

AA2024 ALAŞIMINDA SIMA YÖNTEMİ İLE TİKSOTROPİK YAPI ÜRETİMİ ÜZERİNE YENİDEN ISITMA SICAKLIĞININ ETKİSİ

Neşet AKAR*

* Gazi Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Metal Eğitimi Bölümü, Beşevler-ANKARA
nakar@gazi.edu.tr

(Geliş/Received: 29.04.2010 ; Kabul/Accepted: 01.03.2011)

ÖZET

Bu çalışmada, bir dövme alüminyum alaşımı olan AA2024 alaşımında gerinimin neden olduğu sıvı aktivasyonu (strain induced melt activated-SIMA) yöntemi ile yarı-katı şekillendirme için gerekli tiksotropik mikroyapı üretimi araştırılmıştır. Bu amaçla ekstrüze halde AA2024 alaşımı %20 oranında soğuk deformasyona tabi tutulmuş ve takiben %30, %40 ve %50 sıvı oranına karşılık gelen yarı-katı sıcaklıklara ısıtılarak oda sıcaklığına sahip suda soğutulmuştur. Mikroyapı analizleri metalografik inceleme ve nicel ölçüm yöntemleri ile yapılmıştır. Deneysel sonuçlar, SIMA yöntemiyle AA2024 alaşımında, yarı katı şekillendirme için gerekli olan küresel şekilli tiksotropik mikroyapıların üretilebileceğini göstermiştir. Artan yarı-katı sıcaklıkla tane boyutu artarken şekil faktöründe belirgin bir değişim gözlenmemiştir. SIMA yöntemi ile tiksotropik yapı üretimi için yarı-katı sıcaklıklarda izotermal bekletmeye gerek olmadığı tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yarı-katı şekillendirme, Yarı-katı sıcaklık, AA2024 alaşımı, Tiksotropik yapı, SIMA.

THE EFFECT OF REHEATING TEMPERATURE ON THE PRODUCTION OF THIXOTROPIC STRUCTURE WITH SIMA PROCESS IN AA2024 ALLOY

ABSTRACT

In this study, the production of required thixotropic microstructure for the semi-solid forming in a wrought aluminium alloy AA2024 was investigated by strain induced melt activated (SIMA) method. For this purpose, AA2024 alloy as extruded state were subjected to cold deformation at %20 rate, and then reheated to different semi-solid temperatures which corresponded to 30%, 40% and 50% liquid ratios, and cooled in water held at room temperature. Microstructure analysis was achieved by metallographic and quantitative methods. Experimental results showed that, globular shaped thixotropic microstructures which required for semi-solid forming can be produced in AA2024 Al alloy by SIMA process. With increasing semi-solid temperature, the grain size increases while the shape factor was not change significantly. For the production of thixotropic structure by SIMA process, there is no need to isothermal holding at semi-solid temperature for thixotropic structure transformation.

Keywords: Semi-solid forming, Semi-solid temperature, AA2024 alloy, Thixotropic structure, SIMA.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Yarı-katı metal şekillendirme yöntemleri döküm ve dövme yöntemlerinin avantajlarını birleştiren metal şekillendirme yöntemleridir. Yarı-katı metal şekillendirme yönteminde metal alaşımı ergime sıcaklığının altında katılaşma veya ötektik sıcaklığının üzerindeki bir sıcaklığa ısıtılır. Bu sıcaklıkta yarı-katı durumdaki malzeme, döküm yönteminde olduğu gibi

kapalı bir kalıpta veya dövme yönteminde olduğu gibi açık bir kalıpta şekillendirilir.

Metallerin yarı-katı durumda şekillendirilebilmesi için katı fazın dentritik olmayan bir yapıya sahip olması gerektiği 1970'lerin başındaki bir çalışması sonucu keşfedilmiştir [1]. Dentritik olmayan küresel yapının yarı-katı metal şekillendirme için ideal bir mikroyapı olduğu daha sonra belirlenmiştir [2].

Yarı-katı durumda metal ve alaşımlarını şekillendirebilmek için sıvı faz içinde düzenli olarak dağılmış küresele yakın ince taneli mikroyapıya ihtiyaç duyulur. Birincil faz (katı) ne kadar küresel şekle ve homojenliğe, küçük tane boyutuna ve yüksek şekil faktörüne sahip ise o kadar yüksek yarı-katı şekillendirme özelliğine sahip olmasının yanı sıra yüksek mekanik özelliklerde sağlamaktadır [3].

Yarı-katı şekillendirmede küresel mikroyapıya sahip malzeme tikotropik davranış sergilemektedir. Tikotropi, kuvvet altında zamanla viskozitenin sürekli olarak azalması olarak tanımlanır ve kuvvet kaldırıldığında malzeme eski özelliklerine geri döner [4]. Yarı-katı malzeme serbest halde taşımaya izin verecek kadar şeklini koruyabilecek yüksek viskoziteye sahiptir. Diğer yandan çok küçük bir kuvvet uygulandığında oldukça düşük viskozite sergiler ve akışkan sıvı gibi davranır.

Yarı-katı metal şekillendirme yöntemi geleneksel metal şekillendirme yöntemleri ile karşılaştırıldığında pekçok avantaja sahiptir. Sıvı oranı geleneksel döküm yöntemlerinden daha az olması katılma çekmesini de azaltmaktadır. Mikroyapıda dentritlerin olmaması ve çok az çekme boşlukları bulunması nedeniyle bu yöntemle üretilen parçaların mekanik özellikleri geleneksel döküm yöntemi ile üretilen parçalara kıyasla oldukça üstündür [5].

Günümüzde yarı-katı metal şekillendirme için mekanik karıştırma [1, 2], elektromanyetik karıştırma [7, 8], ultrasonik karıştırma [9], sprej döküm [8], eğimli soğutma plakasına döküm [10, 11], döndürmeli entalpi dengeleme [12, 13], sürekli reo-dönüşüm [8], içten soğutma [14,15], yeni MIT [16], yeniden kristalleşme ve kısmi ergitme (Recrystallization and Partial Melting-RAP) [17] ve gerininin neden olduğu sıvı aktivasyonu (Strain Induced Melt Activated-SIMA) [3,18-24] gibi birçok ön malzeme üretim yöntemi geliştirilmiş ve geliştirilmeye devam edilmektedir.

Bu ön malzeme üretim yöntemlerinden RAP ve SIMA haricindeki yöntemlerin hepsinde sıvı haldeki metale değişik işlem ve uygulamalar yapılarak küresel yapı elde edilmeye çalışılır. RAP ve SIMA yönteminde ise alaşıma katı halde mekanik işlem uygulanır.

SIMA yöntemi kristalleşme sıcaklığının üzerinde ekstrüzyon, haddeleme vb. sıcak şekillendirme işleminden sonra soğuk deformasyon ve sonrasında tekrar ısıtma aşamalarını içerir. RAP yöntemi, SIMA [17, 25] yöntemine benzemekle birlikte, malzemenin yeniden kristalleşme sıcaklığının altındaki bir sıcaklıkta deformasyona tabi tutulması ve takiben yarı-katı sıcaklığa ısıtma işlemi ile mikroyapının küresel hale dönüştürülmesi prensibine dayanır. Bu yöntemin en büyük dezavantajı büyük çaplı biyetlerin parça boyunca homojen olarak deforme edilememesi

nedeniyle homojen olarak küresel mikroyapı üretilmemesidir [17].

AA2024 alaşımında tikotropik yapı üretimi ile ilgili ilk çalışma 1983'de Young ve arkadaşları [18] tarafından yapılmıştır. Bu çalışma aynı zamanda SIMA yönteminin patentidir.

Choi ve Park [20] AA2024 alaşımını %15, %20, %25, %40 ve %60 oranlarında soğuk deforme etmiş ve daha sonra %80 katı oranını veren sıcaklığa ısıtarak tane boyutu ve soğuk deformasyon arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir. Araştırmacılar deformasyon oranı arttıkça ortalama tane boyutunun azaldığını belirlemişlerdir.

Jung ve Kang [22] sıcak ekstrüze edilmiş Al2024 alaşımında yarı-katı sıcaklığın ve bu sıcaklıkta beklemenin mikroyapıya etkisini araştırmışlardır. Araştırmacılar %50 ve %60 katı oranlarını veren sıcaklıklarda elde ettikleri mikroyapıların sadece sıvı hacim oranının farklı olduğunu, küreselleşme oranı ve tane boyutu arasında önemli bir fark olmadığını tespit etmişlerdir.

Tzimas ve Zavaliangos [26] sprej döküm ve SIMA yöntemi ile Al2014 alaşımının mikroyapısının yarı-katı sıcaklıktaki küreselleşme mekanizmasını incelemişlerdir. Sprej döküm yöntemi ile elde edilen ön malzemelelerde çok fazla oranda gaz boşluğu meydana geldiği ve bunun da sprej döküm aşamasında hidrojen gazının çözünmesinden kaynaklandığını bildirmişlerdir.

Zoqi [27] çalışmasında düşük döküm sıcaklığından dökülmüş Al 2014 alaşımına %20 ve % 40 deformasyon uygulamış ve daha sonra % 40 katı oranını veren sıcaklıkta 5 dak bekletmiştir. Araştırmacıya göre küresel ve ince mikroyapı elde edilmesinde deformasyon oranının etkisi ilk döküm tane yapısından çok daha fazladır. Araştırmacı ılık deformasyon oranı arttıkça daha homojen ve ince taneli yapılar üretilebileceğini bildirmiştir.

Jiang ve arkadaşları [28] Al-4Cu-Mg alaşımında sıcak ve soğuk deformasyon oranı ve yarı-katı sıcaklıkta bekleme süresinin tane boyutu üzerine etkilerini araştırmışlardır. Araştırmacılar artan deformasyon oranı ile küresel mikroyapı elde etmek için bekleme sıcaklık ve süresinin azaldığını tespit etmişlerdir. Artan deformasyon oranı, artan yarı katı sıcaklık ve bekleme süresi ile katı fazın küreselliğinin arttığını tespit etmişlerdir.

Jiang ve Li [29] Al-4Cu-Mg alaşımında SIMA yöntemi ile ön malzeme üretiminde diğer araştırmalarda olduğu gibi artan deformasyon oranı ile daha küresel ve ince taneler elde edilebileceğini belirtmişlerdir.

Jiang, Li [30] ve Mi, Tang ve Li [31] yaptıkları diğer çalışmalarında Al-4Cu-Mg alaşımının mikroyapı oluşumu ve tane büyümesi aşamalarını tanımlayan matematiksel model sunmuşlardır.

Sirong ve arkadaşları [19] Al2024 alaşımında soğuk deformasyon oranının tane boyutuna etkisini araştırmışlardır. Araştırmacılar artan deformasyon oranı ile tane boyutunun azaldığını belirlemişlerdir.

AA2024 alaşımlarının tiksotropik yapı üretimi ile ilgili diğer bilimsel çalışmalar ön malzeme üretimi ile ilgilidir. Bu çalışmalardan Guo ve Wang [23] Al2024 alaşımını düşük sıcaklıktan dönen eğimli soğutma plakasına döküm yöntemi ile tiksotropik özelliğe sahip küresel ve ince mikroyapı üretilebileceğini göstermişlerdir. Wang ve arkadaşları [32] da iki aşamalı ısıtma yöntemi adını verdikleri yöntem ile izotermal bekletmeden daha iyi tiksotropik özellikli yapı elde edildiğini iddia etmektedirler.

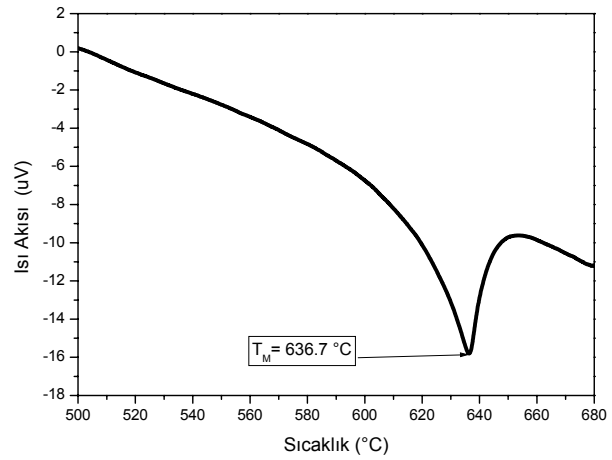
Bu çalışmada, AA2024 alaşımında yarı-katı sıcaklığa yeniden ısıtma yapılarak farklı sıvı oranlarına karşılık gelen yarı-katı sıcaklığın tiksotropik yapı oluşumu üzerine etkisi deneysel olarak araştırılmıştır.

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR (EXPERIMENTAL STUDIES)

Çalışmalarda kullanılan ekstrüze AA2024 alaşımının kimyasal kompozisyonu Tablo 1'de verilmiştir. AA2024 alaşımında SIMA işlemi ile tiksotropik yapı üretimini araştırmak amacıyla 40 mm çapındaki biyetler oda sıcaklığında 250 ton kapasiteli pres altında 2,5 mm/s hızla %20 soğuk deforme edilmişlerdir. Daha sonra soğuk deformasyon

aşamasında biyetlerde oluşan sert yüzeylerin ve şekil bozukluklarının giderilmesi için soğutma sıvısının da kullanıldığı tornalama ile işlemi 60 mm boy ve 40 mm çap ölçülerine getirilmiştir.

Şekil 1'de verilen AA2024 Al alaşımına ait DTA (Diferansiyel Termal Analiz) eğrisi Perkin-Elmer marka DTA cihazı kullanılarak asal gaz atmosferinde (Ar gazı) 20 °C/min ısıtma hızında oda sıcaklığından 750 °C sıcaklığa kadar ısıtılarak elde edilmiştir. Elde edilen DTA eğrilerinden belirlenen ergime ve katılma sıcaklıklarının arasındaki alandan yararlanılarak AA2024 alaşımının sıcaklığa bağlı olarak sıvı-katı oranları tespit edilmiştir. Bu çalışmada %30, %40 ve %50 sıvı oranına karşılık gelen 588°C, 600°C ve 608°C sıcaklıklar yeniden ısıtma işlemi için belirlenmiştir.



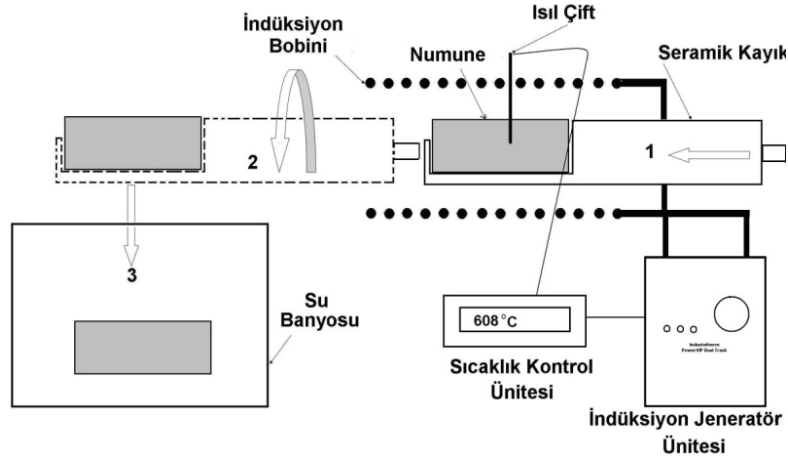
Şekil 1. AA2024 alaşımının DTA eğrisi (Figure 1. DTA curve of AA2024 alloy)

Tablo 1. AA2024 alaşımının kimyasal kompozisyonu (Table 1. Chemical composition of AA2024 alloys)

| Ağırlıkça % | | | | | | | | | | | |
|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| Cu | Mg | Mn | Fe | Zn | Si | Pb | Sn | Ni | Cr | Ti | Al |
| 4,5148 | 0,9133 | 0,5965 | 0,3975 | 0,2362 | 0,2182 | 0,0279 | 0,0269 | 0,0212 | 0,0139 | 0,0111 | Kalan |

Yarı-katı bölgeye yeniden ısıtma Inductotherm marka 35 kW'lık PowerVIP Dual Track induksiyon jeneratör ünitesine bağlı induksiyon bobini ile gerçekleştirilmiştir. İndüksiyon bobininin sıcaklık kontrolü K tipi (NiCr-Ni) ısı çifti ile sağlanmıştır. Yarı-katı bölgeye ısıtma sırasında induksiyon bobinini kontrol eden ısı çiftten eş zamanlı olarak 1 s zaman aralığında sıcaklıklar otomatik olarak veri toplama sistemine kaydedilmiş ve bilgisayara aktarılmıştır.

%20 soğuk deforme edilmiş AA2024 alaşımı induksiyon bobininde yatay konumda 135 °C/min ısıtma hızında tespit edilen farklı yarı-katı sıcaklıklara ısıtılmış ve daha sonra bekletme yapmadan oda sıcaklığındaki suda hızla soğutulmuştur (Şekil 2).



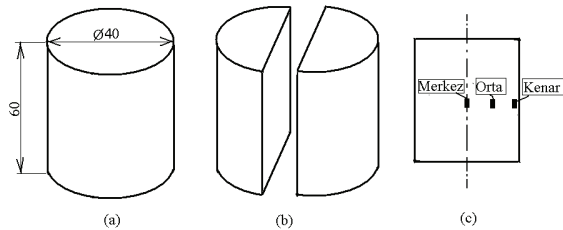
Şekil 2. Deneysel düzeneği (Figure 2. Experimental setup)

Metaloğrafik inceleme amacıyla numuneler (Şekil 3a) boyuna dikey olarak (Şekil 3b) abrasif kesme cihazında kesilmiştir. Numuneler standart metalografik yöntemlerle (Zımparalama + Polisaj) metalografik inceleme için hazırlanmıştır. Dağlayıcı olarak Keller çözeltisi ve mikroyapıların görüntülenmesinde Leica DFC 320 dijital kamera bağlantılı Leica DM 4000 M marka optik mikroskop kullanılmıştır. Metalografik incelemeler kenar, orta ve merkez olmak üzere üç bölgeden yapılmıştır (Şekil 3c).

Tane boyutu ölçümleri ASTM E112 standardına göre yapılmıştır. Tane boyutu ölçümlerinde çizgisel kesişme yöntemi kullanılmıştır. Şekil 3.c’de gösterilen her alandan 500 adet tanenin boyu ölçülmüş ve ölçülen tanelerin boyunun ortalaması alınarak tane boyutu hesaplanmıştır. Ön malzeme üretiminde küreselliğin değerlendirilmesi amacıyla şekil faktörü formülü kullanılmıştır.

$$\text{Şekil faktörü} = \frac{4\pi A}{p^2}$$

Burada A ölçüm yapılan tanenin alanı, P ise tanenin çevresidir.

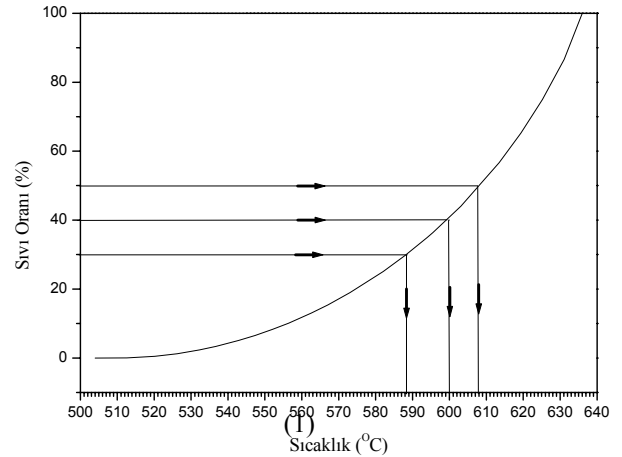


Şekil 3. Numunelerin metalografik inceleme için kesilmesi ve metalografik inceleme bölgeleri (Figure 3. Cutting of samples for metallographic examination and metallographic examination areas)

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

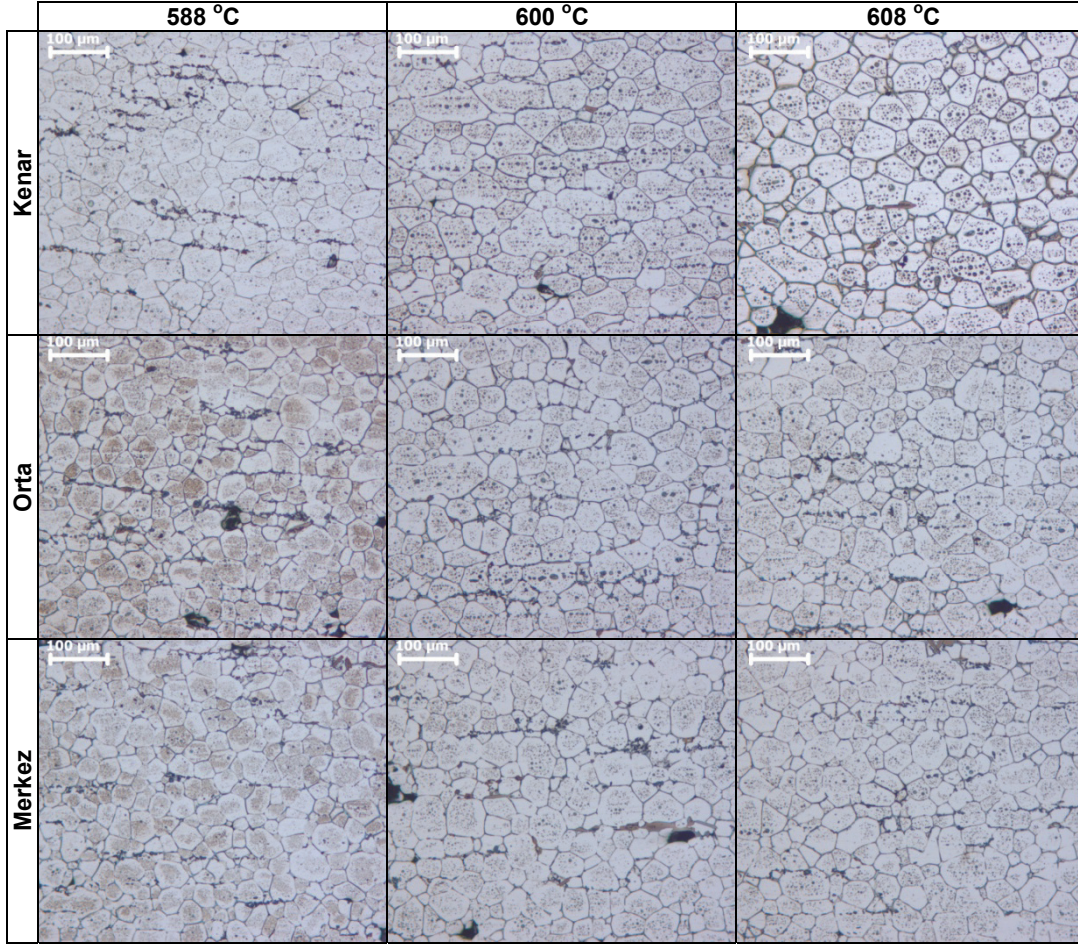
DTA verilerinden alan hesabı kullanılarak elde edilen yarı-katı aralıktaki sıcaklıkların karşılık geldiği sıvı

oranı eğrisi Şekil 4’de verilmiştir. Yarı-katı sıcaklık aralığında şekillendirme için gerekli sıvı miktarı %30–50 arasında olması gerekmektedir [33-35]. Bu çalışmada, Şekil 4’deki sıvı oranı-sıcaklık eğrisi yardımı ile %50, %40 ve %30 sıvı oranına karşılık gelen sıcaklık değerleri sırasıyla 608°C, 600°C ve 588°C olarak belirlenmiştir.



Şekil 4. AA2024 alaşımının DTA ısıtma eğrisinden elde edilen sıcaklık-sıvı oranı (Figure 4. Fraction liquid vs. temperature estimated from DTA heating curves for AA2024 alloy)

%20 soğuk deforme edilmiş ve 588 °C, 600 °C ve 608 °C ye kadar ön ısıtma işlemi uygulanmış AA2024 alaşımı numunelerin mikroyapıları Şekil 5’de verilmiştir. Tablo 2’de numunelerin kenar, orta ve merkez bölgelerinden elde edilen mikroyapı görüntülerinden tane boyutu ölçüm sonuçları ve tane boyutu ortalama değerleri verilmiştir. Numunelerin kenar, orta ve merkez bölgelerinden elde edilen tane boyutu değerleri incelendiğinde numunenin her bölgesinin eşit tane boyutuna sahip olduğu görülebilir. Kenar, orta ve merkez bölgelerden ölçülen değerlerin birbirine çok yakın olması deney düzeneğinin ve kullanılan indüksiyon ısıtma sisteminin hassas ve ısıtmanın tüm kesitte homojen olduğunu göstermektedir.



Şekil 5. %20 deformasyon uygulanmış ve değişik yarı-katı sıcaklıklara ısıtılmış AA2024 alaşımının mikroyapı değişimi (Figure 5. Variations in the microstructure change of AA2024 alloy which was cold deformed 20% and reheated to the different semi-solid temperatures)

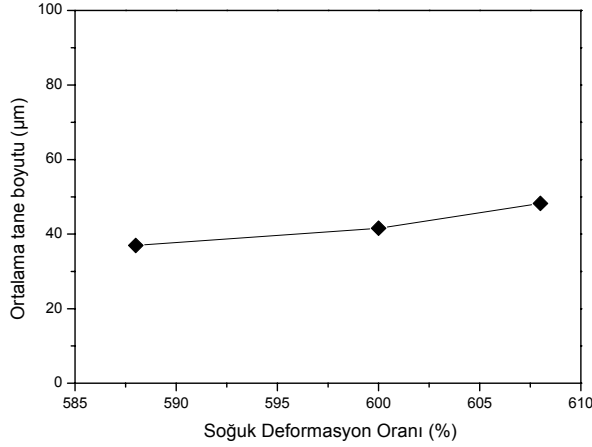
Tablo 2. %20 soğuk deformasyon ve takiben yarı-katı sıcaklığa ön ısıtma işlemi uygulanmış biyetlerin kenar orta ve merkezlerinden ölçülen tane boyutları ve ortalama tane boyutları (Table 2. the grain sizes and average grain sizes of measured in the edge, middle and center of billet regions 20% cold deformed and then reheated at different semi-solid temperatures)

| Yarı-katı sıcaklık (°C) | Tane boyutu (µm) | | | |
|----------------------------|------------------|------|--------|-------------|
| | Kenar | Orta | Merkez | Ortalama |
| 588 | 37,3 | 36,7 | 36,7 | 36,9 |
| 600 | 40,5 | 41,8 | 42,3 | 41,5 |
| 608 | 49,3 | 49,6 | 50,6 | 49,8 |

Şekil 6'da sıcaklığın tane boyutuna etkisi verilmiştir. Tablo 2, Şekil 5 ve Şekil 6 incelendiğinde tane boyutu üzerine yarı-katı sıcaklığın etkisi açıkça görülmektedir. Sıcaklık arttıkça tane boyutu artmaktadır. Yarı-katı sıcaklık 588 °C'den 600 °C'ye yükseldiğinde yaklaşık 4 µm ve 600 °C'den 608 °C'ye yükseldiğinde ise yaklaşık 8 µm'lük bir artış meydana gelmiştir. Sıcaklığın artması ile tane irileşmesi meydana gelmektedir. Bu sonuç literatürle aynı doğrultudadır [36]. Bekletme zamanı katı oranının azalmasına yetecek kadar uzun olduğu zaman Ostwald (ripening) mekanizması da yapısal kabalaşmada etkili olmaya başlamaktadır [36, 37].

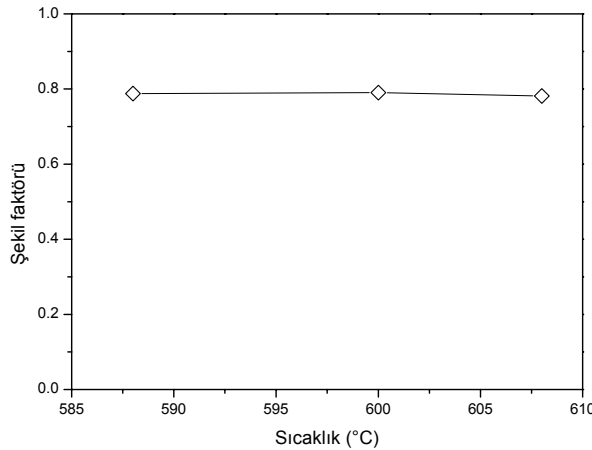
Fakat bu çalışmada yarı-katı sıcaklıkta bekletme yapılmadığı için Ostwald (ripening) mekanizması çok fazla etkili olmamıştır. Dolayısı ile yarı-katı sıcaklık artışıyla çok az miktarda tane irileşmesi görülmüştür. Artan sıcaklıkla taneler yüzey serbest enerji seviyelerini en aza indirmek için büyümektedirler. Taneler termodinamik olarak potansiyel arayüzeylerini en aza indirerek daha kararlı hale gelmektedirler. Toplam tane sınırı (arayüzey) azaltıldığında toplam yüzey serbest enerjide azalır [38,39].

Tikso-şekillendirme için ortalama tane boyutu 100 µm ve altında olması homojen akış ve yarı-katı durumda metalin kalıp boşluğunu doldurması için gereklidir[22, 25, 34, 40–42]. Bu çalışmada farklı yarı-katı sıcaklıklarda elde edilen tane boyutları 50 µm'dan daha küçük olduğundan üretilen ön malzemelerin tikso-şekillendirme için uygun olduğu söylenebilir.



Şekil 6. Yarı-katı sıcaklık ile ortalama tane boyutu değişimi (Figure 6. Variations of average grain size with semi-solid temperature)

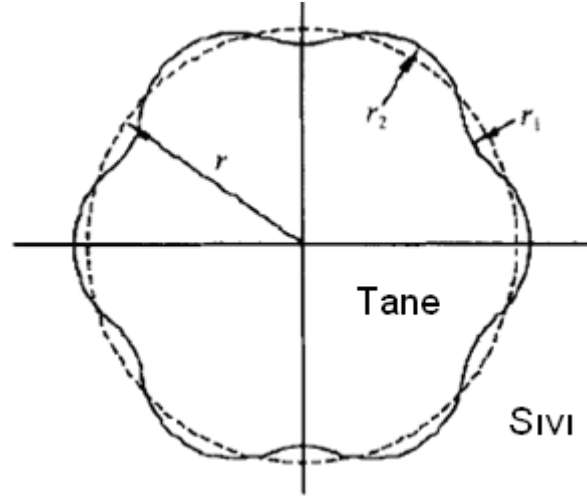
Şekil 7'de %20 soğuk deformasyon ve takiben 588 °C, 600 °C ve 608 °C yeniden ısıtma sonrası mikroyapıdan hesaplanan şekil faktörü değerleri görülmektedir. Şekil 7'den görüleceği üzere yarı-katı sıcaklığın tane küreselleşmesi üzerine belirgin bir etkisi bulunamamıştır.



Şekil 7. Yarı-katı sıcaklık ile şekil faktörü değişimi (Figure 7. Variations of the shape factor with semi-solid temperature)

Jiang ve arkadaşlarının [32] yeniden kristalleşen eşksenel tanelerin küreselleşme modeli Şekil 8'de şematik olarak gösterilmiştir. Modele göre tane ayrılma prosesinde eşksenel yeniden kristalleşmiş taneler birbirinden ayrılır. Birbirinden ayrılan tane yüzeylerinde içbükey ve dışbükey bölgeler bulunur. Dışbükey bölgelerin (r_2) ergime noktaları içbükey bölgelerden (r_1) daha düşüktür. Dolayısıyla dışbükey bölgelerden içbükey bölgelere çözünen atomların taşınmasıyla dışbükey bölgeler gözden kaybolur. İçbükey bölgedeki sıvı kompozisyonu dışbükey bölgeden daha az olduğu için dışbükey bölgeden içbükey bölgeye çözünen atomlar hareket edeceklerdir. Dışbükey bölgeler eriyecek ve bu bölgelerden çözünen atomların içbükey bölgelere taşınmasıyla tane küresel yapıya dönüşecektir.

Tane küreselleşme modeli mekanizmasının çalışabilmesi için atomların difüzyona ihtiyacı vardır [32]. Difüzyon için de zaman gereklidir. Bu çalışmada yarı-katı sıcaklıkta bekleme yapılmadığı için difüzyonla tane küreselleşmesi için gerekli zaman yoktur. Dolayısıyla ile tane küreselleşmesi üzerine sıcaklığın çok baskın bir etkisi görülmemiştir.



Şekil 8. Tane küreselleşme mekanizmasının şematik olarak gösterimi (Figure 8. Schematic representation of the mechanism of the grain globalization) [32]

Liu ve arkadaşları [11] yüksek dayanımlı dövme Al alaşımlarının tiksotropik şekillendirme çalışmasında, yarı-katı sıcaklıkta 0-5 dak bekleminin şekil faktörünü arttırdığını ancak uzun bekleme sürelerinin (5-30 dak) şekil faktöründe azalmaya neden olduğunu bildirmektedirler. Liu ve arkadaşlarının çalışmasına göre yarı-katı sıcaklıkta bekleminin şekil faktörü üzerine daha etkili olduğu anlaşılmaktadır. Ancak Önsel [43], SIMA yöntemi ile ön malzeme üretiminde yarı-katı sıcaklığın küresel yapıya sahip tiksotropik yapı oluşumunda bekleme süresinden daha etkili olduğunu vurgulamaktadır [43]. Bu çalışmada artan yarı-katı sıcaklıkla şekil faktöründeki artışın daha belirgin olduğu tespit edilmiştir. Öte yandan Liu ve arkadaşları [11] yarı-katı sıcaklıkta uzun bekleme sürelerinin numunenin merkezinde ve kenarında makro-segregasyona neden olduğunu bildirmektedir [11].

Biröl, [41] farklı ekstrüze oranlarında deforme ettiği AA6061 alaşımında 635 °C yarı-katı sıcaklıkta 5 dakikadan fazla bekleminin tanelerin küreselliğini iyileştirmedikini ve yarı-katı sıcaklıkta uzun süre bekleminin şekil faktöründe belirgin bir değişime neden olmadığını ancak tane boyutunda belirgin artışa neden olduğunu bildirmektedir [41].

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

AA2024 alaşımında SIMA yöntemi ile yarı-katı şekillendirme için gerekli tiksotropik mikroyapı

üzerine yarı-katı (yeniden ısıtma) sıcaklığının etkisinin belirlenmesi çalışmalarında aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- 1) AA2024 alaşımı 588°C, 600°C ve 608°C’de sırasıyla %30, %40 ve %50 sıvı oranına sahiptir.
- 2) AA2024 alaşımı, SIMA yöntemi ile %20 soğuk deformasyon, takiben indüksiyon bobini ile %30-%50 sıvı oranı aralığına yeniden ısıtılarak ve ısıtılan yarı-katı sıcaklıkta beklemeden yarı-katı şekillendirilebilir.
- 3) Biyetlerde ortalama tane boyutu 37–50 µm arasında olduğundan tiksotroptik şekillendirmeye uygun olduğu belirlenmiştir.
- 4) Deneylede yarı-katı sıcaklığın şekil faktörü üzerine belirgin bir etkisi tespit edilememiştir.
- 5) AA2024 alaşımı 588°C, 600°C ve 608°C’ye yeniden ısıtma sonrası 0,78–0,79 aralığında şekil faktörüne sahip tiksotropik özellikli taneler elde edilmiştir.

SEMOLLER (NOMENCLATURE)

- T_M : Ergime sıcaklığı, °C
 T_S : Katılaşma sıcaklığı, °C
 A : Ölçüm yapılan tanenin alanı, µm²
 P : Ölçüm yapılan tanenin çevresi, µm

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışmaya maddi destek sağlayan Devlet Planlama Teşkilatına (2003K-120470-27) ve Gazi Üniversitesine (BAP 07/2007-18) teşekkür ederim.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Spencer, D.B., Mehrabian, R. and Flemings, M.C., “Rheological Behavior of Sn-15 pct Pb in the Crystallization Range”, **Metallurgical Transaction A**, 3A:1925-1932 1972.
2. Flemings, M.C., Riek R.G. and Young K.P., “Rheocasting”, **Materials Science and Engineering**, 25:103-117 1976.
3. Zoqui, E.J., Paes, M., Es-Sadiqi, E., “Macro- and microstructure analysis of SSM A356 produced by electromagnetic stirring” **Journal of Materials Processing Technology**, 120: 365–373 2002.
4. Tzimas, E., “Evolution of microstructure and rheological behavior of alloys in the semi solid state”, Ph.D. Thesis, **Drexel University, USA**, 1-12 1997.
5. Kapranos, P., Ward P.J., Atkinson H.V. and Kirkwood D.H., “Near net shaping by semi-solid metal processing” **Materials and Design**, 21 (4): 387-394 2000.
6. Li, D. N., Luo, J. R., Wu, S. S., Xiao, Z. H., Mao, Y. W., Song, X. J., Wu, G. Z., “Study on the semi-solid rheocasting of magnesium alloy by mechanical stirring”, **Journal of Materials**

- Processing Technology**, 129 (1-3): 431-434 2002.
7. Hirt, G., and Kopp, R., “Semi-solid Metal Processing” **WILEY-VCH Verlag GmbH & Co, Weinheim** 2009.
8. Czerwinski F. “Semisolid Processing—Origin of Magnesium Molding”, **Magnesium Injection Molding, Springer US, USA**, 81-145 2007.
9. Abramov, V. O., Abramov, O. V. Abramov, B. B. Straumal and W. Gust, “Hypereutectic Al-Si based alloys with a thixotropic microstructure produced by ultrasonic treatment”, **Materials and Design**, 18: 323-326 1997.
10. Taghavi, F., Ghassemi, A., “Study on the effects of the length and angle of inclined plate on the thixotropic microstructure of A356 aluminum alloy”, **Materials and Design** 30:1762–1767 2009.
11. Liu, D., Atkinson, H.V., Kapranos, P., Jirattiticharoen W. and Jones, H., “Microstructural evolution and tensile mechanical properties of thixofomed high performance aluminium alloys”, **Materials Science and Engineering A**, 361 (1-2): 213-224 2003.
12. Nafisi, S., Lashkari, O., Ghomashchi, R., Ajersch, F., Charette, A., “Microstructure and rheological behavior of grain refined and modified semi-solid A356 Al-Si slurries”, **Acta Materialia**, 54: 3503–3511 2006.
13. Dautre, D, Hay, G., Wales, P. and Gabathuler, J.P. “SEED: A new process for semi solid forming”, **Canadian Metallurgical Quarterly**, 43 (2): 265-272, 2004.
14. Birol Y., “Internal Cooling to produce aluminium alloy slurries for rheocasting”, **Journal of Alloy and Compounds**, 480 (2): 365-368 2009.
15. Birol Y., “Production of Al-7Si-0.3Mg slurry for rheocasting via internal cooling of the melt below liquidus temperature”, **Metallic Materials**, 47 (9): 401-407 2009.
16. Martinez, R.A. and Flemings, M.C., “Evolution of particle morphology in the semisolid processing”, **Metallurgical and Materials Transactions A**, 36 (8): 2205-2210 2005.
17. Atkinson, H.V., Liu, D., “Microstructural coarsening of semi-solid aluminium alloys”, **Materials Science and Engineering A**, 496 (1-2):439-446 2008.
18. Young, K.P., Curtis, P.K. and James, C., “Fine Grained Metal Composition”, **United States Patent**, Patent No: 4415374, USA 1983.
19. Sirong, Y., Dongcheng, L., Kim, N., “Microstructure evolution of SIMA processed AA2024”, **Materials Science and Engineering A**, 420 (1-2):165-170 2006.
20. Choi, J. C., Park, H. J. “Microstructural characteristics of aluminum 2024 by cold working in the SIMA process.” **Journal of**

- Materials Processing Technology**, 82: 107–116 1998.
21. Kopp, R., Winning G. and Möller T., “Thixoforming of aluminium alloys” **METEC**, Düsseldorf 1999.
 22. Jung, H.K. Kang C.G. “Reheating process of cast and wrought aluminum alloys for thixoforming and their globularization mechanism”, **Journal of Materials Processing Technology**, 104: 244-253 2000.
 23. Guo, H., Yang, X.,” Preparation of semi-solid slurry containing fine and globular particles for wrought aluminum alloy 2024” *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* 17: 799-804 2007.
 24. Akar, N., Mutlu, I., “Effect of Predeformation Rate in SIMA Process on Thixotropic Structure of AA2024 Aluminium Alloy”, **Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University**, 25(4): 663-670 2010.
 25. Chayong, S., Atkinson, H.V. and Kapranos, P., “Multistep induction heating regimes for thixoforming 7075 aluminium alloy”, **Materials Science and Technology**, 20 (4): 490-496 2004.
 26. Figueredo, A., “Science and technology of semi-solid metal processing” **North America Die Casting Association, USA**, 1-17, 2001.
 27. Tzimas, E. and Zavaliangos, A., “Evaluation of volume fraction of solid in alloys formed by semisolid processing”, **Journal of Materials Science**, 35 (21): 5319-5329 2000.
 28. Zoqui E.J. “Morphological analysis of SSM Al–4.5 wt.% Cu measured by the rheocast quality index”, **Journal of Materials Processing Technology**, 143–144: 195–201 2003.
 29. Jiang, H., Lu, Y., Huang, W., Li, X., Li, M., “Microstructural evolution and mechanical properties of the semisolid Al–4Cu–Mg alloy”, **Materials Characterization**, 51: 1– 10 2003.
 30. Jiang, H., Li, M., “Microscopic observation of cold-deformed Al–4Cu–Mg alloy samples after semi-solid heat treatments”, **Materials Characterization**, 54: 451– 457 2005.
 31. Jiang, H. and Li, M., “Grain growth of Al-4Cu-Mg alloy during isothermal heat treatment”, **Journal of University of Science and Technology Beijing**, 13(1): 67-72 2006.
 32. Jiang, H., Mi, Z., Tang, D., and Li, M., “Microstructure evolution of Al-4Cu-Mg alloy during semi-solid treatment”, **Journal of University of Science and Technology Beijing**, 14(2): 151-156 2007.
 33. Wang, S., Li, Y., Chen, W., Zheng, X., “Microstructure evolution of semi-solid 2024 alloy during two-step reheating process”, **Transactions of Nonferrous Metals Society of China**, 18 (4): 784-788 2008.
 34. Atkinson, H.V., Kapranos, P., Liu, D., Chayong S.A. and Kirkwood D.H. Thixoforming of normally wrought aluminium alloys”, **Materials Science Forum**, 396-402 (3): 131-136 2002.
 35. Atkinson, H.V., “Modelling the semisolid processing of metallic alloys”, **Progress in Materials Science**, 50 (3): 341-412 2005.
 36. Fan, Z., “Semisolid metal processing” **International Materials Reviews**, 47(2): 49-85 2002.
 37. Zhang, L., Liu, Y.B., Cao, Z.Y., Zhang, Y.F., Zhang, Q.Q. “Effects of isothermal process parameters on the microstructure of semisolid AZ91D alloy produced by SIMA”, **Journal of Materials Processing Technology**, 209: 792–797 2009.
 38. Verhoeven, J.D., “Fundamentals of physical metallurgy”, **John Wiley & Sons Inc.**, Canada, 198, 200, 347 1975.
 39. Porter, D.A., and Easterling K.E. “Phase transformation in metals and alloys” **CRC Press**, UK, 131 2001.
 40. Kim, N.S. and Kang, C.G., “An investigation of flow characteristics considering the effect of viscosity variation in the thixoforming process”, **Journal of Materials Processing Technology**, 103: 237-246 2000.
 41. Birol, Y., “Thermomechanical processing of AA6061 billets for semi-solid forming”, **International Journal of Materials Research**, 98 (1): 53-59, (2007).
 42. Atkinson, H.V., Burke K. and Vaneetveld G., “Recrystallization in the semi-solid state in 7075 aluminium alloy”, **Materials Science and Engineering A**, 490 : 266-276 2008.
 43. Önsel, M., “The influence of heating conditions on semi-solid forming of aluminum alloys”, Yüksek Lisans Tezi, **Boğaziçi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, 90 2005.