerilme değerlerinde (≤ 160 MPa) yorulma ömründe artış elde edilmiştir.

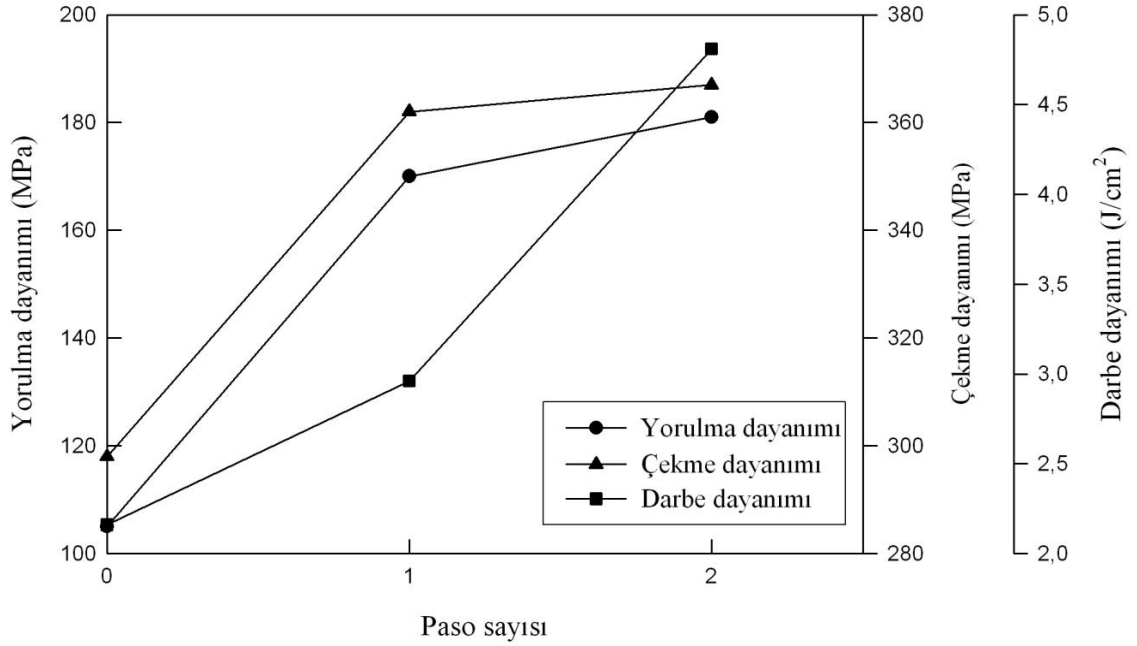


Şekil 21. Zn-60Al alaşımının yorulma dayanımı, çekme dayanımı ve kopma uzaması değerlerinin paso sayısına göre değişimi

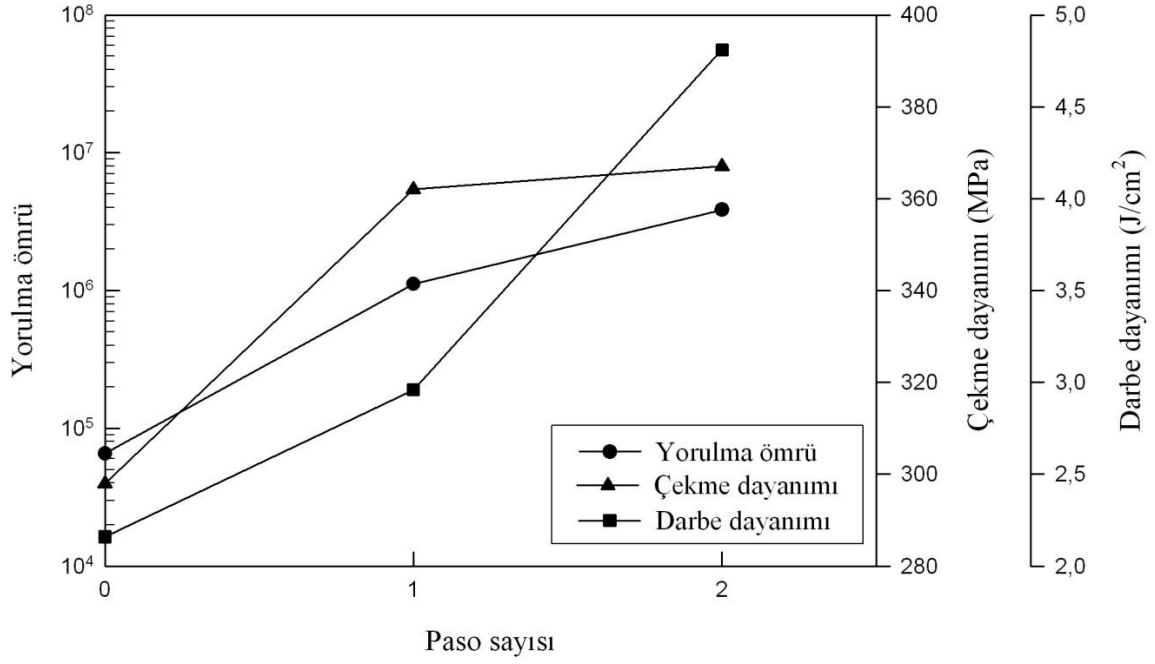


Şekil 22. Zn-60Al alaşımının yorulma ömrü, çekme dayanımı ve kopma uzaması değerlerinin paso sayısına göre değişimi

Zn-80Al alaşımının yorulma özelliklerinin paso sayısına göre değişimini gösteren grafikler de Şekil 23 ve 24'te verilmiştir. Söz konusu alaşımın yorulma davranışları ile mekanik özellikleri arasındaki ilişkiyi açıklamak için, çekme dayanımı ve darbe dayanımı değerlerini gösteren eksenler de bu grafiklere eklenmiştir. Şekil 23'deki grafik, alaşımın 3×10^6 'lık çevrim sayısına karşılık gelen yorulma dayanımının ve ayrıca çekme dayanımı ve darbe dayanımı değerlerinin paso sayısına göre değişimini göstermektedir. Zn-80Al alaşımının 180 MPa lık gerilmeye karşılık gelen yorulma ömrünün, çekme dayanımının ve darbe dayanımının paso sayısına göre değişimini gösteren grafik ise Şekil 24'te verilmiştir. Bu iki grafikten (Şekil 23 ve 24) görüldüğü gibi dökülmüş durumdaki alaşımının yorulma dayanımı ve yorulma ömrü değerleri 1 paso EKAE işlemi sonrasında belirgin bir Şekilde artmış, ardından uygulanan 2 paso sonunda söz konusu değer biraz daha artmıştır. Yine bu grafiklerden, alaşımın çekme dayanımı ve darbe tokluğu değerlerinin de artan paso sayısıyla arttığı grlmektedir.



Şekil 23. Zn-80Al alaşımının yorulma dayanımı, çekme dayanımı ve darbe dayanımı değerlerinin paso sayısına göre değişimi



Şekil 24. Zn-80Al alaşımının yorulma ömrü, çekme dayanımı ve darbe dayanımı değerlerinin paso sayısına göre değişimi

Uzun ömürlü yorulmada, ortalama gerilmenin sıfır olması durumunda malzemelerin yorulma dayanımı ve yorulma ömrü arasında aşağıdaki formülle ifade edilen Basquin bağıntısı geçerli olduğu bilinmektedir [69].

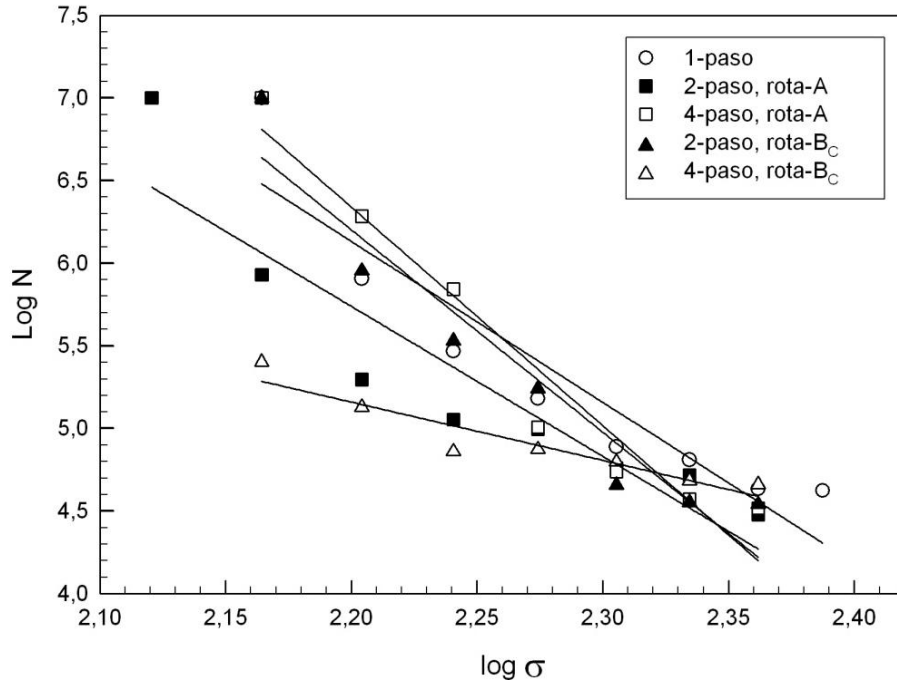
$$N = A \sigma^{-k} \quad (1)$$

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,

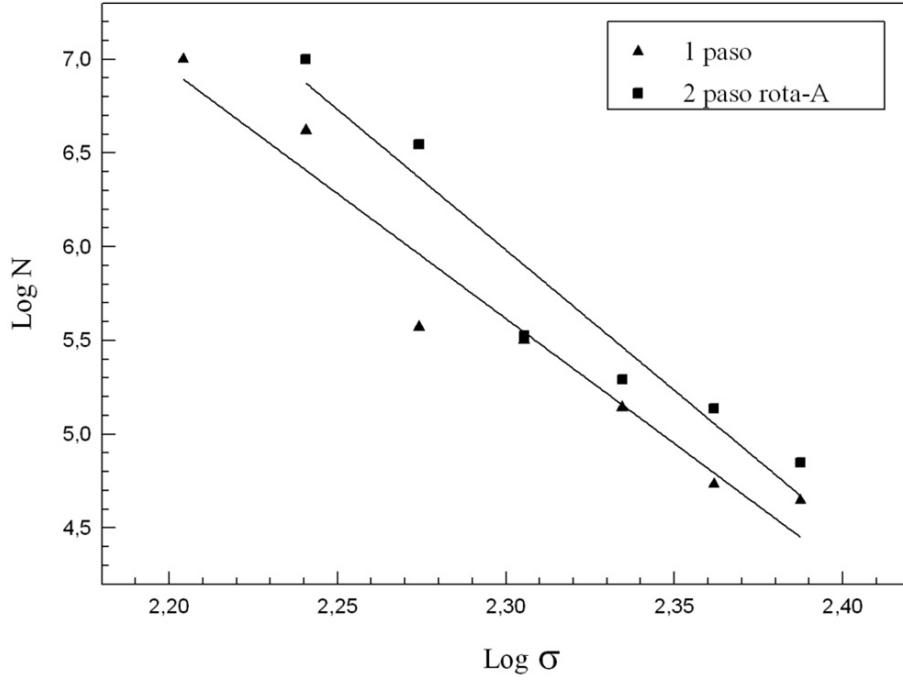
$$\log N = -k \log \sigma + \log A \quad (2)$$

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 [69]. Daha önce yapılan çalışmalarda, Zn-Al alaşımlarının gerek kuru hava, gerekse NaCl ve HCl gibi değişik korozyon ortamlarındaki yorulma davranışının

Basquin bağıntısı ile ifade edilebileceği belirlenmişti [13]. Bu çalışmada incelenen Zn-60Al ve Zn-80Al alaşımlarının yorulma deneylerinden elde edilen veriler kullanılarak çizilen yorulma ömrü ($\log N$) – gerilme genliği ($\log \sigma$) eğrileri sırasıyla Şekil 25 ve 26’da verilmiştir. En küçük kareler yöntemi kullanılarak elde edilen bu doğruların korelasyon katsayılarının (c) 1’e çok yakın olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle, farklı rota ve paso sayılarında EKAE işlemi uygulanan bu alaşımların yorulma davranışlarının Basquin bağıntısı ile ifade edilebileceği sonucuna varılmıştır.



Şekil 25. Farklı rota ve paso sayılarında EKAE işlemi uygulanan Zn-60Al alaşımının $\log N$ – $\log \sigma$ eğrileri



Şekil 26. EKAIE işlemi uygulanan Zn-80Al alaşımasının log N – log σ diyagramı

Her iki alaşımanın incelenen tüm EKAIE koşullarındaki k ve A sabitleri ile c korelasyon katsayısı değerleri belirlenmiş ve söz konusu değerler Zn-60Al alaşımı için Tablo 5’de ve Zn-80Al alaşımı için ise Tablo 6’da verilmiştir. Tablo 5’den görüldüğü gibi, Zn-60Al alaşımı için en yüksek k ve A değerleri rota-A ile 4 paso EKAIE işlemi sonucunda elde edilmiş, rota-A ile 2 paso ve rota-B_C ile 4 paso EKAIE işlemi uygulandığı durumda da bu değerlerde azalma kaydedilmiştir (Tablo 5). Tablo 6’da Zn-80Al alaşımasının rota-A ile 2 paso EKAIE işlemi sonrası belirlenen değerlerde 1 pasoya göre artış elde edilmiştir.

Tablo 5. Farklı rota ve paso sayılarında EKAIE işlemi uygulanan Zn-60Al alaşımasının k ve A sabitleri ile korelasyon katsayısı c değerleri

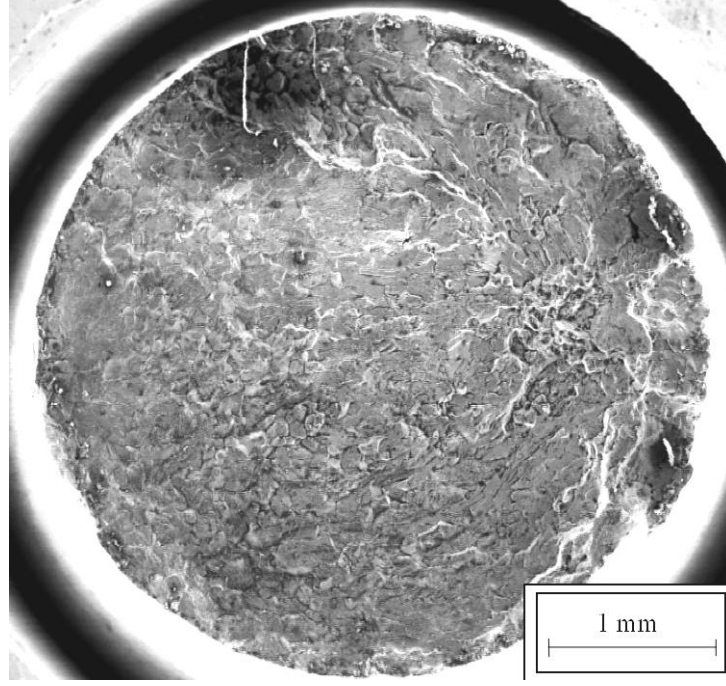
EKAIE rotası	Paso sayısı	k	A	c
	1	27.55	9.73	0.95
A	2	25.70	9.07	0.94
	4	35.43	13.22	0.98
B _C	2	33.14	12.24	0.97
	4	12.92	3.52	0.96

Tablo 6. EKAE işlemi uygulanan Zn-80Al alaşımının k ve A sabitleri ile korelasyon katsayısı c değerleri

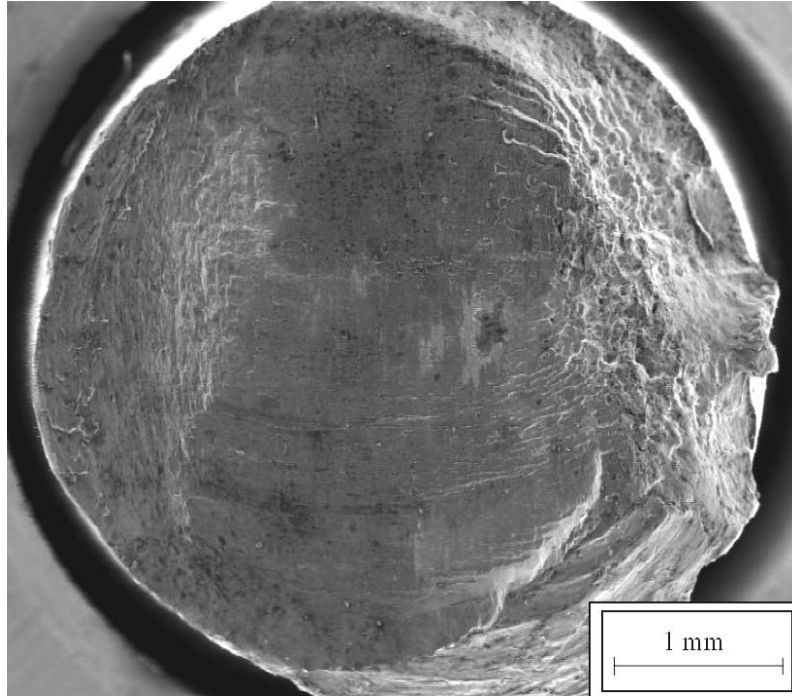
EKAE rotası	Paso sayısı	k	A	c
	1	36.27	13.33	0.95
A	2	40.45	14.98	0.97

3.3.2.2. Yorulma Örneklerinin Kırılma Yüzeylerinin İncelenmesinden Elde Edilen Bulgular

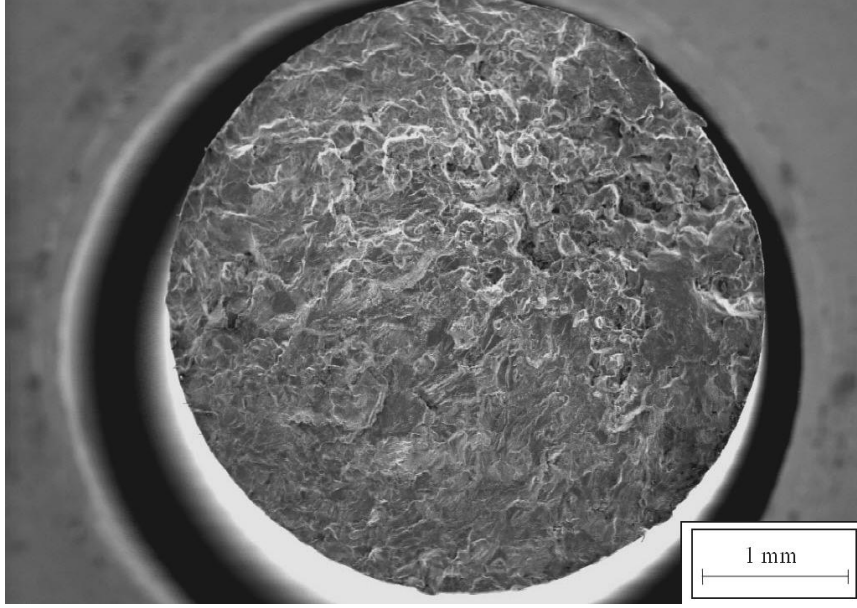
Dökülmüş ve rota-A kullanılarak 4 paso EKAE işlemi uygulanmış Zn-60Al alaşımına ait yorulma numunelerinin kırık yüzeylerini gösteren SEM fotoğrafları sırasıyla Şekil 27 ve 28’de, Zn-80Al alaşımının dökülmüş ve rota-A kullanılarak 2 paso EKAE işlemi uygulanmış durumdaki yorulma numunelerine ait kırılma yüzeylerini gösteren SEM fotoğrafları ise sırasıyla Şekil 29 ve 30’da verilmiştir. Şekil 27’deki fotoğraf 92 MPa’lık gerilme değerinde, Şekil 29’daki fotoğraf ise 105 MPa’lık gerilme değerinde yorulma deneyine tabi tutulan örneklerden elde edilmiştir. Dökülmüş durumdaki yorulma numunelerinden elde edilen fotoğraflardan (Şekil 27 ve 29) görüldüğü gibi, kırılma yüzeyleri oldukça kaba ve pürüzlü olup bol miktarda porozite içermektedir. EKAE işlemi sonrasında alaşımlara ait yorulma numunelerinden, dökülmüş durumdakine göre çok daha pürüzsüz ve çok düşük miktarda porozite içeren bir kırılma yüzeyi elde edilmiştir (Şekil 28 ve 30).



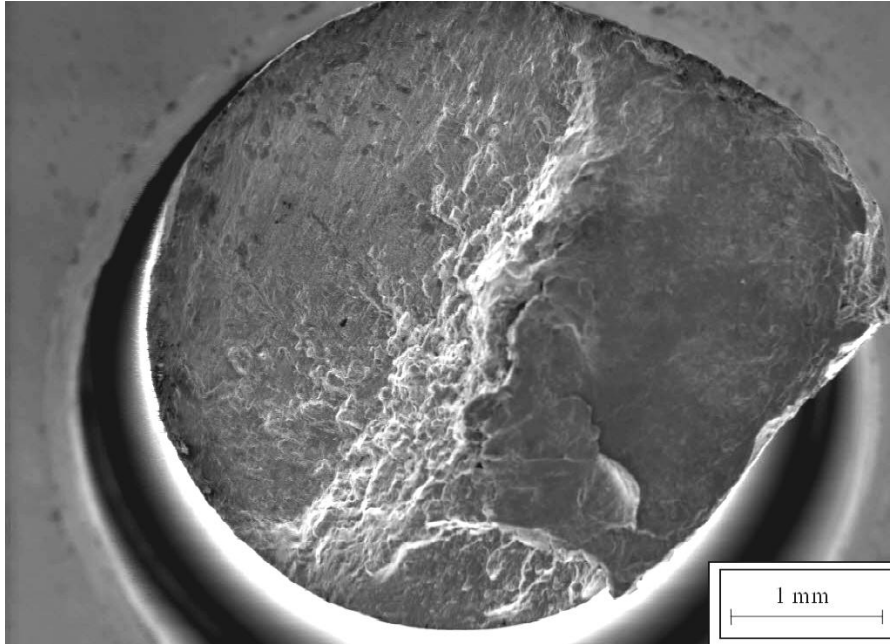
Şekil 27. 92 MPa gerilme değeriinde yorulma deneyine tabi tutulan, dökülmüş durumdaki Zn-60Al alaşımına ait numunenin kırılma yüzeyini gösteren SEM fotoğrafı



Şekil 28. 174 MPa gerilme değeriinde yorulma deneyine tabi tutulan, rota-A ile 4 paso EKAÉ işlemini uygulanmış Zn-60Al alaşımına ait numunenin kırılma yüzeyini gösteren SEM fotoğrafı

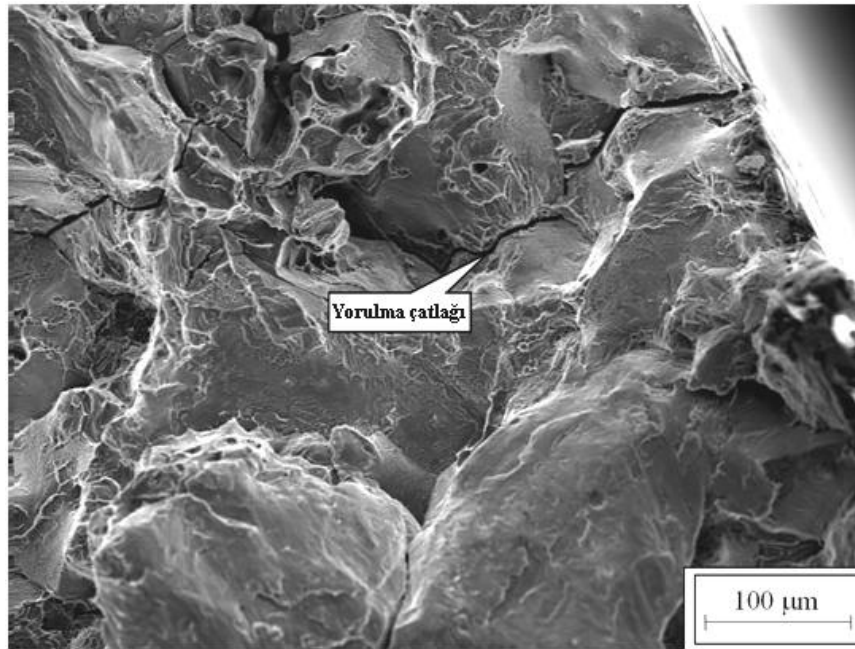


Şekil 29. 105 MPa gerilme değeriinde yorulma deneyine tabi tutulan, dökülmüş durumdaki Zn-80Al alaşımına ait numunenin kırılma yüzeyini gösteren SEM fotoğrafı



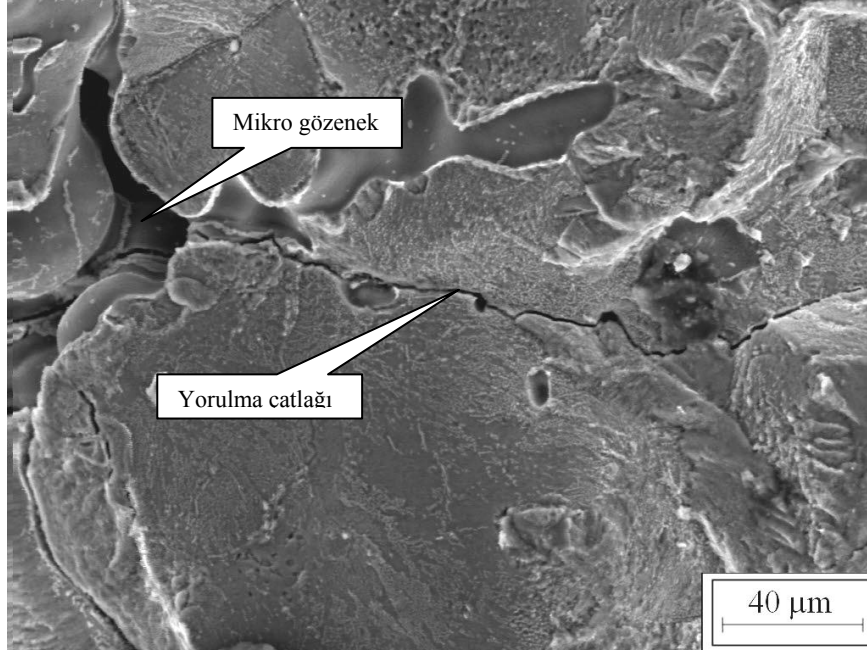
Şekil 30. 174 MPa gerilme değeriinde yorulma deneyine tabi tutulan, rota-A ile 2 paso EKAЕ işlemin uygulanmış Zn-80Al alaşımına ait numunenin kırılma yüzeyini gösteren SEM fotoğrafı

105 MPa gerilme değerinde yorulma deneyine tabi tutulan, dökülmüş durumdaki Zn-80Al alaşımına ait numunenin kırılma yüzeyinin detayını gösteren SEM fotoğrafı Şekil 31’de verilmiştir. Bu fotoğraftan görüldüğü gibi kırılma yüzeyi oldukça kaba ve pürüzlü (dalgalı) olup, yorulma çatlakları yüzeyden başlayarak iç kısımlara doğru ilerlemektedir. 92 MPa gerilme değerinde yorulma deneyine tabi tutulan dökülmüş durumdaki Zn-60Al alaşımına ait numunenin kırılma yüzeyinin detayını gösteren SEM fotoğrafında ise, yorulma çatlaklarının porozitelerde başladığı ve tane sınırları boyunca ilerlediği görülmektedir (Şekil 32). Şekil 33, rota-A ile 2 paso EKAE işleminin uygulanmış durumdaki Zn-80Al alaşımına ait yorulma numunesinin kırılma yüzeyinin detayını göstermektedir. Bu fotoğraftan görüldüğü gibi, kırılma yüzeyi dökülmüş durumdakine göre daha düzgün ve prozitesiz olup yorulma çatlakları tane içi boyunca ilerlemektedir.

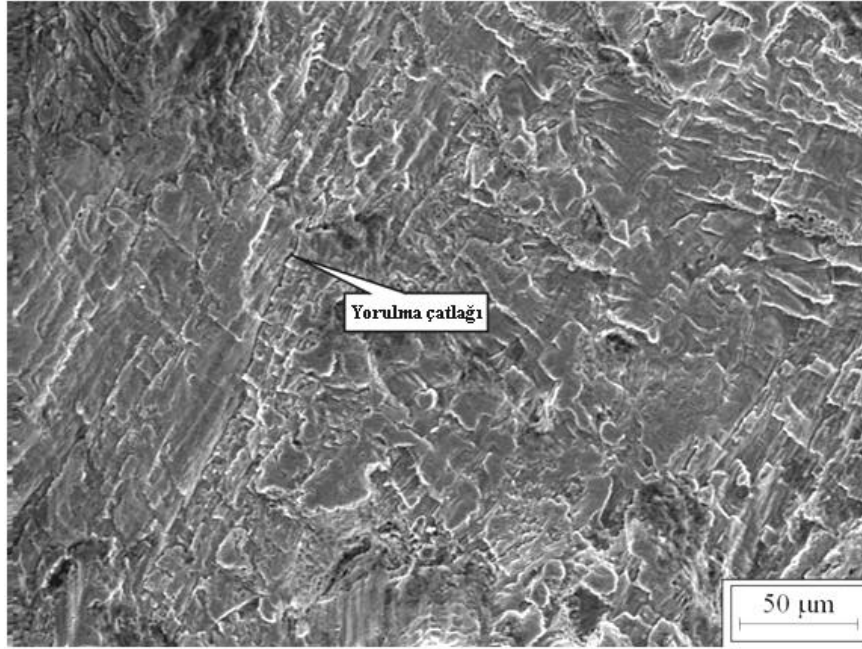


Şekil 31. 105 MPa gerilme değerinde yorulma deneyine tabi tutulan, dökülmüş durumdaki Zn-80Al alaşımına ait numunenin kırılma yüzeyinin detayını gösteren SEM fotoğrafı

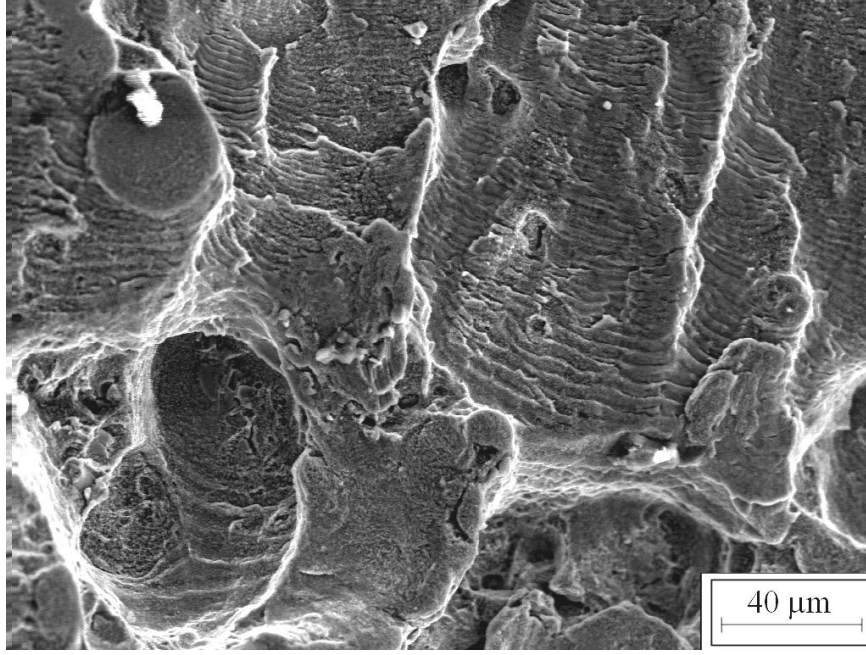
Rota-B_C kullanılarak 4 paso EKAE işleminin uygulanmış durumdaki Zn-60Al alaşımına ait kırılma yüzeyinin düşük ve yüksek büyütmelemlerdeki SEM fotoğrafları Şekil 34 ve 35’de verilmiştir. Şekil 34, dökülmüş durumdaki gevrek kırılma modunun EKAE işleminin uygulanması ile sünek kırılma moduna dönüştüğünü, Şekil 35 ise, yorulma sonucunda oluşan duraklama çizgilerini göstermektedir.



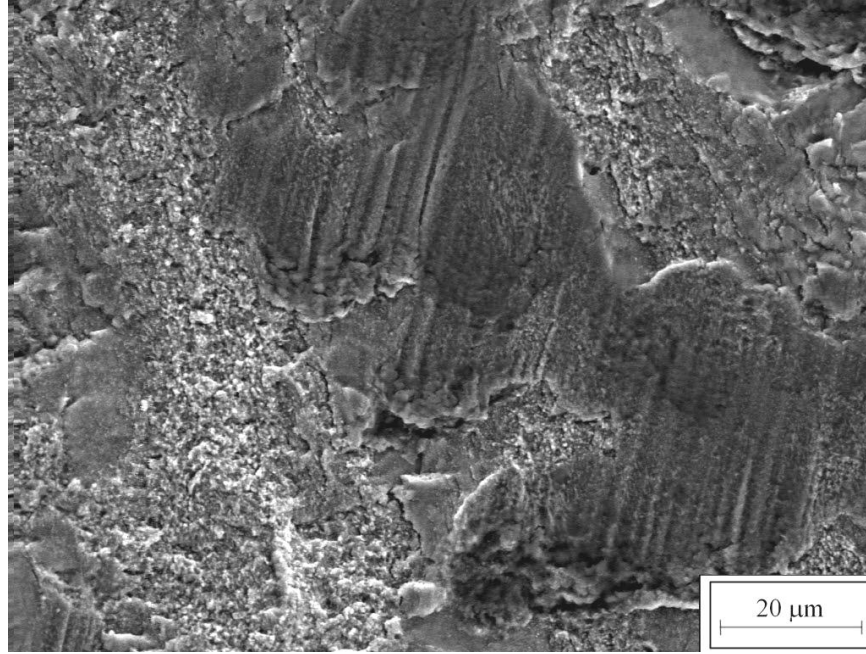
Şekil 32. 92 MPa gerilme değerinde yorulma deneyine tabi tutulan, dökülmüş durumdaki Zn-60Al alaşımına ait numunenin kırılma yüzeyinin detayını gösteren SEM fotoğrafı



Şekil 33. 174 MPa gerilme değerinde yorulma deneyine tabi tutulan, rota-A ile 2 paso EKAE işlemi uygulanmış Zn-80Al alaşımına ait numunenin kırılma yüzeyi detayını gösteren SEM fotoğrafı



Şekil 34. 146 MPa gerilme değerinde yorulma deneyine tabi tutulan, rota-B_C ile 4 paso EKAE işlemi uygulanmış Zn-60Al alaşımında sünek kırılma modunu gösteren SEM fotoğrafı



Şekil 35. 146 MPa gerilme değerinde yorulma deneyine tabi tutulan, rota-B_C ile 4 paso EKAE işlemi uygulanmış Zn-60Al alaşımında yorulma sonucunda oluşan duraklama çizgilerinin SEM görüntüsü

4. İRDELEME

Bu çalışmada, dökülmüş durumdaki Zn-60Al ve Zn-80Al alaşımlarına farklı rota ve paso sayılarında EKAE işlemi uygulanması sonucunda genel olarak alaşımların sertlik, çekme dayanımı, akma sınırı ve kopma uzaması değerlerinin aynı anda arttığı görüldü. 1 paso EKAE işlemi ardından alaşımların mukavemet ve süneklik değerlerindeki bu artış, dendritik döküm yapısının ortadan kalkarak yerine daha ince taneli bir yapının oluşması, deformasyon sertleşmesi ve döküm yapısındaki porozitelerin büyük oranda giderilmesinden kaynaklanmaktadır. Nitekim yapılan bir çalışmada EKAE işlemi uygulanmasıyla döküm yapısında bulunan gözeneklerin azaldığı ve artan paso sayısı ile tamamen kaybolduğu belirlenmiştir [70]. Gözenekli yapının ortadan kalkması sonucunda da mukavemet değerlerinde önemli artış elde edildiği bazı araştırmacılar tarafından rapor edilmektedir [71,72]. Diğer taraftan, EKAE işlemi ile tane boyutunun incelmeye bağlı olarak artan tane sınırı miktarı mukavemet değerlerindeki bu artışı desteklemektedir. Şekil 12 ve 13'te 1 paso EKAE işlemi uygulandıktan sonra proses esnasında oluşan kayma gerilmesi etkisiyle kaba dentritik yapının kaybolduğu, bunun yerine ekstrüzyon doğrultusuyla belli açı yapacak şekilde uzamış (yönlenmiş), ince taneli bir yapının oluştuğu görülmektedir. Rota-A kullanılarak 2 paso EKAE işlemi uygulanan Zn-60Al ve Zn-80Al alaşımlarının içyapısının, 1 pasoda oluşan yapıya göre daha ince, eğim (yönlenme) açısı daha küçük ve şerit gibi uzamış bileşenlerden (alüminyumca zengin α ve çinkoca zengin $\alpha+\eta$ fazları) oluştuğu görülmüştür (Şekil 14 ve 15). 4 paso EKAE işlemi sonunda ise daha da incelmeye, uzamış ve eğim açısı daha da azalmış yani ekstrüzyon doğrultusuna daha da yaklaşmış bileşenlerden oluşan bir içyapı elde edilmiş (Şekil 16), böylece paso sayısı arttıkça tane incelmesinin arttığı ve eğim açısının azaldığı yani eğim açısının ekstrüzyon doğrultusuna yaklaştığı tespit edilmiştir. Bu durum aşırı plastik deformasyondan kaynaklanmaktadır.

Bu çalışmada ayrıca, rota ve paso sayısı gibi EKAE parametrelerinin alaşımların yapı ve mekanik özellikleri üzerinde oldukça etkili olduğu belirlendi. Şöyle ki; Zn-60Al alaşımının sertlik ve mukavemet değerlerinde her iki rotada (rota-A ve rota-B_C) 2 paso EKAE işlemi uygulanması sonucu elde edilen değerlerin 1 paso EKAE işlemi ile elde edilen değerlerden genelde daha düşük olduğu görüldü. Benzer şekilde, Zn-80Al alaşımına rota-A kullanılarak 2 paso EKAE işlemi uygulanması sonucunda 1 paso EKAE işlemi

uygulanmış duruma göre, sertlik değerinde azalma olurken, kopma uzaması ve darbe dayanımı değerlerinde artış elde edildi. Her iki alaşıma da 2 paso EKAE işlemi uygulandıktan sonra ortaya çıkan bu durum deformasyon yumuşaması etkisinden kaynaklanmaktadır. Bu yumuşama, uygulanan her paso EKAE işlemi sonucu deformasyon ve sıcaklığa bağlı homojenizasyon nedeniyle oluşmaktadır. Bu mekanizma daha önce yapılan çalışmalarda sistematik olarak incelenmiş ve detaylı bir biçimde açıklanmıştır [51,73,74]. Zn-80Al alaşımının 2 paso EKAE işlemi sonrası darbe dayanımındaki yaklaşık %122'lik olağandışı artış bu tespiti doğrulamaktadır. Bununla birlikte, Zn-80Al alaşımının çekme dayanımı ve akma sınırı değerlerinde rota-A kullanılarak uygulanan 2 paso EKAE işlemi sonucunda az da olsa bir artış elde edildi. Mukavemet değerlerindeki bu beklenmeyen artışın, tane yapısının küçülmesi ve gözenekli yapının kaybolmasının, deformasyona bağlı homojenizasyonun oluşturduğu yumuşama etkisini dengelemesinden hatta yumuşama etkisine göre daha baskın olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Zn-60Al alaşımına 4 paso EKAE işlemi, rota-A ile uygulandığında sertlik ve mukavemet değerlerinde artış olurken, rota-B_C kullanılarak uygulandığında bu değerlerde azalma kaydedilmiştir. Bunun sebebi farklı rotalarda içyapıda meydana gelen değişikliklerdir. Yani, Rota-A'da rota-B_C'ye oranla daha ince taneli, tamamen farklı bir yapının elde edilmesidir. Bununla birlikte alaşımın EKAE işlemiyle kopma uzaması değeri her iki rotada artan paso sayısı ile sürekli artarken en yüksek değere 4 paso sonrası ulaşılmıştır. Bu durum, 4 paso ile aşırı plastik deformasyon sonucunda ip gibi uzamış bir içyapının oluşmasından kaynaklanmaktadır.

Yorulma deneylerinden elde edilen bulguların değerlendirilmesi sonucunda EKAE işleminin Zn-60Al ve Zn-80Al alaşımının yorulma performansını önemli ölçüde iyileştirdiği görüldü. Alaşımların yorulma performansındaki bu önemli iyileşme öncelikle EKAE ile alaşımlarda ortaya çıkan yapısal değişimlere ve mukavemet değerlerindeki artışa dayandırılarak açıklanabilir. Şöyle ki; klasik döküm yapısında bulunan gözeneklerin giderilmesi ve dentritik yapının kaybolarak yerine daha ince taneli bir yapının oluşması bu sonucu doğurmuştur. Bu faktörlerin alaşımların yorulma performansı üzerindeki etkileri daha önce yapılan çalışmalarda da vurgulanmıştır [75,76]. Zn-Al alaşımlarının dökülmüş durumdaki içyapısının yüksek oranda gözenek içerdiği [77], bu durumun alaşımların mekanik özellikleri ve yorulma performansını önemli ölçüde etkilediği bilinmektedir [9,10,77]. İçyapıda bulunan gözenekler gerilme yığılmasına neden olduğundan çatlak oluşumu ve ilerlemesini kolaylaştırmakta, bu da yorulma performansını olumsuz

etkilemektedir. Bu tip çatlaklar 105 MPa'lık gerilme değerinde yorulma deneyine tabi tutulan dökülmüş durumdaki Zn-80Al alaşımının kırılma yüzeyini gösteren SEM fotoğrafında net bir biçimde görülmektedir (Şekil 31). Bu olumsuzluğun giderilmesinde EKAE işleminin çok etkin bir yöntem olduğu bilinmektedir [52]. Öte yandan, yapılan bir çalışmada, aşırı plastik deformasyon yöntemlerinin başında gelen EKAE işleminin içyapıda meydana getirdiği değişimin dislokasyon yoğunluğunu artırdığı, böylelikle yorulma performansının iyileştirildiği belirlenmiştir [75]. Ayrıca, yorulma performansındaki bu önemli iyileşme, EKAE ile mukavemet ve süneklik değerlerinin birlikte artırılmasından kaynaklanmaktadır. Nitekim bazı araştırmacılar [76] yüksek mukavemet ve sünekliğin olumlu kombinasyonunun yorulma performansını büyük ölçüde iyileştirdiğini ileri sürmektedir.

Yorulma deneylerinden elde edilen veriler kullanılarak yapılan korelasyon çalışmaları sonucunda, rota ve paso sayısı gibi EKAE parametrelerinin alaşımların yorulma özellikleri üzerinde oldukça etkili olduğu belirlendi. Bu durum, EKAE işlemi ile ortaya çıkan ve yukarıda detaylı bir şekilde açıklanan yapısal değişimlerden kaynaklanmaktadır. Örneğin; Zn-60Al alaşımı rota-A kullanılarak 4 pasoya kadar proses edildiğinde, paso sayısı arttıkça tane incelmesinin arttığı ve eğim açısının azaldığı yani ekstrüzyon doğrultusuna yaklaştığı görülmüştür. Yapı ve mekanik özelliklerde meydana gelen değişimlere ilave olarak, eğim açısının da artan paso sayısı ile yorulma performansında elde edilen gelişmeler üzerinde etkili olduğu düşünülmektedir. Ayrıca, Zn-80Al alaşımına rota-A ile 2 paso EKAE işlemi uygulandığında, elastik deformasyon etkisiyle belirgin bir şekilde artan akma dayanımı değeri elastik deformasyon bölgesini genişletmiştir. Elastik deformasyon bölgesinin genişlemesi, çatlak oluşumunu geciktirdiği ve bu durumun da söz konusu alaşımların yorulma performansında olağanüstü artışların elde edilmesini desteklediği düşünülmektedir. Alaşımların çok pasolu EKAE işlemi sonucunda yorulma özelliklerinin değişimi ile diğer mekanik özelliklerinin değişimi kıyaslandığında, yorulma özelliklerinin en çok çekme dayanımına bağlı olduğu sonucuna varılabilir.

Her iki alaşıma ait dökülmüş durumdaki örnekler kullanılarak yapılan yorulma deneylerinde elde edilen kırılma yüzey fotoğraflarından yüzeylerin oldukça kaba ve pürüzlü olup bol miktarda porozite içerdiği görüldü (Şekil 27 ve 29). Gevrek kırılmanın karakteristik özelliği olan bu durum, yüksek oranda döküm boşluklarının (porozite) bir araya gelmesinden kaynaklanmaktadır. Farklı rota ve paso sayısında EKAE işlemine tabi

tutulan numuneler ile yapılan deneyler sonucu elde edilen kırılma yüzeylerinin çok daha pürüzsüz ve porozitesiz bir görünüme sahip olduğu gözlemlendi (Şekil 28 ve 30). Bu incelemeler sayesinde, EKAE işleminin dökülmüş durumdaki yorulma kırılmasının doğal karakteristiğini değiştirerek, kırılma modunu gevrek kırılmadan sünek kırılmaya dönüştürdüğü sonucuna varılabilir (Şekil 34).

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, EKAE işlemi dökülmüş durumdaki Zn-60Al ve Zn-80Al alaşımlarına başarılı bir şekilde uygulanmış ve söz konusu alaşımların mukavemet ve süneklik değerleri ile yorulma performansında önemli iyileşmeler elde edilmiştir. Bu çalışmadan elde edilen genel sonuçlar aşağıdaki gibi sıralanabilir.

1. EKAE işlemi alaşımların mikro poroziteler içeren tipik dentritik döküm yapısını tamamen ortadan kaldırır. Bunun yerine, rota-A kullanıldığında ince ve şerit gibi uzamış fazlardan (alüminyumca zengin α ve çinkoca zengin $\alpha+\eta$) oluşan bir mikro yapı, rota-B_C kullanıldığında ise daha iri taneli ve tane sınırları tam belirgin olmayan bir içyapı oluşur.
2. EKAE işlemi ile elde edilen yapısal değişimlere bağlı olarak dökülmüş durumdaki alaşımların mukavemet ve süneklik değerlerinde önemli artışlar elde edilir.
3. Dökülmüş durumdaki Zn-60Al ve Zn-80Al alaşımlarının yorulma performansı çok pasolu EKAE işlemiyle önemli ölçüde artar. Zn-60Al alaşımına farklı rota ve paso sayıları kullanılarak uygulanan EKAE işlemi sonucunda sözü edilen alaşımın yorulma dayanım sınırındaki artış yaklaşık olarak %82.5 gibi çok yüksek bir orana ulaşırken, Zn-80Al alaşımının yorulma dayanım sınırında ise 1 paso sonunda %74 ve 2 paso sonunda %89'luk artışlar elde edilir.
4. Zn-60Al ve Zn80-Al alaşımlarının mekanik özellikleri ve yorulma performansı uygulanan paso sayısına ve işlem rotasına bağlı olarak değişir. Yorulma dayanımı ve yorulma ömrü değerleri artan paso sayısı ile genelde artar. Ayrıca, yorulma performansı açısından, uygulanan EKAE işlem rotaları karşılaştırıldığında, rota-A'da rota-B_C'ye oranla daha yüksek değerler elde edilir.
5. Farklı rota ve paso sayılarında EKAE işlemi uygulanan alaşımların yorulma dayanımı ve yorulma ömrü değerleri mekanik özellikler içerisinde en çok çekme veya akma dayanımlarına bağlı olarak değişir.
6. EKAE işlemi uygulanan alaşımların uzun ömürlü yorulma davranışları Basquin bağıntısı kullanılarak ifade edilebilir.

7. Çok pasolu EKAE işlemi, dökülmüş durumdaki alaşımların doğal yorulma kırılması karakteristiğini değiştirerek, gevrek kırılma modundan kısmen sünek kırılma moduna dönüştürür.

6. ÖNERİLER

Daha önce yapılan çalışmalardan bakır katkısının çinko-alüminyum alaşımlarının yorulma performansını iyileştirdiği bilinmektedir. Hem yorulma performansının arttığı bu üçlü alaşımlara, hem de kullanım alanları sınırlı olan ticari Zn-Al alaşımlarına EKAE işlemi uygulanarak yorulma performansı üzerindeki etkileri incelenebilir. Ayrıca bu çalışmada incelenmeyen EKAE parametrelerinden biri olan proses sıcaklığının alaşımların yorulma performansı üzerindeki etkileri araştırılabilir.

5. KAYNAKLAR

1. Savaşkan, T., The Structure and Properties of Zinc-Aluminium Based Bearing Alloys, Ph.D. Thesis, The University of Aston, Birmingham, 1980.
2. Savaşkan, T. ve Murphy, S., Mechanical Properties and Lubricated Wear of Zn-25-Al Based Alloys, Wear, 116 (1987) 211-224.
3. Zhu, Y.H. ve Goodwin, F.E., Influence of Rare Earth Element Additions on Phase Transformations in the Zn-27%Al Alloy, J. Mater. Res., 18, 12 (1993) 3043-3049.
4. Zhu, Y.H. ve Goodwin, F.E., Microstructures of Thermomechanically Trated Eutectoid Zn-Al Alloys, Journal of Materials Science and Technology, 10 (1994) 121-126.
5. Durman, M., Çinko-Alüminyum Esaslı Basınçlı Döküm Alaşımlarının %0-%30 Bileşim Aralığında Mekanik ve Mikroyapısal Özelliklerinin İncelenmesi, Nisan 1993, Denizli, Bildiriler Kitabı: 177-191.
6. Gervais, E., Loong, C.A., New ZA Alloys in Die Casting, 11th International Pressure Die Casting Conference, June 1984, Lyon, 1-25.
7. Barnhurst, R.J., Zinc and Zinc Alloys, Proc. Conference on Materials Engineering, University of Leeds, July 1984, 87-96.
8. 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.
9. Savaşkan, T., Aydın, M. and Odabaşıoğlu, H.A., “Fatigue Behaviour of Zn-Al Casting Alloys”, Materials Science and Technology, Vol. 17, June 2001, 681-685.
10. Aydın, M., and Savaşkan, T., “Fatigue properties of zinc-aluminium alloys in 3.5% NaCl and 1% HCl solutions”, International Journal of Fatigue, 26 (2004) 103-110.
11. Savaşkan, T. and Aydın, M., “Fatigue behaviour of monotectoid-based Zn-Al-Cu alloys in 3.5% NaCl and 1% HCl solutions”, Materials Characterization, 52 (2004) 269-278.
12. Çay, F., and Kurnaz, S.C., “Hot tensile and fatigue behaviour of zinc-aluminum alloys produced by gravity and squeeze casting”, Materials and Design, 26 (2005) 479-485.
13. Aydın, M., Çinko-Alüminyum Esaslı Alaşımların Değişik Ortamlardaki Yorulma Davranışlarının İncelenmesi, Doktora Lisans Tezi, K.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2001.

14. Presnyakov, A.A., Gorban, Y.A., Chernyakova, V.V. and Russ J. Phys. Chem., 35, 6 (1961) 632-633.
15. Gervais, E., ZA Alloys-A Challenge to the Metals Industry, CIM Bulletin, 80, 900 (1987) 67-142.
16. Skenazi, A.F., Pelerin, J., Coutsouradis, D., Magnus, B. and Meeus, M., Some Recent Developments in the Improvement of the Mechanical Properties of Zinc Foundry Alloys, MEtall, 37, 9 (1983) 898-902.
17. Perry, C.C., Fatigue Testing in Materials Laboratory Courses, Fatigue Dynamics Inc., USA, 1988.
18. Goodwin, E. ve Ponikvar, A.L., Engineering Properties of Zinc Alloys, Third Edition, International Lead Zinc Research Org. Inc., 1989.
19. Erdöl, M.Ş., Çinko-Alüminyum Esaslı Alaşımlarda Mukavemet Artırma Yöntemlerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 1994.
20. Turhal, M.Ş. ve Savaşkan, T., Çinko-Alüminyum Alaşımları İçin Mukavemet Artırma Yöntemleri, Mühendis ve Makine, 38, 450 (1997) 32-38.
21. Aydın, M., Çinko-Alüminyum Esaslı Alaşımların Yorulma Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 1995.
22. Aydın, M., Küçükömeroğlu, T. ve Savaşkan, T., Çinko-Alüminyum Esaslı Alaşımların Yorulma Özelliklerinin İncelenmesi, Mühendis ve Makine, 38, 444 (1997) 40-45.
23. Zhu, Y.H. ve Murphy, S., A General Rule of Decomposition Reaction in Super-Saturated Zn-Al Based Alloys, Chin J. Met. Sci. Tech., 2 (1986) 105-116.
24. Savaşkan, T., Torul, O. ve Çuvalcı, H., Çinko-Alüminyum Alaşımlarının İç yapı ve Mekanik Özelliklerinin incelenmesi, 5. Metalurji Kongresi, Kasım 1988, Ankara, Bildiriler Kitabı, II: 784-798.
25. Murphy, S., Solid Phase Reactions in the Low Copper Part of the Al-Cu-Zn System, Z. Metalkunde, 71 (1980) 96-102.
26. Savaşkan, T. ve Murphy, S., Creep Behaviour of Zn-Al-Cu Bearing Alloys, Z. Metalkunde, 74 (1983) 993-999.
27. Barnhurst, R.J., Gervais, E. ve Boyles, F.D., Gravity Casting of Zinc-Aluminium Alloys – Solidification Behaviour of ZA-8, ZA-12 and ZA-27, AFS Transactions, 81 (1983) 569.
28. Turhal, M.Ş., Soğuma Hızının Çinko-Alüminyum Esaslı Alaşımların Yapı ve Özelliklerine Etkisi, Doktora Tezi, K.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2001.

29. Sines, G., Waisman, J.L., Metal Fatigue, Mc Graw Hill Book Company Inc., New York, 1959.
30. Swanson, S.R., Handbook of Fatigue Testing, ASTM Special Technical Publication 566, USA, 1974.
31. Ashrafizadeh, F., Young, J.M. ve Kondic, V., Solidification Structures and Mechanical Properties of Zn-27 Al Alloy Cast in Metal Moulds, Materials Science and Technology, (1987) 665-770.
32. Valiev, R.Z., Islamgaliev, R.K. and Alexandrov, I.V., "Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation", Progress in Materials Science, 45 (2000) 103-189.
33. Furukawa, M., Horita, Z., Nemoto, M. and Langdon, T.G., "Review: Processing of metals by equal-channel angular pressing", Journal of Materials Science, 36 (2001) 2835-2843.
34. Valiev, R.Z., "Recent development of SPD processing for fabrication of bulk nanostructured materials", Materials Science Forum, 426-432 (2003) 237-244.
35. Zhu, Y.T., Lowe, T.C. ve Langdon, T.G., 2004. Performance and applications of nanostructured materials produced by severe plastic deformation. Scr. Mater. 51, 825-830.
36. Ma, A., Suzuki, K., Nishida, Y., Saito, N., Shigematsu, I., Takagi, M., Watazu, A. ve Imura, T., 2005. Impact toughness of an ultrafine-grained Al-11 mass%Si alloy processed by rotary-die equal-channel angular pressing. Acta Mater., 53, 211-220.
37. Höppel, H.W., Kautz, M., Xu, C., Murashkin, M., Langdon, T.G., Valiev, R.Z. ve Mughrabi, H., 2006. An overview: fatigue behavior of ultrafinegrained metals and alloys. Int. J. Fatigue 28, 1001-1010.
38. Segal, V.M., 2004. Engineering and commercialization of equal channel angular extrusion (ECAE). Mater. Sci. Eng. A 386, 269-276.
39. Z.F.Zhang, Wu, S.D., Li, Y.J., Liu, S.M. and Wang, Z.G., "Cyclic deformation and fatigue properties of Al-0.7 wt.% Cu alloy produced by equal channel angular pressing", Materials Science and Engineering A, A 412 (2005) 279-286.
40. Iwahashi, Y., Horita, Z., Nemoto, M. and Langdon, T.G., "The process of grain refinement in equal-channel angular pressing", Acta Materialia, 46- 9 (1998) 3317-3331.
41. Hanlon, T., Kwon, Y.N. and Suresh, S., "Grain size effects on the fatigue response of nanocrystalline metals", Scripta Materialia (2003) 675-680.

42. Vinogradov, A., Hashimoto, S. and Kopylov, V.I., "Enhanced strength and fatigue life of ultra-fine grain Fe-36Ni Invar alloy", Materials Science and Engineering A, A 355 (2003) 277-285.
43. Meyers, M.A., Chawla, K.K., *Mechanical Behaviour of Materials*, Printice-Hall Inc., USA, 1999.
44. Karaman, I., Robertson, J., Im, T.T., Mathaudhu, S.N., Luo, Z.P. and Hartwig, K.T., "The effect of temperature and extrusion speed on the consolidation of zirconium-based metallic glass powder using equal-channel angular extrusion", Metallurgical and Materials Transactions A, 35A-1 (2004) 247-256.
45. Furukawa, M., Horita, Z., Nemoto M. and Langdon, T.G., "Review: Processing of metals by equal-channel angular pressing", Journal of Materials Science, 36 (2001) 2835-2843.
46. Cisar, L., Yoshida, Y., Kamado, S., Kojima, Y. and Watanabe, F., "Development of high strength and ductile magnesium alloys for automobile applications", *Materials Science Forum*, 419-422 (2003) 249-254.
47. Valiev, R.Z., Alexandrov, I.V., Zhu, Y.T. and Lowe, T.C., "Paradox of strength and ductility in metals processed by severe plastic deformation", Journal of Materials Research, 17-1, (2002) 5-8.
48. Kim, W.J., An, C.W., Kim, Y.S. and Hong, S.I., "Mechanical properties and microstructures of an AZ61 Mg alloy produced by equal channel angular pressing", Scripta Materialia, 47 (2002) 39-44.
49. Agnew, S.R., Horton, J.A., Lillo, T.M. and Brown, D.W., "Enhanced ductility in strongly textured magnesium produced by equal channel angular processing", Scripta Materialia, 50 (2004) 377-381.
50. Valiev, R.Z., Paradoxes of severe plastic deformation. Adv. Eng. Mater. 5 (2003) 296-300.
51. Saray, O. ve Purcek, G., Microstructural evolution and mechanical properties of Al-40 wt. %Zn alloy processed by equal-channel angular extrusion. J. Mater. Process. Technol. 209 (2009), 2488-2498.
52. Saray, O. ve Purcek, G., Microstructural evolution and mechanical properties of Al-40 wt. %Zn alloy processed by equal-channel angular extrusion. *J. Mater. Process. Technol.* 209 (2009), 2488-2498.
53. Chung, C.S., Kim, J.K., Kim, H.K. and Kim, W.J., "Improvement of high-cycle fatigue life in a 6061 Al alloy produced by equal channel angular pressing", Materials Science and Engineering A, 337 (2002) 39-44.

54. Patlan, V., Vinogradov, A., Higashi, K. and Kitagawa, K., "Overview of fatigue properties of fine grain 5056 Al-Mg alloy processed by equal-channel angular pressing" Materials Science and Engineering A, 300 (2001) 171-182.
55. Vinogradov, A. and Hashimoto, S., "Fatigue of severely deformed metals", Advanced Engineering Materials, 5 (2003) 351-358.
56. Kim, H.K., Choi, M.I., Chung, C.S. and Shin, D.H., "Fatigue properties of ultrafine grained low carbon steel produced by equal channel angular pressing", Material Science and Engineering A, 340A (2003) 243-250.
57. Vinogradov, A., Washikita, A., Kitagawa, K. and Kopylov, V.I., "Fatigue life of Al-Mg-Sc alloys produced by equal-channel angular pressing", Material Science and Engineering A, 340 (2003) 318-326.
58. Mughrabi, H., Höppel, H.W. and Kautz, M., "Fatigue and microstructure of ultrafine-grained metals produced by severe plastic deformation", Scripta Materialia, 51 (2004) 807-812.
59. Purcek, G., Altan, B.S., Miskioglu, I. and Ooi, P.H., "Processing of eutectic Zn-5% Al alloy by equal-channel angular pressing", Journal of Materials Processing Technology, 148 (2004) 279-287.
60. Purcek, G., Altan, B.S., Miskioglu, I. and Patil, A., "Mechanical Properties of severely deformed ZA-27 alloy using equal channel angular extrusion", Materials Science and Technology, 21-9 (2005) 1044-1048.
61. Purcek, G., Karaman, I., Yapici, G.G., Maharbi, M.A., Kucukomeroglu T. and Saray, O., "Enhancement in mechanical behavior wear resistance of severe plastically deformed two-phase Zn-Al alloys", Int. J. Mat. Res.(formerly Z. Metallkd.), 98-4 (2007) 332-338.
62. Purcek, G., Altan, B.S., Miskioglu, I. and Ooi, P.H., Processing of eutectic Zn-%5 Al alloy by equal-channel angular pressing. J. Mater. Process. Technol. 148 (2004) 279-287.
63. Fukawa, M., Iwahashi, Y., Horita, Z., Nemoto, M. and Langdon, T.G., The sharing characteristics associated with equal-channel angular pressing. Mater. Sci. Eng. A 257 (1998b) 328-332.
64. Purcek, G., Karaman, I., Yapici, G.G., Al-Maharbi, M., Kucukomeroglu, T. and Saray, O., Enhancement in mechanical behaviour and wear resistance of severe plastically deformed two-phase Zn-Al alloys. Int. J. Mater. Res. 98 (2007) 332-338.
65. Purcek, G., Improvement of mechanical properties for Zn-Al alloys using equal-channel angular pressing. J. Mater. Process. Technol. 169 (2005) 242-248.

66. Purcek, G., Altan, B.S., Miskioglu, I. and Patil, A., Mechanical properties of severely deformed ZA-27 alloy using equal channel angular extrusion. Mater. Sci. Technol. 21 (2005) 1044-1048.
67. Purcek, G., Saray, O., Kahraman, I. and Haouaoui, M., Microstructural evolution and mechanical response of equal-channel angular extrusion- processed Al-40Zn-2Cu alloy. Metallurgical and Materials Transactions 40A (2009) 2772-2783.
68. Savas, M.A. ve Altintas, S., The microstructural control of cast and mechanical-properties of zinc-aluminum alloys. J. Mater. Sci. 28 (1993) 1775-1780.
69. Nagarjuna, S., Srinivas, M., Balasubramanian, K. and Sormat, D.S., Effect of Alloying Content on High Cycle Fatigue Behaviour of Cu-Ti Alloys, Int. J. Fatigue, 19, 1 (1997) 51-57.
70. McKenzie, P.W.C., Lapovok, R., Wells, P. and Raviprasad, K., Removal of porosity in cast aluminum alloys by equal channel angular extrusion. Mater. Sci. Forum 426-432 (2003) 297-302.
71. Hung, P.C., Sun, P.L., Yu, C.Y., Kao P.W. and Chang, C.P., Inhomogeneous tensile deformation in ultrafine-grained aluminum. Scr. Mater. 53 (2005) 647-652.
72. Purcek, G., Aydin, M., Saray, O. ve Kucukomeroglu, T., Enhancement of tensile ductility of severe plastically deformed two-phase Zn-12Al alloy by equal channel angular extrusion. Mater. Sci. Forum 633-634 (2010) 437-447.
73. Purcek, G., Saray, O., Karaman, I. ve Kucukomeroglu, T., Effect of severe plastic deformation on tensile properties and impact toughness of two phase Zn-40Al alloy. Mater. Sci. Eng. A 490 (2008) 403-410.
74. Purcek, G., Altan, B.S., Miskioglu, I. and Ooi, PH., Processing of eutectic Zn-5% Al alloy by equal-channel angular pressing. J. Mater. Process.Technol. 148 (2004) 279-287.
75. Patlan, V., Vinogradov, A., Higashi, K., Kitagawa, K., Overview of Fatigue properties of fine grain Al-Mg alloy processed by equal-channel angular pressing. Mater. Sci. Eng. A 300 (2001) 171-182.
76. Estrin, Y. and Vinogradov, A., Fatigue behavior of light alloys with ultrafine grain structure produced by severe plastic deformation. Int. J. Fatigue, 32 (2010) 897-907.
77. Turhal, M.Ş. ve Savaşkan, T., Relationships between secondary dendrite arm spacing and mechanical properties of Zn-40Al-Cu alloys. J. Mater. Sci. 38 (1997) 2639-46.

ÖZGEÇMİŞ

Yakup HEYAL; 1984 yılında Trabzon'da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Trabzon'da tamamladı. 2003 yılında girdiği Karadeniz Teknik Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümünden 2008 yılında Makina Mühendisi ünvanı ile mezun oldu. Aynı yıl K.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalının Malzeme Bilim Dalında yüksek lisans öğrenimine başlamış olup, orta derecede İngilizce bilmektedir.