

**ETİAL – 61 AlMgSi ALAŞIMININ YARI – KATI METAL DÖKÜM
TEKNIĞİ İLE ŞEKİLLENDİRİLMESİ**

Sadullah UĞUR

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
METAL EĞİTİMİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**HAZİRAN 2012
ANKARA**

Sadullah UĞUR tarafından hazırlanan “ETİAL – 61 AlMgSi ALAŞIMININ YARI-KATI METAL DÖKÜM TEKNİĞİ İLE ŞEKİLLENDİRİLMESİ” adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Kadir KOCATEPE

.....

Tez Danışmanı, Metal Eğitimi Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Metal Eğitimi Anabilim Dalı Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Neşet AKAR

.....

Metal Eğitimi Anabilim Dalı, G.Ü.

Prof. Dr. Kadir KOCATEPE

.....

Metal Eğitimi Anabilim Dalı, G.Ü.

Yrd. Doç. Dr. Yunus KAYIR

.....

Makine Eğitimi Anabilim Dalı, G.Ü.

Tarih: 04/06/2012

Bu tez ile G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Bilal TOKLU

.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Sadullah UĞUR

**ETİAL – 61 AlMgSi ALAŞIMININ YARI – KATI METAL DÖKÜM TEKNİĞİ
İLE ŞEKİLLENDİRİLMESİ
(Yüksek Lisans Tezi)**

Sadullah UĞUR

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Haziran 2012

ÖZET

Otomotiv, uçak ve savunma sanayinde geniş kullanım alanına sahip Etial-61 (AA6351) AlMgSi dövme alaşımı genellikle talaş kaldırma yöntemi ile şekillendirilir. Bununla birlikte, yarı-katı metal şekillendirme teknolojisi ile son şekle yakın ve yüksek kaliteli parça üretimi mümkün olabilmektedir. Yarı-katı metal şekillendirme yöntemlerinden olan Tikso-döküm, ön malzemenin tekrar ısıtılması esasına dayalı olması nedeni ile maliyetleri önemli miktarda arttırmaktadır. Bu problemin üstesinden gelmek için yarı-katı döküm yönteminde, sıvı esaslı besleme stoku üreten bir yöntem (reo-döküm) Rio Tinto Alcan'de geliştirilmiştir. SEED (Döndürmeli Entalpi Dengeleme) yöntemi olarak adlandırılan bu teknoloji, basit ve düşük maliyetli olmakla birlikte elektromanyetik veya mekanik karıştırma cihazlarına ihtiyaç duymaz. SEED yöntemi kısa işlem zamanı ve mükemmel bir küresel mikroyapı sunmaktadır.

Bu çalışmada, Etial-61 (AA6351) AlMgSi alaşımının yarı-katı dökümü, SEED yöntemi kullanılarak gerçekleştirildi. Etial-61 alaşımının katı-sıvı dönüşüm aralığı karakterizasyonunda, DTA analizi Etial-61 alaşımında yarı-katı bölgeyi 28°C olarak belirten sıvılaşma sıcaklığını 622°C ve katılaşma sıcaklığını 594°C vermiştir. Etial-61 alaşımının yarı-katı şekillendirilmesinde yarı-katı ön malzeme üretmek için SEED yöntemi kullanılmıştır. Etial-61 alaşımı bir elektrik ocağında ergitildikten sonra SEED ünitesi üzerinde bulunan potaya

dökülerek sabit bir dönme hızında 75, 80, 85, 90, 95 ve 100 saniye süreleri ile döndürülmüştür. Sonra, yarı-katı haldeki biyet optimum küresel mikroyapı elde etmek amacı ile oda sıcaklığında su içerisinde soğutulmuştur. 85 saniye döndürme süresinin 52,4µm ortalama tane boyutu ve 0,73-0,76 şekil faktörüne sahip optimum mikroyapıyı ürettiği tespit edilmiştir. Etial-61 alaşımını şekillendirmek için, farklı döndürme süreleri ile elde edilen yarı-katı haldeki ön malzeme sabit bir enjeksiyon hızında ve 150°C sabit sıcaklıkta olan kalıba preslenmiştir. Sonuçlar, yarı-katı şekillendirme işlemi ile üretilen numunelerin 47,6-57,8µm ortalama tane boyutu ve 0,74-0,76 şekil faktörüne sahip olduğunu göstermiştir.

Bilim Kodu : 710.1.092
Anahtar Sözcükler : Yarı-katı metal şekillendirme, Etial-61 (AA6351) alaşımı, SEED proses
Sayfa Adedi : 125
Tez Yöneticisi : Prof. Dr. Kadir KOCATEPE

**FORMING OF ETIAL – 61 AlMgSi ALLOY WITH SEMI – SOLID METAL
CASTING TECHNIQUE**

(M.Sc. Thesis)

Sadullah UĞUR

**GAZI UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

June 2012

ABSTRACT

Etial-61 (AA6351) AlMgSi forging alloy which is widely used in automotive, aircraft and defence industry is generally formed by machining. However, semi-solid metal (SSM) processing technology enables the production of near net shape components of superior quality. With semi-solid forming processes based on billet reheating (thixocasting) increases costs significantly. To overcome this problem, a liquid-based method (rheocasting) of producing feedstock for semi-solid casting has been developed at Rio Tinto Alcan. This method called SEED (Swirled Enthalpy Equilibration Device) technology is both simple and cost-effective and involves no electromagnetic or mechanical stirring devices. The SEED process offers a short processing time and an excellent globular microstructure.

In this study, semi-solid casting of Etial-61 (AA6351) AlMgSi alloy was achieved with using of SEED process. In a DTA analysis concerning the solid-liquid transformation range, characterization of the Etial-61 alloy gave a liquidus temperature of 622°C and solidus temperature of 594°C, resulting in a narrow range of 28°C for the semi-solid region. The SEED process was used to produce feedstock for semi-solid forming of Etial-61 alloy. After remelted of Etial-61 alloy in a electricity heat furnace was poured into crucible on the SEED unit and allowed to swirling with 75, 80, 85, 90, 95 and 100 second times at constant

rotation speed. Then, semi-solid slurry was quenched in the water at room temperature due to obtain optimum globular microstructure. It was found that 85 second swirling time produced an optimum structure having 52,4µm grain size and 0,73-0,76 shape factor. For shape forming of Etial-61 alloy, the feedstock in semi-solid state obtained with various swirling time were injected into mould which has 150°C constant temperatures at constant injection speed. The results indicated that all samples produced semi-solid casting process showed 47,6-57,8 µm cell size and 0,74-0,76 shape factor.

Science Code	: 710.1.092
Key Words	: Semi-solid metal forming, Etial-61 (AA6351) alloy, SEED process
Page Number	: 125
Adviser	: Prof. Dr. Kadir KOCATEPE

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren tez danışmanım Prof. Dr. Kadir KOCATEPE'ye en derin teşekkürlerimi sunarım. Deneysel çalışmalarım esnasındaki yardımlarından dolayı Doç. Dr. Neşet AKAR ve Yrd. Doç. Dr. Volkan KILIÇLI'ya en derin teşekkürlerimi sunarım. Deneysel çalışmaların büyük bir bölümünün gerçekleştirildiği ve çalışmayı her yönüyle destekleyen Altun Döküm A.Ş. ve Akademik Vizyon Ltd.Şti.'ne teşekkürlerimi sunarım.

Manevi destekleri ile yanımda olan değerli arkadaşlarım Öğr. Gör. Sinan AKSÖZ, Arş. Gör. Semih AĞCA, Mustafa ÖZDEMİR, Halil KARAKOÇ, Mustafa DURUM, Berna YILDIRIM ve Orhun DOĞAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışmalarım ve tez yazım sürecinde manevi destekleri ile her zaman yanımda olan çok değerli aileme sonsuz şükranlarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	xii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xiii
RESİMLERİN LİSTESİ	xvi
SİMGELER VE KISALTMALAR	xix
1. GİRİŞ	1
2. YARI-KATI METAL ŞEKİLLENDİRME İŞLEMİNİN GELİŞİMİ	4
2.1. Yarı-Katı Metal Şekillendirme İşleminin Avantajları	6
2.2. Yarı-Katı Metal Şekillendirme İşleminin Dezavantajları	11
3. YARI-KATI METAL ŞEKİLLENDİRME İŞLEMİNDE ÖN MALZEME ÜRETİM YÖNTEMLERİ	13
3.1. Sıvı Halden Ön Malzeme Üretim Yöntemleri	14
3.1.1. Döndürmeli entalpi dengeleme yöntemi	14
3.1.2. Mekanik karıştırma yöntemi	15
3.1.3. İki farklı sıvı karıştırma yöntemi	18
3.1.4. Karıştırmalı soğutma merdanesine döküm yöntemi	20
3.1.5. Elektromanyetik karıştırma yöntemi	21
3.1.6. Ultrasonik karıştırma yöntemi	24
3.1.7. Yeni MIT yöntemi	25
3.1.8. Eğimli soğutma plakasına döküm yöntemi	28
3.1.9. Düşük sıcaklıktan döküm yöntemi	29

	Sayfa
3.1.10. Tane inceltme yöntemi	30
3.1.11. Sprey döküm yöntemi	31
3.1.12. İçten soğutma yöntemi	32
3.1.13. Sürekli reo-dönüşüm yöntemi	34
3.2. Katı Halden Ön Malzeme Üretim Yöntemleri	34
3.2.1. Gerinimin neden olduğu sıvı aktivasyonu (SIMA)	35
3.2.2. Yeniden kristalleşme ve kısmi ergitme işlemi (RAP)	38
4. YARI-KATI METAL ŞEKİLLENDİRME YÖNTEMLERİ	41
4.1. Tikso-şekillendirme Yöntemleri	41
4.1.1. Tikso-döküm	42
4.1.2. Tikso-dövme	44
4.1.3. Tikso-ekstrüzyon	45
4.1.4. Tikso-kalıplama	45
4.1. Reo-şekillendirme Yöntemleri	47
4.1.1. Reo-döküm	47
4.1.2. Reo-kalıplama	48
4.1.3. Yeni reo-döküm	49
5. YARI-KATI METAL ŞEKİLLENDİRME YÖNTEMİNDE MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERİ ETKİLEYEN FAKTÖRLER	51
5.1. Malzemenin Kimyasal Bileşimi	52
5.2. Sıcaklık	53
5.3. Basınç	55
5.4. Piston Hızı	56
5.5. Bekletme Süreleri	57
5.6. Kalıp Malzemesinin Kimyasal Bileşimi	59

	Sayfa
6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	61
6.1. Malzeme.....	61
6.2. Etial-61 Alaşımının Katılaşma (Solidüs) ve Sıvılaşma (Likidüs) Sıcaklıklarının Belirlenmesi.....	61
6.3. Yarı-katı Şekillendirme İçin Uygun Sıcaklıkların Belirlenmesi.....	64
6.4. Ön Malzeme Üretimi.....	65
6.5. Etial-61 Alaşımının Yarı-katı Şekillendirilmesi.....	68
6.6. Metalografik Çalışmalar.....	71
6.6.1. Metalografik numune hazırlama.....	71
6.6.2. Mikroyapı incelemesi.....	71
6.7. Etial-61 Al-Mg-Si Alaşımından Reo Yarı-katı Şekillendirme Yöntemi İle Üretilen Dökümlerin Analizi.....	74
6.7.1. Makro inceleme.....	74
7. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	77
7.1. Etial-61 Alaşımının Yarı-katı Çalışma Sıcaklık Aralığı.....	77
7.2. Döndürmeli Entalpi Dengeleme (SEED) Yöntemi İle Üretilen Ön Malzemelerin Mikro Yapısı.....	77
7.2.1. Metalografik gözlemler.....	77
7.2.2. Tane boyutu.....	90
7.2.3. Şekil faktörü.....	93
7.3. Etial-61 Al-Mg-Si Alaşımından Reo Yarı-katı Şekillendirme Yöntemi İle Üretilen Dökümlerin Analizi.....	95
7.3.1. Makro inceleme.....	95
7.3.2. Mikroyapı inceleme.....	96
7.3.2.1. Metalografik gözlemler.....	96
7.3.2.2. Tane boyutu.....	109

Sayfa

7.3.2.3. Şekil faktörü.....	112
7.4. Etial-61 Al-Mg-Si Alaşımının Döndürmeli Entalpi Dengeleme Prosesi İle Reo Yarı-katı Şekillendirme Yönteminde Katılaşma Mekanizması.....	114
8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	115
8.1. Sonuçlar.....	115
8.2. Öneriler.....	116
KAYNAKLAR.....	117
ÖZGEÇMİŞ.....	125

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Fren silindir parçası için parça kütlesi ve üretim hızı.....	9
Çizelge 2.2. Elektrik bağlantı parçası için parça kütlesi ve üretim hızı.....	10
Çizelge 6.1. Etial-61 (AA6351) alaşımının kimyasal kompozisyonu (%Ağırlıkça).....	61
Çizelge 6.2. Etial-61 alaşımının DTA analizi ile belirlenen katılaşma(solidüs) ve sıvılaşma(likidüs) sıcaklıkları.....	63
Çizelge 6.3. Etial-61 alaşımına döndürmeli entalpi dengeleme ünitesinde uygulanan parametreler.....	68
Çizelge 6.4. Etial-61 alaşımına yarı-katı metal şekillendirme ünitesinde uygulanan parametreler.....	69
Çizelge 7.1. Etial-61 alaşımının SEED ünitesinde elde edilen ve suda katılaştırılan yarı-katı ingotların tane boyutu değerleri (μm).....	92
Çizelge 7.2. Suda katılaştırılan Etial-61 alaşımının şekil faktörü değerleri.....	94
Çizelge 7.3. Etial-61 alaşımının yarı-katı şekillendirilmesi ile üretilen dökümlerin tane boyutu değerleri (μm).....	110
Çizelge 7.4. Etial-61 alaşımının yarı-katı şekillendirilmesi ile üretilen dökümlerde şekil faktörü değerleri.....	112

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Yarı-katı metal şekillendirme işleminin uygulanabileceği sıcaklık aralığı..	2
Şekil 2.1. Artan karıştırma ile küresel mikroyapı oluşumunun şematik gösterimi; a) dendritik parça oluşumu, b) dendritik büyüme, c) rozet oluşumu, d) büyümüş rozet ve e) küresel mikroyapı.....	5
Şekil 2.2. Yarı-katı şekillendirme ve geleneksel döküm yöntemlerinde harcanan enerji ile işlemlerin yapıldığı sıcaklık arasındaki ilişki.....	8
Şekil 3.1. Döndürmeli entalpi dengeleme (SEED process) yönteminin şematik gösterimi.....	15
Şekil 3.2. Sürekli mekanik karıştırma düzeneğinin şematik gösterimi.....	17
Şekil 3.3. Çift karıştırma miline sahip mekanik karıştırma düzeneğinin şematik gösterimi.....	17
Şekil 3.4. İki farklı sıvı karıştırma yönteminin zaman-sıcaklık grafiğinde şematik gösterimi.....	19
Şekil 3.5. İki farklı sıvı karıştırma işleminin şematik gösterimi.....	20
Şekil 3.6. Karıştırmalı soğutma merdanesine döküm yönteminin şematik gösterimi.....	21
Şekil 3.7. Elektromanyetik karıştırma düzeneğinin şematik gösterimi.....	22
Şekil 3.8. Karıştırma esnasında dendrit kollardan küresel katı parçacıkların oluşumu.....	22
Şekil 3.9. a) Elektromanyetik dikey karıştırma ve b) Elektromanyetik yatay karıştırma düzeneğinin şematik gösterimi.....	23
Şekil 3.10. Manyetik karıştırma yönteminin zaman-sıcaklık grafiğinde şematik gösterimi.....	23
Şekil 3.11. Yeni MIT yönteminin; a) aşamalarının şematik gösterimi ve b) aşamalarının sıcak değişimi.....	26
Şekil 3.12. YKM ön malzeme üretimi için yeni MIT işleminin zaman-sıcaklık grafiğinde şematik gösterimi.....	27
Şekil 3.13. Eğimli soğutma plakasına döküm işleminin şematik gösterimi.....	28
Şekil 3.14. Sprey şekil verme yönteminin şematik gösterimi.....	32

Şekil	Sayfa
Şekil 3.15. İçten soğutma yönteminin şematik gösterimi; a) aynı alaşıma ait katı parçacığın paslanmaz çelik çubuğa bağlanması, b) katı parçanın ergiyik metal içerisinde karıştırma hareketi ile çözündürülmesi, c) paslanmaz çelik çubuğun geri çekilmesi ve üretilen ön malzeme.....	33
Şekil 3.16. Sürekli reo-dönüşüm yönteminin şematik gösterimi.....	34
Şekil 3.17. SIMA ve RAP işlemlerinin zaman-sıcaklık eğrisinde şematik gösterimi.....	35
Şekil 3.18. SIMA yönteminin zaman-sıcaklık diyagramında şematik gösterimi.....	36
Şekil 3.19. RAP yönteminin zaman-sıcaklık diyagramında şematik gösterimi.....	39
Şekil 4.1. YKMSŞ yöntemlerinin sınıflandırılması.....	41
Şekil 4.2. Tikso-şekillendirme yöntemlerinin şematik gösterimi.....	42
Şekil 4.3. Sheffield tikso-şekillendirme presinin şematik gösterimi.....	43
Şekil 4.4. Tikso-döküm ile parça üretiminin şematik gösterimi.....	43
Şekil 4.5. Tikso-kalıplama presinin şematik gösterimi.....	46
Şekil 4.6. Reo-döküm ile parça üretiminin şematik gösterimi.....	47
Şekil 4.7. Reo-kalıplama ünitesinin şematik gösterimi.....	49
Şekil 4.8. Yeni reo-döküm yönteminin aşamalarının şematik gösterimi.....	50
Şekil 5.1. YKMSŞ yöntemi ile üretilmiş parçaların basınç altındaki akma ve çekme dayanımları.....	51
Şekil 5.2. A356/390 ve Al2024 alaşımlarının uygulanan basınca göre % uzama değişimi.....	56
Şekil 6.1. Etial-61 alaşımının soğuma eğrisi.....	62
Şekil 6.2. Etial-61 alaşımının DTA analizinde katılaşma ve ergime grafiği.....	63
Şekil 6.3. Etial-61 alaşımının % sıvı oranı-sıcaklık grafiği.....	65
Şekil 6.4. Döndürmeli entalpi dengeleme ünitesinde tiksotropik özellik incelemesi için üretilen ve suya düşürülen ingotlardan numune çıkarılmasının şematik gösterimi.....	72
Şekil 7.1. %1 Mg ve %6 Si içeren Al-Mg-Si denge diyagramı.....	79

Şekil	Sayfa
Şekil 7.2. Etial-61 alaşımasının SEED ünitesinde elde edilen ve suda katılaştırılan yarı-katı ingotlarda çevirme sürelerinin tane boyutuna etkisi.....	93
Şekil 7.3. Suda katılaştırılan Etial-61 alaşımında çevirme sürelerinin şekil faktörü değerlerine etkisi.....	94
Şekil 7.4. Etial-61 alaşımasının yarı-katı şekillendirilmesi ile üretilen dökümlerde tane boyutu.....	111
Şekil 7.5. SEED prosesi ile üretilen parçalarda ortalama tane boyutu.....	111
Şekil 7.6. Etial-61 alaşımasının yarı-katı şekillendirilmesi ile üretilen dökümlerde şekil faktörü.....	113
Şekil 7.7. SEED prosesi ile üretilen parçalarda şekil faktörü.....	113

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. Yarı-katı haldeki Etial-61 alaşımının bıçak ile kesilmesi.....	9
Resim 2.2. YKMŞ yöntemleri ile üretilmiş çeşitli alüminyum parçalar; a) otomobil fren sistemlerinde kullanılan parçalar ve b) elektrik bağlantı parçaları.....	10
Resim 3.1. Yarı-katı haldeki ön malzemenin tiksotropik davranışı.....	13
Resim 3.2. A357 alüminyum alaşımının; a) geleneksel döküm yöntemi ile elde edilmiş dendritik ve b) YKMŞ ile elde edilmiş küresel mikroyapıları.....	14
Resim 3.3. Yeni MIT yöntemi ile üretilmiş a) homojen ön malzeme mikroyapısı ve b) 590°C sıcaklıkta 10dk. bekletilmiş ve suda soğutulmuş ön malzeme mikroyapısı.....	27
Resim 3.4. İçten soğutma yöntemi ile üretilmiş A356 alaşımının 580 °C sıcaklıkta su verme sonrası mikroyapısı.....	33
Resim 4.1. a) tikso-dövme cihazı ve b) tikso-dövme cihazı ile üretilen çeşitli parçalar.....	45
Resim 5.1. Farklı sıcaklıklarda, yeniden ısıtılan 7075 Al alaşımının merkez ve tane sınırlarındaki değişik mikroyapılar; a. 720°C tane sınırı; b. 720°C merkez; c. 642°C tane sınırı; d. 642°C merkez; e. 638°C tane sınırı; f. 638°C merkez.....	54
Resim 5.2. Al7075 alaşımına uygulanan farklı piston hızları sonucu oluşan mikroyapılar; a. 255 mm/dk., b. 170 mm/dk., ve c. 120 mm/dk.....	57
Resim 5.3. 580°C sıcaklığa yeniden ısıtılan 7075 Al alaşımında, farklı bekleme sürelerinde oluşan mikroyapılar; a. 15 dakika, b. 30 dakika, ve c. 60 dakika.....	58
Resim 5.4. 600°C sıcaklığa yeniden ısıtılan 7075 Al alaşımında, farklı bekleme sürelerinde oluşan mikroyapılar; a. 5 dakika, b. 15 dakika ve c. 30 dakika.....	59
Resim 5.5. Alüminyum alaşımının dökülmüş halde ve tavlanmış haldeki mikroyapıları a. kokil kalıp ve b. yalıtkan kalıp.....	60
Resim 6.1. Veri toplama cihazı.....	62
Resim 6.2. Döndürmeli entalpi dengeleme ünitesi (SEED).....	66
Resim 6.3. K tipi termokupl ile yapılan sıcaklık kontrolü.....	67

Resim	Sayfa
Resim 6.4. Yarı-katı metal şekillendirme ünitesi	69
Resim 6.5. Etial-61 alaşımının yarı-katı dökümü için sedye parçası kalıbı.....	70
Resim 6.6. Etial-61 alaşımı numunelerinin mekanik özelliklerinin tespiti için çekme çubuğu kalıbı.....	70
Resim 6.7. SEED yöntemi ile üretilen ve preslenen parçadan numune çıkarılmasının şematik gösterimi.....	72
Resim 6.8. SEED yöntemi ile üretilen ve preslenen çekme çubuğundan numune çıkarılmasının şematik gösterimi.....	73
Resim 6.9. Mikroyapıların görüntülenmesinde kullanılan optik mikroskop.....	73
Resim 6.10. Reo yarı-katı döküm yöntemi ile üretilen sedye parçasında makroyapı.....	75
Resim 6.11. Sıcak çatlak hatasının olduğu bölge	75
Resim 6.12. SEED yöntemi ile reo yarı-katı üretilen döküm parça yolluğu ile birlikte.....	76
Resim 7.1. “1” numaralı numunenin kenar, orta ve merkez mikroyapıları.....	80
Resim 7.2. “2” numaralı numunenin kenar, orta ve merkez mikroyapıları.....	81
Resim 7.3. “3” numaralı numunenin kenar, orta ve merkez mikroyapıları.....	82
Resim 7.4. “4” numaralı numunenin kenar, orta ve merkez mikroyapıları.....	83
Resim 7.5. “5” numaralı numunenin kenar, orta ve merkez mikroyapıları.....	84
Resim 7.6. “6” numaralı numunenin kenar, orta ve merkez mikroyapıları.....	85
Resim 7.7. “7” numaralı numunenin kenar, orta ve merkez mikroyapıları.....	86
Resim 7.8. “8” numaralı numunenin kenar, orta ve merkez mikroyapıları.....	87
Resim 7.9. “9” numaralı numunenin kenar, orta ve merkez mikroyapıları.....	88
Resim 7.10. “10” numaralı numunenin kenar, orta ve merkez mikroyapıları.....	89
Resim 7.11. “11” numaralı numunenin kenar, orta ve merkez mikroyapıları.....	90
Resim 7.12. “12” numaralı numunenin çeşitli bölgelerden alınan mikroyapıları.....	97
Resim 7.13. “13” numaralı numunenin çeşitli bölgelerden alınan mikroyapıları.....	98

Resim	Sayfa
Resim 7.14. “14” numaralı numunenin çeşitli bölgelerden alınan mikroyapıları	99
Resim 7.15. “15” numaralı numunenin çeşitli bölgelerden alınan mikroyapıları	100
Resim 7.16. “16” numaralı numunenin çeşitli bölgelerden alınan mikroyapıları	101
Resim 7.17. “17” numaralı numunenin çeşitli bölgelerden alınan mikroyapıları	102
Resim 7.18. “18” numaralı numunenin çeşitli bölgelerden alınan mikroyapıları	103
Resim 7.19. “19” numaralı numunenin çeşitli bölgelerden alınan mikroyapıları	104
Resim 7.20. “20” numaralı numunenin çeşitli bölgelerden alınan mikroyapıları	105
Resim 7.21. “21” numaralı numunenin çeşitli bölgelerden alınan mikroyapıları	106
Resim 7.22. “22” numaralı numunenin çeşitli bölgelerden alınan mikroyapıları	107
Resim 7.23. “23” numaralı numunenin çeşitli bölgelerden alınan mikroyapıları	108
Resim 7.24. “24” numaralı çubuk şeklindeki numunelerin çeşitli bölgelerinden alınan mikroyapılar	109

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
f_s	Katı oranı
f_L	Sıvı oranı
T_L	Likidüs sıcaklığı
T_R	Yeniden kristalleşme sıcaklığı
T_S	Solidüs sıcaklığı
Kısaltmalar	Açıklama
DTA	Diferansiyel Termal Analiz
ESPD	Eğimli Soğutma Plakasına Döküm
MIT	Massachusetts Institute of Technology
SEED	Swirled Enthalpy Equilibration Device
SIMA	Strain Induced Melt Activation
RAP	Recrystallization and Partial Melting
YKM	Yarı-katı Metal
YKMŞ	Yarı-katı Metal Şekillendirme

1. GİRİŞ

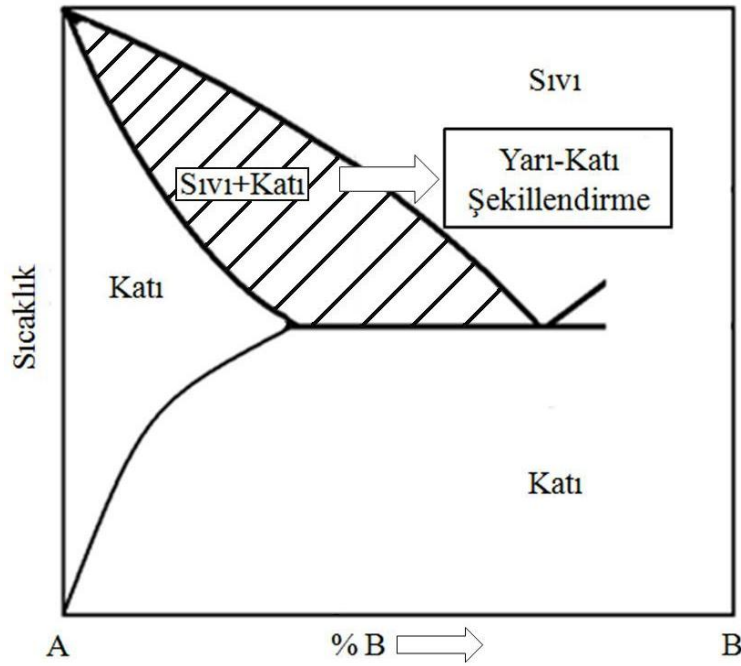
Döküm ve dövme yöntemlerinin bir arada bulunduğu yeni bir metal şekillendirme yöntemi olan yarı-katı metal şekillendirme (YKMŞ) işlemleri, genellikle alüminyum ve magnezyum gibi hafif metal alaşımlarında sıvı ve katının bir arada bulunduğu yarı-katı bölgede, tiksotropik özelliklerinden faydalanarak istenilen özelliklerde parça üretim yöntemlerindendir [Atkinson, 2005]. Tiksotropi, malzemenin yük altında ve zaman ilerledikçe viskozitesinin sürekli olarak azalması olarak tanımlanır ve yük ortadan kaldırıldığında ise malzeme eski özelliğine geri dönmektedir [Tzimas, 1997]. Diğer bir ifade ile tiksotropi, belirli malzemelerin çok küçük gerilme altında katı gibi davranmasına rağmen daha büyük gerilmelerde sıvı gibi davranma halidir. Bu nedenle, yarı-katı metal şekillendirme (YKMŞ) işleminde, alaşımlar yarı-katı durumda fiziki konumunu muhafaza ederken yeterli gerilme altında kalıp boşluğunu sıvı gibi rahatlıkla doldurabilmektedir. YKMŞ yönteminde, üretilen parçanın son şekline yakın ve mikroyapısının homojen olması, uzun kalıp ömrü, düşük işçilik maliyetleri, klasik döküm yöntemlerinde meydana gelen gaz, makro ve mikro çekme boşlukları, segregasyon ve türbülanslı sıvı akışının önemli derecede elimine edilmesi başlıca avantajlardır. YKMŞ yöntemi geleneksel döküm yöntemlerine göre daha yüksek mekanik özelliklere sahip döküm üretimine imkan vermektedir. YKMŞ prosesi özellikle son yıllarda üzerinde çalışmaların yoğunlaştığı bir metal şekillendirme yöntemi olarak kabul edilmektedir [Yang, 2004].

YKMŞ işlemi, özellikle savunma sanayinde, havacılık ve uzay sektöründe, yakıt tanklarında, otomobil ön ve arka aksları, fren diskleri, kilitlemesiz fren sistemi, süspansiyon ve motor parçaları, jant ve şasi gibi yüzey kalitesi ve mekanik özelliklerinin yüksek olması gereken parçaların imalatı için uygundur [Eisen ve Young, 2000].

Ergiyik metalin katılaşma sırasında değişik işlemlere tabii tutulması ile dendritik mikroyapının bulunmadığı hamurumsu halde ön malzeme üretimi ve bu malzemenin ergiyik metal gibi doğrudan metalik kalıba enjekte edilmesi “Reo-döküm”, önceden üretilen küresel mikroyapıya sahip malzemenin tekrar yarı-katı bölgeye ısıtılıp

metalik kalıba enjekte edilmesi ise “Tikso-döküm” olarak adlandırılmaktadır. Bu işlemlerin açık bir kalıpta dövme işlemi ile gerçekleştirilmesi “Tikso-dövme” adını alır. Yukarıdaki işlemlerin değişik versiyonları “YKMŞ işlemleri” olarak adlandırılmaktadır [Kirkwood, 1994].

YKMŞ yönteminde, en etkili parametrelerden biri sıvı-katı oranıdır. Malzeme Şekil 1.1’de de görüldüğü gibi yarı-katı bölgede, istenilen sıvı-katı oranında metalik kalıba enjekte edilebilmesi için sıcaklık aralığı belirlenir ve malzeme bu sıcaklık aralığında basınçlı döküm makinesinde metalik kalıba enjekte edilir.



Şekil 1.1. Yarı-katı metal şekillendirme işleminin uygulanabileceği sıcaklık aralığı

Günümüzde, Etial-61 dövme alaşımının kompleks geometrik şekle sahip parçaların üretimi ingottan talaş kaldırma işlemi ile gerçekleştirilmektedir. Bu çalışmada, otomobil, uçak ve savunma sanayinde geniş kullanım alanına sahip Etial-61 (AA6351) AlSiMg dövme alaşımının SEED (Döndürmeli Entalpi Dengeleme) yöntemi kullanılarak YKMŞ işlemi (reo-döküm) ile şekillendirilmesi hedeflenmiştir.

Etial-61 AlMgSi alaşımının DTA analizi ile katılaşma (solidüs) ve sıvılaşma (likidüs) sıcaklıkları, bu sıcaklıklara göre optimum sıvı-katı oranı ve SEED prosesinde sabit döndürme hızında farklı döndürme süreleri kullanılarak mikroyapıda optimum ortalama tane boyut ve şekil faktörü tespit edilecektir. SEED prosesinde optimum döndürme süreleri ile elde edilecek yarı-katı malzemenin basınçlı döküm makinesinde yarı-katı şekillendirilebilme kabiliyeti araştırılacaktır.

Tez çalışması Altun Döküm A.ř.'nin Etial-60/61 ve Etial-177 alaşımlarının yarı-katı metal şekillendirme yöntemi ile şekillendirilmesi konulu Ar-Ge projesi olması sebebiyle gizli tutulan bazı üretim parametreleri ve bilgileri bu tezde verilmemiştir.

2. YARI-KATI METAL ŞEKİLLENDİRME İŞLEMİNİN GELİŞİMİ

1923 yılında Szegvari ve Schalek tarafından yapılan gözlem, YKMŞ işlemlerinin orijini olarak kabul edilmektedir. Alman bilim adamı Herbert Freundlich'un Szegvari ve Schalek ile demir oksit jeller üzerine yaptıkları çalışmaları sırasında, demir oksit parçacıklarının birkaç saniye düzensiz hareketler sergileyerek sonrasında tekrar jel durumuna döndüğünü mikroskop fokusunu kontrol etmek amacıyla ayarladıklarında keşfetmişlerdir. 1927 yılında ise Freundlich tarafından kayma-hız bağımlı viskozitesi "tiksootropi" olarak tanımlanmıştır [Lewis, 2006].

Basıncılı döküm sektöründe yarı-katı alaşımların şarj malzemesi olarak kullanılması son yıllarda üzerinde araştırmaların yoğunlaştığı bir konu olmuştur. 1971 yılında, yarı katı metaller ve alaşımlarının özellikleri üzerindeki ilk çalışma MIT' de (Massachusetts Institute of Technology) Spencer ve arkadaşları ile başlamıştır. YKMŞ konusunda yapılan ilk çalışmalar, içerisinde %15 Sn bulunan Sn-Pb alaşımları üzerine olmuştur [Spencer, 1972].

YKMŞ işlemlerinden biri olan tikso-kalıplama yönteminin en önemli avantajlarından birisi de, son şekle yakın malzeme üretimi olması ve bunun neticesinde bu yöntemle üretilen malzemelerin klasik döküm yöntemiyle üretilmiş olan malzemeler ile rekabet edebilmesidir. Yine bu yöntemin çalışma prensibinin kolaylıkla anlaşılabilmesine rağmen, dövme ve klasik döküm yöntemleri ile mukayese edilebilmektedir. Değişik zaman aralıklarında, bilim adamlarının YKMŞ işlemi ve tikso-kalıplama işlemleri ile ilgili yapmış oldukları çalışmalar vardır. Örneğin, MIT'de 1971 yılında yapılan araştırmalar neticesinde, A380 alaşımının yarı-katı fazda pres döküme uygunluğu araştırılmış ve %40'a kadar katı faz içerdiği durumda basınç ile dökümün gerçekleştirilebileceği anlaşılmıştır. Bu konuda yapılan başka bir araştırmada ise, hamurumsu haldeki metale ön şekillendirme işlemi yapıldıktan sonra, yarı-katı sıcaklık aralığına kadar yeniden ısıtılıp basınç altında şekillendirilmiştir. Bu malzemeler tespit edilen yarı-katı sıcaklıkta katı davranış göstererek şekillerini muhafaza ederler. Aynı zamanda basınç etkisi ile birlikte

2.1. Yarı-Katı Metal Şekillendirme İşleminin Avantajları

YKMŞ yönteminin en önemli karakteristik özelliği yarı-katı haldeki alaşımın türbülans oluşturmaksızın (laminar akış) kalıbı doldurmasıdır. Alaşımın türbülans oluşturmaksızın kalıbı doldurması gazın kalıp içinde hapsolmasını minimuma düşürerek mikro ve makro yapılarda gözenek oluşumunu azaltır ve bunun sonucunda da üretilen parçaların mekanik özelliklerini iyileştirir [Flemings ve ark., 1976].

YKMŞ yöntemi ile üretilen parçalarda mikroyapının üniform olması sayesinde mekanik özellikler ve üretim kalitesi yüksek olur. Alaşımın kalıba yarı-katı halde preslenmesi ile makro ve mikro çekme boşluğu oluşumu önemli derecede elimine edilir ve oluşan küçük boyutlu boşluklar üniform şekilde dağılır. Yarı-katı haldeki alaşımın viskozitesi yüksek olduğu için kalıp dolumu esnasında daha az çalkantı oluşur. Bu durum üretilen parçanın bünyesinde oluşan gaz boşluğu miktarını azaltır [Sukimoto, 1986].

YKMŞ yöntemleri ile üretilen parçalarda geleneksel döküm yöntemlerine göre daha az katılaşma çekmesi meydana gelir. Dolayısıyla son şekle yakın ve döküm hatasının minimum olduğu parça üretimi ile daha iyi mekanik özellikler elde edilmektedir. Bu da üretilen parçaların dayanım/boyut oranında iyileşme sağlar [Kenney ve ark., 1988].

YKMŞ yöntemleri özellikle basınçlı döküm ve hassas döküm yöntemlerine alternatif metal şekillendirme yöntemidir. YKMŞ yöntemi ile üretilen parçaların mekanik özellikleri alçak basınçlı döküm ve dövme yöntemleri gibi metal şekillendirme yöntemleri ile boy ölçülebilmektedir [Kirkwood, 1994].

YKMŞ yöntemleri ile son şekle yakın veya son şekilde, ince kesitli, yüzey kalitesi yüksek, düşük şekillendirme sıcaklığında ve kaynak kabiliyeti yüksek parça üretimi mümkündür. YKMŞ yöntemi geleneksel döküm yöntemlerine göre alaşım viskozitesinin yüksek ve kalıbın laminar şekilde dolması sebebiyle üretilen parçada gaz boşluğu oluşumunu minimuma indirir. Ayrıca alaşımın düşük sıcaklarda

şekillendirilmesi, katılaşması sırasında çekme miktarının ve sıcak yırtılma eğiliminin azalmasını sağlamaktadır [Kirkwood, 1996].

YKMŞ üretim yöntemlerini kullanan Tietmann ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada, alüminyum alaşımlarının daha iyi mekanik özelliklere sahip olduğu ve katılaşma esnasında basıncın etkisiyle birlikte karmaşık geometriye sahip parçaların üretilebileceği tespit edilmiştir [Tietmann ve ark., 1992]. Kouji, YKMŞ ile üretilen malzemelerin mekanik özelliklerini geleneksel döküm yöntemleri ile üretilen malzemelerin mekanik özellikleri ile karşılaştırdığı çalışmada, katılaşma esnasındaki hızlı soğuma nedeni ile darbe dayanımında, yorulma dayanımında ve çekme geriliminde artışın olduğunu tespit etmiştir [Kouji, 1997].

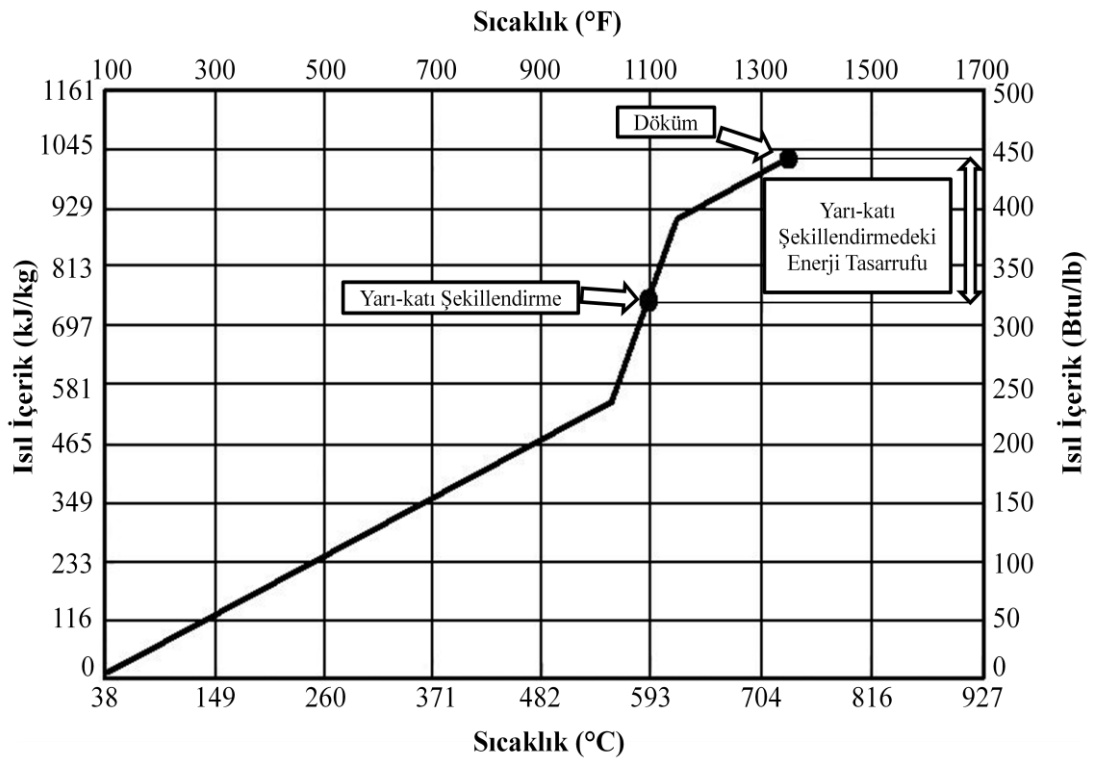
Witulski ve arkadaşları, A356/357 alaşımlarının geleneksel döküm yöntemleri ile şekillendirilmesinde yüksek sıcaklıklarda meydana gelen sıcak çatlak hatasının tikso kalıplama yönteminde giderilebileceğini belirtmişlerdir [Witulski ve ark., 1998].

Ön malzeme mikroyapısının şekillendirme ve diğer aşamalarında korunması, YKMŞ yöntemleri ile üretilen parçaların son mikroyapı kontrolünün mükemmel olduğunu göstermektedir. YKMŞ işleminde katı/sıvı oranının kontrolü ve ön malzeme üretimi esnasındaki parametreler değiştirilerek, viskozite istenilen değere getirilebilir [Figueredo, 2001].

YKMŞ yöntemleri daha düşük sıcaklıklarda gerçekleştirildiği için katılaşma süresi azalır ve bu sayede kalıp ömrü ve üretim kapasitesi artar. YKMŞ yöntemleri ile daha hassas ölçülerde parçalar üretmek mümkündür. YKMŞ yöntemlerinin çalışma sahası, geleneksel döküm yöntemlerine göre daha temiz ve ihtiyaç duyulan enerji daha düşüktür [Figueredo, 2001].

YKMŞ yöntemleri ile üretilen, özellikle ergime sıcaklığı düşük olan alüminyum ve magnezyum alaşımları aşağıdaki avantajlara sahiptir [Atkinson, 2005, Fan, 2002, Kirkwood, 1994, Türkeli, 1991, Türkeli, 1995];

1. YKMŞ teknolojisi ile dendritik olmayan (küresel) mikroyapıya sahip parça üretilmektedir.
2. YKMŞ yöntemleri, geleneksel metal şekillendirme yöntemlerinde meydana gelen porozite, sıcak yırtılma, segregasyon, türbülanslı sıvı akışı, katılaşma çekme boşlukları gibi döküm hatalarını minimuma indirmektedir. Bu da mekanik özelliklerin daha iyi olmasını sağlamaktadır.
3. YKMŞ yöntemlerinde, %100 katı haldeki metal şekillendirme yöntemleri (dövme, ekstrüzyon, haddeleme, vb.) ve geleneksel döküm yöntemlerine göre daha az enerjiye ihtiyaç duyulmaktadır (Şekil 2.2 ve Resim 2.1).
4. YKMŞ teknolojisi ile üretilen parçalarda mikro boşluklar yok denecek kadar azdır.



Şekil 2.2. Yarı-katı şekillendirme ve geleneksel döküm yöntemlerinde harcanan enerji ile işlemlerin yapıldığı sıcaklık arasındaki ilişki [Kenney ve ark., 1988]



Resim 2.1. Yarı-katı haldeki Etial-61 alaşımının bıçak ile kesilmesi

5. YKMŞ yöntemlerindeki mikro ve makro yapıdaki gelişmeler, mekanik özellikleri büyük ölçüde iyileştirmektedir.
6. Çizelge 2.1’de görüldüğü gibi YKMŞ yöntemlerinde parça üretim hızı diğer döküm yöntemlerine göre daha yüksektir.

Çizelge 2.1. Fren silindir parçası için parça kütlesi ve üretim hızı [Flemings, 1991]

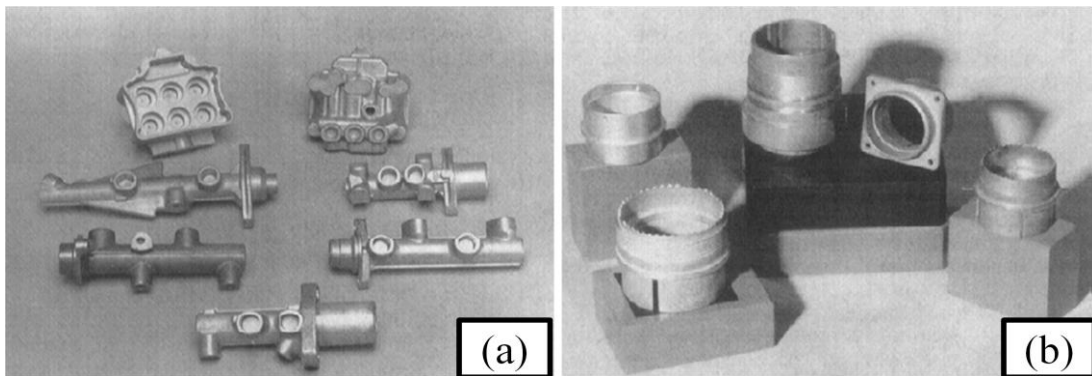
Yöntem	Al alaşımı	İşlem öncesi kütle (g)	Nihai parça kütlesi (g)	İşleme esnasındaki malzeme kaybı (%)	Üretim hızı (1 saatte kalıp başına parça)
Yarı-katı Döküm	357-T5	450	390	13	150
Kalıba Döküm	356-T6	760	450	40	24

7. Çizelge 2.2’de görüldüğü gibi YKMŞ yöntemlerinde son şekle yakın parça üretimi olduğu için talaşlı işleme esnasındaki malzeme kaybı minimuma indirgenmiş olur.

Çizelge 2.2. Elektrik bağlantı parçası için parça kütlesi ve üretim hızı [Flemings, 1991]

Yöntem	Al alaşımı	İşlem öncesi kütle (g)	Nihai parça kütlesi (g)	İşleme esnasındaki malzeme kaybı (%)	Üretim hızı (1 saatte kalıp başına parça)
Yarı-katı Döküm	6262-T6	25	23	8	300
Talaşlı İşleme	6262-T9	245	23	81	200

8. YKMŞ yöntemlerinde düşük sıcaklıklarda şekillendirme yapıldığı için kalıp kullanma süresi, diğer döküm yöntemlerine göre daha uzun ve dolayısıyla daha ekonomiktir.
9. YKMŞ yöntemleri ile son şekle yakın parça üretimi sağlandığı için, şekillendirme sonrasındaki işçilik minimuma indirgenmektedir. Bu sayede de parça daha ekonomik olarak üretilebilmektedir.
10. Yarı-katı haldeki döküm işlemi, geleneksel döküm yöntemleri ile karşılaştırıldığında genel döküm özellikleri ile de avantajlı olduğu görülmektedir.
11. YKMŞ yöntemleri ile kompleks şekilli parçaların üretimi kolaylıkla sağlanmaktadır (Resim 2.2).



Resim 2.2. YKMŞ yöntemleri ile üretilmiş çeşitli alüminyum parçalar; a) otomobil fren sistemlerinde kullanılan parçalar ve b) elektrik bağlantı parçaları [Flemings, 1991]

2.2. Yarı-Katı Metal Şekillendirme İşleminin Dezavantajları

Besleme stoku maliyeti nispeten fazla olduğu için arz-talep miktarını düşürür [Sukimoto, 1986]. Tikso-döküm yönteminde mutlaka dendritik olmayan, küresel mikroyapıya sahip ön malzeme (besleme stoku veya silindirik kütük) hazırlığı gerekmektedir. Bu ön malzeme hazırlığı da maliyeti arttırmaktadır [Atkinson, 2005, Fan, 2002, Kirkwood, 1994, Türkeli, 1991, Türkeli, 1995].

Tikso-kalıplama yönteminde kullanılan teçhizat, geleneksel yöntemlerdekilere göre daha pahalıdır [Sukimoto, 1986]. Kalıp geliştirme süreleri ve üretim maliyetleri yüksektir [Atkinson, 2005, Fan, 2002, Kirkwood, 1994, Türkeli, 1991, Türkeli, 1995].

Bakır, çelik ve süper alaşımların ergime sıcaklığı yüksek olmasına rağmen tikso-şekillendirilmesinde yöntem olarak bir problem yoktur. Ancak hammaddesinin pahalı olması ve bu alaşımların dendritik olmayan küresel mikroyapı elde edebilmek amacı ile elektromanyetik karıştırma işleminin yapılması, parça üretimi için gerekli olan külçelerin sürekli olarak üretilmesinin zorunluluğundan dolayı bu konu üzerine yapılan çalışmalar yavaş ilerlemektedir [Aktar, 2004].

Tikso-şekillendirme yönteminin ilk aşamasında yarı-katı sıcaklık aralığında küresel mikroyapıya sahip silindirik kütle şeklindeki alaşım ısıtılır. Numunenin merkezinden yüzeyine doğru, çapına ve boyuna bağlı olarak üniform olarak kısmi ergime sağlanır. Bu yüzden de genel olarak indüksiyon ile ısıtma yapılarak ısının homojen dağılımı sağlanır. Ancak bu işlemde numunenin yüzeyindeki sıcaklığın yükselme tehlikesi vardır. Diğer yandan güç girişinin hassas ve kontrol edilebilir olması gerekmektedir [Aktar, 2004].

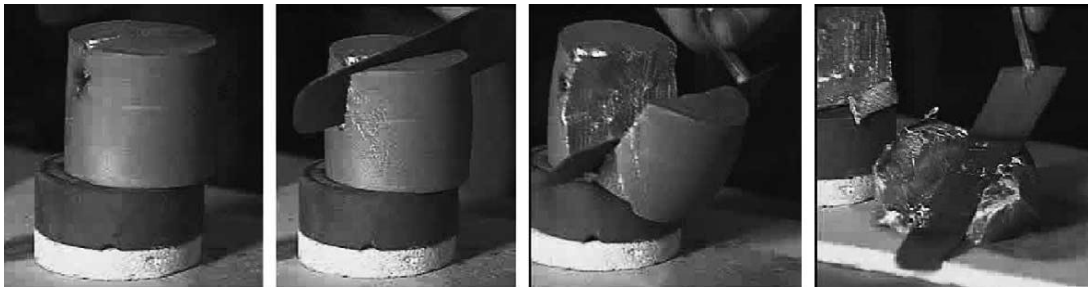
YKMSŞ yöntemleri yarı-katı bölgede, kısmi ergitme ile yapıldığı için sıcaklık kontrolünün çok sıkı yapılması gerekmektedir [Atkinson, 2005, Fan, 2002, Kirkwood, 1994, Türkeli, 1991, Türkeli, 1995].

Yeni bir yöntemi hayata geçirebilmek için proses işlem bilgisine sahip olmak gerekmektedir [Sukimoto, 1986]. YKMŞ yöntemlerinde personelin yüksek işlem bilgisine ve tecrübesine sahip olması gerekmektedir [Atkinson, 2005, Fan, 2002, Kirkwood, 1994, Türkeli, 1991, Türkeli, 1995].

3. YARI-KATI METAL ŞEKİLENDİRME İŞLEMİNDE ÖN MALZEME ÜRETİM YÖNTEMLERİ

YKMŞ işlemi ile ön malzeme üretebilmek için alaşımın, belirli bir katılaşma aralığına ve tiksotropik (eşeksenli ve küresel) mikroyapıya sahip olması gerekmektedir. Endüstride yaygın olarak alüminyum ve magnezyum gibi hafif alaşımlar YKMŞ işlemi ile rahatlıkla istenilen şekli alabilmektedir. Bazı alaşımların katılaşma aralığı çok dar olduğu için (özellikle dövme alaşımlarının) YKMŞ işleminde sıcaklık kontrolü hassas bir şekilde yapılmalıdır [Figueredo, 2001].

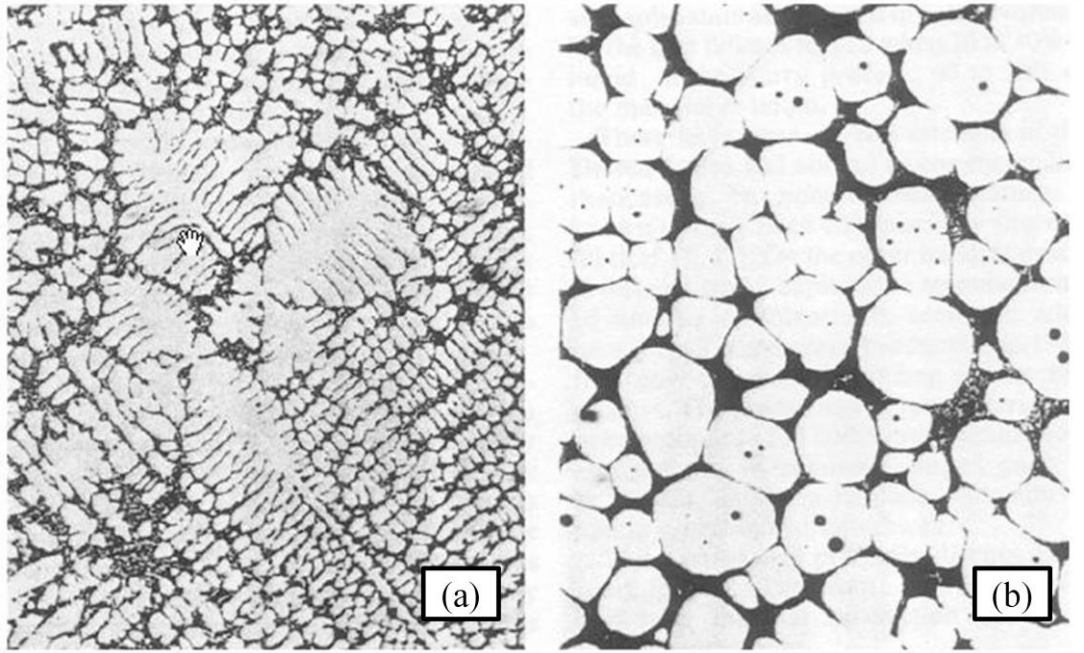
Yarı-katı haldeki ön malzeme Resim 3.1’de görüldüğü gibi serbest halde katı gibi davranarak şeklini muhafaza edebilecek viskoziteye sahip olmakla birlikte, küçük bir kuvvet ile karşılaştığında düşük viskozite göstererek sıvı gibi akışkan davranış gösterir.



Resim 3.1. Yarı-katı haldeki ön malzemenin tiksotropik davranışı [Atkinson, 2005]

Alaşımında birincil fazın (katı) homojen, iyi küresellik derecesi, düşük tane boyutu ve yüksek şekil faktörüne sahip olması o alaşımın yüksek YKM şekillendirilebilme kabiliyetini gösterir. YKM şekillendirilebilme kabiliyeti mekanik özellikler üzerinde oldukça etkilidir [Zoqui ve ark., 2002].

Resim 3.2.a’da A357 alüminyum alaşımının geleneksel döküm yöntemi ile elde edilmiş dendritik mikroyapısı ve Resim 3.2.b’de A357 alüminyum alaşımının YKMŞ işlemi ile elde edilmiş dendritik olmayan (küresel) mikroyapısı görülmektedir.



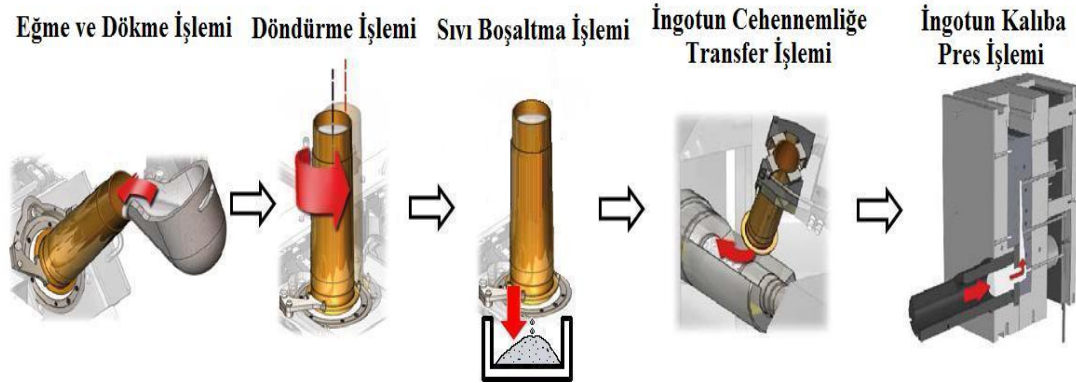
Resim 3.2. A357 alüminyum alaşımının; a) geleneksel döküm yöntemi ile elde edilmiş dendritik ve b) YKMS ile elde edilmiş küresel mikroyapıları [Kenney ve ark., 1988]

3.1. Sıvı Halden Ön Malzeme Üretim Yöntemleri

3.1.1. Döndürmeli entalpi dengeleme yöntemi

Döndürmeli entalpi dengeleme yöntemi (SEED process) son yıllarda geliştirilen bir ön malzeme hazırlama yöntemidir. Bu yöntemde, sıvılaşma (likidüs) çizgisinin üzerinde bir sıcaklığa sahip ergiyik alaşım döndürmeli entalpi dengeleme ünitesinde bulunan silindirik bir metalik potaya döküldükten sonra %30-45 katı oranına ulaşınca kadar soğutulur. Metalik pota soğuma esnasında belirli bir hızda (200 rpm) döndürülür. Döndürme işlem süresi, metalik pota boyutlarına ve ergiyik metal miktarına bağlı olup 30-60 sn arasındadır [Doutre ve ark., 2004]. Döndürme işlemi, metalik potanın duvarlarında oluşan ilk α katı fazını parçalayarak veya pota duvarından uzaklaştırarak pota merkezine doğru homojen dağılmasını sağlar. Döndürme işlem süresi bittikten sonra 5-10 sn kısa süreli bir ara verilerek fazla sıvının metalik potanın dibinden boşalması sağlanır [Nafisi ve ark., 2006]. Daha

sonra elde edilen yarı-katı malzeme basınçlı döküm makinesinde preslenmek üzere potadan döküm haznesine (cehennemliğe) aktarılır.



Şekil 3.1. Döndürmeli entalpi dengeleme (SEED process) yönteminin şematik gösterimi [Nafisi ve ark., 2006]

Döndürmeli entalpi dengeleme yönteminin avantajları aşağıdaki gibidir;

1. Düşük maliyetli teknolojiye sahiptir,
2. Reo yarı-katı döküm için en uygun prosestir,
3. Minimum sıcaklık kontrolüne ihtiyacı vardır,
4. Kusursuz presleme döngüsüne sahiptir,
5. Bir çok alaşım için değişik boyutlarda yarı-katı malzeme elde edilebilir,
6. Kesin ve güvenilir sonuçlar elde edilir,
7. Otomatik üretime uygundur [Nafisi ve ark., 2006].

3.1.2. Mekanik karıştırma yöntemi

YKMŞ yönteminin başlangıcı olarak mekanik karıştırma yöntemi kabul edilmektedir [Spencer ve ark., 1972]. Bu yöntemin ilk çalışması MIT’de (Massachusetts Institute of Technology), yarı-katı haldeki alaşımın mekanik karıştırma düzeneğinde karıştırılması ile yapılmıştır. Mekanik karıştırma düzeneğindeki karıştırma çubuğunun aşınması, ergiyik metalin kalıntı ve oksitler ile kirlenmesi, metalin gaz emmesi ve üretim hızının düşük olması bu yöntemin kullanımını sınırlamaktadır. Yarı-katı haldeki malzemenin sıvı fazını tutan bu yapılar akıcılığı düşürdüğü için ön malzemenin reolojik özelliklerini de olumsuz etkilemektedir [Figueredo, 2001].

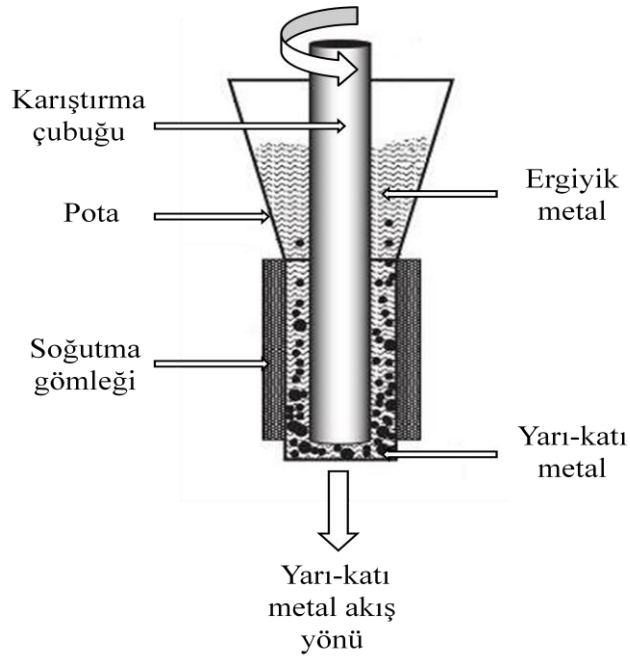
Mekanik karıştırma düzeneğinde ergiyik metali karıştırma işleminde çoğu zaman matkap, çark veya çift karıştırma miline sahip düzenekler kullanılmaktadır [Fan, 2002, Figueredo, 2001].

Mekanik karıştırma yöntemi ile öncelikle, basit karıştırma düzeneklerinde dendritik olmayan küresel mikroyapıya sahip alaşımlar elde edilmeye çalışılmış, sonrasında ise Şekil 3.2 ve Şekil 3.3’de görüldüğü gibi sürekli döküm düzenekleri geliştirilmiştir.

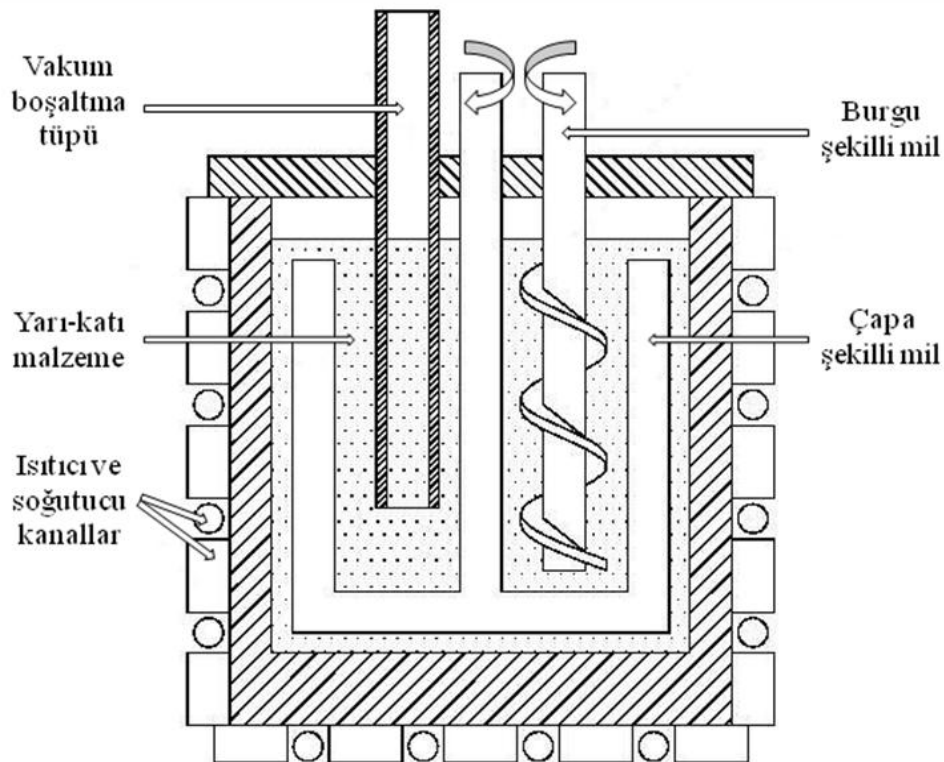
Mekanik karıştırma yönteminde alaşım mikroyapısının dendritik olarak katılaşmasını engellemek için aşağıdaki iki önemli değişken kontrol altında tutulmalıdır [Czerwinski, 2007];

1. Mekanik karıştırma düzeneğindeki karıştırma çubuğunun çevresindeki kayma hızının yüksek olması için, karıştırma çubuğunun en az 1000 devir/dk hız ile döndürülmesi gerekmektedir.
2. Karıştırma çubuğunun çevresindeki kaymanın devamlı olması için, karıştırma çubuğu ile soğutma gömleği arasındaki boşluğun minimum olması sağlanmalıdır. Bu boşluk kritik değerin altında olursa, karıştırma çubuğu ve soğutma gömleği yüksek oranda aşınmaya ve erozyona uğrar.

Mekanik karıştırma düzeneğinde ısı akışı ve sıvı karıştırma hızlarını kontrol altında tutabilmek için, farklı şekil ve boyutlara sahip karıştırma çubukları ve farklı devir/dk’ya sahip hızlar kullanılır [Czerwinski, 2007].



Şekil 3.2. Sürekli mekanik karıştırma düzeneğinin şematik gösterimi [Czerwinski, 2007]



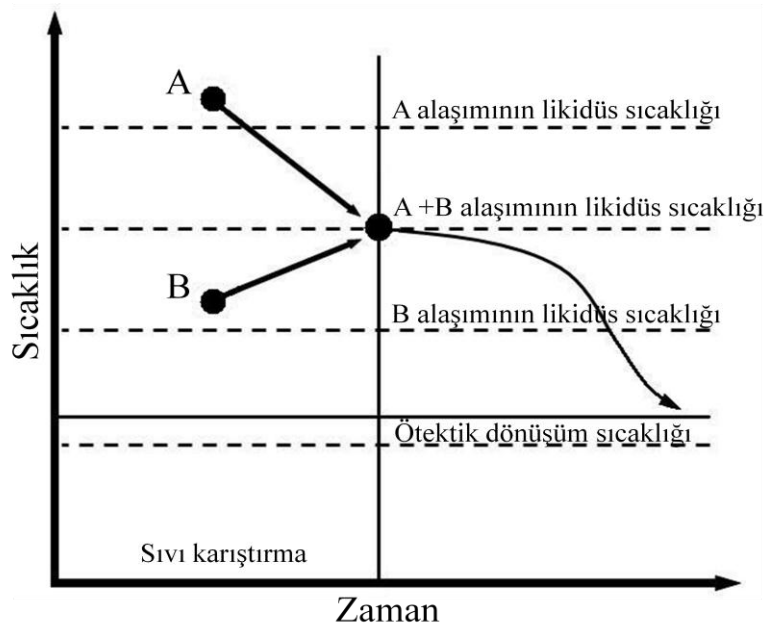
Şekil 3.3. Çift karıştırma miline sahip mekanik karıştırma düzeneğinin şematik gösterimi [Kirkwood ve ark., 2009]

Al-5,2Si alaşımında, izotermal mekanik karıştırma ve tane inceltme ve takiben mekanik karıştırma işlemlerinin tane boyutu üzerine etkisinin araştırıldığı çalışmada, tane inceltici ve takiben mekanik karıştırma işleminin tane boyutunun daha fazla küçülmesini sağladığı tespit edilmiştir. Karıştırma işleminde, karıştırma çubuğuna 400, 600 ve 1000 devir/dk hız ve 1, 5, 10, 20, 30 ve 45 dakika bekleme süreleri uygulanmıştır. 30 dakikaya kadar tane inceltici uygulanan ve uygulanmayan mekanik karıştırma ile tane boyutu küçülmüştür. Diğer yandan 30 dakikadan sonra tane inceltici uygulanmayan mekanik karıştırma ile tane boyutu küçülürken, 45 dakikadan sonra büyümüştür. Tane inceltme ve takiben mekanik karıştırma işlemi 30 dakikaya kadar tane boyutunun küçülmesini sağlarken, 30 dakikadan sonra tane boyutunun büyümesine neden olmuştur. Bununla birlikte her ikisinin de mikroyapısının küreselleşme derecesi artmıştır.

Mekanik karıştırma yöntemi, günümüzde endüstriyel alanda sınırlı olarak uygulanmakta olup, eksik yönlerinin giderilmesi ile ilgili çalışmalar devam etmektedir. Mekanik karıştırma düzeneğindeki karıştırma çubuğunun erozyona uğraması, yarı-katı haldeki metalin cüruf ve gaz emmesi, üretim hızının düşük olması ve sürecin kontrolünün zor olması bu yöntem üzerindeki çalışmaların durmasına sebep olmuştur [Figueredo, 2001].

3.1.3. İki farklı sıvı karıştırma yöntemi

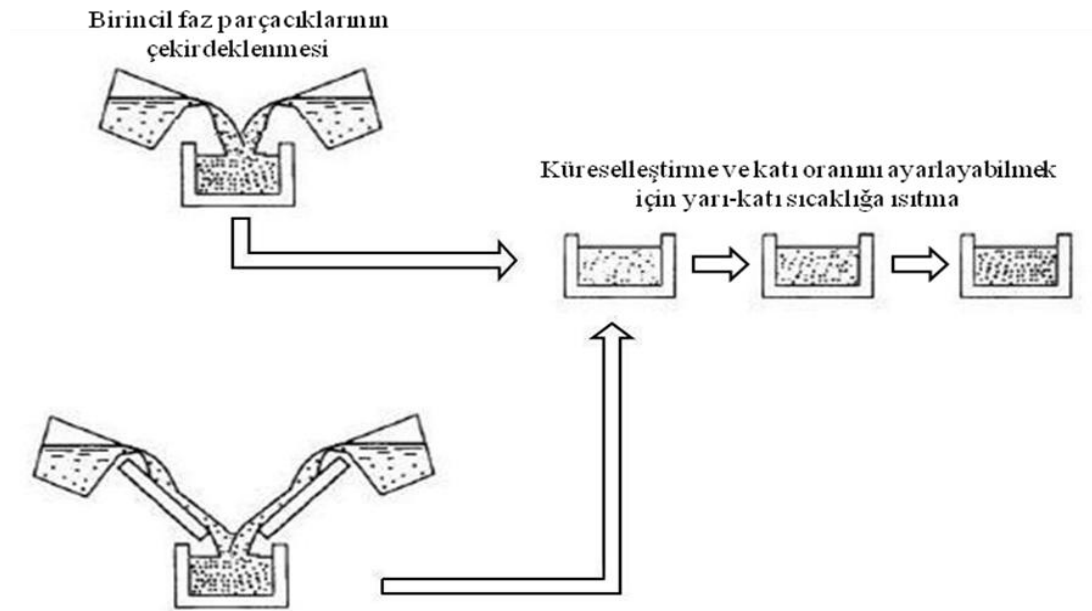
İki farklı sıvı karıştırma yöntemi, iki farklı alaşımın ergiyik halde birbirine karıştırılması ve bu karışımın şekil 3.4’de gösterildiği gibi iki alaşımın da katılaşma sıcaklığının altındaki bir sıcaklıkta yeni bir ötektik kompozisyonu meydana getirmesidir [Figueredo, 2001].



Şekil 3.4. İki farklı sıvı karıştırma yönteminin zaman-sıcaklık grafiğinde şematik gösterimi [Figueredo, 2001]

Karıştırılmak istenilen alaşımlar, ergime sıcaklığının hemen üzerinde bulunduğu için bünyesinde katı çekirdek bulundurabilir veya bulundurmaz. Diğer yandan silindirik kütük şeklinde dökülmek istenilen malzeme, ince ve küresel mikroyapıya sahip bir ön malzeme elde edebilmek için ilave bir ısıtma işlemi ihtiyaç duyabilir [Figueredo, 2001].

İki farklı sıvı karıştırma yöntemi ile karıştırılmak istenen iki alaşım ergime sıcaklığının hemen üzerinde bekletilir ve döküm işlemi iki şekilde yapılabilir. Birincisi Şekil 3.5’de gösterildiği gibi izole edilmiş potaya direkt döküm, diğeri ise izole edilmiş potaya yerleştirilmiş sabit bir karıştırma kanalına döküm yapılmak sureti ile gerçekleştirilir. Karıştırma işlemi bu iki alaşımdan birinin ergime sıcaklığının altında, diğeri ise üstünde yeni bir alaşımın ortaya çıkmasını sağlamaktadır [Figueredo, 2001].



Şekil 3.5. İki farklı sıvı karıştırma işleminin şematik gösterimi [Figueredo, 2001]

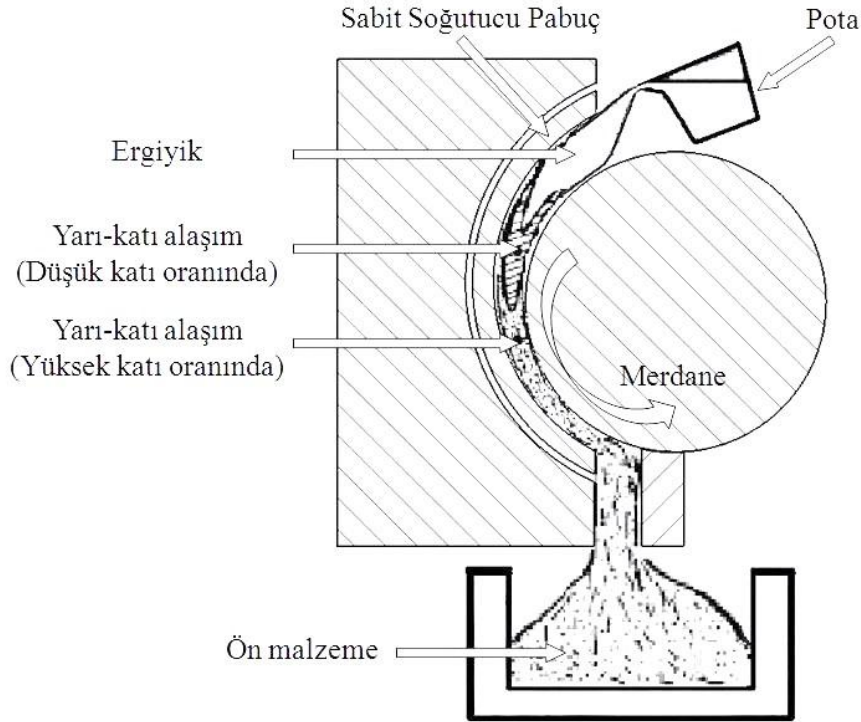
İki farklı sıvı karıştırma yöntemini uygulayan Japon UBE şirketi, iki alaşımın karışımı ile meydana getirilen ergiyikten ısı transferinin hızlı olmasını engellemek ve belirli bir katı oranı elde edebilmek için izole edilmiş bir pota kullanmaktadır. Bu işlemde dendritik olmayan küresel mikroyapılı katı faz içeren ön malzeme elde edilir [Figueredo, 2001].

3.1.4. Karıştırmalı soğutma merdanesine döküm yöntemi

Mekanik karıştırma yöntemi ile benzerlik gösteren karıştırmalı soğutma merdanesine döküm yöntemi, ön malzeme üretim hacmini arttırmak için Japonya’da geliştirilmiş bir yöntemdir. Karıştırmalı soğutma merdanesine döküm yöntemi, alaşımın döner merdanede kayma ve soğutulması esasına dayanır [Kiuchi ve Sugiyama, 1995].

Karıştırmalı soğutma merdanesine döküm yönteminde döner merdane ile soğutucu pabuç arasındaki boşlukta, alüminyum alaşımı ön malzeme oluşumu Şekil 3.6’da şematik olarak gösterilmektedir. Buradaki boşlukta ergiyik soğudukça, döner merdanenin karıştırma ve soğutması sonucu, sürekli olarak YKM için büyük miktarda ön malzeme üretimi sağlanabilmektedir [Kiuchi ve Sugiyama, 1995].

Ancak bu yöntemde ergiyik metal oksitlenmeye ve cüruf oluşumuna karşı korumasızdır [Figueredo, 2001].

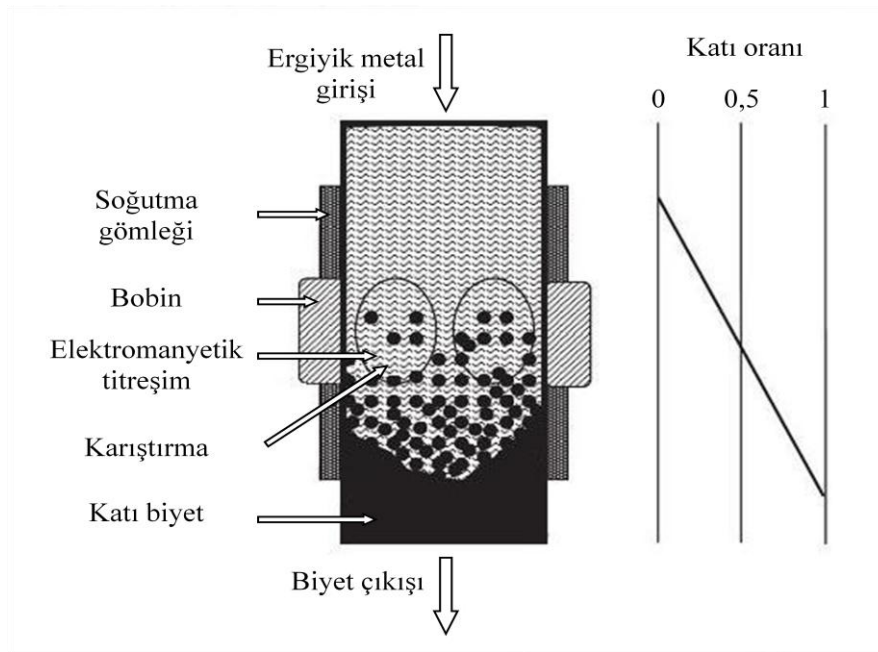


Şekil 3.6. Karıştırmalı soğutma merdanesine döküm yönteminin şematik gösterimi [Kiuchi ve Sugiyama, 1995]

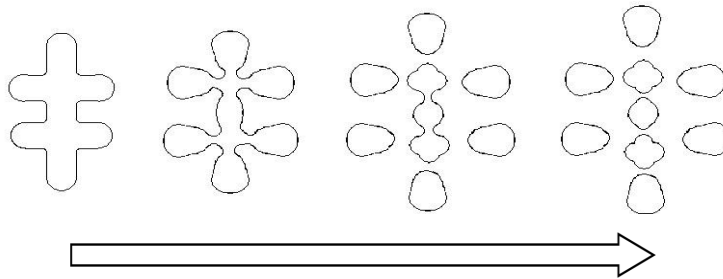
3.1.5. Elektromanyetik karıştırma yöntemi

Elektromanyetik karıştırma yönteminin, mekanik karıştırma yöntemine kıyasla birçok avantajı vardır [Birol ve ark., 2006]. Bu avantajlardan ilki elektromanyetik enerjinin meydana getirdiği titreşim etkisidir. Elektromanyetik teknikler kullanılarak, bobin içerisinden geçen yarı-katı haldeki metalin akışı devamlı veya kısmen devamlı olarak kontrol altına alınabilmektedir [Czerwinski, 2007]. Avantajlardan diğeri ise, elektromanyetik karıştırma yönteminde mekanik karıştırma yöntemindeki gibi kritik boşluk mesafesine ihtiyaç duyulmamasıdır. Bu sayede elde edilen ürün boyutu sınırlandırılmamaktadır. Diğer bir avantaj ise, sistemde dönen parçalar bulunmadığı için aşınma ve erozyon meydana gelmemektedir.

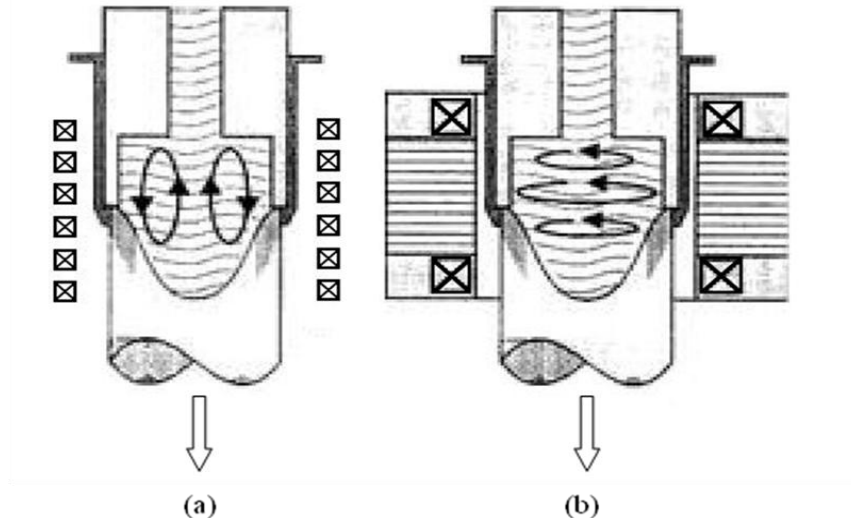
Şekil 3.7’de şematik olarak gösterildiği gibi elektromanyetik karıştırma yönteminde, kontrollü soğutma işlemi ile ergiyik metal katılaştırılırken, elektromanyetik yöntemler kullanılarak ergiyik metalin titreşim altında karıştırılması esas alınmıştır. Bu yöntemde karıştırma esnasında dendritlerin kolları Şekil 3.8’de görüldüğü gibi kırılarak küresel şekle sahip mikroyapı oluşmaktadır. Ergiyik metale uygulanan doğru veya alternatif akım sonucu oluşan elektromanyetik alan ile titreşim ve dönme hareketi uygulanabilmektedir. Elektromanyetik karıştırma yöntemi ile yarı-katı durumdaki alaşıma uygulanan dönme hareketi, Şekil 3.9’da görüldüğü gibi dikey veya yatay olarak uygulanabilmektedir [Hirt ve Kopp, 2009].



Şekil 3.7. Elektromanyetik karıştırma düzeneğinin şematik gösterimi [Czerwinski, 2007]

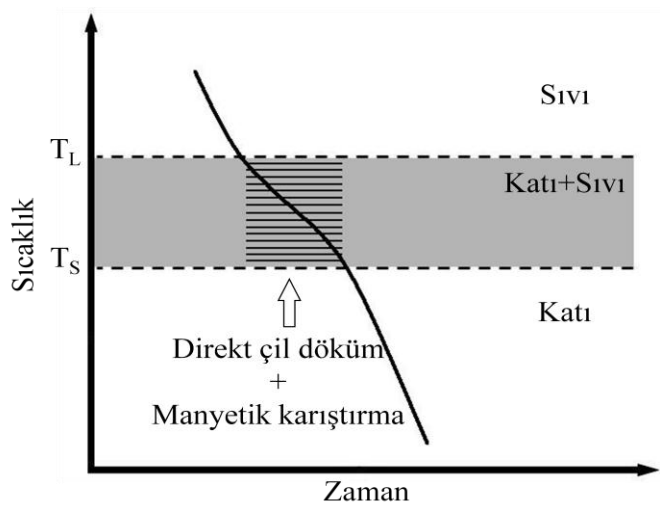


Şekil 3.8. Karıştırma esnasında dendrit kollardan küresel katı parçacıkların oluşumu [Flemings, 1991]



Şekil 3.9. a) Elektromanyetik dikey karıştırma ve b) Elektromanyetik yatay karıştırma düzeneğinin şematik gösterimi [Hirt ve Kopp, 2009]

Elektromanyetik karıştırma yöntemi, katılaşma esnasında doğrudan-çil ve sürekli döküm yöntemlerinin elektromanyetik karıştırma ile birleştirilmesinden meydana gelmektedir (Şekil 3.10). Yarı-katı şekillendirmeye hazır, üniform ve ince taneli (30-100 μ m) mikroyapıya sahip numuneler 100mm çapa kadar üretilebilmektedir. Üretilen bu numuneler başka bir yere taşınabilir ve taşındığı yerde istenilen boyutlara getirilerek ve yeniden ısıtılarak tikso-şekillendirme yöntemi ile parça üretiminde kullanılabilir [Figueredo, 2001].



Şekil 3.10. Manyetik karıştırma yönteminin zaman-sıcaklık grafiğinde şematik gösterimi [Figueredo, 2001]

Elektromanyetik dikey karıştırma yönteminde katılaşma bölgesinde oluşan dendritik mikroyapı tekrar çevrilerek daha sıcak bir üst bölgeye taşınır ve bu bölgede dendritler tekrar ergiyerek yapıyı değiştirebilir. Elektromanyetik yatay karıştırma yönteminde ise, yaklaşık sabit bir sıcaklıkta katı faz düzlemsel olarak karıştırılır. Dendritik mikroyapının aynı sıcaklıkta kayma hareketi ile birbirine yakın boyuta sahip küresel tanelerin oluşumunu ve daha homojen yapıyı sağladığı görülmüştür. Her iki elektromanyetik karıştırma yöntemi ile dendritik mikroyapılı olmayan numuneler elde edilebilir. Elektromanyetik dikey karıştırma yönteminde elektromanyetik güç alanlarının yarı-katı bölgede üniform olmaması, üretilen numunelerin mikroyapısını dikey doğrultuda değiştirir. Dolayısıyla bobin tasarımı, elektromanyetik karıştırma yöntemi ile üretilen numunelerin mikroyapısal karakteristiğini etkilemektedir. Bobin tasarımı, yarı-katı ısıtma esnasında hapsolmuş sıvı miktarının fazla olduğu tam küresel mikroyapıya sahip ön malzeme oluşumunu sağlayabilir [Figueredo, 2001].

3.1.6. Ultrasonik karıştırma yöntemi

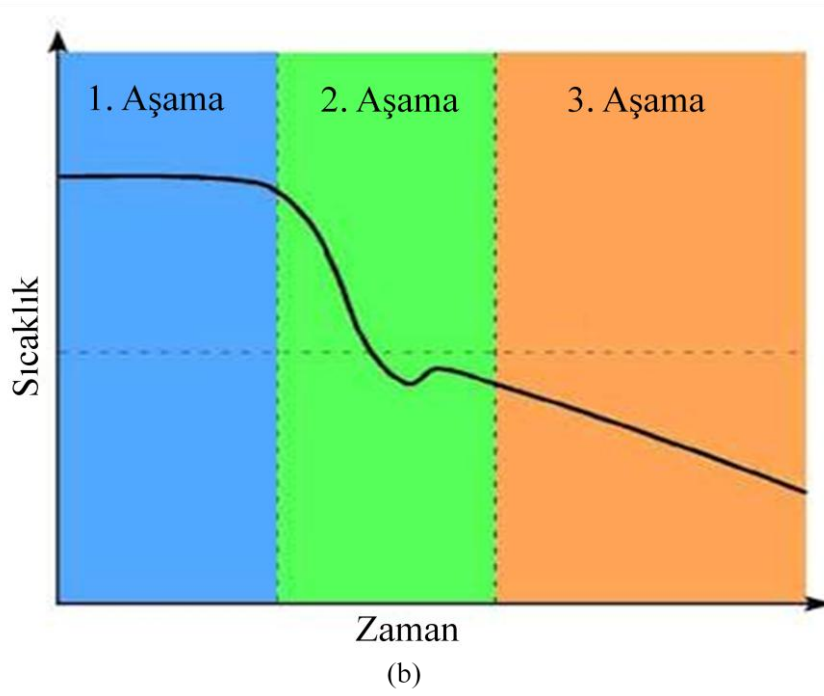
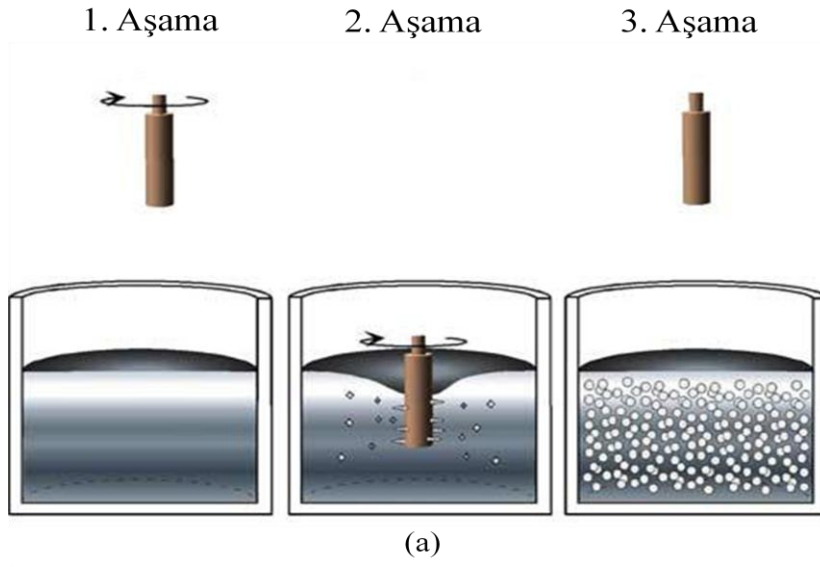
Ultrasonik karıştırma yönteminde katılaşan alaşıma $7-20\text{W}/\text{cm}^2$ şiddetinde çok yüksek ultrasonik güç uygulanır ve ultrasonik titreşim alaşımın dendritik katılaşmasını engeller. Bu sayede sütunsal büyüme engellenir ve mikroyapı daha üniform olur. Ultrasonik karıştırma yönteminde mikroyapı değişim mekanizması, köpürme ve ses dalgası ile açıklanabilir. Burada köpürme, ergiyeğin içerisinde küçük kabarcıkların oluşumunu ve toplanarak büyümesini sağlar. Toplanan kabarcıkların yüksek baskı kuvveti, çekirdeklenme alanlarının oluşumunu teşvik eden hidrolik dalgalar üretir. Diğer yandan bu kabarcıkların toplanması esnasında uygulanan şok dalgaları, katılaşma arayüzeyindeki kristallerin kırılmasına neden olur. Ayrıca bu kabarcıklar çekirdeklenme alanları olarak, oksit ve intermetalik katı partikülleri aktifleştirir [Abramov ve ark., 1997]. Ultrasonik titreşim sıvı-katı arayüzeyindeki sıcaklığı da etkilemektedir. Kabarcıkların boyutunun hızlı bir şekilde artması, ergiyeğin köpürmesine neden olur. Bu köpürme ile kabarcıkların sıcaklığı azalır ve kabarcıkların yüzeyindeki sıvı sıcaklığı katılaşma sıcaklığının altına düşer. Bunun sonucunda bu kabarcıkların yüzeylerinde katı çekirdekleri oluşur. Sonuç olarak, yarı-

katı halde uygulanan ultrasonik titreşim ile oluşan kabarcıklar, tanelerin büyümesini engelleyerek ince taneli mikroyapı oluşumunu sağlar [Czerwinski, 2007, Doğruyol, 2006].

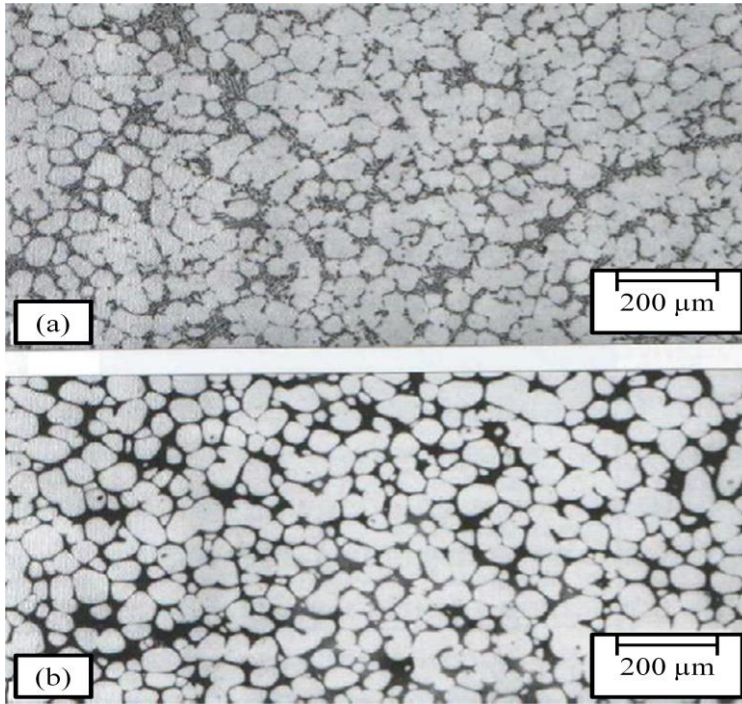
3.1.7. Yeni MIT yöntemi

Yeni MIT yöntemi Flemings ve arkadaşları tarafından yakın zamanda geliştirilmiştir. Bu yöntem ile ince taneli, katı faza sıvının hapsolmadığı ve tamamen küresel α -fazına sahip ön malzeme üretilebilmektedir. Yöntemin basit olması reo-döküm ve tikso-döküm ile şekillendirilmesine kolaylık sağlamaktadır [Martinez ve Flemings, 2005].

Şekil 3.11’de görüldüğü gibi ergiyik içerisine daldırılan ve ergime sıcaklığının birkaç derece üzerinde bekletilen metal karıştırıcı da soğutmaya katkıda bulunmaktadır. Karıştırma işleminin başlaması ile ergiğin sıcaklığı, çekirdeklenmeyi başlatacak bir sıcaklığa düşer ve karıştırıcı geri çekilir. Ergime sıcaklığının hemen altında, aynı anda uygulanan karıştırma ve soğutma işlemi ergiyikte çok miktarda çekirdeklenmeyi sağlar. Çekirdeklenme miktarının yüksek olması, tekrar dendritik mikroyapı oluşumunu zorlaştırmaktadır. Ayrıca bu işlemin karıştırma hızına karşı hassas olmadığı ispatlanmıştır. Bu yöntem ile üretilmiş bir Al alaşımının mikroyapı resimleri Resim 3.3’de görülmektedir.

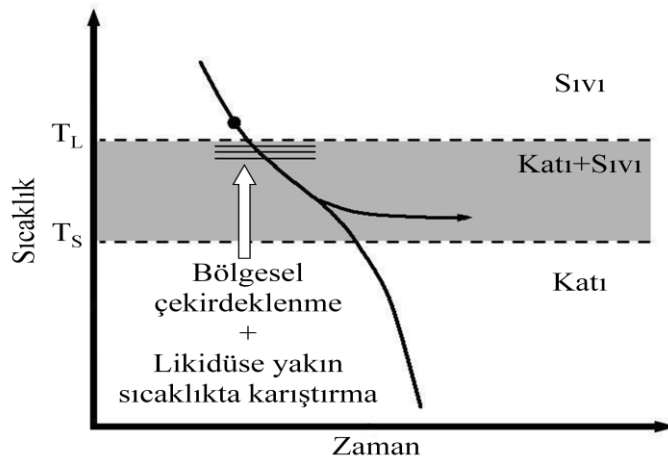


Şekil 3.11. Yeni MIT yönteminin; a) aşamalarının şematik gösterimi ve b) aşamalarının sıcaklık ile değişimi [Martinez ve Flemings, 2005]



Resim 3.3. Yeni MIT yöntemi ile üretilmiş a) homojen ön malzeme mikroyapısı ve b) 590°C sıcaklıkta 10dk. bekletilmiş ve suda soğutulmuş ön malzeme mikroyapısı [Figueredo, 2001]

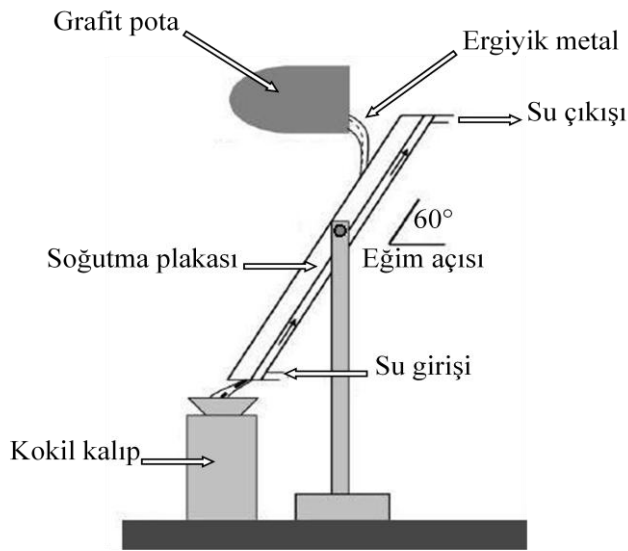
Yeni MIT yöntemi ile Şekil 3.12’de de görüldüğü gibi alaşımın likidüs sıcaklığının altında gerçekleştirilen çok kısa süreli karıştırma işlemi, bölgesel ısı çekme ve kısa süreli yavaş soğutma veya yarı-katı bölgede sabit sıcaklıkta tutma ile bünyesine sıvının hapsolmadığı tam küresel mikroyapılar elde etmek mümkündür.



Şekil 3.12. YKM ön malzeme üretimi için yeni MIT işleminin zaman-sıcaklık grafiğinde şematik gösterimi [Figueredo, 2001]

3.1.8. Eğimli soğutma plakasına döküm yöntemi

Eğimli soğutma plakasına döküm (ESPD) yöntemi ilk olarak Haga tarafından 2000’li yılların başlarında başlamıştır [Haga ve Suzuki, 2001]. ESPD yöntemi çalışma prensibi olarak basit ve Şekil 3.13’de görüldüğü gibi ergiyik metalin döküm sıcaklığında, sürekli soğutulan eğimli bir plaka ile kalıba dökülmesi ile gerçekleştirilir [Biol, 2008].



Şekil 3.13. Eğimli soğutma plakasına döküm işleminin şematik gösterimi [Biol, 2008]

ESPD yönteminde, döküm sıcaklığı, soğutma plakasının boyutu ve eğimi, soğutma plakasının ve kalıbın malzemesi üretilen ön malzemenin mikroyapısını etkilemektedir [Biol, 2007-1, Gençalp ve ark., 2009, Haga ve Suzuki, 2001]. ESPD yönteminde, soğutma plakasının yüzeyinde çekirdeklenme başlar, ilerledikçe büyür ve kalıpta küresel taneler oluşur [Ohno ve ark., 1971]. Küresel tane yapısına sahip ön malzeme yarı-katı sıcaklığa getirildiğinde, YKMS yöntemleri için gerekli olan küresel, ince taneli ve tiksotropik özellik gösteren yapıya dönüşür [Biol, 2008, Bozkurt ve ark., 2005].

ESPD yönteminde soğutma plakasının eğim açısı 40°’den 60°’ye getirildiğinde, soğutma plakası ile ergiyik metal arasındaki ısı transferi ve kayma gerilmesi zamanı

azalır. Diğer yandan soğutma plakasının boyu çok uzun olursa, ergiyik metal ile soğutma plakası arasında ince bir katı tabakası oluşur. Bu da akan ergiyik metal ile soğutma plakasının yüzeyi arasındaki ısı transferinin ve soğuma hızının azalmasına sebep olur. Dolayısıyla ilk katı fazının çekirdeklenme oranı düşer ve mikroyapıdaki tane boyutunun artmasına sebep olur [Taghavi ve Ghassemi, 2009].

YKMŞ için ön malzeme üretim yöntemlerinde, katı fazın morfolojisi ve üniform boyutta oluşmaması önemli bir problemidir. ESPD yöntemi ile üretilen ön malzemelerde, optimum döküm sıcaklığı ve soğutma plakası boyutunun sağlanması ile YKMŞ yöntemleri için gerekli olan küresel mikroyapı oluşturulur [Biol, 2007-1].

YKMŞ için ön malzeme üretim yöntemleri arasında ESPD yöntemi pratik ve ekonomiktir [Bozkurt ve ark., 2005]. ESPD yöntemi ile dövme alüminyum alaşımına sahip numunelerin tiksotropik şekillendirilmeleri başarıyla gerçekleştirilmiştir [Biol, 2007-2, Bozkurt, 2005].

3.1.9. Düşük sıcaklıktan döküm yöntemi

Düşük sıcaklıktan döküm yöntemi, son zamanlarda geliştirilen tiksotropik ön malzeme üretim yöntemlerindendir. Düşük sıcaklıktan döküm yönteminin esası ergime sıcaklığının hemen üzerindeki bir sıcaklıkta ($T_m + (\sim 5 \text{ ila } 30)^\circ\text{C}$) alaşımın kalıba dökülmesini içermektedir. Dolayısıyla çok ince, eşeksenel ve dendritik olmayan mikroyapı oluşur. Düşük sıcaklıktan döküm yöntemi ile üretilen ön malzemelerin tane boyutu $\sim 100\mu\text{m}$ 'dir. Ön malzemenin tekrar ısıtılması esnasında küresel mikroyapı teşekkül eder ve tiksotropik şekillendirme işlemine uygun duruma gelir [Fan, 2002, Figueredo, 2001].

Düşük sıcaklıktan döküm yönteminde döküm sıcaklığının azalması ile sütunsal tane oluşumu engellenerek eşeksenel bölgenin meydana geldiği tespit edilmiştir. Ayrıca döküm sıcaklığının azalması eşeksenli tanelerin incelmelerini sağlamaktadır. Yöntemin pratik ve uygulamasının kolay olması, reo ve tiksotropik şekillendirme için avantaj sağlamaktadır [Czerwinski, 2007, Fan, 2002, Figueredo, 2001].

3.1.10. Tane inceltme yöntemi

Tane inceltme işlemi alüminyum ve diğer hafif alaşımların dökümünde kullanıldığı gibi YKMŞ için ön malzeme üretmek amacı ile de kullanılmaktadır [Fan, 2002, Kirkwood, 1994, Nafisi ve Ghomashchi, 2005].

Ergiyik alaşıma yapılan bir miktar titanyum ilavesi ile tane boyutunda önemli ölçüde küçülme sağlanırken, alaşımın dökülebilirliği de artmaktadır. Alüminyuma ilave edilen az miktarda titanyum ve bor, hızlı bir şekilde ve önemli derecede tane inceltme etkisi gösterir [Karayazı, 2009].

Tane incelticiler heterojen çekirdeklenmeyi artırarak dendritik mikroyapı oluşumunu engeller. Bu sayede ince ve eşksenel rozet şekilli mikroyapılar oluşturulabilir ve tekrar ısıtma işlemi ile tikso-şekillendirme yöntemi için uygun hale getirilebilir [Czerwinski, 2007]. Diğer yandan tane inceltme işlemi tek başına ön malzeme üretimi için kullanılamaz. Dolayısıyla tane inceltme işlemi ile birlikte, mekanik veya elektromanyetik karıştırma yöntemleri gibi ön malzeme üretim yöntemleri kullanılır [Doğruyol, 2006].

Tane inceltici olarak, Al-Ti, Al-B ve Al-Ti-B gibi alaşımlardan biri kullanılır. Tane inceltme işlemi ile alüminyum alaşımlarında uygun mikroyapılı ürünler üretilmesine rağmen, 100µm'dan daha küçük tane boyutundaki mikroyapıya sahip ön malzeme üretmek oldukça güçtür [Kirkwood, 1994].

Dökümhaneden veya ilk üreticiden alınan, tane inceltme yöntemi ile küresel mikroyapıya sahip YKM ön malzemeler tikso-döküm için tekrar ısıtılarak şekillendirilebilir. Tane inceltme yöntemi ile küresel veya rozet şeklindeki mikroyapıya sahip ön malzemeler üretilir. Ancak tane inceltme yöntemi ile üretilmiş ön malzemelerde taneler arasına hapsolmuş sıvı miktarı, manyetik karıştırma yöntemi ile üretilmiş ön malzemelere göre daha fazladır. Diğer yandan tane inceltme işlemi uygulanan alüminyum ön malzemelerin, küresel mikroyapıya sahip olabilmesi için tekrar ısıtma esnasında daha fazla süreye ihtiyaç duyulabilir. Bu

problemler ön malzeme mikroyapılarındaki ikincil dendrit kol aralıklarının ve tane boyutunun azalması ile en aza indirilebilir. Bu yapı daha etkili bir tane inceltici ve daha ince tane yapısı oluşumunu sağlayan döküm yöntemlerinin birleştirilmesi ile sağlanabilir [Figueredo, 2001].

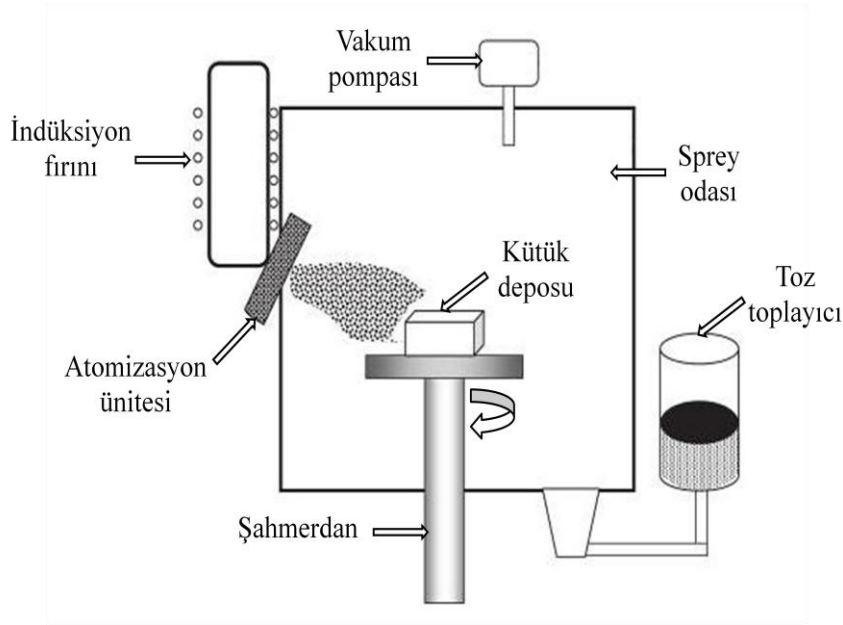
Tane inceltme yönteminin en önemli dezavantajı, tane incelticilerin metalik olmayan inklüzyon oluşumuna neden olmasıdır. Bu inklüzyonlar üretilen parçanın işlenmesini ve mekanik özelliklerini kötü yönde etkilemektedir [Nafisi ve Ghomashchi, 2007].

3.1.11. Sprey döküm yöntemi

1970’li yılların başında Swansea Üniversitesinde, Singer öncülüğü ile spreylendirme yöntemi prensiplerinin temeli atılmıştır. Hızlı katılaşma ile doğrudan ergiyikten alaşım ve kompozit malzemelerin üretildiği proses, spreylendirme, spreylendirme döküm veya spreylendirme yöntemi olarak bilinmektedir. Spreylendirme döküm yönteminde Şekil 3.14’de görüldüğü gibi ergimiş metalin 0,6-1MPa inert gaz altında atomizasyonu ile üretilen damlacıkların püskürtülerek bir kollektör (toplayıcı) üzerinde toplanması sağlanır. Ergiyik metalin 10^2 - 10^3 °C/s gibi yüksek değerlerde katılaşma hızı ile ince ve homojen mikroyapı, alaşım elementlerinin artırılmış katı çözünürlüğü, azaltılmış segregasyona sahip malzemeler elde etmek mümkündür. Kollektör üzerinde katılaşarak üretilen bu ön malzeme, daha sonra dövme, ekstrüzyon ve haddeleme yöntemleri ile şekillendirilebilir. Spreylendirme yönteminin en önemli avantajı, ergiyik metalden doğrudan tek bir işlem ile net şekillendirilmiş ürün elde edebilme imkanıdır [Salamcı, 2004].

Spreylendirme döküm yönteminde dört ana ünite mevcuttur. Bunlar;

1. Ergitme ve dağıtma ünitesi,
2. Gaz atomizasyon cihazı,
3. Atomize edici gaz kaynağı için dağıtma ve kontrol sistemi,
4. Depozit ünitesi [Salamcı, 2004].



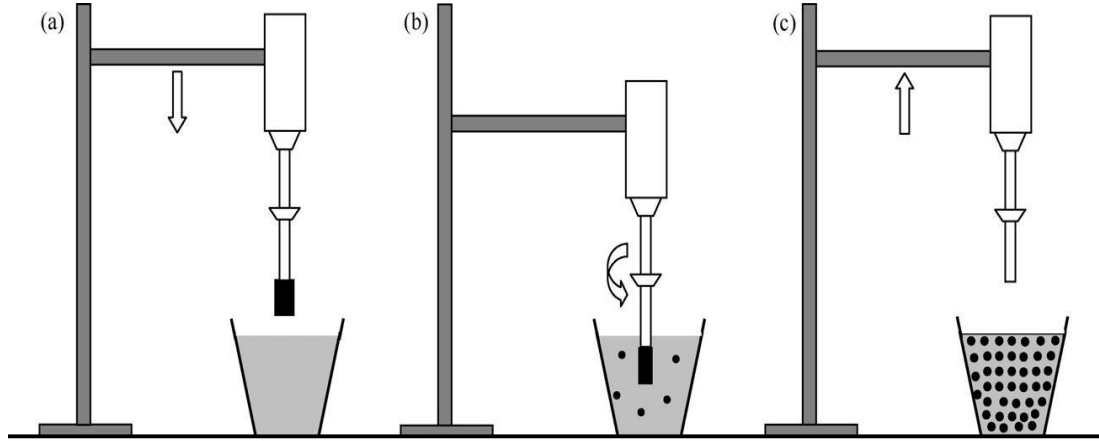
Şekil 3.14. Sprey şekil verme yönteminin şematik gösterimi [Czerwinski, 2007]

Sprey döküm yöntemi ile üretilen ön malzemeden YKMS yöntemi ile parça üretimi, sıvı faz sinterleme yöntemi ile parça üretimine benzemektedir [Czerwinski, 2007].

Osprey yöntemi olarak da bilinen sprey döküm yöntemi, yüksek sıcaklıklarda ergiyen alaşımlara da uygulanmaktadır.

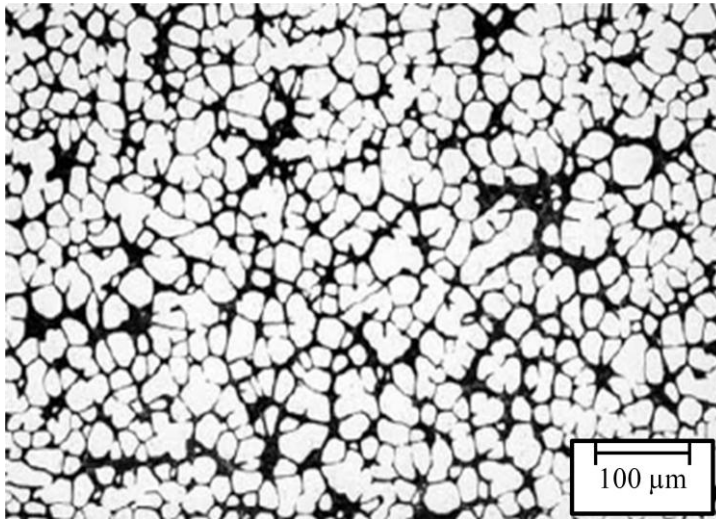
3.1.12. İçten soğutma yöntemi

Temel olarak yeni MIT yöntemine benzeyen içten soğutma yöntemi, son yıllarda Birol tarafından geliştirilmiştir. İçten soğutma yöntemi Şekil 3.15’de görüldüğü gibi, ergiyik metal ile aynı kimyasal kompozisyona sahip katı metal parçacığının ergime sıcaklığının hemen altındaki ergiyik metal içerisine daldırma ve karıştırma hareketi ile çözündürme esasına dayanmaktadır.



Şekil 3.15. İçten soğutma yönteminin şematik gösterimi; a) aynı alaşıma ait katı parçacığın paslanmaz çelik çubuğa bağlanması, b) katı parçanın ergiyik metal içerisinde karıştırma hareketi ile çözündürülmesi, c) paslanmaz çelik çubuğun geri çekilmesi ve üretilen ön malzeme [Birol, 2009-1]

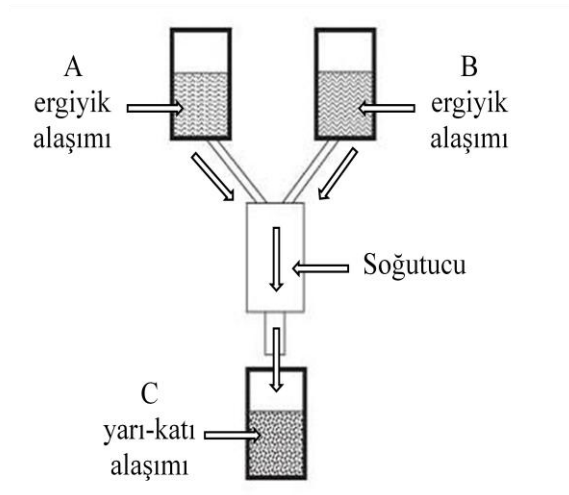
İçten soğutma yönteminde ergiyik metal içerisinde döndürülen katı parçacık, çekirdeklenmenin ergiyiğin her yerinde aynı anda oluşmasını sağlamaktadır. Karıştırma işlemi ile yapısal alt soğuma ve bütün yönlerde aynı hızda büyüme sağlanmaktadır. Dolayısıyla dendritik mikroyapı oluşumu engellenerek, küresel ilk katı fazı oluşur [Birol, 2009-2]. Resim 3.4’de içten soğutma yöntemi ile üretilmiş A356 alaşımının mikroyapısı görülmektedir.



Resim 3.4. İçten soğutma yöntemi ile üretilmiş A356 alaşımının 580°C sıcaklıkta su verme sonrası mikroyapısı [Birol, 2009-2]

3.1.13. Sürekli reo-dönüşüm yöntemi

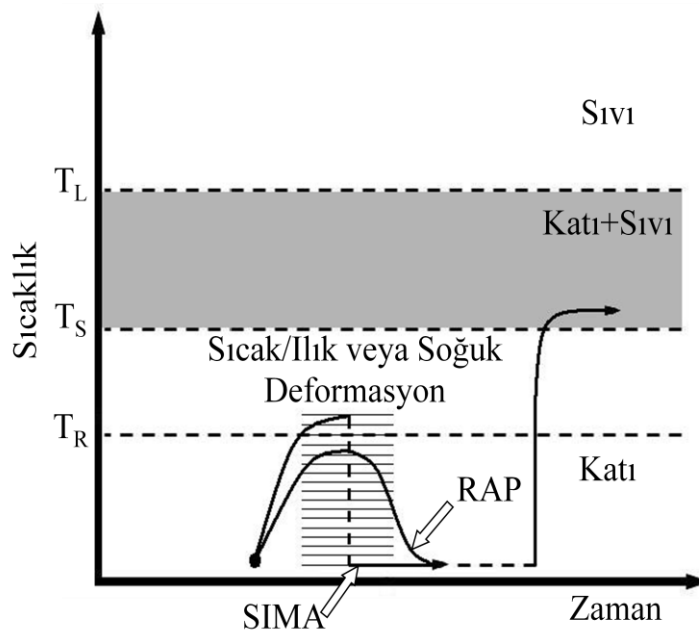
Sürekli reo-dönüşüm yönteminde Şekil 3.16’da gösterildiği gibi belirli bir döküm sıcaklığında, ergiyik halde tutulan iki farklı kimyasal kompozisyona sahip alaşım soğutucu içerisinde aynı anda dökülüp, pasif olarak karışması sağlanır. Likidüs sıcaklığının hemen üstündeki bir sıcaklıkta iki farklı ergiyiğin soğutucu içerisinde akması esnasında ısının çekilmesi ve iki ergiyin birbirine karıştırılması sağlanır. Bu iki farklı alaşımın soğutucudan geçmesi sonucunda, ısı transferi ve türbülans sayesinde küresel mikroyapıya sahip ön malzeme alttaki kalıba dolar. Burada tane boyutu soğuma hızına bağlı olup, yarı-katı sıcaklık aralığında yavaş soğuma ile daha iri taneler oluşmaktadır [Czerwinski, 2007].



Şekil 3.16. Sürekli reo-dönüşüm yönteminin şematik gösterimi [Czerwinski, 2007]

3.2. Katı Halden Ön Malzeme Üretim Yöntemleri

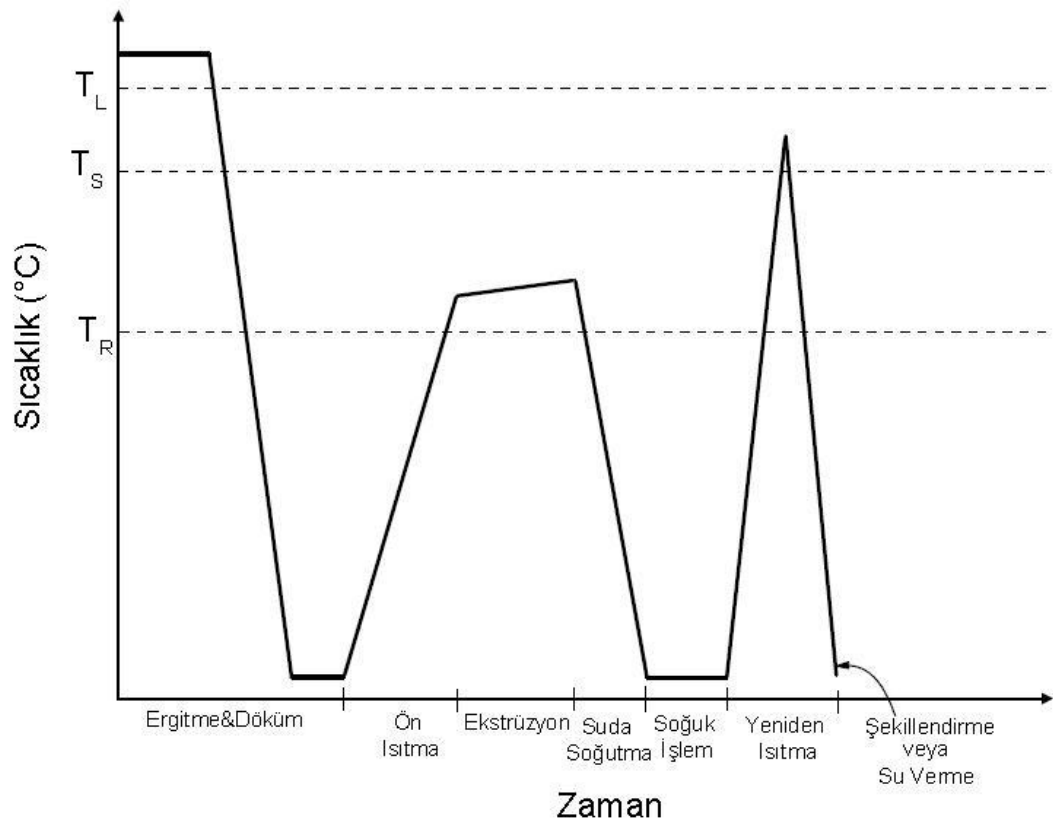
Katı halden ön malzeme üretim yöntemleri, gerinimin neden olduğu sıvı aktivasyonu (SIMA) ve yeniden kristalleşme ve kısmi ergitme işlemi (RAP) olmak üzere iki ana başlık altında incelenebilir. Şekil 3.17’de SIMA ve RAP işlemlerinin zaman-sıcaklık eğrisinde şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 3.17. SIMA ve RAP işlemlerinin zaman-sıcaklık eğrisinde şematik gösterimi [Figueredo, 2001]

3.2.1. Gerinimin neden olduğu sıvı aktivasyonu (SIMA)

Tikso-şekillendirme yöntemi ile üretilen, özellikle dövme alüminyum alaşımlarında ön malzeme hazırlık yöntemi olan SIMA (Strain Induced Melt Activation) yöntemi ergitme ve döküm sonrası, yeniden kristalleşme sıcaklığının üzerinde ekstrüzyon, haddeleme gibi sıcak şekillendirme işleminden sonra soğuk deformasyon ve sonrasında da yeniden ısıtma aşamalarını içerir (Şekil 3.18) [Kılıçlı, 2010, Young ve ark., 1983].



Şekil 3.18. SIMA yönteminin zaman-sıcaklık diyagramında şematik gösterimi [Young ve ark., 1983]

Şekil 3.18’de ergitme ve döküm ile üretilen numuneler, yaklaşık 30 dakika ön ısıtma işlemi uygulanarak, yeniden kristalleşme sıcaklığının üzerine ısıtılır. Bu sıcaklıkta ekstrüze edildikten sonra hızlı bir şekilde su verilerek soğutulur ve böylece yönlendirilmiş tane yapısına sahip numuneler üretilmiş olur. Ekstrüze edilmiş numunelere oda sıcaklığında soğuk deformasyon uygulanarak uygun iç gerilme seviyelerine sahip numuneler elde edilir. Bu numuneler solidüs sıcaklığının üzerine yaklaşık 100 saniye ısıtılarak yarı-katı şekillendirmeye hazır hale gelir [Kılıçlı, 2010, Young ve ark., 1983].

SIMA yönteminde soğuk deformasyon sonrasında numunede kalıntı gerilme depolanır ve tekrar ısıtma esnasında depolanan bu kalıntı gerilme sayesinde küresel mikroyapı oluşur [Sirong ve ark., 2006]. Gerilme miktarı arttıkça daha homojen, ince ve küresel mikroyapıya sahip numuneler üretilebilir [Kenney ve ark., 1988].

SIMA yönteminin temelinde, yarı-katı bölgede kısmi ergitme sırasında yüksek açılı tane sınırlarındaki sıvı nüfuziyeti vardır. Deforme miktarı yeterli olan malzemede, soğuk deformasyondan sonra yeniden kristalleşme meydana gelir. Yeniden kristalleşmiş bu malzeme, ince ve eşeksenel taneye sahip mikroyapı elde edilir. Yarı-katı bölgeye tekrar ısıtma sırasında tane sınırlarındaki tercihli ergimenin ardından iri taneye sahip mikroyapının parçalanması ile ince küresel tanelerden oluşan mikroyapı elde edilir [Figueredo, 2001].

SIMA yöntemi ile ön malzeme üretiminde, tane boyutunu ve şeklini aşağıdaki parametreler ile kontrol edebilmenin mümkün olduğu bildirilmektedir [Tietmann ve ark., 1992];

1. Alaşımın kimyasal kompozisyonu,
2. İlk döküm mikroyapısı,
3. Sıcak veya soğuk deformasyon oranı,
4. Tekrar yarı-katı sıcaklığa ısıtma hızı,
5. Yarı-katı bölgede bekleme sıcaklık ve süresi.

SIMA yönteminde malzemenin tekrar ısıtılma işlemi kritik bir işlem aşamasıdır. Tekrar ısıtmanın amacı sadece uygun sıvı oranını elde etmek değil aynı zamanda ince tane boyutuna sahip küresel mikroyapılı katı faz dönüşümünü sağlamaktır [Fan, 2002].

Tekrar ısıtma, sıvı-katı bölgede belirlenen bir sıcaklığa ısıtmayı ve bazen de belirlenen sıcaklıkta izotermal bekletmeyi içerir. Bu tekrar ısıtma işlemi uygun sıvı oranı elde edebilmek ve katı fazın dendritik kollarının kırılması ile küresel mikroyapıya dönüşümünün sağlanması amacı ile yapılır. Fakat uzun bekletme zamanı tanelerin irileşmesi ile sonuçlanır. Tane irileşmesi yarı-katı ön malzemenin tiksotropik ve yarı-katı şekillendirilmiş parçanın mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkiler [Wang ve ark., 2008].

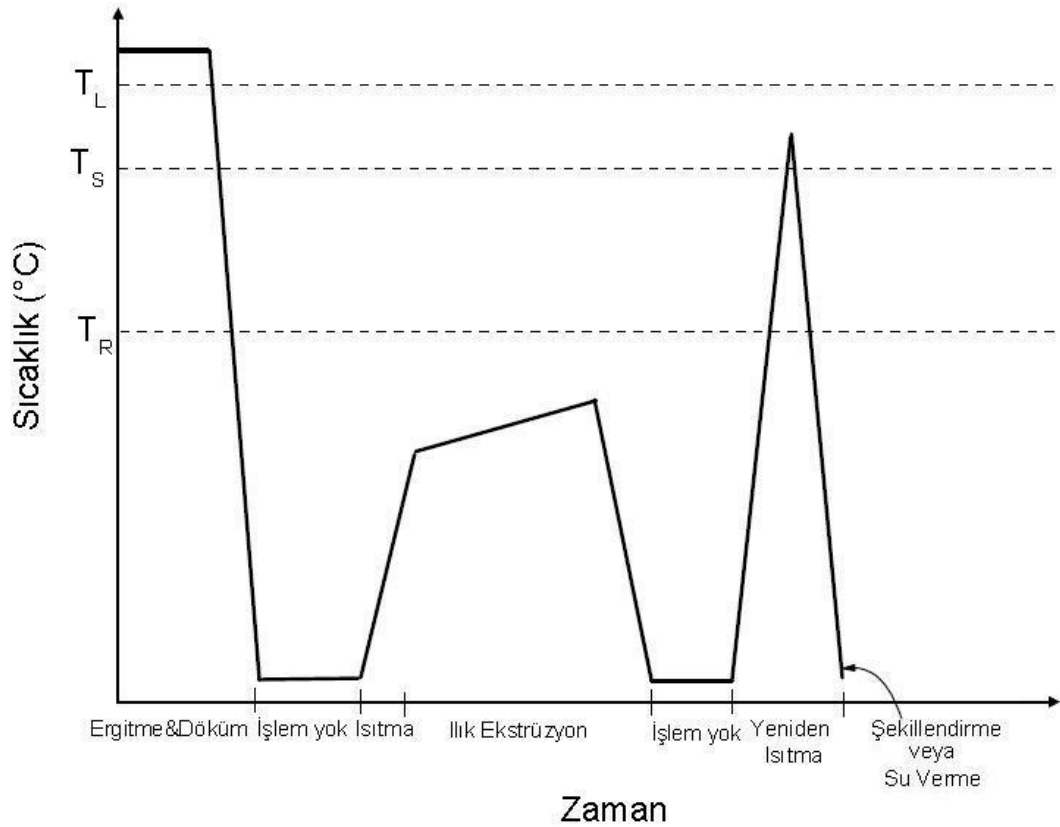
SIMA yöntemi ile alüminyum alaşımlarını dövme veya ekstrüze işlemlerinden biri ile soğuk olarak deforme ettikten sonra tekrar yarı-katı bölgeye ısıtıldığında yeniden

kristalleşme meydana gelir. Ekstrüzyon veya soğuk şekil verme yöntemlerinden biri ile üretilmiş ve/veya deformasyon işlemi uygulanmış malzemede, uygulanan deformasyon miktarına bağlı olarak dislokasyon yoğunluğu da artar. Dislokasyon yoğunluğu tekrar yarı-katı sıcaklığa ısıtma işlemi esnasında birincil α -fazının küresel mikroyapıya dönüşmesinin başlıca sebebidir. Dislokasyon yoğunluğu ne kadar artarsa, yeniden kristalleşecek taneler için o kadar fazla çekirdek merkezi oluşacak ve dolayısıyla mikroyapı o kadar ince olacaktır [Dışpınar ve Türkeli, 2006].

Diğer ön malzeme üretim yöntemlerine göre (manyetik karıştırma gibi) SIMA yöntemi ile çok daha iyi küreselleşmiş mikroyapı elde edilir. Bu da dövme alaşımlarının akıcılığını olumlu yönde etkilemekte ve daha ekonomik olmasını sağlamaktadır. SIMA yöntemi ile yarı-katı parça üretimi ticari olarak kullanılmaya başlanmıştır [Nafisi ve Ghomashchi, 2005, Kirkwood, 1994, Türkeli, 1993, Türkeli ve Akbaş 1996].

3.2.2. Yeniden kristalleşme ve kısmi ergitme işlemi (RAP)

SIMA yöntemine alternatif olarak Kirkwood ve arkadaşları tarafından geliştirilen RAP (Recrystallization and Partial Melting) yöntemi, SIMA yöntemi ile benzerlik göstermekte olup, SIMA yönteminde yeniden kristalleşme sıcaklığının üzerinde sıcak deformasyon uygulanırken, RAP yönteminde dökümden sonra yeniden kristalleşme sıcaklığının altında ılık veya soğuk deformasyon uygulanmaktadır [Atkinson ve Liu, 2008, Atkinson ve ark., 2008, Kirkwood ve ark., 1992]. Bu iki yöntem arasındaki en büyük fark, SIMA yönteminde yeniden kristalleşme sıcaklığının üzerinde gerçekleştirilen sıcak deformasyon sonrası uygulanan soğuk deformasyonun, RAP yönteminde olmamasıdır (Şekil 3.19) [Kılıçlı, 2010].



Şekil 3.19. RAP yönteminin zaman-sıcaklık diyagramında şematik gösterimi [Kirkwood ve ark., 1992]

RAP yönteminde, Şekil 3.19’da görüldüğü gibi malzemenin yeniden kristalleşme sıcaklığının altındaki bir sıcaklıkta deformasyon işleminin yapılması ve sonrasında yarı-katı sıcaklığa tekrar ısıtma işlemi ile ilk önce yüksek açılı yeniden kristalleşen taneler oluşur ve yarı-katı sıcaklıkta oluşan sıvı faz, yeniden kristalleşen tane sınırlarına nüfuz ederek, bu sıcaklıkta tanelerin küreselleşmesini sağlar [Atkinson ve Liu, 2008, Atkinson ve ark., 2008, Kirkwood ve ark., 1992, Kirkwood, 1994].

RAP yönteminin ekonomik ve küçük çaplı ön malzeme üretimine elverişli olması ile dikkat çekmektedir [Atkinson ve Liu, 2008]. RAP yönteminde döküm sonrasında malzemede daha yüksek gerinim elde etmek amacı ile sıcak ekstrüze işlemi yapılmadan yeniden kristalleşme sıcaklığının altında deformasyon işlemi uygulanır [Atkinson ve ark., 2008, Kirkwood 1994]. Böylece dendritik kollar kırılır ve ince, uzun taneli ve deforme olmuş mikroyapı elde edilir. Soğuk deformasyon sonrasında malzemenin yarı-katı aralığında uygun bir sıcaklığa tekrar ısıtılması ile yeniden

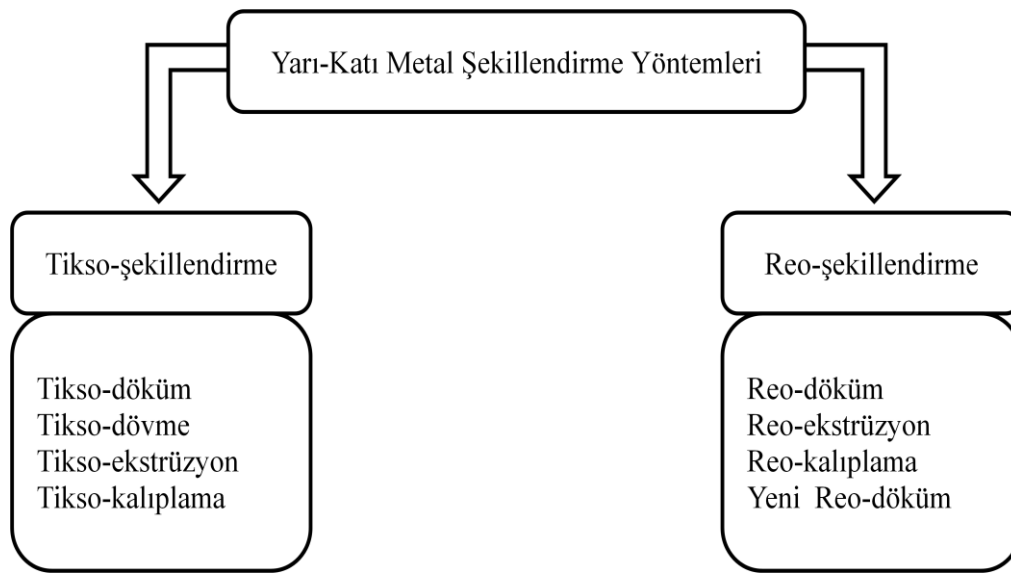
kristalleşmesi ve bu sayede ince ve dendritik olmayan mikroyapının oluşumu sağlanır. SIMA yöntemindeki mekanizmaya benzer olarak, bu oluşan tanelerin sınırları sıcaklığın artması ile birlikte mikrosegregasyondan dolayı yapıda var olan düşük ergime sıcaklığına sahip faz veya bölgelerin ergimesi ile oluşan sıvı faz tarafından ısıtılır [Kenney ve ark., 1988, Kirkwood ve ark., 1992, Kirkwood, 1994].

RAP yönteminin en büyük dezavantajı büyük çapa sahip numunelerin kesit boyunca homojen olarak deformasyon işleminin yapılamaması ve bu nedenle de tamamen üniform bir küresel mikroyapı üretilmemesidir [Atkinson ve Liu, 2008, Atkinson ve ark., 2008].

Literatürde yapılan YKMŞ çalışmalarında, özellikle dövme alüminyum alaşımlarında dendritik olmayan mikroyapıya sahip ön malzeme hazırlığında üç yöntemin en çok kullanılan yöntemler olduğu belirlenmiştir. Bu yöntemlerin; SIMA yöntemi, RAP yöntemi ve ekstrüze halden indüksiyon ile kademeli ısıtma olduğu belirtilmiştir [Atkinson ve ark., 2002, Nafisi ve Ghomashchi, 2005, Saklakoğlu ve ark., 2009, Sirong ve ark., 2006, Song ve Hong, 2007, Wang ve ark., 2008].

4. YARI-KATI METAL ŞEKİLENDİRME YÖNTEMLERİ

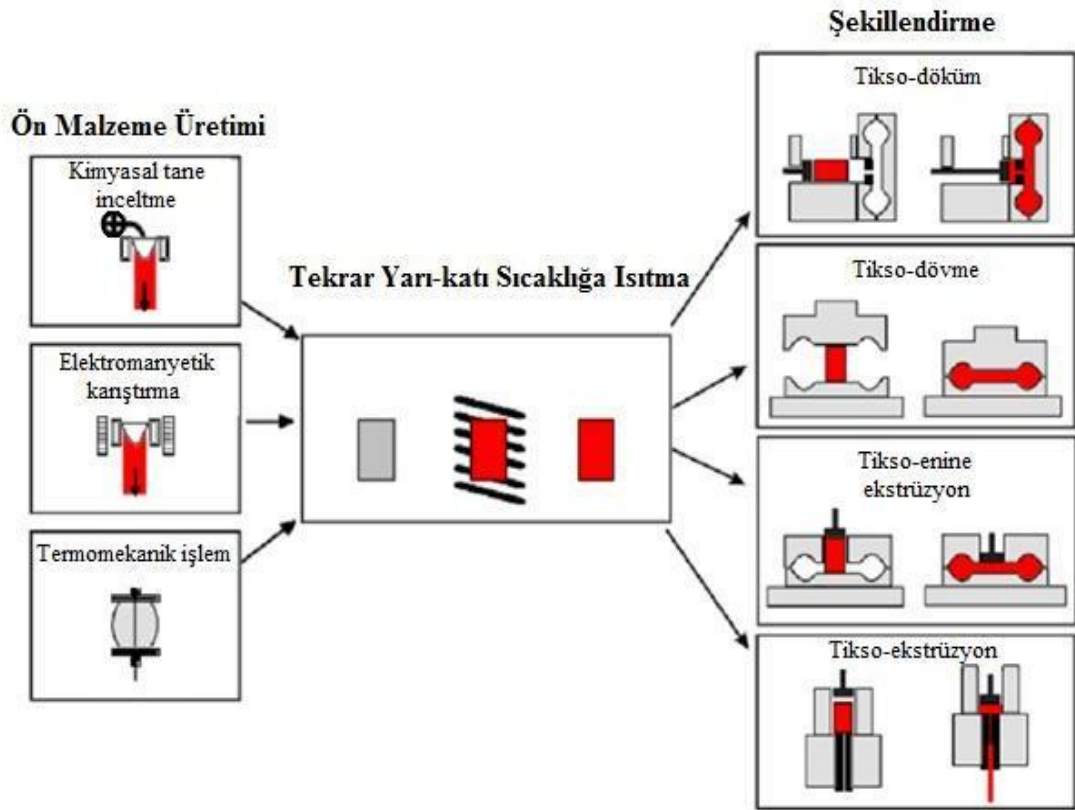
YKMŞ yöntemleri Şekil 4.1’de gösterildiği gibi Tikso-şekillendirme ve Reo-şekillendirme olmak üzere iki ana başlık altında incelenebilir [Atkinson, 2005, Fan, 2002, Kirkwood, 1994]. Tikso ve Reo-şekillendirme kullanılan şekillendirme yöntemine göre kendi alt başlıklarına ayrılmaktadır.



Şekil 4.1. YKMŞ yöntemlerinin sınıflandırılması [Kılıçlı, 2010]

4.1. Tikso-şekillendirme Yöntemleri

Tikso-şekillendirme yöntemleri şematik olarak Şekil 4.2’de görüldüğü gibi üç temel üretim aşamasından oluşmaktadır. Kimyasal tane inceltme, elektromanyetik karıştırma ve termomekanik işlemler ile dendritik olmayan küresel mikroyapıya sahip ön malzemenin üretilmesi, sonrasında ön malzemenin indüksiyon ile yarı-katı sıcaklığa ısıtılması ve son olarak da Tikso-döküm, Tikso-dövme veya Tikso-ekstrüzyon şekillendirme yöntemlerinden birisi ile şekillendirilmesini kapsamaktadır.



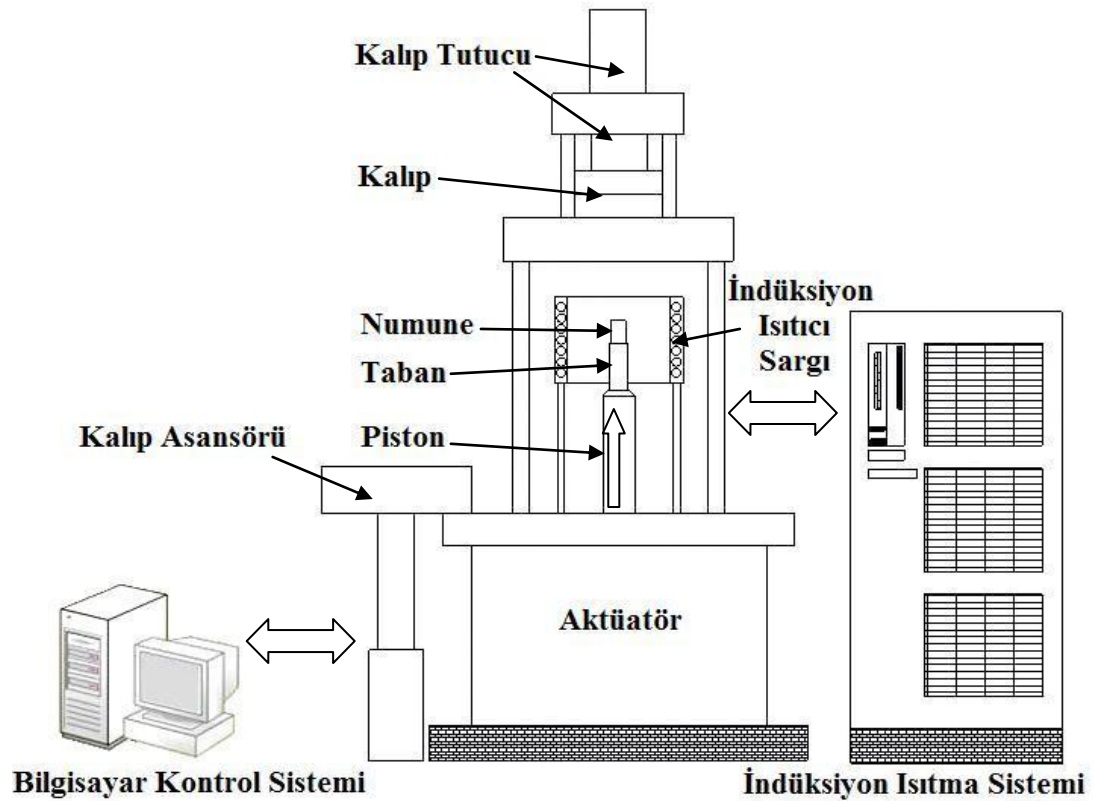
Şekil 4.2. Tikso-şekillendirme yöntemlerinin şematik gösterimi [Hirt ve ark., 1994, Kopp ve ark., 1999]

Geleneksel metal şekillendirme yöntemleri ile üretilmeyen yüksek aşınma dayanımı ve mukavemeti sergileyen dövme malzemelerin bu yöntem ile üretilmesi mümkündür. Bu malzemelerin imalatında kullanılan alaşımlarının yapısal davranışı, ergiyik metal alaşımlarının niteliklerine kısmen bağlıdır. Özellikle de mukavemet ve gerinim özelliklerindeki fark ortadadır. Bu yöntem ile üretilen parçaların bünyesinde bulunan gözenek miktarının az olması ve mikroyapı tane boyutlarının küçük olması muhtemeldir [Çavuşoğlu, 1992].

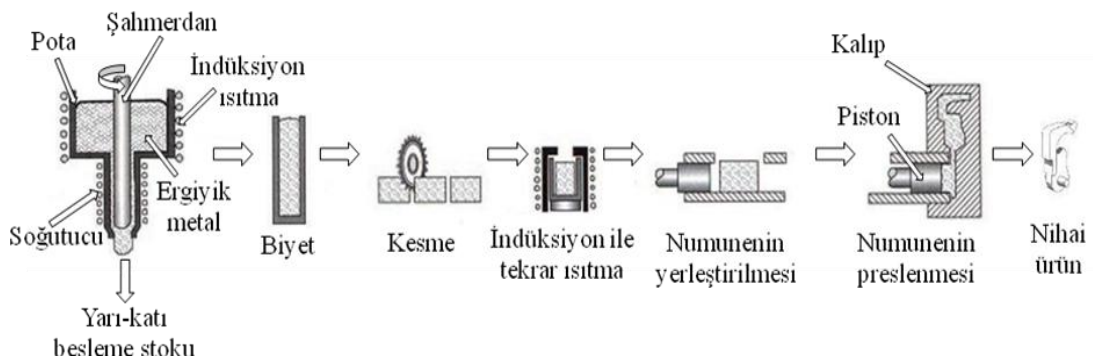
4.1.1. Tikso-döküm

Tikso-döküm yöntemi, sırasıyla kimyasal tane inceltme, elektromanyetik karıştırma ve termomekanik işlemlerden birisi ile ön malzeme hazırlama, yarı-katı sıcaklığa ısıtma ve uygun basınç ile son şeklin verilmesi aşamalarını içerir. Yarı-katı sıcaklığa çıkarılan malzeme, katı şeklini muhafaza ederken, basıncın uygulanması ile birlikte

sıvı gibi akıcı özellik göstermektedir. İngiltere Sheffield Üniversitesinde geliştirilen tikso-şekillendirme presinin şematik gösterimi Şekil 4.3’de verilmiştir. YKMS için genellikle numunenin, yarı-katı bölgedeki sıvı oranı %50’nin üstünde olmalıdır [Atkinson, 2005, Fan, 2002, Kirkwood, 1994].



Şekil 4.3. Sheffield tikso-şekillendirme presinin şematik gösterimi [Kapanos ve ark., 2000]



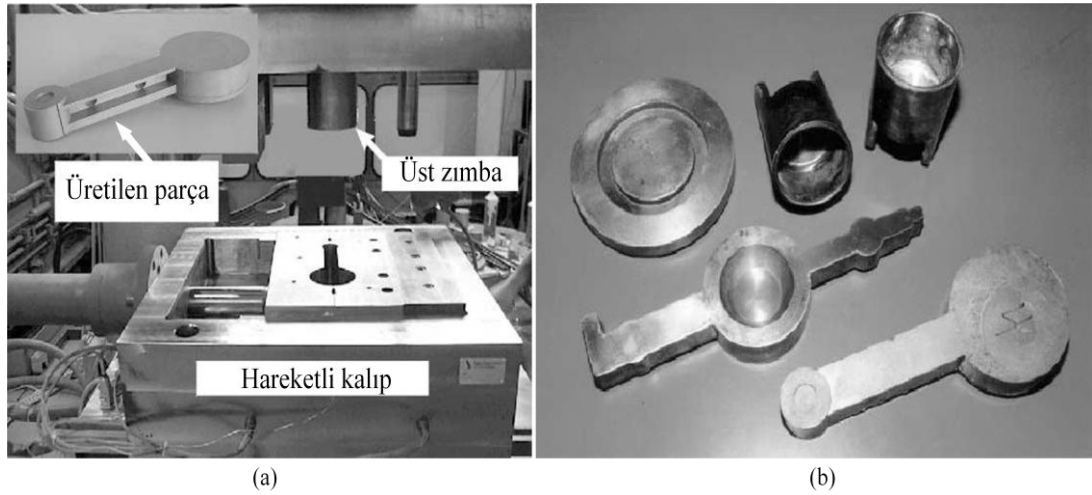
Şekil 4.4. Tikso-döküm ile parça üretiminin şematik gösterimi [Flemings ve ark., 1976]

Tikso-döküm yönteminde, metal ergitme işlemi ve ergiyik metal işleminde kullanılan araç ve gereçlere ihtiyaç duyulmaması avantajlarından biridir. Geleneksel pres döküm yöntemi ile metal şekillendirme yapan makinelerine göre sıcaklığın düşük olması (kalıptaki aşınma oranının düşük olması) ve yarı-katı haldeki alaşımın kalıbı türbülans oluşturmadaan doldurması mümkündür. Çekme miktarının düşük olması nedeni ile imalatı zor ve karmaşık şekilli parçaların nihai boyutlara yakın elde edilmesi mümkündür. Bunun sayesinde de işçiliğin ortadan kalkması ya da azaltılması ile maliyetten ve zamandan tasarruf edilir [Wu, 2004].

Tikso-döküm yönteminin dezavantajları ise; yüksek hammadde fiyatları, ön malzeme hazırlama maliyeti ve üretilen ön malzemenin tekrar yarı-katı sıcaklığa çıkması için harcanan ısıtma maliyeti ve geri dönüşüm işleminin zor olması şeklinde sıralanabilir [Seo ve ark., 2005].

4.1.2. Tikso-dövme

Tikso-dövme yönteminde ön malzeme hazırlama işleminden sonra tekrar yarı-katı sıcaklığa çıkarılan dendritik olmayan ön malzemeye geleneksel dövme işlemine benzer dövme işlemi uygulanır [Atkinson, 2005]. Ön malzeme sıvı oranının %50'nin altında olması tikso-dövme işlemi için yeterlidir [Kopp ve ark., 2001]. Sıkıştırma (squeeze) döküm yöntemi ile üretilen dövme alüminyum parçalarının mekanik özellikleri, tikso-dövme yöntemine göre yüksek olmasına rağmen tikso-dövme yöntemi ile üretilen parçaların yorulma özellikleri daha iyidir [Chen ve ark., 1979]. Tikso-dövme yöntemi Şekil 4.2'de şematik olarak gösterilmektedir. Resim 4.1'de tikso-dövme cihazı ve üretilen çeşitli parçalar gösterilmektedir [Kopp ve ark., 2001].



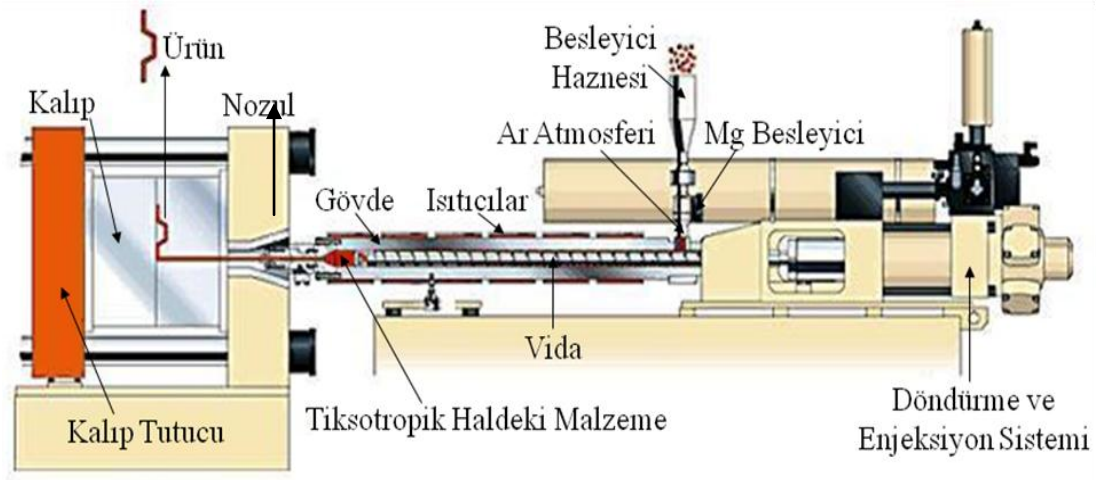
Resim 4.1. a) tikso-dövmek cihazı ve b) tikso-dövmek cihazı ile üretilen çeşitli parçalar [Kopp ve ark., 2001].

4.1.3. Tikso-ekstrüzyon

Tikso-ekstrüzyon yönteminde tekrar yarı-katı sıcaklığa çıkarılan küresel mikroyapıya sahip ön malzemeye ekstrüzyon işlemi uygulayarak yapılan şekil verme işlemidir. Bu yöntem ile soğuk şekillendirme işlemi zor olan dövme alüminyum alaşımlarının dendritik ya da rozet mikroyapının bulunmadığı çubuk şeklindeki parça üretimi sağlanmaktadır [Kim ve ark., 2007]. Tikso-ekstrüzyon yöntemi Şekil 4.2’de şematik olarak gösterilmektedir.

4.1.4. Tikso-kalıplama

Tikso-kalıplama yönteminde plastik enjeksiyon presine benzer pres kullanılmaktadır. Besleyici haznesinde bulunan 2-5 mm boyutlarında Mg talaşları, Ar atmosferi altında karşılıklı vida sisteminin çalışması ile kalıba ulaşır. Vida sisteminin çalıştığı bölgede bulunan ısıtıcılar sayesinde alaşım, dendritik olmayan küresel mikroyapıya sahip yarı-katı hale gelmiş olur [Fan, 2002]. Tikso-kalıplama yönteminde geleneksel döküm teknolojisi ve plastik enjeksiyon presinin bir araya gelmesi ile yoğunluğu yüksek ve karmaşık geometriye sahip malzemelerin üretimi mümkündür. Tikso-kalıplama presi Şekil 4.5’de şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 4.5. Tikso-kalıplama presinin şematik gösterimi [Cho ve Kang, 2000]

Tikso-kalıplama yönteminde genellikle, alüminyum ve magnezyum gibi hafif metallerin değişik takviye elemanları ile kompozit malzeme ve son şekle yakın parça üretmek mümkündür. Tikso-kalıplama yöntemi, genellikle grafit bir kalıp içerisine alçak basınç ile gönderilen yarı-katı alaşımın kalıp boşluğunu doldurması neticesinde gerçekleşir. Tikso-kalıplama yöntemi ile elde edilen parçaların mikroyapıları incelendiğinde sıvı matrisin içerisinde bulunan katı fazı küreleri görülür. Alaşımın tiksotropik özellik göstermesinin nedeni, katı kürelerin sıvı ötektik ile çevrili olmasıdır [Çavuşoğlu, 1992].

Tikso-kalıplama yöntemi ile otomotiv sektörüne yönelik parça üretimi, Japonya gibi bazı ülkelerde yapılabilmektedir. Üretilen parçaların özellikle dayanımlarının, geleneksel yöntemlere göre daha yüksek olması ve parçaların hafif olması bu yöntemin lüks otomobil firmalarınınca (Ferrari, Mercedes, Porsche v.b.) tercih edilmesini sağlamıştır. Bu firmalar otomobillerin motor parçaları, jant, fren diskleri gibi parçalarını tikso-kalıplama yöntemi ile elde etmektedirler [Aktar, 2004].

Tikso-kalıplama yöntemi ile karmaşık geometriye ve nispeten ince kesitlere sahip parçaların üretimi mümkündür. Ayrıca üretilen parçaların mukavemet, sertlik ve aşınma dirençleri daha yüksektir. Tikso-kalıplama yönteminde çalışma sıcaklığının düşük olması nedeni ile parçada oluşabilecek çekme ve çatlak hataları elimine

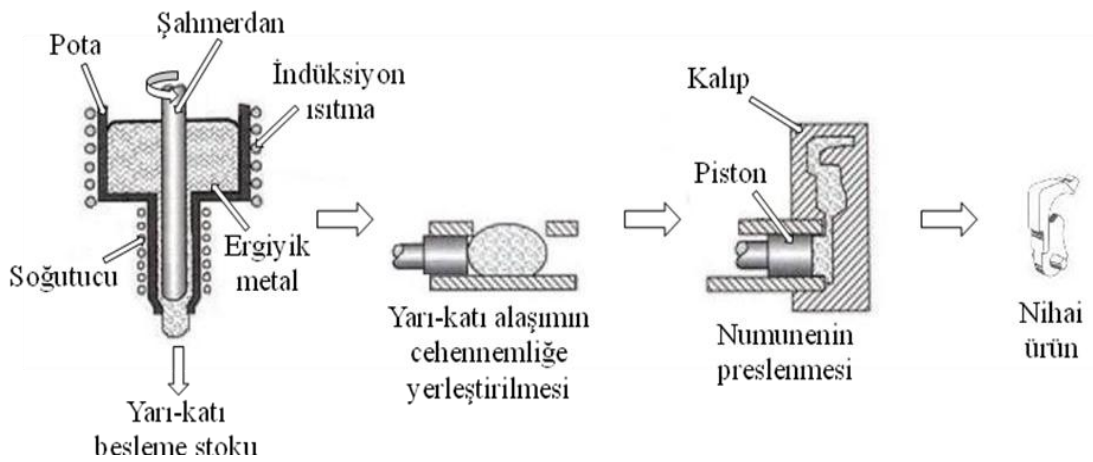
edilirken kalıp aşınması da minimum seviyede olmaktadır [Aktar, 2004, Kang ve ark., 1999].

4.1. Reo-şekillendirme Yöntemleri

4.1.1. Reo-döküm

Katılaşma sırasında ergiyik haldeki alaşımın karıştırılarak küresel mikroyapıya sahip yarı-katının elde edilmesi ve takiben yarı-katı malzemenin basınçlı döküm makinesinde presleme işlemine reo-döküm denilmektedir. Reo-döküm, YKMŞ araştırmalarının odak noktası olmasına rağmen araştırmaların başlangıcında ticari olarak yaygınlaşacağı düşünülmemiştir [Atkinson ve ark., 2002].

Şekil 4.6’da reo-döküm ile parça üretimi şematik olarak gösterilmektedir. Bu yöntemde, ergiyik metalin katılaşması sırasında kullanılan mekanik karıştırma gibi bir yöntem ile dendritik olmayan mikroyapıya sahip yarı-katı durumdaki ön malzeme üretilir. Bu yarı-katı durumdaki ön malzeme presin döküm haznesine (cehennemliğine) yerleştirilir ve uygun parametrelerde kalıba preslenerek şekillendirme işlemi yapılmış olur. Burada üretilen nihai ürün dendritik olmayan mikroyapıya sahiptir.



Şekil 4.6. Reo-döküm ile parça üretiminin şematik gösterimi [Flemings ve ark., 1976]

Reo-döküm yönteminde özel kütle ihtiyacı olmadığı için, ergiyik alaşımdan son şekle yakın parça üretilir. Dolayısıyla bu özelliği ile tikso-döküme göre, enerji ve maliyetten tasarruf edilmiş olunur. Reo-döküm yönteminde çalışılan alaşımda, katı oranı %50'den az olduğu için oluşan ilk kristallerin boyutu küçülür ve küresel bir hal alır [Aktar, 2004].

Reo-döküm için üretilen dendritik olmayan mikroyapıya sahip ön malzemeler, tikso-şekillendirme yöntemlerinde ön besleme stoku olarak kullanılmaktadır [Atkinson, 2005, Fan, 2002, Flemings, 1991, Kirkwood, 1994].

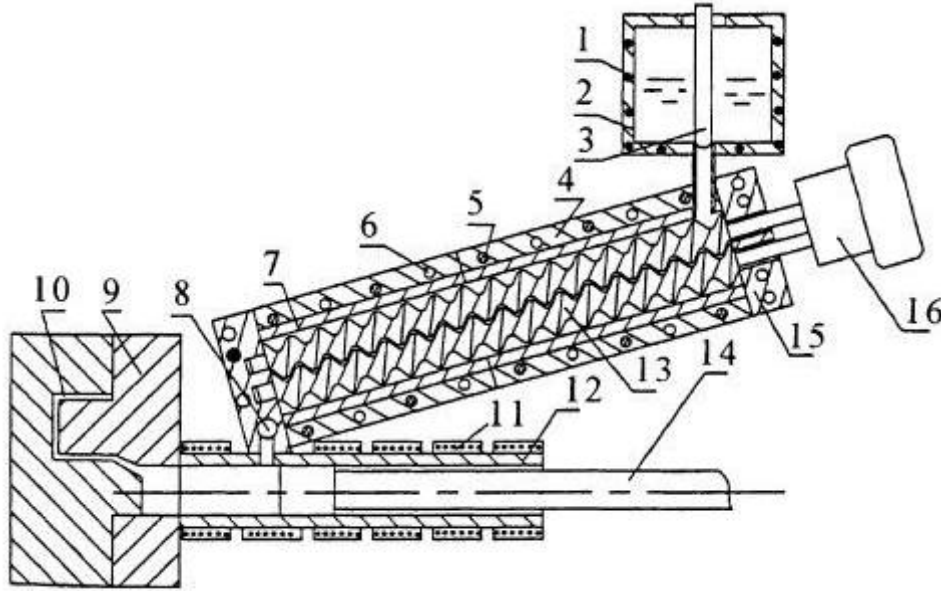
Reo-döküm yönteminin geliştirilmesinden sonraki yaklaşık 30 yıllık araştırmalar neticesinde YKMSŞ yöntemleri için dendritik mikroyapıdan küresel mikroyapıya dönüşüm mekanizması tam olarak anlaşılamamıştır [Figueredo, 2001].

4.1.2. Reo-kalıplama

Tikso-kalıplama yöntemine benzeyen bu yöntemde besleme stoku olarak ergiyik metal şarj edilmektedir [Fan, 2002]. Reo-kalıplama yöntemi, reo-döküm ile enjeksiyon kalıplama yöntemlerinin birleştirildiği son şekli veren bir YKMSŞ yöntemidir.

Genellikle magnezyum alaşımlarının şekillendirilmesinde kullanılan reo-kalıplama yöntemi ile, ötektik tarafından kuşatılmış ve düzenli bir şekilde dağılmış küresel ve ince taneli mikroyapıya sahip parçaların üretilbildiği belirtilmiştir [Fan, 2005]. Reo-kalıplama ünitesi esas olarak, bir ergiyik metal besleyici, çift vidalı ekstrüderi, itici silindir ve merkezi kontrol ünitesinden oluşmaktadır. Ergiyik metal besleyicisi, şekillendirilecek alaşımın istenilen sıcaklıkta ve hacimde kontrolünü sağlayabilecek şekilde tasarlanmalıdır. Çift vidalı ekstrüder tasarımında ise kendini süpürme ve yarı-katı durumdaki malzemenin pompalanmasına imkan vermelidir. Bu vidalar yüksek hızlı kaymaya ve yoğun türbülansa karşı dayanıklıdır. Çift vida etrafında eşleştirilmiş ısıtma ve soğutma elemanları ile ısıtma ve soğutma bölgeleri oluşturulmuştur. Ergitilmiş alaşım çift vidalı ekstrüdere dökülür ve hızlı soğutma ile önceden

belirlenen sıcaklığa düşürülerek ön malzemenin hacim miktarı ayarlanır. Ardından ön malzeme şekillendirme haznesine transfer edilerek piston aracılığı ile kalıba enjekte edilerek şekillendirilir [Figueredo, 2001].



- 1- Isıtıcı elemanlar, 2- Pota, 3- Durdurma çubuğu, 4- Gövde, 5- Isıtıcı elemanlar, 6- Soğutma kanalları, 7- Gövde astarı, 8- Transfer valfi, 9- Kalıp, 10- Kalıp boşluğu, 11- Isıtıcı elemanlar, 12- Vurma kolu, 13- Döner çift vida, 14- Piston, 15- Kapak, 16- Döndürme sistemi.

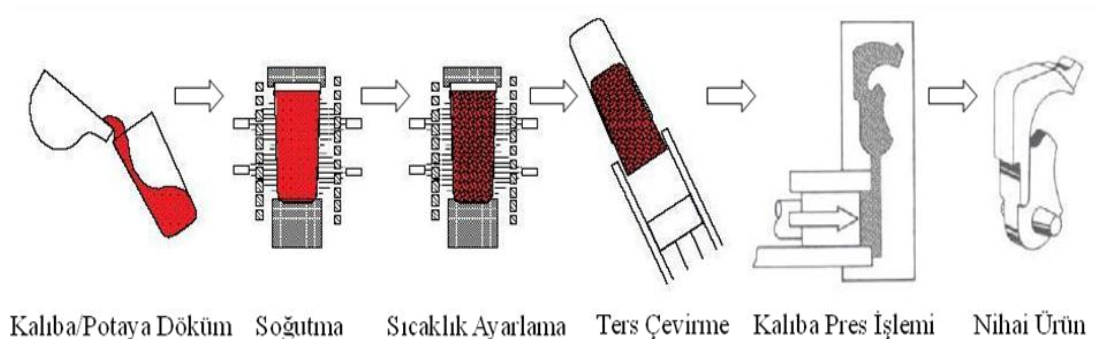
Şekil 4.7. Reo-kalıplama ünitesinin şematik gösterimi [Ji ve ark., 2001]

Son yıllarda, alüminyum alaşımlarının şekillendirilmesinde reo-kalıplama yöntemi başarıyla kullanılabilmektedir. Bu yöntem ile döküm alüminyum alaşımları şekillendirilebildiği gibi dövme alüminyum alaşımları da şekillendirilebilmektedir. Diğer yandan, bu yöntem ile ince taneli, metaller arası bileşiklerin üniform olarak dağıldığı ve gözenek miktarının % 0,5'ten daha az olduğu yapıların elde edilmesi mümkün olmaktadır [Fan, 2005].

4.1.3. Yeni reo-döküm

Yeni reo-döküm yöntemi Japonya'da UBE firması tarafından geliştirilmiş olup UBE yöntemi olarak da bilinmektedir [Nafisi ve Ghomashchi, 2005]. Bu yöntem ile üretilen alüminyum ve magnezyum alaşımlı ön malzemeler Avrupa ve ABD'de ticari

olarak alıcı bulmaktadır. Şekil 4.8’de şematik olarak görüldüğü gibi, döküm işlemi likidüs sıcaklığının hemen üzerindeki sıcaklıklarda uygulanır. Bu ön malzeme üretim yönteminde yalıtılmış potalar ile tek vuruşluk ön malzemeler üretilmektedir. Dolayısıyla ön malzemenin karakteristiği pota işlem parametreleri ile değişebilir [Figueredo, 2001].



Şekil 4.8. Yeni reo-döküm yönteminin aşamalarının şematik gösterimi [Adachi ve ark., 1996]

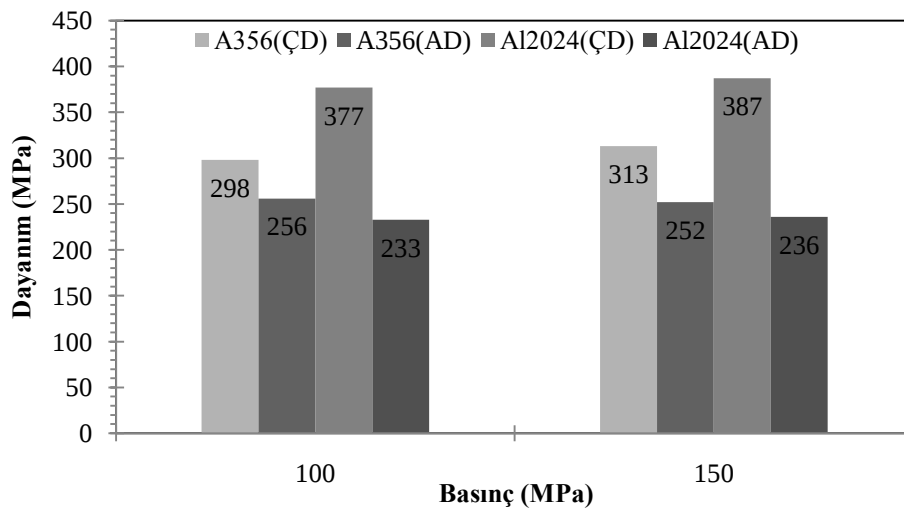
Yeni reo-döküm yöntemi aşağıdaki aşamaları içermektedir [Figueredo, 2001];

1. Ergiyik durumdaki alaşımın soğutucu kalıp ile teması sonucu birincil katı fazın ergiyikte oluşması,
2. Yalıtılmış potalarda veya soğutulmuş plakalarda çok miktarda çekirdek içeren yarı-katının oluşturulması,
3. Kontrollü soğuma ile tam küresel mikroyapıya sahip ön malzeme oluşumu ve ilave soğutma ile şekillendirme için gerekli katı miktarının ayarlanması,
4. Yalıtılmış pota ters çevrilerek yarı-katı durumdaki numune yüzeyinin oksitlenmeden korunması ve kalıba preslenerek şekillendirilmesi.

5. YARI-KATI METAL ŞEKİLLENDİRME YÖNTEMİNDE MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERİ ETKİLEYEN FAKTÖRLER

YKMŞ yöntemi ile üretilmiş parçalar katılaşmanın hızlı gerçekleşmesi ile yorulma, gerilme kuvveti ve çarpma etkisinde oldukça yüksek bir performans gösterdikleri tespit edilmiştir [Kouji, 1997].

Yüksek sıcaklık alaşımlarında YKMŞ yöntemi ile üretilmiş parçaların geleneksel döküm yöntemleri ile üretilmiş parçalardan daha nitelikli olduğu tespit edilmiştir [Kapranos ve ark., 1992]. Şekil 5.1’de YKMŞ yöntemi ile üretilmiş A356 ve Al2024 alaşımına sahip parçaların 100Mpa ve 150Mpa basınç altındaki akma (AD) ve çekme (ÇD) dayanımları verilmiştir.



Şekil 5.1. YKMŞ yöntemi ile üretilmiş parçaların basınç altındaki akma ve çekme dayanımları [Cho ve Kang, 2000]

YKMŞ yöntemi ile üretilmiş parçaların mikroyapı ve mekanik özellikleri etkileyen başlıca faktörler aşağıda verilmiştir;

- Malzemenin kimyasal bileşimi
- Sıcaklık
- Basınç
- Piston hızı
- Bekletme süreleri

- Kalıp malzemesinin kimyasal bileşimi

5.1. Malzemenin Kimyasal Bileşimi

YKMŞ yönteminin uygulanabilmesi için, alaşımların yarı-katı sıcaklık aralığına sahip olması gerekmektedir. Bu yüzden sabit ergime sıcaklığına sahip ötektik bileşime sahip alaşımlar ve saf metaller YKMŞ yöntemi ile şekillendirilemezler. YKMŞ yöntemi katılaşma aralığına sahip olan ötektik altı ve ötektik üstü alaşımlara uygulanabilir.

Katı veya sıvı fazda reaksiyon olması veya olmaması bileşimdeki dengeli (stabil) silisyum miktarının hesaplanmasına etki etmektedir. Yarı-katı malzemede, katı ve sıvı fazlardaki alüminyum ve silisyum bileşimi termodinamik bilgiler kullanılarak tespit edilebilir. Chul ve arkadaşları alüminyum-silisyum alaşımlarında yarı-katı durumda, katı ve sıvıda silisyum miktarının hesaplanmasını içeren deneysel çalışmalar yapmışlardır [Chul ve ark., 1999].

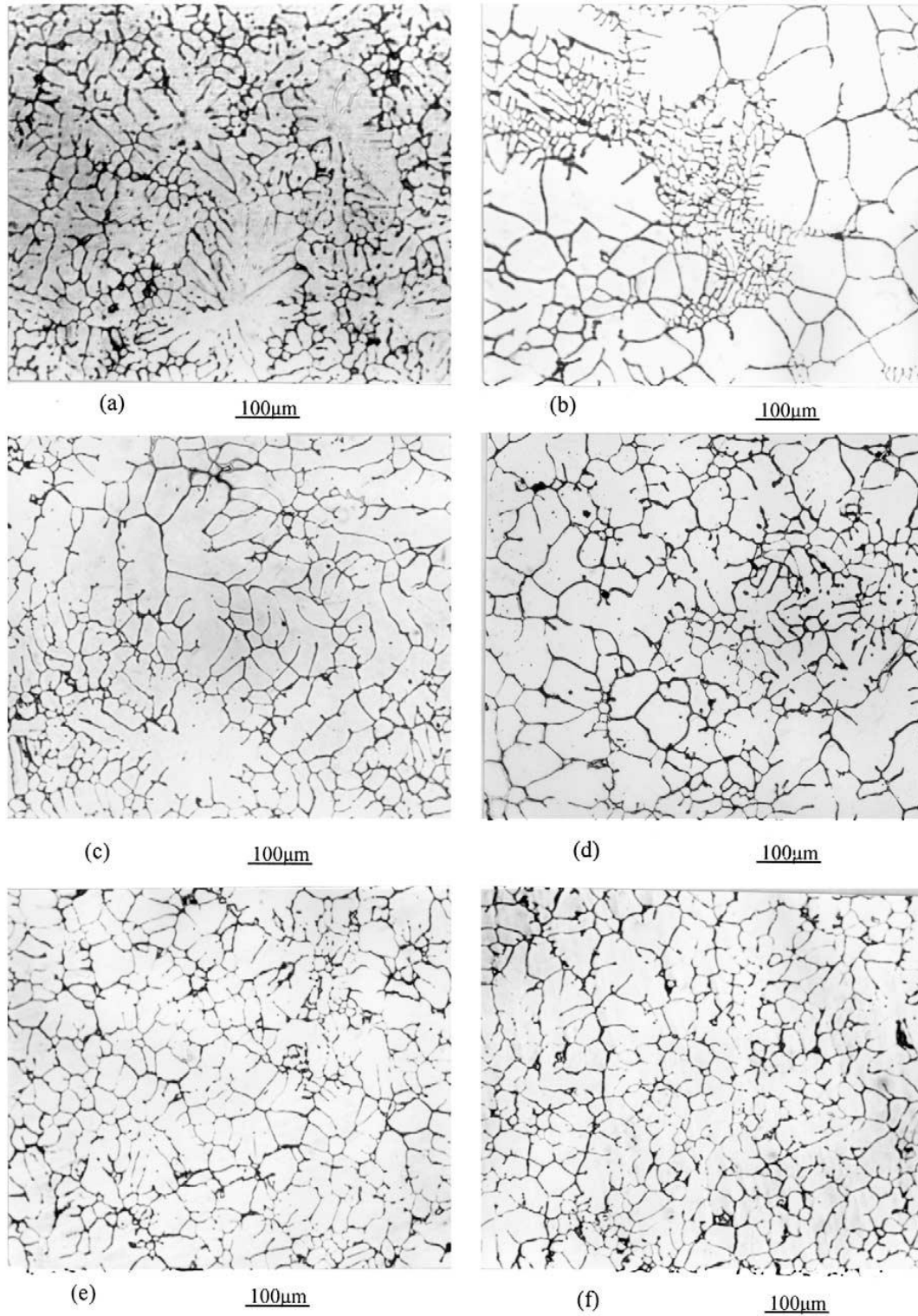
Yarı-katı haldeki malzemenin akışkanlığını arttırmak için bileşime ilave edilen %2 oranındaki magnezyum, Al-25Si-5Cu ve Al-30Si-5Cu gibi üçlü alaşımlarda silisyumun partiküllerinin incelmesine neden olur [Sukimoto, 1986].

YKMŞ kabiliyetini ve denge halindeki faz oranlarını, 7000 serisi Al-Zn-Mg-Cu alaşımlarında Zn/Mg ve Zn+Mg+Cu oranları etkilemektedir. Ağırlık olarak %2,5'den az Zn/Mg ve %7'den fazla Zn+Mg+Cu alaşımlarında optimum şartlar deneysel çalışmalar ile tespit edilmiştir. Diğer yandan YKMŞ kabiliyetini arttırmak için Zn+Mg+Cu oranının artırılması ve Zn/Mg oranının azaltılması gerekmektedir. Zn+Mg+Cu miktarı %7'den az olan alaşımlarda ise YKMŞ kabiliyetinin azaldığı tespit edilmiştir [Kapranos ve ark., 2003].

5.2. Sıcaklık

YKMŞ işleminin yapılacağı alaşıma göre kalıp sıcaklığına sınırlama getirilmelidir. Porozite ve mikroyapı hatalarının oluşumunu teşvik eden, en son katılaştıran bölgedeki sıvı faz oranının daha yüksek olması kalıp sıcaklığının düşük olmasından kaynaklanmaktadır. Örneğin, A356 alaşımının kalıp sıcaklığı 300°C iken, Al2024 alaşımının kalıp sıcaklığı 350°C ile sınırlandırılmalıdır. Ayrıca katı ve sıvı fazların dağılımının daha dengeli olabilmesi için, bu sıcaklıkların altında alaşımın katılaşma hızının artması sağlanmalıdır [Idegomi ve ark., 1998].

7075 dövme alüminyum alaşımının (Al-5.95 Zn-2.22 Mg-1.67 Cu-0.30 Mn-0.35 Fe-0.20 Si) ergime sıcaklığı 635°C olduğu halde, 638°C, 642°C ve 720°C sıcaklığa tekrar ısıtılması sonucu elde edilen mikroyapılar incelenmiştir. Alaşım 638°C sıcaklığa tekrar ısıtıldığında, homojen dağılmış tane yapısı oluşurken, tane sınırları ile merkez arasında değişikliğin olmadığı, 642°C sıcaklığa tekrar ısıtıldığında ise mikroyapıda daha az dendritik kolların oluştuğu, bununla birlikte tane sınırları ve merkezde küreselleşme eğiliminin olduğu, 720°C sıcaklığa tekrar ısıtma işleminde, tane sınırlarında iri dendritik kolların oluştuğu, merkeze doğru ilerledikçe bu yapının azaldığı tespit edilmiştir. 7075 dövme alüminyum alaşımının 638°C, 642°C ve 720°C sıcaklıklarındaki tane sınırı ve merkezinin mikroyapıları Resim 5.1'de görülmektedir [Dong ve Cui, 1996].



Resim 5.1. Farklı sıcaklıklarda, yeniden ısıtılan 7075 Al alaşımının merkez ve tane sınırlarındaki değişik mikroyapılar; a. 720°C sıcaklıkta tane sınırı; b. 720°C sıcaklıkta merkez; c. 642°C sıcaklıkta tane sınırı; d. 642°C sıcaklıkta merkez; e. 638°C sıcaklıkta tane sınırı; f. 638°C sıcaklıkta merkez [Dong ve Cui, 2002]

5.3. Basınç

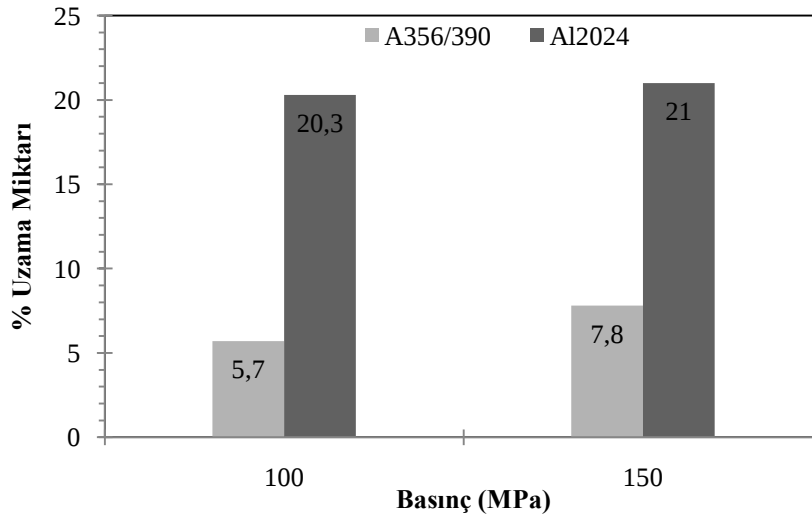
YKMŞ yöntemlerinde, mekanik özellikleri etkileyen en önemli faktörlerden biri de basınçtır. Alaşımın katı ve sıvı faz yoğunluklarını arttırmak için basıncın artırılması gerekmektedir. Bununla birlikte mikroyapı küreselleşme eğilimindedir. Mikroyapıdaki bu küreselleşme % uzama, akma ve kopma dayanımları gibi mekanik özelliklere de olumlu olarak etki etmektedir.

Yüksek basınç ile YKMŞ işlemi uygulanırken, parça ile kalıp arasında oluşan sürtünme neticesinde, alaşım içerisinde sıvı segregasyon miktarının arttığı tespit edilmiştir [Pinsky ve ark., 1984].

Basınç miktarındaki artış, alaşımın kalıp duvarı ile temasının artmasına neden olacaktır. Bununla birlikte ısı geçişinin artması neticesinde, katılaşma daha hızlı gerçekleşir. Çalışmalar sonucunda, yüksek basınç ile şekillendirilen alaşımların merkez bölgesinden alınan mikro vickers sertlik değerleri, sıvı fazın daha çok olduğu kenar bölgelerine oranla daha düşük olduğu tespit edilmiştir [Idegomi ve ark., 1998].

Cho ve Kang, A356 ve Al2024 alaşımlarının YKMŞ yöntemi ile üretilen numunelerde işlem sırasında uygulanan basıncın, mikroyapı ve mekanik özellikleri etkilediğini açıklamışlardır. İşlem sırasında uygulanan 100MPa ve 150MPa değerindeki yüksek basınçların, numunelerin mikroyapısında gözenek hatalarını azalttığı, yoğunluğu artırdığı, akma ve çekme dayanımlarını yükselttiği vurgulanmıştır [Cho ve Kang, 2000].

A356/390 ve Al2024 alaşımlarının YKMŞ ile üretimi sırasında, basınç miktarının kontrol altında tutulması ile sıvı segregasyonu ve katı oranının düzenlenebileceği anlaşılmıştır. Bu alaşımlara YKMŞ ile üretim sırasında uygulanan yüksek basınç, 100MPa'dan 150MPa'a arttırıldığında elde edilen numunelerin % uzama miktarındaki artış değerleri Şekil 5.2'da verilmiştir [Kang ve Jung, 2001].

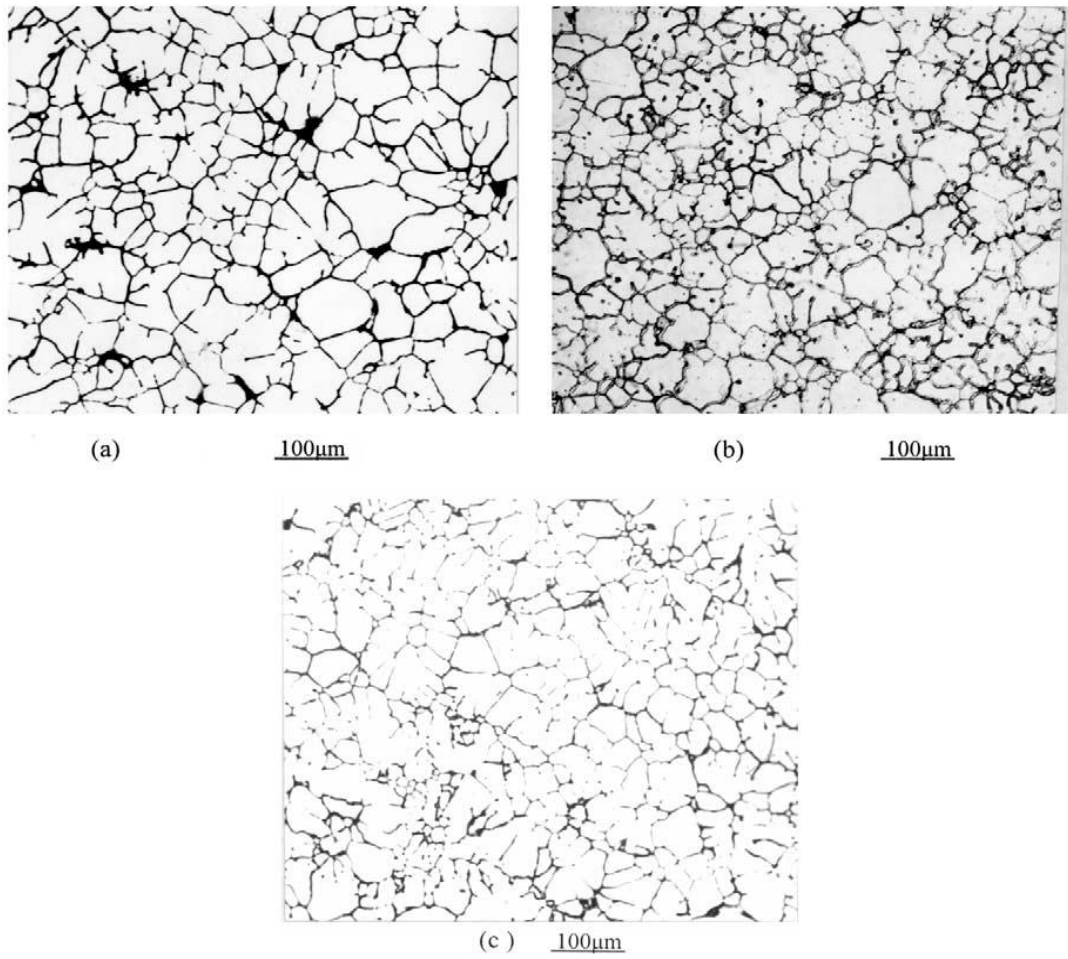


Şekil 5.2. A356/390 ve Al2024 alaşımlarında uygulanan basınca göre % uzama değişimi [Kang ve Jung, 2001]

5.4. Piston Hızı

Al-%4,5Cu alaşımından YKMŞ yöntemi ile parça üretilmesi esnasında, piston hızının azalması ile birlikte sıvı segregasyon miktarının arttığı açıklanmıştır [Yoshida ve ark., 1992].

YKMŞ işleminde, piston hızının mikroyapı homojenliği ve tanelerin küresellik derecesi üzerinde etkili olduğu Lee ve arkadaşları tarafından belirtilmiştir [Lee ve ark., 2004]. Diğer taraftan Dong ve arkadaşları, YKMŞ işleminde, piston hızının azalması ile alaşım mikroyapısının küreselleşme eğiliminde olduğunu ve bunun sonucunda da mekanik özelliklerin daha yüksek elde edilebileceği üzerinde durmuşlardır. Al7075 alaşımının sıkıştırma hızının azalması ile mikroyapıda oluşan farklılıklar Resim 5.2’de görülmektedir [Dong ve ark., 2002].



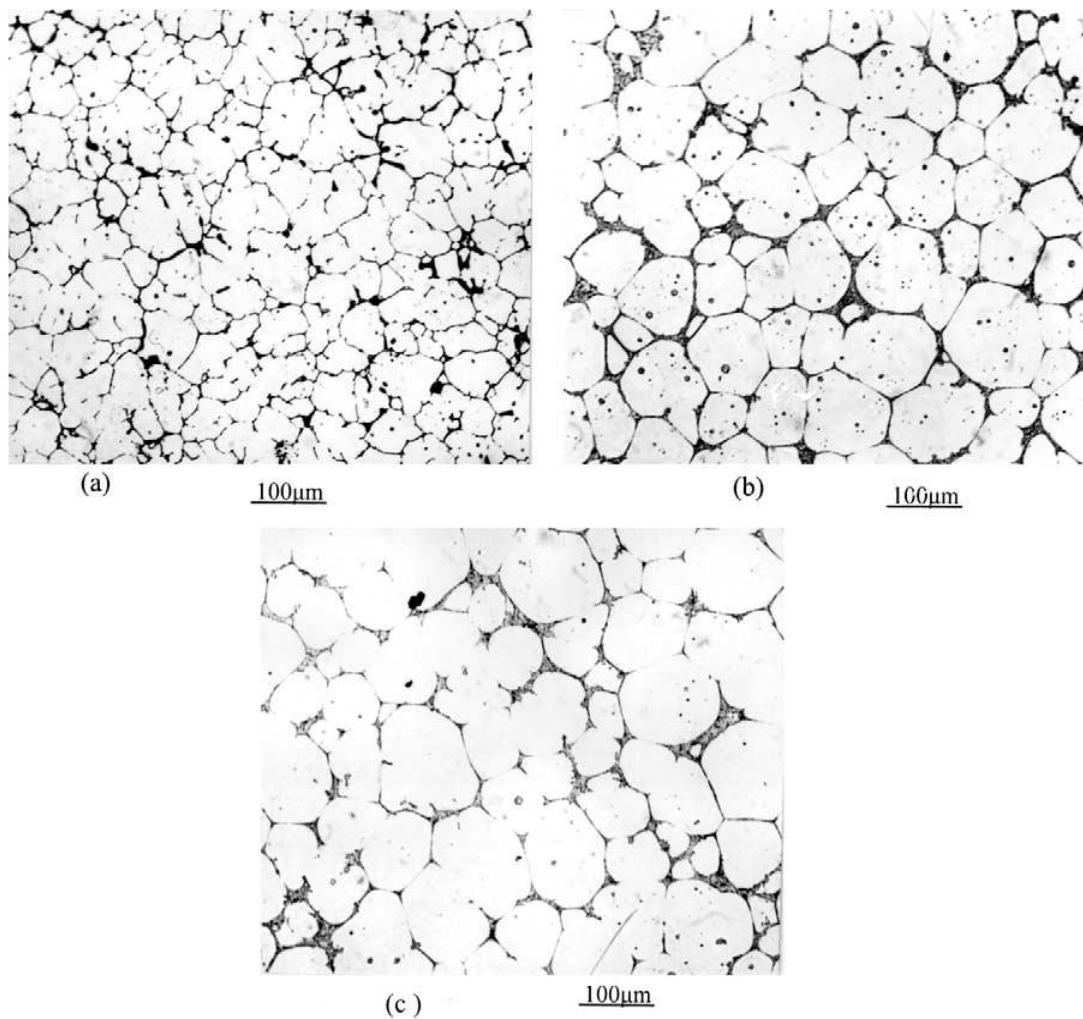
Resim 5.2. Al7075 alaşıma uygulanan farklı piston hızları sonucu oluşan mikroyapılar; a. 255 mm/dk., b. 170 mm/dk., ve c. 120 mm/dk. [Dong ve ark., 2002]

5.5. Bekletme Süreleri

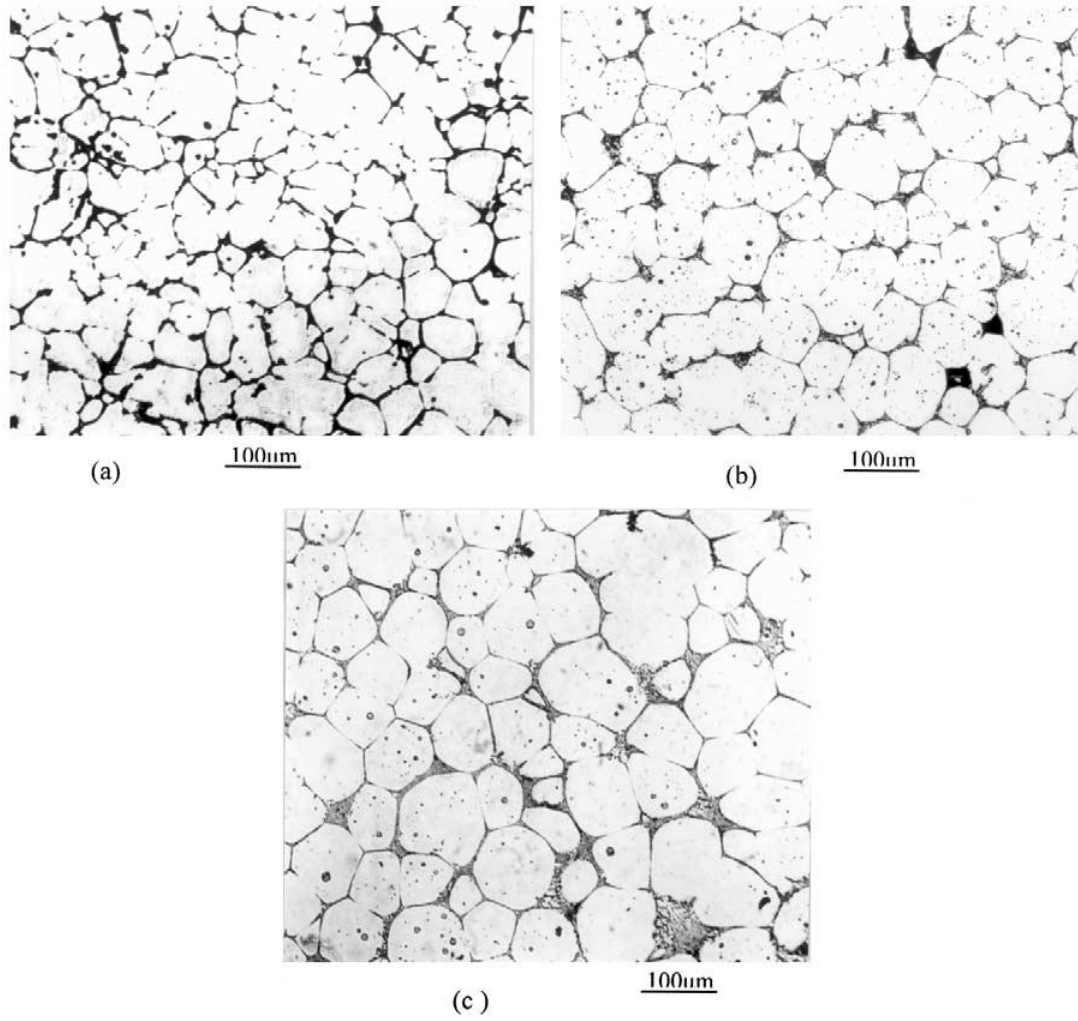
Jung, YKMS işlemi ile şekillendirilen alüminyum alaşımlarının indüksiyon ile ısıtılması esnasında farklı bekletme sürelerinin mikroyapıları üzerine etkilerini araştırdığı çalışmasında, ön malzemenin indüksiyon bobininde 2 dakika süre ile bekletilmesi küreselleşme eğilimini artırdığı, aynı sıcaklıkta bekletme süresinin azaltılması yetersiz küreselleşme sağladığı, bekletme süresinin arttırılması durumunda ise tanelerin irileşme eğiliminde olduğunu belirtmiştir [Jung, 2000].

Dong ve arkadaşları, YKMS işlemi ile şekillendirilen 7075 alüminyum alaşımı ön malzemesinin farklı sıcaklıklara tekrar ısıtılması ve belirlenen sıcaklıklarda farklı

bekletme sürelerinin mikroyapı üzerine etkilerini inceledikleri araştırmada, 580°C sıcaklıkta 15 ve 30 dakika bekletme sürelerinin tanelerde küreselleşme sağladığı, 60 dakika bekletme süresinin ise taneleri küreselleştirerek anormal şekilde büyüttüğünü tespit etmişlerdir (Resim 5.3). 600°C sıcaklıkta 5 dakika bekletme süresinin birincil taneleri küreselleştirdiği, 15 dakika bekletme süresinin ince küresel taneleri oluşturduğu ve anormal tane büyümesinin 30 dakika bekletme süresinde meydana geldiğini vurgulamışlardır (Resim 5.4) [Dong ve ark., 2002].



Resim 5.3. 580°C sıcaklığa yeniden ısıtılan 7075 Al alaşımında, farklı bekletme sürelerinde oluşan mikroyapılar; a. 15 dakika, b. 30 dakika, ve c. 60 dakika [Dong ve ark., 2002]

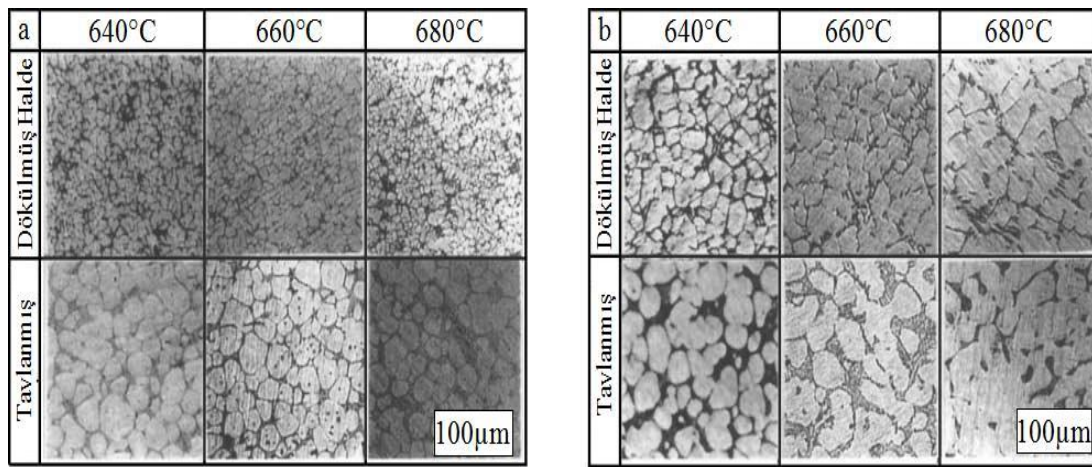


Resim 5.4. 600°C sıcaklığa yeniden ısıtılan 7075 Al alaşımında, farklı bekletme sürelerinde oluşan mikroyapılar; a. 5 dakika, b. 15 dakika ve c. 30 dakika [Dong ve ark., 2002]

5.6. Kalıp Malzemesinin Kimyasal Bileşimi

YKMŞ yöntemi ile üretimi yapılmak istenilen parçanın kalıp malzemesinin farklı olması, ısı transferi farklılığı ortaya çıkaracağından tane boyutunda da farklılaşma meydana getirecektir. Bunun neticesinde mikroyapı ve mekanik özellikler kalıp malzemesinin kimyasal bileşimine göre farklılık gösterecektir. 640°C, 660°C ve 680°C sıcaklığa kadar tekrar ısıtılmış ve kalıba enjekte edilmiş olan Al7075 alüminyum alaşımına sahip numunelerin ilk tane yapıları küresel şekildedir. Diğer taraftan, yalıtkan kalıp kullanıldığında ise 640°C sıcaklıkta ilk tane yapının küresel olduğu fakat 660°C ve 680°C sıcaklıklarda ilk tane şekillerinin küresel olmadığı

görülmüştür. Kalıpta yapılan şekillendirmede, döküm parçadan hızlı ısı transferi gerçekleştiği için mikroyapı ince tanelidir. Bu sayede numunenin mekanik özellikleri artmıştır. Yalıtkan kalıpta yapılan şekillendirmede ise, ısı transferinin yavaş olması nedeniyle tanelerin daha iri olduğu ve mekanik özelliklerinin nispeten düşük olduğu tespit edilmiştir. Resim 5.5’de kalıpta ve yalıtkan kalıpta şekillendirilen Al7075 alüminyum alaşımının dökülmüş halde ve tavlanmış haldeki mikroyapıları verilmiştir [Suzuki ve Haga, 2001].



Resim 5.5. 7075 alüminyum alaşımının YKMSŞ yöntemi ile dökülmüş halde ve tavlanmış haldeki mikroyapıları; a. kalıp ve b. yalıtkan kalıp [Suzuki ve Haga, 2001]

6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

6.1. Malzeme

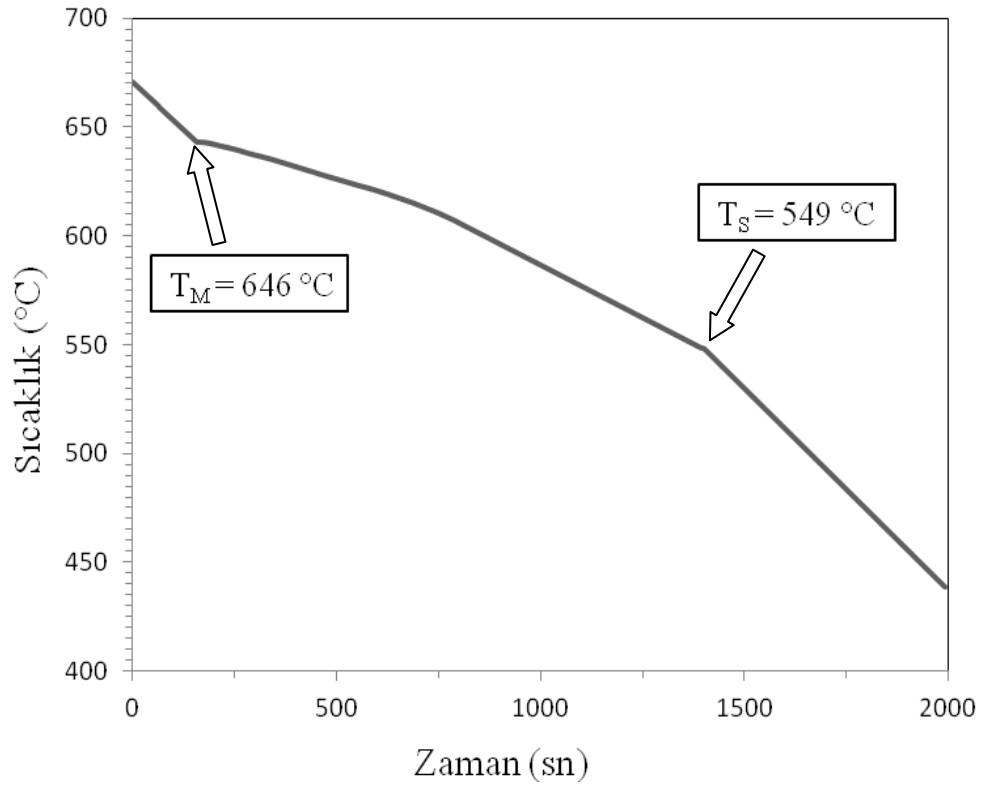
Deneysel çalışmalarda Altun Döküm Sanayi A.Ş.'den temin edilen ve kimyasal kompozisyonu Çizelge 6.1'de verilen Etial-61 (AA6351) alaşımı külçe halinde kullanılmıştır.

Çizelge 6.1. Etial-61 (AA6351) alaşımının kimyasal kompozisyonu (%Ağırlıkça)

Alaşım	Element (%)							
	Si	Mn	Mg	Fe	Zn	Cu	Ti	Al
ETİAL-61	1.360	0.630	0.780	0.220	0.011	0.080	0,117	96.802

6.2. Etial-61 Alaşımının Katılaşma (Solidüs) ve Sıvılaşma (Likidüs) Sıcaklıklarının Belirlenmesi

Etial-61 alaşımına ait katılaşma ve sıvılaşma sıcaklıklarını tespit etmek amacı ile alaşımın soğuma eğrisi çıkarılmış ve Diferansiyel Termal analizi (DTA) yapılmıştır. Soğuma eğrisi için, Etial-61 alaşımı elektrik direnci ile çalışan bir ısıtma ocağında grafit potada ısıtılarak ısıtma ocağı içerisinde 700°C sıcaklıktan itibaren katılaşmaya bırakılmıştır. Ergiyik haldeki alaşımda K tipi ısı çifti aracılığı ile sıcaklıklar ölçülmüş ve her saniye için bir veri alacak şekilde veriler Agilent marka 34970A model veri toplama cihazına kaydedilmiştir (Resim 6.1). Bu çalışma sonucu sıvılaşma sıcaklığı (likidüs) 646°C ve katılaşma sıcaklığı (solidüs) 549°C tespit edilmiştir (Şekil 6.1 ve Çizelge 6.2).



Şekil 6.1. Etial-61 alaşımının soğuma eğrisi

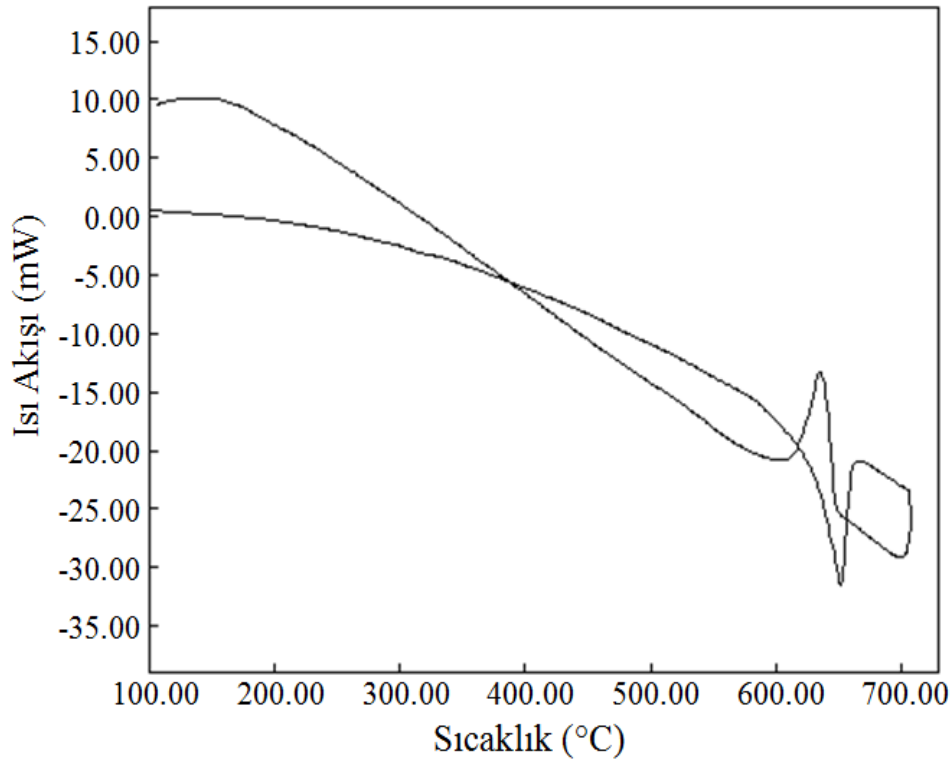


Resim 6.1. Veri toplama cihazı

Etial-61 alaşımının katılaşma (solidüs) ve sıvılaşma (likidüs) sıcaklıklarını ve sıcaklığa bağlı olarak değişen sıvı-katı oranlarının belirlenmesinde Perkin-Elmer marka Diferansiyel Termal Analiz (DTA) cihazı kullanılmıştır. Cihazın yazılımından faydalanılarak elde edilen ısı akışı-sıcaklık grafiği şekil 6.2’de gösterilmektedir. Bu alışma sonucunda sıvılaşma sıcaklığı 646°C ve katılaşma sıcaklığı 549°C olarak tespit edilmiştir (izelge 6.2). Elde edilen verilere göre Etial-61 alaşımının kimyasal kompozisyonunda herhangi bir modifikasyon değişikliği olmadan yeterli çalışma sıcaklık aralığına (97°C) sahip olabileceği düşünülmüştür.

Çizelge 6.2. Etial-61 alaşımının DTA analizi ile belirlenen katılaşma(solidüs) ve sıvılaşma(likidüs) sıcaklıkları

DTA lm şartları (5°C/dk)	Katılaşma (Solidüs) sıcaklığı (°C)	Sıvılaşma (Likidüs) sıcaklığı (°C)
Katılaşma	549	646



şekil 6.2. Etial-61 alaşımının DTA analizinde katılaşma ve ergime grafiği

6.3. Yarı-katı Şekillendirme İçin Uygun Sıcaklıkların Belirlenmesi

Etial-61 alaşımında, yarı-katı bölgede sıcaklığa bağlı olarak değişen sıvı ve katı oranlarının belirlenmesinde DTA eğrisinden faydalanılarak “kısmi alan” yöntemi kullanılmıştır [Tzimas ve Zavaliangos, 2000]. Bu yöntemde DTA eğrisinde pik sıcaklığa (T_L) kadar olan alanın toplamı, toplam sıvı oranına karşılık geldiği kabul edilmektedir. Buna göre istenilen bir sıcaklığa (T) karşılık gelen sıvı oranı (f_L), o sıcaklığın altında kalan alanın $A(T_i)$, toplam alana $A(T)$ bölünmesiyle bulunabilmektedir (Eş. 6.1). Buna göre,

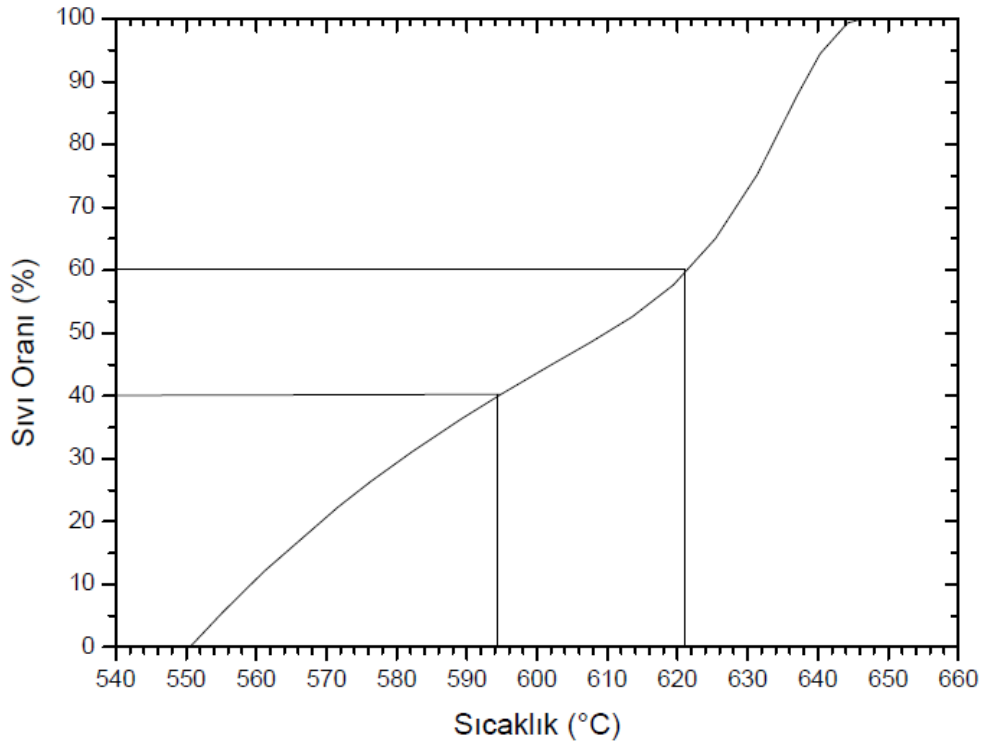
$$f_L(T) = \frac{A(T_i)}{A(T)} \quad (6.1)$$

eşitliği istenilen sıcaklığa (T) ait sıvı oranını vermektedir.

Yarı-katı reo-döküm işlemleri genellikle %30-60 sıvı oranına sahip sıcaklıklarda gerçekleştirilmektedir. %40-60 arasındaki sıvı oranı reo-döküm ile şekillendirme yapabilmek için gereklidir.

Kısmi alan yöntemi kullanılarak hesaplanan sıcaklık-yüzde sıvı oranları Şekil 6.3'te verilmiştir. Sıvı oranın doğru olarak tespit edilmesi reo-döküm işlemleri için oldukça önemlidir.

%40 ve %60 sıvı oranını veren sıcaklıklar sırasıyla 594°C ile 622°C olarak belirlenmiştir. Reo-döküm ile şekillendirme işlemlerinde çalışma sıcaklık aralığı 28°C elde edilmiş ve kullanılmıştır.



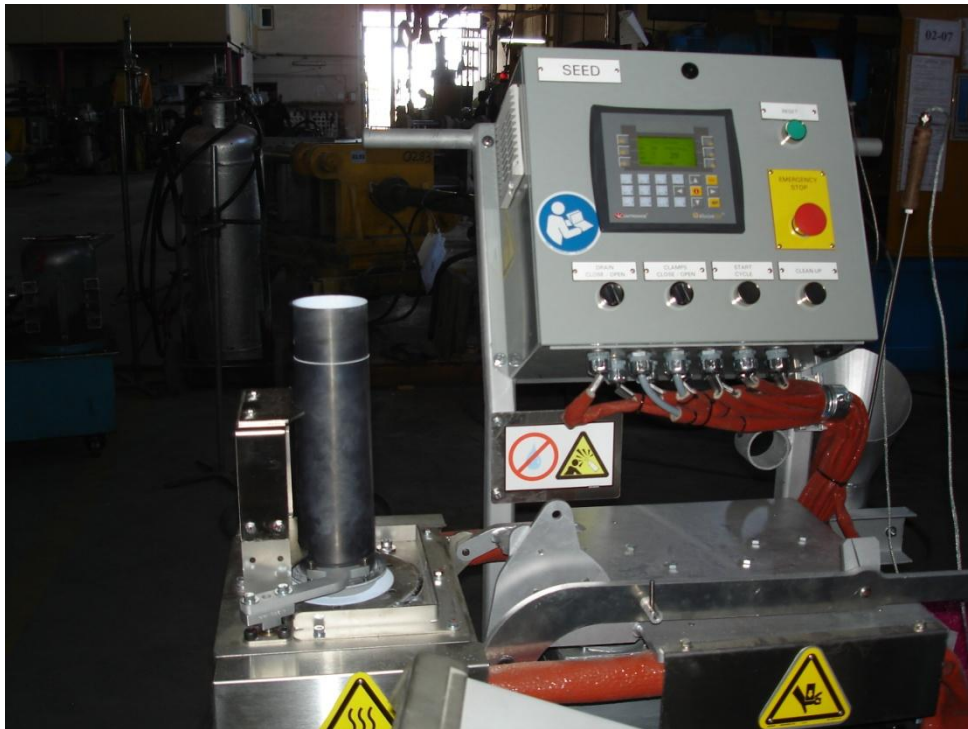
Şekil 6.3. Etial-61 alaşımının % sıvı oranı-sıcaklık grafiği

6.4. Ön Malzeme Üretimi

Etial-61 alaşımının reo yarı-katı dökümünde tiksotropik özelliğe sahip yarı-katı malzemelerin üretilmesi için döndürmeli entalpi dengeleme (SEED) yöntemi seçilmiştir. Deneysel çalışmada, Etial-61 alaşımının ergitme işlemi elektrik direnci ile çalışan 100kg/saat kapasiteli ve sıcaklık kontrollü ergitme ocağında grafit potada yapılmıştır. Ergitme ocağında sıvı alaşımın sıcaklığı, 730°C sıcaklıkta argon gazı ile gaz giderme işleminden sonra 700°C sıcaklığa düşürülmüştür. Çizelge 6.3'de gösterildiği gibi 700°C sıcaklığa sahip yeterli miktarda sıvı alaşım poşebent ile potadan alınarak 665°C sıcaklıkta döndürmeli entalpi dengeleme ünitesi (Resim 6.2) üzerinde konumlandırılan potaya dökülmüştür. Sıvı alaşım döndürmeli entalpi dengeleme ünitesi üzerinde konumlandırılan potaya dökülür dökülmez pota SEED makinesi tarafından sabit hızda döndürme işlemine tabii tutulmuştur. Deneysel çalışmada sabit hızda ve Çizelge 6.3'de verilen döndürme süreleri kullanılarak yarı-katı ön malzeme üretilmiştir. Farklı döndürme süreleri kullanılarak elde edilen yarı-

katı malzeme, tiksotropik özellik bakımından son derece önemli olan optimum tane boyutu ve şekil faktörünün tespiti için potadan oda sıcaklığına sahip suya düşürülmüştür. Döndürmeli entalpi dengeleme ünitesinde kullanılan döndürme süreleri, Şekil 6.3’de verilen % sıvı oranı-sıcaklık grafiğine göre Etial-61 alaşımının %40-60 sıvı-katı oranlarına tekabül eden 594°C ile 622°C sıcaklıkları aralığı dikkate alınmıştır. Ön malzeme hazırlama sıcaklık çalışma aralığı 28°C’dir.

Etial-61 alaşımının basınçlı döküm makinesinde şekillendirmek üzere yarı-katı ön malzeme hazırlığı yukarıda verilen yöntem ile yapılmıştır. Ancak, 6-11 numaralı yarı-katı numunelerin hazırlanmasında, 730°C sıcaklıkta argon gazı ile gaz giderme işleminden sonra, sıvıya %0,5 Ti/B ilave edilerek tane inceltme işlemi uygulanmıştır. Döndürmeli entalpi dengeleme ünitesinde döndürme işleminden sonra yarı-katı malzeme potadan direkt olarak basınçlı döküm makinesi üzerinde bulunan döküm haznesine aktarılmıştır.



Resim 6.2. Döndürmeli entalpi dengeleme ünitesi (SEED)



Resim 6.3. K tipi termokupl ile yapılan sıcaklık kontrolü

Çizelge 6.3’de Etial-61 alaşımının yarı-katı metal şekillendirme ünitesindeki ergitme ocağında bulunan ergiyik alaşımın sıcaklığı, potaya döküm sıcaklığı, potanın çevirme süresi, bekletme süresi, metalin katılaşma ortamı ve sıvı metalin tane inceltme metalürjik işlem parametreleri verilmiştir.

Çizelge 6.3. Etial-61 alaşımına döndürmeli entalpi dengeleme ünitesinde uygulanan parametreler

Numune no	Ergitme ocağındaki sıvı sıcaklığı (°C)	Döküm sıcaklığı (°C)	Döndürme + bekletme süresi (sn)	Katılaşma ortamı	Tane inceltme
1	700	665	İşlemsiz	Havada	Yok
2	700	665	80+5''	Suda	Yok
3	700	665	90+5''	Suda	Yok
4	700	665	100+5''	Suda	Yok
5	700	665	95+5''	Suda	Yok
6	700	665	İşlemsiz	Suda	Var
7	700	665	80+5''	Suda	Var
8	700	665	75+5''	Suda	Var
9	700	665	85+5''	Suda	Var
10	700	665	90+5''	Suda	Var
11	700	665	95+5''	Suda	Var

6.5. Etial-61 Alaşımının Yarı-katı Şekillendirilmesi

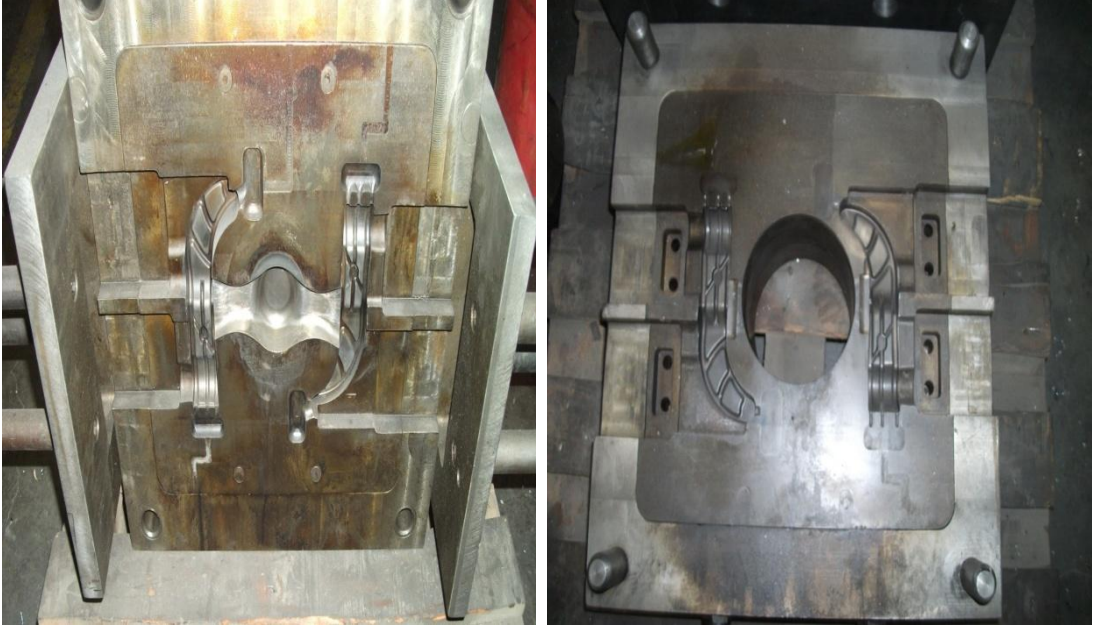
Etial-61 alaşımının yarı-katı şekillendirilmesinde Resim 6.4'te verilen ve Altun Döküm Sanayi A.Ş.'de kurulmuş olan yarı-katı metal şekillendirme ünitesi kullanılmıştır. Yarı-katı metal şekillendirme ünitesi esas olarak basınçlı döküm makinesi, ergitme ocağı ve döndürmeli entalpi dengeleme (SEED) ünitesi olmak üzere üç temel ünitelerden oluşmaktadır. Etial-61 alaşımının yarı-katı şekillendirilmesinde Çizelge 6.4'de verilen ön malzeme hazırlama ve presleme parametreleri kullanılmıştır. Döndürmeli entalpi dengeleme ünitesinde hazırlanan yarı-katı malzeme, potadan birkaç saniye içinde basınçlı döküm makinesinin döküm haznesine aktarılmış ve enjeksiyon döküm prosesinde olduğu gibi preslenmiştir. Etial-61 alaşımının yarı-katı şekillendirilmesinde Resim 6.5'de verilen sedye parçası kalıbı ve Etial-61 alaşımının yarı-katı dökümlerin mekanik özelliklerinin tespiti için Resim 6.6'da verilen çekme çubuğu kalıbı kullanılmıştır.



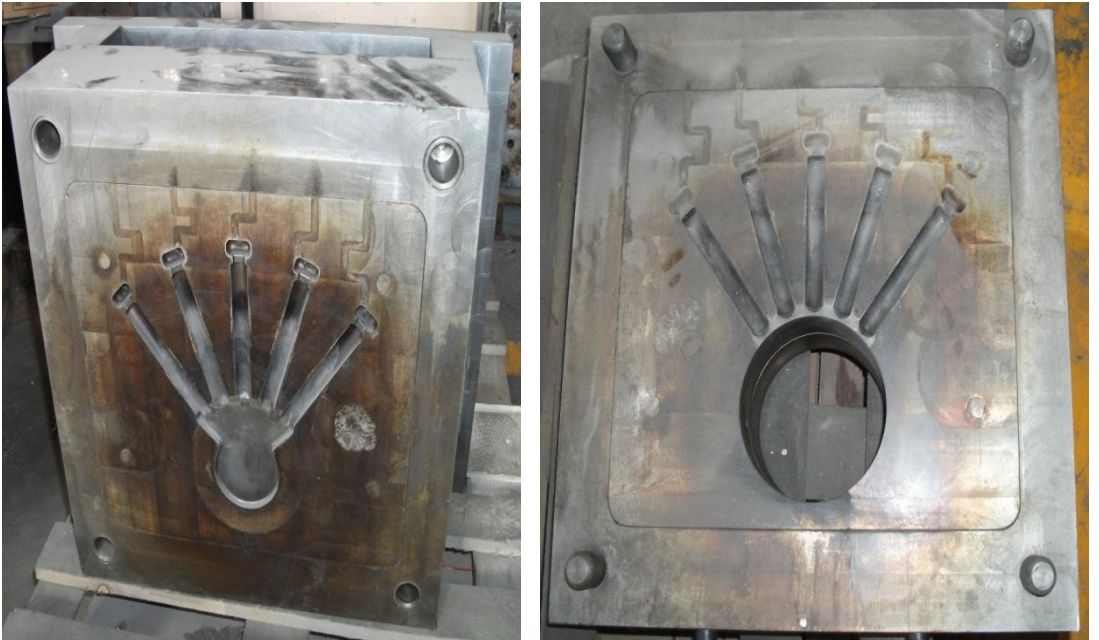
Resim 6.4. Yarı-katı metal şekillendirme ünitesi

Çizelge 6.4. Etial-61 alaşımına yarı-katı metal şekillendirme ünitesinde uygulanan parametreler

Num. no	Ergitme ocağı sic. (°C)	Döküm sic. (°C)	Çalkalama + bekletme süresi (sn)	Pota sic. (°C)	Kartuş sic. (°C)	Kalıp sic. (°C)	Ceh. sic. (°C)
12	690	665	90+5''	30	30	325	350
13	690	665	70+5''	30	30	325	350
14	690	665	65+5''	30	30	325	350
15	690	665	65+5''	30	30	325	350
16	690	665	65+5''	30	30	325	350
17	690	665	65+5''	30	30	325	350
18	710	665	70+5''	30	30	325	325
19	710	665	70+5''	30	30	325	325
20	710	665	70+5''	30	30	325	325
21	710	665	65+5''	30	30	325	325
22	710	665	65+5''	30	30	325	325
23	710	665	65+5''	30	30	325	325
24	710	665	95+5''	30	30	325	325



Resim 6.5. Etial-61 alaşımının yarı-katı dökümü için sedye parçası kalıbı



Resim 6.6. Etial-61 alaşımı numunelerinin mekanik özelliklerinin tespiti için çekme çubuğu kalıbı

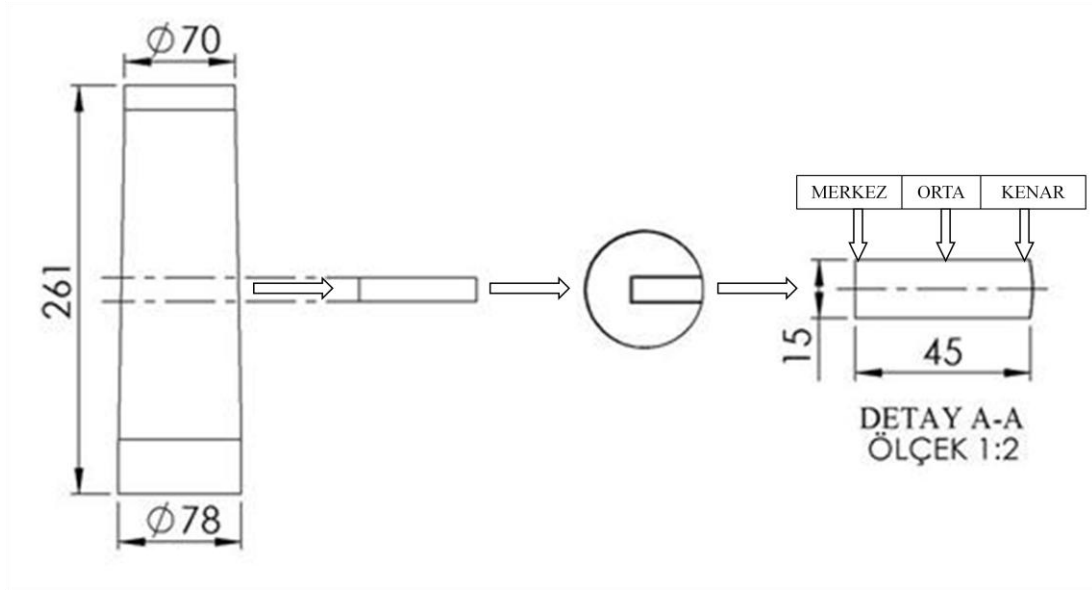
6.6. Metalografik Çalışmalar

6.6.1. Metalografik numune hazırlama

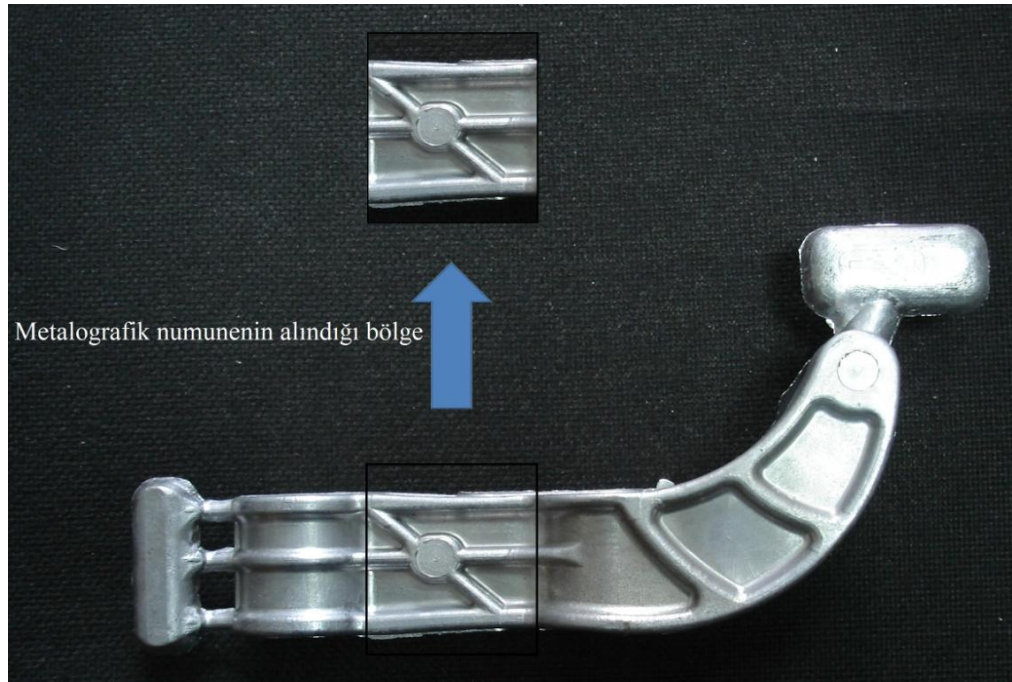
Döndürmeli entalpi dengeleme ünitesinde hazırlanan ve suya düşürülerek elde edilen silindirik ingotlar metalografik inceleme için Şekil 6.4’de gösterildiği gibi yatay olarak ortadan ikiye kesilmiş, sonra kesilen parçanın merkezi orta hattı boyunca kenar, orta ve merkez olmak üzere üç ayrı numune alınmıştır. Diğer yandan basınçlı döküm makinesi ile yarı-katı durumda preslenerek üretilen sedye parçasından metalografik numune alınışı Resim 6.7’de verilmiştir. Sedyeye parçası üzerinden metalografik numune alınması işleminde, makro boşluk vb. döküm hatalarının oluşma ihtimalinin en yüksek olduğu en kalın kesit dikkate alınmıştır. Metalografik numunelere, sırası ile 220, 400, 600, 800 ve 1200 numaralı su zımparaları ile zımparalama işleminden sonra 6µm, 3µm ve 1µm polikristal elmas pasta süspansiyonları kullanılarak parlatma işlemi uygulanmıştır. Nihai parlatma 0,5µm koloidal silika ile yapılmıştır. Dağlayıcı olarak Keller (190ml H₂O + 5ml HNO₃ + 3ml HCl + 2ml HF) çözeltisi kullanılmıştır. İngottan çıkarılan numunenin metalografik incelemesi özellikle kenar, orta ve merkez bölgelerinde yapılarak ingotun bütününi temsil etmesi sağlanmıştır.

6.6.2. Mikroyapı incelemesi

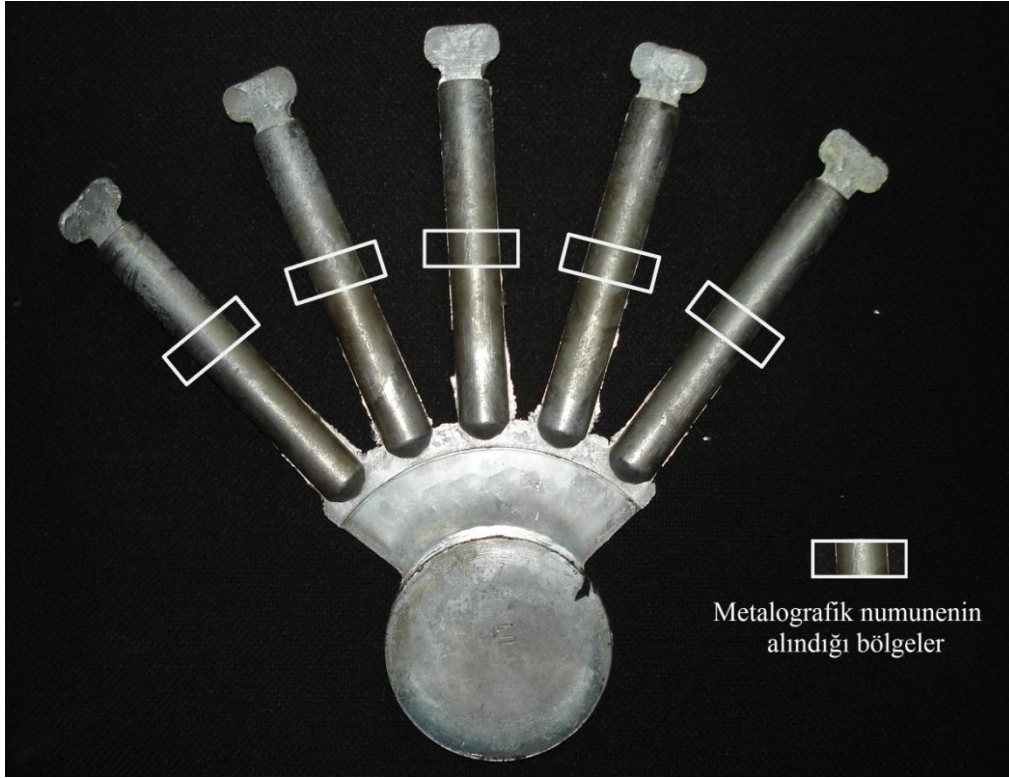
Döndürmeli entalpi dengeleme ünitesinde yarı-katı ön malzeme hazırlama sonrası suya düşürülerek elde edilen silindirik ingotlar ve döndürmeli entalpi dengeleme ünitesi ve basınçlı döküm makinesinin eş güdümlü kullanılması ile yarı-katı şekillendirilen ambulans parçasına ait metalografik numunelere detaylı olarak mikroyapı gözlemlenme ve nicel ölçümler uygulanmıştır. Mikroyapıların görüntülenmesinde Leica DFC 320 dijital kamera bağlantılı Leica DM 4000 M model optik mikroskop (Resim 6.9) kullanılmıştır. Deneysel çalışmada elde edilen her bir numunede, yarı-katı ön malzeme ve yarı-katı döküm üretim parametrelerinin tiksotropik davranış üzerine etkisi dikkatli bir şekilde incelenmiştir.



Şekil 6.4. Döndürmeli entalpi dengeleme ünitesinde tiksotropik özellik incelemesi için üretilen ve suya düşürülen ingotlardan numune çıkarılmasının şematik gösterimi



Resim 6.7. SEED yöntemi ile üretilen ve preslenen parçadan numune çıkarılmasının şematik gösterimi



Resim 6.8. SEED yöntemi ile üretilen ve preslenen çekme çubuğundan numune çıkarılmasının şematik gösterimi



Resim 6.9. Mikroyapıların görüntülenmesinde kullanılan optik mikroskop

Tiksotropik davranış için önemli rolü olan birincil α -Al fazının tane boyutu ve şekil faktörü ölçümleri her bir numune için Leica Q550 MW görüntü analiz yazılımı tercih edilmiştir. Tane boyutu ölçümlerinde çizgisel kesişme yöntemi ve küresellik derecesinin tespiti için aşağıda verilen şekil faktörü eşitliği kullanılmıştır.

$$\text{Şekil Faktörü} = \frac{4\pi A}{P^2} \quad (6.2)$$

Burada, A ; ölçüm yapılan tanenin alanı, P ise tanenin çevre uzunluğudur. Şekil faktörü değerinin 1 olması tanenin tamamen küresel olduğunu gösterir.

Bir ingot ve döküm parça için ortalama tane boyutu ve şekil faktörü ölçümleri, metalografik numunelerinin her birinde on ayrı alandan ve her alandan 10 ölçüm olacak şekilde yapılmıştır.

6.7. Etial-61 Al-Mg-Si Alaşımından Reo Yarı-katı Şekillendirme Yöntemi İle Üretilen Dökümlerin Analizi

Etial-61 alaşımının yarı-katı şekillendirilmesinde, tezin “6.5. Etial-61 Alaşımının Yarı-katı Şekillendirilmesi” bölümünde ve Çizelge 6.4’de detayı verilen yöntemler ile üretilen dökümlerin analizi makro inceleme, metalografik gözlemleme, tane boyutu ve şekil faktörü ölçümleri ile gerçekleştirilmiştir.

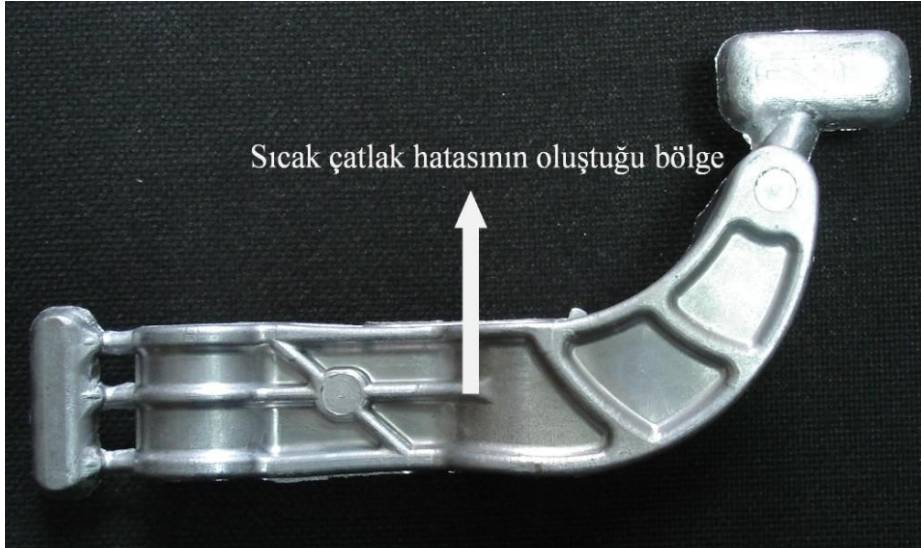
6.7.1. Makro inceleme

Etial-61 alüminyum alaşımının, Çizelge 6.4’de detayı verilen parametrelerin kullanılmasıyla önce döndürmeli entalpi dengeleme ünitesinde yarı-katı malzemenin hazırlanması ve sonra yarı-katı malzemenin basınçlı döküm makinesinde preslenmesiyle üretilen dökümlerin makro incelemesinde makro boşluklar ve çatlak oluşumu gözlemlenmiştir. Üretilen her bir döküm sedye parçasında makro boşluk oluşumu, makro boşluk olma ihtimali en yüksek bölge olan en kalın kesitten (Resim 6.10) numune çıkarılarak gerçekleştirilmiştir. Döküm parçadan çıkarılan numunenin

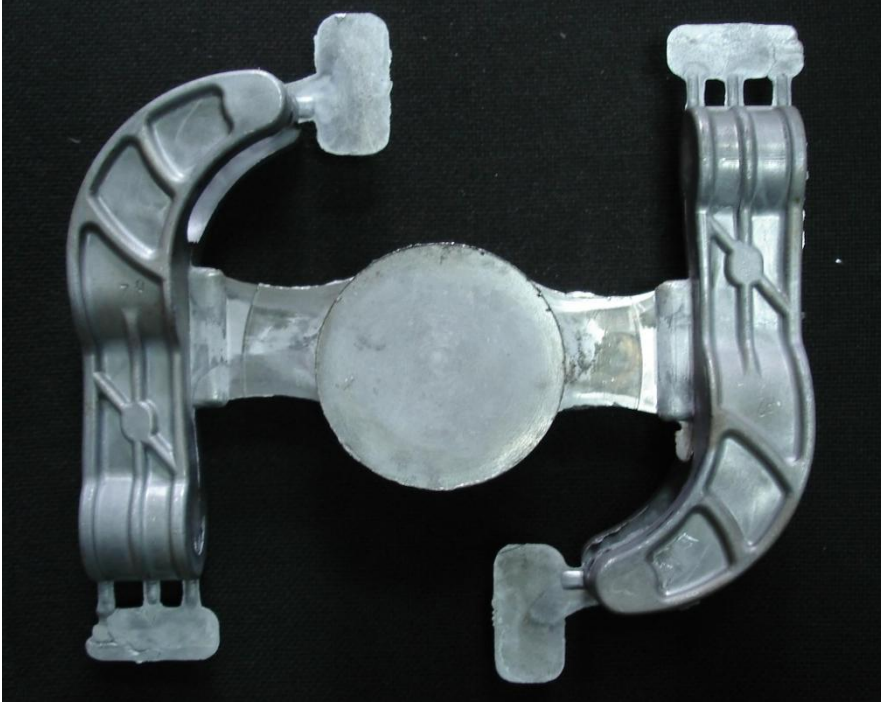
kesme yüzeyleri sırası ile 220, 400, 600, 800 ve 1200 numaralı su zımparaları ile zımparalama işleminden sonra çıplak gözle yapılmıştır. Döküm parçada çatlak oluşumunun incelenmesinde ise döküm parça yüzeyinin bütünü çıplak gözle dikkatli bir şekilde gözlemlenmiştir (Resim 6.11).



Resim 6.10. Reo yarı-katı döküm yöntemi ile üretilen sedye parçasında makroyapı



Resim 6.11. Sıcak çatlak hatasının olduğu bölge



Resim 6.12. SEED yöntemi ile reo yarı-katı üretilen döküm parça yolluğu ile birlikte

7. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

7.1. Etial-61 Alaşımının Yarı-katı Çalışma Sıcaklık Aralığı

Etial-61 alaşımında diferansiyel termal analiz (DTA) ve termal analiz yöntemi ile elde edilen katılma ve sıvılaşma sıcaklıkları sırasıyla 646°C ve 549°C sıcaklı (Şekil 6.1, 6.2 ve Çizelge 6.2). Katılma ve sıvılaşma sıcaklıkları arasında 97°C'lik bir katılma aralığı, diğer bir ifade ile yarı-katı bölge mevcuttur. Ancak, döndürmeli entalpi dengeleme ünitesinde elde edilen yarı-katı ön malzemenin potadan basınçlı döküm makinesi döküm haznesine aktarılabilmesi için fiziki konumunu koruması ve preslenmesi sırasında akıcı davranış göstermesi gerekir. Bir çok araştırmacının yapmış oldukları deneysel çalışmalarda, yarı-katı malzemenin %60-40 sıvı ve katı oranlarında yukarıda belirtilen özelliği sağladığı belirtilmiştir.

Bu amaçla, Etial-61 alaşımında, DTA eğrisinden faydalanılarak “kısmi alan” yöntemi ile yarı-katı bölgede sıcaklığa bağlı olarak değişen %40 ve %60 sıvı oranını veren sıcaklıklar sırasıyla 594°C ile 622°C olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak, reo-döküm ile şekillendirme işlemlerinde 594°C ile 622°C sıcaklıklar arasında kalan 28°C çalışma sıcaklık aralığı elde edilmiş ve kullanılmıştır (Şekil 6.3). Zoqui ve arkadaşlarının, %0,43 Si ve %0,47 Mg içeren AA6063 Al-Mg-Si alaşımının tikso şekillendirilmesi üzerine yaptıkları çalışmada, yarı-katı bölgede çalışma sıcaklık aralığını 23°C bulmuşlardır. Ancak Al-Mg-Si dövme alaşımlarında alaşım içinde bulunan alaşım elementlerinin miktarı sıvılaşma ve katılma sıcaklıklarını önemli ölçüde değiştirebilmektedir.

7.2. Döndürmeli Entalpi Dengeleme (SEED) Yöntemi İle Üretilen Ön Malzemelerin Mikroyapısı

7.2.1. Metalografik gözlemler

Deneysel çalışmada, “6.4 ön malzeme üretimi” bölümünde detayı verilen yöntemler ile elde edilen Etial-61 alaşımı ön malzemelerin mikroyapıları Resim 7.1-7.11’de

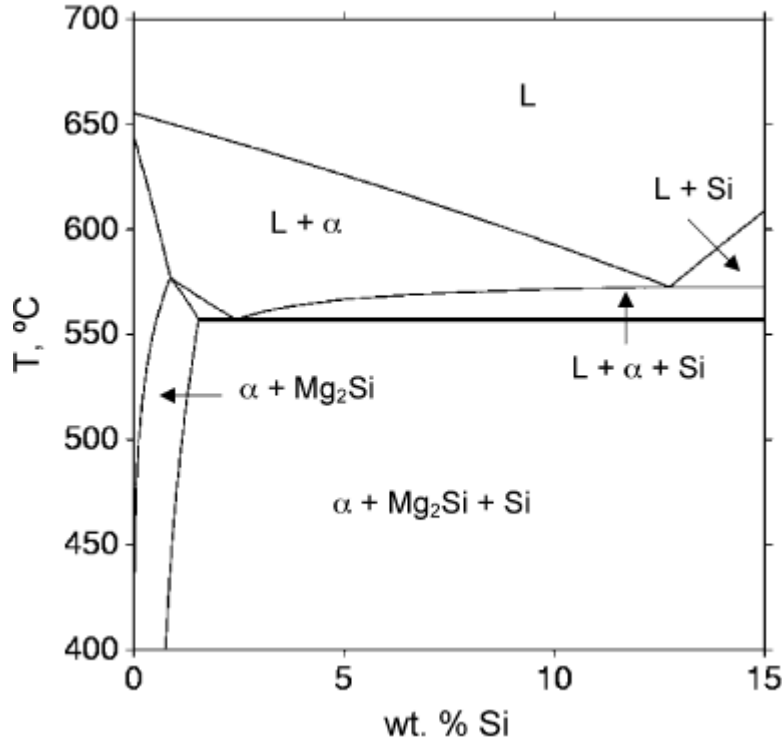
verilmiştir. Döndürmeli entalpi dengeleme ünitesinde yarı-katı elde etmek amacıyla kullanılan potaya 665°C sıcaklıkta dökülen ancak çevirme işlemine tabi tutulmayan ve pota içinde katılaştırılarak elde edilen “1” numaralı numunenin mikroyapısı, Şekil 7.1 ve Resim.7.1’de görüldüğü üzere birincil α -Al+Mg₂Si+Si ötektiğine (quasy-binary alloy) benzer bir yapı meydana gelmiştir. Birincil α -Al, Mg ve Si’un içinde katı eriyik şeklinde çözündüğü fazdır. Birincil α -Al hücreleri (taneleri) eşeksenel şeklinde oluşurken Mg₂Si ve Si partikülleri ötektik miktarının düşük olmasından dolayı birincil α -Al hücre sınırlarında teşekkül etmiştir. İlave olarak, tane sınırlarında Al, Si, Mn ve Fe elementlerinin meydana getirdiği metaller arası bileşiklerin de mevcut olabileceği düşünülmektedir [Cabibbo, 2005].

Döndürmeli entalpi dengeleme ünitesinde, sabit döndürme hızında 80, 90, 95 ve 100 sn döndürme süresi ile elde edilen 2-5 numaralı numunelerde, birincil α -Al tanelerinin boyutu döndürme işlemi uygulanmayan “1” numaralı numuneye göre önemli derecede düşmekle birlikte tanelerin geometrik şekli kısmen küreselleşme eğilimindedir (Resim 7.2-7.5). Fakat, α -Al tanelerinin küreselleşme eğilimi döndürme süresinden etkilenmemiştir. Etial-61 alaşımının döndürmeli entalpi dengeleme ünitesinde kullanılan potada katılaştırılmasının, tane şekli bakımından homojen bir yapı ürettiği ingotların kenar, orta ve merkez bölgelerinden alınan metalografik numunelerin mikroyapılarından anlaşılmaktadır. Bu konuda detaylı bilgi tane boyutu ve şekil faktörü sonuçlarının değerlendirildiği bölümde verilecektir.

Etial-61 alaşımında, tane inceltme işleminin α -Al tane boyutu ve geometrik şekli üzerinde etkisini belirlemek amacıyla, %0,6 Ti/B (5/1) ilavesi ile tane inceltme, 85 sn potada bekletme ve suya düşürme işlemleri ile üretilen “6” numaralı numunede, Resim 7.6’da α -Al tanelerinin boyutunun “1” numaralı numuneye göre daha küçük olduğu gözlemlenmiştir. Küreselleşme eğiliminde ise önemli bir fark gözlemlenmemiştir.

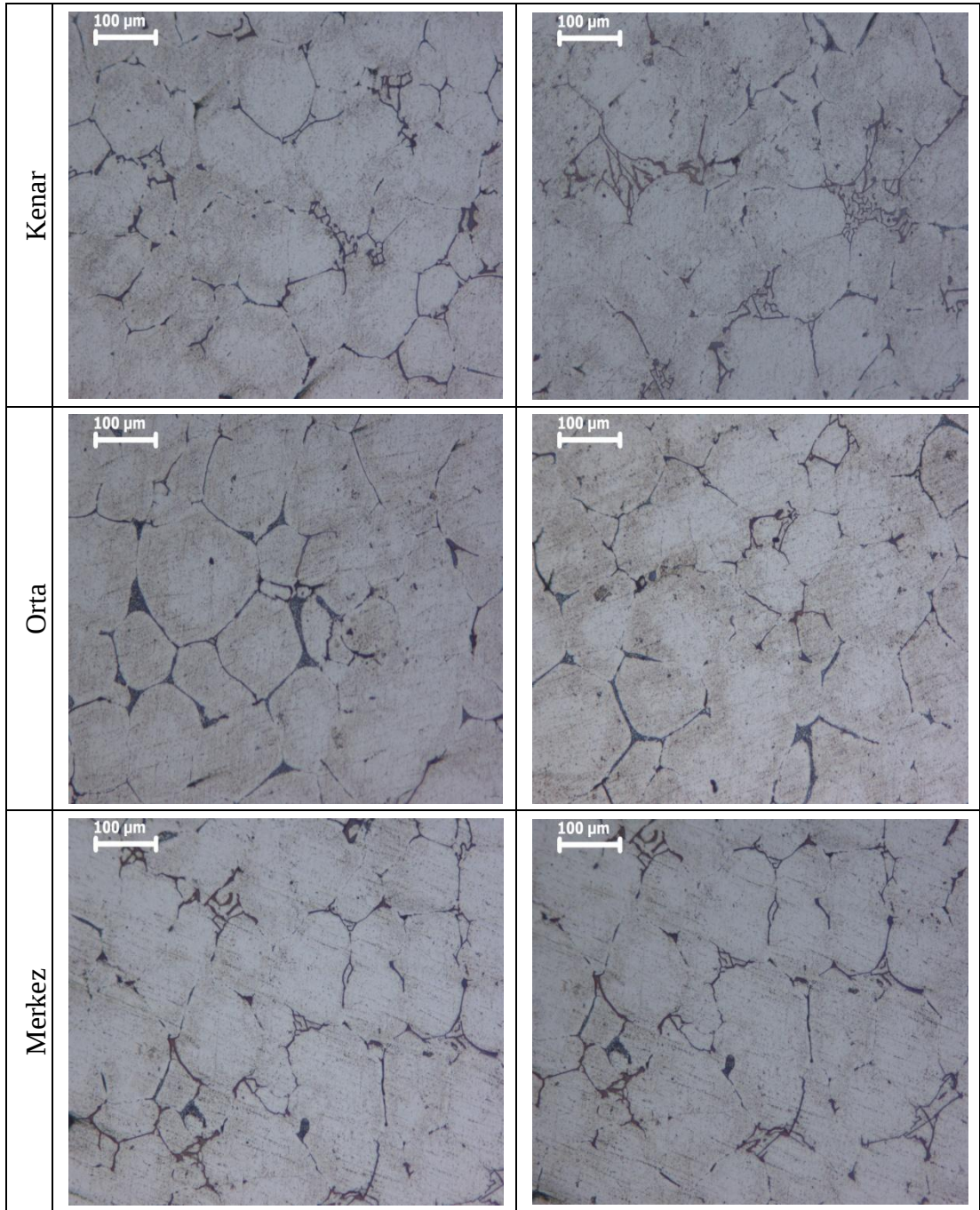
Tane inceltme, döndürmeli entalpi dengeleme ünitesinde, sabit döndürme hızında 75, 80, 85, 90 ve 95 sn döndürme süresini takiben suya düşürme işlemleri ile elde edilen “7-11” numaralı numunelerin birincil α -Al taneleri boyutunda ve küreselleşme

eğiliminde “1” ve “2-5” numaralı numunelere göre kısmen iyileşme olmuştur (Resim 7.7-7.11).



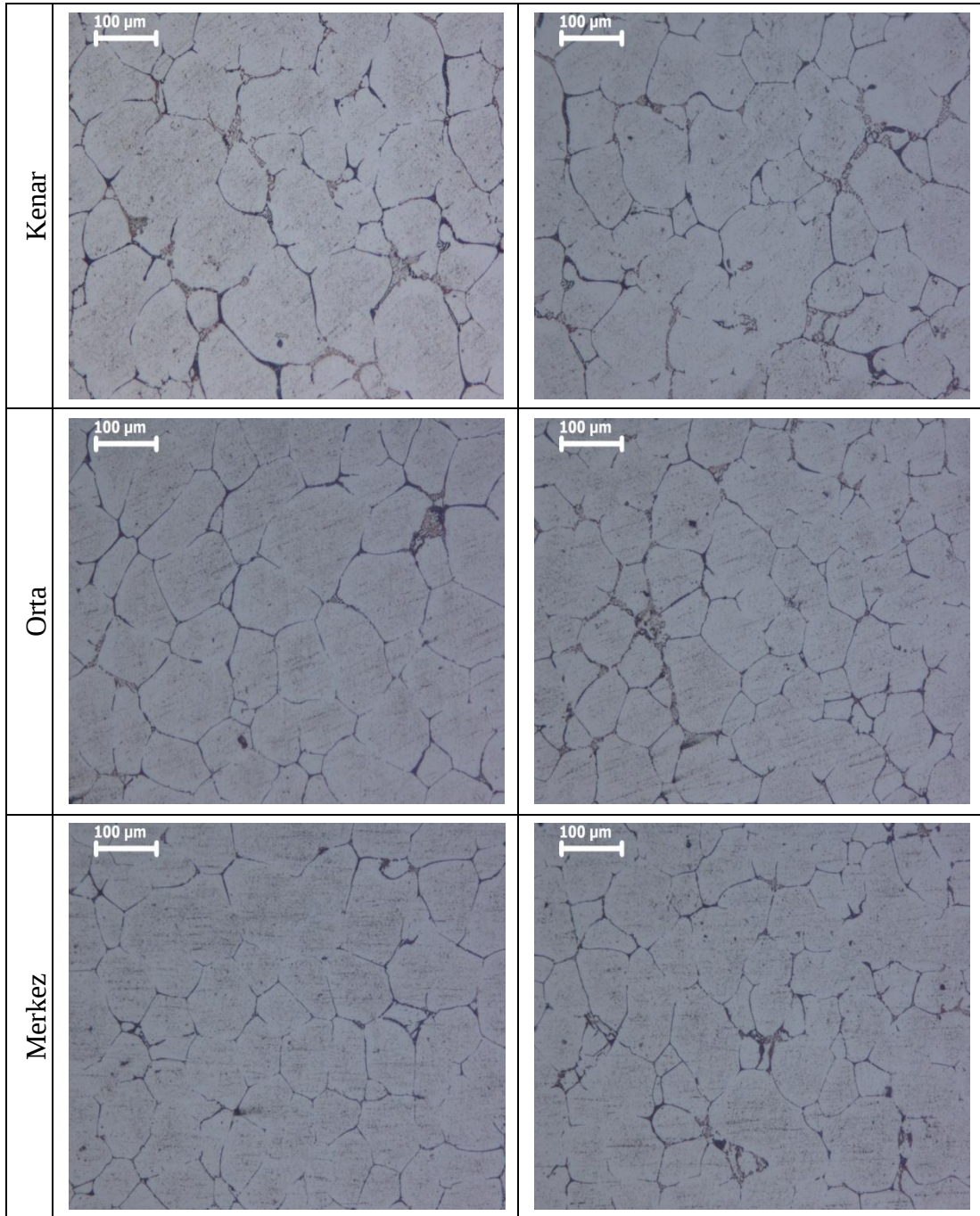
Şekil 7.1. %1 Mg ve %6 Si içeren Al-Mg-Si denge diyagramı [Patel ve ark., 2008]

“1” numaralı numunenin potaya 665°C sıcaklıkta dökülen, çevirme işlemine tabi tutulmayan ve havada soğutma ile katılaştırılarak elde edilen kenar, orta ve merkez mikroyapıları Resim 7.1’de gösterildiği gibidir.



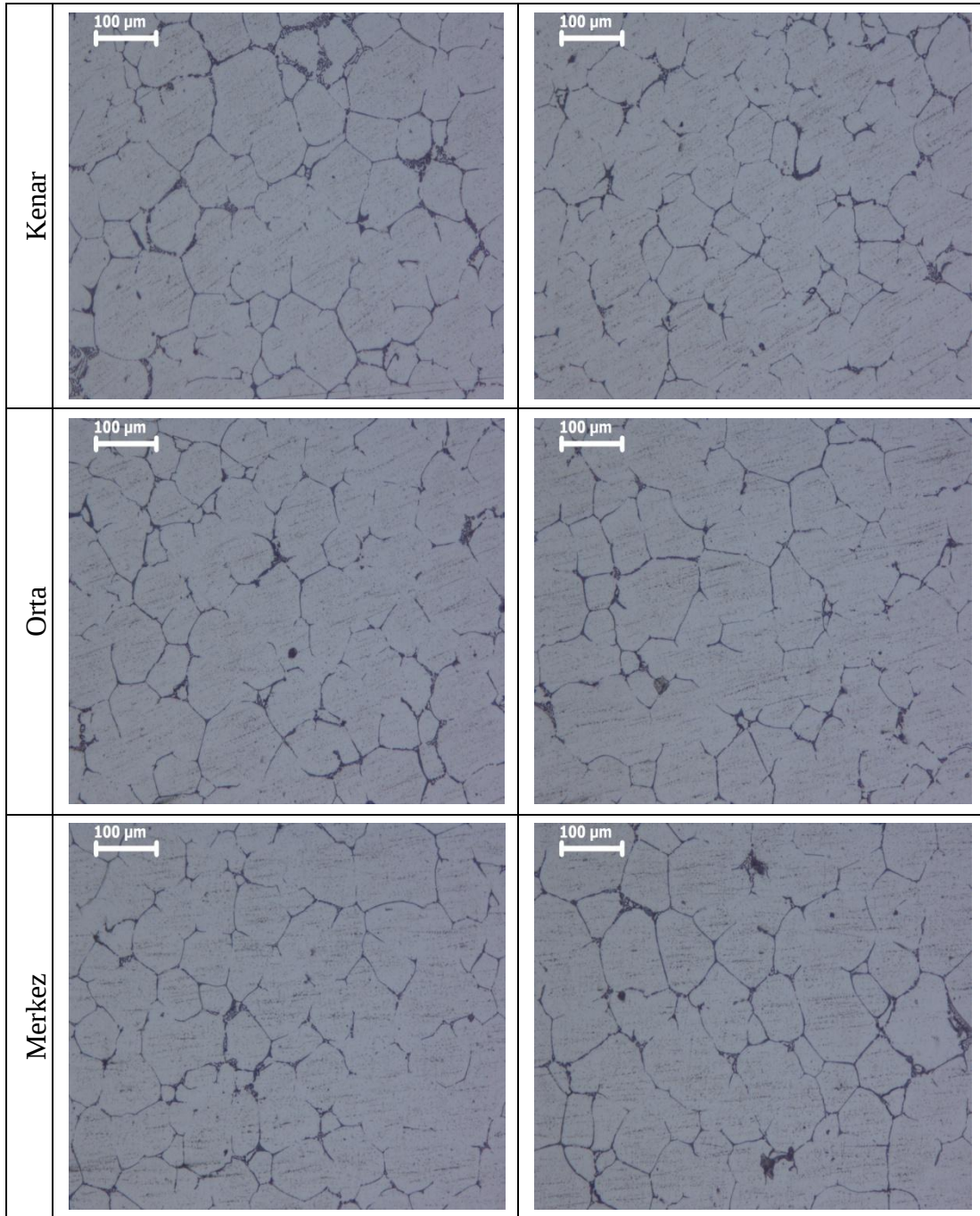
Resim 7.1. “1” numaralı numunenin kenar, orta ve merkez mikroyapıları

“2” numaralı numunenin potaya 665°C sıcaklıkta dökülerek, sabit döndürme hızında ve 80 + 5sn döndürme süresinde suda soğutma ile katılaştırılarak elde edilen kenar, orta ve merkez mikroyapıları Resim 7.2’de gösterildiği gibidir.



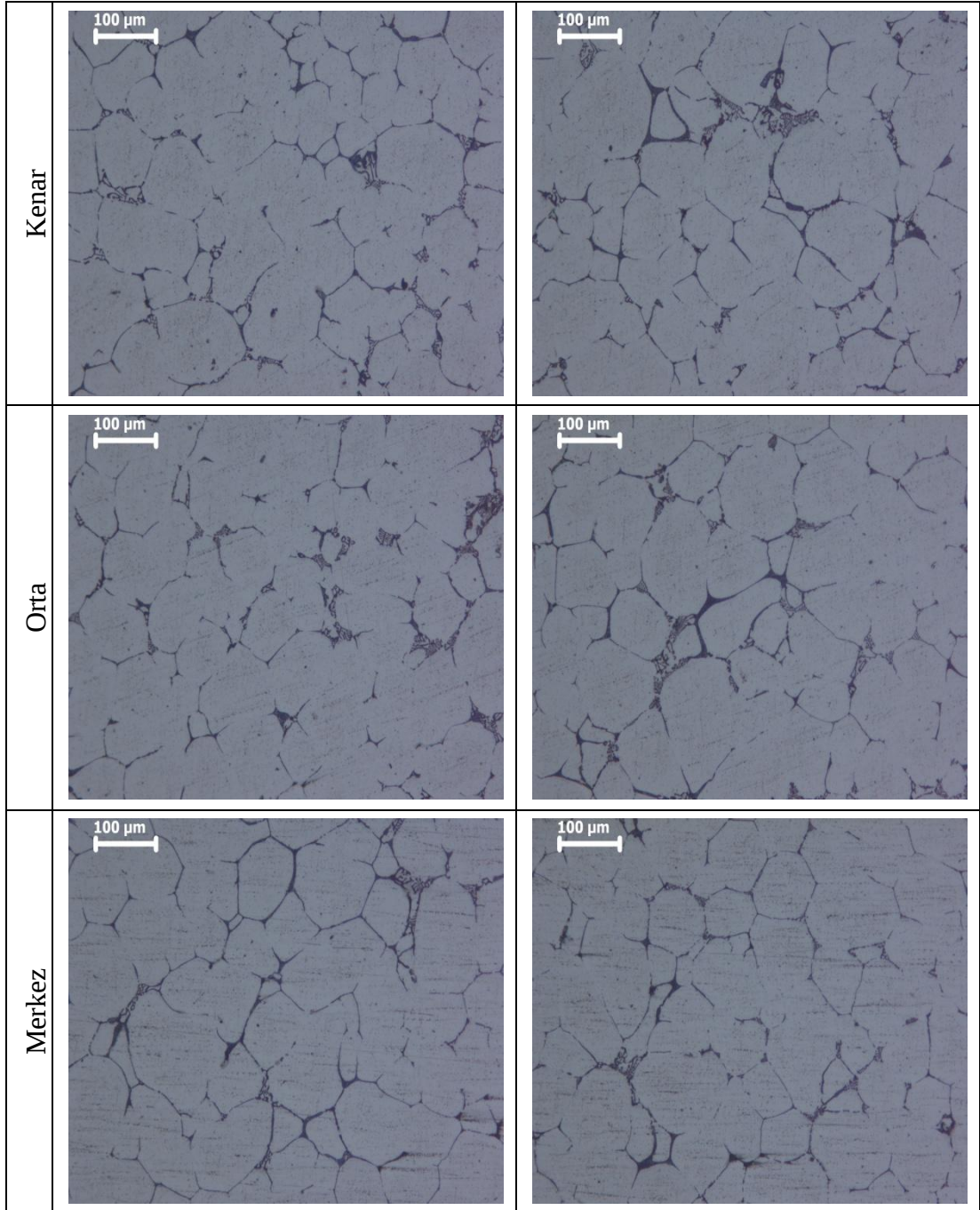
Resim 7.2. “2” numaralı numunenin kenar, orta ve merkez mikroyapıları

“3” numaralı numunenin potaya 665°C sıcaklıkta dökülerek, sabit döndürme hızında ve 90 + 5sn döndürme süresinde suda soğutma ile katılaştırılarak elde edilen kenar, orta ve merkez mikroyapıları Resim 7.3’de gösterildiği gibidir.



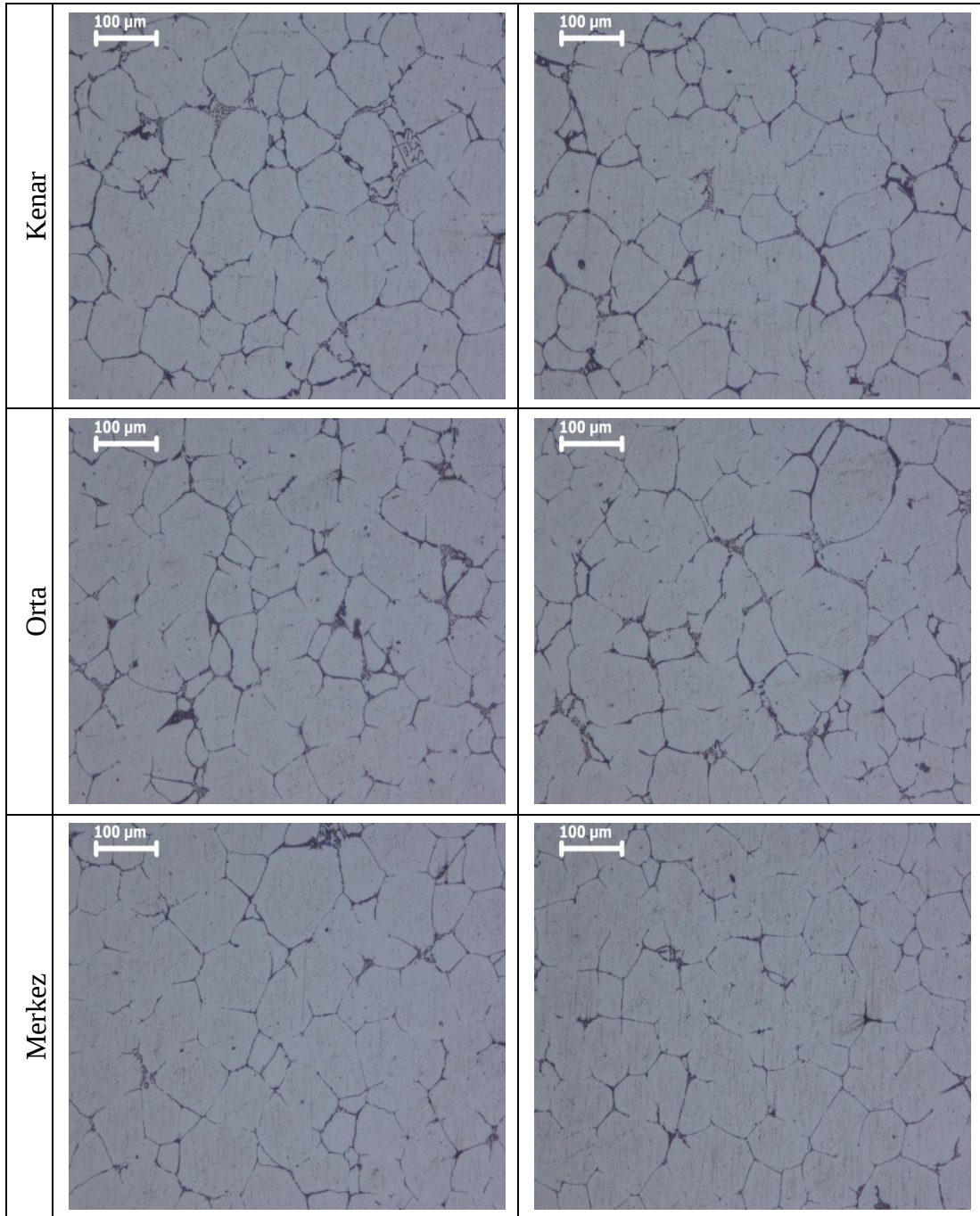
Resim 7.3. “3” numaralı numunenin kenar, orta ve merkez mikroyapıları

“4” numaralı numunenin potaya 665°C sıcaklıkta dökülerek, sabit döndürme hızında ve 100 + 5sn döndürme süresinde suda soğutma ile katılaştırılarak elde edilen kenar, orta ve merkez mikroyapıları Resim 7.4’de gösterildiği gibidir.



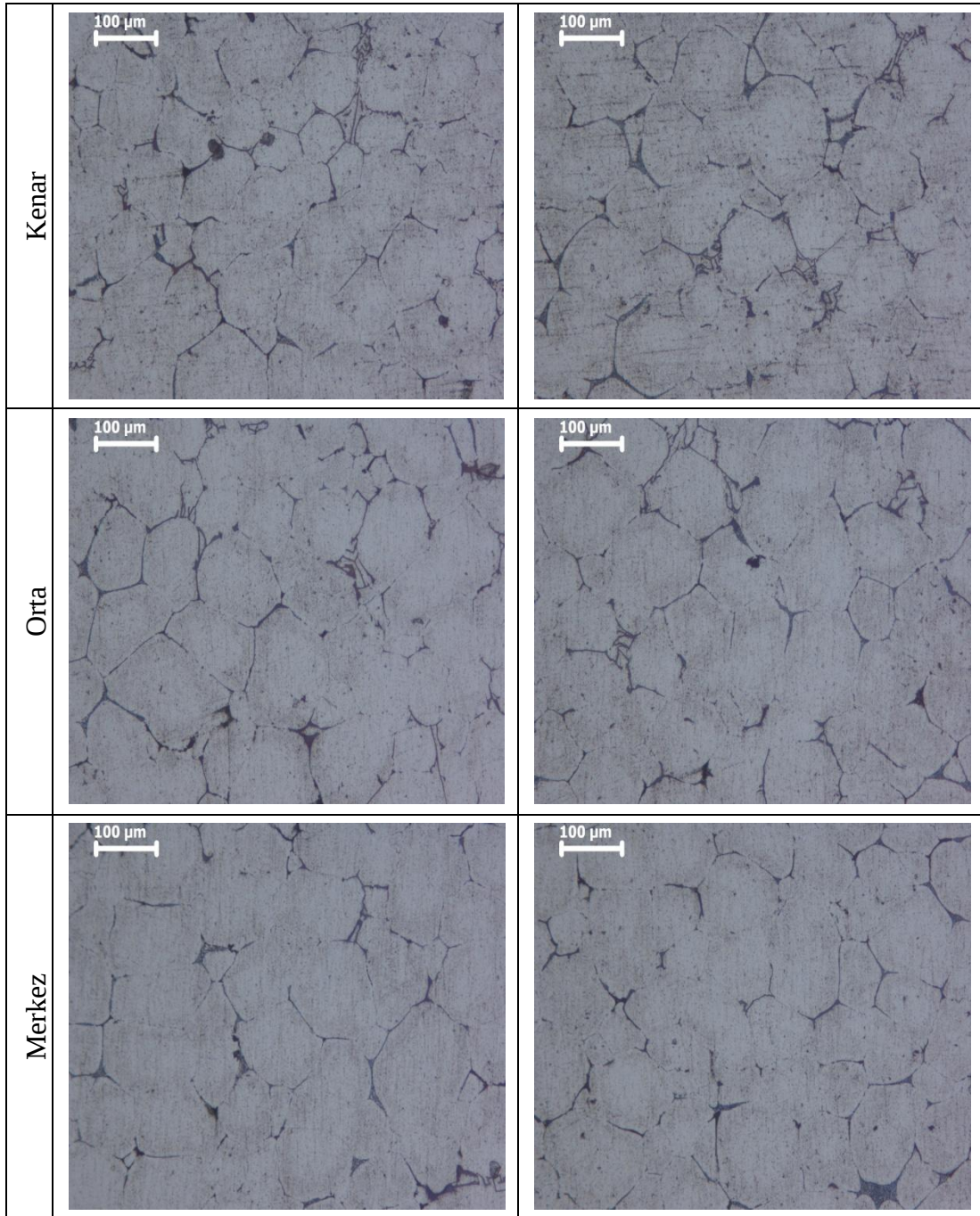
Resim 7.4. “4” numaralı numunenin kenar, orta ve merkez mikroyapıları

“5” numaralı numunenin potaya 665°C sıcaklıkta dökülerek, sabit döndürme hızında ve 95 + 5sn döndürme süresinde suda soğutma ile katılaştırılarak elde edilen kenar, orta ve merkez mikroyapıları Resim 7.5’de gösterildiği gibidir.



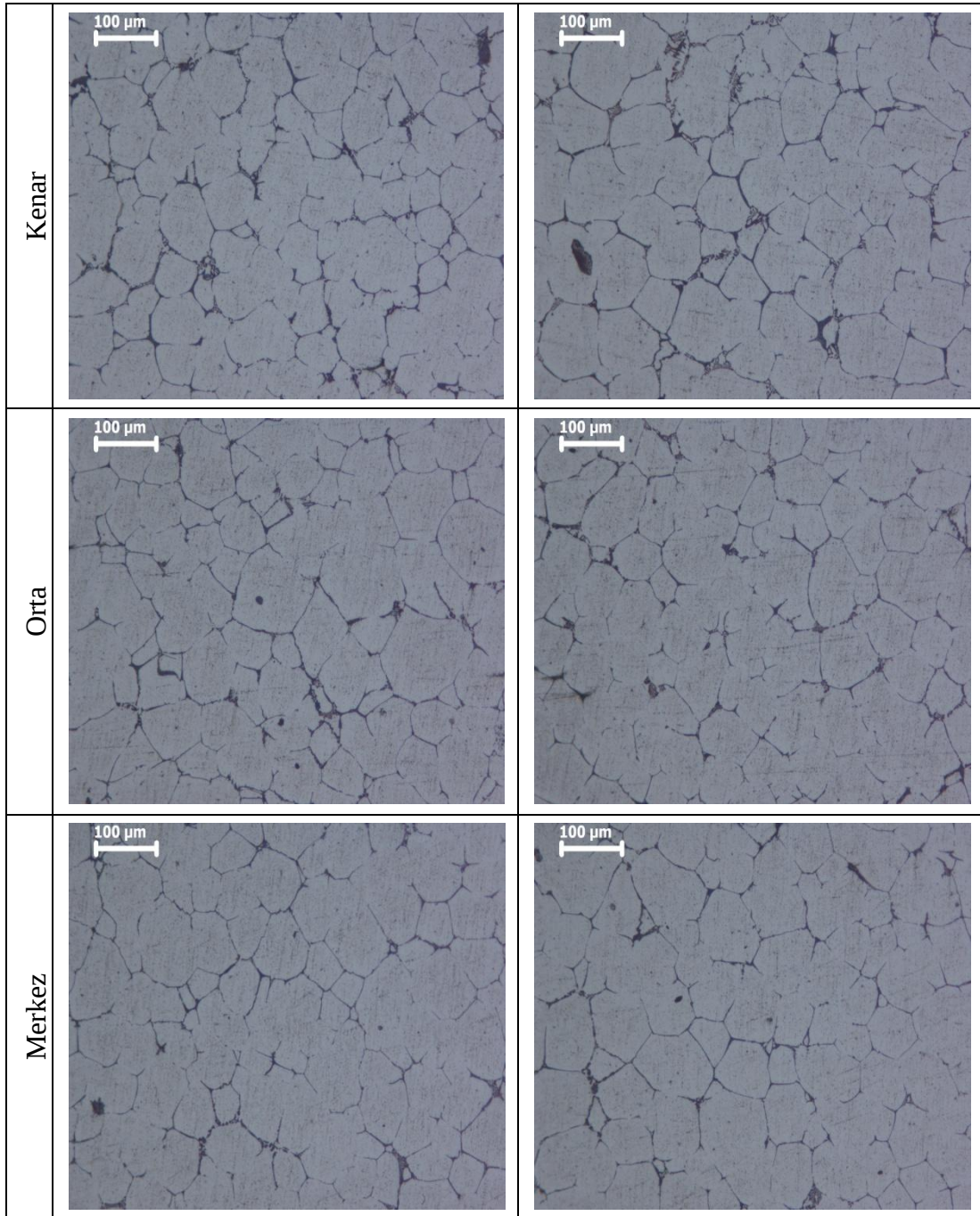
Resim 7.5. “5” numaralı numunenin kenar, orta ve merkez mikroyapıları

“6” numaralı tane inceltme işlemi uygulanan numunenin potaya 665°C sıcaklıkta dökülen, ancak çevirme işlemine tabi tutulmayan ve suda soğutma ile katılaştırılarak elde edilen kenar, orta ve merkez mikroyapıları Resim 7.6’de gösterildiği gibidir.



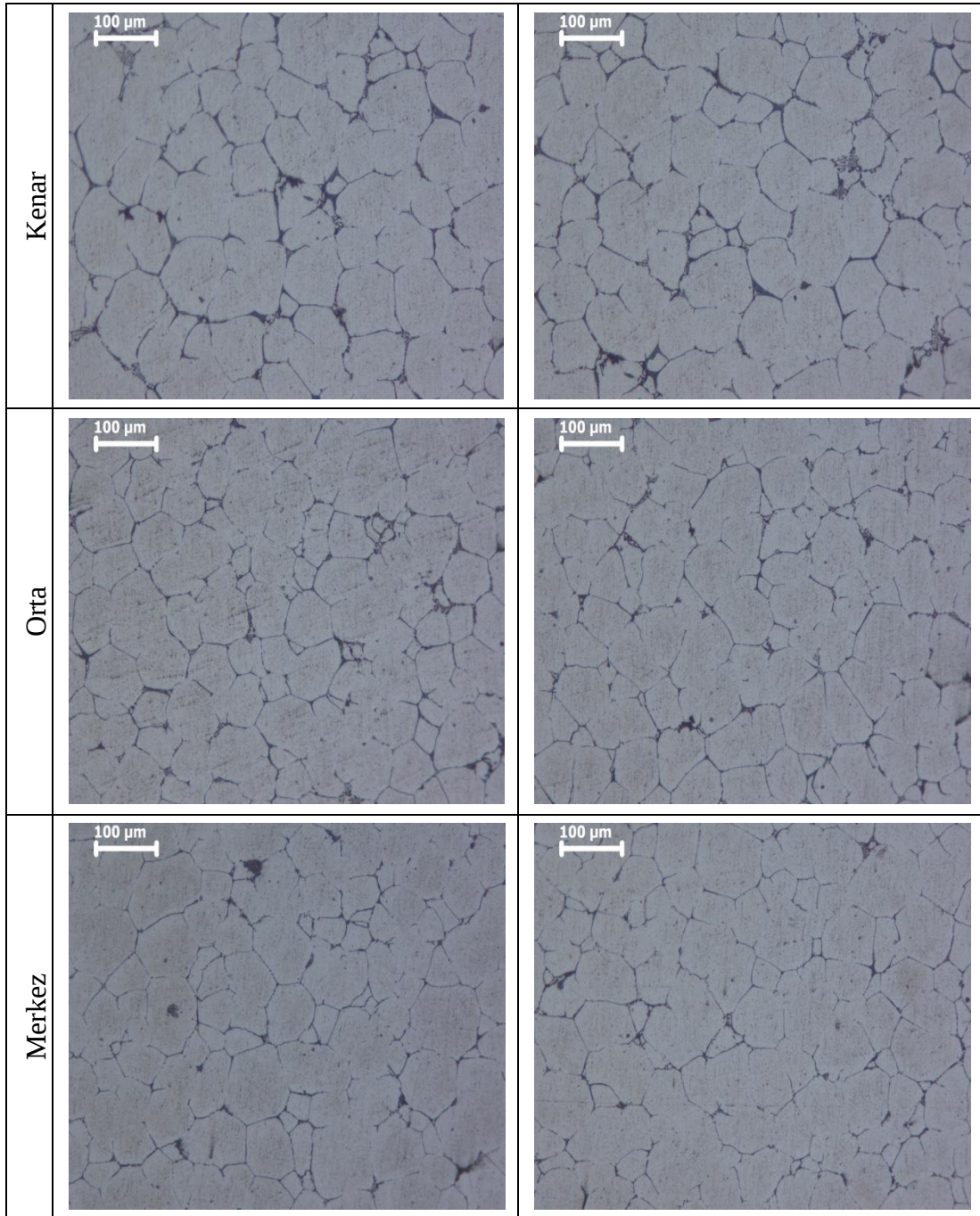
Resim 7.6. “6” numaralı numunenin kenar, orta ve merkez mikroyapıları

“7” numaralı tane inceltme işlemi uygulanan numunenin potaya 665°C sıcaklıkta dökülerek, sabit döndürme hızında ve 80 + 5sn döndürme süresinde suda soğutma ile katılaştırılarak elde edilen kenar, orta ve merkez mikroyapıları Resim 7.7’de gösterildiği gibidir.



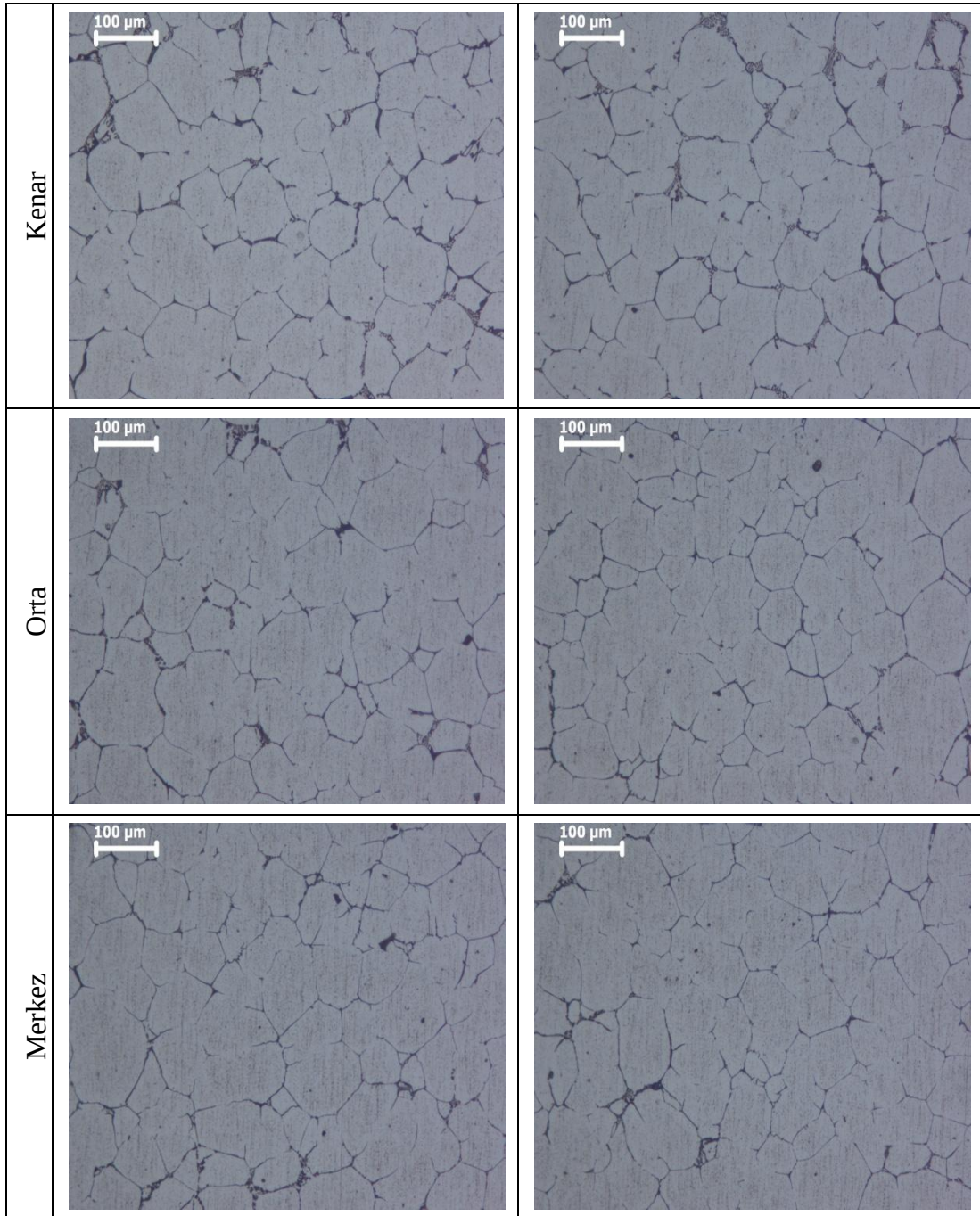
Resim 7.7. “7” numaralı numunenin kenar, orta ve merkez mikroyapıları

“8” numaralı tane inceltme işlemi uygulanan numunenin potaya 665°C sıcaklıkta dökülerek, sabit döndürme hızında ve 75 + 5sn döndürme süresinde suda soğutma ile katılaştırılarak elde edilen kenar, orta ve merkez mikroyapıları Resim 7.8’de gösterildiği gibidir.



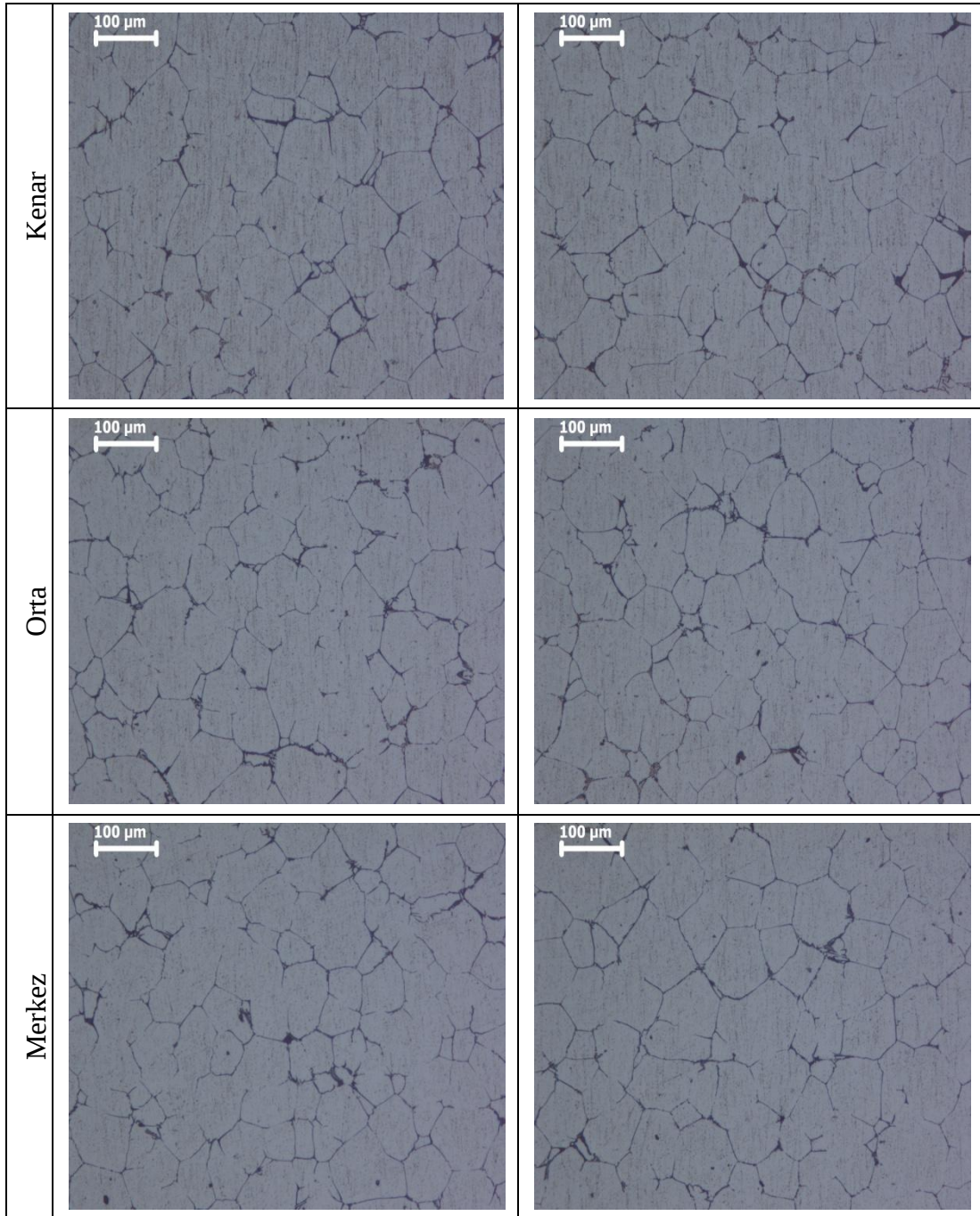
Resim 7.8. “8” numaralı numunenin kenar, orta ve merkez mikroyapıları

“9” numaralı tane inceltme işlemi uygulanan numunenin potaya 665°C sıcaklıkta dökülerek, sabit döndürme hızında ve 85 + 5sn döndürme süresinde suda soğutma ile katılaştırılarak elde edilen kenar, orta ve merkez mikroyapıları Resim 7.9’de gösterildiği gibidir.



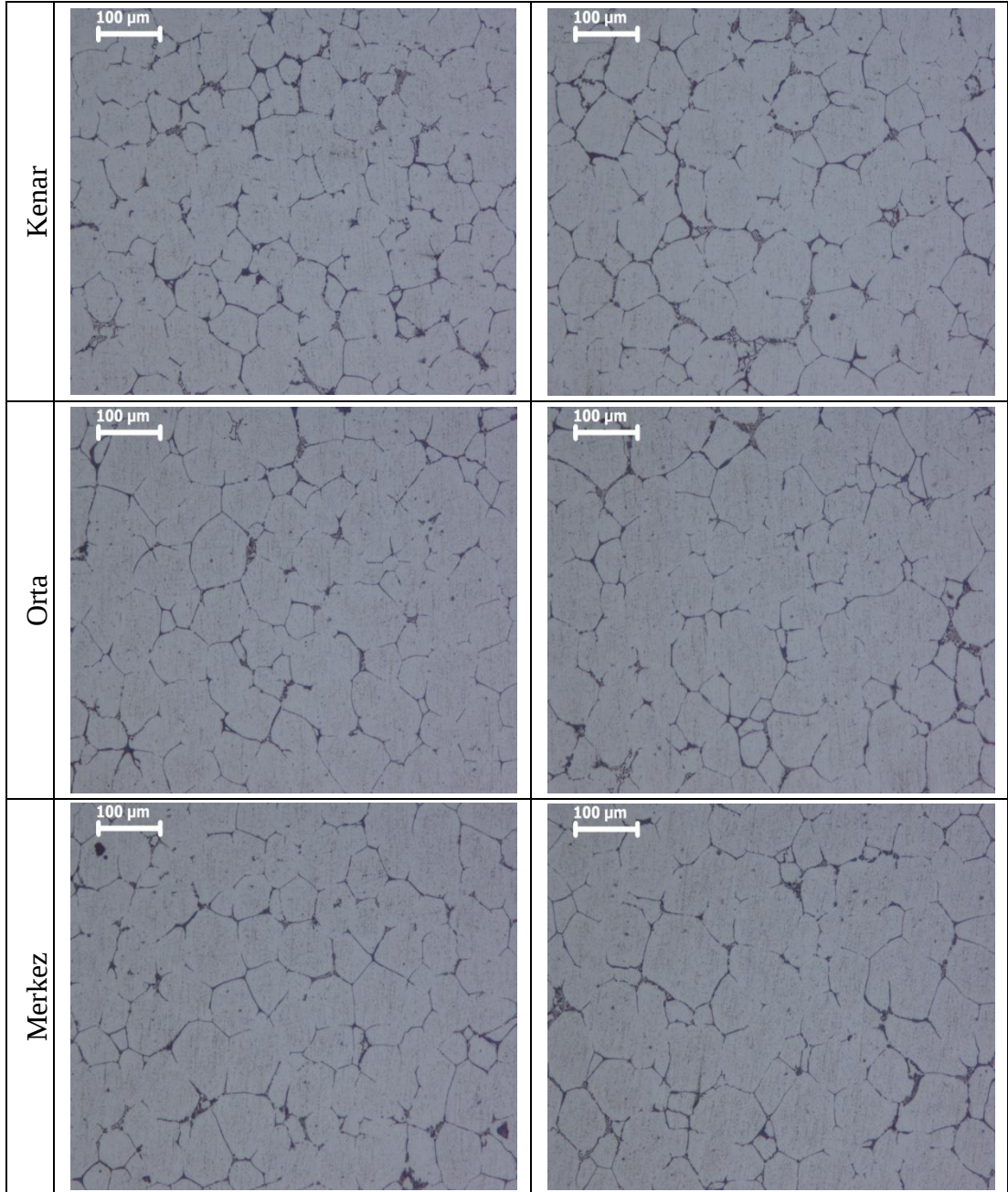
Resim 7.9. “9” numaralı numunenin kenar, orta ve merkez mikroyapıları

“10” numaralı tane inceltme işlemi uygulanan numunenin potaya 665°C sıcaklıkta dökülerek, sabit döndürme hızında ve 90 + 5sn döndürme süresinde suda soğutma ile katılaştırılarak elde edilen kenar, orta ve merkez mikroyapıları Resim 7.10’de gösterildiği gibidir.



Resim 7.10. “10” numaralı numunenin kenar, orta ve merkez mikroyapıları

“11” numaralı tane inceltme işlemi uygulanan numunenin potaya 665°C sıcaklıkta dökülerek, sabit döndürme hızında ve 95 + 5sn döndürme süresinde suda soğutma ile katılaştırılarak elde edilen kenar, orta ve merkez mikroyapıları Resim 7.11’de gösterildiği gibidir.



Resim 7.11. “11” numaralı numunenin kenar, orta ve merkez mikroyapıları

7.2.2. Tane boyutu

Döndürmeli entalpi dengeleme ünitesinde, sabit döndürme hızında ve farklı döndürme süreleri uygulanarak üretilen ön malzemelerin tane boyutu değerleri Çizelge 7.1 ve Şekil 7.2’de verilmiştir.

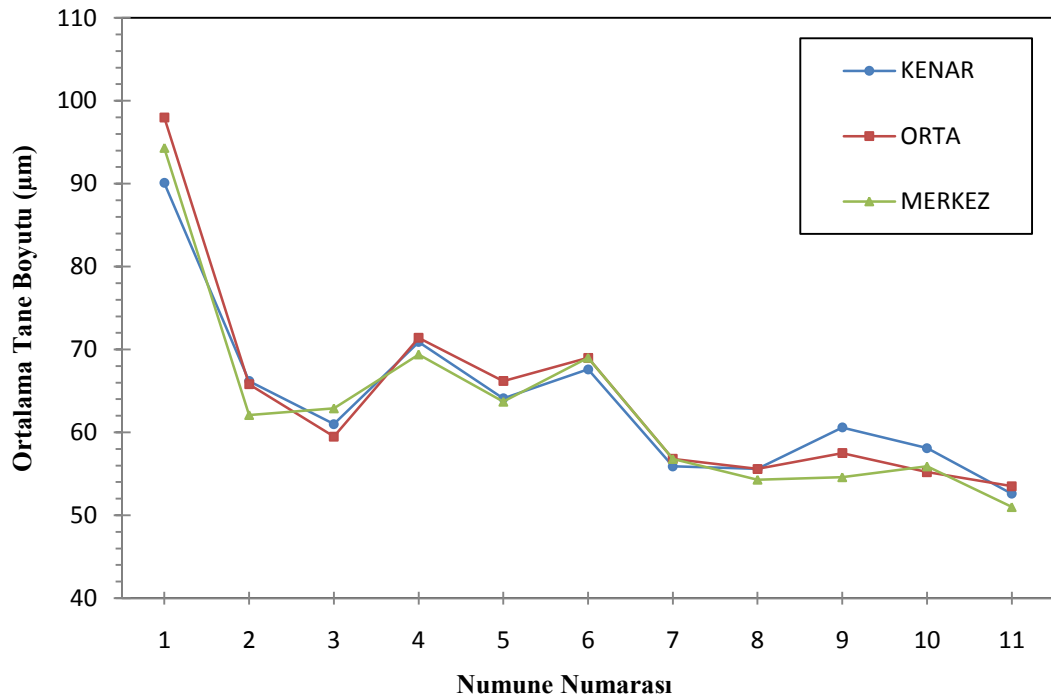
“1” numaralı numunenin tane boyutu değerlerinde kenar, orta ve merkez bölgelerinde yaklaşık %8 fark olmasına karşılık döndürmeli entalpi dengeleme ünitesinde üretilen “2-11” numunelerin kenar, orta ve merkez bölgelerinde önemli derecede farklılık olmamıştır (Çizelge 7.1 ve Şekil 7.2). Bu durum döndürmeli entalpi dengeleme ünitesinde ingotun bütününde homojen tane boyutu elde edilebileceğini göstermektedir. Homojen tane boyut dağılımının, yarı-katı şekillendirme işleminde, yarı-katı malzemenin tiksotropik özelliği üzerinde önemli etkisinin olacağı düşünülmektedir. Döndürme işlemi görmeyen ve havada soğutma işlemi görmüş “1” numaralı numune $94,1\mu\text{m}$ ortalama tane boyutuna sahiptir. Tane boyutunun, tane inceltme işlemi ile önemli derecede düşebileceğini $68,5\mu\text{m}$ ortalama tane boyutu değeri ile “6” numaralı numune ispatlamıştır. Tane inceltme işlemi görmemiş ve döndürmeli entalpi dengeleme ünitesinde değişik sürelerde döndürme işlemi uygulanan, “2-5” numaralı ingotlarda ortalama tane boyutu $61,1-70,6\mu\text{m}$ değerleri arasında gerçekleşmiştir. Ön malzeme üretiminde, tane inceltme ve döndürmeli entalpi dengeleme ünitesinde çevirme işleminin tane boyutu üzerindeki etkisi $52,4-57,6\mu\text{m}$ arasında tane boyutu değerleri ile “7-11” numaralı numunelerde görülmüştür. Tane inceltme ve döndürmeli entalpi dengeleme ünitesi çevirme işleminde en düşük tane boyutu değerini $61,1\mu\text{m}$ ile 95 sn döndürme süresi üretmiştir.

Elde edilen sonuçlar, Etial-61 Al-Mg-Si alaışımının tane inceltme ve döndürmeli entalpi dengeleme ünitesinde döndürme işleminin tane boyutu üzerindeki etkisini açık bir şekilde göstermektedir. Tikso-şekillendirme için yarı-katı sıcaklıktaki ortalama tane boyutunun $100\mu\text{m}$ 'dan küçük olması laminal akışının sağlanması, ince kesitlerin ve kalıp boşluğunun tamamen doldurulabilmesi için gerekli olduğu bir çok araştırmacı tarafından belirtilmiştir [Atkinson ve ark., 2002, Atkinson ve ark., 2008, Birol, 2007-3, Chayong ve ark., 2004, Garat ve ark., 1998, Jung ve Kang, 2000, Kang ve ark., 1998, Kim ve Kang, 2000, Witulski ve ark., 1998]. Özer, eğimli soğutma plakasına döküm yöntemi ile A356 alaışımının yarı-katı şekillendirilmesi üzerine yaptığı çalışmada, $45\mu\text{m}$ tane boyutuna sahip yarı-katı malzemenin basınçlı döküm makinesinde preslenerek şekillendirilebileceğini göstermiştir [Özer, 2010].

Bu çalışmada, tane inceltme ve döndürmeli entalpi dengeleme ünitesinde sabit döndürme hızında 75, 80, 85, 90 ve 95 sn döndürme süreleri ile elde edilen yarı-katı ingotların 52,4-57,6 μ m arasında tane boyutuna sahip olması basınçlı döküm makinesinde preslenebileceğini ifade etmektedir. Deneysel çalışmada kullanılan Etial-61 alaşımı veya bu alaşıma yakın kimyasal bileşime sahip alaşımların yarı-katı şekillendirilmesi üzerine yapılan çalışmalar son derece sınırlı olduğu için karşılaştırmalar yapılamamıştır. Etial-61 alaşımında olduğu gibi özellikle saflık derecesi yüksek dövme Al alaşımlarının yarı-katı şekillendirilmesi üzerine yapılan bilimsel araştırmalar dar çalışma sıcaklık aralığı, katılaşma sıcaklığında ve katılaşma sıcaklığının altındaki yüksek sıcaklıklarda çekme miktarının Al döküm alaşımlarına göre fazla olması, Şekil 7.1’de görüleceği üzere peritektik reaksiyon, sıcak yırtılma ve sıcak çatlama eğiliminin yüksek olması sebebiyle oldukça sınırlıdır.

Çizelge 7.1. Etial-61 alaşımının SEED ünitesinde elde edilen ve suda katılaştırılan yarı-katı ingotların tane boyutu değerleri (μ m)

Numune	Kenar (μ m)	Orta (μ m)	Merkez (μ m)	Ortalama (μ m)
1	90,1	98	94,3	94,1
2	66,2	65,8	62,1	64,7
3	61	59,5	62,9	61,1
4	70,9	71,4	69,4	70,6
5	64,1	66,2	63,7	64,7
6	67,6	69	69	68,5
7	55,9	56,8	56,8	56,5
8	55,6	55,6	54,3	55,2
9	60,6	57,5	54,6	57,6
10	58,1	55,2	55,9	56,4
11	52,6	53,5	51	52,4



Şekil 7.2. Etial-61 alaşımının SEED ünitesinde elde edilen ve suda katılaştırılan yarı-katı ingotlarda çevirme sürelerinin tane boyutuna etkisi

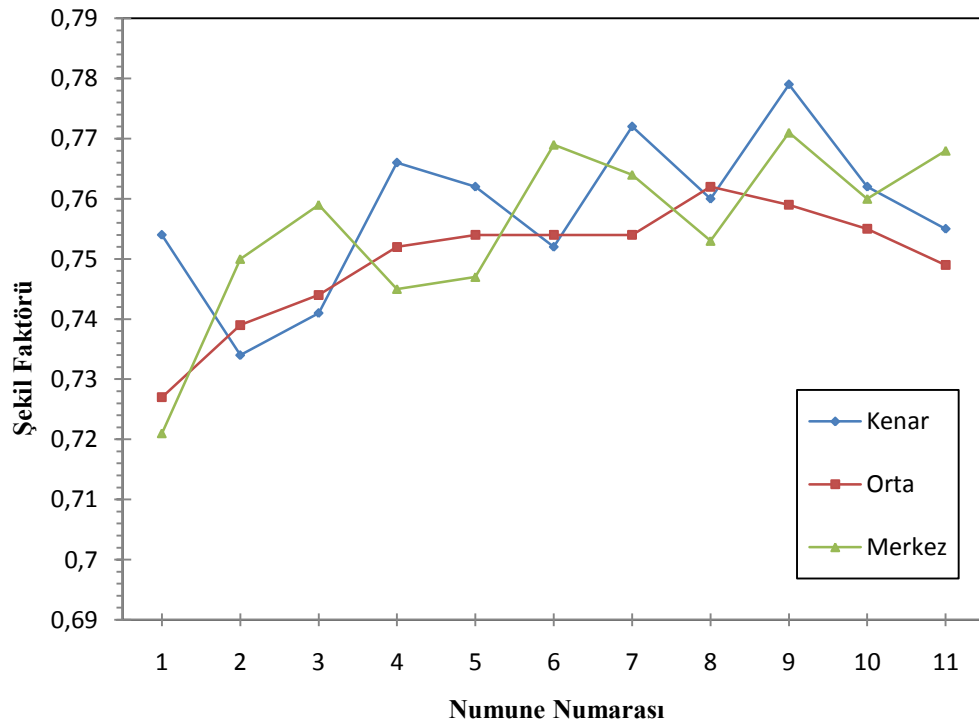
7.2.3. Şekil faktörü

Döndürmeli entalpi dengeleme ünitesinde, sabit döndürme hızında ve farklı döndürme süreleri uygulanarak üretilen ön malzemelerin şekil faktörü değerleri, Çizelge 7.2 ve Şekil 7.3’de görüleceği üzere, ingotların kenar, orta ve merkez bölgelerinde birbirine oldukça yakındır. Bu sonuç, yarı-katı malzeme hazırlanmasında kullanılan potanın homojen mikroyapı ürettiğini göstermektedir. Deneysel çalışmada, Çizelge 6.3’de detayları verilen şartlarda üretilen ingotlar 0,73-0,76 aralığında şekil faktörü değerlerine sahiptir. Deneysel çalışmalarda Etial-61 alaşımında tane inceltme ve döndürmeli entalpi dengeleme ünitesinde çevirme işlemlerinin şekil faktörü üzerinde etkili olmadığı izlenimi tartışılabilir. İngotların her biri aynı potada katılaştığından birbirine yakın soğuma oranlarında birbirine yakın şekil faktörü değerleri oluşmuştur. Bu konu üzerinde birçok yorum yapmak mümkün olmakla birlikte elde edilen şekil faktörü değerlerinin yarı-katı şekillendirme için yeterli olacağı düşünülmektedir. Yarı-katı şekillendirme için şekil

faktörü değerlerinin ortalama tane boyutu ile birlikte değerlendirilmesinin daha sağlıklı olacağı deneysel çalışmalar ile ispatlanmıştır.

Çizelge 7.2. Suda katılaştırılan Etial-61 alaşımının şekil faktörü değerleri

NUMUNE	KENAR	ORTA	MERKEZ	ORTALAMA
1	0,75	0,72	0,72	0,73
2	0,73	0,73	0,75	0,74
3	0,74	0,74	0,75	0,74
4	0,76	0,75	0,74	0,75
5	0,76	0,75	0,74	0,75
6	0,75	0,75	0,76	0,75
7	0,77	0,75	0,76	0,76
8	0,76	0,76	0,75	0,76
9	0,77	0,75	0,77	0,76
10	0,76	0,75	0,76	0,76
11	0,75	0,74	0,76	0,75



Şekil 7.3. Suda katılaştırılan Etial-61 alaşımında çevirme sürelerinin şekil faktörü değerlerine etkisi

7.3. Etial-61 Al-Mg-Si Alaşımından Reo Yarı-katı şekillendirme Yöntemi İle Üretilen Dökümlerin Analizi

Etial-61 alaşımının yarı-katı şekillendirilmesinde, tezin “6.5. Etial-61 Alaşımının Yarı-katı şekillendirilmesi” bölümünde ve Çizelge 6.4’de detayı verilen yöntemler ile üretilen dökümlerin analizi makro inceleme, metalografik gözlemlene, tane boyutu ve şekil faktörü ölçümleri ile gerçekleştirilmiştir.

7.3.1. Makro inceleme

Etial-61 alüminyum alaşımının Çizelge 6.4’de detayı verilen parametrelerin kullanılmasıyla önce döndürmeli entalpi dengeleme ünitesinde yarı-katı malzemenin hazırlanması ve sonra yarı-katı malzemenin basınçlı döküm makinesinde preslenmesiyle üretilen dökümlerin makro incelemesinde makro boşlukların oluşmadığı görülmüştür (Resim 6.10). Ancak, sedye döküm parçasının yalnız Resim 6.11’de gösterilen bölgesinde çok ince çatlak hatası meydana gelmiştir. Döküm parçada çatlak hatası, üretim sürecinde yapılan dikkatli gözlemlene ile, kalıpta katılma sırasında ve döküm parça kalıptan ayrıldıktan sonra oda sıcaklığında soğuma sırasında meydana geldiği tespit edilmiştir. Dolayısıyla meydana gelen çatlak hatasının hem sıcak çatlak hem de sıcak yırtılma hatası olarak tanımlanabileceği düşünülmektedir. Hatanın gerçek sebebi alaşımın katılma mekanizmasından kaynaklanmaktadır. Dökümlerde meydana gelen sıcak çatlak hatasının giderilmesi için Etial-61 Al-Mg-Si alaşımın kimyasal bileşimi modife edilmiştir. Kimyasal bileşimi modife edilmiş Etial-61 alaşımı ile gerçekleştirilen yarı-katı dökümlerde sıcak çatlak veya sıcak yırtılma hatası meydana gelmemiştir. Marcello ve arkadaşlarının, 6082 Al-Mg-Si alaşımının tikso şekillendirmeden sonra karakterizasyonu üzerine yaptıkları çalışmada, 6XXX serisi Al-Mg-Si alaşımlarının yarı-katı döküm yöntemi ile şekillendirilmesinde sıcak çatlak hatası sebebiyle kompleks geometrik şekle sahip parçaların üretilemeyeceğini belirtmişlerdir [Marcello, 2001]. Langlais ve arkadaşları, AA6061 dövme alüminyum alaşımının SEED prosesi kullanarak yarı-katı şekillendirilmesinde sıcak çatlak hatasının elimine edilmesi için bileşimin modife edilmesi gerektiğini açıklamışlardır [Langlais, 2008].

7.3.2. Mikroyapı inceleme

Etial-61 alüminyum alaşımasının Çizelge 6.4’de detayı verilen parametrelerin kullanılmasıyla önce döndürmeli entalpi dengeleme ünitesinde yarı-katı malzemenin hazırlanması ve sonra yarı-katı malzemenin basınçlı döküm makinesinde preslenmesiyle üretilen dökümlerin mikro incelemesi metalografik gözlemlene, tane boyutu ve şekil faktörü değerleri ile yapılmıştır.

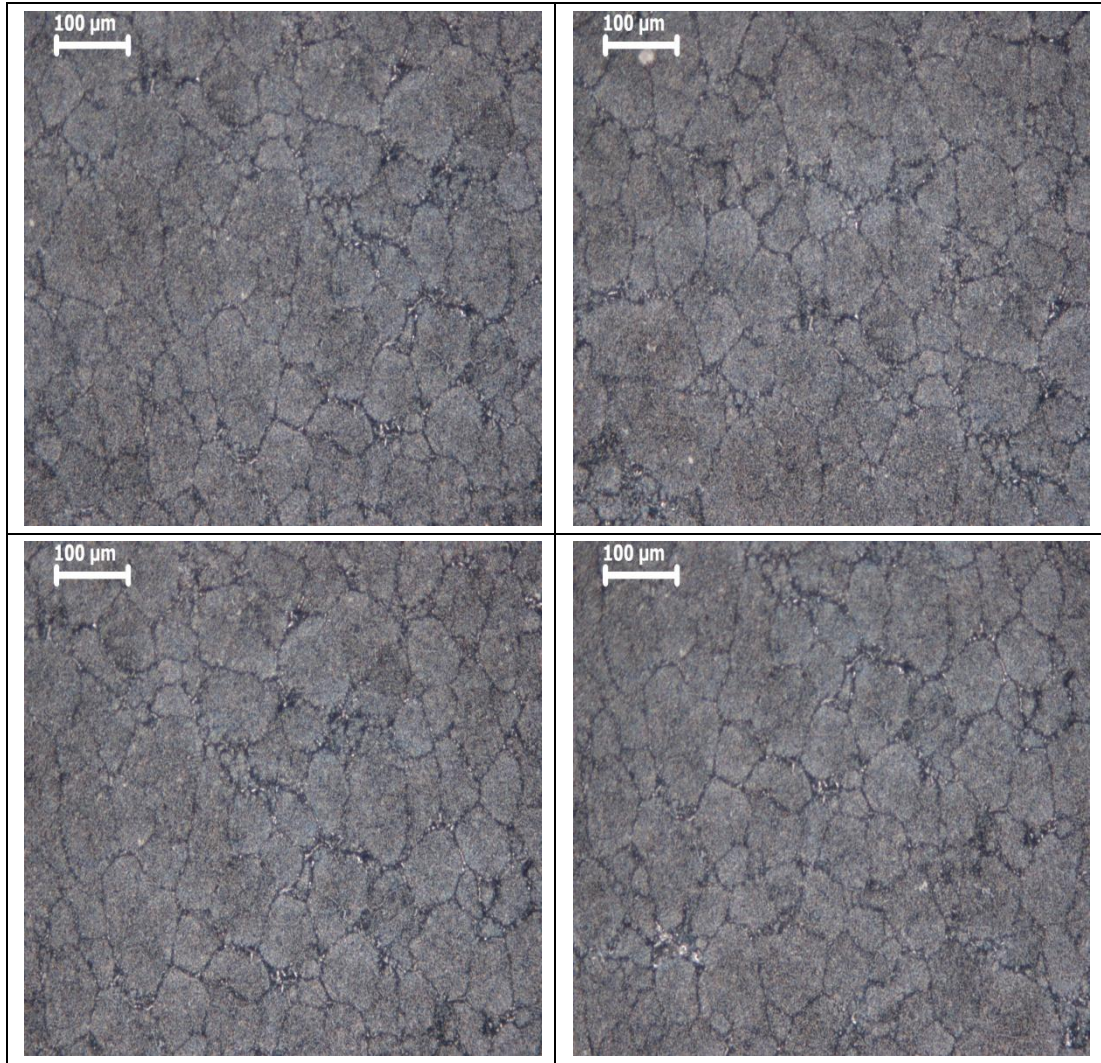
7.3.2.1. Metalografik gözlemlene

Döndürmeli entalpi dengeleme ünitesinde yarı-katı malzemenin hazırlanması ve takiben yarı-katı malzemenin basınçlı döküm makinesinde değişik piston hızları ve basınçları ile preslenmesiyle üretilen sedye parçası ve çekme çubuğu dökümlerin mikro incelemesinde, birincil faz olan α -Al tanelerin geometrik şeklinin ön malzemelerde α -Al tanelerine göre daha küresel olduğu gözlemlenmiştir (Resim 7.12-7.24). Optik mikroskop altında gerçekleştirilen detaylı mikroyapı gözlemlenmesinde küçük gaz boşluğu ve çekme boşluğu hatalarına rastlanılmamıştır. Yarı-katı dökümlerin mikroyapısında sağlanan gelişmeler döndürmeli entalpi dengeleme ünitesinde hazırlanan yarı-katı malzemenin enjeksiyon sırasında tiksotropik davranış gösterdiği, enjeksiyon işleminde kullanılan parametreler ile yarı-katı malzemede türbülans meydana gelmediği, yarı-katı malzemenin kalıbı tam olarak doldurduğu ve katılaşmanın tamamlanması aşamasına kadar basıncın devam ettiğini açık bir şekilde göstermektedir.

Yarı-katı dökümlerin üretiminde, döndürmeli entalpi dengeleme ünitesinde kullanılan döndürme sürelerinin (Çizelge 6.4) bütünü çalışma sıcaklık aralığına tekabül etmektedir. Üretilen sedye parçasında ve çekme deneyi çubuğunda sıcak çatlak hatasının giderilmesi için döndürme süresi, diğer bir ifade ile yarı-katı malzemede katı oranı artırılmış fakat giderilememiştir. Dökümlerde meydana gelen sıcak çatlak hatası Etial-61 alaşımasının kimyasal bileşiminin modife edilmesiyle giderilmiştir.

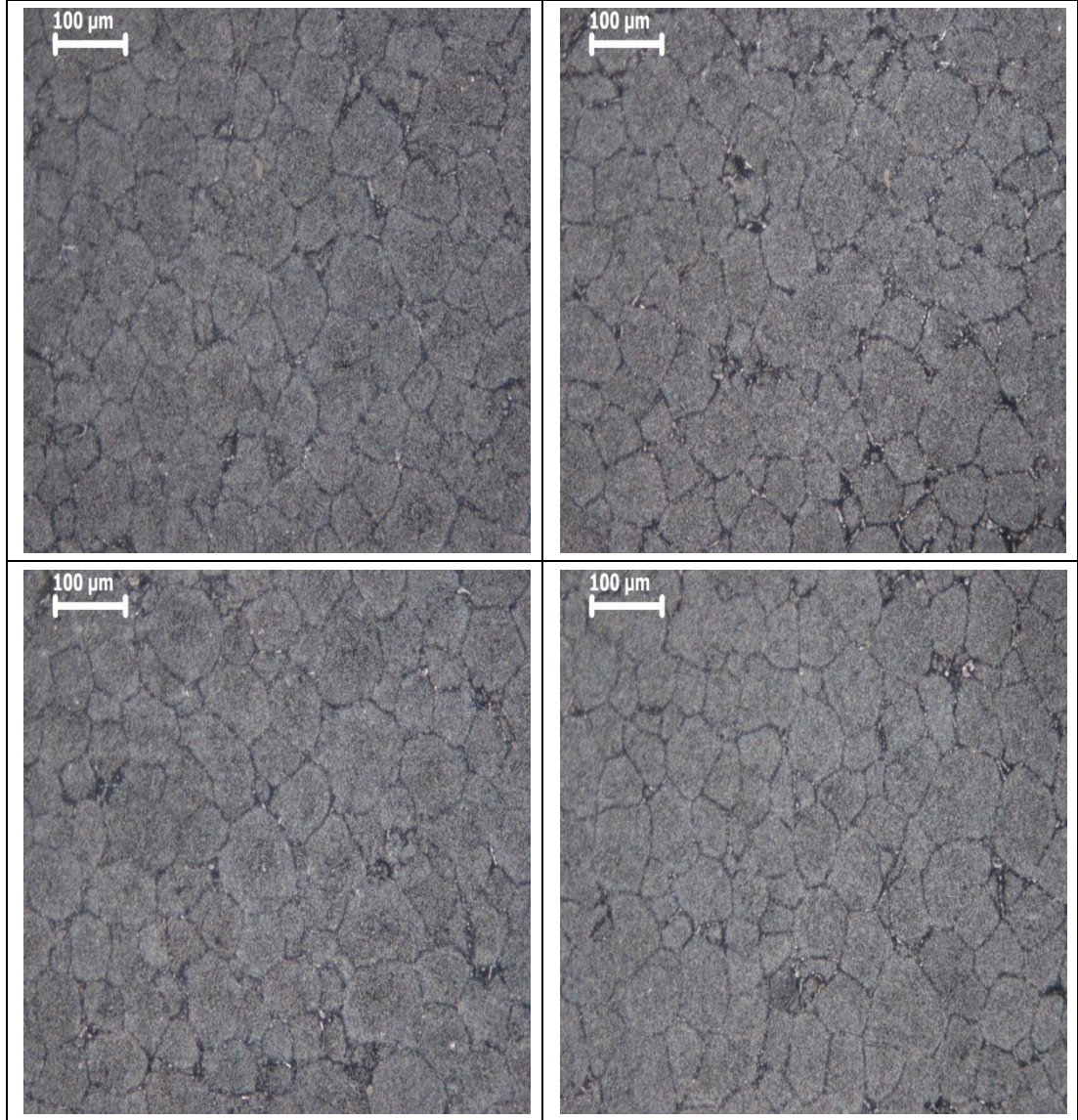
“12-23” numaralı sedye parçası şeklindeki numunelere önceki numunelerden farklı olarak, makro dağılayıcı olan Tucker ($125\text{ml H}_2\text{O} + 15\text{ml HNO}_3 + 45\text{ml HCl} + 15\text{ml HF}$) çözeltisi uygulanmıştır. Optik mikroskobun Brightfield -- Incident (Reflected) Light olan ışığı, Darkfield -- Incident (Reflected) Light olarak ayarlanılmış ve numune mikroyapıları alınmıştır.

“12” numaralı tane inceltme işlemi uygulanan numunenin potaya 665°C sıcaklıkta dökülerek, sabit döndürme hızında ve $90 + 5\text{sn}$ döndürme süresinde preste katılaştırılarak elde edilen çeşitli bölgelerden alınan mikroyapıları Resim 7.12’de gösterildiği gibidir.



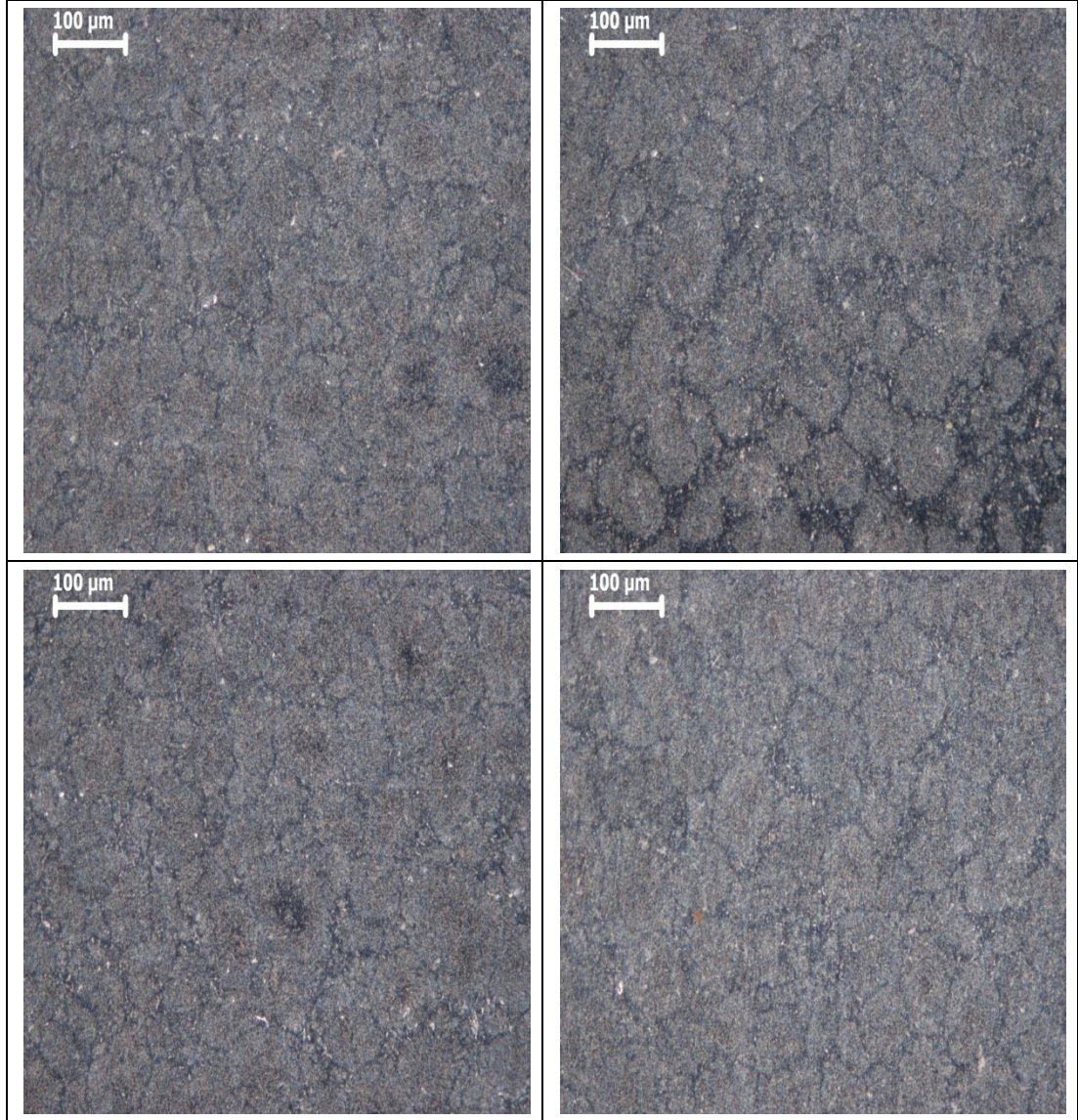
Resim 7.12. “12” numaralı numunenin çeşitli bölgelerden alınan mikroyapıları

“13” numaralı tane inceltme işlemi uygulanan numunenin potaya 665°C sıcaklıkta dökülerek, sabit döndürme hızında ve 70 + 5sn döndürme süresinde preste katılaştırılarak elde edilen çeşitli bölgelerden alınan mikroyapıları Resim 7.13’de gösterildiği gibidir.



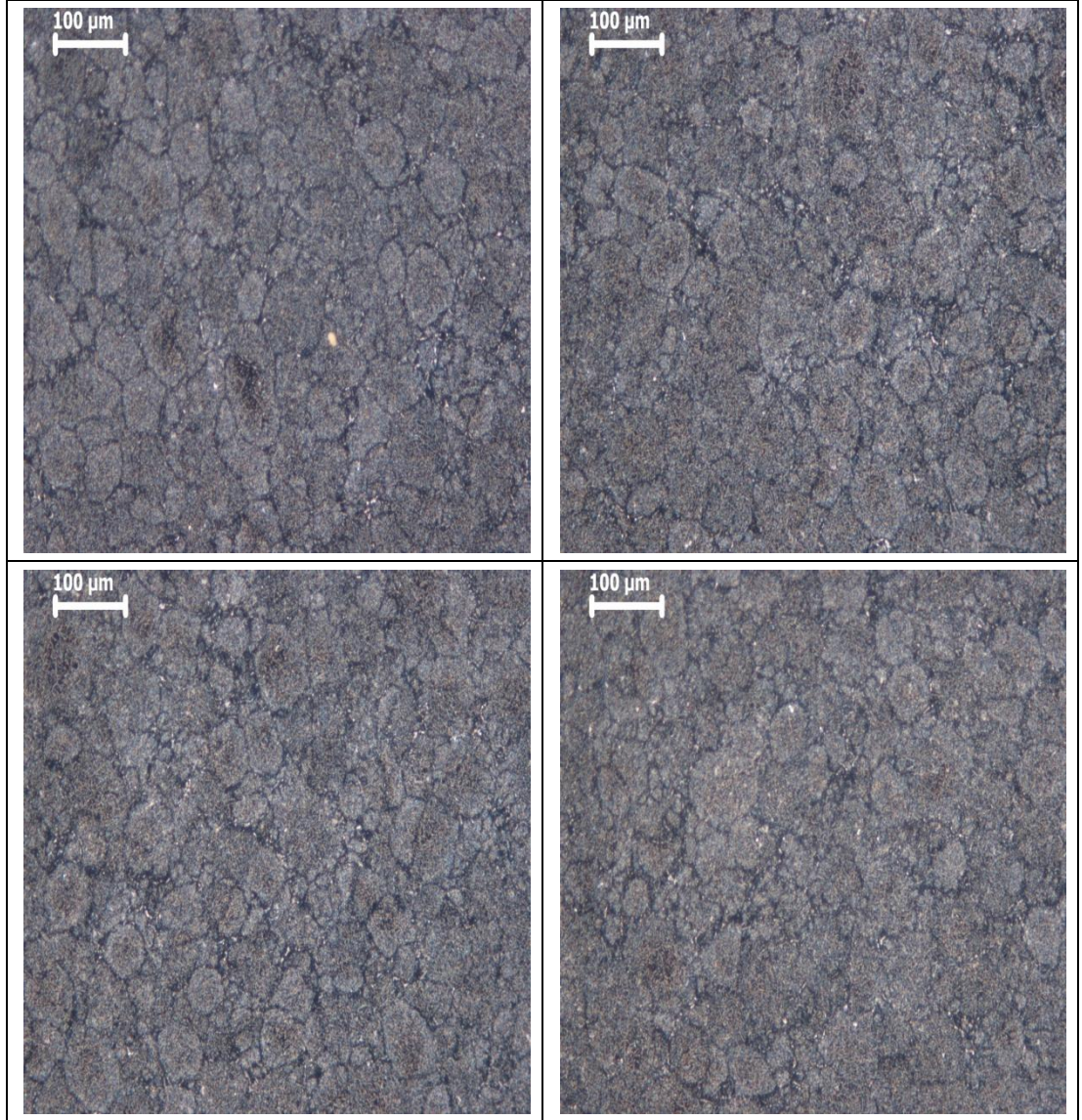
Resim 7.13. “13” numaralı numunenin çeşitli bölgelerden alınan mikroyapıları

“14” numaralı tane inceltme işlemi uygulanan numunenin potaya 665°C sıcaklıkta dökülerek, sabit döndürme hızında ve 65 + 5sn döndürme süresinde preste katılaştırılarak elde edilen çeşitli bölgelerden alınan mikroyapıları Resim 7.14’de gösterildiği gibidir.



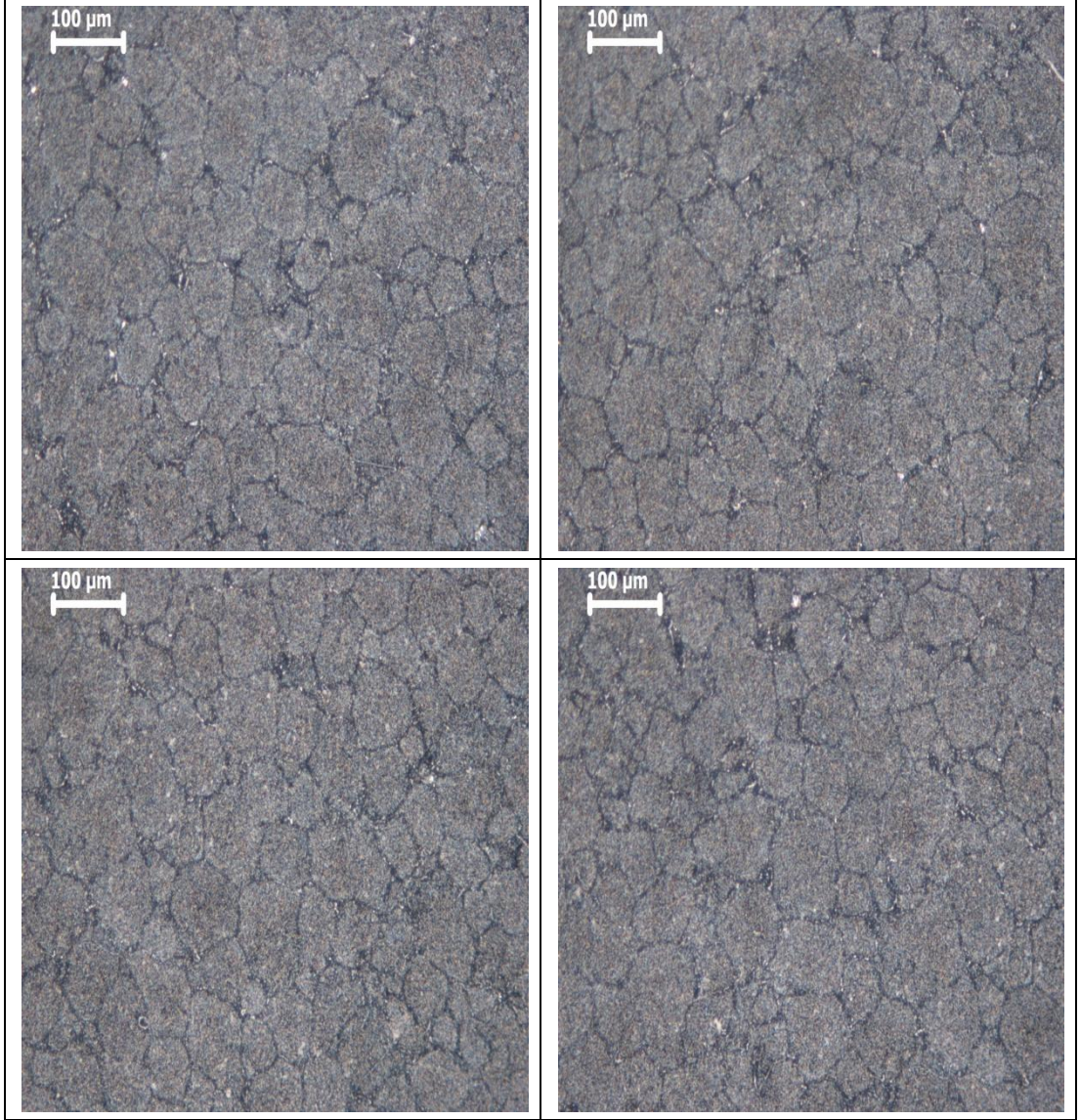
Resim 7.14. “14” numaralı numunenin çeşitli bölgelerden alınan mikroyapıları

“15” numaralı tane inceltme işlemi uygulanan numunenin potaya 665°C sıcaklıkta dökülerek, sabit döndürme hızında ve 65 + 5sn döndürme süresinde preste katılaştırılarak elde edilen çeşitli bölgelerden alınan mikroyapıları Resim 7.15’de gösterildiği gibidir.



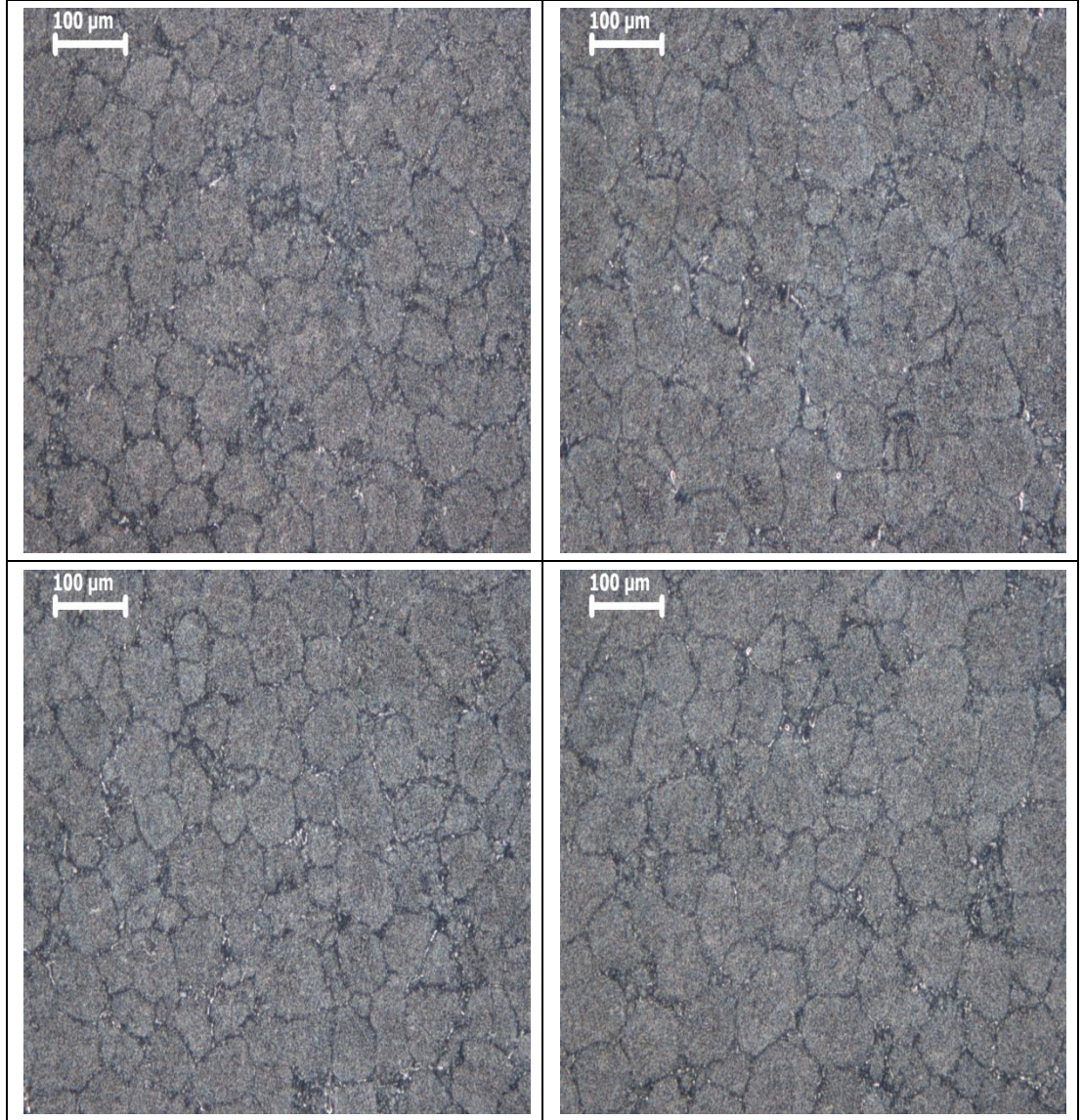
Resim 7.15. “15” numaralı numunenin çeşitli bölgelerden alınan mikroyapıları

“16” numaralı tane inceltme işlemi uygulanan numunenin potaya 665°C sıcaklıkta dökülerek, sabit döndürme hızında ve 65 + 5sn döndürme süresinde preste katılaştırılarak elde edilen çeşitli bölgelerden alınan mikroyapıları Resim 7.16’de gösterildiği gibidir.



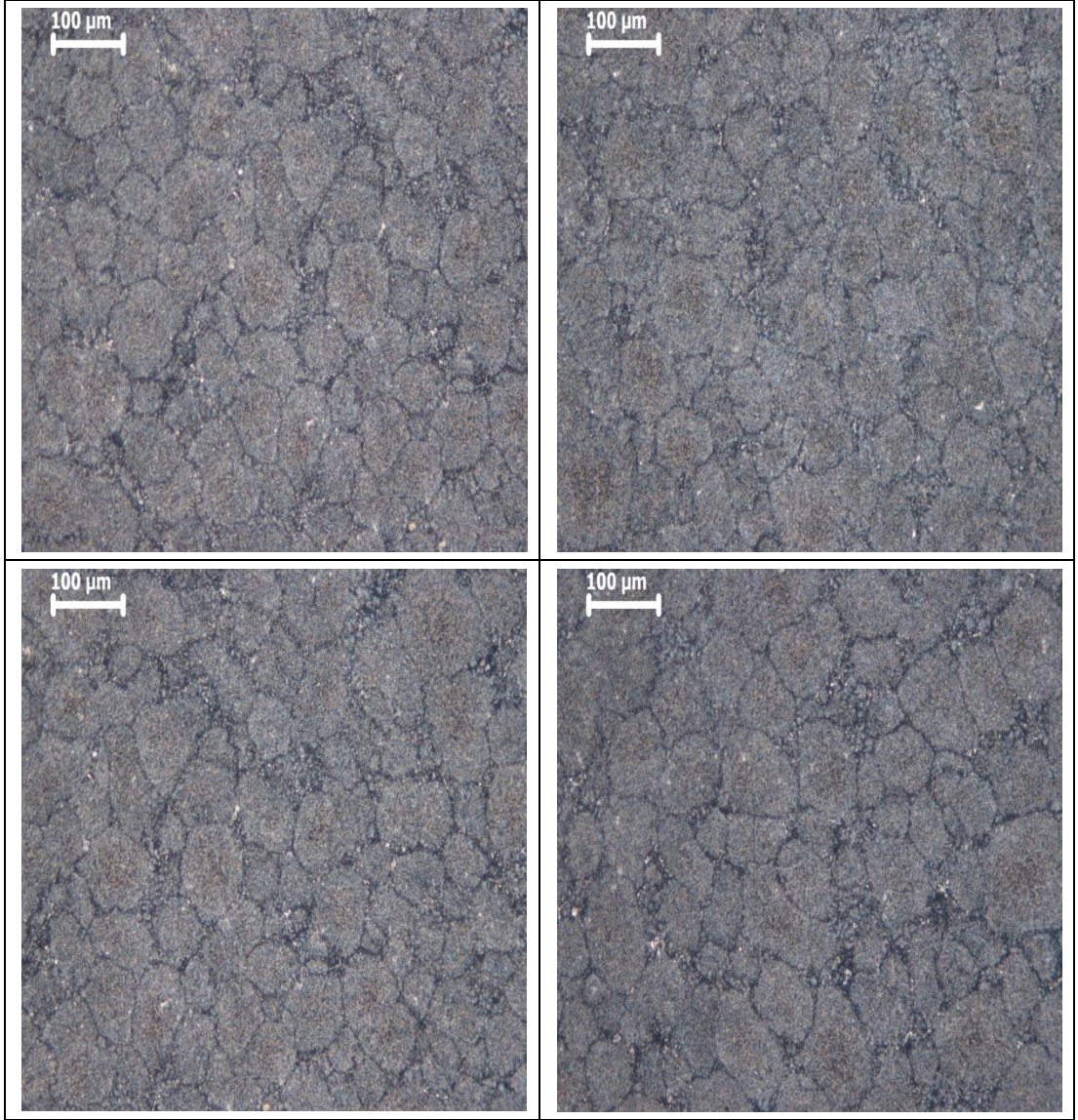
Resim 7.16. “16” numaralı numunenin çeşitli bölgelerden alınan mikroyapıları

“17” numaralı tane inceltme işlemi uygulanan numunenin potaya 665°C sıcaklıkta dökülerek, sabit döndürme hızında ve 65 + 5sn döndürme süresinde preste katılaştırılarak elde edilen çeşitli bölgelerden alınan mikroyapıları Resim 7.17’de gösterildiği gibidir.



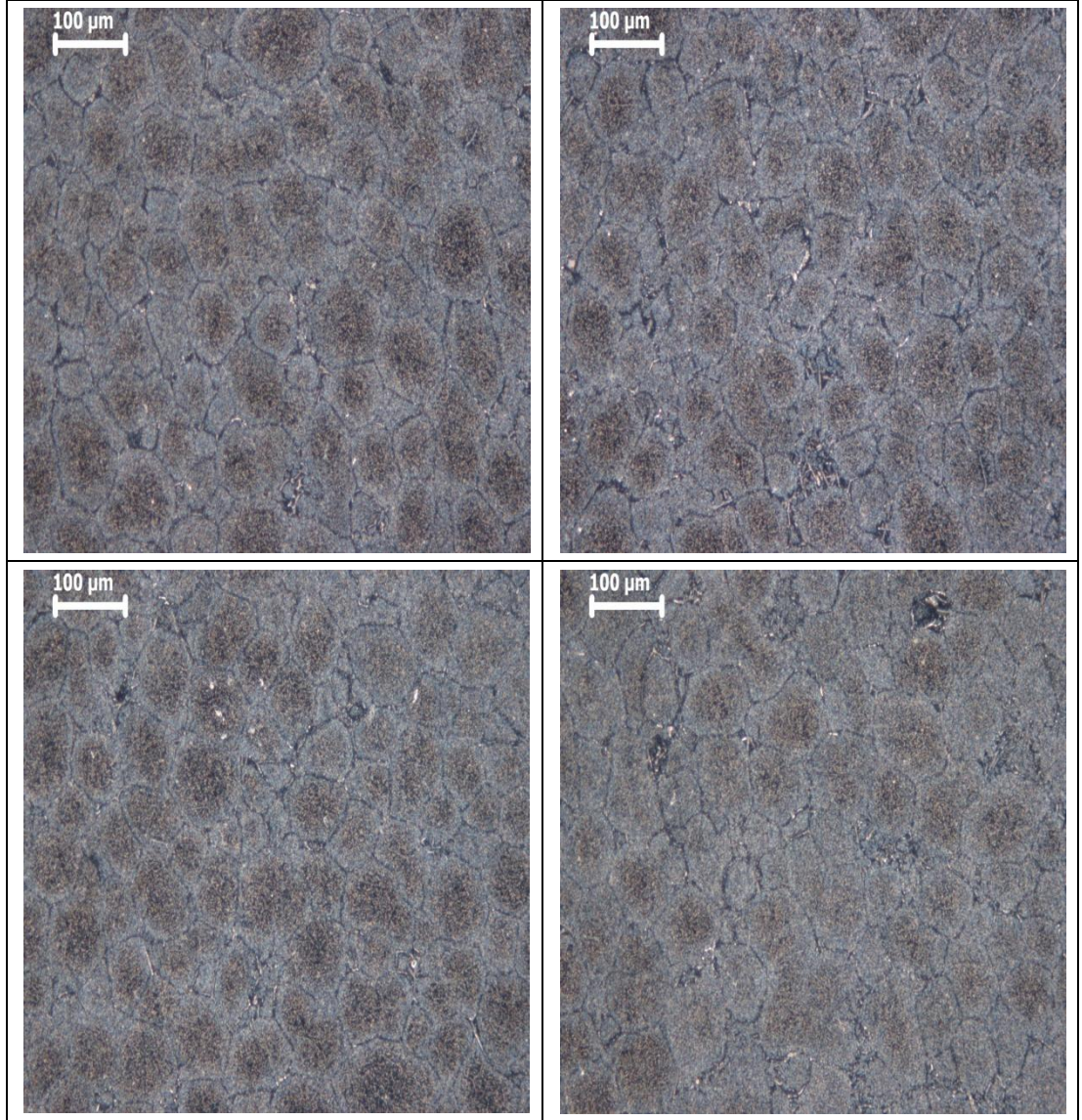
Resim 7.17. “17” numaralı numunenin çeşitli bölgelerden alınan mikroyapıları

“18” numaralı tane inceltme işlemi uygulanan numunenin potaya 665°C sıcaklıkta dökülerek, sabit döndürme hızında ve 70 + 5sn döndürme süresinde preste katılaştırılarak elde edilen çeşitli bölgelerden alınan mikroyapıları Resim 7.18’de gösterildiği gibidir.



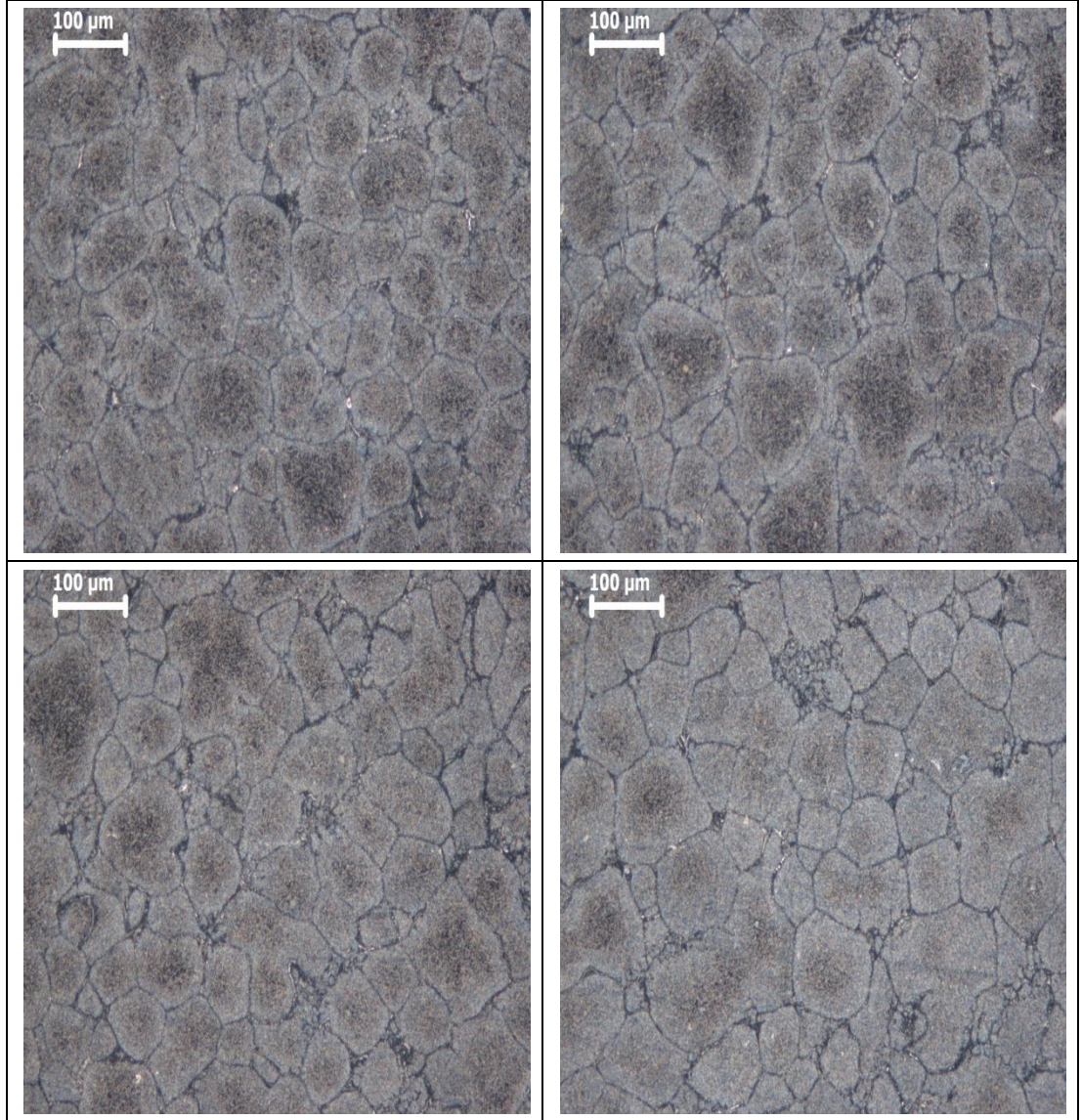
Resim 7.18. “18” numaralı numunenin çeşitli bölgelerden alınan mikroyapıları

“19” numaralı tane inceltme işlemi uygulanan numunenin potaya 665°C sıcaklıkta dökülerek, sabit döndürme hızında ve 70 + 5sn döndürme süresinde preste katılaştırılarak elde edilen çeşitli bölgelerden alınan mikroyapıları Resim 7.19’de gösterildiği gibidir.



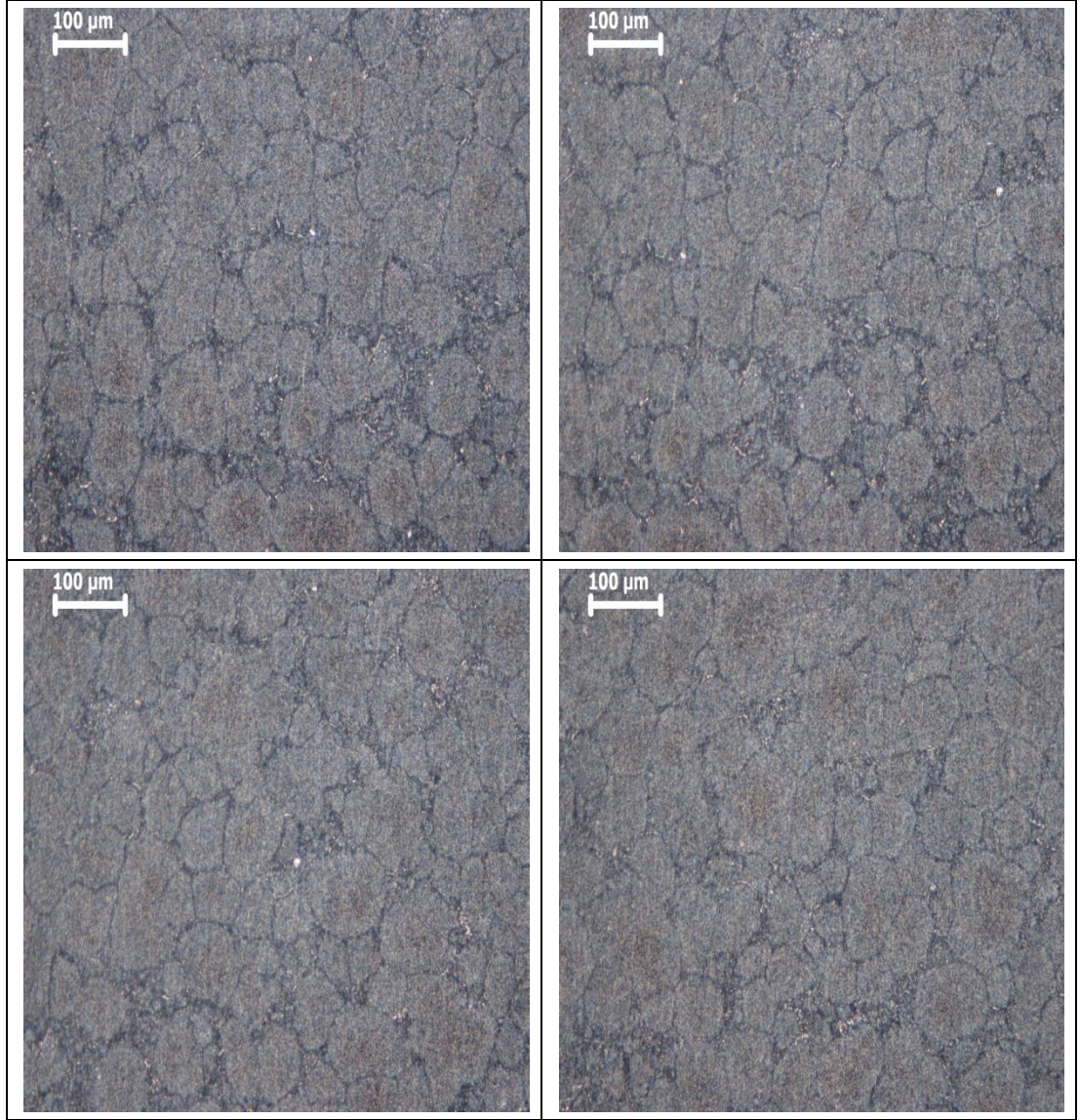
Resim 7.19. “19” numaralı numunenin çeşitli bölgelerden alınan mikroyapıları

“20” numaralı tane inceltme işlemi uygulanan numunenin potaya 665°C sıcaklıkta dökülerek, sabit döndürme hızında ve 70 + 5sn döndürme süresinde preste katılaştırılarak elde edilen çeşitli bölgelerden alınan mikroyapıları Resim 7.20’de gösterildiği gibidir.



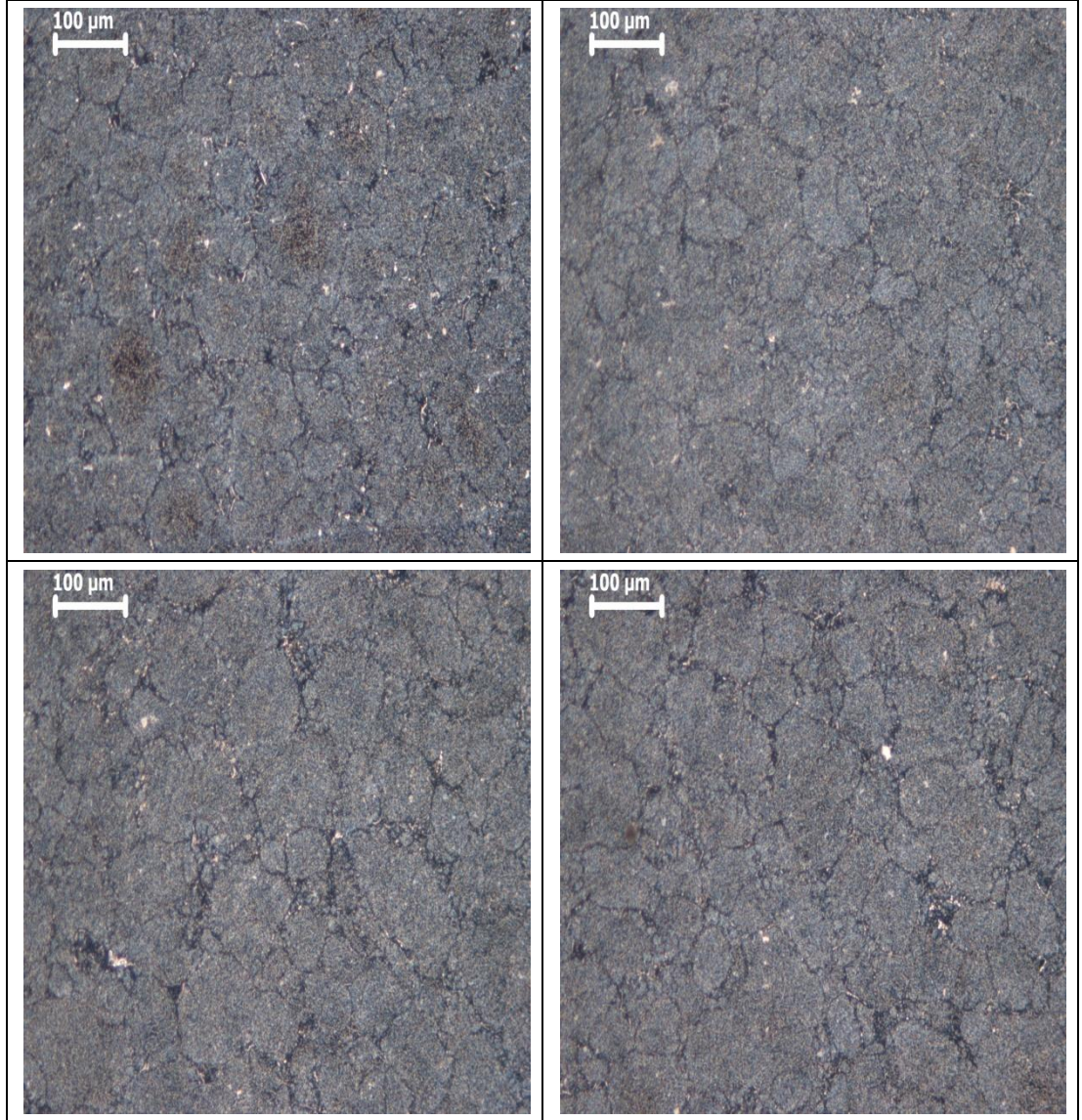
Resim 7.20. “20” numaralı numunenin çeşitli bölgelerden alınan mikroyapıları

“21” numaralı tane inceltme işlemi uygulanan numunenin potaya 665°C sıcaklıkta dökülerek, sabit döndürme hızında ve 65 + 5sn döndürme süresinde preste katılaştırılarak elde edilen çeşitli bölgelerden alınan mikroyapıları Resim 7.21’de gösterildiği gibidir.



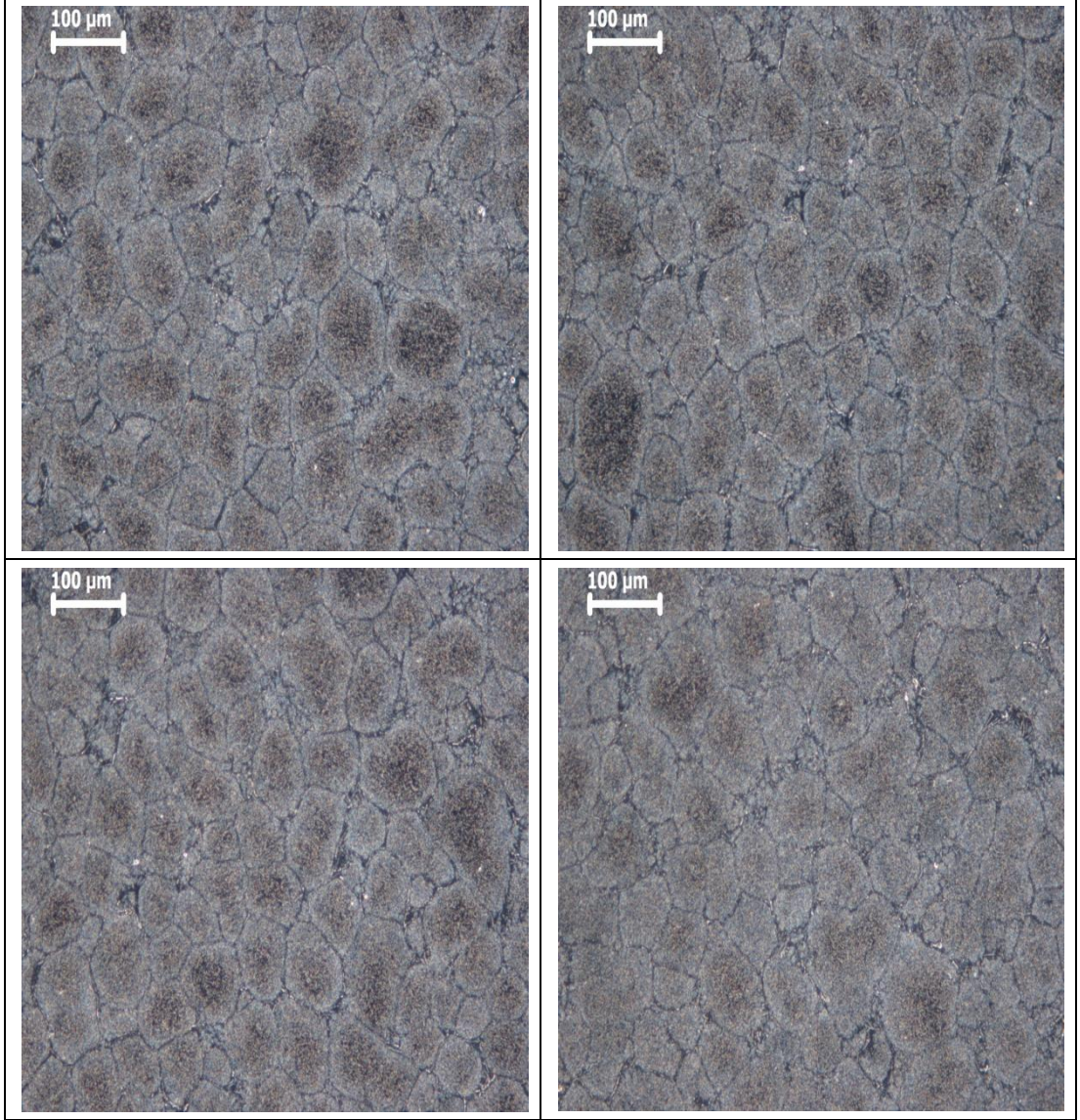
Resim 7.21. “21” numaralı numunenin çeşitli bölgelerden alınan mikroyapıları

“22” numaralı tane inceltme işlemi uygulanan numunenin potaya 665°C sıcaklıkta dökülerek, sabit döndürme hızında ve 65 + 5sn döndürme süresinde preste katılaştırılarak elde edilen çeşitli bölgelerden alınan mikroyapıları Resim 7.22’de gösterildiği gibidir.



Resim 7.22. “22” numaralı numunenin çeşitli bölgelerden alınan mikroyapıları

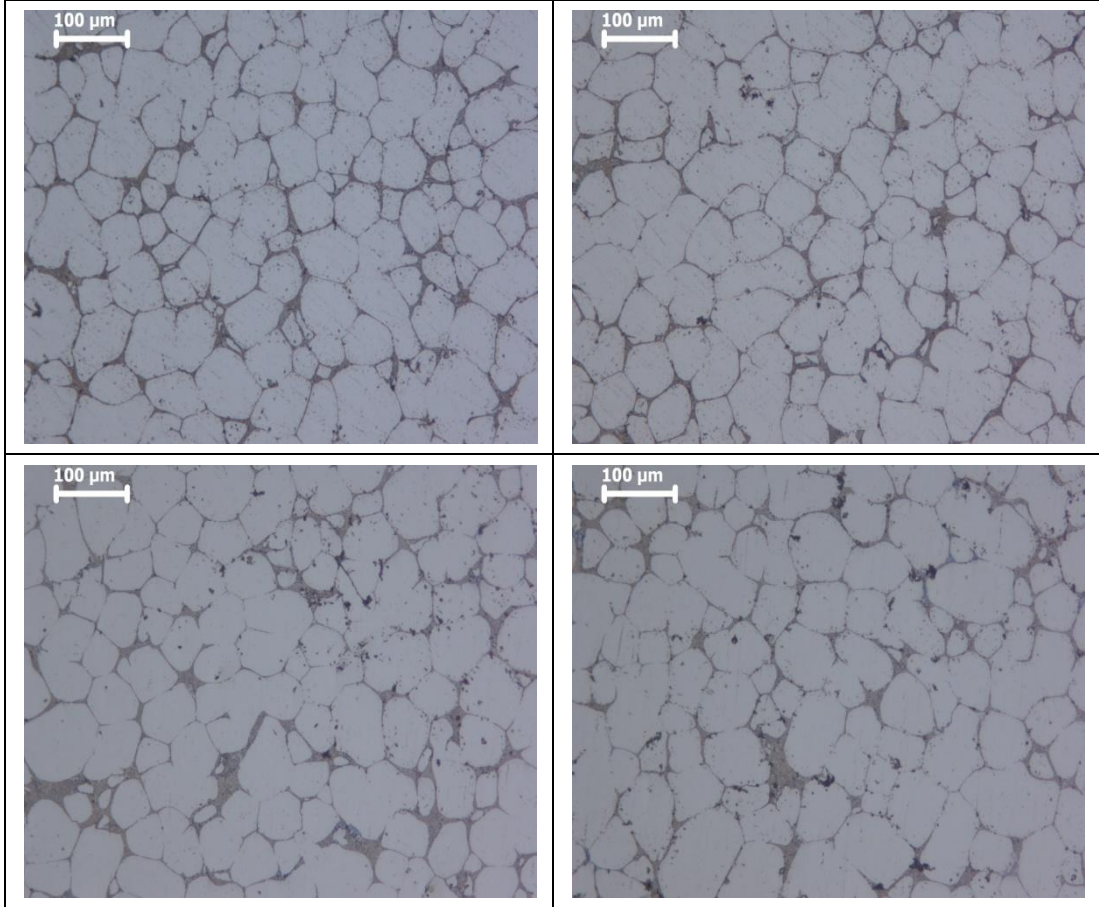
“23” numaralı tane inceltme işlemi uygulanan numunenin potaya 665°C sıcaklıkta dökülerek, sabit döndürme hızında ve 65 + 5sn döndürme süresinde preste katılaştırılarak elde edilen çeşitli bölgelerden alınan mikroyapıları Resim 7.23’de gösterildiği gibidir.



Resim 7.23. “23” numaralı numunenin çeşitli bölgelerden alınan mikroyapıları

“24” numaralı çubuk şeklindeki numune, ergitme ocağında tane inceltme işlemi (%0,6 (5/1 Ti/B) ilavesi ile) yapılan, döndürmeli entalpi dengeleme ünitesinde yarıkatı elde etmek amacıyla kullanılan potaya 665°C sıcaklıkta dökülürken sabit döndürme hızında ve 95 + 5sn döndürme süresi kullanılarak 550 ton kapama

basıncına sahip basınçlı döküm makinesini ile elde edilmiştir. “24” numaralı çubuk şeklindeki numunenin çeşitli bölgelerinden alınan mikroyapı resimleri Resim 7.24’de verildiği gibidir.



Resim 7.24. “24” numaralı çubuk şeklindeki numunelerin çeşitli bölgelerinden alınan mikroyapılar

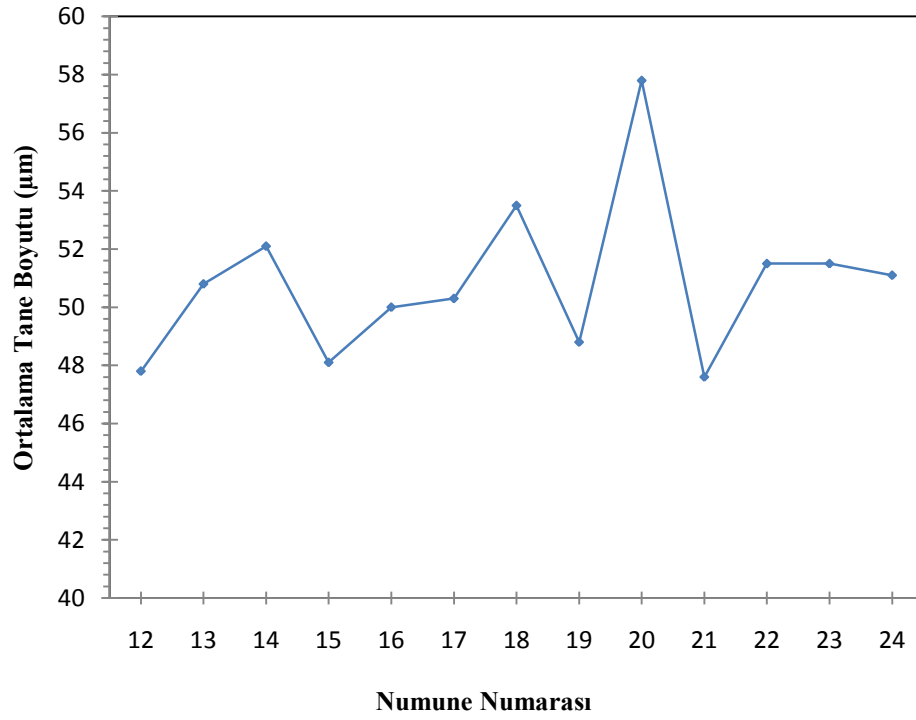
7.3.2.2. Tane boyutu

Yarı-katı döküm yöntemi ile üretilen dökümlerin üretim parametrelerine göre ortalama tane boyutu değerleri Çizelge 7.3’te ve Şekil 7.4’te verilmiştir. Bu grupta üretilen dökümlerin ortalama tane boyutu 47,6-57,8µm değerleri arasında gerçekleşmiştir. Bu değerler ön malzemede elde edilen ortalama tane boyutuna göre biraz daha düşüktür. Fakat, ortalama tane boyutunda azalma, herhangi bir döndürme

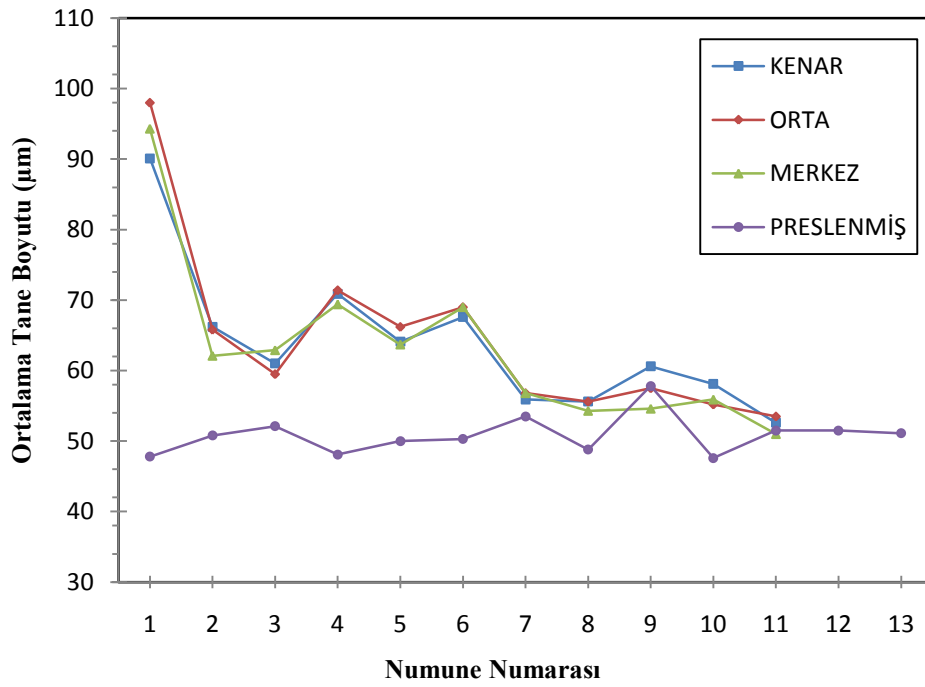
ve tane inceltme işlemi görmemiş aynı pota içinde katılaştırılmış “1” numaralı ingota göre oldukça fazladır. Etial-61 alüminyum alaşımının, döndürmeli entalpi dengeleme ünitesinde yarı-katı malzemenin hazırlanması ve takiben yarı-katı malzemenin basınçlı döküm makinesinde preslenerek katılaşması ile üretilen dökümlerde ortalama tane boyutu değerleri döndürmeli entalpi dengeleme ünitesinde yarı-katı malzemenin hazırlanması ve takiben yarı-katı malzemenin suda katılaşması ile üretilen numunelere göre önemli ölçüde düşmüştür (Şekil 7.5). Döndürmeli dengeleme ünitesinde döndürme sırasında küçük boyutlu tanelerin meydana gelme mekanizması tezin “7.2.2 tane boyutu” bölümünde verilmiştir.

Çizelge 7.3. Etial-61 alaşımının yarı-katı şekillendirilmesi ile üretilen dökümlerin tane boyutu değerleri (μm)

NUMUNE	ORTALAMA (μm)
12	47,8
13	50,8
14	52,1
15	48,1
16	50
17	50,3
18	53,5
19	48,8
20	57,8
21	47,6
22	51,5
23	51,5
24 (ÇUBUK)	51,1



Şekil 7.4. Etial-61 alaşımının yarı-katı şekillendirilmesi ile üretilen dökümlerde tane boyutu



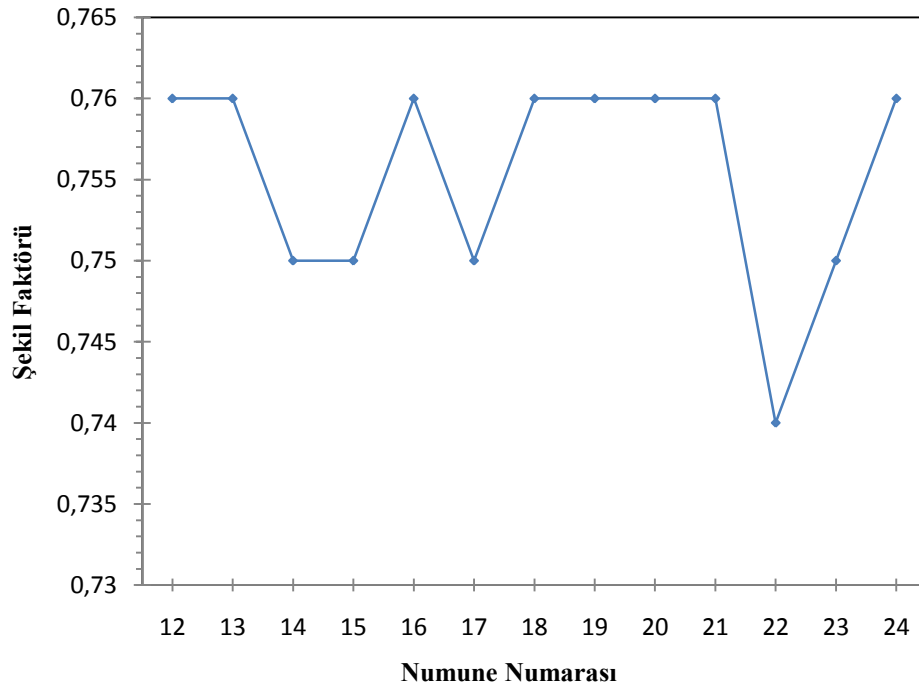
Şekil 7.5. SEED prosesi ile üretilen parçalarda ortalama tane boyutu

7.3.2.3. Şekil faktörü

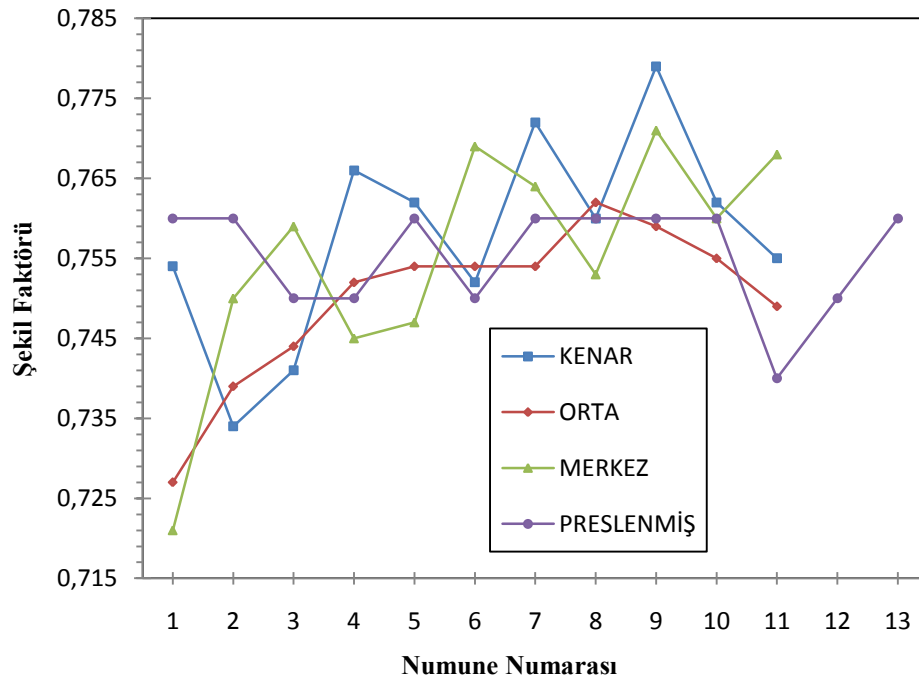
Yarı-katı döküm yöntemi ile üretilen dökümlerin üretim parametrelerine göre şekil faktörü değerleri Çizelge 7.4'te ve Şekil 7.6'da verilmiştir. Yarı-katı dökümlerin üretimi, döndürmeli entalpi dengeleme ünitesinde kullanılan döndürme sürelerinin (Çizelge 6.4) bütünü çalışma sıcaklık aralığında ve presleme parametrelerinde gerçekleştirildiği için şekil faktörü değerleri birbirine oldukça yakındır. Yarı-katı döküm parçaların ürettiği 0,74-0,76 aralığında şekil faktörü değerleri ile ön malzeme ingotların ürettiği şekil faktörü değerleri arasında bir fark görülmemiştir (Şekil 7.7). Ancak yapılan metalografik gözlemlerde, yarı-katı dökümlerde tane küreselliği ön malzemelerde oluşan tanelerin küreselliğinden daha iyi olduğu tespit edilmiştir. Ön malzemeler ile yarı-katı dökümlerin arasında küresellik derecesinin şekil faktörü ile tespit edilememesinin şekil faktörü belirleme yönteminden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Çizelge 7.4. Etial-61 alaşımının yarı-katı şekillendirilmesi ile üretilen dökümlerde şekil faktörü değerleri

NUMUNE	ORTALAMA
12	0,76
13	0,76
14	0,75
15	0,75
16	0,76
17	0,75
18	0,76
19	0,76
20	0,76
21	0,76
22	0,74
23	0,75
24 (ÇUBUK)	0,76



Şekil 7.6. Etial-61 alaşımının yarı-katı şekillendirilmesi ile üretilen dökümlerde şekil faktörü



Şekil 7.7. SEED prosesi ile üretilen parçalarda şekil faktörü

7.4. Etial-61 Al-Mg-Si Alaşımının Döndürmeli Entalpi Dengeleme Prosesi İle Reo Yarı-katı Şekillendirme Yönteminde Katılaşma Mekanizması

Döndürmeli entalpi dengeleme ünitesinde potanın döndürme etkisiyle tane boyutunun azalması aşağıda verilen mekanizmalar ile açıklanabilir. Sıvı metal oda sıcaklığına sahip potaya dökölür dökölmez sıvı metalin potaya döküm sıcaklığı düşük olduğından pota cidarlarından ısı transferi başlar. Pota cidarlarında sıcaklık hızlı bir şekilde katılaşma sıcaklığının altına düşer ve ilk katı birincil α -Al kristalleri meydana gelir. Diğeri taraftan, sıvı metalin potaya dökümünden kaynaklanan sıvı türbölansı, sıvı metalin potada döndürme hareketi ve sıvı içinde sıcaklık farklılıklarından kaynaklanan konveksiyon akımı pota cidarlarında meydana gelen ilk kristalleri henüz büyümeden pota cidarından koparır ve ingotun merkezi bölgesine doğru sürükler. Bu işlem devam ederken pota içinde metal sıcaklığı düşer ve sıvı içinde çekirdeklenme için çok sayıda küçük katı kristaller oluşur. Isı transferi devam ederken çekirdekleyici vazifesi gören küçük katı kristaller üzerinde birincil α -Al taneleri eşeksenel olarak teşekköl etmeye başlar. Sıvı tarafından kuşatılan birincil α -Al taneleri büyümesini tamamlayamadan yarı-katı durumda potadan basınçlı döküm makinesine aktarılır ve nispeten yüksek basınçla kalıba preslenir. Presleme işlemi sonrasında, ısı transfer hızının artmasıyla önce birincil α -Al tanelerinin oluşması tamamlanır ve sonra birincil α -Al tanelerini kuşatan sıvının katılaşmasıyla Mg_2Si , Si ve diğeri metaller arası bileşikler meydana gelir.

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

8.1. Sonuçlar

Ergitme ocağı, döndürmeli entalpi dengeleme (SEED) ünitesi ve basınçlı döküm makinesinin eşgüdümlü kullanılması ile Etial-61 Al-Mg-Si alaşımının reo yarı-katı şekillendirilmesini içeren deneysel çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir;

1. Etial-61 alaşımının reo yarı-katı şekillendirme yönteminde %40-60 sıvı-katı oranlarında çalışma sıcaklık aralığının 594°C ile 622°C (28°C) sıcaklıklar arasında olduğu tespit edilmiştir.
2. Etial-61 alaşımının reo yarı-katı şekillendirme işleminde homojen ve küresel mikroyapıya ve tiksotropik özelliğe sahip yarı-katı malzeme döndürmeli dengeleme prosesi ile elde edilmiştir.
3. Etial-61 alaşımının tane inceltme ve döndürmeli entalpi dengeleme ünitesinde sabit döndürme hızında 75, 80, 85, 90 ve 95 sn. döndürme süreleri ile 52,4-57,6µm arasında tane boyutu ve 0,73-0,76 arasında şekil faktörü değerlerine sahip yarı-katı ön malzeme elde edilmiştir.
4. Etial-61 alüminyum alaşımının döndürmeli entalpi dengeleme ünitesinde yarı-katı malzemenin hazırlanması ve takiben yarı-katı malzemenin basınçlı döküm makinesinde preslenmesiyle üretilen dökümlerde makro boşluklar meydana gelmemiştir.
5. Etial-61 alaşımının reo yarı-katı şekillendirme yöntemi ile üretilen sedye parçası ve çekme testi dökümlerinde sıcak çatlak hatası meydana gelmiştir. Ancak, Etial-61 alaşımının kimyasal bileşimi modife edilerek yarı-katı dökümlerde sıcak çatlak hatası giderilmiştir.
6. Etial-61 alaşımından reo yarı-katı şekillendirme yöntemi ile üretilen sedye parçası ve çekme testi dökümlerinde küresel tane şekline sahip mikroyapı elde edilmiştir.

7. Etial-61 alaşımından reo yarı-katı şekillendirme yöntemi ile üretilen sedye parçası ve çekme testi dökümleri 47,6-57,8µm tane boyutu ve 0,74-0,76 şekil faktörü değerlerine sahiptir.
8. Etial-61 alaşımından reo yarı-katı şekillendirme yöntemi ile üretilen sedye parçası ve çekme testi dökümlerinin mikroyapısında gaz ve mikro çekme boşlukları önemli derecede elimine edilmiştir.
9. Etial-61 alaşımının döndürmeli entalpi dengeleme prosesi ile reo yarı-katı şekillendirilmesinde endüstriyel boyutta parça üretimi gerçekleştirilmiştir.

8.2. Öneriler

Gerçekleştirilen deneysel çalışma sonuçları dikkate alınarak yapılan öneriler aşağıda verilmiştir;

1. Etial-61 alaşımının döndürmeli entalpi dengeleme prosesi ile reo yarı-katı şekillendirilmesinde oksitlenme problemi detaylı olarak araştırılmalı ve koruyucu atmosferde yarı-katı şekillendirme çalışmaları yapılmalıdır.
2. Alüminyum dövme alaşımlarında oluşma ihtimali yüksek olan sıcak yırtılma veya sıcak çatlak hatası hem teorik hem de deneysel olarak detaylı bir şekilde incelenmelidir.
3. Yaygın kullanım alanına sahip diğer dövme alüminyum alaşımlarının döndürmeli entalpi dengeleme prosesi ile reo yarı-katı şekillendirilmesi endüstriyel boyutta araştırılmalıdır.
4. Alaşımların yarı-katı şekillendirilmesi işleminde yolluk sistemi yarı-katı malzemenin kalıbı doldurma mekanizması, akış şekli, basınç ve katılaşma mekanizmaları dikkate alınarak teorik ve deneysel olarak araştırılmalıdır.

KAYNAKLAR

Abramov, O.V., Straumal B.B. and Gust, W., “Hypereutectic Al-Si based alloys with a thixotropic microstructure produced by ultrasonic treatment”, **Materials and Design**, 18: 323-326 (1997).

Adachi, M., Sasaki, H. and Harada, Y., “Methods and apparatus for shaping semisolid metals” UBE Industries, **European Patent**, Patent No: 0745694, (1996).

Aktar, N., “Tikso kalıplama ünitesi tasarımı ve imalatının yapılarak Al-Si alaşımlarının üretilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Karabük, 7-11 (2004).

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).

Atkinson, H.V., “Modelling the semisolid processing of metallic alloys”, **Progress in Materials Science**, 50 (3): 341-412 (2005).

Atkinson, H.V. and Liu, D., “Microstructural coarsening of semi-solid aluminium alloys”, **Materials Science and Engineering A**, 496 (1-2): 439-446 (2008).

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).

Birol, Y., Çakır, O. ve Alageyik, F., “Elektromanyetik karıştırma ile tiksotropik alüminyum biyet üretimi”, **13.Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi Bildiriler Kitabı**, İstanbul, Türkiye, 1704-1712 (2006).

Birol, Y., “A357 thixoforming feedstock produced by cooling slope casting”, **Journal of Materials Processing Technology**, 186 (1-3): 94-101, (2007-1).

Birol, Y., “Thixoforming of non-dendritic AA6061 feedstock produced by low superheat casting with and without a cooling slope”, **International Journal of Materials Research**, 98 (10): 1019-1024 (2007-2).

Birol, Y., “Thermomechanical processing of AA6061 billets for semi-solid forming”, **International Journal of Materials Research**, 98 (1): 53-59, (2007-3).

Birol, Y., “Cooling slope casting and thixoforming of hypereutectic A390 alloy”, **Journal of Materials Processing Technology**, 207 (1-3): 200-203 (2008).

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 (2009-1).

Birol, Y., “Internal cooling to produce aluminium alloy slurries for rheocasting”, ***Journal of Alloy and Compounds***, 480 (2): 365-368 (2009-2).

Bozkurt, U., Birol, Y., Önsel, M., Çakır, O. ve Altıntaş, S., “Alüminyum alaşımlarında eğimli soğutma plakasında döküm yöntemiyle tiksotropik yapı elde edilmesi”, ***12. Uluslararası Metalurji Malzeme Kongresi Bildiriler Kitabı***, İstanbul, Türkiye, 2036-2043 (2005).

Cabibbo, M., Evangelista, E. and Vedani, M., “Influence of severe plastic deformation on secondary phase precipitation in a 6082 Al-Mg-Si alloy”, ***Metallurgical and Materials Transactions A***, 1353-1364 (2005).

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).

Chen, C.Y., Sekhar, J.A., Backman, D.G. and Mehrabian, R., “Thixoforging of aluminium alloys”, ***Materials Science and Engineering***, 40 (2): 265-272 (1979).

Cho, W.G. and Kang, C.G., “Mechanical properties and their microstructure evaluation in the thixoforming process of semi-solid aluminum alloys”, ***Journal of Materials Processing Technology***, 269-277 (2000).

Chul, L., Hyun, K.S. and Lee H.I. “Alloy desing of thixoformable wrought SiC/Al alloy composites”, ***Materials Research Bulletin***, 34: 35-42 (1999).

Czerwinski, F., “Semisolid processing—origin of magnesium molding”, Magnesium Injection Molding, ***Springer US***, USA, 81-145 (2007).

Çavuşoğlu, E., Döküm Teknolojisi I kitabı, ***İ.T.Ü. Kütüphanesi***, Sayı: 1499, İstanbul (1992)

Dışpınar, D. ve Türkeli A., “SIMA ile üretilmiş yarı-katı 2024 ve 7075 alüminyum alaşımlarının çözeltiye alma ısı işlemi”, ***11. Uluslararası Malzeme Sempozyumu Bildiriler Kitabı***, Denizli, Türkiye, 792-798 (2006).

Doğruiyol, E., “Comparison of mechanical properties os semi solid forming and hot forming of a356 aluminium alloy”, ***Bogazici University Graduate Program in Mechanical Engineering***, İstanbul, 1-53 (2006).

Dong, J. and Cui, J.Z., “Proceedings of 6th International conference on semi-solid of alloys and composites”, ***The University of Sheffield***, 193 (1996).

Dong, J., Cui, J.Z., Le, Q.C. and Lu, G.M., “The key laboratory of electromagnetic processing of material, ministry of education”, ***Northeastren University***, Shenyang, People's Republic of China, 317 (2002).

Doutre, 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).

Eisen, P., Young, K., "Diecasting system for semi-liquid and semisolid metal casting- applications", in: G.L. Chiarmetta (Ed.), *Proceedings of the Sixth International Conference on Semisolid Processing of Alloys and Composites*, 41-46 (2000).

Fan, Z., "Semisolid metal processing" *International Materials Reviews*, 47 (2): 49-85 (2002).

Fan, Z., "Development of the rheo-diecasting process for magnesium alloys", *Materials Science and Engineering A*, 413-414: 72-78 (2005).

Figueredo, A., "Science and technology of semi-solid metal processing" *North America Die Casting Association*, USA, 2.1-2.17, (2001).

Flemings, M.C., Riek, R.G. and Young, K.P., "Rheocasting", *Materials Science and Engineering*, 25: 103-117 (1976).

Flemings, M.C., "Behavior of metal alloys in the semisolid state", *Metallurgical Transactions A*, 22 (5): 957-981 (1991).

Garat, M., Blais, S., Pluchon, C. and Lou  , W.R., "Aluminium semi-solid processing: from the billet to the finished part", *Proceedings of the Fifth International Conference on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites*, Colorado, USA, 27-31 (1998).

Gençalp, S., Kasman  . ve Saklako  lu, N. "So  utma plakasında d  k  m sırasında plaka a  ı ve uzunlu  unun mikroyapı geli  imine etkisinin incelenmesi", *5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09) Bildiriler Kitabı*, Karab  k, Türkiye, 784-788 (2009).

Haga, T. and Suzuki, S., "Casting of aluminium alloy ingots for thixoforming using acooling slope", *Journal of Materials Processing Technology*, 118 (1-3): 169-172 (2001).

Handbook ASM, "Casting aluminum and aluminum alloys", *Aluminum Company of America*, 749-753 (1988).

Hirt, G., Cremer, R., Winkelmann, A., Witulski, T. and Zillgen M., "Semi solid forming of aluminium alloys by direct forging and lateral extrusion", *Journal of Materials Processing Technology*, 45: 359-364 (1994).

Hirt, G. and Kopp, R., "Semi-solid metal processing", *WILEY-VCH Verlag GmbH & Co, Weinheim*, (2009).

Idegomori, T., Hirono, H., Ito, O., Kimishima, S. and Mizoue, K., “The manufacturing of automobile parts using semi-solid metal processing”, ***Proceedings of the Fifth International Conference on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites***, Colorado School of Mines, Colorado, USA, 71-77 (1998).

Ji, S., Fan, Z. and Bevis, M.J., “Semi-solid processing of engineering alloys by a twin-screw rheomoulding process”, ***Materials Science and Engineering A***, 299 (1-2): 210-217 (2001).

Jung, H.K., “The induction heating process of semi-solid aluminium alloys for thixoforming and their micro structure evaluation”, ***Journal of Materials Processing Technology***, 105: 176-190 (2000).

Jung, H.K. and 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).

Kang C.G., Choi J.S. and Kim K.H., “The effect of strain rate on macroscopic behavior in the compression forming of semi-solid aluminum alloy”, ***Journal of Materials Processing Technology***, 88: 159-168 (1999).

Kang, C.G. and Jung, G.D., “Improvement of the liquid segregation phenomena of semisolid aluminium alloys by the multistage strain rate control in the compression test”, ***Journal of Materials Engineering Performans***, 10: 419-428 (2001).

Kang, S.S., Kang, C.G. and Do, Y.J., “Effect of reheating conditions of semi-solid aluminum alloy on globular microstructure”, ***Journal of Korean Society Technology Plasticity*** 7 (3): 215-224 (1998).

Kapranos, P., Kirkwood, D.H. and Sellars, C.M., “Semi-solid forging of high temperature alloys”, ***Proceedings of the Second International Conference on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites***, Massachusetts Institute of Technology of, Massachusetts, USA, 119-122 (1992).

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).

Kapranos, P., Atkinson, H.V., Camacho, A.M. and Argent, B.B., “Thermo dynamic predictions of wrought alloy compositions amenable to semi-solid processing”, ***Acta Materialia***, 51: 2319-2330 (2003).

Karayazı, A., “Etial 110 alaşıminın dökümde makro ve mikro porozite oluşumunun modellenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, ***Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü***, Sakarya, 12-15 (2009).

Kenney, M.P., Courtois, J.A., Evans R.D., Farroir G.M., Kyonka, C.P., Koch, A.A. and Young, K.P., “Semisolid metal casting and forging”, ***Metals Handbook, ASM***, Ohio, USA, 15: 327-338 (1988).

Kılıçlı, V., “Yarı-katı döküm tekniği ile üretilen Al-Zn alaşımlarında yapı-özellik ilişkisinin incelenmesi”, Doktora Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, (2010).

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).

Kim, S.K., Yoon, Y.Y. and Jo, H.H., “Novel thixoextrusion process for Al wrought alloys”, **Journal of Materials Processing Technology**, 187-188: 354–357 (2007).

Kirkwood, D.H., Sellars, C.M. and Boyed, L.G.E., “Thixotropic materials”, **United States Patent**, Patent No: 5133811, USA, (1992).

Kirkwood, D.H., “Semisolid metal processing”, **International Materials Reviews**, 39 (5): 173-189 (1994).

Kirkwood, D.H., “Semisolid processing of high melting point alloys”, **Proceedings of the 4th International conference on Semi-Solid processing of Alloys and Composites**, Sheffield, June, (1996).

Kirkwood, D.H., Suery, M., Kapranos, P., Atkinson, H.V., Young, K.P., “Semi-solid processing of alloys”, **Springer**, London, 117-128 (2009).

Kiuchi, M. and Sugiyama, S., “A new process to manufacture semi-solid alloys”, **ISIJ International**, 35 (6): 790-797 (1995).

Kopp, R., Winning, G. and Möller, T., “Thixoforging of aluminium alloys”, **METEC**, Düsseldorf, 1-6 (1999).

Kopp, R., Neudenberger, D. and Winning, G., “Different concepts of thixoforging and experiments for rheological data”, **Journal of Materials Processing Technology**, 111 (1-3): 48-52 (2001).

Kouji S., “The characteristics of thixoforming product”, **Proceedings of the 175th JSTP symposium for semi-solid metals forming**, JSTP & JSME, Tokyo University of Technology, Tokyo, Japan, 25-33 (1997).

Langlais, J., Andrade, N., Lemiux, A., Chen, Z.G. and Bucher, L., “The semi-solid forming of an improved AA6061 wrought aluminum alloy composition”, **Transaction Technology Publications**, Switzerland, 141-143, 511-516, (2008).

Lee, D.H., Seo, P.K. and Kang, C.G., “Die design by filling analysis of semi-solid injection forging process and their experimental investigation”, **Journal of Materials Processing Technology**, 147: 45-50 (2004).

Lewis, D., “Solidification defects revisited and semi-solid processing”, **JOM Journal of the Minerals, Metals and Materials Society**, 58 (6): 12 (2006).

Marcello, C., Enrico, E., Stefano, S. and Emanuela, C., “Characterisation of a 6082 aluminum alloy after thixoforming” **Materials Technology**, 35(1-2), 9-16 (2001).

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).

Nafisi, S. and Ghomashchi, R., “Semi-solid metal processing routes: an overview”, **Canadian Metallurgical Quarterly**, 44 (3): 289-304 (2005).

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).

Nafisi, S. and Ghomashchi, R. “Boron-based refiners: advantages in semi-solid-metal casting of Al–Si alloys” **Materials Science and Engineering A**, 452-453: 437-444 (2007).

Ohno, A., Motegi, T. and Soda, H., “Origin of the equiaxed crystals in castings”, **Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan**, 11 (11):18-23 (1971).

Özer, M., “Yarı-katı döküm tekniği ile üretilen Al-Si alaşımlarında yapı-özellik ilişkisinin incelenmesi”, Doktora Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, (2010).

Patel, J.B., Liu, Y.Q., Shao, G. and Fan, Z., “Rheo-processing of an alloy specifically designed for semi-solid metal processing based on the Al–Mg–Si system” **Materials Science and Engineering A**, 476: 341–349 (2008).

Pinsky, D.A., Charreyron, P.O. and Flemings, M.C., “Compression of semi-solid dentritic Sn-Pb alloys at low strain rates” **Materials Transactions**, 15: 173-181 (1984).

Saklakoğlu, N., Çolakoğlu H. ve Gençalp S., “SIMA prosesi ile üretilmiş Al-4Zn-3Mg alaşımında mikroyapı gelişimi”, **Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi**, 6(3): 89-100 (2009).

Salamcı, E., “Spray döküm”, **G.Ü. Fen Bilimleri Dergisi**, 17(2): 155-173 (2004).

Seo, P.K., Kim, D.U. and Kang, C.G., “The characteristics of grain size controlled microstructure and mechanical properties of Al-Si alloy by thixocasting and rheocasting process”, P.K. Seo, **Journal of processing Technology**, 162-163: 570-578 (2005).

Sirong, Y., Dongcheng, L. and Kim, N., “Microstructure evolution of SIMA processed AA2024”, **Materials Science and Engineering A**, 420 (1-2): 165-170 (2006).

Song, Y.B. and Hong, C.P. “Grain refinement of 6061 alloy by the modified strain induced melt activated (SIMA) process for semi solid processing”, ***Solid State Phenomena***, 119: 311-314 (2007).

Spencer, D.B., Mehrabian R. and Flemings M.C., “Rheological behavior of Sn-15 pct Pb in the crystallization range”, ***Metallurgical Transaction A***, 3: 1925-1932, (1972).

Sukimoto M. ***Aluminium technology proceedings of the international conference***, London, (1986).

Suzuki, S. and Haga, T., “Casting of aluminum alloy ingots for thixoforming using a cooling slope”, ***Journal of Materials Processing Technology***, 118: 169-172 (2001).

Taghavi, F. and 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).

Tietmann, A., Bremer, T., Hirt, G. and Kopp, R., “Preliminary results in thixoforging aluminium wrought alloys”, ***Proceedings of Second International Conference on the Semi-Solid Processing of Alloys and Composites***, Massachusetts, USA, 170-179 (1992).

Türkeli, A., “Yarı-katı halde döküm ve şekil verme”, ***4. Denizli Malzeme Sempozyumu Bildiriler Kitabı***, Denizli, Türkiye, 335-344 (1991).

Türkeli, A., “7001 dövme alüminyum alaşımından SIMA yöntemiyle tiksotropik malzeme üretimi”, ***5. Denizli Malzeme Sempozyumu Bildiriler Kitabı***, Denizli, Türkiye, 52-62 (1993).

Türkeli, A., “Yarı-katı durumda döküm şekil verme ve rafinasyon prosesleri”, ***Metalurji Dergisi***, 98: 37-43 (1995).

Türkeli, A. and Akbaş, N., “Formation of non-dendritic structure in 7075 wrought aluminium alloy by SIMA process and effect of heat treatment”, ***Proceedings of Fourth International Conference on the Semi-Solid Processing of Alloys and Composites***, Sheffield, UK, 71-74 (1996).

Tzimas, E., “Evolution of microstructure and rheological behavior of alloys in the semi solid state”, Ph.D. Thesis, ***Drexel University***, USA, 1-12 (1997).

Wang, S., Li, Y., Chen, W. and 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).

Ward, P.J., Atkinson H.V., Anderson P.R.G., Elias L.G., Garcia L., Kahlen L. and Rogriguez-İbabe J.-M. “Semi-solid processing of novel MMCs based on hypereutectic aluminium-silicon alloys”, ***Acta Materialia***, 44: 1717-1727 (1995).

Witulski, T., Morjan, U., Niedick, I., and Hirt, G., “The thixoformability of aluminium alloys”, ***Proceedings of the Fifth International Conference on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites***, Colorado, USA, 353-360 (1998).

Wu, C., “A numerical study of high pressure die casting with light alloys”, M.Sc. Thesis, Mechanical and Materials Engineering, ***Queen’s University***, Kingston-Ontario, Canada, 1-10 (2004).

Yang, S.J., “Analysis and development of a simple procedure for measuring the rheological properties of thixotropic magnesium alloys”, M.Sc. Thesis, ***University of Queen’s, Mechanical Engineering***, Kingston-Ontario, Canada, 1-16 (2004).

Yoshida, C., Moritaka, M., Shinya, S., Takebayashi, K. and Nanba, A., “Semi-solid forging of aluminium alloys”, ***S.B. Brown, M.C. Flemings (Eds), proceedings of the second international conference on semi-solid processing of alloys and composites***, MIT Press, Cambridge, MA, June 10-12, 95-102 (1992).

Young, K.P., Curtis, P.K. and James .C., “Fine grained metal composition”, ***United States Patent***, Patent No: 4415374, USA (1983).

Zoqui, E.J., Graccioli, J.I. and Lourençato, L.A., “Thixo-formability of the AA6063 alloy: Vonventional production processes versus electromagnetic stirring” ***Journal of Materials Processing Technology***, 198: 155-161 (2008).

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).

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : UĞUR, Sadullah
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 07.05.1986 Bolu
 Medeni hali : Bekar
 Telefon : 0 (536) 613 85 23
 e-mail : sadullahugur@gazi.edu.tr

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metal Eğitimi	2012
Lisans	Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Metal Eğitimi Döküm Öğretmenliği	2010
Lise	Abant Lisesi	2003

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2010-2012	Gazi Üniversitesi Atatürk Meslek Yüksekokulu	Öğretim Görevlisi

Yabancı Dil

İngilizce

Hobiler

Bilgisayar teknolojileri, Gezi, Sinema, Müzik