



**YARI-KATI ŞEKİLLENDİRME İÇİN ELEKTRO-MANYETİK
KARIŞTIRMA YÖNTEMİ İLE ÖN MALZEME ÜRETİMİ**

Seda ATAKUL

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

TEMMUZ 2021

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Seda ATAKUL
02/07/2021

YARI-KATI ŞEKİLLENDİRME İÇİN ELEKTRO-MANYETİK KARIŞTIRMA YÖNTEMİ İLE ÖN MALZEME ÜRETİMİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Seda ATAKUL

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Temmuz 2021

ÖZET

Uzay ve havacılık sektöründe kullanım alanı oldukça fazla olan AA7050 Al alaşımından nihai parça üretimi çoğunlukla talaşlı imalat yöntemi ile veya alçak/yüksek basınçlı döküm yöntemi ile yapılmaktadır. Nihai parça üretimi için hem fire parça hem de zaman kaybı oldukça fazladır. Bu durum üretilen parçada maliyet açısından kazanç kaybına sebep olmaktadır. Son zamanlarda yüksek mekanik özellikleri ve net şekle yakın parça üretimi gibi üstün özelliklerinden dolayı parça üretiminde yarı-katı şekillendirme yöntemi kullanılmaktadır. Yarı-katı şekillendirme için kullanılan ön-malzemenin tiksotropik özelliğe sahip olması gerekir. Tiksotropik özelliklere sahip ön-malzeme üretimi için birçok yöntem bulunmaktadır. Bu çalışmada tiksotropik ön-malzeme üretimi için elektro-manyetik karıştırma yöntemi kullanılmıştır. AA7050 Al alaşımından elektro-manyetik karıştırma yöntemi ile tiksotropik ön-malzeme üretimi yapılmıştır. Elektro-manyetik karıştırma ünitesi özel olarak yazılan bir bilgisayar programı ile kontrol edilmiştir. Elektro-manyetik karıştırma ünitesi, Profi-LAB editör yazılımı kullanılarak oluşturulan ara yüz ile bilgisayar üzerinden PLC aracılığıyla kontrol edilmiştir. Değişken manyetik alan oluşturmak için asenkron motor kullanılmış olup motorun kontrolü frekans konvertörü ile sağlanmıştır. Yarı-katı sıcaklık aralığındaki katılaşma esnasında elektro-manyetik karıştırma yöntemi ile farklı parametrelerle üç farklı numune üretimi gerçekleştirilmiştir. Karşılaştırma yapmak amacıyla elektro-manyetik karıştırma yapılmadan da aynı şartlarda grafit kalıba döküm gerçekleştirilmiştir. Üretilen tüm numunelerin mikroyapıları incelenmiştir. Yapılan mikroyapı incelemeleri sonunda elektro-manyetik karıştırma yöntemi ile üretilen tiksotropik AA7050 numunelerde α -Al dendrit kollarının kırıldığı ve mikroyapıdaki α -Al hücrelerinin rozet ve/veya nadiren küremsi şekle sahip olduğu gözlenmiştir. Elektro-manyetik karıştırma yapılmadan grafit kalıba döküm yöntemi ile üretilen numune incelendiğinde ise mikroyapıdaki α -Al hücrelerinin dendritik olarak oluştuğu belirlenmiştir. Tüm numuneler incelendiğinde ideal tiksotropik ön malzeme üretimi frekans 50 Hz, gerilim 380 volt, tork 160 N/m parametreleri ile sağlanmıştır.

Bilim Kodu : 915517

Anahtar Kelimeler : Yarı-Katı, Elektro-Manyetik Karıştırma, Ön Malzeme Üretimi, Tikso Şekillendirme

Sayfa Adedi : 81

Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Melika ÖZER

FEEDSTOCK PRODUCTION BY ELECTRO-MAGNETIC STIRRING METHOD FOR THIXO-FORMING

(M. Sc. Thesis)

Seda ATAKUL

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

July 2021

ABSTRACT

The production of final parts from AA7050 Al alloy, which has a large area of use in the aerospace and aviation industry, is mostly made by machining or low/high pressure casting method. For the production of the final part, both wasted parts and time loss are quite high. This situation causes loss of profit in terms of cost in the produced part. Recently, semi-solid forming method is used in the production of parts due to its superior properties such as high mechanical properties and production of parts near net shape. The feedstock used for semi-solid forming must have thixotropic properties. There are many methods for the production of precursors with thixotropic properties. In this study, electro-magnetic stirring method was used for thixotropic feedstock production. Thixotropic feedstock was produced from AA7050 Al alloy by electro-magnetic stirring method. Electro-magnetic stirring unit was controlled by a specially written computer program. Electro-magnetic stirring unit was controlled via PLC via computer with interface created using Profi-LAB editor software. An asynchronous motor is used to create a variable magnetic field and the motor is controlled by a frequency converter. During the solidification in the semi-solid temperature range, three different samples were produced with different parameters by electro-magnetic stirring method. For comparison purposes, graphite mold casting was carried out under the same conditions without electro-magnetic stirring. Microstructures of all produced samples were examined. At the end of the microstructure investigations, it was observed that the α -Al dendrite arms were broken and the α -Al grains in the microstructure had rosette and/or rarely spherical shape in the thixotropic AA7050 samples produced by the electro-magnetic stirring method. When the sample produced by the graphite mold casting method without electro-magnetic stirring was examined, it was determined that the α -Al grains in the microstructure were formed dendritic. When all samples were examined, ideal thixotropic feedstock production was achieved with frequency 50 Hz, voltage 380 volts, torque 160 N/m

Science Code : 91517

Key Words : Semi-Solid, Electro-Magnetic Stirring, Feedstock, Production, Thixo-forming

Page Number : 81

Supervisor : Assist. Prof. Dr. Melika ÖZER

TEŞEKKÜR

Bu tezin hazırlanmasında engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım ve her daim desteğini gördüğüm değerli danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Melika ÖZER'e teşekkür eder saygılarımı sunarım.

Çalışmalarım boyunca değerli tecrübelerini, bilgilerini ve yardımlarını esirgemeyen Sayın Doç. Dr. Alpay ÖZER'e, Öğr. Gör. Seyfettin VADİ'ye şükranlarımı bir borç bilirim.

Deneyisel çalışmalarına katkılarından dolayı Gazi Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Arş. Gör. Tolga YILMAZ, Arş. Gör. Ahmet Merih HIRPA teşekkür ederim.

Hayatımın her aşamasında bana güç veren ve hep yanımda olan, çalışmalarım boyunca beni sabırla destekleyen aileme teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Proje Koordinasyon Birimi tarafından 07/2020-01 notlu proje olarak desteklenmiştir.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xi
RESİMLERİN LİSTESİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. YARI-KATI METAL ŞEKİLLENDİRME	3
2.1. Yarı Katı Üretim Yönteminin Avantajları	5
2.2. Yarı Katı Üretim Yönteminin Dezavantajları	6
3. YARI-KATI METAL ŞEKİLLENDİRME YÖNTEMLER	7
3.1. Reo Şekillendirme	8
3.1.1. Reo-döküm.....	8
3.1.2. Reo-kalıplama	9
3.1.3. Yeni reo döküm yöntem.....	10
3.2. Tikso-Şekillendirme Yöntemleri.....	12
3.2.1. Tikso-döküm	13
3.2.2. Tikso-kalıplama.....	14
3.2.3. Tikso-dövme	15
3.2.4. Tikso-ekstrüzyon.....	16
4. TİKSOTROPİK ÖN MALZEME ÜRETİM YÖNTEMLERİ	17
4.1. Mekanik Karıştırma Yöntemi	18

	Sayfa
4.2. Elektro-manyetik Karıştırma Yöntemi.....	20
4.3. Sprey Döküm	25
4.4. Düşük Sıcaklıktan Döküm Yöntemi	26
4.5. Kimyasal Tane İnceltme Yöntemi	27
4.6. Eğimli Soğuma Plakasına Döküm Yöntemi	28
5. TIKSO ŞEKİLLENDİRME İÇİN YENİDEN ISITMA PROSESİ.....	31
6. ALÜMİNYUM VE ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI.....	37
6.1. Alüminyum Alaşımlarının Sınıflandırılması.....	39
6.2. Al-Zn-Mg-Cu Alüminyum Alaşımları	42
7. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	47
7.1. Malzeme.....	47
7.2. AA7050 Alaşımının Ergime ve Katılaşma Sıcaklıklarının Belirlenmesi	47
7.3. AA7050 Alaşımının Ergitilme İşlemi	49
7.4. Elektro-manyetik Karıştırma Ünitesinin Kurulması	49
7.5. Tikotropik Yapıya Sahip Ön Malzemenin Üretilmesi.....	50
7.6. Metalografik Çalışmalar.....	53
7.7. Mikro Sertlik Ölçümü	55
8. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA	57
8.1. Mikroyapı İncelemeleri.....	57
8.1.1. AA7050 Al alaşımının geleneksel döküm yoluyla üretilen mikroyapısı ..	57
8.1.2. AA7050 Al alaşımından dendritik olmayan ön malzeme üretimi	62
8.2. Mikro Sertlik İncelemeleri	69
9. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	71
9.1. Sonuçlar.....	71
9.2. Öneriler	72
KAYNAKLAR	73

ÖZGEÇMİŞ	81
----------------	----



ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.1. AA6082 Al alaşımının farklı ısıtma sıcaklıkları altındaki ortalama tane boyutları	29
Çizelge 6.1. Kullanım alanlarına göre alüminyumun özellikleri	38
Çizelge 6.2. Sektörlere göre alüminyum ürün kullanımı	39
Çizelge 6.3. Dövme alüminyum alaşımları için sınıflandırma sistemi	41
Çizelge 6.4. Döküm alüminyum alaşımları için sınıflandırma sistemi	42
Çizelge 6.5. 7075 T6 standardına (ASM) kıyasla tükso-şekillendirilmiş numunelerinin mekanik özellikleri	44
Çizelge 7.1. AA7050 alüminyum alaşımının kimyasal ve nominal bileşimi	47
Çizelge 7.2. AA7050 alaşımının DSC analizi ile belirlenen katılma ve ergime sıcaklıkları	48
Çizelge 7.3. EMS parametre değerleri	51
Çizelge 8.1. Numunelerin α -Al fazından alınan mikrosertlik (Hv0,1) değerleri	69

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Yarı-katı metal Şekillendirme işleminin uygulanabileceği sıcaklık aralığı....	4
Şekil 3.1. Yarı-katı metal şekillendirme yöntemlerinin üretim aşamaları	7
Şekil 3.2. Yarı-katı metal şekillendirme yöntemlerinin sınıflandırılması.....	7
Şekil 3.3. Reo döküm yönteminin şematik gösterimi	9
Şekil 3.4. Çift vidalı reo-kalıplama işleminin şematik gösterimi	10
Şekil 3.5. Yeni reo-döküm yönteminin şematik gösterimi	11
Şekil 3.6. NRC yönteminin şematik gösterimi, 1.a) Eğimli plaka kullanarak veya 1.b) Direk eğimli kalıba döküm, 2) Kalıbın dik hale getirilmesi, 3.a) İndüksiyon kontrollü soğuma, 3.b) Yarı-katı durumdaki malzemenin katı oranı artar), 3.c) Kalıp ters çevrilir içerisindeki yarı-katı malzeme basma haznesine taşınır. 4) Malzeme kalıba enjeksiyon ile basılır	12
Şekil 3.7. Tikso-Şekillendirme yöntemlerinin şematik olarak gösterimi	13
Şekil 3.8. Sheffield yarı-katı şekillendirme presinin şematik gösterimi	14
Şekil 3.9. Tikso-kalıplama presinin şematik gösterimi.....	15
Şekil 4.1. Tiksotropik ön malzeme üretim yöntemlerinin sınıflandırılması	17
Şekil 4.2. Mekanik karıştırma ünitesi	18
Şekil 4.3. Sürekli mekanik karıştırma ünitesi	19
Şekil 4.4. Elektro-manyetik karıştırma düzeneğinin şematik gösterimi	20
Şekil 4.5. Karıştırma esnasında dendrit kollardan küresel katı parçacıkların oluşumu.....	20
Şekil 4.6. Elektro-manyetik karıştırmanın şematik gösterimi a.) elektro-manyetik dikey karıştırma b.) yatay karıştırma ve c.) hem yatay hem de dikey karıştırma	21
Şekil 4.7. Manyetik karıştırma yönteminin zaman-sıcaklık grafiğinin şematik olarak gösterimi	22
Şekil 4.8. Sprey şekillendirmenin şematik gösterim.....	26
Şekil 4.9. Eğimli soğutma plakasına döküm; a) ergitme ve b) plakaya döküm.....	28
Şekil 5.1. İzotermal bekleme süresine bağlı olarak; a. küre boyutu, b. şekil faktörü	34

Şekil	Sayfa
Şekil 6.1. a. Ekstrüzyon, b. döküm ve c. yassı alüminyum ürün kullanımlarının sektörlere göre dağılımı	39
Şekil 6.2. Alüminyum alaşımları için sınıflandırma sistemi.....	40
Şekil 6.3. Çeşitli alüminyum alaşım serilerinin dayanım-toplam uzama eğrisi	43
Şekil 7.1. AA7050 alaşımının DSC analizi	47
Şekil 7.2. % Katı oranının hesaplanmasında kullanılan DSC eğrisinin şematik gösterimi	48
Şekil 7.3. AA7050 alaşımının sıcaklık-% katı oranı grafiği.....	49
Şekil 7.4. Üretilen numunelerin metalografik incelenmesi; incelenen bölgelerinin şematik gösterimi	53
Şekil 8.1. AA7050 numunelerinin birincil α -Al hücrelerinden alınan mikro sertlik grafiği.....	70

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. Alaşımların yarı-katı durumda tiksotropik davranışı.....	5
Resim 3.1. a. Tikso-dövme cihazı, b. Tikso-dövme ile elde edilmiş parçalar	15
Resim 4.1. Elektro-manyetik karıştırma ile üretilmiş A356 alaşım ön malzemelerin tipik mikroyapısı; a. dökülmüş halde ve b. 580°C’de 60 dakika yeniden ısıtma yapılmış halde	23
Resim 4.2. Orta frekanslı elektromanyetik karıştırma işleminde üretilen yarı-katı ingotun merkez bölgesinin mikro yapıları. (a) karıştırma işlemi olmadan (b) 5dk. (c) 10dk. (d) 15dk.....	25
Resim 5.1. 630-ESP350 numunesinde 572°C’de farklı bekleme sürelerindeki birincil α -Al fazının mikroyapı görüntüleri a) 1dk., b) 3dk., c) 5dk., d) 7dk	34
Resim 6.1. a. Alüminyumun otomotiv üretimindeki kullanım alanları, b. Audi A8 modelindeki alüminyum parçaları	37
Resim 6.2. Alüminyumun metalinin uçak gövdesinde kullanımı.....	38
Resim 7.1. Elektrikli ergitme ocağı ve kullanılan SiC pota.....	49
Resim 7.2. Bilgisayar kontrollü elektro-manyetik karıştırıcının prototip çizimi.....	50
Resim 7.3. Elektro-manyetik karıştırma yönteminin a. şematik gösterimi, b. karıştırma anındaki gösterimi	51
Resim 7.4. Profi-LAB editör yazılımı kullanılarak oluşturulan ara yüz.....	51
Resim 7.5. Profi-LAB editör yazılımı kullanılarak oluşturulan ara yüzden alınan veriler a.15Hz, b. 30Hz, c. 50Hz.....	52
Resim 7.6. Otomatik döner zımparalama ve parlatma cihazı	54
Resim 7.7. Leica DMI 5000M metal mikroskobu	54
Resim 7.8. Jeol marka JSM-6060LV modeli taramalı elektron mikroskobu	55
Resim 7.9. QNESS marka GmbH Q30M modeli mikro sertlik cihazı	55
Resim 8.1. AA7050 Al alaşımı karıştırma işlemi yapılmadan üretilen numunenin 5. Bölgedeki mikroyapıları a. 50X, b. 200X.....	57
Resim 8.2. Geleneksel döküm ile üretilen AA7050 Al alaşımının SEM görüntüleri; a. 500X, b. 2000X.....	58

Resim	Sayfa
Resim 8.3. Döküm AA7050 numunesinden alınan noktasal EDS analiz bölgeleri, b. 1 numaralı, c. 2 numaralı, d. 3 numaralı, e. 4 numaralı, f. 5 numaralı bölgeden alınan EDS analiz sonucu.....	59
Resim 8.4. Döküm AA7050 alaşımının EDS element harita analizi.....	62
Resim 8.5. EMK yönteminde 15 hertz frekans ile elektro-manyetik karıştırma yapılan numunenin mikroyapıları	63
Resim 8.6. EMK yönteminde 30 hertz frekans ile elektro-manyetik karıştırma yapılan numunenin mikroyapıları	64
Resim 8.7. EMK yönteminde 50 hertz frekans ile elektro-manyetik karıştırma yapılan numunenin mikroyapıları	65
Resim 8.8. AA7050 Al alaşımının 50 Hz tiksotropik özellikteki numunenin SEM görüntüleri; a. 330X, b. 800X	65
Resim 8.9. a. AA7050 Al alaşımının 50 Hz tiksotropik özellikteki numuneden alınan noktasal EDS analiz bölgeleri, b. 1 numaralı, c. 2 numaralı, d. 3 numaralı, e. 4 numaralı bölgeden alınan EDS analiz sonucu.....	66
Resim 8.10. AA7050 Al alaşımının 50 Hz tiksotropik özellikteki numunenin EDS element harita analizi.....	69

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler

Açıklamalar

m³

metre küp

Hz

hertz

Dk.

dakika

°C

santigrat derece

µm

mikrometre

Kısaltmalar

Açıklamalar

EMK

Elektro-Manyetik Karıştırma

MIT

Massachusetts Teknoloji Enstitüsü

1. GİRİŞ

Üretim yöntemlerinden biri olan döküm işleminde ürün maliyetlerinin az olmasına rağmen ürünün mekanik özellikleri istenilenden düşüktür. Plastik şekil verme yöntemlerinden olan ekstrüzyon ve dövme işlemleri ile üretilen parçalarda ise üretim maliyetleri fazla ve kullanılan makine envanterinin pahalılığının yanı sıra nihai ürünlerin mekanik özellikleri elverişlidir. Ama bu tür üretim proseslerinde gerek teknik ve gerekse ekonomik yönden bazı sorunlar ortaya çıkabilir. Bu sorunlar nedeniyle üretimde kısıtlamalar ortaya çıkabilir (Rovira, Lancini ve Robert, 1999).

Yarı katı metal şekillendirme teknolojisi, geleneksel metal alaşımlarının üretim süreçlerine göre avantajları nedeniyle giderek daha popüler hale gelmiştir. Malzemelerin yarı katı halde şekillendirilmesi, birincil fazı küresel bir morfolojide sunarak, genellikle döküm, dövme ve ekstrüze malzemeden elde edilen dendritik yapıdan farklı bir yapıya sahip ürünlerle üretilmesini sağlamıştır (Flemings, Riek ve Young, 1976).

Geleneksel üretim yöntemlerine göre yarı-katı metal şekillendirme yönteminin avantajları yüksek yoğunluklu parça, düşük şekillendirme kuvveti, daha uzun kalıp ömrü ve son şekline yakın parça üretimi gibi birçoğunu sıralayabiliriz. Ayrıca, döküm yönteminde yoğunlukla rastlanan katılaşma çekmesi gibi sorunlar yarı-katı şekillendirmede sıvı oranının daha az olmasıyla birlikte az rastlanmaktadır. Mikroyapıda dendritik katılaşmanın oluşmaması ve çekme boşluklarının çok aza indirgenmesinden dolayı yarı-katı yöntemle üretilen nihai ürünlerin mekanik özellikleri döküm yöntemi ile üretilen parçalara kıyasla oldukça üstün, maliyet yönünden bakıldığında ise ekstrüzyon ve dövme gibi üretim yöntemlerinden daha ucuzdur (Kapranos, Ward, Atkinson ve Kirkwood, 2000). Yarı-katı şekillendirme dövme ve döküm yöntemlerine alternatif yeni bir metal şekillendirme yöntemidir.

Günümüzde yoğun çalışmalar yarı-katı şekillendirme üzerinde devam etmekte ve bu çalışmalar özellikle ön malzeme hazırlığı ve yarı-katı halde şekil verme işlemlerini kapsar.

2. YARI-KATI METAL ŞEKİLLENDİRME

Yarı-katı üretim yöntemi son yıllarda araştırma konusu olmasının nedeni nihai ürünün elde edilmesi ve ardından başka bir üretim metoduna ihtiyaç duyulmamasıdır.

Yarı-katı üretim metodu, yüzey kalite özelliği iyi olması gereken askeri uygulama, uzay ve havacılık sektörü alanındaki parçalar, yakıt tankları, otomobil ön ve arka aksları, motor parçaları, fren diskleri, kilitlemesiz fren sistemi, süspansiyon parçaları, şasi, jantlar vb. parçaların üretiminde oldukça başarılıdır. Otomobil jantları yarı-katı üretim yöntemi ile alüminyum malzemesinden üretildiği takdirde diğer yöntemlerle üretilen jantlara göre iyi mekanik özellikler taşır (Eisen and Young, 2000).

Yarı-katı halde şekillendirme yöntemlerinde alüminyum alaşımlarının daha çok kullanılmasının sebebi ise düşük ergime sıcaklığından kaynaklanmaktadır. Bu kullanıma ticari alanda otomobil parçaları üzerinden hidrolik fren valfleri, araba jantları, araba ana silindirleri ve pistonlar örnek olarak verilebilir.

Yarı-katı halde şekillendirme yönteminin otomasyon uygunluğu, şekil verme işlemi için kullanılan kalıp ömrünün fazla olması ile açıklanmaktadır. Yarı-katı şekillendirme yönteminin avantajları arasında; talaş kaldırma gibi işlemlere çok az gereksinim olması, yarı-katı haldeki malzemenin ergiyik malzemeye göre daha az gaz çözünürlüğüne sahip olması ve dolayısıyla daha az mikroporozite içermesi sıralanabilir.

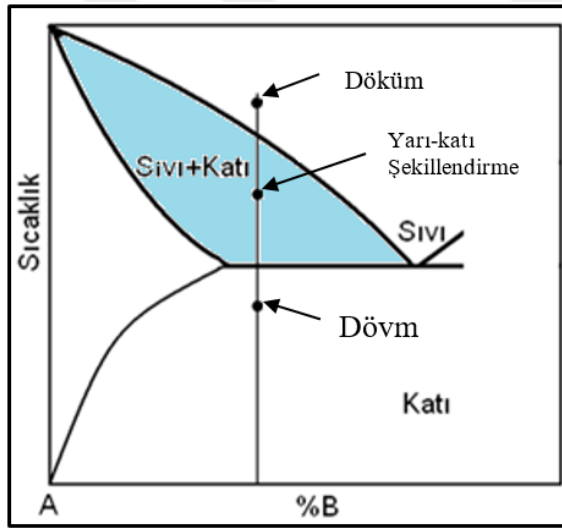
Spencer, Mehriban and Flemings (1972), belli bir katı-sıvı oranına sahip metali mekanik karıştırma yöntemi sonunda katılaşma sırasında oluşan dendritik yapılar kırılarak küresel taneli mikroyapı elde edilmiş ve daha sonra parça üretimi için küresel tane yapısına sahip yarı-katı eriyik kalıba dökülmüştür.

İlk çalışma 1972 yılında Spencer ve diğerlerinin yarı-katı metaller ve alaşımları üzerine olmuştur. Sn-Pb alaşımında %15 Sn bulunan malzeme üzerine yapılan araştırmalar ilkler arasındadır (Spencer ve diğ., 1972).

1972’de inert bir atmosfer veya vakum ortamında yarı-katı işlemle Cu-15 Sn ve Fe, %3C, %4 Si alaşımları “Reo döküm” yöntemiyle dökümü yapılabilmıştır (ASM Handbook, 1988).

Yarı-katı metal şekillendirme yöntemi; Şekil 2.1’de gözlemlendiği gibi metal alaşımı ötektik sıcaklığının üstündeki bir değerde veya ergime sıcaklığının altındaki katılaşmaya uygun bir sıcaklık değerinde ısıtılır. Sonrasında ise döküm yönteminde olduğu gibi yarı-katı malzeme kapalı bir kalıpta veya dövme yönteminde olduğu gibi açık bir kalıpta şekil verilir (Tzimas, 1997).

Saklakoğlu ve diğerleri kokil döküme göre yarı-katı şekillendirme yöntemi ile üretilen parçaların % 30 daha hafif parça üretileceğini ve kokil dökümü ile üretilmiş parçaların mikroyapısından daha ince taneli yapıya ve yapının daha az mikro porozite içerdiğini kanıtlamıştır (Saklakoğlu ve diğ., 2004).



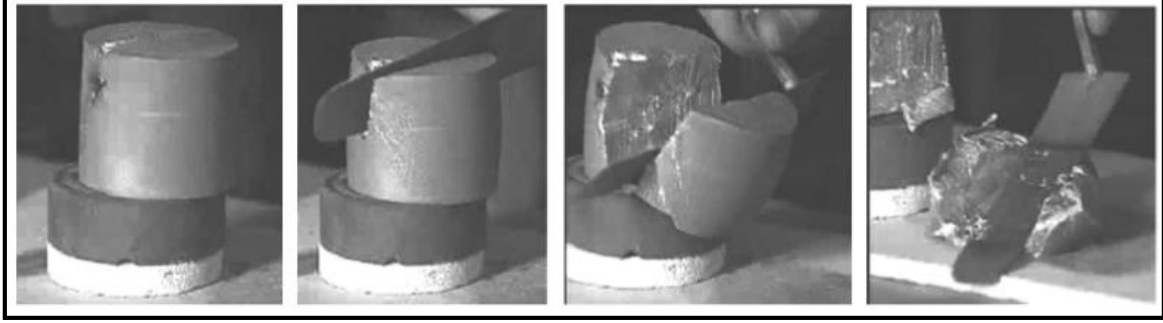
Şekil 2.1. Yarı-katı metal Şekillendirme işleminin uygulanabileceği sıcaklık aralığı

Alüminyum dışında ergime derecesi yüksek olan alaşımların da yarı-katı üretim yöntemleriyle dökülebileceğini 1993 yılında Kapranos yaptığı çalışmayla ispatlamıştır (Kapranos, Ward, Atkinson, Kirkwood, 2000).

Katı ve sıvı fazın aynı anda bulunduğu ve kuvvet altında akışkan hale gelen anlamındaki tiksotropi” 1923 yılında Schalek ve Szegvari tarafından sulu demir oksit jelleri üzerindeki araştırmaları sonucunda bulunmuştur. İki Yunanca kelime olan karıştırmak anlamındaki “thixis” ve dönüşüm anlamındaki “trepō” ‘nun birleşimi olan tiksotropi, başlangıcı ise 1927 yılında ise Pererfi tarafından olmuştur (Tanner ve Walters, 1998).

Yarı-katı şekillendirmenin en büyük avantajı küresel mikroyapıya sahip malzemenin

tiksotropik davranış göstermesidir. Tiksotropi, kuvvet altında zamanla viskozitenin sürekli olarak azalması olarak tanımlanır ve kuvvet kaldırıldığında malzeme eski özelliklerine geri döner (Tzimas, 1997).



Resim 2.1. Alaşımların yarı-katı durumda tiksotropik davranışı (Önsel, 2005)

Yarı-katı malzeme serbest halde şeklini koruyabilecek yüksek viskoziteye sahiptir. Buna karşın çok küçük bir kuvvet uygulandığında oldukça düşük viskozite sergiler ve akışkan sıvı gibi davranır. Yarı-katı malzemenin tiksotropik davranışı Resim 1.1’de görülmektedir (Önsel, 2005).

2.1. Yarı Katı Üretim Yönteminin Avantajları

- Alaşıma laminar akış kazandırdığı için daha az gaz ve makropozite oluşur.
- Üretim sürecinde kontrol aşamasının tam yapılmasını sağlarken otomasyona izin verir.
- Yarı-katı halde şekil verme işlemi düşük sıcaklıklarda ve kısa proses süresinden dolayı kalıp ömrünü uzatır.
- Kısa üretim çevrimi ve otomasyon sonucunda verimlilik artar.
- İnce kesitlerin doldurulmasına ve bu sebepten hafif parçaların şekillendirilmesine imkan sağlar.
- Düşük tolerans aralığında parçanın nihai şekli elde edilir.
- Üretim sonrası talaşlı imalat gibi işlemlere gerek kalmaz.
- Geleneksel döküm yöntemlerine göre %65 enerji tasarrufu sağlar.
- Geleneksel döküm yöntemlerinde meydana gelen türbülanslı sıvı akışı, gaz ve mikro çekme boşlukları, sıcak yırtılma ve segregasyon gibi döküm hataları en aza indirgenir. Geleneksel döküm yöntemlerine göre daha yüksek mekanik özellikler kazandırır (Atkinson ve diğ., 2002a, Tzimas, 1997, Fan, 2002).

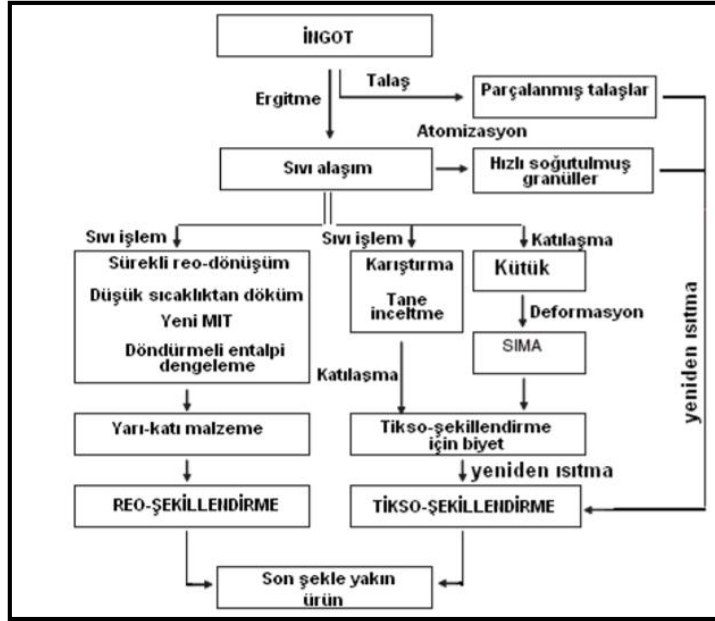
2.2. Yarı Katı Üretim Yönteminin Dezavantajları

- Her bir alaşım için tiksotropik özellikli yapı elde etme ve şekillendirme işlem parametreleri farklıdır. Optimum özellikler ancak deneysel olarak bulunabilir.
- Tikso döküm için gerekli olan reo-döküm malzeme kaynağı az olmakla birlikte maliyeti yüksektir.
- İlk yatırım maliyeti yüksektir.
- Uzman bireylere ihtiyaç duyulur (Flemings ve diğ., 1976, Tzimas, 1997).

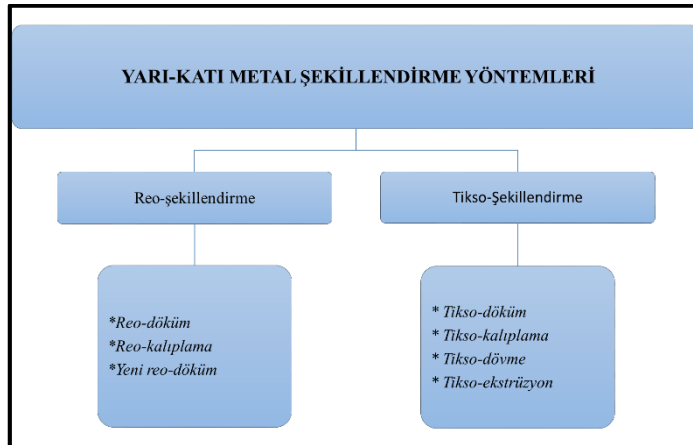


3. YARI-KATI METAL ŞEKİLLENDİRME YÖNTEMLERİ

Günümüzde yarı-katı şekillendirme yöntemleri tikso-şekillendirme ve reo-şekillendirme olarak ikiye ayrılır (Basner, 2001, Kenney ve diğ., 1988, Czerwinski, 2007). Şekil 3.1’de bu yöntemlerin üretim aşamalarının akış şeması gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Yarı-katı metal şekillendirme yöntemlerinin üretim aşamaları (Czerwinski, 2007)



Şekil 3.2. Yarı-katı metal şekillendirme yöntemlerinin sınıflandırılması

Tikso-şekillendirme ve Reo-şekillendirme yöntemleri kullanılan şekillendirme yöntemine göre kendi aralarında ayrılırlar (Şekil 3.2).

3.1. Reo Şekillendirme

Sıvı durumdan yarı-katı bölgeye geçerek yapılan yarı-katı üretim yöntemleri; reo-döküm, reo-dövme, yeni reo-dökümdür. Malzemelerin reolojik davranışlarını gösteren en önemli parametresi malzemelerin viskozitesidir(η). Yarı-katı metal alaşımlarının gerçek viskozitesi aşağıda verilen Eşitlik 3.1 ile bulunabilir (Lashkari, 2006, Martin, Kumar, Brown, 1994, Flemings, 1991);

$$\eta = f(\gamma^\circ, ts, Ta, T^\circ, Co, fs, F, H) \quad (3.1)$$

η : viskozite,

γ° : karıştırma hızı,

ts : karıştırma süresi,

Ta : yarı-katı alaşımın sıcaklığı,

T° : soğuma hızı,

Co : alaşımın kompozisyonu,

fs : katı oranı,

F : şekil faktörü

H : malzemenin gördüğü işlemlerin etkisi,

Eşitlik 3.2’de gösterilen reo-döküm kalite gösterim kriteri (RQI: Reocast quality index criteria) ideal=1dir.

$$RQI = \text{küre boyutu} / (\text{tane boyutu} \times \text{şekil faktörü}) \quad (3.2)$$

$RQI=0,1$ ise rozet mikroyapıyı, $RQI=0,9$ ise mükemmel küresel mikroyapıyı göstermektedir.

Eşitlik 3.3’de gösterilen şekil faktörü değeri 1’e yaklaştıkça ideal küresel yapı elde edilir.

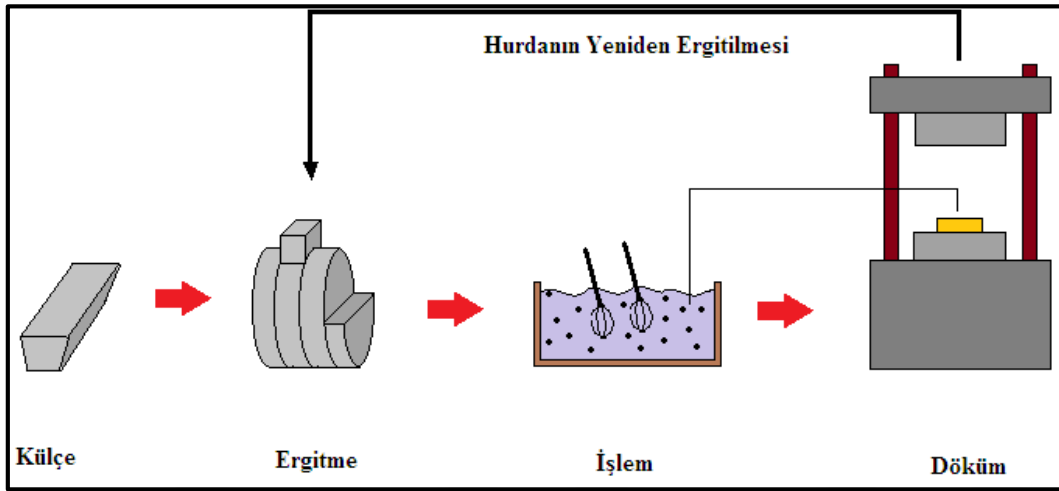
$$F = \text{Şekil faktörü} = 4\pi A\alpha / (P\alpha)^2 \text{ ve/veya } F = (P\alpha)^2 / 4\pi A\alpha \quad (3.3)$$

$A\alpha$ mikroyapıda oluşan ilk fazın alanı, $P\alpha$ mikroyapıda oluşan ilk fazın çevresidir.

3.1.1. Reo-döküm

Reo-döküm katılaşma sırasında sıvı halden yarı-katı hale geçtiği esnada karıştırılarak dendritik olmayan yapı elde etme işlemidir. MIT’de 1970’li yıllarda ilk olarak kullanılmıştır. Yarı-katı eş eksenli mikroyapıya sahip metal yarı mamulü üretmek için kullanılmıştır. Yarı-

katı şekillendirme araştırmalarının merkezinde olan Reo-döküm; araştırmaların başlangıcında ticari olarak yaygın olacağı düşünülmemiştir (Flemings, 1991, Kirkwood, 1994, Atkinson, 2005, Fan, 2002, Özer,2010). Bu yöntemle göre; sıvı metalin katılaştırılması esnasında kullanılan mekanik karıştırma, elektro-manyetik karıştırma ile küresel mikroyapıya sahip yarı katı mamül (feedstok/ingot/hammadde) üretilir. Üretilen küresel mikroyapıya sahip yarı-katı haldeki malzeme pres döküm makinesinde preslenerek şekillendirme işlemi yapılır (Şekil 3.3).



Şekil 3.3. Reo döküm yönteminin şematik gösterimi (Basner, 2001)

Reo döküm özellikle son yıllarda gelişmiştir ve bu gelişim küçük laboratuvarlarda başlamıştır. Bu yöntemlerle üretilen malzemelerin tane boyutu 100-400 μm arasındadır. Basit bir yöntem olmasına karşın seramik karıştırıcının aşınmaya uğraması, hamurumsu malzemenin gaz içermesi ve oksitlenmesi, katı oranının kontrolünün zorluğu nedeniyle bu üretim yöntemi ticari amaçlı olarak kullanılmamaktadır.

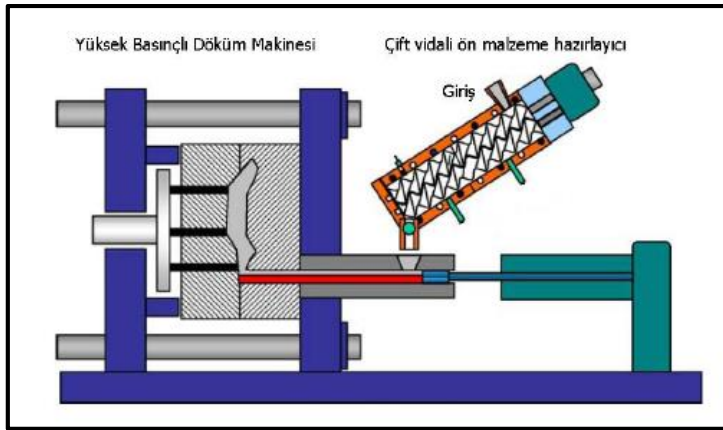
Bu yöntemin birçok avantajı vardır. Bu yöntem için hali hazırda bulunan ergitme üniteleri kullanılabilir, basit alaşım değişkenleri yapılabilir ve sonunda hurda malzemesi tekrar kullanılabilir. Bu yöntemde katı hacim oranının sıvı hacim oranından daha düşük olması gerekir (<%40). Çünkü yüksek katı hacim oranında hamurumsu malzemenin piston yuvasından transferi zordur (Basner, 2001, Özer, 2010).

3.1.2. Reo-kalıplama

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 yarı-katı şekillendirme yöntemidir.

Reo-kalıplama yöntemiyle genellikle magnezyum alaşımlarının şekillendirilmesinde kullanılan sıvı tarafından çevrili ve düzenli bir biçimde dağılmış küresel ve ince taneli mikroyapıya sahip parçaların üretilebildiği belirtilmiştir. Reo-kalıplama mekanizmasına örnek olarak Şekil 3.4’de verilmiştir (Fan, 2005).

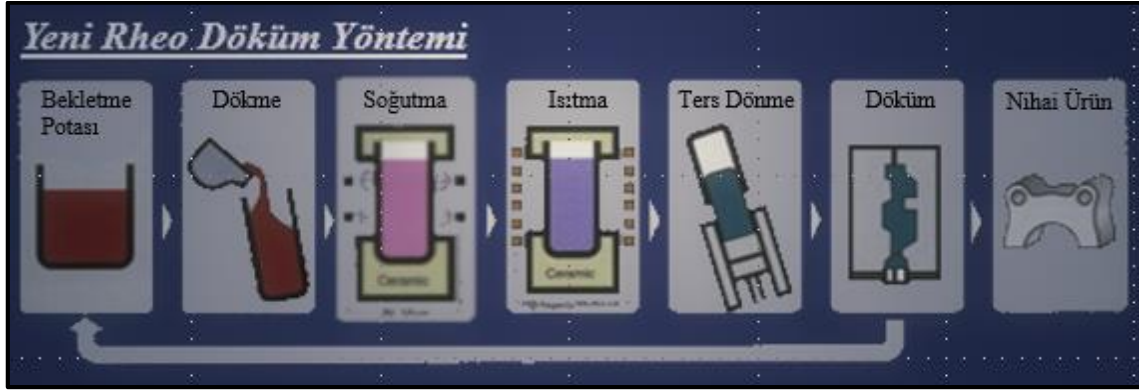


Şekil 3.4. Çift vidalı reo-kalıplama işleminin şematik gösterimi (Fan, 2005)

Al alaşımlarının şekillendirilmesinde son yıllarda reo-kalıplama yöntemi başarıyla kullanılmaktadır. Bu yöntem döküm Al alaşımlarına uygulanabildiği gibi dövme Al alaşımlarının şekillendirilmesinde de kullanılmakta olup bu yöntemle ince taneli, metaller arası bileşiklerin homojen olarak dağılımının sağlanması ve gözenek miktarı % 0,5’ten daha az yapılar elde edilmesi mümkün olmaktadır (Fan, Fang ve Ji, 2005, Kılıçlı, 2010).

3.1.3. Yeni reo döküm yöntem

UBE firması düşük sıcaklardan döküm yöntemi prensibinden yararlanarak yeni reo döküm (NRC) yöntemini geliştirmiştir (Nafisi ve Ghomashchi, 2005). Bu yöntemde; sıvı ergime sıcaklığına yakın bir sıcaklıkta eğimli potaya dökülür ve potanın etrafında tane çekirdeklenmesi meydana gelir. Döküm sıcaklığı ergime sıcaklığına yakın olduğu için tane boyutu küçüktür. Bu yöntem eğimli plakaya döküm (ESP) yöntemi prensibine dayanır (Şekil 3.5) (Atkinson ve diğ., 2002a).



Şekil 3.5. Yeni reo-döküm yönteminin şematik gösterimi (Atkinson ve diğ., 2002a)

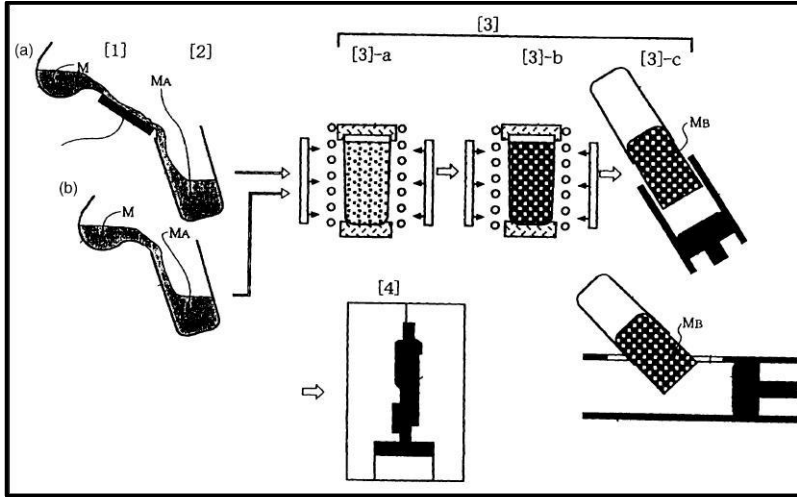
Yeni reo döküm işlemi likidüs sıcaklığının hemen üzerindeki sıcaklıklarda yapılır. Bu üretim yönteminde yalıtılmış potalar ile tek vuruşluk ön malzemeler üretilebilmektedir. Bu nedenle ön malzemenin karakteristiği pota işlem parametreleri ile değişebilir (Figueredo, 2001).

Düşük sıcaklıklardan döküm yöntemi ile hammadde üretimi basit ve ekonomik bir teknik olduğu için merak uyandırır ve geleceği parlak görülmektedir. Fakat, sıcaklık kontrolü problemleri nedeni ile geniş ölçekli üretimde homojen mikroyapı elde edilememesi endüstriyel kullanımına engel oluşturmaktadır (Fan, 2002, Özer, 2010).

Yeni reo-döküm yöntemi aşağıdaki aşamaları içermektedir (Figueredo, 2001);

1. Sıvı haldeki alaşımın soğutucu kalıp veya tabakayla teması ve kalıp ile temas halinde iken birincil α -Al fazının ergiyik de oluşması,
2. Yalıtılmış potalarda veya soğutulmuş plakalarda çok miktarda çekirdek içeren metal oluşturulması,
3. Kontrollü soğuma ile tam küremsi ön malzeme oluşumu ve ilave soğutma ile biçimlendirme için gerekli katı miktarının ayarlanması,
4. Yalıtılmış pota ters çevrilerek yarı katı haldeki numunenin yüzeyi oksitlenmeden korunur ve kalıba basılarak şekillendirme işlemi gerçekleştirilir.

NRC yönteminde sıvı metal direk eğimli kalıba dökülür veya sıvı metal eğimli plakadan kalıba dökülür (Şekil 3.6).



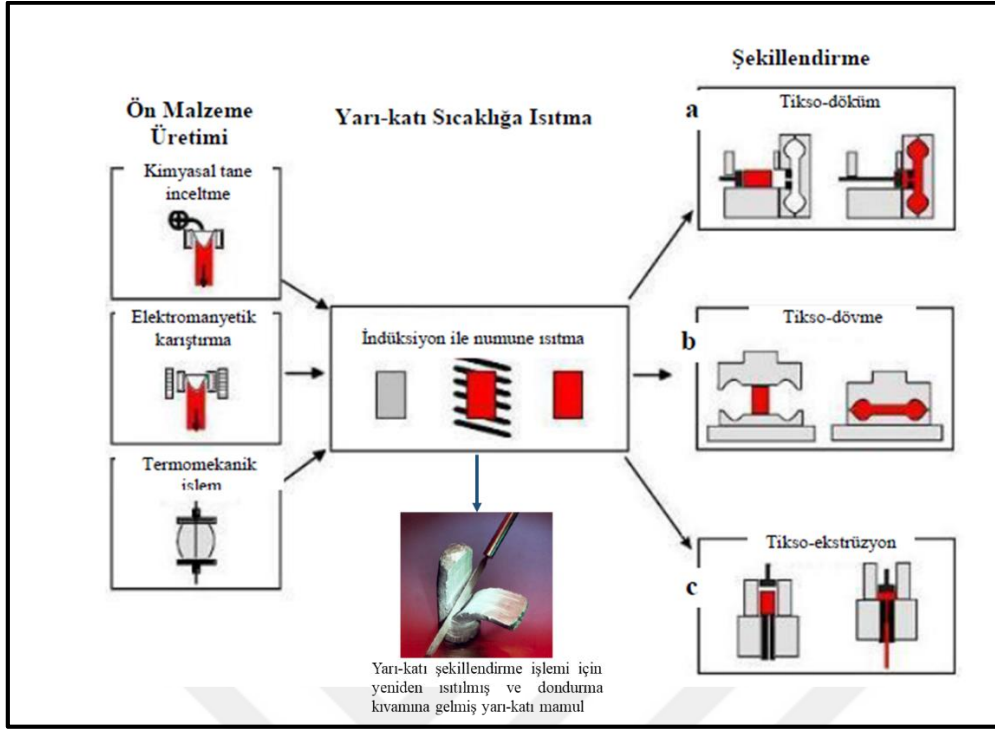
Şekil 3.6. NRC yönteminin şematik gösterimi, 1.a) Eğimli plaka kullanarak veya 1.b) Direk eğimli kalıba döküm, 2) Kalıbın dik hale getirilmesi, 3.a) İndüksiyon kontrollü soğuma, 3.b) Yarı-katı durumdaki malzemenin katı oranı artar, 3.c) Kalıp ters çevrilir içerisindeki yarı-katı malzeme basma haznesine taşınır. 4) Malzeme kalıba enjeksiyon ile basılır (Legoretta, Atkinson ve Jones, 2008a)

3.2. Tikso-Şekillendirme Yöntemleri

Tikso şekillendirme katı haldeki malzemeyi, solüfus ile liküfus sıcaklığı arasındaki bölgeye çıkararak yapılan, yarı katı üretim yöntemlerinin tümünü kapsar. Tikso şekillendirme yönteminde üç temel aşama izlenir. Bu aşamalar;

- İlk olarak tiksotropik özellikli yani dendritik olmayan küresel mikroyapıya sahip ön malzeme (feedstok/ingot) üretimi
- Ön malzemeyi yarı katı bölgesine yeniden ısıtma
- Son olarak da nihai ürün için şekil verilmesi (Atkinson, 2005, Kirkwood, 1994, Fan, 2002).

Tikso şekillendirme yönteminin son aşaması olan şekil verilme yöntemleri; tikso-döküm, tikso-kalıplama, tikso-dövme, tikso-ekstrüzyondur (Fan, 2002, Atkinson, 2005, Kirkwood, 1994). Bu aşamaların şematik gösterimi Şekil 3.7’de belirtildiği gibidir.



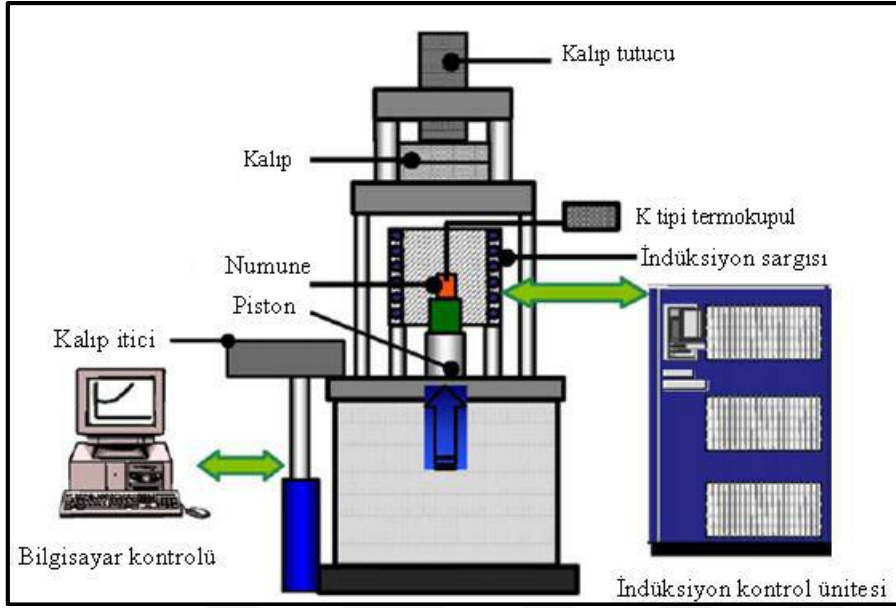
Şekil 3.7. Tikso-Şekillendirme yöntemlerinin şematik olarak gösterimi (Hirt ve diğ., 1994)

3.2.1. Tikso-döküm

Tikso-döküm olarak adlandırılan yarı-katı döküm tekniğinde, ön malzeme hazırlamak için özel yöntemlerle hazırlanmış küresel tane yapısına sahip yarı mamul indüksiyonla yarı-katı duruma ısıtılarak pres döküm makinesinde kalıba enjekte edilir (Atkinson, 2005, Kirkwood, 1994, Fan, 2002). Buna tikso ve/veya yarı-katı döküm denir. Şekil 3.8.'de Sheffield yarı-katı şekillendirme presinin şematik gösterimi verilmiştir (Atkinson, 2005). Yarı mamulün (biyet) düşük katı hacim oranında şeklini koruması güç olduğu için genellikle tikso-döküm yarı-katı malzemede katı hacim oranının yüksek ($>50\%$) olması gereklidir. (Atkinson, 2005, Basner, 2001).

Bu yöntemin avantajı metal ergitme ve sıvı işlem araç ve gereçlerinin elimine edilmesidir. Geleneksel pres döküm makineleriyle karşılaştırıldığında daha düşük sıcaklıklarda çalışılmaktadır ve yarı katı durumdaki metal kalıbı düzlemsel akış ile doldurur. Bu durum kalıpta meydana gelen termal gerilimleri önemli derecede azaltır ve karmaşık şekilli parçaların türbülanssız dolmasına izin verir. Ayrıca küçük miktardaki hacimsel çekme nedeniyle üretimi zor olan parçalar istenilen ölçüye yakın elde edilebilmektedir. Bu işlemde kesme ve işlemeye gerek duyulmaması veya işleme paylarının düşük tutulması zaman ve

enerji tasarrufu sağlar (Wu, 2004, Özer, 2010).

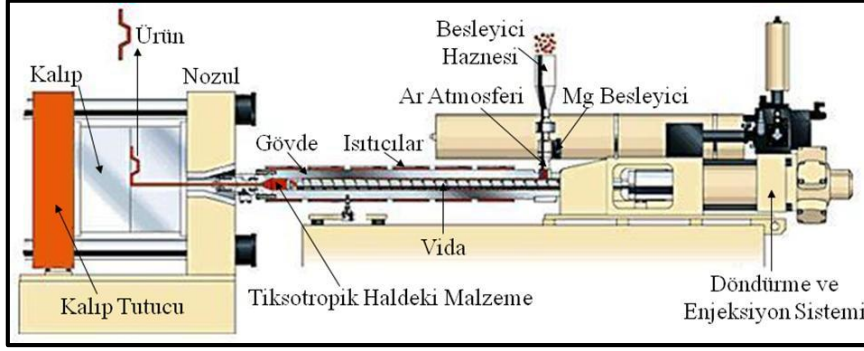


Şekil 3.8. Sheffield yarı-katı şekillendirme presinin şematik gösterimi (Atkinson, 2005)

3.2.2. Tikso-kalıplama

Tikso-kalıplama işlemi genellikle ticari magnezyum alaşımlarının şekillendirilmesinde kullanılır. Tikso-kalıplama işlemi için plastik enjeksiyon kalıplama makinası ve hammadde olarak da 2-3 mm boyutunda granüller veya talaşlar kullanılmaktadır. Yarı-katı şekillendirme için uygun olan katı durumdaki granüller, kısmi ergitilerek kalıplanmaktadır. Yarı katı şekillendirme atmosfer kontrollü olarak gerçekleşir. Birçok makine magnezyum gibi hafif metallerden elde edilen elektronik parçaların üretiminde kullanılır (Figueredo, 2001, Fan, 2002, Özer, 2010).

Tikso-kalıplama işlemi kompozit malzeme üretiminde, alüminyum, magnezyum gibi hafif metallerin farklı takviye elemanlarıyla kullanılan bir yöntemdir. Tikso kalıplama metodu kullanılarak son şekle yakın üretim yapılabilir. Bu işlemde, bir kalıp içerisine (genellikle grafit) yarı-katı metalin düşük presleme yükleriyle şekillendirilmesi yapılmaktadır. Bu yöntem ile üretilen alaşımın mikroyapısı, bir sıvı matris içinde katı metal veya seramik küreleri içermektedir. Metal, sıvı ötektikle çevrili katı kürelerden oluştuğundan dolayı tiksotropik davranış gösterir (Seo, Kim ve Kang, 2005).

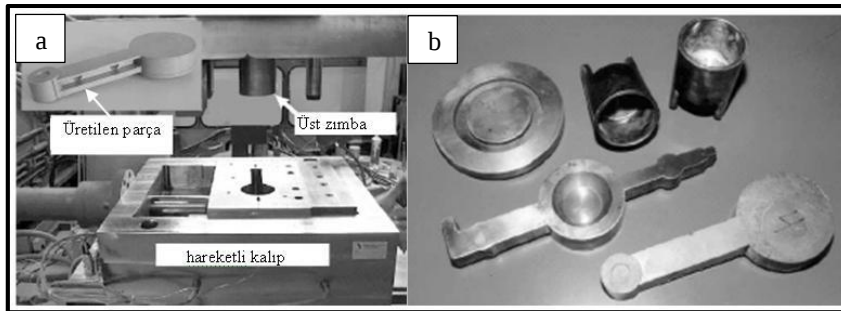


Şekil 3.9. Tikso-kalıplama presinin şematik gösterimi (Cho ve Kang, 2000)

Klasik döküm teknolojisiyle birlikte, plastik enjeksiyon makinesinin şekil yapma kabiliyetini birleştirerek daha karmaşık geometrili ve yüksek yoğunluklu parçalar elde edilebilir. Şekil 3.9’de tikso kalıplama makinesinin şematik gösterimi verilmiştir (Cho ve Kang, 2000).

3.2.3. Tikso-dövme

Klasik dövme işlemi ile benzer özellikleri olan tikso-dövme işlemi yarı katı sıcaklığa ısıtılan biletin (ön malzeme üretimi sonucun ortaya çıkan mamul, kütük) kalıp ile pres arasında konularak ve preslenmesidir. Bilet kalıbın şeklini alır. Tiksotropik yapıya sahip bilet kalıbı tamamen doldurur. Yarı katı dövme için gerekli sıvı oranı %50’nin altında olmaktadır (Kopp, Winning ve Möller, 2001).



Resim 3.1. a. Tikso-dövme cihazı, b. Tikso-dövme ile elde edilmiş parçalar (Fan, 2002)

Yukarıdaki Resim 3.1’de tikso-dövme cihazı ve elde edilen parçalara örnekler görülmektedir.

3.2.4. Tikso-ekstrüzyon

Tikso-ekstrüzyon yeniden yarı-katı bölgeye ısıtılmış dendritik olmayan malzemenin ekstrüze edilmesi işlemidir. Yukarıda Şekil 3.7.c’de tikso-ekstrüzyon işlemi şematik olarak gösterilmektedir. Tikso-ekstrüzyon işlemi en çok soğuk olarak şekillendirilmesi güç olan dövme Al alaşımlarına uygulanmakta olup bu yöntemle üretilen çubuklarda dendritik veya rozet yapıya hiç rastlanmamaktadır (Kim, Yoon ve Jo, 2007).

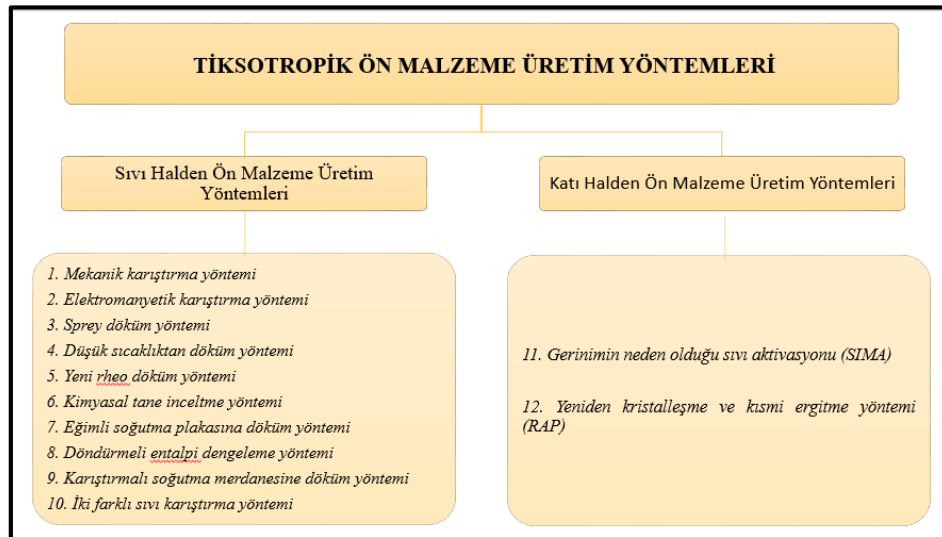


4. TİKSOTROPİK ÖN MALZEME ÜRETİM YÖNTEMLERİ

Metal ve alaşımlarını yarı-katı durumda şekillendirebilmek için sıvı faz içinde homojen olarak dağılmış küresele yakın ince taneli mikroyapıya gereksinim duyulur (Kenney ve diğ., 1998, Xia ve Tausig, 1998, Bozkurt, 2005). Bir başka deyişle yarı-katı alaşımların şekillendirilebilmesi için mikroyapıdaki dendritik tanelerin küreselleştirilmesi temel bir prensiptir (Flemings, 1991, Kirkwood, 1994, Figueredo, 2001, Fan, 2002, Martinez ve Flemings, 2005, Flemings ve Martinez, 2006, Atkinson, 2005, Nafisi ve Ghomashchi, 2005).

Katı faz ne kadar homojenliğe sahip küresel şekle, küçük tane boyutuna, yüksek şekil faktörüne sahip ise o kadar yüksek yarı-katı şekillendirme özelliğine sahip olmasıyla beraber yüksek mekanik özellikler sağlar (Zoqui, Paes ve Es-Sadiqi, 2002).

Flemings 1976, yapılan deneysel çalışmalar ile düzenli küresel bir mikroyapıya sahip yarı-katı alaşımlara uygulanan deformasyona karşı hem sıvı hem de katı durumdaki gibi özellikler gösterdiği sonucuna varıldığını belirtmiştir. Yarı-katı haldeki ön malzeme serbest halde katı gibi davranarak şeklini muhafaza ederken, bir kuvvet ile karşılaştığında katı halde gösterdiği viskoziteden daha düşük bir viskozite sergileyerek sıvı durumdaki gibi akışkan bir hal alır. Tiksotropik üretim yöntemlerinin başlıcaları aşağıdaki Şekil 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.1. Tiksotropik ön malzeme üretim yöntemlerinin sınıflandırılması

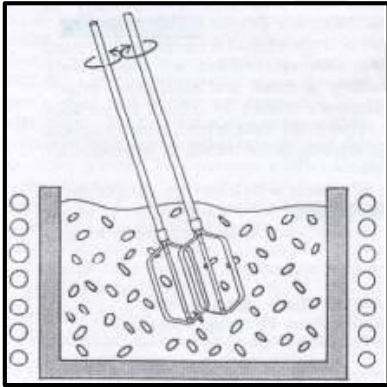
Yarı-katı şekillendirme yöntemi ile endüstride yaygın olarak kullanılan alüminyum ve magnezyum gibi hafif alaşımlar nihai ürün için istenilen şekli verilebilmektedir. Özellikle

dövme alaşımlarının katılaşma aralığı çok dar olduğu için yarı-katı şekillendirme yönteminde sıcaklık kontrolü hassas olmalıdır (Figueredo, 2001).

Araştırmacılar tiksotropik (eşeksenli ve küremsi ince taneli mikroyapı) malzeme üretim yöntemleri ile ilgili birçok çalışma yapmışlardır. Özellikle en uygun malzemeyi en ekonomik koşulda elde etmek için yeni yöntemler geliştirmişlerdir. Bazı yöntemlerde ise eski yöntemleri geliştirerek veya birkaç yöntemi birleştirmişlerdir.

4.1. Mekanik Karıştırma Yöntemi

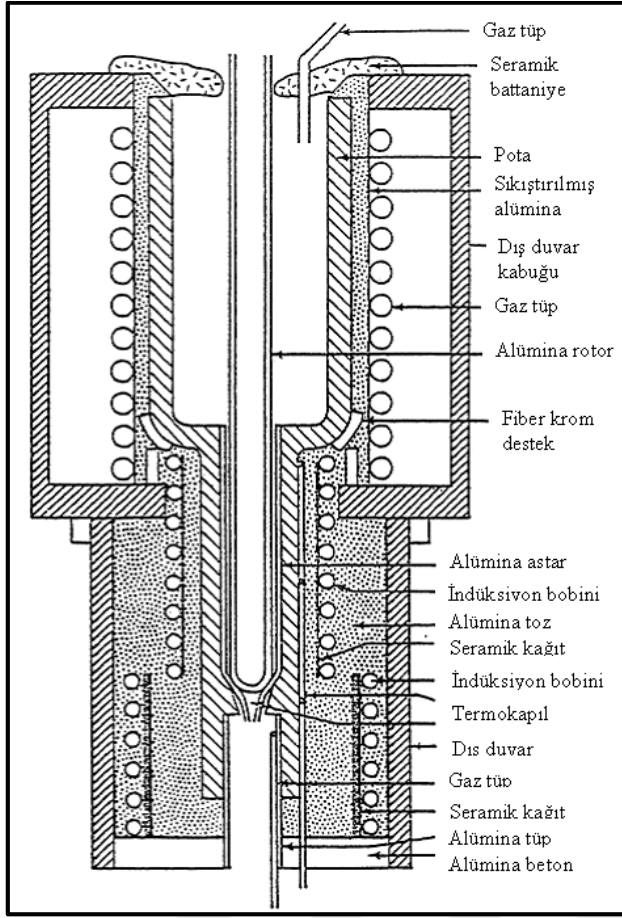
Mekanik karıştırma yöntemi yarı-katı metal şekillendirme yönteminin başlangıcıdır (Spencer ve diğ., 1972). MIT'deki araştırmalar mekanik karıştırma yönteminin esasını oluşturmuştur. Sıvı haldeki alaşımı karıştırma genellikle matkap, çark veya çoklu çarkların merkezde dönen mil üzerine monte edilmesi ile sağlanır (Fan, 2002, Figueredo, 2001).



Şekil 4.2. Mekanik karıştırma ünitesi (Flemings, 1991)

Mekanik karıştırma yöntemi tiksotro-döküm proseslerinde ön malzeme üretimi için kullanılırken reo-döküm prosesleri için ise kesintisiz kullanılır. Fakat mekanik karıştırma ile elde edilen dendritik olmayan mikroyapı özelliği; üretim hızı ve ısının uzaklaştırılması ile sınırlılığını pota malzemesinin düşük ısı iletim özelliği belirler. Yüksek sıcaklıkta karıştırma kanatlarının ve pota refrakter malzemesinin aşınmaya uğraması gibi nedenlerden dolayı bu yöntem laboratuvar çalışmaları dışında fazla kullanım alanı bulamamıştır (Türkeli, 1991).

Mekanik karıştırma yönteminde sıvı alaşım düzenli olarak soğutulurken mekanik olarak karıştırılarak dendritik yapı bozulur (Şekil 4.2). Bu kırılmış dendritik yapı, ilk anda rozet şekilde olup karıştırma ile beraber kabalaşarak küresel bir hale gelir.



Şekil 4.3. Sürekli mekanik karıştırma ünitesi (Flemings ve diğ., 1976)

Diğer bir yöntemde sürekli mekanik karıştırma ünitesidir. Şekil 4.3’de şematik olarak gösterilmiştir. Bu cihaz basit mekanik karıştırma ünitesinin geliştirilmesiyle tasarlanmıştır.

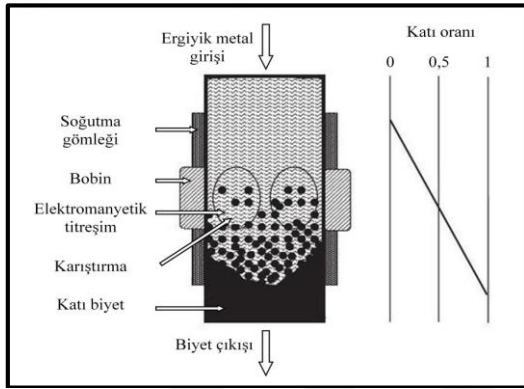
Bu cihazla yüksek karıştırma gerçekleştirilebilir. Metal tabakasının altında karıştırma çok iyidir ve hava ile temas minimuma iner. Soğumanın oldukça hızlı olması ince yapı üretir. Sürekli reo-döküm yönteminde döküm sıcaklığına gelmiş sıvı bekleme potasından aşağıya doğru akarken karışma ve katılaşma eşzamanlı olur. Ergimiş metal mekanik olarak karıştırılır.

Soğumadan dolayı oluşan dendritik yapı karıştırma ile küçük katı parçacıklara ayrılır ve sıvı metal içerisine dağılır. Sonuçta katı metal parçacıklar ve sıvı metal birlikte potanın altındaki nozuldan çıkar. Yarı-katı metal üniteden direk şekillendirilir (reo-döküm) veya daha sonra kullanılmak üzere ön malzeme olarak katılaşır (Fan, 2002).

4.2. Elektro-manyetik Karıştırma Yöntemi

Elektro-manyetik karıştırma yöntemi mekanik karıştırmadaki problemleri gidermek için geliştirilmiştir. Bu yöntem ile üretilen ürünlerde $30\mu\text{m}$ - $100\mu\text{m}$ arasında tanecik boyutunun elde edildiği belirtilmiştir (Fan, 2002, Figueredo, 2001).

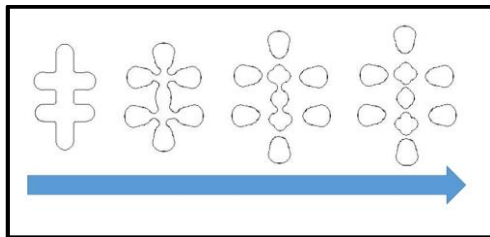
Şekil 4.4’de şematik olarak gösterildiği gibi elektro-manyetik karıştırma yönteminde, kontrollü soğutma işlemi ile ergiyik metal katılaştırılırken, elektro-manyetik yöntemler kullanılarak ergiyik metalin türbülans hareketi ile karıştırılması esas alınmıştır.



Şekil 4.4. Elektro-manyetik karıştırma düzeneğinin şematik gösterimi (Czerwinski, 2007)

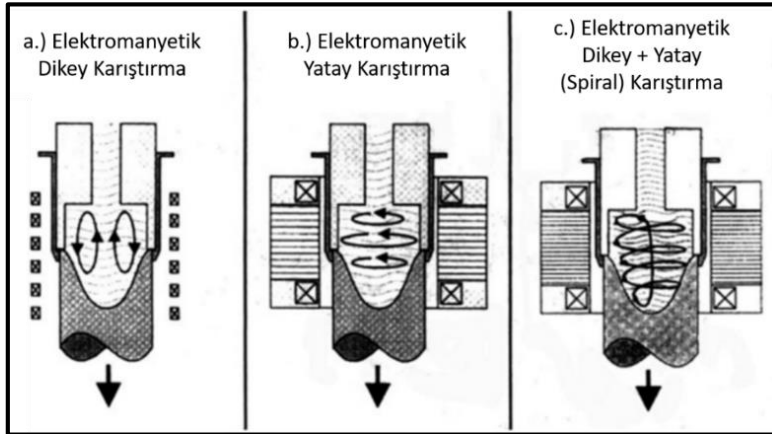
Bu yöntemde karıştırma esnasında dendrit kolları Şekil 4.5’de görüldüğü gibi kırılarak küresel şekle sahip mikroyapı oluşmaktadır.

Ergiyik metale uygulanan doğru veya alternatif akım sonucu oluşan elektro-manyetik alan ile titreşim ve dönme hareketi uygulanabilmektedir. Elektro-manyetik karıştırma yöntemi ile yarı-katı durumdaki alaşıma uygulanan dönme hareketi dikey veya yatay olarak uygulanabilmektedir (Hirt ve Kopp, 2009).



Şekil 4.5. Karıştırma esnasında dendrit kollardan küresel katı parçacıkların oluşumu (Flemings, 1991)

Kalıp çevresindeki su soğutmalı sistem ile katılaşma hızı, dolayısıyla tane boyutu kontrol edilir; bu sayede mekanik karıştırmada 100-400 mikron arasında olan partikül çapı manyetik karıştırma ile 30 mikron civarına düşürülebilir. Sistem yatay veya dikey dizayn edilebilmekte ve 30 mm'den 152 mm çapa kadar üretim yapılabilir. Konvansiyonel karıştırma yöntemlerine göre daha temiz ve etkili bir yöntemdir. Üretilen malzemelerin düşük gaz, oksit ve non-metalik inklüzyon içeriği; askeri, uçak ve otomobil parçaları için ihtiyaç duyulan yüksek kaliteyi karşılamaktadır (Türkeli, 1991).

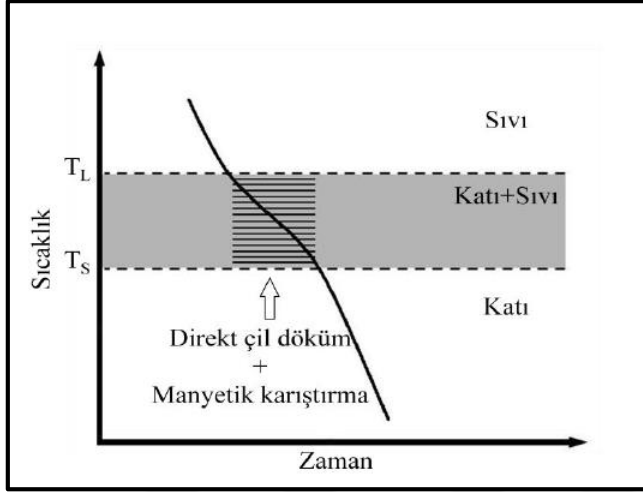


Şekil 4.6. Elektro-manyetik karıştırmanın şematik gösterimi a.) elektro-manyetik dikey karıştırma b.)yatay karıştırma ve c.) hem yatay hem de dikey karıştırma (Hirt ve Kopp, 2009)

Elektro-manyetik karıştırma yatay, dikey, hem yatay hem de dikey olarak 3 farklı şekilde oluşturulabilir (Şekil 4.6). Bu yöntem için en büyük problem üretim maliyetinin yüksek olmasıdır. Üretilen kütüklerin bütün bölgelerinde mikroyapının homojen ve rozet şeklinde olması da bir başka problemdir (Atkinson ve diğ., 2002b).

Elektro-manyetik spiral karıştırma, dikey ve yatay karıştırma türlerini birleşimidir. Yatay elektro-manyetik karıştırmada, katı parçacıkların hareketi yarı-izotermal bir düzlemde gerçekleşir, böylece mekanik kesme muhtemelen küreselleştirme için baskın mekanizmadır (Şekil 4.6.a). Dikey elektro-manyetik karıştırma veya doğrusal karıştırma durumunda, dendritler katılaşma cephesinde benzer şekilde parçalanır, ancak karıştırma odasının daha sıcak bölgesine devirdaim edilir ve kısmen yeniden eritilir. Bu nedenle, ısı işleme mekanik kesme üzerinde baskındır (Şekil 4.6.b). Elektro-manyetik karıştırma yöntemi ile üretilen biyetin mikroyapıları, endüktif bobinlerin tasarımından büyük ölçüde etkilenir. Ek olarak, yarı-katı bölgedeki elektro-manyetik kuvvet alanları tekdüze değildir ve bu, radyal yönde

farklı derecelerde yapısal modifikasyona sahip ingotlar oluşturabilir (Nafisi ve Ghomashchi, 2005).



Şekil 4.7. Manyetik karıştırma yönteminin zaman-sıcaklık grafiğinin şematik olarak gösterimi (Figueredo, 2001)

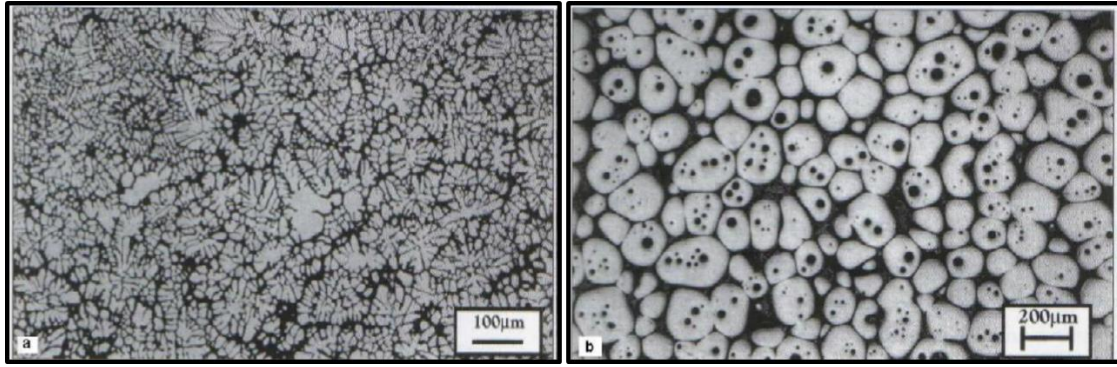
Katılaşma sırasında elektro-manyetik karıştırma yöntemi ile doğrudan çil ve sürekli döküm tekniklerinin birleştirilmiştir (Şekil 4.7). Elektro-manyetik karıştırma yöntemi ile üretilen parçaların 100 mm çapa kadar ulaşabilmektedir. Bu yöntem ile üretilen parçaların taşınabilirlik açısından önemli olup, taşındığı yerde de kolaylıkla istenilen ölçülerde kesilerek tikso-şekillendirme için kullanılabilir (Figueredo, 2001).

Manyetik karıştırma yöntemi ile ön malzeme üretiminde etkili parametreler aşağıda verilmiştir;

- Kimyasal kompozisyon
- Sıvı metalin sıcaklığı
- Sıvı metalin akış hızı
- Kalıp malzemesi ve kalınlığı
- Manyetik karıştırma gücünün etkisi,
- Manyetik karıştırma süresinin etkisi

Elektro-manyetik karıştırma uygulamasının sadece küreselleşmeyi teşvik etmek için dendritleri parçalamakla kalmayıp, aynı zamanda Al-Si döküm alaşımlarında metaller arası partiküller ve ötektik silisyum gibi ikincil fazlar üzerinde de faydalı etkileri olabileceği iddia

edilmektedir (Nafisi, Emadi, Shehata, Ghomashchi ve Charette, 2004).



Resim 4.1. Elektro-manyetik karıştırma ile üretilmiş A356 alaşım ön malzemelerin tipik mikroyapısı; a. dökülmüş halde ve b. 580°C’de 60 dakika yeniden ısıtma yapılmış halde (Figueredo, 2001)

Elektro-manyetik karıştırma ile üretilen ön malzemenin katı faz morfolojisi küresel, rozet şeklinde veya ikisinin karışımı olabilir (Resim 4.1). Tikso-şekillendirme yöntemi için yarı-katı bölgeye tekrar ısıtıldıklarında, numuneler oldukça ince küresel yapılar halini alırlar (Figueredo, 2001).

Yarı-katı şekillendirme yöntemleri için ön malzeme üretim yöntemleri arasında en yaygın ve ticari olarak kullanılan elektro-manyetik karıştırma ile numune üretimidir (Biol, Çakır ve Alageyik, 2006a).

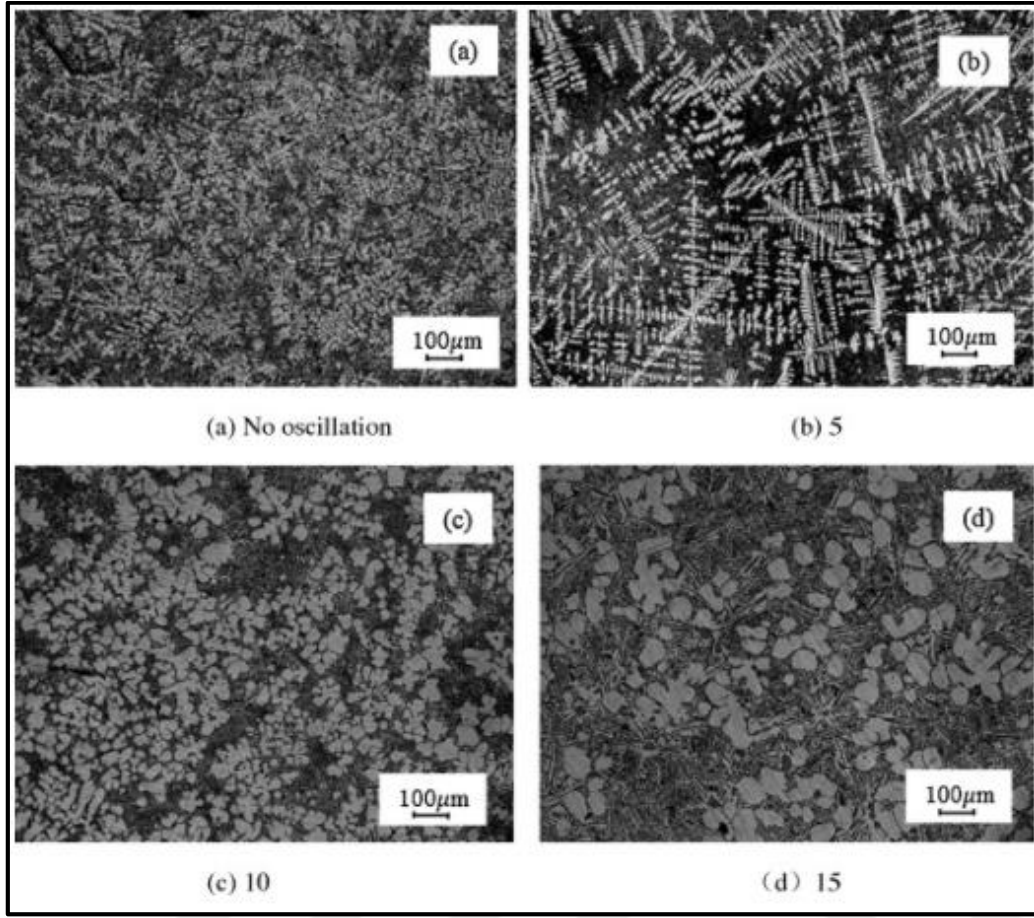
Karıştırma gücü malzemenin tiksotropik davranışını belirleyen küresel tane yapısı üzerinde etkilidir. Zoqui ve diğerleri A356 alaşımında 4 farklı güçte manyetik karıştırma uyguladıkları çalışmalarında, yüksek manyetik gücün (1200 W) yarı katı döküm için daha iyi özelliklere sahip olduğunu açıklamışlardır. Yüksek manyetik gücün yarı-katı alaşımda daha iyi küreselleşme ve küre boyutu ürettiğini de belirtmişlerdir (Zoqui ve diğ., 2002).

A356 Al alaşımlı malzemeyi elektro-manyetik karıştırıcı yöntemi ile tikso-dökümü yapılan bir numune ile geleneksel döküm numunesi kıyaslandığında yüksek sıcaklıkta işlenebilirliği artığı deneysel olarak ispatlanmıştır. Sıcak deformasyon davranışı, 300°C ile 500°C sıcaklık aralığında ve 0,001 s⁻¹ ile 10 s⁻¹ gerinim oranı aralığında izotermal sıcak basma testleri ile incelenmiştir. Testlerden elde edilen akış gerilimi verileri, gerinim hızı duyarlılığını ve gerinim hızı sertleşmesini tahmin etmek için kullanılmış olup alaşımın akış gerilimi analizi, sıcaklığın gerinim sertleşmesi üzerindeki etkisinin daha düşük gerinim seviyelerinde daha

önemli olduğunu ve gerinim hızı duyarlılığının gerinimden bağımsız olduğunu göstermektedir. Tikso-döküm ile üretilen parçanın daha düşük akma mukavemeti ve geleneksel döküm değerlerine kıyasla yüksek sıcaklıkta daha yüksek uzama sergilendiğine yönelik önemli bir sonuç bulunmuştur (Singh, Chattopadhyay ve Dutta, 2015).

AlSi₉Mg alaşımının yarı-katı şekillendirme sürecini basitleştirmek için bir deneysel çalışmalarda yeni bir yöntem geliştirilmiştir (Zhang, Cao ve Cai, 2015). Bu yöntemde eritme işlemi ile karıştırma işlemi birleştirilmiştir. Metalik malzemenin çekirdeklenmesi ve dendrit büyümesi, ara frekanslı elektromanyetik karıştırmadan etkilenir. AlSi₉Mg alüminyum alaşımı, orta frekanslı elektromanyetik karıştırma yöntemi ile yarı-katı şekillendirilmesi incelenmiştir.

Proses parametrelerinin etkisini incelemek için deneylerde yaklaşık 10 dk. süre sonra, yarı-katı bulamaç tanelerinin ortalama boyutu 28 µm, tane boyutu şekil faktörü 0.87 ve gözeneklilik 0.15 idi.



Resim 4.2. Orta frekanslı elektromanyetik karıştırma işleminde üretilen yarı-katı ingotun merkez bölgesinin mikro yapıları. (a) karıştırma işlemi olmadan (b) 5dk. (c) 10dk. (d) 15dk. (Zhang ve diğ., 2015)

Resim 4.2’de elektro-manyetik karıştırma yapılmadan dendritik yapıya sahip olan mikroyapı karıştırma süresi arttıkça dendritik yapıdaki taneler kırılmaya ve küresel tane yapısına eğilimli hale geldiği gözlenmektedir. Yarı katı malzeme 565°C'ye 25 dakika veya 575°C'ye 10 dakika yeniden ısıtıldığında taneler küresel hale dönüştüğü gözlenmektedir. Periyot sayısı, tutma süresi ve tutma sıcaklığının yarı-katı malzemenin özellikleri üzerinde önemli etkileri olduğu ispatlanmıştır (Zhang ve diğ., 2015).

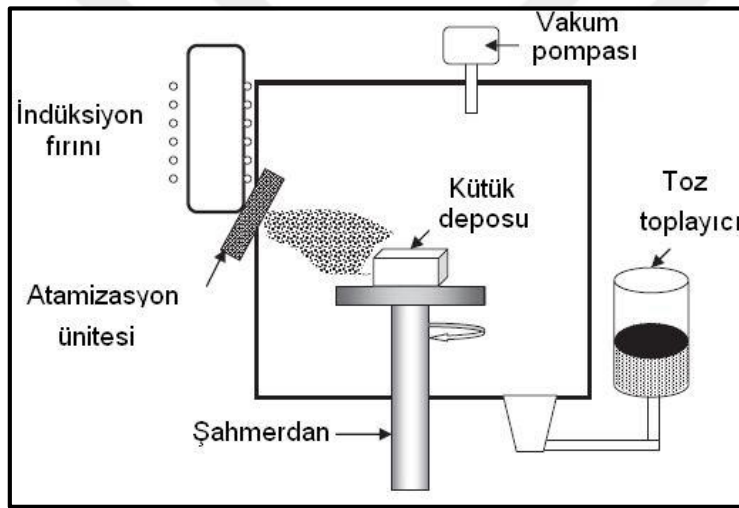
4.3. Sprey Döküm

1970 yıllarda Sprey döküm işleminin prensipleri Swansea Üniversitesinde, Singer tarafından ortaya çıkarılmıştır (Reichelt ve Voss-Spilker, 1986, Lavernia ve Grant, 1988, Salımcı, 2004). Hızlı katılaşma yoluyla direk olarak eriyikten alaşım ve kompozit malzemelerin üretildiği prosese sprej şekil verme, sprej döküm veya sprej biriktirme yöntemi denir. Bu yöntemde ergimiş metalin atomizasyonu ile üretilen damlacıkların püskürtülerek bir

kolektör (toplayıcı) üzerinde toplanması sağlanır. Kolektör üzerinde katılaşarak üretilen bu depozite daha sonra ekstrüzyon, dövme veya haddeme ile şekil verilebilir.

Sprey döküm prosesinde dört ana ünite mevcuttur. Bunlar ergitme ve dağıtma ünitesi, gaz atomizasyon cihazı, atomize edici gaz kaynağı için dağıtma ve kontrol sistemi, depozit ünitesidir (Salamcı, 2004, Özer, 2010).

Bu yönteminin şematik olarak Şekil 4.8’de verilmiştir. Osprey yolu ile spray oluşumu, yüksek hızlı bir inert gaz jetiyle bir sıvı metalinin atomizasyonunu araştırır. Sonrasında, sıvı metal hızla katılaşır, ince eş eksenli taneciklere sahip bir ürün oluşturur (Czerwinski, 2007).



Şekil 4.8. Sprey şekillendirmenin şematik gösterimi (Czerwinski, 2007)

Bu oluşan ön malzemeye daha sonra ekstrüzyon, dövme veya haddeme ile şekil verilebilir. Sprey biriktirme yönteminin en önemli avantajı eriyikten direk olarak tek bir operasyonla net şekillendirilmiş ürün elde etme imkânıdır (Salamcı, 2004). Sprey dökümde katılaşma hızı yüksek değerlerde olmasına rağmen, toz metalurji yöntemine oranla katı halde soğuma hızı yavaştır. Hızlı katılaştırma ile ince ve homojen mikroyapı, alaşım elementlerinin artırılmış katı çözünürlüğü, azaltılmış segregasyon elde etmek mümkündür (Salamcı, 2004, Tzimas ve Zavaliangos, 2000).

4.4. Düşük Sıcaklıktan Döküm Yöntemi

Bu teknik son zamanlarda tiksotropik hammadde üretimi için geliştirilmiştir. Sıvı metal kalıba ergime derecesinin yaklaşık 5-30°C üzerindeki bir sıcaklıktan döküm işlemi yapılır.

Sıcaklık değeri çok düşük olduğu için katılaşıırken oluşan taneler eş eksenlidir. Bu prosesle üretilen ön malzemelerin tane boyutu $\sim 100 \mu\text{m}$ 'dir. Yeniden ısıtma işleminde mikroyapı küreselleşir ve hızla tikso şekillendirme uygulanır (Fan, 2002, Figueredo, 2001, Czerwinski, 2007).

Cahlmers ve diğerleri döküm sıcaklığının etkisi yaklaşık 50 yıl kadar önceye yakın tanımlamışlardır. Sütunsal tane boyutunu engelleyerek eş eksenli tane oluşumunu artırmak için araştırmacılar döküm sıcaklığının düşürmüşlerdir. Bunun yanında eş eksenli tanelerin incilmesi de döküm sıcaklığının düşmesi ile sağlanmaktadır (Fan, 2002).

4.5. Kimyasal Tane İnceltme Yöntemi

Günümüzde hafif metal alaşımlarının sürekli dökümünde çoğunlukla kullanılan tane inceltme yöntemi, yarı katı şekillendirme de ise ön malzeme üretim yöntemlerinden biridir (Kirkwood, 1994, Fan, 2002, Nafisi ve Ghomashchi, 2005). Genellikle titanyum ve bor bazlı olan tane inceltici heterojen çekirdeklenmeyi meydana getirmek üzere belirlenen oranlarda sıvı metale dökümden önce ilave edilir. İnce ve eşeksenli yapıların eldesi heterojen çekirdeklenme oranının artırılması dendritik büyümeye engel olmasının ardından gerçekleşir. Yeniden ısıtma işlemi sırasında katılaşma sıcaklığının üzerindeki sıcaklıkta birincil faz katı parçacıkları küresel hale dönüşür ve tikso şekillendirilir (Kirkwood, 1994, Fan, 2002, Atkinson, 2005, Özer, 2010). Yüksek oranda katkı maddesi kullanarak Al alaşımları için uygun mikroyapıya sahip ürünler elde edilmesine rağmen $100 \mu\text{m}$ 'den küçük tane boyutunu elde etmek çok zordur ve hurdanın yeniden kullanım problemi ortaya çıkar (Kirkwood, 1994, Özer, 2010).

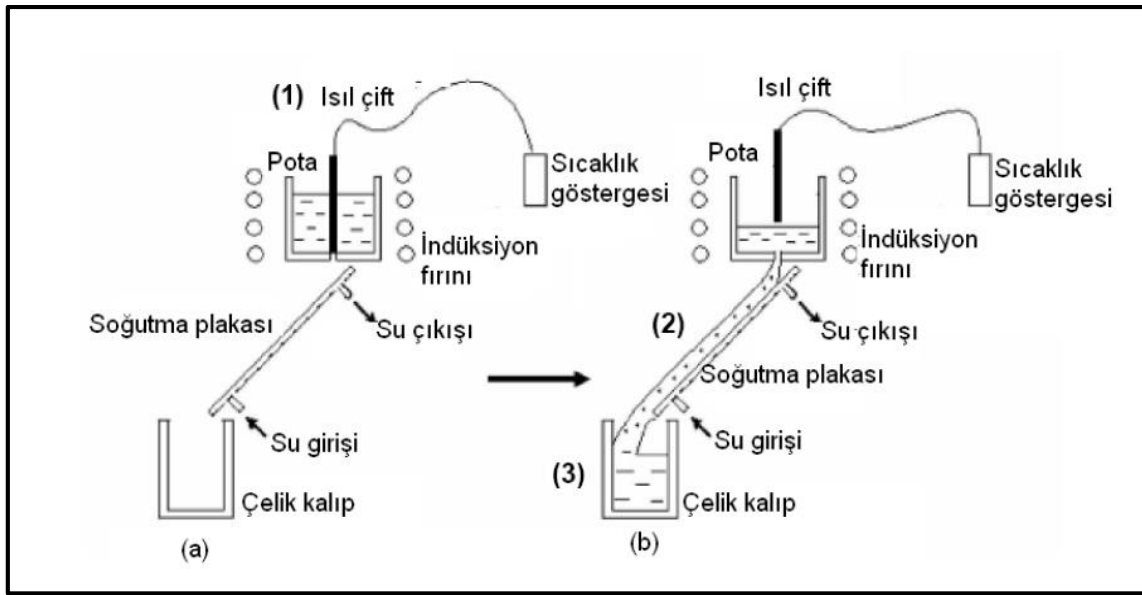
Tikso-şekillendirme için gerekli mikroapı oluşumunu uygun tane inceltme yöntemi ile yeniden ısıtma ile sağlanabilir. Fakat kimyasal tane inceltme yöntemi tek başına uygulanamaz. Kısacası diğer ön malzeme üretim yöntemleriyle (mekanik karıştırma, manyetik karıştırma veya düşük döküm sıcaklığında döküm vb.) birlikte de kullanılabilir.

Kimyasal tane inceltme yönteminin dezavantajı heterojen çekirdeklime etkisinin sadece özel alaşım sistemlerinde etkili olması ve bazı durumlarda çekirdekleyici malzemenin metalik olmayan kalıntılara dönüşmesidir. Bu durum ön malzemenin işlenmesini ve son ürünün mekanik özelliklerini düşmesine sebep olur (Fan, 2002).

4.6. Eğimli Soğutma Plakasına Döküm Yöntemi

Eğimli soğutma plakasına döküm yöntemi Haga tarafından 2000’li yıllarda geliştirilmiştir. Bu yöntem diğer yöntemlere göre daha az işletme maliyeti ile kurulabilir (Haga ve Suzuki, 2001, Taghavi ve Ghassemi, 2009).

Basit bir yöntem olan eğimli soğutma plakasına döküm yöntemi şematik olarak Şekil 4.9’da gösterilmiştir.



Şekil 4.9. Eğimli soğutma plakasına döküm; a) ergitme ve b) plakaya döküm (Liu ve diğ., 2003)

İlk önce metal alaşımı ergitme sisteminde ergitilerek ikinci aşamaya geçilir (Şekil 4.9.a). İkinci aşamada ise ergiyik metal eğimli soğutma plakasına dökülür, ardından eğimli plakaya temas eden ergiyik katılaşmaya başlar. Tane çekirdeklenmesinin başlamasıyla katı kristalleri plaka yüzeyinden ayrılır. Bu aşamada kayma gerilmesini oluşturan etmenler yerçekimi kuvveti ve sıvı akışıdır. Plaka yüzeyinden ayrılan taneler dendritik katılaşmaya zaman vermeden sıvı metal ile çelik kalıba dökülür (Şekil 4.9.b). Bu aşamadan sonra kalıbın içindeki katının mikroyapısı rozetimsi ve küremsi tanelere sahiptir (Birol, 2006c, Taghavi ve Ghassemi, 2009, Legoretta ve diğ., 2008a).

Bu yöntemde üretilen ön malzemenin son mikroyapısını; döküm sıcaklığı, eğimli soğutma plakasının uzunluğu, eğimli soğutma plakasının eğimi, eğimli soğutma plakasının malzemesi

ve döküm yapılan kalıbın malzemesi gibi çeşitli parametreler etkilidir (Taghavi ve Ghassemi, 2009).

Yarı-katı şekillendirme bölgesi büyüdükçe yarı-katı şekillendirme o kadar mümkün hale gelir. Birol (2006b) AA6082 Al alaşımının SIMA yöntemi ve eğimli soğutma yöntemleri ile tiksotropik malzeme üretmiştir. AA6082 Al alaşımının katılaşma aralığı sadece 5°C olmasına rağmen mikroyapılarda küreselliğe ulaşmıştır. Eğimli soğutma plakası ile üretilen numunelerde SIMA yöntemi ile üretilen numuneleri mikroyapıları kıyasladığında daha ince taneli tiksotropik özelliğe sahip olduğunu gözlemlemiştir. Üç farklı 200mm, 300mm ve 400mm uzunluklarındaki eğimli soğuma plakalarında üretim yapan Birol (2006b) farklı ısıtma sıcaklıklarındaki ortalama tane büyüklüğü kıyaslamıştır (Çizelge 4.1).

Çizelge 4.1. AA6082 Al alaşımının farklı ısıtma sıcaklıkları altındaki ortalama tane boyutları (Birol, 2006b)

ESP Döküm Yöntemi				
ESP Uzunluğu (mm)	Döküm Sıcaklığı (°C)			
	665	670	675	680
200	93	92	93	95
300	96	92	97	96
400	90	92	84	88

Birol AA6082 Al alaşımı kullanarak yaptığı çalışmada; en küçük tane boyutuna sahip numune üretiminin 675°C'lik bir döküm sıcaklığı ve 400 mm'lik bir ESP uzunluğu ile elde edildiği sonucuna varmıştır. Tane şekilleri de karşılaştırılabilir olmasına karşın, tanelerin içinde biraz daha yüksek miktarda sıkışmış sıvı saptanmıştır. Yeniden ısıtılan mikroyapıları üzerindeki döküm sıcaklığının etkisinin küçük olduğu, mikroyapının iyileştiği ve tanelerin ESP uzunluğunun artmasıyla giderek daha küçük olduğu ve ESP yönteminde 400mm lik plaka uzunluğu optimize edildiği bulunmuştur (Birol, 2006b).



5. TIKSO ŞEKİLLENDİRME İÇİN YENİDEN ISITMA PROSESİ

Tikso şekillendirme yönteminin önemli bir aşaması yeniden ısıtma prosesidir. Bu proses de ergime noktası düşük olan metal alaşımın sıvı matriste katı kısmın homojen dağılmış küresel tane yapısına sahip yarı katı metal oluşturmayı hedefler. Yeniden ısıtma prosesinde önemli parametreler; ısıtma sıcaklığı, ısıtma süresi ve mikroyapının homojenliğidir. Isıtma sıcaklığı yarı katıda %katı-sıvı miktarını belirler. Isıtma sıcaklığının düşük olması ergimeyi engeller, tiksotropik mikroyapı özelliklerini olumsuz etkiler ve parçanın sünekliliğini düşürmektedir. Isıtma sıcaklığının çok yüksek olması ise parçanın işlenebilirliğini azaltır ve boyutsal kontrolü olumsuz etkiler. Tiksotropik ön malzeme yeniden ısıtma prosesinde parçanın tamamını homojen şekilde ısıtılması önemlidir. Parçanın tiksotropik mikroyapısını homojen olması için bölgesel sıcaklık farkının 6°C'den düşük olması gereklidir. Isıtma süresi incelendiğinde çok az olan ısıtma süresinde tiksotropik özellikleri azaldığı ve katı tanelerin küreselleşmeden kalıba doldurulmasına yol açar. Uzun süreli bir ısıtma ise tanelerin daha büyük olmasına sebep olur (Bozkurt, 2005).

Güner (2013) çalışmasında daha yüksek sıcaklıklarda küreselleşmenin artmakta ve bekleme süresinin azalmakta olduğunu ve bunun yanı sıra küresel tanelerin olduğu uygun süre aralığının da azaldığı sonucuna varmıştır. Yarı-katı sıcaklığa ısıtma aşamasında sıcaklık ve bekleme süresinin hassas bir şekilde kontrol edilmesi gerektiğini belirtmiştir.

Yeniden ısıtma prosesinin genellikle indüksiyon ile ısıtma yapılmaktadır. Tekdüze (uniform) bir ısıtma sistemi sağlayan indüksiyon ile geleneksel fırın yöntemi karşılaştırıldığında fırının ısıtma sisteminin uzun sürede gerçekleştiği ve tekdüze bir ısıtma sağlamaktadır. Bu nedenlerden günümüzde yeniden ısıtma prosesinde genellikle indüksiyon ile ısıtma işlemi yapılır (Kirkwood,1994, Türker,2011).

İndüksiyon ile ısıtma işlemi için süre ve sıcaklık ilişkisi önemli olduğu için tam kontrollü yapılmalıdır. Tam kontrollü yapılan parçaların tüm kesit alanı üzerinde tekdüze sıcaklık dağılımı sağlanmaktadır (Türker,2011).

Yeniden ısıtma prosesinin karmaşık olduğu bilinmesi gereken önemli bir noktadır. Prosesin önemli aşaması ise yarı-katı sıcaklığında metalin ısıtılması işleminin uniform olmasıdır. Tikso-şekillendirme yönteminde alüminyum alaşımlarının yeniden ısıtma prosesinde ön

malzemeyi boylu boyunca ısıtmak için cam elyaf ile sarılı bobin kullanılmaktadır (Jung ve Kang, 2002).

Ön malzeme üretimi sonrasında rozetimsi veya küresele yakın birincil α -Al fazın yeniden ısıtma işlemi ile küreselleşme derecesi artar ve bu tanecikler çevreleri sıvı ile kuşatılmış hale gelir. Böylelikle yarı-katı alaşıma tiksotropik özellik kazandırılmış olunur. Yeniden ısıtma işlemi katı ve sıvı fazların bir arada bulunduğu sıcaklıklar arasında olmasına karşın yarı-katı malzemeye genellikle %40 sıvı ve % 60 katı faz oranlarını belirten sıcaklık değerlerinde yapılması önem arz eder.

Yeniden ısıtma işlemi sonucunda α -Al taneciklerinin küreselleşmesi iki mekanizmadan biri ile veya iki mekanizmanın birleşmesi ile meydana gelebilir. Birinci mekanizma Ostwald büyümesidir. Ostwald büyümesinde (Ostwald ripening); küçük partiküllerden veya taneciklerden ayrılan atomların matris içinden geçerek daha büyük partiküllerin geniş yüzeylerine difüz ettiği kütle transferi gerçekleşir. Ostwald büyüme mekanizmasında küçük partiküller veya tanecikler çözünür ve geniş partiküller büyür. Ortalama partikül veya tane büyüklüğü artarken yoğunlukları azalır. İkinci mekanizma ise birleşme mekanizmasıdır. Bu mekanizmada dağılan partiküller veya taneler serbest hareket halinde ise küreleşme meydana gelir. Öncelikle serbest haldeki partiküllerin veya tanelerin yüzeyleri birbirleri ile temas eder ve daha sonra sinterleme mekanizması ile geniş partiküllere veya tanelerle birleşmeye başlarlar. Bu mekanizma da birim hacimde partikül veya tanecik matris arayüzey alanını ve yoğunluğunu azaltır. Partikül küreleşmesinin tanımlanması en çok Eşitlik 5.1’de gösterilen Lifshitz –Slyozov-Wagner (LSW) analizi ile yapılmaktadır (Özer, 2010, Kocatepe, 1999, Verhoeven, 1975).

$$(\bar{r})^3 - (\bar{r}_0)^3 = \frac{8}{9} \frac{DC\gamma V^2}{kT} t \quad (5.1)$$

$(\bar{r})^3$ = t zamanında ortalama partikül yarıçapı

$(\bar{r}_0)^3$ = Başlangıçtaki ortalama partikül yarıçapı

D = Difüzyon katsayısı

C = Konsantrasyon (yüzey)

γ = Arayüzey enerjisi

V= İkinci faz partiküllerin birim (molar) hacmi

k= Boltzman sabiti

T= Mutlak Sıcaklık

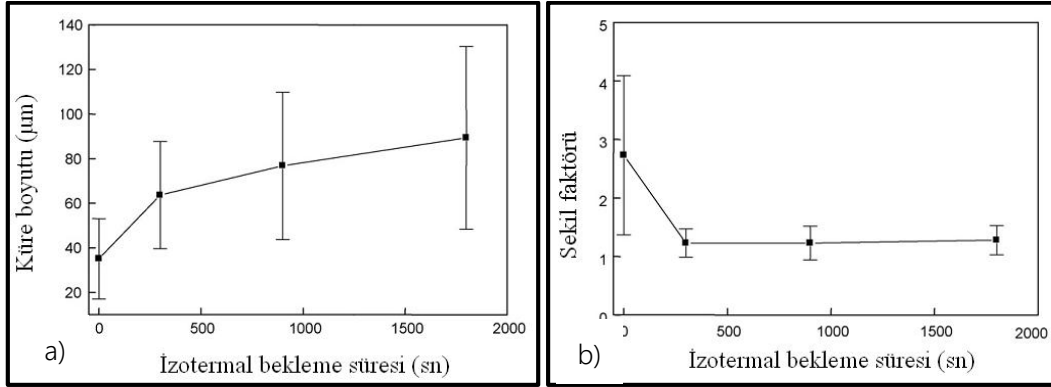
Ötektik altı Al-Si (A357) alaşımında ısıtma işlem kinetiğini en iyi tanımlamayı Liftshiftz – Slyozov-Wagner denkleminin sağladığı belirtilmiştir. Partikül fazının nüfuz ettiği alandaki yarıçap ısıtma işlem zamanının küp kökü ($\sqrt[3]{t}$) ile artar. Küreleşme modelinde partikül yarıçapı zamana bağlıdır. Küçük yarıçaplar geniş partiküllere difüz ettikçe partikül yoğunluğu ısıtma işlem zamanının artması ile azalır. Bu modelde partiküllerin ortalama boyutu ısıtma işlem zamanının artması ile artar (Özer, 2010, Kocatepe, 1999, Meyers, 1985).

Birol, (2006c) A357 alaşımı kullanarak eğimli soğutma plakası yöntemi ile tiktotropik ön alaşım üretmiştir. Yarı-katı sıcaklığa ısıtma işlemi esnasında α -Al taneciklerinin küreselleşmesi için itici gücün katı ve sıvı arasındaki arayüzeyin azalması olduğunu söylemiştir. Kabalaşmanın hem birleşme hem de Ostwald büyümeyle içerebileceğini ve bunun klasik Liftshiftz –Slyozov-Wagner denklemi ile analiz edilebileceğini söylemiştir (Birol, 2006c). Eşitlik 5.2 aşağıdaki gibidir;

$$D^n - D_0^n = Kt \quad (5.2)$$

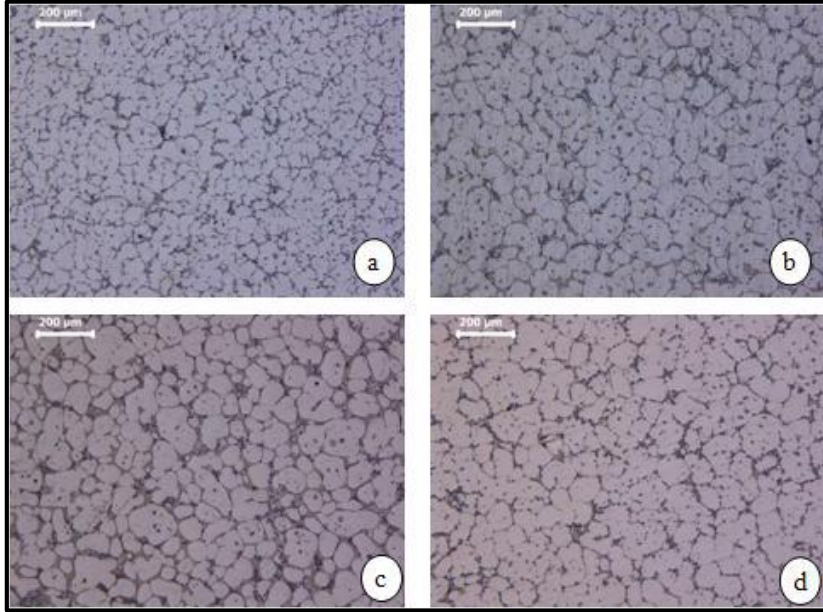
Burada; D_0 : başlangıç tane boyutu, D : t zaman sonra tane boyutu, K : kabalaşma oranı sabiti, t : bekleme süresi

Birol, (2006c) bu çalışmasının sonucunda, birleşme mekanizmasının izotermal beklemenin ilk aşamasında, Ostwald büyümenin ise ikinci aşamada meydana geldiğini söylemiştir. İzotermal bekleme süresi ile tane boyutu artarken şekil faktörü 5 dk. bekleme süresinden sonra değişiklik gösterdiğini tespit etmiştir. Bu değişim Şekil 5.1.a, Şekil 5.1.b’de sırasıyla gösterilmiştir.



Şekil 5.1. İzotermal bekleme süresine bağlı olarak; a. küre boyutu, b. şekil faktörü (Birol, 2006c)

Özer, Kocatepe ve Erdoğan (2011) A357 Al alaşımının yeniden ısıtma prosesinde bekletme süresinin etkilerini araştırmışlardır. Eğimli soğutma plakasına döküm yöntemi ile üretilen ingotları 572°C sıcaklıkta farklı bekletme süreleri ile yapılan yeniden ısıtma işlemlerini bu çalışmada karşılaştırmışlardır.



Resim 5.1. 630-ESP350 numunesinde 572°C’de farklı bekleme sürelerindeki birincil α -Al fazının mikroyapı görüntüleri a) 1dk., b) 3dk., c) 5dk., d) 7dk (Özer ve diğ., 2011)

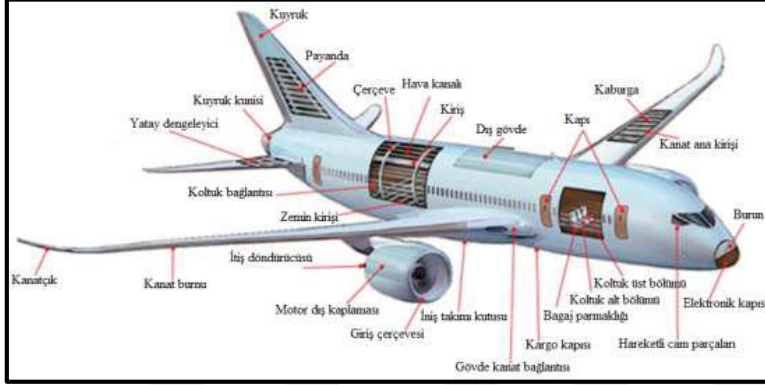
572°C sıcaklıkta yarı-katı bölgede 1dk. bekletme süresinin birincil α -Al fazının rozetimsi yapısını bozmak için yeterli olmadığını belirtilmiş (Resim 5.1.a). Rozetimsi yapının bozunumu 3dk. bekletme süresinde başlamış ancak ayrılma bütünüyle gerçekleşmediğini böylelikle mikroyapıda bulunan bağımsız birincil α -Al fazında küreselleşme gerçekleştiğini

gözlemlenmiş (Resim 5.1.b). Küresele yakın veya rozetimsi yapıya sahip birincil α -Al fazının bozunumu ve küreselleşmesi 5 dk. bekletme süresi ile oluştuğunu ve 5 dk bekletme süresinde birincil α -Al fazının çevresini kuşatan ötektik sıvı durumuna geçerek küreselleşmeyi sağladığı sonucuna varılmıştır (Resim 5.1.c). 7dk. bekleme süresinde ise birincil α -Al fazları birleşerek, tane boyutunun artmasına neden olduğunu (Resim 5.1. d) ve böylece en ideal küresellik derecesine sahip tiksotropik mikroyapı 572 °C sıcaklıkta yarı-katı bölgede 5dk. ile gerçekleştiğini belirtilmiştir (Özer ve diğ., 2011).





2050 yılına kadar 250 kg'a ulaşması beklenmektedir. Geçmişte ve 2050 yılına kadar olan süreçte döküm parçalarının oranı azalırken toplam alüminyum miktarının artması öngörülmüştür. Bu da levha ve ekstrüzyon parçalarının miktarının artması anlamına gelmektedir (Dündar ve Güngör, 2002).



Resim 6.2. Alüminyumun metalinin uçak gövdesinde kullanımı (Alan, 2008)

Resim 6.2’de gösterildiği gibi bugün bazı uygulamaların haricinde bir uçağın ağırlıkça %70’i alüminyumdan oluşmaktadır (Alan,2008). Havacılık sektörünün gelişmesine alüminyum alaşımlarının hafifliği ve sağlamlığının katkısı büyüktür.

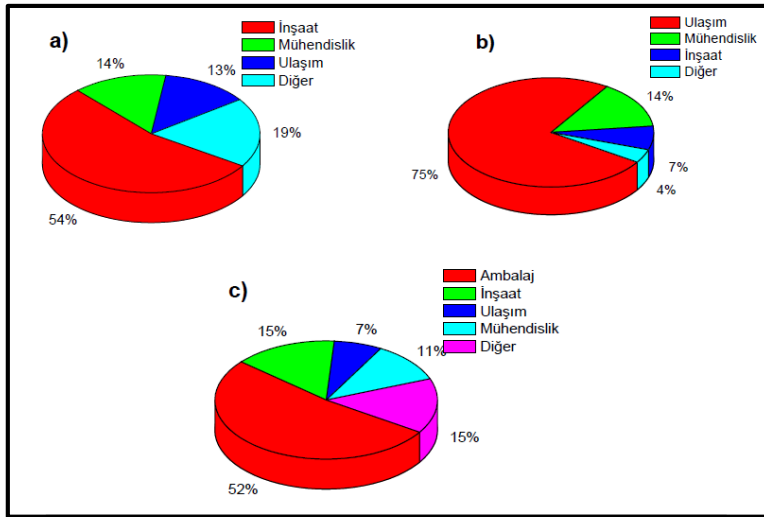
Çizelge 6.1. Kullanım alanlarına göre alüminyumun özellikleri (Altenpohl, 1982)

Uygulama Alanı	Düşük Yoğunluk	İyi Isı ve Elektrik İletkenliği	Korozyon Dayanımı	Dekoratif Görünüm
Ulaşım	●	-	○	○
Mimari	○	-	○	●
Ambalaj	+	+	●	●
Elektrik Endüstrisi	+	●	○	-
Ev Aletleri	○	●	●	○
Makine ve Parçaları	●	○	○	○
Kimya ve Gıda Endüstrisi	○	○	●	○
+ : Arzulanan, ○: Önemli, ●: Çok Önemli				

Çizelge 6.2. Sektörlere göre alüminyum ürün kullanımı (Altenpohl, 1982)

Uygulama Alanı	Döküm Veya Dövme	Levha	Soğuk Ekstrüzyon	Sıcak Ekstrüzyon	Kablo, Tel	Folyo
Ulaşım	○	○	-	○	-	-
Mimari	-	○	-	○	-	-
Ambalaj	-	○	○	-	-	○
Elektrik Endüstrisi	-	-	○	○	○	○
Ev Aletleri	-	-	○	-	-	○
Makine ve Parçaları	○	○	-	-	-	○
Kimya ve Gıda Endüstrisi	+	○	-	○	-	○
+ : Arzulanan, ○: Önemli, ●: Çok Önemli						

Endüstride kullanılan alüminyum ve alüminyum alaşımı parçalar dövme veya döküm yoluyla üretilmektedir. Alüminyum ve alaşımlarının kullanım alanları Çizelge 6.1 ve Çizelge 6.2’de, kullanım alanlarına göre alüminyum ürün dağılımı Şekil 6.1’de gösterilmiştir.

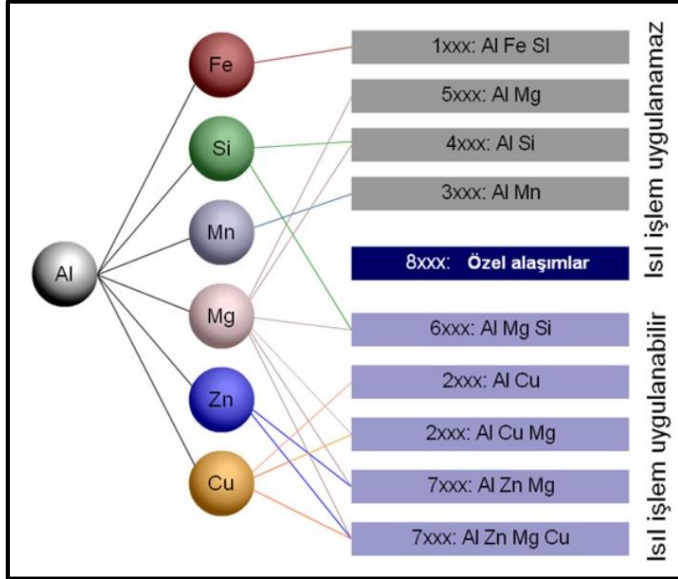


Şekil 6.1. a. Ekstrüzyon, b. döküm ve c. yassı alüminyum ürün kullanımlarının sektörlere göre dağılımı (Alan, 2008)

6.1. Alüminyum Alaşımlarının Sınıflandırılması

Alüminyum alaşımları üretim yöntemleri esas alınarak dövme ve döküm olmak üzere iki ana alt gruba ayrılmaktadır. Plastik deformasyonla şekillendirilen dövme alaşımları, döküm

alaşımlardan oldukça farklı mikroyapı ve kimyasal bileşime sahiptirler. Her iki ana grup içindeki alaşımlar, ısıtıl işlem uygulanabilen ve uygulanamayan alaşımlar olmak üzere, iki alt gruba ayrılmaktadır. Alüminyumun alaşımlandırılmasında kullanılan en önemli alaşım elementleri ve alaşımların sertleşebilme durumları Şekil 6.2’de gösterilmiştir (Smith, 2001)



Şekil 6.2. Alüminyum alaşımları için sınıflandırma sistemi (ASM International, 1991)

Isıl işlem uygulanabilir alüminyum alaşımlarında; bazı ısıtıl işlemle çökelme sertleşmesi elde edilmektedir. Çökelme sertleşmesi elde edilen ısıtıl işlem, alüminyum alaşımlarda istenilen dayanımı elde etmek için uygulanan bir yöntemdir. Isıl işlem uygulanabilir alüminyum alaşımlarının 2xxx, 6xxx ve 7xxx serileri olmak üzere üç ana grubu bulunmaktadır. Isıl işlem uygulanamayan alüminyum alaşımları ise çökelmeyle sertleştirilemez, dayanımlarının artırılabilmesi sadece soğuk deformasyon ile mümkündür. Pekleşme, katı eriyik sertleşmesi ve dağılım mukavemetlendirmesi ile dayanımları artırılmaktadır. Isıl işlem uygulanamayan alüminyum alaşımlarının ise 1xxx, 3xxx ve 5xxx serileriyle üç ana grubu bulunmaktadır (Smith, 2001).

Alüminyum alaşımlarında kullanılan en önemli alaşım elementleri bakır, magnezyum, silisyum, mangan ve çinkodur.

Bakır sertlik ve dayanımı artırırken, silisyum ilavesi sıvı alüminyumun akışkanlığını artırır ve korozyon direnci, aşınma direnci, kaynak kabiliyeti özelliklerinde artış gözlenir. Magnezyum ilavesi malzemenin şekillendirilebilme ve işlenebilme kabiliyetini artırır,

mükemmel korozyon direnci ve süneklik sağlar. Çinko ise alüminyum alaşımlarına yüksek dayanım kazandırmak için ilave edilir ve havacılık-uzay endüstrilerinde kullanılan 7xxx serisi alüminyum alaşımlarının temelini oluşturur. Çinko sıcak yırtılma eğilimini artırsa da bakır ilavesi bu etkiyi azaltmaktadır (Tan, 2011).

Dövme alüminyum alaşımları için dört basamaklı bir numaralandırma sistemi kullanılmaktadır. 2xxx'den 8xxx'e kadar olan gruplarda, ilk rakam temel alaşım elementini, ikinci rakam alaşım modifikasyonlarını göstermektedir. İkinci rakam sıfır ise alaşımda modifikasyon yapılmamıştır. Son iki rakam ise gruptaki farklı alüminyum alaşımlarını ayırmak için kullanılır. 1xxx grubu ise alaşımlandırılmamış safa yakın alüminyumlardır. Bu grupta ilk iki rakam "10" şeklinde yazılırken son iki rakam minimum saflık yüzdesini gösterir (Çizelge 6.3).

Çizelge 6.3. Dövme alüminyum alaşımları için sınıflandırma sistemi (ASM International, 1991)

Ana Alaşım Elementi	Auminum Association (AA)Sistemdeki Gösterimi
Alüminyum $\geq 99\%$	1xxx
Bakır	2xxx
Mangan	3xxx
Silisyum	4xxx
Magnezyum	5xxx
Magnezyum ve silisyum	6xxx
Çinko	7xxx
Diğer elementler	8xxx
Kullanılmayan seriler	9xxx

Döküm alüminyum alaşımları da dövme alüminyum alaşımlarına benzer şekilde dört basamaklı bir numaralandırma sistemi ile tanımlanır. Dövme alaşımlardan farklı olarak kesir işaretiyle diğerlerinden ayrılan son basamak alaşımın döküm ya da ingot halinde olduğunu gösterir.

İlk basamak alaşım grubunu, ikinci ve üçüncü basamak 2xx.x'den 8xx.x'e kadar olan gruplarda özel alaşımı, 1xx.x grubunda ise alaşımın saflık yüzdesini belirtir (Çizelge 6. 4) (Güner, 2013).

Çizelge 6 4. Döküm alüminyum alaşımları için sınıflandırma sistemi (ASM International, 1991)

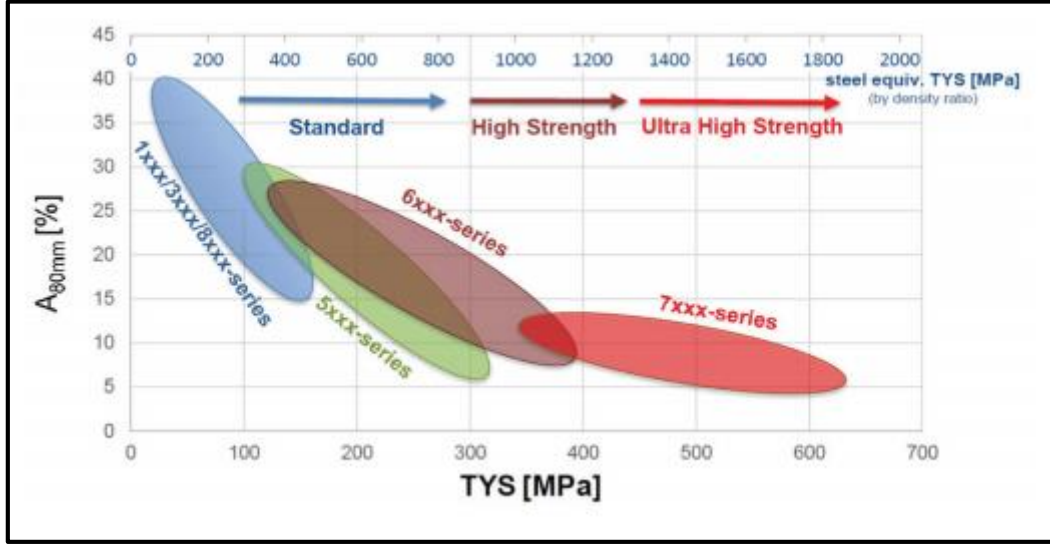
Ana Alaşım Elementi	Auminum Association (AA)Sistemdeki Gösterimi
Alüminyum $\geq 99\%$	1xx.x
Bakır	2xx.x
Mangan	3xx.x
Silisyum	4xx.x
Magnezyum	5xx.x
Magnezyum ve silisyum	6xx.x
Çinko	7xx.x
Diğer elementler	8xx.x
Kullanılmayan seriler	9xx.x

Birol (2008) araştırmasında döküm ve ekstrüzyon haldeki AA6082 Al alaşımının yarı-katı şekillendirme sonrasındaki mikroyapılarını incelemiştir. Ekstrüzyon deformasyonu, yarı-katı sıcaklık aralığına ısıtıldığında ingotun tane yapısının iyileştiğini, yeniden kristalleşmeyi kolaylaştırdığını ve tek biçimli α -Al taneleri üretildiğini gözlemlemiştir. Ekstrüze edilmiş AA6082 ingot parçası böylece 644°C'de kolayca yarı-katı halde şekillendirilmiştir. Sıvı fazın şekillendirme basınçları altında akışı, yarı-katı şekillendirme sırasında tanelerin daha fazla küreselleşmesine katkıda bulunur. Ekstrüze edilmiş hammaddeden yarı-katı şekillendirilmiş parça homojen bir yapı sergiler ve makro ve mikro gözenek oluşumu gözlenmediği sonucuna varılmıştır. Diğer taraftan dökülmüş malzeme, yarı katı sıcaklık aralığında önemli ölçüde tane irileşmesine uğradığı ve bu şekilde elde edilen bazı çok iri taneli heterojen tane yapısı, ekstrüde edilmiş malzeme kadar tiksö şekillendirilebilir değildir. Bu nedenle, kalıbı dökme malzeme ile tamamen doldurmak için 646°C gibi biraz daha yüksek bir şekillendirme sıcaklığı gerekir. Tanelerin çoğu, özellikle iri olanlar, şekillendirme sırasında deforme olurken, küçük olanlar eş eksenli kalır. Dökme külçeden yarı katı halde oluşturulan parça, mekanik özellikleri göz önüne alındığında ara sıra gözenekler ile, ekstrüze edilmiş malzemeden oluşturulana göre mikroyapısal özellikleri açısından çok daha düşüktür (Birol, 2008).

6.2. Al-Zn-Mg-Cu Alüminyum Alaşımları

7xxx serisi Al-Zn döküm alaşımlarının sıcak çatlaması ve Al-Zn dövme alaşımların stres-korozyon çatlamasına karşı hassasiyeti kullanım alanlarında azalmaya neden olmuştur. Bu nedenle diğer alaşım elementleri ile geliştirilen 7xxx serisi dövme alüminyum alaşımlarında gerilme-gerinim özelliklerinin en iyi kombinasyonunu sunar. Al-Zn alaşımını başta Mg ve

Cu alaşım elementlerinin eklenmesiyle en yüksek mukavemete sahip ısıl işlem yapılabilme özelliklerine sahip alüminyum alaşımları üretilmiştir. Zn elementi alaşımda mukavemeti arttırma özelliğinin yanı sıra çökelme sertleştirmesi yöntemine de izin verir (Mondolfo, 1979).



Şekil 6.3. Çeşitli alüminyum alaşım serilerinin dayanım-toplam uzama eğrisi (Wieser ve diğ., 2018)

7xxx serisi alaşımlar, genellikle yüksek gerilim özeliği arzu edilen parçalarda kullanılır (Şekil 6.3). Yüksek mukavemetli 7xxx alüminyum alaşımları, gerilme korozyonu atlmasına karşı daha az direnç gösterir ve genellikle daha iyi mukavemet, korozyon direnci ve kırılma tokluğu kombinasyonları sağlamak için hafıfe aşırı yaşlanmış bir temperde kullanılır.

7xxx serisi birincil alaşım elementi Zn, %1 ile %8 arasında bir oranda bulunur. Genellikle mukavemetini daha çok arttırmak için Mg, Cu ve düşük oranlarda Mn ve Cr ile birlikte kullanılır. Bu grubun en önemli alaşımları olan 7075, 7050 ve 7049 yüksek gerilim altındaki mkemmek mukavemetleri ile uçak sanayisinin vazgeçilemez alüminyum alaşımı olmuşlardır.

7xxx serideki alüminyum alaşımlarının yüksek tokluğa sahip olmalarının yanı sıra kaynak kabiliyet özelliklerinin de olması geniş bir kullanım alanı sunmaktadır (Avner, 1974, Wu, Froes ve Alvarez, 1999, Kaufman, 2000).

Liu ve diğ. (2010) literatürdeki mevcut çalışmalardan yararlanarak AA7075, AA7175, AA7050, AA7010, AA7055, AA7085 ve AA1933 dâhil olmak üzere bazı tipik yüksek dayanımlı alüminyum alaşımlarının su verme duyarlılıklarını süre sıcaklık-özellik diyagramlarıyla incelemişlerdir. Su verme hızının düşürülmesiyle mekanik özelliklerin kötüleştiği görülmüştür. AA7075, AA7175 ve AA7055 alaşımları en yüksek su verme duyarlılığına sahip olurken, AA7085 ve AA1933 alaşımlarının su vermeye karşı en az duyarlılığa sahip olduğu tespit edilmiştir. Isıl işlenebilir ve yüksek dayanım gösterebilmektedirler.

7xxx serisi, alüminyum alaşımlarının en yüksek mukavemete sahip olanıdır. Gerilmeli korozyon gibi problem olduğu yerlerde kullanılır. Bakırlı alaşımlar çökelme sertleştirilebilir.

7xxx serisi alüminyum alaşımları gibi dövme yöntemi ile üretilmiş yüksek performanslı metal alaşımlarının yarı-katı şekillendirme yönteminin uygulanmasında zorluklar yaşanabilir (Liu ve diğ., 2010, Birol Y., 2006b).

7xxx serisi Al alaşımlarında yarı-katı çalışmalar sadece birkaçından ibarettir. Genellikle 7xxx serisi Al alaşımlarında AA7075 alaşımı ile yapılan çalışmalar mevcuttur. AA7075 alaşımının basit bir grafit kalıpta ve takım çeliğinden üretilen kalıpta tikso-şekillendirilmesi karşılaştırılmıştır (Chayong, Atkinson ve Kapranos, 2005). Basit bir grafit kalıpta tikso-şekillendirilmiş ve T6 koşuluna ısıl işleme tabi tutulmuş malzeme için elde edilen en yüksek akma dayanımı 478 MPa ve uzama değeri %6,9'dur. 615°C'de 250°C'ye ısıtılmış bir takım çeliği kalıbına tikso-şekillendirme için, elde edilen en yüksek akma dayanımı 474 MPa ve uzama değeri %4.7'dir. Bu değerler (özellikle mukavemet için), dövme ısıl işlem görmüş durumdaki AA7075 malzemesinin mekanik değerlerine (505 MPa ve %11 uzama) yaklaşımaktadır (Çizelge 6.5). (Chayong, ve diğ., 2005)

Çizelge 6.5. 7075 T6 standardına (ASM) kıyasla tikso-şekillendirilmiş numunelerinin mekanik özellikleri

Experiment/condition	Average yield strength (MPa)	Average elongation (%)
As-thixoformed, experiment 1 (graphite die)	225.3 ± 27	2.0 ± 1.4
As-thixoformed, experiment 5 (heated tool steel die)	235 ± 1.8	2.7 ± 0.6
Single-step heating thixoformed (experiment 1) + T6	435.9 ± 8.1	2.5 ± 0.5
Three-step heating thixoformed (experiment 2) + T6	477.6 ± 4.7	3.0 ± 0.5
Three-step heating thixoformed (experiment 3) + T6	470.0 ± 2.3	3.4 ± 1.1
Three-step heating thixoformed (experiment 4) + T6	472.0 ± 4.5	2.4 ± 0.3
Three-step heating thixoformed (experiment 5, Heated tool steel die) + T6	467.0 ± 5.7	3.2 ± 0.8
7075 T6-standard	505	11

AA7075 Al alaşımı ile SIMA yöntemi ile tiksotropik mikroyapı üzerine çalışılmıştır (Bolouria, Shahmirib ve Kang, 2011). Bolouria ve diğeri (2011), AA7075 malzemesinin SIMA yöntemi ile ürettikleri numunelerin yarı-katı bölgedeki ısıtma sırasında basma kuvvetinin mikroyapı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Numuneler, %40'a varan azalmaya kadar farklı yüksekliklerde basma kuvveti uygulanarak soğuk şekillendirilmiştir. Alaşımın yarı-katı bölge içindeki izotermal bekletme işlemleri, önceden belirlenmiş zaman aralıkların da 610, 620 ve 625°C'de gerçekleştirilmiştir. Isıtma işlemi sırasında basma oranının artmasıyla ortalama katı tane boyutu küçülmüş ve küreselleşme derecesi iyileşme eğilimi göstermiş olduğunu sonucuna varılmıştır. Deformasyon, yeniden kristalleşme mekanizması nedeniyle yarı katı mikroyapıdaki taneleri ince hale gelmesini sağlamış; seçilen %30'un, alınan alaşımların SIMA yönteminde ideal yarı katı mikroyapıyı elde etmesi için uygun bir sıkıştırma aralığı olduğu kanıtlanmıştır.



7. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

7.1. Malzeme

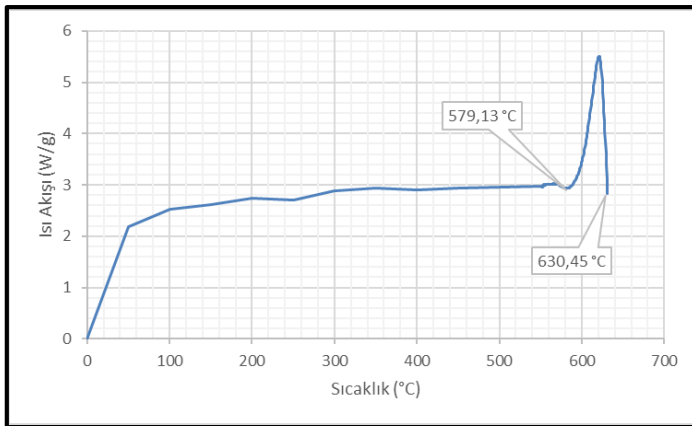
Yarı-katı şekillendirme için ön malzeme üretimi için AA7050 alüminyum alaşımı kullanılmıştır. Blok halinde temin edilen AA7050 alüminyum alaşımının kimyasal kompozisyonu Çizelge 7.1’de verilmiştir.

Çizelge 7.1. AA7050 alüminyum alaşımının kimyasal ve nominal bileşimi (%Ağırlıkça)

Alaşım		Alaşım Elementleri (Ağırlıkça %)									
		Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr	Ti	Zr	Al
Nominal Bileşim	Min.	0,00	0,00	2,00	0,00	1,90	5,70	0,00	0,00	0,08	Kalan
	Max.	0,12	0,15	2,60	0,10	2,60	6,70	0,04	0,06	0,15	
AA7050		0,05	0,11	2,50	0,01	2,30	5,89	0,01	0,04	0,11	88,91

7.2. AA7050 Alaşımının Ergime ve Katılaşma Sıcaklıklarının Belirlenmesi

AA7050 alüminyum alaşımının döküm ve yarı- katı bölge sıcaklıklarının tespiti için 2°C/dakika hızla DSC analizi TENMAK NÜKEN kuruluşunda yapılmıştır (Şekil 7.1). DSC analizlerinden elde edilen verilere göre Çizelge 7.2’de gösterilen katılaşma (solidüs) ve sıvılaşma (liküdüs) sıcaklıkları tespit edilmiştir.



Şekil 7.1. AA7050 alaşımının DSC analizi

DSC analizinden alınan verilerle “kısmi alan” yöntemi ile % katı-sıvı hacim

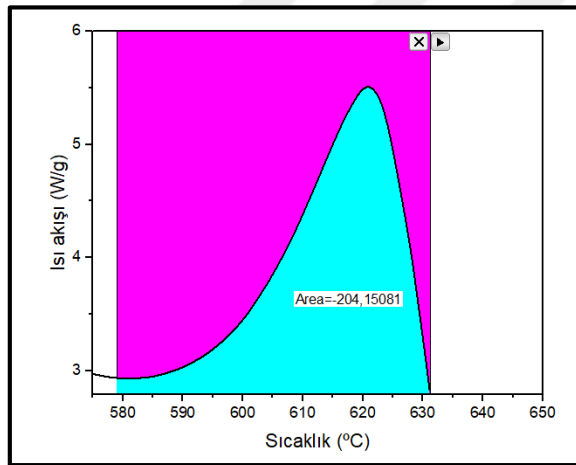
hesaplanmaktadır (Tzimas ve Zavaliangos, 2000). DSC eğrisinde bulunan pik sıcaklıkları arasında bulunan % katı-sıvı hacim oranı, alan hesabı yardımıyla bulunur.

Çizelge 7.2. AA7050 alaşımının DSC analizi ile belirlenen katılaşma ve ergime sıcaklıkları

DSC Ölçüm Şartları (2°C/dk.)	Katılaşma Sıcaklığı (Solidüs)	Ergime Sıcaklığı (Likidüs)
Sıcaklık (°C)	579	630

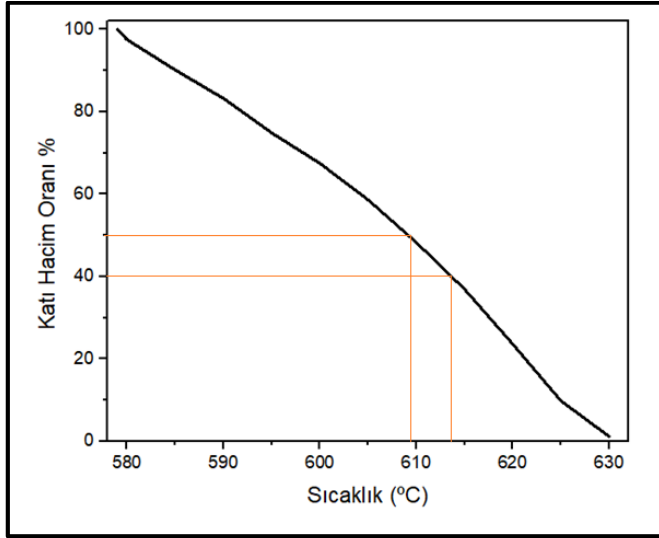
$$f_s(T) = \frac{A(T_i)}{A(T)} \quad (7.1)$$

Eşitlik 7.1 'de f_s : T sıcaklığa karşılık gelen katı oranı, $A(T_i)$: T sıcaklığa denk gelen alan, $A(T)$: Eğrideki pik sıcaklıkları arasında kalan toplam alanı belirtmektedir. Bu eşitlik ile istenilen sıcaklıktaki katı oranı bulabilmek mümkündür. Origin 2021 programı kullanılarak DSC analizi verilerinden alan hesabı ile % katı hacim oranı hesabı yapılmıştır (Şekil 7.2).



Şekil 7.2. % Katı oranının hesaplanmasında kullanılan DSC eğrisinin şematik gösterimi (Mavi renk alanı temsil eder)

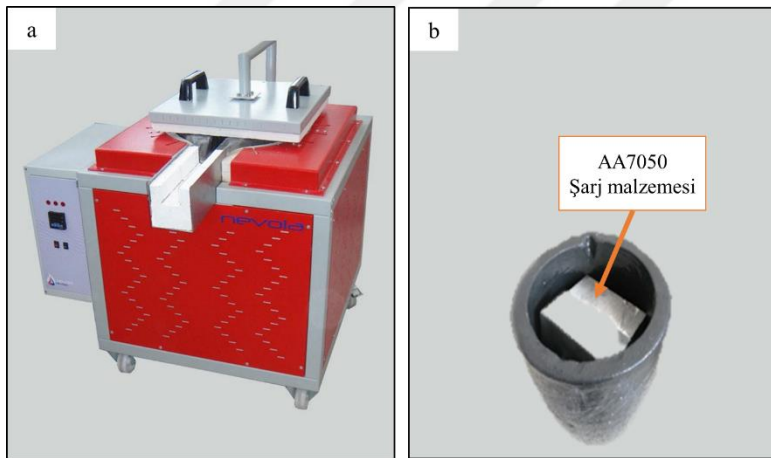
Kısmi alan yöntemi kullanılarak yapılan hesaplamalar sonucunda sıcaklık-% katı hacim oranı grafiği Origin2021 programı kullanılarak çizilmiştir (Şekil 7.3).



Şekil 7.3. AA7050 alaşımının sıcaklık-% katı oranı grafiği

7.3. AA7050 Alaşımının Ergitilme İşlemi

Ergitme işlemi elektrikli ergitme ocağında 20kg'lık SiC potada yapılmıştır (Resim 7.1).



Resim 7.1. Elektrikli ergitme ocağı ve kullanılan SiC pota

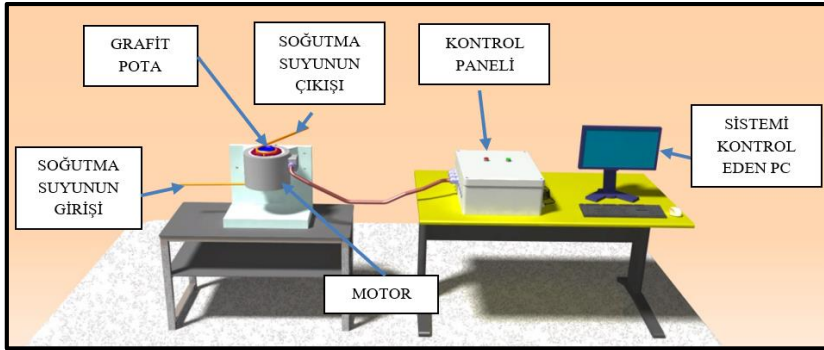
Ergitme ve döküm işlemlerinde sıcaklık kontrolü K tipi termokupl ile gerçekleştirilmiştir. Sıvı metal döküm işleminden önce 700 °C'de % 0,4 oranında DEGAFFEX AE/200 (Azotbazlı tane inceltici ve gaz giderici tablet) ile gaz giderme işlemine tabi tutulmuştur.

7.4. Elektro-manyetik Karıştırma Ünitesinin Kurulması

Elektro-manyetik karıştırma (EMK) ünitesi dizayn edilmiştir, Resim 7.2. Değişken

manyetik alan oluşturmak için asenkron motor kullanılmış olup motorun kontrolü frekans konvertörü ile sağlanmıştır. Prototipi önceden CATIAV5 çizim programı ile tasarlanmıştır. EMK'da etkili soğutma, üniteye monte edilen su soğutma sistemi ile sağlanmıştır. Numune üretimi için Ø45 mm çapında, 190 mm yüksekliğinde grafit kalıp kullanılmıştır.

Elektro-manyetik karıştırma ünitesi Profi-LAB editör yazılımı kullanılarak oluşturulan ara yüz ile bilgisayar üzerinden PLC aracılığıyla kontrol edilmiştir.

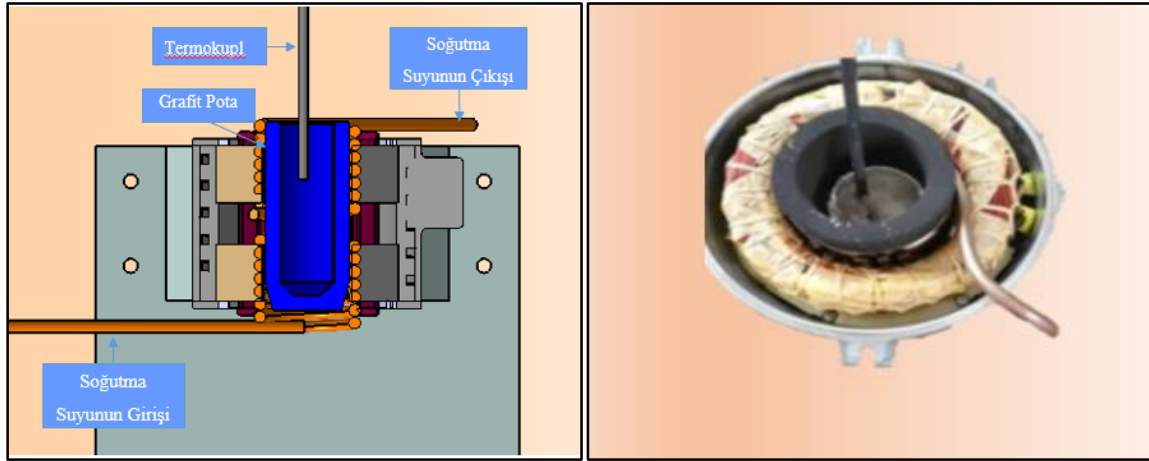


Resim 7.2. Bilgisayar kontrollü elektro-manyetik karıştırıcının prototip çizimi

7.5. Tiksotropik Yapıya Sahip Ön Malzemenin Üretilmesi

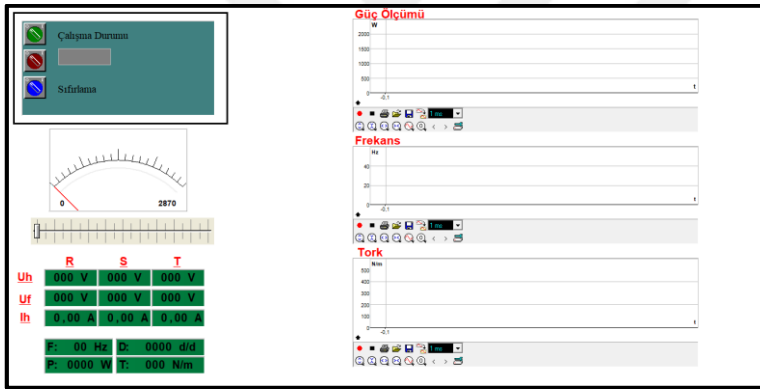
AA7050 alaşımının ergitme işlemi rezistanslı ergitme ocağında yapılmıştır. 700°C'deki sıvı metal grafit potaya dökülmüştür. Döküm sonrasında grafit pota EMK ünitesine yerleştirilmiştir. Sıvı metal yarı-katı faz sıcaklık aralığında bilgisayar kontrollü olarak karıştırma işlemine tabi tutulmuştur (Resim 7.3).

EMK yöntemi ile dendritik olmayan birincil α -Al fazını üretmek için sıvı metale yarı-katı sıcaklık bölgesi boyunca 15Hz, 30Hz ve 50 Hz gibi üç farklı karıştırma frekansı uygulanmıştır. Elektro-manyetik karıştırma parametrelerini kontrol eden Profi-LAB editör yazılımı kullanılarak oluşturulan ara yüz karışma esnasında mevcut tüm verilerin grafik dataları bilgisayara kaydedilmiştir (Resim 7.4).



Resim 7.3. Elektro-manyetik karıştırma yönteminin a. şematik gösterimi, b. karıştırma anındaki gösterimi

Resim 7.4’da Profi-LAB editör yazılımı kullanılarak oluşturulan ara yüz gösterilmiştir.

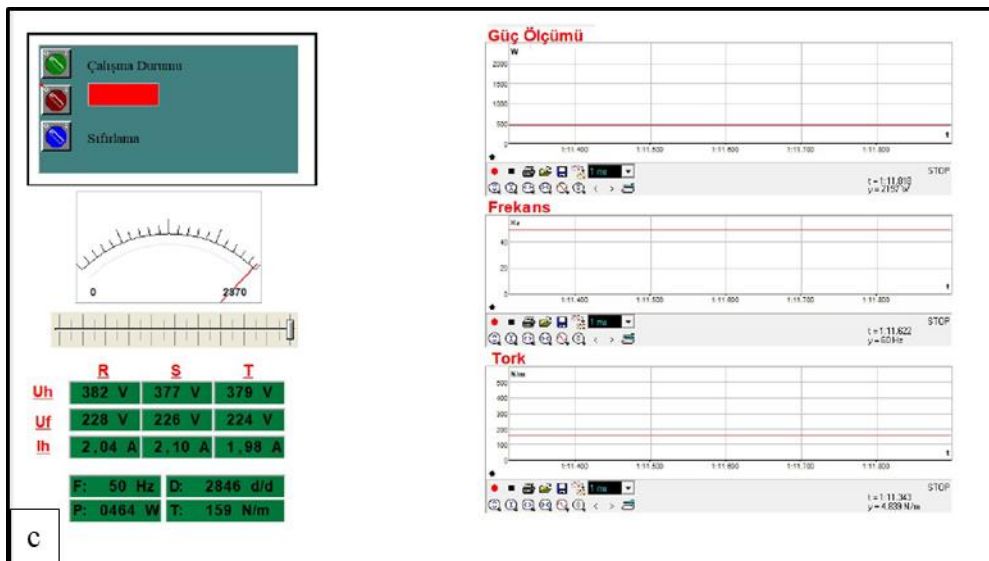
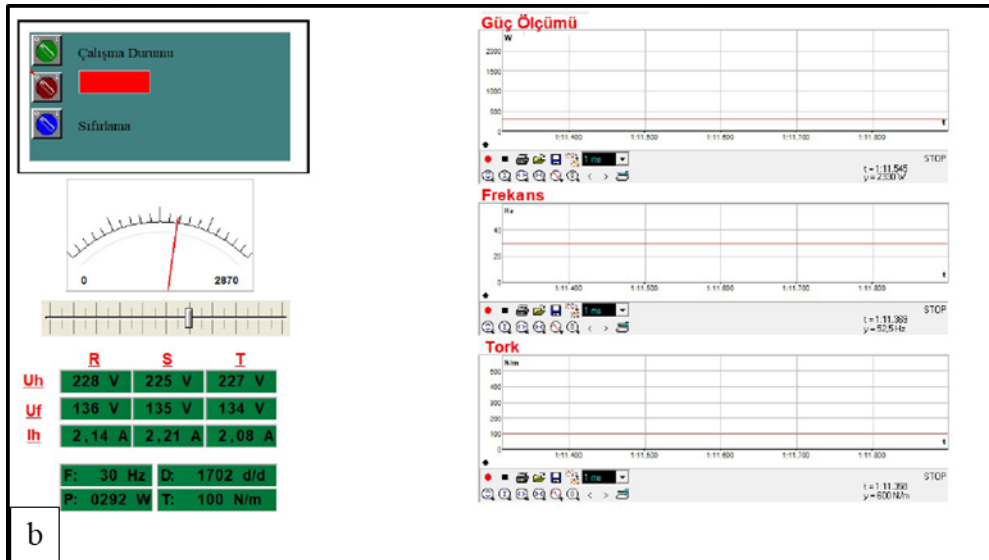
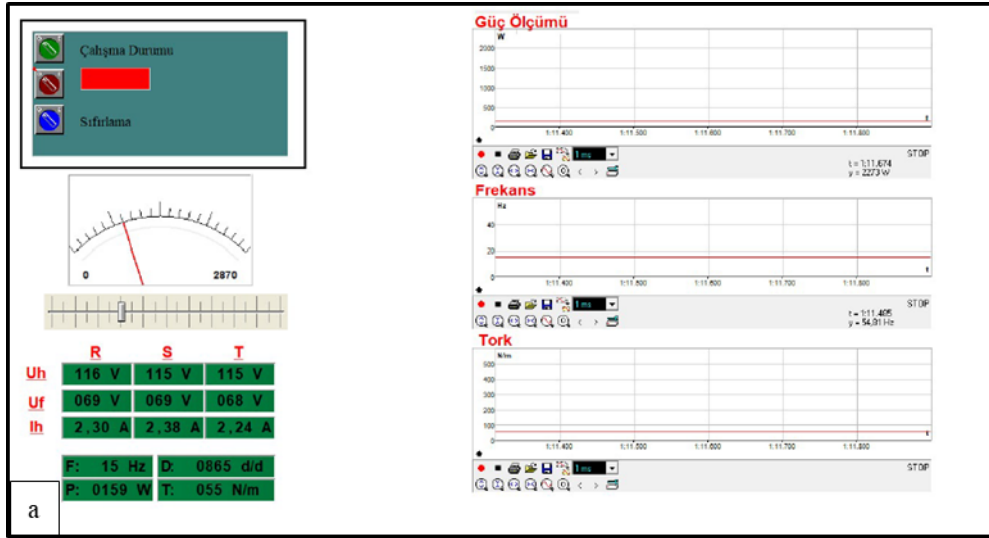


Resim 7.4. Profi-LAB editör yazılımı kullanılarak oluşturulan ara yüz

Çizelge 7.3. EMS parametre değerleri

EMS Parametreleri	Frekans Değeri Hz	Tork Değeri N/m	Güç W	Akım A
I. Numune	15	55	159	2,30
II. Numune	30	100	292	2,14
III. Numune	50	159	464	2,04

EMK yapılan AA7050 alaşımından üretilen ön malzemelerin farklı parametre değerleri Çizelge 7.3’de gösterilmektedir.

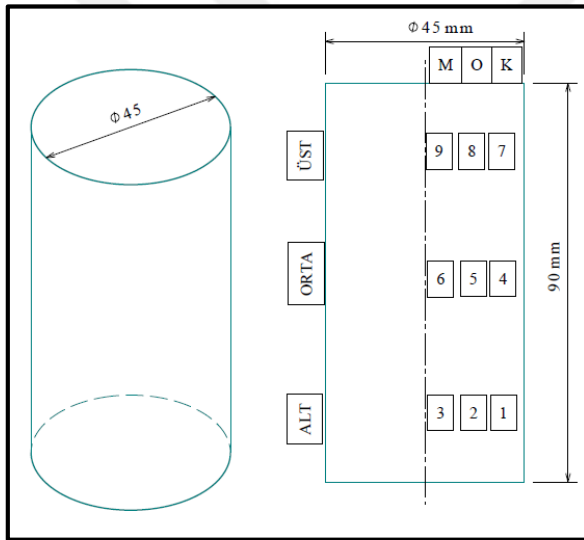


Resim 7.5. Profi-LAB editör yazılımı kullanılarak oluşturulan ara yüzden alınan veriler
 a.15Hz, b. 30Hz, c. 50Hz

EMK yapılan AA7050 alaşımdan üretilen ön malzemelerin farklı parametre değerleri Profi-LAB editör yazılımı kullanılarak oluşturulan ara yüzden alınmıştır.

7.6. Metalografik Çalışmalar

Elektro-manyetik karıştırma ünitesi ile farklı parametrelerde üretilen biyetler (ön malzeme) mikroyapı incelemesi için dik olarak tam ortadan ikiye kesilmiştir. Kesme yüzeyi mikro yapı incelemesine esas olmak üzere, Şekil 7.4’de gösterildiği gibi parçanın alt (A), orta (O) ve üst (Ü) her bir bölgesinden kenar (K), orta (O) ve merkezinden (M) olmak üzere, 10x10x10 mm ölçülerinde toplam 9 adet numune alınmıştır.



Şekil 7.4. Üretilen numunelerin metalografik incelenmesi; incelenen bölgelerinin şematik gösterimi (Ü: Üst, O: Orta, A: Alt, M: Merkez, K: Kenar)

Numunelerin metalografik incelemeleri için abresiv kesici cihazı kullanılmıştır. Kesim işlemi sonrasında numuneler sıcak bakalite alınmıştır.

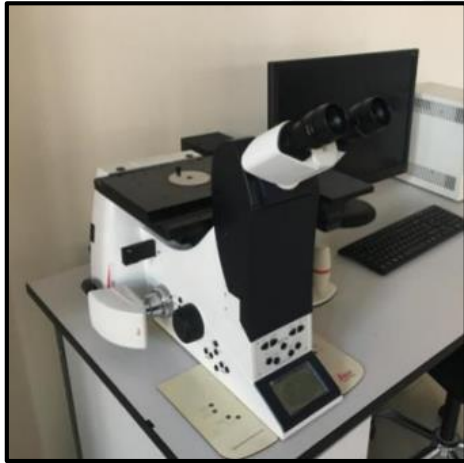
Mikroyapı incelemeleri için standart numune hazırlama tekniği zımparalama ve parlatma işlemleri uygulanmıştır. Zımparalama işleminde sırasıyla 120, 240, 400, 600, 800, 1200 ve 2500 numaralı SiC zımparalar kullanılmıştır. Parlatma işlemi için sırasıyla 6 µm, 3 µm keçeler ve elmas pasta süspansiyonlar kullanılmıştır. Nihai parlatma ise 1 µm kolloidal silika ile yapılmıştır.

Zımparalama ve parlatma işlemleri Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü’nde bulunan Resim 7.6’de gösterilen ATM Saphir 250

otomatik parlatma/zımparalama cihazı kullanılarak yapılmıştır. AA7050 EMK ile üretilen ön malzemelerin numuneleri parlatma işlemi sonrasında dağlayıcı olarak Keller (190 ml H_2O + 5 ml HNO_3 + 3 ml HCl + 2 ml HF) çözeltisi ile dağlanmıştır.



Resim 7.6. Otomatik döner zımparalama ve parlatma cihazı



Resim 7.7. Leica DMI 5000M metal mikroskobu

Mikroyapıların incelemesinde Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'ndeki Leica DMI5000M model metal mikroskobu kullanılmıştır (Resim 7.7).

Mikroyapı incelemelerinden sonra JEOL 6060 LV model tarama elektron mikroskobu (SEM) cihazında görüntüleme yapılmıştır (Resim 7.8). JEOL 6060 LV cihazına bağlı IXRF marka EDS (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy) cihazı ile mikroyapılarda bulunan fazların hangi elementten oluştuğu ve noktasal elementel analiz ile ağırlıkça % oranları tespit

edilmiştir.



Resim 7.8. Jeol marka JSM-6060LV modeli taramalı elektron mikroskobu

7.7. Mikro Sertlik Ölçümü

AA7050 Al alaşımlı EMK ile 3 farklı parametreler ile üretilen numunelerden mikro sertlik ölçümleri alınmıştır. EMK yöntemi ile üretilen numunelerin dışında ayrıca sadece döküm yöntemi ile üretilen numuneden de sertlik değeri alınarak kıyaslanmıştır.



Resim 7.9. QNESS marka GmbH Q30M modeli mikro sertlik cihazı

Sertlik ölçümleri Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümünde bulunan QNESS GmbH Q30 M model mikro sertlik ölçme cihazında $0,1 \text{ kgf} \approx 0,9807 \text{ N}$ yük uygulanarak ASTM E384 – 17 standardına uygun yapılmıştır (Resim 7.9).



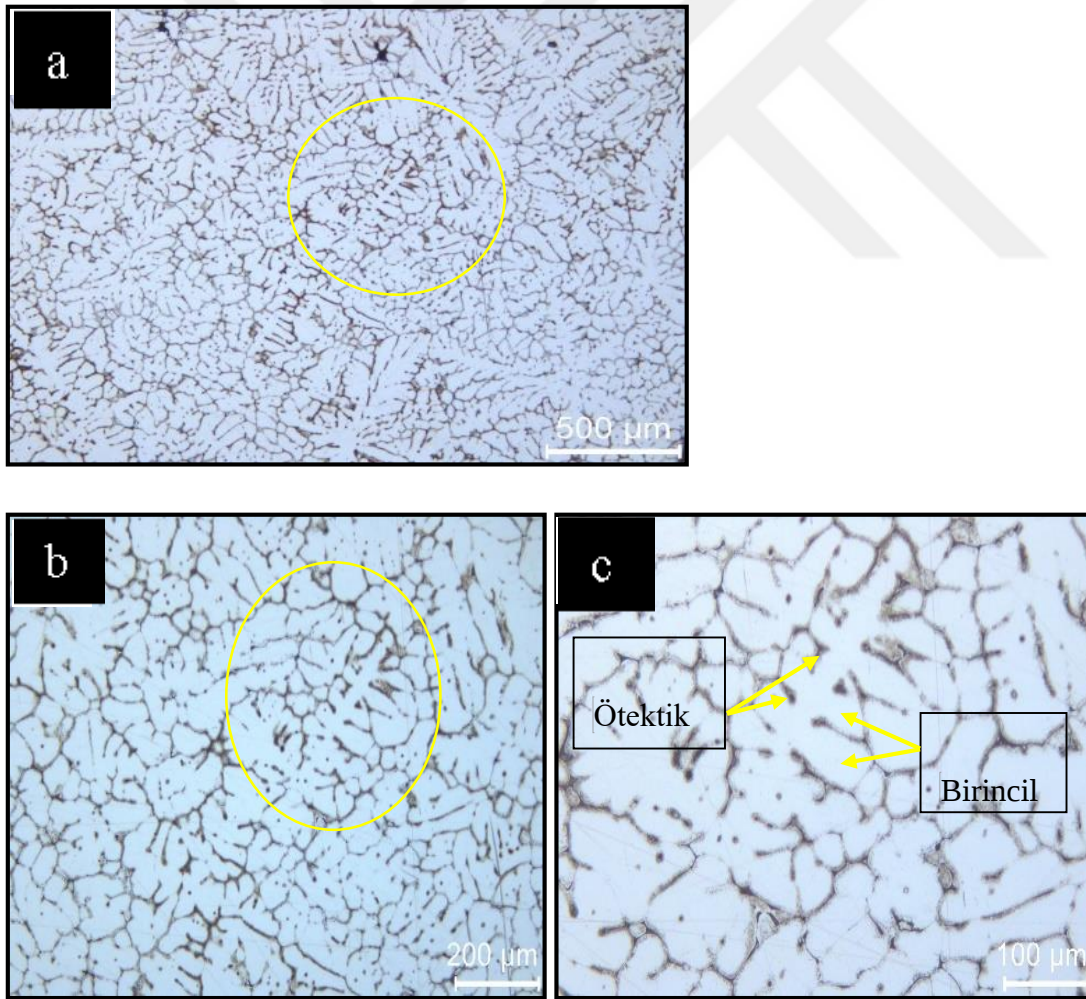
8. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA

8.1. Mikroyapı İncelemeleri

AA7050 Al alaşımının döküm halinin, EMK yöntemi ile 3 farklı parametre ile üretilen ön malzemelerin mikroyapıları optik mikroskop, SEM ve EDS aracılığıyla incelenmiştir.

8.1.1. AA7050 Al alaşımının geleneksel döküm yoluyla üretilen mikroyapısı

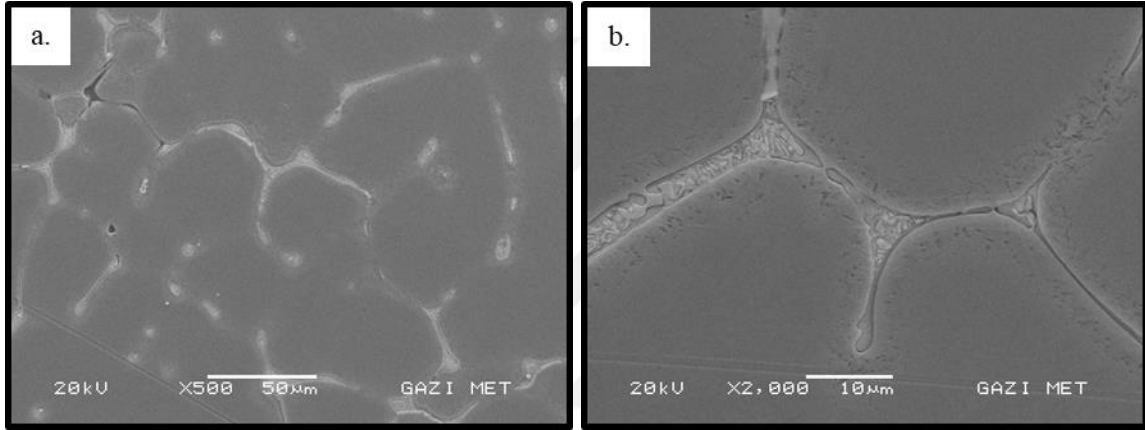
EMK ünitesi kullanılmaksızın geleneksel döküm şartlarında 670°C döküm sıcaklıklarından grafit kalıba yapılan döküm ingotların mikro yapısı dendritik yapıda bulunan birincil α -Al fazı/hücreleri ile ötektik yapıdan oluşmaktadır (Resim 8.1).



Resim 8.1. a. AA7050 Al alaşımı karıştırma işlemi yapılmadan üretilen numunenin 5. Bölgedeki mikroyapıları b. 50X, c. 200X

Metalografik incelemede, ingot mikroyapısının homojen olmadığı gözlemlenmiştir. Ötektik fazın birincil α -Al dendrit kollarının arasında hapsediği veya bozunmuş birincil α -Al hücrelerinin sınırlarında oluştuğu gözlenmiştir (Resim 8.1.c)

Yapıda bulunan birincil α -Al fazı/hücreleri çoğunlukla dendritik olarak katılaşmamıştır. Çünkü sıvı metal geleneksel döküm işleminden önce 700°C’de % 0,4 oranında DEGAFEX AE/200 ile gaz giderme işlemine tabi tutulmuştur. DEGAFEX AE/200 gaz giderici aynı zamanda tane inceltici içermektedir. Buda birincil α -Al hücrelerinin dendritik oluşmasını engellemektedir. Bu sonuç sem görüntülerinde de açıkça gözlenmiştir Resim 8.2.

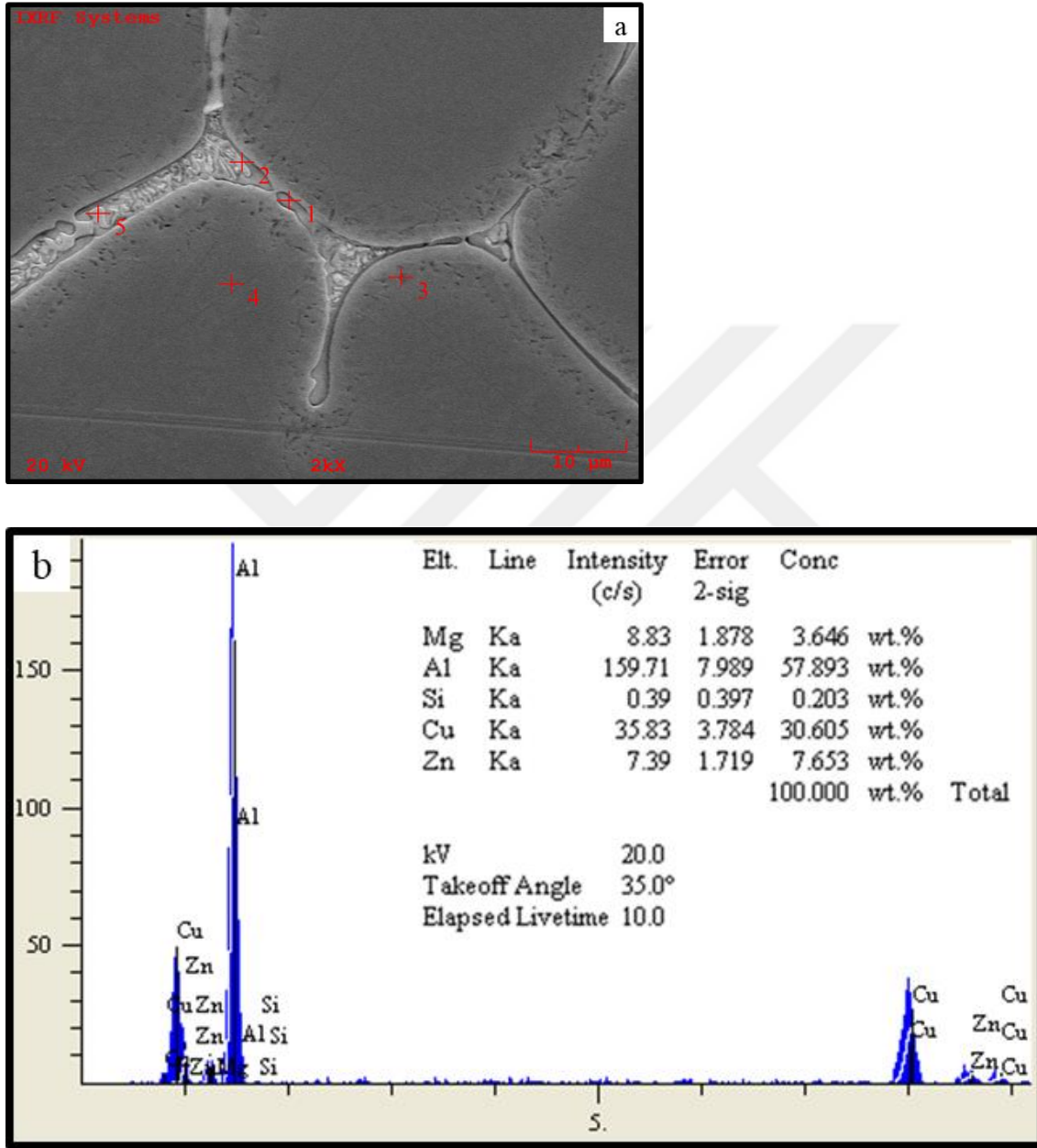


Resim 8.2. Geleneksel döküm ile üretilen AA7050 Al alaşımının SEM görüntüleri; a. 500X, b. 2000X

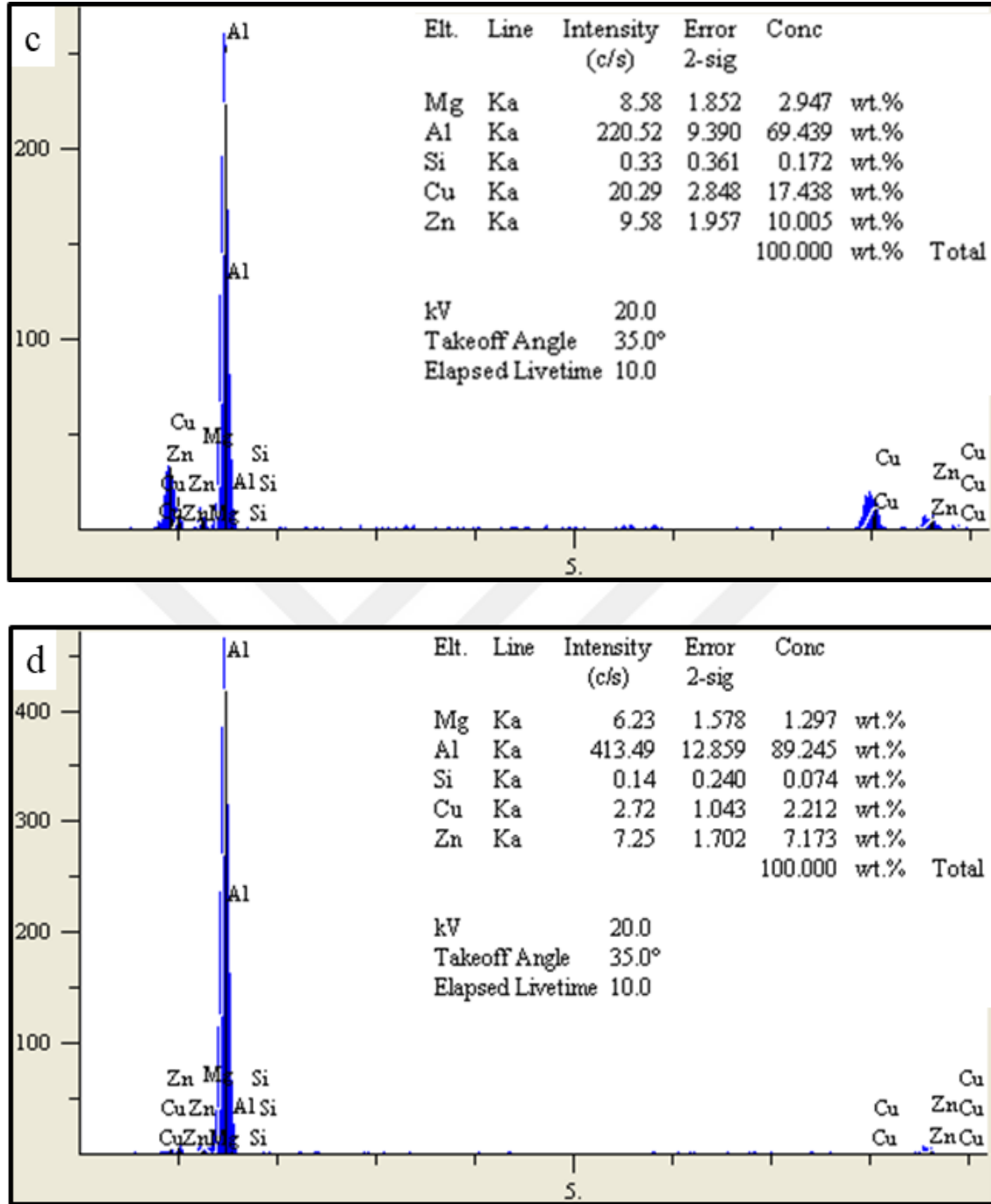
Resim 8.2’de verilen geleneksel döküm numunelerin SEM mikroyapı görüntülerinin incelemelerinin ardından ötektik yapının birincil α -Al dendritik kollarının arasında (Resim 8.2.a) ve/veya birincil α -Al hücre sınırlarında (Resim 8.2.b) sıkıştığı daha net bir şekilde ortaya konmuştur

Döküm AA7050 alaşım numunesinden alınan noktasal EDS analiz bölgeleri Resim 8.3.a’da verilmiştir. EDS noktaları dendritik kollara hapsedilmiş ötektik yapıdan ve α -Al dendritik hücrelerinden alınmıştır. Kollar arasındaki ötektik yapıda Al (% 69,43), Cu (% 17,43) ve Zn (% 7,65)’den oluşan intermetalik bileşik oluştuğunu 1. noktada analiz edilmiştir. (Resim 8.3.b). Farklı bir yapı özelliği gösteren 2. noktanın olduğu bölgede ise ağırlıkça oranları Al: % 57,89; Cu: % 30,60 ve Zn: % 10,00 olarak ağırlıkça oranları tespit edilmiştir (Resim 8.3.c). Benzer özelliklere sahip 5. nokta ise yakın değerlere sahip olduğu belirtilmektedir (Resim 8.3.f). Dendritik hücrelerin hücre sınırlarına yakın bölgeden alınan veriler ise Al ağırlıkça %

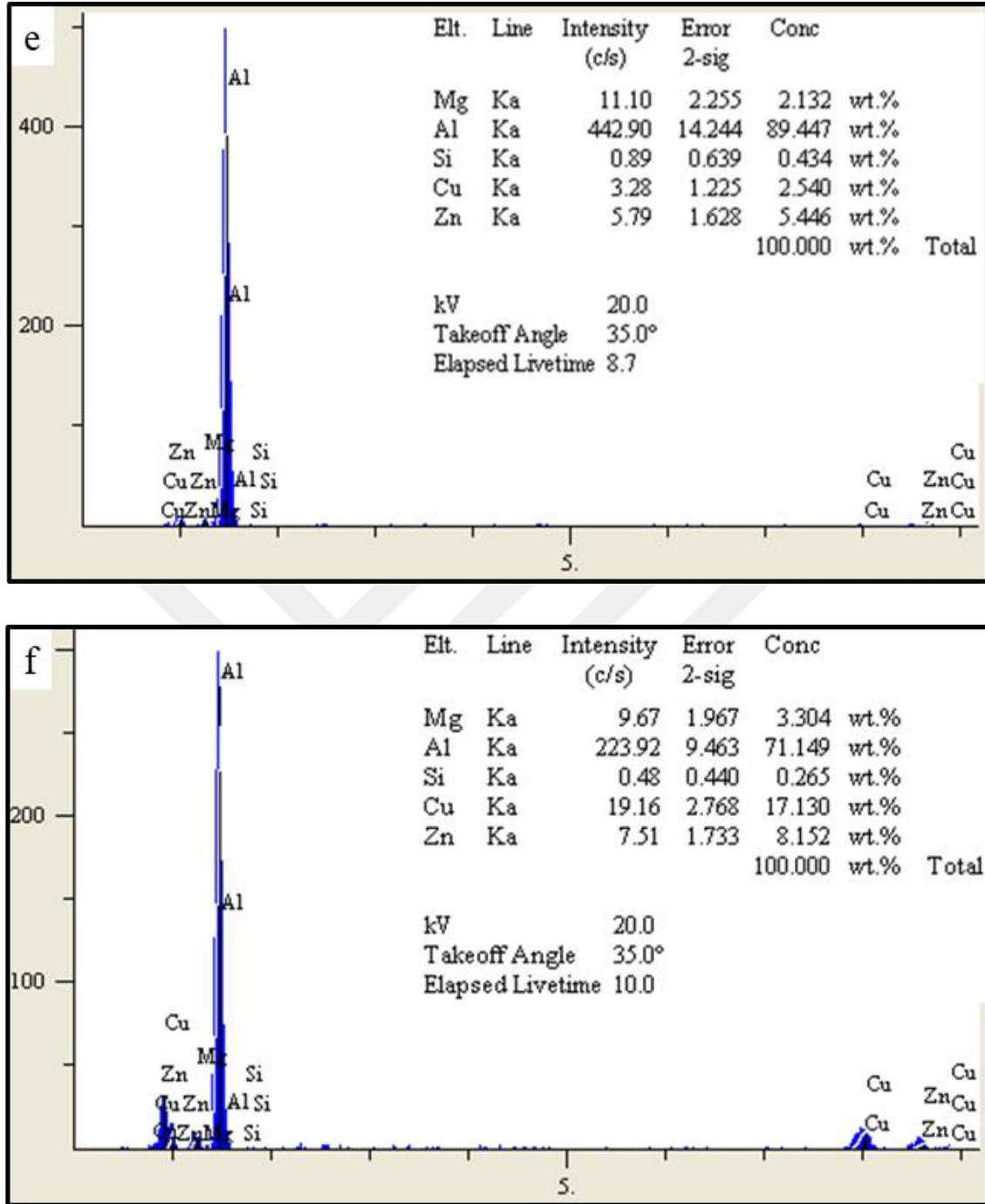
89.25'e kadar artığı göstermektedir. Ayrıca hücre sınırlarındaki Zn elementinin (% 7,17) kısmi olarak hücre içerisine difüzyonu söz konusudur (Resim 8.3.d). Hücre sınırlarından uzaklaştıkça Al % oranının arttığını ve birincil α -Al yapısı gözlenmektedir (Resim 8.3.e).



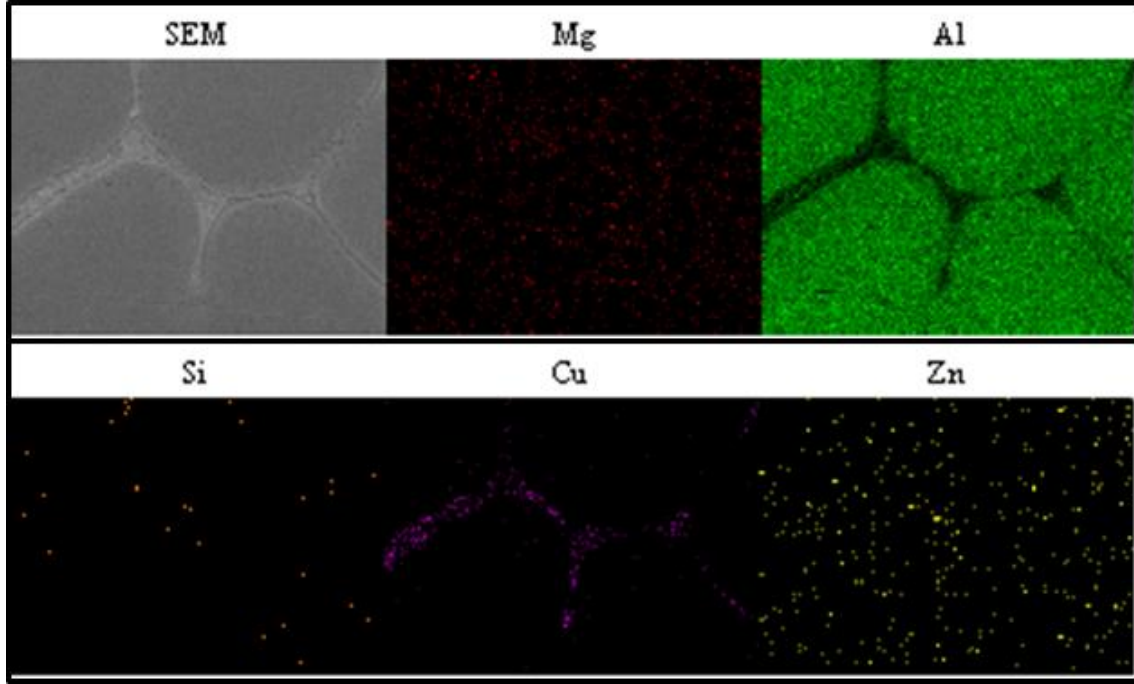
Resim 8.3. Döküm AA7050 numunesinden alınan noktasal EDS analiz bölgeleri, b. 1 numaralı, c. 2 numaralı, d. 3 numaralı, e. 4 numaralı, f. 5 numaralı bölgeden alınan EDS analiz sonucu



Resim 8.3. (devam) Döküm AA7050 numunesinden alınan noktasal EDS analiz bölgeleri, b. 1 numaralı, c. 2 numaralı, d. 3 numaralı, e. 4 numaralı, f. 5 numaralı bölgeden alınan EDS analiz sonucu



Resim 8.3. (devam) Döküm AA7050 numunesinden alınan noktasal EDS analiz bölgeleri, b. 1 numaralı, c. 2 numaralı, d. 3 numaralı, e. 4 numaralı, f. 5 numaralı bölgeden alınan EDS analiz sonucu

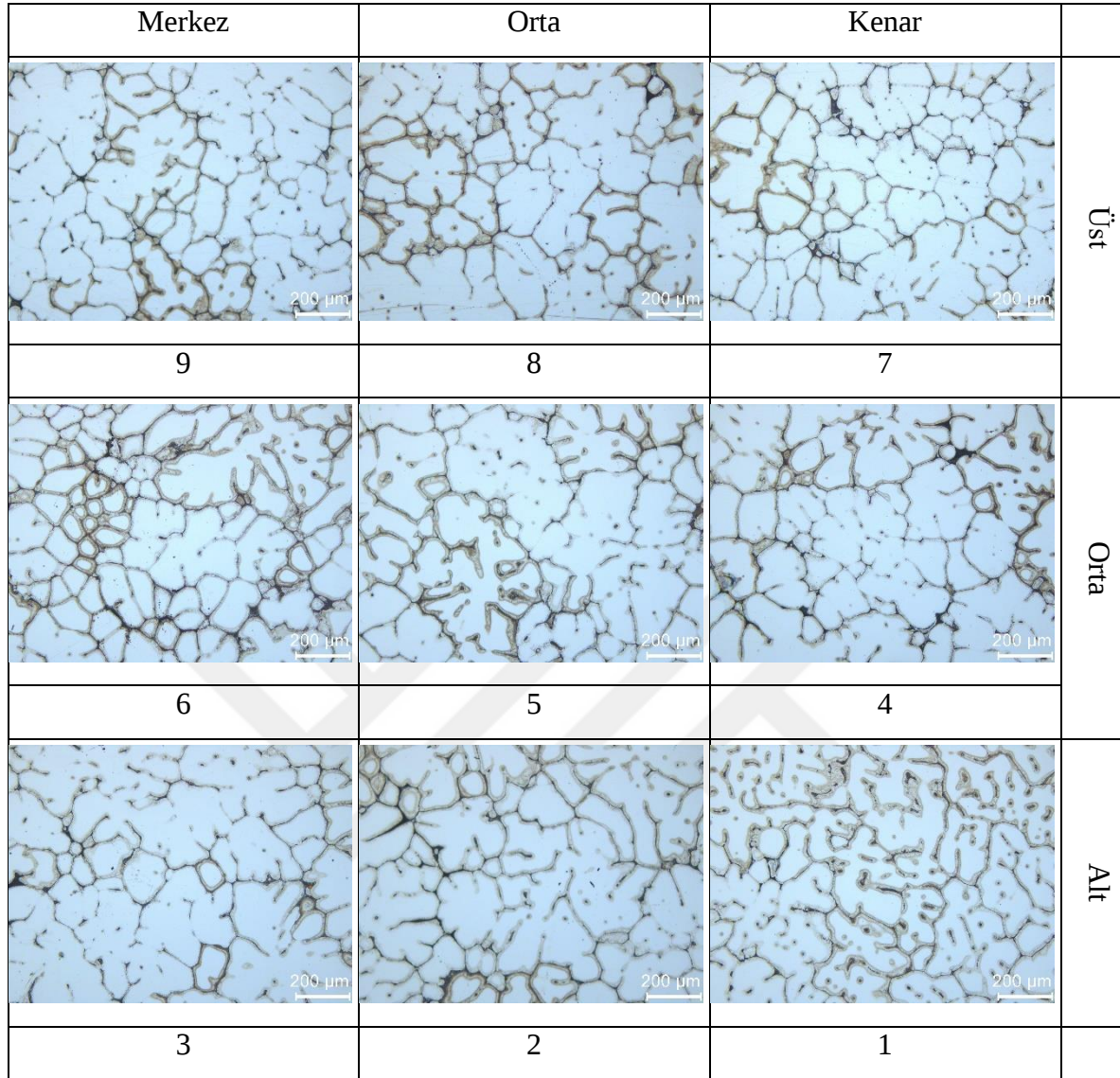


Resim 8.4. Döküm AA7050 alaşımlarının EDS element harita analizi

Döküm AA7050 alaşımlarının EDS element haritası Resim 8.4 'de verilmektedir. EDS element haritası ile AA7050 alaşımlarındaki Zn ve Mg elementlerinin yapı içerisinde homojen olarak dağıldığını ve Cu ve Si elementlerinin ise mikroyapı içinde sadece hücre sınırlarında yer aldığı analizi yapılmıştır.

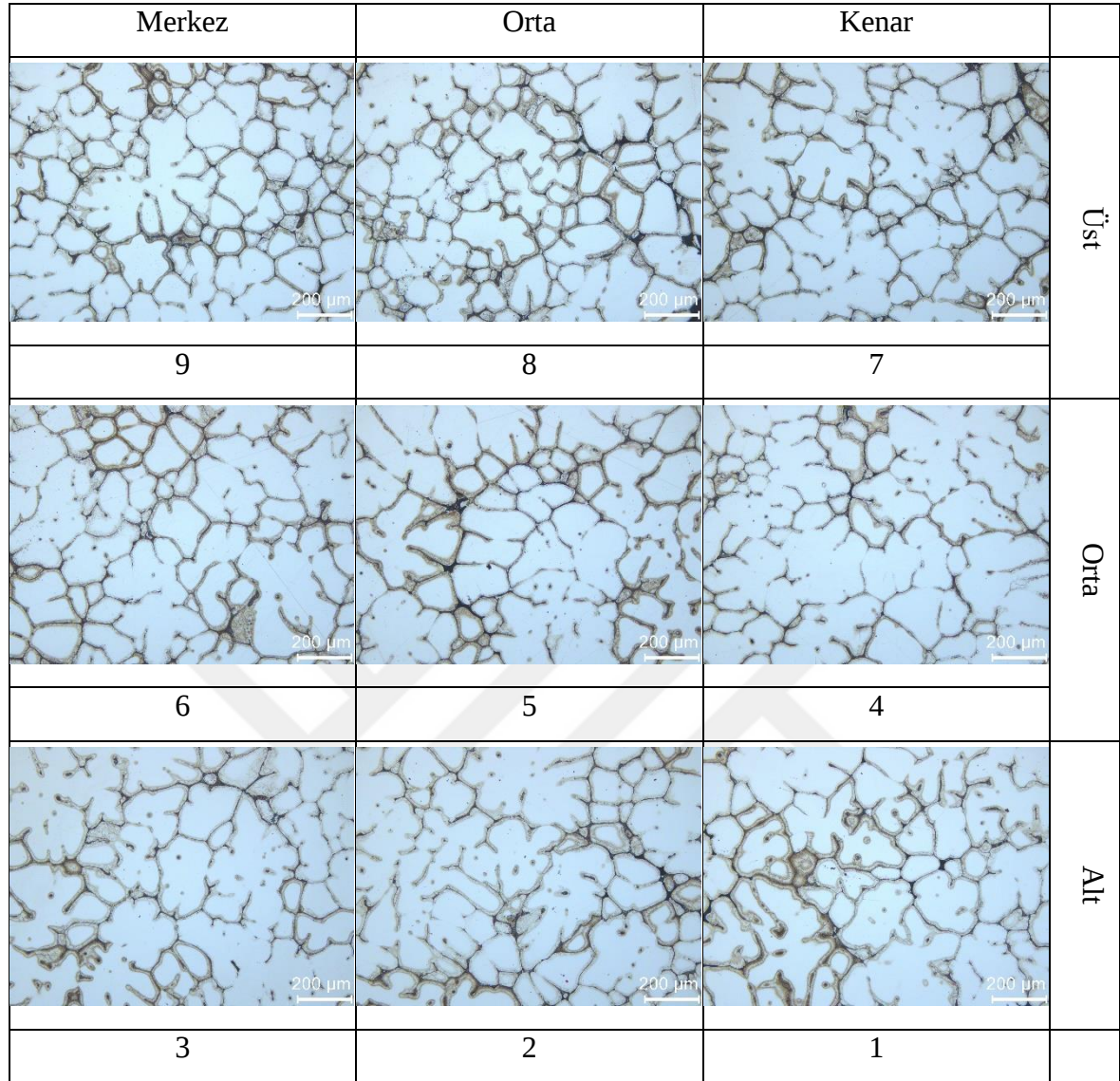
8.1.2. AA7050 Al alaşımlarından dendritik olmayan ön malzeme üretimi

Optimum küresel yapıya sahip AA7050 Al-Zn-Mg-Cu alaşımlarından dendritik olmayan ön malzemeyi üretmek için EMK ünitesi 579°C ile 630°C yarı-katı bölgesi boyunca elektromanyetik karıştırma yapılmıştır. Grafit potadaki ergiyiğin karıştırma parametreleri (Bkz. Çizelge 7.3) 15Hz, 30Hz ve 50Hz'dir. Farklı karıştırma parametreleri sonucu oluşan mikroyapılarda oluşan (Resim 8.5, Resim 8.6 ve Resim 8.7) birincil α -Al hücreleri dendritik morfolojiden daha ziyade küresel ve rozet şeklinde oluşmuştur.



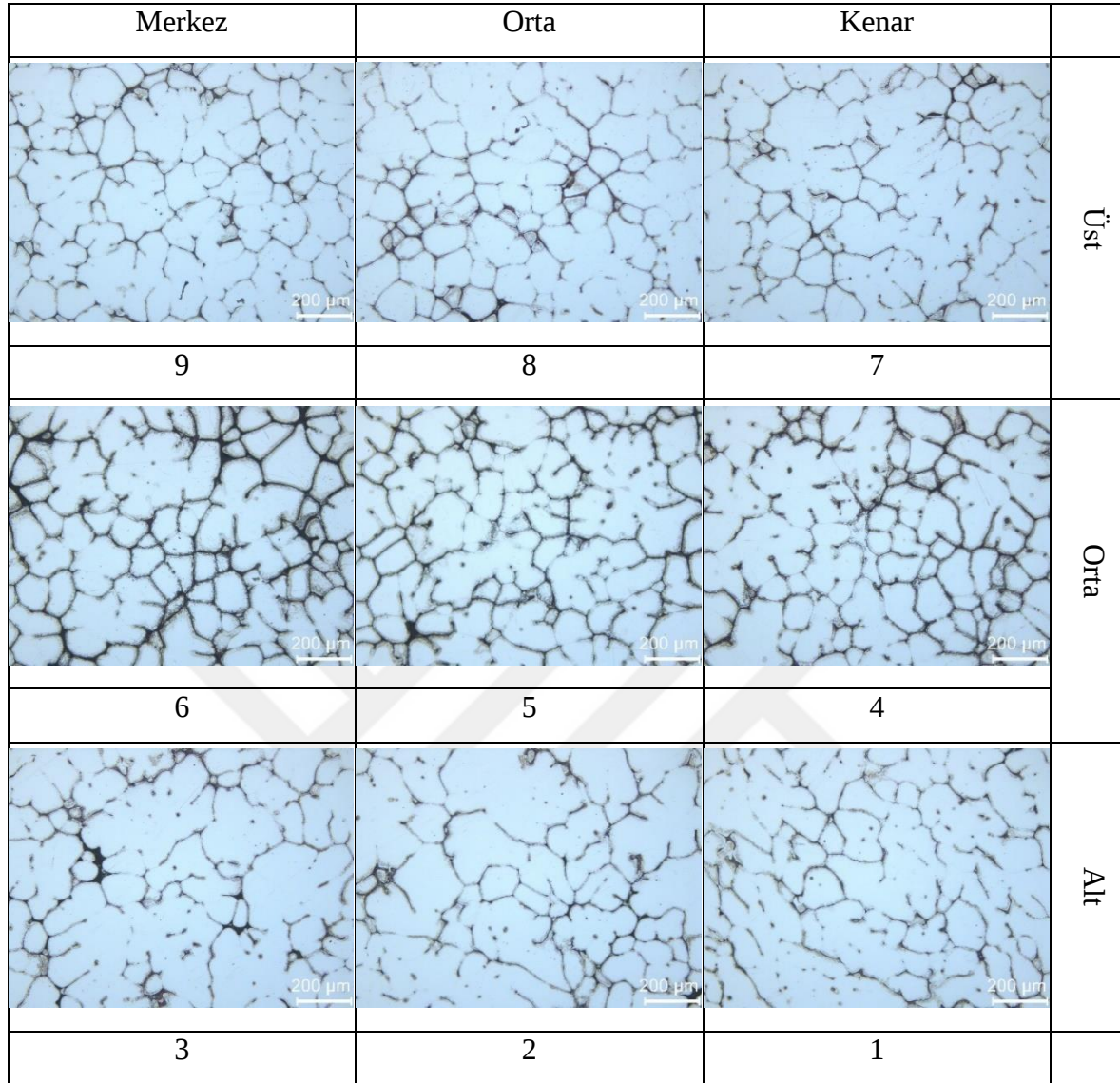
Resim 8.5. EMK yönteminde 15 hertz frekans ile elektro-manyetik karıştırma yapılan numunenin mikroyapıları

EMK ünitesi ile üretilen ön malzemenin mikro yapıları incelendiğinde 15 Hz'lik karıştırma parametresi ile 30Hz'lik karıştırma parametresi ile üretilen numunelerin mikroyapıları dendritik hücre yapısından rozetimsi ve/veya dendritik olmayan hücre yapısı meydana geldiği gözlemlenmiştir.

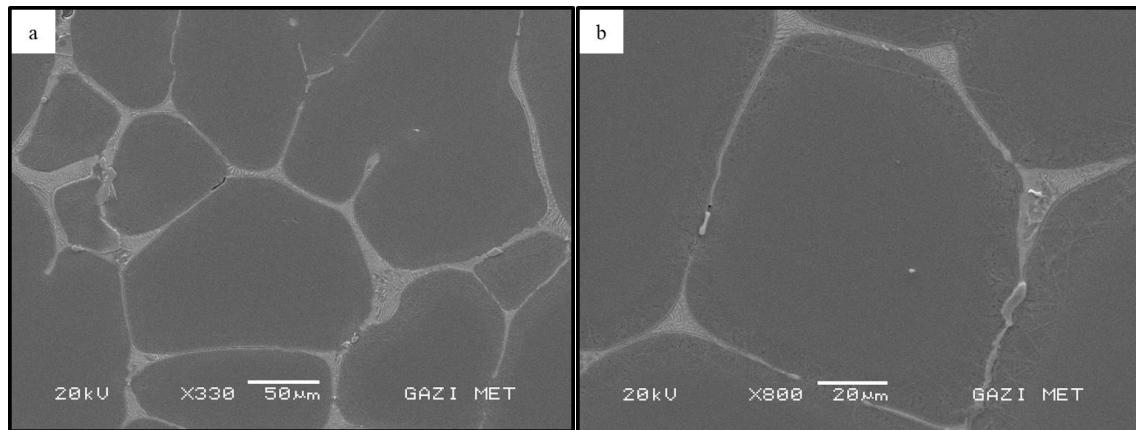


Resim 8.6. EMK yönteminde 30 hertz frekans ile elektro-manyetik karıştırma yapılan numunenin mikroyapıları

EMK ünitesi ile farklı karıştırma parametreleri kıyaslandığında hücrelerin küre şekline daha yakın ve daha homojen bir mikroyapıları 50Hz frekansı ile sağlandığı tespit edilmiştir. Parçanın kenar bölümlerinden merkeze doğru ilerledikçe hücre boyutlarının daha küçüldüğü ve hücrelerin kırılması ardından yeni hücrelerin oluşumları daha fazla olduğu incelenmiştir (Resim 8.6).

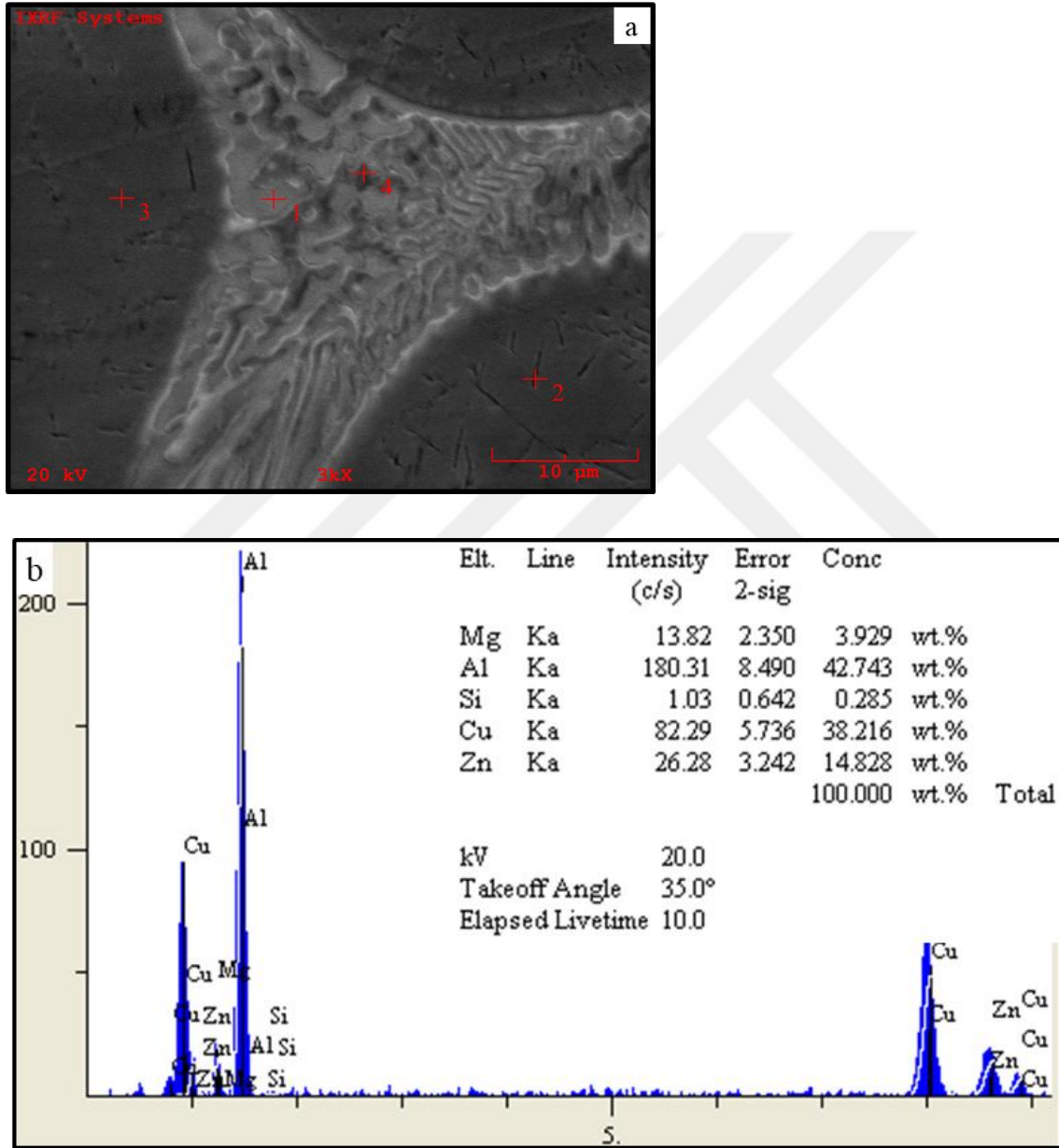


Resim 8.7. EMK yönteminde 50 hertz frekans ile elektro-manyetik karıştırma yapılan numunenin mikroyapıları

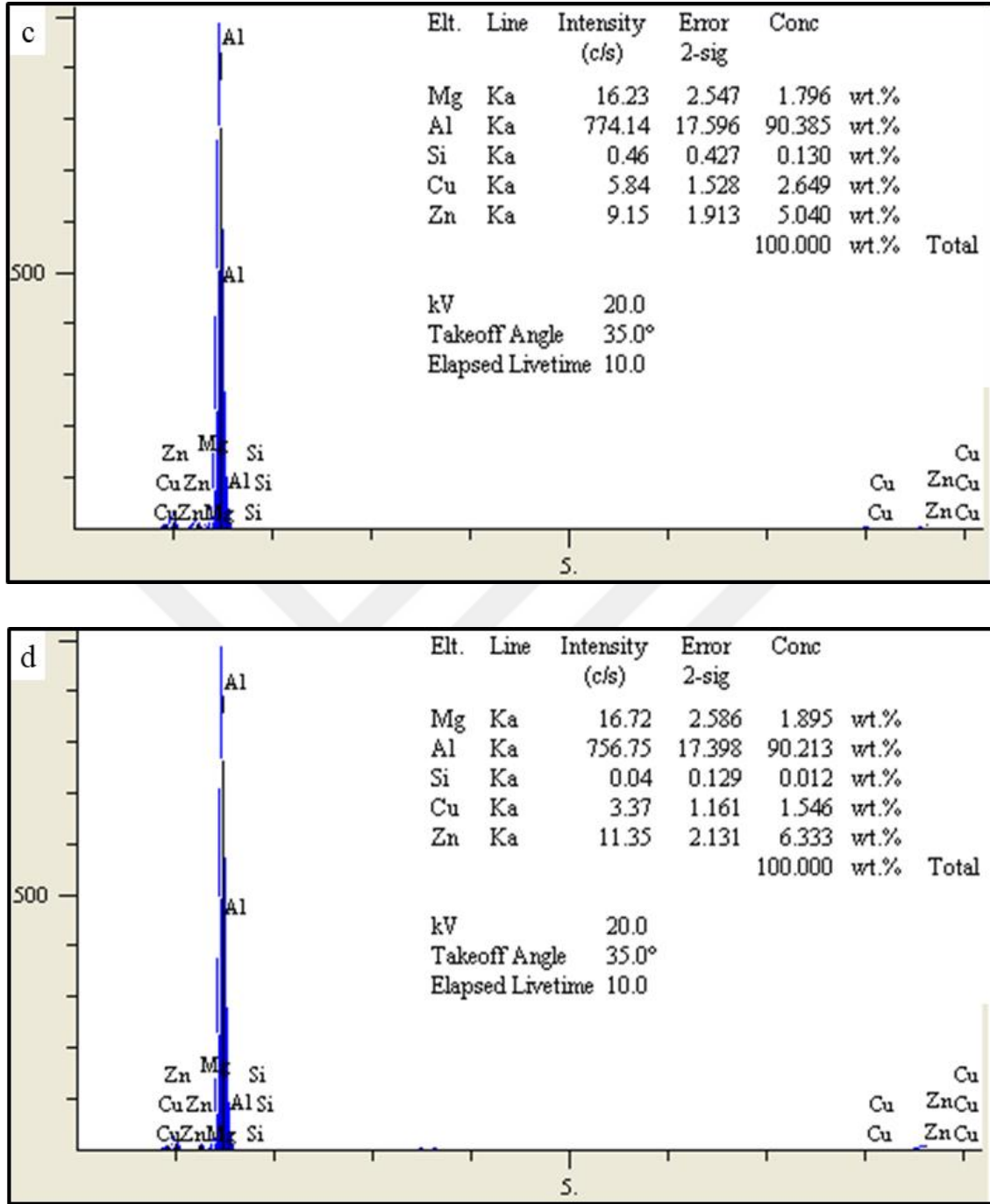


Resim 8.8. AA7050 Al alaşıminın 50Hz tiksotropik özellikteki numunenin SEM görüntüleri; a. 330X, b. 800X

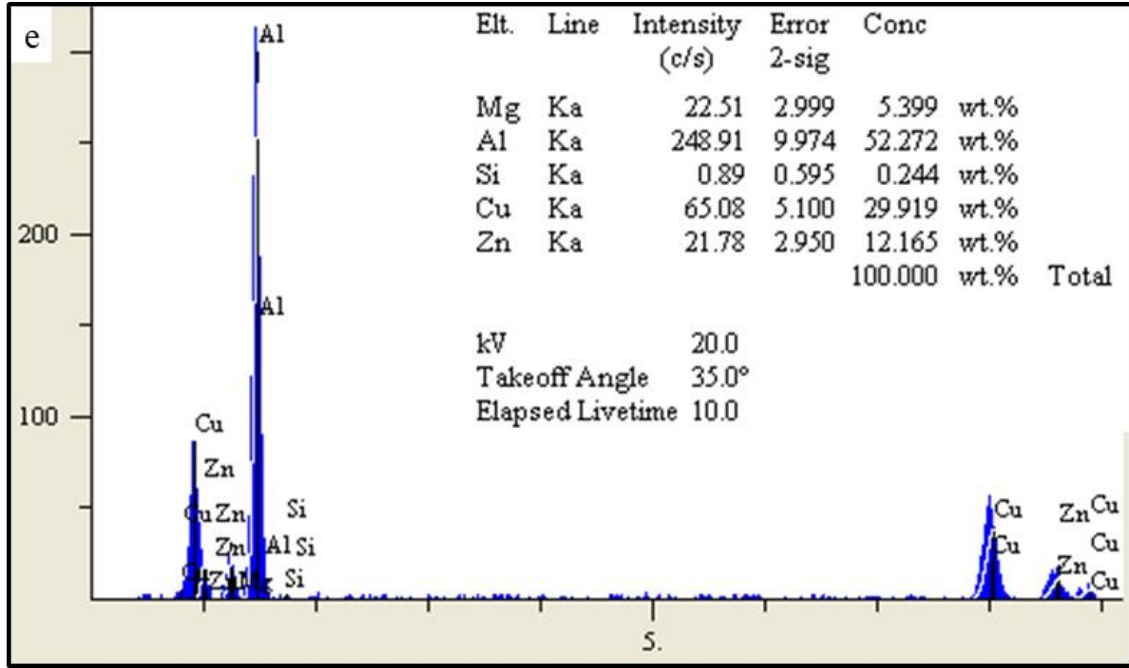
AA7050 EMK yöntemi ile üretilen ön malzeme numunelerinin mikroyapı incelemelerinin ardından 50Hz frekans değeri ile karıştırılan numunenin orta bölgesinden alınan SEM görüntüleri Resim 8.8'dedir. SEM görüntülerinde döküm numunesindeki dendritik kollarının parçalanarak dendritik olmayan ve/veya rozetimsi hücreler haline geldiği ve ötektik yapının hücreler arasında yer aldığı gözlenmektedir.



Resim 8.9. a. AA7050 Al alaşımasının 50Hz tiksotropik özellikteki numuneden alınan noktasal EDS analiz bölgeleri, b. 1 numaralı, c. 2 numaralı, d. 3 numaralı, e. 4 numaralı bölgeden alınan EDS analiz sonucu



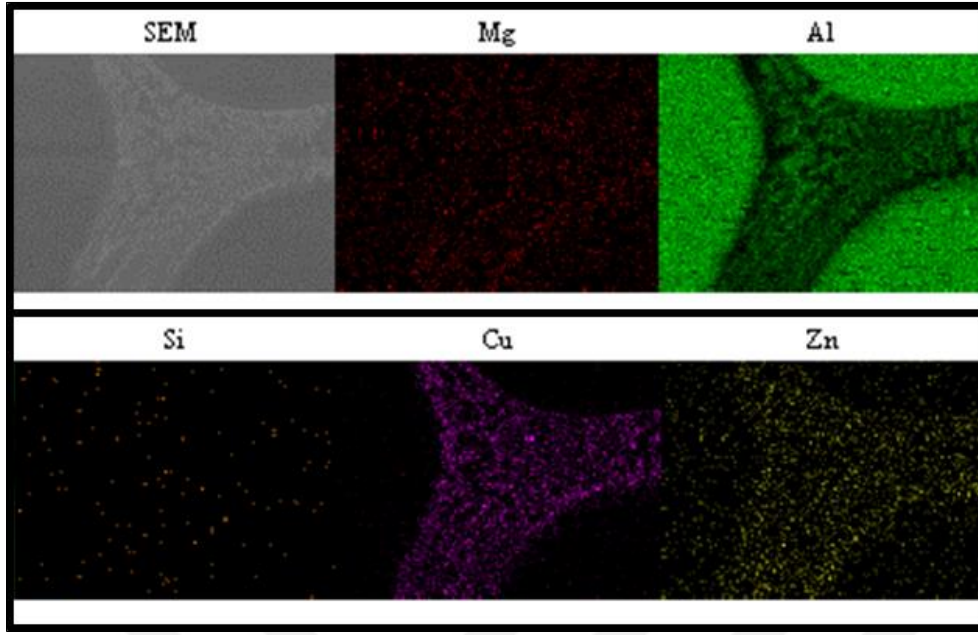
Resim 8.9. (devamı) a. AA7050 Al alaşımlarının 50Hz tiksotropik özellikteki numuneden alınan noktasal EDS analiz bölgeleri, b. 1 numaralı, c. 2 numaralı, d. 3 numaralı, e. 4 numaralı bölgeden alınan EDS analiz sonucu



Resim 8.9. (devamı) a. AA7050 Al alaşımasının 50Hz tiksotropik özellikteki numuneden alınan noktasal EDS analiz bölgeleri, b. 1 numaralı, c. 2 numaralı, d. 3 numaralı, e. 4 numaralı bölgeden alınan EDS analiz sonucu

SEM görüntülerinde karanlık alanlar α -alüminyum fazını ve parlak alanlar dört bileşikli sigma (σ) fazı (Al, Cu, Zn)₂Mg, üçlü S fazı (Al₂MgCu) ve/ve ikili θ fazı (Al₂Cu) olarak analiz edilmektedir.

Tiksotropik özelliğe sahip AA7050 alaşım numunesinden alınan noktasal EDS analiz bölgeleri Resim 8.9.a'da verilmiştir. EDS noktaları hücre sınırlarındaki ötektik yapıdan ve birincil α -Al hücrelerinden alınmıştır. Hücreler arasındaki ötektik yapıda Al 1.noktada % 43,74 ve 4. noktada % 52,27; Cu 1.noktada % 38,22 ve 4. noktada % 29,92; ve Zn 1.noktada % 14,83 ve 4. noktada % 12,17 'den oluşan intermetalik bileşik olduğu tespit edilmiştir (Resim 8.9.b ve Resim 8.9.e). Dendritik olamayan hücrelerden alınan veriler ise Al ağırlıkça % 90,39'e kadar artışı göstermektedir. Hücre sınırlarından uzaklaştıkça Al % oranının artığını ve birincil α -Al hücre yapısı gözlenmektedir (Resim 8.9.c ve Resim 8.9.d).



Resim 8.10. AA7050 Al alaşımının 50 Hz tiksotropik özellikteki numunenin EDS element harita analizi

AA7050 Al alaşımının 50 Hz tiksotropik özellikteki numunenin EDS element haritası Resim 8.10 ‘dadır. EDS element haritası ile AA7050 alaşımındaki Mg ve Si elementinin yapı içerisinde homojen olarak dağıldığını ancak döküm numuneye göre Zn elementinin hücreler arasında daha fazla bulunduğunu; Cu elementinin ise mikroyapı içinde sadece hücre sınırlarında yer aldığı gözlemlenmiştir.

8.2. Mikro Sertlik İncelemeleri

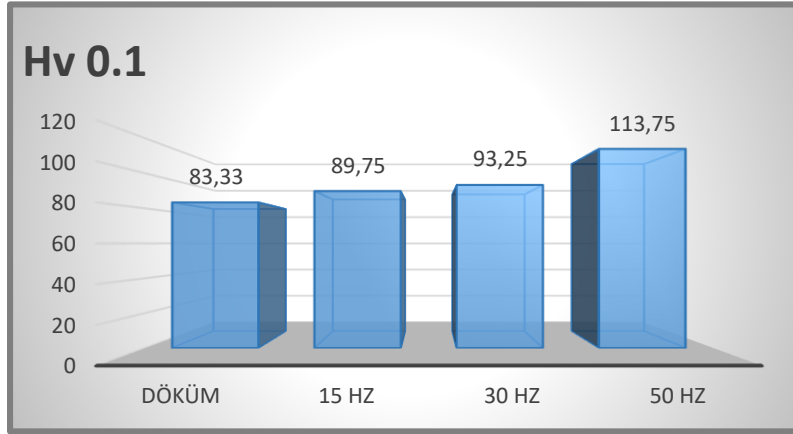
AA7050 Al alaşımının döküm parçasının ve farklı parametreler ile EMK nitesinde üretilen n malzemelerin 4 farklı bölgeden alınan Hv0,1 mikro sertlik ölçümleri yapılmıştır. Alınan ölçümlerin aritmetik ortalaması hesaplanmıştır. Mikro sertlik değerleri izelge 8.1 ‘de yer verilmiştir.

Çizelge 8.1. Numunelerin α -Al fazından alınan mikrosertlik (Hv0,1) değerleri

Numune	Döküm	15 Hz	30 Hz	50 Hz
Hv 0.1	83,33	89,75	93,25	113,75

α -Al fazından alınan mikro sertlik değerleri geleneksel döküm yöntemi ile üretilen

numunenin sertlik değeri en düşüktür. Yarı-katı halde karıştırılan numunelerin karıştırma frekans parametreleri artııkça oluşan hücre yapılarının küremsi hale gelmesi ve daha küçük boyuta sahip hücrelerin oluşması meknik özellikleri artırmıştır (Şekil 8.1).



Şekil 8.1. AA7050 numunelerinin birincil α -Al hücrelerinden alınan mikro sertlik grafiğı

9. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

9.1. Sonuçlar

Bu çalışmada AA7050 Al alaşımının yarı-katı şekillendirme için elektro-manyetik karıştırma yöntemi kullanılmıştır. Elektro-manyetik karıştırma farklı karıştırma parametrelerinde (15-30-50Hz) ön malzeme üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu doğrultuda numunelerin mikroyapıları incelenmiş ve aşağıdaki sonuçlar özetlenmiştir.

1. AA7050 Al alaşımından yarı-katı şekillendirme için gerekli olan dendritik olmayan ön malzeme üretimi EMK yöntemi ile sağlanabilmektedir.
2. AA7050 Al alaşımı karıştırma işlemi yapılmadan grafit kalıba döküldüğünde mikroyapısı dendritik α -Al hücreleri ve ötektik fazdan oluşmaktadır.
3. AA7050 Al alaşımının EMK yöntemi ile üretilen ön malzeme mikroyapı incelemelerinde biyetin kenardan merkeze doğru, dendritik fazın kırıldığı ve rozetimsi/küremsi şekilde oluştuğu sonucuna varılmıştır.
4. EMK karıştırma parametrelerinden 15Hz frekansa olan numunenin (1-3, 4-6, 7-9) kenar bölgesinden merkez bölgesi kıyaslandığında dendritik kollarının parçalanması kenar bölgede henüz yeni başlamasına karşın merkez bölgesinde kırılmanın ilerlediği ve yeni hücrelerin oluştuğu gözlemlenmiştir.
5. EMK karıştırma parametrelerinden 15Hz, 30Hz, 50Hz karşılaştırılması yapıldığında 15Hz'lik frekans parametrelerinde dendritik fazın kırılması ve yeni hücrelerin oluşum süreci devam ettiği ve rozetimsi/küremsi yapının yeterli oranda oluşmadığı sonucuna varılmıştır.
6. EMK karıştırma parametrelerinden 15Hz, 30Hz, 50Hz karşılaştırılması yapıldığında 30Hz'lik frekans parametrelerinde dendritik fazın kırılması ve yeni hücrelerin oluşum sürecinden hücrelerin rozetimsi ve küremsi yapının oluşmaya başladığı fakat yeterli olmadığı sonucuna varılmıştır.
7. EMK karıştırma parametrelerinden 15Hz, 30Hz, 50Hz karşılaştırılması yapıldığında 50Hz'lik frekans parametrelerinde; dendritik fazın kırılması ve yeni hücrelerin oluşum sürecinin bittiği ve rozetimsi/küremsi yapının oluştuğu sonucuna varılmıştır.

9.2. Öneriler

1. Bu çalışma sonrasında üretilen biletler kullanılarak yarı-katı şekillendirme ile parça üretimi mümkündür.
2. Bu çalışmanın devamında yarı-katı şekillendirme ile üretilen parçalara yaşlandırma ısıtma işlemi yapılarak mekanik özellikleri artacağı düşünülmektedir.
3. EMK ünitesi daha fazla geliştirilerek atmosfer kontrollü karıştırma işlemi gerçekleştirilebilir.



KAYNAKLAR

- Alan S. (2008). Alüminyum raporu. *Orta Anadolu İhracatçı Birlikleri Genel Sekreterliği*, Ankara, 4-12
- Altınel, S.A. (2003). *Semi Solid Forming of Al-5083 and A357 Aluminum Alloys*. Bogazici Univesity Institute Of Science And Technology, İstanbul.
- Altenpohl D. (1982). *Aluminum viewed from within: An introduction into the metallurgy of aluminum fabrication*. Germany: Aluminium-Verlag, 310-311.
- ASM International (1991). *ASM Handbook Vol. 4: Heat Treating*. USA: ASM International, 1861-1960.
- ASM International (2004). *ASM Handbook Vol. 9: Metallography and Microstructures*. USA: ASM International, 1688-1787.
- Atkinson, H.V., Kapranos, P., Chayong, P.S., Liu, D., Kirkwood, D. And Camacho, A. M. (2002a). Alloy Development for Thixoforming. *Epsrc Project- Gr/M89096, Sheffield*, 1-7.
- Atkinson, H.V., Kapranos, P., Liu, D., Chayong, S.A., Kirkwood, D. (2002b). Thixoforming of normally wrought aluminium alloys. *Materrials Science Forum*, 131-136.
- Atkinson, H.V. (2005). Modelling the semisolid processing of metallic alloys. *Progress in Materials Science*, 50(3), 341–412.
- Atkinson, H.V., Burke K. and Vaneetveld G. (2008). Recrystallization in the semi-solid state in 7075 aluminium alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 490(1-2), 266-276.
- Avner, S.H. (1974). *Introduction to phsical metallurgy: nonferrous metals and alloys* (Second edition). New York: Mc Graw Hill, 493.
- Basner, T. (2000). *Rheocast of semi-solid A357 aluminum*. SAE 2000 World Congress, Michigan, 6-9.
- Basner, T.G. (2001). *The effect of processing on the mechanical and fatigue properties of semi solid formed A357 Aluminium*. Ph.D. Thesis, The University of Michigan, USA, 1-6.
- Başer, T. A. (2012). Alüminyum Alaşımları ve Otomotiv Endüstrisinde Kullanımı. *Mühendis ve Makina*, 53(635), 51-58.
- Birol, Y., Çakır, O. ve Alageyik, F. (2006a). *Elektromanyetik karıştırma ile tiksotropik alüminyum biyet üretimi*. 13. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi Bildiriler Kitabı, İstanbul, Türkiye, 1704-1712.
- Birol, Y. (2006b). Production of AA 6082 feedstock for forming in the semi solid state. *Materials Science Forum*, 519, 1919-1924.

- Birol, Y. (2006c). A357 thixoforming feedstock produced by cooling slope casting. *Journal of Materials Processing Technology*, 186, 94–101.
- Birol, Y. (2007a). Thermomechanical processing of AA6061 billets for semi-solid forming. *International Journal of Materials Research*, 98 (1), 53-59.
- Birol, Y. (2008). Comparison of thixoformability of AA6082 reheated from the as-cast and extruded states. *Journal of Alloys and Compounds*, 461(1-2), 132-138.
- Bolouria, A., Shahmirib, M., Kang, C.G. (2011). Study on the effects of the compression ratio and mushy zone heating on the thixotropic microstructure of AA 7075 aluminum alloy via SIMA process. *Journal of Alloys and Compounds*, 509, 402–408.
- Bozkurt, U. (2005). *Mechanical properties and microstructure evolution of thixoformed Aluminum Alloys*. M.Sc. Thesis, Bogaziçi Univeristy Graduate Program in Mechanical Engineering, İstanbul, 1-50.
- Chayong, S., Atkinson, H.V., Kapranos P. (2005). Thixoforming 7075 aluminium alloys. *Materials Science and Engineering: A* 390, 3–12.
- Cho, W.G. and Kang, C.G. (2000). Mechanical properties and their microstructure evaluation in the thixoforming process of semi-solid aluminum alloys. *Journal of Materials Processing Technology*, 269-277.
- Choi C., Park H. J. (1998). Microstructural characteristics of aluminum 2024 by cold working in the sima process. *Journal of Materials Processing Technology*, 82(1-3), 107-116.
- Czerwinski F. (2007). *Semisolid Processing Origin of Magnesium Molding, Magnesium Injection Molding*. USA: Springer US, 81-145.
- Dündar, M. ve Güngör, G. (2002). *Otomotiv Sektöründe Alüminyum Uygulamaları ve Sürekli Döküm Tekniği ile Üretilmiş Alüminyum Levha Alaşımları*.- Url: <http://www.assan.com.tr/DC/Image/P3.pdf>, Son Erişim Tarihi: 05 Temmuz 2021.
- Eisen P. and Young K. (2000). *Diecasting system for semi-liquid and semisolid metal casting applications*. Proceedings of alloys Sixth International Conference on Semisolid Processing of Alloys and Composites, Turin, 41-46.
- Fan, Z., Ji, S., and Bevis, M.J. (2001). Semi-solid processing of engineering alloys by a twin-screw rheomoulding process. *Materials Science and Engineering: A*, 299 (1- 2), 210-217.
- Fan, Z. (2002). Semisolid Metal Processing. *International Materials Reviews*, 47(2), 49-85.
- Fan, Z. (2005). Development of the rheo-diecasting process for magnesium alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 413, 72-78.
- Fan, Z., Fang X. and Ji S. (2005). Microstructure and mechanical properties of rheodiecast (RDC) aluminium alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 412, 2898-306.

- Figueredo, A. (2001). *Science and technology of semi-solid metal processing*. USA: North America Die Casting Association, 1-17.
- Flemings, M., Riek, R., Young K. (1976). Rheocasting. *Materials Science and Engineering*, 25, 103-117.
- Flemings, M. (1991). Behavior of Metal Alloys in the semi solid state. *Metallurgical Transactions: A*, 22, 957-981.
- Flemings, M.C. and Martinez R.A. (2006). Principles of microstructural formation in semisolid metal processing. *Solid State Phenomena*, 116-117, 1-8.
- Goodwin, F. Guruswamy, S., Kainer K.U., Kammer C., Knabl W., Koethe A., Leichtfried, G., Schlamp G. Stickler R. and Warlimont H. (2005). *Metals* (Third edition). Berlin: Springer Handbook of Condensed Matter and Materials Data, 183-184.
- Güner, A. (2013). *Yarı-Katı Halde Şekil Verilmiş Alüminyum Alaşımlarının Mekanik Özelliklerine Su Verme Sıcaklığının Etkisi*. Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli, 71-72.
- Haga, T., Suzuki, S. (2001). Casting of aluminium alloy ingots for thixoforming using a cooling slope. *Journal of Materials Processing Technology*, 118 (1-3), 169-172.
- Handbook ASM (1988). *Casting Aluminum and Aluminum Alloys*. USA: Aluminum Company of America, 749-753.
- Hirsch, J. (1999). Light Metal World. *Light Metal Age*, 124.
- Hirt, G., Cremer, R., Winkelmann, A., Witulski, T. and Zillgen M. (1994). Semi solid forming of aluminium alloys by direct forging and lateral extrusion. *Journal of Materials Processing Technology*, 45, 359-364.
- Hirt, G., and Kopp, R., (2009). *Semi-solid Metal Processing*. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co., 120.
- Jiang J., Du Z., Wang Y., and Luo S. (2015). Microstructural evolution of 7050 aluminum alloy semisolid billets fabricated by RAP process. *Solid State Phenomena*, 217-218, 29-36.
- Jung, H. K., and Kang, C. G. (2002). Induction Heating Process of an Al-Si Aluminium Alloy for Semi Solid Die Casting and Its Resulting Microstructure. *Journal of Materials Processing Technology*, 120, 355-364.
- Kapranos P., Ward P. J., Atkinson H. V., Kirkwood D. H. (2000). Near net shaping by semi-solid metal processing. *Materials and Design*, 21, 387-394.
- Kapusuz, Ö.K. (2001). *Semi solid casting of aluminium silicon alloys*. M. Sc. Thesis, Metallurgical and Materials Engineering, ODTÜ, Ankara, 1-7.
- Kaufman, J.G. (2000). *Introduction to aluminum alloys and tempers*. USA: ASM International, 102.

- Kenney, M. P., Courtois, J. A., Evans, R. D., Farrior, G. M., Kyonka, C. P., and Koch, A. A., Young, K. P. (1998). *Semisolid metal casting and forging* (Ninth edition). USA: ASM International, 327-338.
- Kılıçlı, V. (2010). *Yarı-katı döküm tekniği ile üretilen Al-Zn alaşımlarında yapı-özellik ilişkisinin incelenmesi*. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 30.
- Kim, S.K., Yoon, Y.Y. and Jo, H.H. (2007). Novel thixoextrusion process for Al wrought alloys. *Journal of Materials Processing Technology*, 187-188, 354-357.
- Kirkwood D. H. (1994). Semisolid metal processing. *International Materials Reviews*, 39, 173- 189.
- Kocatepe, K. (1999). Metalik Sodyum ile Modife edilmiş Al-%7Si-%0.65Mg Alaşımında Silisyumun Isıl İşlem ile küreselleştirilmesi, *Politeknik Dergisi*, 2(2), 17-25.
- Kopp, R., Winning G. and Möller T. (1999). *Thixoforging of aluminium alloys*. METEC, Düsseldorf.
- Lashkari, O. (2006). *Le Comportement Rheologique De l'alliage A356 semi-solide*. Ph. D. Thesis, University of Quebec, Natural Sciences and Engineering, Canada, 10-20, 49.
- Lavernia, E.J. and Grant, N.J. (1988). Spray Deposition of Metals. *Materials Science and Engineering*, 98, 381-394.
- Legoretta, C.E., Atkinson, H.V., Jones, H. (2008a). Cooling slope casting to obtain thixotropic feedstock I: observations with a transparent analogue. *Journal of Mater Science*, 43,5448-5455.
- Legoretta, C.E. Atkinson, H.V., Jones, H. (2008b). Cooling slope casting to obtain thixotropic feedstock II: observations with A356 alloy. *Journal of Mater Science*, 43, 5456-5469.
- Liu, D., Atkinson, H.V., Kapranos, P., Jirattiticharoean W. and Jones, H. (2003). Microstructural evolution and tensile mechanical properties of thixoformed high performance aluminium alloys. *Materials Science and Engineering A*, 361 (1-2), 213-224.
- Liu, S., Zhong, Q., Zhang, Y., Liu, W., Zhang, X. and Deng, Y. (2010). Investigation of quench sensitivity of high strength Al-Zn-Mg-Cu alloys by time-temperature-properties diagrams. *Materials & Design*, 31 (6), 3116-3120.
- Martin, C.L. Kumar, P., Brown, S. (1994). Constitutive modeling and characterization of the flow behavior of semi-solid metal alloy slurries, *Acta Metallurgica et Materialia*, 42(11), 3603-3614.
- Martinez, R.A. and Flemings, M.C. (2005). Evolution of particle morphology in the semisolid processing. *Metallurgical and Materials Transactions: A*, 36(8), 2205-2210.

- Mondolfo, L.F. (1979). *Aluminum alloys structure and properties*. London: Butterworths, 399-406, 842-864.
- Nafisi, S., Emadi D., Shehata M., Ghomashchi R., and Charette A. (2004). *Semi-Solid Processing of Al-Si Alloys: Effect of Stirring on Iron-Based Intermetallics*. 8th International Conference on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, Limassol, Cyprus.
- Nafisi, S. and Ghomashchi, R. (2005). Semi-solid metal processing routes: an overview. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 44 (3), 289-304.
- Önsel, M. (2005). *The influence of heating conditions on semi-solid forming of aluminum alloys*. M.Sc. Thesis, Bogazici Univeristy Graduate Program in Mechanical Engineering, İstanbul, 1-50.
- Önsel, M., Birol Y., Bozkurt U., Kubilay C., ve Altıntaş S. (2005). *Alüminyum alaşımlarında SIMA prosesiyle tiktotropik yapı elde edilmesi*. 12. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi, İstanbul, Türkiye, 991-998.
- Özer, M. (2010). *Yarı-Katı Döküm Tekniği İle Üretilen Al-Si Alaşımlarında Yapı-Özellik İlişkisinin İncelenmesi*. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Özer, M., Kocatepe, K. ve Erdoğan, M. (2011). *Yarı-Katı Sıcaklıkta Bekletme Süresinin A357 Alaşımının Tiktotropik Mikroyapısı Üzerine Etkileri*. 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11), 442-446.
- Özer M., Kocatepe K., Erdoğan M. (2014). Effects of Pouring Distance and Holding Time on the Thixotropic Microstructure of A357 Alloy. *Materials Testing*, 56(2), 111-117.
- Özer M., Akar N., Kocatepe K., Erdoğan M. (2015). Effects of the thixocasting injection velocity on tensile properties of an A357 Al Alloy. *Materials Testing*, 57(9), 790-794.
- Reichelt, W. and Voss-Spilker, P. (1986). A New and Original Shaping Process for the Metallurgical Industry. *Metallurgia*, 53 (9), 410-413.
- Rovira M. M., Lancini B. C., Robert M. H. (1999). Thixoforming of Al-Cu alloy. *Journal of Materials Processing Technology*, 92, 42-49.
- Saklakoğlu, N., Saklakoğlu, E., Tanoğlu, M., Oztaş, O., Çubukçuoğlu, O. (2004). Mechanical properties and microstructural evaluation of AA5013 aluminum alloy treated in the semi-solid state by SIMA process. *Journal of Materials Processing Technology*, 148(1), 103-107.
- Saklakoğlu N., Çolakoğlu H., Gençalp S. (2009). SIMA Prosesi İle Üretilmiş Al-4Zn-3Mg Alaşımında Mikroyapı Gelişimi. *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 6 (3), 89-100.
- Salamcı, E., (2004). Spray döküm. *G.Ü. Fen Bilimleri Dergisi*, 17(2), 155-173.

- Seo, P.K., Kim, D.U., Kang, C.G., (2005). The characteristics of grain size controlled microstructure and mechanical properties of Al-Si alloy by thixocasting and rheocasting process. *Journal of processing Technology*, 162-163, 570-578.
- Singh, S.K., Chattopadhyay, K. and Dutta, P., (2015). High-Temperature Workability of Thixocast A356 Aluminum Alloy. *Metall Mater Trans: A*, 46, 3248–3259.
- Spencer D. P, Mehriban R. and Flemings M. C. (1972). Rheological Behaviour of Sn-15%Pb in the crystallisation range. *Metallurgical and Materials Transactions: B*, 3, 749-753.
- Taghavi, F., Ghassemi, A. (2009). 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.
- Tan, E. (2011). *Alüminyum alaşımlarında blister oluşumu*. Doktora Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Denizli, 23.
- Tan, E., Tarakçılar, A. R. and Dışpınar, D. (2011a). *Effect of melt quality and quenching temperature on the mechanical properties of SIMA 2024 and 7075*. 14th International Conference On Advances In Materials & Processing Technologies, İstanbul.
- Tan, E., Tarakçılar, A. R. and Dışpınar, D. (2011b). *Blistering problems of strain induced melt activated aluminium alloys*, 6th International Advanced Technologies Symposium, Elazığ.
- Tanner R. I., Walters K. (1998). *Rheology series an historical perspective*. London: Elsevier 187-204.
- Türkeli, A. (1991). *Yarı katı halde döküm ve şekil verme*. 4. Denizli Malzeme Sempozyumu, Denizli, 1-10.
- Türkeli, A. (1995). Yarı-katı durumda döküm şekil verme ve rafinasyon prosesleri. *Metalurji Dergisi*, 98, 37-43.
- Türker, A. (2011). *Etial 171 Alaşımının Yarı Kati Halde Şekillendirilebilirliğine Eser Miktarı Ag İlavesinin Etkisinin İncelenmesi*. Doktora Tezi, Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa, 36-37.
- Tzimas, E. (1997). *Evolution of microstructure and rheological behavior of alloys in the semi solid state*, Ph.D. Thesis, Drexel University, USA, 1-12.
- Tzimas E., Zavaliangos A. (2000). A comparative characterization of near-equiaxed microstructures as produced by spray casting, magnetohydrodynamic casting and the stress induced, melt activated process. *Materials Science and Engineering: A*, 289, 217-227.
- Verhoeven, J.D. (1975). *Fundamentals of Physical Metallurgy*. Newyork: Prentice Hall, 400-403.
- Wu, Y.L., Froes, F.H. and Alvarez, A. (1999). Microalloying of Sc, Ni and Ce in an advanced Al-Zn-Mg-Cu alloy. *Metallurgical and Material Transactions*, 30(4), 1017-1024.

- Wu, C. (2004). *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.
- Xia, K. ve Tausig, G. (1998). Liquidus casting of wrought aluminum alloy 2618 for thixoforming. *Materials Science and Engineering: A*, 246, 1-10.
- Zhang, Q., Cao, M. ve Cai J., (2015). AlSi9Mg aluminum alloy semi-solid slurry preparation by intermediate frequency electromagnetic oscillation process. *Journal of Materials Processing Technology*, 42-49.
- Zeytin, H. (2000). Alüminyum Alaşımları Otomotiv Endüstrisinde Uygulamaları ve Geleceği. *Mühendis ve Makina*, 53(635), 51-58.
- Zoqui, E.J., Paes, M., Es-Sadiqi, E. (2002). Macro and microstructure analysis of SSM A356 produced by electromagnetic stirring. *Journal of Materials Processing Technology*, 120, 365–373.
- Zoqui E.J. (2003). Morphological analysis of SSM Al–4.5 wt.% Cu measured by the rheocast quality index. *Journal of Materials Processing Technology*, 195–201.





GAZİ GELECEKTİR..