

ARAŞTIRMA MAKALESİ

Çok Yönlü Sıcak Dövmenin Al-7Si Alaşımının Mekanik Özelliklerine Etkisi

Effect of Hot Multi Directional Forging Process on the Mechanical Properties of Al-7Si Alloy

Yasin Alemdağ*, Sadun Karabıyık

Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Trabzon

Geliş / Received: 05.05.2022

Kabul / Accepted: 31.05.2022

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author) Yasin Alemdağ, yalemdag@ktu.edu.tr

ÖZ: Bu çalışmada çok yönlü sıcak dövme işleminin Al-7Si alaşımının yapı ve mekanik özelliklerine etkisi araştırıldı. İlgili alaşım kokil kalıba döküm yöntemiyle üretildi. Dövme işlemi bir doğrultuda serbest şekil değişimine izin verebilen dıştan ısıtmalı bir kalıp içerisinde 150 ton kapasiteli bir pres kullanılarak 1 mm/s pres hızında ve 200 °C sıcaklıkta yapıldı. Alaşımın içyapısı standart metalografi ve XRD analizi ile mekanik özellikleri ise çekme, basma ve sertlik deneyleri ile belirlendi. Çok yönlü dövme işleminden sonra alaşımın içyapısında yer alan silisyumların kırılarak yapı içerisine dağıldığı ve alaşımın dendritik yapısının taneli bir yapıya dönüştüğü gözlemlendi. Çok yönlü dövülen alaşımın akma ve çekme dayanımlarının arttığı, basma dayanımının ise düştüğü belirlendi. Alaşımın kopma uzamasının ise artan çok yönlü dövme çevrim sayısı ile sürekli arttığı görüldü. Ancak alaşımın sünekliğindeki sürekli artışa rağmen akma ve çekme dayanımı ile sertliğinin bir çevrim üzerindeki dövme çevrim sayılarında düştüğü görüldü. Alaşımın söz konusu özelliklerindeki değişimin silisyum parçacıklarının kırılmasından, yapı içerisine homojen dağılmasından ve sıcak dövme işleminin Al-alaşımında yol açtığı dinamik yeniden kristalleşmeden kaynaklandığı belirlendi. Diğer taraftan çok yönlü dövülmüş alaşımın sertliğini 150 °C sıcaklığa kadar koruyabildiği, bu değer üzerindeki sıcaklıklarda ise sertliğinde önemli bir azalmanın meydana geldiği görüldü. Bu bulgu söz konusu sıcaklıklarda alaşımın meydana gelen yeniden kristalleşmeye ve/veya dövme işlemi sırasında oluşan kristallerin büyümesine dayandırılarak açıklandı. Diğer taraftan homojenize edilmiş durumda gevrek bir biçimde kırılan alaşımın dövme işleminin ardından sünek bir biçimde kırıldığı belirlendi.

Anahtar Kelimeler: Al-Si alaşımları, çok yönlü dövme, aşırı plastik deformasyon, içyapı, mekanik özellikler

ABSTRACT: The aim of this study is to investigate the effect of hot multi directional forging (MDF) on microstructure and mechanical properties of Al-7Si alloy. For this aim, the alloy was cast in a permanent mould and forging was carried out at a press speed of 1 mm/s and a temperature of 200 °C in an externally heated die which allows free deformation in one direction, using a press with a capacity of 150 tons. Microstructure of the alloy was determined by standard metallography and XRD analysis while tensile, compression and hardness tests were used to determine its mechanical properties. The multi directional forging process led to the fragmentation of the silicon particles, their homogenous distribution and elimination of the alloy's dendritic structure. It was determined that the yield and tensile strength and percentage elongation of the forged alloy increased, while the compressive strength decreased. On the other hand, despite the continuous increase in the ductility of the alloy, its yield and tensile strength with hardness decreased with the number of forging cycles over one cycle. Changes observed alloy's properties was attributed to the fragmentation of the silicon particles, their homogeneous distribution with the dynamic recrystallization caused by the hot forging process in Al-alloys. Hot forged alloy maintained its hardness up to 150 °C above which a significant decrease was determined in this value. This finding was explained according to the recrystallization of the alloy at these temperatures and/or the growth of crystals formed during the forging process. The homogenized alloy showed brittle fracture while ductile type fracture was observed in the multi-directional forged alloy.

Keywords: Al-Si alloys, multi directional forging, severe plastic deformation, microstructure, mechanical properties

1. GİRİŞ

Alüminyum-silisyum (Al-Si) alaşımları içten yanmalı motor parçalarından bazılarının imalatında yaygın olarak kullanılmaktadır [1, 2]. Bu durum söz konusu alaşımların düşük yoğunlukları ile ısı genleşme katsayılarından ve dökümlerinin kolay olmasından kaynaklanmaktadır [1, 3]. Bu alaşımların mekanik özellikleri içerdikleri silisyum miktarına ve silisyumların morfolojisine göre değişim sergilemektedir [4, 5]. Şöyle ki alüminyum ve silisyum sıvı durumda birbiri içinde tam çözünebilirken katı durumda çözünürlük sergilememektedir. Bu nedenle alaşımların içyapısında doğrudan katılaşıma sırasında blok, ötektik dönüşüm sonucunda ise lamel biçiminde sert silisyum parçacıkları oluşmaktadır. Bu sert parçacıklar alaşımların sertliğini artırmakta ancak keskin kenar ve köşelerinden dolayı ana matriste çatlak oluşumuna yol açarak çekme dayanımlarını düşürmektedir. Diğer taraftan söz konusu parçacıklar alaşımların sünekliğini düşürmekte gerek talaşlı imalat gerekse plastik deformasyon yolu ile şekillendirilmelerini zorlaştırmaktadır [4, 5].

Al-Si alaşımlarının içyapısında bulunan silisyumların morfolojisini değiştirmek için farklı yöntemler uygulanmaktadır [6-9]. Bunlar arasında en yaygını sodyum ve stronsiyum (modifikasyon elementleri) katkıları ile sert parçacıkların küresel biçime dönüştürülerek ana matriste homojen bir biçimde dağılımının sağlanmasıdır [8-10]. Bu yöntem ile alaşımların mekanik ve süneklik özelliklerinde her ne kadar bir iyileşme elde edilse de uygulama gereksinimleri için gerekli değerlere nispeten ulaşamamaktadır. Bu durumun alaşımı oluşturan ana matrisin iri taneli dendritik yapısından kaynaklandığı ifade edilmektedir. Bu nedenle ana matrisinde tane yapısının inceltmesi de gerekmektedir. Aşılama yoluyla ile alaşıma katılan tane incelticiler ile nispeten eş eksenli ince tanelerden oluşan ana matris elde edilebilmektedir. Ancak hem tane incelticilerin oluşturduğu fazların morfolojisi hem de tane incelticiler ile modifiye edici elementlerin döküm esnasında kimyasal bileşimlerinin ayarlamaması bir sorun olarak güncelliğini korumaktadır [8-10].

Al-Si alaşımlarının tane boyutunu inceltmek, silisyum parçacıklarının en boy oranlarını bire

yaklaştırmak ve bu parçacıkların ana matris içerisinde homojen dağılımını sağlamak için eş kanallı açılal ekstrüzyon (EKAP), yüksek basınç altında burma (YBB), çok yönlü dövme (ÇYD) gibi aşırı plastik deformasyon yöntemlerinden yararlanılmaktadır [11-13]. Ancak bu yöntemlerden bazıları yüksek pres gücü ve yüksek mukavemetli kalıp malzemesi gerektirmektedir. Diğer taraftan bu yöntemler kullanılarak karmaşık geometri ve büyük boyutlu parçalar üretilmemektedir [14]. Son yıllarda geliştirilen çok yönlü dövme işlemi ile bu sorunlar nispeten ortadan kaldırılmaktadır. Bu yöntemde tekrarlanan paso sayıları ve sıcaklıkla birlikte metaller kolaylıkla deformasyona tabi tutulmakta ve son derece ince taneli metaller üretilmektedir [15]. Bu çalışmada diğer aşırı plastik deformasyon yöntemleri arasında uygulama kolaylığı ile öne çıkan, daha düşük kapasiteli presler, daha düşük maliyetli kalıp ve takımlar kullanılarak yapılan ve de büyük boyutlu parçalara uygulanabilen ÇYD işleminin Al-7Si alaşımının yapı ve mekanik özelliklerine etkisinin detaylı bir biçimde belirlenmesi hedeflenmiştir.

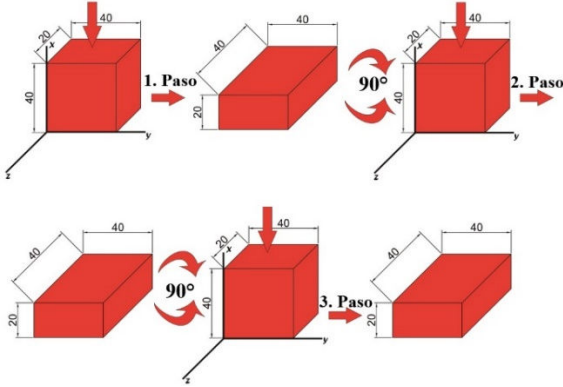
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1 Alaşımın Üretimi ve Çok Yönlü Dövme İşlemi

Al-7Si alaşımı %99,7 saflıkta alüminyum ve Al-12Si ötektik alaşımı kullanılarak üretilmiştir. Söz konusu metaller içerisinde grafit pota bulunan bir elektrikli ergitme ocağında ergitilmiştir. 690 °C sıcaklığa sahip ergiyik orta karbonlu çelikten Ø57 x Ø72 x 180 mm boyutlarında imal edilmiş bir kalıba dökülerek katılaştırılmıştır. Spektral analiz yöntemi ile alaşımın kimyasal bileşiminde sırasıyla %92,9 ve %7,1 oranlarında Al ve Si bulunduğu tespit edilmiştir.

Alaşımın 40 x 40 x 20 mm boyutlarında numuneler hazırlanmıştır. Bu numuneler 450 °C sıcaklıkta 24 saat süreyle homojenizasyon işlemine tabi tutulmuştur. Söz konusu numuneler basınç altında viskozitesini koruyan bir gres ile yağlanmış ve kalıba yerleştirilmiştir. Kalıp bir doğrultuda serbest şekil değişimine izin verecek şekilde tasarlanmış ve numuneler bu kalıp içerisinde 200 °C sıcaklığa kadar ısıtılmıştır. Bu aşamadan sonra numuneler 150 tonluk bir hidrolik preste 1 mm/s'lik basma hızında çok yönlü dövülmüştür. Uygulanan çok yönlü dövme işleminin bir çevriminin şematik

resmi Şekil 1’de verilmiştir. Her bir pasodaki dövme işlemi 0,69’luk gerçek bir şekil değişiminde gerçekleştirilmiştir. Numuneler birden üç çevrime kadar yani 3 pasodan 9 pasoya kadar dövülmüştür.



Şekil 1: Çok yönlü dövme işlemine ait şematik resim

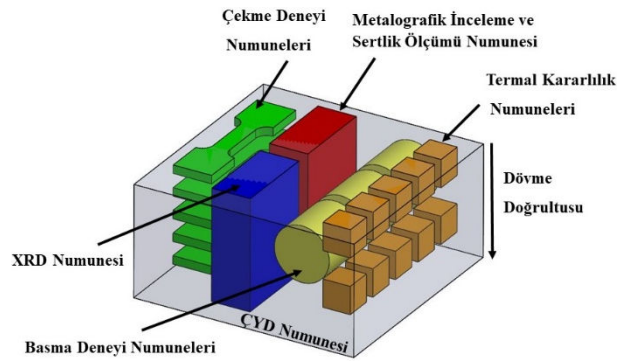
2.2 Alaşımın Yapısal ve Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi

Yapısal incelemelerde ve mekanik deneylerde kullanılan numunelerin dövme parçasından imal edildiği bölgeleri gösteren şematik resim Şekil 2’de verilmiştir. Yapısal incelemelere ait numuneler standart metalografik yöntemleriyle hazırlandıktan sonra %6 sı NaOH geri kalanı saf sudan oluşan bir çözelti ile dağlanmış, optik mikroskopta incelenmiş ve ardından fotoğrafları çekilmiştir. Optik mikroskoptan alınan görüntüler bir görüntü analiz yazılımında incelenmiş, alaşımın içyapısında bulunan silisyumların en/boy oranları belirlenmiş ve bunların yüzde dağılımlarının en/boy oranlarına göre değişimi histogram grafikleri yardımıyla sunulmuştur. Alaşımın içyapısında bulunan fazların türü ise X-ışını difraktometresi (XRD) analizi ile belirlenmiştir. Bu analiz 15-90° Bragg açılarında ve 1 derece/dk tarama hızında gerçekleştirilmiştir.

Alaşımın mekanik özelliklerinin belirlenmesinde Brinell sertlik ve Vickers mikrosertlik ölçümlerinden, çekme ve basma deneylerinden yararlanılmıştır. Mikrosertlik ölçümleri α -Al fazı üzerinden gerçekleştirilmiştir. Brinell sertlik ölçümünde 62,5 kg yük ve 2,5 mm çapında bilye uç, Vickers mikrosertlik ölçümünde ise 500 g’lık yük kullanılmıştır. Çekme deneyleri için tel erozyon yöntemiyle ölçü boyutları 12 x 3 x 1,5 mm olan yassı numuneler üretilmiştir. Bu numuneler 5×10^{-4} s⁻¹’lik deformasyon hızında ve oda sıcaklığında çekme

deneyine tabi tutulmuş akma ve çekme dayanımları ile yüzde uzama değerleri belirlenmiştir. Çekme sonucunda oluşan kırık yüzeyler SEM ile incelenmiş ve dövme işleminin alaşımın kırılma davranışına etkisi belirlenmiştir. Basma deneyleri oda sıcaklığında, 5×10^{-4} s⁻¹’lik deformasyon hızında, 10 x 10 mm boyutlarında numuneler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Basma deneyleri sırasında numunelere %50 oranında deformasyon uygulanmış ve bu deformasyona karşılık gelen gerilme alaşım için basma dayanımı olarak ölçülmüştür. Bütün mekanik deneyler en az beş ölçüm üzerinden yapılmış ve bunların ortalaması alınarak söz konusu değerler belirlenmiştir.

Alaşımın kararlı davranış sergilediği sıcaklıkların ve sürelerin belirlenmesi için, çok yönlü dövme işlemine tabi tutulmuş alaşımdan hazırlanan 5 x 5 x 5 mm³ boyutlarındaki numuneler bir fırın içerisinde 1’er saatlik periyotlarla 50 °C’den başlayarak 300 °C’ye kadar tutulmuş, her bir periyodun ardından su verilerek sertlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

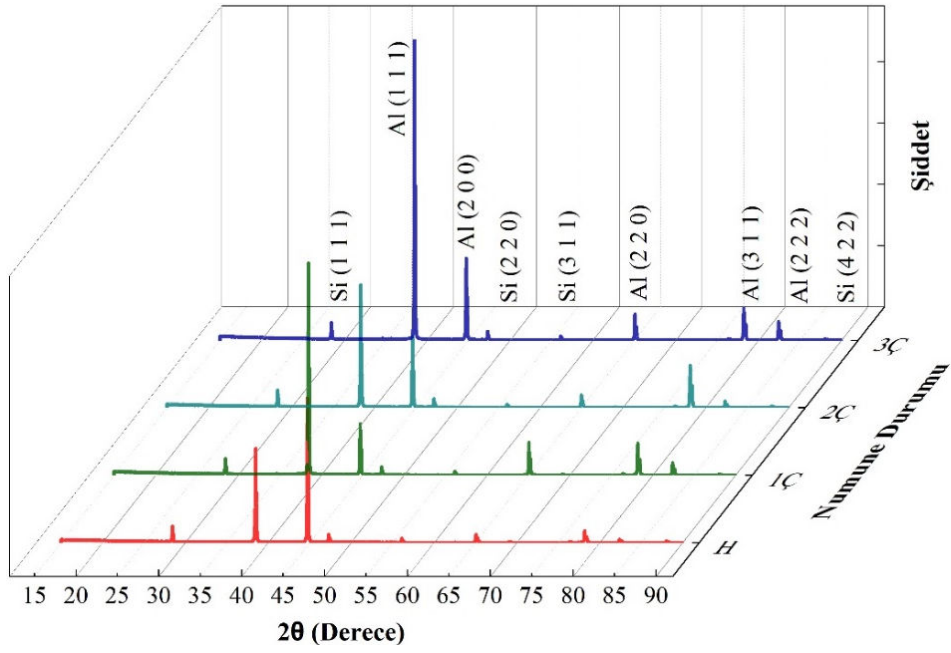


Şekil 2: Deney numunelerinin dövme parçasından imal edildiği yerleri gösteren şematik resim

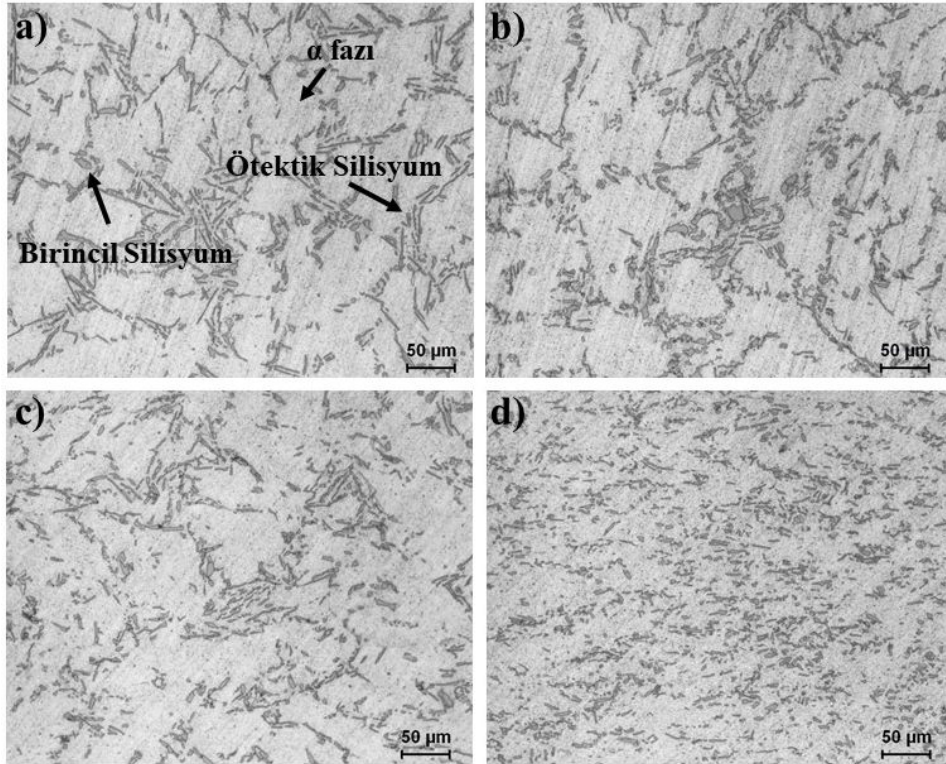
3. BULGULAR

3.1 Yapısal İncelemelerden Elde Edilen Bulgular

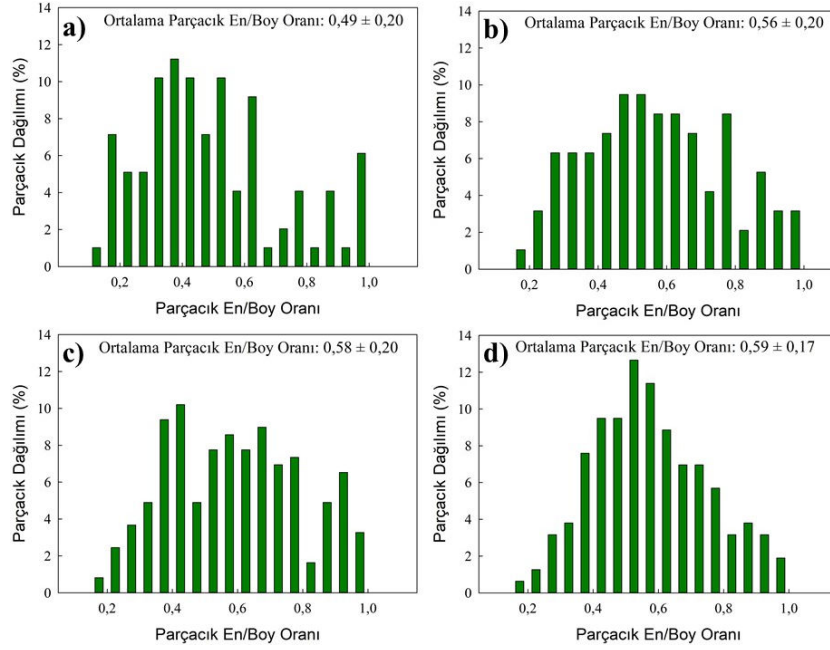
Alaşımın proses görmüş tüm durumlarına ait XRD desenleri ile içyapı görüntüleri sırasıyla Şekil 3 ve Şekil 4’te verilmiştir. Alaşımın homojenize durumdaki içyapısının α -Al taneleri ile silisyum parçacıklarından oluştuğu görülmüştür. α -Al tanelerinin dendritik, silisyumların ince ve uzun (ötektik), kısmende iri ve köşeli (birincil) bir görünüme sahip oldukları gözlenmiştir. Dövme işleminden sonra söz konusu dendritik yapının ortadan kalktığı, silisyumların parçalandığı, artan dövme çevrim sayısı ile yapı içerisine nispeten homojen dağıldığı belirlenmiştir.



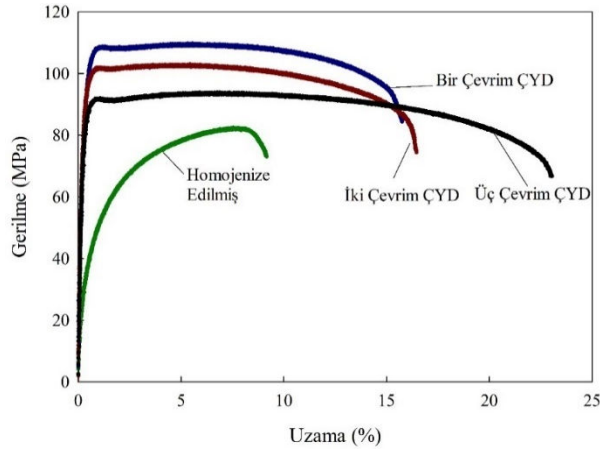
Şekil 3: Alaşımın tüm durumlarına ait XRD desenleri



Şekil 4: Alaşımın a) homojenize edilmiş, b) bir, c) iki ve d) üç çevrim ÇYD işlemi uygulanmış durumlarına ait içyapı görüntüleri



Şekil 5: a) Homojenize edilmiş, b) bir, c) iki ve d) üç çevrim ÇYD işlemi uygulanmış alaşımın iç yapısında bulunan Si parçacıklarının en/boy oranlarının yüzde dağılım grafikleri ve ortalama en/boy oranı değerleri



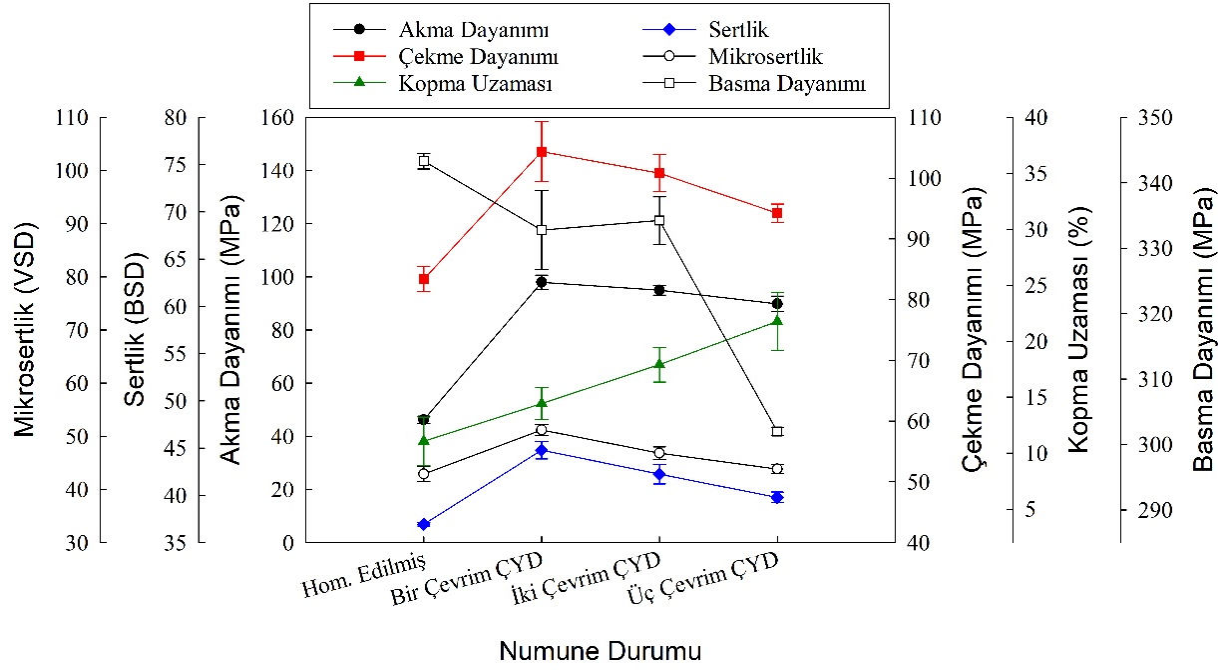
Şekil 6: Alaşıma ait gerilme-yüzde uzama eğrileri

Parçalanmış silisyumların yüzde dağılımlarının en/boy oranına göre değişimleri ise Şekil 5'te gösterilmiştir. Bu diyagramlardan yararlanarak dövme çevrim sayısı arttıkça parçalanmış silisyumların oranının arttığı ve en/boy oranlarının ortalama değerlerinin yaklaşık 0,49'dan 0,6'ya yükseldiği belirlenmiştir.

3.2 Mekanik Deneylerden Elde Edilen Bulgular

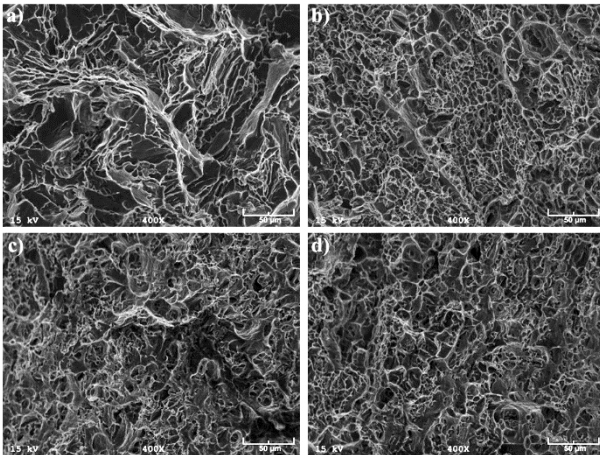
Alaşımın proses görmüş bütün durumlarına ait gerilme-yüzde uzama eğrileri Şekil 6'da verilmiştir. Homojenize durumda deformasyona dayalı sertleşme eğilimi sergileyen alaşımın dövüldükten sonra dayanımının çok düşük uzamalarda en

yüksek değerine ulaştığı yaklaşık bu değerde yüksek bir uzama sergiledikten sonra kırıldığı belirlenmiştir. Bu eğriler ile sertlik ve basma deneylerinden elde edilen verilerin alaşımın işlem durumuna göre değişimleri Şekil 7'de gösterilmiştir. Alaşımın sertlik, akma ve çekme dayanımının bir çevrim dövme işleminden sonra en yüksek değerine ulaştıktan sonra artan çevrim sayısı ile azaldığı, kopma uzamasının ise sürekli bir artış sergilediği belirlenmiştir. Diğer taraftan alaşımın basma dayanımının ise artan çevrim sayısı ile düştüğü belirlenmiştir.



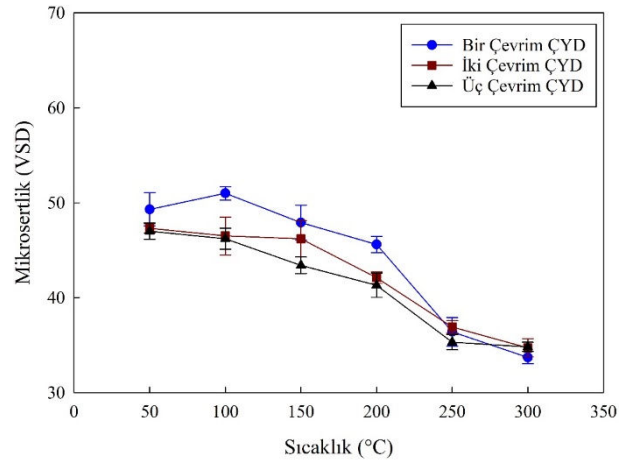
Şekil 7: Alaşımın tüm durumlarına ait mekanik özelliklerinin işlem durumuna göre değişimlerini gösteren eğriler

Çekme deneyi sonucunda kırılan numunelerin kırılma yüzeylerine gösteren SEM fotoğrafları Şekil 8'de verilmiştir. Homojenize durumda alaşımın kırılma yüzeyinde geniş alanlar ile bu alanları birbirinden ayıran tepelerin bulunduğu, dövme işleminden sonra geniş alanların daraldığı, çukurların meydana geldiği ve tepelerin daha yoğun bir biçimde ortaya çıktığı görülmüştür.



Şekil 8: a) Homojenize edilmiş, b) bir, c) iki ve d) üç çevrim ÇYD işlemi uygulanmış alaşımın kırılma yüzeylerini gösteren SEM fotoğrafları

Dövülmüş durumdaki alaşıma ait termal kararlılık eğrileri Şekil 9'da verilmiştir. Alaşımın genel olarak 150 °C sıcaklığa kadar sertliğini koruduğu, bunun üzerindeki sıcaklıklarda ise sertliğinin düştüğü diğer bir ifadeyle termal kararlılığını koruyamadığı belirlenmiştir.



Şekil 9: Çok yönlü sıcak dövülmüş alaşımın mikrosertliğinin sıcaklığa göre değişimini gösteren eğriler

4. TARTIŞMA

Çok yönlü dövme işleminden sonra alaşımın dendritik yapısının ortadan kalktığı, silisyumların parçalanarak yapı içerisine nispeten homojen bir biçimde dağıldığı, parçalanmanın ve homojen dağılımın artan çevrim sayısı ile arttığı gözlenmiştir (Şekil 4). Silisyumların parçalanması bunların sert ve gevrek oluşlarından, dendritik yapının ortadan kalkması sıcak deformasyon sırasında meydana gelen dinamik yeniden kristalleşmeden, parçalanmış silisyumların homojen dağılımı ise üç eksenli dövme işlemi sırasında söz konusu parçacıkların üç ana ekseninde yönlenmesinden kaynaklanmıştır [11, 16-20]. Nitekim silisyum parçacıklarının en/boy oranlarının (Şekil 5) artan çevrim sayısı ile sürekli bir artış sergilemesi; parçalanmanın her çevrimde gerçekleştiğini, parçalama sonucu sayılarının arttığını oluşan çok sayıda silisyum parçacığının birbiri peşine üç ekseninde yapılan dövme işlemi ile yapıya homojen bir biçimde dağıldığını göstermektedir.

Çok yönlü dövme işleminden sonra alaşımın çekme eğrisinin ani bir dikleşme sergileyerek bir maksimuma ulaştığı bu maksimum gerilme etkisi altında yüksek bir uzama sergiledikten sonra kırıldığı belirlenmiştir. (Şekil 6). Bu durum silisyumların parçalanması sonucu çatlak oluşturma eğilimlerinin azalmasından ve dinamik yeniden kristalleşme sonucu nispeten dislokasyon yoğunluğu düşük tane veya alt tanelerin oluşmasından kaynaklanmış olabilir [21, 22].

Çok yönlü dövme işleminden sonra alaşımın akma ve çekme dayanımları ile kopma uzaması değerlerinin arttığı gözlenmiştir (Şekil 7). Akma ve çekme dayanımındaki artış parçalanmış silisyumların yapı içerisine homojen dağılmasından dolayı dislokasyon hareketlerini engellemesinden, süneklikteki artış ise bu parçacıkların çatlak oluşumunu geciktirmesinden kaynaklanmış olabilir [11, 23]. Silisyumların en/boy oranlarının artması nispeten küreselleştiklerini, küresel parçacıkların ise lamel biçimindeki parçacıklara göre gerilme akışını kolaylaştırdığı ve çatlak oluşumunu geciktirdiği bilinmektedir. Ancak her ne kadar sert parçacıklar dislokasyon hareketini engellese de ortaya çıkan dinamik yeniden kristalleşme alaşımın yumuşamasına dolayısıyla dislokasyon hareketlerinin kolaylaşmasına yol

açmaktadır. Nitekim bir çevrimin üzerinde yapılan dövme işleminden sonra alaşımın akma ve çekme ile sertliğinde meydana gelen düşüş, dövme çevrim sayısına bağlı olarak süneklikte meydana gelen sürekli artış alaşımın belirli bir dövme çevrim sayısından sonra yumuşama eğilimi sergilediğini göstermektedir. Diğer taraftan çok yönlü dövme işleminden sonra alaşımın basma dayanımının azaldığı belirlenmiştir. Bu durum alaşımın sünekliğinin artmasından dolayı basma durumunda şekil değiştirme kabiliyetinin artmasından kaynaklanmış olabilir [16-20].

Homojenize durumda alaşımın yüzeyinde görülen geniş alanların (klivaj düzlemlerinin) dövme işleminden sonra daraldığı çekme yönünde uzamış sırtların arttığı belirlenmiştir (Şekil 8a). Söz konusu alanların silisyum yüzeylerinden veya silisyumun ana matristen ayrıldığı yüzeylerden meydana geldiği belirlenmiştir. Nitekim bu gözlem alaşımdaki kırılmanın silisyumların kırılması veya ana matristen ayrılması sonucu oluşan çatlakların ilerlemesi ile meydana geldiğini göstermektedir. Diğer taraftan dövme işleminden sonra yumuşayan matrisin çekme ekseninde yüksek uzama sergiledikten sonrası kopması çekme yönünde uzamış sırtların oluşmasına yol açmaktadır (Şekil 8b-d). Ancak bu sırtlar arasında mesafenin daralması sayıları artan silisyum parçacıklarının birbirine yaklaşmasından diğer bir ifadeyle silisyumlar arasındaki mesafenin azalmasından kaynaklanmış olabilir [21].

Çok yönlü dövülmüş alaşımın 150 °C'ye kadar sertliğini koruduğu ancak bunun üzerindeki sıcaklıklarda sertliğinin düştüğü belirlenmiştir (Şekil 9). Bu durum söz konusu alaşımlarda belirli sıcaklıklardan sonra yeni kristallerin oluşmasından ve/veya dövme işlemi sırasında oluşan yeni kristallerin büyümesinden kaynaklanmış olabilir. Nitekim 150 °C'den daha yüksek sıcaklıklarda oluşan yeni kristallerin oranının artması ve/veya mevcut kristallerin büyümesi alaşımın termal kararlılığını koruyamamasına yol açmaktadır [16-19].

5. SONUÇLAR

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

1. Alaşımın homojenize edilmiş durumundaki yapısal α -Al dendritleri ile dendritler arası

bölgelerde yer alan ince uzun (ötektik) ve blok biçimindeki (birincil) silisyum parçacıklarından oluşmaktadır.

2. Çok yönlü dövme işlemi alaşımın dentritik yapısının ortadan kalkmasına ve silisyumların kırılarak en/boy oranı artmasına ve yapıya nispeten homojen bir biçimde dağılmasına yol açmaktadır.

3. Çok yönlü dövme işleminden sonra alaşımın akma ve çekme dayanımı ile sertlik ve kopma uzaması değerleri artmaktadır. Ancak kopma uzamasındaki sürekli artışa rağmen alaşımın akma ve çekme dayanımı ile sertliği bir çevrim üzerinde yapılan dövme işleminden sonra azalmaktadır. Diğer taraftan çok yönlü dövme işleminden sonra alaşımın basma dayanımı düşmektedir.

4. Alaşımın kırılma yüzeyi homojenize edilmiş durumda klivaj düzlemlerinden, ÇYD işlemi uygulanmış durumda ise çekme yönünde uzamış ayrılma sırtlardan oluşmaktadır. Bu bulgu alaşımın homojenize edilmiş durumda gevrek, çok yönlü dövülmüş durumda ise sünek kırılma davranışı sergilediğini göstermektedir.

5. Dövülmüş durumdaki alaşım 150 °C sıcaklığa kadar sertliğini korumaktadır. Bu bulgu termal kararlılık açısından dövülmüş durumdaki alaşımın söz konu değerler üzerindeki sıcaklıklarda kullanılmasının uygun olmadığını ortaya koymaktadır.

6. TEŞEKKÜR

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

7. KAYNAKLAR

- [1] G.S. Cole, A.M. Sherman, "Light weight materials for automotive applications", Mater. Charact., vol. 35, no. 1, pp. 3-9, 1995.
- [2] H. Ye, "An overview of the development of Al-Si-Alloy based material for engine applications", J. Mater. Eng. Perform., vol. 12, no. 3, pp. 288-297, 2003.
- [3] J.E. Gruzleski, B.M. Closset, "The treatment of liquid aluminum-silicon alloys", American Foundrymen's Society, pp. 1-35, 1990.

- [4] S.P. Nikanorov, M.P. Volkov, V.N. Gurin, Y.A. Burenkov, L.I. Derkachenko, B.K. Kardashev, L.L. Regel, W.R. Wilcox, "Structural and mechanical properties of Al-Si alloys obtained by fast cooling of a levitated melt", Mater. Sci. Eng. A, vol. 390, no. 1, pp. 63-69, 2005.
- [5] C. Cui, A. Schulz, E. Matthei-Schulz, H.-W. Zoch, "Characterization of silicon phases in spray-formed and extruded hypereutectic Al-Si alloys by image analysis", J. Mater. Sci., vol. 44, no. 18, pp. 4814-4826, 2009.
- [6] M. Tiryakioğlu, "Si particle size and aspect ratio distributions in an Al-7%Si-0.6%Mg alloy during solution treatment", Mater. Sci. Eng. A, vol. 473, no. 1, pp. 1-6, 2008.
- [7] Y. Zedan, F.H. Samuel, A.M. Samuel, H.W. Doty, "Effects of Fe intermetallics on the machinability of heat-treated Al-(7-11)% Si alloys", J. Mater. Process. Technol., vol. 210, no. 2, pp. 245-257, 2010.
- [8] S.A. Kori, B.S. Murty, M. Chakraborty, "Development of an efficient grain refiner for Al-7Si alloy and its modification with strontium", Mater. Sci. Eng. A, vol. 283, no. 1, pp. 94-104, 2000.
- [9] N. Rathod, J. Manghani, "Effect of modifier and grain refiner on cast Al-7Si aluminum alloy: A review", International Journal of Emerging Trends in Engineering and Development, vol. 5, no. 2, pp. 574-582, 2012.
- [10] N. Fatahalla, M. Hafiz, M. Abdulkhalek, "Effect of microstructure on the mechanical properties and fracture of commercial hypoeutectic Al-Si alloy modified with Na, Sb and Sr", J. Mater. Sci., vol. 34, no. 14, pp. 3555-3564, 1999.
- [11] G. Purcek, O. Saray, O. Kul, "Microstructural evolution and mechanical properties of severely deformed Al-12Si casting alloy by equal-channel angular extrusion", Met. Mater. Int., vol. 16, no.1, pp. 145-154, 2010.
- [12] Y. Zhang, S. Jin, P.W. Trimby, X. Liao, M.Y. Murashkin, R.Z. Valiev, J. Liu, J.M. Cairney, S.P. Ringer, G. Sha, "Dynamic precipitation, segregation and strengthening of an Al-Zn-Mg-Cu alloy (AA7075) processed by high-pressure torsion", Acta Mater., vol. 162, pp. 19-32, 2019.

- [13] Q.F. Zhu, J. Wang, L. Li, C.Y. Ban, Z.H. Zhao, J.Z. Cui, "Effect of Forging Temperature on Deformability and Structure Evolution of High Purity Aluminium during Multi-Directional Forging Process", *Materials Science Forum*, Trans. Tech. Publ., pp. 371-379, 2017.
- [14] B. Cherukuri, T.S. Nedkova, R. Srinivasan, "A comparison of the properties of SPD-processed AA-6061 by equal-channel angular pressing, multi-axial compressions/forgings and accumulative roll bonding", *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 410-411, pp. 394-397, 2005.
- [15] I. Sabirov, M.Y. Murashkin, R.Z. Valiev, "Nanostructured aluminium alloys produced by severe plastic deformation: New horizons in development", *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 560, pp. 1-24, 2013.
- [16] B. Bay, N. Hansen, "Initial stages of recrystallization in aluminum of commercial purity", *Metallurgical Transactions A*, vol. 10, no. 3, pp. 279-288, 1979.
- [17] M.R. Drury, J.L. Urai, "Deformation-related recrystallization processes", *Tectonophysics*, vol. 172, no. 3, pp. 235-253, 1990.
- [18] S. Gourdet, F. Montheillet, "An experimental study of the recrystallization mechanism during hot deformation of aluminium", *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 283, no. 1, pp. 274-288, 2000.
- [19] K. Huang, R.E. Logé, "A review of dynamic recrystallization phenomena in metallic materials", *Materials & Design*, vol. 111, pp. 548-574, 2016.
- [20] T. Sakai, A. Belyakov, R. Kaibyshev, H. Miura, J.J. Jonas, "Dynamic and post-dynamic recrystallization under hot, cold and severe plastic deformation conditions", *Progress in Materials Science*, vol. 60, pp. 130-207, 2014.
- [21] A. Ma, N. Saito, M. Takagi, Y. Nishida, H. Iwata, K. Suzuki, I. Shigematsu, A. Watazu, "Effect of severe plastic deformation on tensile properties of a cast Al-11mass% Si alloy", *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 395, no.1-2, pp. 70-76, 2005.
- [22] I. Gutierrez-Urrutia, M.A. Muñoz-Morris, D.G. Morris, "Contribution of microstructural parameters to strengthening in an ultrafine-grained Al-7% Si alloy processed by severe deformation", *Acta Mater.*, vol. 55, no. 4, pp. 1319-1330, 2007.
- [23] Y.C. Lee, A.K. Dahle, D.H. StJohn, J.E.C. Hutt, "The effect of grain refinement and silicon content on grain formation in hypoeutectic Al-Si alloys", *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 259, no. 1, pp. 43-52, 1999.