

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**SIVAMA DÖKÜM YÖNTEMİYLE MÜHİMMAT
GÖVDESİ ÜRETİMİ**

Metaller ve Malzeme Yük. Müh.

Hüseyin Murat LUŞ

**F.B.E. Metalurji ve Malzeme Anabilim Dalı Malzeme Programında
Hazırlanan**

DOKTORA TEZİ

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Nihat G.KINIKOĞLU (YTÜ)
İkinci Tez Danışmanı : Doç.Dr. Altan TÜRKELİ (M.Ü)
Jüri Üyeleri : Prof.Dr. Aydın ATASOY (İTÜ)
Prof.Dr. Mustafa ÇİĞDEM (YTÜ)
Prof.Dr. Niyazi ERUSLU (İTÜ)
Prof.Dr. Ahmet EKERİM (YTÜ)

İSTANBUL, 2007

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	iv
KISALTIMA LİSTESİ	v
ŞEKİL LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vi
ÇİZELGE LİSTESİ	ix
ÖNSÖZ.....	x
ÖZET	xi
ABSTRACT	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. GENEL BİLGİLER.....	3
2.1 Sıkıştırılmalı Döküm.....	3
2.1.1 Basıncın Katılaşma Üzerindeki Etkisi	4
2.1.2 Sıkıştırılmalı Dökümde Mikroyapı	6
2.2 Yarı-Katı Metal Dökümü.....	9
2.2.1 Yarı-Katı Dökülmüş Metallerde Yapı	9
2.3 Savurma (Merkezkaç) Döküm.....	13
2.3.1 Katılaşma	13
2.4 Sıvama Döküm	14
2.4.1 Yöntem	14
3. KATILAŞMA.....	17
3.1 Katı-Sıvı Ara Yüzeyi	17
3.2 Alaşımların Dallantılı katılaşması	20
3.2.1 Bileşim Alt Soğuması	23
3.2.2 Dallantı Morfolojisi	26
3.3 Alüminyum Alaşımlarının Katılaşması	29
3.3.1 Tane Yapısı.....	30
3.3.2 Dallantı Yapısı	30
3.3.3 Al Alaşımlarının Yarı-Katı Durumda Kesme Davranışları	31
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	33
4.1 Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Malzeme ve Cihazlar	33
4.1.1 Döküm Alaşımı.....	33

4.1.2	Sıvama Döküm Makinesi	34
4.1.3	Döküm Kalıpları	37
4.1.4	Ergitme Ünitesi	39
4.1.5	Sıcaklık Ölçüm Cihazları	39
4.2	Sıvama Döküm Deneyleri	40
4.2.1	Döküm Öncesi Hazırlıklar	40
4.2.2	Döküm Deneyleri	41
4.3	İncelemeler	46
4.3.1	Metalografik İncelemeler	46
4.3.2	Bileşimdeki Değişmenin Tespiti	47
4.3.3	Nicel Metalografik İncelemeler	49
4.3.4	Gözeneklilik Tayini	52
4.3.5	Sertlik Ölçümü	52
4.3.6	Elektron Mikroskobu İncelemeleri	52
5.	BULGULAR	53
5.1	Mikroyapılar	53
5.1.1	9 No'lu Sıvama Dökümün Mikroyapıları	53
5.1.2	13 No'lu Sıvama Dökümün Mikroyapıları	55
5.1.3	14 No'lu Savurma Döküm Parçasının Mikroyapıları	74
5.1.4	15 No'lu Sıkıştırılmalı Döküm Parçasının Mikroyapıları	77
5.1.5	13,14 ve 15 No'lu Dökümlerin Orta Kısımlarının Mikroyapıları	80
5.2	Bileşimdeki Değişmenin Tespiti	84
5.3	Nicel Metalografik İncelemeler	86
5.4	Gözeneklilik Ölçümü	92
5.5	Sertlik Ölçümü	94
5.6	Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizi	95
5.7	Ortalama Kesme Hızı ve Görünen Ağdalık Hesabı	100
6.	SONUÇLAR ve TARTIŞMA	108
	KAYNAKLAR	112
	EKLER	114
	Ek 1. Küresellik analiz için görüntü analiz programından alınan verilere örnek (0-3)	114
	ÖZGEÇMİŞ	126

SİMGE LİSTESİ

α	Açısal İvme
Ω_0	Açısal Hız
γ	Kesme Hızı
η	Ağdalık
ΔT	Alt veya Üst Sıcaklık Farkı
D_L	Sıvıdaki Yayırlık
C_0	Alaşımın Bileşimi
T_m	Denge Donma Sıcaklığı
T_L	Sıvıgen sıcaklığı
T_G	Sıvının gerçek sıcaklığı
V_L	Sıvının Özgül Hacmi
V_s	Katının Özgül Hacmi
C_s	Katının Bileşimi
C_L	Sıvının Bileşimi
G_L	Sıvının Sıcaklık Eğimcesi
R	Katılaşma Hızı
m	Sıvıgenin eğimi
Pl	Sıvının yoğunluğu
P_{th}	Alaşımın Teorik Yoğunluğu
$Whava$	Havadaki ağırlık
Wsu	Sudaki Ağırlık
M	Tork
τ	Kesme Gerilmesi
ΔH_f	Ergime Gizli Isısı
k	Paylaşım Katsayısı
K	İç silindirin yarıçapının dış silindirin yarıçapına oranı
I_{sistem}	Eylemsizlik Momenti

KISALTMA LİSTESİ

SEM Scanning Electron Microscope
EDX Energy Dispersive X-ray Analysis

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Sıkıştırımlı Döküm Tekniği (A.S.M. Handbook vol.15-Dorcic ve Verma, 1992).....	3
Şekil 2.2 Hızlı katılaşmanın ve uygulanan basıncın Al-Si alaşımının faz diagramı üzerindeki etkisi (Ghomashchi ve Vikhrov, 1998).....	5
Şekil 2.3 LM 24 alaşımının sıkıştırımlı (a) ve konvansiyonel (b) dökülmüş mikroyapıları (Ghomashchi ve Vikhrov, 1998).....	6
Şekil 2.4 Klasik metal kalıba (a) ve Sıkıştırımlı (b) dökülmüş 5083 alaşımın mikroyapıları (Lee vd.,1999).....	7
Şekil 2.5 Değişik döküm sıcaklıklarında sıkıştırımlı dökülmüş 7010 alaşımı. Döküm sıcaklıkları, (a) 953 K (b) 903 K, basınç: 300 Mpa (Yue, 1997).....	8
Şekil 2.6 a) Hızlı karıştırılmış karışımın görünümü, b) Yavaş karıştırılmış karışımın görünümü (Campell, 1970).....	10
Şekil 2.7 Dallantılı katılaşmış (a) ve Yarı-Katı dökülmüş (b) alaşıma ait mikroyapılar (www.gpm2.inpg.fr).....	10
Şekil 2.8 A357 alaşımının yarı-katı metal döküm sıcaklığındaki pelte görünümü (Nadca, 1999).....	11
Şekil 2.9 440C paslanmaz çeliğinin a) dallantılı ve b) pelte döküm döküm yapılarının karşılaştırması (b resmindeki açık renkli küresel parçacıklar sürekli pelte döküm makinasında oluşan birincil katı parçacıklardır) (Matsumoto vd., 1975).12	
Şekil 2.10 Sıvama Döküm sistemi ve işlem kademeleri.....	16
Şekil 3.1 Eşbiçimli ikili bir faz çizgesinin bir bölümü (Abbaschian ve Reed-Hill, 1992).....	18
Şekil 3.2 Bileşim- Mesafe eğrileri (Abbaschian ve Reed-Hill, 1992).....	18
Şekil 3.3 (x) mesafesi içinde alaşımın sıcaklığı (katılaşma sıcaklığından düşük) (Rutter ve Chalmers, 1953).....	20
Şekil 3.4 Arayüzeydeki ısı eğimcesi ve arayüzey morfolojisi arasındaki ilişki (p/c düzlemsel hücrel, c/d hücrel dallantılı, d/e dallantılı eşeksenli sınırları) (Stefanescu, 2002).....	22
Şekil 3.5 Saf metallerde sıcaklık eğimcesinin büyümeye etkisi (Konczos vd. 1998).....	23
Şekil 3.6 Katı çözeltili bir alaşım için şematik faz diagramı (Stefanescu, 2002).....	24
Şekil 3.7 katı ara yüzeyinin denge durumunda: (a) denge çizgesi, paylaşım katsayısı $k = CS/CL < 1$, (b) ara yüzey önünde çözünen (B atomları) dağılımı, (c) kararlı yüzeyde sıcaklık eğimcesi, (d) kararsız yüzeyde sıcaklık eğimcesi (Konczos vd. 1998).....	25
Şekil 3.8 Yönlendirilmiş katılaşma ile belirlenmiş Al-Si alaşımlarının eşlenik bölge çizgesi (Atasoy vd, 1984).....	29
Şekil 3.9 Al-7Si, Al-10Si ve Al-12Si alaşımlarında dallantı kolları arası mesafenin bölgesel katılaşma zamanı ile değişimi (A.S.M. Handbook vol 15- Granger ve Elliot, 1992).....	30
Şekil 3.10 Yarı-Katı bölgenin katı oranının artmasıyla dayanımının arttığını gösteren grafik (Sumitomo vd., 2000).....	31
Şekil 4.1 A-380 Al-Si alaşımının faz çizelgesindeki yeri (www.aluminium.matter.org.uk) ..	34
Şekil 4.2 Sıvama Döküm Sistemi.....	35
Şekil 4.3 Sıvama döküm kalıpları.....	36
Şekil 4.4 Üst kalıbın teknik resmi (ölçüler mm cinsinden).....	37
Şekil 4.5 Alt kalıbın teknik resmi (ölçüler mm cinsinden).....	38
Şekil 4.6 Ergitme Ünitesi.....	39
Şekil 4.7 Döküm anında üst (erkek) ve alt (dişi) kalıplar.....	42
Şekil 4.8 Sıvama dökülmüş parçanın katı modellenmiş (a) ve kesit (b) hali.....	43
Şekil 4.9 Sıvama dökümle üretilmiş döküm parçaları.....	45
Şekil 4.10 Döküm parçasından alınan dilim ve metalografik inceleme yönleri (a) paralel bakış	

(b) dik bakış (ölçüler mm cinsinden).....	47
Şekil 4.11 Kimsayal analiz için dilimlenmiş döküm parçası. Analizler aşağıdan yukarı numaralanmış numunelere dik olarak uygulanmıştır.....	48
Şekil 4.12 Görüntü analiz yazılımında tespit edilen α -Al fazı.....	49
Şekil 4.13 Şekil faktörleri (Ruxanda ve Stefanescu, 2002).....	50
Şekil 5.1 0 No'lu numunenin mikroyapıları (dıştan ---içe).....	53
Şekil 5.2 3 No'lu numunenin mikroyapıları (dıştan ---içe).....	53
Şekil 5.3 5 No'lu numunenin mikroyapıları (dıştan ---içe).....	54
Şekil 5.4 6 No'lu numunenin mikroyapıları (dıştan ---içe).....	54
Şekil 5.5 7 No'lu numunenin mikroyapıları- büyütme x200 (dıştan ---içe).....	54
Şekil 5.6 0 No'lu numunenin mikroyapıları (dıştan ---içe).....	55
Şekil 5.7 1 No'lu numunenin mikroyapıları (dıştan ---içe).....	56
Şekil 5.8 2 No'lu numunenin mikroyapıları (dıştan ---içe).....	57
Şekil 5.9 3 No'lu numunenin mikroyapıları (dıştan ---içe).....	58
Şekil 5.10 4 No'lu numunenin mikroyapıları (dıştan ---içe).....	59
Şekil 5.11 5 No'lu numunenin mikroyapıları (dıştan ---içe).....	60
Şekil 5.12 6 No'lu numunenin mikroyapıları (dıştan ---içe).....	61
Şekil 5.13 7 No'lu numunenin mikroyapıları (dıştan ---içe).....	62
Şekil 5.14 0 No'lu numunenin mikroyapıları (dıştan ---içe).....	64
Şekil 5.15 1 No'lu numunenin mikroyapıları (dıştan ---içe).....	65
Şekil 5.16 2 No'lu numunenin mikroyapıları (dıştan ---içe).....	66
Şekil 5.17 3 No'lu numunenin mikroyapıları (dıştan ---içe).....	68
Şekil 5.18 4 No'lu numunenin mikroyapıları (dıştan ---içe).....	69
Şekil 5.19 5 No'lu numunenin mikroyapıları (dıştan ---içe).....	70
Şekil 5.20 6 No'lu numunenin mikroyapıları (dıştan ---içe).....	71
Şekil 5.21 7 No'lu numunenin mikroyapıları (dıştan ---içe).....	72
Şekil 5.22 Sıvama döküm parçasının en üst kısmından alınan görüntüler.....	73
Şekil 5.23 0 No'lu numunenin mikroyapıları.....	74
Şekil 5.24 1 No'lu numunenin mikroyapıları.....	75
Şekil 5.25 2 No'lu numunenin mikroyapıları.....	75
Şekil 5.26 3 No'lu numunenin mikroyapıları.....	75
Şekil 5.27 4 No'lu numunenin mikroyapıları.....	76
Şekil 5.28 5 No'lu numunenin mikroyapıları.....	76
Şekil 5.29 6 No'lu numunenin mikroyapıları.....	76
Şekil 5.30 7 No'lu numunenin mikroyapıları.....	77
Şekil 5.31 0 No'lu numunenin mikroyapıları.....	77
Şekil 5.32 1 No'lu numunenin mikroyapıları.....	78
Şekil 5.33 2 No'lu numunenin mikroyapıları.....	78
Şekil 5.34 3 No'lu numunenin mikroyapıları.....	78
Şekil 5.35 4 No'lu numunenin mikroyapıları.....	79
Şekil 5.36 5 No'lu numunenin mikroyapıları.....	79
Şekil 5.37 6 No'lu numunenin mikroyapıları.....	79
Şekil 5.38 7 No'lu numunenin mikroyapıları.....	80
Şekil 5.39 Savurma (a) Sıvama (b) ve Sıkıştırılmalı (c) dökülmüş alaşımın 0 no'lu numunesinin orta bölge mikro yapıları.....	80
Şekil 5.40 Savurma (a) Sıvama (b) ve Sıkıştırılmalı (c) dökülmüş alaşımın 1,2 ve 3 no'lu numunelerinin orta bölge mikro yapıları.....	81
Şekil 5.41 Savurma (a) Sıvama (b) ve Sıkıştırılmalı (c) dökülmüş alaşımın 4,5 ve 6 no'lu numunelerinin orta bölge mikro yapıları.....	82
Şekil 5.42 Savurma (a) Sıvama (b) ve Sıkıştırılmalı (c) dökülmüş alaşımın 7 no'lu numunesinin orta bölge mikro yapıları.....	83

Şekil 5.43	9. döküm deney numunesi boyunca bileşim değişimi.....	84
Şekil 5.44	13. döküm deney numunesi boyunca bileşim değişimi.....	84
Şekil 5.45	14. döküm deney numunesi boyunca bileşim değişimi.....	85
Şekil 5.46	15. döküm deney numunesi boyunca bileşim değişimi.....	85
Şekil 5.47	13. Dökümde küreselliğin bileşimle olan değişimi. Küresellik değerleri numunelerin orta kısmından alınmıştır.	86
Şekil 5.48	14. Dökümde küreselliğin bileşimle olan değişimi. Küresellik değerleri numunelerin orta kısmından alınmıştır.	87
Şekil 5.49	15. Dökümde küreselliğin bileşimle olan değişimi. Küresellik değerleri numunelerin orta kısmından alınmıştır.	87
Şekil 5.50	3 Döküm yöntemiyle dökülen parçaların aşağıdan yukarı orta noktalarının % küresellik değişimi.....	88
Şekil 5.51	9. 13, 14 ve 15. Dökümlerin aşağıdan yukarı ikincil dallantılar arası mesafenin değişimi (0-1;7-1), (0-2;7-2).....	89
Şekil 5.52	9. 13, 14 ve 15. Dökümlerin aşağıdan yukarı ikincil dallantılar arası mesafenin değişimi (0-4;7-4), (0-6;7-6).....	90
Şekil 5.53	9. 13, 14 ve 15. Dökümlerin aşağıdan yukarı ikincil dallantılar arası mesafenin değişimi (0-7;7-7), (0-9;7-9).....	91
Şekil 5.54	Arşimet prensibiyle yoğunluk tayininin şematik gösterimi (http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/pbuoy2.html)	92
Şekil 5.54	Üç döküme ait parçaların % Gözenekliliği.	93
Şekil 5.55	Üç döküm yöntemiyle üretilen parçaların döküm parçası boyunca sertlik dağılımları	94
Şekil 5.56	13. Döküm 4 no'lu numunesi orta kısmı elektron mikroskobu görüntüsü ve EDX analizi yerleri	96
Şekil 5.57	13. Döküm 4 no'lu numunesi orta kısmı elektron mikroskobu görüntüsü ve EDX analizi yerleri	98
Şekil 5.58	13. Döküm 4 No'lu numunenin orta kısımlarına ait bir α -Al tanesinde çizgi analizi yerleri	99
Şekil 5.59	α -Al tanesinde çizgi analizi değerleri.....	100
Şekil 5.60	9. ve 13. Döküm deneylerinde sıvıya etkiyen kesme hızı.....	102
Şekil 5.61	13. Döküm deneyinde döküm kalıplarının dev/dk olarak hızının zamana bağlı değişimi.....	104
Şekil 5.62	13. Sıvama dökümün 26,5. ssaniyesinde Döküm parçası sıvının görünür ağıdalığı107	
Şekil 6.1	Ağda dökümde yapının evrimsel gelişimi. (a) başlangıç tanesi; (b) dallantılı yapı; (c) rozet; (d) olgunlaşmış rozet ve (e) küresel (Flemings; 1991).....	108
Şekil 6.2	13. (Sıvama) dökümün 4.4 (a) ve 4.6 (b) no'lu numunelerinin mikroyapısı	109
Şekil 6.3	Değişik çalışmalarda elde edilmiş kesme hızı-ağıdalık ilişkisi (Atkinson, 2004)....	110
Şekil 6.4	Döküm yöntemlerinin kıyaslanması (Vinarcik, 2002).....	111

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 4.1 Sıkıştırılmalı Döküm deneylerinde kullanılan alaşım bileşimi (% olarak).	33
Çizelge 4.2 Hidrolik Pres Teknik Özellikleri	35
Çizelge 4.3 Döküm deneyleri	44
Çizelge 5.1 Üç döküm parçasından alınan numunelerin piknometri değerleri	93
Çizelge 5.1 Şekil 5.55 de ki 1 ve 2 noktalarının EDX analizi	97
Çizelge 5.2 Şekil 5.56'de ki 5 ve 6 noktalarının EDX analizi	98
Çizelge 5.3 9. ve 13. Sıvama dökümlerin kesme hızı hesabı için değerleri	101
Çizelge 5.4 13. Sıvama döküm parçasının dökümün de görünen ağırlık hesabı için değerler.	106

ÖNSÖZ

Bana doktora öğrencisi olma fırsatını veren çok değerli hocam Sayın Prof.Dr. Nihat G.KINIKOĞLU'na üzerimdeki emeği ve sabrı için en derin saygılarımla teşekkür ederim. Hem tezime hem de mesleki gelişimime yaptığı değerli katkılardan dolayı sayın Doç. Dr. Altan TÜRKELİ hocama teşekkür ederim. Sayın Yrd. Doç. Tuncay UZUN hocama gösterdiği ilgi ve yardımlardan dolayı çok teşekkür ederim.

Beni yetiştiren ve her zaman yanımda olan Annem ve tüm Aileme özellikle teşekkür ederim.

Rahat ve huzurlu çalışabilmem için elinden gelen herşeyi yapan ve daima yanımda olan sevgili eşim Çiğdem Luş'a sevgilerimle teşekkür ederim.

Ve Balkan İleri Döküm Teknolojileri Merkezi personeline deneysel çalışmalardaki katkısından dolayı

Teşekkürlerimi sunarım.

ÖZET

Sıvama döküm bu çalışma sürecinde patenti alınan, yeni bir döküm yöntemi olup, geleneksel merkezkaç döküm, sıkıştırılmalı döküm ve yarı-katı metal dökümü yöntemlerini tek bir yöntemde birleştirmektedir. Bu yöntemde Merkezkaç döküm makinasının tablası üzerinde dönmekte olan bir kalıcı kalıp içinde merkezkaç kuvvet etkisiyle ön şekillenmiş yarı-katı metal, dönmeyen bir üst kalıp ile sıkıştırılarak döküm parçasına son şekli verilmektedir. Merkezkaç etki ile ergimiş metalin üst kalıp indirilmeden kalıbın iç duvarında yükselmesi ve alt ve üst kalıplar arasındaki yarı-katı metal üzerinde yaratılan kesme hareketi ile yarı-katı metale kazandırılan akışkanlık daha ince ve uzun parçaların dökümüne imkân vermektedir.

Bu çalışmada “Sıvama Döküm” tekniği, yöntem değişkenleri tanımlanmış ve bir Al-Si-Cu alaşımı (A380) seçilerek başarıyla sıvama dökümü yapılmıştır. Deneysel çalışmalar bomba gövdesi şekline benzeyen bir parçada yürütülmüş ve bu alaşım kullanılarak dökülmüş sıvama döküm parçalarından elde edilen mikroyapılar, sıkıştırılmalı ve savurma dökülmüş parçalardan elde edilen mikroyapılarla kıyas edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Sıvama Döküm, Yarı-Katı Döküm, Pelte döküm, Alüminyum- Silisyum Alaşımları.

ABSTRACT

Swage casting is a patented, new casting technique which combines advantages of squeeze, centrifugal and semi-solid casting methods. Components with one rotating axis such as bomb body can be produced on a swage casting machine from molten metal in one-step operation. Centrifugal action rises the molten metal on the surfaces of the lower mould before the squeezing action is applied. The shearing action on semi-solid metal breaks up the dendrites as in rheocasting enabling casting of thinner walled tubular shapes. Besides, smooth surfaces and excellent details; sound and fine grained microstructure could be obtained with swage casting.

The purposes of this work are to describe swage casting methods, its features and establish process parameters applicable to Al-Si-Cu alloy. Experimental works are carried out on cylinder-like shape using A380 Al-Si-Cu alloy and comparisons are made between squeeze cast, centrifugal cast and swage cast parts. Final microstructures of parts produced by these methods are analyzed.

Keywords: Swage Casting, Semi-Solid Casting, Rheo Casting, Aluminum-Silicon Alloys, .

1. GİRİŞ

Bu çalışma, 98 DPT 07-02-01 no'lu "Mühimmat Gövdesi Üretimi" projesi kapsamında gerçekleştirilmiştir. Sıvama döküm yöntemi; sıkıştırılmalı döküm, merkezkaç döküm ve pelte döküm işlemlerinin bir araya getirilmesi düşünülmüş geliştirilmiş melez bir döküm yöntemidir. Merkezkaç döküm makinasının tablası üzerinde dönmekte olan bir kalıcı kalıp içerisinde merkezkaç kuvvet etkisiyle ön şekillendirilmiş yarı-katı metal, dönmeyen bir üst kalıp ile sıkıştırılarak döküm parçasına son şekli verilmektedir. Merkezkaç etki ile ergimiş metalin üst kalıp indirilmeden kalıbın iç duvarında yükselmesi, alt ve üst kalıplar arasındaki yarı-katı metal üzerinde yaratılan kesme hareketi ile yarı-katı metale kazandırılan akışkanlık daha ince ve uzun parçaların dökümüne imkân vermektedir.

Sıkıştırılmalı döküm (Dövme döküm, sıvı metal dövümü veya sıvı metal şekillendirmesi olarak da bilinir) basınçlı dökümle kapalı kalıpta dövmenin bir bileşimidir. Yöntem basit ve ekonomik bir yöntem olup yüksek üretim oranlarında otomatikleştirilmiş üretim potansiyeline sahiptir. Yüksek boyutsal tamlık ve yüzey düzgünlüğü parçaların işleme ihtiyacını en aza indirir. Diğer döküm yöntemlerine nazaran basınçtan dolayı boşluksuz ve küçük taneli mikroyapıya sahip parçalar üretilir. Döküm parçalar içerisinde sıkıştırılmalı döküm ürünleri en yüksek mekanik özellikleri verir. (Luş, 1999)

Sıvama döküm yönteminin prensibi metalin sıkıştırılmalı dökümdeki basıncın etkisi altındayken yarı-katı metal dökümündeki kesme hareketine tabi tutulması temeline dayanmaktadır. Böylelikle her iki döküm yönteminin avantajlarına sahip tek bir ürün üretimi hedeflenmiştir.

Sıvama dökümün diğer bir önemli ayağı ise yarı-katı metal dökümüdür (Pelte döküm ve ağda döküm). Ticari önemi olan metal şekillendirme işlemleri ya tamamen sıvı metallerin ya da tamamen katı metallerin görev aldığı işlemlerdir. Pelte döküm ve ağda döküm, sıvıgen (likidüs) ve katıgen (solidüs) eğrileri arasındaki uygun bir sıcaklıkta sıvı-katı durumdaki malzemenin dökümünü ve şekillendirilmesini içermektedir (Campell, 1970).

Pelte döküm (Rheocasting) adı verilen yöntemle elde edilen yarı-katı haldeki kütükler kıskaçla tutulabilecek kadar sertleşmiş olmalarına karşın bir darbe veya kesme hareketi ile hemen akmaya başlarlar. Bu şekilde elde edilen kütüklerin katılaşmadan veya katılaştıktan sonra düşük sıcaklıkta katılaşan ara fazlarının ergime sıcaklığına kadar ısıtılması ile yeniden preslenerek dökümde kullanılmasına ise Ağda Döküm (Thixocasting) adı verilir (Kınıkoğlu,

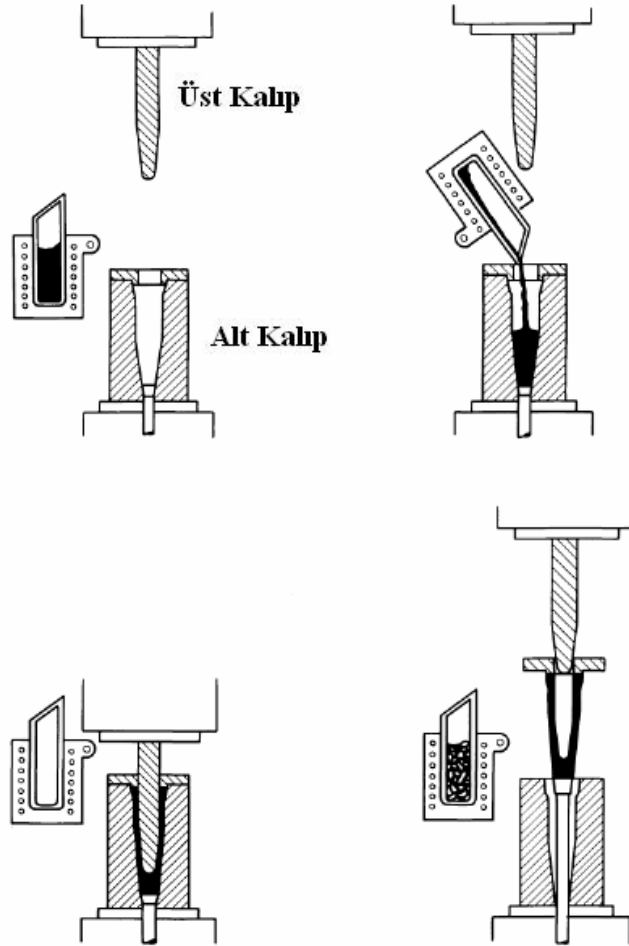
1999).

Bu alışmada Balkan İleri Döküm Teknolojileri Merkezi'nde geliştirilen ve yeni bir yöntem olan "Sıvama Döküm"için gerekli düzenekler tasarlanarak geliştirilmiş, bu yeni metod ile bomba gövdesine benzer bir parça üretilmiş ve bu sırada oluşan mikroyapılar incelenmiş ve karakterize edilmiştir. Bu metodla dökülen parçadan elde edilen mikroyapılar, sıkıştırmalı ve savurma dökümüle elde edilen mikroyapılar ile karşılaştırılarak farklılıkları ortaya konulmuştur.

2. GENEL BİLGİLER

2.1 Sıkıştırılmalı Döküm

Sıkıştırılmalı döküm; sıvı metalden direk basınç altında şekil verilmiş, mükemmel yüzey bitirme kalitesine sahip bir parça elde etmek için geliştirilmiş tek adımlı bir işlemdir. Katılaşma esnasında yüksek basınç uygulanır böylelikle çekme boşluğu ve gözeneklilik önlenir. Döküm işlemindeki sıvı metalin kalıbı doldurması ve dövme işlemindeki dikey pres hareketinin bir araya gelmesiyle oluşmuş melez bir yöntem olarak ortaya çıkmıştır. Yöntem dövme döküm, sıvı metal dövümü ve basınç kristalizasyonu isimleriyle de anılmaktadır. (Clegg, 1991)



Şekil 2.1 Sıkıştırılmalı Döküm Tekniği (A.S.M. Handbook vol.15-Dorcic ve Verma, 1992).

Sıkıştırılmalı Dökümün ana prensibini, doğru ölçülmüş hacimdeki sıvı metalin istenilen sıcaklıktaki kalıba konması ve üst kalıbın inerek veya pistonun yukarı çıkarak metalin katılaşması esnasında basınç uygulaması oluşturur. Son yıllarda yöntem iki ana gruba ayrılmıştır, direk ve dolaylı yöntem (Luş, 1999).

Direk yöntem Şekil 2.1’de görüldüğü gibidir ve 4 kademeye ayrılabilir,

- a) Kalıpların hazırlanması.
- b) İstenilen miktarda sıvı metalin alt kalıba dökülmesi.
- c) Prese bağlı üst kalıbın inmesi ve alt kalıba basınç uygulaması. Bu kademede basınç parça tamamen katılaşıncaya kadar devam ettirilir.
- d) Üst kalıbın yukarı çıkması ve parçanın alınması

(A.S.M. Handbook vol.15-Dorcic ve Verma, 1992).

Göreceli olarak daha yeni bir teknik olan dolaylı sıkıştırılmalı döküm tekniği beş kademeye ayrılmaktadır (Suzuki, 1989). Sıvı metal içinde piston bulunan bir potaya boşaltılır, pota metal kalıba dayanır ve piston yukarı doğru hareket ederek sıvı metali kalıp boşluğuna doldurarak basınç uygulanır.

2.1.1 Basıncın Katılaşma Üzerindeki Etkisi

Basıncın katılaşma üzerindeki aşağıdaki eşitlik ile açıklanabilir. Burada T_m denge donma sıcaklığını, ΔH_f ise denge halinde ergime gizli ısını temsil etmektedir. (Ghomashchi ve Vikhrov, 1998)

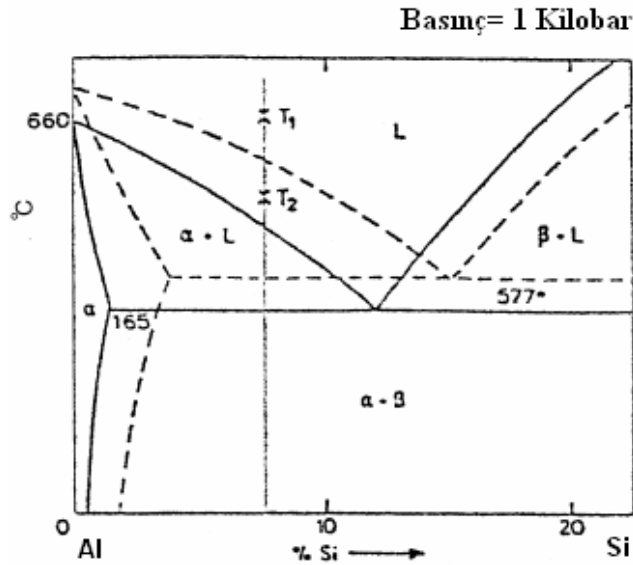
$$P=P_0\exp\left(\frac{-\Delta H_f}{RT_m}\right) \quad (2.1)$$

P_0 , R ve ΔH_f sabitler olduğuna göre eşitlikten T_m nin basıncın artması ile arttığını görebiliriz. Atomal bir yaklaşımla, ergime sıcaklığındaki bu değişim, atomlar arası mesafenin basınçla beraber azalması ve böylece katılaşma veya erime için gerekli atom hareketinin kısıtlanması ile açıklanabilir. Alaşım elementleri ile diğer emrütelerin çözünürlüğünün de basıncın artmasıyla artması beklenir.

Bu yaklaşım deneysel olarak 150 MPa basınç uygulandığında da, Al-Si alaşımlarında sıvıgen

sıcaklığının yaklaşık 9 C^0 arttığı tesbit edilerek ispatlanmıştır ve ayrıca ötektik noktanın sağa kaydığı da gözlemlenmiştir, Şekil 2.2 (Ghomashchi ve Vikhrov, 1998). Hem Chadwick hem de Franklin ayrı ayrı sıkıştırılmalı döküm ürünlerinin mikroyapılarının basınçtan dolayı oldukça ince taneli olacağını belirtmişlerdir (Ghomashchi ve Vikhrov, 1998). Bununla birlikte ikisinde yaklaşımı birbirinden farklıdır. Chadwick ve Yue, basıncın tane incelmeye etkisinin olmadığını, sıkıştırılmalı dökümlerde gözlemlenen tane incelmeye artan ısı iletim katsayısından kaynaklandığını ileri sürmüşlerdir. Franklin ve arkadaşları ise basıncın üst ısıtılmış sıvıda bir altsoğuma meydana getirdiğini, bunda çekirdeklenme frekansını arttırarak ince taneli yapı meydana getirdiğini söylemektedirler. Günümüzde araştırmacılar her iki hipotezinde geçerli olduğuna inanmaktadırlar (Ghomashchi ve Vikhrov, 1998).

Katılaştırma ve kalıp duvarları arasında kalan hava boşluğu ile altsoğumanın miktarı, ince taneli yapının eldesinde etkili olup, basınca, basıncın uygulama zamanına ve katılaştırma alaşımın bileşimine bağlı olarak değişir.



Şekil 2.2 Hızlı katılaştırmanın ve uygulanan basıncın Al-Si alaşımının faz diagramı üzerindeki etkisi (Ghomashchi ve Vikhrov, 1998).

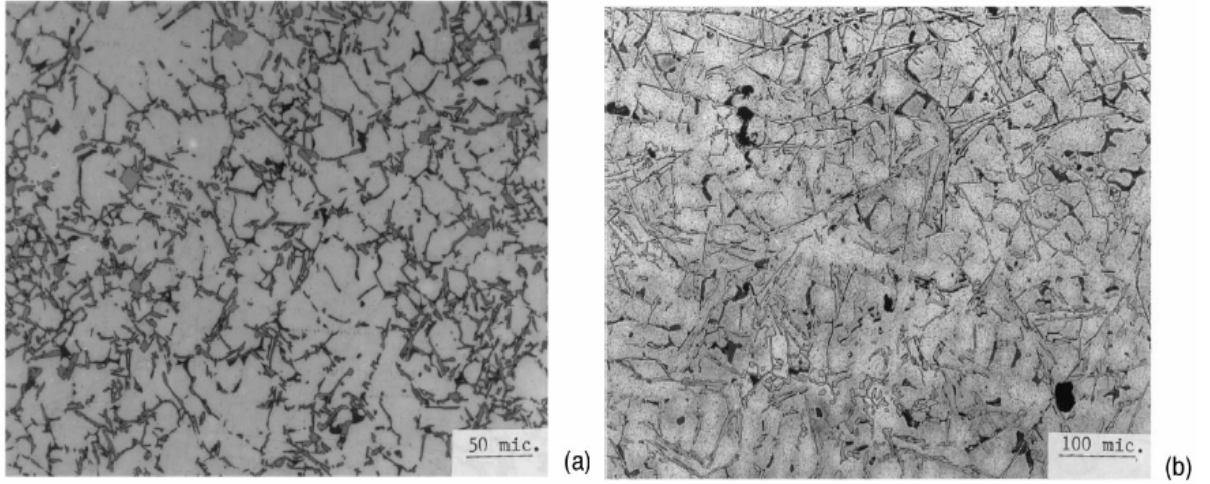
Basıncın ne zaman uygulandığı çok önemli bir değişkendir. Sıvı metale $T > T_m + \Delta T$ şartlarında uygulanan basınç T_m de ki artışın ana sebebidir bu durumda alt soğumanın etkisi ihmal edilebilir ve mikroyapıya hakim olan etki ısı transfer katsayısıdır. Bununla birlikte, eğer basınç $T_m \leq T_2 \leq T_m + \Delta T$ sıcaklığında uygulanırsa, alt soğuma baskın mekanizmadır. Katılaştırma alaşımın bileşiminde özellikle Alüminyumda Sr, P, Na ve Ti gibi elementlerin

varlığı açısından da oldukça önemlidir (Ghomashchi ve Vikhrov, 1998).

Genel olarak Basıncın döküm parçalarına kazandırdığı üstün özellikler, aşağıda belirtilen nedenlerden gelmektedir. i) Sıvı metalin alt soğumasındaki değişim, ii) katılaştıran alaşımdaki fazların bileşiminde ve hacimsel oranlarında ki değişim, iii) Metalik kalıp ile katılaştıran sıvı metal arasındaki ısı iletiminin değişimi, iv) gözenekliliğin azalması sonucu yoğunluğun artması (Ghomashchi ve Vikhrov, 1998).

2.1.2 Sıkıştırılmalı Dökümde Mikroyapı

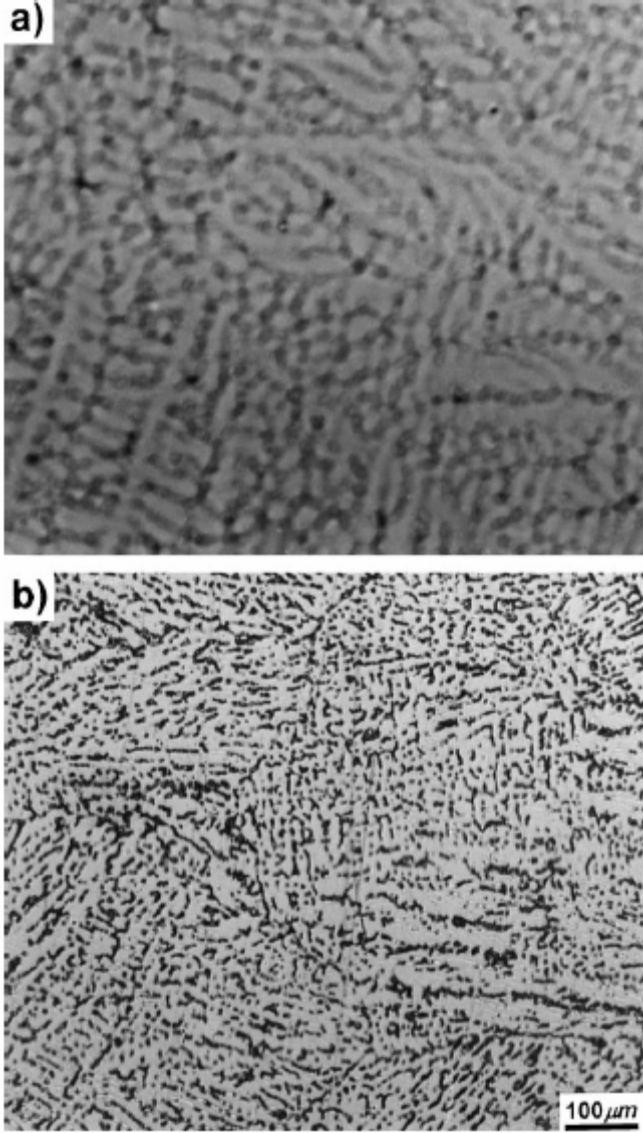
Sıkıştırılmalı dökülmüş parçalar daha önce belirtildiği gibi klasik dökülmüş parçalara göre, daha ince taneli mikroyapı ve teorik yoğunluğa yakın yoğunluğa sahip olmalarından dolayı üstün mekanik özelliklere sahiptir. Sıkıştırılmalı dökülmüş Al-Si alaşımlarında mikroyapıda özellikle fiber silisyum fazı muhtemeldir. Tipik bir Al-Si-Cu alaşımının hem sıkıştırılmalı hem de klasik dökülmüş hali Şekil 2.3 de görülmektedir. Ağırlıkça %12 Si-%3 Cu-%0.7 Mg içeren bu alaşımda sertlik, çekme dayanımı ve %uzama değerlerinde klasik metal kalıba dökülen parçalara nazaran %10–20 arası artış gözlemlenmiştir (Ghomashchi ve Vikhrov, 1998).



Şekil 2.3 LM 24 alaşımının sıkıştırılmalı (a) ve konvansiyonel (b) dökülmüş mikroyapıları (Ghomashchi ve Vikhrov, 1998).

Tane büyüklüğünün oldukça önemli bir parametre olduğu kabul edilmesine rağmen, genellikle ikincil dallantı kolları arası mesafe fiziksel özellikler üzerinde en önemli etkiyi yapmaktadır. Dallantı kolları arası mesafe azaldıkça çekme dayanımı ve % uzama artar. Ayrıca dallantı kolları arası mesafenin azalması ısıl işlemde gerek duyulan homojenleştirme zamanını da azaltır. Şekil 2.4 de klasik metal kalıba dökülmüş ve sıkıştırılmalı dökülmüş bir Al

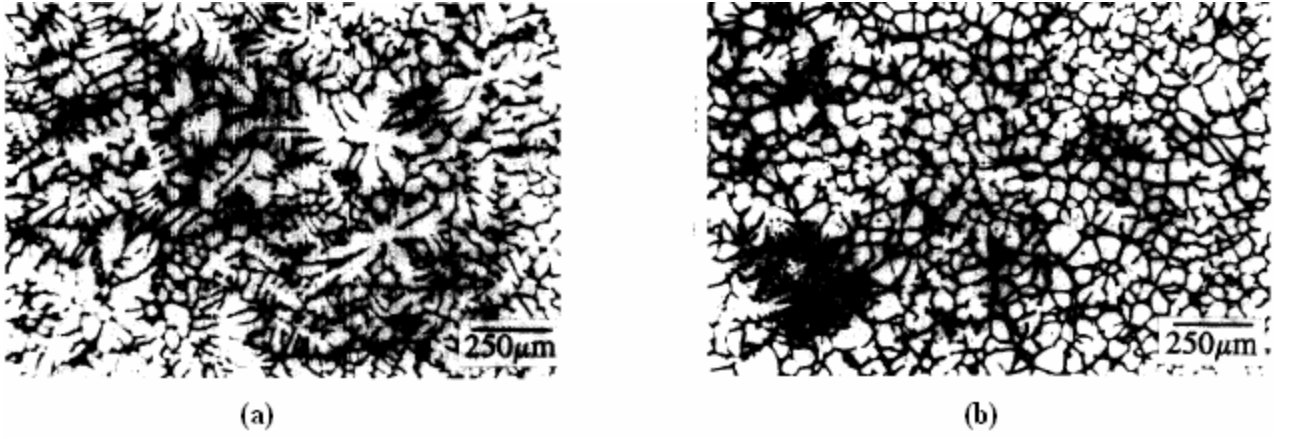
alaşımının (5083) mikroyapıları gözükmektedir.



Şekil 2.4 Klasik metal kalıba (a) ve Sıkıştırılmalı (b) dökülmüş 5083 alaşımın mikroyapıları (Lee vd.,1999).

Şekil 2.4 de metal kalıba dökülmüş parçanın alt tarafında, kalıpla parça arasında kalan havanın neden olduğu düşük soğuma hızından dolayı ikincil dallantı kolları arası mesafe 35,89 μm dir. Sıkıştırırmalı dökülmüş parçada ise aynı bölgede ikincil dallantı kolları arası mesafe 3,19 μm ölçülmüştür (Basınç: 100 Mpa). Metal kalıba dökülen alaşımda ikincil dallantı kolları arası mesafe sadece büyük olmakla kalmayıp döküm parçasının değişik yerlerinde ki soğuma hızlarının farklı olmasından dolayı önemli ölçüde değişmektedir. (Lee vd., 1999)

Sıkıştırırmalı dökümde mikroyapı, basınç ve kalıp sıcaklığı dışında en çok döküm sıcaklığı tarafından etkilenmektedir. Şekil 2.5'te döküm sıcaklığının mikroyapıya etkisi görülebilir.



Şekil 2.5 Değişik döküm sıcaklıklarında sıkıştırırmalı dökülmüş 7010 alaşımı. Döküm sıcaklıkları, (a) 953 K (b) 903 K, basınç: 300 Mpa (Yue, 1997)

2.2 Yarı-Katı Metal Dökümü

Yarı-katı metal dökümü 100 yıldan beri çeşitli şekillerde uygulanmıştır bununla birlikte bugün bildiğimiz yarı-katı metal döküm teknolojisinin esasları M.C. Flemings'in 1960'ların sonlarında MIT'de gerçekleştirdiği bir seri çalışmanın sonunda ortaya çıkmıştır. (Nadca, 1999)

Flemings'in çalışmalarında görüldüğü üzere normal dallantılı mikroyapıya sahip olan malzeme dallantılı olmayan, küresel bir mikroyapıya dönüştürülerek yüksek katı oranının sağlanmasına karşın düşük bir kesme dayanımı sunabilir hale getirilmiştir. Bu tip bir malzeme işlem sonunda ağdalık (tikotropi) özelliği kazanmıştır. Sonuç olarak görülmüştür ki yarı-katı döküm teknolojisinin kullanımıyla üretilmiş olan parçalarda yüksek kalite ve mekanik özellikler sağlanabilmektedir. (Nadca, 1999)

MIT'nin yarı-katı metal dökümü teknolojisi üzerine geliştirmiş olduğu patentin hakları Alcoa grup içerisinde yer alan Alumax Inc. tarafından alınmıştır. Alumax bu patentten yola çıkarak 1980'lerin sonunda otomotiv endüstrisi uygulamaları için yarı-katı döküm parçalarının üretimine başlamıştır. 1992 yılında orijinal patentin koruma süresinin bitmesiyle beraber yöntem geniş bir alanda kullanım bulmuştur. (Nadca, 1999)

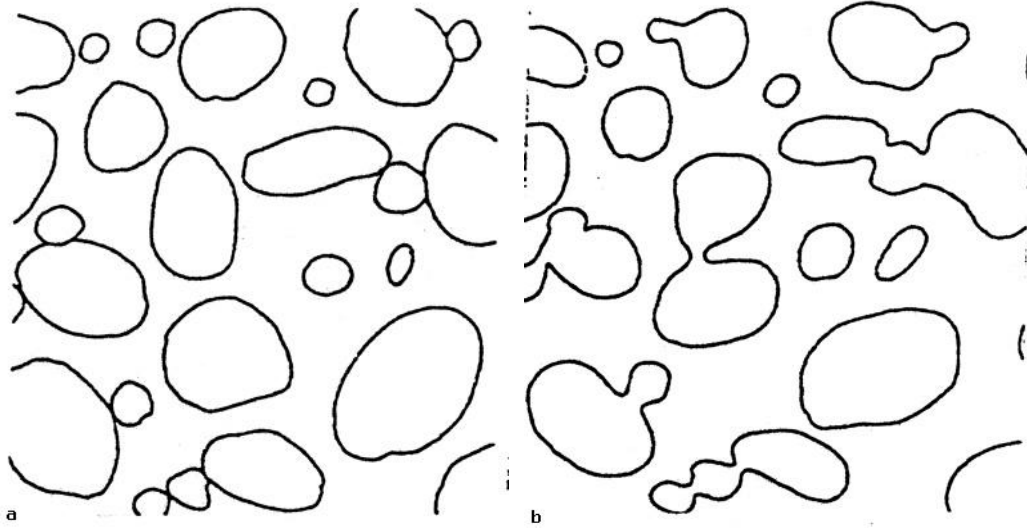
1990'ların başlarından itibaren avrupadaki birincil alüminyum üreticileri direksiyon kutusu, transmisyon kapağı, süspansiyon kolları ve aktuatör şaftı gibi parçaların üretilmesinde yüksek dayanım ve kalitenin sağlanması amacıyla yarı-katı metal döküm teknolojisinden yararlanmaya başlamışlardır. Dünya çapında 60'tan fazla kuruluş birkaç gramdan 7 kilografa kadar olan alüminyum esaslı parçaların üretiminde bu yöntemle başvurmaktadır. (Nadca, 1999)

2.2.1 Yarı-Katı Dökülmüş Metallerde Yapı

Katılaşma sırasında dallantılar bir ağ halinde büyürken arayerlerinde çözünence zengin bir sıvı kalır. Dallantıların birbirleriyle teması şekil değiştirmeye karşı bir direnç oluşturur (Campell, 1970). Soğuma esnasında sıvı katı karışımı hızla karıştırılacak olursa katı dallantılar kırılır ve mikroyapı küreleşmeye başlar (Şekil 2.6).

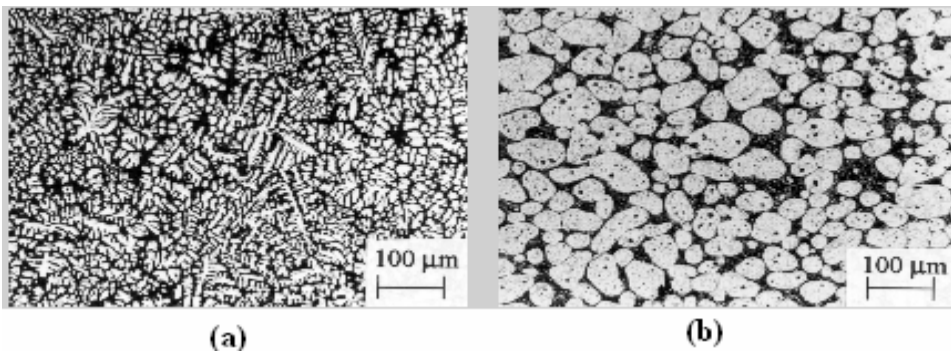
Düşük karıştırma hızlarında karışım büyük ölçüde koyulaşır. Bunun sebebi katı dallantıların kaynaşma ve kabalaşma için daha fazla zaman bulabilmeleridir (Şekil 2.6b). Eğer karışım tamamen karıştırılmazsa dallantıların arasındaki birleşmeler daha da büyüyerek güçlenecek ve

birkaç saniye sonra karışım bir kısıkaç ile katı gibi ele alınabilecektir (Campell, 1970).



Şekil 2.6 a) Hızlı karıştırılmış karışımın görünümü, b) Yavaş karıştırılmış karışımın görünümü (Campell, 1970).

Böylece karışım katı parçacıkların kayganlaştırıcı gibi davranan sıvı ile çevrildiği bir asıltı ortamında ince bir bulamaç gibi davranır. Karışımın viskozitesi ortamda ne kadar katı olduğuna bağlı olarak değişir. Örneğin ortamda %10 katı bulunduğu zaman sıvının viskozitesi tamamen sıvı hale göre %20 yükselir. Katı oranının artmasıyla viskozite çok hızlı bir şekilde yükselir. %50 katı oranında viskozite on katına çıkar. %30 katı oranı viskoziteyi 3 katına çıkartan katı oranıdır ve karışım basit kalıpların içine akabilecek kadar akıcı olur (Campell, 1970). Şekil 2.7 te Al-%4 Cu alaşımına ait dallantılı katılaşmış ve yarı-katı dökülmüş mikroyapılar görülmektedir.



Şekil 2.7 Dallantılı katılaşmış (a) ve Yarı-Katı dökülmüş (b) alaşıma ait mikroyapılar (www.gpm2.inpg.fr).

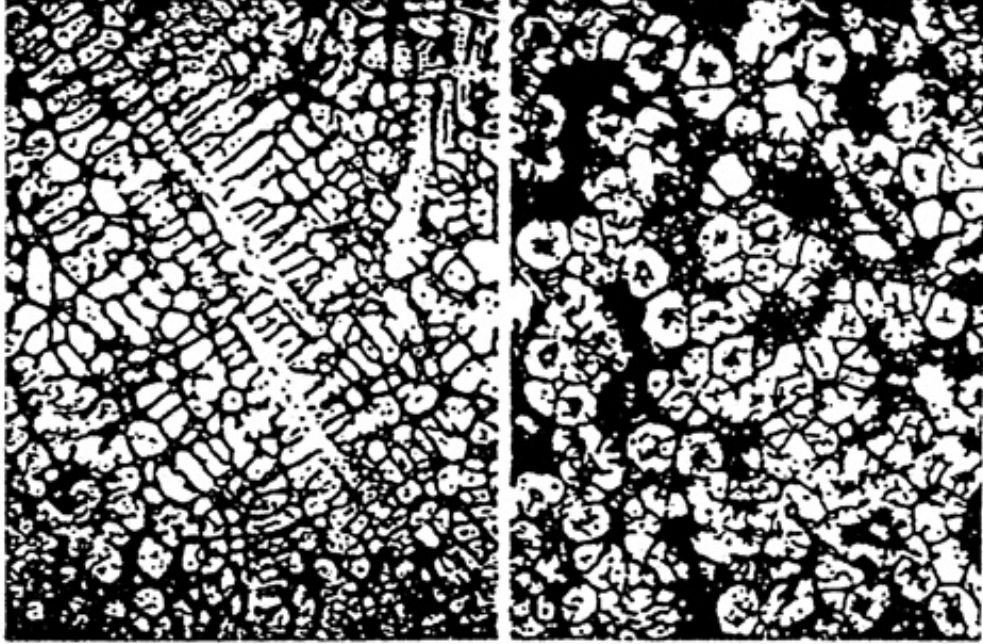
Pelte Döküm (Rheocasting) adı verilen bu yöntemle elde edilen yarı-katı haldeki kütükler kıskaçla tutulabilecek kadar sertleşmiş olmalarına karşın bir darbe veya kesme hareketi ile hemen akmaya başlarlar. Bu tip bir oluşum şekil 2.8’de görülmektedir (Nadca, 1999). Bu şekilde elde edilen kütüklerin katılaşımdan veya katılaştıktan sonra düşük sıcaklıkta katılaşımdan ara fazlarının ergime sıcaklığına kadar ısıtılması ile yeniden preslenerek dökümden kullanılmasına ise Ağda Döküm (Thixocasting) adı verilir (Nadca, 1999). İşlem gazlardan, oksitlerden ve metal olmayan kalıntılardan uzak, süreksizliklerin olmadığı bir malzemeyi amaçlamaktadır (Kınıkoğlu, 1999).



Şekil 2.8 A357 alaşımının yarı-katı metal döküm sıcaklığındaki pelte görünümü (Nadca, 1999)

Alaşımın içyapıları; pelteleşme davranışları, karıştırma vasıtasıyla dikkat edilebilir biçimde değiştirilebilir. Şekil 2.9’da hem klasik dallantılı yapıda sıvılaşımda sıcaklığının üzerinde dökülmüş 440C paslanmaz çelik yapısı, hem de katı-sıvı aralığındaki sıcaklıkta pelte halindeki aynı alaşımın dökümünün dallantılı olmayan küresel şekli görülmektedir. İlk katı

parçacıklar döküm esnasında mevcut olup bunlar soğutulmuş sıvı anayapı ile çevrili olarak görülmekte ve ayırt edilebilmektedir (Şekil 2.9b). (Matsumoto vd., 1975)



(a)

(b)

Şekil 2.9 440C paslanmaz çeliğinin a) dallantılı ve b) pelte döküm döküm yapılarının karşılaştırması (b resmindeki açık renkli küresel parçacıklar sürekli pelte döküm makinasında oluşan birincil katı parçacıklardır) (Matsumoto vd., 1975).

2.3 Savurma (Merkezkaç) Döküm

Bu yöntem, dönen bir kalıbın yarattığı merkezkaç kuvvetin ergimiş metali kalıp cidarlarına fırlatarak ona istenilen şekli vermesi esasına dayanır. Düşey savurma döküm yönteminin kullanılma alanı yatay savurma döküm yöntemine göre daha geniştir. Gerçek düşey savurma dökümde kalıp kendi eksenini etrafında döndürülerek silindirik veya boru şeklindeki parçaların dökümü yapılır. Bu şekilde metal kalıplarda dökülen parçalar dışardan dönme eksenine doğru yönelmiş bir soğumaya veya katılaşmaya uğrayacaktır. Bu yönelmiş katılaşma hatasız, kuma dökümlerde rastlanan büzülmenin olmadığı bir yapı verecektir (Kınıkoğlu, 1999).

Ergimiş metalin dış kısmından dönme eksenine doğru bir sıcaklık eğimcesi oluşturabilmek için metal kalıba doldurulurken kalıbın dönüyor olması istenir. Bazı durumlarda kalıbın aşınmasını önlemek için yavaş doldurma hızı istenirken çoğu durumda tam bir dönme hızı tespiti gereklidir (Kınıkoğlu, 1999).

Kalıcı kalıplarda metal genellikle statik kum kalıplara uygulanandan 40 °C daha yüksek sıcaklıkta dökülür. Bunun nedeni metal kalıbın soğutucu etkisidir. Akıtma hızı kum kalıptakilerden oldukça yüksektir. 45 Kg. dan hafif parçalar için 9 kg/s lik bir akıtma hızı önerilir (Kınıkoğlu, 1999).

2.3.1 Katılaşma

Merkezkaç dökümde ısı, katılaşan parçadan sadece kalıp yüzeyi üzerinden uzaklaşır. Katılaşma döküm parçasının kalıpla temasta olan dış yüzeyinden başlar ve içeri, parça iç yüzeyine doğru ilerler. Katılaşmayı birkaç parametre etkiler. Bunlar; -kalıp malzemesi, kalınlığı ve sıcaklığı, - Kalıp boyası ve ısı iletme özelliği, -üst ısının miktarı, akıtma hızı ve dönme hızı dâhil döküm koşulları ve –döküm sistemindeki herhangi bir titreşim.

Katılaşma üzerine, kalıba bağlı parametrelerin çok az etkisi olmaktadır. Bununla birlikte kalıp kalınlığının mekanik özellikler üstünde önemli etkileri olabilir. En etkili parametreler ise üst ısının miktarı, kalıp boyasının kalınlığı ve dönme hızıdır.

Çelik dökümlerde elde edilen döküm mikroyapısı bileşime bağlı olarak değişir. Genelde kalıp cidarına komşu bölgede incedireksi bir kabuk ve bu kabuğun ilerisinde yönelimi belirgin direksi yapılarla onu takip eden eşksenli bir mikroyapı gözlenir.

2.4 Sıvama Döküm

Sıvama döküm yeni bir döküm yöntemidir. Geleneksel merkezkaç döküm, sıkıştırırmalı döküm ve yarı-katı metal dökümü yöntemlerini tek bir yöntemde birleştirmektedir. Merkezkaç döküm makinasının tablası üzerinde dönmekte olan bir kalıcı kalıp içinde merkezkaç kuvvet etkisiyle ön şekillenmiş yarı-katı metal, dönmeyen bir üst kalıp ile sıkıştırılarak döküm parçasına son şekli verilmektedir (Kınıkoğlu, Tr-patent 2003).

Merkezkaç etki ile ergimiş metalin üst kalıp indirilmeden kalıbın iç duvarında yükselmesi ve alt ve üst kalıplar arasındaki yarı-katı metal üzerinde yaratılan kesme hareketi ile yarı-katı metale kazandırılan akışkanlık daha ince ve uzun parçaların dökümüne imkân vermektedir.

2.4.1 Yöntem

Klasik merkezkaç döküm işleminde ergimiş metal dönen silindirik bir kalıcı metal kalıba dökülmektedir. Merkezkaç kuvvet ergimiş metali dönen kalıbın yüzeylerine yaymakta kalıbın şekline ve bulunduğu yere bağlı olarak ya silindirik bir boru veya kalıbın belirlediği bir biçimde katılaşmaktadır.

Klasik sıkıştırırmalı döküm işleminde ergimiş metal sabit bir metal alt kalıba dökülür. Üst kalıp (zımba), alt kalıptaki sıvı metal üzerine indirilir ve parçanın son şekli zımba daha da bastırılarak elde edilir. Fakat kalıp ve zımba ile temas halindeki ergimiş metal hızla ısı kaybettiğinden sıkıştırma etkisine rağmen hızlı katılaşma işlemin ince yüksek cidarlı parçaların üretilmesinde kullanılmasını sınırlamaktadır.

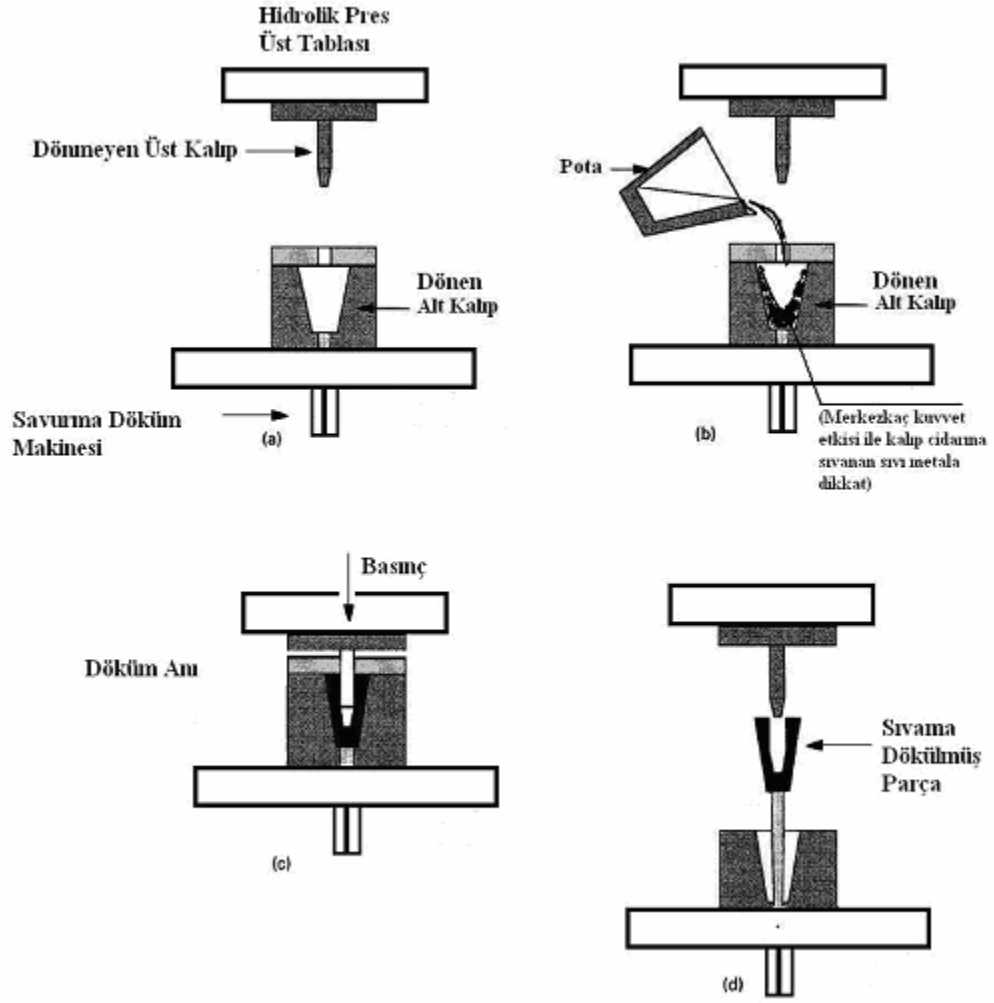
Yarı-katı metal dökümünde, pota içinde peltemsi bölgeye kadar soğumuş yarı-katı metal bir kanatçıkla karıştırılarak dallantılar kırılır ve küreleştirilir. Dallantıları, küreselleşmiş malzemenin kazandığı akışkanlık onun sıvı alaşımlar gibi kalıbın ince kesitlerini doldurmasına imkân verir.

Sıvama döküm alt tablası merkezkaç döküm makinası olan bir sıkıştırırmalı döküm presinde gerçekleştirilmektedir. Sıkıştırırmalı dökümün alt kalıbı bir merkezkaç döküm makinasının döner tablasına yerleştirilmiştir. Sıvı metal merkezkaç döküm makinasının tablası üzerinde dönen (genellikle yağlama ve ısıtma gibi ön hazırlıklar yapılmış halde) metal kalıba dökülür. Sıkıştırırmalı dökümün üst kalıbı olan zımba indirilmeden önce sıvı metal merkezkaç kuvvet etkisiyle kalıbın duvarları üzerinde yayılarak iç yüzeyi merkezkaç kuvvet etkisiyle belirlenen eğimde şekillenecektir. Ergimiş metalin dönen kalıp yüzeyinde kısmen katılaşmasından sonra

zimba indirilerek yarı-katı malzeme dönen alt kalıp ile dönmeyen zimba arasında sıkıştırılarak (Sıkıştırılmalı dökümde her iki kalıpta dönmemektedir.) parçanın son şekli elde edilir. Sıkıştırma hareketinin başında metal henüz yarı-katı haldeyken kalıbın belirli bir süre dönmesi sağlanır. Bu süre makinanın gücü kapatılarak kalıbın kendi ataletiyle durana kadar dönmesi veya kalıp bir süre döndükten sonra dönmenin frenlenmesi şeklinde yapılabilmektedir.

Dönen alt kalıp ve dönmeyen üst zimba kalıp arasındaki yarı-katı metal üzerinde bir kesme etkisi yaratmaktadır. Kesme etkisi kısmen katılaştırmış metalin dallantı ağını ve dallantılarını kopartarak onları yarı-katı metal dökümü işleminde olduğu gibi küreleştirir.

İşlem sırasında üç etki altında kalan sıvı metal çok daha ince kesitli silindirik parçaların dökümüyle üretilmesine imkân vermektedir. Ergimiş metal merkezkaç kuvvetin etkisiyle zimba indirilmeden önce alt kalıbın üst kısımlarına doğru yükselmiş olmaktadır (birinci etki). Bu sırada iç kalıbın soğutucu tesiri olmadığından sıvı metal her iki kalıbın birden soğutucu etkisine maruz kaldığı duruma göre daha sıcak kalmakta, akışkanlığını daha uzun süre muhafaza edebilmektedir. Diğer taraftan, kalıplar arasındaki yarı-katı metal üzerinde oluşan kesme kuvvetlerinin metalin dallantılarını kırarak onu daha akışkan hale getirmesi (ikinci etki) ve sıkıştırmanın yarattığı hidrostatik basınç (üçüncü etki) ile metal iki kalıp arasında daha yükseklere çıkabilmekte, daha ince kesitleri doldurabilmektedir (Kınıkoğlu, Tr-patent 2003).



Şekil 2.10 Sıvama Döküm sistemi ve işlem kademeleri

3. KATILAŞMA

3.1 Katı-Sıvı Ara Yüzeyi

Pratikte, katlaşan sistemlerin tek, yüksek saflıkta veya bir bileşik olması nadirdir. Çözelti halindeki sıvı genellikle bilinerek katılan veya katışkı halinde bulunan diğer elementleri veya bileşikleri, çözünenleri içerir. Bu çözünenlerin dağılımı katılma sürecini ve ürünün sonuçtaki mikro yapısını belirler.

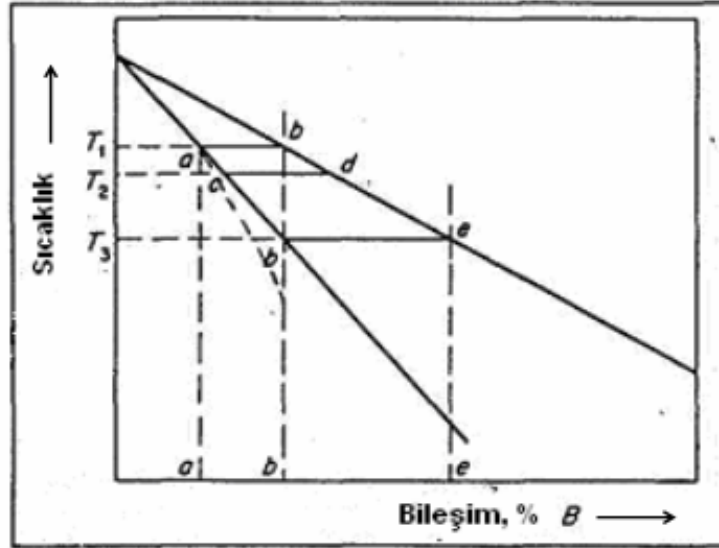
İlerleyen bir ara yüzey, kinetik alt soğuma küçükse denge durumundaymış gibi incelenebilir. T^* ara yüzey sıcaklığında katının bileşimi C_{S^*} , sıvının bileşimi C_{L^*} olacaktır.

$$\text{Paylaşım katsayısı } k = C_{S^*} / C_{L^*} \quad (3.1)$$

Sıvıgen ve katıgen eğrileri genellikle az çok düzgün olduğundan, k verilen bir sistem için yaklaşık olarak sabittir.

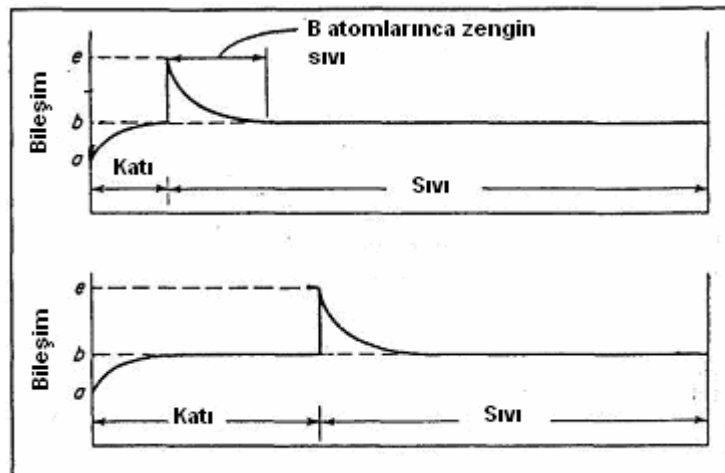
Sonlu bir katılma sisteminde ilerleyen cephe önündeki çözünen dağılımı, sıvıda ve katıdaki yayınımla birlikte bir ayrışma profili oluşturur. Ayrışma son katılma çözünenle yüksek yoğunluktaki bölgeden başlayarak bütün sıvıya yayılır.

Katı içindeki yayınımla nispeten basittir. Bazen (çoğunlukla arayer çözünenleri için) yayınımla o kadar hızlıdır ki katının her yerinde bileşim eşit olur. Bu durumda kaldırma kuralı koşulu geçerli olur. Katılma sürecindeki çözünen ayrışması olmasına rağmen sonuçta yapı tekbiçimlidir (uniform). Diğer taraftan yer alan katı çözünenlerde yayınımla ihmal edilebilecek kadar yavaştır. Oluşan katı bileşimini korur. Bu durumda çözünenin dağılımı Sheil eşitliğine uyar. Bu tür katılma çözünen son katılma bölgeye yığılma eğilimi gösterir ($k < 1$ için). Şekil 3.1'de T_1 sıcaklığında başlangıç bileşimi $C_0 = b$ noktası sıvıgen eğrisindedir.



Şekil 3.1 Eşbiçimli ikili bir faz çizgesinin bir bölümü (Abbaschian ve Reed-Hill, 1992).

İlerleyen zamanla düşen sıcaklıkla sıvı A atomlarınca fakirleşir, B atomlarınca zenginleşir. Kararlı duruma ulaşınca bileşim değişimi duracaktır. Kararlı durumun meydana geldiği T3 sıcaklığında sıvının bileşimi e noktası, katının bileşimi ise başlangıçtaki sıvı bileşimi olan b noktasıdır. T3 sıcaklığında başlangıç sıvısıyla aynı bileşimde katılaşma olacaktır. Ara yüzeydeki B atomlarının derişimi en yüksek olacak, katı başlangıç sıvısıyla aynı bileşimde katılaşacaktır.



Şekil 3.2 Bileşim- Mesafe eğrileri (Abbaschian ve Reed-Hill, 1992).

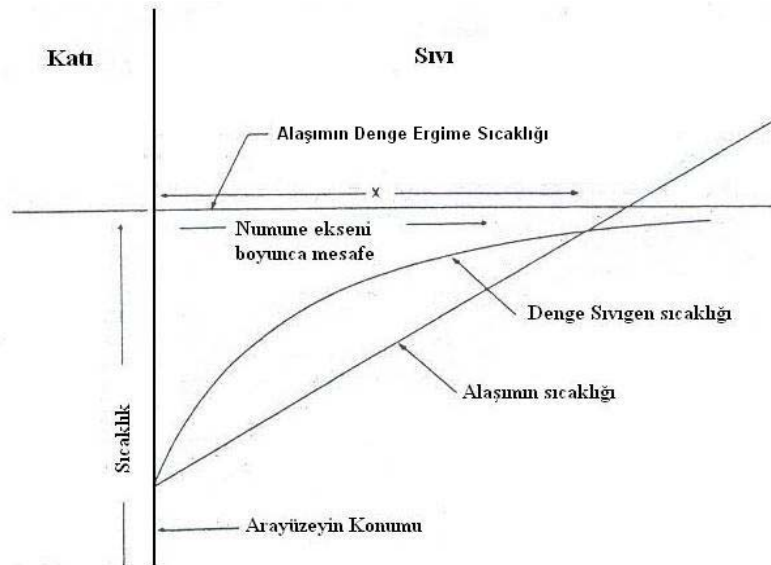
Ara yüzeye bitişik sıvının bileşiminin değişmesiyle birlikte bu sıvıdan oluşan katının da bileşimi değişmektedir. Buna göre Şekil 3.1’de ki sıvının bileşiminin d olduğu noktada oluşan katının bileşimi c olacaktır. Belirtilen katılaşmanın sıcaklığın T_1 ’den T_2 ’ye düşmesiyle meydana geldiği unutulmamalıdır. Katıya bitişik sıvının bileşimi e ‘ye ulaştığında ara yüzeydeki B atomlarının derişimi en yüksek olacaktır. Bu durumda kararlı hale ulaşılmıştır, sıcaklık T_3 olup katı başlangıç sıvısı ile aynı bileşimde katılaşmaktadır

Sıvı ara yüzeye çözünen atomlarını biriktirerek sınır katman kalınlığını meydana getirir, Bileşim mesafe eğrisinin biçimi katılaşma hızı ve sıvıdaki atom yayılım hızına bağlıdır.

3.2 Alaşımın Dallantılı Katılaşması

Birçok alaşım sisteminde dallantılı katılaşma yaygındır. Dallantılı büyümenin itici gücü olan alt soğuma değişik bir alt soğumadır. Daha önce tartışılan ısı alt soğuma da alaşımların katılaşmasında bir etken olmakla beraber Chalmers ve Rutter tarafından öne sürülen bileşim alt soğuması (yapısal alt soğuma) burada daha önemlidir (Kınıkoğlu, 1999). Bileşim alt soğuması, katının kendini oluşturan sıvıdan farklı bir bileşimde katılaştığı zaman meydana gelir.

İşi basitleştirmek için taşınım akımlarını ve diğer etmenleri bir kenara bırakarak kararlı durumun var olduğunu kabul edelim. Katılaşmanın uygulamadaki örneklerinde sıvı metal bir kalıba doldurulur ve kalıp cidarından ısı kaybı sonucu katılır. Bunun bir sonucu olarak metalin sıcaklığı kalıp cidarında en soğuk olup kalıbın merkezine doğru artmaktadır. Dolayısıyla katılaşma kalıp yüzeyinden başlayarak merkeze doğru ilerleyecektir. Bu durum sıvı-katı ara yüzeyinin ilerlemesi ile ara yüzey önünde artan sıvının sıcaklığına dikkat etmemiz gerektiğini ortaya koymaktadır. Sıvının sıcaklığının doğrusal olarak ara yüzeyden olan mesafe ile arttığı kabul edilen bu durum Şekil 3.3'te gösterilmiştir. Şekildeki ikinci eğri sıvıgen sıcaklığının ara yüzeyden uzaklaştıkça nasıl değiştiğini göstermektedir. Bunun nedeni ise, sıvının bileşiminin ara yüzeyden uzaklaştıkça değişmesidir. Şekil 3.3'ten görüleceği gibi sıvının sıcaklığı ara yüzeyde T_3 'tür ve ara yüzeyden uzaklaştıkça hızla yükselmekte ve T_1 de ana sıvının sıcaklığına ulaşarak katılaşmaktadır.



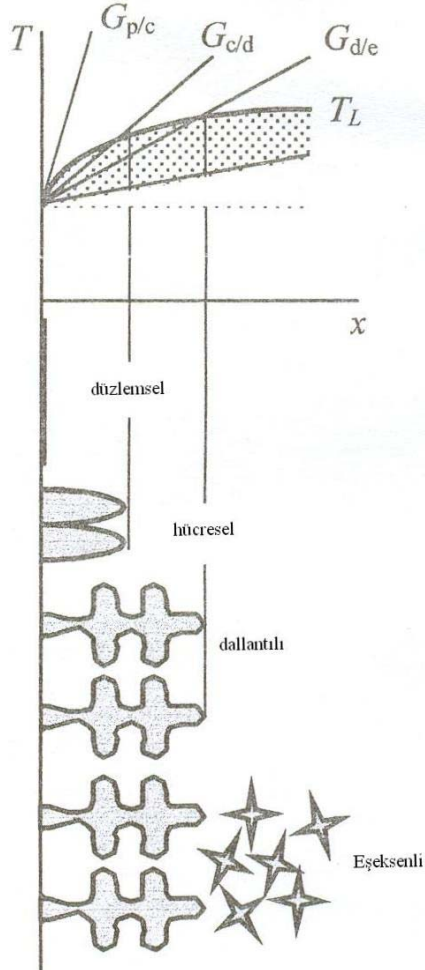
Şekil 3.3 (x) mesafesi içinde alaşımın sıcaklığı (katılaşma sıcaklığından düşük)
(Rutter ve Chalmers, 1953)

Şekilden görüleceği gibi sıvının sıcaklığı ile sıvıgen sıcaklığı iki noktada, ara yüzeyde ve ara yüzeyden x kadar uzakta kesişmektedir. Önemli nokta x uzaklığında kadar sıvının sıcaklığının, donma sıcaklığının altında bulunmasıdır. Sıcaklık eğimcesi artı olmasına rağmen sıvı etkili bir şekilde alt soğumuştur. Bu durum, doğrudan ara yüzeyin önündeki sıvının derişim eğimcesinin bir sonucudur. Gerçek bir dallantılı katılaşmanın (birincil ve ikincil dalları olan) olup olmadığı, ara yüzeyin önündeki sıvının bileşim alt soğumasına sahip olup olmadığına ve alt soğumanın miktarına bağlıdır. Düşük sıcaklık eğimcesi ve /veya düşük soğuma hızı nedeniyle büyük ticari dökümlerde aşırı soğumuş tabaka (Şekil 3.3'teki x mesafesi) genellikle geniştir. Diğer taraftan, aşırı soğumuş bölge ince ise büyüyecekleri alt soğumuş bölgenin derinliği yeterli olmadığından tam bir dallantı büyümesi mümkün değildir. Bu durumda, ara yüzeyin kararsızlığı oval çıkıntılardan oluşan bir yüzeyin (hücresele büyüme) oluşmasına neden olur.

Şekil 3.3'ten görüleceği gibi, sıvıgen noktalarını ve sıcaklık eğimcesini gösteren eğriler iki noktada kesişmekte ve durum bileşimsel (yapısal) aşırı soğumaya neden olmaktadır. Bu koşulda arayüzey kararsızdır, düzlemsel değildir, hücreler veya dallantılar meydana gelecektir. Buna karşılık, sıvının sıcaklığının sıvıgen noktası sıcaklığından daha hızla yükseldiği durumda (daha dik bir sıcaklık eğimcesi) kararlı bir ara yüzey mümkün olacaktır ve dallantı oluşmayacaktır. Tek kristal büyütmeye düzlemsel bir ara yüzey istenir. Kararlı durumda katılaşmadan düzlemsel ara yüzey koşulu şu şekilde yazılabilir:

$$\frac{G_L}{R} \geq \frac{mC_0}{D_L} \frac{(1-k)}{k} \quad (3.2)$$

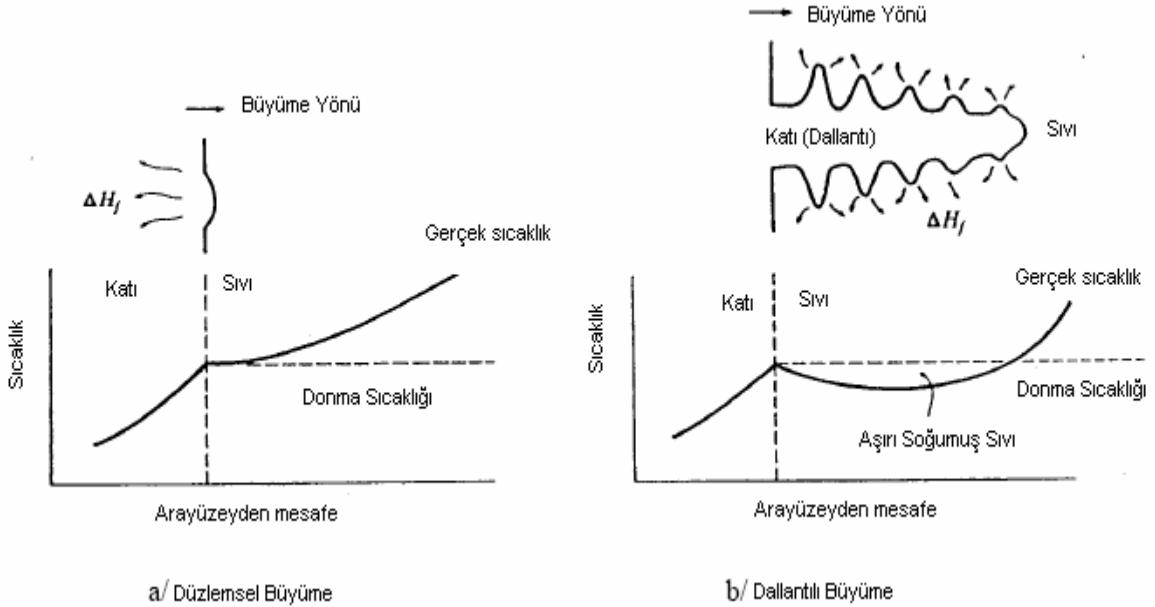
Eşitlikte G_L sıvının sıcaklık eğimcesi, R katılma hızı, m sıvıgenin eğimi, C_0 alaşımın bileşimi, k paylaşım katsayısı ve D_L sıvının yayınlığıdır. Katılma süreçlerinden çoğunda Eşitlik 3.1 ara yüzeyin kararlı olup olmayacağını ve yapısını belirler.



Şekil 3.4 Arayüzeydeki ısı eğimcesi ve arayüzey morfolojisi arasındaki ilişki (p/c düzensel hüresel, c/d hüresel dallantılı, d/e dallantılı eşksenli sınırları) (Stefanescu, 2002).

3.2.1 Bileşim Alt Soğuması

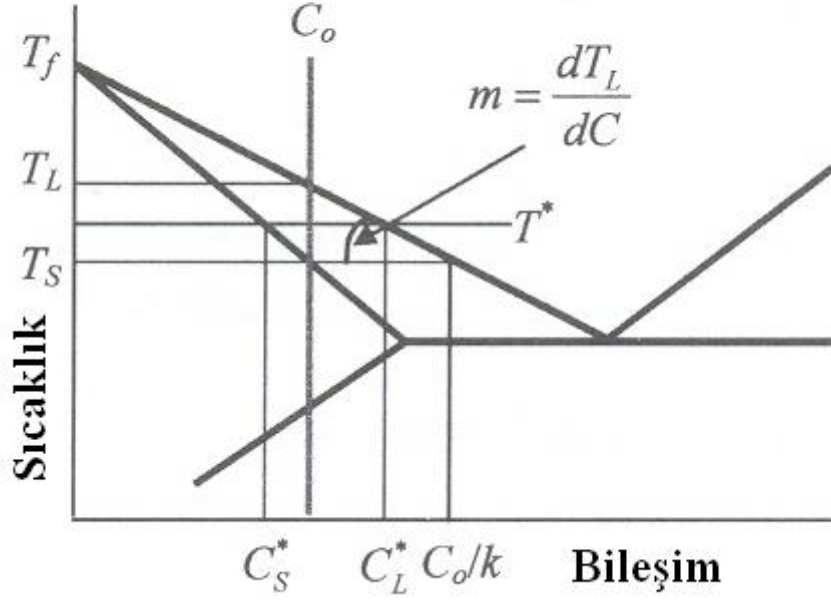
Ara yüzey önünde sıcaklığın daha düşük olması sonucu oluşan bileşim alt soğuması sadece alaşımlarda görülür. Saf metallerde de ara yüzey önünde sıcaklık düşer ve benzer bir mikro yapı oluşursa da bunun nedeni başkadır. Saf metallerden yani tek elementten ısı çekilmesi sıvıyı ΔT kadar alt soğuttuğunda katılaşıma başlayacaktır.



Şekil 3.5 Saf metallerde sıcaklık eğimcesinin büyüme etkisi (Konczos vd. 1998).

Ara yüzeyden ilerde sıvı aşırı soğumuş ise ısıl dalgalanmalar sonucu oluşan mikro çıkıntılar daha soğuk bir ortam bulur dallantılı bir yapı oluşturacak şekilde büyümeye başlar. Fakat katılaşıma sırasında açığa çıkan ısı etkisiyle (ergime gizli ısısı) bir süre sonra dallantı arasındaki ve önündeki sıvı sıcaklığı yükseleceğinden katılaşıma düzensel ara yüzeyle devam edecektir.

Alaşımlarda, saf metallerden farklı olarak çözünen dağılımı serbest enerjide bir değişime oda bir alt soğumaya neden olur. Tek faz katı çözelti meydana getiren ikili bir alaşımın faz çizgesinin sol tarafını dikkate alalım (Şekil 3.5). Alaşımın ana bileşimi C_0 dir. Arayüzeydeki katı bileşiminin, sıvı bileşimine oranı denge paylaşım katsayısı olarak adlandırılmaktaydı (Eşitlik 3.1).



Şekil 3.6 Katı çözültü bir alaşım için şematik faz diagramı (Stefanescu, 2002).

Bu durumda T_L sıvıgen sıcaklığı, T^* arayüzey sıcaklığı T_S katıgen sıcaklığıdır. T^* sıcaklığında arayüzeydeki katının bileşimi C_S^* ise, sıvının bileşimi C_L^* olur. Şekil 3.6 da ki durumda arayüzeyde sıvıya göre katıda daha fazla çözünen bulunmaktadır. Paylaşım katsayısı sadece sıvıgen eğrisinin eğimi m 'in sabit olduğu durumlarda sabittir. Buda oldukça nadir rastlanılan bir durumdur. Bununla birlikte metamatiksel hesaplamalarda kolaylık sağlaması için genellikle m ve k sabit alınır. Katılaşma çizgeleri gözönüne alındığında da

$$\Delta T_0 = T_L - T_S = -m \Delta C_0 \quad (3.3)$$

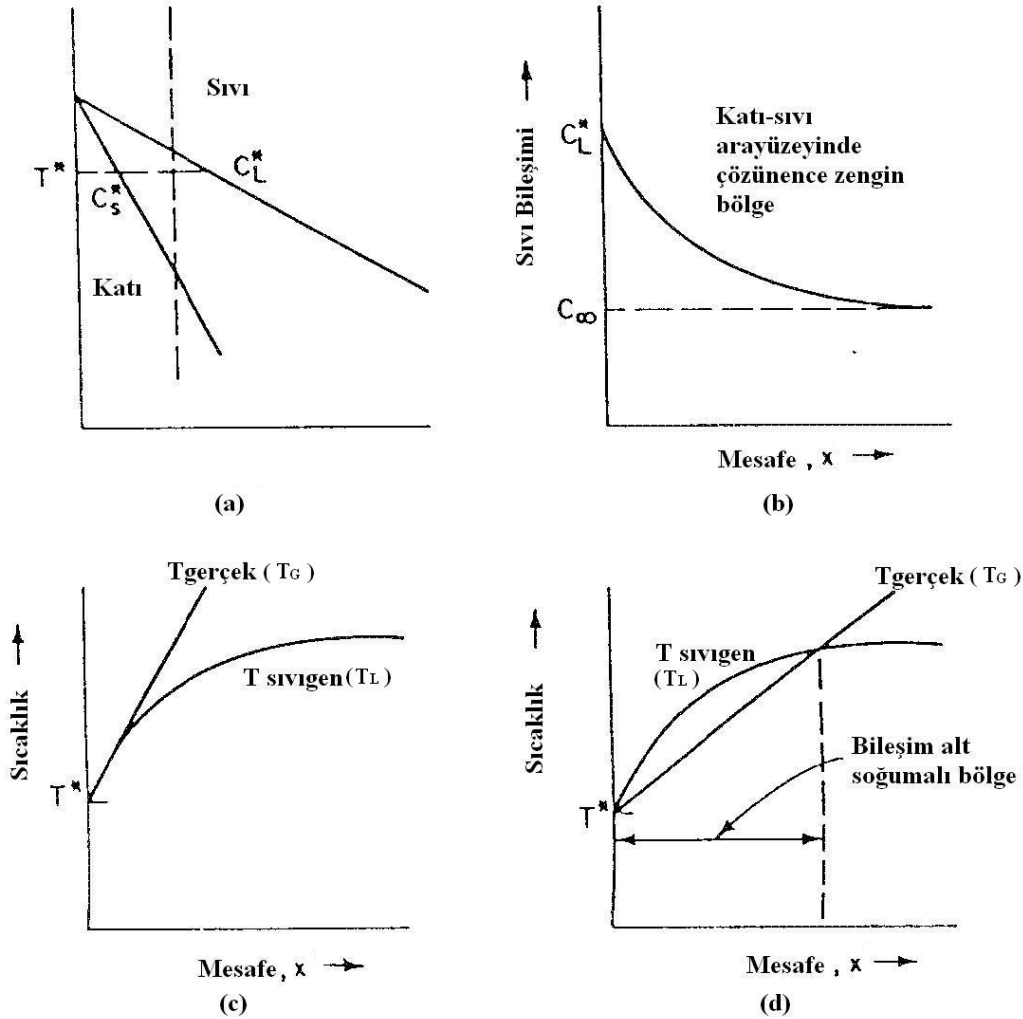
Ve

$$\Delta C_0 = \frac{C_0(1-k)}{k} \quad (3.4)$$

Bağıntıları vardır. Bu eşitliklerde ΔT_0 , C_0 bileşiminde sıvıgen –katıgen sıcaklıkları arasındaki fark, ΔC_0 ise T_S sıcaklığında sıvı ve katı arasındaki bileşim farkıdır (Stefanescu, 2002).

Alaşım elementinin katı ve sıvıdaki farklı çözürlüğü ek lat soğumanın sebebidir ve yapısal veya bileşim alt soğuması olarak adlandırılır.

Çözünen miktarı sıvı-katı ara yüzeyinde en büyük değerdedir ve ara yüzeyden uzaklaştıkça k , D ve k_0 'a bağlı olarak düşer. Ara yüzeyden uzaklığa ve faz çizgesine bağlı olarak değişen denge sıvıgen sıcaklığı (T_L) ise Şekil 3.6 (c), (d), ve (e) ' de gösterilmiştir.



Şekil 3.7 katı ara yüzeyinin denge durumunda: (a) denge çizgesi, paylaşım katsayısı $k = C_S/C_L < 1$, (b) ara yüzey önünde çözünen (B atomları) dağılımı, (c) kararlı yüzeyde sıcaklık eğimcesi, (d) kararsız yüzeyde sıcaklık eğimcesi (Konczos vd. 1998).

Ara yüzeyden itibaren çözünen miktarı düştükçe denge sıvıgen sıcaklığı artar. Büyüyen kristalin gerçek sıcaklığı T_G , aynı eğriler üzerinde verilmiştir. Katı-sıvı ara yüzeyinde denge hali kabul edildiği ve çok küçük bir değere sahip olan ΔT_k hesaba katıldığı takdirde eğriler $x=0$ 'da ΔT_k kadar farklı noktalardan geçer (Şekil 3.6 (c)).

Ana yüzeyin kararlılığını eğrilerin başlangıç noktalarındaki eğimleri belirler. Şekil 3.6 (c)'de olduğu gibi T_L eğrisinin başlangıç noktasındaki eğimi T_G eğrisinin başlangıç noktasındaki eğiminden düşükse ara yüzey kararlıdır. Bu durumda ara yüzey önündeki her nokta denge sıvılaştırma sıcaklığının üzerindeki bir sıcaklıktadır. Şayet herhangi bir kararsızlık düzgün yüzeyden ileri doğru bir çıkıntının oluşmasına neden olursa daha önce saf elementler için anlatıldığı gibi çıkıntı kendini daha sıcak bir bölgede bulacak ve eriyerek geri çekilecektir. Şekil 3.6 (d) T_L eğrisinin eğiminin daha yüksek olduğu hücrenel yapıya yol açan kararsız bir durumu göstermektedir. Burada ara yüzeyin hemen önündeki gerçek sıcaklık denge sıvıdan sıcaklığından düşüktür. Bileşimdeki değişim sonucu meydana gelen bu aşırı soğuma constitutional supercooling (bileşim alt soğuması) diye adlandırılmıştır. Bileşim alt soğuması durumunda meydana gelen herhangi bir çıkıntı aşırı soğumuş bölgeye girince büyümek için daha uygun bir ortam bulacağından ara yüzey kararsızdır. T_L ve T_G eğrileri arasındaki eğim farkı büyüyüp de aşırı soğuma ve aşırı soğumuş bölgenin uzaklığı artınca ilerleyen çıkıntıların uçları büyüme yönünü kristalçizisel olarak belirleyecek şekli alırlar. Buna rağmen bu eğim farkı yeteri kadar büyük değilse uçlar büyümelerini sınırlayan eşsıcaklıklı bir yüzey üzerinde yan yana ilerleyerek hücrenel dallantılı diye adlandırılan bir yapıyı oluştururlar (Kınıkoğlu, 1999).

3.2.2 Dallantı Morfolojisi

Hem kolonsal hemde eşeksenli yapıda, dallantılar yüzey enerjisinden dolayı olgunlaşarak gelişirler. Mikroyapı böylece dallantı kollarının tekrar erimesinden dolayı kaba hale gelir. Bu olayı ölçmek için gerekli parametre ikincil dallantı kolları arası mesafedir. Sonuç dallantı kolları arası mesafe, “yerel katılma zamanı” ile ya da tersine soğuma hızı ile alakalıdır.

Dallantı kolları arası mesafenin artması katılma zamanının sadece başlangıç safhasında görülür. Eşeksenli taneler lapa halde katılmaya başladıklarında, taneler hareket etmekte serbesttirler. Bir kritik yerel katı oranında, taneler bir ağ oluşturur ve bu kütle transferi gittikçe azalır. Bu bağlayıcı ağ dallantı büyüklüğü ve tipine bağlı olarak kuvvet kazanmaya başlar. 0.2 Katı oranında kesme dayanımı ölçülebilir hale gelir. Çok iyi tane inceltmeye tabi tutulan alaşımlarda, dayanım 0,4 katı oranına kadar artış göstermeyebilir. 0,9 katı oranında deformasyon, tane sınırı kaymaları ile bir ölçüde dallantı bozunumu ile gerçekleşir. Taneler arası boşluğun sıvıyla dolumu esnasında dallantılarda bir miktar bozunma olacağıda kesindir.

Yeteri kadar yüksek katı oranında (0,9 civarı), sıvı, katılan metalde ki termal veya diğer kaynaklı gerinimi telafi edecek kadar hareket edemez. Böylece eğer kısmi katılan metalin

dayanımını yenecek bir gerilme varsa, parçada dahili veya harici çatlaklar oluşur. Sıcak yırtılma durumu alaşım durumuna çok bağlıdır. Genellikle sıcak yırtılmaya meyilli alaşımlar geniş katılaşma aralığı gösterirler ve ötektik sıcaklıkta oldukça az sıvı miktarı kalır.

Pratik açıdan bakıldığında, mekanik veya elektromagnetik konveksiyon sonucu katılaşmanın başlangıç safhasında ince eşeksiz tane oluşumu fazladır. Günümüzde elektromagnetik karıştırma sürekli dökümde ince taneli yapı elde etmekte oldukça kullanılmaktadır. Titreşim, düşük döküm sıcaklığı ve dışardan tetiklenmiş konveksiyon dallantı parçalanması mekanizmasının temel sebebidir. Dallantı parçalanmasının sebepleri olarak;

- Dallantı kollarının sıvı akışının yol açtığı kesme sonucu kırılması.
- Normal olgunlaşma sonucu dallantı kökünün tekrar erimesi sonucu kopma. Bu durumda sıvı akışı olgunlaşma sürecinde çözünen difüzyonunu artırır ve kopan dallantı ucu ana yapıdan koparak yeni tane oluşturacağı yere taşınır.
- Türbülans konveksiyonu sonucu yukarıdaki maddede anlatıldığı gibi tekrar erime
- Sıvı akışı sonucu dallantı kökünde gerilim artması sonucu tekrar erime
- Türbülans sonucu tekrar erime ama bu durumda katıdaki yüksek çözünen miktarı kökteki erimeyi artırır.
- Zorlanmış sıvı akışı sonucu gerilim meydana gelmesi ile rekristalizasyon ile yeni taneler etrafında hızlı sıvı akışı (Flemings, 1991).

Bu tür prosese ve bu proses sonucu elde edilen mikroyapıya rheocasting denilirken, Spencer'in ilk çalışmalarından sonra geçen sürede bu yönteme "yarı-katı metal dökümü" adı verilmiştir.

Katılaşmanın başlangıcında uygulanan şiddetli karıştırmanın yeni tür taneler meydana getirdiğini bilmekteyiz. Katılaşma esnasında uygulanan sürekli karıştırma sonrası, dallantılar olgunlaşma, kopma ve aşınma sonucu rozet şeklini alacaktır. Olgunlaşma alt soğumanın artmasıyla artar. Yeteri kadar yüksek kesme ve uygun yavaş soğuma koşullarında, parçacıklar küresel hale gelir ve aralarında hapsolmuş bir sıvı kalır. Dallantı ve rozetlerin tane büyüklüğü orta derecede karıştırma hızına fakat oldukça yüksek derecede soğuma hızına bağlıdır (özellikle katılaşmanın başlangıcındaki soğuma hızına) (Flemings, 1991).

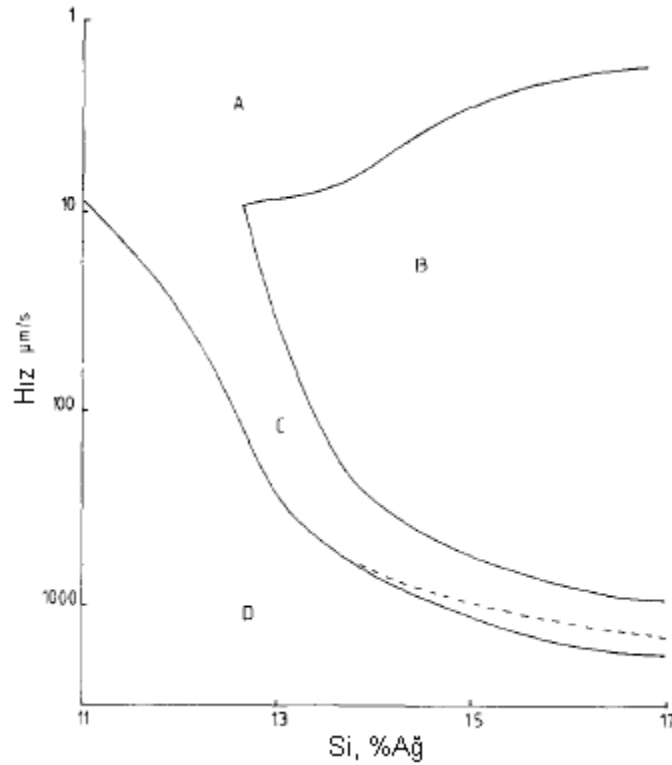
Yarı-katı haldeki ağdamsı metal alaşımının sürekli soğuması esnasında ağdalığı ölçüldüğünde, ağdalığının kesme hızının artmasıyla düştüğü ve kesme hızının oldukça yüksek bir fonksiyona sahip olduğu görülmüştür. Ağdalık ayrıca soğuma hızı ile de oldukça

alakalıdır. Doğal olarak kesme hızının artması ve soğuma hızının azalması daha yoğun ve daha yuvarlak partiküller oluşturacak ve bu partiküller birbiri üzerinde daha kolay kayabilecektir. Kesme hızının ağdalık üzerine etkisi sadece bu görüşle açıklanamaz. Yarı-katı ağdamsı alaşımlarda partiküller birbirleri ile çarpışarak ve birleşerek daha büyük yapılar oluştururlar. Bu daha geniş yapıların boyutu ve dolayısıyla ağdalık, bu yapıların oluşum oranına ve kesme sonucu kırılmaları arasındaki dengeye bağlıdır. Bu yapıların oluşup tekrar bozulmaları aşağı yukarı tersinidir ve kesme hızı ile değişir (Flemings, 1991).

Al-%6,5 Si için yapılan çalışmada ağdalık, düşük kesme hızlarında, dallantı ağının genişlemesi ve aglomerasyondan dolayı yüksektir (Flemings, 1991). Yüksek kesme hızlarında aglomerasyon düşer ve taneler rozet benzeri hal alır. Hızlı soğuyan yapıya kıyasla kararlı durumda karıştırılan ve yavaş soğuyan sıvı sonuçta küresel bir yapı haline gelir. Şekil 24 teki yapı meydana gelip ve sonra kaybolurken kesme hızı aniden değiştirildiğinde ancak belli bir süre sonra yarı-katı alaşım yeni ağdalık değerine sahip olur. Bu esnadaki anlık ağdalık değeri kararlı durumdaki ağdalıktan daha aşağı bir değerdedir çünkü yapı kendini yeni kesme hızına ayarlayamamıştır. Ani kesme hızı değişikliğinden sonra zamanla birlikte birleşmeler devam eder ve ağdalık tekrardan kararlı durumdaki hale yaklaşır. Kararlı durumdaki ağdalık ve ani değiştirilmiş kesme hızındaki ağdalık arasındaki fark karışımın thixotropisini verir (Flemings, 1991).

3.3 Alüminyum Alaşımlarının Katılaşması

Dallantılı yapı normal koşullardaki alüminyumun katılaşması yapısıdır ve düşük sıcaklık eğimcesine bağlıdır. Düşük alaşım miktarı ve yüksek sıcaklık eğimcilerinde hücrel büyüme görülebilir. Hızlı soğuma koşullarında bilhassa dar katılaşma aralıklı alaşımların sürekli dökümünde en sık görülen yapıdır. Diğer bir deyişle alüminyum ve alaşımlarının mikroyapıları sıcaklık eğimcesi, çekirdeklenme, kalıp hareketi, titreşim gibi katılaşma koşullarına bağlı olarak direksiden eşeksenliye yapı değişikliği gösterir. Şekil 3.7 de mikroyapı, Si miktarı ve büyüme hızı arasındaki ilişki görülmektedir.



Şekil 3.8 Yönlendirilmiş katılaşma ile belirlenmiş Al-Si alaşımlarının eşlenik bölge çizgesi (Atasoy vd, 1984).

Şekil 3.7'de A bölgesi-açılı, çubuk (rod) ve yapraksı ötektik silisyum, B bölgesi- ötektik, karmaşık düzenli, yıldızimsı ve iri primer silisyumdur ($Si > 14,5\%$), C bölgesi-ötektik Si, biraz primer Si ($Si > 14,5\%$), D bölgesi- α -Al dallantıları, ötektik Si ve bir miktar primer Si ($Si > 14,5\%$) dir.

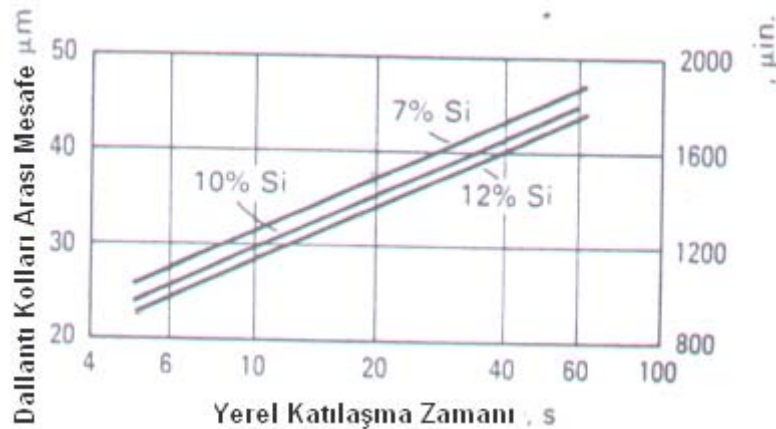
3.3.1 Tane Yapısı

Genellikle, sıcak yırtılma dayanıklılığı ve kütle beslemesini (mass feeding) artırdığından, mekanik özellikleri ve yüzey kalitesini iyileştirdiğinden alüminyum dökümlerinde küçük eşeksizli taneler tercih edilir. Özelliklerdeki gelişmeler büyük çapta gözeneksizliğin bir sonucu olmakla beraber eşeksizli tanelerin direksilere göre daha benzeşik (homogen) olması da bunda büyük rol oynar. Daha benzeşik yapı daha az ayrışma (segregation) bu da daha iyi ısıl işlem özelliği, gözeneklerin ve kalıntıların daha iyi dağılarak daha az zararlı olması demektir. Tane boyutlarının küçülmesi α -alüminyum fazının etkili bir ayrışık çekirdeklenmesi ile sağlanır. Küçülme mekanik veya sıvı akışı kuvvetlerinin dallantı dallarını kırması sonucu meydana gelen tane çoğalması ile elde edilebilmekle beraber uygulamada gerekli çekirdekçikleri sağlamak için kimyasal maddeler kullanılır.

Sonuçtaki döküm tane yapısını etkileyen diğer etmenler, alaşım bileşimi, katılma hızı, sıvıdaki sıcaklık eğimesi ve döküm yöntemidir. Ticari olarak satılan kimyasal katkıları genellikle alüminyum asıllı ana alaşımlar (master alloys) şeklindedir ve geniş bir alaşım bileşimi de ve farklı döküm yöntemlerinde başarı ile kullanılmaktadır.

3.3.2 Dallantı Yapısı

Döküm parçası α alüminyum fazının ayrışık çekirdeklenmesinden sonra, katılma sıcaklık aralığında soğudukça alüminyumun dallantı hücreleri büyür. Alüminyum silisyum alaşımında mesafeler Şekil 3.8 'de gösterilmiştir. Şekil 3.9 bazı alüminyum alaşımlarında dallantı hücre boyutlarının soğuma hızına bağlı olarak değişimini vermektedir.

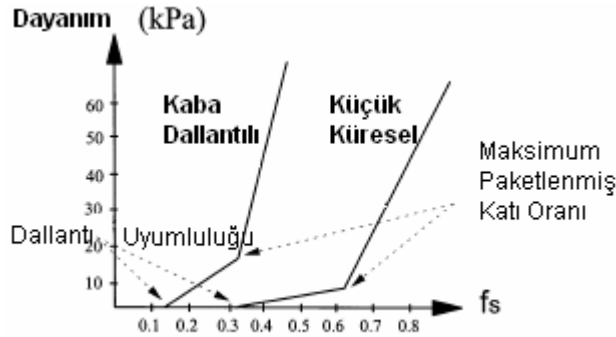


Şekil 3.9 Al-7Si, Al-10Si ve Al-12Si alaşımlarında dallantı kolları arası mesafenin bölgesel katılma zamanı ile değişimi (A.S.M. Handbook vol 15- Granger ve Elliot, 1992)

3.3.3 Al Alaşımlarının Yarı-Katı Durumda Kesme Davranışları

Alüminyum alaşımlarının reolojik davranışları konusunda yapılan araştırmalarda (Sumitomo, 2000) katılaşıpmakta olan bir alaşımda katı oranı arttıkça dayanımın üstel bir şekilde arttığı gözlemlenmiştir. Bu araştırmalara göre (Dahle ve StJohn, 1999; Sumitomo vd, 2000) dayanım artan katı oranıyla beraber artarken iki kritik nokta gözlemlenir; uyumluluk (Coherency) ve maksimum paketlenmiş katı oranı (maximum packing solid fraction). Uyumluluk, katılaşma esnasında dallantıların komşu dallantılarla ilk temas ettiğinde bir ağ ve iskelet oluşturduğu noktada meydana gelir. Al-Si-Cu alaşımlarında uyumluluğun, geniş düzensiz dallantı taneleri için 0,1 katı oranında, küçük küresel taneler için ise 0,45 oranında olduğu rapor edilmiştir (Sumitomo vd, 2000).

Bir alüminyum alaşımının katılaşmasında kaba dallantılı taneler ve küçük küresel taneler için yarı-katı bölgenin dayanımının sıvı içindeki katı oranıyla olan ilişkisinin grafiği çizildiğinde yukarıda bahsedilen iki uç nokta uyumluluk ve maksimum paketlenmiş katı oranı şekil 3.9 da görülmektedir.



Şekil 3.10 Yarı-Katı bölgenin katı oranının artmasıyla dayanımının arttığını gösteren grafik (Sumitomo vd., 2000)

Genelde, rijitlik ve kesme dayanımı yarı-katı bölgenin katı oranının artmasıyla artar. Tamamıyla sıvı olan metalle ($f_s=0$) uyumluluk arasındaki bölgede kesmeye veya karıştırmaya dayanım sıfırdır ve ölçülebilen bir kesme dayanımı yoktur. Bu tanelerin karşılıklı etkileşimi ile açıklanır. Düşük katı oranlarında komşu taneler birbirleriyle temas halinde değildirler ve bir kesme hareketi ile kendilerini rahatlıkla yeniden konumlandırabilirler. Taneler yeniden dağılmakta serbesttirler ve son mikroyapıda herhangi bir deformasyon veya sıvı ayrışması gözlemez. Uyumluluk anından itibaren ilk dayanım değerleri ölçülmeye başlar ve bu andan

itibaren artan katı oranıyla, dayanım, maksimum paketlenmiş katı oranı adı verilen bir eşik noktasına kadar doğru orantılı olarak artar. Bu nokta, tanelerin birbiriyle maksimum temas halinde olduğu an olarak betimlenmiştir (Dahle ve StJohn, 1999). Bu noktadan sonra taneler kolaylıkla yer değiştirememekte ve kesmeye dayanımları çok daha yüksek bir hızda artmaktadırlar. Dayanım kş katı oranı grafiğinde görülen uyumluluk noktasından sonra tanelerin gittikçe daha fazla temas kurmasından dolayı dayanım artmaya başlar. Bu arada sonyapıda gözlemlenebilen ayrılaşma bantları, tanelerin hareketiyle oluşan boşlukların sıvıyla dolması sonucu oluşabilir. Katı oranının artmasıyla ayrılaşmanın artması tanelerin birbirleriyle teması sonucu oluşan ağın gittikçe daha zor deforme olmasından kaynaklanır. Maksimum paketlenmiş katı oranı terimi, sıvıyla dolu boşlukların tane hareketlerini en düşük seviyeye indireceği minimum düzeyi temsil eder. Herhangi bir tane komşu taneyi hareket ettirmeden artık hareket edemez. Bu geline nokta kesme dayanımı ve rijitlikte önemli bir artışa sebep olur. Al-Si7-Cu4 alaşımı için bu noktanın katı oranı (f_s)=0.36 olduğu bildirilmiştir (Sumitomo vd.,2000).

Maksimum paket noktasından sonra yarı-katı bölge çok daha rijit bir durumdadır ve sıkışabilirliği azalmıştır. Katı oranı arttıkça kesme düzleminde ayrılmaya çalışan dallantıların yerini dolduracak daha az sıvı kalır. Düzensiz dallantılı yapının, ince küresel yapıya nazaran daha fazla geçirgen olduğu düşünülürse, dallantılı yapının daha rijit olmasından dolayı sıvıyı harekete geçiren kuvvet dallantılı yapıda daha azdır. Maksimum paket değeri sıcak yırtılma ve ayrılaşma gibi hatalar için uyumluluktan daha önemli bir göstergedir.

Sumitomo vd.(2000) nin belirttiğine göre dallantı morfolojisi (katı oranı, tane boyutu ve şekli) bileşimden ziyade kesmeye karşı dayanım açısından en önemli parametre olmaktadır. Dahle ve StJohn (1999) da kesmeye karşı en kuvvetli direncin rozet tip tanelerden geldiğini ileri sürmektedirler. Dallantılı yapılarda ise, dallantı kollarında deformasyon ve kırılma gözlemlenmektedir. Bunun nedeni dallantı kollarının birbirlerini kilitlemesidir.

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Sıvama döküm deneyleri, 98 DPT 07-02-01 no'lu "Mühimmat Gövdesi Üretimi" projesi kapsamında gerçekleştirilmiştir.

Sıvama döküm yöntemiyle dökülmüş numuneler, sıkıştırılmalı ve savurma dökümle elde edilen numunelerle kıyaslanmıştır.

4.1 Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Malzeme ve Cihazlar

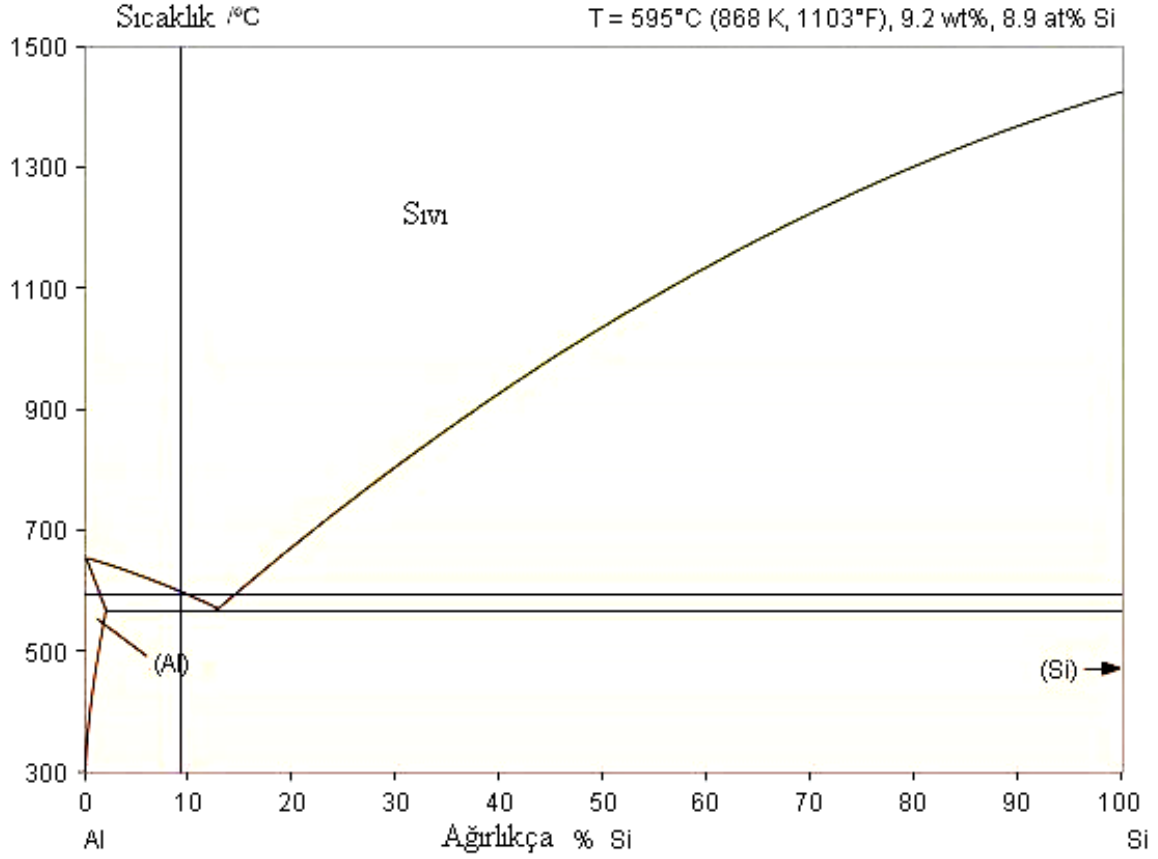
4.1.1 Döküm Alaşımı

Döküm alaşımı olarak daha önceki yüksek lisans tezlerinde de kullanılan yarı-katı metal dökümüne uygun ve ötektik noktaya çok yakın olmayan bir Al-Si alaşımı olan A-380 alaşımı seçilmiş bu alaşıma en yakın bileşimde olan Etial-160 alaşımı Gelişim Metal A.Ş. den temin edilmiştir. Bu alaşımın bileşimi Çizelge 4.1 de verilmiştir.

Çizelge 4.1 Sıkıştırılmalı Döküm deneylerinde kullanılan alaşım bileşimi (% olarak).

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti
8,73	0,603	3,09	0,164	0,216	0,453	0,015

Bu alaşımın Al-Si faz çizelgesindeki yeri aşağıda görülmektedir.



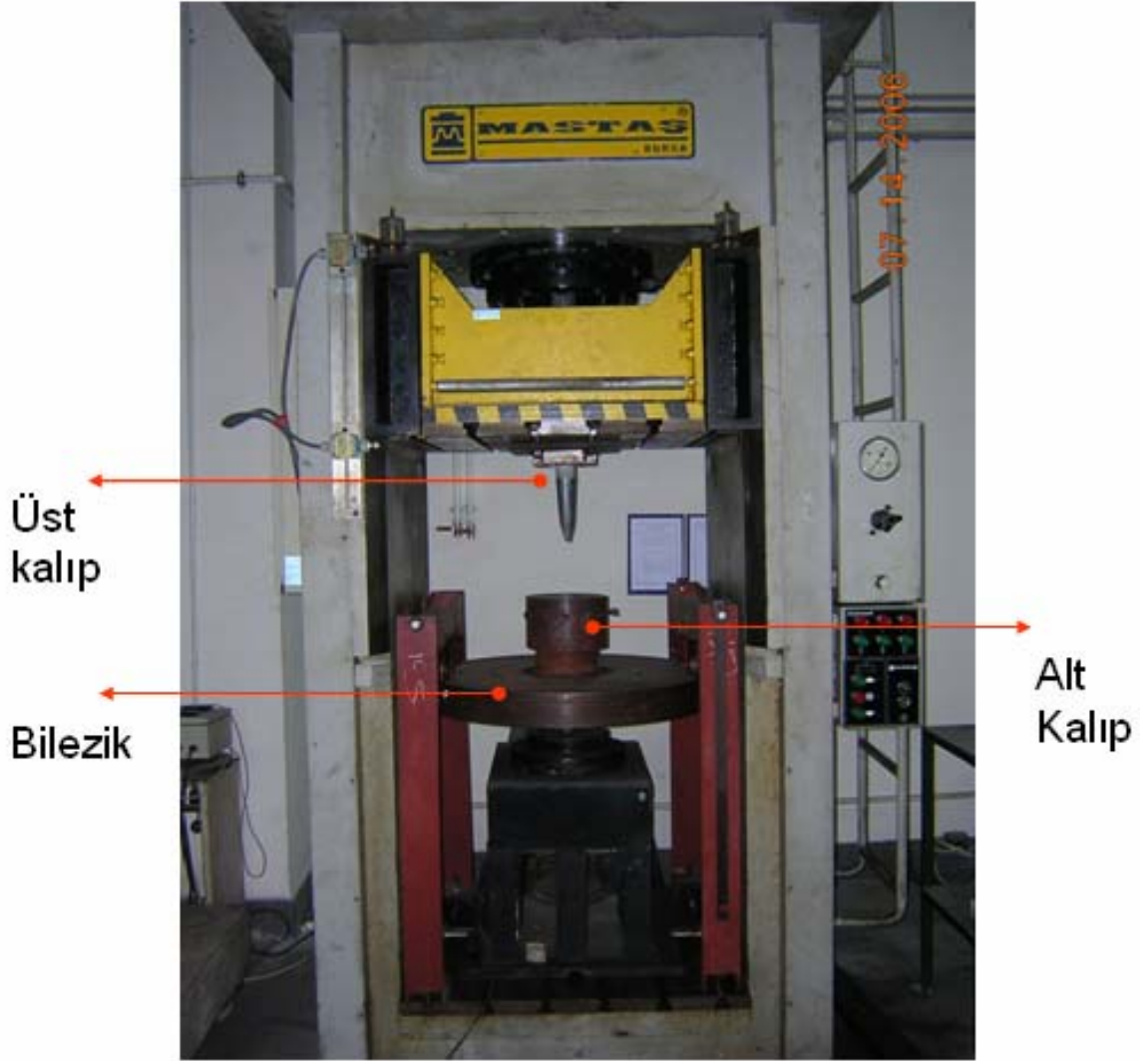
Şekil 4.1 A-380 Al-Si alaşımının faz çizelgesindeki yeri (www.aluminium.matter.org.uk)

4.1.2 Sıvama Döküm Makinesi

Sıvama Döküm sisteminde kullanılan hidrolik pres cihazı, Bursa Mastaş A.Ş. tarafından imal edilmiştir. Bu hidrolik pres cihazı üzerinde, istenilen basıncı en geç 3 saniyede uygulayacak şekilde firma tarafından hidrolik sisteminde değişiklikler yapılmıştır. Hidrolik pres teknik özellikleri Çizelge 4.2 de görülebilir. Pres üst tablasına oynar bağlamalı üst kalıp, alt tablasının üzerinde de savurma döküm makinesi ve üzerine bağlı alt kalıplar bulunmaktadır.

Çizelge 4.2 Hidrolik Pres Teknik Özellikleri

Üst Tabla Kursu	100 mm
Maksimum Yük	100 Ton
Tablalar Arası Maksimum Açıklık	1480 mm
Ağırlık	5200 kg



Şekil 4.2 Sıvama Döküm Sistemi

Döküm sisteminde hidrolik pres altına konulan savurma döküm makinesi Tülomsaş tesislerinde imal edilmiş olup MegaTeknik A.Ş tarafından 60 ton yük altında emniyetli şekilde çalışabilecek hale getirilmiştir. Savurma döküm makinesi üzerinde uygun bağlama parçaları ile alt kalıp monte edilmiştir. Alt kalıp, döküm esnasında Üst kalıbın uyguladığı basınçtan dolayı hemen durmaması için resimde alt kalıbın altında görülen yaklaşık 400 kg. lık bilezik ile itibatlandırılarak atalet momenti arttırılmıştır

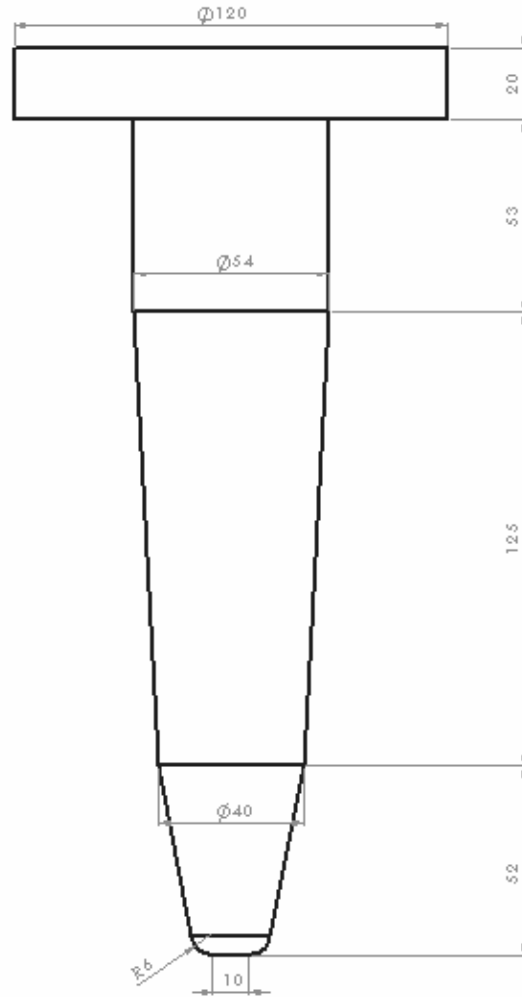
Savurma döküm makinesi üzerine döküm kalıbı sabitlendikten sonra bir komparatör yardımıyla salgısı ölçülmüş bu salgının giderilmesine çalışılmış ama salgının belli bir değerin altına indirilmesi mümkün olmamıştır. Bunun üzerine üst kalıbın oturma yeri yatay ekseninde hareket edebilecek şekilde değiştirilmiştir.



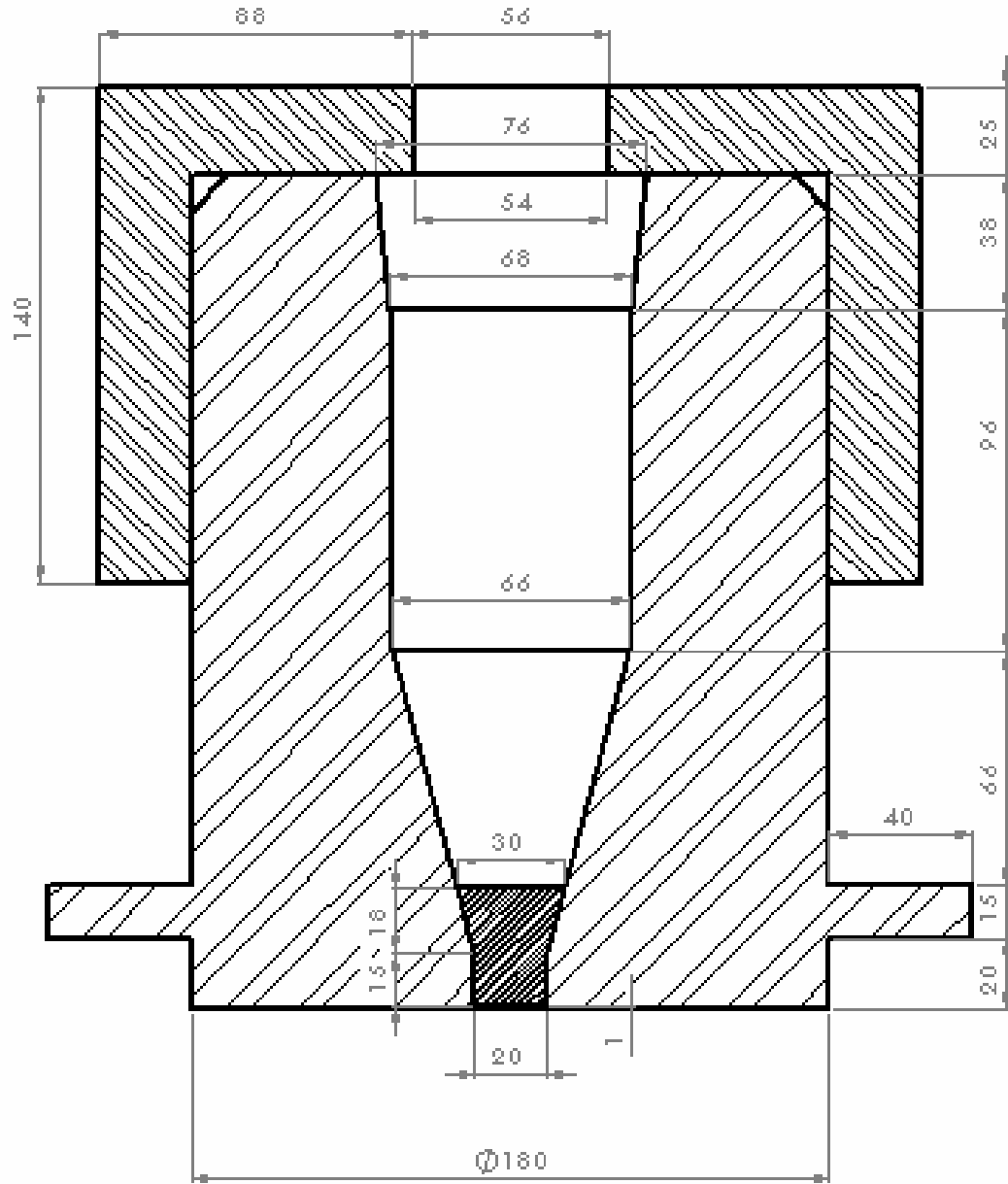
Şekil 4.3 Sıvama döküm kalıpları

4.1.3 Döküm Kalıpları

Döküm Kalıpları 1,2344 rumuzlu sıcak iş takım çeliğinden ilk olarak 1999 yılında imal edilmişler ve ısıtım işlemi gördük 52 HRC sertlik kazandırılmışlardır. İlk tasarımın da alt kalıbın üst taraftan bağlanan kapak bölümü, bazı sorunlara yol açtığından ve sıkışma meydana geldiğinde sökümü çok zorlaştırdığından değiştirilmiş ve kapak bölümü dört adet olarak yeniden tasarlanmış ve imal edilmişlerdir. Üst kalıbın tepe kısmı ise alt kalıbın salgısından dolayı 10. dökümden itibaren yatay ekseninde oynar hale getirilmiştir. Döküm kalıplarının resimleri Şekil 4.4 ve Şekil 4.5’de verilmiştir.



Şekil 4.4 Üst kalıbın teknik resmi (ölçüler mm cinsinden).



Şekil 4.5 Alt kalıbın teknik resmi (ölçüler mm cinsinden)

4.1.4 Ergitme Ünitesi

Ergitme ünitesi olarak Lepel marka 15 KW İndüksiyon ocağı kullanılmıştır. Ergitme ünitesi Şekil 4.6 ' de görülmektedir. Ergitme potası olarak Karasu Metal A.Ş. de yaptırılan özel grafit potalar tercih edilmiştir.



Şekil 4.6 Ergitme Ünitesi

4.1.5 Sıcaklık Ölçüm Cihazları

Sıvı metalin sıcaklığı Testo 900 marka el ünitesi bağlanmış NiCr-NiAl tipi daldırma probu ile kalıpların yüzey sıcaklıkları ise yine Testo 900 el ünitesine bağlanmış NiCr-NiAl tipi yüzey probu ile ölçülmüştür.

4.2 Sıvama Döküm Deneyleri

4.2.1 Döküm Öncesi Hazırlıklar

Her döküm öncesinde aşağıda belirtilen hazırlıklar gerçekleştirilmiştir. Ergitilecek alüminyum alaşımı külçe halinden toplam bir kg.'a yakın olacak şekilde küçük parçalara bölünmüştür. Kesme işleminden sonra her parça ile üzerindeki kesme sıvıları ve diğer zararlı malzemelerden kurtulmak için trikloretilen sıvısı ile temizlenmişlerdir.

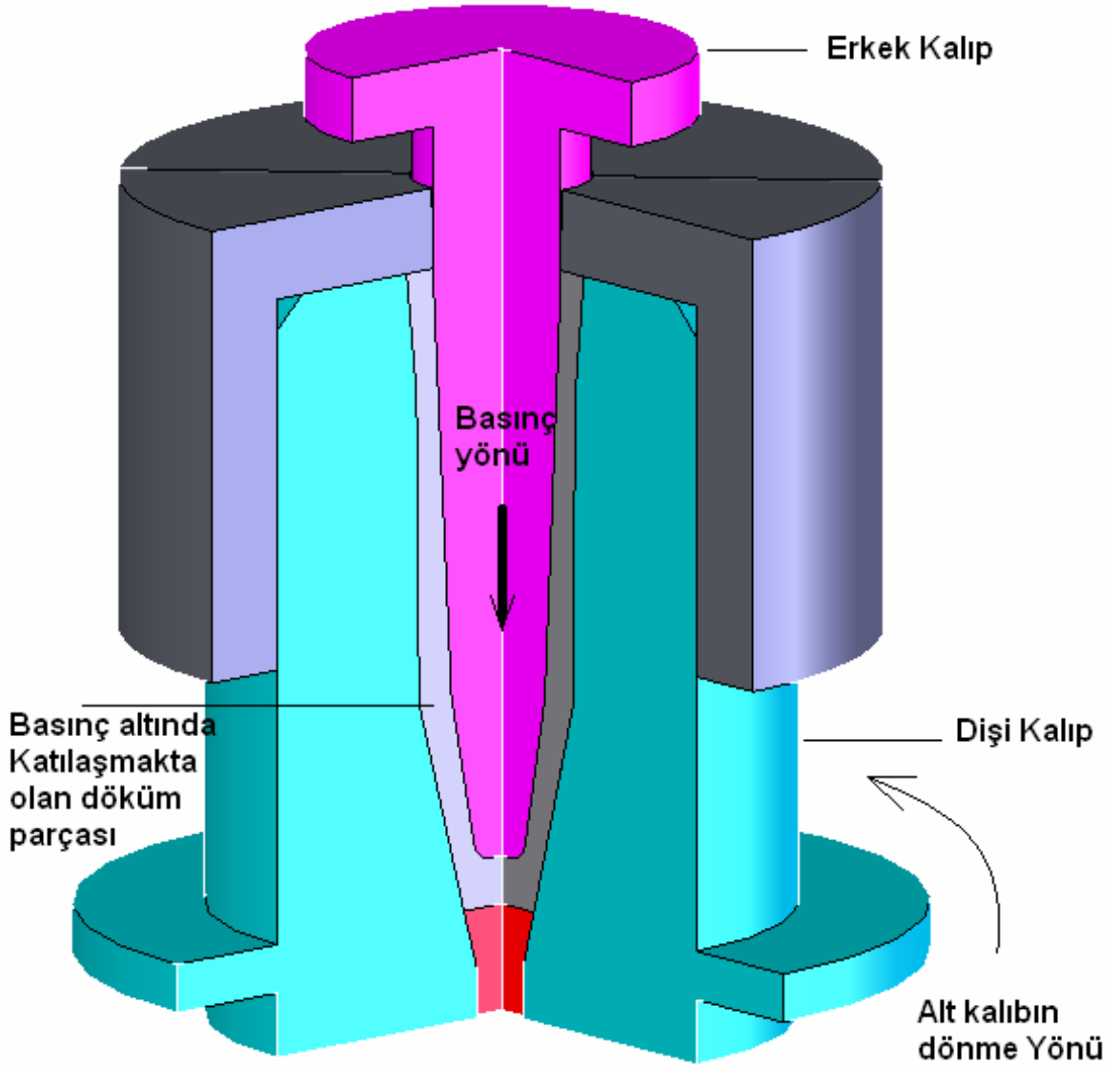
Ergitme işleminde gerekli olan gaz alma tabletleri piyasadan temin edilen klor esaslı gaz alma tabletleridir. Bu tabletlerden ergitilecek metal ağırlığının yaklaşık binde ikisi kadarlık bir miktar toz halde etüvde 30 °C de kurularak alüminyum folyo içine konulup sarılmıştır.

Hidrolik pres altına yerleştirilmiş savurma döküm makinesinin üzerindeki alt döküm kalıbının kapakları 8 adet allen civatayla yan taraflarından sıkılarak kapatılır. Üst kalıp, alt içinde serbest halde bulunurken hidrolik pres üst tablası indirilerek Üst kalıp üst tablaya bağlanmış ve bu şekilde erkeğin dikey eksenine altın eksenini tam çakıştırılmıştır. Eksenleri çakışmış halde iken Üst kalıp hidrolik pres üst tablasına T civataları sabitlenir. Kalıpların sabitlenmesinden sonra, alt döküm kalıbı grafit tozuyla sıvanırken, Üst döküm kalıbı ZypCoatings firmasının Boron-Nitride Hard-Coat ürünü ile kaplanmıştır. Bu işlemin dökümden en az bir gün önce yapılması kaplamanın doğal kuruyarak çatlamaması için önem arz etmektedir.

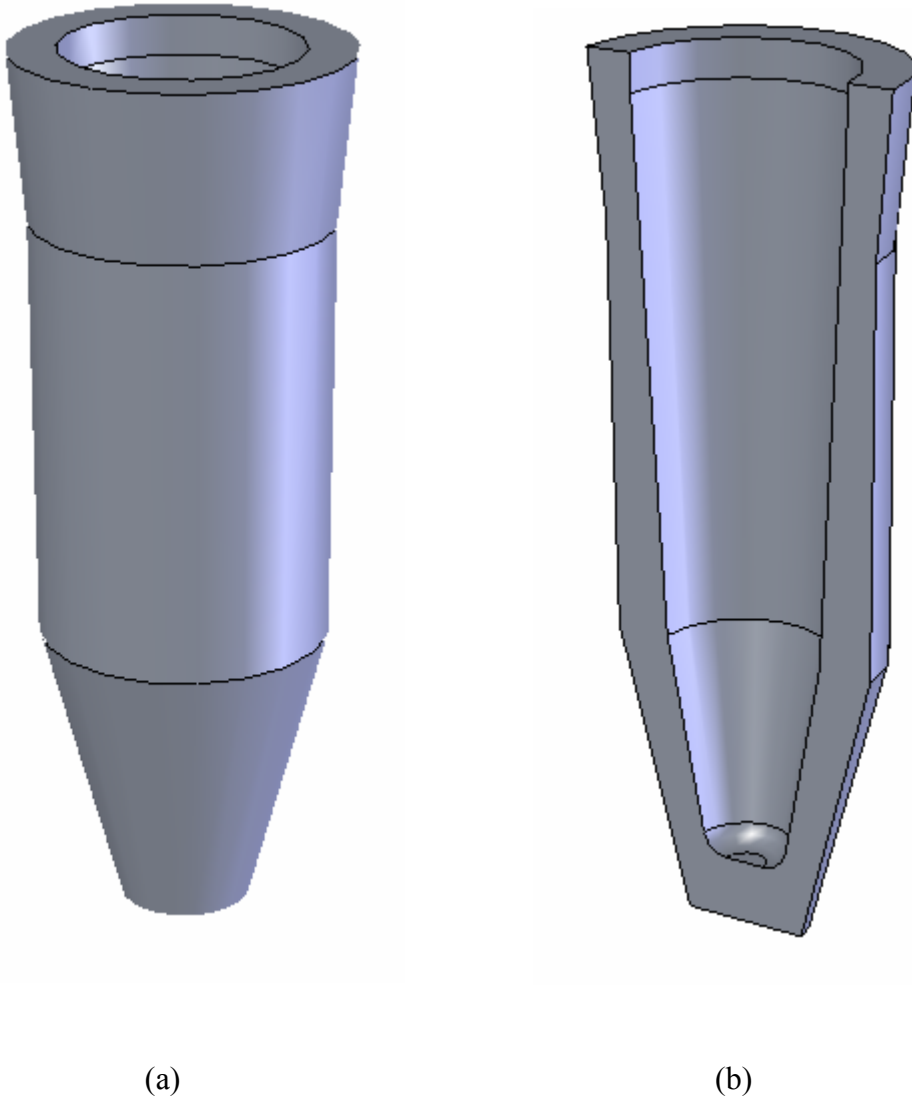
Sabitlenmiş ve kaplanmış kalıplar, döküm öncesinde elektrik dirençli bir fırın yardımıyla istenilen sıcaklığa getirilirler. İstenilen sıcaklığa geldiği yüzey probuyla tespit edilen alt döküm kalıbı bir motor frekans kontrolörü yardımıyla dikey eksen etrafında döküm hızına çıkarılır. Alt kalıbın hareketi zamana karşılık olarak bir encoder yardımıyla ölçülerek YTÜ Elektronik Mühendisliği bölümü Öğr. Üyesi Yrd. Doç.Dr. Tuncay UZUN'un geliştirdiği yazılımla bilgisayar ortamına aktarılmaktadır.

4.2.2 Döküm Deneyleri

Döküm deneyi kalıpların ısıtılması ile başlar. Döküm kalıplarının döküm anında istenilen sıcaklığı 200 °C dir. Isıtılma süresi yaklaşık 2–3 saati bulur. Kalıplar yaklaşık 220 °C ye ısıtılarak fırının alınmasından döküme kadar geçen sürede oluşacak ısı kayıplarıyla döküm sıcaklığının 200 °C yi bulması sağlanır. Kalıplar yaklaşık 210 °C ye geldiklerinde ergitme ünitesine güç verilerek ergitmeye başlanılır bu esnada kalıpların ısıtılması devam eder. Ergitme yaklaşık 10 dk. sürmektedir. Ergitme tamamlanmadan, kalıpların 220 °C'ye ulaşmasıyla, kalıp ısıtma fırını alınarak savurma döküm makinesine bağlı alt döküm kalıpları döndürülmeye başlanır. Alt döküm kalıplarının dönme hızı olarak ilk deneylerde 385 dev/dak seçilmiş sonrasında yeterli kesme elde edildiği düşüncesi ile 600 dev/dak lık hıza çıkılmıştır. Ergitme ünitesinde ergimiş halde bulunan sıvı alaşımın sıcaklığı devamlı ölçülerek gaz alma sıcaklığına gelmesi beklenir. Bu sıcaklığa ulaşan sıvı metale bir çan içinde bulunan klor esaslı gaz alma tableti daldırılır. Gaz alma işlemi sonunda sıvı metalin sıcaklığının yaklaşık 40–50 °C arası düştüğü gözlemlenmiştir. İndüksiyon ocağında grafit potanın içinde bulunan gazı alınmış sıvı metal, bir kısıkaç yardımıyla ocaktan alınarak bekletilmeden hızla dönen alt kalıba dökülür. Potadan son metalin kalıba akmasıyla üst kalıp alt kalıbın üstüne indirilir. Deneylerde hidrolik pres sistemi, 5 tonluk kuvvet uygulayacak şekilde ayarlanmıştır. Hidrolik pres üst tablasına bağlı Üst kalıbın alt üzerine kapanıp sıvıya basınç uygulaması ile savurma döküm makinesine bağlı alt kalıp zorlanarak yavaşlar ve durur. Bu durma süresi her dökümde farklı olmakla beraber her durumda 6 s'yi geçmemektedir. Savurma döküm makinesine bağlı alt kalıbın durmasına rağmen basınç uygulamaya devam edilir. Toplam basınç uygulama süresi 10 s'dir. 10 s'lik süre sonunda pres tablası ve üst kalıp yukarı kaldırılarak döküm işlemi bitirilmiş olur. Kalıplar soğumadan kapak kısmı sökülerek döküm parçası dışarı alınır. Döküm deneylerinde kalıpların dönmeye başlatılması ile tamamen durana kadar geçen sürede kalıbın açılma hızının zamana bağlı değişimi bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Döküm parçasının alt kısmında kalan bölümün kalınlığı kalıba ne kadar sıvı akıtıldığı ile ilgilidir. Döküm deneylerinde genellikle yaklaşık 1100 gr. civarında metal ergitildiği ve bununda bir miktarı ergitmede gaz alma işleminde ve bir miktarıda potada kaldığından döküm parçaları 950 gr. dan hafif olmaktadır. Genellikle döküm parçasının uç tarafının uzunluğu 15 mm civarında ölçülmüştür. Şekil 4.7 döküm anında üst ve alt kalıpların konumunu göstermektedir. Şekil 4.8 de sıvama dökülmüş parçanın katı-model hali ve A-A kesiti verilmiştir.



Şekil 4.7 Döküm anında üst (erkek) ve alt (dişi) kalıplar.



Şekil 4.8 Sıvama dökülmüş parçanın katı modellenmiş (a) ve kesit (b) hali

Bu çalışmada 15 adet döküm deneyi yapılmış olup bu deneyler aşağıda sırasıyla verilmiştir;

Çizelge 4.3 Döküm deneyleri

Döküm No	Ergitilen Metal Ağırlığı (gr)	Basınç Uygulama Zamanı (s)	Kalıp Sıcaklığı (°C)	Alt Kalıp Dönme Hızı (d/d)	Döküm Öncesi Metal Sıcaklığı (°C)	Gaz Alıcı Ağırlığı (gr)
1	1074	10	195	385	780	2
2	1097	10	190	385	825	5
3	1060	10	185	385	771	2.5
4	1073	10	206	385	730	3,8
5	930	10	180	385	800	3
6	1105	10	192	385	820	3
7	1100	10	197	385	812	3
8	1097	10	190	385	750	3
9	1115	10	190	385	820	3
10	1197	10	-	385	-	3
11	1074	10	187	600	735	3
12	1055	10	195	600	734	3
13	1046	10	203	600	835	3
14	1150	10	203	600	830	3
15	1197	10	202	-	825	3

Döküm deneylerinde 11. döküme kadar olan deneylerde karşılaşılan sorunlar giderilerek hatasız döküm parçaları elde edilmeye çalışılmış ve bu nedenle aynı parametrelerle farklı dökümler de yapılmıştır. 4. Dökümden itibaren alt döküm kalıbının hareketinin zamana bağlı grafiği gerçek zamanlı olarak bilgisayar ortamında çizilmeye başlanmıştır. 11. Döküme kadar olan deneylerin bazılarında, savurma döküm makinesine bağlı olan alt kalıp ve alt parçalarının salgısı, balans firmasının yardımıyla dahi belli değerlerin altına indirilememiş ve parçalarda kapakla Üst kalıp arasında sıvı kaçmasının neden olduğu kalıp dolduramama problemi gözlemlenmiştir. Bu sorunu çözmek amacıyla üst kalıpta yatak ekseninde serbest hareket etmesine olanak veren bir değişiklik yapılmıştır.

Özellikle 13. döküm sıvama döküm sıvama döküm deneyleri içinde alt kalıbın en uzun durma süresini verdiği için sıvama döküm yönteminin diğer döküm yöntemleriyle kıyaslanmasında örnek numune olarak seçilmiştir. Son iki deneyde, sıvama dökülmüş parçalarla kıyaslanmak için bir savurma ve bir de sıkıştırılmalı döküm yapılmıştır. Dökülen parçalar üzerinde bölüm 4.3 te ayrıntıları verilen incelemeler gerçekleştirilmiş ve sıvama dökümle üretilen parçalara etkiyen kesme oranı ve döküm sürecinin yaklaşık ilk çeyreğinde yarı-katı alaşımın ağırlığı hesap edilmiştir.

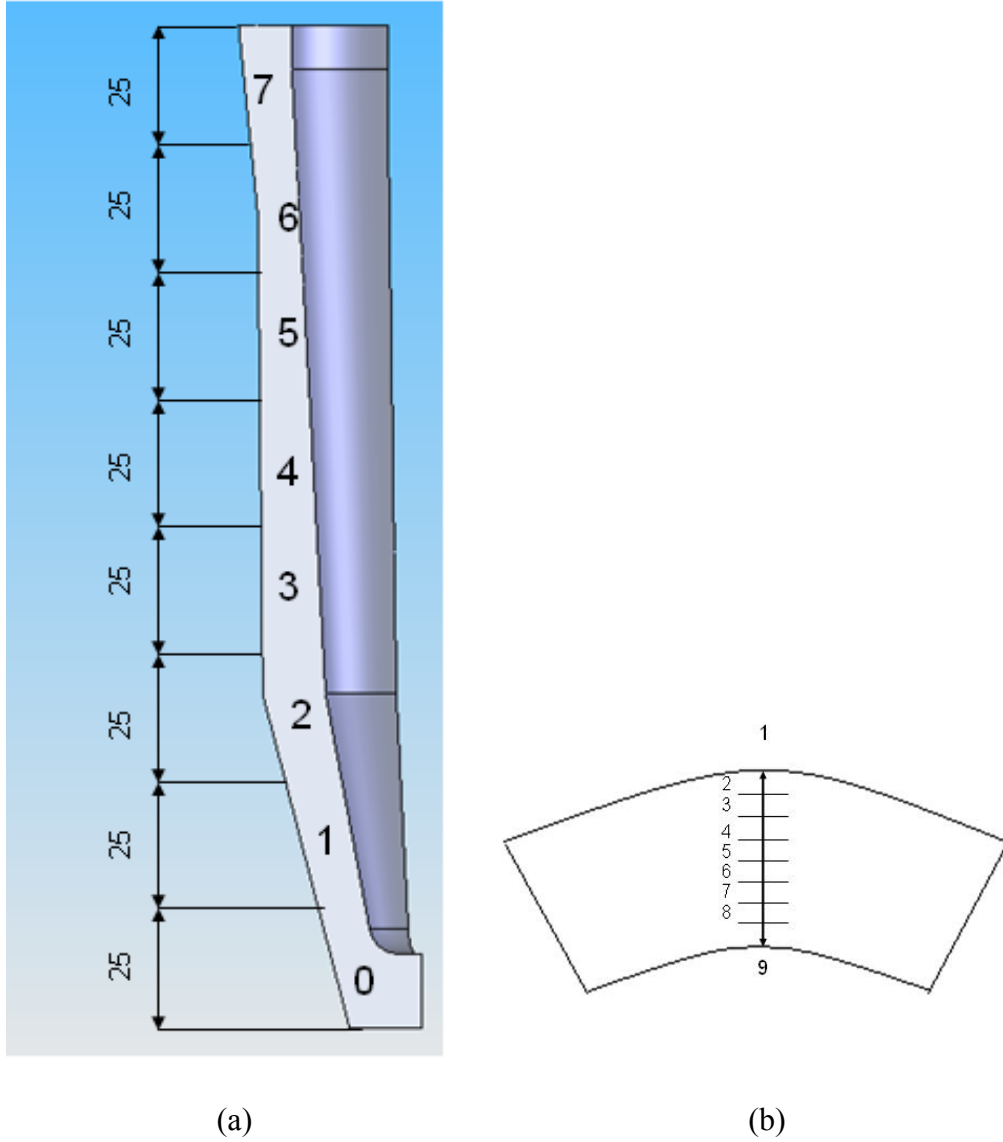


Şekil 4.9 Sıvama dökümle üretilmiş döküm parçaları

4.3 İncelemeler

4.3.1 Metalografik İncelemeler

Döküm parçalarından önce Şekil 5.10 da gösterildiği şekilde dilimler çıkarılmış ve bu dilimler dikine eşit aralıklı olarak 8 parçaya bölünmüştür. Dilimlenmiş döküm parçalarının hem dik hem de paralel olarak mikroyapıları incelenmiştir. Metalografik inceleme için parçalar önce soğuk monte edilmiş sonrasında kalından ince ye doğru sırasıyla 120-240-320-600-800-1200 no.'lu zımparalarla yüzeyleri düzeltilmiştir. 1200 Mesh'lik zımparadan sonra 3 µm'lik elmas pasta ve sonrasında koloidal alümina ile parlatılmışlardır. Parlatılan numuneler 25–30 s arası Keller dağlayıcısı (1 ml HF, 1.5 ml HCl, 2.5ml HNO₃, 95 ml H₂O) ile dağlanmışlardır. Mikroyapılar esas olarak x100 büyütmede görüntülenmiş ve kaydedilmiş gerek duyulduğunda diğer büyütme faktörlerine çıkılmıştır.



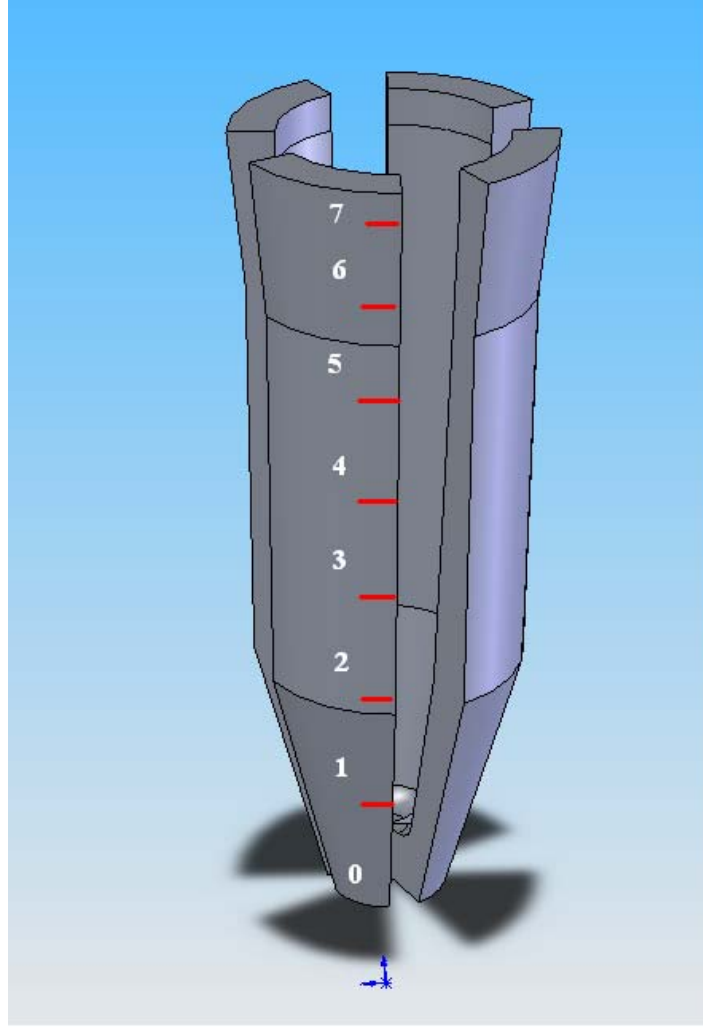
Şekil 4.10 Döküm parçasından alınan dilim ve metalografik inceleme yönleri (a) paralel bakış (b) dik bakış (ölçüler mm cinsinden).

Numuneler ışık metal mikroskopunda alt kalıba temas eden yüzeyden içeri doğru gelinerek tüm hem dik hemde paralel bakılarak kesit boyunca incelenmişlerdir.

4.3.2 Bileşimdeki Değişimin Tespiti

Döküm parçasından birbirine eşit uzaklıkta dört adet dilim çıkarılarak mikroyapıların alındığı yerlere karşılık gelen noktalardan elementel analiz yapılmış ve döküm parçasının boyunca elementel değişimin nasıl değiştiği saptanmıştır. Her nokta için dört ayrı dilimden çıkan

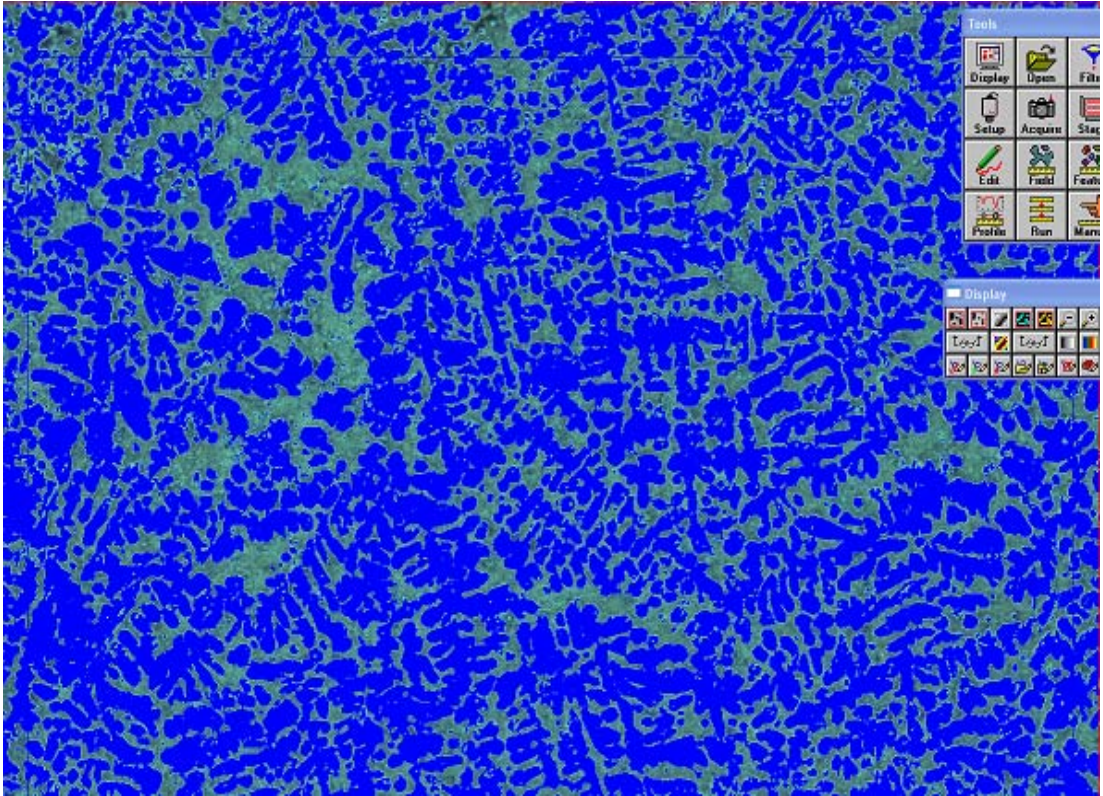
numuneler üzerinde analiz yapılması sonuçların güvenilirliğini arttırmıştır.(Şekil 4.11)



Şekil 4.11 Kimsayal analiz için dilimlenmiş döküm parçası. Analizler aşağıdan yukarı numaralanmış numunelere dik olarak uygulanmıştır.

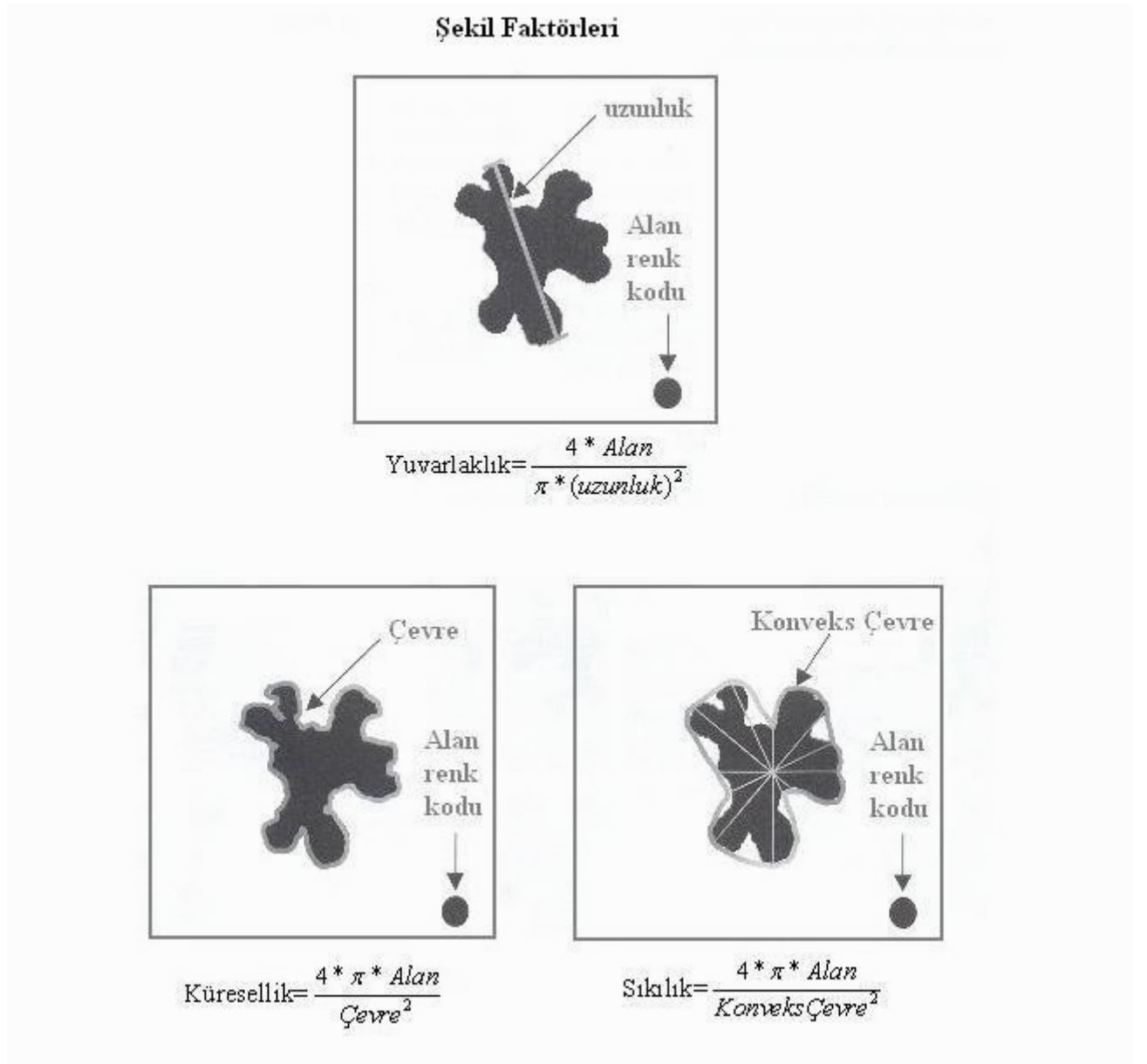
4.3.3 Nicel Metalografik İncelemeler

Elde edilen mikroyapılar üzerinde görüntü analiz yazılımı kullanılarak bazı nicel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Görüntü analiz yazılımıyla faz ayırımı yapılarak α -Al kristallerinin geometrik olarak ne kadar küresel duruma geldikleri döküm parçasının en altından yukarı doğru ve her noktada dışardan içeri gelinerek % olarak belirlenmiş ve grafik haline getirilmiştir.(Şekil 4.12)



Şekil 4.12 Görüntü analiz yazılımında tespit edilen α -Al fazı.

Mikroyapı analizinde, bilgisayar destekli görüntü analizi bazı limitlerle sonuca ulaşmakta büyük kolaylıklar sağlayabilmektedir. Tane morfolojisi incelenirken tanelerin daireselliğini tespit için en çok kullanılan şekil faktörleri; roundness (yuvarlaklık), sphericity (küresellik) ve compactness (sıklık) dır. Bununla birlikte Ruxanda ve Stefanescu, 2002’de küresel grafitin şeklini tarif etmekte küreselliğin, sıklıktan daha iyi olduğunu belirtmişlerdir. Şekil 4.13 te kullanılan yaygın şekil faktörleri ve hesaplamaları gösterilmiştir.



Şekil 4.13 Şekil faktörleri (Ruxanda ve Stefanescu, 2002).

Görüntü analiz çalışmasında dikkat edilmesi gereken bir nokta da piksel büyüklüğüdür. Kaynak görüntü bilgisayara aktarıldığında resimsel bilgi sayısal formata dönüştürülür. Sayısallaştırmada, görüntü yatay ve dikey çizgilerle belirlenen çok küçük bölgelere yani piksellere ayrılır. Piksellerin pozisyon ve sayılarına göre görüntü analiz edilmeye başlanır. Örneğin bir hat boyunca var olan piksellerin sayısına göre o hattın uzunluğu ölçülebilir. Görüntü işlemede şekil faktörünün ölçülmesinde piksel büyüklüğü önemlidir. Bu özellikle küresellik ve kompaktlık gibi şekil faktörünün hesaplanmasında çevre ve alan ölçümleri hesaba katıldığı için önemlidir. Genellikle piksel boyutu büyütme oranıyla ters orantılıdır bu nedenle standart piksel büyüklüklerinin kullanımı farklı çalışmaların sonuçlarının kıyaslanmasında önem kazanır (Ruxanda ve Stefanescu, 2002).

Görüntü analiz yazılımında şekil faktörü olarak seçilen küresellik aşağıdaki bağıntı ile hesaplanmaktadır.

$$\text{Küresellik} = \frac{(4 * \pi * \text{Alan} * 1,064)}{\text{Çevre}^2} \quad (4.1)$$

Burada:

Çevre: α -Al taneleri çevresi, Alan: α -Al taneleri alanıdır. 1,064 köşeleri düzeltme katsayısıdır.

Küresellik değeri 1 değerine eşit olduğunda tam dairesel yapıyı temsil eder ve bu değer 1 değerinden uzaklaştıkça küresellik sapor. Eşitlik 4.1 kullanılarak Sıvama, sıkıştırılmalı ve savurma dökülmüş parçalardan alınan numunelerin döküm parçası boyunca orta kısımlarının küresellikleri, görüntü analiz programı yardımıyla tespit edilmiştir.

Ruxanda ve Stefanescu'nun (2002) yaptıkları çalışmada küresellik $>0,65$ değerinin küresel grafitli dökme demirler için grafit şeklinin küreye en yakın değerler olduğu rapor edilmiştir. Bu referanstan hareketle α -Al fazı için elde edilen küresellik değerlerinden 0,65 in altında olanlar atılmış ve geri kalanlar küre olarak kabul edilmişlerdir. Küresellikleri 0,65 in altında olanların alanı ile küresellikleri tespit edilen α -Al tanelerinin toplam alanı birbirine oranlanarak α -Al fazının ne kadarının tam küre haline geldiği hesaplanmış ve grafikte gösterilmiştir (Şekil 5.50). Ne kadar tanenin küresel hale geldiği alanların oranı yerine küresellikleri 0,65 değerinin üstünde olan tanelerin sayısının toplam tane sayısına oranlanması konseptiyle de bulunabilir.

0,65 Küresellik değerinin yuvarlaklık olarak karşılığı olan 1.538 değeri ayrıca yarı-katı döküm ile elde edilen mikroyapılarda E.J. Zoqui vd. (2002) tarafından yapılan şekil faktörü

ölçümleri ile de uyumludur. E.J. Zoqui vd. (2002) yaptıkları çalışmada yarı-katı dökülmüş A356 alaşımı için şekil faktörü olarak (yuvarlaklık) 1,25-1,79 aralığında değişen değerler bulmuşlardır.

İkinci nicel çalışma olarak ikincil dallantılar arası mesafe ve küre çapları yine aşağıdan yukarı tespit edilen noktalarda ölçülmüş ve grafik olarak gösterilmiştir.

4.3.4 Gözeneklilik Tayini

Üç döküm parçasının gözenekliliği Arşimet Prensibi yardımıyla tespit edilerek grafik olarak gösterilmiştir. Döküm parçalarının gözenekliliğini homojen ölçmek için her döküm parçasından parça yüksekliğine bağlı olarak 3 numune alınarak ölçüm yapılmıştır.

4.3.5 Sertlik Ölçümü

Üç döküm parçasının, parça yüksekliği boyunca Brinell sertlikleri (2,5 mm bilya çapı, 62,5 kgf yük) ölçülerek grafik olarak gösterilmiştir.

4.3.6 Elektron Mikroskobu İncelemeleri

Döküm parçasından metalografik incelemeler için alınan numunelerde tespit edilen intermetalik bileşikleri saptamak ve mikroayırışmayı ölçmek için numuneler Jeol JSM-5410 LV marka tarama elektron mikroskobunda incelenmiş ve enerji saçılımlı X-ışınları ünitesi (EDX) ile analiz edilmişlerdir.

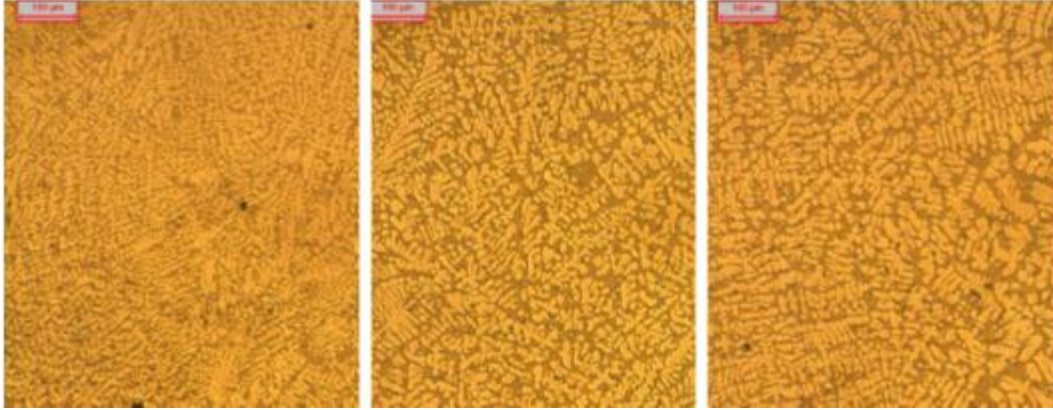
5. BULGULAR

5.1 Mikroyapılar

5.1.1 9 No'lu Sıvama Dökümün Mikroyapıları

9 No'lu döküm parçasının mikroyapıları, parçadan çıkarılan dilim üzerinden, Şekil 5,9'da gösterildiği şekilde aşağıdan yukarı doğru numaralanmış noktalardan alınan numunelerden gözlemlenmiştir. Alınan numunelere dik olarak bakılmıştır (dönme eksenine dik). Büyütme oranı x100, 7 no'lu en üst numunede ise x200 dür.

Dik Bakış

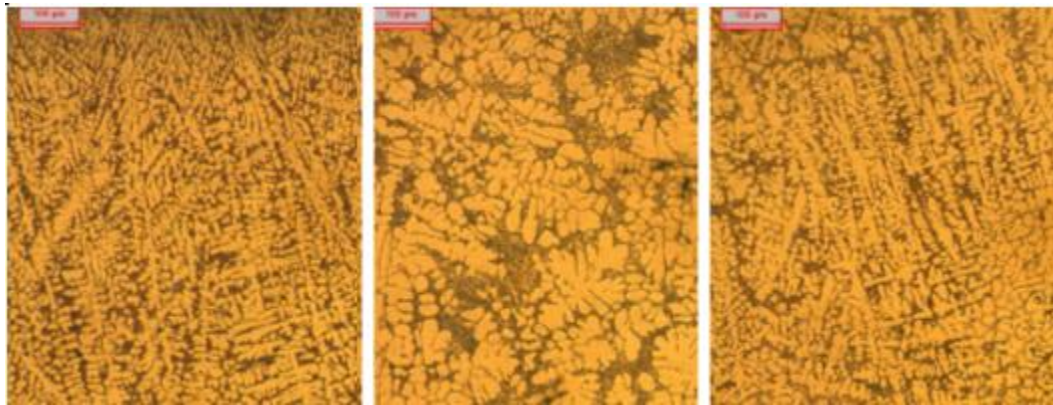


Dış

Orta

İç

Şekil 5.1 0 No'lu numunenin mikroyapıları (dıştan ---içe)

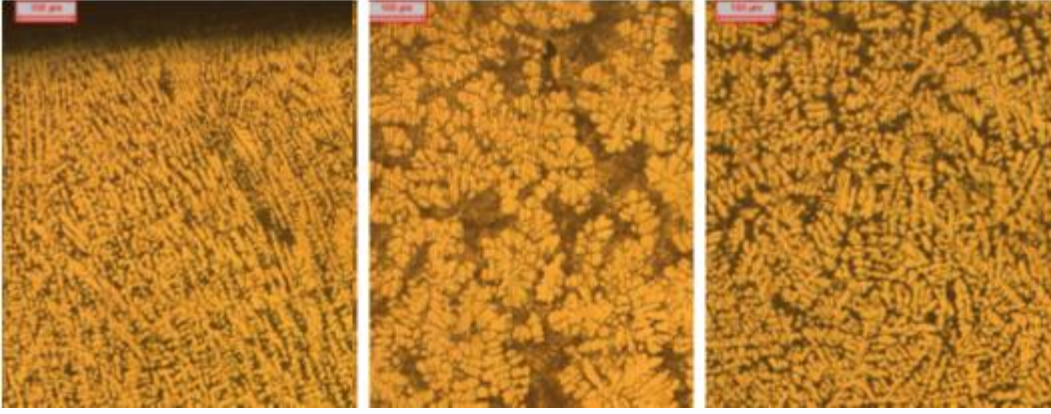


Dış

Orta

İç

Şekil 5.2 3 No'lu numunenin mikroyapıları (dıştan ---içe)

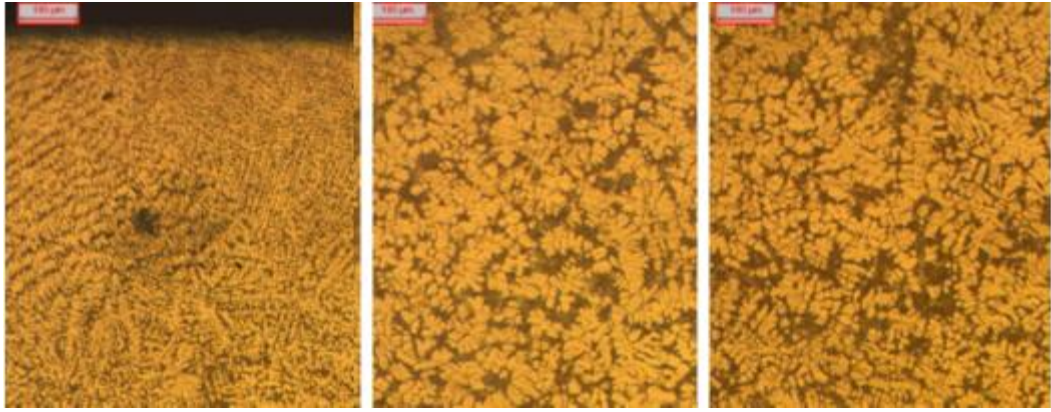


Dış

Orta

İç

Şekil 5.3 5 No'lu numunenin mikroyapıları (dıştan ---içe)

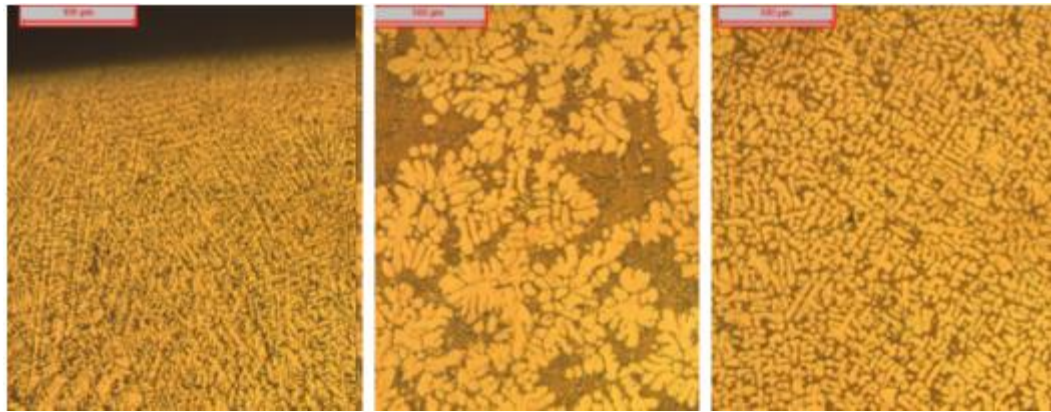


Dış

Orta

İç

Şekil 5.4 6 No'lu numunenin mikroyapıları (dıştan ---içe)



Dış

Orta

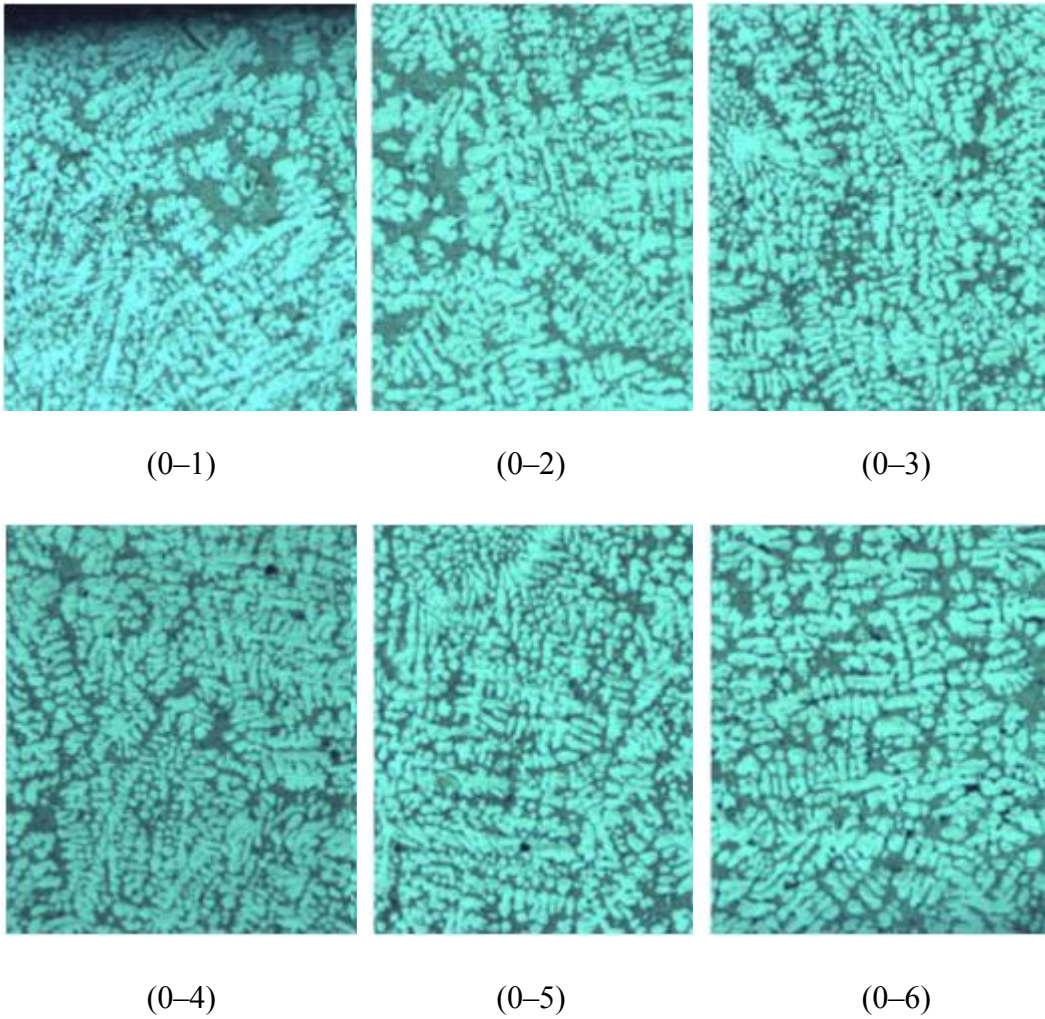
İç

Şekil 5.5 7 No'lu numunenin mikroyapıları- büyütme x200 (dıştan ---içe)

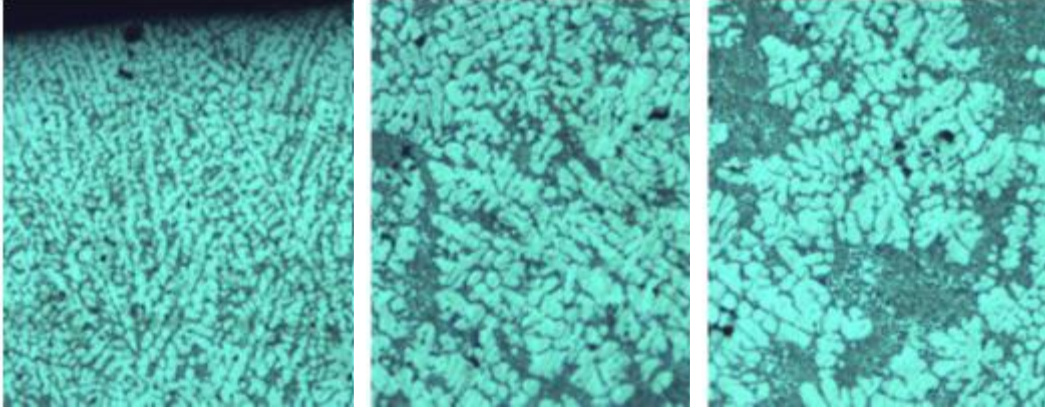
5.1.2 13 No'lu Sıvama Dökümün Mikroyapıları

Döküm parçasının mikroyapıları gözlemlenirken, aynı noktaya hem dik hem de paralel olarak bakılıp, görüntülenmişlerdir. Numuneler sıralanırken en alttaki numuneye (0) en üsteki numuneye (7) numarası verilmiş, sırayla incelenen numunelerin alt kalıba temas eden en dış kısmından (aşağıda 0-1 no'lu resim) başlayıp, en iç tarafa gidilerek (aşağıda 0-6 no'lu resim) mikroyapılar kaydedilmiştir. Mikroyapılar sırasıyla önce dik bakış, sonra paralel bakıştan elde edilenler olarak verilmiştir. Büyütme oranı x100 dür (Aksi belirtilmedikçe).

Dik Bakış:



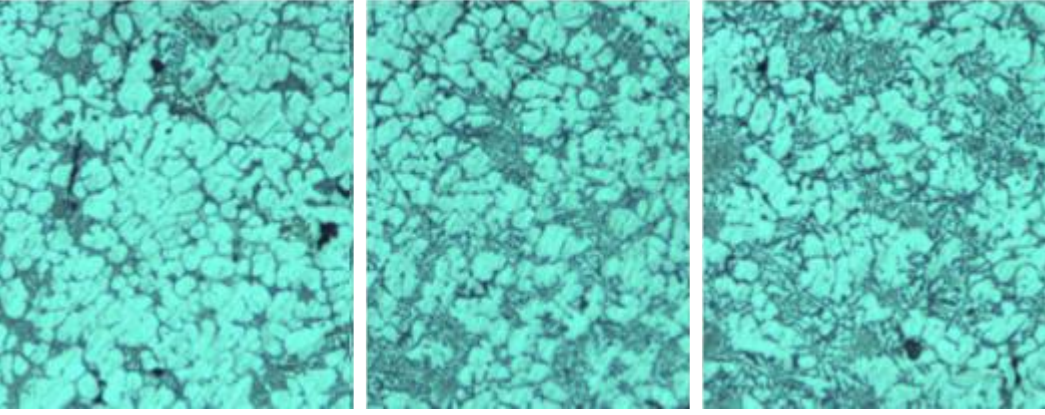
Şekil 5.6 0 No'lu numunenin mikroyapıları (dıştan ---içe)



(1-1)

(1-2)

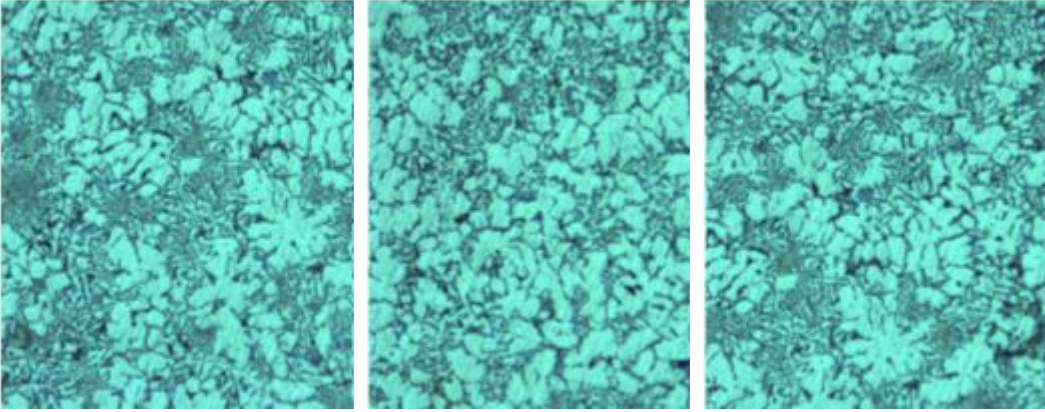
(1-3)



(1-4)

(1-5)

(1-6)

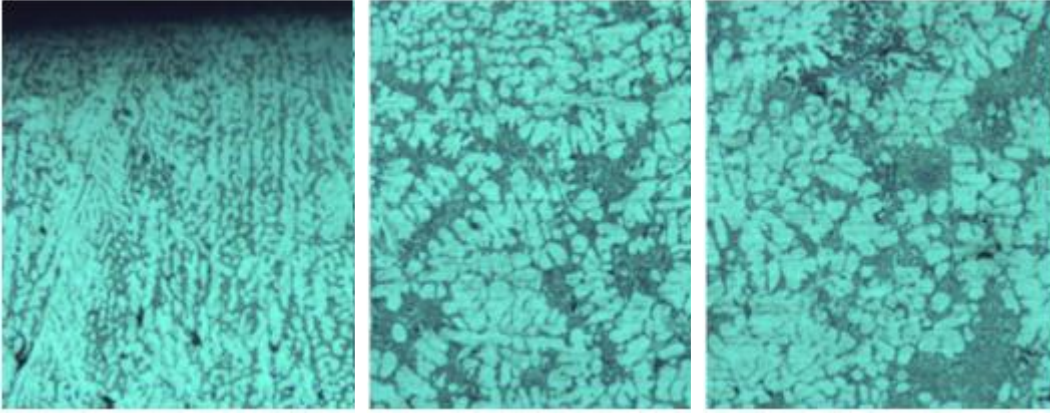


(1-7)

(1-8)

(1-9)

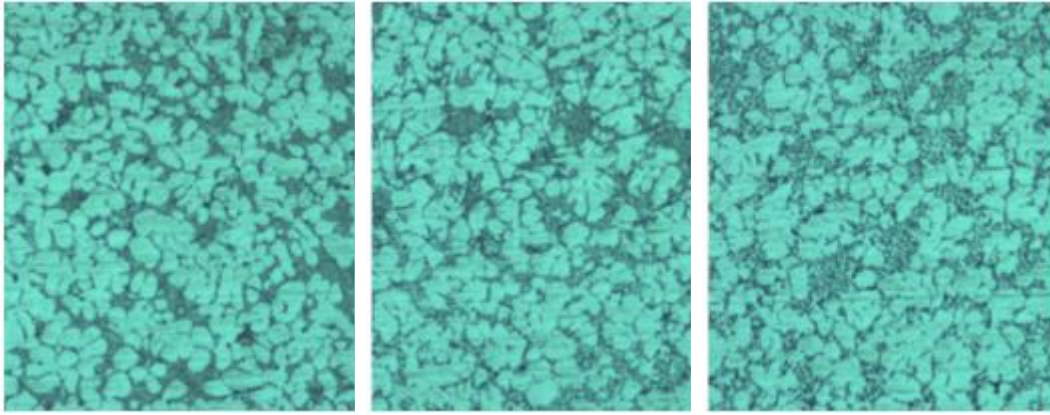
Şekil 5.7 1 No'lu numunenin mikroyapıları (dıştan ---içe)



(2-1)

(2-2)

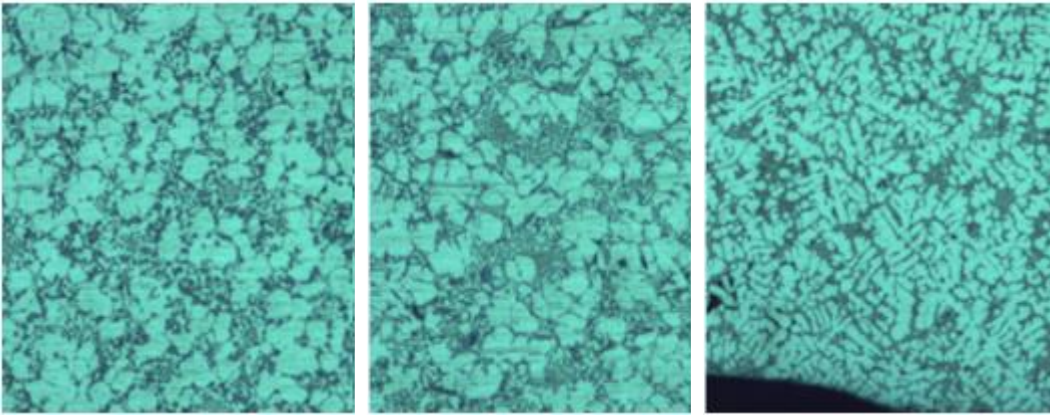
(2-3)



(2-4)

(2-5)

(2-6)

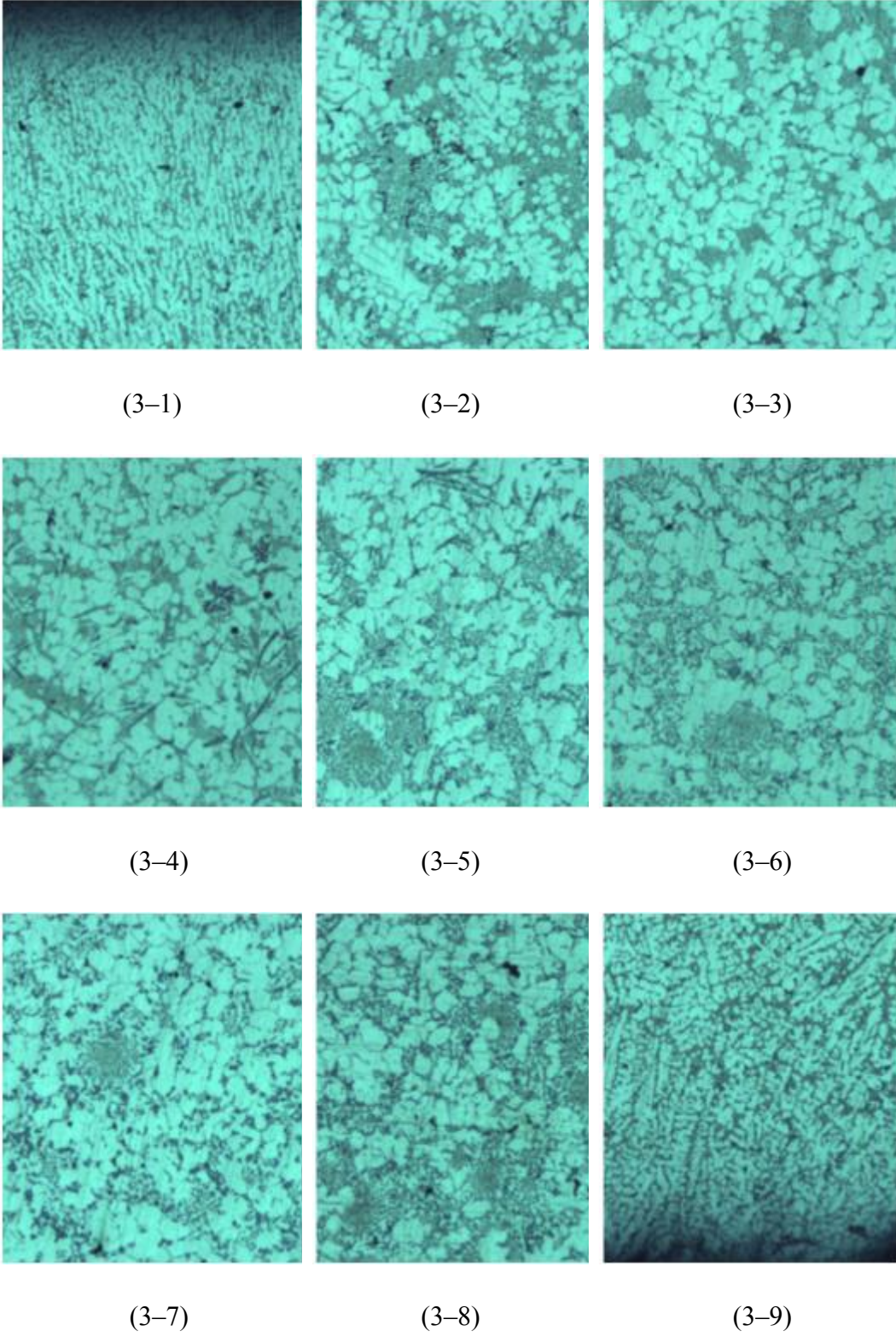


(2-7)

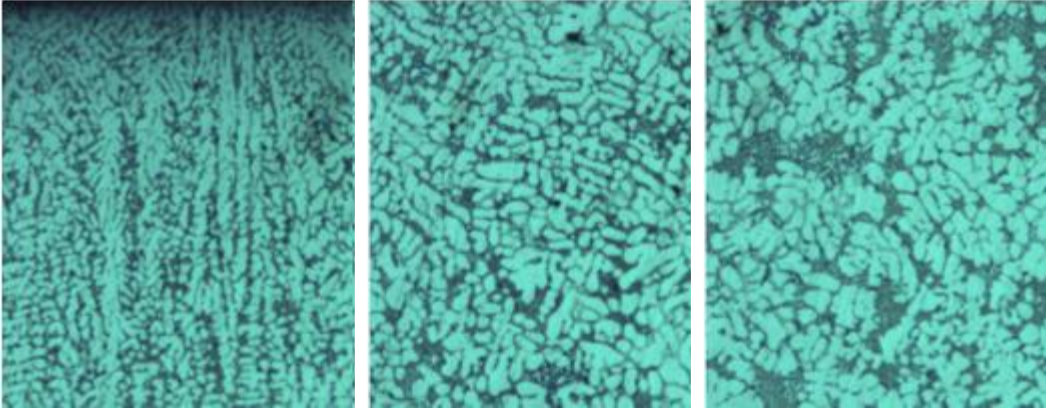
(2-8)

(2-9)

Şekil 5.8 2 No'lu numunenin mikroyapıları (dıştan ---içe)



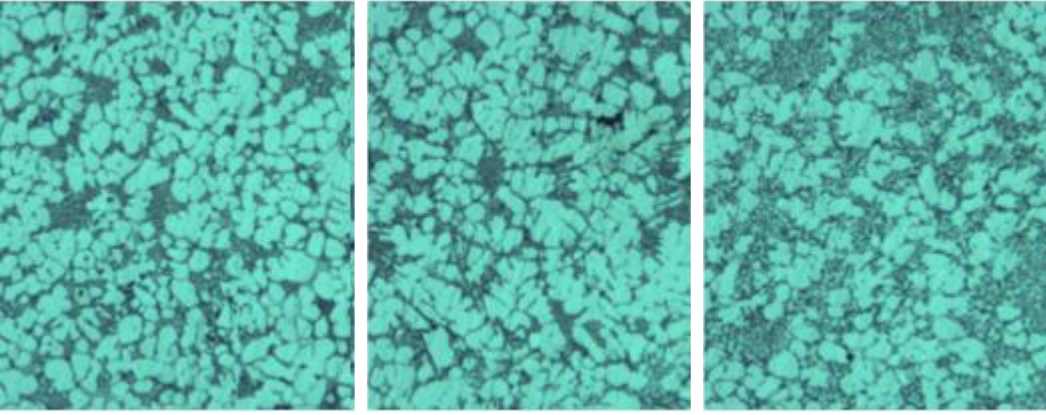
Şekil 5.9 3 No'lu numunenin mikroyapıları (dıştan ---içe)



(4-1)

(4-2)

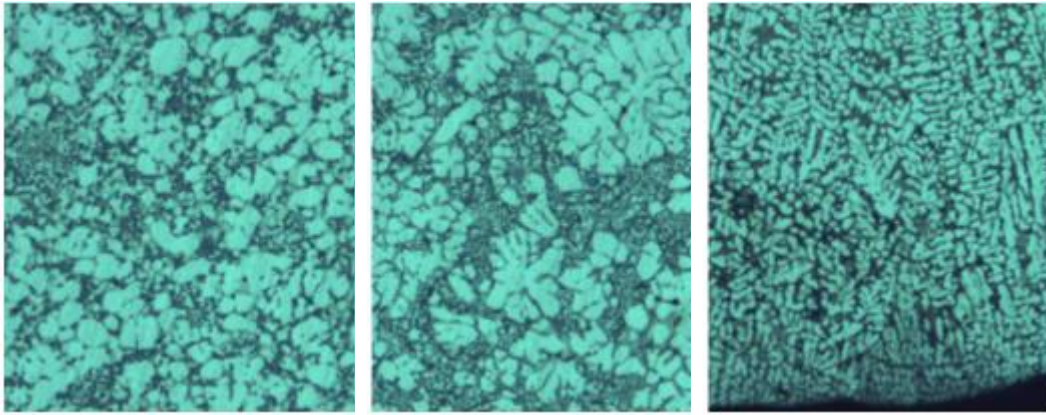
(4-3)



(4-4)

(4-5)

(4-6)

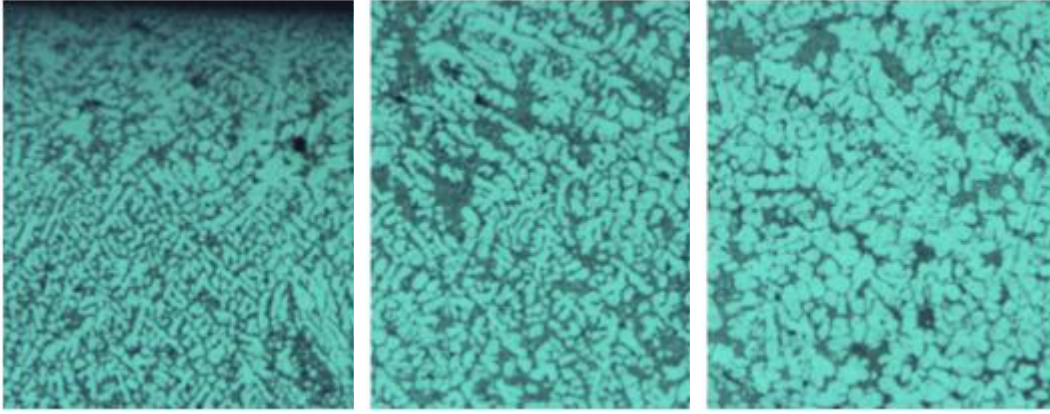


(4-7)

(4-8)

(4-9)

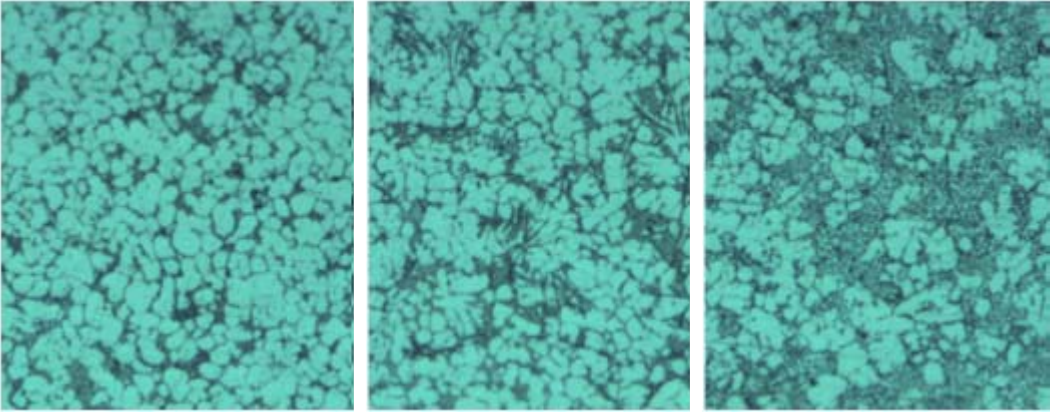
Şekil 5.10 4 No'lu numunenin mikroyapıları (dıştan ---içe)



(5-1)

(5-2)

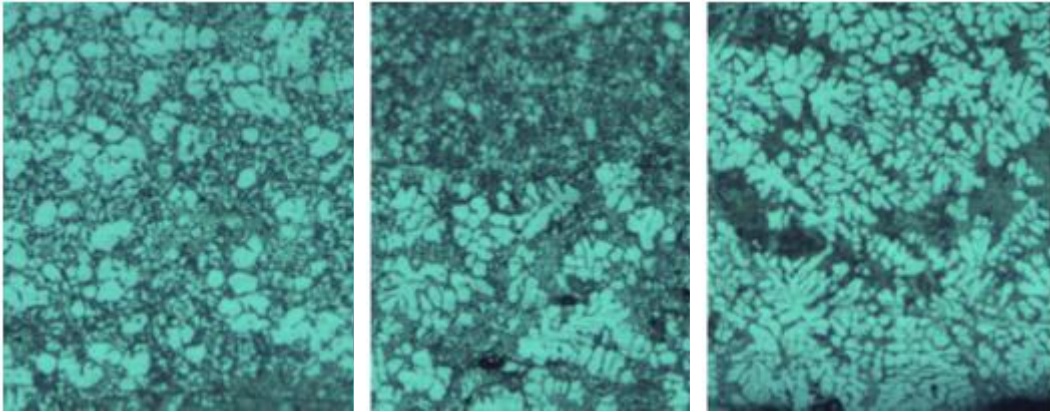
(5-3)



(5-4)

(5-5)

(5-6)

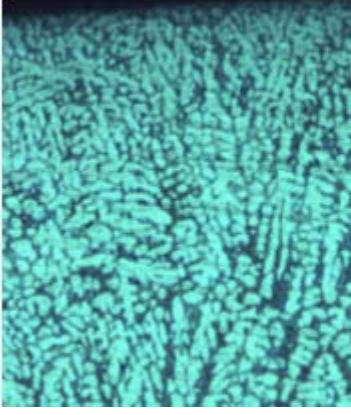


(5-7)

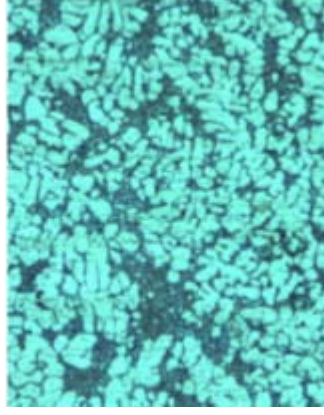
(5-8)

(5-9)

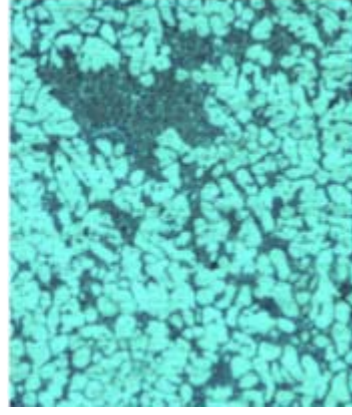
Şekil 5.11 5 No'lu numunenin mikroyapıları (dıştan ---içe)



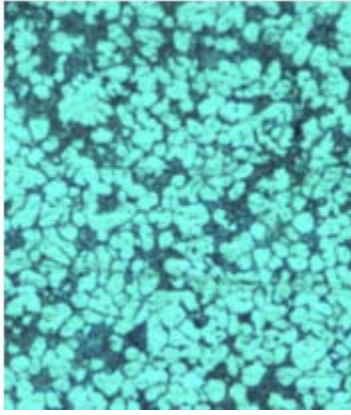
(6-1)



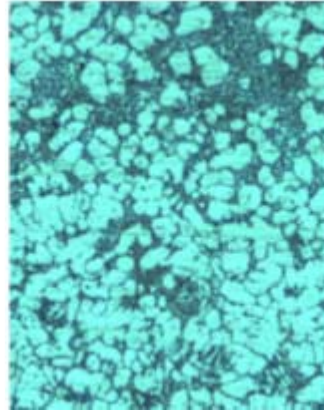
(6-2)



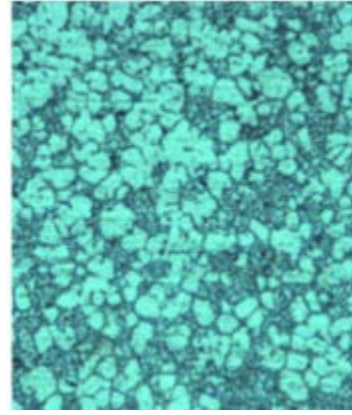
(6-3)



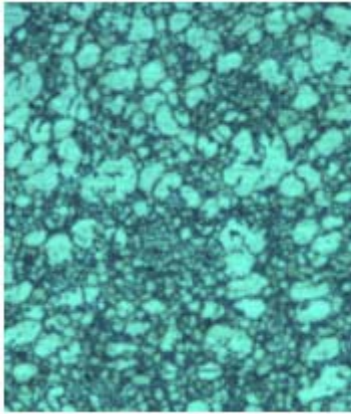
(6-4)



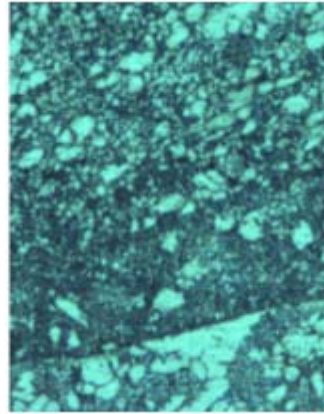
(6-5)



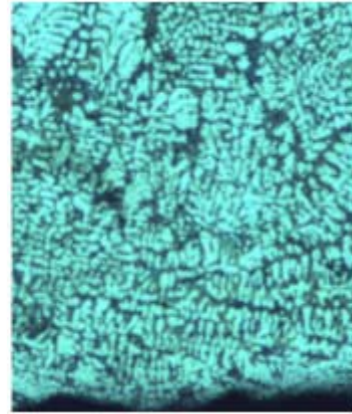
(6-6)



(6-7)

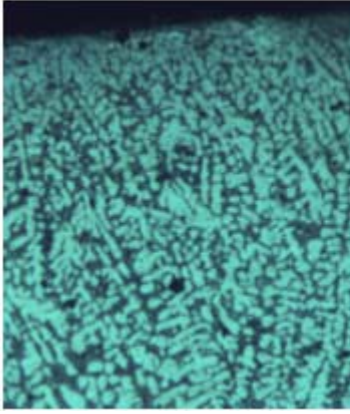


(6-8)

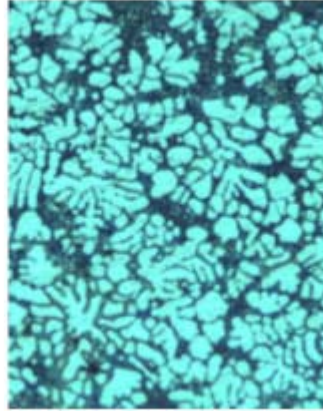


(6-9)

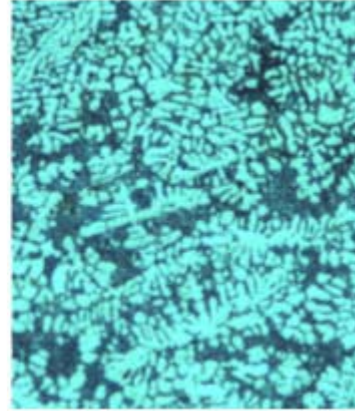
Şekil 5.12 6 No'lu numunenin mikroyapıları (dıştan ---içe)



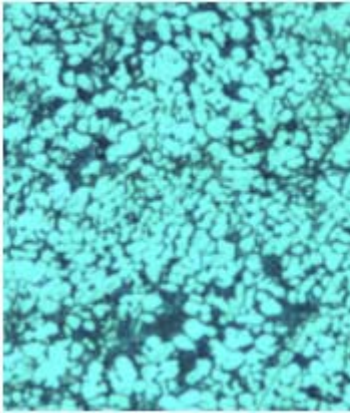
(7-1)



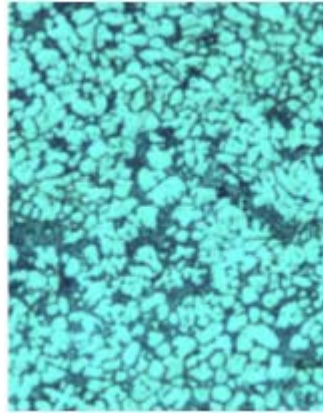
(7-2)



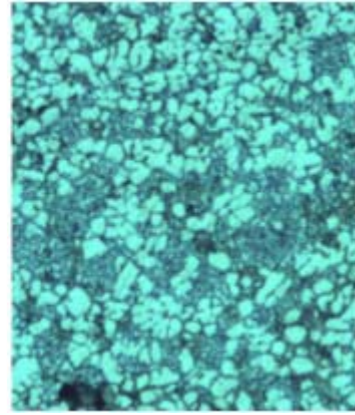
(7-3)



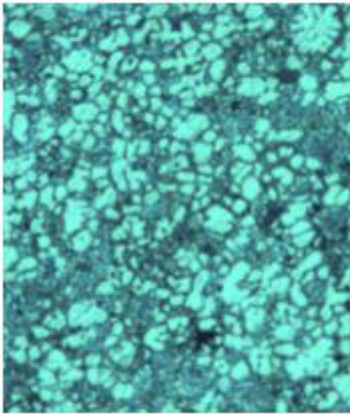
(7-4)



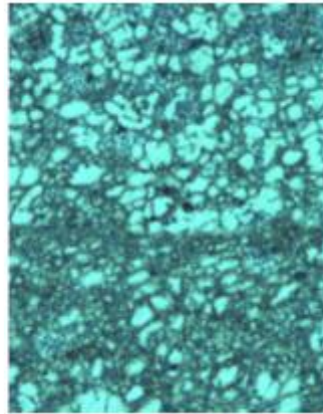
(7-5)



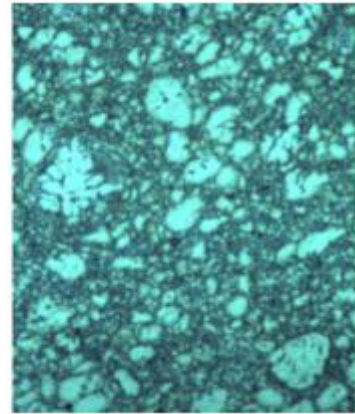
(7-6)



(7-7)



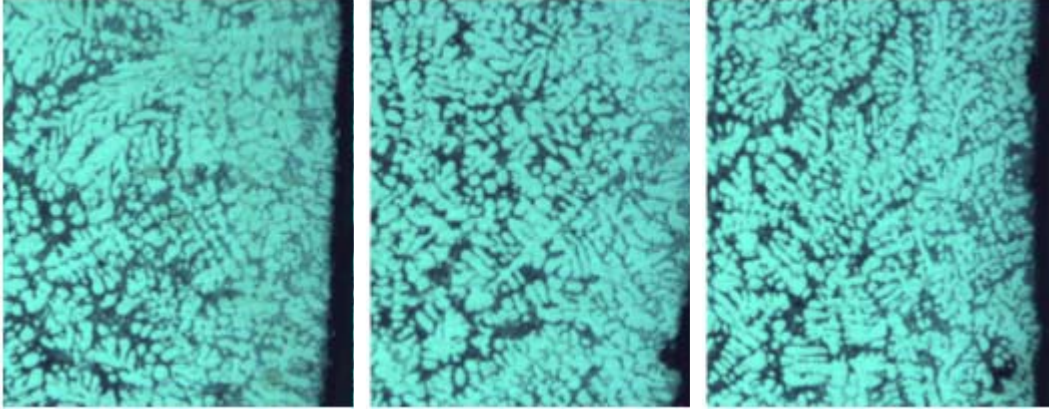
(7-8)



(7-9)

Şekil 5.13 7 No'lu numunenin mikroyapıları (dıştan ---içe)

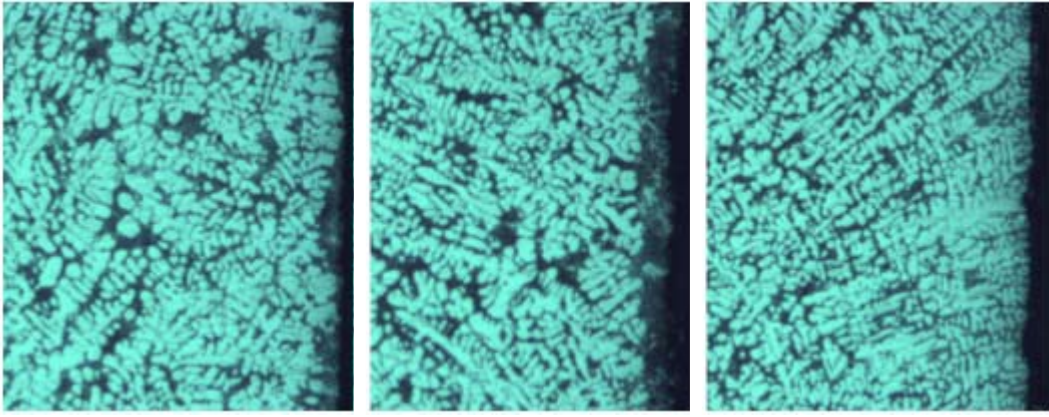
Paralel Bakış:



(0-1)

(0-2)

(0-3)

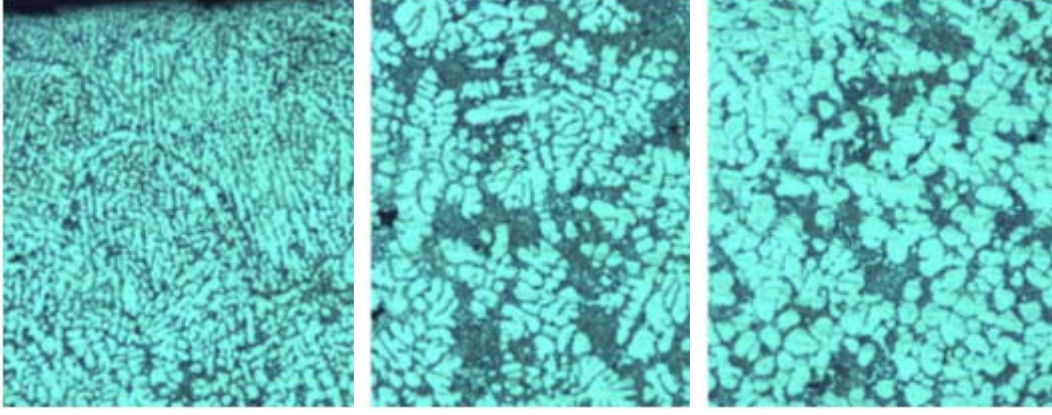


(0-4)

(0-5)

(0-6)

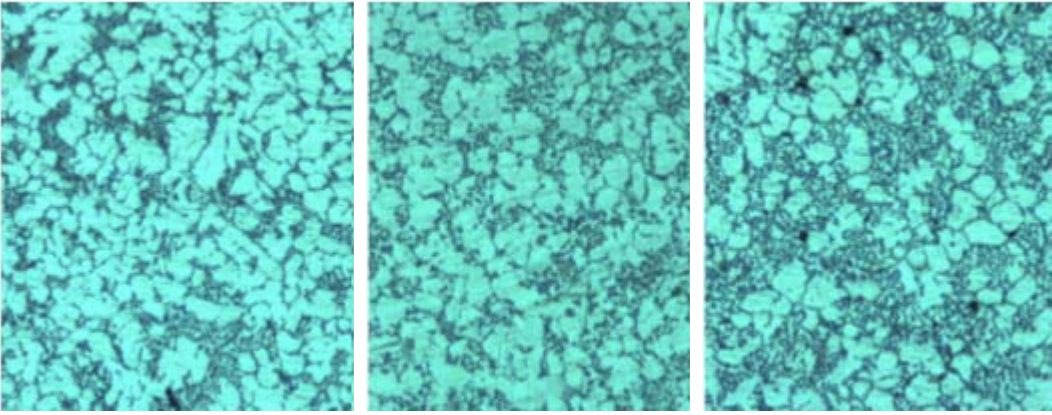
Şekil 5.14 0 No'lu numunenin mikroyapıları (dıştan ---içe)



(1-1)

(1-2)

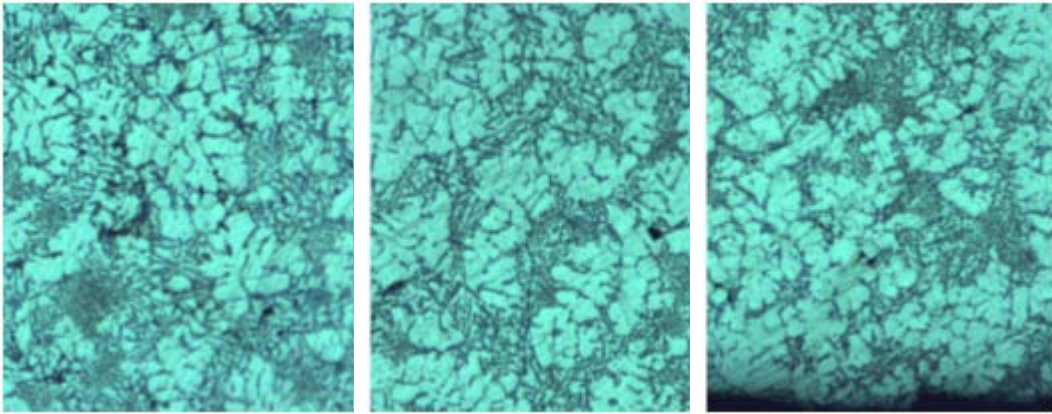
(1-3)



(1-4)

(1-5)

(1-6)

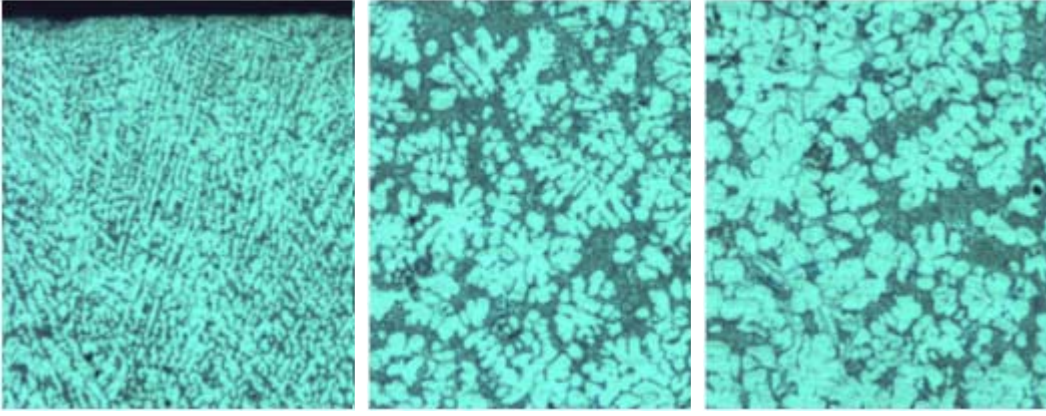


(1-7)

(1-8)

(1-9)

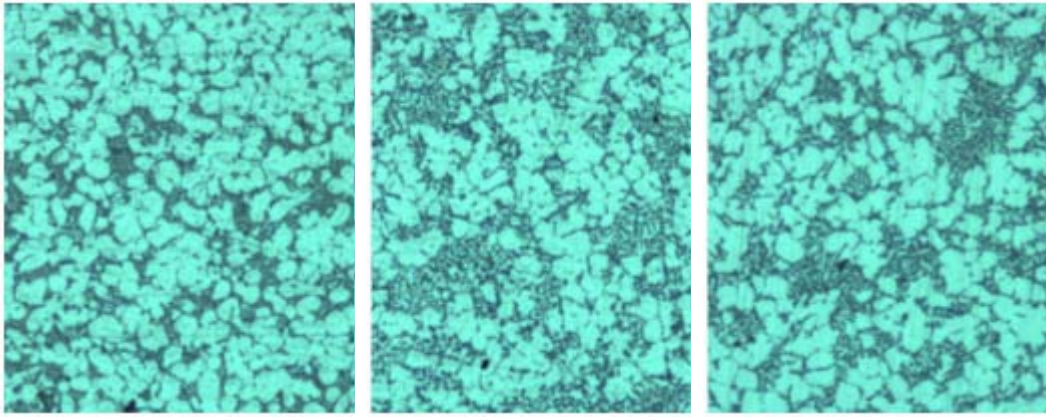
Şekil 5.15 1 No'lu numunenin mikroyapıları (dıştan ---içe)



(2-1)

(2-2)

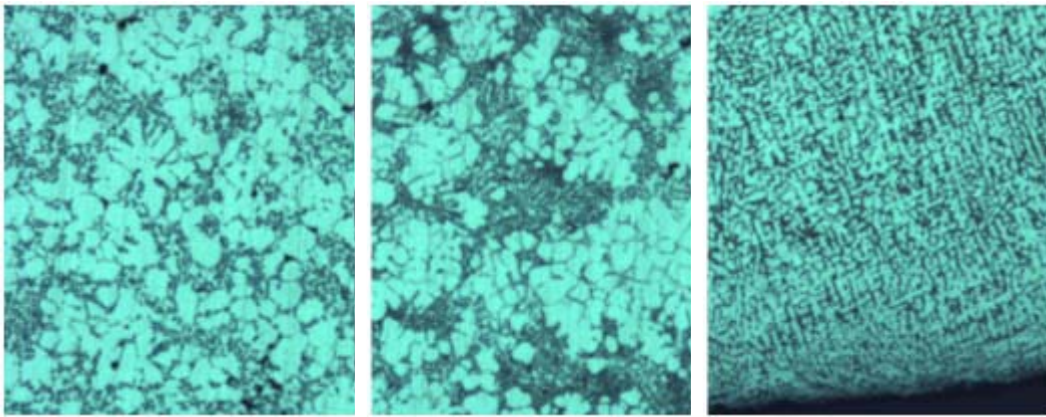
(2-3)



(2-4)

(2-5)

(2-6)

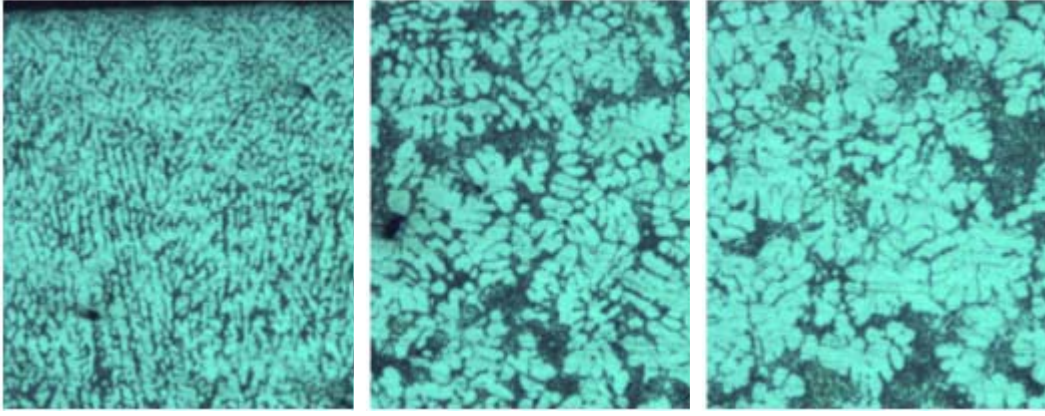


(2-7)

(2-8)

(2-9)

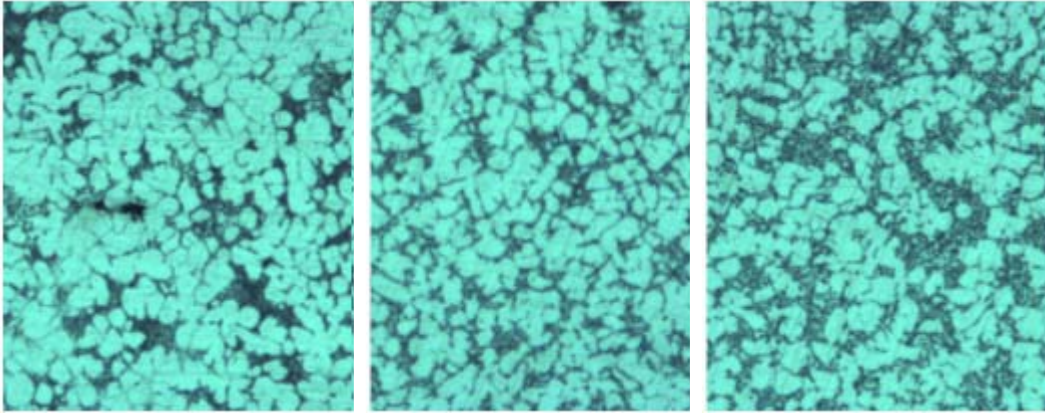
Şekil 5.16 2 No'lu numunenin mikroyapıları (dıştan ---içe)



(3-1)

(3-2)

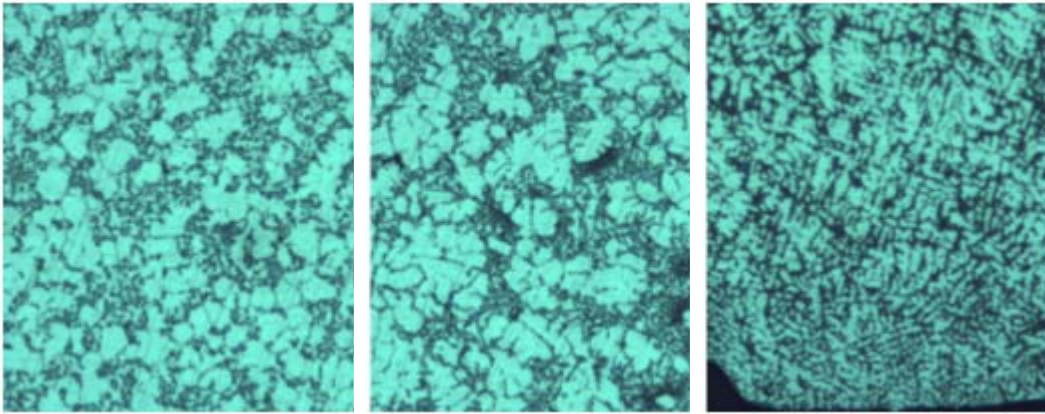
(3-3)



(3-4)

(3-5)

(3-6)

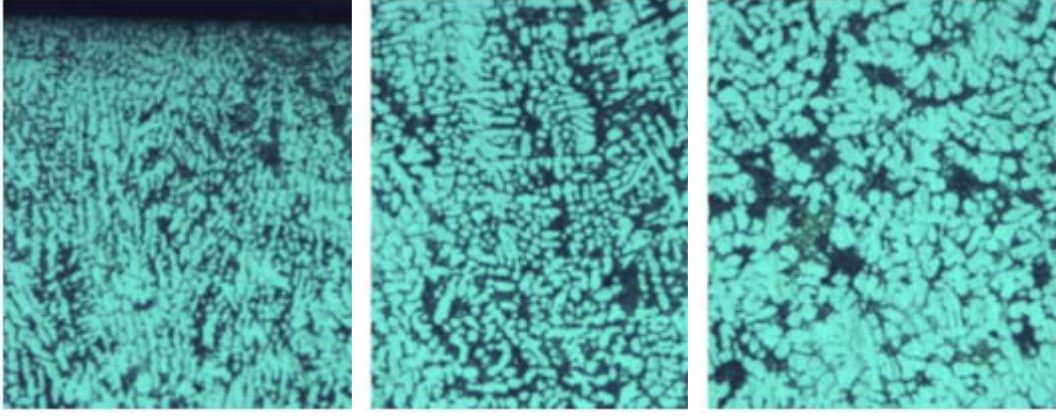


(3-7)

(3-8)

(3-9)

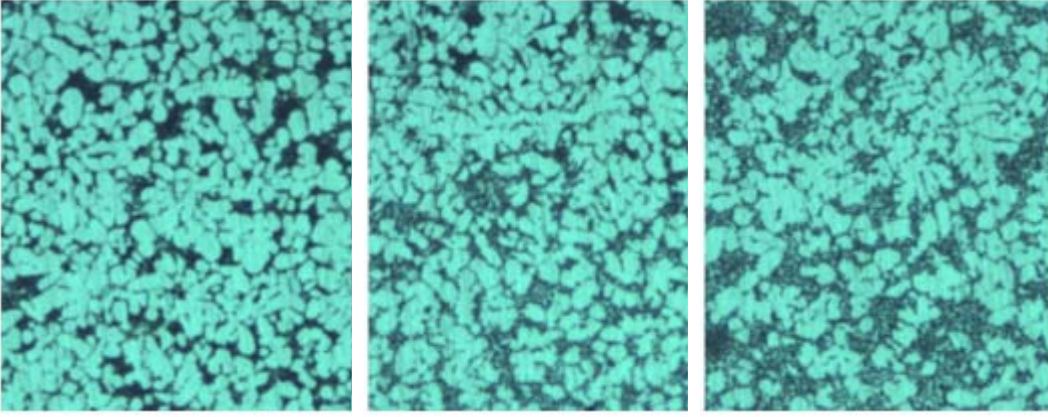
Şekil 5.17 3 No'lu numunenin mikroyapıları (dıştan ---içe)



(4-1)

(4-2)

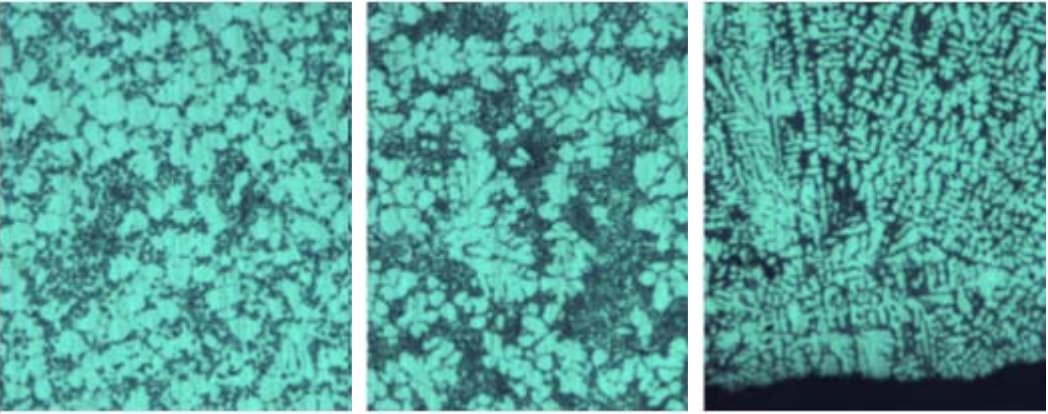
(4-3)



(4-4)

(4-5)

(4-6)

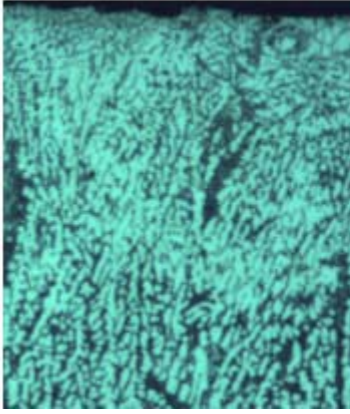


(4-7)

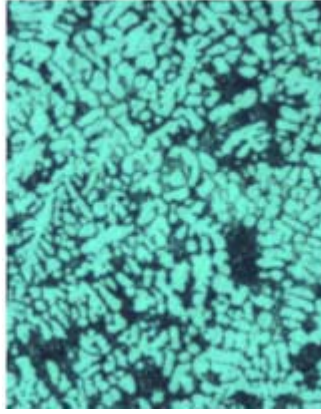
(4-8)

(4-9)

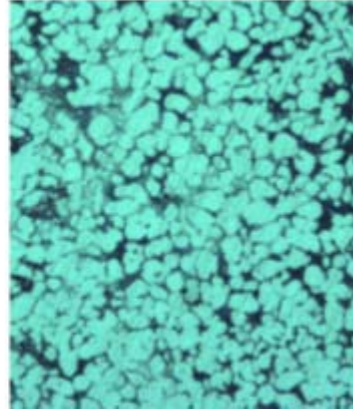
Şekil 5.18 4 No'lu numunenin mikroyapıları (dıştan ---içe)



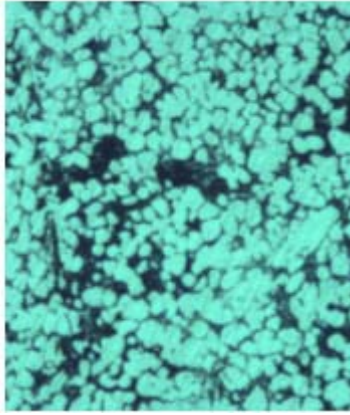
(5-1)



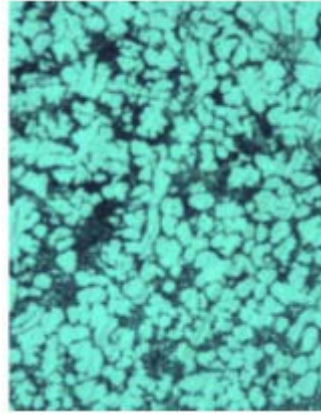
(5-2)



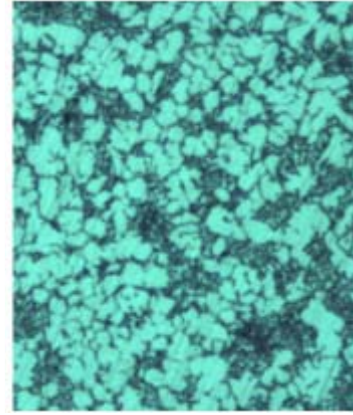
(5-3)



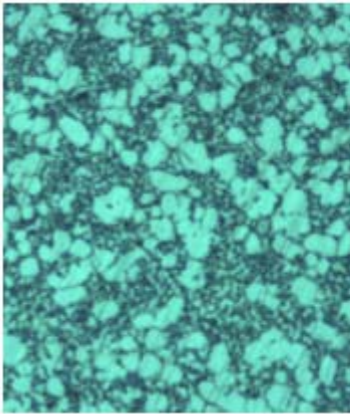
(5-4)



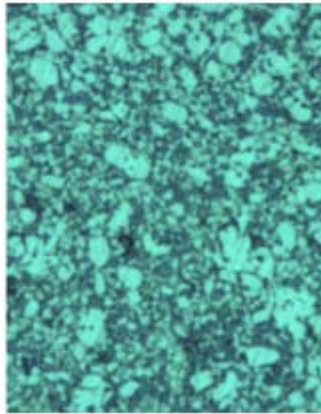
(5-5)



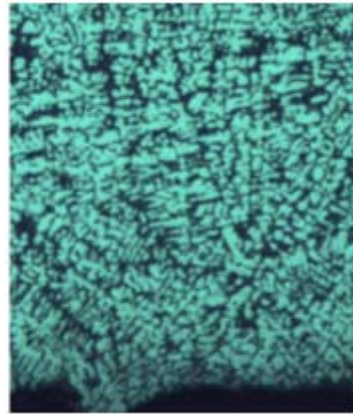
(5-6)



(5-7)

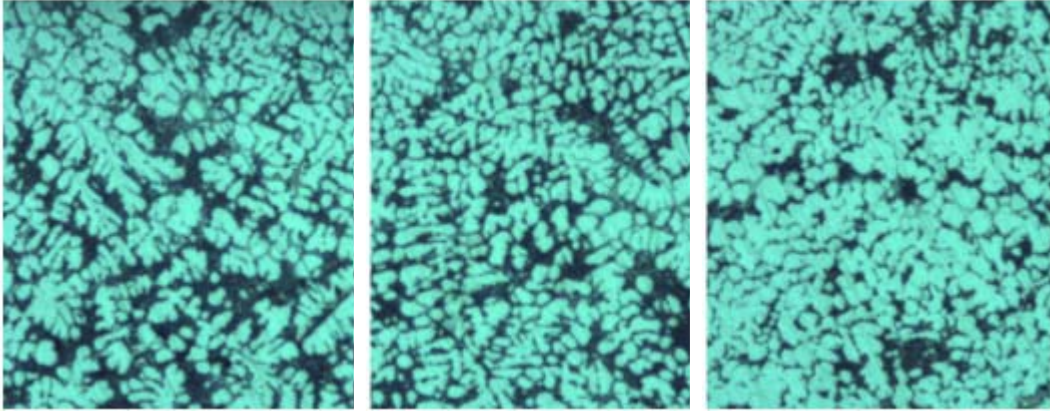


(5-8)



(5-9)

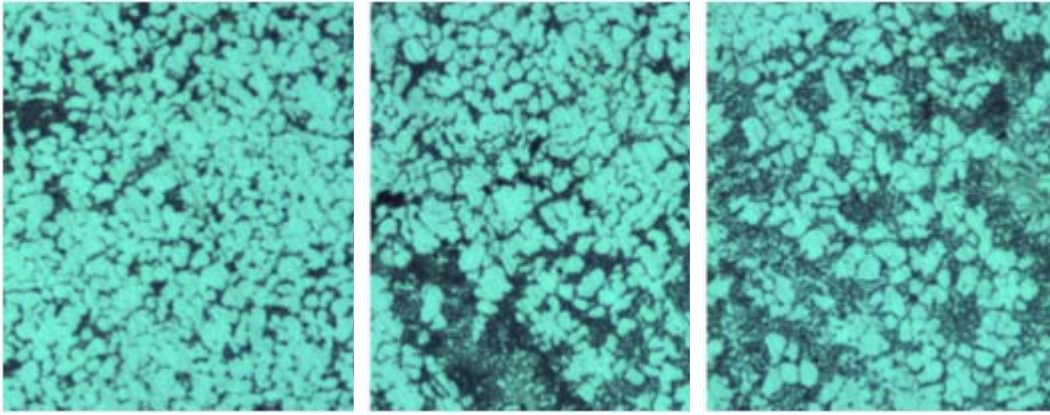
Şekil 5.19 5 No'lu numunenin mikroyapıları (dıştan ---içe)



(6-1)

(6-2)

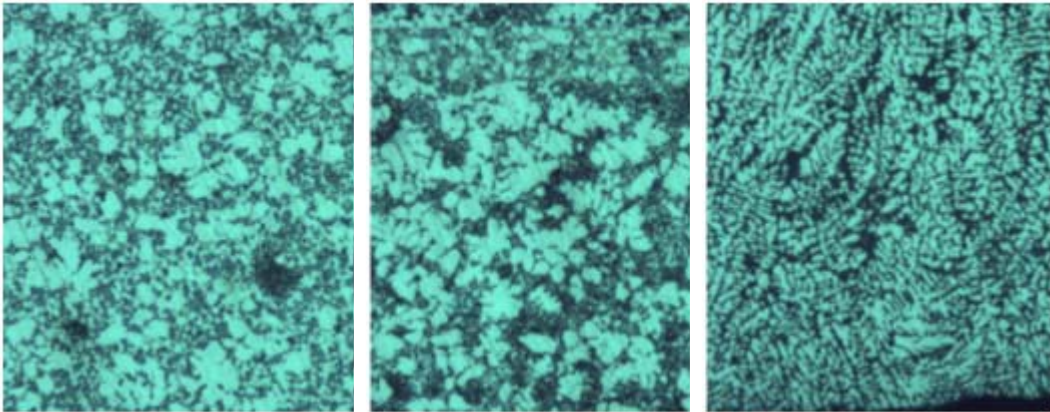
(6-3)



(6-4)

(6-5)

(6-6)

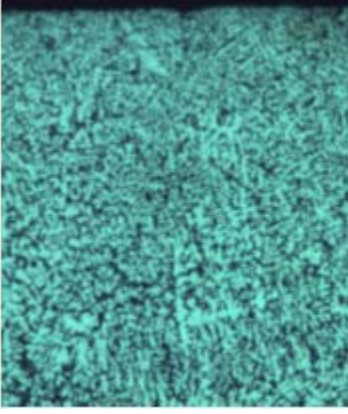


(6-7)

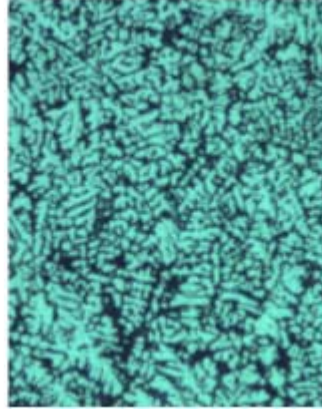
(6-8)

(6-9)

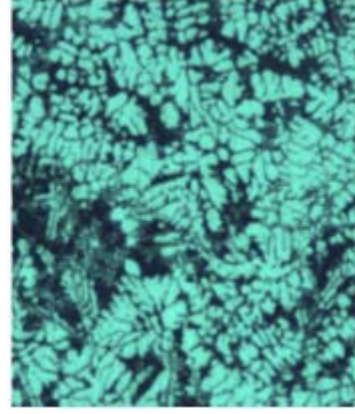
Şekil 5.20 6 No'lu numunenin mikroyapıları (dıştan ---içe)



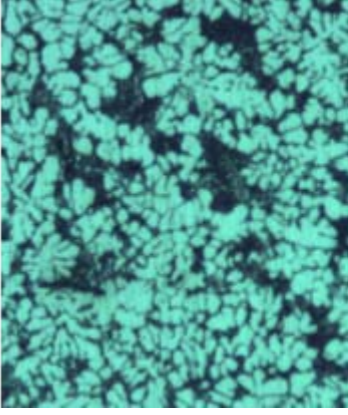
(7-1)



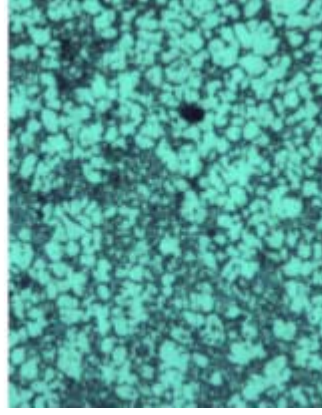
(7-2)



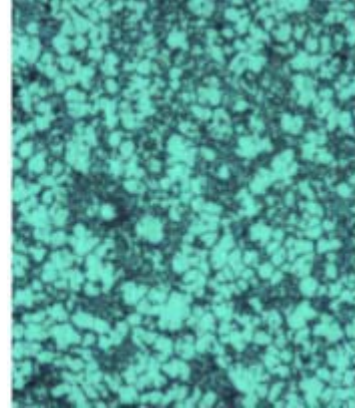
(7-3)



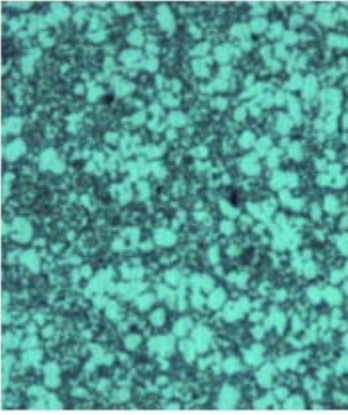
(7-4)



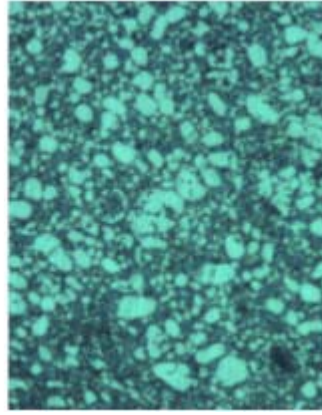
(7-5)



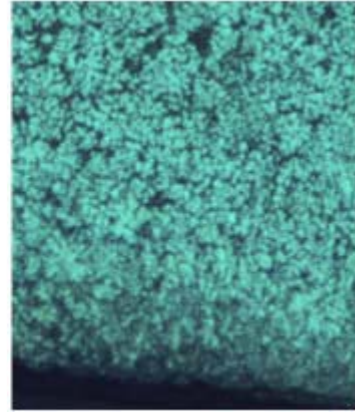
(7-6)



(7-7)



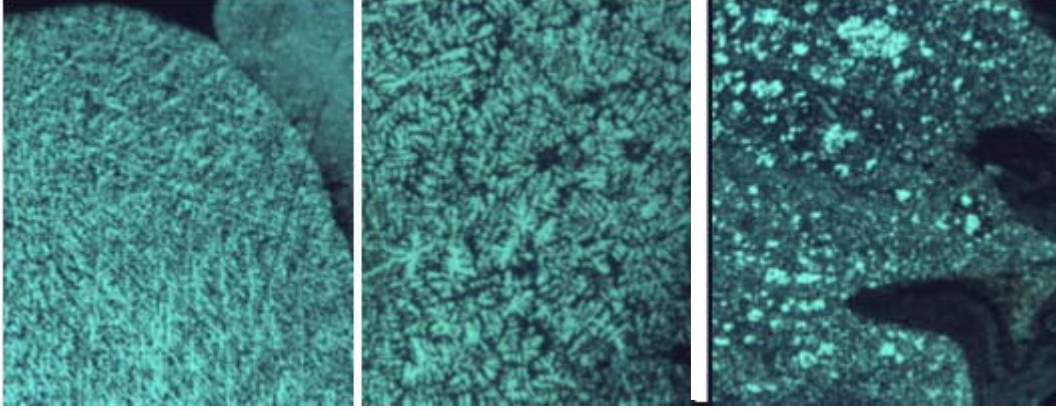
(7-8)



(7-9)

Şekil 5.21 7 No'lu numunenin mikroyapıları (dıştan ---içe)

En üstte kapaklara temas eden kısımların mikroyapı resimlerinde paralel olarak görüntülenip dıştan içe aşağıda verilmiştir.



Dış (x100)

Orta (x100)

İç(x50)

Şekil 5.22 Sıvama döküm parçasının en üst kısmından alınan görüntüler.

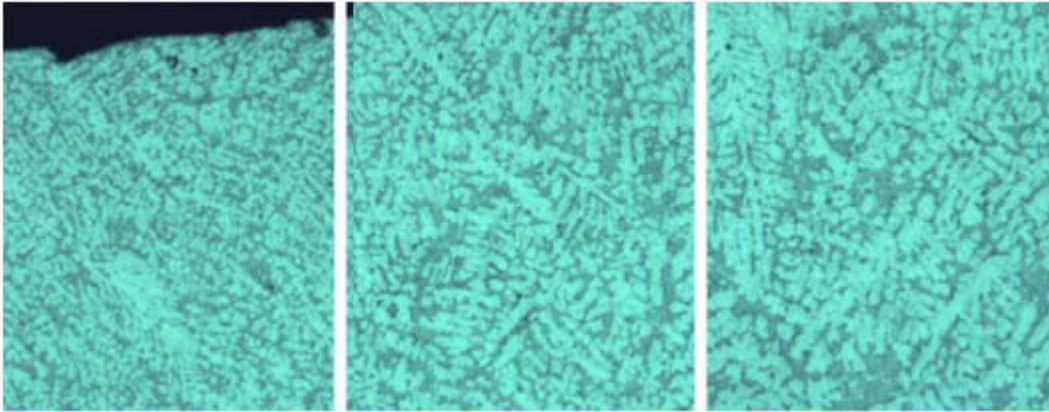
Sıvama döküm parçasının mikroyapıları incelendiğinde en dıştan içe doğru değişik bölgelerin varlığı gözlemlenmektedir ve mikroyapılar sıkıştırılmalı ve savurma dökülmüş parçalardan çekilen mikroyapılardan oldukça farklıdır. Parçanın en alt kısmında kalıba temas eden kısımlarda ince dallantılı bir yapı katılmıştır. Yukarı doğru çıkıldıkça 1 no'lu numuneden itibaren en dış kısımda ince dallantılı bir katılma (x-1) gerçekleşmiş içeri doğru gidildikçe daha kaba dallantılı yapıya geçmiştir (x-2). Kaba dallantılı yapı içeri doğru gidildikçe küresel biçime (x-3) dönüşmüştür. Parçanın orta kısmını geçip iç tarafa doğru ilerlenildikçe küresel biçimli mikroyapının (x-5) mesafesinden itibaren rozet tip mikroyapıya geçtiğini ve bu geçiş bölgesinde iğnemi bir fazın oluştuğu gözlemlenmiştir. Sıkıştırılmalı ve savurma dökülmüş mikroyapılarda bu bölgede dallantılı yapı gözlemlenirken sıvama dökülmüş parçada bu bölgeden sonra küresel tarzda mikroyapı, rozet tarzda mikroyapıya doğru kaymıştır. Sıvama döküm prosesi esnasında kesme etkisi ile dallantıların kırıldığı ve bu dallantıların basıncın etkisi ile yukarı doğru fişkıran sıvıyla beraber parçanın dikey eksenini boyunca yukarı doğru hareket ederek çekirdeklenme merkezleri oluşturduğu ve bu çekirdeklenme sonucu küreselleşmenin arttığı düşünülmektedir. Yukarı doğru çıkıldıkça (5 no'lu numuneden sonra) özellikle numunenin iç tarafında dahada küçük bir ayrımlaşma bandı gözlemlenmiş (dik bakış; 6-7 ve 6-8 no'lu resimler) bunun yukarı doğru fişkıran sıvının içinde taşınan dallantı taneleri sonucu oluştuğu düşünülmüştür. Ayrıca yukarı doğru çıkıldıkça sıvının bileşimi

değişmekte ve yol boyunca kesmeye maruz kalan sıvıda daha küçük küresel taneler oluşmaktadır, bu eğilim 7 no'lu numunenin iç tarafında oldukça belirgin olarak gözlemlenmiştir (dik bakış; 7-6, 7-7 ve 7-8 no'lu resimler). En üstte kapaklara temas eden kısımda dış tarafta çok ince dallantılı bir yapı oluşmuş, en üst kısmın iç tarafında ise çok ince kopmuş dallantılardan yukarı doğru taşınan tanelerden ve diğer intermetalik fazlardan oluşan karma bir yapı gözlemlenmiştir.

5.1.3 14 No'lu Savurma Döküm Parçasının Mikroyapıları

Savurma dökülmüş numunede kalıp yüzeylerine temas eden kısımlarla iç taraf arasında çok fark olmadığından her numune için dış-orta-iç olmak üzere 3 mikroyapı resmi verilmiştir. Savurma dökülmüş yapılarda dış taraf ve iç tarafta ince dallantılı yapı, ortada ise kalın dallantılı yapı gözlemlenmiştir.

Dik Bakış:

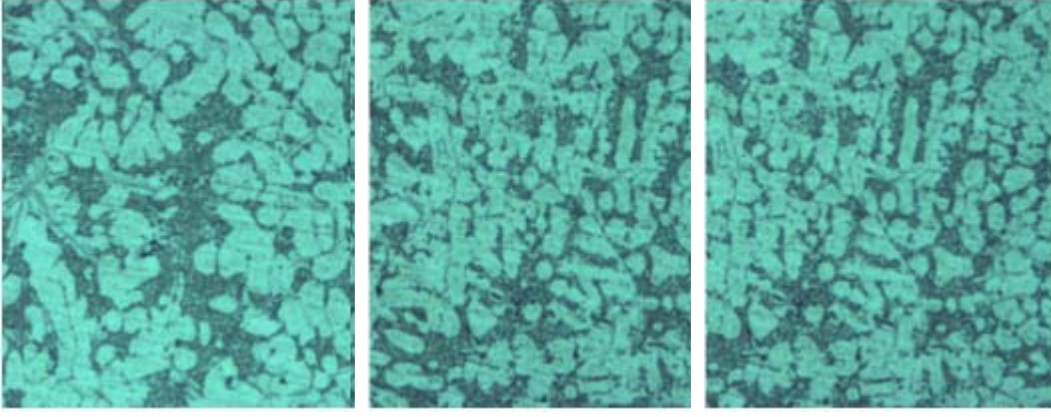


Dış

Orta

İç

Şekil 5.23 0 No'lu numunenin mikroyapıları

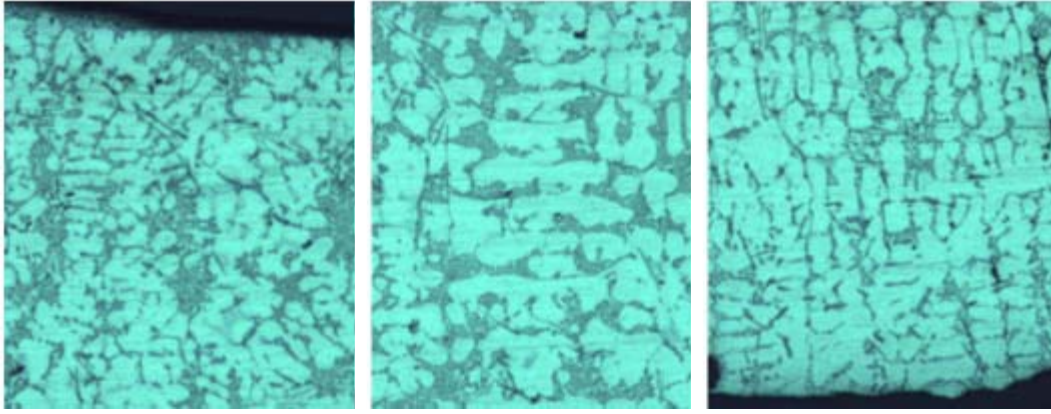


Dış

Orta

İç

Şekil 5.24 1 No'lu numunenin mikroyapıları

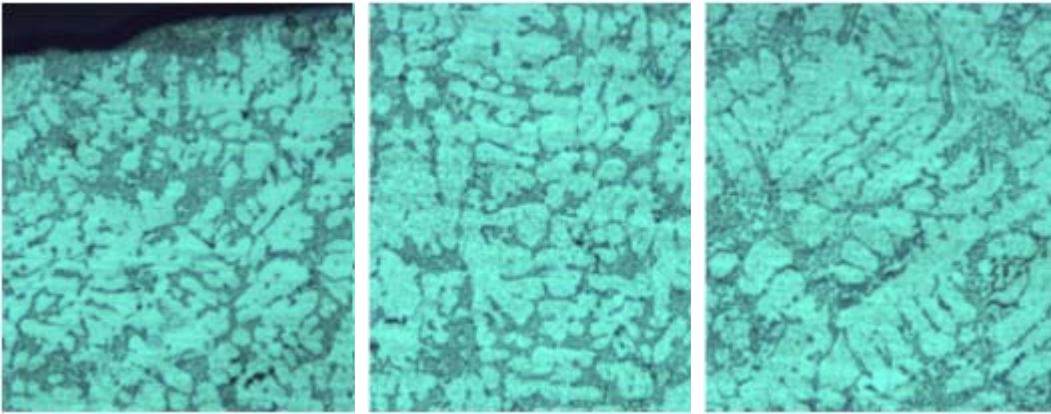


Dış

Orta

İç

Şekil 5.25 2 No'lu numunenin mikroyapıları

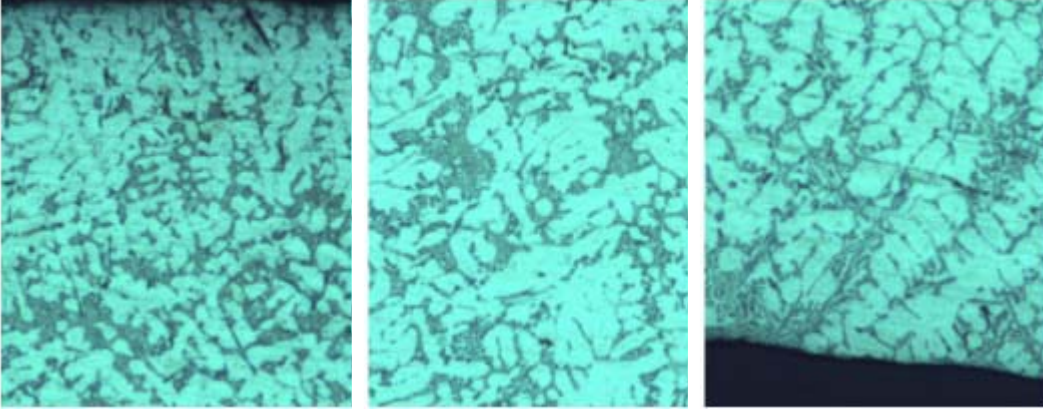


Dış

Orta

İç

Şekil 5.26 3 No'lu numunenin mikroyapıları

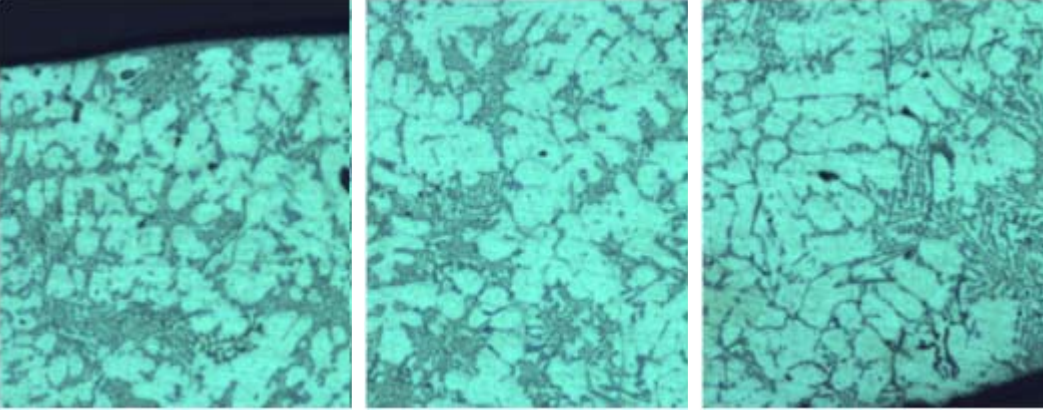


Dış

Orta

İç

Şekil 5.27 4 No'lu numunenin mikroyapıları

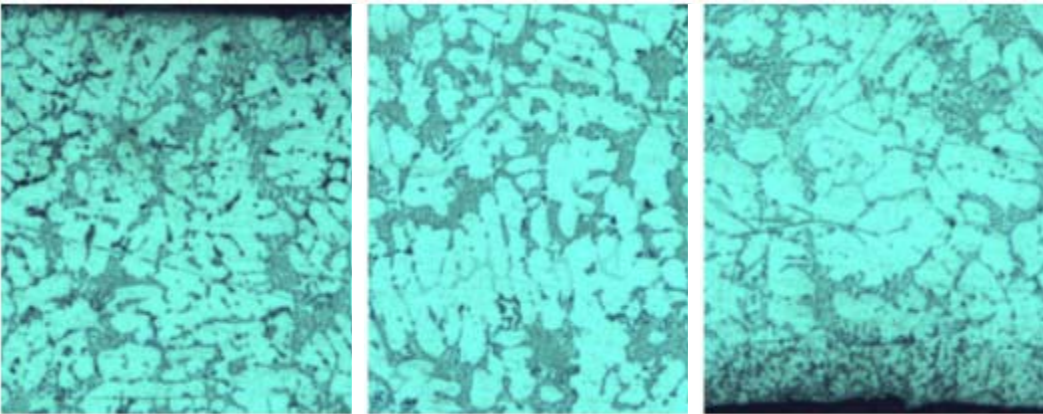


Dış

Orta

İç

Şekil 6.28 5 No'lu numunenin mikroyapıları

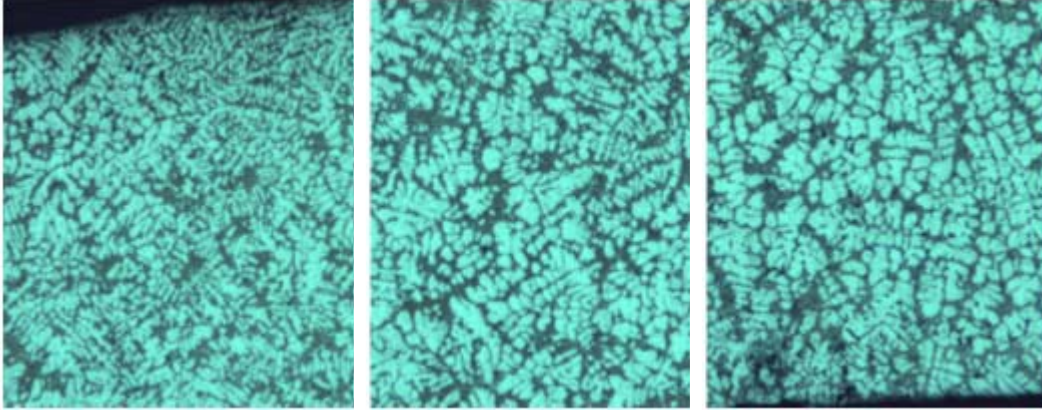


Dış

Orta

İç

Şekil 5.29 6 No'lu numunenin mikroyapıları



Dış

Orta

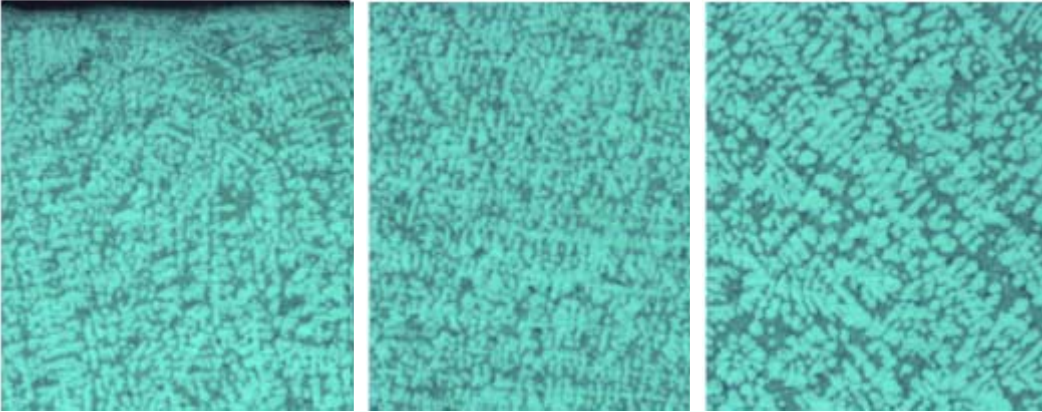
İç

Şekil 5.30 7 No'lu numunenin mikroyapıları

5.1.4 15 No'lu Sıkıştırılmalı Döküm Parçasının Mikroyapıları

Sıkıştırılmalı dökülmüş parçanın mikroyapısı savurma döküm parçasının mikroyapısına benzer ama daha ince dallantılardan oluşmuş bir mikroyapıdır. Sıkıştırılmalı dökülmüş parçada benzer şekilde mikroyapıda kesit boyunca çok değişim göstermediğinden, mikroyapılar sadece dik bakışa ait dış-orta-iç şeklinde verilmiştir.

Dik Bakış;

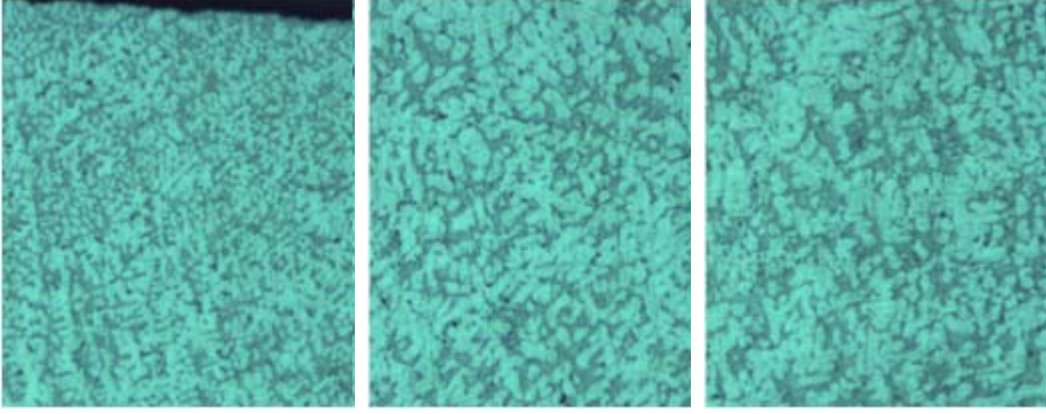


Dış

Orta

İç

Şekil 5.31 15 No'lu numunenin mikroyapıları

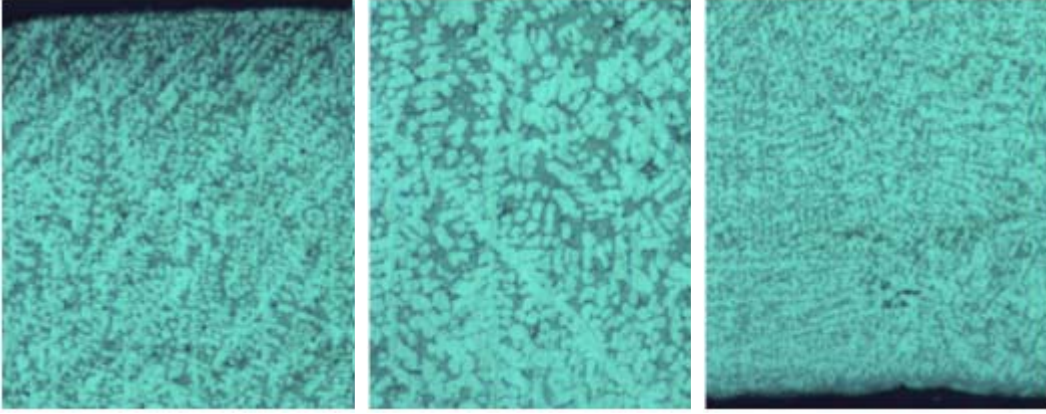


Dış

Orta

İç

Şekil 5.32 1 No'lu numunenin mikroyapıları

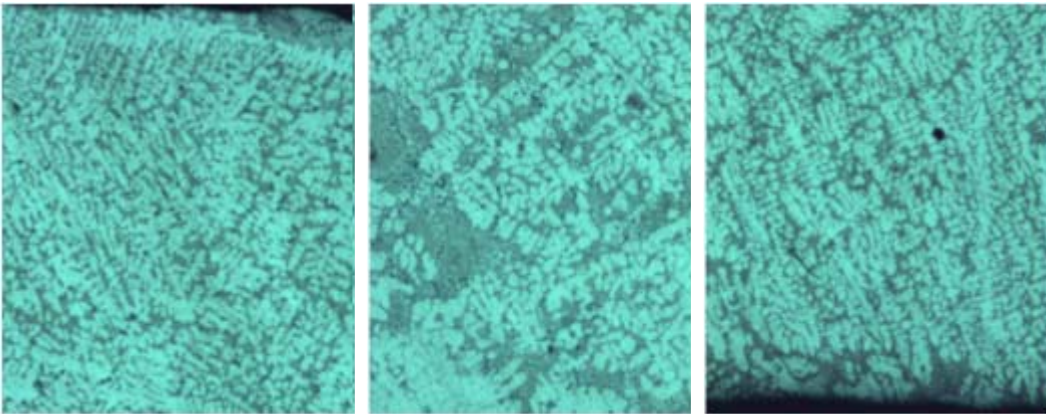


Dış

Orta

İç

Şekil 5.33 2 No'lu numunenin mikroyapıları

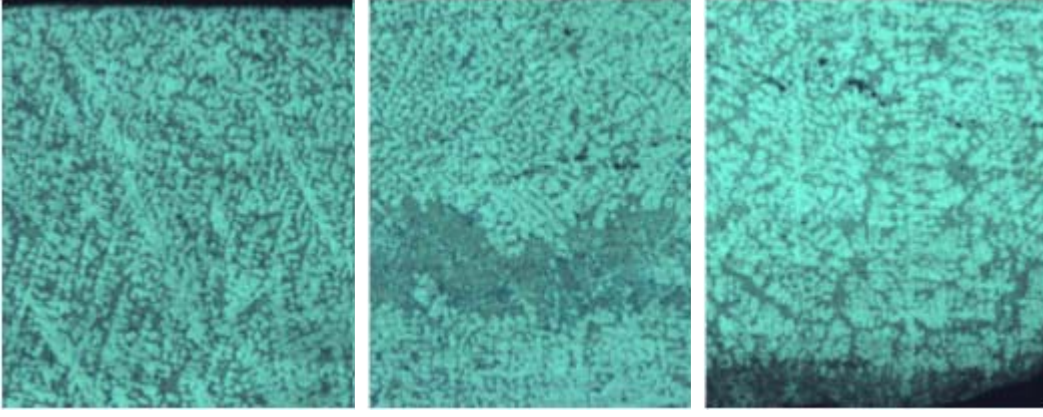


Dış

Orta

İç

Şekil 5.34 3 No'lu numunenin mikroyapıları

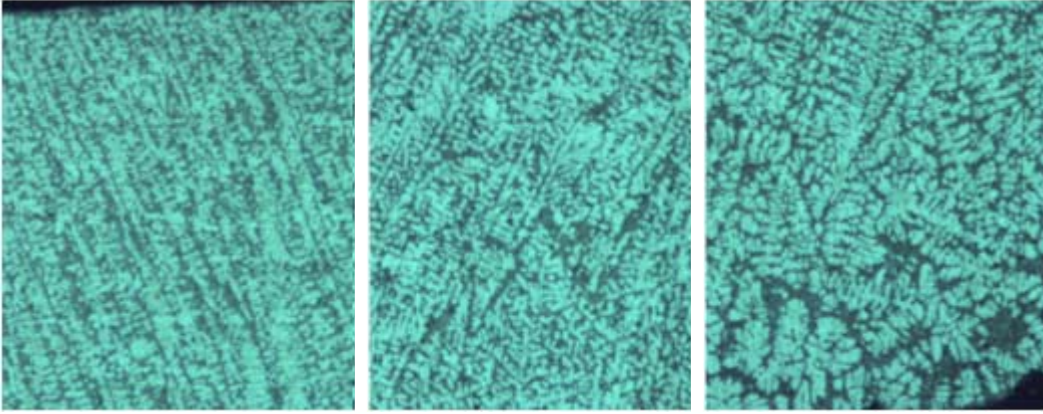


Dış

Orta

İç

Şekil 5.35 4 No'lu numunenin mikroyapıları

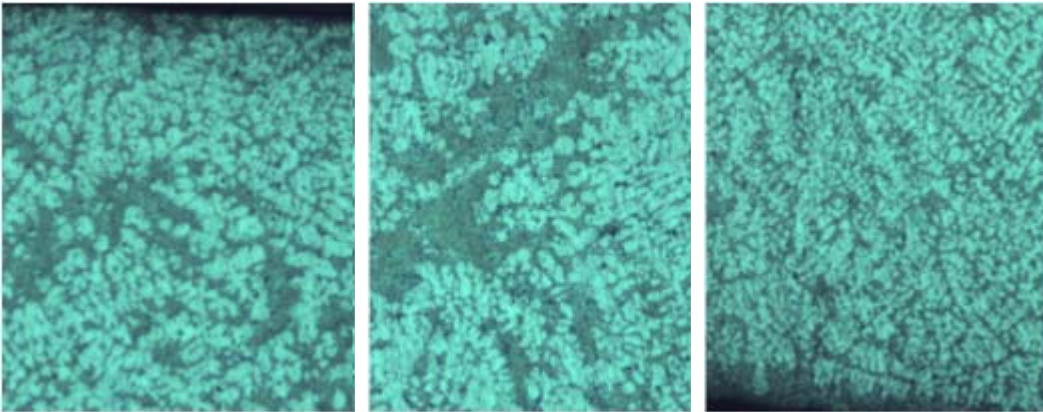


Dış

Orta

İç

Şekil 5.36 5 No'lu numunenin mikroyapıları

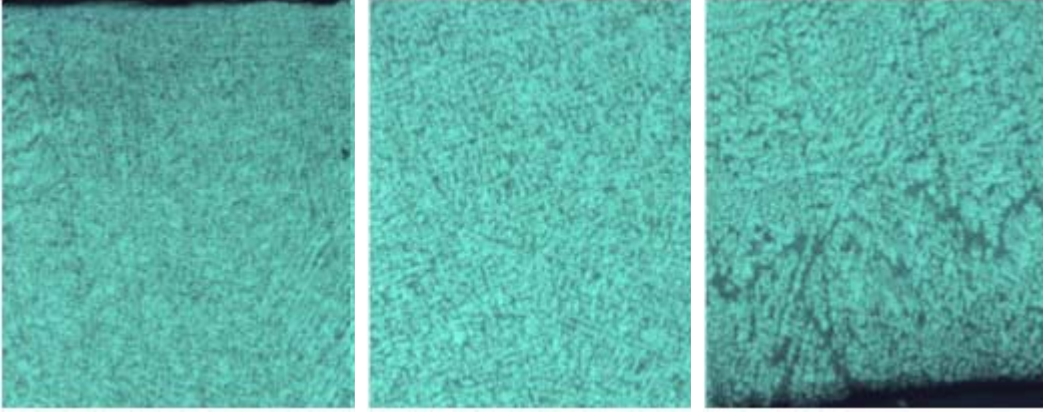


Dış

Orta

İç

Şekil 5.37 6 No'lu numunenin mikroyapıları



Dış

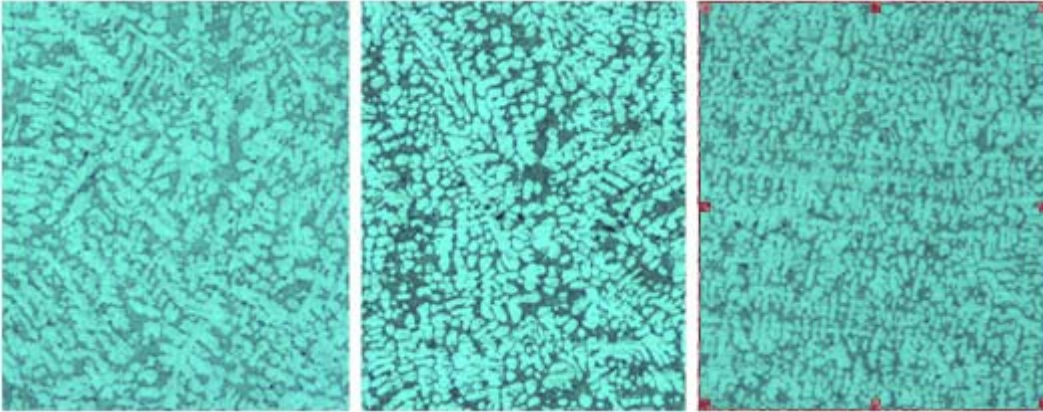
Orta

İç

Şekil 5.38 7 No'lu numunenin mikroyapıları

5.1.5 13,14 ve 15 No'lu Dökümlerin Orta Kısımlarının Mikroyapıları

Üç dökümün mikroyapıları arasındaki farkın daha net anlaşılabilmesi için parçaların orta kısımlarından alınan dik bakılarak çekilmiş mikroyapılar aşağıdan yukarı olarak bir arada aşağıda verilmiştir.

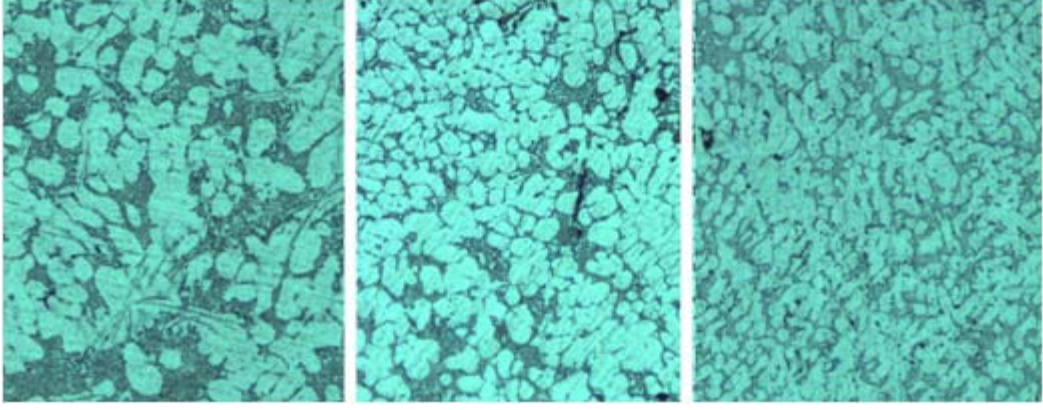


(0a)

(0b)

(0c)

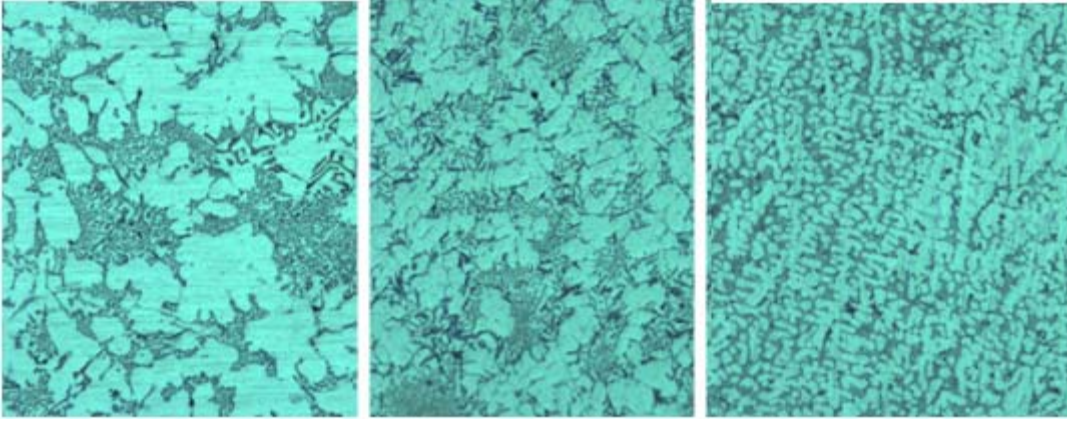
Şekil 5.39 Savurma (a) Sıvama (b) ve Sıkıştırılmalı (c) dökülmüş alaşımın 0 no'lu numunesinin orta bölge mikro yapıları



(1a)

(1b)

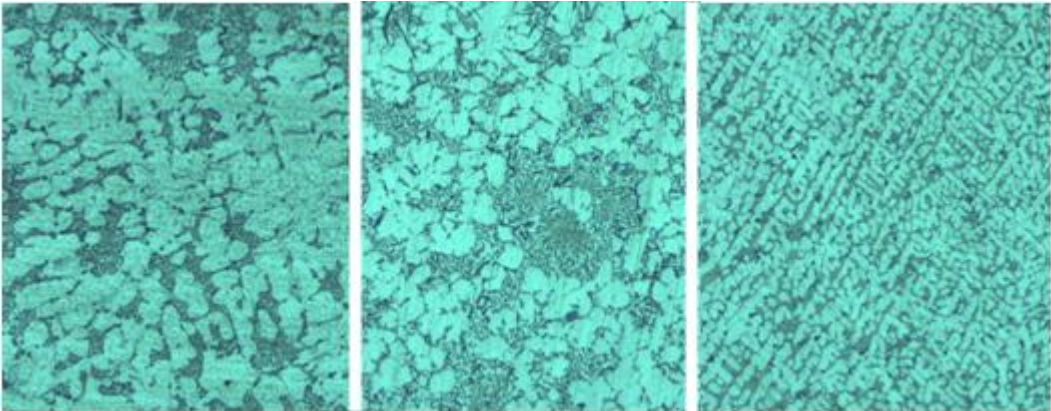
(1c)



(2a)

(2b)

(2c)

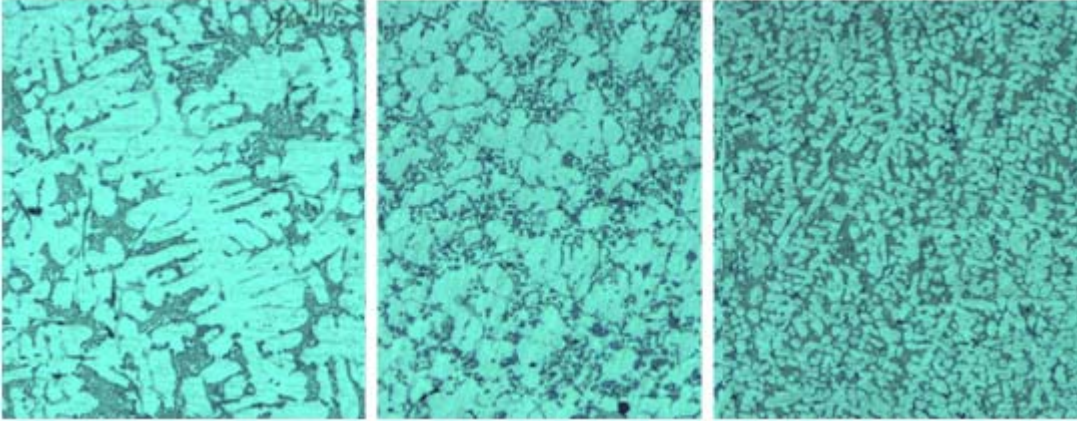


(3a)

(3b)

(3c)

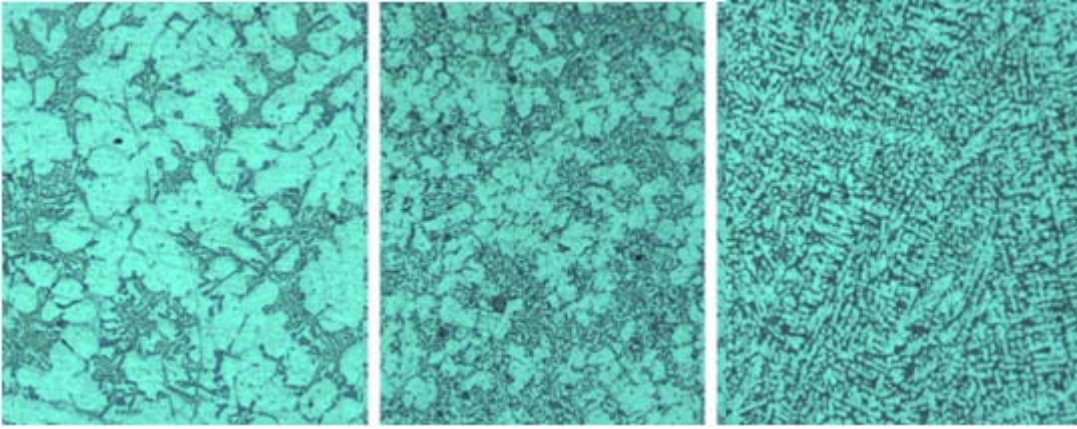
Şekil 5.40 Savurma (a) Sıvama (b) ve Sıkıştırılmalı (c) dökülmüş alaşımın 1,2 ve 3 no'lu numunelerinin orta bölge mikro yapıları



(4a)

(4b)

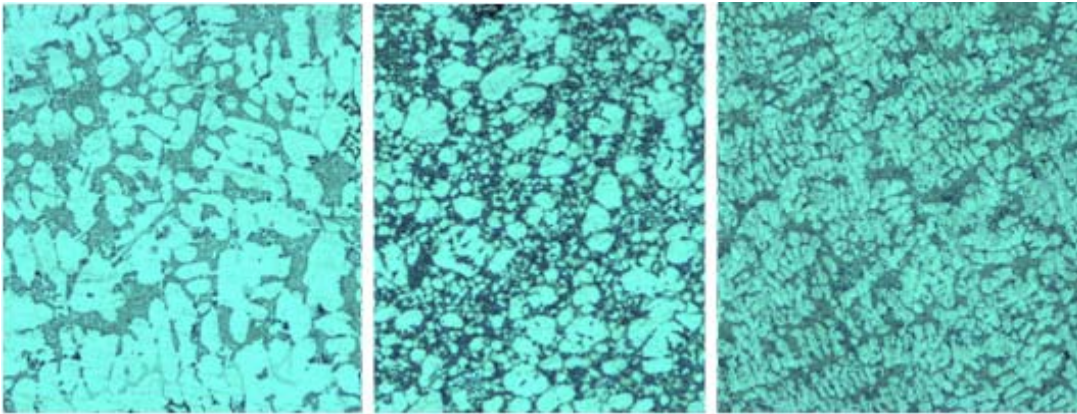
(4c)



(5a)

(5b)

(5c)

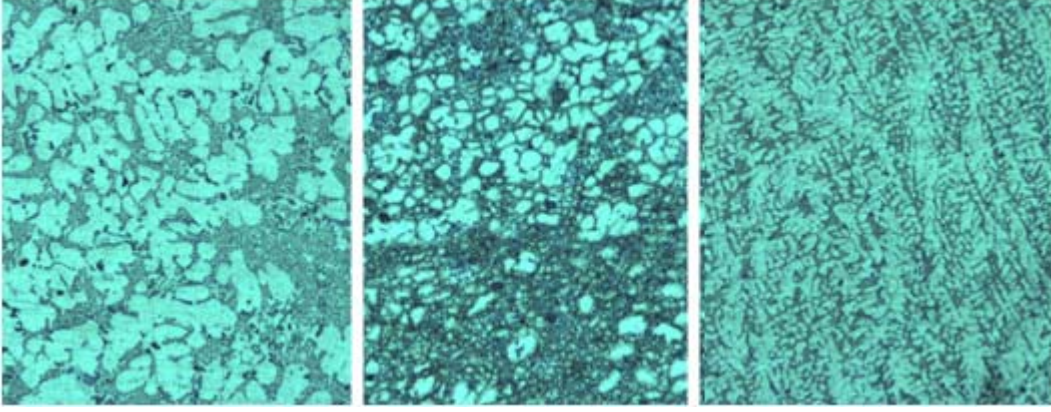


(6a)

(6b)

(6c)

Şekil 5.41 Savurma (a) Sıvama (b) ve Sıkıştırılmalı (c) dökülmüş alaşımın 4,5 ve 6 no'lu numunelerinin orta bölge mikro yapıları



(7a)

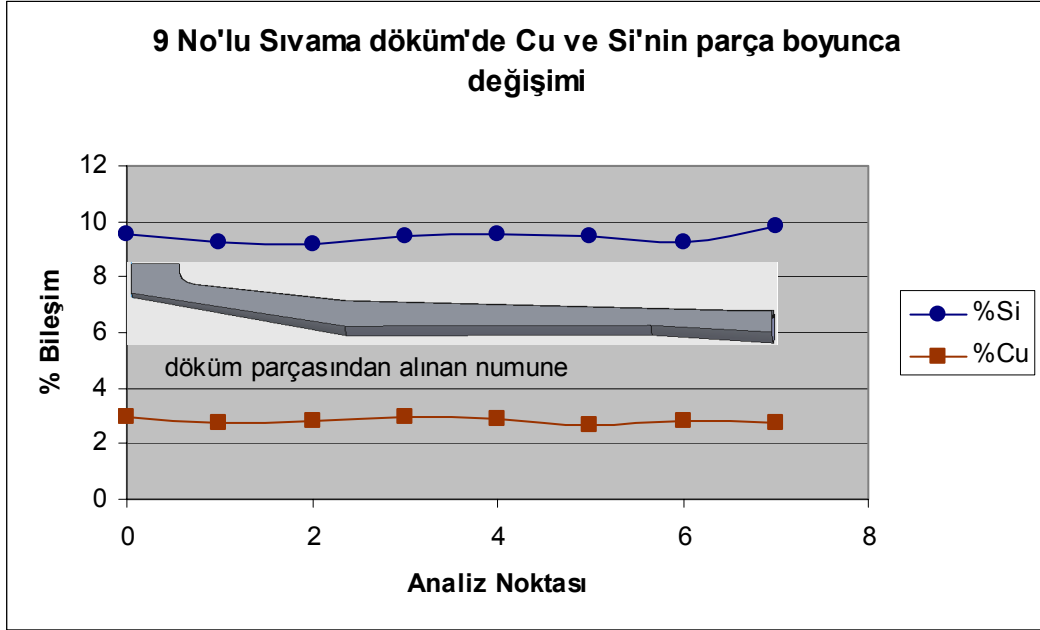
(7b)

(7c)

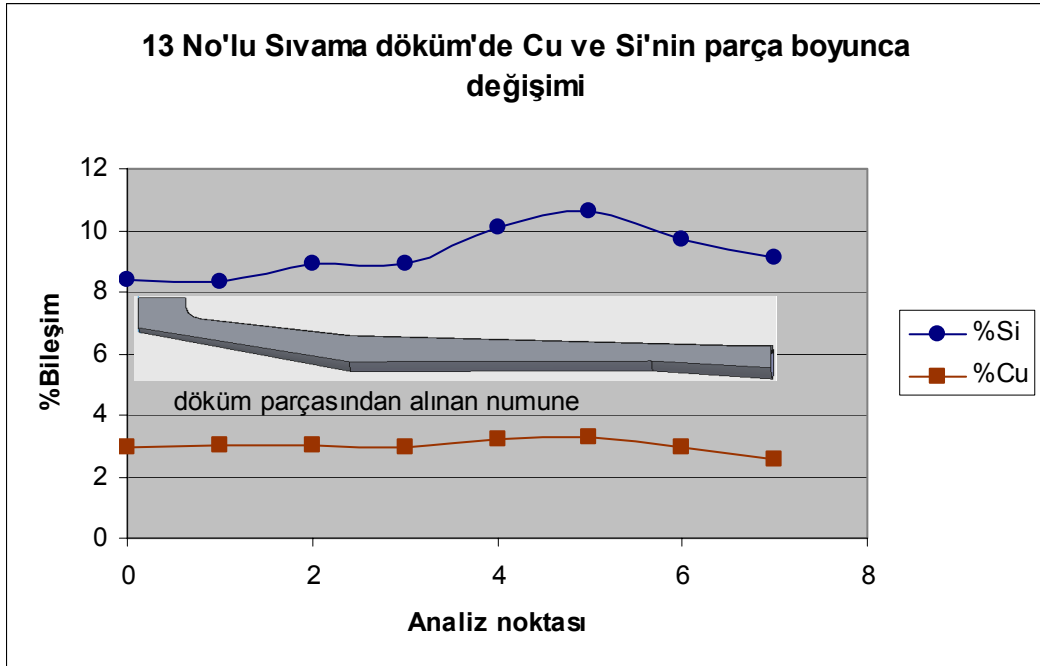
Şekil 5.42 Savurma (a) Sıvama (b) ve Sıkıştırılmalı (c) dökülmüş alaşımın 7 no'lu numunesinin orta bölge mikro yapıları

5.2 Bileşimdeki Değişimin Tespiti

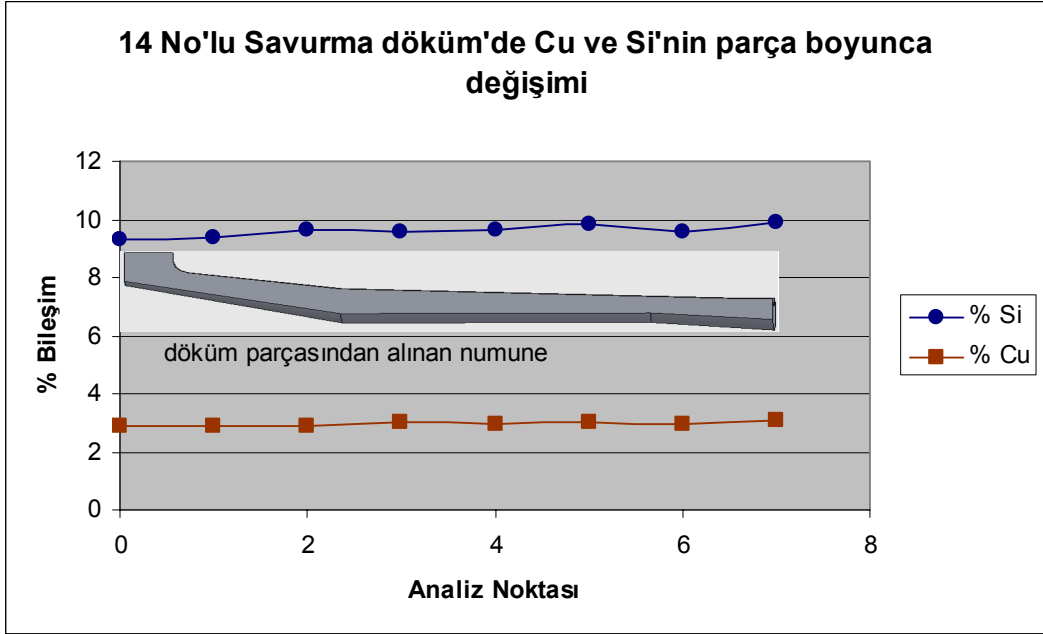
9 ve 13 No'lu sıvama,14 no'lu savurma ve 15 no'lu sıkıştırırmalı dökümlerin aşağıdan yukarı parça boyunca Si ve Cu miktarlarındaki değişimi grafik olarak aşağıda verilmiştir.



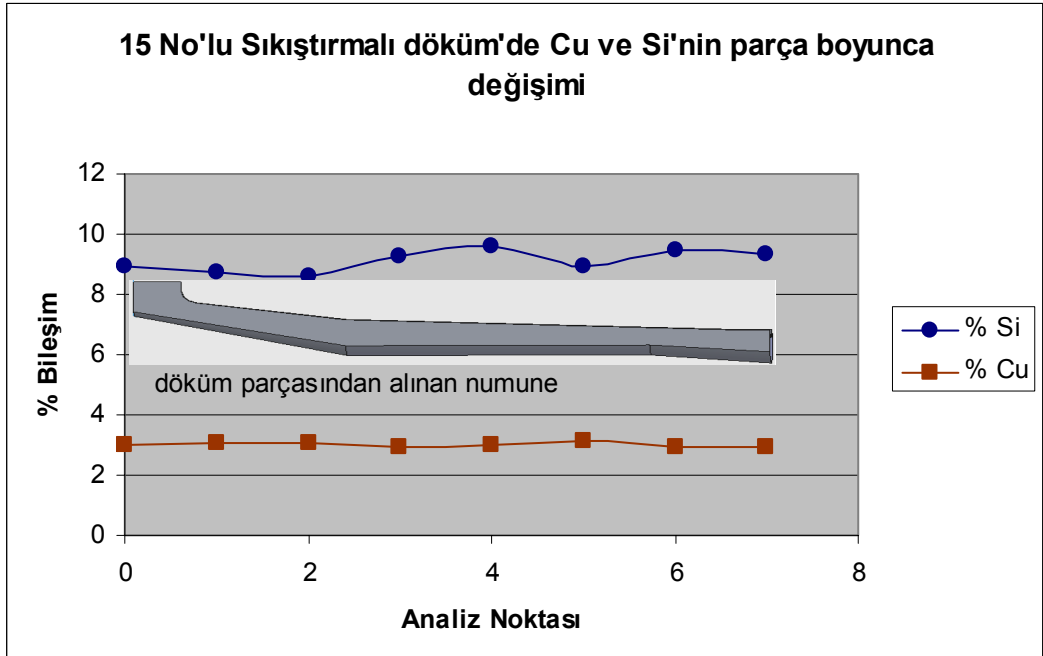
Şekil 5.43 9. döküm deney numunesi boyunca bileşim değişimi



Şekil 5.44 13. döküm deney numunesi boyunca bileşim değişimi



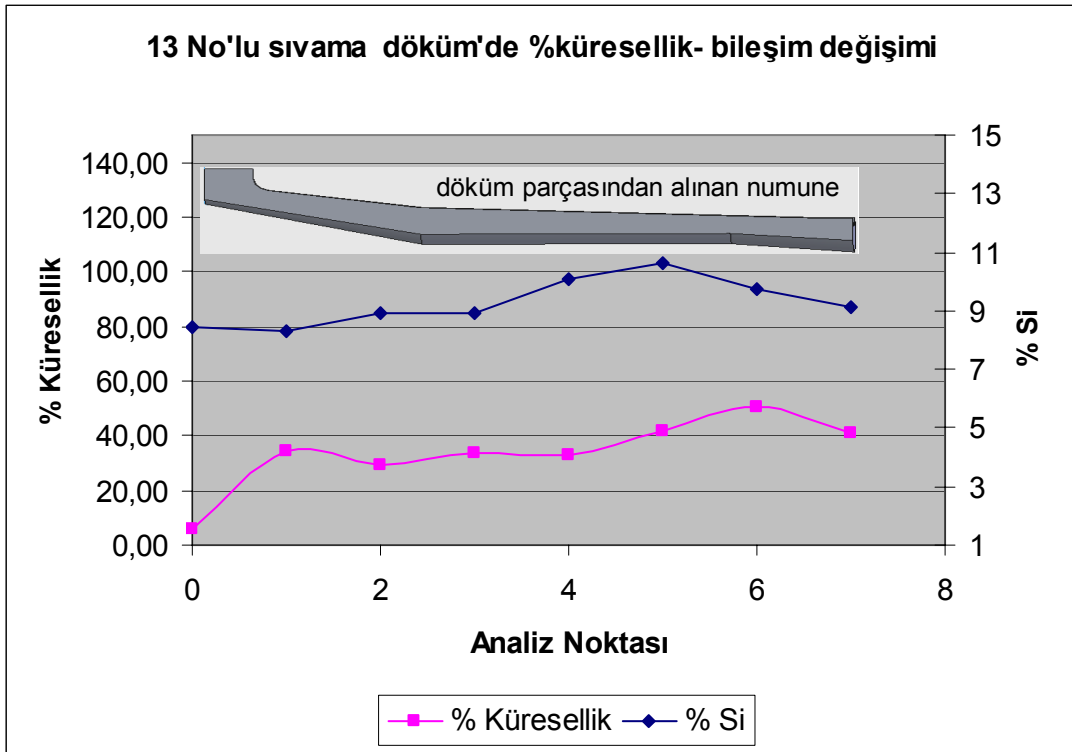
Şekil 5.45 14. döküm deney numunesi boyunca bileşim değişimi



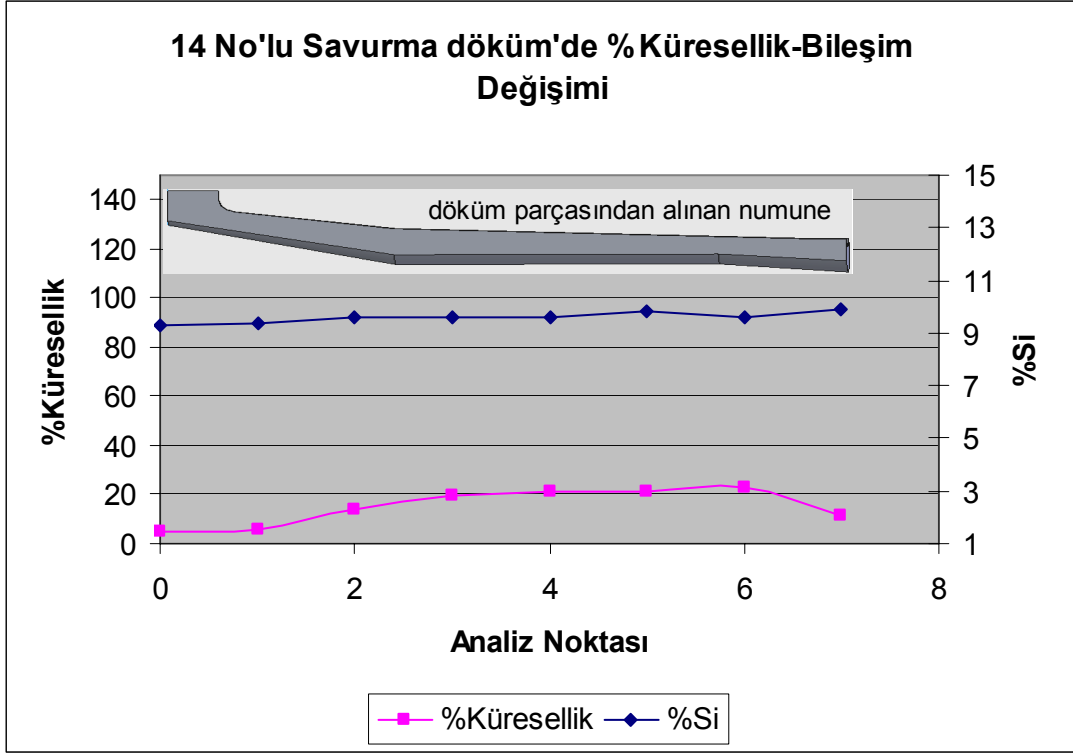
Şekil 5.46 15. döküm deney numunesi boyunca bileşim değişimi

5.3 Nicel Metalografik İncelemeler

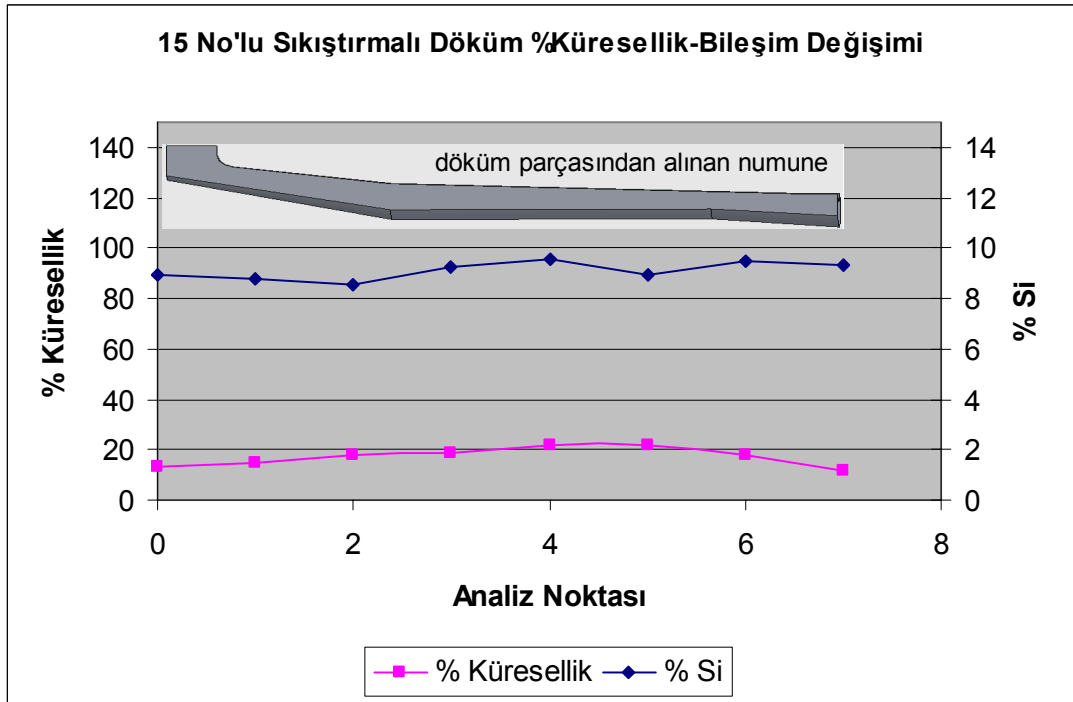
Sıvama döküm parçasından alınan mikroyapılarda, α -Al fazının geometrisi görüntü analiz cihazında incelenmiştir. 13, 14 ve 15 No'lu dökümlerin mikroyapılarında α fazının geometrisi her döküm parçası için aşağıdan yukarı ve her alınan numunun orta kısımlarının % küresellik değerleri bölüm 4.3.3 te anlatıldığı şekilde tespit edilerek, bileşim değişimi, bakır'ın etkisi önemsiz olarak bildirildiği için (Sumitomo vd, 2000), silisyum bileşimi ile aynı grafikte gösterilmiştir.



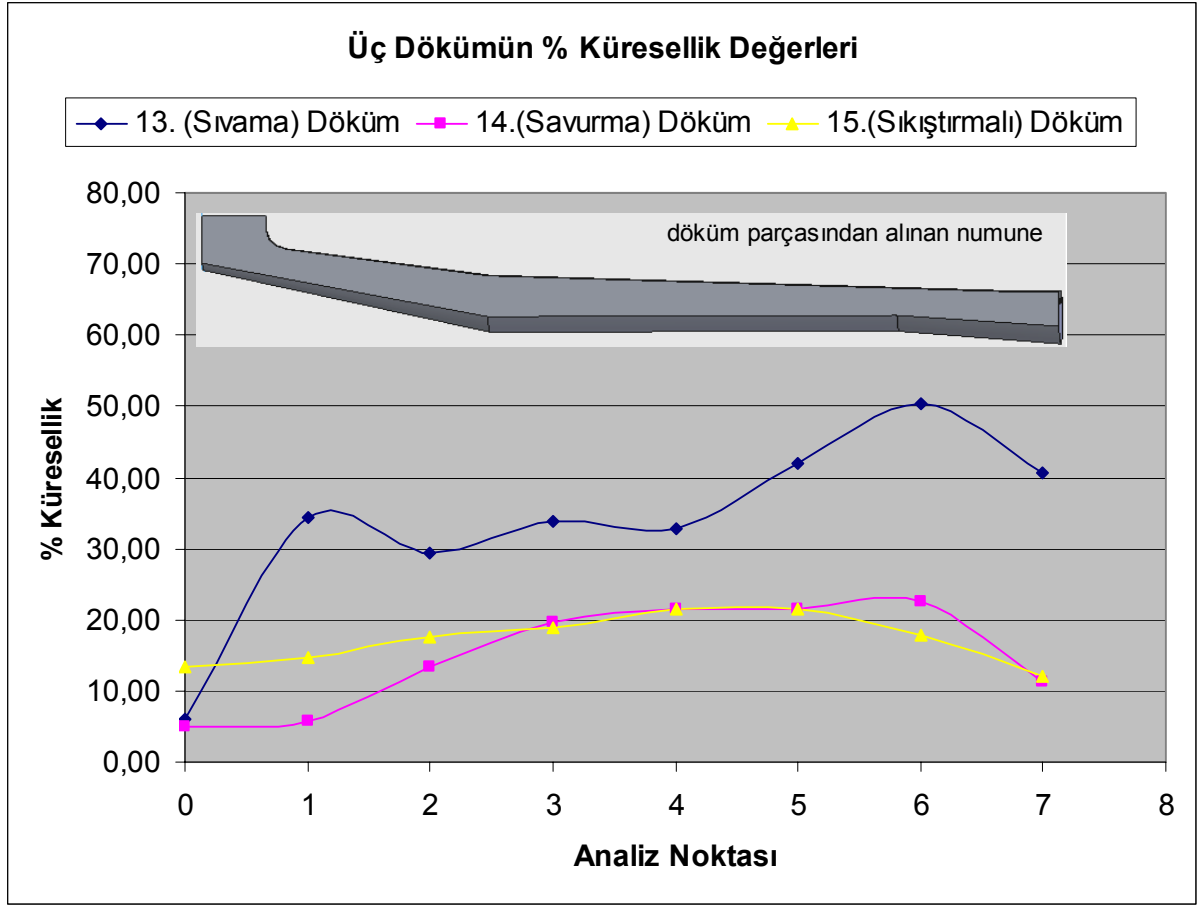
Şekil 5.47 13. Dökümde küreselliğin bileşimle olan değişimi. Küresellik değerleri numunelerin orta kısmından alınmıştır.



Şekil 5.48 14. Dökümde küreselliğin bileşimle olan değişimi. Küresellik değerleri numunelerin orta kısmından alınmıştır.

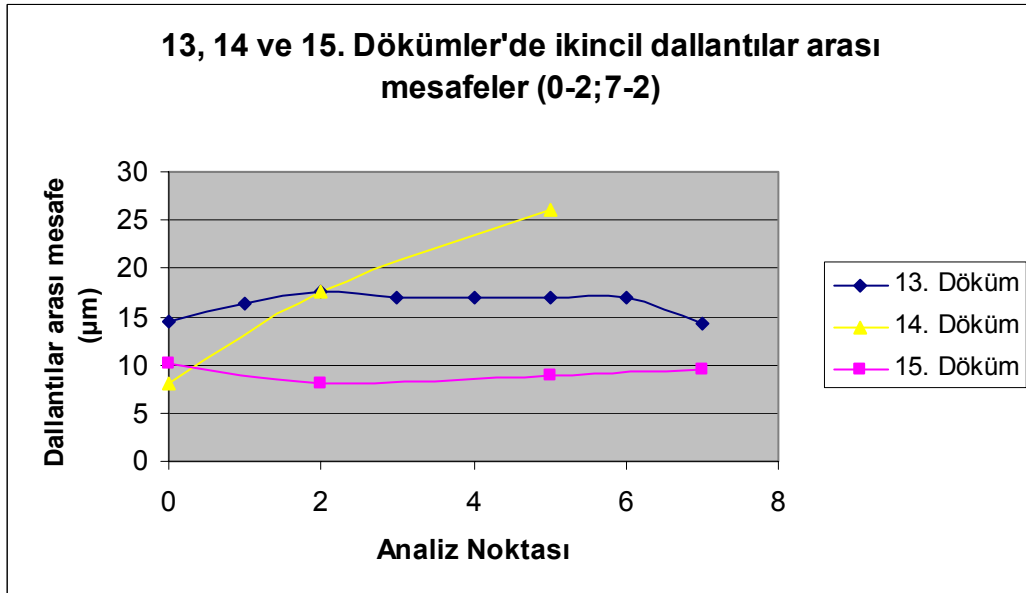
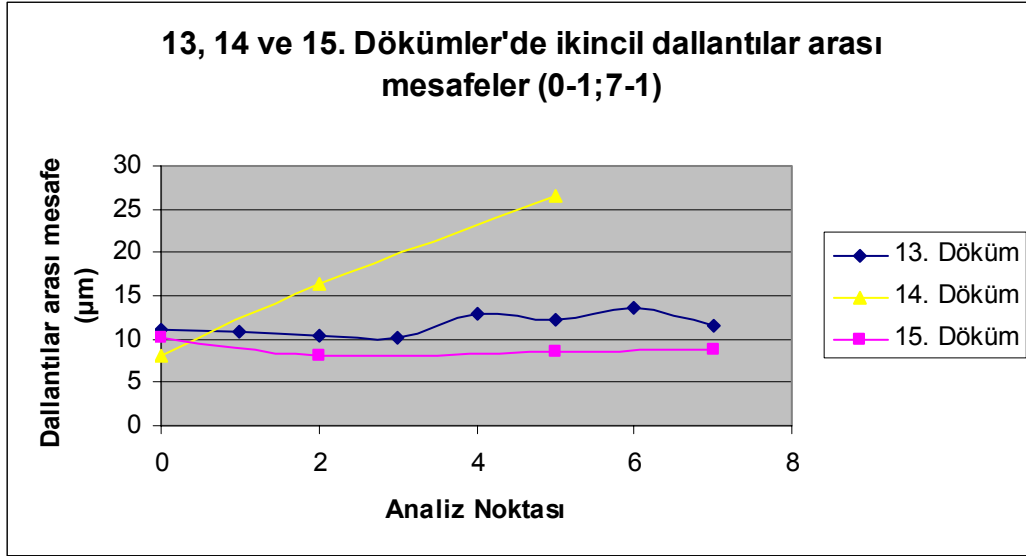


Şekil 5.49 15. Dökümde küreselliğin bileşimle olan değişimi. Küresellik değerleri numunelerin orta kısmından alınmıştır.

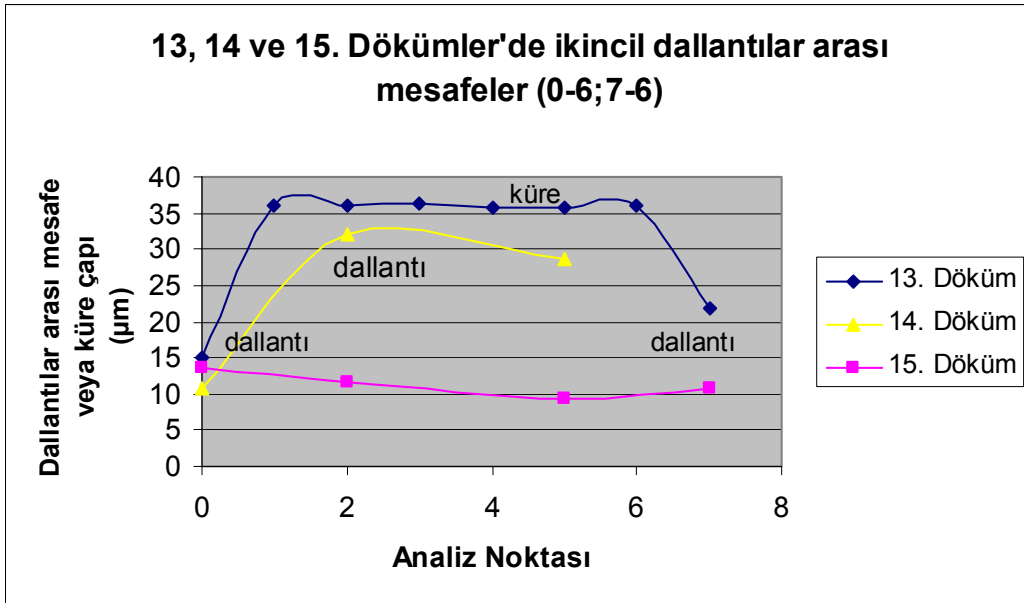
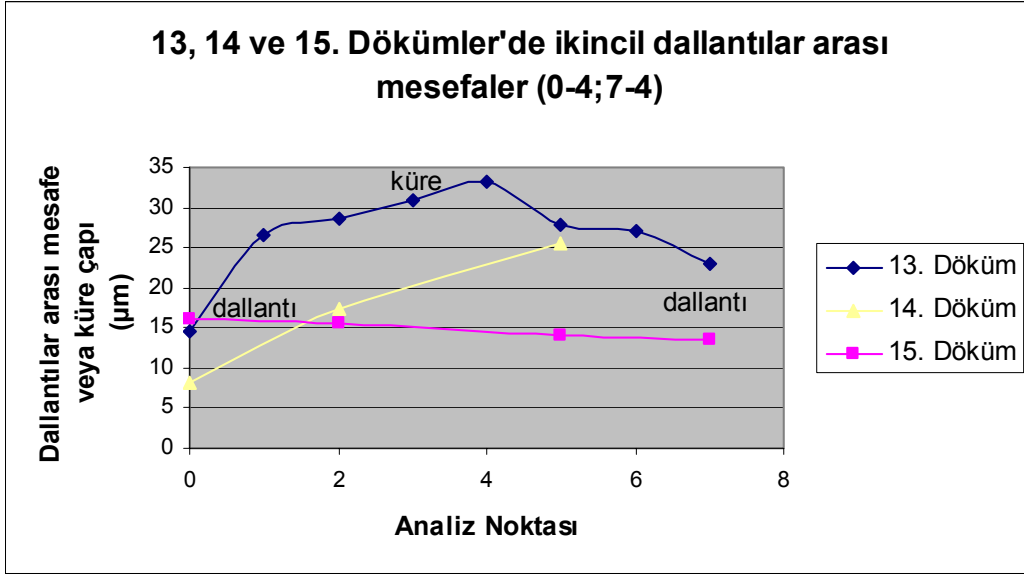


Şekil 5.50 3 Döküm yöntemiyle dökülen parçaların aşağıdan yukarı orta noktalarının % küresellik değişimi

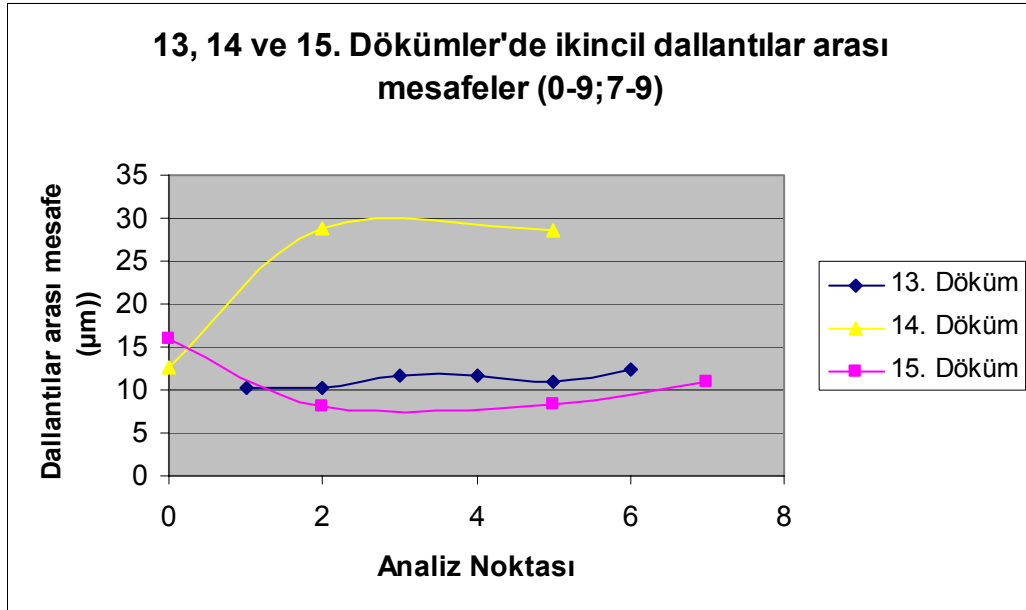
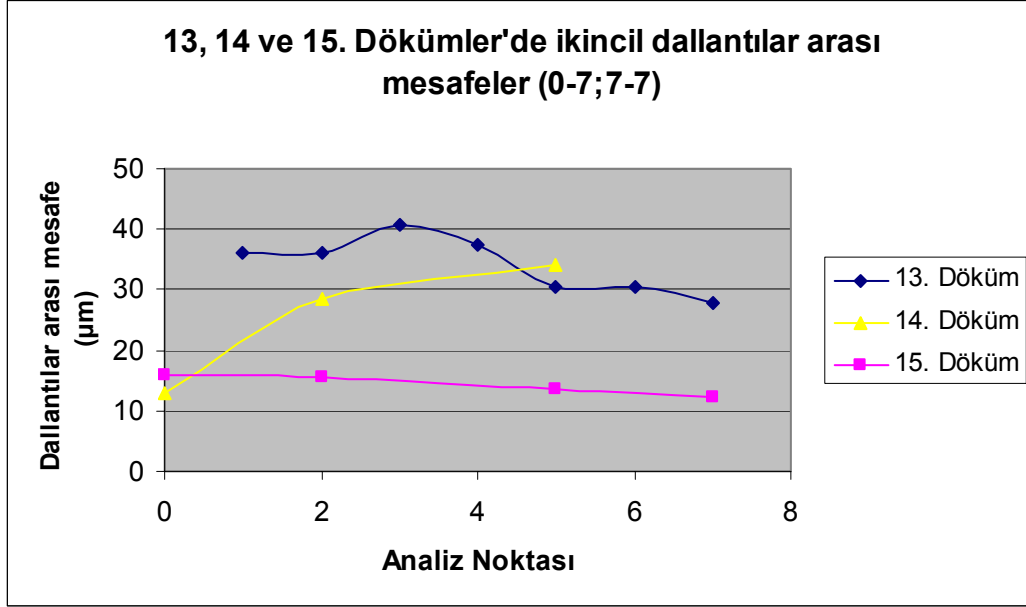
13 No'lu sıvama, 14 no'lu savurma ve 15 no'lu sıkıştırımlı döküm parçalarında aşağıdan yukarı ikincil dallantılar arası mesafe ölçülerek birbirleriyle karşılaştırılmıştır. İkincil dallantılar arası mesafe ölçülürken, 13. dökümde küre ve rozet tip mikroyapılar da kürelerin boyları ölçülerek grafiklerde gösterilmiştir. Grafikte gösterilen değerler, mikroyapının 4-5 farklı yerinden alınan ölçümlerin ortalamasıdır.



Şekil 5.51 9. 13, 14 ve 15. Dökümlerin aşağıdan yukarı ikincil dallantılar arası mesafenin değişimi (0-1;7-1), (0-2;7-2)



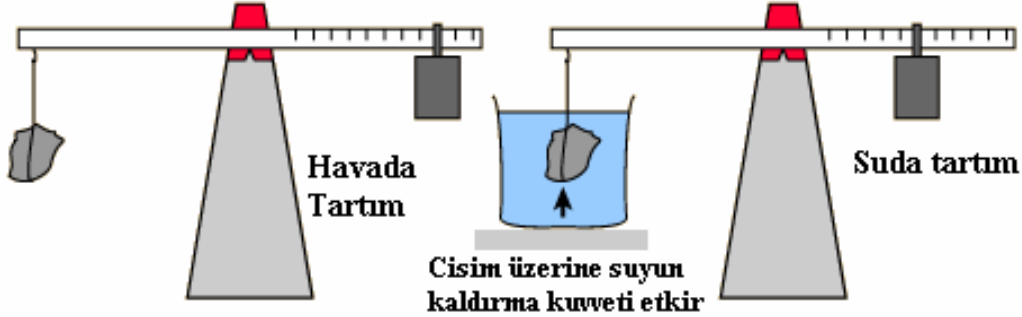
Şekil 5.52 9. 13, 14 ve 15. Dökümlerin aşağıdan yukarı ikincil dallantılar arası mesafenin değişimi (0-4;7-4), (0-6;7-6)



Şekil 5.53 9. 13, 14 ve 15. Dökümlerin aşağıdan yukarı ikincil dallantılar arası mesafenin değişimi (0-7;7-7), (0-9;7-9)

5.4 Gözeneklilik Ölçümü

Döküm deneyleri sonucunda 13. 14. ve 15. döküm parçalarının %gözenekliliği Arşimet Prensi (Şekil 5.54) kullanılarak ölçülmüş ve grafik halinde gösterilmiştir.



Şekil 5.54 Arşimet prensibiyle yoğunluk tayininin şematik gösterimi (<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/pbuoy2.html>)

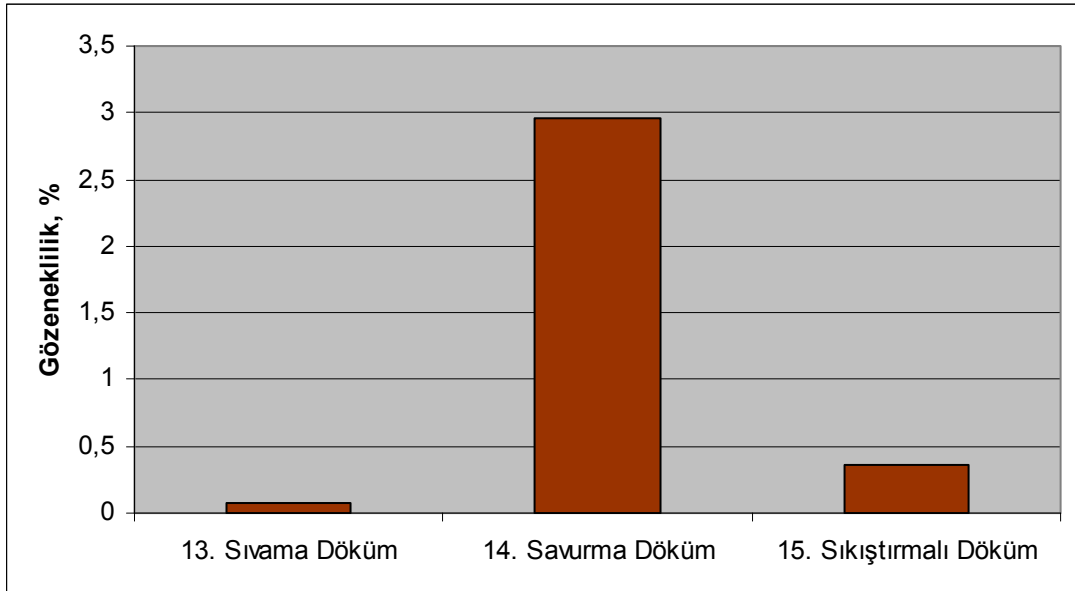
Doğru kıyaslama yapabilmek için her döküm parçasının en alt, orta ve en üst kısmından 3 parça seçilerek havada ve sonra suda tartımları yapılmış ve Eşitlik 5.1 de (Taylor vd., 1999) yerine konularak döküm parçalarının %gözenekliliği hesaplanmıştır.

$$\% \text{ Gözeneklilik} = 100 \times \left(1 - \left(\frac{Pl}{Pth} \right) \times \left(\frac{Whava}{Whava - Wsu} \right) \right) \quad (5.1)$$

Bu eşitlikte Pl= Tartımın yapıldığı suyun yoğunluğu (Suyun yoğunluğu olarak 0,9982 gr/cm³ alınmıştır) Pth= Alaşımın teorik gözeneksiz yoğunluğu, Whava=Havadaki ağırlık ve Wsu=Sudaki ağırlıktır alınmıştır. Alaşımın teorik yoğunluğu olarak A380 alaşımın teorik yoğunluğu (2.76 gr/cm³) alınmıştır (Aluminum Casting Technology, 2001).

Çizelge 5.1 Üç döküm parçasından alınan numunelerin piknometri değerleri

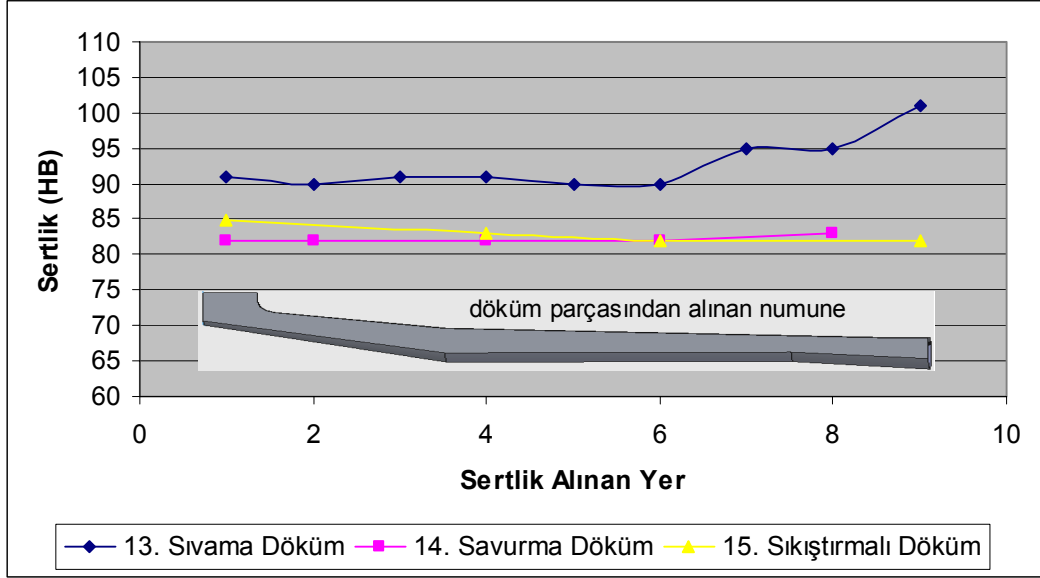
	Whava	Wsu	PI	Pth	%Gözeneklilik	%Ortalama Gözeneklilik
Sıvama Döküm	17,28	11,03	0,9982	2,76	0,0064	0,075555
	13,26	8,46	0,9982	2,76	0,089583333	
	14,58	9,3	0,9982	2,76	0,130681818	
Savurma Döküm	21,48	13,49	0,9982	2,76	2,770963705	2,896751
	25,04	15,71	0,9982	2,76	2,935334048	
	18,67	11,71	0,9982	2,76	2,983955939	
Sıkıştırılmalı Döküm	11,67	7,43	0,9982	2,76	0,456367925	0,392517
	19,18	12,22	0,9982	2,76	0,333812261	
	8,07	5,14	0,9982	2,76	0,387372014	



Şekil 5.54 Üç döküme ait parçaların % Gözenekliliği.

5.5 Sertlik Ölçümü

Üç döküm parçasının, parça yüksekliği boyunca Brinell sertlikleri (2,5 mm bilya çapı, 62,5 kgf yük) ölçülerek grafik olarak gösterilmiştir.

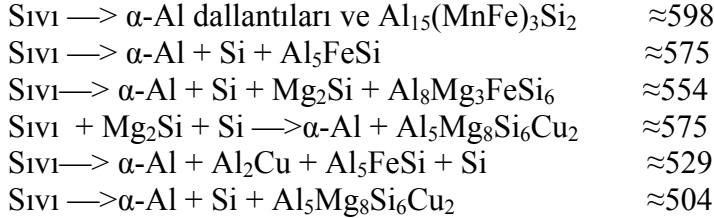


Şekil 5.55 Üç döküm yöntemiyle üretilen parçaların döküm parçası boyunca sertlik dağılımları

5.6 Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM) Analizi

Döküm deneylerinde kullandığımız alaşımın tipik mikroyapısında α -Al dallantıları ve dallantılar arası bölgede Si parçacıkları ve intermetalik fazlar bulunur. Literatürde Al-(8,5-10,5) Si-(2-4)Cu alaşımı için 6 adet tepkime oluşacağı bildirilmiştir (Triveno Rios vd, 2003).

Bunlar;



tepkimeleridir. Mikroyapı incelemeleri, dallantılar arası bölgede dördü (α -Al + Si+ Al₂Cu+ Al₈Mg₃FeSi₆), üçlü (Al + Si+ Al₂Cu), ikili (Al + Si, Al+Al₂Cu) ötektik yapıları bulunabileceğini göstermektedir (Triveno Rios vd, 2003). Arasına bazı bölgelerde çin yazısı morfolojisi λ -Al₅Mg₉Si₆Cu₂(Fe), π -Al₈Si₆Mg₃Fe(Cu) ve α -Al₁₅(MnFe)₃Si₂ fazları α -Al ile birlikte göülebilir. Düzlemsel veya dallantılı katılaşmada Al₂Cu fazı α -Al ile beraber ve aynı morfolojide Si'den bağımsız büyürler.

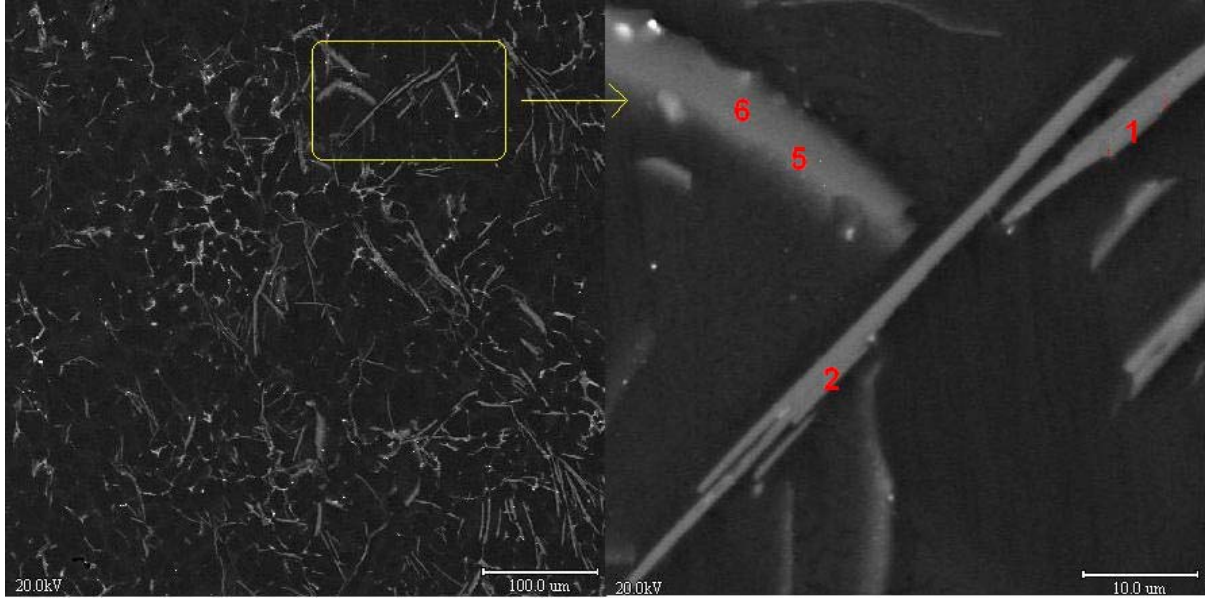
β -Al₅FeSi fazı monoklinik kristal yapıdadır ve dallantılar arası bölgede iğnemsî yapıda görülür. Bizim döküm alaşımımızda demir içeriği 0,6 civarında olduğu için gözlemlenmesi zordur. Düşük soğuma hızlarında ve kaba dallantılı yapılarda bu iğnemsî fazın boyu ve genişliği daha fazladır. Bu fazın varlığı dallantılar arası bölgede sıvı akışını engelleyerek gözeneklilik oluşumunu teşvik eder. Bu faz ayrıca aktif bir gözeneklilik çekirdekleyicisidir.

Bu faz ötektik Si, ötektik Al₂Cu ve Cu zengin fazlar için ana çekirdek merkezi olarak gözükmektedir. Si'nin ve Al₂Cu'nun çekirdeklenmesi geniş β -Al₅FeSi plakaları üzerinde, Al- (β -Al₅FeSi) ikili ötektik karışımı arasında ve daha küçük β -Al₅FeSi üzerinde olur. Silisyum, β - plakaları ile hemen her tarafta büyüyebilir.

Diğer bir genel intermetalik faz, Al₁₅(MnFe)₃Si₂ ya da diğer adıyla α -Al₈Fe₂Si kübik kristal fazıdır. Bu faz β - plakaları kadar yüksek sertliğe sahip olsada çatlak başlangıcı olarak görev yapmaz (Triveno Rios vd, 2003). Al₁₅(MnFe)₃Si₂ fazı, β -Al₅FeSi fazına nazaran soğuma hızına bağlı olarak değişik morfolojiler gösterir. Düşük soğuma hızlarında Al₁₅(MnFe)₃Si₂ fazı primer kristal olarak katılaşır. Bununla birlikte, soğuma hızı arttıkça çin yazısı tipi morfolojiye veya çok ince bir ötektiğe geçiş yapar.

Dallantılı yapıya yakın bölgede, $Al_{15}(MnFe)_3Si_2$ fazının büyümesi baskılanır. Dallantılar arası bölgeden uzaklaşıp α -Al dallantıları içine girildiğinde $Al_{15}(MnFe)_3Si_2$ fazı α -Al beraberce katılır.

Aşağıdaki şekilde 13. Döküm parçasının 4 no'lu numunesinin orta kısmından alınmış bir elektron mikroskobu görüntüsü vardır.



Şekil 5.56 13.Döküm 4 no'lu numunesi orta kısmı elektron mikroskobu görüntüsü ve EDX analizi yerleri

Şekil 5.56'de ki resimde 1 ve 2 no ile gösterilen noktalardan alınan x-ışını analizlerine göre var olan elementler ve miktarları aşağıda verilmiştir.

Çizelge 5.1 Şekil 5.55 de ki 1 ve 2 noktalarının EDX analizi

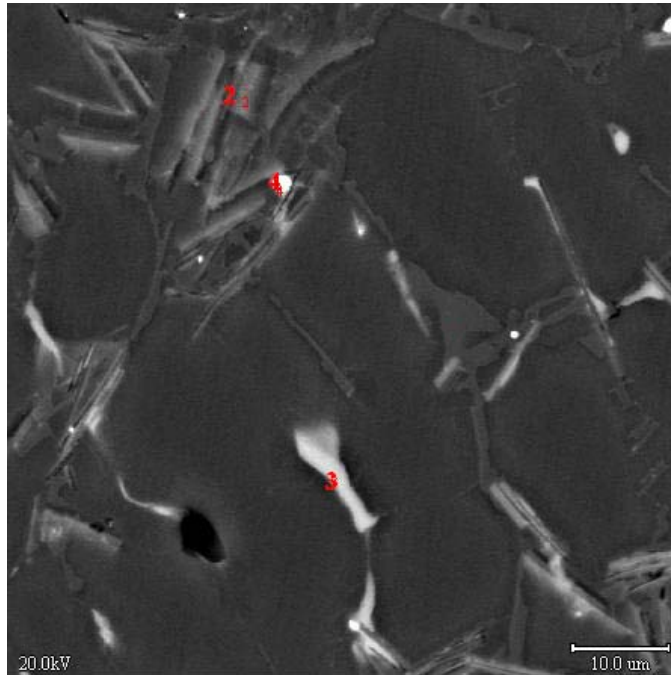
	Element	Şiddet (c/s)	Miktar
1 No'lu nokta	Al	958,44	76.714 ağ.%
	Si	46,40	8.486 ağ.%
	Fe	63.88	14.800 ağ.%
2 No'lu nokta	Al	1059.43	64.254 ağ.%
	Si	146,56	17.446 ağ.%
	Fe	81,37	13,105 ağ.%

Triveno Rios vd. 2003 yılında aynı alaşım için yaptıkları çalışmada β -Al₅FeSi fazının bileşimini ağırlıkça %73,8 Al, %11,4 Si ve % 14,8 Fe olarak tespit etmişlerdir. İnce iğnemsi yapısı ve bileşim olarak benzemesi nedeniyle bu çalışmada bu faz β -Al₅FeSi fazı olarak nitelendirilmiştir. 5 ve 6 Noktaları için yapılan analizde ise çizelge 5.2 de ki değerler bulunmuştur.

Çizelge 5.2 Şekil 5.56'de ki 5 ve 6 noktalarının EDX analizi

	Element	Şiddet (c/s)	Miktar
5 No'lu nokta	Al	748,38	48.987 ağ.%
	Si	120,60	11.959 ağ.%
	Fe	277,03	39.054 ağ.%
6 No'lu nokta	Al	685,91	43.646 ağ.%
	Si	129,79	11.661 ağ.%
	Mn	56,27	5.735 ağ.%
	Fe	299,10	38.957 ağ.%

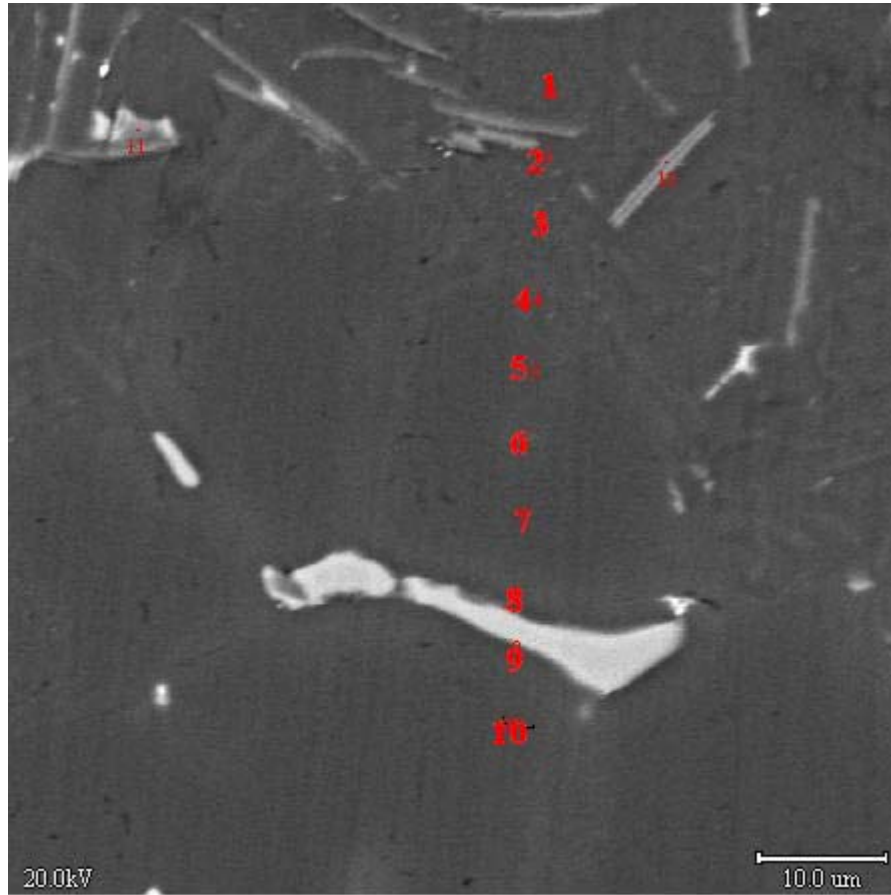
Analizlerde Mn elementinin varlığı ve miktar olarak (5.735 ağ.%) $Al_{15}(MnFe)_3Si_2$ fazında bulunması muhtemel Mn miktarına yakın olması bu faz, $Al_{15}(MnFe)_3Si_2$ fazı olarak tanımlanmıştır.



Şekil 5.57 13.Döküm 4 no'lu numunesi orta kısmı elektron mikroskobu görüntüsü ve EDX analizi yerleri

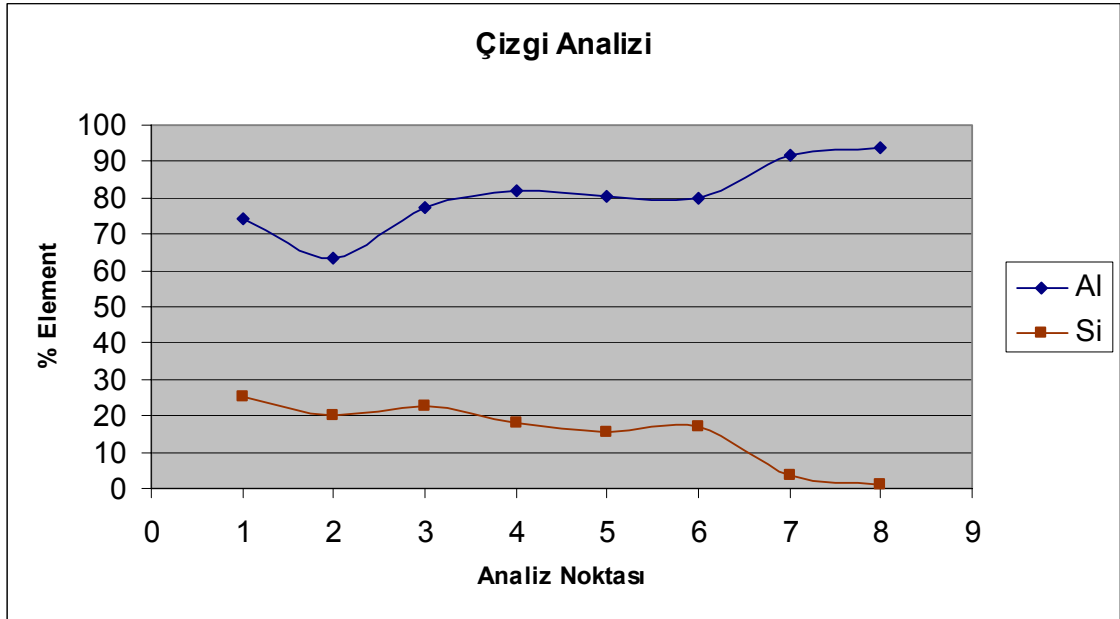
Şekil 5. 57’da yine 13. döküme ait 4 No’lu numunenin orta kısımlarına ait bir başka elektron mikroskobu görüntüsü verilmiştir. “2” No’lu nokta daha önce anlatılmış olan $Al_{15}(MnFe)_3Si_2$ fazıdır. “3” No’lu noktanın EDX analizi bu fazda %85 Al, %15 Cu olduğunu vermektedir. Ana fazda bulunan Al’mun analize etkisini gözönüne aldığımızda bu fazın Al_2Cu fazı olduğunu düşünmekteyiz. “4” Noktası için yapılan analizde % 59 Al, %18 Si, % 10 Fe ve % Cu bulunmuştur. Bu fazında yine Al_2Cu olduğu Si ve Fe değerlerinin üzerinde büyüdüğü $\beta-Al_5FeSi$ plakalarından geldiği düşünülmektedir.

Bir α -Al tanesi içinde çizgi analizi yapılarak tane içindeki ayrışma gözlemlenmiştir.



Şekil 5.58 13. Döküm 4 No’lu numunenin orta kısımlarına ait bir α -Al tanesinde çizgi analizi yerleri

Çizgi analiz değerleri aşağıdaki grafikte verilmektedir.



Şekil 5.59 α -Al tanesinde çizgi analizi değerleri

5.7 Ortalama Kesme Hızı ve Görünen Ağdalık Hesabı

Sıvama dökümde, dönen alt ve sabit üst kalıp arasında kalan sıvı üzerine etkiyen ortalama kesme hızı ve sıvının alt kalıbın dönme süresinin yarısında ulaştığı görünen ağdalık, Spencer, Mehrabian ve Flemings'in(1972) de yayınladığı "Rheological Behavior of Sn-15 Pct. Pb in the Crystallization Range" makalesinde rapor ettiği eşitlikler kullanılarak hesap edilmiştir. Bu makalede;

$$\text{Kesme Hızı } (\dot{\gamma}) = \frac{2\Omega_o K}{1-K^2} \quad \text{dir.} \quad (5.2)$$

Bu eşitlikte;

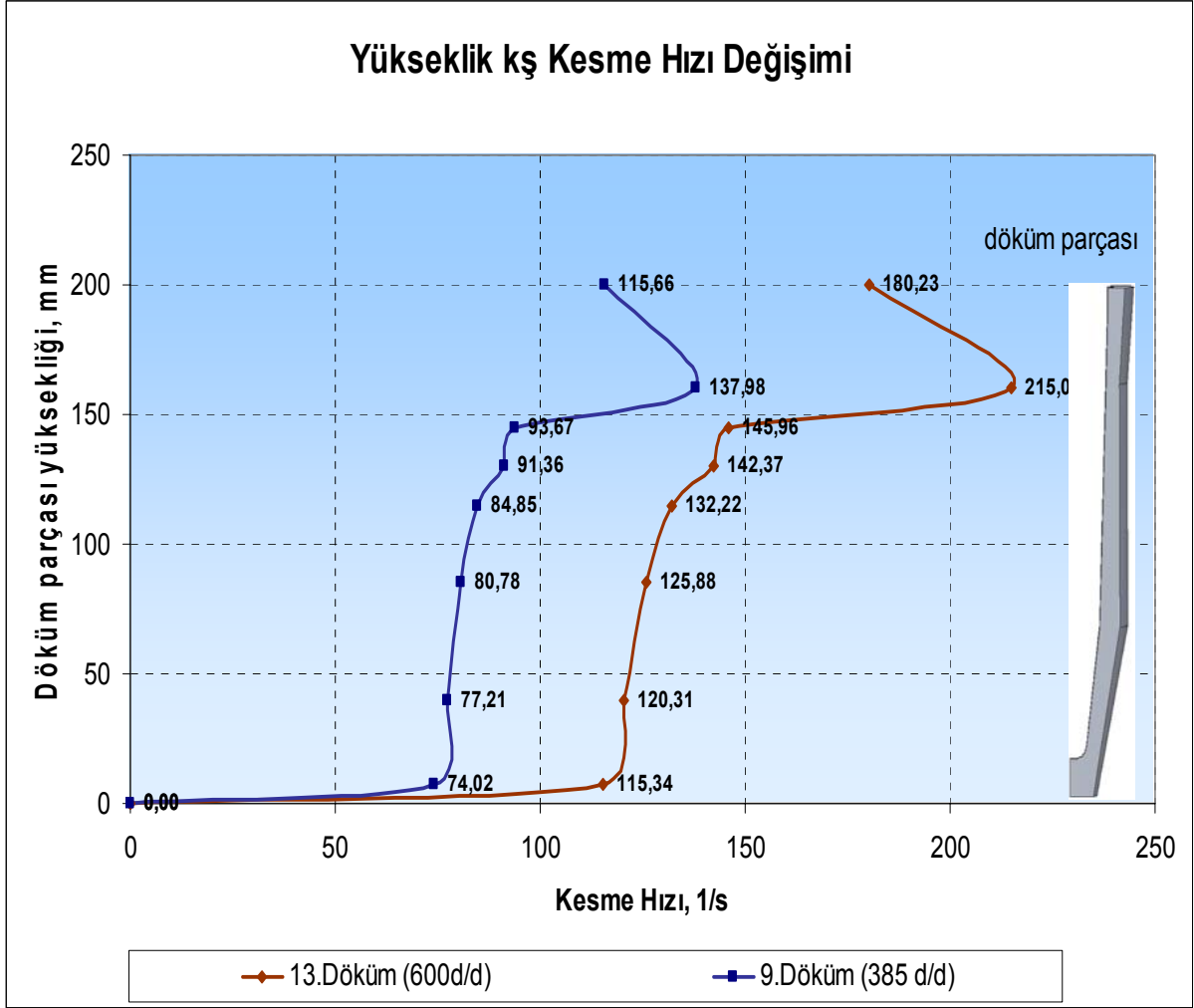
Ω_o Açısal hız (rad/s), K sıvının içinde bulunduğu silindirlere iç silindirin yarıçapının (R_1 , mm) dış silindirin yarıçapına (R_2 , mm) oranıdır.

Bu eşitlikte hesaplama yapabilmek için öncelikle açısal hızın bilinmesi gerekir. 9 No'lu döküm deneyinde alt kalıbın dönme hızı 385 dev/dk olup bu değer 40,3 rad/s değerine karşılık gelmektedir. 13 No'lu döküm deneyinde ise alt kalıbın dönme hızı 600 dev/dk yani 62,8 rad/s dir. Bu değerler ve eşitlik 5.2 kullanılarak yapılan hesaplamada 9 ve 13. döküm deneylerinde

sıvıya etkiyen ortalama kesme hızları, Şekil 5.60'da ki grafikte gösterilmiştir.

Çizelge 5.3 9. ve 13. Sıvama dökümlerin kesme hızı hesabı için değerleri

$\Omega_{9.deney}$ (rad/s)	$\Omega_{13.deney}$ (rad/s)	R_1 (mm)	R_2 (mm)	$K = (R_1/R_2)$	Döküm Parçasının Yüksekliği (mm)	9.döküm, Kesme Hızı, γ (1/s)	13. döküm Kesme Hızı, γ (1/s)
40,3	62,8	27	38	0,71	200	115,66	180,23
40,3	62,8	25,4	33,88	0,75	160	137,98	215,01
40,3	62,8	22,385	34	0,66	145	93,67	145,96
40,3	62,8	22	33,75	0,65	130	91,36	142,37
40,3	62,8	21,175	33,5	0,63	115	84,85	132,22
40,3	62,8	20,57	33,25	0,62	85	80,78	125,88
40,3	62,8	20	33	0,61	40	77,21	120,31
40,3	62,8	19,36	30,85	0,63	24	83,44	130,03
40,3	62,8	16,94	29,04	0,58	15	71,27	111,06
40,3	62,8	13,3	22,385	0,59	7,5	74,02	115,34
40,3	62,8	10,89	18,755	0,58	0	0,00	0,00



Şekil 5.60 9. ve 13. Döküm deneylerinde sıvıya etkiyen kesme hızı.

Açısal hızın 385 dev/dk dan 600 dev/dk ya çıkmış olması kesme hızı üzerinde hatırı sayılır fark meydana getirmiştir.

Çeşitli kaynaklarda belirtildiği gibi iki dönen silindir arasında kalan sıvıya etkiyen kesme hızı

$$\dot{\gamma}(r) = \frac{2 R_1^2 R_2^2 (\Omega_2 - \Omega_1)}{R_2^2 - R_1^2} \frac{1}{r^2} \quad (5.3)$$

eşitliği ile tespit edilir. R_1 iç silindirin, R_2 dış silindirin yarıçapı, Ω_1 iç silindirin açısal hızı, Ω_2 dış silindirin açısal hızıdır. $\Omega_1 = 0$, $\Omega_2 \neq 0$ ve $r = R_2$ değerleri yerine konulursa eşitlik $K = R_1/R_2$ halinde eşitlik 5.4 te ki halini alır (Atasoy, özel görüşme, 2007).

$$\dot{\gamma}_{r=R_2} = \frac{2 K^2 \Omega_2}{1 - K^2} \quad (5.4)$$

Sıvıya etkiyen kesme gerilmesi

$$\tau = \frac{M_2}{2\pi L R_2^2} \quad (5.5)$$

ise görünen ağdalık (η);

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}_{r=R_2}} = \frac{M_2}{2\pi L R_2^2} \frac{1 - K^2}{2 K^2 \Omega_2} = \frac{M_2 (1 - K^2)}{4\pi L K^2 R_2^2 \Omega_2} \quad (5.6)$$

eşitliği ile bulunur (Atasoy, özel görüşme, 2007). Bu görünen ağdalık eşitliği Spencer vd'nin (1972) aşağıda belirttiği eşitlik ile aynıdır..

$$\text{Görünen Ağdalık } (\eta) = \frac{M(1 - K^2)}{4\pi L \Omega_0 R_2^2 K^2} \quad (5.7)$$

Bu eşitlikte;

η Görünen Ağdalık (poise), M Tork (dyne. cm), Ω_0 ya da Ω_2 Açısal hız (rad/s), L silindirlerin yüksekliği (cm), R_1 dış silindirin yarıçapı (cm) ve K sıvının içinde bulunduğu silindirlere iç silindirin yarıçapının (R_1) dış silindirin yarıçapına (R_2) oranıdır. Bu eşitlik $R_1^2 = R_2^2 \cdot K^2$ şartında

$$\text{Görünen Ağdalık } (\eta) = \frac{M(1 - K^2)}{4\pi L \Omega_0 R_1^2} \quad (5.8)$$

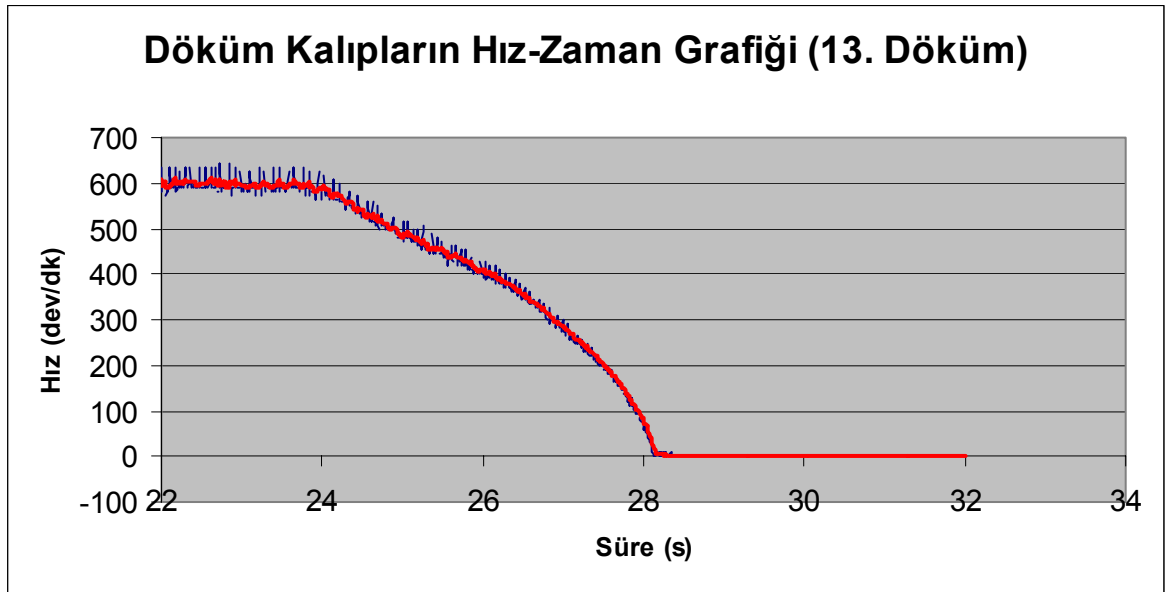
durumunu alır.

Eşitlikte hesaplanan vizkozite, “görünür vizkozite” dir. Newtonyen sıvılarda, kesme gerilmesinin, kesme hızına (γ) oranına vizkozite denir. Tiksotropik sıvılar ise newtonyen olmayan sıvılardır ve viskoziteleri zamana bağlıdır. Yukarıdaki newtonyen Vizkozite eşitliğine bağlı olarak hesaplanan vizkoziteye bu nedenle “görünür vizkozite” denir. Vizkozite ölçümlerinin manalı olabilmesi için kesme hızının mutlaka belirtilmesi gereklidir.

Eşitlik 5.3 de hesaplama yapabilmek için öncelikle döküm kalıplarının durana kadar geçen sürede etkiyen torkun hesap edilmesi gerekir. Tork (M) ; sistemin eylemsizlik momenti (I_{sistem}) ile açısal ivmesinin (α) çarpımına eşittir. Yani;

$$M = I_{\text{sistem}} \cdot \alpha \text{ dır.} \quad (5.9)$$

Sıvama döküm sisteminde kullanılan kalıpların durana kadar sahip olduğu açısal ivmenin bulunması için kalıpların durana kadar geçen sürede çizdiği hız-zaman grafiğine ihtiyacımız vardır. Bu grafik aşağıda verilmiştir.



Şekil 5.61 13.Döküm deneyinde döküm kalıplarının dev/dk olarak hızının zamana bağlı değişimi.

Bu grafikten döküm kalıplarını durana kadar yaklaşık sabit ivmeli bir hareket yaptığını yani döküm süresinin herhangi bir anında kalıplara etkiyen torkun sabit olduğunu anlarız. Eğer dökümün başlangıcından durana kadar geçen süreyi $t = 5$ s olarak alırsak ve kalıpların açısal hızı da 600 dev/dk (62,8 rad/s) ise kalıpların açısal ivmesi $\alpha = -12,56 \text{ rad/s}^2$ olur. İvmenin negatif olması kalıpların yavaşlamasından ileri gelmektedir.

Açısal ivmeden sonra eylemsizlik momentinin hesaplanmasına geçilebilir. Eylemsizlik momenti aşağıdaki formülle hesap edilir.

$$I_{\text{sistem}} = \int r^2 dm \quad (5.10)$$

Alt kalıbımız döküm kalıbı ve ona bağlı olan eylemsizlik yaratması için savurma döküm makinesine takılmış bilezikten meydana gelmektedir. Bu iki cismin ağırlıkları sırasıyla yaklaşık olarak 57,74 kg. ve 400 kg. dır. Eylemsizlik formülü sıvama döküm sistemi için aşağıdaki duruma dönüşür.

$$I_{\text{sistem}} = I_{\text{bilezik}} + I_{\text{altkalıp}} \quad (5.11)$$

$$I_{\text{bilezik}} = (1/2) * M_{\text{küttele(bilezik)}} * R_{\text{bilezik}}^2 \quad (5.12)$$

$$I_{\text{altkalıp}} = (1/2) * M_{\text{küttele(altkalıp)}} * (R_1^2 + R_2^2) \quad (5.13)$$

Eşitlik 5.8 de R_1 : Alt kalıbın iç çapı, R_2 : Alt kalıbın dış çapıdır.

Alt kalıp daha hassas bir hesaplama için 5 farklı parçaya ayrılabilir. Alt Kalıbın eğik kesimlerinde ortalama yarıçaplar dikkate alınarak eşitlik düzenlenirse;

$$I_{\text{sistem}} = [(1/2) * (400) * (0,880/2)^2] + [1/2 * 12,16 * (0,09^2 + 0,024^2) + 1/2 * 3,24 * (0,09^2 + 0,0335^2) + 1/2 * 23,2 * (0,116^2 + 0,0335^2) + 1/2 * 11,31 * (0,116^2 + 0,036^2) + 1/2 * 7,75 * (0,116^2 + 0,028^2)]$$

$$I_{\text{sistem}} = 38,72 + 0,3759 = 39,096 \text{ kg.m}^2$$

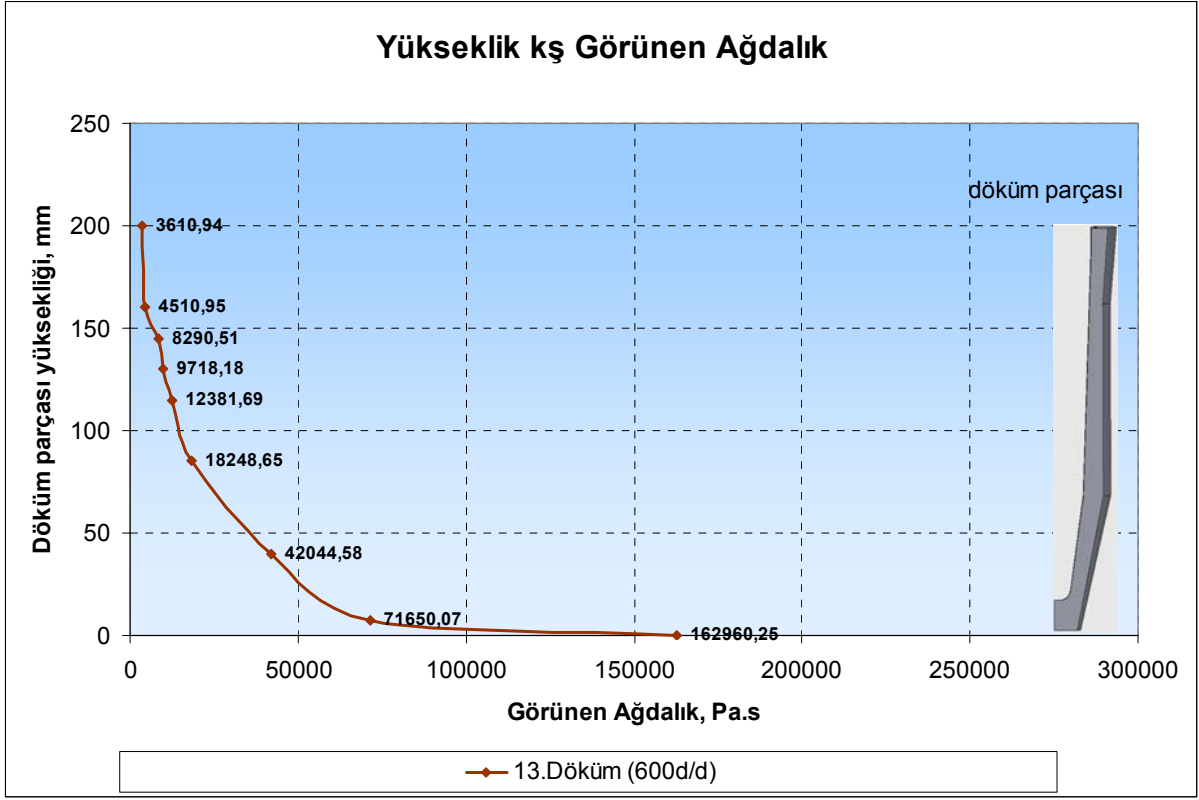
değeri bulunur. Bu değer Tork formülünde yerine konulursa döküm kalıplarına durana kadar etkileyen tork değeri,

$$M = I_{\text{sistem}} * \alpha = 39,096 \text{ kg.m}^2 * 12,56 \text{ rad/s}^2 = 491,0457 \text{ N.m (rad) elde edilir.}$$

13. Sıvama döküm deneyi'nde, döküm prosesinin 26,5. saniyesi yaklaşık alt kalıbın dönme süresinin yarısına denk gelir ve Şekil 5.61'den verilen sürede kalıpların hızının bu anda 351,4 dev/dk (36,77 rad/s) hızında olduğu görülebilir. Bu değer ve ilgili değerler eşitlik 5.3 de yerine konulursa $t=26,5$ s'de sıvının görünen ağıdalığı döküm kalıplarının en üst noktasında 36109, 37468 Poise veya 3610,937 Pa.s olarak hesap edilmiştir. Görünen ağıdalığın döküm parçası boyunca değişimi şekil 5.62'de görülebilir.

Çizelge 5.4 13. Sıvama döküm parçasının dökümün de görünen ağırlık hesabı için değerler.

Tork, M (dyne-cm)	K (R₁/R₂)	Döküm Parçası Yükseklığı, L (cm)	Açısal Hız, Ω_0 (Ω_2) (rad/s)	İç Silindirin Yarıçapı, R₁ (cm)	Görünen Ağırlık (Pa.s)
4910457000	0,71	20	36,77	2,7	3610,937
4910457000	0,75	16	36,77	2,54	4510,955
4910457000	0,66	14,5	36,77	2,2385	8290,513
4910457000	0,65	13	36,77	2,2	9718,184
4910457000	0,63	11,5	36,77	2,1175	12381,69
4910457000	0,62	8,5	36,77	2,057	18248,65
4910457000	0,61	4	36,77	2	42044,58
4910457000	0,63	2,4	36,77	1,936	71650,07
4910457000	0,58	1,5	36,77	1,694	162960,3
4910457000	0,59	0,75	36,77	1,33	518526

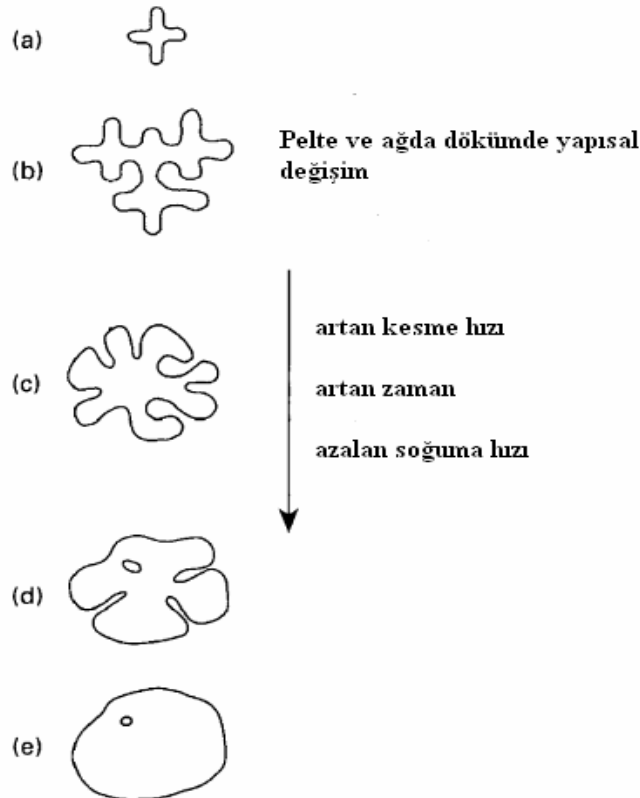


Şekil 5.62 13. Sıvama dökümün 26,5. ssaniyesinde Döküm parçası sıvının görünür ağdalığı

6. SONUÇLAR ve TARTIŞMA

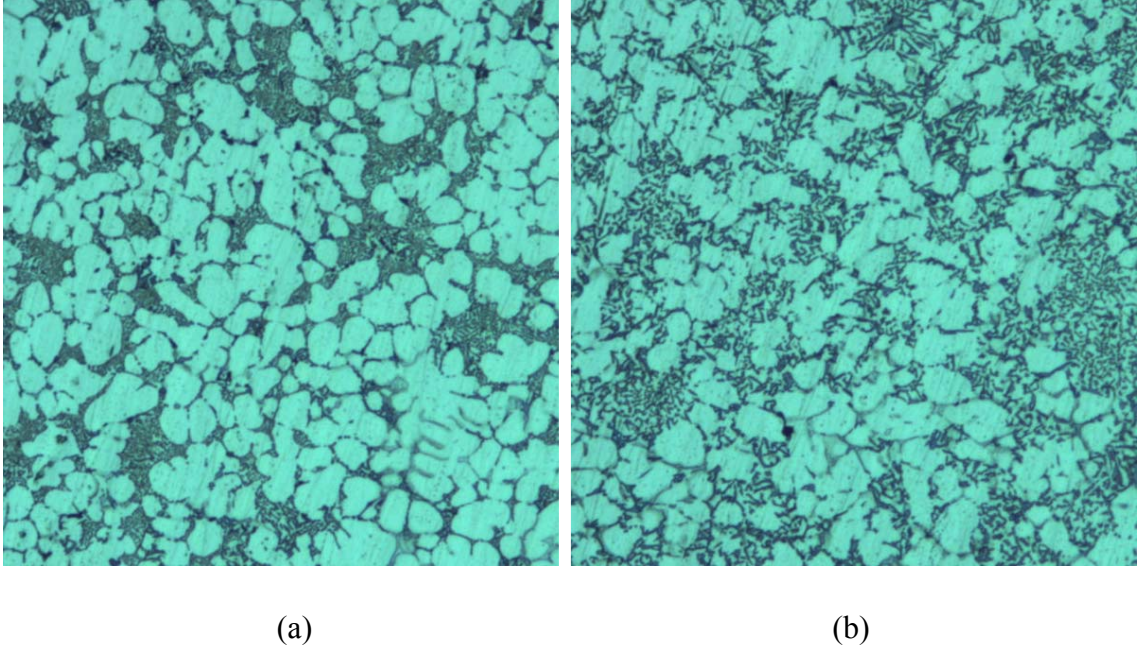
Yeni bir yöntem olan sıvama döküm için döküm makinesi geliştirilmesi uzun zaman ve uğraşı gerektirmiştir. Sıvama döküm deneyleri sonucu üretilen parçaların, aynı döküm makinesi kullanılarak üretilen, sıkıştırılmalı ve savurma döküm parçaları ile kıyaslaması yapılmıştır.

9 ve 13. döküm deneylerinde elde edilen döküm parçasının mikroyapıları incelendiğinde alt kalıba temas eden dış ve üst kalıba temas eden iç kısımların, 14. ve 15. döküm deneylerinden elde edilen mikroyapılara benzer yapılar olduğu anlaşılmıştır. 9. Dökümde ise orta kısımlara ilerledildikçe yapıda dallantılı yapı ile beraber kısmen küresel ve rozetimsi yapılar da gözlemlenmiştir. 13. Dökümde ise dış taraftan içe doğru ilerledildikçe önce dallantılı yapının tamamıyla küresel yapıya döndüğü, küresel yapının rozet yapıya geçiş yaptığı (Şekil 5.6-Şekil 5.13) ve iç tarafta tekrar ince dallantılı yapıya döndüğü gözlemlenmiştir. 9. Dökümle 13. döküm deneyi arasındaki tek fark alt kalıbın dönme hızının 385 dev/dk dan 600 dev/dk ya çıkarılmış olmasıdır. Alt kalıbın dönme hızındaki bu artış Şekil 5.60'ta ki grafikten görülebileceği gibi kesme hızında neredeyse iki katına yakın bir artış meydana getirmektedir.



Şekil 6.1 Ağda dökümde yapının evrimsel gelişimi. (a) başlangıç tanesi; (b) dallantılı yapı; (c) rozet; (d) olgunlaşmış rozet ve (e) küresel (Flemings; 1991).

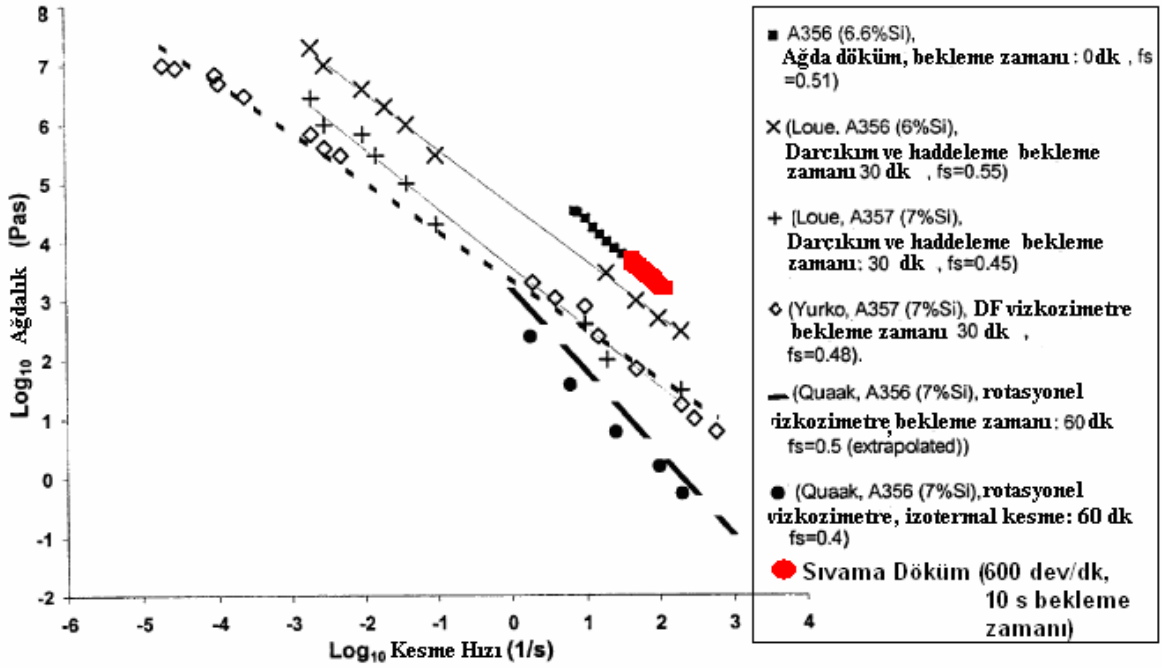
Mikroyapının tam anlamı ile küresel olması için kesme hızının yeterli olduğu düşünülmesine rağmen Şekil 6.1’de görüldüğü gibi, yeterli sürenin olmayışı, mikroyapıyı ağda döküm parçalarının mikroyapısı ile tam dallantılı yapı arasında bir yerde bırakmaktadır. 13. Dökümde alt kalıba temas eden en dış taraftan içeri doğru gelirken dallantılı yapıdan küresel yapı ve sonrada rozet tarzında ki yapı oluşmuştur (Şekil 6.2). Şekil 3.9’da değişik alüminyum alaşımlarının soğuma hızları ile dallantı kolları arası mesafe arasındaki ilişki görülmektedir. Sıkıştırılmalı, sıvama ve savurma döküm deneylerinde elde edilen ikincil dallantı kolları arası mesafe yaklaşık olarak ortalama 15 μm civarında ölçülmüştür. Şekil 3.9’ da ki grafiğe göre bu değer yaklaşık 20 ile 40 $^{\circ}\text{C/s}$ soğuma hızına karşılık gelmektedir. Bu çok yüksek soğuma hızı, mikroyapının tam küresel duruma dönüşecek evrimleşmeye fırsat bulamadığını göstermektedir.



Şekil 6.2 13. (Sıvama) dökümün 4.4 (a) ve 4.6 (b) no’lu numunelerinin mikroyapısı

Sıvı üzerine etkileyen kesme etkisinin iki nedenden dolayı olduğu düşünülmektedir. Bu nedenlerden birincisi, dış ve iç taraftan büyüyen dallantı kollarının birbirini kırması, ikincisi ise üst kalıbın kapanması ile birlikte hızla yukarı doğru yükselen sıvının büyüyen dallantı kollarını koparmasıdır. Dolayısıyla bölüm 5.7 te hesap edilen kesme hızları aslında sıvıya etkileyen tek kesme gerilmesi değildir. Yukarı doğru yükselen sıvının dallantıları kopararak diğer parçacıklarla yukarı taşınması Şekil 5.13 ve Şekil 5.21 de 7 No’lu numunenin orta kısımlarından anlaşılmaktadır. Bu yukarı taşınan parçacıklar katılaşma süreci boyunca çekirdek merkezleri olarak da görev yapmaktadırlar. Sıvı üzerine etkileyen kesme hızının

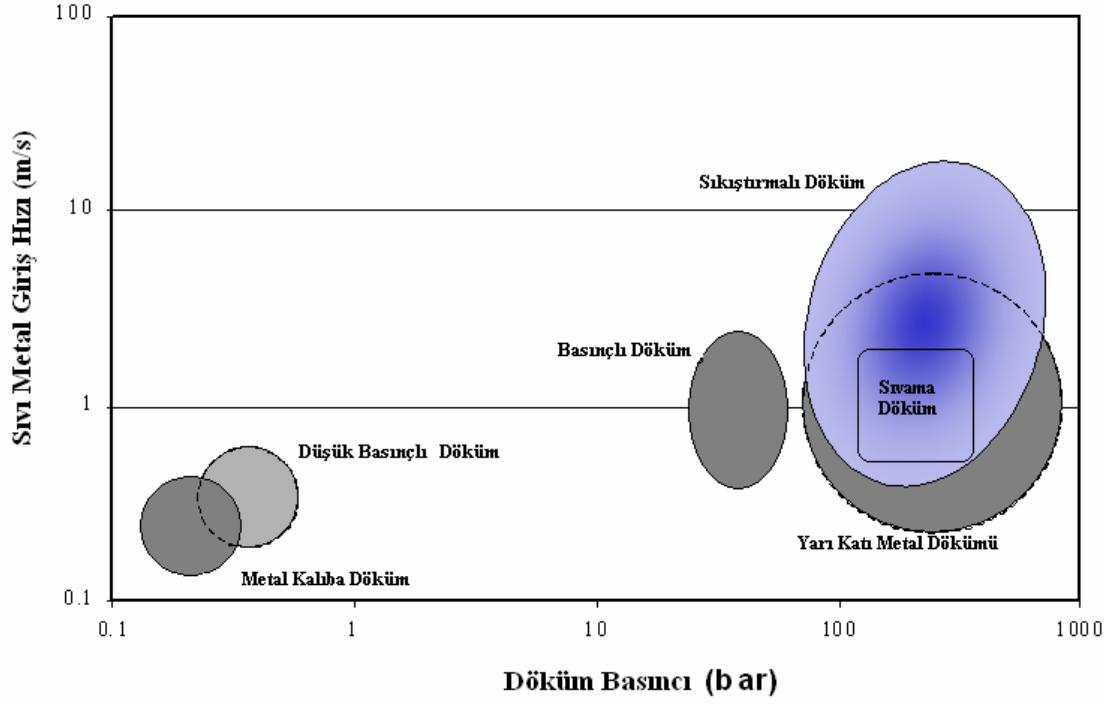
yüksekliğe bağlı değişimi Şekil 5.60'da verilmişti. Değişik araştırmacıların farklı alüminyum alaşımları ve farklı üretim teknikleri ile yaptıkları çalışmalardan elde ettikleri kesme hızı-ağdalık değerleri Şekil 6.3'de görülebilir.



Şekil 6.3 Değişik çalışmalarda elde edilmiş kesme hızı-ağdalık ilişkisi (Atkinson, 2004)

Bu çalışmada bulunan kesme hızı değerleri ile Atkinson'ın %6.6 Si içeren A356 alaşımı kullanarak bulduğu kesme hızı ve ağdalık değerleri birbirine yakınlık göstermektedir. 13. Döküm deneyinde kesme hızı değerleri parçanın aşağısından yukarı doğru sırasıyla 80 1/s ile 200 1/s arasında değişmektedir. Atkinson'ın çalışmasında, kesme hızının 200 1/s olduğu durumda ağdalık 3500 Pas değerindedir. Bu çalışma da ise 13. döküm için kesme hızının 175 1/s olduğu durumda parçanın en üst kısmında ağdalık değeri $t=26,5$ s'de döküm kalıplarının en üst noktasında 3610,937 Pas, döküm parçasının en altından 40 mm yukarıda ise 42044,58 Pa.s olarak hesap edilmiştir. Bununla birlikte yeterli evrim zamanının olmayışı ve soğuma hızının sıvama dökümde yüksek olması yapının tam küresel olmasını engellemektedir.

Hız/Basınç Kıyaslaması



Şekil 6.4 Döküm yöntemlerinin kıyaslanması (Vinarcik, 2002)

Sonuç olarak “Sıvama Döküm” ün, sağladığı ek akışkanlık nedeniyle silindirik ve ince cidarlı parçaların üretiminde kullanılabileceği kanıtlanmıştır.

KAYNAKLAR

- Abbaschian R. and Reed-Hill R., (1992) "Physical Metallurgy Principles," PWS-Kent Publishers Aluminum Casting Technology 2nd Edition (2001), American Foundry Society
- Atasoy, O.A., Yılmaz, F., Elliot, R. (1984), "Growth Structures in Aluminium-Silicon Alloys. I. The coupled zone" Journal of Crystal Growth 66, 137-146
- Atasoy, O.A ile özel görüşme, 2007
- Atkinson, H.V. (2005), "Modelling the semi-solid processing of metallic alloys", Progress in Materials Science, 50, 341-412.
- A.S.M. Handbook, (1992), Casting, 2nd edition, vol.15.
- Chadwick, G.A. ve Stubbington, C.A. (1991) "High quality squeeze casting of monolithic and of reinforced aluminium alloys", The Foundrymen, December, 471-474
- Campell, J. Ve Met, M. (1975) "Rheocasting and Thixocasting-A review of Progress To Date", Foundry Trade Journal 3037, 291-295.
- Clegg, A.J. (1991), Precision Casting Processes, Pergamon Press, United Kingdom, 200-207.
- Dahle A.K. ve StJohn D.H. (1999) "Rheological Behaviour Of The Mushy Zone And Its Effect On The Formation Of Casting Defects During Solidification", Acta Mater. Vol:47 no.1, 31-41.
- Flemings, M.C. (1991) "Behavior of Metal Alloys in the Semisolid State", Metallurgical Transactions B, vol. 22B June, 269-293
- Franklin, J.R. ve Das, A.A. (1984) "Squeeze Casting – A Review of the Status", British Foundrymen, 150-158.
- Ghomashchi, M.R. ve Vikhrov, A. (2000) "Squeeze casting: an overview", Journal of Materials Processing Technology, 101, 1-9
- Kınıkoğlu, N.G., (1999) "Özel Döküm Yöntemleri Dersi Notları", Yıldız Teknik Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü (yayınlanmamış), İstanbul, 227-242.
- Kınıkoğlu, N.G., (1999) "Katılma Ders Notları", Yıldız Teknik Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü (yayınlanmamış), İstanbul
- Konczos G., Barsony I., Deak P., (1998) "Introduction to Materials Science and Technology" Textbook of the Technical University of Budapest for Ph.D Students in Physics.
- Lee J.H., Kim H.S., Hong S.I., Won C.W., Cho S.S., Chun B.S., (1999) "Effect of die geometry on the microstructure of indirect squeeze cast and gravity die cast 5083 wrought Al alloy and numerical analysis of the cooling behavior" Journal of Materials Processing Technology, (96), 188-197
- Luş, M., (1999) "Dövme (Sıkıştırılmalı) Döküm", Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Matsumoto, N., Young, R.P., Mehrabian, R., Flemings, M.C., et. al., (1975) "Rheocasting of Ferrous Alloys – Ferrous Die Casting Economics", GT75-153, Cambridge.

- Rutter J.W., Chalmers B.A. (1953) "Prismatic Substructure Formed During Solidification of Metals" *Can. J. Phys.* , 31, 15-39
- Ruxanda, R. Stefanescu, D. M (2002), "Graphite shape characterisation in cast iron - from visual estimation to fractal dimension", *International Journal of Cast Metal Research*, Vol 14, No 4, 207-216
- Spencer D.B., Mehrabian R., Flemings M.C. (1972), "Rheological Behavior of Sn-15 Pct. Pb in the Crystallization Range ", *Metallurgical Transactions*, Vol 3, 1925-1932
- Stefanescu, D. M., (2002), "Science and Engineering of Casting Solidification", Kluwer Academic.
- Sumitomo T. , StJohn D.H. , Steinberg T. (2000) "The shear behaviour of partially solidified Al-Si-Cu alloys", *Materials Science and Engineering*, A289, 18-29
- Suzuki, S. (1989) "Vertical Squeeze Casting of Aluminum Components", *Modern Casting*, October, 38-40.
- Taylor, R. P., McClain, S. T., and Berry, J. T., (1999) "Uncertainty Analysis of Metal-Casting Porosity Measurements Using Archimedes' Principle," *International Journal of Cast Metals*, Vol. 11 No.4, 247-257.
- The North American Die Casting Association (NADCA), (1999), "Product Specification Standards for Semi-Solid And Squeeze Casting Processes", Rosemont, Illinois, 2-9.
- Tr-patent: No: Tr-1997-0056000568-b, Kınıkoğlu N.G., 2003 "Sıvama Döküm"
- Triveño Rios C., Caram R., Bolfarini C., Botta F. W.J. ve Kiminami C.S. (2003) "Intermetallic Compounds In The Al-Si-Cu System", *Acta Microscopica*, vol:12, 77-81
- Vinarcik E.J. (2002) "High Integrity Die Casting Processes", John Wiley and Sons, Inc
- Yue, T.M. (1997) "Squeeze Casting of High-Strength Aluminium Wrought Alloy AA7010", *Journal of Materials Processing Technology*, 66 179-185
- Zoqui E.J., Shehata M.T., Paes M., Kao V., Es-Sadiqi E. (2002) "Morphological evolution of SSM A356 during partial remelting" *Materials Science and Engineering: A*, Vol 325, Number 1, 38-53 (16)

INTERNET KAYNAKLARI

- [1] www.gpm2.inpg.fr
- [2] www.aluminium.matter.org.uk
- [3] <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu>

EKLER**Ek 1. Küresellik analiz için görüntü analiz programından alınan verilere örnek (0-3)**

Number	Area (μm^2)	X FCP	Y FCP	Roundness	EquivDiam (μm)
1	488.610	560.000	62.000	5.798	24.942
2	15.217	1.009.000	68.000	1.224	4.402
3	56.442	146.000	70.000	1.597	8.477
4	34.585	1.072.000	71.000	1.322	6.636
5	44.822	1.224.000	74.000	1.297	7.554
6	6.640	536.000	75.000	1.508	2.908
7	22.411	380.000	78.000	1.197	5.342
8	7.470	1.058.000	79.000	1.222	3.084
9	78.023	515.000	84.000	1.155	9.967
10	2.213	882.000	89.000	1.346	1.679
11	47.865	765.000	94.000	1.941	7.807
12	121.737	1.086.000	94.000	2.489	12.450
13	140.828	58.000	99.000	3.047	13.391
14	345.845	601.000	99.000	4.139	20.984
15	397.583	77.000	103.000	4.168	22.499
16	9.407	523.000	103.000	1.487	3.461
17	4.980	924.000	103.000	1.500	2.518
18	99.327	540.000	108.000	1.141	11.246
19	118.694	559.000	112.000	1.743	12.293
20	1.383	963.000	112.000	1.496	1.327
21	32.094	1.162.000	115.000	1.364	6.392
22	3.320	480.000	118.000	1.402	2.056
23	688.093	497.000	118.000	8.479	29.599
24	107.074	649.000	118.000	2.381	11.676
25	16.324	221.000	119.000	1.553	4.559
26	20.751	234.000	119.000	1.153	5.140
27	3.043	1.084.000	120.000	1.333	1.969
28	4.980	1.101.000	122.000	1.201	2.518
29	1.383	233.000	123.000	1.496	1.327
30	14.664	327.000	123.000	1.187	4.321
31	1.383	474.000	123.000	1.496	1.327
32	1.383	768.000	123.000	1.496	1.327
33	1.383	470.000	126.000	1.496	1.327
34	136.401	885.000	128.000	2.295	13.178
35	16.047	874.000	129.000	1.239	4.520
36	225.768	978.000	129.000	1.927	16.955
37	2.213	1.001.000	130.000	1.346	1.679
38	8.300	283.000	133.000	1.207	3.251
39	238.218	790.000	133.000	3.615	17.416
40	94.347	583.000	135.000	1.137	10.960
41	1.672.230	1.173.000	135.000	25.446	46.143
42	127.271	547.000	136.000	1.259	12.730

43	1.383	1.181.000	137.000	1.496	1.327
44	16.324	993.000	138.000	1.298	4.559
45	79.129	478.000	142.000	1.845	10.037
46	21.857	538.000	144.000	1.160	5.275
47	3.320	283.000	147.000	1.402	2.056
48	27.114	872.000	148.000	1.411	5.876
49	66.402	307.000	150.000	1.399	9.195
50	1.772.940	597.000	152.000	14.200	47.512
51	784.653	1.205.000	153.000	6.752	31.608
52	13.557	248.000	154.000	1.197	4.155
53	20.751	341.000	154.000	1.153	5.140
54	50.908	269.000	155.000	2.348	8.051
55	2.213	1.168.000	161.000	1.346	1.679
56	22.687	1.213.000	163.000	1.117	5.375
57	156.322	518.000	164.000	2.169	14.108
58	10.790	1.149.000	164.000	1.613	3.707
59	27.114	324.000	166.000	1.161	5.876
60	6.640	989.000	167.000	1.948	2.908
61	15.494	156.000	169.000	1.123	4.442
62	213.871	558.000	169.000	2.206	16.502
63	75.533	143.000	172.000	1.267	9.807
64	6.640	849.000	177.000	1.125	2.908
65	23.241	130.000	178.000	1.219	5.440
66	115.651	401.000	178.000	2.244	12.135
67	1.054.689	178.000	179.000	15.056	36.645
68	7.194	980.000	179.000	1.798	3.026
69	224.661	1.176.000	180.000	3.947	16.913
70	78.023	429.000	182.000	2.547	9.967
71	6.087	857.000	184.000	1.645	2.784
72	107.904	332.000	186.000	1.197	11.721
73	1.383	346.000	186.000	1.496	1.327
74	195.887	222.000	187.000	2.190	15.793
75	19.644	805.000	188.000	1.147	5.001
76	3.043	863.000	188.000	1.333	1.969
77	10.514	1.181.000	189.000	1.230	3.659
78	4.703	313.000	190.000	1.271	2.447
79	33.754	980.000	195.000	1.134	6.556
80	26.561	952.000	204.000	1.310	5.815
81	95.730	393.000	206.000	2.076	11.040
82	66.679	195.000	207.000	1.117	9.214
83	7.747	330.000	207.000	1.178	3.141
84	2.213	319.000	208.000	1.346	1.679
85	39.011	236.000	209.000	1.274	7.048
86	84.386	588.000	210.000	1.730	10.366
87	61.145	411.000	213.000	1.904	8.823
88	94.347	668.000	214.000	2.511	10.960
89	15.494	1.179.000	214.000	1.123	4.442
90	3.597	1.105.000	216.000	1.473	2.140
91	1.383	885.000	217.000	1.496	1.327
92	29.881	948.000	217.000	1.164	6.168
93	1.383	1.238.000	224.000	1.496	1.327
94	21.027	343.000	226.000	1.206	5.174
95	40.671	416.000	227.000	1.124	7.196
96	3.320	664.000	227.000	1.222	2.056
97	147.745	996.000	228.000	2.051	13.715

98	362.722	1.135.000	228.000	3.424	21.490
99	703.587	1.199.000	228.000	6.890	29.931
100	29.881	376.000	230.000	1.164	6.168
101	507.147	647.000	230.000	5.347	25.411
102	53.952	574.000	232.000	1.077	8.288
103	153.832	391.000	235.000	3.149	13.995
104	13.280	229.000	238.000	1.310	4.112
105	178.456	859.000	238.000	2.472	15.074
106	87.430	1.192.000	241.000	1.367	10.551
107	64.742	936.000	242.000	1.392	9.079
108	39.011	412.000	243.000	1.172	7.048
109	39.288	1.150.000	243.000	1.114	7.073
110	29.051	653.000	245.000	1.256	6.082
111	17.154	192.000	248.000	1.159	4.673
112	36.798	426.000	249.000	1.139	6.845
113	24.901	478.000	250.000	1.264	5.631
114	16.601	798.000	251.000	1.198	4.597
115	31.541	203.000	255.000	1.103	6.337
116	43.991	865.000	256.000	1.582	7.484
117	26.008	408.000	257.000	1.149	5.754
118	15.494	652.000	257.000	1.283	4.442
119	2.767	759.000	258.000	1.264	1.877
120	46.205	393.000	259.000	1.258	7.670
121	3.320	436.000	260.000	1.402	2.056
122	372.406	74.000	265.000	3.473	21.775
123	1.383	610.000	265.000	1.496	1.327
124	8.300	217.000	267.000	1.207	3.251
125	9.960	206.000	268.000	1.197	3.561
126	17.431	402.000	270.000	1.216	4.711
127	12.727	878.000	270.000	1.185	4.026
128	3.043	947.000	271.000	1.333	1.969
129	4.427	226.000	272.000	1.197	2.374
130	12.450	214.000	276.000	1.124	3.982
131	571.889	345.000	276.000	6.322	26.984
132	52.845	962.000	277.000	1.142	8.203
133	40.671	739.000	280.000	1.323	7.196
134	16.877	275.000	281.000	1.256	4.636
135	11.620	187.000	283.000	1.298	3.846
136	57.549	196.000	283.000	1.762	8.560
137	59.485	81.000	284.000	1.515	8.703
138	48.418	936.000	288.000	1.156	7.852
139	20.197	536.000	290.000	1.184	5.071
140	1.383	141.000	291.000	1.496	1.327
141	146.085	353.000	293.000	4.046	13.638
142	17.707	1.074.000	293.000	1.273	4.748
143	21.304	964.000	296.000	1.259	5.208
144	21.027	931.000	301.000	1.206	5.174
145	1.383	1.073.000	303.000	1.496	1.327
146	29.604	1.119.000	323.000	1.292	6.139
147	6.917	1.039.000	324.000	1.197	2.968
148	6.087	379.000	327.000	1.227	2.784
149	3.873	827.000	331.000	1.202	2.221
150	9.130	1.221.000	332.000	1.199	3.410
151	16.877	450.000	335.000	1.178	4.636
152	15.217	1.135.000	336.000	1.144	4.402

153	5.534	158.000	337.000	1.350	2.654
154	3.043	580.000	340.000	1.333	1.969
155	57.549	673.000	340.000	1.566	8.560
156	29.051	465.000	342.000	1.140	6.082
157	12.174	474.000	345.000	1.430	3.937
158	5.534	156.000	346.000	1.212	2.654
159	83.003	645.000	347.000	1.844	10.280
160	6.917	881.000	348.000	1.583	2.968
161	13.004	638.000	350.000	1.432	4.069
162	42.055	827.000	352.000	1.181	7.318
163	5.257	468.000	353.000	1.275	2.587
164	18.261	666.000	353.000	1.089	4.822
165	56.995	453.000	354.000	1.139	8.519
166	8.024	358.000	357.000	1.743	3.196
167	8.577	816.000	357.000	1.631	3.305
168	15.771	640.000	362.000	1.261	4.481
169	4.150	667.000	362.000	1.441	2.299
170	27.114	796.000	362.000	1.221	5.876
171	43.715	872.000	364.000	1.592	7.461
172	25.178	1.158.000	367.000	1.250	5.662
173	17.154	657.000	368.000	2.028	4.673
174	12.450	932.000	369.000	1.496	3.982
175	1.383	792.000	370.000	1.496	1.327
176	457.899	402.000	373.000	5.760	24.146
177	176.519	594.000	376.000	2.136	14.992
178	32.371	1.147.000	376.000	1.729	6.420
179	11.620	1.200.000	376.000	1.113	3.846
180	2.213	1.115.000	380.000	1.346	1.679
181	4.980	328.000	381.000	1.346	2.518
182	10.237	505.000	384.000	1.164	3.610
183	61.145	1.105.000	387.000	3.184	8.823
184	5.257	929.000	389.000	1.421	2.587
185	29.881	112.000	397.000	1.465	6.168
186	1.383	434.000	397.000	1.496	1.327
187	93.793	658.000	403.000	1.274	10.928
188	2.213	834.000	404.000	1.346	1.679
189	13.004	1.007.000	404.000	1.160	4.069
190	7.747	811.000	405.000	1.413	3.141
191	1.383	1.020.000	409.000	1.496	1.327
192	152.172	1.215.000	411.000	1.767	13.919
193	361.616	780.000	416.000	4.359	21.457
194	32.371	763.000	417.000	2.457	6.420
195	18.537	1.203.000	417.000	1.969	4.858
196	44.822	794.000	421.000	1.154	7.554
197	48.695	394.000	423.000	1.851	7.874
198	13.004	166.000	424.000	1.160	4.069
199	49.802	871.000	424.000	1.167	7.963
200	163.516	845.000	427.000	2.009	14.429
201	81.896	1.179.000	427.000	1.617	10.211
202	3.043	1.164.000	428.000	1.333	1.969
203	11.620	174.000	429.000	1.113	3.846
204	2.213	860.000	430.000	1.346	1.679
205	5.534	758.000	432.000	1.350	2.654
206	19.091	1.085.000	432.000	1.180	4.930
207	50.632	415.000	434.000	1.328	8.029

208	27.944	364.000	435.000	1.126	5.965
209	21.304	1.035.000	436.000	1.477	5.208
210	19.921	183.000	438.000	1.272	5.036
211	147.192	324.000	440.000	1.924	13.690
212	214.424	830.000	442.000	1.973	16.523
213	5.534	849.000	443.000	1.350	2.654
214	30.711	1.118.000	444.000	1.133	6.253
215	8.300	987.000	445.000	1.207	3.251
216	19.367	102.000	447.000	1.164	4.966
217	34.585	1.029.000	447.000	1.106	6.636
218	16.601	76.000	448.000	1.706	4.597
219	43.991	417.000	448.000	2.438	7.484
220	48.418	724.000	449.000	1.751	7.852
221	3.043	823.000	450.000	1.530	1.969
222	76.086	199.000	452.000	2.154	9.843
223	71.382	767.000	452.000	1.949	9.533
224	4.150	835.000	454.000	1.441	2.299
225	16.324	176.000	456.000	1.066	4.559
226	1.383	308.000	458.000	1.496	1.327
227	6.640	1.217.000	459.000	1.247	2.908
228	6.917	1.231.000	461.000	1.197	2.968
229	5.810	789.000	465.000	1.286	2.720
230	45.098	828.000	468.000	1.439	7.578
231	46.482	426.000	469.000	1.498	7.693
232	8.024	1.140.000	470.000	1.364	3.196
233	3.320	1.225.000	470.000	1.801	2.056
234	14.387	486.000	471.000	1.210	4.280
235	6.640	782.000	471.000	1.508	2.908
236	23.241	1.103.000	472.000	1.425	5.440
237	45.652	1.164.000	473.000	3.198	7.624
238	9.130	272.000	474.000	1.199	3.410
239	28.221	405.000	476.000	1.356	5.994
240	1.383	624.000	476.000	1.496	1.327
241	21.304	211.000	477.000	1.796	5.208
242	86.876	755.000	478.000	1.887	10.517
243	85.216	1.082.000	479.000	1.554	10.416
244	1.383	461.000	481.000	1.496	1.327
245	52.845	658.000	485.000	1.142	8.203
246	2.213	845.000	485.000	1.346	1.679
247	78.576	187.000	487.000	2.529	10.002
248	51.738	1.143.000	490.000	1.742	8.116
249	22.134	360.000	492.000	1.572	5.309
250	97.390	1.107.000	492.000	1.918	11.136
251	78.023	496.000	493.000	1.155	9.967
252	56.442	769.000	493.000	1.502	8.477
253	1.383	1.225.000	493.000	1.496	1.327
254	1.383	217.000	495.000	1.496	1.327
255	4.427	1.004.000	495.000	1.687	2.374
256	113.160	97.000	496.000	2.173	12.003
257	468.689	810.000	496.000	5.470	24.429
258	76.363	62.000	498.000	1.290	9.860
259	1.383	1.005.000	498.000	1.496	1.327
260	1.383	649.000	499.000	1.496	1.327
261	34.861	405.000	500.000	1.202	6.662
262	19.091	1.216.000	500.000	1.253	4.930

263	41.225	426.000	501.000	2.899	7.245
264	8.577	305.000	502.000	1.390	3.305
265	16.601	1.139.000	502.000	1.198	4.597
266	3.873	1.208.000	502.000	1.929	2.221
267	271.973	380.000	503.000	4.679	18.609
268	16.601	361.000	504.000	1.527	4.597
269	18.814	780.000	504.000	1.940	4.894
270	39.841	831.000	505.000	1.459	7.122
271	593.470	1.168.000	505.000	9.980	27.489
272	12.174	1.014.000	506.000	1.239	3.937
273	56.165	79.000	507.000	1.114	8.456
274	6.640	1.189.000	510.000	1.125	2.908
275	6.364	1.215.000	510.000	1.174	2.846
276	5.810	408.000	511.000	1.286	2.720
277	14.664	1.134.000	511.000	1.106	4.321
278	2.490	791.000	512.000	1.870	1.781
279	1.383	1.037.000	515.000	1.496	1.327
280	14.664	358.000	516.000	1.445	4.321
281	3.873	348.000	517.000	1.544	2.221
282	4.427	805.000	519.000	1.351	2.374
283	198.100	892.000	520.000	2.288	15.882
284	2.213	1.095.000	522.000	1.580	1.679
285	2.213	744.000	523.000	1.580	1.679
286	3.043	391.000	525.000	1.530	1.969
287	3.320	855.000	526.000	1.222	2.056
288	14.387	817.000	530.000	1.473	4.280
289	39.288	1.206.000	530.000	1.896	7.073
290	362.169	601.000	532.000	2.240	21.474
291	11.344	970.000	533.000	1.233	3.800
292	20.474	834.000	534.000	1.783	5.106
293	198.100	635.000	539.000	2.948	15.882
294	13.834	464.000	541.000	1.437	4.197
295	88.260	891.000	541.000	1.501	10.601
296	251.499	456.000	544.000	4.092	17.895
297	24.901	653.000	544.000	1.264	5.631
298	93.240	372.000	547.000	2.589	10.896
299	158.259	435.000	550.000	3.223	14.195
300	6.917	658.000	550.000	1.583	2.968
301	14.941	363.000	556.000	1.165	4.362
302	2.767	75.000	557.000	1.264	1.877
303	44.268	52.000	558.000	1.466	7.508
304	90.473	793.000	558.000	2.619	10.733
305	3.659.317	39.000	561.000	31.656	68.258
306	18.814	661.000	562.000	1.271	4.894
307	16.601	384.000	563.000	1.122	4.597
308	220.787	1.001.000	564.000	2.970	16.767
309	1.383	52.000	565.000	1.496	1.327
310	16.601	330.000	565.000	2.095	4.597
311	9.130	644.000	565.000	1.199	3.410
312	200.590	238.000	568.000	2.139	15.981
313	60.869	433.000	570.000	1.481	8.803
314	208.890	954.000	570.000	2.664	16.309
315	12.727	307.000	571.000	1.367	4.026
316	28.498	1.141.000	572.000	1.221	6.024
317	61.699	801.000	576.000	1.374	8.863

318	1.383	244.000	577.000	1.496	1.327
319	9.130	1.006.000	578.000	1.199	3.410
320	9.407	300.000	579.000	1.375	3.461
321	249.562	365.000	580.000	4.050	17.826
322	2.213	888.000	583.000	1.580	1.679
323	156.322	1.175.000	584.000	1.938	14.108
324	32.648	1.128.000	590.000	1.227	6.447
325	7.470	978.000	592.000	1.222	3.084
326	11.344	732.000	600.000	1.140	3.800
327	36.498.270	1.026.000	600.000	334.671	215.572
328	22.687	306.000	608.000	1.387	5.375
329	3.873	1.044.000	608.000	1.202	2.221
330	3.043	565.000	611.000	1.333	1.969
331	45.098	687.000	612.000	1.102	7.578
332	125.611	660.000	613.000	1.886	12.646
333	18.814	175.000	614.000	1.198	4.894
334	5.257	604.000	620.000	1.421	2.587
335	3.320	640.000	621.000	1.402	2.056
336	310.154	443.000	623.000	3.747	19.872
337	14.387	589.000	623.000	1.382	4.280
338	1.383	972.000	625.000	1.496	1.327
339	3.873	310.000	626.000	1.202	2.221
340	113.437	460.000	626.000	1.612	12.018
341	4.427	1.026.000	626.000	1.351	2.374
342	37.351	1.005.000	628.000	1.224	6.896
343	371.299	327.000	630.000	5.887	21.743
344	2.213	973.000	630.000	1.346	1.679
345	1.383	304.000	631.000	1.496	1.327
346	9.407	464.000	635.000	1.164	3.461
347	32.648	611.000	637.000	1.227	6.447
348	13.004	1.055.000	637.000	1.840	4.069
349	18.261	646.000	639.000	1.234	4.822
350	32.094	969.000	651.000	1.192	6.392
351	2.213	368.000	655.000	1.580	1.679
352	8.854	782.000	658.000	1.461	3.358
353	5.534	1.005.000	658.000	1.350	2.654
354	6.087	1.145.000	659.000	1.360	2.784
355	1.383	905.000	660.000	1.496	1.327
356	68.892	981.000	660.000	1.308	9.366
357	3.873	767.000	662.000	1.202	2.221
358	21.857	739.000	663.000	1.227	5.275
359	14.664	756.000	664.000	1.537	4.321
360	8.024	893.000	664.000	1.248	3.196
361	2.715.022	1.201.000	664.000	19.390	58.795
362	2.213	915.000	666.000	1.346	1.679
363	2.767	292.000	667.000	1.264	1.877
364	96.837	569.000	667.000	1.170	11.104
365	1.383	1.122.000	667.000	1.496	1.327
366	4.427	1.103.000	668.000	1.351	2.374
367	2.213	625.000	669.000	1.346	1.679
368	69.446	957.000	670.000	1.545	9.403
369	3.320	914.000	671.000	1.402	2.056
370	2.213	311.000	672.000	1.346	1.679
371	2.651.663	874.000	673.000	26.134	58.105
372	2.336.529	1.080.000	673.000	12.123	54.543

373	34.031	595.000	676.000	1.231	6.583
374	40.395	763.000	678.000	1.230	7.172
375	63.082	941.000	681.000	1.429	8.962
376	24.347	614.000	683.000	1.227	5.568
377	6.640	777.000	683.000	1.125	2.908
378	10.514	1.177.000	684.000	1.230	3.659
379	65.019	563.000	687.000	1.146	9.099
380	17.707	1.015.000	694.000	1.273	4.748
381	164.346	991.000	695.000	2.539	14.466
382	28.221	276.000	696.000	1.356	5.994
383	9.407	754.000	700.000	1.375	3.461
384	10.237	777.000	703.000	1.263	3.610
385	11.344	621.000	705.000	1.140	3.800
386	102.093	956.000	706.000	3.373	11.401
387	1.383	755.000	708.000	1.496	1.327
388	562.482	863.000	708.000	5.064	26.761
389	95.453	879.000	708.000	1.603	11.024
390	107.074	598.000	710.000	1.429	11.676
391	7.470	650.000	711.000	1.222	3.084
392	1.383	55.000	712.000	1.496	1.327
393	123.674	37.000	722.000	3.233	12.549
394	4.980	843.000	722.000	1.201	2.518
395	14.941	852.000	722.000	1.165	4.362
396	19.644	479.000	724.000	1.147	5.001
397	4.980	628.000	724.000	1.500	2.518
398	16.877	420.000	725.000	1.178	4.636
399	54.229	577.000	727.000	1.662	8.309
400	737.895	1.025.000	727.000	10.096	30.652
401	40.118	658.000	728.000	1.188	7.147
402	81.066	823.000	729.000	1.360	10.160
403	68.062	600.000	730.000	1.447	9.309
404	131.974	765.000	730.000	3.481	12.963
405	35.691	50.000	731.000	1.122	6.741
406	30.158	1.093.000	731.000	1.269	6.197
407	111.224	694.000	732.000	1.103	11.900
408	25.731	722.000	732.000	1.101	5.724
409	22.964	672.000	733.000	1.234	5.407
410	46.482	405.000	735.000	1.711	7.693
411	32.094	513.000	735.000	1.084	6.392
412	5.257	666.000	736.000	1.275	2.587
413	11.620	828.000	739.000	1.298	3.846
414	597.897	312.000	741.000	6.792	27.591
415	118.971	1.016.000	748.000	2.547	12.308
416	9.684	86.000	750.000	1.336	3.511
417	17.154	832.000	750.000	1.314	4.673
418	18.537	591.000	752.000	1.216	4.858
419	2.213	853.000	753.000	1.346	1.679
420	26.008	661.000	755.000	1.273	5.754
421	43.715	332.000	756.000	1.330	7.461
422	83.003	712.000	757.000	1.292	10.280
423	97.113	1.085.000	757.000	1.503	11.120
424	83.003	1.023.000	759.000	1.596	10.280
425	187.586	692.000	764.000	4.325	15.455
426	6.087	89.000	766.000	1.360	2.784
427	2.213	615.000	766.000	1.580	1.679

428	3.043	804.000	766.000	1.333	1.969
429	502.997	272.000	769.000	6.748	25.307
430	2.213	619.000	769.000	1.580	1.679
431	79.129	533.000	772.000	2.774	10.037
432	54.229	834.000	773.000	1.154	8.309
433	349.442	639.000	775.000	4.190	21.093
434	125.888	95.000	776.000	2.568	12.660
435	9.684	1.001.000	776.000	1.130	3.511
436	21.857	749.000	780.000	1.160	5.275
437	1.107.257	932.000	781.000	12.627	37.547
438	9.684	138.000	785.000	1.231	3.511
439	8.577	943.000	785.000	1.168	3.305
440	128.378	269.000	787.000	2.058	12.785
441	16.047	104.000	789.000	1.239	4.520
442	19.091	650.000	789.000	1.405	4.930
443	12.174	922.000	792.000	1.333	3.937
444	11.620	1.079.000	792.000	1.298	3.846
445	7.747	432.000	793.000	1.178	3.141
446	123.951	83.000	794.000	1.413	12.563
447	2.213	230.000	795.000	1.346	1.679
448	32.094	357.000	796.000	1.880	6.392
449	13.004	95.000	798.000	1.160	4.069
450	4.427	556.000	798.000	1.351	2.374
451	11.067	1.023.000	798.000	1.466	3.754
452	2.767	1.061.000	798.000	1.264	1.877
453	38.735	957.000	803.000	1.231	7.023
454	45.098	1.136.000	805.000	1.388	7.578
455	25.178	78.000	806.000	1.187	5.662
456	15.771	153.000	806.000	1.895	4.481
457	789.357	577.000	806.000	7.503	31.702
458	18.537	1.071.000	806.000	1.216	4.858
459	158.535	601.000	809.000	2.172	14.208
460	71.936	852.000	823.000	1.253	9.570
461	79.959	877.000	825.000	2.853	10.090
462	96.837	498.000	826.000	2.356	11.104
463	12.450	672.000	826.000	1.212	3.982
464	2.213	867.000	826.000	1.346	1.679
465	9.684	916.000	826.000	1.336	3.511
466	3.597	906.000	828.000	1.294	2.140
467	2.213	929.000	828.000	1.346	1.679
468	3.320	846.000	830.000	1.222	2.056
469	1.383	760.000	831.000	1.496	1.327
470	1.026.191	326.000	834.000	7.503	36.147
471	1.383	933.000	834.000	1.496	1.327
472	54.782	960.000	834.000	3.554	8.352
473	1.383	800.000	835.000	1.496	1.327
474	1.383	587.000	836.000	1.496	1.327
475	8.854	879.000	837.000	1.236	3.358
476	8.854	868.000	838.000	1.131	3.358
477	106.797	217.000	840.000	1.938	11.661
478	3.597	798.000	841.000	1.473	2.140
479	2.767	802.000	843.000	1.683	1.877
480	976.113	70.000	844.000	11.266	35.254
481	974.176	991.000	845.000	13.056	35.219
482	94.900	307.000	846.000	1.846	10.992

483	2.767	797.000	846.000	1.264	1.877
484	154.662	34.000	850.000	3.010	14.033
485	12.727	885.000	853.000	1.185	4.026
486	1.383	397.000	857.000	1.496	1.327
487	14.110	234.000	858.000	1.409	4.239
488	1.383	890.000	858.000	1.496	1.327
489	220.511	897.000	858.000	5.095	16.756
490	561.929	262.000	862.000	5.458	26.748
491	183.713	666.000	862.000	1.595	15.294
492	13.280	899.000	864.000	1.497	4.112
493	86.046	919.000	864.000	2.601	10.467
494	4.427	336.000	866.000	1.351	2.374
495	25.731	1.108.000	867.000	1.101	5.724
496	26.838	1.122.000	867.000	1.173	5.846
497	13.834	151.000	868.000	1.258	4.197
498	2.213	263.000	868.000	1.580	1.679
499	2.213	853.000	868.000	1.580	1.679
500	2.213	214.000	869.000	1.580	1.679
501	1.383	1.062.000	869.000	1.496	1.327
502	2.213	1.096.000	870.000	1.346	1.679
503	39.841	741.000	871.000	1.147	7.122
504	9.130	566.000	873.000	1.652	3.410
505	23.794	796.000	875.000	2.631	5.504
506	32.924	670.000	877.000	1.217	6.475
507	1.383	1.086.000	878.000	1.496	1.327
508	2.767	69.000	879.000	1.264	1.877
509	2.213	1.216.000	879.000	1.580	1.679
510	190.630	1.005.000	880.000	2.475	15.579
511	11.067	1.111.000	882.000	1.169	3.754
512	30.252.863	109.000	884.000	245.366	196.263
513	3.320	977.000	885.000	1.222	2.056
514	118.694	203.000	886.000	4.135	12.293
515	223.831	953.000	887.000	1.890	16.882
516	70.276	261.000	888.000	1.443	9.459
517	83.556	924.000	888.000	1.320	10.314
518	16.324	1.092.000	888.000	1.380	4.559
519	9.130	1.132.000	888.000	1.416	3.410
520	3.043	246.000	889.000	1.530	1.969
521	50.632	604.000	889.000	1.890	8.029
522	2.767	577.000	890.000	1.264	1.877
523	40.671	940.000	890.000	1.323	7.196
524	7.470	80.000	896.000	1.341	3.084
525	92.963	501.000	896.000	1.763	10.880
526	4.980	69.000	900.000	1.500	2.518
527	4.427	76.000	900.000	1.351	2.374
528	65.572	96.000	900.000	2.729	9.137
529	1.383	855.000	900.000	1.496	1.327
530	470.073	32.000	901.000	8.215	24.465
531	32.924	52.000	904.000	1.162	6.475
532	13.004	1.079.000	904.000	1.338	4.069
533	80.513	895.000	906.000	1.188	10.125
534	1.383	999.000	906.000	1.496	1.327
535	9.407	1.069.000	907.000	1.267	3.461
536	124.781	1.101.000	907.000	1.625	12.605
537	22.964	1.037.000	908.000	1.104	5.407

538	69.169	225.000	909.000	1.264	9.384
539	14.664	959.000	912.000	1.356	4.321
540	11.067	309.000	915.000	1.169	3.754
541	5.257	280.000	916.000	1.421	2.587
542	125.611	619.000	916.000	2.179	12.646
543	3.597	891.000	920.000	1.294	2.140
544	11.620	241.000	921.000	1.298	3.846
545	46.482	99.000	923.000	1.939	7.693
546	3.873	253.000	923.000	1.544	2.221
547	99.880	32.000	924.000	1.165	11.277
548	50.632	218.000	924.000	3.023	8.029
549	31.264	1.087.000	924.000	1.462	6.309
550	204.464	955.000	925.000	4.008	16.135
551	1.383	668.000	926.000	1.496	1.327
552	5.810	676.000	926.000	1.286	2.720
553	16.324	261.000	927.000	1.553	4.559
554	5.257	602.000	927.000	1.138	2.587
555	35.138	381.000	928.000	2.120	6.689
556	12.174	718.000	930.000	1.239	3.937
557	15.771	939.000	932.000	1.181	4.481
558	22.964	679.000	937.000	1.301	5.407
559	72.766	628.000	938.000	1.557	9.625
560	11.897	717.000	938.000	1.463	3.892
561	153.832	1.109.000	938.000	2.379	13.995
562	280.273	154.000	939.000	4.182	18.891
563	1.383	199.000	939.000	1.496	1.327
564	8.306.645	473.000	941.000	75.247	102.841
565	3.320	433.000	943.000	1.222	2.056
566	88.260	987.000	945.000	1.816	10.601
567	41.501	501.000	946.000	1.795	7.269
568	46.482	422.000	949.000	2.059	7.693
569	7.194	484.000	949.000	1.269	3.026
570	53.398	751.000	949.000	1.587	8.246
571	7.470	103.000	950.000	1.341	3.084
572	1.210.181	299.000	950.000	17.930	39.254
573	52.845	338.000	952.000	1.317	8.203
574	119.247	465.000	952.000	1.805	12.322
575	64.189	838.000	954.000	1.535	9.040
576	18.537	1.215.000	954.000	1.528	4.858
577	57.272	718.000	961.000	1.133	8.539
578	891.450	1.238.000	961.000	7.358	33.690
579	16.047	501.000	973.000	1.239	4.520
580	3.597	1.101.000	973.000	1.663	2.140
581	28.774	325.000	974.000	1.209	6.053
582	168.219	607.000	988.000	1.984	14.635
583	175.136	262.000	992.000	2.153	14.933
584	229.364	152.000	1.003.000	3.941	17.089
585	25.454	701.000	1.003.000	1.174	5.693
586	1.383	58.000	1.005.000	1.496	1.327
587	31.818	114.000	1.007.000	1.376	6.365
588	70.829	297.000	1.009.000	1.197	9.496
589	2.767	623.000	1.011.000	1.264	1.877
590	610.901	313.000	1.012.000	4.488	27.889
591	56.165	544.000	1.013.000	1.282	8.456

Total	132.745.558	389.854.000	324.825.000	1.876.779	5.009.642
Mean	224.612	659.651	549.619	3.176	8.477
Std Dev	1.991.149	338.052	268.101	17.383	14.633
Std Error	81.905	13.906	11.028	0.715	0.602
Max	36.498.270	1.238.000	1.013.000	334.671	215.572
Min	1.383	32.000	62.000	1.066	1.327
2-s					
Range	7.964.597	1.352.206	1.072.404	69.532	58.533

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi	06.09.1973	
Doğum yeri	Erzurum	
Lise	1987-1990	Taksim Atatürk Lisesi
Lisans	1991-1996	Yıldız Teknik Üniversitesi Kimya-Metalürji Fakültesi Metalürji Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans	1997-1999	Yıldız Teknik Üniversitesi Kimya-Metalürji Fakültesi Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü
Doktora	2001-2006	Yıldız Teknik Üniversitesi Kimya-Metalürji Fakültesi Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü

Çalıştığı Kurumlar

1996-5 ay	PolyMetal A.Ş.
1998-Devam Ediyor	Yıldız Teknik Üniversitesi Kimya-Metalürji Fakültesi Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Araştırma Görevlisi