



Investigation of the effects of T5 and T6 heat treatments on the structural, mechanical, and tribological properties of Zn-40Al-2Cu-0.1Sr alloy

Ali Paşa Hekimoğlu^{1*}, Murat Hacıosmanoğlu¹, Murat Tellioglu¹, Temel Savaşkan²

¹Mechanical Engineering Department, Faculty of Engineering and Architecture, Recep Tayyip Erdogan University, 53100, Fener, Rize, Türkiye

²Mechanical Engineering Department, Faculty of Engineering, Haliç University, 34060, Eyüpsultan, İstanbul, Türkiye

Highlights:

- T5 heat treatment increases elongation to fracture of Zn-40Al-2Cu-0.1Sr alloy.
- T6 heat treatment increases hardness and tensile strength of Zn-40Al-2Cu-0.1Sr alloy.
- T5 and T6 heat treatment reduce wear volume of Zn-40Al-2Cu-0.1Sr alloy.

Keywords:

- Zn-40Al-2Cu-0.1Sr alloy
- Microstructure
- Mechanical properties
- Friction
- Wear

Article Info:

Research Article

Received: 10.02.2023

Accepted: 26.11.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.1249792

Acknowledgement:

This work was supported by Research Fund of the Recep Tayyip Erdogan University. Project Number: FYL-2021-1245.

Correspondence:

Author: Ali Paşa Hekimoğlu
e-mail: ali.hekimoglu@erdogan.edu.tr
Phone: +90 464 223 7518 / 1959

Graphical/Tabular Abstract

Effects of T5 and T6 heat treatments on the structural, mechanical, and tribological properties of Zn-40Al-2Cu-0.1Sr alloy produced by permanent mold casting method were investigated. The hardness, tensile strength, friction coefficient and wear volume values of the alloy in as-cast, T5 and T6 heat treated conditions are given in Figure A comparatively.

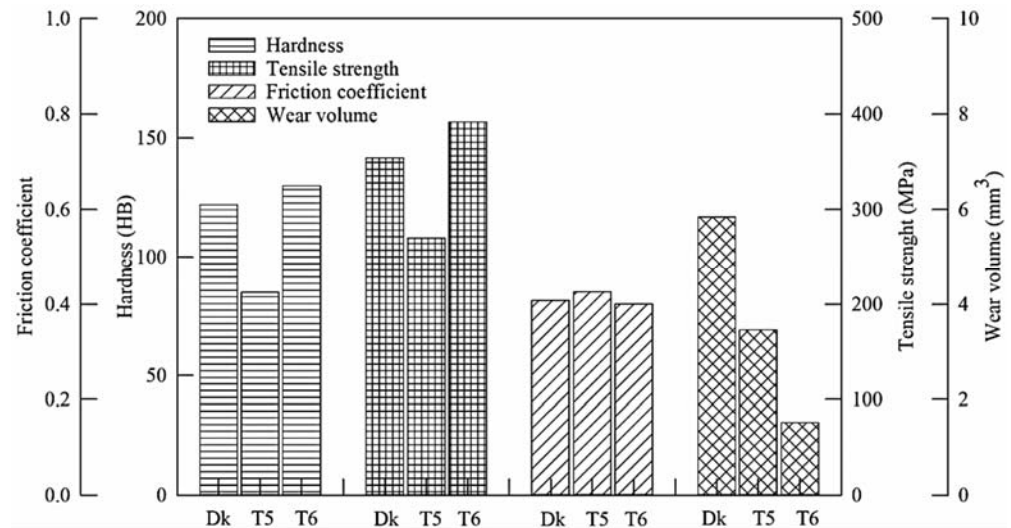


Figure A. The bars showing the hardness, tensile strength, friction coefficient, and wear volume values of the Zn-40Al-2Cu-0.1Sr alloy in as-cast, T5 and T6 heat treated conditions

Purpose: The purpose of this study is to investigate effects of T5 and T6 heat treatments on the structural, mechanical, and tribological properties of Zn-40Al-2Cu-0.1Sr alloy produced by permanent mold casting method.

Theory and Methods: Zn-40Al-2Cu-0.1Sr alloy ingot was produced by permanent mold casting method. Microstructures of the produced alloys were examined with optical, scanning electron microscopy and XRD studies. The hardness of the alloy was determined by Brinell measurement method, and its mechanical properties were determined by tensile tests performed by a universal test machine. Dry sliding friction and wear tests were carried out according to ASTM: G99 using a ball-on-disc type tribotest machine.

Results: As-cast microstructure of the alloy consisted of α dendrites, eutectoid transformation product of $\alpha+\eta$ phase mixture, copper-rich ϵ (CuZn_4) particles, and $\mu(\text{SrZn}_x)$ phase. T5 heat treatment had no significant effect on the dendritic microstructure of this alloy but T6 heat treatment removed it completely. T5 heat treatment decreased the hardness and tensile strength but caused a slight increase in the elongation to fracture of the alloy. T6 heat treatment caused an increase in hardness and tensile strength of the alloy but decreased its elongation to fracture. Both heat treatments (T5 and T6) increased the wear resistance of the alloy.

Conclusion: T5 and T6 heat treatments can be applied for improving mechanical and tribological properties of Zn-40Al-2Cu-0.1Sr alloy. Especially, T6 heat treatment significantly increases the hardness, tensile strength, and wear resistance of the Zn-40Al-2Cu-0.1Sr alloy.



T5 ve T6 ısıtma işlemlerinin Zn-40Al-2Cu-0,1Sr alaşımının yapısal, mekanik ve tribolojik özelliklerine etkilerinin incelenmesi

Ali Paşa Hekimoğlu^{1*}, Murat Hacıosmanoğlu¹, Murat Tellioglu¹, Temel Savaşkan²

¹Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 53100, Fener, Rize, Türkiye

²Haliç Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 34060, Eyüpsultan, İstanbul, Türkiye

ÖNEÇİKANLAR

- T5 ısıtma işlemi Zn-40Al-2Cu-0,1Sr alaşımının kopma uzamasını artırmaktadır
- T6 ısıtma işlemi Zn-40Al-2Cu-0,1Sr alaşımının sertlik ve çekme dayanımını artırmaktadır
- T5 ve T6 ısıtma işlemi Zn-40Al-2Cu-0,1Sr alaşımının aşınma kaybını azaltmaktadır

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 10.02.2023

Kabul: 26.11.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.1249792

Anahtar Kelimeler:

Zn-40Al-2Cu-0,1Sr alaşımı,
içyapı,
mekanik özellikler,
sürtünme,
aşınma

ÖZ

Bu çalışmada T5 ve T6 ısıtma işlemlerinin Zn-40Al-2Cu-0,1Sr alaşımının yapısal, mekanik ve tribolojik özelliklerine etkilerinin belirlenmesi amacıyla gerekli sayıda külçe kokil kalıba döküm yöntemiyle üretildi. Üretilen alaşımın yapı ve özellikleri uygun deneysel yöntemlerle incelendi. Söz konusu alaşımın dökülmüş durumdaki mikroyapısının α dendritleri ile dendritler arası bölgelerde yer alan ötektoid dönüşüm ürünü $\alpha+\eta$, bakırca zengin ϵ (CuZn_4) ve μ (SrZn_x) fazlarından oluştuğu gözlemlendi. Uygulanan T5 ısıtma işleminin bu alaşımın dendritik yapısında belirgin bir değişime yol açmadığı, T6 ısıtma işleminin ise bu yapıyı önemli ölçüde değiştirdiği gözlemlendi. T5 ısıtma işleminin incelenen alaşımın sertlik ve çekme dayanımını azaltırken kopma uzamasını az da olsa artırdığı belirlendi. T6 ısıtma işleminin alaşımın sertlik ve çekme dayanımını artırdığı, kopma uzaması değerini ise azalttığı gözlemlendi. Yapılan değerlendirme sonucunda her iki ısıtma işleminin de (T5 ve T6) söz konusu alaşımın aşınma direncini artırdığı belirlendi. Uygulanan ısıtma işlemlerinin alaşımın mekanik ve tribolojik özellikleri üzerindeki etkileri gözlenen yapısal değişimlere dayanılarak açıklandı.

Investigation of the effects of T5 and T6 heat treatments on the structural, mechanical, and tribological properties of Zn-40Al-2Cu-0.1Sr alloy

HIGHLIGHTS

- T5 heat treatment increases the elongation to fracture of Zn-40Al-2Cu-0.1Sr alloy
- T6 heat treatment increases the hardness and tensile strength of Zn-40Al-2Cu-0.1Sr alloy
- T5 and T6 heat treatment reduce the wear volume of Zn-40Al-2Cu-0.1Sr alloy

Article Info

Research Article

Received: 10.02.2023

Accepted: 26.11.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.1249792

Keywords:

Zn-40Al-2Cu-0.1Sr alloy,
microstructure,
mechanical properties,
friction,
wear

ABSTRACT

To assess the effects of T5 and T6 heat treatments on the structural, mechanical, and tribological properties of Zn-40Al-2Cu-0.1Sr alloy several ingots were produced by the permanent mold casting. The structure and properties of the alloy were investigated by appropriate test procedures. It was observed that the as-cast microstructure of the alloy consisted of α dendrites, eutectoid transformation product of $\alpha+\eta$ phase mixture, copper-rich ϵ (CuZn_4), and μ (SrZn_x) phase particles. T5 heat treatment had no significant effect on the dendritic microstructure of this alloy but T6 heat treatment removed it completely. It was also observed that T5 heat treatment decreased the hardness and tensile strength but caused a slight increase in the elongation to fracture of the alloy. T6 heat treatment caused an increase in the hardness and tensile strength of the alloy but decreased its elongation to fracture. It was also observed that both heat treatments (T5 and T6) increased the wear resistance of the alloy. The effects of the heat treatments on the mechanical and tribological properties of the alloy were explained in terms of the observed microstructural changes.

*Sorumlu Yazar/Yazarlar / Corresponding Author/Authors : *ali.hekimoglu@erdogan.edu.tr, murat.haciosmanoglu@erdogan.edu.tr, murat_tellioglu19@erdogan.edu.tr, temelsavaskan@halic.edu.tr / Tel: +90 464 223 7518 / 1959

1. Giriş (Introduction)

Avrupalı bilim insanlarının II. Dünya Savaşı yıllarından itibaren çinko (Zn)-alüminyum (Al) esaslı alaşımlar üzerinde yaptıkları yoğun çalışmalar sonucunda bu alaşımların geleneksel yatak malzemelerine alternatif olabileceği yönünde bulgular ortaya konulmuştur [1-3]. Bunun üzerine bu alaşımların yatak malzemesi olarak geliştirilmesine ve kullanımına yönelik araştırma-geliştirme çalışmaları giderek artmıştır. Bu çalışmalar sonucunda farklı oranlarda alüminyum ve alaşım elementi içeren Zn-Al esaslı üçlü ve dörtlü birçok alaşım geliştirilmiştir [4-7]. Bunlara örnek olarak Zn-40Al-2Cu, Zn-30Al-5Cu, Zn-27Al-2Cu ve Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımları verilebilir [7-10]. Geliştirilen bu alaşımların geleneksel malzemelere göre bazı avantajlara sahip oldukları belirlenmiştir [7, 8, 10]. Bu üstünlüklerin başında söz konusu alaşımların üretimlerinin kolay ve ekonomik, özgül mukavemetleri (mukavemet/yoğunluk) ve aşınma dirençlerinin daha yüksek, sürtünme katsayılarının daha düşük ve çalışma ortamındaki sert parçacıkları yutma özelliğine sahip olmaları gelmektedir [11-14]. Bu üstünlüklerine rağmen, Zn-Al esaslı alaşımların bazı uygulamalar için yetersiz kalan mukavemet değerleri ile aşınma ve korozyon dirençlerinin artırılmasına yönelik çalışmalar günümüzde de yoğun bir şekilde sürdürülmektedir [15, 17, 18]. Bu çalışmalarda Zn-Al esaslı alaşımların mukavemet değerlerinin ve dolayısıyla performanslarının alaşım elementi ilavesi, ısıl işlem uygulama ve tane inceltme gibi yöntemler ile artırılacağı görülmüştür [18-21]. Yapılan çalışmalar sonucunda Zn-Al alaşımlarının mekanik ve tribolojik özelliklerinin iyileştirilmesi için en uygun element katkısının bakır olduğu belirlenmiştir [13, 15, 17]. Özellikle %2 dolayındaki bakır katkısının farklı oranlarda alüminyum içeren Zn-Al alaşımlarının sertlik, mukavemet ve aşınma direnci değerlerini önemli ölçüde artırdığı ortaya konulmuştur [16, 17, 22]. Bakır katkısının söz konusu oranı (%2) aşması durumunda ise içyapıda oluşan yarı kararlı intermetalik ϵ (CuZn_4) fazının zamanla dönüşmesi sonucunda boyutsal kararsızlık probleminin ortaya çıktığı gözlemlenmiştir [17, 18, 23]. Zn-Al esaslı alaşımlarda özellikle kullanım sırasında ortaya çıkan bu boyutsal kararsızlık problemi T5 ısıl işlemi ile giderilebilmektedir [5, 18, 24]. Söz konusu alaşımlarda sertlik ve mukavemet değerlerinin artırılması için uygulanan ısıl işlemlerin başında ise T6 ısıl işlemi gelmektedir [25-27]. Tane inceltme yoluyla Zn-Al esaslı alaşımların mukavemetini artırmak için döküm sonrası soğuma hızının artırılması ve/veya döküm sırasında tane inceltici element katmak gerekmektedir [17, 19, 20]. Zn-40Al-2Cu alaşımına tane inceltici olarak katılan (Sr) elementinin bu alaşımın mikroyapı, mekanik ve aşınma özellikleri üzerindeki etkilerinin araştırılması sonucunda üstün mekanik ve tribolojik özelliklere sahip Zn-40Al-2Cu-0,1Sr alaşımı geliştirilmiştir [28]. Bu alaşımın üstün mekanik ve tribolojik özellikler sergilemesi, %0,1Sr katkısının içyapıdaki dendritleri inceltmesinin yanı sıra ağırlıklı olarak Zn ve Sr içeren metaller arası bir bileşik oluşturmasına dayandırılarak açıklanmıştır [28]. Ancak ısıl işlemin söz konusu alaşımın yapı ve özellikleri üzerindeki etkilerini ortaya koyan herhangi bir çalışma yapılmamıştır. Bu nedenle, bu çalışmada T5 ve T6 ısıl işlemlerinin Zn-40Al-2Cu-0,1Sr alaşımının yapısal, mekanik ve tribolojik özelliklerine etkilerinin belirlenmesi amaçlanmıştır.

2. Materyal ve Metot (Material and Method)

2.1. Alaşımın üretimi (Production of the Alloy)

Zn-40Al-2Cu-0,1Sr alaşımı indüksiyon ocağında ergitilip kokil kalıba dökülerek üretildi. Elde edilen alaşımın kimyasal bileşimi spark optik emisyon spektrometresi (Spark OES) yöntemi ile belirlendi. Alaşımın üretiminde %99,9 saflıkta çinko ve %99,8 saflıkta alüminyum ile Al-50Cu ve Al-15Sr master alaşımları kullanıldı. Alaşım elementleri/bileşenleri, kütleleri ölçüldükten sonra Şekil 1'de fotoğrafı verilen 50 kW gücüne sahip SiC potalı bir indüksiyon ocağına yerleştirildi ve bu ocakta orta frekanslarda ergitildi. Ergimiş durumdaki sıvı metal özellikle Al-15Sr master alaşımındaki

stronsiyumun homojen dağılım sergilemesi amacıyla karıştırıldıktan sonra 650°C dolayındaki bir sıcaklıktan, teknik resmi ve fotoğrafı Şekil 2'de verilen SAE 8620 çeliğinden yapılmış bir kalıcı kalıba [17, 19, 20, 29] dökülerek katılaştırıldı.

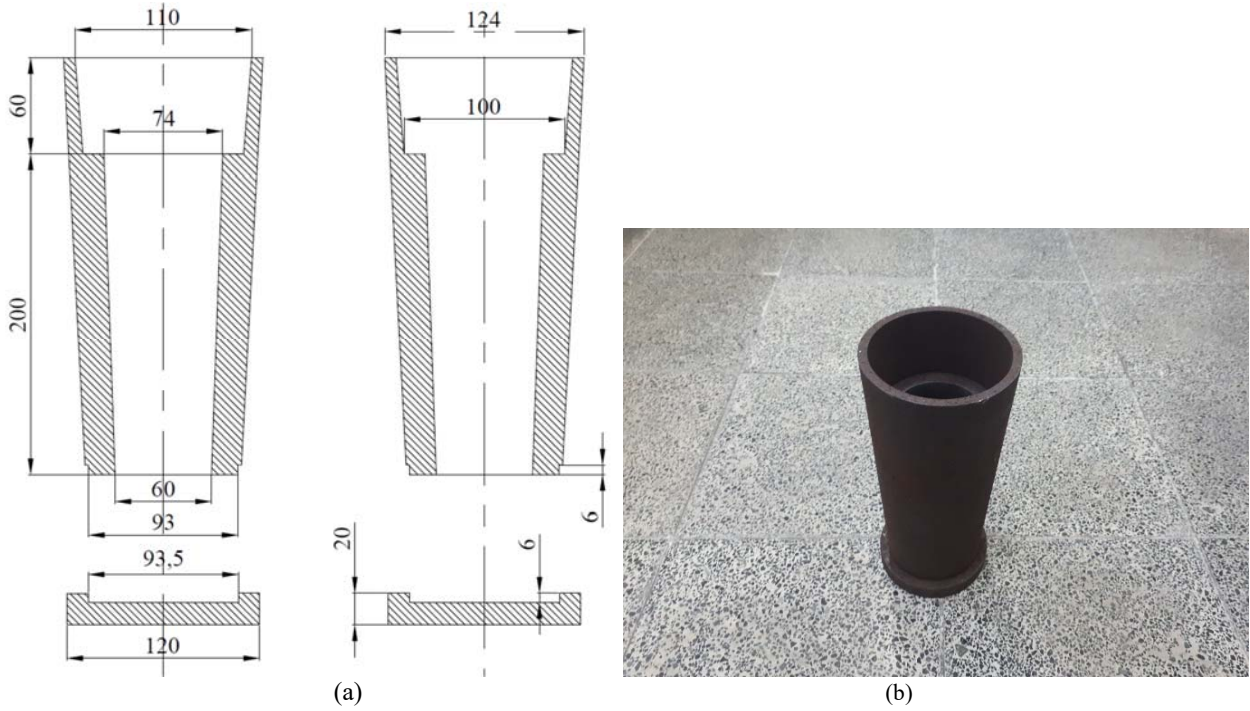
Üretilen alaşımın dökülmüş ve ısıl işlem (T5 ve T6) görmüş durumdaki yapı ve özellikleri uygun yöntemlerle incelendi. T5 işlemi, alaşımın 150°C sıcaklıkta 100 saatlik bir süre yaşlandırılması ile uygulandı. T6 ısıl işlemi ise alaşımın 375°C sıcaklıkta 36 saatlik bir süre çözündürülmesi, su verilmesi ve 180°C sıcaklıkta 2 dakikalık bir süre yaşlandırılması ile gerçekleştirildi. Isıl işlem koşulları bu konuda daha önce yapılan çalışmalardan [15, 18, 30] elde edilen verilerden yararlanılarak belirlendi.



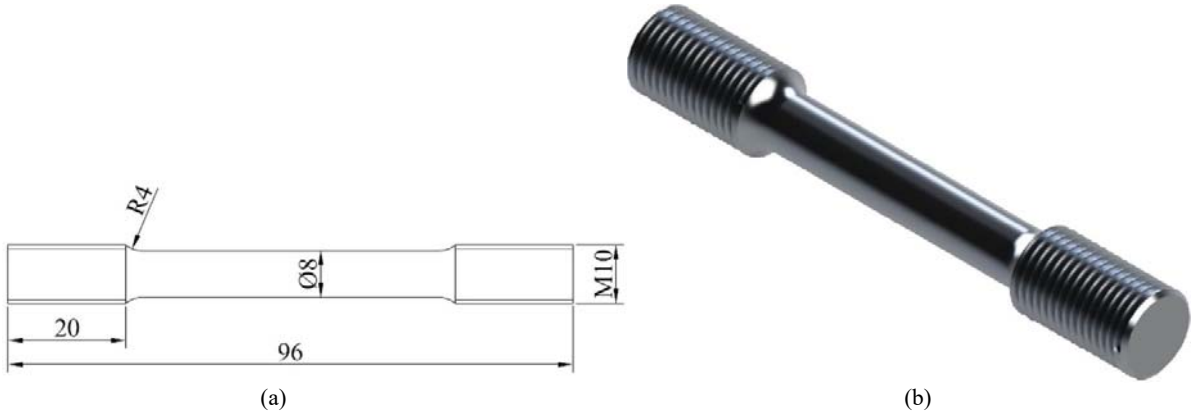
Şekil 1. Çalışmada kullanılan döküm ocağının fotoğrafı (A photograph of the induction casting furnace used in the study)

2.2. Yapısal ve Mekanik Özelliklerin İncelenmesi (Examination of the Structural and Mechanical Properties)

Alaşımın mikroyapısal ve mekanik özellikleri talaşlı imalat yöntemleri ile hazırlanan örnekler kullanılarak incelendi. İyapı incelemeleri ve sertlik ölçümleri $\text{Ø}15 \times 10$ mm boyutlarında silindirik numuneler kullanılarak gerçekleştirildi. İyapı incelemeleri için gerekli numuneler standart metalografik yöntemler uygulanarak hazırlandı. Bu kapsamda numunelerin yüzeyleri 300, 600, 1200 ve 2000 numaralı zımparalar ile taşlandıktan sonra 9 ve 3 μm 'lik elmas ve 0,05 μm 'lik SiO_2 süspansiyonlar kullanılarak parlatıldı. Bu aşamadan sonra numuneler %5'lik Nital (nitrik asit+etil alkol) ayırıcı ile dağıldı. Dağlanmış durumdaki numuneler optik (OM) ve taramalı elektron mikroskopunda (SEM) incelendi ve alaşımın dökülmüş ve ısıl işlem görmüş numunelerinin metalografik yapıları görüntüldü. Alaşımın içyapısındaki fazlar mikroskobik gözlemler, enerji dispersiyon spektroskopisi (EDS) analizleri ve X-ışını difraksiyonu (XRD) yardımı ile belirlendi. XRD çalışmaları yassı numuneler üzerinde 35-60° tarama aralığında, 1°/dk'lık tarama hızında, 1,54059 Å dalga boyuna sahip $\text{CuK}\alpha$ radyasyonu kullanılarak gerçekleştirildi. Alaşım örneklerinin sertliği Brinell sertlik ölçüm yöntemi ile belirlendi. Sertlik ölçümleri 62,5 $\text{kg}\times\text{f}$ yük altında 2,5 mm çapında bir bilye uç kullanılarak yapıldı. Numuneler üzerinde en az on ölçüm gerçekleştirildi ve elde edilen sonuçların ortalaması alınarak alaşım örneklerinin sertliği belirlendi. Çekme deneyleri, üniversal bir deney makinesinde izometrik resmi Şekil 3'te verilen $\text{Ø}8 \times 40$ mm ölçü boyuna sahip numuneler kullanılarak 10^{-3} s^{-1} 'lik deformasyon hızında yapıldı. Bu deneylerde en az altı numune kullanıldı.



Şekil 2. Alaşımın üretiminde kullanılan çelik kalıbın (kokil) teknik resmi (a) ve fotoğrafı (b)
(Technical drawing (a) and a photograph (b) of the permanent mold used in the production of the alloy)



Şekil 3. Çekme deneyi numunesinin (a) teknik ve (b) izometrik resimleri
(a) Technical and (b) isometric drawing of tensile test samples)

2.3. Sürtünme ve Aşınma Özelliklerinin İncelenmesi (Examination of the Friction and Wear Properties)

Üretilen alaşımın hem dökülmüş hem de ısıtılmış işlem uygulanmış durumlardaki örneklerinin tribolojik deneyleri izometrik çizimi Şekil 4'te verilen bilye-disk esaslı bir test düzeneğinde gerçekleştirildi. Bu deney düzeneği hakkında literatürde [31-33] ayrıntılı bilgi yer almaktadır. Söz konusu düzeneğin çalışma prensibi aşındırıcı bir bilyenin ayarlanabilir devirlerde dönebilen bir disk üzerine yerleştirilen numuneyi aşındırması esasına dayanmaktadır. Sürtünme ve aşınma deneylerinde aşındırıcı olarak çapı 6 mm olan ve sertliği 58-62 RSD-C arasında değişen AISI 52100 (100Cr6) çeliğinden imal edilmiş bir bilye kullanıldı. Yükleme işlemi düzenekteki yüklem koluna ağırlık asılarak gerçekleştirildi. Deneyler sırasında bir sensör yardımıyla kaydedilen sürtünme kuvveti bir yazılım tarafından işlenip uygulanan normal yüke bölünerek incelenen alaşım numunesinin sürtünme katsayısı hesaplandı. Bu deneyler izometrik görüntüsü Şekil

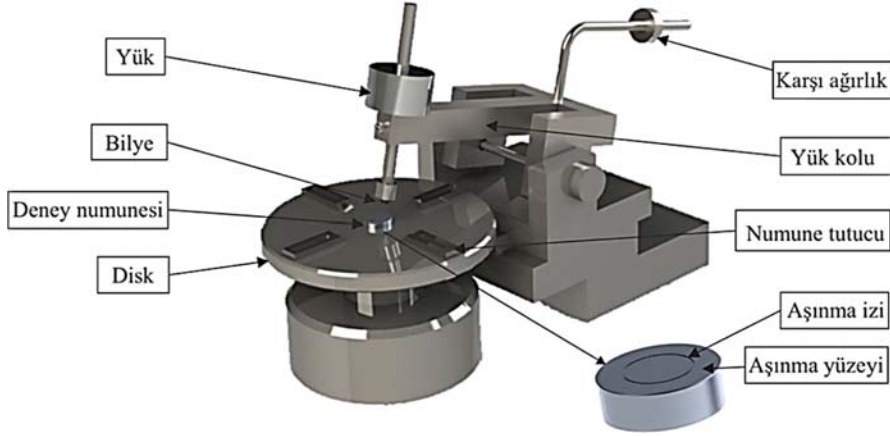
4'teki fotoğrafta yer alan $\text{Ø}17 \times 5$ mm boyutlarındaki deney numuneleri ile gerçekleştirildi. Tornalama yöntemiyle hazırlanan numunelerin yüzeyleri deneylerden önce 1200 numaralı zımpara kullanılarak taşlandı. Aşınma deneyleri yağsız ortamda, 5 N'luk sabit yük altında ve 0,15 m/s'lik kayma hızında 1000 m'lik kayma mesafesi tamamlanarak gerçekleştirildi. Deney parametreleri literatürde yer alan benzer çalışmalar [20, 29, 34] dikkate alınarak belirlendi. Numuneler testlerden önce ve sonra ultrasonik bir temizleyicide art arda trikloretilen (C_2HCl_3) ve alkol-aseton karışımı banyolarında temizlendi. Bu numuneler daha sonra sıcak hava üflenerek kurutuldu ve kütleleri 0,01 mg'lık hassasiyete sahip bir elektronik terazi ile tartıldı. Deneylere başlamadan önce elde edilen ölçüm değerleri ile deney sonrası elde edilen değerler arasındaki fark numunelerin özkütle değerlerine bölünerek hacim kaybı değerleri hesaplandı. Aşınan numune yüzeyleri ve toplanan aşınma parçacıkları taramalı elektron mikroskobu (SEM) yardımı ile incelenerek alaşımdaki karakteristik aşınma iz ve belirtilerini gösteren fotoğraflar çekildi.

3. Sonuçlar ve Tartışmalar (Results and Discussions)

Çalışılan alaşımın kimyasal bileşimi Tablo 1’de sunulmuş ve dökülmüş ve ısı işleme görmüş durumdaki içyapılarını gösteren fotoğraflar, alaşım elementlerinin içyapıdaki dağılımlarını gösteren EDS haritalama görüntüleri ve X-ışını difraksiyon desenleri ise Şekil 5-Şekil 7’de verilmiştir. Alaşımın dökülmüş durumdaki içyapısının α dendritleri ile $\alpha+\eta$ ve ϵ (CuZn_4) fazlarından oluştuğu belirlendi, Şekil 5a-Şekil 5d. Ayrıca bu mikroyapıda, beyaz görünümlü ve keskin

köşeli yeni bir mikroyapı elemanının (faz) yer aldığı gözlemlendi, Şekil 5b. Zn, Sr, Cu ve Al elementlerini içeren bu yapı elemanı μ fazı olarak adlandırıldı [35]. Alaşımın içyapısını oluşturan fazların kimyasal bileşimleri Tablo 2’de verilmiştir. Söz konusu içyapının oluşumu literatürde ayrıntılı biçimde açıklanmıştır [6, 7, 17].

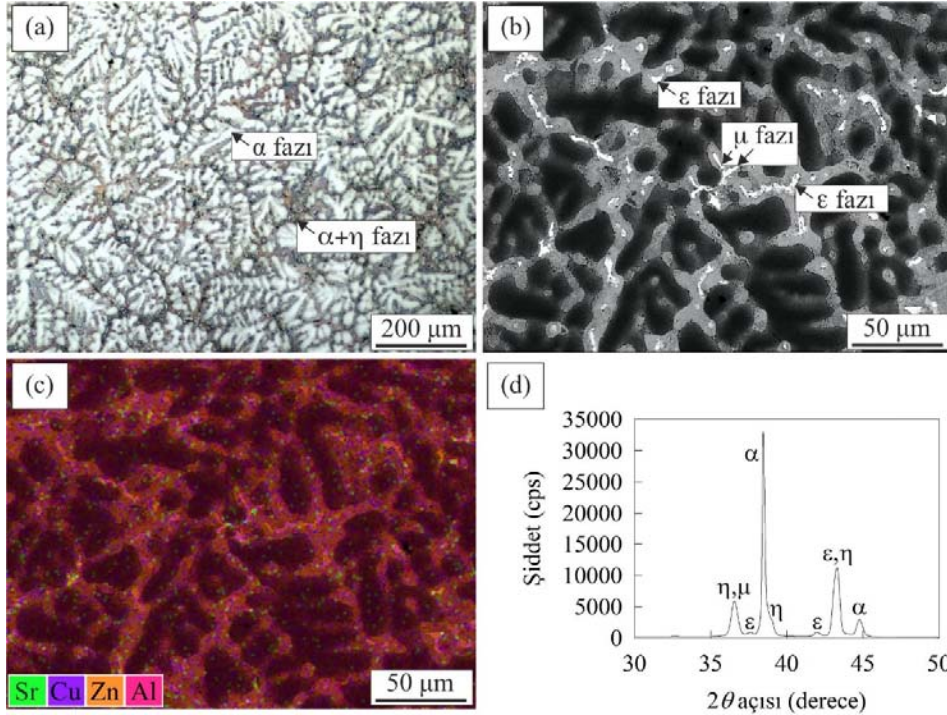
T5 ısı işleminin Zn-40Al-2Cu-0,1Sr alaşımının içyapısında önemli bir değişikliğe yol açmadığı gözlemlendi, Şekil 6a-Şekil 6d. Bu durum literatürde [18] de belirtildiği gibi T5 ısı işleminin kritik dönüşüm



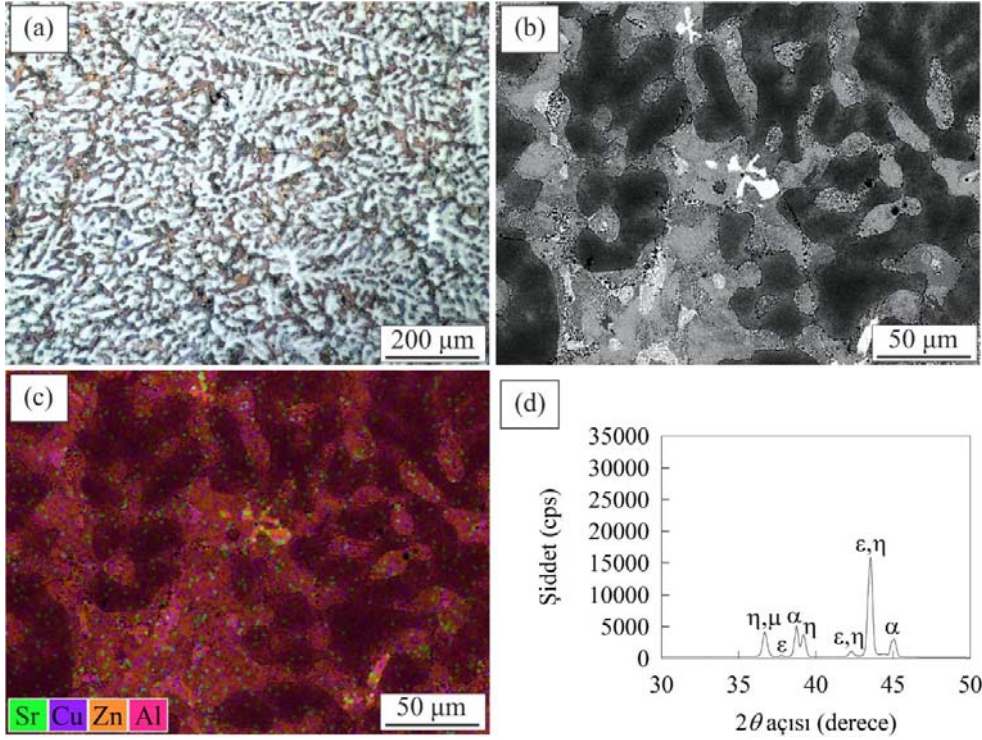
Şekil 4. Aşınma deney düzeneği ve numunesinin izometrik görüntüsü (Isometric view of the wear test setup and sample)

Tablo 1. İncelenen alaşımın kimyasal bileşimi (Chemical composition of the alloy tested)

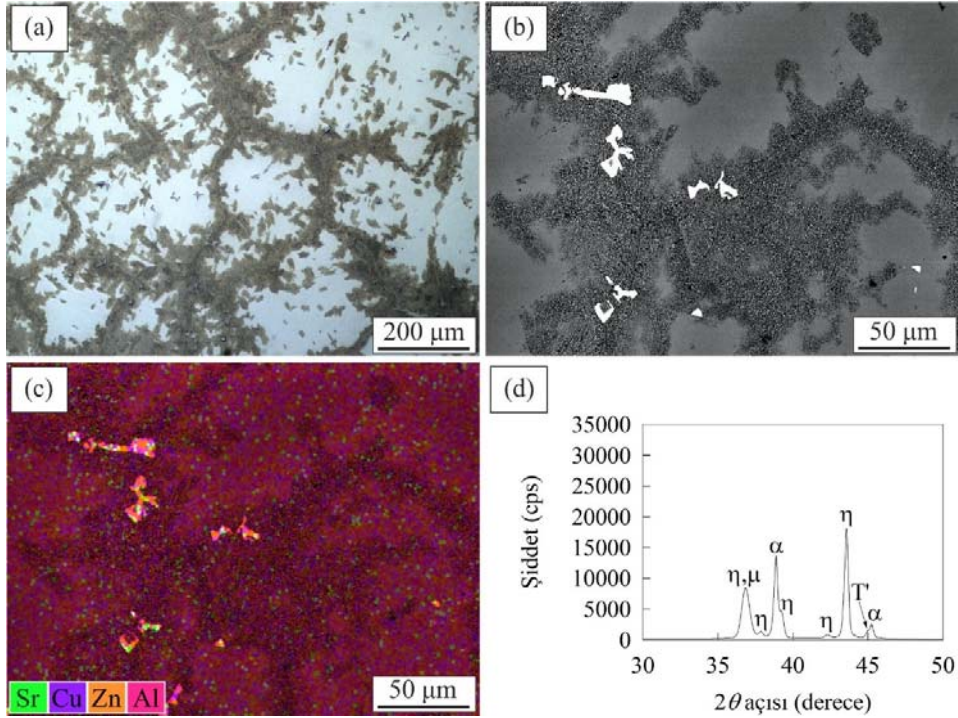
Alaşım	Kimyasal bileşim (ağırlıkça %)				
	Al	Cu	Sr	Safsızlık elementleri (Fe, Si, Mg, Cr, Ba, P, Ca, Ni, Ti, etc)	Zn
Zn-40Al-2Cu-0,1Sr	39,9	1,9	0,12	0,4	Kalan



Şekil 5. Alaşımın dökülmüş durumdaki numunesinin mikro yapısının a) OM görüntüsü, b) SEM görüntüsü, c) EDS haritalama görüntüsü, d) X-ışını difraksiyon deseni (a) OM image, b) SEM image, c) EDS mapping image showing elemental distribution in the microstructure, and d) X-ray diffraction pattern of the as-cast alloy)



Şekil 6. Alaşımın T5 ısısal işlemi uygulanmış numunesinin mikroyapısının a) OM görüntüsü, b) SEM görüntüsü, c) element dağılımını gösteren EDS haritalama görüntüsü, d) X-ışını difraksiyon deseni (a) OM image, b) SEM image, c) EDS mapping image showing elemental distribution in the microstructure, and d) X-ray diffraction pattern of the T5 heat treated sample of the alloy)



Şekil 7. Alaşımın T6 ısısal işlemi uygulanmış numunesinin mikroyapısının a) OM görüntüsü, b) SEM görüntüsü, c) element dağılımını gösteren EDS haritalama görüntüsü, d) X-ışını difraksiyon deseni (a) OM image, b) SEM image, c) EDS mapping image showing elemental distribution in the microstructure, and d) X-ray diffraction pattern of the T6 heat treated sample of the alloy)

sıcaklığından (275°C) daha düşük bir sıcaklıkta uygulanmasından ortaya çıkmaktadır. Bu ısısal işlemde sadece döküm yapısındaki yarı kararlı fazlar kararlı fazlara dönüşmektedir [18]. Bu fazların hacimsel

oranları çok düşük olduğundan T5 ısısal işleminin alaşımın içyapısında önemli bir değişime yol açması beklenen bir durum değildir. Uygulanan T6 ısısal işleminin alaşımın dendritik yapısını tamamen

Tablo 2. Zn-40Al-2Cu-0,1Sr alaşıminin içyapısındaki fazların kimyasal bileşimleri
(Chemical compositions of the phases of Zn-40Al-2Cu-0.1Sr alloy)

Durum	Faz	Kimyasal bileşim (% ağırlık)			
		Al	Cu	Sr	Zn
Dökülmüş [25]	α	64,7-66,7	0-1,1	0-0,2	33,3-34,0
	$\alpha+\eta$	38,3-47,6	2,1-3,7	0-0,1	49,9-60,6
	ε	0,8-24,0	8,9-13,5	0-0,1	58,5-90,3
	μ (Zn-Sr-Cu-Al)	2,2-5,6	3,6-7,0	6,4-8,6	80,5-85,6
T5 ısıtıl işlemi uygulanmış	α	53,7-63,6	0-1,5	0,2-0,6	35,8-45,1
	$\alpha+\eta$	24,2-27,9	1,5-2,9	0-0,4	69,7-73,9
	ε	9,8-18,6	12,7-24,9	0-0,1	56,5-77,1
	μ (Zn-Sr-Cu-Al)	2,0-2,9	3,9-5,1	7,7-9,8	83,7-85,8
T6 ısıtıl işlemi uygulanmış	α	37,3-42,0	1,4-2,9	0-0,4	56,5-59,7
	$\alpha+\eta$	36,6-42,3	1,7-3,0	0-0,4	55,3-61,1
	μ (Zn-Sr-Cu-Al)	2,5-23,9	3,2-7,0	4,8-8,5	67,5-82,9

Tablo 3. İncelenen alaşımin bazı fiziksel ve mekanik özelliklerine ait değerler
(The values of some physical and mechanical properties of the alloy tested)

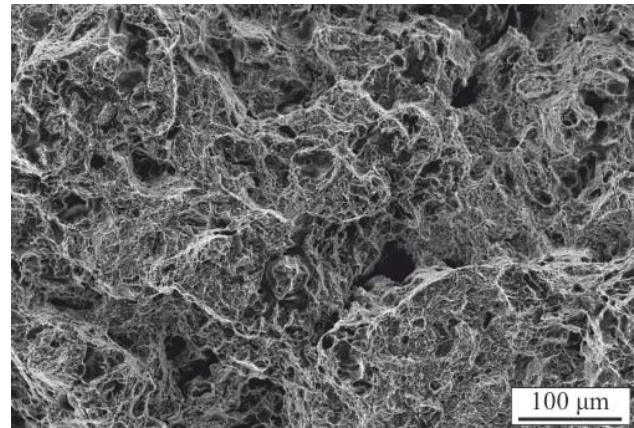
Alaşım	Yoğunluk (g/mm ³)	Sertlik (BSD)	Çekme dayanımı (MPa)	Kopma uzaması (%)
Zn-40Al-2Cu-0,1Sr (Dk)	0,004280495	122	354	13
Zn-40Al-2Cu-0,1Sr (T5)	0,004209579	85	270	14
Zn-40Al-2Cu-0,1Sr (T6)	0,004214855	130	392	7

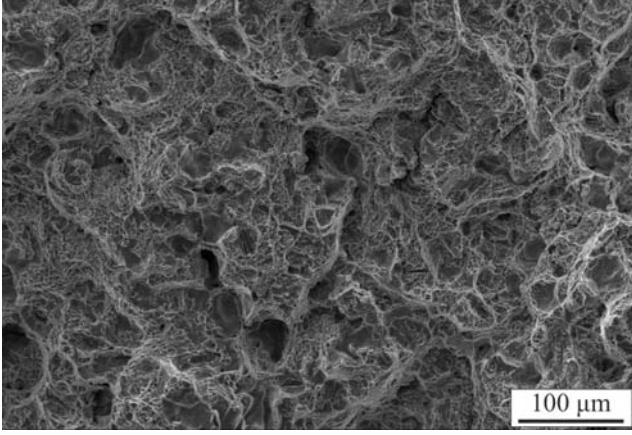
ortadan kaldırdığı ve bunun yerini taneli bir yapının aldığı görüldü, Şekil 7a ve b. Ayrıca alaşımın dökülmüş durumdaki içyapısında bulunan ε fazının T6 ısıtıl işlemi sonrası ortadan kalktığı ve özellikle tane sınırlarında yoğun biçimde η fazının çökeldiği gözlemlendi, Şekil 7c ve Şekil 7d. Bu yapısal değişim T6 ısıtıl işleminin aşama ve koşullarına göre açıklanabilir. Bilindiği gibi T6 ısıtıl işlemi çözündürme, hızlı soğutma (su verme) ve yapay yaşlandırma aşamalarını içermektedir [5, 18]. Bu çalışmada 375°C sıcaklıkta uygulanan 36 süreli çözündürme işlemi çinkoca zengin η ve ε fazlarının alüminyumca zengin α fazı içerisinde tamamen çözünmesini sağlamaktadır. Başka bir deyişle çözündürme aşamasında yarı kararlı ε fazı, α fazı ile tepkimeye ($\alpha + \varepsilon \rightleftharpoons T' + \eta$) girerek T' ve η fazlarını oluşturmaktadır [36, 37]. Su verme aşaması sonunda aşırı doymuş α katı çözeltisi elde edilmektedir. Yapay yaşlandırma sırasında ise aşırı doymuş α katı çözeltisinin tane sınırlarında çekirdeklenme ve büyüme mekanizması ile çinkoca zengin η çökeltileri oluşmaktadır. Çökeltilerin daha çok tane sınırlarında oluşması bu bölgelerdeki çinko oranının daha yüksek ve enerji seviyelerinin uygun olmasından kaynaklanmaktadır [5].

Zn-40Al-2Cu-0,1Sr alaşıminin dökülmüş ve T5 ve T6 ısıtıl işlemleri uygulanmış durumlardaki bazı fiziksel ve mekanik özelliklerine ait değerler Tablo 3'te verilmiştir. T5 ısıtıl işleminin bu alaşımın sertliğinde %30 (37 BSD), çekme dayanımında ise %23,7 (84 MPa) oranlarında azalmaya yol açtığı görülmektedir. Alaşımın sertlik ve mukavemetinde gözlenen bu azalmalar literatürde [18, 24] de belirtildiği gibi T5 ısıtıl işlemi sırasında alaşımın dökülmüş durumdaki numunesinde bulunan kalıntı gerilmelerin giderilmesi ve kararsız veya yarı kararlı fazların dönüşmesinden kaynaklanmaktadır. T6 ısıtıl işleminin ise Zn-40Al-2Cu-0,1Sr alaşıminin sertliğini %6,6 (8 BSD), çekme dayanımını %10,7 (38 MPa) oranlarında artırdığı gözlenmiştir. Öte yandan T5 ısıtıl işlemi söz konusu alaşımın kopma uzamasını %7,7 oranında artırırken, T6 ısıtıl işleminin bu değeri %46 oranında azalttığı görülmektedir. Alaşımın sertlik ve çekme dayanımında meydana gelen bu artışlar çökeltme sertleşmesi mekanizmasından kaynaklanmaktadır [15, 27]. T6 ısıtıl işlemi kapsamındaki çözündürme ve su verme aşamalarından sonra aşırı doymuş durumdaki α fazının yaşlandırılması sırasında çekirdeklenme ve büyüme mekanizması ile η çökeltileri oluşmaktadır [18, 32, 38]. Çökeltme sırasında oluşan

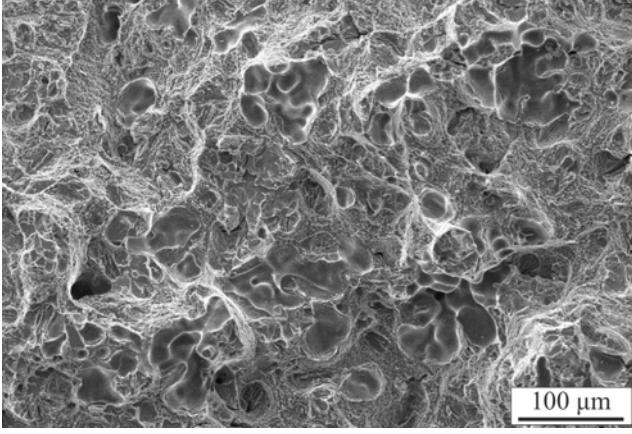
bağdaşıklık gerilmelerinin etkisi ile α matrisinin kafes yapısında meydana gelen çarpılma alaşımın sertlik ve mukavemetinin artmasına, kopma uzamasının ise azalmasına yol açmaktadır [5, 18]. Ayrıca, nispeten iri yapılu ε fazının ortadan kalkarak onun yerini ince taneli ve sert intermetalik T' fazının [36, 37] alması da mukavemet artışına katkı sağlamış olabilir.

İncelenen alaşımın çekme deneyine tabi tutulan numunelerinin kırılma yüzeylerinde çukurlar, boşluklar, ayrılma sınırları ve kırılma belirtileri gözlemlendi, (Şekil 8-Şekil 10). Dökülmüş ve T5 ısıtıl işlemi görmüş numunelerin kırılma yüzeyleri sünek kırılmayı karakterize eden mat ve lifli bir görünüme sergiledi (Şekil 8 ve Şekil 9). Çukurların ve ayrılma sınırlarının fazlalığı alaşımın sünekliğinin yüksek olmasından kaynaklanmış olabilir. Alaşımın T6 ısıtıl işlemi uygulanmış örneğinin kırılma yüzeyinin ise gevrek kırılmanın belirtisi olan nispeten parlak ve kristalin görünüme sergilediği gözlemlendi (Şekil 10). Bu durum yaşlandırma sırasında sertliği artan α tanelerinin nispeten gevrek kırılma davranışı sergilemelerinden kaynaklanmaktadır.

**Şekil 8.** Dökülmüş durumdaki alaşımın çekme deneyi numunesinin kırılma yüzeyinin fotoğrafı
(SEM image of the fracture surface of tensile test sample of the as-cast alloy)



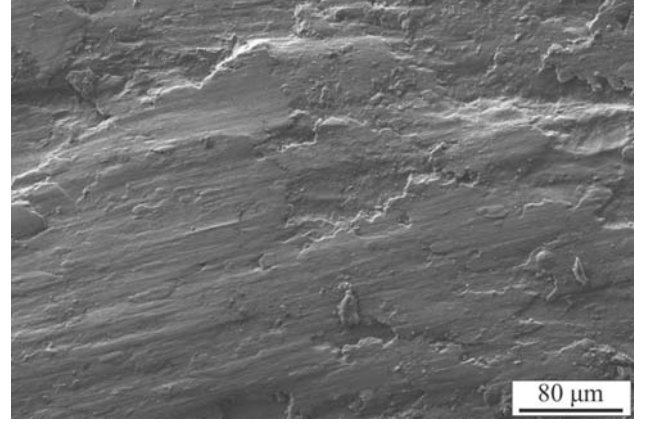
Şekil 9. Alaşımın T5 ısıtılması sonrası çekme deneyine tabi tutulan numunesinin kırılma yüzeyinin fotoğrafı
(SEM image of the fracture surface of tensile test sample of the T5 heat treated alloy)



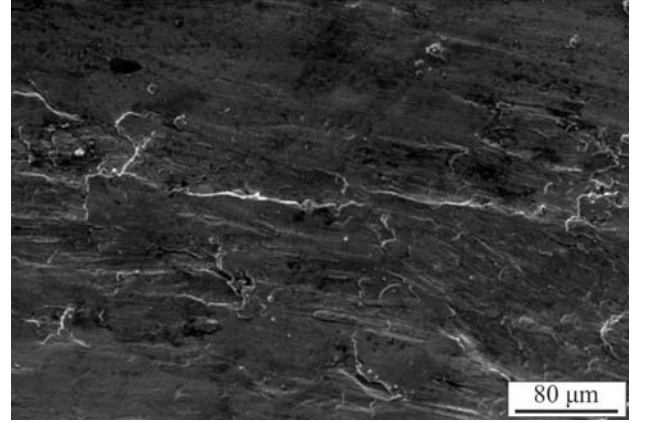
Şekil 10. Alaşımın T6 ısıtılması sonrası çekme deneyine tabi tutulan numunesinin kırılma yüzeyinin görüntüsü
(SEM image of the fracture surface of tensile test sample of the T6 heat treated alloy)

T5 ve T6 ısıtılması işlemlerinin Zn-40Al-2Cu-0,1Sr alaşımında aşınma nedeniyle meydana gelen hacim kaybını azalttığı, bir başka deyişle alaşımın aşınma direncini artırdığı görüldü, Tablo 4. T5 ısıtılması işleminin aşınma direncine etkisi alaşımın sertliğinin azalması ve sünekliğinin artmasına dayandırılarak açıklanabilir. Şöyle ki, malzemelerin sertliği azalıp sünekliği arttıkça aşınma parçacıklarının yüzeye sıvanması kolaylaşır [28]. T5 ısıtılması işleminin sertlik ve mukavemeti azaltması nedeniyle yüzeyde meydana gelen deformasyon ve aşınma miktarı artsa bile aşınan malzemenin yüzeyden ayrılmasının zorlaşması veya basınç ve sıcaklık etkisiyle tekrar yüzeye yapışması aşınma kaybının azalmasına yol açmaktadır. T6 ısıtılması işleminin hacim kaybını azaltması yani aşınma direncini artırması ise alaşımın sertlik ve mukavemetinde meydana gelen artıştan kaynaklanmaktadır. Nitekim Zn-Al alaşımlarında aşınma direncinin sertlik ve mukavemet arttıkça arttığı bilinmektedir [18,39].

İncelenen alaşım örneklerinin aşınma yüzeylerinde yoğun sıvanma belirtileri gözlemlendi, Şekil 10-Şekil 13. Belirgin sıvanma ve yapışmanın gözlenmesi alaşım numunelerinde adhezif aşınmanın etkin olduğunu göstermektedir [29,40]. Söz konusu sıvanmanın aşınma nedeniyle yüzeyden ayrılan malzemenin basınç ve sıcaklığın etkisiyle tekrar yüzeye yapışmasından kaynaklandığı ileri sürülmektedir [40,41].



Şekil 11. Dökülmüş durumdaki alaşım örneğinin aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü
(SEM image of wear surface of the as-cast alloy sample)

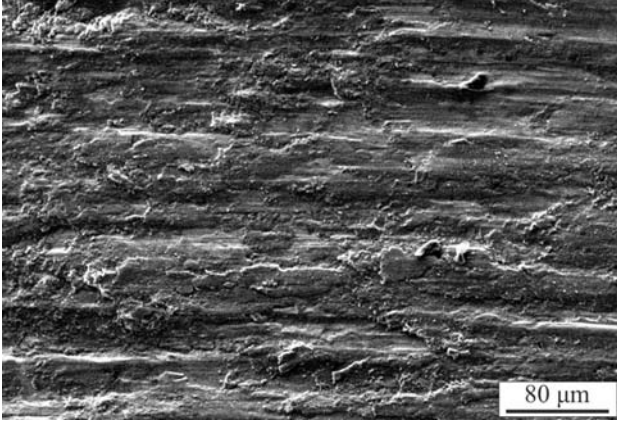


Şekil 12. T5 ısıtılması işlemi uygulanmış alaşım numunesinin aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü
(SEM image of wear surface of the T5 heat treated alloy sample)

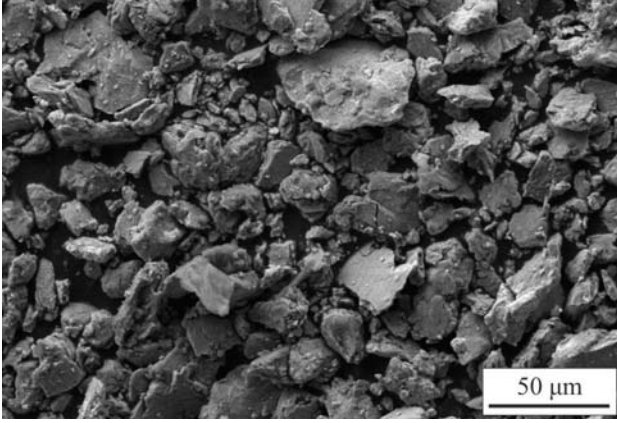
Aşınma deneyleri sonunda numunelerden toplanan aşınma parçacıklarının farklı boyut ve morfolojiye sahip oldukları görüldü (Şekil 14-Şekil 16). Dökülmüş durumdaki numunenin aşınma parçacıklarının genelde geniş ve yassı, ısıtılması işlem görmüş numunelerin aşınma parçacıklarının ise küçük boyutlu ve topaklanmış görünüme sahip oldukları gözlemlendi. Bu durum sert ve gevrek yüzey tabakasından ayrılan aşınma parçacıklarının yüzeyden ayrılırken aşındırıcı bilye ve yüzey arasında sıkışıp basıncın etkisiyle ufulanarak veya birbirlerine temas ederek kırılmalarından kaynaklanmıştır olabilir.

Tablo 4. Aşınma deneylerinden elde edilen sonuçlar (The results obtained from the wear tests)

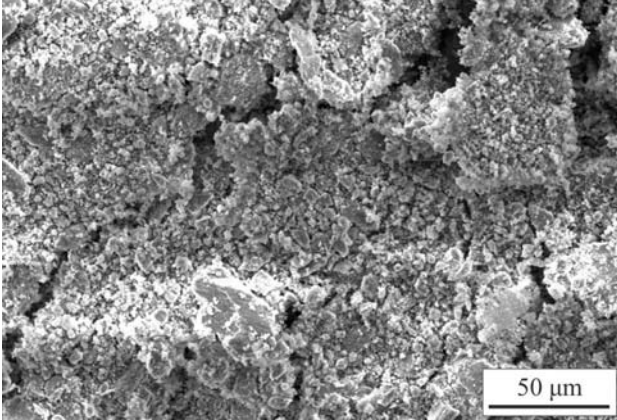
Alaşım	Sürtünme katsayısı	Hacim Kaybı (mm ³)	Aşınma direnci (1/mm ³)
Zn-40Al-2Cu-0,1Sr (Dk)	0,408	5,845	0,171
Zn-40Al-2Cu-0,1Sr (T5)	0,426	3,456	0,289
Zn-40Al-2Cu-0,1Sr (T6)	0,401	1,522	0,657



Şekil 13. T6 ısıt işlemleri uygulanmış alaşım numunesinin aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü
(SEM image of wear surface of the T6 heat treated alloy sample)



Şekil 14. Dökülmüş durumdaki alaşım numunesine ait aşınma parçacıklarının SEM görüntüsü
(SEM image of wear particles of the as-cast alloy sample)

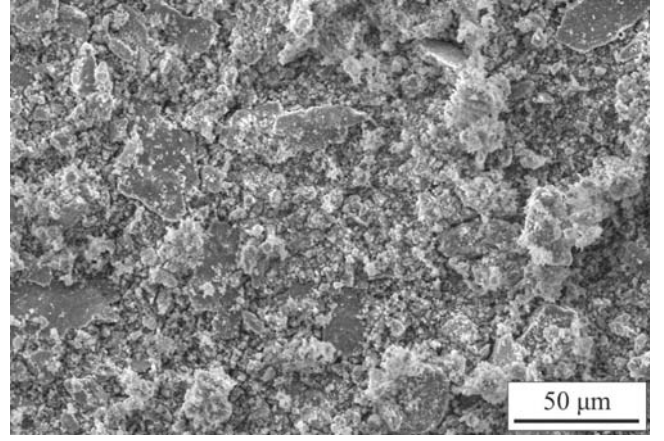


Şekil 15. T5 ısıt işlemleri uygulanmış alaşım numunesine ait aşınma parçacıklarının SEM görüntüsü
(SEM image of wear particles of the T5 heat treated alloy sample)

4. Sonuçlar (Conclusions)

T5 ve T6 ısıt işlemlerinin Zn-40Al-2Cu-0,1Sr alaşımın yapısal, mekanik ve tribolojik özelliklerine etkilerinin belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilen bu çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir:

- Zn-40Al-2Cu-0,1Sr alaşımının dökülmüş durumdaki mikroyapısı α dendritleri ile ötektoid dönüşüm ürünü $\alpha+\eta$, ϵ (CuZn) ve μ fazlarından oluşmaktadır.
- T5 ısıt işlemleri Zn-40Al-2Cu-0,1Sr alaşımının dendritik yapısı üzerinde belirgin bir değişime yol açmamaktadır. T6 ısıt işlemleri ise söz konusu alaşımın dendritik yapısının ortadan kalkmasına ve bunun yerine taneli bir yapının oluşmasına neden olmaktadır.
- T5 ısıt işlemleri Zn-40Al-2Cu-0,1Sr alaşımının sertlik ve çekme dayanımını düşürürken kopma uzamasını az da olsa artırmaktadır.
- T6 ısıt işlemleri Zn-40Al-2Cu-0,1Sr alaşımının sertlik ve çekme dayanımını artırmakta, kopma uzamasını ise önemli ölçüde azaltmaktadır.
- T5 ısıt işlemleri Zn-40Al-2Cu-0,1Sr alaşımının sürtünme katsayısını artırırken hacim kaybını azaltmaktadır. T6 ısıt işlemleri ise söz konusu alaşımın hem sürtünme katsayısını hem de aşınma kaybını azaltmaktadır. Bu sonuçlar uygulanan ısıt işlemlerinin etkisi ile alaşımın sertlik ve mukavemetinde meydana gelen değişimlerden kaynaklanmaktadır.



Şekil 16. T6 ısıt işlemleri uygulanmış alaşım numunesine ait aşınma parçacıklarının SEM görüntüsü
(SEM image of wear particles of the T6 heat treated alloy)

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışma Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimince Desteklenmiştir. Proje Numarası: FYL-2021-1245. İncelenen alaşımın dökümlerindeki katkısından dolayı Mak. Yük. Müh. Merve Çalış Özekinci'ye teşekkür ederiz.

Kaynaklar (References)

1. Goodwin F.E, Ponikvar A.L, Engineering properties of zinc alloys, International Lead Zinc Research Organization, 3rd ed., 148, 1989.
2. Gervais E., Barnhurst R.J, Loong C.A., An Analysis of Selected Properties of ZA Alloys. Jom, 37 (11), 43–47, 1985.
3. Skenazi A.F, Pelerin J., Coutouradis D., Magnus B., Meeus M., Some recent developments in the improvement of the mechanical properties of zinc foundry alloys, Metall, 37 (9), 1983.
4. Delneuve P., Tribological behaviour of ZnAl alloys (ZA27) compared with bronze when used as a bearing material with high load and at very low speed, Wear, 105 (4), 283–292, 1985.
5. Savaşkan T., Hekimoğlu A.P., Effect of quench-ageing treatment on the microstructure and properties of Zn-15Al-3Cu alloy, Int. J. Mater. Res., 106 (5), 2015.
6. Savaşkan T., Aydın A., Effects of silicon content on the mechanical and tribological properties of monotectoid-based zinc-aluminium-silicon alloys, Wear, 257 (3–4), 377-388, 2004.
7. Savaşkan T., Bican O., Effects of silicon content on the microstructural features and mechanical and sliding wear properties of Zn-40Al-2Cu-(0-5)Si alloys, Mater. Sci. Eng., A, 404 (1–2), 259-269, 2005.

8. Savaşkan T., Hekimoğlu A.P., Pürçek G., Effect of copper content on the mechanical and sliding wear properties of monotectoid-based zinc-aluminium-copper alloys, *Tribol Int.*, 37 (1), 45-50, 2004.
9. Tan H.O., Savaşkan T., Correction to: determination of dry wear properties of Zn-30Al-Cu bearing alloys in terms of their copper content and working conditions including pressure and sliding velocity, *J Mater Eng Perform.*, 29 (10), 4794-4803, 2020.
10. Savaşkan T., Pürçek G., Hekimoğlu A.P., Effect of copper content on the mechanical and tribological properties of ZnAl27-based alloys, *Tribol Lett.*, 15 (3), 257-263, 2003.
11. Lee P.P., Savaşkan T., Laufer E., Wear resistance and microstructure of Zn-Al-Si and Zn-Al-Cu alloys. *Wear*, 117 (1), 79-89, 1987.
12. Prasad B.K., Effects of silicon addition and test parameters on sliding wear characteristics of zinc-Based alloy containing 37.5% aluminium, *Mater. Trans. JIM*, 38 (8), 701-706, 1997.
13. Alemdağ Y., Savaşkan T., Mechanical and tribological properties of Al-40Zn-Cu alloys. *Tribol. Int.*, 42 (1), 176-182, 2009.
14. Alemdağ Y., Savaşkan T., Effects of silicon content on the mechanical properties and lubricated wear behaviour of Al-40Zn-3Cu-(0-5)Si alloys, *Tribol. Lett.*, 29 (3), 221-227, 2008.
15. Savaşkan T., Hekimoğlu A.P., Azaklı Z., Çalış M., Effect of Working Conditions on the Lubricated Wear Behavior of Zn-40Al-2Cu-2Si Alloy in the As- Cast and T6 Heat-Treated States, *J. Tribol.*, 144 (3), 2022.
16. Savaşkan T., Azaklı Z., An investigation of lubricated friction and wear properties of Zn-40Al-2Cu-2Si alloy in comparison with SAE 65 bearing bronze, *Wear*, 264 (11-12), 920-928, 2008.
17. Savaşkan T., Turhal M.Ş., Relationships between cooling rate, copper content and mechanical properties of monotectoid based Zn-Al-Cu alloys, *Mater. Charact.* 51 (4), 259-270, 2003.
18. Savaşkan T., Azaklı Z., Hekimoğlu A.P., Effect of heat treatment on mechanical and wear properties of Zn-40Al-2Cu-2Si alloy, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 31 (9), 2651-2663, 2021.
19. Hekimoğlu A.P., Çalış M., Effect of grain refinement with titanium on the microstructure, mechanical and corrosion properties of Al-25Zn alloy, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 35 (1), 311-322, 2020.
20. Hekimoğlu A.P., Çalış M., Effects of titanium addition on structural, mechanical, tribological, and corrosion properties of Al-25Zn-3Cu and Al-25Zn-3Cu-3Si alloys, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 30 (2), 303-317, 2020.
21. Hekimoğlu A.P., Turan Y.E., İsmailoğlu İ.İ., Akyol M.E., Şen E., Effect of grain refinement with boron on the microstructure and mechanical properties of Al-30Zn alloy, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 34 (1), 523-534, 2019.
22. Savaşkan T., Pürçek G., Murphy S., Sliding wear of cast zinc-based alloy bearings under static and dynamic loading conditions. *Wear*, 252 (9-10), 693-703, 2002.
23. Durman M., Murphy S., Precipitation of metastable ϵ -phase in a hypereutectic zinc-aluminium alloy containing copper, *Acta Metall. Mater.*, 39 (10), 2235-2242, 1991.
24. Bican O., Savaşkan T., Influence of T5 heat treatment on the microstructure and lubricated wear behavior of ternary ZnAl40Cu2 and quaternary ZnAl40Cu2Si2.5 alloys, *Materialwiss. Werkstofftech.*, 51 (3), 383-390, 2020.
25. Savaşkan T., Hekimoğlu A.P., Microstructure and mechanical properties of Zn-15Al-based ternary and quaternary alloys, *Mater. Sci. Eng., A*, 603, 52-57, 2014.
26. Li S., Ning J., Zhang G.F., Zhang L.J., Wu J., Zhang L.X., Microstructural and mechanical properties of wire-arc additively manufactured Al-Zn-Mg aluminum alloy: The comparison of as-deposited and heat-treated samples, *Vacuum*, 184, 2021.
27. Malekan M., Emamy M., Mossayebi N., Lotfipour M., Effects of Al₃Ni and Al₇Cr Intermetallics and T6 Heat Treatment on the Microstructure and Tensile Properties of Al-Zn-Mg-Cu Alloy, *J. Mater. Eng. Perform.*, 29 (5), 3432-3442, 2020.
28. Tellioglu M., Stronsiyum katkısı ve farklı ısı işlemlerin Zn-40Al-2Cu alaşımının içyapı, mekanik ve tribolojik özelliklerine etkilerinin incelenmesi, Master Tezi, Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Rize, 2022.
29. Hekimoğlu A.P., Haciosmanoğlu M., Baki M., Effect of zinc contents on the structural, mechanical and tribological properties of an AC-48100 (Al-17Si-4Cu-Mg) alloy, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 35 (4), 1799-1814, 2020.
30. Azaklı Z., Zn-40Al esaslı alaşımların yapısal, mekanik ve tribolojik özelliklerinin incelenmesi, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2016.
31. Alemdağ Y., Beder M., Effects of zinc content on strength and wear performance of Al-12Si-3Cu based alloy, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 29 (12), 2463-2471, 2019.
32. Beder M., Alemdağ Y., Influence of Mg addition and T6 heat treatment on microstructure, mechanical and tribological properties of Al-12Si-3Cu based alloy, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 31 (8), 2208-2219, 2021.
33. Alemdağ Y., Karabıyık S., Pürçek G., 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, 2021.
34. Hekimoğlu A.P., Çalış M., Effect of arc re-melting on microstructure, mechanical and tribological properties of commercial 390A alloy, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 31 (8), 2264-2276, 2021.
35. Haciosmanoğlu M., Tellioglu M., Hekimoğlu AP., The Effect of strontium on the microstructure, mechanical, and tribological properties of the Zn-40Al-2Cu alloy, *Int. J. Metalcast.*, 17 (4), 3133-3142, 2023.
36. Zhu Y.H., Murphy S., Yeung C., Early stages of phase transformation in quenched zinc-aluminum based alloys, *J. Mater. Process Technol.*, 94 (2), 78-84, 1999.
37. To S., Zhu Y.H., Lee W.B., Tang G.Y., Liu X.M., Jiang YB. Effects of dynamic electropulsing on phase transformation of a Zn-Al based alloy, *Mater. Trans.*, 50 (5), 1105-1112, 2009.
38. Azimi H, Nourouzi S, Jamaati R., Effects of Ti particles and T6 heat treatment on the microstructure and mechanical properties of A356 alloy fabricated by compocasting, *Mater. Sci. Eng., A*, 818, 2021.
39. Savaşkan T, Hekimoğlu AP., Relationships between mechanical and tribological properties of Zn-15Al-based ternary and quaternary alloys, *Int. J. Mater. Res.*, 107 (7), 646-652, 2016.
40. Hekimoğlu AP, Savaşkan T., Effects of contact pressure and sliding speed on the unlubricated friction and wear properties of Zn-15Al-3Cu-1Si alloy, *Tribol. Trans.*, 59 (6), 1114-1121, 2016.
41. Hekimoğlu AP, Savaşkan T., Lubricated friction and wear properties of Zn-15Al- (1-5) Cu alloys, *Türk. J. Electromech. Energy*, 1 (2), 1-7, 2016.