

**T.C.
NEVŞEHİR HACI BEKTAŞ VELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DÜŞÜK Ag İÇERİKLİ, Sn–Ag–Zn KURŞUNSUZ
LEHİMLERİN TERMAL, ELEKTRİKSEL ve MEKANİK
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**Tezi Hazırlayan
Murat ARI**

**Tez Danışmanı
Prof. Dr. Sezen AKSÖZ**

**Fizik Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi**

Prof. Dr. Sezen AKSÖZ danışmanlığında Murat ARI tarafından hazırlanan "**Düşük Ag İçerikli, Sn–Ag–Zn Kurşunsuz Lehimlerin Termal, Elektriksel ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi**" başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalında **Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

12/09/2023

JÜRİ

Başkan : Prof. Dr. Sezen AKSÖZ

Üye : Prof. Dr. Necmettin MARAŞLI

Üye : Prof. Dr. Bayram DEVİREN

ONAY:

Bu tezin kabulü Enstitü Yönetim Kurulunun.....tarih ve..... sayılı kararı ile onaylanmıştır.

.../.../20..

Doç. Dr. Cemal ÇARBOĞA
Enstitü Müdürü

TEZ BİLDİRİM SAYFASI

Tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada yer alan bütün bilgilerin bilimsel ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu ve bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Murat ARI

TEŞEKKÜR

Tez alıŐma konumu belirlemede yardımcı olan, tez çalıŐmamın bütün aŐamalarında maddi ve manevi desteğini eksik etmeyen, saygı değer hocam Prof. Dr. Sezen AKSÖZ'e çok teşekkür ederim.

Çok değerli laboratuvar deneyimlerini ve bilgi birikimlerini, deneysel çalıŐmalarımnda benden esirgemeyip, büyük bir sabırla ve ilgiyle tüm konularda yardımda bulunan, Dr.Pınar ATA ESENER hanıma teŐekkürlerimi bir borç bilirim. Yine değerli bilgi, birikim ve tecrübelerini, benimle paylaşan, Dr. Öğr. Üyesi Serkan DAL hocama teşekkür ederim.

Maddi ve manevi olarak her zaman desteklerini hissettiren değerli AİLEME, teŐekkürlerimi bir borç bilirim.

**DÜŞÜK Ag İÇERİKLİ, Sn–Ag–Zn KURŞUNSUZ LEHİMLERİN TERMAL,
ELEKTRİKSEL VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ
(Yüksek Lisans Tezi)**

Murat ARI

**NEVŞEHİR HACI BEKTAŞ VELİ ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ
ENSTİTÜSÜ**

Eylül 2023

ÖZET

Sn-%2 ağ.Ag-%2 ağ.Zn, Sn-%2 ağ.Ag-%2.5 ağ.Zn, Sn-%1.5 ağ.Ag-%2 ağ.Zn, Sn-%1.5 ağ.Ag-%2.5 ağ.Zn kurşunsuz lehim alaşımlarının ısı iletkenliklerinin sıcaklıkla değişimini lineer ısı akış metoduyla , elektriksel iletkenliğin sıcaklığa bağlı değişimini ise 4-nokta iletkenlik ölçüm tekniğiyle ölçüldü. Alaşımlara ait elektriksel ve ısı iletkenliğin sıcaklığa bağlı değişimine ait grafikleri de çizildi. Bu grafikler yardımıyla ısı ve elektriksel iletkenlik katsayıları belirlendi. Mekanik özelliklerinin belirlenebilmesi için mikrosertlik ve çekme-uzanım testleri yapıldı. Tez çalışmasında Vickers sertlik ölçme yöntemiyle mikrosertlik ölçümleri yapıldı. Çekme analizi, mekanik tahrikli çekme cihazında tek eksende ve sabit hızla koparıncaya kadar çekilerek yapıldı. Her bir numune için kuvvet-uzama eğrileri çizildi.

Anahtar Kelimeler: Kurşunsuz Lehim Alaşımları, Isıl İletkenlik, Elektriksel İletkenlik, Mekanik Özellikler

**Tez Danışman: Prof. Dr. Sezen AKSÖZ
Sayfa Adeti: 105**

**INVESTIGATION OF THE THERMAL, ELECTRICAL AND MECHANICAL
PROPERTIES OF LOW Ag CONTENT, Sn–Ag–Zn LEAD-FREE SOLDERS
(Master Thesis)**

Murat ARI

**NEVŞEHİR HACI BEKTAŞ VELİ UNIVERSITY GRADUATE SCHOOL OF
NATURAL AND APPLIED SCIENCE**

September 2023

ABSTRACT

Sn-2 wt. % Ag-2 wt. % Zn, Sn-2 wt. % Ag-2.5 wt. % Zn, Sn-1.5 wt. % Ag-2 wt. % Zn, Sn-1.5 wt. % Ag- 2.5 wt. % Zn the change in thermal conductivity of lead-free solder alloys with temperature was measured by the linear heat flow method, and the change in electrical conductivity depending on temperature was measured by the 4-point conductivity measurement technique. Graphs of the changes in electrical and thermal conductivity of the alloys depending on temperature were also drawn. With the help of these graphs, thermal and electrical conductivity coefficients were determined. Microhardness and tensile-strain tests were performed to determine its mechanical properties. In the thesis study, microhardness measurements were made using the Vickers hardness measurement method. Tensile analysis was performed by pulling on a mechanically driven tensile device in a single axis and at a constant speed until it was broken. Force-extension curves were drawn for each sample.

Keywords: Lead-Free Solder Alloys, Thermal Conductivity, Electrical Conductivity, Mechanical Properties

Thesis Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Sezen AKSÖZ

Page Number: 105

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY SAYFASI	i
TEZ BİLDİRİM SAYFASI	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
İÇİNDEKİLER	vi
TABLolar LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLER LİSTESİ	xi
SİMGE VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	xiv
1. BÖLÜM	
KURŞUNLU ve KURŞUNSUZ LEHİM ALAŞIMLARI.....	1
1.1. Lehim Nedir?.....	1
1.2. Lehimlerin Performans Özellikleri.....	5
1.3. Lehim Alaşım Maliyetleri	6
1.4. Lehim Alaşımları.....	9
1.4.1. Kurşunlu Lehim Alaşımları.....	9
1.4.1.1. Kurşunla ilgili sağlık ve çevresel kaygılar	10
1.4.2. Kurşunsuz Lehim Alaşımları	11
1.4.2.1. Kalay-Çinko (Sn-Zn).....	14
1.4.2.2. Kalay- Bakır (Sn-Cu)	14
1.4.2.3. Kalay -Bizmut (Sn-Bi)	14
1.4.2.4. Kalay-Gümüş (Sn-Ag)	15
1.4.2.5. Kalay- İndiyum (Sn-In).....	15

1.4.2.6.	Kalay-Gümüş (-Bakır, Bizmut, İndiyum) (Sn–Ag (–Cu, Bi, In)) sistemi....	16
1.4.2.7.	Kalay-Bizmut (-İndiyum, Antimon, Gümüş) (Sn–Bi(–In, Sb, Ag)) ötektiğe yakın sistemler.....	18
1.4.2.8.	Kalay-Çinko (-Bizmut-İndiyum) (Sn–Zn(–Bi, In)) sistemleri.....	18

2. BÖLÜM

LEHİM ALAŞIMLARININ GENEL ÖZELLİKLERİ		20
2.1.	Giriş.....	20
2.2.	Erime Sıcaklığı.....	21
2.3.	Islatma Özelliği	24
2.3.1.	Yüzey Gerilimi.....	25
2.3.2.	Islatma Açısı.....	27
2.3.3.	Islatma Kuvveti	29
2.4.	Lehimin Alt Tabaka ile Etkileşimi	32
2.4.1.	Cu-Sn.....	33
2.4.2.	Bi-Cu	34
2.4.3.	Cu-In.....	35
2.4.4.	Sn-Zn.....	36
2.4.5.	Ag-Sn	37
2.4.6.	Küçük bileşenler.....	38
2.5.	Mekanik Özellikler.....	38
2.5.1.	Çekme Özellikleri	40
2.5.2.	Kesme Özellikleri.....	44
2.5.3.	Sürünme	46
2.5.4.	Dayanıklılığını Yitirme	47
2.6.	Termal Özellikler	48

2.6.1.	Termal Genleşme katsayısı	48	
2.6.2.	Termal iletkenlik	49	
2.7.	Elektriksel Özellikler.....	49	
2.8.	Kimyasal Özellikler.....	50	
2.8.1.	Cu Çözünürlüğü	51	
2.8.2.	Aşınma	51	
2.8.3.	Lehim Alaşımlarının Oksidasyonu.....	51	
3. BÖLÜM			
DENEYSEL YÖNTEMLER			52
3.1.	Giriş.....	52	
3.2.	Deneysel Sistemler.....	52	
3.2.1.	Kül fırını.....	52	
3.2.2.	Lineer ısı akış sistemi.....	53	
3.2.2.1.	Isıtıcı sistem.....	53	
3.2.2.2.	Soğutucu sistem.....	55	
3.2.2.3.	Numune tutucu	58	
3.3.	Isıl İletkenlik Ölçümü Deneyi	59	
3.3.1.	Numune kalıbının hazırlanışı	59	
3.3.2.	Numune ait kalıbın fırın içine koyulması ve döküm işleminin yapılması ...	62	
3.3.3.	Numunenin lineer ısı akış sistemine koyulması.....	63	
3.3.4.	Lineer ısı akış sisteminde bir deneyin yapılışı	67	
3.4.	Metalografik İşlemler	68	
3.4.1.	Numunelerin kesilmesi ve kalıplanması	68	
3.4.2.	Numunelerin zımparalanması	70	
3.4.3.	Numunelerin parlatılması.....	71	

3.4.4.	Numunelerin dağlanması.....	71
3.4.5.	Fazların belirlenmesi	72
3.5.	Mekanik Özelliklerin Belirlenmesi İçin Yapılan Hazırlıklar.....	72
3.5.1.	Sertlik deneyinin yapılışı.....	72
3.5.2.	Çekme-dayanım deneyinin yapılışı.....	74
3.6.	Elektriksel İletkenlik	76
3.6.1.	Özdirenç ölçümü	76
3.6.2.	4-Nokta iletkenlik ölçüm yöntemi sistemi	80
4. BÖLÜM		
SONUÇ ve TARTIŞMA		
4.1.	Giriş.....	81
4.2.	Yapı	82
4.3.	Erime/sıvı sıcaklığı.....	83
4.4.	Termal ve Elektriksel İletkenliğin Sıcaklık ve Kompozisyonla Değişimi ..	86
4.5.	Bileşime Göre Mekanik Özelliklerin Değişimi.....	90
KAYNAKLAR		93
ÖZGEÇMİŞ		105

TABLULAR LİSTESİ

Tablo 1.1.	Lehim alaşımlarının önemli özellikleri	6
Tablo 1.2.	kg başına metal maliyeti	7
Tablo 1.3.	kg başına lehim alaşımlarının maliyeti.....	7-8
Tablo 1.4.	Pb içermeyen lehim alaşımlarının elementel bileşimi.....	12
Tablo 2.1.	Pb içermeyen lehim bileşimlerinin erime sıcaklıkları	22
Tablo 2.2.	İkili alaşımlar için ölçülen yüzey gerilimi değerleri	26
Tablo 2.3.	Pb içermeyen lehim alaşımlarının doğal eğrilik yarıçapı R	27
Tablo 2.4.	Kurşunsuz lehimlerin ıslatma açısı.....	27
Tablo 2.5.	Çıplak Cu parçalarında ıslatma kuvveti, 240°C	30
Tablo 2.6.	Erime noktasının 62°C üzerindeki, çıplak Cu parçalarında ıslatma kuvveti	30
Tablo 2.7.	Pb içermeyen lehimlerin çekme özellikleri	41
Tablo 2.8.	Kesme özellikleri.....	44
Tablo 2.9.	Sıcaklık artışı ile kayma mukavemetinde kayıp.....	45
Tablo 2.10.	Pb içermeyen lehimler için CTE verileri.....	48
Tablo 2.11.	Pb içermeyen lehimler için termal iletkenlik verileri.....	49
Tablo 2.12.	Bazı Pb içermeyen lehimler ve mikro elektronik ambalaj malzemeleri için oda sıcaklığı direnç değerleri.....	50
Tablo 3.1.	Özdirenç düzeltme faktörü eşitlikleri	77
Tablo 4.1.	Sn-2Ag-[x]Zn (X=2,2.5) ve Sn-1.5Ag-[x]Zn (X=2,2.5) alaşımlarının bazı termal özellikleri	85
Tablo 4.2.	Sn-Ag-Zn Alaşımlarının termal ve elektriksel değerlerin sıcaklıkla değişimi	86
Tablo 4.3.	Lehim alaşımlarının erime sıcaklığında elektriksel ve termal özellikleri.....	88
Tablo 4.4.	Sn-1.5Ag-[x]Zn (X=2,2.5) ve Sn-2Ag-[x]Zn (X=2,2.5) alaşımlarının mikrosertlik ve çekme dayanımı değerleri	96

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1.	Silikon IC montaj işlemine genel bakış.....	1
Şekil 1.2.	Çevrilmiş çip ve bağlantısının kesiti	2
Şekil 1.3.	Pim geçiş deliği kullanılarak yapılan baskı devre kartı.....	2
Şekil 1.4.	Yüze montaj tekniği kullanılarak hazırlanan baskı devre kartı	3
Şekil 1.5.	Bir bilyeli ızgara dizisinin (BGA) mikro elektronik bileşeninden kesiti ..	3
Şekil 1.6.	Basılı bir devre kartı üzerindeki mikro elektronik bileşenin pim geçiş deliği bağlantısının kesiti.....	4
Şekil 1.7.	Bir mikro elektronik bileşenin baskılı bir devre kartı üzerindeki kabloları olan bir yüze montaj bağlantısının kesiti	4
Şekil 1.8.	Bir PCBA'nın dalga lehimlemesi	5
Şekil 1.9.	Sn–Ag–Cu üçlü fazının sıvılaşıma yüzeyi. Telif hakkı 1994, TMS'nin izniyle	17
Şekil 1.10.	(a) Zn-Sn alaşımlarının oda sıcaklığında çekme özellikleri ve (b) mükemmel süneklik gösteren soğuk haddelenmiş Zn-30Sn sacın görünümü.....	19
Şekil 2.1.	Islatma açısı diyagramı.....	25
Şekil 2.2.	Depolanan yüzey enerjilerinin ıslatma kuvvetine etkisi.....	32
Şekil 2.3.	Cu-Sn ikili faz diyagramı	34
Şekil 2.4.	Cu-Bi ikili faz diyagramı.....	35
Şekil 2.5.	Cu-In ikili faz diyagramı	36
Şekil 2.6.	Zn-Sn ikili faz diyagramı.....	37
Şekil 2.7.	Ag-Sn ikili faz diyagramı	38
Şekil 2.8.	Kalıp (a1), lehim (a2) ve alt tabaka (a3) arasındaki CTE uyumsuzluğu nedeniyle termal döngü sırasında kesme gerilimine maruz kalan lehim bağlantıları.....	39

Şekil 2.9.	Montajın taşınması sırasında alt tabakanın esnemesi (bükülmesi) nedeniyle çekme yüklemesine maruz kalan Lehim Tümsekleri (eklemler)40
Şekil 3.1.	Kül Fırını 52
Şekil 3.2.	Isıtıcı sistem..... 53
Şekil 3.3.	Isıtıcı sistemin (a) üst ısıtıcısı (b) alt ısıtıcısı..... 54
Şekil 3.4.a.	Soğutucu sistemin genel görünümü..... 56
Şekil 3.4.b.	Soğutucu bloğun şematik gösterimi 56
Şekil 3.5.	Soğutucu-ısıtıcılı sıcaklık gradyenti sisteminin genel görünüşü 57
Şekil 3.6.	Numune tutucunun şematik gösterimi..... 58
Şekil 3.7.	Grafit malzemedan yapılan pota, huni ve numune kalıbı..... 59
Şekil 3.8.	Kalıpların hazırlandığı torna tezgahı 59
Şekil 3.9.	Hazırlanan numuneye ait kalıbın fotoğrafı (a), şematik gösterimi (b) 60
Şekil 3.10.	(a) Numuneye ait pota ve birleşen yerlerin silikonlanarak birbirine tutturulduğu bölüme ait fotoğraf, (b) Numuneye ait potanın ve birleşim noktasının çizimsel görünümü..... 61
Şekil 3.11.	Grafit malzemedan yapılan potaya ait çizimsel gösterim..... 62
Şekil 3.12.	Numune kesim cihazı 63
Şekil 3.13.	Termal çiftin numuneye temas ettiği noktalar 64
Şekil 3.14.	Sıcaklık ölçümlerinin yapan ve kaydedilmesini sağlayan cihaz 64
Şekil 3.15.	Ölçümlerde kullanılan K tipi ısı çiftler..... 65
Şekil 3.16.	Lineer ısı akış sisteminin genel görünüşü 66
Şekil 3.17.	Optik mikroskop ve CCD kameradan oluşan görüntü sistemi 68
Şekil 3.18.	Elmas Kesme Diski 69
Şekil 3.19.	Epoksi-resin ile kalıplanmış numunelerin resmi 69
Şekil 3.20.	Zımparalama-Parlatma aleti 70
Şekil 3.21.	Parlatma işleminde kullanılan zımpara, keçe ve süspansiyonlar..... 71

Şekil 3.22.	Vickers sertlik ölçümüne ait çizimsel gösterim.....	73
Şekil 3.23.	Vickers sertlik deneyinde elde edilen iz ve izin ölçülmesi.....	73
Şekil 3.24.	Sertlik ölçme aleti.....	74
Şekil 3.25.	Çekeme-basma test cihazı	76
Şekil 3.26.	t Kesitli Numune çizimsel gösterimi	78
Şekil 3.27.	4 nokta iletkenlik ölçüm yöntemi	79
Şekil 3.28.	(a) Numune tutucu çizimsel gösterimi, (b) Numune tutucu resmi	80
Şekil 4.1.	Sn-%2 ağ. Ag-% [X] ağ. Zn (X=2,2.5) ve Sn-%1.5 ağ. Ag-% [X] ağ. Zn (X=2,2.5)'in optik fotoğrafları	83
Şekil 4.2.	Sn-%2 ağ. Ag-%[X] ağ. Zn (X=2,2.5) ve Sn-%1.5 ağ. Ag-% [X] ağ. Zn (X=2,2.5) sıcaklığı ile termal iletkenlik değişimleri	87
Şekil 4.3.	Sn-1.5Ag-[x]Zn (X=2,2.5) ve Sn-2Ag-[x]Zn (X=2,2.5) için sıcaklıkla elektriksel iletkenlik değişimleri	90
Şekil 4.4.	Sn-1.5Ag-[x]Zn (X=2,2.5) ve Sn-2Ag-[x]Zn (X=2,2.5) alaşımları için sertlik değeri (H).....	91
Şekil 4.5.	(a) Sn-2Ag-2Zn (b) Sn-2Ag-2.5Zn (c) Sn-1.5Ag-2Zn ve (d) Sn-1.5Ag-2.5Zn alaşımları için kuvvet-uzama eğrisi	92

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

Ag	Gümüş
Zn	Çinko
Sn	Kalay
Pb	Kurşun
Bi	Bizmut
Cu	Bakır
In	İndiyum
Sb	Antimon
Au	Altın
Mg	Mağnezyum
Fe	Demir
Ni	Nikel
O	Oksijen
Na	Sodyum
Cl	Klor
Si	Silisyum
C	Karbon
H	Hidrojen
N	Azot
	Isı sığası
	Hız
	Serbest yol
α	Metal fazı
β	Metal fazı

γ	Metal fazı
δ	Metal fazı
ζ	Metal fazı
ε	Metal fazı
η	Metal fazı
δ	Metal fazı
ϕ	Metal fazı
τ	Kayma gerilimi
ΔH	Aktivasyon enerjisi
PWB	Asimetri fonksiyonu
PTH	Delik içi kaplama
SMD	Yüzey montaj cihazı
SMT	Yüzey montaj teknolojisi
BGA	Bilyeli ızgara dizisi
ABD	Amerika Birleşik Devletleri
PCBA	Baskılı devre kartı montajı
IC	Entegre devre
NCMS	Ulusal İmalat Bilimleri Merkezi
EPA	Çevre Koruma Ajansı
OSHA	Mesleki Güvenlik ve Sağlık İdaresi
TEM	Geçirimli elektron mikroskobu
CALPHAD	Faz diyagramlarının hesaplanması
DSC	Diferansiyel taramalı kalorimetri
TMS	Mineraller, Metaller ve Malzemeler Topluluğu
WEEE	Atık elektrikli ve elektronik ekipman

AB	Avrupa Birliği
IDEALS	Geliştirilmiş tasarım ömrü ve kurşunsuz lehimleme ile elektronik tertibatların çevreye duyarlı üretimi
NEDO	Yeni Enerji ve Endüstriyel Teknoloji Geliştirme Organizasyonu
T_k	Katılaşma sıcaklığı
T_s	Sıvılaşma sıcaklığı
T_ö	Ötektik sıcaklığı
T_H	Homolog sıcaklık
γ	Yüzey gerilimi
γ_{gk}	Katının yüzey gerilimi
γ_{sk}	Katı ile sıvı arasındaki yüzey gerilimi
γ_{gs}	Sıvının yüzey gerilimi
ppm	Toplam madde miktarının milyonda 1 birimlik maddesi
R	Doğal eğrilik yarıçapı
ρ	Yoğunluk
g	Yerçekimi ivmesi
F_{max}	Islatma kuvveti
G	Kesme modülü
E	Elastik modül
ν	Poisson oranı
K	Kelvin
OFHC	Oksijensiz yüksek iletkenlik bakırı
FR-4	Cam elyaf epoksi ile üzeri farklı micron kalınlıklarında bakır kaplamalı laminat levha
CTE	Termal Genleşme katsayısı
UTS	Nihai çekme mukavemeti

IR	İnfrared Isıtma
UTS	Nihai gerilme mukavemeti
CCD	Şarjlı bağlı cihaz

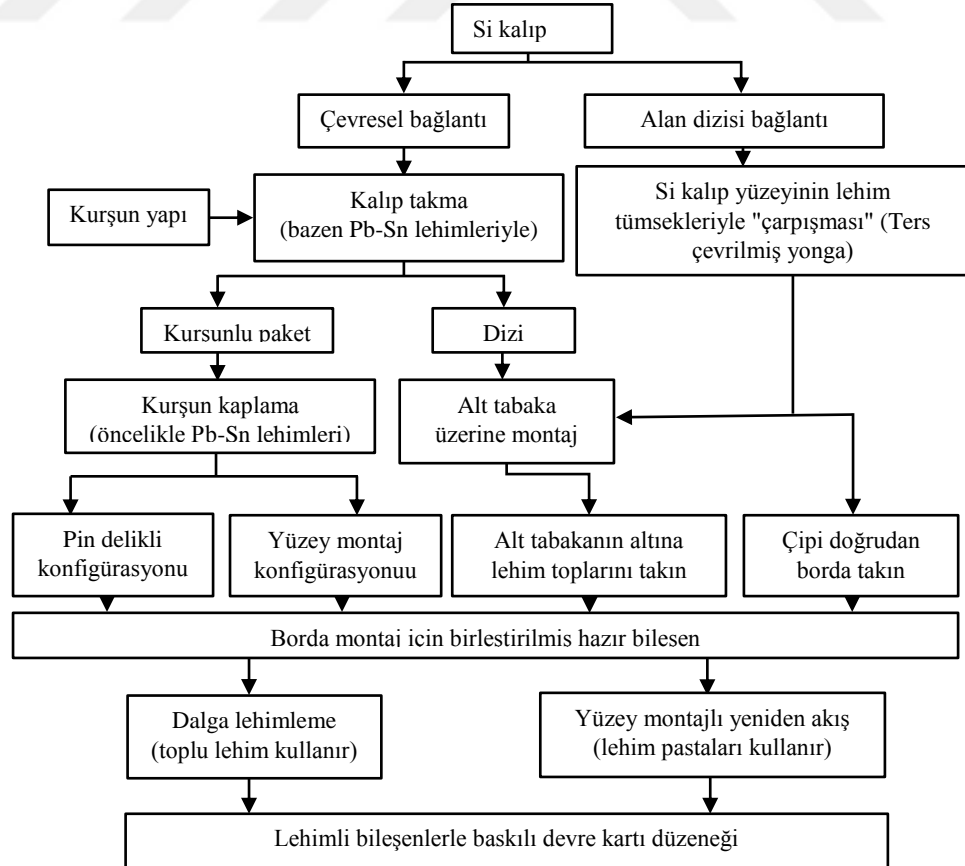


BÖLÜM 1

KURŞUNLU ve KURŞUNSUZ LEHİM ALAŞIMLARI

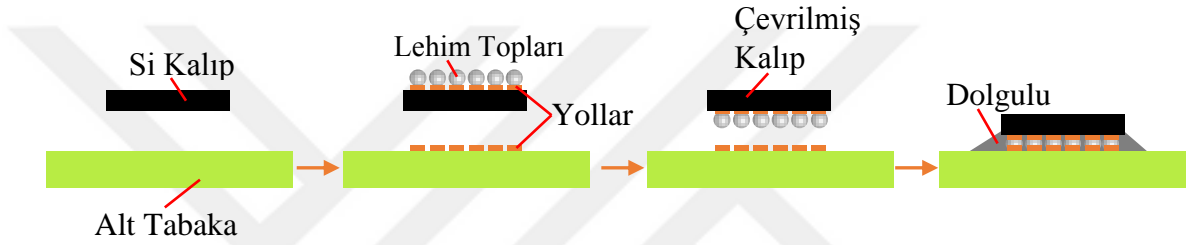
1.1. Lehim Nedir?

Lehim, iki veya daha çok metali farklı oranlarda içeren alaşımdır. Lehimleme ise, ısıtılmış haldeyken metaller arasında ve etrafında akabilen düşük erime noktalı bir alaşımının (lehim) soğuması ve sertleşmesi esnasında iki farklı metalli birbirine bağlaması ile gerçekleştirilen bir işlemdir. Elektronik malzeme dünyasında lehim, silikon kalıbın (veya çipin) montajında ve ara bağlantılarında çok önemli bir rol oynar. Birleştirici malzeme olarak lehim, elektronik aksamalarda elektriksel, termal ve mekanik süreklilik sağlar. Lehimin performansı ve kalitesi, lehim bağlantısının bütünlüğü için oldukça önemlidir ve bu da montajın genel fonksiyonel işleyişi için önemlidir. Lehimler, Şekil 1.1.'de gösterildiği gibi, elektronik montaj dizisinin farklı seviyelerinde



Şekil 1.1. Silikon IC montaj işlemine genel bakış [1]

kullanılır. Bir kalıp bağlama malzemesi olarak lehim, silikon kalıp ile bu kalıbın birleşeceği yüzey arasında elektriksel ve mekanik bağlantıyı sağlar. Aynı zamanda yarı iletken tarafından üretilen ısının montajlı yüzeye dağılmasını sağlar. Kalıbın bir alt tabakaya bağlanması ve kapsüllenmesi, Seviye 1 paketleme olarak adlandırılır. Silikon çipe elektriksel bağlantı sağlamanın en yaygın yönteminden biri olan tel bağlama yolu iken; çiplerde giriş/çıkış sayısının artması nedeniyle tel bağlama yerine, Si kalıbın yüzeyinde lehim tümseklerinin kullanılması son zamanlarda uygulanan en yaygın yöntem olmuştur. Bir kesiti Şekil 1.2.'de gösterilen çip çevirme yöntemi böyle bir yaklaşımdır. Si kalıbı ters çevrilir ve uygun bir alt tabaka üzerine monte edilir [1].

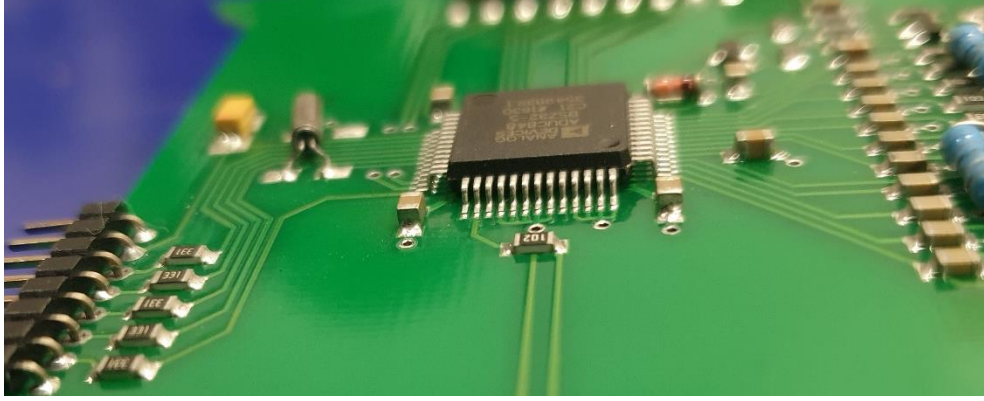


Şekil 1.2. Çevrilmiş çip ve bağlantısının kesiti

Sıklıkla Seviye 2 paketleme olarak anılan bir sonraki montaj ve ara bağlantı seviyesi, bileşenin (kapsüllenmiş silikon kalıp) baskılı bir devre kartına (PWB) monte edildiği yerdir. Lehim, Seviye 2 paketlemede birincil ara bağlantı aracıdır. Pratik olarak tüm mikro elektronik cihazlar bu lehimleme yöntemi kullanılarak baskılı bir devre kartına (PWB) monte edilir. Şekil 1.3. ve Şekil 1.4.' de gösterildiği gibi; elektronik bileşenleri baskılı devre kartına (PWB) takmanın iki ana yolu vardır. Birinci yol; delik içi kaplama

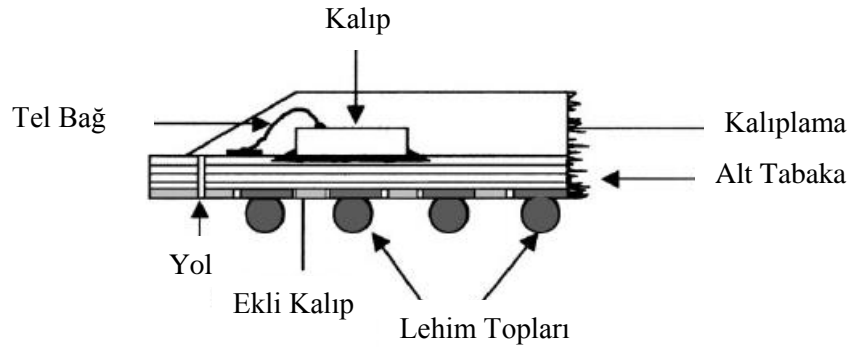


Şekil 1.3. Pim geçiş deliği kullanılarak yapılan baskılı devre kartı



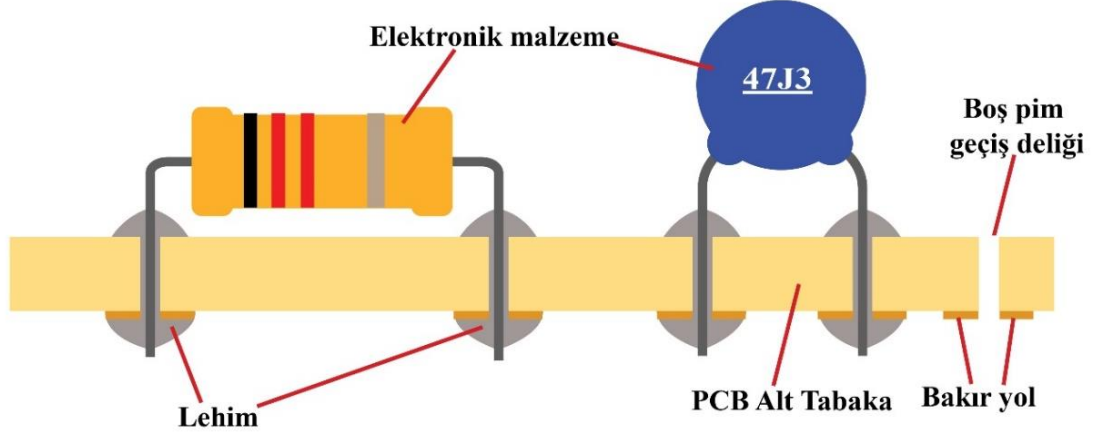
Şekil 1.4. Yüze monte tekniği kullanılarak hazırlanan baskılı devre kartı

(PTH), diğeri ise yüze monte teknolojisidir (SMT). Yüze monte elektronik bileşenler, Şekil 1.3.'te gösterildiği gibi kurşunlu levha şeklinde olabilir veya Şekil 1.5.'de gösterildiği gibi, bilyeli ızgara dizisi (BGA) adı verilen lehim topları gibi de olabilir [1].

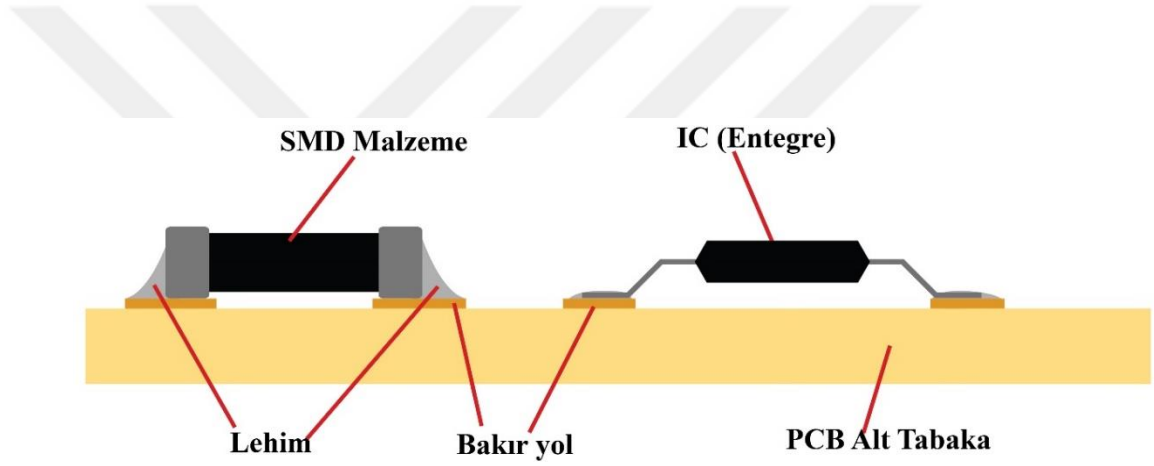


Şekil 1.5. Bir bilyeli ızgara dizisinin (BGA) mikro elektronik bileşeninden kesiti [1]

Baskılı devre kartı elemanlarının montajı ve lehimlenmesi hem yüze monte montajında hem de iğne deliğinin kullanıldığı montajda, tek veya çift taraflı olarak yapılabilmektedir. Şekil 1.6.' da pim geçiş delikli devre kartının kesiti görülmekte, Şekil 1.7.' de ise yüze monte montajı gerçekleşen devre kartının kesiti görülmektedir. Yüze monte cihazların lehimlenmesi, genellikle baskılı devre kartında lehim yapılacak yüzey üzerine, lehim pastasının uygulanması ve ısıtılmasıyla yapılır. Lehim pastası, lehimleme işleminin yapılacağı yüzeyin temiz olmasını ve lehimin daha kaliteli olmasını sağlar. Aynı zamanda havyanın ucundaki kirli lehim artıklarının da temizlenmesine yardımcı olur [2].



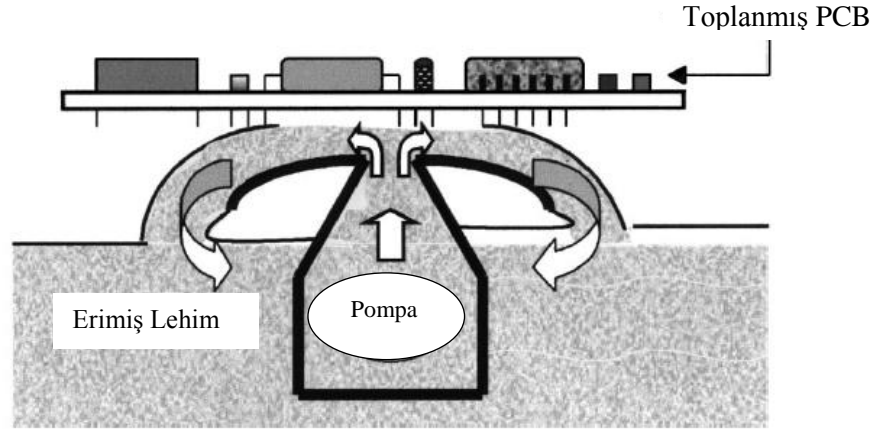
Şekil 1.6. Basılı bir devre kartı üzerindeki mikro elektronik bileşenin pim geçiş deliği bağlantısının kesiti



Şekil 1.7. Bir mikro elektronik bileşenin baskılı bir devre kartı üzerindeki kabloları olan bir yüzeye montaj bağlantısının kesiti

Delik içi kaplama (PTH) lehimleme, Şekil 1.8.' de gösterilen düzenekte, erimiş bir lehim banyosuna kartın batırılarak kılcal hareketlerle lehim bağlantıları oluşturduğu, dalga lehimleme ile yapılır. Erimiş lehimin viskozitesi ve yoğunluğu, dalga lehimleme işleminin performansını önemli ölçüde etkilerken, lehim pastasının formülasyonu ve basıla bilirligi, yeniden akış lehimleme için kritik parametrelerdir [1].

Şimdiye kadar, lehim kullanımı temel olarak kart seviyesi montaj işlemiyle, yani seviye 2 paketleme ile sınırlandırılmıştı ve seviye 1 paketlemede çok az kullanılıyordu. Bununla birlikte, katman dizisi paketleme konseptlerinin (çip çevirme ve bilyalı ızgara dizileri) ortaya çıkmasıyla birlikte, seviye 1 paketlemede lehimlerin kullanımı net bir şekilde artmaktadır [1].



Şekil 1.8. Bir PCBA'nın dalga lehimlemesi [1]

1.2. Lehimlerin Performans Özellikleri

Mikro elektronikte kullanılan lehim alaşımları için önemli gereksinimler vardır. Genel olarak, bir lehim alaşımından beklenen elektriksel ve mekanik performans seviyelerini karşılamalı ve ayrıca istenen erime sıcaklığına sahip olmalıdır. Alternatif olarak kullanılacak lehim alaşımı lehimleme işlemi sırasında baskı devre kartına yerleştirilecek elektronik malzemelerin bacaklarını yeterince eriyik ile kaplamalı, kontrol edilebilir lehim bağlantıları oluşturmalı, yüksek hacimli lehimlemeye ve kusurlu bağlantıların yeniden işlenmesine izin vermeli, hizmet koşullarında güvenilir lehim bağlantıları sağlamalı ve son olarak da montaj maliyetini önemli ölçüde azaltmalıdır [1].

Yaygın olarak kullanılan mevcut Pb-Sn lehimlerine bir alternatif belirlemeye çalışırken, bulunacak alternatif lehimin özelliklerinin Pb-Sn lehimleriyle eşdeğer veya onlardan çok daha iyi olmasına dikkat etmek ve emin olmak gerekir. İkinci seviye paketleme uygulamaları için önemli olan noktalar; lehimin başlıca performans özellikleri, üretilebilirlik, güvenilirlik ve çevreye uygunluktur. Üretilebilirlik, Pb içermeyen bir lehimin, önemli değişiklikler gerektirmeden mevcut ikinci seviye paketleme uygulamalarına ne kadar iyi uyduğunu açıklar. Üretilebilirlik, erime sıcaklığı, lehimlenebilirlik, viskozite, yoğunluk, termal ve elektriksel özellikler, korozyon ve oksidasyon davranışı, yüzey gerilimi, yeniden işlenebilirlik ve maliyet gibi lehimleme ile ilgili bir lehim alaşımının fiziksel özelliklerinin çoğunu içerir. Birinci ve ikinci seviye paketleme için bir lehim alaşımının güvenilirliği esas olarak; alaşımın termal genleşme katsayısı, elastik modülü, akma mukavemeti, kesme mukavemeti, dayanıklılığını yitirme ve yayılma davranışına bağlıdır. Pb içermeyen bir alaşımın da

çevreye bir zararı olmaması gerekir. İmalat ve ayrıca uzun vadeli güvenilirlik açısından önemli olan lehimlerin özellikleri Tablo 1.1.'de özetlenmiştir [1].

Tablo 1.1. Lehim alaşımlarının önemli özellikleri [1]

İmalatla İlgili Özellikler	Güvenilirlik ve Performansla İlgili Özellikler
Erime/Sıvı Sıcaklığı	Elektriksel İletkenlik
Islanabilirlik	Termal İletkenlik
Maliyet	Termal Genleşme Katsayısı
Çevre Dostu	Kesme Özellikleri
Tedarikçilerin Mevcudiyeti ve Sayısı	Çekme Özellikleri
Mevcut Prosesler Kullanılarak Üretilirlik	Yayıma Direnci
Top Haline Getirilebilme Özelliği	Dayanıklılığını Yitirme Özellikleri
Bakır Toplama Oranı	Korozyon ve Oksidasyon Direnci
Geri Dönüştürülebilirlik	İntermetalik Bileşik Oluşumu
Macun Haline Getirilebilme	

1.3. Lehim Alaşım Maliyetleri

Mikro elektronik endüstrisi düşük maliyet bilincine sahiptir. Endüstrinin tarihi, sürekli olarak daha düşük maliyetlerle daha yüksek performans üretmek olmuştur. Ürünün maliyeti, bileşenlerin kümülatif maliyetinin bir sonucu olduğundan, Pb içermeyen lehim alaşımlarının maliyeti, bitmiş ürünün maliyetini etkileyebilir. Elektronik endüstrisindeki maliyet rekabetinin amacı, toplam maliyet düşüşünü en üst düzeye çıkarmak için tek tek bileşenlerin maliyetini en aza indirmektir [1].

1995 yılında dünya Pb tüketimi yaklaşık beş milyon tondu ve bunun yarısından fazlası geri dönüştürülmüş pillerde kullanılıyordu. Buna karşılık, elektronik tüketim, kullanımdan sonra düzenli depolama alanlarına atılan toplam atığın yaklaşık %2'si kadardı. Bu nedenle, uygun alaşım adaylarını bulmanın ilk adımı, bu miktardaki Pb'nin yerini alabilecek toksik olmayan, düşük erime sıcaklıklı alaşımlar bulmaktır [3,4,5]. Aday alaşım bileşenleri, temel element olarak Sn'yi, ana alaşım elementleri olarak Ag, Bi, Cu, Zn, In ve Sb gibi diğer bazı küçük ilaveleri içerir [6].

Lehimlerde kullanılan başlıca elementer ve metallerin birim maliyetleri Tablo 1.2'de özetlenmiştir. Tablo 1.3'de ise bazı lehim alaşımlarının maliyetleri listelenmiştir. Element bazında, Pb ve Zn en ucuz metallerdir. Şaşırtıcı bir şekilde In, Ag'den daha pahalıdır. Pb içermeyen lehim alaşımlarının tümü, ötektik Pb-Sn alaşımından daha pahalıdır. Alaşımların bazıları 49,00-64,00 \$/kg aralığındayken, diğer alaşımlar 76,00 \$ ile 92,00 \$/kg arasındadır. Sn-In-Ag üçlü alaşımın maliyeti 120,13 \$/kg'dır. Maliyet tek belirleyici faktör olsaydı, elektronik endüstrisi alternatif bir lehim benimsemeyecektir [1].

Tablo 1.2. kg başına metal maliyeti

Element	Maliyet (3 Ocak 2023) (ABD Doları/kg)
Kurşun	2.21
Çinko	3.02
Bakır	16
Antimon	51.47
Bizmut	39.50
Kalay	64.10
Gümüş	772.86
İndiyum	245

Tablo 1.3. kg başına lehim alaşımlarının maliyeti [1]

Alaşım	Maliyet (3 Ocak 2023) (ABD Doları/kg)	Patentli Alaşım
63Sn-37Pb	41,20	Hayır
42Sn-58Bi	49,83	Hayır
77.2Sn-20In-2.8Ag	120,13	Evet
85Sn-10Bi-5Zn	58,59	Hayır
91Sn-9Zn	58,78	Hayır
90Sn-7.5Bi-2Ag-0.5Cu	76,19	Hayır
96.3Sn-3.2Ag-0.5Cu	61,81	Hayır
95Sn-3.5Ag-1.5In	91,62	Hayır
96.2Sn-2.5Ag-0.8Cu-0.5Sb	81,37	Evet

96.5Sn-3.5Ag	88,91	Hayır
98Sn-2Ag	78,28	Hayır
99.3Sn-0.7Cu	63,76	Hayır
97Sn-2Cu-0.8Sb-0.1Ag	63,68	Evet
95Sn-5Sb	63,47	Hayır

Alternatif olarak belirlenecek kurşunsuz lehim alaşımlarını belirlemede maliyet kadar önemli başka özelliklerde vardır. Örneğin, güvenilirlikte maliyet artışını dengeleyebilecek önemli bir özelliktir ve daha yüksek maliyetli bir alternatifin benimsenmesini haklı gösterebilir. Yeni alaşım seçimlerinin maliyet artışı kurşunsuz lehimlemenin gelişimini yavaşlatsa da, kurşunsuz teknoloji için güçlü karşıt güçler bulunmaktadır. Hükümet, bu karşıt görüşlerin Pb lehimlerini kullanmalarının önüne geçmek için bir kanun koyması gerekir. Ayrıca Tablo 1.3.'de, listelenen alaşımlardan sadece üçü patentli alaşımlardır bu da tedarikçi sayısını kısıtlamaktadır. Lehim alaşımları için bütün endüstrinin tek bir tedarikçiye bağımlı olması istenilen bir durum değildir. Bu durum ise rekabet olmayacağı için gelecekte fiyatların düşme olasılığını düşürmektedir [1].

İndiyum (In), dünya üretiminde sınırlı olan değerli bir element olarak bilinmektedir. Bulunabilirliği göz önüne alındığında, indiyum ana alaşım elementi olarak kullanmak mantıklı değildir [3]. Ağırlıkça yaklaşık %3 In içeren lehimli ticari elektronik ürünler piyasaya sürülmüştür [7]. Bu tür ürünler, Sn-Pb lehimleme ve kurşunsuz lehimleme arasında bir geçiş olarak kullanılmıştır [6]. Bundan dolayı, In fiyatı oldukça değişken olmuştur. Ocak 1997'de metalik In fiyatı 187 \$/kg iken, geçmişte büyük dalgalanmalara maruz kalmıştır. Ortalama yıllık fiyat 1994 yılında 136.4 \$/kg, 1995 yılında 374 \$/kg, 1996 yılında 369.6 \$/kg, 1997 yılında 308 \$/kg ve 1998 yılında 297 \$/kg olmuştur [8]. 1996 yılı içinde In üretiminin %76'sı Kanada, Çin, Fransa ve Japonya elde edilirken [9] 1998 yılında ise ABD'deki cevherlerden In elde edilemedi [10]. Günümüzde ise; bu dalgalanma devam etmiştir. 2015 yılında, 520 \$/kg, 2016 yılında 345 \$/kg, 2017 yılında 363 \$/kg [11], 2018 yılında 375 \$/kg, 2019 yılında 390 \$/kg, 2020 yılında 395 \$/kg ve 2022 245 \$/kg olmuştur [12].

Gümüşün (Ag) fiyatı da son 15 yılda nispeten istikrarlı olmasına rağmen geçmişte dalgalanmıştır. Küçük bileşenlerin fiyat dalgalanmaları alaşımın maliyeti üzerine minimum etkisi olmasına rağmen, ana bileşenlerin fiyat dalgalanmalarında daha önemli bir etkiye sahiptir [1].

Ulusal İmalat Bilimleri Merkezi (NCMS) raporuna göre Bizmut (Bi), nadir bir metal olarak kabul edilmektedir. Lehimlerde kullanımı ağırlıkça %15'ten az olmalıdır. Ancak dünyanın toplam kaynak miktarı ve yıllık üretim miktarına ilişkin bilgiler halen belirsizdir. Bazı raporlar, Bi arzının Sn-58Bi ötektik lehim sistemlerine bile yeterli olmadığını söylemektedir [13,14]. Bizmutun elektronik montajda kullanılabilmesi için, yakın gelecekteki dünya kaynaklarının ve bizmut tedariklerinin daha fazla araştırılmasını gerektirecektir. Maliyet, elektronik uygulamalarda kullanılan lehimlemede önemli bir faktördür. Genel olarak, ham metallerin maliyeti dikkate alındığında, kurşunsuz lehimlerin çoğu, Sn-Pb lehimlerinden yaklaşık iki ila üç kat daha pahalıdır. Buna karşılık, Sn-0.7Cu ötektik lehimin maliyeti bundan sadece yaklaşık 1.3 kat daha yüksektir, bu da Sn-Cu'nun neden daha çok tercih edildiğini açıklar [7]. Ek olarak, tipik bir elektronik ürünün (dizüstü bilgisayar veya TV gibi) devre kartındaki lehim sayısı küçüktür, yaklaşık 10 g'dır ve bu durumda her bir ürünün görünen fiyatını etkilemez [6].

Gelecek yıllarda maliyet düşürme işlemine devam edecektir, öyle ki Ag ve In gibi değerli elementlerin içeriğini azaltmak, yeni süreçler ve yeni lehim alaşımları geliştirilecektir. Maliyet ve bulunabilirlik açısından en uygun olan, istikrarlı bir fiyat yapısına sahip olan lehim alaşımı ise en çok tercih edilen lehim alaşımı olacaktır [6].

1.4 Lehim Alaşımları

1.4.1 Kurşunlu Lehim Alaşımları

183°C'lik bir erime sıcaklığına sahip Sn-Pb lehimleri, ötektik bir bileşim olan Sn-37Pb veya ötektiğe yakın bir bileşim olan Sn-40Pb alaşımlarından oluşmaktadır. Ötektik lehimlerin ana bileşeni olan Pb Sn-Pb lehimlerine aşağıda maddeler halinde verilen birçok teknik avantajı sağlar [1].

1. Pb, 232°C'de 550 mN/m olan saf kalayın yüzey gerilimini azaltır ve 63Sn-37Pb lehimin (280°C'de 470 mN/m) daha düşük yüzey gerilimiyle ıslanmasını kolaylaştırır [15].
2. Pb, Sn ve Cu gibi metallerin intermetalik oluşturmasını engeller [1].

Bu faktörler yanında, Pb'nin kolayca bulunabilmesi ve düşük maliyetli olması, onu kalay ile ideal bir alaşım elementi haline getirir. Ayrıca ötektik ve ötektiğe yakın Sn-Pb lehimleme sistemi ile yapılan kart sistemleri, uzun yıllara dayanan deneyimle iyi geliştirilmiş ve rafine edilmiştir. Ötektik Sn-Pb lehimlerinin fiziksel metalurjisi, mekanik özellikleri, üretim süreçleri ve güvenilirliği dikkate alındığında güçlü bir bilgi veri tabanı vardır. Kart düzeyinde montaj ve lehimleme ekipmanı ise tamamen Sn-Pb lehimi düşünülerek tasarlanmıştır. Sn-Pb lehimlerinin davranışının iyi anlaşılması küçük geometrili lehim bağlantılarını birleştirmesini ve oluşturmasını sağlamıştır. Ancak, alternatif lehim malzemelerinin geliştirilmesi için baskı yapan yasal, çevresel ve teknolojik faktörler vardır. Bu faktörler şunlardır [1]:

1. Çevresel ve toksikolojik kaygılar nedeniyle Pb kullanımını vergilendiren ve kısıtlayan mevzuatlar [1].
2. Yüzeye montaj teknolojisini gelişmesi ile birlikte daha sağlam ve güvenilir lehim bağlantıları sağlamak için önemli bir parametre olan lehimin eğrilik yarıçapının Sn-Pb alaşımlarında büyük olmasıdır [16].
3. İnce yapılı SMT için gerekli olan daha iyi macun baskı kapasitesine duyulan ihtiyaç [1].
4. Farklı erime sıcaklıklarına sahip, farklı tipte lehimler gerektiren karmaşık montajların lehimleme ihtiyacı [1].

Elektronik endüstrisinde özel uygulamalar için kullanılan Sn-Au, Sn-In, Sn-Ag, Sn-Bi gibi birkaç Pb içermeyen lehim vardır. Büyük lehim pastası satıcıları, ötektik Sn-Pb'nin yerine düşünülebilecek yeni alaşımlar geliştirmeyi hedefleyen araştırma programları bulunmaktadır. Bu yeni alaşımların çoğu ikili, üçlü ve dördüldür [1].

1.4.1.1 . Kurşunla ilgili sağlık ve çevresel kaygılar

Kurşun ve kurşun bileşikleri, Çevre Koruma Ajansı (EPA) tarafından insan yaşamı ve çevre için en büyük tehdidi oluşturan ilk 17 kimyasaldan biri olarak belirtilmiştir [17].

Pb vücutta zamanla biriktiğinde, olumsuz sağlık etkileri olabilir. Kurşun, vücuttaki proteinlere güçlü bir şekilde bağlanır ve insan vücudunun normal işleyişini engeller. Sinir ve üreme sistemi bozuklukları, nörolojik ve fiziksel gelişimdeki gecikmeler, bilişsel ve davranışsal değişiklikler, hemoglobin üretiminin azalması sonucunda anemi ve hipertansiyon [18] kurşunun insan sağlığı üzerindeki olumsuz etkilerinden bazıları olarak sayılabilir. Kandaki kurşun düzeyi 50 mg/dl'yi geçtiğinde kurşun zehirlenmesi gerçekleşmiş olduğu kabul olur [19]. Son araştırmalar, belirlenen resmi eşiğin çok altında bir Pb seviyesinin bile bir çocuğun nörolojik ve fiziksel gelişimi için tehlikeli olabileceğini bulmuştur [1].

Elektronik endüstrisinde Pb kullanımına ilişkin endişe; mesleki maruziyetten, üretim sürecinden kaynaklanan Pb atığından ve elektronik tertibatların atılmasından kaynaklanmaktadır. Elektronik endüstri tarafından Pb tüketimi minimum gibi görünse de [18], Pb'ye maruz kalma potansiyeli yüksektir. Elektronikte ise kurşuna maruz kalma kaynağı, lehimleme işlemidir. Çalışmalar, kurşunun normal lehimleme sıcaklıklarında nispeten uçucu olmadığı için elle lehimleme ve kalaylama işlemlerinde Pb'ye maruz kalma tehlikesinin çok az olduğunu göstermiştir [20]. Bununla birlikte, erimiş havuza daldırılarak yapılan dalga lehimleme işlemi sırasında cüruf tarafından üretilen kurşun buharlarının veya kurşun taşıyan tozun solunması, çalışanlar için olası bir tehlikedir. Dalga lehimleme, erimiş lehimin yüzeyinde yüzey oksidasyonu nedeniyle cüruf üretir. Dalga lehimleme sırasında oluşan cürufun yaklaşık %90'ı yeniden kullanım için saf metale rafine edilebilir [21], ancak geri kalanı bir atık üründür. Kaynak Koruma ve Geri Kazanım Yasası, bu atığı insan sağlığı için tehlikeli olarak sınıflandırmıştır ve özel işlem ve imha gerektirir. Mesleki Güvenlik ve Sağlık İdaresi (OSHA), çalışanların kanlarında 50 mg/dl'den fazla Pb bulunmamasını şart koşmaktadır [22]. Çalışma ömrü boyunca kandaki Pb seviyesinin 40 mg/dl'de veya altında olması beklenmektedir. OSHA, çocuk sahibi olmayı planlayan işçiler için kandaki Pb düzeylerinin 30 mg/dl'nin altında tutulmasını önermektedir [1].

1.4.2 Kurşunsuz Lehim Alaşımları

Çok sayıda Pb içermeyen lehim alaşımları ve bunların elementel bileşimleriyle Tablo 1.4.'te özetlenmiştir. Lehim alaşımları ikili, üçlü ve hatta bazıları dörtlü alaşımlardır. Literatürden toplam 69 alaşım tanımlanmıştır. Bu lehim alaşımlarının çok büyük bir kısmının, birincil veya ana bileşenin kalaydır. Ana bileşenler olan diğer iki element

indiyum ve bizmuttur. Diğer alaşım elementleri ise Zn, Ag, Sb, Cu ve Mg ve eser miktarda Pb'dur. Tablo 1.4.'ü incelediğimizde, listelenen bileşimlerin temel bir varyasyona göre bir araya getirildiği görülebilir [1].

Tablo 1.4. Pb içermeyen lehim alaşımlarının elementel bileşimi [1]

Alaşım	Sn	In	Zn	Ag	Bi	Sb	Cu	Mg	Fe	Pb
Sn-37Pb	63									37
Sn-40Pb	60									40
Bi-26In-17Sn	17	26			57					
Bi-32In		32			68					
Bi-41.7Sn-1.3Zn	41.7		1.3		57					
Bi-41Sn-1Ag	41			1	58					
Bi-41Sn-1Pb	41				58					1
Bi-42Sn	42				58					
Bi-43Sn	43				57					
Bi-43Sn-2.5Fe	43				54.5				2.5	
Bi-45Sn-0.33Ag	45			0.33	54.7					
In-3Ag		97		3						
In-34Bi		66			34					
In-48Sn	48	52								
Sn-1Ag-1Sb	98			1		1				
Sn-1Ag-1Sb-1Zn	97		1	1		1				
Sn-2.5Ag-0.8Cu-0.5Sb	96.2			2.5		0.5	0.8			
Sn-2.8Ag-20In	77.2	20		2.8						
Sn-25Ag-10Sb	65			25		10				
Sn-2Ag	98			2						
Sn-2Ag-0.8Cu-0.6Sb	96.6			2		0.6	0.8			
Sn-2Ag-0.8Cu-6Zn	91.2		6	2			0.8			
Sn-2Ag-0.8Cu-8Zn	89.2		8	2			0.8			
Sn-3.5Ag	96.5			3.5						
Sn-3.5Ag-<6Bi	90.5			3.5	6					
Sn-3.5Ag-1Zn	95.5		1	3.5						
Sn-3.5Ag-1Zn-0.5Cu	95		1	3.5			0.5			
Sn-3.6Ag-1.5Cu	94.9			3.6			1.5			
Sn-4.7Ag-1.7Cu	93.6			4.7			1.7			
Sn-4Ag	96			4						
Sn-4Ag-7Sb	89			4		7				

Sn-4Ag-7Sb-1Zn	88		1	4		7			
Sn-10Bi-0.8Cu	89.2				10		0.8		
Sn-10Bi-0.8Cu-1Zn	88.2		1		10		0.8		
Sn-10Bi-5Sb	85				10	5			
Sn-10Bi-5Sb-1Zn	84		1		10	5			
Sn-4.8Bi-3.4Ag	91.8			3.4	4.8				
Sn-42Bi	58				42				
Sn-45Bi-3Sb	52				45	3			
Sn-45Bi-3Sb-1Zn	51		1		45	3			
Sn-56Bi-1Ag	43			1	56				
Sn-57Bi-1.3Zn	41.7		1.3		57				
Sn-5Bi-3.5Ag	91.5			3.5	5				
Sn-7.5Bi-2Ag-0.5Cu	90			2	7.5		0.5		
Sn-0.75Cu	99.25						0.75		
Sn-0.7Cu	99.3						0.7		
Sn-2Cu-0.8Sb-0.2Ag	97			0.2		0.8	2		
Sn-3Cu	97						3		
Sn-4Cu-0.5Ag	95.5			0.5			4		
Sn-10In-1Ag-(0-10.5)Bi	78.5	10		1	10.5				

Sn'nin yumuşak akışkan olması, birçok alt tabakalar üzerinde yayılma özelliği, elektronik uygulamalar için kullanılan çoğu lehim alaşımının ana bileşeni haline gelmesine neden olmuştur. Kalay 231°C'de erir. Kalay, katı halde iki farklı kristal yapıya sahiptir. Bunlar; birincisi beyaz Sn veya β -Sn'dir ve gövde merkezli bir tetragonal kristal yapıya sahiptir, oda sıcaklığında kararlıdır. Kübik kristal yapıya sahip olan gri kalay veya α -Sn, 13°C'nin altında kararlıdır. β -kalay'ın aynı zamanda kalay zararlısı olarak da adlandırılan α -kalay'a dönüşümü, sıcaklık 13°C'nin altına düştüğünde gerçekleşir ve hacimde büyük bir artışla sonuçlanır, bu da kalayın yapısında çatlama sebepleri olur. Sonuç olarak bu durum düşük sıcaklıkta çalışan uygulamalar için özellikle 13°C sıcaklıkta çalışan cihazlar için bir sorun olabilir. Anizotropik, gövde merkezli tetragonal kristal yapısı nedeniyle, kalayın termal genişmesi de anizotropiktir [23]. Bu nedenle, kalay tekrarlanan termal döngüye maruz kalırsa, plastik deformasyon ve tanecik yapılarında çatlama meydana gelebilir. Bu etki, 30-75°C kadar küçük sıcaklık aralığında gözlemlenebilir [24]. Bu nedenle, harici mekanik zorlama uygulanmadığında bile lehim alaşımlarının kalay veya kalay bakımından zengin fazlarında termal

dayanıklılığını yitirebilir. Alaşım faktörlerinin eklenmesinin, bu faz dönüşümünü bastırmada etkili olduğu ve böylece kalaya zarar verecek sorunları iyileştirdiği görülmüştür. Lewis'e [25] göre, ağırlıkça %0.5'ten fazla Sb, ağırlıkça %0.1'den fazla Bi veya ağırlıkça %5'ten fazla Pb ilavesi, kalayın zarar görmesini engellemektedir. Sn-Pb sistemi örneğinde, Pb'nin 138°C 'de Sn içindeki katı çözünürlüğü ağırlıkça %0.3'ten azdır. Ağırlıkça %5'lik bir Pb-Sn alaşımı, Sn ve Pb bakımından zengin fazlardan oluşan iki fazlı bir alaşım olacaktır [1].Aşağıda ise farklı kurşunsuz lehim alaşımlarının özellikleri verilmiştir.

1.4.2.1 Kalay-Çinko (Sn-Zn)

Sn-% 9ağ.Zn alaşımı, ötektik kalay-kurşuna nispeten yakın olan 198°C'lik bir erime sıcaklığından dolayı dikkat çekici bir alternatif lehim alaşımıdır. Ötektik yapısı iki fazdan oluşur: kütle merkezli bir tetragonal Sn matris fazı ve katı çözeltilde %1'den az kalay içeren ikincil bir altıgen Zn fazı [26]. Mikro yapısı Sn ve Zn açısından zengin fazlardan oluşan, katmanlı bir yapıya sahiptir. Pb-Sn sistemiyle karşılaştırıldığında ise, Sn-Zn sisteminde hem Sn hem de Zn, intermetalik fazlar oluşturmak için Cu ile etkileşime girer [1].

1.4.2.2 Kalay- Bakır (Sn-Cu)

Sn-Cu ikili alaşımı, ağırlıkça Sn-% 0.7 ağ.Cu ötektik bir bileşime ve 227°C ötektik sıcaklığa sahiptir. Bu alaşımın özelliklerini açıklayan çok fazla veri yoktur. Bununla birlikte, bu alaşımdaki yüksek kalay konsantrasyonu nedeniyle, kıl büyümesine eğilimli olabilir veya gri kalay dönüşümü meydana gelebilir. Cu ilavelerinin kalay kılı büyümesi veya $\beta \rightarrow \alpha$ dönüşümü üzerindeki etkisi hakkında net bilgi yoktur [1].

1.4.2.3 Kalay -Bizmut (Sn-Bi)

Sn-Bi alaşımı, Sn-% 58 ağ.Bi'lik bir ötektik bileşime ve 139°C gibi nispeten düşük bir ötektik sıcaklığa sahiptir [27]. Kalay, 130°C ötektik katılma sıcaklığında Bi'de çok düşük çözünürlüğe sahip olduğundan, Bi fazı esas olarak saf Bi'dir. Bununla birlikte, Bi'nin Sn'deki maksimum çözünürlüğü ağırlıkça yaklaşık %21'dir [28]. Alaşım soğudukça Bi, Sn fazında çökler. Yeterli soğuma hızlarında ötektik Sn-Bi mikro yapısı, ötektik nokta sınırlarında katmanlıdır. Bu mikro yapı, kısmen yavaş soğutma hızları için, Croker ve arkadaşları tarafından teorik olarak hesaplanmıştır [29]. Wild ve

arkadaşları ise [30] yavaş soğuyan ötektik Sn-Bi lehim bağlantılarında çatlaklar gözlemiştir. Yavaş soğuma büyük tanelerin oluşmasına neden olmaktadır. Kalay, çatlamanın meydana geldiği bu büyük tanelerin sınırları boyunca lehim matrisinde çökelmektedir [1].

1.4.2.4 Kalay-Gümüş (Sn-Ag)

Sn-Ag ikili sistemi için ötektik bileşim, Sn-% 3.5 ağırlıkça Ag'den oluşur. Ötektik sıcaklık 221°C'dir. Mikro yapı, ince trombositler biçimindeki Sn ve intermetalik Ag₃Sn'den oluşur [31]. McCormack ve arkadaşları [31] ikili ötektik Sn-%3.5ağırlıkça Ag 'nin katılmış mikro yapısını, dendritik taneciklere sahip bir β-Sn fazından ve bir β-Sn matrisi içinde Ag₃Sn çökeltilerinin ötektik dağılımına sahip inter-dendritik bölgelerden oluştuğunu tanımlanmıştır. %1 ağırlıkça Zn ilavesinin, büyük β-Sn dendritik tanelerini ortadan kaldırarak ve alaşım boyunca daha ince ve daha düzgün bir iki fazlı dağılım getirerek bu alaşımın katılma mikro yapısını iyileştirdiği gösterilmiştir [32]. Zn ilavesi, β-Sn dendritlerinin oluşumunu bastırır ve Ag₃Sn'nin düzgün bir şekilde dağılmasına neden olur. Sn-% 0.07 ağırlıkça Cu alaşımına benzer şekilde, bu lehim, yüksek kalay bileşimi nedeniyle kıl büyümesine eğilimli olabilir. Ancak literatürde Sn-Ag'de kıl büyümesi ile ilgili herhangi bir bilgi bulunmamaktadır [1].

1.4.2.5 Kalay- İndiyum (Sn-In)

Kalay-kurşun lehimlere kıyasla önemli ölçüde daha düşük erime sıcaklıkları ve yapışma özelliği çok daha düşük olduğundan, In-Sn lehimleri SMT uygulamaları için kullanılmıştır. In-%48 ağırlıkça Sn bileşimine sahip indiyum bazlı lehim, SMT uygulamaları için yaygın olarak kullanılan lehimdir. Ötektik bileşim In-%49.1ağırlıkça Sn'dir ve ötektik sıcaklık 117°C'dir. Oluşan iki faz intermetalik fazlardır, ağırlıkça %44.8 Sn içeren, In açısından zengin, kütle merkezli tetragonal faz; β ve ağırlıkça %77,6 Sn içeren, Sn bakımından zengin, altıgen faz; γ'dır [23]. Sn açısından zengin faz, eş eksenli tanelerden oluşur. Daha az düzensizliğe sahip benzer bir yapı, Freer ve Morris [33] tarafından bir Ni alt tabaka üzerinde gözlemlendi ve Seyyedi [34] tarafından yapılan bir çalışmada, bir Cu alt tabaka üzerine yapılan lehim bağlantılarının uzun süre beklemenin sonucunda önemli ölçüde mikro yapısal bozulmalar gözlemlendi [1].

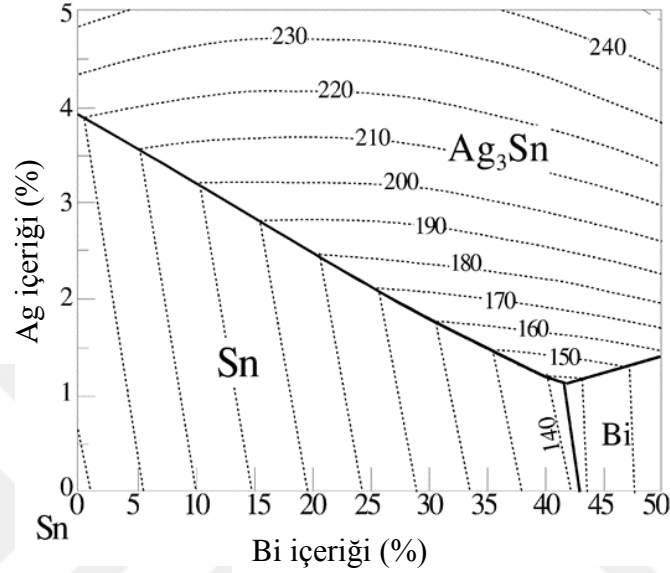
1.4.2.6 Kalay-Gümüş (-Bakır, Bizmut, İndiyum) (Sn-Ag (-Cu, Bi, In)) sistemi

Bu alaşım sistemi oldukça önemlidir çünkü genellikle kurşunsuz bir lehim için ilk tercih olarak kabul edilir. Sn-Ag ikili sistemi iyi karakterize edilmiştir [35] ve ötektik bileşim, Sn-%3,5ağ.Ag ve sıcaklık 221°C'dir. Suganuma [36] yakın zamanda geçirimli elektron mikroskobu (TEM) kullanarak mikro yapıyı ayrıntılı olarak analiz etti ve Ag-Sn iğnelerinin ince dağılımının birincil β -Sn tanelerini çevreleyen ötektik bölgenin ince ağlarını oluşturduğuna dikkat çekti (ötektik alaşım için bile). Sn-Ag çökelteleri, β -Sn matrisi ile benzersiz bir kristalografik ilişki oluşturduğunu, bu ise iyi ara bağı oluşumuna ve mükemmel mekanik özellikler geliştirdiğini açıkladı [6].

Üçlü faz sistemi ilk olarak Gebhardt ve arkadaşları [37] yarı ötektik bileşim olarak Sn-%4.0 ağ.Ag-%0.5 ağ.Cu olarak keşfettiler. Ötektik sıcaklık 225°C idi ve Sn-Ag ikili ötektik sıcaklığından daha yüksekti. Miller ve arkadaşları [38], ötektik bileşimin, Sn-%4.7 ağ.Ag-%1.7 ağ.% Cu olduğunu buldular. Ötektik sıcaklık 217°C idi. Cu eklenmesi Ag içeriğinin ötektik bileşim değerini artırmıştı. Bununla birlikte, mikroyapısal gözlem ve dikkatli termal analiz kullanılarak üçlü sistem üzerinde yapılan en son çalışma, ötektik bileşimin çok daha düşük Ag ve Cu içeriğine sahip olduğunu ortaya çıkardı [39,40]. Ag ve Cu yüzdeleri, deneysel sistemlerden [39,40] ağırlıkça %3.5 Ag ve %0.9 Cu, CALPHAD yönteminden ise [40] ağırlıkça %3.7 Ag ve %0.9 Cu olarak bulundu. Ötektik sıcaklık da 217°C olarak tespit edildi. Gebhardt ve arkadaşlarının [37] raporları ile Miller ve arkadaşlarının [38] en son iki çalışması arasındaki tutarsızlık Sn-Ag alaşımlarının 20°C üzerindeki aşırı soğutma etkisinden kaynaklandığı tahmin edilmektedir. Gerçek bileşimin ne olacağını doğrulamak için daha fazla analiz gerekecek olsa da, gerçek ötektik bileşimin, güvenilir termodinamik tahminlerle birleştirilmiş dikkatli termal analizle gerçekleştirilen raporlar dikkate alınmalıdır [6].

Sn-Ag alaşımlarına Bi eklenmesi, erime sıcaklığını etkili bir şekilde azaltabilir [35] ve alaşımların Cu [41,42] üzerinde yayılmasını sağlar. Büyük miktarlarda Bi eklemek, güvenilirlikte birkaç soruna neden olduğundan, maksimum Bi ilavesi miktarı ağırlıkça %3'ün altında kullanılmaktadır. (özel uygulamalar için kullanılan Sn-%57 ağ.Bi ötektik alaşım hariç). Kattner ve ark. [43], Sn-Ag, Sn-Bi ve Ag-Bi'nin iyi tanımlanmış ikili alaşım sistemlerinden elde edilen termodinamik verilerden hesaplanan üçlü faz diyagramını araştırdı. Şekil 1.9. Sn açısından zengin bir sıvılaştırma köşe yüzeyini

göstermektedir. Sn-Ag alaşımlarının mekanik özelliklerini bozan kırılğan Ag_3Sn birincil fazının oluşumunu önlemek için, Bi içeriğini artırarak Ag içeriğini azaltmamız gerekir. CALPHAD tahmininden elde edilen Sn-Ag-Bi üçlü alaşım fazı hakkında yeterli bilgi olmadığından başka araştırmacılar tarafından da araştırılmaya devam etmektedir [44].



Şekil 1.9. Sn-Ag-Cu üçlü fazının sıvılaşıma yüzeyi. Telif hakkı 1994, TMS'nin izniyle [43]

Bi'nin Sn-Ag alaşım sistemine eklenmesi, erime reaksiyonundaki macunsu oluşma aralığını genişletir. Son zamanlarda, Hwang ve ark. [45], Sn-%3,2 ağırlıkta Ag alaşımında artan Bi içeriği ile mikroyapısal değişikliği araştırdılar. Bi, Ag_3Sn/Sn ağırlıkta ötektik bölgesini ayırır ve Ag_3Sn morfolojisini ince iğnelere dönüştürür [6].

Sn-Ag-In hem deneysel olarak hem de termodinamik modelleme yoluyla incelenmiştir [46]. Üçlü diyagramın Sn açısından zengin köşesindeki alaşımların erime/katılaşma davranışını araştırmak için diferansiyel taramalı kalorimetri (DSC) kullanılmıştır. Bazı In-çeren lehim alaşımlarının soğuması sırasında, katı-sıvı arayüzeyinde güçlü bir ayrışma meydana gelir. Yeterince yüksek In konsantrasyonlarında (ağırlıkça %16), bu ayrışma, 113°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda lehimin kısmen erimesine neden olur [6].

1.4.2.7 Kalay-Bizmut (-İndiyum, Antimon, Gümüş) (Sn–Bi(–In, Sb, Ag)) ötektiğe yakın sistemler

Bi'da ana element olarak Sn eklenebilir. Sn-% 57 ağırlıkta Bi ikili ötektik lehim alaşımı, düşük sıcaklıkta eriyen lehim (139°C'de eriyen) olarak bilinir ve 20 yılı aşkın bir süredir elektronik malzeme montajında kullanılmaktadır [6].

Sn–Bi'nin ikili faz diyagramı Lee ve arkadaşları tarafından [47] araştırılmış ve termodinamik olarak hesaplanmıştır. Ötektik bileşime yakın sıvı bölgesinde, hesaplanan ve deneysel veriler [35,47,48] arasında da tutarsızlık gözlemlenmiş olduğu için daha çok araştırma yapılmıştır [6].

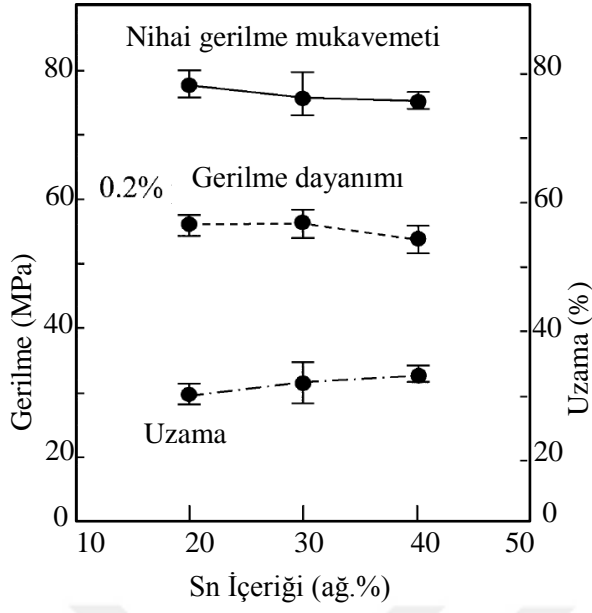
Sn–Bi–Sb [48,49] ve Sn–Bi–In [47,50] için üçlü sistemler incelenmiştir. Sn–Bi–Sb alaşım sisteminde sadece iki ötektik reaksiyon bulundu; üçlü ötektik reaksiyonu ise termodinamik hesaplamalarla tahmin edilmedi [48,49]. Sn–Bi–In sisteminde, Yoon ve arkadaşları [49], Sn–BiIn ve Sn–BiIn₂ yarı-ikili sistemlerinin aslında ikili olmadığını keşfetti. Bu bulgu, faz diyagramını yalnızca bir ötektik reaksiyona sahip olarak tanımlayan önceki araştırmalardan [51,28] farklılık göstermektedir.

1.4.2.8 Kalay-Çinko (-Bizmut-İndiyum) (Sn–Zn(–Bi, In)) sistemleri

Zn-Sn alaşım sistemi herhangi bir intermetalik bileşik oluşturmadığından, alaşımların sünekliği büyük bir avantaj haline gelir. Kalay içeriğinin bir fonksiyonu olarak Zn-Sn alaşımlarının çekme özellikleri Şekil 1.10.a' da görülmektedir.

Artan kalay içeriğiyle, nihai gerilme mukavemeti (UTS) ve %0,2 uzama gerilimi hafifçe azalırken, yumuşak kalay hacim bölümünde artışa dayalı olarak, uzama artar. Zn-Sn alaşımlarının oda sıcaklığında mükemmel sünekliğe sahiptir. Ayrıca alaşım külçenin soğuk haddelenmesiyle oluşturulan Zn-%30 ağırlıkta Sn levhası Şekil 1.10.b' de gösterilmektedir [52].

Zn-Sn alaşım sistemi ile ilgili endişelerden bir tanesi, nemde oksidasyon direncidir. Sn-Zn ötektik alaşımının, matrisin tane sınırları boyunca ZnO oluşturmak için yüksek nemde kolayca korozyona uğrayabileceği iyi bilinmektedir [53]. Yapılan bir çalışmada, Zn-Sn alaşımları, 1.000 saate kadar 85°C/85%RH' ye maruz bırakılmıştır. Çalışma sonucunda; serbest yüzeyden birkaç mikrometre kalınlığında oksitlenmiş bir tabakaya rastlandı [54]. Böylece Zn-Sn'nin şiddetli nemde bile stabil olduğu kanıtlanmıştır [52].



(a)



(b)

Şekil 1.10. (a) Zn-Sn alaşımlarının oda sıcaklığında çekme özellikleri ve (b) mükemmel süneklik gösteren soğuk haddelenmiş Zn-%30 ağ.Sn sacın görünümü [54]

Sn-Zn alaşımları ayrıca lehimlerin yanı sıra çeliklerin kaplanması için yararlı kurşunsuz alaşımlar olarak da kullanılmıştır. Referans [35]'de ikili faz diyagramı deneysel yöntemler ile elde edilmiş ve CALPHAD yöntemi [55] ile de doğrulanmıştır. Sn-Zn-Bi sistemi için deneysel faz diyagramları referans [51]'de detaylı olarak verilmiştir. Son zamanlarda, Lee ve ark. [56] ise CALPHAD yöntemiyle bu faz diyagramını doğrulamıştır [6].

BÖLÜM 2

LEHİM ALAŞIMLARININ GENEL ÖZELLİKLERİ

2.1 Giriş

Metal ara bağlantıları için kullanılan Sn–Pb lehimlerinin 2000 yıl öncesine dayanan uzun bir geçmişi vardır. Bu lehim ve onunla geliştirilen alaşımlar, Cu ve alaşımları üzerinde kullanım kolaylığı, düşük erime sıcaklıkları, iyi işlenebilirlik, süneklik ve mükemmel ıslatma gibi birçok faydayı uzun süredir sağlamıştır, sağlamaya da devam etmektedir. Günümüzde lehimleme teknolojisi, neredeyse tüm elektronik cihazların ve devrelerin birbirine bağlanması ve paketlenmesi için vazgeçilmez hale gelmiştir. Kurşun içeren lehimler ve özellikle ötektik veya ötektiğe yakın Sn-Pb alaşımları, modern elektronik devrelerin montajında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, kurşunun toksisitesi ile ilgili artan çevresel ve sağlık endişeleri, aynı zamanda kurşun içeren lehimlerin kullanımını sınırlayan mevzuattan dolayı (Elektrikli ve Elektronik Ekipman Atıkları (WEEE) teklifinde [57] açıklandığı gibi), elektronik uygulamalarda, kurşunsuz lehim alaşımlarına alternatifler araştırılmaya başlanmıştır [6].

Çeşitli ticari ve deneysel Sn bazlı kurşunsuz lehim alaşımları mevcut olmasına rağmen, hiçbiri düşük erime sıcaklığı, ıslanabilirlik, mekanik bütünlük, iyi üretilebilirlik ve uygun maliyeti gibi tüm standartları karşılamıyor. Şu an birçok endüstri kuruluşunda Pb-Sn lehimleme işlemine uygun ekipman ve koşullar mevcuttur. Eğer yeni üretilecek lehim alaşımı mevcut Pb-Sn lehimleme sistemine uygun değilse yeni havya ve montaj süreçleri geliştirilmesi gereklidir. Halihazırda, Amerika Birleşik Devletleri'ndeki Ulusal İmalat Bilimleri Merkezi (NCMS) projesi [3], Avrupa Birliği'ndeki Geliştirilmiş Tasarım Ömrü ve Kurşunsuz Lehimleme ile elektronik tertibatların çevreye duyarlı üretimi (IDEALS) projesi [58] ve Japonya'daki Yeni Enerji ve Endüstriyel Teknoloji Geliştirme Organizasyonu (NEDO) projesi [59] gibi kurşunsuz lehimlerin geliştirilmesine yönelik birkaç büyük proje yürütülmüştür. Bu projelerle ilgili raporlar, elektronik ürünlerin kurşunsuz lehimlerle işlenmesi hakkında bize çok faydalı bilgiler sağlayarak bilim camiasının kullanımına sunmuştur. Bununla birlikte, kurşunsuz

lehimlerin pratik kullanımına ek olarak, kurşunsuz lehimlerin kullanıldığı elektronik çip üretiminde meydana gelen çeşitli olayları anlamamızı sağlayacak, bilimsel bilgilere de ihtiyaç duyulmaktadır. Bilimsel temeli oluşturmadığımız sürece, yukarıda belirtilen özelliklere uygun, kolay montaja izin veren, kurşunsuz bir lehim alaşımının geliştirilmesi de zor olacaktır [6]. Bu nedenle tezin bu bölümünde alternatif lehim alaşımlarının temel özellikleri hakkında bilgi verilecektir.

2.2 Erime Sıcaklığı

Lehim alaşımları için, imalat açısından bakıldığında, erime sıcaklığı, yani sıvılaştırma sıcaklığı, ilk ve en önemli faktördür. Sn-Pb'nin ötektik sıcaklığı 183°C'dir ve günümüzde kullanılan montaj ekipmanlarının çoğu, temel referans olarak 183°C kullanılarak çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Temel sıcaklıktaki bazı değişiklikler, örneğin yeni Pb içermeyen lehimin erime noktası daha yüksekse, o zaman üreticiler tarafından yeni ekipmanın satın alınması gerekecek, dolayısıyla ürünlerin maliyetinde artışlar olacaktır [1].

Erime noktasını 183°C'ye yakın bir sıcaklıkta tutmanın bir başka nedeni ise, mikro elektronik çip üretiminde termoset polimerlerin yaygın kullanımınıdır. Epoksi reçineler, kalıbın taşıyıcılara veya alt tabakalara kalıp tutturma malzemesi olarak kullanılır. Bazı bölümlerde silikonlar da kullanılır. Lehimleme işlemleri sırasında bu ve diğer malzemelerin bozulmaması önemlidir. Bu polimerik malzemelerin maruz kaldığı en yüksek sıcaklık, lehim toplarının ve lehim tümseklerinin yeniden akışı sırasında, 90 saniye boyunca yaklaşık 230°C'dir [1].

İkili veya üçlü ötektik bileşimler için, Sn-Pb alaşımına uyumlu şekilde eriyen benzersiz bir "erime sıcaklığı" beklenir. Erime, katılaşma sıcaklığında başlar ve sıvılaştırma sıcaklığında tamamlanır. İkili sistemler için katılaşma, sıvılaştırma ve ötektik sıcaklıklar kolayca elde edilebilirken üçlü sistemler için erime sıcaklığı bilgisi yeterli düzeyde değildir. Dörtlü sistemler içinse erime sıcaklığının elde edilmesi, belirli alaşım geliştirici firmalar veya imalatçılar dışında son derece zordur [1].

Pb-Sn alaşımları ve kurşun içermeyen alaşımlar için, katılaşma (T_k), sıvılaştırma (T_s) ve ötektik sıcaklıklar ($T_ö$) Tablo 2.1'de verilmektedir. Üçlü ve dörtlü sistemler için ötektik sıcaklık literatürde erime sıcaklığı olarak ifade edilir ve Tablo 2.1'de de bu şekilde listelenmiştir. Bilinen erime sıcaklığının gerçekte sıvılaştırma sıcaklığıdır. Mikro

elektronik endüstrisindeki lehimleme işlemleri için önemli olan sıcaklık sıvılaşma sıcaklığıdır ve lehim alaşımının tamamen eridiği sıcaklıktır [1].

Tablo 2.1'den görülebileceği gibi, Pb içermeyen lehim alaşımlarının büyük çoğunluğu 200°C aralığında erime noktalarına veya sıvılaşma sıcaklıklarına sahiptir. Eğer alaşım içinde Bi ve In metalleri varsa erime sıcaklığında önemli ölçüde düşüş gözlenmektedir. Sn-Cu alaşım sistemleri, Pb-Sn alaşımlarına göre daha yüksek sıvılaşma sıcaklığına sahiptir. Çok yüksek sıvılaşma sıcaklığı, işlem sıcaklığı sırasında daha yüksek lehimleme sıcaklığına sahip olması gerektiği anlamına gelir. Ötektik sıcaklığı 183°C olan bir ötektik Pb-Sn lehimi kullanırken, tipik lehimleme sıcaklığı 220°C'dir. Bu durumda kabul edilebilir sıvılaşma sıcaklığı, en fazla ötektik sıcaklığın 40°C üstünde olabilir. Kabul edilebilir en yüksek sıvılaşma sıcaklığı aşağıdaki faktörlere bağlıdır [1]:

1. Mikro elektronikte kullanılan polimerik malzemeler, yüksek sıcaklıkta kalıcı bozulma olmadan dayanabilmelidir [1].
2. Isı transferinin verimliliği, lehim alaşımının kısa sürede erimesini, bir bağlantı oluşturmasını ve yeniden katılaşmasını sağlar, böylece verimlilik korunmuş olur (mevcut standart lehimleme süresi 90 s'dir) [1].
3. Lehimleme için kullanılan fırınlarında sıcaklık profili değişimleri hassas bir şekilde kontrol edilebilir olmalıdır [1].

Tablo 2.1. Pb içermeyen lehim bileşimlerinin erime sıcaklıkları [1]

Alaşım Bileşimi	T_k(°C)	T_s(°C)	T_ö(°C)	Referans
Sn-37Pb			183	[1]
Sn-40Pb	183	187		[1]
Bi-26In-17Sn			79	[23]
Bi-32In			109.5	[1]
Bi-41.7Sn-1.3Zn			127	[60]
Bi-41Sn-1Ag				[1]
Bi-41Sn-1Pb				[1]
Bi-42Sn			139	[1]
Bi-43Sn (ötektik)			139	[1]
Bi-43Sn+2.5%Fe				[1]
Bi-45Sn-0.33Ag			140-145	[61]
In-3Ag			141	[1]
In-34Bi			110	[1]
In-48Sn (ötektik)			117	[1]
Sn-1Ag-1Sb	222	232		[62]

Sn-1Ag-1Sb-1Zn				[1]
Sn-2.5Ag-0.8Cu-0.5Sb		217	210-216	[63,64]
Sn-2.8Ag-20In			178	[64]
Sn-25Ag-10Sb			233	[65]
Sn-2Ag	221	225		[1]
Sn-2Ag-0.8Cu-0.6Sb			210-216	[60]
Sn-2Ag-0.8Cu-6Zn	217	217		[62]
Sn-2Ag-0.8Cu-8Zn	215	215		[62]
Sn-3.5Ag			221	[1]
Sn-3.5Ag-(<6)Bi	211-221	212		[60,64]
Sn-3.5Ag-1Zn			217	[66,67]
Sn-3.5Ag-1Zn-0.5Cu			216-217	[26,66]
Sn-3.6Ag-1.5Cu			225	[62]
Sn-4.7Ag-1.7Cu			217	[60,68]
Sn-4Ag	221	225		[1]
Sn-4Ag-7Sb		230		[62]
Sn-4Ag-7Sb-1Zn				[1]
Sn-10Bi-0.8Cu	185	217		[62]
Sn-10Bi-0.8Cu-1Zn				[1]
Sn-10Bi-5Sb	193	232		[62]
Sn-10Bi-5Sb-1Zn				[1]
Sn-4.8Bi-3.4Ag				[1]
Sn-42Bi	139	170		[1]
Sn-45Bi-3Sb	145	178		[62]
Sn-45Bi-3Sb-1Zn				[1]
Sn-56Bi-1Ag			136.5	[60]
Sn-57Bi-1.3Zn			127	[60]
Sn-5Bi-3.5Ag				[1]
Sn-7.5Bi-2Ag-0.5Cu	207	212		[23]
Sn-0.75Cu	227	229		[1]
Sn-0.7Cu (ötektik)			227	[1]
Sn-2Cu-0.8Sb-0.2Ag			266-268	[63]
Sn-3Cu	227	275		[1]
Sn-4Cu-0.5Ag	216	222		[23,69,70]
Sn-10In-1Ag-(0-10.5)Bi			188-197	[60]
Sn-20In-2.8Ag			178-189	[60]
Sn-42In	117	140		[1]
Sn-5In-3.5Ag				[1]
Sn-10In-1Ag-0.5Sb			196-206	[60]
Sn-36In	117	165		[1]
Sn-50In	117	125		[1]
Sn-8.8In-7.6Zn			181-187	[60]
Sn-2Mg (ötektik)			200	[1]
Sn-5Sb	234	240		[1]
Sn-4Sb-8Zn			198-204	[60]

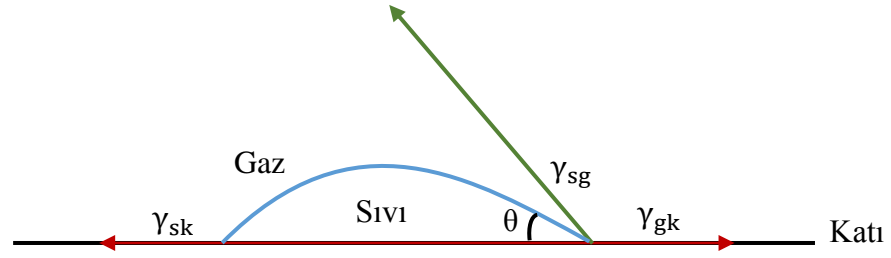
Sn-7Zn-10In-2Sb			181	[67,71]
Sn-8Zn-10In-2Bi			175	[72]
Sn-8Zn-4In				[1]
Sn-8Zn-5In-(0.1-0.5)Ag			187	[60,66]
Sn-9Zn-10In			178	[67,71]
Sn-5.5Zn-4.5In-3.5Bi			185-188	[60]
Sn-6Zn-6Bi			127	[60]
Sn-9Zn (ötektik)			198	[1]
Sn-9Zn-5In			188	[60,67,71,72]

Yukarıda verilen koşullarda dikkate alındığında yapılan araştırmalar, alternatif lehim alaşımı için erime sıcaklığı için 20°C tolerans sıcaklığının yeterli olduğu görüşündedir. Polimerik malzemeler 120 saniye süresince maksimum 250°C sıcaklığa dayanabiliyorsa, o zaman 230°C civarında erime sıcaklıklarına sahip lehim alaşımlarını kullanmak mümkün hale gelir [1].

Katılma sıcaklığı, lehim alaşımının homolog sıcaklığını belirler. Homolog sıcaklık (T_H), alaşımın Kelvin cinsinden istenen işlem sıcaklığının yine Kelvin cinsinden erime noktasına bölünmesiyle elde edilir. Bu, metalik bir alaşım içindeki atomların aktifleşme durumunun bir ölçüsüdür. Alaşım içindeki atomlar, $T_H > 0,5$ olduğunda, termal olarak (sürünme ve tane büyümesi gibi) aktif süreçlere katılabileceği yeterli enerjiye sahip olur. Ötektik Pb-Sn alaşımları için oda sıcaklığı homolog sıcaklığın $\sim 0,65$ 'ini temsil eder. Bu nedenle, lehim alaşımı sabit bir statik yüke maruz kalırsa, sürünmesi beklenebilir. Daha düşük katılma sıcaklıklarına sahip lehim alaşımlarının kullanılması, homolog sıcaklığın artacağı anlamına gelir. Buda alaşımın daha şiddetli sürünme koşullarına maruz kalmasıyla sonuçlanması beklenebilir. "Sürünmeye karşı direnç" açısından bakıldığında, daha yüksek katılma sıcaklıklarına sahip lehim alaşımlarının kullanılması avantajlı olacaktır [1].

2.3 Islatma Özelliği

İki metal arasında uygun bir metalurjik bağ oluşturmak için ıslatma gerçekleşmelidir. Bu, sıvı lehim ile lehimlenecek parçaların katı yüzeyi arasında belirli bir etkileşimin olması gerektiği anlamına gelir. Erimiş lehimin lehimleme işlemi sırasında akma veya yayılma özelliği, uygun bir metalik bağın oluşumu için birincil öneme sahiptir. "Islatma" terimi genellikle lehimleme işlemlerinden söz edilirken kullanılır ayrıca yayılma olgusuna da sıklıkla ıslatma denir [1].



Şekil 2.1. İslatma açısı diyagramı

Tanım olarak ıslatma, sıvı olan bir malzemenin, katı olan başka bir malzeme üzerine yayılma yeteneğinin bir ölçüsüdür [16]. İslatma derecesi, Şekil 2.1’de gösterildiği gibi, belirli bir ortamda katı ve sıvının birleştiği yerde oluşan temas açısı ile ölçülür. Genel olarak, eğer ıslatma veya temas açısı 0 ile 90° arasındaysa, sistem ıslanır denir. İslatma açısı 90 ile 180° arasında ise sistem ıslatmaz olarak kabul edilir. Temas açısı (θ) Young-Dupre denkleminde göre birleşme noktasındaki yüzey gerilimlerinin dengesinden belirlenir [1].

$$\gamma_{gk} = \gamma_{sk} + \gamma_{gs} \cos\theta \quad (2.1)$$

burada γ_{gk} katının belirli bir ortamdaki yüzey gerilimidir, γ_{sk} katı ile sıvı arasındaki arayüzey enerjisidir (yüzey gerilimi) ve γ_{gs} aynı ortamdaki sıvının yüzey gerilimidir.

İslatmanın en temel karakterizasyonu, ıslatma kuvvetlerinin termodinamiği dikkate alınarak verilmiştir. Serbest enerji açısından, eğer toplam serbest enerjide net bir azalma varsa, yani lehimin yüzey enerjisi, daha düşük bir yüzey-arayüzey enerjisinde olan bir arayüz oluşturarak düşürülürse iyi bir ıslatma meydana gelecektir [1].

2.3.1 Yüzey Gerilimi

Yüzey gerilimi, uygun lehim bağlantılarının oluşumunu belirleyen ıslatma derecesini etkiler. Bu nedenle yüzey gerilimi, lehimin ıslatma davranışını belirleyen kritik fiziksel özelliklerinden biridir. İslatmaya ek olarak, erimiş lehimin yüzey gerilimi yüzeye monte cihazların (SMT) montajında kritik rol oynar. PTH lehimleme için kılcal akış, yüzeye monte cihazlar (SMT) için kendi kendine hizalanması, ikinci yeniden akış sırasında malzemelerin düşmesini önleme özelliği ve doğal eğrilik yarıçapının tümü, erimiş lehimin yüzey geriliminin bir işlevidir [1].

Bir sıvının yüzey gerilimi termodinamik bir niceliktir ve sıvı yüzey alanını izotermal olarak büyötmek için gereken iş miktarı olarak tanımlanır [73]. Gerçek SMT lehimlemede termal dengeye nadiren ulaşılır, çünkü denge sıcaklığına ulaşılmadan önce lehimleme işlemi tamamlanır. Ayrıca alt tabakanın erimiş lehimde çözünmesi, akının oksidasyonu, lehimleme ortamı gibi etkenler lehimin yüzey gerilimini etkiler. Çalışmalar, lehimin yüzey gerilimi değerinin sıcaklığa [74], akı bileşimine [75] ve lehim katmanının etkileşim boyutuna [76] göre değiştiğini göstermiştir. Bu nedenlerden dolayı, gerçek işleme koşulları altında lehimin ve diğer birçok sıvı metalin yüzey gerilimleri tam olarak bilinmemektedir [77]. Kurşunsuz lehimler için çok az yüzey gerilimi verisi bulunmaktadır. Vincent ve Richards [78], hem havada hem de nitrojen (<20 ppm O₂ içeren) ortamında, kendi sıvı sıcaklıklarının 50°C üzerinde, Pb içermeyen ikili alaşımların yüzey gerilimini ölçtüler. Bu ölçümler Tablo 2.2'de gösterilmektedir. Oksidasyon, sıvı yüzeyinin serbest enerjisini azalttığından, genel olarak yüzey gerilimi değerleri havada durağan atmosferdekenden daha düşük olma eğilimindedir. Veriler ötektik Sn-Zn ve Sn-Cu için bu eğilime uymadığını göstermektedir. Bu nedenle yüzey gerilimi ile ilgili daha detaylı çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır [1].

Tablo 2.2. İkili alaşımlar için ölçülen yüzey gerilimi değerleri [1]

Alaşım	Yüzey Gerilimi (mN/m)	
	Hava	Nitrojen (<20 PPM O ₂)
Bi-42Sn	319	349
Sn-9Zn	518	487
Sn-40Pb (yakın ötektik)	417	464
Sn-3.5Ag	431	493
Sn-0.7Cu	491	461
Sn-5Sb	468	495

Tablo 2.2.'de yer alan yüzey gerilimi değerleri, Denklem 2'de alaşımların doğal eğrilik yarıçapı R'yi hesaplamak için kullanıldı ve sonuçlar Tablo 2.3'de verildi [1].

$$R = \left(\frac{\gamma}{\rho g} \right)^{1/2} \quad (2.2)$$

Bu denklem de γ yüzey gerilimi, ρ yoğunluk ve g yerçekimi ivmesidir. Tablo 2.3'den görülebileceği gibi, yalnızca Bi-%42 ağ.Sn, Pb-Sn'den daha küçük bir doğal eğrilik

yarıçapına sahiptir. Diğer alaşımlar daha büyük R değerlerine sahiptir. Bu sonucun anlamı, temas noktaları arasındaki mesafe giderek küçüldükçe, temas noktaları arasında köprü oluşmasını önlemek amacıyla, bu alaşımlara ekstra özen gösterilmesi gerektiğidir [1].

Tablo 2.3. Pb içermeyen lehim alaşımlarının doğal eğrilik yarıçapı R [1]

Alaşım	Yoğunluk (g/cm ³)	R _{nava} (mm)	R _{nitrojen} (mm)
Bi-42Sn	8.74	1.93	2.02
Sn-9Zn	7.27	2.7	2.61
Sn-40Pb (yakın ötektik)	8.90	2.19	2.31
Sn-3.5Ag	7.39	2.44	2.61
Sn-0.7Cu	7.29	2.62	2.54
Sn-5Sb	7.25	2.57	2.64

2.3.2 Islatma Açısı

Yüzey gerilimi ve ıslatma açısı ilişkili olsa da ıslatma açısı belirli malzeme kombinasyonlarında daha spesifik bir başlıktır. Pb içermeyen lehimlerin, özellikle Cu alt tabakalar üzerinde, çeşitli eriktenler kullanılarak belirlenen ıslatma açıları Tablo 2.4.'de verilmiştir. Islatma açısı, yüzey pürüzlülüğü, zaman, kullanılan akı ve akı etkinliği ve ölçüm sıcaklığı, gibi çeşitli faktörlerden etkilenir [1].

Tablo 2.4. Kurşunsuz lehimlerin ıslatma açısı [1]

Lehim alaşımı	Islatma Açısı (°)	Sıcaklık (°C)	Referans
Bi-42Sn	43+/-8	195	[66,79]
	37+/-7	215	
Sn-9Zn (ötektik)			[60]
Sn-5Sb	37		[80]
	36+/-3	260	[81]
	34<x<51		[70]
Sn-20In-2.8Ag	44+/-8	220	[65]
Sn-50In	63+/-6	215	[66]
	41+/-9	230	[1]
	33+/-5	245	[1]
Sn-3Cu	31		[79]
Sn-4Cu-0.5Ag	34<x<51		[70]
Sn-10Bi-0.8Cu	32	250	[62]

	42	340	[62]
Sn-10Bi-0.8Cu-1Zn	33	250	[62]
	38	295	[62]
	27	340	[62]
Sn-10Bi-5Sb	39	250	[62]
	48	340	[62]
Sn-10Bi-5Sb-1Zn	50	250	[62]
		295	[62]
	29	340	[62]
Sn-4.8Bi-3.4Ag	33+/-4	230	[81]
	31+/-4	245	[81]
	33+/-4	260	[81]
Sn-1Ag-1Sb	38	250	[62]
	43	340	[62]
Sn-1Ag-1Sb-1Zn	41	250	[62]
	41	295	[62]
	42	340	[62]
Sn-2.5Ag-0.8Cu-0.5Sb	44+/-8		[64,84]
	44+/-8		[63]

Tablo 2.4’de, Loomans [62] ve arkadaşları tarafından belirlenen veriler, farklı alaşımların ıslatma açılarını karşılaştırmak için en kullanışlı olanıdır, çünkü hepsi aynı akı kullanılarak ölçülmüştür. ıslatma açısı ölçülen alaşımlardan Sn-10Bi-0.8Cu alaşımı 250°C’de 32° ile en düşük ıslatma açısına sahiptir. Bu alaşıma ağırlıkça %1 Zn ilavesi ıslatma açısını önemli ölçüde etkilemez. Sıcaklık arttıkça ıslatma açısının düşmesi beklenir. Ancak, Loomans [62] ve arkadaşları tarafından bildirilen veriler, bu beklentiyi desteklememektedir. Bazı sistemlerde sıcaklığın artmasıyla ıslatma açısı azalırken bazı sistemlerde bunun tersinin olduğu görülmüştür. İlginçtir ki, Loomans [62] ve arkadaşları tarafından ölçülen alaşım sistemleri için, alaşım maddesi olarak Zn olmadığına, ölçüm sıcaklığı arttığında ıslatma açısı artmaktadır. Başka bir deyişle, alaşımlar bakır alt tabakasını 250°C’de, 340°C gibi daha yüksek sıcaklıklarda, olduğundan daha iyi ıslatır. Bununla birlikte, ağırlıkça %1 Zn ilavesi, daha yüksek sıcaklıklarda ıslatmanın gelişmesiyle ya da aynı kalmasıyla birlikte, tüm sistemlerde bu eğilimi durdurur [1].

Artaki ve arkadaşları [62] Sn-48Bi-3.4Ag alaşımı için ıslatma açısının sıcaklıktan nispeten bağımsız olduğunu kanıtlamışlardır. Vianco ve arkadaşları [82] iki lehim alaşımının ıslatma açısını ölçtüler. Oksijensiz, yüksek iletkenlikli (OFHC) Cu alt tabakaları üzerine üç farklı akı kullanarak, akı seçiminin, ıslatma açısını 34° ile 51° arasında değiştiği gösterdiler [1].

Pb içermeyen lehim alaşımlarının ıslatma açılarına ilişkin veriler birbirinden oldukça farklıdır ve alaşımların performansını anlamlı bir şekilde karşılaştırılmasını zorlaştırmaktadır. Bunun nedeni ise, ölçüm sıcaklığının, Cu alt tabakalarının hazırlanmasının, kullanılan akıların ve diğer deneysel değişkenlerin her araştırmacıya göre değişmesidir [1].

Kurşunsuz lehim alaşımlarının ıslatma açılarını ölçmek için standart bir prosedür yoktur. Sıcaklık ve alaşım faktörlerinin ıslatma açısını etkileme şekli tam olarak anlaşılmadığı için daha fazla araştırmaya ihtiyaç duyulmaktadır [1].

2.3.3 Islatma Kuvveti

Temas açısını ve dolayısıyla ıslatma derecesini belirlemek için sabit düşme yöntemine ek olarak, ıslatma derecesini belirlemek için katı bir alt tabaka bir sıvıya daldırıldığında ve daha sonra çıkarıldığında etkileşim kuvvetini ölçen bir ıslatma kuvveti dengesi de kullanılır. Islatma kuvveti temas açısıyla ilişkilendirilebilir, daha yüksek ıslatma kuvvetleri daha küçük ıslatma açılarını ve dolayısıyla daha iyi ıslatmayı gösterir. Her iki teknik de ıslatma derecesinin ölçülmesine izin verirken, ıslatma kuvveti dengesi ayrıca belirli bir kombinasyon için ıslatmanın maksimum miktarına ulaşmak için gereken sürenin ölçülmesine de izin verir. Bu, gerçek üretim operasyonları için önemli bir karakteristik özelliktir. Lehimleme işlemlerinin tamamlanma süreleri ortalama 60-90 saniyedir. Çok iyi ıslatma özelliklerine, yani düşük ıslatma açılarına veya yüksek ıslatma kuvvetlerine sahip olabilen, ancak maksimum ıslatmanın elde edilmesi için 2-5 dakika gibi uzun inkübasyon süreleri gerektiren lehimler, bilimsel açıdan uygun olabilir, ancak; verim kaybı nedeniyle ticari olarak geçerli olmayabilir. Islatma süresi bu nedenle lehimlerin endüstriyel olarak kullanılabilirliğini belirleyebilir [1].

Tablo 2.5’de görüldüğü gibi Pb içermeyen lehim alaşımlarının tümü, ötektik Pb-Sn'den önemli ölçüde daha düşük ıslatma kuvvetlerine (F_{max}) sahiptir. Akı seçiminin ölçülen ıslatma kuvvetleri üzerinde de önemli bir etkisi olsa da, eğilim aynı kalmaktadır. Sn-%9

ağ. Zn alaşımı özellikle düşük F_{max} değerlerine sahiptir ve daha az akı kullanıldığında Cu alt tabakasını hiç ıslatmadığı gözlemlendi. Islatma süresinde büyük farklılıklar olsa da, bunların tümü 3 sn veya bu süreden daha azdır; üretim yönünden bakıldığında ise, T_I 'deki değişiklikler endişe verici düzeyde değildir. Aynı ölçümler erime noktasının üzerindeki 62°C sıcaklıkta tekrarlanarak, sonuçlar Tablo 2.6. a ve b'de gösterilmektedir [1].

Tablo 2.5. Çıplak Cu parçalarında ıslatma kuvveti, 240°C [1]

Alaşım	T_m (°C)	$F_{max(avg)}$ (mN)	$T_{I(avg)}$ (s)
(a) Temiz sıvı akı			
Sn-37Pb	183	5.025	0.457
Sn-3.5Ag	221	4.816	1.557
Sn-58Bi	139	3.814	0.486
Sn-9Zn	199	1.931	1.029
(b) Temiz olmayan akı			
Sn-37Pb	183	4.396	1.100
Sn-3.5Ag	221	2.594	3.057
Sn-58Bi	139	2.570	1.714
Sn-9Zn	199	-5.790	-

Tablo 2.6. Erime noktasının 62°C üzerindeki, çıplak Cu parçalarında ıslatma kuvveti [1]

Alaşım	T_e (°C)	$F_{max(ort.)}$ (mN)	$T_{I(ort.)}$ (s)	$T_{deneysel}$ (°C)
(a) Temiz sıvı akı				
Sn-37Pb	183	4.792	0.385	245
Sn-3.5Ag	221	4.822	0.400	283
Sn-58Bi	139	3.518	0.608	201
Sn-9Zn	199	1.772	0.625	261
(b) Temiz olmayan akı				
Sn-37Pb	183	3.486	1.570	
Sn-3.5Ag	221	4.013	0.785	
Sn-58Bi	139	2.410	4.092	
Sn-9Zn	199	-4.300	X	

Her alaşım için yeniden akış sıcaklığı erime sıcaklığına bağlı olacağından, erime noktasının 62°C üzerinde ölçümler yapıldı. Ötektik Pb-Sn lehimler için, 140°C erime

sıcaklığına sahip bir lehim alaşımı, 220-240°C aralığından çok daha düşük olan 180-190°C civarında yeniden akıtılabilir. Üretim dikkate alındığında, alaşımların ıslatma kuvvetinin erime noktasının üzerinde sabit bir sıcaklık değerinde ölçülmesi, Cu üzerindeki ıslatma kuvvetinin daha doğru şekilde karakterize edilebileceği düşünülmüştür [1].

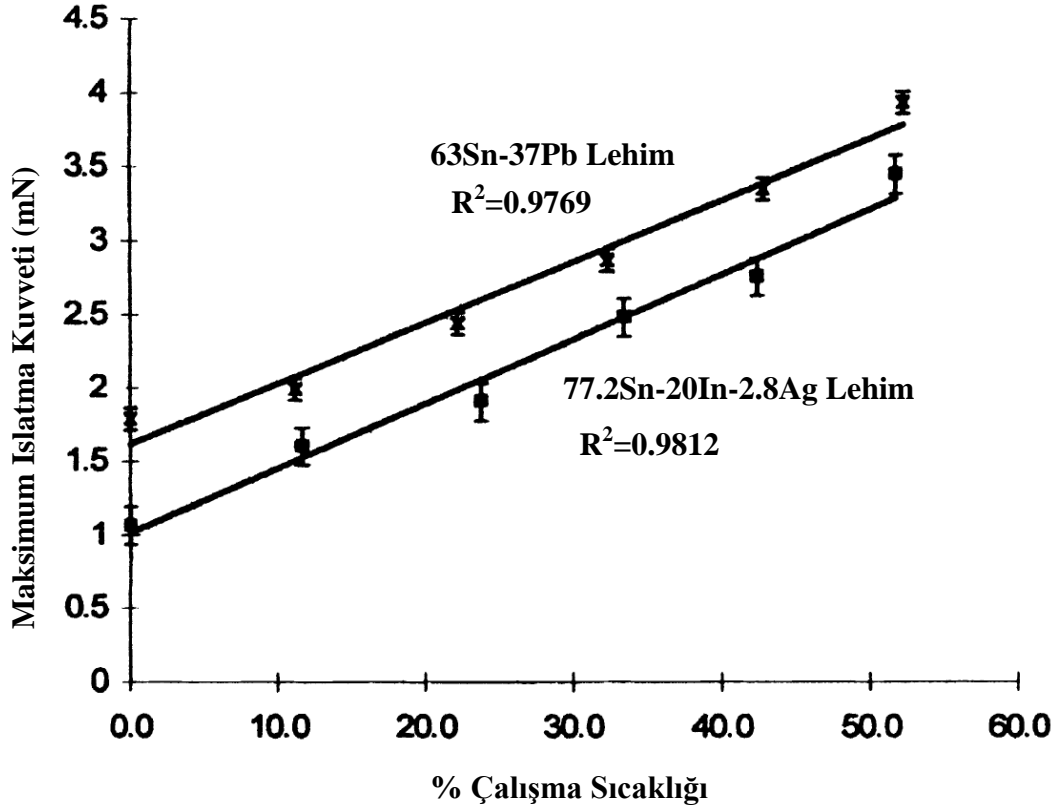
Sn-%9 ağ.Zn lehim alaşımı, bakır ile temas ettiğinde zayıf ıslatma özelliklerine sahiptir. ıslatma açısı veya ıslatma kuvvetinin etkileşiminin kapsamı, kullanılan akı tipine bağlıdır. Daha etkin bir akışın kullanılması, sürekli olarak daha yüksek ıslatma kuvvetlerinin yansıttığı gibi daha iyi etkileşim ile sonuçlanır. Bunun nedeni, daha etkin akının (bu durumda temiz olmayana kıyasla sıvı temizleme) yüzey oksidasyon katmanlarının çıkarılmasında da daha etkili olmasıdır [1].

Sonuçların genel eğilimi önemli ölçüde farklı olmasa da, bazı değişiklikler bulunmaktadır. Sn-%3.5 ağ.Ag alaşımının ıslatma kuvvetinin, ötektik Pb-Sn'nin ıslatma kuvvetinden daha iyi olmasa da karşılaştırılabilir olduğu görülmektedir. Sn-%9 ağ.Zn alaşımının gösterdiği ıslatma kuvveti, temiz olmayan bir akı kullanıldığında meydana gelen ıslatmayla birlikte diğerlerinden önemli ölçüde daha düşüktür [1].

Depolanan yüzey enerjilerinin ıslatma kuvveti üzerindeki etkisini belirlemek için yapılan bir çalışmada ötektik Pb-Sn lehimin davranışı Sn-%20 ağ.Zn-%2.8 ağ.Ag bir lehimle karşılaştırılmıştır [83]. Sonuçlar Şekil 2.2'de gösterilmektedir. Bakır parçaları soğuk haddelenmiştir, soğuk iş başlangıcında parçalarda depolanan enerji %10, 20, 30, 40 ve %50 idi ve bu işlemin ardından ıslatma kuvveti de ölçülmüştür. ıslatma kuvvetinin, test edilen soğuk çalışma aralığı boyunca, soğuk çalışma kapsamı ile doğrusal olarak arttığı gözlemlenmiştir. Üçlü Sn-In-Ag alaşımının ıslatma kuvvetleri tipik olarak Pb-Sn alaşımından 0,6-0,7 mN daha düşük olmasına rağmen, bu eğilim her iki lehim alaşımı için de aynıydı. ıslatma kuvvetinin artmasıyla birlikte ıslatma süresinin de (T_I) azaldığı bulundu. Ancak, T_I 'nin tüm değerleri 0,4 s veya daha azdı ve bu nedenle endüstriyel lehimleme işlemleri üzerinde hiçbir etkisi yoktur [1].

Romm ve Abbott [84] ötektik Pb-Sn ve Pb içermeyen Sn-Ag-Cu-Sb alaşımlarının ıslatma davranışını karşılaştırdı. Çalışmalarının amacı, Pb içermeyen lehim alaşımlarının kendilerini test etmek yerine, Pb içermeyen kaplamaların etkilerini belirlemek ve bunu Pb-Sn kurşun kaplama ile karşılaştırmaktı. Bununla birlikte, test

edilen kombinasyonlar için, ıslatma açısı ile lehim bağlantısının güvenilirliği veya mekanik mukavemeti arasında bir korelasyon olmadığını tespit ettiler. Tüm kombinasyonların sıcaklık döngüsü testlerini hatasız olarak geçtiğini gördüler [1].



Şekil 2.2. Depolanan yüzey enerjilerinin ıslatma kuvvetine etkisi [1]

2.4 Lehimin Alt Tabaka ile Etkileşimi

Lehimleme sırasında erimiş metal (lehim) ve alt tabaka veya PCB üzerindeki Cu ped ile temas ederek, reaksiyona girer. Bu etkileşimin doğası, lehimin bileşimine ve bileşenlerin her birinin Cu ped ile nasıl etkileşime girdiğine bağlıdır. Bakır pedin lehim ile kaplanıp kaplanmadığı, ki bu sıklıkla kaplanır, lehimin bileşenleri ile etkileşimini de etkiler [1]. Burada temel nokta, doğrudan lehim ile Cu pedi arasında oluşan bağın kalitesine bağlı olarak lehim bağlantısının uzun vadeli güvenilirliğidir [1].

Lehimleme sırasında alt katmanda ve lehim arayüzünde oluşan çok sayıda intermetalik bileşik olabilir. Bununla birlikte, sadece lehimleme işlemi sırasında ilk oluşan intermetalik bileşiklerin ıslatma ve lehimlenebilirlik üzerinde önemli bir etkisi vardır. Lehim alt katman arayüzünde intermetalik bileşikler oluştuğunda, arayüz enerjisi düşer,

bu da ıslatmanın gerçekleştirdiğini gösterir ve arayüzdeki net serbest enerjinin azalmasına neden olur [1].

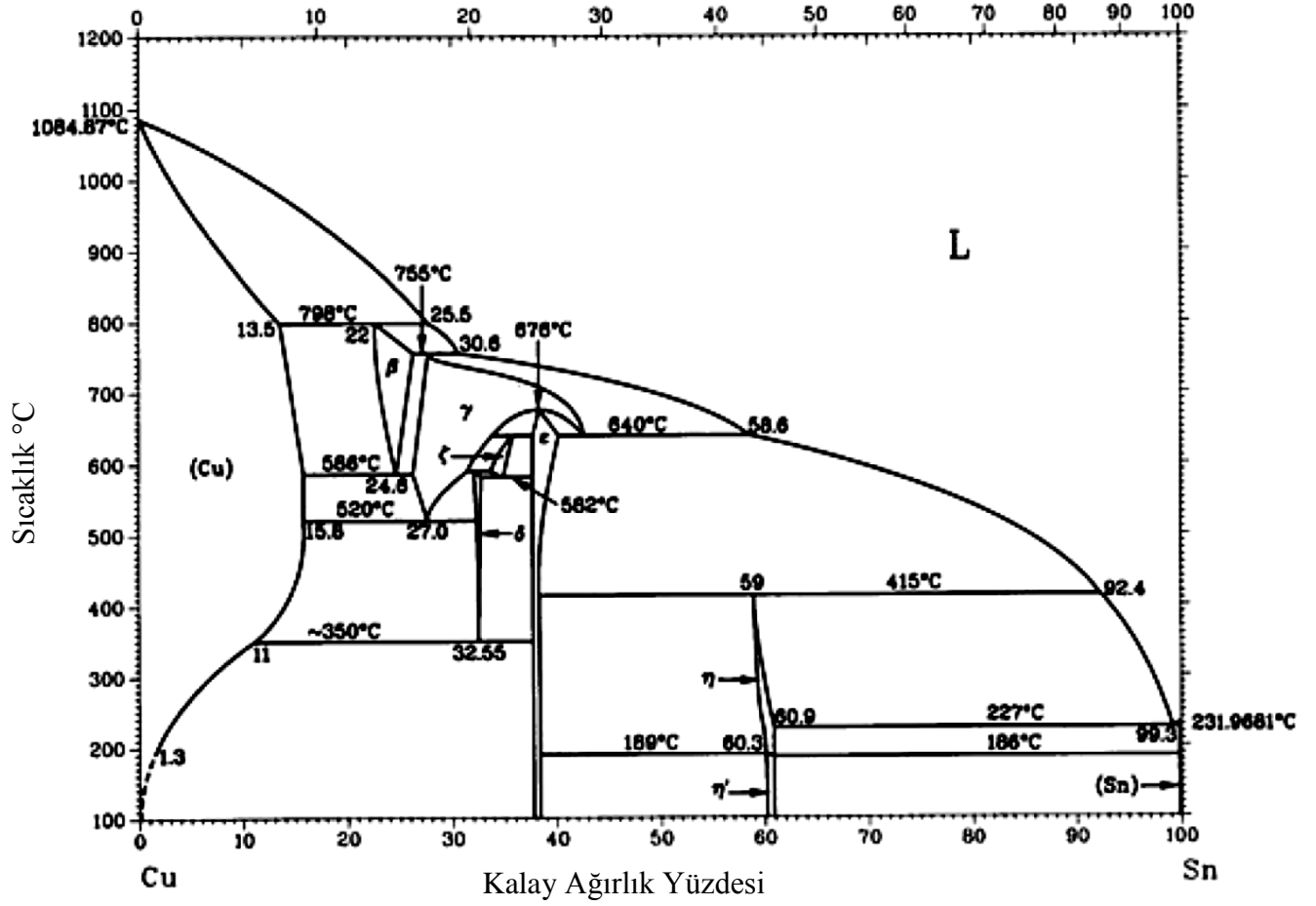
İyi bir lehim bağlantısının oluşumu, lehim ve Cu alt tabaka arasında intermetalik bileşiklerin oluşumuna bağlıdır. Bununla birlikte, oluşan intermetalik bileşiklerin türleri, büyüme hızları ve lehim bağlantısının uzun vadeli güvenilirliğine etkileri çok uzun süredir araştırma konusu olmuştur. Araştırmalarda daha çok, Cu-Sn intermetalik bileşiklerinin, lehim bağlantı kuvveti ve uzun vadeli güvenilirlik üzerindeki etkilerine odaklanılmıştır. Sn, In ve Bi, Pb içermeyen lehim alaşımlarının ana bileşenleri olarak kullanıldığı için bu ana bileşenlerin, Cu ile etkileşimini inceleyelim [1].

2.4.1 Cu-Sn

Cu-Sn faz diyagramından, 300°C'nin altında stabil olan intermetalik fazlar ϵ ve η fazlarıdır. ϵ fazı, ağırlıkça %25.7 ile %27.1 Sn arasında bir bileşim aralığına sahiptir ve Cu_3Sn bileşimine çok yakındır. η fazı ağırlıkça %44.8 ile %45.5 arasında Sn konsantrasyonuna sahiptir ve Cu_6Sn_5 bileşimine karşılık gelir. Pb-Sn lehim-Cu alt tabaka etkileşimlerinin araştırmalarında her iki faz da tanımlanmıştır [85-86]. Bu fazların büyümesinin Arrhenius ilişkisine göre 90-170°C aralığında, Cu_6Sn_5 için aktivasyon enerjisinin 0.41 ile 0.5 eV arasında ve Cu_3Sn için 1.06 ile 1.27 eV arasında, olduğu rapor edilmiştir [87]. Bu, Cu_6Sn_5 'in büyümesinin, bu sıcaklık koşulları altında Cu_3Sn 'den daha hızlı olacağını gösterir. Bu veriler, tek kristal Cu alt tabaka üzerinde Sn-%40 ağırlıkça Pb lehim pastasının reaksiyona sokulmasıyla elde edilir.

Mikro elektronikte kullanılan bakır normalde aşağıdaki üç biçimden birinde bulunur: (a) kurşun çerçeveler için haddelenmiş bakır, (b) kurşun izleri için kullanılan haddelenmiş bakır folyo ve (c) elektrolizle kaplanmış bakır yollar veya pedler. Bu bakır türleri üzerinde Cu_6Sn_5 ve Cu_3Sn 'nin oluşumu ve büyümesi için aktivasyon enerjilerinin tek kristal bakırınkinden farklı olması beklenir ve bu konuyla ilgili daha fazla araştırmaya ihtiyaç duyulmaktadır [1]. Cu-Sn sistemine ait ikili faz diyagramı Şekil 2.3'de gösterilmiştir.

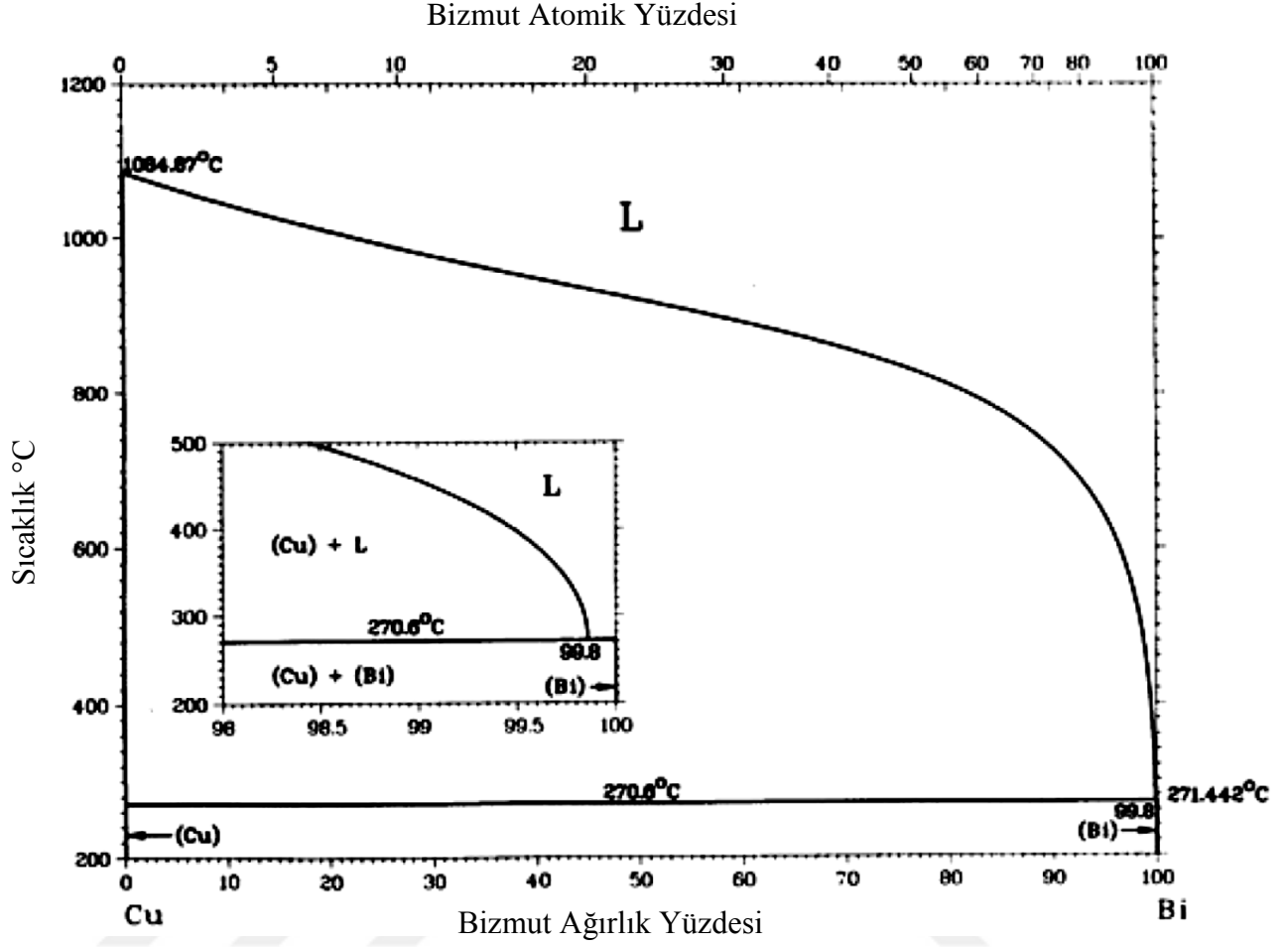
Kalay Atomik Yüzdesi



Şekil 2.3. Cu-Sn ikili faz diyagramı [88]

2.4.2 Bi-Cu

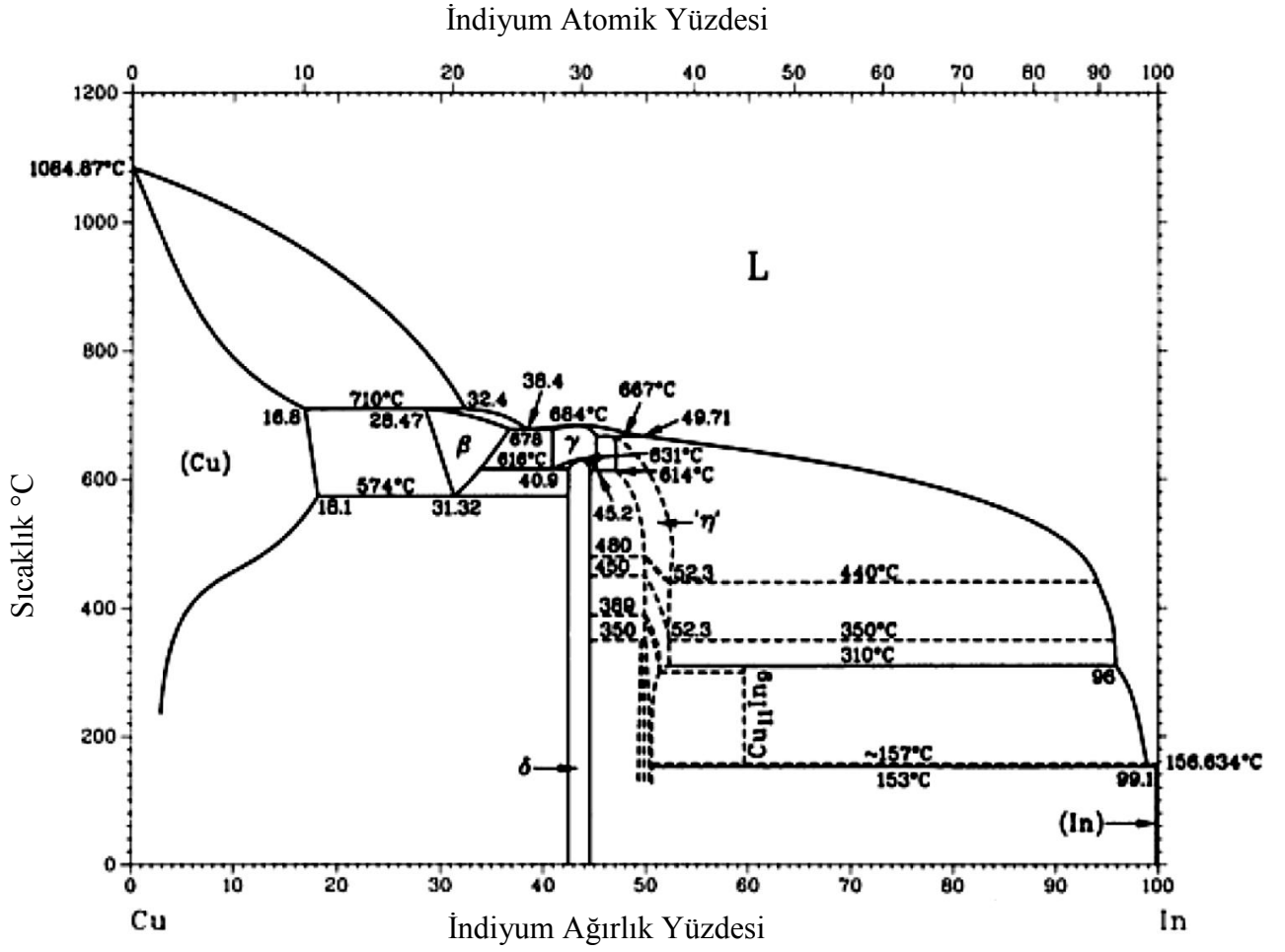
Bi-Cu ikili sistemi, ağırlıkça %99,5 Bi ötektik bileşimine sahiptir ve ötektik sıcaklığı 270°C'dir. Bi, Cu ile intermetalik bileşikler oluşturmaz [1]. Bi-Cu sistemine ait ikili faz diyagramı Şekil 2.4'de gösterilmiştir.



Şekil 2.4. Cu-Bi ikili faz diyagramı [88]

2.4.3 Cu-In

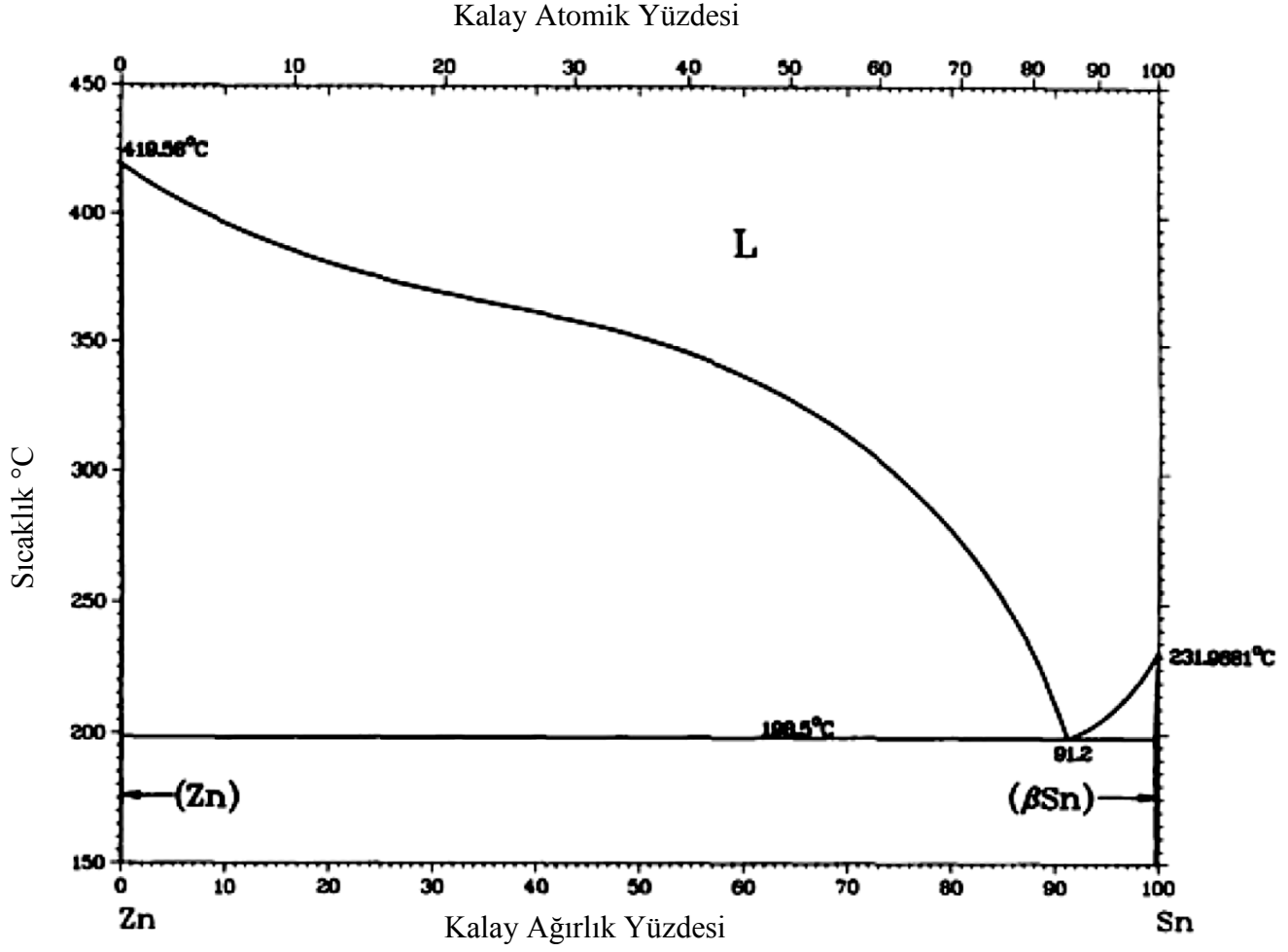
Cu-In alaşım sisteminde 300°C'nin altındaki sıcaklıklarda, üç intermetalik faz oluşur. δ fazı ağırlıkça %28 ila %31 arasında In konsantrasyonlarına sahiptir, η fazındaki In konsantrasyonu ağırlıkça %35 ila %39 arasındadır ve ϕ fazındaki In konsantrasyonu ise ağırlıkça %41 ila 42 arasındadır. Büyüme oranları ve aktivasyon enerjisi hakkında yeterli veriye rastlanmamaktadır [1]. Cu-In sistemine ait ikili faz diyagramı Şekil 2.5'de gösterilmiştir.



Şekil 2.5. Cu-In ikili faz diyagramı [88]

2.4.4 Sn-Zn

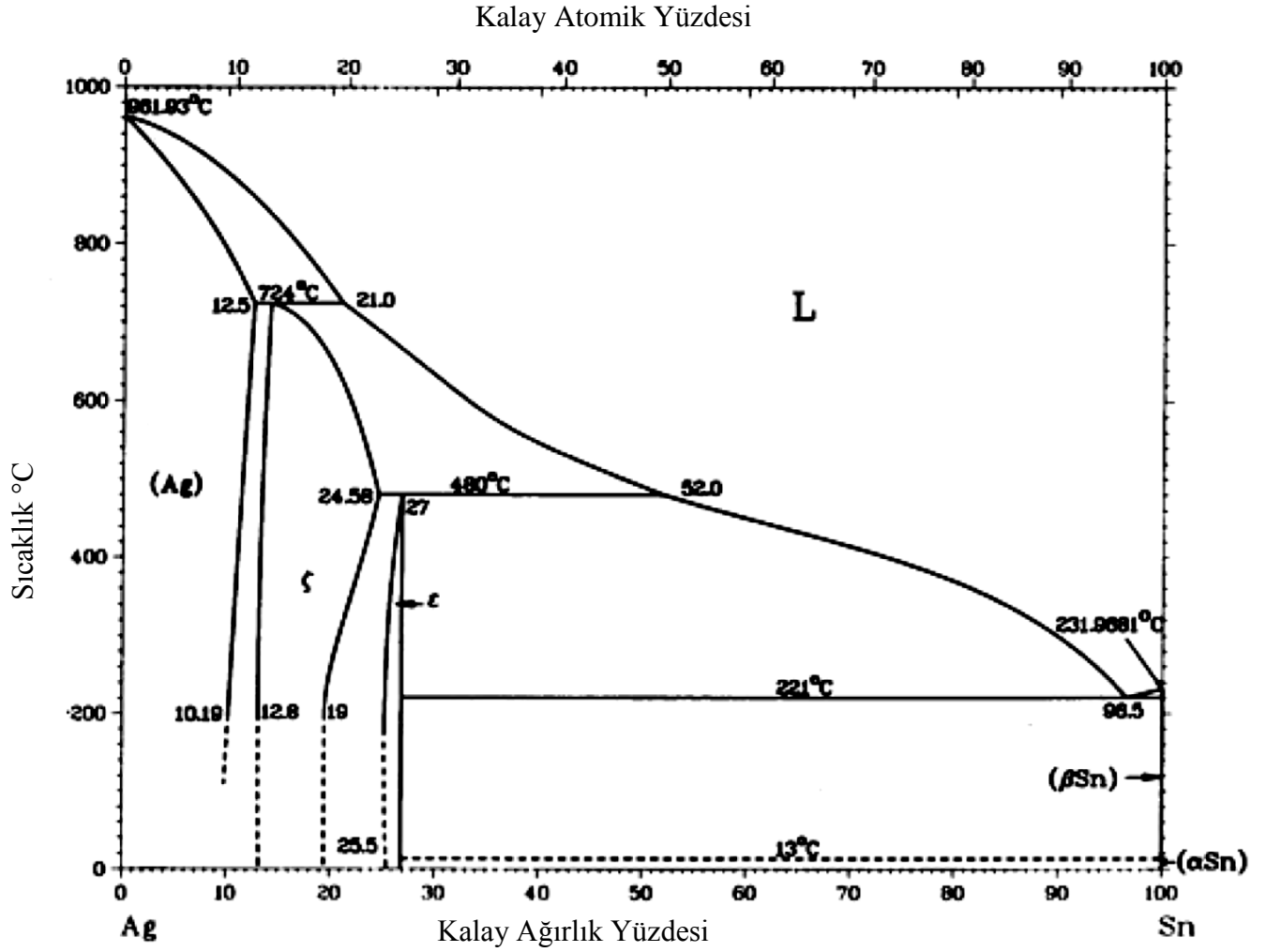
Sn-Zn sistemi, Sn-%9 ağırlıkça Zn ötektik bileşimi ve 198°C ötektik sıcaklığı ile ötektik davranış sergiler. Sn'nin Zn içindeki katı çözünürlüğü ağırlıkça %0.05'ten azdır. Zn'nin Sn içindeki maksimum katı çözünürlüğünün ağırlıkça yaklaşık %2 olduğu tahmin edilmektedir [89]. Zn bakımından zengin faz saf Zn olduğundan, bakır alt tabakalar üzerinde Sn-Zn lehimleri kullanıldığında Zn-Cu'nun intermetalik bileşiklerinin oluşması gözlemlenebilir [1]. Sn-Zn sistemine ait ikili faz diyagramı Şekil 2.6'de gösterilmiştir.



Şekil 2.6. Zn-Sn ikili faz diyagramı [88]

2.4.5 Ag-Sn

Ag-Sn sistemi, Sn-%3.5ağ.Ag ötektik bileşimi ve 221°C ötektik sıcaklığı sahiptir. Sn bakımından zengin intermetalik faz (ϵ), Ag_3Sn 'dir. Sn konsantrasyonu ağırlıkça %25.5 ile %26 arasında değişir. Ag'nin Sn içindeki katı çözünürlüğü ağırlıkça %0.1'den azdır [1]. Ag-Sn sistemine ait ikili faz diyagramı Şekil 2.7'de gösterilmiştir.



Şekil 2.7. Ag-Sn ikili faz diyagramı [88]

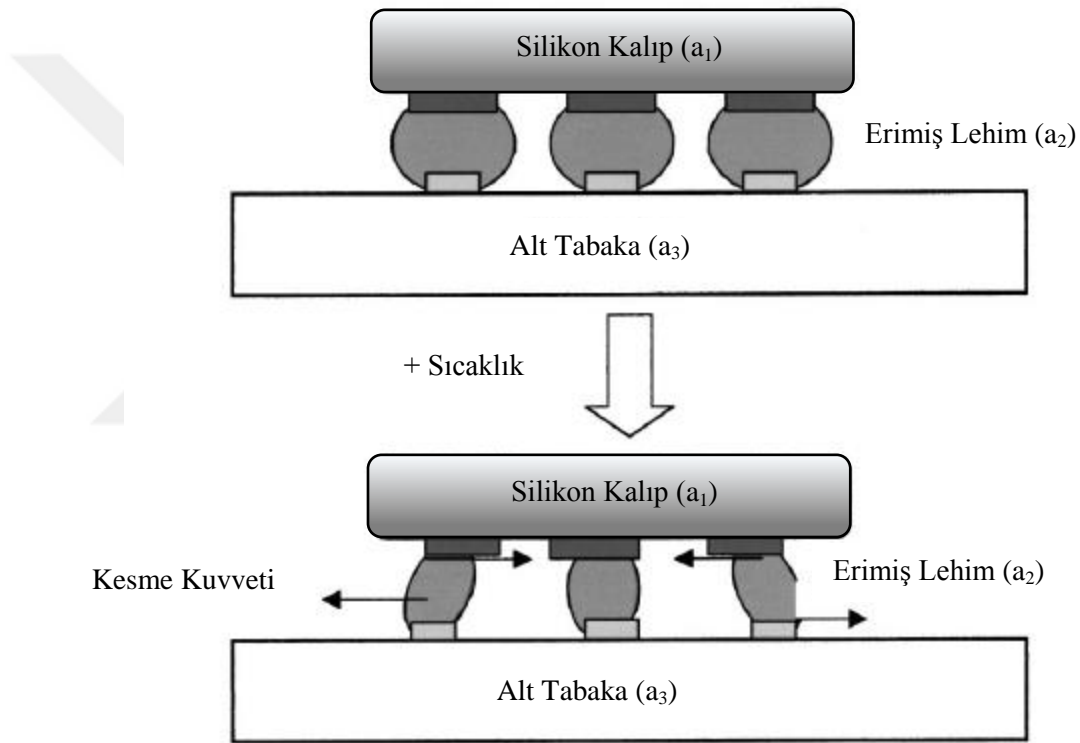
2.4.6 Küçük bileşenler

Ana bileşenler olmasa da, Pb içermeyen lehimler az miktarda Zn, Ag, Sb ve Mg içerebilir. Cu-Zn sistemi, nispeten geniş stokiometri aralıkları ile üç ara faz oluşturur; bunların hiçbiri intermetalik bileşikler olarak adlandırılmaz. Ag-Cu sistemi, intermetalik bileşikler veya faz oluşumu olmaksızın Pb-Sn'ye çok benzer, ötektik davranış sergiler. Sb, Cu ile iki ara faz oluşturur. ϵ fazı, ağırlıkça %18.3 ile %19.7 arasında Sb konsantrasyonuna sahiptir. İkinci ara faz, ağırlıkça %32.5 ila 33.4 Sb arasında bir bileşim aralığına sahiptir ve Cu_2Sb bileşiğine karşılık gelir [1].

2.5 Mekanik Özellikler

Elektronik bir cihaz çalışırken, lehim bağlantıları mekanik gerilimlere maruz kalır. Bu gerilimlerin birincil nedeni, elektronik bileşenin ve kartın farklı termal genişleme

katsayılarına sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Ters çevrilmiş mikro devre paketi durumunda, silikon kalıp ile alt tabaka arasındaki bu gerilimlerin nasıl olduğunu gösteren örnek, Şekil 2.8'de gösterilmektedir. Oda sıcaklığı, zorlanmamış koşulları temsil ediyorsa, sistemin sıcaklığı arttıkça, levha, bileşenden daha fazla genişler, bu da lehim bilyesi bağlantısının kesme gerilimine maruz kalmasına neden olur. Sistem "açıldığında" ve "kapatıldığında", termal döngüye maruz kalır, bu da lehim bağlantısının döngüsel kesme gerilmelerine maruz kalmasıyla sonuçlanır. Ortaya çıkan kesme gerilimi, belirli lehim malzemesinin kesme modülü tarafından belirlenir [1].

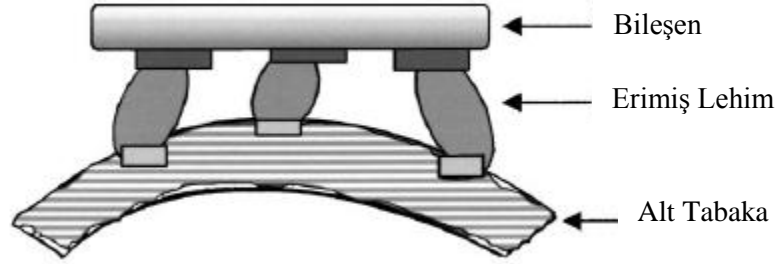


Şekil 2.8. Kalıp (a₁), lehim (a₂) ve alt tabaka (a₃) arasındaki CTE uyumsuzluğu nedeniyle termal döngü sırasında kesme gerilimine maruz kalan lehim

Lehim bağlantıları böylece döngüsel yüklemeye tabi tutulur ve yorulma ömrüne bağlı olarak, yorulma hatası başlamadan önceki döngü sayısı belirlenir. Lehim bağlantısının plastik deformasyonu, diferansiyel termal genişmeden kaynaklanan kesme geriliminin akma için kesme gerilimini aşması durumunda mümkündür [1].

Lehim eklemi ayrıca, tipik olarak, Şekil 2.9'de şematik olarak gösterildiği gibi, levha veya alt tabaka büküldüğünde, çekme yüklemesine maruz kalır. Bu, ürünün mekanik olarak taşınması sırasında, montajdan sonra testde ve bazen bitmiş ürünün bağlantısına

kenetlendiğinde olabilir. Bu nedenle, akma dayanımı, UTS ve elastik modül gibi çekme özellikleri, lehim bağlantısının hatasız dayanabileceği çekme deformasyonunun derecesini belirlemek için gereklidir [1].



Şekil 2.9. Montajın taşınması sırasında alt tabakanın esnemesi (bükülmesi) nedeniyle çekme yüklemesine maruz kalan Lehim Tümsekleri (eklemler) [1]

Elektronik cihazların kullanıldığı ortamlardan bazıları titreşime maruz kalmakta olup, bunun en önemli örnekleri otomotiv ve havacılık uygulamalarıdır. Cihazlar, lehim bağlantısının döngüsel yüklemeye maruz kalmasının doğrudan sonucu olarak çok sayıda titreşime maruz kalabilir. Bu tür uygulamalar için, yükleme özelliklerinin bir fonksiyonu olarak lehim bağlantısının yorulma ömrü kritik hale gelir [1].

Cihaz fiilen çalışırken, diferansiyel termal genleşme, lehim bağlantısına sabit bir statik yüklemenin uygulanmasına neden olabilir. Çoğu lehim için oda sıcaklığı bile 0,6'dan daha büyük olan homolog bir sıcaklığı temsil ettiğinden, bu, lehim bağlantısının sürünmeye duyarlı olabileceği koşullar altında yüklenmesine, yani yüksek sıcaklıklarda sabit yüke maruz kalmasına neden olur[1].

2.5.1 Çekme Özellikleri

Bazı lehim alaşımlarının elastik modül, akma mukavemeti, nihai çekme mukavemeti ve uzama yüzdesi açısından süneklik hakkındaki bilgiler Tablo 2.7'de özetlenmiştir. Elastik modül değeri en düşük olan In-%48 ağ.Sn ötektik alaşımı için 19,5 GPa iken en yüksek değer ise 50 GPa ile Sn-%3.5ağ.Ag alaşımına aittir. Sn-%37ağ.Pb ötektik lehimin elastik modülü 39 GPa'dır. Bi-%42 ağ.Sn alaşımı ise , Sn-%37 ağ.Pb'ye yakın olan 42 GPa'lık bir elastik modüle sahiptir [1].

Tablo 2.7. Pb içermeyen lehimlerin çekme özellikleri [1]

Lehim Bileşimleri	Elastik modülü (GPa)	Referans	Akma Dayanımı (MPa)	Referans	Nihai Gerilme Kuvveti (Mpa)	Referans	Yüzde Uzama	Referans
Sn-37Pb	39,30.5	[23]			20°C de 19, 100°C de 4	[90]		
Bi-41Sn-1Ag							25°C de 40%	[91]
Bi-41Sn-1Pb					0,4/s gerinim hızında 73, döküm işleme	[23]		
					Belirtilmemiş gerinim hızında ve işlemede 55	[23]		
					Belirtilmemiş gerinim hızında ve toplu işlemede 71	[23]		
Bi-42Sn	42	[23]	41	[23]			0,005<X<0,0033 gerilme hızında %73-150	[92]
							-65°C de 4.9%, 25°C de 20%, 85°C de 159%	[91]
In-48Sn (ötektik)	23.6	[23]						
	19.5	[23]						
Sn-2.5Ag-0.8Cu-0.5Sb	29.4	[63]			39.5	[63]	42.4%	[63]
Sn-3.5Ag	50	[23]	48	[23]	5°C/dk soğutmada 42,8	[60]	5°C/dk da 42.5%	[60]
					0,022 gerinim hızında 55, döküm işleme	[23]		
					0.000033 gerinim hızında 37, döküm işleme	[23]		
					0,00015 gerinim hızında 20, döküm, 25°C'de yaşlandırılmış	[23]		
					0.0008 gerinim hızında 56, soğuk haddelenmiş sac	[23]		
					20°C de 37	[90]		
Sn-5Ag			34	[23]				
Sn-3.5Ag-<6Bi					5°C/ dk soğutmada 71.7	[23]	5°C/dak soğutmada %15	[60]
							0,00015/s gerinim hızında %40	[92]

						0,033/s gerinim hızında %25	[92]
						0,000033/s gerinim hızında %31	[92]
Sn-3.5Ag-1Zn					5°C/dk soğutmada 52.2	[60]	5°C/dk soğutmada %27,5 [60]
Sn-3.5Ag-1Zn-0.5Cu					5°C/dk soğutmada 48,3	[60]	5°C/dk soğutmada %7,0 [60]
Sn-42Bi							16.6% [92]
Sn-5Bi-3.5Ag							5°C/dk soğutmada %15 [60]
Sn-20In-2.8Ag	20°C de 38.6	[44]					Belirtilmemiş soğutma hızında %47 [60, 65]
					46.9	[65]	
Sn-30In			17	[23]			
Sn-42In							5/s gerinim hızında %38 [92]
Sn-60In			4.5	[23]			
Sn-5In-3.5Ag					5°C/dk soğutmada 62.1	[60]	5°C/dk soğutmada %20 [60]
Sn-8Zn-4In					5°C/dk soğutma hızında 50,3	[60]	5°C/dk soğutma hızında %25 [60]
Sn-8Zn-5In(0.1-0.5)Ag					5°C/dk soğutma hızında 52,4 (%0,1 Ag)	[60]	5°C/dk soğutma hızında %40 (%0,1 Ag) [60]
Sn-9Zn-10In					55.2	[67]	
Sn-9Zn (ötektik)					5°C/dk soğutma hızında 64,8	[60]	5°C/dk soğutma hızında %45 [60]
					103	[67]	
Sn-9Zn-5In					62.1	[67]	
Sn-5Sb					20°C de 31	[90]	20°C de 25% [90]
					100°C de 20	[90]	100°C de 31% [90]

Akma mukavemeti, nihai gerilme mukavemeti ve süneklik (% uzama) mikro yapıya ve gerinim oranına bağlı olması beklenir. Mikro yapı ise soğuma hızı, kimyasal bileşime ve termal geçişlere bağlıdır. UTS ve süneklik verileri, mikro yapı ve gerinim hızına olan bu bağımlılığı yansıtır. Sn-%3.5ağ.Ag alaşımı, 0.022/s gerinim hızında 55 MPa UTS'ye sahiptir. Yaşlanma yapıldığında ve 0,0015/s gerinim hızında test edildiğinde, UTS 20 MPa'ya düşer. Yaşlanma olmadan, gerinim hızı 0,022'den 0,000033/s'ye düşürüldüğünde, UTS de 55'ten 37 MPa'ya düşer. Tamamı 5°C/dak hızında soğutulan lehim alaşımının UTS değerleri karşılaştırıldığında, Sn-% ağ.5Bi- %3.5 ağ.Ag sistemi 71.7 MPa ile en yüksek dayanıma sahiptir. Çoğu lehim alaşımının UTS'si 40-50 MPa aralığındadır. Sn-%40 ağ.Pb alaşımı için UTS, 20°C'de 19 MPa ve 100°C'de 4 MPa'dır [1].

Veriler incelendiğinde, Pb içermeyen lehimlerin tümü, ötektiğe yakın Sn-%40 ağ.Pb'den önemli ölçüde daha yüksek UTS değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, UTS büyük ölçüde mikro yapıya bağlıdır ve verilerin büyük bir dikkatle yorumlanması gerekir. Tablo 2.7.'da yer alan gerinim oranları incelenirken alaşımın mikro yapısı ve sağlığının etkileri de dikkate alınması gerekir. Mikro elektronikte özellikle ilgili olan nokta, sıcaklık arttıka güç kaybının olmasıdır. Daha yüksek sıcaklıklarda önemli bir mukavemet kaybı, alaşımın sürünme deformasyonuna ve yorulma arızasına karşı daha duyarlı olmasına neden olur. Sn-%40 ağ.Pb alaşımının UTS'si, sıcaklık 20'den 100°C 'ye yükseltildiğinde 19'dan 4 MPa'ya düşer, bu da gerilme mukavemetinde %79'luk bir kayıp anlamına gelir. Sn-%5 ağ.Sb alaşımı, sıcaklıktaki aynı artış için gerilme mukavemetinin %35'ini kaybeder [1].

Pb içermeyen lehim alaşımının sünekliği de işleme ve test koşullarına bağlıdır. Bi-%42 ağ.Sn verileri bunu çok iyi göstermektedir. Gerinim hızı 0,005 ila 0,0033/s arasında değişirken, uzama %73 ila 150 arasında değişmektedir. Benzer şekilde, uzama -65°C 'de %4.9 iken, 85°C'de %159'dur. Genel olarak, alaşımın sünekliği %15-40 aralığındadır ve Sn-%5 ağ.Bi-%3.5 ağ.Ag alaşımı %15 en düşük sünekliğe sahiptir. Veriler incelendiğinde, düşük UTS değerleri ile sünekliğin arttığı eğilimindedir. Mikro yapı ise bu eğilimi etkilemede önemli bir rol oynamaktadır [1].

2.5.2 Kesme Özellikleri

Daha önce de belirtildiği gibi, kullanımı boyunca mikro elektronik sistemlerdeki lehim bağlantıları çoğu zaman kayma yüküne maruz kalır. Lehim alaşımları için kesme özellikleri, yani kesme modülü ve kesme mukavemeti verileri Tablo 2.8'de verilmiştir. Şaşırtıcı olan, Sn-%42 ağ.Bi haricinde, alaşımlar için hem kesme modülü hem de kesme mukavemeti verileri mevcut değildir, yani alaşımların her biri için yalnızca bir veri mevcuttur. Mevcut kesme modülleri Sn-%42 ağ.Bi ve Bi-%41ağ.Sn-%1 ağ.Ag için sırasıyla 7,5 ve 7,8 GPa'dır. Kesme modülü (G) için deneysel değerlerin yoksa, elastik modül (E) ve Poisson oranı (ν) değerleri Denklem 2.3'de yerine yazarak hesaplanabilir [94].

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (2.3)$$

Tablo 2.8.Kesme özellikleri [1]

Lehim bileşimi	Kayma modülü (GPa)	Referans	Kesme Kuvveti (MPa)	Referans
Sn-40Pb			20°C'de 34; 100°C'de 21	[94]
Bi-41Sn-1Ag	25°C'de yaklaşık 7,8, %0,5 gerinim, 1 Hz, 2000 devir	[91]		
Bi-42Sn	15.8		0,0033/s<X<0,005/s gerinim hızında 35	[92]
			0,4/s gerinim hızında 55	[95]
			0,4/s gerinim hızında 23,7	[96]
			0,001/s gerinim hızında 26	[92]
			0.00062 gerilim hızında 26, 25°C	[23]
			0.0015 gerilim hızında 28, 60°C	[23]
In-48Sn (ötektik)	8.87		yaklaşık 25°C'de 7,8, %0,5 gerinim, 1 Hz, 2000 döngü	[23]
			Cu alt tabaka üzerinde 0,0081/s gerinim hızında 11,5, 40°C	[23]
			Cu alt tabaka üzerinde 0,083/s de 7 gerinim hızında, 75°C	[23]
			Cu alt tabaka üzerinde 0,083/s de 3,5 gerinim hızında, 100°C	[23]
Sn-3.5Ag	18.8		20°C de 38; 100°C de 23	[94]
			0,004/s gerinim hızında 27, Cu bindirmeli kesme bağlantısı, 25°C	[23]
			4/s gerinim hızında 39, Bakır halka ve tapa, 25°C	[23]

			0,004/s gerinim hızında 14, Cu bindirmeli kesme bağlantısı	[23]
Sn-4.8Bi-3.4Ag			81+/-11, dolgu halkasının testi	[97]
Sn-42Bi	25°C'de yaklaşık 7,5, %0,5 gerinim, 2000 döngüde 1 Hz	[91]	0,0001/s gerinim hızında 20, 3 günlük (Cu)	[71]
			0,0001/s gerinim hızında 30, 30 günlük (Cu)	[71]
			0,001/s gerinim hızında 30, 3 günlük (Cu)	[71]
			0,001/s gerinim hızında 32, 30 günlük (Cu)	[71]
Sn-5Bi-3.5Ag			0,0033/s<X<0,005/s gerinim hızında 35	[92]
Sn-20In-2.8Ag	14.5		20°C'de 33.1	[65]
Sn-5Sb			25°C'de 37; 21 100°C'de	[94]
			20°C'de 28; 100°C'de 14	[90]
Sn-2.5Ag-0.8Cu-0.5Sb	11.1			

Elastik modül verilerinin mevcut olduğu alaşımlar için, ν için 0,33 değeri varsayılarak kayma modülü hesaplanarak Tablo 2.8'a dahil edildi. Tablo 2.9 ise farklı sıcaklıklarda kayma mukavemeti değerleri verildi. Yüksek sıcaklıklarda, kayma mukavemetinde kayıp %40-50 aralığında olduğu görüldü ki, bu da önemli bir kayıp demektir. In-%48 ağ.Sn alaşımı için kesme mukavemetindeki kayıp %75'tir. Çekme mukavemeti ve kesme mukavemeti verilerinin test sıcaklığı ve gerinim hızına güçlü bir şekilde bağlı olması normaldir, çünkü lehim alaşımları tipik olarak oda sıcaklığı koşullarında bile 0,5'ten daha yüksek bir homolog sıcaklıktadır [1].

Tablo 2.9 Sıcaklık artışı ile kayma mukavemetinde kayıp [1]

Alaşım Bileşimi	Kesme Kuvveti (MPa)			Kayıp (%)
	20°C	25°C	100°C	
Sn-40Pb	34.0		21.0	38
In-48Sn		14.0	3.5	75
Sn-3.5Ag		27.0	14.0	48
	38.0		23.0	39
Sn-5Sb	37.0		21.0	43
	28.0		14.0	50

2.5.3 Sürünme

Sürünme, bir malzemenin yüksek sıcaklıkta sabit bir yük altındayken bozulması için gereken sürenin bir ölçüsüdür [98]. Termal olarak yönlendirilen ve difüzyon süreçlerini gerektiren tane sınırı kayması, boşluk difüzyonu vb. gibi deformasyon mekanizmalarını içerir. Bu nedenle, sıcaklık malzemenin mutlak erime sıcaklığının yarısını aştığında sürünme deformasyonu kritik hale gelir [98,99]. Lehimleme alaşımlarının çoğu için, oda sıcaklığı mutlak erime sıcaklığının yarısının çok üzerinde olduğundan, SMT'de sürünme, en önemli lehim deformasyon mekanizması olarak kabul edilir [100].

Bir malzeme yüksek sıcaklıkta sabit bir yüke maruz kaldığında, birincil, ikincil ve üçüncül sürünme olmak üzere üç sürünme davranışı bölgesi sergiler. Kararlı durumdaki ikincil sürünme bölgesi en alakalı olanıdır, çünkü en basit, en tekrarlanabilir davranışa ve mühendislikte büyük önemi olan deformasyon mekanizmalarına sahiptir [27]. Kararlı durum ikincil sürünme bölgesindeki sürünme denkleminin en basit biçimi şu şekildedir [23].

$$\frac{d\gamma}{dt} = A\tau^n \exp\left(\frac{\Delta H}{RT}\right) \quad (2.4)$$

Burada ($d\gamma/dt$) kayma gerinimi oranıdır, τ kayma gerilimidir, n stres üssüdür ve ΔH aktivasyon enerjisidir. ΔH ve n , baskın sürünme mekanizmasına özgüdür. A sabiti mikro yapıya bağlıdır. R , evrensel gaz sabitidir ve T (K), mutlak sıcaklıktır. Sn-Pb lehim için, n değeri, mikro yapıya ve baskın sürünme mekanizmasına bağlı olarak 2 ile 7 arasında değişir. Benzer şekilde, aktivasyon enerjisi, ikincil sürünme [27] için hız kontrol süreci ile ilgilidir ve malzemenin sürünme mekanizması hakkında fikir verir [1].

Sn-%58 ağ.Bi için birincil, ikincil ve üçüncül sürünme gözlemlenmiştir [27]. Mei ve Morris [27], 65°C'de ötektik Sn-Bi'nin lehim bağlantılarının, aynı koşullar altında oluşturulan ötektik Pb-Sn lehim bağlantılarından daha fazla sürünmeye dirençli olduğunu gözlemlədiler [27]. Bununla birlikte, bozulmaya kadar olan toplam gerinim yalnızca %20-25 idi; bu, ötektik Sn-Pb için bulunandan daha azdır. Wild [30] tarafından yapılan gerilim gevşeme testlerinin sonuçlarına göre, hem oda sıcaklığında hem de

60°C'de Sn-Bi lehim bağlantılarında ötektik Pb-Sn lehim bağlantılarından daha hızlı gerilim gevşemesi meydana gelmiştir [1].

Ötektik In-Sn lehiminin sürünme davranışını değerlendirmek için Freer ve Morris [33] tarafından yapılan testler, erken arızaya yol açan hızlı ve kapsamlı deformasyon gösterdi. Birincil sürünme gözlenmedi; ancak, yoğun deformasyonun meydana geldiği sabit durumlu sürünme bölgesi ve üçüncül bir sürünme bölgesi ile karşılaşıldı. Ayrıca, Pb-Sn'ye benzer kabalaşma ve yeniden kristalleşme gibi mikro yapısal değişiklikler gözlenmedi. Darveaux ve Banerji [101] tarafından elde edilen test sonuçları, Sn-%3.5 ağ.Ag alaşımının kendi test koşulları altında, bozulmadan önce ötektik Sn-Pb'ye göre önemli ölçüde daha fazla gerinim sergilediğini göstermiştir. Test sonuçları ayrıca, aynı koşullar altında bir termal döngü testindeki hızlanma faktörünün Sn-%3.5 ağ.Ag için ötektik Sn-Pb'den daha büyük olabileceğini göstermiştir [1].

2.5.4 Dayanıklılığını Yitirme

Yorgunluk, döngüsel yükleme nedeniyle arızaya karşı direncin bir ölçüsüdür, izotermal veya 'termal' olabilir. İzotermal yorgunluk, sabit bir sıcaklıkta uygulanan döngüsel yer değiştirmenin meydana geldiği yerdir. Termal yorgunluk ise, farklı termal genişleme katsayılarına sahip iki malzemenin birleştirilmesi nedeniyle sıcaklıktaki bir değişiklik nedeniyle döngüsel yer değiştirmenin meydana geldiği bir durumdur. Lehim bağlantılarındaki yorulma, çatlak başlangıcına ve çatlak ilerlemesine yol açar; bir lehim bağlantısının yorulma ömrü, bir çatlak başlamadan ve yayılmadan önce dayandığı stres döngülerinin sayısı ile belirlenir. Döngüsel gerilme malzemenin akma gerilmesinin çok altında olsa bile, mikro yapıdaki çatlak başlama yerleri olarak hizmet edebilecek kusurlar ve düzensizlikler nedeniyle yorulma başarısızlığı meydana gelebilir. Bir malzemenin yorulma ömrünü artırmanın bir yolu, malzemenin çatlak başlangıcına veya çatlak ilerlemesine karşı direncini değiştirmektir. Lehim alaşımlarındaki başarısızlık, hem yorulmayı hem de sürünmeyi içerir. Ötektik kalay-kurşun lehim için, sürünme ve yorulmadaki arıza modu aynı görünmektedir. Bununla birlikte, termal yorulma ömrü ve sürünme verileri arasındaki ilişki iyi anlaşılammıştır [102]. Lehimlerin, zamanla gerilim dağılımlarının değiştiği çok dinamik bir hizmet ortamında performans göstermeleri beklendiğinden, Pb içermeyen lehimlerin yorulma direnci davranışını anlayabilmek çok önemlidir [1].

Pb içermeyen alaşımların geneline ait yorulma direnci verileri çok azdır. Mevcut birkaç veri, test koşullarının, ilk mikro yapının veya arıza mekanizmalarının doğru karakterizasyonundan yoksundur. Ayrıca, mevcut veriler daha çok, gerçek yüzey montajlı lehimleme uygulamalarından uzak olan izotermal yorulma testlerine odaklanan laboratuvar testlerinden elde edilmiştir. Lea'ya [100] göre ötektik Sn-Pb en düşük yorulma direncine sahiptir. Artan sırayla sıralanan bazı Pb içermeyen lehimlerin yorulma dirençleri: Sn-%36 ağ.In, Sn-%58 ağ.Bi, Sn-50 ağ.In, Sn-%0.75 ağ.Cu, Sn-%4 ağ.Ag ve Sn-%5 ağ.Sb [1].

2.6 Termal Özellikler

2.6.1 Termal Genleşme katsayısı

Tipik bir mikroelektronik düzeneği; metaller, polimerler, polimer bazlı kompozitler ve bazen de seramikler olmak üzere çok çeşitli malzemelerden oluşur. Hizmet ömrü boyunca cihaz ısı döngülerinden geçer, çünkü cihaza her güç verildiğinde IR ısıtması nedeniyle ısı üretilir. Cihaz içindeki bileşenlerin tümü aynı termal genleşme katsayılarına sahipse ve ısı transferi anlksa, aynı oranda genleşecek ve büzülecek ve termal olarak indüklenen gerilim ortaya çıkmayacaktır. Ne yazık ki, durum böyle değildir ve termal olarak indüklenen gerilimler ortaya çıkar. Kurşunsuz lehimler için termal genleşme katsayısı hakkında çok az veri bulunur ve bunlar Tablo 2.10'da özetlenmiştir. Termal genleşme katsayısı verileri, Si, Cu (kurşun çerçeveler olarak kullanılır), epoksiler (en yaygın kapsülleme malzemesi) ve FR-4 (en yaygın PCB malzemesi) için ayrıca referans aracılığıyla tabloya dahil edilmiştir. Termal genleşme katsayısı $15 \times 10^{-6}/K$ olan Bi-%42 ağ.Sn dışında, lehim alaşımlarının çoğu düşük $20 \times 10^{-6}/K$ aralığında termal genleşme katsayısına sahiptir [1].

Tablo 2.10. Pb içermeyen lehimler için termal genleşme katsayı verileri [1]

Lehim bileşimi	CTE ($\times 10^{-6}/K$)	Referans
Bi-42Sn	20°C de 15.0	[23]
	14.0	[97]
In-48Sn (ötektik)	20°C de 20.0	[23]
	20°C de 2.0	[103]
Sn-3.5Ag	22.0	[23]
	30.0	[23]
	23.0	[97]
Sn-4.8Bi-3.4Ag	23.0	[97]

Sn-20In-2.8Ag	20°C de 28.0	[65]
Sn-37Pb	21.0	[104]
In-3Ag	20.0	[105]
Si	2.6	[1]
Cu	16.0-18.0	[1]
Epoksiler	60.0-80.0	[1]
FR-4	11.0-15.0	[1]

2.6.2 Termal iletkenlik

Cihazın güvenilir çalışmaya devam etmesi için kalıp tarafından üretilen ısının dağıtılması gerekir. Isı dağılımı için ana yol kapsülleme malzemesinden geçerken, lehim bağlantıları da ısı dağılımı için bir yol olarak düşünülür. 400'den fazla lehim topuna sahip yüksek bağlantılı BGA cihazlarında, herhangi bir elektriksel işleve hizmet etmeyen termal lehim toplarının ısı dağıtma ortamı olarak kullanılması yaygın bir uygulamadır. Lehimin termal iletkenliği bu nedenle ilgilenilen bir özelliktir. Lehim alaşımları için mevcut olan termal iletkenlik verileri Tablo 2.11'de özetlenmiştir. Sn-%3.5 ağ.Ag verilerinin gösterdiği gibi oda sıcaklığında termal iletkenlik yaklaşık 50 W/mK iken daha yüksek sıcaklıklarda termal iletkenlik azalır [1].

Tablo 2.11. Pb içermeyen lehimler için termal iletkenlik verileri [1]

Lehim bileşimi	Termal iletkenlik (W/mK)	Referans
Bi-42Sn	21.0 - 85°C de	[23]
In-48Sn (ötektik)	34.0 - 85°C de	[23]
Sn-3.5Ag	33.0 - 85°C de	[60]
	54.3 - 23.9°C de (w/o kontak direnci)	[65]
	36.2 - 23°C de (w/o kontak direnci)	[106]
	28.2 - 222.9°C de	[106]
	28.6 - 246°C de	[106]
	29.2 - 256°C de	[106]
Sn-3.5Ag-1Zn	33.0 - 85°C de	[23]
Sn-20In-2.8Ag	53.5 - 30°C de	[65]
In-3Ag	73.0	[105]

2.7 Elektriksel Özellikler

Mikroelektronik cihaz çalışırken, lehim aynı zamanda elektriksel bir ara bağlantı görevi görür, yani cihaza giren ve çıkan tüm elektrik akımları lehim bağlantısından geçmelidir [1].

Bir elektriksel ara bağlantının yeterince işlev görebilmesi, elektriksel özdirence bağlıdır. Seçilen lehimlerin elektrik iletkenliği, IR ısıtma olmadan seçilen geometri için akım akışına izin verecek düzeyde yüksek olmalıdır. Bu, lehim bağlantısının nasıl tasarlandığının bir fonksiyonu olsa da, minyatürleştirme baskısı devam ettikçe, lehimin elektrik direnci daha önemli hale gelmeye devam edecektir. Lehim ara bağlantılarının da akım akışı nedeniyle belirli bir miktarda IR ısıtmasına maruz kalması beklenir. Ayrıca silikon cihazın ürettiği ısı nedeniyle belli bir miktar ısınma olabilir. Bu nedenle, lehim bağlantısındaki sıcaklıkların 125°C'ye kadar çıkması beklenir. Bu nedenle sıcaklık özdirenç katsayısı da önemli hale gelir [1].

Çoğu elektronik uygulama için, lehimin özdirenci nispeten düşüktür ve devrenin genel işlevselliği üzerindeki etkisi önemsizdir. Özdirencin mikro yapıya, tane boyutuna, dislokasyon yoğunluğuna vs. bağlı olması nedeniyle, ölçülen değerler hem saf metaller hem de aynı bileşime sahip alaşımlar arasında önemli ölçüde farklılık gösterir [23]. Mikroelektronik uygulamalar için kullanılan yaygın lehimlerin ve paketleme malzemelerinin oda sıcaklığı özdirenç değerleri Tablo 2.12'de verilmektedir. Bi-Sn alaşımının elektrik özdirenci, benzer elektrik özdirençlerine sahip olan diğer alaşımlardan önemli ölçüde daha yüksektir. Bi-Sn yüksek özdirenç değerinin olması, Bi'nin yüksek elektrik özdirencine bağlanabilir. Çünkü; Sn'nin özdirenç değeri 10.1 $\mu\Omega$ cm iken Bi'nin ise 115 $\mu\Omega$ cm'dir [1].

Tablo 2.12. Bazı Pb içermeyen lehimler ve mikro elektronik ambalaj malzemeleri için oda sıcaklığı direnç değerleri [23]

Lehim Alaşımı	Özdirenç ($\mu\Omega$ cm)	Kurşun Yapılar	Özdirenç ($\mu\Omega$ cm)	Elementler	Özdirenç ($\mu\Omega$ cm)
63Sn-37Pb	10, 14.4, 15	52Ni-48Fe	43.2	Ag	1.59
96.5Sn-3.5Ag	10, 12.3	42Ni-58Fe	57	Bi	115
58Bi-42Sn	30, 34.4, 34	Cu-0.6Fe-0.05Mg-0.23Sn	2.65	Sn, Pb	10.1
50Sn-50In	14.7, 30			Cu	1.73
48Sn-52In	14.7				

2.8 Kimyasal Özellikler

Lehimlerin kullanımını ve uzun vadeli güvenilirliğini etkileyen, üç ana kimyasal özellik vardır. Bunlar; (a) Cu'nun lehimde çözünürlüğü, (b) korozyona karşı direnç ve (c) oksidasyon davranışıdır [1].

2.8.1 Cu Çözünürlüğü

Dalga lehimleme gibi büyük lehim banyoları kullanıldığında, lehimlenen bakır uçlardan lehim banyosu Cu'yu alma eğilimindedir. Banyoda kritik bir Cu konsantrasyonuna ulaşıldığında, banyonun değiştirilmesi gerekir. Bu nedenle, banyonun değiştirilmesi gerekmeden önce, banyodaki Cu alma oranı ve Cu konsantrasyonunun derecesi, lehimleme işlemlerinde önemli parametreler ve maliyet faktörleridir. Lehim banyolarının Cu'yu tutma özelliği, doğrudan ana bileşenlerdeki Cu'nun çözünürlüğüne bağlıdır [1].

2.8.2 Aşınma

Elektronik bileşenin özel tasarımına ve alt tabakaya veya baskılı devre kartına monte edilme şekline göre, lehim bağlantısı atmosfere maruz kalabilir. Çoğu SMT, PTH ve BGA konfigürasyonlarında durum böyledir. Lehim sadece havaya değil, aynı zamanda neme, klor ve kükürt bileşikleri gibi diğer aşındırıcılara da maruz kalır. Lehimin atmosferik korozyona dayanabilmesi, bağlantıların uzun vadeli kullanımı anlamına gelir. Ek olarak, lehim alaşımları elektronik cihazdaki diğer metalik bileşenlerle, özellikle de bakır iletkenlerle elektriksel olarak bağlanır. Bu nedenle, lehimin galvanik kaynaklı korozyon potansiyel özelliği, oluşabilecek herhangi bir atmosferik korozyonu şiddetlendirecektir [1].

2.8.3 Lehim Alaşımlarının Oksidasyonu

Lehimlerin yerleştirildiği ortamlara bağlı olarak, ortamdaki oksijenle reaksiyona girerek oksit tabakası oluşturma potansiyeli vardır. Bir metalin oksit oluşturma olasılığı ve oluşan oksidin kararlılığı, o oksidin standart Gibbs serbest oluşum enerjisi ile temsil edilir [1].

Seri üretime uygun endüstriyel ekipmanlarla oksidasyon başlangıcını kontrol etmek mümkün olmasa da, oksidasyonun devam etmesi için lehimlemenin yapıldığı ortamdaki oksijen içeriği kısıtlanarak oksidasyonun ilerleme derecesi kontrol edilebilmekte, minimum seviyede tutmak mümkündür. Sıkça uygulanan alternatif bir yaklaşım, azaltıcı atmosferleri korumaktır [1].

BÖLÜM 3

DENEYSEL YÖNTEMLER

3.1. Giriş

Tezin amacı Sn-2Ag-[X]Zn (X=2,2.5) ve Sn-1.5Ag-[X]Zn (X=2,2.5) alaşım sistemlerinin termal, elektriksel, mikroyapı ve mekaniksel özelliklerini tespit etmektir. Bu bölümde bu özellikleri ölçmek için kullanılan deneysel sistemlere yer verilecektir.

3.2. Deneysel Sistemler

3.2.1. Kül fırını

Laboratuvar fırını olarak da isimlendirilen kül fırını; ön ısıtma, kül testi, su verme, menevişleme (temperleme), yükseltgenme (oksidasyon) gibi, ısıl işlemlerin kullanıldığı, malzemelerin geliştirilmesinde kullanılır. Laboratuvarlarda, ufak malzemelerin incelenmesi, testi ve analizinde genellikle kül fırınları kullanılır. Şekil 3.1. de görülen ve tezde kullanılan kül fırını; 1 saat 5 dakikada 1100°C ısı hacmine sahip, sıcaklık değerini ± 2 °C hassasiyetle kontrolünü sağlayan, 6,3 L hacim kapasitesine sahip, 2000 W gücündedir [107].



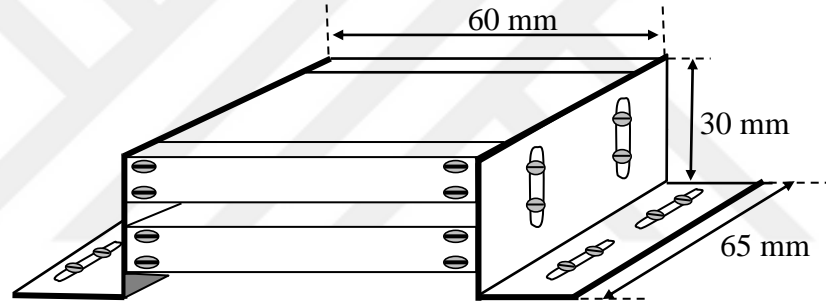
Şekil 3.1. Kül Fırını [107]

3.2.2 Lineer ısı akış sistemi

Lineer ısı akış sistemi, Maraşlı ve arkadaşları tarafından geliştirilmiştir. Bu sistem ile malzemelerin ısı iletkenlikleri ölçülmektedir. Sistemi oluşturan bölümler, malzeme tutucu, soğutucu ve ısıtıcı sistemden meydana gelmektedir. Deneyde, soğutucu ve ısıtıcı sistemlerinin sıcaklıkları, durağan sıcaklık gradyentinden dolayı sabit tutulmuştur [107].

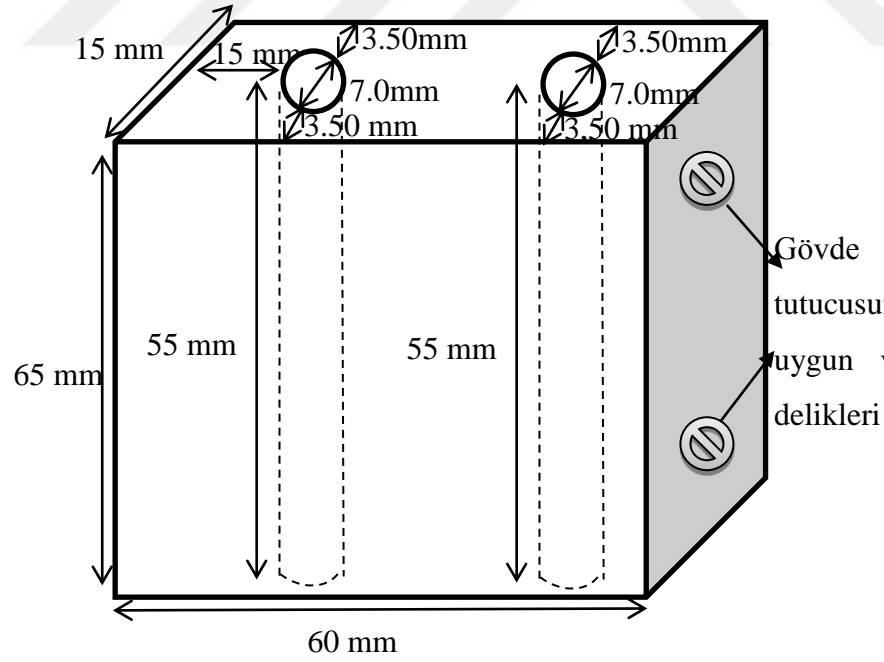
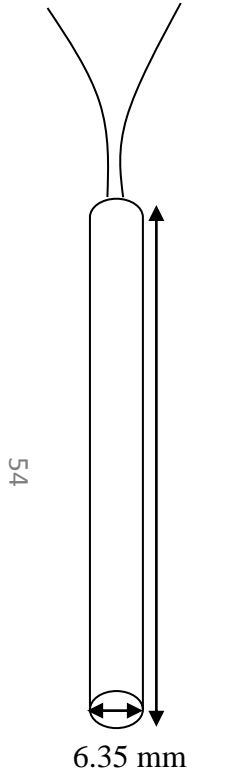
3.2.2.1 Isıtıcı sistem

Bu sistemde sıcaklık iletiminin iyi olmasının nedeni, kolay işlenebilen ve oksitlenmeye karşı direnç gösteren pirinç malzemeden üretilmiştir. Şekil 3.2.' de görülen gövdelerin ön cephesi pirinç malzemeden elde edilmiş; 60 x 65 x 30 mm boyutlarında, alt ve üst ısıtıcı sistemden meydana gelmektedir [107].

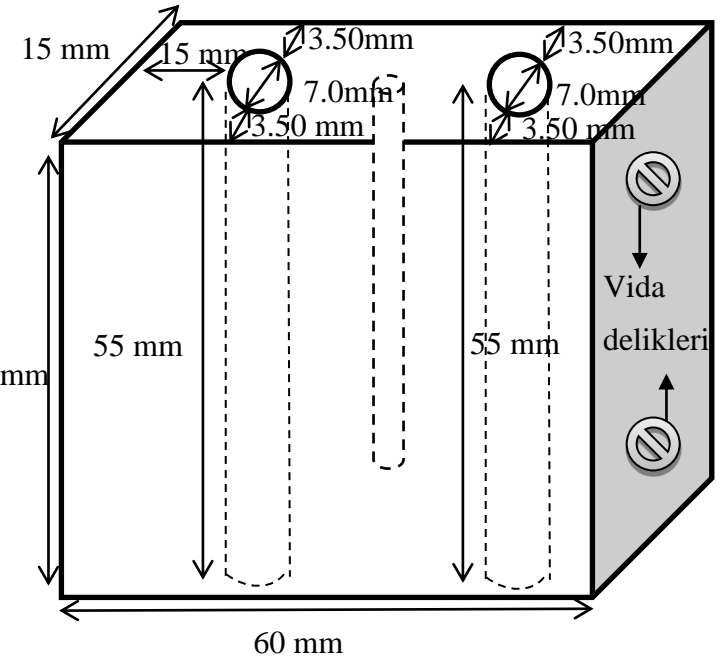


Şekil 3.2. Isıtıcı sistem [108]

Isıtıcı sistem, 45 x 60 x 6 mm boyutunda, iki tane pirinç ana gövdesinden meydana gelmiştir. Şekil 3.3. deki görülen sistemde, ikişer tane ana gövde ve gövde tutucu, dört tane ise kapak bulunmaktadır. Isıtıcı yatağı oluşturmak için; şekil 3.3a ve şekil 3.3b'deki, üst ve alt ısıtıcı sistemlerine iki tane, 7 mm çapında delikler açıldı. Termal çiftle, ısıtıcı sisteme ait sıcaklığı ölçmek üzere, alt ısıtıcı sisteminde ısıtıcı elementlerinin ara kısmına 1.5 mm çaplı, 35 mm uzunluklu oyuk açıldı. Sisteme ait üst ve alt yüzeyler parlatılarak, ısıtıcı sistemin malzemeye tamamen dokunması ve homojen ısı dağılımının oluşması sağlanmıştır [107].



(a)



(b)

Şekil 3.3. Isıtıcı sistemin (a) üst ısıtıcısı (b) alt ısıtıcısı [107]

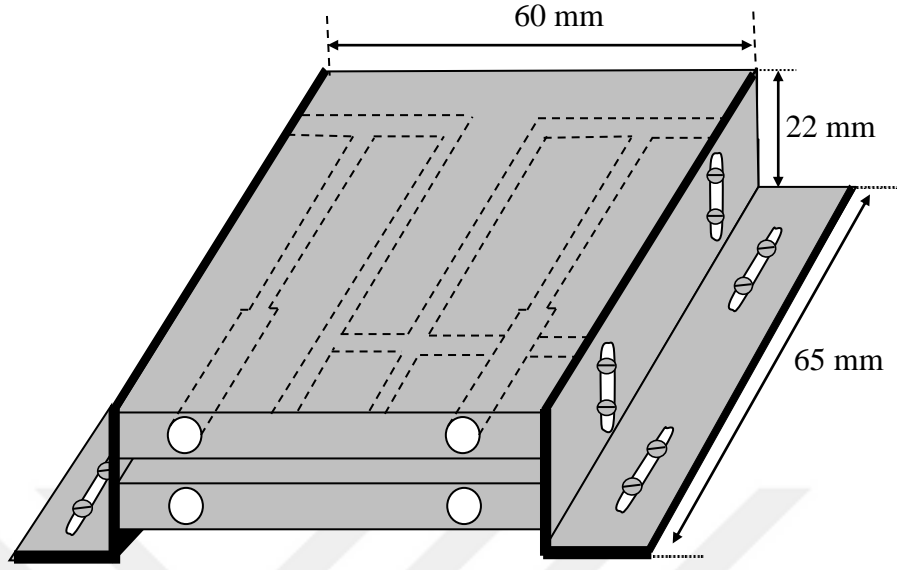
“Gövdeler arası dikey mesafeyi, numunenin kalınlığına göre ayar yapabilmek adına ve ısıtıcı gövdeler kaymasının önüne geçmek için, sol ve sağ gövde tutuculara ayarlanabilir vida delikleri açıldı [109]. Isıtıcı blok 130 x 310 x 5 mm boyutlarında, metal bir tabla üstüne koyuldu. Yüksek sıcaklıklara dayanıklı olması için, tabla metal malzemeden tercih edilmiştir. Isıtıcı sisteme ait sıcaklık değerleri, Eurotherm 2704 marka sıcaklık mikro kontrolcüsü vasıtasıyla ± 0.01 K aralıklı kontrolleri sağlandı. Bu sistemde sıcaklık maksimum 673 K sıcaklık derecesine çıkabilmektedir [107]”.

3.2.2.2 Soğutucu sistem

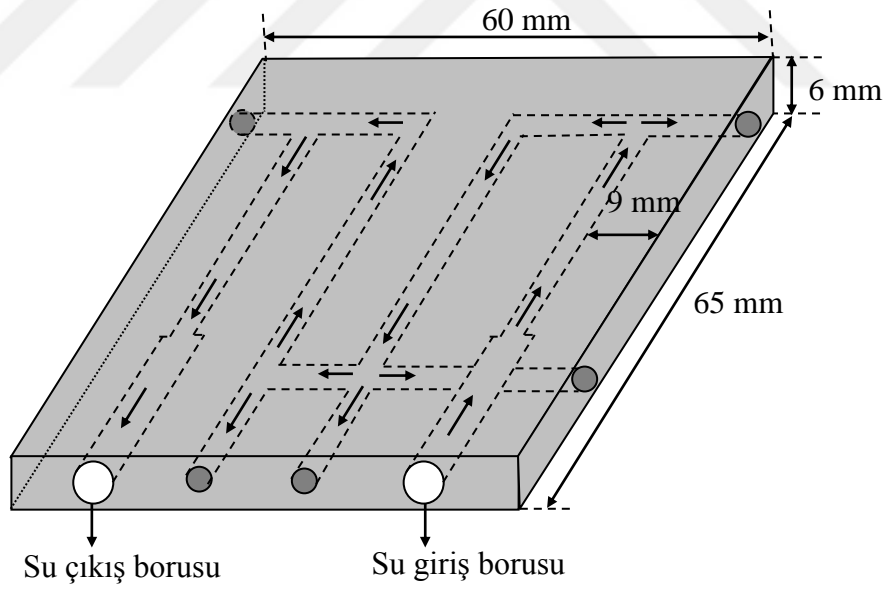
“Pirinç malzemeden yapılan soğutucu sistem, ikişer adet soğutucu gövdeye ve gövde tutucusuna sahip olmak üzere dört parçadan meydana gelir (Şekil 3.4.a). Şekil 3.4.b’de görülen soğutucu gövde bloğu, 65 mm uzunluğa, 60 mm eni ve 6 mm kalınlıkta iki adet pirinç tabakadan oluşur. Bloklarda, su girişi ve çıkışına ait 5 mm çapında kanal bulunmaktadır. Soğutmayı eşit dağıtmak üzere, 4 mm çap genişliğinde, birbirine paralel 4 adet kanal vardır. Deney esnasında açılmış kanalların yüksek basınçlı suya dayanabilmesi ve su kaçağı olmaması adına kanal girişlerine kaynak yapılarak kapatılmıştır. Su geçişi için oluşturulan uç kısımları açık olan giriş-çıkış kanallarına, 3 mm çap ve 80 mm uzunlukta pirinç borular kaynak yapıldı. Su geçişi için, altta bulunan soğutucu blok çıkışını, üstteki soğutucu blok girişine hortum vasıtasıyla bağlandı. Sistemin bu şekilde olması, homojen soğutma sağlamakta ve incelemesi yapılacak numunenin, durağan sıcaklık gradyentinde olması sağlanmaktadır” [107].

“Şekil 3.5’da görülen soğutucu gövdeleri, pirinçten yapılan, eni 19 mm, yüksekliği 22 mm ve uzunluğu ise 65 mm olan metal plakaya sabitlenmiştir. Yine bu plakaya ısıtıcı sistemde sabitlenmiştir. Şekil 3.5.’da ise bu sistemin genel şekli gösterilmiştir” [107].

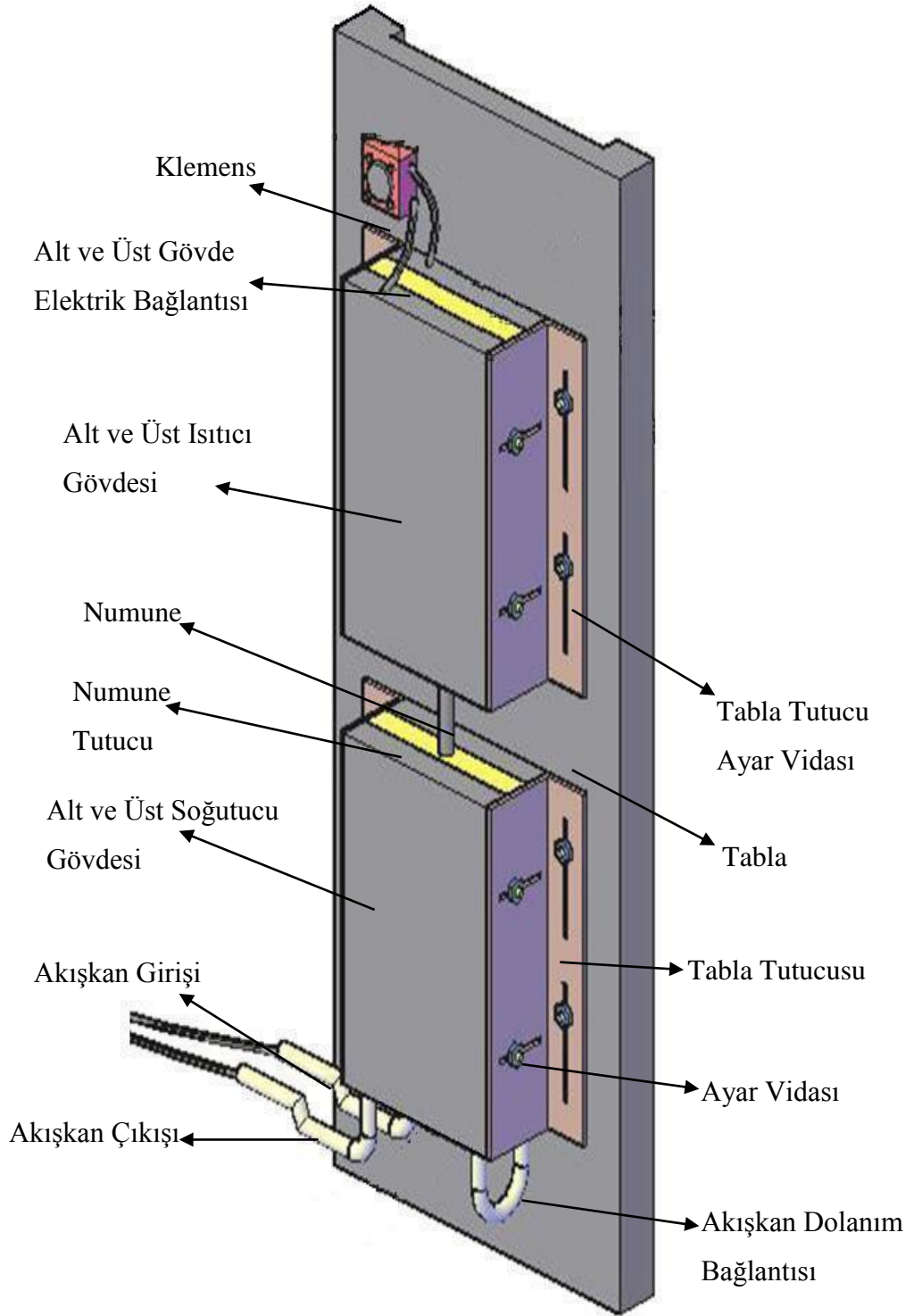
“9702 model PolyScience cihazı ile soğutucu sisteme ait sıcaklık kontrolü sağlandı. 13 litre su kapasitesine sahip olan su devir-daim sisteminin sıcaklık kontrol aralığı -40°C (233 K) ile 200°C (473 K) arasındadır. Dijital göstergesi $\pm 0,01$ K sıcaklık hassasiyetine sahip olan bir cihazdır. Sistem; dakikada 12-25 litre su debisine, ayrıca dakikada 8-18 litre su emiş debisine sahiptir [109].”



Şekil 3.4.a. Soğutucu sistemin genel görünümü [109]



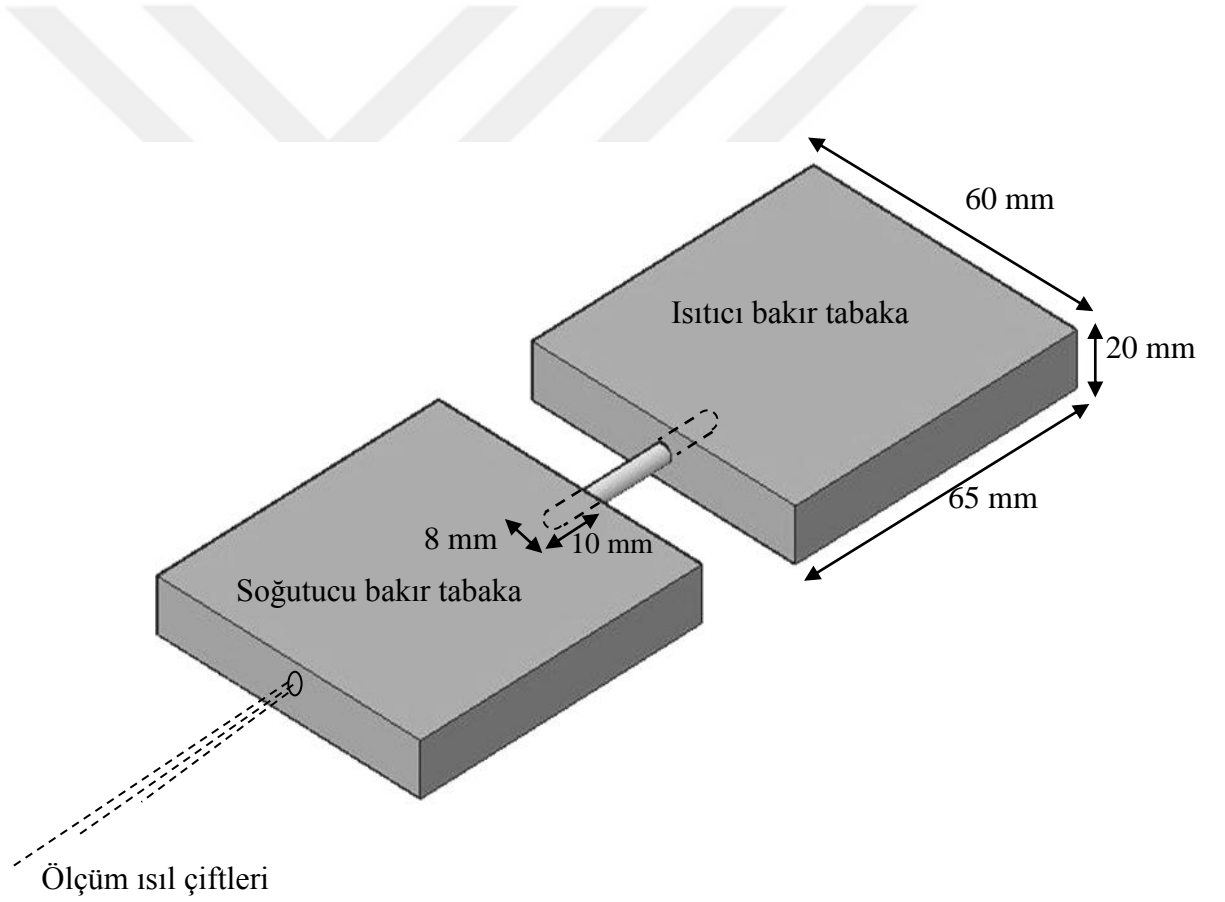
Şekil 3.4.b. Soğutucu bloğun şematik gösterimi [109]



Şekil 3.5. Soğutucu-ısıtıcılı sıcaklık gradyenti sisteminin genel görünüşü [108]

3.2.2.3 Numune tutucu

Boyutları 65 mm eninde, 60 mm boyunda ve 20 mm yüksekliğindeki numune tutucu, bakır iki bloktan oluşmaktadır. Bakırın seçilme sebebi ise, iletkenliğinin ve erime noktasının yüksek olmasıdır. Bu tutucunun amacı numuneyi, soğuk ve sıcak sistem arasına koyarak ısı iletimin kaliteli iletimini sağlamaktır. Tutuculara numuneyi koyabilmek için delikler açılmıştır. Bu deliklerin boyutları 10 mm derinliğinde, 8 mm çapındadır. Şekil 3.6'da görüldüğü gibi, ölçüm yapması için kullanılan ısı çiftlerinin, numuneye tam olarak yerleştirilebilmesi için, bakır soğutucu tabakanın iki tarafında da açıklık olacak biçimde 3 mm çaplı oyuk açılmıştır [107].



Şekil 3.6. Numune tutucunun şematik gösterimi [108]

3.3. Isıl İletkenlik Ölçümü Deneyi

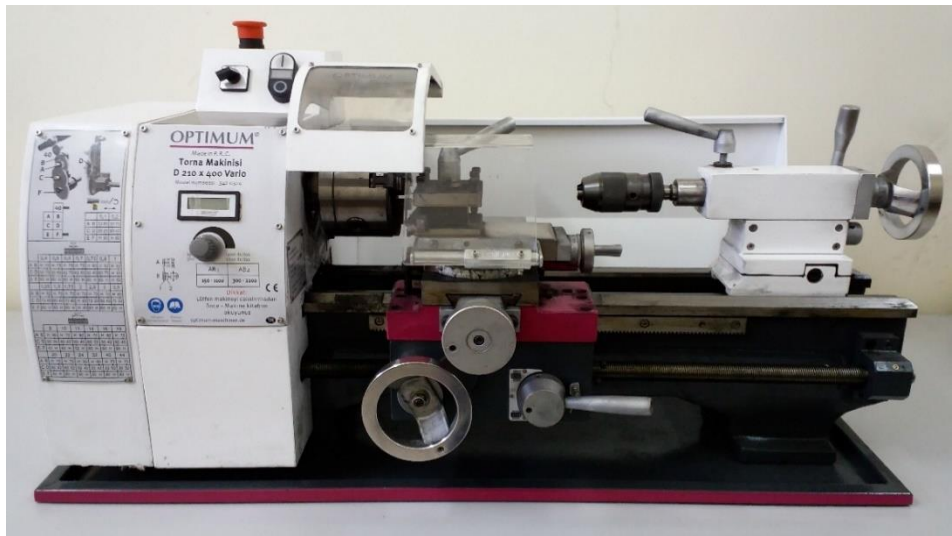
3.3.1 Numune kalıbının hazırlanışı

İstediğimiz ölçüde döküm yapabilmek için, Morgan markalı grafit çubuklar tercih edilmiştir. Grafit kolay işlenebilen, şekillendirilmesi kolay, iletkenliği yüksek, yüksek sıcaklıklara dayanabilen ve diğer metallerle etkileşime girmeyen maddedir. Bu sebeplerden dolayı kalıp kullanımında tercih edilmektedir. Alaşımın bir kalıp haline getirebilmek için, şekil 3.7’de görüldüğü gibi huni, pota ve numuneye ait kalıp hazırlanmıştır.



Şekil 3.7. Grafit malzemedен yapılan pota, huni ve numune kalıbı [108]

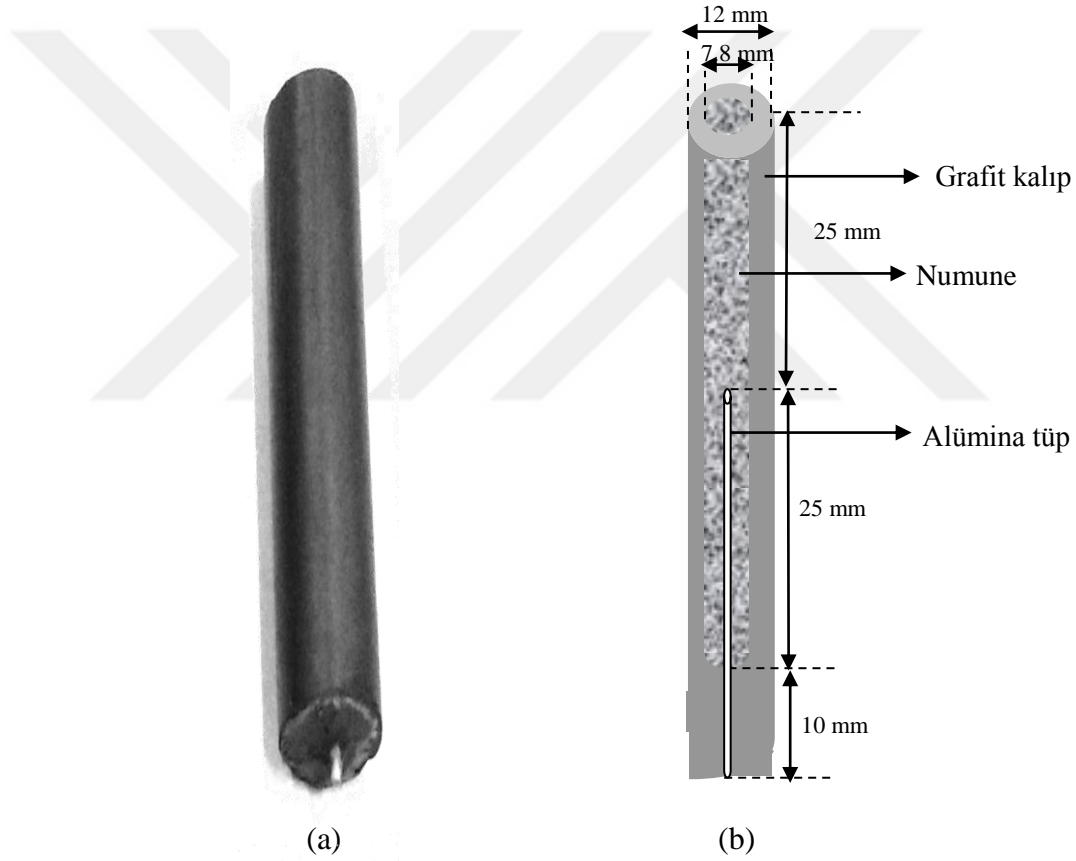
Şekil 3.8’de görülen tornada huni, numune kalıpları ve pota delinmiştir.



Şekil 3.8. Kalıpların hazırlandığı torna tezgahı [107]

30 mm çapa sahip grafit çubuk 80 mm uzunlukta kesilerek pota hazırlanır. İki farklı pota yapılır. İlk potayı, 23 mm'lik matkap ucu kullanarak, 60 mm uzunlukta delik açarak yapılır. Alaşımı fırında eritmek üzere bu pota kullanılır. İkinci potanın uçları farklı kalınlıkta matkap ucu ile delinir. Potanın bir tarafını 23 mm çaplı matkap ucu kullanarak 30 mm boyunda, öbür tarafını da numuneye ait kalıbın yerleştirilebilmesi için 7.8 mm çaplı matkap ucu kullanarak 10 mm uzunlukta oyuk açılmıştır. Pota bir boru gibi iki ucuda açılmış halde hazırlanır ve alaşım haznesi adını alır [107].

Silindirik boru şeklinde olan numune kalıbı Şekil 3.9 'da gösterilmektedir.



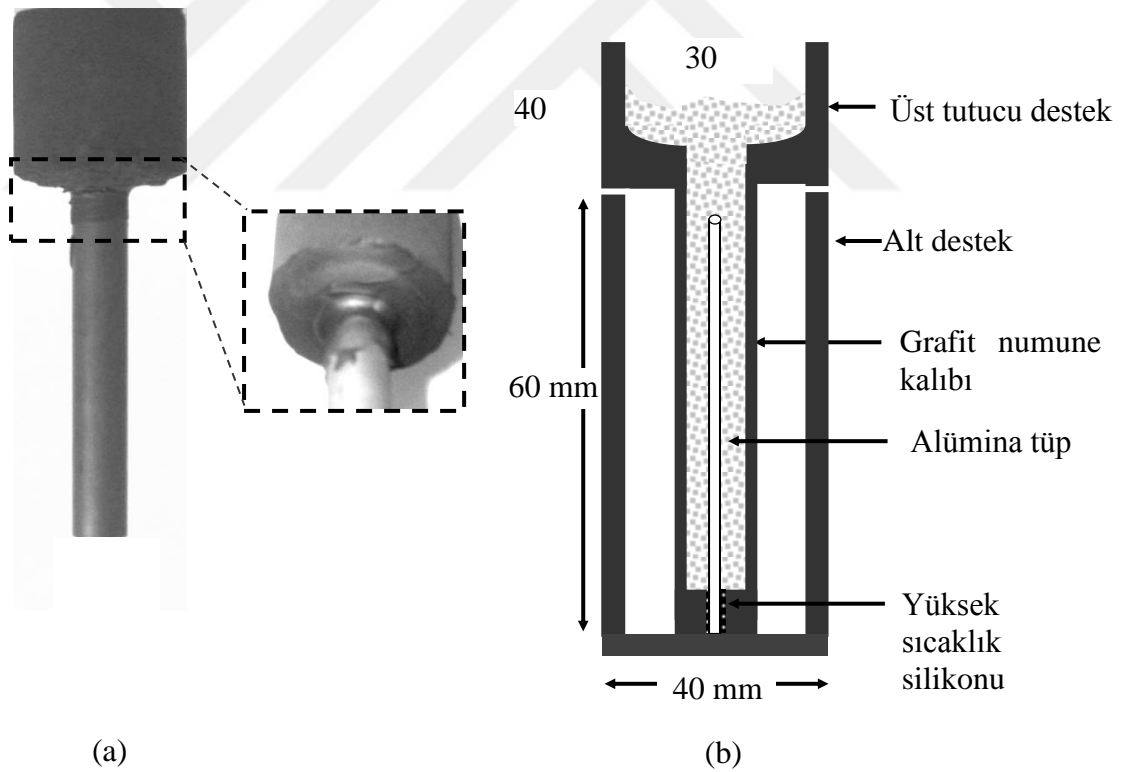
Şekil 3.9. Hazırlanan numuneye ait kalıbın fotoğrafı (a), şematik gösterimi (b) [108]

Kalıp olarak kullanacağımız grafit çubuk, 12 mm çapında ve 250 mm uzunluktadır. Çubuğu öncelikle, tornanın kesme bölümüyle 60 mm uzunlukta parçalara bölünür. Bu şekilde numune kalıpları oluşturulur. Hazırlanan kalıbın bir tarafı matkapta kullanılan 7.8 mm'lik uç ile 7 mm iç çaplı, 12 mm dış çaplı ve 50 mm derinlikli olacak biçimde

delinir. Alümina tüpü kalıbın diğer tarafına yerleştirebilmek için, 1.2 mm çaplı matkap ucu kullanılarak ortalama 20 mm uzunlukta delik açılır [107].

35 mm uzunlukta kesilen alümina tüp, bir ucu sızıntı olmayacak biçimde oksijen kaynağında ısıtılır ve tamamı kapatılır. Alümina tüp, numune kalıbının 1.2 mm çapa sahip oyuğa yerleştirilir. Alümina tüp ile kalıbın bir araya geldiği bölüme, alaşım eridiğinde sızmasın diye yüksek sıcaklıklara dayanıklı silikon sürülür.

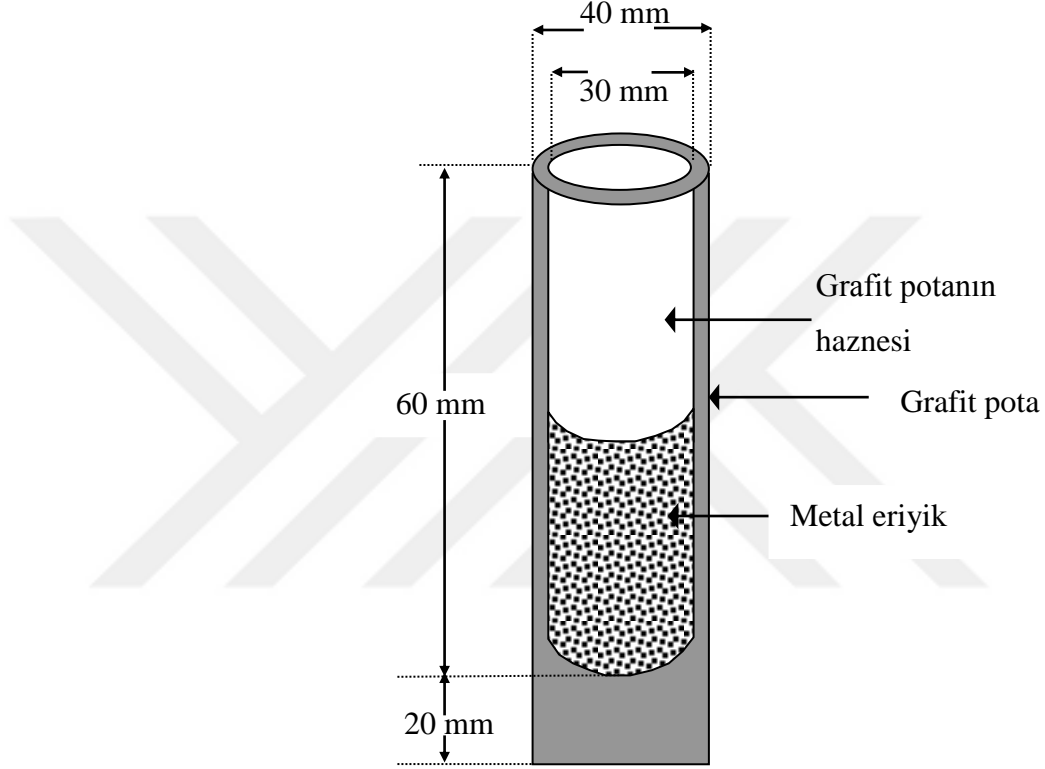
İki ucu delik olan potanın 12 mm çaplı deliğine, hazırladığımız numune kalıbı (alaşım haznesi) yerleştirilir. Sızıntı olmasın diye kalıp ve pota birleşim yerine, yine sıcaklığa dayanıklı silikon ile kapatılarak kurumaya bırakılır. Kalıp şekil 3.10'da görüldüğü gibidir.



Şekil 3.10. (a) Numuneye ait pota ve birleşen yerlerin silikonlanarak birbirine tutturulduğu bölüme ait fotoğraf, (b) Numuneye ait potanın ve birleşim noktasının çizimsel görünümü [110]

3.3.2. Numuye ait kalıbın fırın içine koyulması ve döküm işleminin yapılması

Tek tarafı delik grafit potaya, şekil 3.10’da görülen numune kalıbı, kalıp altta, alaşımın olduğu bölüm üstte olacak biçimde yerleştirilir. Şekil 3.11 ‘de görülen bir ucu delik diğer potaya ise alaşımı oluşturacak metaller koyulur.



Şekil 3.11. Grafit malzemedeki potaya ait çizimsel gösterim [108]

İçi temizlenen grafit potaya, alaşımı oluşturacak metalleri, en altta erime sıcaklığı düşük olan, en üstte ise erime sıcaklığı yüksek olan kalacak şekilde koyarız. Daha sonra hazırlanan dolu pota ve kalıp aynı zamanda kül fırınında ısıtmaya koyulur. Fırının sıcaklığı uygun set değerine ayarlanır ve çalıştırılır. İstenilen ısı değerine gelen fırının kapağı açılarak, erimiş haldeki metaller homojen olması için belli zaman dilimlerinde karıştırılır. Erimiş metalin bulunduğu pota maşa ile tutularak, alaşım donmadan ve üst yüzey oksitlenmesine müsaade etmeden hızlı bir şekilde numune kalıbına boşaltılır. Bu işlem bittikten sonra fırın kapağı tekrar kapatılır ve set edilen sıcaklığa gelene kadar beklenir [107].

Aktarım yaptığımız sıvı haldeki alaşım tekrar grafit çubuk ile karıştırılır ve daha homojen bir alaşım elde ederiz. Kalıp içerisine alaşımın problemsiz aktığından emin olduktan sonra, fırını kapatırız. Fırın içindeki alaşımı, kendi halinde soğumaya bırakırız. Böylelikle alaşım katılaşma sürecine girer [107].

Tamamen soğuyan fırından kalıp çıkarılır. Alaşım bölmesi ile kalıp daha önce silikonladığımız yerinden yavaş bir şekilde ayrılır. Alaşımın bölmesine zarar vermemeye dikkat edilir [107].

Grafit kalıba, sert olmayan darbeler vasıtasıyla kırılarak, kalıp içinden numune çıkarılır. Kesme işlemi, Şekil 3.12'deki Metkon MICRACUT 151 model kesim cihazıyla, 30 mm boyunda, alümina tüpün bulunmadığı bölümden kesilerek, Linear Isı Akış Sistemi üzerine yerleştirilecek duruma getirilir [107].

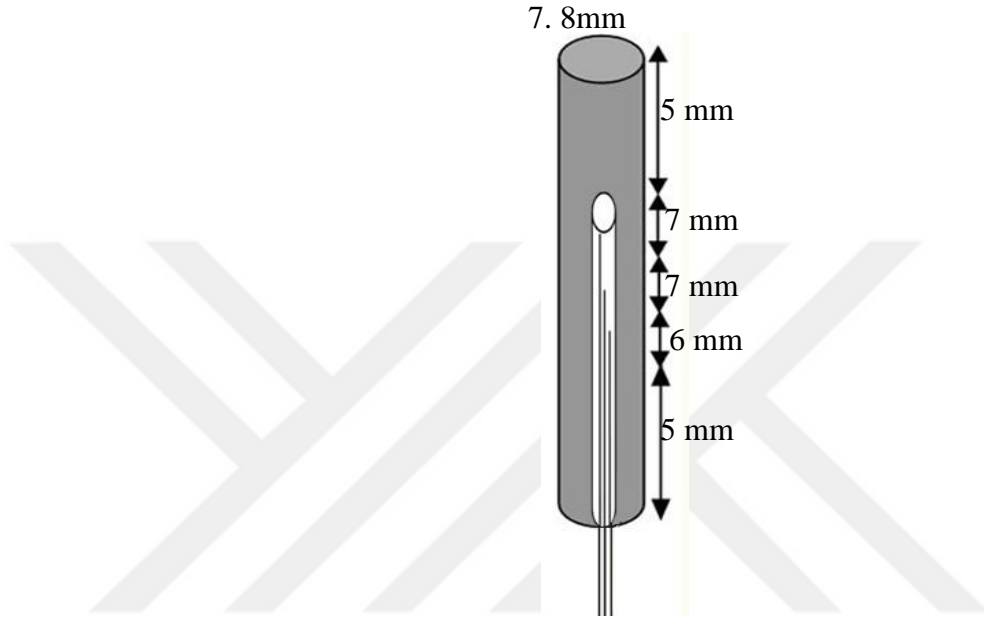


Şekil 3.12. Numune kesim cihazı [107]

3.3.3. Numunenin lineer ısı akış sistemine koyulması

Doğrusal bir sıcaklık gradyenti [107] elde edebilmek için, 30 mm boyundaki numunenin uç kısımlarından 10 mm'lik bölümleri Şekil 3.6'da görüldüğü gibi, bakır numune tutucularının iç kısmında bulunan birbirine bakan deliklere yerleştirilir. Daha sonra ısıl çiftler Şekil 3.13'te görüldüğü gibi 7 mm aralık olacak şekilde, 1.2 mm dış çaplı, 1 mm iç çapa sahip ve 20 mm uzunluğundaki alümina tüp içerisine yerleştirilir.

Isıl çiftlerden veri alabilmek için, diğer uçları şekil 3.14'te görülen, veri kaydediciye (data logger) [107], veri kaydedici ise bilgisayara bağlanarak sıcaklık ölçümü yapılır. Bu şekilde alümina tüp içindeki üç farklı noktadan sıcaklık değerleri tespit edilir.



Şekil 3.13. Termal çiftin numuneye temas ettiği noktalar[108]



Şekil 3.14. Sıcaklık ölçümlerinin yapan ve kaydedilmesini sağlayan cihaz [111]

Isıl çiftlere, sıcaklık ölçen sensör de denir. Adından da anlaşılacağı üzere, iki farklı iletken malzemenin birleşmesinden oluşur. Birleştirilmiş malzemeler ısıya maruz kalırsa

uçlarında gerilim indüklenir. 1821 yılında Seebeck tarafından bulunmuştur [107]. Termometre ile yüksek sıcaklıklarda ölçüm yapılamadığından, ısı çiftleri bu alanda kullanılmıştır. Sıcaklık ölçüm aralığı ise, $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ile $2300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye kadar olabilmektedir.

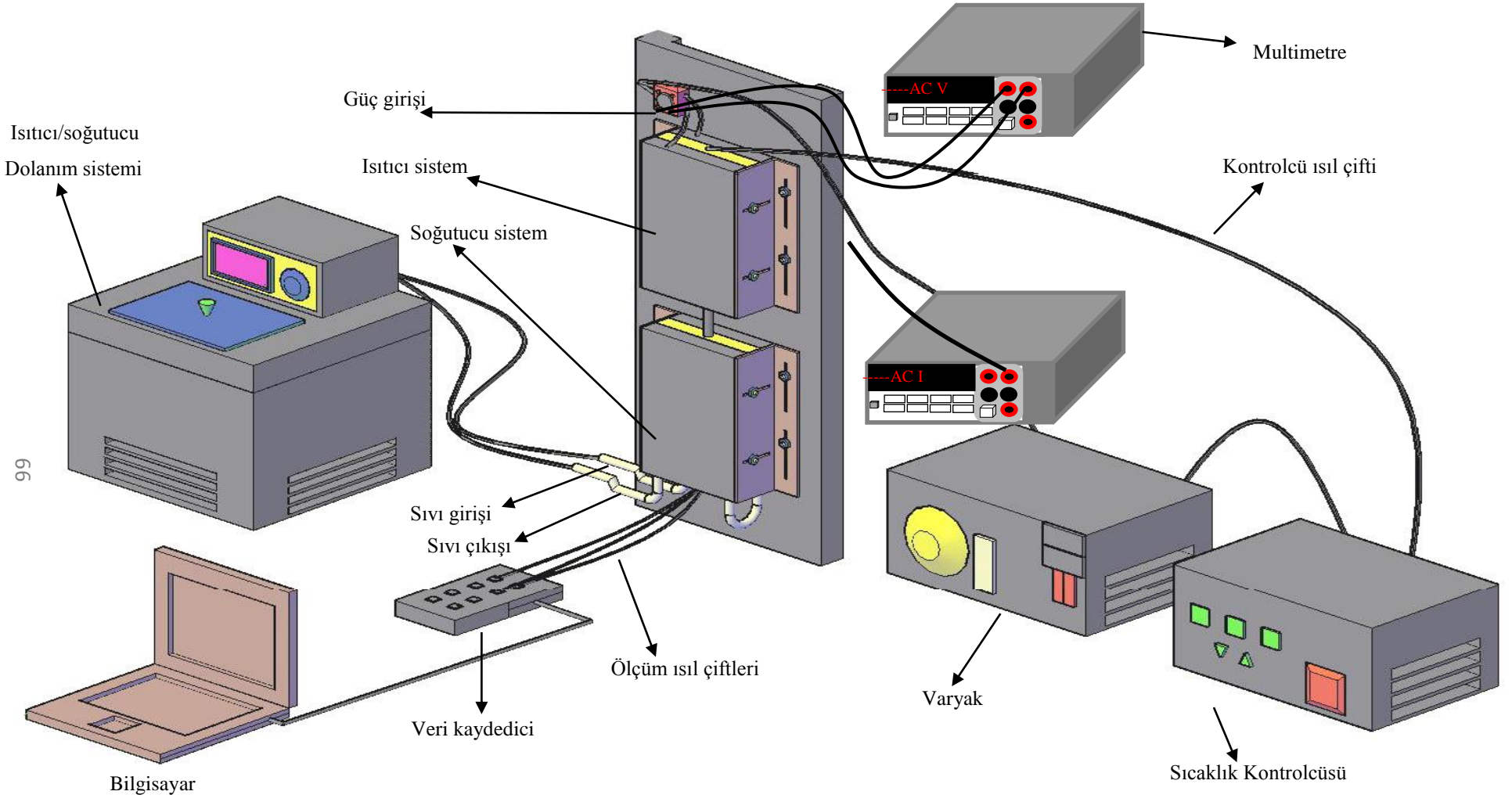
“ Çok fazla kullanılan ısı çiftleri K tipli Chromel – Alümel ile R tipli Platin – Platin %13 Rodyum çiftleridir. K tipinin kullanım yeri yüksek sıcaklıklar iken, R tipi ise düşük olan sıcaklıklarda tercih edilir” [111].

Tezde kullanılan K tipi ısı çifti Şekil 3.15’de gösterilmiştir [107].



Şekil 3.15. Ölçümlerde kullanılan K tipi ısı çiftleri [107]

Tezde, üç adet ısı çiftleri 7 mm aralıklarla, numunede bulunan alümina tüp içine yerleştirildi. Ölçümler sırasında ısı çiftlerinin kaymasını önlemek için bant ile masaya sabitlendi. Sisteme yerleştirilmiş olan numune ve sistemin sabitlenmiş olduğu metal levhalar, dikey olarak tutucu ayaklara monte edildi. Isıtma işlemini yapan sistemin üst tarafta, soğutucu sistemininse altta olmasının avantajı, ısının iletiminde dış etkileri azaltmak ve numunenin iç tarafına doğru sabit doğrusal ısı transferi oluşturmaktır. Kullanılan sistem Şekil 3.16’deki gibi dikey olarak yerleştirildi [107].



99

Şekil 3.16. Lineer ısı akış sisteminin genel görünüşü [108]

3.3.4. Lineer ısı akış sisteminde bir deneyin yapılışı

Genel görünüşü Şekil 3.16’da gösterilen sisteme, numune hazır hale getirildikten sonra yerleştirilir. Sıvının dolaştığı aletin sıcaklık değeri 273 K ‘e ayarlanır ki, durağan bir sıcaklık gradyentini hesaplanabilsin. Isıtıcı sistemin durağan bir güç alabilmesi adına Eurotherm 2604 kontrolcü cihazı arasına, 5 kVA değerine sahip varyak seri olarak bağlandı. Bu şekilde malzemede kontrollü bir ısı değeri yakalanmış oldu. Elde edilen kararlı hal sıcaklığında iki saat durulduktan sonra, numunedeki sıcaklıkta kararlı hale geldi. Daha sonra ısıtıcı teldeki voltaj ve akım değerleri Hewlett Packard 34401A marka çoklu ölçme aletiyle, $\pm 1 \mu V$ hassasiyette ölçüldü. Ayrıca, ısı çiftlerin temasta olduğu yerlerdeki sıcaklıklar Pico markasının TC-08 modellenli cihazı ile bilgisayar üzerine aktarımı yapılarak veriler kayıt altına alındı. Katı fazın ısı iletkenlik katsayısına ait ölçümde her biri K tipi olan ısı çiftler kullanıldı. Kullanılan ısı çift numune iç kısmına 7 mm boşluklarla koyuldu. Lineer ısı akış sisteminde radyal, ısı kazancı veya kaybının olmadığı düşünülerek, numunenin sıcaklığının kararlı haldeki ısı iletkenliği tek boyutlu Fourier - Biot ısı iletim denklemi [107],

$$K = -\frac{Q \Delta X}{A \Delta T} \quad (3.1)$$

ile gösterilir.

“Katıya ait ısı iletkenlik K, ısı akışının hızı Q, numune kesitinin alanı A, T_1 ve T_2 sıcaklık değerlerinin ölçümü yapıldığı yerler arasındaki mesafe $\Delta X = X_2 - X_1$ uzunluğu ve X_2 ve X_1 noktaları arasındaki sıcaklık farkı da $\Delta T = T_2 - T_1$ şeklindedir”[112].

“İki saat boyunca her kararlı hal sıcaklığında beklenir ve Hewlett Packard 34401-A marka çoklu ölçüm cihazı ile ısıtıcı sistemdeki gerilim azalması ile ısıtıcıdan geçmekte olan akım değeri ölçülür ve bu değerler yardımıyla güç giriş değeri bulunur. Isıyı alma süresince seçilen tüm ölçümler bittikten sonra, soğutma işlemi de aynı şekilde oda sıcaklık değerine gelinceye kadar yapılır”[112].

“Numuneyi lineer ısı akış sistemi üzerinden alınır. Numuneye ait boyuna kesit, ölçüm sonuçlarında hataya neden vermeyeceğinden emin olmak adına çatlak, gözenek ve döküm hataları yönünden incelemesi yapılır”[112].

Metal alaşımların, ısı iletkenliğinin sıcaklık ile değişim değerleri Q , ΔX , A ve ΔT değerleri denklem 3.1’den kullanılarak hesaplanacaktır.

3.4. Metalografik İşlemler

Numune iç yapısında oluşan fazların fotoğraflarının görüntüleme işlemi, ısı iletkenlik değerlerinin ölçülmesinden sonra, Şekil 3.17’ de görülen dijital kameralı optik mikroskop yardımıyla görüntüleme işlemi yapılır.

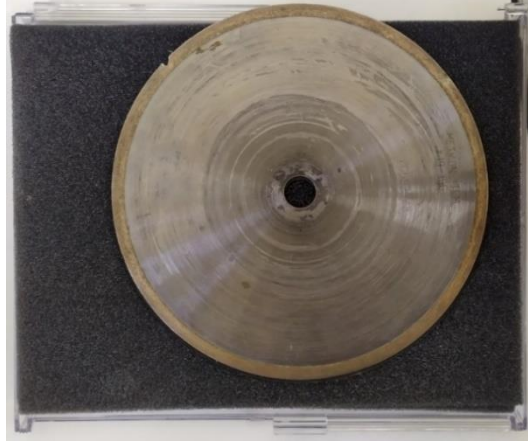


Şekil 3.17. Optik mikroskop ve CCD kameradan oluşan görüntü sistemi [107]

Numune belli ölçülerde kesilir, kalıplaması yapılır, zımparalanır ve son olarak parlatma işlemi yapılır. Bu basamakların sonunda dağlama işlemi gerçekleşir. Bu işlemin amacı mikro yapının net bir şekilde görüntülenmesini sağlamaktır. Aşağıda, bu metalografik işlemlerin geniş açıklaması bulunmaktadır [107].

3.4.1. Numunelerin kesilmesi ve kalıplanması

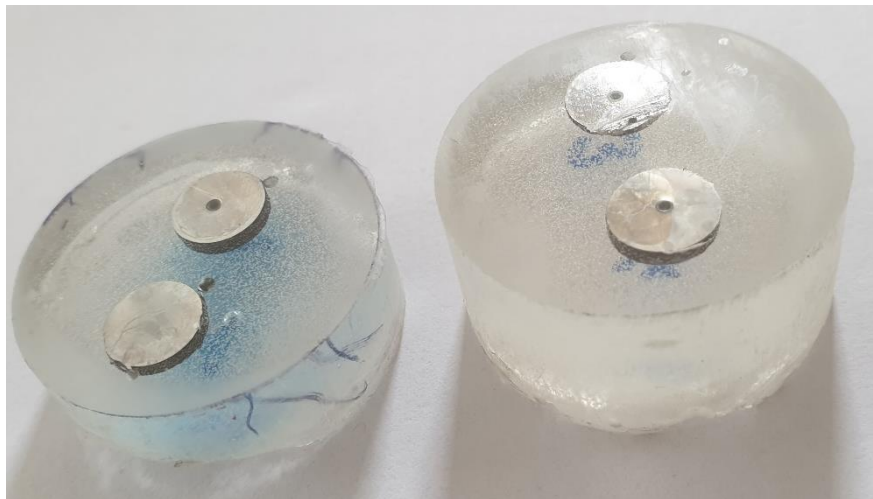
Şekil 3.12’deki Metkon MICRACUT 151 kesim aletiyle hazırladığımız numuneleri, istediğimiz boyutta kesmek için kullanırız. Kesim için kullanılan Şekil 3.18’deki hassas kesim işlemleri için tercih edilen 152 mm çaplı elmas kesim diski kullanılır [107].



Şekil 3.18. Elmas Kesme Diski [107]

Numuneleri 1 cm kalınlıkta pul şeklinde kesim aletinde kestikten sonra, kalıp yapılmaya hazırlanır. Bu numuneler, epoksi-resin kullanılarak soğuk kalıplama tekniği yardımıyla kalıp haline getirildi. Epoksi-resin dökülmesi anında kaymaması için zemine sabitlenen, plastik malzemeden üretilen 3-3.5 cm çaplı ve 3 cm boyundaki kalıp içerisine, numune koyulur [107].

1 ml Epofix-hardener ve 7 ml Epofix-resin karıştırılarak Epoksi-resin hazırlanır. Karışımı hazırlarken epofix-hardener ve epofix-resin bir kabın içinde dikkatlice karıştırılır. Hazırlanan karışım, plastik malzemeden yapılan kalıp içerisindeki numunelerin üstüne akıtılır ve donmaya bırakılır. Plastik kalıp donmuş epoksi kalıbının dışından çıkartılır. Daha sonra numuneler, parlatılmaya ve zımparalanmaya uygun hale getirilir. Kalıp halindeki numuneler Şekil 3.19’ da gösterilmiştir [107].



Şekil 3.19. Epoksi-resin ile kalıplanmış numunelerin resmi

3.4.2. Numunelerin zımparalanması

Pürüzlü yüzeylerin düz hale getirilmesinde kullanılan aşındırıcı zımpara olarak adlandırılır. Yüzeyinde bulunan taneciklerin sayısı bize zımpara kağıdının sertliği hakkın da bilgi verir. Zımpara kağıdı üzerinde birim yüzeye düşen tanecik sayısı grid olarak ifade edilir. Grid ile tanecik boyutu ters orantılıdır. Yani; grid değeri artarsa mikron cinsinden tanecik boyutu azalır. 120-600 grid değerli olanlar kaba, 800-2000 grid değerliler ince zımpara diye gruplaması yapılır [107]. Bu tezde tercih edilen zımpara, silisyum karbür (SiC) ve doğal mıknatıs özelliği olan magnetit tozu içermektedir. Bu tez çalışmasında zımpara işlemi, zımparalama ve parlatma işlemini aynı anda yapabilen Şekil 3.20’de görülen Metkon marka alet ile yapılmıştır.



Şekil 3.20. Zımparalama-Parlatma aleti [107]

Aletin zımpara diskine tercih edilen tane büyüklüğüne sahip zımpara kağıdı yerleştirilir ve aletin su modu açılır. Zımpara işlemine uygun hız devri seçilir, kalıp halindeki numuneleri sulu zımpara üzerinde tutarak zımparalama yapılır. Zımpara işlemi sürecinde, su kullanılmasının sebebi, sürtünme ile ısı oluşmasının önüne geçmek ve tüm yüzeyde eşit temas sağlamak için kullanılır. Zımpara işlemi, 160 devir/ dakika’ da yapılır. Zımpara kağıtları sırasıyla, 120 grid ölçekliden başlanarak 2000 grid ölçekli kullanılarak yapıldı [107].

3.4.3. Numunelerin parlatılması

Parlatma işlemini Şekil 3.20’de görülen cihazla yapıldı. Bu işlem zımparalama bittikten sonra gözle tespiti edilemeyen çizikleri yok etmek üzere yapılır. Parlatma işlemi için, parlatma diski üzerine numuneye uyumlu özellikte keçe yapıştırılır ve su ile ıslanması sağlanır. Diskin dönme devri 160 devirdir, parlatma esnasında bu devirde çalışma yapılmıştır. Parlatma sırasında tane büyüklükleri farklı DIAPAT-M marka elmas süspansiyonlar, sırası ile 6µm, 3µm, 1µm, 0.25µm şeklinde kullanıldı. 15-20 dakika boyunca numuneler süspansiyonlarda tutularak parlatma işlemi yapıldı. Tabii ki bu süreçte keçede nem azalması olacaktır, bunun için ara ara süspansiyon takviyesi de yapıldı. İşlem sırasında sadece süspansiyon takviyesi keçenin nemli kalması ve numunenin keçeye yumuşak dokunması için yeterli değildir. Bunun için süspansiyona ek yağlayıcıda (lübrikant) uygulanmıştır. Yağlayıcı 10-15 saniye zaman dilimleriyle kullanıldı. Tüm süspansiyon aşamalarından sonra, yeni süspansiyon işlemine geçiş yapmadan, keçeyi saf su ile güzelce temizleriz, diğer süspansiyondan keçe üzerinde kalmasını. Bu işlemlerde kullanılan süspansiyonlar ve keçe Şekil 3.21’de görülmektedir [107].



Şekil 3.21. Parlatma işleminde kullanılan zımpara, keçe ve süspansiyonlar [107]

3.4.4. Numunelerin dağlanması

“Parlatma işleminin sonunda numune yüzeyi pürüzsüz, ayna gibi parlak görünse de bir numune yüzeyinde karışıklık meydana getirmeden inceleme yapılamaz. Mikroyapı

incelemesi yapabilmek için numunenin dağlanması gerekir. Bu işlem ile numuneye ait mikroyapı özellikleri meydana çıkarılır. Metalografide iki farklı dağlama şekli bulunur: kimyasal ve elektrolitik dağlama. Kimyasal dağlamada numune üzerine yani yüzeyine, uygun olan çözelti uygulanır. Dağlama işleminde dikkat edilmesi gereken önemli konu, metal özellikli malzemeler için uygun olan dağlama çözeltisinin seçimidir. Elektrolitik dağlamada ise yüzey üzerinden atom katmanları atılır. Tabii ki bu işlem sırasında belirli bir enerjiye gereksinim duyulur. Yüksek voltaj veya ısı uygulanarak enerji sağlanır [111]. “

Bu tez çalışmasında kimyasal dağlama tekniği seçildi. Fazların rahat görüntüleyebilmek üzere uygun olan dağlayıcı belirlendi. Numunenin yüzeyi güzel bir şekilde parlatılıp, temizlendikten sonra, numune belli bir süre dağlayıcı içinde tutularak yapılır. Mikroskop da dağlama süresinin uygun olup olmadığı sonucuna varılır.

Bu çalışmada (Sn-2Ag-2Zn), (Sn-2Ag-2.5Zn), (Sn-1.5Ag-2Zn), (Sn-1.5Ag-2.5Zn) lehim alaşımlarına uygun olan dağlayıcı çözeltisi 80 ml gliserin ($C_3H_8O_3$), 10 ml asetik asit (CH_3COOH), 10 ml nitrik asit (HNO_3) maddelerinden hazırlandı. Her numuneye çözelti, oda sıcaklığında 10 saniye boyunca uygulanmasıyla dağlama işlemi yapıldı.

3.4.5. Fazların belirlenmesi

Hazırlanan numuneler üzerinde yapılması gereken işlemlerden sonra Şekil 3.17'deki optik mikroskop ile fazlarının görüntüleri kaydedildi. Kaydedilen bu görüntüler farklı objektif büyüklükleri ile numune yüzeylerinin farklı yerlerinden alındı.

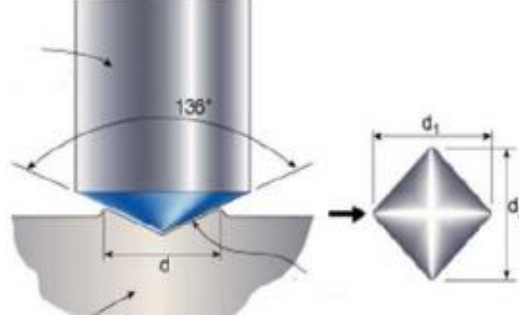
3.5. Mekanik Özelliklerin Belirlenmesi İçin Yapılan Hazırlıklar

Tezde, mekanik özelliklerden çekme-dayanımı ve sertlik testleri yapılmıştır.

3.5.1. Sertlik deneyinin yapılışı

Numune sertlikleri statik sertlik ölçme yönteminden biri olan Vickers Sertlik deneyi yapılarak ölçüldü. Vickers sertlik ölçme yönteminde, numune üstüne kuvvet

uygulayan batıcı uç tabanı kare piramit olan tepe açısı 136° olan elmas uç kullanılır. Elmas uca ait çizimsel gösterim şekil 3.22’de gösterilmektedir.

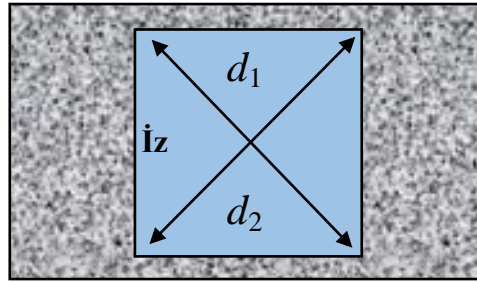


Şekil 3.22. Vickers sertlik ölçümüne ait çizimsel gösterim [113]

Vickers sertlik testinde piramit şeklinde olan elmas uç, numune yüzeyine belirlenmiş kuvvet ile uygulanır. Belli bir zaman bekletilen elmas uç, havaya kaldırılır. Yükün numune yüzeyinde oluşturduğu izin köşegenleri ölçülür. Vickers sertlik değerini hesaplamak için denklem 3.2’ den faydalanılarak Vickers sertlik değeri hesaplanır.

$$VSD = \frac{F}{A} = \frac{2 \cdot F \cdot \sin \frac{136^\circ}{2}}{d^2} = 1,854 \cdot \frac{F}{d^2} \quad (3.2)$$

Denklemden $VSD =$ Vickers sertlik değeri (kgf/mm^2), $F =$ Uygulanan yük (kgf),
 $A =$ İz alanı (mm^2), $d =$ Ortalama taban köşegen uzunluğu (mm) [107].



Şekil 3.23. Vickers sertlik deneyinde elde edilen iz ve izinin ölçülmesi

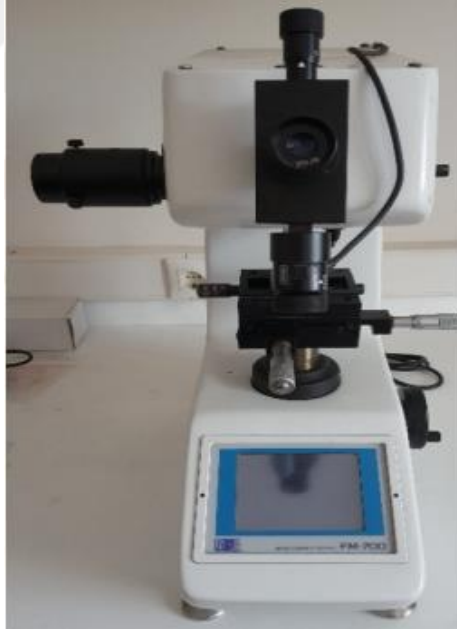
Taban köşegeni (d) Şekil 3.23’ de görüldüğü üzere kare piramit gibidir. Vickers sertlik değeri, deneyde uygulanan yükün iz alanına bölünmesiyle hesaplanır. Burada ki iz alanının bulunabilmesi için malzeme yüzeyinde oluşan piramit şeklindeki izin

d_1 ve d_2 olarak isimlendirilen köşegenleri ölçülür sonra ortalaması alınır, sonucunda ise taban köşegen değeri olan (d) denklem 3.3' deki formülü elde edilir [114].

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (3.3)$$

Burada d_1 = Birinci köşegen uzunluğu (mm) , d_2 = İkinci köşegen uzunluğu şeklinde tanımlanır.

Numunelerin parlatma ve zımparalama işlemleri bittikten sonra Şekil 3.24' deki sertlik ölçme cihazı ile sertlik değerleri ölçüldü. Tez çalışmasında numune yüzeylerinin farklı bölgelerinden tercih edilen noktalarda 25g'lık HV(kg/mm^2) ve 50g'lık HV(kg/mm^2) yükün altında 10 saniye tutularak sertlik ölçümleri yapıldı [107].



Şekil 3.24. Sertlik ölçme aleti [107]

3.5.2. Çekme-dayanım deneyinin yapılışı

Çekme-dayanımı testine uygun standartlarda belirlenen farklı boyutlarda ve kesitlerde numune üretimi yapılabilir. Bu tezde silindirik numune üretimi yapıldı. Kalıp olarak kullanmak için boyutu 6.35 mm olan grafit çubuk kullanıldı. Tornada

50 mm boyutunda kesilen grafit çubuğun, bir ucu 4 mm çaplı matkap ucu ile 40 mm uzunlukta oyulur. Kalıp içine oturtulması için pota yani; alaşım haznesi hazırlığı yapılır. Öncelikle 40 mm boyunda grafit çubuk kesilir. Kesilen grafitin bir ucu 23 mm çaplı matkap ucuyla 30 mm uzunluğunda oyuk açılır. Diğer tarafı 6 mm çaplı matkap ucu yardımıyla 10 mm uzunluğunda delinir. Bir ucunu oyarak hazırladığımız kalıp potanın 6 mm çaplı matkap ucu yardımıyla delinmiş ucundaki oyuga yerleştirilir. Birleşen bölgeleri kaçak olmasını engellemek için sıcaklığa dayanıklı silikon ile kaplanır. Kalıbımız fırında döküm yapmaya hazır olur. Döküm yaparken, ısı iletkenlik numunesinin oluşturulmasında geçerli olan bütün teknikler bu işlem basamağı içinde uygulanır. Döküm işleminden sonra soğuyan kalıp yavaş bir şekilde kırılır. 40 mm boyunda ince silindir şeklindeki numune çekme-dayanım testine hazırlanır [107].

Çekme testi cihazları, iki değişik çalışma sisteminde üretilir. Bir tanesi hidrolik, diğeri ise mekanik tahriklidir. Bu cihazlarda, çapraz kafa da denilen, yukarı ve aşağı hareket eden bölüm vardır. Mekanik tahrikli olanlarda, çapraz kafanın hareketi motor ile sağlanırken, hidrolik olanlarda ise hareket hidrolik pistonlar ile olur. Çekme testinde kullanılan cihaz şekil 3.25'de görülmektedir. Bu cihaz yük hücresi, gövde, tek-çift kolonlar, çapraz kafa, kontrol ünitesi, çekme çeneleri ve bilgisayar donanımlarından meydana gelir [114].

Bu tez çalışmasında SHIMADZU AG-XD 50 kN marka, test alanı: 500 mmx1060 mm, test hızı aralığı: 0.0005 mm/dk-1000 mm/dk, tüm hızlarda maksimum hız uygulayabilme, test hızı hassasiyeti: $\pm 0.1\%$, veri okuma sıklığı max. 0.2 ms, Stroke, force ve stres kontrollü test yapabilme özelliğine, ISO 7500/1, ASTM E4, DIN51221 standartlarındadır [115].

Çekme testi, deneye ait numunelerin belirlenen standartlara göre hazırlanarak, tek eksen boyunca ve sabit hızda numune kopuncaya kadar çekilmesiyle yapılmıştır. Çekme testi, çekme aleti çenelerine numunenin tutturulmasıyla başlar. Numuneye devamlı şekilde artışta olan bir kuvvet uygulanarak, numunenin kopması sonucunda, test biter. Çekme testi boyunca numunenin kırıldığı anda oluşan uzama değeri kaydedilir [116]. Test anında oluşan değerler (3.4), (3.5) ve (3.6) denklemlerinde yerine yazılarak birim uzama, % uzama ve gerilme değerleri hesaplanır.

$$\sigma = \frac{P}{A_0} \quad (3.4)$$

$$\text{Birim uzama} = \frac{l_1 - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (3.5)$$

$$\%uzama = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \times 100 = \frac{\Delta l}{l_0} \times 100 \quad (3.6)$$

Burada σ =Gerilme (kgf/mm^2 veya N/mm^2 veya MPa), P=Kuvvet (kgf veya N),

A_0 =Numunenin ilk kesit alanı (mm^2), l_1 =Numunenin uzama sonrası boyu (mm), l_0 =Numunenin ilk boyu (mm) olarak ifade edilir [107].



Şekil 3.25. Çekeme-basma test cihazı [116]

3.6. Elektriksel İletkenlik

3.6.1. Özdirenç ölçümü

Maddenin ayırt edici özelliği olan özdirenç belirlenebilmesi için gerilim, geometrik şekil ve akım faktörünün biliniyor olması gerekir. Bunlara ek, yine özdirenç hesabının yapılabilmesi için, geometrik şeklinin de ölçülerinin bilinmesi gereklidir. Özdirenç formülünde $V=I.R$ eşitliğine geometrik yapının da etkisinden meydana gelen “geometrik özdirenç düzeltme faktörü (RCF) [109]” değerini eklenir ve yeni oluşan özdirenç hesaplanmış olur. Düzeltme katsayısını etkileyen faktörler, numune kalınlığına, yüzey alanına, geometrik şekline, bağlantı tellerinin numunedeki diziliş ve konumuna bağlı olan faktörlerden oluşur [117]. Özdirenç hesaplanmasında

kullanılan formül ifadesi $\rho = \frac{V}{I}G$ olarak tanımlanır. Buradaki G “geometrik özdirenç düzeltme faktörü (RCF)” diye ifade edilir [107]. Değişik geometrik yapıların özdirenç düzeltme faktörüne ait eşitliklerin bulunduğu Tablo 3.1’de gösterilmiştir.

Tablo 3.1. Özdirenç düzeltme faktörü eşitlikleri [118]

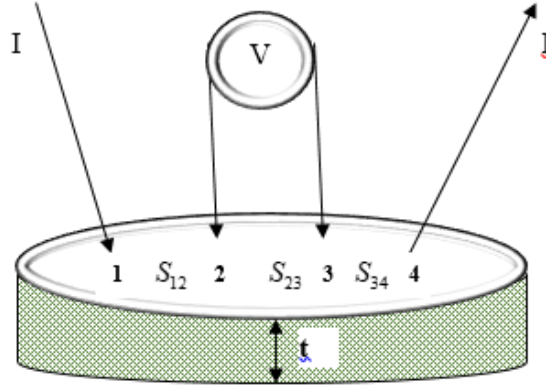
(∞)- Kesit	(∞)- Yüzey	$G = \frac{2 \cdot \pi}{\frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_3} - \frac{1}{S_1 + S_2} - \frac{1}{S_2 + S_3}}$			
		$G = 2 \cdot \pi \cdot s$			(*)
(t)- Kesit	(∞)- Yüzey	$F_1(t/s) = \frac{t/s}{2 \cdot \ln \frac{\text{Sinh } t/s}{\text{Sinh } t/2s}}$	Kalın	$G = 2 \cdot \pi \cdot s \cdot F_1(t/s)$	(**)
			İnce	$G = \frac{\pi}{\ln 2} \cdot t$	
			Çok İnce	$G = \frac{\pi}{\ln 2}$	(***)
	(Daire) -Yüzey	$F_2(d/s) = \frac{\ln 2}{\ln 2 + \left[\frac{(d/s)^2 + 3}{(d/s)^2 - 3} \right]}$	Kalın	$G = 2 \cdot \pi \cdot s \cdot F_1(t/s) \cdot F_2(d/s)$	(****)
			İnce	$G = \frac{\pi}{\ln 2} \cdot t \cdot F_2(d/s)$	
			Çok İnce	$G = \frac{\pi}{\ln 2} \cdot F_2(d/s)$	
(*)	$S_1 = S_2 = S_3 = S$				
(**)	$t \rightarrow \infty$ yaklaşırken $F_1(t/s) \rightarrow 1$ yaklaşır. $t \geq 5s$ için $F_1(t/s) = 1$ alınabilir.				
(***)	Sonsuz ince kalınlık için t ihmal edilir.				
(****)	$d \rightarrow \infty$ yaklaşırken $F_2(d/s) \rightarrow 1$ yaklaşır. $d \geq 40s$ için $F_2(d/s) = 1$ alınabilir.				
*	Kalın; $t \geq \frac{S}{2}$, İnce; $t < \frac{S}{2}$, Çok (Sonsuz)İnce; $t < \frac{S}{10}$, Çok (Sonsuz)Kalın; $t \geq 5S$				

Elektrik iletkenliği ölçümünde tercih edilen iki teknikten biri olan “2- nokta iletkenlik ölçüm” tekniğinde ise numuneye ait toplam direnç değerine iletken tele ait direnç, bağlantının uçları ve numune ile dokunduğu ara yüzey direnç değeri de

eklenir. Bundan dolayı bu yöntemde hesaplanmış olan ρ öz direnç değeri, gerçek olandan yüksek hesaplanır [118]. Bundan dolayı “4-nokta iletkenlik ölçümü” yöntemi tercih sebebi olur. 4-nokta iletkenlik ölçümü yöntemindeki bağlantı uçlarındaki direnç değerleri hesaplamada dikkate alınmaz ve ölçümü yapılan ρ numuneye ait gerçek öz direnç değeridir.

3.6.2. 4-Nokta iletkenlik ölçüm yöntemi sistemi

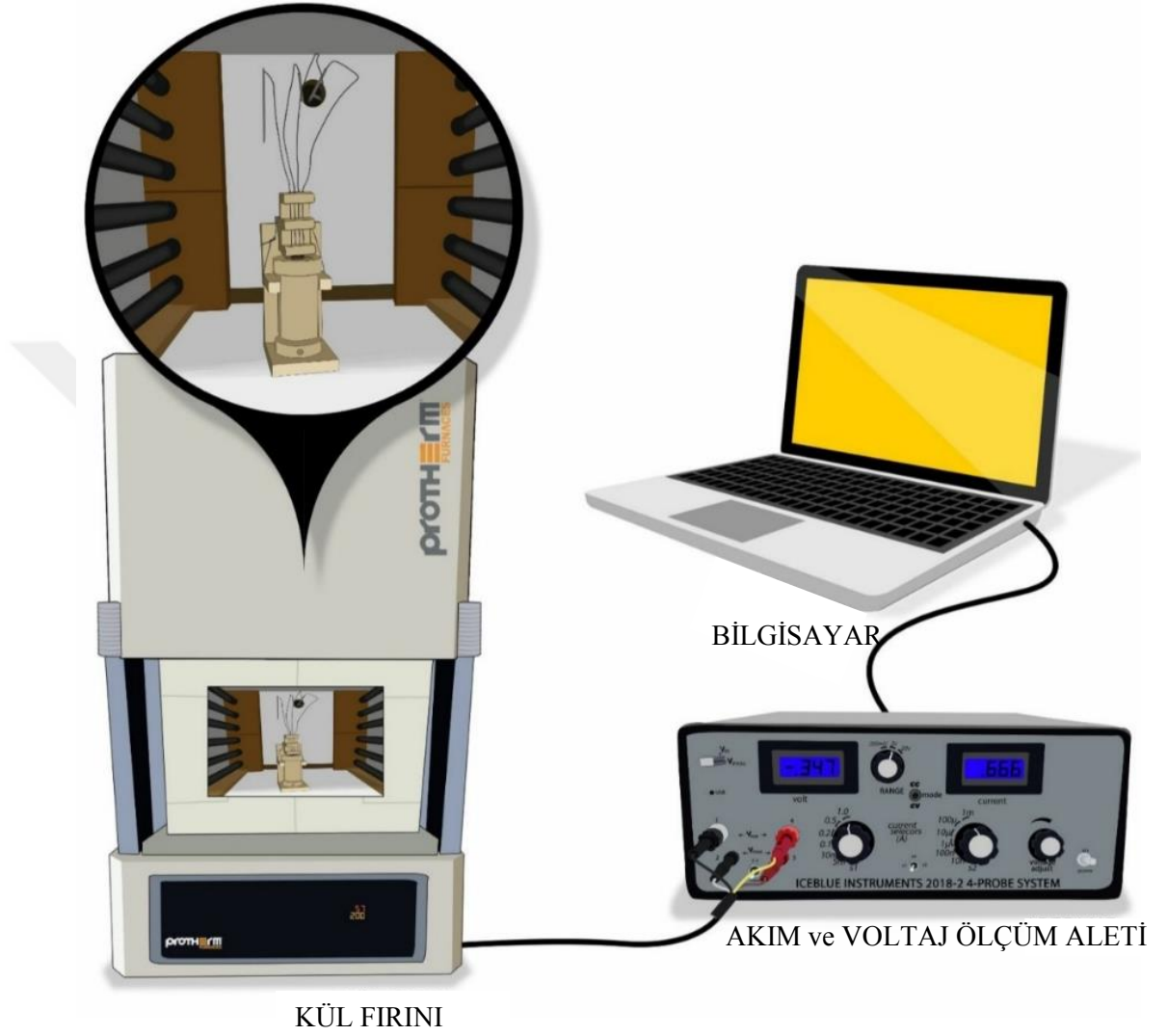
Bu teknikte kullanılan problemlerin numune üzerine teması Şekil 3.26’de şematik olarak gösterilmektedir. Şekildeki numune üzerine 4 tane prob dokunmaktadır. Problar yani teller, platin malzemeden üretilmiş ve dairesel kesitlidir. Şekil 3.26’ de görülen 1 ve 4 numaralı noktalar akım (I) değerini ölçmekte, 2 ve 3 numaralı noktalar ise gerilim (V) ölçüldüğü noktalardır. Şekil 3.26’de görülen “s” ise teller arası mesafeyi temsil eder ve bu mesafe araları eşit uzaklığa sahiptir ($S_{12}= S_{23}= S_{34}=S$). Çoğunlukla bu yöntemde problemlerin diziliş şekilleri lineer, ara mesafeleri s eşit ayarlanır. Numune kalınlığı ise t ile ifade edilir. Elimizdeki bütün veriler, numuneye ait G faktörünün değerini etkiler [1071].



Şekil 3.26. t Kesitli Numune çizimsel gösterimi [118]

Bu tezde problemlerin yani teller arasındaki mesafe 1 mm, t kalınlık olarak 3 mm ve 7.9 mm çapa sahip dairesel yüzey şekilli numuneler kullanıldı. Deney düzeneğinde ise Şekil 3.27’ deki Proton model kül fırını, gerilim ve akım değerlerinin ölçümlerini yapabilen cihaz kullanıldı. Fırındaki sıcaklığı ölçebilmek için 0.25 mm çaplı K tipi ısı çifti tercih edildi. Numuneye ait iletkenlik değerleri ölçülen gerilim ve akımlar

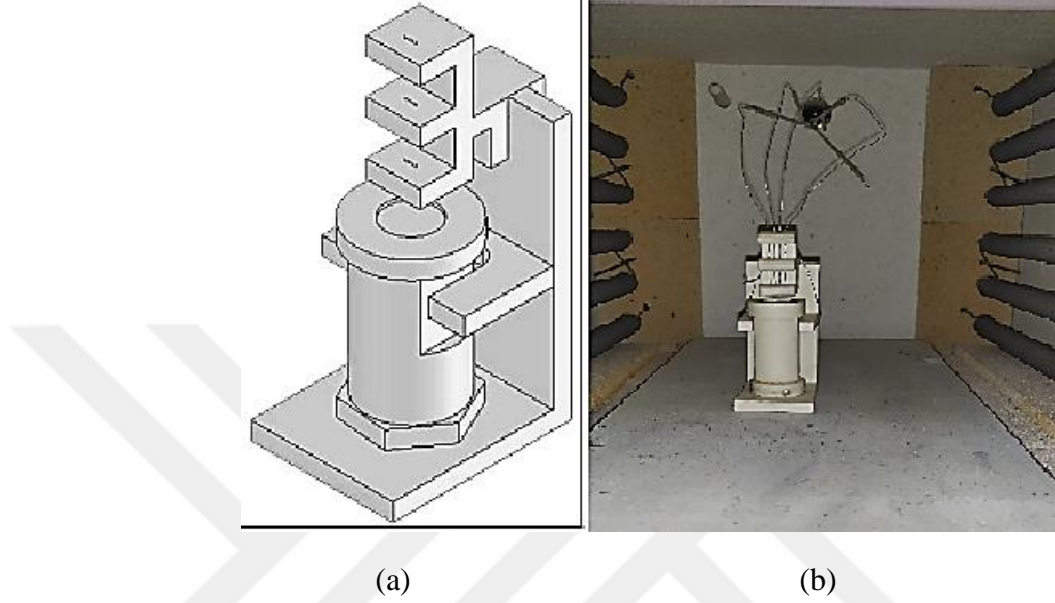
bilgisayar ortamında kaydedilir. 4 nokta iletkenlik ölçüm yöntemi şekil 3.27’ de gösterilmiştir [107].



Şekil 3.27. 4 nokta iletkenlik ölçüm yöntemi

Şekil 3.28’deki numune tutucu, platin tellerin numune üzerine tam olarak dokunabilmesi için, numuneyi koyduğumuz taşıyıcının yukarı ve aşağı hareketini sağlayan mekanizmadan ve gövdeden oluşur.

Numune tutucunun böyle sistemlerde yüksek sıcaklığa dayanması ve iletken hale geçmemesi beklenir. Bundan dolayı tutucu böyle sistemlere özel olarak alümina malzemeden üretilmiştir [118].



Şekil 3.28. (a) Numune tutucu çizimsel gösterimi, (b) Numune tutucu resmi [118]

3.6.3. Elektriksel iletkenlik ölçümü deneyinin yapılışı

Numuneyi tutucuya koyulur ve platin tellerin numune üzerine dokunduğundan emin olunur. Tam olarak temas etmiyorsa, numune tutucu tabletleri elimizin yardımıyla ayarlanır ve tam olarak dokundurulur. Ayarladığımız düzeneğin ve temasın gitmemesi için fırın kapağı dikkatlice kapatılır. Bilgisayarda bulunan ölçmede kullanılacak programı açılır ve kullanıma hazır hale getirilir. Ölçme yapacak cihaz gerilim ve akım değerlerini ölçebilmesi için, veri alacak şekilde ayarı yapılır. Bilgisyardaki program ve fırın aynı anda olacak şekilde çalıştırılır. Numune erime sıcaklığına yakın olacak bir değer seçilir ve veriler bu değere gelinceye kadar kaydı yapılır. İşlem bittikten sonra yine aynı anda hem bilgisayar hem de fırın kapatılır [107]. Kaydını yaptığımız gerilim değerleri, akım değeri ve hesaplanan G değeri

$\rho = \frac{V}{I}G$ formülünde yerine yazılır. Böylece her numune için, elektriksel öz direnç

değeri farklı sıcaklıklar için hesaplanır [107].

BÖLÜM 4

SONUÇ ve TARTIŞMA

4.1 Giriş

Lehimler, elektronik bileşenler ile baskılı devre kartları veya alt tabakalar arasında mekanik ve elektriksel bağlantılar oluşturmak için kullanılır. Geleneksel olarak, Sn-Pb lehimleri, düşük erime noktasına, düşük maliyete, iyi mekanik mukavemete sahip olduklarından elektronik endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır [119]. Ancak son zamanlarda Pb gibi toksik maddelerden tamamen arındırılmış “yeşil” elektronik ürünler tercih edildiği için ve elektronik ambalajlarda kurşun içeren lehim alaşımlarının yasaklanması ile birlikte yaygın olarak kullanılan ötektik SnPb lehimlerinin yerine kurşunsuz lehimlerin geliştirilmesi zorunlu hale geldi. Kurşunsuz lehim alaşımları üzerine yapılan çalışmalarda görüldüğü, Sn-Pb lehimlerinin sadece toksitlenme problemi değil, aynı zamanda, kayma mukavemeti, sürünme ve termal mekanik yorgunluğa karşı direnç özelliklerinin de diğer kurşunsuz alaşımlara göre kötü olduğu görüldü. Bu nedenle SnPb yerine gösterilecek kurşunsuz lehim alaşımının bu dezavantajları ortadan kaldıracak özelliklere sahip olması gerektiği görüldü. Halihazırda ticari olarak çok sayıda kurşunsuz lehim alaşımı olmakla birlikte bunlar arasında SnAg alaşımı en dikkat çekici alaşımdır [120]. Bu lehim, geleneksel kurşun-kalay lehim alaşımlarından daha yüksek bir erime sıcaklığına sahip olmasına rağmen, sağlık ve çevresel riskleri çok daha düşüktür [119].

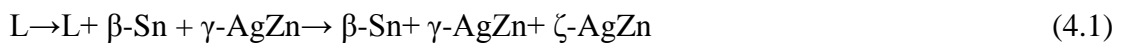
Son zamanlarda yapılan çalışmalar, Sn-Ag lehimine bakır, nikel, gümüş, antimon, bizmut ve çinko gibi alaşım elementlerinin ilave edilmesi alaşımın erime noktasını düşürürken aynı zamanda mekanik özelliklerini iyileştirdiğini göstermiştir. [121-126]. Lehim ara bağlantılarının güvenilirliğini artırmak için kullanılan bir tekniktir, uygun takviyelere bu güvenlik daha üst düzeye çıkarılmaktadır. Takviye edici partiküller sadece tane sınırı kaymasını, metallar arası bileşik oluşumunu ve tane büyümesini engellemekle kalmayıp, aynı zamanda stresi düzgün bir şekilde yeniden dağıttığından,

lehim alaşımının güvenirlik seviyesini artırmaktadır. Ayrıca, yabancı takviye ilavelerinin uygun seçimi, metallar arası sert parçacıkların homojen olarak dağılmasına ve parçacıkların kabalaşmasını engellemektedir. Homojen olarak iyi dağılmış takviye elementler, tane ve çatlak büyümesini ve dislokasyon hareketini engeller ve böylece lehimin sürtünme ve yorulma deformasyonuna karşı direnci artar. [127-128] Lehim alaşımına katkı yapılan element süneklik ve sürtünme direnci ile birlikte alaşımının mukavemetinide katkı sağlarsa ideal bir lehim alaşımını temsil edebilir. Yapışma mukavemeti, kurşunsuz bir lehimin performansını değerlendirirken önemli bir parametredir, çünkü bu özellik metalurjik bağlama ve lehim bağlantısının güvenilirliği hakkında bir fikir verir [129-133].

Bu çalışmada ise, halen araştırmaları devam eden ve kurşunsuz lehim alaşımları içinde en çok umut verici olan Sn-%2 ağ. Ag-% [X] ağ. Zn (X=2,2.5) ve Sn-%1.5 ağ. Ag-% [X] ağ. Zn (X=2,2.5) alaşımlarının ısıl, elektriksel ve mekanik özellikleri incelenecektir. Anmin Hu [134] ve arkadaşları tarafından bu alaşımların farklı özellikleri araştırılmış olmasına ragmen bu çalışmada ise bu alaşımların literatürde olmayan ısıl, elektriksel ve mekanik özellikleri belirlenecektir.

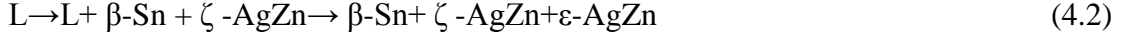
4.2 Yapı

Anmin Hu [134] ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada Sn-xAg-yZn (x=1, 1.5, 2, 3; y=1, 1.5, 2, 2.5, 3, 4) alaşımlarının mikroyapıları detaylı olarak analiz edilmiştir. Bu çalışmada ise bu alaşımlar içinden Sn-2Ag-[x]Zn (X=2,2.5) ve Sn-1.5Ag-[x]Zn (X=2,2.5) alaşımlarının mikroyapıları incelenmiştir. Şekil 4.1'de grldğu gibi bu çalışmada elde edilen mikroyapı fotoğraflarının Anmin Hu [134] ve arkadaşları tarafından elde edilen mikroyapılarıyla uyumludur. Sn-2Ag-2Zn alaşımında, Şekil 4.1'de grldğu gibi γ -AgZn (Ag_5Zn_8) ve dendritik β -Sn olmak üzere iki faz tespit edilmiştir. Bu alaşım için birincil faz γ -AgZn (Ag_5Zn_8)'dir ve Anmin Hu ve arkadaşları tarafından [134] Sn-2Ag-2Zn lehiminin katılaştırma prosedürü aşağıdaki Şekilde tanımlanmıştır.

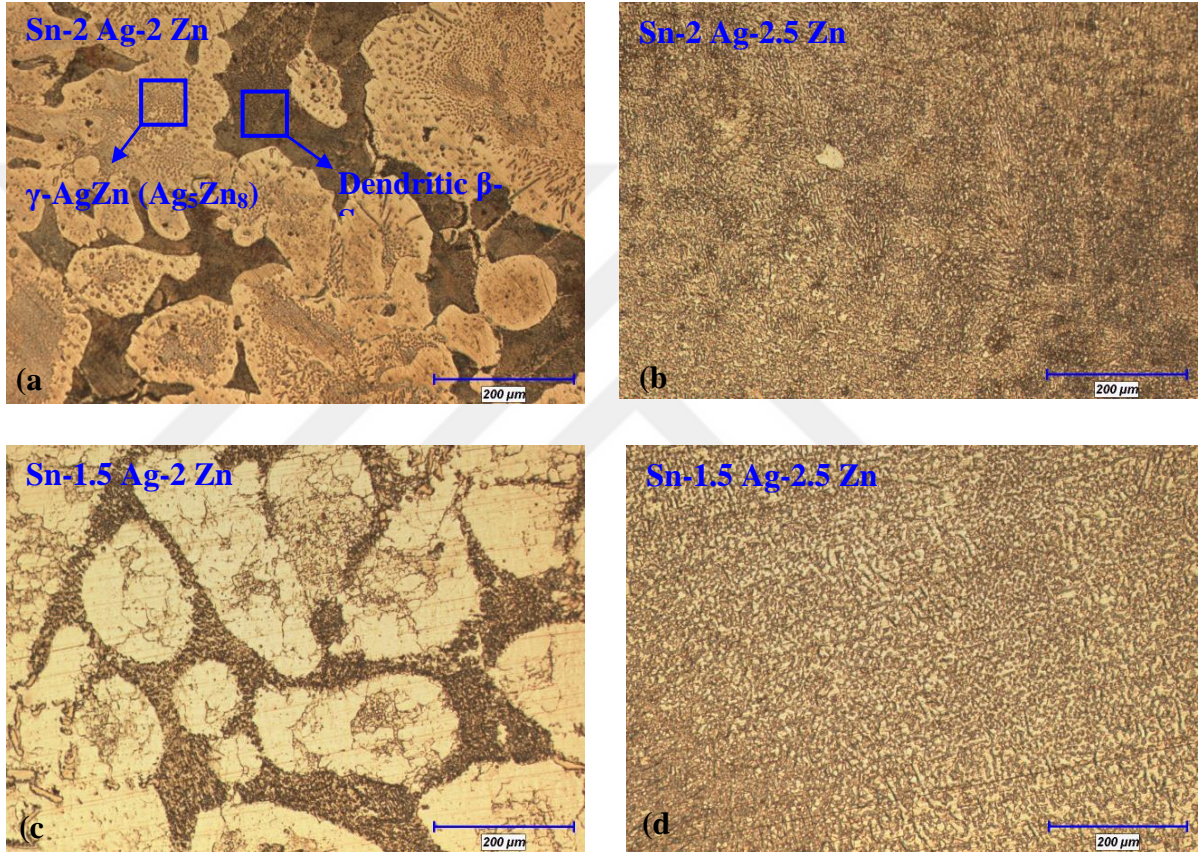


Çinko miktarının artırıldığı Sn-2Ag-2.5Zn alaşımında ise dendritik β -Sn tamamen kaybolurken, γ -AgZn fazı nadiren gözlenir. Artık bu fazların yerine ötektik fazı eş eksenli koloniler halinde oluşan β -Sn fazı gözlenir. (Şekil 4.1.b) Anmin Hu [134] ve

arkadaşları tarafından Sn–2Ag–2.5Zn lehiminin katılaştırma prosedürü ise aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır.



Şekil 4.1.c-d görüldüğü gibi Ag miktarı ağırlıkça 1.5 düşürülmesine rağmen mikroyapı varyasyonu ağırlıkça %2 Ag lehimlerine benzerdir.



Şekil 4.1. Sn-%2 ağ. Ag-% [X] ağ. Zn (X=2,2.5) ve Sn-%1.5 ağ. Ag-% [X] ağ. Zn (X=2,2.5)'in optik fotoğrafları

4.3 Erime/sıvı sıcaklığı

Lehim alaşımları için, imalat açısından bakıldığında erime sıcaklığı, ilk ve en önemli faktördür. Sn-Pb'nin ötektik sıcaklığı 183°C'dir ve günümüzde kullanılan montaj ekipmanlarının çoğu, temel referans olarak 183°C kullanılarak çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Temel sıcaklıktaki bazı değişiklikler, örneğin yeni Pb içermeyen lehimin erime noktası daha yüksekse, o zaman üreticiler tarafından yeni ekipmanın satın alınması gerekecek, dolayısıyla ürünlerin maliyetinde artışlar olacaktır [1].

Erime noktasını 183°C'ye yakın bir sıcaklıkta tutmanın bir başka nedeni ise, mikro elektronik çip üretiminde termoset polimerlerin yaygın kullanımınıdır. Epoksi reçineler, kalıbın taşıyıcılara veya alt tabakalara kalıp tutturma malzemesi olarak kullanılır. Bazı bölümlerde ise silikonlar da kullanılır. Lehimleme işlemleri sırasında bu ve diğer malzemelerin bozulmaması önemlidir. Bu polimerik malzemelerin maruz kaldığı en yüksek sıcaklık, lehim toplarının ve lehim tümseklerinin yeniden akışı sırasında, 90 saniye boyunca yaklaşık 230°C'dir [1].

Bu nedenle alternatif olarak belirlenecek kuşunsuz lehim alaşımının Sn-Pb alaşımına uyumlu şekilde eriyen benzersiz bir "erime sıcaklığı" beklenir. Erime, katılma sıcaklığında başlar ve sıvılaşma sıcaklığında tamamlanır. Belirlenecek alaşımların öncelikle sıvılaşma ve katılma sıcaklıklarının hangi tolerans aralığında olması gerektiği tespit edilmelidir. Kabul edilebilir en yüksek sıvılaşma sıcaklığı aşağıdaki faktörlere bağlıdır: [1]

1. Mikroelektronikte kullanılan en yüksek sıcaklıktaki polimerik malzemeler, kalıcı bozunma başlangıcı olmadan dayanabilir.
2. Lehim alaşımının makul bir süre içinde erimesini, bir bağlantı oluşturmasını ve yeniden katılmasını sağlamak için ısı transferinin verimliliği, böylece üretkenlik korunabilir (mevcut standart yeniden akış süresi 90 s'dir).
3. Lehimleme için kullanılan fırınların içindeki sıcaklık profili değişimlerinin ne ölçüde hassas bir şekilde kontrol edilebildiği [1].

Yukarıda verilen koşullarda dikkate alındığında yapılan araştırmalar, alternatif lehim alaşımı için sıvılaşma sıcaklığı için 20°C tolerans sıcaklığının yeterli olduğu görüşündedir. Polimerik malzemeler 120 saniye süresince maksimum 250°C sıcaklığa dayanabiliyorsa, o zaman 230°C civarında sıvılaşma sıcaklıklarına sahip lehim alaşımlarını kullanmak mümkün hale gelir. Anmin Hu [134] arkadaşları tarafından Sn-2Ag-[x]Zn (X=2,2.5) ve Sn-1.5Ag-[x]Zn (X=2,2.5) alaşımları için Tablo 4.1'de verilen datalar incelendiğinde sıvılaşma sıcaklığı tolerans sıcaklığı arasında yer almaktadır. Sn-

Ag-Zn alaşımındaki Ag ve Zn'nin kompozisyonlarının değişimi sıvılaşma sıcaklığında önemli bir etki oluşturmamıştır.

Tablo 4.1. Sn-2Ag-[x]Zn (X=2,2.5) ve Sn-1.5Ag-[x]Zn (X=2,2.5) alaşımlarının bazı termal özellikleri [134]

Kompozisyon (%ağ.)	Katılaşma Sıcaklığı (K)	Sıvılaşma Sıcaklığı (K)	Homolog Sıcaklık	Erime aralığı (K)
Sn-1.5Ag-2Zn	491.45	493.95	0.61	2.5
Sn-1.5Ag-2.5Zn	487.05	493.25	0.61	6.2
Sn-2Ag-2Zn	491.85	494.75	0.61	2.9
Sn-2Ag-2.5Zn	492.05	494.25	0.61	2.2

Katılaşma sıcaklığı, lehim alaşımının homolog sıcaklığını belirler [1]. Homolog sıcaklık (T_H), alaşımın Kelvin cinsinden istenen servis sıcaklığının yine Kelvin cinsinden erime sıcaklığının bölünmesiyle elde edilir. Malzemelerin gösterdiği mekanik davranış sıcaklıkla değişmektedir. Özellikle metal şekillendirme işlemlerinde arzulanan düşük akma gerilmesi ve yüksek süneklik sıcaklıktan etkilenmektedir. Sıcaklığın etkisi malzemenin sıcaklığı (veya şekillendirme ortamının sıcaklığı) erime sıcaklığına doğru yaklařtıķça daha da artmaktadır. Metalik yapıya sahip malzemelerin erime sıcaklıklarında büyük farklılıklar gösterdiğinden sıcak/soğuk ayırımı için malzemelerin erime sıcaklığını da içeren bir ölçüte ihtiyaç duyulmuştur. "Homolog Sıcaklık" olarak adlandırılan bu parametre gerçekte birimsiz olup 0 ile 1 arasında değerler almaktadır. Homolog Sıcaklık T_H ;

$$T_H = \frac{T(K)}{T_M(K)} \quad (4.3)$$

şeklinde mutlak sıcaklık cinsinden çalışma sıcaklığının T , malzemenin erime sıcaklığına T_M oranı olarak tanımlanmaktadır. Sıcaklığın mutlak sıfır değerine yaklaşması durumunda homolog sıcaklık 0 değerine yaklaşırken, sıcaklığın malzemenin erime sıcaklığına yaklaşması halinde ise homolog sıcaklık 1 değerine yaklaşmaktadır. Homolog sıcaklığa göre deformasyon işlemleri soğuk, ılık ve sıcak işlem olmak üzere üç gruba ayrılır. Çalışma sıcaklığı aralıkları homolog sıcaklığa göre; soğuk ($0 < T_H < 0.3$), ılık ($0.3 < T_H < 0.5$) ve sıcak ($0.5 < T_H < 1$) şeklinde sınıflandırılmaktadır. Tablo 4.2 incelendiğinde, Sn-2Ag-[x]Zn (X=2,2.5) ve Sn-1.5Ag-[x]Zn (X=2,2.5) alaşımları için

homolog sıcaklık değeri, oda sıcaklığında (298.15 K) 0.61 olarak elde edilir ve sıcak işlem aralığında bulunmaktadır. Ötektik Pb-Sn alaşımları için oda sıcaklığında, homolog sıcaklık değeri 0,65'dir [1].

Tablo 4.2. Sn-Ag-Zn Alaşımlarının termal ve elektriksel değerlerin sıcaklıkla değişimi

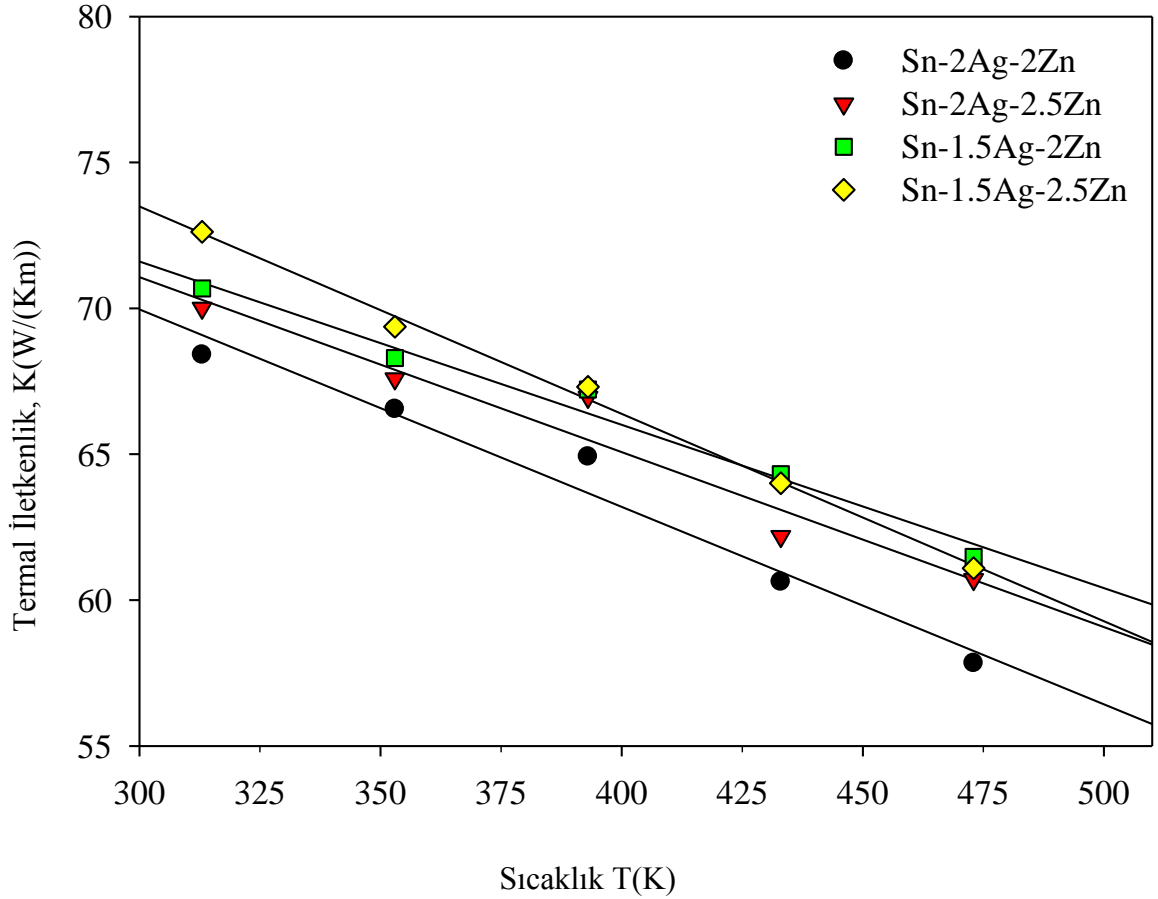
Sıcaklık (K)	Sn-1.5Ag-2Zn		Sn-1.5Ag-2.5Zn		Sn-2Ag-2Zn		Sn-2Ag-2.5Zn	
	K (W/Km)	σ ($\times 10^8$ /Wm)	K (W/Km)	σ ($\times 10^8$ /Wm)	K (W/Km)	σ ($\times 10^8$ /Wm)	K (W/Km)	σ ($\times 10^8$ /Wm)
313	70.68	0.0366	72.62	0.0317	68.41	0.0252	70.01	0.0301
353	68.30	0.0353	69.37	0.0317	66.55	0.0245	67.59	0.0299
393	67.22	0.0340	67.31	0.0309	64.92	0.0243	66.96	0.0281
433	64.34	0.0338	64.01	0.0299	60.63	0.0241	62.19	0.0275
473	61.48	0.0315	61.09	0.0295	57.84	0.0237	60.71	0.0271

Homolog sıcaklığın yükselmesi demek lehim alaşımı sabit bir statik yüke maruz kaldığı zaman daha çok sürüneceği anlamına gelmektedir. Daha düşük katılaşma sıcaklıklarına sahip lehim alaşımlarının kullanılması, homolog sıcaklığın artacağı anlamına gelir. Bu ise, alaşımın daha şiddetli sürünme koşullarına maruz kalmasıyla sonuçlanması beklenebilir. "Sürünmeye karşı direnç" açısından bakıldığında, daha yüksek katılaşma sıcaklıklarına sahip lehim alaşımlarının kullanılması avantajlı olacaktır. Buna göre Sn-2Ag-[x]Zn (X=2,2.5) ve Sn-1.5Ag-[x]Zn (X=2,2.5) alaşımları için katılaşma sıcaklığı, Pb-Sn alaşımının katılaşma sıcaklığından daha yüksek iken homolog sıcaklığı daha düşüktür.

4.4 Termal ve Elektriksel İletkenliğin Sıcaklık ve Kompozisyonla Değişimi

Mikroelektronik cihazların güvenilir bir şekilde çalışmaya devam etmesi için kalıp tarafından üretilen ısının dağıtılması gerekir. Isı, ana yol kapsülleme malzemesinden geçerken, lehim bağlantıları da ısı dağılımı için bir yol olarak düşünülür. 400' den fazla lehim topuna sahip yüksek bağlantılı BGA cihazlarında, herhangi bir elektriksel işleve hizmet etmeyen termal lehim toplarının ısı dağıtma ortamı olarak kullanılması yaygın bir uygulamadır [6]. Bu nedenle lehim alaşımlarının sıcaklığa bağlı olarak termal iletkenliğinin bilinmesi BGA cihazlarının kullanımı için önemli bir özelliktir. Yapılan literatür çalışmasında görüldüğü, kurşunsuz lehim alaşımlarına ait oda sıcaklığında ısı iletimi için datalar mevcut olsada, ısı iletkenliğin sıcaklığa bağlı olarak değişimini

veren çok az data bulunmaktadır. Bu çalışmada ise Sn-2Ag-[x]Zn (X=2,2.5) ve Sn-1.5Ag-[x]Zn (X=2,2.5) lehim alaşımlarının ısı iletkenlik değerlerinin sıcaklık ve kompozisyona bağlı olarak değişimi Tablo 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.2. Sn-%2 ağ.Ag-%[X] ağ.Zn (X=2,2.5) ve Sn-%1.5 ağ.Ag-% [X] ağ.Zn (X=2,2.5) alaşımlarının termal iletkenliğinin sıcaklıkla değişimi

Şekil 4.2’de görüldüğü gibi alaşımların ısı iletkenlik değerleri sıcaklık artıçça düşmüştür. Bu beklenen bir sonuçtur. Çünkü ısı iletkenlik (4.4) denkleminde olduğu gibi ısı sığası, hız ve serbest yola bağlıdır.

$$K = \frac{1}{3} c \cdot v \cdot l \quad (4.4)$$

Buradaki katsayıların tek tek sıcaklıkla değişimine bakarsak; c ısı sığası düşük sıcaklıklarda T^3 ile artarken, yüksek sıcaklıklarda sabit bir değere ulaşır. Isı iletkenlik genelde yüksek sıcaklıklarda meydana geldiğine göre c ile değişiminden çok büyük

katkı getirmez. Yapılan çalışmalarda v hızında aslında sıcaklıkla etkilenmediği göstermiştir. Ancak l ortalama serbest yol sıcaklığa kuvvetli biçimde bağlıdır. Ortalama serbest yolu etkileyen üç faktör vardır. Bunlar; bir fononun başka bir fononla çarpışması, bir fononun kristaldeki bir kirlilik yada dislokasyonla çarpışması, bir fononun kristal yüzeyiyle çarpışmasıdır. Fonon-fonon çarpışmaları genelde yüksek sıcaklıklarda meydana gelmektedir. Yüksek sıcaklıklarda ortalama serbest yol daha kısadır. l 'de K ile orantılı olduğundan yüksek sıcaklıklarda malzemenin ısı iletkenliğinin düşmesi gerekir. Kirlilik veya kusurlarda daha fazla fonon çarpışmasına sebep olur. Bu durumda ortalama serbest yol küçültür.

Alaşımların ısı iletkenlik değerlerinin kompozisyona bağlı olarak değişimi incelenirse Tablo 4.3 de görüldüğü gibi Ag miktarı arttıkça ısı iletkenlik değeri düşmektedir.

Tablo 4.3. Lehim alaşımlarının erime sıcaklığında elektriksel ve termal özellikleri

Lehim	Referanslar	Katılma Sıcaklığı (K)	Termal İletkenlik K (W/Km)	Elektriksel İletkenlik σ ($\times 10^8/\Omega m$)
Sn-1.5Ag-2Zn		491.45	61.04 \pm 5.49	0.031 \pm 0.00155
Sn-1.5Ag-2.5Zn		487.05	60.31 \pm 5.42	0.029 \pm 0.00145
Sn-2Ag-2Zn		491.85	56.93 \pm 5.12	0.023 \pm 0.00115
Sn-2Ag-2.5Zn		492.05	59.50 \pm 5.35	0.026 \pm 0.00130
Sn-4 Ag-2 In	[135]	490.50	62.5	0.049
Sn-20 Ag-2 In	[135]	490.50	55.1	0.043
Sn-40 Ag-2 In	[135]	490.50	59.5	0.039
Sn-60 Ag-2 In	[135]	490.50	45.7	0.036
Sn-71 Ag-2 In	[135]	490.50	44.5	0.034

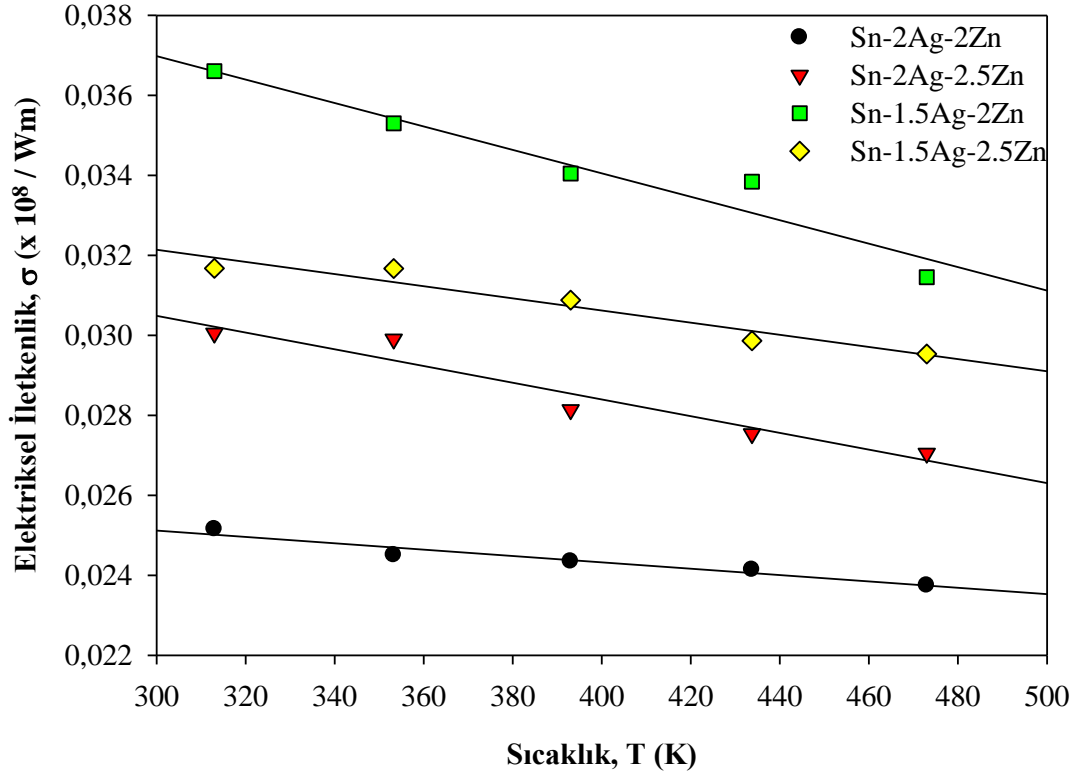
Yapılan literatür çalışmasında da görüldüğü gibi Ag ısı iletkenliği yüksek bir malzeme olmasına rağmen eklendiği alaşımın ısı iletkenlik değerini düşürmektedir. Bu çalışmada Ag miktarındaki artış çok fazla olmadığı için ısı iletkenlikteki azalış önemli ölçüde değildir. Fakat [135] nolu referans, Ag miktarındaki artışın alaşımın ısı iletkenlik değerindeki düşüşünü net bir şekilde göstermektedir. Tablo 4.3 incelendiğinde Ag miktarının sabit tutulup, Zn miktarının artırıldığı Sn-1.5Ag-[x]Zn (X=2,2.5) alaşımlarında Zn miktarının artışı ısı iletkenliğe önemli bir katkı sağlamamıştır. Fakat

Sn-2Ag-[x]Zn (X=2,2.5) alaşımında Zn miktarındaki artış ısı iletkenliği %4.5 artırmıştır.

Lineer ısı akış sisteminde deneysel parametrelerde belirsizlikler vardır. Toplam belirsizlik, ısı akış hızından yaklaşık %5, sıcaklık farklarının ölçümünden yaklaşık %2,5, ısı iletkenlik ölçümünden yaklaşık %0.5, kesit alanı ve sabit mesafe ölçümünden yaklaşık %0,3 olmak üzere yaklaşık %9'dur.

Mikroelektronik cihazlar çalışırken, lehim aynı zamanda elektriksel bir ara bağlantı görevi görür. Bu nedenle elektronik bir devrede kullanılacak lehimin elektriksel iletkenliğini bilmek önemlidir. Elektriksel iletkenlik ise mikro yapı, tane boyutu, dislokasyon yoğunluğu gibi etkenlere bağlı olması nedeniyle, ölçülen değerler hem saf metaller hem de alaşımlar arasında önemli ölçüde farklılık gösterir [23]. Bu nedenle bu çalışmada da Sn-Ag-Zn alaşımında kompozisyon değişimi yapılarak elektriksel iletkenlik değerleri ölçülmüştür. Ayrıca elektriksel iletkenlik değerinin sıcaklıkla değişimide incelenmiştir. Çünkü; lehim ara bağlantıları akım akışı nedeniyle belirli bir miktarda IR ısıtmasına maruz kalır. Ayrıca silikon cihazın ürettiği ısı nedeniyle de belli bir miktar ısınma yaşanır. Bu nedenle, lehim bağlantısındaki sıcaklık 125°C'ye kadar çıkabilir [136]. Bu nedenle elektriksel iletkenlik değerinin sıcaklık değişim değerlerinin bilinmesi birçok uygulama için kolaylık sağlayacaktır. Bu çalışmada ise herbir alaşımın elektriksel iletkenlik değeri 20⁰C aralıklarla ölçülerek bu değerler Tablo 4.3 de verilmiştir. şekil 4.3'de görüldüğü gibi alaşımların elektriksel iletkenlik değerleri artan sıcaklıkla azalmıştır. Sn-1.5Ag-[x]Zn (X=2,2.5) alaşımında artan Zn miktarının elektriksel iletkenlik değerini yaklaşık olarak %7 azaltmıştır. Fakat Tablo 4.2'de görüldüğü gibi Sn-2Ag-[x]Zn (X=2,2.5) alaşımında Zn miktarındaki artış elektriksel iletkenliği %13 artırmıştır.

Dört nokta elektriksel iletkenlik ölçümünde toplam hata payı, akım ve voltaj ölçümünden yaklaşık %2.5, kül fırınının kontrolcüsünden yaklaşık %1, kumpas ve termaliftlerden yaklaşık %1 olmak üzere yaklaşık %5'tir.



Şekil 4.3. Sn-%1.5 ağ.Ag-%[X] ağ.Zn (X=2,2.5) ve Sn-%2 ağ.Ag-%[X] ağ.Zn (X=2,2.5) alaşımlarının sıcaklıkla elektriksel iletkenliğinin değişimi

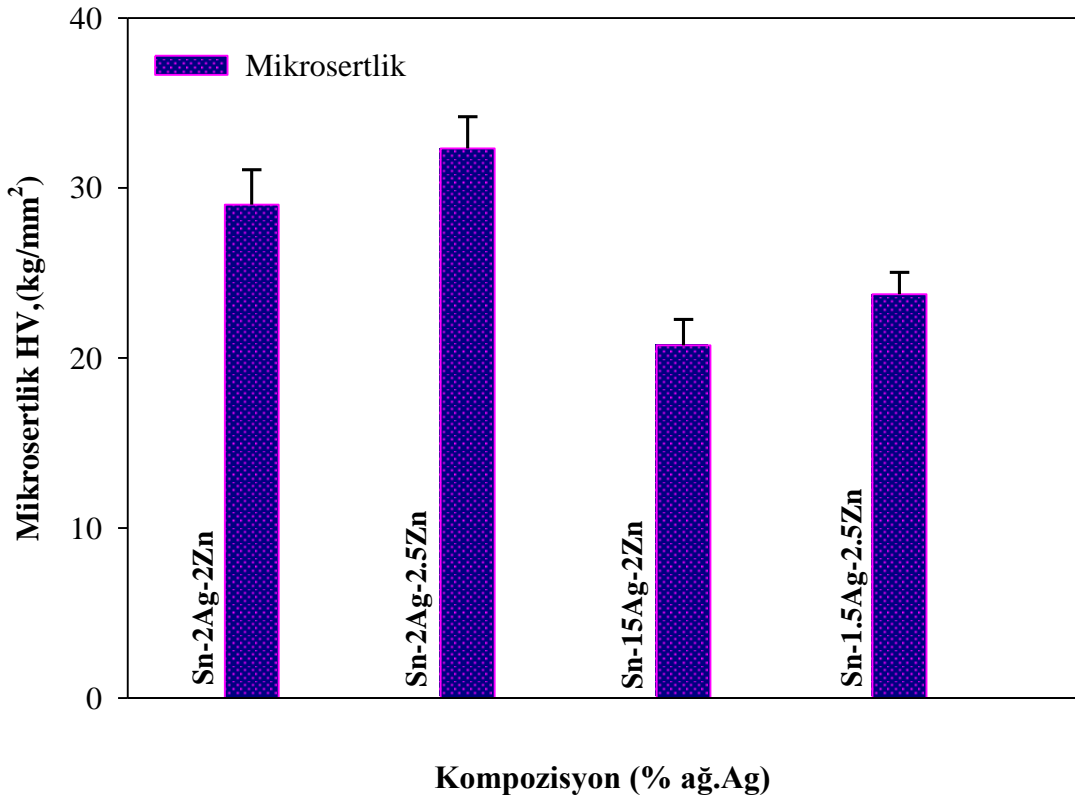
4.5 Kompozisyona Göre Mekanik Özelliklerin Değişimi

Mikrosertlik ölçümü, lehim alaşımlarının mekanik özelliklerini karakterize etmek için kullanılan bir yöntemdir. Bir malzemenin sertliği genellikle aşınmaya veya aşınmaya karşı direncine eşittir. Mazlemelerin mikrosertlik değerini bilmek bize kullanım sırasında bir malzemenin dayanma koşullarını hakkında bilgi verir. Bir lehim alaşımının mikrosertliği, dislokasyonların hareketine, tanelerin büyümesine ve konfigürasyonuna bağlıdır. Dolayısıyla mikrosertlik değerleri mikroyapıya, işlem sıcaklığına ve bileşime bağlı olarak değişim gösterir. Bu çalışmada ise bileşime bağlı olarak mikrosertlik değerlerin değişimi incelenmiştir. Tablo 4.4’de görüldüğü gibi bu çalışmada hem Ag miktarı sabit tutulup Zn miktarı artırılmıştır hemde Zn miktarı sabit tutulup Ag miktarı artırılmıştır.

Tablo 4.4. Sn-1.5Ag-[x]Zn (X=2,2.5) ve Sn-2Ag-[x]Zn (X=2,2.5) alaşımlarının mikrosertlik ve çekme dayanımı değerleri

Lehim Alaşımları	Mikrosertlik HV (kgf mm^{-2})	Çekme Dayanım (MPa)
Sn-2Ag-2Zn	31.08±1.55	42.94±2.14
Sn-2Ag-2.5Zn	30.46±1.52	36.94±1.84
Sn-1.5Ag-2Zn	22.27±1.11	31.06±1.55
Sn-1.5Ag-2.5Zn	22.16±1.10	30.36±1.51

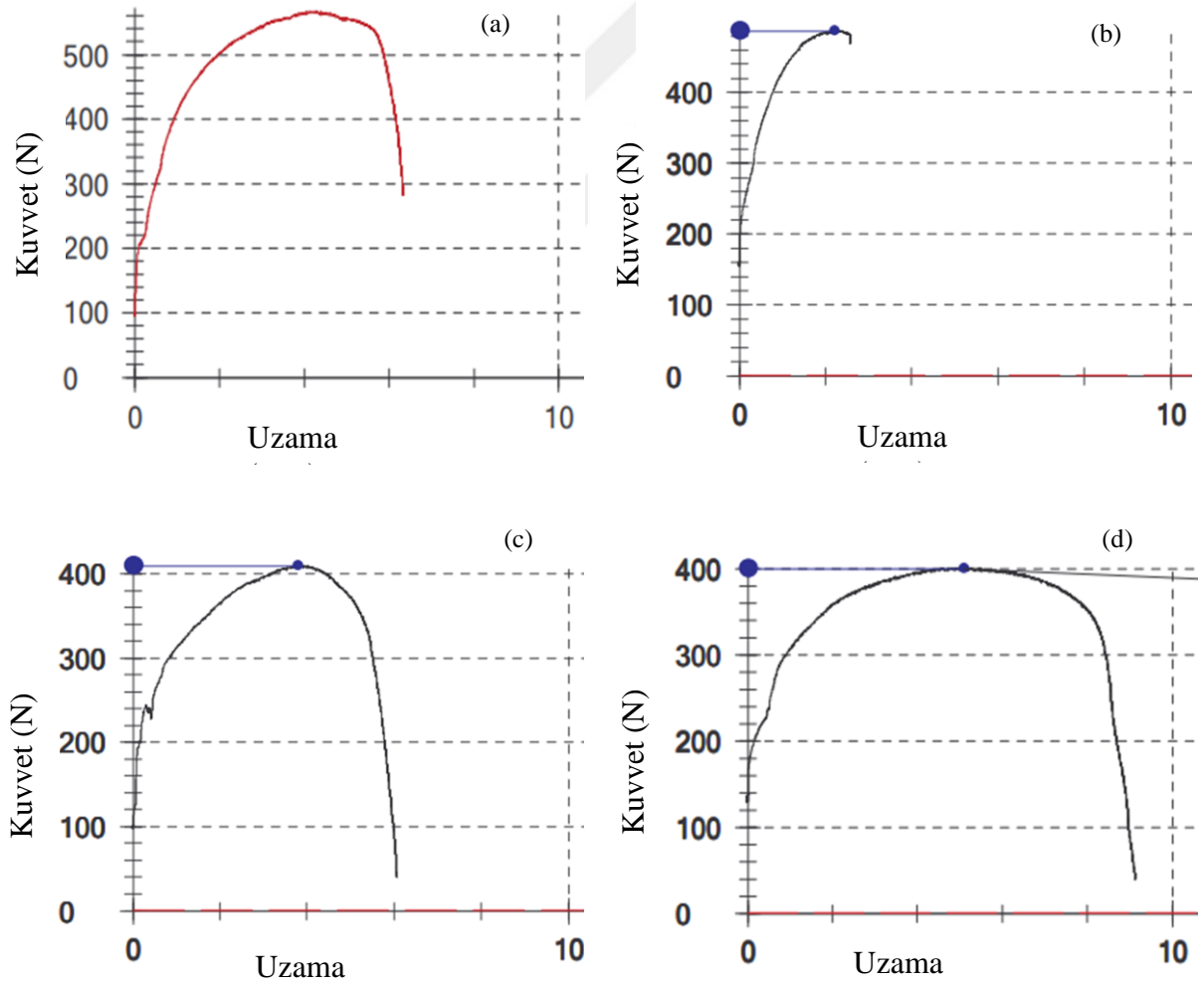
Her iki kompozisyon değişiminde de incelendiğinde artan Ag ve Zn miktarına bağlı olarak mikrosertlik değerlerinde artış gözlenmiştir. Fakat ağırlıkça Zn miktarının sabit tutulup Ag miktarındaki artışın sağlandığı Sn-[X]Ag-2 Zn (X=1.5,2) ve Sn-[X]Ag-2.5 Zn (X=1.5,2) alaşım gruplarında artış daha belirgin olmuştur. Sn-[X]Ag-2.5 Zn (X=1.5,2) alaşım grubunda artan Ag miktarı ile mikrosertlik değerinde %39 yükselme olurken, Sn-[X]Ag-2 Zn (X=1.5,2) alaşımında bu artış %45 olmuştur. Şekil 4.4 ise mikrosertlik değerlerinin kompozisyona bağlı olarak değişimleri verilmiştir.



Şekil 4.4. Sn-1.5Ag-[x]Zn (X=2,2.5) ve Sn-2Ag-[x]Zn (X=2,2.5) alaşımları için sertlik değeri (H)

Çekme testi için hazırlanan numuneler, DIN EN ISO 6892-1 Standardında oda sıcaklığında 1 mm/dak. hız da çekilmiştir. Şekil 4.5 de yer alan kuvvet-uzama eğrilerinden alaşımların gerilme değerleri hesaplanmış ve Tablo 4.4 de kaydedilmiştir. Artan Ag içeriği ile mukavemetin azalmaktadır. Sn-2Ag-xZn (X=2, 2.5) lehimlerinde ise β -Sn dendritlerinin azalmasından dolayı %2 Zn'de mukavemet maksimum seviye ulaşmıştır. Zn bileşimi ağırlıkça %2.5 olduğunda ise mukavemette düşüş gözlemlenmiştir. Artan Zn miktarı ile lehim ötektik noktadan uzaklaşmakta ve mukavemet azalmaktadır.

Mikrosertlik ve çekme dayanım cihazlarından ölçülen hata payları ayrı ayrı yaklaşık %5'tir.



Şekil 4.5. (a) Sn-2Ag-2Zn (b) Sn-2Ag-2.5Zn (c) Sn-1.5Ag-2Zn ve (d) Sn-1.5Ag-2.5Zn alaşımları için kuvvet-uzama eğrisi

KAYNAKLAR

1. Mulugeta, A., Guna, S., “Lead-free solders in microelectronics”, *Materials Science and Engineering*, 27, 95-141, 2000.
2. Rudolf, S., “ASM Handbook Volume 1 10th ed.”, *ASM International*, s. 55, Ohio, 1989.
3. National Center for Manufacturing Sciences, “Lead-Free Solder Project – Final Report”, *NCMS Report 040IRE96*, Michigan, 1997.
4. Wood, P. J., Nimmo, K., L., “In search of new lead-free electronics solders”, *Journal of Electronic Materials*, 23, 709-713, 1994.
5. Richards, B., Nimmo, K., “An analysis of the current status of lead-free soldering-one year on”, *UK Department of Trade and Industry*, London, 2000.
6. Suganuma, K., “Advances in lead-free electronics soldering”, *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 5, 55-64, 2001.
7. Suganuma, K., “Development of lead-free soldering and practice”, *Denshi-zairyou (Electronic Material)*, 4, 56–63, 2000.
8. Brown, R. D., “Indium in Commodity Data Summaries”, *U.S. Geological Survey*, 84, 1999.
9. Brown, R. D., “Indium in Commodity Data Summaries”, *U.S. Geological Survey-Minerals Information*, 1997.
10. Industry Aids Environment, Oct. 14, *Japan Times*, s. 10, 1999.
11. Anderson, S. C., U.S. Department of the Interior, “Mineral Commodity Summaries 2020”, *U.S.G.S, Virginia*, s. 78-80, 2020.
12. Anderson, S. C., U.S. Department of the Interior, “Mineral Commodity Summaries 2022”, *U.S.G.S, Virginia*, s. 80-82, 2022.
13. Hua, F., Mei, Z., Lavagnino, A., “Eutectic Sn–Bi as an alternative Pb-free solder. In: Proceedings of an international summit on lead free electronics assemblies”, *IPC Works '99*, s. 1-8, 1999.
14. Yamagishi, Y., Ochiai, M., Shimizu, K., Ueda, H., “Step soldering with low temperature solders”, *Proc. EcoDesign '99 Japan Symposium*, s. 54–55, Tokyo, 1999.

15. Vianco, P. T., "Development of alternatives to lead-bearing solders", *Proceedings of the Technical Program on Surface Mount International*, San Jose, 1993.
16. Wassink, K. J. R., Verguld, M. M. F., "Manufacturing Techniques for Surface Mounted Assemblies", *Electrochemical Publications Ltd.*, GB-Port Erin, s. 17, 1995.
17. Wood, P. E., Nimmo, K., L., "In search of new lead-free electronic solders", *Journal of Electronic Materials*, 23 (8), s. 709-713, 1994.
18. Monsalve, E. R., "Lead ingestion hazard in hand soldering environments", *Proceedings of the 8th Annual Soldering Technology and Product Assurance Seminar*, China Lake, 1984.
19. Napp, D., "Lead-free interconnect materials for the electronics industry", *Proceedings of the 27th International SAMPE Technical Conference*, s. 342, Albuquerque, 1995.
20. Allenby, B. R., Ciccacelli, J. P., Artaki, I., Fisher, R., Schoenthaler J. D., Carroll, T. A., Dahringer, D. W., Degani, Y., Freund, R. S., Graede, T. E., Lyons, A. M., Plewes, J. T., Gherman, C., Solomon, H., Melton, C., Munie, G. C., Socolowski, N., "An assessment of the use of lead in electronics assembly", *Circuit World*, 19, s. 1-28, 1993.
21. Nriagu, J. O., Pacyna, J. M., "Quantitative assessment of worldwide contamination of air, water and soils by trace metals", *Nature* 333, 6169, s. 134-139, 1988.
22. U.S. Environmental Protection Agency, "National Air Quality and Emission Trend Report, 1989", *EPA-450/4-91-003*, *Research Triangle Park*, 1991.
23. Glazer, J., "Metallurgy of low temperature Pb-free solders for electronic assembly", *Int. Mater. Rev.*, 40 (2), 65-93, 1995.
24. Lea, C., "A Scientific Guide to Surface Mount Technology", *Electrochemical Publications Ltd.*, GB-Port Erin, s. 378-379, 1988.
25. Lewis, W. R., "Notes on Soldering", *Tin Research Institute*, s. 66, 1961.
26. McCormack, M., Jin, S., "Improved mechanical properties in new, Pb-free solder alloys", *Journal of Electronic Materials*, 23, 715-720, 1994.

27. Morris, J. W., Goldstein, J. L. F., Mei, Z., “Microstructure and mechanical properties of Sn-In and Sn-Bi solders”, *Journal of Electronic Materials*, 22, 25-27, 1993.
28. Kabassis, H., Rutter, J. W., Winegard, W. C., “Phase relationships in Bi-In-Sn alloy systems”, *Materials Science and Technology*, 2, *Institute of Materials, Minerals and Mining*, s. 985-988, 1986.
29. Croker, M. N., Fidler, R. S., Smith, R. W., “The characterization of eutectic structure”, *Proceedings of the Royal Society*, 335, 15-17, 1973.
30. Wild, R. W., “Properties of Some Low Melting Fusible Alloys”, *IBM Federal Systems Division Laboratory, New York*, 1971.
31. McCormack, M., Jin, S., Kammlott, G. W., Chen, H. S., “New Pb-free solder alloy with superior mechanical properties”, *Applied Physics Letters*, 63, 15-17, 1993.
32. McCormack, M., Jin, S., Kammlott, G. W., “The design of new Pb-free solder alloys with improved properties”, *IEEE 0-7803-2137-5/95*, 1995.
33. Freer, J. L., Morris, J.W., “Microstructure and creep of indium/tin on Cu and Ni substrates”, *Journal of Electronic Materials*, 21, 647-652, 1992.
34. Seyyedi, J., “Thermal fatigue behavior of low melting point solder joints”, *Soldering & Surface Mount Technology*, 13, 26-32, 1993.
35. Massalski, T. B., Okamoto, H., Subramanian, P. R., Kacprzak, L., editors, “Binary alloy phase diagrams 2nd ed.”, *ASM International*, 1990.
36. Sukanuma, K., Nakamura, Y., “Microstructure and strength of interface between Sn–Ag eutectic solder and Cu”, *Journal of Japan Institute of Metals*, 59, 1299–1305, 1995.
37. Gebhardt, E., Petzow, G., “Over structure of silver–copper–tin systems”, *Z Metallkde*, 50, 597–605, 1959.
38. Miller, C.M., Anderson, I.E., Smith, J.F., “A viable tin–lead solder substitute”, *Journal of Electronic Materials* , 23, 595–601, 1994.
39. Loomans, M.E., Fine, M.E., “Silver copper eutectic temperature and composition”, *Journal of Electronic Material*, 31, 1155–1162, 2000.
40. Moon, K. W., Boettinger, W. J., Kattner, U. R., Biancaniello, F. S., Handwerker, C. A., “Experimental and thermodynamic assessment of Sn–Ag–Cu solder alloys”, *Journal of Electronic Material*, 27, 1122-1136, 2000.

41. Vianco, P.T., Rejent, J.A., “Properties of ternary Sn–Ag–Bi solder alloys. Part II. Wettability and mechanical properties analyses”, *Journal of Electronic Material*, 28, 1138–1143, 1999.
42. Artaki, I., Jackson, A. M., Vianco, P. T., “Evaluation of lead-free solder joints in electronic assemblies”, *Journal of Electronic Material*, 23, 757-763, 1994.
43. Kattner, U. R., Boettinger, W. J., “On the Sn–Bi–Ag ternary phase diagrams”, *Journal of Electronic Material*, 23, 603-610, 1994.
44. Ohnuma, I., Liu, X. J., Ohtani, H., Ishida, K., “Thermodynamic database for phase diagrams in micro-soldering alloys”, *Journal of Electronic Material*, 28, 1164–1171, 1999.
45. Hwang, C. W., Suganuma, K., “High temperature stability of lead-free soldering interfaces”, *International Congress on Electronics Goes Green 2000+*, Berlin, 2000.
46. Korhonen, T. M., Kivilahti, J. K., “Thermodynamics of the Sn–In–Ag solder system”, *Journal of Electronic Material*, 27, 149–158, 1998.
47. Lee, B. J., Oh, C. S., Shim, J. H., “Thermodynamic assessments of the Sn–In and Sn–Bi systems”, *Journal of Electronic Material*, 25, 983–991, 1996.
48. Ohtani, H., Ishida, K., “A thermodynamic of the phase equilibria in the Bi–Sn–Sb system”, *Journal of Electronic Material*, 23, 747–755, 1994.
49. Ghosh, G., Loomans, M., Fine, M. E., “An investigation of phase equilibria of the Bi–Sb–Sn system”, *Journal of Electronic Material*, 23, 619–623, 1994.
50. Yoon, S. W., Rho, B. S., Lee, H. M., Kim, H. M., Lee, B. J., “Investigation of the phase equilibria in the Sn–Bi–In alloy system”, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 30, 1503–1515, 1999.
51. Villars, P., Prince, A., Okamoto, H., “Handbook of ternary alloy phase diagrams”, *ASM International*, 1995.
52. Katsuaki, S., Seong-Jun, K., Keun-Soo, K., "High-Temperature Lead-Free Solders: Properties and Possibilities", *Journal of The Minerals, Metals & Materials Society*, 61 (1), 64-71, 2009.
53. Suganuma, K., Niihara, K., Shoutoku, T., Nakamura, Y., “Wetting and interface microstructure between Sn–Zn binary alloys and Cu”, *Journal of Materials Research*, 13, 2859–2865, 1998.

54. Lee, J. E., Kim, K. S., Suganuma, K., Inoue, M., Izuta, G., “Thermal Properties and Phase Stability of Zn-Sn and Zn-In Alloys as High Temperature Lead-Free Solder”, *Materials Transactions*, 48 (3), 584–593, 2007.
55. Lee B. J., “Thermodynamic assessments of the Sn–Zn and In–Zn binary systems”, *Calphad*, 20 (4), 471–480, 1996.
56. Yoon S. W., Soh J. R., Lee H. M., Kim H. M., Lee B. J., “Thermodynamic-aided alloy design and evaluation of Pb-free solder, Sn–Bi–In–Zn system”, *Acta Materialia*, 45 (3), 951–960, 1997.
57. European Parliament, “Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council on Waste Electrical and Electronic Equipment and on the restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment”, *COM (2000)347, Official Journal of the European Communities*, 2000.
58. Harrison M. R., Vincent J. H., “Improved design life and environmentally aware manufacturing of electronics assemblies by lead-free soldering”, *Proc 12th Microelectronics and Packaging Conference*, s. 98–104, Cambridge: IMAPS Europe, 1999.
59. The Japan Electronic Industry Development Association, “Report on research and development on lead-free soldering”, *JEIDA 00-ki-17*, Tokyo, 2000.
60. Hua, F., Glazer, J., “Lead-free solders for electronic assembly”, Design and reliability of solders and solder interconnections, R.K. Mahidhara, D.R. Frear, S.M.L. Sastry, K.L. Liaw, W.L. Winterbottom (Eds.), *The Minerals, Metals and Materials Society*, s. 65-74, 1997.
61. McCormack, M., Artaki, I., Jin, S., Jackson, A. M., Machusak, D. M., Kammlott, G. W., Finley, D. W., “Wave soldering with a low melting point Bi-Sn alloy: effects of soldering temperatures and circuit board finishes”, *Journal of Electronic Material*, 25 (7), 1128-1131, 1996.
62. Loomans, M. E., Vaynman, S., Ghosh, G., Fine, M. E., “Investigation of multi-component lead-free solders”, *Journal of Electronic Material*, 23 (8), 741-746, 1994.
63. Seelig, K., “A study of lead-free solder alloys”, *Circuits Assembly*, 6 (10), 46-48, 1995.

64. Artaki, I., Finley, D. W., Jackson, A. M., Ray, U., Vianco, P. T., "Wave soldering with lead-free solders", *Surface Mount International conference*, s. 495-510, San Jose, 1995.
65. Lee, N. C., Slattery, J., Sovinsky, J., Artaki, I., Vianco, P. "A novel lead-free solder replacement", *Circuits Assembly*, 6 (10), 36-44, 1995.
66. Jackson, A.M, Vianco, P.T., Artaki, I., "Manufacturing feasibility of several lead-free solders for electronic assembly", *Proceedings of the 7th International SAMPE Electronics Conference*, s. 381-391, Parsippany- NJ, 1994.
67. McCormack, M., Jin, S., "Progress in the design of new lead-free solder alloys", *JOM*, 45 (7), 36-40, 1993.
68. Miller, C.M., Anderson, I.E., Smith, J.F., "A viable tin-lead solder substitute: Sn-Ag-Cu", *Journal of Electronic Material*, 23 (7), 595-601, 1994.
69. Kwoka, M.A., Foster, D., "A comparison of lead-free vs. eutectic solders", *Circuits Assembly*, 6 (10), 32-35, 1995.
70. Vianco, P. T., Hosking, F. M., Rejent, J. A., "Wettability analysis of tin-based, lead-free solders", *Proceedings of the Technical Program (Vol. 3) - National Electronic Packaging and Production Conference*, Anaheim-CA, s. 1730-1738, 1992.
71. Knorr, D. B., Felton, L. E., "Designing lead-free solder alloys for advanced electronics assembly", *Proceedings of the 1994 Design for Manufacturability Conference*, New York, s. 27-34, 1994.
72. McCormack, M., Jin, S., Chen, H. S., Machusak, D. A., "New lead-free, Sn-Zn-In solder alloys", *Journal of Electronic Material*, 23 (7), 687-690, 1994.
73. Wassink, R. J. K., "A Comprehensive Treatise on Soldering Technology for Surface Mounting and Through-Hole Techniques", *Soldering in Electronics*, 2nd Edition, *Electrochemical Publications Ltd.*, GB-Port Erin-British Isles, s. 36-37, 1989.
74. Howie, F. H., Lea, C., "Blowholing in PTH solder fillets - towards a solution", *Proceedings of Internepcon UK*, Brighton, s. 104-111, 1984.
75. Goldman, L. S., Krall, B., "Measurement of solder-flux-vapor surface tension by a modified maximum bubble pressure technique", *Rev. Sci. Instr.*, 47 (3), 324-325, 1976.

76. Deighan, R. A., "Surface tension of solder alloys", *Int. J. Hybrid Electron.*, 5 (2), 307-313, 1982.
77. Carroll, M. A., Warwick, M. E., "Surface tension of some Sn-Pb alloys: Part I. Effect of Bi, Sb, P, Ag and Cu on 60Sn-40Pb solder", *Mater. Sci. Technol.*, 3 (12), 1040-1045, 1986.
78. Vincent, J. H., Richards, B. P., "Alternative solders for electronics assemblies", *Circuit World*, 19 (3), 33, 1993.
79. Felton, L. E., Raeder, C. H., Havasy, C. K., Knorr, D. B., "Pb-free soldering alternatives for fine pitched electronics packaging", *Proceedings of the 13th IEEE/CHMT International Symposium on Electronics Manufacturing Technology*, s. 300-304, Troy-NY, 1992.
80. Pan, T. Y., Nicholson, J., Blair, H., Poulson, R., Cooper, R., Mitlin, D., Cheung, M. F., "Dynamic wetting characteristics of some lead-free solders", *Proceedings of the 7th International SAMPE Electronics Conference*, s. 20-23, Ford Motor Company, 1994.
81. Vianco, P. T., Frear, D. R., "Issues in the replacement of lead-bearing solders", *JOM*, 45 (7), 14-19, 1993.
82. Vianco, P.T., May, C., "An evaluation of prototype surface mount circuit boards assembled with three non-lead bearing solders", *SMT Surface Mount International conference (CONF-9508140-3)*, s. 481-494, San Jose-CA, 1995.
83. Collazo, J., "Effect of Surface Stresses on Wetting of Copper by Solder", *Senior Project Report*, Department of Materials Engineering, San Jose State University, 1997.
84. Romm, D. W., Abbott, D. C., "Lead-free solder joint evaluation", *Surf. Mount Technol.*, 12 (3), 84, 1998.
85. Tu, K. N., "Interdiffusion and reaction in bimetallic Cu-Sn thin films", *Materials Chemistry and Physics*, 46, 217-223, 1996.
86. Kay, P. J., Mackay, C. A., "The growth of intermetallic compounds on common base materials coated with tin and tin-lead alloys", *Trans. Instit. Metal Finish.*, 54, 68-74, 1976.
87. Dunn, D. S., Marinis, T. F., Sherry, W. M., Williams, C. J., "Dependence of Cu/Sn and Cu/60Sn40Pb solder joint strength on diffusion controlled growth of

- Cu₃Sn and Cu₆Sn₅”, *Materials Research Society Symposium Proceedings*, s. 129-138, 1985.
88. Langer, Edward L., “ASM Handbook-Alloy Phase Diagrams Volume 3”, *ASM International*, s. 512, 1992.
 89. Hansen, M., Anderko, K., “Constitution of Binary Alloys, 2nd Edition”, *McGraw-Hill*, New York, s. 1218, 1958.
 90. Thwaites, C. J., “Soft Soldering Handbook”, *International Tin Research Institute*, s. 119, 1977.
 91. Yamagishi, Y., Ochiai, M., Ueda, H., Nakanishi, T., Kitazima, M., “Pb-free solder of Sn-58Bi improved with Ag”, *Proceedings of the 9th International Microelectronics Conference*, Omiya- Japan, s. 252-255, 1996.
 92. Tojima, K., “Wetting Characteristics of Lead-free Solders”, *Senior Project Report*, Materials Engineering Department, San Jose State University, May 1999.
 93. Van Vlack, L. H., “Materials Science for Engineers”, *Addison-Wesley*, Reading-MA, s. 192, 1970.
 94. “Electronic Materials Handbook: Packaging, Vol. 1”, *CRC Press*, Materials Park-OH, s. 640, 1989.
 95. “Solder alloy data: mechanical properties of solders and soldered joints”, *International Tin Research Institute*, Uxbridge-England, s. 60, 1986.
 96. Tomlinson, W. J., Collier, I., “The mechanical properties and microstructures of copper and brass joints soldered with eutectic tin-bismuth solder”, *J. Mater. Sci.*, 22, 1835-1839, 1987.
 97. Artaki, I., Jackson, A. M., Vianco, P. T., “Evaluation of lead-free joints in electronic assemblies”, *J. Electron. Mater.*, 23 (6), 757-764, 1994.
 98. Hwang, J. S., “Solder Paste in Electronic Packaging”, *Van Nostrand Reinhold*, New York, 1989.
 99. Frear, D. R., “The mechanical behavior of interconnect materials for electronic packaging”, *J. Mater.*, 48 (3), 49-53, 1996.
 100. Lea, C., “A Scientific Guide to Surface Mount Technology”, *Electrochemical Publications Ltd.*, GB-Port Erin, 1988.

101. Darveaux, R., Banerji, K., “Constitutive relations for tin-based solder joints”, *Proceedings 42nd Electronic Components & Technology Conference*, s. 1014-1022, San Diego-CA ,1992.
102. Frear, D. R., Jones, W. B., Kinsman, K. R., “Solder Mechanics: A State of the Art Assessment”, *TMS Publications*, s. 437, Warrendale-PA, 1991.
103. Glazer, J., “Microstructure and mechanical properties of Pb-free solder alloys for low cost electronic assembly: a review”, *J. Electron. Mater.*, 23 (8), 693-700, 1994.
104. “Electronic Materials Handbook: Packaging, Vol. 1”, *CRC Press*, Materials Park-OH, s. 58, 1989.
105. Abtey, M., “Corrosion of Indium Based Solders Induced by Flux Residue and Ionic Contamination”, Amdahl Corporation, *Technical Bulletin*, 1993.
106. Lloyd, J. R., Zhang, C., Tan, L. H., Shangguan, D., Achari, A., “Measurements of thermal conductivity and specific heat of lead-free solder”, *Proceedings of the IEEE/CPMT International Symposium on Electronic Manufacturing Technology*, s. 252-262, Omiya- Japan, 1995.
107. Öcal, F., “SAC105 Kurşunsuz lehim alaşımına eser miktarda antimon (sb) ilavesi yapılarak termal, elektriksel, mekanik ve mikroyapısal özelliklerinin incelenmesi”, *Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Yüksek Lisans Tezi, s. 12-101, Nevşehir, 2021.
108. Aksöz, N., “Metalik Alaşımın Termofiziksel Özelliklerinin Belirlenmesi”, *Nevşehir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Yüksek Lisans Tezi, Nevşehir, 2013.
109. Akbulut, S., “İkili Saydam Monotektik Alaşımın Katı-Sıvı Arayüzey Enerjilerinin Ölçümü”, *Erciyes Üniversitesi*, Yüksek Lisans Tezi, Kayseri, 2006.
110. Engin, S., “Metalik Alaşımın Katı-Sıvı Arayüzey Enerjilerinin Doğrusal Büyütme Tekniğiyle Ölçümü”, *Erciyes Üniversitesi*, Yüksek Lisans Tezi, Kayseri, 2009.
111. Engin, S., “Kontrollü katılaştırılan çok bileşenli ötektik alaşımın, mekanik ve elektriksel özelliklerinin katılaştırma parametrelerine bağlılığının incelenmesi”, *Erciyes Üniversitesi*, Doktora Tezi, Kayseri, 2013.

112. Ata, P., “Lineer Isı Akış Metoduyla In-Bi İntermetalik Alaşımlarının Isıl İletkenlik Katsayısının Ölçümü”, *Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Yüksek Lisans Tezi, Nevşehir, 2015.
113. Yıldız, A., Genç, Ö., Bektaş, S., “Enstrümental Analiz Yöntemleri, İkinci Baskı”, *Hacettepe Üniversitesi Yayınları A-64*, Ankara, 1997.
114. Uzun, H., “Malzemelerin Mekanik Özellikleri, Faz Diyagramları, Mühendisler İçin Malzeme Biliminin Temel İlkeleri, 1. Baskı, *Değişim Yayınları*, s. 306-375, 2012.
115. İnternet: Erciyes Üniversitesi “çekme - basma test cihazı” <http://taum.erciyes.edu.tr/cekmen.html>.
116. Şavaşkan, T., “Malzeme Muayenesi, Çekme Deneyi, Malzeme Bilgisi ve Muayenesi, 5. Baskı”, *Celepler Matbaacılık*, Trabzon, s. 305-307, 2009.
117. Yamashita, M., “Resistivity correction factor for the four-probe method”, *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, 20, s. 1454-1456, 1987.
118. Yılmaz, S., “Dy₂O₃, Eu₂O₃, Sm₂O₃ Katkılanmış β- 2 3 Bi O Tipi Katı Elektrolitlerin Sentezlenmesi, Karakterizasyonları ve Katı Hal Oksijen İyonik İletkenliklerinin Araştırılması”, *Gazi Üniversitesi*, Doktora Tezi, Ankara, 2008.
119. Lee, H. T., Lee, Y. H., “Adhesive strength and tensile fracture of Ni particle enhanced Sn–Ag composite solder joints”, *Materials Science and Engineering A*, 419, 172–180, 2006.
120. Ahat, S., Sheng, M., Luo, L., “Microstructure and Shear Strength Evolution of SnAg/Cu Surface Mount Solder Joint During Aging”, *Journal of Electronic Materials*, 30, 1317–1322, 2001.
121. Lee, J. G., Guo, F., Subramanian, K. N., Lucas, J. P., “Intermetallic morphology around Ni particles in Sn- 3.5Ag solder”, *Soldering & Surface Mount Technology*, 14 (2), 11–17, 2002.
122. Guo, F., Choi, S., Lucas, J. P., Subramanian, K. N., “Microstructural characterisation of reflowed and isothermally- aged Cu and Ag particulate reinforced Sn- 3.5Ag composite solders “, *Soldering & Surface Mount Technology*, 13 (1), 7–18, 2001.
123. Sigelko, J., Choi, S., Subramanian, K. N., Lucas, J. P., “The effect of small additions of copper on the aging kinetics of the intermetallic layer and

- intermetallic particles of eutectic tin-silver solder joints”, *Journal of Electronic Materials*, 29 (11), 1307–1311, 2000.
124. F. Guo, J. Lee, S. Choi, J.P. Lucas, K.N. Subramanian, “Processing and aging characteristics of eutectic Sn-3.5Ag solder reinforced with mechanically incorporated Ni particles”, *Journal of Electronic Materials*, 30 (9), 1073–1082, 2001.
125. Kim, K. S., Huh, S. H., Suganuma, K., “Effects of fourth alloying additive on microstructures and tensile properties of Sn–Ag–Cu alloy and joints with Cu” *Microelectronics Reliability*, 43 (2), 259–267, 2003.
126. Lee, H. T., Chen, M. H., Jao, H. M., Hsu, C. J., “Effect of adding Sb on microstructure and adhesive strength of Sn-Ag solder joints”, *Journal of Electronic Materials*, 33 (9), 1048–1054, 2004.
127. Mavoori, H., Jin, S., “New, creep-resistant, low melting point solders with ultrafine oxide dispersions”, *Journal of Electronic Materials*, 27 (11), 1216–1222, 1998.
128. Mavoori, H., Jin, S., “Dispersion strengthening for dimensional stability in low-melting-point solders”, *JOM*, 52 (6), 30–32, 2000.
129. Chuang, C. M., Shih, P. C., Lin, K. L., “Mechanical strength of Sn-3.5Ag-based solders and related bondings”, *Journal of Electronic Materials*, 33 (1), 1–6, 2004.
130. Rhee, H., Subramanian, K. N., Lee, A., Lee, J. G., “Mechanical characterization of Sn-3.5Ag solder joints at various temperatures”, *Soldering & Surface Mount Technology*, 15 (13), 21–26, 2003.
131. Kikuchi, S., Nishimura, M., Suetsugu, K., Ikari, T., Matsushige, K., “Strength of bonding interface in lead-free Sn alloy solders”, *Materials Science and Engineering: A*, 319–321, 475–479, 2001.
132. K.H. Prakash, T. Sritharan, “Tensile fracture of tin-lead solder joints in copper”, *Materials Science and Engineering: A*, 379 (1-2), 277–285, 2004.
133. Lee, H. T., Chen, M. H., “Influence of intermetallic compounds on the adhesive strength of solder joints”, *Materials Science and Engineering: A*, 333 (1-2), 24–34, 2002.

134. Luo, T., Chen, Z., Hun, A., Li, M., “Study on melt properties, microstructure, tensile properties of low Ag content Sn–Ag–Zn Lead-free solders”, *Materials Science and Engineering: A*, 556, 885–890, 2012.
135. Ocak, Y., Aksöz, S., Maraşlı, N., Keşlioğlu, K., “Thermal and electrical conductivity of Sn–Ag–In alloys”, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 356 (35-36) 1795–1801, 2010.

