

CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**VİBRASYON ALTINDA SOĞUTMA PLAKASINDA (COOLING
SLOPE) DÖKÜM PROSESİYLE ETİAL 160 ALAŞIMINDAN
TİKSOTROPİK KARAKTERDE MALZEME ÜRETİMİ VE
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makina Mühendisi Simge GENÇALP

Anabilim Dalı : Makina Mühendisliği

Programı : Konstrüksiyon ve İmalat

MANİSA 2009

CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**VİBRASYON ALTINDA SOĞUTMA PLAKASINDA (COOLING
SLOPE) DÖKÜM PROSESİYLE ETİAL 160 ALAŞIMINDAN
TİKSOTROPİK KARAKTERDE MALZEME ÜRETİMİ VE
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makina Mühendisi Simge GENÇALP

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 17 Temmuz 2009

Tezin Savunulduğu Tarih : 17 Ağustos 2009

Tez Danışmanı : Doç.Dr. Nurşen SAKLAKOĞLU

Diğer Jüri Üyeleri : Yrd. Doç.Dr. Salim ŞAHİN (CBÜ)

Yrd.Doç.Dr. Serdar KARAOĞLU (EÜ)

MANİSA 2009

İÇİNDEKİLER

SEMBOL LİSTESİ.....	III
ŞEKİL LİSTESİ.....	IV
TABLO LİSTESİ.....	VIII
KISALTMALAR LİSTESİ.....	IX
TEŞEKKÜR.....	X
ÖZET.....	XI
ABSTRACT.....	XII
1. GİRİŞ.....	1
Metalik Alaşımların Katılaşması.....	2
Döküm Yapısı.....	6
Mikrosegregasyon.....	8
2. TİKSOTROPİK HAMMADDE ÜRETİMİ.....	9
Tikso Şekillendirme İçin Alaşımların Elverişliliği.....	10
Katılaşma Aralığı.....	11
Sıvı Kısımın Sıcaklık Hassasiyeti.....	12
Katı Fazın Morfolojisi.....	13
Yarı-Katı Durumda Reolojik Özellikler.....	14
Tiksotropik Bulamaç (Slurry) Hazırlama Metotları.....	20
Karıştırma.....	21
SIMA (Strain Induced Melt Activation) Prosesi.....	24
Eğimli Soğutma Plakasında Döküm.....	27
3. VİBRASYON ALTINDA EĞİMLİ SOĞUTMA PLAKASINDA DÖKÜM.....	29
4. TİKSO ŞEKİLLENDİRME İÇİN YENİDEN ISITMA PROSESİ.....	34
İndüksiyonla Isıtmanın Temeli.....	35
5. TİKSO ŞEKİLLENDİRME.....	39
Yarı-Katı Halde Şekillenebilme.....	41
Yarı-Katı Halde Şekillendirmenin Avantajları ve Dezavantajları.....	42
Yarı-Katı Şekillendirmenin Uygulama Alanları.....	42
6. DENEYSEL ÇALIŞMA.....	45
Deneyisel Çalışmada Kullanılan Malzemeler.....	45
Deney Düzenegi.....	46

Eğimli Soğutma Plakasında Döküm Cihazı.....	46
İndüksiyon Isıtma Ünitesi.....	47
Kalıp.....	49
Şekillendirme Ünitesi (Pres).....	52
Eğimli Soğutma Plakasında Döküm.....	53
Vibrasyon Altında Eğimli Soğutma Plakasında Döküm.....	54
İndüksiyonla Isıtma.....	57
A380 (ETIAL 160) Alüminyum Alaşımını Tikso Şekillendirme.....	60
7. SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	62
Gravite Döküm Yoluyla Üretilen A380 (ETIAL 160) Alaşımı.....	63
Eğimli Soğutma Plakasında Döküm Yoluyla Üretilen A380 (ETIAL 160) Alaşımı.....	64
Vibrasyon Altında Eğimli Soğutma Plakasında Döküm Yoluyla Üretilen A380 (ETIAL 160) Alaşımı.....	68
Doğrudan Döküm Sırasında Kalıba Vibrasyon Uygulanması Yoluyla Üretilen A380 (ETIAL 160) Alaşımı.....	70
A380 (ETIAL 160) Alüminyum Alaşımından Tiksotropik Karakterde Hammadde Üretimi.....	72
Tane Analizleri ve Sertlik Sonuçları.....	77
Tane Analizleri.....	77
Sertlik Sonuçları.....	80
Tikso Şekillendirme.....	82
8. GENEL SONUÇLAR.....	84
REFERANSLAR.....	86
ÖZGEÇMİŞ.....	91
EK.....	92

SEMBOL LİSTESİ

ΔG	Oluşum Serbest Enerjisi
$\Delta G_{\text{Aryüzey}}$	Arayüzey Serbest Enerjisi
ΔG_{Hacim}	Hacimsel Serbest Enerji
ΔG_v	Sıvıdan katıya dönüşüm sırasında birim hacim başına açığa çıkan enerji
γ	Arayüzey Enerjisi
A	Küresel Çekirdeğin Alanı
V	Küresel Çekirdeğin Hacmi
r^*	Kritik Yarıçap
ΔH	Ergime Enerjisi
ΔT	Aşırı Soğuma
T_m	Ergime Sıcaklığı
γ_{ML}	Kalıp-Sıvı Arayüzey Enerjisi
γ_{SM}	Katı-Kalıp Arayüzey Enerjisi
γ_{SL}	Katı-Sıvı Arayüzey Enerjisi
V_s	Katı Çekirdeğin Hacmi
A_{SM}	Katı-Kalıp Arayüzey Alanı
A_{SL}	Katı-Sıvı Arayüzey Alanı
θ	Islatma Açısı
η	Viskozite
K	Sabit
γ	Kayma Hızı
n	Üstel Katsayısı
f_s	Katı Faz Oranı
f_L	Sıvı Faz Oranı

ŞEKİL LİSTESİ

- Şekil 1.1. Tikso şekillendirme teknolojisi ile üretilmiş (a) süspansiyon parçası, (b) motor mesneti, (c) cep telefonu şasisi
- Şekil 1.2. Çekirdekleşmenin olabilmesi için gerekli serbest enerji değişimi
- Şekil 1.3. Kalıp duvarında heretojen çekirdekleşmenin oluşumu
- Şekil 1.4. Homojen ve heterojen çekirdekleşme için gerekli serbest enerji değişiminin karşılaştırılması
- Şekil 1.5. Genel bir ingot yapısı
- Şekil 1.6. Üç farklı yapıda ingot dökümü. (a)Kolonsal yapı, (b)Kolonsal ve eşeksenli yapı, (c) Eşeksenli yapı
- Şekil 2.1. Tikso şekillendirme ve Rheo döküm proses için sıcaklık-zaman diyagramı
- Şekil 2.2. Yarı-katı alaşım metallerinin bir fotoğrafla ardı ardına resimlenen tiksotropik davranışı
- Şekil 2.3. Tipik bir sıvı kısım (%) - sıcaklık eğrisi
- Şekil 2.4. Yarı-katı dendritik Sn-%15 Pb alaşımının izotermal kayma gerilmesi
- Şekil 2.5. Sn-%15 Pb non-dendritik alaşım için deneysel olarak elde edilmiş viskozite-kayma gerilmesi-katı oranı ilişkisi
- Şekil 2.6. Yarı-katı halde şekil vermenin oluşumu (a) kayma ile dendritlerin kırılması, (b) viskozite-katı oranı ilişkisi
- Şekil 2.7. Yarı-katı haldeki malzemenin katılaşması sırasında tane morfolojisindeki değişim, (a) ilk dendrit oluşumu, (b) dendritik büyüme, (c) rozet, (d) kabalaşmış rozet, (e) küreselleşme
- Şekil 2.8. Yarı katı alaşımların görünen viskozitesi üzerine kayma hızının etkisi
- Şekil 2.9. Yarı-katı alaşımların görünen viskozitesi üzerine soğuma hızının etkisi
- Şekil 2.10. Karıştırma döküm cihazı
- Şekil 2.11. Katılaşma esnasında manyetik karıştırma üretmek için deneysel sistem
- Şekil 2.12. MHD proses kullanılarak tipik yarı-katı mikroyapı oluşumu
- Şekil 2.13. SIMA prosesinin şematik gösterimi
- Şekil 2.14. Modifiye edilmiş SIMA yöntemi için şematik proses sırası
- Şekil 2.15. Eğimli soğutma plakası kullanılarak tikso şekillendirme prosesinin şematik gösterimi

Şekil 3.1. Titreşimli eğimli soğutma plakasında döküm prosesinin şematik çizimi 1- Pota, 2- Motor, 3- Ergiyik akışı, 4- Titreşim sistemi bağlantısı, 5- Mekanik yaylar, 6- Kalıp

Şekil 3.2. Plakadaki çekirdek oluşumunda ısı difüzyon yönünün şematik çizimi

Şekil 3.3. Çekirdek çoğalması

Şekil 3.4. Direkt küresel büyümeye ait mikroyapı

Şekil 3.5. Dendritik kol kökünün kırılması

Şekil 3.6. Dendritik kolun parçalanması: pozisyon A

Şekil 4.1. Silindirik bir iş parçasının indüksiyonla ısınması

Şekil 4.2. “Elephant foot” olgusu (a) ve “slug tilting” (b) etkisi

Şekil 5.1. Üst: Bilgisayar kontrollü hidrolik dikey tikso şekillendirme presi ve Alt: Tipik ticati hidrolik yatay tikso şekillendirme presi

Şekil 5.2. Yarı-katı alaşımın homojen akışının şematik diyagramı

Şekil 6.1. Döküm yapılan A380 alüminyum alaşımı külçesi

Şekil 6.2. Eğimli soğutma plakasında döküm cihazı

Şekil 6.3. İndüksiyon Isıtma Ünitesi

Şekil 6.4. Isıtma bobinin fotoğrafı ve ısıtma özellikleri

Şekil 6.5. Yarı-katı şekillendirme kalıbına ait teknik resim: üst kalıp (a), alt kalıp (b)

Şekil 6.6. Kalıbının montajı

Şekil 6.7. Kalıp

Şekil 6.8. İngot (a), Son ürün (b)

Şekil 6.9. Yarı-katı şekillendirme ünitesi

Şekil 6.10. Ergitmenin yapıldığı rezistanslı fırın

Şekil 6.11. Titreşim cihazı

Şekil 6.12. Vibrasyon altında eğimli soğutma plakasında döküm cihazı

Şekil 6.13. Vibrasyon altında gravite döküm

Şekil 6.14. Çalışma esnasında indüksiyon ısıtma ünitesi

Şekil 6.15. Parlatma cihazı

Şekil 6.16. Dijital kamera ile desteklenen optik mikroskop

Şekil 6.17. Brinell sertlik ölçme cihazı

Şekil 6.18. Şekillendirme işleminden önce sistemin fotoğrafı

Şekil 7.1. Katılaşma esnasında A380 alüminyum alaşımının DSC eğrisi

Şekil 7.2. A380 alüminyum alaşımının sıcaklık eğrisi

Şekil 7.3. Gravite dökümden elde edilen A380 alaşımına ait mikroyapı

Şekil 7.4. A380 alaşımının 60° eğim ve 500 mm plaka uzunluğundaki sabit eğimli soğutma plakasında farklı döküm sıcaklıklarından elde edilen mikroyapılar: (a),(b) 615°C; (c),(d) 630°C; (e),(f) 650°C

Şekil 7.5. Malzemenin plakadan akışı sırasında farklı pozisyonlardaki mikroyapı gelişimi

Şekil 7.6. Plaka yüzeyinde oluşan katılaşma kabuğunun (a)üst, (b)orta, (c) alt noktasındaki mikroyapı gelişimi

Şekil 7.7. A380 alaşımının 60° eğim ve 500 mm plaka uzunluğundaki vibrasyon altında eğimli soğutma plakasında farklı döküm sıcaklıklarından elde edilen mikroyapılar: (a),(b) 615°C; (c),(d) 630°C; (e),(f) 650°C

Şekil 7.8. Sabit eğimli soğutma plakası yüzeyinde kalan artık malzemenin katılaşma mikroyapısı: (a) ve (b), ve Vibrasyon altında eğimli soğutma plakası yüzeyinde kalan artık malzemenin katılaşma mikroyapısı: (c) ve (d)

Şekil 7.9. Doğrudan döküm (gravite döküm) esnasında 5dk titreşim uygulanmış mikroyapılar: (a) ve (b), doğrudan döküm (gravite döküm) esnasında 10 dk titreşim uygulanmış mikroyapılar: (c) ve (d) elde edilen mikroyapılar

Şekil 7.10. İzotermal olarak (a)565°C' de (b) 567°C' de tutulmasından sonra elde edilmiş A380 döküm kütüklerin fotoğrafları

Şekil 7.11. Sabit eğimli soğutma plakasında dökümden A380 alaşımı ingotlarının 565°C sıcaklıkta 5dk. tutulmasıyla elde edilen mikroyapılar: (a) 615°C, (b) 630°C, (c) 650°C; Vibrasyon altında eğimli soğutma plakasında dökümden A380 alaşımı ingotlarının 565°C sıcaklıkta 5dk. tutulmasıyla elde edilen mikroyapılar: (d) 615°C, (e) 630°C, (f) 650°C

Şekil 7.12. Sabit eğimli soğutma plakasında dökümden A380 alaşımı ingotlarının 567°C sıcaklıkta 5dk. tutulmasıyla elde edilen mikroyapılar: (a) 615°C, (b) 630°C, (c) 650°C; Vibrasyon altında eğimli soğutma plakasında dökümden A380 alaşımı ingotlarının 565°C sıcaklıkta 5dk. tutulmasıyla elde edilen mikroyapılar: (d) 615°C, (e) 630°C, (f) 650°C

Şekil 7.13. Gravite dökümden (a)565°C, (b)567°C; 5dk.'lık vibrasyon altında gravite dökümden (c)565°C, (d)567°C; 10dk.'lık vibrasyon altında gravite dökümden (e) 565°C, (f) 567°C sıcaklıklarda yeniden ısıtılmış ingotların mikroyapıları

Şekil 7.14. Yarı-katı sıcaklıkta uygulanan izotermal işlemde elde edilen katı oranlarının sabit eğimli soğutma plakasındaki döküm koşullarına göre değişimi

Şekil 7.15. Yarı-katı sıcaklıkta uygulanan izotermal işlemde elde edilen katı oranlarının vibrasyon altında eğimli soğutma plakasındaki döküm koşullarına göre değişimi

Şekil 7.16. Döküm koşullarının yarı-katı ısıtma sıcaklığında elde edilen küresellik üzerine etkisi

Şekil 7.17. Sabit ve vibrasyon altında eğimli soğutma plakasında döküm yöntemiyle elde edilen ingotların sertlik grafiği

Şekil 7.18. Sabit ve vibrasyon altında eğimli soğutma plakasında döküm yöntemiyle elde edilen ingotların yarı-katı sıcaklığa ısıtılmasıyla elde edilen sertlik grafiği

Şekil 7.19. Tikso şekillendirilmiş numuneler

TABLO LİSTESİ

Tablo 5.1. Alüminyum jant üretimi için yarı-katı şekillendirme ve kokil döküm yöntemlerinin karşılaştırılması

Tablo 5.2. Yarı-katı şekillendirme ve kokil dökümle üretilmiş alüminyum merkez fren silindirlerinin karakteristiklerinin karşılaştırılması

Tablo 6.1. Bu çalışmada kullanılan ETIAL 160 (A380) alüminyum alaşımının kimyasal kompozisyonu

Tablo 6.2. Yarı-katı şekillendirme ünitesi özellikleri

Tablo 6.3. Eğimli soğutma plakasında döküm parametreleri

KISALTMALAR LİSTESİ

CS	Soğutma Plakası (Cooling Slope)
MHD	Manyetohidrodinamik
SSM	Yarı-Katı Metal (Semi-Solid Metal)
DSC	Diferansiyel Tarama Kalorimetri (Differential Scanning Calorimetry)
SIMA	Gerilme Altında Metal Aktivasyonu (Strain Induced Melt Activation)
AC	Alternatif Akım

TEŞEKKÜR

Bu çalışmada, bilgisi ve tecrübesiyle bana her zaman yardımcı ve destek olan saygıdeğer hocam Doç.Dr. Nurşen SAKLAKOĞLU' na, deneysel çalışmalarındaki yardımlarından dolayı Öğr.Gör. Şefika KASMAN' a, P.Arş.Gör. Yiğit ERÇAYHAN' a, manevi desteğini ve bilgilerini hiçbir zaman esirgemeyen Arş.Gör. Selda AKGÜN' e, deney malzemelerinin temininde yardımcı olan Şükrü UÇAR' a, yardımlarından dolayı teknisyen Bahri ÇELİK' e, manevi desteğinden ötürü Arş.Gör. Nazlı YEYİNLİ' ye, danışmanlığını esirgemeyen Doç.Dr. Yücel BİROL' a ve en önemlisi bana en büyük desteği sağlayan anneme ve babama çok teşekkür ederim.

Ayrıca bu çalışma 107M300 no' lu proje kapsamında TÜBİTAK tarafından ve FBE 2007-081 no' lu proje kapsamında BAP tarafından desteklenmiştir.

ÖZET

Yarı-katı halde şekillendirme, karmaşık şekilli parçaların daha az sayıda adımda ve daha düşük maliyetlerle üretilmeleri için cazip bir yöntemdir. Hammadde olarak katı metalleri (dövme) veya sıvı metalleri (döküm) kullanan geleneksel işlemlerden farklı olarak; yarı-katı halde şekillendirme işlemi, yarı-katı durumdaki malzemeleri şekillendirir ve hammadde üretimi, tekrar ısıtma ve şekillendirme olmak üzere üç ana procesten oluşur. Bu çalışmada yarı-katı halde şekillendirmenin üç basamağında ETIAL 160 (A380) alüminyum alaşımı için uygulanmıştır. Eşeksenli ve ince rozet taneli bir mikroyapının (tikotropik olarak adlandırılır) üretilmesi yarı-katı halde şekillendirme sürecinin ilk işlemini oluşturur. Bu tür bir yapının oluşturulması için eğimli soğutma plakasından döküm işlemi uygulanmıştır. Döküm işlemi hem sabit bir plakadan hem de titreşim frekansına maruz kalan plakadan yapılmıştır. Ayrıca gravite döküm yöntemi ile de üretim yapılmıştır, aynı zamanda gravite döküm yapılan sabit kalıp da titreşim frekansına maruz bırakılmıştır. Döküm sıcaklığının ve titreşimin tikotropik yapı oluşumu üzerindeki etkisi incelenmiştir. Yeniden ısıtma işleminde, dökülen kütükler indüksiyon fırını kullanılarak yarı-katı sıcaklık aralıklarında kısmen eritilmiş ve bu sıcaklıklarda bazı bekleme sürelerine tabi tutulmuşlardır. Isıtılan kütüklerde mikroyapısal evrimi, sertlikleri ve tane analizleri gözlemlenmiştir. Üçüncü basamak olan şekillendirme işleminde, dökülen kütükler ikinci basamakta uygulaması yapılmış sıcaklıklara tekrar ısıtılıp, özel olarak tasarlanmış kalıpta yarı-katı halde şekillendirilmişlerdir. Şekillendirilmiş örneklerin dış görünüşleri ve kalıbı doldurma kabiliyetleri incelenmiştir. Tikotropik hammaddenin doğasında olan düşük vizkozite özelliğinden yararlanmak amacıyla şekillendirme işlemi literatürde uygulanan kuvvetlere oranla daha düşük yükler altında, yüksek hızlarda gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Titreşimli eğimli soğutma plakası, Mikroyapı gelişimi, Konveksiyon

ABSTRACT

Thixoforming is an attractive process for the manufacture of complex parts with substantial savings of time and cost. Different from the conventional metal forming technologies which use either solid metals (forging) or liquid metals (casting) as starting materials, thixoforming deals with semi-solid slurries. Thixoforming is composed of three main processes, i.e. thixotropic feedstock production, reheating, and thixoforming. In this study, three steps of the thixoforming process were carried out for A380 alloy. The production of a fine, equiaxed, rosette microstructure (often referred to as “thixotropic”) is a must for the success of the thixoforming process. In the first step, cooling slope (CS) casting process was carried out to obtain such a feedstock. The casting process was realized from both a constant inclined plate and a inclined plate under vibration. Moreover, the production was also carried out gravity casting, at the same time, the constant mold employed gravity casting was exposed to vibration frequency. The effect of casting temperature and vibration on the formation of thixotropic microstructure were investigated. In the reheating step, as-cast billets were partially remelted at semi-solid temperature intervals and isothermally held for suitable durations with an induction furnace in order to observe the microstructural evolution, hardness and grain analysis. In the forming step of the process, as-cast billets were inductively reheated to the temperatures practiced in the second step and then thixoformed between dies. External appearances and capability of the filling mold of the thixoformed samples were investigated. In order to use the advantage of low viscosity presented in the thixotropic feedstocks, thixoforming was performed with lower press loads comparing to the loads and lower press speed used in literature.

Keywords: Vibrating inclined plate, Microstructure evolution, Convection

1. GİRİŞ

Yarı-katı halde şekil verme yöntemleri konvensiyonel döküm yöntemlerine alternatif olarak çıkmıştır. Uygun koşullar sağlandığı takdirde, diğer döküm yöntemlerine tercih edilecek kadar birçok avantaja sahiptir. Bu amaçla, bir çok döküm alaşımları üzerinde çalışmalar yapılmış ve halen bu çalışmalar devam etmektedir. Günümüzde, ABD, Japonya ve bazı Avrupa ülkelerinde yarı-katı yöntemlerle ticari olarak parça üretilebilmektedir. Ülkemizde, bu proses ticari olarak kullanılmamaktadır. Ayrıca üniversitelerimizde bu konu üzerinde sınırlı çalışma yapılmıştır.

Bu çerçevede bu çalışmada, ETIAL 160 alüminyum alaşımına tiksotropik karakterde hammadde üretmek amaçlı vibrasyon altında eğimli soğutma plakasında döküm yöntemi uygulanmış, bu ingotlara yeniden ısıtma prosesi ile küresel mikroyapı oluşturulmuş, yarı-katı halde şekil verilmiş ve mikroyapılar incelenerek tane analizleri ve sertlik özellikleri araştırılmıştır.

Eğimli soğutma plakasında döküm prosesi ergiyiğin alt soğutmalı eğik bir plakadan akışı ile non-dendritik yapının elde edilmesi esasına dayanmaktadır. Böyle bir malzemenin yeniden ısıtılmasıyla birlikte yapıda var olan düşük ergime sıcaklığına sahip ikinci fazın erimesiyle oluşan sıvı faz, geniş açılı tane sınırlarını ıslatmaktadır. Dar açılı tane sınırları ise zamanla birleşerek yok olurlar. Bu yapı non-dendritik malzeme üretim yöntemleri için ideal bir yapıdır.

Yarı-katı üretim yöntemiyle, birçok otomobil parçaları (otomobil jantları, fren silindirleri, fren valfleri, direksiyon kutusu vb) üretilebilmektedir ve aynı zamanda, bu yöntemle parçanın yaklaşık nihai şekli bir kademede üretilebilmektedir. Şekil 1.1’ de tiksotrofik şekillendirme teknolojisi ile üretilmiş parçalara ait fotoğraflar bulunmaktadır.

Ayrıca bu yöntemle, diğer döküm yöntemleriyle üretilen çok kompleks parçalara da şekil verilerek üretim hızı arttırılabilir. Amerika’ da 15 milyondan fazla piston yarı-katı proseslerle üretilmiştir. Alumax şirketinin ana silindir kapağı ürettiği 2.5 milyon parçadan sadece dört tanesinin geri çevrilmesi bu yöntemin başarısını ortaya koymaktadır.



Şekil 1.1. Tikso şekillendirme teknolojisi ile üretilmiş (a) süspansiyon parçası, (b) motor mesneti, (c) cep telefonu şasisi [9]

1.1. Metalik Alaşımların Katılaşması

Katılaşma sıvı fazdan katı fazın olduğu bir sıvı-katı dönüşümüdür. Katı fazın oluşumu iki kademedeyi gerçekleştirir. Bunlar;

- 1- Çekirdeklenme
- 2- Büyüme

Ergime sıcaklığının altına soğutulmuş saf bir metalde, katı fazın serbest enerjisi sıvı fazın serbest enerjisinden daha düşüktür ve dolayısıyla daha karardır. Oluşan bu katı faz termodinamik olarak kararlı olmasına rağmen, ilk çekirdeğin oluşabilmesi için denge sıcaklığı ile ilk çekirdeklenme sıcaklığı arasında bir aşırı soğumaya ihtiyaç vardır. Bu safhaya çekirdeklenme adı verilir [35].

Katı fazın sıvı faz içinde çekirdeklenmesi iki şekilde gerçekleşir. Bunlar, homojen çekirdeklenme ve heterojen çekirdeklenmedir [35].

Bir katı çekirdek, kendi sıvı eriyiği içinde, yabancı maddelerin yardımı olmaksızın oluşabiliyorsa, buna homojen çekirdeklenme adı verilir. Homojen çekirdeklenme, aşırı soğumanın (ΔT) çok yüksek olduğu durumlarda sağlanabilir. Bu yüzden homojen çekirdeklenmeye çok ender olarak rastlanır [35].

Eğer ilk çekirdeklenme kalıp-metal ara yüzey çıkıntılarında, sıvıdaki inklüzyonlar, aşıl原因ıcılar veya kalıp içinde çatlak ve girintilerde başlıyorsa buna heterojen çekirdeklenme adı verilir [35].

Homojen çekirdekleşmede, sıvı kütlesi içinde bir öbek atomun bir araya gelmesi ile bir embriyo oluşur. Embriyonun yüzey enerjisi ve serbest enerjisi, katının yüzey enerjisi ve serbest enerjisine eşit kabul edilir. Embriyonun çapı belli bir kritik değere ulaştığında bunlara çekirdek adı verilmekte ve şekillerinin küresel olduğu düşünülmektedir. Bu çekirdekler oluştukları zaman son derece küçüktürler ve yaklaşık çapları 10 Å kadardır. Dolayısıyla yüzey/hacim oranları çok yüksektir. Bu çekirdeklerin yüzeylerinin oluşumu, serbest enerjide pozitif bir artış gösterdiği için, bu enerji küçük çekirdeklerin oluşumunda bir engel oluşturacaktır. Yüzey etkisi de göz önüne alınarak, bir çekirdeği oluşturmak için serbest enerji değişimi aşağıda gösterildiği gibidir [35].

$$\Delta G = \Delta G_{\text{Arayüzey}} + \Delta G_{\text{Hacim}} \quad (1)$$

$$\Delta G = \gamma A + \Delta G_V \cdot V \quad (2)$$

$$\Delta G = \gamma 4\pi r^2 + 4/3 \pi r^3 \Delta G_V \quad (3)$$

Burada;

ΔG : Oluşum Serbest Enerjisi

$\Delta G_{\text{Arayüzey}}$: Arayüzey Serbest Enerjisi

ΔG_{Hacim} : Hacimsel Serbest Enerji

ΔG_V : Sıvıdan katıya dönüşüm sırasında birim hacim başına açığa çıkan serbest enerji

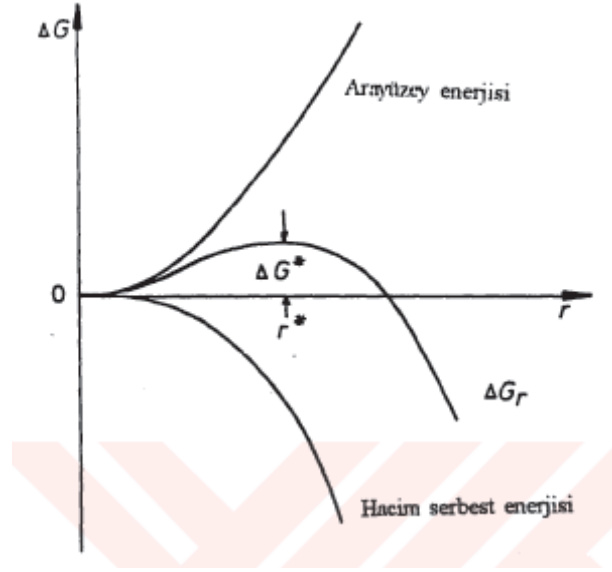
γ : Arayüzey Enerjisi

A : Küresel Çekirdeğin Alanı

V : Küresel Çekirdeğin Hacmi

Şekil 1.2.'de, çekirdekleşmenin oluşabilmesi için gerekli negatif hacim serbest enerji terimi ile, prosesi engelleyen pozitif arayüzey serbest enerji terimi gösterilmektedir. Ayrıca toplam serbest enerjideki maksimum kritik yarıçap olan r^* da görülebilir [35].

Buna göre, $r > r^*$ olduğunda, r^* in üzerinde çekirdeğin büyümesi serbest enerjiyi azaltmaktadır. Bu nedenle r^* , kritik yarıçaptır ve bunun değeri eşitlik 4'te verilmektedir.



Şekil 1.2. Çekirdekleşmenin olabilmesi için gerekli serbest enerji değişimi [35]

$$d\Delta G/dr = 0 \rightarrow r^* = -2\gamma / \Delta G_v \quad (4)$$

Bu eşitlik, 3 no'lu eşitlikte yerine yazılırsa kritik serbest enerji değişimi bulunur.

$$\Delta G^*_{\text{hacim}} = 16\pi\gamma^3 / 3\Delta G_v^2 \quad (5)$$

$$\Delta G_v = \Delta H \Delta T / T_m \quad (6)$$

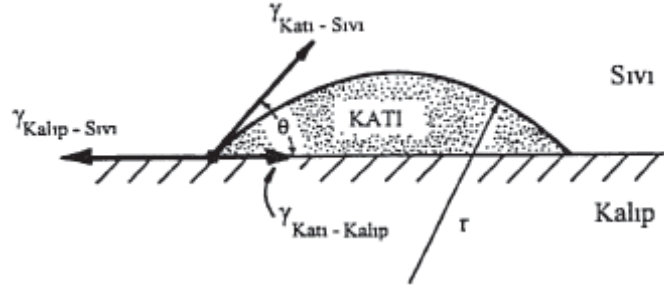
Burada,

ΔH : Ergime Enerjisi

ΔT : Aşırı Soğuma

T_m : Ergime sıcaklığıdır.

Heterojen çekirdekleşmeyi anlayabilmek için Şekil 1.3. göz önüne alındığında arayüzeyde enerjinin üç fazın birleştiği noktada dengede olduğu görülmektedir [35].



Şekil 1.3. Kalıp duvarında heterojen çekirdekleşmenin oluşumu

$$\gamma_{ML} = \gamma_{SM} + \gamma_{SL} \cos \theta \quad (7)$$

Kristalin oluşumu ile ilgili serbest enerji değişimi;

$$\Delta G_{het} = -V_s \cdot \Delta G_v + A_{SL} \gamma_{SL} + A_{SM} \gamma_{SM} - A_{SM} \gamma_{ML} \quad (8)$$

Burada;

γ_{ML} : Kalıp-Sıvı arayüzey enerjisi

γ_{SM} : Katı-Kalıp arayüzey enerjisi

γ_{SL} : Katı-Sıvı arayüzey enerjisi

V_s : Katı çekirdeğin hacmi

A_{SM} : Katı-Kalıp arayüzey alanı

A_{SL} : Katı-Sıvı arayüzey alanı

θ : ıslatma açısıdır.

$$\Delta G_{het}^* = \Delta G_{hom}^* f(\theta) \quad (9)$$

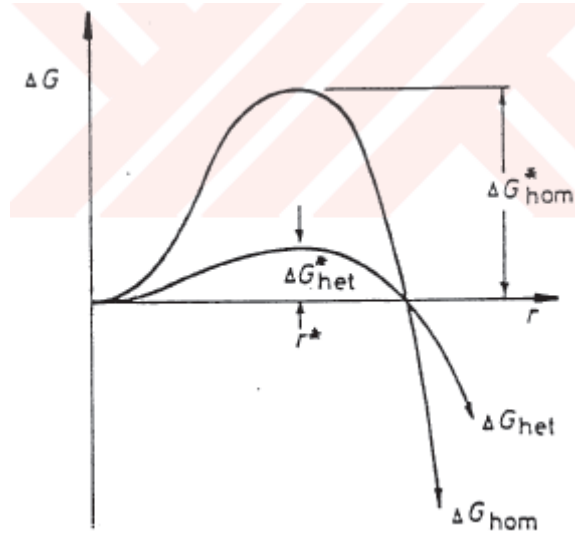
$$\Delta G_{het}^* = (16\pi\gamma^3 / 3\Delta G_v^2) f(\theta) \quad (10)$$

$$f(\theta) = (2 + \cos \theta) (1 - \cos \theta)^2 / 4 \quad (11)$$

f faktörü 0 ile 1 arasında değişir ve ıslatma açısına bağlıdır. Açı büyüdükçe ıslanma azalacak ve f faktörü 1'e yaklaşacaktır [36].

Eşitlik 5 ve 10 karşılaştırıldığında, heterojen çekirdekleşmenin, homojen çekirdekleşmeye göre daha az kritik serbest enerjiye gereksinimi olduğu görülür. Şekil 1.4.'de

homojen ve heterojen çekirdekleşme için gerekli serbest enerji değerleri karşılaştırılmaktadır [37].



Şekil 1.4. Homojen ve heterojen çekirdekleşme için gerekli serbest enerji değişiminin karşılaştırılması [37]

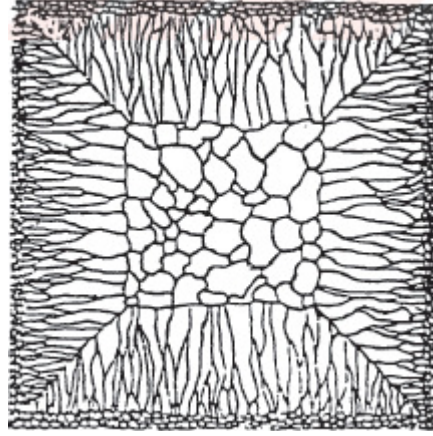
Katılaşma, çekirdekleşme sonrasında alaşımın bileşimine ve faz diyagramına bağlı olarak ya dendritik ya da ötektik olarak gerçekleşir. Dendritik katılaşma, daha çok tek fazlı alaşımlarda görülür. Fakat alaşımdaki ikinci fazın difüzyonuna ve faz diyagramına bağlı olarak dendritik yapılar arasında genelde ötektik katılaşmada olur. Ötektik miktarının düşük olduğu alaşımlar genelde dövme alaşımlarıdır. Buna karşın ötektik miktarı yüksek ise alaşımlara döküm alaşımları denir. Bu yapılar ya eşeksenli ya da kolonsal taneler halinde oluşurlar. Bu yüzden malzemelerin birçok özellikleri direkt olarak ilk döküm yapısıyla ve döküm şekliyle belirlenir [38].

1.2. Döküm Yapısı

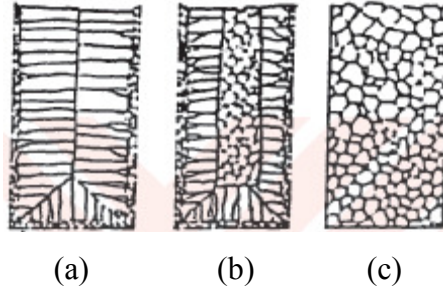
Metaller ve alaşımların, başta mekanik özellikleri olmak üzere birçok özellikleri, tane yapısı ile doğrudan ilişkilidir. Bu da, ingot dökümünde tane yapısının oluşumunun incelenmesini ve yapı kontrolü ile ilgili yöntemlerin araştırılmasını zorunlu kılmıştır [38].

Tek fazlı metal ve alaşımların mikroyapısını kontrol eden faktörler, sıvıdaki sıcaklık gradyanı, katılaşma hızı, alaşım kompozisyonudur [35].

Genel olarak bir ingot yapısının şematik gösterimi Şekil 1.5.' de verilmiştir. Bu şekilde, ingotun iç duvarına yakın kısımlar eş eksenli bölge, arada kolonsal bölge ve ingot merkezinde de iç eş eksenli bölge görülmektedir. Saf metallerin ingot dökümlerinde yalnızca dış eş eksenli bölge ve kolonsal bölge görülebilir (Şekil 1.6.(a)). Alaşımların dökümlerinde ise bunlara ek olarak iç eş eksenli bölgeler görülebileceği gibi (Şekil 1.6.(b)), tane yapısı tamamen eş eksenli de olabilir (Şekil 1.6.(c)) [39].



Şekil 1.5. Genel bir ingot yapısı [35]



Şekil 1.6. Üç farklı yapıda ingot dökümü. (a) Kolonsal yapı, (b) Kolonsal ve eş eksenli yapı, (c) Eş eksenli yapı [39]

Dış eş eksenli kristaller, soğuk kalıp cidarı ile temas sonucu aşırı soğumaya maruz kalan sıvı metal içerisinde heterojen çekirdeklenme yolu ile oluşurlar. Bu bölgenin kalınlığı metal sıcaklığına, kalıp sıcaklığına ve kalıp malzemesinin ısı iletim katsayısına bağlıdır. Metal sıcaklığı yüksek, kalıp sıcaklığı düşük ve ısı iletimi de düşük ise, dış eş eksenli bölge ince olacaktır. Metal sıcaklığı nispeten düşük ve kalıp sıcaklığı yüksek ise, bu durumda dış eş eksenli bölge daha kalın olacaktır.

Katılaşmanın başlangıcında kristaller kalıp cidarında rasgele yönlenirler. Fakat ısı akış yönüne paralel olan kristaller diğerlerini elimine ederek daha hızlı büyürler ve kolonsal taneleri oluştururlar. Bu arada ikincil dendrit kolları arası mesafe, hem eş eksenli hem de kolonsal dendritlerde katılaşma boyunca artar. Bu artış, bazı ikincil dendrit kollarının eriyerek yok olmasından veya birleşerek bütünleşmesinden kaynaklanmaktadır. Böylece sistem yüzey enerjisini minimuma indirir [36].

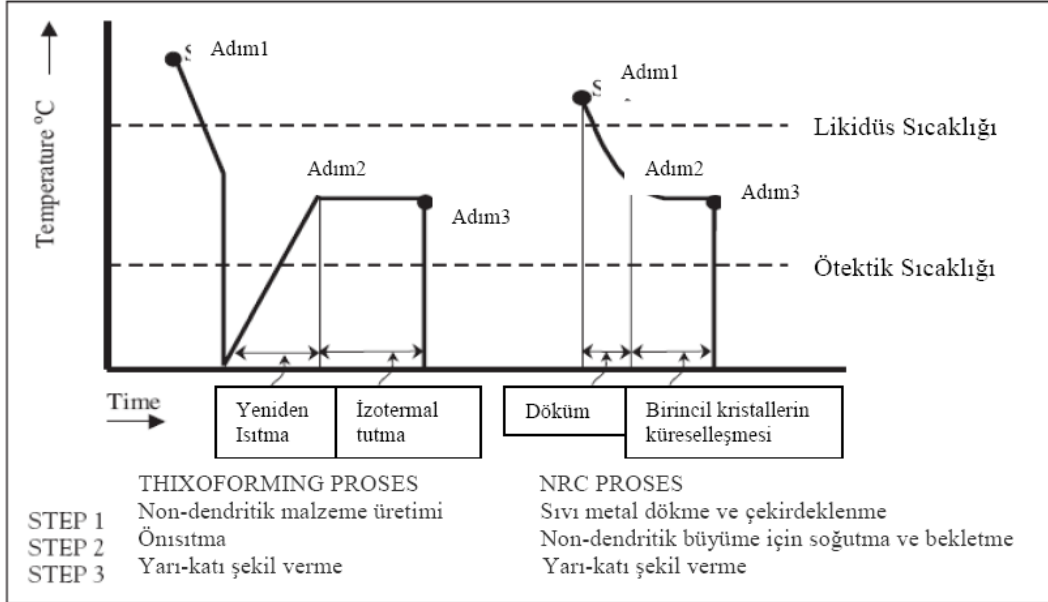
İç eş eksenli taneler ise, ya ingotun üst yüzeyinin hava ile temas etmesinden dolayı oluşan aşırı soğuma ile ya da ikincil dendrit kollarının çeşitli mekanizmalara bağlı olarak kopması ile oluşur. İkinci fazın daha homojen dağılması ve katı sıvı aralığına ısıtma sırasında sıvı dağılımının da homojen olması için eş eksenli tanelerin oluşumu tercih edilir.

1.3. Mikrosegregasyon

Mikrosegregasyon, alaşımların dengesiz katılaşması sonucu oluşur. Dengesiz katılaşmada, oluşan katıda difüzyonun tamamlanması için yeterli süre olmadığından, ilk katı bileşimi ile sonradan oluşan katının bileşimi arasındaki farklılığa mikrosegregasyon denir.

2. TİKSOTROPİK HAMMADDE ÜRETİMİ

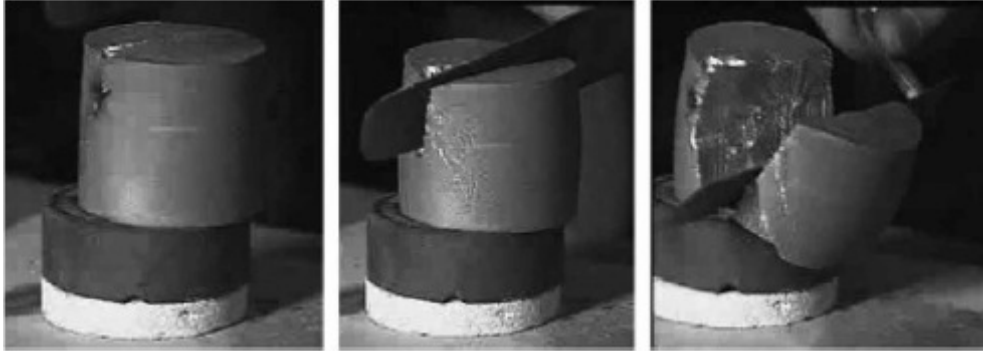
Yarı-katı işlemede iki başlıca yöntem vardır. ‘Thixo’ yöntemde, malzeme küresel mikroyapı elde etmek için önceden işlenir. Daha sonra katılaştıran hammaddeye, yeniden likidüs-solidüs aralığı içinde uygun bir sıcaklığa ısıtılmasıyla şekil verilir. Bu tip yaklaşımın dezavantajı yeniden ısıtmanın söz konusu olmasından dolayı orta maliyette olmasıdır. Yarı-katı işleminin alternatif bir dalı “rheo” işlemdir. Burada sıvı yarı-katı aralığa soğutulur ve soğutma esnasında dendritlerden çok küresel mikroyapı elde etmek üzere olan bir yöntemdir. Burada malzeme katılaştırmadan ve yeniden ısıtmadan yarı-katı durumdan direkt olarak işlenir. ‘Rheo’ yöntem ‘thixo’ yöntemlerden daha geçerli bir maliyete sahiptir [26].



Şekil 2.1. Tikso şekillendirme ve Rheo döküm proses için sıcaklık-zaman diyagramı [26]

Yarı-katı metal işleme, yarı-katı durumda bulunan tiksotropik davranışın benzersiz avantajlarına sahiptir. Bu durumda, alaşım genellikle artan kayma hızı ile düşük viskoziteye sahiptir [1]. Sıvı fazdaki yarı-katı malzemenin viskozitesi 0.001 Pa s kadardır ve bu davranış zamandan ve kayma hızından bağımsız Newtonyen akıştır. Ancak, yarı-katı durumda ($f_s=0.3-0.7$) şekillendirmede viskozite sıcaklık ve kayma kuvvetinin fonksiyonu olarak 0.1’den 1×10^{-6} Pa s ciddi bir biçimde değişmektedir. Statik haldeyken yüksek viskoziteden dolayı katı gibi davranabilen malzeme, şekillendirmede iyi doluma neden olan bir visko-akış olarak

görülebilmektedir [2]. Yarı-katı bulamacın bu benzersiz tiksotropik yapısı yarı-katı parçanın bıçak ile tıpkı bir tereyağı gibi kesilebildiği Şekil 2.2’ de gösterilmektedir.



Şekil 2.2. Yarı-katı alaşım metallerinin bir fotoğrafla ardı ardına resimlenen tiksotropik davranışı [9]

Yarı-katı aralıktaki proses için temel gereksinim, yarı-katı haldeki alaşımların tikso işlemede final şekillendirilebilme için dendritlerden yoksun ince eşeksenli mikroyapılar ortaya koymasıdır [3]. Komponenti şekillendirmeden önce yarı-katı bir malzeme için ideal mikroyapı, sıvı bir matrikste uniform olarak dağılmış ince ve küresel taneleri tam anlamıyla belirlemektir [4].

2.1. Tikso Şekillendirme için Alaşımların Elverişliliği

Çeşitli alaşımlar için yarı-katı metal işlemenin uygulanabilirliği 30 yıldır araştırılmaktadır. Başlangıçta, ilk odak noktası yüksek sıcaklık alaşımlarına, özellikle çeliklere olmuştur. Ancak 1970’lerdeki petrol krizi ve 1980’lerden beri artan çevresel endişelerden dolayı otomobil piyasa güçleri yüksek performanslı hafif metal parçaları kullanarak ağırlığı azaltma arayışındaydı. Sonuç olarak, 1990’lardan beri, yarı-katı metal işleme çoğunlukla alüminyum alaşımlarından otomotiv parçaları üretmeye odaklanmıştır . Bununla birlikte magnezyum alaşımlarından çeşitli otomobil parçaları, cep telefonu ve bilgisayar ekipmanları üretimi de son zamanlarda üzerinde çok araştırma yapılan konulardan biri olmuştur [5].

Milyonlarca alüminyum alaşımı komponent Avrupa, Japonya ve ABD’de her yıl bu proses kullanılarak üretilmektedir, fakat onların hemen hemen tamamı döküm alaşımından

yapılmaktadır [6]. Ancak, döküm alaşımının mekanik özellikleri dövme alüminyum alaşımı ile karşılaştırılamamaktadır. Böyle bir sınırlama tikso şekillendirmenin uygulama alanının oldukça dar olduğunun bir kanıtıdır. Bu sınırlamanın üstesinden gelmek için, araştırmaların çoğu çeşitli dövme alüminyum alaşımları için tikso şekillendirme prosesini geliştirmek üzerine yapılmaktadır. İlk olarak, döküm Al-Si alüminyum alaşımından farklı, dövme alüminyum alaşımlarının tikso şekillendirme için hammaddeleri ticari piyasada bulunmamaktadır. İkinci olarak, dövme alüminyum alaşımlarının sıvı fazı sıcaklık değişimi ile çok hızlı bir şekilde değişmektedir, oysa parça yeniden ısıtıldığında, iyi tikso şekillendirilebilme sağlayan makul sıvı faz elde edilmelidir. Dövme alüminyum alaşımlarında sıcaklıktaki küçük bir düşme yarı-katı şekillendirmeye tam olarak uygun olmayan bir mikroyapı ile sonuçlanan, katı kısımda kayda değer bir artışa neden olabilir. Üçüncüsü, yarı-katı durumda, dövme alüminyum alaşımları döküm alüminyum alaşımlarından daha yüksek viskoziteye ve sıcak yırtılma eğilimine sahiptirler [7].

Tikso şekillendirilebilme, tikso şekillendirmede uygun alaşımları belirlemek için kullanılan bir terimdir. Tikso şekillendirilebilme sıvı kısımdaki (f_L) miktar, sıvı kısım hassasiyeti, katılaşma aralığı, katı tane morfolojisi gibi parametrelere dayanır [8].

Tikso şekillendirme için pek çok kriter alaşımın kompozisyon seçiminde göz önünde bulundurulmaktadır.

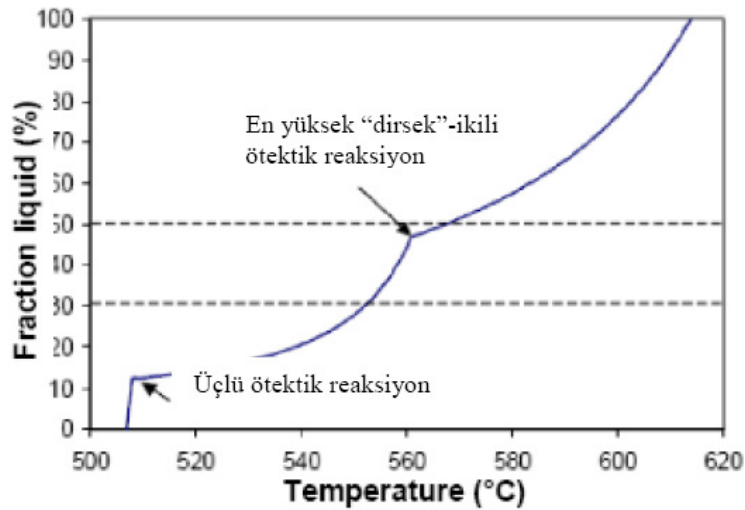
2.1.1. Katılaşma Aralığı

Katılaşma aralığı genellikle solidüs ve likidüs arasındaki sıcaklık aralığı olarak tanımlanmaktadır. Temelde alaşım kompozisyonu yolu ile belirlenmekte ve soğutma hızı gibi işlem koşulları tarafından etkilenmektedir. Katılaşma aralığı önemli bir faktördür ve yarı-katı metal işleme için alaşım geliştirme esnasında optimize edilmelidir. Katılaşma aralığı çok geniş olmamalıdır, çünkü bu durum sıcak yırtılmaya karşı zayıf direnç ve sıvı alaşımın zayıf akışkanlığına yol açabilmektedir. Diğer taraftan çok dar bir katılaşma aralığı yarı-katı kütüklerin sıcaklık kontrolünü zorlaştırmaktadır [5].

2.1.2. Sıvı Kısım Sıcaklık Hassasiyeti

Belirli bir alaşım kompozisyonu için yarı-katı bir metalin hacmindeki sıvı kısım, genellikle yarı-katı metal işleme sıcaklığı yoluyla belirlenmektedir. Sıcaklık hassasiyeti, sıvı kısım (%)-sıcaklık eğrisinin eğimi yoluyla tanımlanabilir. Yarı-katı metal işleme için tasarlanan alaşımlar sıvı kısımda küçük bir sıcaklık hassasiyetine sahip olmalıdır [8].

Tipik bir sıvı kısım (%)-sıcaklık eğrisi Şekil 2.3.'de gösterilmektedir. Sıvı kısım-sıcaklık eğrisindeki en yüksek dirsek %30 ve 50 arasında oluşmalıdır (Şekil 2.3.'de görüldüğü gibi); bu erimeye başlayan α -katı çözünen sıcaklığıdır. Eğer sıvı %30-50 arasında oluşursa, sıvı oluşumu kontrol edilebilme eğiliminde olmaktadır, çünkü dirsek üstünde sıvı oluşum hızı yavaş olma eğilimindedir [8].



Şekil 2.3. Tipik bir sıvı kısım (%)-sıcaklık eğrisi [8]

Sıvı kısım hassasiyeti mümkün olduğunca küçük olmalıdır. Büyük olduğunda, sıcaklığın küçük oranda değişmesi sıvı oranının önemli ölçüde değişimi ile sonuçlanmaktadır. Bu malzemenin reolojik davranışında önceden bilinmeyen değişimlere yol açacaktır ve aynı şekilde final üründe kusurlara ve düşük özelliklere neden olacaktır. Prosesin kontrolü ve emniyeti sıvı kısım hassasiyetinin küçük değerini gerektirir. Gelişmiş ısıtma sistemleri çalışma sıcaklığını $\pm$ %0.5 tolerans ile kontrol ederken, birçok endüstriyel ısıtma sistemi $\pm$ %1-3 civarında bir hassasiyet vermektedir. Sıcaklıktaki bu değişimler katı kısımda ciddi varyasyonlara yol açabilmektedir. Küçük sıcaklık gradyanları malzeme özelliklerinde önemli değişikliklere neden olabilmekte ve prosesin güvenilirliğine zarar vermektedir [3].

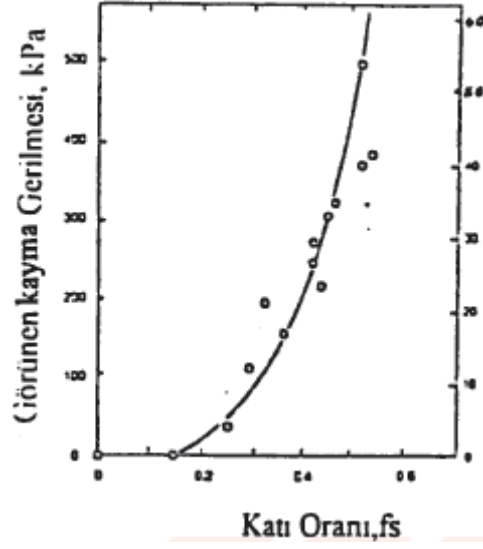
2.1.3. Katı Fazın Morfolojisi

Yarı-katı alaşımların reolojik özellikleri temelde katı fazın morfolojisi tarafından etkilenmektedir. Yarı-katı metal işleme için ideal bir bulamaç iyi akışkanlığa sahip bir sıvı matrikste uniform olarak dağılmış ince ve küresel katı tanelerin bulunduğu kontrollü bir hacme sahiptir. Bu gibi yarı-katı metal bulamaç katılaşmadan sonra düzgün bir kalıp dolumu ve ince ve uniform mikroyapı sağlayabilmektedir. İnce ve küresel taneler alaşım kompozisyonuna bağlı olarak yarı-katı metal işleme esnasında kolaylıkla şekil alabilmektedir. Bu yüzden, alaşım tasarımı esnasında kompozisyon seçimi ideal bir yarı-katı metal bulamacının yaradılışını kolaylaştırmaktadır [5].

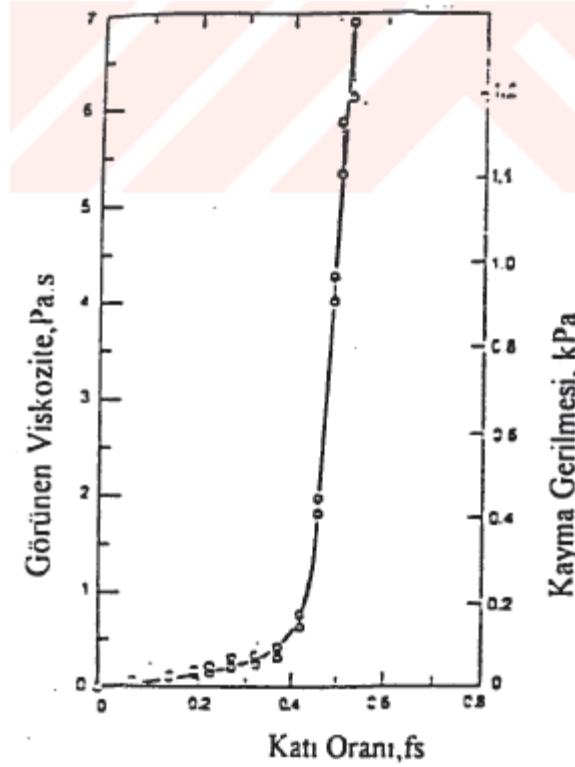
2.1.4. Yarı-Katı Durumda Reolojik Özellikler

Diğer geleneksel döküm teknikleri ile karşılaştırılan yarı-katı metal işleme tekniğinin avantajları, yarı-katı bulamacın karakteristik reolojik özellikleridir. Proses şartları, morfoloji ve boyut, katı fazın sıvı matriksteki dağılımı gibi parametreler bulamacın viskozitesinde büyük bir etkiye sahiptir. Viskozitedeki değişim ise diğer yandan, döküm kabiliyetini etkileyecektir. Ek olarak, tanelerin bir araya gelmesinin engellenmesi yarı-katı metal işlemeyi kolaylaştıracaktır ve bu durum alaşım elementlerinin ilavesi sayesinde gerçekleştirilebilir [5].

1971 yılında Spencer, Sn-%15 Pb alaşımına likidüs sıcaklığının üzerinde bir kayma gerilmesi uygulamış ve kayma devam ederken katılaşma aralığında alaşımın yavaşça soğumasını sağlamıştır [1]. Spencer, kayma gerilmesinin likidüs sıcaklığının altında, sıcaklık azaldıkça çok yavaş arttığını görmüştür. Yaptığı çalışmalar sonucu non-dendritik malzemenin, dendritik malzemeye göre daha düşük bir kayma gerilmesine sahip olduğunu gözlemiştir. Dendritik malzeme, $f_s = 0.4$ 'ün biraz üzerinde maksimum 200 kPa kayma gerilmesi gösterirken, yine aynı katı oranında non-dendritik malzeme maksimum 0.2 kPa kayma gerilmesi göstermiştir. Şekil 2.4 ve 2.5'de bu durum açıkça görülmektedir. Ayrıca Şekil 2.5'deki diyagramdan non-dendritik malzemenin viskozitesinin son derece düşük olduğu da görülmektedir. Burada katı oranı (f_s) gerçek sıcaklık ölçümleriyle ve Scheil eşitliğinden hesaplanmıştır [1].



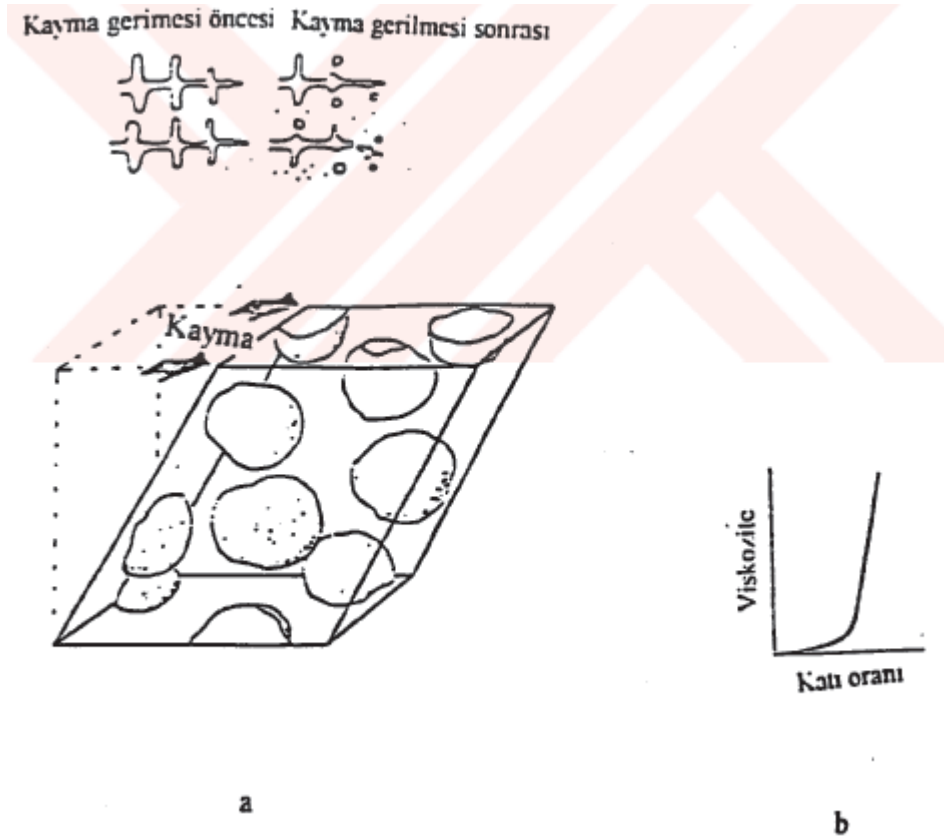
Şekil 2.4. Yarı-katı dendritik Sn-%15 Pb alaışımının izotermal kayma gerilmesi [1]



Şekil 2.5. Sn-%15 Pb non-dendritik alaşım için deneysel olarak elde edilmiş viskozite-kayma gerilmesi-katı oranı ilişkisi [1]

Şekil 2.6' da, Spencer'in yaptığı bu çalışmada, uygulanan kayma gerilmesine göre malzemenin yapı ve akış davranışı şematik olarak gösterilmektedir. Şekil 2.6.(a)'da, katılaşma sırasında yarı katı alaışımın karıştırılması, dendritlerin kırılmasını ve küresel yapının oluşumunu sağlamaktadır.

Şekil 2.6.(b)'de, malzemede katı oranı arttığında, viskozitenin de arttığı görülmektedir. Yalnız bu şekilde dikkat edilmesi gereken husus, belli bir katı oranında viskozitede ani bir artışın olmasıdır. Yarı katı şekil verme proseslerinde, viskozitenin düşük olması istenir. Bu yüzden kritik katı oranının iyi belirlenmesi gerekir.

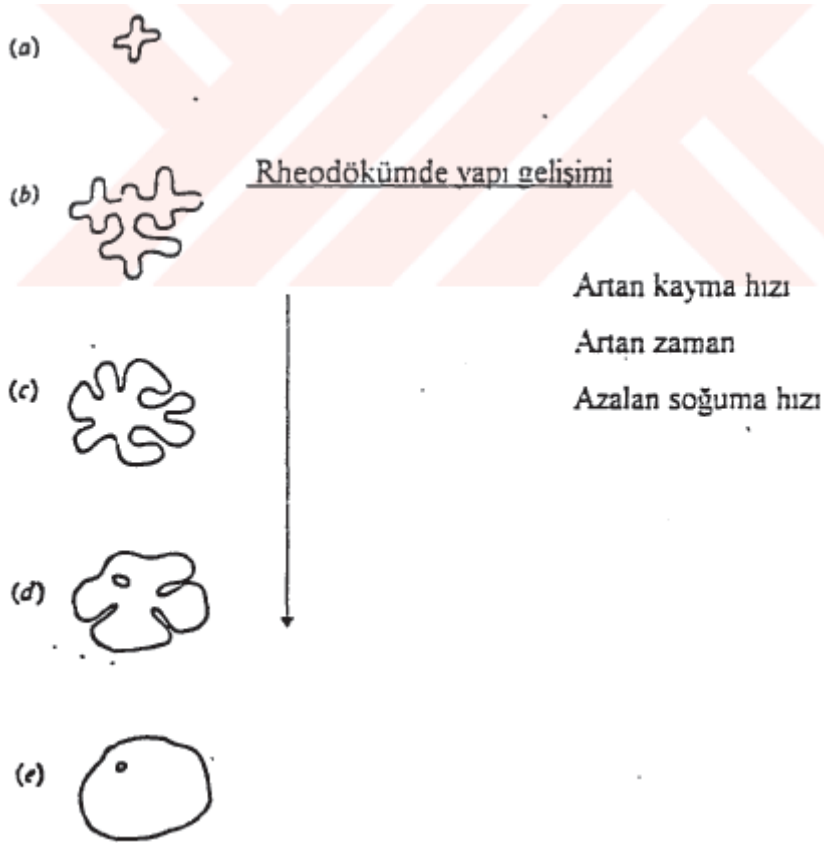


Şekil 2.6. Yarı-katı halde şekil vermenin oluşumu (a) kayma ile dendritlerin kırılması, (b) viskozite-katı oranı ilişkisi [1]

Spencer'dan bugüne kadar yarı katı halde şekil verme konusu üzerinde birçok çalışmalar yapılmış, fakat malzemenin reolojisi hakkında kantitatif olarak bir bilgi elde edilememiştir. Spencer da malzemenin reolojik davranışını tamamen gözlediği sonuçlarla tanımlamıştır. Dolayısıyla bunun tamamen doğru ve kalitatif olduğu söylenemez [1].

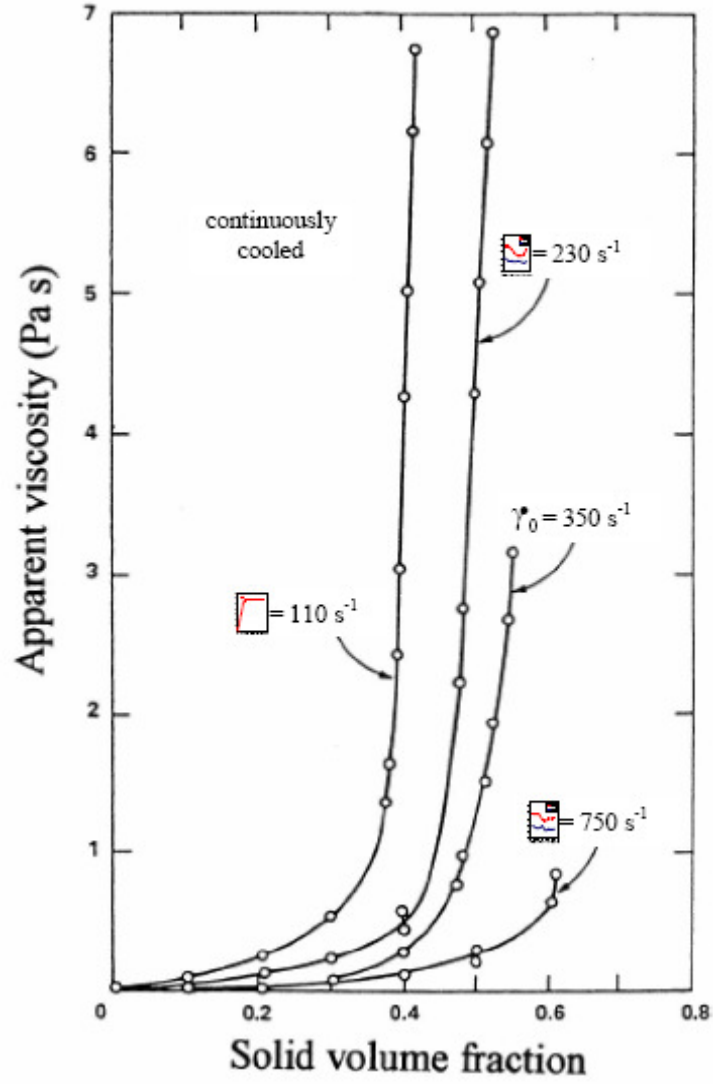
Şekil 2.7' de, yarı-katı haldeki malzemenin katılaşması sırasında tane morfolojisindeki değişim görülmektedir. Şekil 2.7.(a), ilk dendrit oluşumunu, 2.7.(b), her bir dendritin büyümesini, 2.7.(c), katılaşma sırasında kaymanın devam etmesiyle ve zamanla dendrit morfolojisinin rozet şeklini aldığını göstermektedir. Şekil 2.7.(d), kayma ve kabalaşmanın

sonucunda rozet şeklindeki tanenin diğer taneleri aşındırdığı görülür. Kabalaşma, soğuma hızı azaldıkça artar. Şekil 2.7’de görüldüğü gibi, yeterli derecede düşük soğuma hızı ve yüksek kayma hızı ile partiküller küresel olur ve az miktarda sıvıyı içine hapseder. Şekil 2.7.(a)’dan 2.7.(e)’ye doğru gidildikçe kayma hızı ve zaman artarken, soğuma hızı azalır. Tane boyutu, kayma hızından daha çok soğuma hızına bağlıdır.



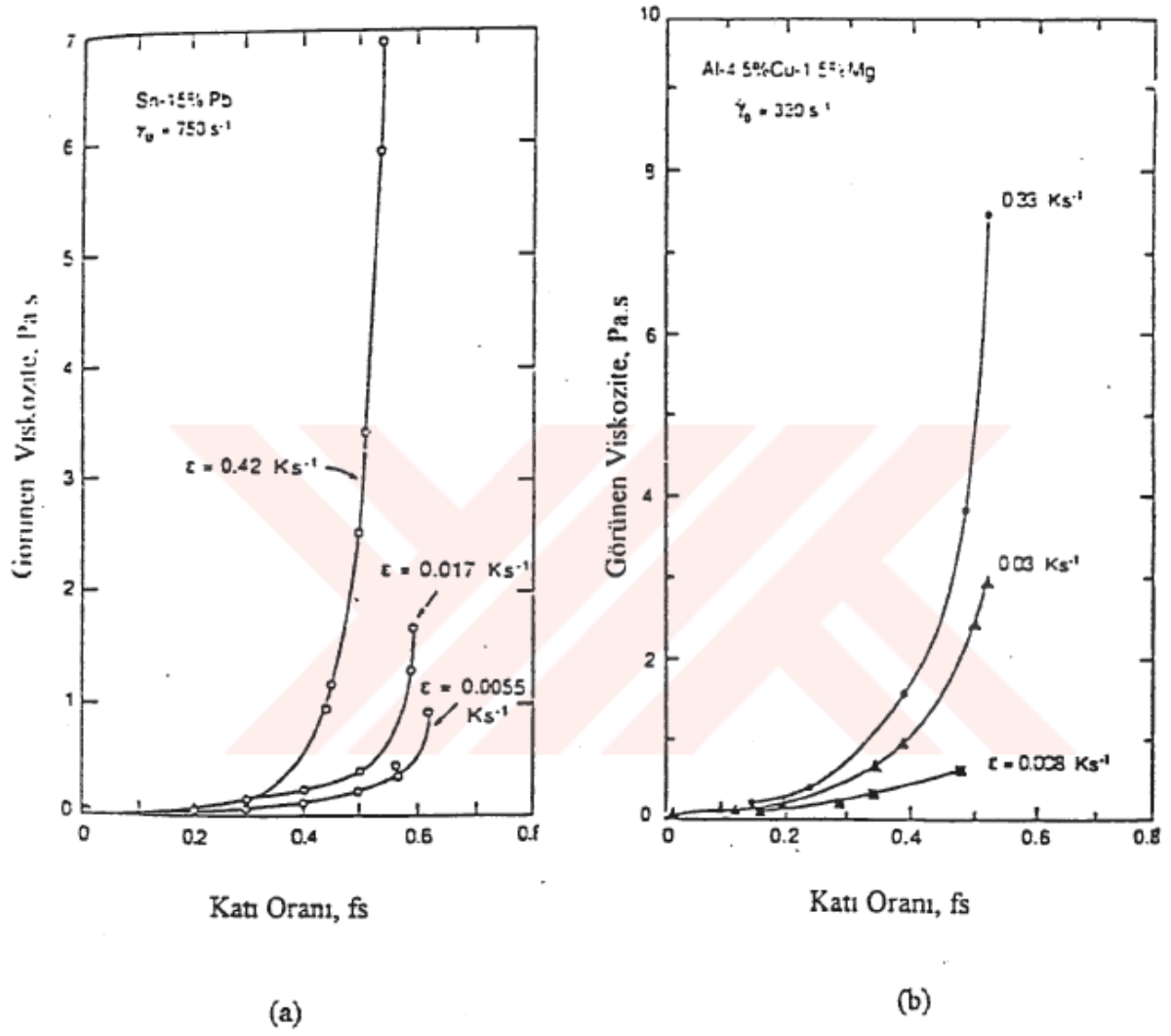
Şekil 2.7. Yarı-katı haldeki malzemenin katılaşması sırasında tane morfolojisindeki değişim, (a) ilk dendrit oluşumu, (b) dendritik büyüme, (c) rozet, (d) kabalaşmış rozet, (e) küreselleşme [1]

Şekil 2.8.’de yarı-katı alaşımların, görünen viskozitesine kayma hızının etkisi gösterilmektedir. Bu şekilden de görüleceği gibi artan kayma hızıyla viskozite azalmaktadır. Ancak belli bir kayma hızında malzemenin viskozitesi yine onun katı oranına bağlıdır.



Şekil 2.8. Yarı katı alaşımların viskozitesi üzerine kayma hızının etkisi [8]

Viskozite, ayrıca soğuma hızına da bağlıdır. Şekil 2.9.'da yarı-katı alaşımların, viskozitesi üzerine soğuma hızının etkisi gösterilmektedir. Buradan, malzemenin soğuma hızı arttıkça viskozitesinin de arttığı kolayca anlaşılmaktadır.



Şekil 2.9. Yarı-katı alaşımların görünen viskozitesi üzerine soğuma hızının etkisi [1]

Reolojide, yarı-katı malzemeler psedoplastik olarak tanımlanır. Psedoplastik malzemelerin viskozitesini tanımlamak için, amprik eşitliklerde en az dört parametrenin bilinmesi istenir.

Geniş çapta kullanılan ve çok iyi bilinen eşitlik üstel (powerlaw) eşitliğidir.

$$\eta = K \cdot \dot{\gamma}^{n-1}$$

Burada;

η : Viskozite

K : Sabit

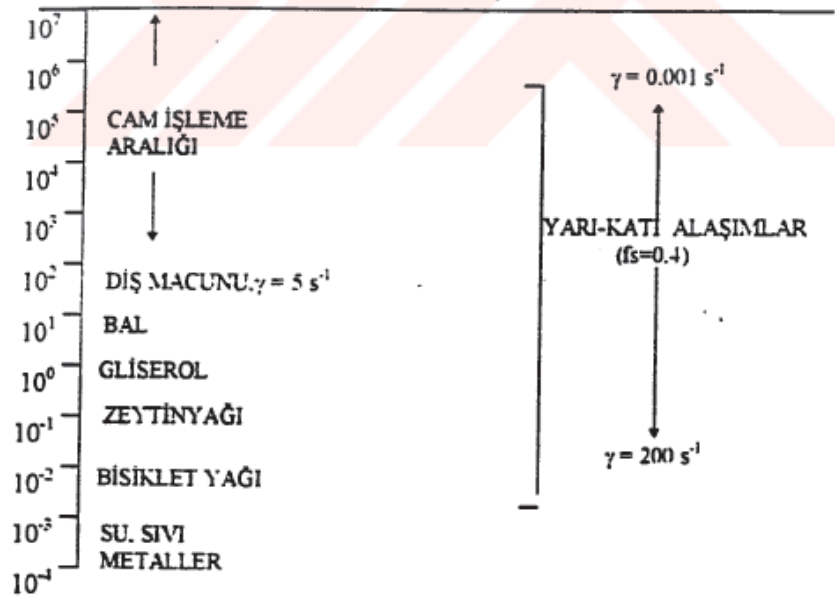
$\dot{\gamma}$: Kayma hızı

n : üstel katsayısı

Buna göre, n değeri küçüldükçe psedoplastisite artmaktadır. Bu eşitlik, yarı-katı alaşımların viskozitesinde, proses değişkenlerinin etkisini anlamak için kullanılır.

Tablo 2.1. ve Tablo 2.2.'de bazı malzemelerin ve yarı-katı alaşımların viskozite değerleri verilmiştir. Tablo 2.1.'de, non-dendritik malzemenin viskozitesinin bisiklet yağı ve sıvı metalden daha yüksek olduğu, buna karşın bal, gliserol, zeytinyağı ile aynı viskozite değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Tablo 2.2.'de yoğurdun aynı viskozite aralığında olduğu görülmektedir. Daha yüksek viskozitelerde, erimiş polimerler ve silikat camları gösterilmiştir. Cilt kremi ve gres yağının viskozitesi ise non-dendritik malzemedan daha fazladır [1].

Tablo 2.1. Bazı tip viskozite değerleri [1]



Tablo 2.2. Bazı metallerdeki viskozite değerleri [1]

Malzeme	Viskozite η ($\gamma = 200 \text{ s}^{-1}$)
Gres yağı	9
Cilt kremi	2
Rheo döküm	0.3
Yoğurt	0.3

2.2. Tiksotropik Bulamaç (Slurry) Hazırlama Metotları

Döküm yapısının kalitesini belirleyen dört temel kriter vardır. Bunlar; segregasyon, porozite, inklüzyon ve tane boyutudur.

Tane küçültme işlemleriyle makrosegregasyon önlenilmekte, ayrıca porozite ve inklüzyonların döküm parçalarındaki dağılımları homojen olabilmektedir. Ancak bu işlemlerde dışarıdan tane küçültücü ilavelere ihtiyaç duyulmaktadır.

Döküm yapısının kalitesini belirleyen diğer bir faktör olan inklüzyonlar ise, iç ve dış kaynaklı olmak üzere ikiye ayrılırlar. Dış kaynaklı inklüzyonlar, pota astarından cüruftan veya yolluk ve kalıptan metale geçen metalik olmayan parçacıklardır. Bunlar, daha kaliteli astar malzemesi ve refrakter kullanımı, uygun yolluk ve besleyici dizaynı, cürufun uygun şekilde alınması, yolluğa konulan filtrelerle, özel ergitme ve döküm yöntemleriyle önlenabilir. Buna karşılık iç kaynaklı inklüzyonlar, alaşımların katılaşması sırasında çözelti elementlerinin mikrosegregasyonuna bağlı olarak oluşan reaksiyonlar sonucu meydana gelirler.

Alaşımların katılaşma sırasında çözelti elementleri ve ergitme sırasında sıvı metal içinde çözünen gazlar, döküm yapısında mikrosegregasyon ve porozite oluşumuna neden olurlar. Sıvı metaldeki gaz çözünürlüğünün azaltılması ile porozite miktarının düşürülmesi mümkündür. Sıvı metaldeki gaz çözünürlüğünün azaltılması, ergitmenin vakum veya inert gaz atmosferi altında yapılmasıyla sağlanabilir. Döküm sonrası porozitenin giderilmesi ise, döküm parçasının yüksek sıcaklıkta basınca maruz bırakılmasıyla mümkündür.

Katılaşma sonucu oluşan dendritik ve hücresel yapıdaki mikrosegregasyon, ancak döküm sonrası yüksek sıcaklıkta uzun süre homojenleştirme ısıl işlemiyle giderilebilmektedir.

Yukarıdaki açıklamalardan da anlaşılacağı gibi döküm yapısının kalitesini belirleyen faktörler ve sıcak yırtılmada olduğu gibi bazı döküm hatalarının temelinde segregasyon olayı yatmaktadır.

Bu segregasyonu kullanarak, 1970’li yıllarda MIT’de (Massachusetts Institute of Technology) yapılan ve yaklaşık olarak %60 katı faz içeren non-dendritik katı-sıvı karışımının, katılara göre, daha yüksek bir akışkanlığa sahip olduğu anlaşılmıştır. Bu

bilgilerin ışığında bir seri yeni üretim yöntemleri geliştirilmiştir. Bu yöntemler; Reo-döküm (Rheocasting), Tikso-döküm (Thixocasting), Karıştırma döküm (Stircasting), Gir-döküm (Gircasting), Tikso-şekil verme (Thixoforging), Yarı-katı halde şekil verme (Semi-solid forging) gibi adlar altında toplanmıştır [5].

1970'lerden önce, Spencer ve çalışma arkadaşları bir kurşun-kalay alaşımında katılaşma aralığının geniş olması sayesinde sıcak yırtılma çalışması gerçekleştirmişlerdir. Sürekli kesme altında beklenenden çok daha düşük dirence sahip yarı-katı malzeme keşfetmişlerdir. Daha önemlisi, katılaşmış malzemenin mikroyapısı normal dendritik yapıdan tamamen farklı olmasıdır. Geleneksel döküm proseslerinde yüksek oranda iğneye benzer dendritik yapılar elde edilir, oysa katılaşma, düşük sıcaklıkta eriyen ötektik faz tarafından çevrelenen daha üniform birincil α -kürecikleri üretmektedir. Küresel mikroyapı, kısmen yeniden ergime olduğu zaman, yüksek orandaki katı kısımda bile akış için düşük direnç sunmaktadır [12].

Katı iskeletin yapısı, tane gelişimi ve küreselleşme derecesi yarı-katı şekillendirme esnasında alaşımın reolojik davranışını önemli ölçüde etkilemektedir [10].

Bulamaç hazırlamanın ilk hedefi, daha sonra yapılan komponente şekil verme prosesini kolaylaştırmak için uygun reolojik özellikleri sağlayan bir yapı yaratmaktır. Teknik olarak, bu yapı bir takım farklı teknikler yoluyla elde edilebilir. İlk grup, sıvı alaşımın mekanik ya da manyetik hareket yoluyla karıştırılmasıdır ve ikincisi, plastik deformasyonu takip eden bir statik yeniden kristalleşme ısı işlemi içermektedir. Diğer metotlar geliştirilmektedir ve özellikle aralarında umut verici olarak görülen düşük sıcaklıkta döküm tekniğidir [11].

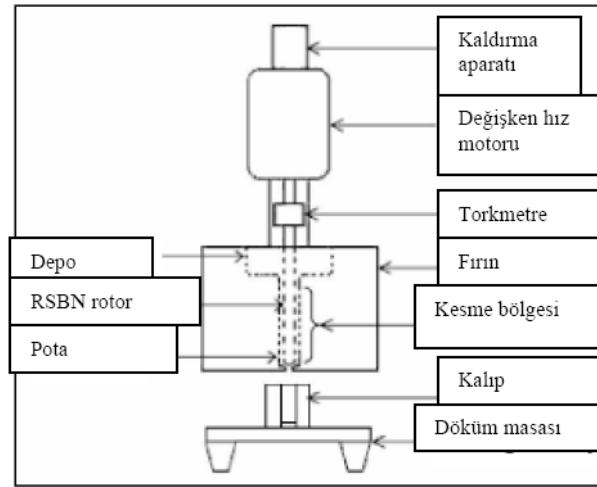
Farklı aşamalardan oluşan, araştırma ve geliştirme içeren birçok tiksotropik hammadde üretim tekniği bulunmaktadır.

2.2.1. Karıştırma

Yarı-katı metal proses gelişiminin ilk yılları esnasında, mekanik karıştırma dendritleri parçalamak ve tiksotropik metal yapısı üretmek için çeşitli yollardan biriydi. Hızlı ısı uzaklaştırması ve güçlü ergiyik çalkalaması sayesinde dendrit kollarının kırılmasını sağlayan

bu yöntem, karıştırıcının farklı boyut ve geometrilerinden ve farklı karıştırma hızlarından önemli oranda etkilenmektedir. Çeşitli araştırmacılar bu süreçte “stircast” yapısının gelişiminden bahsetmişlerdir. Şekil 2.10.’da karıştırma döküm cihazının şematik resmi gösterilmektedir. Yarı-katı alaşım oluklu bir rotor ve bir pota arasında ısıtılmış boru şeklinde bir bölgede kesilmektedir. Bu metotlar istenen metal yapısını etkin bir biçimde üretmelerine rağmen, karıştırıcıların aşınması prosesin dezavantajı olmaktadır. Karıştırıcıların aşınmasını azaltmak ve impüritesiz döküm sağlamak için pasif çalkalama teknikleri geliştirilmiştir [13].

Tiksodöküm uygulamalarında üretilen hammadde için oldukça etkileyici ilk pasif karıştırma metodu Dantzing ve çalışma arkadaşları tarafından geliştirilen Manyetohidrodinamik (MHD) döküm prosesidir [14]. Bu yaklaşımda, katılaştan ergiyik mekanik karıştırıcılar yoluyla çalkalanmaz fakat dalgalı elektromanyetik alanlar yoluyla yapılır. Bu ve diğer non-dendritik alaşım üretme metotlarına karşın, mekanik karıştırma prosesi ve bunun varyasyonlarının ticari önemi yüksektir.

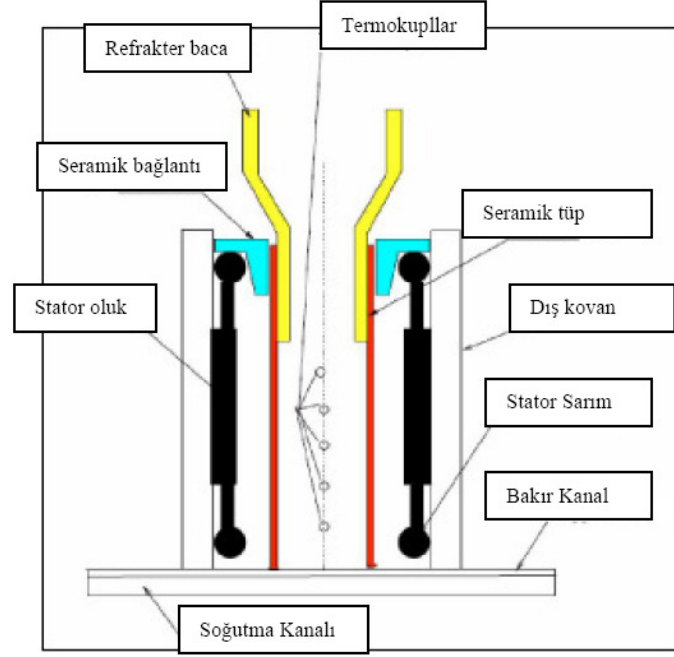


Şekil 2.10. Karıştırma döküm cihazı

Pratik bir görüş açısından katılaşmanın ilk evreleri esnasında mekanik ya da elektromanyetik karıştırma yoluyla ısı yayımı ince eşeksenli tanelerin oluşumuna yardımcı bulunmaktadır [1].

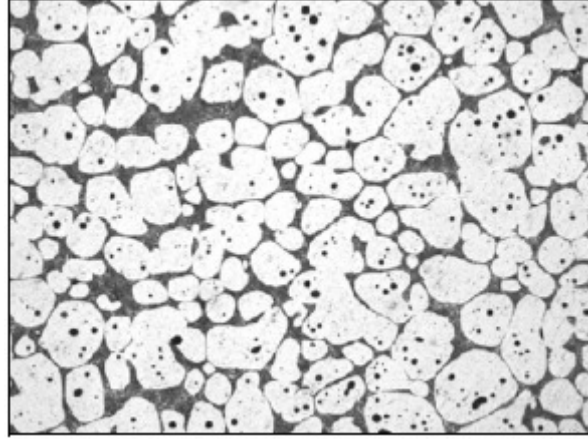
MHD döküm prosesi bilinen sürekli döküm teknolojisine entegre edilebilmektedir, fakat var olan malzemelerin uygun ekipmanları için fazladan yatırıma gereksinim olmaktadır.

Şekil 2.11.'de dönen bir manyetik alan yoluyla karıştırılan, laboratuvar ölçeklerindeki sistem gösterilmektedir. İndüksiyon bobinleri bir pota etrafında yer almaktadır. Ergiyik elektromanyetik kuvvetlere maruz kalırken, pota alaşımındaki soğumayı sağlayan bir soğutma sistemi ile donatılmıştır. Alaşım oda sıcaklığına soğutulduğunda, eşeksenli, non-dendritiktir [12]. MHD karıştırma prosesi önemli ölçüde iyi çalışmakta ve bugün ticari anlamda geniş ölçüde kullanılmaktadır.



Şekil 2.11. Katılaşma esnasında manyetik karıştırma üretmek için deneysel sistem [12]

Şekil 2.12. MHD proses ile elde edilen tipik bir yarı-katı mikroyapısını sunmaktadır. MHD dökümün sonuç mikroyapısı “rozet” olarak adlandırılan olgunlaşmış eşeksenli dendritlerden oluşmaktadır. Bu mikroyapı bozulan dendritlerin bir sonucudur. Sıvı metal akışı, hem elektromanyetik alan hem de soğutma sistemi yoluyla soğumaya maruz kalmaktadır. Ergiyik metal soğutma bölgesine girdiği zaman, sıcaklık likidüs sıcaklığının altına düşer ve katı, kalıp duvarlarında şekil alan dendritlere karşı çekirdeklenmeye başlar. Bu dendritler kalıptan bağımsızdır, sıvı metal kalıp içine akar ve büyümeye maruz kalır ve rozet yapıya gelişerek küreselleşir. Aynı zamanda, dendritler diğer serbest dolaşan rozetlere çarpar ve bir araya gelir, eğer dendritlerin yönlenmesi uygun değilse yığılma oluşur [15].



Şekil 2.12. MHD proses kullanılarak tipik yarı-katı mikroyapı oluşumu

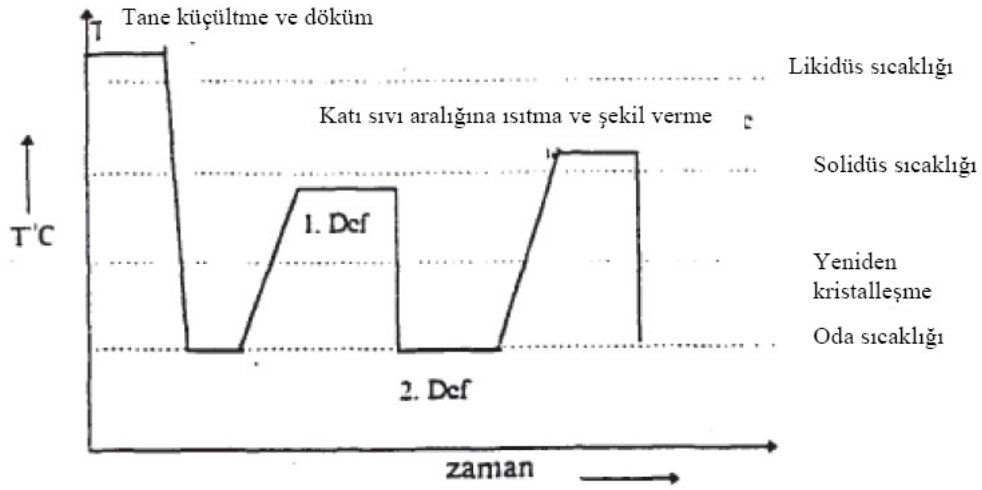
Tikotropik hammadde üretimi için bu teknolojinin genel kabulde esas engeli, yüksek üretim maliyetleri içermesi, döküm kütüğünün enine kesitinde uniform olmayan mikroyapı ve küresel olmayan (non-dendritik olmasına karşın) tane morfolojisidir [17]. Mikroyapısal eksiklik, uzatılmış yeniden ısıtma zamanına ve thixo şekillendirme esnasında zorluklara, sonuç olarak üretim maliyetlerinin daha fazla artmasına neden olacaktır [12].

2.2.2. SIMA (Strain Induced Melt Activation) Prosesi

Halen, elektromanyetik karıştırma (MHD) tikso şekillendirme için en yaygın ticari üretim yöntemi olarak görülmektedir. Ancak, MHD yöntemi ile üretilen kütükler sıvı fazın eşit olmayan bir dağılıma yol açtığı heterojen kompozisyon gösterme eğilimindedirler, bundan dolayı heterojen bir akış meydana gelmektedir. Bu üretim tekniklerine alternatif, yarı-katı sıcaklık alanına ısıtmadan önce plastik deformasyon içeren bir yöntem olan SIMA prosesi olabilir. Isıtma esnasında yeniden kristalleşme meydana gelir, sıvı faz tane sınırlarının arasından geçerek tane sınırlarını ıslatır, eş eksenli tanelerin oluşumuna neden olur. SIMA prosesi yoluyla elde edilen kütükler MHD yöntemden elde edilenlerle kıyaslandığında sıvı miktarında bir azalma gösterdiği ve daha çok küresel tane oluştuğu görülmektedir. Böylece daha iyi tikso şekillendirme kabiliyeti elde edilmektedir [18]. Ek olarak, SIMA prosesi ile elde edilen yarı-katı kütükler parçalanarak dendritik yapıya sahiptir ve mekanik bir karıştırmaya gereksinim duyulmadığı gibi basit bir prosestir [19].

SIMA prosesi dört farklı aşamada meydana gelir. İlk olarak, alaşım tipik bir dendritik yapı içeren uygun boyutlarda döküm numunesi elde edilir. Daha sonra, yeniden kristalleşme sıcaklığının üstünde veya altında yüksek oranlarda deformasyona tabi tutularak dendritik

yapıdan ince uzun taneli yapıya dönüştürülür. Üçüncü aşama, küresel mikroyapı elde etmek için solidüs-likidüs sıcaklıkları arasına ısıtılır ve son olarak yarı-katı hale gelmiş parça şekillendirilir [20]. Alaşım deforme edildiğinde dislokasyon yoğunluğu artar. Final aşamasında sıcaklık artar ve deforme edilen alaşım katı durumda kalırken yeniden kristalleşmeye maruz kalır. Gerilme altında olmayan taneler çekirdeklenir, gerilme altındaki taneler ise büyür. Bu yeni taneler yüksek açılı tane sınırına sahiptir. Katılaşma sıcaklığının üzerinde ısıtma esnasında, yüksek enerjili tane sınırlarına sıvı nüfuz eder ve tanelerin parçalanmasına neden olur. Yarı-katı durumda, bu ısıtma zamanı ve sıcaklığının, tane büyüme miktarını ve küreselleşme derecesini kontrol etmesi beklenmektedir [16].

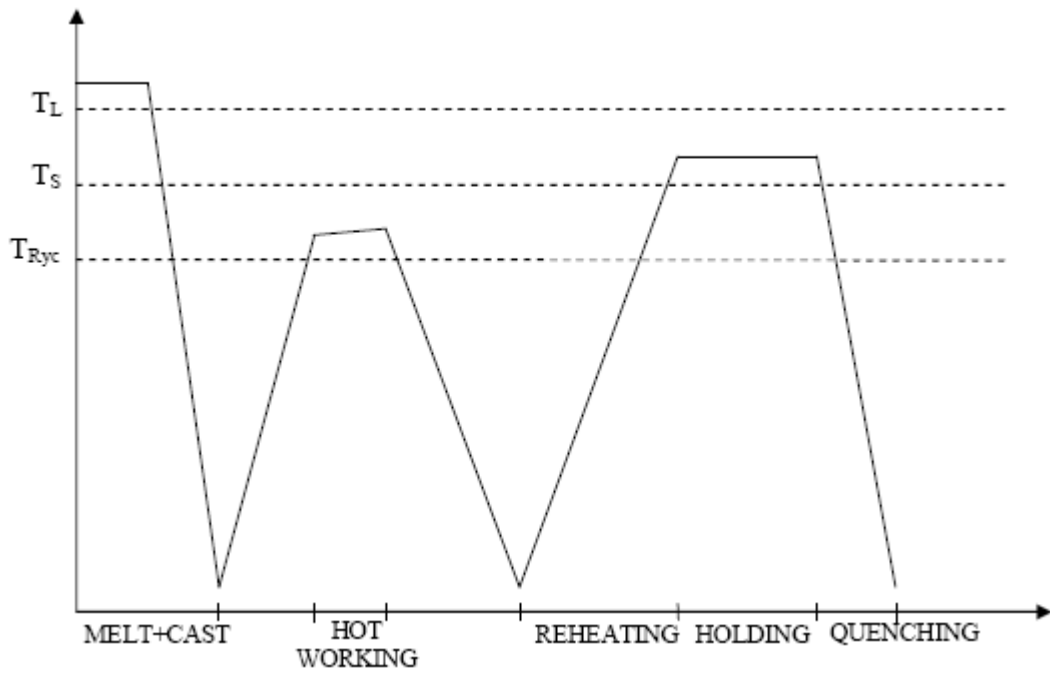


Şekil 2.13. SIMA prosesinin şematik gösterimi [38]

SIMA proste tercih edilen malzeme başlangıçta, dendritik yapıya sahip olan veya olmayan tamamen katı bir haldedir. Malzeme ekstrüzyon, haddeleme, gerilme etkisiyle uzama ya da basma etkisiyle deforme edilmiş olabilir. Deformasyon düşük sıcaklıklarda gerçekleştirilebilir. Fakat, sıcaklık yükseldiğinde yapının yeniden kristalleşmesi meydana gelmektedir. Artan sıcaklıktan sonraki adım alaşımın ergimesine izin vermektedir. Bu ergime yapıdaki, dökümden sonra tane sınırları ve dendrit kolları arasında mikrosegregasyondan dolayı oluşan düşük ergime bölgelerinde başlamaktadır [21].

Günümüzde, dövme alüminyum alaşımlarının tikso şekillendirilmesi ile ilgili çalışmaların çoğu SIMA prosesi yoluyla yapılmaktadır. Bu proses, plastik deformasyon ve yeniden kristalleşme yoluyla meydana gelen yüksek açılı tane sınırlarının yarı-katı

sıcaklıktaki sıvı metal tarafından ısıtılmasıyla ince ve küresel yapı ile sonuçlandığı bilimsel anlayışa dayanmaktadır. SIMA prosesin bir modifikasyonu maksimum gerilme sertleşmesi sağlamak için yeniden kristalleşme sıcaklığının altında bir sıcaklıkta soğuk işlemenin sıcak işlemeye değişimi yoluyla Kirkwood ve çalışma arkadaşları tarafından yapılmıştır. Proses sırası Şekil 2.14.'de ki şematik diyagramda gösterilmektedir. SIMA prosesi ile ilgili bilimsel çalışmalar, çoğunlukla, proses parametrelerinin (plastik deformasyon miktarı, yeniden ısıtma sıcaklığı ve bu sıcaklıkta tutma süresi) etkilerinin kavranmasına yöneliktir..Uygun seçilmiş proses koşulları ile, katı faz taneleri genellikle boyut olarak ince, morfoloji olarak küresel ve dağılım olarak üniformdur [5].



Şekil 2.14. Modifiye edilmiş SIMA yöntemi için şematik proses sırası [5]

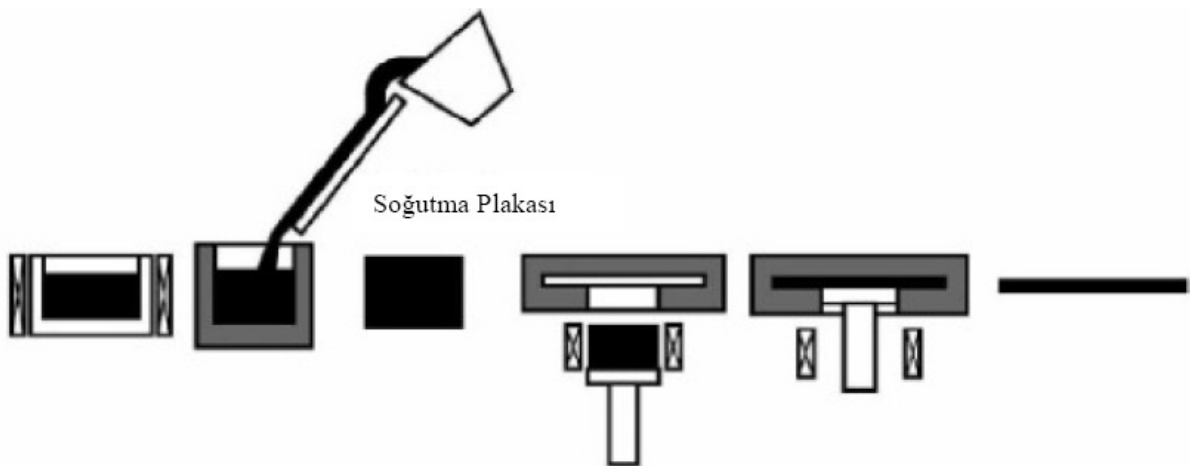
$T > T_{\text{solidüs}}$ 'e kısmi ergime, yapıyı ısıtma yolu ile basitçe tiksotropik yapı üretebilir; ancak yüksek sıcaklıklarda uzun süre tutma, istenmeyen tane/küresel büyüme oranını yükseltebilir [22]. Küreselleşme akış davranışında pozitif bir etkiye sahipken tane büyümesi ve birleşmesi akış davranışında zararlı bir etki yapmaktadır [18].

2.2.3. Eğimli Soğutma Plakasında Döküm

Tikso şekillendirme prosesinin yüksek maliyetlerine neden olan büyük bir faktör tikso şekillendirme için gerekli ingotların üretim maliyetidir. Tikso şekillendirme için ingotlar genellikle elektriksel karıştırmanın (manyetohidrodinamik (MHD) karıştırma yöntemi) bazı biçimleri kullanılarak sürekli dökülür, daha sonra ingotlar uygun boyutlarda kesilir ve tikso şekillendirme için yarı-katı duruma yeniden ısıtılır. Eğer döküm ve kesme adımlarından biri çıkarılırsa tikso şekillendirilmiş ürünlerdeki maliyetlerin büyük bir kısmı ortadan kalkar. Eğimli soğutma plakası ile ilgili ekipman ve işlem maliyetleri oldukça düşüktür [23].

Eğimli soğutma plakası temelde Şekil 2.15.'de gösterildiği gibi su ile soğutulan çok basit bir plaka sisteminden oluşmaktadır. Bu proseste, uygun sıcaklıktaki erimiş metal yumuşak çelikten yapılmış eğimli plaka boyunca akarak kalıp içine dökülmektedir. Eğimli soğutma plakasının yüzeyi katılaştan metalin yüzeye yapışmasını engellemek için çoğunlukla bor nitrür ile kaplanmaktadır. Katı çekirdekler ergiyik ve eğimli plaka arasındaki temasta hızlı ısı transferinden dolayı şekillenmektedir. Bu çekirdekler uygulanan kayma gerilmesi ve metal akışının bir sonucu olarak yüzeyden ayrılır. Sonuç olarak, çekirdekler metal içine dağılmaktadır [24].

Bu yöntemde eğik düzlem boyunca dökülen alaşım, tekrar yarı-katı aralığa ısıtıldığında tikso şekillendirmeler için gerekli olan non-dendritik ve küresel tane yapısına sahip olur [26].



Şekil 2.15. Eğimli soğutma plakası kullanılarak tikso şekillendirme prosesinin şematik gösterimi [23]

Eğimli soğutma plakasından elde edilen döküm alaşımı yarı-katı sıcaklığa ısıtıldığında küresel ya da küremsi mikroyapı elde edilmektedir. Küresel bir mikroyapının gelişiminde ilk temel etki, alaşımın soğutma kanalı üzerinde dökülmesiyle meydana gelen zorlanmış çekirdeklenmedir. Ergiyik sıcaklığı yarı-katı alan içine hızlıca düşmek zorundadır. İkinci temel etki yarı-katı kütüğün proses sıcaklığına yavaşça soğutulmasıdır [25]. Döküm sıcaklığı, eğimli plakanın uzunluğu, kalıp malzemesi, eğimli plakanın malzemesi gibi eğimli soğutma plakasında döküm metodundaki farklı parametrelerde final mikroyapısına etki etmektedir.

3. VİBRASYON ALTINDA EĞİMLİ SOĞUTMA PLAKASINDA DÖKÜM

Soğutma Plakasında döküm yöntemi ekipman ve işlem maliyetleri düşük ve uygulaması nispeten kolay bir yöntemdir. Bu yöntemde eğik düzlem boyunca dökülen alaşım, tekrar yarı-katı aralığa ısıtıldığında tiksö şekillendirmeler için gerekli olan non-dendritik ve küresel tane yapısına sahip olur.

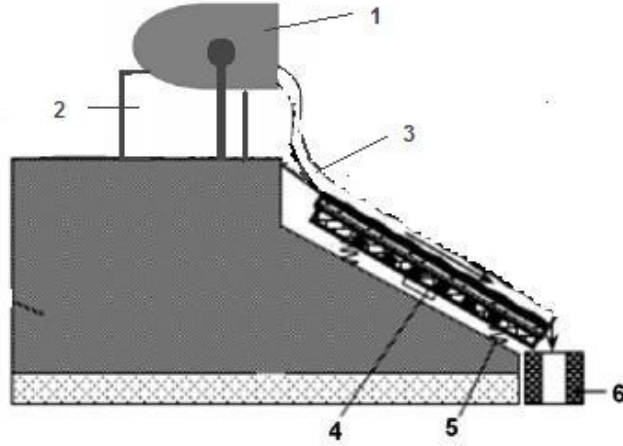
Sabit eğimli soğutma plakası titreşimli olarak modifiye edilebilmektedir.

Sabit eğimli soğutma plakasına nazaran titreşimli eğimli soğutma plakasında döküm prosesi çeşitli avantajlar sunmaktadır. İlk olarak, yüksek kalitede ingot hazırlamak için elverişli ve düşük maliyetlidir. Mevcut proseste hazırlanan ingotların mikroyapıları oldukça incedir. İkinci olarak, sabit plakadan döküm yapıldığında plaka yüzeyine kaplama yapılmasına rağmen yüzeyde bir miktar katılaşma kabuğu oluşabilmektedir ancak titreşim uygulandığında bu kabuktan etkin bir biçimde kaçınmak mümkün olmuştur. Ek olarak, bu proses dinamik katılaşma davranışları gösteren mikroyapı oluşum mekanizmalarını içerir [45].

Eğimli soğutma plakasında döküm sisteminde alaşım öncelikle bir potada eritilir. Bu eritme şekli pota sistem üzerindeyken indüksiyonla olabileceği gibi potanın içindeki alaşım fırında ısıtılıp sisteme yerleştirilebilir. Döküm işlemi potanın bir motor tahriki ile hareketlendirilerek kendi ekseninde dönmesiyle eriyiğın plakaya boşaltılması ile gerçekleştirilir. Erimiş metal bulunan potanın içine eritme ve boşaltma boyunca sıcaklığı görüntülemek için bir thermocouple yerleştirilir. Plaka boyunca akan malzeme kalıp içerisine dolar.

Plaka altsoğutmalı bir sistemdir. Plakanın üst kısmında su girişı, alt kısmında ise su çıkışı bulunmaktadır.

Titreşimli olarak modifiye edilmiş eğimli soğutma plakasına ait şematik çizim Şekil 3.1' de verilmiştir.

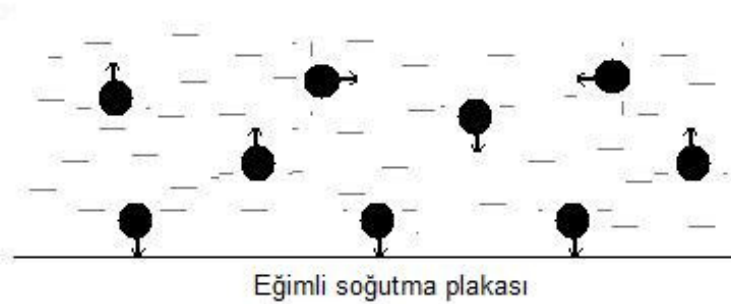


Şekil 3.1. Titreşimli eğimli soğutma plakasında döküm prosesinin şematik çizimi 1- Pota, 2- Motor, 3- Ergiyik akışı, 4- Titreşim sistemi bağlantısı, 5- Mekanik yaylar, 6- Kalıp

Ergiyik haldeki alaşım titreşimli eğimli soğutma plakasında dökülür, ergiyik titreşimli soğutma plakası tarafından hareketlendirilerek soğutulur Ergiyik gittikçe yarı-katı alaşıma dönüşüm göstererek kalıp içine dolar. Aynı zamanda plaka altsoğutmalı olduğundan akış esnasında ergiyik soğumaktadır.

Döküm esnasında, döküm sıcaklığı, eğimli plaka uzunluğu, titreşim genliği ve eğim açısı optimize edilmelidir.

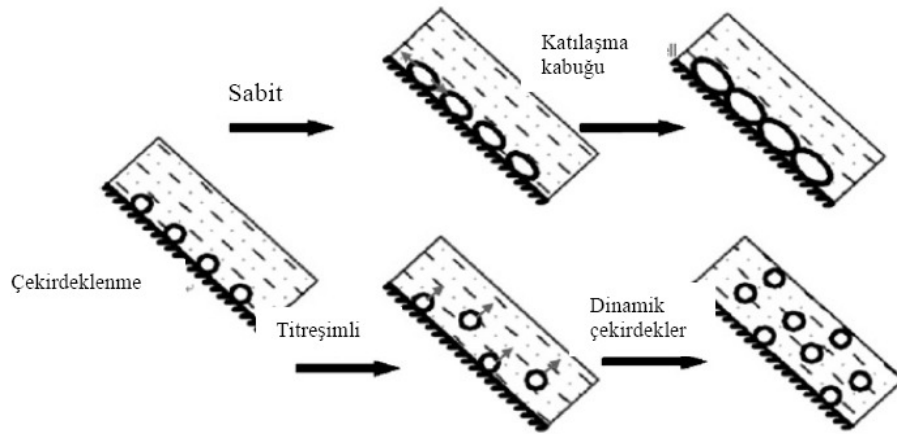
Bu proses titreşim ve akış tarafından güçlü bir şekilde etkilenmektedir. Plakada oluşmaya başlayan çekirdek sabit olmayan ergiyikte kayabilmekte ve dönebilmektedir (Şekil 3.2), yani ısı difüzyon yönü sabit değildir. Bu durum her yön boyunca uniform ısı difüzyonuna yol açacaktır, bu şekilde ısı difüzyon modeli ince ve küresel tane oluşumu için elverişli koşulları sağlamaktadır [44].



Şekil 3.2. Plakadaki çekirdek oluşumunda ısı difüzyon yönünün şematik çizimi

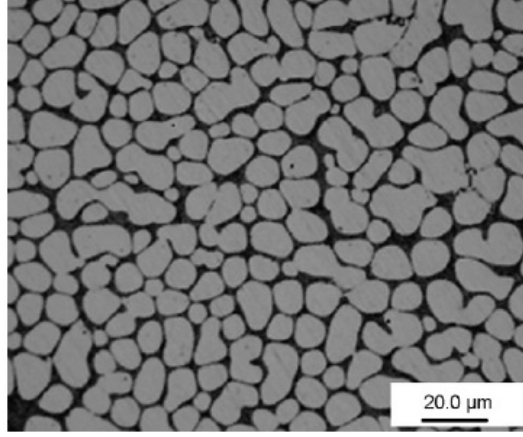
Mikro-ölçekte, plaka yüzeyi düzdür ve ana ısı difüzyon yönü yüzeyin normal hattı boyunca olmalıdır. Plakaya titreşim uygulanmadığında ana dendritik gövdenin plakanın yüzeyine normal hat boyunca uzandığı açıkça görülebilmektedir, yani ısı difüzyon yönünün bu hat boyunca olduğu açıkça anlaşılmaktadır. Ancak titreşim altındaki plakada akış esnasında çekirdek oluşumu her yönde uniform olarak ısı difüzyonu sağlayabilecek ve büyüme esnasında küresel yapıyı stabil tutabilmek mümkün olmaktadır [45].

Eğimli plaka hareketsizse ya da konveksiyon mevcut değilse, heterojen çekirdeklenme plaka yüzeyinde görülecek ve diğer çekirdeklerle temasa geçmesi gecikecek, sonunda, bir katılaşma kabuğu artı kalacaktır. Ancak, eğimli plaka titredığında ve bunun üzerinde metal akışı gerçekleştiğinde, plaka yüzeyindeki çekirdek oluşumunun bir çoğu tüm ergiyikte dağılacak, büyük oranda etkin bir çekirdek miktarı gelişecektir. Bu durum çekirdek çoğalması olarak adlandırılır (Şekil 3.3) [45].



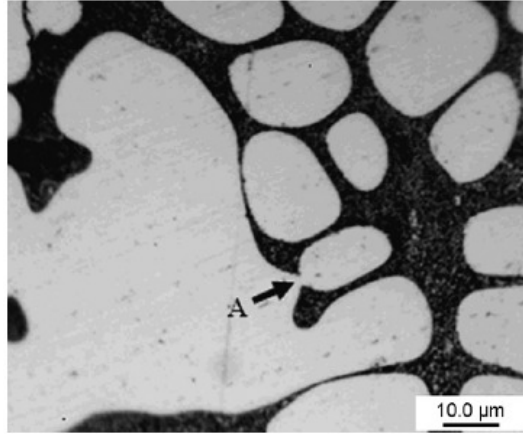
Şekil 3.3. Çekirdek çoğalması [45]

İki tane büyüme yolu bulunmaktadır: direkt küresel büyüme ve dendritik büyüme. Direkt olarak küresel büyümeye neden olan tek şey plakadan kayma sırasında ergiyiğin maruz kaldığı kayma gerilmesi değildir, aynı zamanda çözünen madde ve sıcaklık dağılımları tane büyüme yollarını belirleyen başlıca nedenlerdir. Şekil 3.4'de direkt küresel büyümeye bir örnek verilmiştir [45].

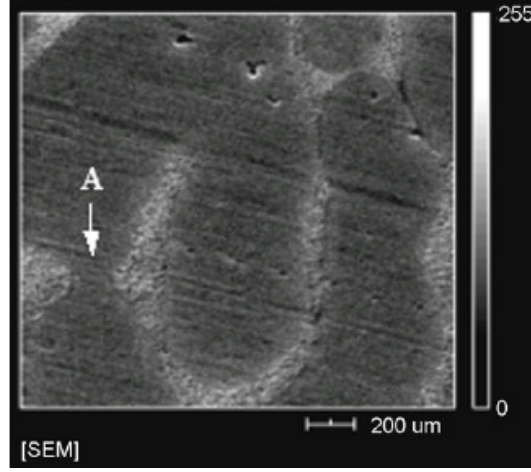


Şekil 3.4. Direkt küresel büyümeye ait mikroyapı

Diğer büyüme stili dendritik büyüme ve daha sonra meydana gelen dendritik kol kırılmasıdır. Bu durum plakadan akış sırasında maruz kaldığı kayma gerilmesinin etkisiyle mikroyapıda oluşan bir durumdur. Isı akışı altında aşağı doğru birleşebilen dendrit kol kökünde düşük erime noktalı çözünen maddeler kolayca bir araya gelebilmektedir. Bu davranış Şekil 3.5 ve 3.6’ da gözlemlenebilmektedir. Titreşim ve metal akışı dendrit kol kırılmasını hızlandırır (Şekil 3.5). Dendritik kol parçaları bir sonraki aşamada yarı-katı halde iken büyüyebilmekte ve küresel taneye gelişebilmektedir [45].



Şekil 3.5. Dendritik kol kökünün kırılması [45]



Şekil 3.6. Dendritik kolun parçalanması: pozisyon A [45]

İki büyüme yolu titreşimli akış esnasında plaka yüzeyinden alınan ergiyiğin mikroyapısı incelendiğinde gözlemlenebilmektedir. Küresel/dendritik yapıdan küresel/eşeksenli yapıya ve küresel yapıya mikroyapı gelişimi tespit edilebilmiştir.

Küresel büyüme ve küresimsi taneler başlangıçtan sona kadar var olmaktadır ve dendritik kol kırılması ve küreselleşme meydana gelmektedir. Titreşim ve metal akışı karıştırmaya neden olmakta, aynı zamanda dendritik kollar arasında ötektik kompozisyonun bir araya gelmesi hızlanmaktadır ve bu durum da dendritik kol parçalanmasına sebep olmaktadır [45].

4. TIKSO ŞEKİLLENDİRME İÇİN YENİDEN ISITMA PROSESİ

Yarı-katı duruma yeniden ısıtma özellikle tikso şekillendirme prosesinde önemli bir aşamadır. Düşük ergime noktalı sıvı bir matrikste tam olarak kontrol edilebilen katı kısımda uniform olarak dağılmış ince ve küresel tanelerin bulunduğu yarı-katı metal elde etmeyi amaçlamaktadır. Bu yarı-katı mikroyapıyı elde etmek için, yeniden ısıtma prosesi esnasında önemli proses parametreleri, ısıtma sıcaklığı ve ısıtma süresinin doğruluğunu ve uniformluğunu kapsar. Isıtma sıcaklığı metaldeki katı kısmın belirlendiği sıcaklıktır. Çok düşük bir ısıtma sıcaklığı ergimemeye, kalıbı doldurma esnasında reolojik özellikler üzerinde ve nihai ürünün sünekliği üzerinde zararlı bir etkiye neden olurken, çok yüksek bir ısıtma sıcaklığı metal işleme için zorluklarla sonuçlanan metalin değişimine neden olur. Sıcaklıktaki küçük bir değişim katı kısımda büyük bir farka neden olabilmektedir. Bu yüzden, sıcaklığın doğruluğu, şekillendirme prosesinin stabilitesini ve ürün kalitesinin tutarlılığını etkilemektedir. Ayrıca, metal boyunca uniform bir sıcaklık dağılımı önemlidir, çünkü sıcaklığın uniform olmayan dağılımı katı kısım ve reolojik özelliklerde dalgalanmaya neden olabilmektedir. Genel yargı, kütükteki maksimum sıcaklık farkı 6°C'den düşük olmalıdır. Son olarak, ısıtma süresi optimize edilmelidir, çok kısa bir ısıtma süresi reolojik özellikleri azaltan ve kalıp doldurma esnasında zorluklara yol açan katı tanelerin henüz tamamlanmamış bir küreselleşmeye neden olurken, çok uzun bir ısıtma süresi yapısal kabalaşmaya neden olacaktır [12].

Doğrudan doğruya rezistansla ısıtma yoluyla ısınan kütük uygulanabilir değildir, rezistansların alt ve üst kısımlarında kalan malzeme ısınmamakta ve bir dövme uygulamasında parça hurdaya ayrılmaktadır [5].

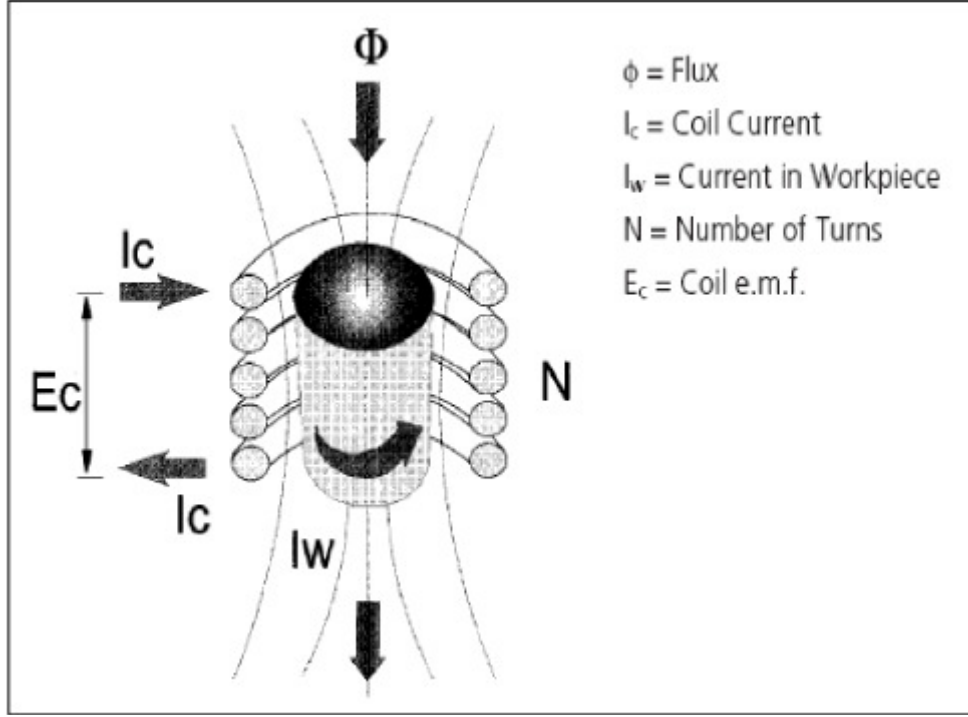
Günümüzde, bir konveksiyon fırını da, bazı durumlarda kullanılmasına karşın, yeniden ısıtma işlemi indüksiyonla ısıtma yoluyla çoğunlukla başarılmaktadır. Çünkü geleneksel fırında ısıtma çok uzun bir ısıtma süresi içerir ve uniform bir sıcaklık dağılımı elde edilememektedir. İndüksiyonla ısıtma yöntemi genellikle yeniden ısıtma prosesinde kullanılmaktadır [27].

İndüksiyonla ısıtma yarı-katı metal işleme için gerekli olan doğru ve hızlı ısıtma avantajlarına sahiptir. İndüksiyonla ısıtma esnasında süre ve sıcaklık arasındaki ilişki, tüm kesit alanı üzerine uniform dağılmış bir sıcaklık elde etmek için tam olarak kontrol edilmelidir [28]. İndüksiyonla ısıtmanın bir başka özelliği onun tekrarlanabilirliğidir. Belirli bir malzeme için, güç girişi ısıtma döngüsü üzerinde tam olarak tekrarlanır. Bu, sıcaklığın ölçümü için zaman ayırır, malzeme ölçülen bir zaman içinde ısınmıştır, yüksek kesinlikte belirli bir sıcaklıkta olduğu varsayılır. Bu, otomatik besleme ve emisyon kullanan sabit üretim oranı bulunan yerlerde faydalıdır. Çünkü, şekillendirme prosesinde kütüğün ilk sıcaklığı yarı-katı şekillendirme prosesi sonucundaki doldurma işlemine anahtar parametredir, bu sıcaklık tam anlamıyla kontrol edilebilir bir indüksiyonla ısıtma prosesi için seçilmelidir. Tikso şekillendirme prosesinde alüminyum alaşımlarının yeniden ısıtılması sırasında, sarımları örülmüş cam elyaf kaplı bobinler, genellikle kütüğü boylu boyunca ısıtma için kullanılmaktadır [2].

Yeniden ısıtmanın kompleks bir proses olduğu açıkça anlaşılmaktadır. Yarı-katı sıcaklık aralığına ısıtılan metal, prosesin kritik bir kısmıdır. Metal, çalışma sıcaklığına mümkün olduğunca hızlı uniform olarak ısıtılmak zorundadır [3]. Modern indüksiyon ısıtma sisteminde başarılı bir dizayn sağlamak için, proses özelliklerinin tam anlamıyla anlaşılması gerekmektedir. Proses parametrelerinin optimizasyonu şekillendirilen parçaların yüksek kalitede olması için kritik bir adımdır.

4.1. İndüksiyonla Isıtmanın Temeli

İndüksiyonla ısıtma (Şekil 4.1.) temaslı bir ısıtma yöntemi değildir, elektriksel olarak iletken malzeme (tipik olarak bir metal) dalgalı bir manyetik alan yoluyla ısıtılmaktadır [5].



Şekil 4.1. Silindirik bir iş parçasının indüksiyonla ısınması[29]

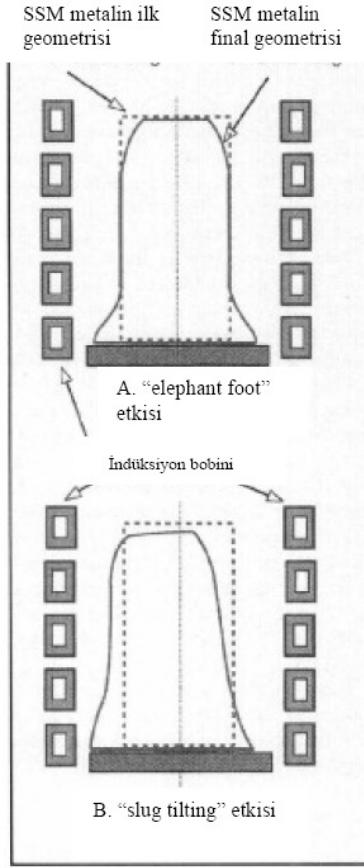
İndüksiyonla ısıtma prensibi Faraday etkisinin bir sonucudur, taşınabilir bir manyetik alandan elektrik akımını ilk üreten fizikçi Michael Faraday'den ismini almıştır. Faraday'ın keşfinin uygulanabilir şekli olan indüksiyonla ısıtma bir devre boyunca AC akımı akışının onun yakınında yer alan ikincil bir devrenin manyetik hareketini etkilediği anlaşılmaktadır [30]. Dalgalı manyetik alan iletken iş parçasında bir akımın akışına sebep olmaktadır. İş bobini ve iş parçasının düzenlemesi elektriksel bir dönüştürücü olarak düşünülebilir. İş bobini elektriksel enerjinin beslendiği birincil yer gibidir ve iş parçası kısa devre olmuş ikincil tek bir sarım gibidir [31].

Diğer bağımsız değişkenler iş parçasının geçirgenliği (malzemenin manyetikliğinin ölçüsü), hava boşluğu (indüktör bobini ve iş parçası arasındaki mesafe) ve frekans indüksiyon prosesini ve onun verimliliğini etkiler [5].

İndüksiyonla ısıtmada ısı, iş parçası içine doğru oluşmaktadır; bu durum radyasyon ya da, fırın veya ocaktaki gibi iletim yoluyla transmisyon ısı enerjisine dayanmaz. Ek olarak, ısıtma belirli bir alana uygulanmaktadır. İndüksiyon prosesleri kesindir, tutarlıdır ve

tekrarlanabilir. Çünkü ısıtma, parçanın kendisinde gerçekleşir, indüksiyonla ısıtma alternatif metotlardan çok daha etkin verimlilikte bir prosestir [32].

Tikso şekillendirme için yeniden ısıtma prosesinde bobin-iş parçası ilişki mesafesini etkileyen iki olgu vardır. Dikey tip bir bobin düzenlemesinde, “elephant foot” olgusu metalin yarı-katı koşulda elde dildiği bir belirtmedir. Bu olgunun bir sonucu olarak, bobin-metal hava boşluğu bobin yüksekliği boyunca aynı olmayacaktır (Şekil 4.2.(a)). Hava boşluğu değişimi bobin ve metalin farklı alanları arasında elektromanyetik ilişkiyi değiştirmektedir. Böylece, güç yoğunluğu dağılımı mükemmel bir silindirik hacim ile karşılaştırılırsa metal yüksekliği boyunca değişecektir. “Elephant foot” olgusuna ek olarak, metalin üst kısmında “slug tilting” etkisi ve “yüzey erozyonu” etkisi daha kompleks bir durum oluşturur (Şekil 4.2.(b)). Eğilmeden dolayı, metalin belirli alanları indüktör ile daha iyi ilişkiye sahiptir. Daha iyi ilişkideki alanlar daha şiddetli eğimle sonuçlanacak ve daha yoğun ısıtmaya maruz kalacaklardır. Bir metalin üst kısmındaki “yüzey erozyonu” ve alt kısımdaki “elephant foot” olgularından dolayı metalin üst, alt ve merkez alanlarında akım yollarının uzunluğu farklı olacaktır. Bu metalin farklı yüzey alanlarındaki akımı farklı dirençler ile sonuçlanacaktır. Bir başka deyişle, elektromanyetik açıdan, metal farklı elektriksel iletkenliğe sahip metallerden yapılmış bir takım diskler gibi görülebilecektir [33].



Şekil 4.2. "Elephant foot" olgusu (a) ve "slug tilting" (b) etkisi [33]

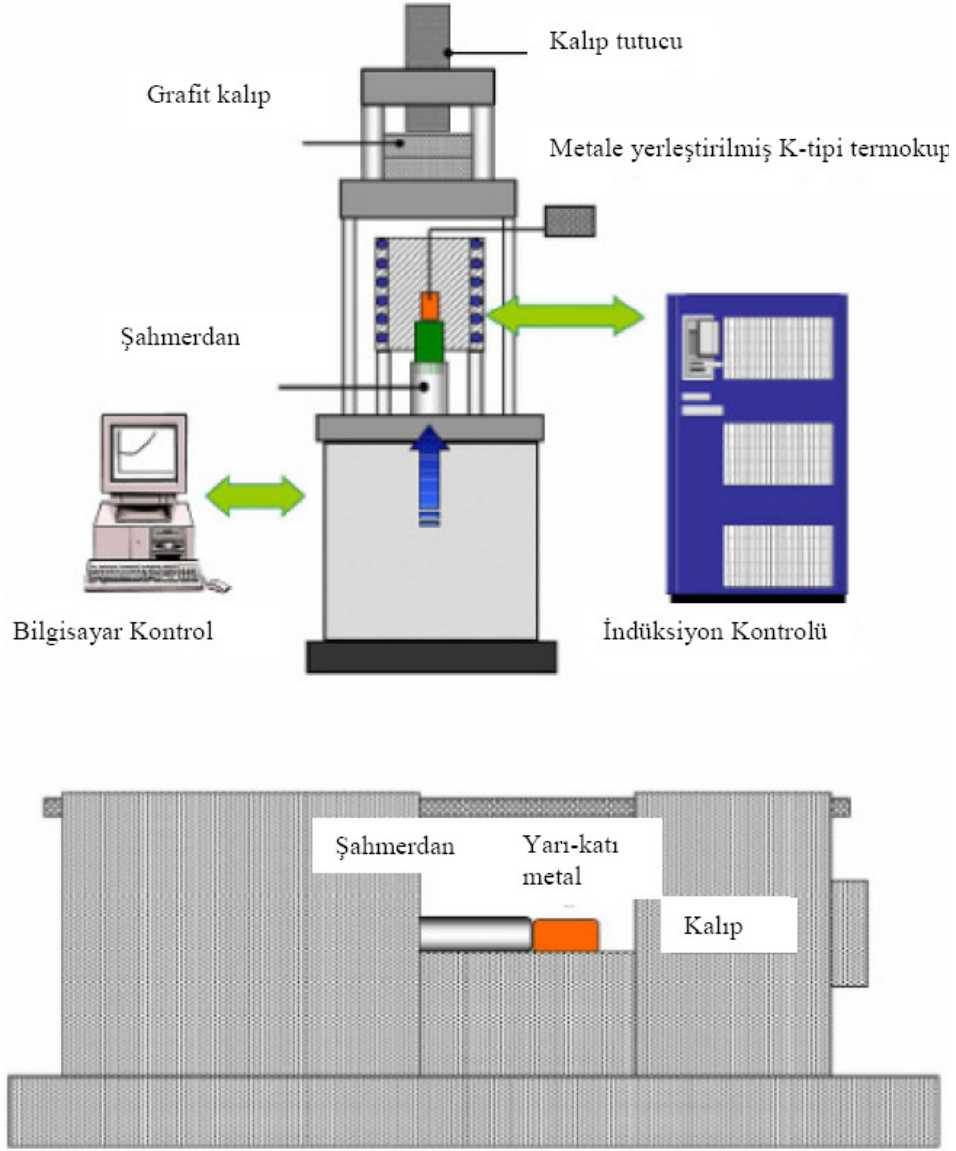
5. TIKSO ŞEKİLLENDİRME

Kısmi ergitilmiş non-dendritik alaşımın metal kalıp içine yaklaşık kesin şekilde basıldığı şekillendirme prosesi tikso döküm, tikso dövme ya da genel olarak tikso şekillendirme olarak adlandırılır. Tikso döküm çoğunlukla bir şahmerdan ya da çekiç yoluyla basınçlı dökümdeki gibi kalıp içine enjekte edilen metalin işlemi olarak adlandırılır ve gerçekte ilk SSM işi basınçlı döküm makinaları ve kalıplarına yapılmıştır. İki açık yarım olarak bulunan kalıp içinde yer alan metalin iki yarım kalıp tarafından birleştirilmesi tikso dövme olarak adlandırılır. Ancak, kalıp içinde yarı-katı alaşımın deformasyonu ve akışı her iki proseste de pür sıvı ve pür katıdan farklıdır ve bu durum tikso şekillendirme olarak adlandırılır, genellikle tercih edilendir [13].

Kalıp içinde şekillendirilmiş uygun non-dendritik yapılu bir metali yani tikso şekillendirmeyi kapsayan iki farklı durum bulunmaktadır. İlki aşırı sıcaklık gradyanından kaçınmak için indüksiyonla ısıtılan uniform ısılı ve kısmi ergimiş alaşımdır. Metal doğru yumuşatılmış şartlarda olduğunda, metalin sıcaklığı bir ısıtma sistemi ile ölçülmektedir. Robot yoluyla kalıp dolum bölmesine transfer edilen metal hidrolik bir piston yoluyla kalıp içine enjekte edilebilmektedir. Alternatif olarak, indüksiyonla ısıtma, pistona bağlı bir taban üzerine oturtulmuş metalde gerçekleştirilebilir ve metal kalıp içine direk olarak enjekte edilebilir. Bu teknikten yarı-katı metal işlemede kaçınılır, çünkü ısıtma ve enjeksiyon bir vakum ya da kontrol edilebilir atmosfer bölümünün içinde gerçekleştirilir, bu durum yüksek sıcaklıklarda kolaylıkla okside olabilen alaşımlar için avantaj sunar [13].

Tikso şekillendirmede, metaldeki malzeme akışı pistonun etkisi ile başlar ve metalin tiksotropik doğası gereği çok düşük basınçta boşluk içine metal akışına izin verir. Sadece şekillendirme stroğunun sonunda basınç, tamamen sıkışmış komponentin şekil alması için seçilmiş seviyeye yükselir. Basınç altındaki süre, alaşıma ve parça geometrisine bağlıdır ve normalde sadece birkaç saniye tutulur çünkü, kalıp içine ısı transferi yüksek basınçta tam anlamıyla etkilidir. Şekillendirme döngüsünün bitiminde kalıplar açılır ve parça çıkarılır [41]. Şekil 5.1. tipik bir tikso şekillendirme düzenlemesini göstermektedir. Metal istenen yarı-katı duruma gelinceye kadar genelde bir indüksiyonlu ısıtıcıda ısıtılır ve sonra bir piston yoluyla kalıp içine basılır. Metaller çoğunlukla ısıtma boyunca dikey olarak yönlendirilirler fakat bazen kaçan sıvıyı yakalamak için metalin bir kap içinde yer aldığı bazı yatay düzenlemeler

bulunmaktadır. Yatay ısıtma düzenlemeleri 0.6 civarında sıvı kısmı, dikey ısıtma düzenlemeleri ise 0.4 sıvı kısmı işleme eğilimindedir [42].



Şekil 5.1. Üst: Bilgisayar kontrollü hidrolik dikey tikso şekillendirme presi ve Alt: Tipik ticari hidrolik yatay tikso şekillendirme presi [42]

5.1. Yarı-Katı Halde Şekillenebilme

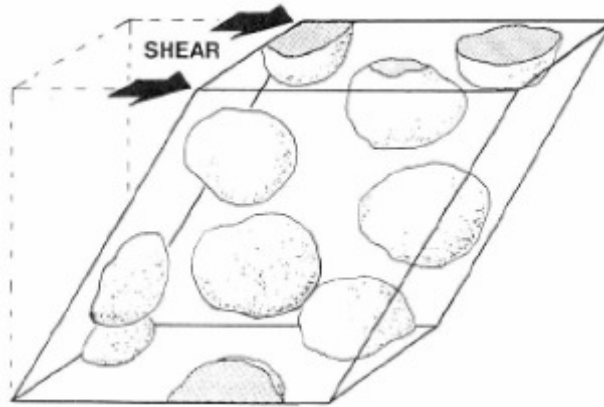
Yarı-katı aralıkta şekillenebilme aşağıdaki parametrelere bağlıdır:

Katı kısmın hacmi: Yarı-katı bir malzemenin davranışı katı kısmın hacminden oldukça etkilenir. Büyük bir katı kısım hacmi viskozitenin artması ile ve deformasyon esnasında önemli iç hasar ile sonuçlanmaktadır, ayrıca kalıp dolumunda zorluklara ve final üründe kusurlara neden olmaktadır. Literatürde spesifik olarak bir sınır getirilmemesine karşın, proses esnasında katı kısım hacminin 0.6 civarında olması genel olarak kabul edilir [3].

Katı tanelerin morfolojisi: MHD malzeme, yarı-katı durumda eş eksenliye yakın rozete benzer katı taneler içerir. Bu durumda, kayma direnci yüksektir ve küreselleşme ve viskoziteyi azaltmak için malzemeyi izotermal tutma gerekmektedir [3].

Sıvı fazın dağılımı: Tane büyüme prosesinin bir sonucu olarak, sıvı kısım bazen katı tanelerin içinde bulunur. Bu durum deforme olan malzemenin kabiliyetini etkiler, çünkü deformasyon için gerekli olan birbirine bağlı etkin sıvı miktarı azalmaktadır [3].

Tikso şekillendirme katı halde şekillendirmenin üstünde bir avantaja sahiptir. Yarı-katı şekillendirme için istenen mikroyapı, mümkün olan küresel bir forma sahip katı ve katı tane içerisinde minimum ölçüde sıvı bulunmasıdır. Elde edilen yarı-katı karışım o zaman homojen olarak akar, Şekil 5.2, katı kısmı, morfolojisi, kayma hızı ve süreye bağlı olan viskoziteye sahip tiksotropik bir akış gibi davranır.



Şekil 5.2. Yarı-katı alaşımın homojen akışının şematik diyagramı

5.2. Yarı-Katı Halde Şekillendirmenin Avantajları ve Dezavantajları

Avantajları [40];

- 1- Yarı katı halde şekil verme için gerekli olan sıcaklık normal döküm sıcaklığından daha azdır. Bu, kalıp ömrünü uzatır ve proses süresini kısaltır.
- 2- Yüksek otomasyon ve üretilebilirlik sağlar.
- 3- Yüksek basınç altında kalıbın dolması, küçük parçalara şekil verme ve ince kesitlerin daha iyi dolmasına imkan verir.
- 4- Düşük tolerans limitlerinde parçanın yaklaşık kesin şekli elde edilir.
- 5- Isıtma, döküm için istenen enerjinin %65'i kadardır.
- 6- Kalıptaki laminer akış nedeniyle malzemede daha az gaz ve makroporozite oluşur.
- 7- Yarı-katı halde şekil verme ile daha az katı-sıvı büzülmesi ve mikroporozite oluşur.
- 8- Kalıp malzemesi olarak metalik olmayan ucuz seramik malzemeler kullanılabilir.
- 9- Birçok alaşım grubuna bu yöntem başarıyla uygulanabilir.
- 10- Yolluk ve çıkıcı gibi dizaynlara gereksinim yoktur.

Dezavantajları [40];

- 1- Özel hazırlanmış hammadde gerekir.
- 2- Hammadde üretim maliyeti yüksektir.
- 3- Özel dizayn gerektiğinden cihazlar pahalıdır.
- 4- İlk yatırım maliyeti yüksektir.
- 5- Konunun uzmanı kişilere ihtiyaç vardır.

5.3. Yarı-Katı Şekillendirmenin Uygulama Alanları

Yarı-katı halde şekil verme yöntemi, konvensiyonel döküm yöntemlerinin yerini almaktadır. Bu yöntem otomobil jantları, fren silindirleri, antilock fren valfleri, makine pistonları, kompresör yuvaları, direksiyon kutusu, fren dengeleme valfleri, elektriksel birleştiriciler ve çeşitli yataklarda kullanılmaktadır [38].

Alüminyum jantlar, ilk olarak kokil kalıba döküm veya sıkıştırma döküm yöntemi ile üretilmekteydi. Yarı- katı halde şekillendirme yöntemi bu yöntemlerden daha sonra

geliştirilmiştir. Tablo 5.1.'te alüminyum otomobil jantlarının yarı-katı halde şekillendirme ile kokil kalıba döküm karakteristikleri ve ekonomikliği kıyaslanmaktadır [40].

Tablo 5.1. Alüminyum jant üretimi için yarı-katı şekillendirme ve kokil döküm yöntemlerinin karşılaştırılması [40]

Proses	Döküm Ağ. (kg)	Son Ağ. (kg)	Üretim hızı (saat)	Alaşım grubu	Kopma Muk. (MPa)	Akma Muk. (MPa)	Uzama (%)
Yarı-katı şekil verme	7.5	6.1	90	357-T5	290	214	10
Kokil döküm	11.1	8.6	12	356-T6	221	208	8

Görüldüğü gibi yarı-katı halde şekil verme ile malzeme %30 daha hafif olmaktadır. Bu yöntemle üretilen jantlar daha iyi tane yapısına sahiptir ve sıcaklık kontrolü dar toleranslar içinde tutulabilmektedir. Bu da iyi parça boyutu ve metalurjik özellikler sağlar. Üretilen jantların özellikleri izotropiktir ve çok yüksek basınç altında yarı-katı halde şekil verildiği için daha iyi parça yüzeyi elde edilmektedir [38].

Tablo 5.2.'te yarı-katı şekillendirme ve kokil dökümle üretilmiş alüminyum merkez fren silindirlerinin karakteristikleri kıyaslanmaktadır [40].

Tablo 5.2. Yarı-katı şekillendirme ve kokil dökümle üretilmiş alüminyum merkez fren silindirlerinin karakteristiklerinin karşılaştırılması [40]

Proses	Döküm Ağ. (kg)	Son Ağ. (kg)	Üretim hızı (saat)	Alaşım grubu	Kopma Muk. (MPa)	Akma Muk. (MPa)	Uzama (%)
Yarı-katı şekil verme	0.45	0.39	150	357-T5	303	228	8
Kokil döküm	0.76	0.45	24	356-T6	290	214	8

Tablo 5.2.'te görüldüğü gibi yarı-katı halde şekillendirme ile 0.45 kg malzemeden 0.39 kg ağırlığında parça üretirken, kokil kalıba döküm yöntemi ile 0.76 kg malzemeden 0.45

kg ağırlığında parça üretilmektedir. Dolayısıyla bu yöntemle daha az malzeme kaybı olmakta ve daha iyi mekanik özelliklere sahip malzeme üretilebilmekte, ayrıca üretim hızıda daha yüksek olmaktadır [40].

Askeri ve uzay çalışmalarında kullanılan elektriksel birleştiriciler yüksek gerilim altındadır. Dolayısıyla üretim kalite kontrol yöntemleri ile malzemenin yük altındaki performansı ve özellikleri uygun şekilde sağlanmalıdır [38].

6. DENEYSEL ÇALIŞMA

6.1. Deneysel Çalışmada Kullanılan Malzeme

Yarı-katı metal işlemenin geleneksel döküm yöntemleriyle kıyaslandığında yaklaşık nihai şekli vermede gelecek vadeden bir teknoloji olduğuna inanılmaktadır. Bu çalışmada, ETİAL 160 (A380) alüminyum alaşımının yarı-katı halde şekillendirilebilirliği araştırılmıştır. COMPONENTA DÖKTAŞ A.Ş. ‘de pek çok otomotiv parçasının rutin üretiminde kullanılan ETİAL 160 alüminyum alaşımı seçilmiştir. Tablo 6.1’ de ETIAL 160 (A380) alüminyum alaşımının kimyasal kompozisyonu verilmiştir.

A380 alaşımı otomotiv parçalarını üretmek için büyük ölçüde kullanılan bir basınçlı döküm alaşımıdır. Yarı-katı durumda bu alaşımın şekillendirilmesi basınçlı döküm prosesinde var olan problemleri büyük ölçüde ortadan kaldırılabilmektedir ve böylece birçok avantaj sunmaktadır.

Bu çalışmada genel bir basınçlı döküm alaşımının tiksö şekillendirilmesi araştırılmıştır. A380; A356 ve A357 alaşımlarından nispeten yüksek Si içeren ötektik bir kompozisyona yakındır. A380 alaşımı iyi akıcılık, basınç mukavemeti, sıcak kırılmaya direnç, iyi mekanik özellikler göstermektedir ve havalı fren dökümleri, dişli kutuları ve hava soğutmalı silindir kapakları gibi çeşitli otomotiv parçaları yapmak için kullanılmaktadır.

Tablo 6.1. Bu çalışmada kullanılan ETIAL 160 (A380) alüminyum alaşımının kimyasal kompozisyonu

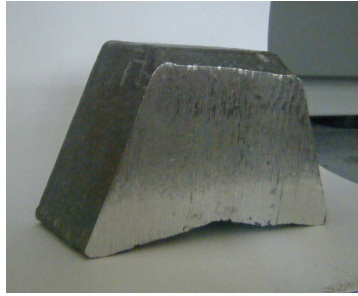
Si	Fe	Cu	Mn	Mo	Zn	Cr	Ni
8.163	0.972	2.987	0.170	0.144	0.737	0.0181	0.196

Sıvı/katı kısmın Scheil’in eşitliği kullanılarak hesaplandığı bilinmektedir. Ancak, kompleks alaşımlar için dağılım katsayısını belirlemek oldukça zordur. A380 alaşımının sıcaklığa karşı erime aralığı ve katı oranı Diferansiyel Tarama Kalorimetri (Differential Scanning Calorimetry (DSC)) tekniği yoluyla belirlenmiştir. DSC testleri ısıtma esnasında faz

dönüşümlerinin genliğini belirlemek için kullanılmıştır. A380 alaşımı DSC testi için küçük parçalara kesilmiştir. DSC testleri oksidasyonun önüne geçmek için bir argon atmosferinde karbon panlar ve lidler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tüm DSC çalışmaları TÜBİTAK-MAM' da Seteram DTA-DSC cihazında yapılmıştır.

A380 alaşımı için, DSC 20°C/dak. ısıtma oranında oda sıcaklığından 650°C' ye kadar artarak çalıştırılmıştır, daha sonra numune 650°C' de 10 dak. tutulmuş ve sonunda 2.5°C/dak.'da 650°C' den 450°C' ye soğutulmuştur. Bununla ilgili DSC diyagramı Bölüm 7' de de verilmiştir.

Deneyisel çalışmalarda COMPONENTA DÖKTAŞ A.Ş.'den külçeler halinde A380 alüminyum alaşımı temin edilmiştir. Bu külçeler ergitilmek üzere 500'er gr.lık dilimler halinde kestirilmiştir (Şekil 6.1).



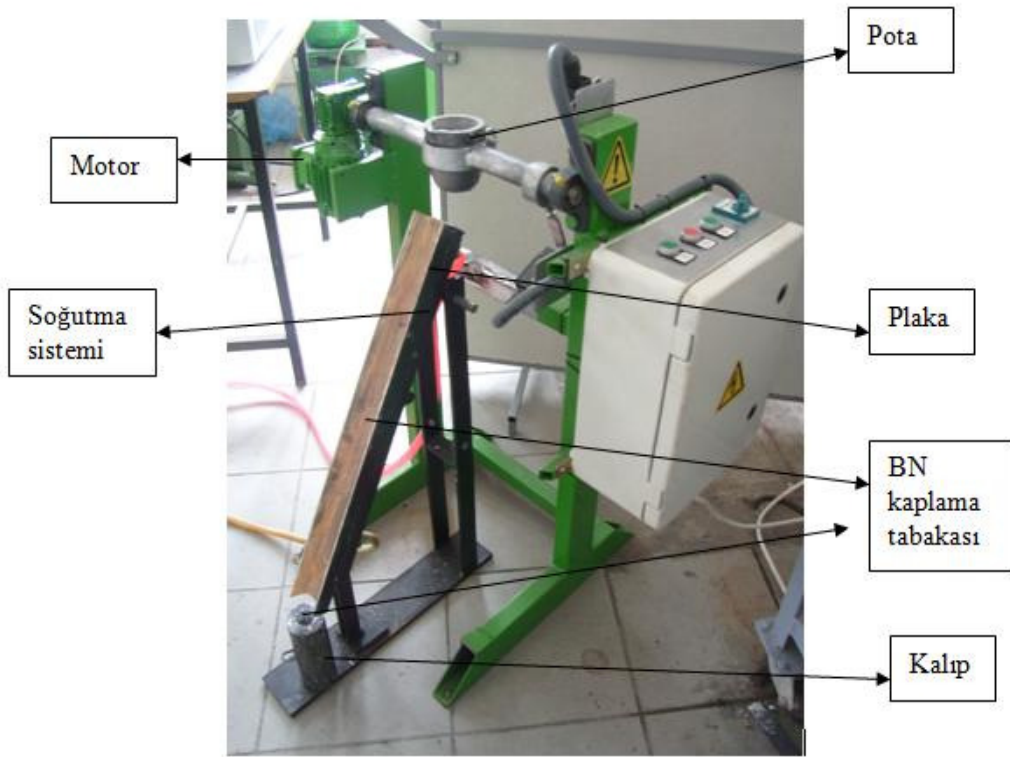
Şekil 6.1. Döküm yapılan A380 alüminyum alaşımı külçesi

6.2. Deney Düzeneği

6.2.1. Eğimli Soğutma Plakasında Döküm Cihazı

Eğimli soğutma plakasında döküm cihazının tasarımı ve imalatı literatürde bulunan deney düzenekleri referans alınarak gerçekleştirilmiştir. Cihazın resmi kalıpla birlikte Şekil 6.2' de verilmiştir. Cihaz şekil 1' de de görüldüğü gibi; motor tahriki ile dönen bir mil üzerine yerleştirilen potanın devri ile içerisinde bulunan ergiyeğin, alttan soğutmalı eğik bir plakadan akması sonucunda kalıbın içerisine dolması prensibi ile çalışmaktadır. Potanın devri bir hız kontrol ünitesi ile kontrol edilebilmektedir. Eğimli plakanın üst kısmında bulunan su

girişinden giren su plaka boyunca akarak plakanın alt kısmından tahliye edilmektedir. Ergiyik 150 mm genişliğinde ve 10 mm kalınlığında U profilli bir plakadan akmaktadır. Plaka, ergiyiğin çelik plaka ile temasını kesmek ve yapışmayı önlemek için BN tabakası ile kaplanmıştır. Döküm kalıp malzemesi AISI 4340 çeliğidir ve 160 mm boy, 30 mm iç çapa sahiptir. Ayrıca, döküm kalıbının iç yüzeyi de yapışmayı önlemek ve ingotun kolay çıkmasını sağlamak için BN ile kaplanmıştır. Plaka ergiyiğin yüzeye 500 mm boyunca ve 60° temas edeceği şekilde konumlanmıştır. Döküm potası olarak içerisine 500 gr. alüminyum alaşımı alan birlik grafit pota kullanılmıştır.



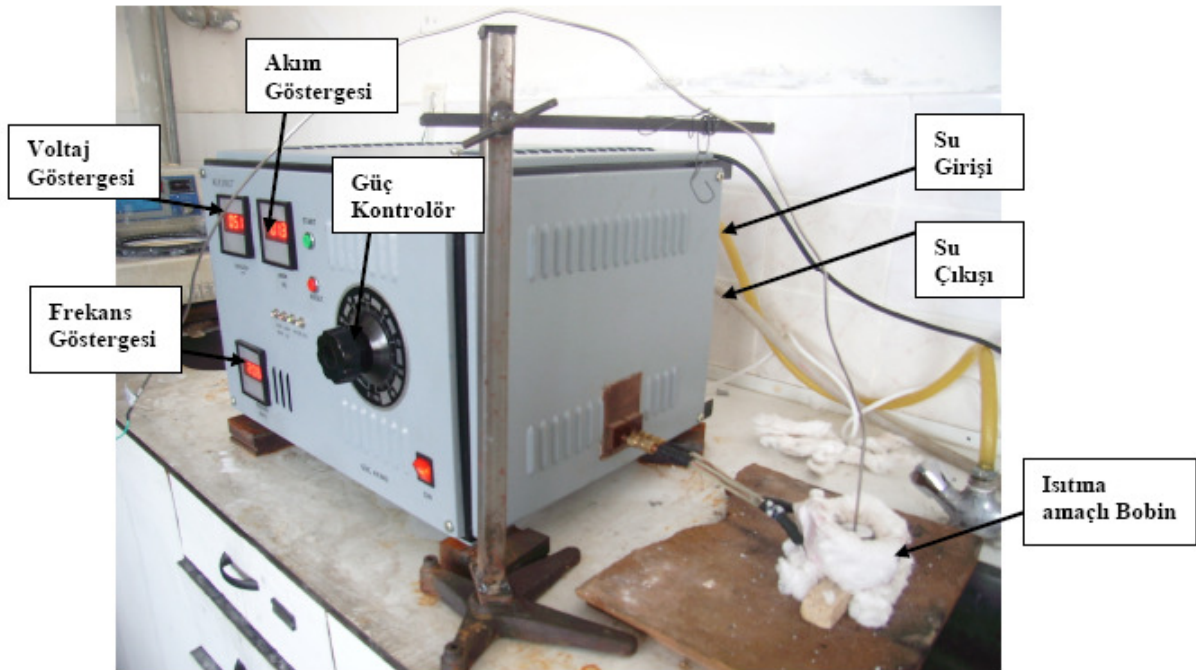
Şekil 6.2. Eğimli soğutma plakasında döküm cihazı

6.2.2. İndüksiyon Isıtma Ünitesi

Tüm deneylerde alüminyum ingotları ısıtmak için yüksek frekanslı bir indüksiyon ısıtma ünitesi kullanılmıştır. İndüksiyon ısıtma ünitesi Şekil 6.3' de gösterilmektedir. İndüksiyon ısıtma ünitesinin boyutları 50 cm x 50 cm x 30 cm ve ağırlığı 20 kg.' dır. Bu cihaz sıcak metal nesnelere bir bobin boyunca alternatif akım (AC) taşımak için elektriksel bir kaynak kullanır. Elektriksel olarak iletken bobin boyunca akımın geçişi, iş parçası boyunca

eddy akımlarının akışına neden olan güçlü ve hızlıca değişen bir manyetik alan meydana getirir.

Voltaj, akım ve frekans değerlerini gösteren indüksiyon fırınının ön kısmında su gösterge ekranı bulunmaktadır. Isıtma periyodu esnasında sabit kalan indüksiyon ısıtma fırınının frekansı malzemeye gelince 90 kHz' den 140 kHz' e kadar farklılaşmaktadır. Güç değeri, ölçülen voltaja çarparak hesaplanmaktadır ve akım değerleri indüksiyon ısıtma fırınının panelinde gösterilmektedir. 0' dan (%0) en yüksek güç seviyesine (%100) güç ayarlama bir güç kontrolörü ile gerçekleştirilmektedir. Akım ve voltaj değerleri güç kontrolörünün pozisyonuna göre ekranda görüntülenmektedir. Maksimum ulaşılabilir güç bu makine ile 3 kW civarındadır. İstenen etkiyi elde etmek için kütüğün durumuna göre ve değişme olmayan bir mikroyapıya sahip kütükte uniform katı/sıvı oranı elde etmek için ısıtma gücü tam olarak ve vaktinde kontrol edilmek zorundadır.



Şekil 6.3. İndüksiyon Isıtma Ünitesi

Bundan başka, iki uyarı lambası ısıtıcının panelinde bulunmaktadır, birincisi aşırı akım için ve diğeri ise aşırı ısı içindir.

Su soğutması, bobin boyunca yüksek frekanslı akımın geçişi ile aşırı ısı üretimini ortadan kaldırmak için kullanılmaktadır. Bu doğrultuda, indüksiyon ısıtma ünitesinin arka

tarafında su giriş ve çıkış bölümleri bulunmaktadır ve su hortumlar yoluyla sirküle edilmektedir. Soğutma suyunun akış gereksinimi 2-3 lt/dak. civarındadır.

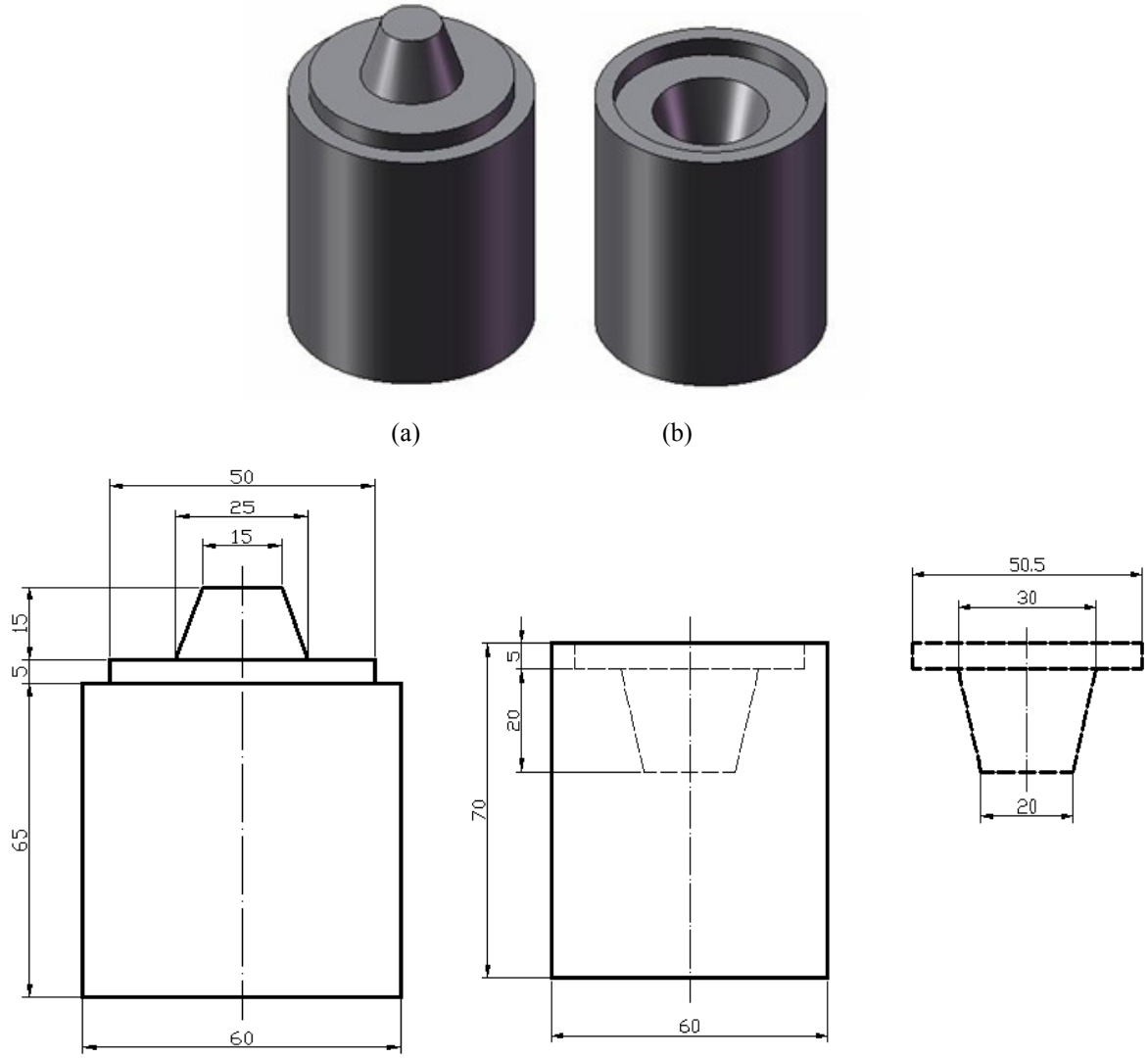
Şekil 6.4 ısıtma bobininin fotoğrafını ve özelliklerini göstermektedir. Deneylerde kullanılan A380 kütüğün çapı 30 mm' dir. Bobinin 50 mm' dir. Bu konuda, ilişki mesafesi Bölüm 4.1' de verilen değerlere göre uygundur.

	Isıtma Bobini Özellikleri Heating coil specifications		
	Dış çap	Outer diameter	65 mm
	İç çap	Inner diameter	50 mm
	Tel çapı	Wire diameter	7.5 mm
	Yükseklik	Height	50 mm
	Sarım sayısı	Number of turns	5

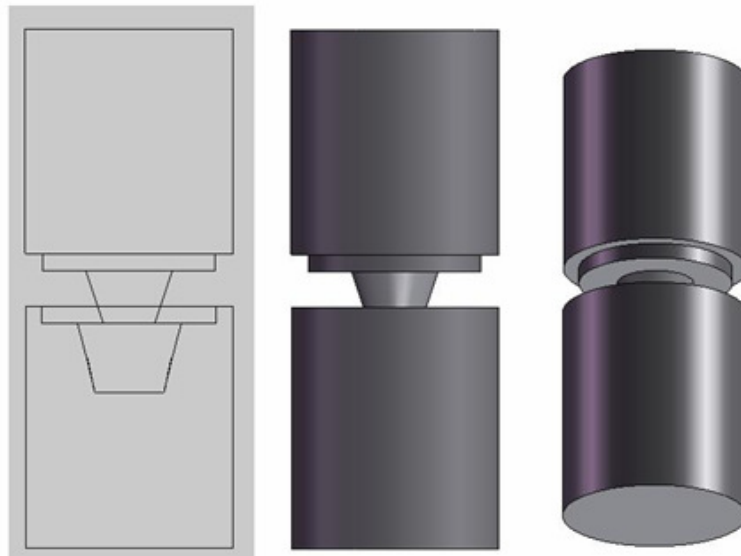
Şekil 6.4. Isıtma bobinin fotoğrafı ve ısıtma özellikleri

6.2.3. Kalıp

Kalıbın tasarım çalışmaları bilgisayar ortamında Solidworks 2007 katı modelleme programı ile gerçekleştirilmiştir. Üretilen kalıp, Şekil 6.5' de görüldüğü gibi iki parçadan oluşmaktadır. Bu kalıp şekillendirme çalışmaları için laboratuarda bulunan prese bağlanmıştır. Tasarım aşaması tamamlandıktan sonra kullanılan tasarım programının montaj modülü ile Şekil 6.6' deki montaj işlemi gerçekleştirilmiştir. Kalıbın resmi Şekil 6.7' de gösterilmiştir. Kalıbın alt kısmı sabit parça üst kısmı ise hareketli parçadır. Bu tasarımda dişi sabit parça, erkek ise hareketli parça olarak konumlandırılmıştır. Şekillendirme işlemi sonrasında son ürün olarak Şekil 6.8' de gösterilen ürün elde edilmesi hedeflenmiştir. Bu kalıpta farklı döküm koşullarından elde edilen numunelerin uygun yarı-katı sıcaklıkta şekillendirilmesi hedeflenmiştir.



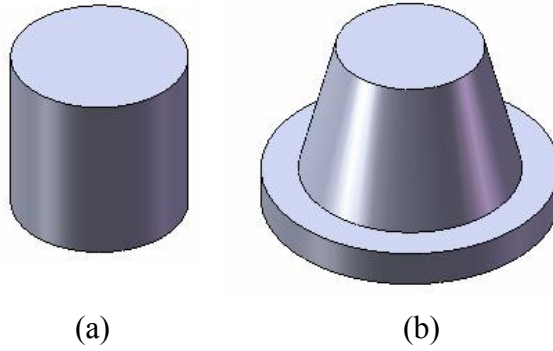
Şekil 6.5. Yarı-katı şekillendirme kalıbına ait teknik resim: üst kalıp (a), alt kalıp (b)



Şekil 6.6. Kalıbının montajı



Şekil 6.7. Kalıp



Şekil 6.8 İngot (a), Son ürün (b)

Bu kalıp dizaynına göre, yeniden ısıtılmış metal ürünün şekline sahip kalıp boşluğunun içine girmektedir. Bu yeni tasarım kavramından ticari bakış açısına göre iki avantaj çıkarılabilmektedir: (1) ayrı bir giriş ve ayrı bir yolluk olmadan kalıp boyutları önemli ölçüde azaltılabilmektedir; (2) ek hidrolik ejeksiyon sistemine ihtiyaç yoktur çünkü parça ejeksiyonu bir itici gibi görev yapan sabit parçayı kullanılarak yapılabilmektedir.

Kütük, kalıbın ana parçasının boşluğunun üzerinde ısıtılmaktadır. Refrakter bir malzeme ısıtma aşaması esnasında kütüğün boşluk içine düşmesinin önüne geçmek için kütük ve kalıp arasına yerleştirilmiştir. Refrakter malzeme kütüğün ısı kaybını mümkün olduğunca minimize etmek için faydalıdır. Refrakter malzeme iki parçadan oluşmaktadır. Kütük yarı-katı aralıktaki istenen sıcaklığa geldiği zaman, refrakter malzemeler çekilir ve kütük kalıp boşluğu içine düşer. Aynı anda, şekillendirme işlemi gerçekleştirilir. Bu kalıp kavramında, sabit parça bir itici gibi davranır, böylece tikso şekillendirme işleminden sonra ürünün çıkarımı

kolaylaşır. Şekillendirmeden sonra, hareketli parça alt kalıptan ayrıldığında sabit parça ürünü içerisindeki yayın etkisi ile iter. Şekillendirme işleminden sonra ürün kalıptan çıkarılır ve sonra su verilir.

6.2.4. Şekillendirme Ünitesi (Pres)

Şekillendirme ünitesi bir hidrolik silindir, punchı tutmak için bir ana gövde ve kalıp, gerekli uygulamak için hidrolik güç ünitesi, ve presin hızını ayarlamak için ve switchleri kontrol etmek için plc kontrol ünitesinden oluşmaktadır. Yarı-katı şekillendirme ünitesi Şekil 6.9’ de gösterilmektedir. Yarı-katı şekillendirme ünitesinin özellikleri Tablo 6.2’de verilmektedir. Hidrolik güç ünitesi yüksek verim ve rijit bir konstrüksiyon sağlamak için sistem tarafından gereken özelliklere göre tasarlanmıştır. Pres tasarımı ve imalatı IŞIKOĞLU Mühendislik Kalıp ve Makine İmalatı Ltd.Şti.’ de gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6.9. Yarı-katı şekillendirme ünitesi

Tablo 6.2.Yarı-katı şekillendirme ünitesi özellikleri

Şekillendirme ünitesinin boyutları	57 x 72 x 195 mm
Maksimum yük	20 ton-kuvvet
Maksimum hız	250 mm/s
Stroke	400 mm

Presin hızı şekillendirme esnasında 250 mm/s hıza çıkmaktadır. Bu hız şekillendirme prosesi için oldukça yüksek bir hızdır. Yarı-katı şekillendirmede en önemli parametrelerden biri olan hızın yüksek oluşu şekillendirme esnasında avantaj sunmaktadır. Bu avantaj şekillendirme esnasında ingotun ısı kaybını minimuma indirmektir.

6.3. Eğimli Soğutma Plakasında Döküm

Non-dendritik hammadde üretimi için eğimli soğutma plakasında döküm yöntemi uygulanmıştır. A380 alüminyum alaşımı grafit bir pota içerisinde 700°C sıcaklıktaki rezistanslı fırında (Şekil 6.10) ergitilmiştir. Ergitme esnasında alaşımın içerisine tane inceltici olarak 0.2 gr stronsiyum ilave edilmektedir. Ergitmeden hemen önce ergiyik içerisine flux ilave edilmektedir. Flux hem eriyik içerisindeki gazı çıkarmaktadır hem de içerisindeki kirliliği ergiyiğin yüzeyine çıkararak kolayca temizlenmesine imkan vermektedir. Daha sonra pota eğimli soğutma plakası deney düzeneğine yerleştirilir ve K tipi bir termokupl yardımıyla sıcaklık kontrolünün sağlandığı ergiyik istenen döküm sıcaklığına geldiğinde motor tahrikiyle hareketlenen pota kendi ekseninde 90° dönerek içerisinde bulunan ergiyiği BN kaplı plakaya boşaltmaktadır. Plakayla malzemenin temas uzunluğu 500 mm' dir. Ergiyik 60° eğimli plakadan 500 mm boyunca akarak önceden 200°C' ye ısıtılmış kalıp içine dolmaktadır.



Şekil 6.10. Ergitmenin yapıldığı rezistanslı fırın

Bu çalışmada üç farklı döküm sıcaklığı seçilmiştir. Düşük döküm sıcaklığı olarak 615°C, orta döküm sıcaklığı olarak 630°C ve yüksek döküm sıcaklığı olarak ise 650°C sıcaklıklarında dökümler gerçekleştirilmiştir. Düşük döküm sıcaklığı olarak 615°C seçilmesinin sebebi, bu sıcaklıktan daha düşük sıcaklıkta döküm yapıldığında plaka boyunca akan malzemenin büyük bir kısmı alt soğutmalı plaka yüzeyinde katılaşmaktadır. Yüksek döküm sıcaklığı olarak 650°C seçilmesinin sebebi ise yine bu sıcaklıktan daha yüksek sıcaklıklarda yapılan dökümlerin içyapısında bir değişiklik olmadığı gözlemlenmiştir. Döküm sıcaklığının likidüs sıcaklığının biraz üzerinde seçilmesi, eğimli soğutma plakasının üzerinde α -Al rozetlerinin meydana gelmesini kolaylaştırmaktadır. Dökümden elde edilen 30 mm çapında 160 mm uzunluğundaki ingot oda sıcaklığında soğutulur.

6.4. Titreşim Altında Eğimli Soğutma Plakasında Döküm

Eğimli soğutma plakasında döküm yönteminde plakaya titreşim uygulanarak vibrasyon altında eğimli soğutma plakasında döküm yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntemle ilgili literatürde az sayıda makaleye rastlanmaktadır. Bu yöntem ürettiğimiz eğimli soğutma plakasına titreşim cihazının laboratuvar imkanlarımız dahilinde entegre edilmesiyle dökümler gerçekleştirilmiştir. Titreşim cihazının resmi Şekil 6.11’ de verilmiştir. Eğimli soğutma

plakasının titreşim cihazı ile modifikasyonu Şekil 6.12’ de gösterilmektedir. Bu sayede dökümler vibrasyon altındaki plakada gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6.11. Titreşim cihazı

Tikso şekillendirme için ingotun mikroyapısı non-dendritik olmalıdır. Yarı-katı aralığa ısıtılması ile küreselleşecek olan iç yapı ön mamul hazırlamak üzere rozet denilen non-dendritik ingot mikroyapısı titreşim altında eğimli soğutma plakasında döküm yöntemiyle etkin bir biçimde elde edilebilmektedir. Vibrasyon altında eğimli soğutma plakasından dökülen ergiyik kalıp içine dolmaktadır ve ingot oda sıcaklığına soğumaktadır. Daha sonra içyapısı incelenerek titreşim altında dökümün etkileri araştırılabilmektedir.

Sabit eğimli soğutma plakasında düşük döküm sıcaklığında döküm yapıldığında plaka yüzeyinde oluşabilen katılaşma kabuğu, titreşim sayesinde etkin bir biçimde yüzeyden uzaklaştırılabilmektedir. Bundan başka titreşimin eğimli soğutma plakasında döküm üzerindeki avantajları araştırılmıştır.



Şekil 6.12. Vibrasyon altında eğimli soğutma plakasında döküm cihazı

Döküm parametreleri, sabit eğimli soğutma plakasında döküm parametreleri ile aynıdır. Plakaya 5.75 Hz frekans değerinde titreşim uygulanmıştır. Sabit ve vibrasyon altında eğimli soğutma plakasında döküm parametreleri Tablo 6.3’ de verilmektedir.

Tablo 6.3. Eğimli soğutma plakasında döküm parametreleri

Numune	ETIAL 160 (A380)
Döküm sıcaklığı	615°C, 630°C, 650°C
Eğimli soğutma plakası	
Malzeme	Yumuşak çelik
Kaplama	BN
Açı	60°
Uzunluk	500 mm
Kalıp	AISI 4340 (41CrNiMo6)
Titreşim frekansı	5.75 Hz

Farklı olarak bir de gravite döküm esnasında kalıba 5dk. ve 10 dk. olmak üzere iki farklı sürede titreşim uygulanmıştır (Şekil 6.13). Böylece titreşimin doğrudan döküm yapısına etkileri de incelenebilmiştir. Gravite döküm ETIAL 160 alaşımının döküm sanayinde kullanılan döküm sıcaklığı olan 700°C’ de gerçekleştirilmiştir.



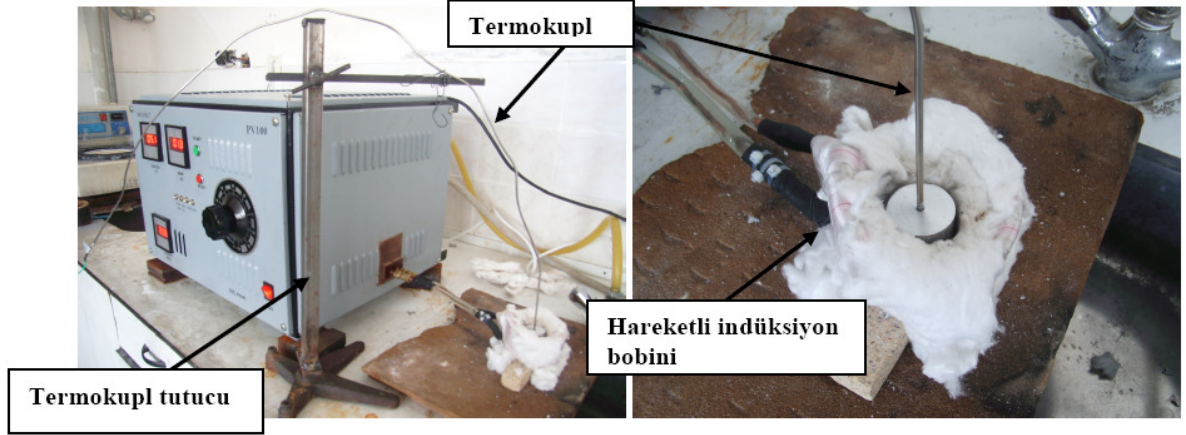
Şekil 6.13. Vibrasyon altında gravite döküm

6.5. İndüksiyonla Isıtma

Tikso şekillendirme prosesi için, kütük yarı-katı aralığa yeniden ısıtılmalıdır. Yeniden ısıtma prosesi bir kütüğün şekillendirme prosesinde çok önemlidir; fakat kütüğün mikroyapısının kontrolü de oldukça önemlidir. Çalışmanın bu kısmında, yeniden ısıtma sıcaklığının etkileri, sabit eğimli soğutma plakasından ve vibrasyon altında eğimli soğutma plakasından elde edilen A380 alaşımının mikroyapısının küreselleşmesinde ısıtma mikroyapıları araştırılmıştır.

Dökümden elde edilen A380 alaşım ingotu 30 mm çapında ve 40 mm boyunda olacak şekilde kesilmiştir. Böylece ingot, indüksiyonla ısıtma ünitesinin bobinine uyarlanmıştır. İndüksiyon ısıtma deneyleri Celal Bayar Üniversitesi Malzeme Laboratuvarında indüksiyon ısıtma fırını kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Isıtma prosesi esnasında kütük sıcaklığı kontrol

edilmektedir. Yeniden ısıtma prosesi sırasında kütüğün sıcaklık değişimleri görüntülenmek üzere, numunenin merkezine 3 mm çapında bir delik işlenmiştir ve K tipi termokupl bulamacın sıcaklığını kesin olarak ölçmek ve kontrol etmek için deliğe yerleştirilmiştir. Termokupl bir termokupl göstergesine bağlanmıştır. Bu sistem Şekil 6.14’ de verilmiştir.



Şekil 6.14. Çalışma esnasında indüksiyon ısıtma ünitesi

Isıtma gücü tam olarak, etkili biçimde bir kütük elde etmek için zamanında ve değişmeyen mikroyapıya sahip kütükte uniform sıvı/katı oranı sağlamak için kontrol edilmek zorundadır. DSC diyagramından tespit edilen % 40-50 sıvı faz oranının 565°C ve 567°C’ de elde edilebileceği tespit edilmiş ve bu sıcaklık değerlerini optimize etmek için ısıtma denemeleri yapılmıştır. İlk aşamada farklı döküm parametrelerinden elde edilen rozet yapıdaki kütükler uygun küresel mikroyapı elde edilmek üzere 565°C ‘ ye ısıtılmış ve bu sıcaklıkta 5 dk. tutulmuştur. İkinci aşamada 567°C’ ye ısıtılmış ve bu sıcaklıkta 5 dk. tutulmuştur. Isıtma bittikten sonra termokupl numuneden çıkarılmış ve ardından hareketli bobin kaldırılarak içerisindeki numune su içerisine bırakılarak suda soğutulmuştur.

Hem sabit hem de titreşimli eğimli soğutma plakasından ve ısıtma çalışmalarından elde edilen ingotlar metalografik numune hazırlamak için 10 mm kalınlığında kesilmiştir. Numuneler STRUERS parlatma cihazı kullanılarak 240, 400, 600, 800, 1200 gritlik SiC zımparalarda zımparalanmış ve 3 µm ve 1 µm olmak üzere iki farklı kademede elmas pasta ile parlatılmıştır Şekil (6.15). Parlatılan numuneler %5 HF çözeltisinde dağlanmış. CLEMEX dijital kamera ile desteklenen NIKON Ecilipse LV100 optik mikroskobu ile mikroyapı fotoğrafları çekilmiştir (Şekil 6.16). Ayrıca BMS marka Brinell sertlik ölçme cihazında 62.5 kgf yük altında 2.5 mm çapındaki ball uç ile sertlikleri ölçülmüştür (Şekil 6.17).



Şekil 6.15. Parlatma cihazı



Şekil 6.16. Dijital kamera ile desteklenen optik mikroskop



Şekil 6.17. Brinell sertlik ölçme cihazı

6.6. A380 (ETIAL 160) Alaşımını Tikso şekillendirme

Çalışmanın bu kısmında, A380 alüminyum alaşımı yarı-katı aralığa ısıtılmış ve basınç altında tikso şekillendirilmiştir. şekillendirmenin ardından dış görünüş, kalıbı doldurma kabiliyeti araştırılmıştır.

Tikso şekillendirme deneylerinde, teçhizatın birçok formu kombinasyon halinde çalışılmıştır ve birçok parametre kontrol edilmiştir. Operasyon ilk bakışta kompleks gözükmetedir. Ancak, bu proste kombinasyon halinde iki farklı aşama vardır: bir indüksiyon ısıtma ünitesi tarafından kütükleri ısıtma, ve bir hidrolik pres yoluyla kütüklere şekil verme.

Tikso şekillendirme numuneleri 30 mm çapında ve 40 mm yüksekliğinde işlenmiştir. Bir indüksiyon ısıtma ünitesi (3kW, 100kHz) kütükleri ısıtmak için kullanılmıştır. Kütükler indüksiyon bobinine yerleştirilmiştir ve ısı istenen sıvı faza ulaşana kadar ısıtılmıştır. Kütükler kalıbın ana parçasının boşluğunun üzerine yerleştirilen bir çift refrakter malzeme üzerinde yarı-katı sıcaklığa ısıtılmıştır (şekil 6.18). Kütüklerin anlık sıcaklığı kütüklerin merkezine giren bir K-tipi termokupl yoluyla ölçölmüştür. Kütükler yarı-katı aralıkta istenen sıcaklığa geldiğinde, refrakter malzemeler çekilmiş ve malzeme elle müdahale olmaksızın kalıp boşluğuna düşmüştür. Aynı anda, punch aşağı doğru hareket etmiş ve kalıp boşluğundaki kütüğü basmıştır. Malzemenin tiksotropik doğası çok düşük basınçta boşluk içine akması için metale izin vermiştir. şekillendirme işlem süreci sadece birkaç saniyedir. şekillendirme strokunun sonunda tamamen yoğun haldeki komponente şekil vermek için, bir basınç artışı olmaktadır. şekillendirme operasyonu tamamlandıktan sonra, punch geri hareket etmiş ve numune kalıbın sabit parçasından yukarı doğru itme yoluyla kalıptan ayrılmıştır.

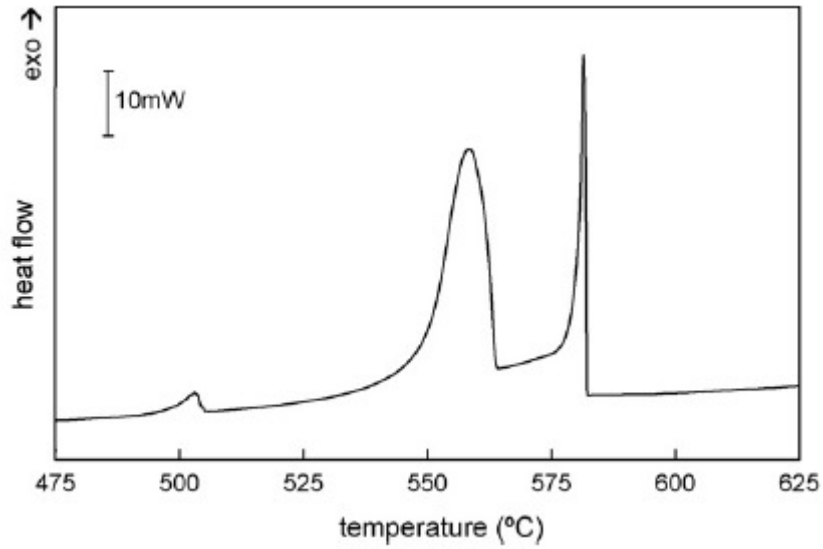


Şekil 6.18. Şekillendirme işleminden önce sistemin fotoğrafı

Tikso şekillendirme denemeleri, indüksiyonla ısıtma deneylerinden elde edilen numunelerin incelenen mikroyapı sonuçları doğrultusunda gerçekleştirilmiştir. İstenen sıvı faz oranı 567°C ' de elde edildiğinden yarı-katı şekillendirmede ısıtma parametresi olarak bu sıcaklık seçilmiştir.

7. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

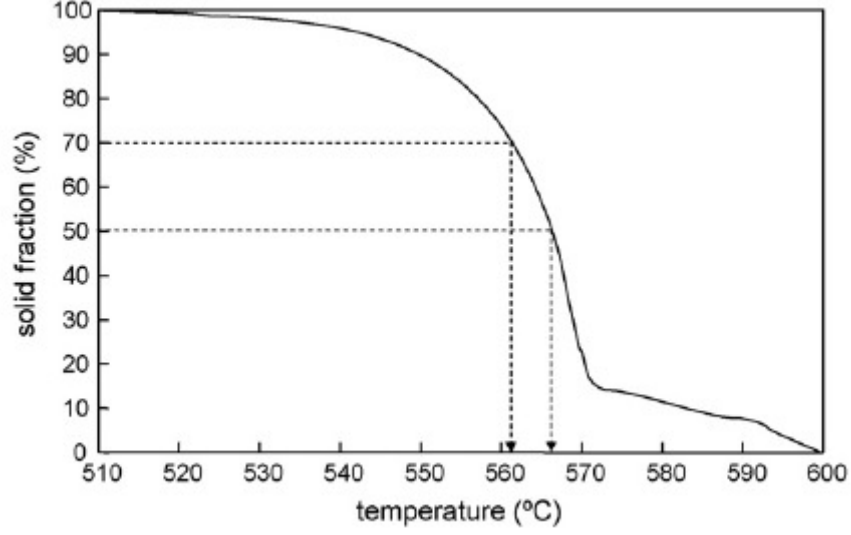
TÜBİTAK-MAM’ da yapılan DSC çalışmalarından elde edilen katılaşma esnasında sıcaklık ve ısı akışı (eksotermik etki) grafiği Şekil 7.1’ de gösterilmektedir.



Şekil 7.1. Katılaşma esnasında A380 alüminyum alaşımının DSC eğrisi

Likidüs sıcaklığı DSC datalarından 582°C olarak değerlendirilmiştir.

A380 alüminyum alaşımının katı kısım(%)-sıcaklık(°C) eğrisi DSC grafiğinden değerlendirilmiştir ve Şekil 7.2.’ de gösterilmektedir. Buna göre alaşım 582°C’ nin üzerinde tam eriyik halde olmaktadır.

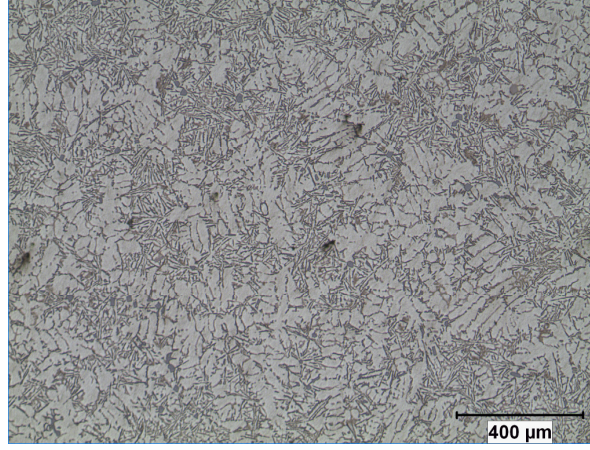


Şekil 7.2. A380 alüminyum alaşımasının sıcaklık eğrisi

Katı kısım (f_s), yüksek katı ve sıvı oranları (her iki durumda %80' den yüksek) hariç, tüm erime aralığı sıcaklık dalgalanmalarına yüksek ölçüde duyarlıdır. %30-50 sıvı oranında sıcaklık sadece $\pm 1^\circ\text{C}$ değiştiğinde %3-6 kadar çok katı oranı değişmektedir. Bu durumun problemsiz tikso şekillendirme için gerekli olduğu iddia edilmektedir. A380 alüminyum alaşımında bu kadar sıvı eldesini başarmak için sıcaklık aralığının $561\text{-}567^\circ\text{C}$ olması Şekil 7. 2' den anlaşılmaktadır.

7.1. Gravite Döküm Yoluyla Üretilen A380 (ETIAL 160) Alaşımı

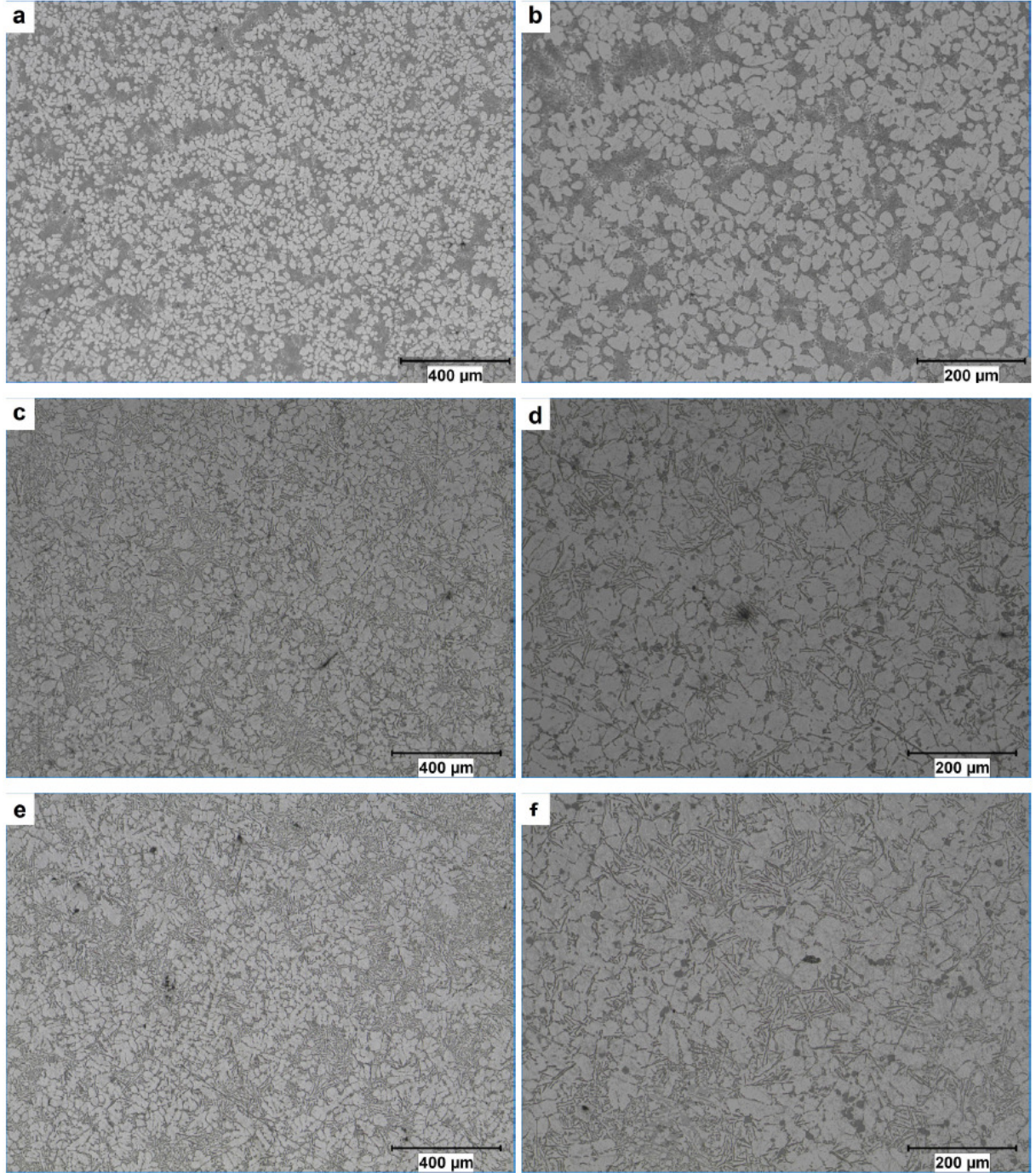
Şekil 7.3 eğimli soğutma plakasında akış olmadan silindirik kalıp içine doğrudan dökülmüş, yani gravite döküm yapılmış numunenin mikroyapısını göstermektedir. Mikroyapı $\alpha\text{-Al}$ fazının büyük dendritlerini içermektedir. Bu döküm ticari alanda kullanılan A380 alaşımının geleneksel döküm sıcaklığı olan 700°C ' de yapılmıştır.



Şekil 7.3. Gravite dökümden elde edilen A380 alaşımına ait mikroyapı

7.2. Eğimli Soğutma Plakasında Döküm Yoluyla Üretilen A380 (ETIAL 160) Alaşımı

Uygun döküm sıcaklığını elde edebilmek için düşük, orta ve yüksek döküm sıcaklığı olacak şekilde 615°C, 630°C ve 650°C üç farklı döküm sıcaklığında dökümler gerçekleştirilmiştir. Bu dökümler 60° eğimli ve 500 mm temas uzunluğuna sahip sabit soğutma plakasında yapılmıştır. Eğimli soğutma plakası sabit tutularak yapılan dökümlere ait mikroyapılar Şekil 7.4.’de verilmiştir. Mikroyapı fotoğraflarında da görüldüğü üzere düşük döküm sıcaklığında dendritlerin daha fazla kırıldığı, 615°C dökümde hiçbir dendrit yapıya rastlanmadığı tamamen rozet yapı diye adlandırılan yapının oluştuğu hatta tanelerin küresel forma çok yaklaştığı açıkça görülmektedir. 630°C döküm sıcaklığında da dendrit yapının hemen hemen parçalandığı gözlemlenmektedir. Ancak döküm sıcaklığı arttıkça hem taneler kabalaşmış hem de dendrit yapıların tam anlamıyla kırılmadığı, yapıda hala dendritlerin bulunduğu gözlemlenmiştir. 650°C’ de yapılan dökümlerde taneler arası ötektik yapının daha belirgin olduğu ve tane kümeleşmesinin olduğu gözlemlenmiştir.

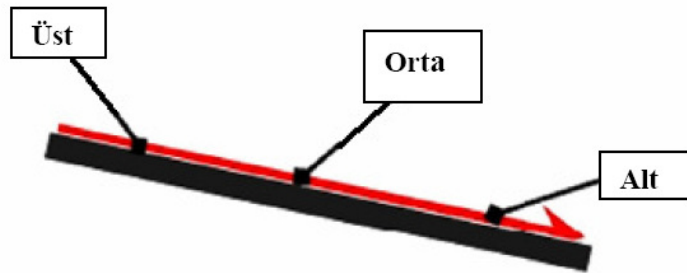


Şekil 7.4. A380 alaşımının 60° eğim ve 500 mm plaka uzunluğundaki sabit eğimli soğutma plakasında farklı döküm sıcaklıklarından elde edilen mikroyapılar: (a),(b) 615°C; (c),(d) 630°C; (e),(f) 650°C

Ayrıca düşük döküm sıcaklığında tane sayısının arttığı da tespit edilebilmektedir. Yani döküm sıcaklığı düştükçe katılaşma sırasında oluşan çekirdeklenme sayısı artmıştır. Bu durum malzeme plakadan akarken alttan soğutma yapılması ile açıklanabilmektedir. Plakanın su ile

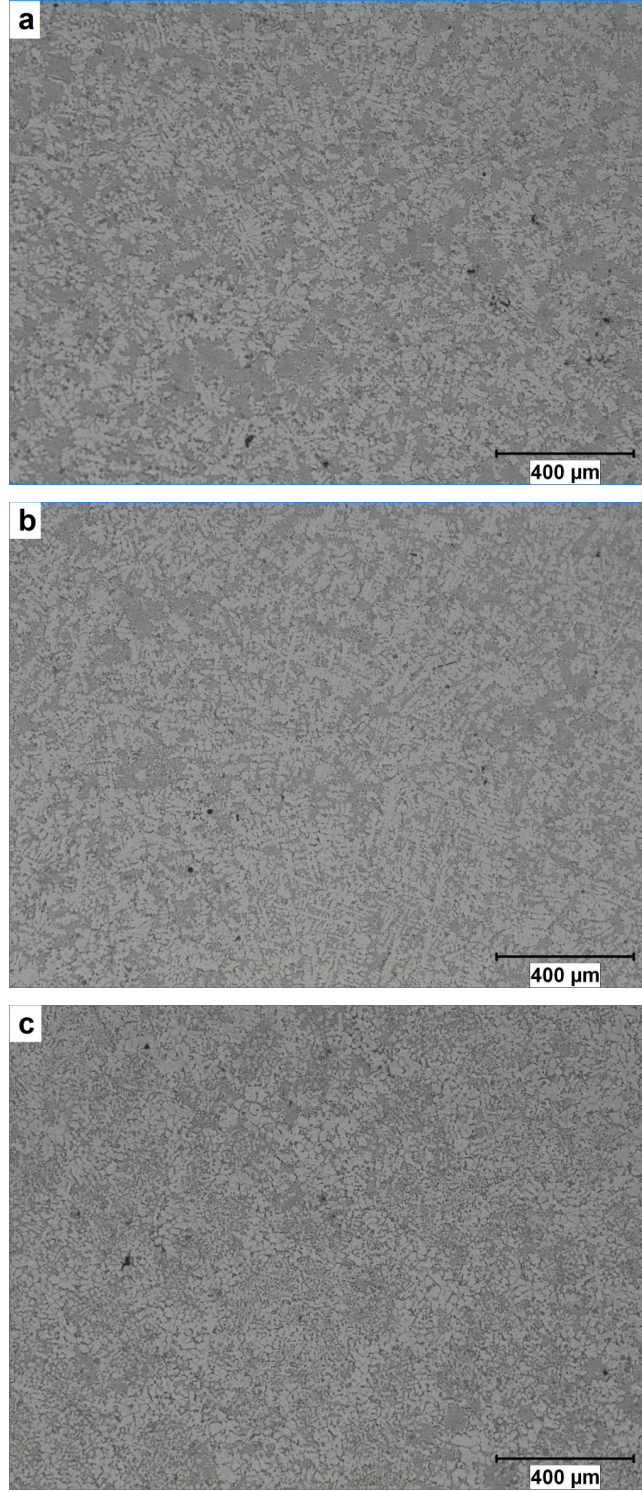
soğutulması malzemenin plaka boyunca akarken ilk katılaşmanın plaka üzerinde olmasına sebep olmaktadır. Böylece ilk çekirdeklenme plaka yüzeyinde meydana gelecektir. İlk çekirdeklenme sırasında malzeme plakadan akarken kayma gerilmesinin etkisi ile dendrit yapı kırılacak ve rozet yapı elde edilecektir. Malzemenin döküm sıcaklığı arttırılır ise plakada ilk katılaşma için gerekli soğutma yeterince sağlanamayacak ve plaka üzerinde yeterince çekirdeklenme elde edilemeyecektir. Bu nedenle optimum döküm sıcaklığı düşük döküm sıcaklığı olan 615°C olarak tespit edilmiştir. 615°C' den daha düşük sıcaklıklarda döküm yapıldığında malzemenin büyük bir bölümü plaka yüzeyinde katılaşmaktadır. Bu durum istenmeyen bir durum oluşturmaktadır çünkü kalıp içerisine oldukça az malzeme dolmaktadır. Yine döküm sıcaklığı 650°C' nin üzerinde olduğunda ergiliğin sıcaklığı oldukça yüksek olacağından çekirdeklenme için gerekli soğutmayı yapmada alt soğutmalı plaka yetersiz kalmakta ve çekirdek oluşumu tamamen kalıp içinde gerçekleşmektedir. Buda yarı-katı şekillendirme için gerekli olan ön mamul rozet iç yapısının oluşumunu imkansız kılmaktadır.

Döküm sırasında plaka bor nitrür tabakası ile kaplanmıştır. Böylece döküm esnasında plaka üzerinde hiçbir şekilde artık malzeme kalmamakta, malzemenin tamamı düzgün bir akış ile kalıp içine dolmaktadır. Ancak düşük döküm sıcaklığında plaka yüzeyinde bir miktar katılaşma kabuğu meydana gelmektedir. Malzemenin plakadan akması ile meydana gelen dendrit yapının kırılmasını inceleyebilmek için bu katılaşma kabuğu araştırılmıştır (Şekil 7.5).



Şekil 7.5. Malzemenin plakadan akışı sırasında farklı pozisyonlardaki mikroyapı gelişimi

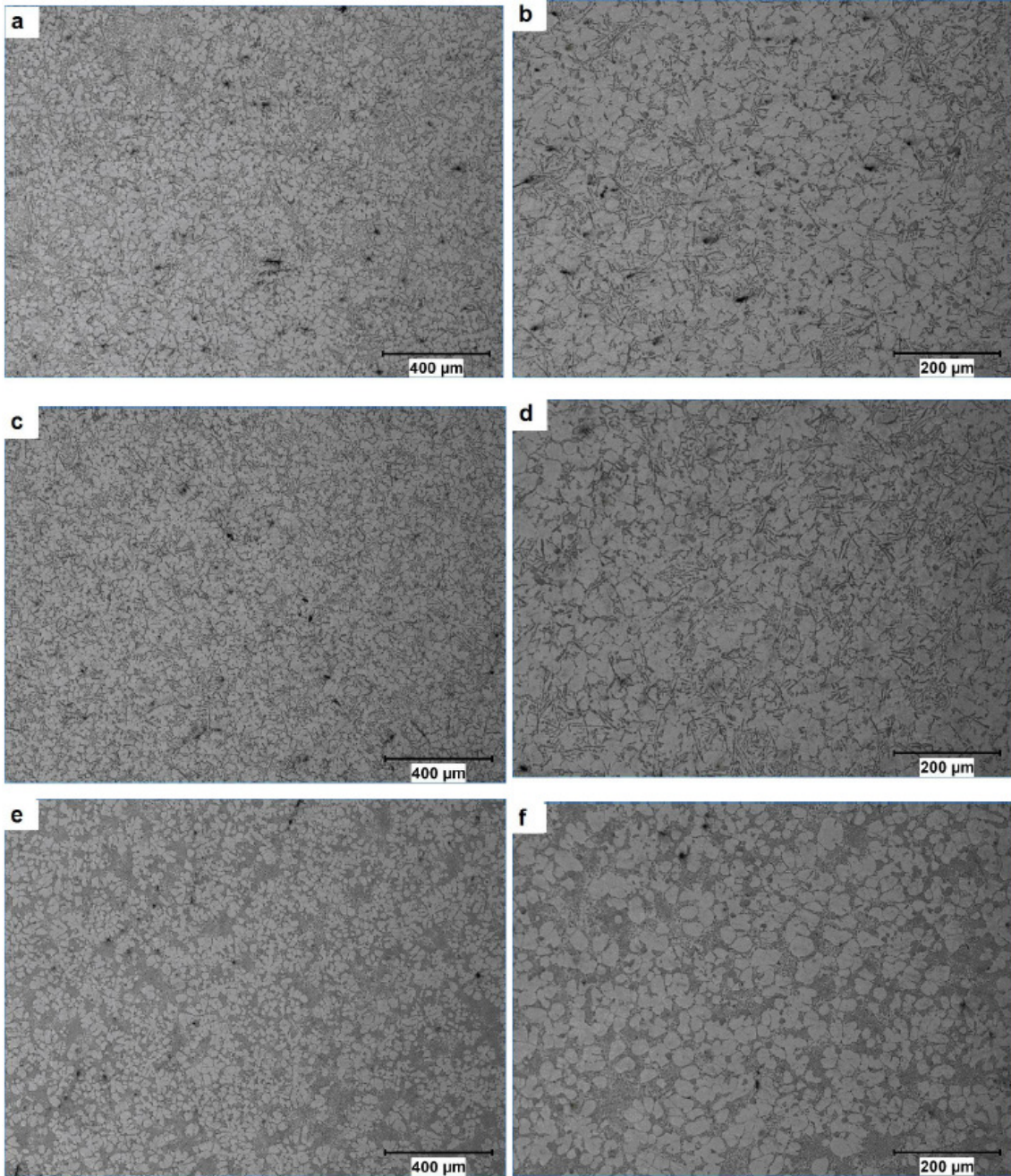
Plaka üzerinde kalan artık malzemeye üst, orta ve alt kısımda olmak üzere üç farklı noktadan metalografik incelemeler yapılmış ve bu incelemelerin sonucu da Şekil 7.6' de verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi plakada üst noktadan alt noktaya doğru gidildikçe alt soğutmalı plaka yüzeyinde meydana gelen çekirdeklenme nedeniyle hem tane sayısı artmış hem de eğimli akıştan dolayı oluşan kayma gerilmesinin etkisi ile dendrit kollarının kırıldığı tespit edilebilmiştir.



Şekil 7.6. Plaka yüzeyinde oluşan katılaşma kabuğunun (a)üst, (b)orta, (c) alt noktasındaki mikroyapı gelişimi

7.3. Vibrasyon Altında Eğimli Soğutma Plakasında Döküm Yoluyla Üretilen A380 (ETIAL 160) Alaşımı

615°C, 630°C ve 650°C döküm sıcaklıklarında titreşimli plakadan elde edilen dökümlere ait mikroyapılar Şekil 7.7' de verilmiştir.



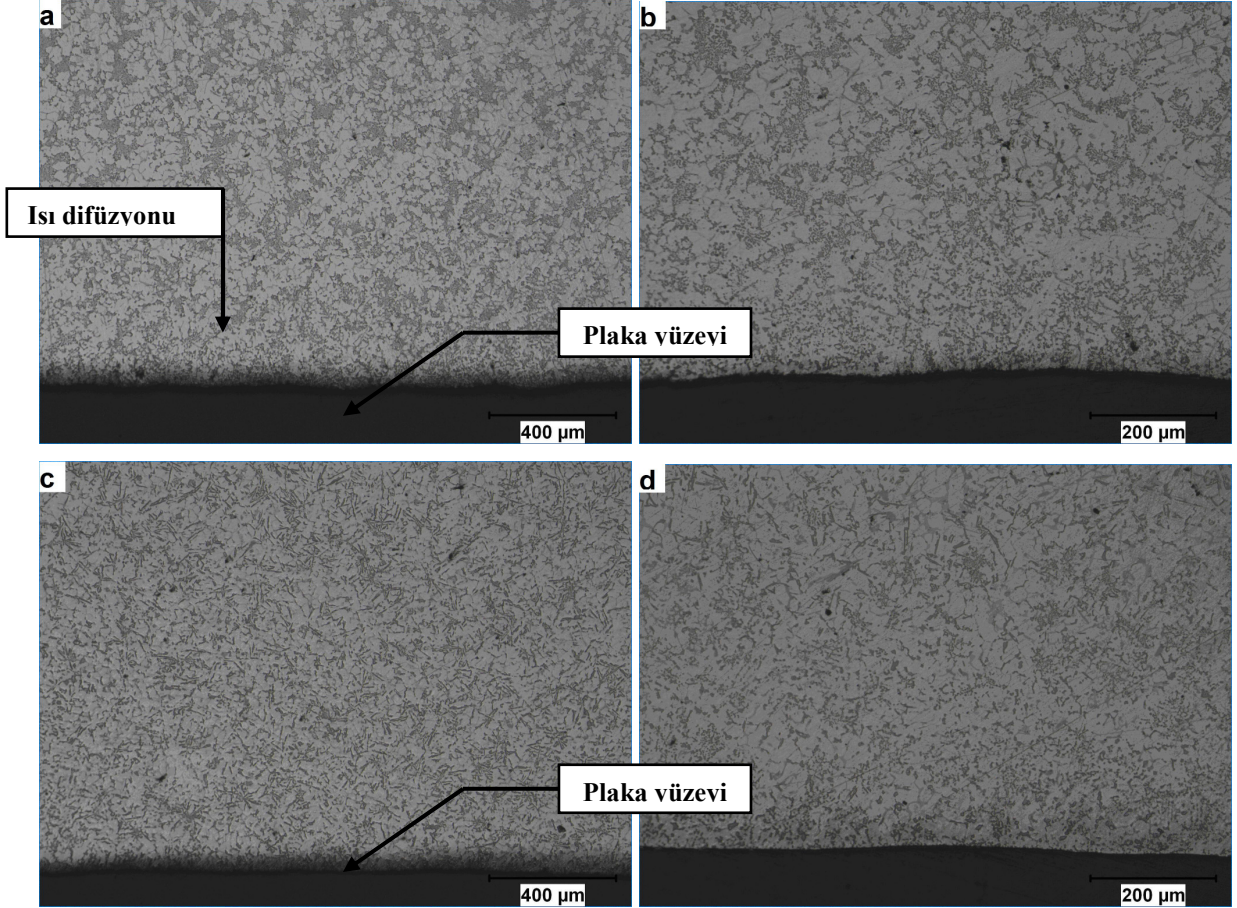
Şekil 7.7. A380 alaşımının 60° eğim ve 500 mm plaka uzunluğundaki vibrasyon altında eğimli soğutma plakasında farklı döküm sıcaklıklarından elde edilen mikroyapılar: (a),(b) 615°C; (c),(d) 630°C; (e),(f) 650°C

Eğimli soğutma plakası döküm esnasında 5.75 Hz' lik bir frekans değerine sahip titreşim hareketine maruz bırakılmıştır. Şekilde görüldüğü gibi plakanın sabit ve titreşimli hali kıyaslandığında titreşim hareketinin çekirdeklenme sayısını arttırdığı gözlemlenebilmektedir. Bu durum malzemenin plakadan akışı sırasında uygulanan titreşimin daha homojen bir soğumaya neden olması ile açıklanabilmektedir. Plaka titreştiği sırada plaka üzerinden akan malzemede ilk katılma sırasında oluşan taneler birbirine çarpacak ve plakanın alt kısmından yapılan soğutma, bu tanelerin vibrasyon etkisi sayesinde birbirine çarpması ile iletilerek daha homojen olmasını sağlayacaktır. Titreşim etkisi ile birbirine çarpan taneler arasında bir ısı transferi mekanizması oluşacaktır. Normalde sadece plakanın alt kısmında oluşan soğutma etkisi bu sayede plakadan akan tüm ergiyikte homojen olarak dağılabilecektir. Böylece daha uniform bir soğuma ile çekirdek dağılımı daha homojen olmuş ve çekirdeklenme sayısı da artmıştır. Bu doğrultuda mikroyapılar incelendiğinde, her üç döküm sıcaklığında da dendrit yapının kırılarak istenen rozet yapıya dönüştüğü gözlemlenmektedir. Buna hem akış esnasındaki kayma gerilmesi hem de uygulanan titreşim hareketi sebep olmuştur. Ayrıca yine titreşim hareketinin etkisi ile α -Al tanelerinin yapıda homojen olarak dağıldığını, lokal olarak bir araya gelme eğilimi göstermediğini gözlemlemek mümkün olmuştur. Ancak yine burada da düşük döküm sıcaklığında plakadan akış sırasında daha fazla çekirdek oluşacağından tane sayısında artış meydana gelmiştir.

Ayrıca, vibrasyon altında eğimli soğutma plakasında döküm ile sabit eğimli soğutma plakasında döküm esnasında oluşan katılma kabuğundan etkin bir biçimde uzaklaşmak mümkün olmuştur.

Plakanın üzerindeki ısı transfer mekanizmasını gösterebilmek için düşük döküm sıcaklığında (610°C) plaka yüzeyinde kalan katılma kabuğu kesitten incelenmiştir. Böylece mikroyapı ile ısı difüzyon yönü ve çekirdeklenme miktarı ortaya konabilmiştir. Bu inceleme hem vibrasyon altındaki hem de sabit plakadan döküm ile karşılaştırmalı olarak Şekil 7.8' de verilmiştir. Sabit eğimli soğutma plakasında döküm yönteminde ana dendritik yapının plaka yüzeyine doğrusal bir hat boyunca uzandığı görülmektedir, dolayısıyla ısı difüzyon yönünün de bu hat boyunca olduğu anlaşılmaktadır. Ancak vibrasyon altında eğimli soğutma plakasında döküm esnasında ısı difüzyon yönü düzenli bir şekilde değişeceğinden uniform bir ısı dağılımı söz konusu olmuştur. Böylece büyüme esnasında dengeli dağılmış küresel yapıyı sağlamak için oluşan ilk çekirdekler her yönde uniform olarak soğutulabilmiştir. Şekil 7.8.(a) ve (b)' ye baktığımız da ısı difüzyon yönünün plaka yüzeyine doğru geliştiği görülmektedir.

Ancak Şekil 7.8.(c) ve (d)' ye baktığımızda her yönde gelişigüzel tane büyüme stili görünmektedir. Titreşim altında yapılan döküm sadece dendritlerin titreşim etkisiyle daha fazla kırılmasına değil aynı zamanda her yöndeki uniform ısı difüzyonu küresel büyüme ve çekirdeklerin çoğalması için uygun şartları sağlamaktadır.



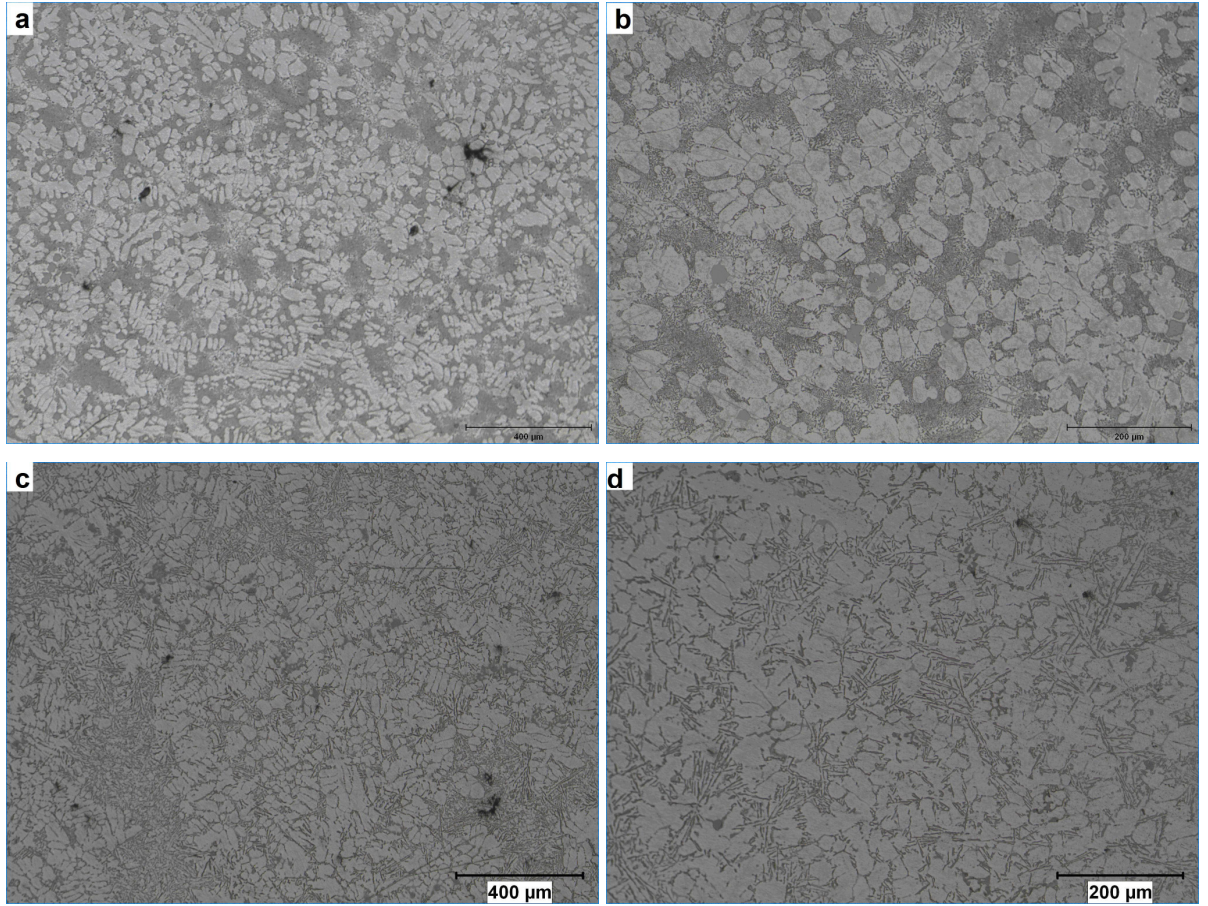
Şekil 7.8. Sabit eğimli soğutma plakası yüzeyinde kalan artık malzemenin katılaşma mikroyapısı: (a) ve (b), ve Vibrasyon altında eğimli soğutma plakası yüzeyinde kalan artık malzemenin katılaşma mikroyapısı: (c) ve (d)

7.4. Doğrudan Döküm Sırasında Kalıba Vibrasyon Uygulanması Yoluyla Üretilen A380 (ETIAL 160) Alaşımı

Gravite döküm (doğrudan döküm) bir de vibrasyon altında uygulanmıştır. Böylece titreşimin gravite dökümde katılaşma sırasındaki tanelerin oluşumuna etkisi gözlemlenebilmiştir. Ayrıca döküm sırasında kalıba 5 dk ve 10 dk olmak üzere iki farklı sürede titreşim uygulanmıştır. Bunların sonucunda normal gravite döküme kıyasla titreşim

uygulandığında dendritlerin kısmen kırıldığı, ancak birbirlerinden ayrılamadığı gözlemlenmiştir. Oluşan tane yapısı eğik düzlemde dökümdeki kadar etkin bir yapıya ulaşamamıştır. Buradan titreşimin katılma sırasında dendrit kollarını kırma etkisi olduğu sonucu çıkmaktadır.

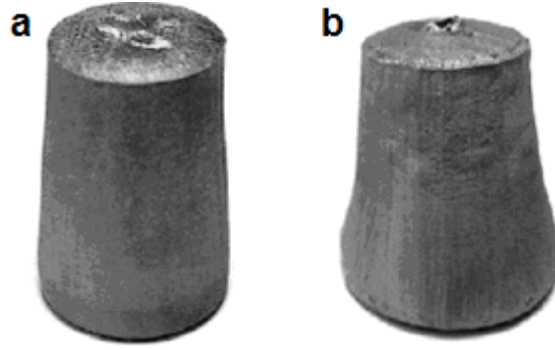
Şekil 7.9 'de titreşimin iki farklı sürede uygulanması sonucu elde edilen mikroyapı fotoğrafları verilmiştir. Buradan titreşim süresi arttıkça oluşan tanelerin bir araya toplandığı homojen bir şekilde dağılamadığı, kümелendiği gözlemlenmektedir. Ayrıca titreşim süresi arttıkça taneler arası ötektik yapı daha belirgin olmuştur. Ancak, vibrasyon altında doğrudan dökümün kısmen de olsa dendrit yapıları kırma eğilimi gösterdiği gözlemlenmektedir.



Şekil 7.9. Doğrudan döküm (gravite döküm) esnasında 5dk titreşim uygulanmış mikroyapılar: (a) ve (b), doğrudan döküm (gravite döküm) esnasında 10 dk titreşim uygulanmış mikroyapılar: (c) ve (d) elde edilen mikroyapılar

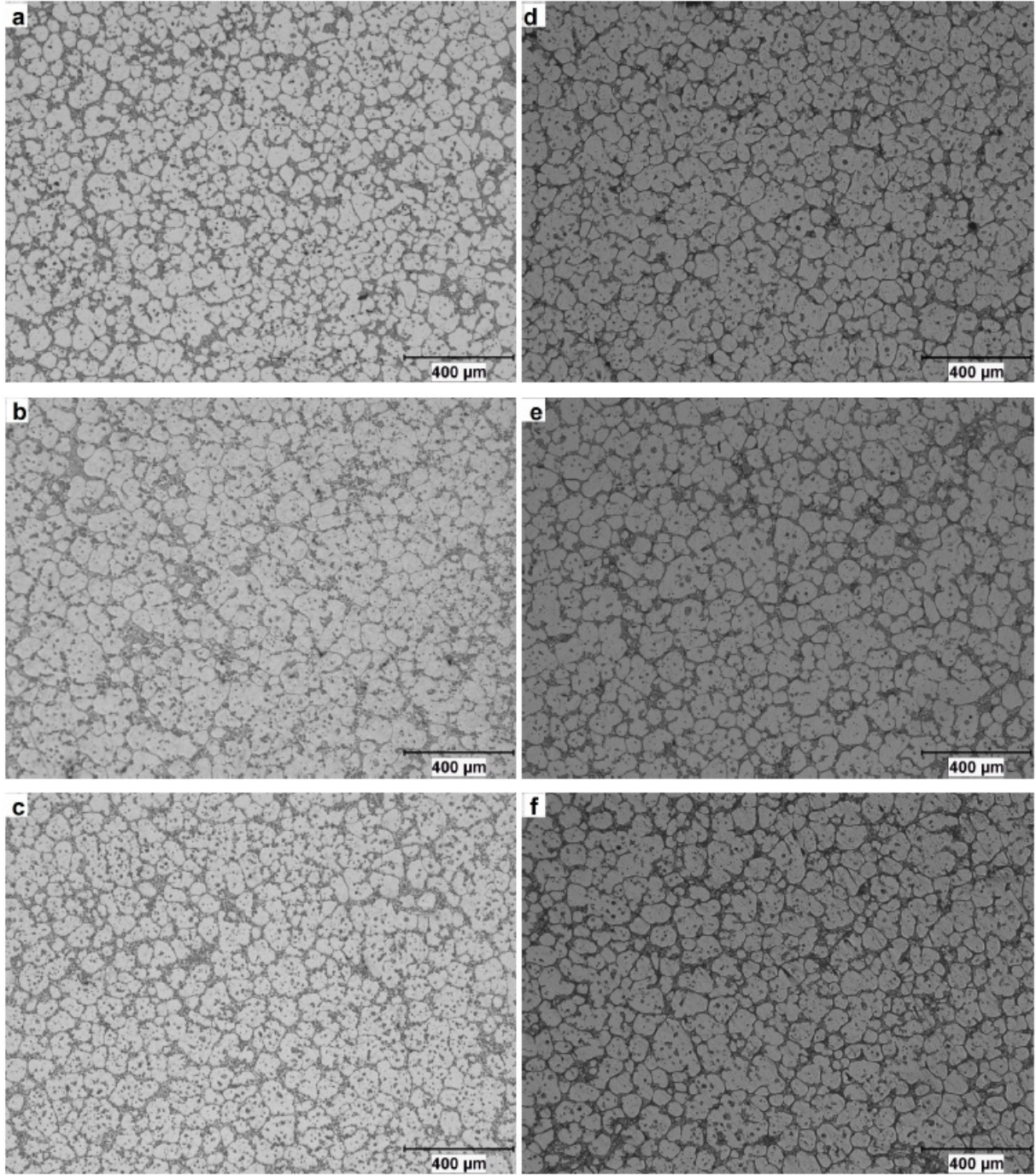
7.5. A380 (ETIAL 160) Alüminyum Alaşımından Tiksotropik Karakterde Hammadde Üretimi

Çelik kalıp içine eğimli soğutma plakası yoluyla üretilmiş A380 alüminyum alaşımı ingotlardan 30 mm çapında 40 mm yüksekliğe sahip kütükler bir indüksiyon fırınında ısıtılmış ve 565°C ve 567°C’ de izotermal olarak tutulmuştur. Yeniden ısıtılmış ve izotermal olarak tutulmuş A380 döküm kütüğünün fotoğrafı Şekil 7.10’ de verilmiştir. 5dk. süresince 567°C’ de tutulmuş numunelerin alt kısmı üst kısımdan kaynaklanan ağırlığa karşı direnç gösterememektedir ve bu yüzden döküm kütüğünün silindirik şekli bölüm 4.1 ‘de anlatıldığı gibi “elephant foot” denilen şekle değişim göstermiştir.



Şekil 7.10. İzotermal olarak (a) 565°C’ de (b) 567°C’ de tutulmasından sonra elde edilmiş A380 döküm kütüklerinin fotoğrafları

Şekil 7.11’ de kütüklerin 565°C yeniden ısıtma sıcaklığında 5dk. tutulmasından sonra suda soğutma ile elde edilen mikroyapı sonuçları bulunmaktadır. 565°C sıcaklıkta tiksotropik şekillendirme için gerekli sıvı fazın henüz yeterince oluşamadığı gözlemlenmiştir. Şekil 7.11’ de sabit eğimli soğutma plakasında ve vibrasyon altında eğimli soğutma plakasında yapılan dökümleri kıyaslırsak titreşimin etkisi ile daha fazla tane oluşmuştur, sıvı faz ise henüz yeterli oranda oluşamadığından yapıyı tam olarak çevreleyememiş ve taneler birbirlerinden ayrılamamışlardır. Buna rağmen titreşim etkisiyle tanelerin küresele daha yakın bir formda olduğu anlaşılabilmektedir.



Şekil 7.11. Sabit eğimli soğutma plakasında dökümden A380 alaşımı ingotlarının 565°C sıcaklıkta 5dk. tutulmasıyla elde edilen mikroyapılar: (a) 615°C, (b) 630°C, (c) 650°C; Vibrasyon altında eğimli soğutma plakasında dökümden A380 alaşımı ingotlarının 565°C sıcaklıkta 5dk. tutulmasıyla elde edilen mikroyapılar: (d) 615°C, (e) 630°C, (f) 650°C

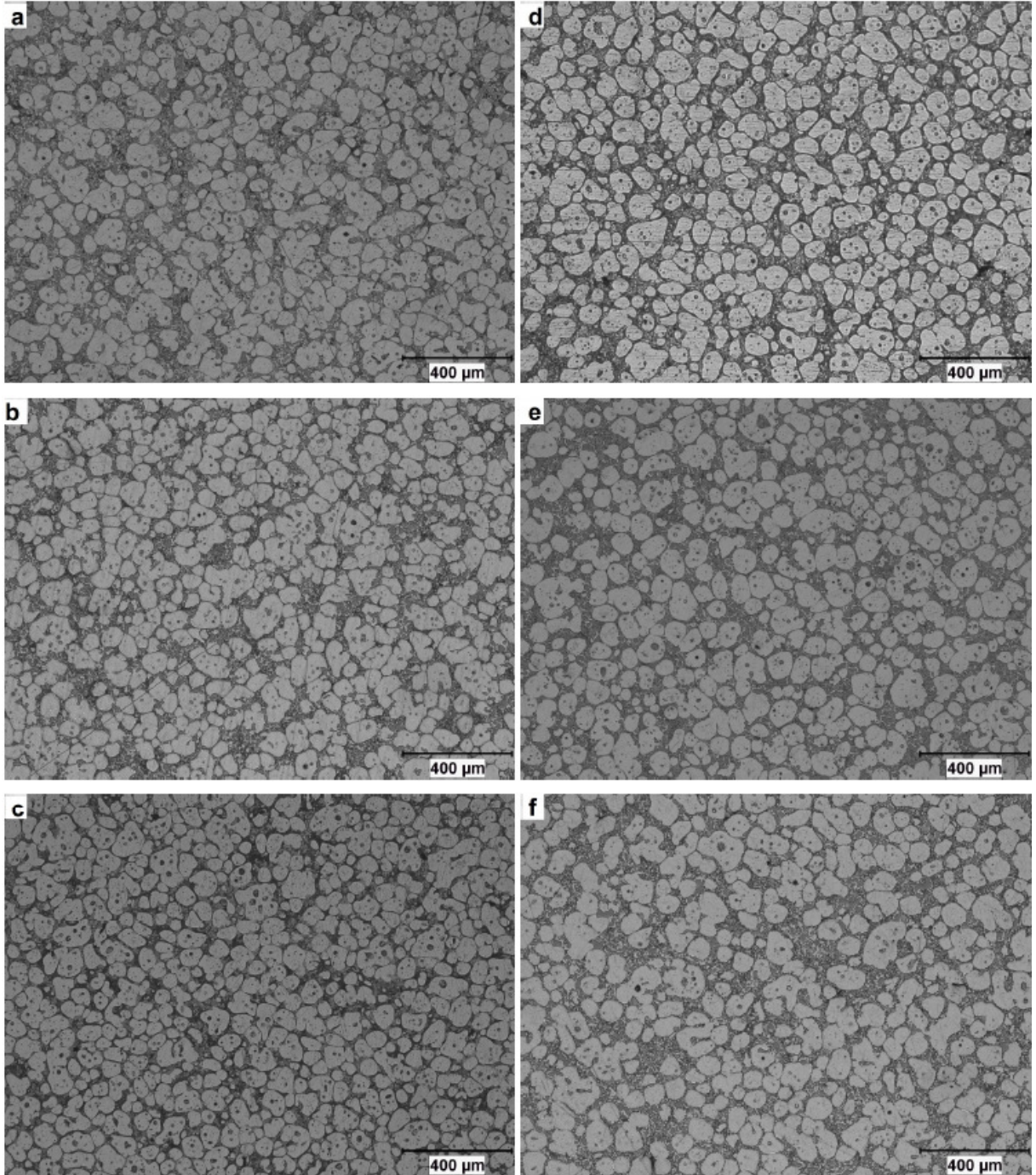
A380 alüminyum alaşımı 567°C’ de α -Al birincil fazının hemen hemen tamamı katı kalırken ötektik bileşen erimektedir. Numuneler izotermal olarak 5 dk. tutulmuştur.

Mikroyapısal gelişimin sonuçları tipik optik mikroskop resimleri ile Şekil 7.12.'de gösterilmektedir. Numuneler indüksiyon fırınında yarı-katı aralığa ısıtılmış ve sonra hızlıca su verilmiştir. Bu durum belirtilen sıcaklıkta tutulan yarı-katı numunelerin mikroyapılarının oluşumunu vermektedir. Döküm kütüklerinin rozet morfolojisi yeniden ısıtma ve izotermal tutma uygulamasından sonra uniform olarak dağılmış küresel tanelere dönüşmektedir.

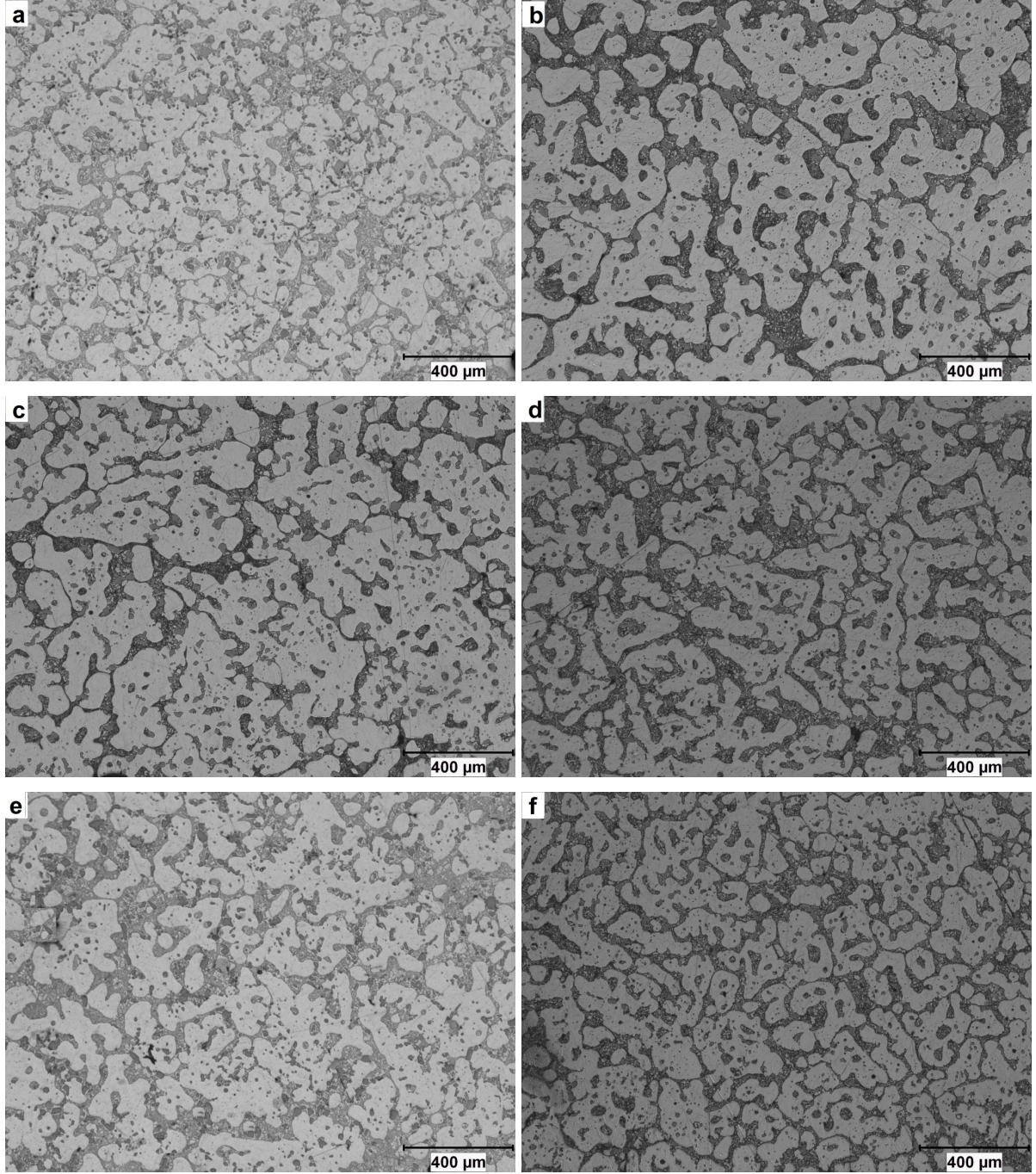
Şekil 7.12.(d)' de 615°C döküm sıcaklığında 60° eğimde 500 mm temas uzunluğundaki 5.75 Hz titreşim frekansı altında yapılan dökümün ardından izotermal olarak 567°C' de tutulmuş ingotun mikroyapısal gelişimi görülmektedir. İzotermal olarak 5 dk. tutulan ingot, eğimli soğutma plakasında döküm prosesinden elde edilen ince rozet yapı açıkça küresel mikroyapıya gelişim göstermiştir. Mikroyapı tam anlamıyla küresel olmuştur ve uniform taneler elde edilmiştir. Prosesin sonunda küresel α -Al taneleri su verilmiş sıvı matrikste homojen olarak dağılmıştır.

Şekil 7.12' ye genel itibari ile bakıldığında küresel forma yakın, uygun sıvı/katı oranı elde edildiği gözlemlenebilmektedir. Ancak titreşimin etkisi ile özellikle düşük döküm sıcaklıklarında daha küresel form elde edilmiştir. Yüksek döküm sıcaklığında tanelerin bir araya gelme eğilimi gösterdiği tespit edilmiştir.

Ayrıca, gravite döküm ve vibrasyon altında gravite dökümden elde edilen ingotlar da yarı-katı hale yeniden ısıtılmıştır. Böylece tiksö şekillendirme öncesinde non-dendritik yapı üretiminin önemi anlaşılmaktadır. . Çünkü gravite döküm yöntemiyle üretilen ingotlar yarı katı haldeyken kaba dendrit yapıların oldukça büyüyerek yapıya hakim olduğu ve hiçbir şekilde küreselleşme oluşmadığı anlaşılmıştır (Şekil 7.13.). Uygulanan titreşim süresinin artması ile 567°C sıcaklıkta yarı-katı hale ısıtmada sıvı faz taneleri ayırma eğilimi göstererek daha küçük taneler elde edilmiştir.



Şekil 7.12. Sabit eğimli soğutma plakasında dökümden A380 alaşımı ingotlarının 567°C sıcaklıkta 5dk. tutulmasıyla elde edilen mikroyapılar: (a) 615°C, (b) 630°C, (c) 650°C; Vibrasyon altında eğimli soğutma plakasında dökümden A380 alaşımı ingotlarının 565°C sıcaklıkta 5dk. tutulmasıyla elde edilen mikroyapılar: (d) 615°C, (e) 630°C, (f) 650°C

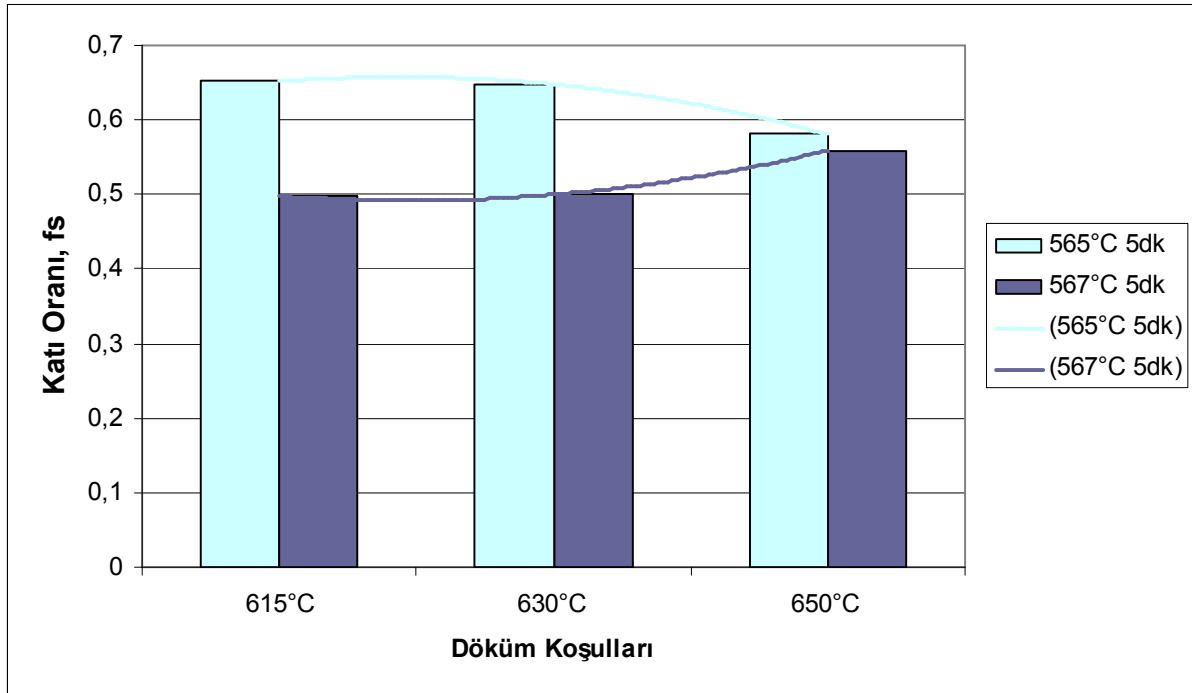


Şekil 7.13. Gravite dökümden (a)565°C, (b)567°C; 5dk.'lık vibrasyon altında gravite dökümden (c)565°C, (d)567°C; 10dk.'lık vibrasyon altında gravite dökümden (e) 565°C, (f) 567°C sıcaklıklarda yeniden ısıtılmış ingotların mikroyapıları

7.6. Tane Analizleri ve Sertlik Sonuçları

7.6.1. Tane Analizleri

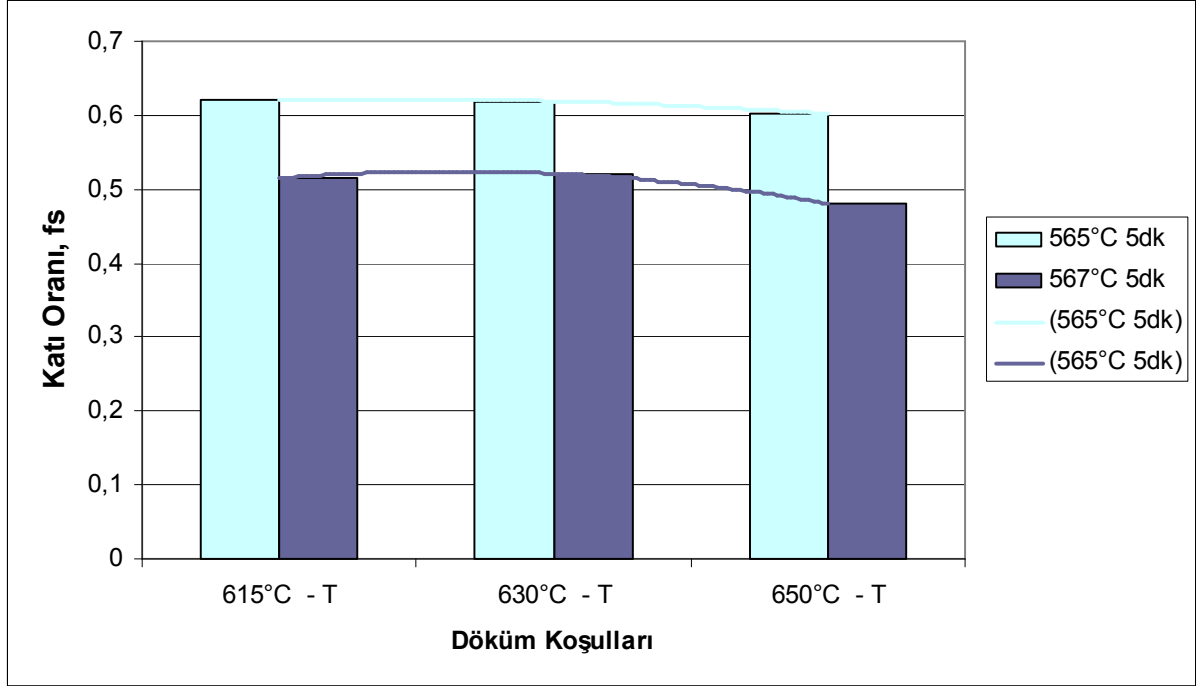
CLEMEX dijital kamera ile desteklenen NIKON Ecilipse LV100 optik mikroskobu kullanılarak çekilen mikroyapı fotoğrafları CLEMEX PROFESSIONAL EDITION analiz programı ile tane analizleri yapılmıştır. Buna göre uygulanan yarı-katı yeniden ısıtma sıcaklıklarındaki katı/sıvı oranları ve elde edilen küresel formdaki taneleri sphericity yani küresellik değerleri elde edilmiştir. Buna göre öncelikle iki farklı yeniden ısıtma sıcaklığının döküm koşullarına göre oluşan katı fazın grafiği çizilmiştir. Sabit eğimli soğutma plakasında döküm ile elde edilen katı faz oranlarının verildiği grafik Şekil 7.14' de, vibrasyon altında eğimli soğutma plakasında döküm ile elde edilen katı faz oranlarının verildiği grafik Şekil 7.15' de verilmiştir.



Şekil 7.14. Yarı-katı sıcaklıkta uygulanan izotermal işlemde elde edilen katı oranlarının sabit eğimli soğutma plakasındaki döküm koşullarına göre değişimi

Sabit eğimli soğutma plakasında dökümden elde edilen ingotların 567°C yeniden ısıtma sıcaklığında 5dk. izotermal tutulmasıyla daha fazla sıvı oranı elde edildiği

görülmektedir (Şekil 7.14). Tikso şekillendirme için uygun f_s değeri olan 0.4, 0.5 civarında katı oranı 567°C’ de 5dk. tutulmasıyla elde edilmiştir. 565°C’ de ısıtmada yeterli oranda sıvı faz oluşmamaktadır. Bu sıcaklık için $f_s = 0.65$ civarında olduğu tespit edilmiştir.



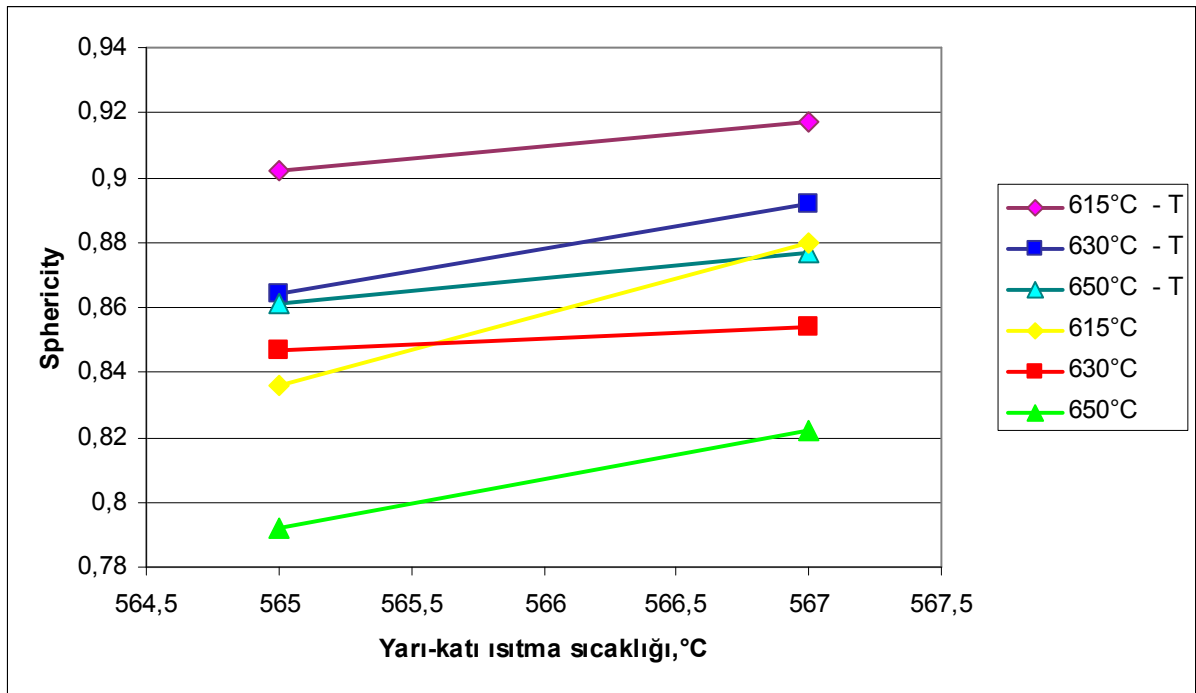
Şekil 7.15. Yarı-katı sıcaklıkta uygulanan izotermal işlemde elde edilen katı oranlarının vibrasyon altında eğimli soğutma plakasındaki döküm koşullarına göre değişimi

Vibrasyon altında eğimli soğutma plakasında dökümden elde edilen ingotların 567°C yeniden ısıtma sıcaklığında 5dk. izotermal tutulmasıyla 565°C’ye göre daha fazla sıvı oranı elde edildiği görülmektedir (Şekil 7.15). Tikso şekillendirme için uygun f_s değeri olan 0.4-0.5 civarında katı oranı 567°C’ de 5dk. tutulmasıyla elde edilmiştir. 565°C’ de ısıtmada yeterli oranda sıvı faz oluşmamaktadır. Bu değer için $f_s = 0.6$ civarındadır. Yüksek döküm sıcaklığı olan 650°C’ de daha fazla sıvı fazın oluşumunun sebebi döküm esnasında yüksek sıcaklıkta daha az çekirdeklenmeden dolayıdır. Böylece yapıda daha az α -Al taneleri mevcut olmaktadır.

Yüksek sıcaklıkta dökümde tane sınırlarında daha fazla sıvı olduğu görülmektedir. Ancak, bu durum sabit eğimli soğutma plakasından elde edilen döküm numunesinde 567°C’ de yapılan izotermal ısıtmada sapma göstermiştir. Katı faz oranının azalması beklenirken artmıştır. Bu durum mikroyapı fotoğrafına bakıldığında açıklanabilir. Bu parametrede tane içinde sıvı tutunması meydana gelmiştir. Bu nedenle tane sınırlarında sıvı faz oluşumu daha

az olmuştur. Ancak titreşim uygulandığında daha uniform tane oluştuğundan bu durum gözlenmemiştir.

Yeniden ısıtma esnasında oluşan küreselleşmenin tespiti için sphericity (küresellik) analizi yapılmıştır. Buna göre farklı döküm parametrelerinden elde edilen ingotlara uygulanan izotermal işlemin küreselliğe etkisini gösteren grafik Şekil 7.16’ da verilmektedir. Küreselliğin 1 olduğu durum en iyi küresel formu vermektedir, buna göre düşük döküm sıcaklığında vibrasyon altındaki plakadan yapılan dökümde 567°C ısıtma süresinde en küresel tane yapısına ulaşılmıştır.



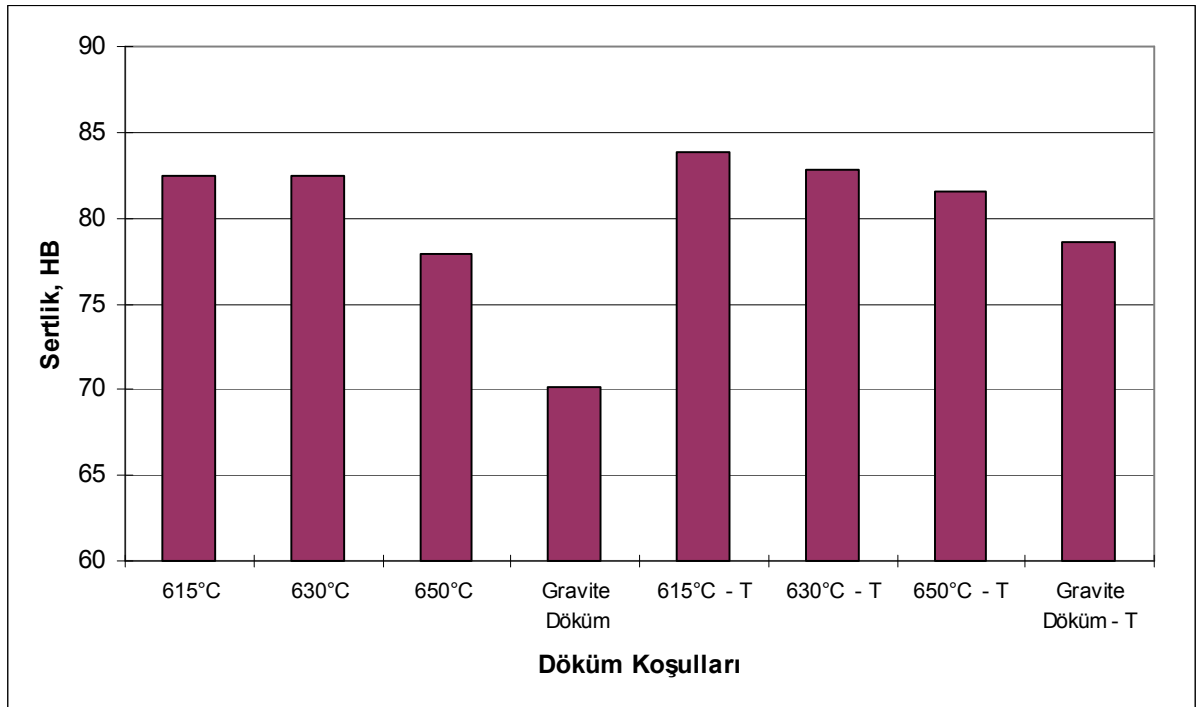
Şekil 7.16. Döküm koşullarının yarı-katı ısıtma sıcaklığında elde edilen küresellik üzerine etkisi

Şekil 7.16’ da verilen sphericity (küresellik) değerleri incelendiğinde titreşim altında yapılan döküm ile çok daha küresel tane yapısına ulaşıldığı açıkça görülmektedir. Döküm esnasında yapıda daha homojen dağılmış ve daha etkin bir kayma gerilmesi etkisine maruz kalan taneler yarı-katı ısıtma esnasında sıvı faz tarafından çevrelenerek oldukça küresel tane formu elde edilmiştir. Buna göre en küresel tane yapısı en düşük döküm sıcaklığı olan 615°C’ de 60° eğimli ve 500 mm temas uzunluğuna sahip vibrasyon altında yapılan dökümden elde edilen ingotun indüksiyonla 567°C’ ye ısıtılıp bu sıcaklıkta 5dk. izotermal tutulmasıyla

ulaşılmıştır. Ayrıca döküm yöntemleri kendi içinde karşılaştırıldığında en düşük küresellik değerleri en yüksek döküm sıcaklığı olan 650°C’ de elde edilmiştir.

7.6.2. Sertlik Sonuçları

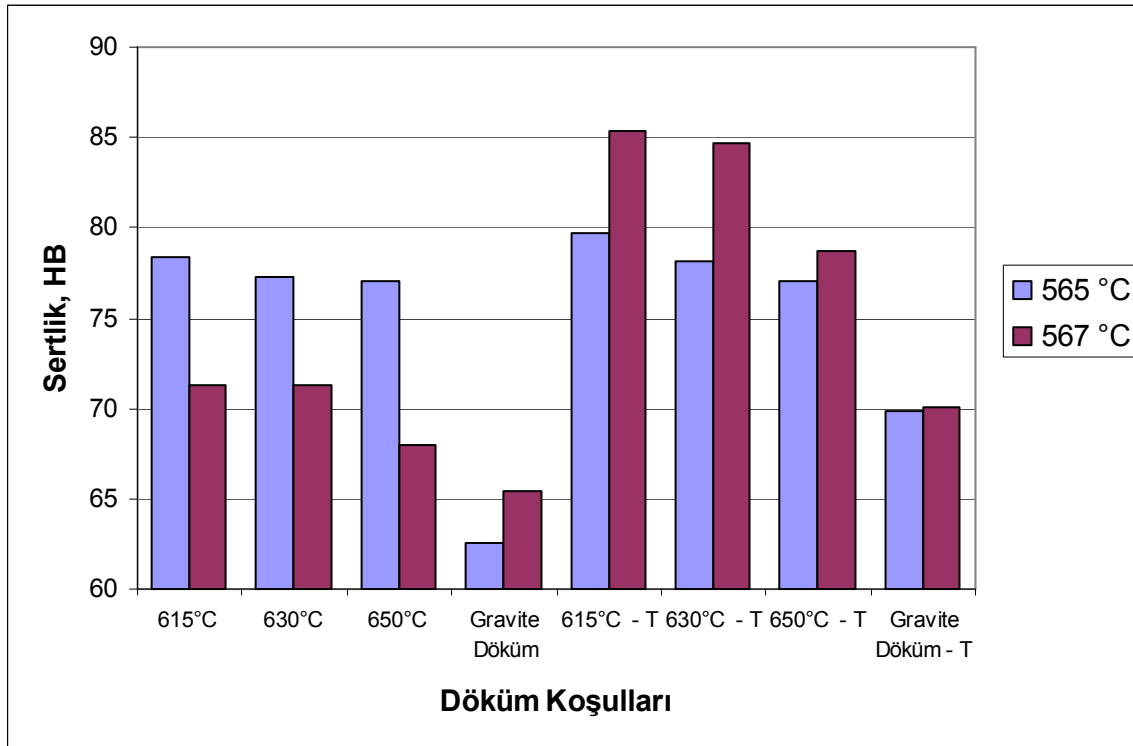
Sabit ve vibrasyon altında eğimli soğutma plakasında döküm ile elde edilen ingotların 62.5 kgf altında Brinell sertlik değerleri ölçülmüştür. Bununla ilgili grafik Şekil 7.17’ de verilmiştir.



Şekil 7.17. Sabit ve vibrasyon altında eğimli soğutma plakasında döküm yöntemiyle elde edilen ingotların sertlik grafiği

Şekil 7.17’ de verilen sertlik grafiği karşılaştırmalı olarak incelendiğinde, eğimli soğutma plakasında döküm yöntemi geleneksel doğrudan döküm yöntemine göre çok daha üstün sertlik değerleri vermektedir. Eğimli soğutma plakasında döküm yönteminde düşük döküm sıcaklığında en yüksek sertlik değerlerine ulaşılmıştır. Aynı zamanda titreşimin etkisi göz önüne alındığında sertlik artışına bulunduğu görülmektedir. En yüksek sertlik değeri ise mikroyapı fotoğraflarında da en üstün mikroyapı sonucunu veren 615°C sıcaklıkta 60° eğimdeki 500 mm temas uzunluğuna sahip titreşim altındaki plakadan yapılan döküm ile elde edilmiştir. Tane boyutu küçüldükçe sertlik değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir.

Şekil 7.18’ de sabit ve vibrasyon altında eğimli soğutma plakasında döküm yöntemiyle elde edilen ingotların yarı-katı sıcaklığa ısıtılmasıyla elde edilen sertlik grafiği verilmiştir. Sertlik grafiği genel olarak titreşim uygulanmasıyla sertlik değerlerinin arttığı sonucunu vermektedir. Sabit eğimli soğutma plakasından elde edilen ingotlar için izotermal işlem göz önüne alındığında istenen sıvı faz oranının elde edilemediği 565°C sıcaklıkta daha yüksek sertlik sonuçları elde edilmiştir. Ancak bu durum tikso şekillendirme için gerekli ve uygun olan sıvı fazın elde edildiği 567°C sıcaklıkta titreşim altında yapılan dökümler için daha yüksek sertlik değerlerine ulaşılmıştır. Vibrasyon altında dökümde 567°C sıcaklıkta elde edilen sıvı faz miktarı ile taneler birbirinden ayrılmıştır, ancak 565°C sıcaklıkta yeterli sıvı faz oluşmadığından taneler tam olarak birbirlerinden ayrılamamışlardır. Bu sebepten ötürü tane boyutu azalmış ve sertlik değeri artmıştır. Tikso şekillendirme için en uygun parametre olan 615°C döküm sıcaklığında titreşim altında eğimli soğutma plakasında yapılan dökümden elde edilen ingotların 567°C’ de 5dk. tutulmasıyla en yüksek sertlik değerine ulaşılmıştır. Bu durum mikroyapı sonuçlarını da destekler niteliktedir.



Şekil 7.18. Sabit ve vibrasyon altında eğimli soğutma plakasında döküm yöntemiyle elde edilen ingotların yarı-katı sıcaklığa ısıtılmasıyla elde edilen sertlik grafiği

7.7. Tikso Şekillendirme

Tikso şekillendirme uygulaması, 615°C ve 650°C döküm sıcaklıklarında 60° eğimdeki 500 mm uzunluğundaki plakadan hem sabit hem de vibrasyon altında yapılan dökümlerden elde edilen kütüklere, ve hem sabit hem de titreşim altında yapılan gravite döküm yöntemiyle elde edilen kütüklere ısıtma çalışmalarından elde edilen 567°C optimum ısıtma sıcaklığında yapılmıştır. Tikso şekillendirilmiş numunelerin fotoğrafları Şekil 7.19’ de gösterilmektedir.



Şekil 7.19. Tikso şekillendirilmiş numuneler

Tikso şekillendirme işlemi ısıtma çalışmalarından elde edilen parametreler doğrultusunda gerçekleştirilmiştir. Buna göre, ısıtma sıcaklığı ve izotermal işlem olarak uygun sıvı faz oranının elde edildiği 567°C’ de 5dk. olarak seçilmiştir. Bu sıcaklıkta hem eğimli soğutma plakasında dökümden elde edilen ingotlar hem de gravite döküm yöntemiyle elde edilen ingotlar şekillendirilmiştir. Böylece mikroyapıların şekillenme kabiliyetine etkisi etkin bir şekilde gösterilmiştir. Gravite dökümden elde edilen ingotların mikroyapısında kaba dendritlerin hakim olduğu bilinmektedir. Bu dendrit yapı malzeme yarı-katı formdayken

akmaya karşı yüksek bir direnç gösterdiğinden şekillenme kabiliyeti oldukça düşüktür (Şekil 7.19).

Titreşimin etkisinin incelenebilmesi için hem sabit hem de vibrasyon altında eğimli soğutma plakasında döküm yönteminden elde edilen ingotlar şekillendirilmiştir. Buna göre titreşimin etkisiyle oldukça iyileşen ingot mikroyapısının şekillendirme kabiliyetini de etkilediği açıkça görülmektedir (Şekil 7.19). Titreşim etkisiyle yapı içerisinde daha homojen dağılmış taneler daha homojen bir şekillenme sağlayarak, kalıbı oldukça uniform bir şekilde doldurmuştur. Ayrıca düşük döküm sıcaklığında elde edilen üstün mikroyapı şekillenme kabiliyetinde de en üstün sonucu vermektedir.

8. GENEL SONUÇLAR

Tikso şekillendirme kompleks parçaların üretilmesi için zaman ve maliyetin önemli tasarrufuna sahip, ilgi çekici bir prosestir ve üç ana prosesten oluşur, tiksotropik hammadde üretimi, yeniden ısıtma ve tikso şekillendirme. Bu çalışmada, tikso şekillendirmenin üç adımı A380 alüminyum alaşımı (ETIAL 160) için gerçekleştirilmiştir. Tikso şekillendirme için hammadde eşekslenli, küresel tanelerin sıvı bir matrikste uniform olarak dağıldığı non-dendritik bir mikroyapıya sahip olmalıdır. Eğimli soğutma plakasında döküm prosesi hem ekonomik hem de pratik bir hammadde üretim yöntemidir. Eğimli soğutma plakasında dökülerek elde edilen numunelerde döküm sıcaklığının azalması daha non-dendritik ve eş ekslenli, rozet diye adlandırılan taneler oluşturmuştur. Eğimli soğutma plakasında döküm esnasında plakaya titreşim uygulanması daha homojen tane oluşumuna neden olmuştur. Bu da şekillendirme prosesi için oldukça önemli bir etki oluşturmaktadır.

Deneylerin yeniden ısıtma adımı, A380 döküm numuneleri bir indüksiyon ünitesinde 565°C ve 567°C' ye kısmen ergitilmiştir ve izotermal olarak 5 dk. tutulmuştur. Kütüklerin dış görünüşü alaşımın yeniden ısıtma uygulaması esnasında “elephant foot” şekline dönüşmektedir. Eğimli soğutma plakasında dökümden elde edilen numunelerdeki non-dendritik morfoloji, A380 alaşımının kısmi yeniden ergitme ve izotermal olarak tutulmasının ardından daha homojen ve küresel bir mikroyapıya dönüşmüştür.

Tüm parametreler için mikroyapısal gelişim, tane analizleri ve sertlik değerleri araştırılmıştır. Buna göre vibrasyon altında düşük sıcaklıkta (615°C) yapılan eğimli soğutma plakasında dökümden elde edilen numune 567°C' de 5dk. izotermal olarak tutulmasıyla en homojen ve küresel mikroyapı elde edilmiştir. Yine bu parametrede tikso şekillendirme için en uygun sıvı faz oranı elde edilmiş ($f_s = 0.51$) ve tüm sertlik ölçümlerinde en yüksek sertlik değerine 85HB olarak bu parametrede ulaşılmıştır.

Deneylerin şekillendirme adımı, döküm kütükleri yeniden ısıtma adımı uygulanan sıcaklığa manyetik alan vasıtasıyla yeniden ısıtılmış ve ardından tikso şekillendirme gerçekleştirilmiştir. Tikso şekillendirilen numunelerin şekillenebilme kabiliyetine bakıldığında, vibrasyon altında düşük sıcaklıkta (615°C) yapılan eğimli soğutma

plakasında dökümden sonra 567°C' de 5dk. izotermal olarak tutulan numunenin kalıp dolumu başarıyla sonuçlanmıştır.

REFERANSLAR

1. Flemings, M. C., “Behavior of Metal Alloys in the Semi-solid State”, *Metallurgical Transactions A*, Vol. 22A, pp. 957-980, 1991.
2. Kim, N. S. and C. G. Kang, “An Investigation of Flow Characteristics Considering the Effect of Viscosity Variation in the Thixoforming Process”, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.103, pp. 237-246, 2000.
3. Tzimas, E. and A. Zavaliangos, “Material Selection for Semisolid Processing”, *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 14, 1999,
http://www.materials.drexel.edu/faculty/antonios/publications/papers_pdfs/MaterManuf.pdf.
4. Huang W., T. Li, X. Lin and L. Wang, “Formation of Semisolid Globular Structures under Shearing”, *Proceedings of the 8th International Conference on the Processing of Semi-solid Alloys and Composites*, 2004.
5. Bozkurt, U., “Mechanical Properties and Microstructure Evolution of Thixoformed Aluminum Alloys” M.S. Thesis, Boğaziçi University, 2005.
6. Liu, D., H. V. Atkinson, P. Kapranos, W. Jirattiticharoean, and H. Jones, “Microstructural Evolution and Tensile Mechanical Properties of Thixoformed High Performance Aluminium Alloys”, *Materials Science and Engineering*, Vol.A361, pp. 213-224, 2003.
7. Lee, S. Y. and S. Oh, “Thixoforming Characteristics of Thermo-mechanically Treated AA 6061 Alloy for Suspension Parts of Electric Vehicles”, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.130–131, pp. 587–593, 2002.
8. Liu, D., H. V. Atkinson and H. Jones, “Mtdata Thermodynamic Prediction of Suitability of Alloys for Thixoforming”, *Proceedings of the 8th International Conference on the Processing of Semi-solid Alloys and Composites*, 2004.

9. Dasgupta R., "Industrial Applications – The Present Status and Challenges We Face", *Proceedings of the 8th International Conference on the Processing of Semi-solid Alloys and Composites*, 2004.
10. Tzimas, E. and A. Zavaliangos, "Evolution of Near-equiaxed Microstructure in the Semisolid State", *Materials Science and Engineering*, Vol. A289, pp. 228-240, 2000.
11. Vieira, E. A., A. M. Kliauga, M. Ferrante, "Microstructural Evolution and Rheological Behaviour of Aluminum Alloys A356, and A356 + 0.5% Sn Designed for Thixocasting", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 155, pp. 1629- 1633, 2004.
12. Roplekar, J. K. and J. A. Dantzig, "A Study of Solidification with a Rotating Magnetic Field" *International Journal of Cast Metals Research*, Vol. 14, pp. 79-95 2001.
13. Kirkwood, D. H., "Semi-solid Metal Processing", *International Materials Reviews*, Vol.39, No. 5, pp. 173-189, 1994.
14. Dantzig, J. A., J. Winter and D. E. Tyler, "Process and Apparatus for Making Thixotropic Metal Slurries", U.S. Patent 4,434,837, 1984.
15. Tzimas, E. and A. Zavaliangos, "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*, Vol. A289, pp. 217-227, 2000.
16. Buynacek, C. J. and W. L. Winterbottom, "High Volume Semi-solid Forming of Aluminum Master Cylinders", *SAE 2000 World Congress*, 2000.
17. Winterbottom W. L., "Semi-solid Forming Applications: High Volume Automotive Products", *Metallurgical Science and Technology*, Vol. 18, No. 2, pp. 5-10, 2000.
18. Kliauga, A. M. and M. Ferrante, "Comparison of Flow Behaviour and Microstructure and Texture Development of Aluminium Alloy A356 in Semisolid State Submitted to Two Different Thermomechanical Treatments", *Materials Science and Technology*, Vol. 18, pp. 820-826, 2002.

19. Changming, L. and Z. Maohua, "Effects of Compressing and Remelting in SIMA Processing on Semi-solid Structure Evolution of an Al-Zn Wrought Alloy", *Rare Metals*, Vol. 22, No. 3, pp. 185-191, 2003.
20. Saklakoğlu, İ.E., "SIMA Prosesiyle Yarı Katı Dalde Mikroyapı Oluşumu", *Metallurji Dergisi*, 138. sayı.
21. Kirkwood, D. H., C. M. Sellars and L. G. E. Boyed, "Thixotropic Materials", U.S. Patent 5,133,811, 1992.
22. Kirkwood, D. H., "Semi-solid Metal Processing", *International Materials Reviews*, Vol.39, No. 5, pp. 173-189, 1994.
23. Haga, T. and P. Kapranos, "Billetless Simple Thixoforming Process", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.130–131, pp. 581–586, 2002.
24. Salarfar, S., Akhlaghi F. and M. Nili-Ahmadabadi, "Influence of Pouring Conditions in the Inclined Plate Process and Reheating on the Microstructure of the Semi-solid A356 Aluminum Alloy", *Proceedings of the 8th International Conference on the Processing of Semi-solid Alloys and Composites*, 2004.
25. Grimmig, T., J. Aguilar, M. Fehlbier and A. Bührig-Polaczek, "Optimization of the Rheocasting Process under Consideration of the Main Influence Parameters on the Microstructure", *Proceedings of the 8th International Conference on the Processing of Semi-solid Alloys and Composites*, 2004.
26. Legoretta E.C., Atkinson H.V., Jones H., "Cooling slope casting to obtain thixotropic feedstock" makalesi
27. Jung, H. K. and C. G. Kang, "Induction Heating Process of an Al-Si Aluminium Alloy for Semi-solid Die Casting and Its Resulting Microstructure", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 120, pp. 355-364, 2002.

28. Jung, H. K., “The Induction Heating Process of Semi-solid Aluminium Alloys for Thixoforming and Their Microstructure Evaluation”, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 105, pp. 176-190, 2000.
29. Kapranos, P., R. C. Gibson, D. H. Kirkwood and C. M. Sellars, “Induction Heating and Partial Melting of High Melting Point Thixoformable Alloys”, *Proceedings of the 4th International Conference on Semi-solid Processing Alloys and Composites*, 1996.
30. Fairchild Semiconductor 2002, “Induction Heating System Topology Review”,
<http://www.fairchildsemi.com/an/AN/AN-9012.pdf>.
31. Burnett R., “RF Induction Heating”, <http://www.richieburnett.co.uk/indheat.html>.
32. Herring, D. H., “Induction Heating for the Rest of Us”, *Industrial Heating*, Vol. 71, Iss. 5, pp. 12-13, 2004.
33. Midson, S., V. Rudnev and R. Gallik, “Semi-solid Processing of Aluminum Alloys”, *Industrial Heating*, Vol. 66, Iss. 1, 1999.
34. Yurko, J. A., R. A. Martinez and M. C. Flemings, “SSRTM: The Spheroidal Growth Route to Semi-solid Forming”, *Proceedings of the 8th International Conference on the Processing of Semi-solid Alloys and Composites*, 2004.
35. Porter D.A.,Easterling K.E. (1983): “Phase transformation in metal and alloys”, Second Edition, Chapman and Hall, U.K., 186-237
36. Flemings, M.C., “Solidification Processing”, ISBN 0-07-021283-X, Mc Graw-Hill, Newyork, USA, 1974.
37. Kurz W., D.J. Fisher, “Fundamentals of Solidification”, First Edition, TransTech Publication, Switzerland, 1986.
38. Kırtay, S., “Etial 24 ve Etial 44 Alaşımlarına Yarı-Katı Halde Şekil Verilmesi, Mikroyapı ile Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi”, Y.L. Tezi, İstanbul Üniversitesi, 1997.

39. Sencer, B.H., “Al-Cu Al-Cu-Si alaşımlarında yeniden kristalleşme yöntemiyle thixotropik malzeme üretimine etki eden parametrelerin incelenmesi”, Bitirme Tezi, İ.T.Ü, Sakarya Mühendislik Fakültesi, 1991.
40. ASM Handbook Vol. 15, Ninth Edition, ISBN 0-87170-007-7, Ohio, USA, 327-338, 1990.
41. Kenney, M.P., J.A. Courtois, R.D. Evans, G.M. Farrior, C.P. Kyonka, A.A. Koch and K.P. Young, “Semisolid Metal Casting and Forging”, *Metals Handbook*, Ninth Edition, Vol.15, pp. 327-338, 1998.
42. Camacho, A.M., H.V. Atkinson, P. Kapranos and B.B. Argent, “Thermodynamic Predictions of Wrought Alloy Compositions Amenable to Semi-solid Processing”, *Acta Materialia*, Vol. 51, pp. 2319-2330, 2003.
43. Birol Y., “Forming of AlSi8Cu3Fe alloy in the semi-solid state”, *Journal of Alloys and Compounds*, 183-187, 470, 2009.
44. Wu, S., L. Xie, J. Zhao and H. Nakae, “Formation of Non-dendritic Microstructure of Semi-solid Aluminum Alloy Under Vibration”, *Scripta Materialia*, 58, 556-559, 2008.
45. Guan, R.G., F.R. Cao, L.Q. Chen, J.P. Li, C. Wang, “Dynamical Solidification Behaviors and Microstructural Evolution during Vibrating Wavelike Sloping Plate Process”, *Journal of Materials Processing Technology*, 2008.

BU ÇALIŞMADAN ÇIKAN YAYINLAR

Gençalp S., Ş. Kasman, N. Saklakoğlu, “Soğutma Plakasında Döküm Sırasında Plaka Açığı ve Uzunluğunun Mikroyapı Gelişimine Etkisi”, *5.Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09)*, 2009.

Kasman Ş., S. Gençalp, N.Saklakoğlu, Ş.Uçar, “Döküm Yönteminin ETİAL 160 Alaşımının Mekanik Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi”, *5.Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09)*, 2009.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı: Simge GENÇALP

Doğum Tarihi: 11 Ekim 1985

Doğum Yeri : İzmir

Eylül 1999 – Haziran 2002 : İzmir Karataş Lisesi

Eylül 2003 – Haziran 2007 : Celal Bayar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine
Mühendisliği Bölümü

Eylül 2007 - : Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Konstrüksiyon ve İmalat Programında Yüksek Lisans
Eğitimi

Eylül 2007 - : Celal Bayar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine
Mühendisliği Bölümü Proje Asistanlığı

EK

Al-Si Faz Diyagramı

