

ALÜMİNYUMUN YÖNLÜ KATILAŞTIRILMASI

Yusuf Tolga ÖKSÜZ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
METAL EĞİTİMİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**HAZİRAN 2006
ANKARA**

ALÜMİNYUMUN YÖNLÜ KATILAŞTIRILMASI

Yusuf Tolga ÖKSÜZ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
METAL EĞİTİMİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**HAZİRAN 2006
ANKARA**

Y. Tolga ÖKSÜZ tarafından hazırlanan ALÜMİNYUMUN YÖNLÜ KATILAŞTIRILMASI adlı bu tezin yüksek lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.



Doç. Dr. Kadir KOCATEPE

Tez Yöneticisi

Bu çalışma, jürimiz tarafından Metal Eğitimi Anabilim Dalında Yüksek lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan

: Doç. Dr. Mehmet ERDOĞAN



Üye

: Doç. Dr. Kadir KOCATEPE



Üye

: Yrd. Doç. Dr. Yunus TÜREN



Üye

: _____

Üye

: _____

Tarih

: 22.06.2006

Bu tez, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygundur.



TEZ BİLDİRİMİ

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

Yusuf Tolga ÖKSÜZ

ALÜMİNYUMUN YÖNLÜ KATILAŞTIRILMASI
(Yüksek Lisans Tezi)

Y. Tolga ÖKSÜZ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Haziran 2006

ÖZET

Bu tez, ticari saflıkta (%99,3) alüminyumun tek yönlü ısı akışı altında, yönlü katılaştırılması çalışmalarını içermektedir. Yönlü katılaştırma için “sabit kalıp - hareketli fırın” sistemi kuruldu. Yönlü katılaştırma işleminde farklı fırın ilerleme hızları (0,00816mm/sn, 0,0123 mm/sn, 0,0184 mm/sn, 0,0218 mm/sn) uygulandı. Farklı fırın ilerleme hızlarında sıcaklık gradyanları, katı- sıvı ara yüzey ilerleme hızları, makro/mikro yapılar ve birim hücre sayıları tespit edildi. En düşük katı-sıvı ara yüzey ilerleme hızı (0,0107mm/sn) 0,00816mm/sn fırın ilerleme hızında ve en yüksek sıcaklık gradyanı (29,23⁰C/cm) 0,0123mm/sn fırın ilerleme hızında elde edildi. Ara yüzey ilerleme hızı ve birim hücre sayısı, artan fırın ilerleme hızı ile birlikte artmıştır. Fakat sıcaklık gradyanı katı-sıvı ara yüzey ilerleme hızı arttıkça düşmüştür.. Taneler ve hücreler dökümlerin tümünde yönlendi.

Bilim Kodu : 710.3.011
Anahtar Kelimeler : Yönlü katılaşma, tek kristal
Sayfa Adedi : 133
Tez Yöneticisi : Doç. Dr. Kadir KOCATEPE

**DIRECTIONAL SOLIDIFICATION OF THE ALUMINIUM
(M.Sc. Thesis)**

Y. Tolga ÖKSÜZ

**GAZİ UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
June 2006**

ABSTRACT

This thesis, comprises of a study of the directional solidification of commercially pure (99,3 wt. %) aluminium in one directional heat flow. For directional solidification, stable mould – active furnace system was setted. Various furnace velocities (0,0218mm/s., 0,0184mm/s., 0,0123mm/s. and 0,00816mm/s.) has been applied to directional solidification. Temperature gradients, solid-liquid interface velocities, , macro/micro structures and unit cell numbers have been determined with respect to different furnace velocities. The minimum interface velocity (0,0111mm/s.) was obtained at 0,00816mm/sec furnace velocity, and maximum temperature gradient (29,23⁰C/cm) at 0,0123mm/sec furnace velocity. Interface velocity and unit cell numbers increased with increasing furnace velocity. However, temperature gradients decreased as increasing interface velocity. Grains and cells were directed in all obtained castings.

**Science Code : 710.3.011
Key Words : Directional solidification, single crystal
Page Number : 133
Adviser : Doç. Dr. Kadir KOCATEPE**

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca kıymetli tecrübelerinden faydalandığım hocam Doç. Dr. Kadir KOCATEPE'ye, yine değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren hocam Dr. Kamil K. TÜZÜNALP'e, ayrıca refrakter malzemeler ve kalıp yapım teknikleri konusunda benden yardımlarını esirgemeyen Arş. Gör. Neşet AKAR ve Arş. Gör. Necati YALÇIN'a, laboratuvar çalışmalarım sırasında bilgi ve tecrübeleriyle bana yardımcı olan teknisyen İsmail ESER'e, deney düzeneği montajında ve çalışmalarım boyunca beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan arkadaşım İlker ÜNALAN'a, eğitimim boyunca benden maddi ve manevi yardımlarını esirgemeyen aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xi
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xii
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xvii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xviii
1. GİRİŞ	1
2. KATILAŞMA.....	3
2.1. Bir Şekillendirme Yöntemi Olarak Katılaşmanın Önemi.....	3
2.2. Katılaşma Prensipleri	3
2.3. Çekirdeklenme	5
2.3.1. Homojen çekirdeklenme.....	5
2.3.2. Heterojen çekirdeklenme.....	9
2.4. Sıvı Katı Ara Yüzeyinde Sıcaklık Dağılımı.....	11
2.4.1. Pozitif sıcaklık gradyanı.....	11
2.4.2. Negatif sıcaklık gradyanı	12
2.5. Isı Akışı ve Ara Yüzey Kararlılığı	12
2.6. Hücresel ve Dentritik Katılaşma	14
2.6.1. Dentritik büyüme yönleri.....	15
2.6.2. Dentrit uç yarıçapı	18

	Sayfa
3. YÖNLÜ KATILAŞMA	21
3.1. Giriş.....	21
3.2. Yönlü Katılaşmanın Avantajları	23
3.3. Yönlü Katılaşma Sistemlerinin Sınıflandırılması	24
3.3.1. Sabit kalıp ve sabit fırın kullanılan uygulamalar	25
3.3.2. Hareketli fırın veya hareketli kalıp kullanılan uygulamalar	28
3.4. Alaşım Sistemleri.....	33
3.5. Yönlü Katılaşmada Tane Yapısı	34
3.6. Geleneksel Döküm İle Yönlü Katılaştırma Arasındaki Farklar	36
3.7. Yönlü Katılaştırma Sistemlerinde Kullanılan Fırınlara ve Özellikleri.....	38
3.8. Kalıp Malzemesi	39
3.9. Soğutucu Özellikleri.....	39
3.10. Tek Kristal Üretim Yöntemlerinde Kullanılan Tane Seçici Modelleri	39
3.10.1. Helis modeli	40
3.10.2. Dik açılı tane seçici	41
3.10.3. Tohumlama yöntemi	41
3.11. Yönlü Katılaştırmada Meydana Gelen Döküm Hataları	41
3.11.1. Yanlış yönlendirilmiş taneler.....	42
3.11.2. Çekme	42
3.11.3. Mikroporozite	43

Sayfa

3.11.4. Kalıp çarpılması	43
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	44
4.1. Yönlü Katılaştırma Deneyinde Kullanılan Metal	44
4.2. Yönlü Katılaştırma Deney Düzeneği.....	44
4.2.1. Tek kademeli fırının hazırlanması	45
4.2.2. Fırın kaldırma aparatı	46
4.2.3. Soğutucu, soğutma sistemi ve soğutucu ısıtma fırını hazırlanması	48
4.2.4. Kalıbın hazırlanması.....	50
4.2.5. Sistemin ısı kontrolü	51
4.3. Metalin Ergitilmesi ve Kalıba Dökümü	53
4.3.1. Sistemin kalibrasyonu ve ısı haritasının çıkarılması	54
4.4. Saf Alüminyumun Yönlü Katılaştırılması	55
4.4.1. Soğuma eğrilerinin elde edilmesi.....	55
4.4.2. Sıcaklık gradyanlarının elde edilmesi	56
4.4.3. Büyüme hızı hesapları.....	59
4.4.4. Farklı fırın ilerleme hızları için yapılan deneyler	59
4.4.5. Makro yapı inceleme	60
4.4.6. Mikro yapı inceleme	61
5. DENEYSEL SONUÇLAR.....	63
5.1. Yönlü Katılaştırma Düzeneğinin Isı Haritası	63
5.2. Farklı Fırın İlerleme Hızlarında Yönlü Katılaştırma.....	66
5.2.1. Dönüşüm noktaları ve soğuma eğrileri	66

Sayfa

5.2.2. Sıcaklık gradyanları	77
5.2.3. Ara yüzey ilerleme hızları	80
5.2.4. Yapılan deneylerden elde edilen makro yapılar	83
5.2.5. Yapılan deneylerden elde edilen mikro yapılar ve birim hücre sayıları	88
5.3. Deneysel Sonuçların İlişkilendirilmesi	110
5.3.1. Farklı fırın ilerleme hızlarının BHS'na etkisi.....	110
5.3.2. Ara yüzey ilerleme hızı ile sıcaklık gradyanı arasındaki ilişki	111
5.3.3. Yönlü katılaştırma düzeneği	112
5.4. Farklı Fırın İlerleme Hızlarının Döküm Mikro Yapısına Etkisi.....	113
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	116
6.1. Sonuçlar	116
6.2. Öneriler	117
KAYNAKLAR	118
EKLER	121
EK-1 MAR M-200 süper alaşımının kompozisyonu.....	122
EK-2 Yönlü katılaştırma düzeneğinde kullanılan refrakter malzemeler	123
EK-3 Step motor hareketi için kullanılan bilgisayar programı	124
EK-4 Düzeneklerde kullanılan ısı kontrol cihazının teknik özellikleri	126
EK-5 Ön deneylerde kullanılan parametreler ve elde edilen makro yapılar.....	127
EK-6 Makro ve mikro incelemede kullanılan dağılayıcılar	130
EK-7 Yönlü katılaştırma düzeneği ile ilgili fotoğraflar	131
ÖZGEÇMİŞ	133

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Çeşitli malzemeler için tercih edilen büyüme yönleri	16
Çizelge 3.1. Yönlü ve geleneksel katılaşma yöntemleri arasındaki farklar	37
Çizelge 4.1. Yönlü katılaştırma deneyleri sırasında kullanılan %99,3 saflıkta alüminyum metalinin kompozisyonu	44
Çizelge 4.2. Yönlü katılaştırma deneylerinde kullanılan parametreler.....	60
Çizelge 5.1. Kalıp içi ve kalıp duvarından okunan sıcaklıklar	64
Çizelge 5.2. Farklı fırın ilerleme hızları için soğuma eğrilerinden elde edilen dönüşüm noktaları	69
Çizelge 5.3. Çizelge 5.2’de verilen 4 deney için $G_{üst}$ hesaplarının sonuçları	78
Çizelge 5.4. Çizelge 5.2’de verilen 4 deney için V_{ort} hesaplarının sonuçları	81
Çizelge 5.5. Fırın ilerleme hızına bağlı olarak tane seçiciden çıkan ve döküm ingotu oluşturan tane sayıları	85
Çizelge 5.6. Yönlü katılaştırma deneylerinden elde edilen numunelerin bölgelere göre ortalama BHS’ları.....	89
Çizelge 5.7. Yayınlarda geçen numune $\Delta G_{üst}$ değerleri ile bu çalışmada elde edilen $\Delta G_{üst}$ değerlerinin karşılaştırılması	114

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Sıcaklık gradyanı ve alaşımın kompozisyonunun sıvı – katı geçiş bölgesinin üzerine etkisinin şematik olarak gösterimi.....	2
Şekil 2.1. Ticari saflıkta alüminyum malzemeye ait soğuma eğrisinin şematik gösterimi.....	4
Şekil 2.2. Katı ve sıvı fazlar için serbest enerji değişimleri.....	5
Şekil 2.3. Sıvı metal içinde küresel katı bir çekirdek oluşumu ile ilgili serbest enerji değişimi	8
Şekil 2.4. Düzlemsel bir kalıp duvarında kesik kürenin heterojen olarak çekirdeklenmesi	10
Şekil 2.5. Pozitif sıcaklık gradyanı.....	11
Şekil 2.6. Negatif sıcaklık gradyanı	12
Şekil 2.7. Düzlemsel ara yüzeyin sıcaklık gradyanı ve ara yüzey sıcaklık izotermi.....	13
Şekil 2.8. Sütunsal ve dentritik büyüme grafikleri.....	15
Şekil 2.9. Kübik kristalli malzemelerde <100> yönünde dendrit uçlarının büyümesi.....	17
Şekil 2.10. Sabit bir sıcaklık gradyanı G_L ve artan V için sıvı-katı ara yüzey yapısının şematik gösterimi	18
Şekil 2.11. Dentrit ucundaki sıcaklık dağılımı.....	19
Şekil 3.1. Tane ve tane sınırları dayanımı-sıcaklık ilişkisi	23
Şekil 3.2. Yönlü katılaşma uygulamalarında kullanılan iki temel yöntem.....	25
Şekil 3.3. Te ergime sıcaklığında dökülen bir alaşım için sıcaklık dağılımı	26

Şekil	Sayfa
Şekil 3.4. Yönlü katılaştırılmış türbin kanatlarının egzotermik malzemeler kullanılarak üretimi için kalıp-soğutucu düzeneğinin şematik olarak gösterimi	26
Şekil 3.5. Yönlü katılaştırma için güç kesme yöntemi kullanan düzeneği	27
Şekil 3.6. Kalıp-soğutucu ikilisi ile yönlü katılma prosesi	28
Şekil 3.7. Yönlü katılaştırılan bir çubuğun şematik gösterimi	29
Şekil 3.8. Bridgman tekniği ile tek kristal oluşturulması	30
Şekil 3.9. Tipik Bridgman-Stockbarger düzeneği	31
Şekil 3.10. Tribün kanatlarının tane yapısının kontrolü	32
Şekil 3.11. Kristal çekme ya da Czochralski tekniği	33
Şekil 3.12. Yönlü katılaşmış ve geleneksel döküm alaşımlarının karşılaştırılması	38
Şekil 3.13. Tek kristal üretiminde kullanılan tane seçici modelleri	40
Şekil 3.14. Bir tribün kanadının kesiti	41
Şekil 4.1. Yönlü katılaştırma düzeneğinde kullanılan fırın ölçüsü ve ısı çiftlerinin sisteme yerleşimi	47
Şekil 4.2. Fırın taban plakası altına yerleştirilen perde ve ölçüleri	48
Şekil 4.3. Yönlü katılaştırma deney düzeneğinde kullanılan soğutucu ve ölçüleri	48
Şekil 4.4. Yönlü katılaştırma düzeneğinde kullanılan su soğutma sistemi	49
Şekil 4.5. Yönlü katılaştırma düzeneğinde kullanılan kalıp ve ölçüleri	50
Şekil 4.6. Isıl çiftlerin kalibrasyon işlemi sırasında, ticari saflıktaki alüminyumdan elde edilen soğuma eğrileri	51

Şekil	Sayfa
Şekil 4.7. Soğuma eğrisi ve dönüşüm noktalarının belirlenmesi için kullanılan ısı çiftlerinin kalıp içerisindeki konumu	56
Şekil 4.8. Sıcaklık gradyanların grafiklerinin çiziminde kullanılan yöntem	58
Şekil 4.9. Mikro analiz için numunenin kesit bölgeleri	61
Şekil 4.10. Hücre sayımı için çizgi metodunda kullanılan çizgilerin konumu	62
Şekil 5.1. Çizelge 5.1.'den elde edilen verilerin grafik olarak gösterimi (kalıp içi)	65
Şekil 5.2. Çizelge 5.1.'den elde edilen verilerin grafik olarak gösterimi (kalıp duvarı)	65
Şekil 5.3. 0,00816mm/sn fırın ilerleme hızı ile yapılan deneyler için elde edilen soğuma eğrisi	67
Şekil 5.4. 0,0123mm/sn fırın ilerleme hızı ile yapılan deneyler için elde edilen soğuma eğrisi	67
Şekil 5.5. 0,0184mm/sn fırın ilerleme hızı ile yapılan deneyler için elde edilen soğuma eğrisi	68
Şekil 5.6. 0,0218mm/sn fırın ilerleme hızı ile yapılan deneyler için elde edilen soğuma eğrisi	68
Şekil 5.7. 0,00816mm/sn fırın ilerleme hızı ile yapılan deney no:1.1.'den elde edilen sıcaklık zaman ilişkisi	71
Şekil 5.8. 0,00816mm/sn fırın ilerleme hızı ile yapılan deney no:1.2.'den elde edilen sıcaklık zaman ilişkisi	71
Şekil 5.9. 0,00816mm/sn fırın ilerleme hızı ile yapılan deney no:1.3.'den elde edilen sıcaklık zaman ilişkisi	72
Şekil 5.10. 0,0123mm/sn fırın ilerleme hızı ile yapılan deney no:2.1.'den elde edilen sıcaklık zaman ilişkisi	72
Şekil 5.11. 0,0123mm/sn fırın ilerleme hızı ile yapılan deney no:2.2.'den elde edilen sıcaklık zaman ilişkisi	73

Şekil	Sayfa
Şekil 5.12. 0,0123mm/sn fırın ilerleme hızı ile yapılan deney no:2.3.'den elde edilen sıcaklık zaman ilişkisi	73
Şekil 5.13. 0,0184mm/sn fırın ilerleme hızı ile yapılan deney no:3.1.'den elde edilen sıcaklık zaman ilişkisi	74
Şekil 5.14. 0,0184mm/sn fırın ilerleme hızı ile yapılan deney no:3.2.'den elde edilen sıcaklık zaman ilişkisi	74
Şekil 5.15. 0,0184mm/sn fırın ilerleme hızı ile yapılan deney no:3.3.'den elde edilen sıcaklık zaman ilişkisi	75
Şekil 5.16. 0,0184mm/sn fırın ilerleme hızı ile yapılan deney no:4.1.'den elde edilen sıcaklık zaman ilişkisi	75
Şekil 5.17. 0,0184mm/sn fırın ilerleme hızı ile yapılan deney no:4.2.'den elde edilen sıcaklık zaman ilişkisi	76
Şekil 5.18. 0,0184mm/sn fırın ilerleme hızı ile yapılan deney no:4.3.'den elde edilen sıcaklık zaman ilişkisi	76
Şekil 5.19. 0,00816mm/sn fırın ilerleme hızı için $G_{\text{Üst}}$ parametresinin konuma bağlı grafiği.....	78
Şekil 5.20. 0,0123mm/sn fırın ilerleme hızı için $G_{\text{Üst}}$ parametresinin konuma bağlı grafiği.....	79
Şekil 5.21. 0,0184mm/sn fırın ilerleme hızı için $G_{\text{Üst}}$ parametresinin konuma bağlı grafiği.....	79
Şekil 5.22. 0,0218mm/sn fırın ilerleme hızı için $G_{\text{Üst}}$ parametresinin konuma bağlı grafiği.....	80
Şekil 5.23. 0,00816mm/sn fırın ilerleme hızı için katı-sıvı ara yüzey ilerleme hızı ile fırın ilerleme hızı arasındaki ilişki	81
Şekil 5.24. 0,0123mm/sn fırın ilerleme hızı için katı-sıvı ara yüzey ilerleme hızı ile fırın ilerleme hızı arasındaki ilişki	82
Şekil 5.25. 0,0184mm/sn fırın ilerleme hızı için katı-sıvı ara yüzey ilerleme hızı ile fırın ilerleme hızı arasındaki ilişki	82
Şekil 5.26. 0,0218mm/sn fırın ilerleme hızı için katı-sıvı ara yüzey ilerleme hızı ile fırın ilerleme hızı arasındaki ilişki	83

Şekil	Sayfa
Şekil 5.27. Tane seçici ve bölümleri.....	84
Şekil 5.28. 0,00816mm/sn fırın ilerleme hızında elde edilen dökümlerin makro yapıları.....	86
Şekil 5.29. 0,0123mm/sn fırın ilerleme hızında elde edilen dökümlerin makro yapıları.....	86
Şekil 5.30. 0,0184mm/sn fırın ilerleme hızında elde edilen dökümlerin makro yapıları.....	87
Şekil 5.31. 0,0218mm/sn fırın ilerleme hızında elde edilen dökümlerin makro yapıları.....	87
Şekil 5.32. 0,00816mm/sn fırın ilerleme hızı ile yapılan deneylerin BHS konum ilişkisi	108
Şekil 5.33. 0,0123mm/sn fırın ilerleme hızı ile yapılan deneylerin BHS konum ilişkisi	109
Şekil 5.34. 0,0184mm/sn fırın ilerleme hızı ile yapılan deneylerin BHS konum ilişkisi	109
Şekil 5.35 0,0218mm/sn fırın ilerleme hızı ile yapılan deneylerin BHS konum ilişkisi	110
Şekil 5.36. Farklı fırın ilerleme hızlarının (V_F),birim hücre sayısına (BHS) etkisi.....	111
Şekil 5.37. Ara yüzey ilerleme hızı (V) ile sıcaklık gradyanı (G) arasındaki ilişki.....	112

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 3.1. Al-Si alaşımasının katılaşması sonucu oluşan tane yapıları	35
Resim 3.2. Gaz türbin motorları için üretilen kanat	36
Resim 4.1. Isıl çiftin sıvı metal içerisinde hareket etmesini sağlayan ısıl çift asansörü	52
Resim 5.1. 0,00816mm/sn fırın ilerleme hızı ile yapılan deney no:1.1.'den elde edilen mikro yapılar.....	90
Resim 5.2. 0,00816mm/sn fırın ilerleme hızı ile yapılan deney no:1.2.'den elde edilen mikro yapılar.....	91
Resim 5.3. 0,00816mm/sn fırın ilerleme hızı ile yapılan deney no:1.3.'den elde edilen mikro yapılar.....	93
Resim 5.4. 0,0123mm/sn fırın ilerleme hızı ile yapılan deney no:2.1.'den elde edilen mikro yapılar.....	94
Resim 5.5. 0,0123mm/sn fırın ilerleme hızı ile yapılan deney no:2.2.'den elde edilen mikro yapılar.....	96
Resim 5.6. 0,0123mm/sn fırın ilerleme hızı ile yapılan deney no:2.3.'den elde edilen mikro yapılar.....	97
Resim 5.7. 0,0184mm/sn fırın ilerleme hızı ile yapılan deney no:3.1.'den elde edilen mikro yapılar.....	99
Resim 5.8. 0,0184mm/sn fırın ilerleme hızı ile yapılan deney no:3.2.'den elde edilen mikro yapılar.....	100
Resim 5.9. 0,0184mm/sn fırın ilerleme hızı ile yapılan deney no:3.3.'den elde edilen mikro yapılar.....	102
Resim 5.10. 0,0218mm/sn fırın ilerleme hızı ile yapılan deney no:4.1.'den elde edilen mikro yapılar	103
Resim 5.11. 0,0218mm/sn fırın ilerleme hızı ile yapılan deney no:4.2.'den elde edilen mikro yapılar	105
Resim 5.12. 0,0218mm/sn fırın ilerleme hızı ile yapılan deney no:4.3.'den elde edilen mikro yapılar	106

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklama
$\cos Q$	Islatma açısı
D	Difüzyon katsayısı
d	Tane boyutu
$f(Q)$	Şekil faktörü
G	Gibbs serbest enerjisi
G_L	Sıvının serbest enerjisi
G_S	Katının serbest enerjisi
$G_{üst}$	Ara yüzey önündeki sıcaklık gradyanı
ΔG_T	Toplam serbest enerji değişimi
ΔG_V	Hacim serbest enerjisi değişimi
H	Entalpi
k	Sabit sayı
K	Termal iletkenlik
L_V	Ergime gizli ısı
γ_{ML}	Sıvı-kalıp duvarı ara yüzeyi
γ_{Ms}	Katı-kalıp duvarı ara yüzeyi
r	Dentrit yarıçapı
r^*	Kritik çekirdek yarıçapı
S	Entropi
γ_{SL}	Kat-sıvı ara yüzeyi
T	Sıcaklık
ΔT	Alt soğuma
T_i	Ara yüzey sıcaklığı

Simgeler**Açıklama** **T_m**

Ergime sıcaklığı

 T_∞

Süper soğutulmuş sıvı sıcaklığı

 V

Ara yüzey ilerleme hızı

 V_F

Fırın ilerleme hızı

 λ_1

Birincil dentrit kol açıklığı

 λ_2

İkincil dentrit kol açıklığı

Kısaltmalar**Açıklama****BHS**

Birim hücre sayısı (hücre sayısı/mm)

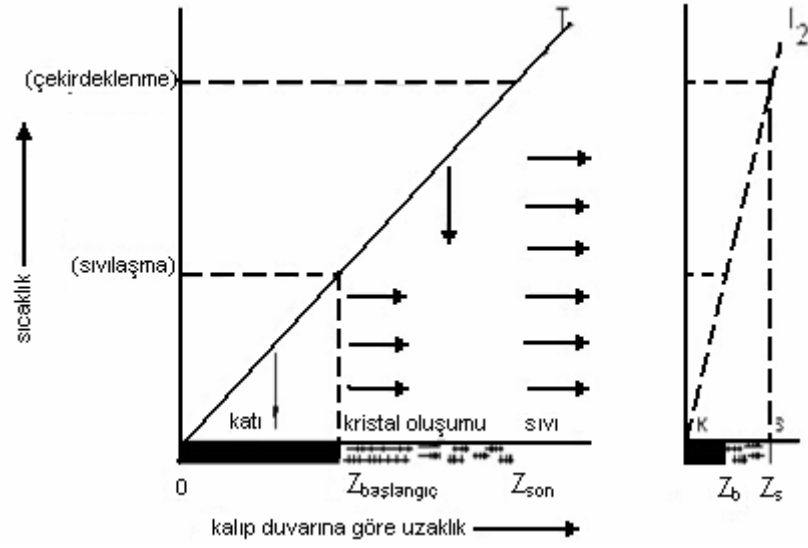
1.GİRİŞ

Metal ve alaşımların mekanik özellikleri katılaşma sırasında oluşan makro ve mikro yapıya bağlıdır. Kontrollü katılaştırma teknikleri ile istenilen makro ve mikro yapılar elde edilebilir. Yönlü katılaştırma yöntemi, kontrollü katılaştırma için kullanılan önemli bir yöntemdir. Bu yöntem ile katılaşmada makro ve mikro yapının oluşumunu etkileyen mekanizmaların anlaşılabilmesi için önemli teorik ve deneysel gelişmeler sağlanmıştır [1].

Bridgman (1925) ve Stokbarger (1936) yaptıkları yayınlarda yönlü katılaşma yöntemini kullanarak metalik alaşımların ve inorganik malzemelerin büyümesini açıkladılar. Bu tekniğin geliştirilmesi ile çeşitli malzemelerde kristal büyümesi üzerinde çalışmalar devam etmiştir. Tiller (1953) sıvı – katı ara yüzeyinin karakteristiklerini sayısal olarak ifade edebilmek için gerekli kontrol koşullarını “yönlü katılaşma” (DS) tekniği ile sağlamıştır [2].

Yönlü katılaşma temel olarak uygun yöntemlerle sıcaklık gradyanının dikleştirilmesi, diğer bir söylem ile soğuk – sıcak bölgeler arasındaki sıcaklık farkının yüksek tutulması ile sağlanır. Bunun yanında döküş hızı ve sıcaklığının kontrolü, soğutucu kullanılarak soğuma hızının ve yönünün kontrol edilmesi ve sıcak kalması gereken bölgelere ısı sağlanması yönlü katılaşmada iyi kontrol sağlayan faktörlerdir.

Sıcaklık gradyanının katılaşma üzerine etkisi ve buna bağlı olarak ara bölgenin genişliğinin değişimi Şekil 1.1’de verilmiştir. Bu şekilde sıcaklık gradyanının dikleştirilmesi ile sıvı – katı geçiş bölgesinin daralması ve bunun sonucu olarak kristaller arası besleme yapılması gereken uzaklığın azalması görülmektedir [1].



Şekil 1.1. Sıcaklık gradyanı ve alaşımın kompozisyonunun sıvı – katı geçiş bölgesinin üzerine etkisinin şematik olarak gösterimi [1]

2. KATILAŞMA

2.1. Bir Şekillendirme Yöntemi Olarak Katılaşmanın Önemi

Katılaşma, döküm uygulamalarında önemli rol oynayan bir faz dönüşümüdür. Döküm yöntemi ise bir üretim şeklidir ve bu yöntemde sıvı metal, içine döküldüğü kalıbın şeklini alarak katılaşır [3].

Katılaşma teorileri, mikro yapıyı etkileyen faktörlerin tanımlanabilmesi açısından temel oluşturduğu için, dökümlerin özelliklerinin ve kalitesinin iyileşmesine yardımcı olmaktadır [1].

Malzemelerin doğası ve davranışı hakkındaki bilgilerimiz, genellikle boyutları atomlara oranla çok büyük olan numunelerden elde edilir. Yapılan ölçümler ve kullanılan terimler çok büyük sayıdaki atomların ortalama davranışlarını açıklar.

Ancak atomlar tek başına ele alındığında davranışlarının ortalamadan çok farklı olduğu görülür. Bu sebepten temel yaklaşım olarak, katılaşma olayının anlaşılabilmesi için bazı özelliklerin makro ölçekte incelenmesi gerekir.

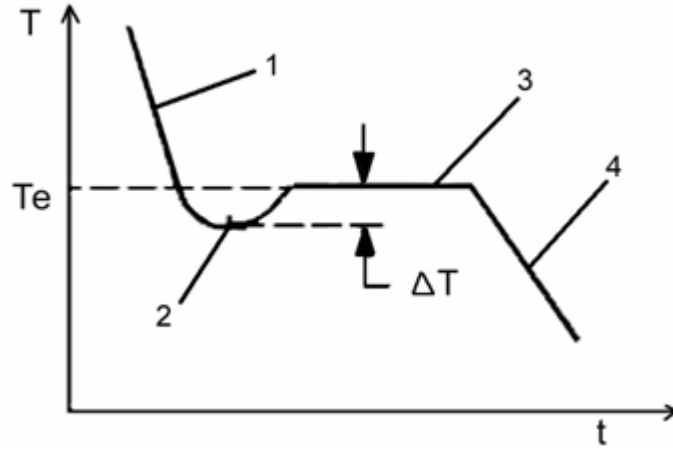
Örneğin; sıcaklık, gizli ergime ısısı, kompozisyon ve yüzey serbest enerjisi gibi makro ölçekli özellikler, çok sayıdaki atomun veya molekülün ortalama davranışının ölçülebilmesi için ve atomların tek başına nasıl hareket ettiklerinin açıklanabilmesi için temel oluştururlar [1].

2.2. Katılaşma Prensipleri

Bu bölümde yönlü katılaşmanın sağlanabilmesi için, temel katılaşma prensipleri, yönlü katılaşma konusu ile paralel ele alınacaktır. Metallerin sıvıdan katıya geçişleri dört temel adımda incelenebilir. Bu adımlar;

- 1- Sıvı faz soğuması
- 2- Alt soğuma, çekirdek oluşumu
- 3- Katılaşma (sıvı fazın büyümesi)
- 4- Katı fazın soğuması

Katılaşmanın gerçekleşmesi için gerekli olan dört temel adım, şekil 2.1'deki soğuma eğrisinde görülmektedir [1].



Şekil 2.1. Ticari saflıkta alüminyum malzemeye ait soğuma eğrisinin şematik gösterimi [1]

1 numaralı bölgede sıvı durumda soğuma meydana gelir. 2 numaralı bölgede ise malzemenin katılaşabilmesi için ΔT kadar alt soğuma yaptığı bölge görülmektedir. Bu bölgede çekirdeklenme meydana gelir. 3 numaralı bölgede sabit sıcaklıkta (660°C 'de) katılaşma gerçekleşir.

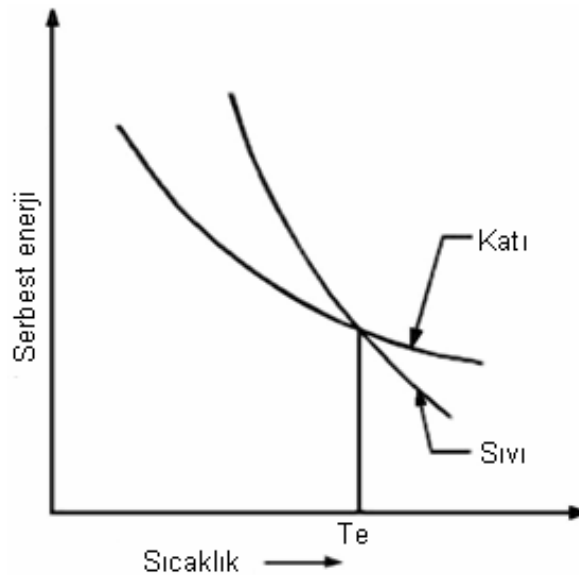
Bu esnada atomlar kafesteki yerlerini alırlar. Ancak atomlar kafesteki yerlerini alırken termal enerji açığa çıkar. Bu sebepten dönüşüm izotermaldir. Dördüncü bölümde ise katı durumda soğuma gerçekleşir [3].

2.3. Çekirdeklenme

Yukarıda verilen soğuma eğrisinden de anlaşılacağı gibi katılaşmanın gerçekleşebilmesi için sıvı sıcaklığının katılaşma sıcaklığının altındaki bir sıcaklığa ΔT kadar alt soğutulması gerekir. Yeterli alt soğumanın karşılandığı durumda malzemenin kendiliğinden katılaşması beklenir [1]. Homojen çekirdeklenmede ergime sıcaklığının 0,2 katı kadar alt soğumaya ihtiyaç vardır. Ancak pratikte bu kadar alt soğumaya gerek yoktur. Kalıp duvarları, kirlilikler, yabancı maddeler gibi çekirdeklenmeyi teşvik edici unsurlar alt soğumanın düşük olması durumunda da katılaşmayı başlatırlar [3].

2.3.1. Homojen çekirdeklenme

Homojen çekirdeklenmeyi, fazların serbest enerjileri ve sıvı–katı fazlar arasındaki dönüşümlerin nedenleri yönünden incelediğimizde, katı fazın en düşük iç enerjiye ve en yüksek düzenlilik derecesine (veya sıvı faza göre en düşük entropiye) sahip olduğunu dikkate almak gerekir (Şekil 2.2).



Şekil 2.2. Katı ve sıvı fazlar için serbest enerji değişimleri. Burada T_e ergime sıcaklığıdır [1,4,5]

Denge sıcaklığında (T_e), iki faz bir arada bulunur. Sıvı ve katı fazların serbest enerjileri birbirine eşittir. Bundan dolayı $G_{\text{sıvı}} = G_{\text{katı}}$ şartı yazılabilir. Termodinamik bilimi açısından bakıldığında kapalı bir sistem ve bir faz için Gibbs serbest enerjisi aşağıdaki gibi tanımlanabilir [1,4,6].

$$G = H - TS \quad (2.1)$$

Burada H entalpi, S entropi ve G Gibbs serbest enerjisidir. İki fazın dengede bulunması halinde $\Delta G = 0$ ($G_{\text{sıvı}} = G_{\text{katı}}$) durumu söz konusudur. Bu nedenle sıvı fazdan katı faza dönüşüm için gerekli “hacim serbest enerjisi değişimi” ΔG_V aşağıdaki şekilde verilebilir.

$$\Delta G_V = (H_{\text{sıvı}} - H_{\text{katı}}) - T_e \cdot (S_{\text{sıvı}} - S_{\text{katı}}) \quad (2.2)$$

Burada entalpi ve entropi fonksiyonlarının sıcaklığa bağımlılığı çok küçük olarak kabul edildiğinde $H_{\text{sıvı}} - H_{\text{katı}} = L$ olarak tanımlanabilir. L burada ergime gizli ısıdır. Gerekli düzenlemeler yapılarak iki fazın dengede bulunması halinde;

$$L = T_e \Delta S \text{ ve} \quad (2.3)$$

$$\Delta S = \frac{L}{T_e} \quad (2.4)$$

Katılaşma için entropi değişimi elde edilir. Buradan da hacim serbest enerji değişimi (ΔG_V);

$$\Delta G_v = \frac{L_v}{T_e} \times \Delta T \quad (2.5)$$

$$\Delta G_v = \left(\frac{4}{3}\right) \pi \cdot r^3 \times \left(\frac{L}{T_e}\right) \times \Delta T \quad (2.6)$$

Olarak bulunur. Bu denklemde ΔT alt soğumayı, L_v ise birim hacim için ergime gizli ısını temsil eder [1].

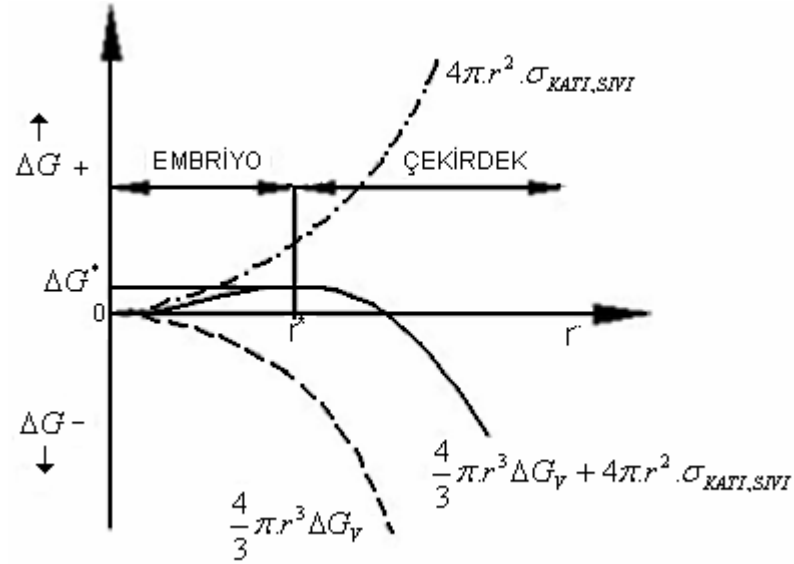
Belirli sayıda atomun bir araya gelerek sıvı içinde bir katı oluşturduğunu kabul edelim. Eğer katı-sıvı ara yüzey enerjisi izotropik ise bu katı küre şeklindedir. Sıvı içinde katının oluşmasıyla sistemin serbest enerjisi G_1 'den G_2 'ye değişecektir. Burada ΔG ,

$$\Delta G = G_1 - G_2 \quad (2.7)$$

Ve serbest enerjideki toplam değişim,

$$\Delta G_T = -\left(\frac{4}{3}\pi \cdot r^3\right) \times \Delta G_v + 4\pi \cdot r^2 \times \gamma_{KS} \quad (2.8)$$

olur. Yukarıdaki eşitlikte $\left(\frac{4}{3}\pi \cdot r^3\right)$ kürenin hacmi, ΔG_v hacim serbest enerjisidir ve sistemin toplam enerjisine negatif bir katkıda bulunur. $4\pi \cdot r^2$ Kürenin alanı, γ_{KS} sıvı-katı ara yüzey enerjisidir ve toplam enerji değişimine pozitif bir katkı sağlar [1]. Sistemin toplam net serbest enerji değişimi Şekil 2.3'de gösterilmiştir.



Şekil 2.3. Sıvı metal içinde küresel katı bir çekirdek oluşumu ile ilgili serbest enerji değişimi. Burada r^* çekirdeklenme için gerekli kritik yarıçaptır [1, 4]

Burada r^* , küre biçiminde bir çekirdek için kritik yarıçap ve ΔG_T ise, Gibbs serbest enerjisindeki toplam değişimdir. Sıvı içinde kararlı bir katı oluşabilmesi için toplam serbest enerji değişimi, bütün sistemin daha düşük enerji seviyesine gelmesini sağlayacak şekilde olmalıdır.

Toplam enerji değişiminin katı lehine gelişmesi için kritik yarıçap ve kritik serbest enerji değişimi;

$$\frac{d\Delta G_T}{dr} = 0 \quad (2.9)$$

$$\frac{d\Delta G_T}{dr} = -\frac{4}{3}\pi r^3 \cdot \left(\frac{L \cdot \Delta T}{T_m}\right) + 4\pi r^2 \cdot \gamma_{KS} \quad (2.10)$$

$$= -\frac{12}{3}\pi r^2 \cdot \left(\frac{L \cdot \Delta T}{T_m}\right) + 8\pi r \cdot \gamma_{KS} \quad (2.11)$$

$$4 r \left(\frac{4 \cdot \Delta T}{T_m} \right) = 8 \gamma_{KS} \quad (2.12)$$

$$r^* = \frac{2 \gamma_{KS}}{\frac{L \Delta T}{T_m}} = \frac{2 \gamma_{KS}}{\Delta G_v} = \frac{2 \gamma_{KS} \cdot T_m}{L} \cdot \frac{1}{\Delta T} \text{ ve} \quad (2.13)$$

$$\Delta G^* = \left(\frac{16 \pi \gamma_{KS}^3 \cdot T_e}{3 L_v^2} \right) \times \frac{1}{\Delta T} \quad (2.14)$$

Elde edilir. Kritik yarıçap denkleminde de anlaşılacağı gibi alt soğumanın (ΔT) artmasıyla r^* ve ΔG^* değerlerinin azaldığı görülebilmektedir.

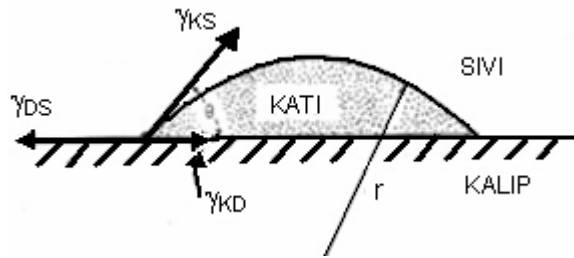
2.3.2. Heterojen çekirdeklenme

Dökümlerin çoğunluğu heterojen çekirdeklenme mekanizması ile katılaşır. Heterojen çekirdeklenme için kullanılan teori Turnbull tarafından geliştirilmiştir. Bu teoriye göre yeni bir faz, üzerinde büyüyebileceği yabancı bir parçacık bulabilirse bu parçacığın yarıçapına adapte olarak serbest enerjisini düşürebilir. Yeni faz, kalıp yüzeylerinde veya ergiyik içindeki safsızlıkların katı yüzeylerinde çekirdeklenebilir [1].

Düşük alt soğurma değerlerinde çekirdeklenmenin kolay olması için ara yüzey enerjisi teriminin azaltılması gerekir. Bu azalmayı sağlayacak en basit etken çekirdeğin kalıp duvarında oluşmasıdır. Düzlemsel bir kalıp duvarı ile temasta bulunan katı çekirdeğin oluşması şekil 2.4'de verilmiştir. Katı-sıvı ara yüzey enerjisi (γ_{KS}) parametresinin yöne bağımlı olduğu düşünüldüğünde, katının verilen bir hacmi için oluşan çekirdek Q ısıtma açısına sahip kesik küre şeklini aldığı zaman sistemin ara yüzey serbest enerjisi minimum değere ulaşacaktır.

Bunun olması için gerekli şart γ_{DS} , γ_{KD} ve γ_{KS} ara yüzey gerilimlerinin kalıp duvarı düzleminde denge halinde bulunmalarıdır.

$$\gamma_{DS} = \gamma_{KD} + \gamma_{KS} \cdot \cos Q \quad (2.15)$$



Şekil 2.4. Düzlemsel bir kalıp duvarında kesik kürenin heterojen olarak çekirdeklenmesi [2, 7]

Heterojen çekirdeklenme için gerekli enerji dengesi Kruz tarafından verilmiştir. Buna göre;

$$\Delta G_{Het} = \Delta G_{Hom} \cdot f(\theta) \text{ dir.} \quad (2.16)$$

Burada $f(\theta)$ şekil faktörüdür.

$$f(\theta) = \frac{(2 + \cos \theta)(1 - \cos \theta)^2}{4} \quad (2.17)$$

Homojen ve heterojen çekirdeklenmede kritik yarıçap miktarı r^* aynıdır. Fakat Gibbs serbest enerji miktarları farklıdır. Heterojen çekirdeklenme için Gibbs serbest enerji değeri homojen çekirdeklenmeden daha düşüktür. Bunun nedeni; heterojen çekirdeklenme mekanizmasında bulunan kalıp duvarı,

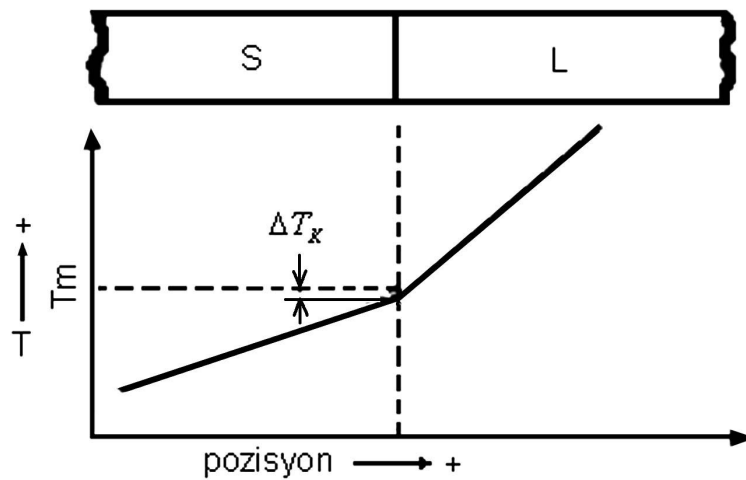
curuf, yabancı maddelerin, çekirdeklenmeye karşı gelen yüzey serbest enerjisini minimize etmesidir [1].

2.4. Sıvı-Katı Ara Yüzeyinde Sıcaklık Dağılımı

Sıvı-katı ara yüzeyinde sıcaklık gradyanı ara yüzey şeklinin kontrolünde önemli bir faktördür. Pozitif ve negatif olmak üzere iki tip sıcaklık gradyanı bulunmaktadır.

2.4.1. Pozitif sıcaklık gradyanı

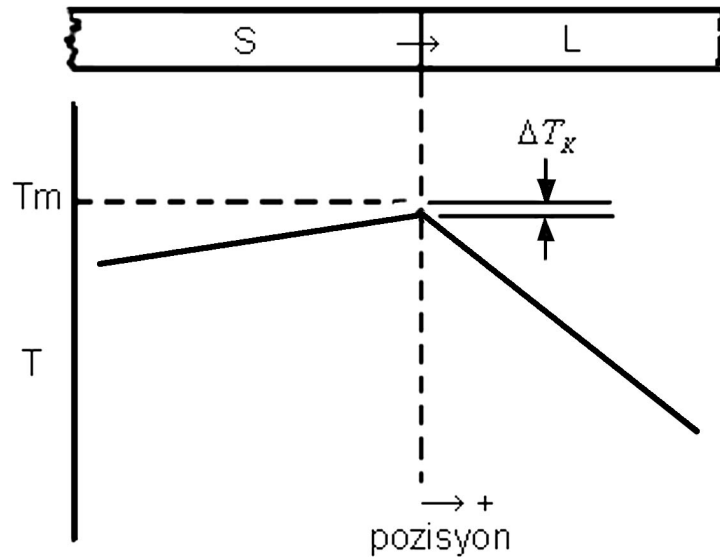
Tek yönlü ısı akışı ile katılaştıran bir çubukta ara yüzey önündeki sıvının sıcaklığı ara yüzey sıcaklığından ve katının sıcaklığından daha yüksektir [8-10]. Ara yüzeyin sıvıya doğru ilerlemesi için ΔT_k kadar kinetik alt soğuma yapması gerekir. Bu durumda sıvıdaki sıcaklık gradyanı pozitifdir (Şekil 2.5) [1].



Şekil 2.5. Pozitif sıcaklık gradyanı [1]

2.4.2. Negatif sıcaklık gradyanı

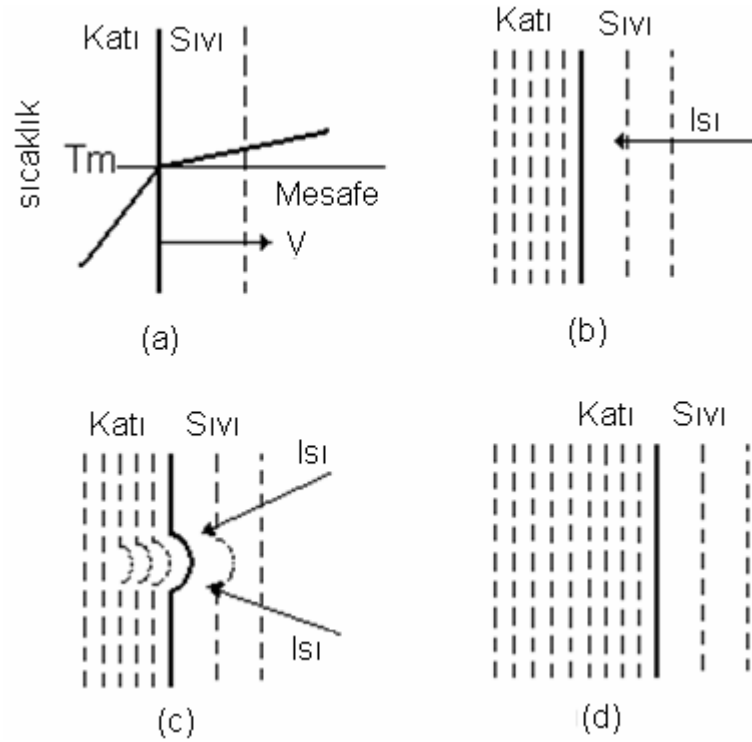
Tek yönlü ısı akışı ile katılaşılan bir çubukta sıvının sıcaklığı ara yüzey sıcaklığından daha düşüktür (Şekil 2.6). Bu durumda ara yüzey önündeki sıvı aşırı soğumuştur. Katı-sıvı ara yüzey sıcaklığı $T_m - \Delta T_k$ kadar ve genellikle 1°C den daha azdır.



Şekil 2.6. Negatif sıcaklık gradyanı [1]

2.5. Isı Akışı ve Ara Yüzey Kararlılığı

Büyüyen bir ara yüzeyin şeklini belirlemek için klasik termodinamik tanımlar yeterli olmamaktadır. Bu durumda ara yüzey kararlılığı kriterini kullanmak yararlı olacaktır. Saf metallerde katılaşma, katı-sıvı ara yüzeyinden iletilebilen ergime gizli ısı oranı ile kontrol edilmektedir. Isı iletimi ara yüzeydeki sıcaklık gradyanına bağlı olarak sıvı içinden veya katı içinden gerçekleşir. Saf bir malzemede kararlılık ısı akış yönüne bağlıdır. Düzlemsel ara yüzeyin (V) hızında sıvıya doğru büyüdüğünü kabul edelim (Şekil 2.7).



Şekil 2.7. Düzlemsel ara yüzeyin sıcaklık gradyanı ve ara yüzey sıcaklık izotermi [3] a) pozitif sıcaklık gradyanı, b) ısı akış yönü, c) ısıнын ara yüzeye akışı, d) ara yüzeyin düzlemsel katılaşması

$$K_S \cdot G_S = K_L \cdot G_L + V L_V \quad (2.18)$$

$$V L_V = K_S \cdot G_S - K_L \cdot G_L \quad (2.19)$$

Buradan V , $(K_S \cdot G_S - K_L \cdot G_L)$ 'ye bağlıdır. Eş. 2.18 ve Eş. 2.19'daki eşitliklerde;

K = Termal iletkenlik

L_V = Birim hücrenin gizli ergime ısısı

V = Büyüme hızı

G_S = Katının sıcaklık gradyanı

G_L = Sıvının sıcaklık gradyanı

Bu eşitlik düzlemsel ara yüzey için geneldir ve katı süper ısıtılmış sıvıya doğru büyüdüğü zaman düzlemsel ara yüzey kararlıdır. Büyüme sırasında; sıcaklık dalgalanmaları ya da (V) büyüme hızında bölgesel artış sonucu ara yüzeyde küçük bir şişkinlik oluşur (Şekil 2.7.c). Katıdaki sıcaklık gradyanının düşük, sıvıdaki sıcaklık gradyanının yüksek olması nedeni ile şişkinlik olan bölgeye doğru ısı akışı meydana gelir. Sonuç olarak $(K_S.G_S - K_L.G_L)$ azalır ve buna bağlı olarak (V) büyüme oranı da azalacaktır. Bunun sonucunda şişkinlik kaybolur (Şekil 2.7.d).

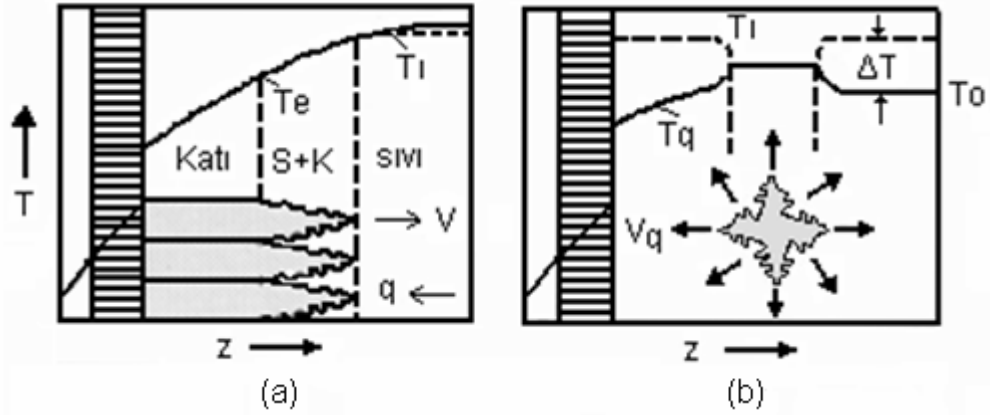
Fakat katının süper soğutulmuş sıvıya doğru büyümesi durumunda sıvı içinde negatif sıcaklık gradyanı oluşur. Bu durumda ısı şişkin uç kısımdan, şişkinliğin dışındaki bölgelere doğru uzaklaşır. Şişkinliğin dışındaki bölgeler katının, yani ara yüzeyin tercihli büyümesini sağlar. Bu yüzden süper soğumuş sıvıya doğru ilerleyen katı-sıvı ara yüzeyi doğal olarak kararsızdır. Şişkin yumruda katının sıcaklık gradyanı değişmez, sıvının sıcaklık gradyanı azalır. Bunun sonucunda $(K_S.G_S - K_L.G_L)$ yükselir ve ara yüzey hızı artar.

2.6. Hücresel ve Dendritik Katılaşma

Düzlemsel bir ara yüzeyde, yapısal alt soğumaya uğramış bir bölgenin olması durumunda ara yüzeyde kararlı çıkıntılar oluşur. Eğer ısı akışı tane büyüme yönünün tersine doğruysa ara yüzeyde oluşan çıkıntılar tekrar erir. Bu durum yönlendirilmiş ve sütunsal katılaşmada baskı altında büyüme olarak adlandırılır.

Fakat ısı akışı ara yüzey ilerleme yönündeyse (ısının kristalden eriyiğe doğru akışı) dendritler alt soğumaya bağlı olarak serbestçe büyüyebilir. Şekil 2.8. a'da sütunsal büyüme, Şekil 2.8. b'de ise eş eksenli büyüme grafikleri verilmiştir. Şekil 2.8. a'da pozitif sıcaklık gradyanı olduğu ve büyümenin ısı akışına ters yönde olduğu görülmektedir. Şekil 2.8. b'de ise alt soğumaya bağlı olarak dendritik katılaşma gerçekleştiği görülmektedir. Dendritik katılaşmada dendrit uçları alt soğuma olan bölgelere doğru ilerler. Tane

sınırları birinci dendrit gövde eksenine paraleldirler ve katı boyunca kesintiye uğramazlar. Her dendrit, komşu dendritlerle düşük açılı sınırlara sahiptir ve dendrit gövdeleri, arka arkaya yan kollar yaparak taneyi oluştururlar (Şekil 2.8) [11].



Şekil 2.8. (a) Sütunsal, (b) dentritik büyüme grafikleri [11]

2.6.1. Dentritik büyüme yönleri

Büyüme koşulları dendrit oluşumunu sağlayacak şekilde olduğunda, hücreler hızlıca dendritlere dönüşürler [12]. Bu dendritlerde, ikinci ve üçüncü kollar ve kristalografik olarak belirlenen büyüme yönleri ortaya çıkar. Çeşitli malzemeler için tercih edilen büyüme yönleri Çizelge 2.1’de verilmiştir [1]. Tercihli yönlerde büyüme etkisi büyüme tarzına etki eden önemli bir faktördür. Düzlemler ara yüzeylerde (Şekil 2.10) dendrit yönlenmesinin, yavaş büyüyen düzlemlerce çevrelenmiş bir ucun ilerlemesi şeklinde olduğu düşünülür. Şekil 2.9.a, $\langle 100 \rangle$ yönünde büyüyen bir uç ve çevresinde dört tane büyüyen $\{111\}$ düzlemi içeren bir dendritin şematik gösterimidir.

Buna ek olarak, şartların değişmesiyle $\{111\}$ düzlemlerinin daha hızlı büyümesi ve $\{100\}$ düzlemlerinin geride kaldığı durumda ise dendrit büyüme yönü $\langle 111 \rangle$ olacaktır.

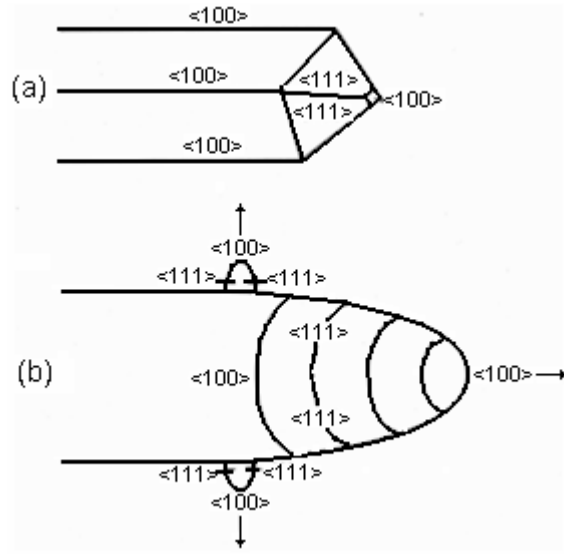
Çizelge 2.1. Çeşitli malzemeler için tercih edilen büyüme yönleri [1]

Yapı	Dendrit Yönlenmesi	Örnek
Yüzey Merkezli Kübik	$\langle 100 \rangle$	Al
Hacim Merkezli Kübik	$\langle 100 \rangle$	δ -Fe
Hacim Merkezli Tetragonal	$\langle 110 \rangle$	Sn
Hegzagonal Sıkı Paket	$\langle 1010 \rangle$	H ₂ O (Kar)
	$\langle 0001 \rangle$	Co ₁₇ Sm ₂ (Cu)

Düzlemsiz dendritik büyüme tarzına sahip metallerde büyüme yönünün nedenini açıklamak kolay değildir. Deneysel çalışmaların sonuçlarına göre, bu durumda Şekil 2.9.b'de görülen büyüme tarzı geçerlidir.

Weinberg ve Chalmers [13] tarafından, yavaş büyüyen düzlemlerin en sıkı paketlenmiş düzlemler olacağı ve böylece ana dendrit yönünün, kenarları en sıkı paketlenmiş düzlemler olan bir piramidin ekseni olacağı açıklanmıştır. Bu yönler gövde için $\langle 100 \rangle$ doğrultusunda oluşur.

Büyüme hızı V , ve dendrit yapısı veya aralığı, λ , büyük oranda dendrit uç bölgesinin davranışına bağlıdır. Uçun büyümesi sırasında saf metallerde olduğu gibi sadece ısı açığa çıkabilir veya alaşımlarda olduğu gibi ısı ile birlikte çözünen atomlar da dışarı atılabilir. Bu tip yayınma kontrollü işlemler, sıvı içindeki sıcaklık gradyanları tarafından yönlendirilirler [12].



Şekil 2.9. Kübik kristalli malzemelerde $\langle 100 \rangle$ yönünde dendrit uçlarının büyümesi. Burada a) düzlemlü büyüme b) düzlemsiz büyüme [13]

Sıvıdaki sıcaklık gradyanı ve ara yüzey ilerleme hızına bağlı olarak, çeşitli mikroyapılar oluşur. Bu tip mikroyapılar Şekil 2.10'da şematik olarak verilmiştir. Birçok farklı malzeme türünde aynı tip mikroyapılar gözlenebilir. Flemings [13] tarafından tarif edilen sınıflandırma McLean [14] tarafından aşağıdaki şekilde uyarlanmıştır (Şekil 2.10).

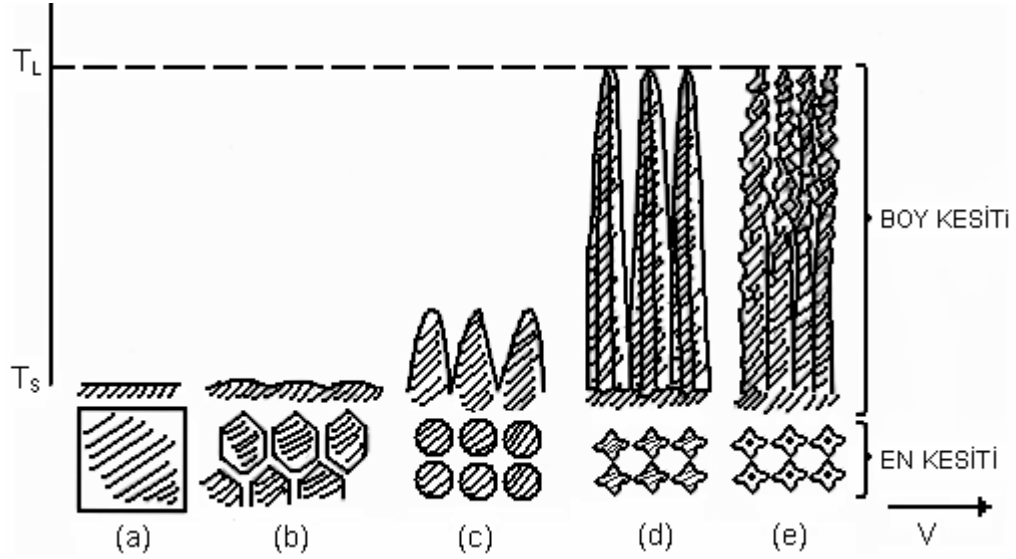
(a) Düzlemsel ara yüzey,

(b) Hücresel yapı: Burada ısı akış yönüne paralel yönde hücreler oluşur.

(c) Hücresel yapı: Burada kübik malzemeler için $\langle 100 \rangle$ olan tercihli kristalografik büyüme yönüne paralel silindir şekline yakın hücreler oluşur. Normal olarak, ısı akış yönü ve tercihli büyüme yönü arasında çok küçük bir yönlenme farkı bulunur.

(d) Hücresel / dendritik yapı: Burada kristalografik yöne paralel uzanan ve kollara sahip artı şeklinde taneler oluşur.

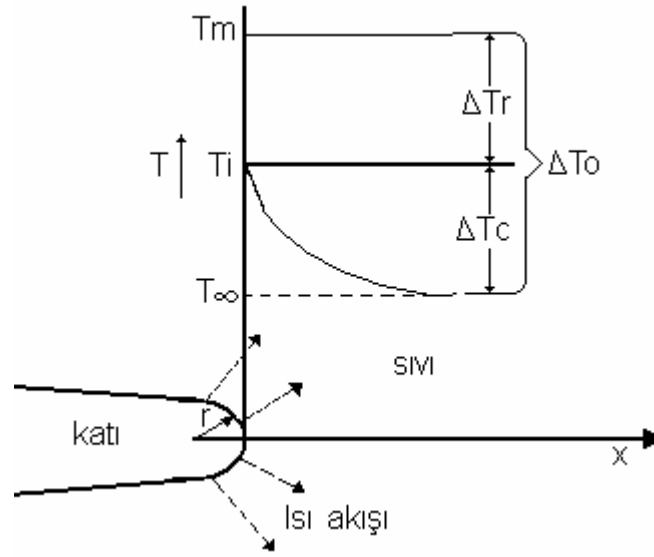
Dendritik yapı. Burada hücresel / dendritik yapının (d) kolları üzerinde ikincil ve daha fazla dendrit kolları ortaya çıkar.



Şekil 2.10. Sabit bir sıcaklık gradyanı G_L ve artan V için sıvı-katı ara yüzey yapısının şematik gösterimi. Burada yapısal alt soğumanın olduğu bölge, alaşımın dengeli katılaşma aralığına doğru uzar [14]

2.6.2. Dendrit uç yarıçapı

Dendrit uç yarıçapı kristalin büyümesinde önemli rol oynayan bir faktördür. Dendritik katılaşmada birincil dendrit kollarından ikincil ve üçüncül dendrit büyümektedir. Büyüyen dendrit kollarının uçları detaylı bir şekilde incelenirse düzlemsel ara yüzeyden farklı olduğu görülür. Isı dendrit uçlarından üç boyutlu olarak uzaklaşır (Şekil 2.11).



Şekil 2.11. Dendrit ucundaki sıcaklık dağılımı [3]

Eğer katının izotermal olduğunu kabul edersek $G_S=0$ olduğu zaman dendrit ucunun büyüme oranı, (2.19)'daki eşitliğe benzer bir eşitlikle verilebilir. Dendrit ucundaki ısı akışı için sıvının sıcaklık gradyanı (G_L) yaklaşık olarak $\Delta T_c/r$ olarak verilebilir. Şekil 2.11'de;

T_m = ergime sıcaklığı

ΔT_o = ergime sıcaklığı ile süper soğutulmuş sıvı sıcaklığı arasındaki fark

ΔT_r = alt soğuma

r = dendrit yarıçapı

T_∞ = süper soğutulmuş sıvının sıcaklığı

T_i = ara yüzey sıcaklığı

ΔT_c = ara yüzey sıcaklığı ile süper soğutulmuş sıvının sıcaklığı arasındaki farkı ifade eder. Eş. 2.19'dan büyüme oranı;

$$V = \frac{-K_L \times G_L}{L_v} \cong \frac{K_L}{L_v} \times \frac{\Delta T}{r} \quad (2.20)$$

Olarak bulunur. Şekil 2.11'de görüldüğü gibi ergime sıcaklığının altında ΔT_r kadar alt soğuma meydana gelir.

$$\Delta T_r = \frac{2\gamma T_m}{L_v r} \quad (2.21)$$

$\Delta T_r = \Delta T_o$ olduğu zaman, dentrit ucunun yarıçapı minimum değere gelecektir. Bu kritik çekirdek yarıçapıdır.

$$r^* = \frac{2\gamma T_m}{L_v \Delta T_o} \quad (2.22)$$

Sonuç olarak Şekil 2.13'den;

$$\Delta T_o = \Delta T_c + \Delta T_r \text{ olur ve Eş. 2.21'den} \quad (2.23)$$

$$V \cong \frac{K_L}{L_v} \times \frac{1}{r} \left(1 - \frac{r^*}{r} \right) \quad (2.24)$$

Büyüme hızı denklemi elde edilir. Maksimum büyüme hızı $r=2r^*$ şartında sağlanır.

3. YÖNLÜ KATILAŞMA

3.1. Giriş

Yönlü katılaştırma yönteminin temel prensibi soğumanın kontrol altına alınmasıdır. Yönlü katılaştırma işleminde döküm parça (kalıp) genellikle önceden belirlenmiş ve yaklaşık sabit bir V hızı ile hareket ettirilir [15]. Normal olarak ısı kaynağına göre sabit olan bu hız, dökümün bir kısmını sıvı olarak tutarken diğer kısmını ise ergime sıcaklığının altında olmasını sağlar. Bundan dolayı katılaştıran malzeme üzerinde bir sıcaklık gradyanı oluşur [8, 10,16,17].

Yönlü katılaştırma sisteminde ısıнын sistemden hangi şekilde ve hangi hızda uzaklaştırıldığıнын bilinmesi önem taşır. Karmaşık şekilli döküm parçalarda ısı transferi hesaplamalarının güçlüğü nedeni ile deneysel çalışmalar genellikle basit silindir şekiller için yapılmıştır. Bunun nedeni basit silindir şekle sahip parçalarda basit ısı transferi mekanizmalarının geçerli olmasıdır [18].

Yönlü katılaştırmış ve tek kristalli malzemelerin başta elektronik ve optik endüstrisinde olmak üzere geniş kullanım alanı bulunmaktadır. Yüksek sıcaklık dayanımı gerektiren yerlerde bu malzemelerin kullanılması uygundur. Fakat üretimlerinin zor ve pahalı olması geniş olması gereken kullanım alanını kısıtlamıştır. Elektronik endüstrisinde yarı iletken kristaller çok önemlidir. Son 10 yıl içerisinde büyük silisyum kristalleri için talep hızlı bir şekilde artmıştır. 1986 yılında üretilen silisyum hacminin her yıl dünya çapında yaklaşık 3000 ton olabileceği tahmin edilmiştir. Son zamanlarda $\langle 100 \rangle$ ve $\langle 111 \rangle$ doğrultularında şekillendirilmiş 15-20cm çapında ve 1 metreden uzun silisyum kristallerinin çubuk üretimi son derece yaygındır [19].

Czochralski-silisyum tek kristal büyütme ile (CZ-silisyum) IC fabrikaları için üretilmektedir. Czochralski yöntemi ile alaşımlı ya da alaşımsız Al_2O_3 , $Y_2Al_3O_{12}$, $Y_3Fe_5O_{12}$, YAG gibi yüksek ergime dereceli oksit kristalleri elde

edilebilir. Bu kristaller; lazer çubuğu, lineer olmayan optik elemanlar ve çeşitli üstün katı hal aygıtlarında sensör olarak kullanılmaktadır [1].

1970' li yılların başından itibaren işleme maliyetini ve hurdayı düşürmek için şekillendirilmiş kristaller (levhalar, tüpler ya da delik içeren çubuklar) büyötmeye büyük para ve çaba harcanmıştır.

Ayrıca yüksek sıcaklıklarda çalışan türbin kanatlarının daha ucuz ve basit olarak üretilebilmesi için birçok üretici konu hakkında araştırma yapmaktadır. 1991 Temmuzunda EC-EURAMBRİTE firması tek kristalden üretilmiş türbin kanadının geliştirilmesi için bir araştırma fonu ayırmıştır. Bu çalışmada; tek kristalin türbin kanadı üzerinde büyümesi, çeşitli alaşımların denenmesi ve gerekli mekanik testlerin yapılması amaçlanmıştır [10].

Benzer bir çalışmayı da İsviçreli şirket Sulzer ile Alman motor imalatçısı MTU birlikte gerçekleştirmiştir. Sulzer ve MTU' nun işbirliği ile tek kristalli malzeme üretim tekniğı geliştirilmiştir. Geliştirilen bu yöntemle; tek kristalli malzemenin üretimi için taneyi yönlendiren özel bir ocağı ihtiyaç duyulur.

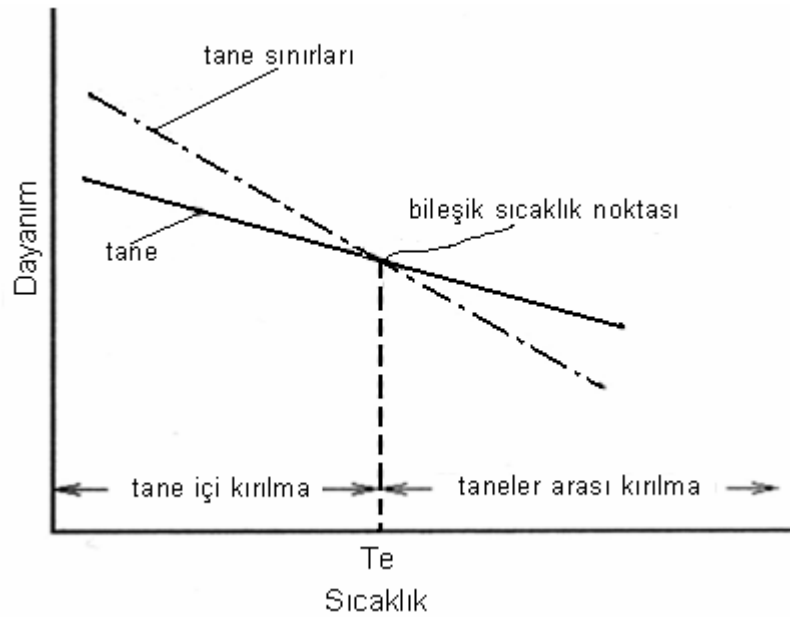
Sulzer ve MTU şirketleri bu yöntemde vakumlu bir fırın kullanmışlardır. Bir dış ısıtma kaynağı ve soğutucu kullanılarak ergiyiğın soğutulması tek yönlü olarak sürdürölür. Bu işlem oldukça hızlıdır. 20-30 dk içerisinde üretilen parçalar, 60-150 dk da üretilen malzemelerle kıyaslanabilirler. Oluşturulan mekanizma sayesinde daha karmaşık dizaynların üretilmesi mümkün kılınmıştır.

Geliştirilen bu sistem sayesinde üretim maliyeti düşürölmüştür. Versynder ve arkadaşları yönlü katılaşmış tek kristalli süper alaşımları yapısal parçalar olarak kullanmayı önermişlerdir [20]. Ayrıca üretilen malzemeler birçok çalışma koşullarında, motorlarda ve türbinlerde sürünmeye karşı oldukça iyi sonuçlar vermiştir [10].

3.2. Yönlü Katılaşmanın Avantajları

Genellikle oda sıcaklığında tane sınırları tanelerden daha mukavemetlidir. Fakat sıcaklık arttıkça tane sınırlarındaki mukavemet düşmekte, hatta artan sıcaklıkla tane sınırları mukavemet düşüş hızı tane içi mukavemetteki azalma hızından daha fazla olmaktadır.

Şekil 3.1' de T_e (bileşik sıcaklık) noktasının üzerindeki sıcaklıklarda iri taneli yapı, ince taneli yapıya oranla daha yüksek mukavemet gösterecektir. Bununla birlikte T_e noktasının gerilmeye bağlı olduğu görülmektedir. Gerilmenin yüksek olması aynı zamanda T_e noktasının yüksek olması demektir [21].



Şekil 3.1. Tane ve tane sınırları dayanımı-sıcaklık ilişkisi [21]

Sürünme gerinmesi artış hızı aşağıda verilen eşitlikte belirtildiği şekilde tane boyutunun karesi ile ters orantılıdır.

$$\text{Sürünme Gerinmesi Artış Hızı} = \frac{K\sigma D}{d^2 T} \quad (3.1)$$

Burada K sabit, σ uygulanan gerilim, D difüzyon katsayısı, d tane boyutu ve T sıcaklıktır. Dolayısıyla yüksek sıcaklıklarda tane sınırının kaymasını engellemek önem kazanmaktadır. En iyi çözüm, yüksek sıcaklık ve orta gerilme ortamlarında çalışan türbin bıçaklarında olduğu üzere malzemenin tümünün tek kristalden üretilmesidir. Yönlü katılaşmış malzemelerin, yüksek sıcaklıklarda sağladığı avantajlar [21]

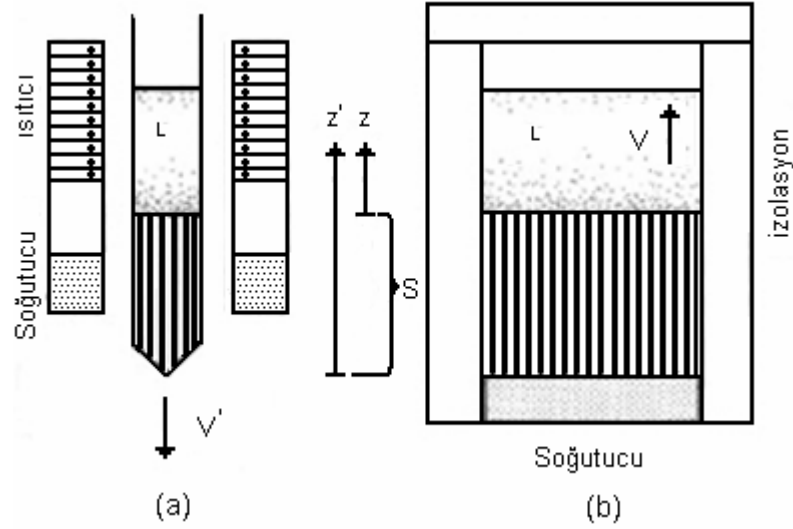
1. Boyuna yönlenmiş taneler, termal yorulma ve sürünme kayıplarının kaynağı olarak gözlenen zayıf, enine tane sınırlarını minimize eder.
2. $\langle 001 \rangle$ yönünde büyütülen taneler termal yorulma dayanımında önemli bir artış sağlar.
3. B, C, Zr vb. tane sınırı dayanım arttırıcı elementlerin minimize edilmesi ile katılaşma sıcaklığı arttırılarak yüksek sürünme dayanımı sağlanır.

3.3. Yönlü Katılaşma Sistemlerinin Sınıflandırılması

Yönlü katılaşma uygulamalarının başladığı yıllardan itibaren temel iki yöntem ön plana çıkmıştır. Bunlar;

- Bridgman yöntemi (Şekil 3.2.a)
- Sıvı metal soğutma yöntemidir (Şekil 3.2.b).

Bridgman yönteminde; bir pota, sabit bir sıcaklık gradyanı altında ve sabit bir V hızında fırın içinden aşağı doğru çekilir. Bu yöntem küçük numune boyutları için uygulanabilmekte ve istenilen pozitif sıcaklık gradyanının oluşturulması zaman gerektirdiğinden, üretimde kullanılması açısından maliyeti arttırmaktadır. Bu nedenle, daha çok araştırmalarda ve tek kristalli malzeme üretiminde kullanılır. Sıvı metal soğutma yönteminde de bridgman yönteminde olduğu gibi özellikler iyi bir şekilde kontrol edilebilir. Ancak bakır soğutucudan uzaklaştıkça G ve V değerleri değişeceğinden mikro yapıda uzaklığa bağlı farklılıklar oluşacaktır [1].



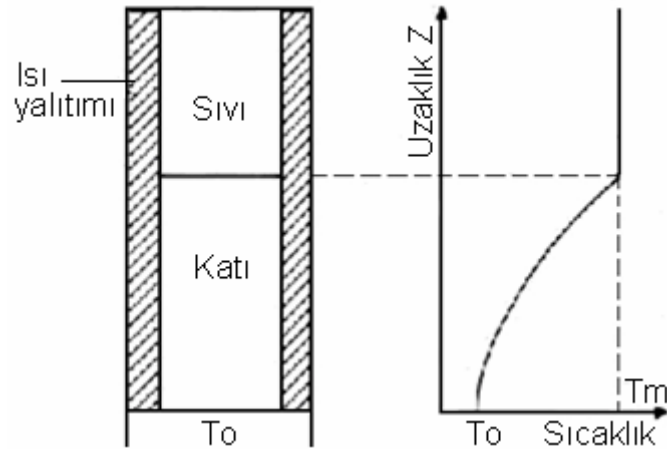
Şekil 3.2. Yönlü katılaşma uygulamalarında kullanılan iki temel yöntem. a) Bridgman yöntemi, b) Sıvı metal soğutma yöntemi [1]

Yönlü katılaştırma sistemlerinin sınıflandırılmasında McLean daha fazla detay verebilmek için sınıflandırmaya farklı bir yönden yaklaşmıştır. McLean tarafından yapılan sınıflandırmaya göre;

- 1-) Sabit döküm ve sabit fırın kullanılan uygulamalar.
- 2-) Hareketli fırın veya hareketli kalıp kullanılan uygulamalar..

3.3.1. Sabit kalıp ve sabit fırın kullanılan uygulamalar

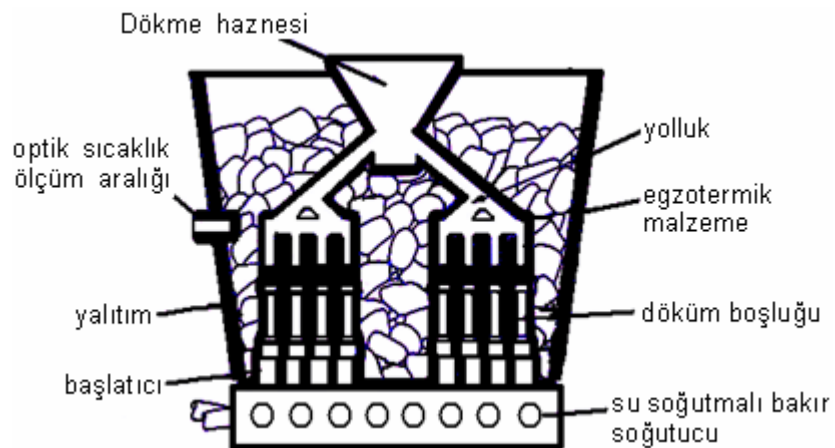
Yönlü katılaştırma için kullanılan bu basit yöntemde ısı çıkışının kontrol edildiği bir soğutucu üzerine, mükemmel bir şekilde yalıtılmış kalıp yerleştirilir (Şekil 3.3). Kalıba dökülen sıvı metalin ısısı yalnız tabanda bulunan soğutucu tarafından kontrollü bir şekilde transfer edilir. Kalıbın silindirik şeklinde olması durumunda ısı akışı silindirik eksenini boyunca dökümden soğutucuya doğru gerçekleşir. Diğer bir ifade ile katılaşma soğutucu yüzeyinden döküm parçaya doğru ilerler ve sıcaklık değişimi sadece katı içinde oluşur [1].



Şekil 3.3. T_e ergime sıcaklığında dökülen bir alaşım için sıcaklık dağılımı. Burada kalıbın kusursuz yalıtıldığı ve ısı çıkışının sadece tabandaki soğutucudan gerçekleştiği varsayılmıştır [1]

Egzotermik yöntem

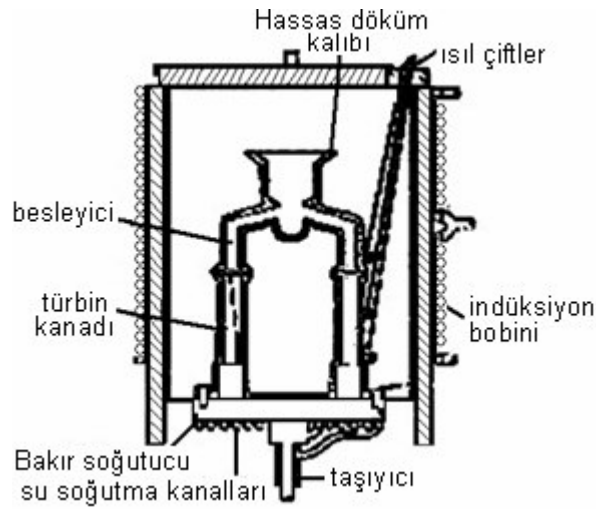
Egzotermik yöntem yönlü katılaştırma düzeneklerinin ilk örneklerindendir ve bakır soğutucu üzerine yerleştirilen, çevresi egzotermik malzeme ile sarılı kalıptan oluşturulmuştur. Guard tarafından 1960 yılında oluşturulan bu düzeneğin en büyük dezavantajı yüksek sıcaklık gradyanı elde edilememesidir (Şekil 3.4) [1].



Şekil 3.4. Yönlü katılaştırılmış türbin kanatlarının egzotermik malzemeler kullanılarak üretimi için kalıp-soğutucu düzeneğinin şematik olarak gösterimi [1]

Sıcaklık gradyanı oluşturan bobin yöntemi

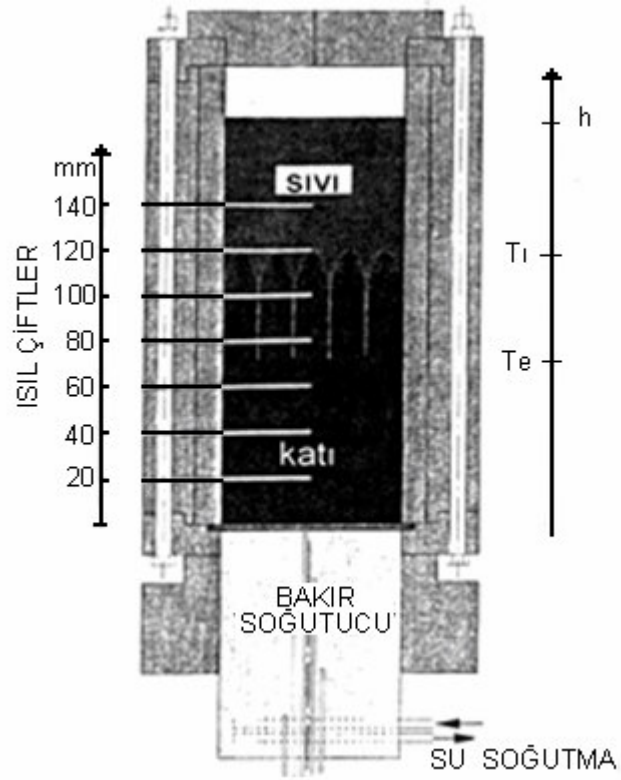
Bu yöntemde bakır veya dökme demir soğutucu üzerine hassas döküm malzemeleri kullanılarak üretilmiş bir kalıp yerleştirilir. Kalıp çevresi, kalıba ısı sağlayabilecek endüksiyon bobinleri veya rezistans telleri ile sarılır, (Şekil 3.5). güç kesme (power-down) yöntemi olarak da bilinen bu yöntemde yönlendirme kademeli olarak yerleştirilen rezistans telleri ile yapılır [1].



Şekil 3.5. Yönlü katılaştırma için güç kesme yöntemi kullanan düzeneği [1]

Kalıp-soğutucu ikilisi ile yönlendirme yöntemi

Bu yöntem, basit su soğutmalı bir soğutucunun üzerine iyi yalıtılmış bir kalıbın yerleştirilmesi prensibine dayalıdır. Bakır soğutucunun içerisinden geçen soğutma suyu, malzeme içerisinde dik bir gradyan oluşmasına yardımcı olur. Şekil 3.6'da kalıp-soğutucu ikilisine bir örnek gösterilmektedir [1].

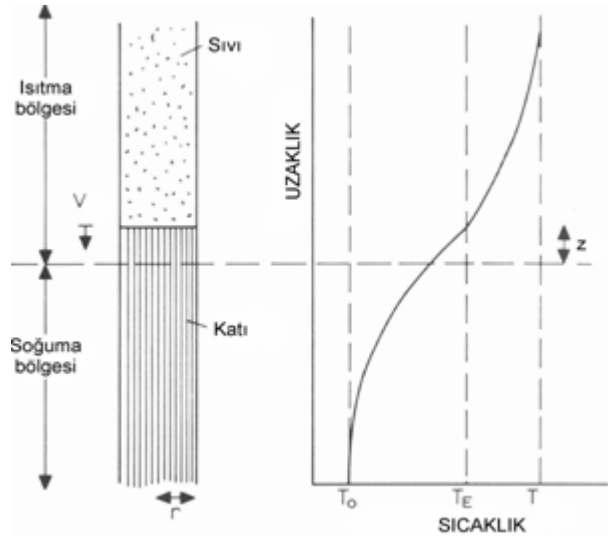


Şekil 3.6. Kalıp-soğutucu ikilisi ile yönlü katılaşma prosesi [1]

3.3.2. Hareketli fırın veya hareketli kalıp kullanılan uygulamalar

Bu yöntem yönlü katılaştırma için genellikle laboratuvar ve ticari uygulamalarda yaygın olarak kullanılmıştır. İlk defa Bridgman tarafından kullanıldığı için onun adı ile anılır. Yönlü katılaştırma işlemi için, fırın sabit tutularak kalıp fırın içinden aşağıya doğru çekilir veya kalıp sabit tutularak, fırın kontrollü olarak hareket ettirilir [22].

Fırın sabit tutularak, kalıbın hareket ettirildiği bir sistem için sıcaklık dağılımı Şekil 3.7'de verilmiştir. Bu şekil silindirik bir kalıpta ısıtma ve soğutma geçiş bölgesinde, katı-sıvı ara yüzeyin mesafe ve sıcaklığa göre konumunu göstermektedir. Bu sistemde katı-sıvı ara yüzey hızı (V) arttıkça z değeri azalır ve dik eksen boyunca katılaşma $x > 0$ şartında mümkün olabilir [22].



Şekil 3.7. Yönlü katılaştırılan bir çubuğun şematik gösterimi. Burada çubuk sabit bir ısıtıcıya göre hareket ettirilmektedir [22]

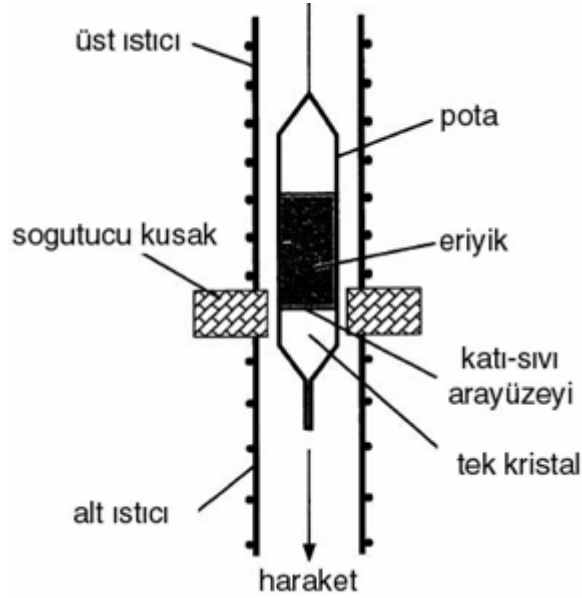
Bridgman yöntemi

Yönlü katılaştırma ve tek kristal üretimi konusunda en çok kullanılan sistem Bridgman tipi düzeneklerdir. Bunlar iki kategoride toplanabilir [9,14-20]. Birincisi laboratuvar ölçekli düzenekler, ikincisi ise ticari ölçekli düzeneklerdir. Şekil 3.18'de Bridgman yönteminin şematik gösterimi verilmiştir [23].

İlk Bridgman düzeneği 1925' te yapılmıştır. 1936-1946 yılları arasında Stockbarger bu düzeneği geliştirerek kullanmıştır. Bu teknik Bridgman-Stockbarger yöntemi olarak kabul edilse de Tamman 1925 ve Obreimov 1924 benzer yöntemler kullanarak tek kristal imal etmişlerdir. 1951 yılında Buckley bu tekniğin tarihsel yönünü araştırıp, tekniğe Bridgman tekniği adını vermiştir [15].

Bridgman yönteminin temel prensibi soğumanın kontrol altına alınmasıdır [24]. Aynı zamanda iyi özellikler elde etmek için istenilen yönde dik bir sıcaklık gradyanı oluşturmak gereklidir. Tek kristal üretim yöntemlerinde ve yönlü katılaşmanın sağlanması için ısıtıcının sistemden hangi şekilde ve hangi hızda uzaklaştırıldığına bilinmesi gerekir. Karmaşık şekilli döküm parçalarda

ısı transferi hesaplamalarının güçlüğü nedeni ile deneysel çalışmalar genellikle basit silindir biçimli şekiller için yapılmıştır [25].



Şekil 3.8. Bridgman tekniği ile tek kristal oluşturulması [23].

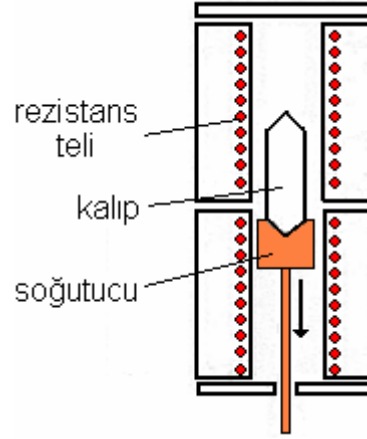
Yönlü katılaşma ya da kayık modeli

Bu yöntem bir pota ya da fırın içerisindeki ergiyeğin katılaşma sıcaklığından yavaşça soğutulmasını içermektedir. Soğutma üç teknikle gerçekleştirilir.

- Fırından potanın indirilmesi.
- Potanın sabit, fırının hareketli olması.
- Kademeli ısıtıcı bulunan bir fırın içerisinde sıcaklık gradyanı oluşturma.

Bridgman metodunda fırın sıcaklığı sabit tutulur ve konik bir kalıp pozitif sıcaklık gradyanı oluşturacak şekilde, sabit bir hızla fırından aşağıya çekilir [14-18]. Stockbarger dik bir sıcaklık gradyanı elde etmek amacıyla fırının ortasından ayırıcı bir kanatçık kullanmıştır. Tipik bir Bridgman-Stockbarger düzeneği Şekil 3.9'da gösterilmiştir. Bridgman metodunun yatay versiyonu bazı avantajlara sahiptir. Kayık ölçüsü ve şekli değişken olabilir. Böylece farklı ölçü ve şekillerde kristal büyümesi sağlamak mümkündür. Eğer

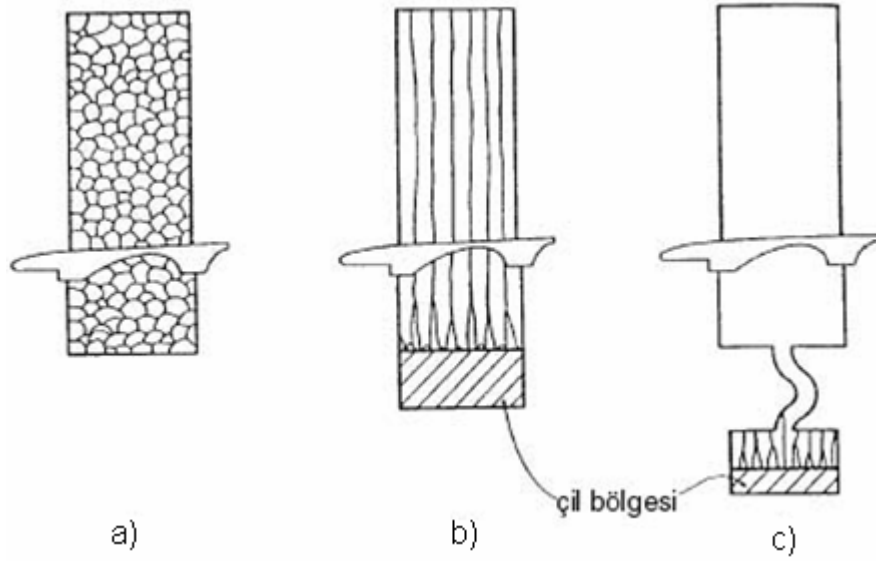
katılaşma uygun yönlenmiş bir kristalden başlarsa tercihli yönlenmiş kristaller büyütülebilir [1].



Şekil 3.9. Tipik Bridgman-Stockbarger düzeneği [1,8]

Yarı iletkenler (InSb, InAs, GaAs), düşük ergime dereceli metaller (Sn, Bi, Zn v.s) ve Germanyumun tek kristal büyütmesinde bu metot yaygın olarak kullanılmaktadır. Kademeli ısıtıcılı fırınlar, azaltılmış yer çekimi şartları altında makroskobik homojenlik için sıkça kullanılmaktadır [1].

Bu yöntem yetmişli yılların başında türbin kanatlarının üretimi için endüstriyel bir metot haline getirilmiştir. Nikel bazlı süper alaşımların geleneksel dökümü eş eksenli taneler ile sonuçlanmaktadır (Şekil 3.10.a). Eşeksenli türbin kanatlarında mekanik yüklemde kırılma, zıt tane sınırları boyunca ilerler. Yönlü katılaşmanın kullanımı ile uzun sütunsal taneler ya da tek kristalli malzemeler üretilmiştir (Şekil 3.10.b ve Şekil 3.10.c) Her iki durumda da sütunsal tanelerin katılaşması soğuk bir yüzeyle başlamaktadır. Tek kristal büyümesi için, tek tanenin büyümesine izin veren birçok farklı tane seçici tasarımı yapılmıştır. Tane yapısının modifikasyonu, termal yorulmayı düşürerek malzeme ömrünün 8 kat artmasını sağlar [1].



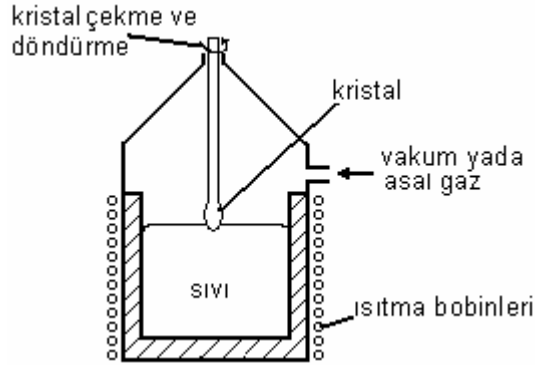
Şekil 3.10. Türbin kanatlarının tane yapısının kontrolü.
a) Geleneksel eş eksenli taneler, b) Yönlendirilmiş taneler, c) Tek kristal [1]

Kristal çekme yöntemi

Bu metot soğutulmuş bir kristalin (kök) eriyik içerisine daldırılması ve sonra yavaş yavaş dışarıya çekilmesinden oluşmaktadır (Şekil 3.11). Bu metot tek kristalli malzeme üretimi için ilk tanımı yapan Czochralski' den sonra adlandırılmıştır. Czochralski metodu bazı avantajlara sahiptir. Yönlendirilmiş bir kök kristal kullanıldığından dolayı yönlenme kontrolü kolaydır. Katılaştan kristal bir kalıp içerisinde değildir. Bu nedenle iç gerilim oluşumu azaltılır. Kristal işlem boyunca gözükmemektedir. Pota duvarı üzerinde istenmeyen tanelerin oluşumu elimine edilebilir [1].

Kristal çekme yönteminde, ısı akışı çap değişikliğine bağlıdır ve bu nedenle sıcaklık kontrolü çok önemlidir. Czochralski yönteminde kristalin ya da potanın ağırlığının ölçülmesi ile otomatik çap kontrolü kullanılır. Tüm işlem uygun bir bilgisayar programı ile kontrol edilir. Erigiyiğin ısıtılması rezistans kullanılmasıyla ya da indüksiyon ısıtması ile sağlanır. Çekme işlemi sırasında kristal, tesadüfi sıcaklık homojensizliğini düşürmek için döndürülür. Ticari ekipmanlarla ve kurulan düzeneklerle; Çekme oranı=0,2-10mm h⁻¹, Dönme

$\text{hızı} = 100 \text{ devir.min}^{-1}$ gibi geniş bir aralıkta modifiye edilebilir. Bu yöntemle kristal çekimi yapılan potanın kirliliğe sebep olmaması için yüksek saflıkta olması istenir. Çekilen kristalin hızlı soğumasını engellemek için pota üzeri termal izolasyon malzemesi ile kaplanır [1].



Şekil 3.11. Kristal çekme ya da Czochralski tekniği [1]

3.4. Alaşım Sistemleri

Gerek yönlü katılaştırmada, gerekse tek kristal üretiminde, alaşım sistemini belirlemede, parçanın kullanım yeri ve parçadan beklenen özellikler göz önüne alınmalıdır. Bu nedenle yönlü katılaştırma yönteminde süper alaşımlar, pbSn , AlCu ve saf Al gibi birçok alaşım sistemi kullanılabilir.

Yönlü katılaştırmış türbin elemanlarına örnek olarak içinde %12,5 tungsten bulunduran nikel esaslı MAR M-200 alaşımı verilebilir (Ek-1). Yönlü katılaştırma proseslerinde en çok kullanılan malzemelerden biride alüminyum ve alaşımlarıdır.

Alüminyum ve alaşımları, sahip oldukları düşük yoğunluk, yüksek elektrik ve ısı iletkenlik ve korozyon direnci ile ön plana çıkmıştır. Alüminyum ile ilgili en önemli sınırlılık 660°C olan ergime sıcaklığıdır. Bu değer, alüminyum ve alaşımlarının çok yüksek sıcaklıklarda çalışmasını engeller. Ancak bu değer aynı zamanda, eritme kolaylığı bakımından avantaj olarak sayılabilir [26].

Alüminyum alaşımlarının olumlu özellikleri aşağıda verilmiştir;

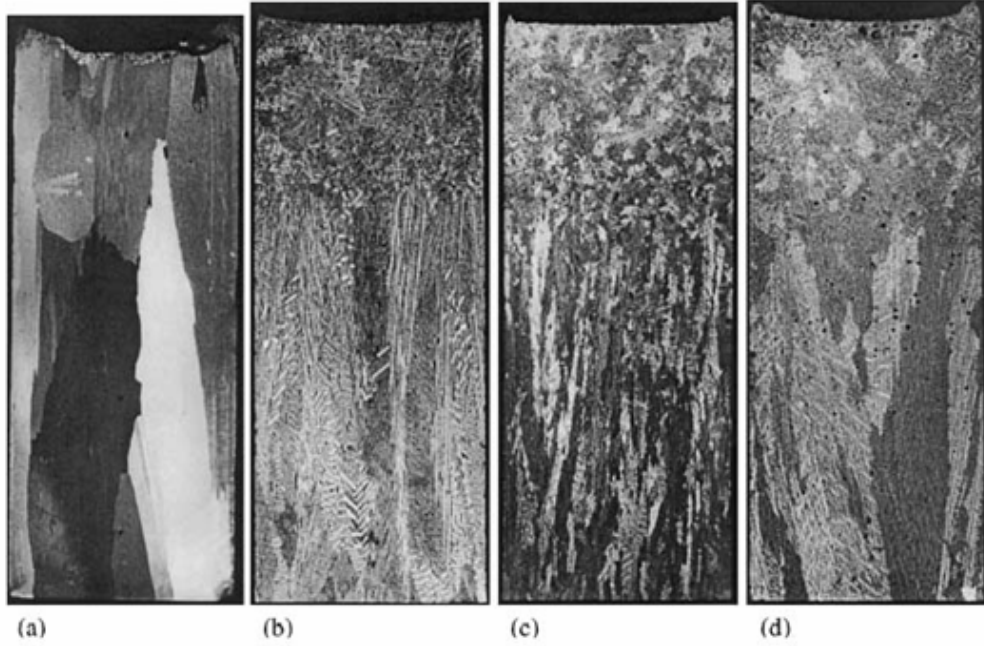
- İyi akışkanlığa sahiptir ve bu sebepten ince kesitleri doldurabilir.
- Ergimiş alüminyumdan kalıba ısı transferi çok hızlı olduğundan, kısa soğuma zamanları sayesinde hızlı üretim olanağı sağlar.
- Alüminyum ve alaşımlarında çözülebilen tek gaz hidrojendir ve üretim içinde kolaylıkla kontrol altına alınabilir.
- Alüminyum alaşımlarının sıcak yırtılma eğilimleri düşüktür.
- Alüminyum ve alaşımlarının kimyasal kararlılığı yüksektir [1].

3.5. Yönlü Katılaşmada Tane Yapısı

Döküm parçaların çoğu gerilim alanlarının izotropik olduğu uygulamalarda kullanılmaktadır. Fakat temel olarak gerilimin bir eksen boyunca tek yönlü olması, bu eksen boyunca döküm parçanın özelliklerinin geliştirilmesine olanak tanır. Bu şekilde malzemeler üretmek için yönlü katılaştırma ve tek kristal en yaygın kullanılan metotlardan iki tanesidir [27].

Gerilimin bir eksen boyunca tek yönlü olması için parçanın sütunsal taneli (yönlü katılaşmış), ya da tek kristalli olması gerekmektedir. Eş eksenli büyüme metallerin genel bir taneseli katılaşma özelliğidir. Ergiyiğin katılaşması sırasında katılaşma yönü tanelerin morfolojisini belirler.

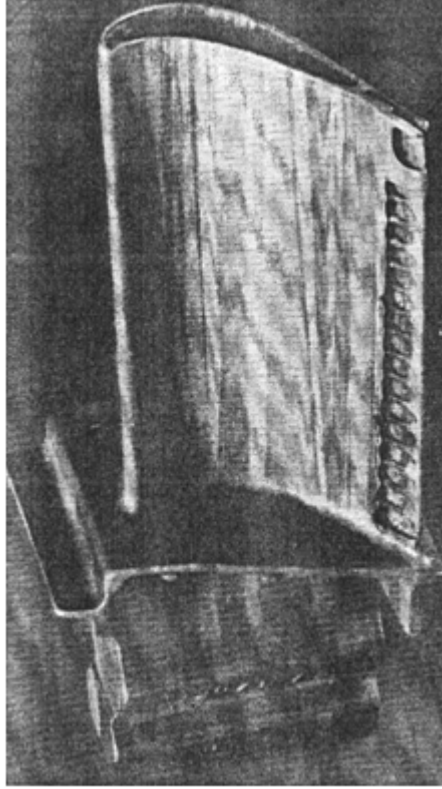
Katılaşmada, katılaşma kuşağına dik büyüyen sütunsal tanelerin şeklini geniş bir şekil faktörü karakterize eder. Sütunsal katılaşma kuşağında olmayan taneler dairesel biçimde olabilir. Katılaşma sonucu oluşan taneseli yapı kalıptaki ısı akışı şartlarına bağlıdır. Resim 3.1’de Al-Si alaşımının katılaşması sonucu taneseli yapıları görülmektedir [28].



Resim 3.1. Al-Si alaşımasının katılaşması sonucu oluşan tane yapıları [28].
 a) %99,99 saf Al, döküm sıcaklığı 759°C., b) Al-%3 Si, döküm sıcaklığı 763°C., c) Al-%7 Si, döküm sıcaklığı 746°C., d) Al-%11 Si, döküm sıcaklığı 768°C

Bir sütunsal tane oluşumunun diğer yolu da eş eksenli tanelerin dendritik olarak büyümesidir. Ancak dendrit kollarının sıvıdaki ilerlemesi için pozitif sıcaklık gradyanının sağlanması gereklidir. Dikey Bridgman yönteminde sıvı-katı arasında hayali bir makroskobik ara yüzey düşünülebilir. Bu ara yüzeyin üst kısmında metal tamamen sıvıdır. Burada kullanılan soğutucu ya da kademeli fırın sistemi sayesinde ısı akışı ve yönlenme meydana gelir [28].

Yönlü katılaşmanın önemli bir örneği, türbin kanadı Resim 3.2.'de görülmektedir. Bu parçalar esas eksenleri boyunca hem yüksek gerilime, hem de yüksek sıcaklığa maruz kalmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda tane sınırları, tanelerden daha zayıf olduğu için ve üzerlerindeki gerilim etkisini minimize etmek için tane sınırları ana gerilim eksenine hizalanmıştır (Sütunsal olarak yönlendirilmiştir) [29].



Resim 3.2. Gaz türbin motorları için üretilen kanat [29]

Sonuç olarak sütunsal ve eş eksenli taneler sıcaklık profiline göre oluşmaktadır. Sütunsal tanelerin oluşumu çeşitli termal olaylara dayalıyken, eş eksenli taneler kendiliğinden oluşma eylemi içerisinde.

3.6. Geleneksel Döküm İle Yönlü Katılaştırma Arasındaki Farklar

Yönlü katılaştırma tekniğinde; katılaşma hızı (V) ve sıcaklık gradyanı (G) parametrelerinin etkili olduğu daha önceki bölümlerde anlatılmıştır. Ayrıca, alaşımın başlangıç kompozisyonu (C_0), mikroyapıyı oluşturan birincil dendrit kol açıklığı (λ_1) parametreleri de bize ürünlerinin yapısı ve özellikleri hakkında bilgi vermektedir [30]. Bu parametreler ile mekanik özellikler arasındaki ilişkiler incelenerek elde edilen dökümlerin kalitesi hakkında bilgiler elde edilebilir. Geleneksel döküm ile yönlü katılaştırma yöntemleri arasındaki temel farklar Çizelge 3.1 ve Şekil 3.12’de verilmiştir. Eş eksenli katılaşmada:

- Katı-sıvı sıcaklık gradyanı negatiftir,
- Kalan sıvıdaki çekirdeklenme büyüme ile olur,
- Büyüme hızı değişir,
- Katılaşma koşullarının değişmesi ve tane büyüklüğünün genellikle küçük olması, rejim halinde katılaşmaya müsaade etmez [12].

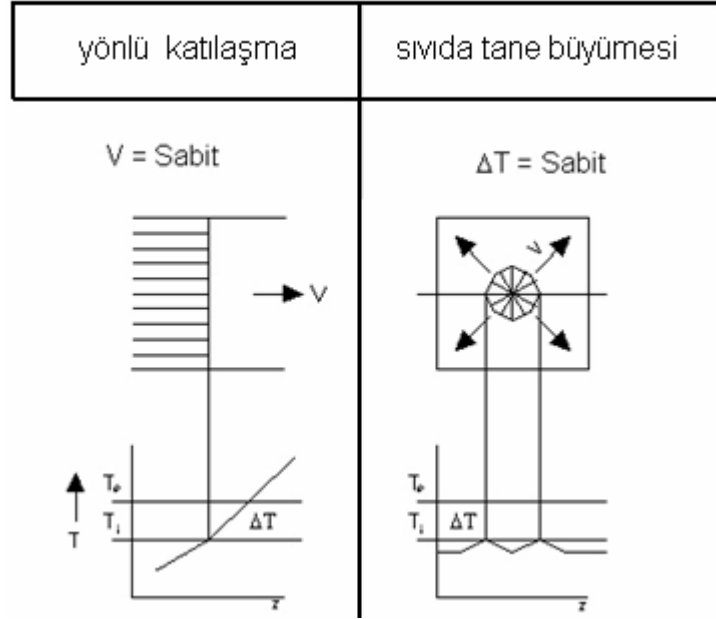
Çizelge 3.1. Yönlü ve geleneksel katılaşma yöntemleri arasındaki farklar [1]

	Yönlü Katılaşma	Geleneksel Döküm
İşlem değişkeni	V_{pota}	$\Delta T_{ergiyik}$
İç değişken	ΔT (alt soğuma)	r^* , V (çekirdeklenme ve büyüme hızı)
Ergime gizli ısısının verilme yolu	Katıya doğru	Sıvı ve katıya doğru
Ara yüzeydeki sıcaklık gradyanı	$G > 0$ (pozitif gradyan)	$G < 0$ (negatif gradyan)
Büyüme hızı	Yaklaşık sabit	Çekirdeklenmeye ve alt soğumaya bağlı olarak değişir

Yönlü katılaştırma bazı yapısal özelliklerin optimize edilmesi için ısı akışının ve mikro yapının kontrol edilebilmesini sağlar. Bu yaklaşım, deneysel çalışmalardan yola çıkılarak güvenilir endüstriyel uygulamalar yapılabilmesi amacıyla gelişme göstermiştir ve bazı gaz türbin kanatlarından, nikel ve kobalt bazlı süper alaşımların üretimine kadar kullanılmıştır [31].

Yönlü katılaştırma işlemi alüminyum alaşımlarına başarı ile uygulanır. Bu yöntem ile tane yapısının iyileştirilmesinin yanı sıra, gözenek miktarı da azaltılabilir. Yönlü katılaşma yüksek sıcaklık gradyanı altında gerçekleştirildiği zaman dendritler arası kanalların diplerine kadar sıvı beslemesi sağlanabilmekte ve yapı iyileşmektedir [32].

Yönlü katılaşma deneyleri sonucunda, alüminyum alaşımlarında verilen bir soğutma hızının artışıyla beraber ortalama gözenek boyutu ve gözenek hacim yüzdesi azalır.



Şekil 3.12. Yönlendirilmiş ve eş eksenli katılaşma koşullarının şematik olarak karşılaştırılması [1]

3.7. Yönlü Katılaştırma Sistemlerinde Kullanılan Fırınlara ve Özellikleri

Yönlü katılaştırma sistemlerinin çokluğu kadar, bu sistemlerde kullanılan fırınlarda çeşitlidir. Yönlü katılaşma sistemlerinde fırınlar kalıp içinde dik termal gradyan oluşturabilmek amacıyla kullanılırlar. Burada dik termal gradyan olarak verilen tanım, kalıp tabanı ile üst bölgeler arasında olabildiğince sıcaklık farkı oluşturmak ve kalıp tabanından yukarı doğru soğumuş bölgenin iletilerek, yönlü katılaşmayı sağlayacak değişken bir sıcaklık profilini oluşturmak olarak verilebilir [1, 13-15, 26-34].

Kullanılan alaşımın cinsine göre indüksiyon bobinleri ya da elektrik rezistans telleri kullanılabilir. Rezistans telli fırınlara aynı zamanda güç kesme fırınları da denir. Rezistansların belli aralıklarla kademeli olarak elektriklerinin azaltılmasıyla istenilen dik sıcaklık gradyanı sağlanır [1].

3.8. Kalıp Malzemesi

Kalıp yapımında kullanılan malzemenin önemi büyüktür. Bu malzemenin yüksek sıcaklığa dayanabilmesi ve gerek duyulan şekilde biçimlendirilebilmesi gereklidir. Yönlü katılaşma sistemlerindeki kalıplar incelendiğinde temel olarak iki farklı malzemenin kullanıldığı görülmüştür. Bunlardan birincisi grafit, diğeri ise Al_2O_3 (alümina)'dır. Bunların dışında SiO_2 seramik ve yüksek yalıtımlı seramik gibi malzemelerde kullanılmaktadır [1].

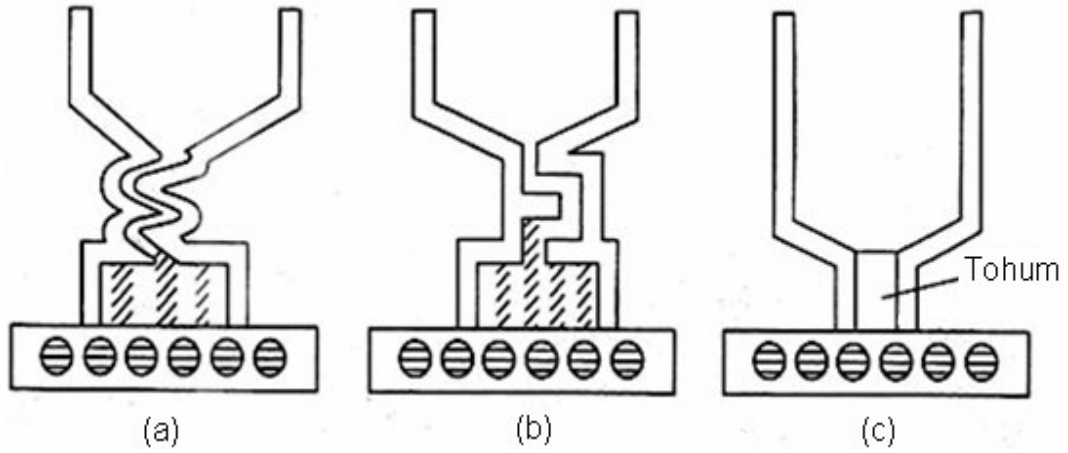
3.9. Soğutucu Özellikleri

Yönlü katılaşma işleminde ısının numuneden yönlü olarak uzaklaştırılması için genel eğilim, bakır malzemedan hazırlanmış ve içinden soğutma suyu geçirilen bir bloğun üzerine dökülecek kalıbı monte etmek şeklindedir. Bazı deneylerde bakır yerine çelik, kalıbın bir su haznesine batırılması, üzerine su püskürtülebilen çelik plaka yöntemleri kullanılmıştır [1].

Yapılan çalışmalar incelendiğinde soğutucu boyutlarının kalıba göre büyük olduğu görülmüştür. Bunun nedeni, deney başlangıcında suyun ilk verilişi sırasında, sıvı metale ani soğutma uygulanarak eş eksenli tane oluşmasının engellenmesi olduğu anlaşılmıştır. Soğutucu boyutunun büyümesi daha dik bir sıcaklık gradyanı oluşumuna yardımcı olur.

3.10. Tek Kristal Üretim Yöntemlerinde Kullanılan Tane Seçici Modelleri

Tek kristal üretiminde, tane seçici dışında yönlü katılaştırma yöntemlerine benzer üretim teknikleri kullanılır. Tane seçme işleminde uygun yönlenmiş bir tane gereklidir. Tane seçme işleminde genellikle Şekil 3.13'de gösterilen 1-Helis modeli, 2-Dik açılı tane modeli, 3-Tohumlama yöntemi olmak üzere 3 model kullanılır [26].

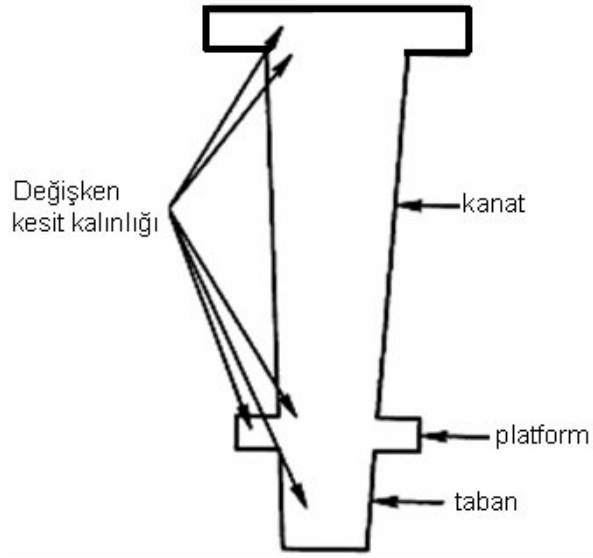


Şekil 3.13. Tek kristal üretiminde kullanılan tane seçici modelleri [26]
a) Helis modeli, b) Dik açılı tane seçici, c) Tohumlama yöntemi

3.10.1. Helis modeli

Bu modelde helis şeklinde tane seçici soğutucu ve kalıp arasına yerleştirilir. Helis şeklindeki tane seçici kalıbın içerisine sadece bir tanenin girmesine izin verir. Şekil 3.13.a'da gösterildiği gibi, katılaşma ilerlerken taneler helis tane ayırıcının içine girer [26]. Ancak bazı tanelerin helise girişi bloke edilir. Buna rağmen birden fazla sayıda tanenin helise girmesi mümkündür. Fakat sadece bir tanesi tane seçiciden çıkıp kalıbı tek bir kristal olarak doldurur [35]. Helisin çapı 2,5-5 mm arasında değişiklik göstermektedir. Gerekli ısı akışı ve kalıp bütünlüğünü sağlamak amacı ile tam boyut seçilir. Tribün kanadı üretiminde, keskin köşelerde çekirdeklenmeyi engellemek amacıyla dikdörtgen kesit yerine dairesel kesitli bir helis kullanılır [9].

Türbin kanadında olduğu gibi birçok parça farklı kesit kalınlığına sahiptir. Tek kristal kalıp içerisinde ilerlerken, farklı kesit kalınlığına bağlı olarak katılan metalin miktarında farklılıklar oluşur. Örneğin; tribün kanadında kanattan platforma ve platformdan tabana kadar kesit kalınlığı değişir (Şekil 3.14.). Genellikle taban kalın, kanat ince kesitlidir [36]. Kesitin değiştiği alanlarda tane çekirdeklenmesini engellemek amacıyla katı-sıvı ara yüzeyi uygun bir şekilde ilerletilir.



Şekil 3.14. Tübin kanadının kesiti [36]

3.10.2. Dik açılı tane seçici

Tane seçici olarak kullanılan ikinci modelde, helis içerisinde bir seri dik açılı çıkıntılar oluşturulur. Büyüme, ayırıcının her bir kolları arasında tercihli büyüme doğrultusunda olduğu için tane daha fazla yönlendirilmeye meyillidir [26].

3.10.3. Tohumlama yöntemi

Üçüncü model özellikle tane yönlendirmesinden ziyade tane içerisindeki oryantasyonun belirlenmesinde kullanılır. Tohumlamanın kullanımı, sıvı metal dökülmeden önce tohumların hazırlanıp kalıbın içine yerleştirilmesini gerektirir [26].

3.11. Yönlü Katılaşmada Meydana Gelen Döküm Hataları

Yönlü katılaştırma teknikleri, fazla tanelerin oluşumu ve onların zararlı tane sınırı etkilerinden kaçınmak için sıkı işlem kontrolü gerektirir. Uygun tane

yapıları elde etmek için alaşım kompozisyonu, termal bölge, büyüme hızı ve sıcaklık gradyanı gibi parametreler arasındaki ve döküm geometrisi ile ilişkilerin bilinmesi gerekir. Fakat yönlü katılaşma sırasında tane oluşumunu etkileyen birçok fiziksel olgu karmaşık bir şekilde birbirleriyle ilişkilidir.

Bu olgular birçok parçanın üretimi için hurda oranının artmasına sebep olan kanal segregasyonları, çiller, poroziteler ve eş eksenli taneler olarak kabaca tanımlanabilir. Dökümlerin içerisindeki segregasyonlar dökümlerin dış yüzeyindeki çil zincirleri, poroziteler, ikinci faz partikülleri ve rasgele yönlenmiş eş eksenli tanelerden oluşan hatalar üretilen döküm parçanın hurdaya ayrılmasına ve dolayısıyla maliyetin artmasına neden olmaktadır [19].

Yönlü katılaşmış dökümlerde kesitler ve ara yüzeyler makro olarak incelenir. Yanlış yönlenmiş taneler, çekme, mikroporozite ve kalıp çarpılması en yaygın görülen döküm hatalarıdır.

3.11.1. Yanlış yönlenmiş taneler

Yanlış yönlenmiş taneler, ara yüzeyin önündeki sıcaklığın sıvı sıcaklığının altına düşmesi durumunda meydana gelir. Yeni taneler çekirdeklenir ve bu taneler gelişi güzel yönlenir. Fakat bir termal gradyan içinde büyüdükleri için sütunsaldırlar. Yanlış yönlenmiş taneler daha dik bir pozitif sıcaklık gradyanının uygulanmasıyla elimine edilebilir [27].

3.11.2. Çekme

Çekme hatası yönlü katılaşma sistemlerinde ender olarak meydana gelen bir hatadır. Yeterli sıcaklık gradyanı oluşmaması durumunda meydana gelir. Çekme hatası, bazen yönlü katılaşmış dökümün üst yüzeyinde oluşur. Bu yüzeyleri beslemek mümkün değildir. En yaygın çözüm dökümün ters çevrilmesidir [27].

3.11.3. Mikroporozite

Katılaşma sırasında yarı katı bölgede katılaşmanın ilerlemesiyle sıvı gölcükler katı tarafından izole edilir. Bu en son katılaştıran bölgelerde mikroporozite meydana gelir. Termal gradyanın artırılması yarı katı bölgenin uzunluğunu azaltarak mikroporozite problemini çözebilir [27].

3.11.4. Kalıp çarpılması

Yönlü katılaşmış dökümlerdeki hataların yaygın bir sebebi de kalıp çarpılmasından kaynaklanmaktadır. Kalıp uzun sürelerde yüksek sıcaklıklara maruz kalmasından dolayı çarpılır. Kalıbı meydana getiren refrakter malzemenin bölgesel olarak allotropik dönüşümünde çarpılmaya neden olabilir. Ölçüsel problemlerden kaçınmak için, kalıp ya da kullanılan refrakter malzeme kompozisyonunun ve sıcaklık kontrolünün iyi ayarlanması gerekir [27].

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1. Yönlü Katılaştırma Deneyinde Kullanılan Metal

Yönlü katılaştırma işlemine tabi tutulmak üzere nispeten tek bir katılaşma sıcaklığına sahip olan %99,3 saflığında ve kimyasal bileşimi Çizelge 4.1.'de verilen alüminyum metali kullanılmıştır. Külçe halinde bulunan alüminyum metali ergitme kolaylığı ve deneylerin standart olması açısından toplam 350gr ağırlığa sahip küçük parçalara ayrılmıştır.

Çizelge 4.1. Yönlü katılaştırma deneyleri sırasında kullanılan %99,3 saflıkta alüminyum metalinin kompozisyonu

Element	%		Element	%
Si	0,177		Cr	0,00675
Fe	0,392		Pb	0,00475
Cu	0,0406		Sn	0,00500
Mn	0,00661		Ti	0,0162
Mg	0,00093		Sb	0,00300
Zn	0,0412		Al	99,30
Ni	0,00308			

4.2. Yönlü Katılaştırma Deney Düzeneği

Yönlü katılaştırma düzeneklerinden Bridgman yöntemi yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu sebeple klasik Bridgman yöntemi üzerinde değişik mekanik ve ısı kontrol sistemlerini içeren yönlü katılaştırma düzeneği tasarlanmış ve imalatı yapılmıştır. Düzeneğin hazırlanmasında tek yönlü ısı akışının sağlanması özellikle dikkate alınmıştır. Soğutucu ve kalıp sabit tutularak, fırın hareketi esas alınan yönlü katılaştırma düzeneği genel olarak aşağıda verilen beş ana bölümden oluşmaktadır.

- 1 Tek kademeli fırın
- 2 Step motor kontrollü fırın kaldırma aparatı
- 3 Bakır soğutucu ve soğutucu ısıtma fırını
- 4 Yalıtkan refrakter kalıp
- 5 Isı kontrol sistemi

Yönlü katılaştırma düzeneği, yönlü katılaşmada etkili olan parametreler dikkate alınarak tasarlanmış ve inşa edilmiştir. Bu parametreler:

1. Tek yönlü ısı akışı,
2. Kullanılan alaşım,
3. Fırın ilerleme hızı,
4. Fırın sıcaklığı,
5. Soğutucu başlangıç sıcaklığı,
6. Soğutucu-döküm ara yüzey ısı iletim katsayısı,
7. Soğutma suyu akış hızı,
8. Soğutma suyu başlangıç sıcaklığı,
9. Soğutucu malzemesi,
10. Döküş sıcaklığı,
11. Sıvı metal başlangıç sıcaklığı,
12. Kalıp şekli ve malzemesi,
13. Kalıp üzerindeki tane seçicinin şekli ve büyüklüğü,
14. Deneyin yapıldığı ortam sıcaklığı.

Tezin ana hedefi, saf alüminyum malzemenin tek yönlü ısı akışı altında yönlü katılaşmasını sağlamak, elde edilen numuneleri makro ve mikro açıdan incelemektir.

4.2.1. Tek kademeli fırının hazırlanması

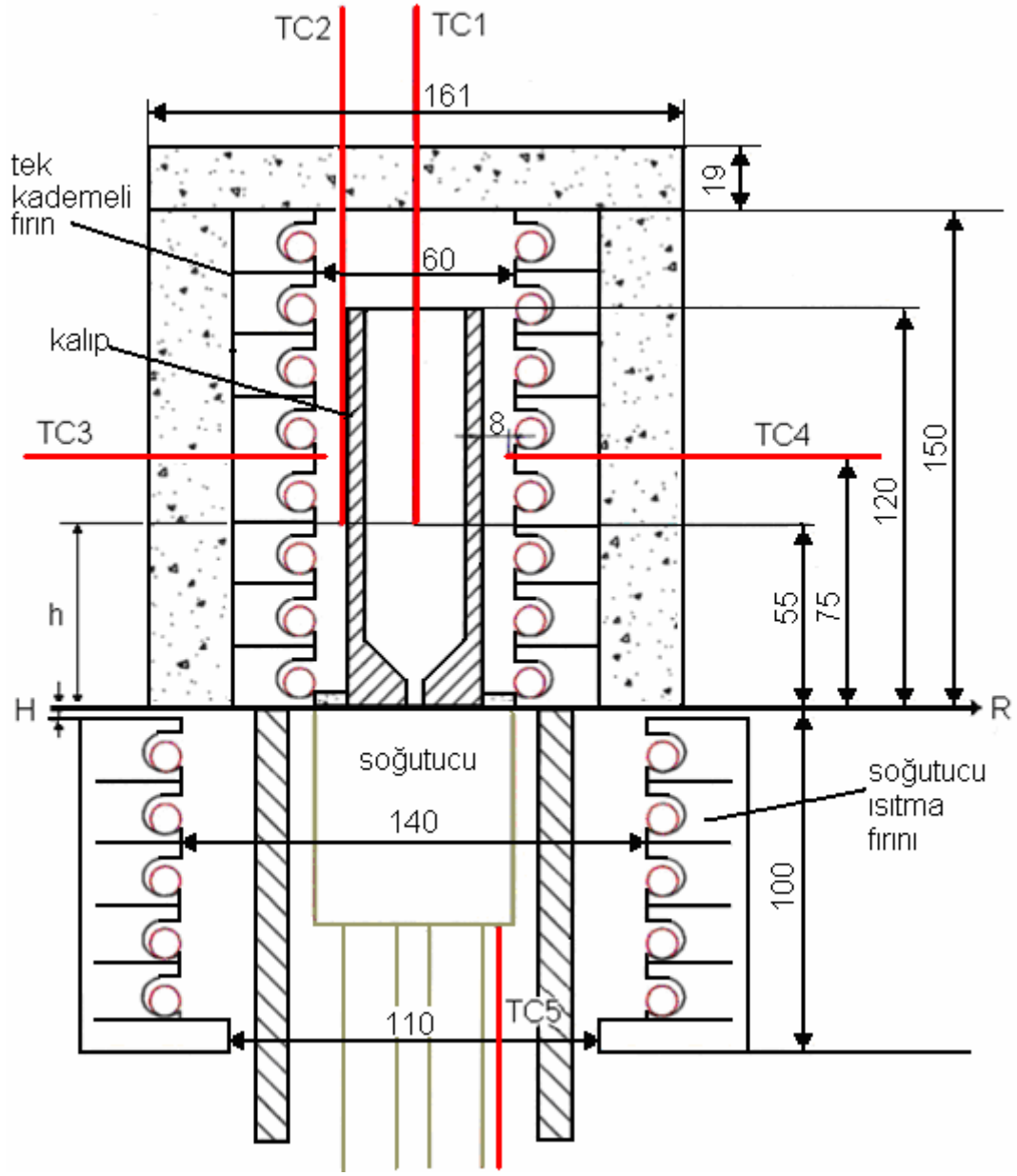
Kalıp içindeki sıvı metalden, ısı çıkışını kontrol edebilmek amacıyla, tek kademeli rezistans fırını imal edildi. Fırın üzerinde 1200°C sıcaklığa

dayanıklı, 1,5 mm çapında, 10 metre uzunluğunda rezistans teli kullanıldı. Resistans teller JM tuğladan (Ek-2) imal edilmiş taşıyıcılar ile desteklendi. Fırın ölçüleri Şekil 4.1'de verilmiştir. Fırın, 4.2.2'de açıklanan çekme aparatı taşıyıcı parçası üzerine sabitlendi. Bu şekilde, dikey doğrultuda toplam 28 mm hareket edebilmektedir.

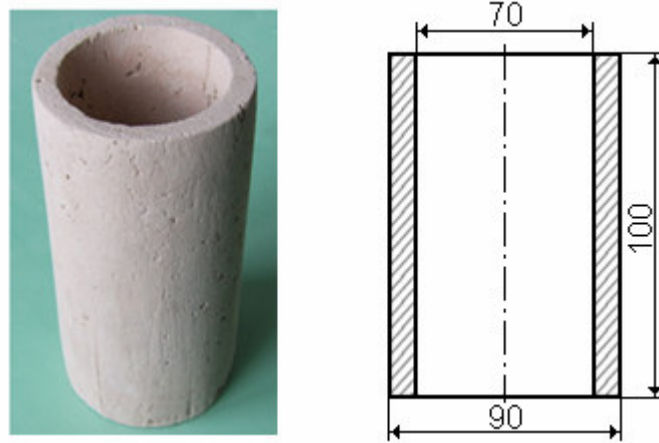
Fırın taban plakası altına, fırın yukarı hareket ettiğinde, içindeki kalıbın doğrudan soğuk hava ile temas etmesini engellemek amacıyla 100 mm yüksekliğinde, 90 mm dış çap ve 70 mm iç çap ölçülerine sahip bileşimi ek-2'de verilen refrakter bir ısı perdesi ilave edildi (Şekil 4.2). Isı perdesi, ısı şoklara yüksek dayanım gösteren, kolay şekillendirilebilen ve ısı transfer katsayısı düşük olan toz refrakter malzemeye %36 su ilave edildi ve karışım önceden hazırlanmış ahşap kalıp içinde dövülerek sıkıştırıldı. Malzeme 24 saat kalıp içinde sertleşmesi için bekletildi ve sonra kalıptan çıkarılarak 40°C sıcaklıkta 6 saat kurutuldu. Kurutulan perde 800°C sıcaklıkta 5 saat süre ile sinterlendi.

4.2.2. Fırın kaldırma aparatı

Daha önce kaynak [1]'de kullanılan fırın kaldırma sistemi burada oluşturulan yeni düzeneğe uyarlandı. Bu sistem, bilgisayar ile kontrol edilebilen bir step motor, motorun fırını çekebilmesi için gerekli çelik kablo-makara sistemi ve fırının dikey yönde doğrusal hareketini hassas biçimde sağlayan rulmanlı kızak sisteminden oluşmaktadır. Fırın ağırlığını dengeleyebilmek için karşı ağırlık kullanılmıştır. Burada, step motor hızı sonsuz oranda değiştirilebilmektedir. Hız ayarı kullanılan Basic bilgisayar programından (Ek-3) ayarlanabilmektedir.



Şekil 4.1. Yönlü katılaştırma düzeneğinde kullanılan fırınların ölçüsü ve ısıl çiftlerin sisteme yerleşimi

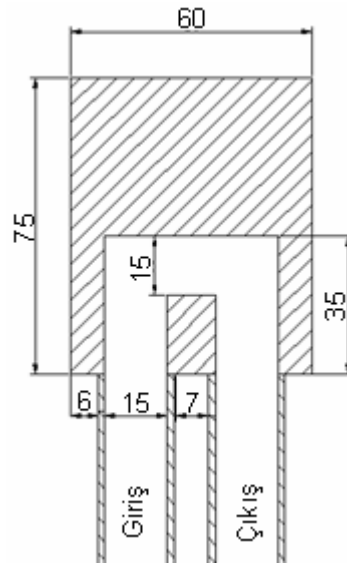


Şekil 4.2. Fırın taban plakası altına yerleştirilen perde ve ölçüleri

4.2.3. Soğutucu, soğutma sistemi ve soğutucu ısıtma fırını hazırlanması

Soğutucu

Deney düzeneğinde kalıptan tek yönlü ısı akışının sağlanabilmesi için, ticari saflıktaki ekstrüze bakır malzemeden soğutucu imal edildi. Kalıp tabanına yerleştirilen soğutucu ölçüleri Şekil 4.3’de verilmiştir.

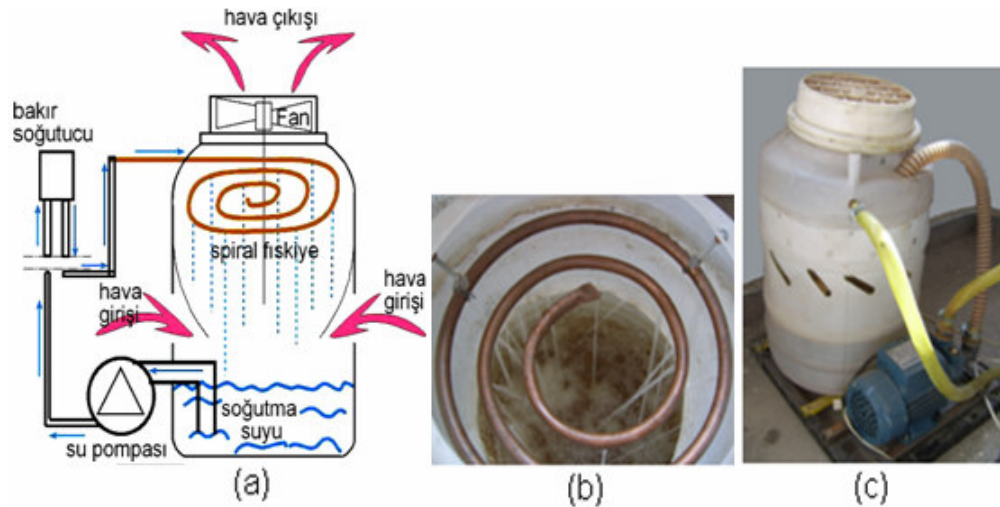


Şekil 4.3. Yönlü katılaştırma deney düzeneğinde kullanılan soğutucu ve ölçüleri

Soğutma sistemi

Bakır soğutucu içinde ısınan suyun, soğutulabilmesi için soğutma sistemi imal edildi (Şekil 4.4). Soğutma sisteminde, 0.5 HP gücünde bir pompa, suyu silindirik şekilli depodan alarak soğutucuya basınçla göndermektedir. Soğutucudan geçen su ise, sisteme geri dönerek üzerinde 100 adet 1,2mm çapında delik olan spiral şekilli bir fiskiye'den tekrar aynı depoya akmaktadır (Şekil 4.4.a ve Şekil 4.4.c). Soğutma suyu fiskiye'den depoya dönerken, ters yönlü gelen bir hava akımı ile soğutulmaktadır.

Sistemde kullanılan su pompası motoru bir dijital devir kontrol cihazına bağlandı. Yapılan bütün deneylerde pompa motoruna 20 Hz frekans ile çalıştırıldı ve bakır soğutucu içinden 8 Litre/dak. debisinde su akışı sağlandı.



Şekil 4.4. Yönlü katılaştırma düzeneğinde kullanılan su soğutma sistemi.
a) Su soğutma sisteminin şematik görüntüsü, b) Su soğutma sisteminde kullanılan fiskiye, c) Su soğutma sisteminin son hali.

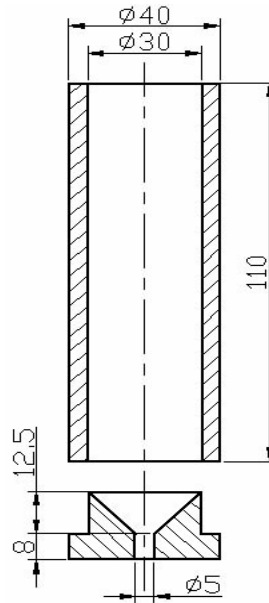
Soğutucu ısıtma fırını

Döküm parçada soğutucudan kaynaklanan çil etkisini giderebilmek amacıyla bakır soğutucu sıcaklığını, kontrol altında tutabilen ikinci bir fırın imal edildi

(Şekil 4.1). Fırın imalatında bölüm 4.2.1’de olduğu gibi rezistans tel ve ısı iletkenlik katsayısı düşük refrakter malzemeler kullanıldı.

4.2.4. Kalıbın hazırlanması

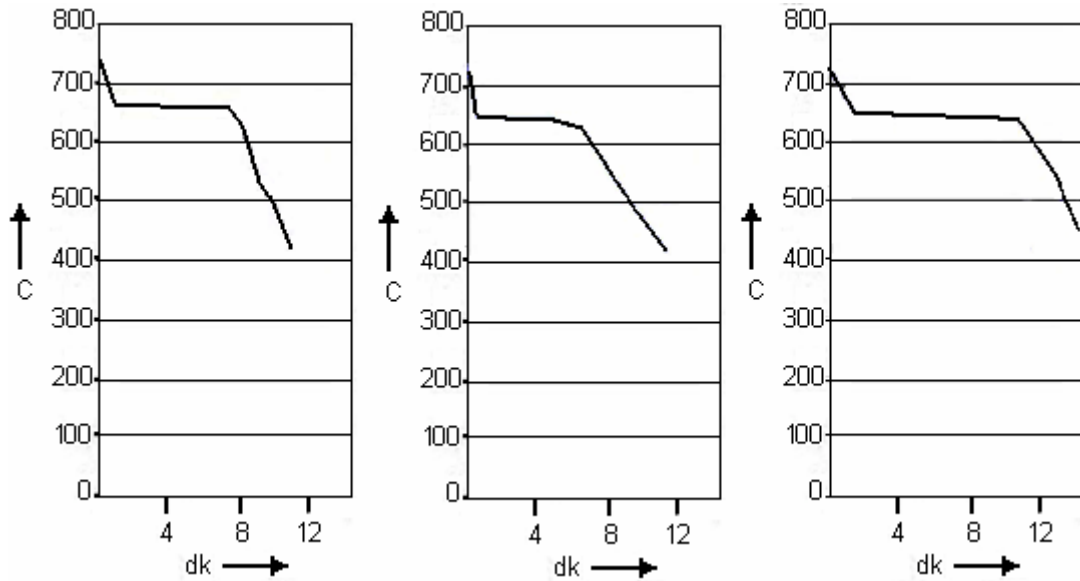
Yönlü katılaşma düzeneğinde ısı çıkışının yalnız soğutucu yönünde olması gerekir. Bu sebepten kalıp imalatında yüksek ısı yalıtkanlığına sahip LOD-607 refrakter malzeme (Ek-2) kullanılmıştır. Aynı zamanda bu refrakter malzeme yüksek sıcaklıklarda sıvı alüminyum ile reaksiyona girmemektedir. Her kalıbı üretmek için 110 gr LOD 607 ve 66 ml su karıştırılarak kullanıldı. Karışım bir el mikser ile homojenize edildi ve kalıp içine dökülerek katılaşması için 24 saat bekletildi. Son işlem olarak 800°C sıcaklıkta sinterleme işlemi uygulanmıştır. Deney düzeneğinde kullanılan kalıp iki ayrı parçadan oluşmaktadır (Şekil 4.5). Parçalardan birincisi metalin kütlesini içinde bulunduran silindir şekilli kalıp ve ikincisi ise, kalıp tabanında yer alan V şekilli tane seçicidir. Tane seçici, silindir kalıba geçebilecek şekilde üretilmiştir ve sinterleme öncesinde aynı malzemenin çamuru ile sızdırmaya karşı iki parça arasındaki aralıklar doldurulmuştur.



Şekil 4.5. Yönlü katılaştırma düzeneğinde kullanılan kalıp ve ölçüleri

4.2.5. Sistemin ısı kontrolü

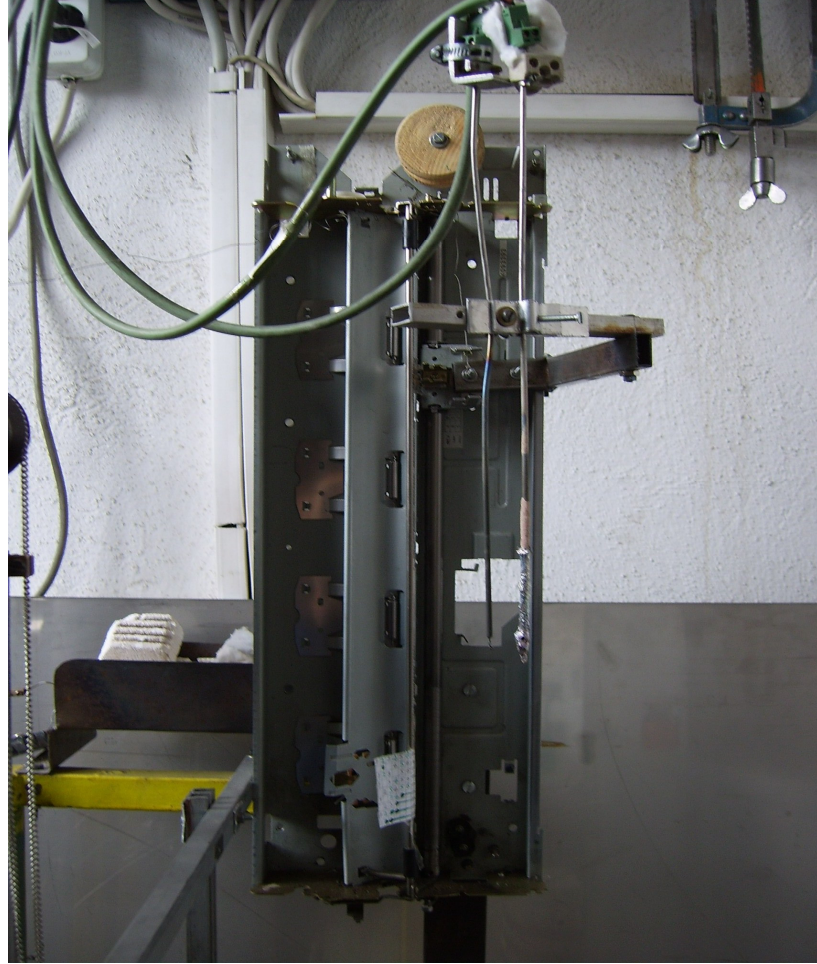
Yönlü katılaştırma düzeneği üzerinde ısı kontrolü sağlayabilmek için Şekil 4.1’de konumları belirtilen TC1, TC2, TC3, TC4 ve TC5 olmak üzere beş adet ısı çifti kullanılmıştır. Isıl çiftler “K” tipi ve 3mm dış çapına sahip mineral izolelidir. Kullanılan ısı çiftlerinin kalibrasyonu, ergiyik saf alüminyumun, fırın içinde yavaş soğutulması ile yapıldı. Soğuma sırasında, metalin sıcaklığı kalibrasyonu yapılacak ısı çifti ile takip edilerek, Şekil 4.6’ da görülen eğriler elde edildi. Metalin olması gereken katılma (dönüşüm) sıcaklığı olan 660°C derece ile, ısı çiftten alınan sıcaklık karşılaştırıldı. Elde edilen sonuçlara göre hata payının %1 olduğu gözlemlendi.



Şekil 4.6. Isıl çiftlerin kalibrasyon işlemi sırasında, ticari saflıktaki alüminyumdan elde edilen soğuma eğrileri

TC1 ısı çifti, deney sırasında sıvı metal içindeki sıcaklık profilini takip etmek için kullanılmıştır. Bu ısı çifti hareketlidir ve fırın hareketi ile senkronize olarak dikey yönde yukarı doğru hareket etmektedir. Bu hareketin amacı, ısı çiftinin sıvı-katı ara yüzeyinin üzerinde olması şartıyla, ara yüzeyin belli bir mesafe üzerindeki sıcaklığı sürekli olarak yakalayabilmektir. Bu amaçla kullanılan ısı çifti asansörü Resim 4.1’de verilmiştir. TC1 ısı çifti, yüksek sıcaklıkta

alüminyum metali ile reaksiyonu engellemek için LOD-607 malzeme ile kaplanmıştır.



Resim 4.1. Isıl çiftin sıvı metal içerisinde hareket etmesini sağlayan ısı çift asansörü

TC2, deney sırasında kalıp duvarındaki sıcaklığı ölçmektedir. Bu ısı çift TC1 gibi fırın ile senkronize şekilde yukarı hareket etmektedir. TC1 ile TC2 ısı çiftlerinin okuma uçları aynı yükseklikte konumlandırılmıştır ve birlikte yukarı doğru hareket etmektedirler (Şekil 4.1).

TC3, fırın sıcaklığını kontrol eden dijital göstereye veri göndermektedir. Burada, kullanılan dijital kontrol cihazının özellikleri Ek-4'de verilmiştir. TC3 ısı çifti, soğutucudan itibaren 75 mm yüksekte ve yatay konumdadırlar. TC4,

fırın sıcaklığını ölçen bir ısı çiftidir. Görevi, TC3 ısı çiftinden okunan değerleri kontrol etmektir.

TC5, soğutucu sıcaklığını okuyan bir dijital göstergeye bağlıdır. Görevi, deney boyunca soğutucu sıcaklığındaki değişimleri ölçmektir. Yönlü katılaştırma düzeneğinin son hali ek-7'de verilmiştir.

4.3. Metalin Ergitilmesi ve Kalıba Dökümü

Ergitme fırını: Bu tez kapsamında 350-400 gr saf Al malzemeyi 2.5 saate yaklaşık 1000°C sıcaklığa ulaştırabilecek kapasiteye sahip rezistans telli ergitme fırını imal edildi.

Ergitme gerçekleşikten sonra, döküm öncesinde, sıvı metal yüzeyinde oluşan oksit tabakası temizlendi.

Sıvı metal sıcaklığı K-Tipi daldırma ısı çifti ile ölçüldü. Isıl çiftin alüminyum metali ile reaksiyona girmesini engellemek amacıyla LOD-607 refrakter malzeme ile kaplandı. Isıl çift metal içinde uzun süre bekletildiği için, kaplama malzemesinden kaynaklanan hatanın minimum düzeyde olacağı düşünüldü.

Döküm: Ergitme fırınında bekleyen sıvı metal, 953°C sıcaklıkta deney kalıbı içine döküldü. Kalıba döküm amacıyla, LOD-607 malzemeden üretilmiş yolluk kullanıldı.

Bu yolluk, döküm sonrasında alınarak, ısı izolasyonu için kalıbın üst açıklığı seramik battaniyeden üretilmiş kapak ile kapatıldı.

4.3.1. Sistemin kalibrasyonu ve ısı haritasının çıkarılması

Üretilen yönlü katılaştırma düzeneği ile, aynı koşullar altında gerçekleştirilen deneylerde, aynı sonuçların elde edilebilmesinin sağlanması için ön deneyler yapıldı (Ek-5). Bu deneylerde, soğutucu ile tane seçicinin etkisi ayarlandı çalışıldı ve az sayıda tane elde edebilmek için gerekli koşullar belirlendi. Döküş sıcaklığı, soğutucu başlangıç sıcaklığı, fırın sıcaklığı gibi koşullar tespit edildikten sonra sistemin ısı haritası çıkarıldı.

Isı haritasının çıkarılışı amacıyla temel olarak bölüm 4.2.5’de verilen TC1 ve TC2 ısı çiftleri kullanıldı. Burada ocağın zemini, ısı çiftler ve fırın için referans ekseni olarak kabul edilmiştir ve Şekil 4.1’de “R” ile ifade edilmiştir. Aynı şekilde, “H” fırın hareket miktarını, “h” ise ısı çift hareketini temsil eder. Isı haritasının çıkarılışı ilk olarak H=8.3mm seviyesinde başlar. Ancak, deney düzeneğinin karmaşık yapıda olması nedeniyle TC3 ve TC4 konumlarında ± 1 mm’lik sapma olduğu görüldü.

Sıcaklık dağılımının belirlenmesi sırasında sistemde fırını kontrol eden TC3 850⁰C’ye sabitlendi ve deney süresince bu değer sabit tutuldu. TC3 ve TC4 850⁰C’ye ulaşıncaya kadar sistem 1 saat ısıtıldı. Takiben 830⁰C’deki sıvı alüminyum kalıba döküldü ve 15 dk. sıvının dengeye gelmesi beklendi. Sıvı metalin denge sıcaklığı 780⁰C’dir.

Fırın H=8,3 seviyesine getirildi. Fırın bu seviyede TC1 ve TC2 ile; kalıbın 6 farklı bölgesinden, (TC1 ve TC2’nin sıcaklıkları sabitlenip birbirlerini doğruladıkları zaman) sıcaklık okundu. Daha sonra bu işlemler H değeri için 16,6mm, 24,9mm, 33,2mm, 41,5mm ve 49,8mm olmak üzere 5 defa tekrarlandı.

4.4. Saf Alüminyumun Yönlü Katılaştırılması

Yönlü katılaştırma deneylerinde aşağıdaki işlem sırası izlenmiştir.

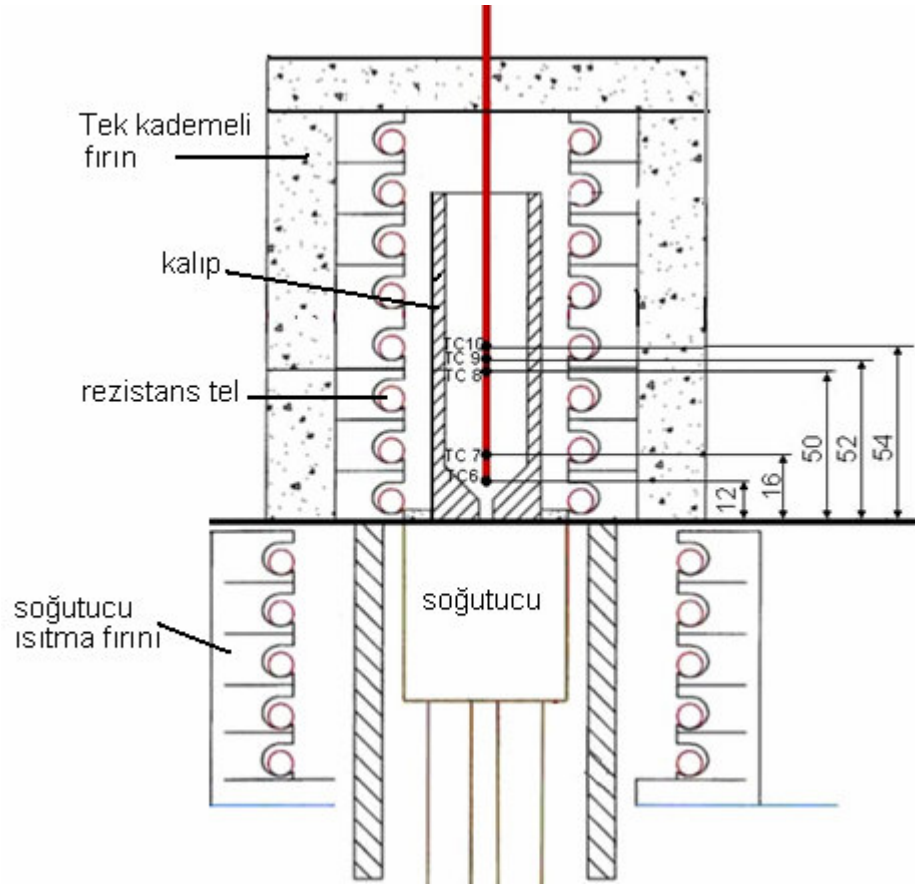
1. Soğuma eğrilerinin elde edilmesi,
2. Sıcaklık gradyanlarının elde edilmesi,
3. Büyüme hızı hesapları,
4. Farklı fırın ilerleme hızları için yapılan deneyler,
5. Makro inceleme,
6. Mikro inceleme

4.4.1. Soğuma eğrilerinin elde edilmesi

Bir alaşımın ergime sıcaklığı üzerindeki bir sıcaklıktan soğumaya bırakılması sonucunda, sıcaklığın zamana karşı kaydedilmesi ile “soğuma eğrileri” elde edilir. Soğuma işlemi sırasında alaşımın, sıvı fazdan katı faza geçtiği sıcaklık “ergime sıcaklığı” olarak adlandırılır ve (Te) simgesi ile ifade edilir.

Şekil 4.7’de görüldüğü gibi kalıp içine, sıvı-katı ara yüzeyin ilerlediği yönde beş adet ısı çifti yerleştirilmiştir. Isıl çiftler birlikte bir salkım halinde bağlanmıştır. Sıvı metalle reaksiyona girmelerini engellemek amacıyla 1,5mm kalınlıkta lod-60 refrakter malzeme ile kaplanmıştır.

Bu çalışmada soğuma eğrilerinin elde edilmesi için Agilent 34970A veri toplama cihazı kullanılmış ve saniyede bir sıcaklık değeri alınmıştır. Soğuma eğrisi elde etme işleminde bölüm 4.2.5.’de açıklandığı şekilde kalibre edilen ısı çiftleri kullanılmıştır. Her farklı fırın sıcaklığı için 1 adet soğuma eğrisi çıkartılmıştır.



Şekil 4.7. Soğuma eğrisi ve dönüşüm noktalarının belirlenmesi için kullanılan ısı çiftlerinin kalıp içerisindeki konumu

4.4.2. Sıcaklık gradyanlarının elde edilmesi

Yönlü katılaşma işlemini etkileyen en önemli parametreler ara yüzey büyüme hızı ve sıcaklık gradyanıdır. Bu parametreler elde edilen döküm parçanın makro ve mikro yapılarını önemli ölçüde etkiler.

Sıcaklık gradyanı hesabı için, bu çalışmanın şartlarına uyan hesaplama yöntemi Gandin [28] tarafından verilmiştir. Buna göre döküm numunesi üzerinde bulunan bir x ısı çifti için bu ısı çiftin üstünde ve altında kalan bölgelerde $G_{üstx}$ ve G_{altx} hesaplanabilir. Gandin tarafından, z_1 konumunda bulunan bir ısı çiftin dengeli katılaşma sıcaklığına geldiği t_1 zamanı sıcaklık gradyanı olarak tanımlanmıştır.

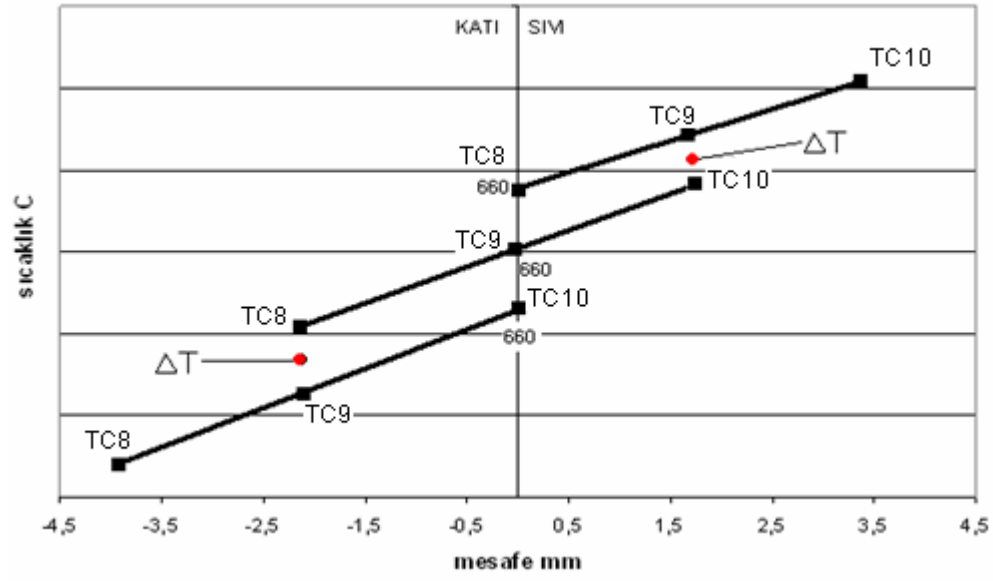
Yönlü katılaştırma işlemlerinde sıvı-katı ara yüzey önünde dik bir pozitif sıcaklık gradyanı istenir. Bu nedenle ilgili ısı çiftin üst bölgesinde oluşan sıcaklık gradyanı büyümeyi kontrol eder. İlgili ısı çifti alt bölgesi denge sıcaklığının altına düştüğü için o bölge katılaşmıştır. Bu nedenle $G_{Alt,x}$ parametresi hesaplanmamıştır. $G_{Üst,x}$ değerinin hesaplanmasında kullanılan eşitlik aşağıda verilmiştir.

$$\Delta G_{Üst,x} = \frac{[T_{x+1}(t_1) - T_x(t_1)]}{(z_{x+1} - z_x)} \quad (4.1)$$

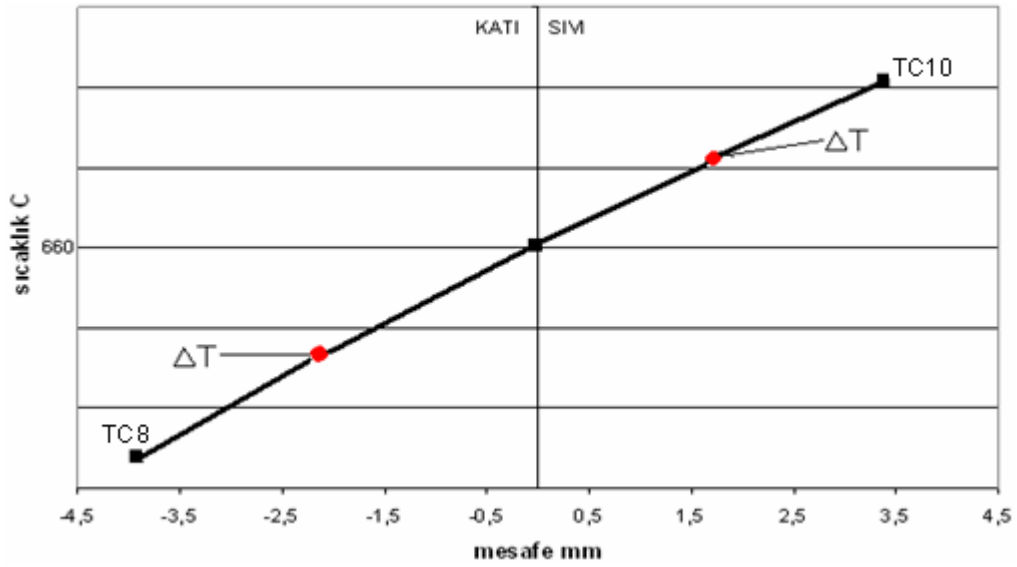
Burada x ısı çiftin bulunduğu noktanın numarasıdır. (örneğin 4 numaralı ısı çift için x=4'tür.). z_x ilgili ısı çiftin bulunduğu konumdur.

$G_{Üst}$ parametresinin konuma bağlı grafiğinin çiziminde kalıp içerisine Şekil 4.7.' de gösterildiği şekilde yerleştirilen 5 adet ısı çiftten yararlanılmıştır. Kalıp boşluğunun alt kısmında bulunan TC6 ve TC7 ile ayrı, kalıp boşluğunun üst kısmında bulunan TC8, TC9 ve TC10 ile ayrı $G_{Üst}$ grafikleri çizilmiştir. Kalıbın alt kısmındaki $G_{Üst}$ 1. bölge, üst kısmındaki $G_{Üst}$ ise 2. bölge olarak adlandırılmıştır.

Grafiklerin çiziminde her bir ısı çiftin bulunduğu denge sıcaklığındaki (t_1) zamanında, diğer ısı çiftlerden okunan sıcaklık farkı esas alınmıştır. 2. bölgedeki $G_{Üst}$ parametresinin konuma bağlı grafiğinin çiziminde her üç ısı çift için (TC8, TC9, TC10) Şekil 4.8.a'da görüldüğü gibi ayrı ayrı grafikler çizilmiştir. Bu grafiklerin çiziminde her bir ısı çiftin, denge sıcaklığına geldiği anda diğer ısı çiftten okunan sıcaklıklar kaydedilmiştir. Şekil 4.8.b'de ise bu 3 ayrı grafik tek grafikte çizilmiştir. Bu 3 grafiğin tek grafikte birleştirilmesi işleminde Şekil 4.8.a'da katı bölgede görülen TC8 ve TC9'nin aritmetik ortalaması alınmıştır. Aynı grafikte sıvı bölgede görülen TC9 ve TC10 için de aynı yöntem kullanılmıştır.



(a)



(b)

Şekil 4.8. Sıcaklık gradyanı grafiklerinin çiziminde kullanılan yöntem
a) 2. bölgedeki $G_{üst}$ parametresinin konuma bağlı grafiğinin çiziminde kullanılan 3 ayrı grafik, b) 2. bölgedeki $G_{üst}$ parametresinin konuma bağlı grafiğinin çiziminde kullanılan 3 ayrı grafiğin birleştirilmiş hali

4.4.3. Büyüme hızı hesapları

Sıvı-katı ara yüzey ilerleme hızlarının belirlenmesinde, şekil 4.7'de görüldüğü şekilde kalıp boşluğuna yerleştirilen ısıl çiftler kullanılmıştır. Bu sayede kalıp içindeki ilgili iki ısıl çift arasındaki bölge için ortalama hızlar aşağıdaki eşitlikle hesaplanabilir.

$$V_{ort} = \frac{z_{x+1} - z_x}{t_{x+1} - t_x} \quad (4.2)$$

4.4.4. Farklı fırın ilerleme hızları için yapılan deneyler

Bölüm 4.2'de yönlü katılaştırma düzenekleri üzerinde etkili olan parametreler verilmişti. Bu tez çalışmasında değişken parametre olarak, farklı fırın hareket hızları seçilmiş ve diğer bütün parametreler sabit tutulmuştur.

Deneyler sırasında 0,0218mm/sn, 0,0184mm/sn, 0,0123mm/sn ve 0,00816mm/sn olmak üzere 4 adet fırın ilerleme hızı seçilmiştir. Kullanılan her farklı fırın ilerleme hızındaki deneyleri kalibre edebilmek amacıyla deneyler üç defa tekrarlanmıştır. Deneyler sırasında kullanılan parametreler Çizelge 4.2'de verilmiştir.

Bu bölümdeki bütün deneylerde, sıvı metalin kalıba dökümünden sonra sıvı metal sıcaklığının dengeye gelmesi beklendi. Sıvı metal sıcaklığı (TC1) 850⁰C'ye geldiğinde fırın ilerlemeye başladı. Fırın hareketi ile eş zamanlı olarak soğutma suyu çalıştırıldı.

Çizelge 4.2. Yönlü katılaştırma deneyleri sırasında kullanılan parametreler

Fırın ilerleme Hızı (mm/sn)	Deney No:	Fırın Sıc. (°C)	Döküm Sıc. (°C)	Sıvı Başlangıç Sıc. (°C)	Kalıp Boşluğu Sıc. (°C)	Kalıp Duvarı Sıc. (°C)	Soğutucu Sıc. (°C)	Soğutma Suyu Debisi (lt/dak.)
0,00816	1.1	950	951 ±1	850	930 ±2	996 ±1	100	8
	1.2							
	1.3							
0,0123	2.1	950	954 ±2	850	932 ±3	995 ±2	100	8
	2.2							
	2.3							
0,0184	3.1	950	951 ±1	850	931 ±1	993 ±1	100	8
	3.2							
	3.3							
0,0218	4.1	950	950 ±2	850	926 ±3	995 ±1	100	8
	4.2							
	4.3							

4.4.5. Makro yapı inceleme

Deneyler sonunda elde edilen numuneler orta dik eksen boyunca kesilmiştir. Kesilen numuneler reçineye gömüldükten sonra zımparalama aşamasına geçilmiştir.

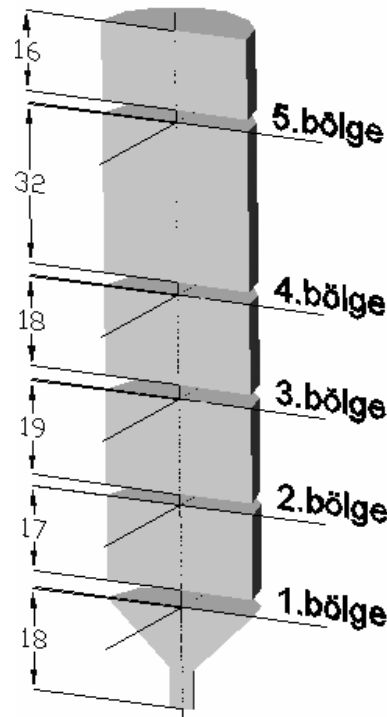
Zımparalama işlemi min 50, max 500 devir/dk hızla dönebilen zımpara makinesinde yapılmıştır. Zımparalama işleminde sırası ile 80-220-400-600-800 ve 1000 numaralı SiC zımparalar kullanılmıştır. Zımparalama işlemi bittikten sonra makro dağlamaya hazır hale getirilen numuneler, ek-6'da kompozisyonu verilen "Tucker" ayıracı ile dağlanmıştır.

Dağlama işlemi, ayıraç içine daldırılan bir pamuğun taneler görülene kadar, zımparalanmış numune yüzeyine sürülmesi şeklinde yapılmıştır.

Taneler ortaya çıktıktan sonra numuneler bol su ile yıkanmış ve kurutulmuştur. Elde edilen numuneler scanner ile taranarak dijital ortama aktarılmıştır.

4.4.6. Mikro yapı inceleme

Fırın ilerleme hızlarının numunedeki hücre boyutuna etkisinin incelenmesi amacıyla mikro yapı analizi yapılmıştır. Mikro analiz için dikey olarak kesilen numune yatay olarak Şekil 4.9'daki gibi kesilip, 5 bölgeye ayrılmıştır.

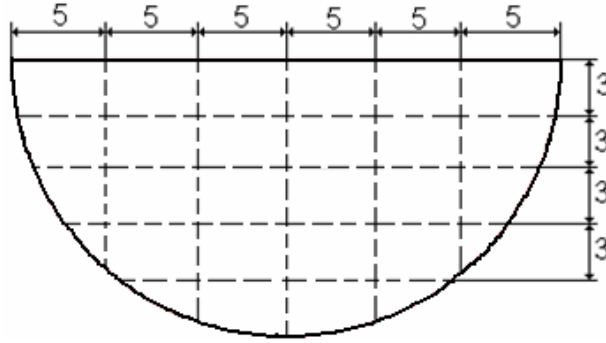


Şekil 4.9. Mikro analiz için numunenin kesit bölgeleri.

Daha sonra sırasıyla 80-180-240-400-600-800-1000 ve 1200 numaralı SiC zımparalar ile zımparalanmıştır. Polisaj işlemi için 3 mikronluk alümina pasta kullanılmıştır. Polisaj işleminden sonra birçok standart dağlayıcı formülü (Tucker, Keller's ve derişik hidroflorik asit) kullanılmasına rağmen sonuç alınamamıştır. Bu aşamada mikro analize imkân verecek farklı bir dağlayıcı formülü geliştirilmiştir. Mikro analiz işleminde kullanılan dağlayıcı formülü Ek-6'da verilmiştir.

Mikro yapı incelemesi optik mikroskop kullanılarak yapılmıştır. Yatay olarak kesilen numunelerdeki hücreler çizgisel kesişme yöntemi kullanılarak

sayılmış ve sonuçlar “hücre sayısı/mm” cinsinden hesaplanmıştır. Hücre sayımında Şekil 4.9’da gösterilen numune üzerinde yatay olarak 4 ve dikey olarak 5 adet çizgi belirlenmiş ve bu çizgi üzerindeki hücreler dikkate alınmıştır. Şekil 4.10’da bu çizgiler ve konumları yer almaktadır.



Şekil 4.10. Hücre sayımı için çizgi metodunda kullanılan çizgilerin konumu. Burada düz çizgi numuneyi kesik çizgiler ise tane sayımında kullanılan hayali çizgileri temsil eder

Birim hücre sayısı aşağıda verilen eşitlikle elde edilmiştir.

$$\text{Birim hücre sayısı (BHS)} = \frac{\text{Hücre sayısı}}{\text{Toplam çizgi uzunluğu}} \quad (4.3)$$

5. DENEYSEL SONUÇLAR

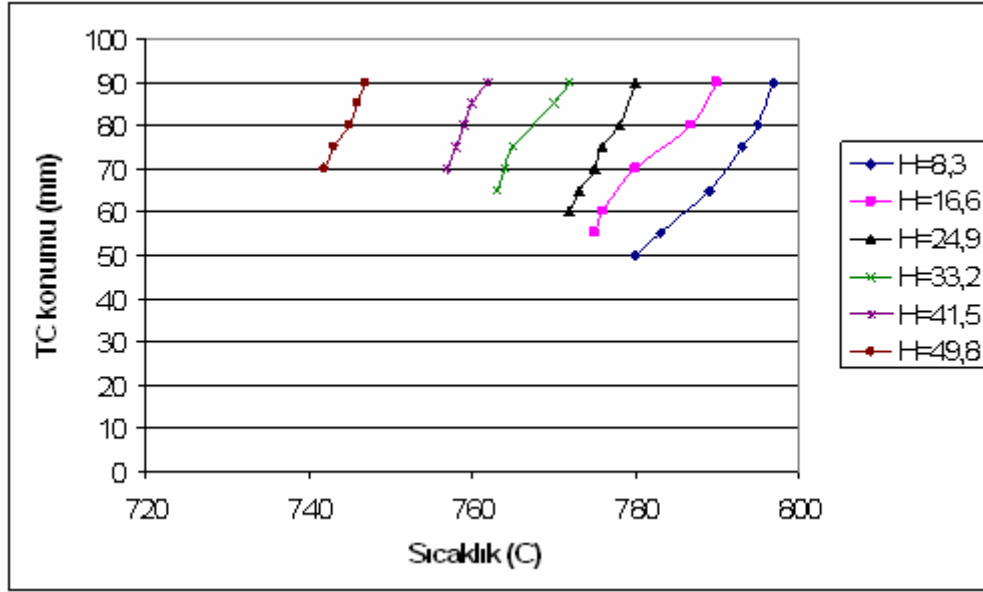
5.1. Yönlü Katılaştırma Düzeneğinin Isı Haritası

Bölüm 4.3.1.'de açıklandığı şekilde yapılan ölçümlerden elde edilen sıcaklık verilerine, Çizelge 5.1, göre yönlü katılaştırma düzeneğinin ısı haritası çıkarılmıştır. Kalıp içerisindeki ısı dağılımı Şekil 5.1.'de, kalıp duvarındaki ısı dağılımı ise Şekil 5.2'de verilmiştir. Çizelge 5.1 ve Şekil 5.1 ve Şekil 5.2'de verilen “H” fırın hareket mesafesi, “h” ise ısı çift konumunu temsil etmektedir.

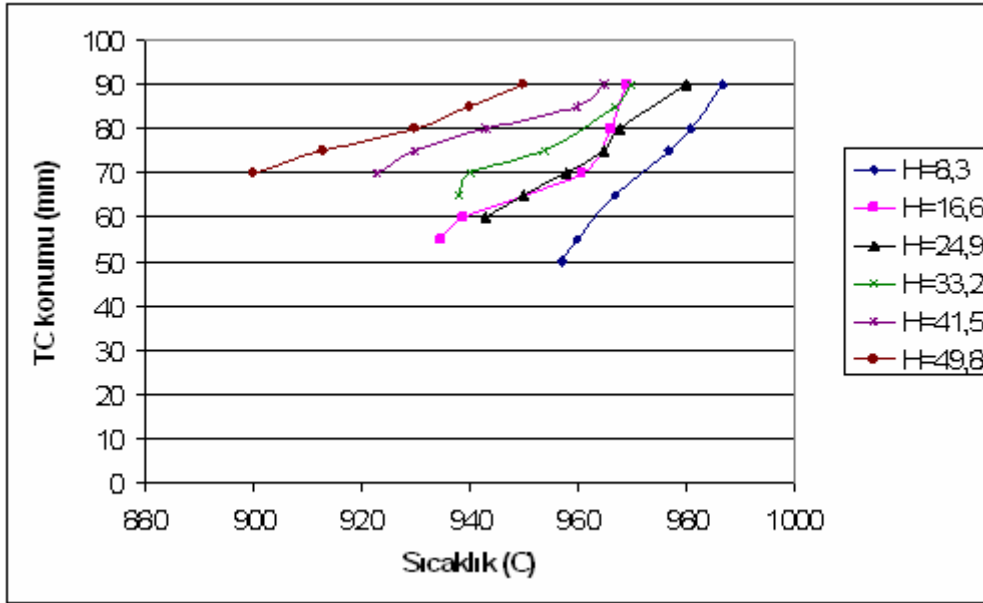
Fırın ısı haritasının çıkarılmasında yapılan üç deneysel çalışmada aynı sıcaklık verilerinin elde edilmesi bu düzenekte aynı koşullarda aynı sonuçların sağlanabileceğini veya diğer bir ifade ile aynı koşullarda yönlü katılaştırma işleminin tekrar edilebileceğini göstermektedir. Zira aynı fırın ilerleme hızlarında yönlü katılaştırma işlemi 3 defa tekrar edilmiştir. Bu sebepten aynı şartlarda yönlü katılaştırmanın tekrarlanabilirliği oldukça önemlidir. Quyang [33] tek kristal büyütme için kullandığı Bridgman yönteminde aynı şartlarda deneylerin tekrarlanabilirliği için ısı haritasının önemini belirtmiştir.

Çizelge 5.1. Kalıp içi ve kalıp duvarından okunan sıcaklıklar

H(mm)	Isıl Çift Kalıp Merkezinde						
8.3	h (mm)	50	55	65	75	80	90
	T °C	780	783	789	793	795	797
16.6	h (mm)	55	60	70	80	90	
	T °C	775	776	780	787	790	
24.9	h (mm)	60	65	70	75	80	90
	T °C	772	773	775	776	778	780
33.2	h (mm)	65	70	75	85	90	
	T °C	763	764	765	770	772	
41.5	h (mm)	70	75	80	85	90	
	T °C	757	758	759	760	762	
49.8	h (mm)	70	75	80	85	90	
	T °C	742	743	745	746	747	
H(mm)	Isıl Çift Kalıp Duvarında						
8.3	h (mm)	50	55	65	75	80	90
	T °C	957	960	967	977	981	987
16.6	h (mm)	55	60	70	80	90	
	T °C	935	939	961	966	969	
24.9	h (mm)	60	65	70	75	80	90
	T °C	943	950	958	965	968	980
33.2	h (mm)	65	70	75	85	90	
	T °C	938	940	954	967	970	
41.5	h (mm)	70	75	80	85	90	
	T °C	923	930	943	960	965	
49.8	h (mm)	70	75	80	85	90	
	T °C	900	913	930	940	950	



Şekil 5.1. Kalıp içerisindeki ısı dağılımı.



Şekil 5.2. Kalıp duvarındaki ısı dağılımı.

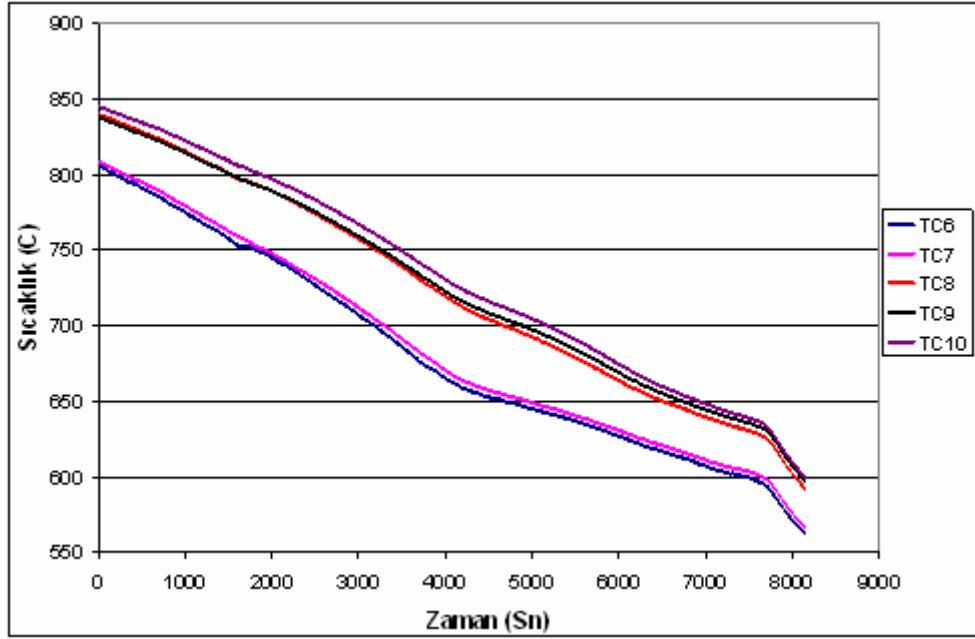
5.2. Farklı Fırın İlerleme Hızlarında Yönlü Katılaştırma

0,00816mm/sn, 0,0123mm/sn, 0,0184mm/sn ve 0,0218mm/sn fırın ilerleme hızlarında ve her farklı fırın ilerleme hızı için 3 deney olmak üzere toplam 12 adet yönlü katılaştırma deneyi yapılmış ve deney sonuçları sırasıyla aşağıda verilmiştir;

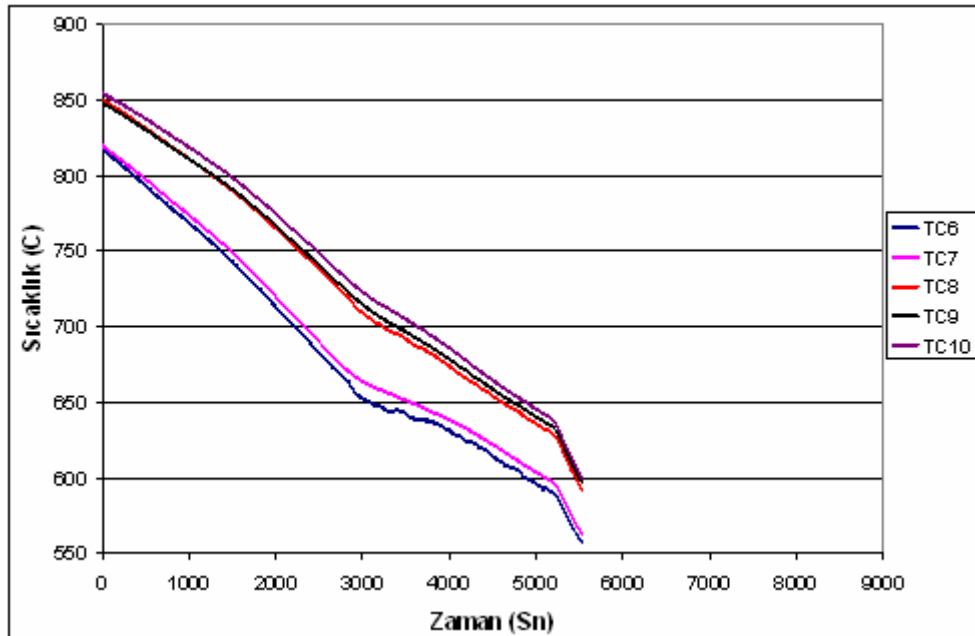
1. Dönüşüm noktaları ve soğuma eğrileri,
2. Sıcaklık gradyanları,
3. Ara yüzey ilerleme hızları,
4. Yapılan deneylerden elde edilen makro yapılar,
5. Yapılan deneylerden elde edilen mikro yapılar ve birim hücre sayıları,

5.2.1. Dönüşüm noktaları ve soğuma eğrileri

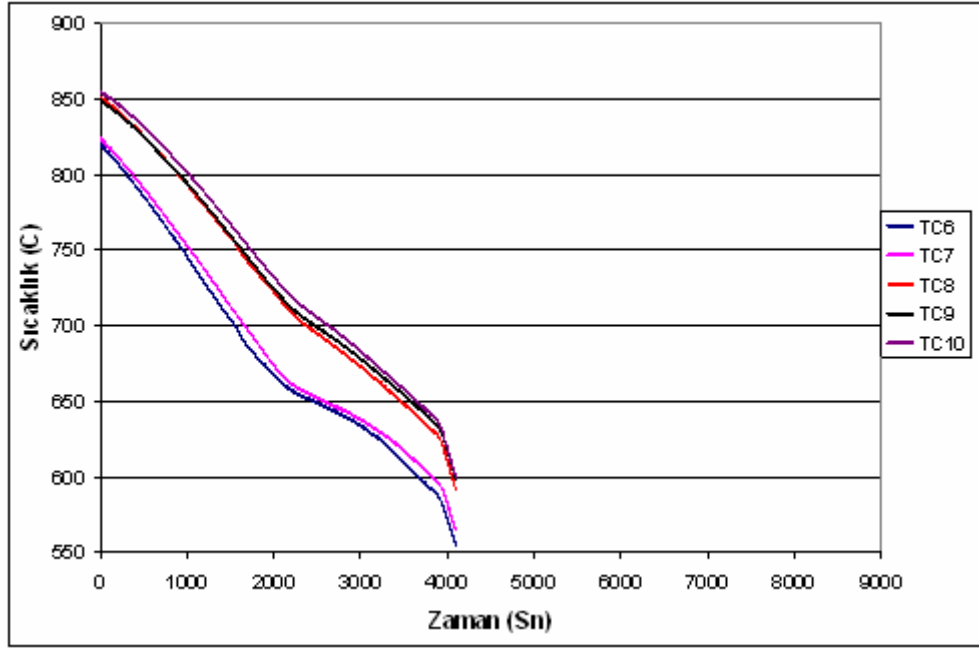
0,00816mm/sn, 0,0123mm/sn, 0,0184mm/sn ve 0,0218mm/sn fırın ilerleme hızlarında 4 adet yönlü katılaştırma deneylerinde kalıp içersinde sabit konumda ısı çiftleri kullanılarak elde edilen soğuma eğrileri Şekil 5.3 - Şekil 5.6'da ve bu soğuma eğrilerinden belirlenen dönüşüm noktaları Çizelge 5.2'de verilmiştir.



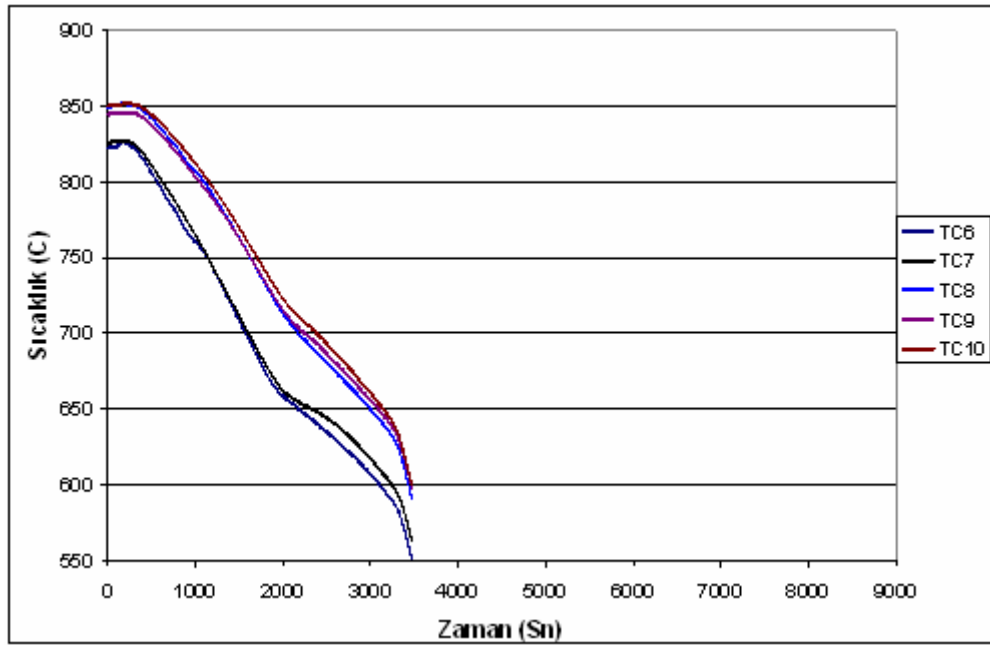
Şekil 5.3. 0,00816mm/sn fırın ilerleme hızı ile yapılan deneyler için elde edilen soğuma eğrisi



Şekil 5.4. 0,0123mm/sn fırın ilerleme hızı ile yapılan deneyler için elde edilen soğuma eğrisi



Şekil 5.5. 0,0184mm/sn fırın ilerleme hızı ile yapılan deneyler için elde edilen soğuma eğrisi



Şekil 5.6. 0,0218mm/sn fırın ilerleme hızı ile yapılan deneyler için elde edilen soğuma eğrisi

Çizelge 5.2. Farklı fırın ilerleme hızları için soğuma eğrilerinden elde edilen dönüşüm noktaları

Fırın ilerleme hızı (mm/sn)	Isıl çift no	Dönüşüm noktası (sn)
0,00816mm/sn	TC6	4160
	TC7	4353
	TC8	6118
	TC9	6304
	TC10	6483
0,0123mm/sn	TC6	2861
	TC7	3125
	TC8	4341
	TC9	4464
	TC10	4609
0,0184mm/sn	TC6	2132
	TC7	2238
	TC8	3264
	TC9	3375
	TC10	3456
0,0218mm/sn	TC6	1969
	TC7	2040
	TC8	2844
	TC9	2933
	TC10	3001

Soğuma eğrilerinden ve Çizelge 5.2' den görüleceği üzere fırın ilerleme hızının artmasıyla katılaşma başlangıç zamanını ifade eden dönüşüm noktaları azalmıştır. 0.00816mm/sn fırın ilerleme hızında TC6 ısı çifti için dönüşüm noktası 4160 sn iken 0,0218mm/sn fırın ilerleme hızında aynı ısı çifti için dönüşüm noktası 1969 sn'dir. Diğer fırın ilerleme hızlarında da fırın ilerleme hızı arttıkça aynı ısı çiftleri için dönüşüm noktaları azalmıştır.

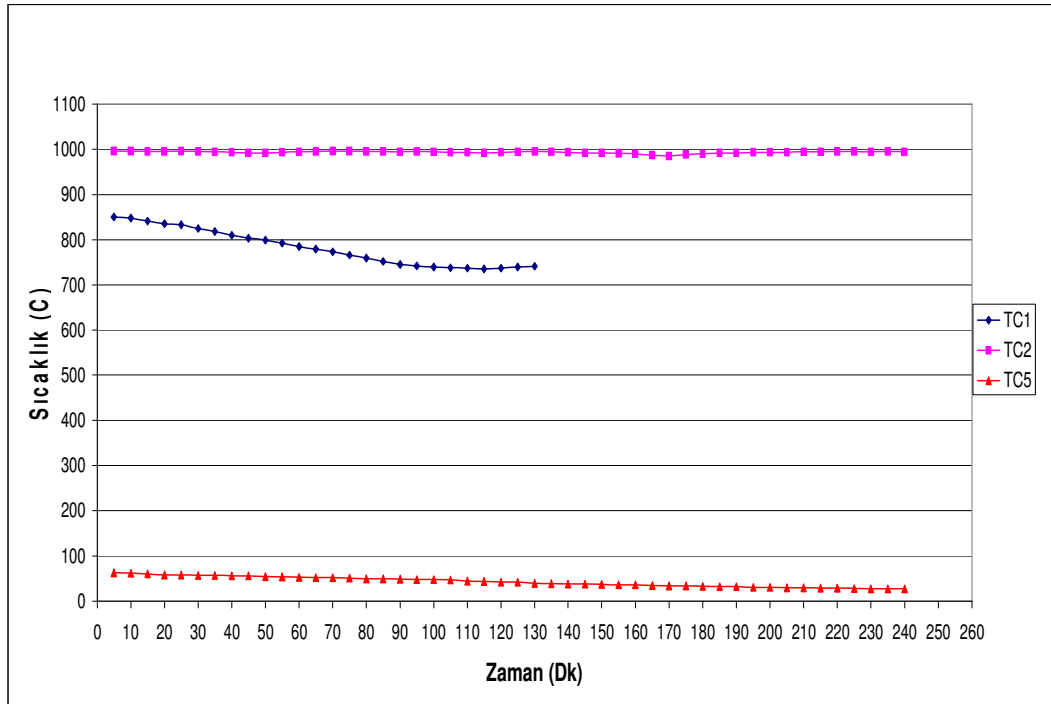
Yapılan 12 adet yönlü katılaştırma deneyi sırasında, bölüm 4.2.5.'de detayları verilen ısı çifti asansörü yardımıyla deney süresince sıvı metal içerisinde hareketli TC1, kalıp duvarında hareketli TC2 ve soğutucuda sabit konumda bulunan TC5 ısı çiftleri kullanılarak elde edilen sıcaklık-zaman eğrileri Şekil 5.7-Şekil 5.18'de sunulmuştur. Farklı fırın ilerleme hızlarında elde edilen sıcaklık-zaman ilişkilerinden (Şekil 5.7- Şekil 5.18) görüldüğü gibi soğutucuda sabit konumda bulunan TC5 ısı çiftinin zamana göre verdiği sıcaklık verileri esas itibarıyla değişmemiştir. Bu durum farklı fırın ilerleme hızlarında

gerçekleştirilen yönlü katılaştırma deneylerinde soğutucu etkisinin sabit olduğunu açık bir şekilde göstermektedir. Dolayısıyla yönlü katılaştırma deneylerinde sıcaklık gradyanı ve katı-sıvı ara yüzey ilerleme hızları üzerinde yalnız fırın ilerleme hızı etkilidir.

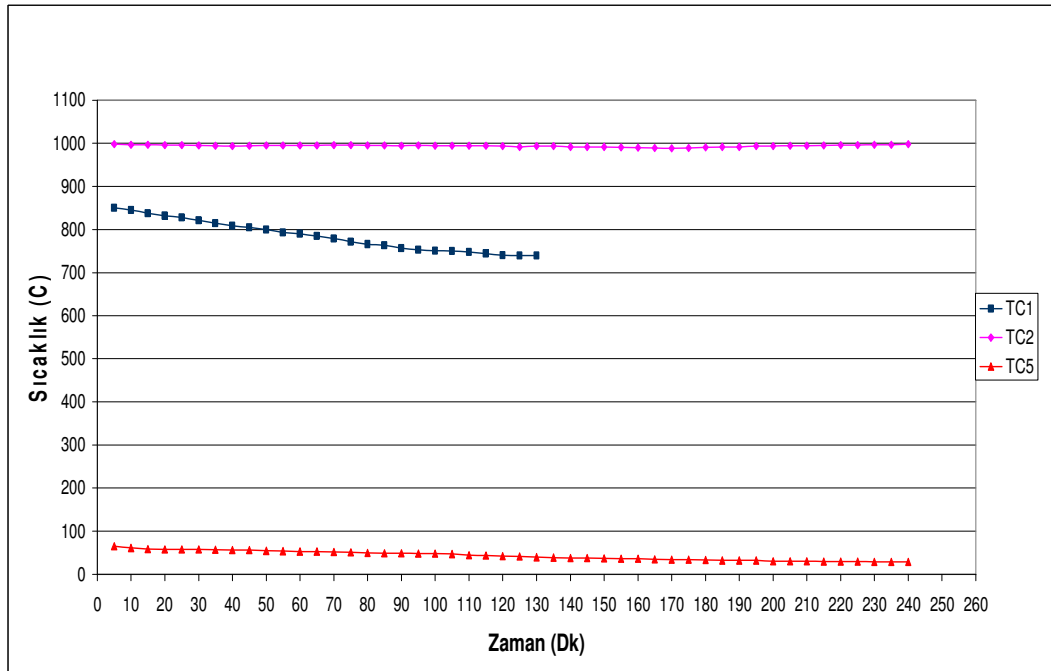
Fırın ilerleme hızı ile birlikte eş zamanlı hareket eden kalıp duvarında hareketli konumdaki TC2 ısı çiftinin zamana göre verdiği değerler farklı fırın ilerleme hızlarına göre değişmemiştir. TC2 ısı çiftlerinin farklı fırın ilerleme hızlarına göre değişmemesi fırın sıcaklık kontrolünün yüksek derecede ve fırın ısı yalıtımının mükemmel olduğunu ifade eder.

Yönü katılaştırma deneylerinde fırın ilerleme hızı ile sıvı içerisinde eş güdümlü hareket eden TC1 ısı çiftlerinin zamana göre sıcaklık verilerinin sabit olması amaçlanmıştır. Ancak farklı fırın ilerleme hızlarında yönü katılma süresince fırın ilerleme hızı ile sıvı içerisinde eş güdümlü hareket eden TC1 ısı çiftlerinin zamana göre sıcaklık verileri düşme yönünde değişim göstermiştir. Bu düşme fırın ilerleme hızı ile katı-sıvı ara yüzey ilerleme hızı kontrolünün tam olarak eş güdümlü olmamasından kaynaklanmaktadır.

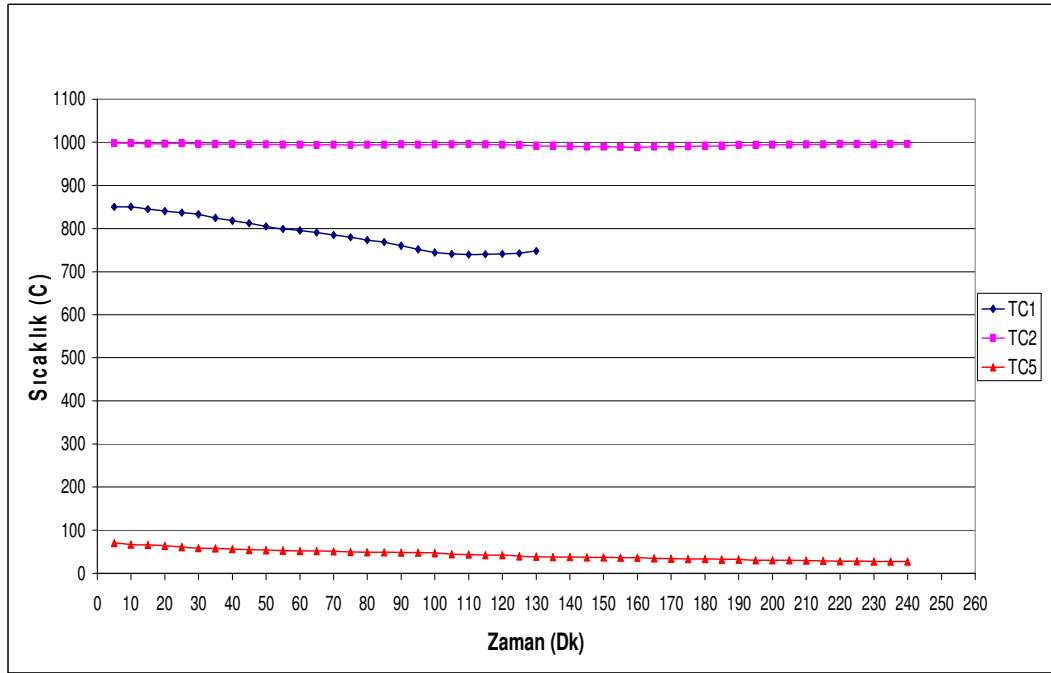
Ön deneysel çalışmada sıvı ve fırın sıcaklığı, fırın ilerleme hızı gibi birçok değişken parametreler kullanılmasına rağmen fırın ilerleme hızı ile katı-sıvı ara yüzey ilerleme hızlarının eş güdümü sağlanamamıştır. Buna sebep olarak deneyin başlangıcında soğutucunun yetersizliği ve katılma başladıktan sonra soğutucu ile fırın sıcaklığı arasındaki uyumsuzluk gösterilebilir.



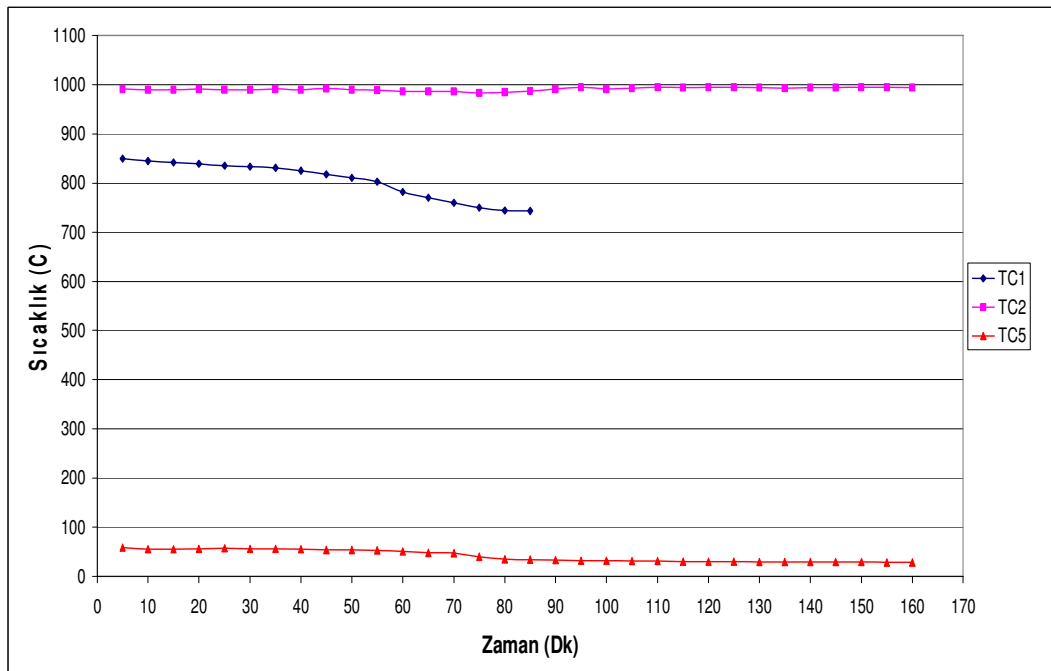
Şekil 5.7. Deney no:1.1.'den elde edilen sıcaklık zaman ilişkisi



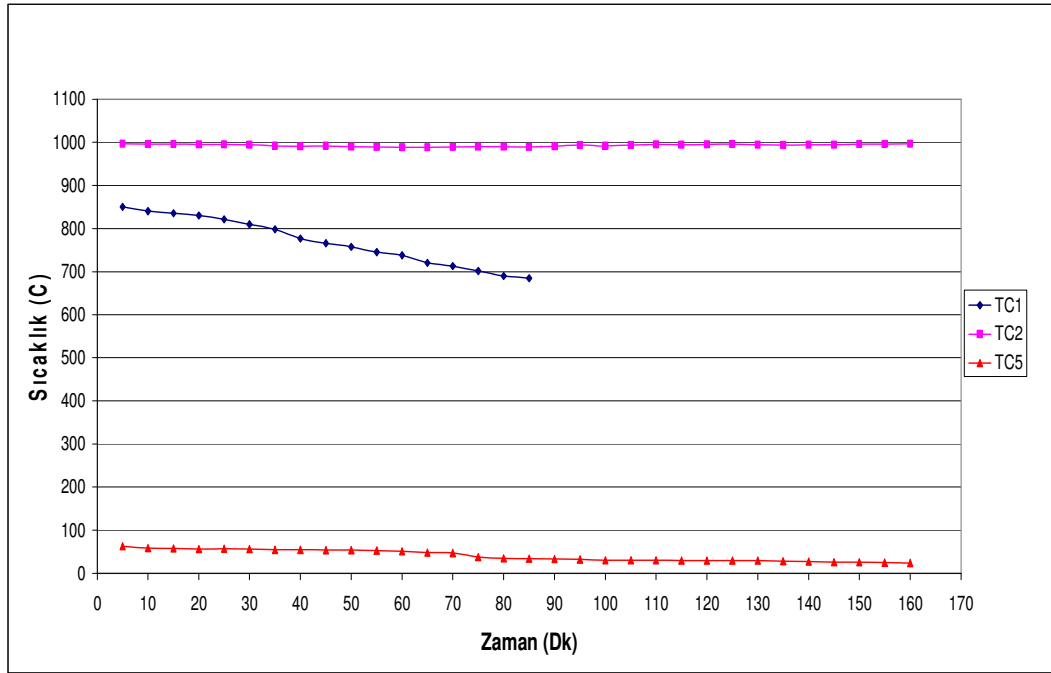
Şekil 5.8. Deney no:1.2.'den elde edilen sıcaklık zaman ilişkisi



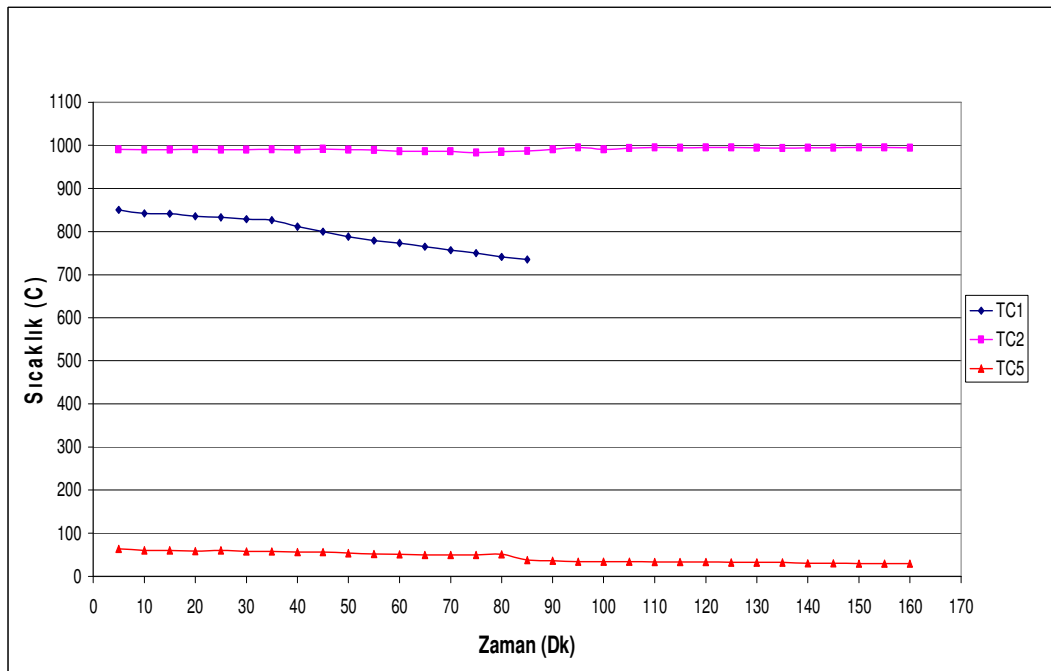
Şekil 5.9. Deney no:1.3.'den elde edilen sıcaklık zaman ilişkisi



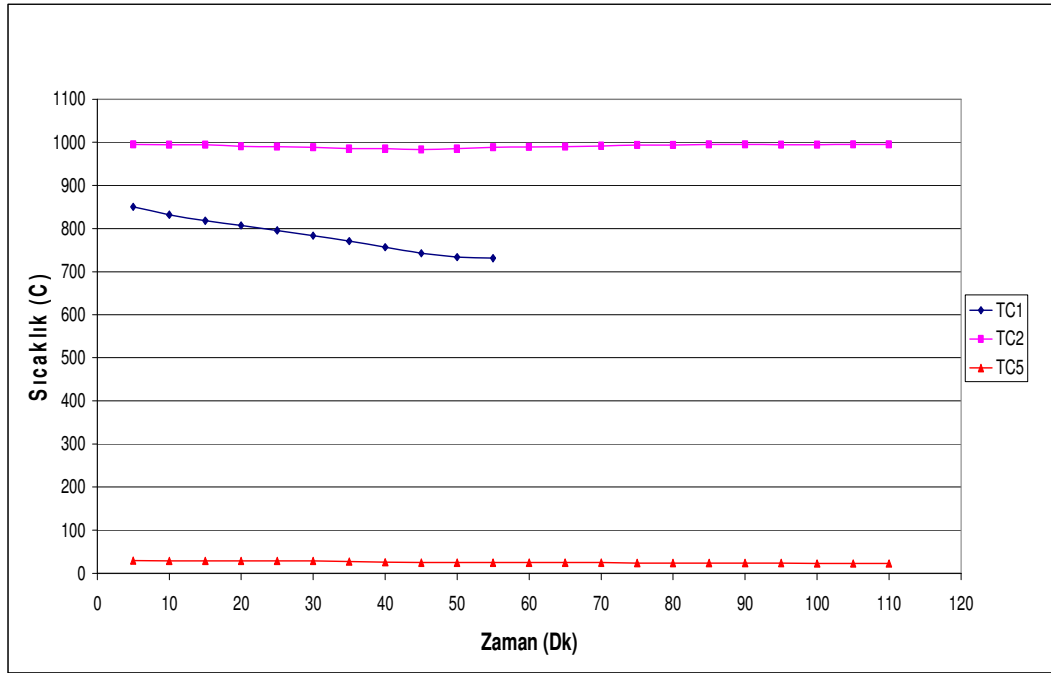
Şekil 5.10. Deney no:2.1.'den elde edilen sıcaklık zaman ilişkisi



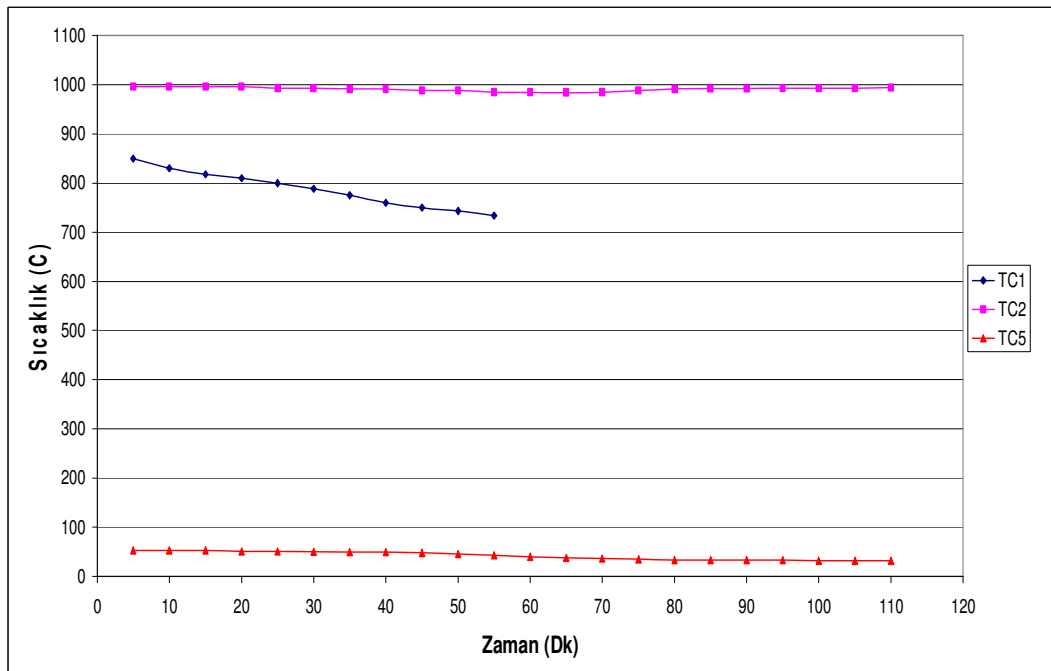
Şekil 5.11. Deney no:2.2.'den elde edilen sıcaklık zaman ilişkisi



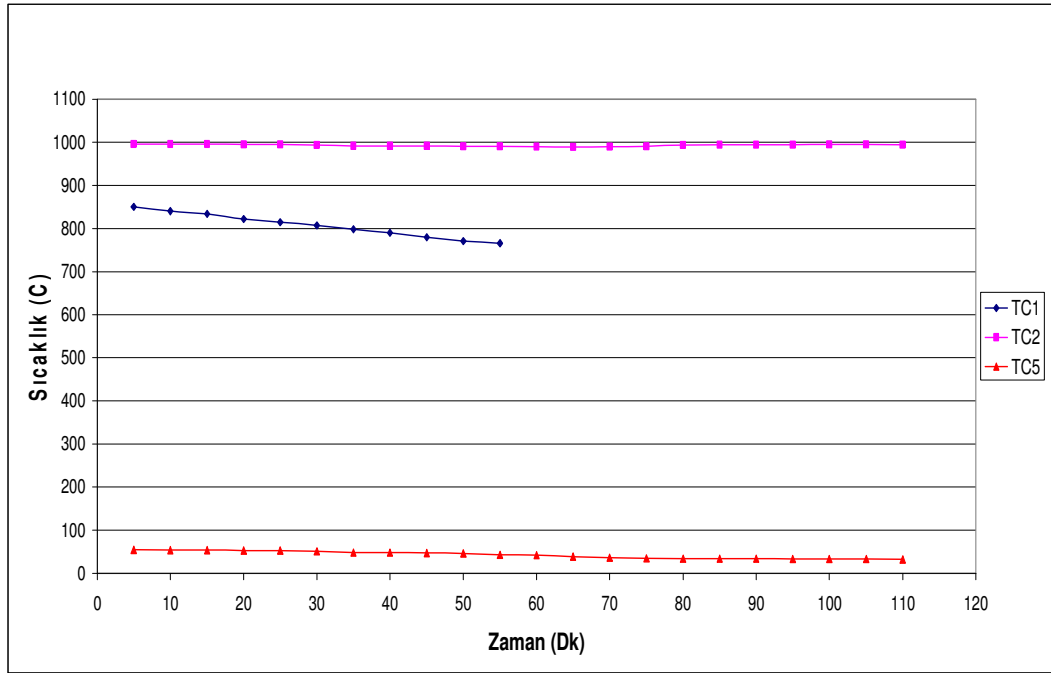
Şekil 5.12. Deney no:2.3.'den elde edilen sıcaklık zaman ilişkisi



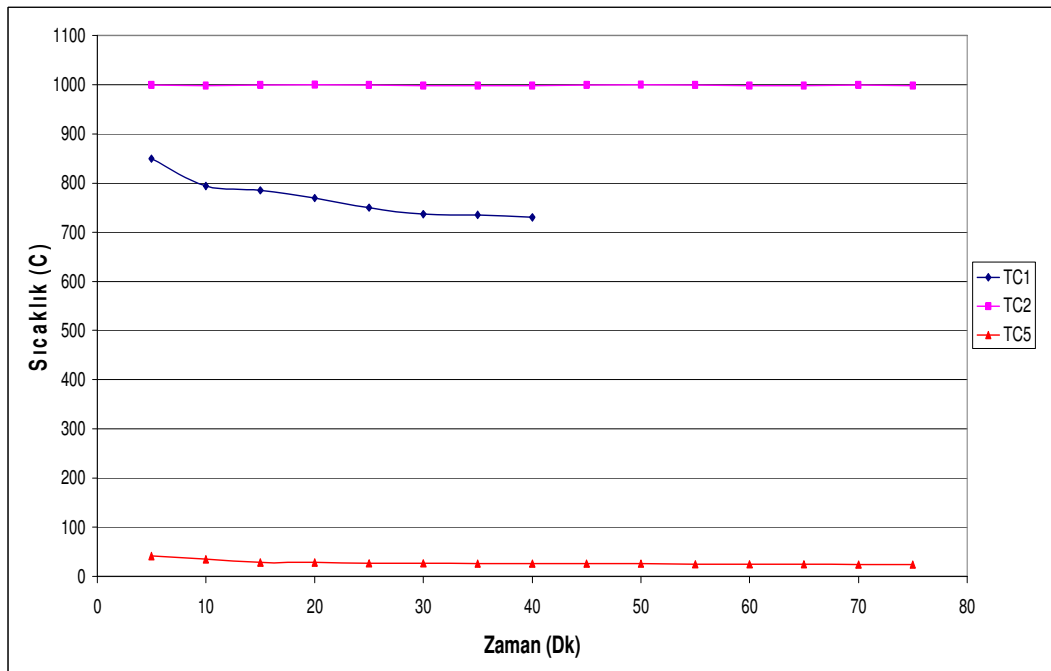
Şekil 5.13. Deney no:3.1.'den elde edilen sıcaklık zaman ilişkisi



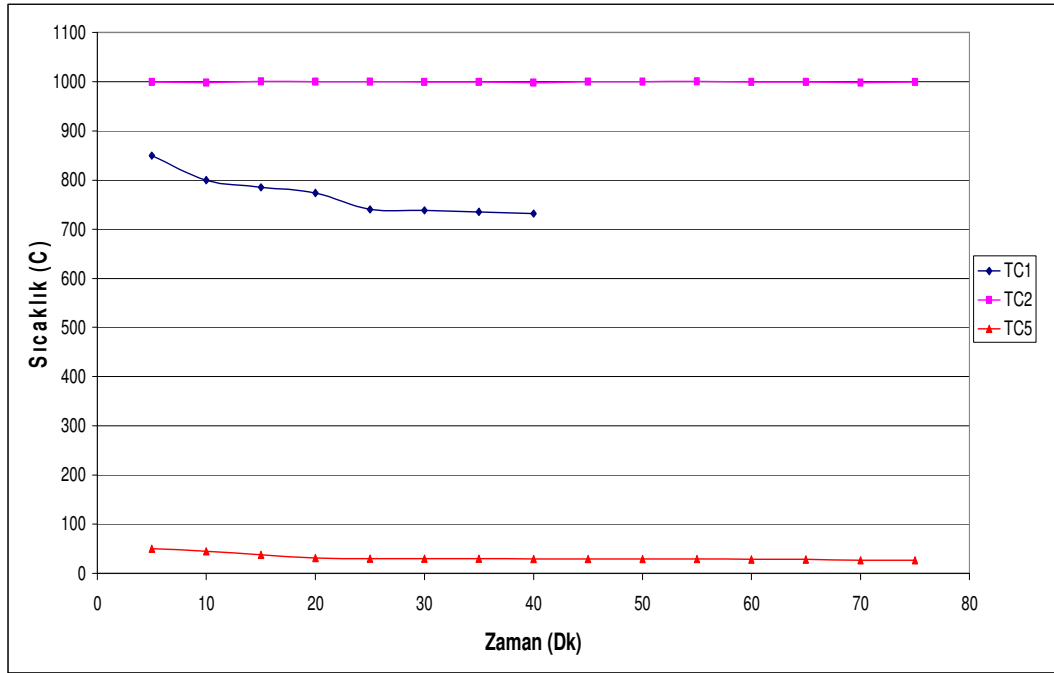
Şekil 5.14. Deney no:3.2.'den elde edilen sıcaklık zaman ilişkisi



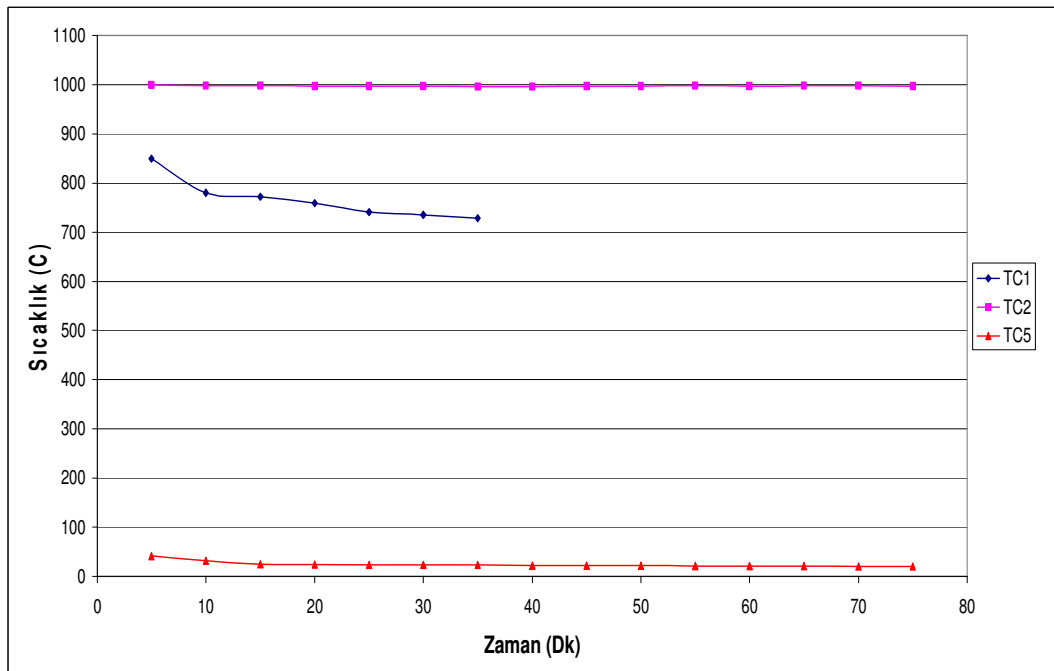
Şekil 5.15. Deney no:3.3.'den elde edilen sıcaklık zaman ilişkisi



Şekil 5.16. Deney no:4.1.'den elde edilen sıcaklık zaman ilişkisi



Şekil 5.17. Deney no:4.2.'den elde edilen sıcaklık zaman ilişkisi



Şekil 5.18. Deney no:4.3.'den elde edilen sıcaklık zaman ilişkisi

5.2.2. Sıcaklık gradyanları

Bölüm 4.4.2’de verilen Eş. 4.1 kullanılarak elde edilen sıcaklık gradyanları Çizelge 5.3’de verilmiştir. Çizelge 5.3’de verilen $G_{üst}$ değerleri aynı zamanda grafik olarak da ifade edilebilir. Bu şekilde elde edilen $G_{üst}$ değerlerinin konuma (z) bağlı grafikleri ise Şekil 5.19-Şekil 5.22’ de verilmiştir.

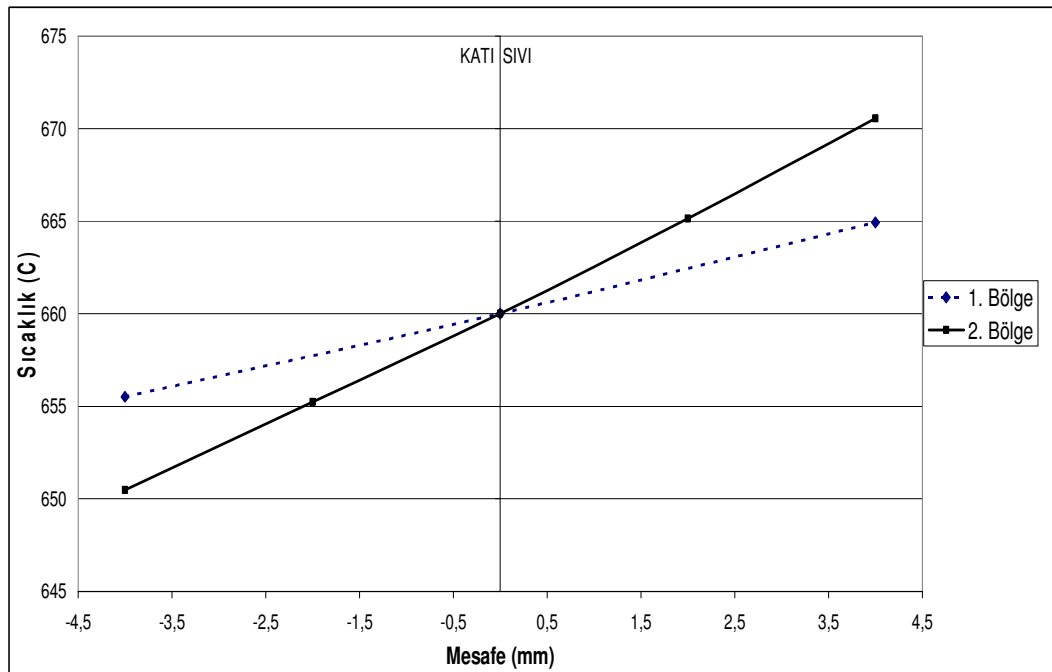
Çizelge 5.3’de görüldüğü gibi 0,00816mm/sn, 0,0123mm/sn, 0,0184mm/sn ve 0,0218mm/sn fırın ilerleme hızları benzer sıcaklık gradyanı oluşturmuştur. Fırın ilerleme hızları birinci bölgede 10,50 ile 14,62 $^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ arasında sıcaklık gradyanları üretirken ikinci bölge 24,3 ile 29,23 $^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ arasında sıcaklık gradranları üretmiştir.

0,0218mm/sn, 0,0184mm/sn ve 0,00816mm/sn fırın ilerleme hızlarında $G_{üst6}$, $G_{üst7}$ ve $G_{üst8}$ değerinin sürekli artma fakat $G_{üst9}$ değerinin düşme eğiliminde olduğu görülmüştür. Ancak bu eğilim 0,0123mm/sn fırın hızında değişim göstererek sıcaklık gradyanı yüksek $G_{üst6}$ değerinden sonra hızlı bir düşme ve takiben hızlı bir artış göstermiştir.

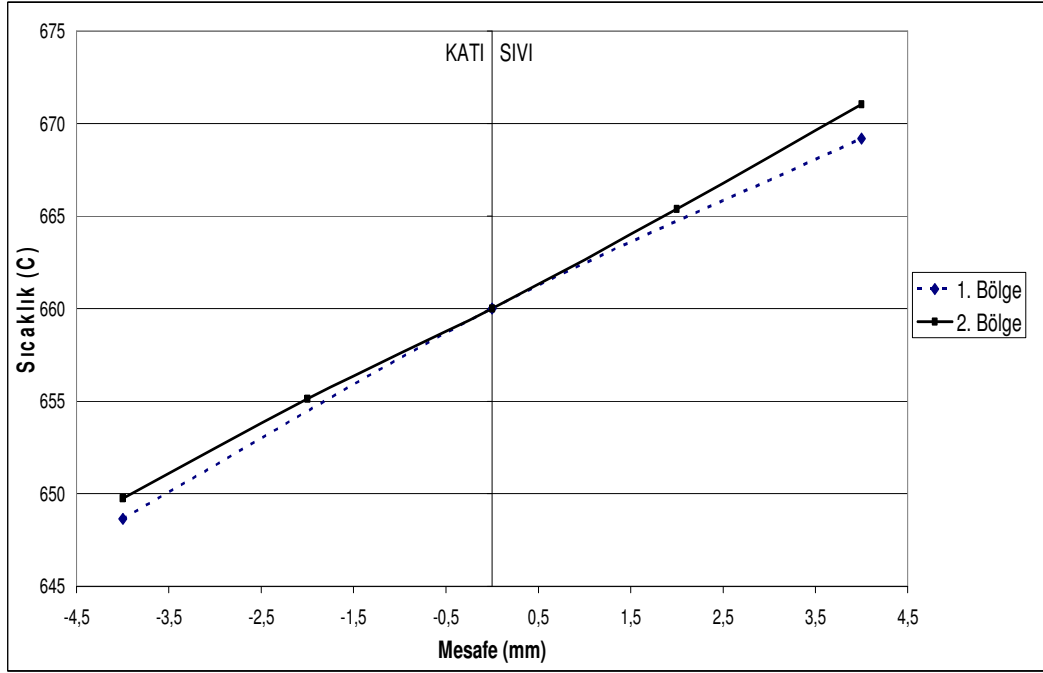
Bu fırın ilerleme hızında I.bölge ile II.bölge sıcaklık gradyanı arasındaki aralık oldukça dardır, Şekil 5.21. Bu çalışmada yönlü katılaştırma deneylerinde elde edilen sıcaklık gradyanlarından daha dik sıcaklık gradyanı elde edilememiştir.

Çizelge 5.3. Çizelge 5.2’de verilen 4 deney için $G_{\text{Üst}}$ hesaplarının sonuçları

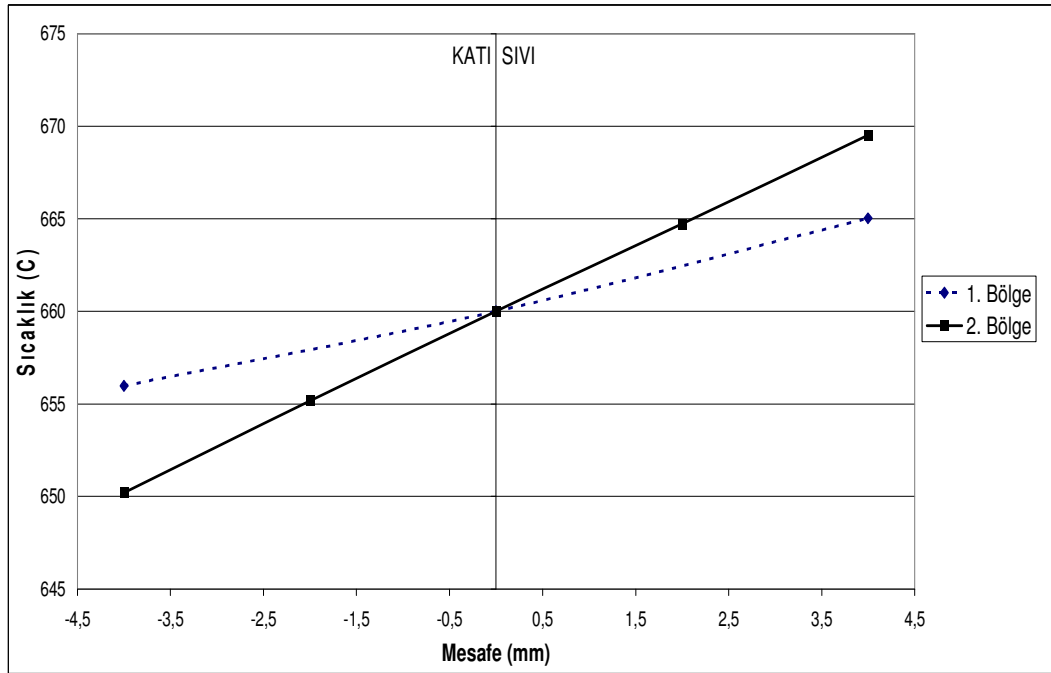
Fırın ilerleme hızı (mm/sn)	Sıcaklık gradyanı $G_{\text{Üst}}$ ($^{\circ}\text{C}/\text{cm}$)
0,00816mm/sn	$G_{\text{Üst6}} = 12,17$
	$G_{\text{Üst7}} = 14,09$
	$G_{\text{Üst8}} = 25,91$
	$G_{\text{Üst9}} = 24,30$
0,0123mm/sn	$G_{\text{Üst6}} = 22,84$
	$G_{\text{Üst7}} = 12,82$
	$G_{\text{Üst8}} = 23,83$
	$G_{\text{Üst9}} = 29,23$
0,0184mm/sn	$G_{\text{Üst6}} = 11,82$
	$G_{\text{Üst7}} = 13,67$
	$G_{\text{Üst8}} = 26,15$
	$G_{\text{Üst9}} = 19,91$
0,0218mm/sn	$G_{\text{Üst6}} = 10,50$
	$G_{\text{Üst7}} = 14,62$
	$G_{\text{Üst8}} = 27,10$
	$G_{\text{Üst9}} = 24,69$



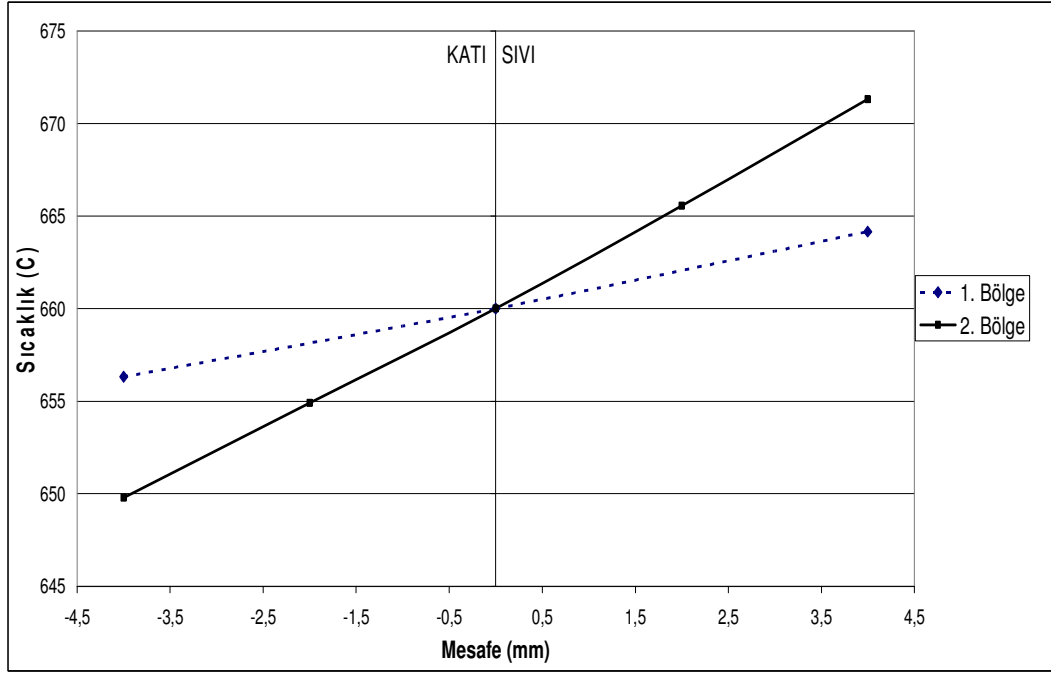
Şekil 5.19. 0,00816mm/sn fırın ilerleme hızı için $G_{\text{Üst}}$ parametresinin konuma bağlı grafiği



Şekil 5.20. 0,0123mm/sn fırın ilerleme hızı için $G_{Üst}$ parametresinin konuma bağlı grafiği



Şekil 5.21. 0,0184mm/sn fırın ilerleme hızı için $G_{Üst}$ parametresinin konuma bağlı grafiği



Şekil 5.22. 0,0218mm/sn fırın ilerleme hızı için $G_{üst}$ parametresinin konuma bağlı grafiği

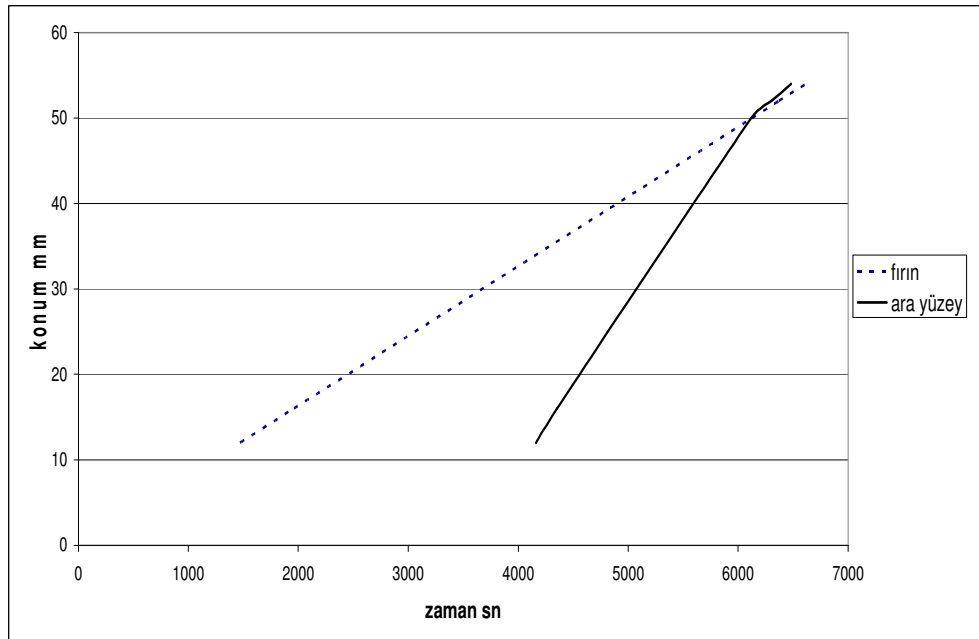
5.2.3. Ara yüzey ilerleme hızları

Bölüm 4.4.3'de verilen Eş. 4.2 kullanılarak elde edilen ara yüzey ilerleme hızları Çizelge 5.4'de verilmiştir. Ara yüzey ilerleme hızlarının hesaplanması sırasında Çizelge 5.2'de verilen zaman değerleri kullanılmıştır. Fırın ile ara yüzey ilerleme hızlarının zamana bağlı konumları arasındaki ilişki Şekil 5.23 ile 5.26 arasındaki grafiklerde verilmiştir. Çizelge 5.4'de görüleceği üzere 0,00816mm/sn, 0,0123mm/sn, 0,0184mm/sn ve 0,0218mm/sn fırın ilerleme hızlarında fırın ilerleme hızı arttıkça katı-sıvı ara yüzey ilerleme hızı da artmıştır. Fakat 0,0123mm/sn fırın ilerleme hızında sütunsal tanelerin yönlendiği bölge olan V6 ara yüzey ilerleme hızı hafif bir düşme göstermiştir. Bu durum aynı fırın ilerleme hızında $G_{üst6}$ sıcaklık gradyanının da yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Her bir fırın ilerleme hızında katı-sıvı ara yüzey ilerleme hızı V_8 'e kadar sürekli azalmış, fakat daha sonra artmıştır. Bu değerler sıcaklık gradyanları değerlerine göre beklenen olağan bir sonuçtur. Çünkü düşük sıcaklık gradyanları yüksek katı-sıvı ara yüzey ilerleme hızları üretir. V_9 ara yüzey ilerleme hızlarında meydana gelen artış ara yüzey

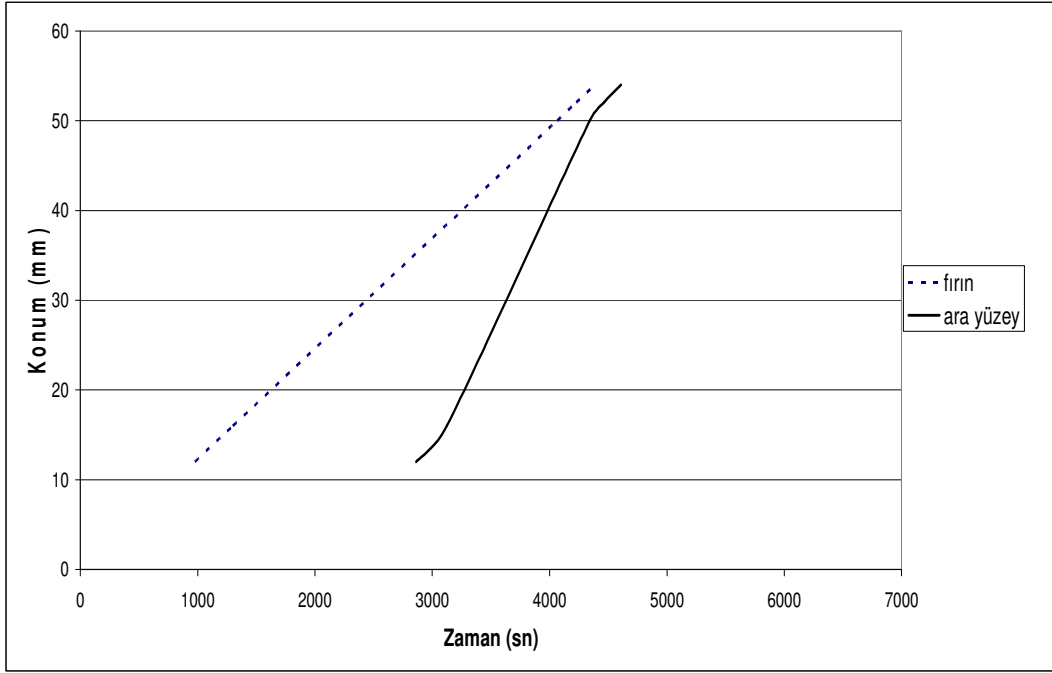
ilerleme hızlarının fırın ilerleme hızları ile eşgüdümlü olmamasından kaynaklanmaktadır. Şekil 5.11 - Şekil 5.14' de fırın ilerleme hızı ile katı-sıvı ara yüzey ilerleme hızı değerleri konum itibarıyla fırın ilerleme hızı artıkça ingotun üst bölgesinde bulunan ve soğutucu yüzeyinden 56 mm mesafede birbirilerinden uzaklaşma eğilimindedirler.

Çizelge 5.4. Çizelge 5.2'de verilen 4 deney için V_{ort} hesaplarının sonuçları

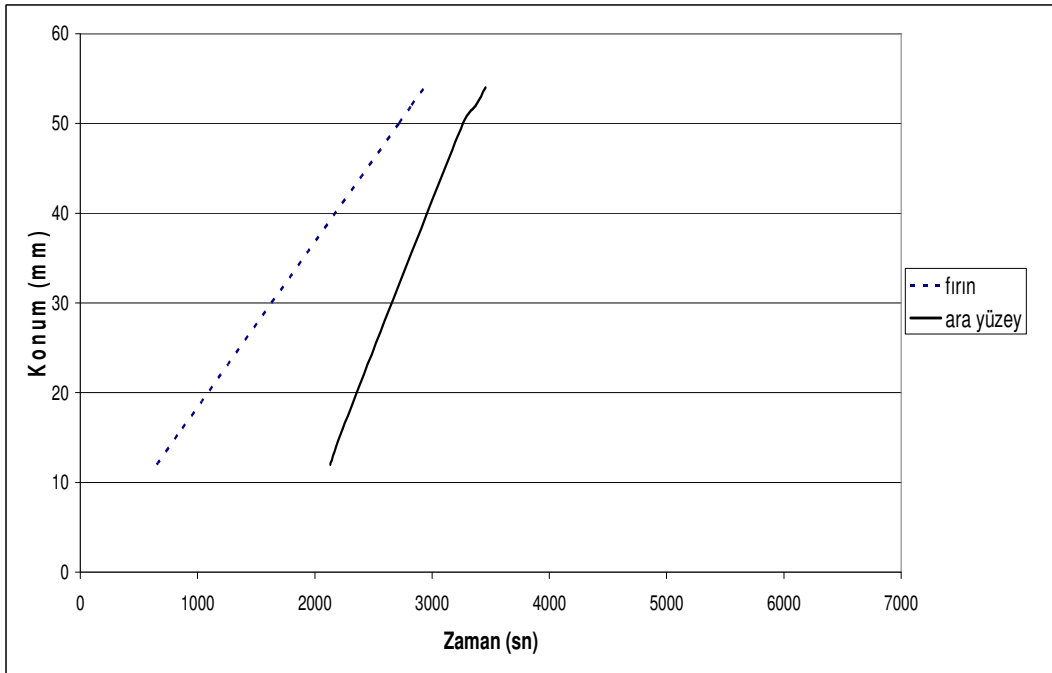
Fırın İlerleme Hızı (mm/sn)	V_6 (mm/sn)	V_7 (mm/sn)	V_8 (mm/sn)	V_9 (mm/sn)
0,00816	0,0207	0,0192	0,0107	0,0111
0,0123	0,0151	0,0279	0,0162	0,0137
0,0184	0,0337	0,0331	0,0180	0,0246
0,0218	0,0563	0,0422	0,0224	0,0298



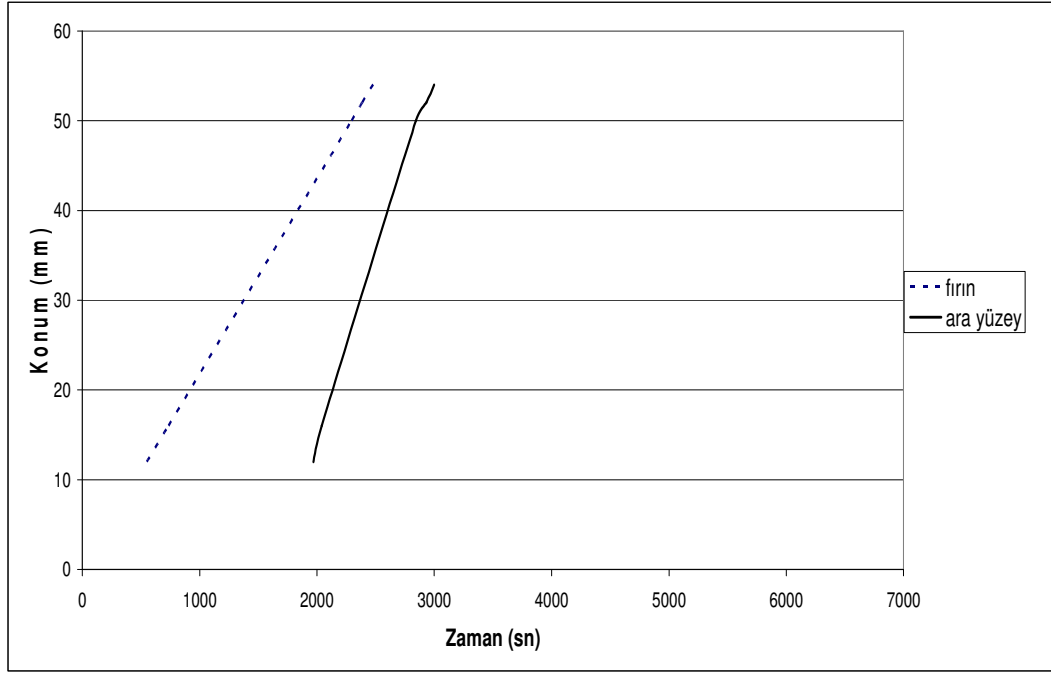
Şekil 5.23. 0,00816mm/sn fırın ilerleme hızı için katı-sıvı ara yüzey ilerleme hızı ile fırın ilerleme hızı arasındaki ilişki



Şekil 5.24. 0,0123mm/sn fırın ilerleme hızı için katı-sıvı ara yüzey ilerleme hızı ile fırın ilerleme hızı arasındaki ilişki



Şekil 5.25. 0,0184mm/sn fırın ilerleme hızı için katı-sıvı ara yüzey ilerleme hızı ile fırın ilerleme hızı arasındaki ilişki



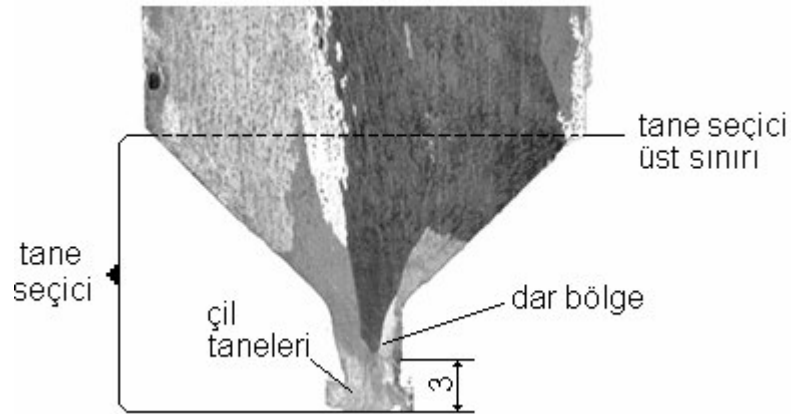
Şekil 5.26. 0,0218mm/sn fırın ilerleme hızı için katı-sıvı ara yüzey ilerleme hızı ile fırın ilerleme hızı arasındaki ilişki

5.2.4. Yapılan deneylerden elde edilen makro yapılar

0,00816mm/sn, 0,0123mm/sn, 0,0184mm/sn ve 0,0218mm/sn fırın ilerleme hızları ile yapılan deneyler sonucunda elde edilen dökümlerin makro yapıları Şekil 5.28 – Şekil 5.31’ de verilmiştir.

Yapılan yönlü katılaştırma deneylerinde daha az sayıda sütunsal tane oluşturmak ve katılaştırmanın başlangıcında kontrolü sağlamak için tane seçici kullanılmıştır. Elde edilen makro yapıların tamamında dökümün soğutucuya temas eden yüzeyinde yaklaşık olarak 3 mm kalınlığında çil taneleri meydana gelmiştir, Şekil 5.27 Sıvı metal sıcaklığının yüksek veya pozitif sıcaklık gradyanı olması nedeniyle farklı yönlerde sahip çil tanelerin komşuları ile kesişerek büyümeleri engellenmiştir. Ancak, tane seçicinin dar bölgesinde çil taneleri üzerinde kısmen fazla sayıda ve ince sütunsal taneler meydana gelmiş ve ısı çıkışının tersi yönünde tek yönlü olarak büyümeye devam etmiştir. Tane seçicinin dar bölgesinin bitiminde ince sütunsal taneler

birbirileri ile birleşerek sütunsal tanelerin sayısında düşme meydana gelmiştir. Tane seçicinin üst sınırında sütunsal tane sayısı ve yönlenmesi esas olarak belirlenmiş ve daha sonra 0,00816mm/sn, 0,0123mm/sn ve 0,0184mm/sn fırın ilerleme hızlarında önemli derecede değişmemiştir, (Çizelge 5.5). Fakat 0,0218mm/sn fırın ilerleme hızında sütunsal tane sayısı artmış ve sütunsal tanelerin yönlenmeleri kısmen bozulmuştur, (Şekil 5.31).



Şekil 5.27. Tane seçici ve bölümleri

Elde edilen makro yapılar incelendiğinde, düşük fırın ilerleme hızlarında büyük ve düzgün yönlenmiş taneler elde edilirken yüksek fırın ilerleme hızlarında nispeten daha küçük ve düzensiz taneler elde edilmiştir. Düşük fırın ilerleme hızlarında, katı-sıvı ara yüzey ilerleme hızının düşük olması nedeni ile taneler büyümek için daha fazla zaman bulmuşlardır. 0,0184mm/sn fırın ilerleme hızı ile deney no:3.3'den elde edilen dökümün makro yapısında oldukça büyük taneler oluşmuştur. Bu oluşumun nedeni, tane seçicinin hemen üzerinde meydana gelen gaz boşluğunun o bölgede farklı bir ara yüzey oluşturması ve oluşan hava-sıvı ara yüzeyinin soğutma etkisini azaltmasıdır.

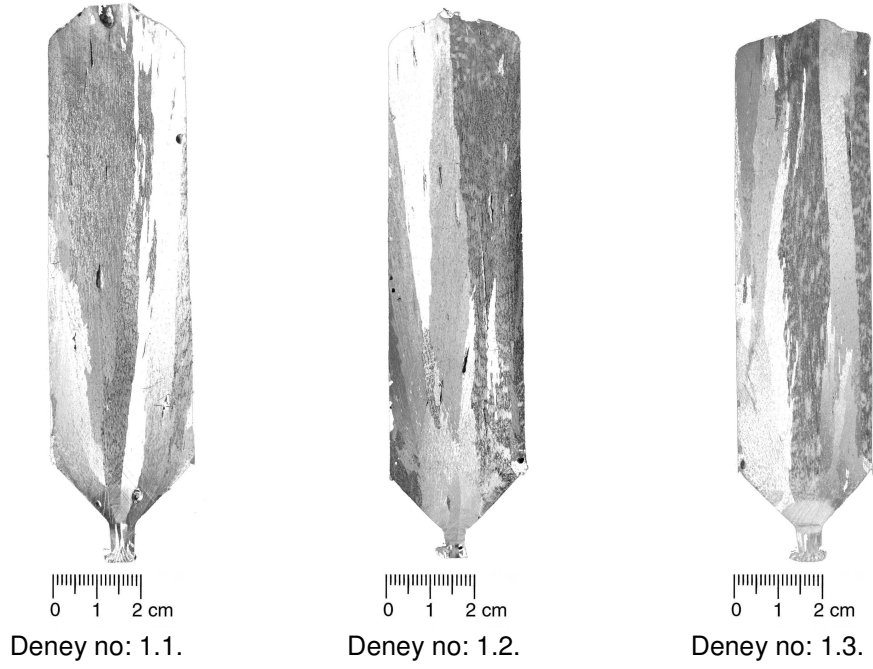
Yönlü katılaştırma düzeneğinde, hızlı soğumaya bağlı olarak numunenin zemininde çil bölgesi oluşumunun engellenmesi için en düşük su debisi (8lt/dk) kullanılmıştır. Yapılan deneylerde, fırın ilerleme hızına (V_F) bağlı

olarak katı-sıvı ara yüzey ilerleme hızı azaldıkça daha dik ve düzgün sütunsal taneler elde edilmiştir.

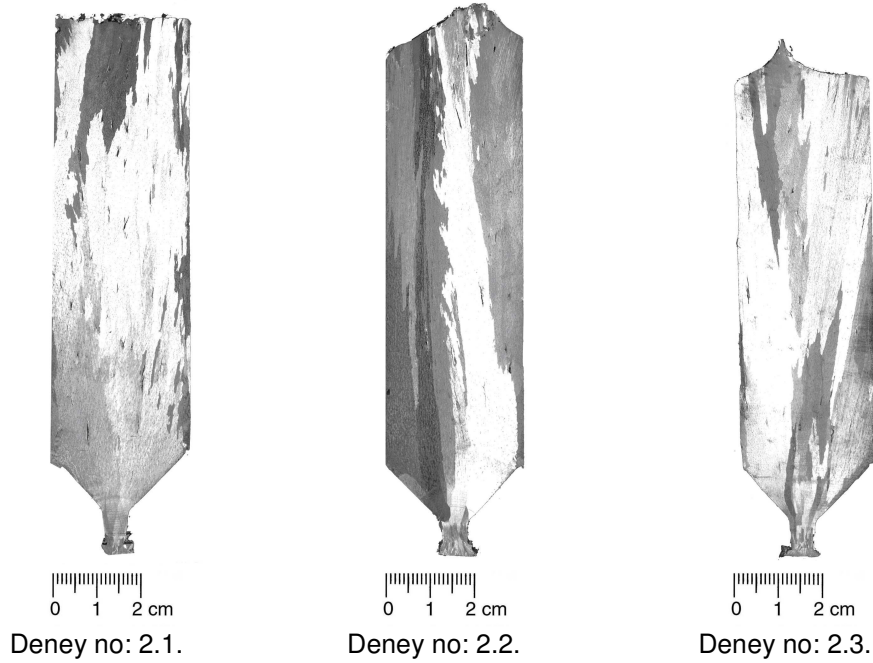
Çizelge 5.5. Fırın ilerleme hızına bağlı olarak tane seçiciden çıkan ve döküm ingotu oluşturan tane sayıları

Fırın ilerleme hızı (mm/sn)	Deney no	Tane seçiciden çıkan tane sayısı	İngotu oluşturan tane sayısı
0,00816	1.1.	5	5
	1.2.	4	5
	1.3.	5	5
0,0123	2.1.	2	4
	2.2.	4	5
	2.3.	6	6
0,0184	3.1.	4	5
	3.2.	6	7
	3.3.	4	5
0,0218	4.1.	9	16
	4.2.	7	14
	4.3.	9	17

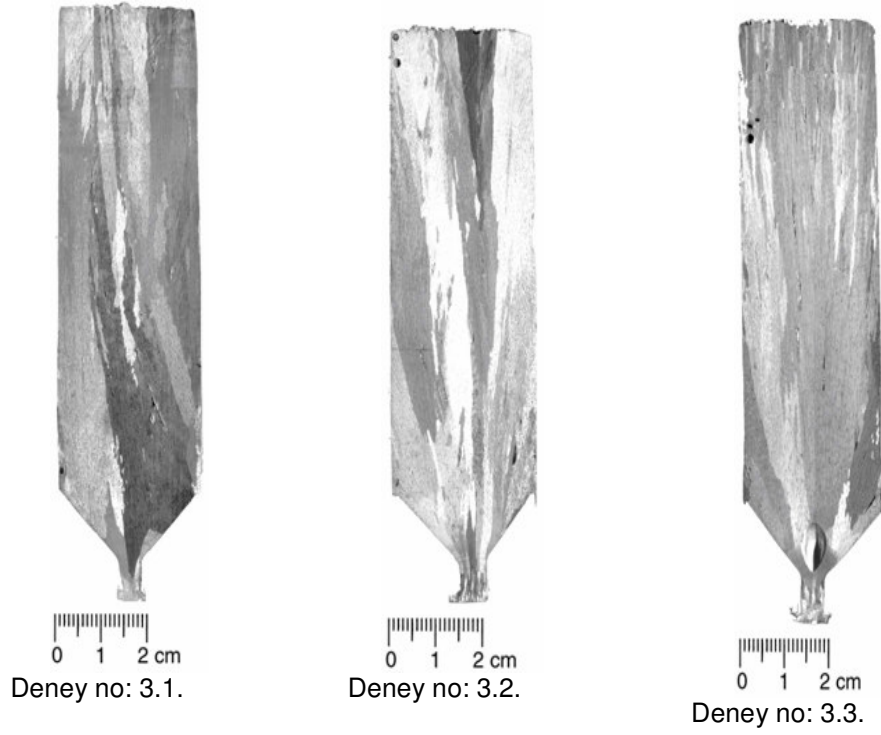
0,0123mm/sn, 0,0184mm/sn ve 0,0218mm/sn fırın ilerleme hızlarında sırasıyla deney 2.3, 3.1 ve 4.2' de elde edilen dökümlerde tanelerin çapraz yönlendiği görülmüştür (Şekil 5.29 - Şekil 5.31). Aynı şartlarda yapılan diğer deneylerde benzer bir durum ortaya çıkmamıştır. Bu çapraz yönlenmenin, kalıbın fırın içerisinde tam olarak merkezlenememesi ve ısı yoğunluğunun homojen olmamasından kaynaklandığı kanısına varılmıştır.



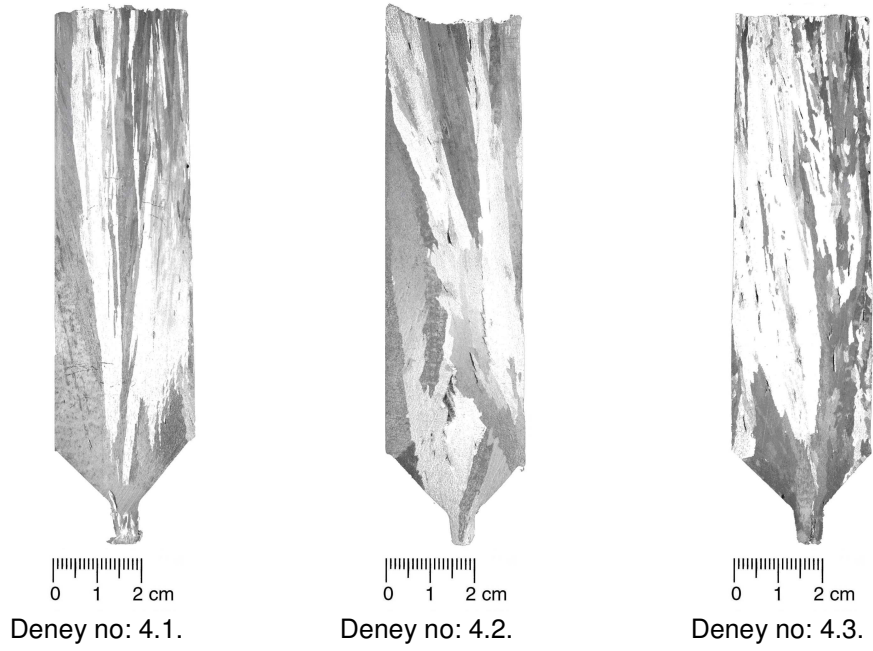
Şekil 5.28. 0,00816mm/sn fırın ilerleme hızında elde edilen dökümlerin makro yapıları



Şekil 5.29. 0,0123mm/sn fırın ilerleme hızında elde edilen dökümlerin makro yapıları



Şekil 5.30. 0,0184mm/sn fırın ilerleme hızında elde edilen dökümlerin makro yapıları



Şekil 5.31. 0,0218mm/sn fırın ilerleme hızında elde edilen dökümlerin makro yapıları

5.2.5. Yapılan deneylerden elde edilen mikro yapılar ve birim hücre sayıları

0,00816mm/sn, 0,0123mm/sn, 0,0184mm/sn ve 0,0218mm/sn fırın ilerleme hızları ile yapılan yönlü katılaştırma deneyleri sonucunda elde edilen dökümlerin mikro yapıları Resim 5.1 - Resim 5.12' de verilmiştir.

Mikro yapı analizi çalışmalarında Şekil 4.9'da gösterildiği şekilde bölgelere ayrılan dökümlerin çizgisel kesişme yöntemi kullanılarak birim mesafeye düşen hücreleri sayılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre fırın ilerleme hızının artmasıyla birim hücre sayılarının (BHS) da arttığı gözlenmiştir (Çizelge 5.6).

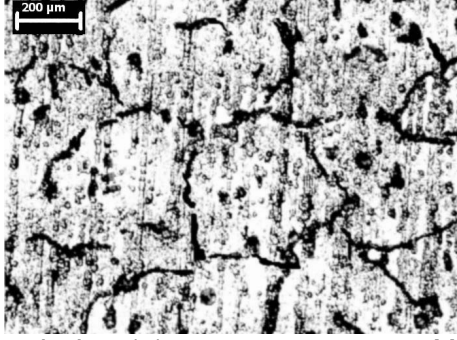
Elde edilen dökümlerin tamamının hücrel olarak katılaşmaya başladığı, fakat soğutucu yüzeyinden 104mm yukarıda (5. bölge) dentritik katılaştığı görülür. 0,0218mm/sn fırın ilerleme hızı ile yapılan deneylerde ise dentritik katılaşma soğutucu yüzeyinden 54mm (3. bölge) yukarıda başlamıştır. Bunun nedeninin soğutucu yüzeyinden 54mm yukarıya tekabül eden G_{UST9} ve V_9 değerlerinin dentritik katılaşma için kritik değerler olduğu düşünülmüştür. BHS'larının hesaplanmasında dentritik katılaşan 5. bölgeden ölçüm alınmamıştır. Aynı şekilde 0,0218mm/sn fırın ilerleme hızı ile elde edilen dökümlerin dentritik katılaşan bölgelerinden ölçüm alınmamıştır.

Ayrıca Çizelge 5.6'da görüldüğü gibi milimetre başına düşen BHS'ı hücrel katılaşma için max 5'tir. Bu değerden sonra hücrel katılaşma dentritik katılaşmaya dönüşür.

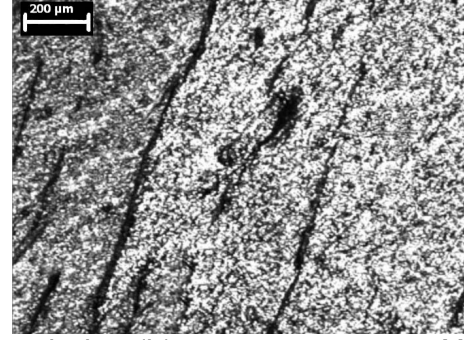
Çizelge 5.6. Yönlü katılaştırma deneylerinden elde edilen numunelerin bölgelere göre ortalama BHS'ları

Fırın ilerleme hızı	Deney No	Bölge No	BHS (hücre sayısı/mm)	Ortalama BHS (hücre sayısı/mm)
0,00816mm/sn	1.1	1	2,838	3,326
		2	3,17	
		3	3,417	
		4	3,898	
	1.2	1	2,96	3,446
		2	3,408	
		3	3,518	
		4	3,918	
	1.3	1	3,021	3,673
		2	3,618	
		3	3,963	
		4	4,11	
0,0123mm/sn	2.1	1	3,671	3,9
		2	3,748	
		3	3,92	
		4	4,275	
	2.2	1	3,3	3,657
		2	3,514	
		3	3,7	
		4	4,124	
	2.3	1	3,628	3,83
		2	3,649	
		3	3,875	
		4	4,17	
0,0184mm/sn	3.1	1	4	4,228
		2	4,253	
		3	4,303	
		4	4,362	
	3.2	1	3,8	3,951
		2	3,912	
		3	3,927	
		4	4,167	
	3.3	1	3,821	4,047
		2	3,978	
		3	4,145	
		4	4,25	
0,0218 mm/sn	4.1	1	3,435	4,326
		2	5,217	
		3	Ölçüm alınmadı	
		4	Ölçüm alınmadı	
	4.2	1	3,4	4,225
		2	5,05	
		3	Ölçüm alınmadı	
		4	Ölçüm alınmadı	
	4.3	1	3,659	4,311
		2	4,964	
		3	Ölçüm alınmadı	
		4	Ölçüm alınmadı	

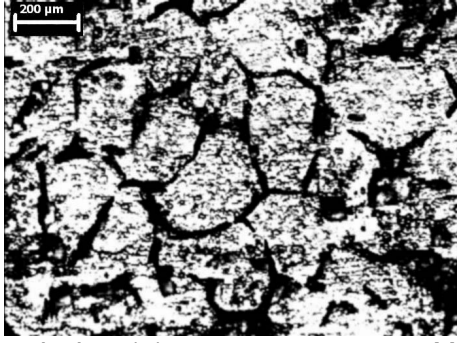
Deney no:1.1



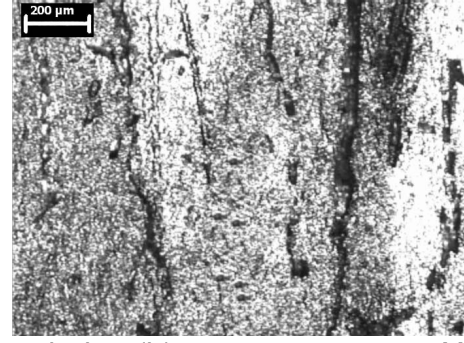
1. bölge (a) 50X



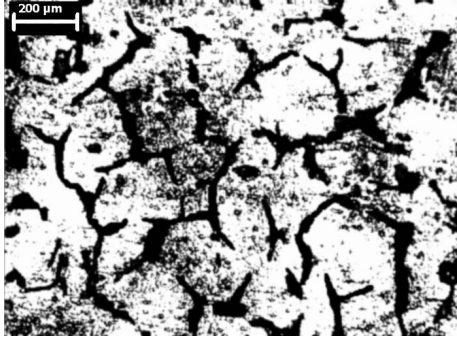
1. bölge (b) 50X



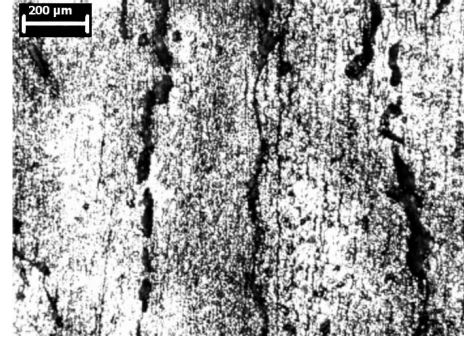
2. bölge (a) 50X



2. bölge (b) 50X

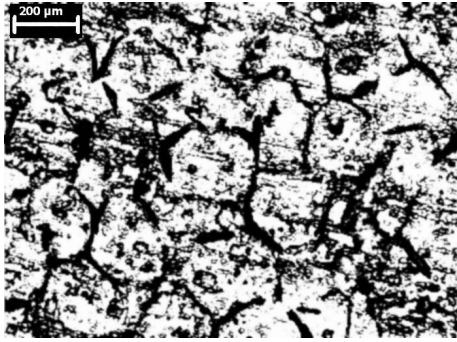


3. bölge (a) 50X



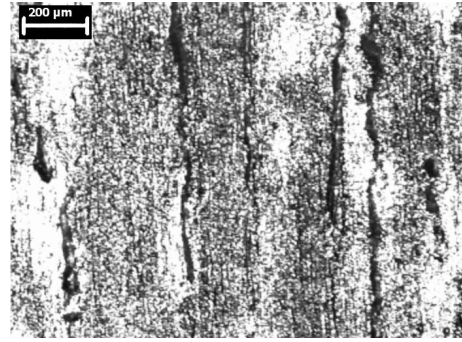
3. bölge (b) 50X

Resim 5.1. 0,00816mm/sn fırın ilerleme hızı ile yapılan deney no:1.1.'den elde edilen mikro yapılar. a) yatay kesit, b) dikey kesit



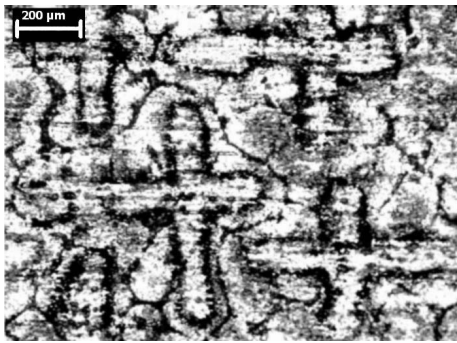
4. bölge (a)

50X



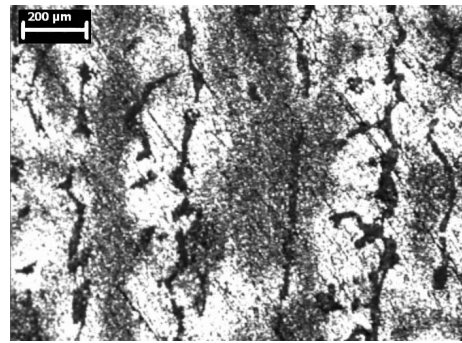
4. bölge (b)

50X



5. bölge (a)

50X

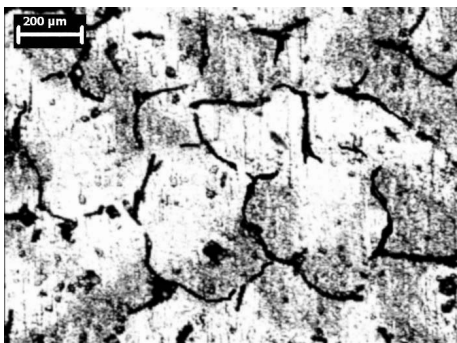


5. bölge (b)

50X

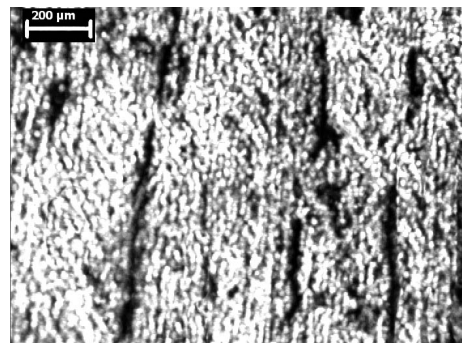
Resim 5.1. (Devam) 0,00816mm/sn fırın ilerleme hızı ile yapılan deney no:1.1.'den elde edilen mikro yapılar. a) yatay kesit, b) dikey kesit

Deney no:1.2



1. bölge (a)

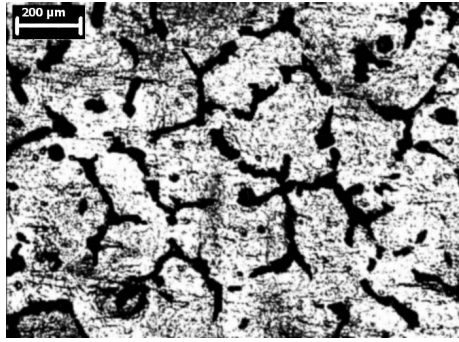
50X



1. bölge (b)

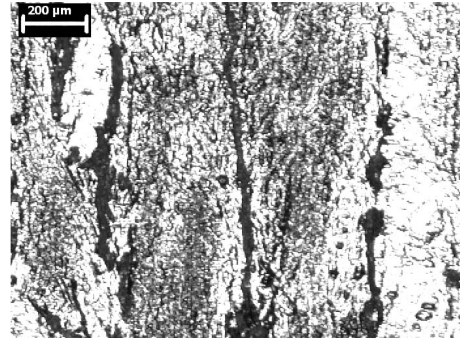
50X

Resim 5.2. 0,00816mm/sn fırın ilerleme hızı ile yapılan deney no:1.2.'den elde edilen mikro yapılar. a) yatay kesit, (b) dikey kesit



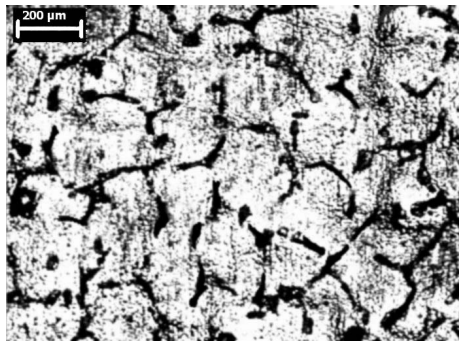
2. bölge (a)

50X



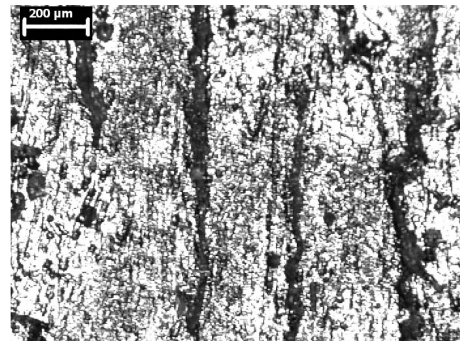
2. bölge (b)

50X



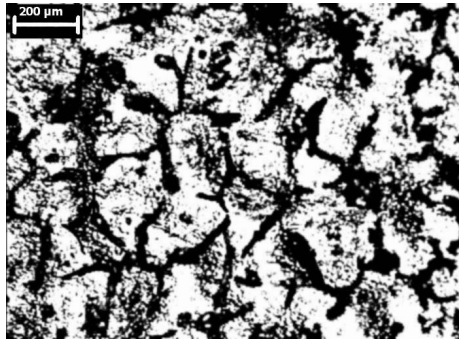
3. bölge (a)

50X



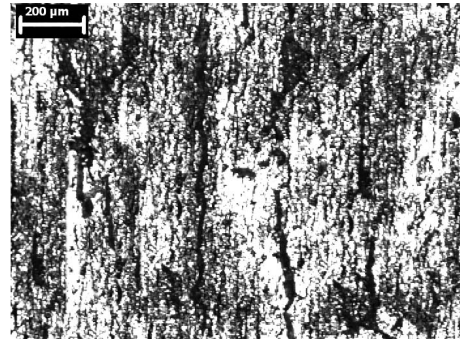
3. bölge (b)

50X



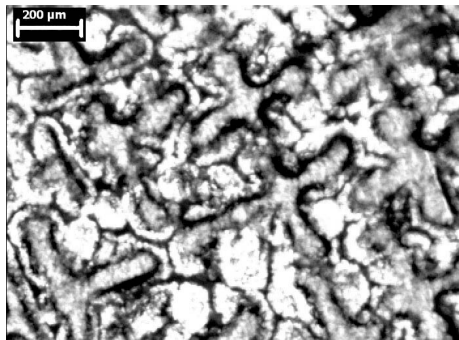
4. bölge (a)

50X



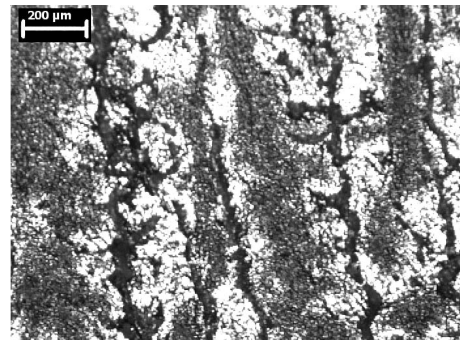
4. bölge (b)

50X



5. bölge (a)

50X

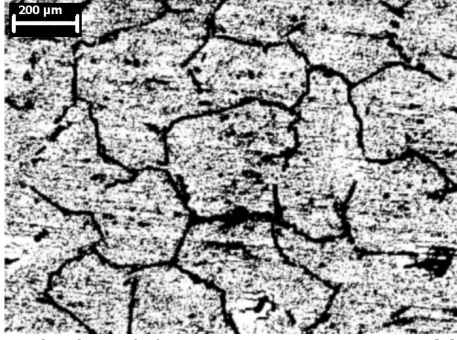


5. bölge (b)

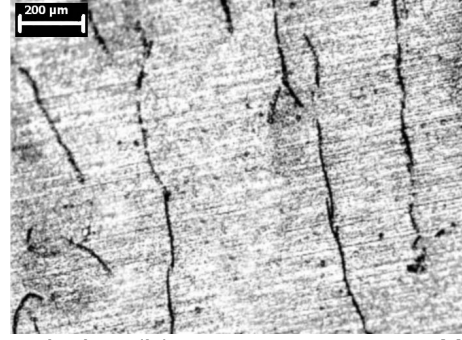
50X

Resim 5.2. (Devam) 0,00816mm/sn fırın ilerleme hızı ile yapılan deney no:1.2.'den elde edilen mikro yapılar. a) yatay kesit, b) dikey kesit

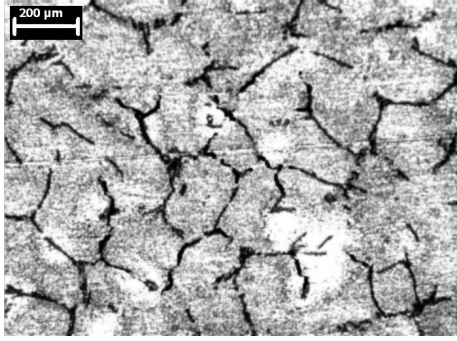
Deney no:1.3



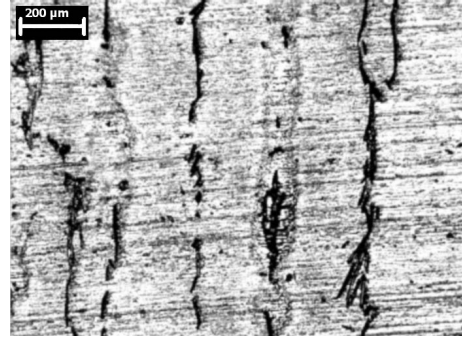
1. bölge (a) 50X



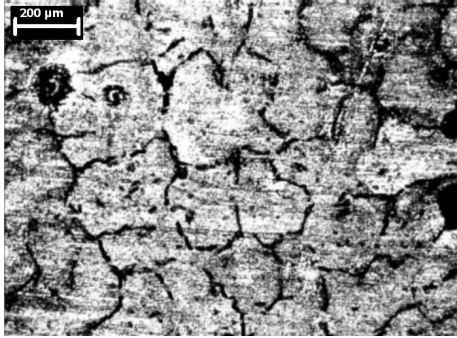
1. bölge (b) 50X



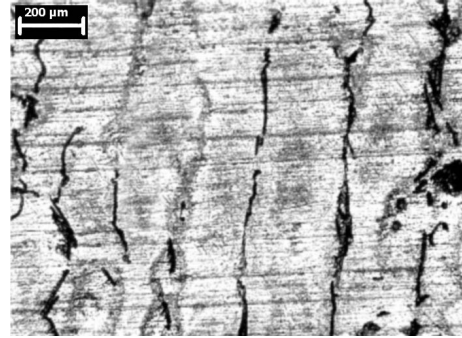
2. bölge (a) 50X



2. bölge (b) 50X

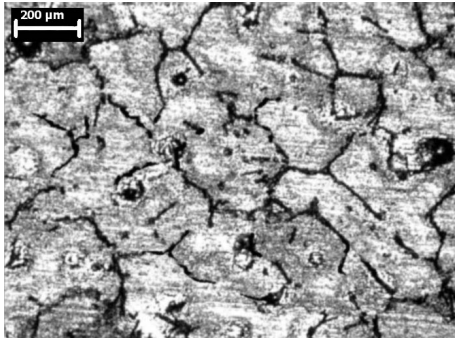


3. bölge (a) 50X



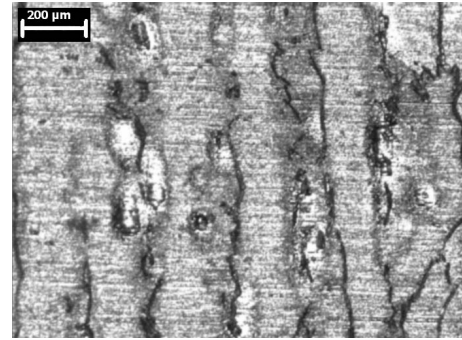
3. bölge (b) 50X

Resim 5.3. 0,00816mm/sn fırın ilerleme hızı ile yapılan deney no:1.3.'den elde edilen mikro yapılar. a) yatay kesit, b) dikey kesit



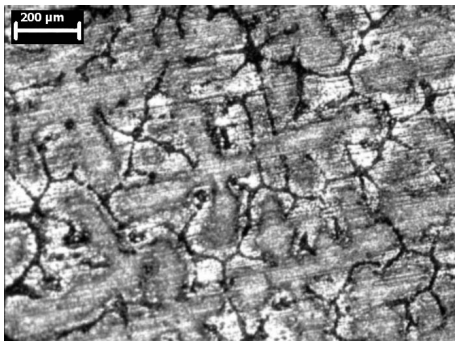
4. bölge (a)

50X



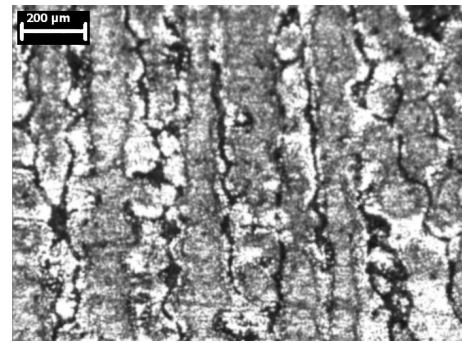
4. bölge (b)

50X



5. bölge (a)

50X

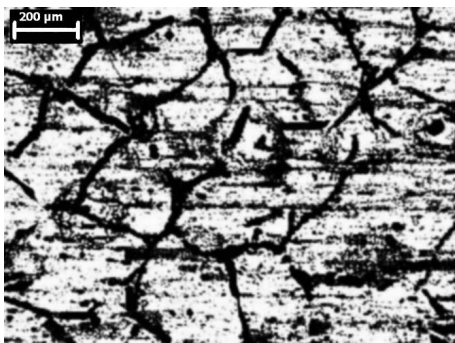


5. bölge (b)

50X

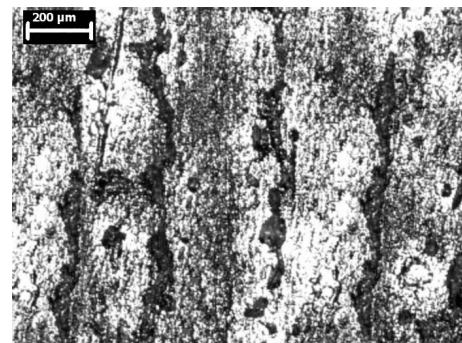
Resim 5.3. (Devam) 0,00816mm/sn fırın ilerleme hızı ile yapılan deney no:1.3.'den elde edilen mikro yapılar. a) yatay kesit, b) dikey kesit

Denen no: 2.1



1. bölge (a)

50X



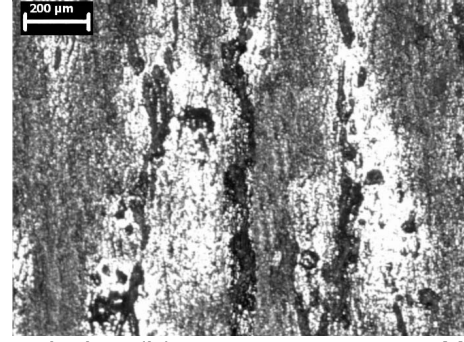
1. bölge (b)

50X

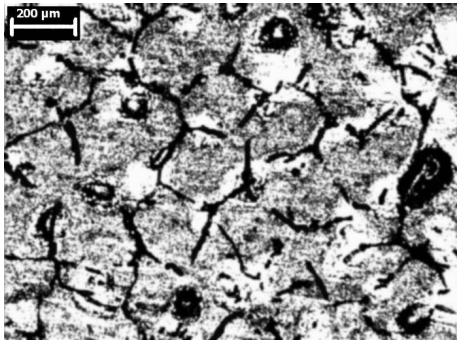
Resim 5.4. 0,0123mm/sn fırın ilerleme hızı ile yapılan deney no:2.1.'den elde edilen mikro yapılar. a) yatay kesit, b) dikey kesit



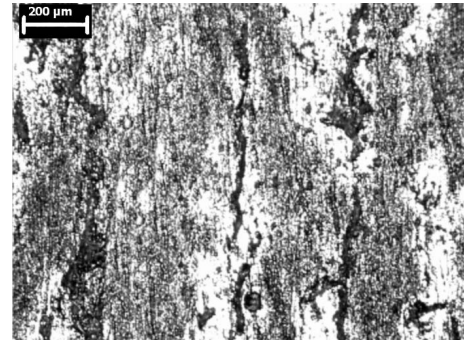
2. bölge (a) 50X



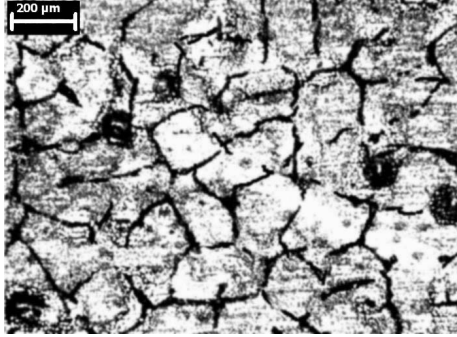
2. bölge (b) 50X



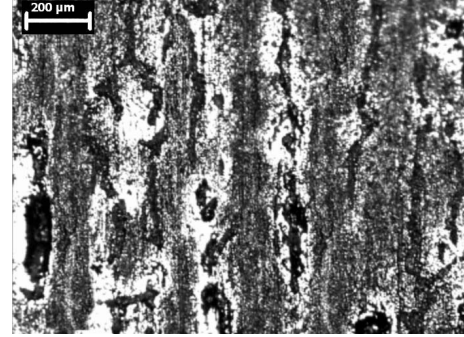
3. bölge (a) 50X



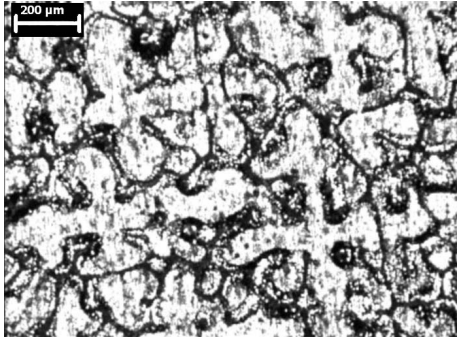
3. bölge (b) 50X



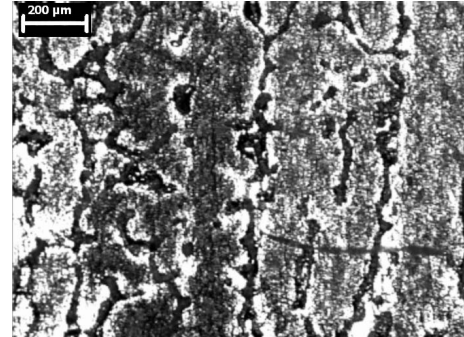
4. bölge (a) 50X



4. bölge (b) 50X



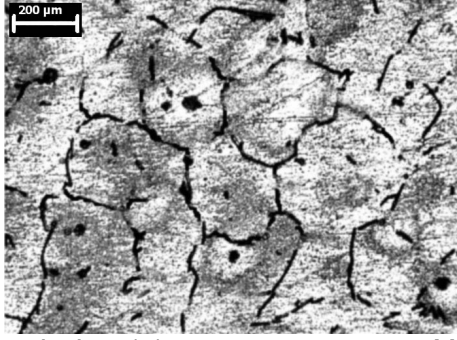
5. bölge (a) 50X



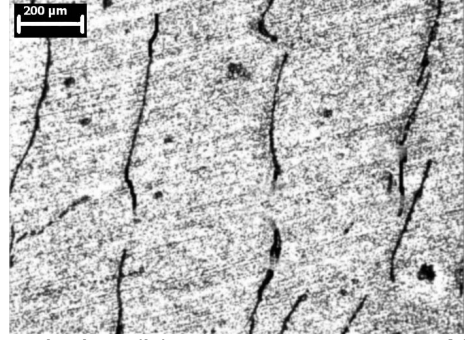
5. bölge (b) 50X

Resim 5.4. (Devamı) 0,0123mm/sn fırın ilerleme hızı ile yapılan deney no:2.1.'den elde edilen mikro yapılar. a) yatay kesit, b) dikey kesit

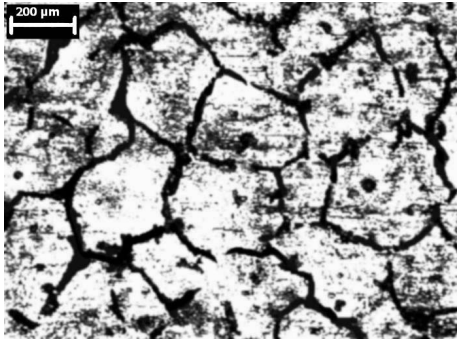
Deney no: 2.2



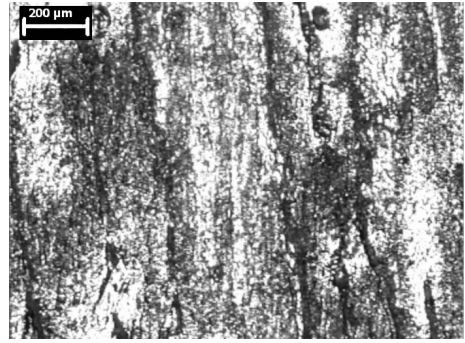
1. bölge (a) 50X



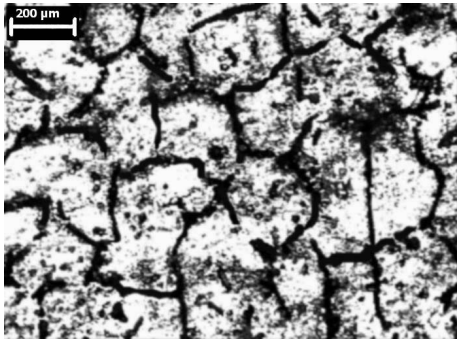
1. bölge (b) 50X



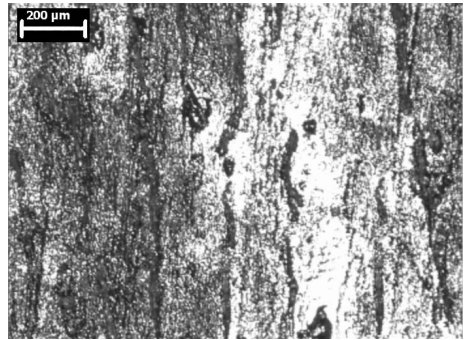
2. bölge (a) 50X



2. bölge (b) 50X

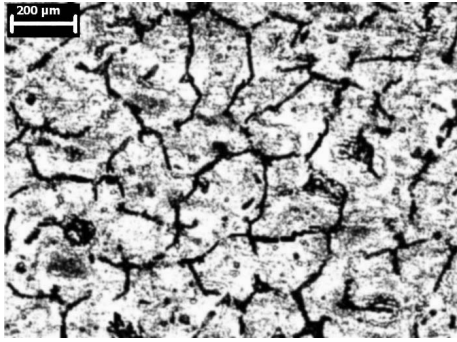


3. bölge (a) 50X



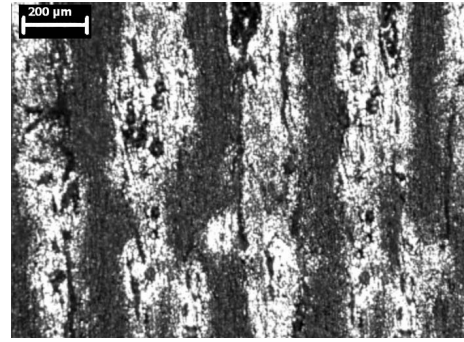
3. bölge (b) 50X

Resim 5.5. 0,0123mm/sn fırın ilerleme hızı ile yapılan deney no:2.2.'den elde edilen mikro yapılar. a) yatay kesit, b) dikey kesit



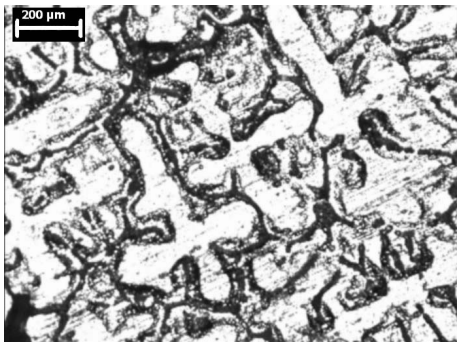
4. bölge (a)

50X



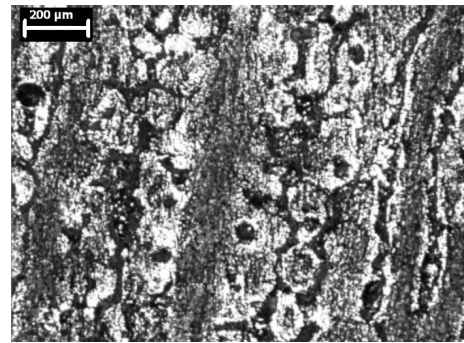
4. bölge (b)

50X



5. bölge (a)

50X

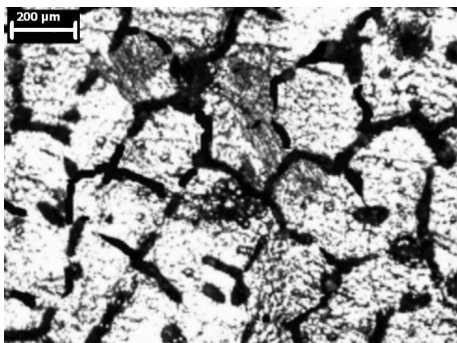


5. bölge (b)

50X

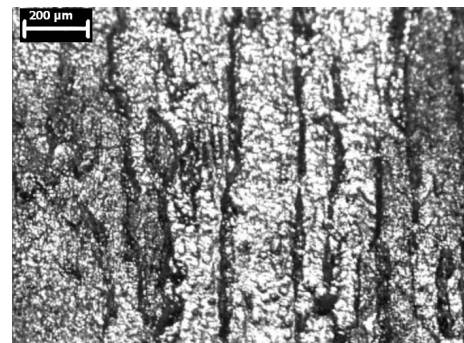
Resim 5.5. (Devam) 0,0123mm/sn fırın ilerleme hızı ile yapılan deney no:2.2.'den elde edilen mikro yapılar. a) yatay kesit, b) dikey kesit

Deney no: 2.3



1. bölge (a)

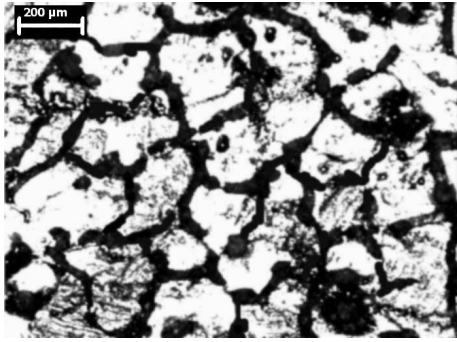
50X



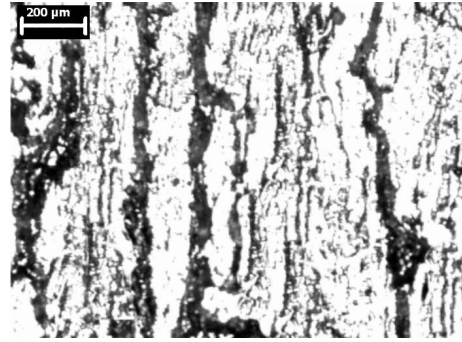
1. bölge (b)

50X

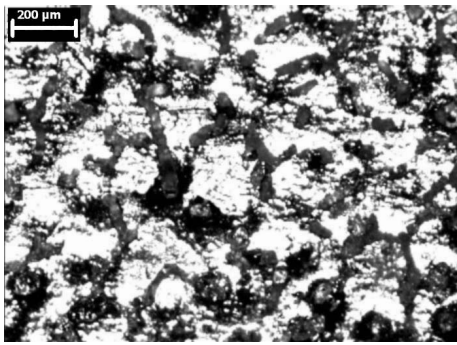
Resim 5.6. 0,0123mm/sn fırın ilerleme hızı ile yapılan deney no:2.3.'den elde edilen mikro yapılar. a) yatay kesit, b) dikey kesit



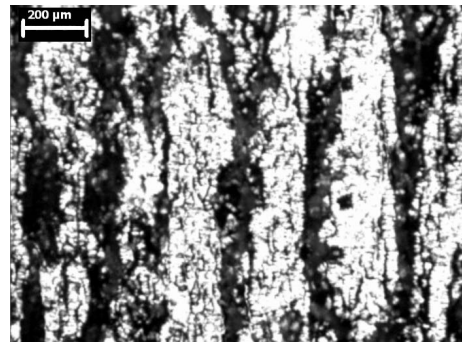
2. bölge (a) 50X



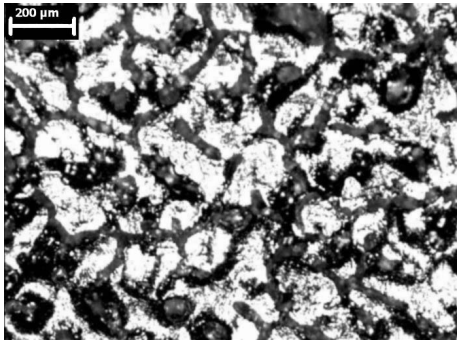
2. bölge (b) 50X



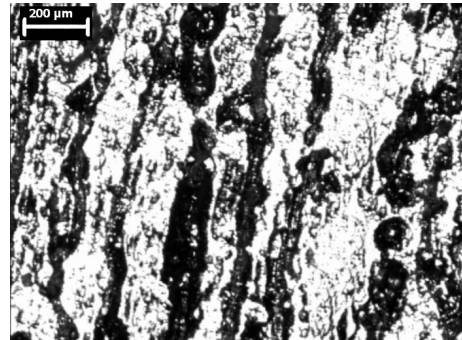
3. bölge (a) 50X



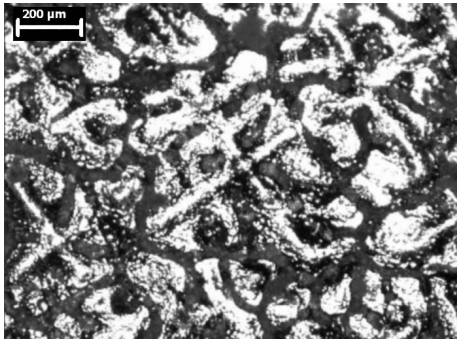
3. bölge (b) 50X



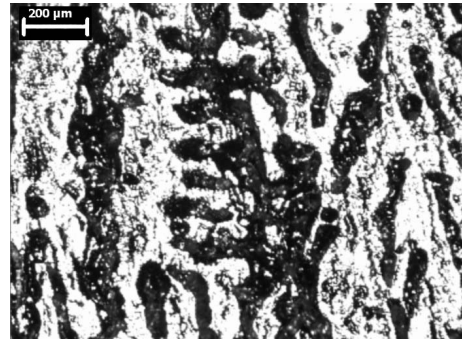
4. bölge (a) 50X



4. bölge (b) 50X

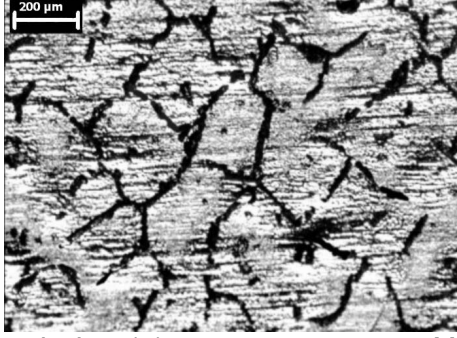


5. bölge (a) 50X

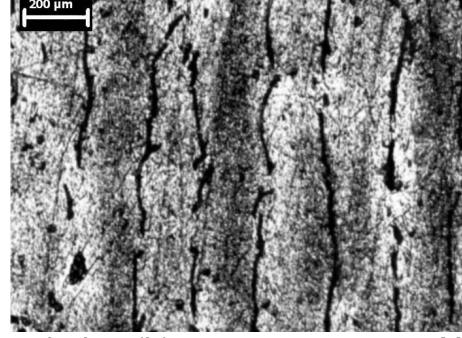


5. bölge (b) 50X

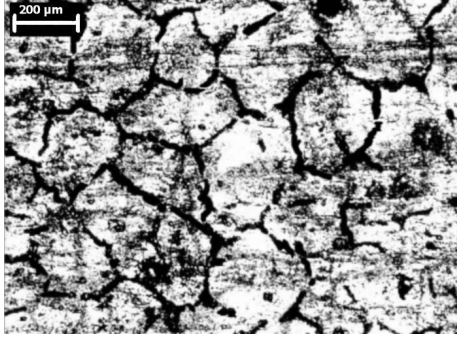
Resim 5.6. (Devam) 0,0123mm/sn fırın ilerleme hızı ile yapılan deney no:2.3.'den elde edilen mikro yapılar. a) yatay kesit, b) dikey kesit

Deney no: 3.1

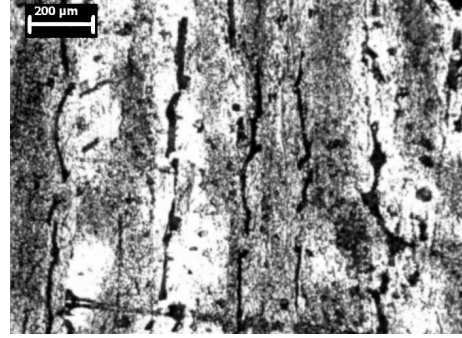
1. bölge (a) 50X



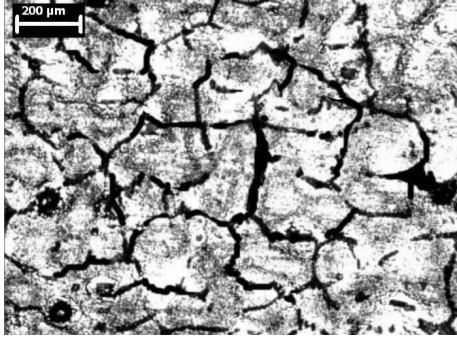
1. bölge (b) 50X



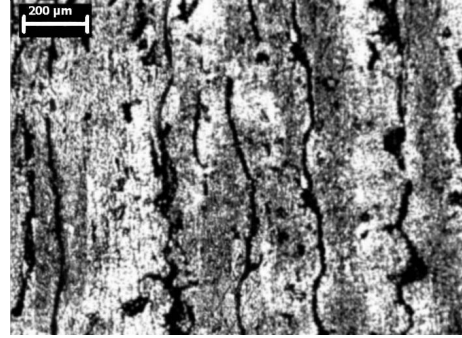
2. bölge (a) 50X



2. bölge (b) 50X

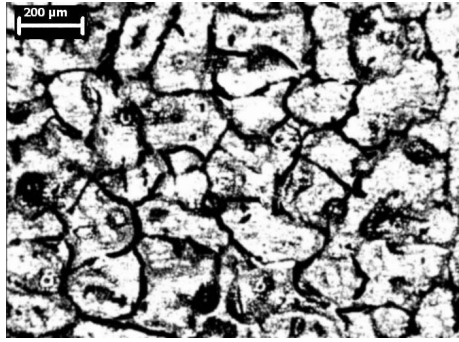


3. bölge (a) 50X



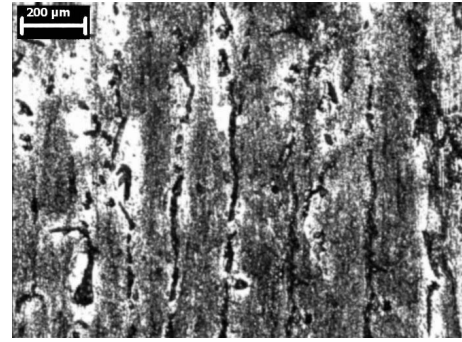
3. bölge (b) 50X

Resim 5.7. 0,0184mm/sn fırın ilerleme hızı ile yapılan deney no:3.1.'den elde edilen mikro yapılar. a) yatay kesit, b) dikey kesit



4. bölge (a)

50X



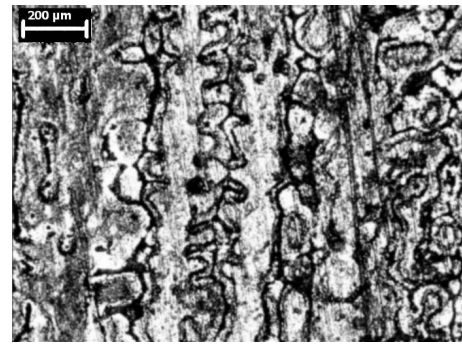
4. bölge (b)

50X



5. bölge (a)

50X

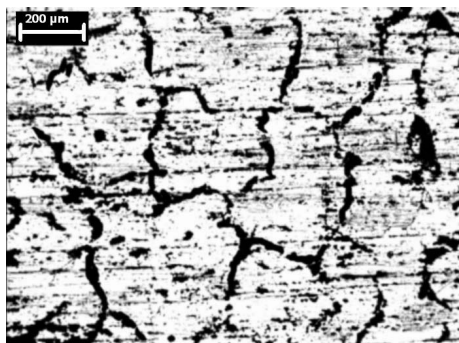


5. bölge (b)

50X

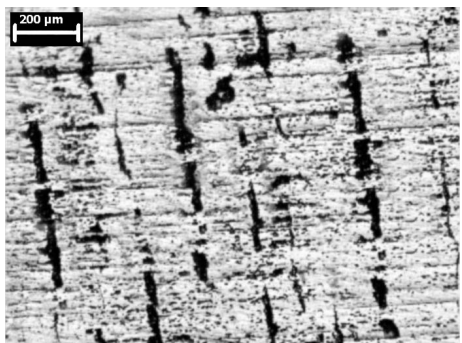
Resim 5.7. (Devam) 0,0184mm/sn fırın ilerleme hızı ile yapılan deney no:3.1.'den elde edilen mikro yapılar. a) yatay kesit, b) dikey kesit

Deney no: 3.2



1. bölge (a)

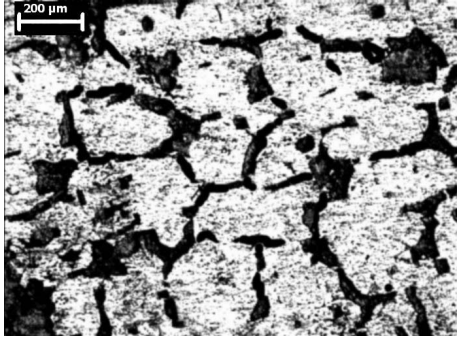
50X



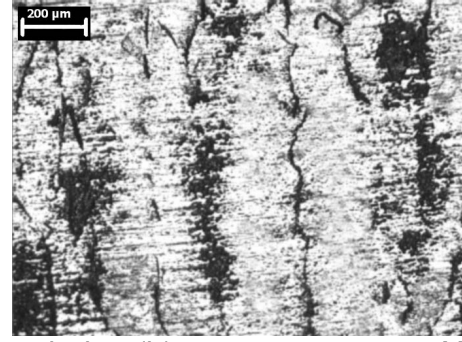
1. bölge (b)

50X

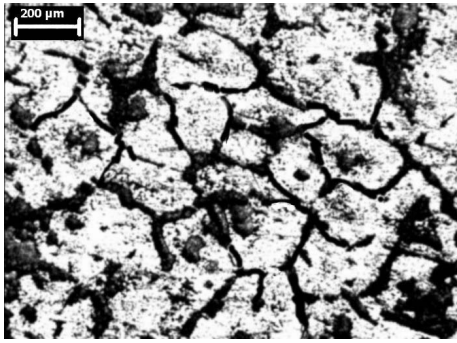
Resim 5.8. 0,0184mm/sn fırın ilerleme hızı ile yapılan deney no:3.2.'den elde edilen mikro yapılar. a) yatay kesit, b) dikey kesit



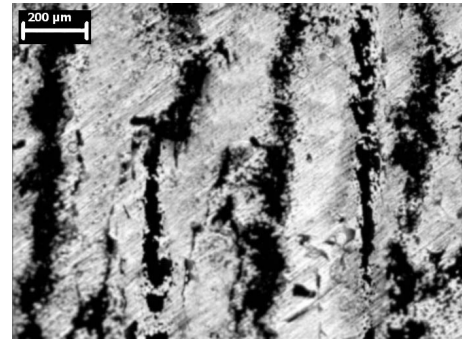
2. bölge (a) 50X



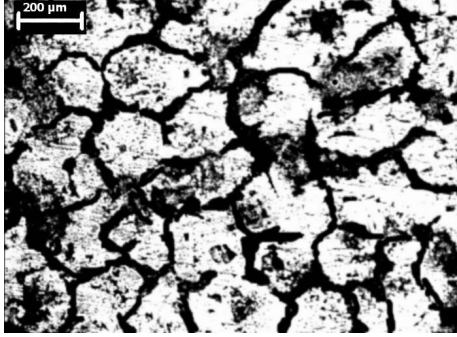
2. bölge (b) 50X



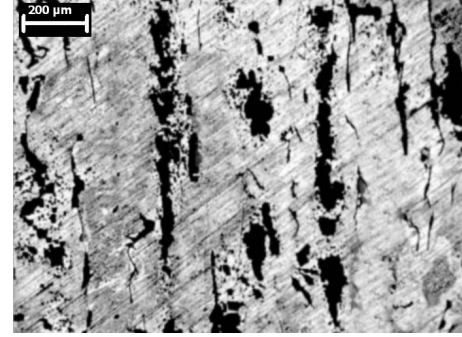
3. bölge (a) 50X



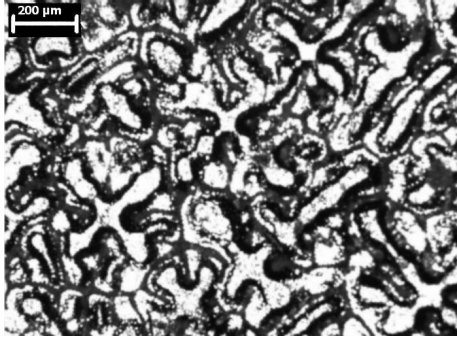
3. bölge (b) 50X



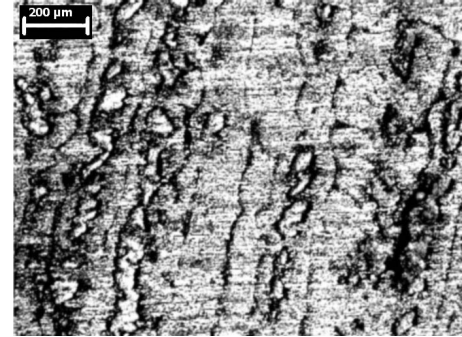
4. bölge (a) 50X



4. bölge (b) 50X



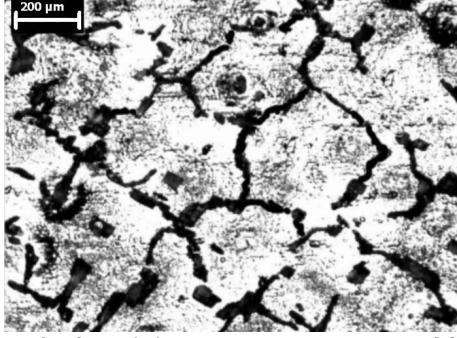
5. bölge (a) 50X



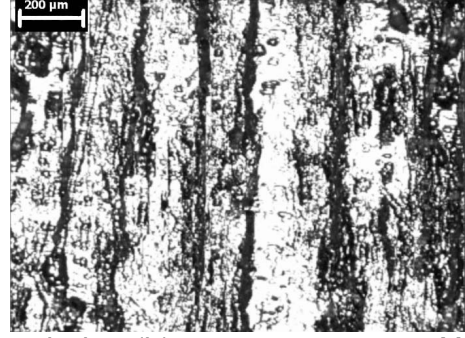
5. bölge (b) 50X

Resim 5.8. (Devam) 0,0184mm/sn fırın ilerleme hızı ile yapılan deney no:3.2.'den elde edilen mikro yapılar. a) yatay kesit, b) dikey kesit

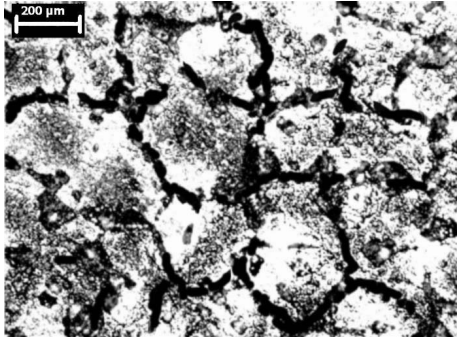
Deney no: 3.3



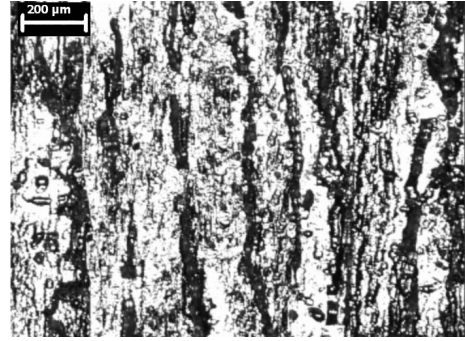
1. bölge (a) 50X



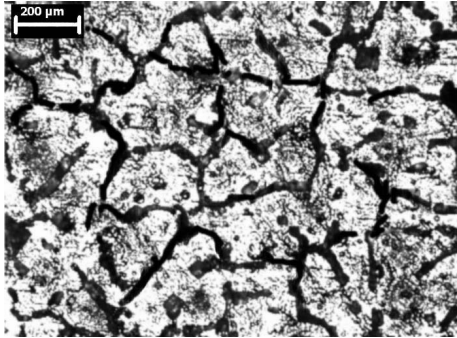
1. bölge (b) 50X



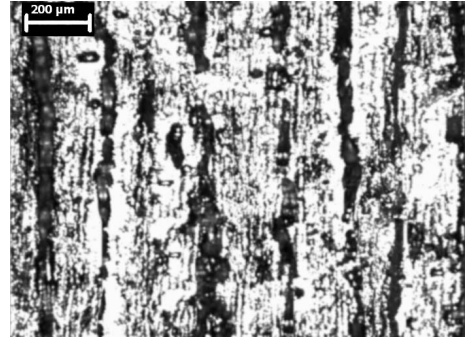
2. bölge (a) 50X



2. bölge (b) 50X

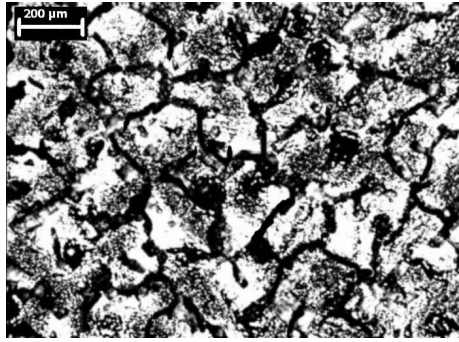


3. bölge (a) 50X

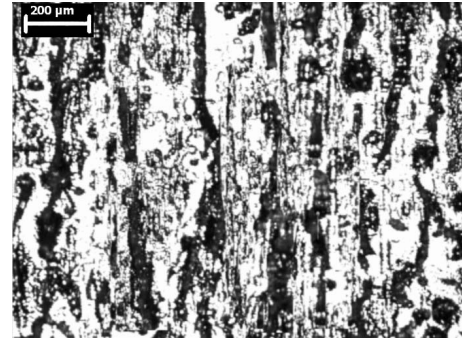


3. bölge (b) 50X

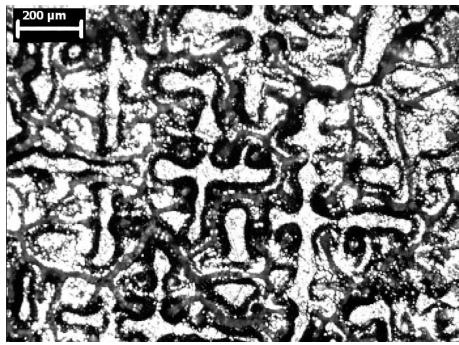
Resim 5.9. 0,0184mm/sn fırın ilerleme hızı ile yapılan deney no:3.3.'den elde edilen mikro yapılar. a) yatay kesit, b) dikey kesit



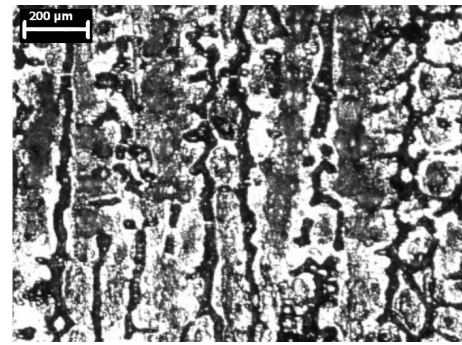
4. bölge (a) 50X



4. bölge (b) 50X



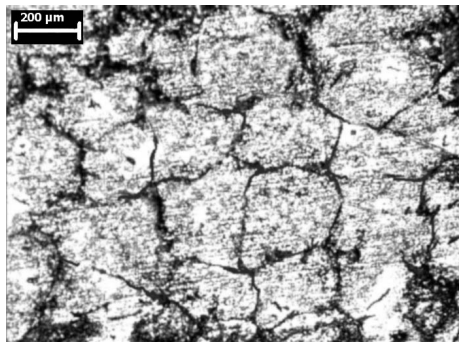
5. bölge (a) 50X



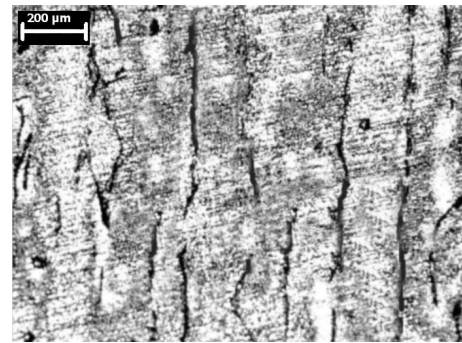
5. bölge (b) 50X

Resim 5.9. (Devam) 0,0184mm/sn fırın ilerleme hızı ile yapılan deney no:3.3.'den elde edilen mikro yapılar. a) yatay kesit, b) dikey kesit

Deney no: 4.1

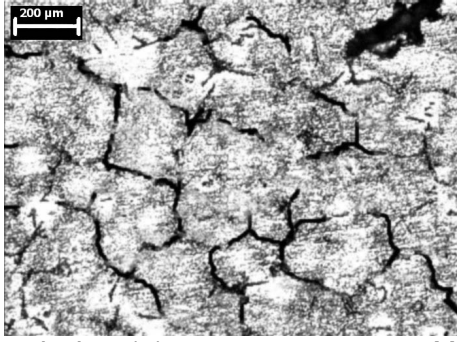


1. bölge (a) 50X



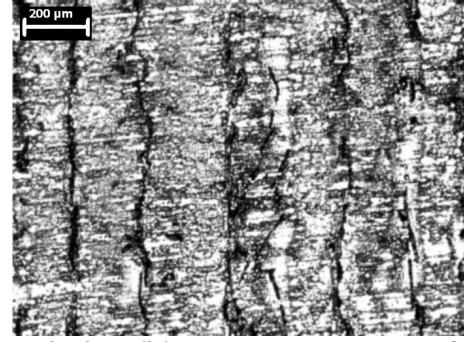
1. bölge (b) 50X

Resim 5.10. 0,0218mm/sn fırın ilerleme hızı ile yapılan deney no:4.1.'den elde edilen mikro yapılar. a) yatay kesit, b) dikey kesit



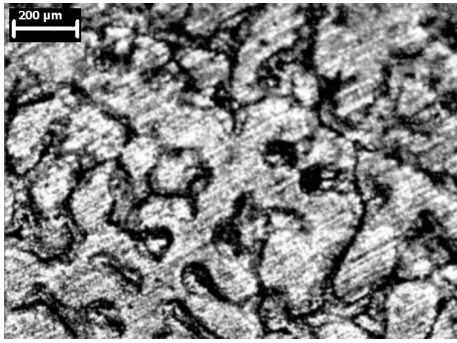
2. bölge (a)

50X



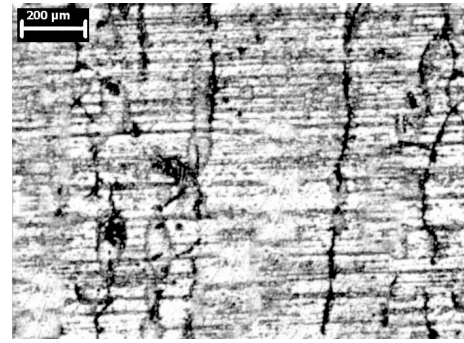
2. bölge (b)

50X



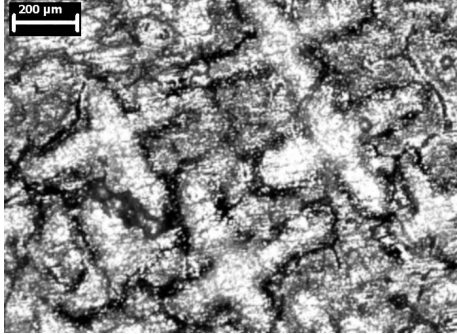
3. bölge (a)

50X



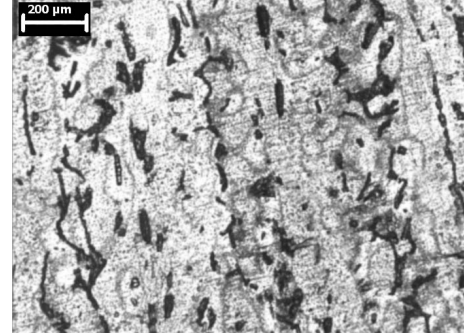
3. bölge (b)

50X



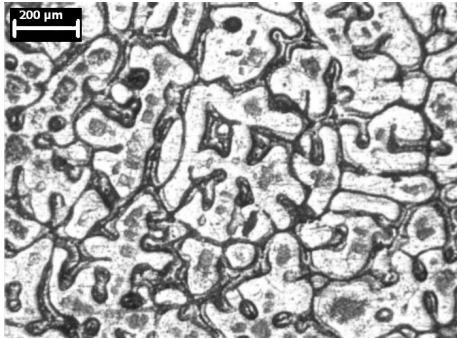
4. bölge (a)

50X



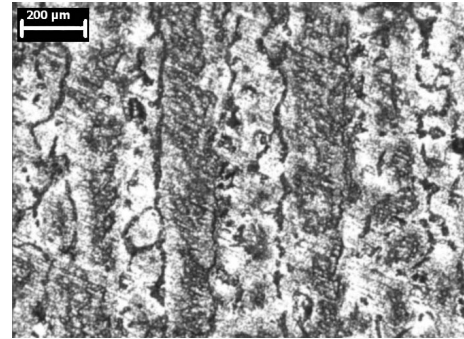
4. bölge (b)

50X



5. bölge (a)

50X

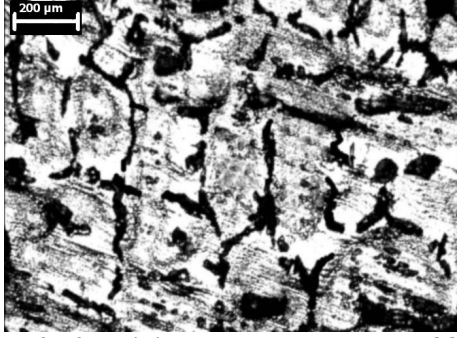


5. bölge

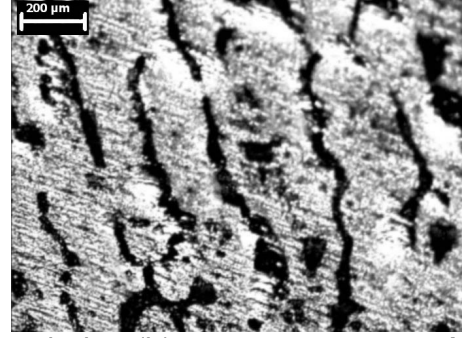
50X

Resim 5.10. (Devam) 0,0218mm/sn fırın ilerleme hızı ile yapılan deney no:4.1.'den elde edilen mikro yapılar. a) yatay kesit, b) dikey kesit

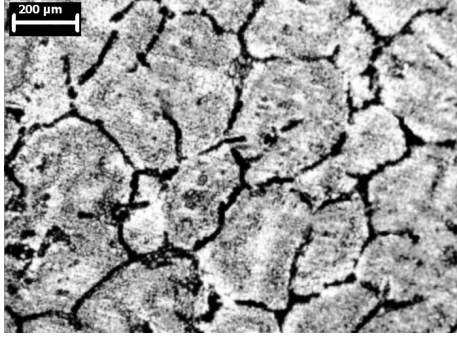
Deney no: 4.2



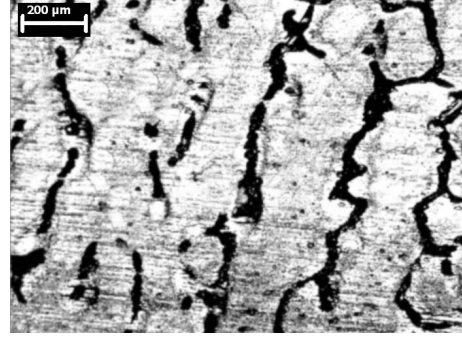
1. bölge (a) 50X



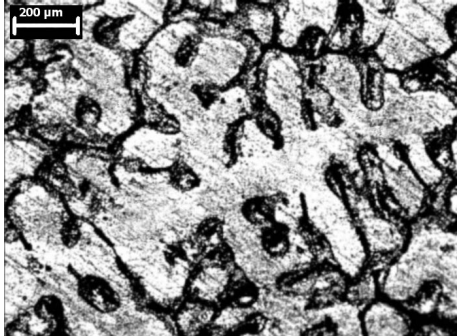
1. bölge (b) 50X



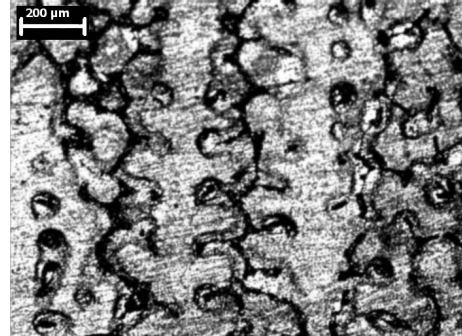
2. bölge (a) 50X



2. bölge (b) 50X

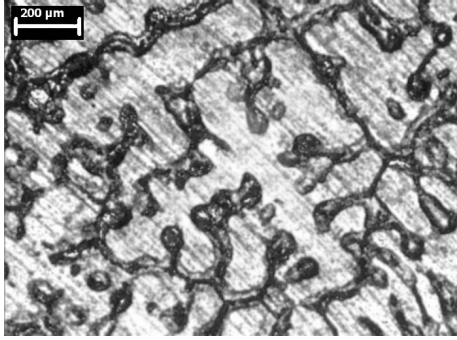


3. bölge (a) 50X



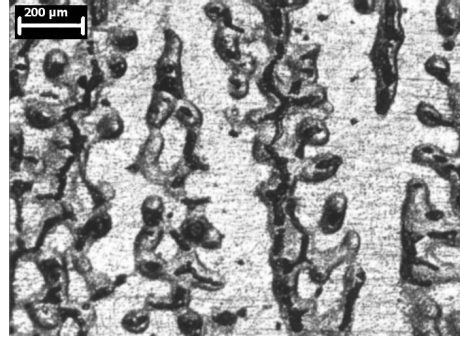
3. bölge (b) 50X

Resim 5.11. 0,0218mm/sn fırın ilerleme hızı ile yapılan deney no:4.2.'den elde edilen mikro yapılar. a) yatay kesit, b) dikey kesit



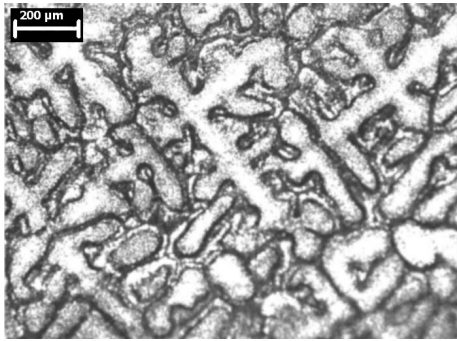
4. bölge (a)

50X



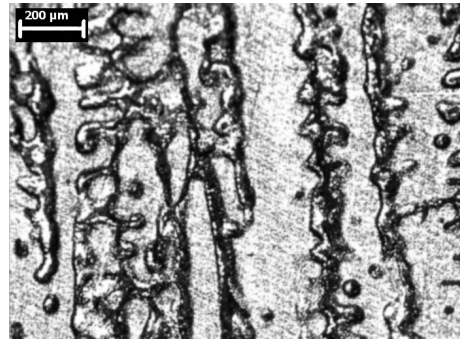
4. bölge (b)

50X



5. bölge (a)

50X

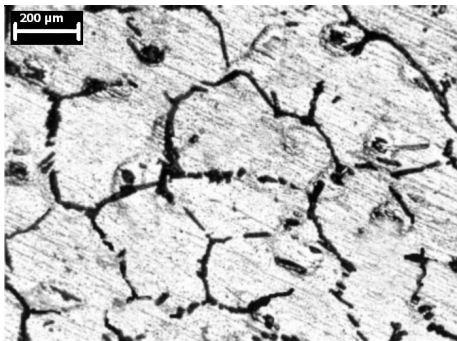


5. bölge (b)

50X

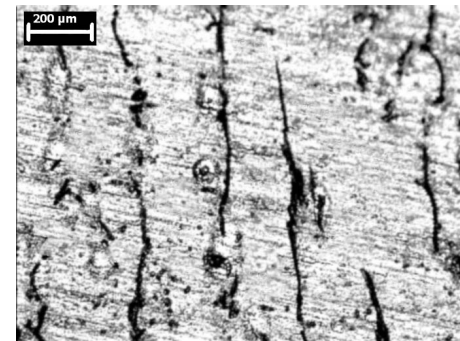
Resim 5.11. (Devam) 0,0218mm/sn fırın ilerleme hızı ile yapılan deney no:4.2.'den elde edilen mikro yapılar. a) yatay kesit, b) dikey kesit

Deney no: 4.3



1. bölge (a)

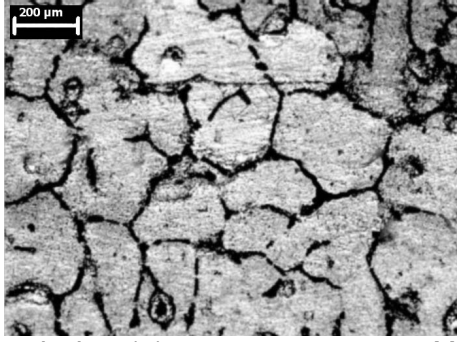
50X



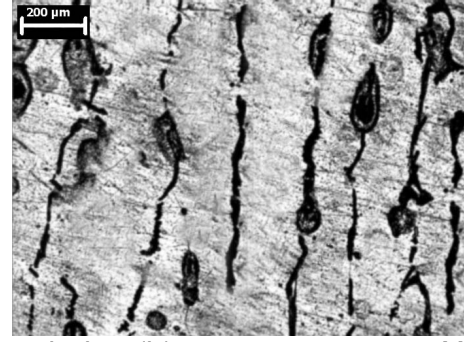
1. bölge (b)

50X

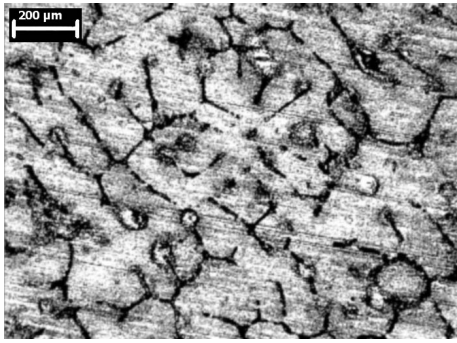
Resim 5.12. 0,0218mm/sn fırın ilerleme hızı ile yapılan deney no:4.3.'den elde edilen mikro yapılar. a) yatay kesit, b) dikey kesit



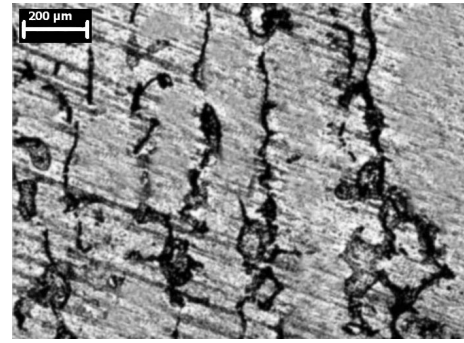
2. bölge (a) 50X



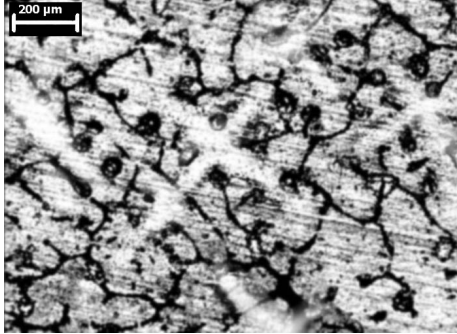
2. bölge (b) 50X



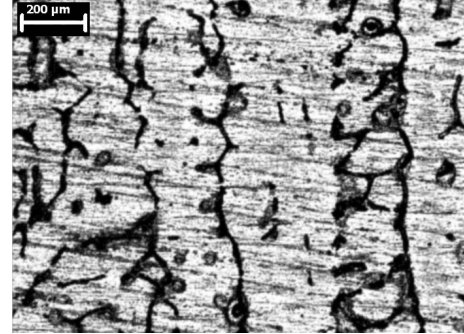
3. bölge (a) 50X



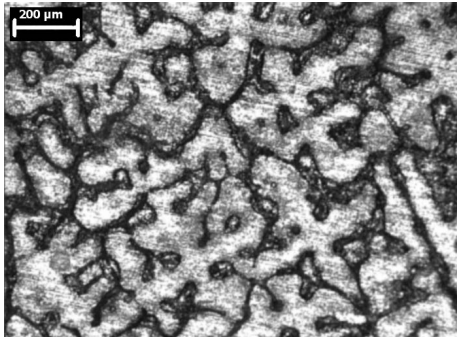
3. bölge (b) 50X



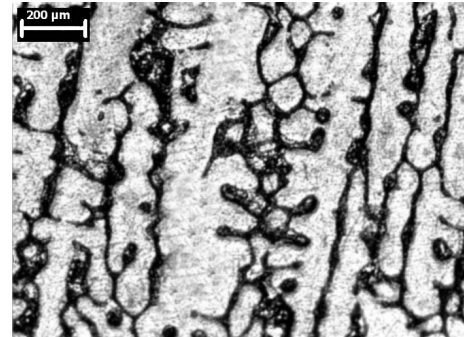
4. bölge (a) 50X



4. bölge (b) 50X



5. bölge (a) 50X

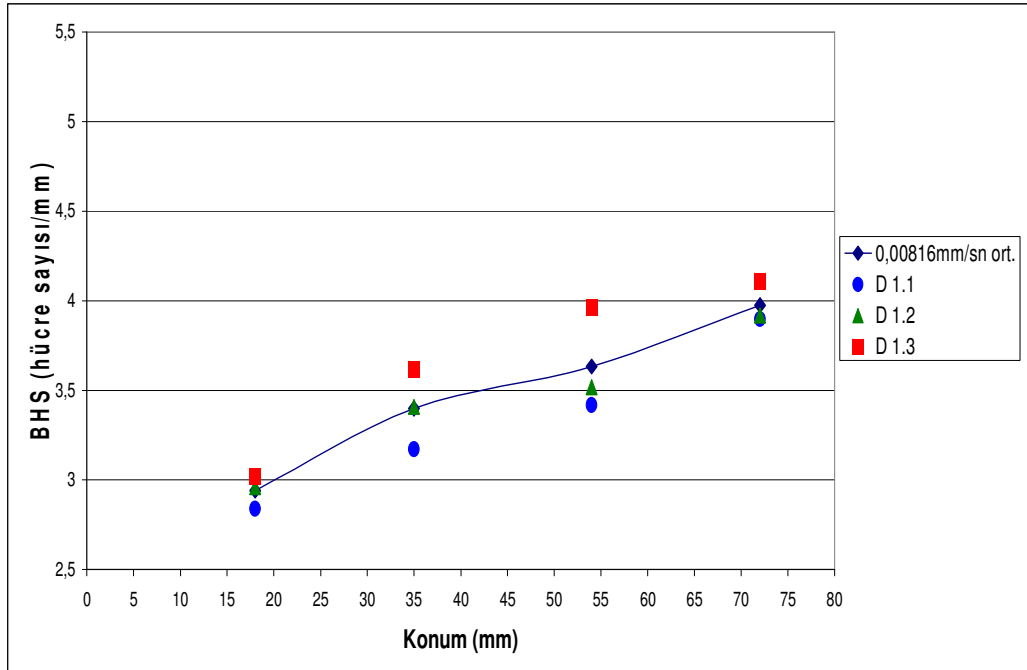


5. bölge (b) 50X

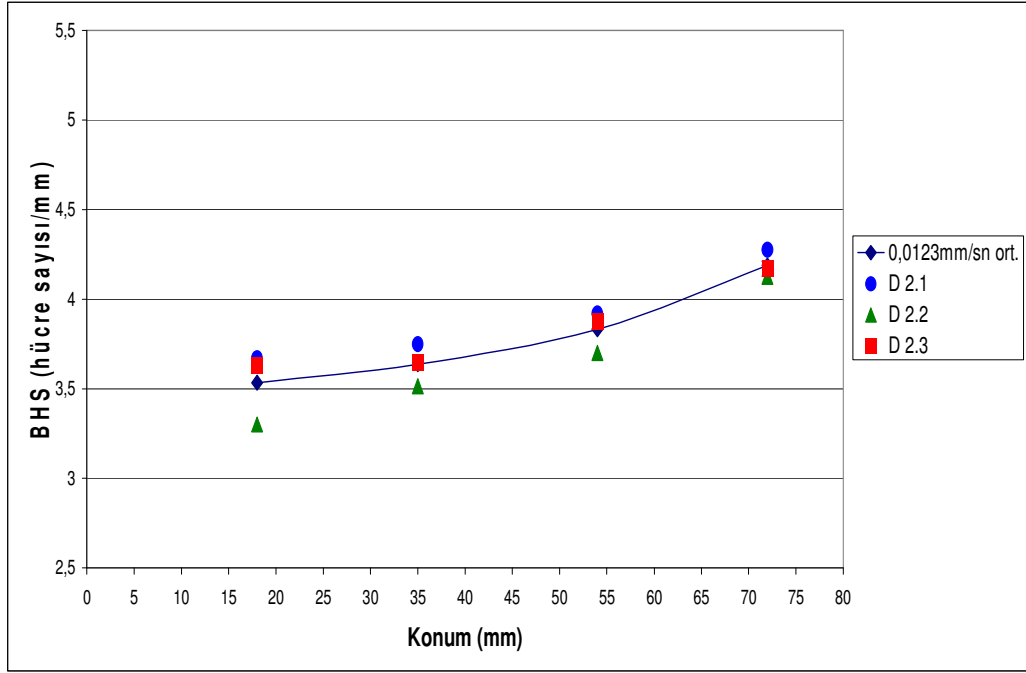
Resim 5.12. (Devam) 0,0218mm/sn fırın ilerleme hızı ile yapılan deney no:4.3.'den elde edilen mikro yapılar. a) yatay kesit, b) dikey kesit

Birim hücre sayısı ile mesafe arasındaki ilişkiyi incelemek amacıyla Çizelge 5.5'deki veriler kullanılarak farklı fırın ilerleme hızı için BHS konum ilişkisini gösteren grafikler Şekil 5.32 - Şekil 5.35' de verilmiştir. Grafiklerde, ilgili deneylerin Şekil 4.9.'da verilen konumlardaki BHS'ları ve bunların ortalaması karşılaştırılmaktadır.

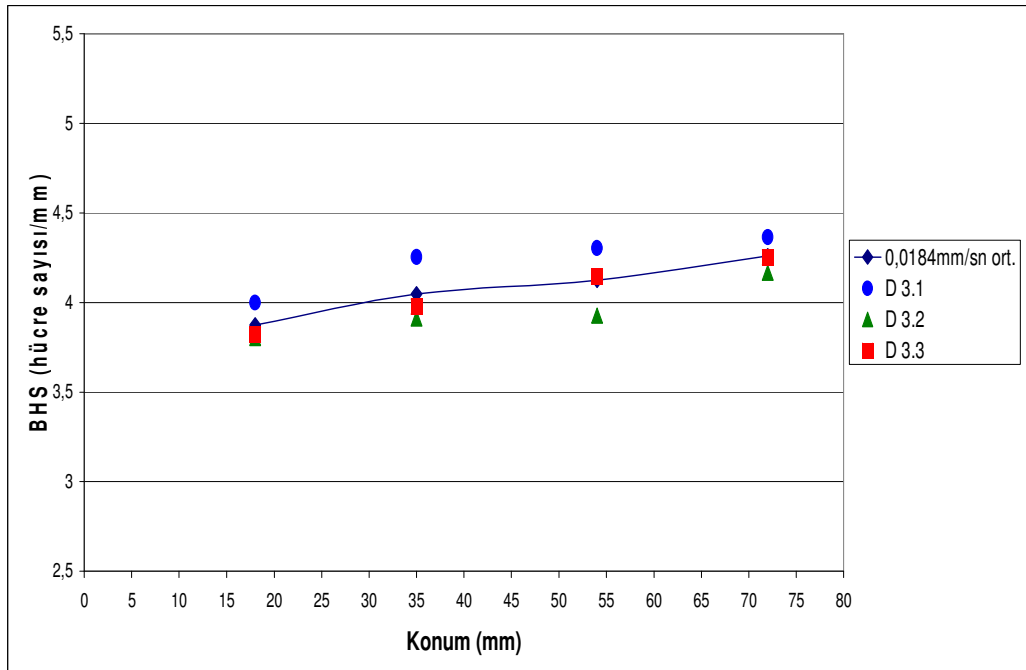
Elde edilen grafikler incelendiğinde, her fırın ilerleme hızı için hücrelerin dökümün zemininde daha az sayıda ve daha büyük olduğu, yukarıya çıkıldıkça küçüldüğü ve sayılarının arttığı görülmektedir. Ayrıca fırın ilerleme hızına bağlı olarak katı-sıvı ara yüzey ilerleme hızının artmasıyla ilgili bölgelerdeki BHS'nın da arttığı gözlenmektedir.



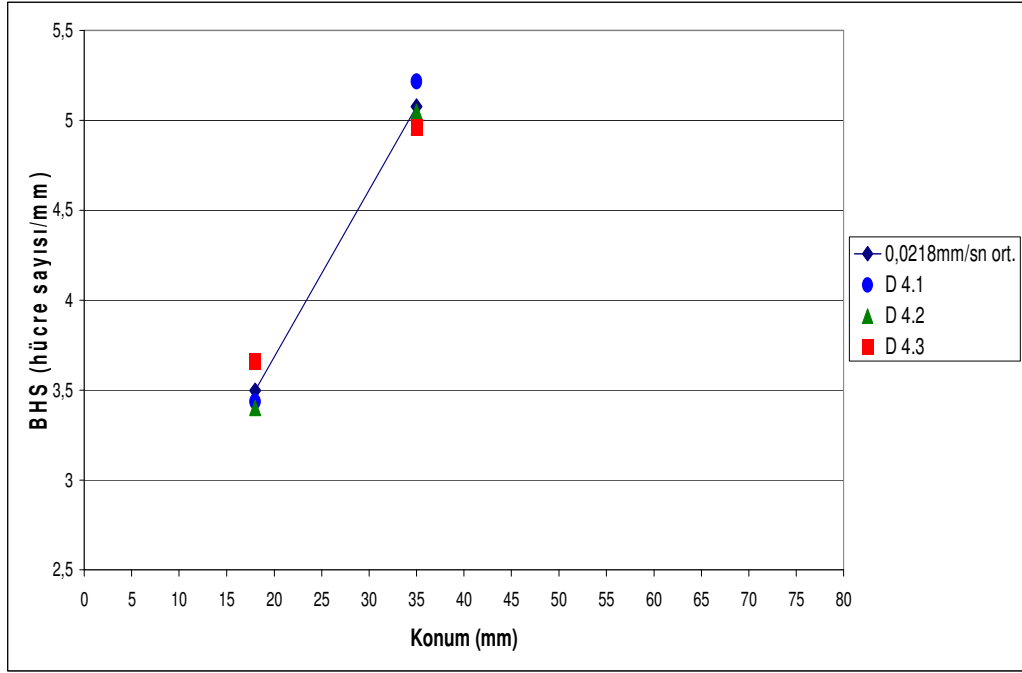
Şekil 5.32. 0,00816mm/sn fırın ilerleme hızı ile yapılan deneylerin, BHS konum ilişkisi



Şekil 5.33. 0,0123mm/sn fırın ilerleme hızı ile yapılan deneylerin, BHS konum ilişkisi



Şekil 5.34. 0,0184mm/sn fırın ilerleme hızı ile yapılan deneylerin, BHS konum ilişkisi



Şekil 5.35. 0,0218mm/sn fırın ilerleme hızı ile yapılan deneylerin, BHS konum ilişkisi

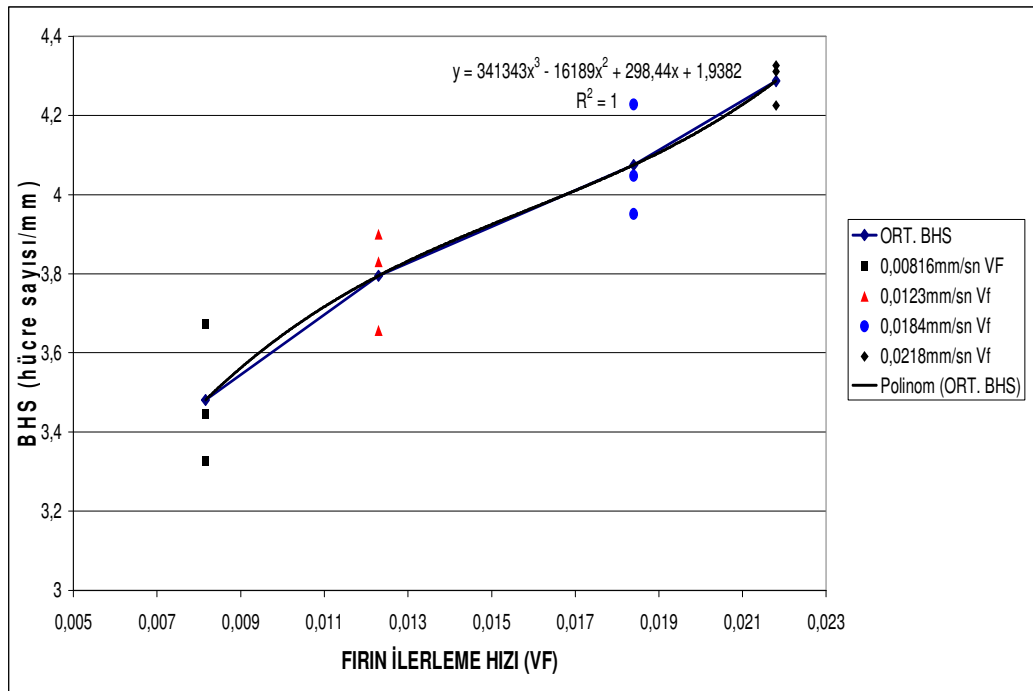
5.3. DeneySEL Sonuçların İlişkilendirilmesi

Bu bölümde deneysel olarak elde edilen verilerin birbirleri ile olan ilişkilerini ortaya çıkartmak amacıyla farklı fırın ilerleme hızlarının BHS'na etkisi, ara yüzey ilerleme hızı ile sıcaklık gradyanı arasındaki ilişki ve deney düzeneği irdelenmiştir.

5.3.1. Farklı fırın ilerleme hızlarının BHS'na etkisi

Farklı fırın ilerleme hızlarının (V_F), BHS' üzerine etkisinin incelenmesi için Çizelge 5.6'daki veriler kullanılmıştır. Her farklı fırın ilerleme hızında yapılan deneylerin ortalama BHS'ları alınmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 5.36'da verilmiştir. Ayrıca bütün deneylerin genel ortalaması alınmış ve bu ortalamaya eğim çizgisi ilave edilerek, bu çalışmada kullanılmamış daha farklı fırın ilerleme hızları ile yapılacak deneylerin BHS'ları hakkında yorum yapma imkanı elde edilmiştir.

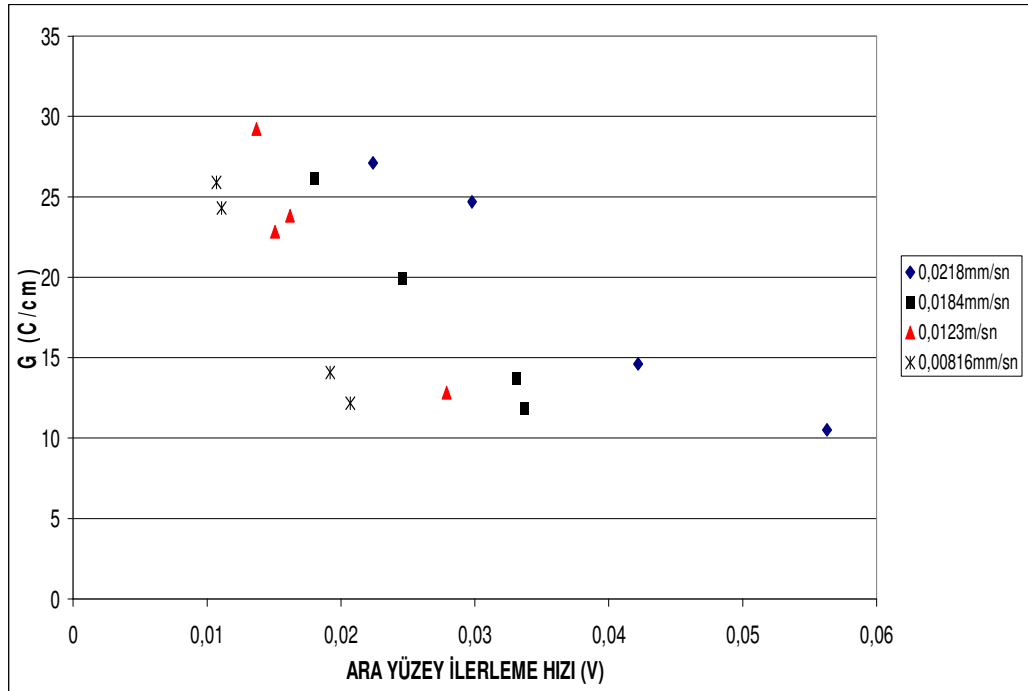
Fırın ilerleme hızına bağlı olarak katı-sıvı ara yüzey ilerleme hızının artmasıyla BHS'nın da arttığı gözlenmektedir, (Şekil 5.36). Bu beklenen bir sonuçtur. Çünkü katı-sıvı ara yüzey ilerleme hızının yüksek olması katılaşma zamanının azalmasına, dolayısıyla hücrelerin büyümeden katılaşmanın tamamlanmasına neden olmaktadır.



Şekil 5.36. Fırın ilerleme hızının (V_F), birim hücre sayısına (BHS) etkisi.

5.3.2. Ara yüzey ilerleme hızı ile sıcaklık gradyanı arasındaki ilişki

Ara yüzey ilerleme hızı (V) ile sıcaklık gradyanı (G) arasındaki ilişki Şekil 5.37'de gösterilmiştir. Bu grafikte sıcaklık gradyanının artması ile katı-sıvı ara yüzey ilerleme hızının azaldığı görülmektedir. Katı-sıvı ara yüzeyinin önündeki sıcaklık gradyanının yüksek olması katı-sıvı ara yüzey ilerleme hızının düşük olmasına neden olmuştur. Ayrıca aynı grafikte fırın ilerleme hızının artmasıyla katı-sıvı ara yüzey ilerleme hızının da arttığı açık bir şekilde görülmektedir.



Şekil 5.37. Ara yüzey ilerleme hızı (V) ile sıcaklık gradyanı (G) arasındaki ilişki.

5.3.3. Yönlü katılaştırma düzeneği

Yönlü katılaştırma işlemi için birçok sistem kombinasyonları kullanılmaktadır. Bu sistemler incelendiğinde en sık kullanılanı sabit fırın – hareketli kalıp kombinasyonudur. Bu tarz sistemlerde kalıbın hareketi sarsıntısız ve çok hassas olmalıdır. Kalıp hareketi sırasında herhangi bir titreşim kontrollü tane yönelmesini olumsuz etkiler. Bu düzeneklerde kalıp, fırın içerisinden genellikle hidrolik sistem yardımı ile aşağıya çekilir. Kalıbın fırın içerisinden istenilen hız ile aşağıya doğru çekilmesi için gerekli hidrolik sistem karmaşık yapılıdır. Deneyler sırasında kullanılan “sabit kalıp – hareketli fırın” düzeneği basit yapılıdır ve benzerlerinden oldukça düşüktür maliyetlidir. Deneyler sırasında kullanılan yönlü katılaştırma düzeneği yapı ve sistem olarak kaynak [37] ile benzerlik taşımaktadır. Tasarlanan yönlü katılaştırma düzeneğinin benzerlerinden en büyük farkı yüksek ısı kontrolü sağlamasıdır. Dolayısıyla aynı şartlar altında deneyler tekrarlanabilir özelliğine sahiptir. Yönlü katılaştırma düzeneğinin kalibrasyonu sistemin ısı dağılımının belirlenmesi ile

yapılmıştır (Bölüm 5.1). Elde edilen sonuçlar kaynak [37] ile benzerlik göstermiştir. Yönlü katılaştırma deney düzeneği ile elde edilen numunelerin makro yapı ve mikro yapı analizleri ile sistemin hassasiyeti konusunda daha gerçekçi sonuçlara varılabilir.

5.4. Farklı Fırın İlerleme Hızlarının Döküm Mikro Yapısına Etkisi

Yönlü katılaştırma düzeneği ile yapılan deneyler sırasında, sıvı metal içerisinde hareketli ısı çifti kullanılmıştır. Deneyler sırasında, hareketli ısı çifti ile okunan sıcaklıkların ifade edildiği grafiklerde (Şekil 5.7 - Şekil 5.18), fırın ile eş zamanlı olarak sıvı metal içerisinde hareket eden ısı çiftinden (TC1) okunan sıcaklık sayısı, kalıp duvarından okunan sıcaklık sayısından daha azdır. Bunun nedeni; sıvı metal içerisinde hareket eden ısı çiftinin, deneyin başlamasından sonra fırın ilerleme hızına bağlı olarak sıvı metal içerisinden çıkmasıdır. Deney süresince TC2 ısı çiftinden okunan sıcaklık değerlerinde fazla bir değişimin olmadığı görülür. Bu ısı çifti kalıp duvarının sıcaklığını ölçmektedir. Bu sıcaklığın değişmemesi yüksek fırın ısı yalıtımının sağlandığını gösterir.

Soğuma eğrisi, sıcaklık gradyanı ve ara yüzey hızlarının belirlenmesinde kalıp içerisine salkım şeklinde yerleştirilen 5 adet ısı çiftinden faydalanılmıştır (Şekil 4.7). Kalıp içerisine yerleştirilen ısı çiftlerinin makro ve mikro yapıyı bozması nedeni ile, bu deneylerin makro ve mikro incelemesi yapılmamıştır.

Yönlü katılaştırma düzeneği ile yapılan farklı V_F hızları için, farklı mikro yapılar elde edilmiştir. Bu yapıların oluşumu sırasındaki sıcaklık profillerinden elde edilen G_{UST} ve katı-sıvı ara yüzey ilerleme hızı (V) parametreleri incelendiğinde; 0,0218mm/sn, 0,0184mm/sn ve 0,00816mm/sn V_F hızlarında G_{UST6} , G_{UST7} ve G_{UST8} değerinin sürekli artma eğiliminde olduğu fakat G_{UST9} değerinin düşme eğiliminde olduğu görülmüştür (Çizelge 5.3).

0,0218mm/sn V_F hızı ile yapılan deneyde elde edilen ara yüzey ilerleme hızı kaynak 38 ile benzerlik taşımaktadır. Fakat 0,0218mm/sn V_F hızı ile yapılan deneyde elde edilen sıcaklık gradyanı $24^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ iken, ilgili çalışmada $44^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ 'dir. Bu çalışmada elde edilen sıcaklık gradyanı kaynak 1 ile benzerlik göstermektedir. Kaynak 37'de NiAl alaşımı kullanılmış ve fırın 1740°C 'de çalıştırılmıştır. Kaynak 37'deki sıcaklık gradyanı yapılan çalışmadan elde edilen sıcaklık gradyanı ile benzerlik taşımaktadır. Kaynak 1 ve 38 ile bu çalışmadan elde edilen sıcaklık gradyanları Çizelge 5.7'de verilmiştir.

Çizelge 5.7. Yayınlarda geçen numune $\Delta G_{\text{ÜST}}$ değerleri ile bu çalışmada elde edilen $\Delta G_{\text{ÜST}}$ değerlerinin karşılaştırılması

Katılaştırma Yöntemi	V_F (mm/sn)	$\Delta G_{\text{ÜST}}$ ($^{\circ}\text{C}/\text{Cm}$)
Sabit kalıp hareketli fırın Kaynak [1]	0,12	22,1-34,6
	0,12	12,8-40
	0,0292	4,29-13,7
	0,0292	9,3-25,3
	0,0146	0,95-23,7
	0,0146	19,3
	0,0073	1,43-34,7
	0,0049	0,48-35,3
	0,0037	3,81-63,8
Sabit kalıp hareketli fırın Kaynak [38]	0,028	44
	0,108	44
	0,192	44
	0,270	44
Sabit kalıp hareketli fırın Bu çalışma	0,0218	10,5-27,1
	0,0184	11,8-26,1
	0,0123	12,8-29,2
	0,00816	12,1-25,9

Ara yüzey ilerleme hızları (V) incelendiğinde,. 0,0218mm/sn, 0,0184mm/sn ve 0,00816mm/sn V_F hızlarında V_1 , V_2 ve V_3 ara yüzey hızlarının sürekli düştüğü, V_4 ara yüzey ilerleme hızının ise arttığı görülür. (Çizelge 5.4). Buradan düşük ara yüzey ilerleme hızında yüksek sıcaklık gradyanı, yüksek ara yüzey ilerleme hızında ise düşük sıcaklık gradyanı meydana geleceği sonucunu çıkarabiliriz. Ara yüzey ilerleme hızının (V) artması ile sıcaklık gradyanının (G) düştüğü Şekil 5.37'de görülmektedir.

Şekil 5.23 ile Şekil 5.26 arasında fırın ilerleme hızları ile katı-sıvı ara yüzey ilerleme hızlarının zaman-konum ilişkileri verilmiştir. Grafiklerde fırın ilerleme hızının lineer olduğu görülür. Fakat ara yüzey ilerleme hızı lineer değildir. Ara yüzey fırının hareketinden daha sonra ilerlemeye başlar. Fakat daha sonra ara yüzey ilerleme hızı, fırın ilerleme hızından daha büyük değere ulaşır. Bunun sonucunda fırın deney süresince hareket edeceği mesafeyi (120mm) tamamlamadan döküm katılaşır. Diğer bir ifade ile katı-sıvı ara yüzey ilerleme hızı ile fırın ilerleme hızı arasında eşgüdüm sağlanamamıştır.

V_F hızının artmasıyla birim mesafeye düşen hücre sayısı (BHS) artmaktadır, (Şekil 5.32) 0,0218mm/sn fırın ilerleme hızı ile yapılan deneyler dışındaki bütün deneylerde yalnız 5. bölgede dentritik katılaşma gözlenmiştir. 0,0218mm/sn fırın ilerleme hızı ile yapılan deneylerde ise 3., 4. ve 5. bölgelerde dentritik katılaşma meydana gelmiştir. Numunelerin üst bölgelerinde dentritik katılaşma, katı-sıvı ara yüzey ilerleme hızının üst bölgelere doğru daha yükselmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

6.1. Sonuçlar

Ticari saflıktaki alüminyum alaşımının 0,00816mm/sn, 0,0123mm/sn, 0,0184mm/sn ve 0,0218mm/sn fırın ilerleme hızlarında yönlü katılaştırılma deneylerinde elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- 1-) Üretilen yönlü katılaştırma düzeneğinde ısı kontrolü sağlanmıştır.
- 2-) Üretilen deney düzeneği ile ticari saflıktaki alüminyum alaşımının 0,00816mm/sn, 0,0123mm/sn, 0,0184mm/sn ve 0,0218mm/sn fırın ilerleme hızlarında yönlü katılaştırılması gerçekleştirilmiştir.
- 3-) Fırın ilerleme hızları ile sıcaklık gradyanları arasında herhangi bir ilişki olmadığı görülmüştür.
- 4-) Fırın ilerleme hızının artmasıyla katı-sıvı ara yüzey ilerleme hızı artmıştır.
- 5-) Fırın ilerleme hızı ile katı-sıvı ara yüzey ilerleme hızının eşgüdümlü hareketi sağlanamamıştır.
- 6-) Düşük fırın ilerleme hızları nispeten daha büyük ve yönlenmiş taneler üretmiştir.
- 7-) Fırın ilerleme hızının artmasıyla dökümlerdeki BHS'lerinin da arttığı görülmüştür
- 8-) Katı-sıvı ara yüzey ilerleme hızının atmasıyla hücresel yapı dentritik yapıya dönüşmüştür.

6.2. Öneriler

Bu tez kapsamında yapılan çalışmaların ışığında, geleceğe yönelik olarak verilebilecek öneriler aşağıda maddeler halinde sunulmuştur;

1-) Deneylerin uzun sürmesi nedeni ile malzemede gaz alma problemleri ortaya çıkmıştır. Döküm öncesinde gaz giderici kullanmak bu problemi azaltabilir. Fakat kullanılan gaz gidericinin aynı zamanda çekirdekleyici etki yapabileceği unutulmamalıdır. Deneyi argon gazı atmosferinde yapmak malzemenin deney sırasında gaz alma problemini ortadan kaldırabilir.

2-) Düzenek üzerinde bulunan ısı çiftlerin, fırından etkilenmelerini en aza indirmek için ısı çiftlerin klemens bağlantılarının olabildiğince uzatılarak soğuk bölgeye taşınması yararlı olacaktır.

3-) Yönlü katılaştırma düzeneğinde fırın kontrolünün sağlanabilmesi için fırın iç çapı küçültülmüştür. Bu işlem sonrasında fırın içerisine yerleştirilen kalıp ile rezistans telleri arasında çok az mesafe kalmıştır. Bu da çalışma zorluğu yaratmıştır. Rezistans telli fırın yerine indüksiyon bobinli fırın kullanımı, fırın kontrolü ve çalışma toleransı açısından daha yararlı olacaktır.

4-) Yönlü katılaştırma düzeneklerinde ara yüzey önündeki sıvı sıcaklığının kontrolü dik sıcaklık gradyanları için önemlidir. Ancak rezistans telli düzeneklerde sıvı sıcaklık kontrolü oldukça zordur. Bu sebepten indüksiyon bobini veya sıvı içine daldırma ısıtıcılar kullanılmalıdır.

KAYNAKLAR

1. Tüzünalp, K.K., “Alüminyum Alaşımlarının Yönlü Katılaşması ve Süreç Parametrelerinin İrdelenmesi”,Doktora Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 10-93 (2002).
2. Meyer, S., Ostrogorsky, A.G. , “Interface Shape In The Vertical Bridgman Configuration With and Without The Submerged Heater”, **Rensselaer Polytechnic Institute**, New York USA, 700-707 (1996)
3. A.S.M. Handbook, “Mechanical Testing”, 8: 479-480 (1992).
4. Xu, H., Effect of Self-Generated Thermal Field On Spatio-Temporal Growth of Hierarchical Structures During Polymer Crystallization, **The Graduate Faculty of The University of Akron**, 15-24 (2004).
5. Brush, L.N., “Advanced Numerical Methods in Solidification Theory”, **Department of Metallurgical Engineering and Materials Science Camegie Mellon University**, Pennsylvania, 5-7 (1987).
6. Laaksonen, A., Talanquer, V., Oxtoby, D.W., “Nucleation, measurements, theory, and atmospheric applications”, **Annu. Rev. Phys. Chem**, 461-489 (1995).
7. Flinn, R.A., “Mechanism and Rate of Solidification of Metals and Alloys, Fundamentals of Metal Casting”, **Addison-Wesley Pub. Co.**, Massachusetts, 435-438 (1963).
8. Mazumder, P., “Tranport Processes in Directional Solidification and Their Effects on Microsturcture Development”, **Mechanical Engineering Iowa State University**, 1-6 (1999).
9. Jalics, M., “A Numerical Study of Steady Crysatal Growth in a Vertical Bridgman Device”, **Ohio State University**, 1-9 (1998).
10. Nicoara, I., Stelian, C., “Comparison Between Numerical Simulation and Experimental Measurement of Solute Segregation During Directional Solidification”, **Depertment of Physics West University of Timisoara**, Romania,107-115 (2003).
11. Lin, X., Huang, W., Feng, J., Li, T., Zhou, Y., “History Dependent Selection of Primary Celluar Dendritic Spacing During Unidirectional Solidification In Aluminium Alloys”, **Northwestern Polytechnical University**, China, 3271-3281 (1999).
12. Chen, H., Chen, Y. S., Tewari, S.N., “History Dependence of Primary Dentrite Spacing During Directional Solidification of Binary Metallic Alloys

- and Interdendritic Convection”, **Cleveland State University**, Cleveland USA, 414-422 (2003).
13. Flemings, M.C., “Solidification Processing”, **McGraw-Hill Inc.**, New York, 278-292 (1974).
 14. McLean, M., “Directionally Solidified Materials for High Temperature Service”, **The Metals Society**, London, 345-349 (1983).
 15. Ying, T., “Segregation Reduction In Bridgman Crystal Growth”, **University Wisconsin-Madison**, 1-38 (2000).
 16. Distanov, V. E., “The Influence of the Intensity of Melt Stirring on the Radial Impurity Distribution in Proustite Single Crystals Grown by the Stockbarger Method Using ACRT”, **Institute of Mineralogy and Petrography Siberian Branch of Russian Academy of Sciences**, Russia, 65-68 (2002).
 17. Chao, C.K., Hung, S.Y., “Stress analysis in the vertical Bridgman growth with the modified thermal boundary condition”, Ph.D. Thesis, **Department of Mechanical Engineering**, National Taiwan University, 107-110 (2002).
 18. Chao, C.K., Hung, S.Y., “Stress analysis in the vertical Bridgman growth with the modified thermal boundary condition”, **Department of Mechanical Engineering**, National Taiwan University, 38-45 (2002).
 19. A.S.M. Handbook, “Casting”, 15: 379-480 (1992).
 20. Thevoz, P.T., Rappaz, M., “Solute Diffusion Model For Equiaxed Dendritic Growth”, **Acta Metallurgical**, 1487-1497 (1987).
 21. Kurt, A.O., “Malzemelerin Yüksek Sıcaklık Davranışları”, **Sakarya Üniversitesi Metalurji Mühendisliği Bölümü**, Sakarya, 6-8 (2003).
 22. Quyong, H., Shyy, W., “Numerical Simulation of CdTe Vertical Bridgman Growth”, **Department of Aerospace Engineering Science**, University of Florida USA, 353-365 (1996).
 23. Ying, T., “Segregation Reduction in Bridgman Crystal Growth”, **University of Wisconsin**, Madison, 1-9 (1997).
 24. Meyer, S., Ostrogorsky, A.G., “Interface Shape In The Vertical Bridgman Configuration With and Without The Submerged Heater”, Ph.D. Thesis, **Rensselaer Polytechnic Institute**, New York USA, 700-707 (1996).
 25. Li, Y., “A New Approach To Front Tracking on A Fixed Grid In Solidification Problems”, **University of Purdue**, USA, 132-134 (2002).

26. Elihu, F. Bradley., "High Performance Casting a Technical Guide", ***The Materials Information Society***, 83-88 (1998).
27. Shew, H., Lee, K., "Bridgman Growth and Characterization of Single Crystals of Strontium Barium Niobate and Related Materials", ***The Department of Applied Physics, Stanford University***, 71-93 (1999).
28. Gandin, Ch., A., "Experimental Study of the Transition from Constrained to Unconstrained Growth During Directional Solidification", ***Department of Engineering Science***, France, 971-978 (2000).
29. ASM Handbook, "Casting", ***The Materials Information Society***, 319-323 (1992).
30. Sonda, P., Yeckel, A., Daoutidis, P., Derby, J., "Improved Radial Segregation Via the Destabilizing Vertical Bridgman" Ph.D. Thesis, ***Configuration, University of Minnesota***, USA, 263-266 (2003).
31. Lehoczky, S. L., "Crystal Growth of II-VI Semiconducting alloys by Directional Solidification", ***NASA Marshall Space Flight Center***, USA, 1-17 (2000).
32. Spencer, B.J., Huppert, H.E., "On the Solidification of Dendritic Arrays: An Asymptotic Theory for the Directional Solidification of Slender Needle Crystals", ***Acta Materialia***, 1535-1548 (1997).
33. Kurz, W., Fisher, D.J., "Fundamentals of Solidification", ***Trans Tech Publications***, Switzerland 18-25 (1992).
34. Thomas, S. Piwonka., "Directional and Monocrystal Solidification", ***Metal Casting Technology Center***, University of Alabama 319-323 (1998).
35. Rappaz, M., "Simulation of Solidification", ***Laboratoire de Metallurgie Physique***, Switzerland, 275-281 (1998).
36. Gusin, S. Piwonka., "Single Crystal Solidification", ***Metal Casting Technology Center***, University of Alabama 319-323 (2000).
37. Quyang, H., "Multi-Level Simulation and Modeling of Vertical Bridgman Growth of Single Crystals and Solidification of Binary Alloys", Ph.D. Thesis, ***Mechanics and Engineering Science***, China, 36-45 (1996).
38. Khan, S., "Directional Solidification of Aluminium-Silicon Eutectic Alloys", Ph.D. Thesis, ***University of Manchester Materials Science Center***, England 65-98 (1990).

EKLER

EK-1 MAR M-200 süper alaşımlarının kompozisyonu

Çizelge 1.1. MAR M-200 süper alaşımlarının kompozisyonu

Element	%		Element	%		Element	%
Co	10		C	0,15		Nb	1
Cr	9		Ta	-		Zr	0,05
Al	9		Mo	-		Bi	0,015
Ti	2		W	12,5			

EK-2 Yönlü katılaştırma düzeneğinde kullanılan refrakter malzemeler

Çizelge 2.1. J.M. tuğlanın bazı fiziksel özellikleri

J.M. TUĞLA-ÖZELLİKLER
1430 °C sıcaklığa kadar yapısını koruyabilir.
Termal şok direnci yüksektir.
Elde veya makinede kolayca işlenebilir.
Demir yüzdesi düşüktür. Rezistans telleri ile reaksiyona girmez

Çizelge 2.2. J.M. tuğlanın kompozisyonu

Element	%		Element	%
Al ₂ O ₃	58		Fe ₂ O ₃	0,7
TiO	0,1		Na ₂ O+Ca ₂ O	1,7
MgO	0,2		CaO	0,1
Si	39,1		Alkali	-

Çizelge 2.3. LOD-60 malzemesinin kompozisyonu

Element	%
Kalay	10-70
Çimento	20-50
Cam yünü	5-35
Kalsiyum oksit	<5
Eser maddeler	<1

EK-3 Step motor hareketi için kullanılan bilgisayar programı

Yazılan programda 10 numaralı satıra kadar olan bölüm ekranın düzenlenmesi ve kullanıcıya bilgiler aktarmak için, satır 10 – 100 arası ise step motora ilerleme vermek için kullanılmıştır. Satır 20 ve 25 motorun dönme yönünü değiştirmek içindir. Satır 20 işletildiğinde fırın yukarı doğru kaldırılmakta, 25 işletildiğinde ise fırın aşağı doğru ilk başlangıç konumuna geri dönmektedir. Satır 60 bilgisayar dışına sinyal göndermek için port adresini içermektedir. Bu adres standart yazıcı konnektörünün adresidir ve her bilgisayar için ayarlanması gereklidir. Satır 70 ile başlayan FOR döngüsü ile motora giden sinyallerin hızı sonsuz oranda değiştirilebilir. Örneğin 60. satırda görülen 855 değeri, fırının 60 dakikada 10 cm yukarı kalkmasını sağlamaktadır. Diğer taraftan, FOR döngüsü iptal edilerek 90. satır işletildiğinde bize saniyenin katlarında (1, 2, 3, 4, 5, 6,saniye gibi) sinyal gönderme olanağı sunmaktadır. Kullanılan program birkaç ekleme ile standart bir ticari paket programa dönüştürülebilir. Ancak bu aşamada mevcut hali kullanılmıştır [1].

```
CLS
PRINT
COLOR 10, 5
PRINT "STEP MOTOR DRIVE"
COLOR 13, 0
LOCATE 4, 8
PRINT "İLERLEME VERMEYE BAŞLIYORUM"
SLEEP 5
COLOR 11, 9
```

PRINT

```
10 DIM dir (4)
20 dir (1) = 3; dir (2) = 6; dir (3) = 12; dir (4) = 9
(Programın devamı)
```

```
REM 25 dir (1) = 9; dir (2) = 12; dir (3) = 6; dir (4) = 3
30 N = 0
35 LET C = 0
40 IF (N = 4) THEN N = 0
45 LET C = C + 1
```

EK-3 (Devam) Step motor hareketi için kullanılan bilgisayar programı

```
50 N = N + 1
60 OUT &H278, dir (N)
70 FOR I = 1 TO 855
80 NEXT I
90 REM SLEEP 1
CLS
PRINT
PRINT
PRINT
LOCATE 10, 10
PRINT "ADIM SAYISI (STEP) = " ; C
100 GOTO 40
```


EK-4 Düzeneklerde kullanılan ısı kontrol cihazının teknik özellikleri

Çizelge 4.1. Isı kontrol cihazının teknik özellikleri

Besleme Voltajı	220 V AC $\pm$ % 15
Kontrol Çıkışı	1 Role 250 VAC/10 A (1NA+1NK)
Çalışma Ortamı	Ortam Sıcaklığı = -10, +70 °C
Max. Hat Direnci	: PT 100 < 20 : T/C < 100
Gösterge	: PT 100 = -100 +100/0/200, 400 °C : L = 0 – 400 °C : K = 0 – 1200 °C
Gösterge	Dijital (2 x 3 ½ Digit Seti, Okunan Sıcaklık ve Set Sıcaklığı Aynı Anda görülebilmekte)
Isı Kontrolü	ON / OFF Tip
Isı Tutma Aralığı	3 °C
Boyutlar	100x100x100 mm (küp)
Bağlantı Terminali	Klemens

EK-5 Ön deneylerde kullanılan parametreler ve elde edilen makro yapılar

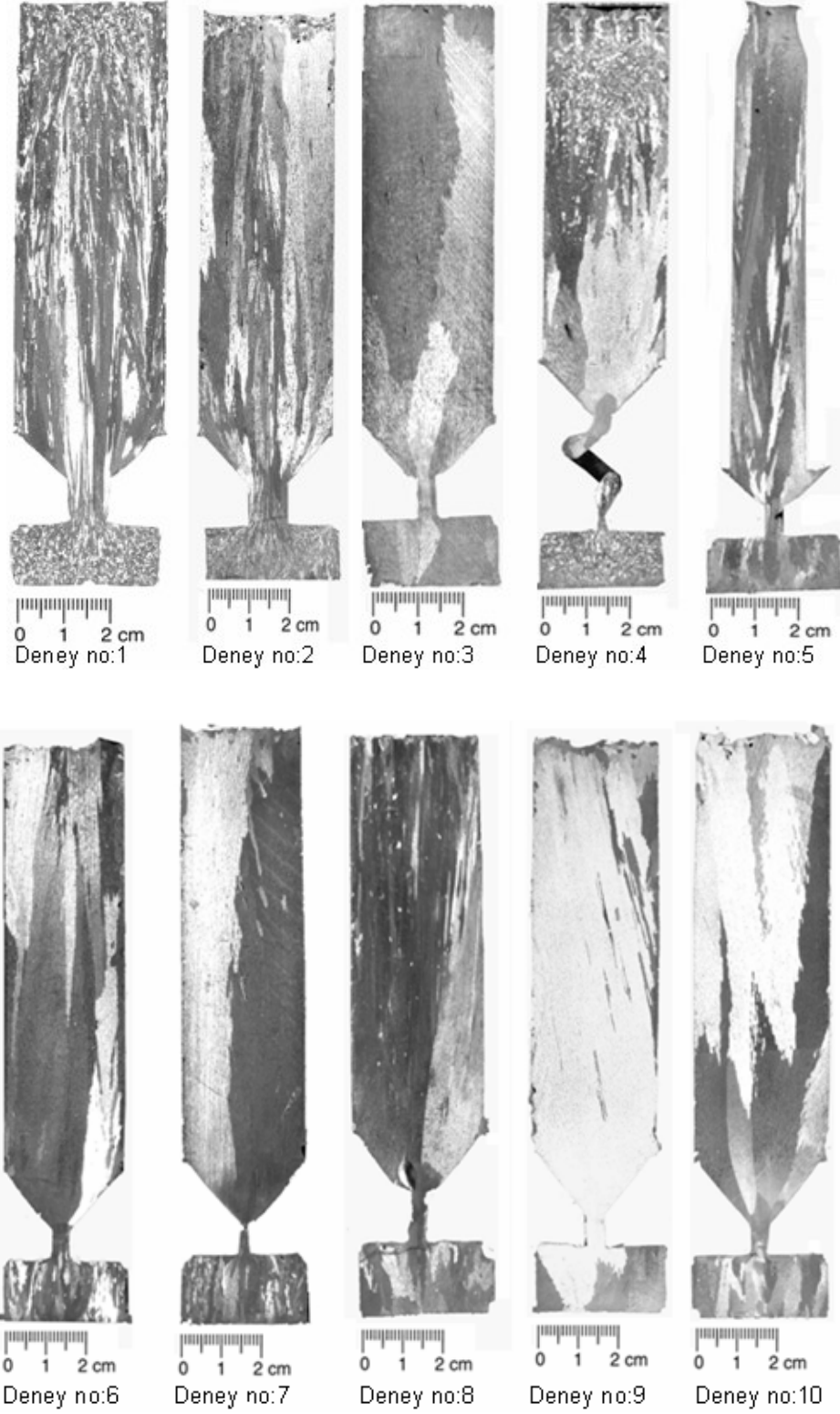
Çizelge 5.1. Ön deneylerin parametre değişiklikleri ve deneysel şartlarının genel gösterimi

Parametre Deney no	Fırın ilerlemehızı cm/sn	Döküş sıcaklığı °C	Soğutucu sıcaklığı °C	Üst fırın sıcaklığı °C	Alt fırın sıcaklığı °C	Soğutma tipi	Tane seçici	Kalıp
1	0,0441	850	310	800	533	SU	V=10mm	CAST-95
2	0,0441	830	295	800	533	SU	V=10mm	CAST-95
3	0,0012	910	395	810	600	FAN	V=5mm	CAST-95
4	0,0012	830	395	810	580	FAN	HELİS	CAST-95
5	0,0012	830	394	800	600	FAN	V=5mm	CAST-95 KER530
6	0,0012	865	390	810	600	FAN	V=5mm	CAST-95
7	0,0012	900	379	820	625	FAN	V=5mm	CAST-95
8	0,0012	890	502	*	660	FAN	V=5mm	CAST-95
9	-	950	600	850	760	FAN	V=5mm	CAST-95
10	0,0012	893	561	900	740	FAN	V=5mm	CAST-95
11	-	881	600	**	760	FAN	V=5mm	CAST-95
12	-	881	610	**	760	FAN	V=5mm	LOD-60
13	0,0012	886	555	880	722	FAN	V=5mm	LOD-60
14	-	886	610	**	760	FAN	V=5mm	CAST-95
15	-	868	605	**	760	FAN	V=5mm	CAST-95
16	0,0012	854	573	900	760	FAN	YOK	CAST-95
17	-	880	650	**	760	FAN	V=5mm	CAST-95
18	-	900	725	**	800	FAN	V=5mm	CAST-95
19	-	886	600	**	760	FAN	V=5mm	CAST-95
20	-	1024	638	**	900	FAN	V=5mm	CAST-95

*8 no'lu deneyde üst ocağı sıvı metal içerisine daldırılmış ısı çift kontrol etmiştir. Üst fırın deney süresince 750°C'de setlenmiştir.

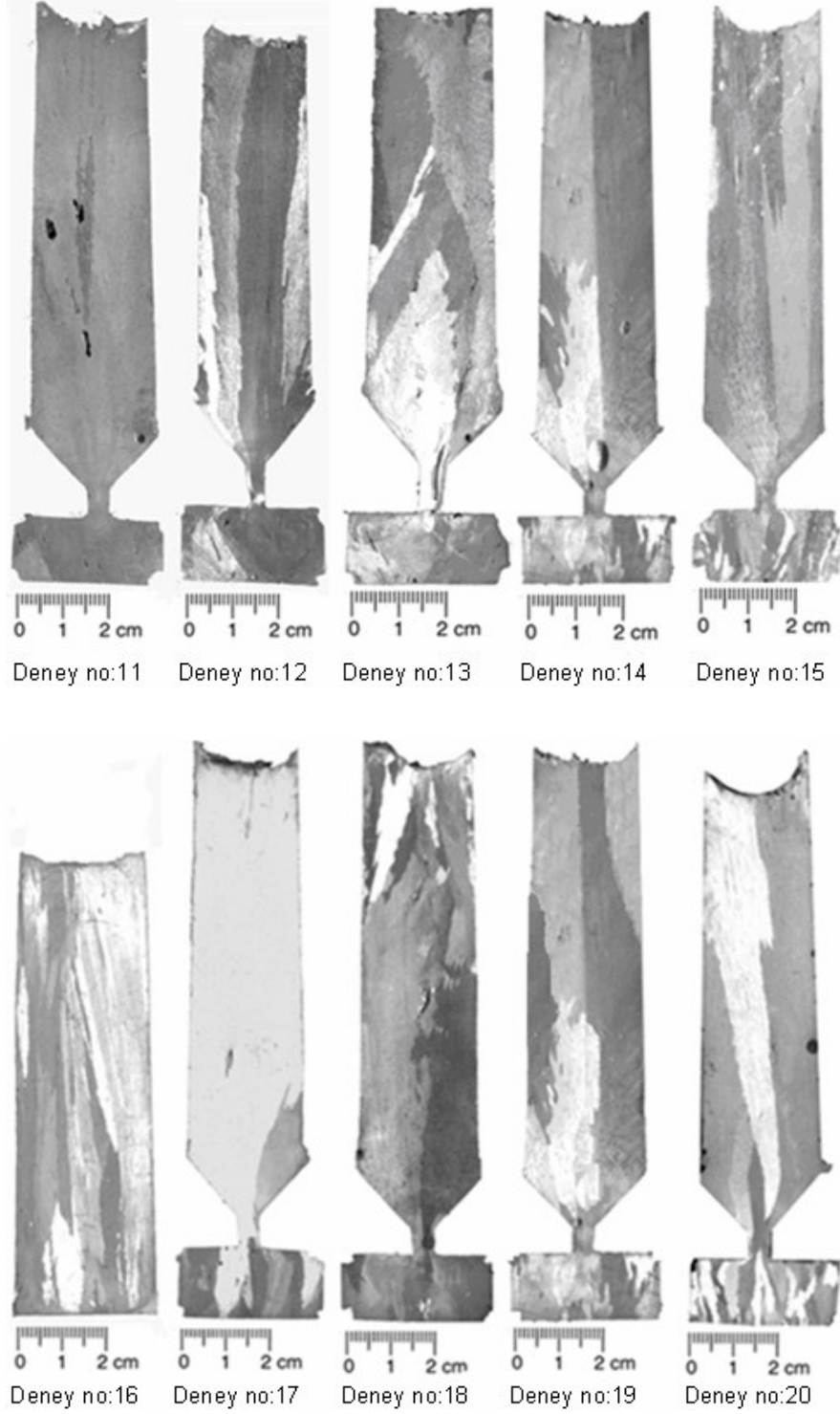
** 9, 11, 12, 14, 15, 17, 18, 19 ve 20no'lu deneylerde üst fırın farklı rejimlerde çalıştırılmıştır. 9, 11, 12, 14, 15, no'lu deneylerde aynı fırın rejimleri kullanılmıştır.

EK-5 (Devam) Ön deneylerde kullanılan parametreler ve elde edilen makro yapılar



Resim 5.1. Yapılan ön deneyler sonucu elde edilen makro yapılar

EK-5 (Devam) Ön deneylerde kullanılan parametreler ve elde edilen makro yapılar



Resim 5.1. (Devam) Yapılan ön deneyler sonucu elde edilen makro yapılar

EK-6 Makro ve mikro incelemede kullanılan dağılayıcılar

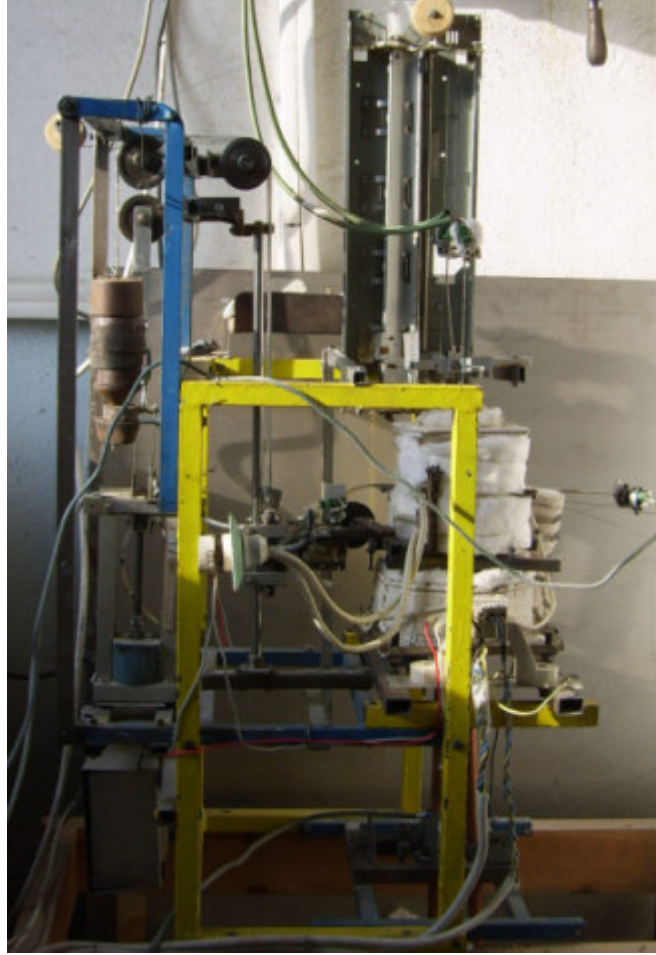
Çizelge 6.1. Makro incelemede kullanılan TUCKER dağılayıcısı

Konsantrasyonlu HCl 45 kısım
Konsantrasyonlu HNO ₃ 15 kısım
%48 Konsantrasyonlu HF 15 kısım
Damıtılmış H ₂ O 25 kısım

Çizelge 6.2. Mikro inceleme için hazırlanan dağılayıcı formülü

5 ml HF (hidroflorik asit)
20 ml HNO ₃ (nitrik asit)
20 ml HCl (hidroklorik asit)
65 ml H ₂ O (su)

EK-7 Yönlü katılaştırma düzeneği ile ilgili fotoğraflar



Resim 7.1. Yönlü katılaştırma düzeneğinin son hali



Resim 7.2. Deneyler sırasında kullanılan kalıp ve parçaları

EK-7 (Devam) Yönlü katılaştırma düzeneği ile ilgili fotoğraflar



Resim 7.3. Yönlü katılaştırma düzeneğinde kullanılan fırın ve fırın yalıtımı



Resim 7.4. Kalıbın fırın içerisindeki görüntüsü

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : ÖKSÜZ, Yusuf Tolga
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 01.06. 1981 İzmir
Medeni hali : Bekar
Telefon : 0 (544) 8861052
e-mail : tolga_oksuz@hotmail.com

Eğitim Derece

Eğitim Birimi

Mezuniyet Tarihi

Lisans	Gazi Üniversitesi /Döküm Öğrt.	2003
Orta öğretim	Mithatpaşa E.M.L. /Döküm Bölümü	1998

İş Deneyimi

Yıl

Yer

Görev

1998	BMC Dökümhanesi / İzmir	Staj
2002	CMS Jant Fabrikası / İzmir	Staj

Yabancı Dil

İngilizce

Hobiler

Basketbol, Yüzme, Müzik