

T.C.
NİĞDE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI

BİLGİSAYAR KONTROLLÜ KATILAŞTIRILAN ÜÇLÜ METALİK
ALAŞIMLARIN YAPI VE FİZİKSEL ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

M. İzzettin YILMAZER

Doktora Tezi

Danışman
Prof. Dr. Emin ÇADIRLI

Mayıs 2014

M. İzzettin YILMAZER tarafından **Prof. Dr. Emin ÇADIRLI** danışmanlığında hazırlanan “**Bilgisayar kontrollü katılaştırılan üçlü metalik alaşımların yapı ve fiziksel özelliklerinin araştırılması**” adlı bu çalışma jürimiz tarafından Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Fizik** Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : **Prof. Dr. Refik KAYALI**, Niğde Üniversitesi



Üye : **Prof. Dr. Emin ÇADIRLI**, Niğde Üniversitesi



Üye : **Prof. Dr. Hasan KAYA**, Erciyes Üniversitesi



Üye : **Doç. Dr. Uğur BÜYÜK**, Erciyes Üniversitesi



Üye : **Doç. Dr. İbrahim KARACA**, Niğde Üniversitesi



ONAY:

Bu tez, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca belirlenmiş olan yukarıdaki jüri üyeleri tarafından/...../20.... tarihinde uygun görülmüş ve Enstitü Yönetim Kurulu'nun/...../20.... tarih ve sayılı kararıyla kabul edilmiştir.

...../...../20...

Doç. Dr. Murat BARUT

MÜDÜR

ÖZET

BİLGİSAYAR KONTROLLÜ KATIŞTIRILAN ÜÇLÜ METALİK ALAŞIMLARIN YAPI VE FİZİKSEL ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

YILMAZER, M. İzzettin

Niğde Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Emin ÇADIRLI

Haziran 2014, 180 sayfa

Bu çalışmada, Al-Cu-Co, Al-Cu-Si ve Zn-Al-Cu alaşımlarının mikroyapı, mekanik ve elektriksel özelliklerinin sıcaklık gradyenti (G) ve katılaştırma hızına (V) bağlılığı araştırıldı. Bu amaçla, vakumlu eritme fırını ve döküm fırını yardımıyla belirlenen bileşimde alaşımlar hazırlanarak grafit numune kalıplarına dolduruldu. Daha sonra numuneler sabit bir katılaştırma hızında, farklı sıcaklık gradyentlerinde ve sabit sıcaklık gradyenti, farklı katılaştırma hızlarında Bridgman tipi doğrusal katılaştırma fırınında yukarı yönlü doğrusal katılaştırıldı.

Optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) yardımıyla kontrollü olarak doğrusal katılaştırılan numunelerin mikroyapı fotoğrafları çekildi. Çekilen bu fotoğraflar üzerinden ötektik ve dendritik mesafeler ölçüldü. Farklı katılma parametrelerinde üretilen her bir numunenin mikrosertlik (HV), çekme-dayanımı (σ_U) basma-dayanımı (σ) ve elektriksel özdirenç (ρ) değerleri ölçüldü. Sıcaklık gradyenti ve katılaştırma hızının, lamelsel mesafeler (veya dendritik mesafeler), mikrosertlik, çekme dayanımı, basma dayanımı ve elektriksel özdirenç değerleri üzerine etkisi doğrusal regresyon analizi kullanılarak belirlendi.

Bu sonuçlara göre, sıcaklık gradyenti ve katılaştırma hızının artmasıyla lamelsel ve dendritik mesafelerin azaldığı, buna karşın mikrosertlik, çekme-dayanımı, basma-dayanımı ve elektriksel özdirenç değerlerinin arttığı tespit edildi. Ayrıca çalışılan alaşımların entalpi (ΔH) ve özısı (C_p) değerleri DSC analizi ile hesaplandı. Elde edilen deneysel sonuçlar literatürde bulunan benzer deneysel çalışmalarla karşılaştırıldı ve deneysel sonuçların literatürde bulunan benzer alaşımlar için elde edilmiş deneysel sonuçlarla uyum içinde olduğu tespit edildi.

Anahtar Kelimeler: Doğrusal katılaştırma, Mikroyapı, Mikrosertlik, Çekme-dayanım, Basma-dayanımı, Elektriksel özdirenç, Entalpi, Özısı

SUMMARY

INVESTIGATION OF THE STRUCTURE AND PHYSICAL PROPERTIES OF THE COMPUTER CONTROLLED SOLIDIFIED TERNARY METALLIC ALLOYS

YILMAZER, M. İzzettin

Nigde University, Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Physics

Supervisor: Prof. Dr. Emin ÇADIRLI

June 2014, 180 pages

In this study, the microstructural, the mechanical and the electrical properties of Al-Cu-Co, Al-Cu-Si and Zn-Al-Cu alloys were investigated in terms of the dependency on the temperature gradient (G) and growth rate (V). For this purpose, the alloys with determined components were placed in a graphite sample crucible by using a vacuum melting furnace and casting furnace. Then samples have been directionally solidified upward with a constant growth rate (V) at different temperature gradients (G) and with a constant temperature gradient at different growth rates in a Bridgman type directional solidification furnace.

The microstructures of the controlled directionally solidified samples were photographed by using optical light microscopy and the scanning electron microscopy (*SEM*). Using these images the lamellar (λ_E) and dendritic (λ) spacings have been measured. And also the microhardness (HV), tensile strength (σ_t), compressive strength (σ_c) and electrical resistivity (ρ) of each sample produced under the different solidification conditions have been measured. The effect of the temperature gradient and the growth rate on the lamellar spacings (or dendritic spacings), microhardness, tensile strength, compressive strength and electrical resistivity were determined by linear regression analysis.

Using these obtained results, it has been found that the value of lamellar and dendritic spacings decrease with the increasing temperature gradient and growth rate, whereas the microhardness, tensile strength, compressive strength and electrical resistivity increase with the increasing temperature gradient and growth rate. Furthermore, the enthalpy (ΔH) and the specific heat (C_p) values of the studied alloys were calculated from DSC analysis. The experimental results obtained in this study have been compared with the previous similar experimental results in the literature, and it was seen that they are in a good agreement with the previous similar experimental results.

Keywords: Directional solidification, Microstructure, Microhardness, Tensile strength, Compressive strength, Electrical resistivity, Enthalpy, Specific heat

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması boyunca değerli desteklerini esirgemeyen danışmanım Sayın Prof. Dr. Emin ÇADIRLI'ya saygı, sevgi ve şükranlarımı sunarım. Bazı deneysel çalışmalar için Erciyes Üniversitesi Fizik Bölümü Katıhal Fiziği laboratuvarını kullanma imkanı sağlayan Sayın Prof. Dr. Necmettin MARAŞLI'ya ve deneysel çalışmalarım esnasında yardımlarını esirgemeyen malzeme fiziği araştırma grubundaki arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım. Yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen Sayın Prof. Dr. Hasan KAYA'ya, Sayın Doç. Dr. Uğur BÜYÜK'e ve Sayın Yrd. Doç. Dr. Mevlüt ŞAHİN'e teşekkür ederim. Ayrıca hayatım boyunca maddi manevi desteklerini esirgemeyen aileme, eşime ve çocuklarıma teşekkür ederim.

Bu çalışma, FEB 2011/08 numaralı “Üçlü metalik alaşımların bilgisayar kontrollü katılaştırılması ve fiziksel özelliklerinin karakterizasyonu” isimli BAP projesinden üretilmiş olup, projeye destek sağlayan Niğde Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimine katkılarından dolayı teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

ÖZET	iv
SUMMARY	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
ŞEKİLLER DİZİNİ	xiv
KISALTMALAR VE SİMGELER	xx
BÖLÜM I.....	1
GİRİŞ	1
1.1. Giriş	1
1.2. Katı-Sıvı Faz Dönüşümleri için Temel Kavramlar	2
1.2.1. Gibbs serbest enerjisi	2
1.2.2. Faz dönüşümlerinde denge	4
1.2.3. Katılaşmada sürücü kuvvet.....	5
1.2.4. Alt soğumalar.....	6
1.2.4.1. Kinetik alt soğuması (ΔT_k).....	9
1.2.4.2. Çözünürlük alt soğuması (ΔT_s)	9
1.2.4.3. Eğrilik alt soğuması (ΔT_r).....	10
1.2.5. Çekirdeklenme	11
1.2.5.1. Homojen çekirdeklenme	11
1.2.5.2. Heterojen çekirdeklenme	14
BÖLÜM II	17
GENEL BİLGİLER	17
2.1. Alaşımların Katılaştırılması.....	17
2.1.1. Alaşımların düzlemsel cephede katılaştırılması	19
2.1.2. Alaşımların hücreli katılaştırılması	20

2.1.3. Alaşımın dendritik katılaştırılması	22
2.1.4. Alaşımın ötektik katılaştırılması.....	23
2.2. Ötektik Yapılar ve Ötektik Yapıların Sınıflandırılması	27
2.2.1. Normal ötektikler	28
2.2.2. Anormal ötektikler	29
2.2.3. Üçlü ötektikler	32
2.3. Sertlik	33
2.3.1. Brinell sertlik ölçme yöntemi	34
2.3.2. Rockwell sertlik ölçme yöntemi	35
2.3.3. Knoop sertlik ölçme yöntemi.....	35
2.3.4. Vickers sertlik ölçme yöntemi	36
2.3.5. Mikroyapı parametresi, katılaştırma hızı ve sertlik değerleri arasındaki ilişki	37
2.4. Çekme-Dayanım.....	38
2.4.1. Mikroyapı parametresi, katılaştırma hızı ve çekme-dayanım değerleri arasındaki ilişki.....	40
2.5. Elektriksel Özellikler.....	41
2.5.1. Elektriksel özdirenç ve ölçüm yöntemleri	41
2.6. Termal Özellikler.....	46
2.6.1. Entalpi ve öz ısı ölçüm yöntemleri	47
2.6.2. Termal iletkenlik ve ölçüm yöntemleri.....	49
2.6.3. Wiedemann–Franz ve Smith–Palmer yöntemleri ile termal iletkenliklerin hesaplanması.....	49
2.7. Ötektik Katılaştırma Üzerine Yapılan Deneysel Çalışmalar.....	50
2.7.1. $\lambda_E^2 V = \text{Sabit}$ tipindeki bağıntılar	50
2.8. Dendritik Katılaştırma Üzerine Yapılan Deneysel Çalışmalar	51
2.8.1. $\lambda = kV^{-n}$ ve $\lambda = kG^{-m}$ tipindeki bağıntılar	51

2.9. Sertlik Üzerine Yapılan Deneysel Çalışmalar	52
2.10. Çekme-Dayanımı Üzerine Yapılan Deneysel Çalışmalar	53
2.11. Elektriksel Özdirenç Üzerine Yapılan Deneysel Çalışmalar.....	54
2.12. Öz ısı ve Termal iletkenlikler Üzerine Yapılan Deneysel Çalışmalar	55
BÖLÜM III	57
GEREÇ ve YÖNTEM	57
3.1. Deneysel Sistem	57
3.1.1. Vakumlu eritme fırını	57
3.1.2. Döküm fırını	60
3.1.3. Kontrollü katılaştırma fırını	62
3.1.3.1. Isıtıcı sistem	62
3.1.3.2. Soğutucu sistem	63
3.1.3.3. Sürücü sistem	63
3.2. Deneyin Yapılışı	65
3.2.1. Numunenin hazırlanması	65
3.2.1.1. Numune kalıbının yapılması	65
3.2.1.2. Numune potasının yapılması	67
3.2.1.3. Alaşımın hazırlanması	69
3.2.1.4. Dökümün yapılması	69
3.2.1.5. Termal çift seçimi ve sıcaklık ölçümleri.....	71
3.2.2. Kontrollü katılaştırma	73
3.2.2.1. Sıcaklık gradyentinin ölçülmesi.....	76
3.2.2.2. Katılaştırma hızının ölçülmesi	77
3.2.3. Metalografik işlemler.....	78
3.2.3.1. Numunelerin kesilmesi	78
3.2.3.2. Numunelerin zımparalanması	79
3.2.3.3. Numunelerin parlatılması	80

3.2.3.4. Numunelerin dağlanması	83
3.2.4. Mikroyapıların gözlenmesi	84
3.3. Mikrosertlik Değerlerinin Ölçülmesi	86
3.4. Çekme-Dayanım Değerlerinin Ölçülmesi	87
3.5. Elektriksel Özdirenç Değerlerinin Ölçülmesi	88
3.6. Entalpi ve Öz Isı Ölçülmesi ve Termal İletkenliklerin Hesaplanması	88
BÖLÜM IV	90
BULGULAR, TARTIŞMA ve SONUÇ	90
4.1. Mikroyapı Analizi ve Gözlenen Mikroyapılar	90
4.2. Fazların Kimyasal Bileşimlerinin Belirlenmesi	97
4.3. Ötektik Mesafelerin Ölçülmesi.....	101
4.3.1. Al-Cu-Co ötektik alaşımında ötektik mesafelerin ölçümü	101
4.3.2. Zn-Al-Cu ötektik alaşımında ötektik mesafelerin ölçümü	101
4.4. Birincil ve İkincil Dendrit Kollar Arası Mesafenin Ölçümü.....	102
4.4.1. Al-Cu-Si alaşımlarında dendritik mesafelerin ölçümü	104
4.5. Doğrusal Katılaştırılmış Alaşımların Mikrosertlik Değerlerinin Ölçülmesi	104
4.6. Doğrusal Katılaştırılmış Alaşımların Çekme-Dayanım ve Basma-Dayanım Değerlerinin Ölçülmesi	104
4.7. Doğrusal Katılaştırılmış Alaşımların Elektriksel Özdirenç Değerlerinin Ölçülmesi	105
4.8. Katılaştırma Parametrelerine Bağlı Olarak Ötektik Mesafe, Dendritik Mesafe, Mikrosertlik, Çekme-Dayanım ve Elektriksel Özdirenç Değerlerinin İncelenmesi	105
4.9. Deneysel Sonuçların Literatürle Karşılaştırılması.....	133
4.9.1. Mikroyapı ölçüm sonuçlarının literatürle karşılaştırılması.....	133
4.9.2. Mikrosertlik ve çekme-dayanım ölçüm sonuçlarının literatürle karşılaştırılması.....	134
4.9.3. Elektriksel özdirenç ölçüm sonuçlarının literatürle karşılaştırılması	136

4.9.4. Öz ısı ve termal iletkenlik sonuçlarının literatürle karşılaştırılması	136
4.10. Kopma Yüzey Analizi	138
4.11. Sonuç ve Öneriler	140
KAYNAKLAR	143
EKLER.....	153
EK 1. Regresyon Analizi	153
EK 2. Stokiyometrik Hesaplamalar	154
EK 3. Deneysel Bağıntılar	155
ÖZGEÇMİŞ	158

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Elektriksel iletkenliğin sınıflandırılması	41
Çizelge 2.2. Malzemelerin elektriksel iletkenlik değer aralıkları.....	43
Çizelge 2.3. Alaşımlarda kullanılan bazı malzemelerin oda sıcaklığındaki elektriksel iletkenlik değerleri	44
Çizelge 2.4. Ötektik ve dendritik katılaştırma üzerine yapılan çalışmalar ve elde edilen bağıntılar	52
Çizelge 2.5. Mikrosertlik üzerine yapılan çalışmalar ve elde edilen bağıntılar.....	53
Çizelge 2.6. Çekme-dayanım üzerine yapılan çalışmalar ve elde edilen bağıntılar	54
Çizelge 2.7. Elektriksel özdirenç ile ilgili yapılan çalışmalar	55
Çizelge 2.8. Öz ısı ve termal iletkenlikler üzerine yapılan deneysel çalışmalar.....	56
Çizelge 3.1. Parlatmada kullanılan çözelti ve kumaşlar	83
Çizelge 3.2. Alaşım sistemlerinde kullanılan dağlayıcılar	84
Çizelge 4.1. Al-Cu-Co ötektik alaşımı için sabit sıcaklık gradyenti ($G=5.66$ K/mm) farklı katılaştırma hızlarında ve sabit katılaştırma hızı ($V=18.8\mu\text{m/s}$) farklı sıcaklık gradyentlerinde elde edilen ötektik mesafeler, mikrosertlik, basma-dayanım ve elektriksel özdirenç değerleri.....	107
Çizelge 4.2. Al-Cu-Co ötektik alaşımı için ölçülen elektriksel özdirenç değerlerinden elde edilen termal iletkenlikler	115
Çizelge 4.3. Al-Cu-Si dendritik alaşımı için sabit sıcaklık gradyenti ($G=4.64$ K/mm) farklı katılaştırma hızlarında ve sabit katılaştırma hızı ($17.4\mu\text{m/s}$) farklı sıcaklık gradyentlerinde elde edilen dendrit kollar arası mesafeler, mikrosertlik ve elektriksel özdirenç değerleri.....	117
Çizelge 4.4. Al-Cu-Si dendritik alaşımı için elde edilen termal iletkenlik değerleri....	123
Çizelge 4.5. Zn-Al-Cu ötektik alaşımı için sabit sıcaklık gradyenti ($G=10.67$ K/mm) farklı katılaştırma hızlarında ve sabit katılaştırma hızı ($V=16.4\mu\text{m/s}$) farklı sıcaklık gradyentlerinde elde edilen ötektik mesafeler, mikrosertlik, çekme-dayanımı ve elektriksel özdirenç değerleri	125
Çizelge 4.6. Zn-Al-Cu ötektik alaşımı için ölçülen elektriksel özdirenç değerlerinden elde edilen termal iletkenlik değerleri	132
Çizelge 4.7. Katılaştırma deneylerinden elde edilen bazı bağıntılar	133
Çizelge 4.8. Bazı alaşımlarda kontrollü katılaştırma üzerine yapılan çalışmalar ve elde edilen bağıntılar	133

Çizelge 4.9. Mikrosertlik ve çekme-dayanım/basma-gerilim değerleri için elde edilen bağıntılar	134
Çizelge 4.10. Bazı alaşımlarda mikrosertlik üzerine yapılan çalışmalar ve elde edilen bağıntılar	135
Çizelge 4.11. Bazı alaşımlarda çekme-dayanımı üzerine yapılan çalışmalar	135
Çizelge 4.12. Elektriksel özdirenç değerleri için elde edilen bağıntılar	136
Çizelge 4.13. Alüminyum esaslı alaşımlarda elektriksel özdirenç üzerine yapılan çalışmalar	136

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Gibbs serbest enerjilerinin sıcaklıkla değişimi (Porter ve Easterling, 1984) ...	3
Şekil 1.2. Atomların dağılımına göre Gibbs serbest enerjisinin değişimi (Porter ve Easterling, 1984)	5
Şekil 1.3. Zamana bağlı sıcaklık değişimi ve alt soğuma	7
Şekil 1.4. Alaşımların katılaştırılmasında yapısal alt soğuma (Davies, 1973) (a) Katı-sıvı arayüzeyi (b) Katı-sıvı arayüzey önündeki çözünence zengin bölge (c) Yapısal olarak alt soğuma	8
Şekil 1.5. Çözünürlük alt soğumasına neden olan faktörler (Flemings, 1976).....	10
Şekil 1.6. Homojen çekirdeklenmede embriyonun serbest enerjisinin embriyo yarıçapına bağlılığı (Porter ve Easterling, 1984)	12
Şekil 1.7. Heterojen çekirdeklenmenin şematik gösterimi (Porter ve Easterling, 1984)	14
Şekil 1.8. Aktivasyon enerjisinin ve çekirdeklenme hızının alt soğumaya göre değişimi (Porter ve Easterling, 1984)	16
Şekil 2.1. Değişik malzemelerde gözlenen mikroyapılar	18
Şekil 2.2. Birbirini sınırlı oranda eriten ikili sistemlerde denge faz diyagramı	19
Şekil 2.3. Düzlemsel cephede katılaşmanın şematik gösterimi	19
Şekil 2.4. Düzlemsel katılaşmadan dendritik katılaşmaya geçiş (Jackson ve Hunt, 1965)	21
Şekil 2.5. Hücresel katılaşmanın yapısı ve mikroyapı parametrelerinin şematik gösterimi	21
Şekil 2.6. (a) Katı ve sıvı fazlar arasında malzemenin katılaşma morfolojisi ve yumuşak bölge derinliği, (b) Al-Cu alaşımında oluşan dendritlerin fotoğrafı (Voorhees, 2006).....	22
Şekil 2.7. Dendritik katılaşmanın yapısı ve mikroyapı parametrelerinin şematik gösterimi.....	23
Şekil 2.8. İki bileşenli ötektik sisteme ait faz diyagramı ve mikroyapı oluşumu (Askeland, 1990)	24
Şekil 2.9. Üç bileşenli ötektik sisteme ait faz diyagramı ve mikroyapı oluşumu.....	25
Şekil 2.10. Lamelsel ötektik büyümenin şematik gösterimi (Hunt ve Jackson, 1966)...	26
Şekil 2.11. Doğrusal katılaştırılmış ötektik alaşımlara ait farklı yapılar	30
Şekil 2.12. Farklı ötektik yapıların şematik gösterimi.....	32

Şekil 2.13. Doğrusal katılaştırılmış üçlü ötektiklerin sınıflandırılması (Ding vd., 1997)	33
.....	33
Şekil 2.14. Brinell sertlik ölçüm metodunun şematik gösterimi.....	34
Şekil 2.15. (a) Vickers sertlik ölçüm metodunun şematik gösterimi,.....	36
Şekil 2.16. Çekme-dayanım test cihazı.....	38
Şekil 2.17. Çekme-uzama diyagramı.....	39
Şekil 2.18. İki nokta (d.c.) elektriksel iletkenlik ölçüm tekniği.....	43
Şekil 2.19. Dört nokta (d.c.) elektriksel iletkenlik ölçüm tekniği.....	46
Şekil 2.20. Perkin Elmer Pyris Diamond model Diferansiyel Taramalı Kalorimetre	47
Şekil 3.1. Vakumlu eritme fırını	58
Şekil 3.2. Vakumlu eritme fırınının şematik gösterimi	59
Şekil 3.3. Döküm fırınının fotoğrafı	60
Şekil 3.4. Döküm fırınının şematik gösterimi.....	61
Şekil 3.5. Bridgman tipi kontrollü doğrusal katılaştırma fırını (Çadırlı, 1997).....	64
Şekil 3.6. Grafit numune kalıbı (a) Üst enine kesiti, (b) Alt enine kesiti, (c) Yandan görünüşü.....	66
Şekil 3.7. Grafitlerin işlenmesinde kullanılan araçlar a) Büyük torna, b) Küçük torna c) Yönlü matkap.....	66
Şekil 3.8. Numune potası ve alt-üst desteklerin şematik gösterimi	67
Şekil 3.9. Deneylerde kullanılan grafit numune kalıpları ve potaları.....	68
Şekil 3.10. (a) Grafit numune kalıplarının yapımında kullanılan pirinç destek ve değişik ebatlarda matkap uçları,	68
Şekil 3.11. Alaşım metallerinin tartılmasında kullanılan hassas terazi	69
Şekil 3.12. Grafitten yapılmış (a) Pota ve (b) Huninin şematik gösterimi	71
Şekil 3.13. Numunelerin sıcaklıklarının ölçümünde kullanılan K-tipi termal çiftler	72
Şekil 3.14. Sıcaklık değişimlerinin kaydedilmesinde kullanılan Pico TC-08 model sıcaklık kaydedicisi.....	73
Şekil 3.15. Deney sisteminin şematik gösterimi.....	74
Şekil 3.16. Deney sisteminin fotoğrafı	74
Şekil 3.17. Bridgman tipi kontrollü katılaştırma fırınının içyapısı.....	75
Şekil 3.18. Numunelerin farklı hızlarda katılaştırılmasını sağlayan senkronize motorlar	77
Şekil 3.19. Numune kalıbının oluşturulmasından epoksi-resin ile kalıplanması sürecine kadarki her bir aşamanın gösterimi.....	79

Şekil 3.20. Epoksi-resin ile kalıplanarak metalografik işlemlere tabi tutulan her bir ötektik alaşımın enine ve boyuna kesitleri.....	79
Şekil 3.21. Numuneleri zımparalamada kullanılan bazı zımpara kağıtları.....	80
Şekil 3.22. Kesme robotu ile kesilmiş numunedeki yüzey durumu (A, B, C tabakaları zımparalama işlemiyle oluşan şekil değişikliklerini D ise orijinal içyapıyı göstermektedir) (Geçkinli, 1989).....	80
Şekil 3.23. Otomatik parlatma robotu.....	81
Şekil 3.24. Numunelerin parlatılmasında kullanılan (a) Kumaşlar ve (b) Süspansiyonlar	82
Şekil 3.25. Numunelerin dağlanmasında kullanılan bazı dağlama malzemeleri	84
Şekil 3.26. Görüntü sistemi elemanları; optik mikroskop ve CCD kamera	85
Şekil 3.27. Taramalı elektron mikroskopunun (SEM) dıştan ve içten görünüş fotoğrafları	86
Şekil 3.28. (a) Mikrosertlik ölçüm cihazının şematik gösterimi,.....	87
Şekil 3. 29. a) Keithley 2700 marka multimetre b) Keithley 2400 marka programlanabilir güç kaynağı c) Protherm marka kül fırını	88
Şekil 4.1. Doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Co ötektik alaşımı için sabit katılaştırma hızı ($V=18.8 \mu\text{m/s}$) farklı sıcaklık gradyentlerinde ($G=1.23-5.66 \text{ K/mm}$) oluşan mikroyapıların bazı optik mikroskop fotoğrafları	91
Şekil 4.2. Doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Co ötektik alaşımı için sabit sıcaklık gradyenti ($G=5.66 \text{ K/mm}$) farklı katılaştırma hızlarında ($V=8.3-83 \mu\text{m/s}$) oluşan mikroyapıların bazı optik mikroskop fotoğrafları	92
Şekil 4.3. Doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Si dendritik alaşımı için sabit katılaştırma hızı ($V=17.4 \mu\text{m/s}$) farklı sıcaklık gradyentlerinde ($G=1.60-4.64 \text{ K/mm}$) oluşan mikroyapıların bazı optik mikroskop fotoğrafları	93
Şekil 4.4. Doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Si dendritik alaşımı için sabit sıcaklık gradyenti ($G=4.64 \text{ K/mm}$) farklı katılaştırma hızlarında ($V=8.3-83 \mu\text{m/s}$) oluşan mikroyapıların bazı optik mikroskop fotoğrafları	94
Şekil 4.5. Doğrusal katılaştırılmış Zn-Al-Cu ötektik alaşımı için sabit katılaştırma hızı ($V=16.4 \mu\text{m/s}$) farklı sıcaklık gradyentlerinde ($G=1.60-4.64 \text{ K/mm}$) oluşan mikroyapıların bazı optik mikroskop fotoğrafları	95

Şekil 4.6. Doğrusal katılaştırılmış Zn-Al-Cu ötektik alaşımı için sabit sıcaklık gradyenti (G=10.67 K/mm) farklı katılaştırma hızlarında (V=18.8-83 µm/s) oluşan mikroyapıların bazı optik mikroskop fotoğrafları	96
Şekil 4.7. Al-Cu-Co ötektik alaşımının kimyasal bileşim analizi.....	98
Şekil 4.8. Al-Cu-Si dendritik alaşımının kimyasal bileşim analizi.....	99
Şekil 4.9. Zn-Al-Cu ötektik alaşımının kimyasal bileşim analizi.....	100
Şekil 4.10. Düzenli ötektiklerde lamelsel mesafelerin ölçümü (a) Üç boyutlu görüntü (b) geniş bölge görüntüsü (enine kesit) (c) dar bölge görüntüsü (enine kesit)	102
Şekil 4.11. λ_1 ve λ_2 ölçümlerinin şematik gösterimi (a) ve (b) enine kesitte λ_1 'in metodu ve alan sayma metodu ile hesaplanması (c) boyuna kesitte λ_1 'in hesaplanması	103
Şekil 4.12. Doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Co ötektik alaşımı için ötektik mesafelerin katılaştırma hızı ile değişimi ve elde edilen bağıntılar	108
Şekil 4.13. Doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Co ötektik alaşımı için ötektik mesafelerin sıcaklık gradyenti ile değişimi ve elde edilen bağıntılar.....	108
Şekil 4.14. Doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Co ötektik alaşımı için mikrosertlik değerlerinin katılaştırma hızı ile değişimi ve elde edilen bağıntılar	109
Şekil 4.15. Doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Co ötektik alaşımı için mikrosertlik değerlerinin ötektik mesafelerle değişimi ve elde edilen bağıntılar	109
Şekil 4.16. Doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Co ötektik alaşımı için mikrosertlik değerlerinin sıcaklık gradyenti ile değişimi ve elde edilen bağıntılar	110
Şekil 4.17. Doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Co ötektik alaşımı için mikrosertlik değerlerinin ortalama ötektik mesafe ile değişimi ve elde edilen bağıntı..	110
Şekil 4.18. Doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Co ötektik alaşımı için basma-dayanımı değerlerinin uzama ile değişimi	111
Şekil 4.19. Doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Co ötektik alaşımı basma-dayanımı değerlerinin uzama ile değişimi	111
Şekil 4.20. Doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Co ötektik alaşımı için basma-dayanımı değerlerinin katılaştırma hızı ile değişimi ve elde edilen bağıntı	112
Şekil 4.21. Doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Co ötektik alaşımı için basma-dayanımı değerlerinin sıcaklık gradyenti ile değişimi ve elde edilen bağıntı.....	112
Şekil 4.22. Doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Co ötektik alaşımı için elektriksel öz direnç değerlerinin katılaştırma hızı ile değişimi ve elde edilen bağıntı	113

Şekil 4.23. Doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Co ötektik alaşımı için elektriksel özdirenç değerlerinin sıcaklık ile değişimi ve elde edilen bağıntılar	113
Şekil 4.24. Doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Co ötektik alaşımı için termal iletkenlik değerlerinin sıcaklık ile değişimi	114
Şekil 4.25. Doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Co ötektik alaşımı için termal iletkenlik değerlerinin sıcaklık ile değişimi	114
Şekil 4.26. Doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Co ötektik alaşımı için termal iletkenlik değerlerinin sıcaklık ile değişimi	115
Şekil 4. 27. Doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Si dendritik alaşımı için birincil kollar arası mesafelerin katılaştırma hızı ile değişimi ve elde edilen bağıntı	118
Şekil 4.28. Doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Si dendritik alaşımı için ikincil kollar arası mesafelerin katılaştırma hızı ile değişimi ve elde edilen bağıntı	118
Şekil 4.29. Doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Si dendritik alaşımı için birincil kollar arası mesafelerin sıcaklık gradyenti ile değişimi ve elde edilen bağıntı	119
Şekil 4.30. Doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Si dendritik alaşımı ikincil kollar arası mesafelerin sıcaklık gradyenti ile değişimi ve elde edilen bağıntı	119
Şekil 4.31. Al-Cu-Si dendritik alaşımı için mikrosertlik değerlerinin birincil kollar arası mesafe ile değişimi ve elde edilen bağıntı	120
Şekil 4.32. Doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Si dendritik alaşımı için mikrosertlik değerlerinin ikincil kollar arası mesafe ile değişimi ve elde edilen bağıntı	120
Şekil 4.33. Doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Si dendritik alaşımı için katılaştırma hızı- mikrosertlik değişimi ve elde edilen bağıntılar	121
Şekil 4.34. Doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Si dendritik alaşımı için sıcaklık gradyenti- mikrosertlik değişimi ve elde edilen bağıntılar	121
Şekil 4.35. Doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Co ötektik alaşımı için elektriksel özdirenç değerlerinin katılaştırma hızı ile değişimi ve elde edilen bağıntı	122
Şekil 4.36. Doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Co ötektik alaşımı için elektriksel özdirenç değerlerinin sıcaklık ile değişimi	122
Şekil 4.37. Doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Si dendritik alaşımı için termal iletkenlik değerlerinin sıcaklık ile değişimi	123
Şekil 4.38. Zn-Al-Cu ötektik alaşımı için lamelsel mesafelerin katılaştırma hızı ile değişimi ve elde edilen bağıntılar	126

Şekil 4.39. Zn-Al-Cu ötektik alaşımı için lamelsel mesafelerin sıcaklık gradyenti ile değişimi ve elde edilen bağıntılar	126
Şekil 4.40. Doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Co ötektik alaşımı için mikrosertlik değerlerinin katılaştırma hızı ile değişimi ve elde edilen bağıntılar	127
Şekil 4.41. Zn-Al-Cu ötektik alaşımı için mikrosertlik değerlerinin lamelsel mesafelerle değişimi ve elde edilen bağıntılar	127
Şekil 4.42. Zn-Al-Cu ötektik alaşımı için mikrosertlik değerlerinin sıcaklık gradyenti ile değişimi ve elde edilen bağıntılar	128
Şekil 4.43. Zn-Al-Cu ötektik alaşımı için mikrosertlik değerlerinin ortalama çubuksal mesafe ile değişimi ve elde edilen bağıntı	128
Şekil 4.44. Zn-Al-Cu ötektik alaşımı için çekme-dayanımı değerlerinin uzama ile değişimi	129
Şekil 4.45. Zn-Al-Cu ötektik alaşımı için çekme-dayanımı değerlerinin uzama ile değişimi	129
Şekil 4.46. Zn-Al-Cu ötektik alaşımı için çekme-dayanımı değerlerinin katılaştırma hızı ile değişimi ve elde edilen bağıntı	130
Şekil 4.47. Zn-Al-Cu ötektik alaşımı için çekme-dayanımı değerlerinin sıcaklık gradyenti ile değişimi ve elde edilen bağıntı	130
Şekil 4.48. Zn-Al-Cu ötektik alaşımı için elektriksel özdirenç değerlerinin katılaştırma hızı ile değişimi ve elde edilen bağıntı	131
Şekil 4.49. Zn-Al-Cu ötektik alaşımı için elektriksel özdirenç değerlerinin sıcaklık ile değişimi	131
Şekil 4.50. Doğrusal katılaştırılmış Zn-Al-Cu ötektik alaşımı için termal iletkenlik değerlerinin sıcaklık ile değişimi	132
Şekil 4.51. Al-23.9Cu-1.2Co alaşımına ait ısı akışı-sıcaklık eğrisi	137
Şekil 4.52. Al-13.6Cu-6Si alaşımına ait ısı akışı-sıcaklık eğrisi	137
Şekil 4.53. Zn-7Al-2.96Cu alaşımına ait ısı akışı-sıcaklık eğrisi	138
Şekil 4.54. Zn-Al-Cu numunelerinin yüzeylerinden alınan SEM fotoğrafları a) G=10.67 K/mm, V=83 µm/s b) G=10.67 K/mm, V=8.3 µm/s	139
Şekil 4.55. Zn-Al-Cu numunelerinin yüzeylerinden alınan SEM fotoğrafları a) G=10.67 K/mm, V=16.4 µm/s b) G=6.70 K/mm, V=16.4 µm/s	140

KISALTMALAR VE SİMGELER

Sembol	Anlamı	Birimi
C_o	Alaşımın başlangıç bileşimi	(% ağı.)
C_s	Alaşımın sıvı bileşimi	(% ağı.)
C_k	Alaşımın katı bileşimi	(% ağı.)
G	Sıcaklık gradyenti	(K/m)
G_s	Sıvının sıcaklık gradyenti	(K/m)
G_k	Katının sıcaklık gradyenti	(K/m)
V	Katılaştırma hızı	(m/s ²)
λ	Lamelsel mesafe (enine kesit)	(m)
λ^*	Lamelsel mesafe (boyuna kesit)	(m)
λ_E	Lamelsel ötektik mesafe	(m)
λ_{ext}	Ekstremum ötektik mesafe	(m)
λ_m	Minimum ötektik mesafe	(m)
λ_M	Maksimum ötektik mesafe	(m)
λ_1	Birincil kollar arası mesafe	(m)
λ_2	İkincil kollar arası mesafe	(m)
R	Dendrit uç yarıçapı	(m)
d	Yumuşak bölge derinliği	(m)
Γ	Gibbs-Thomson katsayısı	(K.m)
$ağ.$	Ağırlık olarak	--
$at.$	Atomik olarak	--
T	Sıcaklık	(K)
T_0	Ötektik sıcaklık	(K)
G	Gibbs serbest enerjisi	(J)
ΔG	Gibbs serbest enerjisi değişimi	(J)

Sembol	Anlamı	Birimi
ΔG_D	Difüzyon için gerekli aktivasyon enerjisi	(J)
ΔG_v	Birim hacim başına düşen serbest enerji	(J)
g	Molar Gibbs serbest enerjisi	(J/mol)
G_s	Sıvının Gibbs-serbest enerjisi	(J)
G_k	Katının Gibbs-serbest enerjisi	(J)
E	Sistemin iç enerjisi	(J)
H	Entalpi	(J)
H_k	Katının entalpisi	(J)
H_s	Sıvının entalpisi	(J)
L	Erime gizli ısı	(J)
ΔT	Alt soğuma	(K)
ΔT_k	Kinetik alt soğuması	(K)
ΔT_s	Çözünürlük alt soğuması	(K)
ΔT_r	Eğrilik alt soğuması	(K)
k	Dağılım katsayısı	--
δ	Lamelsel yapı için boyutsuz parametre	--
m_s	Sıvılık eğrisinin eğimi	(K / % at)
m_α	Ötektik sıcaklıktaki α fazının sıvılık eğimi	(K / % at)
m_β	Ötektik sıcaklıktaki β fazının sıvılık eğimi	(K / % at)
N_L	Toplam lamel sayısı	--
X	Lamellerin toplam genişliği	(m)
P	Peclet sayısı	--
r	Korelasyon katsayıları	--
r	Eğrilik yarıçapı	(m)
r^*	Kritik yarıçap	(m)

Sembol	Anlamı	Birimi
σ_{ks}	Katı-sıvı arayüzey enerjisi	(J/m ²)
σ_{ka}	Katı-alt cisim arayüzey enerjisi	(J/m ²)
σ_{sa}	Alt cisim-sıvı arayüzey enerjisi	(J/m ²)
σ_U	Maksimum gerilme değeri	(N/mm ²)
A_{ks}	Katı-sıvı arayüzey alanı	(m ²)
n	Atom sayısı	--
N_a	Avagadro sayısı	(6.02×10 ²³ mol ⁻¹)
k	Boltzmann sabiti	(1.38×10 ⁻²³ J / K)
h	Planck sabiti	(6.63×10 ⁻³⁴ J.s)
R	Gaz sabiti	(8.31 J /mol K)
S	Entropi	(J/K)
ΔS	Birim hacim başına düşen entropi değişimi	(J/m ³ K)
D_s	Sıvı içindeki çözünenin dağılım katsayısı	--
f_α	α fazının hacim kesri	--
f_β	β fazının hacim kesri	--
K	Sistem parametresi	--
F	Kuvvet	(N)
P	Basınç	(N/m ²)
V	Hacim	(m ³)
V_k	Katının molar hacmi	(m ³)
V_s	Sıvının molar hacmi	(m ³)
V_F	Düzlemlı fazın hacim oranı	(m ³)
V_{NF}	Düzlemsiz fazın hacim oranı	(m ³)
γ	Yüzey gerilimi	(N/m)
θ	Temas açısı	(°)

Sembol	Anlamı	Birimi
λ	Hücre genişliği	(m)
α	A bileşenince zengin faz	--
β	B bileşenince zengin faz	--
ρ_k	Katının yoğunluğu	(kg/m ³)
ρ_s	Sıvının yoğunluğu	(kg/m ³)
ρ	Elektriksel özdirenç	(Ω m)
I_{hom}	Homojen çekirdeklenme hızı	(atom/s)
I_{het}	Heterojen çekirdeklenme hızı	(atom/s)
HB	Brinell sertliği	(kgf/mm ²)
HR	Rockwell sertliği	(kgf/mm ²)
HK	Knoop sertliği	(kgf/mm ²)
HV	Vickers sertliği	(kgf/mm ²)
D	Baskı küresinin yarıçapı	(m)
d	İzin çapı	(m)
L	İzin eksenel uzunluğu	(m)
C_p	Düzeltilme faktörü	--
g	Yer çekim ivmesi	(m/s ²)
H_o	Malzemenin ilk sertlik değeri	(kg/m ²)

BÖLÜM I

GİRİŞ

1.1. Giriş

İnsanoğlunun ilk dökümü yapmasının üzerinden yaklaşık 70 asır geçmesine rağmen, istenilen özelliklerde döküm üretilmesi kontrollü katılaştırma ile son 60 yılda gerçekleştirilebilmiştir (Smith, 1966). Sıvı fazdan katı faza geçiş sürecinde kontrol edilebilen parametreler üzerinde fizikçiler, malzeme bilimcileri ve yakın zamanlarda uygulamalı matematikçiler çalışmaktadırlar (Srinivasan ve Saghir, 2013). Çok fazlı alaşımlar üzerinde yapılan çalışmalar güncelliğini korumakta, yeni teori ve bulgularla çalışmalar geliştirilerek sürdürülmektedir. Özellikle ötektik katılaştırma, ötektik yapı ile ana faz ilişkisi ve çok fazlı kompozit malzemelerin üretimi üzerinde çalışmalar hızla devam etmektedir (Porter ve Easterling, 1984).

Alaşım sistemlerinin kontrollü olarak katılaştırılması, tek kristallerin büyütülmesinde, malzemelerin saflaştırılmasında ve malzemede homojen bileşim elde edilmesi uygulamalarında kullanılmaktadır. Bu tür katılaştırmalar, yarı iletken kristallerin büyütülmesi, oksit lazer sistemleri, ısıya, zora ve çevresel şartlara dayanıklı savunma sistemleri ve optik uygulamalar için kristallerin büyütülmesi olarak sayılabilir.

Katılaştırma olayında, katılaştırılan malzemenin bileşimi (C_o), sıcaklık gradyenti (G) ve katılaştırma hızı (V) birbirinden bağımsız olarak kontrol edilebilmektedir. C_o , G ve V parametreleri “katılaştırma parametreleri” olarak adlandırılır. Katılaştırma parametrelerine bağlı olarak, kontrollü katılaştırılan ötektik malzemenin λ_E (lameller arası mesafe ya da lamelsel mesafe) değeri ve buna bağlı olarak malzemelerin mekanik, elektriksel ve termal özellikleri değişmektedir.

Son yıllarda, özellikle ticari ve endüstriyel önemi bulunan üçlü ve dördü ötektik alaşımların mekanik ve fiziksel özelliklerinin iyileştirilebilmesi için kontrollü katılaştırma üzerinde çalışmalar yoğunlaşmıştır. Özellikle uzay ve otomotiv endüstrisinde alüminyum esaslı alaşımlar, elektronik ve kimya endüstrisinde kurşunsuz lehimleme alaşımları üzerine çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmaların çoğunda alaşımlar Bridgman tipi katılaştırma yöntemi kullanılarak farklı sıcaklık gradyentleri ve

katılaştırma hızlarında üretilmiştir (Jain ve Gupta, 2003; Bei ve George, 2005; Yang vd., 2013).

Alüminyum ve alüminyum temelli alaşımlar, artırılabilen mukavemet özellikleri ve korozyon dirençleri, özgül ağırlığının düşük olması, elektriği ve ısıyı iyi iletmesi ve kolay biçimlendirilebilirlik ve akıcılık gibi temel özelliklerinden dolayı günümüz endüstrisi ve teknolojisinde oldukça yoğun bir kullanım alanına sahiptir. Çinko ve çinko temelli alaşımlarsa, korozyondan korunmak amacıyla diğer metallerin galvanize edilmesinde, otomotiv endüstrisinde döküm kalıplarında ve pillerin gövdelerinin yapımı gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Bu alaşımlar için her geçen gün yeni kullanım alanları açılmaktadır. Bu kullanım alanları ev eşyalarından uzay araçları yapımına kadar farklı alanlarda olabilmektedir.

Mühendislik uygulamalarında ve günlük hayatta yaygın kullanım alanına sahip olan alüminyumun en belirgin özelliği hafif olmasıdır. Bununla beraber, alüminyuma katılan elementler alüminyumun mukavemet ve sertlik özelliklerini artırarak, diğer metallere göre daha üstün olmasını sağlar. Bu konuda yapılan çalışmalar özellikle ötektik kompozisyonlar üzerinde yoğunlaşmaktadır. Çinkonun en belirgin özelliği ise düşük kaynama sıcaklığıdır.

Bu tez çalışması için belirlenen Al-23.9Cu-1.2Co (%ağ.), Al-13.6Cu-6Si (%ağ.) ve Zn-7Al-2.96Cu (%ağ.) üçlü alaşımları Bridgman tipi katılaştırma yöntemi kullanılarak beş farklı hız ve gradyentte katılaştırılmış, katılaştırma hızının malzemelerin mikroyapı (λ_E), mekanik özelliklerden sertlik (HV), çekme-dayanım (σ_U), elektriksel özdirenç (ρ) ve kopma yüzey yapısı üzerine etkileri araştırılmıştır. Ayrıca bu alaşımlara ait erime entalpisi ve özısı değerleri tespit edilmiştir.

1.2. Katı-Sıvı Faz Dönüşümleri için Temel Kavramlar

Bu bölümde katı-sıvı faz dönüşümleri hakkında genel bir bilgi verilecek ve bu dönüşümlere etki eden parametreler detaylı bir şekilde anlatılacaktır. Ayrıca Gibbs serbest enerjisi, faz dönüşümlerinde denge, sürücü kuvvet ve alt soğumalar üzerinde de durulacaktır.

1.2.1. Gibbs serbest enerjisi

Katı-sıvı faz dönüşümleri sabit sıcaklık ve sabit basınçta oluşan bir faz dönüşümüdür. Gibbs serbest enerjisiyle açıklanabilir. Gibbs serbest enerjisi aşağıdaki denklemle verilir (Porter ve Easterling, 1984).

$$G = H - TS \quad (1.1)$$

Burada T , mutlak sıcaklık, S sistemin düzensizliğinin bir ölçüsü olan entropi ve H ise sistemin ısı kapasitesinin ölçüsü olan entalpidir. Entalpi aşağıdaki şekilde verilir.

$$H = E + PV \quad (1.2)$$

Burada E sistemin iç enerjisi, P basıncı ve V hacmidir. Sistemin iç enerjisi atomların kinetik ve potansiyel enerjilerinin toplamıdır. Kinetik enerji, katıdaki atomların titreşim enerjisinden ve sıvıdaki atomların titreşim, öteleme ve dönme enerjilerinden ileri gelir. Potansiyel enerji ise atomların bağ enerjilerinden ve birbirleriyle olan etkileşme enerjilerinden oluşur. Katı-sıvı faz dönüşümlerinde PV terimi E ile karşılaştırıldığında çok küçük olduğundan, sistemin entalpisi yaklaşık olarak sistemin iç enerjisine eşittir. Yani $H \cong E$ olur.

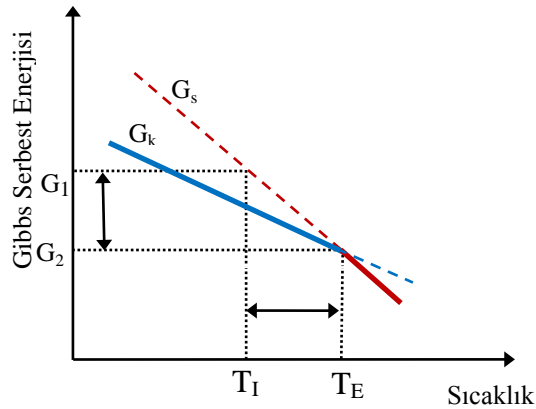
Sabit kütleli ve sabit bileşimli diğer bir deyişle kapalı bir sistem için Gibbs serbest enerjisinin sıcaklıkla değişimi klasik termodinamiğe göre aşağıdaki biçimde yazılabilir.

$$dG = -SdT + VdP \quad (1.3)$$

Sabit basınçta $dP = 0$ olduğundan,

$$\left(\frac{\partial G}{\partial T} \right)_P = -S \quad (1.4)$$

olur. Denklem (1.4)'den sıcaklığın artmasıyla Gibbs serbest enerjisinin azaldığı anlaşılmaktadır. Katı ve sıvı fazların Gibbs serbest enerjilerinin sıcaklıkla değişimi Şekil 1.1'de gösterilmektedir.



Şekil 1.1. Gibbs serbest enerjilerinin sıcaklıkla değişimi (Porter ve Easterling, 1984)

Eğer bir sıvı erime sıcaklığı, T_E 'nin altındaki bir T_I sıcaklığına kadar soğutulursa sıvının T_E sıcaklığında aniden katıya dönüşmesi beklenir. Ancak bu her zaman mümkün değildir. Örneğin, uygun şartlar altında saf metaller sıvı fazdan katı faza geçerken, soğutma hızına bağlı olarak erime sıcaklığının birkaç derece altında katılaşabildikleri gibi yüksek aşırı soğuma nedeniyle erime sıcaklığının 300 °C altında bile katılaşabilirler (Turnbull, 1950a; Turnbull, 1950b). Bunun sebebi, ilk katı oluşurken yeni bir katı-sıvı arayüzeyinin oluşumu için büyük miktarda enerjiye ihtiyaç duyulmasıdır. Sıvı fazdaki atomların katı faza geçmeleri için $\Delta T = T_E - T_I$ kadar bir sıcaklık değişimine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu sıcaklık düşmesi sırasında sıvıdaki atom veya moleküller katıya benzer bir yapıya sahip olan atom gruplarını (embriyo) oluşturmak için bir araya gelirler. Şekil 1.1'de gösterildiği gibi sıvı-katı faz dönüşümünün olabilmesi için Gibbs serbest enerjisinin azalması gerekmektedir. Gibbs serbest enerjisindeki bu azalma katılaşmada sürücü kuvveti meydana getirir. Bir sistemde faz dönüşümünün olabilmesi için son durumun Gibbs serbest enerjisi G_2 'nin ilk durumun Gibbs serbest enerjisi G_1 'den küçük olması gerekir. Yani $\Delta G = G_2 - G_1 < 0$ olmalıdır. Sistem kararlı denge durumuna ulaşabilmek için yüksek enerjili durumdan (G_1) düşük enerjili duruma (G_2) geçmek isteyecektir.

1.2.2. Faz dönüşümlerinde denge

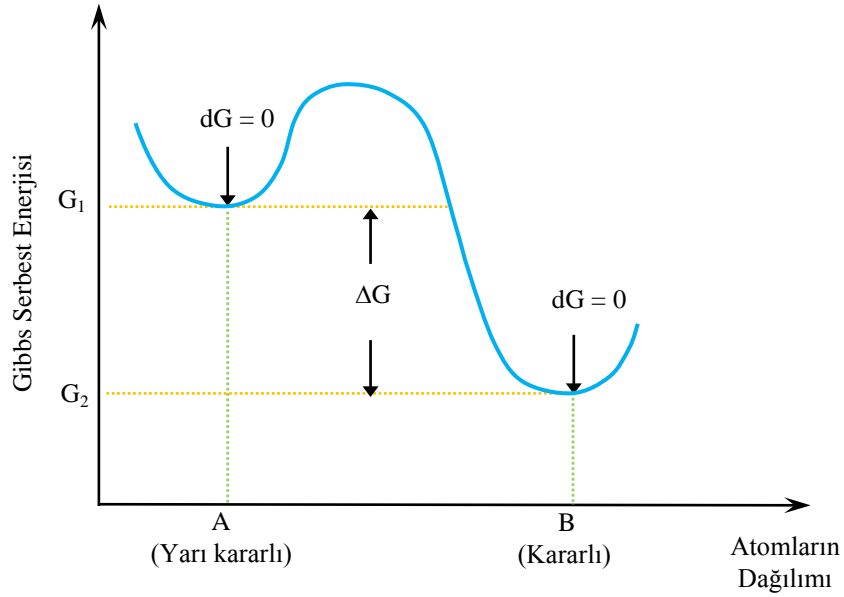
Bir sistemin dengede olması, mekanik, termal ve kimyasal olarak dengede olması demektir. Katı-sıvı arayüzeyi hareket etmediği zaman sistem mekanik olarak dengededir. Arayüzey sabit bir sıcaklıkta tutulduğunda ise termal dengededir. Kimyasal denge durumundaysa fazların kimyasal potansiyelleri eşittir, yani kütle akışı yoktur.

Sıvı fazın entropisinin büyük olmasından dolayı, Şekil 1.1'de görüldüğü gibi sıvının Gibbs serbest enerjisi katının Gibbs serbest enerjisinden daha hızlı azalmaktadır. Erime sıcaklığından (T_E) küçük sıcaklıklarda katı fazın serbest enerjisi sıvı fazın serbest enerjisinden daha küçüktür. Bu yüzden katı faz kararlı denge durumundadır. T_E sıcaklığının üzerindeki sıcaklıklarda ise, sıvının serbest enerjisi katının serbest enerjisinden daha küçüktür. Dolayısıyla erime sıcaklığının üstündeki sıcaklıklarda sıvı faz kararlı denge durumundadır. T_E sıcaklığında ise her iki fazın Gibbs serbest enerjileri birbirlerine eşittir. Böylece erime sıcaklığında katı ve sıvı faz birlikte denge halinde bulunurlar.

Klasik termodinamiğe göre, sabit basınç ve sıcaklıkta bulunan yalıtılmış bir sistemin Gibbs serbest enerjisi minimum değerde ise bu sistemin dengede olduğu söylenir. Yani yalıtılmış bir sistemin denge durumu için Gibbs serbest enerjisi matematiksel olarak aşağıdaki biçimde ifade edilir.

$$(dG)_{T,P} = 0 \quad (1.5)$$

Şekil 1.2’de atomların dağılımına göre Gibbs serbest enerjileri verilmektedir.



Şekil 1.2. Atomların dağılımına göre Gibbs serbest enerjisinin değişimi (Porter ve Easterling, 1984)

Şekil 1.2’de görüldüğü gibi (1.5) eşitliğini yarı kararlı (A) ve kararlı (B) durumları sağlamaktadır. Kararlı durumda sistemin Gibbs serbest enerjisi mümkün olabilecek en küçük değere sahip olduğundan sistem kararlı denge durumundadır. Yarı kararlı durumda da Gibbs serbest enerjisindeki değişim sıfırdır. Fakat mümkün olabilecek minimum değerden büyüktür. Bu durumu kararlı denge durumundan ayırt etmek için A noktasına yarı kararlı denge durumu denir. Kararlı denge durumu ile yarı kararlı denge durumu arasındaki geçiş durumlarına ise kararsız denge durumları denir (Porter ve Easterling, 1984).

1.2.3. Katılışmada sürücü kuvvet

Şekil 1.1’den açıkça görülebileceği gibi sıvılar erime sıcaklığının altındaki bir sıcaklığa kadar soğutulursa, Gibbs serbest enerjisinde $\Delta G = G_1 - G_2$ kadar değişme olacaktır.

Gibbs serbest enerjisindeki bu azalma katılaşma için gerekli olan sürücü kuvveti sağlar (Porter ve Easterling, 1984). Katılaşma için gerekli olan serbest enerji değişim miktarı aşağıda verilen işlem basamaklarıyla elde edilebilir.

Sabit basınçta ΔT sıcaklık aralığında katı ve sıvı fazlar için Gibbs serbest enerjilerinin sıcaklıkla değişiminin lineer olduğu kabul edilir. Böylece Gibbs serbest enerjileri takip eden ifadeyle verilir.

$$G_k = H_k - T S_k \text{ ve } G_s = H_s - T S_s \quad (1.6)$$

Bu durumda, ΔG aşağıdaki biçimde elde edilir.

$$\Delta G = G_k - G_s = H_k - H_s - T(S_k - S_s) = \Delta H - T\Delta S \quad (1.7)$$

Burada k ve s indisleri sırasıyla katı ve sıvı fazları göstermektedir. Saf bir maddenin faz dönüşüm sıcaklığı olan T_E 'de, $G_k = G_s$ olacağından $\Delta G = 0$ olur. Buna göre denklem (1.7) yeniden düzenlenerek aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\Delta S = \frac{\Delta H}{T_E} \quad (1.8)$$

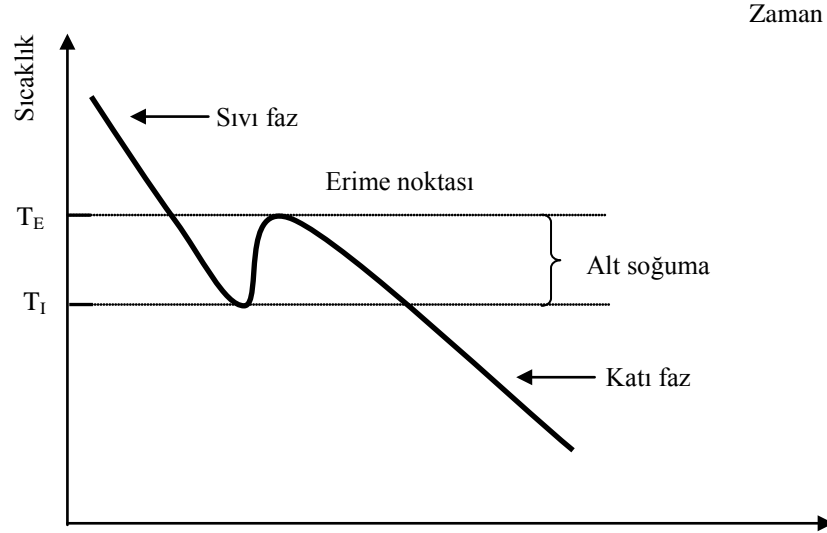
Burada ΔS entropideki değişimdir. Sonuç olarak (1.7) ve (1.8) denklemlerinden herhangi bir T sıcaklığında Gibbs serbest enerjisindeki değişim elde edilir.

$$\Delta G \cong \Delta H - \frac{\Delta H T}{T_E} = \frac{\Delta H (T_E - T)}{T_E} = \frac{\Delta H \Delta T}{T_E} = \Delta T \Delta S \quad (1.9)$$

Denklem (1.9)'a sıvı fazdan katı faza dönüşüm için hacimsel serbest enerji değişimi veya sürücü kuvvet denir (Porter ve Easterling, 1984). Saf maddeler için erime sıcaklığındaki entalpi değişimi erime gizli ısısına eşittir. Diğer bir deyişle $\Delta H = L$ dir.

1.2.4. Alt soğumalar

Bir katılaşma olayında katılaşmanın gerçekleşmesi T_E erime sıcaklığında olmayıp erime sıcaklığının altındaki bir T_I sıcaklığında gerçekleşebilir.



Şekil 1.3. Zamana bağlı sıcaklık değişimi ve alt soğuma

Bu enerji, ΔT sıcaklık farkından sağlanmakta olup bu farka alt soğuma denir (Burden ve Hunt, 1974). Alt soğuma arayüzey eğriliğine, sıvının bileşimine ve atomların sıvıdan katıya geçmesi için gerekli olan enerji miktarına bağlıdır. Katılaşma için gerekli olan toplam alt soğuma takip eden ifade ile verilir.

$$\Delta T = T_E - T_I = \Delta T_k + \Delta T_s + \Delta T_r \quad (1.10)$$

Burada ΔT_k kinetik alt soğuması, ΔT_s çözünürlük alt soğuması ve ΔT_r ise eğrilik alt soğumasıdır.

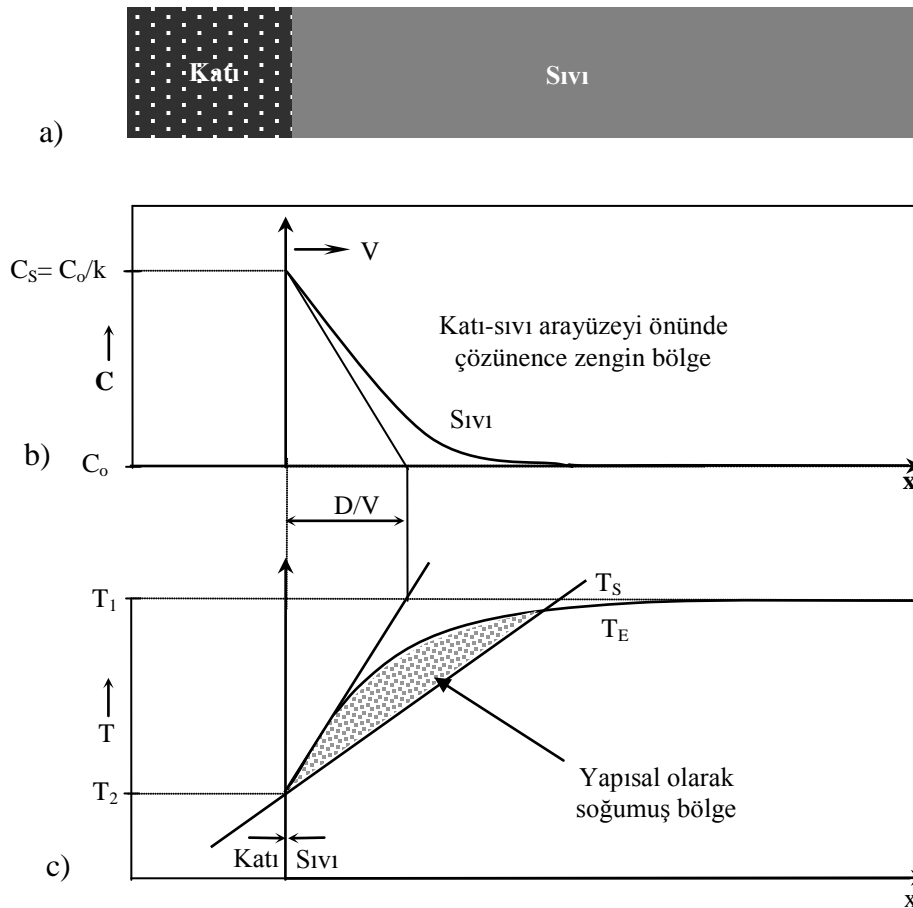
Şekil 1.4'te arayüzeydeki düzlemsel cepheyi kararsız hale getiren sıcaklık değişiminin nasıl oluştuğu görülmektedir. Şekil 1.4.b'de gösterilen sıvı bileşimi C_s , arayüzeyde maksimum iken, arayüzeyden uzaklaştıkça azalır ve çözünence zengin bir sıvı tabakası oluşturur. Çözünen miktarı azaldıkça sıvı sıcaklığı artacağından, dengesel sıvılaşma (likudus) sıcaklığı arayüzeyden uzaklaştıkça artar. Şekil 1.4.c'de arayüzey sıcaklığı, dengesel sıvılaşma sıcaklığının üstündedir. Bu durum düzlemsel cephede kararlı bir katılaştırma için gerekli olan şartı göstermektedir.

Eğer bir kararsızlık, başlangıçta düz bir arayüzeyde bir çıkıntı oluşturursa bu çıkıntı aşırı ısıtılmış ortam içerisinde bulunacak ve tekrar eriyecektir. Kararsız durum Şekil 1.4.c'de gösterilmektedir. Burada arayüzeyin hemen önündeki sıvının gerçek sıcaklığı, sıvılaşma sıcaklığının altındadır. Bu durumda arayüzeyde oluşan bir çıkıntı, aşırı soğumuş ortam içinde bulunacak ve katılaşma devam edecektir. Sıvılaşma sıcaklığının altındaki bu sıvı aşırı soğumuş durumdadır. Bu olaya yapısal alt soğuma adı

verilmektedir (Rutter ve Chalmers, 1953). Yapısal ifadesi, bileşimdeki değişmeden dolayıdır. Yapısal alt soğuma teorisine göre, arayüzeyde oluşan bir çıkıntı, kendisini aşırı soğumuş bir sıvı içerisinde bulacak ve düzlemsel cephede bir kararsızlık meydana getirecektir. Arayüzeyde sıvı içerisinde çözünen bileşimin gradyenti (1.11) eşitliği ile verilir (Davies, 1973).

$$\left(\frac{dC_s}{dx}\right)_{x=0} = -\frac{V}{D_s} C_s (1-k) \quad (1.11)$$

Burada V , katı-sıvı arayüzeyinin ilerleme hızıdır. D_s , sıvı maddenin difüzyon katsayısı, C_s sıvı maddenin bileşimi, k ise dağılım katsayısıdır.



Şekil 1.4. Alaşımların katılaştırılmasında yapısal alt soğuma (Davies, 1973)
(a) Katı-sıvı arayüzeyi (b) Katı-sıvı arayüzey önündeki çözünen zengin bölge
(c) Yapısal olarak alt soğuma

Düzlemsel arayüzeyin dengede olduğu kabul edilerek (1.12) eşitliği yazılabilir.

$$\left(\frac{dT_s}{dx}\right)_{x=0} = m_s \left(\frac{dC_s}{dx}\right)_{x=0} \quad (1.12)$$

Arayüzeydeki sıvı içerisinde sıcaklık gradyenti (1.13) eşitsizliğini sağlıyorsa yapısal alt soğuma yoktur (Davies, 1973).

$$G \geq \left(\frac{dT_s}{dx} \right)_{x=0} \quad (1.13)$$

$C_k = kC_s$ durumunda, yapısal alt soğuma ifadesi (1.14) elde edilir.

$$\frac{G_s}{V} \geq - \frac{m_s C_k (1-k)}{kD_s} \quad (1.14)$$

Burada m_s sıvılaşma eğimi, C_k katı fazın bileşimidir. Bu durumda düzlemsel cephe kararlıdır (Davies, 1973). Alt soğuma olayında Gibbs serbest enerjisi, aşırı soğutulmuş bir sıvıda kararlı veya yarı kararlı fazlardan hangisinin oluşabileceğini belirler. Alt soğuma olayının anlaşılabilmesi için, bir sıvının katılaşmasında başlangıç olan çekirdeklenme olayının da bilinmesi gerekmektedir.

1.2.4.1. Kinetik alt soğuması (ΔT_k)

Bütün maddelerde atomların katıdan sıvıya veya sıvıdan katıya geçişlerini engelleyen bir enerji engeli vardır. Eğer bir madde erime sıcaklığının altındaki bir sıcaklığa kadar soğutulursa, sıvıdan katıya geçen atomların sayısı katıdan sıvıya geçen atomların sayısından fazla olur. Bu durumda katı faz büyür, yani katılaşma olur. Bu durumun aksine katıdan sıvıya geçen atomların sayısı sıvıdan katıya geçen atomların sayısından daha fazla olursa sıvı faz büyür, yani erime olur. Atomların geçişlerini sürdürmeleri için gerekli olan bu alt soğumaya kinetik alt soğuma denir.

Bir katı-sıvı arayüzeyinde katı fazdan sıvı faza geçen atomların sayısı, sıvı fazdan katı faza geçen atomların sayısına eşit ise katı-sıvı arayüzeyi dengededir. Dengedeki bir sistem ister saf olsun isterse çok bileşenli bir sistem olsun kinetik alt soğuma, $\Delta T_k = 0$ olur.

1.2.4.2. Çözünürlük alt soğuması (ΔT_s)

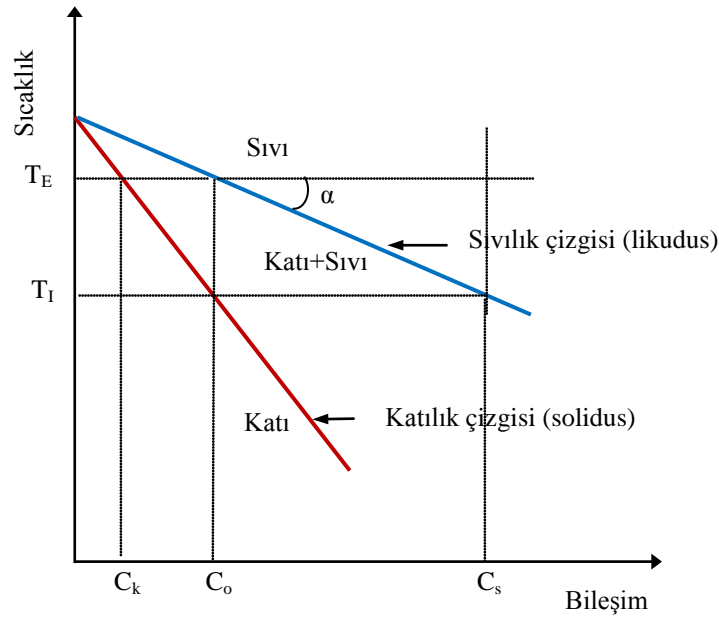
Çözünürlük alt soğuması, katı-sıvı arayüzeyindeki sıvının bileşimi ile sıvı içerisindeki herhangi bir noktanın bileşim farklılığından kaynaklanır. Şekil 1.5'te verilen çözünürlük alt soğuması (Flemings, 1976) (1.15) ifadesi ile verilir.

$$\Delta T_s = T_E - T_1 = m_s (C_o - C_s) = m_s C_o \left(\frac{k-1}{k} \right) \quad (1.15)$$

Eğim ise aşağıdaki ifade ile verilir.

$$m_s = \tan \alpha = \frac{\Delta T}{\Delta C} = \frac{T_E - T_I}{C_s - C_o} \quad (1.16)$$

Burada T_E erime sıcaklığı, T_I arayüzey sıcaklığı, C_s sıvı içerisindeki herhangi bir noktanın bileşimi, C_o eğrilik arayüzeyindeki katının bileşimi, m_s sıvılaştırma eğrisinin eğimi ve k dağılım katsayısıdır. Tek bileşenli sistemler için yani tek kristal büyütme durumunda $C_o=C_s$ olduğundan $k=1$ olacaktır. Bu yüzden saf malzemeler için çözünürlük alt soğuması $\Delta T_s=0$ olur.



Şekil 1.5. Çözünürlük alt soğumasına neden olan faktörler (Flemings, 1976)

Ayrıca katı-sıvı arayüzeyi dengede olduğu durumda, sistem ister iki bileşenli, isterse daha fazla bileşenli olsun sıvı içerisinde bileşim gradyenti olmadığı için $\Delta T_s=0$ olur (Burden ve Hunt, 1974). Sonuç olarak; katı-sıvı arayüzeyinin denge durumunda toplam alt soğuma eğrilik alt soğumasına eşittir.

1.2.4.3. Eğrilik alt soğuması (ΔT_r)

Eğrilik alt soğuması genellikle Gibbs-Thomson alt soğuması olarak da adlandırılır. Bu alt soğuma katı-sıvı arayüzey eğriliğinden meydana gelmektedir. Eğrisel bir arayüzeyin kimyasal ve mekaniksel dengesi göz önüne alınarak, eğrilik alt soğuması ΔT_r aşağıdaki ifade olarak verilir (Burden ve Hunt, 1974).

$$\Delta T_r = \Gamma \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \quad (1.17)$$

Burada Γ Gibbs-Thomson katsayısı, r_1 ve r_2 ise arayüzeyin eğrilik yarıçaplarıdır. Küresel bir katı-sıvı arayüzeyinin eğrilik yarıçapları $r_1=r_2=r$ olduğundan (1.17) denklemi (1.18) şeklini alır.

$$\Delta T_r = \frac{2\Gamma}{r} \quad (1.18)$$

Silindirik katı-sıvı arayüzeyi için $r_1=r$ ve $r_2=\infty$ olacağından (1.17) denklemi (1.19)'a dönüşür.

$$\Delta T_r = \frac{\Gamma}{r} \quad (1.19)$$

1.2.5. Çekirdeklenme

Soğumaya bırakılan herhangi bir sıvı, erime sıcaklığına düşünce hemen katılaşmaz. Soğuma hızına bağlı olarak erime sıcaklığının altında bir sıcaklığa ulaşınca katılaşır. Sıvı içerisinde, öncelikle aynı moleküllerin bir araya gelerek oluşturduğu katıya benzer bir yapı oluşur. Bu yapıya embriyoya da çekirdekçik denir. Embriyonun etrafında büyüme meydana gelir ve katılaşma başlar. Bu olaya çekirdeklenme denir. Homojen ve heterojen çekirdeklenme olmak üzere iki çeşit çekirdeklenme vardır.

1.2.5.1. Homojen çekirdeklenme

Homojen çekirdeklenme, içerisinde hiçbir yabancı madde katkısı olmaksızın uygun laboratuvar şartlarında ve çok yüksek aşırı soğumalarda nadiren gerçekleşen bir çekirdeklenmedir. Aşırı soğutulmuş sıvı ile katı arasındaki serbest enerji farkına sürücü kuvvet denir ve homojen çekirdeklenme için büyük bir sürücü kuvvete ihtiyaç vardır (Flemings, 1976). Homojen çekirdeklenme için gerekli olan enerji yani sürücü kuvvet hacimsel serbest enerjideki azalma ve yüzey enerjisindeki artmanın toplamı olarak aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$\Delta G = -V_k \Delta G_V + A_{ks} \sigma_{ks} \quad (1.20)$$

Burada, V_k oluşan katının molar hacmi, ΔG_V katının birim hacim başına düşen hacimsel serbest enerjisindeki değişim, A_{ks} katı-sıvı arayüzey alanı ve σ_{ks} katı-sıvı arayüzey enerjisidir. Hacimsel serbest enerjideki değişim ise (1.21) ile verilir.

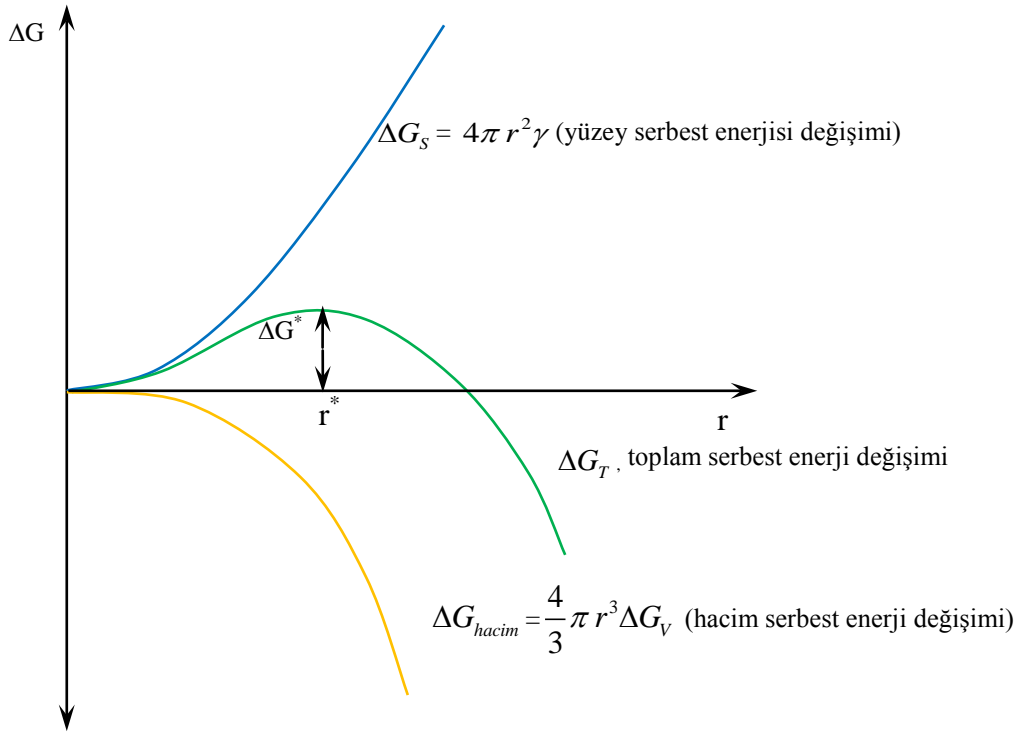
$$\Delta G_V = \frac{\Delta H \Delta T}{T_E} \quad (1.21)$$

Bu ifade de ΔH erime entalpisi, ΔT alt soğuma, T_E ise erime sıcaklığıdır.

Homojen çekirdeklenmede başlangıçta oluşan embriyonun r yarıçaplı bir küre olduğu kabul edilerek, embriyonun serbest enerjisindeki değişim (1.20) denkleminde hacim ve yüzey ifadelerinin yerlerine konulmasıyla elde edilir.

$$\Delta G = -\frac{4}{3}\pi r^3 \Delta G_V + 4\pi r^2 \sigma_{ks} \quad (1.22)$$

ΔG 'nin r 'ye göre değişimi Şekil 1.6'da verilmiştir (Porter ve Easterling, 1984).



Şekil 1.6. Homojen çekirdeklenmede embriyonun serbest enerjisinin embriyo yarıçapına bağlılığı (Porter ve Easterling, 1984)

r 'nin küçük değerlerinde ΔG kritik bir değere kadar artar ve kritik değerde maksimum olduktan sonra tekrar azalır. ΔG 'nin maksimum olduğu andaki r değerine kritik yarıçap denir ve r^* ile gösterilir. Kritik yarıçapa karşılık gelen serbest enerji ise ΔG^* ile gösterilir ve aktivasyon enerjisi olarak adlandırılır. Aktivasyon enerjisi homojen çekirdeklenmenin oluşabilmesi için gereken enerjidir. Çekirdeklenme kritik yarıçapta başladığı için embriyonun yarıçapı her zaman r^* olur. ΔG 'nin eğiminin kritik

yarıçaptaki değeri sıfır olacağından, $\frac{d\Delta G}{dr} = 0$ şartı denklem (1.22)'de uygulandığında kritik yarıçap aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$r^* = \frac{2\sigma_{ks}}{\Delta G_V} \quad (1.23.a)$$

Denklem (1.21), denklem (1.23.a)'da yerine yazılarak embriyonun yarıçapı takip eden ifadeyle bulunur.

$$r^* = \frac{2\sigma_{ks}T_E}{L\Delta T} \quad (1.23.b)$$

Şekil 1.6'da görüldüğü gibi r^* 'nin küçük değerleri için ΔG kritik bir yarıçap değerine kadar artar fakat sonra azalma gösterir. Homojen çekirdeklenme için kritik yarıçapa karşılık gelen aktivasyon serbest enerjisi, denklem (1.23.b) ile verilen r^* değerinin denklem (1.22)'de yerine yazılmasıyla ΔG^* aşağıdaki şekilde bulunur.

$$\Delta G_{\text{hom}}^* = \frac{16\pi\sigma_{ks}^3}{3(\Delta G_V)^2} = \frac{4}{3}\pi r^{*2}\sigma_{ks} \quad (1.24)$$

Denklem (1.23.b)'den σ_{ks} 'nin artmasıyla veya ΔT 'nin azalmasıyla kritik yarıçap değerinin artacağı görülmektedir.

Klasik çekirdeklenme teorisinin temelleri Volmer-Weber (Volmer ve Weber, 1926) ve Becker-Döring (Becker ve Döring, 1953) tarafından atılmıştır. Bu araştırmacılar yoğunlaştırılmış buhar ile oluşturdukları sıvı damlacıklarının çekirdeklenme kinetiğini incelemişlerdir. Turnbull'da (Turnbull, 1950a; Turnbull, 1950b) yaptığı çalışmalarla çekirdeklenme teorisinin temellerinin oluşmasına önemli katkılar sağlamıştır.

Daha sonra Turnbull ve Fisher (Turnbull ve Fisher, 1949), Becker ve Döring yaklaşımını kullanarak bir sıvı içerisinde katının çekirdeklenme hızının belirlenmesi için yeni bir teori geliştirmişlerdir. Bu teori çekirdeklenme kinetiğini betimlemek ve arayüzey enerjisini tahmin etmek için kullanılmıştır. Turnbull (Turnbull, 1950a; Turnbull ve Fisher, 1949) homojen çekirdeklenme hızını (I_{hom}) alt soğumanın bir fonksiyonu olarak ölçmüştür.

Erime sıcaklığının altındaki herhangi bir T sıcaklığında, sıvının birim hacimdeki homojen çekirdeklenme hızı aşağıdaki ifadeyle verilir.

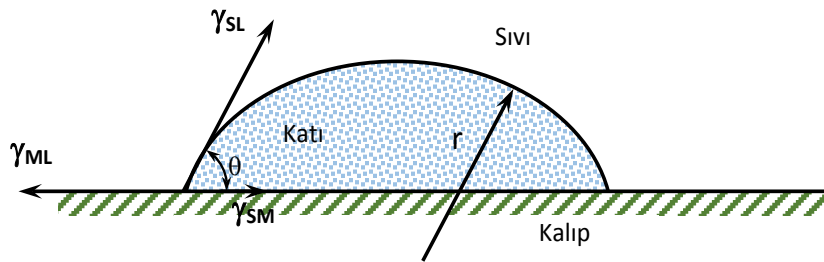
$$I_{\text{hom}} = N_V \frac{kT}{h} \exp\left(-\frac{\Delta G_D}{kT}\right) \exp\left(-\frac{16\pi\sigma_{ks}^3}{3(\Delta G_V)^2 kT}\right) \quad (1.25)$$

Burada N_V birim hacimdeki sıvı atom sayısı, k Boltzmann sabiti, h Planck sabiti, ΔG_D difüzyon için gerekli olan aktivasyon enerjisi ve ΔG_V ise hacimsel serbest enerji değişimidir.

Çekirdeklenme sırasında çözünmeyen parçacıkları ortadan kaldırmak için sıvı damlacıkların çapları bir mikron ile yüz mikron arasındaki damlacıklara ayrılır. Böylece bu damlacıklar heterojen çekirdekçik oluşturamayacak ve gerçek homojen çekirdeklenme meydana gelecektir. İlk homojen çekirdeklenme deneylerinde çekirdeklenme hızı ve sıcaklığı, dilatometre ile ölçülmüştür (Turnbull, 1952; Miyazawa ve Pound, 1974). Daha sonraki deneyler ise numunelerin katılaşma sıcaklığının değişimi mikroskop altında gözlemlenerek gerçekleştirilmiştir (Stowell, 1970; Skripov, 1977).

1.2.5.2. Heterojen çekirdeklenme

Sıvı içerisinde bulunan yabancı maddeler üzerinde, şapka şeklinde çekirdekçiklerin oluşmasıyla heterojen çekirdeklenme başlar. Heterojen çekirdeklenme, homojen çekirdeklenmeye göre daha sık rastlanılan ve çekirdeklenme hızının daha büyük olduğu bir çekirdeklenme türüdür. Heterojen çekirdeklenmede, bir alt cisim üzerinde oluşan çekirdeğin küresel bir yapıda olduğu kabul edilir.



Şekil 1.7. Heterojen çekirdeklenmenin şematik gösterimi (Porter ve Easterling, 1984)

Heterojen çekirdeklenmede alt cisim, yeni oluşan katı çekirdek ve sıvı arasındaki arayüzey enerjilerinin mekanik denge şartı denklem (1.26) ile verilir.

$$\sigma_{sa} = \sigma_{ka} + \sigma_{ks} \cos \theta \quad (1.26)$$

Burada σ_{sa} sıvı ile alt cisim arasında birim uzunluktaki arayüzey enerjisini, σ_{ka} katı çekirdek ile alt cisim arasında birim uzunluktaki arayüzey enerjisini, σ_{ks} katı çekirdek ile sıvı arasında birim uzunluktaki arayüzey enerjisini, θ açısı ise temas açısını ifade etmektedir.

Heterojen çekirdeklenme teorisi için serbest enerji ifadesi aşağıdaki ifadeyle verilir.

$$\Delta G_{het} = \left(-\frac{4}{3}\pi r^3 \Delta G_V + 4\pi r^2 \sigma_{ks} \right) \frac{1}{4} (2 - 3 \cos \theta + \cos^3 \theta) \quad (1.27)$$

Kritik yarıçapta $\frac{d\Delta G}{dr} = 0$ şartı denklem (1.27)'ye uygulanarak kritik yarıçap aşağıdaki gibi elde edilir.

$$r_{het}^* = \frac{2\sigma_{ks}}{\Delta G_V} \quad (1.28)$$

Denklem (1.28) denklem (1.27)'de yerine yazılarak aşağıdaki ifade elde edilir.

$$\Delta G_{het}^* = \frac{16\pi\sigma_{ks}^3}{3\Delta G_V^2} f(\theta) \quad (1.29)$$

Denklem (1.28)'deki $f(\theta) = \frac{1}{4}(2 - 3 \cos \theta + \cos^3 \theta)$ olup, temas açısı faktörü olarak adlandırılır. Denklem (1.24) ve (1.29) birbirine eşitlenirse, (1.30) ifadesi elde edilir (Porter ve Easterling, 1984).

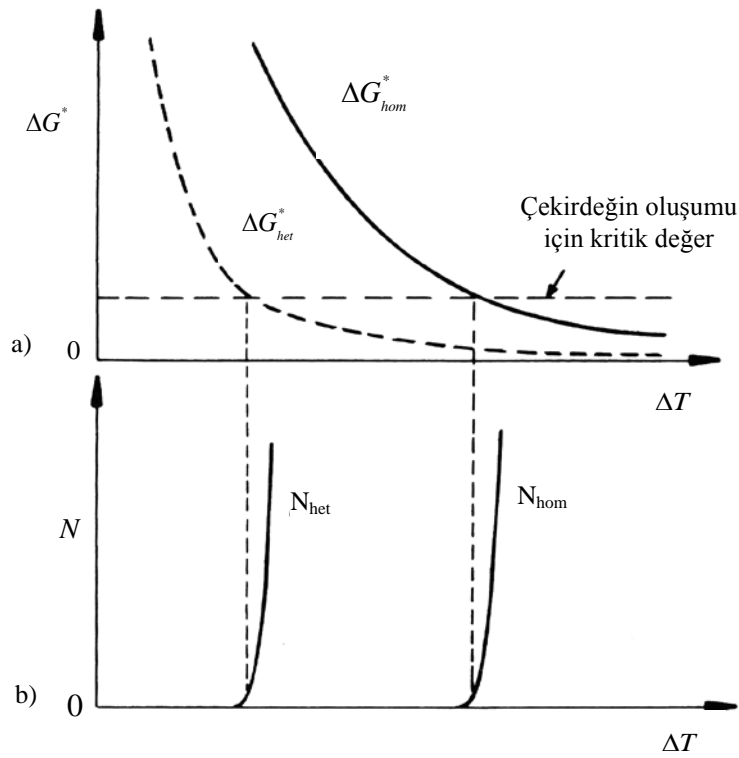
$$\Delta G_{het}^* = \Delta G_{hom}^* f(\theta) \quad (1.30)$$

Bu ifadelerden de anlaşılacağı gibi, heterojen çekirdeklenmedeki aktivasyon enerji engeli, homojen çekirdeklenmedeki enerji engelinden $f(\theta)$ faktörü kadar daha küçüktür.

Enerji engelinin küçük olması, heterojen çekirdeklenmede çekirdeklenme hızının büyük olmasını sağlamaktadır. Temas açısının küçük olması, heterojen çekirdeklenmedeki enerji engelini azaltmaktadır. $\theta = 0$ olduğunda $\Delta G_{het}^* = 0$ olur ki, bu durumda çekirdeklenme yok demektir. $\theta = 180^\circ$ olduğunda $\Delta G_{het}^* = \Delta G_{hom}^*$ olur. Bu durumda ise çekirdeklenme homojendir ve çekirdekçiğin alt cisimle hiçbir teması yoktur. Heterojen çekirdeklenme hızı, (1.31) ifadesi olarak elde edilir (Turnbull ve Fisher, 1949).

$$I_{het} = N_s \frac{kT}{h} \exp\left(-\frac{\Delta G_D}{kT}\right) \exp\left(-\frac{16\pi\sigma_{ks}^3}{3(\Delta G_V)^2 kT} f(\theta)\right) \quad (1.31)$$

(1.31) ifadesindeki N_s alt cisimle temas halinde bulunan birim yüzeydeki atom sayısı, ΔG_D katı-sıvı arayüzeyini geçmek için gerekli olan difüzyon enerjisi, ΔG_V ise birim hacimdeki enerji değişimidir. Şekil 1.8'de aktivasyon enerjisinin ve çekirdeklenme hızının alt soğumaya göre değişimi verilmektedir.



Şekil 1.8. Aktivasyon enerjisinin ve çekirdeklenme hızının alt soğumaya göre değişimi (Porter ve Easterling, 1984)

BÖLÜM II

GENEL BİLGİLER

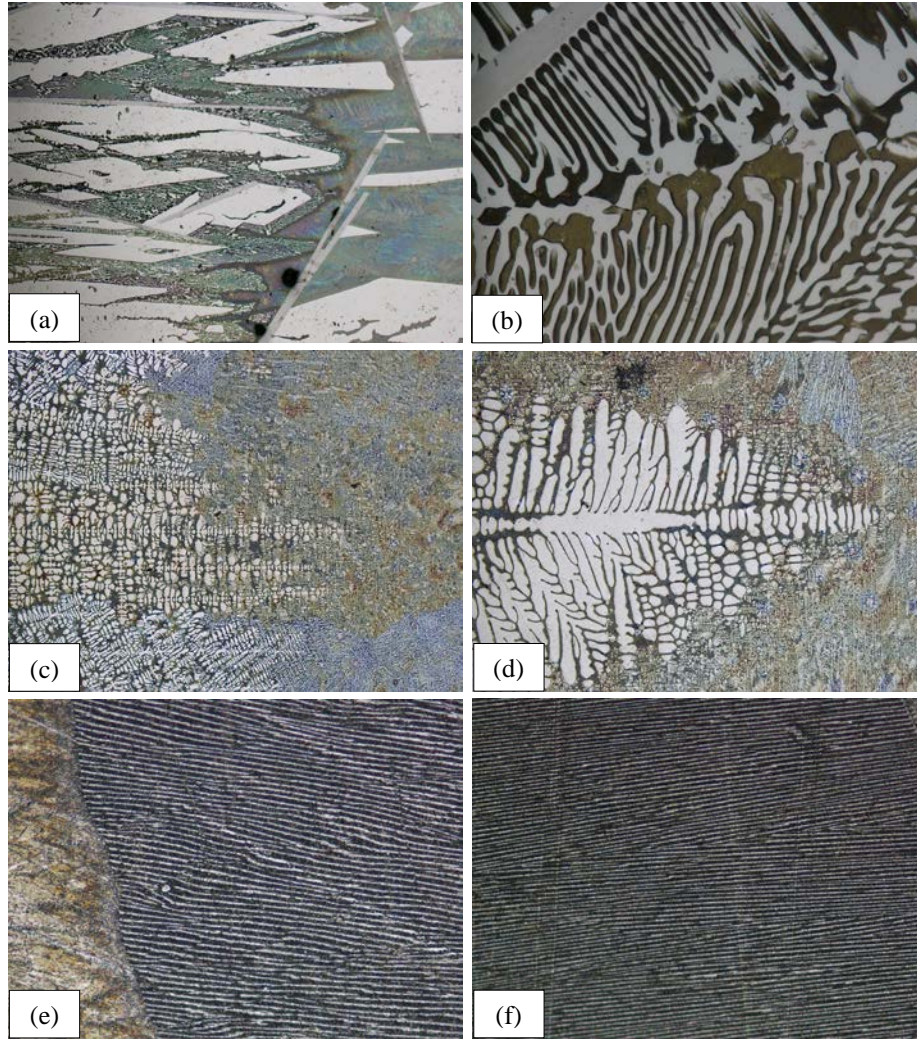
Bu bölümde, katılaştırma türleri ele alınacak ve ötektik ve dendritik katılaştırma üzerinde durulacaktır. Literatürde daha önce yapılmış olan ötektik katılaştırma ve bazı dendritik katılaştırma çalışmaları özetlenecektir. Ayrıca mikrosertlik, çekme-dayanımı, elektriksel öz direnç, entalpi ve özısı ölçümleri hakkında bilgiler verilecektir.

2.1. Alaşımların Katılaştırılması

Malzemelerin mikroyapılarındaki değişikliklerin, mikrosertlik ve çekme dayanımı gibi mekanik özellikleri ve elektriksel iletkenlik, termal özellikler, korozyon gibi diğer özelliklerini etkilediği bilinmektedir. Malzemelerde düzenli mikroyapıların oluşması ve tanecik boyutları (λ), bu malzemelerin katılaştırılması esnasındaki katılaştırma parametrelerine (G , V ve C_o) bağlıdır. Yani, katılaştırma parametreleri G , V ve C_o birbirinden bağımsız kontrol edilerek malzemelerin tanecik boyutundaki mikroyapılarına, mekanik ve elektriksel özelliklerine etki etmek kontrollü katılaştırma yöntemi ile mümkündür. Bu yöntem ile değişik malzemelerden elde edilen farklı mikroyapı şekilleri Şekil 2.1'de verilmiştir.

Bir alaşım sistemi, iki veya daha fazla elementin belirli bir sıcaklık, basınç ve bileşimde eritilmesiyle elde edilen bir katı çözeltilidir. Alaşımlar, alaşımı oluşturan elementlerin özelliklerini taşıyabileceği gibi, bu elementlerin özelliklerinden başka yeni özellikler de taşıyabilirler. Örneğin saf bir metale alaşım elementi ilave edilerek, onun mekanik özellikleri büyük ölçüde geliştirilebilmektedir (Thornton, 1985). Alaşımlar, kendisini oluşturan elementlerin birbiri içerisindeki karışımına göre tek fazlı ve çok fazlı olmak üzere ikiye ayrılırlar. Homojen bir sistemin fiziksel sınırlarla ayrılmış olan kısmına faz denir. Birbiri içerisinde her oranda homojen olarak karışabilen alaşımlar, tek fazlı alaşımlardır. Böyle bir alaşım sistemindeki, alaşım elementlerinin örgü sistemlerinde olan değişiklik sonucunda alaşım elementinden birinin atomları diğerinin kristal örgüsüne yerleşir. Yeni örgüde farklı özelliklere sahip atomların bulunmasından dolayı farklılıklar oluşur ve yeni bir malzeme ortaya çıkar. Çok fazlı alaşımlarda, alaşımı

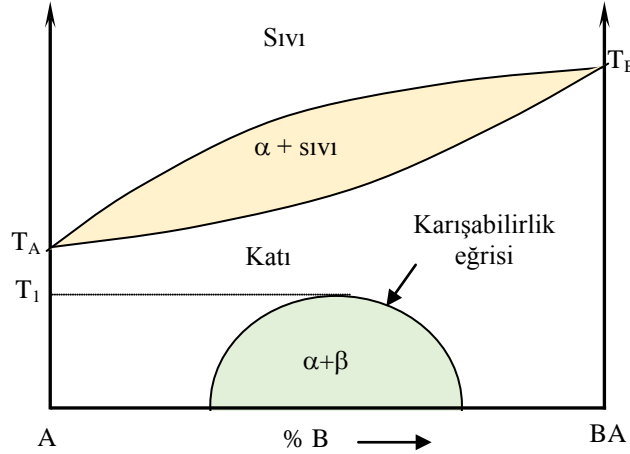
oluşturan elementlerin baskın özellikleri görülür ve örgü yapılarında bir değişiklik olmaz (Clark, 1959; Onaran, 1986).



Şekil 2.1. Değişik malzemelerde gözlenen mikroyapılar

(a) ve (b) Al-Cu-Co, (c) ve (d) Al-Cu-Si, (e) ve (f) Zn-Al-Cu

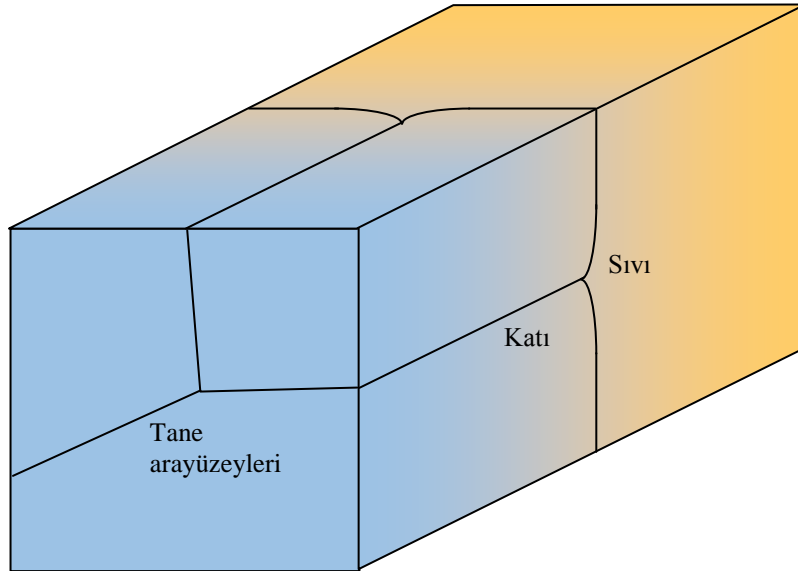
Endüstride kullanılan metalik sistemler, yüksek sıcaklıklarda birbirini her oranda eritebilmelerine rağmen, düşük sıcaklıklarda sınırlı oranda eritebilmektedirler. Şekil 2.2’de ikili bir alaşım sistemine ait faz diyagramı verilmektedir. Faz diyagramından da görüldüğü gibi alaşım sistemi, sıvı halden soğutulmaya başlandığında, önce katı çökelti oluşmasıyla α fazı meydana gelmektedir. Daha sonra sıcaklık T_1 ’e düşürüldüğünde α fazı B atomlarınca zenginleşmekte ve bu sıcaklığın altında B atomlarının fazlası β fazı şeklinde çökerek α ve β fazlarını oluşturmaktadır.



Şekil 2.2. Birbirini sınırlı oranda eriten ikili sistemlerde denge faz diyagramı (Onaran, 1986)

2.1.1. Alaşımların düzlemsel cephede katılaştırılması

Alaşımların düzlemsel cephede kontrollü olarak katılaştırılması pratikte tek kristallerin büyütülmesinde, malzemeleri saflaştırmada ve kontrollü büyütülen malzemede homojen bileşim elde etmede kullanılır. Bu tür katılaştırmanın en önemli ticari uygulaması, yarıiletken kristallerin büyütülmesidir. Örnek olarak alüminyum oksitler, tantal oksitler ve niyobyum oksitler verilebilir. Şekil 2.3'te düzlemsel cephede katılama yapısının şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 2.3. Düzlemsel cephede katılmanın şematik gösterimi

Araştırmalarda metal-metal alaşımların düzlemsel cephede katılaştırılmış kristallerinin incelenmesi büyük bir paya sahiptir. Birçok metalin ve metal olmayan inorganiklerin eriyiklerinin katılaştırılması esnasında arayüzeyin iyi bir yaklaşıklıkla dengede olduğu

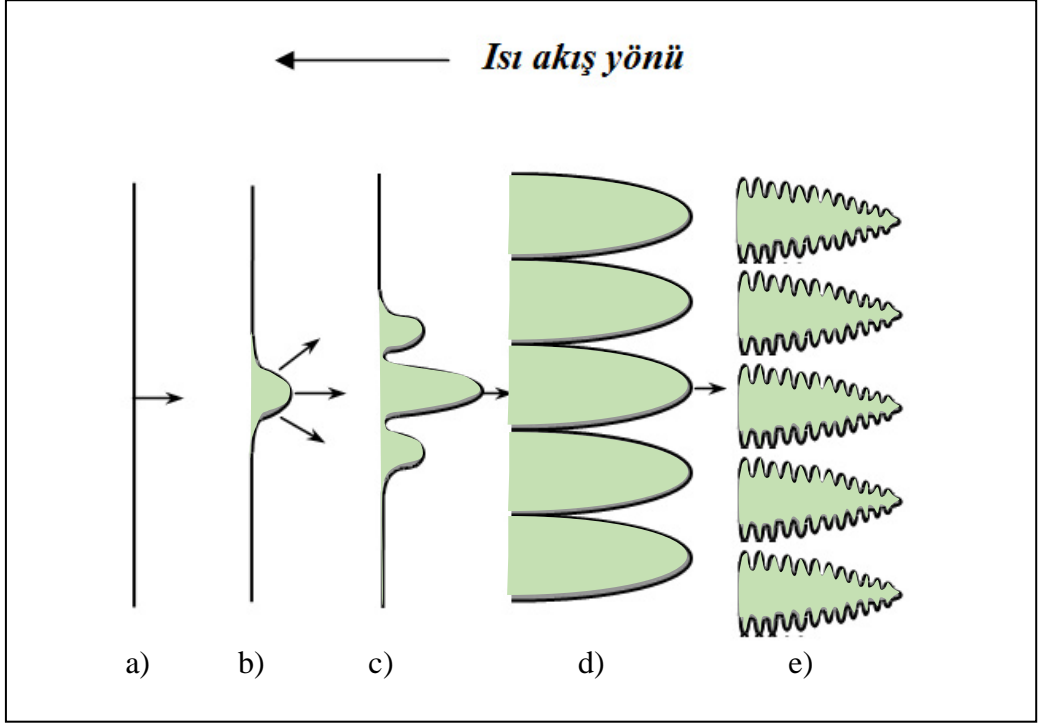
kabul edilir. Yani katılaştırma esnasında, katı-sıvı arayüzeyinin önünde büyük bileşim gradyentleri meydana gelebilir. Ancak arayüzeyden geçişte atomların aktarılmasına karşı çok küçük miktarda, ihmal edilebilir bir direnç mevcuttur. Bu durum yapısal aşırı soğuma teorisi ile açıklanmaktadır (Rutter ve Chalmers, 1953). Yapısal aşırı soğuma teorisi, başlangıçta düzlemsel cephede arayüzeyin önünde katı ve sıvının hangisinin termodinamik olarak kararlı olduğu sorusu ile ilgilenir. Yani sıvı kararlı ise arayüzeyin düzlemsel kaldığı, katı kararlı ise arayüzeyin bozulduğu kabul edilir.

2.1.2. Alaşımın hücrel katılaştırılması

Arayüzey yapısının bozularak hücrel biçime, sonrasında da dendritik biçime nasıl dönüştüğü Şekil 2.4'te gösterilmiştir. Düzlemsel cephede katılan bir alaşım sisteminde ilk katılan kısmın bileşimi, ortalama C_0 bileşiminin altında oluşur. Dolayısıyla bir kısım çözünen madde sıvı içine itilir. Katılma ilerledikçe sıvı içine itilen çözünen madde miktarı arayüzeyde artar ve çözünen zenginleşen arayüzeyde sıcaklık azalır (Mullins ve Sekerka, 1963).

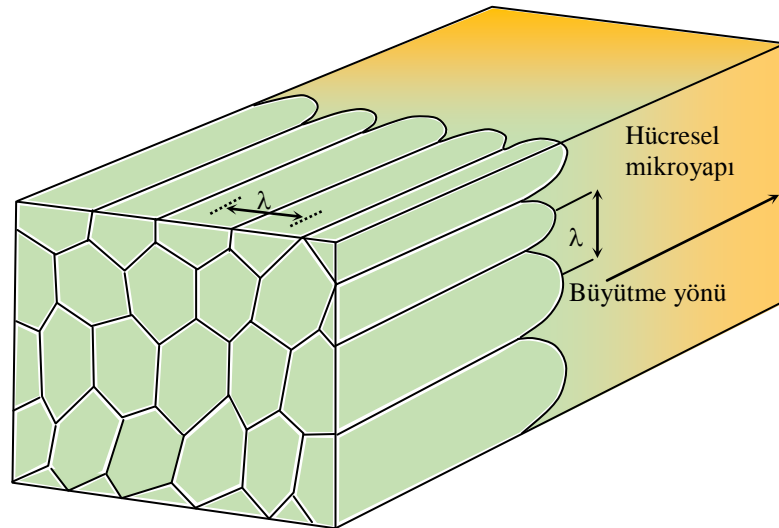
Eğer arayüzeyin önündeki sıcaklık gradyenti kritik sıcaklık gradyentinden daha büyük ise, arayüzey sıcaklığı normal sıcaklığın üstünde olacak ve katılan kısım tekrar erimeye başlayacaktır. Eğer düzlemsel arayüzeyin önündeki sıcaklık gradyenti yavaşça kritik sıcaklığın altına düşürülürse düzlemsel arayüzeydeki ilk çıkıntılar Şekil 2.4.b'deki gibi oluşacaktır. Çıkıntılardan sıvı içerisine itilen çözünen madde, çıkıntının ön ve yanlarında toplanarak bu bölgeleri çözünen zenginleştirir ve arayüzey sıcaklığını sıvı denge sıcaklığının altına düşürür. Bu nedenle, katı-sıvı arayüzeyi kararsız hale gelir ve arayüzey sıcaklığının en düşük olduğu yerlerde yeni çıkıntılar oluşur.

Bu çıkıntılar tarafından itilen çözünen maddeler çıkıntılar arasında toplanırlar ve çözünen maddelerce zenginleşen bu bölgeler sıvı halde iken Şekil 2.4.d'de görüldüğü gibi, çıkıntılar sıvının içine doğru hücreler halinde ilerler. Bu katılaştırma olayına hücrel katılaştırma denir. Hücrenin uçlarındaki sıcaklık, hücrenin gerisindeki sıcaklıktan daha yüksek olduğundan, hücrenin gerisi ön kısmına göre çözünen madde yönünden daha zengindir. Katılaştırma hızı yeterince yüksek değere ulaşıncaya Şekil 2.4.e'de görülen çam ağacına benzer bir yapı oluşur. Bu şekillenim dendritik yapı olarak bilinir.



Şekil 2.4. Düzlemsel katılaşmadan dendritik katılaşmaya geçiş (Jackson ve Hunt, 1965)

Metalik alaşımlarda hüresel ve dendritik yapıları incelemek için en iyi yol, katılaştırmayı aniden soğutma (quench) ile durdurmaktır. Bu metot, ağırlıkça % 1'den daha fazla çözünen içeren alaşımlarda oldukça iyi sonuçlar vermektedir (Trivedi, 1939). Şekil 2.5'te hüresel katılaşma yapısı ve mikroyapı parametrelerinin şematik gösterimi verilmiştir.

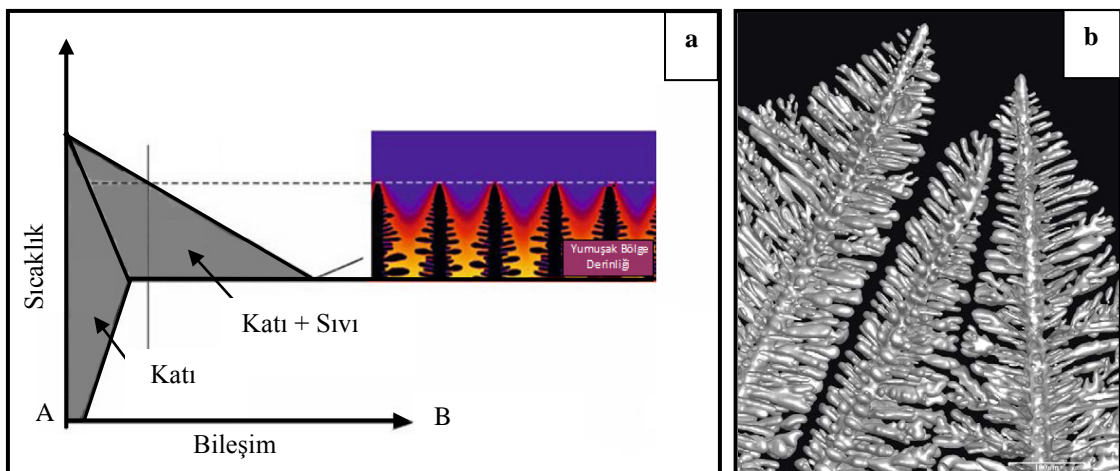


Şekil 2.5. Hüresel katılaşmanın yapısı ve mikroyapı parametrelerinin şematik gösterimi

2.1.3. Alaşımların dendritik katılaştırılması

Alaşımların katılaştırılmasında dendritik büyüme çok yaygın görülmektedir. Dendritik katılaştırma, hücresel katılaştırmanın bir sonraki aşamasıdır. Çözelti içindeki bileşim gradyantleri yapısal aşırı soğumaya ve arayüzeyin bozularak hücresel hale geçmesine neden olur. Bu durum çözünen miktarının yanlara doğru itilmesine sebep olduğu için çözünence zengin ara bölgeler oluşur ve yapısal aşırı soğumayı daha da artırır. Sonuçta birincil kollara dik ikincil kollar oluşur ve büyür. Bu am ağacına benzer yapı "dendritik katılaşma yapısı" olarak bilinir.

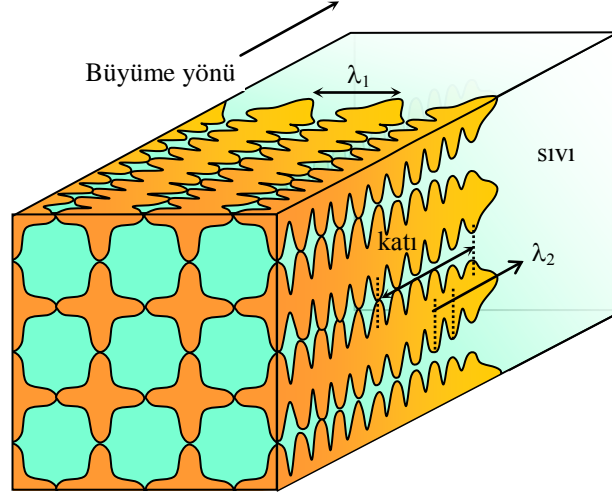
Katılaşma yapısı bölgesel katılaştırma hızına ve sıcaklık gradyantine göre değişmektedir. Yani, eğer uygulanan katılaştırma hızı yeterince düşükse çözünen madde zamanla arayüzeyden sıvı içine itilir. Bunun sonucunda arayüzey dzlemselleşeceği için katılaştırma düzlemsel olur. Diğer taraftan yüksek katılaşma hızlarında çözünen madde arayüzeyde birikir. Bu ise yapısal aşırı soğuma için potansiyel oluşturur ki bu durumda yapısal aşırı soğuma şiddetine bağlı olarak oluşan yapı, hücresel veya dendritik biçimde olur. Eğer uygulanan katılaştırma hızı yüksek ise ince dendritik yapı elde edilir, tane yapısı küçülür. Bu nedenle malzemenin sertliği ve mukavemeti artar. Dolayısıyla malzemelerin mekaniksel özellikleri ile dendrit kollar arası mesafe arasında sıkı bir bağ vardır (Edwards ve Endean, 1990).



şekil 2.6. (a) Katı ve sıvı fazlar arasında malzemenin katılaşma morfolojisi ve yumuşak bölge derinliği, (b) Al-Cu alaşımında oluşan dendritlerin fotoğrafı (Voorhees, 2006)

Doğrusal katılaştırmada dendritik yapı; birincil kollar arası mesafe λ_1 , ikincil kollar arası mesafe λ_2 , dendrit uç yarıçapı R ve yumuşak bölge derinliği d , alaşımın bileşimine,

katılaştırma hızına ve sıcaklık gradyentine bağlı olarak değişmektedir. Bu özellik malzemeye yeni kullanım alanları kazandırmaktadır. Bu sebeplerden dolayı son yıllarda dendritik katılaştırma konusu önem kazanmış ve bu konuda birçok çalışma yapılmıştır (Sharp ve Hellawell, 1971; Gündüz ve Çadırılı, 2002). Şekil 2.7’de dendritik katılaştırmanın yapısı ve mikroyapı mesafeleri şematik olarak verilmiştir.



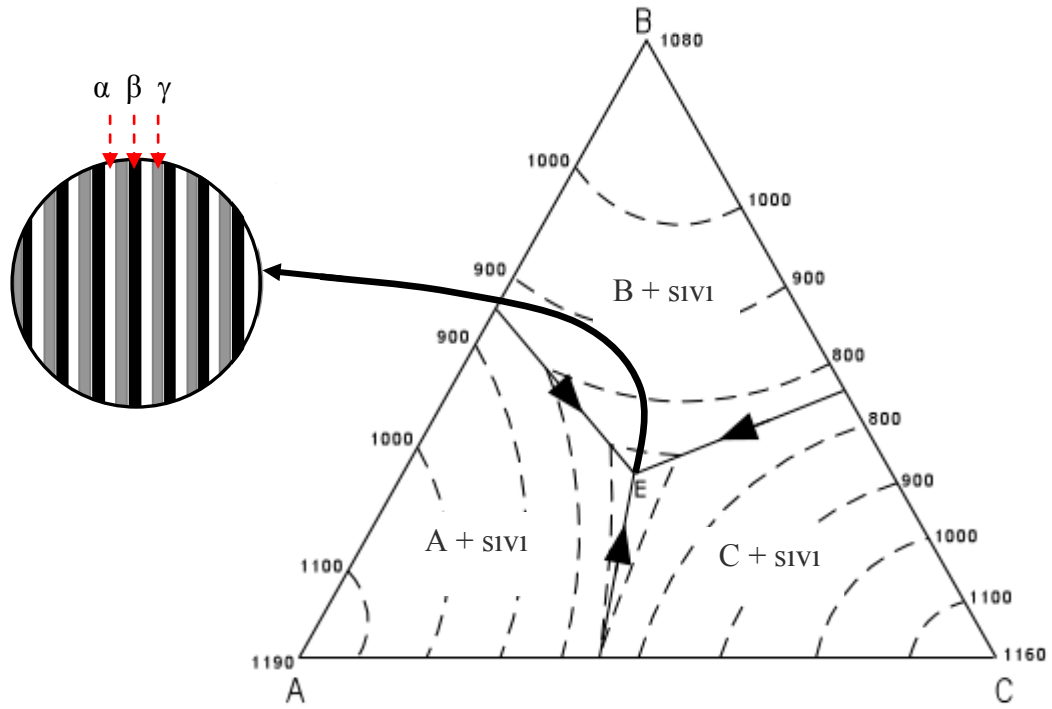
Şekil 2.7. Dendritik katılaştırmanın yapısı ve mikroyapı parametrelerinin şematik gösterimi

2.1.4. Alaşımların ötektik katılaştırılması

Ötektik kelimesi, Yunancada kolay eriyen anlamına gelmektedir. Ötektik bölge, bir alaşım sisteminde α ve β gibi katı fazlar ile sıvı fazın dengede olduğu üçlü bölgedir. Bu noktadaki sıcaklığa ötektik sıcaklık, bileşime de ötektik bileşim denir. Ötektik alaşımı oluşturan iki bileşenli sistemlerde bileşenler birbirinin erime sıcaklıklarını düşürür ve ötektik reaksiyon sonucu sıvı faz aynı anda iki farklı katı faza dönüşür. Dolayısıyla ötektik reaksiyon aşağıdaki biçimde ifade edilir (Onaran, 1986).

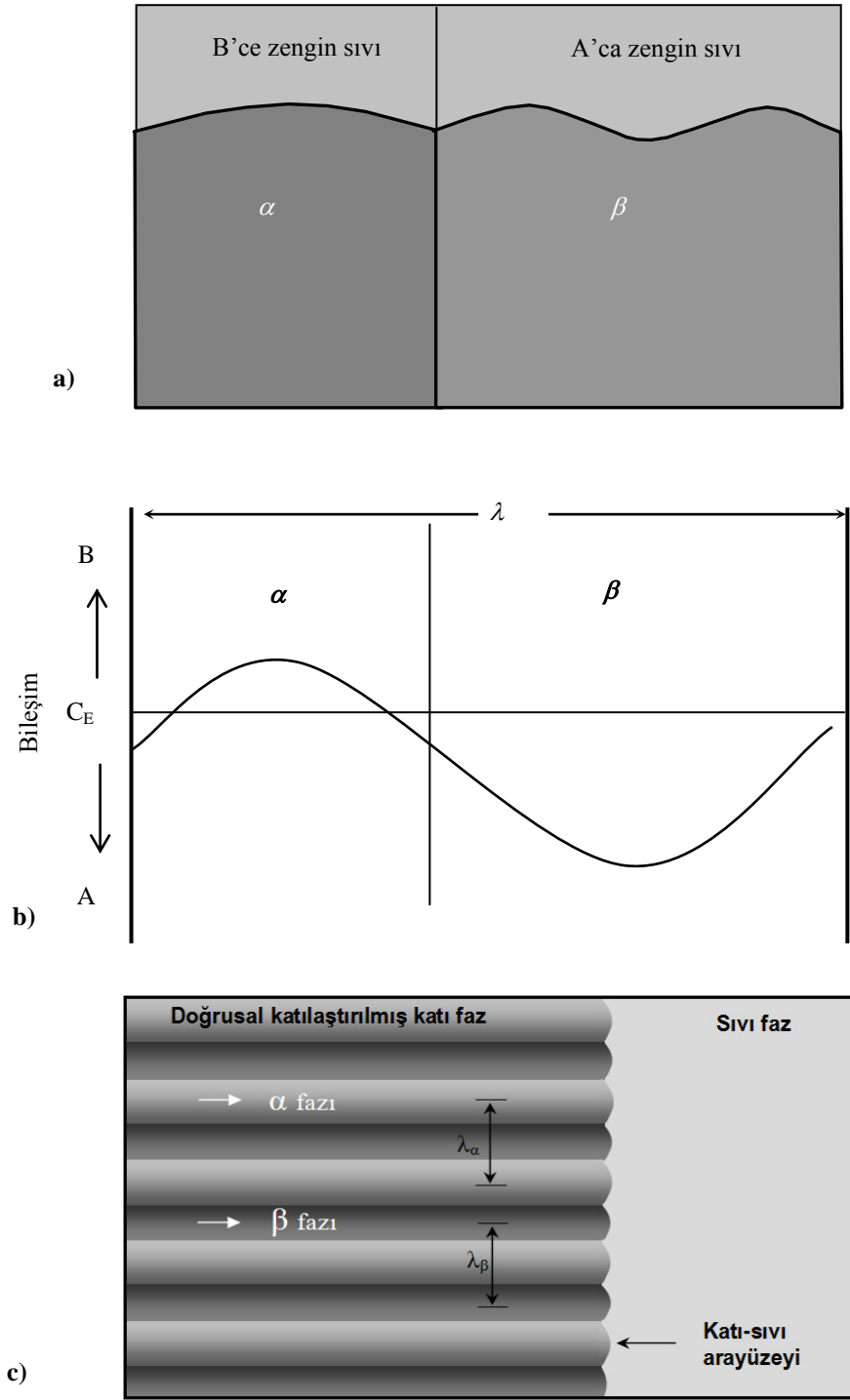


Bu tür reaksiyona sahip sistemlere ötektik sistemler denir. Bu reaksiyon esnasında iki katı faz yan yana gelerek ince tabakalar halinde şekillenir ve ötektik yapı oluşur (Askeland, 1990). Ötektik yapının oluşumu; katılaştırma hızı, sıcaklık gradyenti ve alaşımın bileşimine göre değişim gösterir. Şekil 2.8’de iki bileşenli bir ötektik sisteme ait faz diyagramı ve katılaştırma yapısı verilmektedir.



Şekil 2.9. Üç bileşenli ötektik sisteme ait faz diyagramı ve mikroyapı oluşumu

Şekil 2.10'da arayüzey çözünen konsantrasyonuna ve aşırı soğumaya bağlı olarak α ve β lamellerinin oluşumu görülmektedir. Şekil 2.10.a'da A bileşenince zengin olan α fazı katılaştırırken, B atomları sıvı içerisine hareket ederek B bileşenince zengin olan β fazını nasıl oluşturduğunun şematik gösterimi verilmiştir. Benzer şekilde β fazının önüne A atomları itilerek α fazı oluşur. Şekil 2.10.b'de ise B atomları α lamelleri önünde hafifçe artarken β lamellerinin önünde azalır. Katı-sıvı arayüzeyindeki A ve B atomlarının kısa mesafe difüzyonu ile α ve β katı fazlarının oluşturduğu lamelsel yapılar ise Şekil 2.10.c'de verilmektedir. Bu lamelsel ötektiklerin genişliği büyüme hızı ve difüzyon hızına yani α fazı önündeki B atomlarının β fazına geçiş hızı ve β fazı önündeki A atomlarının α fazına geçiş hızına bağlıdır. Buna göre, katılaşma ne kadar hızlı gerçekleştirilirse, ötektik tane yapısı o oranda küçük olur (Kaya, 2001).



Şekil 2.10. Lamelsel ötektik büyümenin şematik gösterimi (Hunt ve Jackson, 1966)
 (a) Lamelsel büyümede katı-sıvı arayüzey şekli (b) Katı-sıvı arayüzeyinde A ve B atomlarının bileşimi (c) Lamelsel ötektik mesafeler

$\alpha - \beta$ arayüzeyine ait yüzey geriliminin ($\gamma_{\alpha\beta}$) belirlenmesi ile de λ bulunabilir. Örneğin, bir mol sıvının katılaştırılmasıyla oluşan serbest enerji değişimi aşağıdaki eşitlikle verilir (Kaya, 2001).

$$\Delta G(\lambda) = -\Delta G(\infty) + \frac{2\gamma_{\alpha\beta}V_m}{\lambda} \quad (2.1)$$

(2.1) ifadesindeki $\Delta G(\lambda)$, ötektik mesafeye bağlı serbest enerji değişimi, $\Delta G(\infty)$, λ 'nın çok büyük değerleri için azalan serbest enerji değişimi ve V_m ötektik malzemenin molar hacmidir. $\Delta G(\lambda) > 0$ ise katılaşma olmaz. $\Delta G(\infty)$, arayüzey enerjisini dengelemek için yeterince büyük olmalıdır. Yani ötektik katı-sıvı arayüzeyi, ötektik denge sıcaklığı altında aşırı soğutulmalıdır. Eğer toplam alt soğuma ΔT_o ile tanımlanırsa, $\Delta G(\infty)$ yaklaşık olarak aşağıdaki ifade ile verilir, burada ΔH , entalpi değişimidir.

$$\Delta G(\infty) = \frac{\Delta H \Delta T_o}{T_E} \quad (2.2)$$

Lamelsel mesafenin alabileceği en küçük değer (λ^*) için, $\Delta G(\lambda^*) = 0$ olduğu göz önüne alınırsa, $\Delta G(\infty)$ ve λ^* ifadeleri aşağıdaki şekilde elde edilir (Kaya, 2001).

$$\Delta G(\infty) = \frac{2\gamma_{\alpha\beta}V_m}{\lambda^*} \Rightarrow \quad (2.3)$$

$$\lambda^* = \frac{2\gamma_{\alpha\beta}V_m}{\Delta G(\infty)} = \frac{2\gamma_{\alpha\beta}V_m T_E}{\Delta H \Delta T_o} \quad (2.4)$$

2.2. Ötektik Yapılar ve Ötektik Yapıların Sınıflandırılması

Ötektik alaşımların kontrollü katılaştırılması ile oluşan mikroyapıların sınıflandırılması konusunda değişik görüşler ileri sürülmüştür (Hunt ve Jackson, 1966; Graham ve Kraft, 1966). Bu sınıflandırmalar çoğunlukla mikroyapıların morfolojik görünümüne bağlı olarak yapılmıştır.

Scheil (1959), ötektik mikroyapıları normal ve anormal olmak üzere iki ana grupta incelemiştir. Bu sınıflandırmada, ötektik yapıdaki fazların dağılımında birbirlerine göre düzenlilik derecesi dikkate alınmıştır. Normal mikroyapılar sürekli bir ana faz içerisine gömülmüş birbirine paralel lamelsel, çubuksal ve küresel kristallerden meydana gelmiştir. Anormal mikroyapılarda ise ötektik mikroyapıyı oluşturan fazların aynı hızda ve sıcaklıkta büyümediği ve fazların gelişigüzel yöneldiği yapılardan meydana gelmiştir.

Chadwick (1962) ise ötektik yapıyı sürekli, süreksiz ve spiral olmak üzere üçe ayırmıştır. Sürekli yapılar, lamelsel ve çubuksal yapılardan meydana gelirken, süreksiz yapı bir ana faz içerisinde gelişigüzel dağılmış taneciklerden meydana gelmiştir. Spiral katılaşma şeklini gösteren ötektik yapılar ise aynı isimle anılmıştır. Bu sınıflandırma, optik mikroskopta incelenen numunelerin yüzeylerindeki yapıların şekilsel görünüşlerine göre yapılmıştır.

Hunt ve Jackson (1966) tarafından geliştirilen ve ötektik mikroyapıyı oluşturan fazların erime entropilerine dayanan sınıflandırma, ikili ötektik alaşımların katılaşmasıyla ortaya çıkan mikroyapıları üç gruba ayırmıştır. Bu yapılan sınıflandırmaya ait mikroyapı oluşumları Şekil 2.11'de şematik olarak gösterilmektedir. Bunlar,

a) Düzlemsiz-Düzlemsiz (Nonefaceted-Nonefaceted) Ötektikler: Her iki elementin erime entropisi düşüktür ve sadece düzenli lamelsel veya fiber şeklinde mikroyapılar oluşur. Metal-metal ötektik alaşımlarda gözlenir (Sn-Pb, Al-Zn).

b) Düzlemsiz-Düzlemlı (Nonefaceted-Faceted) Ötektikler: Elementlerden birisi düşük diğeri ise yüksek erime entropisine sahiptir. Bu tür alaşımlarda düzensiz veya kompleks düzenli mikroyapılar görülür. Metal-ametal ötektik alaşımlarda gözlenir (Al-Si, Fe-C).

c) Düzlemlı-Düzlemlı (Faceted-Faceted) Ötektikler: Bu tür ötektiklerde hiçbir düzenli yapı oluşmaz. Bu tür mikroyapı, sadece organik ötektiklerde (Azobenzen-Benzil), bazı yarı metallerde (Bi, Si, Ge) veya erime entropisi yüksek intermetalik bileşiklerde görülür.

Crocker vd. (1971, 1975), Hunt ve Jackson'un (1966) ortaya attıkları modeli geliştirerek ötektik yapıları daha anlamlı bir şekilde sınıflandırmışlardır. Buna göre ötektik fazların düzlemlı olup olmaması, ötektik sıcaklıktaki dönüşüm entropisine bağlıdır. Katı-sıvı dönüşüm entropisi $\Delta S_{\alpha} \geq 23 \text{ J.mol}^{-1}\text{K}^{-1}$ olduğu durumda, faz düzlemlıdir ve normal ötektikle anormal ötektik birbirinden ayrılır. Normal ve özellikle anormal ötektiklerde yapılar, düzlemlı fazın hacim oranı V_F , katılaşma hızı, sıcaklık gradyenti ve bileşime bağlı olarak değişir.

2.2.1. Normal ötektikler

Normal ötektiklerde, her faz düşük bir dönüşüm entropisine sahip olup, çekirdeklenmeden sonra pürüzlü bir katı-sıvı arayüzeyi boyunca büyüme görülür. Çok

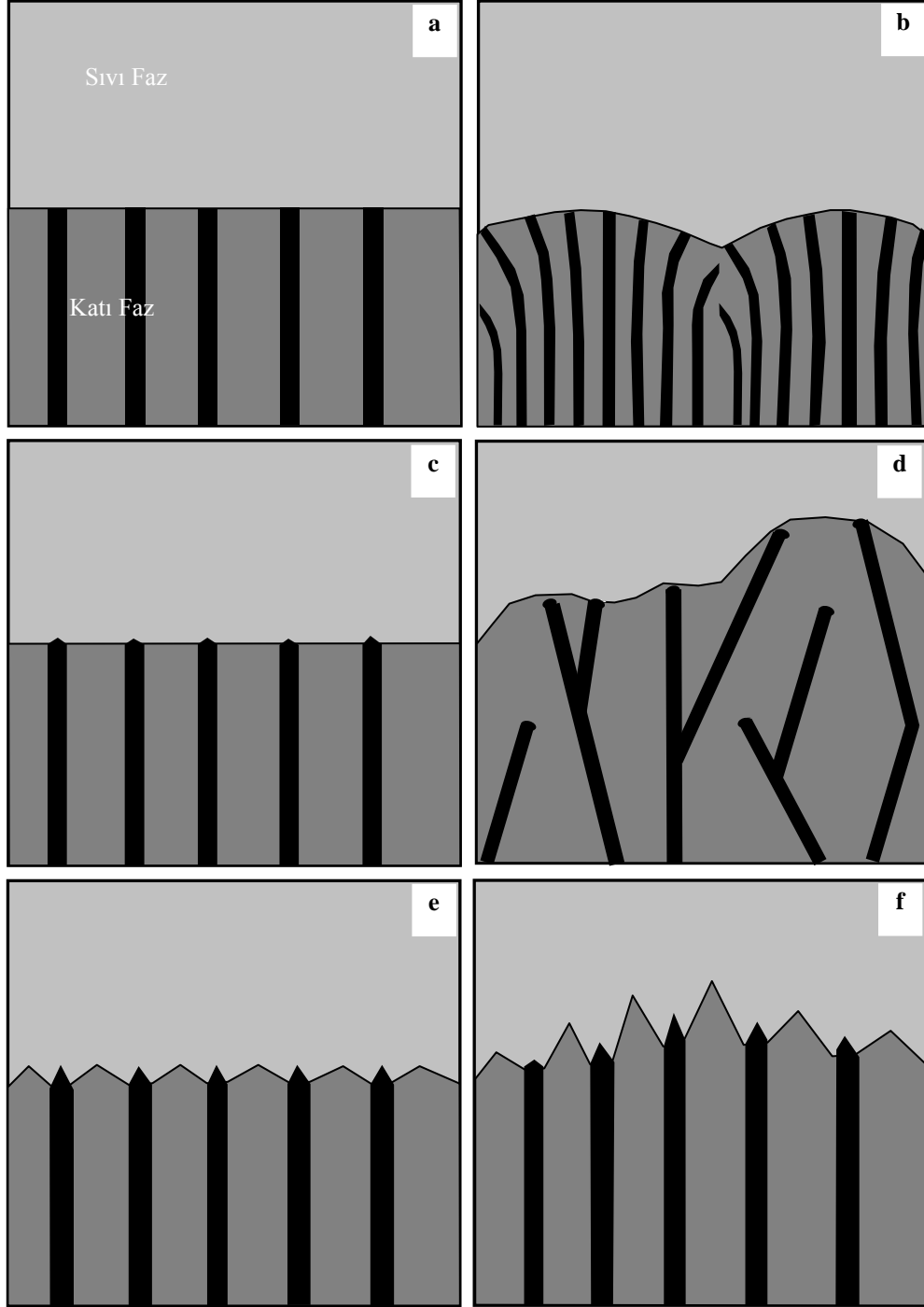
az bir alt soğuma ile α ve β lamelleri veya ana faza çökelmiş çubuksal yapılar oluşur. Bu yapılar normal ötektiklerin en genel özelliğidir. Denge şartlarında, sıvıda bir bileşim gradyenti vardır. Bu bileşim gradyenti katı-sıvı arayüzeyinden yayılan A ve B atomlarınca oluşturulur. Bu yüzden lamelsel veya çubuksal kristaller arası mesafe (λ_E) korunur (Elliot, 1977). Normal ötektik mikroyapılar kendi içerisinde ikiye ayrılır (Crocker vd., 1971; Crocker vd., 1975). Bunlar;

a) Lamelsel: Uzun mesafeler boyunca uzanan düzenli fakat kristal hatalarıyla kesilen birbirine paralel lameller şeklindeki kristallerden oluşan mikroyapıdır.

b) Çubuksal: Uzun mesafeler boyunca uzanan ve katılma yönü doğrultusunda birbirine paralel olarak yönelmiş düzenli fiber şeklindeki kristallerden oluşan levhasal mikroyapıdır. Yapı düzenlidir fakat ana faz içerisinde dik kesiti çok köşeli ve çubuksaldır.

2.2.2. Anormal ötektikler

Anormal ötektik yapı, ticari bakımdan çok önemli olan Al-Si ve C-Fe-C alaşımlarında görülür. Fazlardan biri düzlemlilik karaktere sahip olduğundan, normal ötektiğe göre çok farklı ve karmaşık mikroyapısal özellik gösterir. Düzlemlilik fazlarda kinetik alt soğuma ΔT_k büyük olduğundan ötektik büyüme yavaş olur. Dolayısıyla sıcaklık dalgalanmaları dengelenemez. Kinetik engelin aşılmasındaki zorluklardan dolayı düzensiz ve farklı yapılar oluşur. Düzlemlilik fazın büyümesi için katı-sıvı arayüzeyinde büyüme tabakalarının oluşması gerekir. Bu tabakalar ve iki boyutlu çekirdeklenme, yüzeyde oluşan düzensizliklerden kaynaklanır. Bu düzensizliklerin oluşumu ise büyük ölçüde alt soğumaya bağlıdır. Düzlemlilik fazın farklı kristal büyüme özelliği, anizotropik karakteri, diğer faz ile eş-zamanlı büyümemesi, anormal ötektiklerin çok farklı yapılara sahip olmasına neden olur (Elliot, 1977).



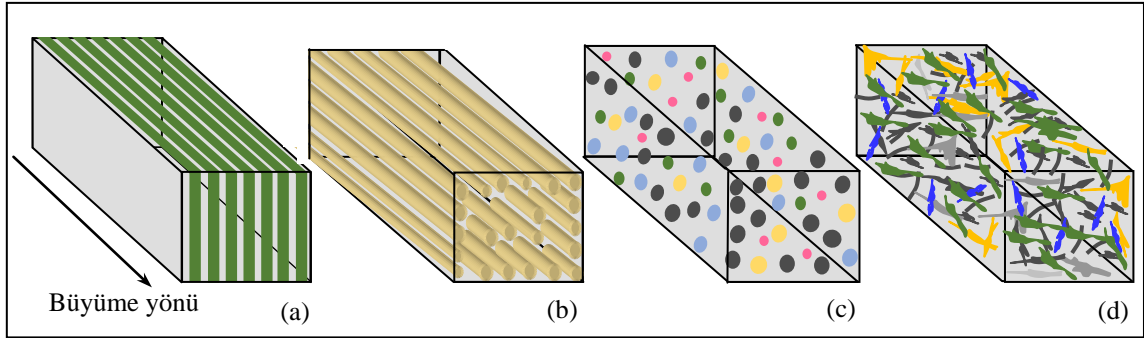
Şekil 2.11. Doğrusal katılaştırılmış ötektik alaşımlara ait farklı yapılar

- a) Düzlemsiz/Düzlemsiz (Nf/Nf), düzlemsel arayüzey,
- b) Düzlemsiz/Düzlemsiz (Nf/Nf), eğrisel arayüzey,
- c) Düzlemsiz/Düzlemlı (Nf/F), düzlemsel arayüzey,
- d) Düzlemsiz/Düzlemlı (Nf/F), eğrisel arayüzey,
- e) Düzlemlı/Düzlemlı (F/F), düzlemsel arayüzey,
- f) Düzlemlı/Düzlemlı (F/F), eğrisel arayüzey.

Eğer düzlemlili-düzlemsiz ötektik bir sistemde, düzlemlili fazın hacim oranı V_F , düzlemsiz fazın hacim oranı V_{NF} 'den küçük ise kesikli lamelsel (broken lamellar) yapılar oluşur. Bu oluşumun nedeni, düzlemlili olmayan fazın, düzlemlili olan fazın büyümesini nispeten veya tamamen engellemesinden kaynaklanır. Düzlemlili fazın hacim oranı biraz daha artırılırsa düzlemlili olmayan faz, düzlemlili fazı büyüme esnasında sık sık kuşatır ve sıvı ile temasını kısmen keser. Bu engellemeyi aşmak için düzlemlili faz dallanmalar ve farklı yönelimler gösterir. Eğer V_F artırılırsa, düzlemlili faz atomları katı-sıvı arayüzeyinde birikim gösterir. Bu arayüzey birikimi, yapısal alt soğumaya sebep olur ve karmaşık düzenli yapı meydana gelir. V_F , ana faz oluşturacak kadar çoksa mikroyapı düzlemlili olmayan fazın yarı düzenli dağılımından oluşur. Katılaştırma hızı ve sıvı sıcaklık gradyenti bu oluşumda önemli rol oynar. Yüksek G/V şartlarında katılaştırma, düzlemlili fazın çevrenmesini önler ve izotermal katı-sıvı arayüzeyi oluşur. Eğer arayüzey büyüme hızı (V) artarsa (düşük G/V şartında) izotermal arayüzey bozulur, bu ise düzlemsel fazın diğer faz tarafından çevrenmesine ve düzensiz yapı oluşumuna yol açar (Elliot, 1977). Anormal ötektik mikroyapılar kendi içerisinde altıya ayrılır (Croker vd., 1971; Croker vd., 1975). Bunlar;

- a) Fleyk Yapı (Flake): Uzun mesafeler boyunca düzenli olmayan, dallanmış veya dallanmamış levhasallardan oluşan kuru yaprak veya 'mısır gevreği' şeklindeki kristallerden oluşan mikroyapılardır.
- b) Kesikli Lamelsel Yapı (Broken Lamellar): Kesikli levhaların oluşturduğu düzenli sayılabilecek mikroyapılardır.
- c) Lifli Yapı (Fibrous): Uzun mesafeler boyunca düzensiz olarak uzanan ve birbiri ile bağlantılı çok ince fiberlerden oluşan mikroyapılardır.
- d) Karmaşık Düzenli Yapı (Complex Regular): Çok küçük bir hacim içerisinde ve genellikle spiral biçimli birbirine paralel düzenli levhalardan oluşan mikroyapılardır.
- e) Çin Yazısı Yapı (Chinese Script): Birbirinden ayrı, küçük ve ince bir şekilde dallanmış mikrodüzlemlili levhalardan oluşan mikroyapılardır.
- f) Yarı Düzenli Yapı (Quasi Regular): Erime entropisi yüksek bir ana faz içindeki düzlemsiz fazın levha veya fiber şeklindeki kristallerinden oluşmuş mikroyapılardır. Bu yapı, üçüncü bileşen ilavesi ile veya özel katılaştırma şartlarında elde edilebilir.

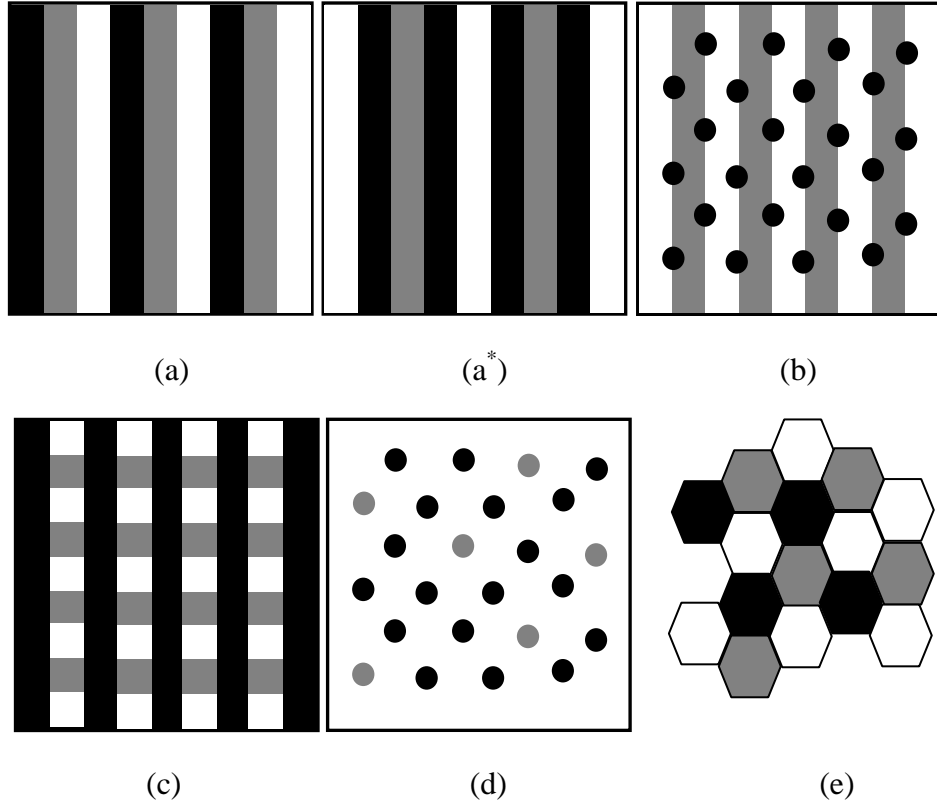
Her ne kadar yorum ve tanımlarda bazı farklılıklar olsa da araştırmacılar tarafından ortak olarak benimsenen ötektik yapılar Şekil 2.12’de Şematik olarak gsterildiği gibidir (Haasen, 1974).



Şekil 2.12. Farklı ötektik yapıların Şematik gsterimi
(a) Lamelsel ötektik (Pb-Sn), (b) Çubuksal ötektik (Cu-Cr),
(c) Küresel ötektik (Cu-CrO), (d) Karmaşık Düzenli ötektik (Al-Si).

2.2.3. Üçlü ötektikler

Üçlü ötektik alaşımların sınıflandırılması ikili ötektik alaşımlara göre oldukça zor ve karmaşıktır. Üçlü ötektik alaşımların bileşen sayısının ikili sistemlere göre daha fazla olması katılaştırma neticesinden sayıca fazla yapıların oluşmasına neden olmaktadır. Üçlü ötektik alaşımların sınıflandırılması üzerine son yıllarda Ruggerio ve Rutter (1977), bir yaklaşım geliştirmişlerdir. Bu yaklaşımda üçlü ötektikler için mümkün durumları kabaca lamelsel ve lifli fazların farklı oluşumları Şeklinde tanımlamışlardır. Ruggerio ve Rutter tarafından üçlü alaşımlar için oluşturulan sınıflandırma türleri Şekil 2.13’te verilmektedir. Bu ötektik Şekillenim türleri üçlü alaşımı meydana getiren tüm bileşenlerin arayüzey enerjilerinin eşit olduğu kabul edilerek oluşturulmuştur. Ayrıca araştırmacılar ikili sistemlere benzer olarak, üçlü ötektik alaşımlarda da ötektik yapıyı oluşturan her bir fazın arayüzey enerjisinin eşit ve hacimsel kesirlerinin küçük olması durumunda çubuksal ötektik yapı oluşacağını ifade etmişlerdir.



Şekil 2.13. Doğrusal katılaştırılmış üçlü ötektiklerin sınıflandırılması (Ding vd., 1997)
 (a-a*) Üçlü lamelsel büyüme, (b) Bir lifli, iki lamelsel büyüme,
 (c) İki lifli, bir lamelsel büyüme, (d) Bir ana faz, iki lifli büyüme,
 (e) Üçlü lifli büyüme

2.3. Sertlik

Malzemelerin sertliğinin ölçülmesi endüstride büyük bir öneme sahiptir. Sertlik, dayanım ve aşınma direncine bağlı olan bir özelliktir. Bir malzemenin yüzeyine batırılan bir cisme, malzemenin gösterdiği dirence o malzemenin sertliği denir.

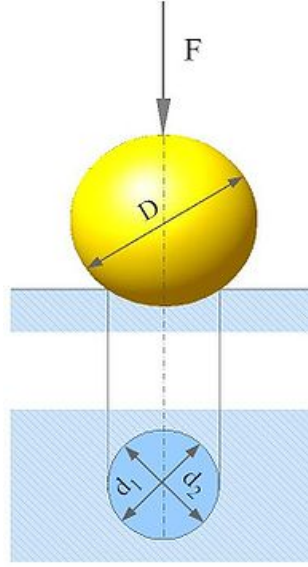
Bir malzeme ne kadar sert ise dayanımı o kadar yüksek ve aşınma direnci de o kadar fazladır. Makine elemanlarında kullanılan malzemelerin ömrü, sertlikleriyle yakından ilişkilidir. Ayrıca, sert malzemelerin içyapıları düzensiz ve stresli olduğundan, elektriksel iletkenlikleri de oldukça düşüktür. Bu nedenle malzemelerin sertlikleri ile elektriksel iletkenlikleri arasında yakın bir ilişki vardır. Günümüzde yaygın olarak kullanılan dört çeşit sertlik ölçme yöntemi vardır. Bunlar,

- a) Brinell sertlik ölçme yöntemi,
- b) Rockwell sertlik ölçme yöntemi,
- c) Knoop sertlik ölçme yöntemi,

d) Vickers sertlik ölçme yöntemidir.

2.3.1. Brinell sertlik ölçme yöntemi

Bu yöntemde batıcı uç olarak sertleştirilmiş çelik küre veya tungsten karbür kullanılmaktadır. Kullanılacak kürenin çapı numune kalınlığına ve malzemenin şekline göre seçilir. Yükün uygulanma süresi 10-15 saniyedir. Sertliği ölçülecek numune üzerine batırılan çelik küre, hacmi nedeniyle numune üzerinde küresel bir iz bırakır. Şekil 2.14'te Brinell sertlik ölçüm metodunun şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 2.14. Brinell sertlik ölçüm metodunun şematik gösterimi

Numune üzerindeki izin alanı hesaplanarak, Brinell sertlik (H_B) değeri (2.5) ve (2.6) bağıntıları ile bulunur (Weissbach, 1993).

$$H_B = \frac{\text{Uygulanan yük (kgf)}}{\text{İz yüzeyi (mm}^2\text{)}} \quad (2.5)$$

$$H_B = \frac{2F}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (\text{kgf} / \text{mm}^2) \quad (2.6)$$

Burada F ; numuneye uygulanan yük, D ; baskı küresinin çapı, d ; numune üzerinde oluşan izin çapıdır.

2.3.2. Rockwell sertlik ölçme yöntemi

Rockwell sertlik ölçme yönteminde, standart cihaz ve yüzeysel cihaz olmak üzere iki tip sertlik ölçme cihazı kullanılmaktadır. Standart cihazda, 60, 100, 150 kg'lık kütleler kullanılır. Batıcı uç olarak, sert malzemeler için uç kısmında tepe açısı 120° olan, 0.2 mm çapında yuvarlaklaştırılmış elmas koni kullanılırken, yumuşak malzemeler içinde 1/16" (~1.59 mm) çapında sertleştirilmiş çelik bilye kullanılmaktadır. Yüzeysel cihazlar çok ince ve yumuşak malzemeler için kullanılmakla beraber, sertlik ölçümünde 15, 30, 45 g'lık kütleler kullanılır. Uç olarak standart cihazlarda kullanılan çelik bilyeler ve elmas koni yüzeysel cihazlarda da kullanılmaktadır. Rockwell yönteminde sertlik, numuneye batan ucun meydana getirdiği derinlik esas alınarak bulunmaktadır.

Sertlik ölçme cihazının hassasiyeti kontrol edildikten sonra sertliğini ölçmek istediğimiz malzemeye uygun ağırlık ve uç seçilir. Uç, malzemeye önce 10 kg'lık bir kütle ile yük uygular. Ön yükleme aracılığıyla malzemeye temas sağlanır. Böylelikle sertlik ölçümünde ön yükleme ile bir başlangıç noktası tespit edilmiş olur. 10 kg'lık yüklemenden sonra cihazın ibresi sıfıra ayarlanarak kalan ağırlıklar yüklenir. Bu durumda ucun, numuneye batması beklenir. Bir süre sonra son yüklenen ağırlık kaldırılarak sertlik değeri göstergeden okunur. Sertlik ölçümünde uç, numuneye ne kadar derin batarsa numune o kadar yumuşak demektir (Colling, 1995; Weissbach, 1993).

2.3.3. Knoop sertlik ölçme yöntemi

Sertlik ölçme yöntemlerinden bir diğeri olan Knoop sertlik ölçme yöntemi, özellikle çok ince ve kırılğan malzemelerin mikrosertlik değerlerinin ölçülmesinde kullanılır. Bu yöntemde amaç, sertliği ölçülecek numune üzerinde sadece küçük bir iz bırakılmasıdır. Piramit şeklindeki elmas bir uç, belirli bir kuvvet ve süre kadar uygulanır. Sonuçta numune üzerinde ancak mikroskopla okunabilecek bir iz oluşur. Knoop sertliği H_K veya KHN ile gösterilir ve aşağıdaki formülle ifade edilir;

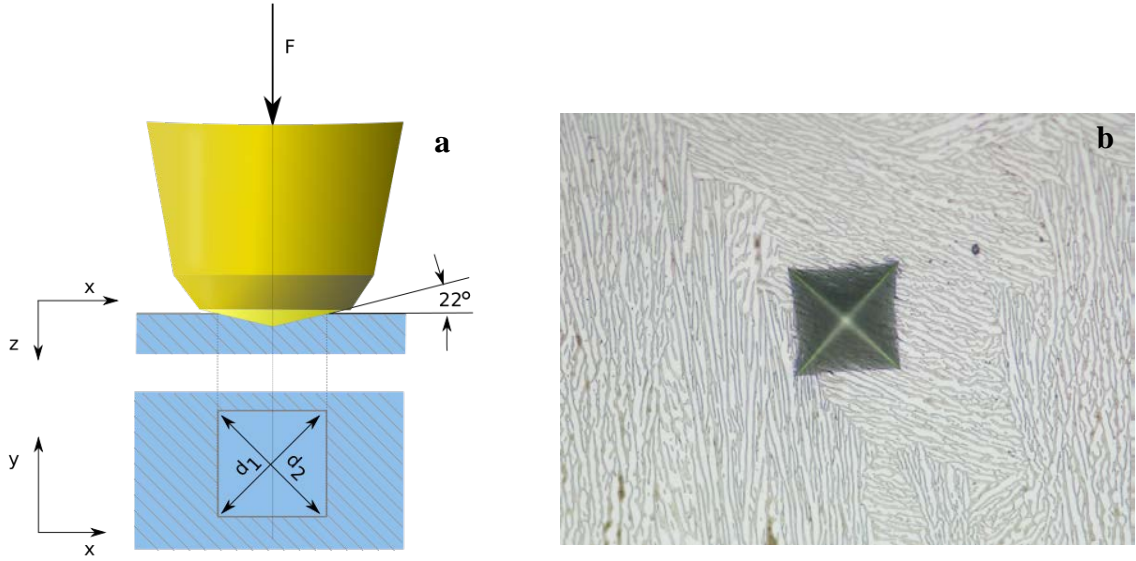
$$H_K = \frac{\text{Uygulanan Yük}}{\text{İz Alanı}} = \frac{P}{C_p L^2} \text{ (kgf / mm}^2\text{)} \quad (2.7)$$

Burada L ; numune üzerindeki izin eksensel uzunluğu, C_p ; düzeltme faktörü (izin şekline bağlıdır ve genellikle 0.070279 değeri kullanılır) ve P ; uygulanan yük miktarıdır.

H_K genellikle 100'den 1000'e kadar değişen sertlik değerlerini alır. Bu metotla çok küçük boyutlu malzemelerin bile mikrosertlik değerleri ölçülebilmektedir. Ancak numune üzerinde oluşturulan izin boyutunun ölçülmesi sırasında mikroskobun kullanımındaki zorluklar, numuneyi hazırlama ve iz uygulama işlemlerinin zaman alması bu yöntemin dezavantajlarıdır (Knoop vd., 1939).

2.3.4. Vickers sertlik ölçme yöntemi

Vickers sertlik ölçümünde kullanılan uç, yüzeyleri arasında 136° açı bulunan bir elmas piramittir. Darbelere karşı daha hassas olduğundan en sert malzemeler bile bu metotla ölçülebilir. Uygulanan yük 10 g ile 1000 g arasında değişmektedir. Uç, numuneye belli bir kuvveti 5-30 saniye kadar uygulayarak, numune üzerinde kare şeklinde iz oluşturur. İzin köşegen boyutları (d), cihaz mikroskobundan okunarak belirlenir. Şekil 2.15'de Vickers sertlik ölçüm metodunun şematik gösterimi ve batıcı ucun numune yüzeyinde bıraktığı izin fotoğrafı verilmiştir.



Şekil 2.15. (a) Vickers sertlik ölçüm metodunun şematik gösterimi, (b) Batıcı ucun numune yüzeyinde bıraktığı izin fotoğrafı

Vickers sertliği (HV), Brinell sertliğine benzer şekilde, uygulanan kuvvetin iz alanına bölünmesi ile belirlenir.

$$HV = \frac{2F \sin(\theta/2)}{g \cdot d^2} \text{ (kgf/mm}^2\text{)} \quad (2.8)$$

Burada, F ; uygulanan yük, g ; yer çekim ivmesi, d ($d^2 = d_1 \cdot d_2$); izin alanıdır. Vickers sertliği ile çok ince bölge veya tabakaların bile sertliği hassas bir şekilde

ölçülebildiğinden, bu metotla ölçülen sertlik değerleri, mikrosertlik olarak da bilinir (Askeland, 1990; Colling, 1995; Weissbach, 1993).

2.3.5. Mikroyapı parametresi, katılaştırma hızı ve sertlik değerleri arasındaki ilişki

Hall (1951) ve Petch (1953) tarafından yapılan tane büyüklüğü ile mikrosertlik ve çekme-dayanım değerleri arasında ilişki kuran birbirinden bağımsız fakat aynı sonuca ulaşılmış çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmalarda (2.9) ve (2ç10) şeklinde bağıntılar elde edilmiştir.

$$HV = H_o + \frac{k}{\sqrt{d}} \quad (2.9)$$

$$\sigma_U = \sigma_o + \frac{k}{\sqrt{d}} \quad (2.10)$$

Burada d (mm); taneler arası mesafe, k ; bileşime bağlı sabit, H_o (kg/mm²); malzemenin ilk sertlik değeri ve HV (kg/mm²); işlem gördükten sonra malzemenin sertlik değeri, σ_o (N/mm²); malzemenin ilk çekme-dayanım değeri ve σ_U (N/mm²); işlem gördükten sonra malzemenin çekme-dayanım değeridir.

Bazı araştırmacılar (Fan vd., 2010; L.Silva vd., 2012; Khan vd., 1993; Liu vd., 1998; Fan vd., 2010) ötektik sistemler üzerinde çalışmalar yapmışlardır. Bu araştırmacılar Hall (1951) ve Petch (1953) tarafından elde edilen bu bağıntılardan faydalanarak, d taneler arası mesafe yerine mikroyapı parametresi olan ötektik mesafeleri (λ_E) kullanarak malzemenin sertlik değerini (HV) incelemişlerdir. Ayrıca Hall (1951) ve Petch (1953) tarafından elde edilen bu bağıntılar yardımıyla katılaştırma hızının etkisini gözlemleyebilmek için Jackson-Hunt (1965) modeli olarak bilinen $\lambda_E^2 V = Sabit$ bağıntısından katılaştırma hızını çekip ötektik mesafe (λ_E) değeri yerine koyarak aşağıdaki bağıntıları elde etmişlerdir.

$$HV = H_o + k V^{0.25} \quad (2.11)$$

$$HV = H_o + k \lambda_E^{-0.50} \quad (2.12)$$

Burada λ (mm); lameller arası mesafe, V (mm/s); katılma hızı, k ; bileşime bağlı sabit, H_o (kg/mm²); malzemenin ilk sertlik değeri ve HV (kg/mm²); kontrollü olarak katılaştırılan malzemenin sertlik değeridir. Böylece ötektik sistemler üzerine yapılan

çalışmalarda mikrosertlik değerlerinin hem ötektik mesafelere bağlı olarak hem de katılaştırma hızına bağlı olarak nasıl değiştiğini inceleyebilmişlerdir.

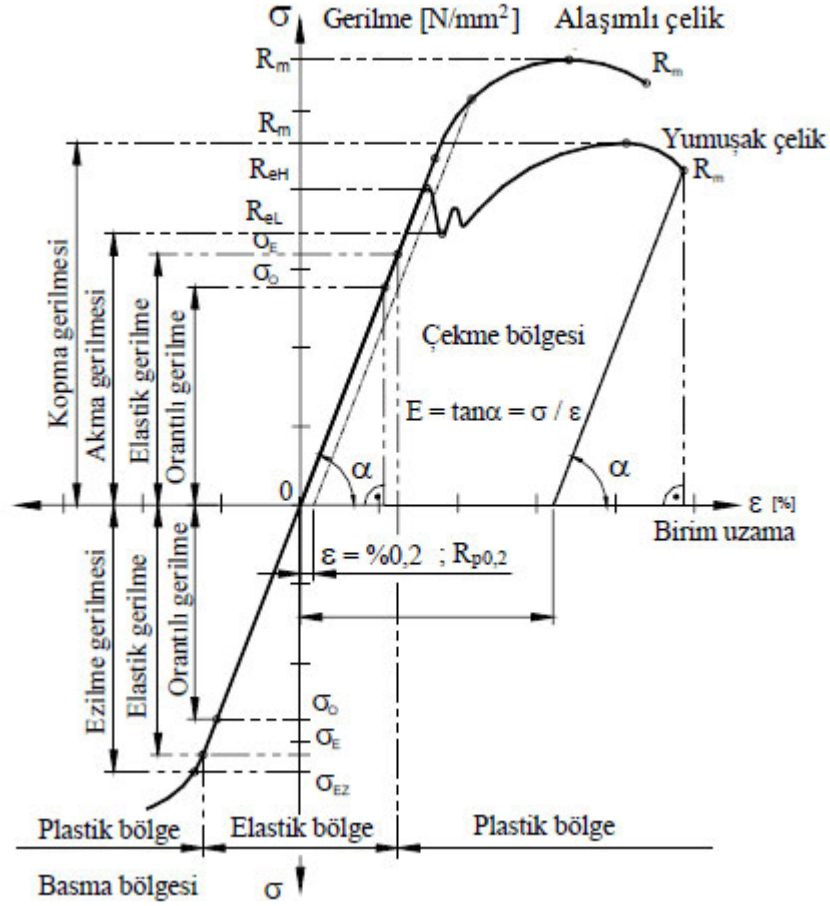
2.4. Çekme-Dayanım

Dinamometre veya çekme-dayanım test cihazı olarak isimlendirilen alet vasıtasıyla malzemelerin mukavemet özellikleri elde edilir. Çekme-dayanım, malzemeye iki ucundan çekme kuvveti uygulanması sonucu kopmadan önceki malzemenin ulaştığı maksimum gerilmeye denir. Bu gerilme malzemenin iç kuvvetlerinin büyüklüğü ile dış kuvvetlerin denge halinde olduğu durumda elde edilir.



Şekil 2.16. Çekme-dayanım test cihazı

Malzeme artan dış zorlanmalar altında şekil değiştirir, sonra dayanımını yitirerek kopar. Şekil 2.16'da görüldüğü gibi malzemenin dinamometreyle çekilmesinden sonra elde edilen grafik vasıtasıyla çekme-dayanım değeri belirlenir. Gerilme kuvvetiyle doğru orantılı olduğundan diyagramda genel tanımlamaların yapılabilmesi için kuvvet yerine gerilme ifadesi kullanılır. Malzemede oluşan bütün değişikliklerin kendine özgü deyimleri vardır ve bunların bazıları şu şekilde sıralanır:



Şekil 2.17. Çekme-uzama diyagramı

Kopma mukavemeti: Devamlı ve lineer fazlalaşan gerilme sonucu malzemenin koştuğu gerilme büyüklüğüne “kopma mukavemeti” adı verilir ve R_m ile gösterilir.

Akma mukavemeti: Kuvvetin sabit kalmasına rağmen kalıcı deformasyonun başladığı gerilmenin değeri “akma mukavemeti” adı verilir ve σ_{AK} veya τ_{AK} ile gösterilir.

% 0,2 Uzama mukavemeti: Kuvvetin sabit kalmasına rağmen kalıcı deformasyonun %0,2 olduğu gerilmenin değeri “%0,2 uzama mukavemeti” adı verilir ve $R_{p0,2}$ ile gösterilir.

Orantılı mukavemet: Devamlı ve lineer olarak fazlalaşan gerilme ile uzamanın birbirine oranının sabit kaldığı gerilme büyüklüğüne “orantılı mukavemet” adı verilir ve σ_0 veya τ_0 ile gösterilir.

Elastiklik modülü: Elastiklik modülü, orantılı mukavemette, gerilmenin uzamaya oranıdır.

Çekme-dayanımı σ_U ,

$$\sigma_U = \frac{F}{A} \quad (2.13)$$

eşitliği ile hesaplanır ve birimi N/mm² veya MPa'dır. Burada, F çekme kuvveti, A ise malzemenin deformasyona uğramadan önceki kesit alanıdır. Deformasyon (uzama) miktarı ε , aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır.

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L - L_0}{L} \quad (2.14)$$

Burada, ΔL anlık alınan deformasyon miktarı, L_0 ise başlangıç uzunluğudur. Bir malzemenin çekme-dayanımı ne kadar yüksek ise o malzeme çekilirken o kadar az süner veya şekil değiştirir. Çekme-dayanım deneyi genellikle yuvarlak veya dikdörtgen kesitli çubuklar üzerinde yapılır.

2.4.1. Mikroyapı parametresi, katılaştırma hızı ve çekme-dayanım değerleri arasındaki ilişki

Bazı araştırmacılar (Golart vd., 2010; Cante vd., 2010; Garcia vd., 2010) sertlik üzerine yapılan araştırmaların bir benzeri şeklinde ötektik sistemler üzerinde çalışmalar yapmışlardır. Bu araştırmacılar, Hall (1951) ve Petch (1953) tarafından elde edilen denklem 2.11'den faydalanarak d taneler arası mesafe yerine mikroyapı parametresi olan ötektik mesafeleri (λ_E) kullanarak malzemenin çekme-dayanım değerini (σ_U) incelemişlerdir. Ayrıca Hall (1951) ve Petch (1953) tarafından elde edilen bu bağıntılar yardımıyla katılaştırma hızının etkisini gözleyebilmek için Jackson ve Hunt (1966) modeli olarak bilinen $\lambda_E^2 V = \text{Sabit}$ bağıntısından katılaştırma hızını çekip ötektik mesafe (λ_E) değeri yerine koyarak aşağıdaki bağıntıları elde etmişlerdir.

$$\sigma_U = \sigma_o + k V^{0.25} \quad (2.15)$$

$$\sigma_U = \sigma_o + k \lambda_E^{-0.50} \quad (2.16)$$

Bu ifadelerde λ_E (mm); lameller arası mesafe, V (mm/s); katılma hızı, k ; bileşime bağlı sabit, σ_o (N/mm²); malzemenin ilk çekme-dayanım değeri ve σ_U (N/mm²); kontrollü olarak katılaştırılan malzemenin çekme-dayanım değeridir.

2.5. Elektriksel Özellikler

Serbest elektrik yüklerinin herhangi bir etki ile bir veya iki yöndeki hareketi elektriksel iletkenlik olarak tanımlanır. Elektriksel iletkenlik hareketli taneciklere göre sınıflandırılır. Bu sınıflandırmada hareketli tanecikler elektronlar ise elektronik iletkenlik, iyonlar ise iyonik iletkenlik, her iki tanecik türünün de hareketli olduğu iletkenlik türü ise karma iletkenlik olarak tanımlanmaktadır.

2.5.1. Elektriksel özdirenç ve ölçüm yöntemleri

İletkenlik genel olarak üçe ayrılır ve Çizelge 2.1’de verilen şekilde gruplandırılır. Bir malzemenin elektrik iletimi iyonik ya da elektronik mekanizmalardan biri ile olur (Kane ve Larrabee, 1970). İyonik ve elektronik iletkenliğe sahip malzemelerin iletkenlik aralıkları Çizelge 2.2’de verilmiştir. Yarıiletkenlik, süperiletkenlik ve metalik iletkenliği içine alan elektronik iletkenliğin dışında diğer bir iletkenlik türü iyonların hareketine bağlı olan iyonik iletkenliktir. İyonik iletkenlik özellikle O^{-2} , N^{-3} , Cl^{-} , B^{-2} gibi anyonlar veya H^{+} , Na^{+} , Li^{+} gibi katyonların hareketleri ile görülür (Kane ve Larrabee, 1970).

Çizelge 2.1. Elektriksel iletkenliğin sınıflandırılması

Elektriksel İletkenlik		
Elektronik İletkenlik	İyonik İletkenlik	Karma İletkenlik
Metalik İletkenlik (<i>Au, Cu gibi</i>)	Katı Elektrolitler (<i>Zirkonyum tabanlı katı elektrolit gibi</i>)	(<i>δ-Bi_2O_3 Fazı</i>)
Yarıiletkenlik (<i>Si, Ge, Polimer gibi</i>)	Süper İyonik İletkenlik (<i>SrF_2</i>)	
Süper İletkenlik (<i>Hg, Al, MgB_2 gibi</i>)	Hızlı İyon İletkenliği (<i>$Tl_3Cu_2Cl_5$</i>)	

İyonların kristal örgüde hareket etmeleri ile gerçekleşen iletkenliğe iyonik iletkenlik, bu tür iletkenliğe sahip katılarda ise katı elektrolit denir. Yalnızca yüksek sıcaklıkta atomların termal enerjilerinin yüksek olduğu ve örgü kusuru konsantrasyonunun çok yüksek sayılara ulaştığı yerlerde bu tür iletkenlik fark edilebilir. NaCl, MgO gibi çoğu kristal malzemeler düşük iyonik iletkenliğe sahiptir. Çünkü atomlar termal titreşimlerine rağmen örgü noktalarından ayrılamazlar. Bunun tersi olarak, çoğu katı elektrolit malzemeler yüksek iyonik iletkenliğinden dolayı hızlı iyonik elektrolit ya da süper iyonik elektrolit olarak sınıflandırılırlar.

Sıfır Kelvin sıcaklıkta sistemin serbest enerjisi potansiyel enerji tarafından baskılanır. Sıcaklık artırıldıkça sistemin düzensizliğinin derecesi olan entropinin artmasından dolayı sistemin serbest enerji dağılımı oldukça belirginleşir. Çizelge 2.3'te alışımlarda sıkça kullanılan bazı metalik malzemelerin oda sıcaklığında elektriksel iletkenlik değerleri azalan sıralanışa göre verilmiştir.

Sistem, artan serbest enerjiyi en aza indirmek ve kararlılığını artırmak için en düşük düzeyde örgü boşluklarına sahip olmalıdır. Bu durum hareketli taneciklerin, sürekli örgü kusurlarından geçişi ile gerçekleştirilir (Kumar ve Yashonath, 2006). Taneciklerin bu hareketi bir elektrik alan ile yönlendirilerek iletkenlik meydana getirilir. Katı haldeki malzemenin iletkenliği, yük taşıyıcıların konsantrasyonu, kristalin sıcaklığı, iyonun örgü içinde hareket edebilirliği, kristal içindeki kusurun miktarı gibi özelliklerden etkilenir. Örgüde boşluk kusurları normalde iki yöntemle meydana getirilir. Bunlardan biri kristalin ısıtılması ile oluşan örgü kusuru, diğeri ise safsızlık katkılanmasıyla elde edilen örgü kusurudur. Sıcaklık ve safsızlık iyonik iletkenliği büyük oranda etkiler. Safsızlık katkılanmış bileşiklerde yüksek sıcaklıkta bu iki etki de iletkenlikte rol oynar. Düşük sıcaklıklarda, elektriksel iletkenlik oldukça azdır. Bu durumda safsızlık etkisi ile meydana gelen kusurlar daha baskındır. Ancak yüksek sıcaklıklara çıktıkça sıcaklık etkisiyle oluşan kusurlar artacağından, katı karışık tip örgü kusuru içermeye başlar. Bu durumda gözlenen iletkenlik türü karışık tip iletkenliktir.

Elektriksel iletkenlik ve özdirenç diğeri bir deyişle dirençlilik bir malzemenin karakteristik özelliğidir. Bir numunenin elektriksel iletkenliğinin belirlenebilmesi için ölçülen voltaj ve akım şiddeti, hesaplanan özdirenç değeri ile numunenin geometrik yapısı arasındaki ilişki kullanılır. Bu nedenle özdirenç hesaplanmasında kullanılan Ohm Kanunu (2.17) eşitliğine, geometrik yapıya bağlı olan bir düzeltme katsayısı (resistivity correction factor) değeri ilave edilerek özdirenç hesaplanır.

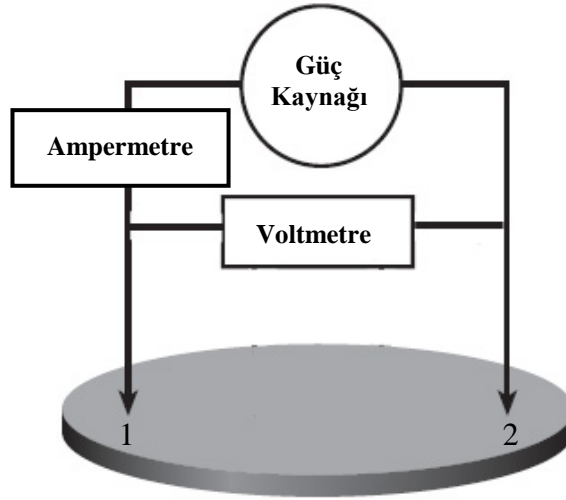
$$\frac{V}{I} = R \quad (2.17)$$

Bu düzeltme katsayısı numunenin kalınlığına ve geometrik yapısına, yüzey büyüklüğüne, numune kenar sınırlarının yapısına, kontakların numune üzerinde bulunduğu konuma ve kontakların düzenine bağlı olarak değişir (Caignan ve Holt, 2002).

Çizelge 2.2. Malzemelerin elektriksel iletkenlik değer aralıkları

	Malzeme	İletkenlik ($\Omega \text{ cm}$) ⁻¹
İyonik İletkenlikler	İyonik Kristaller	$<10^{-16} - 10^{-2}$
	Katı Elektrolitler	$10^{-1} - 10^3$
	Sıvı Elektrolitler	$10^{-1} - 10^3$
Elektronik İletkenlikler	Metaller	$10^3 - 10^7$
	Yarıiletkenler	$10^{-3} - 10^4$
	Yalıtkanlar	$<10^{-10}$

Malzemelerin özdirençlerinin belirlenebilmesi için numune içinde elektrik alan oluşturacak bir akım kaynağına, bu elektrik alan nedeniyle numune içinde meydana gelen I elektrik akımının şiddeti ve keyfi seçilen herhangi iki nokta arasında meydana gelen V potansiyel düşmesinin belirlenmesine ihtiyaç vardır. Bir maddenin elektriksel özdirenci, maddenin üzerinden geçen I akımı ve bunun meydana getirdiği V geriliminin oranı ile bulunur.



Şekil 2.18. İki nokta (d.c.) elektriksel iletkenlik ölçüm tekniği

Çizelge 2.3. Alaşımlarda kullanılan bazı malzemelerin oda sıcaklığındaki elektriksel iletkenlik değerleri

Malzeme	Sembolü	Elektriksel İletkenlik ($\times 10^7 (\Omega \text{ m})^{-1}$)
Gümüş	Ag	6.3
Bakır	Cu	5.96
Altın	Au	4.52
Alüminyum	Al	3.77
Magnezyum	Mg	2.26
Tungsten	W	1.89
Molibdenyum	Mo	1.87
Kobalt	Co	1.72
Çinko	Zn	1.66
Nikel	Ni	1.43
İndiyum	In	1.16
Lityum	Li	1.08
Demir	Fe	0.993
Platin	Pt	0.966
Kalay	Sn	0.917
Krom	Cr	0.774
Kurşun	Pb	0.481
Uranyum	U	0.38
Antimon	Sb	0.288
Titanyum	Ti	0.234
Neodyum	Nd	0.157
Cıva	Hg	0.104
Bizmut	Bi	0.0867
Plutonyum	Pu	0.0666
Karbon	C	0.0061
Germanyum	Ge	1.45×10^{-7}
Silikon	Si	2.52×10^{-11}
Selenyum	Se	1.0×10^{-11}
Bor	B	1.0×10^{-11}

İki iletken kontak tel ile yapılan elektriksel iletkenlik ölçüm yöntemine iki nokta (d.c.) elektriksel iletkenlik ölçümü denir (Şekil 2.18). Burada direncin belirlenebilmesi için V ve I değerinin doğrudan ölçülmesi yeterlidir. Bu yöntemle yapılan direnç belirleme ölçümünde elde edilen R değeri ileride de belirteceğimiz şartlara bağlı olarak kontakların direncini de içerir. Bu durumda elde edeceğimiz R direnci ve buna bağlı elde edilen ρ elektriksel öz direnç değeri sadece numuneye ait olmayacaktır.

Direncin elde edilmesi numunenin öz direncinin belirlenmesini sağlar. Homojen bir numunenin elektriksel öz direnci belirlenmek istendiğinde malzemenin geometrik özelliklerinin de bilinmesi gereklidir. Elektriksel öz direnç ifadesi aşağıdaki şekilde verilebilir (Yamashita, 1987).

$$\rho = \frac{V}{I} G \quad (2.18)$$

(2.18) ifadesinde G ; numunenin yüzey geometrik sınırlarını ve kalınlığını, elektriksel kontakların numune üzerindeki konumlarını, kontakların diziliş düzenlerini içeren bir katsayıdır ve “Geometrik Düzeltme Katsayısı” (Resistivity Correction Factor, RCF) olarak tanımlanır (Smits, 1958).

İki nokta (d.c.) elektriksel ölçüm yöntemi ile elde edilen R_{toplam} direnç değeri numunenin direncinin dışında başka ek dirençleri de içerir. Bu ek dirençler iletken telin (R_{tel}), numuneye akımı aktaran iğne uçların (prob, pin) (R_{prob}), gerekirse problemleri numuneye tutturarak iletken lehimin (R_{pasta}), kontak ucu ve numune temas ara yüzeyinin dirençlerinin (R_{kontak}) toplamıdır. Bu nedenle numunenin hesaplanan ρ öz direnci olması gerekenden daha yüksektir.

Numuneye kontak olarak kullanılan iletken teller genel olarak iki parçalıdır ve bu da iki farklı dirençli kontak kullanmak demektir. Bu kontakların bir kısmı, ölçüm cihazlarına bağlı olan iletken tel kablolar ve diğer kısmı da bu kabloların numuneye temas eden uç kısımları olan problemlerdir. Problemler genelde ihtiyaca uygun farklı metallere yapılır. Bunun nedeni numunenin cinsine göre numuneye sert ve sağlam temasın sağlanmasıdır.

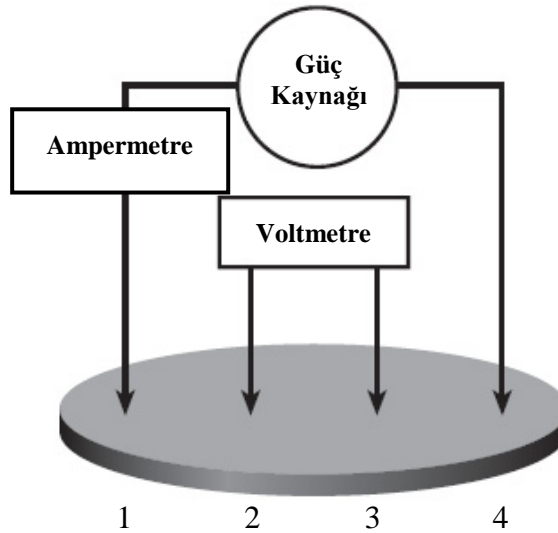
Bu gibi durumlardan dolayı sadece numunenin direncini belirleyen bir direnç ölçme tekniği daha uygun olacaktır. Bu durum özellikle kontak direnci numune direncine oranla yüksek olan iyi iletkenlerin ve yarıiletkenlerin öz direncinin belirlenmesinde ortaya çıkar.

Elektriksel iletkenliğin ölçümünde kullanılan diğer bir yöntem olan dört nokta (d.c.) elektriksel iletkenlik ölçme tekniğinde, kullanılan kontakların dirençleri ölçümde hesaba girmez ve hesaplanan değer sadece numunenin öz direncidir. Bu amaçla kurulan düzenekte kontaklardan ikisi numune üzerinden akan akımı ölçmek için, diğer ikisi ise herhangi iki nokta arasındaki potansiyel farkı ölçmek için kullanılır. Şekil 2.19’da görüldüğü gibi 1. ve 4. problemlerden akım, 2. ve 3. problemlerden ise potansiyel fark ayrı ayrı ölçüldüğü için iki nokta iletkenlik ölçüm tekniğindeki gibi kontak dirençleri, ölçüme

doğrudan dâhil olmaz. Yine bu sistemde de kontak direnci söz konusudur ama ölçümün sonucunu çok az etkileyeceğinden ihmal edilebilir.

Kontakların aynı doğrultuda dizilmeleri en avantajlı ölçüm şekli olacaktır. Bu durumda G faktörünün belirlenmesi ve hesabı daha kolaydır. Burada s ardışık kontaklar arası mesafedir. Bu şekildeki bir ölçüm düzeneğinde yukarıda yer alan ρ öz direnç denklemindeki G katsayısı numune geometrisine, kontakların numune üzerindeki konumuna ve kontaklar arası s mesafesine bağlıdır. Uygulamada genel olarak yapılan kontak dizilişi $s_{12} = s_{23} = s_{34} = s$ olan eşit aralıklı düzendir.

Bu ölçüm tekniğinde elektriksel öz direnç denklemi yukarıda verilenden farklı olmamakla beraber aşağıdaki şekildedir;



Şekil 2.19. Dört nokta (d.c.) elektriksel iletkenlik ölçüm tekniği

2.6. Termal Özellikler

Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (Differential scanning calorimetry, *DSC*) cihazı malzemelerin termo-fiziksel karakterizasyonunda kullanılmaktadır. Özellikle erime, kristallenme, faz geçişi, camsı geçiş gibi özellikler doğrudan ölçülmekte, entalpi (ΔH) ve öz ısı (C_p) ise elde edilen eğrilerden hesaplanmaktadır. Entalpi ve öz ısı sırasıyla denklem (2.19) ve (2.20) ile hesaplanmaktadır.

$$\Delta H = \text{Area (mJ)} / \text{Kütle (mg)} \quad (2.19)$$

Denklem (2.19)'dan görüldüğü gibi entalpi, birim kütlenin erimesi için gerekli enerjidir. Burada Area (alan) oluşan pikin sınırladığı alandır. Birimi mJ ve kütle ise mg

mertebesinde cihazın içine yerleştirilen örneğin kütlesidir. Öz ısı ise denklem (2.20) ile hesaplanır.

Üçlü alaşımlarının yaklaşık 10 mg'lık kütleli örnekleri DSC cihazına yerleştirilerek sistemin kararlı olması sağlanmaktadır. Daha sonra değişik ısı akış değerlerinde bu malzemeler ısıtma ve soğutma süreçlerine tabi tutulmaktadır. Isı akış hızı-sıcaklık, ısı akış hızı-zaman gibi eğriler elde edilip gerekli ekstrapolasyon ve hesaplamalar yapılarak her bir örnek için erime entalpisi ve öz ısı değerleri elde edilmektedir.

$$C_p = \frac{dQ}{dt} \frac{1}{m \beta_o} = \frac{dH}{dT} = \frac{\Delta H}{T_{peak}} \quad (2.20)$$

(2.20) ifadesinde, $\beta_o = \frac{dT}{dt} = 10$ K/dakika (ısıtma hızı), dQ/dt = heatflow (ısı akışı) (J/s veya watt), m = kütle (Değişik miktarlarda) ve Area = Üçgenin alanı = $0.5 \times \text{taban} \times \text{yükseklik} = 0.5 \times \text{zaman} \times \text{Güç}$ (Numunenin erimesi için gerekli enerji) olarak açıklanabilir (Liu vd., 1998). Bu termal analizde kullanılan Perkin Elmer Pyris Diamond DSC Şekil 2.20'de görülmektedir.



Şekil 2.20. Perkin Elmer Pyris Diamond model Diferansiyel Taramalı Kalorimetre

2.6.1. Entalpi ve öz ısı ölçüm yöntemleri

Açık sistemler ile çevreleri arasındaki enerji alışverişleri incelenirken (PV) çarpımının U iç enerjisinin yanında yer aldığı görülür. Bu nedenle U iç enerjisi ile (PV) çarpımının ayrı ayrı verilmesi yerine bunların ikisinin toplamına eşit olan (2.21a) büyüklüğünün verilmesi büyük kolaylık sağlamaktadır.

$$H = U + PV \quad (2.21a)$$

Bu büyüklüğe entalpi adı verilir. U , P ve V 'nin sisteme ait özellikler olması nedeniyle entalpi de sisteme ait bir özelliktir. Birim kütle için (2.21a) eşitliği (2.21b) şeklini alır.

$$h = u + Pv \quad (2.21b)$$

İç enerji için mutlak değer söz konusu olmadığına göre entalpi için de böyle bir değer söz konusu değildir. Verilmiş bir referans hali için entalpinin değeri belirlenir.

Sistemin iç enerjisini ve entalpisini doğrudan doğruya ölçme imkânı yoktur. Bu nedenle sistemin bu özellikleri ile doğrudan doğruya ölçülebilen basıncı, sıcaklığı ve özgül hacmi arasında bir bağıntının kurulmasına gerek vardır. Böyle bir bağıntının $u=u(T,v)$ şeklinde verildiğini varsayalım. Bu ifadenin diferansiyeli alınır (2.22) eşitliği elde edilir.

$$du = \left(\frac{\partial u}{\partial T} \right)_v dT + \left(\frac{\partial u}{\partial v} \right)_T dv \quad (2.22)$$

Hal değişimi süresince sistemin hacmi sabit kalıyorsa (2.22) eşitliği aşağıdaki şekli alır.

$$du = \left(\frac{\partial u}{\partial T} \right)_v dT$$

$$C_v = \left(\frac{\partial u}{\partial T} \right)_v = \frac{1}{m} \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_v \quad (2.23a)$$

Büyükliğüne sistemin sabit hacimdeki öz ısı adı verilir. Sistemin sabit hacimdeki molar öz ısı n molekül sayısını göstermek üzere (2.23b) eşitliği ile tanımlanır.

$$\bar{C}_v = \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial T} \right)_v = \frac{1}{n} \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_v \quad (2.23b)$$

Entalpi, basınç ve sıcaklık arasında $h=h(P,T)$ bağıntısının verilmiş olduğunu varsayalım. Bu ifadenin diferansiyeli alınır (2.24) ifadesi elde edilir.

$$dh = \left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_P dT + \left(\frac{\partial h}{\partial P} \right)_T dP \quad (2.24)$$

Hal değişimi süresince sistemin basıncı sabit kalıyorsa (2.24) denklemi aşağıdaki şekli alır.

$$dh = \left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_P dT$$

$$C_p = \left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_p = \frac{1}{m} \left(\frac{\partial H}{\partial T} \right)_p \quad (2.25a)$$

Büyükliğüne sistemin sabit basınçtaki öz ısısı adı verilir. Sistemin sabit basınçtaki molar öz ısısı n molekül sayısını göstermek üzere, (2.25b) eşitliği ile tanımlanır.

$$\overline{C_p} = \left(\frac{\partial \bar{h}}{\partial T} \right)_p = \frac{1}{n} \left(\frac{\partial H}{\partial T} \right)_p \quad (2.25b)$$

Öz ısının birimi (kJ/kgK) veya (kJ/kmolK) dir. Paydaya sıcaklık farkı olarak girdiğinden aynı birimler (kJ/kg°C) ve (kJ/kmol°C) şeklinde de yazılabilir (Büyüktür, 1989).

2.6.2. Termal iletkenlik ve ölçüm yöntemleri

Isı iletim katsayısı bilinen bir metal yardımı ile diğer bir metalin ısı iletim katsayısını ölçmek için, bu metallere yapılmış ve eşit kesit alanlı iki silindirik çubuk uç uca tam temas temin edilerek lehimlenir. Bu birleşik çubuk ısı kayıplarına karşı yalıtıldıktan sonra, bir ucu ısıtılır, diğer ucu soğutulur. Sürekli rejime gelmesi temin edilir. Bundan sonra her iki çubuk üzerinde ΔL_1 ve ΔL_2 uzunluklarında sıcaklık düşümleri termo elemanlar vasıtası ile ölçülür. Sürekli rejimde birim zamanda her iki çubuktaki ısı akımı aynı olacağından aşağıdaki biçimde yazılır.

$$Q = \lambda_1 A \frac{(\Delta T)_1}{\Delta L_1} = \lambda_2 A \frac{(\Delta T)_2}{\Delta L_2} \quad (2.26)$$

(2.26) ifadesindeki bilinmeyen ısı iletim katsayısı için (2.27) ifadesi elde edilir.

$$\lambda_2 = \lambda_1 \frac{(\Delta T)_1}{(\Delta T)_2} \frac{\Delta L_2}{\Delta L_1} \quad (2.27)$$

Yalnız sıcaklık ve uzunluk ölçmelerinden bilinmeyen ısı iletim katsayısı λ_2 hesaplanır. İletilen ısı miktarını ölçmeye gerek yoktur (Kakaç, 1998).

2.6.3. Wiedemann–Franz ve Smith–Palmer yöntemleri ile termal iletkenliklerin hesaplanması

Çok düşük olmayan sıcaklıklarda, ısı iletim katsayısının elektrik iletkenlik katsayısına oranının metal cinsinden bağımsız ve sıcaklıkla doğru orantılı olduğu söylenebilir. Bu sonuç metal tarihçesinde önemli bir aşama olmuştur. Bunu açıklamak üzere (2.28) bağıntısı kullanılabilir.

$$\frac{K}{\sigma} = \frac{\pi^2 k_{BTnr/3m}^2}{ne^2 \tau / m} = \frac{\pi^2}{3} \left(\frac{k_B}{e} \right)^2 T \quad (2.28)$$

Lorenz sayısı adı verilen bir sabit aşağıdaki şekilde tanımlanabilir.

$$L \equiv K / \sigma T \quad (2.29)$$

Denklem (2.28)'e göre Lorenz sayısının değeri aşağıdaki gibi olmalıdır.

$$L = \frac{\pi^2}{3} \left(\frac{k_B}{e} \right)^2 = 2.72 \times 10^{-13} \text{ esu} / \text{deg}^2 = 2.45 \times 10^{-8} \text{ W}\Omega / K^2 \quad (2.30)$$

Bu sonuç n elektron yoğunluğu veya m kütesinden bağımsızdır ve Wiedemann-Franz ifadesi olarak bilinir (Kittel, 1965).

Elektrik ve ısı iletkenliklerinin metallerdeki serbest elektronlara bağlı olduğu gerçeğinden yola çıkılarak, denklem (2.29) ifadesinin uyarlanmış bir hali Smith-Palmer ifadesi olarak bilinir ve (2.31) ifadesi olarak yazılabilir (Poirier ve Geiger, 1994).

$$K = 0.909L\sigma T + 10.5 \quad (2.31)$$

2.7. Ötektik Katılaştırma Üzerine Yapılan Deneysel Çalışmalar

Ötektik katılma olayını açıklayabilmek ve mikroyapı parametresi (λ_E) ile katılaştırma parametresi (V) arasındaki ilişkileri bulabilmek için, araştırmacılar tarafından teorik modeller geliştirilerek çok sayıda deneysel çalışma yapılmıştır. Bu kesimde bazı ikili ve üçlü ötektik alaşımlar üzerine yapılan katılaştırma çalışmaları, katılaştırma parametreleri ile mikroyapı parametresi, mikrosertlik, çekme-dayanım ve elektriksel öz direnç değerleri arasındaki ilişki ve bağıntılar verilmiştir.

2.7.1. $\lambda_E^2 V = \text{Sabit}$ tipindeki bağıntılar

Jackson ve Hunt (1966) modeli olarak bilinen $\lambda_E^2 V = \text{Sabit}$ bağıntısı var olan teorik modellerin en çok kullanılan bağıntısı olup lamelsel veya çubuk şeklinde büyüyen alaşımlarda kullanılır. Bu bağıntı birçok ikili ötektik alaşımın farklı metotlarla farklı hızlardaki kontrollü büyütmesi için test edilmiş ve büyük bir uyum tespit edilmiştir. Son yıllarda katılaştırma çalışmaları üç veya daha fazla bileşenli sistemler üzerine yoğunlaşmaya başlamış olup bu sistemler içinde Jackson ve Hunt (1966) modeli test edilmiştir. Bu bağıntı kullanılarak elde edilen sonuçlar Çizelge 2.4'te gösterilmektedir.

2.8. Dendritik Katılaştırma Üzerine Yapılan Deneysel Çalışmalar

2.8.1. $\lambda = kV^{-n}$ ve $\lambda = kG^{-m}$ tipindeki bağıntılar

Jackson ve Hunt (1966) modeli olarak bilinen $\lambda_E^2 V = Sabit$ bağıntısının bir başka gösterimi olarak tanımlanabilir. Bu ifadeler deneysel verilerin lineer regresyon analizi (EK 1) ile elde edilebilir. Burada k , korelasyon sabiti n ve m ise büyüme hızının üstel değerleridir. Jackson ve Hunt (1966) modeli $\lambda_E^2 V = Sabit$ bağıntısından da anlaşılacağı üzere n değerini teorik 0.50 tanımlamışlardır. Araştırmacılar sıcaklık gradyentinin katılaştırma hızına göre mikroyapı parametresi üzerindeki etkisinin daha küçük olduğunu belirtmişlerdir. Bu nedenle çalışmalarımızda katılaştırma hızının değişiminin mikroyapı parametresini nasıl etkilediği üzerinde durulmuştur. Bu tür bağıntılar kullanılarak elde edilen sonuçlar Çizelge 2.4'te gösterilmektedir.

Çizelge 2.4. Ötektik ve dendritik katılaştırma üzerine yapılan çalışmalar ve elde edilen bağıntılar

Alaşım	λ^2V	$\lambda = kV^{-n}$	Referans
Ni-11.5Si (% ağı.)	$\lambda^2V = 101.94 \mu\text{m}^3 / s$		(Milenkovic ve Caram, 2002)
Ni-Si (% at.)	$\lambda^2V = 388.88 \mu\text{m}^3 / s$		(Dutra vd., 2005)
Al-13Si (% ağı.)		$\lambda = 27V^{-0.53}$	(Hosch vd., 2009)
Al-1.7Fe (% ağı.)		$\lambda_E = 1.93.10^{-5} V^{0.628}$	(Hirai vd., 1977)
Al-5.7Ni (% ağı.)	$\lambda^2V = 101.80 \mu\text{m}^3 / s$	$\lambda = 10.76V^{-0.50}$	(Kaya vd., 2010)
	$\lambda^2V = 129.28 \mu\text{m}^3 / s$	$\lambda = 11.61V^{-0.51}$	
Al-12.6Si (% ağı.)	$\lambda^2V = 784.98 \mu\text{m}^3 / s$		(Gündüz vd., 2004)
Al-42.2Nb (% at.)	$\lambda^2V = 116.38 \mu\text{m}^3 / s$		(Rios vd., 2005)
Al-10.98Si-4.9Ni (% at.)		$\lambda = 0.114R^{-0.46}$	(Rohatgi vd., 1975)
Al-3.7Ni-1.5Fe (% ağı.)	$\lambda_E^2V = 100 \mu\text{m}^3 / s$ $\lambda^2V = 7000 \mu\text{m}^3 / s$		(Bottinger vd., 1988)
Al-11.1Si-4.2Ni (% ağı.)	$\lambda_{Si}^2V = 170.52 \mu\text{m}^3 / s$ $\lambda_{Al_3Ni}^2V = 82.01 \mu\text{m}^3 / s$	$\lambda_{Si} = 12.58V^{-0.50}$ $\lambda_{Al_3Ni} = 7.94V^{-0.47}$	(Böyük vd., 2011)
Al-7 Si-0.6 Mg (% ağı.)		$\lambda_E = 33.5V^{-0.5}$	(Steinbach ve Ratke, 2007)
Ni-45.5Al-9Mo (% at.)	$\lambda^2V = 33.94 \mu\text{m}^3 / s$		(Zhang vd., 2011)
Ni- 45.5Al-9Mo (% at.)	$\lambda V^{1/2} = 5.14 \mu\text{m}^{3/2} s^{-1/2}$		(Bei ve George, 2005)
Fe-22.8Al-9.7Nb (% at.)	$\lambda^2V = 277.77 \mu\text{m}^3 / s$		(Mota vd., 2005)
Ti-32.5Fe (% ağı.)	$\lambda^2V = 6.19 \mu\text{m}^3 / s$	$\lambda = 0.15 + 4.7V^{-0.5}$	(Contieri vd., 2011)
Ti-49Al (% at.)		$\lambda_L = 5.82^{-0.41}$	(Fan vd., 2012)
Ti-43Al-3Si (% at.)		$\lambda = 650.1V^{-0.44}$ $\lambda_L = 13.2V^{-0.41}$ $f_v = 16.6V^{-0.17}$	(Fan vd., 2010)

2.9. Sertlik Üzerine Yapılan Deneysel Çalışmalar

Ötektik alaşımlarda mikrosertlik ölçümleri üzerine bazı araştırmacılar katılaştırma parametreleri ile mikroyapı parametresi ve mikrosertlik değerinin nasıl bir değişim

gösterdiğini araştırmış ve bazı bağıntılar elde etmişlerdir (Fan vd., 2010; Fan vd., 2012; Kaya vd., 2003; Smits, 1958). Çizelge 2.5'te bu çalışmaların bazıları özetlenmiştir.

Çizelge 2.5. Mikrosertlik üzerine yapılan çalışmalar ve elde edilen bağıntılar

Alaşım	Mikrosertlik	Referans
Al-11.1Si-4.2Ni (% ağı.)	$HV = 72.44(V)^{0.08}$	(Böyük, 2012)
Al-1Fe (% ağı.)	$HV = 31 + 13.1\lambda^{-0.5}$	(L.Silva vd., 2012)
Al-1.5Fe (% ağı.)	$HV = 31 + 33.1\lambda^{-0.5}$	
Al-3Ni (% ağı.)	$HV = 27 + 104.1\lambda^{-0.5}$	
Al-5Ni (ağı.%)	$HV = 44.8 + 52.3\lambda^{-0.5}$	
	$HV = 66.1V^{0.11}$	
Al-7Ni (% ağı.)	$HV = 309.0(\lambda_1)^{-0.35}$	(Kaya vd., 2013)
	$HV = 114.8(\lambda_2)^{-0.24}$	
Al-12Si (% ağı.)	$HV = H_o + KV^{-0.12}$	(Khan vd., 1993)
Al-14.6Si (% ağı.)		
Al-12.6Si (% ağı.)	$HV = 82.79(V)^{0.11}$	(Kaya vd., 2003)
Zn-3.1 Mg (% ağı.)	$HV = 141 + 1.9\lambda^{-0.5}$	(Liu vd., 1998)
Zn-5 Al (% ağı.)	$HV = 61 + 0.46\lambda^{-0.5}$	
	$HV = k_1V^{0.10}$	
Al-17.6 Cu-42.2 Ag (% ağı.)	$HV = k_2G^{0.13}$	(Böyük vd., 2012)
	$HV = k_3\lambda^{-0.22}$	
	$HV = 363.1V^{0.10}$	
	$HV = 257.5 + 0.44\lambda_L^{-0.5}$	
Ti-43Al-3Si (% at.)	$HV = 1288.2\lambda^{-0.19}$	(Fan vd., 2010)
	$HV = 1318.3f_v^{-0.44}$	
	$HV = 313.9V^{0.16}$	
Ti-49Al (% at.)	$HV = 615.6\lambda^{-0.36}$	(Fan vd., 2012)
	$HV = 794.7V^{0.15}$	
Ti-46 Al-0.5 W-0.5 Si (% at.)	$HV = 398.1\lambda_1^{-0.31}$	(Fan vd., 2010)
	$HV = 491.5 + 53.4\lambda^{-0.5}$	

2.10. Çekme-Dayanımı Üzerine Yapılan Deneysel Çalışmalar

Araştırmacıların katılaştırma parametreleri ile mikroyapı parametresi ve çekme-dayanım değerinin nasıl bir değişim gösterdiğine dair araştırmaları sonucunda elde ettikleri bağıntılar Çizelge 2.6'da özetlenmiştir.

Çizelge 2.6. Çekme-dayanım üzerine yapılan çalışmalar ve elde edilen bağıntılar

Alaşım	Çekme-Dayanım	Referans
Al-1.5Fe (% ağı.)	$\sigma_U = 62.8 + 98.3(\lambda_C^{-0.5})$	
Al- 1.0Fe (% ağı.)	$\sigma_U = 60.2 + 90.5(\lambda_C^{-0.5})$	(Goulart vd., 2010)
Al- 0.5Fe (% ağı.)	$\sigma_U = 57.6 + 65.4(\lambda_C^{-0.5})$	
Al- 1Ni (% ağı.)	$\sigma_U = 71.3 + 200.2(\lambda_1)^{-0.5}$ $\sigma_U = 52.3 + 188.3(\lambda_2)^{-0.5}$	
Al- 3Ni (% ağı.)	$\sigma_U = 73.2 + 325.6(\lambda_1)^{-0.5}$ $\sigma_U = 57.5 + 221.7(\lambda_2)^{-0.5}$	(Cante vd., 2010)
Al- 5Ni (% ağı.)	$\sigma_U = 74.1 + 468.5(\lambda_1)^{-0.5}$ $\sigma_U = 58.3 + 228.6(\lambda_2)^{-0.5}$	
Al- 5Si (% ağı.)	$\sigma_U = 93 + 45(1 / \lambda_2)^{0.5}$	(Goulart vd., 2006)
Al- 9Si (% ağı.)	$\sigma_U = 111 + 146(1 / \lambda_2)^{0.5}$	
Sn-4Zn (% ağı.)	$\sigma_U = 31.95 - 0.63(1 / \lambda_2)^{0.5}$	
Sn-9Zn (% ağı.)	$\sigma_U = 37 + 4.5(1 / \lambda)^{0.5}$	(Garcia vd., 2010)
Sn-12Zn (% ağı.)	$\sigma_U = 29 + 9.74(1 / \lambda_2)^{0.5}$	
Zn-3Al (% ağı.)	$\sigma_U = 114 + 185(1 / \lambda_2)^{0.5}$	(Osorio ve Garcia, 2002)
Zn- 4 Al (% ağı.)	$\sigma_U = 97 + 289(1 / \lambda_2)^{0.5}$	
Zn-27 Al (% ağı.)	$\sigma_U = 114 + 1500(1 / \lambda_2)^{0.5}$ $\sigma_y = 65 + 1650(1 / \lambda_2)^{0.5}$	(Santos vd., 2007)

2.11. Elektriksel Özdirenç Üzerine Yapılan Deneysel Çalışmalar

Çeşitli araştırmacılar DC dört nokta (Smits, 1958) gibi farklı yöntemlerle alaşımların elektriksel özdirençlerini ölçmüşler ve genellikle özdirençin sıcaklıkla değişimini incelemişlerdir. Bu çalışmaların bazıları Çizelge 2.7’de özetlenmiştir.

Çizelge 2.7. Elektriksel özdirenç ile ilgili yapılan çalışmalar

Alaşım	Sıcaklık aralığı	Elektriksel Özdirenç ($\times 10^{-8} \Omega m$)	Referans
Al-5Si (% ağı.)	25-550	3.85 – 11.14	
Al-7Si (% ağı.)	25-550	4.17 - 12.22	
Al-9Si (% ağı.)	25-550	3.89 - 11,77	
Al-12Si (% ağı.)	25-550	4.25 - 12.44	
Al-5Si-0.6Mg (% ağı.)	25-550	4.10 -11.25	
Al-7Si-0.6Mg (% ağı.)	25-550	4.43 - 12.42	
Al-9Si-0.6Mg(% ağı.)	25-550	4.42 - 12.75	
Al-12Si-0.3Mg (% ağı.)	25-550	4.87 - 13.40	
Al-12Si0.6Mg (% ağı.)	25-550	5.20 - 14.27	(Brandt ve Neuer, 2007)
Al-6Si-1Cu (% ağı.)	25-500	5.17 - 11.63	
Al-6Si-3Cu (% ağı.)	25-500	5.61 - 12.55	
Al-9Si-1Cu (% ağı.)	25-500	5.36 - 12.64	
Al-9Si-2Cu (% ağı.)	25-500	5.57 -12.77	
Al-9Si-3Cu (% ağı.)	25-500	5.73 - 13.03	
Al-11Si-1Cu (% ağı.)	25-500	5.55 - 13.16	
Al-11Si-3Cu (% ağı.)	25-500	5.95 - 13.49	
Al-11.1Si-4.2Ni (% ağı.)	25	4.57(V) ^{0.08}	(Böyük, 2012)
Sn-3Cu (% ağı.)	300-500 K	9.87 - 21.02	(Çadırılı vd., 2010)
Pb-25Sn (% ağı.)	25-110 °C	28 - 40.5	(Kamal ve Gouda, 2007)
Sn-0.7Cu (% ağı.)		11.14	
Sn-0.7Cu-0.5Zn (% ağı.)		13.05	(El-Ashram ve Shalaby, 2005)
Sn-0.7Cu-0.5Bi (% ağı.)		15.68	

2.12. Öz ısı ve Termal iletkenlikler Üzerine Yapılan Deneysel Çalışmalar

Araştırmacıların çoğu termal ve elektriksel iletkenlik üzerinde incelemeler yapmışlardır. Öz ısı üzerinde yapılan araştırmaların çok az olduğu Çizelge 2.8’de de görülmektedir.

Çizelge 2.8. Öz ısı ve termal iletkenlikler üzerine yapılan deneysel çalışmalar

Alaşım (%ağ.)	Termal İletkenlik k (W/Km)	Elektriksel İletkenlik $\sigma \times 10^{-8}$ (1/ Ω m)	C_p	Referans
Sn-4Ag-2In	62.5±4.4	0.049	-	
Sn-20Ag-2In	55.1±3.8	0.043	-	(Ocak vd., 2010)
Sn-60Ag-2In	45.7±3.2	0.036	-	
Zn-10Sb	55.68	0.0181	-	
Zn-30Sb	30.86	0.0080	-	(Aksöz vd., 2013)
Al-5.2Mg-0.1Mn-0.1Cr	74.2	-	-	(Baudouy ve Four, 2014)
Al-3Cu	143.1	0.055	-	
Al-15Cu	116.3	0.046	-	(Aksöz vd., 2010)
Al-52.5Cu	107.9	0.033	-	
Sn-25Al	112.30	-	-	
Sn-50Al	142	-	-	(Meydaneri vd., 2010)
Sn-8.9Zn	86.39	-	-	
Sn-1Zn	74.89	-	-	(Saatçi vd., 2007)
Sn-3.5Ag-0.5Cu	-	-	0.25 J/gK	(Çadırılı vd., 2011)
Al-1Ni	202		0.902 J/gK	(Pariona vd., 2010)

BÖLÜM III

GEREÇ ve YÖNTEM

Bugüne kadar, çeşitli alaşım sistemlerinde ötektik ve dendritik mesafenin tespiti üzerine birçok deneysel çalışma yapılmış, yapılan bu çalışmalarda çeşitli malzemelerin mikroyapı (λ), mikrosertlik (HV), çekme-dayanım (σ_U), elektriksel özdirenç (ρ) ve termal iletkenlik (k) gibi özellikleri ayrı ayrı ele alınmıştır. Bu çalışmada ise, Al-%23.9Cu-%1.2Co (ağ.), Al-%13.6Cu-%6Si (ağ.) ve Zn-%7Al-%2.96Cu (ağ.) alaşım sistemleri incelenmiştir. Bu inceleme sırasında alaşımlar sabit katılaştırma hızında farklı sıcaklık gradyentlerinde ve sabit sıcaklık gradyenti farklı katılaştırma hızlarında katılaştırılmıştır. Katılaştırılan malzemelerde sıcaklık gradyenti ve katılaştırma hızının malzemelerin mikroyapı, mikrosertlik, çekme-dayanım, basma-dayanım, elektriksel özdirenç ve kopma yüzey analizi üzerine etkileri araştırılmıştır. Ayrıca bu alaşımlara ait erime entalpisi ve özısı değerleri de tespit edilmiştir. Böylece ele alınan alaşım sistemlerinin birçok fiziksel özelliği bir bütün olarak tanımlanmıştır.

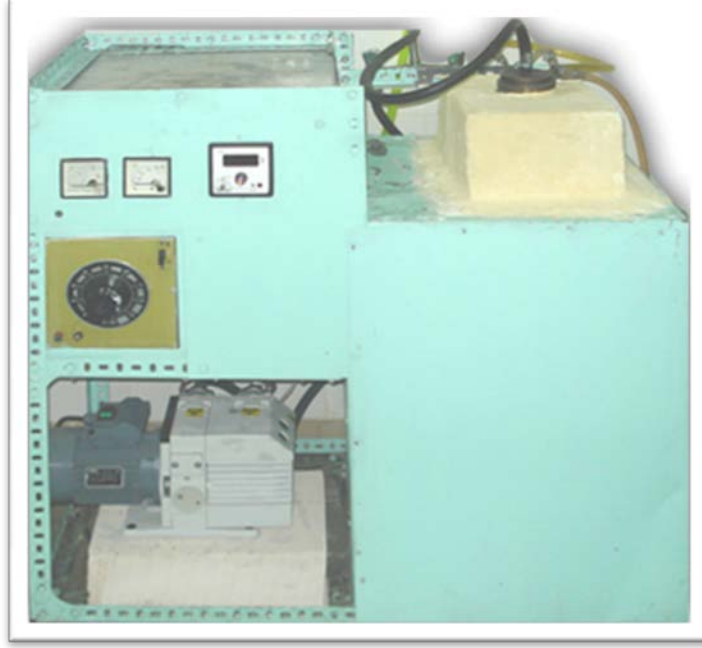
Bu bölümde katılaştırma çalışmalarının gerçekleştirilmesinde kullanılan deney sisteminin tanıtımı ve kontrollü katılaştırma deneyinin yapılışının aşamaları ayrıntılı olarak anlatılacaktır.

3.1. Deneysel Sistem

Bu tez çalışmasında üç ayrı metalürjik fırın (vakumlu eritme fırını, döküm fırını ve kontrollü katılaştırma fırını) kullanılmıştır. Bu deneylerde kullanılan fırınlar aşağıdaki başlıklarda ayrıntılı olarak anlatılacaktır.

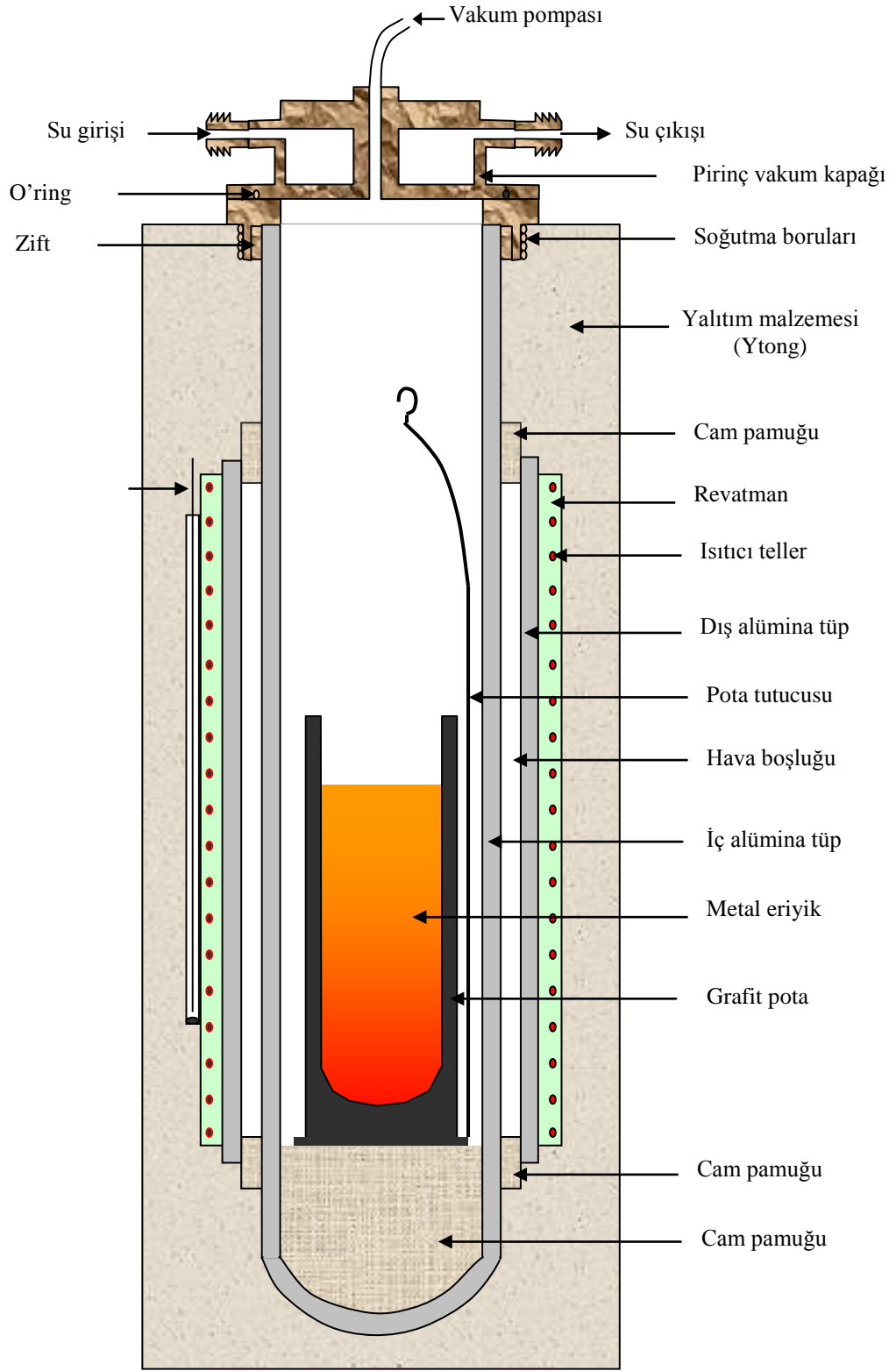
3.1.1. Vakumlu eritme fırını

Vakumlu eritme fırını alaşım yapılacak metallerin vakumlu ortamda oksitlenmeden eritilmesinde kullanılır. Vakumlu eritme fırınının fotoğrafı Şekil 3.1'de verilmiştir. Şematik gösterimi Şekil 3.2'de verilen vakumlu eritme fırını, iç içe geçmiş iki alümina tüp, vakum pompası, sıcaklık kontrolcüsü, güçteki dalgalanmaları engellemek için kullanılan varyak ve soğutma sisteminden oluşmaktadır.



Şekil 3.1. Vakumlu eritme fırını

İçteki alümina tüpün iç çapı 50 mm, dış çapı 60 mm ve uzunluğu 700 mm olup bir ucu kapalıdır. Bu alümina tüpün içinde vakumlu ortam oluşturulur. Dış alümina tüpün ebatları ise 80 mm × 90 mm × 500 mm olup her iki ucu da açıktır. Dış alümina tüpün etrafına 1.2 mm kalınlığındaki Kanthal A1 telinden (FeCrAl alaşımından yapılmış tel) 80 sarım sarılmıştır. Isıtıcı telin toplam direnci 28.1 Ω olarak ölçülmüştür. Isıtıcı tellerin birbirine değmemesi için sarımların arasını dolduracak şekilde, tellerin etrafı ısındıkça sertleşen iyi bir yalıtım malzemesi olan revatman ile sıvanmıştır. Fırının ısı kaybını önlemek için alümina tüplerin etrafına gaz beton (Ytong) tuğlası ve cam yünü (kaowool) yerleştirilmiştir. Vakumlu ortam oluşturabilmek için bir ucu kapalı alümina tüpün açık ucuna vakum pompasını bağlayacak şekilde pirinçten bir soğutma sistemi yapılmıştır. Vakumlama esnasında hava sızmaması için iç alümina tüp ile pirinç soğutma sisteminin arası zift ile yalıtılmıştır. Fırın ısıtıldığında ziftin erimemesi için soğutma sisteminden sürekli su dolandırılmaktadır. Fırının sıcaklığı sıcaklık kontrolcüsü ile kontrol edilmektedir. Vakumlu eritme fırını 1100 °C'ye kadar (± 2 °C hassaslıkta) çıkabilmektedir. Eritme işlemi vakum pompası yardımıyla 10^{-3} mbar basınç altında yapılmaktadır.



Şekil 3.2. Vakumlu eritme fırınının şematik gösterimi

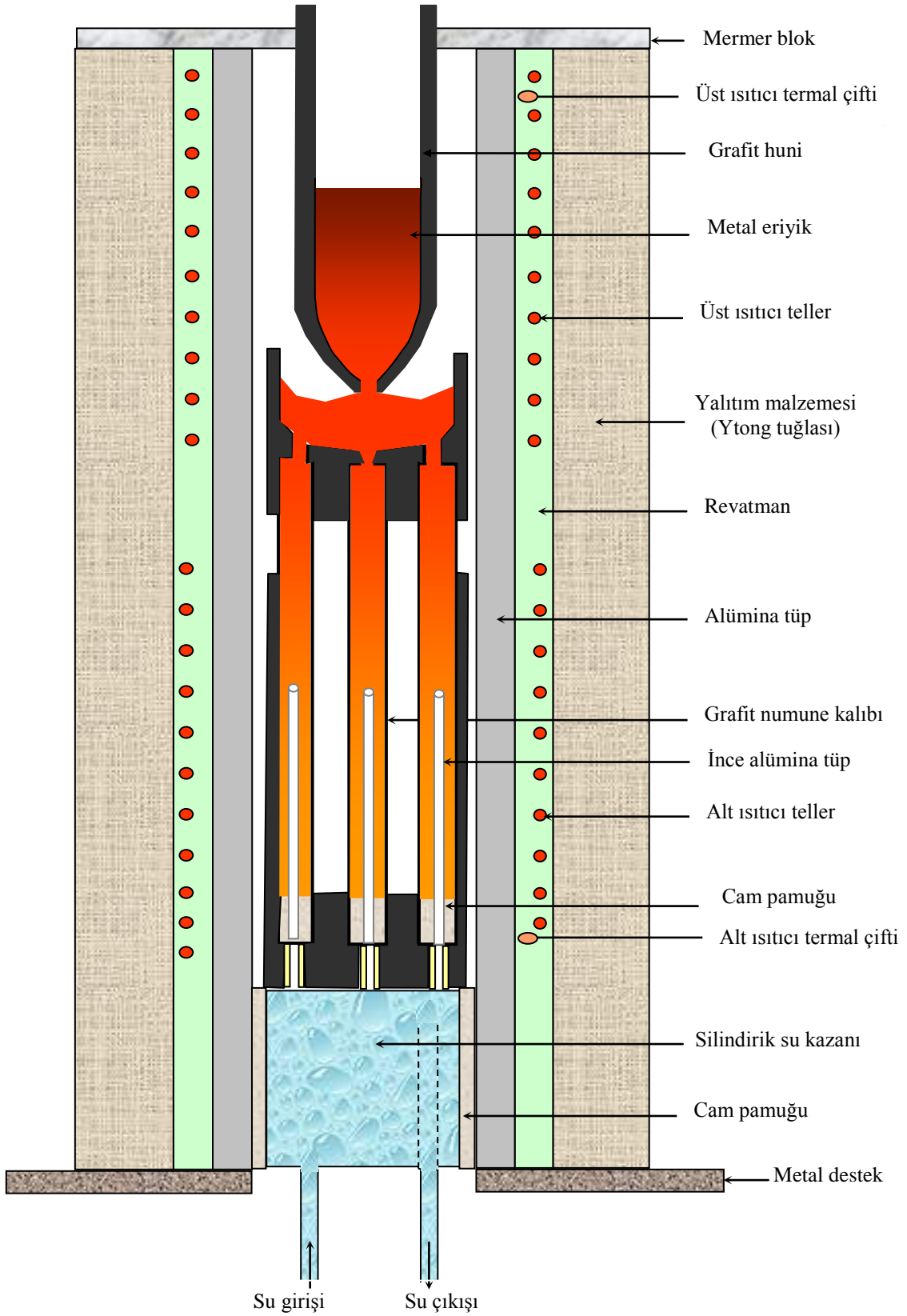
3.1.2. Döküm fırını

Döküm fırını, ergimiş haldeki alaşımın özel numune kalıbı içerisine dökümünün yapılması ve alaşımın kalıp içerisinde tek yönlü (doğrusal) olarak katılaştırılması için kullanılmaktadır. Bu fırın aynı zamanda numuneler içerisinde hava boşluğunun kalmaması ve numune kalıplarının tamamen dolması için kullanılmaktadır. Döküm fırınının fotoğrafı Şekil 3.3'te verilmiştir.



Şekil 3.3. Döküm fırınının fotoğrafı

Döküm fırını; iki ucu açık alümina, alt ısıtıcı, üst ısıtıcı ve soğutma kazanından oluşmaktadır. İç çapı 50 mm, dış çapı 60 mm ve uzunluğu 750 mm olan alümina tüpün etrafındaki farklı iki bölgeye ısıtıcı teller sarılarak birbirinden bağımsız iki ısıtıcı bölge oluşturulmuştur. Isıtıcı tel olarak 1.2 mm kalınlığında Kanthal A1 teli kullanılmıştır. Alt ve üst ısıtıcıların dirençleri sırasıyla 16.675 Ω ve 9.725 Ω olarak ölçülmüştür. Isıtıcı tellerin birbirine değmemesi için sarımların arasını dolduracak şekilde tellerin etrafı revatman ile sıvanmıştır. Alt ve üst ısıtıcıların sıcaklıklarını ölçmek için ısıtıcıya yakın mesafelere iki adet yalıtılmış K-tipi termal çift yerleştirilmiştir. Alümina tüpün alt tarafına 40 mm çapında ve 160 mm uzunluğunda silindirik bir su kazanı yerleştirilmiştir. Alümina tüpün etrafı ise ısı yalıtımı amacıyla gaz beton (Ytong) tuğlası ile kaplanmıştır. Döküm fırını 1100 °C'ye kadar (± 2 °C hassaslıkta) çıkabilmektedir. Döküm fırınının şematik gösterimi Şekil 3.4'te verilmiştir.



Şekil 3.4. Döküm fırınının şematik gösterimi

3.1.3. Kontrollü katılaştırma fırını

Kristal büyütme çalışmalarının yaklaşık % 40'ı Bridgman tipi kontrollü katılaştırma fırını ile yapılmaktadır. Özellikle mühendislik alanında gerilime dayanıklı malzeme üretiminde bu fırınlar yaygın olarak kullanılmaktadır (Kaya, 2001). Sıcak döküm fırınında elde edilen numunelerin, değişik sıcaklık gradyenti ve hızlarda katılaştırılması, kontrollü katılaştırma fırını yardımıyla yapılmaktadır.

Şekil 3.5'te şematik olarak gösterilen kontrollü katılaştırma fırınında, değişik katılma hızları elde etmek için kullanılan motor bağlantılı bir sürücü sistem, farklı sıcaklık gradyenti oluşturmak için kullanılan ısıtıcı ve soğutucu sistemler bulunmaktadır. Bu fırında numune tutucusuna yerleştirilen numuneler, sürücü sistem aracılığıyla sıcak bölgeden soğuk bölgeye çekilirken, kalıp içerisindeki sıvı alaşım, en alt kısımdan başlayarak katılaşmakta ve katı-sıvı arayüzeyi yukarı yönde ilerlemektedir.

Kontrollü katılaştırma fırını 1100 °C sıcaklığa kadar çıkılabilmektedir. Ayrıca bu fırına yerleştirilen numune içerisinde 10 ile 100 °C/cm arasında bir sıcaklık gradyenti elde edilebilmektedir. Bridgman tipi kontrollü katılaştırma fırını başlıca ısıtıcı sistem, soğutucu sistem ve sürücü sistem olmak üzere üç kısımdan oluşmaktadır. Şimdi bu kısımları detaylı bir şekilde inceleyelim.

3.1.3.1. Isıtıcı sistem

Isıtıcı sistem, yüksek sıcaklıklara dayanıklı iç çapı 50 mm, dış çapı 60 mm ve uzunluğu 800 mm olan iki ucu açık alümina tüp etrafına 1 mm çapında, toplam direnci 25 Ω olan Cr-Ni telden 30 m sarılarak yapılmıştır. Alümina tüpün iki ucuna pirinçten yapılmış dairesel kesitli kaideler geçirilmiştir. Alümina tüp ile pirinç kaideler arasındaki boşluk 180 °C'ye dayanıklı zift (black wax) ile doldurulmuş ve böylece numunenin argon atmosferinde çalışması durumunda sızdırmazlığı sağlanmıştır. Dolgu ziftinin aşırı ısınmasını önlemek ve pirinç kaideyi soğuk tutmak için kaidelerin içerisinden sürekli su sirkülasyonu sağlanmıştır. Fırının sıcaklığını kontrol etmek için 0.5 mm çapında yalıtılmış, metal kaplı K-tipi termal çift sıcak bölgenin tam ortasına yerleştirilmiştir. Ayrıca üst bölgede pirinç kapak ile pirinç kaide arasından hava sızması için lastik halka (O'ring) yerleştirilmiştir. Kontrollü katılaştırma fırınının ısıtıcı sistemi ± 0.1 °C hassasiyetinde 2604S Eurotherm sıcaklık kontrolcüsü ile kontrol edilmiştir.

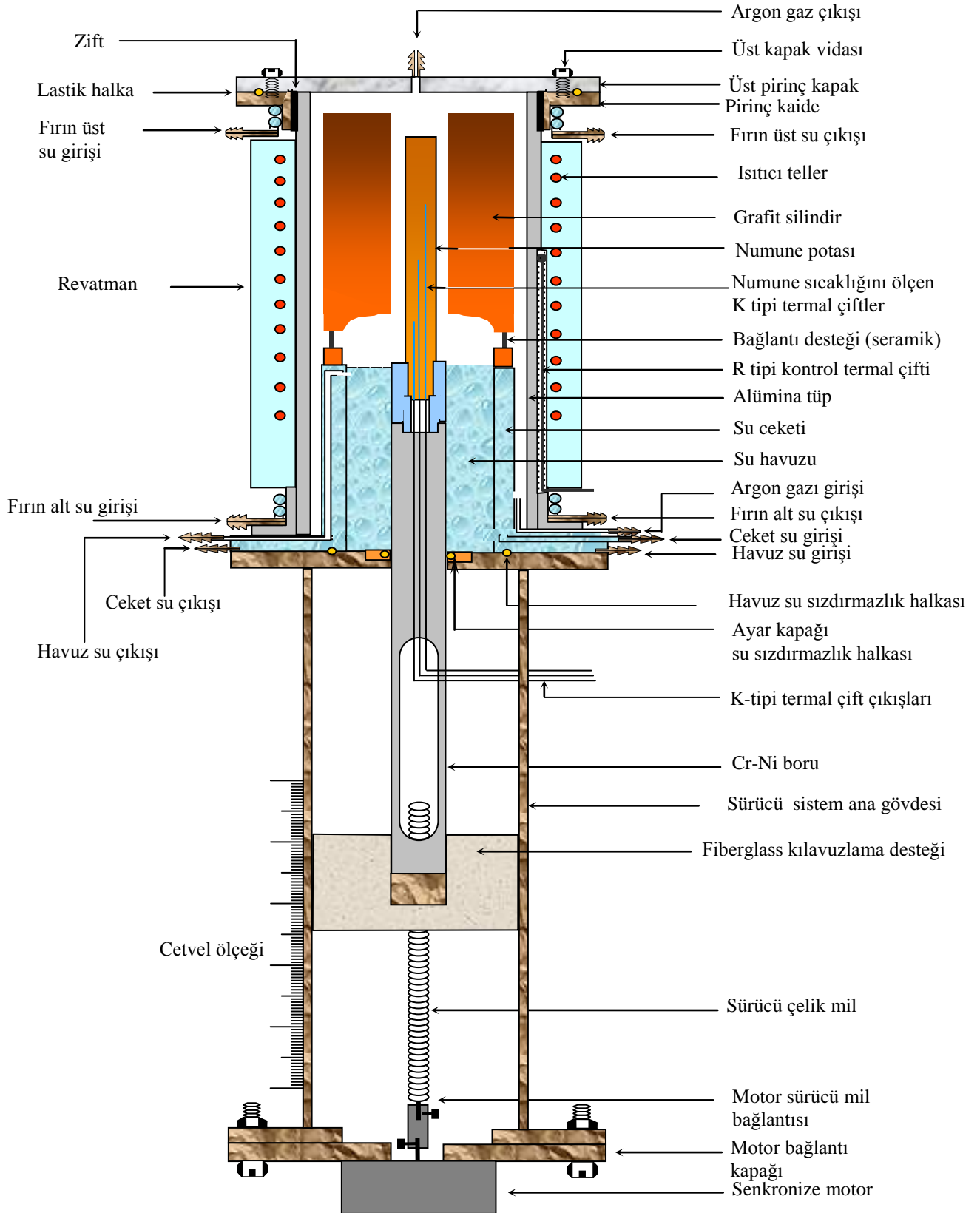
3.1.3.2. Soğutucu sistem

Soğutma sistemi, fırın içerisinde sıcaklık gradyenti oluşturmak amacıyla tasarlanmıştır. Yeterli uzunlukta katılaştırılan numune, aniden soğutma bölgesine (iç su havuzuna) çekilerek ani soğutma (quench) sağlanmaktadır. Soğutucu sistem, 300 mm uzunluğunda 23 ve 33 mm çaplara sahip iç içe geçmiş iki silindir pirinç borudan oluşmaktadır. Pirinç boruların alt kısmı yaklaşık 10 mm kalınlığında, 100 mm çapında dairesel pirinç parçaya kaynatılmıştır. Dolayısıyla soğutucu sistem iç içe geçmiş iki silindirin (iç ve dış silindir) oluşturduğu bir havuzdan yapılmıştır. Numune doğrudan havuza çekilmektedir.

Havuzlardaki suyun sıcaklığı, ± 0.01 °C hassasiyetinde -40 °C ile 200 °C sıcaklık aralığında çalışabilen PolyScience dijital kontrollü ısıtmalı/soğutmali akışkan dolaşım sistemi ile kontrol edilmektedir. Dolaşım sisteminden gelen akışkan (antifrizli su) ilk olarak havuzun taban kısmından girmekte, havuzda belli bir seviyeye kadar birikmekte ve sonrada fırını terk ederek dolaşım sistemine geri dönmektedir. Böylece havuz ve içerisindeki akışkanın sürekli soğuk kalması sağlanabilmektedir. Dolaşım sisteminin akışkan tankı 13 L hacminindedir ve bu tank içerisindeki akışkan belli bir sıcaklık aralığında (-40 °C ile 200 °C) hem ısıtılıp hem de soğutulabilmektedir. Ayrıca dolaşım sisteminin tankında bulunan akışkanın, fırın içerisinde istenilen hızda dolaşımı sağlanabilmekte yani dolaşım sisteminin akışkan pompalama hızı ayarlanabilmektedir.

3.1.3.3. Sürücü sistem

Farklı katılaştırma hızları elde etmek amacı ile kullanılan sürücü sistem, 540 mm boyunda ve 40 mm çapında pirinç gövde içerisinde bulunan, dış çapı 12 mm, iç çapı 10 mm ve uzunluğu 650 mm olan Cr-Ni borudan oluşmaktadır. Üzerinde cetvel ölçeği bulunan sürücü sistemin alt kısmında, değişik katılaştırma hızları sağlayan sürücü mile bağlı senkronize motor bulunmaktadır. Pirinç gövde içerisindeki Cr-Ni boru, alt ucundan fiberglastan yapılmış mil yuvasına, üst ucundan da numune tutucusuna sabitleştirilmiştir. Cr-Ni borunun kenarlarından su sızıntılarını önlemek amacıyla lastik halkalar kullanılmıştır. Pirinç gövde içerisine yerleştirilmiş fiberglas, 65 mm uzunluğundadır. Fiberglas'ın bir ucu 12 mm çapındaki Cr-Ni boruya sıkı bir şekilde geçebilmesi için delinmiştir.



Şekil 3.5. Bridgman tipi kontrollü doğrusal katılaştırma fırını (Çadırılı, 1997)

Diğer ucuna ise sürücü milin içinde hareket edebilmesi için 20 mm çapında 30 mm uzunluğunda pirinç blok yerleştirilmiştir. Bu parçanın merkezine 3 mm çapında metrik diş açılmıştır. Sürücü mil çelikten yapılmış olup buna da 3 mm'lik metrik diş açılmıştır. Numune bu çelik mil vasıtasıyla motor devir hızına bağlı olarak, soğuk bölgeye doğru çekilip, aşağıdan yukarıya doğru kontrollü olarak katılaşması sağlanmaktadır.

3.2. Deneyin Yapılışı

Bir kontrollü katılaştırma deneyi; numunenin hazırlanması, katılaştırma fırınında kontrollü katılaştırılması, metalografik işlemler ve ortaya çıkan mikroyapıların gözlenmesi basamaklarından oluşmaktadır. İlerleyen başlıklarda bu basamakların her birini ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir.

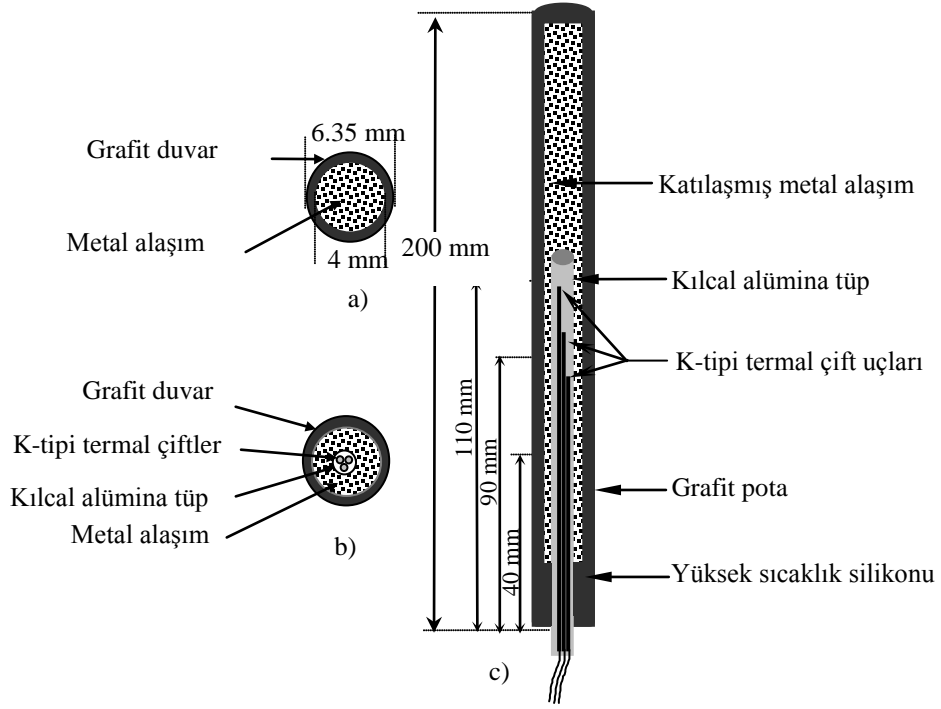
3.2.1. Numunenin hazırlanması

3.2.1.1. Numune kalıbının yapılması

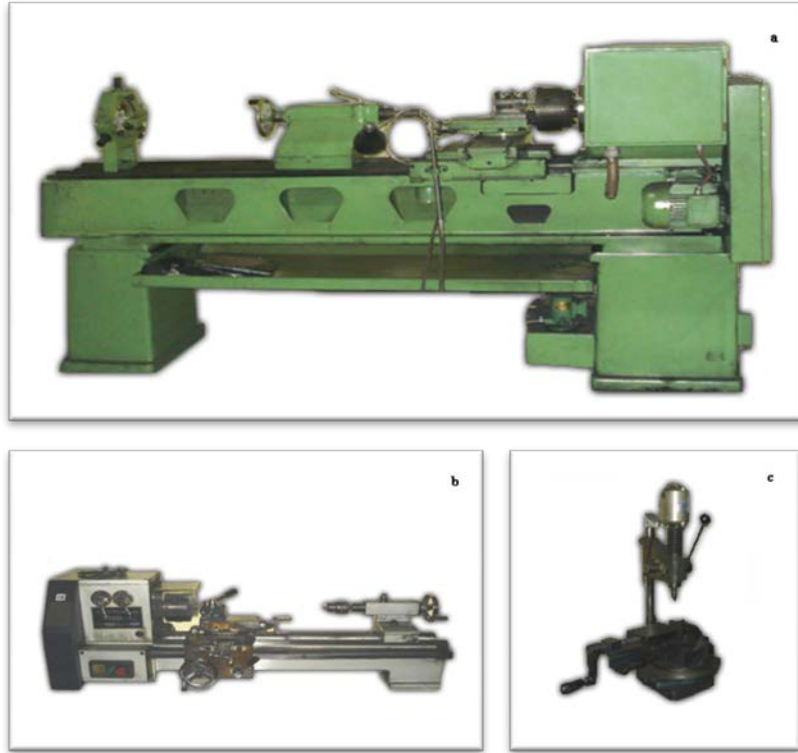
Numune pota ve kalıplarının hazırlanmasında iyi bir ısı iletkenliğine ve kolay işlenebilme özelliklerine sahip olması, metalik alaşımlarla reaksiyona girmemesi nedeniyle grafit tercih edilmiştir. Bu amaçla deneysel çalışmalarda kolay işlenebilen, yüksek ısı iletkenliğe sahip, korozyona karşı dayanımı yüksek ve erime sıcaklığı 1600 °C'ye kadar olan metaller için kullanılabilen Morgan marka ince tane yapısına sahip grafitler kullanılmıştır.

Deneylerde numune kalıbı olarak 200 mm uzunluğunda ve 6.35 mm çapında grafit çubuklar kullanılmıştır. Bu grafit çubuklar delinme esnasında kolayca kırılabilirdikleri için, pirinçten yapılmış kalıbın içine yerleştirilerek 4 mm çapında 220 mm uzunluğunda özel matkap uçları ile tornada delinmiş ve böylelikle içi boş grafit kalıplar elde edilmiştir. Her bir alaşım sistemi için 11 grafit kalıbından 6'sı termal çiftsiz, 5'i ise termal çiftli olacak şekilde hazırlanmıştır. Termal çiftsiz olarak hazırlanan numune kalıplarının bir ucu, içerisinde sıvı halde bulunan metal alaşımın sızmasını engellemek için bir uçtan başlayan delme işlemi diğer ucun sonuna kadar getirilmiş ve grafitin diğer ucu kapalı bırakılmıştır. Termal çiftli numune kalıplarının hazırlanmasında ise 1.2 mm dış çapında 0.8 mm iç çapında kılcal alümina tüp kullanılmıştır. Şekil 3.6'da görüldüğü gibi, alümina tüp iki ucu delik olan numune kalıbının bir ucundan geçirilip diğer ucu merkezde olacak şekilde yerleştirilerek sızıntı olmaması için etrafı sıkı bir şekilde cam

pamuğu ve silikonla desteklenmiştir. Bu grafitlerin işlenmesinde kullanılan cihazların fotoğrafları Şekil 3.7’de verilmiştir.



Şekil 3.6. Grafit numune kalıbı (a) Üst enine kesiti, (b) Alt enine kesiti, (c) Yandan görünüşü



Şekil 3.7. Grafitlerin işlenmesinde kullanılan araçlar
a) Büyük torna, b) Küçük torna c) Yönlü matkap

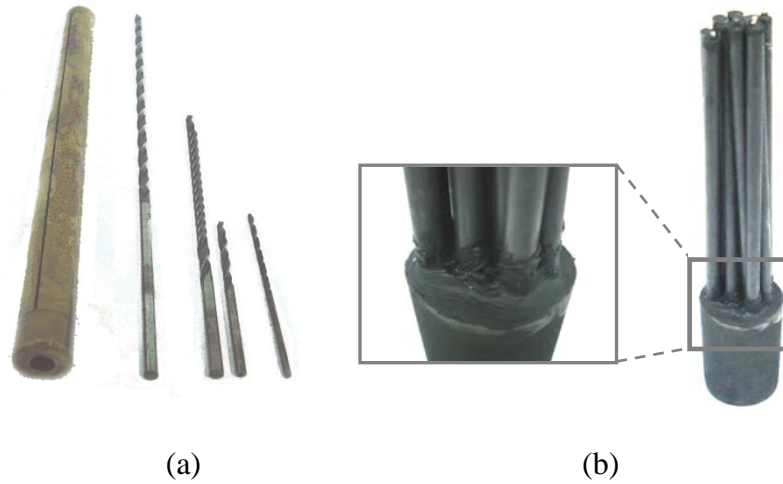
katkılı silikon yapıştırıcı ile tutturulmuştur. Şekil 3.9’da deneylerin yapımında kullanılan grafit numune kalıpları ve potalarının fotoğrafları verilmiştir.



Şekil 3.9. Deneylerde kullanılan grafit numune kalıpları ve potaları

Şekil 3.10’da ise grafit numune kalıplarının hazırlanmasında kullanılan pirinç blok, matkap uçları (Şekil 3.10.a) ve üst destek ile numune kalıplarının silikon yapıştırıcı yardımıyla birleştirilmesi (Şekil 3.10.b) verilmiştir. Üst destek ile numune kalıpları arasına sürülen silikonların kuruması için yaklaşık bir gün süreyle beklenmiştir.

Daha sonra önceden hazırlanan alt destek yardımıyla kılavuzlama yapılmıştır. Hazırlanan kalıp döküm fırınına teller yardımıyla indirilmiş böylece kalıp hazırlama işlemleri tamamlanarak alaşım hazırlama basamağına geçilmiştir.



Şekil 3.10. (a) Grafit numune kalıplarının yapımında kullanılan pirinç destek ve değişik ebatlarda matkap uçları,
(b) Üst destek ile numune kalıplarının silikon yapıştırıcı yardımıyla birleştirilmesi

3.2.1.3. Alaşımın hazırlanması

İncelenecek olan alaşımların istenilen noktadaki bileşim oranları her birinin faz diyagramları yardımıyla tespit edildi (Zolotorevsky vd., 2007; Mondolfo, 1943; Mondolfo, 1976; Zhang ve Du, 2007). Alaşım üretiminde kullanılan malzemelerin yüksek saflıkta olmasına özellikle dikkat edildi. Yeterince saf olmayan malzemelerle alaşım hazırlandığında safsızlıklar arayüzeyde birikmekte ve deneysel süreçte arayüzeyde oluşan yapı Őekillerini olumsuz etkilemektedir. Her bir bileşen, uygun oranlarda Şekil 3.11 de gösterilen 0.1 mg'a duyarlı AND GX-600 tipi hassas terazi ile tartıldı.



Şekil 3.11. Alaşım metallerinin tartılmasında kullanılan hassas terazi

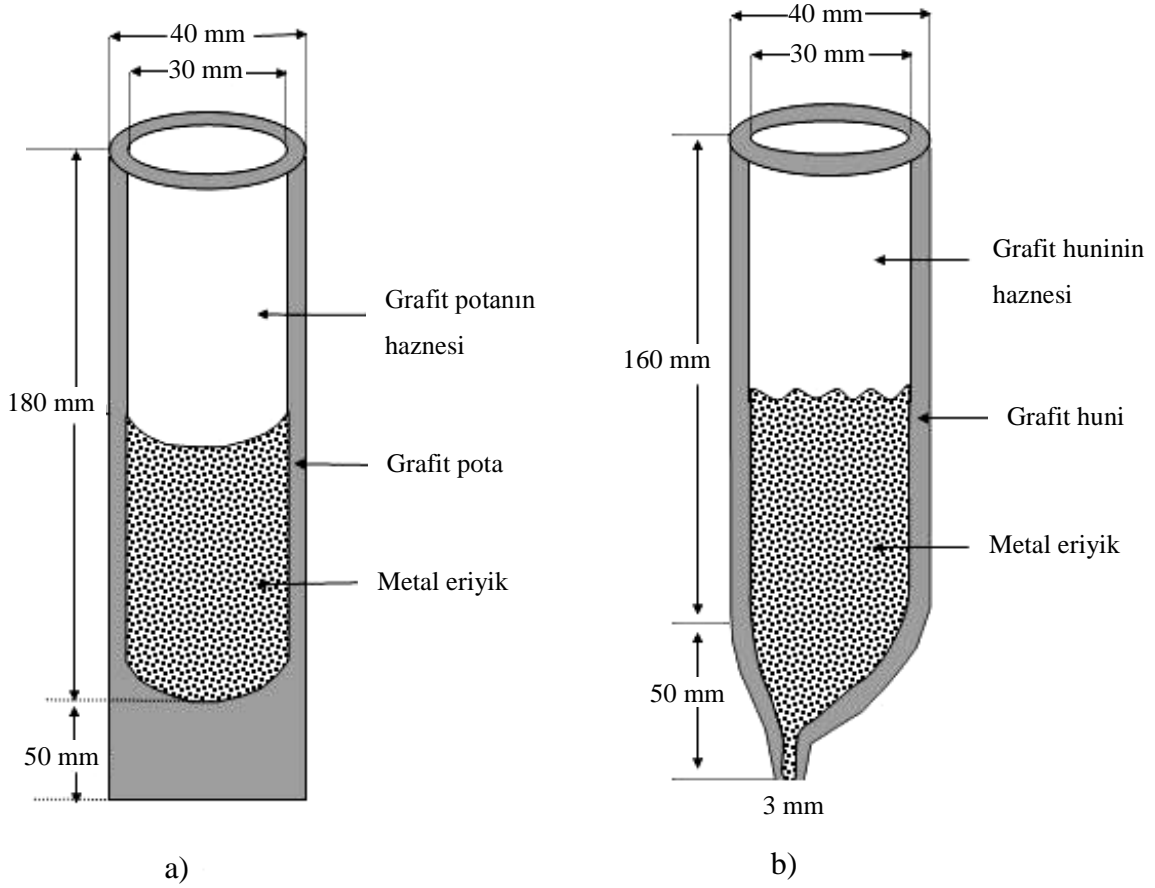
3.2.1.4. Dökümün yapılması

Alaşım hazırlamada kullanılacak metallerin miktarları hassas terazi ile tartıldıktan sonra alaşımın hazırlanması ve hazırlanan alaşımın numune kalıplarına doldurulması aşamalarına gechildi. Erime sıcaklığı düşük olan metal altta kalacak Şekilde metal malzemeler grafit potaya yerleştirildi. Grafit pota uygun bir Őengelli tel pota tutucusu yardımıyla vakum fırınına indirildi. Vakum pompası çalıştırılarak fırın vakumlandı. Fırın ısıtmaya başlamadan önce fırının kapaklarında bulunan ziftin sıcaklığın etkisiyle erimemesi için kapak içerinden su geçirilerek soğutma yapıldı. Varyak en düşük güç durumunda çalıştırıldı ve yaklaşık her 5 dakikada varyağın değerini % 5 artırıldı. Varyağın değerinin artırılmasına fırın istenilen sıcaklığa çıkıncaya kadar devam edildi. Metaller tamamen eridikten sonra vakum kapağı açılarak grafit karıştırıcı çubuk yardımıyla metal eriyik karıştırıldı. Bu işlem 20-25 dakika arayla 4-5 defa tekrarlandı. Böylece eriyik halde metalik l alaşım hazırlanmış oldu.

Vakumlu eritme fırınında alaşım hazırlama işlemleri devam ederken diğer taraftan döküm fırınında dökümün yapılması ve önceden yapılan numune kalıplarına alaşımın doldurulması hazırlıklarına başlandı. Numune potalarıyla desteklenen numune kalıplarının etrafı cam pamuğu ile sarılarak çevresine sarılan tel yardımıyla fırına indirildi. Dökümü kolaylaştırmak amacıyla kalıp üzerine grafitten yapılmış bir huni yerleştirildi. Döküm sırasında sıvı alaşımın dışarıya taşıp fırına sızmasını engellemek için grafit huni ile alümina tüp arasına yüksek sıcaklığa dayanıklı cam yünü sıkıştırıldı. Fırının alt ve üst ısıtıcılarına güç verilerek fırının iç bölgesinin ısıyı çekmesi beklendi. Döküm fırınının varyakları yavaş yavaş artırılarak alt ısıtıcının sıcaklığı alaşımın erime sıcaklığının yaklaşık 50 °C üzerindeki bir sıcaklığa, üst ısıtıcının ise erime sıcaklığının 100-150 °C üzerindeki bir sıcaklığa çıkması sağlandı. Burada amaç vakumlu eritme fırınından eriyik halde çıkarılan alaşımın döküm fırınına yerleştirilen numune kalıplarına dolması esnasında akışkanlığını koruması ve bu süreç esnasında katılaşmadan kalıp içlerine tam bir dolunun sağlanmasıdır.

Vakumlu eritme fırınında hazırlanan ve yeterli miktarda karıştırılarak alaşım olduğuna kanaat getirilen eriyik, maşayla sıkıca kavrandı ve vakit geçirilmeden huni yardımıyla numune kalıplarına döküldü. Şekil 3.12.a'da vakumlu eritme fırınında alaşımı oluşturacak metalleri içerisinde eritmede kullanılan grafit pota ve Şekil 3.12.b'de döküm fırınında döküm yapmak amacıyla kullanılan grafit huninin şematik gösterimi verilmiştir.

Grafit numune potası üzerine yerleştirilen huni çıkarıldı ve ince bir grafit çubuk ucuna bağlanan alümina tüp ile sıvı alaşım tekrar tekrar karıştırılarak numune kalıpları içerisinde bulunabilecek hava kabarcıklarının dışarıya çıkması sağlandı. Döküm fırınının alt ısıtıcısı kapatıldı, üst ısıtıcı çalışır haldeyken numune kalıbının altında bulunan soğutma kazanından su geçirilerek tek yönlü katılaştırma başlatıldı. Tek yönlü katılaştırmanın amacı numune kalıbının içerisinde hava boşluğu kalmaksızın tamamen doldurulmasıdır. Katılama tamamlandıktan sonra üst ısıtıcı da kapatılarak fırının soğuması beklendi. Fırın tamamen soğuduktan sonra, dökümü yapılan grafit numune kalıpları fırından çıkarıldı. Üst ve alt destek kısımları numune kalıplarından ayrıldı. Böylece her bir numune kalıbının aynı anda aynı tür malzemeyle dolması sağlanarak, numuneler kontrollü katılaştırma fırınına yerleştirilecek hale getirildi.



Şekil 3.12. Grafitten yapılmış (a) Pota ve (b) Huninin şematik gösterimi

3.2.1.5. Termal çift seçimi ve sıcaklık ölçümleri

Termal çiftler, fırınlarda ısıtılan numunelerin sıcaklığını ölçmek ve kontrol etmek amacıyla kullanılmaktadır. Deneysel çalışmalarda yaygın olarak Kromel-Alumel (K-tipi) ve Platin-%13 Platin-Rodyum (R-tipi) olmak üzere iki tür termal çift kullanılmaktadır. Deneysel çalışmalara geçmeden önce, deneylerde kullanılacak termal çiftlerin seçimi ve testi yapıldı. Deneyler esnasında sıcaklık ölçümlerini yapabilmek için Şekil 3.13'te gösterilen 0.25 mm çapında 100 cm uzunluğunda, $-270\text{ }^{\circ}\text{C}$ ile $1370\text{ }^{\circ}\text{C}$ aralığında ölçüm yapabilen, K-tipi termal çiftler kullanıldı.

Deneylerde kullanılan termal çiftlerin, çapları 0.25 mm olması, deneysel çalışmalarda kolaylık sağlamak ve hassasiyeti artırmaktadır. Bu termal çiftlerin iç tarafındaki kontak noktası seramik tozla yalıtılmış ve yüzeyi metalle kaplanmış olduğu için ayrıca bir yalıtıma ihtiyaç duyulmamaktadır. Kontak uç, sıcaklığı ölçülecek bölgeye yerleştirilirken, diğer uçlar referans sıcaklığında ($0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de antifrizli su) tutulmaktadır. Bu

amaçla PolyScience dijital kontrollü ısıtmalı/soğutmalı akışkan dolaşım sisteminin akışkan tankı kullanılmıştır.



Şekil 3.13. Numunelerin sıcaklıklarının ölçümünde kullanılan K-tipi termal çiftler

Referans noktasını sabitlemede kullanılan dolaşım sistemi, tankı içerisinde bulunan akışkanı $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ile $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklık aralığında $\pm 0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ hassasiyetle kontrol edebilme özelliğine sahip olup 6 L hacminindedir. Bu nedenle sıcaklık ölçümünde kullanılan termal çiftlerin bir uçları sıcaklığı ölçülecek bölgeye yerleştirildikten sonra, diğer uçları içerisinde etil alkol bulunan bir cam tüp içerisine yerleştirilerek dolaşım sisteminin tankı içerisine sabitlendi. Cam şişe içlerinde etil alkolün kullanılmasının nedeni, ısı iletkenliğinin havanın ısı iletkenliğinden daha yüksek olması ve tank içerisindeki ısıyı termal çift uçlarına daha iyi iletmesinden dolayıdır. Dolaşım sisteminin tankına ise antifrizli su (etilen glikol çözeltisi) doldurularak referans sıcaklığı olan $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de akışkanın donması engellendi. Sistemde sıcak bölge ile soğuk bölge arasında bir e.m.k. oluşmakta ve bu oluşan e.m.k. μV mertebesinde hassas ölçüm yapan sıcaklık kaydedicisi yardımıyla okunarak $^{\circ}\text{C}$ birimine dönüştürmektedir. Böylece fırın içerisindeki numune sıcaklığı belirlenmektedir. Kullanılan termal çiftlerin ($-270\text{ }^{\circ}\text{C}$ ile $1370\text{ }^{\circ}\text{C}$) ölçüm aralıkları, deneysel çalışmalardaki ölçüm aralıkları ile uyumlu olduğundan dolayı hassas ve duyarlı bir şekilde ölçümler alınabilmiştir.

Alaşımın erime sıcaklığının tayininde (kalibrasyon), katılaştırma süreci devam ederken numune içerisinde oluşan sıcaklık gradyentinin ölçümünde ve ani soğutma anında ölçüm termal çiftlerinin sıcaklık değişimlerinin kaydedilmesinde sıcaklık kaydedicisi (data logger) kullanılmıştır. Kontrollü katılaştırma deneylerinde ölçüm termal çiftlerinin sıcaklık değişimlerinin kaydında Pico TC-08 model sıcaklık kaydedicisi kullanılmış ve

veriler bilgisayar ortamına kaydedilmiştir. Kullanılan sıcaklık kaydedicisinin fotoğrafı Şekil 3.14’te verilmiştir.



Şekil 3.14. Sıcaklık değişimlerinin kaydedilmesinde kullanılan Pico TC-08 model sıcaklık kaydedicisi

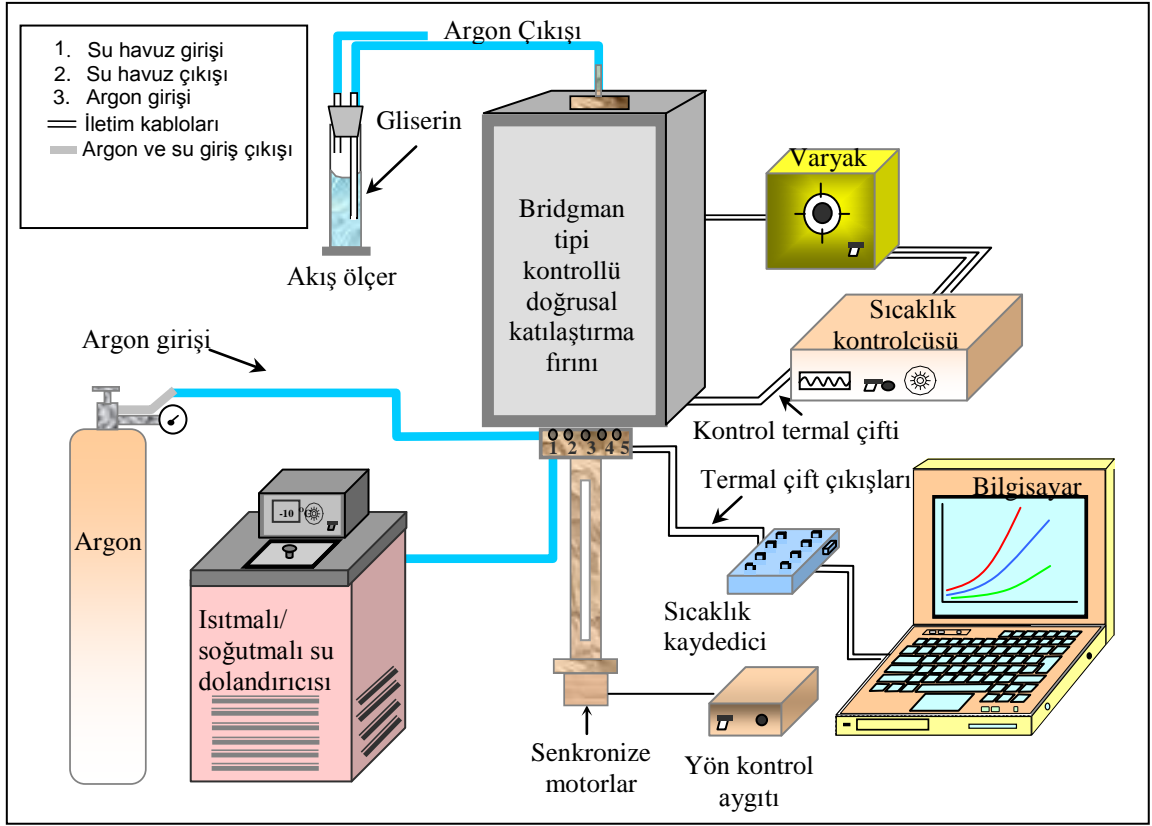
3.2.2. Kontrollü katılaştırma

Kontrollü katılaştırma deney düzeneği; yukarıda ayrıntılı özellikleri anlatılan alaşım ile doldurulan grafit numune kalıplarının, kontrollü olarak düşey doğrultuda katılaştırıldığı kontrollü katılaştırma fırını, sıcaklık kontrol ünitesi, varyak, senkronize motor, yön kontrol ünitesi, argon pozitif basınç ünitesi, akış ölçer (flowmeter), su dolaşım sistemi, sıcaklık kaydedicisi (data logger) ve bilgisayardan oluşmaktadır.

Dökümü yapılan numunelerden biri kontrollü katılaştırma fırınının numune tutucusuna yerleştirildi. Termal çift çıkışları 5 terminali bulunan selektöre bağlandı. Fırının bağlantı uçları, referans sıcaklığını 0 °C yapmak amacıyla içerisinde etil alkolün bulunduğu cam tüp borular içerisine konularak içerisinde 0 °C’de antifrizli su bulunan dijital dolaşım sisteminin tankının içerisine yerleştirildi. Şekil 3.15’te bir bütün olarak deney sisteminin şematik görünümü, Şekil 3.16’de ise laboratuvar ortamındaki fotoğrafı verilmiştir.

Bu işlemden sonra soğutma havuzu giriş ve çıkış hortumlarının bağlantıları ve istenilen dönme hızına sahip senkronize motor bağlantıları yapılarak deney sistemi kuruldu. Soğutma havuzundaki akışkanın sıcaklığı istenen düzeye geldikten sonra sisteme sıvı haldeki alaşımın katılma sürecinde herhangi bir oksidasyona maruz kalmaması için argon gazı verildi. Bu aşamadan sonra kontrollü katılaştırma fırını istenilen sıcaklığa ayarlandı. Fırının istenilen sıcaklığa gelişi, sıcaklık kaydedici ve bilgisayar bağlantısı yardımıyla kontrol edildi. Numune üzerindeki sıcaklık akışının kararlı hale gelmesi için yaklaşık 2 saat kadar beklendi. Daha sonra sürücü motor çalıştırılarak deney başlatıldı.

Numune yaklaşık 10 cm katılaştıktan sonra ani soğutma (quench) yapılarak katılaştırma durduruldu. Ani soğutma işlemi numunenin kontrollü katılaştırılma işlemi devam ederken, hızla soğuk su havuzuna çekilerek o anki haliyle katılaştırılmasıdır.



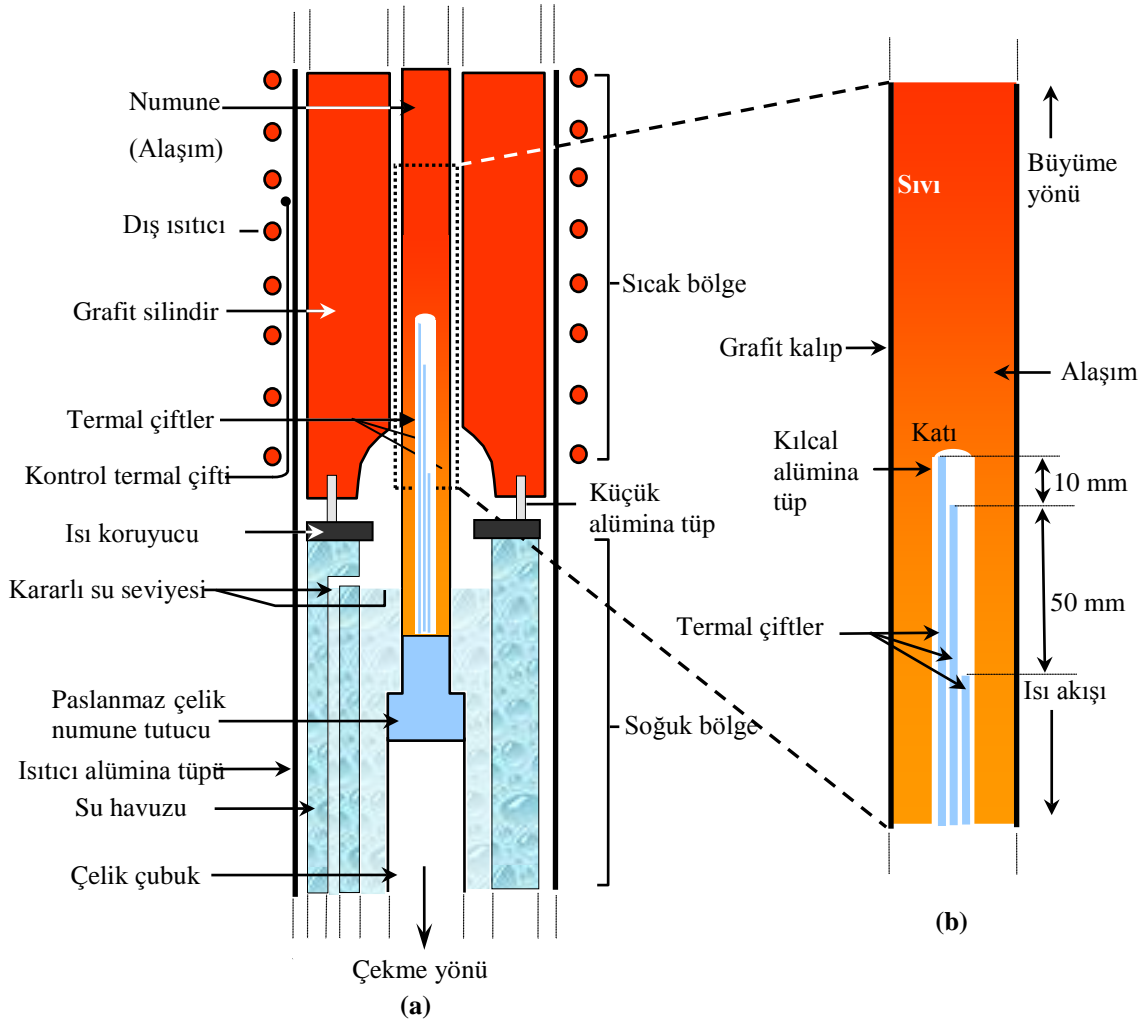
Şekil 3.15. Deney sisteminin şematik gösterimi



Şekil 3.16. Deney sisteminin fotoğrafı

Bu noktada numuneyi havuza çekme işleminin hızının yüksek olması ve havuzdaki suyun sıcaklığının numune üzerinde denge durumunu bozabilecek bir dalgalanma oluşturmaması gereklidir. Bu nedenle ani soğutmanın etkin olabilmesi için çekme işlemi çok hızlı yapıldı ve iç havuzun sıcaklığı hassas bir şekilde kontrol edildi.

Bu işlem 5 farklı katılma hızında ikişer adet olmak üzere her bir ötektik sistem için (Al-Cu-Co, Al-Cu-Si ve Zn-Al-Cu) 10 defa tekrarlandı. İkişer adet yapılmasının nedeni ise ilk yapılan deneylerde katılaştırma hızlarını ve malzemenin sıcaklık gradyentini belirlemek için içine termal çiftlerin yerleştirileceği alümina tüpler konulmasıdır. İçine alümina tüp konulan numunelerden çekme-dayanım testi güvenilir sonuçlar vermeyecektir. Bu nedenle de aynı şartlar altında iki deney yapılmıştır. Kontrollü katılaştırma fırınının iç yapısını ve içine yerleştirilen numunenin ayrıntıları Şekil 3.17’de verilmiştir.



Şekil 3.17. Bridgman tipi kontrollü katılaştırma fırınının iç yapısı

(a) Fırının sıcak ve soğuk bölgeleri (b) Numune kalıbı

Kararlı ötektik mikroyapıların oluşabilmesi için ötektik bileşim değerine karşılık gelen oranların doğru olarak hesaplanması, tartılması ve deney esnasında katılaştırma şartlarının kararlı olması (yani katılaştırma esnasında konveksiyon etkisinin minimum ve numune üzerinde sıcaklık değişiminin ± 0.1 °C'den büyük olmaması) gerekmektedir.

Ayrıca deney esnasında numunenin katılaştırma hızının ve sıcaklık gradyentinin hassas bir şekilde ölçülmesi ve deney sonucunda oluşan ötektik mikroyapı mesafelerinin hassas okunması deneysel hata oranını minimize etmektedir.

3.2.2.1. Sıcaklık gradyentinin ölçülmesi

Kontrollü katılaştırma deneylerinde kontrol parametrelerden birisi sıcaklık gradyentidir. Sıcaklık gradyentinin ölçümü aşağıda özetlenmiştir. Kontrollü katılaştırma fırınına yerleştirilen numune içerisindeki sıcaklık akışı kararlı hale geldikten sonra sürücü motor çalıştırılarak katılaştırma başlatıldı. Deney sisteminde kullanılan Bridgman tipi kontrollü katılaştırma fırını düşey olarak tasarlandığından içerisindeki numune aşağıdan yukarıya doğru katılaşmaktadır. Numune içerisindeki kılcal alümina tüpün içine yerleştirilen üç K-tipi termal çift ve sıcaklık kaydedicisi yardımıyla numunenin sıcaklığı tespit edildi. Numune katılaştırılırken, birinci termal çift katı-sıvı arayüzeyine geldiğinde ikinci ve üçüncü termal çiftlerin sıcaklıkları ölçüldü. Buradan;

$$G_{12} = \frac{\Delta T}{\Delta X} = \frac{T_2 - T_1}{X_2 - X_1}, G_{23} = \frac{\Delta T}{\Delta X} = \frac{T_3 - T_2}{X_3 - X_2} \text{ veya } G_{13} = \frac{\Delta T}{\Delta X} = \frac{T_3 - T_1}{X_3 - X_1} \quad (3.1)$$

denklemleri yardımıyla sıvı içerisindeki sıcaklık gradyenti G_s , üç farklı noktadan ölçüldü. T_1 , T_2 ve T_3 sırasıyla 1., 2. ve 3. termal çiftlerin ölçtüğü sıcaklık, X_1 , X_2 ve X_3 ise sırasıyla 1., 2. ve 3. termal çiftlerin numune tabanına olan uzaklıklarıdır.

Deney esnasında termal çiftler arasındaki mesafelerin değişmemesi ve sıcaklık gradyenti ölçümlerinin daha hassas olabilmesi için kalıp içerisine yerleştirilen termal çiftler numune kalıbı hazırlama sürecinde birbirlerine yapıştırılmış ve yüksek sıcaklık silikonu yardımıyla kalıbın alt kısmına sabitlenmiştir. Deneyler yapılmadan önce ve deneyler tamamlandıktan sonra birbirine tutturulmuş termal çiftler arasındaki mesafeler fotoğrafları çekilerek Adobe Photoshop CS4 programı yardımıyla hassas bir şekilde ölçüldü. Termal çiftler arasındaki mesafelerin böyle hassas bir şekilde ölçülmesi sıcaklık gradyenti hesaplamalarında güvenilirliği artırmaktadır.

3.2.2.2. Katılaştırma hızının ölçülmesi

Kontrollü katılaştırma deneylerinde kontrol parametrelerinden bir diğeri ise katılma hızıdır. Katılma hızı, sürücü motor vasıtasıyla elde edilen çekme hızından farklıdır. Çekme hızı numunenin soğutucu sisteme doğru çekilme hızı yani motorun çekme hızıdır. Katılma hızı ise numune içerisinde oluşan katı-sıvı arayüzeyinin ilerleme hızıdır. Çekme hızı arttıkça katılma hızı artmakta, çekme hızı azaldıkça katılma hızı da azalmaktadır. Farklı sıcaklık gradyentleri için katılma hızını, çekme hızına eşit olarak almak yeterince hassas değildir.

Deneylerde hem çekme hızı hem de katılma hızı hassas bir şekilde ölçülmüş fakat hesaplamalarda sadece katılma hızı kullanılmıştır. Şekil 3.18’de bazı senkronize motorların fotoğrafı verilmektedir.



Şekil 3.18. Numunelerin farklı hızlarda katılaştırılmasını sağlayan senkronize motorlar

Katılma hızı şu şekilde ölçülmüştür: Katılaştırma süreci devam ederken sıcaklık kaydedici tarafından sıcaklık-zaman değişimini sürekli olarak kaydedilmektedir. Katılaştırma işlemi bittiğinde sıcaklık kaydedicinin topladığı veriler yardımıyla ikinci termal çiftin ötektik erime sıcaklığına geldiğindeki süre (t_2) ve üçüncü termal çiftin ötektik sıcaklığına geldiğindeki süre (t_3) saniye cinsinden ölçüldü. İkinci ve üçüncü termal çift arasındaki mesafe önceden bilindiğinden,

$$V = \frac{\Delta X}{\Delta t} = \frac{X_3 - X_2}{t_3 - t_2} \quad (\mu m / s) \quad (3.2)$$

denklemleri yardımıyla katılaştırma hızı hesaplandı. Al-Cu-Co, Al-Cu-Si ve Zn-Al-Cu alaşım sistemleri için katılaştırma hızlarının birbirlerine çok yakın olması nedeniyle ortalamaları alınmış ve genel bir değerlendirme yapılmıştır.

3.2.3. Metalografik işlemler

Katı-sıvı arayüzeyinde oluşan mikroyapıyı gözlemleyebilmek için numune metalografik işlemlere tabi tutulmalıdır. Bunun için ani soğutulmuş numune kontrollü katılaştırma fırınından çıkarıldı. Numunelerin kesilmesi, zımparalanması, kalıplanması, parlatılması, ultrasonik temizlenmesi ve dağlanması gibi metalografik işlemler sonunda, açığa çıkan mikroyapıların fotoğrafları görüntü sistemi (optik mikroskop + CCD kamera + bilgisayar) ve taramalı elektron mikroskopuyla (SEM) çekildi. Bu süreçler aşağıda ayrıntılı olarak anlatılmıştır.

3.2.3.1. Numunelerin kesilmesi

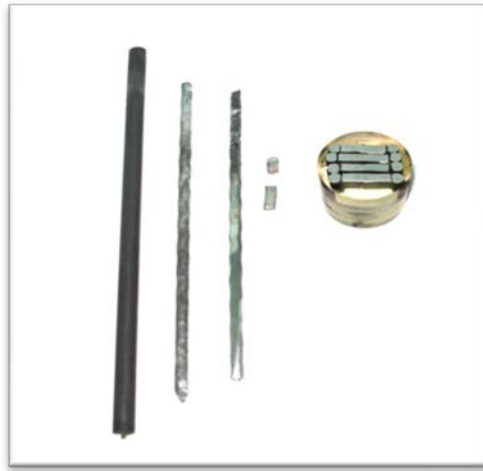
Metal numuneleri istenilen boyutlara kesmede Struers Minitom kesme aleti ve 127 mm çaplı, 0.4 mm kalınlığında Struers elmas kesici kullanılmıştır. Numunenin boyuna kesitleri arayüzeyi içine alacak şekilde, enine kesitleri ise arayüzeye olabilecek en yakın mesafeden alınmıştır. Burada dikkat edilmesi gereken husus kesme esnasında numunede herhangi bir yapı değişiminin oluşmasını engellemektir. Keski kullanarak yapılan kesme işlemlerinde yapıda bozulmalar olabilir. Prensipte olarak, numune yapısında minimum yapı değişimi yapan ve en az ısı oluşturan kesme tekniğinin kullanılması gerekmektedir.

Bridgman tipi kontrollü katılaştırma fırınından çıkarılan numunenin grafit kalıbı, numuneye zarar vermeyecek şekilde itina ile çıkarıldı. Numune bir yüzeyinden boyuna parlatılarak arayüzeyin yeri tespit edildi. Daha sonra kesme robotu yardımıyla arayüzeye en yakın katı ve sıvı bölgelerinden parçalar düşük hızda kesildi. Aynı işlem üretilen her bir numune için tekrarlandı. Enine ve boyuna kesitleri alınan numuneler, kalıplamaya ve zımparalamaya hazır hale getirilmiş oldu.

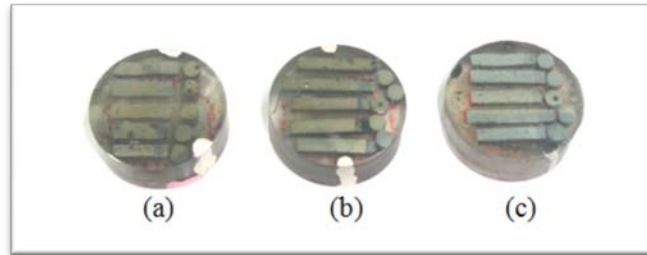
Bu çalışmada enine ve boyuna kesitleri alınan numuneler soğuk kalıplama yöntemi kullanılarak epoksi-resin ile kalıplandı. Numunenin boyutlarına uygun, plastikten yapılmış kalıplar içine numuneler yerleştirildi. Numune, üzerine kalıplama için hazırlanan epoksi-resin karışımının dökülmesi esnasında kaymaması için sabitlendi.

Epoksi ve sertleştirici 7/1 oranında karıştırılarak kalıba döküldü ve sertleşmeye bırakıldı. Epoksi-resin yaklaşık 8 saat içerisinde sertleşti. Bu süre sonunda kalıp etrafındaki plastik çıkartılarak zımparalamaya hazır hale getirildi.

Şekil 3.19'da Bridgman kontrollü katılaştırma fırınından çıkarılan numunenin grafit kalıptan çıkarılması, arayüzeyin belirlenmesi, arayüzeyden boyuna ve enine kesitlerin alınması ve epoksi-resin ile kalıplanması sürecinin fotoğrafı verilmiştir. Hem boyuna hem de enine kesilen ve epoksi-resin ile kalıplanan her bir alaşım sistemin fotoğrafı Şekil 3.20'de verilmektedir.



Şekil 3.19. Numune kalıbının oluşturulmasından epoksi-resin ile kalıplanması sürecine kadarki her bir aşamanın gösterimi



Şekil 3.20. Epoksi-resin ile kalıplanarak metalografik işlemlere tabi tutulan her bir ötektik alaşımın enine ve boyuna kesitleri
(a) Al-Cu-Co, (b) Al-Cu-Si (c) Zn-Al-Cu

3.2.3.2. Numunelerin zımparalanması

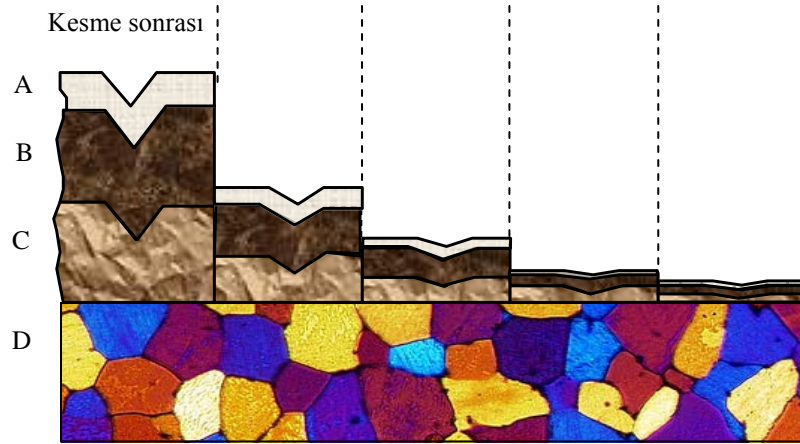
Numunelerin zımparalanması silisyum karbür (SiC) taneleri ve magnetit tozu içeren zımpara kâğıtlarıyla yapıldı. Zımpara kâğıtlarında birim alana düşen tane sayısı (grid) arttıkça mikron cinsinden tane boyutu azalmaktadır. 80-600 gridler kaba, 800-4000 gridler ise ince zımpara olarak sınıflandırılmaktadır.

Numuneler, 80 gridlik zımpara kâğıdından başlayarak 4000 gride kadar, kabadan inceye doğru kademeli olarak zımparalandı. Numunelerin zımparalanmasında kullanılan bazı zımpara kâğıtlarının fotoğrafı Şekil 3.21’de verilmektedir.



Şekil 3.21. Numuneleri zımparalamada kullanılan bazı zımpara kağıtları

Her bir numune kaba zımparalarla 10-15 dakika, ince zımparalarla ise 20-25 dakika süreyle zımparalandı. Numune yüzeyinde zımparalama işlemiyle oluşan şekil değişikliğinin şematik gösterimi Şekil 3.22’te verilmektedir.



Şekil 3.22. Kesme robotu ile kesilmiş numunedeki yüzey durumu (A, B, C tabakaları zımparalama işlemiyle oluşan şekil değişikliklerini D ise orijinal içyapıyı göstermektedir) (Geçkinli, 1989)

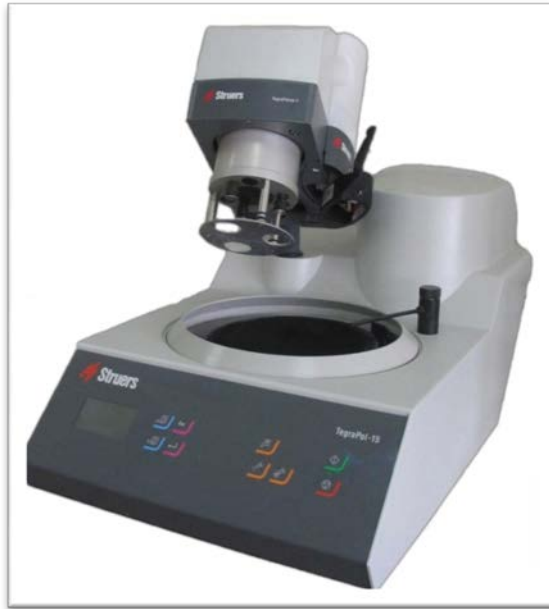
3.2.3.3. Numunelerin parlatılması

Zımparalama ve parlatma işlemleri Struers TegraPol-15 tipi otomatik parlatma robotu ile yapıldı. Otomatik parlatma robotunun fotoğrafı Şekil 3.23’te verilmiştir. Öncelikle parlatma robotun disklerine farklı tane büyüklüklerine sahip zımparalar takıldı. Cihazın

su modu açılarak numunelere sulu zımparalama yapması sağlandı. Böylelikle numunenin hem ısınması engellendi hem de homojen bir temas sağlandı.

Zımparalamanın düzgün ve itinalı yapılması fotoğraf çekmede odaklama kolaylığı sağlamaktadır. Her bir zımparalama kademesinden sonra numune yüzeyinin düz olmasına ve derin çiziklerin giderilmiş olmasına dikkat edildi. Daha sonra dönüş hızı ve baskı basınç değeri ayarlanabilen otomatik parlatma robotunun disklerine, parlatılacak numuneye uygun parlatma kumaşları takıldı. Kaba ve ince parlatma için farklı tane büyüklüğüne sahip elmas süspansiyonlar kullanıldı.

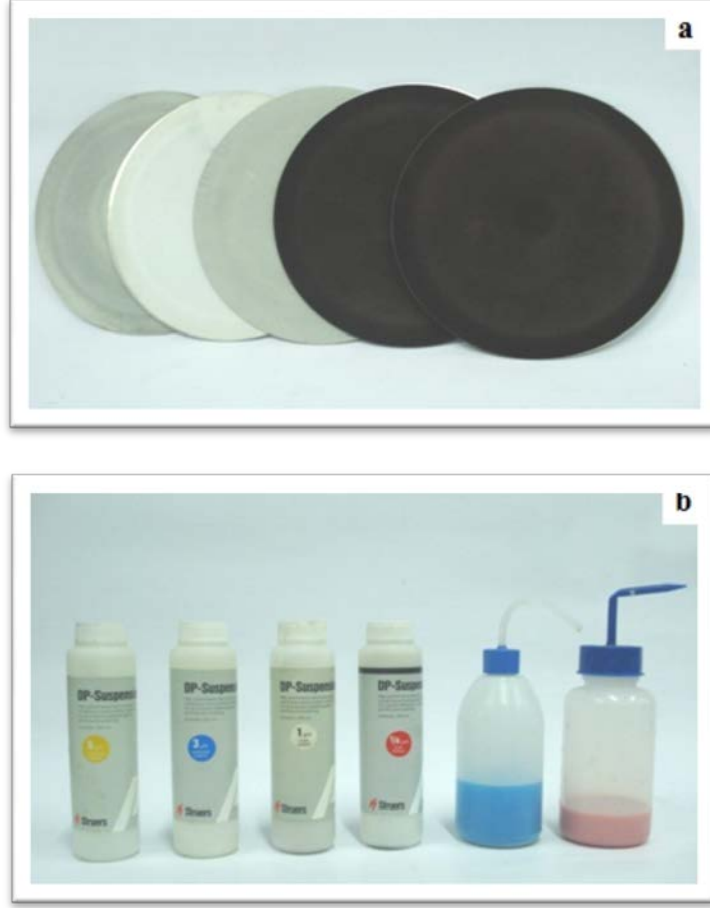
Parlatma işleminde kullanılan elmas süspansiyonlar sırasıyla 6 μm , 3 μm , 1 μm , 0.25 μm ve 0.05 μm tane büyüklüğüne sahip elmas çözeltilerdir. Parlatma sırasında her bir elmas süspansiyon için ayrı metal diskler üzerine yapıştırılmış parlatma kumaşları kullanıldı. Numune ile parlatma kumaşı arasında yumuşak bir temas sağlamak ve nem miktarını ayarlamak amacıyla parlaticı ile birlikte Struers Depif yağlayıcı (lubrikant) kullanıldı. Parlatma sırasında disk dönerken nem azaldıkça, numune yüzeyine parlaticı çözeltiler yapışabilmekte ve yüzeyde leke oluşturabilmektedir. Disk üzerindeki kumaşın kurumaması için zaman zaman çözelti veya yağlayıcı ilavesi yapıldı.



Şekil 3.23. Otomatik parlatma robotu

6 μm , 3 μm ve 1 μm 'lik parlatma çözeltileri kullanılırken numune üzerine her numunede farklı olmak üzere kuvvet (20-50 N) uygulandı. 0.25 μm ve 0.05 μm 'lik parlatma çözeltileri kullanılırken uygulanan kuvvetin büyüklüğü azaltıldı. Numuneler her bir çözelti ile ortalama 5-10 dakika parlatıldı. Parlatma sırasında elmas çözeltinin

disk üzerinde homojen dağılmasına dikkat edildi. Her aşama sonunda numune bol damıtık su ile yıkandı. Numunelerin parlatılmasında kullanılan parlatma kumaşları ve parlatma süspansiyonları Şekil 2.24'te verilmektedir.



Şekil 3.24. Numunelerin parlatılmasında kullanılan
(a) Kumaşlar ve (b) Süspansiyonlar

0.05 μm 'lik çözelti ile yapılan parlatma kademesinin sonunda disk üzerine saf su sıkılarak numune iyice temizlendi. Artık numune yüzeyi dağlanmaya hazır duruma gelmiştir. Çizelge 3.1'de bu çalışmada kullanılan çözelti ve kumaşların özellikleri verilmektedir.

Çizelge 3.1. Parlatmada kullanılan çözelti ve kumaşlar

Çözeltinin Tane Büyüklüğü	Çözeltinin Özelliği	Parlatma Kumaşı	Kullanılan Yağlayıcı
6 µm	Struers Elmas Çözelti	Struers Polifloc3	Struers Depif
	Monokristal, Samex	200 mm çapında	Mavi renkli
3 µm	Struers Elmas Çözelti	Struers Polifloc3	Struers Depif
	Monokristal, Samte	200 mm çapında	Mavi renkli
1 µm	Struers Elmas Çözelti	Struers Polifloc3	Struers Depif
	Monokristal, Samno	200 mm çapında	Mavi renkli
0.25 µm	Struers Elmas Çözelti	Struers Policel2	Struers Depif
	Polikristal, Sapuq	200 mm çapında	Mavi renkli
0.05 µm	Struers Alümina Çözelti	Struers Policel2 200 mm çapında	Damıtık Su

Her malzemenin parlatılması birbirinden farklılıklar gösterebilmektedir. Yumuşak malzemenin parlatılması sürecinde malzemenin taneleri parlatılan yüzeye yapışarak yapıyı kapatmaktadır. Dolayısıyla her bir parlatma kademesinde yüzeyde oluşan tabakanın temizlenmesi gerekmektedir. Sert malzemelerde ise parlatma esnasında üzerine oldukça yüksek (50 N) bir kuvvet uygulamak gerekmektedir. Bu tez çalışmasında belirlenen alaşımların hepsi (Al-Cu-Co, Al-Cu-Si ve Zn-Al-Cu) sert malzemelerdir.

3.2.3.4. Numunelerin dağlanması

Her ne kadar parlatma sonucunda numunenin yüzeyi düzgün, pürüzsüz ve ayna gibi parlak olsa da numune yüzeyinde kontrast oluşturmadan inceleme yapmak mümkün değildir. Mikroyapı analizi için numunenin dağlanması gerekmektedir. Dağlama sonucunda mikroyapı karakteristikleri ortaya çıkarılır. Metalografide iki çeşit dağlama vardır: elektrolitik dağlama ve kimyasal dağlama. Elektrolitik dağlama ile yüzeyden atom tabakaları atılır. Bunun için belirli bir enerjiye ihtiyaç vardır. Bu enerji, ısı veya yüksek voltaj uygulanarak sağlanabilir (Geçkinli, 1989). Kimyasal dağlama ise numunenin yüzeyine uygun bir çözelti uygulanarak yapılmaktadır. Dağlama işleminde en önemli nokta metalik malzeme için uygun dağlama çözeltisini seçmektir.

Bu çalışmada, numunelerin tane sınırlarını ve mikroyapı özelliklerini ortaya çıkarmak için numune yüzeyine uygun bir reaktif tespit edilerek kimyasal dağlama tekniği uygulandı. Kimyasal dağlama işlemi; yüzeyi istenen kalitede temizlenmiş ve pürüzsüz

hale getirilmiş numunenin, dağlama çözeltilisine uygun sürelerde daldırılmasıyla yapılmaktadır. Dağlama işlemi sonunda parlatılmış yüzey, çözeltilinin etkisiyle renk değiştirir ve donuklaşır. Dağlamanın yeterli olup olmadığına mikroskopla numuneye bakılarak karar verilir. Dağlama neticesinde katı bölge matlaşırken sıvı bölge sedefsi bir renge dönüşür. Dağlama, tane sınırlarının açığa çıkarılması, fazların tayin edilmesi ve dislokasyonların belirlenmesi gibi durumlarda yapılmaktadır (Geçkinli, 1989). Şekil 3.25’de farklı katılma şartlarında üretilen numunelerin dağlanmasında kullanılan bazı kimyasal dağlama malzemelerinin fotoğrafları verilmiştir.



Şekil 3.25. Numunelerin dağlanmasında kullanılan bazı dağlama malzemeleri

Bu çalışmada Al-Cu-Co, Al-Cu-Si ve Zn-Al-Cu alaşım sistemleri için metalografi kitaplarından faydalanarak uygun dağlayıcı çözeltileri hazırlandı. Çözelti bileşenlerinin oranları değiştirilerek mikroyapıyı en iyi ortaya çıkaran dağlayıcılar tespit edildi.

Çizelge 3.2. Alaşım sistemlerinde kullanılan dağlayıcılar

Alaşım sistemi	Dağlayıcı	Dağlama süresi
Al-Cu-Co	2mL HF-6mL HNO ₃ -92mL H ₂ O	15 saniye
Al-Cu-Si	5mL HF-10mL H ₂ SO ₄ -85 mL H ₂ O	20 saniye
Zn-Al-Cu	3mL HCl-100 mL H ₂ O	1-5 saniye

3.2.4. Mikroyapıların gözlenmesi

Üretilen her bir numunenin uygun bölgelerinden kesitler alınıp soğuk kalıplama yöntemiyle kalıplandıktan sonra metalografik işlemlere tabi tutuldu ve uygun dağlayıcılarla dağlandı. Üretilen her bir numunenin mikroyapı fotoğrafları öncelikle optik görüntü sistemiyle daha sonra taramalı elektron mikroskopuyla (SEM) çekildi.

İlk olarak bütün numunelerin yüzeyi incelenerek oluşan ötektik mikroyapıların fotoğrafları optik mikroskopla farklı büyüklükteki objektiflerle ($\times 2.5$, $\times 5$, $\times 10$, $\times 20$, $\times 50$, $\times 100$ ve $\times 200$) çok sayıda (enine ve boyuna kesitten) çekildi. Ötektik mikroyapı mesafelerinin doğru bir şekilde tayin edilebilmesi için optik mikroskopun büyütme ölçeğinin bilinmesine dolayısıyla da düzeltme çarpanının bilinmesine ihtiyaç vardır. Düzeltme çarpanını hesaplayabilmek için 1 mm'lik bir mikrometre (gratikula) kullanıldı. Mikrometrenin fotoğrafı, mikroyapı fotoğraflarının çekilmiş olduğu objektif ile çekildi. Mikrometrenin ve mikroyapının fotoğrafları bilgisayar bağlantılı Olympus DP12 tipi dijital kamera monte edilmiş Olympus BX51 tipi optik ışık mikroskopundan oluşan görüntü sistemi vasıtasıyla çekildi. Görüntü sisteminin fotoğrafı Şekil 3.26'da verilmiştir.



Şekil 3.26. Görüntü sistemi elemanları; optik mikroskop ve CCD kamera

Numunelerin SEM fotoğraflarının çekilmesinde LEO 440 marka bilgisayar kontrollü dijital taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanıldı. Bu mikroskop, 40 kV hızlandırma voltajlı ve Secondary - Backscattered elektron detektörüne sahip $\times(5-300\ 000)$ kat büyütme kapasitelidir. Ayrıca farklı fazların tane yönelimini tespit edebilme özelliği bulunmaktadır. Şekil 3.27'de kullanılan SEM mikroskobunun fotoğrafı verilmektedir.

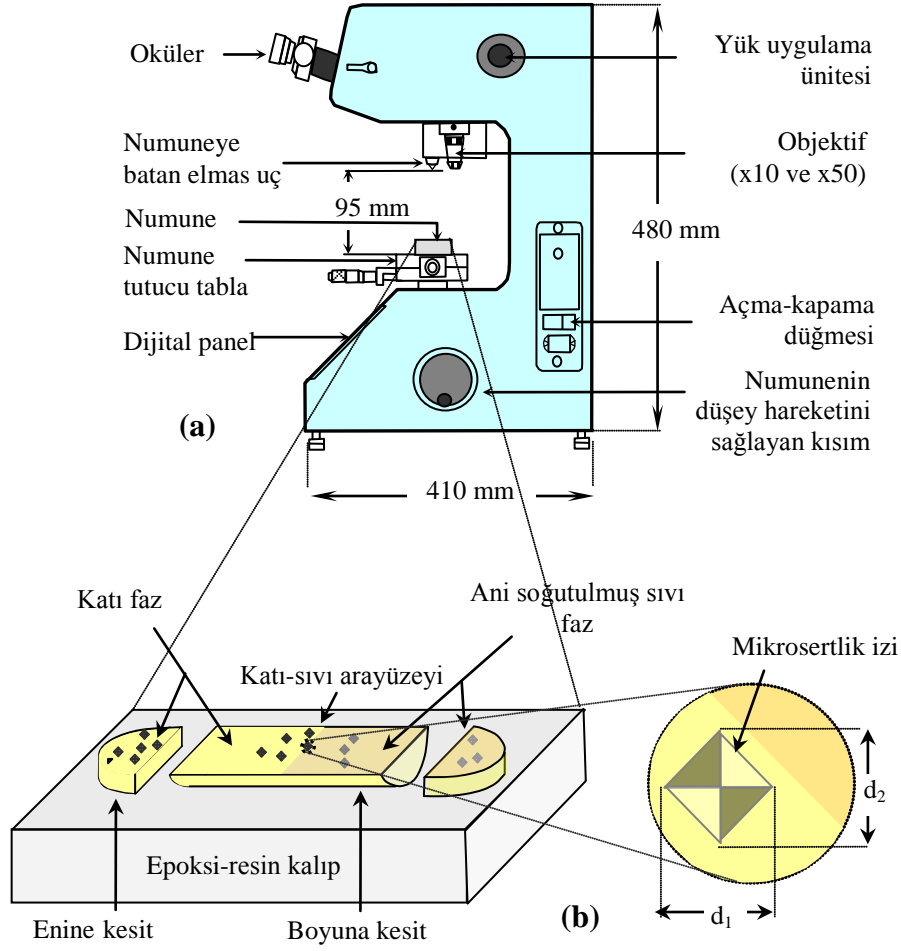


Şekil 3.27. Taramalı elektron mikroskobunun (SEM) dıştan ve içten görünüş fotoğrafları

SEM ile fotoğraf çekimine geçmeden önce, parlatılmış ve dağlanmış olan numuneler, elektron demetinin yüzeyden daha iyi saçılması ve görüntünün daha iyi kontrast ve netliğe sahip olması için kaplama ünitesinde yüzeyleri yaklaşık 10-40 nm inceliğinde gümüş tabaka ile kaplanarak vakum altına alındı. Bu işlemden sonra gümüş tabaka ile kaplanmış numuneler, SEM'in vakum haznesi içindeki numune tablası kısmına yerleştirilerek numunelerin uygun bölümlerinden farklı büyütmelerde fotoğrafları çekildi.

3.3. Mikrosertlik Değerlerinin Ölçülmesi

Numunelerin mikroyapı fotoğrafları optik görüntü sistemi ve SEM mikroskobuyla çekildikten sonra mikrosertlik ölçümlerine geçildi. Mikrosertlik ölçümlerinde, şematik yapısı Şekil 3.28'de verilen Future Tech FM-700 model dijital mikrosertlik ölçüm cihazı kullanılmıştır. Bu cihaz 10 g, 25 g, 50 g, 100 g, 200 g, 300 g, 500 g ve 1000 g'lık yük uygulayabilen, %5 hassasiyette ölçüm alabilen ve elektronik olarak mikrosertlik değerini kendisi hesaplayabilen bir cihazdır. Kendi üzerinde fotoğraf çekme ünitesi olup $\times 200$, $\times 500$ ve $\times 1000$ büyütme değerlerindeki objektiflerle fotoğraf çekebilme özelliklerine sahiptir.



Şekil 3.28. (a) Mikrosertlik ölçüm cihazının şematik gösterimi, (b) Numune üzerinde cihazın bıraktığı izin detayları.

Farklı katılaştırma parametrelerinde (G , V) katılaştırılan numuneler sırasıyla ölçüm cihazına bağlanarak, her bir numunenin enine kesitinden ve boyuna kesitinin katı-sıvı arayüzeyine yakın katı kesitinden 8-12 adet mikrosertlik ölçümleri alınmıştır. Ölçülen mikrosertlik değerleri kullanılarak, katılaştırma parametreleri (G , V) ve mikroyapı parametresi (λ_E) değerleri ile mikrosertlik (HV) değerleri arasındaki ilişki ve bağıntılar elde edilmiştir. Elde edilen ölçüm sonuçları grafiklerle Bölüm IV'de verilecektir.

3.4. Çekme-Dayanım Değerlerinin Ölçülmesi

Farklı katılaştırma şartlarında katılaştırılan numunelerin her birinden ikişer adet yapılmıştır. Çünkü çekme-dayanım testi için en az 50 mm uzunluğunda düzgün katılmış kesite ihtiyaç duyulmuştur. Böylece mikroyapı belirlenmesi ve elektriksel özellikler için ilk numune kullanılırken aynı şartlar altında katılaştırılan ikinci numuneler çekme-dayanım testi için kullanılmıştır.

Farklı katılaştırma parametrelerinde üretilen 4 mm çaplı ve en az 50 mm uzunluğundaki kontrollü katılaştırılmış numuneler Shimadzu marka çekme-dayanım cihazının çeneleri arasına sıkıca yerleştirildikten sonra 20 mm/dak hızlarında çekilerek gerilme-uzama eğrileri elde edilmiştir. Böylece elde edilen eğrilerden her bir numunenin çekme-dayanım değeri belirlenerek katılaştırma hızı ve mikroyapıyla değişimi tanımlanmıştır. Elde edilen ölçüm sonuçları grafiklerle Bölüm IV’de verilecektir.

3.5. Elektriksel Özdirenç Değerlerinin Ölçülmesi

Üretilen her bir alaşımın mikroyapıya bağlı elektriksel özdirenç değerlerinin ölçümünde dört nokta iletkenlik ölçüm metodu kullanılmıştır. Ölçümler için Şekil 3.29’da görülen Keithley 2400 marka programlanabilir güç kaynağı, Keithley 2700 marka multimetre ve Protherm marka kül fırınından faydalanılmıştır.

Ölçümlerde gümüş tellerin çubuk şekilli numunelere doğrudan teması sağlandı. Ölçümler, her bir numune için oda sıcaklığında 0.1 s’de bir 100 ölçüm alınarak yapıldı. Elde edilen ölçüm sonuçları grafiklerle Bölüm IV’de verilecektir.



Şekil 3. 29. a) Keithley 2700 marka multimetre
b) Keithley 2400 marka programlanabilir güç kaynağı c) Protherm marka kül fırını

3.6. Entalpi ve Öz Isı Ölçülmesi ve Termal İletkenliklerin Hesaplanması

Sıcaklığa karşılık gelen termal iletkenlik değerleri, ölçülen elektriksel iletkenlik değerleri (σ) kullanılarak Wiedemann - Franz (Kittel, 1965) ve Smith - Palmer (Poirier ve Geiger, 1994) denklemlerinden belirlenebilir. Weidemann - Franz ve Smith - Palmer

denklemlerinden sıcaklığa karşılık gelen termal iletkenlik değerini hesaplamak için σ değeri kadar Lorentz sayısı (L) değeri de gereklidir. Kullanılan alaşımlar için gerekli olan Lorenz sayıları literatürden bulunmuştur. Bu işlem yapılırken alaşımda büyük oranı kaplayan malzeme seçildi. Örnek olarak Al-%23.9Cu-%1.2Co (%Ağ.) alaşımı için literatürden Al ve Zn-7Al-2.96Cu (%ağ.) alaşımı için literatürden Zn için L değeri (Hatch, 1984; Pollock, 1993) bulundu. Belirli bir bileşim için termal iletkenliğin katı fazdaki sıcaklığa bağımlılığı doğrusaldır. Termal iletkenlik sıcaklık katsayısı

$$\alpha_{TCT} = \frac{K - K_o}{K_o(T - T_o)} = \frac{\Delta K}{K_o \Delta T} \quad (3.3)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada K , T sıcaklığındaki termal iletkenlik, K_o ise oda sıcaklığındaki termal iletkenliktir. $T_o=300$ K ve α_{TCT} termal iletkenliğin sıcaklık katsayısı olarak ifade edilebilir. Bunun anlamı α_{TCT} termal sıcaklık katsayısının termal iletkenliğe karşı sıcaklık grafiğinden belirlenebileceğidir.

Endüstriyel uygulamalar için büyük önem arz ettiğinden dolayı çalışılan malzemelerin entalpileri (ΔH) ve özısı değişimleri (ΔC_p) de belirlendi. Bu işlem için diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC - Perkin Elmer Diamond modeli) kullanıldı. Termal analiz için sabit atmosfer basıncı ve nitrojen soğutması altında 300-780 K sıcaklık aralığı, 10 K/dak. ısıtma hızı değerleri kullanıldı. Elde edilen ölçüm sonuçları grafiklerle Bölüm IV'de verilecektir.

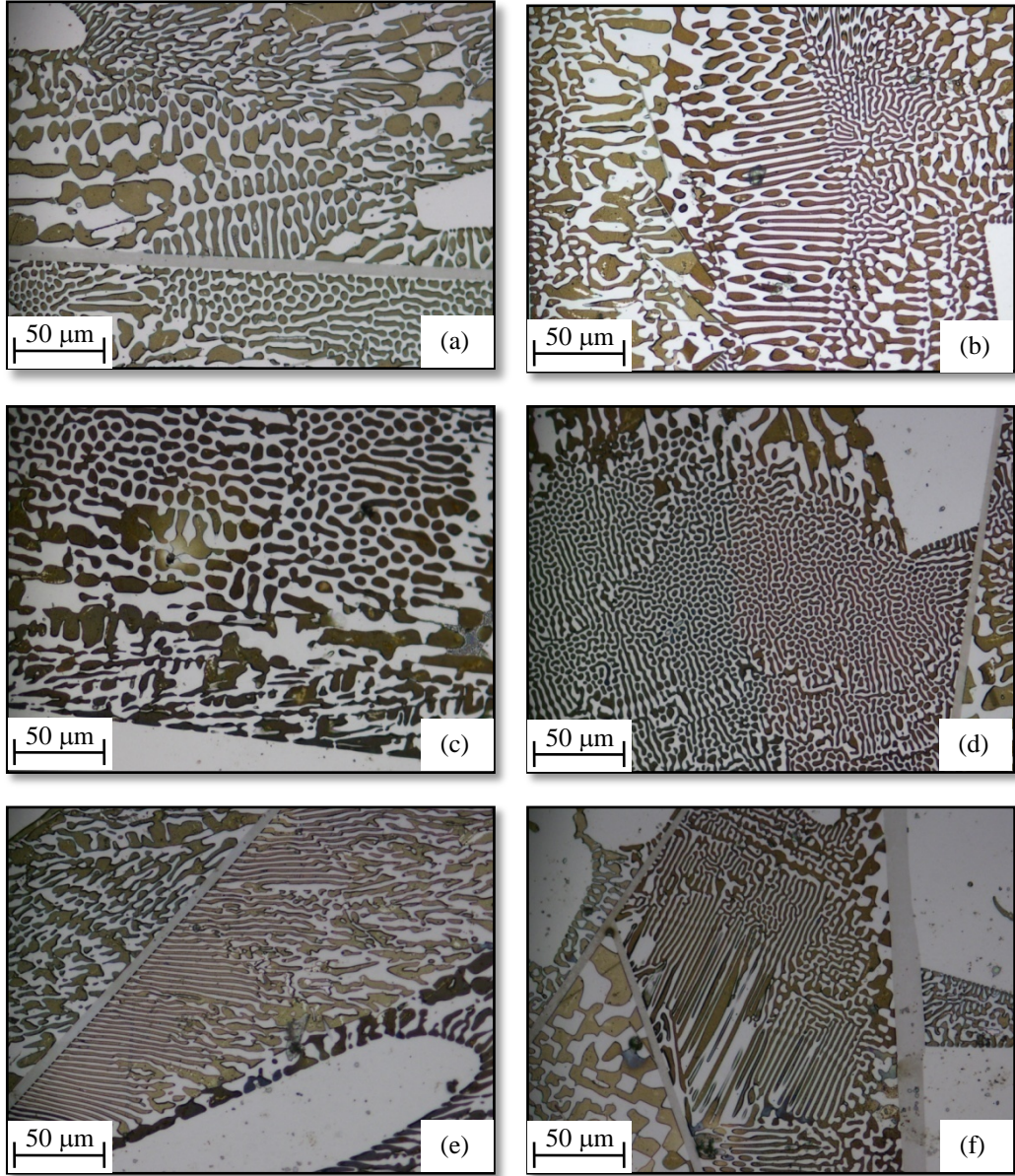
BÖLÜM IV

BULGULAR, TARTIŞMA ve SONUÇ

Bu bölümde Al-Cu-Co (Al-%23.9Cu-%1.2Co (ağ.)), Al-Cu-Si (Al-%13.6Cu-%6Si (ağ.)) ve Zn-Al-Cu (Zn-%7Al-%2.96Cu (ağ.)) alaşım sistemleri için yapılan kontrollü katılaştırma deneylerinden elde edilen mikroyapılardan, ötektik mesafe ve dendritik mesafe ölçümleri yapılmıştır. Katılaştırma hızının ve sıcaklık gradyentinin malzemelerin mikroyapı, mekanik özelliklerden mikrosertlik, çekme-dayanım, basma-dayanım ve elektriksel özdirenç üzerine etkilerini araştırılarak aralarındaki bağımlılar belirlenmiştir. Buna ilaveten çalışılan alaşımların entalpi, öz ısı ve termal iletkenlikleri de hesaplanmıştır. Ayrıca deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen bulgular literatürdeki benzer deneysel çalışmalarla karşılaştırılmıştır.

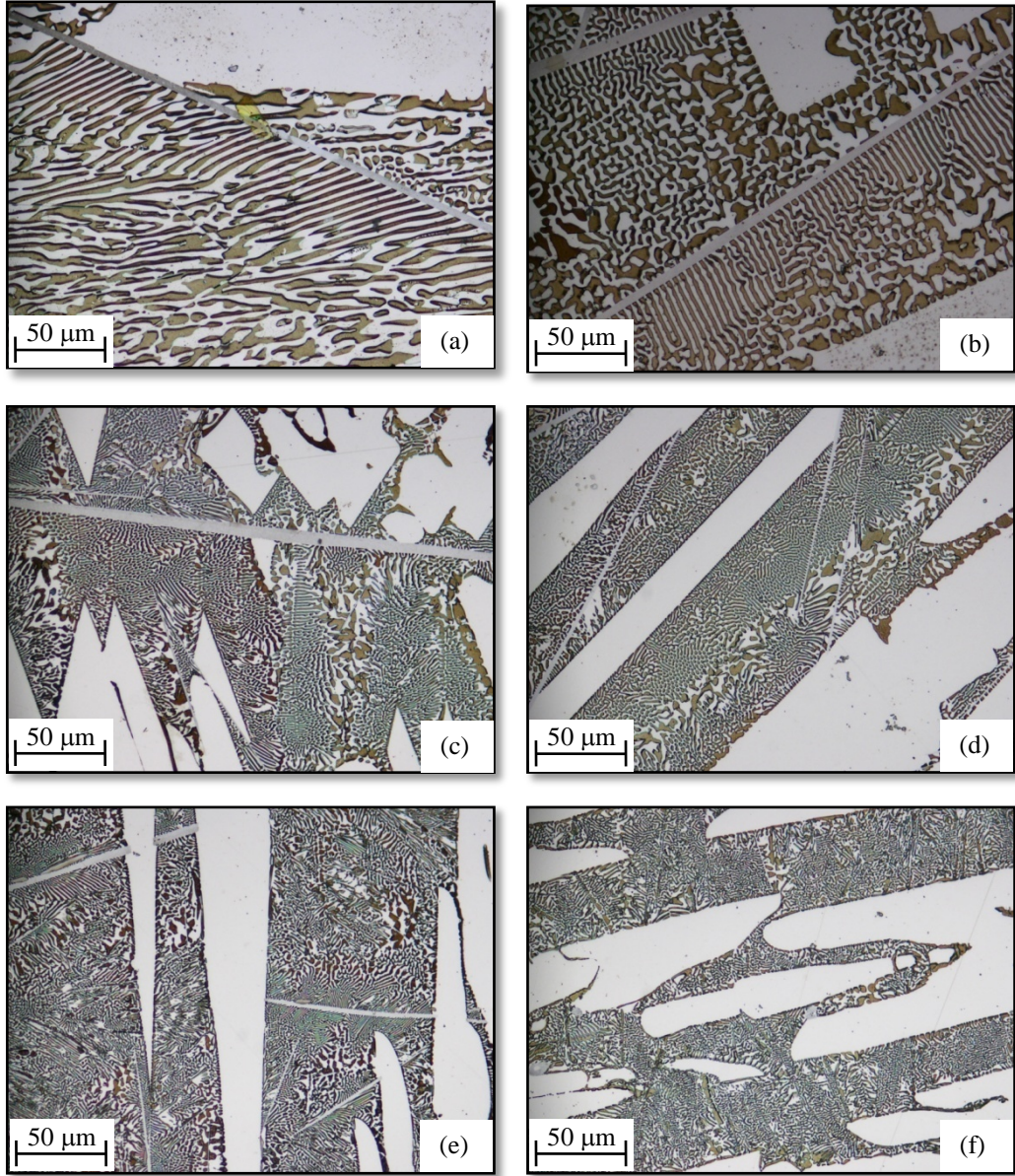
4.1. Mikroyapı Analizi ve Gözlenen Mikroyapılar

Bridgman tipi kontrollü katılaştırma fırınında, farklı katılaştırma parametrelerinde üretilen her bir numunenin hem optik hem de SEM fotoğrafları farklı büyütme oranlarında çok sayıda çekilmiştir. Katılaştırma deneyleri neticesinde alaşımların mikroyapılarının fotoğraflarının çekilmesinde öncelikle optik mikroskop kullanılmış, elde edilen görüntülerin yüksek çözünürlüklü olarak açığa çıkarılması ve fazların belirlenmesi için de SEM mikroskobu kullanılmıştır. Bu kapsamda; sabit katılaştırma hızı farklı sıcaklık gradyentlerinde ve sabit sıcaklık gradyenti farklı katılaştırma hızlarında kontrollü katılaştırılmış Al-Cu-Co (ötektik), Al-Cu-Si (dendritik) ve Zn-Al-Cu (ötektik) alaşımlarının optik mikroskopla çekilen mikroyapı fotoğraflarından bazıları Şekil 4.1 - 4.6'da verilmiştir.



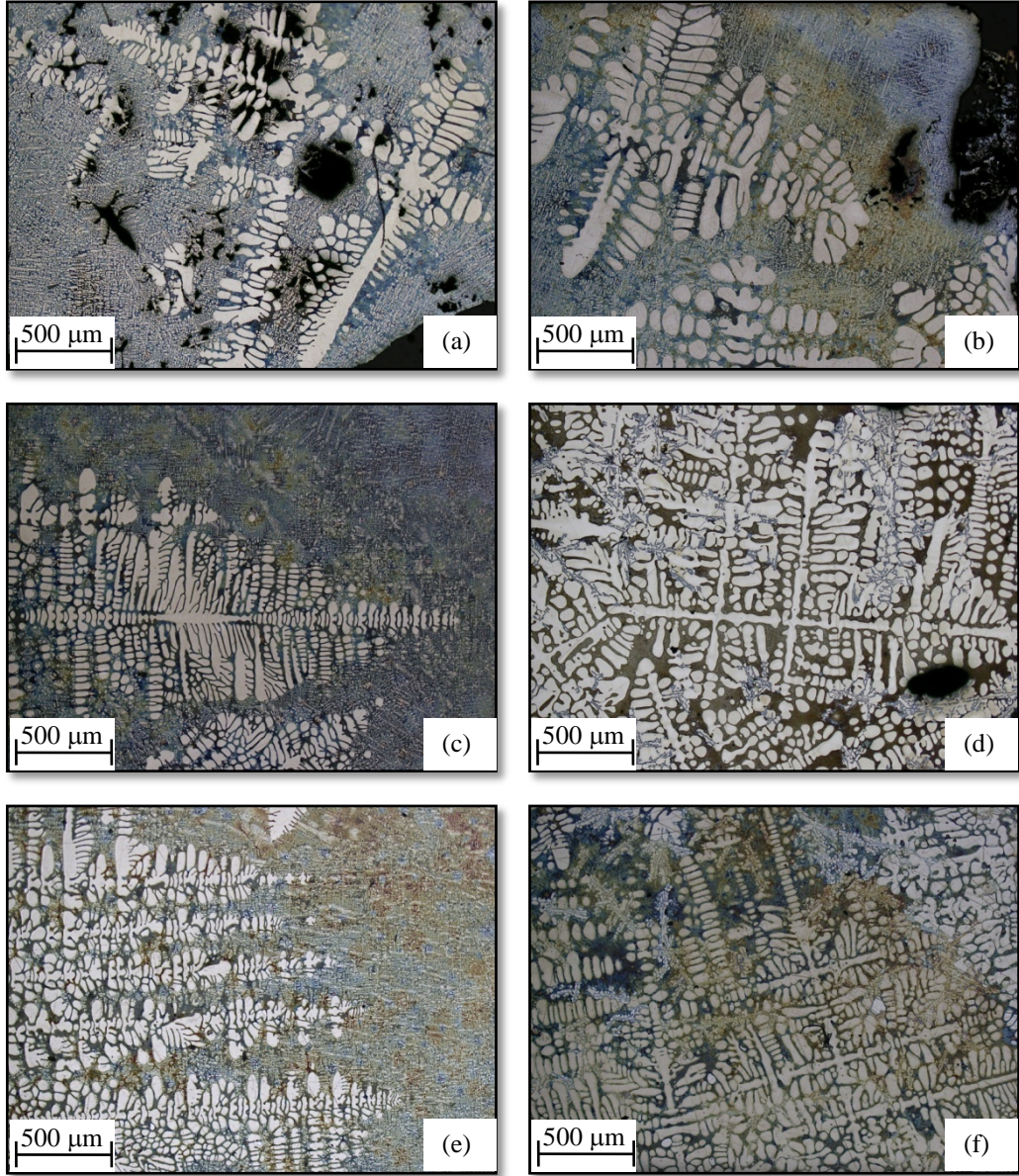
Şekil 4.1. Doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Co ötektik alaşımı için sabit katılaştırma hızı ($V=18.8 \mu\text{m/s}$) farklı sıcaklık gradyentlerinde ($G=1.23\text{-}5.66 \text{ K/mm}$) oluşan mikroyapıların bazı optik mikroskop fotoğrafları

- (a) Boyuna kesit (b) Enine kesit ($G=1.23 \text{ K/mm}$)
- (c) Boyuna kesit (d) Enine kesit ($G=3.15 \text{ K/mm}$)
- (e) Boyuna kesit (f) Enine kesit ($G=5.66 \text{ K/mm}$)



Şekil 4.2. Doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Co ötektik alaşımı için sabit sıcaklık gradyenti ($G=5.66$ K/mm) farklı katılaştırma hızlarında ($V=8.3-83$ $\mu\text{m/s}$) oluşan mikroyapıların bazı optik mikroskop fotoğrafları

- (a) Boyuna kesit (b) Enine kesit ($V=8.3$ $\mu\text{m/s}$)
(c) Boyuna kesit (d) Enine kesit ($V=41.5$ $\mu\text{m/s}$)
(e) Boyuna kesit (f) Enine kesit ($V=83$ $\mu\text{m/s}$)



Şekil 4.3. Doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Si dendritik alaşımı için sabit katılaştırma hızı ($V=17.4 \mu\text{m/s}$) farklı sıcaklık gradyentlerinde ($G=1.60-4.64 \text{ K/mm}$) oluşan mikroyapıların bazı optik mikroskop fotoğrafları

(a) Boyuna kesit (b) Enine kesit ($G=1.60 \text{ K/mm}$)

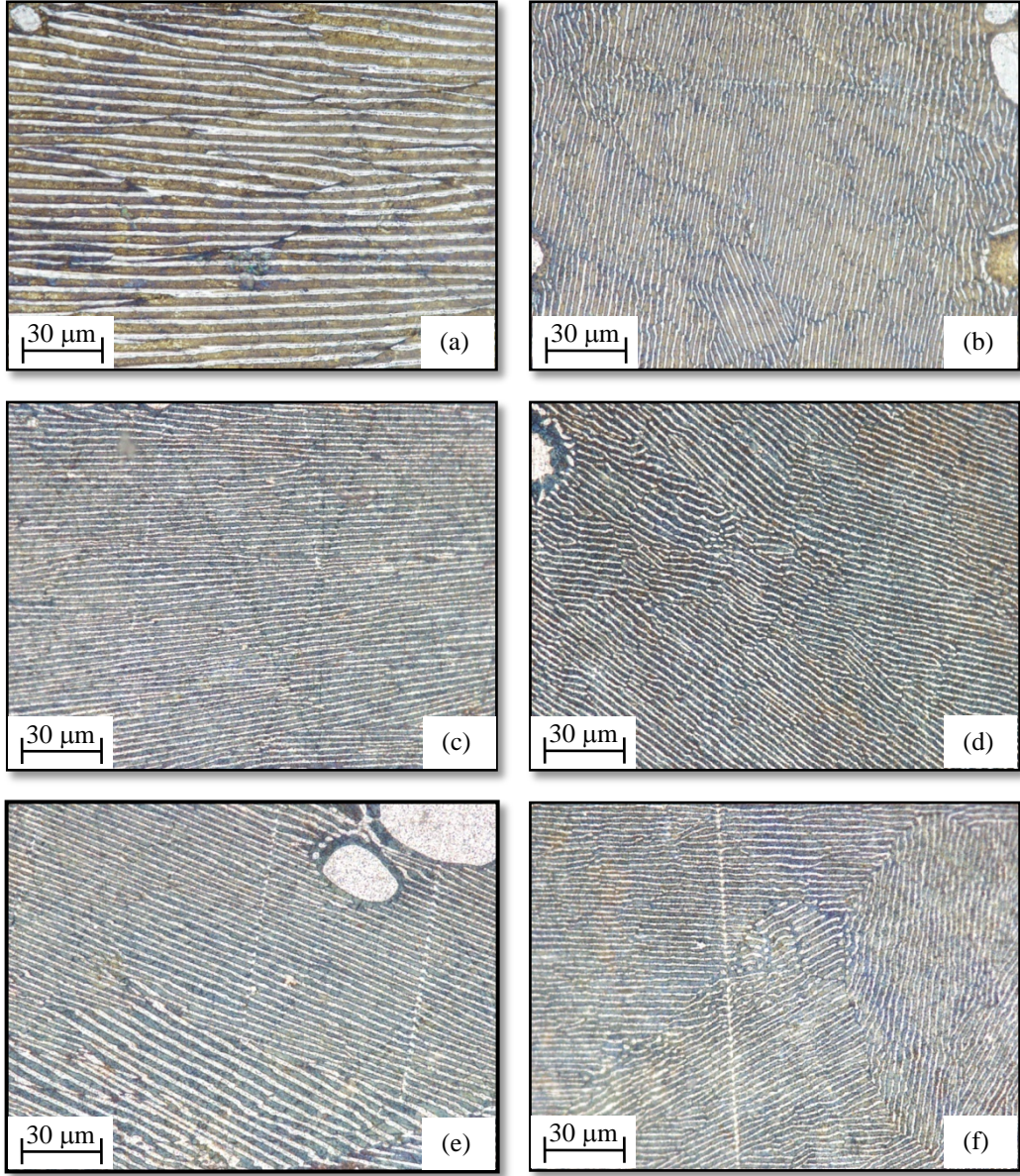
(c) Boyuna kesit (d) Enine kesit ($G=3.55 \text{ K/mm}$)

(e) Boyuna kesit (f) Enine kesit ($G=4.64 \text{ K/mm}$)



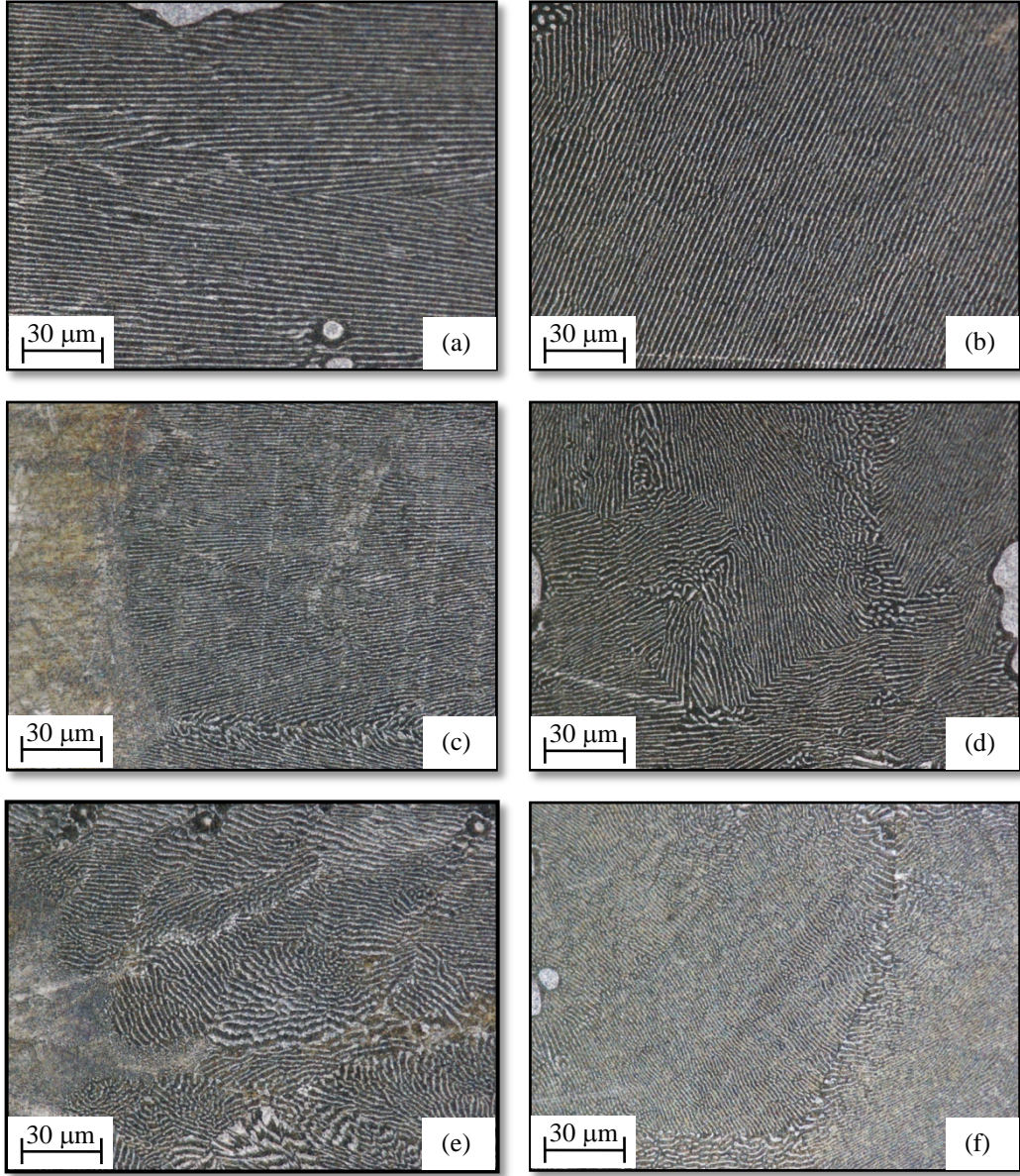
Şekil 4.4. Doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Si dendritik alaşımı için sabit sıcaklık gradyenti ($G=4.64$ K/mm) farklı katılaştırma hızlarında ($V=8.3-83$ $\mu\text{m/s}$) oluşan mikroyapıların bazı optik mikroskop fotoğrafları

- (a) Boyuna kesit (b) Enine kesit ($V=8.3$ $\mu\text{m/s}$)
- (c) Boyuna kesit (d) Enine kesit ($V=41.5$ $\mu\text{m/s}$)
- (e) Boyuna kesit (f) Enine kesit ($V=83$ $\mu\text{m/s}$)



Şekil 4.5. Doğrusal katılaştırılmış Zn-Al-Cu ötektik alaşımı için sabit katılaştırma hızı ($V=16.4 \mu\text{m/s}$) farklı sıcaklık gradyentlerinde ($G=1.60\text{-}4.64 \text{ K/mm}$) oluşan mikroyapıların bazı optik mikroskop fotoğrafları

- (a) Boyuna kesit (b) Enine kesit ($G=6.70 \text{ K/mm}$)
(c) Boyuna kesit (d) Enine kesit ($G=7.90 \text{ K/mm}$)
(e) Boyuna kesit (f) Enine kesit ($G=9.55 \text{ K/mm}$)



Şekil 4.6. Doğrusal katılaştırılmış Zn-Al-Cu ötektik alaşımı için sabit sıcaklık gradyenti ($G=10.67$ K/mm) farklı katılaştırma hızlarında ($V=18.8-83$ $\mu\text{m/s}$) oluşan mikroyapıların bazı optik mikroskop fotoğrafları

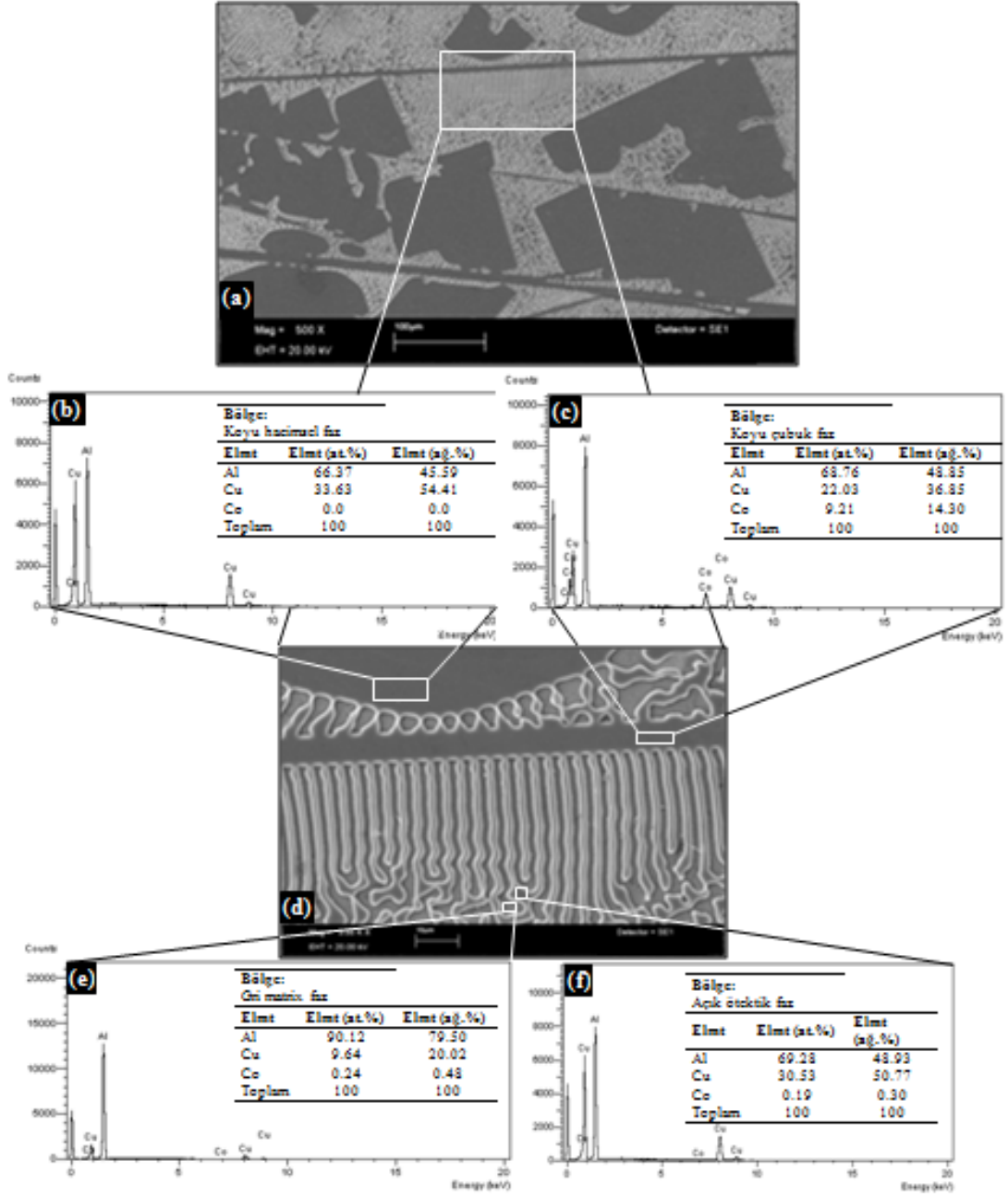
- (a) Boyuna kesit (b) Enine kesit ($V=18.8$ $\mu\text{m/s}$)
(c) Boyuna kesit (d) Enine kesit ($V=41.5$ $\mu\text{m/s}$)
(e) Boyuna kesit (f) Enine kesit ($V=83$ $\mu\text{m/s}$)

4.2. Fazların Kimyasal Bileşimlerinin Belirlenmesi

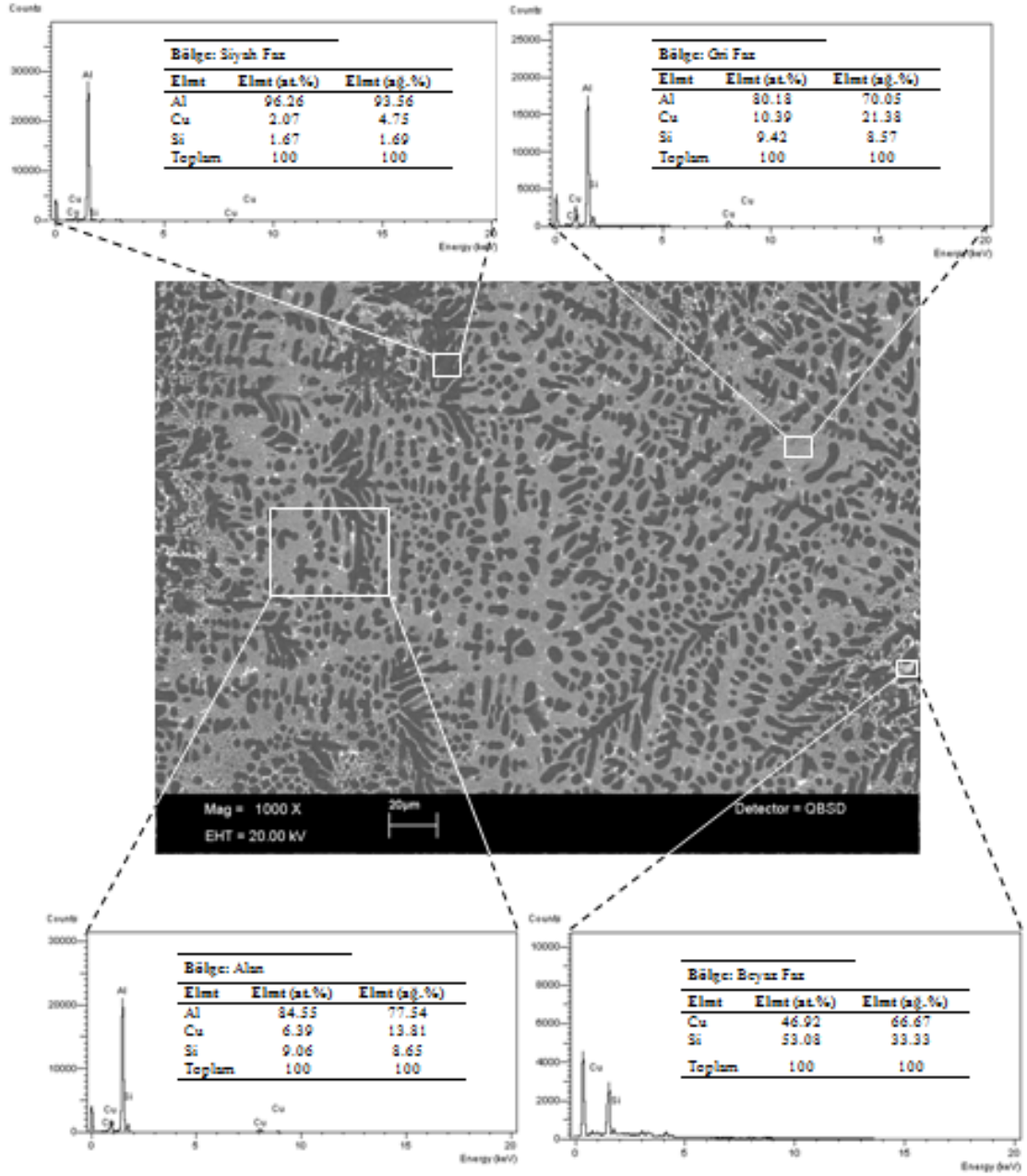
Her bir alaşım sistemine ait numunelerden SEM fotoğrafları çekildikten sonra bu bölgelerde belirginleşen her bir fazın kimyasal bileşim analizleri yapılmıştır. Her bir ötektik sistem için yapılan katılaştırma deneyleri neticesinde faz diyagramlarında da tanımlandığı gibi bazı fazlar birbirinden ayrılmıştır. İncelenen ötektik alaşımda belirginleşen her bir fazın nokta bileşim analizleri ve stokiyometrik hesaplamaları (EK 2) yapılmıştır. Yapılan bu analizler sonucunda Şekil 4.1 ve 4.2’de verilen mikroyapı fotoğraflarından Al-23.9Cu-1.2Co (%ağ.) ötektik alaşımında ana faz (matrix) üzerinde koyu gri (çubuksal), koyu gri (hacimsel) ve açık gri (ötektik) olmak üzere dört farklı fazın büyüdüğü gözlenmiştir. Bu fazların; ana fazın (Al zengin faz) 79.50Al-20.02Cu-0.48Co (%ağ.), koyu gri hacimsel fazın (Cu zengin faz) 54.41Cu-45.59Al (%ağ.), koyu gri çubuksal fazın (Co zengin Al-Cu fazı) 48.85Al-36.85Cu-14.30Co (%ağ.), açık gri fazın (Al-Cu ötektik fazı) 48.93Al-50.77Cu-0.30Co (%ağ.), olduğu belirlenmiştir.

Şekil 4.3 ve 4.4’te verilen mikroyapı fotoğrafları verilen Al-Cu-Si alaşımında beyaz, gri ve siyah olmak üzere üç farklı fazın büyüdüğü tespit edilmiştir. Yapılan EDX analizleri sonucunda, Şekil 4.8’de gösterildiği gibi bu fazlardan; beyaz fazın (ara faz) 66.67Cu-33.33Si (%ağ.), gri fazın (Al-zengin ana faz) 70.05Al-21.38Cu-8.57Si (%ağ.) ve siyah fazında (α -Al fazı) 93.56Al-4.75Cu-1.69Si (%ağ.) bileşimine sahip olduğu belirlenmiştir.

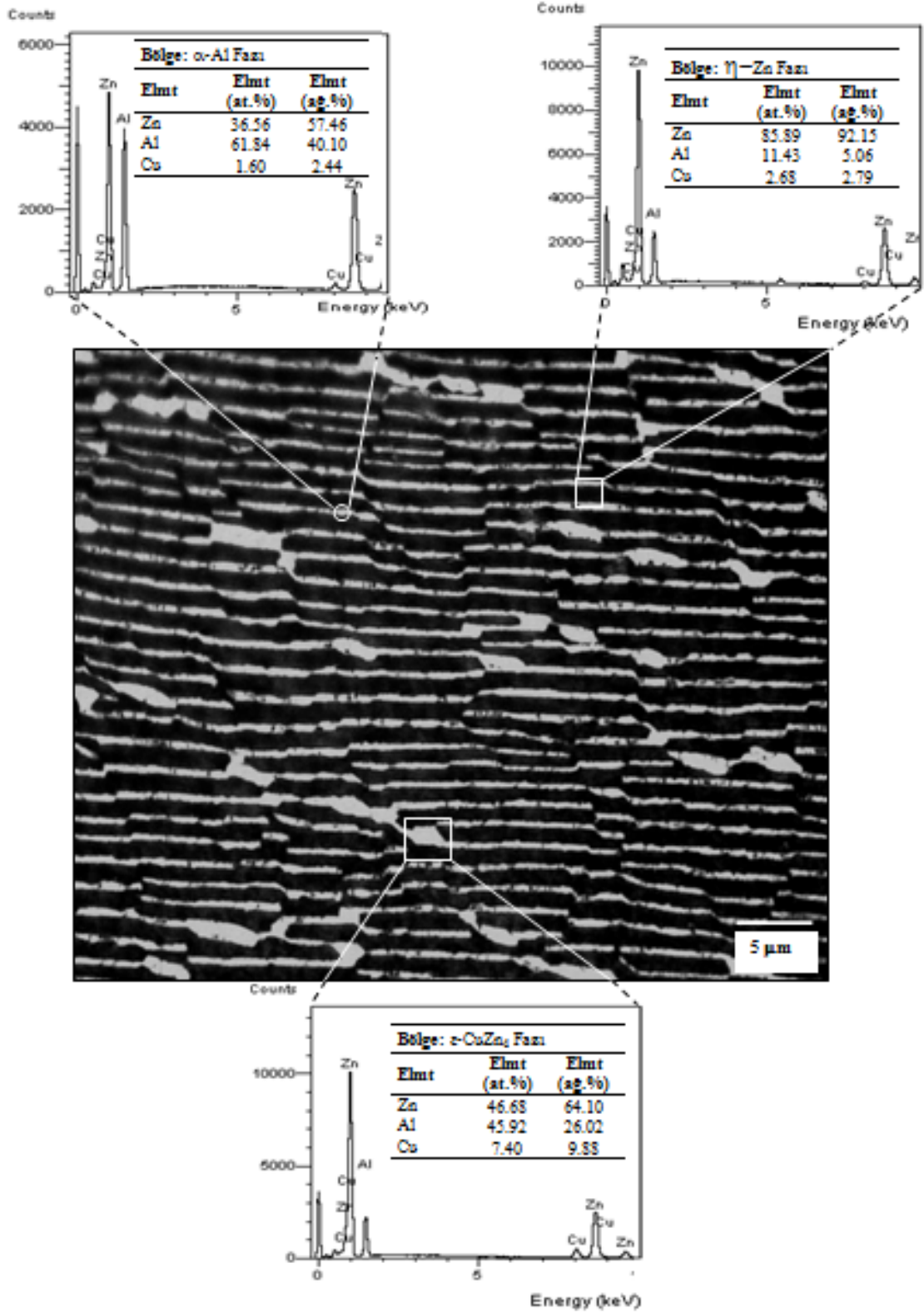
Son olarak Şekil 4.5 ve 4.6’da mikroyapı fotoğrafları verilmiş olan Zn-7Al-2.96Cu (%ağ.) alaşımına ait her bir fazın kimyasal bileşim analizleri yapılmış ve SEM fotoğrafları çekilmiştir. İncelenen ötektik alaşımda oluşan her bir fazın bileşim analizleri yapılmıştır. Yapılan bu analizler sonucunda, Zn-Al-Cu alaşımına ait mikroyapı fotoğraflarından toplam üç fazın oluştuğu tespit edilmiştir. Yapılan EDX analizleri sonucunda, Şekil 4.9’da gösterildiği gibi bu fazlardan; α fazının (Al zengin) 57.46Zn-40.1Al-2.44Cu (%ağ.), η fazının (Zn zengin ana faz) 92.15Zn-5.06Al-2.79Cu (%ağ.) ve ϵ fazının da (CuZn_4) 64.1Zn-26.02Al-9.88Cu (%ağ.) bileşimine sahip olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.7. Al-Cu-Co ötektik alaşımının kimyasal bileşim analizi



Şekil 4.8. Al-Cu-Si dendritik alaşımının kimyasal bileşim analizi



Şekil 4.9. Zn-Al-Cu ötektik alaşımının kimyasal bileşim analizi

4.3. Ötektik Mesafelerin Ölçülmesi

İkili ötektik alaşımlarda lamelsel yapılar α ve β fazlarından, üçlü ötektik alaşımlarda ise α , β ve γ fazlarından oluşmaktadır. Bazı durumlarda intermetalik fazlarda oluşabilmektedir. Lameller arası mesafe λ_E , Şekil 4.10'da görüldüğü gibi en yakın α - α veya en yakın β - β fazlarının merkezleri arasındaki uzaklıktır. Başka bir ifade ile bir α ve bir β fazının toplam genişliğidir. Lameller arası mesafelerin ölçümlerinde, hem boyuna kesitten hem de enine kesitten ölçümler alınmıştır. Sonuçların güvenilirliğini artırmak amacıyla her bir numunenin farklı bölgelerinden fotoğraflar çekilerek pek çok bölgeden lamelsel mesafe değeri ölçülerek bu verilerin ortalamaları alınmıştır. Lameller arası mesafeler Şekil 4.10'da gösterildiği gibi kesişim (intercept) metoduyla (Ourdjini vd., 1994) ölçülmüştür. Lameller arası mesafeler,

$$\lambda_E = \frac{X}{N_L - 1} \quad (4.1)$$

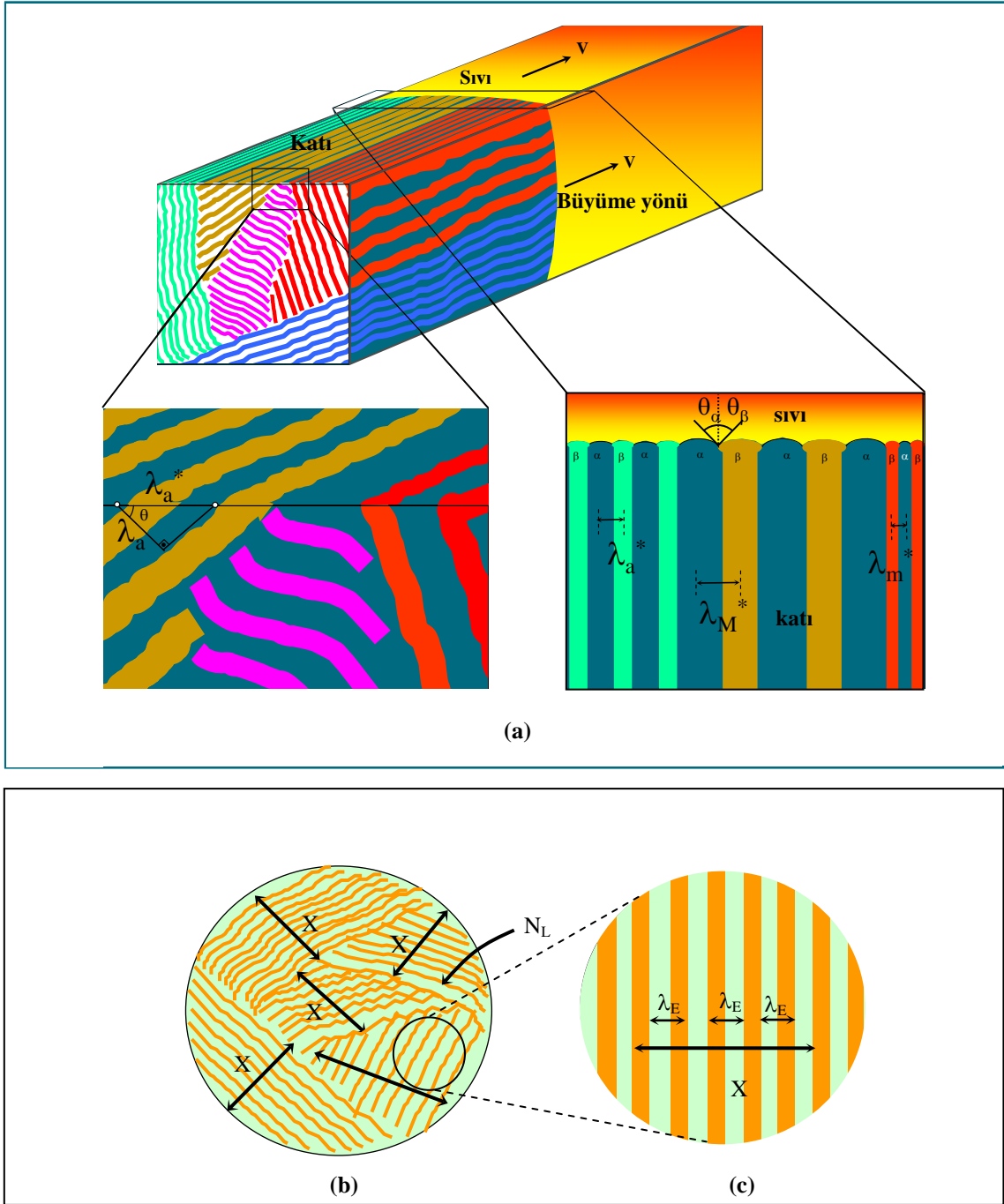
eşitliği ile hesaplanmıştır. Burada X, lamellerin toplam genişliği, N_L ise toplam lamel sayısıdır.

4.3.1. Al-Cu-Co ötektik alaşımında ötektik mesafelerin ölçümü

Al-Cu-Co ötektik alaşımı doğrusal katılaştırıldığında gri ana faz üzerinde koyu gri hacimsel faz, koyu gri çubuksal faz ve açık gri ötektik fazların büyüdüğü gözlenmiştir. Şekil 4.7 (d) de görüldüğü gibi lamelsel mesafeler Adobe Photoshop CS4 programı yardımıyla ölçülmüştür. Gri ana faz üzerinde açık gri ötektik fazın büyüdüğü çok belirgin bir şekilde gözlenmektedir.

4.3.2. Zn-Al-Cu ötektik alaşımında ötektik mesafelerin ölçümü

Zn-Al-Cu alaşımının doğrusal katılaştırılması sonucunda optik mikroskop ile çekilen fotoğraflardan, α -Al, η -Zn ve ϵ -CuZn₄ fazlarının oluştuğu gözlenmiştir. Şekil 4.6'dan görülebileceği üzere ötektik bir yapı elde edilmiştir.



Şekil 4.10. Düzenli ötektiklerde lamelsel mesafelerin ölçümü (a) Üç boyutlu görüntü (b) geniş bölge görüntüsü (enine kesit) (c) dar bölge görüntüsü (enine kesit)

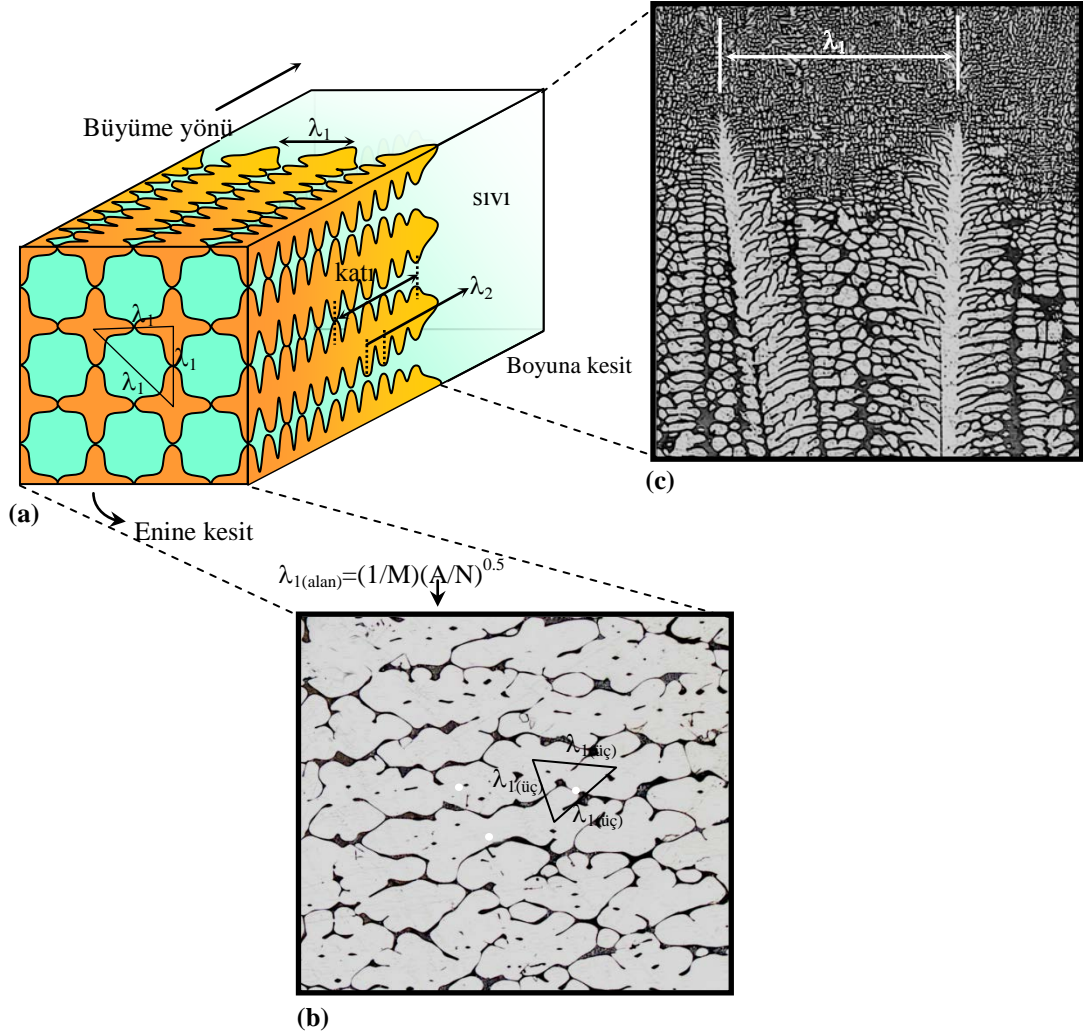
4.4. Birincil ve İkincil Dendrit Kollar Arası Mesafenin Ölçümü

Birincil kol mesafeleri numunenin hem enine hem de boyuna kesitinden hesaplanmaktadır. Boyuna kesitte komşu iki dendrit uçları arasındaki mesafe birincil kol mesafesini vermektedir (Şekil 4.11 a,c). Fakat ölçümlerin daha sağlıklı olabilmesi için

çekilen fotoğraflarda dendritlerin mümkün olduğunca fazla olması gerekir. Bu durumda birincil kol mesafesi,

$$\lambda_1 = \frac{X}{n_1 - 1} \quad (4.2)$$

eşitliği ile hesaplanır. Burada X birincil dendritler arasındaki toplam uzunluk, n_1 ise birincil dendrit gövdelerinin sayısıdır.



Şekil 4.11. λ_1 ve λ_2 ölçümlerinin şematik gösterimi (a) ve (b) enine kesitte λ_1 'in üçgen metodu ve alan sayma metodu ile hesaplanması (c) boyuna kesitte λ_1 'in hesaplanması

Numunenin enine kesitinden birincil kol mesafelerini hesaplamak için üçgen metodu (Ganesan vd., 1992) ve alan sayma metotları (Bhat vd., 1995) kullanılır. Üçgen metodunda (Ourdjini vd., 1994) üç komşu dendrit merkezleri birleştirilerek üçgen elde edilir. Üçgenin bu kenarları birincil kol mesafeleridir (Şekil 4.11 a,b). Alan metodunda (Bhat vd., 1995) ise numunenin enine kesitinde belirli bir alan seçilir (Şekil 4.11 a,b).

Seçilen kesit alan A, bu alan içerisinde bulunan birincil dendrit sayısı N ve büyütme faktörü de M olmak üzere, birincil kol mesafesi,

$$\lambda_{1(\text{alan})} = \frac{1}{M} \left(\frac{A}{N} \right)^{0.5} \quad (4.3)$$

eşitliği ile hesaplanır. Üçgen (Ganesan vd., 1992) ve alan metotlarından (Bhat vd., 1995) hesaplanan birincil kol mesafelerinin ortalaması enine kesitten ölçülen birincil kol mesafeleri olarak alındı. İkincil kol mesafeleri ise numunelerin sadece boyuna kesitinden ölçülmüştür. Güvenirliliği artırmak için çok sayıda ölçüm yapılmış ve ortalamaları kullanılmıştır.

4.4.1. Al-Cu-Si alaşımlarında dendritik mesafelerin ölçümü

Şekil 4.3 ve 4.4'te görüldüğü gibi dendritik bir yapı elde edilmiştir. Dendritler arası bölgede ise çin yazısı biçiminde ince ötektik yapı oluşmuştur. Artan sıcaklık gradyenti ve büyütme hızında dendritik yapıda sıklaşma ve daha ince bir tane yapısına geçiş gözlenmektedir.

Her bir katılaştırma parametresine bağlı olarak, mikroyapı parametrelerinin (λ_1 , λ_2) değerleri optik mikroskop ile elde edilen fotoğraflardan resim düzenleme programı vasıtasıyla ölçülmüştür.

4.5. Doğrusal Katılaştırılmış Alaşımların Mikrosertlik Değerlerinin Ölçülmesi

Kontrollü olarak doğrusal katılaştırılan numunelerin mikroyapı ölçümleri yapıldıktan sonra, Bölüm III'te anlatıldığı gibi Vickers sertlik ölçme yöntemi ile mikrosertlik değerlerinin ölçümüne geçilmiştir. Her bir numune, mikrosertlik test cihazına takılarak, 10 ve 25 g'lık kütlelerle, boyuna kesitteki katı-sıvı arayüzeyinin katı bölgelerinden (HV_b) ve katılaştırılan bölgenin enine kesitinden (HV_e) mikrosertlik değerleri, kg/mm^2 cinsinden ölçülmüştür. Ölçülen mikrosertlik değerleri değişen sıcaklık gradyenti, katılaştırma hızı ve ötektik mesafe (λ_E) değerlerine göre ayrı ayrı incelenmiştir. İstatistiksel güvenirliliği artırmak için her bir kesit üzerinde en az 10 ölçüm alınarak ortalamaları hesaplanmıştır.

4.6. Doğrusal Katılaştırılmış Alaşımların Çekme-Dayanım ve Basma-Dayanım Değerlerinin Ölçülmesi

Kontrollü olarak doğrusal katılaştırılan numunelerin mikroyapı ölçümleri ve sertlik değerlerinin belirlenmesinden sonra, bir önceki bölümde anlatıldığı gibi çekme-dayanım

testine geçilmiştir. Her bir numune en az 30-50 mm uzunluğunda kesilerek, çekme-dayanım test cihazının çeneleri arasında sıkıştırıldıktan sonra, 20 mm/dak'lık hızlarda çekilerek kopması sağlanmış ve çekme-dayanım değerleri, N/mm^2 cinsinden ölçülmüştür. Basma-dayanım testleri de aynı cihazla yapılmıştır. Ölçülen çekme-dayanım ve basma-dayanım değerleri değişen sıcaklık gradyenti, katılaştırma hızı ve ötektik mesafe (λ_E) değerlerine göre ayrı ayrı incelenmiştir. Al-Cu-Co alaşımı için basma-dayanım, Zn-Al-Cu alaşımı için çekme-dayanım testleri yapılmış olup. Al-Cu-Si alaşımı çok gevrek olduğundan dolayı çekme veya basma-dayanım testleri yapılamamıştır.

4.7. Doğrusal Katılaştırılmış Alaşımların Elektriksel Özdirenç Değerlerinin Ölçülmesi

Kontrollü olarak doğrusal katılaştırılan numunelerden 20 mm uzunluğunda kesilerek 3. Bölüm'de anlatıldığı gibi elektriksel özdirenç ölçümü yapılmıştır. Her bir numune, oda sıcaklığında kül fırını içine yerleştirilip dört gümüş telin numuneye tamamen temas ettiği belirlendikten sonra elektriksel özdirenç değerleri Ωm cinsinden alınmıştır. İstatistiksel güvenilirliği artırmak için her bir numune üzerinde en az 100 ölçüm alınarak ortalamaları hesaplanmıştır. Ölçülen elektriksel özdirenç değerleri değişen katılaştırma hızı ve ötektik mesafe (λ_E) değerlerine göre ayrı ayrı incelenmiştir. Ayrıca özdirenç değerlerinin artan sıcaklığa göre değişimleri incelenerek özdirenç sıcaklık değişim katsayıları (α) hesaplanmıştır.

4.8. Katılaştırma Parametrelerine Bağlı Olarak Ötektik Mesafe, Dendritik Mesafe, Mikrosertlik, Çekme-Dayanım ve Elektriksel Özdirenç Değerlerinin İncelenmesi

Aşağıda sırasıyla Al-Cu-Co, Al-Cu-Si ve Zn-Al-Cu alaşım sistemlerine ait farklı katılaştırma parametrelerinde (sabit G farklı V ve sabit V farklı G) büyütülen numunelerin ötektik mesafelerinin, mikrosertlik, çekme-dayanım ve özdirenç değerlerine göre değişimlerinin logaritmik grafikleri verilmiştir. Bu deneysel verilerden yararlanarak elde edilen sonuçlar yorumlanmış ve aralarındaki bağıntılar, lineer regresyon analizi (EK 1) ile tespit edilmiştir.

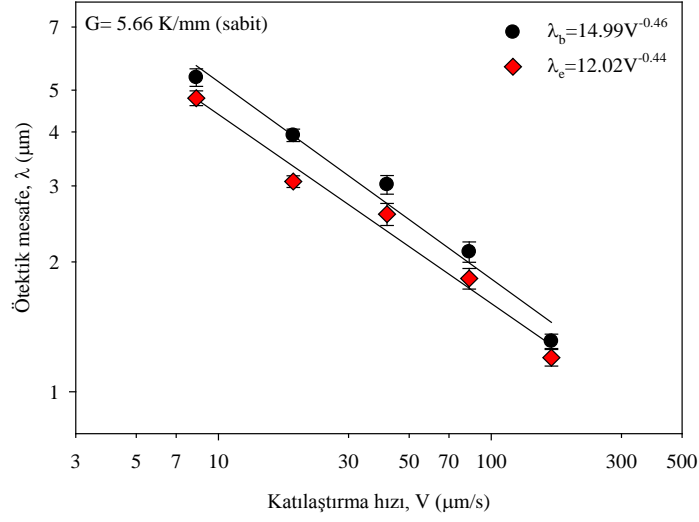
a) Al-Cu-Co Ötektik Alaşımının İncelenmesi:

Al-Cu-Co alaşımının doğrusal katılaştırılması sonunda gri ana faz üzerinde koyu gri hacimsel faz, koyu gri çubuksal faz ve açık gri ötektik faz olmak üzere üç ayrı fazın

büyüdüğü gözlenmiştir. Çizelge 4.1’de Al-Cu-Co ötektik alaşım sistemi için farklı katılaştırma parametrelerinde üretilen numunelerden ölçülen ötektik mesafeler, mikrosertlik, basma-dayanım ve elektriksel özdirenç değerleri verilmiştir. Ayrıca deneysel olarak ölçülen elektriksel özdirenç değerlerinden faydalanılarak Weidemann-Franz (Kittel, 1965) ve Smith-Palmer (Poirier ve Geiger, 1994) denklemleriyle termal iletkenlik değerleri de hesaplanmış ve çizilen grafikler verilmiştir (Şekil 4.12-4.26). Al-Cu-Co ötektik alaşım sistemi için elde edilen verilerle lineer regresyon yöntemiyle tespit edilen parametreler arası bağıntılar ise ilgili grafiklerin üzerinde verilmiştir.

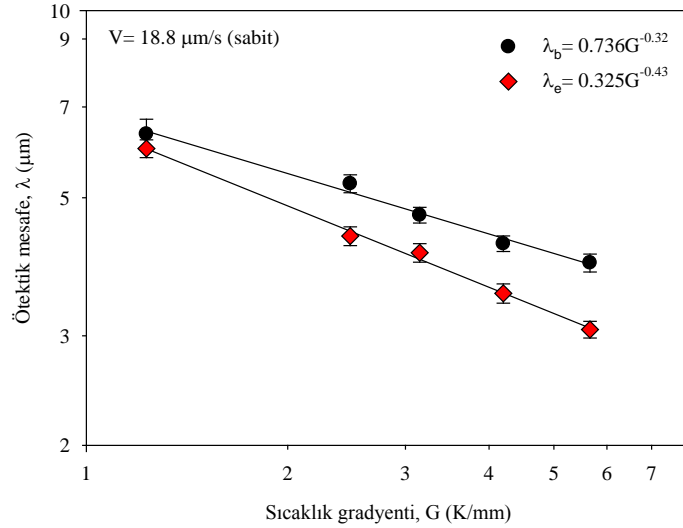
Çizelge 4.1. Al-Cu-Co ötektik alaşımı için sabit sıcaklık gradyenti ($G=5.66$ K/mm) farklı katılaştırma hızlarında ve sabit katılaştırma hızı ($V=18.8\mu\text{m/s}$) farklı sıcaklık gradyentlerinde elde edilen ötektik mesafeler, mikrosertlik, basma-dayanım ve elektriksel özdirenç değerleri

Katılaştırma Parametreleri		Ötektik Mesafeler		Mikrosertlik Değerleri		Basma-Dayanım Değerleri	Elektriksel Özdirenç Değerleri
G (K/mm)	V ($\mu\text{m/s}$)	λ_b (μm)	λ_e (μm)	HV _b (kg/mm ²)	HV _e (kg/mm ²)	σ (MPa)	$\rho \times 10^{-7}$ (Ωm)
5.66	8.3	5.35 ± 0.25	4.79 ± 0.19	199.40 ± 1.91	201.78 ± 1.43	242.37	1.05
	18.8	3.93 ± 0.13	3.07 ± 0.09	207.44 ± 2.05	211.43 ± 1.64	286.30	1.12
	41.5	3.02 ± 0.15	2.58 ± 0.15	216.79 ± 2.03	218.66 ± 1.46	337.02	1.18
	83.0	2.11 ± 0.12	1.83 ± 0.10	222.66 ± 6.64	225.68 ± 3.37	388.01	1.25
	166.0	1.31 ± 0.05	1.20 ± 0.05	228.09 ± 3.30	231.49 ± 5.54	467.38	1.38
1.23		6.33 ± 0.35	6.00 ± 0.19	190.24 ± 1.87	193.25 ± 1.47	169.20	
2.48		5.27 ± 0.17	4.34 ± 0.15	195.60 ± 1.82	199.89 ± 1.26	203.50	
3.15	18.8	4.69 ± 0.13	4.08 ± 0.14	201.20 ± 1.60	203.62 ± 2.33	216.76	Ölçülmedi
4.20		4.22 ± 0.12	3.51 ± 0.12	206.53 ± 1.58	208.11 ± 2.28	236.71	
5.66		3.93 ± 0.13	3.07 ± 0.09	211.32 ± 2.05	213.43 ± 1.64	253.65	

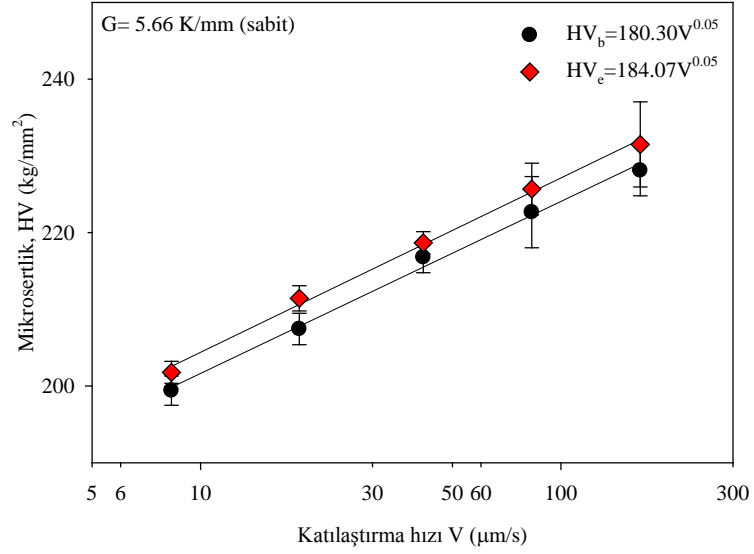


Şekil 4.12. Doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Co ötektik alaşımı için ötektik mesafelerin katılaştırma hızı ile değişimi ve elde edilen bağıntılar

Şekil 4.12 incelendiğinde katılaştırma hızı arttıkça ötektik mesafe değerinin azaldığı görülmektedir. Şekil 4.12'den de görüldüğü gibi alınan ölçümler incelendiğinde sabit sıcaklık gradyanında katılaştırma hızı arttıkça λ_b 0.46 ve λ_e 0.44 üstel değerleriyle azalmaktadır. Şekil.4.13 de ise sabit katılaştırma hızında sıcaklık gradyanı arttıkça λ_b 0.32 ve λ_e 0.43 üstel değerleriyle azalmaktadır.

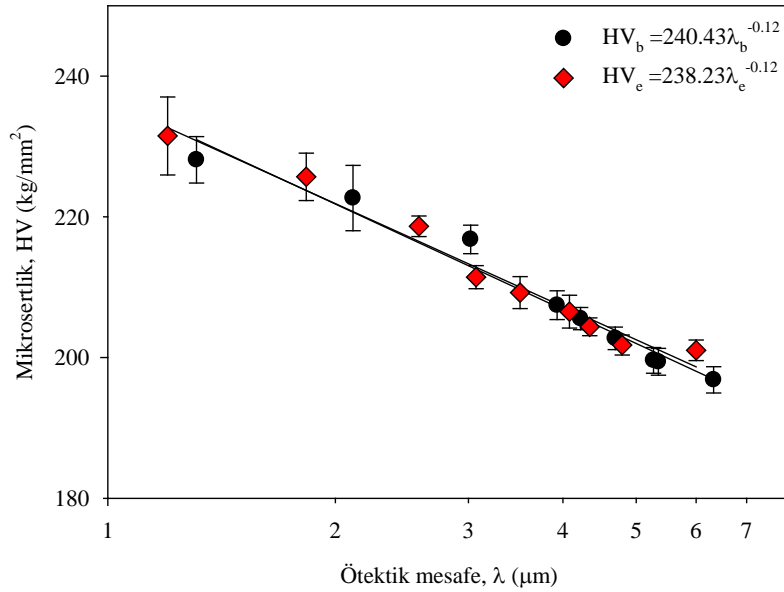


Şekil 4.13. Doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Co ötektik alaşımı için ötektik mesafelerin sıcaklık gradyanı ile değişimi ve elde edilen bağıntılar

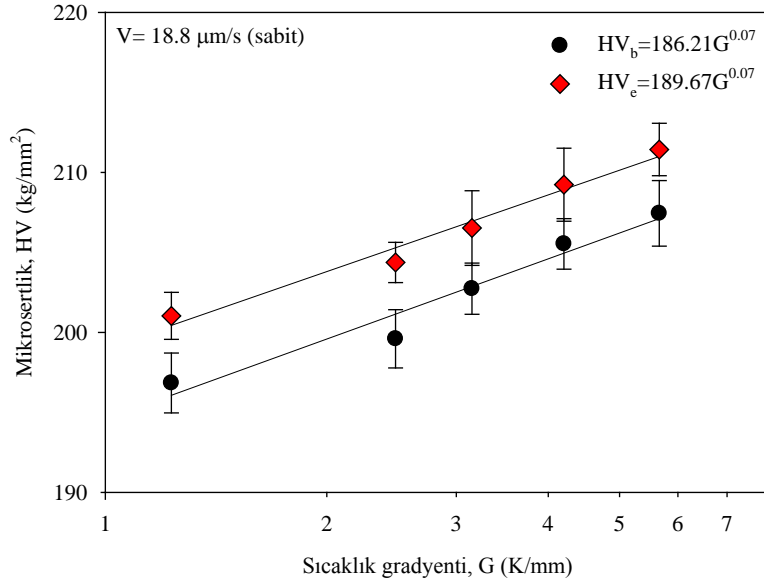


Şekil 4.14. Doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Co ötektik alaşımı için mikrosertlik değerlerinin katılaştırma hızı ile değişimi ve elde edilen bağıntılar

Al-Cu-Co ötektik alaşım sisteminde farklı katılaştırma hızlarına bağlı olarak üretilen numunelere ait ölçülen mikrosertlik değerleri Şekil 4.14’de verilen değişim grafiği incelendiğinde, artan katılaştırma hızına bağlı olarak mikrosertlik değeri, 0.05 üstel değerleri ile artmaktadır. Şekil 4.15’de verilen grafikte artan λ_E değerlerine bağlı olarak mikrosertlik değerlerinin 0.12 üstel değeriyle azaldıkları görülmektedir.

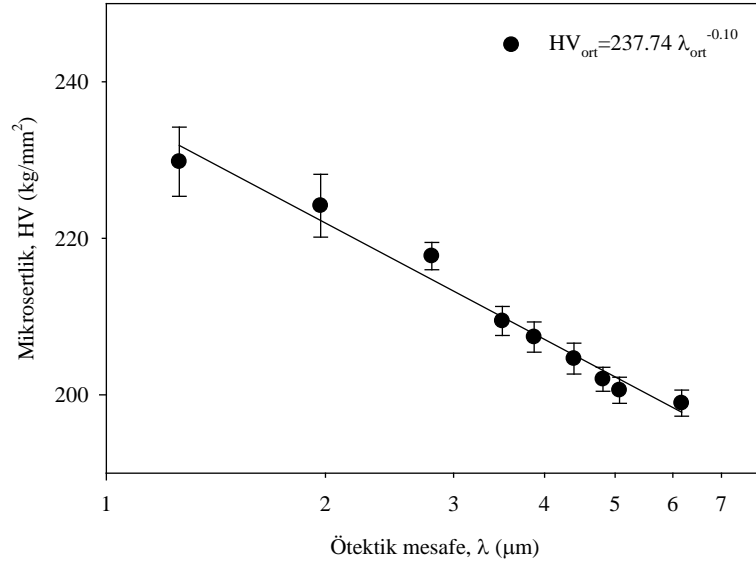


Şekil 4.15. Doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Co ötektik alaşımı için mikrosertlik değerlerinin ötektik mesafelerle değişimi ve elde edilen bağıntılar

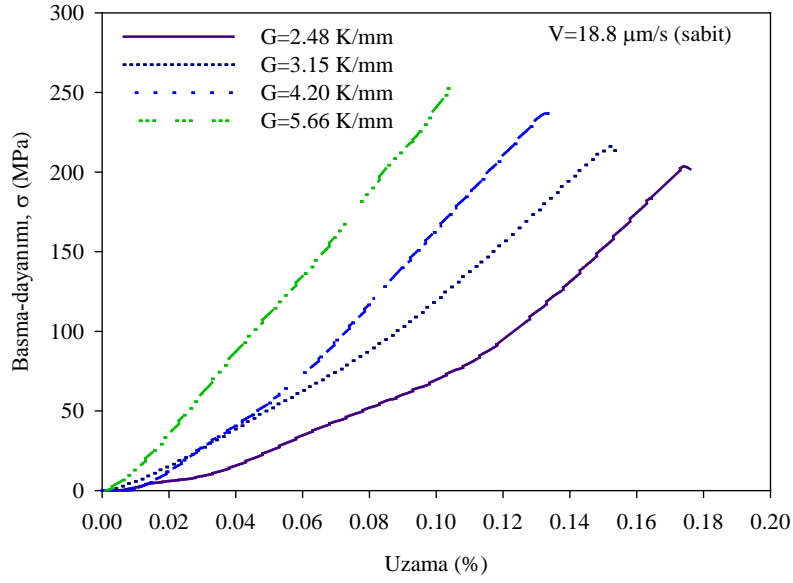


Şekil 4.16. Doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Co ötektik alaşımı için mikrosertlik değerlerinin sıcaklık gradyenti ile değişimi ve elde edilen bağıntılar

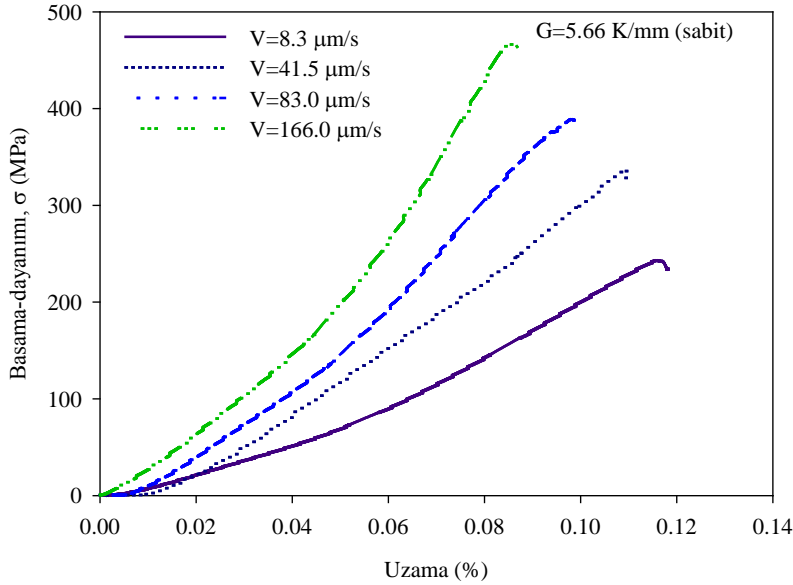
Ayrıca Şekil 4.16'da verilen grafikte $V=18.8\mu\text{m/s}$ sabit büyütme hızında artan sıcaklık gradyentlerine karşılık mikrosertlik değerlerinin 0.07 üstel değeriyle arttığı gözlenmektedir. Şekil 4.17 ise mikrosertlik değerlerinin ortalama ötektik mesafe ile 0.10 üstel değeri ile azaldığını göstermektedir.



Şekil 4.17. Doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Co ötektik alaşımı için mikrosertlik değerlerinin ortalama ötektik mesafe ile değişimi ve elde edilen bağıntı

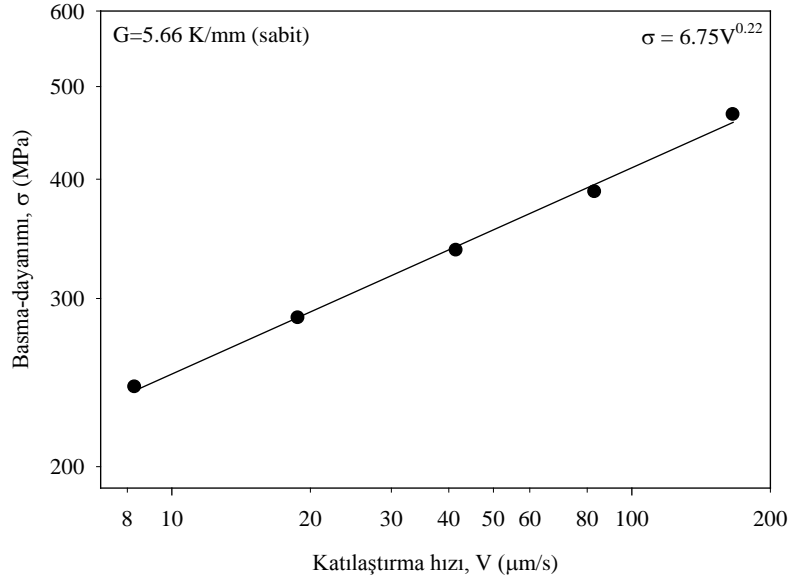


Şekil 4.18. Doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Co ötektik alaşımı için basma-dayanımı değerlerinin uzama ile değişimi



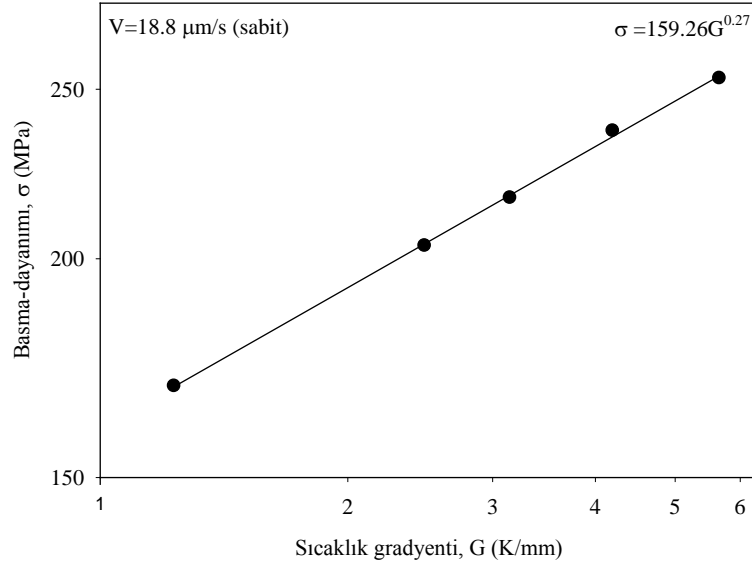
Şekil 4.19. Doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Co ötektik alaşımı basma-dayanımı değerlerinin uzama ile değişimi

Şekil 4.18 ve Şekil 4.19 farklı sıcaklık gradyentleri sabit katılaştırma hızında ve sabit sıcaklık gradyenti farklı katılaştırma hızlarında elde edilmiş olan Al-Cu-Co alaşımının basma gerilimi grafiklerini göstermektedir. Grafiklerin bitiş noktası deformasyonun olduğu durumlardır.



Şekil 4.20. Doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Co ötektik alaşımı için basma-dayanımı değerlerinin katılaştırma hızı ile değişimi ve elde edilen bağıntı

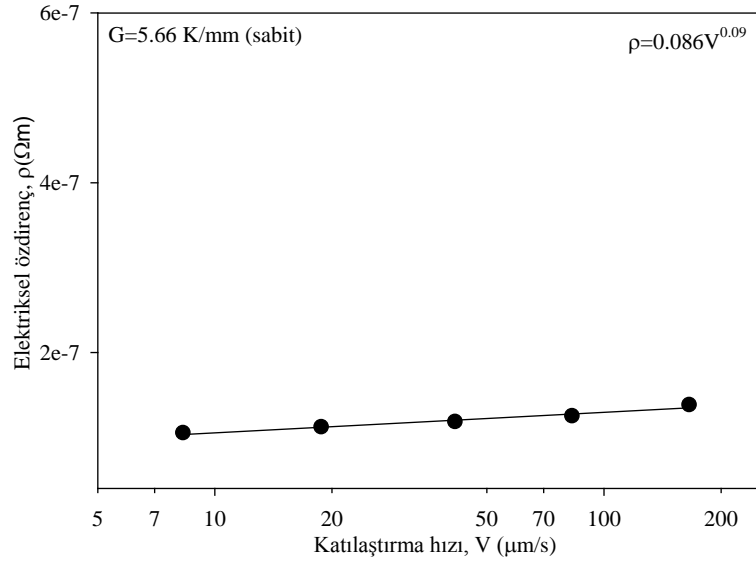
Şekil 4.18'den elde edilen deformasyon değerleri alınarak, Şekil 4.20 çizilmiştir. Bu grafik incelendiğinde, artan katılaştırma hızına bağlı olarak basma-dayanımın, 0.22 üstel değeri ile artmakta olduğu görülmektedir.



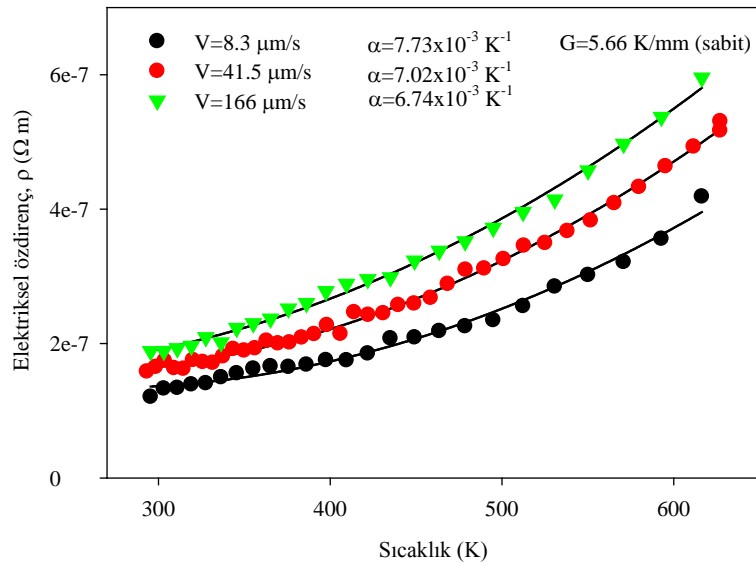
Şekil 4.21. Doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Co ötektik alaşımı için basma-dayanımı değerlerinin sıcaklık gradyenti ile değişimi ve elde edilen bağıntı

Şekil 4.19'dan elde edilen bu grafikte, artan sıcaklık gradyenti değerlerine bağlı olarak basma-dayanım değerlerinin 0.27 üstel değeriyle arttığı görülmektedir.

Al-Cu-Co ötektik alaşım sisteminde farklı katılaştırma hızlarına bağlı olarak üretilen numunelere ait ölçülen elektriksel öz direnç değerleri Şekil 4.22’de verilmiştir. Artan katılaştırma hızına bağlı olarak elektriksel öz direnç değeri, 0.09 üstel değeri ile artmaktadır. Ayrıca, Şekil 4.23’de verilen grafikte, numunelerin artan sıcaklık değerlerine bağlı olarak elektriksel öz direnç değerlerinin arttığı görülmektedir.

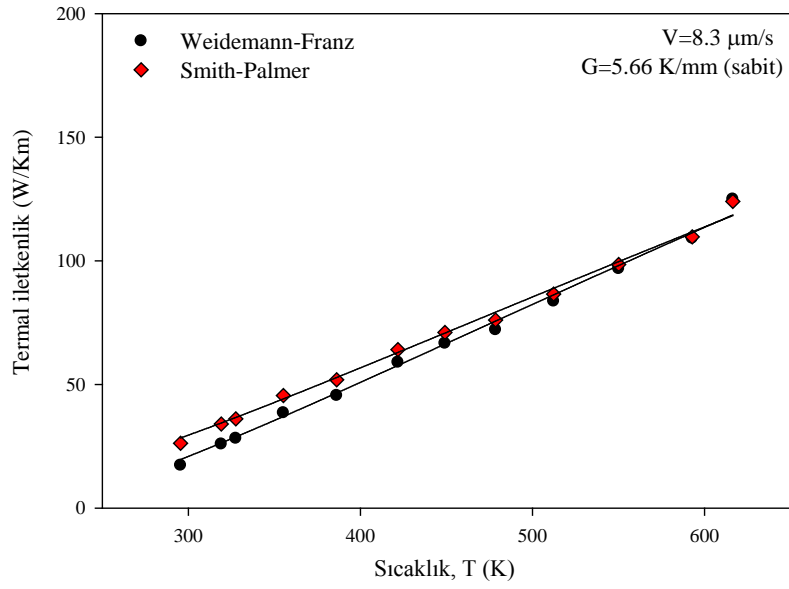


Şekil 4.22. Doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Co ötektik alaşımı için elektriksel öz direnç değerlerinin katılaştırma hızı ile değişimi ve elde edilen bağıntı

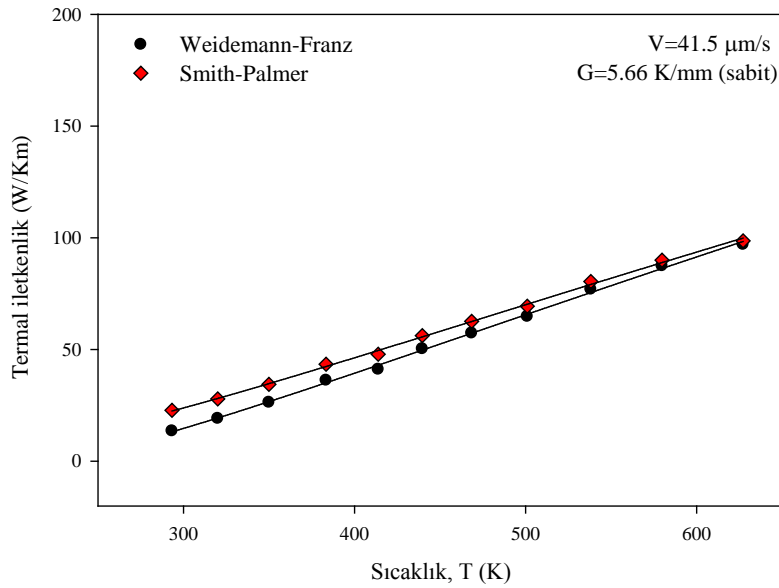


Şekil 4.23. Doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Co ötektik alaşımı için elektriksel öz direnç değerlerinin sıcaklık ile değişimi ve elde edilen bağıntılar

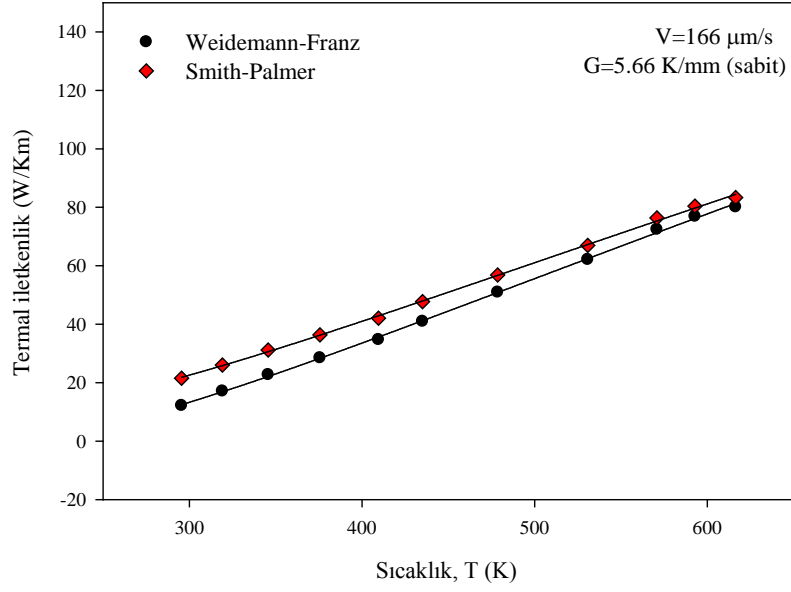
Şekil 4.24, 4.25 ve 4.26'da verilen grafiklerde ve Çizelge 4.2'de sabit sıcaklık gradyentinde ($G=5.66$ K/mm) farklı katılaştırma hızları için Weidemann-Franz ve Smith-Palmer eşitliklerinden elde edilen termal iletkenlik değerlerinin sıcaklıkla değişimleri görülmektedir.



Şekil 4.24. Doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Co ötektik alaşımı için termal iletkenlik değerlerinin sıcaklık ile değişimi



Şekil 4.25. Doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Co ötektik alaşımı için termal iletkenlik değerlerinin sıcaklık ile değişimi



Şekil 4.26. Doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Co ötektik alaşımı için termal iletkenlik değerlerinin sıcaklık ile değişimi

Çizelge 4.2. Al-Cu-Co ötektik alaşımı için ölçülen elektriksel özdirenç değerlerinden elde edilen termal iletkenlikler

Alaşım (% ağı.)	T (°K)	Termal İletkenlikler	
		Weidemann-Franz (W/Km)	Smith-Palmer (W/Km)
Al-23.9Cu-1.2Co	293.32	13.54	22.81
	320.04	19.17	27.93
	349.90	26.32	34.43
	383.37	36.20	43.41
	413.87	41.12	47.88
	439.62	50.30	56.22
	468.41	57.31	62.59
	500.95	64.76	69.37
	538.09	76.95	80.45
	579.77	87.46	90.00
	627.09	96.99	98.66

b) Al-Cu-Si Dendritik Alaşımının İncelenmesi:

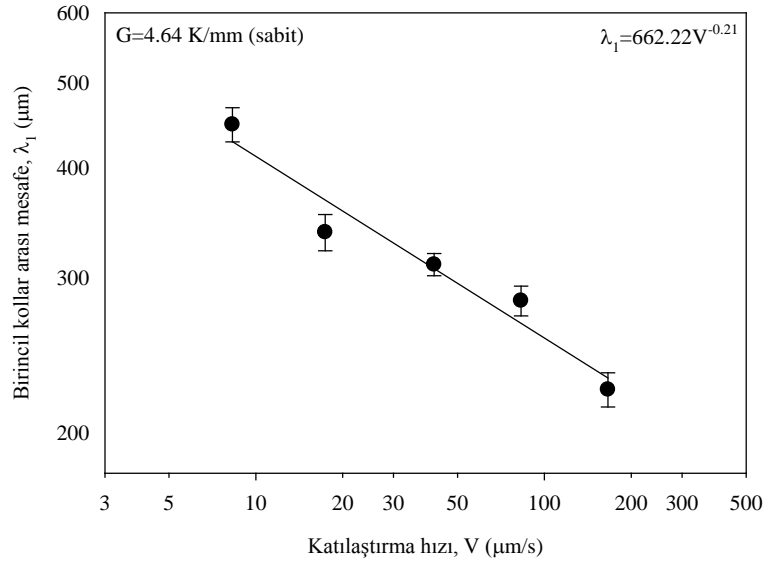
Al-Cu-Si alaşımında beyaz, gri ve siyah olmak üzere üç farklı fazın büyüdüğü tespit edilmiştir. Yapılan EDX analizleri sonucunda bu fazlardan; beyaz fazın (ara faz) gri fazın (Al zengin ana faz) ve siyah fazın da (α -Al fazı) olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 4.3'te Al-Cu-Si dendritik alaşım sistemi için sabit sıcaklık gradyentinde, farklı katılaştırma hızlarında üretilen numunelerden ölçülen birincil ve ikincil dendrit kollar arası mesafeler, mikrosertlik ve elektriksel özdirenç değerleri verilmiştir.

Elde edilen alaşım çok gevrek olduğundan basma-dayanım ve çekme-dayanım değerleri ölçülememiştir. Ayrıca deneysel olarak ölçülen elektriksel özdirenç değerlerinden faydalanılarak Weidemann-Franz (Kittel, 1965) ve Smith-Palmer (Poirier ve Geiger, 1994) denklemleriyle termal iletkenlik değerleri de hesaplanmıştır. Çizilen bütün grafikler ve lineer regresyon yöntemiyle tespit edilen parametreler arası bağıntılar ilgili grafiklerin üzerinde verilmiştir.

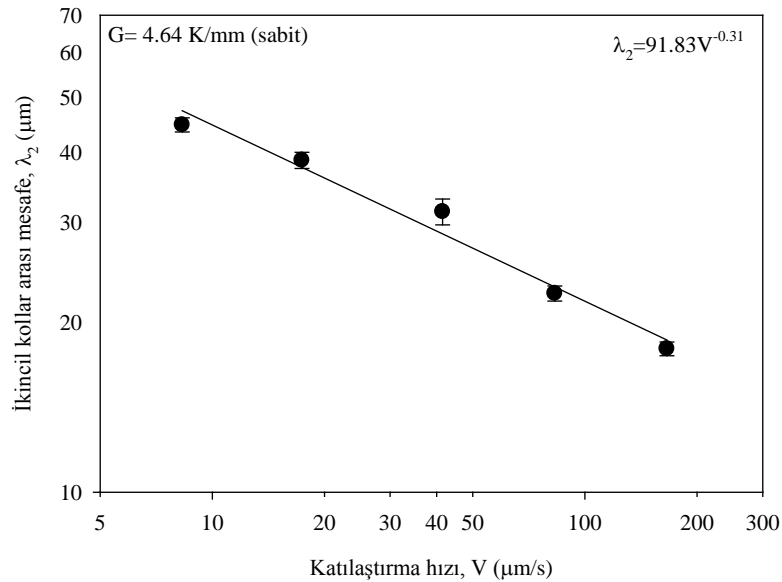
Çizelge 4.3. Al-Cu-Si dendritik alaşımı için sabit sıcaklık gradyenti ($G=4.64$ K/mm) farklı katılaştırma hızlarında ve sabit katılaştırma hızı (17.4 $\mu\text{m/s}$) farklı sıcaklık gradyentlerinde elde edilen dendrit kollar arası mesafeler, mikrosertlik ve elektriksel özdirenç değerleri

Katılaştırma Parametreleri		Dendrit Kollar Arası Mesafeler		Mikrosertlik Değerleri		Elektriksel Özdirenç Değerleri
G (K/mm)	V ($\mu\text{m/s}$)	λ_1 (μm)	λ_2 (μm)	HV _b (kg/mm ²)	HV _e (kg/mm ²)	$\rho \times 10^{-8}$ (Ωm)
4.64	8.3	448.06 \pm 20.00	44.76 \pm 1.29	66.55 \pm 1.20	68.73 \pm 1.30	4.24
	17.4	338.00 \pm 16.00	38.73 \pm 1.27	68.33 \pm 1.10	70.95 \pm 1.40	4.38
	41.5	310.66 \pm 9.00	31.41 \pm 1.65	72.69 \pm 1.00	72.99 \pm 0.80	5.78
	83.0	282.60 \pm 11.00	22.50 \pm 0.69	74.15 \pm 0.75	76.31 \pm 0.90	5.92
	166.0	224.00 \pm 10.00	17.95 \pm 0.50	76.27 \pm 1.40	78.65 \pm 1.40	6.10
1.60		590.00 \pm 15.0	61.60 \pm 2.65	60.14 \pm 0.55	63.53 \pm 1.10	Ölçülmedi
2.64		515.00 \pm 11.0	47.60 \pm 2.84	64.40 \pm 1.10	65.65 \pm 1.10	
3.55	17.4	429.84 \pm 10.0	40.54 \pm 2.12	66.64 \pm 0.90	69.26 \pm 1.40	
4.64		338.00 \pm 9.4	38.73 \pm 2.12	68.33 \pm 1.10	70.95 \pm 1.40	
6.12		317.00 \pm 8.5	35.00 \pm 2.00	70.12 \pm 1.20	72.00 \pm 0.57	

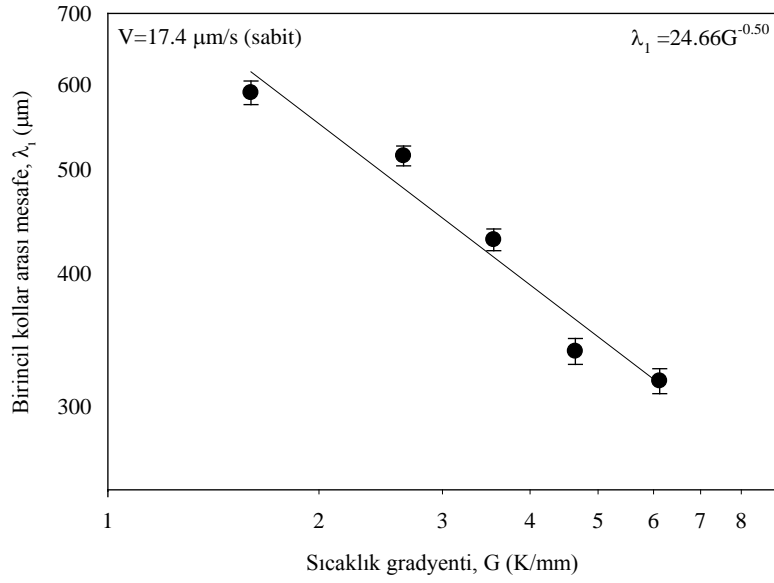


Şekil 4.27. Doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Si dendritik alaşımı için birincil kollar arası mesafelerin katılaştırma hızı ile değişimi ve elde edilen bağıntı

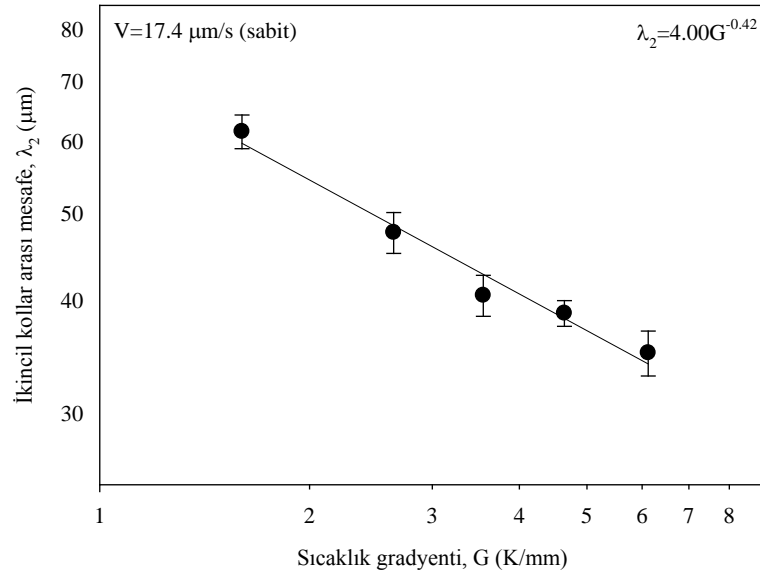
Şekil 4.27 ve 4.28 incelendiğinde katılaştırma hızı arttıkça birincil ve ikincil kollar arası mesafe değerlerinin azaldığı görülmektedir. Alınan ölçümler incelendiğinde sabit sıcaklık gradyentinde katılaştırma hızı arttıkça λ_1 -0.21 ve λ_2 -0.31 üstel değeriyle azalmaktadır.



Şekil 4.28. Doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Si dendritik alaşımı için ikincil kollar arası mesafelerin katılaştırma hızı ile değişimi ve elde edilen bağıntı

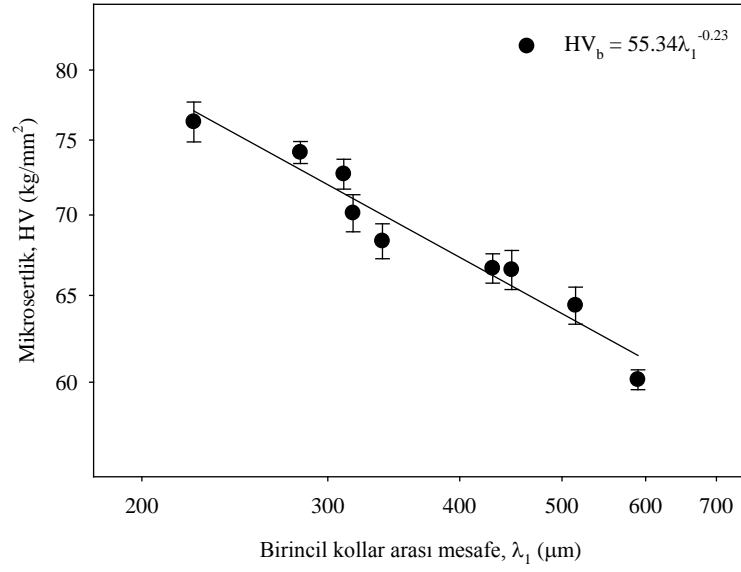


Şekil 4.29. Doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Si dendritik alaşımı için birincil kollar arası mesafelerin sıcaklık gradyenti ile değişimi ve elde edilen bağıntı



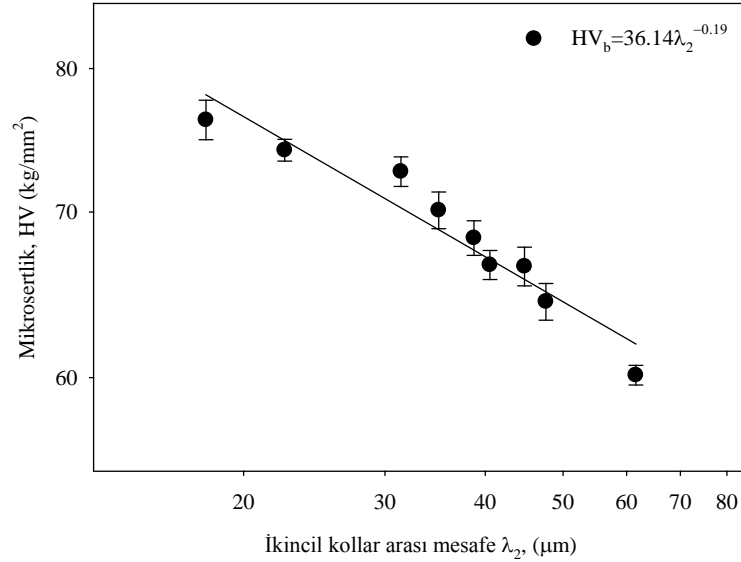
Şekil 4.30. Doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Si dendritik alaşımı ikincil kollar arası mesafelerin sıcaklık gradyenti ile değişimi ve elde edilen bağıntı

Şekil 4.29 ve 4.30 incelendiğinde sıcaklık gradyenti arttıkça birincil ve ikincil kollar arası mesafe değerlerinin azaldığı görülmektedir. Regresyon bağıntıları incelendiğinde sabit sıcaklık gradyentinde katılaştırma hızı arttıkça λ_1 -0.50 ve λ_2 -0.42 üstel değeriyle azalmaktadır.

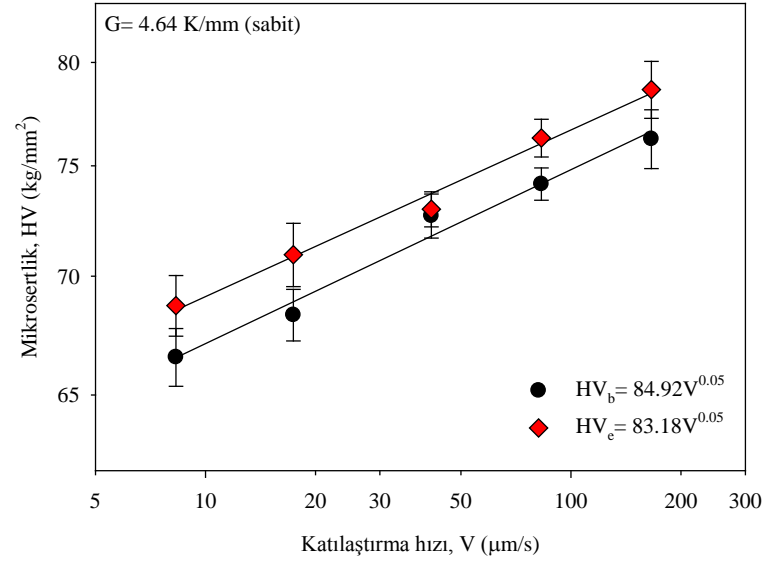


Şekil 4.31. Al-Cu-Si dendritik alaşımı için mikrosertlik değerlerinin birincil kollar arası mesafe ile değişimi ve elde edilen bağıntı

Şekil 4.31 ve 4.32’de verilen grafikler incelendiğinde, artan birincil ve ikincil kollar arası mesafelere bağlı olarak mikrosertlik değerlerinin, λ_1 için -0.23 ve λ_2 için -0.19 üstel değerleri ile azaldığı görülmektedir.

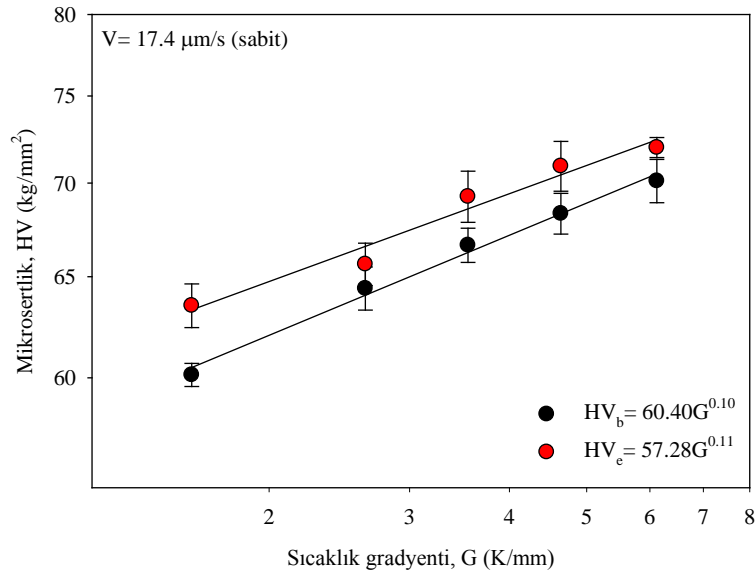


Şekil 4.32. Doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Si dendritik alaşımı için mikrosertlik değerlerinin ikincil kollar arası mesafe ile değişimi ve elde edilen bağıntı



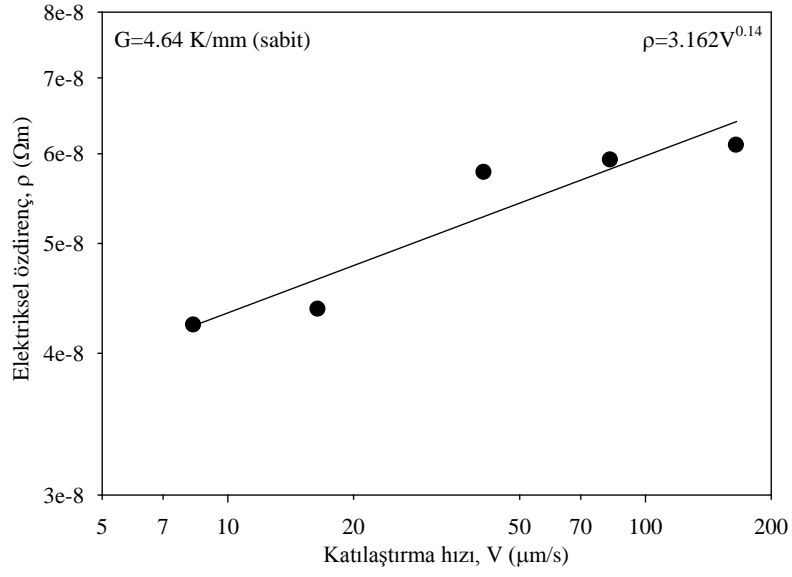
Şekil 4.33. Doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Si dendritik alaşımı için katılaştırma hızı-mikrosertlik değişimi ve elde edilen bağıntılar

Şekil 4.33 ve 4.34'te verilen grafiklerde sıcaklık gradyenti ile mikrosertlik değerlerinin değişiminin, katılaştırma hızına göre mikrosertlik değerlerinin değişimine kıyasla yaklaşık iki kat fazla arttığı gözlenmektedir.

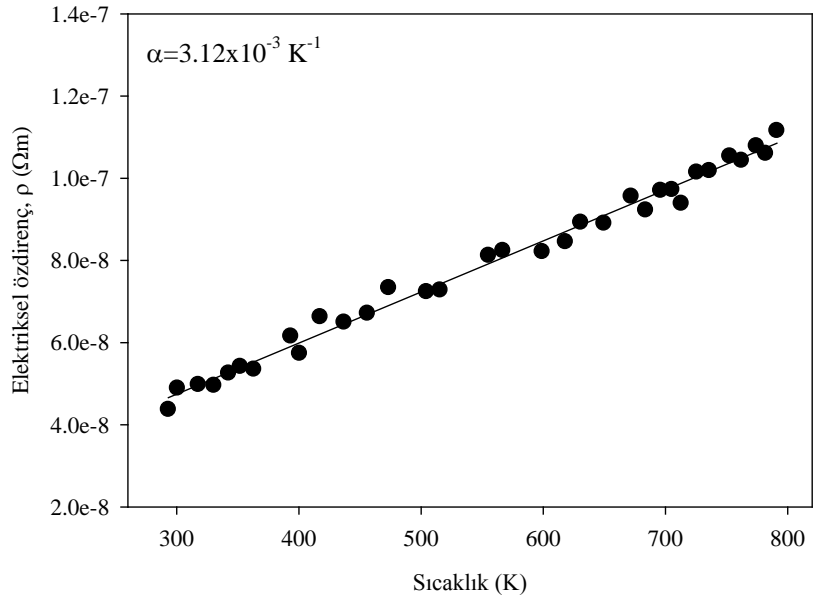


Şekil 4.34. Doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Si dendritik alaşımı için sıcaklık gradyenti-mikrosertlik değişimi ve elde edilen bağıntılar

Şekil 4.35'te verilen grafikte, artan katılaştırma hızına bağlı olarak elektriksel özdirenç değeri, 0.14 üstel değeri ile artmaktadır. Ayrıca, Şekil 4.36'da verilen grafikte, artan sıcaklık değerlerine bağlı olarak elektriksel özdirenç değerlerinin arttığı görülmektedir.

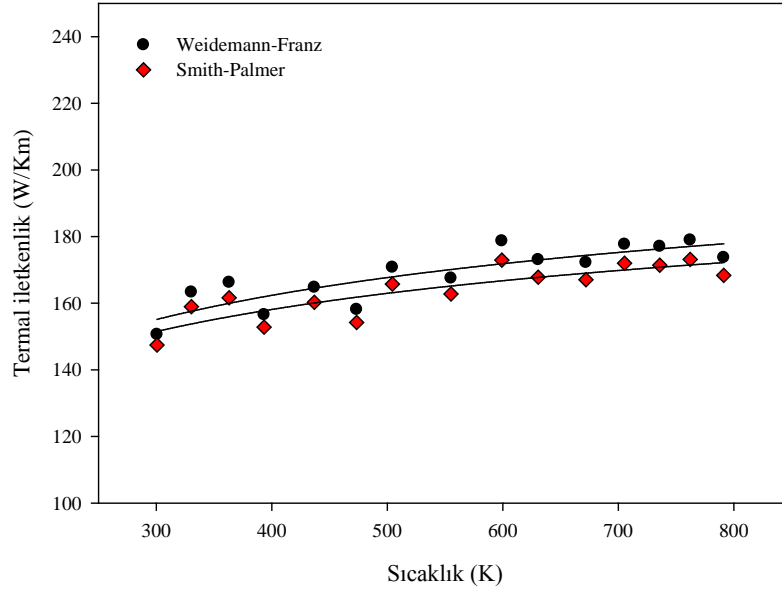


Şekil 4.35. Doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Co ötektik alaşımı için elektriksel özdirenç değerlerinin katılaştırma hızı ile değişimi ve elde edilen bağıntı



Şekil 4.36. Doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Co ötektik alaşımı için elektriksel özdirenç değerlerinin sıcaklık ile değişimi

Şekil 4.37’de verilen değişim grafiğinde ve Çizelge 4.4’te ölçülen elektriksel özdirenç değerlerinden hesaplanan Weidemann-Franz ve Smith-Palmer eşitliklerinden elde edilen termal iletkenlik değerlerinin sıcaklıkla değişimlerinde az da olsa bir artış görülmektedir.



Şekil 4.37. Doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Si dendritik alaşımı için termal iletkenlik değerlerinin sıcaklık ile değişimi

Çizelge 4.4. Al-Cu-Si dendritik alaşımı için elde edilen termal iletkenlik değerleri

Alaşım (% ağı.)	T (°K)	Termal İletkenlikler	
		Weidemann-Franz (W/Km)	Smith-Palmer (W/Km)
Al-13.6Cu-6Si	300.62	150.63	147.42
	330.42	163.30	158.94
	363.10	166.25	161.62
	393.37	156.55	152.80
	436.91	164.75	160.26
	473.43	158.09	154.21
	504.42	170.76	165.72
	555.15	167.49	162.75
	599.12	178.69	172.93
	630.62	173.03	167.79
	671.93	172.19	167.02
	705.29	177.68	172.01
	735.83	177.02	171.41
	762.11	178.93	173.15
791.17	173.67	168.37	

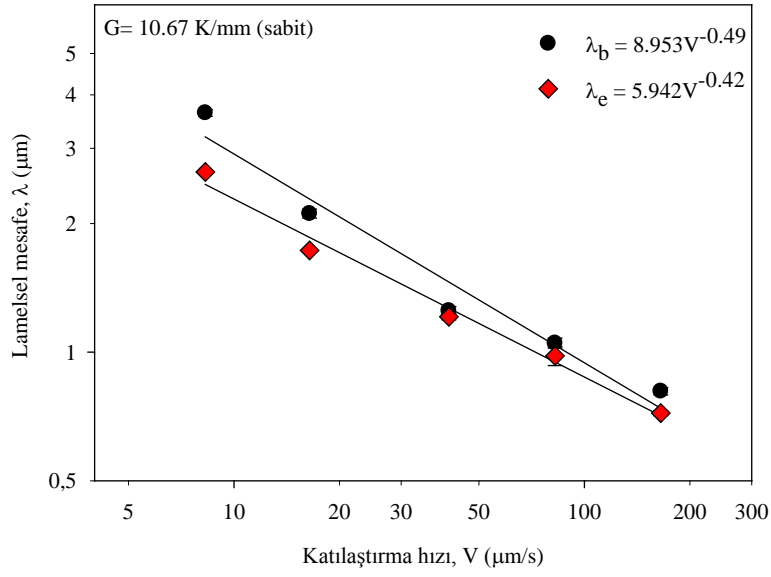
c) Zn-Al-Cu Ötektik Alaşımının İncelenmesi:

Zn-Al-Cu alaşımının doğrusal katılaştırılması sonucunda ötektik bir yapı elde edilmiş ve optik mikroskop ile çekilen fotoğraflardan, α -Al, η -Zn ve ε -CuZn₄ fazlarının

oluştugu gözlenmiştir. Çizelge 4.5'te Zn-Al-Cu ötektik alaşım sistemi için sabit sıcaklık gradyentinde farklı katılaştırma hızlarında ve sabit katılaştırma hızında farklı sıcaklık gradyenlerinde üretilen numunelerden ölçülen ötektik mesafeler, mikrosertlik, çekme dayanımı ve elektriksel özdirenç değerleri verilmiştir. Bu elektriksel özdirenç değerlerinden faydalanılarak Weidemann-Franz (Kittel, 1965) ve Smith-Palmer (Poirier ve Geiger, 1994) denklemleri kullanılarak termal iletkenlik değerleri de hesaplanmış ve grafikler çizilmiştir. Zn-Al-Cu ötektik alaşım sistemi için elde edilen verilerle lineer regresyon yöntemiyle tespit edilen parametreler arası bağıntılar ise ilgili grafikler üzerinde gösterilmiştir.

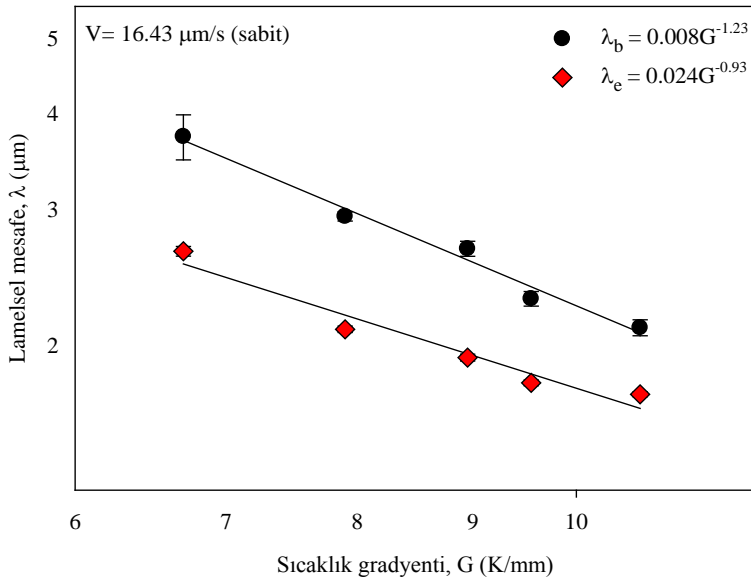
Çizelge 4.5. Zn-Al-Cu ötektik alaşımı için sabit sıcaklık gradyenti ($G=10.67$ K/mm) farklı katılaştırma hızlarında ve sabit katılaştırma hızı ($V=16.4$ $\mu\text{m/s}$) farklı sıcaklık gradyentlerinde elde edilen ötektik mesafeler, mikrosertlik, çekme-dayanımı ve elektriksel özdirenç değerleri

Katılaştırma Parametreleri		Ötektik Mesafeler		Mikrosertlik Değerleri		Çekme-Dayanımı Değerleri	Elektriksel Özdirenç Değerleri
G (K/mm)	V ($\mu\text{m/s}$)	λ_b (μm)	λ_e (μm)	HV _b (kg/mm ²)	HV _e (kg/mm ²)	σ_U (MPa)	$\rho \times 10^{-9}$ (Ωm)
10.67	8.3	3.63± 0.07	2.64± 0.02	100.80± 0.78	102.78± 1.07	148.02	5.27
	16.4	2.11± 0.05	1.73± 0.01	103.10± 0.73	105.30± 0.91	165.83	5.79
	41.5	1.25± 0.03	1.21± 0.02	104.40± 0.72	106.40± 0.86	187.92	6.93
	83.0	1.05± 0.03	0.98± 0.05	105.70± 1.29	109.40± 0.85	202.99	8.90
	166.0	0.81± 0.02	0.72± 0.01	108.20± 0.00	109.70± 0.34	227.65	10.15
6.70		3.73 ± 0.25	2.65 ± 0.04	96.10 ± 0.63	97.20 ± 0.70	145.65	
7.90		2.94 ± 0.04	2.10 ± 0.02	98.00 ± 0.03	99.00 ± 0.63	153.23	
8.95	16.4	2.67 ± 0.06	1.93 ± 0.02	101.60 ± 0.37	101.70 ± 0.63	158.02	Ölçülmedi
9.55		2.30 ± 0.05	1.79 ± 0.02	102.70 ± 0.58	103.40 ± 0.68	161.35	
10.67		2.11 ± 0.05	1.73 ± 0.01	103.10 ± 0.73	105.30 ± 0.91	165.83	

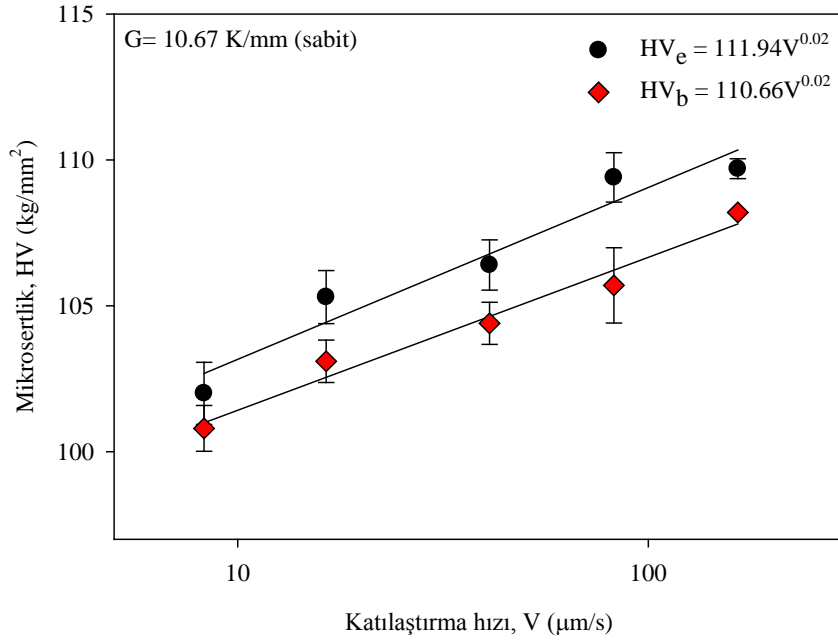


Şekil 4.38. Zn-Al-Cu ötektik alaşımı için lamelsel mesafelerin katılaştırma hızı ile değişimi ve elde edilen bağıntılar

Şekil 4.38 ve 4.39 incelendiğinde katılaştırma hızı ve sıcaklık gradyenti arttıkça ötektik mesafe değerlerinin azaldığı görülmektedir. Alınan ölçümler incelendiğinde sabit sıcaklık gradyentinde katılaştırma hızı arttıkça λ_b -0.49 ve λ_e -0.42, sabit katılaştırma hızında λ_b -1.23 ve λ_e -0.93 üstel değerleriyle azalmaktadır.

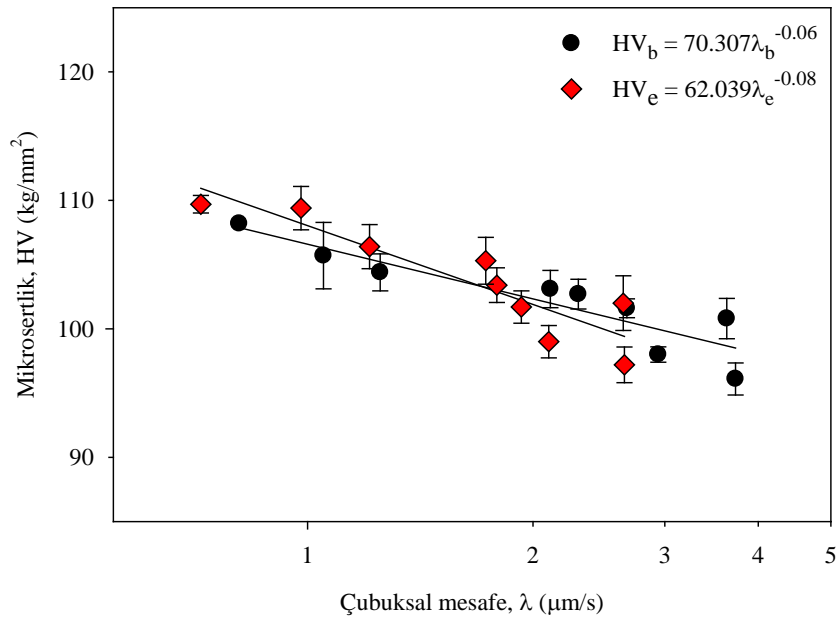


Şekil 4.39. Zn-Al-Cu ötektik alaşımı için lamelsel mesafelerin sıcaklık gradyenti ile değişimi ve elde edilen bağıntılar

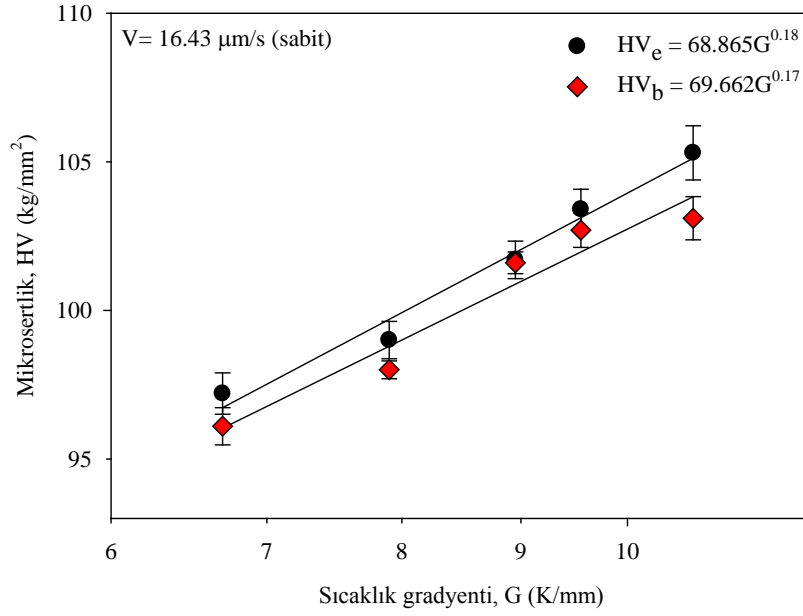


Şekil 4.40. Doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Co ötektik alaşımı için mikrosertlik değerlerinin katılaştırma hızı ile değişimi ve elde edilen bağıntılar

Şekil 4.40'ta verilen grafikte, artan katılaştırma hızına bağlı olarak mikrosertlik değerlerinin, 0.02 üstel değeri ile arttığı görülmektedir. Şekil 4.41'de verilen grafikte ise artan lamelsel mesafelere bağlı olarak mikrosertlik değerlerinin λ_b - 0.06 ve λ_e - 0.08 üsteli ile azaldıklarını göstermektedir.

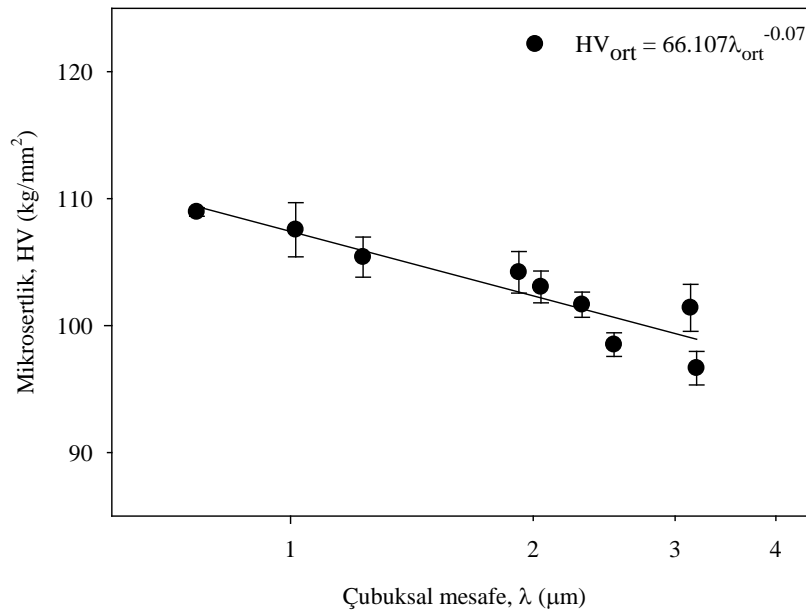


Şekil 4.41. Zn-Al-Cu ötektik alaşımı için mikrosertlik değerlerinin lamelsel mesafelerle değişimi ve elde edilen bağıntılar

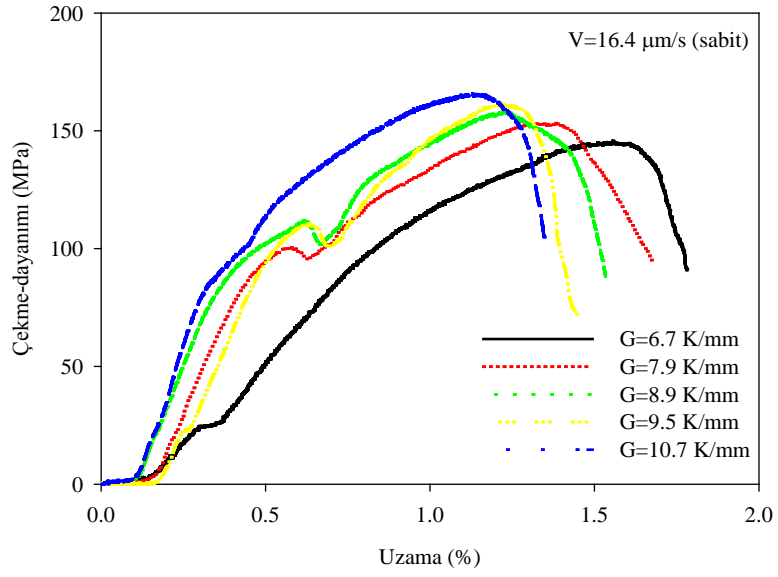


Şekil 4.42. Zn-Al-Cu ötektik alaşımı için mikrosertlik değerlerinin sıcaklık gradyenti ile değişimi ve elde edilen bağıntılar

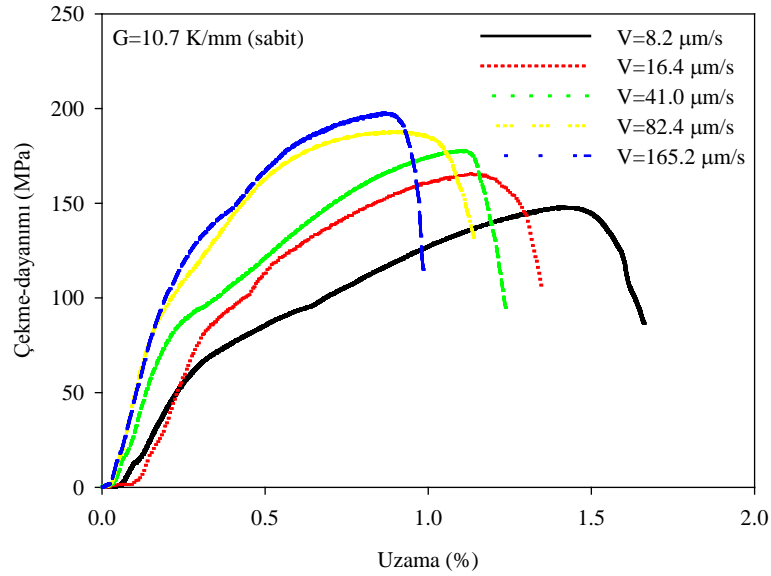
Şekil 4.42’de verilen grafikte $V=16.43 \mu\text{m/s}$ sabit katılaştırma hızında artan sıcaklık gradyentlerine karşılık mikrosertlik değerlerinin enine kesit için 0.18, boyuna kesit içinse 0.17 üstel değeriyle arttığı gözlenmektedir.



Şekil 4.43. Zn-Al-Cu ötektik alaşımı için mikrosertlik değerlerinin ortalama çubuksal mesafe ile değişimi ve elde edilen bağıntı

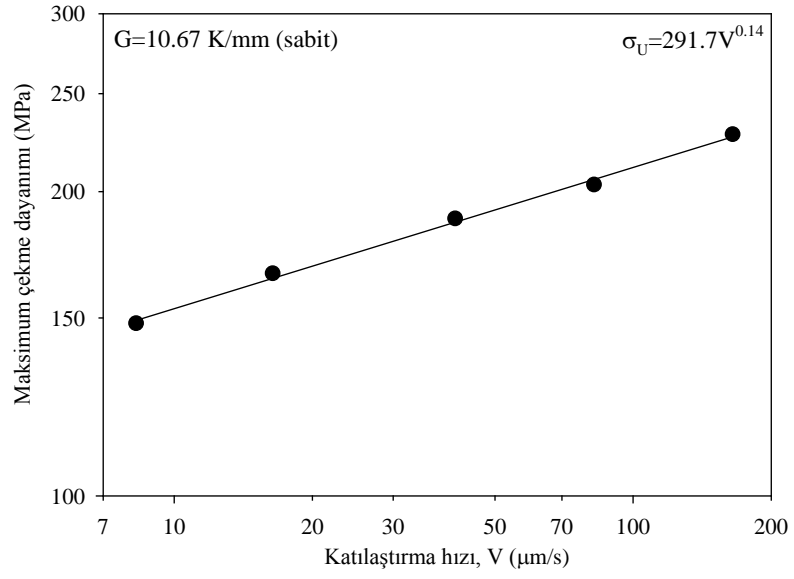


Şekil 4.44. Zn-Al-Cu ötektik alaşımı için çekme-dayanımı değerlerinin uzama ile değişimi



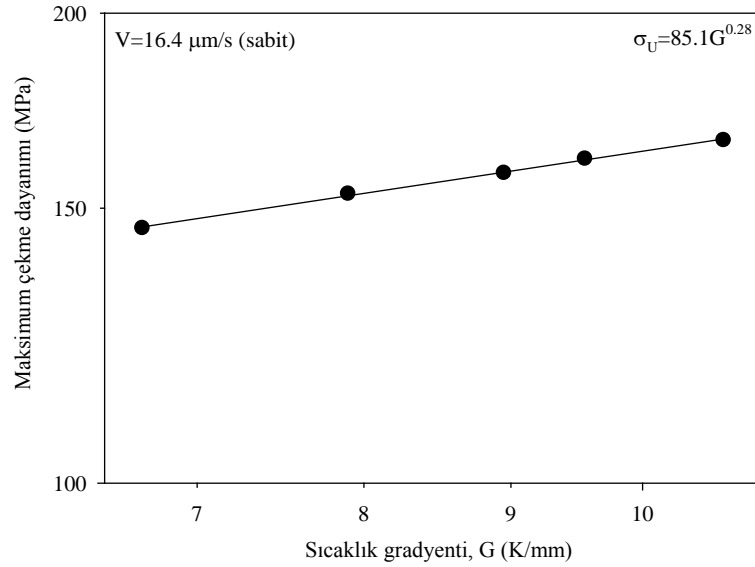
Şekil 4.45. Zn-Al-Cu ötektik alaşımı için çekme-dayanımı değerlerinin uzama ile değişimi

Şekil 4.44 ve 4.45'te sabit katılaştırma hızı farklı sıcaklık gradyantlerinde ve sabit sıcaklık gradyanı farklı katılaştırma hızlarında elde edilen numunelerin çekme-dayanımı grafikleri görülmektedir. Bu grafiklerdeki deformasyon noktaları alınarak Şekil 4.46 ve 4.47 elde edilmiştir.

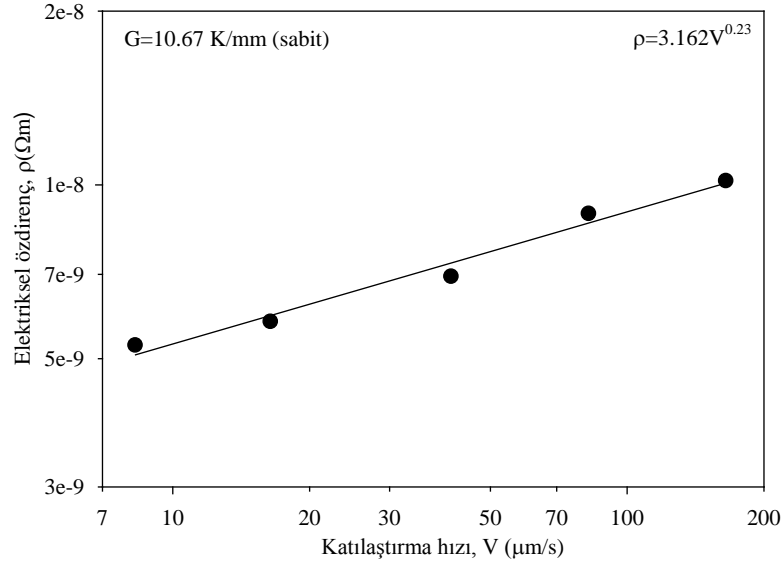


Şekil 4.46. Zn-Al-Cu ötektik alaşımı için çekme-dayanımı değerlerinin katılaştırma hızı ile değişimi ve elde edilen bağıntı

Zn-Al-Cu ötektik alaşım sisteminde farklı katılaştırma hızlarına bağlı olarak üretilen numunelere ait ölçülen çekme-dayanımı değerleri Şekil 4.46 ve 4.47'de verilmiştir. Bu grafikler incelendiğinde, artan katılaştırma hızı ve sıcaklık gradyentine bağlı olarak çekme-dayanımının, 0.14 ve 0.28 üstel değerleri ile arttığı görülmektedir.

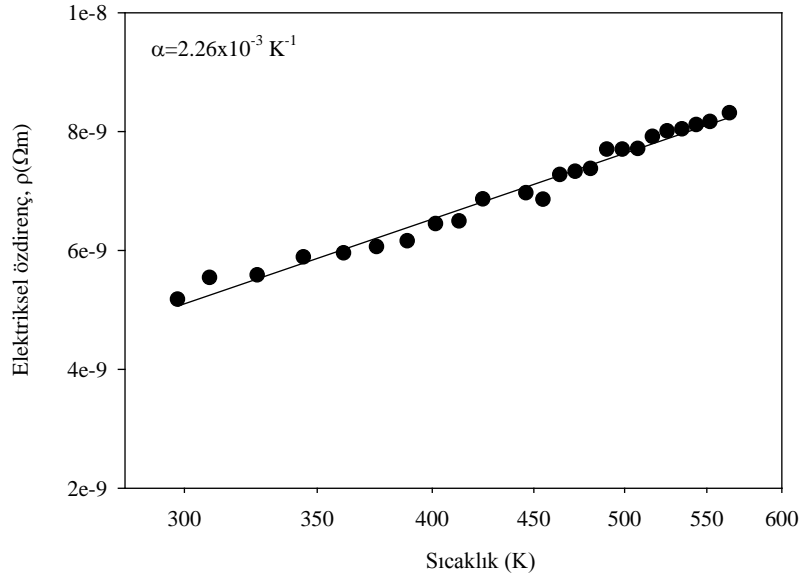


Şekil 4.47. Zn-Al-Cu ötektik alaşımı için çekme-dayanımı değerlerinin sıcaklık gradyenti ile değişimi ve elde edilen bağıntı



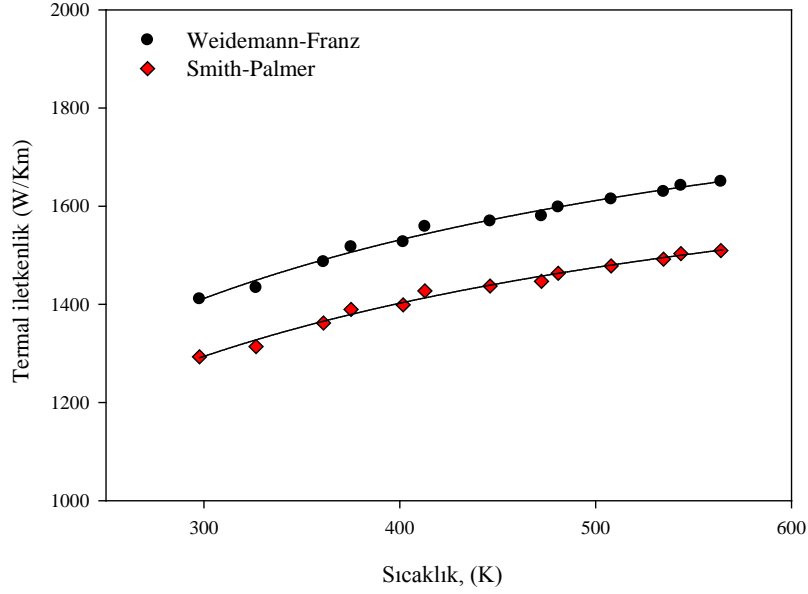
Şekil 4.48. Zn-Al-Cu ötektik alaşımı için elektriksel özdirenç değerlerinin katılaştırma hızı ile değişimi ve elde edilen bağıntı

Zn-Al-Cu ötektik alaşım sisteminde farklı katılaştırma hızlarına bağlı olarak üretilen numunelere ait ölçülen elektriksel özdirenç değerleri Şekil 4.48’de verilmiştir. Artan katılaştırma hızına bağlı olarak elektriksel özdirenç değerleri 0.23 üstel değeri ile artmaktadır.



Şekil 4.49. Zn-Al-Cu ötektik alaşımı için elektriksel özdirenç değerlerinin sıcaklık ile değişimi

Şekil 4.49’da verilen grafikte, sabit sıcaklık gradyenti (16.67 K/mm) ve katılaştırma hızında (16.4 μm) üretilmiş numunenin artan sıcaklık değerlerine bağlı olarak elektriksel özdirenç değerleri görülmektedir. Şekil 4.50’de verilen grafikte Weidemann-Franz ve Smith-Palmer eşitliklerinden elde edilen termal iletkenlik değerlerinin sıcaklıkla değişimleri görülmektedir.



Şekil 4.50. Doğrusal katılaştırılmış Zn-Al-Cu ötektik alaşımı için termal iletkenlik değerlerinin sıcaklık ile değişimi

Çizelge 4.6. Zn-Al-Cu ötektik alaşımı için ölçülen elektriksel özdirenç değerlerinden elde edilen termal iletkenlik değerleri

Alaşım (% ağı.)	T (°K)	Termal İletkenlikler	
		Weidemann-Franz (W/Km)	Smith-Palmer (W/Km)
Zn-7Al-2.96Cu	297.79	1411.02	1293.12
	326.61	1434.02	1314.03
	361.05	1486.77	1361.97
	375.11	1517.29	1389.72
	401.72	1527.46	1398.96
	412.81	1558.77	1427.42
	446.09	1569.64	1437.31
	472.36	1580.21	1446.91
	480.87	1598.34	1463.39
	507.97	1614.64	1478.21
	534.68	1629.97	1492.15
	543.56	1642.25	1503.31
	564.00	1650.54	1509.46

4.9. Deneysel Sonuçların Literatürle Karşılaştırılması

4.9.1. Mikroyapı ölçüm sonuçlarının literatürle karşılaştırılması

Bu tez çalışmasında yapılan Al-Cu-Co, Al-Cu-Si ve Zn-Al-Cu alaşım sistemlerine ait kontrollü katılaştırma deneylerinden elde edilen verilerin lineer regresyon analiziyle belirlenen katılaştırma hızının mikroyapıya etkisini veren sonuçlar Çizelge 4.7’de verilmiştir.

Çizelge 4.7. Katılaştırma deneylerinden elde edilen bazı bağıntılar

Alaşım (% ağı.)	Kontrol Sıcaklığı (°C)	Sıcaklık Gradyenti (K/mm)	Katılaştırma Hız Aralığı (µm/s)	Elde Edilen Bağıntılar
Al-23.9Cu-1.2Co	750	5.66	8.30-166.00	$\lambda_b=14.989V^{-0.46}$ $\lambda_c=12.021V^{-0.44}$
Al-13.6Cu-6Si	750	4.64	8.30-166.00	$\lambda_1=662.22V^{-0.21}$ $\lambda_2=91.83V^{-0.31}$
Zn-7Al-2.96Cu	750	10.67	8.28-165.20	$\lambda_b=8.953V^{-0.49}$ $\lambda_c=5.942V^{-0.42}$

Çizelge 4.8. Bazı alaşımlarda kontrollü katılaştırma üzerine yapılan çalışmalar ve elde edilen bağıntılar

Alaşım (% ağı.)	$\lambda=kV^{-n}$	Referans
Bi-Pb	$\lambda_a=97.99V^{-0.49}$	(Koçak vd., 2013)
Sn-3.5Ag-0.9Cu	$\lambda_{rod}=10.47V^{-0.51}$ $\lambda_{plate}=12.58V^{-0.51}$	(Böyük ve Maraşlı, 2009)
Bi-Cd	$\lambda_c=4.91V^{-0.47}$	(Kaya vd., 2007)
Al-11.1Si-4.2Ni	$\lambda_{Si}=12.58V^{-0.5}$ $\lambda_{Al_3Ni}=7.9V^{-0.47}$	(Böyük vd., 2011)
Al-13Si	$\lambda=27V^{-0.53}$	(Hosch vd., 2009)
Al-1.7Fe	$\lambda_E=1.93 \times 10^{-5}V^{0.628}$	(Hirai vd., 1977)
Al-5.7Ni	$\lambda=11.61V^{-0.51}$	(Kaya vd., 2010)
Al-7 Si-0.6 Mg	$\lambda_E=33.5V^{-0.5}$	(Steinbach ve Ratke, 2007)

Çizelge 4.7’de verilen katılaştırma hızı ile ötektik mesafeler arasındaki ilişkilerden de görüleceği gibi bu tez çalışmasında incelenen alaşım sistemlerinin üstel değerleri ötektik sistemler için (Al-Cu-Co ve Zn-Al-Cu) birbirleriyle uyumludur. Al-Cu-Si alaşım sisteminin üstel değerlerinin diğer alaşım sistemlerine göre biraz küçük olmasının nedeni dendritik yapı oluşturmasından kaynaklanmaktadır. Çizelge 4.8’de verilen literatürdeki benzer alaşım sistemlerinin üstel değerlerinin de deney sonuçları ile uyumlu olduğu görülmektedir.

4.9.2. Mikrosertlik ve çekme-dayanım ölçüm sonuçlarının literatürle karşılaştırılması

Al-Cu-Co, Al-Cu-Si ve Zn-Al-Cu alaşım sistemlerine ait mekanik özelliklerden mikrosertlik basma dayanım ve çekme-dayanım değerleri için elde edilen bağıntılar Çizelge 4.9’da verilmiştir.

Çizelge 4.9. Mikrosertlik ve çekme-dayanım/basma-gerilim değerleri için elde edilen bağıntılar

Alaşım (% ağı.)	Mikrosertlik	Basma-Dayanımı (σ)/Çekme-Dayanımı (σ_U)
Al-23.9Cu-1.2Co	$HV_b=186.21G^{0.07}$	$\sigma=159.26G^{0.27}$ $\sigma=6.75V^{0.22}$ (Basma-dayanım)
	$HV_e=189.67G^{0.07}$	
	$HV_b=180.30V^{0.05}$	
	$HV_e=184.07V^{0.05}$	
	$HV_b=240.43\lambda_b^{-0.12}$	
	$HV_e=238.23\lambda_e^{-0.12}$	
	$HV_{ort}=237.74\lambda_{ort}^{-0.10}$	
Al-13.6Cu-6Si	$HV_b=60.40G^{0.10}$	Malzeme çok gevrek olduğundan ölçülemedi
	$HV_e=57.28G^{0.11}$	
	$HV_b=84.92V^{0.05}$	
	$HV_e=83.18V^{0.05}$	
	$HV_b=55.34\lambda_1^{-0.23}$	
Zn-7Al-2.96Cu	$HV_b=36.14\lambda_2^{-0.19}$	$\sigma_U=85.1G^{0.28}$ $\sigma_U=291.7V^{0.14}$ (Çekme-dayanım)
	$HV_b=69.662G^{0.17}$	
	$HV_e=68.865G^{0.18}$	
	$HV_b=110.66V^{0.02}$	
	$HV_e=111.94V^{0.02}$	
	$HV_b=70.307\lambda_b^{-0.06}$	
$HV_e=62.039\lambda_e^{-0.08}$		
	$HV_{ort}=66.107\lambda_e^{-0.07}$	

Çizelge 4.10. Bazı alaşımlarda mikrosertlik üzerine yapılan çalışmalar ve elde edilen bağıntılar

Alaşım (%ağ.)	Mikrosertlik	Referans
Bi-Pb	$HV=13.42+0.105\lambda^{-0.5}$ $HV=13.52+5.64V^{0.25}$	(Koçak vd., 2013)
Sn-23Bi-5Zn	$HV=236.34V^{0.06}$	(Çadrlı vd., 2011)
Al-7Ni	$HV=66.1V^{0.11}$ $HV=309.0\lambda_1^{-0.35}$ $HV=114.8\lambda_2^{-0.24}$	(Kaya vd., 2013)
Al-12.6Si	$HV=82.79V^{0.11}$	(Kaya vd., 2003)
Al-11.1Si-4.2Ni	$HV=72.44V^{0.08}$	(Böyük, 2012)
Zn-5Al	$HV=115.64V^{0.13}$	(Engin vd., 2011)

Çizelge 4.10'da verilen benzer çalışmalar bu tez çalışmasında elde edilen sonuçları desteklemektedir. Ayrıca lineer regresyon analizi yapılmış sonuçların da üstel ifadelerinin literatür sonuçlarıyla oldukça uyumlu oldukları görülmektedir. Çizelge 4.11'de ise bazı alaşımlarda çekme-dayanımı üzerine yapılan çalışmalar ve elde edilen bağıntılar verilmiştir. Bu tez çalışmasındaki çekme-dayanımı sonuçlarının literatürdeki benzer sonuçlarla uyum içerisinde olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.11. Bazı alaşımlarda çekme-dayanımı üzerine yapılan çalışmalar

Alaşım (%ağ.)	Çekme-Dayanımı	Referans
Al- 5Si	$\sigma_U=93+45(1/\lambda_2)^{0.5}$	(Goulart vd., 2010)
Al- 9Si	$\sigma_U=111+146(1/\lambda_2)^{0.5}$	
Sn-23Bi-5Zn	$\sigma_C=56.17G^{0.32}$ $\sigma_C=224.23V^{0.19}$	(Çadrlı vd., 2011)
Zn-27Al	$\sigma_U=114+1500(1/\lambda_2)^{0.5}$ $\sigma_Y=65+1650(1/\lambda_2)^{0.5}$	(Santos vd., 2007)
Zn-Al	$\sigma_U=114+185(1/\lambda_2)^{0.5}$ $\sigma_U=97+289(1/\lambda_2)^{0.5}$ $\sigma_{Y=0.2}=42+232(1/\lambda_2)^{0.5}$ $\sigma_{Y=0.2}=30+326(1/\lambda_2)^{0.5}$	(Osorio ve Garcia, 2002)
Sn-4Zn	$\sigma_U=31.95-0.63(1/\lambda_2)^{0.5}$	(Garcia vd., 2010)
Sn-9Zn	$\sigma_U=37+4.5(1/\lambda_2)^{0.5}$	
Sn-12Zn	$\sigma_U=29+9.7(1/\lambda_2)^{0.5}$	

4.9.3. Elektriksel özdirenç ölçüm sonuçlarının literatürle karşılaştırılması

Bu çalışmada incelenen Al-Cu-Co, Al-Cu-Si ve Zn-Al-Cu alaşım sistemlerine ait kontrollü katılaştırma deneylerinden elde edilen verilerin lineer regresyon analiziyle belirlenen katılaştırma hızı ve mikroyapının elektriksel özdirenç etkisini veren sonuçlar Çizelge 4.12’de verilmiştir.

Çizelge 4.12. Elektriksel özdirenç değerleri için elde edilen bağıntılar

Alaşım (%ağ.)	Katılaştırma Hız Aralığı ($\mu\text{m/s}$)	Elektriksel Özdirenç için Elde Edilen Bağıntılar
Al-23.9Cu-1.2Co	8.30-166.00	$\rho=0.086V^{0.09}$
Al-13.6Cu-6Si	8.30-166.00	$\rho=3.162V^{0.14}$
Zn-7Al-2.96Cu	8.28-165.20	$\rho=3.162V^{0.23}$

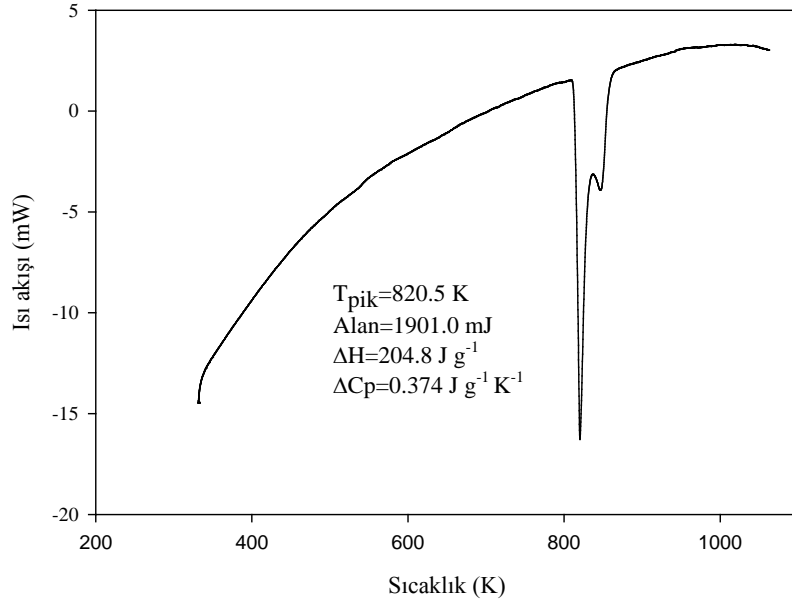
Daha önce yapılan çalışmalardan elde edilmiş olan elektriksel özdirenç değerleri Çizelge 4.13’te verilmiştir. Bu tez çalışmasında elde edilmiş olan elektriksel özdirenç üstel değerlerinin Al-Cu-Co için literatürle oldukça uyumlu olduğu, diğer alaşım sistemleri içinse biraz yüksek oldukları gözlenmektedir.

Çizelge 4.13. Alüminyum esaslı alaşımlarda elektriksel özdirenç üzerine yapılan çalışmalar

Alaşım (%ağ.)	Elektriksel Özdirenç için Elde Edilen Bağıntılar	Referans
Al-5.7Ni	$\rho=0.013V^{0.07}$	(Kaya vd., 2012)
Al-7Ni	$\rho=0.014V^{0.07}$	(Kaya vd., 2013)

4.9.4. Öz ısı ve termal iletkenlik sonuçlarının literatürle karşılaştırılması

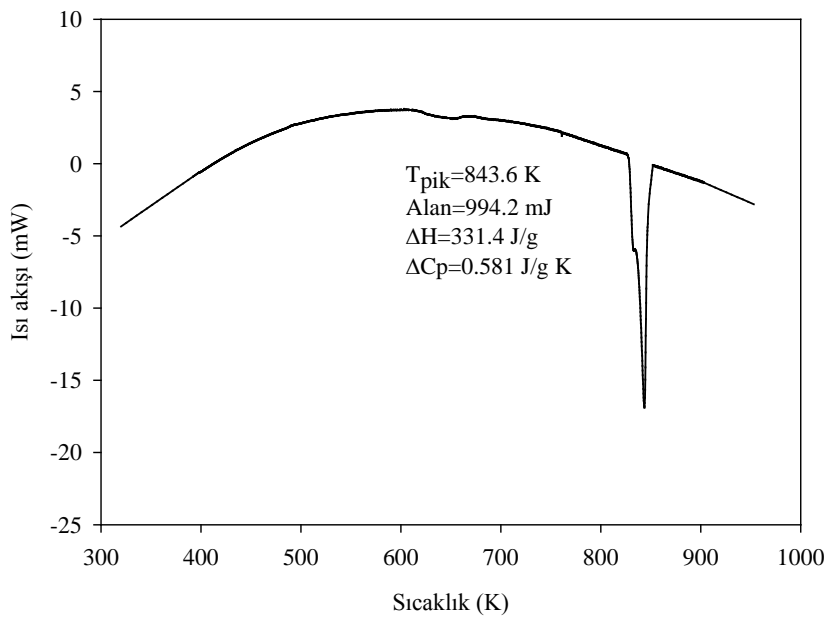
Al-23.9Cu-1.2Co (%ağ.) alaşımının termal özellikleri 10 K/dak. ısıtma hızında 331-1063 K sıcaklık aralığında incelenmiştir. Isı akışının sıcaklıkla değişimi Şekil 4.51’de verilmiştir. Bu ısı akışı-sıcaklık eğrisinden Al-23.9Cu-1.2Co (%ağ.) alaşımının erime sıcaklığı 820.5 K, $\Delta H = 204.8 \text{ J/g}$ ve $\Delta C_p = 0.324 \text{ J/g K}$ olarak tespit edilmiştir.



Şekil 4.51. Al-23.9Cu-1.2Co alaşımına ait ısı akışı-sıcaklık eğrisi

Aksöz ve arkadaşları, Al-24Cu (%ağ.) çalışmalarında (Aksöz vd., 2010) $\Delta H=264.3$ J/g ve $\Delta C_p=0.321$ J/(gK) değerlerini elde etmişlerdir.

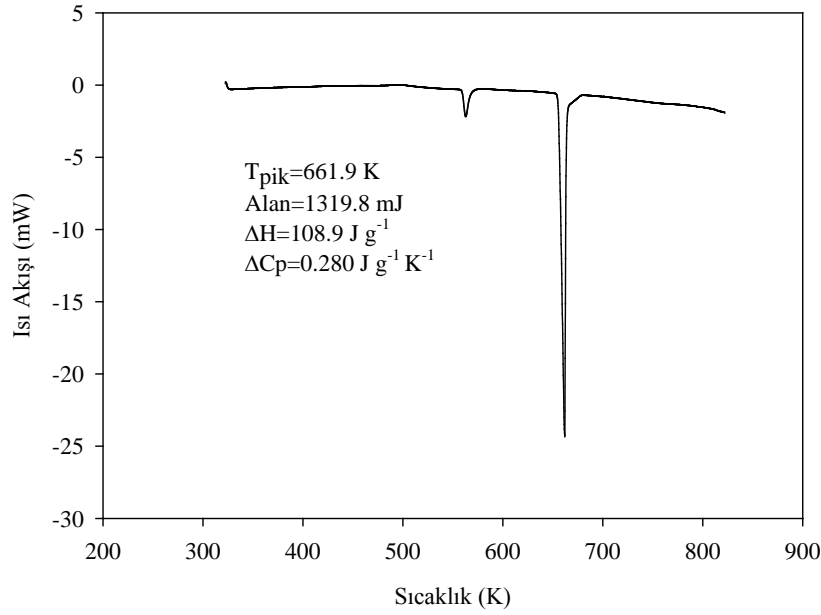
Al-13.6Cu-6Si (%ağ.) alaşımının termal özellikleri 10 K/dak. ısıtma hızında 320-953 K sıcaklık aralığında incelenmiştir. Isı akışının sıcaklıkla değişimi Şekil 4.52’de verilmiştir. Bu ısı akışı-sıcaklık eğrisinden Al-13.6Cu-6Si (%ağ.) alaşımının erime sıcaklığı 843.6 K, $\Delta H = 331.4$ J/g ve $\Delta C_p = 0.581$ J/g K olarak tespit edilmiştir.



Şekil 4.52. Al-13.6Cu-6Si alaşımına ait ısı akışı-sıcaklık eğrisi

Böyük ve arkadaşları, Al-17.6Cu-42.4Ag (%ağ.) çalışmalarında (Böyük vd., 2012) $\Delta H=123.4$ J/g ve $\Delta C_p=0.159$ J/(gK) değerlerini elde etmişlerdir.

Zn-7Al-2.96Cu (%ağ.) alaşımının termal özellikleri 10 K/dak. ısıtma hızında 323-822 K sıcaklık aralığında incelenmiştir. Isı akışının sıcaklıkla değişimi Şekil 4.53'de verilmiştir. Bu ısı akışı-sıcaklık eğrisinden Zn-7Al-2.96Cu (%ağ.) alaşımının erime sıcaklığı 661.9 K, $\Delta H = 108.9$ J/g ve $\Delta C_p = 0.280$ J/g K olarak tespit edilmiştir.



Şekil 4.53. Zn-7Al-2.96Cu alaşımına ait ısı akışı-sıcaklık eğrisi

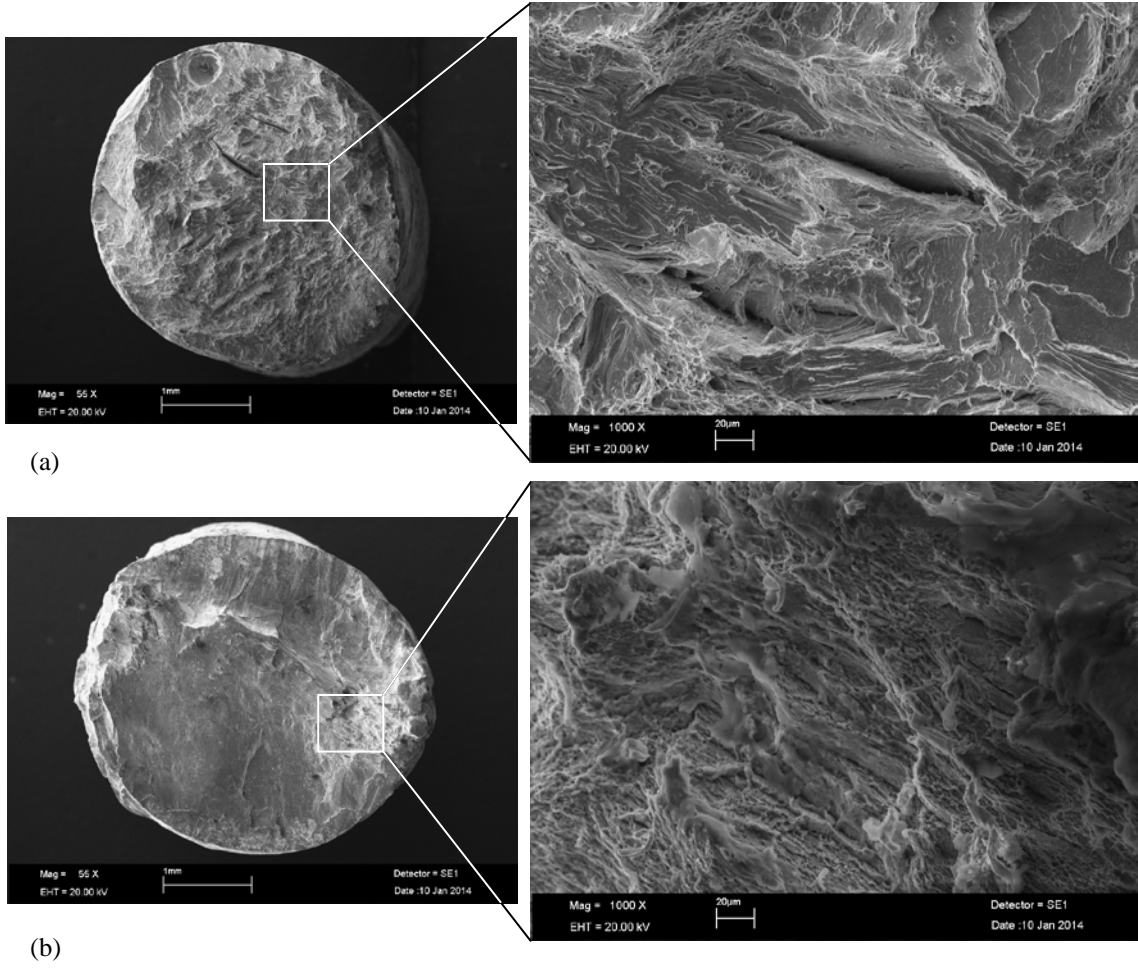
Engin ve arkadaşları, Zn-5Al (%ağ.) çalışmalarında (Engin vd., 2011), $\Delta H=111.91$ J/g ve $\Delta C_p=0.389$ J/(gK) değerlerini elde etmişlerdir.

Kaya ve arkadaşları, Zn-0.7,1.5,2.4,7.37Cu (%ağ.) çalışmalarında (Kaya vd., 2011), ΔH değerlerini 155.78-159.12 J/g aralığında ve ΔC_p değerlerini ise 0.362–0.375 J/g K aralığında ölçmüşlerdir.

4.10. Kopma Yüzey Analizi

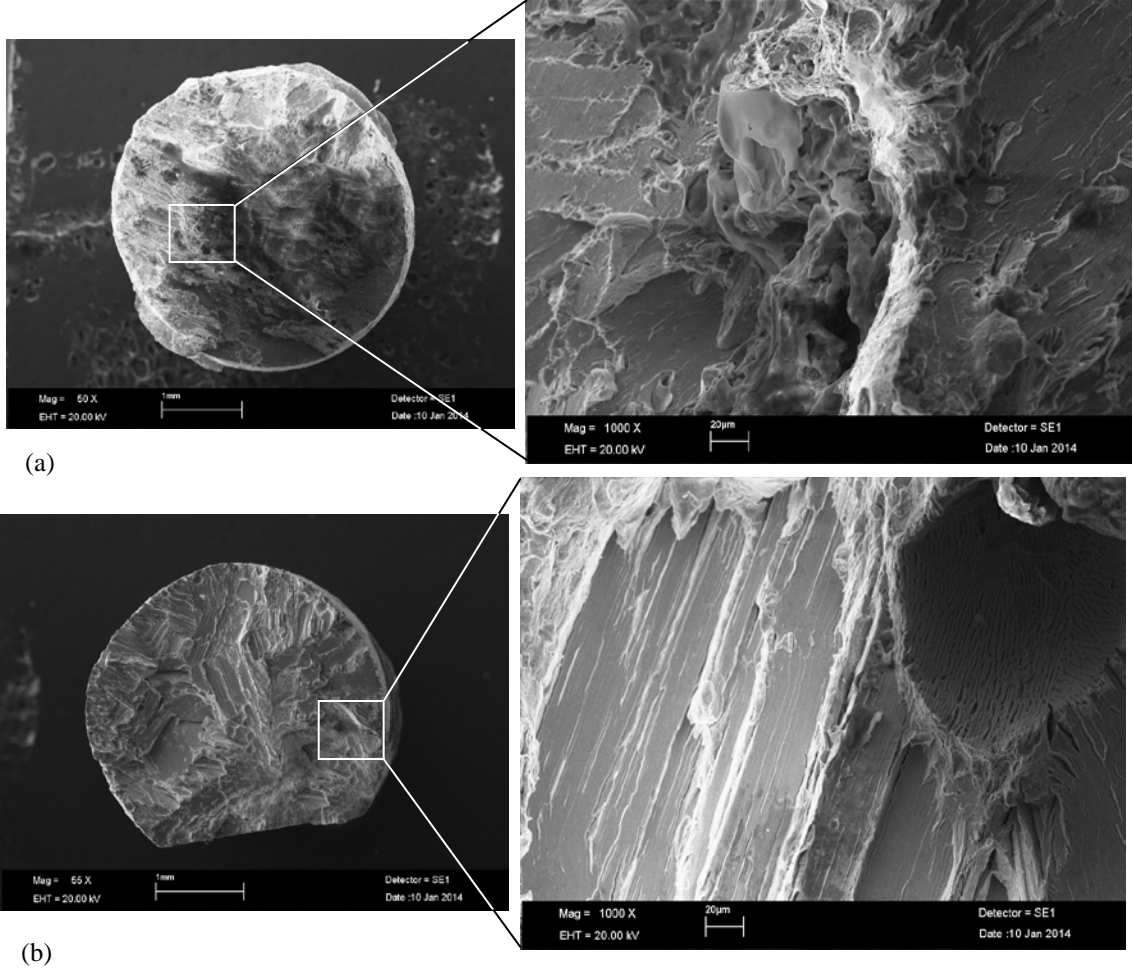
Malzemelerin mekanik özellikleri, mikroskobik kopma olayları ve kopma sürecinde gerçekleşen olaylarla doğrudan ilişkilidir. Bu nedenle, taramalı elektron mikroskobu kullanılarak yapılan malzeme araştırmaları, nicel fraktografide önemli bir rol oynar. Aslında, birçok kopma sünek bir mikro mekanizma ile meydana gelir (Çadırılı, 2013). Bu çalışmada yalnızca çekme-dayanım değerleri ölçülebilen Zn-Al-Cu alaşımı için

kopma yüzey analizi yapılmıştır. Kopma yüzeylerinden alınan SEM fotoğrafları, alaşımların bileşimine bağlı olarak analiz edilmiştir.



Şekil 4.54. Zn-Al-Cu numunelerinin yüzeylerinden alınan SEM fotoğrafları
a) $G=10.67$ K/mm, $V=83$ µm/s b) $G=10.67$ K/mm, $V=8.3$ µm/s

Şekil 4.54 (a) incelendiğinde, kopma yüzeylerinin derin çukurlar barındırdığı, nispeten daha küçük yarıkların da bulunduğu görülmektedir. Şekil 4.54 (a)'da görülen yapı daha derin çukurlara ve daha geniş bir yüzey morfolojisine sahiptir. Dolayısıyla daha gevrek bir yapıdadır. Şekil 4.54 (b) ise daha sıkı bir yüzey morfolojisine sahiptir yüzeyde göze çarpan derin çukurlar bulunmamaktadır ve boyun verme gözlenmektedir. Yani sünek bir yapıya sahiptir.



Şekil 4.55. Zn-Al-Cu numunelerinin yüzeylerinden alınan SEM fotoğrafları

a) $G=10.67$ K/mm, $V=16.4$ $\mu\text{m/s}$ b) $G=6.70$ K/mm, $V=16.4$ $\mu\text{m/s}$

Şekil 4.55 (a) incelendiğinde kopma yüzeylerinin yumuşak kırılmayla meydana gelmiş birçok küçük çukur ve boşluklar barındırdığı görülmektedir. Bazı büyük boşluklar ve çukurlar da vardır. Birçok mikro çatlaklar bu büyük boşluklar ve çukurlarla başlamaktadır. Bu yapı en az uzamaya sahip, diğer bir deyişle daha gevreklerdir. Şekil 4.55 (b) ise boşluk ve çukurlara sahip değildir. Dolayısıyla daha fazla uzamaya sahip olduğu çekme-dayanım grafiklerinden anlaşılmaktadır. Şekilde açıkça boyun verme görülmesine de önceki numuneye göre daha sünek bir yapıya sahiptir.

4.11. Sonuç ve Öneriler

Bu tez çalışmasında, Al-23.9Cu-1.2Co (%ağ.), Zn-7Al-2.96Cu (%ağ.) ve Al-13.6Cu-6Si (%ağ.) alaşımları sabit bir katılaştırma hızında, farklı sıcaklık gradyentlerinde ve sabit bir sıcaklık gradyentinde farklı katılaştırma hızlarında Bridgman tipi doğrusal katılaştırma fırınında yukarı yönlü doğrusal olarak katılaştırıldı. Katılaştırılan alaşımlara standart metalografik işlemler uygulanarak mikroyapıları açığa çıkartıldı. Katılaştırma

parametrelerinin mikroyapı parametreleri üzerine etkisi araştırıldı. Daha sonra alaşımların mikrosertlik ve çekme-dayanımı/basma-gerilimi gibi mekanik testleri yapılarak mikrosertliğin ve maksimum gerilme dayanımlarının katılaştırma ve mikroyapı parametrelerine bağımlılığı incelendi. Çalışılan alaşımların elektriksel ve termal özelliklerinin sıcaklığa göre nasıl bir davranış sergilediği ortaya çıkarılmaya çalışıldı. Bunun için öncelikle alaşımların öz direnç ölçümleri dört nokta yöntemi ile yapıldı ve öz direncin sıcaklık katsayıları hesaplandı. Wiedemann–Franz (Kittel, 1965) ve Smith-Palmer (Poirier ve Geiger, 1994) bağıntıları kullanılarak elde edilen deneysel bulgularla termal iletkenlik-sıcaklık ilişkileri tespit edildi. Ayrıca, DSC analizleri yapılarak entalpi ve özısı değerleri belirlendi.

Yapılan bu analizler sonucunda, Al-23.9Cu-1.2Co (%ağ.) ötektik alaşımında ana faz (matrix) üzerinde koyu gri (çubuksal), koyu gri (hacimsel) ve açık gri (ötektik) olmak üzere dört farklı fazın büyüdüğü gözlenmiştir. Bu fazlardan; ana fazın (Al-zengin faz) 79.50Al-20.02Cu-0.48Co (%ağ.), koyu hacimsel fazın (Cu-zengin faz) 54.41Cu-45.59Al (%ağ.), koyu çubuksal fazın (Co-zengin Al-Cu fazı) 48.85Al-36.85Cu-14.30Co (%ağ.) ve açık gri fazın (Al-Cu ötektik fazı) 48.93Al-50.77Cu-0.30Co (%ağ.) olduğu belirlenmiştir.

Al-Cu-Si alaşımında beyaz, gri ve siyah olmak üzere üç farklı fazın büyüdüğü tespit edilmiştir. Bu fazlardan; beyaz fazın (ara faz) 66.67Cu-33.33Si (%ağ.), gri fazın (Al-zengin ana faz) 70.05Al-21.38Cu-8.57Si (%ağ.) ve siyah fazında (α -Al fazı) 93.56Al-4.75Cu-1.69Si (%ağ.) bileşimine sahip olduğu belirlenmiştir.

Yapılan EDX analizleri sonucunda Zn-Al-Cu alaşımında üç fazın oluştuğu tespit edilmiştir. Bu fazlardan; α fazının (Al zengin) 57.46Zn-40.1Al-2.44Cu (%ağ.), η fazının (Zn zengin ana faz) 92.15Zn-5.06Al-2.79Cu (%ağ.) ve ε fazının da (CuZn₄) 64.1Zn-26.02Al-9.88Cu (%ağ.) bileşimine sahip olduğu belirlenmiştir.

Al-Cu-Co ve Zn-Al-Cu alaşımları için gerek mikroyapı gerekse mekanik özellikler için elde edilen deneysel bağıntılar literatürdeki teorik ve deneysel sonuçlarla genelde paralellik göstermekte ve bu sonuçları doğrulamaktadır. Bu alaşımlarda V' ye göre elde edilen üstel değerler (0.50-0.52), ötektik teorinin öngördüğü 0.50 değeri ile örtüşmektedir. Al-Cu-Si alaşımları ise dendritik bir mikroyapı ile katılmış olup λ_1 ve λ_2 'nin G ve V' ye göre elde edilen bağıntılarındaki üstel değerler gerek teorik modellerle

gerekse literatürle uyum içerisinde (Gündüz ve Çadırılı, 2002). Elde edilen deneysel bulgular geniş bir açıdan genel olarak değerlendirildiğinde, katılaştırma parametrelerindeki artışın dendritik ve ötektik mikroyapıyı küçülttüğü, bu küçülmenin de alaşımların mekanik özelliklerini (mikrosertlik, gerilme dayanımı) daha da iyileştirdiği tespit edilmiştir.

Doğrusal katılaştırılan alaşımların mekanik özelliklerinin belirgin bir şekilde artırılabilmesi için sıcaklık gradyenti, büyüme hızı gibi parametrelerinin yeterince büyük olmasının yanında katılaştırılan alaşımın içerdiği element ve miktarlarının da doğru oranlara sahip olması gerekmektedir. Ayrıca bu katılaştırma parametrelerinin elektriksel ve doğal olarak termal özellikler üzerinde de azda olsa etkili olduğu gözlenmiştir.

Bu tez çalışmasından da görüldüğü gibi mikroyapı katılaştırma parametreleri ile, mekanik özellikler de katılaştırma ve mikroyapı parametrelerinin değişimi ile kontrol edilmektedir. Dolayısıyla mikroyapı araştırmaları üzerine daha da yoğunlaşarak numunelerin fiziksel özellikleri istenilen en uygun düzeye getirilebilir.

Günümüzde alaşımların katılaştırılmasında pek çok yöntem kullanılmakta ve değişik süreçlere tabi tutulmaktadır. Gelecekte daha çok bileşenli alaşımlar daha farklı katılaştırma şartlarında üretilip fiziksel özellikleri daha geniş bir yelpazede incelenebilir. Yani hangi katılaştırma yöntemi ve katılaştırma sonrası işlemin, hangi fiziksel özellik üzerinde daha etkili olduğu detaylı bir şekilde incelenebilir. Böylece üretilen alaşımların amaca uygun olarak iyileştirilmesi ve endüstrideki kullanılabilirliğinin artırılması sağlanabilir.

KAYNAKLAR

Aksöz, S., Ocak, Y., Maraşlı, N., Çadırılı, E., Kaya, H. ve Büyük, U., “Dependency of the thermal and electrical conductivity on the temperature and composition of Cu in the Al based Al–Cu alloys”, *Experimental Thermal and Fluid Science*, (34), ss.1507-16, 2010.

Aksöz, S., Öztürk, E. ve Maraşlı, N., “The measurement of thermal conductivity variation with temperature”, *Measurement*, (46), ss.161-70, 2013.

Askeland, D.R., The Science and Engineering of Materials, *Chapman and Hall*, London, 1990.

Baudouy, B. ve Four, A., “Low temperature thermal conductivity of aluminum alloy 5056”, *Cryogenics*, (60), ss.1-4, 2014.

Becker, R. ve Döring, W., “Kinetics Behandlung der Keimbildung in übersöttingte Dömpfen”, *Annual Physics*, (24), s.719, 1953.

Bei, H. ve George, E.P., “Microstructures and mechanical properties of a directionally solidified NiAl–Mo eutectic alloy”, *Acta Materialia*, 53, ss.69-77, 2005.

Bhat, M.S., Poirier, D.R. ve Heinrich, J.C., “Permeability for cross flow through columnar-dendritic alloys”, *Metallurgical Transactions*, (26 B), ss.1049-56, 1995.

Bottinger, W.J., Bendersky, L.A., Shaefer, R.J. ve Biancaniello, F.S., “On The Formation of Dispersoids During Rapid Solidification of An Al-Fe-Ni Alloy”, *Metallurgical Transactions*, (19A), ss.1101-07, 1988.

Böyük, U., “Physical and mechanical properties of Al–Si–Ni eutectic alloy”, *Metals and Materials International*, 6(18), ss.933-38, 2012.

Böyük, U., Engin, S. ve Maraşlı, N., “Microstructural characterization of unidirectional solidified eutectic Al–Si–Ni alloy”, *Materials Characterization*, (62), ss.844-51, 2011.

Böyük, U. ve Maraşlı, N., “The microstructure parameters and microhardness of directionally solidified Sn–Ag–Cu eutectic alloy”, *Journal of Alloys and Compounds*, (485), ss.264-69, 2009.

- Böyük, U., Maraşlı, N., Çadırlı, E., Kaya, H. ve Keşlioğlu, K., “Variations of microhardness with solidification parameters and electrical resistivity with temperature for Al-Cu-Ag eutectic alloy”, *Current Applied Physics*, (12), ss.7-10, 2012.
- Brandt, R. ve Neuer, G., “Electrical Resistivity and Thermal Conductivity of Pure Aluminum and Aluminum Alloys up to and above the Melting Temperature”, *International Journal of Thermophysics*, 5(28), ss.1429-46, 2007.
- Burden, M.H. ve Hunt, J.D., “Cellular and dendritic growth II”, *Journal of Crystal Growth*, (22), ss.109-16, 1974.
- Büyüktür, A.R., Termodinamik Cilt-1, *Uludağ Üniversitesi Basımevi*, Bursa, 1989.
- Caignan, A.G. ve Holt, E.M., “New 1,4-dihydropyridine Derivates with Hetero, Saturated B Rings”, *Journal of Chemical Crystallography*, (32), ss.315-23, 2002.
- Cante, M.V., Spinelli, J.E., Cheung, N. ve Garcia, A., “The correlation between dendritic microstructure and mechanical properties of directionally solidified hypoeutectic Al-Ni alloys”, *Metals and Materials International*, (16), ss.39-49, 2010.
- Chadwick, G.A., “Decanted interfaces and growth forms”, *Acta Metallurgica*, (10), ss.1-12, 1962.
- Clark, D.S., Engineering Metals and Process [PhD. Thesis], *Ohio University*, Ohio, 1959.
- Colling, D.A., Industrial Materials, Metals and Alloys, *Prentice- Hall Inc.*, Ohio, 1995.
- Contieri, R.J., Lopes, E.S.N., Cruz, M.T., Costa, A.M., Afonso, C.R.M. ve Caram, R., “Microstructure of directionally solidified Ti-Fe eutectic alloy with low interstitial and high mechanical strength”, *Journal of Crystal Growth*, (333), ss.40-47, 2011.
- Crocker, M.N., Baragar, D. ve Smith, R.W., “Anomalous eutectic growth II”, *Journal of Crystal Growth*, (30), ss.198-212, 1975.
- Crocker, M.N., Fidler, R.S. ve Smith, R.W., “The cellular growth of Bi-Pb₂Bi eutectic”, *Journal of Crystal Growth*, (11), ss.121-31, 1971.
- Çadırlı, E., İkili Metalik Alaşımlarda Doğrusal Katılaştırma [Doktora Tezi], *Erciyes Üniversitesi*, Kayseri, 1997.

- Çadırılı, E., “Effect of Solidification Parameters on Mechanical Properties of Directionally Solidified Al-Rich Al-Cu Alloys”, *Metals and Materials International*, 19(3), ss.411-22, 2013.
- Çadırılı, E., Büyük, U., Engin, S., Kaya, H., Maraşlı, N. ve Arı, M., “Investigation of microhardness and thermo-electrical properties in the Sn-Cu hypereutectic alloy”, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, (21), ss.468-74, 2010.
- Çadırılı, E., Büyük, U., Kaya, H. ve Maraşlı, N., “Determination of mechanical, electrical and thermal properties of the Sn-Bi-Zn ternary alloy”, *Journal of Non-Crystalline Solids*, (357), ss.2876-81, 2011.
- Çadırılı, E., Şahin, M., Kayalı, R., Arı, M. ve Durmuş, S., “Dependence of electrical and thermal conductivity on temperature”, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, (22), ss.1709–14, 2011.
- Davies, G.J., Solidification And Casting, *John Wiley and Sons*, New York, 1973.
- Ding, G.L., Huang, W., Lin, X. ve Zhou, Y., “Prediction of Average Spacing for Constrained Cellular/Dendritic Growth”, *Journal of Crystal Growth*, (177), ss.281-88, 1997.
- Dutra, A.T., Ferrandini, P.L., Costa, C.A.R., Gonçalves, M.C. ve Caram, R., “Growth and Solid/Solid Transformation in a Ni–Si Eutectic Alloy”, *Journal of Alloys and Compounds*, (399), ss.202-07, 2005.
- Edwards, L. ve Edean, M., Manufacturing with Materials, *The Open University Press*, Hong Kong, 1990.
- El-Ashram, T. ve Shalaby, R.M., “Effect of rapid solidification and small additions of Zn and Bi on the structure and properties of Sn-Cu eutectic alloy”, *Journal of Electronic Materials*, (34), ss.212-15, 2005.
- Elliot, R., “Eutectic solidification”, *International Metals Reviews*, (219), ss.161-86, 1977.
- Engin, S., Büyük, U., Kaya, H. ve Maraşlı, N., “Directional solidification and physical properties measurements of the zinc-aluminum eutectic alloy”, *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 18(6), ss.659-64, 2011.

Fan, J., Li, X., Su, Y., Guo, J. ve Fu, H., “Dependency of microhardness on solidification processing parameters and microstructure characteristics in the directionally solidified Ti-46Al-0.5W-0.5Si alloy”, *Journal of Alloys and Compounds*, (504), ss.60-64, 2010.

Fan, J., Li, X., Su, Y., Guo, J. ve Fu, H., “The microstructure parameters and microhardness of directionally solidified Ti-43Al-3Si alloy”, *Journal of Alloys and Compounds*, (506), ss.593-99, 2010.

Fan, J., Li, X., Su, Y., Guo, J. ve Fu, H., “Effect of growth rate on microstructure parameters and microhardness in directionally solidified Ti-49Al alloy”, *Materials Design*, (32), ss.552-58, 2012.

Flemings, M.C., Döküm ve Katılaştırma Tekniği Çeviri: M. Başaran., *İTÜ Matbaası*, İstanbul, 1976.

Ganesan, S., Chan, C.L. ve Poirier, D.R., “Permeability for flow parallel to primary arms”, *Materials Science and Engineering: A*, (151), ss.97-105, 1992.

Garcia, L.R., Osorio, W.R., Peixoto, L.C. ve Garcia, A., “Mechanical properties of Sn-Zn lead-free solder alloys based on the microstructure array”, *Material Characterization*, (61), ss.212-20, 2010.

Geçkinli, A.E., Metalografi (I. Kısım), *İTÜ Kütüphanesi*, İstanbul, 1989.

Goulart, P.R., Spinelli, J.E., Cheung, N. ve Garcia, A., “The effects of cell spacing and distribution of intermetallic fibers on the mechanical properties of hypoeutectic Al-Fe alloys,” *Materials Chemistry and Physics*, (119), ss.272-78, 2010.

Goulart, P.R., Spinelli, J.E., Osorio, W.R. ve Garcia, A., “Mechanical properties as a function of microstructure and solidification thermal variables of Al-Si castings”, *Materials Science and Engineering: A*, (421), ss.245-53, 2006.

Graham, L.D. ve Kraft, R.W., “Coarsening at of eutectic micro structure at elevated temperatures”, *Transactions*, (236), ss.94-102, 1966.

Gündüz, M. ve Çadırılı, E., “Directional Solidification of Aluminium-Copper Alloys”, *Materials Science and Engineering A*, (327), ss.167-85, 2002.

Gündüz, M., Kaya, H., Çadırılı, E. ve Özmen, A., “Interflake spacings and undercoolings in Al–Si irregular eutectic alloy”, *Materials Science and Engineering: A*, (369), ss.215–29, 2004.

Haasen, P., Physical Metallurgy, *Cambridge University Press*, Cambridge, 1974.

Hall, E.O., “The deformation and ageing of mild steel: III discussion of results”, *Proceedings of the Physical Society of London: Section B*, (64), ss.747-53, 1951.

Hatch, J.E., Aluminum: Properties and Physical Metallurgy, *American Society for Metals*, U.S.A, 1984.

Hirai, M., Sato, T. ve Ohiro, G., “Interfacial Stability of α (Al - Rich Solid Solution) Liquid Interface of Unidirectionally Solidified Al-FeAl₃ Eutectic Alloy”, *Journal of Crystal Growth*, (38), ss.340-52, 1977.

Hosch, T., England, L.G. ve Napolitano, R.E., “Analysis of the high growth-rate transition in Al-Si eutectic solidification”, *Journal of Materials Science*, (44), ss.4892-99, 2009.

Hunt, J.D. ve Jackson, K.A., “Binary eutectic solidification”, *Transactions of the Metallurgical Society*, (236), ss.843-52, 1966.

Jackson, K.A. ve Hunt, J.D., “Transparent Compounds That Freeze Like Metals”, *Acta Metallurgica*, (13), ss.1212-15, 1965.

Jain, M. ve Gupta, S.P., “Formation of intermetallic compounds in the Ni–Al–Si ternary system”, *Materials Characterization*, (51), ss.243-57, 2003.

Kakaç, S., Isı Transferine Giriş I, *Tip&Teknik Yayıncılık*, Ankara, 1998.

Kamal, M. ve Gouda, E.S., “Effect of cooling speed on structure and properties of rapidly solidified Pb-25wt. % Sn alloy”, *Radiation Effects and Defects in Solids*, (162), ss.691-96, 2007.

Kane, P.F. ve Larrabee, G.B., Characterization of Semiconductor Materials 4th ed., *McGraw Hill Book Company*, USA, 1970.

Kaya, H., İkili Ötektik Alaşımların Doğrusal Katılaştırılması ve Mekaniksel Özelliklerinin İncelenmesi, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi*, Ankara, 2001.

Kaya, H., Büyük, U., Çadırılı, E. ve Maraşlı, N., “Unidirectional solidification of aluminium–nickel eutectic alloy”, *Kovove Mater*, (48(5)), ss.291-300, 2010.

- Kaya, H., Büyük, U., Çadırılı, E. ve Maraşlı, N., “Measurements of the microhardness, electrical and thermal properties of the Al–Ni eutectic alloy”, *Materials and Design*, (34), ss.707-12, 2012.
- Kaya, H., Büyük, U., Çadırılı, E. ve Maraşlı, N., “Influence of Growth Rate on Microstructure, Microhardness, and Electrical Resistivity of Directionally Solidified Al-7 wt% Ni Hypo-Eutectic Alloy”, *Metals and Materials International*, 19(1), ss.39-4, 2013.
- Kaya, H., Çadırılı, E. ve Gündüz, M., “Eutectic growth of unidirectionally solidified bismuth–cadmium alloy”, *Journal of Materials Processing Technology*, (183), ss.310-20, 2007.
- Kaya, H., Çadırılı, E., Gündüz, M. ve Ülgen, A., “Effect of the temperature gradient, growth rate, and the interflake spacing on the microhardness in the directionally solidified Al-Si eutectic alloy”, *Journal of Materials Engineering and Performance*, (12(5)), ss.544–51, 2003.
- Kaya, H., Çadırılı, E. ve Ülgen, A., “Investigation of the effect of composition on microhardness and determination of thermo-physical properties in the Zn–Cu alloys”, *Materials and Design*, (32), ss.900-06, 2011.
- Khan, S., Ourdjini, A., Hamed, Q.S., Alam Najafabadi, M.A. ve Eliot, R., “Hardness and Mechanical Property Relationship in Directionally Solidified Aluminium- Silicon Eutectic Alloys with Different Silicon Morphologies”, *Journal of Materials Science*, (28), ss.5957-62, 1993.
- Kittel, C., Introduction to Solid State Physics 6th ed., *Wiley*, New York, 1965.
- Knoop, F., Peters, C.G. ve Emerson, W.B., “A Sensitive Pyramidal-Diamond Tool for Indentation Measurements”, *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, (23), ss.39-61, 1939.
- Koçak, Y., Engin, S., Büyük, U. ve Maraşlı, N., “The influence of the growth rate on the eutectic spacings, undercoolings and microhardness of directional solidified bismuth-lead eutectic alloy”, *Current Applied Physics*, (13), ss.587-93, 2013.
- Kumar, P.P. ve Yashonath, S., “Ionic Conduction in the Solid State”, *Journal of Chemical Sciences*, (118 (1)), ss.135-54, 2006.

- L.Silva, B., Garcia, A. ve Spinelli, J.E., “The effects of microstructure and intermetallic phases of directionally solidified Al–Fe alloys on microhardness”, *Materials Letters*, (89), ss.291–95, 2012.
- Liu, H.Y., Li, Y. ve Jones, H., “Thermal stability of the Zn-Mg₂Zn₁₁ and Zn-Al eutectics obtained by Bridgman growth”, *Journal of Materials Science*, (33), ss.1159-64, 1998.
- Meydaneri, F., Saatçi, B. ve Özdemir, M., “Thermal conductivities of solid and liquid phases for pure Al, pure Sn and their binary alloys”, *Fluid Phase Equilibria*, (298), ss.97-105, 2010.
- Milenkovic, S. ve Caram, R., “Effect of the growth parameters on the Ni-Ni₃Si eutectic microstructure”, *Journal of Crystal Growth*, ss.237-239, 95-100., 2002.
- Miyazawa, Y. ve Pound, G.M., “Homogeneous Nucleation of Crystalline Gallium from Liquid Gallium”, *Journal of Crystal Growth*, (23), s.45, 1974.
- Mondolfo, L.F., Metallography of Aluminum Alloys, *J. Wiley & Sons Inc.*, London, 1943.
- Mondolfo, L.F., Aluminum alloys: structure and properties (Vol. 5), *Butterworths*, London, 1976.
- Mota, M.A., Coelho, A.A., Bejarano, J.M.Z., Gama, S. ve Caram, R., “Fe–Al–Nb phase diagram investigation and directional growth of the (Fe, Al)₂Nb–(Fe, Al, Nb) eutectic system”, *Journal of Alloys and Compounds*, (399), ss.196–201, 2005.
- Mullins, W.W. ve Sekerka, R.F., “Morphological Stability of a Particle Growing by Diffusion or Heat Flow”, *Journal Applied Physics*, (34), ss.323-29, 1963.
- Ocak, Y., Aksöz, S., Maraşlı, N. ve Keşiloğlu, K., “Thermal and electrical conductivity of Sn–Ag–In alloys”, *Journal of Non-Crystalline Solids*, (356), ss.1795-801, 2010.
- Onaran, K., Malzeme Bilimi, *Çağlayan Basımevi*, İstanbul, 1986.
- Osorio, W.R. ve Garcia, A., “Modeling dendritic structure and mechanical properties of Zn-Al alloys as a function of solidification conditions”, *Materials Science and Engineering: A*, (325), ss.103-11, 2002.
- Ourdjini, A., Liu, J. ve Elliot, R., “Eutectic Spacing Selection in The Al-Cu System”, *Materials Science and Technology*, (10), ss.312-18, 1994.

- Pariona, M.M., Rugenski, J.K., Canté, M.V., Spinelli, J.E. ve A., G., “Thermal stress analysis of a directionally solidified Al–1 wt%Ni alloy casting”, *Finite Elements in Analysis and Design*, 10(46), ss.889–95, 2010.
- Petch, N.J., “The cleavage strength of polycrystals”, *Journal of the Iron and Steel Institute*, (174), ss.25-31, 1953.
- Poirier, D.R. ve Geiger, G.H., *Transport Phenomena in Materials Processing*, Wiley, Warrendale, 1994.
- Pollock, D.D., *Physical Properties of Materials for Engineers*, CRC Press, U.S.A, 1993.
- Porter, D.A. ve Easterling, K.E., *Phase Transformation in Metals and Alloys*, Van Nostrand and Reinhold, New York, 1984.
- Rios, C.T., Milenkovic, S., Ferrandini, P.L. ve Caram, R., “Directional solidification, microstructure and properties of the Al₃Nb–Nb₂Al eutectic”, *Journal of Crystal Growth*, (275), ss.153-58, 2005.
- Rohatgi, P.K., Sharma, R.C. ve Prabhakar, K.V., “Microstructure and mechanical properties of unidirectionally solidified Al–Si–Ni ternary eutectic”, *Metallurgical Transactions A*, 6(3), ss.569-75, 1975.
- Ruggiero, M.A. ve Rutter, J.W., “Origin of Microstructure in the 332 K Eutectic of The Bi–In–Sn System”, *Materials Science and Technology*, (13), ss.5-11, 1977.
- Rutter, J.W. ve Chalmers, B., “Prismatic substructure formed during solidification metals”, *Canadian Journal of Physics*, (31), ss.15-39, 1953.
- Saatçi, B., Maraşlı, N. ve Gündüz, M., “Thermal conductivities of solid and liquid phases in Pb–Cd and Sn–Zn binary eutectic alloys”, *Thermochimica Acta*, (454), ss.128-34, 2007.
- Santos, G.A., Neto, C.M., Osorio, W.R. ve Garcia, A., “Design of mechanical properties of a Zn₂₇Al alloy based on microstructure dendritic array spacing”, *Materials & Design*, (28), ss.2425-30, 2007.
- Scheil, E., “On Eutectic Crystallization”, *Giesserei, techn-wiss. Beih.*, (24), s.1313, 1959.
- Sharp, R.M. ve Hellawell, A., “Solute Distributions At-Non Planar Solid-Liquid Growth Fronts II”, *Journal of Crystal Growth*, (11), ss.77-91, 1971.

- Skripov, V.P., “Homogeneous Nucleation in Metals and Amorphous Films”, *Crystal Growth and Materials*, (327), 1977.
- Smith, C.S., “The early history of casting, molds, and the science of solidification”, *Metall Transformations, Informal Proceedings of the Second Buhl International Conference on Materials*, s.418, 1966.
- Smits, F.M., “Measurement of sheet resistivities with the four-point probe”, *Bell System Technical Journal*, (37), s.711, 1958.
- Srinivasan, S. ve Saghir, M.Z., “Modeling of thermotransport phenomenon in metal alloys using artificial neural networks”, *Applied Mathematical Modelling*, 37(5), ss.2850–69, 2013.
- Steinbach, S. ve Ratke, L., “The influence of fluid flow on the microstructure of directionally solidified AlSi-base alloys”, *Metallurgical and Materials Transactions A*, (38A), ss.1388-94, 2007.
- Stowell, M.J., “The Solid-Liquid Interfacial Free Energy of Lead form Supercooling Data”, *Philosophical Magazine*, (22), ss.1-6, 1970.
- Sümbüloğlu, K. ve Sümbüloğlu, V., Biyoistatistik, *Haliboğlu Yayınevi*, İstanbul, 1987.
- Thornton, P.A., Fundamentals of Engineering Materials, *Prentice-Hall Inc.*, Enlewood Cliffs, 1985.
- Trivedi, R., “Theory of Dendritic Growth During The Directional Solidification of Binary Alloys”, *Journal of Crystal Growth*, (49), ss.219-32, 1939.
- Turnbull, D., “Formation of crystal nuclei in liquid metals”, *Journal of Applied Physics*, (21), ss.1022-29, 1950a.
- Turnbull, D., “Isothermal rate of solidification of small droplets of mercury and tin”, *Journal of Chemical Physics*, (18), ss.768-75, 1950b.
- Turnbull, D., “Kinetics of Solidification of Supercooled Liquid Mercury Droplets”, *Journal of Chemical Physics*, (20), ss.411-24, 1952.
- Turnbull, D. ve Fisher, J.C., “Rate of Nucleation in Condensed System”, *Journal of Chemical Physics*, (17), ss.71-73, 1949.
- Volmer, M. ve Weber, A., “Keimbildung in übersöttingten Gebilden”, *Journal of Physical Chemistry*, (119), s.227, 1926.

Voorhees, P.W., Utilization of Space, *Springer*, AIAA, 2006.

Weissbach, W., Malzeme Bilgisi ve Muayenesi Translated by S. Anık, E. Anık ve M. Vural., *Birsen Kitapevi*, İstanbul, 1993.

Yamashita, M., “Resistivity Correction Factor for the Four-Probe Method”, *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, (20), ss.1454-56, 1987.

Yang, X., Zhang, J., H., S., Jie, Z., Liu, L. ve Fu, H., “Solidification microstructure of Bridgman-grown Si-TaSi₂ eutectic in situ composite”, *Journal of Crystal Growth*, (376), ss.59-65, 2013.

Zhang, L. ve Du, Y., “Thermodynamic description of the Al-Fe-Ni system over the whole composition and temperature ranges: Modeling coupled with key experiment”, *Computer Coupling of Phase Diagrams and Thermochemistry*, (31), ss.529-40, 2007.

Zhang, J., Shen, J., Shang, Z., Feng, Z., Wang, L. ve Fu, H., “Regular rod-like eutectic spacing selection during directional solidified NiAl-9Mo eutectic in situ composite”, *Journal of Crystal Growth*, (329), ss.77-81, 2011.

Zolotarevsky, V.S., Belov, N.A. ve Glazoff, M.V., 2007. Casting Aluminum Alloys. Amsterdam: *Elsevier*. ss.41,42,47.

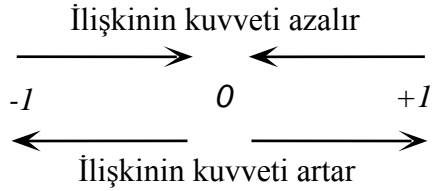
EKLER

EK 1. Regresyon Analizi

İki değişken arasındaki, değişim ilişkisini gösteren ölçü korelasyon katsayısıdır ve r harfi ile gösterilir. Korelasyon katsayısı;

$$r = \frac{\sum xy - \frac{(\sum x)(\sum y)}{n}}{\sqrt{\left(\sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{n}\right)\left(\sum y^2 - \frac{(\sum y)^2}{n}\right)}}$$

ile ifade edilir. Değişkenler arasındaki ilişki pozitif ise işareti artı, negatif ise eksi olur. Korelasyon katsayısı -1 ile +1 arasında herhangi bir değer alabilir ($-1 \leq r \leq +1$). Her iki yönde de 0'dan ± 1 'e yaklaştıkça ilişkinin kuvveti artar. -1 veya +1'den 0'a yaklaştıkça ilişkinin kuvveti azalır, sıfır değerini aldığı anda kaybolur.



İki değişken arasında belirgin bir ilişki olduğunda bu ilişki, dağılım grafiğindeki noktalar arasından geçen uygun bir doğru ile tanımlanabilir. Bu doğruya regresyon doğrusu denir ve matematiksel bir denklem ile gösterilebilir. Bu denklemede regresyon denklemi denir. Regresyon katsayısı;

$$\text{Regresyon Katsayısı} = \frac{\sum xy - \frac{\sum x \sum y}{n}}{\sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{n}}$$

ile ifade edilir. Regresyon doğrusunu çizmeden önce doğrusallıktan sapma değerinin kontrolünün yapılması gerekir. Eğer doğrusallıktan sapma önemli ise iki değişken arasında ilişki doğrusal değildir. Başka bir ifadeyle ilişki $y=a+bx$ doğrusal denklemi ile ifade edilemez. Bu nedenle regresyon doğrusu çizilemez. Burada x ; bağımsız değişken, y ; bağımlı değişken, a ; doğrunun y eksenini kestiği nokta, b ise regresyon katsayısıdır diğer bir deyişle eğimdir (Sümbüloğlu ve Sümbüloğlu, 1987)

EK 2. Stokiyometrik Hesaplamalar

Alaşım	Al (% ağ.)	Cu (% ağ.)	Co (% ağ.)	Si (% ağ.)	Zn (% ağ.)
Al-Cu-Co	74.9	23.9	1.2	-	-
Al-Cu-Si	80.4	13.6	-	6	-
Zn-Al-Cu	7	2.96	-	-	90.4

EK 3. Deneysel Bağıntılar

Al-23.9Cu-1.2Co (%ağ.)

Bağıntılar	Sabitler (k)	Korelasyon Katsayıları (r)
$\lambda_b=k_1G^{-0.32}$	$k_1=0.736 (\mu\text{m}^{1.32}\text{K}^{-0.32})$	$r_1=-0.994$
$\lambda_e=k_2G^{-0.43}$	$k_2=0.325 (\mu\text{m}^{1.43}\text{K}^{-0.43})$	$r_2=-0.998$
$\lambda_b=k_3V^{-0.46}$	$k_3=14.989(\mu\text{m}^{0.54}\text{s}^{-0.46})$	$r_3=-0.987$
$\lambda_e=k_4V^{-0.44}$	$k_4=12.021(\mu\text{m}^{0.56}\text{s}^{-0.44})$	$r_4=-0.989$
$HV_b=k_5G^{0.07}$	$k_5=186.21 (\text{kg K}^{-0.07}\text{mm}^{-1.93})$	$r_5=0.978$
$HV_e=k_6G^{0.07}$	$k_6=189.67 (\text{kg K}^{-0.07}\text{mm}^{-1.93})$	$r_6=0.990$
$HV_b=k_7V^{0.05}$	$k_7=180.30 (\text{kg mm}^{-2.05}\text{sn}^{0.05})$	$r_7=0.996$
$HV_e=k_8V^{0.05}$	$k_8=184.07 (\text{kg mm}^{-2.05}\text{sn}^{0.05})$	$r_8=0.992$
$HV_b=k_9\lambda_b^{-0.12}$	$k_9=240.43 (\text{kg mm}^{-1.88})$	$r_9=0.994$
$HV_e=k_{10}\lambda_e^{-0.12}$	$k_{10}=238.23 (\text{kg mm}^{-1.88})$	$r_{10}=0.995$
$HV_{\text{ort}}=k_{11}\lambda_{\text{ort}}^{-0.10}$	$k_{11}=237.74(\text{kg mm}^{-1.90})$	$r_{11}=0.987$
$\sigma_U=k_{12}V^{0.22}$	$k_{12}=6.75(\text{MPa mm}^{-0.22}\text{s}^{0.22})$	$r_{12}=0.998$
$\sigma_U=k_{13}G^{0.27}$	$k_{13}=159.26(\text{MPa K}^{-0.27}\text{mm}^{0.27})$	$r_{13}=0.998$
$\rho=k_{14}V^{0.09}$	$k_{14}=0.086\Omega\mu\text{m}^{0.91}\text{s}^{0.09}$	$r_{14}=0.988$

Al-13.6Cu-6Si (%ağ.)

Bağıntılar	Sabitler (k)	Korelasyon Katsayıları (r)
$\lambda_1=k_1G^{-0.50}$	$k_1=24.66 (\mu\text{m}^{0.50}\text{K}^{0.50})$	$r_1 =-0.976$
$\lambda_1=k_2V^{-0.21}$	$k_2=662.22 (\mu\text{m}^{1.21}\text{s}^{-0.21})$	$r_2 =-0.972$
$\lambda_2=k_3G^{-0.42}$	$k_3=4.00 (\mu\text{m}^{0.58}\text{K}^{0.42})$	$r_3 =-0.986$
$\lambda_2=k_4V^{-0.31}$	$k_4=91.83 (\mu\text{m}^{1.31}\text{s}^{-0.31})$	$r_4 =-0.987$
$\text{HV}_L=k_5\lambda_1^{-0.23}$	$k_5=55.34 (\text{kg mm}^{-1.77})$	$r_5=-0.972$
$\text{HV}_L=k_6\lambda_2^{-0.19}$	$k_6=36.14 (\text{kg mm}^{-1.81})$	$r_6=-0.961$
$\text{HV}_T=k_7G^{0.11}$	$k_7=57.28 (\text{kg K}^{-0.11}\text{mm}^{-1.89})$	$r_7= 0.994$
$\text{HV}_L=k_8G^{0.10}$	$k_8=60.40 (\text{kg K}^{-0.10}\text{mm}^{-1.90})$	$r_8= 0.996$
$\text{HV}_T=k_9V^{0.05}$	$k_9=83.18 (\text{kg mm}^{-2.05}\text{sn}^{0.05})$	$r_9= 0.990$
$\text{HV}_L=k_{10}V^{0.05}$	$k_{10}=84.92 (\text{kg mm}^{-2.05}\text{sn}^{0.05})$	$r_{10}= 0.995$
$\rho=k_{11}V^{0.14}$	$k_{11}=3.162\Omega\mu\text{m}^{0.86}\text{s}^{0.14}$	$r_{11}=0.941$

Zn-7Al-2.96Cu (%ağ.)

Bağıntılar	Sabitler (k)	Korelasyon Katsayıları (r)
$\lambda_b=k_1G^{-1.23}$	$k_1=0.008 (\mu\text{m}^{-0.23}\text{K}^{1.23})$	$r_1=-0.991$
$\lambda_e=k_2G^{-0.93}$	$k_2=0.024 (\mu\text{m}^{0.07}\text{K}^{0.93})$	$r_2=-0.974$
$\lambda_b=k_3V^{-0.49}$	$k_3=8.953 (\mu\text{m}^{1.49}\text{s}^{-0.49})$	$r_3=-0.980$
$\lambda_e=k_4V^{-0.42}$	$k_4=5.942 (\mu\text{m}^{1.42}\text{s}^{-0.42})$	$r_4=-0.993$
$\text{HV}_b=k_5G^{0.17}$	$k_5=69.662 (\text{kg K}^{-0.17}\text{mm}^{-1.83})$	$r_5=0.97$
$\text{HV}_e=k_6G^{0.18}$	$k_6=68.865 (\text{kg K}^{-0.18}\text{mm}^{-1.82})$	$r_6=0.99$
$\text{HV}_b=k_7V^{0.02}$	$k_7=110.66 (\text{kg mm}^{-2.02}\text{sn}^{0.02})$	$r_7=0.987$
$\text{HV}_e=k_8V^{0.02}$	$k_8=111,94 (\text{kg mm}^{-2.02}\text{sn}^{0.02})$	$r_8=0.967$
$\text{HV}_b=k_9\lambda_b^{-0.06}$	$k_9=70.307 (\text{kg mm}^{-1.94})$	$r_9=0.904$
$\text{HV}_e=k_{10}\lambda_e^{-0.08}$	$k_{10}=62.039 (\text{kg mm}^{-1.92})$	$r_{10}=0.904$
$\text{HV}_{\text{ort}}=k_{11}\lambda_e^{-0.07}$	$k_{11}=66.107 (\text{kg mm}^{-1.93})$	$r_{11}=0.916$
$\sigma=k_{12}G^{0.28}$	$k_{12}=85.1 \text{ MPaK}^{-0.28}\text{mm}^{0.28}$	$r_{12}=0.998$
$\sigma=k_{13}V^{0.14}$	$k_{13}=291.7\text{MPamm}^{-0.14} \text{ s}^{0.14}$	$r_{13}=0.997$
$\rho=k_{14}V^{0.23}$	$k_{14}=3.162\Omega\mu\text{m}^{0.77}\text{s}^{0.23}$	$r_{14}=0.989$

ÖZGEÇMİŞ

1970 yılında Oğuzeli’nde doğdu. İlköğrenimini Gaziantep’te lise öğrenimini İskenderun’da tamamladı. 1988 yılında kazandığı Erciyes Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü’nden 1993 yılında mezun oldu. 1995 yılında Niğde Üniversitesi Eğitim Fakültesi Fen Bilgisi Öğretmenliği Anabilim Dalında Araştırma Görevlisi olarak göreve başladı. 1999 yılında “Yarıiletken Aygıtların Nümerik Modellemesi” başlıklı tez çalışması ile Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalında yüksek lisansını tamamladı. 2000 yılında Niğde Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü’nde Öğretim Görevlisi olarak çalışmaya başladı. 2006 yılında Erciyes Üniversitesi Eğitim Fakültesi İlköğretim Bölümü Fen Bilgisi Öğretmenliği Anabilim Dalında Öğretim Görevlisi olarak çalışmaya başladı. 2010 yılında Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalında doktora programına başladı. Halen Fen Bilgisi Öğretmenliği Anabilim Dalında Öğretim Görevlisi olarak çalışmaktadır. Evli ve iki çocuk babasıdır.