T.C.
RECEP TAYYİP ERDOĞAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

STRONSİYUM KATKISI VE FARKLI ISIL İŞLEMLERİN ZN-40AL-2CU ALAŞIMININ İÇYAPI, MEKANİK VE TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Murat TELLİOĞLU

Danışman
Doç. Dr. Ali Paşa HEKİMOĞLU

RİZE
2022

KABUL VE ONAY

Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalında, Doç. Dr. Ali Paşa Hekimoğlu danışmanlığında, Murat Tellioğlu tarafından hazırlanan *Stronsiyum Katkısı ve Farklı Isıl İşlemlerin Zn-40Al-2Cu Alaşımının İçyapı, Mekanik ve Tribolojik Özelliklerine Etkilerinin İncelenmesi* adlı bu tez çalışması, 26.05.2022 tarihinde yapılan savunma sınavı sonucunda oy birliği/oy çokluğuyla başarılı bulunarak jürimiz tarafından **Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri		**Unvanı, Adı Soyadı**	**İmza**
Başkan	:	Doç. Dr. Ali Paşa HEKİMOĞLU	
Üye	:	Dr. Öğr. Üyesi Muhammet DEMİRTAŞ	
Üye	:	Dr. Öğr. Üyesi Zeki AZAKLI	

ETİK BEYAN

Makine Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programından mezun olmak üzere teslim ettiğim “Stronsiyum Katkısı ve Farklı Isıl İşlemlerin Zn-40Al-2Cu Alaşımının İçyapı, Mekanik ve Tribolojik Özelliklerine Etkilerinin İncelenmesi” adlı tezim, bilim ve araştırma etiği prensiplerine riayet edilerek tarafımdan yazılmıştır.

Tez çalışmamda, başka kaynaklardan aktarılan bütün bilgi ve alıntılar, Enstitünüz Tez Yazım Kılavuzuna uygun olarak açıkça gösterilmiştir. Kaynağı gösterilenler dışında kalan bütün bilgiler uygun araştırma yöntemi kullanılarak tarafımdan edinilmiş ve esere bu şekilde yansıtılmıştır. Şahsıma ait olmayan hiçbir bilgi, kasıt veya kusurlar, şahsıma aitmiş gibi gösterilmemiştir. İnternet kaynakları dâhil, sahibine/kaynağına atıf yapılmaksızın hiçbir bilgi kullanılmamıştır. Aksinin ortaya çıkması halinde doğacak bütün hukuki, idari, akademik ve etik sorumluluk tarafıma ait olacaktır. Eserin tesliminden sonra herhangi bir zamanda, bilim etiğine aykırılık tespit edilmesi ve / veya eserimle ilgili intihal veya intihal şeklinde anlaşılacak bir durumun ortaya çıkması halinde; Üniversiteniz ve eğitim kadronuzun hiçbir şekilde sorumlu tutulmayacağını hür irademle kabul, beyan ve taahhüt ederim.
26 / 05 / 2022

Murat TELLİOĞLU

ÖN SÖZ

Bu çalışma piyasada kullanılan nispeten pahalı olan yüksek yoğunluklu dökme demir, bronz ve pirinç gibi geleneksel yatak malzemelerine göre daha ekonomik, kolay üretilebilir, düşük yoğunluklu, üstün mekanik özelliklere ve aşınma direncine sahip yeni bir alaşım geliştirmek amacıyla yapılmıştır.

Daha önceden kaymalı yatak uygulamalarında kullanılmak üzere geliştirilen üçlü Zn-40Al-2Cu alaşımı esas alınarak, bu alaşıma mukavemet artırmak amacıyla stronsiyum ilavesi yapılmış ve dökülmüş ve ısıl işlem uygulanmış koşullarda söz konusu alaşımın hem mekanik hem de tribolojik özellikleri incelenmiştir. Hem dökülmüş, hem de T5 ve T6 ısıl işlemleri uygulanmış durumda yaptığımız incelemeler sonucunda elde ettiğimiz bulgular geleneksel yatak malzemelerinden üstünlüğü literatürde zaten ortaya koyulmuş Zn-40Al-2Cu alaşımından aynı koşullarda elde edilen bulgularla karşılaştırıldı. Elde edilen bulgular Zn-40Al-2Cu-0,1Sr alaşımının hem dökülmüş hem de ısıl işlem görmüş durumlarda Zn-40Al-2Cu alaşımından çok daha yüksek mukavemet ve aşınma direnci sergilediğini ve dökme demir, bronz ve pirinç gibi geleneksel yatak malzemelerine önemli bir alternatif olabileceğini göstermiştir.

Bu çalışmanın tamamlanmasında emeği geçen başta danışman hocam Doç. Dr. Ali Paşa HEKİMOĞLU olmak üzere, çalışma süresince önemli katkılarda bulunan Prof. Dr. Yasin ALEMDAĞ'a, Arş. Gör. Murat HACIOSMANOĞLU'na, Mak. Yük. Müh. Merve ÇALIŞ ÖZEKİNCİ'ye, Arş. Gör. Sadun KARABIYIK'a ve Mak. Müh. Süha ZİMİTOĞLU'na teşekkür ederim.

Ayrıca, Yüksek Lisans Tezi çalışmam süresince maddi ve manevi desteklerini benden esirgemeyen başta annem ve babam olmak üzere tüm sevdiklerime teşekkür ederim.

"Bu çalışma Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü birimince desteklenmiştir. Proje Numarası: FYL-2021-1245"

Murat TELLİOĞLU

2022 / RİZE

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY I
ETİK BEYAN II
ÖN SÖZ III
İÇİNDEKİLER IV
ÖZET V
ABSTRACT VI
TABLOLAR LİSTESİ VII
ŞEKİLLER LİSTESİ VIII
GİRİŞ 1
1. GENEL BİLGİLER 4
1.1 Faz Diyagramları 4
1.1.1. Alüminyum-Çinko Esaslı Alaşımların Kimyasal Bileşimleri ve Yapısal Özellikleri 8
1.1.2. Alüminyum-Çinko Esaslı Alaşımların Mekanik Özellikleri 15
1.1.3. Alüminyum-Çinko Esaslı Alaşımların Tribolojik Özellikleri 18
1.2. Literatür Özeti 18
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR 20
2.1. Materyal 20
2.2. Yöntem 20
2.3. Alaşımların Yapısal ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi 22
2.4. Alaşımların Sürtünme ve Aşınma Özelliklerinin İncelenmesi 22
3. BULGULAR 24
3.1. Alaşımların Yapısal İncelemelerinden Elde Edilen Bulgular 24
3.2. Fiziksel ve Mekanik Deneylerden Elde Edilen Bulgular 30
3.3. Kırılma Yüzeylerinin İncelenmesinden Elde Edilen Bulgular 31
3.4. Sürtünme ve Aşınma Deneyinden Elde Edilen Bulgular 35
3.5. Aşınma Yüzeyleri ve Aşınma Parçacıklarının İncelenmesinden Elde Edilen Bulgular 35
4. TARTIŞMA VE ÖNERİLER 42
4.1. Sonuç ve Tartışma 42
4.2. Öneriler 48
KAYNAKÇA 50

Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Anabilim Dalı: Makine Mühendisliği
Tez Türü : Yüksek Lisans
Danışman : Doç. Dr. Ali Paşa HEKİMOĞLU
Hazırlayan : Murat TELLİOĞLU
Yıl : 2022
Sayfa : 56

ÖZET

STRONSİYUM KATKISI VE FARKLI ISIL İŞLEMLERİN ZN-40AL-2CU ALAŞIMININ İÇYAPI, MEKANİK VE TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Zn-40Al-2Cu ve Zn-40Al-2Cu-0,1Sr alaşımı kokil kalıba döküm yöntemiyle üretildi. Üretilen alaşımların içyapısı, mekanik özellikleri ve aşınma dirençleri araştırıldı. Her iki alaşımında dökülmüş durumda α dendritleri ile bu dendritler arasında yer alan ötektoid α+η faz karışımı ve bakırca zengin ε ($CuZn_4$) fazlarından oluştuğu, ancak Zn-40Al-2Cu-0,1Sr alaşımının içyapısındaki dendritlerin daha ince olduğu gözlendi. T5 ısıl işlemi incelenen alaşımların dendritik yapısında belirgin bir değişime neden olmadığı görüldü. T6 ısıl işleminin ise söz konusu alaşımların içyapısının dendritik yapısını önemli ölçüde değiştirdiği gözlendi. Zn-40Al-2Cu-0,1Sr alaşımı Zn-40Al-2Cu alaşımına göre daha yüksek sertlik, çekme mukavemeti ve kopma uzaması değerleri sergilemiştir. T5 ısıl işlemi incelenen alaşımların sertliğini ve çekme mukavemetini azaltırken kopma uzamasını az da olsa artırmıştır. T6 ısıl işlemi ise alaşımlarının sertliğini ve çekme mukavemetini artırırken, kopma uzaması değerlerinin azalmasına yol açmıştır. Stronsiyum ilavesi Zn-40Al-2Cu alaşımının sürtünme katsayısı ve hacim kaybı değerlerini hem dökülmüş hem de ısıl işlem görmüş durumlarda azaltmıştır. Stronsiyum ilavesi sonucunda Zn-40Al-2Cu alaşımının sürtünme katsayısı ve hacim kaybı değerlerinde belirlenen iyileşmeler yapısal ve mekanik özelliklerinde ortaya çıkan değişimlere dayandırılarak irdelendi.

Anahtar Kelimeler: Zn-40Al-2Cu, İçyapı, Mekanik Özellikler, Triboloji

Recep Tayyip Erdogan University Institute of Graduate Studies
Department : Department of Mechanical Engineer
Thesis Type : Master Thesis
Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Ali Paşa HEKİMOĞLU
Author : Murat TELLİOĞLU
Year : 2022
Pages : 56

ABSTRACT

INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF STRONTIUM ADDITION AND DIFFERENT HEAT TREATMENTS ON THE MICROSTRUCTURE, MECHANICAL AND TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF ZN-40AL-2CU ALLOY

Zn-40Al-2Cu and Zn-40Al-2Cu-0.1Sr alloy were produced by permanent mold casting method. The microstructure, mechanical properties and wear resistance of the produced alloys were investigated. It was observed that both alloys consisted of α dendrites and the eutectoid α+η phase mixture and copper-rich ε ($CuZn_4$) phases located in interdendritic regions, but the dendrites in the microstructure of the Zn-40Al-2Cu-0.1Sr alloy were thinner. It was observed that the T5 heat treatment did not cause a significant change in the dendritic structure of the examined alloys. On the other hand, it was observed that T6 heat treatment significantly changed the dendritic structure of the microstructure of the alloys. Zn-40Al-2Cu-0.1Sr alloy exhibited higher hardness, tensile strength and elongation to fracture values than Zn-40Al-2Cu alloy.T5 heat treatment decreased the hardness and tensile strength of the alloys investigated and slightly increased the elongation at break.T6 heat treatment, on the other hand, increased the hardness and tensile strength of the alloys, while reducing the elongation to fracture values.Addition of strontium reduced the friction coefficient and wear volume values of Zn-40Al-2Cu alloy in both cast and heat treated conditions.The improvements determined in the friction coefficient and wear volume values of Zn-40Al-2Cu alloy with the addition of strontium were discussed based on the changes in the structural and mechanical properties.

Keywords: Zn-40Al-2Cu, Microstructure, Mechanical Properties, Tribology

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 1. Çinko esaslı bazı ticari alaşımların kimyasal bileşimleri..... 8
Tablo 2. Çinko esaslı bazı ticari alaşımlar ile geleneksel yatak malzemelerinin mekanik özellileri..... 17
Tablo 3. İncelenen alaşımların nominal kimyasal bileşimleri..... 20
Tablo 4. İncelenen alaşımlarının fiziksel ve mekanik özellikleri..... 31
Tablo 5. İncelenen alaşımların sürtünme ve aşınma deneylerinden elde edilen bulgular 35

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1. İkili Al-Zn faz diyagramı 5
Şekil 2. İkili Zn-Cu faz diyagramı 5
Şekil 3. İkili Zn-Sr faz diyagramı 6
Şekil 4. İkili Al-Cu faz diyagramı 6
Şekil 5. İkili Al-Sr faz diyagramı 7
Şekil 6. Üçlü Al-Zn-Cu sisteminin 350 °C sıcaklıktaki kesiti. 7
Şekil 7. Zn-5Al alaşımının içyapısını gösteren fotoğraf 9
Şekil 8. Zn-10Al alaşımının içyapısını gösteren fotoğraf 10
Şekil 9. Zn-15Al alaşımının içyapısını gösteren fotoğraf 10
Şekil 10. Zn-20Al alaşımının içyapısını gösteren fotoğraf 11
Şekil 11. Zn-25Al alaşımının içyapısını gösteren fotoğraf 11
Şekil 12. Zn-27Al alaşımının içyapısını gösteren fotoğraf 12
Şekil 13. Zn-40Al alaşımının içyapısını gösteren fotoğraf 12
Şekil 14. Zn-60Al (Al-40Zn) alaşımının içyapısını gösteren fotoğraf..... 13
Şekil 15. Zn-85Al (Al-15Zn) alaşımının içyapısını gösteren fotoğraf..... 13
Şekil 16. Zn-40Al-2Cu alaşımının içyapısını gösteren fotoğraf 14
Şekil 17. Zn-40Al-4Si alaşımının içyapısını gösteren fotoğraf 14
Şekil 18. Alaşımların üretiminde kullanılan ergitme ocağının fotoğrafı 21
Şekil 19. Alaşımların üretiminde kullanılan çelik (kokil) kalıbın fotoğrafı..... 21
Şekil 20. Çekme deneyi numunesinin teknik resmi 22
Şekil 21. Sürtünme aşınma deney düzeneğinin şematik resmi 23
Şekil 22. Zn-40Al-2Cu alaşımının dökülmüş durumdaki a) düşük büyütmede (100X) ve b) yüksek büyütmede (500X) görüntülenen içyapısı..... 25
Şekil 23. Zn-40Al-2Cu-0,1Sr alaşımının dökülmüş durumdaki a) düşük büyütmede (100X) b) yüksek büyütmede (500X) görüntülenen içyapısı 26
Şekil 24. Zn-40Al-2Cu alaşımının T5 ısıl işlemi uygulanmış durumdaki a) düşük büyütmede (100X) ve b) yüksek büyütmede (500X) görüntülenen içyapısı 27
Şekil 25. Zn-40Al-2Cu-0,1Sr alaşımının T5 ısıl işlemi uygulanmış durumdaki a) düşük büyütmede (100X) ve b) yüksek büyütmede (500X) görüntülenen içyapısı 28

Şekil 26. Zn-40Al-2Cu alaşımının T6 ısıl işlemi uygulanmış durumdaki a) düşük büyütmede (100X) ve b) yüksek büyütmede (500X) görüntülenen içyapısı 29

Şekil 27. Zn-40Al-2Cu-0,1Sr alaşımının T6 ısıl işlemi uygulanmış durumdaki a) düşük büyütmede (100X) ve b) yüksek büyütmede (500X) görüntülenen içyapısı 30

Şekil 28. Dökülmüş durumdaki Zn-40Al-2Cu alaşımının çekme deneyi numunesinin kırılma yüzeyinin görüntüsü..... 32

Şekil 29. Dökülmüş durumdaki Zn-40Al-2Cu-0,1Sr alaşımının çekme deneyi numunesinin kırılma yüzeyinin görüntüsü..... 32

Şekil 30. T5 ısıl işlemi uygulanmış durumdaki Zn-40Al-2Cu alaşımının çekme deneyi numunesinin kırılma yüzeyinin görüntüsü 33

Şekil 31. T5 ısıl işlemi uygulanmış durumdaki Zn-40Al-2Cu-0,1Sr alaşımının çekme deneyi numunesinin kırılma yüzeyinin görüntüsü 33

Şekil 32. T6 ısıl işlemi uygulanmış durumdaki Zn-40Al-2Cu alaşımının çekme deneyi numunesinin kırılma yüzeyinin görüntüsü 34

Şekil 33. T6 ısıl işlemi uygulanmış durumdaki Zn-40Al-2Cu-0,1Sr alaşımının çekme deneyi numunesinin kırılma yüzeyinin görüntüsü 34

Şekil 34. Dökülmüş durumdaki Zn-40Al-2Cu alaşımına ait aşınma deney numunesinin a) aşınma yüzeyinin ve b) aşınma parçacıklarının SEM görüntüsü..... 36

Şekil 35. Dökülmüş durumdaki Zn-40Al-2Cu-0,1Sr alaşımına ait aşınma deney numunesinin a) aşınma yüzeyinin ve b) aşınma parçacıklarının SEM görüntüsü 37

Şekil 36. T5 ısıl işlemi uygulanmış durumdaki Zn-40Al-2Cu alaşımına ait aşınma deney numunesinin a) aşınma yüzeyinin ve b) aşınma parçacıklarının SEM görüntüsü 38

Şekil 37. T5 ısıl işlemi uygulanmış durumdaki Zn-40Al-2Cu-0,1Sr alaşımına ait aşınma deney numunesinin a) aşınma yüzeyinin ve b) aşınma parçacıklarının SEM görüntüsü 39

Şekil 38. T6 ısıl işlemi uygulanmış durumdaki Zn-40Al-2Cu alaşımına ait aşınma deney numunesinin a) aşınma yüzeyinin ve b) aşınma parçacıklarının SEM görüntüsü 40

Şekil 39. T6 ısıl işlemi uygulanmış durumdaki Zn-40Al-2Cu-0,1Sr alaşımına ait aşınma deney numunesinin a) aşınma yüzeyinin ve b) aşınma parçacıklarının SEM görüntüsü 41

GİRİŞ

Ana alaşım elementi olarak çinko (Zn) ve alüminyum (Al) elementlerini içeren Zn-Al esaslı alaşımlar ilk olarak 1920'li yıllarda ~%4 oranında Al içeren ZAMAK serisi alaşımlar olarak piyasaya sürülmüştür (Goodwin ve Ponikvar, 1989; Gervais v.d., 1985; Skenazi v.d., 1983). Bu alaşımlar başlangıçta ağırlıklı olarak elektrik, elektronik, otomotiv ve genel amaçlı makine imalatı sektörlerindeki üretimlerde bazı yapısal parçaların imalatında ve dekoratif amaçlı uygulamalarda kullanılmıştır (Goodwin ve Ponikvar, 1989). İkinci Dünya Savaşı yıllarında Alman bilim insanlarının bu alaşımlar üzerine yaptığı yoğun araştırma geliştirme çalışmaları sonucunda düşük oranlarda bakır içeren daha üstün malzeme özelliklerine sahip sırasıyla %30 ve 50 oranlarında Al içeren ALZEN 305 ve ALZEN 501 isimli Zn-Al alaşımları geliştirilmiştir (Hekimoğlu ve Savaşkan, 2016; Skanazi v.d., 1983; Gervais v.d., 1980; Lee v.d., 1987). ALZEN alaşımlarının beyaz metal ve bronz gibi geleneksel yatak malzemelerine alternatif olabileceği ortaya koyulmuştur (Goodwin ve Ponikvar, 1989; Lee v.d., 1987). İkinci Dünya Savaşı yıllarından sonra da bu alaşımlar üzerine yapılan çalışmalar yoğunluğu artırılarak sürdürülmüştür. Bu çalışmalar sonucunda ise ağırlıkça % 8 ile 35 arasında Al içeren ZA serisi alaşımlar geliştirilmiştir [Goodwin ve Ponikvar, 1989; Hekimoğlu ve Savaşkan, 2016).

Zn-Al esaslı alaşımlarının geleneksel yatak malzemelerine göre başlıca avantajları üretimlerinin kolay ve ekonomik olması, özgül mukavemetlerinin (mukavemet/ yoğunluk) ve aşınmaya karşı dirençlerinin yüksek olması, sürtünme katsayılarının düşük olması, çalışma ortamındaki sert parçacıkları yutma özelliklerine sahip olmalarıdır. Söz konusu alaşımlar ayrıca yüksek sönümleme ve sessiz çalışma özelliklerinin yanı sıra yük taşıyıcı sert ve kaymayı kolaylaştırıcı nispeten yumuşak fazlardan oluşan çok fazlı bir içyapıya sahip olduklarından aşırı yükleme, yetersiz yağlama ve yüksek hızlı çalışma koşullarında bile ideal tribolojik davranış sergilemektedirler (Prasad, 2005; Gang ve Ma, 1993; Delneuville, 1985; Lyon, 1986; Ünlü v.d., 2009). Yukarıda belirtilen üstünlüklerinin yanı sıra Zn-Al esaslı alaşımlar bazı kısıtlara da sahiptir. Bu kısıtların başında sertlik, mukavemet ve aşınma dirençlerinin bazı uygulamalar için yetersiz kalması ve ergime noktalarının düşük olması nedeniyle belli sıcaklık değerlerinin üzerindeki sıcaklıklarda kararlılıklarını koruyamamaları gelmektedir (Prasad, 1997; Savaşkan ve Alemdağ, 2008; Zhu v.d.,

1995). Bu nedenle Zn-Al esaslı alaşımlar üzerine son zamanlarda yapılan çalışmalarda bu alaşımların mukavemetlerini, aşınma dirençlerini ve yüksek sıcaklıklardaki kararlılıklarını artırma üzerine odaklanılmıştır (Lee v.d., 1987; Prasad, 1997; Savaşkan ve Murphy, 1987; Zhu v.d., 1995; Calayag ve Ferres, 1983). Bu çalışmalarda Zn-Al esaslı alaşımlarındaki alüminyum oranlarının artırılması veya ikili Zn-Al alaşımlarına farklı alaşım elementleri ilavesiyle mukavemetlerinin artırılabileceği görülmüştür. İkili Zn-Al alaşımlarının mukavemetlerini artırmak için en yaygın kullanılan alaşım elementlerinin başında bakır (Cu) ve silisyum (Si) gelmektedir. Bu alaşımlara düşük oranlarda (ağırlıkça %1-3) yapılan Cu ve Si katkılarının hem sertlik ve mukavemetlerini hem de aşınma dirençlerini önemli oranda artırdığı deneysel olarak yapılan çalışmalarla ortaya koyulmuştur. Ancak bakırın bu alaşımlara ağırlıkça % 3'ten daha fazla ilave edilmesi durumunda boyutsal kararsızlığa neden olduğu ortaya koyulmuştur (Köster ve Moeller, 1941, 1942; Köster, 1941). Bu kararsızlık probleminin alaşımlara ısıl işlem uygulanarak giderilebildiği ortaya koyulmuştur (Savaşkan v.d., 2021; Savaşkan ve Hekimoğlu, 2015; Savaşkan ve Tan, 2014). Zn-Al alaşımlarında alüminyum oranı arttıkça mekanik özelliklerin iyileştiğinin ve %2-3 oranlarında bakır katkısı yapılan Zn-Al alaşımlarının ikili Zn-Al alaşımlarına göre daha üstün mekanik ve tribolojik özellikler sergilediğini ortaya koyulması üçlü Zn-40Al-2Cu alaşımının geliştirilmesine yol açmıştır (Savaşkan v.d., 2004; Savaşkan v.d., 2003; Hekimoğlu ve Savaşkan, 2014; Savaşkan ve Turhal, 2003).

Bakır katkısı nedeniyle Zn-40Al-2Cu alaşımında meydana gelebilecek boyutsal kararsızlık probleminin bu alaşıma stabilizasyon (T5) işlemi uygulama ile giderilebileceği ortaya koyulmuştur (Bican ve Savaşkan, 2020; Savaşkan ve Hekimoğlu, 2019; Savaşkan v.d., 2021). Bu ısıl işlem, genellikle 100–200 °C arasındaki bir sıcaklıkta alaşımı uygun bir süre yaşlandırma ile gerçekleştirilmektedir. Ancak, T5 ısıl işlemi alaşımın boyutsal kararsızlık problemini büyük ölçüde giderirken sertlik ve mukavemeti değerlerini düşürmektedir (Bican ve Savaşkan, 2020; Savaşkan ve Hekimoğlu, 2019; Savaşkan v.d., 2021). T5 ısıl işleminin alaşımın mikro yapısı üzerinde ise belirgin bir değişime yol açmadığı ancak alaşımın içyapısında bulunan alüminyumca zengin α-dendritlerinde çinko çökeltilerinin oluşmasına neden olduğu ortaya koyulmuştur (Bican ve Savaşkan, 2020; Savaşkan ve Hekimoğlu 2019; Savaşkan v.d., 2021).

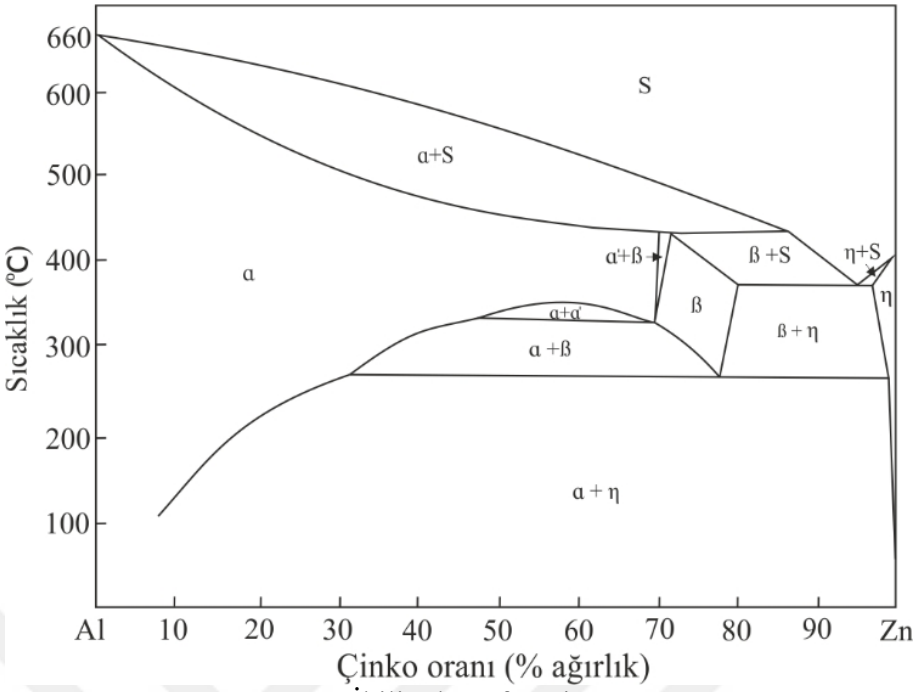
Zn-40Al esaslı alaşımların mekanik özelliklerini iyileştirmek amacıyla en yaygın kullanılan ısıl işlem çökelme sertleşmesidir (Savaşkan v.d., 2021; Savaşkan ve Hekimoğlu, 2014, 2015; Savaşkan v.d., 2022). Bu ısıl işlem (T6) söz konusu alaşımın yaklaşık olarak 375 °C'lik bir sıcaklıkta uygun bir süre bekletildikten sonra suda soğutulup akabinde 100–200 °C arasındaki bir sıcaklıkta yaşlandırılmaları ile gerçekleştirilmektedir (Savaşkan v.d., 2021; Savaşkan ve Hekimoğlu, 2014, 2015; Savaşkan v.d., 2022). T6 ısıl işleminin Zn-40Al esaslı alaşımların dendritik yapısını tamamen ortadan kaldırdığı daha önceki çalışmalarda gösterilmiştir (Savaşkan ve Hekimoglu, 2015; Savaşkan v.d., 2022).

Literatürde Zn-40Al-Cu esaslı alaşımların yapısal, mekanik ve tribolojik özelliklerinin incelendiği birçok çalışma olmasına rağmen, alüminyum içeren alaşımlarda tane inceltme yoluyla mukavemeti artırdığı bilinen stronsiyumun Zn-40Al-2Cu alaşımının yapısal, mekanik ve tribolojik özelliklerine etkisinin incelenerek ortaya koyulduğu bir çalışma henüz yapılmamıştır. Bu nedenle bu çalışmada %0,1 oranında stronsiyum içeren Zn-40Al-2Cu-0,1Sr alaşımı üretilerek stronsiyum katkısının Zn-40Al-2Cu alaşımının yapısal, mekanik ve tribolojik özelliklerine etkisinin incelenmesi ve kararlılığı ve mukavemeti artırma amacıyla uygulan T5 ve T6 ısıl işlemlerinin söz konusu malzeme özelliklerine etkilerinin detaylı bir şekilde ortaya konulması amaçlanmıştır.

1. GENEL BİLGİLER

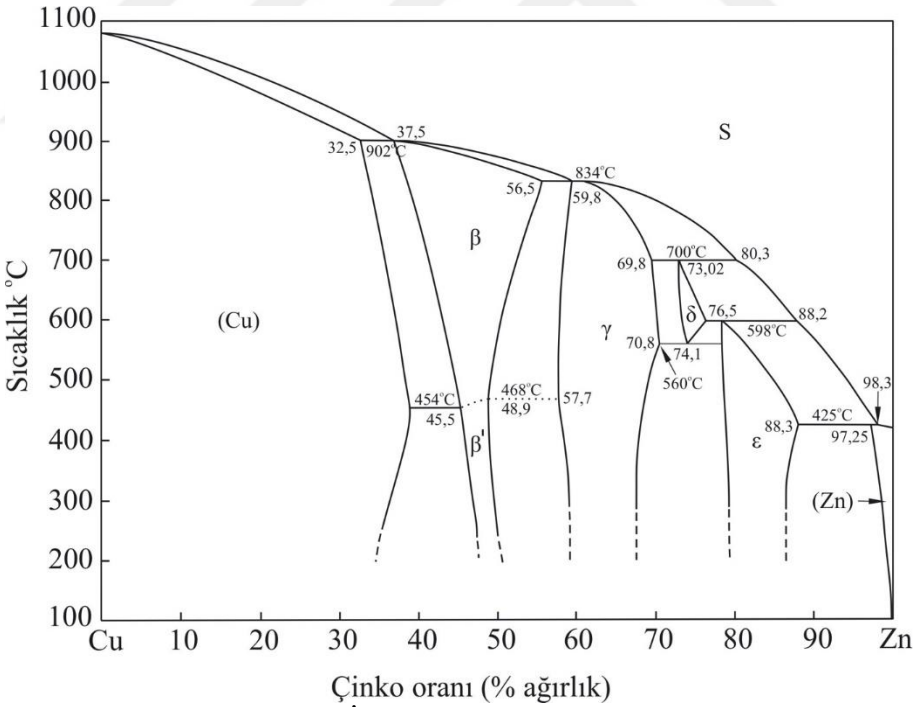
1.1 Faz Diyagramları

Zn, Al, Cu ve Sr elementlerinin birbiriyle oluşturdukları ikili alaşım sistemlerine ait faz diyagramları Şekil 1-5'de verilmektedir. Bu elementlerin üçlü alaşım sistemlerine ait faz diyagramları ise henüz tam olarak ortaya koyulmamıştır. Ancak üçlü Al-Zn-Cu alaşım sisteminin 350 ℃'deki kesiti bilinmekte olup Şekil 6'da verilmektedir. İkili Al-Zn faz diyagramına göre Zn-Al alaşımları denge durumunda katılaştıklarında oda sıcaklığında alüminyumca zengin α ve çinkoca zengin η fazlarından (katı çözeltilerinden) oluşan bir içyapı sergilerler. İkili Cu-Zn diyagramına göre ise denge durumunda çinko oda sıcaklığında yaklaşık olarak %35 oranına kadar bakır içerisinde çözünebilmekte tek fazlı bir yapı ortaya çıkmakta, çinko oranının artması durumunda alaşımların içyapısında çinko oranına bağlı olarak β, β',γ ve ε gibi fazlar oluşabilmektedir. Çinkonun içerisinde bakırın çözünürlüğü ise yok denecek kadar kısıtlıdır. İkili Zn-Sr alaşım sisteminde ise denge koşullarında katılaşma durumunda oda sıcaklığında αSr, SrZn, $SrZn_2$, $\alpha SrZn_5$ ve $SrZn_{13}$ bileşikleri (fazları) oluşmaktadır. Al-Cu alaşım sistemi oda sıcaklığında bakır oranına bağlı olarak α, β, θ, η, γ ve ζ fazlarının biri veya bir kaçının karışımından oluşabilmektedir. Al-Sr alaşım sisteminde ise oda sıcaklığında stronsiyum oranına bağlı olarak Al_4Sr, Al_2Sr, Al_7Sr_8 bileşikleri ve αSr fazı oluşmaktadır. Zn, Al, Cu ve Sr elementlerinin üçlü faz diyagramı tam olarak ortaya koyulamamıştır. Üçlü faz diyagramları genel olarak belli bir sıcaklıktaki kesitler olarak sunulmaktadır. Örnek olarak Zn-Al-Cu alaşım sisteminin 350 °C sıcaklıktaki kesiti Şekil 6'da verilmiştir. Söz konusu kesit bu alaşım sisteminin oda sıcaklığındaki fazlarını da temsil etmektedir. Bu kesitten görüleceği gibi Zn-Al-Cu alaşım sistemi elementlerin oranlarına bağlı olarak α, β, θ, ε, η ve T' fazlarını içermektedir.



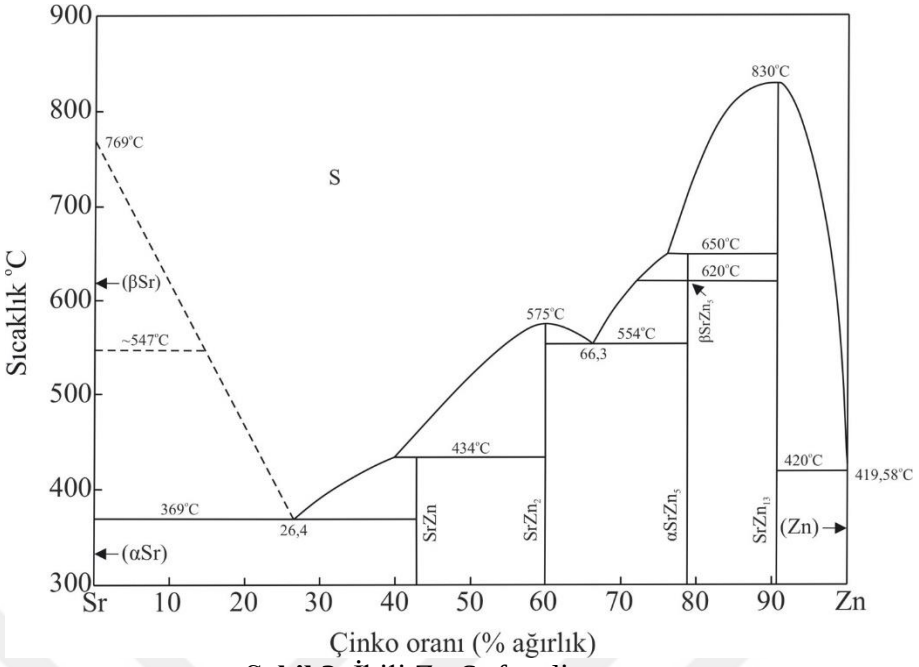
Şekil 1. İkili Al-Zn faz diyagramı

Kaynak: Presnyakov v.d., 1961; Hanson ve Gayler , 1922; Fuller ve Wilcox, 1936



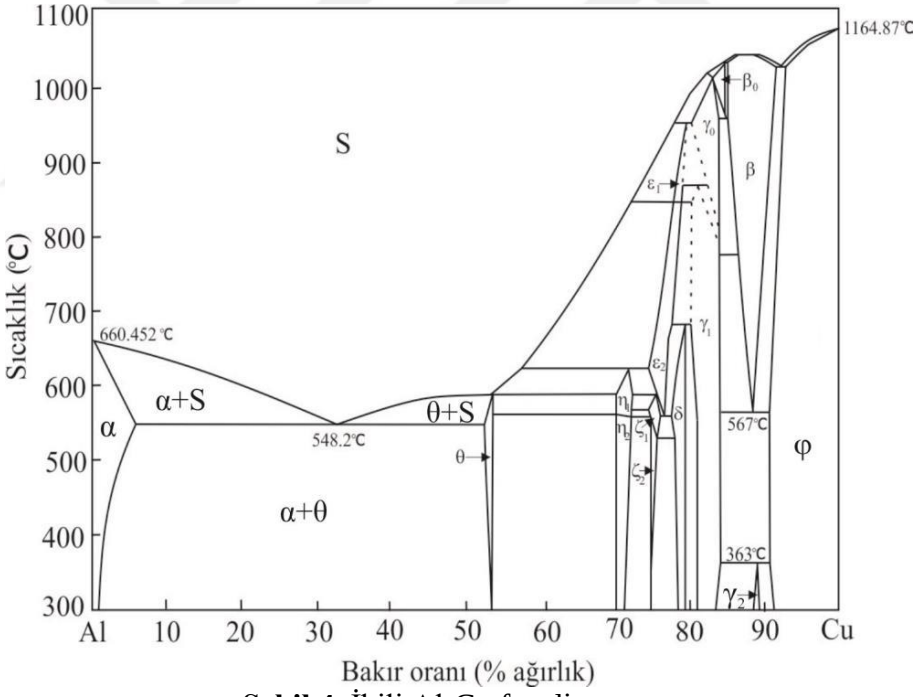
Şekil 2. İkili Zn-Cu faz diyagramı

Kaynak: ASM International, 1990



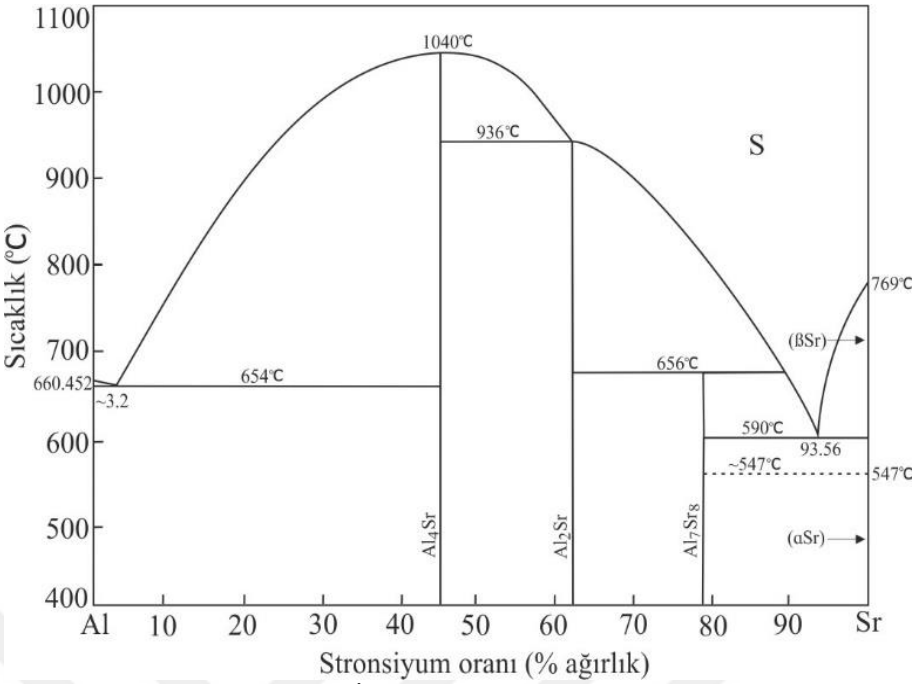
Şekil 3. İkili Zn-Sr faz diyagramı

Kaynak: ASM International, 1990

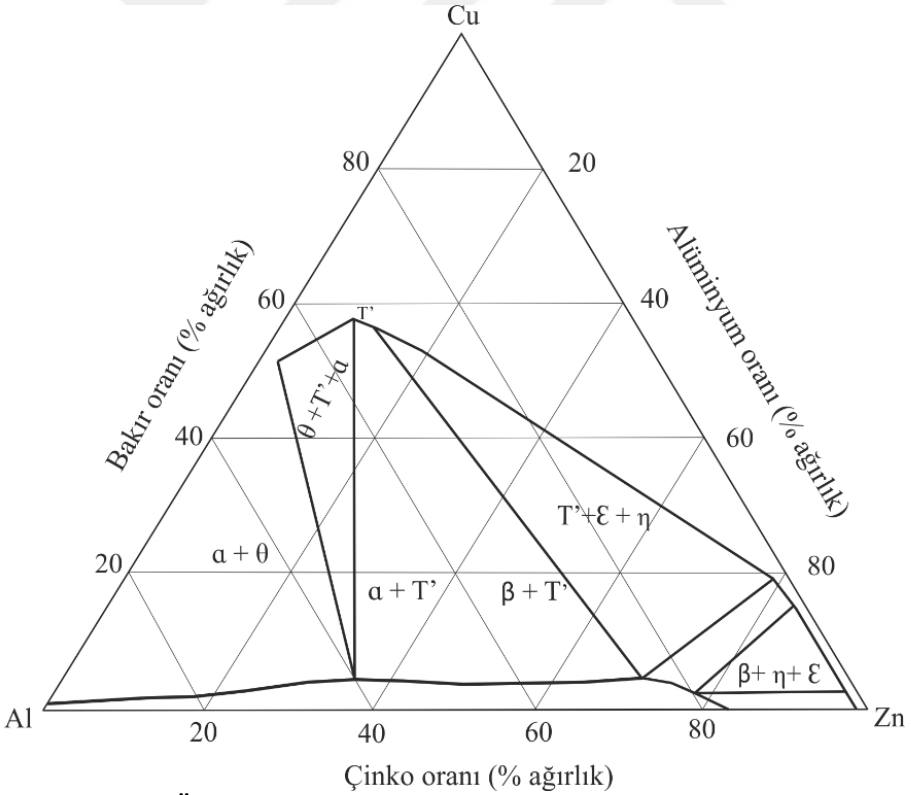


Şekil 4. İkili Al-Cu faz diyagramı

Kaynak: ASM International,1990



Şekil 5. İkili Al-Sr faz diyagramı
Kaynak: ASM International,1990



Şekil 6. Üçlü Al-Zn-Cu sisteminin 350 °C sıcaklıktaki kesiti
Kaynak: Murphy, 1980

1.1.1. Alüminyum-Çinko Esaslı Alaşımların Kimyasal Bileşimleri ve Yapısal Özellikleri

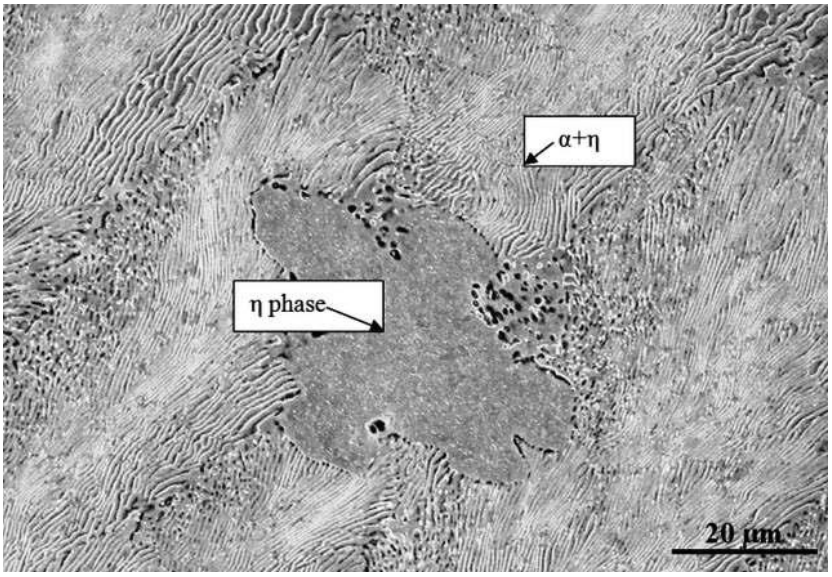
Endüstriyel uygulamalarda sıklıkla tercih edilen bazı Zn-Al esaslı alaşımların kimyasal bileşimleri Tablo 1'de verilmiştir (Goodwin ve Ponikvar, 1989; Gervais v.d., 1985; Skanazi v.d., 1983; Hekimoğlu, 2013). Bu tabloda görüldüğü gibi ZAMAK alaşımları %4, ZA-8, ZA-12, ZA-27 ve ZA-35 alaşımları ise sırasıyla yaklaşık olarak %8, 12, 27 ve 35 oranlarında alüminyum içermektedir. Bu alaşımlardan ZAMAK 3 ve ZAMAK 7 hariç olmak üzere tümü ağırlıkça %0,5 ile 5 arasında değişen oranlarda bakır içermektedir. ZA-35 alaşımında bakır ile birlikte ağırlıkça %2-5 arasında silisyum elementi de bulunmaktadır. Söz konusu ticari alaşımların kimyasal bileşimlerinde bulunan magnezyum (Mg), demir (Fe), kurşun (Pb), kadmiyum (Cd), kalay (Sn) ve nikel (Ni) gibi elementler genellikle safsızlık elementleridir. Bu elementler oranları çok düşük olduğunda alaşımın yapısal, fiziksel, mekanik ve tribolojik özelliklere belirgin bir etki yapmamaktadır.

Tablo 1. Çinko esaslı bazı ticari alaşımların kimyasal bileşimleri

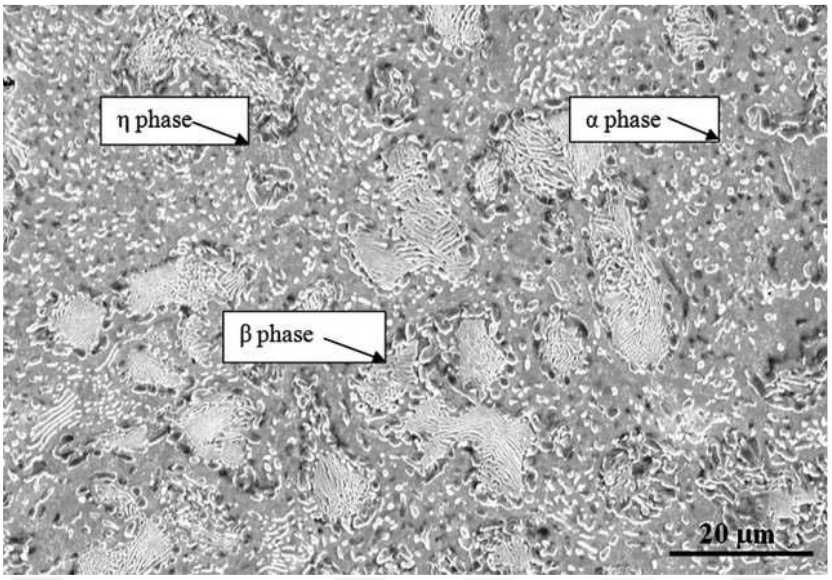
Alaşım	Alaşım elementi oranı (% ağırlıkça)									
	Al	Cu	Mg	Fe (maks)	Pb (maks)	Cd (maks)	Sn (maks)	Ni (maks)	Si	Zn
ZAMAK 2	3,7 - 4,3	2,6 - 3,3	0,02 - 0,06	0,035 - 0,05	0,040 - 0,005	0,003 - 0,004	0,0015 - 0,002	-		Geriye kalan
ZAMAK 3	3,7 - 4,3	0,1 (max)	0,02 - 0,06	0,035 - 0,05	0,040 - 0,005	0,003 - 0,004	0,0015 - 0,002	-		Geriye kalan
ZAMAK 5	3,7 - 4,3	0,7 - 1,2 (max)	0,02 - 0,06	0,035 - 0,5	0,004 - 0,005	0,003 - 0,004	0,0015 - 0,002	-		Geriye kalan
ZAMAK 7	3,7 - 4,3	0,1 (max)	0,005 - 0,02	0,035 - 0,05	0,003	0,002	0,001	0,005 - 0,02		Geriye kalan
ZA-8	8,0 - 8,8	0,8 - 1,3	0,01 - 0,03	0,035 - 0,075	0,005 - 0,006	0,005 - 0,006	0,002 - 0,003	-		Geriye kalan
ZA-12	10,5 - 11,5	0,5 - 1,2	0,01 - 0,03	0,05 - 0,075	0,005 - 0,006	0,005 - 0,006	0,002 - 0,003	-		Geriye kalan
ZA-27	25,0 - 28,0	2,0 - 2,5	0,01 - 0,02	0,07 - 0,075	0,005 - 0,006	0,005 - 0,006	0,002 - 0,003	-		Geriye kalan
ZA-35	30,0 - 35,0	3,0 - 5,0	-	0 - 0,1	0 - 0,004	0 - 0,003	0 - 0,002		2,0 - 5,0	Geriye kalan

Kaynak: Goodwin ve Ponikvar, 1989; Gervais v.d., 1985; Skanazi v.d., 1983; Hekimoğlu, 2013

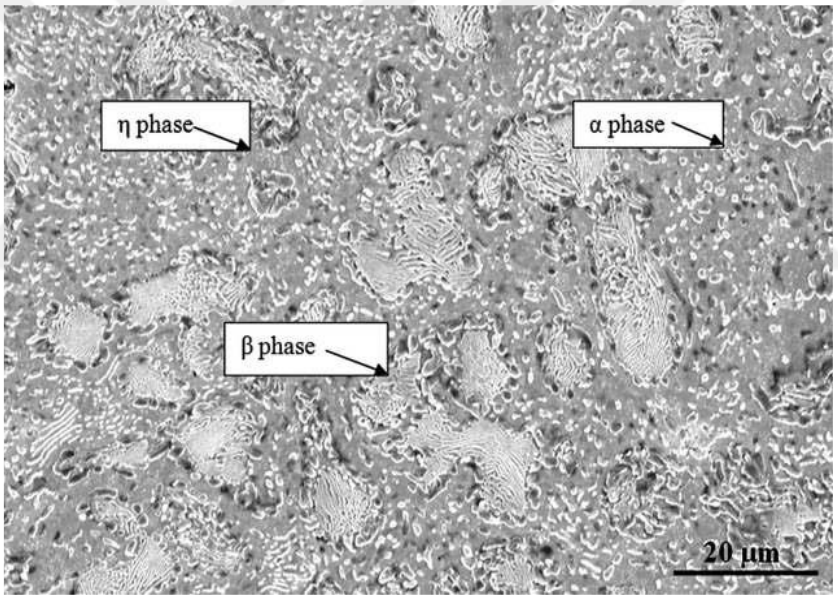
Zn-Al esaslı alaşımların içyapıları ve içyapılarında bulunan fazlar içerdikleri alüminyum ve alaşım elementi oranlarına bağlı olarak farklılık göstermektedir. İkili Zn-(5-25)Al alaşımlarının yapısal özelliklerinin incelendiği bir çalışmada (Hekimoğlu ve Savaşkan, 2014) elde edilen ve alaşımların içyapılarını gösteren içyapı fotoğrafları Şekil 7-11'de verilmektedir. Bu bulgulara göre Zn-5Al alaşımının içyapısı ötektoid α+η ve çinkoca zengin ötektik η fazından oluşmaktadır. Ötektoid α+η fazı lamelli bir yapıya sahip olup η faz bölgelerinin etrafını sarmaktadır, Şekil 7. Zn-10Al ve Zn-15Al alaşımlarının içyapıları ise çinkoca zengin η fazı ile çevrili proötektik β dendiritleri ve ince yapılı kısmen küresel yapılı alüminyumca zengin α parçacıklarından oluşmaktadır, Şekil 8 ve 9. Daha yüksek oranda alüminyum içeren Zn-20Al ve Zn-25Al alaşımlarının içyapısında dendritlerin daha belirginleşerek hacimsel oranının arttığı, bu alaşımlarda gözlenen dendritlerin α göbekli β dendritleri olduğu ve söz konusu dendritleri η fazı ve α parçacıkları tarafından çevrelendiği ortaya koyulmuştur, Şekil 10 ve 11. Zn-Al alaşımlarında %25 Al oranından sonra alüminyumca zengin α dendritleri belirgin bir şekilde büyümekte ve içyapıda ana matrisi oluşturmaktadır, Şekil 12-14. Dendritlerarası bölgede yer alan çinkoca zengin η fazının hacimsel oranı alüminyum oranı arttıkça giderek azalmakta ve bu faz %85Al oranında kaybolmaktadır, Şekil 15.



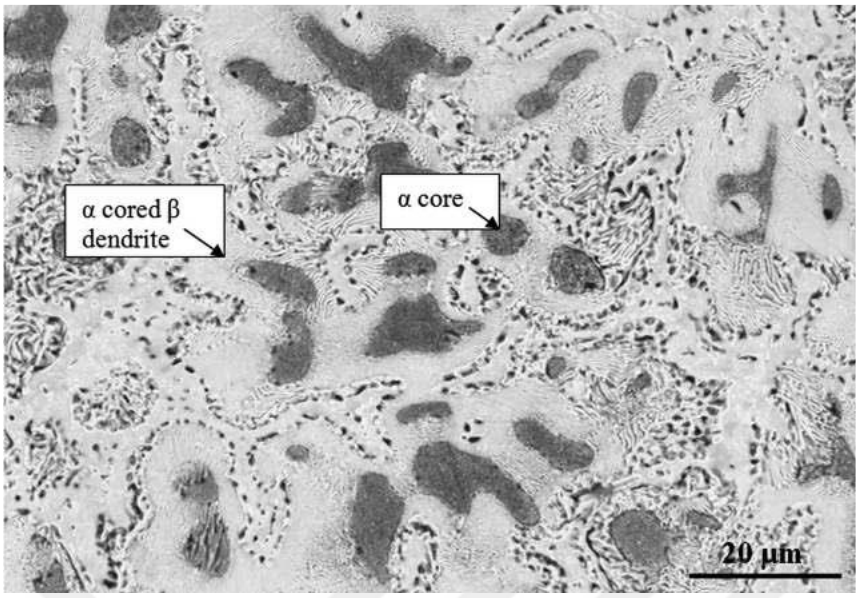
Şekil 7. Zn-5Al alaşımının içyapısını gösteren fotoğraf
Kaynak: Hekimoğlu ve Savaşkan, 2014



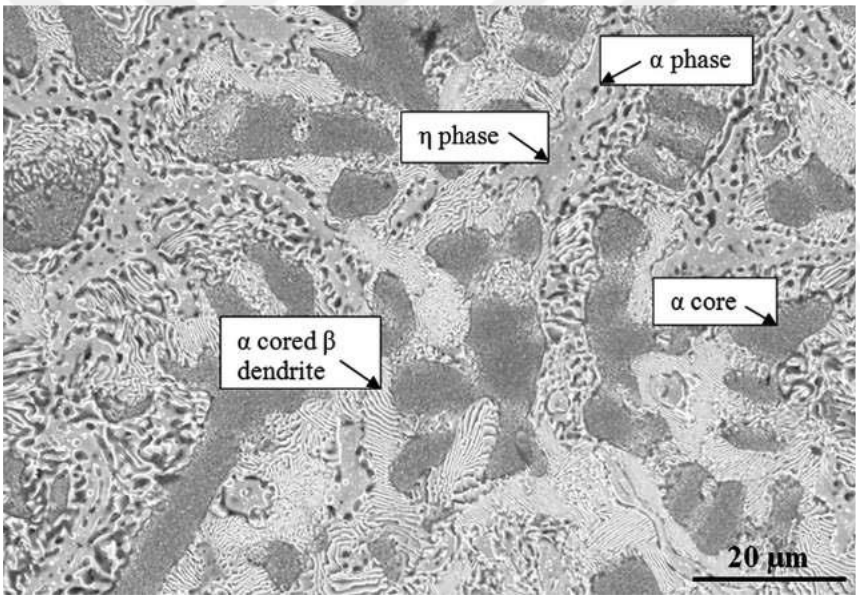
Şekil 8. Zn-10Al alaşımının içyapısını gösteren fotoğraf
Kaynak: Hekimoğlu ve Savaşkan, 2014



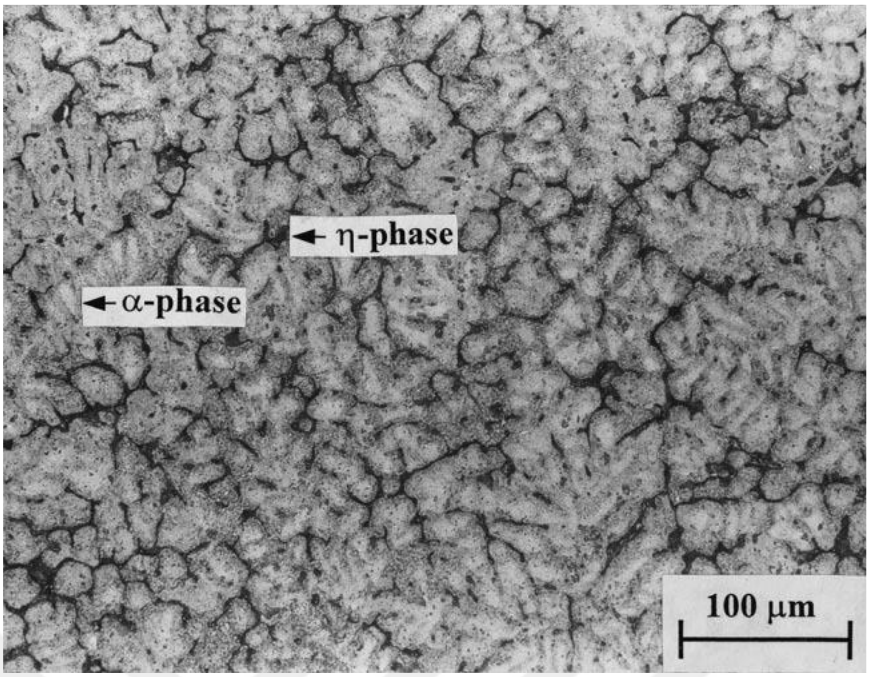
Şekil 9. Zn-15Al alaşımının içyapısını gösteren fotoğraf
Kaynak: Hekimoğlu ve Savaşkan, 2014



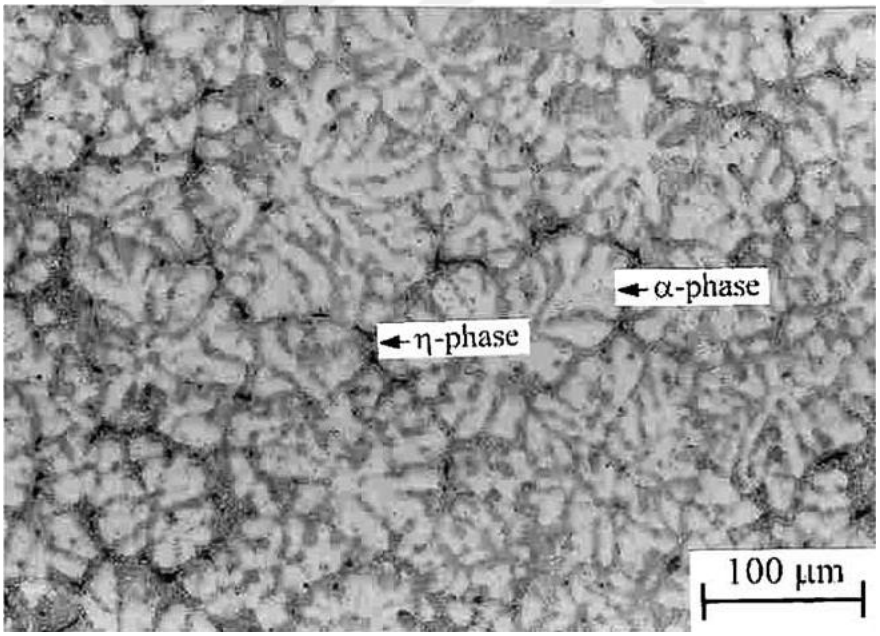
Şekil 10. Zn-20Al alaşımının içyapısını gösteren fotoğraf
Kaynak: Hekimoğlu ve Savaşkan, 2014



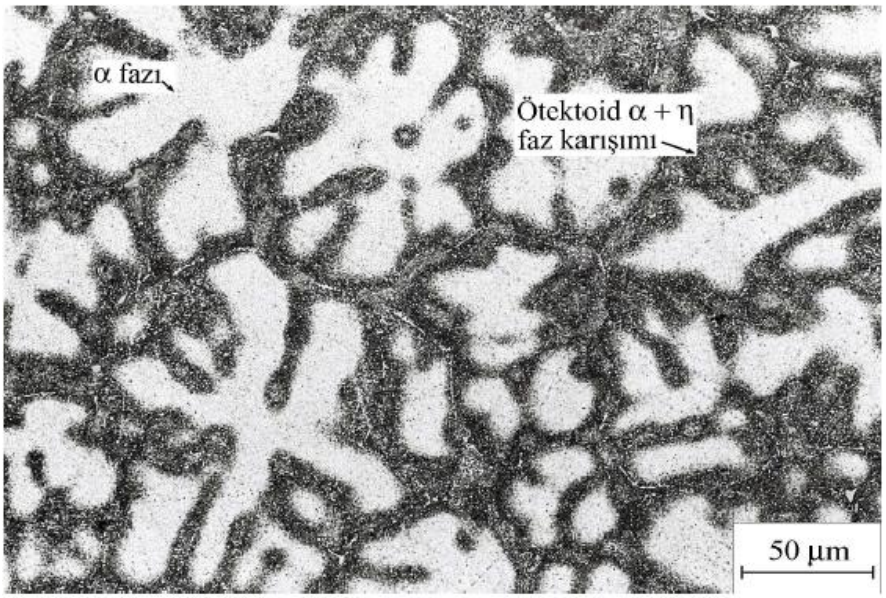
Şekil 11. Zn-25Al alaşımının içyapısını gösteren fotoğraf
Kaynak: Hekimoğlu ve Savaşkan, 2014



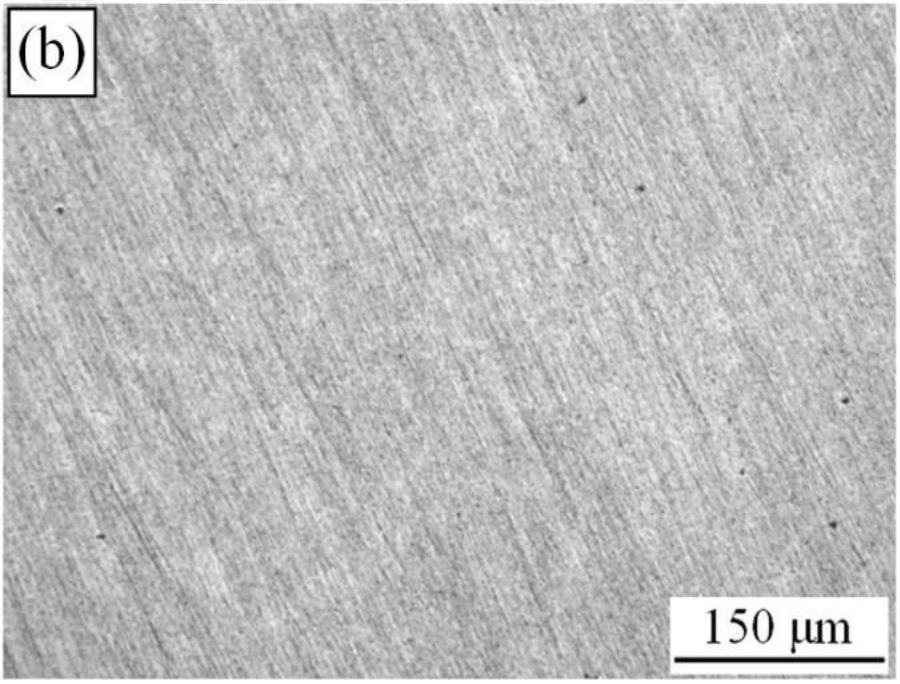
Şekil 12. Zn-27Al alaşımının içyapısını gösteren fotoğraf
Kaynak: Savaşkan v.d., 2003



Şekil 13. Zn-40Al alaşımının içyapısını gösteren fotoğraf
Kaynak: Savaşkan v.d.,2004



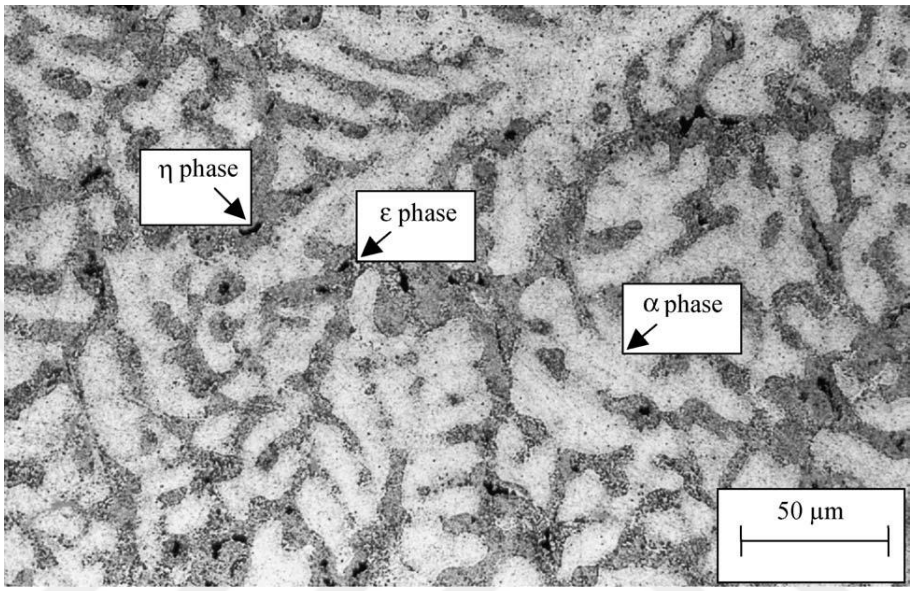
Şekil 14. Zn-60Al (Al-40Zn) alaşımının içyapısını gösteren fotoğraf
Kaynak: Alemdağ, 2007



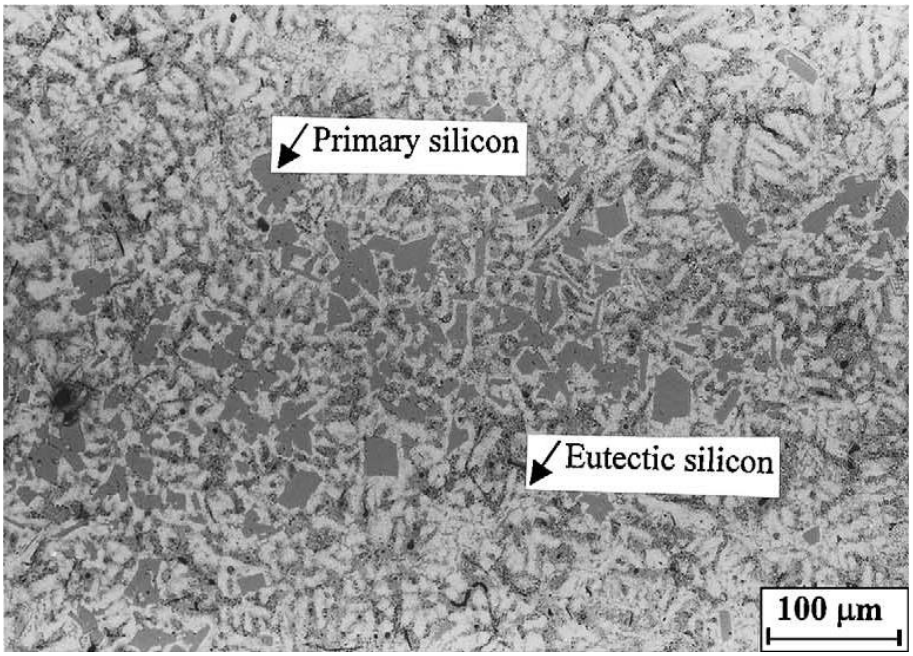
Şekil 15. Zn-85Al (Al-15Zn) alaşımının içyapısını gösteren fotoğraf
Kaynak: Hekimoğlu ve Turan, 2019

İkili Zn-Al alaşımlarına mukavemet ve tribolojik özellikleri artırmak amacıyla en yaygın olarak ilave edilen alaşım elementleri bakır ve silisyumdur. Düşük oranlarda bakır ilaveleri Zn-Al alaşımlarının içyapısını oluşturan fazlar içerisinde çözünürken kütlece %2'den fazla ilave edilmesi durumunda alaşımın içyapısında dendiritler arası bölgelerde bakırca zengin ε($CuZn_4$) fazının oluşmasına yol açmaktadır (Savaşkan v.d.,

2004; Savaşkan ve Bican 2005). Silisyum ise bu alaşımların içyapısında çözünmemekte veya herhangi bir bileşik oluşturmamakta, ötektik veya primer silisyum parçacıkları olarak alaşımın içyapısında rastgele dağılım sergilemektedir (Savaşkan ve Aydıner, 2004). Örnek olarak sırasıyla bakır ve silisyumun içeren Zn-40Al alaşımının içyapısını gösteren fotoğraflar Şekil 16 ve 17'de verilmektedir.



Şekil 16. Zn-40Al-2Cu alaşımının içyapısını gösteren fotoğraf
Kaynak: Savaşkan ve Bican, 2005



Şekil 17. Zn-40Al-4Si alaşımının içyapısını gösteren fotoğraf
Kaynak: Savaşkan ve Aydıner, 2004

1.1.2. Alüminyum-Çinko Esaslı Alaşımların Mekanik Özellikleri

İkili çinko-alüminyum alaşımları içerdikleri alüminyum oranına göre farklı sertlik ve mukavemet değerleri sergilemektedir. Alüminyum oranı arttıkça bu değerler artmaktadır (Hekimoğlu ve Savaşkan, 2014; Savaşkan v.d., 2009). İkili çinko-alüminyum alaşımlarının sertlik ve mukavemet değerleri alaşım elementi ilavesi ve/veya ısıl işlem uygulamalarıyla artırılabilmektedir (Skanazi v.d., 1983; Lee v.d., 1987; Delneuville, 1985; Prasad v.d., 2004; Savaşkan ve Murphy, 1986; Prasad v.d., 1997; Jovanoviç v.d., 2007). Bu alaşımlara sertlik ve mukavemet artırma amacıyla en çok katılan elementlerin başında bakır, silisyum, magnezyum, mangan ve nikel gelmesine rağmen son yıllarda alaşım elementi ilavesiyle sertlik ve mukavemet artırma konusunda yapılan çalışmalarda bakır ve silisyum katkıları üzerine yoğunlaşıldığı görülmektedir (Savaşkan ve Hekimoğlu, 2014, 2016; Savaşkan v.d., 2003, 2004; Savaşkan ve Bican, 2005). Bakır elementi katı çözelti sertleşmesi mekanizmasına ve ε ($CuZn_4$) ile θ ($CuAl_2$) gibi sert fazların oluşumuna yol açarak, silisyum elementi ise sertliğinin yüksek olmasının yanı sıra ve dispersiyon sertleşmesine de neden olarak çinko-alüminyum alaşımlarında sertlik ve/veya mukavemet artışına yol açmaktadır (Hekimoğlu ve Savaşkan, 2016; Savaşkan v.d., 2003, 2004; Savaşkan ve Aydıner, 2004). Literatürdeki bu çalışmalar bakır ve silisyumun %2-3 oranlarında katılması durumunda en fazla mukavemet artışına yol açtığını, bu oranlardan fazla katılması durumunda ise çekme mukavemeti değerlerini azalttığını ortaya koymuştur. Zn-Al alaşımlarında fazla bakır ve silisyum ilavesi nedeniyle oluşan mukavemet azalmasının ε, θ ve Si gibi sert ve gevrek fazların alaşımları gevrekleştirmesi nedeniyle ortaya çıktığı ifade edilmektedir (Savaşkan v.d., 2003, 2004; Savaşkan ve Aydiner, 2004).

Çinko-alüminyum alaşımlarında mukavemet artırma amacıyla uygulanan ısıl işlemlerin başında T6 ısıl işlemi gelmektedir. Bu ısıl işlem uygun sıcaklıklarda alaşımı çözündürdükten sonra su verme ve su verme sonrası alaşıma özel olarak belirlenen sıcaklıklarda uygulanan yapay yaşlandırma aşamalarından oluşmaktadır (Savaşkan ve Hekimoğlu, 2015; Savaşkan v.d., 2021). T6 ısıl işlemi uygulandığı alaşımın dendritik yapısını ortadan kaldırmakta ve taneli bir yapının oluşmasına yol açmaktadır (Savaşkan ve Hekimoğlu, 2015; Savaşkan v.d., 2021). Bu işlemden istenen sonucun alınması için çözündürme sıcaklığının, çözündürme süresinin ve yaşlandırma zamanının hassas bir şekilde belirlenmesi gerekmektedir.

Çinko-alüminyum esaslı alaşımlara, döküm sonucunda ortaya çıkan iç gerilmeleri gidermek ve kararsız fazların kararlı hale getirilmesi amacıyla T5 ısıl işlemi uygulanmaktadır. Bu ısıl işlem söz konusu alaşımları dönüşüm sıcaklığının altında oda sıcaklığının üzerinde olan bir sıcaklıkta genellikle 100-200 ℃ sıcaklık aralığında belli bir süre tavlama suretiyle gerçekleştirilmektedir (Savaşkan v.d., 2021; Bican ve Savaşkan, 2020;). T5 ısıl işlemi alaşımın dendritik yapısını pek fazla etkilememekte ve boyutsal kararlılığını sağlamakta ancak sertlik ve mukavemet özelliklerinde bir miktar azalmaya yol açabilmektedir (Savaşkan v.d., 2021; Bican ve Savaşkan, 2020).

Çinko esaslı alaşımların mukavemetlerinin geliştirilmesine yönelik çalışmalar incelendiğinde, tane inceltme mekanizması yoluyla mukavemet geliştirme çalışmalarının bir başka deyişle bor, titanyum, stronsiyum vb. tane inceltici elementlerin bu elementlerin mekanik özelliklerine etkilerinin yeterince incelenmediği ve yapılan çalışmaların çok sınırlı olduğu görülmektedir. Bor katkılarının Al-30Zn, titanyum katkılarının Al-25Zn, Al-25Zn-3Cu, Al-25Zn-3Cu-3Si ve Al-40Al-2Cu ve stronsiyum katkısının Zn-27Al-3Si (Hekimoğlu ve Çalış, 2020; Mao v.d., 2015; Hekimoğlu v.d., 2019; Mikuszewski v.d., 2016) alaşımlarının yapısal ve mekanik özelliklerine etkilerinin incelendiği bazı çalışmalarda söz konusu katkıların tane incelmesine yol açarak Zn-Al alaşımlarının mukavemet özelliklerini önemli ölçüde iyileştirdiği ortaya koyulmuştur.

Ticari bazı çinko-alüminyum esaslı alaşımlar ile bu alaşımların alternatif olarak üretildiği bazı geleneksel malzemelerin (SAE-40 pirinci, SAE 660 bronzu ve kır dökme demir) sertlik, çekme dayanımı, kopma uzaması, darbe dayanımı, yorulma dayanımı ve Young modülü değerleri Tablo 2'de verilmektedir (Savaşkan, 1980; Goodwin ve Ponikvar, 1989; Skanazi v.d., 1983; Gervais v.d., 1980; Lyon, 1986; Calayag ve Ferres, 1983; Altorfer, 1982). Bu tablodan da görüleceği gibi çinko-alüminyum esaslı alaşımların çekme mukavemeti değerleri 440 MPa değerine kadar çıkabilirken, belirtilen geleneksel malzemelerin çekme mukavemeti değeri 270 MPa ile sınırlı kalmaktadır. Ticari birçok Zn-Al esaslı alaşım olmasına rağmen tane inceltici element içeren Zn-Al esaslı alaşımların henüz ticarileşmediği veya yaygınlaşmadığı görülmektedir. Bu gözlem bu konuda daha fazla araştırma geliştirme çalışması yapılması gerekliliğini ortaya koymaktadır.

Tablo 2. Çinko esaslı bazı ticari alaşımlar ile geleneksel yatak malzemelerinin mekanik özellileri

Alaşım	Mekanik Özellikler					
	Çekme dayanımı (MPa)	**Kopma uzaması (%)**	**Sertlik (BSD)**	**Yorulma dayanımı (MPa)**	**Darbe dayanımı (MPa)**	**Young modülü (psix10^6)**
Zamak 2	359	7	100	59	48	12,4
Zamak 3	283	10	82	48	58	12,4
Zamak 5	331	7	91	56	65	12,4
Zamak 7	283	13	80	47	58	12,4
ZA-8	221-255	1-2	80-90	103	20	12,4
ZA-12	310-345	1-3	90-105	103	25	12,0
ZA-27	400-440	3-6	110-120	117	47	11,3
SAE-40 pirinci	255	30	60	76	15	12,0
SAE 660 bronzu	270	11	81	90	15	11,5
Kır dökme demir	214	10	210	97	54	13-16,4

Kaynak: Hekimoğlu, 2013

1.1.3. Alüminyum-Çinko Esaslı Alaşımların Tribolojik Özellikleri

Çinko-alüminyum esaslı alaşımların dökme demir, bronz ve pirinç gibi malzemelere göre daha üstün tribolojik özellikler sergiledikleri ortaya koyulmuştur (Delneuville, 1985; Lyon, 1986; Ünlü v.d., 2009; Calayag ve Ferres, 1983; Savaşkan ve Azaklı, 2008; Savaşkan ve Alemdağ, 2008; Hekimoğlu ve Savaşkan, 2018). Çinko esaslı alaşımların bu üstünlüklerinin çok fazlı bir yapıya sahip olmaları, çalışma esnasında yüzeylerinde çinko ve alüminyum oksit tabakaları oluşması ve oluşan bu tabakaların kaymayı ve sürtünmeyi kolaylaştırmasından kaynaklandığı ortaya koyulmuştur (Hekimoğlu ve Savaşkan, 2018; Prasad, 1997; Murphy ve Savaşkan, 1984). Zn-Al esaslı alaşımların mikroyapısında bulunan α, ε, T′ ve θ gibi sertliği yüksek fazlar yük taşıma görevi yapmakta, η fazı ise sıkı düzenli hegzagonal kafes yapısının özelliği sayesinde katı yağlayıcı gibi görev yapmakta ve kaymayı kolaylaştırmaktadır (Hekimoğlu ve Savaşkan, 2018; Prasad, 1997; Murphy ve Savaşkan 1984). Çalışma anında sürtünme nedeniyle yüzeylerinde oluşan sert alüminyum oksitler de yük taşımaya yardımcı olurken, çinko oksitler özellikle sınır ve karışık sürtünme devrelerinde kaymayı kolaylaştırmaktadır (Mondal v.d., 2005; Savaşkan v.d., 2002; Murphy ve Savaşkan, 1984). Yapılan çalışmalar Zn-Al esaslı alaşımların aşınma dirençlerinin sertlik ve mukavemet değerleriyle ilişkili olduğu, özellikle mukavemet değerleri arttıkça aşınma dirençlerinin de arttığını ortaya koymuştur (Savaşkan ve Hekimoğlu, 2016; Zhu v.d., 1995; Alemdağ ve Savaşkan, 2008).

1.2. Literatür Özeti

Zn-Al esaslı alaşımlar 1920'li yıllardan beri endüstriyel uygulamalarda kullanılmaktadır. Bu alaşımlar başlangıçta dekoratif amaçlı uygulamalarda kullanılmış zaman geçtikçe elektrik, elektronik, otomotiv ve genel amaçlı makine imalatı sektörlerinde de kullanılmaya başlanılmıştır. İkinci Dünya Savaşı yıllarında Alman bilim insanlarının bu alaşımlar üzerine yaptığı yoğun araştırma geliştirme çalışmaları sonucunda bazı Zn-Al esaslı alaşımların beyaz metal, bronz ve dökme demir gibi geleneksel yatak malzemelerine alternatif olabileceği yönünde veriler ortaya koyulmuştur. Bunun üzerine bu alaşımların yatak malzemesi olarak geliştirilmesine ve kullanılması yönelik araştırma çalışmaları giderek artmıştır. Bu çalışmalar sonucunda farklı oranlarda alüminyum ve değişik oranlarda alaşım elementleri içeren üçlü ve

dörtlü Zn-Al esaslı alaşımlar geliştirilmiş ve geliştirilen bu yeni alaşımların geleneksel yatak malzemelerine göre üretimlerinin kolay ve ekonomik olması, özgül mukavemetlerinin (mukavemet/yoğunluk) ve aşınmaya karşı dirençlerinin yüksek olması, sürtünme katsayılarının düşük olması, çalışma ortamındaki sert parçacıkları yutma gibi avantajlara sahip oldukları ortaya konulmuştur. Zn-Al esaslı alaşımların bazı uygulamalar için yeterli olmayan mukavemetlerinin geliştirilmesi ve/veya uygulama performanslarının artırılmasına yönelik çalışmalar günümüzde yoğun bir şekilde sürdürülmektedir. Bu çalışmalarda Zn-Al esaslı alaşımların mukavemet değerlerinin ve dolayısıyla performanslarının alaşım elementi ilavesi, ısıl işlem ve tane inceltme mekanizmaları gibi mukavemet artırma yöntemleri ile artırılabileceği rapor edilmiştir. Bakır ve silisyum Zn-Al esaslı alaşımlarda mukavemet ve tribolojik özelliklerin geliştirilmesi için ilave edilen başlıca katkı elementleri arasında yer almaktadır. Söz konusu alaşımlarda sertlik ve mukavemet değerlerinin artırılması için uygulanan ısıl işlemlerin başında ise T6 ısıl işlemi gelmektedir. Zn-Al esaslı alaşımlarda özellikle kullanım sırasında ortaya çıkabilecek boyutsal kararsızlık probleminin ise T5 ısıl işlemi ile giderilebileceği ortaya koyulmuştur. Zn-40Al-2Cu alaşımı son yıllarda geliştirilen üstün özelliklere sahip yeni bir Zn-Al esaslı alaşımdır. Bu alaşım üzerine pek çok çalışma olmasına rağmen, alüminyum içeren alaşımlarda tane inceltme yoluyla mukavemeti artırdığı bilinen stronsiyumun Zn-40Al-2Cu alaşımının yapısal, mekanik ve tribolojik özelliklerine etkisinin incelenerek ortaya koyulduğu bir çalışma henüz yapılmamıştır. Bu nedenle bu çalışmada %0,1 oranında stronsiyum içeren Zn-40Al-2Cu-0,1Sr alaşımı üretilerek stronsiyum katkısının Zn-40Al-2Cu alaşımının yapısal, mekanik ve tribolojik özelliklerine etkisinin incelenmesi ve kararlılığı ve mukavemeti artırma amacıyla uygulan T5 ve T6 ısıl işlemlerinin söz konusu malzeme özelliklerine etkilerinin detaylı bir şekilde ortaya konulması amaçlanmıştır.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. Materyal

Bu çalışmada Zn-40Al-2Cu ve Zn-40Al-2Cu-0,1Sr alaşımları üretilerek incelenmiştir. Üretilen alaşımların nominal kimyasal bileşimleri Tablo 3'de verilmiştir.

Tablo 3. İncelenen alaşımların nominal kimyasal bileşimleri

Alaşım	Kimyasal bileşim (wt. %)			
	Al	Cu	Sr	Zn
Zn-40Al-2Cu	40	2	-	Kalan
Zn-40Al-2Cu-0,1Sr	40	2	0,1	Kalan

2.2. Yöntem

Çalışma konusu Zn-40Al-2Cu ve Zn-40Al-2Cu-0,1Sr alaşımları indüksiyonlu ergitme ocağında ergitme ve kokil kalıba döküm yöntemiyle üretildi. Alaşımların üretiminde %99,9 saflıkta çinko ve %99,8 saflıkta alüminyum ile Al-50Cu ve Al-15Sr master alaşımları kullanıldı. Alaşımları oluşturan alaşım elementleri/bileşenleri kütleleri ölçüldükten sonra Şekil 18'de fotoğrafı verilen 50 kW gücüne sahip SiC potalı bir indüksiyon ocağına yerleştirildi ve bu ocakta orta frekanslarda ergitildi. Ergimiş durumdaki sıvı metal karıştırıldıktan sonra yaklaşık olarak 650 °C döküm sıcaklığından Şekil 19'da teknik resmi verilen ve oda sıcaklığında tutulan SAE 8620 çeliğinden üretilmiş olan bir kokil kalıba dökülerek katılaştırıldı.

Üretilen alaşımlar hem dökülmüş hem de T5 ve T6 ısıl işlemleri uygulanmış durumlarda incelendi. T5 ısıl işlemi döküm sonrasında oda sıcaklığına soğumuş alaşımı 150 °C sıcaklıkta 100 saat yapay yaşlandırma suretiyle uygulandı. T6 ısıl işlemi ise alaşım kütlesini 375 °C sıcaklıkta 36 saat tutarak çözündürme ve çözündürme sonrası su verdikten sonra 180 °C sıcaklıkta 2 dakika yapay yaşlandırma suretiyle uygulandı.



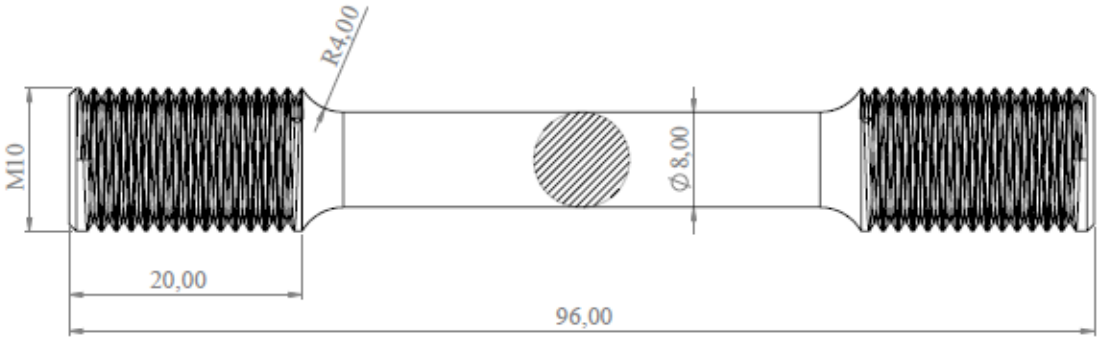
Şekil 18. Alaşımların üretiminde kullanılan ergitme ocağının fotoğrafı



Şekil 19. Alaşımların üretiminde kullanılan çelik (kokil) kalıbın fotoğrafı

2.3. Alaşımların Yapısal ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi

Üretilen alaşımların içyapı ve mekanik özellikleri alaşım külçelerinden talaşlı işlemler ile hazırlanan numuneler kullanılarak incelendi. İçyapı incelemeleri ve sertlik ölçümleri Ø15×10 mm boyutlarında silindirik numuneler üzerinde gerçekleştirildi. İçyapı incelemeleri için numuneler standart metalografik yöntemler ile hazırlandı. Bu kapsamda numunelerin yüzeyleri sırasıyla 300, 600, 1200 ve 2000 numaralı zımparalar ve 9 ile 3 µm'lik elmas, 0,05 µm'lik SiO_2 süspansiyonlar ile parlatıldı. Parlatılan numuneler %5 oranında nitrik asit içeren nitrik asit+etil alkol ayıracı ile dağlandı. Dağlanmış durumdaki numuneler hem optik hem de elektron mikroskobunda incelendi ve alaşımın içyapısı görüntülendi. Alaşımların sertliği Brinell sertlik ölüm yöntemi ile belirlendi. Sertlik ölçümleri 62,5 kg×f yük altında 2,5 mm çapında bilye uç kullanılarak gerçekleştirildi. Numuneler üzerinde en az beş ölçüm gerçekleştirildi ve bu ölçümlerin ortalaması alınmak suretiyle alaşım örneklerinin sertliği belirlendi. Çekme deneyleri teknik resmi Şekil 20'de verilen numuneler kullanılarak üniversal bir çekme deney makinesinde 10^{-3} s^{-1}'lik deformasyon hızında hem dökülmüş hem de ısıl işlem görmüş alaşım örnekleri üzerinde gerçekleştirildi. Bu deneylerde en az üçer numune kullanıldı. Ölçüm sonuçlarının ortalaması alınarak örneklerin çekme dayanımı ve kopma uzaması değerleri belirlendi.

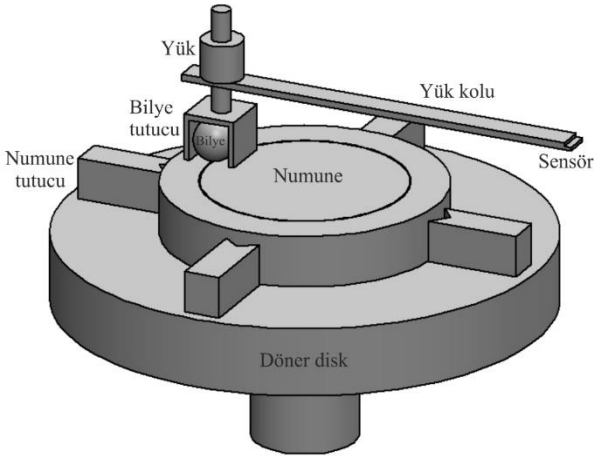


Şekil 20. Çekme deneyi numunesinin teknik resmi

2.4. Alaşımların Sürtünme ve Aşınma Özelliklerinin İncelenmesi

Üretilen alaşımların hem dökülmüş hem de ısıl işlem uygulanmış durumdaki örneklerinin sürtünme ve aşınma deneyleri şematik resmi Şekil 21'de verilen bilye-disk esaslı bir deney düzeneğinde gerçekleştirildi. Bu deney düzeneği hakkında literatürde (Alemdağ ve Beder, 2019, 2021; Alemdağ v.d., 2021) detaylı bilgiler mevcuttur. Söz konusu düzeneğin çalışma prensibi aşındırıcı bir bilyenin ayarlanabilir

devirlerde dönebilen bir disk üzerine yerleştirilen numuneyi aşındırması esasına dayanmaktadır. Sürtünme aşınma deneylerinde aşındırıcı olarak 6 mm çap ve 58-62 RSD sertlik değerlerine sahip 100Cr6 çeliğinden imal edilmiş bir bilye kullanıldı. Söz konusu deneylerde yükleme düzenekteki yükleme koluna ağırlık asılarak gerçekleştirildi. Deneyler sırasında bir sensör yardımıyla toplanıp kaydedilen sürtünme kuvvetleri bir yazılım tarafından işlenip, uygulanan normal yüke bölünerek incelenen alaşımların sürtünme katsayıları hesaplandı. Bu deneyler Ø17×5 mm boyutlarındaki numuneler ile gerçekleştirildi. Tornalama yöntemiyle hazırlanan numunelerin yüzeyleri deneylerden önce 1200 numaralı zımpara kullanılarak parlatıldı. Sürtünme-aşınma testleri yağsız ortam, 5 N' luk sabit yük, 0,15 m/s' lik kayma hızı ve 1000 m'lik kayma mesafesi parametrelerinde gerçekleştirildi. Bu test parametreleri literatürdeki benzer çalışmalar (Hekimoğlu ve Çalış, 2020, 2021; Hekimoğlu v.d., 2020) dikkate alınarak belirlendi. Numuneler testlerden önce ve sonra ultrasonik bir temizleyicide sırasıyla trikloretilen (C_2HCl_3) ve alkol-aseton karışımı banyolarında temizlendi. Temizlenen numuneler sıcak hava üflenerek kurutuldu ve kütleleri 0,01 mg' lık hassasiyete sahip bir terazi ile tartıldı. Deneylere başlamadan önce elde edilen ölçüm değerleri ile deney sonrası elde edilen değerler arasındaki fark numunelerin yoğunluk değerlerine bölünerek aşınma deneylerinde ortaya çıkan hacim kaybı değerleri hesaplandı. Aşınan numune yüzeyleri ve aşınma parçacıkları taramalı elektron mikroskobunda (SEM) incelenerek incelenen alaşımların aşınma karakteristiklerini gösteren fotoğraflar çekildi.

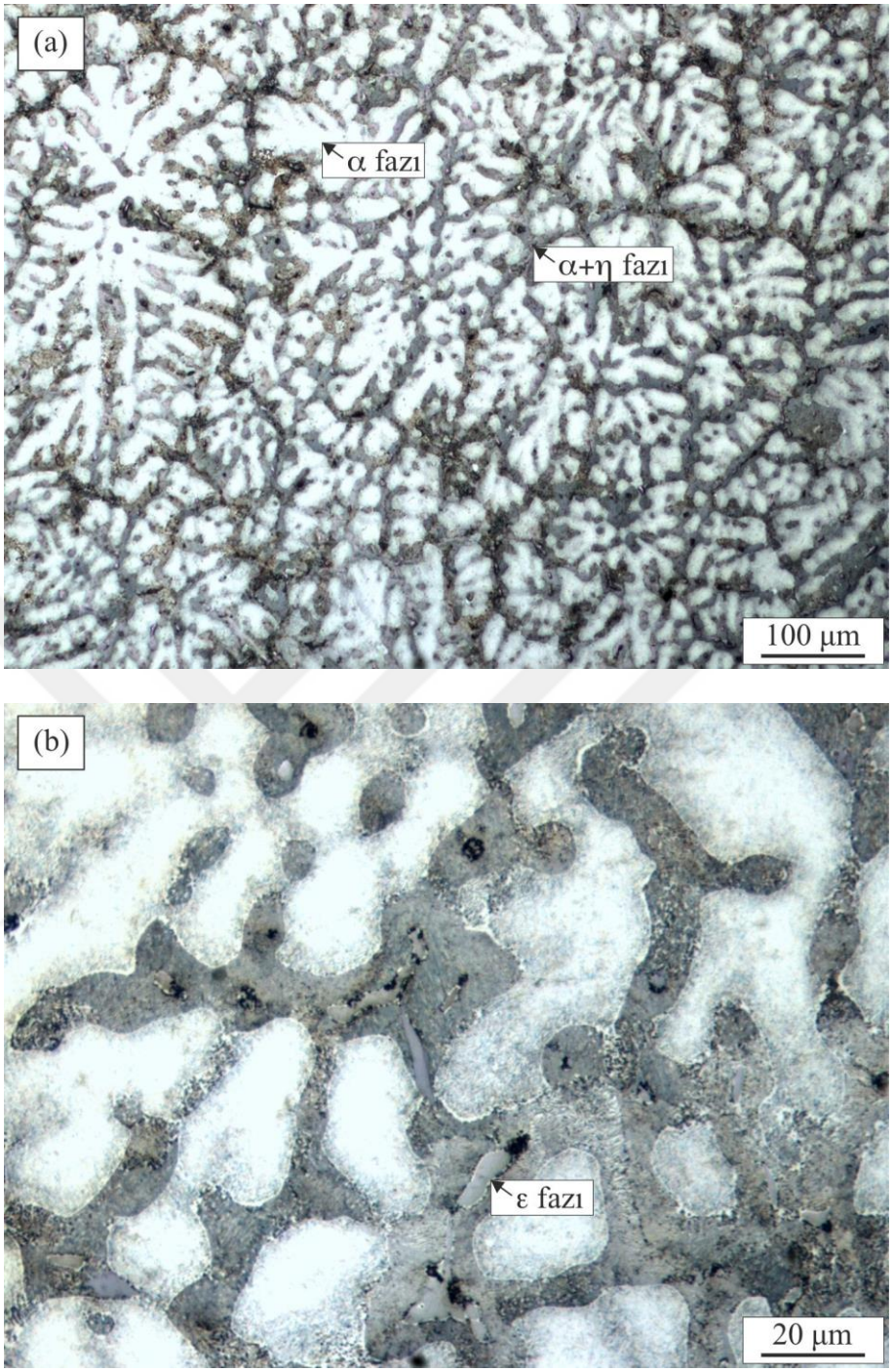


Şekil 21. Sürtünme aşınma deney düzeneğinin şematik resmi

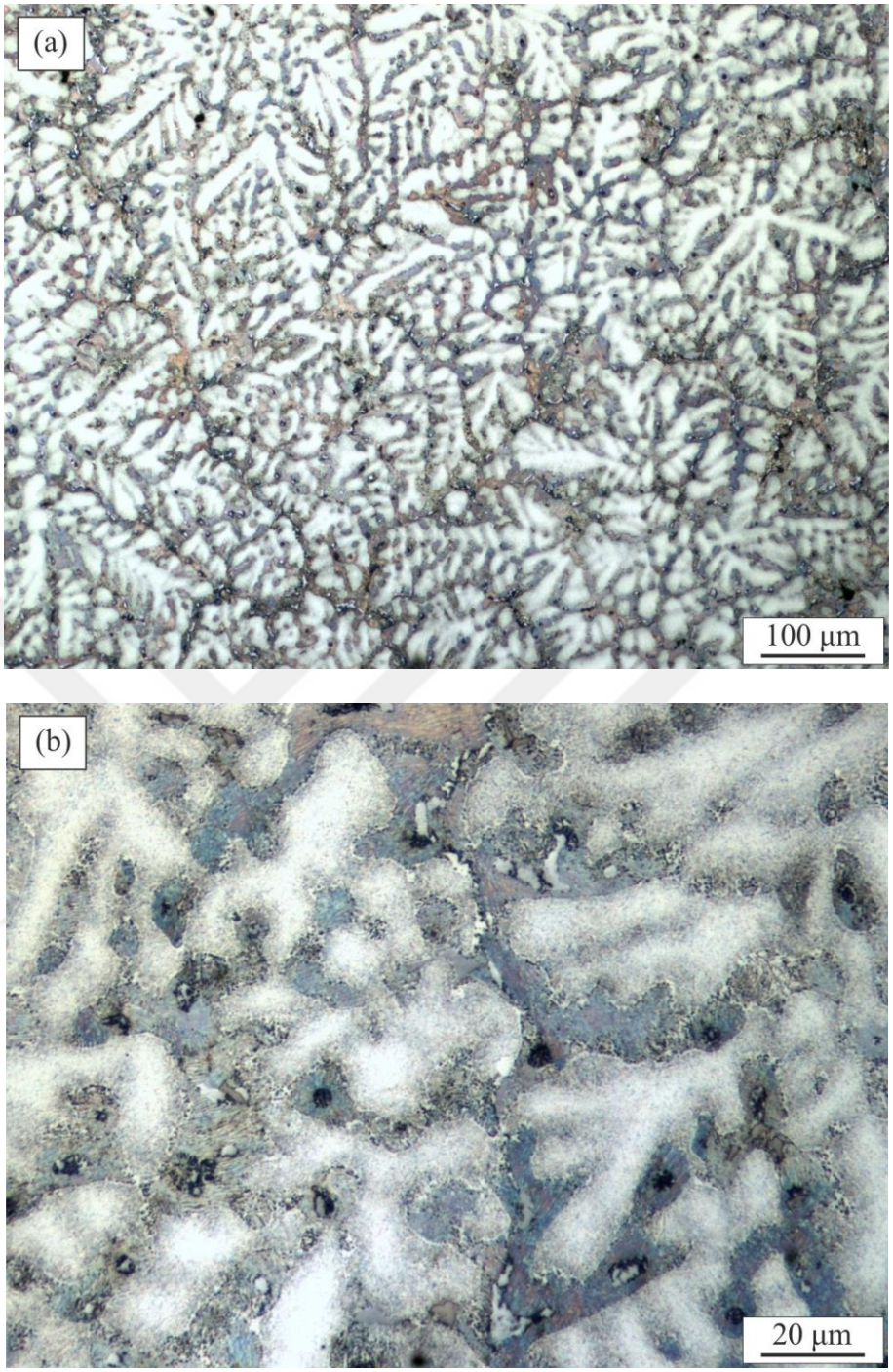
3. BULGULAR

3.1. Alaşımların Yapısal İncelemelerinden Elde Edilen Bulgular

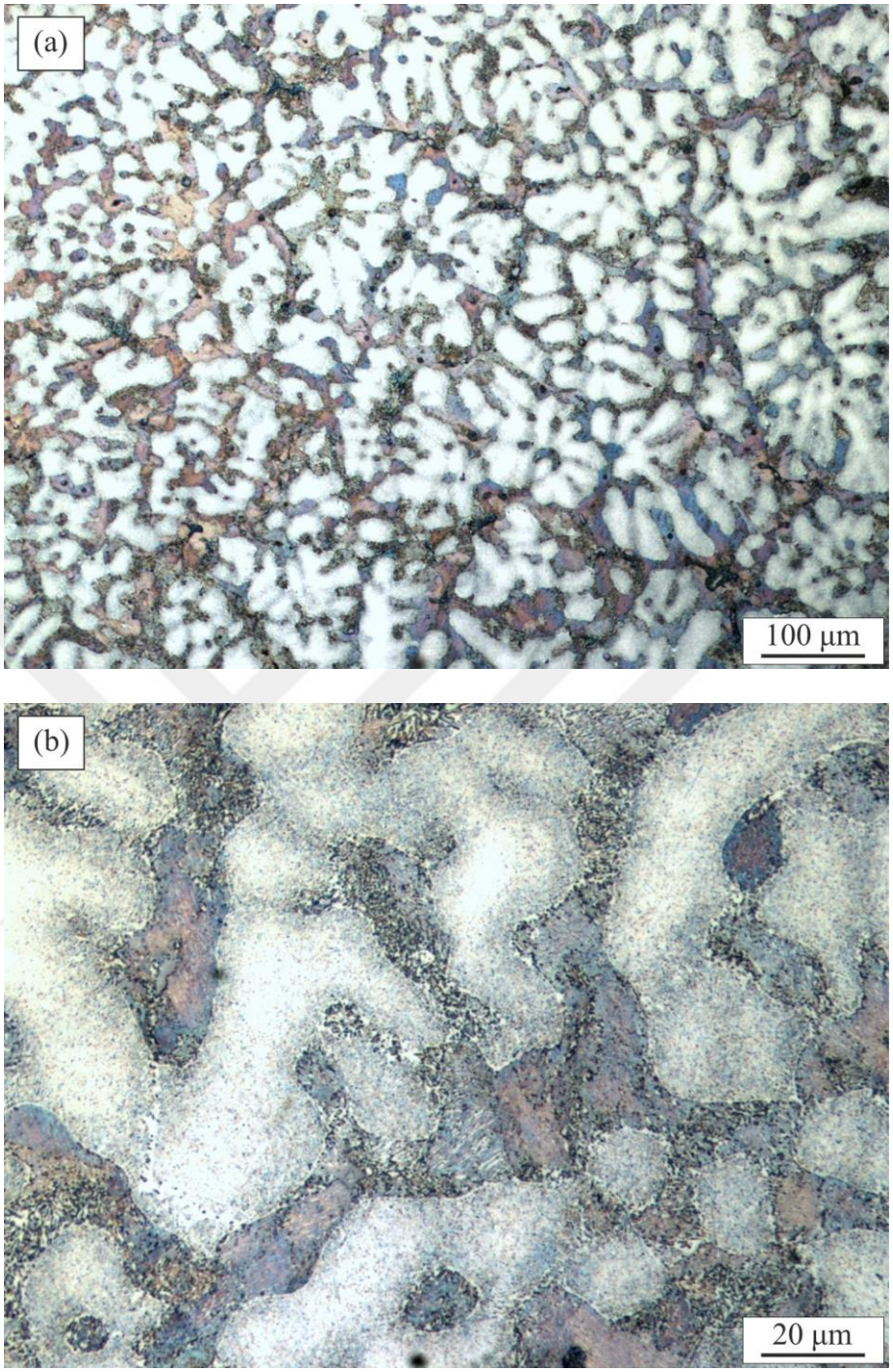
Üretilen alaşımların dökülmüş, T5 ve T6 ısıl işlemleri uygulanmış durumdaki numunelerinin içyapı incelemelerinden elde edilen ışık mikroskobu görüntüleri Şekil 22-27'te verilmektedir. Dökülmüş durumdaki Zn-40Al-2Cu alaşımının içyapısının daha önce yapılan benzer çalışmalarda (Savaşkan v.d., 2022; Bican ve Savaşkan, 2020; Savaşkan v.d., 2004) ortaya koyulduğu gibi alüminyumca zengin α dendritleri ile bu dendritler arasında yer alan ötektoid α+η faz karışımı ve bakırca zengin ε ($CuZn_4$) fazlarından oluşmaktadır, Şekil 22. Bu içyapının oluşumu literatürde detaylı olarak açıklanmıştır (Savaşkan ve Aydıner, 2004; Savaşkan v.d., 2003, 2004; Savaşkan ve Bican, 2005). Zn-40Al-2Cu-0,1Sr alaşımı da Zn-40Al-2Cu alaşımına benzer olarak α dendritleri, α dendritlerini çevreleyen ötektoid α+η faz karışımı ve ε ($CuZn_4$) fazlarından oluşan bir içyapı sergilemiştir, Şekil 23. Ancak Zn-40Al-2Cu-0,1Sr alaşımının içyapısında bulunan dendiritlerin Zn-40Al-2Cu alaşımındakilere göre oldukça daha ince bir yapıda olduğu gözlenmiştir. Üretilen alaşımların T5 ısıl işlemi uygulanmış durumdaki içyapılarını gösteren ışık mikroskobu görüntüleri Şekil 24 ve 25'de verilmiştir. Bu görüntüler T5 ısıl işleminin hem Zn-40Al-2Cu hem de Zn-40Al-2Cu-0,1Sr alaşımının dendritik içyapısı üzerinde belirgin bir değişikliğe neden olmadığını göstermektedir. Üretilen alaşımların T6 ısıl işlemi uygulanmış durumdaki içyapılarını gösteren ışık mikroskobu görüntüleri ise Şekil 26 ve 27'de verilmiştir. Bu fotoğraflar T6 ısıl işleminin alaşımların içyapısının dendritik formdan taneli bir yapıya doğru yönlenme suretiyle değişmesine, dendritler/taneler arası bölgenin genişlemesine ve ikincil dendrit kol mesafelerinin azalmasına veya ikincil dendrit kollarının birleşmesine yol açtığını göstermektedir.



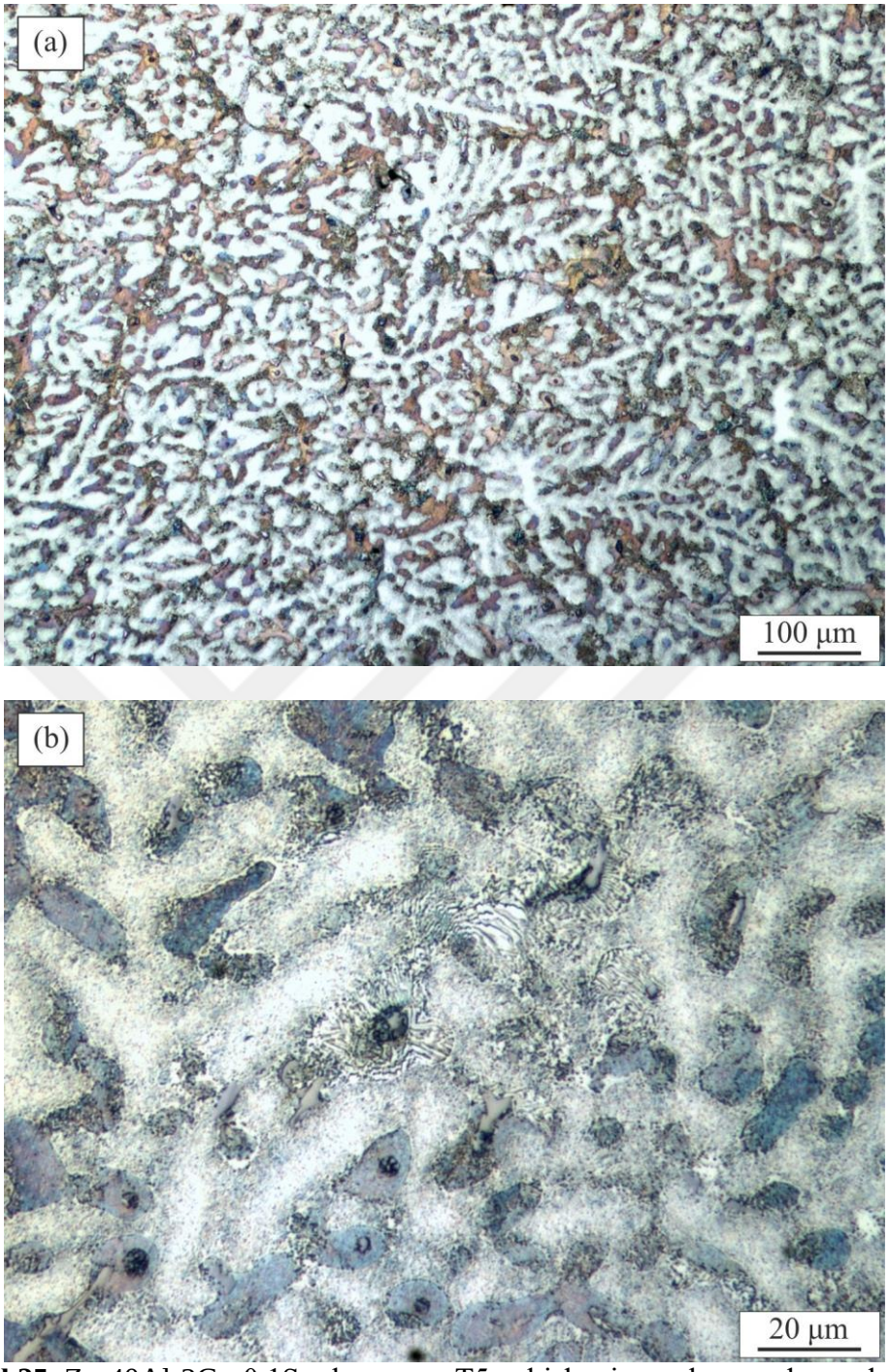
Şekil 22. Zn-40Al-2Cu alaşımının dökülmüş durumdaki a) düşük büyütmede (100X) ve b) yüksek büyütmede (500X) görüntülenen içyapısı



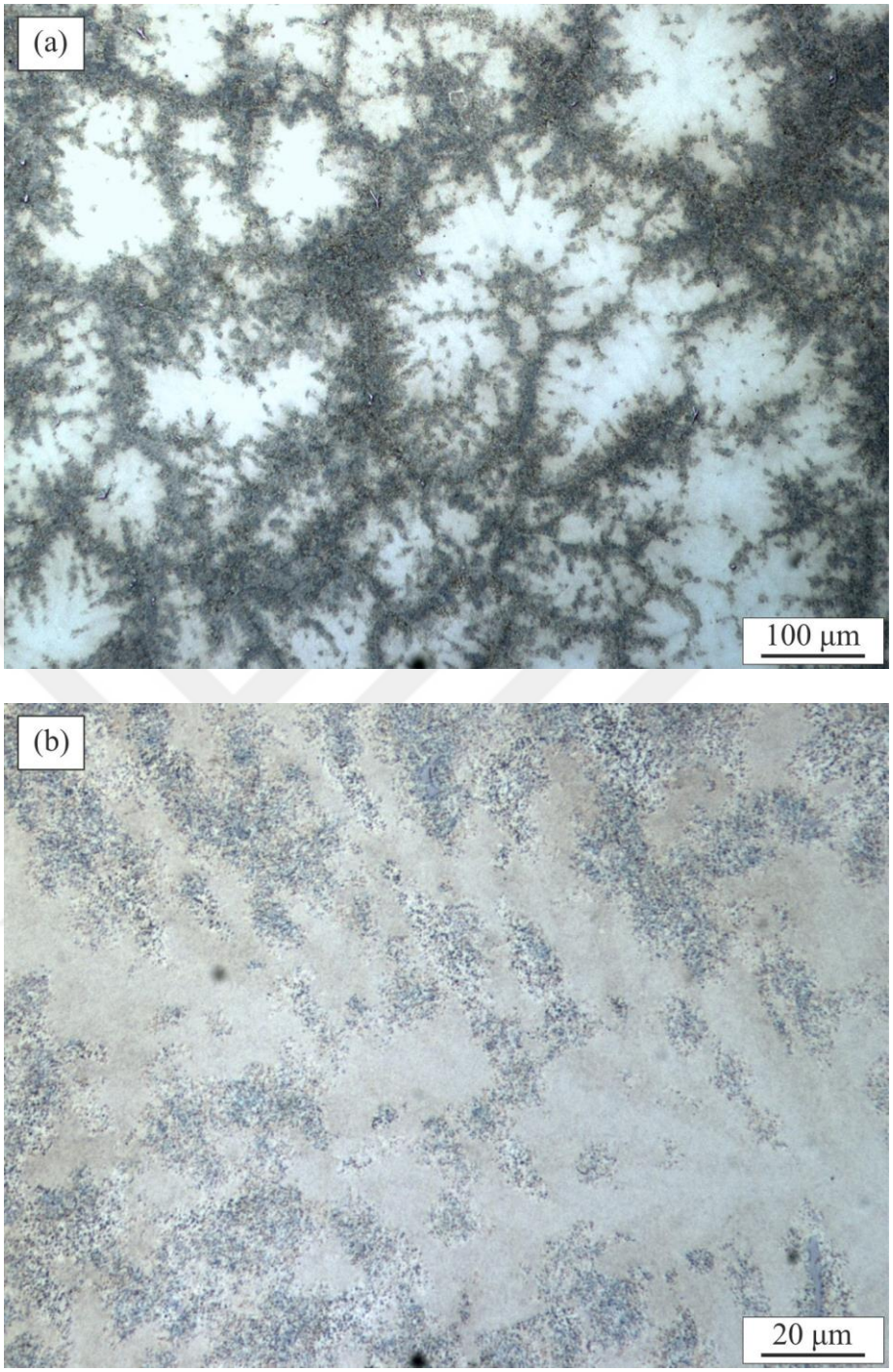
Şekil 23. Zn-40Al-2Cu-0,1Sr alaşımının dökülmüş durumdaki a) düşük büyütmede (100X) b) yüksek büyütmede (500X) görüntülenen içyapısı



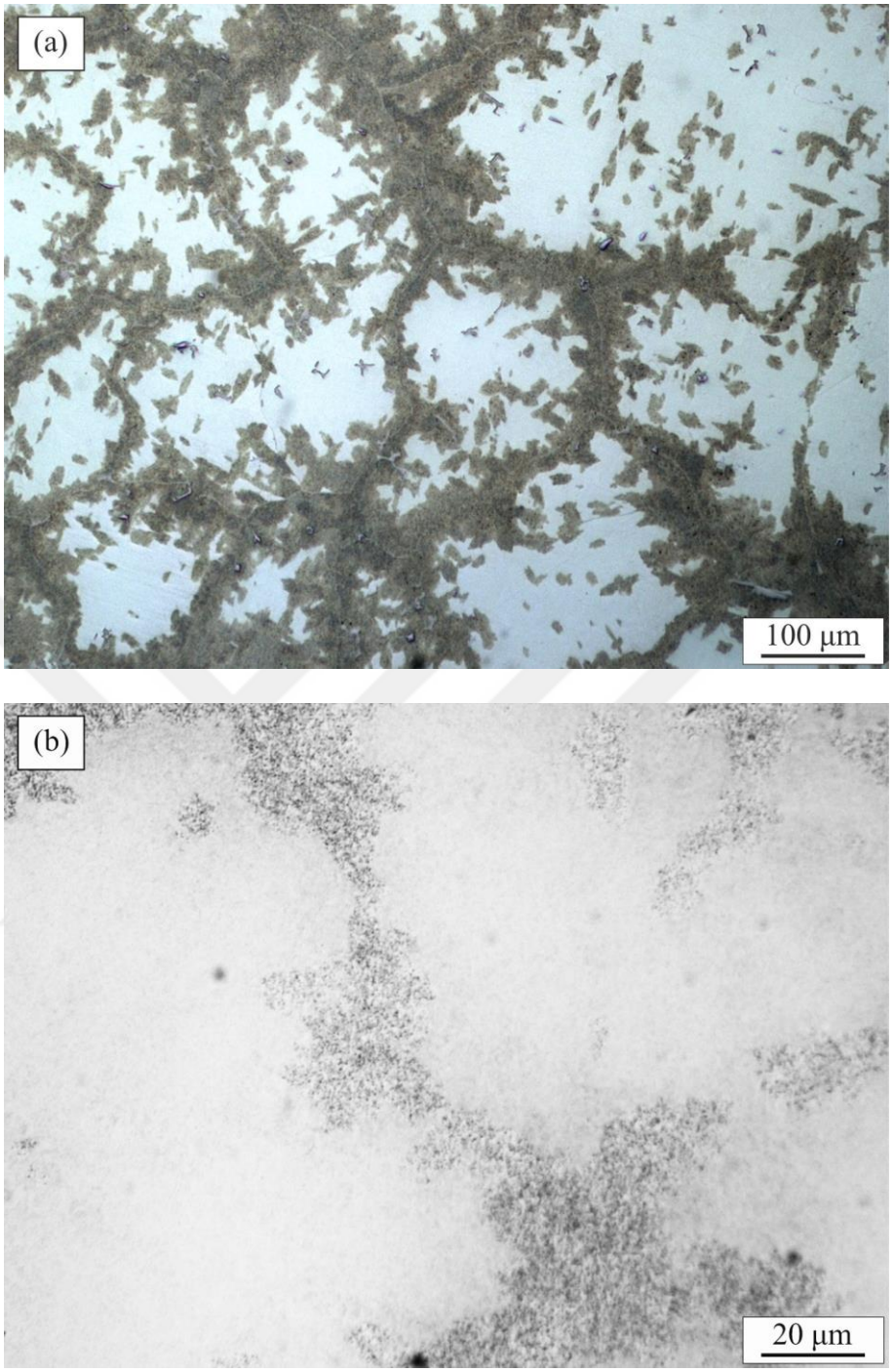
Şekil 24. Zn-40Al-2Cu alaşımının T5 ısıl işlemi uygulanmış durumdaki a) düşük büyütmede (100X) ve b) yüksek büyütmede (500X) görüntülenen içyapısı



Şekil 25. Zn-40Al-2Cu-0,1Sr alaşımının T5 ısıl işlemi uygulanmış durumdaki a) düşük büyütmede (100X) ve b) yüksek büyütmede (500X) görüntülenen içyapısı



Şekil 26. Zn-40Al-2Cu alaşımının T6 ısıl işlemi uygulanmış durumdaki a) düşük büyütmede (100X) ve b) yüksek büyütmede (500X) görüntülenen içyapısı



Şekil 27. Zn-40Al-2Cu-0,1Sr alaşımının T6 ısıl işlemi uygulanmış durumdaki a) düşük büyütmede (100X) ve b) yüksek büyütmede (500X) görüntülenen içyapısı

3.2. Fiziksel ve Mekanik Deneylerden Elde Edilen Bulgular

Bu çalışma kapsamında incelenen alaşımların yoğunluk, sertlik, çekme dayanımı, kopma uzaması değerleri Tablo 4'te verilmiştir. Bu tabloda görüldüğü üzere stronsiyum katkısı ve T5 ile T6 ısıl işlemleri alaşımların yoğunluklarını fazla değiştirmemiştir. Stronsiyum ilavesi ile Zn-40Al-2Cu alaşımının sertliği 2BSD, çekme dayanımı 29 MPa, kopma uzaması ise %1 artmıştır. T5 ısıl işlemi Zn-40Al-2Cu alaşımının sertliğinin 35 BSD, çekme mukavemetinin 62 MPa azalmasına, kopma

uzamasının ise %1 artmasına yol açmıştır. T6 ısıl işlemi ise Zn-40Al-2Cu alaşımının sertliğinin 4 BSD, çekme mukavemetinin 55 MPa artmasına, kopma uzamasının ise %3 azalmasına yol açmıştır. Zn-40Al-2Cu-0,1Sr alaşımına uygulan T5 ısıl işlemi ise bu alaşımın sertliğini 37 MPa, çekme mukavemetini 84 MPa azaltmış, kopma uzamasını %1 artırmıştır. Zn-40Al-2Cu-0,1Sr alaşımına T6 ısıl işlemi uygulanması durumunda sertlik 8 BSD, çekme dayanımı 38 MPa artmış, kopma uzaması % 6 azalmıştır.

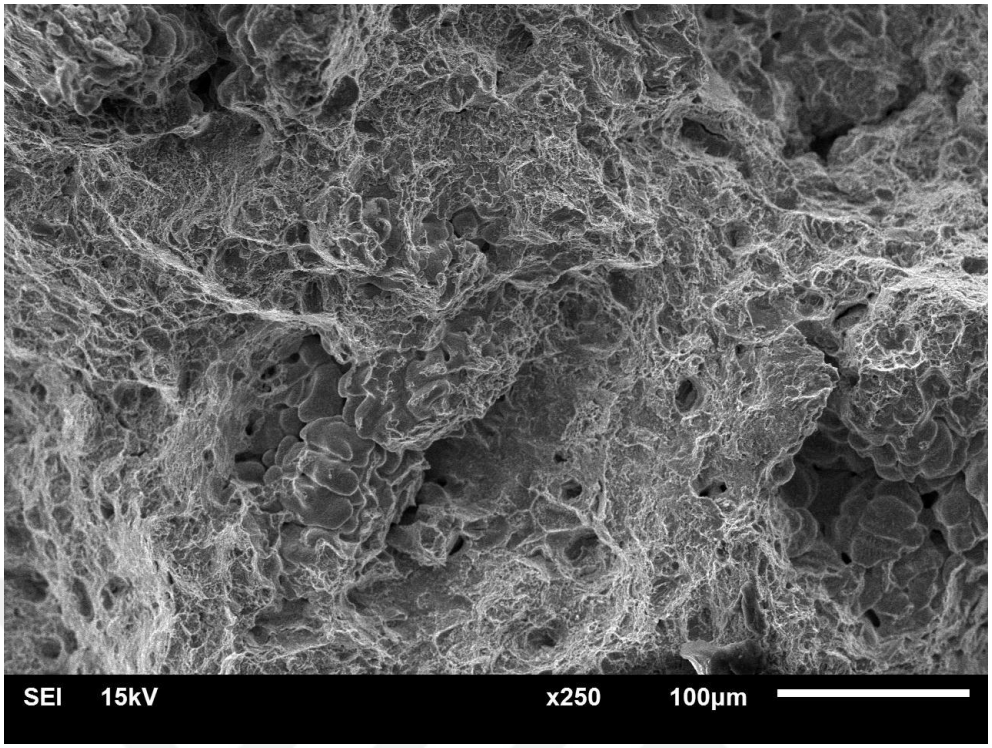
Tablo 4. İncelenen alaşımlarının fiziksel ve mekanik özellikleri

Alaşım	Yoğunluk (g/mm^3)	Sertlik (BSD)	Çekme dayanımı (MPa)	Kopma uzaması (%)	Hacim Kaybı (mm^3)
Zn-40Al-2Cu	0,004255768	120	325	12	6,898872726
Zn-40Al-2Cu-0,1Sr	0,004280495	122	354	13	5,845118846
Zn-40Al-2Cu*	0,004213730	85	263	13	4,774867377
Zn-40Al-2Cu-0,1Sr*	0,004209579	85	270	14	3,456402651
Zn-40Al-2Cu**	0,004245595	124	380	9	2,249390149
Zn-40Al-2Cu-0,1Sr**	0,004214855	130	392	7	2,142422706

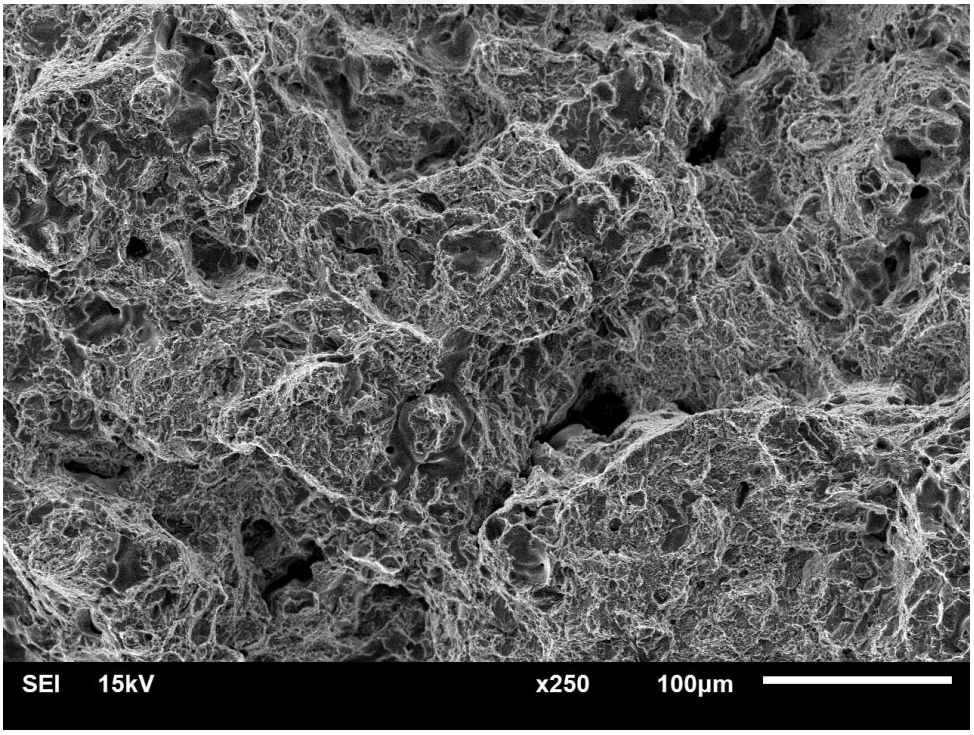
*:T5 ısıl işlemi uygulanmış
**:T6 ısıl işlemi uygulanmış

3.3. Kırılma Yüzeylerinin İncelenmesinden Elde Edilen Bulgular

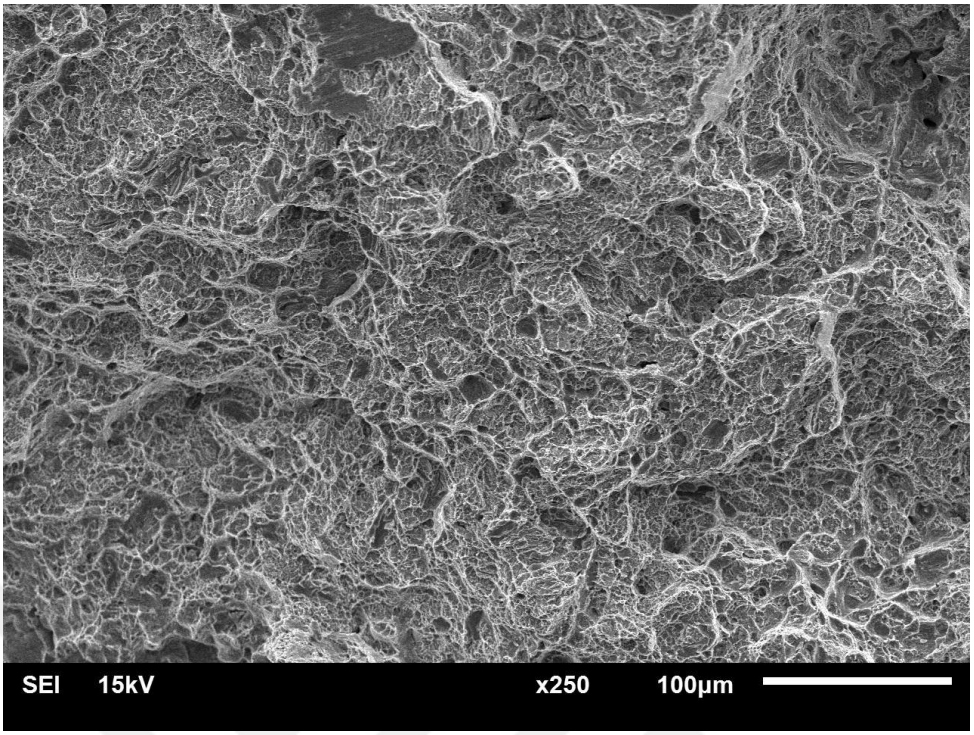
İncelenen alaşımların çekme deneyi numunelerinin kırılma yüzeylerini gösteren fotoğraflar Şekil 28-33'te verilmiştir. Bu fotoğraflar dökülmüş ve T5 ısıl işlemi uygulanmış alaşımların yüzeylerinde çukurların ve ayrılma sırtlarının ağırlıklı olduğunu gösterirken (Şekil 28-31), T6 ısıl işlemi uygulanmış numunelerin yüzeyinde nispeten daha fazla çatlakların ve ayrılmış yüzeylerin (klivaj) olduğu görülmektedir, Şekil 32 ve 33.



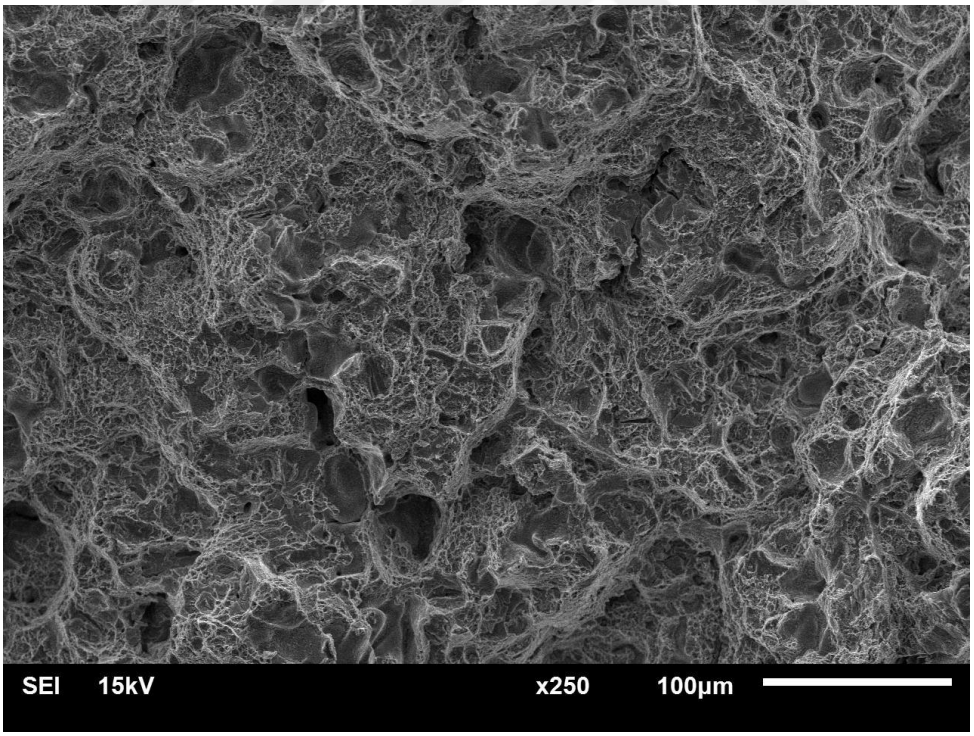
Şekil 28. Dökülmüş durumdaki Zn-40Al-2Cu alaşımının çekme deneyi numunesinin kırılma yüzeyinin görüntüsü



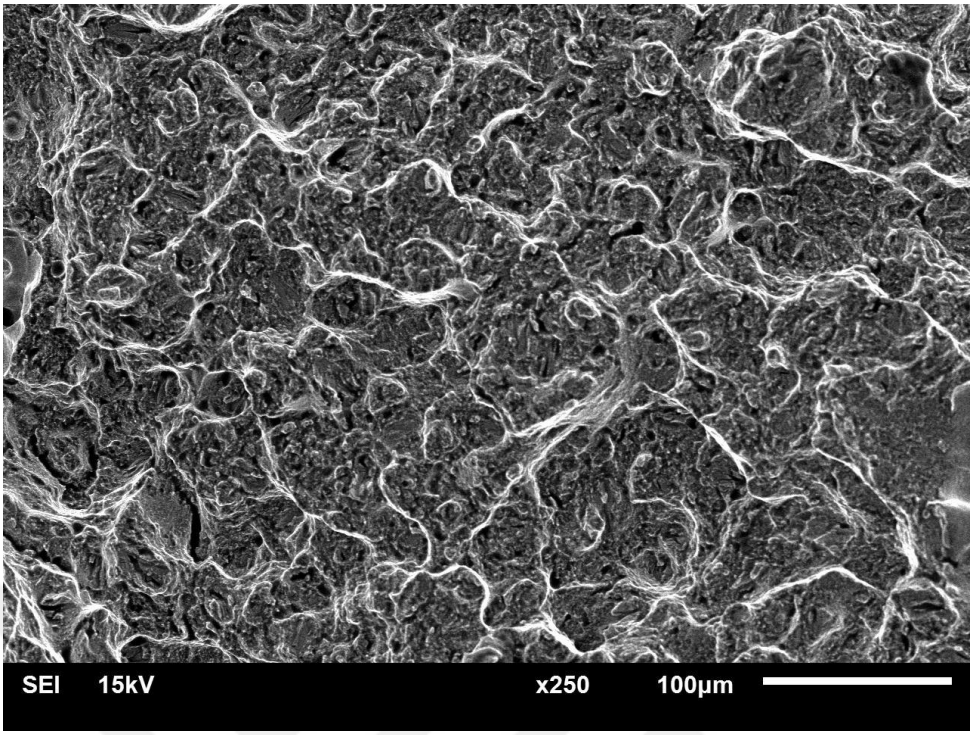
Şekil 29. Dökülmüş durumdaki Zn-40Al-2Cu-0,1Sr alaşımının çekme deneyi numunesinin kırılma yüzeyinin görüntüsü



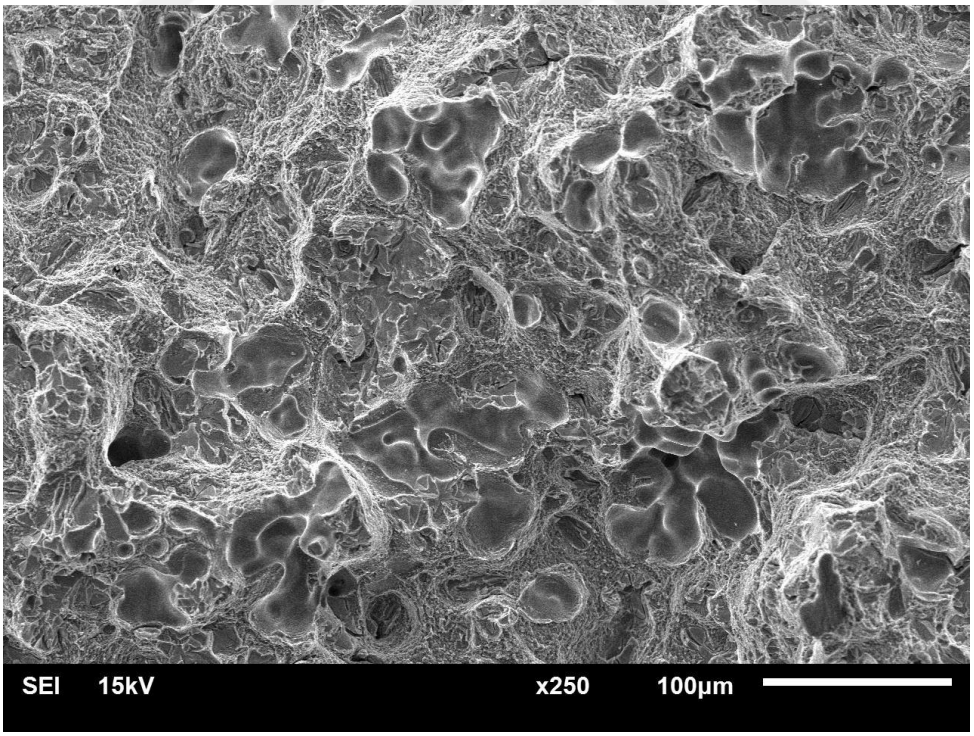
Şekil 30. T5 ısıl işlemi uygulanmış durumdaki Zn-40Al-2Cu alaşımının çekme deneyi numunesinin kırılma yüzeyinin görüntüsü



Şekil 31. T5 ısıl işlemi uygulanmış durumdaki Zn-40Al-2Cu-0,1Sr alaşımının çekme deneyi numunesinin kırılma yüzeyinin görüntüsü



Şekil 32. T6 ısıl işlemi uygulanmış durumdaki Zn-40Al-2Cu alaşımının çekme deneyi numunesinin kırılma yüzeyinin görüntüsü



Şekil 33. T6 ısıl işlemi uygulanmış durumdaki Zn-40Al-2Cu-0,1Sr alaşımının çekme deneyi numunesinin kırılma yüzeyinin görüntüsü

3.4. Sürtünme ve Aşınma Deneyinden Elde Edilen Bulgular

İncelenen Zn-40Al-2Cu ve Zn-40Al-2Cu-0,1Sr alaşımlarından dökülmüş ve T5 ile T6 ısıl işlemleri uygulanmış durumdaki örneklerinin testlerinden elde edilen sürtünme katsayısı ve hacim kaybı değerleri ile hesaplanan aşınma direnci değerleri Tablo 5'te verilmiştir. Bu sonuçlar Sr ilavesi yapılması durumunda Zn-40Al-2Cu alaşımının sürtünme katsayısının azaldığı ve bu alaşımda aşınma nedeniyle meydana gelen hacim kaybının azaldığı bir başka deyişle aşınma direncinin arttığı görülmektedir. Stronsiyum içeren dörtlü Zn-40Al-2Cu-0,1Sr alaşımına T5 ve T6 ısıl işlemlerinin uygulanması durumunda bu alaşımın aşınma direncinin daha da arttığı gözlenmiştir.

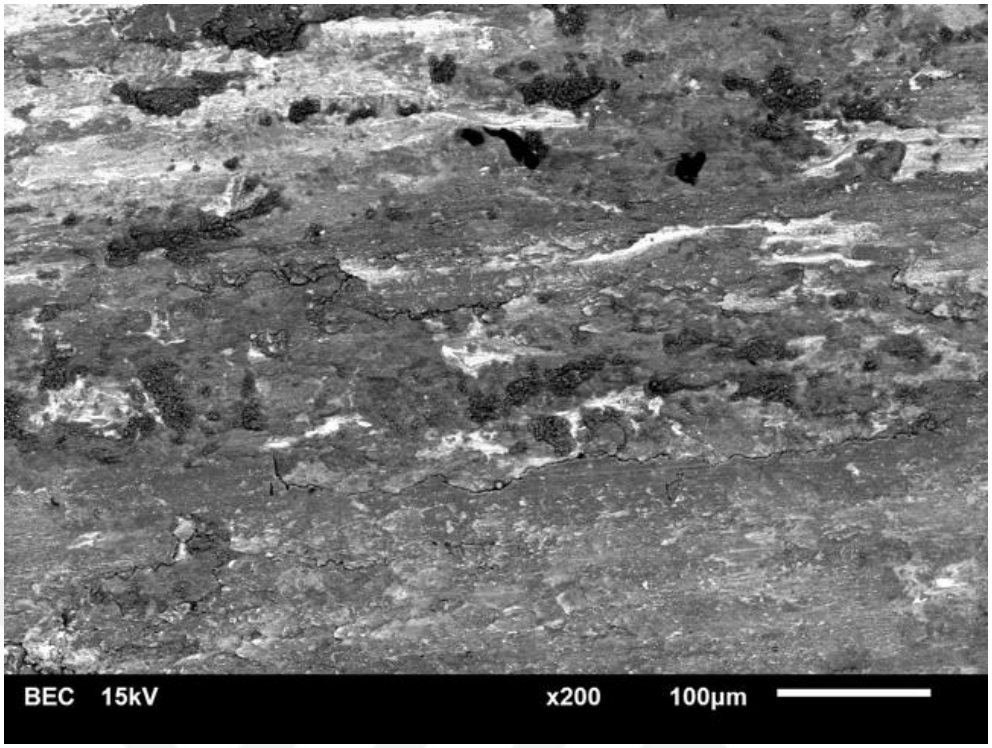
Tablo 5. İncelenen alaşımların sürtünme ve aşınma deneylerinden elde edilen bulgular

Alaşım	Sürtünme katsayısı	Hacim Kaybı (mm^3)	Aşınma direnci ($1/mm^3$)
Zn-40Al-2Cu	0,451	6,900	0,144
Zn-40Al-2Cu-0,1Sr	0,408	5,845	0,171
Zn-40Al-2Cu*	0,441	4,770	0,209
Zn-40Al-2Cu-0,1Sr*	0,426	3,456	0,289
Zn-40Al-2Cu**	0,429	2,249	0,444
Zn-40Al-2Cu-0,1Sr**	0,401	1,522	0,657

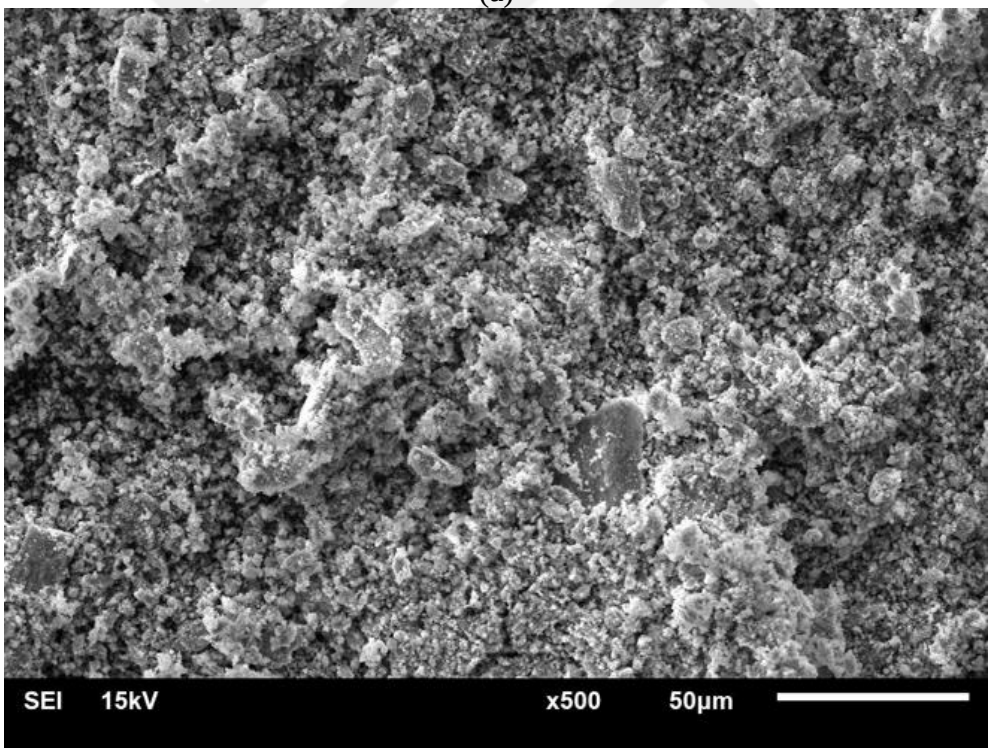
*:T5 ısıl işlemi uygulanmış
**:T6 ısıl işlemi uygulanmış

3.5. Aşınma Yüzeyleri ve Aşınma Parçacıklarının İncelenmesinden Elde Edilen Bulgular

Aşınma deneyine tabi tutulan alaşım örneklerinin aşınma yüzeylerinden ve aşınma parçacıklarından elde edilen SEM görüntüleri Şekil 34-39'da verilmiştir. Bu şekiller incelenen alaşımların aşınma yüzeylerinde yoğun sıvama tabakaları ile bu tabakalarda meydana gelen çatlakların oluştuğunu göstermektedir. Aşınma parçacıkları ise 50 μm'ye kadar irili ufaklı farklı boyutlarda olup farklı şekiller sergilemiştir.

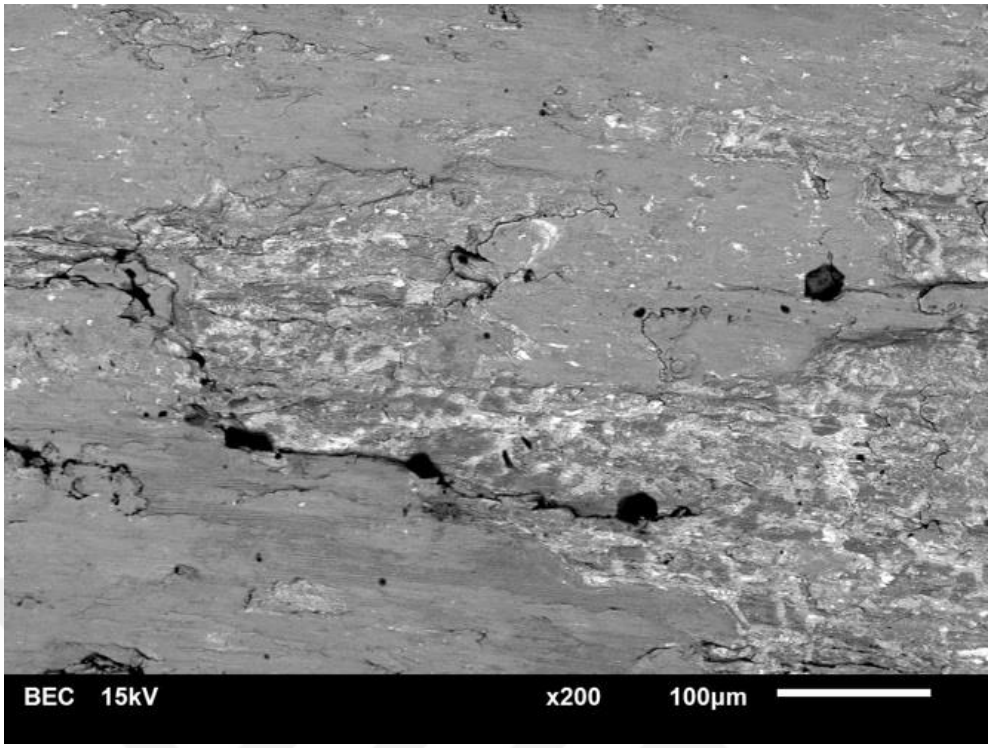


(a)

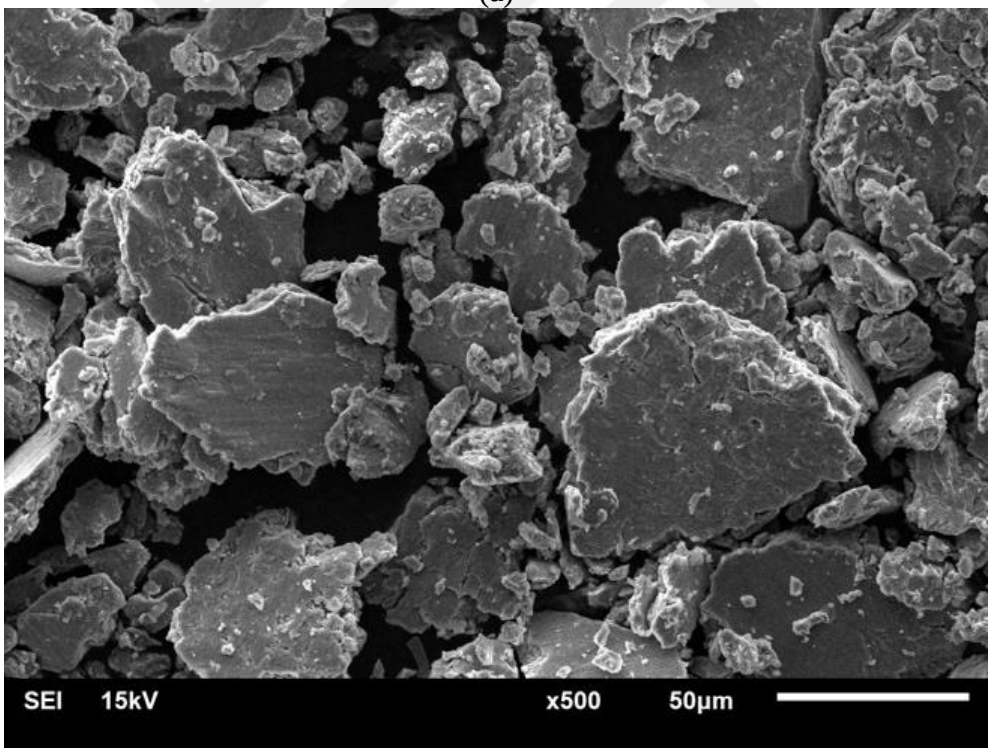


(b)

Şekil 34. Dökülmüş durumdaki Zn-40Al-2Cu alaşımına ait aşınma deney numunesinin a) aşınma yüzeyinin ve b) aşınma parçacıklarının SEM görüntüsü

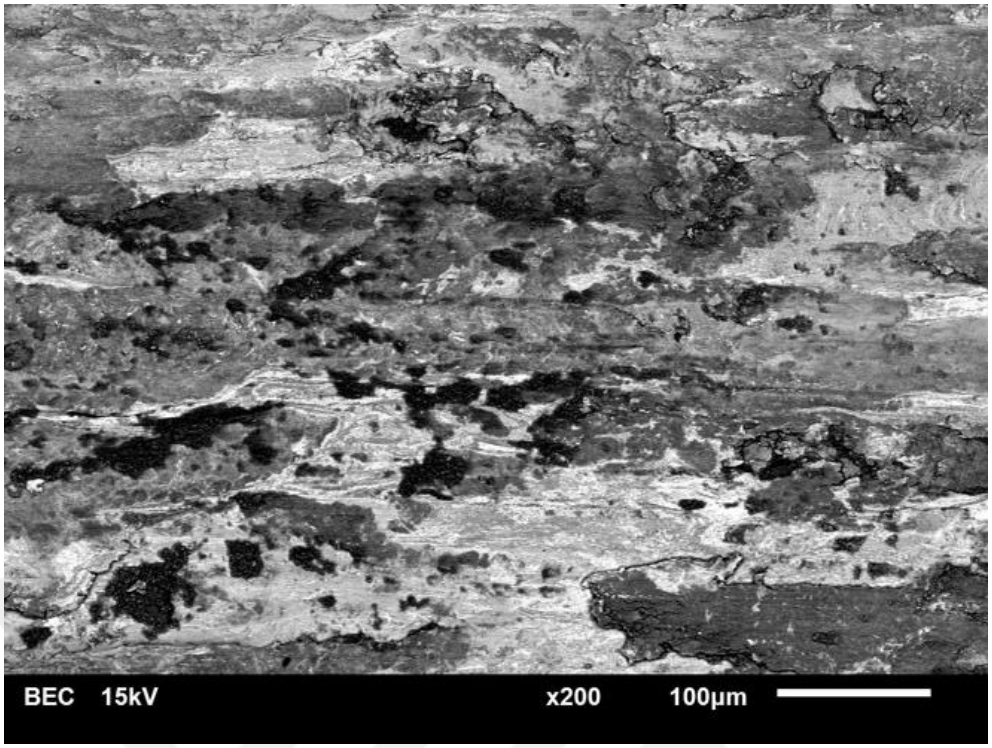


(a)

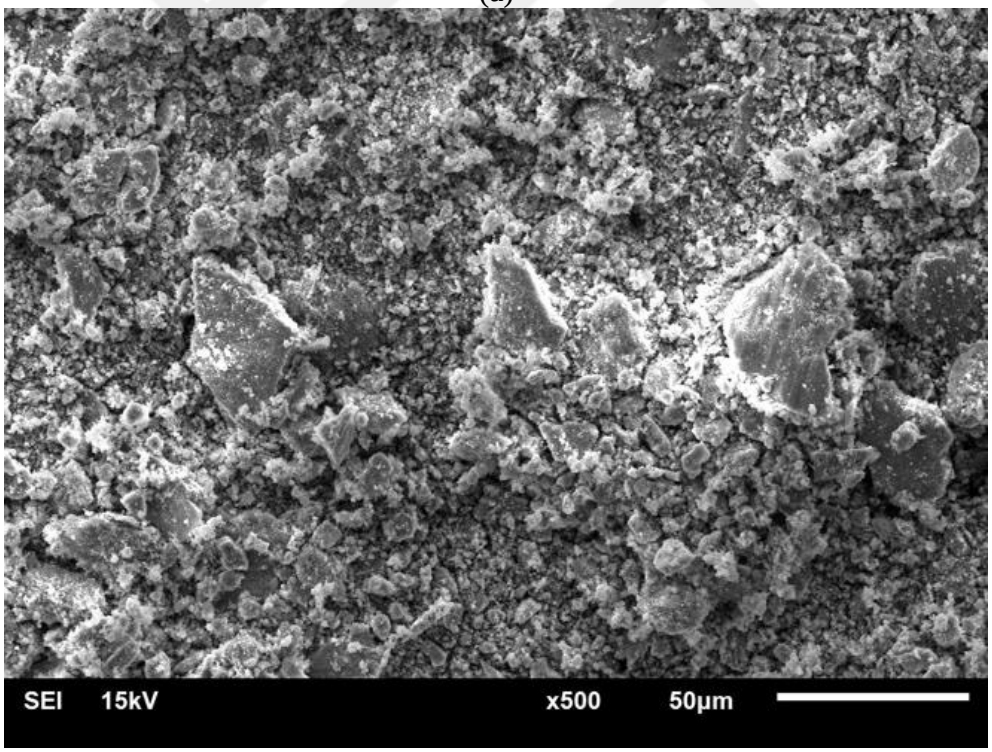


(b)

Şekil 35. Dökülmüş durumdaki Zn-40Al-2Cu-0,1Sr alaşımına ait aşınma deney numunesinin a) aşınma yüzeyinin ve b) aşınma parçacıklarının SEM görüntüsü

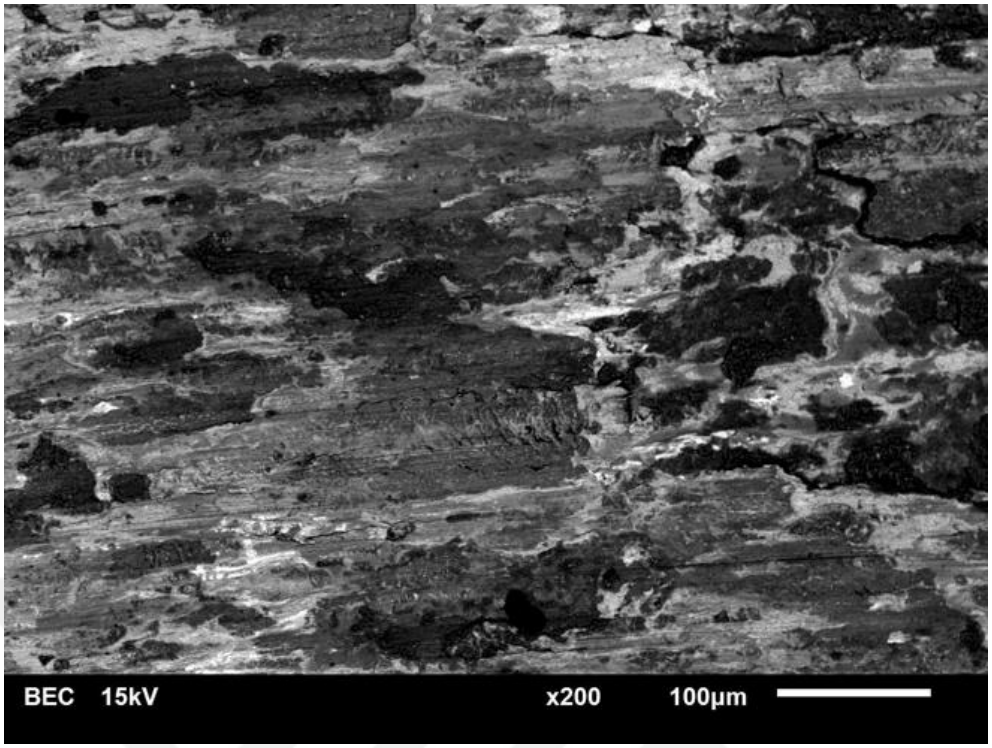


(a)

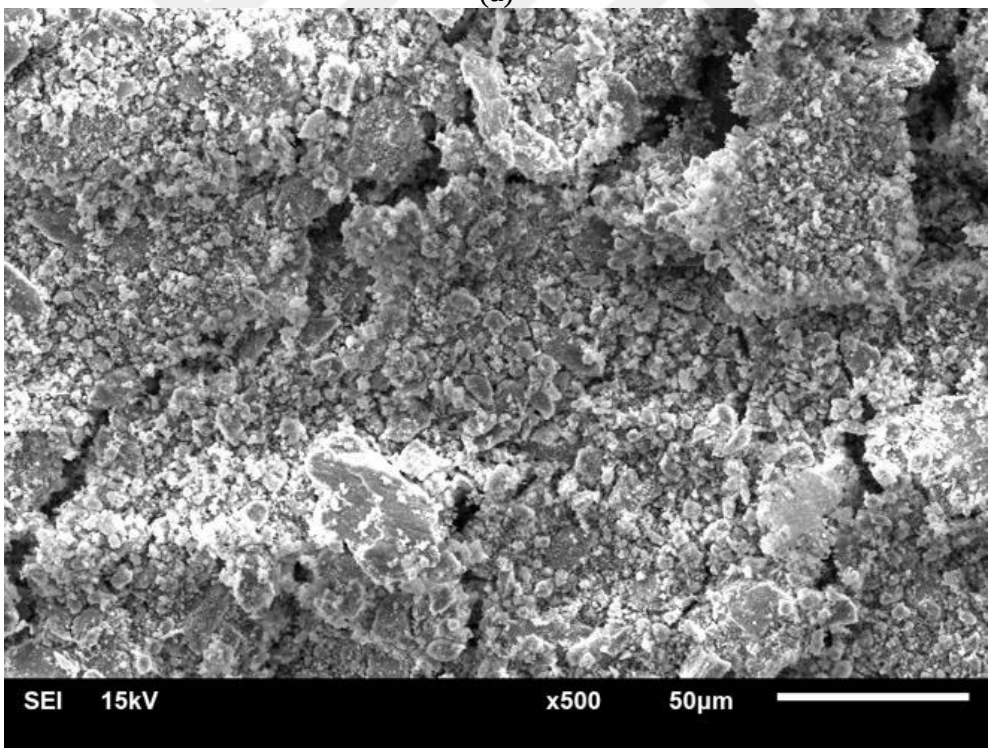


(b)

Şekil 36. T5 ısıl işlemi uygulanmış durumdaki Zn-40Al-2Cu alaşımına ait aşınma deney numunesinin a) aşınma yüzeyinin ve b) aşınma parçacıklarının SEM görüntüsü

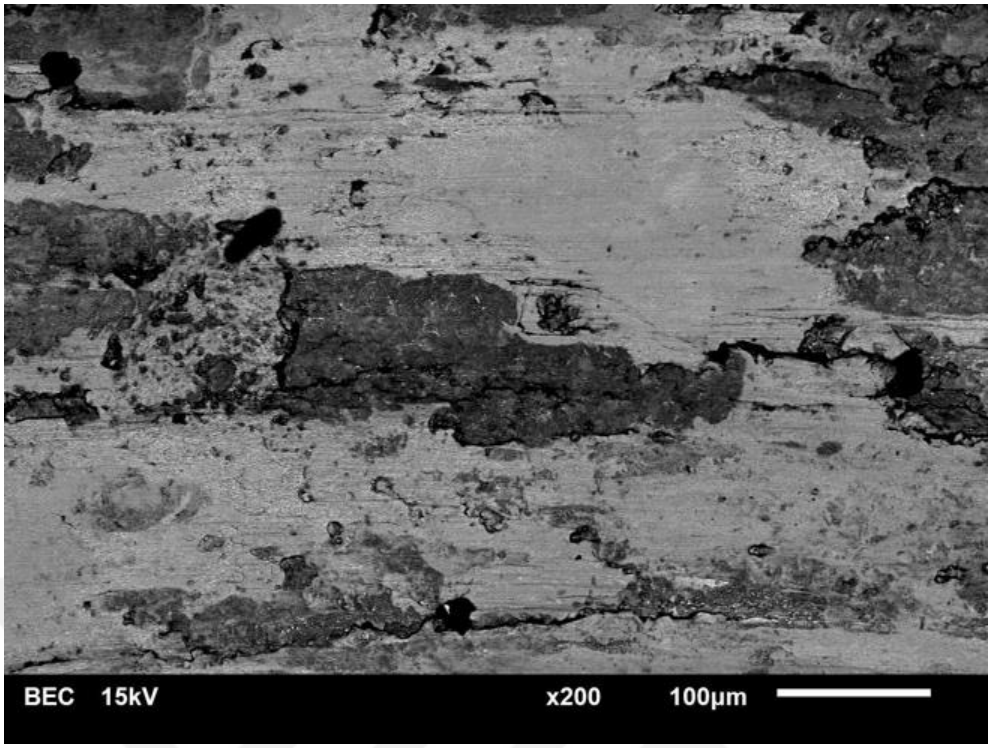


(a)

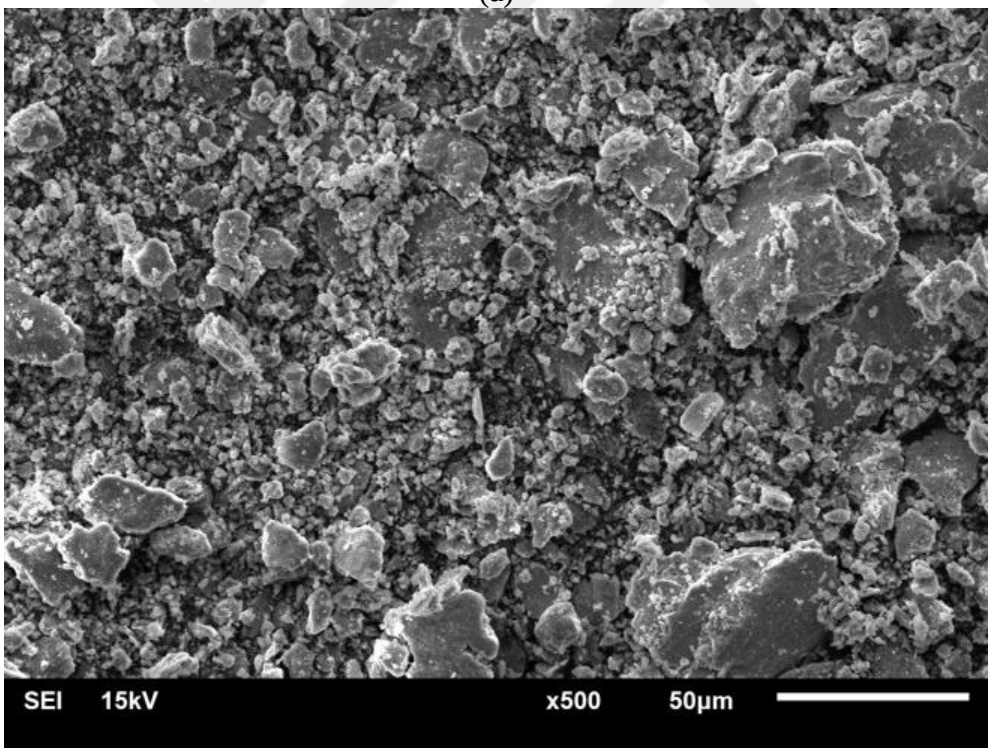


(b)

Şekil 37. T5 ısıl işlemi uygulanmış durumdaki Zn-40Al-2Cu-0,1Sr alaşımına ait aşınma deney numunesinin a) aşınma yüzeyinin ve b) aşınma parçacıklarının SEM görüntüsü

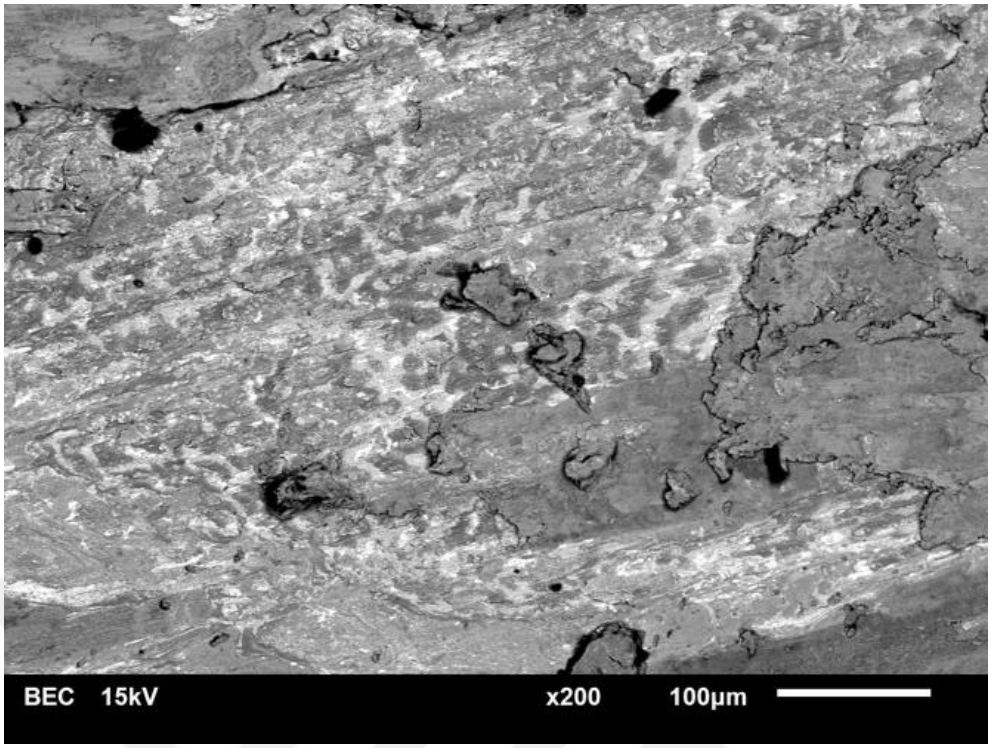


(a)

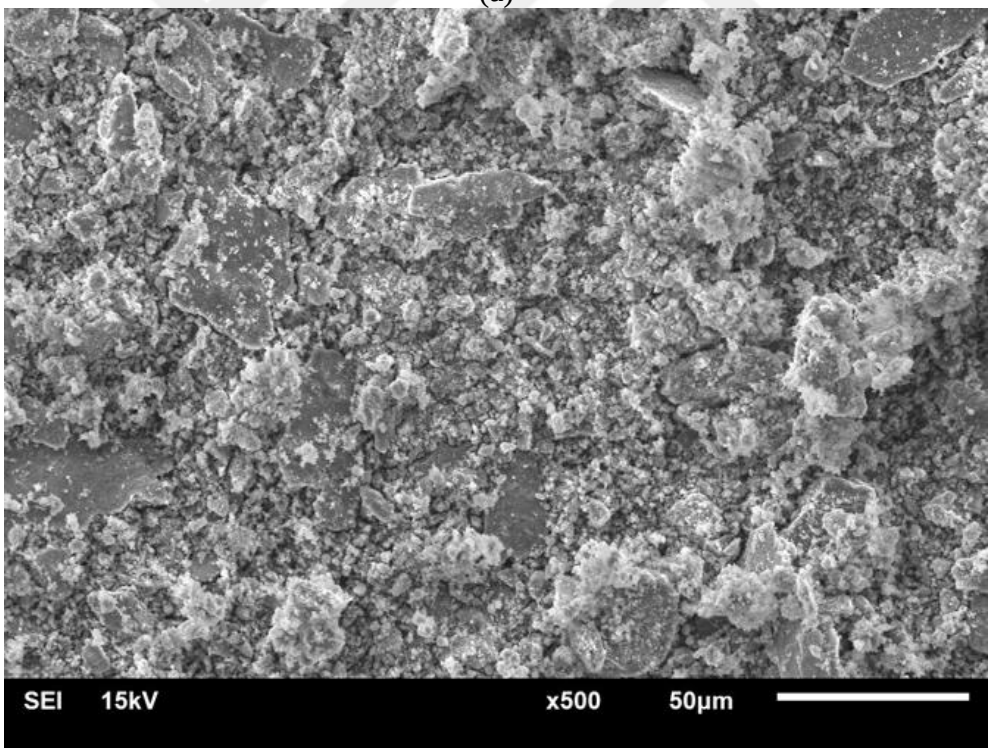


(b)

Şekil 38. T6 ısıl işlemi uygulanmış durumdaki Zn-40Al-2Cu alaşımına ait aşınma deney numunesinin a) aşınma yüzeyinin ve b) aşınma parçacıklarının SEM görüntüsü



(a)



(b)

Şekil 39. T6 ısıl işlemi uygulanmış durumdaki Zn-40Al-2Cu-0,1Sr alaşımına ait aşınma deney numunesinin a) aşınma yüzeyinin ve b) aşınma parçacıklarının SEM görüntüsü

4. TARTIŞMA VE ÖNERİLER

4.1. Sonuç ve Tartışma

Dökülmüş durumdaki Zn-40Al-2Cu alaşımının içyapısı alüminyumca zengin α dendritleri ile bu dendritler arasında yer alan ötektoid α+η faz karışımı ve bakırca zengin ε ($CuZn_4$) fazlarından oluşmaktadır, Şekil 22. Zn-40Al-2Cu alaşımının dökülmüş durumdaki içyapısı ve bu yapının oluşumu literatürde (Savaşkan ve Aydıner 2004; Savaşkan v.d., 2003, 2004; Savaşkan ve Bican, 2005; Savaskan v.d., 2021; Savaşkan v.d., 2022).detaylı olarak ortaya koyulmuş olup, çalışmamızdan elde edilen bulgular literatür ile uyumlu çıkmıştır. Stronsiyum ilavesi yapılarak elde edilen dörtlü Zn-40Al-2Cu-0.1Sr alaşımının içyapısının da Zn-40Al-2Cu alaşımına benzer olarak α dendritleri, α dendritlerini çevreleyen ötektoid α+η faz karışımı ve ε ($CuZn_4$) fazlarından oluştuğu gözlenmiştir, Şekil 23. Ancak dörtlü Zn-40Al-2Cu-0,1Sr alaşımının içyapısındaki dendritlerin üçlü Zn-40Al-2Cu alaşımındakilere göre daha ince bir yapıda olduğu gözlendi. Alüminyum alaşımlarında tane inceltici elementlerin yol açtığı tane incelmesi literatürde farklı teorilere dayandırılarak açıklanabilmektedir. Bu teoriler arasında karbür−bor, peritektik, peritektik hulk, dubleks çekirdeklenme ve çözünürlük teorileri öne çıkmaktadır. Elde ettiğimiz bulgular Sr ilavesi sonucunda ile Zn-40Al-2Cu alaşımında yeni bir faz oluşmadığını gösterdiği için bir başka deyişle stronsiyum alaşım içinde tamamen çözündüğü için, bu elementin yol açtığı tane incelmesi çözünürlük teorisine dayandırılarak açıklanabilir. Bu teoriye göre bir fazın içerisinde başka bir element atomlarının çözünmesi durumunda çözen fazın tane büyümesi kısıtlanır ve çözünürlük arttıkça tane büyümesi daha fazla engellenir. Bu mekanizmada tane büyümesinin kısıtlayıcı faktör Maxweell ve Hellawell (Maxwell ve Hellawell, 1975; Chen v.d., 2016) tarafından ortaya koyulan $Q=C_0m(k-1)$ bağıntısıyla ifade edilir. Bu bağıntıda; Q: tane büyümesini kısıtlayıcı faktör, C_0: çözünen madde miktarı, m: likidus çizgisinin eğimi ve k: ayrılım/bölme katsayısı olarak sunulmaktadır. Bu eşitlikten de anlaşılacağı üzere bir fazın içerisinde bir elementin çözünmesi durumunda veya çözünürlüğün artması durumunda tane büyümesini kısıtlayıcı faktör artar, bu da tane büyümesinin kısıtlanması bir başka deyişle tanelerin daha ince kalmasına yol açar. Çalışmamızda da stronsiyumun alüminyumca zengin α fazı içerisinde çözünmesinin yukarıda bahsedilen teoriye göre bu fazın büyümesini kısıtladığı ve daha ince taneli bir yapının oluşmasına yol açtığı, ayrıca tane

büyümesinin kısıtlanması sonucunda çekirdekleşmenin daha çok sayıda tane etrafında meydana gelerek tane sayısının artmasına neden olduğu düşünülmektedir. Stronsiyum ilavesi ile dendritlerin küçülmesinin ya da incelmesinin bir nedeni de katılaşmanın başlangıç aşamasında oluşan fazla sayıda çekirdeğin sıvı metal içerisindeki daha yüksek ergime noktasına sahip alüminyumun oranını azaltması ve katılaşmanın ilerleyen aşamalarında alüminyumca zengin α dendiritlerinin büyümeleri için gerekli alüminyum atomlarını sıvı metal içerisinden çekememesi olabilir (Hekimoğlu v.d., 2019; Hekimoğlu ve Çalış, 2020).

T5 ısıl işlemi hem Zn-40Al-2Cu hem de Zn-40Al-2Cu-0,1Sr alaşımının içyapısında önemli bir değişikliğe yol açmamıştır, Şekil 24 ve 25. Bu durum literatürde (Savaşkan v.d., 2021) de belirtildiği gibi T5 ısıl işleminin kritik dönüşüm sıcaklığının altında bir sıcaklıkta gerçekleştirilmesinden kaynaklanmaktadır. Bu ısıl işlemde sadece dökülmüş durumdaki kararsız fazlar kararlı fazlara dönüşmektedir (Savaşkan v.d., 2021). İncelenen alaşımlarda bu tür fazların hacimsel oranı çok düşük olduğundan T5 ısıl işleminin içyapısında belirgin bir değişikle yol açmaması beklenen bir sonuçtur. Uygulanan T6 ısıl işlemi incelenen alaşımların içyapısı üzerinde önemli değişikliklere yol açmıştır, Şekil 26 ve 27. Şöyle ki; bu işlem sonucunda alaşımların dendritik içyapısı önemli ölçüde değişime uğramış ve taneli bir yapıya geçiş eğilimine girmiştir. Söz konusu taneli yapı Zn-40Al-2Cu-0,1Sr alaşımında daha belirgin olarak ortaya çıkmıştır. Ayrıca dendritlerin/tanelerin sınırlarında önemli oranda η fazı çökelmiş ve alaşımın içyapısındaki dendritler/taneler bu çökeltilerin yer aldığı faz bölgesiyle çevrelenmiştir. Bu yapısal değişim T6 ısıl işleminin özelliğine dayandırılarak açıklanabilir. Şöyle ki, T6 ısıl işleminin ilk aşaması çözündürme işlemidir. Çalışmamızda 375 °C'de uygulanan çözündürme işlemi sırasında ikili Al-Zn faz diyagramına göre çinkoca zengin η fazı alüminyumca zengin α fazı içerisinde çözünür. Çözündürme işleminin akabinde su verme işlemi uygulandığında ikili Zn-Al faz diyagramına göre alaşım aşırı doymuş α tanelerinden oluşan bir içyapı sergilemesi beklenir. Yaşlandırma işlemi sırasında ise aşırı doymuş katı çözelti içindeki çinko atomları çökelerek η fazı çökeltilerinin oluşmasına neden olurlar. Çökeltilerin dendrit/tane sınırlarına yakın bölgelerde olması bu bölgelerde çinko oranının daha yüksek olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Tane sınırlarında çinkonun fazla olması hem dökülmüş durumda çinkonun dendritler arası bölgelerde olmasından hem

de tane sınırlarına yakın bölgelerde difüzyon yolunun kısa olması nedeniyle daha fazla çinkonun bulunmasından kaynaklanmış olabilir.

Zn-40Al-2Cu alaşımına %0,1 oranında ilave edilen Sr bu alaşımın sertliğini 2 BSD ve çekme mukavemetini 29 MPa artırmıştır, Tablo 4. Alaşımın sertliğinde ve mukavemetinde meydana gelen bu artış Sr ilavesi sonucunda alaşımın yapısında ortaya çıkan değişimlere dayandırılarak açıklanabilir. Şöyle ki, Sr ilavesi Zn-40Al-2Cu alaşımın içyapısındaki dendritlerin küçülmesine, incelmesine ve daha sıkı dizilmesine yol açmıştır, Şekil 23. Bu durum primer dendritlerin boyutlarının küçüldüğünü ve ikincil dendrit kollarının arasındaki mesafelerin azaldığını göstermektedir. İkincil dendrit kol mesafelerinin azalması ve primer dendritlerin küçülmesi durumunda Zn-40Al esaslı alaşımların mukavemetlerinin arttığı literatürde (Turhal ve Savaşkan, 2003; Savaşkan v.d., 2003; Skenazi v.d., 1983) ortaya koyulmuştur. Sonuçlarımız bu çalışmalar ile uyumludur. Çinko-alüminyum alaşımlarında ikincil dendrit kol mesafesi ile alaşımların çekme dayanımı arasındaki ilişki Skenazi ve Savaşkan tarafından ortaya koyulan eşitliklere göre $\sigma çm=Ad^{-1/2}+B$ şeklindedir. Bu bağıntıda; σçm: alaşımın çekme mukavemeti, d: ikincil dendrit kol mesafesi, A ve B ise sabitlerdir. Primer dendritlerin küçülmesinin ise tane boyutunun küçülmesi anlamına geleceği için bu yapısal değişimin yol açtığı mukavemet artışı Hall-Patch eşitliği ile açıklanabilir. Bilindiği üzere (Hekimoğlu ve Çalış, 2020) Hall-Patch eşitliği $\sigma=\sigma_0+kd^{-1/2}$ olup, bu eşitlikte; σ: malzeme mukavemeti, σ_0:tek kristalin mukavemeti, k: malzeme sabiti ve d:ortalama tane boyutudur. Söz konusu eşitliğe göre d ortalama tane boyutu azaldıkça malzemenin mukavemetinin artması beklenir. Dolayısıyla stronsiyum ilavesiyle primer dendritlerin küçülmesinin alaşımın mukavemetini artıran bir diğer etken olduğu söylenebilir.

T5 ısıl işlemi Zn-40Al-2Cu ve Zn-40Al-2Cu-0,1Sr alaşımlarının sertliğini sırasıyla 35 ve 37 BSD, çekme mukavemetlerini ise sırasıyla 62 ve 84 MPa azaltmıştır. Söz konusu alaşımların sertlik ve mukavemetinde gözlenen azalma literatürde (Bican ve Savaşkan, 2020; Savaşkan v.d., 2021) de belirtildiği gibi T5 ısıl işlemiyle alaşımların dökülmüş durumda yapısında kalan kalıntı gerilmelerin giderilmesinden ve kararsız veya yarı kararlı fazların dönüşmesinden kaynaklanmış olabilir.

T6 ısıl işlemi ise Zn-40Al-2Cu alaşımının sertliğinin 4 BSD, çekme mukavemetinin 55 MPa, Zn-40Al-2Cu-0,1Sr alaşımının sertliğini 8 BSD, çekme

dayanımı 38 MPa artmıştır. T6 ısıl işleminden sonra alaşımların sertlik ve çekme dayanımı değerlerinde gözlenen artış literatürde ki benzer çalışmalarda olduğu gibi çökelme sertleşmesi mekanizmasının ortaya çıkması ile açıklanabilir (Avner, 1974; Askeland, 1988; Smith, 1996). Bilindiği gibi T6 ısıl işlemi çözündürme, su verme ve yaşlandırma aşamalarından oluşmaktadır (Avner, 1974; Askeland, 1988; Smith, 1996). İncelenen alaşımlara uygulanan çözündürme işlemiyle çinkoca zengin η fazının alüminyumca zengin α fazı içerisinde çözündürdükten sonra uygulanan su verme işlemi ile aşırı doymuş α katı çözeltisi elde edilir. Su verme işlemi sonrasında uygulanan yaşlandırma işlemi sırasında ise η fazı çökeltileri oluşmaya başlar. Söz konusu çökeltilerin neden olduğu bağdaşıklık gerilmeleri alaşımların kafes yapısında çarpılmaya neden olur. Kafes yapılarında meydana gelen çarpılma nedeniyle dislokasyonların ilerlemesi zorlaşır ve bu nedenle alaşımların mukavemetlerinde artış olurken sünekliklerinde dolayısıyla kopma uzamalarında azalma meydana gelir.

İncelenen alaşımların çekme deneyi numunelerinin kırılma yüzeylerinde farklı derinlikte çukurlar, boşluklar, ayrılma sınırları ve dendritler arası kırılmalar gözlenmiştir, Şekil 28-33. Dökülmüş durumdaki Zn-40Al-2Cu-0,1Sr alaşımında Zn-40Al-2Cu alaşımına göre daha ince/küçük çukurlar ve ayrılma sırtları gözlenmiştir. Ayrıca Zn-40Al-2Cu alaşımında gözlenen dendritler arası kırılma Zn-40Al-2Cu-0,1Sr alaşımında gözlenmemiştir, Şekil 28 ve 29. Bu durum stronsiyum ilavesiyle dendritlerin incelmesinden kaynaklanmış olabilir. Şöyle ki; çukurlar ve ayrılma sırtları sünek kırılma işareti olup, bu kırılma daha çok sünek fazlarda gözlenir. Söz konusu alaşımlarda nispeten sünek faz α fazı olduğu için bu fazın stronsiyum ilavesi sonucunda incelmesi kırılma yüzeylerindeki çukurların ve çukurları çevreleyen ayrılma sırtlarının küçülmesine yol açmış olabilir. T5 ısıl işlemi uygulanmış alaşımların yüzeylerinde çukurların ve ayrılma sırtlarının ağırlıklı olduğu ve dökülmüş duruma göre kırılma yüzeylerindeki boşlukların derinliğinin azaldığı görülmektedir, Şekil 30 ve 31. Çukurların ve ayrılma sırtlarının fazlalığının alaşımın sünekliğinin yüksek olmasından, boşlukların derinliğinin az olması ise alaşımın mukavemetindeki azalma nedeniyle kırılmanın daha kolay ve erken meydana gelmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. T6 ısıl işlemi uygulanmış Zn-40Al-2Cu alaşımının yüzeyinde çok sayıda çatlak/yarık ve ayrılma çizgileri gözlenmiştir, Şekil 32. Bu alaşımın kırılma yüzeyinde çatlak ve yarıkların ön plana çıkmasının T6 ısıl işlemiyle alaşımın

gevrekleşmesi ve bunun sonucunda çatlak oluşumunun kolaylaşmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. T6 ısıl işlemi uygulanmış Zn-40Al-2Cu-0,1Sr alaşımında ise Zn-40Al-2Cu alaşımından farklı olarak pürüzsüz klivaj benzeri görüntüye sahip kısımlar gözlendi. Bu kısımların α fazının kırılarak ayrılmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Stronsiyum içeren Zn-40Al-2Cu-0,1Sr alaşımı Zn-40Al-2Cu alaşımından daha düşük sürtünme katsayısı ve hacim kaybı değeri sergilemiştir, Tablo 5. Stronsiyum ilavesi nedeniyle sürtünme katsayısında meydana gelen azalma içyapıdaki fazların özelliklerine ve stronsiyumun yol açtığı yapısal değişime dayandırılarak açıklanabilir. Şöyle ki, Zn-Al alaşımlarının içyapısındaki çinkoca zengin η fazının c/a oranı yüksek olan sıkı düzenli hegzagonal bir kafes yapısına sahip olduğu ve bu özelliği sayesinde kaymayı kolaylaştırdığı bilinmektedir (Hekimoğlu ve Savaşkan, 2018; Prasad, 1997; Murphy ve Savaşkan, 1984). Söz konusu alaşımların içyapısındaki alüminyum ve bakırca zengin fazların ise sertliği nispeten yüksek olup daha çok yük taşıma görevi yaptığı bilinmektedir (Hekimoğlu ve Savaşkan, 2018; Prasad, 1997; Murphy ve Savaşkan, 1984). İçyapı fotoğrafları Zn-40Al-2Cu alaşımına stronsiyum katılması durumunda nispeten sünek olan α fazının incelmesine yol açtığını ve η fazının yapıdaki dağılımının (hacimsel oranının) arttığını göstermektedir, Şekil 22 ve 23. Kaymayı kolaylaştırıcı görev yapan η fazının içyapıdaki miktarının artması sürtünme katsayısının azalmasına yol açmış olabilir. Stronsiyum ilavesi nedeniyle alaşımda aşınma nedeniyle meydana gelen hacim kaybının azalmasının, bir başka deyişle alaşımın aşınma direncinin artmasının söz konusu alaşımın mukavemetinde meydana gelen artıştan kaynaklandığı düşünülmektedir. Zira literatürde Zn-Al esaslı alaşımların aşınma dirençlerinin mukavemetleriyle yakından ilişkili olduğu, özellikle çekme mukavemetleri arttıkça aşınma dirençlerinin arttığı birçok yayında (Savaşkan ve Hekimoğlu, 2016; Zhu v.d., 1995; Savaşkan v.d., 2021) ortaya koyulmuştur.

T5 ve T6 ısıl işlemlerinin hem Zn-40Al-2Cu hem de Zn-40Al-2Cu-0,1Sr alaşımında aşınma nedeniyle ortaya çıkan hacim kayıplarını azalttığı, bir başka deyişle aşınma dirençlerini artırdığı görülmüştür, Tablo 5. T5 ısıl işleminin incelenen alaşımların aşınma dirençleri üzerine etkisi alaşımların sünekliğinde meydana gelen artışa dayandırılarak açıklanabilir. Şöyle ki, alaşımların sünekliği arttıkça aşınma yüzeylerinde deformasyona uğrayan tabakaların yüzeyden ayrılması zorlaşır ve

yüzeye sıvanması kolaylaşır. T5 ısıl işleminin mukavemette yol açtığı azalma nedeniyle yüzeyde meydana gelen deformasyon artsa bile deformasyona uğrayan yüzey tabakasının yüzeyden koparak ayrılmasının zorlaşması veya basınç ve sıcaklık etkisiyle tekrar yüzeye yapışması yüzeyden malzeme kaybını engelleyebilir. Bu durum ölçülen hacim kaybının düşük olmasına yol açmış olabilir. T6 ısıl işlemi uygulanmış numunelerin daha düşük hacim kaybı yani daha yüksek aşınma direnci sergilemesinin ise bu alaşımların mukavemetlerinde meydana gelen artıştan kaynaklandığı düşünülmektedir. Yukarıda da ifade edildiği gibi Zn-Al esaslı alaşımlarda artan mukavemete bağlı olarak bu alaşımların aşınma dirençlerinin de arttığını literatürde ortaya koyan birçok çalışma (Savaşkan ve Hekimoğlu, 2016; Savaşkan v.d., 2021) mevcuttur. Dolayısıyla bu bulgularımız literatür ile uyumludur.

İncelenen tüm alaşımların aşınma yüzeylerinde yoğun sıvama ve yapışma tabakaları ile bu tabakalar üzerinde yer alan çatlaklar gözlenmiştir, Şekil 34-39. Sıvama ve yapışma tabakalarının fazla olması incelenen alaşımlarda adeziv aşınma mekanizmasının etkin olduğunu göstermektedir. Söz konusu tabakalar deforme olmuş yüzey tabakasının basınç ve sıcaklığın etkisiyle yüzeyde dönme yönünde uzaması veya aşırı deformasyon sonucunda yüzeyden ayrılan malzemenin basıncın etkisiyle tekrar yüzeye yapışmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Zn-Al esaslı alaşımlarda benzer bulgular literatürde de mevcut olup çalışmamız bu konudaki mevcut çalışmalar (Hekimoğlu ve Savaşkan, 2016a, 2016b) ile uyumludur. Aşınmış yüzeylerdeki çatlakların bir kısmının aşırı plastik deformasyon ve oksitlenmenin etkisiyle sertleştiği bilinen (Hekimoğlu ve Savaşkan, 2016) yüzey tabasındaki mikro çatlakların büyümesi sonucu oluştuğu düşünülmektedir. Yüzeydeki çatlakların bir kısmının ise farklı çalışma anlarında yüzeye sıvanan malzemeler arasındaki sınırlar olduğu düşünülmektedir. İncelenen alaşımların aşınma deneyleri tamamlandıktan sonra toplanan aşınma parçacıklarının farklı boyutlarda ve morfolojilerde olduğu gözlendi. Gerek stronsiyum ilavesine göre gerekse de ısıl işlem durumuna göre aşınma parçacıkları arasında belirgin ve sistematik bir fark gözlenememiştir. Bu durum sert ve gevrek yüzey tabakasından ayrılan aşınma parçacıklarının yüzeyden ayrılırken aşındırıcı bilye ve yüzey arasında basıncın etkisiyle sıkışıp ufalanarak veya birbirleri temas ederek rastgele bir şekilde kırılmalarından kaynaklanmış olabilir.

Çalışmamızdan elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

Dökülmüş durumdaki Zn-40Al-2Cu alaşımının içyapısı alüminyumca zengin α dendritleri ile bu dendritler arasında yer alan ötektoid α+η faz karışımı ve bakırca zengin ε ($CuZn_4$) fazlarından oluşmaktadır.

Zn-40Al-2Cu-0,1Sr alaşımı dökülmüş durumda α dendritleri, α dendritlerini çevreleyen ötektoid α+η faz karışımı ve ε ($CuZn_4$) fazlarından oluşmakta, ancak dendiritleri Zn-40Al-2Cu alaşımındakilere göre oldukça daha ince bir yapıdadır.

T5 ısıl işleminin hem Zn-40Al-2Cu hem de Zn-40Al-2Cu-0,1Sr alaşımının dendritik içyapısı üzerinde belirgin bir değişikliğe neden olmamaktadır. Ancak T6 ısıl işlemi söz konusu alaşımların içyapısının dendritik formdan taneli bir yapıya doğru değişmesine, dendritler/taneler arası bölgenin genişlemesine ve ikincil dendrit kol mesafelerinin azalmasına yol açmaktadır.

Zn-40Al-2Cu alaşımına ağırlıkça %0,1 oranında yapılan stronsiyum ilavesi bu alaşımın sertliğini, çekme mukavemetini ve kopma uzamasını artırmaktadır.

T5 ısıl işlemi Zn-40Al-2Cu ve Zn-40Al-2Cu-0,1Sr alaşımlarının sertliğini ve çekme mukavemetini azaltırken kopma uzaması değerlerini az da olsa artırmaktadır.

T6 ısıl işlemi Zn-40Al-2Cu ve Zn-40Al-2Cu-0,1Sr alaşımlarının sertliğini ve çekme mukavemetini artırmakta, kopma uzaması değerlerini ise önemli miktarda azaltmaktadır.

Stronsiyum ilavesi Zn-40Al-2Cu alaşımının sürtünme katsayısı değerini azaltmaktadır.

Stronsiyum ilavesi Zn-40Al-2Cu alaşımında aşınma ile meydana gelen hacim kaybını azaltmakta bir başka deyişle aşınma direncini artırmaktadır.

T5 ve T6 ısıl işlemleri Zn-40Al-2Cu ve Zn-40Al-2Cu-0,1Sr alaşımlarının aşınmaya karşı direncini artırmaktadır.

4.2. Öneriler

Bu tez kapsamında Zn-40Al-2Cu alaşımına %0,1Sr ilavesi yapılarak yeni Zn-40Al-2Cu-0,1Sr alaşımı geliştirilmiştir. Çalışma kapsamında alaşım kokil döküm yöntemiyle üretilmiş olup, dökümler oda sıcaklığındaki bir kalıp kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yeni geliştirilen alaşımın içyapısı, mekanik özellikleri ve aşınma direnci hem dökülmüş hem de T5 ve T6 ısıl işlemleri uygulanmış durumlarda gerçekleştirilmiştir. Aşınma deneyleri bilye-disk esaslı bir deney düzeneğinde yağsız

koşullarda gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmanın devamı olabilecek önerilerimiz şunlardır:

Bu çalışma ile literatüre ilk kez sunulan Zn-40Al-2Cu-0,1Sr alaşımı döküm sonrası farklı soğuma hızlarında katılaştırılarak soğuma hızının bu alaşımın yapısal, mekanik ve tribolojik özelliklerine etkileri araştırılabilir.

Zn-40Al-2Cu-0,1Sr alaşımının yorulma ve darbe dayanımları incelenerek Zn-40Al-2Cu alaşımı ile karşılaştırılabilir.

Zn-40Al-2Cu-0,1Sr alaşımına farklı sıcaklık ve sürelerde çözündürme, farklı sıcaklıklarda çözündürme sonrası yaşlandırma işlemleri uygulanarak en uygun T6 ısıl işlemi koşulları araştırılabilir.

Zn-40Al-2Cu-0,1Sr alaşımı farklı yük ve hız koşullarında aşınma deneylerine tabi tutularak çalışma koşullarının söz konusu alaşımın sürtünme ve aşınma özelliklerine etkileri incelenebilir.

KAYNAKÇA

Alemdağ Y. (2007). Bakır silisyum veya nikel içeren Al-40Zn esaslı alaşımların yapısal, mekanik ve tribolojik özelliklerinin incelenmesi. Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trbazon, Türkiye, 101 s.

Alemdağ, Y. and Beder, M. (2019). Effects of zinc content on strength and wear performance of Al-12Si-3Cu based alloy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 29(12), 2463-2471.

Alemdağ, Y. and Savaşkan, T. (2008). Effects of silicon content on the mechanical properties and lubricated wear behaviour of Al-40Zn-3Cu-(0-5)Si alloys. *Tribology Letters*, 29,221-227.

Alemdağ, Y., Karabıyık, S., Pürçek G. (2021). Effect of multi-directional hot forging on mechanical and tribological properties of Al-7Si-4Zn-3Cu alloy. *Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 36(1), 255-265.

Altorfer, K. (1982). Zinc Alloys Compete with Bronze in Bearings and Bushings, *Metal Progress*, 122(6), 29-31.

Askeland, D.R. (1988). The Science and Engineering of Materials, S.I. Edition, Van Nostrand Reinhold (VNR) Company Ltd., HonG Kong.

ASM, (1990). ASM Handbook Volume 3: Alloy Phase Diagrams. ASM International, ISBN:978-1-62708-070-5.

Avner, S.H. (1974). Introduction to Physical Metallurgy, International edition, McGraw Hill Book Company, New York, USA.

Beder, M. and Alemdağ, Y. (2021). Influence of Mg addition and T6 heat treatment on microstructure, mechanical and tribological properties of Al-12Si-3Cu based alloy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 31(8), 2208-2219.

Bican, O. and Savaşkan, T. (2020). Influence of T5 heat treatment on the microstructure and lubricated wear behavior of ternary ZnAl40Cu2 and quaternary ZnAl40Cu2Si2.5 alloys/Einfluss der T5 wärmebehandlung auf das gefüge und das geschmierte verschleißverhalten von der ternären ZnAl40Cu2- und der quaternären ZnAl40Cu2Si2,5-Legierung. *Materials Science & Engineering Technology (Materialwissenschaft und Werkstofftechnik),* 51(3), 383–390. DOI:10.1002/mawe.201800222.

Calayag, T. and Ferres, D. (1983). High-performance, high-aluminum zinc alloys for low-speed bearings and bushings. *SAE Annual Conference*, Paper No 820643, 2241-2251.

Chen Z., Kang H., Fan G., Li J., Lu Y., Jie J., Zhang Y., Li, T., Jian X. and Wang T. (2016). Grain refinement of hypoeutectic Al−Si alloys with B. *Acta Materialia*, 120, 168−178.

Delneuville, P. (1985). Tribological behaviour of Zn-Al alloys (ZA27) compared with bronze when used as a bearing material with high load and very low speed. *Wear*, 105, 283-292.

Fuller, M.L. and Wilcox, R.L. (1936). Phase changes during aging of zinc-alloy die castings, II-changes in the solid solution of aluminum in zinc and their relation to dimensional changes. *Trans. Am. Inst. Min. Metall. Pet. Eng*., 122, 231–243.

Gang, H. and Ma, J. (1993). Firiction and wear of Al-Zn-Pb bearing alloy. *Wear*, 169, 201-207.

Gervais, E., Levert, H. and Bess, M. (1980). The development of a family of zinc-based foundry alloys. *American Foundrymen's Society Transaction*, 88, 183-194.

Gervais, E., Barnhurst, R.J., and Loong, C.A. (1985). An analysis of selected properties of ZA alloys. *Journal of Metals*, 37(11), 43-47.

Goodwin, F.E. and Ponikvar, A.L. (1989). Engineering properties of zinc alloys. International Lead Zinc Research Organization, Third Edition, USA, January.

Hanson, D. and Gayler, M.L.V. (1922). A further study of the alloys of aluminium and zinc. *J. Inst. Met*., 27, 267–306.

Hekimoğlu, A.P. (2013). Bakır ve/veya silisyum içeren Zn-15Al esaslı alaşımların yapısal, mekanik ve tribolojik özelliklerinin incelenmesi. Doktora Tezi, KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü.

Hekimoğlu, A.P. and Çalış, M. (2020). Effects of titanium addition on structural, mechanical, tribological, and corrosion properties of Al−25Zn−3Cu and Al−25Zn−3Cu−3Si alloys. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 30, 303−317.

Hekimoglu, A. P. and Calis, M. (2020). Effect of grain refinement with titanium on the microstructure, mechanical and corrosion properties of Al-25Zn alloy. Journal of *The Faculty of Engıneering and Architecture of Gazi University*, 35(1), 311-322.

Hekimoğlu, A.P. and Çalış, M. (2021). Effect of arc re-melting on microstructure, mechanical and tribological properties of commercial 390A alloy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 31(8), 2264-2276.

Hekimoğlu, A.P., Hacıosmanoğlu, M., and Baki, M. (2020). Effect of different zinc contents on the structural, mechanical and tribological properties of EN AC-48100 (Al-17Si-4Cu-Mg) alloy. *Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 35(4), 1799-1814.

Hekimoğlu, A.P. and Savaşkan, T. (2014). Structure and mechanical properties of Zn-(5-25)Al alloys. *International Journal of Materials Research,* 105(11), 1084-1089.

Hekimoğlu, A.P. and Savaşkan, T. (2016). Lubricated friction and wear properties of Zn-15Al-(1-5)Cu alloys. *Turkish Journal of Electromechanics & Energy,* 1(2) 1-7.

Hekimoğlu, A.P. and Savaşkan, T., (2016). Effects of contact pressure and sliding speed on the unlubricated friction and wear properties of Zn-15Al-3Cu-1Si alloy. *Tribology Transactions,* 59 (6), 1114-1121. DOI: 10.1080/10402004.2016. 1141443.

Hekimoğlu, A.P. ve Savaşkan, T. (2018). Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımı ve SAE 660 bronzunun yağlı durumdaki aşınma karakteristikleri / Lubricated wear characteristics of Zn–15Al–3Cu–1Si alloy and SAE 660 bronze. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi/Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 33(1), 145-154.

Hekimoğlu, A.P. ve Turan, Y.E. (2019). Çinko oranının Al-(5-50)Zn alaşımlarının yapısal ve mekanik özelliklerine etkisi. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 9(1), 16-25.

Hekimoğlu, A.P., Turan, Y.E., İsmailoğlu, İ.İ., Akyol, M. E. and Şen, E. (2019). Effect of boron additions on the microstructure and mechanical properties of Al−30Zn alloy. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University,* 34, 523−534.

Jovanoviç, M.T., Bobiç, I., Djuriç, B., Grohovac, N. and Iliç, N. (2007). Microstructural and sliding wear behaviour of a heat-treated zinc-based alloy. *Tribology Letters,* 25, 173-184.

Köster, W. (1941). On the synthesis and constitution of alloys of brass. III. Review of The Equilibrium in Copper-Aluminum-Zinc System. *Z. Metallkd,* 33, 289-296.

Köster, W. and Moeller, K. (1941). On the synthesis and constitution of zinc-copper-aluminum alloys. II. The Correlation of Cu-Al with The Ternary Crystalline Phase. *Z.Metallkd,* 33, 284-288.

Köster, W. and Moeller, K. (1942). The constitution and volume changes of Zn-Cu-Al alloys.V. The Division of The Ternary Phases at Low Temperatures. *Z.Metallkd,* 34, 206-207.

Lee, P.P., Savaşkan, T. and Laufer, E. (1987). Wear resistance and microstructure of Zn-Al-Si and Zn-Al-Cu alloys. *Wear,* 117, 79-89.

Lyon, R. (1986). The properties and applications of ZA alloys. *The British Foundryman,* August/ September, 344-349.

Mao, F., Chen, F., Yan, G., Wang, T., and Cao, Z. (2015). Effect of strontium addition on silicon phase and mechanical properties of Zn-27Al-3Si alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 871-879. DOI:101016/jjallcom201411013.

Maxwell, I. and Hellawell A. (1975). A simple model for grain refinement during solidification. *Acta Metallurgica*, 23, 229−237.

Mikuszewski, T. and Rafał M. (2016). Structure and hardness of the ZnAl40Cu(1-2)Ti(1-2) alloys. Solid State Phenomena. *Trans Tech Publications, Ltd.*, 246, 47–50. DOI:10.4028/www.scientific.net/ssp.246.47

Mondal, D.P., Das, S. and Rajput, V. (2005). Effect of zinc concentration and experimental parameters on high stress abrasive wear behaviour of Al-Zn alloys: a factorial design approach. *Materials Science and Engineering A*, 406, 24-33.

Murphy, S. (1980). Solid-phase reactions in the low-copper part of the Al-Cu-Zn system. *Zeitschrift Für Metallkunde*, 71, 96-102.

Murphy, S. and Savaşkan, T. (1984). Comparative wear behaviour of Zn-Al based alloys in an automotive engine application. *Wear*, 98, 151-161.

Prasad, B.J. (2004). Influence of heat treatment parameters on the lubricated sliding wear behaviour of a zinc based alloy. *Wear*, 257, 1137-1144.

Prasad, B.K., Patwardhan, A.K. and Yagneswaran, A.H. (1997). Tensile properties of some Zn-27.5 wt %Al alloys as influenced by heat treatment and test conditions. *Journal of Materials Science Letters*, 16, 1890-1893.

Prasad, B.K. (1997). Effects of silicon addition and test parameters on sliding wear characteristics of zinc-based alloy containing 37,5% aluminium. *Materials Transactions*, JIM., 38(8), 701-706.

Prasad, B.K. (2005). Sliding wear response of a zinc-based alloy and its composite and comparison with a gray cast iron: influence of exeternal lubrication andmicrostructural features. *Materials Science and Engineering A*, 392, 427-439.

Presnyakov, A.A., Gorban, Y.A. and Chrevyakova, V.V. (1961). The aluminum-zinc phase diagram. *Russian Journal of Physical Chemistry*, 35(6), 632-633.

Savaşkan, T. and Tan, H.O. (2014). Fatigue behaviour of Al–25Zn–3Cu alloy. *Materials Science and Technology*, 30(8), 938-943. DOI: 10.1179/1743284713Y.0000 000362.

Savaşkan, T. and Alemdağ, Y. (2008). Effects of pressure and sliding speed on the friction and wear properties of Al-40Zn-3Cu-2Si alloy: a comparative study with SAE 65 Bronze. *Materials Science and Engineering A*, 496, 517-523.

Savaşkan, T., Turhal, M.Ş., and Murphy, S. (2003). Effect of cooling rate on the structure and mechanical properties of monotectoid zinc-aluminium alloys. *Materials Science and Technology*, 19(1), 67-74. DOI: 10.1179/026708303225008644.

Savaşkan, T. and Murphy, S. (1986). Zn-Al esaslı yatak alaşımlarındaki faz dönüşümleri. 4. Ulusal Metalurji Kongresi, Ekim, Ankara, Bildiriler Kitabı I, 532-555.

Savaşkan, T. and Murphy, S. (1987). Mechanical properties and lubricated wear of Zn-25Al based alloys. *Wear,* 116, 221-224.

Savaşkan, T. and Hekimoğlu, A.P. (2019). T5 ve T7 Isıl işlemlerinin Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımının yağlı çalışma koşullarındaki sürtünme ve aşınma özelliklerine etkilerinin incelenmesi. *3rd International Symposium on Innovative Approaches in Scientific Studies Section: Engineering and Natural Sciences*, Ankara, Türkiye,19 Nisan – 21 Eylül, 427-433.

Savaşkan, T. and Hekimoğlu, A.P. (2015). Effect of quench-ageing treatment on the microstructure and properties of Zn-15Al-3Cu alloy. *International Journal of Materials Research*, 106(5), 481-487.

Savaşkan, T., Hekimoglu, A.P. and Pürçek, G. (2004). Effect of copper content on the mechanical and sliding wear properties of monotectoid-based zinc-aluminium copper alloys. *Tribology International*, 37(1), 45-50.

Savaşkan, T., Pürçek, G. and Hekimoğlu, A.P. (2003). Effect of copper content on the mechanical and tribological properties of ZnAl27-based alloys. *Tribology Letters*, 15(3), 257-263.

Savaskan, T. and Aydiner, A. (2004). Effects of silicon content on the mechanical and tribological properties of monotectoid-based zinc-aluminium-silicon alloys. *Wear*,257(3-4), 377-388, DOI10.1016/j.wear.2004.01.007

Savaskan, T. and Hekimoglu, A.P. (2014). Microstructure and mechanical properties of Zn-15Al-based ternary and quaternary alloys. *Materials Science and Engineering A-Structural Materials Properties Microstructure and Processing*, 603, 52-57.

Savaskan, T. and Bican, O. (2005). Effects of silicon content on the microstructural features and mechanical and sliding wear properties of Zn-40Al-2Cu-(0-5)Si alloys. *Materials Science and Engineering A-Structural Materials Properties Microstructure And Processing*, 404(1-2), 259-269. DOI:10.1016/j.msea.2005.05.078

Savaşkan, T., Hekimoğlu, A.P., Azaklı, Z. and Çalış, M. (2022). Effect of working conditions on the lubricated wear behavior of Zn-40Al-2Cu-2Si alloy in the as cast and T6 heat treated states. *Journal of Tribology-Transactions of the ASME*,144,031702-1-031702-8.

Savaşkan, T., Azaklı, Z. and Hekimoğlu, A.P. (2021). Effect of heat treatment on mechanical and wear properties of Zn-40Al-2Cu-2Si alloy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 31(9), 2651-2663. DOI: 10.1016/S1003-6326(21)65682-0.

Savaskan, T. and Hekimoglu, A.P. (2015). Effect of quench-ageing treatment on the microstructure and properties of Zn-15Al-3Cu alloy. *International Journal ofMaterials Research*, 106(5), 481-487.

Savaşkan, T. and Azaklı, Z. (2008). An Investigation of lubricated friction and wear properties of Zn-40Al-2Cu-2Si alloy in comparison with SAE 65 bearing bronze. *Wear*, 264, 920-928.

Savaşkan, T., Pürçek, G. and Murphy, S. (2002). Sliding wear of cast zinc-based alloy bearing under static and dynamic loading conditions. *Wear*, 252, 693-703.

Savaşkan, T. and Hekimoğlu, A.P. (2016). Relationships between mechanical and tribological properties of Zn-15Al-based ternary and quaternary alloys. *International Journal of Materials Research*, 107(7), 646-652. DOI: 10.3139/ 146.111390.

Savaşkan, T., Bican, O. and Alemdağ, Y. (2009). Developing aluminium-zinc-based a new alloy for tribological applications. *Journal of Materials Science*, 44(8), 1969-1976.

Savaşkan, T. (1980). The structure and properties of zinc-aluminium based bearings alloys, PhD thesis. University of Aston Birmingham.

Savaşkan, T. and Turhal, M.Ş. (2003). Relationships between cooling rate, copper content and mechanical properties of monotectoid based Zn-Al-Cu alloys. *Materials Characterization*, 51(4), 259-270.

Skanazi, A.F., Pelerin, J., Coutsouradis, D., Magnus, B. and Meeus, M. (1983). Some recent developments in the improvement of the mechanical properties of zinc foundry alloys. *Metallwissenschaft und Technik*, 37(9), 898-902.

Smith, W.F. (1996). Principles of Materials Science and Engineering, McGraw-HillInc, New York, USA.

Turhal, M.Ş. and Savaşkan, T. (2003). Relationships between secondary dendrite arm spacing and mechanical properties of Zn-40Al-Cu alloys. *Journal of Materials Science*, 38(12), 2639-2646.

Ünlü, B.S., Yılmaz, S.S. and Kurgan, N. (2009). Compare of wear and mechanical properties of bronze-ferrous, P/M-Casting bearings. *5.Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09)*, Karabük, Türkiye, Mayıs, Bildiriler Kitabı: 990-993.

Zhu, Y., Yan, B. and Huang, W. (1995). Bearing wear resistance of monotectoid Zn-Al based alloy (ZA-35). *Journal of Materials Science and Technology*, 11, 109-113.