

# AA2024 ALÜMİNYUM ALAŞIMININ TİKSOTROPİK YAPISI ÜZERİNE SIMA YÖNTEMİNDEKİ DEFORMASYON ORANININ ETKİSİ

Neşet AKAR\* ve İlhan MUTLU\*\*

\* Gazi Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Metal Eğitimi Bölümü, Beşevler-ANKARA

\*\* MEB, Çubuk MEM, Çubuk-ANKARA

[nakar@gazi.edu.tr](mailto:nakar@gazi.edu.tr), [ilhmutlu@hotmail.com](mailto:ilhmutlu@hotmail.com)

(Geliş / Received: 24.12.2009 ; Kabul / Accepted: 15.04.2010)

## ÖZET

Bu çalışmada, bir dövme alaşım 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 değişik oranlarda soğuk deformasyona tabi tutulmuş ve takiben yarı-katı bölgeye 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 soğuk deformasyon oranı ile şekil faktörü artarken tane boyutu azalmıştır. SIMA yöntemi ile tiksotropik yapı üretimi için en az %20 soğuk deformasyonun gerekli olduğu belirlenmiş ve tiksotropik yapı dönüşümü için yarı-katı sıcaklıkta izotermal bekletmeye gerek olmadığı tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Yarı-katı şekillendirme, AA2024 alaşımı, tiksotropik yapı, SIMA.

## EFFECT OF PREDEFORMATION RATE IN SIMA PROCESS ON THIXOTROPIC STRUCTURE OF AA2024 ALUMINIUM ALLOY

### ABSTRACT

In this study, thixotropic microstructure produced in a wrought AA2024 alloy for the semi-solid forming was investigated by strain induced melt activated (SIMA) method. For this purpose, AA2024 alloy as extruded state were subjected to cold deformation at different rates, following heated to a semi-solid region, and cooled in water at room temperature. Microstructure analysis was achieved by metallographic and quantitative methods. Experimental results showed that spherical shaped thixotropic microstructures which required for semi-solid forming can be produced in AA2024 Al alloy by SIMA process. With increasing cold deformation rate, the shape factor increases while the grain size decreased. For the production of thixotropic structure by SIMA process, cold deformation rate was determined to be necessary at least 20%, and there is no need to isothermal holding at semi-solid temperature for thixotropic structure transformation.

**Keywords:** Semi-solid forming, AA2024 alloy, thixotropic structure, SIMA.

### 1.GİRİŞ (INTRODUCTION)

Yarı-katı metal (YKM) şekillendirme yöntemleri geleneksel dövme ve döküm yöntemlerine alternatif yeni metal şekillendirme yöntemleridir [1]. Yarı-katı

metal şekillendirme yöntemi yüksek yoğunluklu döküm parça, daha uzun kalıp ömrü, düşük şekillendirme kuvveti ve son şekline yakın parça üretimi gibi birçok avantaja sahiptir. Günümüzde YKM şekillendirme üzerinde yoğun çalışmalar

sürmekte ve bu çalışmalar özellikle ön malzeme hazırlığı ve yarı-katı halde şekil vermeyi içermektedir [2, 3].

Yarı-katı durumda metallerin şekillendirilmesi yarı-katı halde tiksootropik davranış gösteren küresel şekilli mikroyapı ile sağlanabilir [4–6]. Bundan dolayı küresel şekilli mikroyapıya sahip ön malzeme hazırlığı YKM şekillendirme için zorunludur. Ön malzeme hazırlığı için mekanik karıştırma, elektromanyetik karıştırma, eğimli soğutma plakasına döküm, tane inceltme, düşük sıcaklıktan döküm, gerinimin neden olduğu sıvı aktivasyonu (SIMA), yeniden kristalleşme ve kısmi ergitme (recrystallisation and partial melting-RAP) ve spray döküm gibi birçok yöntem mevcuttur [2, 3, 7]. Bu yöntemler arasında SIMA kristalleşme sıcaklığının üzerinde ekstrüzyon, haddeleme vb. sıcak şekillendirme işleminden sonra soğuk deformasyon ve sonrasında tekrar ısıtma aşamalarını içerir. SIMA yöntemi yarı-katı parça üretiminde ticari olarak kullanılmaya başlanmıştır. Yarı-katı sıcaklığa ısıtma aşamasında yeniden kristalleşme meydana gelir ve ilk sıvı yeniden kristalleşen tane sınırlarına dalma eğilimindedir. Bundan dolayı sıvı tarafından kuşatılan katı faz küresel bir şekil alır ve tikso şekillendirme için gerekli olan tiksootropik özelliğe sahip mikroyapı elde edilir. RAP yöntemi, SIMA [8] 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 [9–12]. Bu yöntemin en büyük dezavantajı büyük çaplı biyetlerin parça boyunca homojen olarak deforme edilememesi ve bundan dolayı da homojen olarak küresel mikroyapı üretilmemesidir [8].

SIMA yöntemi, diğer yöntemlere göre (manyetik karıştırma vb.) çok daha iyi küreselleşmiş mikroyapı üretir ve bu da iyi akış özellikleri sağlar. Bu yöntemde soğuk deformasyon sonucunda alaşımda kalıntı gerinme depolanır ve yeniden ısıtma işleminde depolanmış kalıntı gerinme sayesinde küresel mikroyapı elde edilir [1].

Yarı-katı şekillendirilmiş AA2024, AA2014 ve AA7075 gibi dövme alüminyum alaşımları, döküm alüminyum alaşımlarına göre üstün mekanik özelliklerinden dolayı havacılık ve otomobil sektöründe daha geniş uygulama imkânı bulmaktadır. Dövme Al alaşımları dövme, haddeleme ve ekstrüzyon vb. plastik deformasyon yöntemleri ile sadece basit geometri parçaların şekillendirilmesinde kullanılabilir. Talaşlı imalat yöntemleri ise parça üretimini geometrik açıdan sınırlandırmakta ve üretim maliyetini önemli derecede artırmaktadır [13]. Buna karşın, dövme alüminyum alaşımları YKM şekillendirme yöntemleri ile seri olarak şekillendirilebilir. Dövme alüminyum alaşımlarının

geleneksel döküm yöntemleri ile üretilmesindeki en büyük problem sıcak yırtılma ve akıcılıktır [14]. Son yıllarda, bu sebepten dövme alüminyum alaşımları YKM şekillendirme yöntemleri olan tikso-döküm ve reo-döküm ile şekillendirilmektedir [2,3, 7, 15]. Dövme alüminyum alaşımlarının YKM yöntemi ile şekillendirilmesi üzerine yapılan çalışmalar tikso-döküm üzerine yoğunlaşmıştır [14, 16]. Tikso-döküm için en çok kullanılan ön malzeme hazırlığı SIMA yöntemidir [17].

SIMA yönteminde alaşım kompozisyonu, başlangıç döküm yapısı, soğuk veya sıcak deformasyon oranı, yarı-katı sıcaklığa ısıtma hızı, yarı katı sıcaklık ve bu sıcaklıkta bekleme zamanı tane boyut ve şeklini etkileyen önemli parametrelerdir [18].

SIMA yönteminde malzemenin yeniden ısıtılma işlemi kritik bir işlem aşamasıdır. Yeniden ısıtmanın amacı sadece uygun sıvı oranını elde etmek değil aynı zamanda ince tane boyutuna sahip küresel yapı katı faz dönüşümünü sağlamaktır [3]. Yeniden ısıtma sıvı-katı bölgede belirlenen bir sıcaklığa ısıtmayı ve bazen de belirlenen sıcaklıkta izotermal bekletmeyi içerir. Bu yeniden ısıtma işlemi uygun sıvı oranı elde etmek ve katı fazın dentritik yapıdan küresel yapıya dönüşümünün sağlanması amacıyla yapılır. Fakat uzun bekletme zamanı tane kabalaşması ile sonuçlanır [19]. Tane kabalaşması yarı-katı ön malzemenin tiksootropik özelliklerinin ve yarı-katı şekillendirilmiş parçanın mekanik özelliklerinin kötüleşmesine neden olur [19]. Bu nedenle ön ısıtma parametrelerinin yarı-katı şekillendirme için en çok arzu edilen mikroyapı karakteristiklerini elde etmek için daha fazla araştırmaya ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu çalışmada, farklı oranlarda soğuk deforme edilmiş AA2024 alaşımı %50 sıvı oranına karşılık gelen sıcaklığa yeniden ısıtılarak tiksootropik davranış gösteren küresel yapı elde edilmesi hedeflenmiştir. Farklı oranlarda soğuk deforme edilmiş alüminyum alaşımında yarı-katı bölgeye yeniden ısıtma işleminin mikroyapı özellikleri üzerindeki etkisi incelenerek soğuk deformasyon oranının tiksootropik yapı üretimine etkisi araştırılmıştır.

## 2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR (EXPERIMENTAL STUDIES)

Çalışmalarda kullanılan ekstrüze AA2024 alaşımının kimyasal kompozisyonu Tablo 1’de verilmiştir. Mikroyapı oluşumu üzerine deformasyon oranının etkisinin araştırılması için 40 mm çapında ekstrüze biyetten deformasyon işleminden sonra son boyu 80 mm olacak şekilde %10, %20, %30 ve % 40 deformasyon oranını verecek boylarda kesilmiştir. Yüzde deformasyon oranı;

$$\% \varepsilon = [(t_0 - t) / t_0] \times 100 \quad (1)$$

**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

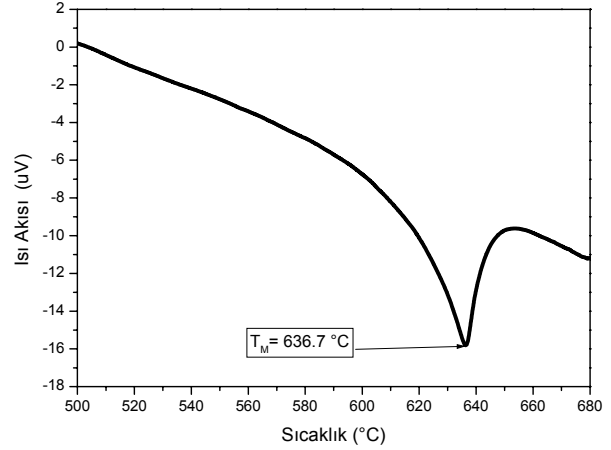
eşitliği ile hesaplanmıştır. Burada  $t_0$  ve  $t$  sırasıyla malzemenin ilk ve son boyudur. Ekstrüze biletler oda sıcaklığında 250 ton kapasiteli pres altında 2.5 mm/s hızla boyutsal olarak küçültülmüştür. Daha sonra biletler, oda sıcaklığında soğuk deformasyon aşamasında oluşan sert yüzeylerin ve şekil bozukluklarının giderilmesi için soğutma sıvısı kullanılarak 60 mm boy ve 40 mm çap ölçülerine sahip olacak şekilde talaş kaldırılarak işlenmiştir.

Şekil 1'de verilen AA2024 Al alaşımına ait DTA eğrisi Perkin-Elmer marka DTA cihazı kullanılarak asal gaz atmosferinde (Ar gazı) 20 °C/dk 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 %50 sıvı oranını veren 608°C sıcaklık yeniden ısıtma işlemi için belirlenmiştir.

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

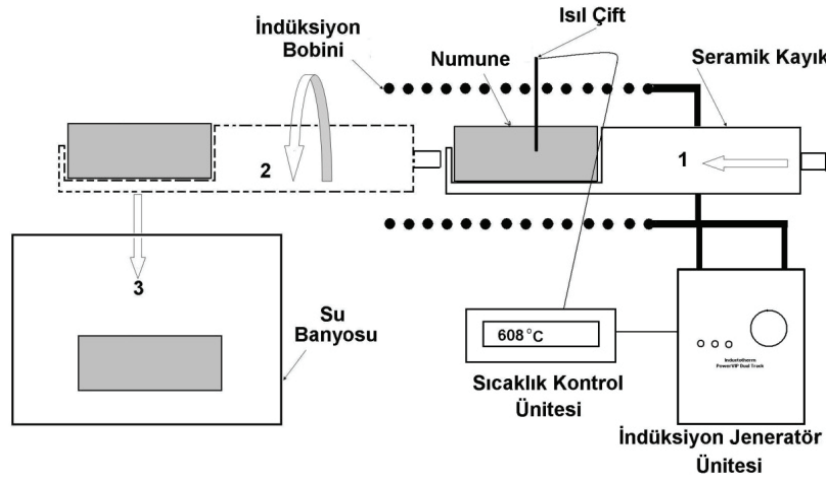
Farklı oranlarda soğuk deforme edilmiş AA2024 alaşımı indüksiyon bobininde yatay konumda 135 °C/dk ısıtma hızında 608°C'ye kadar ısıtılmış ve daha

sonra bekletme yapmadan oda sıcaklığındaki suda hızla soğutulmuştur (Şekil 2).

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

Metalografik 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).

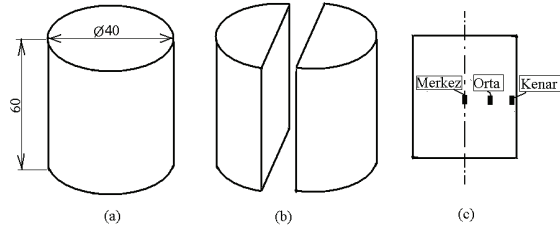
Tane boyutu ölçümleri ASTM E112 standardına göre yapılmıştır. Tane boyutu ölçümlerinde çizgisel kesişme yöntemi kullanılmıştır. Şekil 3.c'de

**Şekil 2.** Deney düzeneği (Figure 2. Experimental setup)

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.

$$\text{Şekil faktörü} = \frac{4\pi A}{P^2} \quad (2)$$

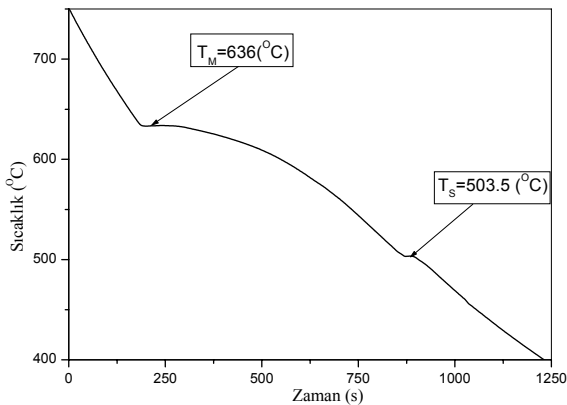
Burada A ölçüm yapılan tanenin alanı, P ise tanenin çevresidir.



**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)

Şekil 4'de AA2024 alaşımının katılma eğrisi görülmektedir. AA2024 alaşımı 636 °C'de katılma başlamış ve katılmasını 503.5 °C'de tamamlamıştır. Bu sonuçların DTA eğrisinden (Şekil 1) elde edilen ergime ( $T_M$ ) sıcaklığı ile uyumlu olduğu görülmektedir. Wang ve arkadaşları [19] AA2024 alaşımının ergime ve katılma sıcaklığını DSC analizi ile 636.8 °C ve 500.4 °C olarak tespit ettiklerini bildirmişlerdir.



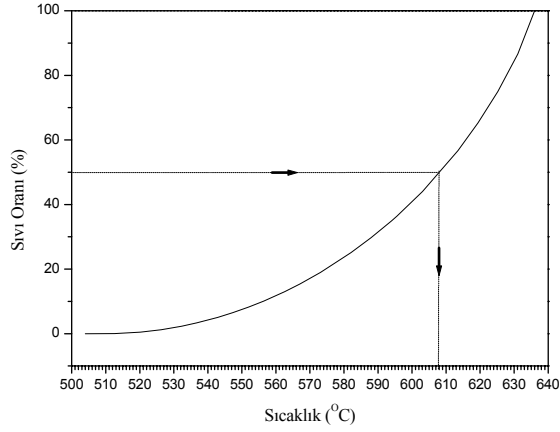
**Şekil 4.** AA2024 alaşımının soğuma eğrisi (Figure 4. Cooling curve of AA2024 alloys)

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

oranı eğrisi Şekil 5'de verilmiştir. Yarı-katı sıcaklık aralığında şekillendirme için gerekli sıvı miktarı %30–50 arasında olması gerekmektedir[7]. Bu çalışmada, Şekil 5'deki sıvı oranı-sıcaklık eğrisi yardımı ile %50 sıvı oranına karşılık gelen sıcaklık değerinin 608°C olduğu belirlenmiştir. AA2024 alaşımının için Scheil eşitliğini kullanarak Wang ve arkadaşları %51.5 sıvı için 620°C [19], Sirong ve arkadaşları %50 sıvı için 630°C [1] ve Jung ve Kang [20] %50 için 620°C olarak bildirmişlerdir. Elde edilen %50 sıvı oranına karşılık gelen sıcaklık diğer araştırmacıların elde ettiği sonuçlar ile karşılaştırıldığında oldukça düşüktür. Scheil eşitliği ikili alaşımlar için sıvı-katı oranı hesaplaması için doğru sonuçlar verebilir. Fakat AA2024 alaşımının kompozisyonunda Cu elementinden başka yüksek sayılabilecek oranda (%0.5'den fazla) Mg, Mn, Si ve Fe gibi alaşım elementleri de bulunmaktadır (Tablo 1). Alaşıma giren her element faz diyagramındaki faz oranlarını ve faz dönüşüm sıcaklıklarını değiştirdiğinden dolayı AA2024 alaşımı için Scheil eşitliği ile doğru katı-sıvı oranı tespiti oldukça zordur. Liu ve arkadaşları [21] Al2014 alaşımı için DSC eğrisi, Scheil eşitliği ve faz denge kuralı yardımıyla sıvı oranına karşılık gelen sıcaklıkları karşılaştırmışlar ve birbirinden oldukça farklı sonuçlar elde etmişlerdir.

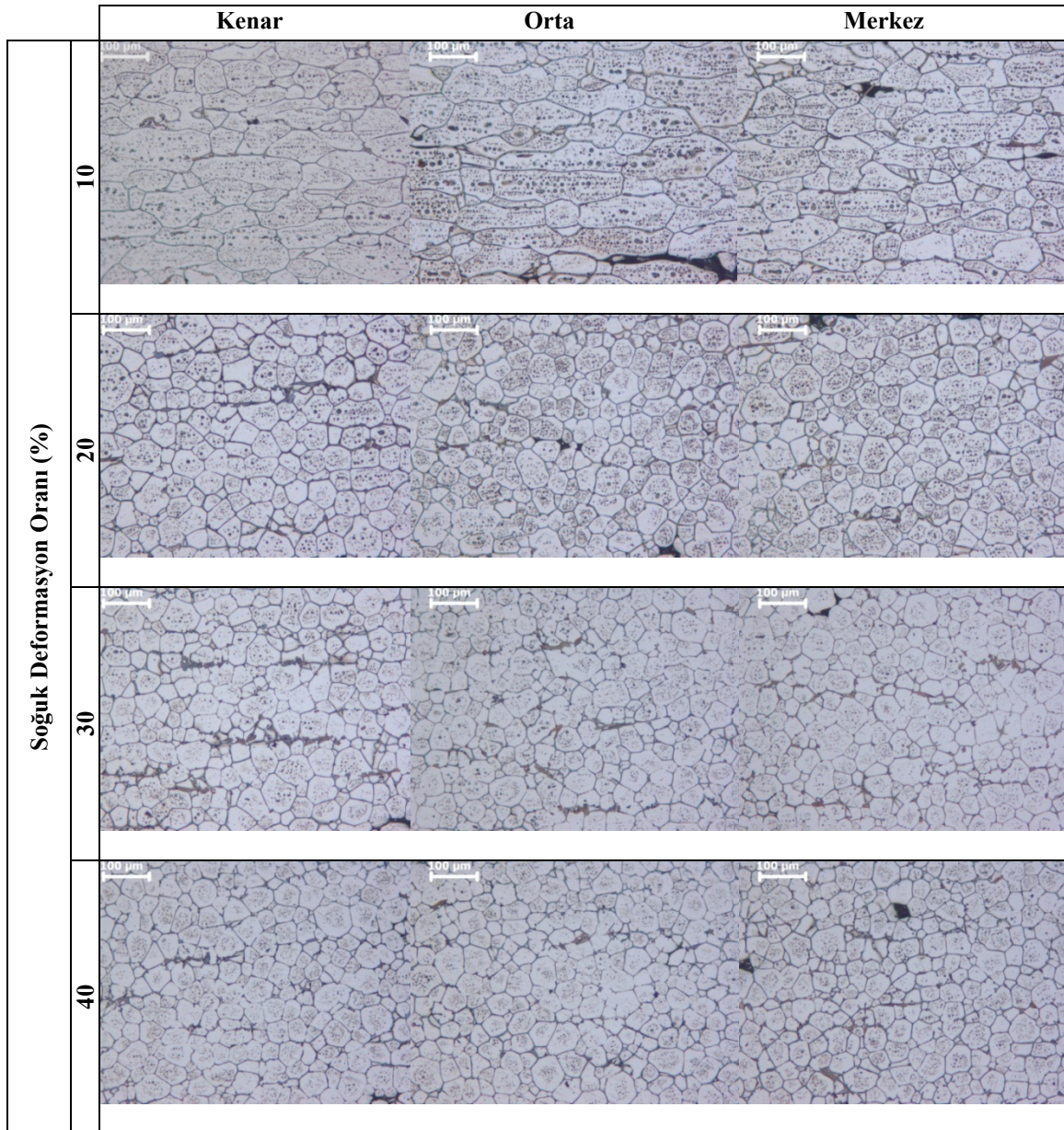
Farklı oranlarda (%10, %20, %30 ve %40) soğuk deformasyon ve takiben 608 °C'ye kadar ön ısıtma işlemi uygulanmış AA2024 alaşımı biyetlerin tane boyutları Tablo 2'de, mikroyapıları Şekil 6'da verilmiştir. Biyetlerin farklı bölgelerinden (Şekil 3.c) ölçülen tane boyutları ve mikroyapı görüntüleri birlikte incelendiğinde, soğuk deformasyon ve takiben yarı-katı bölgeye yeniden ısıtma işlemi biyetlerin her bir soğuk deformasyon oranı için kenar, orta ve merkez bölgelerinde yaklaşık olarak eşit tane boyutu üretmiştir. Bu sonuçlar biyetin her bölgesinde eşit soğuk deformasyonun meydana geldiğini ve indüksiyon sistemi ile ısıtmanın homojen olduğunu göstermektedir.

% 10 soğuk deforme edilmiş malzemede oldukça kaba ve düşük küreselleşme oranına sahip tane yapısı görülürken %20, % 30 ve %40 soğuk deformasyon oranlarında ise küçük ve küresel tane yapısı elde edilmiştir. Benzer sonuçlar AA2024 alaşımının soğuk deformasyon sonrası mikroyapı oluşumunu inceleyen diğer araştırmacılar tarafından da rapor edilmiştir [1, 6, 22].



**Şekil 5.** AA2024 alaşımının DTA ısıtma eğrisinden elde edilen sıcaklık-sıvı oranı (Figure 5. Fraction liquid vs. temperature estimated from DTA heating curves for AA2024 alloy)

Ortalama tane boyutu üzerine plastik deformasyon oranının etkisi Şekil 7’de görülmektedir. Deformasyon oranı arttıkça ortalama tane boyutu da azalmaktadır. Ortalama tane boyutu %10 deformasyon oranından sonra belirgin bir şekilde düşmektedir. Deformasyon oranı %30’dan %40’a çıktığında ise ortalama tane boyutunda azalma miktarı yaklaşık olarak  $2 \mu\text{m}$ ’dir (Tablo 2). Jung ve Kang [20] tikso-şekillendirme için ortalama tane boyutunun  $100 \mu\text{m}$ ’dan düşük olması gerektiğini bildirmiştir. %10 deformasyon oranında ortalama tane boyutu  $100 \mu\text{m}$ ’un üzerinde olduğu için bu deformasyon oranı tikso-şekillendirme için uygun değildir. Ancak %20 deformasyon oranının üzerinde  $50 \mu\text{m}$ ’un altında ortalama tane boyutu elde edilebilmektedir. Fakat plastik deformasyon artışına paralel olarak ortalama tane boyutu çok az miktarda azalmaktadır.



**Şekil 6.** Farklı oranlarda soğuk deforme edilmiş ve  $608 \text{ }^\circ\text{C}$ ’ye kadar ön ısıtma işlemi uygulanmış AA2024 biletlerin mikroyapıları (Figure 6. Microstructures of billets which was deformed different rates and reheated at  $608 \text{ }^\circ\text{C}$ )

**Tablo 2.** Farklı oranlarda deformasyon ve takiben 608 °C'ye kadar 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 deformed different rates and then reheated at 608 °C)

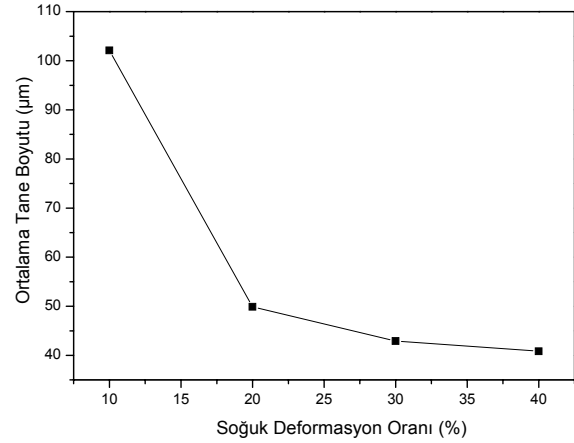
Soğuk Deformasyon Oranı (%)	Tane boyutu (µm)			
	Kenar	Orta	Merkez	Ortalama
10	105.75	104.42	96.17	<b>102.11</b>
20	49.38	49.61	50.69	<b>49.89</b>
30	43.29	43.01	42.47	<b>42.92</b>
40	41.07	41.32	40.15	<b>40.84</b>

Deformasyon oranı arttıkça kalıntı gerilmenin sebep olduğu ve alaşım malzemesine depolanan iç enerji de artar. Alaşıma yeniden ısıtma işlemi uygulandığında depolanan iç enerji serbest kalır ve dentritik mikroyapının parçalanmasını sağlar. Malzemenin içinde ne kadar çok kalıntı gerilme oluşursa o kadar çok enerji depolanır ve daha küçük tane boyutu elde edilir[1].

Yarı-katı bölgede AA2024 alaşımının mikroyapı oluşumu malzemeye uygulanan ön işleme bağlıdır[1, 8, 13, 19, 20]. Malzeme yarı-katı bölgeye ısıtıldığında deformasyondan kaynaklanan boşluklar serbest enerjii düşürmek için birleşir ve dislokasyonlar harekete geçerek çapraz kayma gerçekleşir. Sonuç olarak, toparlanma ve yeniden kristalleşme nispeten küçük ve eşksenel tanelerden oluşan mikroyapıyı üretir[23]. Yeniden kristalleşmiş eşksenel taneler yüksek enerjili düzensiz tane sınırlarından oluşur. Yarı-katı bölgeye ısıtma sıcaklığı ötektik sıcaklığın üstünde olduğu için bölgesel ergime başlar. Ergime yüksek enerjili şekil bozukluğu olan tane sınırlarında ve düşük ergime noktasına sahip faz bölgelerinde meydana gelir. Ergime, ortalama tane boyutunu azalttığı için tikotropik yapı üretiminde önemli rol oynar. Tane sınırındaki enerjii düşürmek için yeniden kristalleşmiş eşksenel taneler birbirine temas eden bölgelerde ergiyerek birbirinden ayrılır. Aynı zamanda katılma sıcaklığının ( $T_s$ ) üzerinde düşük ergime sıcaklığına sahip ötektik faz da ergir. Ergiyen ötektik sıvı faz yüksek enerjili tane sınırlarına sızarak eşksenel tanelerin birbirinden ayrılmasını kolaylaştırır [24].

Tane küreselleşme oranını veren şekil faktörü üzerine plastik deformasyon oranının etkisi Şekil 8'de verilmiştir. Deformasyon oranı arttıkça ortalama şekil faktörü de artmıştır. %10 soğuk deformasyon yaklaşık olarak 0.27 şekil faktörü değerini üretirken %20 deformasyon oranı 0.78 şekil faktörü değerini üretmiştir. %20'nin üzerindeki deformasyon oranları şekil faktörünü önemli derecede değiştirmemiştir. Şekil 6'da verilen mikroyapı görüntüleri ve Tablo 3'de verilen şekil faktörü değeri % 10 deformasyon

oranının tane küreselleşmesi için yeterli olmadığını göstermektedir.



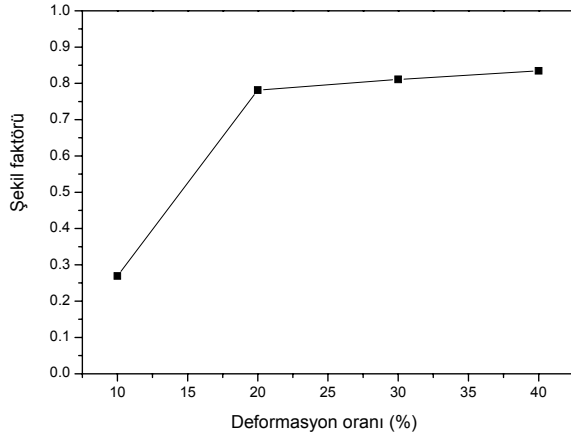
**Şekil 7.** Soğuk deformasyon oranı ile ortalama tane boyutunun değişimi (Figure 7. Variations of average grain size with cold deformation rate)

**Tablo 3.** Farklı oranlarda deformasyon ve takiben 608 °C'ye kadar ön ısıtma işlemi uygulanmış biyetlerin şekil faktörleri (Table 3. The shape factors of billet deformed different rates and then reheated at 608 °C)

Soğuk Deformasyon Oranı (%)	Şekil Faktörü
10	0.27
20	0.78
30	0.81
40	0.83

Soğuk deformasyon oranının artmasıyla beraber malzemedeki kalıntı gerilme miktarı da artar. Sıcaklığın artmasıyla beraber kalıntı gerilme miktarına bağlı olarak yeniden kristalleşme sonucu oluşacak tane miktarı da değişir. Küçük taneler büyük tanelere göre daha yüksek enerjili ve kararsız arayüzeye sahiptir[24]. Toplam arayüzey alanındaki azalma tanelerin küreselleşmesi için itici güç sağlar[25]. Deformasyon oranı arttıkça yeniden kristalleşen tane sayısı da artar (Şekil 7). Küreselleşme veya tane şekil faktörü oranının soğuk deformasyon sonrası malzemeye yüklenen iç gerilim miktarından etkilendiği açıkça görülmüştür. Yeniden ısıtma sonucu oluşan tane boyutu ve yeniden kristalleşen tanelerin küreselleşme oranının her ikisi de soğuk deforme edilmiş AA2024 alaşımının yarı-katı işlem sırasında mikroyapı morfolojisini kontrol etmek için önemlidir.

AA2024 alaşımının ön deformasyon oranı yarı-katı malzemenin ortalama tane boyutu ve tanelerin küreselleşmesi üzerine önemli etkiye sahiptir. Deneysel çalışmalarda, AA2024 alaşımında optimum tikotropik özellik yaklaşık olarak 50 µm ortalama tane boyutu ve 0.78 şekil faktörü %20 soğuk deformasyon ile elde edilmiştir.



**Şekil 8.** Soğuk deformasyon oranı ile şekil faktörünün değişimi (Figure 8. Variation of shape factor with cold deformation rate)

#### 4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

AA2024 alaşımında SIMA yöntemi ile yarı-katı şekillendirme için gerekli tikotropik mikroyapı üzerine deformasyon oranının etkisinin belirlenmesi çalışmalarında aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- 1) AA2024 alaşımı 608°C'de %50 sıvı oranına sahiptir.
- 2) Soğuk deformasyon ve takiben yarı-katı bölgeye yeniden ısıtma işlemi, her bir soğuk deformasyon oranı için AA2024 biletlerin kenar, orta ve merkez bölgelerinde yaklaşık olarak eşit tane boyutu üretmiştir.
- 3) Artan deformasyon oranı ile ortalama tane boyutu azalırken şekil faktörü artmıştır. % 10 soğuk deforme edilmiş malzemede oldukça kaba ve düşük küreselleşme oranına sahip tane yapısı görülürken %20, % 30 ve %40 soğuk deformasyon oranlarında ise tikotropik şekillendirme için uygun küçük ve küresel tane yapısı elde edilmiştir.
- 4) AA2024 alaşımı, SIMA yöntemi ile %20 soğuk deformasyon, takiben indüksiyon ile %50 sıvı oranını veren 608°C'ye ısıtılarak ve ısıtılan yarı-katı sıcaklıkta beklemeden yarı-katı şekillendirilebilir.

#### SEMBOLLER (NOMENCLATURE)

- $T_M$  : Ergime sıcaklığı, °C  
 $T_S$  : Katılaşma sıcaklığı, °C  
 $\epsilon$  : Soğuk deformasyon oranı, %  
 $t_0$  : İlk boy, mm  
 $t$  : Son boy, mm  
 $A$  : Ölçüm yapılan tanenin alanı,  $\mu\text{m}^2$   
 $P$  : Tanenin çevresi,  $\mu\text{m}$

#### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

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

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Sirong, Y., Dongcheng, L., Kim, N., "Microstructure evolution of SIMA processed AA2024". **Materials Science and Engineering A**; 420, 165-170, 2006.
2. Flemings, M.C., "Behaviour of metal alloys in the semisolid state", **Metallurgical and Materials Transactions A**; 22, 957-981, 1991.
3. Fan, Z., Semisolid Metal Processing, **International Materials Reviews**; 47 (2), 49-85, 2002.
4. Kirkwood, D.H., "Semisolid metal processing", **International Materials Reviews**; 39 (5), 173-189, 1994.
5. Tzimas, E. and Zavaliangos, A., A comparative characterization of near-equiaxed microstructures as produced by spray casting, magnetohydrodynamic casting and the stress induced, melt activated process, **Materials Science and Engineering A**; A289, 217-227, 2000.
6. Choi, 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.
7. Atkinson, H.V., "Modelling the semisolid processing of metallic alloys", **Progress in Materials Science**, 50, 341-412, 2005.
8. Atkinson, H.V., Liu, D., "Microstructural coarsening of semi-solid aluminium alloys", **Materials Science and Engineering A**, 496, 439-446, 2008.
9. Birol, Y., "Thermomechanical processing of AA6061 billets for semi-solid forming", **International Journal of Materials Research**; 98, 53-59, 2007.
10. Önsel M., Birol Y., Bozkurt U., Kubilay C., ve Altıntaş S., "Alüminyum alaşımlarında "SIMA" prosesiyle tikotropik yapı elde edilmesi", **12.Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi**, 991-998, 2005, İstanbul, Türkiye.
11. Birol, Y., Çakır, O. ve Alageyik, F., "AA6061 alaşımında tikotropik yapı elde edilmesi", **13.Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi**, 1704-1712, 9-11 Kasım 2006, İstanbul, Türkiye.
12. Birol, Y., "Production of AA 6082 feedstock for forming in the semi solid state", **Materials Science Forum**, 519-521:1919-1924, 2006.
13. Guo, H., Yang, X., Zhang, M., "Microstructure characteristics and mechanical properties of rheoformed wrought aluminum alloy 2024",

- Trans. Nonferrous Met. Soc. China**; 18, 555-561, 2008.
14. Fan, Z., "Development of the rheo-diecasting process for magnesium alloys", **Materials Science and Engineering A**, 413/414, 72-78, 2005.
  15. 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.
  16. Yurko, J., Flemings, M.C., Martinez R.A., "Semi-solid rheocasting (SSR)-Increasing the capabilities of die casting", *J. Die Casting Engineer*, 2004(1): 50-52.
  17. Saklakoglu, N., Saklakoglu, I. E., Tanoglu, M., Oztas, O., Cubukcuoglu, O., "Mechanical properties and microstructural evaluation of AA5013 aluminum alloy treated in the semi-solid state by SIMA process", **Journal of Materials Processing Technology**; 48, 103-107, 2004.
  18. Türkeli, A., Akbaş, N., "Formation of Non-Dendritic Structure in 7075 Wrought Aluminum Alloy by SIMA Process and Effect of Heat Treatment", **Proceedings of Fourth International Conference on the Semi-Solid Processing of Alloys and Composites**, England, UK, 71-74, 1996.
  19. Wang, S., Li, Y., Chen, W., Zheng, X., "Microstructure Evolution of Semi-Solid 2024 Alloy During Two-Step Reheating Process", **Trans. Nonferrous Met. Soc. China**; 18, 784-788, 2008.
  20. Jung, H.K., Kang, C.G., "Reheating process of cast and wrought aluminum alloys for thixoforging and their globularization mechanism", **Journal of Materials Processing Technology**, 104 244-253, 2000.
  21. Liu, D., Atkinson, H.V., Higginson, R.L., "Disagglomeration in thixoformed wrought aluminium alloy 2014" **Materials Science and Engineering A**, 392, 73-80, 2005.
  22. Freitas, E.R., Ferracini E., Ferrante, M., "Microstructure and rheology of an AA2024 aluminium alloy in the semi-solid state, and mechanical properties of a back-extruded part", **Journal of Materials Processing Technology**, 146, 241-249, 2004.
  23. 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.
  24. Jiang, H., Mi, Z., Tang, D., Li, M., "Microstructure evolution of Al-4Cu-Mg alloy during semi-solid treatment", **Journal of University of Science and Technology Beijing (Materials)**, 14 (2), 151-156, 2007.
  25. Dong, J., Cui, J.Z., Le, Q.C., Lu, G.M., "Liquidus semi-continuous casting, reheating and thixoforging of a wrought aluminum alloy 7075", **Materials Science and Engineering A**, 345, 234-242, 2003.