

**SERAMİK KALIBA DÖKÜLEREK ÜRETİLEN
Sn-Zn ALAŞIMLARININ MİKRO YAPI VE
MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ**

**2014
YÜKSEK LİSANS TEZİ
İMALAT MÜHENDİSLİĞİ**

Bekir YAVUZER

**SERAMİK KALIBA DÖKÜLEREK ÜRETİLEN Sn-Zn ALAŞIMLARININ
MİKRO YAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Bekir YAVUZER

**Karabük Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İmalat Mühendisliği Bölümünde
Yüksek Lisans Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

**KARABÜK
Haziran 2014**

Bekir YAVUZER tarafından hazırlanan “SERAMİK KALIBA DÖKÜLEREK ÜRETİLEN Sn-Zn ALAŞIMLARININ MİKRO YAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Dursun ÖZYÜREK

Tez Danışmanı, İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı

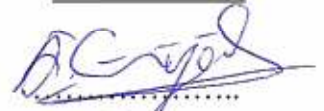


Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile İmalat Mühendisliği Bölümünde Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir. 16/ 06/ 2014

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan: Prof. Dr. Ali GÜNGÖR (KBÜ)



Üye : Doç. Dr. Dursun ÖZYÜREK (KBÜ)



Üye : Yrd. Doç. Dr. Tansel TUNÇAY (KBÜ)

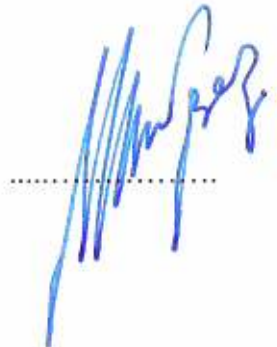


.../.../2014

KBÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Mustafa BOZ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü



“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

Bekir YAVUZER

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

SERAMİK KALIBA DÖKÜLEREK ÜRETİLEN Sn-Zn ALAŞIMLARININ MİKRO YAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Bekir YAVUZER

**Karabük Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İmalat Mühendisliği Bölümü**

Tez Danışmanı:

Doç. Dr. Dursun ÖZYÜREK

Haziran 2014, 77 sayfa

Bu çalışmada, Sn-Zn kurşunsuz lehim alaşımlarına farklı oranlarda ilave edilen Cu ve Al'nin, mikro yapıya ve mekanik özelliklere etkisi incelenmiştir. Sn-Zn, Sn-Zn-Cu ve Sn-Zn-Al alaşımları hassas döküm yöntemi ile 9 farklı kimyasal bileşimde üretilmiştir. Üretilen alaşımların mekanik özellikleri (çekme, aşınma ve sertlik) araştırılmıştır. Alaşımların mikro yapıları optik mikroskop ve tarama elektron mikroskobu (SEM+EDS) ve X-ışını kırınımı (XRD) ile karakterize edilmiştir. Çekme testleri 1 m/dk hızla yapılmıştır. Aşınma testlerinde pin-on-disk tipi aşınma ünitesi kullanılmıştır. Tüm numuneler 10 N yük, 1m/s^{-1} ve toplamda beş farklı (400, 800, 1200, 1600 ve 2000 m) kayma mesafesinde test edilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda, ötektik Sn-9Zn alaşımlarının mekanik özelliklerinin ötektik üstü ve ötektik altı alaşımların sertlik, çekme dayanımı ve aşınma dayanımlarının daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Ayrıca Sn-9Zn ötektik alaşımına Cu ilavesinin sertlik,

çekme dayanımı ve aşınma özelliklerini olumsuz etkilediği, Al ilavesinin ise sertlik, çekme dayanımı ve aşınma dayanımını arttırdığı belirlenmiştir.

Anahtar Sözcükler : Sn-9Zn, kurşunsuz lehim alaşımları, hassas döküm, mikro yapı, mekanik özellikler, aşınma davranışı.

Bilim Kodu : 916.1.094

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

INVESTIGATION OF MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF Sn-Zn ALLOYS WHICH ARE POURED INTO THE CERAMIC MOLD

Bekir YAVUZER

Karabük University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Manufacturing Engineering

Thesis Advisor:

Assoc. Prof. Dr. Dursun ÖZYÜREK

June, 77 Pages

In this study, different amount of compositions of Sn-Zn lead free solder and the effects of Cu and Al on eutectic Sn-Zn alloys were investigated. Sn-Zn, Sn-Zn-Cu and Sn-Zn-Al alloys were manufactured with investment casting method in 9 different composition method. Tensile test, wear test, hardness test were carried out of produced alloys and they were characterized by optical microscope, scanning electron microscope (SEM+EDS), X-Ray diffraction (XRD). Tensile tests were carried out 1 mm/minute crosshead velocity. Wear test were performed on pin on type disc with 1 m/s⁻¹ sliding speed under 10 N load at five different sliding distance (400 - 2000 m). As results of the study, it was observed that mechanical properties of eutectic Sn-9Zn alloys are better than hypoeutectic and hypereutectic alloys hardness, tesnsile strenght and wear properties. Also it was observed that while addition of Cu affects negatively on hardness, tesnsile strenght and wear properties

in Sn-9Zn eutectic alloy, additon of Al develops the hardness, tensile strenght, and wear properties.

Key Word : Sn-9Zn, Lead-free solder, investment casting, microstructure, mechanical properties, wear behaviour.

Science Code : 916.1.094

TEŞEKKÜR

Bu tez alıőmasının planlanmasında, araőtırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalıőmamı bilimsel temeller ışığında şekillendiren sayın hocam Doç. Dr. Dursun ÖZYÜREK'e beni en iyi şartlarda yetiőtirdięi için sonsuz teőekkürlerimi sunarım.

Deneysel alıőmalar ve araőtırmalarım sırasında yardımlarını esirgemeyen Yrd. Doç. Dr. Tansel TUNÇAY'a, Arő. Gör. Musa Yıldırım'a ve yüksek lisans öğrencisi Osman PALAVAR'a akademik hayatlarında başarılarının devamını dilerim.

Sevgili aileme, maddi ve manevi hiçbir yardımı esirgemedен yanımda oldukları için teőekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL	ii
ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xv
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	3
HASSAS DÖKÜM YÖNTEMİ.....	3
2.1. DÖKÜM YÖNTEMİ.....	3
2.1.1. Döküm Yöntemiyle Şekillendirmenin Avantajları.....	3
2.1.2. Yaygın Olarak Kullanılan Döküm Yöntemleri.....	4
2.1.2.1. Kum Kalıba Döküm Yöntemi	4
2.1.2.2. Seramik Kabuk Kalıba Döküm Yöntemi	4
2.1.2.3. Metal Kalıba (Kokil) Döküm.....	5
2.1.2.4. Savurma Döküm Yöntemi	6
2.1.2.5. Sürekli Döküm Yöntemi	6
2.1.2.6. Hassas Döküm Yöntemi.....	6
2.2. HASSAS DÖKÜMÜN TARİHÇESİ	7
2.3. MUM MODEL ÜRETİMİ	8
2.4. MODEL HAZIRLAMA	8
2.5. KAUÇUK MALZEMELERİ	9
2.6. SIVI KAUÇUK HAZIRLAMA	9

	<u>Sayfa</u>
2.7. MUM ENJEKSİYONU.....	10
2.8. MUM SALKIM DİZİMİ.....	11
2.9. ALÇININ HAZIRLANMASI VE KALIPLAMA	11
2.10. MUM İNDİRME	13
2.11. ALÇININ PİŞİRİLMESİ VE DÖKÜM İŞLEMİ.....	13
BÖLÜM 3	16
LEHİM ALAŞIMLARI.....	16
3.1. KURŞUN İLE İLGİLİ SAĞLIK VE ÇEVRESEL KAYGILAR.....	16
3.1.1. Kurşunun Sağlığa Olan Olumsuz Etkileri	16
3.1.2. Kurşun ve Çevre	17
3.2. LEHİM ALAŞIMLARINDA ARANAN ÖZELLİKLER.....	18
3.2.1. Ergime Sıcaklığı	19
3.2.2. Islatabilirlik Özellikleri.....	22
3.2.3. Lehim-Yüzey Etkileşimleri.....	23
3.2.4. Mekanik Özellikler	23
3.2.5. Isıl Özellikler	25
3.2.6. Elektriksel Özellikler	26
3.3. KURŞUNSUZ LEHİM ALAŞIMLARI.....	28
3.3.1. Kalay.....	28
3.3.2. Sn-Cu	29
3.3.3. Sn-Bi	29
3.3.4. Sn-Ag.....	29
3.3.5. Sn-In.....	30
3.3.6. Sn-Zn	30
BÖLÜM 4	32
MALZEME VE METOT	32
4.1. GİRİŞ.....	32
4.2. MUM MODEL ÇEKME NUMUNESİ ÜRETİMİ.....	32
4.3. SERAMİK KALIP OLUŞTURMA	33
4.4. ALAŞIMLARIN HAZIRLANMASI VE DÖKÜM.....	35

	<u>Sayfa</u>
4.5. METALOGRAFİK NUMUNE HAZIRLAMA	35
4.6. TARAMALI ELEKTRON MİKROSKOBU (SEM) İNCELEMELERİ	36
4.7. X-IŞINI KIRINIMI (XRD) İNCELEMELERİ	36
4.8. SERTLİK ÖLÇÜMLERİ	37
4.9. ÇEKME TESTLERİ.....	37
4.10. AŞINMA TESTLERİ.....	37
BÖLÜM 5	39
DENEYSEL SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ VE TARTIŞMA	39
5.1. MİKROYAPI İNCELEMELERİ	39
5.1.1. SEM ve OM Görüntülerinin İncelenmesi.....	39
5.1.2. XRD Analizi Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	45
5.2. SERTLİK ÖLÇÜMLERİNİN İNCELENMESİ.....	47
5.3. ÇEKME TESTİ SONUÇLARI	48
5.3.1.1. Kırık Yüzey İncelemeleri.....	51
5.3.1.2. Weibull İstatistiksel Analizleri.....	54
5.4. YOĞUNLUK ÖLÇÜMLERİNİN İNCELENMESİ	57
5.5. AŞINMA TESTİ SONUÇLARI.....	59
BÖLÜM 6	68
SONUÇLAR VE ÖNERİLER	68
KAYNAKLAR.....	71
ÖZGEÇMİŞ	77

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Kauçuk çeşitleri: sıvı kauçuk, disk kauçuk, silikon kauçuk.	9
Şekil 2.2. Tipik hassas döküm kalıp tozu bileşimleri	11
Şekil 2.3. Alçı karışımı hazırlama aşamaları	12
Şekil 2.4. Alçının dereceye dökülmesi	13
Şekil 2.5. Hassas döküm alçısı	14
Şekil 2.6. Döküm alçısı pişirme sıcaklık-süre değişimi	15
Şekil 3.1. Islatma açısı	22
Şekil 3.2. Isıl dönüşüm sonucunda BDP ve alt tabaka arasındaki lehim bağlantılarında meydana gelen kesme kuvveti.	23
Şekil 3.3. BDP'nin esnemesi sonucunda lehim toplarında meydana gelen çekme gerilimi	24
Şekil 4.1. Metal mum enjeksiyon kalıbı.....	33
Şekil 4.2. Mum enjeksiyon kazanı, ve model mumu.	33
Şekil 4.3. Hassas döküm derecesi, ve alt lastiği.....	34
Şekil 4.4. Elektrikli ergitme ocağı.....	35
Şekil 4.5. Taramalı elektron mikroskobu (SEM).	36
Şekil 4.6. Shimadzu AG-IS çekme cihazı.....	37
Şekil 4.7. Aşınma test cihazının şematik görünümü.	38
Şekil 5.1. Sn-Zn alaşımlarının optik mikroskop ve SEM görüntüleri Sn-7Zn, Sn-9Zn ve Sn-11Zn.	40
Şekil 5.2. Sn-9Zn alaşımına farklı oranlarda Cu ilave edilerek üretilen Sn-Zn-Cu alaşımlarının OM ve SEM görüntüleri: Sn-9Zn-0,5Cu, Sn-9Zn-0,7Cu ve Sn-9Zn-0,9Cu.....	42
Şekil 5.3. Sn-9Zn alaşımına farklı oranlarda Al ilave edilerek üretilen Sn-Zn-Al alaşımlarının OM ve SEM görüntüleri: Sn-9Zn-0,5Al, Sn-9Zn-0,7Al ve Sn-9Zn-0,9Al.	44
Şekil 5.4. Sn-9Zn, Sn-9Zn-0,7Cu, Sn-9Zn-0,7Al, Sn-9Zn, Sn-9Zn-0,9Cu, Sn-9Zn-0,9Al numunelerine ait XRD analizi sonuçları.....	46
Şekil 5.5. Sn-xZn, Sn-9Zn-xCu, Sn-9Zn-xAl alaşımları sertlik değişimi.....	47
Şekil 5.6. Sn-7Zn, Sn-9Zn ve Sn-11Zn alaşımlarının çekme testi sonuçları.	49

Şekil 5.7. Sn-9Zn, Sn-9Zn-0,5Cu, Sn-9Zn-0,7Cu ve Sn-9Zn-0,9Cu alaşımlarının çekme testi sonuçları.....	50
Şekil 5.8. Sn-9Zn, Sn-9Zn-0,5Al, Sn-9Zn-0,7Al ve Sn-9Zn-0,9Al alaşımlarının çekme testi sonuçları.....	51
Şekil 5.9. Sn-7Zn, Sn-9Zn ve Sn-11Zn alaşımlarının kırık yüzey SEM görüntüleri.....	52
Şekil 5.10. Sn-9Zn, Sn-9Zn-0,5Cu, Sn-9Zn-0,7Cu ve Sn-9Zn-0,9Cu alaşımlarının kırık yüzey SEM görüntüleri.....	53
Şekil 5.11. Sn-9Zn, Sn-9Zn-0,5Al, Sn-9Zn-0,7Al ve Sn-9Zn-0,9Al alaşımlarının kırık yüzey SEM görüntüleri.....	54
Şekil 5.12. Sn-7Zn, Sn-9Zn ve Sn-11Zn alaşımlarının maksimum çekme değerleri kullanılarak oluşturulan Weibull olasılık dağılımı grafiği.....	55
Şekil 5.13. Sn-9Zn-0,5Cu, Sn-9Zn-0,7Cu ve Sn-9Zn-0,9Cu maksimum çekme değerleri kullanılarak oluşturulan Weibull olasılık dağılımı grafiği.....	56
Şekil 5.14. Sn-9Zn-0,5Al, Sn-9Zn-0,7Al ve Sn-9Zn-0,9Al maksimum çekme değerleri kullanılarak oluşturulan Weibull olasılık dağılımı grafiği.....	57
Şekil 5.15. Sn-7Zn, Sn-9Zn ve Sn-11Zn alaşımları yoğunluk değerleri.....	58
Şekil 5.16. Sn-9Zn-0,5Cu, Sn-9Zn-0,7 Cu ve Sn-9Zn-0,9 Cu alaşımları yoğunluk değerleri.....	58
Şekil 5.17. Sn-9Zn-0,5Al, Sn-9Zn-0,7Al ve Sn-9Zn-0,9Al alaşımları yoğunluk değerleri.....	59
Şekil 5.18. Sn-7Zn, Sn-9Zn ve Sn-11Zn alaşımları 10 N yük altında ağırlık kayıpları ve aşınma oranları.....	60
Şekil 5.19. Sn-9Zn, Sn-9Zn-0,5Cu, Sn-9Zn-0,7Cu ve Sn-9Zn-0,9Cu alaşımları 10 N yük altında ağırlık kayıpları ve aşınma oranları.....	61
Şekil 5.20. Sn-9Zn, Sn-9Zn-0,5Al, Sn-9Zn-0,7Al ve Sn-9Zn-0,9Al alaşımları 10 N yük altında ağırlık kayıpları ve aşınma oranları.....	62
Şekil 5.21. Sn-7Zn, Sn-9Zn ve Sn-11Zn alaşımlarının sürtünme katsayıları.....	63
Şekil 5.22. Sn-9Zn, Sn-9Zn-0,5Cu, Sn-9Zn-0,7Cu ve Sn-9Zn-0,9Cu alaşımlarının sürtünme katsayıları.....	63
Şekil 5.23. Sn-9Zn, Sn-9Zn-0,5Al, Sn-9Zn-0,7Al ve Sn-9Zn-0,9Al alaşımlarının sürtünme katsayıları.....	64
Şekil 5.24. Sn-7Zn, Sn-9Zn ve Sn-11Zn alaşımlarının aşınma yüzeyi SEM görüntüleri.....	65
Şekil 5.25. Sn-9Zn, Sn-9Zn-0,5Cu, Sn-9Zn-0,7Cu ve Sn-9Zn-0,9Cu alaşımlarının aşınma yüzeyi SEM görüntüleri.....	66
Şekil 5.26. Sn-9Zn, Sn-9Zn-0,5Al, Sn-9Zn-0,7Al ve Sn-9Zn-0,9Al alaşımlarının aşınma yüzeyi SEM görüntüleri.....	67

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 3.1. Lehim alaşımlarının önemli özellikleri.	19
Çizelge 3.2. Lehim alaşımları ergime sıcaklıkları.	19
Çizelge 3.3. Kurşunsuz lehim alaşımları için IGK verileri.	25
Çizelge 3.4. Kurşunsuz lehim alaşımları için ısı iletkenlik verileri.	26
Çizelge 3.5. Mikro elektronik paketleme malzemeleri ve bazı kurşunsuz lehim alaşımlarının oda sıcaklığındaki özdirenç değerleri.	27
Çizelge 4.1. Alaşımların kimyasal bileşimleri.	32
Çizelge 5.1. Farklı kimyasal bileşimlere sahip Sn-Zn alaşımlarının EDS sonuçları.	41
Çizelge 5.2. Sn-9Zn alaşımına farklı oranlarda Cu ilave edilerek üretilen Sn-Zn-Cu alaşımlarının EDS analizleri: Sn-9Zn-0,5Cu, Sn-9Zn-0,7Cu ve Sn-9Zn-0,9Cu.	43
Çizelge 5.3. Sn-9Zn alaşımına farklı oranlarda Al ilave edilerek üretilen Sn-Zn-Al alaşımlarının EDS analizleri: Sn-9Zn-0,5Al, Sn-9Zn-0,7Al ve Sn-9Zn-0,9Al.	45

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

°C	: derece santigrat
mm	: milimetre
mg	: miligram
ml	: mililitre
kg	: kilogram
dk	: dakika
g	: gram
μ	: mikron
N	: Newton
P	: yükleme ağırlığı
S	: kayma yolu
ΔG	: ağırlık kaybı
D	: yoğunluk
MPa	: mega Pascal

KISALTMALAR

AB	: Avrupa Birliği
ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
RTV	: Room Temperature Vulcanizing
EPA	: Environmental Protection Agency (Çevre Koruma Ajansı)
OSHA	: The Occupational Safety and Health Administration
BDP	: Baskı Devre Plaketi
IGK	: Isıl Genleşme Katsayısı
BGA	: Ball Grid Array
SMT	: Surface Mount Technology
IR	: Infrared Radiation
SEM	: Spectron Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskobu)
XRD	: X-Ray Diffraction (X-Işını Kırınımı)
HMV	: Hardness Micro Vickers (Mikro Sertlik Vikers)
OM	: Optik Mikroskop
DSC	: Differential Scanning Calorimetry (Diferansiyel Taramalı Kalorimetre)
IMC	: Intermetallic Compound (İntermetalik Bileşik)

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Kurşun ve kurşun içeren bileşikler, insanlara ve çevreye olan zararlı etkileri sebebiyle zehirli madde olarak kabul edilmektedir. Dünyadaki bir çok ülke tarafından çevreyi koruma amacıyla uygun gelişim programları ile, kurşun kullanılan endüstriyel alanlarda kısıtlamalar getirilmiştir. Bu bağlamda, 1 Haziran 2006 tarihinde AB ve ABD Çevre Koruma Ajansı kurşun içerikli elektronik ürünleri yasaklamıştır.

Geleneksel Sn-Pb lehim alaşımlarını, kurşun içermeyen alternatifleriyle değiştirmek için büyük çabalar harcanmaktadır. Kurşunsuz lehim alaşımı olan Sn-Zn ötektik alaşımının ergime sıcaklığı, Sn-Pb alaşımının ergime derecesine yakındır. Buna rağmen, yeni lehim alaşımları ekonomik durumu, fiziksel ve kimyasal özellikleri ile diğer bazı şartları da sağlamalıdır. Bu açıdan geliştirilen kurşunsuz lehim alaşımlarının ergime dereceleri, geleneksel Sn-Pb ötektik alaşımına yakın, dayanımı ve sağlamlığı da benzer veya üstün olmalıdır. Ayrıca üretim maliyeti açısından da, yeni geliştirilen alaşımların maliyetleri, kurşun içeren alaşımlarla rekabet edebilmesi gerekmektedir.

Bu amaçla, daha önceden yapılan birçok çalışmada, Sn esaslı çok bileşenli alaşımlara odaklanılmıştır [1-3]. Ancak, bu lehim alaşımlarının fabrikalardaki üretim şartlarındaki değişimlerden kaynaklanan ve kimyasal bileşimlerinin hatasız hazırlanamaması nedeniyle, Sn-Pb ötektik alaşımıyla karşılaştırıldığında, ergime derecelerinde artış olduğu görülmektedir. Bu sınırlamalar dikkate alınarak, herhangi bir değişiklik yapılmadan mevcut üretim hattında kullanılabilmesi, Sn-Zn alaşımlarının alternatif lehim alaşımları olarak tercih edilmesini sağlamıştır. Elektronik sektöründeki lehimlemelerde, mekanik bütünlüğün sağlanması ve üretilebilirliğin göreceli olarak düşük maliyetli olmasından dolayı, bu alaşımların faydaları üzerine odaklanılmıştır. Lehim bölgelerinin uzun süreli çalışmalarda ısı

gerilmeler, zorlanma ve çarpımlara uğraması veya fazla ısındığında akışkan davranış göstererek, elektronik cihaza hasar verdiği ve cihazın kullanım ömrünü kısalttığı bilinmektedir. Lehimli bölgelerde sıcaklık artışına bağlı olarak, gerilmeler ve zorlanmalar oluşabilmektedir. Eğer lehim alaşımının mekanik özellikleri bilinirse, bu değerler (matematiksel modeller de kullanılarak) lehimin ömrünü ve güvenilirliğinin tahmin edilmesinde kullanılabilir [4]. Lehim alaşımlarında mikro yapı ve rijitliğin kontrol edilebilmesi, metalürjik ve mikro mekanik açıdan karmaşıklığına neden olsa da, ısıl işlemlerin önemli bir rol oynadığı iyi bilinmektedir.

Bu çalışmada, seramik kalıba dökülerek (hassas döküm yöntemiyle) retilen farklı oranlarda Sn-Zn ve Sn-Zn tektik alaşımları farklı oranlarda Al ve Cu ilave edilerek üretilmiştir. Alaşımların mikro yapısal karakteristiklerinin ve ilave edilen elementlerin, alaşımların mekanik özelliklerine ve aşınma davranışına etkilerinin incelenmesi hedeflenmiştir.

BÖLÜM 2

HASSAS DÖKÜM YÖNTEMİ

2.1. DÖKÜM YÖNTEMİ

Metal ve alaşımlarının dökümü; istenilen bir parçanın elde edilmesi için, seçilen metal ve/veya alaşımın ergitilerek, üretilmesi hedeflenen parçanın negatifi olan kalıp boşluğuna dökülmesi ile yapılan üç boyutlu bir şekillendirme işlemidir.

İstenilen özelliklere sahip ve sağlam bir döküm malzemenin elde edilmesinde beş önemli aşama göz önünde bulundurulmalıdır. Bunlar;

- Seçilen döküm yöntemine göre kalıp ve/veya maçaların hazırlanması,
- İstenen alaşımın hazırlanması, uygun ergitme ünitesinin seçimi, ergitme ve gerekli işlemlerin (gaz giderme, modifikasyon, aşılama vb.) yapılması,
- Sıvı metalin kalıp geometrisine uygun şekilde ve akıcılıkla kalıp boşluğuna transfer edilmesi,
- Döküm malzemenin mikro yapısının kontrolü,
- Kalıp içinde katılaştan metalin hacimsel daralmasını karşılayacak olan sıvı metal depolarının (besleyicilerin) kalıba yerleştirilmesidir.

2.1.1. Döküm Yöntemiyle Şekillendirmenin Avantajları

Döküm yöntemi ile şekillendirmenin avantajları şu şekilde sıralanabilir;

- İçten ve dıştan girift ve karışık şekillere sahip parçaların döküm yolu ile elde edilebilmesi ve talaş kaldırma kaynak vb. işlemlere ya çok az, ya da hiç ihtiyaç duyulmaması.

- Tasarımla basitlik kazandırılarak, istenen geometrinin tek parça halinde üretilebilmesi.
- Büyük miktarlardaki seri üretime uygun olması ve çok sayıda parçanın kısa sürede üretilebilmesi.
- Bazı alaşımların döküm halindeki mühendislik özellikleri tercih edilmektedir. Bazı metal veya alaşımlar da bu metalürjik özellikleri nedeniyle, yalnız bu yöntem ile şekillendirilebilmektedir (Dökme demirler gibi).

2.1.2. Yaygın Olarak Kullanılan Döküm Yöntemleri

Döküm sektöründe kullanılan döküm yöntemleri, farklı başlıklar altında sınıflandırılmaktadır. Bu sınıflandırmalar ya kalıp malzemesi veya yöntemin özelliği göz önünde bulundurularak yapılmaktadır. Döküm sektöründe yaygın olarak kullanılan döküm yöntemleri: kum kalıba döküm, seramik kalıba döküm, metal kalıba (kokil) döküm, savurma döküm, sürekli döküm ve hassas döküm yöntemidir.

2.1.2.1. Kum Kalıba Döküm Yöntemi

Kum kalıba döküm, döküm sektöründe en çok kullanılan yöntemdir. Çok farklı büyüklükteki parçalara uygulanabilirliği ve kalıplama maliyetinin az oluşu nedeniyle tercih edilmektedir. Kum kalıba döküm yöntemi, kullanılan kalıbın cinsine göre farklı gruplara ayrılmaktadır. Bunların başlıcaları; yaş kum kalıba döküm, kuru kum kalıba döküm, tamamen maçaların bir araya getirilmesiyle oluşturulan maça kalıba döküm, kabuk kalıba döküm, gaz sertleştirici silikat yöntemi olarak bilinen, CO₂ yöntemi ile hazırlanan kalıba döküm yöntemleri olarak sayılabilir.

2.1.2.2. Seramik Kabuk Kalıba Döküm Yöntemi

Seramik kabuk kalıp yöntemi, öncelikle karbon çelikleri ve alaşımlı çelikler paslanmaz çelikler, ısıya direnli alaşımlar ve diğer ergime dereceleri 1100 °C'nin üzerinde olan alaşımların dökümünde tercih edilen bir döküm yöntemidir. Bu yöntemde modeller, bir sıvı içinde süspansiyon halinde bulunan seramik tozundan oluşan bulamaç içine daldırılır ve seramik kaplı ıslak yüzeye, kuru refrakter taneleri

bir yatak içinde veya başka bir yöntemle püskürtülerek yapılmaktadır. Bu işlem yeterli kabuk kalınlığı elde edilinceye kadar tekrarlanmaktadır. Ön kaplamanın düzgünlüğü, döküm parça yüzeyinin düzgünlüğünü de belirlemektedir.

Dökülen parçanın şekline, ağırlığına ve kullanılan seramik ve bağlayıcı cinsine bağlı olarak kabuk kalınlığı, 0,50 - 1,50 cm arasında değişmektedir. Ancak, uygun bir şekilde kalıbın gaz geçirgenliğini arttırmak ve kaplama işleminin süresini ve maliyetlerini azaltmak için, kalınlığın düşük ölçülerde olması tercih edilmektedir.

Seramik kabuklar her daldırma işleminden sonra (tabakanın içinde bağların oluşması için) kurutulmakta, sonrasında ise pişirilerek sertleştirilmektedir. Ancak oluşturulan kabuklar genellikle mum bağlama işleminden önce, 24 saat tam kurumaya bırakılmaktadır.

Seramik kabuk yönteminde, refrakter malzeme olarak düşük ısıl genleşme özelliğinden dolayı, ergimiş silika kullanılmaktadır. Ergimiş silika, demir esaslı dökümler ile kobalt esaslı alaşımların dökümünde kullanılan kalıp malzemeleridir. Ergimiş silikada faz dönüşümü 1150 °C'de faz başlasa da, 1650 °C'ye kadar olan döküm sıcaklıklarına dayanıklıdır.

2.1.2.3. Metal Kalıba (Kokil) Döküm

Metal kalıba döküm genellikle karmaşık şekilli, dar boyut toleransları olan ve çok sayıda üretilmesi planlanan döküm parçaların üretiminde kullanılmaktadır. Bu yöntem isminden de anlaşıldığı gibi, iki veya daha fazla parçadan oluşan ve seri üretimde kullanılan ve sıvı metalin bir metal kalıba döküldüğü yöntemdir. Basit maçalar metalden, karmaşık şekilli maçalar kum karışımı veya alçıdan yapılmaktadır. Bu yöntemle üretilen parçalar ile kum kalıba döküm yöntemi ile üretilen parçalar karşılaştırıldığında, döküm yapısının daha sık ve ince taneli oluşu, üretilen parçaların daha düzgün yüzeyli ve boyutlarının daha hassas olması ve mekanik özelliklerinin yüksek olması gibi belirgin avantajlarının olduğu görülmektedir.

2.1.2.4. Savurma Döküm Yöntemi

Döküm parçaların üretiminde karşılaşılan en büyük zorluk, metalin sıvı durumdan katı duruma geçerken, hacimsel daralmalar nedeniyle meydana gelen ölçüsel farklılıklardır. Bunları gidermek için basınç kullanma düşüncesi, bir anlamda savurma döküm yöntemine yol açmıştır. Savurma döküm işleminde, kalıp döndürülerek sıvı metale basınç uygulanmaktadır. Silindirik şekilli parçaların dökümünde, merkezkaç kuvvetinden yararlanarak sıvı metalin kalıp içine gönderilmesi prensibine dayanmaktadır. Kalıp eksenini düşey, yatay ya da eğik olabilmektedir. Bu yöntemin avantajları;

- Düşük yoğunluklu metalik olmayan inklüzyonlar iç yüzeye doğru taşındığından dolayı, basit bir talaş kaldırma işlemi ile sağlam parçaların elde edilmesi,
- Oldukça yüksek bir döküm basıncı sağlanmasından ve iyi beslenme nedeniyle döküm parçaların sağlamlık derecelerinin yüksek olması,
- Sıvı metalin yüksek hızla beslenebilmesinin, döküm sıcaklığının daha düşük tutulmasına imkân vermesi,
- Düşük döküm sıcaklığının ise gaz absorbesini azaltması ve tane boyutunun küçülmesine neden olması, olarak sıralanmaktadır.

2.1.2.5. Sürekli Döküm Yöntemi

Bu döküm yöntemi, sıvı metalin, dış yüzeyi su ile soğutulan iki ucu açık bir kalıptan geçirilerek, katılaşmasının sağlandığı bir işlemdir. İşlemin sürekli oluşu nedeniyle, sürekli döküm yöntemi olarak adlandırılmaktadır. Kalıbın konumu ve katılaştıran metalin çekilme yönüne bağlı olarak düşük sürekli döküm, yatay sürekli döküm, eğik sürekli döküm olarak sınıflandırılmaktadır.

2.1.2.6. Hassas Döküm Yöntemi

Bu yöntemde mum ve benzeri modeller, bulamaç haldeki refrakter bir malzeme içine gömülerek kalıplar hazırlanmaktadır. Kalıplama sonrasında kalıp ısıtılarak, mum

model eritilmektedir. Model mum eritilerek, kalıp boşluğu oluşturulmaktadır. Daha sonra ergimiş metal kalıp boşluğuna dökülerek, döküm parça üretilmektedir [5].

2.2. HASSAS DÖKÜMÜN TARİHÇESİ

Hassas döküm yöntemi milattan önce dört bin yılına kadar dayanmaktadır. Eski Mısır ve Mezopotamya uygarlıklarının sanatçı ve heykeltıraşları, mücevher, süs eşyaları ve putların yapımında hassas döküm metodunu kullanmıştır. Çin’de, Çin Hanedanlığı, Afrika’daki Benin Krallığı ve Meksika’daki Aztekler de benzer teknikleri kullanmışlardır. Bu yöntem, iletişimin ve gidip gelmelerin artmasıyla da yaygınlaşmıştır. Ama en çok kullanıldığı alan kuyumculuk ve süs eşyaları üretimidir.

Dişçilikte hassas döküm yönteminin kullanıldığını gösteren belgelenmiş ilk kayıt, 1897 yılında Amerika’da Doktor Phill Broke tarafından yayınlanmıştır [4]. Bunu takiben 1907 yılında Chicago’dan Doktor William Tagart’ın yaptığı araştırmalar sonucunda, bu metodun dolgu malzemeleri ve diş köprülerinde kullanılmasında dönüm noktası olduğu kabul edilmektedir [4].

Endüstriyel alanda, hassas döküm metodu İkinci Dünya Savaşı’nın başlarında yeniden keşfedilmiştir. İkinci Dünya Savaşı süresince askeri taleplerin artmasıyla birlikte, makine ve teçhizat üretimi ile artan maliyet ve zaman yükü, bu alana yönelmeyi hızlandırmıştır. Bunun sebebi, yüksek miktarda karmaşık şekilli işlenmiş silah, teçhizat ve uçak parçası talebidir. Bilhassa Almanya ve Amerika’da bu taleplere işleme ve dövme atölyelerinin yetişemediği bir dönemde, hassas döküm metodu kullanarak kısa yoldan nihai ürün toleranslarına çok yakın değerlerdeki parçaların, istenen her türlü özel alaşımla dökülmesine olanak sağlamıştır. Üreticiler bu yöntemle, hemen hemen bütün makine işlemlerinden kurtularak, kısa sürede çok sayıda malzeme üretebilmiştir.

Askeri unsurlar tarafından yöntemin en çok kullandığı alanlar, bilhassa 20. yüzyılın başlarından itibaren gelişmeye başlayan jet tribün kanatlarının üretimidir. Hemen her uçağın şu andaki jet tribün kanatları bu yöntemle üretilmektedir. Silah ve kritik parçaların hassas dökümle üretilmesi, önceki maliyetlerinin küçük bir bölümünü

oluşturmaktadır. Dişçilikten elde edilen bilgi birikimi ve kuyumcuların mükemmelleştirdikleri sürekli döküm teknikleri birleştirilerek, birçok kritik parçanın üretimi sağlanmıştır. Bugün hassas döküm yöntemlerine bakıldığında, metal parça üretiminin gerektiği hemen her endüstriyel alanda bu yöntemin kullanıldığı görülmektedir. Elektronik devreler, mikrodalga fırın ekipmanları, silah parçaları (tetik, tabanca, tüfek gövdeleri gibi), dürbün hamilleri gibi parçalar, hassas döküm yöntemiyle kolaylıkla üretilebilmektedir. Bu sayede, bu tarz parçaların üretilebilmesi için gerekli sürekli döküm kalıplarına duyulan zorunluluk da ortadan kalkmaktadır [6].

2.3. MUM MODEL ÜRETİMİ

Hassas döküm yönteminde döküm parçanın başarılı bir şekilde üretilmesinde en önemli aşama, mum modelin hazırlanmasıdır. Çünkü, mum modelde oluşan bütün ayrıntılar döküm parçada elde edilmektedir. Düzgün hazırlanmayan mum modeller kesinlikle salkıma alınmamalıdır. Aksi takdirde bu parçaların, üretim hatalı olarak hurdaya ayrılması kaçınılmazdır [6].

2.4. MODEL HAZIRLAMA

Model üretimi direkt olarak mum işlenerek yapılabildiği gibi, hazır bir modelin kalıpları alınarak da hızlı bir şekilde yapılabilmektedir. Esnekliği nedeniyle karmaşık modellerin kalıptan alınmasına imkân verdiği için, kalıp malzemesi olarak genellikle kauçuk malzemeler kullanılmaktadır. Hassas dökümde önemli olan etkenlerden birisi de yolluk sistemi seçimidir.

Yolluk sistemi seçiminde dikkat edilmesi gereken hususlar şunlardır;

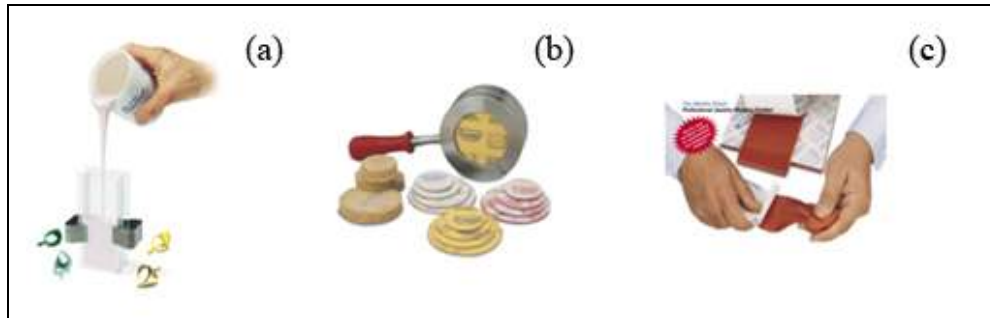
- Yolluklar silindirik kesitli olmalıdır.
- Çok uzun veya çok kısa olmamalıdır.
- Yolluk sistemi elemanları akışı engelleyecek şekilde eğimli olmamalıdır.
- Model kalınlığından ince olmamalıdır (Model bağlantı yerinden).

- Bir yolluk sistemi ile doldurulamayan büyük modeller için dallantılı yolluklar kullanılmalıdır.
- Bir yolluk sistemine çok sayıda küçük farklı model bağlanabilmektedir.
- Bazı özel durumlarda (düz ve tek taraflı takılar için) yolluklar, alttan verilebilmektedir [7].

2.5. KAUÇUK MALZEMELERİ

Kauçuklarda vulkalizasyon sıcaklığı 143 - 176 °C arasındadır. Her bir plaka için 7 - 7,5 dakika pişirme süresi tercih edilmektedir. Kuyumculuk sektöründe kullanılan bazı kauçuk çeşitleri;

- Sıvı kauçuk
- Rulo ve levha kauçuk
- Silikon kauçuktur (Şekil 2.1).



Şekil 2.1. Kauçuk çeşitleri: a) sıvı kauçuk, b) disk kauçuk ve c) silikon kauçuk [8].

2.6. SIVI KAUÇUK HAZIRLAMA

Hassas dökümde, ana modellemenin kalıplamasında kullanılan silikon kalıplamanın, hızlı prototip imalat sektöründe yaygın olarak kullanılmasının yanında, oto inşa teknolojisiyle daha hızlı ve kolay bir şekilde model imalatı da yapılabilmektedir. Şeffaf çift bileşenli RTV (Room Temperature Vulcanizing) silikon malzemeler, sıvı halden katı hale kısa sürede ve büzülme/şişmeye uğramadan geçebilmektedirler. Bunun yanında, kalıba döküldüğünde yüksek akışkanlıkları sayesinde, model üzerine yüksek basınç uygulamadan modeli çevreleyerek parmak izi gibi en küçük detayların

ve yüzey desenlerinin kalıplanabilmesini de sağlamaktadır. RTV oda sıcaklığında vulkanize (kür) olan silikonlar, istendiğinde çabuk kür olması için daha sıcak bir ortamda bekletilmektedir. Silikon malzemelerin içerisinde hava kabarcıkları kalmaması için, vakumlu bir ortamda tutulması gereklidir. Silikon kalıpların ömürlerini, önemli oranda ana modellemenin geometrisi ve kalıba dökülecek malzemenin aşındırıcılığı belirlemektedir. Ortalama olarak, bir silikon kalıba yaklaşık 25 adet mum enjeksiyon model üretimi mümkün olmaktadır. Kuyumculuk sektöründe ise çok daha karmaşık silikon kalıplar, seri üretimde hassas döküm için mum model üretiminde yaygın ve etkili bir şekilde kullanılmaktadır [9].

2.7. MUM ENJEKSİYONU

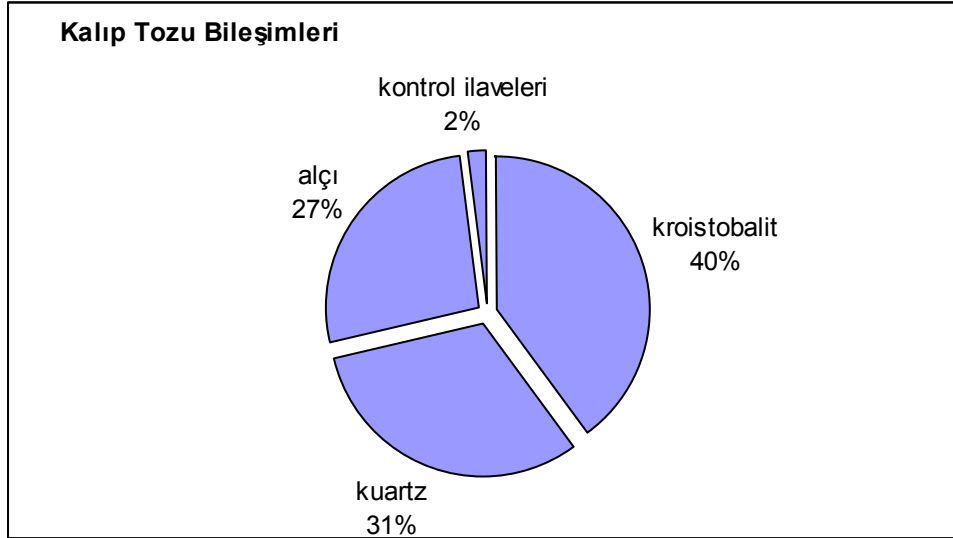
Başlangıç aşamasında, model üretiminde kullanılan mum malzemeler özelliğine göre, basınç ve sıcaklık değerleri önceden hazırlanmış mum kazanına konulmaktadır. Mumun ergime özelliği sayesinde akıcılık kazanarak belli bir basınç altında kauçuk kalıp içerisine açılan yolluk yardımı ile giriş yaparak, orada katılaştırılması işlemi mum enjeksiyonu olarak ifade edilmektedir. Daha önceden hazırlanmış olan kauçuk kalıp kontrol için pudralanarak, alt ve üst flanşlar arasında sıkıştırılmasıyla, mum enjeksiyonu yapılmaktadır. Mumun katlaşması tamamlandıktan sonra kalıp açılır. Elde edilen mum modeller mutlaka kontrol edilmelidir. Enjeksiyon cihazının gerekli sıcaklık ve basınç ayarları yapılarak, mumun donma süresi beklenmelidir. Kauçuk kalıpta kalan hava, mumun kalıp içine ilerlemesini engellemektedir. Bu sebeple mum modellerde hatalar oluşmaktadır. Bunun önlenmesi için kauçuk kalıba bisturi ile çentik açılarak, havanın dışarıya tahliyesi sağlanmaktadır. Bu işlemden sonra, seri mum basma işlemine geçilmektedir. Enjektör kullanımı, mum sıcaklığı ve modellerin hatasız olması açısından son derece önemlidir. Sıcaklık kontrolü enjektördeki termometre yardımıyla sağlanmaktadır. Mumun kalıptan kolay ayrılması ve mum enjeksiyonu sırasında havanın kalıptan çıkışını kolaylaştırmak için talk pudrası kullanılmaktadır [7].

2.8. MUM SALKIM DİZİMİ

Döküm işleminde mum salkımı, sıvı metal için bir depo ve geçiş yolu olarak düşünülmektedir. Genellikle yolluk sisteminin (değerli metal sarfiyatını azaltmak için) çapı küçük tutulmaktadır. Mum modellerin yolluk sistemine bağlanmalarındaki diziliş de çok önemlidir. Katılaşmanın dışarıdan içeriye doğru yönlendirilmesini sağlamak için, diziliş şekilleri dikkate alınmalıdır. Dizime, yolluk sisteminin üst kısımdan başlanmalı ve aşağıya doğru devam edilmelidir. En üst sıradaki mum modeller havayla monte edildikten sonra, derece takılarak kontrol edilmelidir. Mum modeller dereceden 1 cm kadar içeride olmalıdır [9].

2.9. ALÇININ HAZIRLANMASI VE KALIPLAMA

Alçı kalıpların hazırlanması sırasında en kritik nokta, su ve depo sıcaklığı gibi yerel değişimlerin dikkate alınmasıdır. Alçı, atmosferik şartlara bağlı olarak kısa sürede bozulabilmektedir. Bu faktör, alçı stoku yapılırken, dikkate alınmalıdır. Şekil 2.2’de tipik hassas döküm kalıp tozu bileşimleri verilmiştir.



Şekil 2.2. Tipik hassas döküm kalıp tozu bileşimleri [10].

Çalışma süresi, yani karıştırma başlangıcından bulamaç oluşuna kadar geçen süre en az 2 dakika olmalıdır. İdeal alçı karışımının elde edilmesi, çalışma süresi ve

kullanılan su sıcaklığına bağlıdır. Su sıcaklığı 21 °C olmalıdır. Su sıcaklığının artması işlem süresini de hızlandırmaktadır. En ideal çalışma süresi 9 - 10 dakika arasındır. Şekil 2.3’de alçı karışımı hazırlama aşamaları verilmiştir.



Şekil 2.3. Alçı karışımı hazırlama aşamaları [11].

Alçının hazırlanırken, alçı suya yavaş yavaş dökülerek karıştırılmaktadır. Suyun alçıya oranı, üretici firma değerlerine göre yapılmalıdır. Alçı hazırlandıktan sonra, vakumlu kalıplama makineleriyle karıştırma ve doldurma işlemleri otomatik olarak gerçekleştirilmelidir. Mum salkımı dereceye alınmadan önce, derece üzerindeki eski alçı kalıntıları tel fırça veya kum püskürtme ile temizlenmelidir. Hazırlanan alçı daha önceden hazırlanan dereceye yolluk sisteminden süzdürülerek, yavaş yavaş doldurulmalıdır (Şekil 2.4).



Şekil 2.4. Alçının dereceye dökülmesi [7].

2.10. MUM İNDİRME

Mum indirmedeki amaç, derece içerisinde alçılanarak vakumlanması biten mum modellerin alçı içerisinde alınarak, kalıp boşluğunun oluşturulmasıdır. Ergimiş alaşımın dökülerek katılaşması için, bir döküm boşluğunun olması şarttır. Bu işlem buharla veya ısı yardımı ile alçı içerisinde akıtılarak yapılmaktadır. Mum modellerin oluşturduğu boşluklara daha sonra sıvı metal dökülerek döküm işlemi tamamlanmaktadır [9].

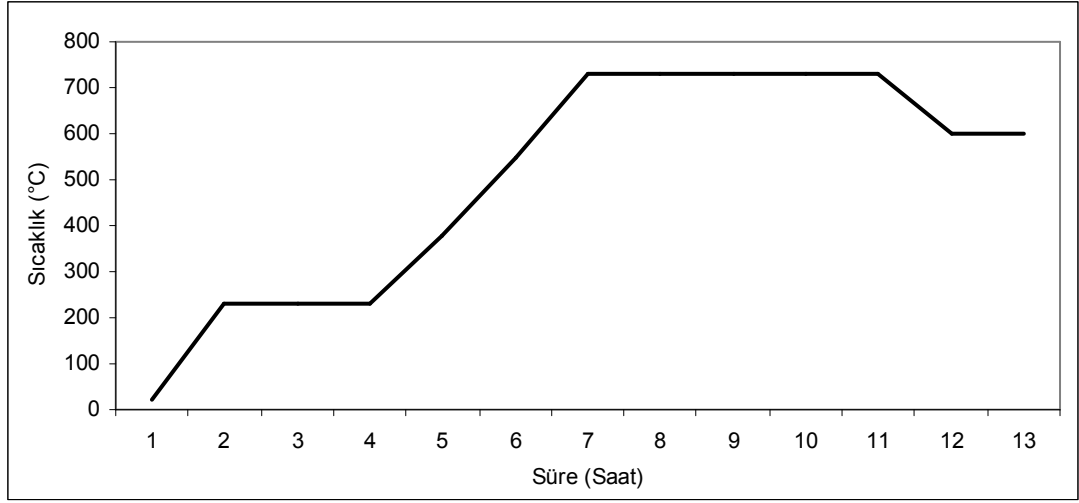
2.11. ALÇININ PİŞİRİLMESİ VE DÖKÜM İŞLEMİ

Hatasız bir döküm işlemi için, alçı kalıbın kusursuz hazırlanması gerekmektedir. Mum modellerin hatasız dizilmesi, alçılama ve vakumlama işleminin düzgün yapılması ve son aşamada mum indirme işleminin yapılması gereklidir. Alçı kalıbı oluşturabilmek için, döküme elverişli alçılar kullanılmalıdır. Genellikle uygulamalarda, önceden hazırlanarak pişirme işlemine hazır hale getirilen alçı kalıplarının üzerine numaralar yazılarak bir çizelge hazırlanmaktadır. Şekil 2.5’de hassas döküm alçısına örnek gösterilmiştir [12].



Şekil 2.5. Hassas döküm alçısı [12].

Çizelge hazırlama işleminin amacı, döküm işlemi sırasında hangi derece için ne kadar metal kullanıldığının belirlenmesidir. Dereceler döküme hazır hale getirildikten sonra, uygun pişirme fırınında 80 - 100 °C'ye kadar ısıtılmaktadır. Pişirme işlemi için kademeli ısıtmaya elverişli fırınlar kullanılmaktadır. Derecelemlerin homojen olarak pişirilebilmesi için en uygun pişirme fırınları döner tabanlı fırınlardır. Tüm hazırlıklar tamamlandıktan sonra, fırın aşamalı olarak 100 °C'ye kadar ısıtılmaktadır. Daha fazla pişmesi istenen büyük çaplı dereceler en arkaya, küçük çaplı dereceler ve az pişmesi istenen dereceler ön kısma gelecek şekilde yerleştirilmektedir. Fırın içi yerleştirme planı bir çizelgeye kaydedilmektedir. Kullanılan alçı katalogundan derecelerin çap ve yüksekliğine bağlı olarak, pişirme sıcaklıklarıyla süreleri tespit edilmektedir. Derecelerin katalog bilgilerinde bulunan pişirme süresinde, tavsiye edilen sıcaklığa kadar pişirilmesi gereklidir. Pişirme işlemi sırasında rezistanslara yakın bölgelerin yanmasını önlemek için, döner tabanlı fırınlar kullanılmaktadır. Fırın kademeli olarak 700 °C'ye kadar ısıtılmaktadır. Kullanılan alçının özelliğine ve üretici firmanın önerilerine göre 740 - 750 °C'ye kadar ısıtılarak, kalıplar bu sıcaklıkta 2 - 3 saat bekletilmektedir. Bu sürenin sonunda fırın sıcaklığı, kullanılacak alaşımın döküm sıcaklığına yakın sıcaklığa kadar düşürülmektedir [12]. Şekil 2.6'da döküm alçısı pişirme sıcaklık-süre değişimi verilmiştir.



Şekil 2.6. Döküm alçısı pişirme sıcaklık-süre değişimi [13].

Pişirme işlemine başladıktan sonra, ara vermeden işlem tamamlanmalı ve fırın sıcaklıklarında ani değişiklikler yapılmamalıdır. Önceden yarım pişirilmiş olan dereceler tekrar pişirilmelidir. Bu gibi durumlarda, alçı kalıpta çatlama meydana gelebilmektedir. Pişirme işleminde fırının homojen şekilde ısıtma işlemi yapması da çok önemlidir. Buna dikkat edilmediğinde, bazı döküm hataları meydana gelmektedir. Dereceler fırına yerleştirilirken, birbirleri arasında ve fırın duvarları arasındaki boşluk, maksimum 20 - 25 mm olmalıdır. Kataloglarda tavsiye edilen sıcaklıklardan daha yüksek sıcaklıklarda ısıtma işlemi yapılması, karbon kalıntılarının etkisiyle kalsiyum sülfatın ayrışmasına sebep olmaktadır. Kalsiyum sülfatın pişirme işlemi sırasında ayrışması, pürüzlü yüzey oluşumlarına neden olmaktadır [12].

BÖLÜM 3

LEHİM ALAŞIMLARI

Lehimleme, ergime derecesi 425 °C'nin altında olan bir dolgu metali kullanarak yapılan, metalürjik bir birleştirme yöntemidir [14]. Lehimler, mikro elektronik devrelerin ara bağlantılarında veya montajında kullanılmaktadır. Bağlantı malzemesi olarak lehimler, elektronik montajında elektriksel, ısıl ve mekanik süneklilik şartlarını sağlamalıdır [4]. Lehim malzemelerinin performans ve kaliteleri, montajın en hayati noktası olan lehim bağlantıları için çok önemlidir.

Yaygın olarak kullanılan lehim alaşımı Pb-Sn alaşımlarıdır. Ancak dünya çapındaki yeni çevresel düzenlemelerin ortaya çıkmasıyla (özellikle Avrupa ve Japonya'da), elektronik devrelerinde kullanılan ve zararlı etkileri olan Pb'nin elemine edilmesi hedeflenmektedir. Bu da mikro elektronik devrelerde, kurşunsuz alaşımların araştırılmasının önemini ortaya çıkarmaktadır.

3.1. KURŞUN İLE İLGİLİ SAĞLIK VE ÇEVRESEL KAYGILAR

3.1.1. Kurşunun Sağlığa Olan Olumsuz Etkileri

Kurşun ve kurşun içerikli bileşikler, Çevresel Koruma Ajansı (EPA) tarafından insan hayatı ve çevreye en çok zarar veren 17 kimyasal maddeden biri olarak gösterilmektedir [15]. Kurşun insan vücudunda biriktiğinde, sağlığa olumsuz etkileri olmaktadır. İnsan vücudunda kurşun bulunması, vücuttaki proteinlere güçlü bir şekilde bağlanarak, normal olarak işlemini ve fonksiyonlarını yerine getirmesini engellemektedir. Vücutta bulunan kurşunun sinir ve üreme sistemini düzensizleştirilmesi, sinirsel ve fiziksel gelişmeyi geciktirmesi, kavrama kabiliyetini ve davranışları etkilemesi, hemoglobin üretiminin azaltılmasıyla oluşan kansızlık ve yüksek tansiyon gibi rahatsızlıklara neden olmaktadır [16]. Kandaki kurşun seviyesi

50 mg/dl'yi aştığında ise, kurşun zehirlenmesi meydana gelmektedir [17]. Ancak yapılan bazı çalışmalarda, resmi olarak belirlenmiş maksimum kurşun oranının çok altında bile, çocukların sinirsel ve fiziksel gelişimlerinin tehdit altında olduğu belirtilmektedir [4].

Kurşunun elektronik endüstrisinde kullanımı ile oluşan mesleki hastalıklar, üretim işlemleri sonucunda meydana gelen kurşun atıkları ve elektronik montajında kullanılan kurşunlar endişe yaratmaktadır. Elektronik endüstrisinin kurşun tüketimi minimum düzeyde görülmesine rağmen, kurşuna maruz kalma durumu göz ardı edilmemelidir [16]. Elektronikteki mesleki etkilenmelerin olası nedenleri, lehimleme işlemleridir (özellikle dalga lehimleme işlemi). Yapılan çalışmalar, kurşunun normal lehimleme sıcaklığında nispeten uçucu olmamasından dolayı, elle lehimlemenin daha az tehlikeli olduğunu göstermektedir [4]. Buna rağmen, kurşun buharı veya dalga lehimleme sırasında cürufların meydana getirdiği kurşun taşıyan tozlar, çalışanlar için bir tehdit olarak algılanmaktadır [18]. Dalga lehimlemede, ergimiş lehimlerin yüzey oksitlenmesinden kaynaklanan cüruflar meydana gelmektedir. Dalga lehimleme sırasında oluşan cürufların yaklaşık %90'ı rafine edilerek yeniden saflaştırılabilir [19]. Ancak kalan kısım atık ürünlerdir. "The Resource Conservation and Recovery Act", bu atıkları insan hayatı için tehlikeli atıklar olduğunu belirtmektedir. "The Occupational Safety and Health Administration" (OSHA) ise, çalışanların kanında 50 mg/dl'den daha fazla kurşunun bulunmamasını istemektedir [20]. Bu sınırın belirlenmesinin sebebi, kandaki kurşun miktarının 40 mg/dl'nin altında kaldığı sürece, kurşundan kaynaklı herhangi bir olumsuz etkinin olmamasıdır. OSHA çocuk sahibi olmayı planlayan çalışanlar için, kandaki kurşun seviyesinin 30 mg/dl'nin altında olması gerektiğini belirtmektedir.

3.1.2. Kurşun ve Çevre

Elektronik endüstrisinde kurşunun montaj malzemesi olarak kullanılmasından dolayı, elektronik cihaz atıkları çevreye zarar vermektedir [21]. Ancak kurşunun kullanıldığı elektronik ürünlerden, kurşunun yeraltı sularına, hayvanların veya insanların besin zincirine giriş mekanizmasını tanımlayan, açık bir bilimsel veri veya çalışma bulunmamaktadır.

Kurşun kullanımının pillerde kalıcı olduğu görülmektedir. Toplam kurşun kullanımının yaklaşık %40 - 50'sinin, elektronik lehimlerinde kullanıldığı belirtilmektedir. Bu yüzden, elektronik endüstrisindeki kurşunun geri dönüşümü kapsamının artırılması beklenmektedir. Fakat geri dönüştürülmüş kurşunun elektronik cihazlarda kullanımı, geri dönüştürülmemiş kurşunun saf kurşundan daha fazla α parçacığı yaydığı için, oldukça sınırlı olmaktadır. α parçacığı yayılımından dolayı, entegre devrelerin performansı olumsuz etkilenmektedir [22].

3.2. LEHİM ALAŞIMLARINDA ARANAN ÖZELLİKLER

Mikro elektronik parçalarda kullanılan lehim alaşımlarının, yüksek performansa sahip olması istenmektedir. Genel olarak bir lehim alaşımının elektriksel ve mekanik özellikleri, beklenen seviyede ve istenen ergime sıcaklığında olmalıdır. Baskı devre plakentinin (BDP) yüzeyini yeterli oranda ıslatabilmeli, kontrol edilebilir lehim bağlantıları oluşturmalı, kusurlu bağlantıları düzeltmeye olanak vermeli, kullanım şartları altında güvenli bağlantılar oluşturmalı ve montaj maliyetlerini önemli miktarda azaltılabilmelidir.

Yaygın olarak kullanılan Pb-Sn alaşımlarının alternatifleri tanımlanmaya çalışıldığında, bu alaşımların ya Pb-Sn alaşımlarıyla kıyaslanabilir ya da daha üstün özelliklerinin olması gerekmektedir. Lehim alaşımlarının ana karakteristikleri üretilebilirlikleri, güvenilirlikleri ve çevresel uygunluklarıdır. Bunların yanında üretilebilirlik, ergime derecesi, lehimlenebilirlik, akıcılık, yoğunluk, ısı ve elektriksel özellikler, korozyon ve oksidasyon davranışları, yüzey gerilimi, yeniden çalışılabilirlik ve maliyet gibi, lehim alaşımının lehimleme ile alakalı çoğu fiziksel özelliklerini de kapsamaktadır. Birinci ve ikinci seviye paketleme yapılacak bir lehim alaşımının güvenilirliği, başlıca ısı genleşme katsayısı olmak üzere, elastik modülü, çekme gerilimi, kesme mukavemeti, yorulma ve sürünme davranışlarına bağlıdır. Kurşunsuz bir lehim alaşımı, ayrıca çevreyle de dost olmalıdır. Uzun süreli güvenilirlik ve üretilebilirliğin önemli olduğu lehim alaşımlarının özelliklerine bakış açısı Çizelge 3.1'de özetlenmiştir.

Çizelge 3.1. Lehim alaşımlarının önemli özellikleri [4].

Üretilebilirlik ile ilgili özellikler	Güvenilirlik ve performansla ilgili özellikler
Ergime derecesi	Elektrik iletkenliği
Bakırı ıslatabilirliği	Isıl iletkenliği
Maliyet	Isıl genleşme katsayısı
Çevresel uygunluğu	Kesme özellikleri
Tedarikçilerin çokluğu ve uygunluğu	Çekme özellikleri
Üretimde mevcut yöntemlerin kullanılabilir olması	Sürünme direnci
Yuvarlatılabilmeye uygunluk	Yorulma özellikleri
Bakır ile birleşme oranı	Korozyon ve oksidasyon direnci
Yeniden kullanılabilirliği	İntermetalik bileşik oluşumları
Yapıştırılabilir yapılabilmesi	

3.2.1. Ergime Sıcaklığı

Üretim açısından bakıldığında, ergime sıcaklığı muhtemelen en önemli etkidir. Sn-Pb alaşımının ötektik sıcaklığı 183 °C'dir ve bu gün kullanılan montaj donanımlarının çoğu 183 °C'de çalışacak şekilde tasarlanmaktadır. Mevcut lehimlerin yerine kullanılması planlanan kurşunsuz lehim alaşımlarının ergime sıcaklıkları yüksek olduğu takdirde, mevcut cihazlar değiştirilmek zorundadır. Bu da üretim maliyetlerinin artışına neden olmaktadır [4]. Çizelge 3.2'de lehim alaşımlarının ergime sıcaklıkları verilmiştir.

Çizelge 3.2. Lehim alaşımları ergime sıcaklıkları [4,24-38].

Alaşım	$T_m(^{\circ}C)$	$T_s(^{\circ}C)$	$T_1(^{\circ}C)$	$T_e(^{\circ}C)$
Sn-37Pb				183
Sn-40Pb		183	187	
Bi-26In-17Sn	79			
Bi-32In				109,5
Bi-41,7Sn-1,3Zn	127			
Bi-41Sn-1Pb				

Çizelge 3.2. (devam ediyor).

Bi-42Sn				139
Bi-43Sn (ötektik)				139
Bi-43Sn+2,5%Fe				
Bi-45Sn-0,33Ag	140-145			
In-3Ag				141
In-34Bi				110
In-48Sn (ötektik)				117
Sn-1Ag-1Sb		222	232	
Sn-1Ag-1Sb-1Zn				
Sn-2,5Ag-0,8Cu-0,5Sb	210-216		217	
Sn-2,8Ag-20In	178			
Sn-25Ag-10Sb	223			
Sn-2Ag		221	225	
Sn-2Ag-0,8Cu-0,6Sb	210-216			
Sn-2Ag-0,8Cu-6Zn		217	217	
Sn-2Ag-0,8Cu-8Zn		215	215	
Sn-3,5Ag				221
Sn-3,5-(<6)Bi		211-221	212	
Sn-3,5Ag-1Zn	217			
Sn-3,5Ag-1Zn-0,5Cu	216,217			
Sn-3,6Ag-1,5Cu	225			
Sn-4,7Ag-1,7Cu	217			
Sn-4Ag		221	225	
Sn-4Ag-7Sb			230	
Sn-4Ag-7Sb-1Zn				
Sn-10Bi-0,8Cu		185	217	
Sn-10Bi-0,8Cu-1Zn				
Sn-10Bi-5Sb		193	232	
Sn-10Bi-5Sb-1Zn				
Sn-4,8Bi-3,4Ag				

Çizelge 3.2. (devam ediyor).

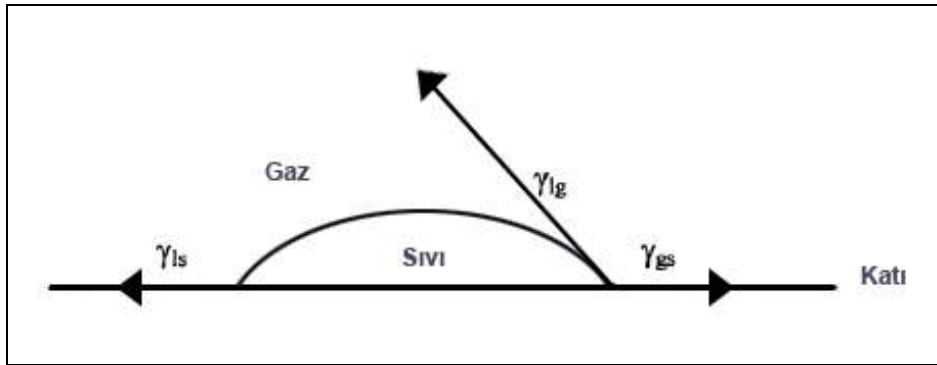
Sn-42Bi-3Sb		145	178	
Sn-42Bi-3Sb-1Zn				
Sn-56Bi-1Ag	136,5			
Sn-57Bi-1,3Zn	127			
Sn-5Bi-3,5Ag				
Sn-7,5Bi-2Ag-0,5Cu		207	212	
Sn-0,75Cu		227	229	
Sn-0,7Cu (ötektik)				227
Sn-2Cu-0,8Sb-0,2Ag	266-268			
Sn-3Cu		227	275	
Sn-4Cu-0,5Ag		216	22	
Sn-10In-1Ag-(0-10,5)Bi	188-197			
Sn-20In-2,8Ag	178-189			
Sn-42In		117	140	
Sn-5In-3,5Ag				
Sn-10In-1Ag-0,5Sb	196-206			
Sn-50In		117	125	
Sn-8,8In-7,6Zn	181-187			
Sn-2Mg (ötektik)				200
Sn-5Sb		234	240	
Sn-4Sb-8Zn	198-204			
Sn-7Zn-10In-2Sb	181			
Sn-8Zn-10In-2Bi	175			
Sn-8Zn-4In				
Sn-8Zn-5In-(0,1-0,5)Ag	187			
Sn-9Zn-10In	178			
Sn-5,5Zn-4,5In-3,5Bi	185-188			
Sn-6Zn-6Bi	127			
Sn-9Zn (ötektik)				198
Sn-9Zn-5In	188			

3.2.2. Islatabilirlik Özellikleri

İki metal arasında uygun bir metalürjik bağ olması için, ıslatma meydana gelmelidir. Lehimleme işlemi sırasında akan veya yayılan ergimiş metal, uygun metalik bağ oluşturmalıdır. Bu nedenle ıslatma (wetting) terimi, lehimleme işleminin teorik ifadesinde sık sık kullanılmaktadır. Genellikle yayılma olgusu, ıslatma olarak ifade edilmektedir. Bir sıvının katı yüzey üzerinde yayılmasına ve yüzeyi belli oranda kaplamasına ıslatma, katı yüzeyin herhangi bir sıvı tarafından belli oranda kaplanmasına ıslanma, bu olayın gerçekleşme derecesi ise ıslatabilirlik veya ıslanabilirlik olarak adlandırılmaktadır [23]. Islatma açısı, belirli bir ortamda bir sıvı ve bir katının birleşme noktasında oluşan açıdır (Şekil 3.1). Genel olarak bu ıslatma veya temas açısı 0 ve 90° arasında ise sistem ıslatabilirliğini, 90 ve 180 ° arasında ise sistemin ıslatabilirlik yeteneğinin olmadığını göstermektedir. Islatma açısı (θ) Young-Dupre eşitliğine göre (3.1), birleşme bölgesindeki yüzey gerilimi dengesiyle belirlenmektedir [4].

$$\gamma_{gs} = \gamma_{ls} + \gamma_{gl} \cos \theta \quad (3.1)$$

γ_{gs} Belirli bir ortamdaki katının yüzey gerilimi, γ_{ls} Sıvı ile katı arasındaki ara yüzey enerjisi ve γ_{gl} aynı ortamdaki sıvının yüzey gerilimidir (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. Islatma açısı [4].

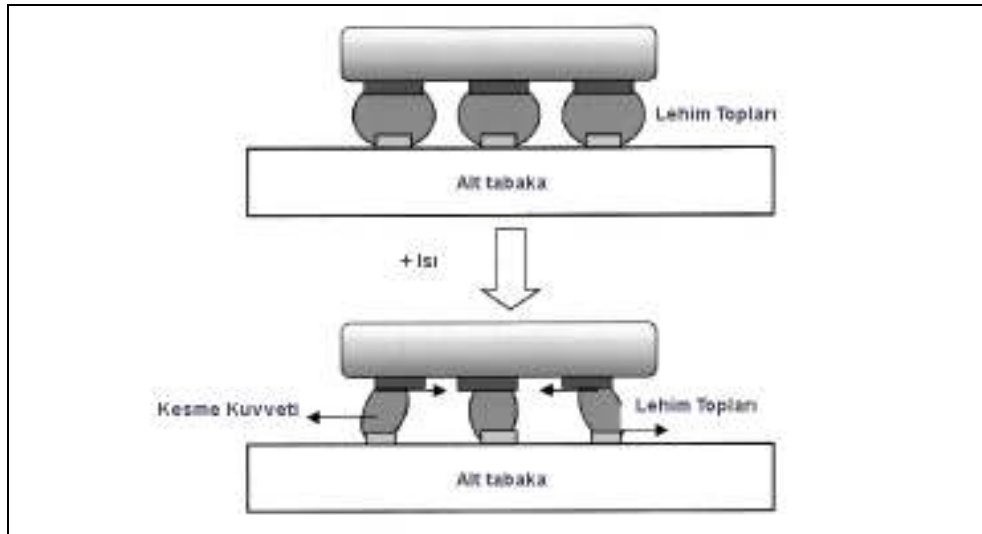
3.2.3. Lehim-Yüzey Etkileşimleri

Lehimleme sırasında ergimiş lehim, baskı devre plakası (BDP) üzerinde bulunan Cu katmanı ile reaksiyona girmektedir. Bu etkileşim, lehim bileşimine ve her bir bileşenin Cu ile ilişkisine bağlıdır. Burada asıl önemli olan, lehimli bağlantının uzun ömürlü olmasıdır. Bu bağlantının kalitesi, lehim ile Cu arasındaki ıslatabilirlik ile direkt olarak ilişkilidir.

Lehimleme sırasında yüzey ile lehim arasında çok sayıda intermetalik (IMC) olabilmektedir. Bununla birlikte lehimlemenin ilk aşamasında oluşan IMC'ler, ıslatabilirliği ve lehimlenebilirliği de azaltmaktadır [4].

3.2.4. Mekanik Özellikler

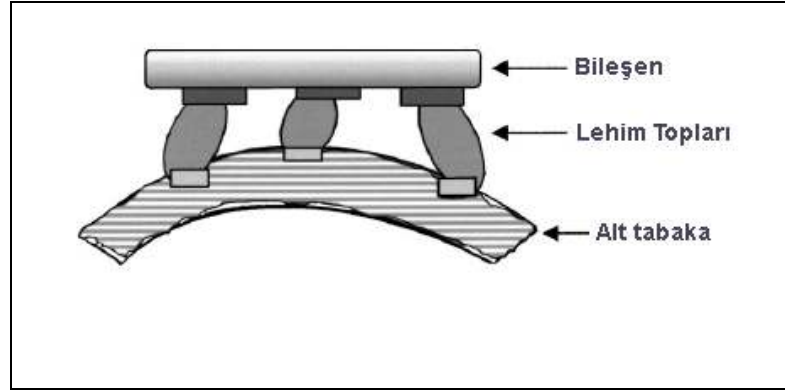
Elektronik cihazlar, lehimleme işlemleri sırasında, mekanik gerilim ve gerinime maruz kalmaktadır. Bu gerilim ve gerinimlerin en önemli nedeni, elektronik bileşenlerle, bordun farklı ısıl gerilme katsayılarına sahip olmamalarıdır. Ara yüzey ile silikon kalıp arasındaki bu gerilimlerin nasıl oluştuğu, Şekil 3.2'de şematik olarak verilmektedir.



Şekil 3.2. Isıl dönüşüm sonucunda BDP ve alt tabaka arasındaki lehim bağlantılarında meydana gelen kesme kuvveti [4].

BDP'lere lehimleme işlemleri sırasında, lehim bileşenlerinde (devre-lehim malzemesi) oluşan genleşme, plakada oluşan genleşmeden daha düşüktür. Ayrıca, lehim toplarında da kesme gerilimi meydana gelmektedir. Sistem aç-kapa olarak çalıştırıldığında ise, ısıl döngü oluşmaktadır. Bunun sonucunda, lehim bağlantılarında, dönüşümlü kesme gerilimi meydana gelmektedir. Bu kesme gerilimi sonucunda da, lehim malzemesi kesme modülü tarafından deforme olmaktadır. Böylelikle, lehim bağlantıları dönüşümlü yüke maruz kalmakta ve yorulma ömrüne bağlı olarak bozunmaktadır. Farklı ısıl genleşmeler (sünelkiliğin) üzerine çıkıldığında ise, lehim bağlantılarında plastik deformasyon oluşmaktadır [4].

Şekil 3.3'de plakette görülen eğilmeler oluştuğunda ise, lehim bağlantılarında çekme gerilmeleri meydana gelmektedir. Bu gerilmeler ancak ürünün mekanik olarak kullanımı sonucunda ve bazen de, ürün montaj sonrası testleri için mengeneyle sabitlendiğinde meydana gelebilmektedir. Lehim bağlantılarının çekme özelliklerinin, deformasyona bağlı uzamalara karşı dirençli olması gereklidir [4].



Şekil 3.3. BDP'nin esnemesi sonucunda lehim toplarında meydana gelen çekme gerilimi [4].

Elektronik cihazların kullanıldığı bazı alanlarda titreşim olması muhtemeldir. Bunun en dikkate değer örnekleri, havacılık ve otomotiv endüstrisi uygulamalarıdır. Bu cihazların lehim bağlantılarının çok fazla titreşime maruz kalmalarından dolayı, tekrarlı yüklere maruz kalmaktadır. Bu tür uygulamalarda, lehim bağlantılarının yorulma ömürleri çok kritiktir. Cihaz çalıştırıldığında, farklı ısıl genleşmeler ile lehim bağlantılarında, kalıcı statik yük meydana gelebilmektedir.

3.2.5. Isıl Özellikler

Isıl genişleme, tipik mikro elektronik devreleri ile birlikte birçok malzemede oluşmaktadır. Bu malzemeler metaller, polimerler, polimer bazlı kompozitler ve seramiklerdir. Silikon kalıbı üstünde lokalize edilen sıcaklık yaklaşık, 300 °C'ye kadar yükselbilmektedir. Eğer cihaz içindeki bileşenlerin tamamı aynı ısıl genişleme katsayısına sahipse ve ısı transferi ani ise, malzemeler aynı oranda genişlemektedir. Büzülmede ise herhangi bir ısıl kaynaklı gerilim oluşmamaktadır. Ancak, pratikte ısıl gerilimler ortaya çıkmaktadır. Pb içermeyen lehimler için ısıl genişleme katsayısı (IGK) hakkındaki bazı bilgiler, Çizelge 3.3'te özetlenmiştir.

Çizelge 3.3. Kurşunsuz lehim alaşımları için IGK verileri [24,40-43].

Lehim Bileşimi	IGK ($\times 10^{-6}/K$)
Bi-42Sn	15,0 20 °C
	14,0
In-48Sn (ötektik)	20,0 20 °C'da
	2,0 20 °C'da
Sn-3,5Ag	22,0
	30,0
	23,0
Sn-4,8Bi-3,4Ag	23,0
Sn-20In-2,8Ag	28,0 20 °C'da
Sn-37Pb	21,0
In-3Ag	20,0
Si	2,6
Cu	16,0-18,0
Epoksiler	60,0-80,0

Devre tarafından üretilen ısının, cihazın sağlıklı çalışmasını sürdürmesi için çevreye dağıtılması gerekmektedir. Bu durum, ısıl iletkenlik olarak da ifade edilmektedir. Isı dağıtımı için en önemli etken kaplama malzemesi iken, lehim bağlantılarından da ayrıca, çevreye ısı dağıtımında faydalanılmaktadır. Birleştirmede 400 lehim topundan

daha fazlasının kullanıldığı yüksek ara bağlantılı BGA (ball grid array) cihazlarında, lehim toplarının birleştirilmesi için kullanılan yaygın bir uygulamadır. Bu işlemde, lehim toplarının hiçbir elektriksel fonksiyonu bulunmamakla birlikte, sadece bir ısı dağıtım aracı olarak kullanılmaktadır. Bundan dolayı, lehimin ısıl iletkenliği ile ilgilenilmektedir. Lehim alaşımları için mevcut ısıl iletkenlik verileri, Çizelge 3.4’de özetlenmiştir. Oda sıcaklığında ısıl iletkenlik yaklaşık 50 W/mK’dır. Sn-3,5Ag’nin verileri incelendiğinde, yüksek sıcaklıklarda ısıl iletkenliğin düştüğü görülmektedir. Metallerdeki ısıl iletkenliğin birincil fonksiyonu elektron taşınımı olduğu için bu sonuç şaşırtıcı değildir.

Çizelge 3.4. Kurşunsuz lehim alaşımları için, ısıl iletkenlik verileri [24,30,43,44].

Lehim Bileşimi	Isıl iletkenlik (W/mK)
Bi-42Sn	21 85 °C’da
In-48Sn (ötektik)	34,0 85 °C’da
Sn-3,5Ag	33,0 85 °C’da
	54,3 23,9 °C’da
	36,2 23 °C’da
	28,2 222,9
	28,6 246 °C’da
	29,2 256 °C’da
Sn-3,5Ag-1Zn	33,0 85 °C’da
Sn-20In-2,8Ag	53,5 30 °C’da
In-3Ag	73,0

3.2.6. Elektriksel Özellikler

Lehimler mikro elektronik cihazların montajında, ara bağlantı malzemesi olarak kullanılmaktadır. Bu nedenle, cihazdaki tüm elektrik akımları, lehim bağlantıları üzerinden geçmektedir. Lehimin bir elektrikli cihazda ara bağlantı elemanı olarak yeterince işlev görebilmesi için, elektriksel öz direnç özelliğine sahip olması gerekmektedir. Kullanılan lehimlerin elektrik iletkenliği, Infrared Radiation (IR) ısınması olmadan, yeterli miktarda elektrik akımının geçişine izin vermelidir.

Elektronik devreler küçüldükçe, lehim bağlantılarının boyutları da küçülmekte ve lehimlerin elektrik özdirençlerinin önemi de artmaktadır. Ayrıca lehim bağlantılarının, mevcut akımın oluşturduğu ciddi miktardaki IR ısınmalarına dayanabilmeleri de gerekmektedir. Buna ek olarak, silikon cihazda oluşan sıcaklık yükselmelerine dirençli olması beklenmektedir. Elektronik devrelerde oluşan bu sıcaklıklar, 125 °C'ye kadar yükselebilmektedir. Bu yüzden, lehimlerin sıcaklık özdirenç katsayıları (TCR) çok önemli hale gelmektedir. İdealde 125 °C'ye kadar, TCR'nin sıfıra yakın olması istenmektedir.

Lehimlerin özdirenci oldukça düşük olduğundan, elektronik uygulamaların çoğunda etkileri önemsizdir. Özdirenç mikro yapıya, tane boyutuna ve dislokasyon yoğunluğuna bağlı olduğundan dolayı, saf metallerin ve aynı bileşimdeki alaşımların özdirençleri farklı olabilmektedir [39]. Mikro elektronik uygulamalar için kullanılan yaygın lehimler ve ambalaj malzemelerinin, oda sıcaklığı öz direnç değerleri Çizelge 3.5'de verilmiştir.

Çizelge 3.5. Mikro elektronik paketleme malzemeleri ve bazı kurşunsuz lehim alaşımlarının oda sıcaklığındaki özdirenç değerleri [39].

Lehim Alaşımı	Özdirenç($\mu\Omega$ cm)	Element	Özdirenç($\mu\Omega$ cm)
Sn-37Pb	10, 14.4, 15	Ag	1,59
Sn-3,5Ag	10, 12,3	Bi	115
Bi-42Sn	30, 34.4, 34	Sn, Pb	10,1
50Sn-50In	14.7, 30	Cu	1,73

Yüksek frekanslarda, Alternatif Akım (AA) koşulları altında ölçülen özdirenç verilerinde azalma olmaktadır. Elektronik ürünlerin hızları arttıkça, malzemelerin AA'ya olan dirençleri, Doğru Akım (DA)'ya olan direncinden daha önemli hale gelmektedir.

3.3. KURŞUNSUZ LEHİM ALAŞIMLARI

Şimdiye kadar, birçok kurşunsuz lehim alaşımı önerilmiştir (Çizelge 3.2). Lehim alaşımları ikili, üçlü ve dörtlü alaşım sistemlerinden meydana gelmektedir. Bu alaşımlarının çoğu kalay esaslıdır ve diğer iki temel bileşen ise In ve Bi'dur. Diğer alaşım elementleri Zn, Ag, Sb, Cu ve Mg'dur. Çizelge 3.2'de bazı bileşimlerin, temel bir bileşiminin farklı oranları olduğu görülebilmektedir. Örneğin 4 tane Sn-10Bi bileşimi vardır. Bu bileşime Cu veya Sb ilave edilerek ve Zn kullanılarak veya kullanılmadan oluşturulan bileşimler bulunmaktadır. Kurşunsuz lehim alaşımlarında en çok kullanılan ikili sistemler aşağıda açıklanmıştır.

3.3.1. Kalay

Yayımla ve ıslatabilme yeteneği sebebiyle kalay, elektronik uygulamalarında kullanılan çoğu lehim alaşımının temel bileşenini oluşturmaktadır. Saf kalay 231 °C'de ergimekte ve katı halde iki farklı kristal yapıda bulunmaktadır. Beyaz kalay (β -kalay) hacim merkezli tetragonal yapılıdır ve oda sıcaklığında bulunmaktadır. Tin pest (kalay hastalığı) olarak da ifade edilen gri kalay (α -kalay) ise, sıcaklığın 13 °C'nin altına düşmesiyle meydana gelmektedir. Tin pest, kalayın yapısında kırılmalığa neden olmakla birlikte, hacimde de artışa neden olmaktadır. Bu nedenle tin pest, 13 °C sıcaklığın altında çalışan cihazlarda problem yaratmaktadır. Anizotropik olan hacim merkezli tetragonal kristal yapısı nedeniyle, kalayın genişmesi de anizotropiktir [39]. Bu yüzden kalay, tekrarlanan ısıl döngüye maruz kaldığında plastik deformasyona uğramaktadır. Bu etki 30–75 °C aralığında gözlenmektedir [45]. Lewis'e göre %0,5 Sb, % 0,1 Bi veya % 5 Pd ilavesi tin pest oluşumunu ortadan kaldırmaktadır [46]. Bu alaşım elementleri tin pest'i gideren mekanizmalar oluştursa da, bunun nasıl gerçekleştiği şimdiye kadar açıklanamamıştır. Sn-Pb sisteminde, Pb'nin Sn içinde çözünürlüğü 13 °C'de % 0,3'den daha azdır. %5 Pb-Sn, Sn-zengin ve Pb-zengin fazlardan meydana gelen, iki fazlı bir alaşım oluşturmaktadır. Pb ilavesinin, gerçekten de Sn-zengin fazlardaki $\beta \rightarrow \alpha$ dönüşümünü engelleyip engellemediği açık değildir.

Kalay'ın yapısında, tetragonal β -kalaydan oluşan tek kristalli whisker büyümesine de rastlanmaktadır [22]. Whiskerler, malzemedeki iç gerilimler veya dıştan gelen yükler sebebiyle oluşmaktadır. Kalayda 51 °C sıcaklıkta, hızlı whisker büyümeleri meydana gelmektedir ve bu büyümeler, temas edilen ara yüzeyin özelliklerinden etkilenmektedir. Whiskerler, lehmlenebilirliği etkilememekte ve kalay tabakasında bozulmalara neden olmamaktadır. Ancak uzun whiskerler, BDP'lerde elektrik iletkenliğini zayıflatabilmektedir. Kurşun gibi elementler, kalaydaki whisker büyümelerini önlemektedir [22].

3.3.2. Sn-Cu

Sn-Cu ikili alaşımında, sıcaklığı 227 °C olan ve Sn-0,7Cu'dan oluşan bir ötektik nokta bulunmaktadır. Sistemin katılaşmasıyla birlikte, çubuk şeklindeki Cu_6Sn_5 IMC'leri meydana gelmektedir. Bu alaşımında, kalayın yüksek konsantrasyonundan dolayı whisker büyümesi görülebilmekle birlikte, gri kalay dönüşümü de oluşabilmektedir [4]. Kalaya bakır ilavesinin, whisker büyümesine veya $\beta \rightarrow \alpha$ dönüşümüne olan etkisi şimdiye kadar açıklanamamıştır.

3.3.3. Sn-Bi

Sn-Bi alaşımında, Sn-58Bi ötektik bileşimine ve nispeten düşük sıcaklığa (139 °C) sahip olan bir ötektik nokta bulunmaktadır. Oda sıcaklığındaki denge fazları, Bi ve yaklaşık %4 Bi içeren Sn katı çözeltilisidir [47]. 130 °C ötektik katılaşma sıcaklığında kalayın çözünürlüğü çok düşük olduğu için, Bi fazı aslında saf haldedir. Buna rağmen Bi'un Sn içindeki çözünürlüğü yaklaşık %21'dir [48]. Alaşım katılaşırken Sn fazında Bi çökelmektedir. Makul soğuma oranında, ötektik Sn-Bi mikro yapısı lamellerle birlikte, ötektik tane sınırlarındaki bozunmuş yapıdan oluşmaktadır. Bu mikro yapı, Croker tarafından, teorik olarak yapılmış tahminle benzer niteliktedir [49].

3.3.4. Sn-Ag

Sn-Ag ikili sisteminin ötektik bileşimi Sn-3,5Ag'dir. Ötektik sıcaklığı 221 °C'dir. Mikro yapısı, Sn ve iğnemsî şeklindeki Ag_3Sn IMC'den meydana gelmektedir.

McCormack, Sn-3,5Ag ötektik alaşımının mikro yapısının, β -Sn fazı ile yuvarlak dentritler ve dentritler arası bölgelerle β -Sn matrisinde dağılmış Ag_3Sn çökeltilerinden oluştuğunu belirtmiştir [50]. Bu alaşıma %1 Zn eklenmesi ile β -Sn fazlar engellenebilir ve daha düzenli ikinci fazlar oluşturularak, katılaştıran mikro yapı iyileştirilebilmektedir [51]. Alaşımın bileşimine Zn'nin eklenmesi, β -Sn yapı oluşumunu önlemekte ve Ag_3Sn 'nin mikro yapıda homojen dağılımını sağlamaktadır. Bu alaşım da, Sn-0,07 Cu alaşımına benzer şekilde yüksek kalay içeriğinden dolayı, whisker büyümesine yatkındır. Buna rağmen, Sn-Ag alaşımının whisker büyümesiyle ilgili bir bilgi literatürde bulunmaktadır.

3.3.5. Sn-In

Düşük ergime sıcaklıkları ve altın temizleyebilme kabiliyetleri olduğu için, In-Sn alaşımları SMT (Surface Mount Technology) uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu ikilli sistemin ötektik bileşimi In-49,1Sn ve ötektik sıcaklığı 117 °C'dir. Bu ötektik alaşım, In-zengin hacim merkezli tetragonal benzeri β (%44,8Sn) ve hegzagonal Sn-zengin γ (%77,6 Sn) faz'dan oluşan iki intermetalik faz oluşturabilmektedir [39]. Mei ve Morris, Cu yüzeydeki In-48Sn lehiminin mikro yapısının lameller olduğunu belirtmektedir [52]. Sn-zengin faz eşeksenli tanelerden meydana gelmekte ve In-zengin fazı Sn çökeltilerini içermektedir.

3.3.6. Sn-Zn

Kalay-kurşun alaşımları, lehim malzemesi olarak bilinmektedir. Ancak kurşun ve kurşun içeren bileşikler, insanlara ve çevreye olan zararlı etkilerinin bilinmesi sebebiyle, zehirli madde olarak sayılmaktadır. Dünyadaki birçok ülke tarafından koruma amacıyla, uygun gelişim programları ile kurşun kullanmayı tercih eden endüstrilere kısıtlamalar getirilmiştir. Bu bağlamda, 1 Haziran 2006 tarihinde Avrupa Birliği ve ABD'de Çevre Koruma Ajansı, kurşun içerikli elektronik ürünleri yasaklamıştır [53,54].

Geleneksel Sn-Pb lehim alaşımını kurşun içermeyen alternatifleri ile değiştirmek için büyük çaba harcanmaktadır. Bu araştırmalar sonucunda, alternatif olabilecek

alaşımların arasında Sn-Zn alaşımları 6n plana çıkmıştır. Ergime derecesi 6tektik Sn-Pb alaşımına yakın olmasıyla (198 6C) Sn-9Zn alaşımları en cazip lehim alaşımı olarak g6r6lmektedir [53-58]. 6tektik yapısı hacim merkezli tetragonal Sn matris faz ve katı halde %1'den daha az Sn den oluşan hegzagonal Zn olarak, iki fazdan meydana gelmektedir [33]. Katı mikro yapının, b6y6k taneler ve d6zenli olarak dağılmış ikinci 6tektik gruplardan oluştuğu rapor edilmektedir. Pb-Zn sistemine karşın Sn-Zn sisteminde, her iki element de bakır ile intermetalik yapılar oluşturabilmektedir [4].

BÖLÜM 4

MALZEME VE METOT

4.1. GİRİŞ

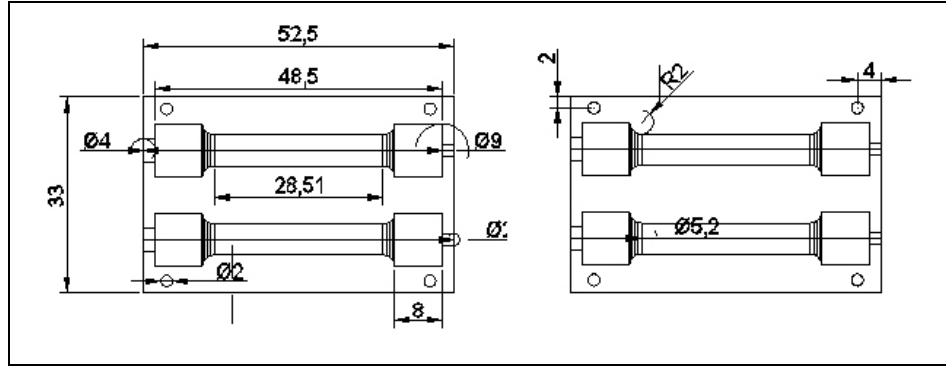
Bu çalışmada, farklı bileşimlere ve oranlara sahip Sn-Zn alaşımları hassas döküm yöntemi ile üretilmiştir. Üretilen alaşımların kimyasal bileşimleri Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Deneysel çalışmalarda kullanılan alaşımların kimyasal bileşimleri.

Kimyasal Bileşim
Sn-7Zn
Sn-9Zn
Sn-11Zn
Sn-9Zn-0,5Cu
Sn-9Zn-0,7Cu
Sn-9Zn-0,9Cu
Sn-9Zn-0,5Al
Sn-9Zn-0,7Al
Sn-9Zn-0,9Al

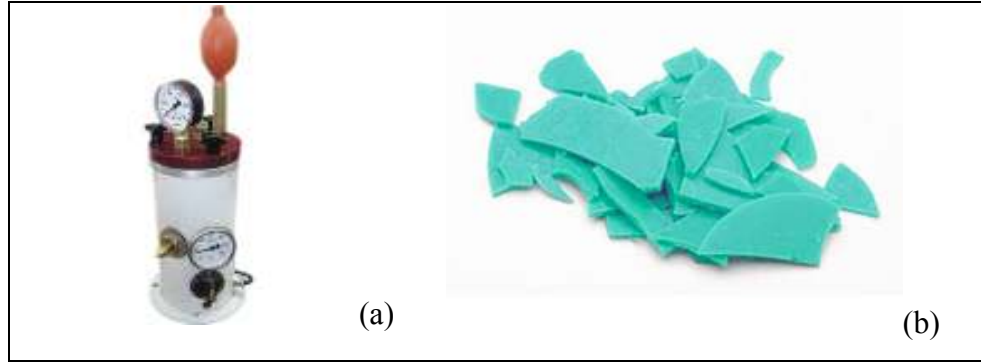
4.2. MUM MODEL ÇEKME NUMUNESİ ÜRETİMİ

Üretilen çekme numunesinin mum modellerinin hazırlanmasında metal kalıp kullanılmıştır. Kalıbın ayrıntıları şematik olarak Şekil 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.1. Metal mum enjeksiyon kalıbı.

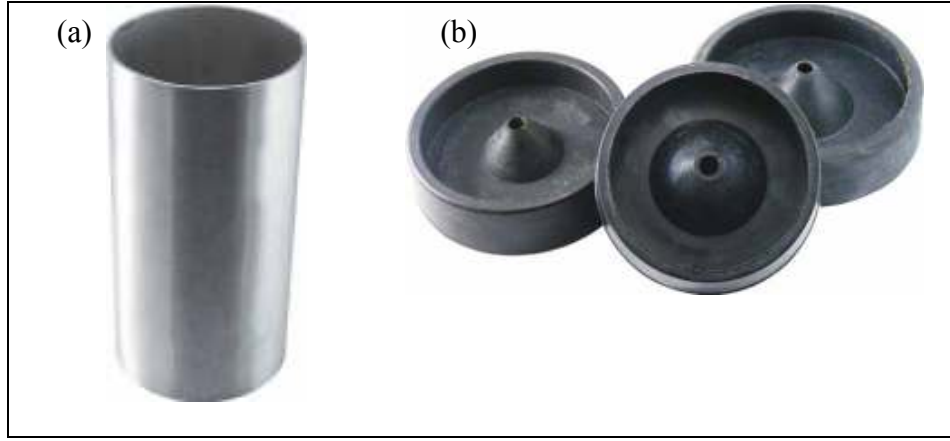
Çekme numunesinin boyutları, ASTM: B557M-10 standartlarına uygun olarak hazırlanmıştır. Mum enjeksiyonu için Teknik Döküm marka 1 kg kapasiteli mum enjeksiyon makinesi (Şekil.4.2 a) ve Freeman Aqua Wax marka mum (Şekil.4.2 b) kullanılmıştır. Metal kalıba mum enjeksiyonu 73 °C sıcaklık ve 0,8 bar basınç altında yapılmıştır. Üretilen çekme numunesi mum modelleri 30 W gücünde elektrikli havya yardımıyla birbirine yapıştırılarak salkım model oluşturulmuştur.



Şekil 4.2. a) Mum enjeksiyon kazanı ve b) model mumu.

4.3. SERAMİK KALIP OLUŞTURMA

Oluşturulan salkım model 90 mm çapındaki derece alt lastiğine yerleştirilmiş ve derece alt lastik ile sızıntı yapmayacak biçimde 90 mm çapındaki çelik derece birleştirilmiştir. Oluşturulan derece ve alt lastiği Şekil 4.3'de görülmektedir.



Şekil 4.3. a) Hassas döküm derecesi ve b) alt lastiği.

Kalıp malzemesi olarak Eurovest Jewellery Investment Powder marka alçı kullanılmıştır. Hazırlanan alçıda 1 (kg) / 380 (ml) alçı/su oranı kullanılmıştır. Alçı karışımı 3 dakika süre ile ve alçıyı suya ilave ederek hazırlanmıştır. Ayrıca oluşan hava kabarcıklarını en aza indirebilmek için, 2 dakika boyunca titreşime maruz bırakılmıştır. Hava kabarcıklarını azaltmak için alçı dereceye mum modelin en üst noktasından, yavaş bir şekilde dökülmüştür. Alçının su ile karıştırılıp dereceye dökülmesi, alçının katılaşması 6 dakikada tamamlanmıştır. Alçı, dereceye döküldükten sonra, katılaşması ve ısıl işleme hazır hale gelebilmesi için 4 saat dinlendirilmiştir.

Oluşturulan kalıbın içindeki mumun boşaltılması ve kalıbın ısıl işlemi için 1000 °C sıcaklığa çıkabilme kapasiteli ısıl işlem fırını kullanılmıştır. Fırının sıcaklığı 1 saatte 230 °C'ye çıkartılarak, bu sıcaklıkta 3 saat bekletilmiştir. Bu işlem alçıda hatalar oluşmaması için ve mumun kalıbı tamamen boşaltması için, 4 saat de tamamlanmıştır. Mum tamamen kalıp dışına alındıktan sonra, mum haznesi ısıl işlem fırınının dışına alınmış ve fırının sıcaklığı 3 saat süre ile 730 °C'ye çıkarılmıştır. Alçı kalıbın döküm işlemine uygun duruma gelebilmesi için, bu sıcaklıkta 4 saat bekletilmiştir. Daha sonra alçı kalıp 4 saatte, döküm sıcaklığına (130 °C) düşürülmüştür.

4.4. ALAŞIMLARIN HAZIRLANMASI VE DÖKÜM

Alaşım, Çizelge 4.1’de verilen kimyasal bileşime uygun olarak toplam ağırlığı 270 g olacak şekilde tartılarak hazırlanmıştır. Hazırlanan alaşımlarda homojen dağılımı sağlayabilmek için, ilk olarak ön alaşımlama yapılmıştır. Ergitme işlemi 1 kg kapasiteli Teknik Döküm marka elektrikli direnç ocağında (Şekil 4.4), grafit potada yapılmıştır.



Şekil 4.4. Elektrikli ergitme ocağı.

Alaşım, döküm sıcaklıkları olan 240 °C’de ergitilmiş ve 130 °C sıcaklığındaki önceden hazırlanmış hassas döküm kalıplarına, atmosfer şartlarında dökülmüştür. Çalışmada, sıcaklık ölçümleri tel çapı 0,23 mm olan NiCr K tipi mineral izoleli termokupollar kullanılarak yapılmıştır.

4.5. METALOGRAFİK NUMUNE HAZIRLAMA

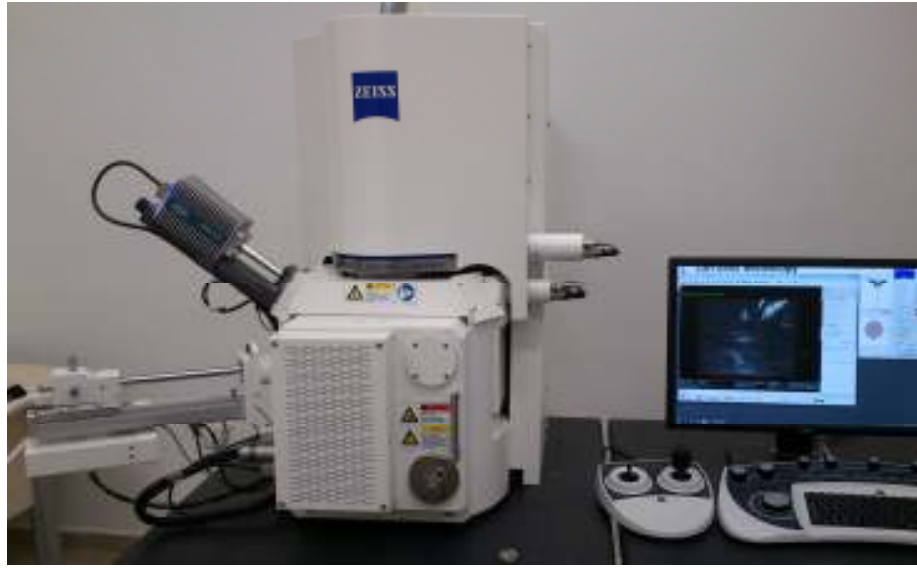
Döküm parçalarından metalografik inceleme için numuneler alınmıştır. Zımparalama (400, 600, 800, 1000, 1200 mesh) ve parlatma işlemi PRESI marka MECAPOL P 262 model polisaj cihazı kullanılarak yapılmıştır. Zımparalama işleminden sonra numuneler 3 µm elmas pasta ile parlatılarak, 100 ml (H₂O), 2 ml (HCl), 10 g (FeCl₃) solisyonda 45 saniye dağlanmıştır.

4.6. OPTİK MİKROSKOP İNCELEMELERİ

Standart metalografik işlemlerle hazırlanan numunelerin mikro yapı incelemeleri Karabük Üniversitesi İmalat Mühendisliği laboratuvarında Meiji marka optik mikroskop görüntüleri incelenmiştir.

4.7. TARAMALI ELEKTRON MİKROSKOBU (SEM) İNCELEMELERİ

Standart metalografik işlemlerle hazırlanan numunelerin mikro yapı incelemelerinde Karabük Üniversitesi Demir Çelik Enstitüsü Laboratuvarı'nda bulunan CARL ZEISS ULTRA PLUS GEMINI (FEG) marka taramalı elektron mikroskobu (Şekil 4.5) kullanılmıştır.



Şekil 4.5. Taramalı elektron mikroskobu (SEM).

4.8. X-IŞINI KIRINIMI (XRD) İNCELEMELERİ

Mikro yapıda oluşan fazların belirlenmesi amacıyla, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü “Rigaku D-MAX RINT-2200 Series” marka cihazla XRD analizleri yapılmıştır. Ölçümlerde bakır (Cu) $K\alpha$ ışınımı, 40 kV gerilim ve 45 mA akım, $1^\circ/102$ saniye ölçüm hızı ve $10^\circ-90^\circ$ aralığı kullanılmıştır.

4.9. SERTLİK ÖLÇÜMLERİ

Numunelerin sertlikleri Karabük Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği Laboratuvarı'nda bulunan Shimadzu HMV-2 model mikro sertlik cihazında (HMV) ölçülmüştür. Sertlik ölçümlerinde numunelere, 20 saniye süre ile 50 gram yük uygulanmıştır. Her bir numune üzerinden beş adet sertlik ölçümü yapılarak ortalaması alınmıştır.

4.10. ÇEKME TESTLERİ

Farklı alaşımlardan üretilen çekme numuneleri sırasıyla 600, 1000, 1200 ve 2000 mesh zımparalar ile yüzeyi parlatılmıştır. Numunelerin çekme testleri Shimadzu AG-IS marka 50 kN kapasitesine ayarlanabilen çekme cihazında (Şekil.4.6) ve 1 mm/dk çekme hızında gerçekleştirilmiştir.

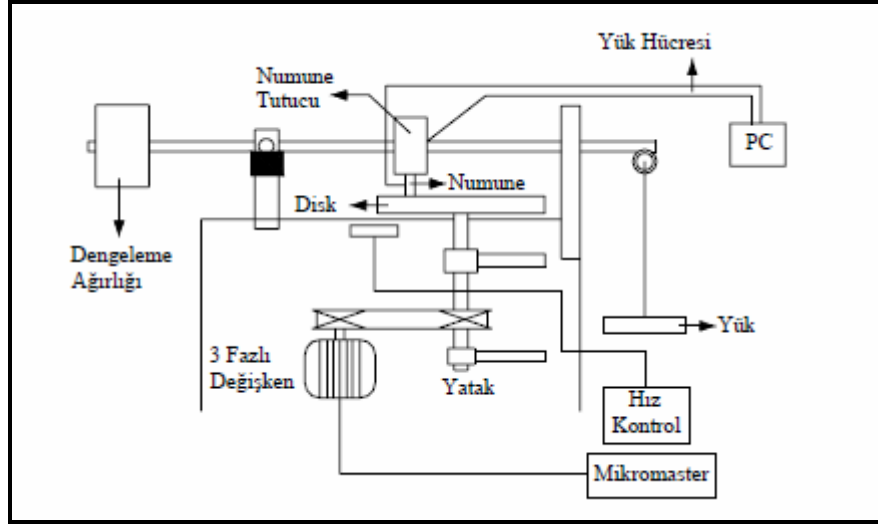


Şekil 4.6. Shimadzu AG-IS çekme cihazı.

4.11. AŞINMA TESTLERİ

Aşınma testleri, ASTM:G99-05 standardına uygun olarak yapılmıştır. Aşınma testi numuneleri, hassas döküm yöntemi ile dökülen, boyu 10 cm ve çapı 10 mm olan çubuklardan, 10 mm uzunluğunda parçalar kesilerek üretilmiştir. Aşınma testlerinde

kullanılan pin-on-disk tipi standart deney aparatının görüntüsü, Şekil 4.7’de şematik olarak verilmiştir. Aşınma testlerinde her bir numune için 1m/s kayma hızı, 10 N yük ve beş farklı kayma mesafesinde (400 m, 800 m, 1200 m, 1600 m ve 2000 m) kullanılmıştır.



Şekil 4.7. Aşınma test cihazının şematik görünümü.

Sn-Zn alaşımları numuneleriyle çalışılacak dönel disk için AISI 4140 malzemeden yapılmış Ø230 mm çapında, 20 mm kalınlığında ve 60-64 HRC sertliğinde çelik disk kullanılmıştır. Deney cihazı devrinin ölçülmesi için Compact marka takometre (0-1000 dv/dk, 0.5 V çıkışlı) kullanılmıştır. Aşındırılan numuneler 1/10000 hassasiyetli Precsia marka terazide tartılarak ağırlık kayıpları belirlenmiştir. Aşınma oranının hesaplanmasında kullanılan bağıntı Eşitlik 4.1’de verilmiştir.

$$W_a = \frac{\Delta G \text{ (mg)}}{d \cdot P \cdot S \text{ (g/cm}^3 \cdot \text{N} \cdot \text{m)}} \quad (4.1)$$

Burada;

W_a : Aşınma oranı (mm^3/Nm)

S : Kayma yolu (m)

ΔG : Ağırlık kaybı (mg)

D : Yoğunluk (g/cm^3)

P : Yükleme ağırlığı (N)

BÖLÜM 5

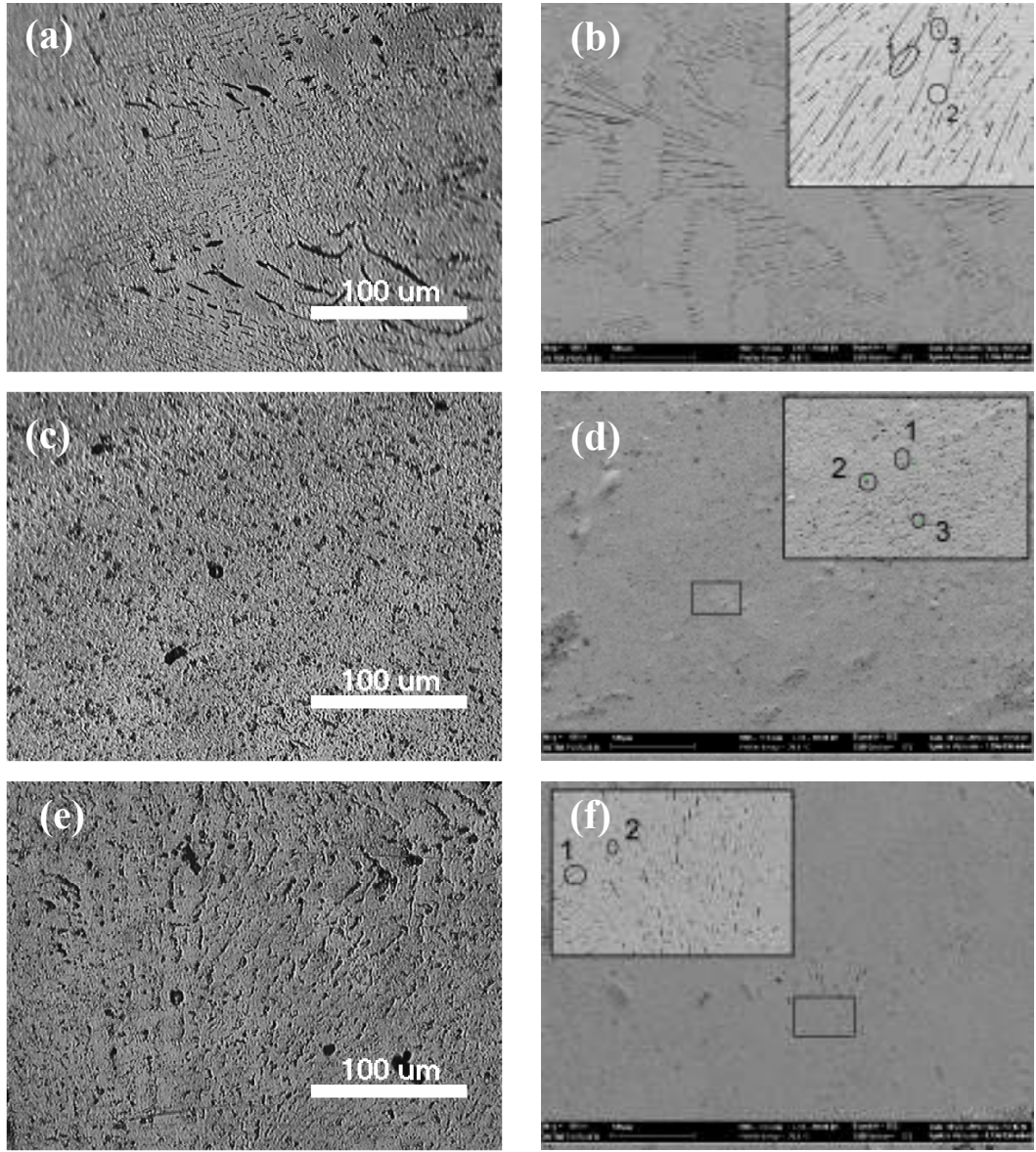
DENEYSEL SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ VE TARTIŞMA

Deneysel çalışmalarda farklı kimyasal bileşimlere sahip Sn-Zn alaşımlarının mikro yapısal ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Sn-Zn alaşımına farklı oranlarda Al ve Cu ilave edilerek üretilen Sn-Zn-Al ve Sn-Zn-Cu alaşımlarının mekanik özellikleri (çekme ve aşınma davranışları) araştırılmıştır. Hassas döküm yöntemiyle üretilen bu alaşımlar optik (OM) ve taramalı elektron mikroskop (SEM), enerji dağılım spektrokopisi (EDS), X-ışını kırınımı (XRD) incelemeleri yapılarak, karakterize edilmiştir.

5.1. MİKROYAPI İNCELEMELERİ

5.1.1. SEM ve OM Görüntülerinin İncelenmesi

Farklı kimyasal bileşimlere sahip (Çizelge 4.1) alaşımlar, üç farklı grup altında OM'de ve SEM+EDS ile incelenmiştir. Şekil 5.1'de farklı kimyasal bileşimlere sahip Sn-Zn alaşımlarının OM ve SEM görüntüleri verilmiştir. Döküm işlemleri sırasında yapıda oluşan bu fazların tanımlanabilmesi için yapılan EDS analizi sonuçları ise, Çizelge 5.1'de verilmiştir.

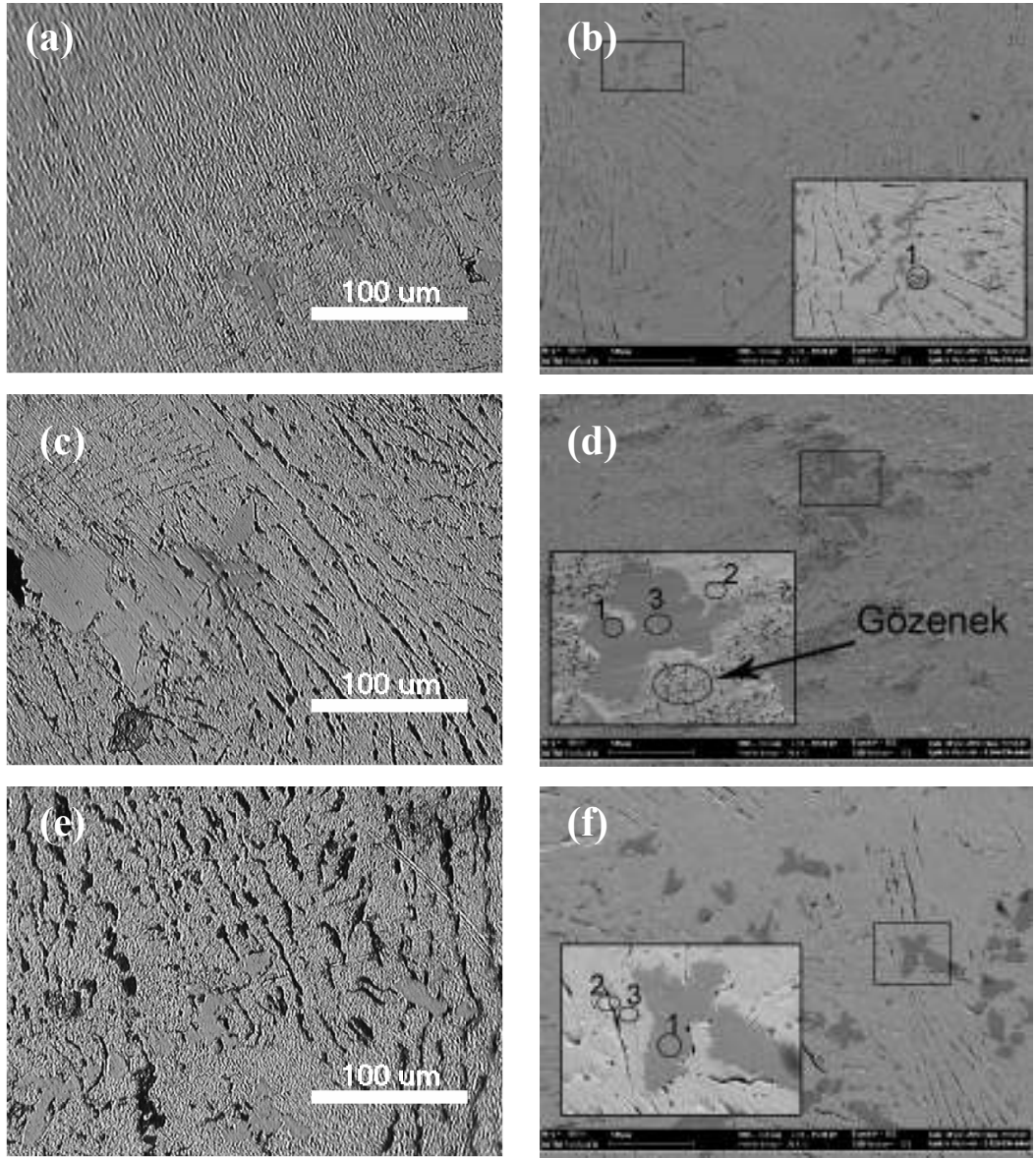


Şekil 5.1. Sn-Zn alaşımlarının optik mikroskop ve SEM görüntüleri: a ve b) Sn-7Zn, c ve d) Sn-9Zn, d ve e) Sn-11Zn.

Çizelge 5.1. Farklı kimyasal bileşimlere sahip Sn-Zn alaşımlarının EDS sonuçları.

Şekil	Bölge	Sn	Zn	O	C
5.1.b	1	75,08	14,15	7,82	2,95
	2	92,68	3,24	2,07	2,01
	3	11,45	1,15	-	87,4
5.1.d	1	98,96	1,04	-	-
	2	96,37	3,63	-	-
	3	89,33	10,67	-	-
5.1.f	1	86,90	6,03	3,37	2,48
	2	96,17	1,01	1	1,04

Şekil 5.1 a ve b’de optik mikroskop ve SEM mikro yapı görüntülerinde, Sn-7Zn ötektik altı alaşımının yapısında parlak bölgeler ve lamel yapıları görülmektedir. EDS analizlerinde de (Çizelge 5.1.b) parlak bölgenin ilk katılacak Sn’ce zengin ötektik altı yapı ve diğer bölgenin de Sn-Zn ötektik alaşımı olduğu anlaşılmaktadır. Daha önce yapılan bazı çalışmalarda da, Sn-Zn alaşımlarının mikro yapılarında ötektik altı yapının oluştuğu belirtilmektedir [60,61]. Şekil 5.1 c ve d de verilen OM ve SEM görüntülerinde Sn-9Zn (c ve d) alaşımının tipik lamelli ötektik yapıya sahip olduğu görülmektedir. Bu yapıda parlak olarak görülen bölgeler β -Sn fazıdır. Daha önce yapılan bazı çalışmalarda da belirtildiği gibi, koyu renkli yuvarlak ve iğnemsiz bölgeler ise yapıda ilk olarak katılacak Zn’ce zengin bölgeler olduğu vurgulanmaktadır [2,3,61-63]. Şekil 5.1 e ve f’de OM ve SEM görüntüleri verilen Sn-11Zn alaşımının mikro yapı görüntülerinde ise, β -Sn fazının içinde Zn’ce zengin fazların homojen olarak dağıldığı, ayrıca Sn-9Zn ötektik yapısına oranla Zn fazlarının uzunluk ve kalınlıklarının arttığı görülmektedir. Şekil 5.2’de farklı oranlarda Cu ilave edilen Sn-9Zn alaşımlarının OM ve SEM görüntüleri, Çizelge 5.2’de ise EDS analizi sonuçları verilmiştir.

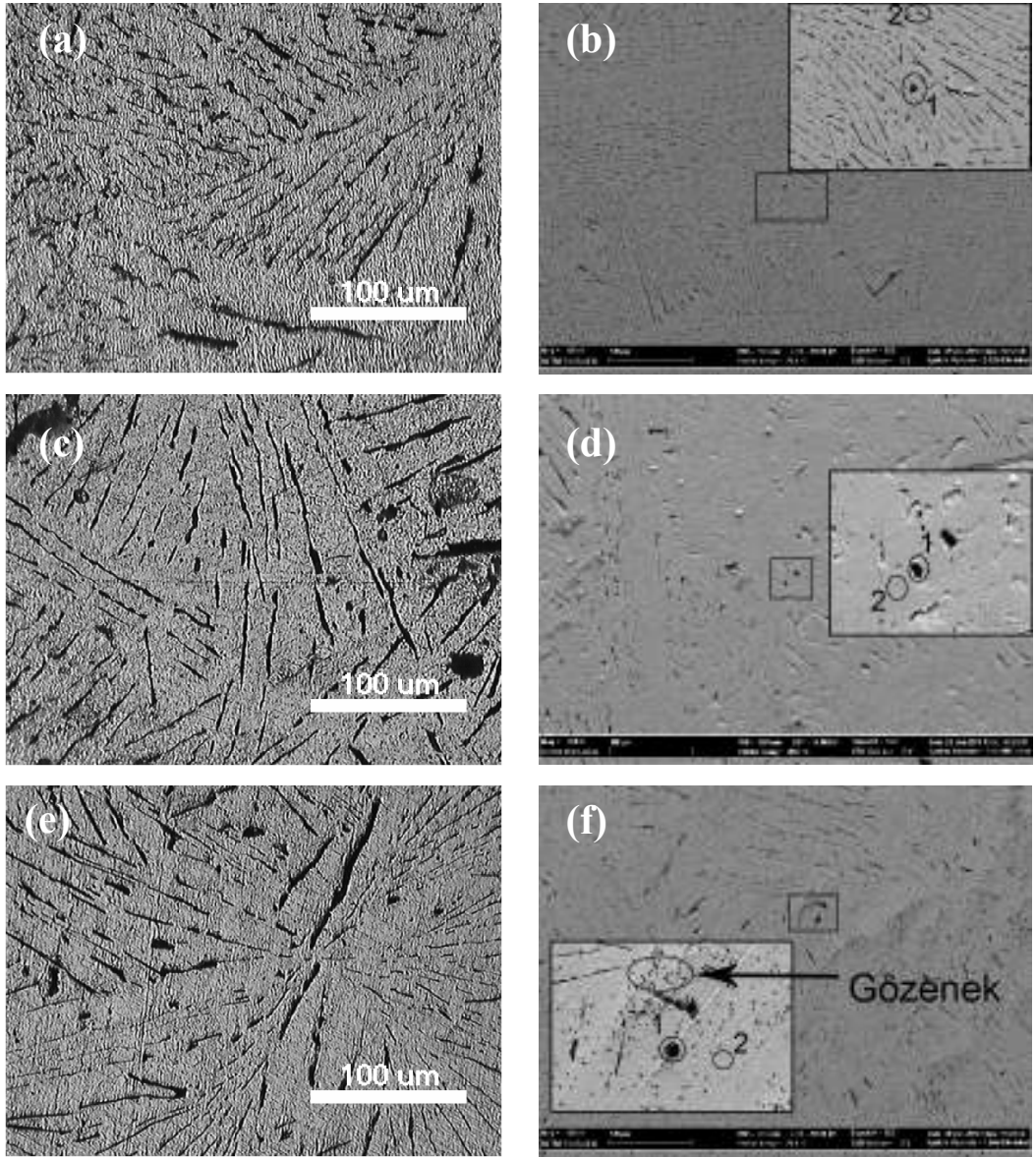


Şekil 5.2. Sn-9Zn alaşımına farklı oranlarda Cu ilave edilerek üretilen Sn-Zn-Cu alaşımlarının OM ve SEM görüntüleri: a ve b) Sn-9Zn-0,5Cu, c ve d) Sn-9Zn- 0,7Cu, e ve f) Sn-9Zn-0,9Cu.

Çizelge 5.2. Sn-9Zn alaşımına farklı oranlarda Cu ilave edilerek üretilen Sn-Zn-Cu alaşımlarının EDS analizleri: Sn-9Zn-0,5Cu (a ve b), Sn-9Zn-0,7Cu (c ve d) Sn-9Zn-0,9Cu (e ve f).

Şekil	Bölge	Sn	Zn	Cu	O	C
5.2.b	1	2,98	76,39	20,63	-	-
5.2.d	1	-	65,91	27,13	1,25	5,72
	2	90,98	3,39	-	2,59	3,04
	3	67,47	15,47	5,4	3,7	7,97
5.2.f	1	-	72,83	19,20	1,2	6,77
	2	72,56	26,53	-	0,91	-
	3	92,30	6,86	0,84	-	-

Şekil 5.2’de Sn-9Zn ötektik alaşımına farklı oranlarda (% 0,5, 0,7, 0,9) Cu ilavesi sonucunda elde edilen alaşımların OM ve SEM görüntüleri verilmiştir. Bu alaşımların mikro yapılarında, ana matris olan β -Sn, ötektik α -Zn ve çiçek şeklindeki fazların olduğu tespit edilmiştir. EDS sonuçlarında çiçek şeklindeki fazların Zn ve Cu’dan meydana geldiği ve XRD sonuçları incelendiğinde, yapıda Cu_5Zn_8 intermetalik bileşiğin (IMC) olduğu anlaşılmaktadır. Cu ilavesi arttıkça oluşan IMC’lerin boyutlarının büyüdüğu ve yapı içerisindeki oranlarının arttığı belirlenmiştir. Ayrıca bu IMC’lerin çevresindeki α -Zn fazlarının daha ince olduğu görölmektedir. Şekil 5.2.d’de meydana gelen yapının gözenekli olduğu görölmektedir. Hassas dökümde soğuma hızının yavaş olması nedeniyle mikro yapılarda gözenekler oluşmaktadır. Daha önce Leonardo ve arkadaşlarının yaptığı bir çalışmada da, alaşımın mikro yapısında gözeneklerin oluştuğu belirtilmiştir [60]. Şekil 5.3’de farklı oranlarda Al ilave edilen Sn-9Zn alaşımlarının OM ve SEM görüntüleri, Çizelge 5.3’de ise EDS analizi sonuçları verilmiştir.



Şekil 5.3. Sn-9Zn alaşımına farklı oranlarda Al ilave edilerek üretilen Sn-Zn-Al alaşımlarının OM ve SEM görüntüleri: a ve b) Sn-9Zn-0,5Al, c ve d) Sn-9Zn-0,7Al, e ve f) Sn-9Zn-0,9Al.

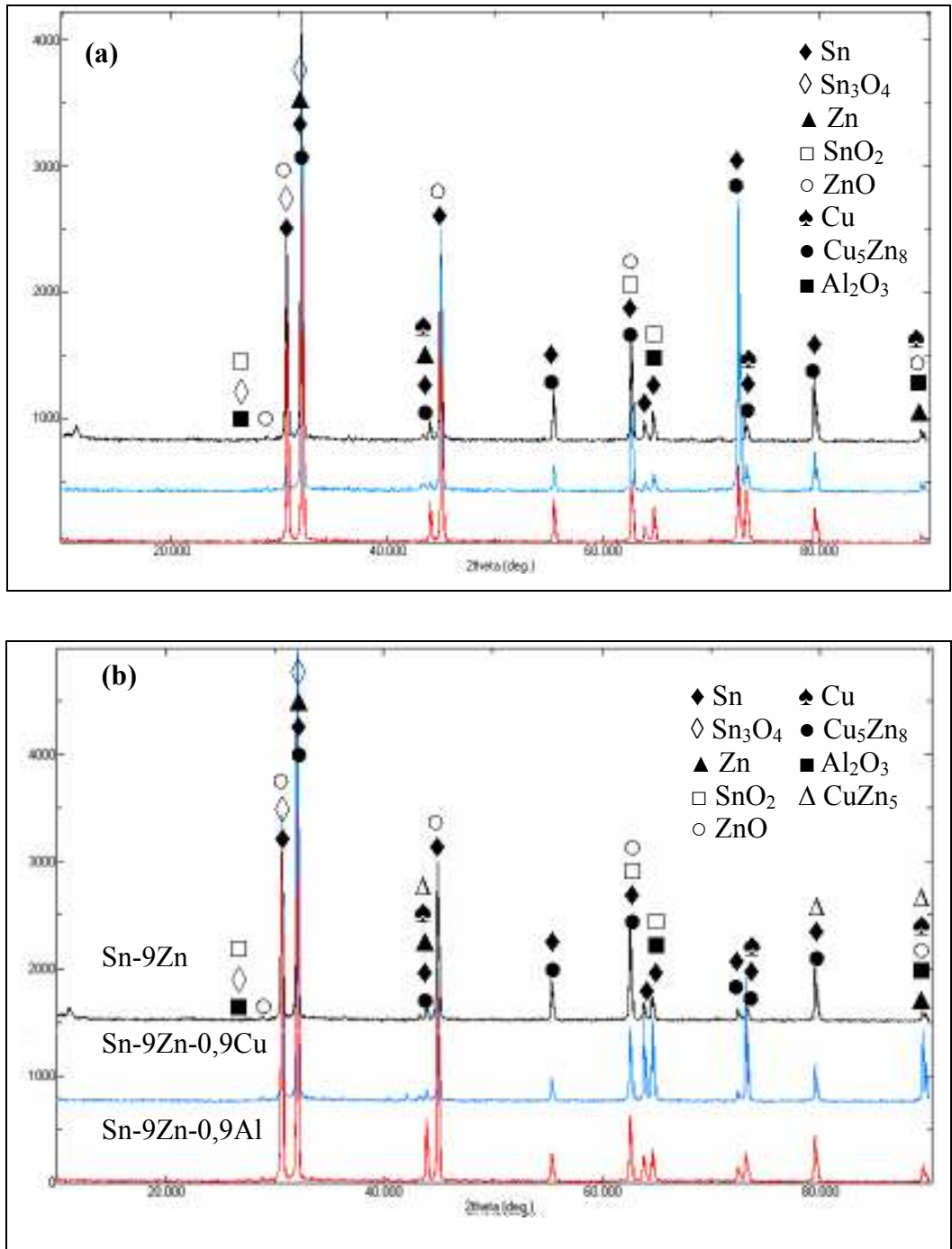
Çizelge 5.3. Sn-9Zn alaşımına farklı oranlarda Al ilave edilerek üretilen Sn-Zn-Al alaşımlarının EDS analizleri: a ve b) Sn-9Zn-0,5Al, c ve d) Sn-9Zn-0,7Al, e ve f) Sn-9Zn-0,9Al.

Şekil	Bölge	Sn	Zn	Al	O	C
5.3.b	1	55,92	3,27	11,75	25,77	-
	2	93,87	0,9	1,57	2,99	-
5.3.d	1	93,68	3,86	2,46	-	-
	2	99,43	0,52	0,05	-	-
5.3.f	1	37,5	3,93	14,88	29,18	14,52
	2	91,2	3,61	-	2,89	2,31

Şekil 5.3’de verilen OM ve SEM görüntülerinden anlaşılacağı gibi, alaşımların mikro yapılarında Al’ce zengin bölgelerin oluştuğu belirlenmiştir. Daha önce Das ve arkadaşlarının yaptığı bir çalışmada da, Sn-Zn-Al alaşımlarının mikro yapı incelemelerinde Al zengin bölgelerin olduğu rapor edilmektedir [2]. Çizelge 5.3’de verilen EDS analizi sonuçları incelendiğinde, yapıda Al_2O_3 intermetalik oluşumların bulunduğu anlaşılmaktadır. Daha önce yapılan bazı çalışmalarda, bu bölgelerin Al_6Zn_3Sn olduğu belirtilmesine rağmen [2,3,62,64], yapılan EDS analizi ve X-ışını kırınımı (XRD) incelemelerinde bu intermetalik faz belirlenememiştir. Yine EDS ve XRD sonuçlarından hareket edilerek, bu intermetalik fazın Al_2O_3 olduğuna karar verilmiştir. Ötektik yapıya %0,9 Al ilavesi ile oluşturulan alaşımın mikro yapısında da gözeneklerin oluştuğu görülmektedir.

5.1.2. XRD Analizi Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Hassas döküm ile üretilen 5 farklı alaşımın (Sn-9Zn, Sn-9Zn,0,7Cu, Sn-9Zn,0,9Cu Sn-9Zn,0,7Al Sn-9Zn,0,9Al) yapısında oluşan fazların ve kırınım düzlemlerinin belirlenmesi için, XRD analizleri yapılmıştır. Sn-9Zn, Sn-9Zn,0,7Cu ve Sn-9Zn,0,7Al alaşımlarının XRD sonuçları, Şekil 5.4’de verilmiştir.

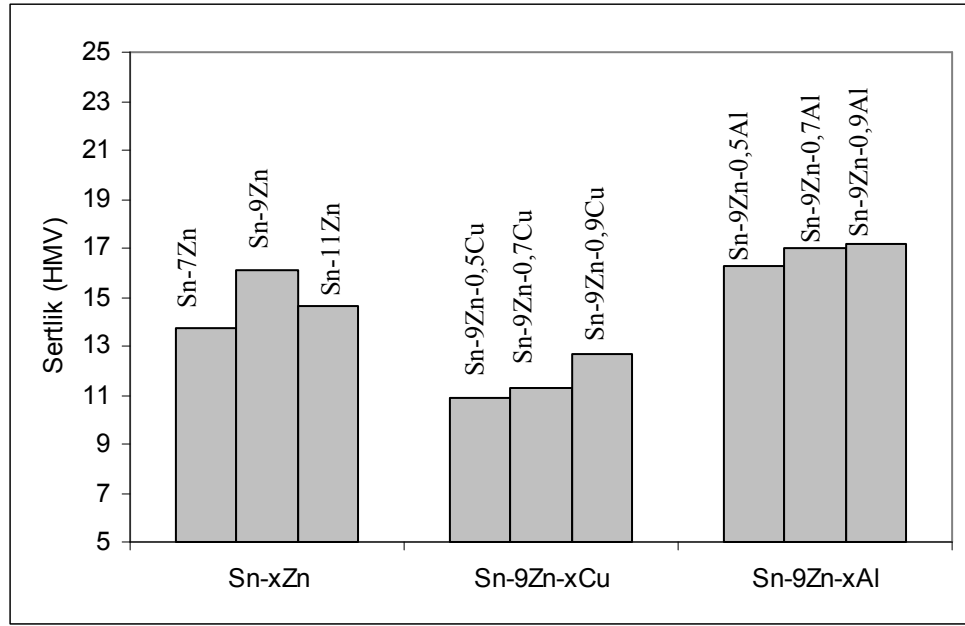


Şekil 5.4. a) Sn-9Zn, Sn-9Zn-0,7Cu, Sn-9Zn-0,7Al b) Sn-9Zn, Sn-9Zn-0,9Cu, Sn-9Zn-0,9Al numunelerine ait XRD analizi sonuçları.

Şekil 5.4’de verilen XRD sonuçlarına göre, Al ilave edilen Sn-9Zn alaşımların yapısında aynı fazların oluştuğu belirlenmiştir. Cu ilave edilen alaşımlarında ise Sn-9Zn-0,9Cu numunesinde Sn-9Zn-0,7Cu alaşımında bulunmayan CuZn₅ fazının oluştuğu belirlenmiştir.

5.2. SERTLİK ÖLÇÜMLERİNİN İNCELENMESİ

Farklı bileşimlere sahip (Çizelge 4.1) Sn-xZn, Sn-9Zn-xCu, Sn-9Zn-xAl alaşımlarının sertlik değerlerinin belirlenmesi için, mikro sertlik ölçümleri yapılmıştır. Hassas döküm yöntemiyle üretilen numunelerden elde edilen sertlik sonuçları Şekil 5.5’de verilmiştir.



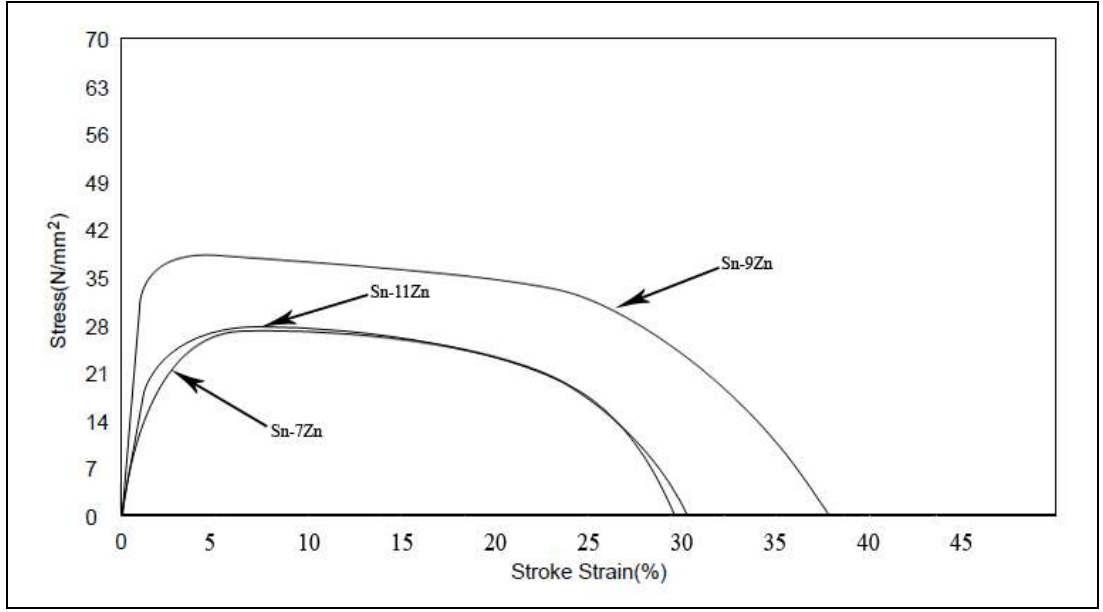
Şekil 5.5. Sn-xZn, Sn-9Zn-xCu, Sn-9Zn-xAl alaşımları sertlik değişimi.

Şekil 5.5’de verilen sertlik değerleri Sn-7Zn 13, Sn-9 Zn 16 ve Sn-11Zn 15 HMV olarak ölçülmüştür. Bu değerler birbirleriyle karşılaştırıldığında, en yüksek sertlik değeri, Sn-9Zn ötektik alaşımında elde edilmiştir. Ötektik yapının dislokasyon hareketlerini zorlaştırdığı bilinmektedir. Şekil 5.1’de verilen mikro yapı görüntüleri ile sertlik değerleri ilişkilendirildiğinde, homojen ötektik yapı sebebiyle en yüksek sertlik değeri, ötektik Sn-9Zn bileşimde elde edilmiştir. Leonardo ve arkadaşlarının yapmış olduğu bir çalışmada da benzer sonuçlar bulunmuştur [60]. Sn-9Zn ötektik alaşımına farklı oranlarda (%0,5, 0,7 ve 0,9) Cu ilave edilerek üretilen Sn-9Zn-xCu alaşımlarında, ötektik alaşım ile karşılaştırıldığında, sertlikte bir azalma olduğu görülürken, Cu miktarı arttıkça sertlikte artış olduğu gözlenmiştir. Şekil 5.5’de verilen sertlik sonuçları ile Şekil 5.1 ve Şekil 5.2’deki mikro yapı görüntüleri ilişkilendirildiğinde ise, Sn-Zn alaşımlarında iki fazlı yapı görülürken, Cu

eklenmesiyle birlikte yapıda üçüncü bir faz oluştuğu belirlenmiştir. Das ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada da bu fazın oluştuğu rapor edilmiştir [2]. Alaşıma %0,5 Cu ilave edildiğinde (Şekil 5.2 a ve b) karmaşık şekilli Cu_5Zn_8 IMC'lerin oluşması, ana matris ile yapıda oluşan bu IMC arasında zayıf bölgeler oluşturduğu için sertliğin azalmasına neden olmaktadır. Sn-9Zn ötektik bileşime ilave edilen Cu miktarı arttırıldığında ise, alaşımların sertliklerinde artış meydana geldiği gözlenmiştir. Şekil 5.2'de verilen mikro yapı görüntüleri incelendiğinde ise, Cu miktarı arttıkça Cu_5Zn_8 fazlarının boyutlarında ve miktarlarında bir artışın olduğu anlaşılmaktadır. Ana matrise göre daha sert olan bu IMC'nin yapıda daha fazla oluşması da, sertliğin artmasına neden olmaktadır. Sn-9Zn ötektik alaşımına farklı oranlarda Al ilave edildiğinde ise, Sn-9Zn ötektik alaşımının sertlik değerleri ile mukayese edildiğinde, Al ilavesinin alaşımların sertliğini arttırdığı belirlenmiştir. Daha önce yapılan bazı çalışmalarda da, bu yönde benzer sonuçlar bulunmuştur [2,3]. Şekil 5.3'de verilen mikro yapı görüntülerinde ve Şekil 5.4'de verilen XRD sonuçlarında belirlenen Al_2O_3 fazının, alaşımların sertlik değerlerini arttırdığı görülmektedir. Oluşan bu fazlarının boyutlarının Cu_5Zn_8 fazına oranla küçük olması sebebiyle sertliğin arttığı belirlenmiştir [65].

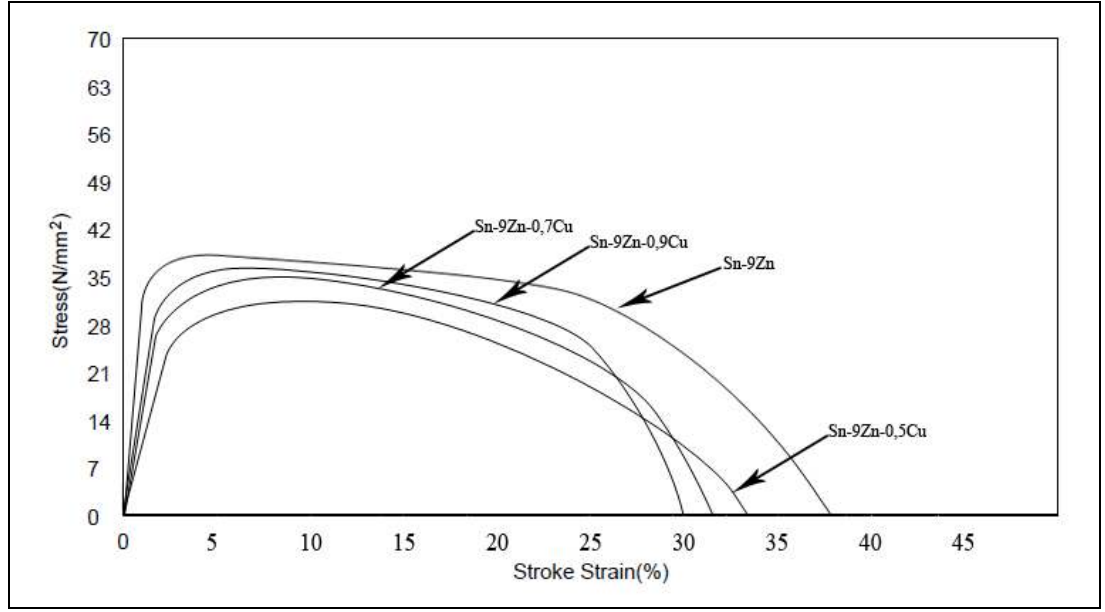
5.3. ÇEKME TESTİ SONUÇLARI

Hassas döküm yöntemiyle üretilen alaşımlarının mekanik özelliklerinin belirlenmesi için çekme testleri yapılmıştır. Sn-7Zn, Sn-9Zn ve Sn-11Zn alaşımlarının çekme testi sonuçları Şekil 5.6'de verilmiştir.



Şekil 5.6. Sn-7Zn, Sn-9Zn ve Sn-11Zn alaşımlarının çekme testi sonuçları.

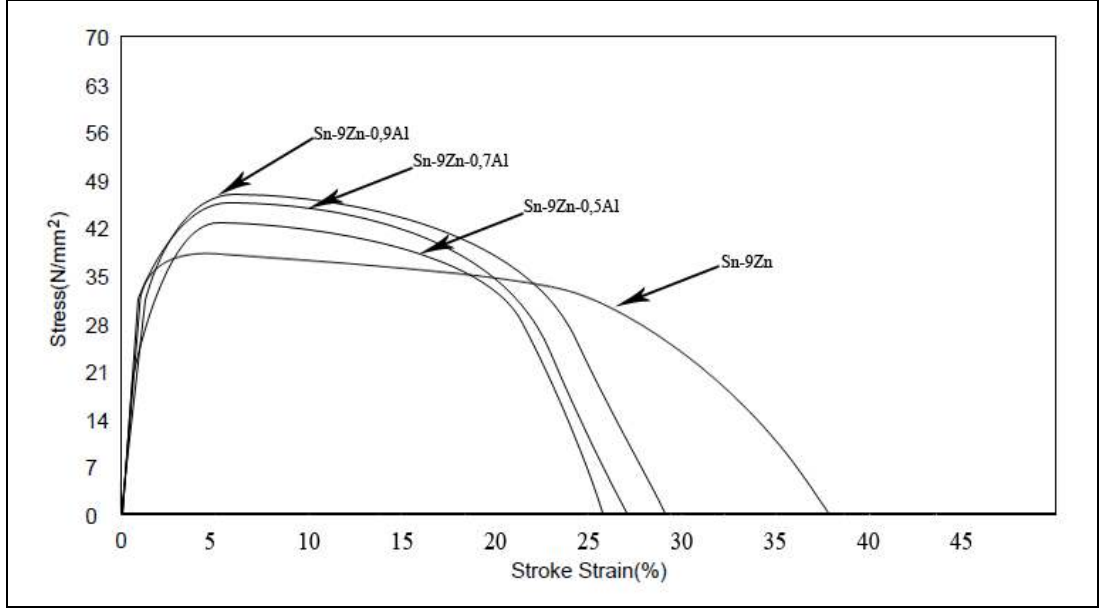
Sn-Zn alaşımlarının çekme mukavemetleri Sn-7Zn 28, Sn-9Zn 38 ve Sn-11Zn 27 MPa olarak ölçülmüştür. Şekil 5.6’da verilen çekme testi sonuçlarına göre Sn-7Zn ve Sn-11Zn alaşımlarının maksimum çekme mukavemetlerinin birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. En yüksek çekme mukavemeti ise, Sn-9Zn ötektik alaşımında ölçülmüştür. Şekil 5.1’de verilen SEM ve OM mikro yapıları incelendiğinde Sn-9Zn alaşımının mikro yapısında, yuvarlak ve çubuk şeklinde Zn’ce zengin bölgeler oluştuğu görülmektedir. Ayrıca daha önce yapılan bir çalışmada ikinci fazın şeklinin de dayanımı etkilediği belirtilmektedir [60]. Sn-Zn ötektik alaşımında, küresel ve kısa çubuk şeklinde fazların oluşması alaşımın dayanımını arttırmaktadır. Sn-7Zn alaşımında ilk katılaştıran ötektik altı bölgelerin olması (Şekil 5.1.a ve b) ve Zn’ce zengin faz uzunluklarının fazla olması nedeniyle, dislokasyonların hareketini kolaylaştırarak, çekme dayanımını azaltmaktadır. Aynı durum Sn-11Zn alaşımı için de geçerlidir. Şekil 5.7’de Sn-9Zn, Sn-9Zn-0,5Cu, Sn-9Zn-0,7Cu ve Sn-9Zn-0,9Cu alaşımlarının çekme testi sonuçları verilmiştir.



Şekil 5.7. Sn-9Zn, Sn-9Zn-0,5Cu, Sn-9Zn-0,7Cu ve Sn-9Zn-0,9Cu alaşımlarının çekme testi sonuçları.

Şekil 5.7’de verilen çekme testi sonuçlarına göre Sn-Zn ötektik alaşımına %0,5 Cu ilavesi ile, maksimum çekme mukavemetinde azalma olduğu görülmektedir. Elde edilen çekme testi sonuçları ile Şekil 5.2’de verilen mikro yapı görüntüleri karşılaştırıldığında, çekme mukavemetinin azalmasına neden olan faktörün, yapıda oluşan Cu_5Zn_8 IMC fazından kaynaklandığı anlaşılmaktadır. Ayrıca yapıda oluşan bu intermetalikler, matris faz ile zayıf bir bağ oluşturduklarından dolayı, alaşımın mukavemeti azalmaktadır. Sn-9Zn-xCu alaşımlarında, alaşıma ilave edilen Cu miktarı arttıkça yapıda oluşan IMC’lerin boyutlarının arttığı gözlemlenmiştir. Alaşımların yapısındaki intermetaliklerinin boyutundaki artışla paralel olarak çekme mukavemetleri artarken, % uzama miktarlarının azaldığı belirlenmiştir. Buna rağmen, Cu ilave edilen alaşımlarda en yüksek çekme mukavemetinin elde edildiği %0,9 Cu ilave edilen alaşımın çekme mukavemeti bile, ötektik alaşımın (Sn-9Zn) çekme mukavemeti değerine ulaşamadığı belirlenmiştir. Bunun sebebi ise, döküm işlemleri ve alaşımların katılaşması sırasında yapıda oluşan büyük boyutlu intermetaliklerin, alaşımın yapısında çentik etkisi göstermesidir. Bu nedenle, gerilim altında, özellikle intermetaliklerin uç bölgelerinde yüksek gerilim alanları oluşmakta ve bu yüksek gerilim çatlaklara dönüşmektedir. Oluşan bu çatlaklar yükün artmasıyla büyüyerek,

kırılmaya neden olmaktadır. Şekil 5.8’de Sn-9Zn, Sn-9Zn-0,5Al, Sn-9Zn-0,7Al ve Sn-9Zn-0,9Al alaşımlarına ait çekme sonuçları verilmiştir.

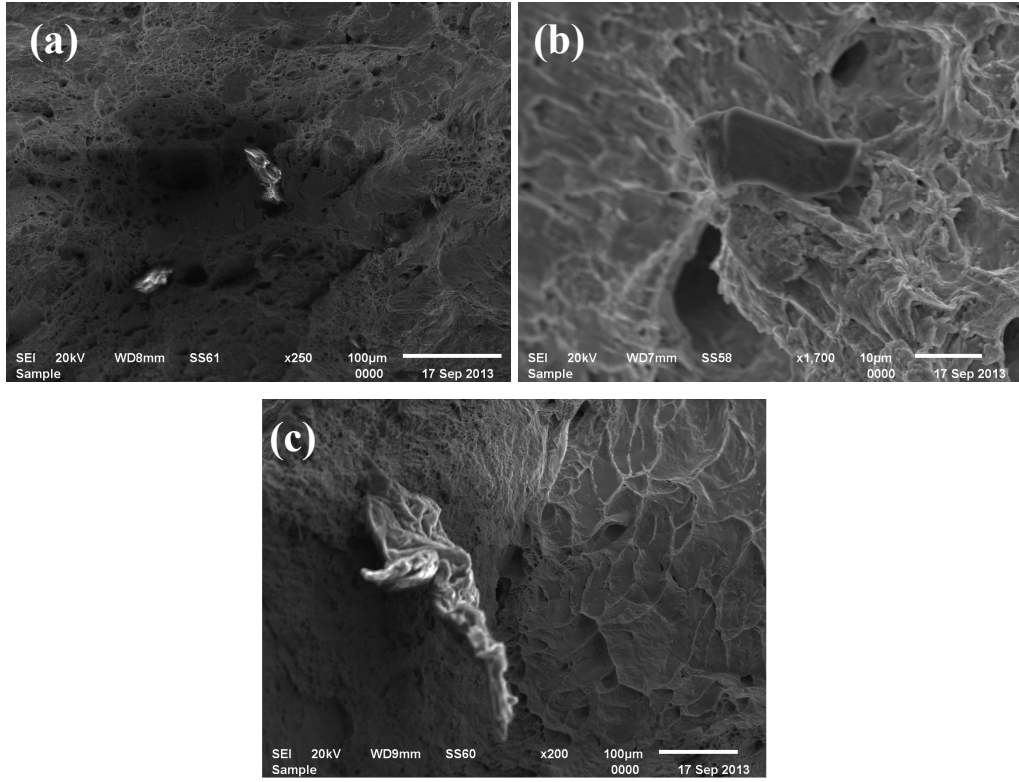


Şekil 5.8. Sn-9Zn, Sn-9Zn-0,5Al, Sn-9Zn-0,7Al ve Sn-9Zn-0,9Al alaşımlarının çekme testi sonuçları.

Şekil 5.8’de verilen çekme testi sonuçları incelendiğinde, en yüksek çekme mukavemetinin Sn-9Zn-0,9Al alaşımında elde edildiği anlaşılmaktadır. En düşük çekme mukavemeti değeri ise, Sn-9Zn ötektik alaşımında elde edilmiştir. Sn-9Zn-0,5Al ve Sn-9Zn-0,7Al alaşımlarının çekme mukavemetlerinin ise bu iki alaşımın çekme mukavemetlerinin arasında olduğu görülmektedir. Buna göre, Sn-9Zn ötektik alaşımına ilave edilen Al miktarı arttıkça, alaşımların maksimum çekme mukavemetleri de artmaktadır. Çizelge 5.3’de verilen EDS analizi sonuçları ve Şekil 5.4’de verilen XRD sonuçları ile çekme mukavemeti sonuçları ilişkilendirildiğinde Al₂O₃ fazının çekme mukavemetlerini arttırdığı ifade edilebilir.

5.3.1.1. Kırık Yüzey İncelemeleri

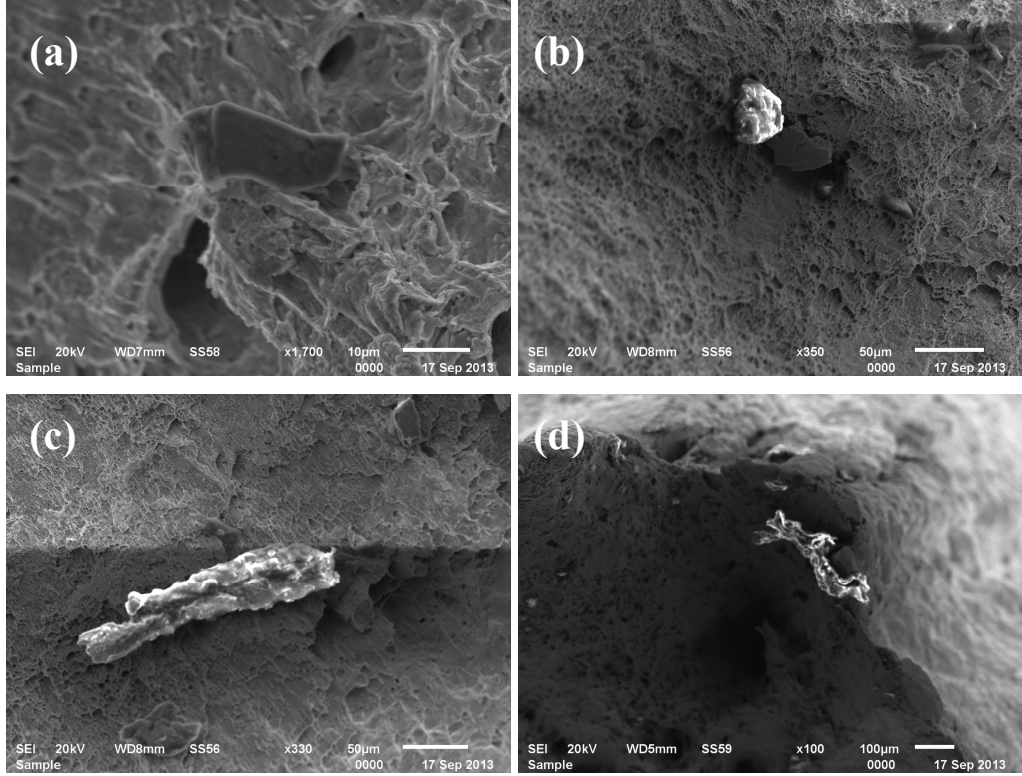
Sn-xZn alaşımlarının çekme numunelerinin kırık yüzeylerinden elde edilen SEM görüntüleri Şekil 5.9’da verilmiştir.



Şekil 5.9. a) Sn-7Zn, b) Sn-9Zn ve c) Sn-11Zn alaşımlarının kırık yüzey SEM görüntüleri.

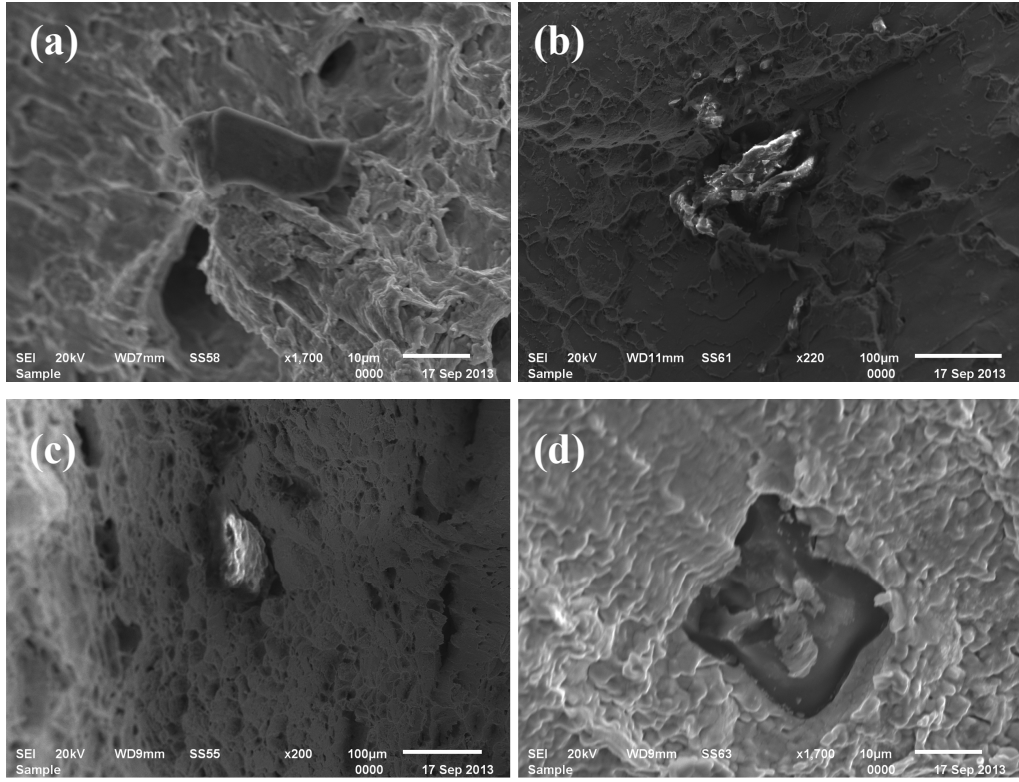
Sn-xZn alaşımlarının kırık yüzey SEM görüntüleri incelendiğinde, bazı oksit oluşumlarının varlığı görülmektedir. Alaşımlar atmosfer şartlarında hazırlandığı için tüm numunelerde oksit oluşumu gözlenmiştir. Bunun nedeni, alaşımlar atmosfer şartlarında hazırlanarak döküldükleri için, döküm işlemleri sırasında sıvı metalin atmosferle temasının oksit oluşumlarına neden olmasıdır. Sn-xZn alaşımları genellikle, elektronik sektöründe lehim malzemesi olarak kullanılmaktadır. Lehimleme işlemlerinin atmosferik şartlarda yapılması nedeniyle, çalışma genelinde koruyucu atmosfer oluşturulmamıştır (aynı şartları sağlaması amacıyla). Yapıda döküm işlemleri sırasında oluşan intermetaliklerin fiziksel ve mekanik özellikleri matris yapıyla farklı oldukları için, yük altında meydana gelen kalıcı plastik deformasyon (kırılma gibi), matris-intermetalik ara yüzelerindeki uyumsuz bölgelerden başlamaktadır. Şekil 5.9'da verilmiş olan Sn-xZn alaşımlarının kırık yüzeylerinde matris-intermetalik faz uyumsuzluğu nedeniyle de kırılmalar, bu bölgelerde gerçekleşmektedir. Ayrıca Sn-xZn alaşımlarının kırık yüzeylerinde sünek kırılma olduğu, yüzey topografından da anlaşılmaktadır. Şekil 5.10'de Sn-9Zn, Sn-

9Zn-0,5Cu, Sn-9Zn,0,7Cu ve Sn-9Zn-0,9Cu alaşımlarının kırık yüzey SEM görüntüleri verilmiştir.



Şekil 5.10. a) Sn-9Zn, b) Sn-9Zn-0,5Cu, c) Sn-9Zn-0,7Cu ve d) Sn-9Zn-0,9Cu alaşımlarının kırık yüzey SEM görüntüleri.

Şekil 5.10'da, Sn-9Zn, Sn-9Zn-0,5Cu, Sn-9Zn-0,7Cu ve Sn-9Zn-0,9Cu alaşımlarının çekme testi sonucunda oluşan kırık yüzey SEM görüntüleri incelendiğinde, yapıda oksit fazların bulunduğu görülebilmektedir. Sn-xZn alaşımları kırık yüzeylerinde açıklandığı gibi, Sn-9Zn-xCu alaşımlarında da oksitlerin matrisle uyumsuzluğundan kaynaklanan kırılmalar oluşmaktadır. Tüm numunelerin topografyasından da kırılmaların sünek karakterli olduğu görülmektedir. Şekil 5.11'de Sn-9Zn-xAl alaşımlarının kırık yüzey SEM görüntüleri verilmiştir.

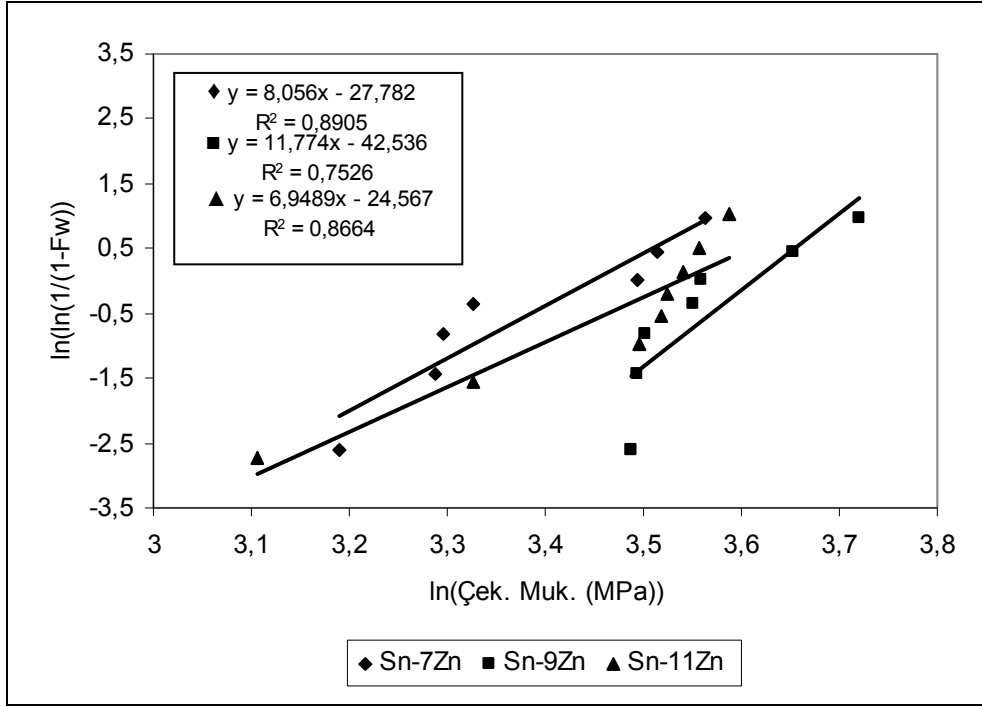


Şekil 5.11. a) Sn-9Zn, b) Sn-9Zn-0,5Al, c) Sn-9Zn,0,7Al ve d) Sn-9Zn-0,9Al alaşımlarının kırık yüzey SEM görüntüleri.

Şekil 5.3.a'da, kırılma yüzeylerinde oksitlerin olduğu görülmektedir. Kırılma yüzeylerinde gerilmeler tane sınırları ile ana matris arasında oluşmaktadır. Al zengin fazlar, kırılmaların başladığı noktalar olduğu düşünülmektedir [62]. Bu fazlar nedeniyle, malzemenin dayanımı artarken, sünekliği azalmaktadır.

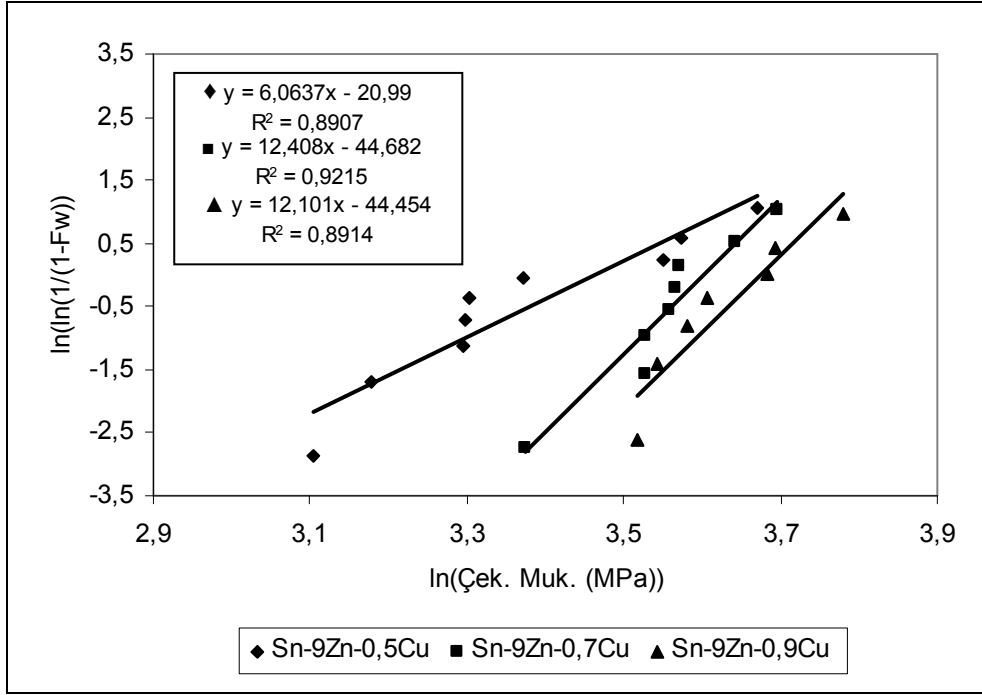
5.3.1.2. Weibull İstatistiksel Analizleri

Çekme testlerinden elde edilen veriler kullanılarak, döküm malzemesinin kalitesi iki boyutlu Weibull istatistiksel metodu kullanılarak değerlendirilmiştir Şekil 5.12'de Sn-7Zn, Sn-9Zn ve Sn-11Zn alaşımlarının Weibull olasılık dağılımı verilmiştir.



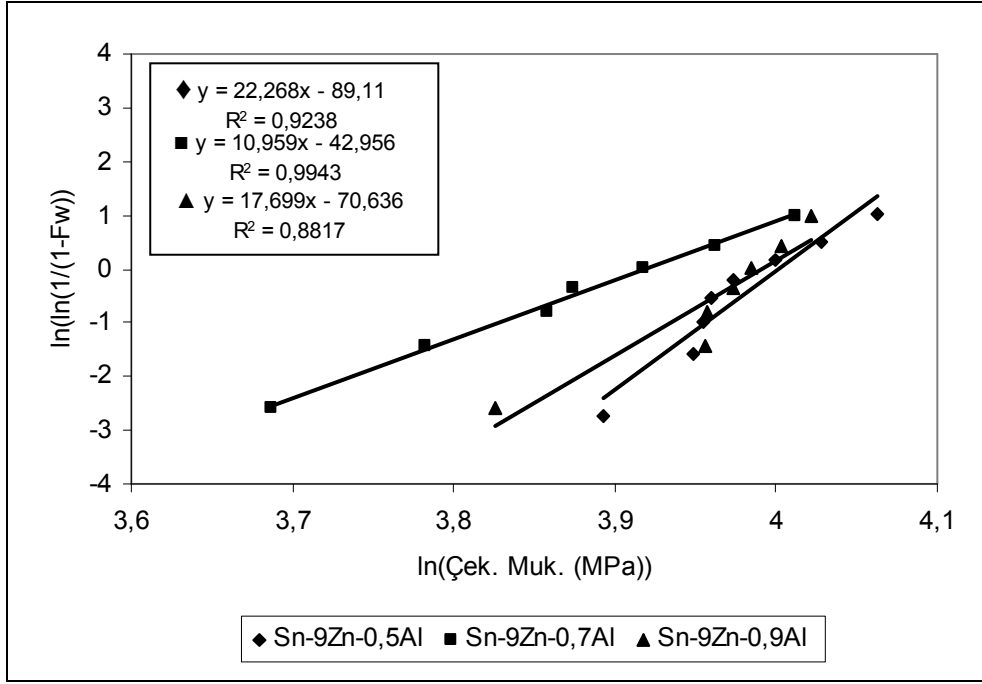
Şekil 5.12. Sn-7Zn, Sn-9Zn ve Sn-11Zn alaşımlarının maksimum çekme değerleri kullanılarak oluşturulan Weibull olasılık dağılımı.

Sn-7Zn, Sn-9Zn ve Sn-11Zn alaşımlarının Weibull modülleri sırasıyla 8.056, 11.774 ve 6.9489 olarak belirlenmiştir. En yüksek Weibull modülü Sn-9Zn'nin çekme mukavemet değerleri birbirlerine daha yakın olduğundan, Sn-9Zn alaşımından elde edilmiştir. Şekil 5.13'de Sn-9Zn-0,5Cu, Sn-9Zn-0,7Cu ve Sn-9Zn-0,9Cu alaşımları Weibull olasılık dağılımı verilmiştir.



Şekil 5.13. Sn-9Zn-0,5Cu, Sn-9Zn-0,7Cu ve Sn-9Zn-0,9Cu maksimum çekme değerleri kullanılarak oluşturulan Weibull olasılık dağılımı.

B1, B2 ve B3 numunelerinin Weibull modülleri sırasıyla 6.0637, 12.408 ve 12.101 olarak belirlenmiştir. Sn-9Zn-0,7Cu ve Sn-9Zn-0,9Cu alaşımlarında yakın Weibull modülü değerleri elde edilmiştir. Mikro yapıdaki IMC'lerin artmasıyla güvenilirliğinin arttığı anlaşılmaktadır. Şekil 5.14'de Sn-9Zn-0,5Al, Sn-9Zn-0,7Al ve Sn-9Zn-0,9Al alaşımlarının Weibull olasılık dağılımı verilmiştir.

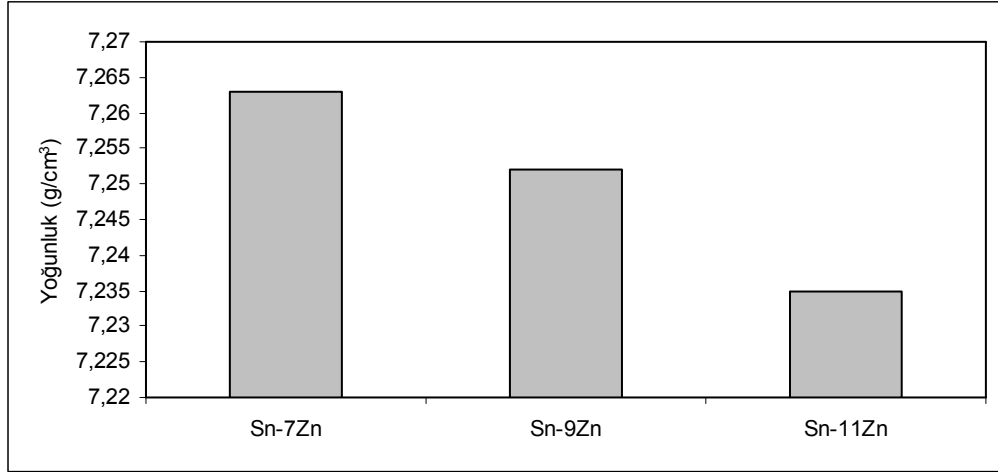


Şekil 5.14. Sn-9Zn-0,5Al, Sn-9Zn-0,7Al ve Sn-9Zn-0,9Al maksimum çekme değerleri kullanılarak oluşturulan Weibull olasılık dağılımı.

Sn-9Zn-0,5Al, Sn-9Zn-0,7Al ve Sn-9Zn-0,9Al alaşımlarına ait Weibull modülleri sırasıyla 22.268, 10.959 ve 17.699 olarak belirlenmiştir. En yüksek Weibull modülü Sn-9Zn,0,5Al alaşımından elde edilmiştir. Alaşıma Al ilavesi arttıkça oluşan alüminyum oksitlerin artması nedeniyle alaşımın mukavemeti arttığını ancak, güvenilirliğinin azaldığı belirlenmiştir.

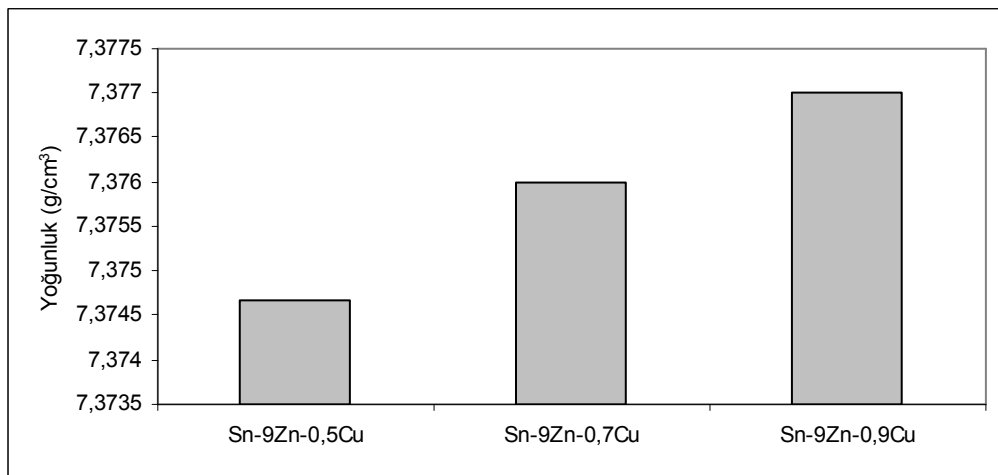
5.4. YOĞUNLUK ÖLÇÜMLERİNİN İNCELENMESİ

Şekil 5.15’de Sn-7Zn, Sn-9Zn ve Sn-11Zn alaşımlarının yoğunluk değerleri verilmiştir.



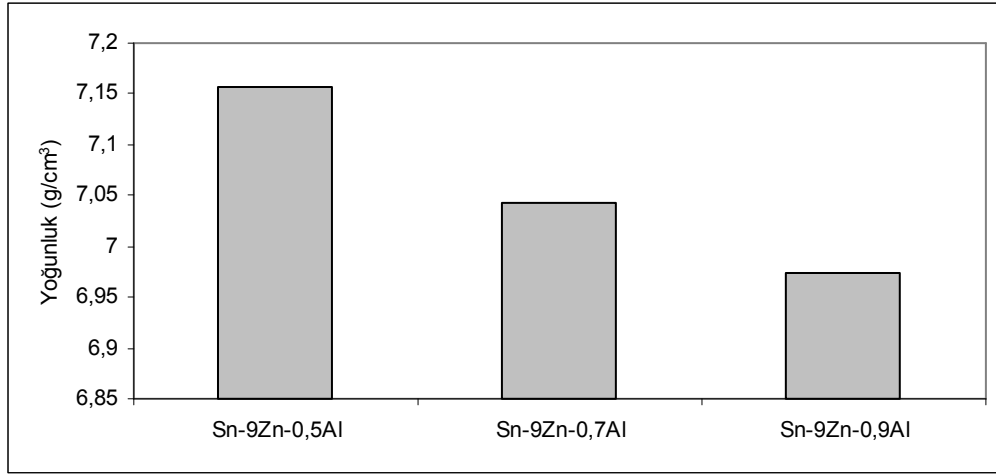
Şekil 5.15. Sn-7Zn, Sn-9Zn ve Sn-11Zn alaşımları yoğunluk değerleri.

Şekil 5.15’de verilen Sn-xZn alaşımlarının yoğunluk değişimleri incelendiğinde, en yüksek yoğunluk değerinin Sn-7Zn (A1) alaşımına ait olduğu görülürken, en düşük değer Sn-11Zn alaşımına ait olduğu görülmektedir. Zn miktarına bağlı olarak alaşımların yoğunluklarının düştüğü gözlenmiştir. Sn’nin yoğunluğunun (7,265 g/cm³), Zn’nin yoğunluğundan (7,14 g/cm³) fazla olduğundan dolayı bileşimlerde, Zn oranı arttıkça alaşımların yoğunlukları azalmaktadır. Şekil 5.16’da Sn-9Zn ötektik alaşımına farklı miktarlarda Cu ilave edilmesi ile elde edilen alaşımların yoğunluk değerleri verilmektedir.



Şekil 5.16. Sn-9Zn-0,5Cu, Sn-9Zn-0,7 Cu ve Sn-9Zn-0,9 Cu alaşımları yoğunluk değerleri.

Şekil 5.16’da verilen grafikte, Sn-9Zn alaşımına Cu ilave edilmesi ile birlikte yoğunluk değerlerinde artış meydana geldiği görülmektedir. Cu elementinin yoğunluğu ($8,96 \text{ g/cm}^3$) Sn-9Zn alaşımı yoğunluğundan fazla olması sebebiyle, alaşımların yoğunluklarında bir artış olduğu görülmektedir. Şekil 5.17’de Sn-9Zn ötektik alaşımına Al ilavesi ile üretilen alaşımların yoğunluk değerleri verilmektedir.

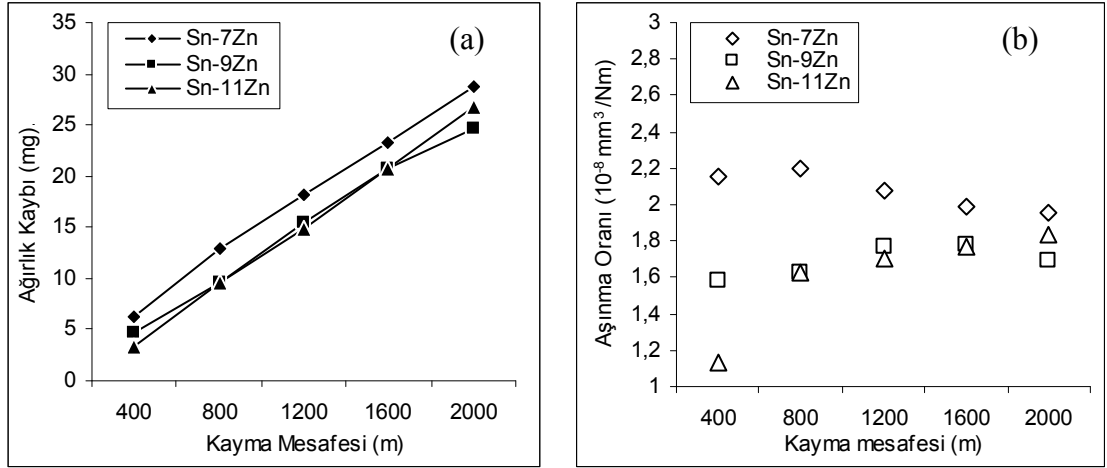


Şekil 5.17. Sn-9Zn-0,5Al, Sn-9Zn-0,7Al ve Sn-9Zn-0,9Al alaşımları yoğunluk değerleri.

Şekil 5.16’da verilen grafikte, Al ilavesi ile alaşımların yoğunluklarında düşüş olduğu görülmektedir. Al elementinin yoğunluğu $2,7 \text{ g/cm}^3$ ’dür. Sn-9Zn alaşımı yoğunluğuna oranla, bu değer daha düşük olduğu görülmektedir. Bu alaşıma Al elementi ilave edilmesi ile yoğunluk değerlerinin azaldığı da görülmektedir.

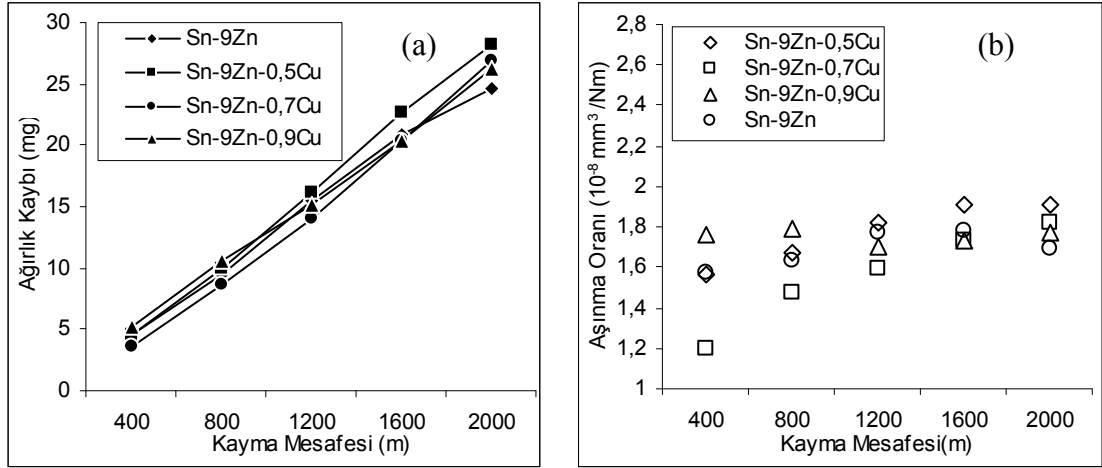
5.5. AŞINMA TESTİ SONUÇLARI

Sn-7Zn, Sn-9Zn, Sn-11Zn, Sn-9Zn-0,5Cu, Sn-9Zn-0,7Cu, Sn-9Zn-0,9Cu, Sn-9Zn-0,5Al, Sn-9Zn-0,7Al ve Sn-9Zn-0,9Al alaşımları 10 N yük altında, 1 m/sn^{-1} kayma hızında ve 5 farklı (400 m, 800 m, 1200 m, 1600 m ve 2000 m) kayma mesafesinde aşınma testleri yapılmıştır. Aşınma testleri sonucunda, numunelerde meydana gelen ağırlık kayıpları ölçüldükten sonra, Bölüm 4’de verilen eşitlik ile (Eşitlik 4.2) aşınma oranları hesaplanmıştır. Ölçülen ağırlık kayıpları ve hesaplanan aşınma oranları Şekil 5.18’de verilmiştir.



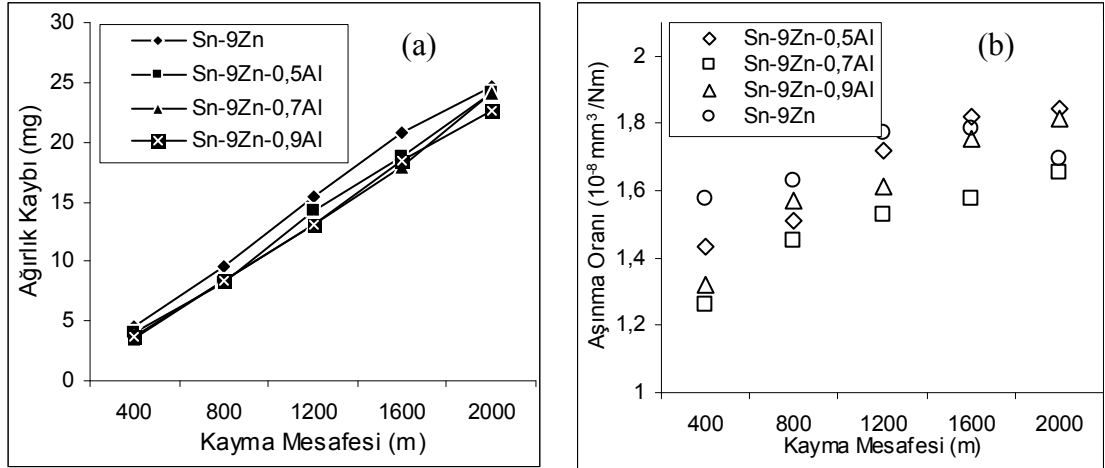
Şekil 5.18. Sn-7Zn, Sn-9Zn ve Sn-11Zn alaşımları 10 N yük altında a) ağırlık kayıpları ve b) aşınma oranları.

Şekil 5.18 a'da verilen Sn-7Zn, Sn-9Zn ve Sn-11Zn bileşimlerine sahip alaşımların ağırlık kayıpları incelendiğinde, kayma mesafesine bağlı olarak ağırlık kayıplarının düzenli olarak arttığı görülmektedir. En az ağırlık kaybının Sn-9Zn alaşımında meydana geldiği görülmektedir. Şekil 5.5'de verilen sertlik sonuçlarına göre en yüksek sertliğin Sn-9Zn alaşımına ait olduğu görülmektedir. Sn-9Zn ve Sn-11Zn alaşımlarının 800 - 1600 m kayma mesafeleri boyunca ağırlık kayıplarının birbirine yakın olduğu görülmektedir. Şekil 5.18 b'de verilen aşınma oranları incelendiğinde, Sn-7Zn alaşımı 400 ve 800 m kayma mesafelerinde birbirine yakın aşınma oranı gösterirken, 1200 ve 2000 m aralığında aşınma oranında azalma olduğu belirlenmiştir. Sn-9Zn alaşımının aşınma oranı ise 400 - 1600 m kayma mesafelerinde artış gösterirken, 2000 m kayma mesafesinde aşınma oranında azalma olduğu görülmüştür. Sn-11Zn alaşımı da 400 - 800 m kayma mesafesi aralığında yüksek aşınma oranı artışı gözlenirken, 1200 - 2000 m kayma mesafelerinde birbirine yakın değerler elde edilmiştir. Sn-9Zn, Sn-9Zn-0,5Cu, Sn-9Zn,0,7Cu ve Sn-9Zn-0,9Cu alaşımlarına ait 10 N yük altında ağırlık kayıpları ve aşınma oranları Şekil 5.19'da verilmiştir.



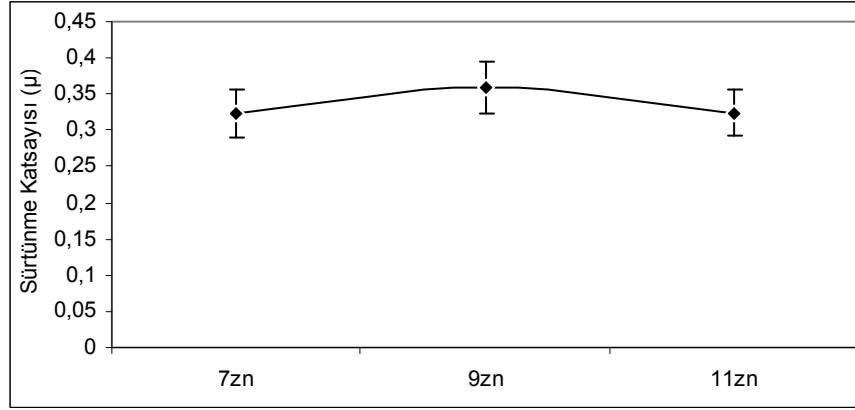
Şekil 5.19. Sn-9Zn, Sn-9Zn-0,5Cu, Sn-9Zn-0,7Cu ve Sn-9Zn-0,9Cu alaşımları 10 N yük altında a) ağırlık kayıpları ve b) aşınma oranları.

Şekil 5.19’da verilen Sn-9Zn, Sn-9Zn-0,5Cu, Sn-9Zn-0,7Cu ve Sn-9Zn-0,9Cu bileşimlerine sahip alaşımların ağırlık kayıpları incelendiğinde, kayma mesafesine bağlı olarak ağırlık kayıplarının lineer olarak arttığı görülmektedir. En az ağırlık kaybının Sn-9Zn alaşımında meydana geldiği görülmektedir. Sertlik değerlerine de bakıldığında, en yüksek sertliğin Sn-9Zn alaşımına ait olduğu görülmektedir. Sn-9Zn-0,5Cu en fazla ağırlık kaybı görülürken, Cu miktarının artmasıyla da Sn-9Zn-0,7Cu ve Sn-9Zn-0,9Cu alaşımlarında ağırlık kayıplarında azalma olduğu görülmüştür. Şekil 5.19’da aşınma oranları incelendiğinde, Sn-9Zn-0,7Cu alaşımı (400 - 2000 m) kayma mesafelerinde aşınma oranı artış göstermiştir. Sn-9Zn-0,5Cu ve Sn-9Zn-0,9Cu alaşımlarının aşınma oranları ise (400 - 2000 m) kayma mesafelerinde birbirine yakın oranlarda aşınma davranışı sergilediği anlaşılmaktadır. Sn-9Zn, Sn-9Zn-0,5Al, Sn-9Zn-0,7Al ve Sn-9Zn-0,9Al alaşımlarına ait 10 N yük altında ağırlık kayıpları ve aşınma oranları Şekil 5.20’de verilmiştir.



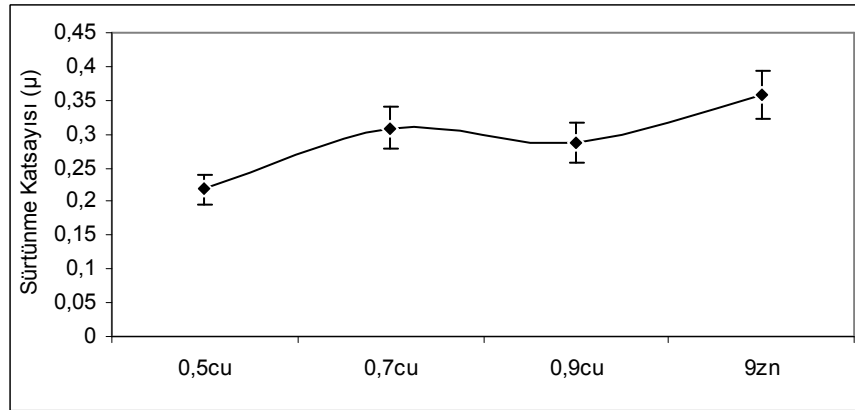
Şekil 5.20. Sn-9Zn, Sn-9Zn-0,5Al, Sn-9Zn-0,7Al ve Sn-9Zn-0,9Al alaşımları 10 N yük altında a) ağırlık kayıpları ve b) aşınma oranları.

Şekil 5.20’de verilen Sn-9Zn, Sn-9Zn-0,5Al, Sn-9Zn-0,7Al ve Sn-9Zn-0,9Al bileşimlerine sahip alaşımların aşınma kayıpları incelendiğinde, kayma mesafesine bağlı olarak ağırlık kayıplarının lineer olarak arttığı görülmektedir. En az ağırlık kaybının Sn-9Zn-0,9Al alaşımında meydana geldiği görülmektedir. Şekil 5.5’deki sertlik değerlerine de bakıldığında en yüksek sertliğin Sn-9Zn-0,9Al alaşımına ait olduğu görülmektedir. Sn-9Zn-0,9Al en az ağırlık kaybı görülürken, en fazla ağırlık kaybı sırasıyla Sn-9Zn, Sn-9Zn-0,5Al ve Sn-9Zn-0,7Al alaşımlarında elde edilmiştir. Şekil 5.20’de aşınma oranları incelendiğinde ise, Sn-9Zn-0,5Al, Sn-9Zn-0,7Al ve Sn-9Zn-0,9Al alaşımlarının aşınma oranları (400 - 2000 m) kayma mesafelerinde kayma mesafesine bağlı olarak artış gösterdiği anlaşılmaktadır. Sn-7Zn, Sn-9Zn ve Sn-11Zn alaşımlarına ait 10 N yük altında sürtünme katsayıları Şekil 5.21’de verilmiştir.



Şekil 5.21. Sn-7Zn, Sn-9Zn ve Sn-11Zn alaşımlarının sürtünme katsayıları.

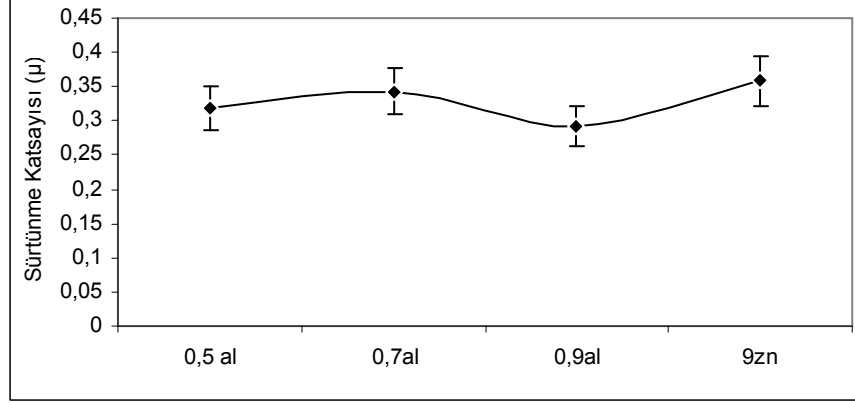
Şekil 5.21’de verilen Sn-7Zn, Sn-9Zn ve Sn-11Zn alaşımlarına ait 10 N yük altında sürtünme katsayıları incelendiğinde, sürtünme katsayıları sırasıyla en yüksekten en küçüğe doğru Sn-9Zn, Sn-11Zn ve Sn-7Zn olarak kaydedilmiştir. Sn-9Zn, Sn-9Zn-0,5Cu, Sn-9Zn-0,7Cu ve Sn-9Zn-0,9Cu alaşımlarına ait 10 N yük altında sürtünme katsayıları Şekil 5.22’de verilmiştir.



Şekil 5.22. Sn-9Zn, Sn-9Zn-0,5Cu, Sn-9Zn-0,7Cu ve Sn-9Zn-0,9Cu alaşımlarının sürtünme katsayıları.

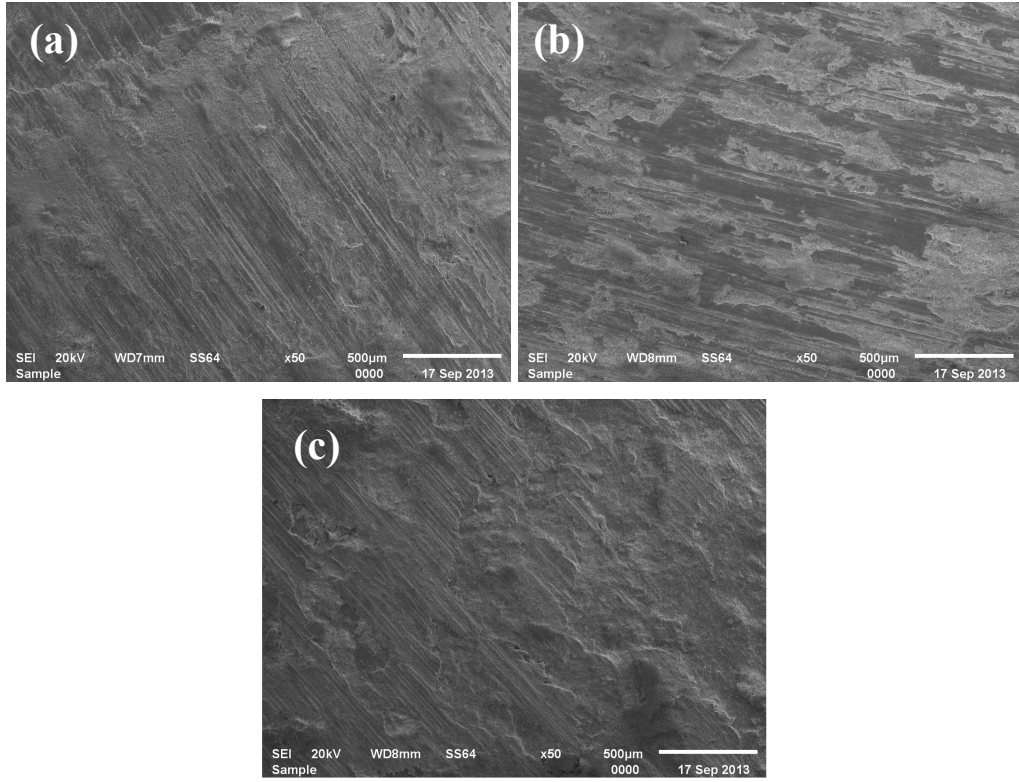
Şekil 5.22’de verilen Sn-9Zn, Sn-9Zn-0,5Cu, Sn-9Zn-0,7Cu ve Sn-9Zn-0,9Cu alaşımlarına ait 10 N yük altında sürtünme katsayıları incelendiğinde, sürtünme katsayıları sırasıyla en yüksekten en küçüğe doğru Sn-9Zn, Sn-9Zn-0,7Cu, Sn-9Zn-0,9Cu ve Sn-9Zn-0,5Cu olarak sıralandığı görülmektedir. Sn-9Zn, Sn-9Zn-0,5Al, Sn-

9Zn-0,7Al ve Sn-9Zn-0,9Al alaşımlarına ait 10 N yük altında sürtünme katsayıları Şekil 5.23’de verilmiştir.



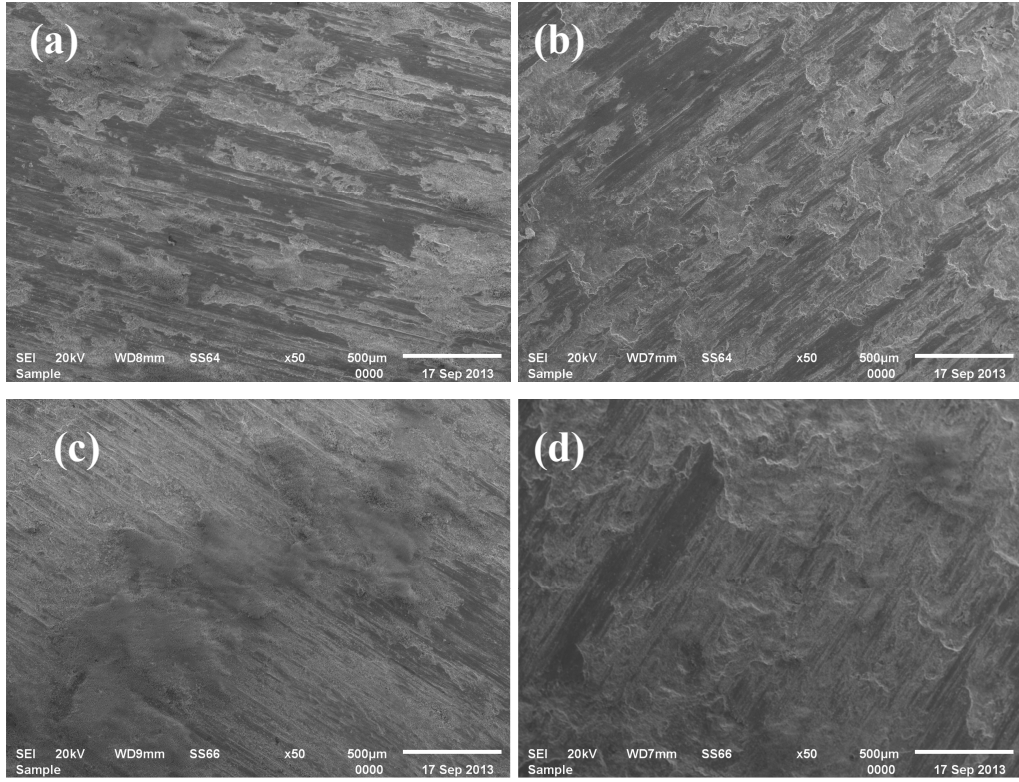
Şekil 5.23. Sn-9Zn, Sn-9Zn-0,5Al, Sn-9Zn-0,7Al ve Sn-9Zn-0,9Al alaşımlarının sürtünme katsayıları.

Şekil 5.23’de verilen 9Zn, Sn-9Zn-0,5Al, Sn-9Zn-0,7Al ve Sn-9Zn-0,9Al alaşımlarına ait 10 N yük altında sürtünme katsayıları incelendiğinde, sürtünme katsayıları sırasıyla en yüksekten en ke doğru Sn-9Zn, Sn-9Zn-0,7Al, Sn-9Zn-0,5Al ve Sn-9Zn-0,9Al olarak sıralandığı görülmektedir. Sn-9Zn-0,7Al ve Sn-9Zn-0,5Al alaşımları Sn-9Zn alaşımının sürtünme katsayısına yakın değerler gösterirken, Sn-9Zn-0,9Al alaşımı daha düşük sürtünme katsayısı değerini göstermiştir. Sn-7Zn, Sn-9Zn ve Sn-11Zn alaşımlarına ait 10 N yük altında aşınma yüzeyleri Şekil 5.24’de verilmiştir.



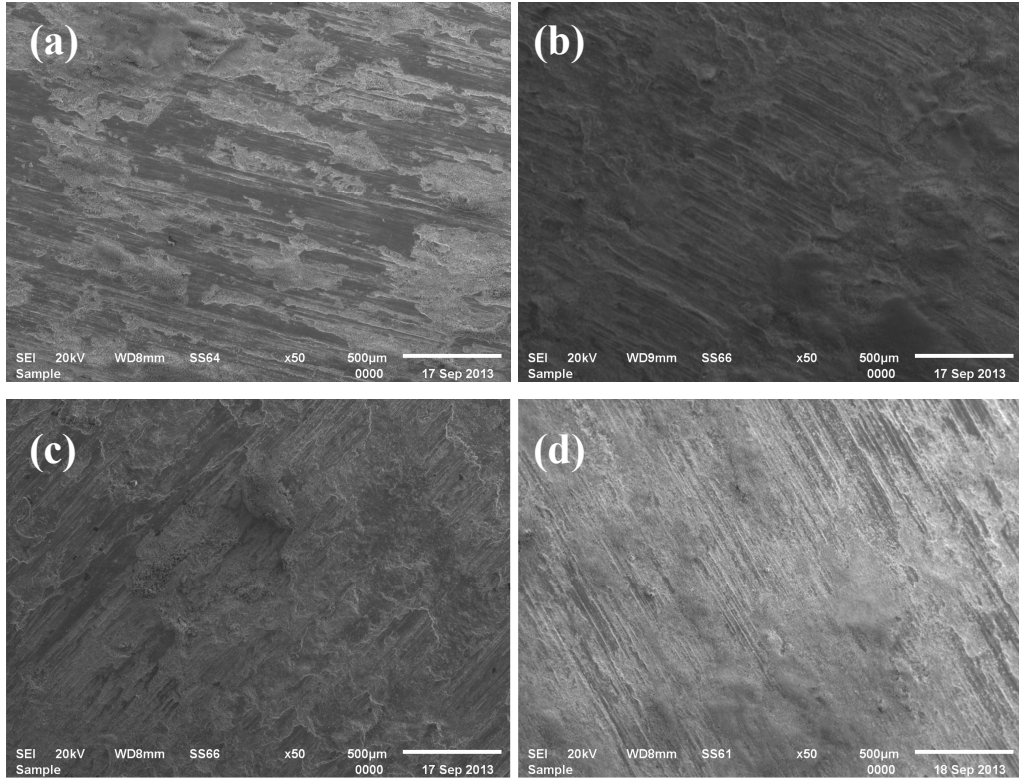
Şekil 5.24. a) Sn-7Zn, b) Sn-9Zn ve c) Sn-11Zn alaşımlarının aşınma yüzeyi SEM görüntüleri.

Şekil 5.24’de verilen Sn-7Zn, Sn-9Zn ve Sn-11Zn alaşımlarına ait 10 N yük altında, Sn-7Zn alaşımında kayma yönü net bir şekilde belli olmaktadır. Sn-7Zn (a) alaşımında belirli bölgelerde adhesiv aşınma olduğu görülmektedir. Sn-9Zn (b) alaşımı SEM görüntüsünde bölgesel çizikler görülmektedir. Ayrıca yapıda yüzeyden kopan mikro talaş parçacıklarının tekrar yüzeye kaynaklandığı da görülmüştür. Sn-11Zn (c) alaşımı SEM görüntüsünde ise mikro tepelikler ve bölgesel aşınma olduğu görülmektedir. Mikro tepelikler deformasyona uğrayan noktalardır. Ayrıca tüm numunelerin aşınma yüzeylerinde bir miktar oksidasyon olduğu da görülmektedir. Sn-9Zn, Sn-9Zn-0,5Cu, Sn-9Zn-0,7Cu ve Sn-9Zn-0,9Cu alaşımlarına ait 10 N yük altında aşınma yüzeyleri Şekil 5.25’de verilmiştir.



Şekil 5.25. a) Sn-9Zn, b) Sn-9Zn-0,5Cu, c) Sn-9Zn-0,7Cu ve d) Sn-9Zn-0,9Cu alaşımlarının aşınma yüzeyi SEM görüntüleri.

Şekil 5.25’de verilen Sn-9Zn, Sn-9Zn-0,5Cu, Sn-9Zn-0,7Cu ve Sn-9Zn-0,9Cu alaşımlarına ait 10 N yük altında aşınma yüzeyleri incelendiğinde, Sn-9Zn (a) alaşımının aşınma yüzeyinde adhesiv mekanizma sonucunda oluşan sıvanmalar net bir şekilde görülmekte iken, Sn-9Zn,0,5Cu (b) alaşımında ise kayma yönüne bağlı olarak aşınmanın olduğu görülmektedir. Sn-9Zn,0,7Cu (c) alaşımının SEM görüntüsünde her iki taraflı aşınma sonucunda, bölgesel tepeciklerin olduğu görülmektedir. Sn-9Zn,0,9Cu (d) alaşımının aşınma yüzeyinde de adhesiv aşınma mekanizmasının ağırlıklı olduğu anlaşılmaktadır. Aşınma numunelerinin yüzeylerinde bir miktar oksidasyon olduğu da görülmektedir. Sn-9Zn, Sn-9Zn-0,5Al, Sn-9Zn-0,7Al ve Sn-9Zn-0,9Al alaşımlarına ait 10 N yük altında aşınma yüzeyleri Şekil 5.26’da verilmiştir.



Şekil 5.26. a) Sn-9Zn, b) Sn-9Zn-0,5Al, c) Sn-9Zn-0,7Al ve d) Sn-9Zn-0,9Al alaşımlarının aşınma yüzeyi SEM görüntüleri.

Şekil 5.26'da verilen Sn-9Zn, Sn-9Zn-0,5Al, Sn-9Zn-0,7Al ve Sn-9Zn-0,9Al alaşımlarına ait 10 N yük altında aşınma yüzeyleri incelendiğinde, Sn-9Zn (a) alaşımının SEM görüntüsünde adhesiv aşınmanın olduğu anlaşılmaktadır. Sn-9Zn-0,5Al (b) alaşımının aşınma yüzeyinde ise karşılıklı bölgesel aşınma olduğu görülmektedir.

BÖLÜM 6

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışma ile elde edilen genel sonuçlar aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır.

- Sn-xZn alaşımlarının SEM ve OM görüntülerinde Sn-7Zn'de ötektik altı, Sn-11Zn'de ötektik üstü ve Sn-9Zn'de ise tipik lamelli ötektik yapının oluştuğu görülmüştür.
- Sn-9Zn-xCu alaşımlarının SEM ve OM görüntülerinde, Cu ilaveli alaşımlarda çiçek şeklinde Cu_5Zn_8 fazlarının oluştuğu belirlenmiştir. Cu miktarı arttıkça bu IMC fazların boyutlarının büyüdüğü ve ana matrisle aralarındaki bölgelerde α -Zn fazlarının daha ince olduğu görülmüştür.
- Sn-9Zn-xAl alaşımlarının SEM ve OM görüntülerinde, Al ilaveli alaşımlarda yuvarlak şekilli Al_2O_3 fazlarının oluştuğu görülmüştür.
- Sn-9Zn-0,7Cu ve Sn-9Zn-0,9Al alaşımlarının mikro yapı görüntülerinde, alaşımların yavaş soğumasından kaynaklanan gözeneklerin meydana geldiği gözlenmiştir.
- XRD incelemeleri sonucunda Sn-9Zn-xCu alaşımlarında Cu_5Zn_8 fazının oluştuğu, ancak $CuZn_5$ fazının sadece Sn-9Zn-0,9Cu alaşımında oluştuğu görülmüştür. Tüm alaşımlarda oksitlerin oluştuğu da belirlenmiştir.
- Sn-xZn alaşımları sertlik değerlerine bakıldığında, en yüksek sertlik değerinin Sn-9Zn ötektik alaşımında ölçüldüğü görülmüştür. Ötektik altı Sn-7Zn ve ötektik üstü Sn-11Zn alaşımlarının sertlik değerleri birbirine yakın ölçülmüştür.
- Sn-9Zn-xCu alaşımlarında Cu ilavesi arttıkça sertlik değerinin de arttığı belirlenmiştir. Ancak sertlik değeri en yüksek olan Sn-9Zn-0,9Cu alaşımının sertlik değeri bile Sn-9Zn ötektik alaşımının değerine ulaşamadığı belirlenmiştir.

- Sn-9Zn-xAl alaşımlarında, Al miktarının artmasıyla sertlik değerlerinin arttığı tespit edilmiştir. Al ilave edilen alaşımların tümünün sertlik değerleri, Sn-9Zn tektik alaşımından yüksek olduğu belirlenmiştir.
- Sn-xZn alaşımlarının çekme testi sonuçlarında, en yüksek çekme mukavemeti Sn-9Zn tektik alaşımından elde edilmiştir. Sn-7Zn ve Sn-11Zn'nin en yüksek çekme mukavemeti birbirine yakın ölçülmüştür.
- Sn-9Zn-xCu alaşımlarından elde edilen değerlere bakılarak, Cu ilaveli alaşımlarda en yüksek çekme mukavemeti Sn-9Zn-0,9Cu alaşımında tespit edilmiştir. Ancak Cu ilave edilen alaşımların hiç biri, Sn-9Zn tektik alaşımının en yüksek çekme mukavemetine ulaşılamamıştır.
- Çekme sonuçlarından elde edilen grafikler incelendiğinde, Sn-9Zn tektik alaşımına Al ilavesi ile en yüksek çekme dayanımının arttığı grlmştr. Al miktarı arttıa, % uzama miktarında azalma belirlenmiştir.
- Tüm numunelerin kırık yüzey SEM görüntülerinde oksit oluşumlarına rastlanmıştır. Çatlak oluşumu başlangıcının bu noktalardan başladığı düşünülmüştür. Numunelerin topografına bakılarak, tüm alaşımlarda sünek kırılma meydana geldiği tespit edilmiştir.
- Weibull istatistiksel analiz sonuçları incelendiğinde Sn-xZn alaşımlarında, Sn-9Zn alaşımının daha güvenilir olduğu belirlenmiştir.
- Sn-9Zn-xCu alaşımlarının Weibull istatistiksel analiz sonuçlarından Sn-9Zn-0,7Cu'nun en güvenilir olduğu tespit edilmiştir.
- Sn-9Zn-xAl alaşımlarının Weibull istatistiksel analizi sonucunda, Al miktarı arttıa alaşımın güvenilirliğinin azaldığı grlmştr.
- Yoğunluk lmleri sonucunda Sn-xZn alaşımlarında Zn miktarı arttıa alaşımların yoğunluğunun azaldığı, Sn-9Zn-xCu alaşımlarında Cu miktarı arttıa alaşımların yoğunluğunun arttığı ve Sn-9Zn-xAl alaşımlarında Al miktarı artmasıyla alaşımların yoğunluğunun düştüğü belirlenmiştir.
- Sn-xZn alaşımların aşınma testleri sonucunda en az ağırlık kaybının Sn-9Zn tektik alaşımında, en yüksek ağırlık kaybının ise Sn-11Zn alaşımında ve Sn-7Zn alaşımının ağırlık kaybı değerinin de bu iki alaşım arasında olduğu bulunmuştur.

- Sn-9Zn-xCu alaşımlarının aşınma testlerinden elde edilen verilere bakılarak, Cu ilavesi arttıka aşınma kayıplarının azaldığı ancak, Sn-9Zn alaşımından daha fazla aşınma kaybının olduğu görölmüştür. Sn-9Zn alaşımına %0,9 Cu ilave edildiğinde ağırlık kaybının en az olduğu, %0,5 Cu ilave edildiğinde ise aşınma kaybının en yüksek olduğu, %0,7 Cu ilave edilen alaşımlarda ise ağırlık kaybının bu iki alaşımın ağırlık kaybı arasında olduğu tespit edilmiştir.
- Sn-9Zn-xAl alaşımları aşınma testi sonuçlarına bakılarak, Sn-9Zn alaşımına Al ilavesi ile ağırlık kayıplarının azaldığı görölmüştür. Alaşımların ağırlık kaybı grafiklerinde göröldüğü üzere, en belirgin ağırlık kaybı düşüşü %0,9 Al ilavesi ile elde edilmiştir. %0,5 ve 0,7 Al ilave edilen alaşımların ağırlık kayıplarının birbirine yakın olduğu görölmüştür.
- Sn-7Zn, Sn-9Zn ve Sn-11Zn alaşımlarına ait 10 N yük altında sürtünme katsayıları incelendiğinde, sürtünme katsayıları sırasıyla en yüksekten en küçüğe doğru Sn-9Zn, Sn-11Zn ve Sn-7Zn olarak kaydedilmiştir.
- Sn-9Zn, Sn-9Zn-0,5Cu, Sn-9Zn-0,7Cu ve Sn-9Zn-0,9Cu alaşımlarına ait 10 N yük altında sürtünme katsayıları incelendiğinde, sürtünme katsayıları sırasıyla en yüksekten en küçüğe doğru Sn-9Zn, Sn-9Zn-0,7Cu, Sn-9Zn-0,9Cu ve Sn-9Zn-0,5Cu olarak görölmüştür.
- Sn-7Zn, Sn-9Zn ve Sn-11Zn alaşımlarına ait 10 N yük altında sürtünme katsayıları incelendiğinde, sürtünme katsayıları sırasıyla en yüksekten en küçüğe doğru Sn-9Zn, Sn-11Zn ve Sn-7Zn olarak kaydedilmiştir.
- Aşınma yüzeyi SEM görüntülerine bakılarak, tüm numunelerin belirli bölgelerinde adhesiv aşınma olduğu görölmüştür. Malzemenin yumuşak olmasından kaynaklanan sıvanmaların olduğu da belirlenmiştir.

Daha sonra yapılacak çalışmalar için öneriler;

- Aşınma deneyleri farklı yükler altında yapılabilir.
- Sn-9Zn ötektik alaşımına ilave edilen Al ve Cu miktarları değiştirilebilir.
- Numunelerin üretimi atmosfer kontrollü ortamda yapılabilir.

KAYNAKLAR

1. Gain, A. K., Chan, Y. C., Sharif, A., Wong, N. B. and Yung, W. K. C., “Interfacial microstructure and shear strength of Ag nano particle doped Sn–9Zn solder in ball grid array packages”, *Microelectronics Reliability*, 49: 746-753 (2009).
2. Das, S. K., Sharif, A., Chan, Y. C., Wong, N. B. and Yung W. K. C., “Influence of small amount of Al and Cu on microstructure, microhardness and tensile properties of Sn-9Zn binary eutectic solder alloy”, *Journal of Alloys and Compounds*, 481: 167-172 (2009).
3. Billah, Md. M., Alam, T., Hossain, M. A., Sharif, A. and Islam, S. M. K. N., “Effect of Al Addition on the thermal and mechanical behavior of Sn-9Zn eutectic Pb-Free solder alloy” *Proceedings of the International Conference on Mechanical Engineering*, Dhaka, Bangladesh, AM-016 (2011).
4. Abtewa, M. and Selvadurayb, G., “Lead-free solders in microelectronics”, *Materials Science and Engineering*, 27: 95-141 (2000).
5. Aran, A., “Metal Döküm Teknolojisi”, *İstanbul Teknik Üniversitesi Yayınları*, İstanbul, 21-47 (1989).
6. Tiryakioğlu, U. ve Silisan, A., “Hassas döküm metodu ve kullanım alanları”, *İSO VİZYON Toplantıları*, İstanbul, 1-9 (2009).
7. İnternet: MEGEP, “Kuyumculuk Teknolojisi-Alçı Kalıp Modülü”, http://hbogm.meb.gov.tr/modulerprogramlar/kursprogramlari/kuyumculuk/moduller/alci_kalip.pdf (2006).
8. İnternet: Castaldo, “RRTV Rubber Physical Proberties”, http://www.castaldo.com/pdf_techs/RTV_Rubber_Tech_Sheet.pdf (2014).
9. İnternet: MEGEP, “Makine Teknolojisi – Hassas Döküm Modellemeleri 2”, http://hbogm.meb.gov.tr/modulerprogramlar/kursprogramlari/makine_tek/moduller/hassas_dokum_modelleri2.pdf (2006).
10. Horton, P. J., “Inverstment powders and casting”, *Gold Technology*, 28: 12-17 (2000).
11. Işıtman, O. ve Işıkcı, C., “Alçı kalıp problemlerinin çözümü ve maksimum verimlilikte kalıp üretimi”, Seramik Teknik Kongresi Bildiriler Kitabı II, *Kimya Mühendisleri Odası Yayınları*, İstanbul, 289-306 (1985).

12. Yaman, B., “Demir dışı alaşımların dereceli hassas dökümünde kullanılan kalıp malzemeleri”, Yüksek Lisans Tezi, *YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul (2002).
13. İnternet: SRS Setting The Standart, “Technical Centre”, http://www.srs-ltd.co.uk/technical/technical_centre.html (2014).
14. Manko H. H., “Solder and Soldering 2nd Edition”, *McGraw-Hill*, New York, (1979).
15. Wood, E. P. and Nimmo, K. L., “In search of new lead-free electronic solders”, *J. Electron Mater*, 23 (8): 709-713 (1994).
16. Monsalve, E. R., “Lead ingestion hazard in hand soldering environments”, *Proceedings of the 8th Annual Soldering Technology and Product Assurance Seminar*, Naval Weapons Center, China Lake, CA (1984).
17. Napp, D., “Lead-free interconnect materials for the electronics industry”, *Proceedings of the 27th International SAMPE Technical Conference*, Albuquerque, NM, 9-12 October, 342 (1995).
18. Allenby, B. R., Ciccarella, J. P., Artaki, I., Fisher, R. J., Schoenthaler, 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. and Socolowski, N., “An assessment of the use of lead in electronics assembly”, *Circuit World*, 19 (2): 1-28 (1993).
19. Nriagu, J. O. and Pacyna, J. M., “Quantitative assessment of worldwide contamination of air, water and soils by trace metals”, *Nature*, 333 (6169): 134-139 (1988).
20. Environmental Protection Agency, “National Air Quality and Emission Trend Report”, *EPA-450 Research Triangle Park*, NC, US, 4-91-003 (1989).
21. Jin, S., Frear, D. R., Morris J. W. and Foreword, Jr., “In search of new lead-free electronic solders”, *J. Electron. Mater*, 23 (8): 709-713 (1994).
22. ASM International, “Electronic Material Handbook, Vol. 1”, *Materials Park*, OH, 965-966 (1989).
23. Özkan, A., “Plazma polimerizasyon tekniği ile farklı yüzey kararlılığı oluşturulan tip 4 titanyum implant materyaline 2 farklı yüzey enerjisine sahip oral streptokokların in vitro adezyonunun incelenmesi”, Doktora Tezi, *Başkent Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 13 (2011).
24. Glazer, J., “Metallurgy of low temperature Pb-free solders for electronic assembly”, *Int. Mater. Rev*, 40 (2): 65-93 (1995).

25. Hua, F. and Glazer, J., "Lead-free solders for electronic assembly, design and reliability of solders and solder interconnections", *Metals and Materials Society*, 65-74 (1997).
26. McCormack, M., Artaki, I., Jin, S., Jackson, A. M., Machusak, D. M., Kammlott, G. W. and Finley, D. W., "Wave soldering with a low melting point Bi-Sn alloy: effects of soldering temperatures and circuit board finishes", *J. Electron. Mater.*, 25 (7): 1128-1131 (1996).
27. Loomans, M. E., Vaynman, S. and Ghosh, G., "Fine Investigation of multi-component lead-free solders", *J. Electron. Mater.*, 23 (8): 741-746 (1994).
28. Seelig, K., "A study of lead-free solder alloys", *Circuits Assembly* 6 (10): 46-48 (1995).
29. Artaki, I., Finley, D. W., Jackson, A. M., Ray, U. and Vianco, P. T., "Wave soldering with lead-free solders, proceedings of the technical program on advanced electronics manufacturing technologies", *SMI Surface Mount International*, San Jose, CA, 495-510 (1995).
30. Lee, N. C., Slattery, J., Sovinsky, J., Artaki, I. and Vianco, P., "A novel lead-free solder replacement", *Circuits Assembly*, 6 (10): 36-44 (1995).
31. Jackson, A. M., Vianco, P. T. and Artaki, I., "Manufacturing feasibility of several lead-free solders for electronic assembly", *Proceedings of the 7th International SAMPE Electronics Conference*, 20-23 June, Parsippany, NJ, US, 381- 391 (1994).
32. McCormack, M. and Jin, S., "Progress in the design of new lead-free solder alloys", *JOM*, 45 (7): 36-40 (1993).
33. McCormack, M. and Jin S., "Improved mechanical properties in new, Pb-free solder alloys", *J. Electron. Mater.* 23 (8): 715-720 (1994).
34. Miller, C. M., Anderson, I. E. and Smith, J. F., "A viable tin-lead solder substitute: Sn-Ag-Cu", *J. Electron. Mater.*, 23 (7): 595-601 (1994).
35. Kwoka, M. A., and Foster, D., "A comparison of lead-free vs. eutectic solders", *Circuits Assembly*, 6 (10): 32-35 (1995).
36. Vianco, P. T., Hosking, F. M. and Rejent, J. A., "Wettability analysis of tin-based, lead-free solders, in: Proceedings of the technical program", *National Electronic Packaging and Production Conference*, Vol. 3, Cahner Exposition Group, Anaheim, CA, US, 1730-1738 (1992).
37. Knorr, D. B. and Felton, L. E., "Designing lead-free solder alloys for advanced electronics assembly", *Proceedings of the Design for Manufacturability Conference*, ASME N.Y., New York, US, 27-34 (1994).

38. McCormack, M., Jin, S., Chen, H. S. and Machusak, D.A., "New lead-free, Sn-Zn-In solder alloys", *J. Electron. Mater.* 23 (7): 687-690 (1994).
39. Glazer, J., "Metallurgy of low temperature Pb-free solders for electronic assembly", *Int. Mater. Rev.* 40 (2): 67 (1995).
40. Artaki, I. Jackson, A. M. and Vianco, P. T., "Evaluation of lead-free joints in electronic assemblies", *J. Electron. Mater.*, 23 (6): 757-764 (1994).
41. Glazer, J., "Microstructure and mechanical properties of Pb-free solder alloys for low cost electronic assembly", *J. Electron. Mater.*, 23 (8): 693-700 (1994).
42. ASM International, "Electronic Materials Handbook Vol. 1", *Materials Park*, OH, 58 (1989).
43. Abtew, M., "Corrosion of indium based solders induced by flux residue and ionic contamination", *Amdahl Corporation Technical Bulletin*, UK (1993).
44. Lloyd, J. R., Zhang, C., Tan, H. L., Shangguan, D., and Achari, A., "Measurements of thermal conductivity and specific heat of lead-free solder", *Proceedings of the IEEE/CPMT International Symposium on Electronic Manufacturing Technology*, Omiya, Japan, 252-262 (1995).
45. Lea, C., "A Scientific Guide to Surface Mount Technology", *Electrochemical Publications Ltd.*, GB-Port Erin, British Isles, 378-379 (1988).
46. Lewis, W.R., "Notes on Soldering", *Tin Research Institute*, Greenford, UK, 66 (1961).
47. Morris, J. W., Goldstein, Jr. J. L. F., and Mei, Z., "Microstructure and mechanical properties of Sn-In and Sn-Bi solders", *J. Electron. Mater.*, July 25-27 (1993).
48. Kabassis, H., Rutter, J.W. and Winegard, W. C., "Phase relationships in Bi-In-Sn alloy systems, Mater". *Sci. Technol.*, 2: 985-988 (1986).
49. Croker, M. N., Fidler, R. S. and Smith, R. W., "The characterization of eutectic structure", *Proc. R. Soc.*, London, Ser. A: 33515-17 (1973).
50. McCormack, M., Jin, S., Kammlott, G. W. and Chen, H. S., "New Pb-free solder alloy with superior mechanical properties", *Appl. Phys. Lett.*, 63 (1): 15-17 (1993).
51. McCormack, M., Jin, S. and Kammlott, G. W., "The design of new Pb-free solder alloys with improved properties", *IEEE*, 7803-2137-5/95 (1995).
52. Mei, Z. and Morris Jr. J. W., "Superplastic creep of low melting point solder joints", *J. Electron. Mater.*, 21 (4): 401- 407 (1992).

53. Islam, R. A., Chan, Y. C., Jillek, W. and Islam, S., “Comparative study of wetting behavior and mechanical properties (microhardness) of Sn–Zn and Sn–Pb solders”, *Microelectron J*, 37: 705–13 (2006).
54. Yu, S. P., Lin, H. J. and Hon, M. H., “Effects of process parameters on the soldering behavior of the eutectic Sn–Zn solder on Cu substrate”, *J Mater Sci-Mater*, 11:461–71 (2000).
55. Sukanuma, K. and Kim K. S., “Sn–Zn low temperature solder”. *J Mater Sci-Mater*, 18:121–7 (2007).
56. Chen, X., Li, M., Ren, X. X., Hu, A. M. and Mao, D. L., “Effect of small additions of alloying elements on the properties of Sn–Zn eutectic alloy”, *J Electron Mater*, 35:1734–9 (2006).
57. Wei, C., Liu, Y. C., Han, Y. J., Wan, J. B. and Yang, K., “Microstructures of eutectic Sn–Ag–Zn solder solidified with different cooling rates”, *J Alloys Compd*, 464:301–305 (2008).
58. Lin, K. L., Chen, K. I., Hsu, H. M. and Shi, C. L., “Improvement in the properties of Sn–Zn eutectic based Pb-free solder”, *Electron. Components and Technology Conference (IEEE)*, Kaohsiung County, Taiwan, 658–63 (2003).
59. Islam, R. A., Wu, B. Y., Alam, M. O., Chan, Y. C. and Jillek, W., “Investigations on microhardness of Sn-Zn based lead-free solder alloys as replacement of Sn-Pb solder”, *Journal of Alloys and Compounds*, 392: 149–158 (2005).
60. Leonardo R. Garcia, Wislei R. Osorio, Peixoto, C. and Garcia, A., “Mechanical properties of Sn-Zn lead-free solder alloys based on the microstructure array” *Materials Characterization - MATER CHARACTER*, 61 (2): 212-220. (2010).
61. Wei, X., Huang, H., Zhou, L., Zhang, M. and Liu, X., “On the advantages of using a hypoeutectic Sn-Zn as lead-free solder material” *Materials Letters - MATER LETT*, 61: 655-658 (2007).
62. Chen, K., Cheng, S. C., Wu, S. and Lin, K. L., “Effects of small additions of Ag, Al, and Ga on the structure and properties of the Sn-9Zn eutectic alloy”, *J. Alloy. Compd.*, 416 (1–2): 98–105 (2006).
63. El-Daly, A.A. and Hammad, A. E., “Effects of small addition of Ag and/or Cu on the microstructure and properties of Sn-9Zn lead-free solders” *Materials Science and Engineering: A*, 527: 5212–5219 (2010).
64. Kazi, S. Md., Islam N., Sharif, A. and Alam, T., “Interfacial microstructure, microhardness and tensile properties of Al micro-particle doped Sn-9Zn eutectic Pb-free solder alloy for microelectronics applications” *Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering*, 4: 35-39 (2012).

65. Fouzder, T., Gain, A. K., Chan, Y. C., Sharif, A. and Yung, K. C., "Effect of nano Al₂O₃ additions on the microstructure, hardness and shear strength of eutectic Sn-9Zn solder on Au/Ni metallized Cu pads", *Microelectronics Reliability*, 50: 2051-2058 (2010).

ÖZGEÇMİŞ

Bekir YAVUZER, 1988 yılında Kocaeli ilinde doğup, ilköğretim hayatını Şirintepe 7. Boru İlköğretim Okulu'nda (1994 - 2002) ve lise öğrenimini Kocaeli Sabancı Anadolu Meslek Lisesi Elektronik Bölümü'nde 2002 - 2006 yıllarında başarıyla tamamlamıştır. 2008 yılında, Karabük Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Metal Eğitim Bölümü Döküm Öğretmenliği'ni kazanmış ve 2009 yılında Componenta Döküm Ltd. Şti. Firması'nda 25 iş günü stajını başarıyla tamamladıktan sonra, lisans eğitimini Karabük Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Metal Eğitim Bölümü Döküm Öğretmenliği Programı'nda tamamlamıştır. Halen Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İmalat Mühendisliği Bölümü'nde yüksek lisans eğitimine devam etmektedir.

ADRES BİLGİLERİ

Adres: Hürriyet Mah. Kırkpınar Cad. No:26 Karamürsel/Kocaeli
Tel: (507) 408 88 99
E-posta: iletisim@bekiryavuzer.com.tr