



## Effect of multi-directional hot forging on mechanical and tribological properties of Al-7Si-4Zn-3Cu alloy

Yasin Alemdağ\*<sup>ID</sup>, Sadun Karabıyık<sup>ID</sup>, Gençğa Pürçek<sup>ID</sup>

Mechanical Engineering Department, Karadeniz Technical University, Trabzon, 61080, Turkey

### Highlights:

- Multi-Directional forging resulted in the breaking up the silicon particles and the elimination of dendritic structure
- Multi-Directional forging increased the tensile properties and ductility of the tested alloy
- Multi-Directional forging increased the friction coefficient and mass loss of the of the tested alloy

### Keywords:

- Al-Si alloys
- Multi-directional forging
- Friction and wear

### Article Info:

Research Article  
Received:06.02.2019  
Accepted: 21.08.2020

### DOI:

10.17341/gazimmfd.523117

### Acknowledgement:

This study was performed at Karadeniz Technical University Mechanical Engineering Department. The author would like thank to all technicians in the department for their valuable help.

### Correspondence:

Author: Yasin Alemdağ  
e-mail: yalemdag@ktu.edu.tr  
phone: +90 462 377 4134

### Graphical/Tabular Abstract

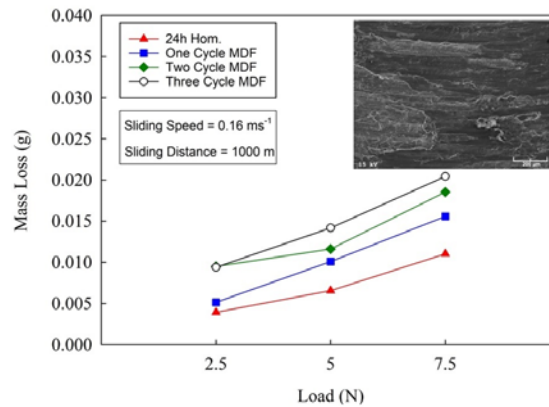


Figure A. The curves showing the mass loss of the alloy versus with applied forging cycle and load with a reperanstative image of its worn surface

### Purpose:

The purpose of this study is to investigate the effect of multi-directional hot forging on the mechanical and tribological properties of the Al-7Si-4Zn-3Cu alloy.

### Theory and Methods:

The main theory of this study is to improve the strength, ductility and wear performance of the Al-7Si-4Zn-3Cu with severe plastic deformation technique. For this aim, the alloy was forged in open die on three main axis at 200 °C using hydraulic press with capacity of 150 tons. The microstructure of the alloy was examined with optical microscopy while its mechanical properties were determined by the tensile and Brinell hardness tests. The friction and wear tests were carried out using a ball-on-disc type tribometer. These tests were performed at constant sliding speed and distance under different load. Worn surface of the alloy, ball surface and wear debris were examined with SEM-EDS.

### Results:

Multi-directional hot forging resulted in both breaking up the silicon particles and elimination of dendritic structure of the alloy. This process increased the yield and tensile strength with percentage elongation of the alloy but decreased its hardness. The highest yield and tensile strength were obtained from the alloy forged two cycles, while the alloy forged three cycles showed a lowest hardness but highest percentage elongation. On the other hand, the alloy hot forged states exhibited the higher friction coefficient and lower wear resistance than that of its homogenized state. After the wear test, smeared and delaminated layer were observed on the worn surface of the alloy in all test conditions.

### Conclusions:

The main conclusions of this study were summarized as:

The multi-directional hot forging resulted in the breaking up the silicon particles and the elimination of the dendritic structure. The multi-directional hot forging gave rise to an increase in the strength and ductility of the Al-7Si-4Zn-3Cu alloy. The multi-directional hot forging caused to an increase in friction coefficient and mass loss of the tested alloy. The friction coefficient of the alloy decreased as the load increased but its mass loss exhibited a reverse trend. Smearing and delamination were observed to be effective wear mechanisms of the alloy in all states.



## Çok yönlü sıcak dövme işleminin Al-7Si-4Zn-3Cu alaşımının mekanik ve tribolojik özelliklerine etkisi

Yasin Alemdağ\*<sup>ID</sup>, Sadun Karabıyık<sup>ID</sup>, Genççağa Pürçek<sup>ID</sup>

Karadeniz Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Trabzon, 61080, Türkiye

### Ö N E Ç İ K A N L A R

- Çok yönlü dövme işlemi silisyum parçacıklarının parçalanmasına ve dendritik yapının ortadan kalkmasına yol açmıştır
- Çok yönlü dövme işlemi alaşımın mekanik ve süneklik özelliklerini iyileştirmiştir
- Çok yönlü dövme işlemi alaşımın sürtünme katsayısını ve aşınma kaybını artırmıştır

### Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 06.02.2019

Kabul: 21.08.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.523117

### Anahtar Kelimeler:

Al-Si alaşımları,  
çok yönlü dövme,  
sürtünme ve aşınma

### ÖZET

Bu çalışmada farklı çevrim sayılarında çok yönlü sıcak dövme işlemine tabi tutulmuş Al-7Si-4Zn-3Cu alaşımının mekanik ve tribolojik özellikleri incelenmiştir. Çok yönlü sıcak dövme işlemi alaşımın içyapısında bulunan silisyum parçacıklarının parçalanmasına ve dendritik yapının ortadan kalkmasına yol açmıştır. Bu işlem Al-7Si-4Zn-3Cu alaşımının akma ve çekme dayanımı ile kopma uzaması değerlerini artırmış, sertliğini ise düşürmüştür. En yüksek akma ve çekme dayanımı iki çevrim dövme uygulanmış alaşımdan, en düşük sertlik ve en yüksek kopma uzaması üç çevrim uygulanmış alaşımdan elde edilmiştir. Diğer taraftan çok yönlü sıcak dövülmüş alaşım, homojenize edilmiş durumuna göre daha yüksek sürtünme katsayısı ve daha düşük aşınma direnci sergilemiştir. Aşınma deneyi sonucunda alaşımların yüzeylerinde sıvanmış tabakaların oluştuğu ve soyulmaların meydana geldiği görülmüştür. Bu gözlem sıvanmanın ve soyulmanın hem homojenize edilmiş hem de dövme işlemi uygulanmış numuneler için etkin aşınma mekanizmaları olduğunu göstermiştir.

## Effect of multi-directional hot forging on mechanical and tribological properties of Al-7Si-4Zn-3Cu alloy

### H I G H L I G H T S

- Multi-Directional forging resulted in the breaking up the silicon particles and elimination of dendritic structure
- Multi-Directional forging improved the mechanical properties and ductility of the tested alloy
- Multi-Directional forging increased the friction coefficient and mass loss of the of the tested alloy

### Article Info

Research Article

Received:06.02.2019

Accepted: 21.08.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.523117

### Keywords:

Al-Si alloys,  
multi-directional forging,  
friction and wear

### ABSTRACT

In this study, mechanical and tribological properties of multi-directional hot forged Al-7Si-4Zn-3Cu alloy at different cycles were investigated. Multi-directional hot forging resulted in both breaking up the silicon particles and the elimination of dendritic structure of the alloy. This process increased the yield and tensile strength with percentage elongation of the alloy but decreased its hardness. The highest yield and tensile strength were obtained from the alloy forged two cycles, while the alloy forged three cycles showed a lowest hardness but the highest percentage elongation. On the other hand, hot forged alloy exhibited higher friction coefficient and lower wear resistance than those of its homogenized state. After the wear test, smeared and delaminated layers were observed on the worn surface of the alloy in all test conditions. This observation showed that smearing and delamination were effective wear mechanisms of the alloy in all states.

\*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: yalemdag@ktu.edu.tr, skarabiyik@ktu.edu.tr, purcek@ktu.edu.tr / Tel: +90 462 377 4134

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Al-Si alaşımları düşük yoğunluk, yüksek özgül mukavemet, düşük genleşme katsayısı, iyi dökülebilirlik ve yüksek aşınma direnci gibi üstün özelliklere sahiptir [1, 2]. Bu alaşımlar içerdikleri silisyum oranına göre ötektik, ötektik altı ve ötektik üstü olmak üzere üç gruba ayrılmaktadır [1]. Ötektik alaşımlar %12 oranında, ötektik altı alaşımlar %12'nin altında, ötektik üstü alaşımlar ise %12'nin üzerinde silisyum içermektedir [1]. Bunlar arasında ötektik ve ötektik altı alaşımlar içten yanmalı motor parçalarının imalatında ve kaymalı yatak yapımında yaygın olarak kullanılmaktadır [1, 2]. Ötektik altı alaşımlar arasında Al-7Si alaşımlar daha çok tercih edilmektedir [3, 4]. Bu alaşımların mekanik ve tribolojik özelliklerini geliştirmek amacıyla yapılan çalışmalar günümüzde de devam etmektedir. Bu çalışmalarda genellikle alaşımlama ve ısıtma işleminin söz konusu özelliklere etkisi araştırılmaktadır [5-7]. Alaşımlama ve ısıtma işleminin sonra söz konusu alaşımların mukavemet ve süneklik özelliklerinin bir miktar arttığı belirlenmiş ancak bu değerlerin pek çok uygulama için yeterli seviyede olmadığı kanaatine varılmıştır [8]. Özellikle düşük süneklik değerleri bu alaşımların şekillendirilmesinde bir dezavantaj olarak ortaya konulmuştur. Bu durum söz konusu alaşımların mukavemet özelliklerinin yanı sıra sünekliğinin de geliştirilmesi gerekliliğini ortaya çıkarmıştır. Literatürde bu iki özelliğin geliştirilmesi amacıyla farklı tür aşırı plastik deformasyon yöntemleri geliştirilmiştir ve bunların alaşımlama ve ısıtma işlemlerine göre daha üstün rol oynadıkları görülmüştür [9-11].

Aşırı plastik deformasyon yöntemleri eş kanallı açısız presleme (EKAP), yüksek basınç altında burma (YBB), birikimli hadde bağı (BHB) ve çok yönlü dövme (ÇYD) gibi işlemlerden oluşmaktadır [9-14]. Bunlardan ilk ikisinin kalıp ve takım maliyetlerinin yüksek olması, parça boyutlarının sınırlı olması ve karmaşık geometriye sahip parçalar için uygun olmaması gibi nedenlerinden dolayı endüstriyel kullanımları sınırlıdır [13, 14]. Ancak 1990'lı yılların başında geliştirilen çok yönlü dövme yöntemi nispeten ince taneli malzemelerin endüstriyel kullanım boyutlarında üretilmesine olanak sağlamıştır [12, 13]. Bu yöntem titanyum, magnezyum, nikel ve alüminyum gibi alaşımlara başarıyla uygulanmış, deformasyon ve sıcaklığın tane incelmeye üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir [12, 15-18]. Söz konusu yöntemleri kullanarak yapılan çalışmaların daha çok metallerin mukavemet ve süneklik özelliklerini geliştirmeye yönelik olduğu görülmüştür. Ancak bu yöntemlerle proses edilmiş metallerin sürtünme ve aşınma özellikleri sınırlı sayıda çalışmada ele alınmıştır. Bu çalışmaların bazılarında göre aşırı plastik deformasyon yöntemlerinin malzemelerin aşınma direncini artırdığı, bazılarında göre ise düşürdüğü görülmüştür [19]. Aşınma direncindeki artış deformasyon sonucunda sertlikte meydana gelen artışa, düşüş ise bu işlemten sonra enerji bakımından dengesiz tane sınırlarının oluşumuna dayandırılarak açıklanmıştır [19]. Son yıllarda gerek otomotiv gerekse havacılık sektöründe alüminyum-

silisyum esaslı alaşımların kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Özellikle piston yapımında, motor gömleği imalatında ve kaymalı yatak uygulamalarında, otomobil jantı yapımında bu alaşımlara olan ilgi giderek artmaktadır [2, 20]. Bu kapsamda geleneksel bileşimlere sahip alaşımların yanı sıra bu alaşımlarla rekabet edebilecek yeni alaşımların geliştirilmesine yönelik çalışmalar devam etmektedir. Bu kapsamda yapılan bir çalışmada üçlü Al-7Si-Zn ve dördü Al-7Si-Zn-Cu alaşımları geliştirilmiş, bunlar arasında dördü alaşımların hem mekanik hem de tribolojik açıdan üçlü alaşımlara göre daha üstün performans sergilediği belirlenmiştir [3, 4]. Ancak bu alaşımların düşük süneklik sergilemesi ve çoğu uygulamalar için mukavemetinin yetersiz olması kullanım alanını kısıtlamaktadır. Al-Si esaslı alaşımlar üzerine yapılan bazı çalışmalar incelendiğinde bu alaşımların süneklik ve mukavemet özelliklerinin aşırı plastik deformasyon yöntemleriyle iyileştirilebildiği göze çarpmaktadır [11, 21, 22]. Ancak söz konusu iyileşmenin alaşımların sürtünme ve aşınma davranışları üzerindeki etkilerinin yeterli ölçüde araştırılmadığı görülmektedir. Bu durumlar dikkate alınarak, bu çalışmada aşırı plastik deformasyon yöntemlerinden biri olan çok yönlü sıcak dövme işleminin yeni geliştirilen Al-7Si-4Zn-3Cu alaşımının hem mukavemet hem de tribolojik özelliklerine etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır.

## 2. DENEYSEL METOT (EXPERIMENTAL METHOD)

### 2.1. Alaşımın Üretimi ve Çok Yönlü Dövme İşlemi (Production of Alloy and Multi Directional Forging)

Bu çalışmada kullanılan Al-7Si-4Zn-3Cu alaşımı kokil kalıba döküm yöntemi ile üretildi. Alaşımın üretiminde ticari saflıkta alüminyum (%99,7), yüksek saflıkta (%99,9) çinko, Al-12Si ve Al-50Cu ön alaşımı kullanıldı. Söz konusu malzemeler bir elektrikli ergitme ocağında 690°C'de ergitildikten sonra oda sıcaklığında tutulan orta karbonlu çelikten imal edilmiş 57x72x180mm boyutlarına sahip bir kalıba dökülerek katılaştırıldı. Katılaştırmanın ardından alaşımlar kalıptan çıkarıldı ve spektral analiz yöntemi ile kimyasal bileşimleri belirlendi. Bu alaşımdan talaşlı imalat yöntemi ile 40x40x20mm boyutuna sahip numuneler üretildi. Bu numuneler 450°C sıcaklıkta 24 saat boyunca homojenleştirme işlemine tabi tutulduktan sonra fırın içerisinde soğumaya bırakıldı.

Homojenize edilen numuneler yüksek basınca dayanıklı bir gres ile yağlandıktan sonra bir doğrultuda serbest şekil değişimine olanak sağlayan ve dıştan bir sıcaklık hücresi ile ısıtılan kalıp içerisine yerleştirildi. Kalıbın ısıtılmasında kullanılan hücrenin sıcaklığı bir kontrol ünitesi ile sabit bir değere ayarlandı. Numunenin sıcaklığı tam ortasına yerleştirilen bir termo elaman ile ölçüldü. Sistematik ön deneyler neticesinde en uygun dövme işlemi sıcaklığı 200°C olarak belirlendi. Benzeş sıcaklık kavramından yararlanarak bu sıcaklıkta yapılan dövme işleminin sıcak işlem olduğu tespit edildi [15]. Numune sıcaklığı 200°C'ye ulaştığında dövme işlemi aşamasına geçildi ve bu işlem 150 tonluk bir

hidrolik preste 1mm/s'lik zımba hızında gerçekleştirildi. Dövme işlemi her bir pasoda numunenin 40mm'ye karşılık gelen boyutunda %50 deformasyon oluşturacak şekilde uygulandı. Bu deformasyonun numunede oluşturduğu birim şekil değişimi değeri 0,69 olarak hesaplandı. Birinci pasodan sonra numune uzun kenarı üste gelecek şekilde 90° döndürüldükten sonra ikinci ve ardından da üçüncü pasoya geçilerek bir çevrim tamamlandı. Söz konusu işlemin üç pasoya karşılık gelen bir çevrimi Şekil 1'de şematik olarak gösterilmiştir. Numuneler bir, iki ve üç çevrime karşılık gelen 3, 6 ve 9 pasolarda dövme işlemine tabi tutuldu.

## 2.2. Yapısal Özellikler ve Mekanik Deneyler (Microstructural Examination and Mechanical Tests)

Homojenize edilmiş ve çok yönlü dövme işlemi uygulanmış durumdaki numunelerden alınan örnekler zımparalama ve parlatma işlemlerine tabi tutulduktan sonra sodyum hidroksit çözeltisi (%6'lık NaOH + 94ml saf su) içerisinde dağlandı. Bu numuneler optik mikroskopta incelendikten sonra içyapılarını gösteren fotoğrafları çekildi.

Çekme deneyleri için numunelerden tel erozyon yöntemi ile ölçüm bölgesinin boyutları 12x3x1,5mm olan yassı biçimde örnekler üretildi. Bu örnekler oda sıcaklığında  $5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  değerindeki deformasyon hızında çekme deneyine tabi tutuldu. Çekme işlemi sırasında örneklerin ölçü uzunluğunda meydana gelen uzama bir video ekstansometre ile ölçülerek yüzde uzama değerine dönüştürüldü. Numunelerin sertliği Brinell sertlik ölçme yöntemi ile 62,5 kg yük ve 2,5mm çapında bilye uç kullanılarak ölçüldü. Çekme deneyleri her bir durum için en az beş numune kullanılarak yapılırken, sertlik deneyleri her bir numunenin farklı bölgelerinden en az 10 ölçüm alınarak gerçekleştirildi. Ölçülen değerlerin ortalaması alınarak gerek homojenize edilmiş gerekse dövülmüş durumdaki numunelerin mekanik özellikleri belirlendi.

## 2.3. Sürtünme ve Aşınma Deneyleri (Friction and Wear Tests)

Numunelerin homojenize edilmiş ve dövülmüş durumdaki sürtünme ve aşınma deneyleri ASTM: G99 standardına uygun olarak UTS firması (www.uts-design.com) tarafından geliştirilmiş olan bilye-disk esaslı bir test cihazı kullanılarak yapıldı. Söz konusu cihazın şematik resmi Şekil 2'de gösterilmektedir. Sürtünme ve aşınma deneyleri için homojenize edilmiş ve çok yönlü dövme işlemine tabi tutulmuş numunelerden tel erozyon ile 20mmx20mm boyutlarında ve 7mm kalınlığında örnekler hazırlandı. Söz konusu örneklerin yüzeyleri bu deneylerden önce otomatik zımparalama ve parlatma makinesi kullanılarak düzgen hale getirildi. Deneylerde aşındırıcı yüzey olarak 100Cr6 çeliğinden imal edilmiş 6mm çapında bilye kullanıldı. Sürtünme ve aşınma deneyleri  $0,16 \text{ ms}^{-1}$  kayma hızında ve 2,5 N ile 7,5 N arasında değişen yüklerde 1000 m'lik yola karşılık gelen kayma mesafesinde yapıldı. Bir yük hücresi yardımıyla ölçülen sürtünme kuvveti bir yazılım ile sürtünme katsayısına dönüştürüldü. Aşınma deneyleri için örnekler hem deney öncesinde hem de deney sonrasında

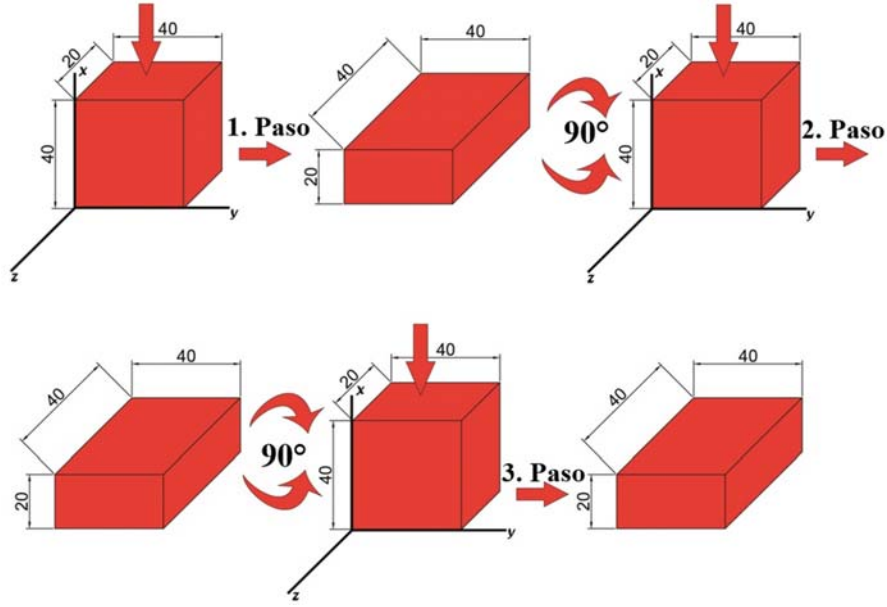
ultrasonik olarak alkol-aseton karışımı içerisinde temizlendi. Temizlenen örneklerin kütleleri  $0,01 \text{ mg}$ 'lık hassasiyete sahip bir terazi ile ölçüldü. Kütle ölçüm değerleri arasındaki fark bu örneklerde aşınma sonucu meydana gelen kütle kaybı olarak belirlendi. Aşınma deneyine tabi tutulan örneklerin aşınmış yüzeyleri ile bu yüzeylerden kopan parçacıklar enerji dispersif spektrometresine sahip bir taramalı elektron mikroskobu ile incelendi.

## 3. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

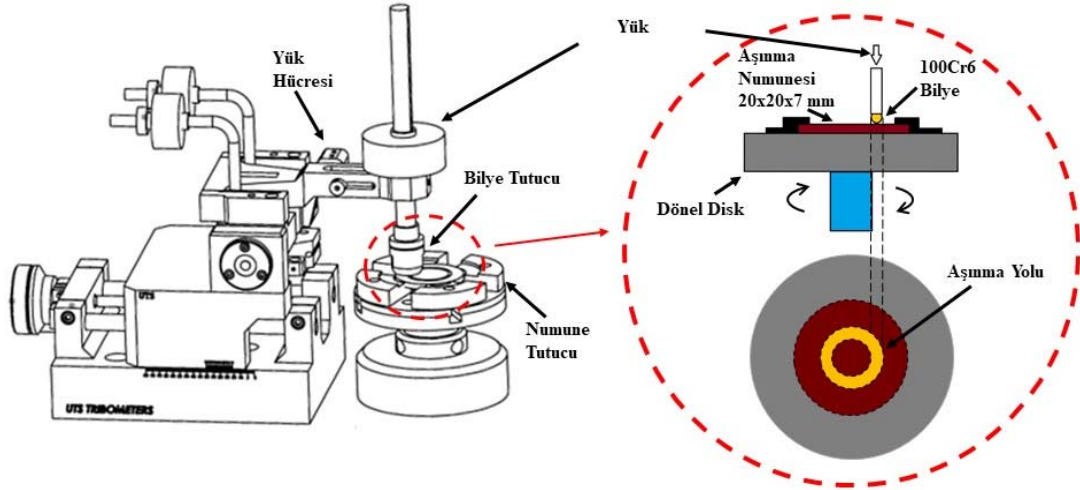
### 3.1. Yapısal İncelemelerden ve Mekanik Deneylerden Elde Edilen Bulgular (Microstructural Examination and Mechanical Test Results)

Homojenize edilmiş ve çok yönlü dövme işlemine tabi tutulmuş numunelerin içyapılarını gösteren optik mikroskop görüntüleri Şekil 3'te verilmiştir. Homojenize edilmiş durumdaki numunenin içyapısının ötektik silisyum parçacıkları tarafından sarılmış kısmen dendritik görünüme sahip alüminyumca zengin  $\alpha$  fazı, çok az miktarda birincil silisyum parçacıkları ile bakırca zengin  $\theta$  ( $\text{CuAl}_2$ ) fazından oluştuğu görülmüştür, (Şekil 3a). Ötektik silisyum parçacıklarının ince ve uzun, birincil silisyum parçacıklarının ise geniş ve köşeli bir görünüm sergiledikleri belirlenmiştir. Çok yönlü sıcak dövme işlemi sonucunda hem silisyum parçacıklarının parçalanarak küçüldüğü hem de dendritik yapının tamamen ortadan kalktığı görülmüştür, (Şekil 3b, Şekil 3d). Çevrim sayısı arttıkça silisyum parçacıkların daha çok incelendiği ve yapı içerisine nispeten homojen dağıldığı gözlenmiştir, (Şekil 3c, Şekil 3d). Silisyum parçacıklarının parçalanması bunların sert ve gevrek oluşlarına, dendritik yapının ortadan kalkması ise alüminyum esaslı alaşımlarda sıcak deformasyon sırasında ortaya çıkan dinamik yeniden kristalleşme mekanizmasına dayandırılarak açıklanabilir [23, 24]. Şöyle ki elmas kübik yapısına sahip silisyumun sertliği yüksek ancak sünekliliği oldukça düşüktür [25]. Bu karakteristik özelliklerinden dolayı dövme işlemi sırasında uygulanan gerilme, söz konusu parçacıkların parçalanmasına yol açmıştır. Bu parçalanma sonucunda birden çok parçaya ayrılan silisyumlar her bir çevrimde üç farklı doğrultuda yapılan dövme işlemi ile matris içerisine nispeten homojen olarak dağılmıştır. Diğer taraftan sıcak koşullarda aşırı plastik deformasyona tabi tutulan alüminyum esaslı alaşımlarda dinamik yeniden kristalleşmenin meydana geldiği bilinmektedir [23, 26]. Bu durum söz konusu alaşımda yeni kristallerin oluşumuna ve dolayısıyla dendritik yapısının ortadan kalkmasına yol açmış olabilir.

Al-7Si-4Zn-3Cu alaşımının homojenize edilmiş ve çok yönlü dövülmüş durumdaki çekme ve sertlik deneyi sonuçları Tablo 1'de verilmiştir. Söz konusu alaşımın bir çevrim çok yönlü dövme işlemi sonucunda çekme dayanımının değişmediği ancak akma dayanımının 132 MPa değerinden 185 MPa çıkararak yaklaşık %40'lık bir artış sergilediği belirlenmiştir. İki çevrim sonunda ise hem akma hem de çekme dayanımı en yüksek değerlerine ulaşmıştır. Bu çevrim sonunda akma dayanımı 203 MPa, çekme



Şekil 1. Çok yönlü dövme işlemine ait bir çevrimin şematik gösterimi (A schematic illustration of one cycle multi directional forging)

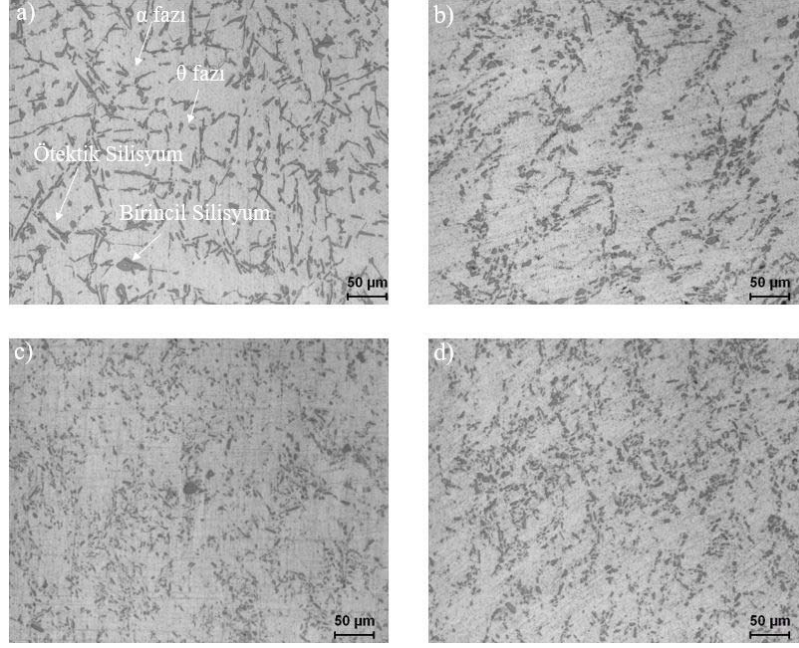


Şekil 2. Bilye disk esaslı aşınma deney düzeneğinin ve test bölgesinin şematik gösterimi.  
(A schematic illustration of the ball-on-disc type machine and test region.)

dayanımı ise 239 MPa olarak belirlenmiştir. Bu veriler iki çevrim çok yönlü dövme işleminin homojenize edilmiş durumdaki alaşımın akma ve çekme dayanımlarını sırasıyla yaklaşık %53 ve %10 oranında artırdığını göstermiştir. Üç çevrim sonucunda ise akma ve çekme dayanımlarının iki çevrim sonucunda elden elde edilen sonuçlara göre daha düşük olduğu belirlenmiştir. Diğer taraftan bu işlem sonucunda elde edilen değerler homojenize durumdaki alaşımın değerleri ile karşılaştırıldığında, işlemin alaşımın akma dayanımını %31 oranında artırdığı, çekme dayanımı üzerinde ise önemli bir etkisinin olmadığı görülmüştür. Çok yönlü dövme işleminin homojenize edilmiş durumdaki alaşımın sertliğini düşürdüğü kopma uzaması değerlerini ise artırdığı belirlenmiştir. Sertlikteki düşüş bir ve iki çevrim sonunda yaklaşık %5-6 aralığında değişirken, üç çevrim sonunda %12,5 oranında olup en düşük değerine ulaşmıştır.

Homojenize edilmiş durumdaki alaşımın kopma uzaması değerinin ise bir çevrimlik çok yönlü dövme işleminden sonra %88, iki ve üç çevrimlik işlemlerinden sonra sırasıyla %211 ve %356 oranında arttığı belirlenmiştir. Bu veriler incelendiğinde çok yönlü dövme işleminde çevrim sayısının artırılmasının alaşımın çekme dayanımından daha çok akma dayanımı, sertlik ve kopma uzaması değerleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu sonucuna varılmıştır. Elde edilen bu sonuçlar silisyum parçacıklarının morfolojisine, dağılımına ve ana matriste ortaya çıkan dinamik yeniden kristalleşme mekanizmasına dayandırılarak açıklanabilir [23]. Mikroskobik incelemeler ince ve uzun silisyum parçacıklarının homojenize edilmiş durumdaki alaşımın dendritler arası bölgelerinde toplandığını göstermiştir, (Şekil 3a). Bu parçacıkların hem keskin uçları hem de bunların yüzeyleri ile matris arasındaki ara yüzey bağının düşük





**Şekil 3.** Homojenize edilmiş (a) bir (b) iki (c) ve üç çevrim (d) çok yönlü dövme işlemine tabi tutulmuş Al-7Si-4Zn-3Cu alaşımına ait optik mikroskop görüntüleri.

(Optical microscopy images of homogenized (a) one cycle (b) two cycle (c) and three cycle (d) multi directional forged Al-7Si-4Zn-3Cu alloy.)

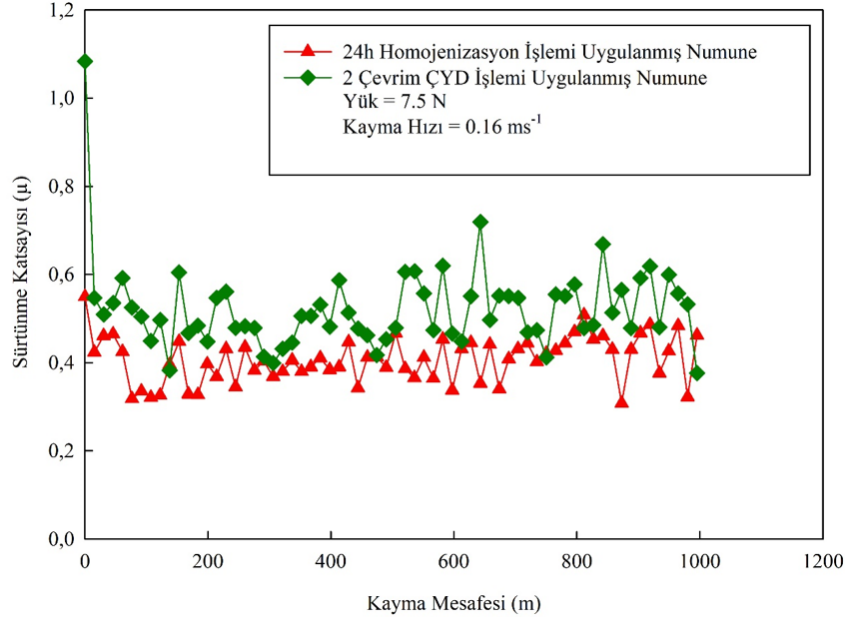
**Tablo 1.** Al-7Si-4Zn-3Cu alaşımının mekanik deney sonuçları (Mechanical test results of Al-7Si-4Zn-3Cu alloy.)

Numune Durumu	Çekme Dayanımı (MPa)	Akma Dayanımı (MPa)	Sertlik (BHN)	Kopma Uzaması (%)
24s Hom.	216±3	132±2	72±1	4,02±1
1 Çevrim	217±1	185±4	68±1	7,57±1
2 Çevrim	239±4	203±3	69±1	12,53±1
3 Çevrim	219±1	173±3	63±2	18,35±1

olması bu bölgelerde çatlak oluşumunu kolaylaştırmaktadır. Ancak dövme işlemi ile bu parçacıkların parçalandığı ve uygulanan çevrim sayısına bağlı olarak yapı içerisine nispeten homojen bir biçimde dağılmaya başladığı görülmüştür, (Şekil 3b, Şekil 3d). Bu durum söz konusu parçacıkların dövme işlemi uygulanmış alaşıma ait numunelerinde çatlak oluşturma eğilimini düşürerek bunların hem mukavemetinin hem de sünekliğinin artmasına yol açmış olabilir. Diğer taraftan çok yönlü dövme işlemi uygulanmış numunelerde süneklik sürekli artarken akma ve çekme dayanımında ikinci çevrimden sonra önemli bir azalmanın meydana geldiği görülmüştür. Akma ve çekme dayanımının ikinci çevrime kadar olan artışında hem silisyum parçacıklarının boyutunun küçülmesinin hem de ince taneli bir yapının oluşmasının, ikinci çevrimden sonra bu değerlerdeki düşüşte ise oluşan yeni kristallerin büyümesinin etkin olabileceği düşünülmektedir. Nitekim dövülmüş durumdaki numunelerde en yüksek sertlik düşüşünün ikinci çevrimden sonra meydana geldiği görülmüştür. Dövülmüş durumdaki numunelerin homojenize edilmiş durumuna göre daha düşük sertlik sergilemeleri bu numunelerde yeniden kristallerin oluşumuna ilişkin bir dayanak olarak gösterilebilir.

### 3.2. Sürtünme ve Aşınma Deneylerinden Elde Edilen Bulgular (Friction and Wear Test Results)

Farklı yüklerde, sabit kayma hızı ve mesafesinde sürtünme deneyine tabi tutulan örneklerin sürtünme katsayılarının alınan yola göre değişimlerinin benzer davranışlar sergilediği görülmüştür. Bu davranış şekli 7,5 N'luk yük altında deneye tabi tutulan homojenize durumdaki alaşım ile iki çevrim çok yönlü dövme işlemi uygulanmış alaşımın sürtünme katsayılarının alınan yola göre değişimleri gösterilen eğrilerde verilmiştir, (Şekil 4). Söz konusu eğriler, alaşımın her durumundaki sürtünme katsayısının çalışmanın başlangıç aşamasında ani bir biçimde artarak bir tepe noktasından geçtikten sonra azalıp nispeten kararlı bir duruma ulaştığını göstermiştir. Ancak numunelerin bu bölgedeki sürtünme katsayılarının dalgalı bir değişim sergilediği görülmüştür. Bu sonuçlar sürtünen yüzeyler arasındaki temas alanına bağlı olarak açıklanabilir [3, 27-29]. Çalışmanın başlangıç aşamasında yüzeylerin geometrisinden dolayı temas alanı düşük olup bu alanda ortaya çıkan basınç oldukça yüksektir. Bu aşamadaki yüksek basınç nedeniyle numune yüzeyinde ortaya çıkan deformasyon kaymayı zorlaştırarak sürtünme katsayısının



**Şekil 4.** Homojenize edilmiş ve sıcak dövülmüş durumdaki alaşımın sürtünme katsayısının kayma mesafesine göre değişimini gösteren eğriler.

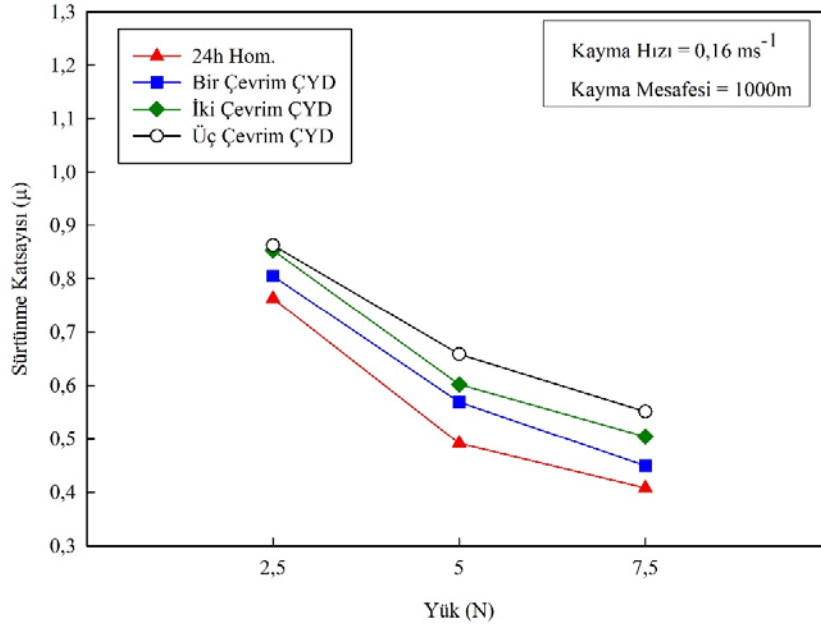
(Variation in friction coefficient of the homogenised and two cycle hot forged samples as a function of sliding distance)

artmasına yol açmaktadır. Kayma mesafesi arttıkça temas alanı artmakta ve basınç azalmaktadır. Bu durum ise sürtünme katsayısının azalarak kararlı bir duruma ulaşmasını sağlamaktadır. Ancak kararlı durumda yüzeyden kopan parçacıkların temas yüzeyleri arasındaki hareketi sürtünme katsayısının bu süreçte dalgalı bir değişim sergilemesine neden olmaktadır [27-29]. Numunelerin kararlı bölgedeki ortalama sürtünme katsayılarının uygulanan yüke göre değişimlerini gösteren eğriler Şekil 5'te verilmiştir. Bu eğriler numunelerin sürtünme katsayısının artan yük ile azaldığını göstermiştir. Sürtünme katsayısının artan yük ile azalması gerçek temas alanının artmasından kaynaklanmış olabilir. Diğer taraftan çok yönlü dövme işlemine tabi tutulan numunelerin homojenize edilmiş durumuna göre daha yüksek sürtünme katsayısına sahip olduğu belirlenmiştir. Ayrıca numunelerin sürtünme katsayılarının artan çevrim sayısı ile arttığı gözlenmiştir. Bu bulgular dövme uygulanmış numunelerin sertliğindeki düşüşe ve sünekliğinde meydana gelen artışa dayandırılarak açıklanabilir [30]. Dövme işlemi uygulanmış numunelerin sertliğinin düşük sünekliğinin yüksek olması kayma esnasında temas yüzeyleri arasındaki adezyonu artırmaktadır. Bu durum söz konusu temas yüzeyleri arasındaki izafi harekete karşı bir direnç oluşturarak sürtünme katsayısının artmasına yol açmaktadır [30-32].

Aşınma deneyine tabi tutulan homojenize edilmiş ve çok yönlü dövme işlemine tabi tutulmuş alaşıma ait numunelerde meydana gelen kütle kaybının uygulanan yüke göre değişimlerini gösteren eğriler Şekil 6'da verilmiştir. Bu eğrilerden yola çıkarak alaşımın her durumundaki kütle kaybının artan yük ile arttığı belirlenmiştir. Ayrıca numunelere uygulanan dövme çevrim sayısı arttıkça aşınma nedeniyle oluşan kütle kaybının arttığı görülmüştür. Nitekim

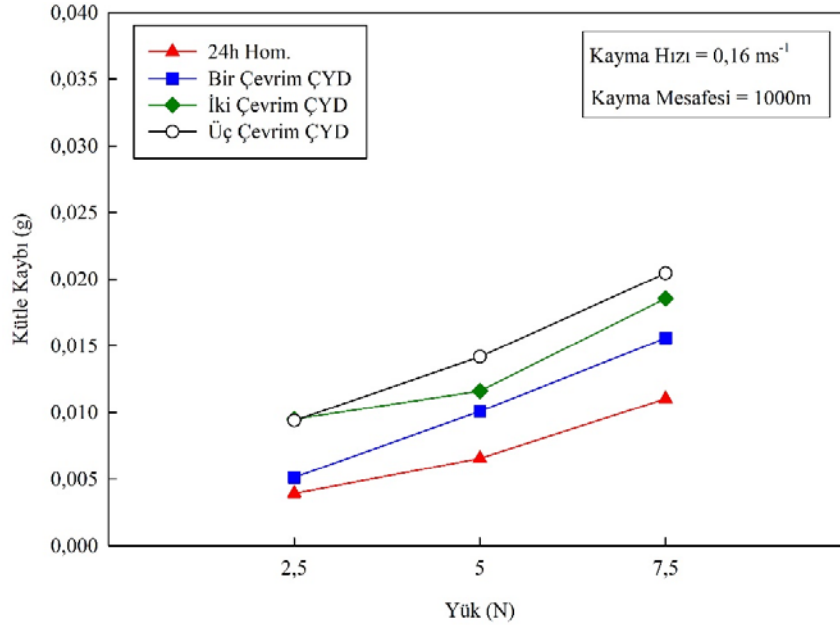
en düşük kütle kaybını homojenize edilmiş durumdaki alaşım sergilerken, en yüksek kütle kaybının üç çevrim dövme işlemi uygulanmış alaşımda meydana geldiği belirlenmiştir. Bu sonuçlar Archard yaklaşımına dayandırılarak açıklanabilir [33, 34]. Söz konusu yaklaşıma göre aşınma kaybı artan yük ile doğru, malzemenin sertliği ile ters orantılı olarak bir değişim sergiler. Artan yük ile aşınma kaybında meydana gelen artış yüzeyler arasındaki adezyonun artmasından kaynaklanmaktadır. Adezyonun artması kayma işlemi sırasında yüksek oranda aşınma parçacığının yüzeyden ayrılmasına, dolayısıyla aşınma kaybının artmasına yol açmaktadır. Diğer taraftan artan dövme çevrim sayısı ile numunelerin sertliğinin azalması, sünekliğinin ise artması yüzeyler arasındaki adezyonu kolaylaştırabilir. Bu numunelerde adezyonun kolaylaşması söz konusu numunelerin homojenize edilmiş durumuna göre daha yüksek kütle kaybı sergilemesine yol açmış olabilir.

Homojenize edilmiş ve çok yönlü dövme işlemine tabi tutulmuş numunelerin aşınma yüzeylerinin birbirine benzer bir görünüm sergiledikleri gözlenmiştir. Yapılan incelemelerde numunelerin aşınma yüzeylerinde sıvama tabakalarının oluştuğu ve bazı bölgelerde soyulmaların meydana geldiği görülmüştür. Bu durum homojenize edilmiş ve üç çevrim dövme işlemi uygulanmış alaşıma ait aşınma örneklerinin aşınmış yüzeylerini gösteren SEM fotoğraflarında gösterilmiştir, (Şekil 7a, Şekil 7b). Ayrıca sıvanmış tabakanın kimyasal bileşimini gösteren EDS analiz sonuçları da bu şekiller üzerinde verilmiştir. Bu sonuçlar sıvanmış tabakanın yüksek oranda alüminyum ve oksijen ile silisyum, çinko, bakır ve çok az miktarda demir ve krom içerdiğini göstermiştir. Numunelerde meydana gelen aşınma mekanizmasının tam olarak belirlenebilmesi için, homojenize edilmiş ve üç çevrim dövme işlemi uygulanmış



**Şekil 5.** Homojenize edilmiş ve sıcak dövülmüş durumdaki alaşımın ortalama sürtünme katsayısının uygulanan çevrim sayısına ve yüke göre değişimlerini gösteren eğriler.

(The change in friction coefficient of the homogenized and hot forged Al-7Si-4Zn-3Cu alloy samples with respect to applied cycle and load.)



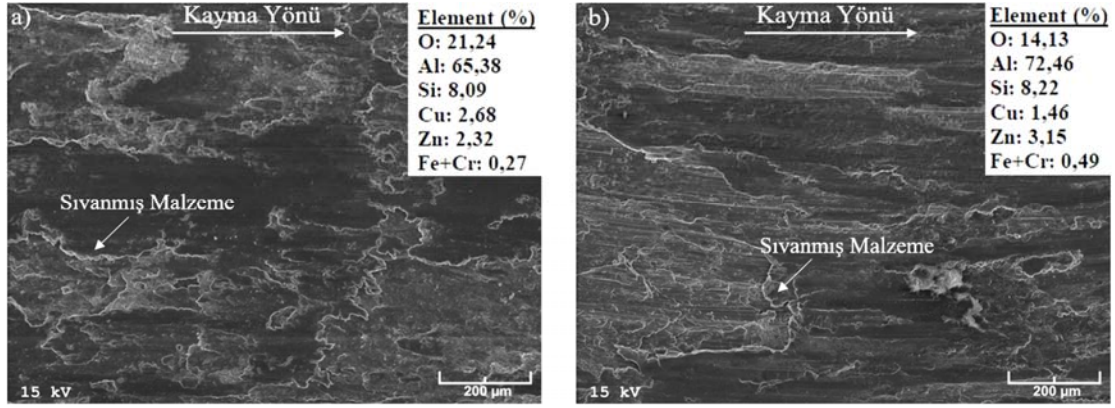
**Şekil 6.** Homojenize edilmiş ve sıcak dövülmüş durumdaki alaşımda aşınma sonucu meydana gelen kütle kaybının uygulanan çevrim sayısına ve yüke göre değişimlerini gösteren eğriler.

(The curves showing the mass loss of homogenised and hot forged samples versus with applied cycle and load.)

alaşıma ait numunelerin aşınma deneylerinde kullanılan aşındırıcı bilyelerin yüzeylerini gösteren SEM fotoğrafları Şekil 8'de gösterilmiştir. Şekil 9'da ise aşınma sonucu bu numunelerden kopan aşınma parçacıklarının SEM görüntüleri verilmiştir. Ayrıca bilye yüzeyleri ile aşınma parçacıklarının EDS analiz sonuçları da bu şekiller üzerinde gösterilmiştir. Şekil 8'deki fotoğraflar numunelerin aşınmış yüzeylerinde oluşan sıvanmış tabakaya benzer bir tabakanın bilye yüzeylerinde de oluştuğunu göstermiştir. Şekil 9'daki

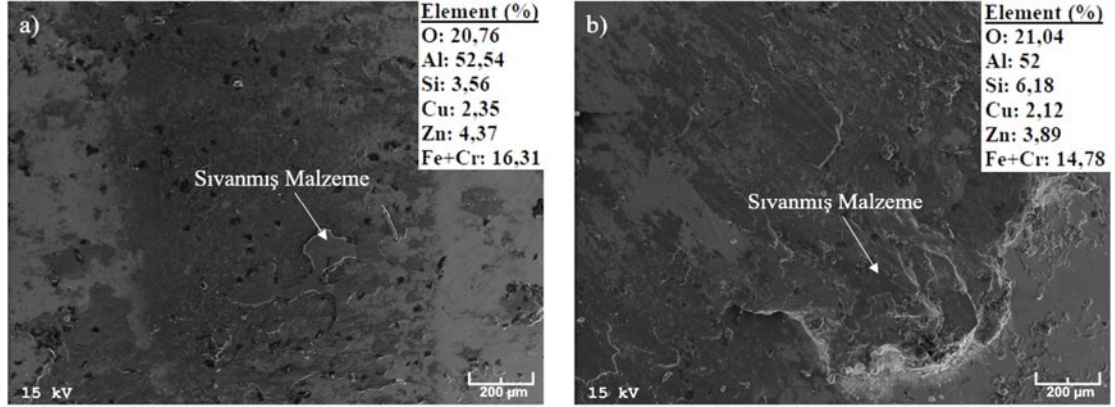
fotoğraflarda ise aşınma sonucu kopan parçacıkların irili ufaklı toz biçimindeki parçacıklar ile nispeten büyük boyutlu yassı parçacıklardan oluştuğu görülmüştür. Diğer taraftan, bilye yüzeylerinde oluşan sıvama tabakası ile özellikle yassı biçimindeki aşınma parçacıklarının kimyasal bileşimlerinin aşınma yüzeylerinde oluşan sıvama tabakasının kimyasal bileşimi ile hemen hemen aynı olduğu belirlenmiştir. Ayrıca çok yönlü dövme işlemine tabi tutulan numunelerin aşınma deneylerinde kullanılan bilyelerin yüzeylerinde daha belirgin





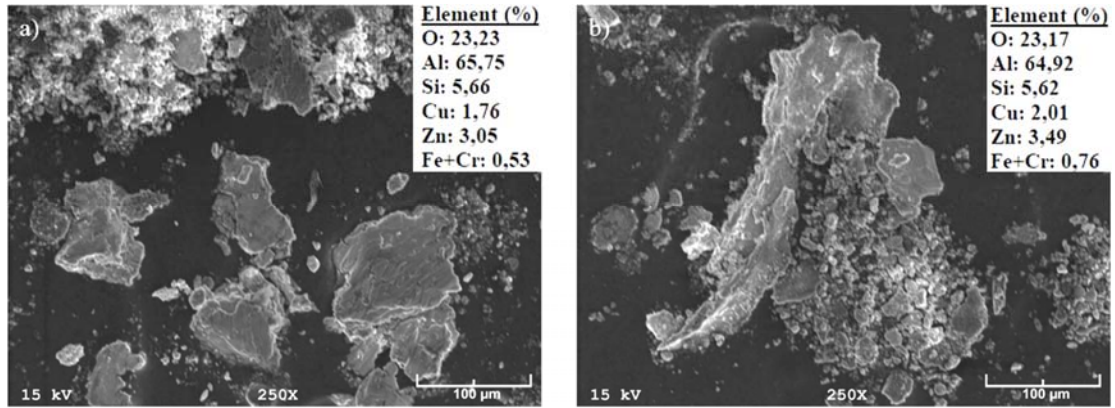
**Şekil 7.** (a) Homojenize edilmiş ve (b) üç çevrim dövme işlemi uygulanmış alaşıma ait aşınma örneklerinin aşınmış yüzeylerini gösteren SEM fotoğrafları ve EDS analizleri.

(SEM images and EDS analysis of worn surfaces of: a) 24h homogenised, b) three cycle forged alloy samples.)



**Şekil 8.** Homojenize edilmiş (a) ve üç çevrim dövme işlemi uygulanmış (b) alaşıma ait numunelerin aşınma deneylerinde kullanılan aşındırıcı bilyelerin yüzeylerini gösteren SEM fotoğrafları ve EDS analizleri.

(SEM images and EDS analysis of ball surfaces used for the wear of a) 24h homogenised and b) three cycle forged samples.)



**Şekil 9.** Homojenize edilmiş (a) ve üç çevrim dövme işlemi uygulanmış numunelerin aşınma deneyi sonucunda numunelerden kopan aşınma parçacıklarının SEM görüntüleri ve EDS analizleri.

(SEM images and EDS analysis of wear debris of a) 24h homogenised and b) three cycle forged samples after their wear test.)

sıvama tabakalarının oluştuğu, ayrıca bu numunelerden kopan aşınma parçacıklarının boyutlarının arttığı gözlenmiştir. Bu sonuçlar Al-Si esaslı alaşımın aşınma davranışına dayandırılarak açıklanabilir. Şöyle ki, çalışmanın başlangıç aşamasında temas yüzeyleri arasındaki yüksek basınç bu yüzeylerin birbirine yapışmasına yol

açmaktadır. Harekete başladıktan sonra ortaya çıkan kesme kuvveti etkisiyle yapışan yüzeylerde kırılmalar meydana gelmekte ve bunun sonucunda aşınma parçacıkları oluşmaktadır. Bu parçacıklar kayma sırasında önce bilye yüzeyine, daha sonra geri dönerek numune yüzeyine sıvanmaktadır. Bu durum söz konusu numunelerin ve

bunların aşınmasında kullanılan bilyelerin yüzeylerinde bir sıvama tabakasının oluşumuna yol açmaktadır [3, 29, 35, 36]. Ancak çalışmanın ilerleyen zamanlarında sürtünme ısısında meydana gelen artış, sıvama tabakasının oksitlenme hızını artırarak gevrekleşmesine neden olmaktadır [37, 38]. Gevrekliği artan sıvama tabakası kritik bir kalınlığa ulaştığında kırılarak yassı biçiminde büyük boyutlu aşınma parçacıklarının oluşumuna yol açmaktadır. Söz konusu parçacıkların bir kısmı merkezkaç kuvvetinin etkisiyle aşınma yolu üzerinden uzaklaşırken, bir kısmı ise temas yüzeyleri arasında yuvarlanırken parçalanıp daha ince parçalara ayrılmaktadır [38, 39]. Nitekim EDS analizleri yassı biçimdeki parçacıkların sıvama tabakasının kırılması sonucu yüzeyden uzaklaşan parçacıklar olduğunu, ince toz biçimindeki parçacıkların ise yüzeyler arasında kalanların parçalanması sonucunda oluştuğunu göstermektedir. Diğer taraftan dövülmüş durumdaki numunelerin yüzeylerinde oluşan sıvanmış tabakanın aynı alaşımın homojenize edilmiş durumuna göre daha belirgin bir görünüm sergilemesi ve aşınma parçacıklarının boyutunun artması bu numunelerde dövme işleminden sonra meydana gelen sertlik düşüşüne ve süneklik artışına dayandırılarak açıklanabilir. Numunelerin sertlik değerlerindeki düşüş ve süneklik değerlerindeki artış transfer olan aşınma parçacıklarının numune yüzeyine sıvanmasını kolaylaştırmakta ve böylece sıvama tabakasının belirginleşmesine yol açmaktadır. Ancak daha önce ifade edildiği gibi sıvama tabakası belirli bir kalınlığa ulaştığında kırılarak büyük boyutlu aşınma parçacıklarının oluşumuna neden olmaktadır [28, 30, 32].

#### 4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmadan elde edilen genel sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- Çok yönlü sıcak dövme işlemi silisyum parçacıklarının parçalanmasının yanı sıra dendritik yapının ortadan kalkmasına yol açmıştır.
- Çok yönlü sıcak dövme işlemi Al-7Si-4Zn-3Cu alaşımının akma ve çekme dayanımı ile sünekliğini artırmış, sertliğini ise düşürmüştür. En yüksek akma ve çekme dayanımını iki çevrim dövme işlemi uygulanmış alaşım sergilerken, üç çevrim dövme uygulanmış alaşımın en düşük sertlik ile en yüksek sünekliğe sahip olduğu belirlenmiştir.
- Çok yönlü sıcak dövme işlemi alaşımın hem sürtünme katsayısını hem de bu alaşımlarda aşınma sonucu meydana gelen kütle kaybını artırmıştır. Diğer bir ifadeyle çok yönlü sıcak dövme işlemi Al-7Si-4Zn-3Cu alaşımının sürtünme ve aşınma özelliklerini olumsuz etkilemiştir. Nitekim en düşük sürtünme katsayısı ve kütle kaybı homojenize edilmiş durumdaki alaşımdan, en yüksek sürtünme katsayısı ve kütle kaybı ise üç çevrim sıcak dövme işlemine tabi tutulmuş alaşımdan elde edilmiştir.
- Alaşımın bütün durumlarındaki sürtünme katsayısı artan yük ile azalmış, kütle kaybı ise artmıştır.
- Aşınma deneyleri sonucunda sıvanmanın (adezyon) ve soyulmanın (delaminasyon) hem homojenize edilmiş hem de dövme işlemi uygulanmış numuneler için etkin aşınma mekanizmaları olduğu belirlenmiştir.

#### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma Karadeniz Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde gerçekleştirilmiştir. Yazar değerli katkılarını esirgemeyen tüm teknisyenlere teşekkürlerini sunar.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Ye, H., An overview of the development of Al-Si-Alloy based material for engine applications, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 12 (3), 288-297, 2003.
2. Hirsch, J., Recent development in aluminium for automotive applications, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 24 (7), 1995-2002, 2014.
3. Alemdağ, Y. ve Beder, M., Microstructural, mechanical and tribological properties of Al-7Si-(0-5)Zn alloys, *Materials & Design*, 63, 159-167, 2014.
4. Alemdağ, Y., Beder, M., Dry sliding wear properties of Al-7Si-4Zn-(0-5) Cu alloys, *Journal of the Balkan Tribological Association*, 21, 154-165, 2015.
5. Birol, Y., Semisolid processing of near-eutectic and hypereutectic Al-Si-Cu alloys, *Journal of Materials Science*, 43 (10), 3577-3581, 2008.
6. Kori, S.A., Murty, B.S. ve Chakraborty, M., Development of an efficient grain refiner for Al-7Si alloy and its modification with strontium, *Materials Science and Engineering: A*, 283 (1), 94-104, 2000.
7. Hekimoğlu A.P., Turan Y.E., İsmailoğlu İ.İ., Akyol M.E. ve 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.
8. Basavakumar, K.G., Mukunda, P.G. ve Chakraborty, M., Influence of grain refinement and modification on microstructure and mechanical properties of Al-7Si and Al-7Si-2.5Cu cast alloys, *Materials Characterization*, 59 (3), 283-289, 2008.
9. Cao, Y., Ni, S., Liao, X., Song, M. ve Zhu, Y., Structural evolutions of metallic materials processed by severe plastic deformation, *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 133, 1-59, 2018.
10. Estrin, Y. ve Vinogradov, A., Extreme grain refinement by severe plastic deformation: A wealth of challenging science, *Acta Materialia*, 61 (3), 782-817, 2013.
11. Purcek, G., Saray, O. ve Kul, O., Microstructural evolution and mechanical properties of severely deformed Al-12Si casting alloy by equal-channel angular extrusion, *Metals and Materials International*, 16 (1), 145-154, 2010.
12. Suresh, M., Sharma, A., More, A.M., Kalsar, R., Bisht, A., Nayan, N. ve Suwas, S., Effect of equal channel angular pressing (ECAP) on the evolution of texture, microstructure and mechanical properties in the Al-Cu-Li alloy AA2195, *Journal of Alloys and Compounds*, 785, 972-983, 2019.
13. Sabirov, I., Murashkin, M.Y. ve Valiev, R.Z., Nanostructured aluminium alloys produced by severe

- plastic deformation: New horizons in development, *Materials Science and Engineering: A*, 560, 1-24, 2013.
14. Cherukuri, B., Nedkova, T.S. ve Srinivasan, R., A comparison of the properties of SPD-processed AA-6061 by equal-channel angular pressing, multi-axial compressions/forgings and accumulative roll bonding, *Materials Science and Engineering: A*, 410-411, 394-397, 2005.
  15. Zhu, Q.F., Wang, J., Li, L., Ban, C.Y., Zhao, Z.H. ve Cui, J.Z., Effect of Forging Temperature on Deformability and Structure Evolution of High Purity Aluminium during Multi-Directional Forging Process, *Materials Science Forum*, 877, 371-379, 2017.
  16. Zhang, Z.X., Qu, S.J., Feng, A.H., Hu, X. ve Shen, J., Microstructural mechanisms during multidirectional isothermal forging of as-cast Ti-6Al-4V alloy with an initial lamellar microstructure, *Journal of Alloys and Compounds*, 773, 277-287, 2019.
  17. Djavanroodi, F., Ebrahimi, M. ve Nayfeh, J.F., Tribological and mechanical investigation of multi-directional forged nickel, *Scientific Reports*, 9 (1), 241, 2019.
  18. Wei, J., Jiang, S., Chen, Z. ve Liu, C., Increasing strength and ductility of a Mg-9Al alloy by dynamic precipitation assisted grain refinement during multi-directional forging, *Materials Science and Engineering: A*, 780, 139192, 2020.
  19. Gao, N., Wang, C.T., Wood, R.J.K. ve Langdon, T.G., Tribological properties of ultrafine-grained materials processed by severe plastic deformation, *Journal of Materials Science*, 47 (12), 4779-4797, 2012.
  20. Larouche, D. ve Javidani, M., Application of cast Al-Si alloys in internal combustion engine components, *International Materials Reviews*, 59 (3), 132-158, 2014.
  21. Gutierrez-Urrutia, I., Muñoz-Morris, M.A. ve Morris, D.G., Contribution of microstructural parameters to strengthening in an ultrafine-grained Al-7% Si alloy processed by severe deformation, *Acta Materialia*, 55 (4), 1319-1330, 2007.
  22. Alemdağ, Y., Karabıyık, S., Yanar, H. ve Pürçek, G., Mechanical Properties of Multi-Directional Forged Al-7Si-4Zn-3Cu Alloy, *Defect and Diffusion Forum*, 385, 250-255, 2018.
  23. Kapoor, R., Sarkar, A., Yogi, R., Shekhawat, S.K., Samajdar, I. ve Chakravarty, J.K., Softening of Al during multi-axial forging in a channel die, *Materials Science and Engineering: A*, 560, 404-412, 2013.
  24. Stemler, P.M.A., Flausino, P.C.A., Pereira, P.H.R., de Faria, C.G., Almeida, N.G.S., Aguilar, M.T.P. ve Cetlin, P.R., Mechanical behavior and microstructures of aluminum in the Multi-Axial Compression (MAC) with and without specimen re-machining, *Materials Letters*, 237, 84-87, 2019.
  25. Hegde, S. ve Prabhu, K.N., Modification of eutectic silicon in Al-Si alloys, *Journal of Materials Science*, 43 (9), 3009-3027, 2008.
  26. Naser, T.S.B., Bobor, K. ve Krállics, G., Tensile behavior of multiple forged 6082 Al alloy, *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*, 58 (2), 113-117, 2014.
  27. Clarke, J. ve Sarkar, A.D., Wear characteristics of as-cast binary aluminium-silicon alloys, *Wear*, 54 (1), 7-16, 1979.
  28. Lee, P.P., Savaskan, T. ve Laufer, E., Wear resistance and microstructure of Zn-Al-Si and Zn-Al-Cu alloys, *Wear*, 117 (1), 79-89, 1987.
  29. Dey, S.K., Perry, T.A. ve Alpas, A.T., Micromechanisms of low load wear in an Al-18.5% Si alloy, *Wear*, 267 (1-4), 515-524, 2009.
  30. Torabian, H., Patak, J.P. ve Tiwari, S.N., Effect of hardness on wear rates of Al-Si alloys, *Journal of Materials Science Letters*, 14 (23), 1631-1632, 1995.
  31. Bai, B.N.P. ve Biswas, S.K., Mechanism of wear in dry sliding of a hypoeutectic aluminum alloy, *Lubrication Engineering*, 43 (1), 57-61, 1987.
  32. Li, X.Y. ve Tandon, K.N., Mechanical mixing induced by sliding wear of an Al-Si alloy against M2 steel, *Wear*, 225, 640-648, 1999.
  33. Dwivedi, D.K., Adhesive wear behaviour of cast aluminium-silicon alloys: Overview, *Materials & Design*, 31 (5), 2517-2531, 2010.
  34. Sarkar, A. ve Clarke, J., Friction and wear of aluminium-silicon alloys, *Wear*, 61 (1), 157-167, 1980.
  35. Alemdağ, Y. ve Savaşkan, T., Effects of silicon content on the mechanical properties and lubricated wear behaviour of Al-40Zn-3Cu-(0-5) Si alloys, *Tribology Letters*, 29 (3), 221-227, 2008.
  36. Hekimoğlu A.P. ve Savaşkan T., Lubricated wear characteristics of Zn-15Al-3Cu-1Si alloy and SAE 660 bronze, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 33 (1), 145-154, 2018.
  37. Xu, C.L., Yang, Y.F., Wang, H.Y. ve Jiang, Q.C., Effects of modification and heat-treatment on the abrasive wear behavior of hypereutectic Al-Si alloys, *Journal of Materials Science*, 42 (15), 6331-6338, 2007.
  38. Wilson, S. ve Alpas, A.T., Thermal effects on mild wear transitions in dry sliding of an aluminum alloy, *Wear*, 225, 440-449, 1999.
  39. Mahato, A., Perry, T.A., Jayaram, V. ve Biswas, S.K., Pressure and thermally induced stages of wear in dry sliding of a steel ball against an aluminium-silicon alloy flat, *Wear*, 268 (9-10), 1080-1090, 2010.

