

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**KATKI ELEMENTLERİNİN LEHİM ALAŞIMLARINDA
MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN
ARAŞTIRILMASI**

Yusuf DONAT

Doktora Tezi

METALÜRJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Teknolojileri

Malzeme Bilim Dalı

HAZİRAN 2023

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı
Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Teknolojileri

Doktora Tezi

KATKI ELEMENTLERİNİN LEHİM ALAŞIMLARINDA MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

Tez Yazarı
Yusuf DONAT

Danışman
Prof. Dr. Halis ÇELİK

HAZİRAN 2023
ELAZIĞ

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı
Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Teknolojileri

Doktora Tezi

Başlığı:	Katkı Elementlerinin Lehim Alaşımlarında Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerine Etkisinin Araştırılması
Yazarı:	Yusuf DONAT
İlk Teslim Tarihi:	29.12.2022
Savunma Tarihi:	20.06.2023

TEZ ONAYI

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına göre hazırlanan bu tez aşağıda imzaları bulunan jüri üyeleri tarafından değerlendirilmiş ve akademik dinleyicilere açık yapılan savunma sonucunda OYBİRLİĞİ ile kabul edilmiştir.

Danışman:	Prof. Dr. Halis ÇELİK Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi	<i>İmza</i> Onayladım
Başkan:	Doç. Dr. İlyas SOMUNKIRAN Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi	Onayladım
Üye:	Prof. Dr. Vedat Veli ÇAY Dicle Üniversitesi, Havacılık Yüksek Okulu	Onayladım
Üye:	Doç Dr. Tülay YILDIZ Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi	Onayladım
Üye:	Dr. Öğr. Üyesi Yakup SAY Munzur Üniversitesi, Tunceli MYO	Onayladım

Bu tez, Enstitü Yönetim Kurulunun/...../20..... tarihli toplantısında tescillenmiştir.

İmza

Prof. Dr. Burhan ERGEN
Enstitü Müdürü

BEYAN

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım “ Katkı Elementlerinin Lehim Alaşımlarında Mikroyapı Ve Mekanik Özelliklerine Etkisinin Araştırılması ” Başlıklı Doktora Tezimin içindeki bütün bilgilerin doğru olduğunu, bilgilerin üretilmesi ve sunulmasında bilimsel etik kurallarına uygun davrandığımı, kullandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi, maddi ve manevi desteği olan tüm kurum/kuruluş ve kişileri belirttiğimi, burada sunduğum veri ve bilgileri unvan almak amacıyla daha önce hiçbir şekilde kullanmadığımı beyan ederim.

20.06.2023

Yusuf DONAT



ÖNSÖZ

Yürütülen bu doktora tez çalışmasında sanayide oldukça sık kullanılan sert lehim ilave metalinin elde edilmesinde kullanılan alaşım elementlerinin etkilerinin incelenmesi ve içlerinden maliyeti yüksek olan gümüş miktarının azaltılarak yerine indiyum elementinin eklenmesiyle sert lehim ilave metalindeki metalürjik etkileri araştırılmıştır. Gümüş içerikli sert lehim ilave metallerinde ki gümüş, metalürjik olarak olumlu etkiler göstermesine karşın her geçen gün artan maliyeti nedeniyle ilave metal kullanımında sanayici için ekonomik açıdan sıkıntı oluşturmaktadır. Sert lehim ilave metalinde kullanılan gümüşün alternatifi olacak yeni elementlerin değerlendirilmesi hem sanayiciler hem de bilimsel anlamda önem arz etmektedir. Bu alanda yürütülecek olan bilimsel çalışmanın sonucunda katma değeri yüksek ürünlerin oluşturulması ülkemizde yürütülen bilimsel çalışmaların elle tutulur hale gelmesinde bir örnek teşkil edeceği düşünülmektedir. Sert lehim ilave metallerinin içreğindeki alaşım elementlerinin ideal oranlarda alaşımlandırılması için indüksiyon ocağında yaklaşık 1000 C° gibi yüksek sıcaklıklarda çalışılması oldukça dikkat edilmesi gereken bir durumdur. Tehlikeli ve oldukça hassas bir çalışma gerektiren bu çalışmada sahip olduğu bilgi ve imkânları esirgmeden kullanılmasına izin veren tez danışmanım Sn. Prof. Dr. Halis Çelik Hocama teşekkürü borç bilirim. Tezin tamamlanması için gerekli testlerin (numune parlatma, optik inceleme, çekme testi, SEM) gerçekleşmesinde altyapı imkânlarından yararlandığım Fırat Üniversitesi'ne teşekkür ederim. Ayrıca tezin hazırlanmasında özverili yardımlarından dolayı mesai arkadaşım Arş. Gör. Emrah Çelik'e, resmi evrakların işlenmesinde yardımlarından dolayı Öğrenci İşlerinde görevli Halil İnce'ye, tezin son halinin hazırlanmasında katkılarından dolayı Melih Yardımcı'ya ve tüm bu süreçte yordüğüm Fen Bilimleri Enstitüsünün tüm çalışanlarına sonsuz şükranlarımı sunuyorum.

Doktora tezimi, tüm sıkıntılı ve zor günlerimde yanımda olan anneme, babama ve eşime ithaf ediyorum.

Yusuf DONAT
ELAZIĞ, 2023

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	iv
İÇİNDEKİLER	v
ÖZET	vii
ABSTRACT	viii
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
TABLolar LİSTESİ	xii
EKLER LİSTESİ	xiii
SİMGELER	xiv
1. GİRİŞ	1
2. LEHİMLEME VE ALAŞIMLARI.....	2
2.1. Yumuşak Lehim- Sert Lehim	2
2.2. Sert Lehimleme işlemi.....	3
2.3. Sert lehimde kullanılan alaşımlar	5
2.3.1. Gümüş ilaveli sert lehim teli	7
2.3.2. Bakır ilaveli sert lehim teli	7
2.4. Lehimleme işlemi etkileyen etkenler.....	8
2.5. Lehim bağlantı aralığı.....	8
2.6. Oksi-Gaz Alevi ile Sert Lehimleme	10
2.7. İndiyum ve özellikleri.....	11
2.8. Alaşım elementlerinin maliyet hesapları	12
2.9. Termal Analiz.....	14
2.10. Literatür incelemeleri	19
3. MATERYAL VE METOD	24
3.1. Malzeme Seçimi ve Yöntem.....	24
3.2. Alaşımlama işlemi	24
3.3. İmalat Maliyetlerinin Hesaplanması.....	28
3.4. Sert Lehimleme İşlemi.....	29
3.5. Metalografik İşlemler	30
3.6. Bindirmeli Kesme Testi.....	31
3.7. Mikrosertlik Ölçümü	32
3.8. Kullanılan Cihaz ve Ekipmanlar.....	33
4. BULGULAR	34
4.1. Mikroyapı İncelemeleri	34
4.2. Termal Analiz (TGA-DTA).....	41
4.3. XRD Analizi	46
4.4. SEM-EDS Analizi	47
4.5. Mikrosertlik Ölçüm Sonuçları	68
4.6. Bindirmeli Kesme Testi Sonuçları.....	70
5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	82
ÖNERİLER	85
KAYNAKLAR.....	86

EKLER	88
ÖZGEÇMİŞ	



ÖZET

Katkı Elementlerinin Lehim Alaşımlarında Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerine Etkisinin Araştırılması

Yusuf DONAT

Doktora Tezi

FIRAT ÜNİVERSİTESİ

Fen Bilimleri Enstitüsü

Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Teknolojileri

Haziran 2023, Sayfa: xv + 87

Bu doktora tez çalışması, sanayide yaygın olarak kullanılan sert lehim ilave metalinin elde edilmesinde kullanılan alaşım elementlerinin etkilerinin araştırılmasını ve maliyeti yüksek olan gümüş miktarının azaltılması için indiyum elementinin kullanımının metalürjik etkilerinin incelenmesini içermektedir. Gümüş içerikli sert lehim ilave metallerinde kullanımı giderek artan maliyeti nedeniyle ekonomik açıdan zorluklar yaratmaktadır. Bu nedenle, sert lehim ilave metalinde gümüş yerine indiyum elementinin kullanılması, hem sanayiciler hem de bilim camiası açısından önemli bir gelişme olacaktır. Bu tez çalışması, sert lehim ilave metalinin maliyetini düşürmek için indiyum elementinin potansiyelini araştırmaktadır. Yürütülen bu çalışmada %45 Cu, %35 Zn, %20 Ag içerikli lehim ilave metali referans alınarak içeriğindeki gümüş miktarı %0'a düşüncüye kadar kademeli olarak azaltılarak azalan oranda %In ilave edilmiştir. %Cu ve %Zn miktarları değişmeksizin sadece %Ag düşürülürken %In miktarı artırılmıştır. Lehim ilave metallerinin imalatı atmosferik ortamda önceden belirlenen alaşımların ağırlıkları hesaplanarak indüksiyon ocağında eritilerek gerçekleştirilmiştir. Elde edilen 9 farklı numune St37 çeliğinin lehimlenmesi işleminde kullanılmıştır. Ardından mikroyapı incelemeleri, termografik incelemeler, SEM, EDS, XRD testleri, mikrosertlik ölçümü ve bindirme kaymak testi gerçekleştirilmiştir. Yapılan testler ve incelemeler neticesinde gümüş miktarında %10 azalmasına karşın %10 indiyum ilavesinin referans numune olan indiyumsuz ve %20 Gümüş içerikli sert lehim malzemesi ile benzer kesme dayanımı gösterdiği sonucuna ulaşılmıştır. Bu sonuç ile önemli ölçüde gümüş maliyetinin indiyum ile azaltılmasının mümkün olduğu ortaya çıkmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Sert lehim, Gümüş, İndiyum

ABSTRACT

Investigation of the Effect of Additive Elements on Microstructure and Mechanical Properties of Solder Alloys

Yusuf DONAT

Ph.D. Thesis

FIRAT UNIVERSITY

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Metallurgical and Materials Engineering

Metallurgical and Materials Engineering Technologies

June 2023, Pages: xv + 87

This doctoral thesis study includes the investigation of the effects of alloying elements used in the production of the brazing additive metal, which is widely used in the industry, and the metallurgical effects of the use of indium element to reduce the amount of silver, which is costly. The use of silver-containing brazing additive metals creates economic difficulties due to its increasing cost. For this reason, the use of indium instead of silver in the brazing additive metal will be an important development for both the industrialists and the scientific community. This thesis study explores the potential of indium element to reduce the cost of brazing additive metal. In this study, with reference to the solder filler metal containing 45% Cu, 35% Zn, 20% Ag, the amount of silver in its content was reduced gradually until it was reduced to 0%, and %In was added at a decreasing rate. While the %Cu and %Zn amounts have not changed, only %Ag has been decreased, while the %In amount has been increased. The production of solder metals was carried out by calculating the weights of the alloying elements determined in the atmospheric environment and melting them in the induction furnace. The obtained 9 different samples were used in brazing of St37 steel. Then, microstructure investigations, thermoanalysis examinations, SEM, EDS, XRD tests, microhardness measurement and single point overlap slider test were performed. As a result of the tests and examinations, it was concluded that although the amount of silver decreased by 10%, 10% indium addition showed similar breaking strength with the reference sample, indium-free and 20% silver-containing brazing material. This result shows that it is possible to significantly reduce the cost of silver with indium.

Keywords: Brazing, Silver, Indium

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1. Sert lehimde kullanılan ilave metal çeşitleri.....	6
Şekil 2.2. Sertlehim birleştirme tipleri.....	9
Şekil 2.3. İndiyum alaşımının 2022 yılına ait fiyat değişim grafiği [13].....	12
Şekil 2.4. Gümüş alaşımının 2022 yılına ait fiyat değişim grafiği [14].....	13
Şekil 2.5. Çinko alaşımının 2022 yılına ait fiyat değişim grafiği [15]	13
Şekil 2.6. Bakır alaşımının 2022 yılına ait fiyat değişim grafiği [16]	14
Şekil 2.7. DTA grafiğine ait bir görsel[18].....	15
Şekil 2.8. TG analiz grafiğine ait bir görsel[18]	16
Şekil 2.9. TG ve DTA grafiklerinin şematik gösterimleri	17
Şekil 2.10. TG analizinde karşılaşılan grafik örnekleri	18
Şekil 3.1. Sert lehim ilave metal imalatında kullanılan alaşım elementleri	25
Şekil 3.2. Uygulanan işlem basamaklarının kısa tarifi	26
Şekil 3.3. İndüksiyonla eritme ve alaşımlama işlemi	27
Şekil 3.4. İndüksiyonla eritme işlemi sonrası elde edilen numunelere ait görseller;.....	27
Şekil 3.5. İndiyum miktarı ile oluşan kâr dağılım grafiği.....	28
Şekil 3.6. Bindirmeli kesme test numunesi şematik gösterimi [9]	29
Şekil 3.7. St37 çeliğinin lehimlenmesi ile elde edilen numune örnekleri.....	30
Şekil 3.8. Kesilmiş, parlatılmış ve dağlanmış numuneler.....	31
Şekil 3.9. 5 mm kalınlığındaki St37 çeliği bindirmeli kesme testine tabi tutulurken	31
Şekil 3.10. 5 mm kalınlığındaki St37 çeliğine ait bindirmeli kesme test sonucu kesme anı	32
Şekil 3.11. Lehim bölgesinden alınan sertliklerin şematik gösterimi	32
Şekil 4.1. Cu-Ag denge diyagramı[29].....	34
Şekil 4.2. Cu-In Denge diyagramı[29]	35
Şekil 4.3. Ag-In Denge diyagramı[29]	35
Şekil 4.4. Cu-Zn-In üçlü denge diyagramı [30].....	36
Şekil 4.5. 1 Numaralı 20Ag-Cu-Zn numunesine ait mikroyapı görüntüsü	36
Şekil 4.6. 2 Numaralı 19Ag-Cu-Zn-1In numunesine ait mikroyapı görüntüsü	37
Şekil 4.7. 3 Numaralı 18Ag-Cu-Zn-2In numunesine ait mikroyapı görüntüsü	37
Şekil 4.8. 4 Numaralı 15Ag-Cu-Zn-5In numunesine ait mikroyapı görüntüsü	38
Şekil 4.9. 5 Numaralı 13Ag-Cu-Zn-7In numunesine ait mikroyapı görüntüsü	38
Şekil 4.10. 6 Numaralı 10Ag-Cu-Zn-10In numunesine ait mikroyapı görüntüsü	39

Şekil 4.11. 7 Numaralı 7Ag-Cu-Zn-13In numunesine ait mikroyapı görüntüsü	40
Şekil 4.12. 8 Numaralı 5Ag-Cu-Zn-15In numunesine ait mikroyapı görüntüsü	40
Şekil 4.13. 9 Numaralı Cu-Zn-20In numunesine ait mikroyapı görüntüsü	41
Şekil 4.14. 1,4,6,8 ve 9 numaralı numunelere ait TGA değerleri	41
Şekil 4.15. 1,4,6,8 ve 9 numaralı numunelere ait zamana bağlı termogravimetre analiz grafiği	42
Şekil 4.16. 1,4,6,8 ve 9 numaralı numunelere ait zamana bağlı yüksek oranlı %TGA değişim grafiği	43
Şekil 4.17. 1,4,6,8 ve 9 numaralı numunelere ait zamana bağlı düşük oranlı %TGA değişim grafiği	44
Şekil 4.18. 1,4,6,8 ve 9 numaralı numunelere ait DTA grafiği.....	45
Şekil 4.19. 1, 6 ve 9 numaralı numunelere ait XRD diyagramları.....	46
Şekil 4.20. 1 numaralı 20Ag-Cu-Zn alaşımlı numunenin SEM-EDS görüntüsü	47
Şekil 4.21. 1 numaralı 20Ag-Cu-Zn alaşımlı numunenin SEM-EDS görüntüsü	48
Şekil 4.22. 1 numaralı 20Ag-Cu-Zn alaşımlı numunenin SEM-EDS görüntüsü	49
Şekil 4.23. 2 numaralı 19Ag-Cu-Zn-1In alaşımlı numunenin SEM-EDS görüntüsü	50
Şekil 4.24. 2 numaralı 19Ag-Cu-Zn-1In alaşımlı numunenin SEM-EDS görüntüsü	50
Şekil 4.25. 2 numaralı 19Ag-Cu-Zn-1In alaşımlı numunenin SEM-EDS görüntüsü	51
Şekil 4.26. 3 numaralı 18Ag-Cu-Zn-2In alaşımlı numunenin SEM-EDS görüntüsü	52
Şekil 4.27. 3 numaralı 18Ag-Cu-Zn-2In alaşımlı numunenin SEM-EDS görüntüsü	52
Şekil 4.28. 3 numaralı 18Ag-Cu-Zn-2In alaşımlı numunenin SEM-EDS görüntüsü	53
Şekil 4.29. 4 numaralı 15Ag-Cu-Zn-5In alaşımlı numunenin SEM-EDS görüntüsü	54
Şekil 4.30. 4 numaralı 15Ag-Cu-Zn-5In alaşımlı numunenin SEM-EDS görüntüsü	54
Şekil 4.31. 4 numaralı 15Ag-Cu-Zn-5In alaşımlı numunenin SEM-EDS görüntüsü	55
Şekil 4.32. 5 numaralı 13Ag-Cu-Zn-7In alaşımlı numunenin SEM-EDS görüntüsü	56
Şekil 4.33. 5 numaralı 13Ag-Cu-Zn-7In alaşımlı numunenin SEM-EDS görüntüsü	56
Şekil 4.34. 5 numaralı 13Ag-Cu-Zn-7In alaşımlı numunenin SEM-EDS görüntüsü	57
Şekil 4.35. 5 numaralı 13Ag-Cu-Zn-7In alaşımlı numunenin SEM-EDS görüntüsü	58
Şekil 4.36. 6 numaralı 15Ag-Cu-Zn-5In alaşımlı numunenin SEM-EDS görüntüsü	59
Şekil 4.37. 6 numaralı 15Ag-Cu-Zn-5In alaşımlı numunenin SEM-EDS görüntüsü	59
Şekil 4.38. 6 numaralı 15Ag-Cu-Zn-5In alaşımlı numunenin SEM-EDS görüntüsü	60
Şekil 4.39. 7 numaralı 7Ag-Cu-Zn-13In alaşımlı numunenin SEM-EDS görüntüsü	61
Şekil 4.40. 7 numaralı 7Ag-Cu-Zn-13In alaşımlı numunenin SEM-EDS görüntüsü	61
Şekil 4.41. 7 numaralı 7Ag-Cu-Zn-13In alaşımlı numunenin SEM-EDS görüntüsü	62
Şekil 4.42. 8 numaralı 5Ag-Cu-Zn-15In alaşımlı numunenin SEM-EDS görüntüsü	63
Şekil 4.43. 8 numaralı 5Ag-Cu-Zn-15In alaşımlı numunenin SEM-EDS görüntüsü	63
Şekil 4.44. 8 numaralı 5Ag-Cu-Zn-15In alaşımlı numunenin SEM-EDS görüntüsü	64

Şekil 4.45. 9 numaralı Cu-Zn-20In alaşımlı numunenin SEM-EDS görüntüsü	65
Şekil 4.46. 9 numaralı Cu-Zn-20In alaşımlı numunenin SEM-EDS görüntüsü	65
Şekil 4.47. 9 numaralı Cu-Zn-20In alaşımlı numunenin SEM-EDS görüntüsü	66
Şekil 4.48. 9 numaralı Cu-Zn-20In alaşımlı numunenin SEM-EDS görüntüsü	67
Şekil 4.49. Lehim bölgesinden alınan sertliklerin dağılım grafiği.....	68
Şekil 4.50. 1 numaralı 20Ag-Cu-Zn numunesine ait bindirmeli kesme diyagramı	70
Şekil 4.51. 2 numaralı 19Ag-Cu-Zn-1In numunesine ait bindirmeli kesme diyagramı.....	70
Şekil 4.52. 3 numaralı 19Ag-Cu-Zn-2In numunesine ait bindirmeli kesme diyagramı.....	71
Şekil 4.53. 4 numaralı 19Ag-Cu-Zn-5In numunesine ait bindirmeli kesme diyagramı.....	71
Şekil 4.54. 5 numaralı 19Ag-Cu-Zn-7In numunesine ait bindirmeli kesme diyagramı.....	72
Şekil 4.55. 6 numaralı 19Ag-Cu-Zn-10In numunesine ait bindirmeli kesme diyagramı.....	72
Şekil 4.56. 7 numaralı 19Ag-Cu-Zn-13In numunesine ait bindirmeli kesme diyagramı.....	73
Şekil 4.57. 8 numaralı 19Ag-Cu-Zn-15In numunesine ait bindirmeli kesme diyagramı.....	73
Şekil 4.58. 9 numaralı 19Ag-Cu-Zn-20In numunesine ait bindirmeli kesme diyagramı.....	74
Şekil 4.59. 1 numaralı 20Ag-Cu-Zn numunesine ait bindirmeli kesme diyagramı	74
Şekil 4.60. 2 numaralı 19Ag-Cu-Zn-20In numunesine ait bindirmeli kesme diyagramı.....	75
Şekil 4.61. 3 numaralı 18Ag-Cu-Zn-2In numunesine ait bindirmeli kesme diyagramı.....	75
Şekil 4.62. 4 numaralı 15Ag-Cu-Zn-5In numunesine ait bindirmeli kesme diyagramı.....	76
Şekil 4.63. 5 numaralı 13Ag-Cu-Zn-7In numunesine ait bindirmeli kesme diyagramı.....	76
Şekil 4.64. 6 numaralı 10Ag-Cu-Zn-10In numunesine ait bindirmeli kesme diyagramı.....	77
Şekil 4.65. 7 numaralı 7Ag-Cu-Zn-13In numunesine ait bindirmeli kesme diyagramı.....	77
Şekil 4.66. 8 numaralı 5Ag-Cu-Zn-15In numunesine ait bindirmeli kesme diyagramı.....	78
Şekil 4.67. 9 numaralı Ag-Cu-Zn-20In numunesine ait bindirmeli kesme diyagramı.....	78
Şekil 4.68. Lehimlenen St37 çelik numunelerine ait bindirmeli kesme test sonuçları	79
Şekil 4.69. Kayma ve çekme gerilmesinin hesaplandığı test numunesinin şematik gösterimi	80
Şekil 4.70. Kayma ve çekme gerilmelerinin numunelere göre dağılımı.....	81

TABLÖLER LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 2.1. Kullanılan elementlerin Mayıs 2023' ait kg fiyatları	14
Tablo 2.2. Merkez Bankası verilerine göre Amerikan Doları alış-satış fiyatları.....	14
Tablo 3.1. Kullanılan alaşım elementlerine ait erime sıcaklığı ve sertlik dağılımları	24
Tablo 3.2. Elde edilen sert lehim ilave metallerine ait içerik oranları.....	25
Tablo 3.3. Alaşım elementlerinin 1 kg numuneye göre fiyat dağılım Tablosu	28
Tablo 4.1. Lehim bölgesinden alınan sertliklerin dağılım tablosu	68
Tablo 4.2. Ortalaması alınan bindirmeli kesme testine ait kayma gerilmesi ve çekme gerilmesi	80

EKLER LİSTESİ

	Sayfa
Ek-1: 1 Numaralı Numuneye Ait Termal Analiz Çıktısı.....	88
Ek-2: 4 Numaralı Numuneye Ait Termal Analiz Çıktısı.....	88
Ek-3: 6 Numaralı Numuneye Ait Termal Analiz Çıktısı.....	89
Ek-4: 8 Numaralı Numuneye Ait Termal Analiz Çıktısı.....	89
Ek-5: 9 Numaralı Numuneye Ait Termal Analiz Çıktısı.....	90



SİMGELER

%	: Yüzde
Al ₂ O ₃	: Alüminyum Oksit
Cr ₂ O ₃	: Krom Oksit
Fe ₂ O ₃	: Demir Oksit
°	: Derece
Ag	: Gümüş
Ag ₂ In	: Gümüş(II)İndiyum
Al	: Alüminyum
Au	: Altın
Bi	: Bizmut
C	: Karbon
CaO	: Kalsiyum Oksit
cBN	: Kübik Bor Nitrür
Cr	: Krom
Cu	: Bakır
CuAg	: Bakır-Gümüş
Cu ₉ In ₄	: Bakır-İndiyum
CuZn	: Bakır-Çinko
CuO	: Bakır Oksit
FeS	: Demir Sülfür
H ₂ SO ₄	: Sülfürik Asit
HCl	: Hidroklorik Asit
HfO ₂	: Hafniyum Oksit
In:	: İndiyum
L	: Uzunluk
MgO	: Magnezyum Oksit
mm	: Milimetre
Mn	: Mangan
Mo	: Molibden
MPa	: Megapaskal
Ni	: Nikel
NiO	: Nikel Oksit
nm	: Nanometre
P	: Fosfor
PbO	: Kurşun Oksit
Pd	: Paladyum
R	: Redüksiyon oranı (%)
S	: Kükürt
SiO ₂	: Silisyum Dioksit
Si	: Silisyum
SrO	: Stronsiyum
T	: Kalınlık
TiO ₂	: Titanyum Dioksit
TiB	: Titanyum borür
TiB ₂	: Titanyum Diborür
TiN	: Titanyum Nitrür

V	: Vanadyum
V1	: Giriş blok hızı (m/s)
V2	: Çıkış blok hızı (m/s)
W	: Genişlik
WC-Co	: Tungsten Karbür
Zn	: Çinko
ZnO	: Çinko Oksit
μ	: Mikron
μV	: Mikrovolt



1. GİRİŞ

Gümüş sert lehim dolgu metalleri, bakır, yumuşak çelik, paslanmaz çelik ve diğer alaşımların birleştirilmesinde yaygın olarak kullanılan dolgu malzemeleridir. Bu dolgu metalleri yüksek mukavemet, termal iletkenlik, elektrik iletkenliği, oksidasyon direnci ve uygun erime noktası gibi özelliklere sahiptir [1,2]. Gümüş içeriği %20-45 olan dolgu metalleri, Cd içeriğiyle beraber östenitik paslanmaz çelik ve bakırın yüksek hassasiyetli bağlantılarında sert lehimleme için sıkça tercih edilir. Ancak, sert lehimleme işlemi sırasında kadmiyum buharlarının toksik olması nedeniyle birçok ülkenin elektrikli ekipman endüstrisi, kadmiyum kullanımını kısıtlayan yönergeleri takip etmek zorundadır [3]. Ayrıca, gümüşün fiyatı uluslararası siyasi ve ekonomik durumdan ve makroekonomik politikalardan kolayca etkilenir. Bu da yüksek gümüş içeren sert lehim dolgu metallerinin fiyatının pahalı ve dalgalı olmasına neden olur. Bu nedenle, düşük gümüş içeren ve kadmiyum içermeyen sert lehim dolgu metallerinin geliştirilmesi ve pazar taleplerini karşılaması büyük bir ilgi görmektedir.

Düşük gümüş içeren kadmiyum içermeyen Ag-Cu-Zn alaşımları, Cd içeren dolgu metallerine kıyasla biraz daha yüksek erime noktası, geniş erime aralığı, zayıf ıslanabilirlik ve kaynaklanabilirlik gösterir [4]. Bu özellikler, havacılık, güç elektroniği ve ev aletleri gibi endüstrilerde düşük gümüş içeren kadmiyum içermeyen Ag-Cu-Zn sert lehim dolgu metallerinin kullanımını sınırlandırabilir. Ma tarafından yapılan çalışmalar, Ga ve Ce ilavesinin 17Ag-Cu-Zn dolgu metalinin termal ve mekanik özelliklerini optimize edebileceğini göstermiştir [5,6]. Ancak, 17Ag-Cu-Zn dolgu metalinin hala yüksek gümüş içeriği bulunmaktadır. Bununla birlikte, Ga'nın yüksek maliyeti, yeni sert lehim dolgu metallerinin daha yaygın kullanımını kısıtlar. İndiyum, Ga'ya kıyasla daha yaygın olarak üretilir ve fiyatı daha uygun olduğu için tercih edilebilir. . Bu çalışmanın amacı, In'un kimyasal özelliklerinin, gümüşlü kadmiyum içermeyen 20Ag-Cu-Zn dolgu metali referans alınarak Ag miktarının belirli oranlarda düşürülmesi ve yerine In ilave edilmesiyle imalat maliyetinin düşürülmesi ve lehimleme işlemi sonrasında lehimli bağlantıların çekme dayanımı ve mikroyapısal etkisinin araştırılmasıdır. Lehimlenecek malzeme olarak St37 çelik altlıklar kullanılmıştır.

2. LEHİMLEME VE ALAŞIMLARI

Lehim, iki veya daha fazla metal (veya seramik) parçanın birleştirilmesi için kullanılan bir kaynak yöntemidir. Bu yöntemde, parçaların arasındaki boşluğu doldurmak için ana malzemelerden daha düşük bir erime sıcaklığına sahip dolgu malzemesi kullanılır. Parçalar öncelikle birleştirme amacına bağlı olarak geçici olarak sabitlenir ve ardından seçilen dolgu malzemesi bu birleşim noktasına uygulanır. Dolgu malzemesinin erimesi için ana malzemelerin erime sıcaklığından daha düşük, dolgu malzemesinin erime sıcaklığından ise daha yüksek bir sıcaklık uygulanır. Eriyen dolgu malzemesi, kılcal etkiyle birleşim noktasındaki boşluğu doldurarak sağlam bir birleşme oluşturur. Dolgu malzemesi, iki parça arasındaki boşluğu doldururken aynı zamanda iki malzemenin yüzeyine de nüfuz ederek güçlü bir kaynak sağlar. Kullanılacak dolgu malzemesi, parçaların geometrisine, uygulama amacına ve yöntemine bağlı olarak toz, çamur halinde bir bağlayıcıyla karıştırılmış, folyo, bant, tel gibi farklı formlarda kullanılabilir. [7]

2.1. Yumuşak Lehim- Sert Lehim

Lehim işlemi, lehimleme sıcaklığı ve lehimleme aralığına göre farklı türlerde yapılır. Ergime sıcaklığı 450°C'nin altında olan lehim alaşımlarıyla gerçekleştirilen birleştirme işlemine yumuşak lehimleme denir. Bununla birlikte, ergime sıcaklığı 450°C'nin üzerinde olan lehim alaşımlarıyla yapılan birleştirme işlemine ise sert lehimleme adı verilir. [7]

Lehimleme aralığına göre de iki farklı tür bulunmaktadır. Kapiler lehimleme, birleştirilecek parçalar arasındaki açıklık yaklaşık olarak 0,1 mm olduğunda kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemde, lehim alaşımı kapilarite etkisiyle parçalar arasına yayılır. Diğer bir tür olan lehim kaynağı ise V veya X şeklinde açılar oluşturularak parçalara lehim alaşımının doldurulduğu birleştirme işlemidir. [7]

Sert lehimleme ve yumuşak lehimleme, uygulanış açısından birbirlerine oldukça benzerdir. Ancak, bu iki yöntem arasındaki temel fark, sıcaklık değeridir. Amerikan Kaynak Derneği (AWS) tarafından belirlenen tanıma göre, ilave malzemenin ergime sıcaklığı 427 °C altında ise yöntem yumuşak lehimleme olarak adlandırılır, aksi takdirde sert lehimleme olarak adlandırılır.

Yumuşak lehimleme genellikle elektrik-elektronik gibi alanlarda kullanılır, çünkü birleştirilen yüzeyler arasındaki bağlantı kuvveti, makine imalatında gereken mukavemeti genellikle sağlayamaz. Lehim kaynağı ise sert lehimlemeden farklı bir uygulama yöntemine sahiptir. Sert lehimlemede, ilave metal, ana metaller arasındaki boşlukta kapilarite etkisiyle yayılırken, lehim kaynağında birleştirilecek parçalara V veya X şeklinde bir birleştirme ağzı hazırlanır ve bu ağzlar erimiş lehimle doldurulur. Lehim kaynağı, basit uygulamasına rağmen bazı

dezavantajlara sahiptir. Öncelikle, kullanılan ilave malzemenin niteliğine bağlı olarak sınırlı bir sıcaklık aralığında kullanılabilir ve belirli bir sıcaklık değerinin üzerinde dayanımı azalır. İkinci önemli dezavantaj, bazı kimyasal ortamların ilave malzeme üzerinde yıkıcı etkiler yaratabilmesidir. Ayrıca, lehim kaynağında iç boşlukların tespiti zor olabilir, renk uyumunda sorunlar ve ilave malzeme maliyeti gibi dezavantajlar da mevcuttur. [7]

Kaynak işlemi ise birleştirilecek bölgelerin eritilmesi ve bu bölgelerin katılaşmasıyla birleşmenin gerçekleştiği bir yöntemdir. Sert lehimleme işleminde ise ana metaller erimez, birleşme işlemi birleştirilecek parçaların yüzeyleri ile ilave metal arasında oluşan metalürjik bir bağ ile gerçekleşir.

2.2. Sert Lehimleme işlemi

Sert lehimleme, metalleri veya benzer malzemeleri birbirine bağlamak için kullanılan bir işlemdir. Bu işlemde, erime noktası 450°C 'nin üzerinde olan bir dolgu metal (lehim), benzer veya benzer olmayan metallerin birleştirilmesinde kullanılır. Lehimin düşük bir erime noktasına sahip olması, parçaların erimesini engellerken dolgu metalinin kolayca erimesini sağlar. Lehimleme işlemi sırasında, bağlanacak parçalar veya lehimleme bölgesi 450°C 'nin üzerine ısıtılır. Bu sıcaklık, dolgu metalinin erimesi için yeterlidir, ancak parçaların erimesini önler. Erimiş dolgu metalinin yüzey gerilimi etkisiyle ek yerine yapışır, taban metal yüzeylerini yayar ve ıslatarak bir araya getirir. Dolgu metalinin parçalara kılcal bağlanması, metalürjik reaksiyonlar ve atomik bağlar aracılığıyla gerçekleşir. Bu ıslatma işlemi, dolgu metalinin katı metal yüzeye yapışması ve güçlü bir bağ oluşturması sayesinde gerçekleşir. 90° 'den küçük bir açıyla ifade edilen ıslatma açısı, sıvının katı yüzeyi ıslatma kabiliyetini gösterir. Yani, sıvı dolgu metalinin katı metal yüzeyi ıslatması, adezyon kuvvetlerinin iç kohezyon kuvvetlerinden daha güçlü olduğunu gösterir [8].

Lehimleme işlemi, benzer veya benzer olmayan metallerin birleştirilmesinde yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Dolgu metalinin uygun seçimi ve ıslatma kabiliyeti, başarılı bir lehimleme bağlantısı elde etmek için önemlidir/ Lehimleme, çok bileşenli bağlantılar oluşturmak için kullanılabilen son derece karmaşık ve ekonomik bir süreçtir. Bu yöntem, geniş bir derz alanı veya derz uzunluğu olan derzleri mümkün kılar. Aynı zamanda eşit gerilim dağılımı ve etkili ısı transferi özellikleri sağlar. Lehimleme işlemi, farklı metal kalınlıklarına sahip metallerin birleştirilmesini sağlar. Bu yöntemle hem çok ince hem de çok kalın farklı metaller birbirine bağlanabilir. Bu, farklı kalınlıktaki malzemeleri birleştirirken önemli bir avantaj sağlar. Ayrıca lehimleme yöntemi tekrarlanabilir ve tekrarlanabilir kalite kontrol tekniklerinin uygulanabildiği bir süreçtir. Bu sayede stabil, homojen ve sıkı bağlantılar hızlı ve ucuz bir şekilde yapılabilir. Aynı anda birden fazla bağlantı yapılarak zamandan tasarruf sağlanır.

Lehimleme ile yapılan bağlantılar yüksek mukavemete sahip olabilir. Dolgu metalinin doğal bir dolgu geometrisine güçlendirilmesi, yorulma direnci için ideal bir yapı oluşturur. Sonuç olarak,

lehimleme işlemi çeşitli avantajlar sunar ve farklı malzemeleri birleştirmek için güvenilir bir yol olarak kullanılabilir. [8]

Mikroyapı heterojen olarak ifade edilir ve farklı kimyasal, fiziksel özellikleri barındıran fazlardan oluşmaktadır. Bazı metalin kısmi çözünmesi (difüzyon prosesleri yoluyla), bazı metal/dolgu metal ara yüzünün kimyasal ve fiziksel özelliklerini değiştirir. Bu değişikliğin bir sonucu olarak, karmaşık bir ara geçiş bölgesi veya tamamen farklı bir bölge oluşabilir. Lehimleme işlemi sırasında oluşan heterojen alan, parçanın homojen bölgelerinden kaynaklanan yükleri eşit olarak dağıtamaz ve bu da çatlamaya neden olabilir. Ek olarak, lehimleme sırasında ana malzemede kısmi çözünme ya da plastik şekil değişimi, deformasyon oluşabilir. İlave metali eritmek için ihtiyaç duyulan yüksek sıcaklıklar, tavsiye edilmeyen ısı işlemlere ya da önceden uygulanmış ısı işlemlerin etkilerinin giderilmesine neden olabilir. Ancak lehimleme işlemi sırasında elde edilen mekanik özellikler, kullanılan lehimleme sıcaklığı ile değişebilmektedir. Sonuç olarak, lehimleme işlemi mikro yapıda heterojen bir alan oluşturur ve bazı potansiyel zorluklar ortaya çıkarabilir. Bununla birlikte, uygun parametreler ve dikkatli tasarım ve işleme adımları ile istenen bağlantı noktalarına ve güçlü bağlantı noktalarına ulaşmak mümkündür. [8]

Lehimleme işlemine başarılı bir şekilde bağlantı sağlamak için dikkate alınması gereken ana parametreler şunlardır:

1. Bağlantı tasarımı: Bileşenlerin temas yüzeylerinin birbirine paralel ve kapiler çekime neden olacak kadar yakın olmasına dikkat edilmelidir. İyi bağlantı kalitesi ve dayanıklılık için tasarım önemlidir.

2. Lehimleme sıcaklığı ve süresi: Lehimleme sıcaklığı, seçilen ilave metalin erime noktasının üzerinde olmalıdır. Lehimin eriyip ek yerinde dağılması için sıcaklık ve sürenin doğru ayarlanması gerekir.

3. Pürüzsüz yüzey hazırlığı: Bileşenlerin birleştirme yüzeyleri temiz, oksitlerden arındırılmış ve pürüzsüz olmalıdır. Uygun yüzey temizliği ve hazırlığı, lehimin yüzeylere iyi yapışmasını sağlayacaktır.

4. Dolgu metalinin ve ana metalin akış özellikleri: Seçilen ana metal ve dolgu metalinin uyumlu olması önemlidir. Dolgu metalinin, birleştirme bölgesine iyi dağılabilmesi ve uygun akış özelliklerine sahip olması gerekmektedir. Dolgu metalinin düşük viskozitesi ve yeterli ıslatma kabiliyeti, homojen bir bağlantı elde etmek için önemlidir.

5. Ana metalin mukavemeti: Ana metalin mukavemeti, lehimli bağlantının mukavemeti üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Yüksek mukavemetli bir ana metal, daha güçlü bağlantılar sağlar. Bu nedenle, lehimleme işlemi için uygun bir ana metal seçimi önemlidir.

6. Termal genleşme katsayısı ve uyumsuzluk etkisi: Farklı malzemeleri birleştirirken, termal genleşme katsayıları arasındaki uyumsuzluk etkisi dikkate alınmalıdır. Malzemelerin sıcaklık değişimlerine bağlı olarak genleşme ve büzülme eğilimleri farklı olabilir. Bu durum, bağlantı

sıcaklığına yaklaşıldığında boşlukların açılıp kapanmasına neden olabilir. Bu uyumsuzluklar, bağlantının mekanik özelliklerini etkileyen kalıntı gerilmelerin oluşmasına yol açabilir. Bu etkiyi azaltmak için, uyumlu termal genişleme katsayılarına sahip malzemeler ve uygun lehimleme teknikleri kullanılmalıdır[8].

2.3. Sert lehimde kullanılan alaşımlar

Lehimleme için yaygın olarak kullanılan bazı ana metal malzemeler arasında bakır alaşımları, paslanmaz çelikler, dökme demir, nikel ve kobalt bazlı alaşımlar bulunur. Her malzeme için uygun lehimleme alaşımları ve lehimleme işlemleri gereklidir. Malzemelerin uygun seçimi, istenen eklem gücünü elde etmek ve bağlantının istenilen özelliklere sahip olmasını sağlamak için önemlidir.

Dolgu metalinin seçimi ve kullanımı lehimleme işlemi için önemlidir. Bazı önemli faktörler:

1. Tutarlı Akışkanlık: Sert-lehimin, sert-lehimleme sıcaklıklarında tutarlı bir akışkanlığa sahip olması önemlidir. Bu, ek malzemenin kılcal hareketle bağlantı bölgesine etkili bir şekilde yayılmasını sağlar.

2. Düşük buharlaşma: Erime sıcaklığı düşük olan elementlerin seçilen dolgu malzemesinde buharlaşmaması önemlidir. Sonuç olarak, dolgu metali bileşimini korur.

3. Islanabilirlik: Lehimleme alaşımı, ana metalin birleştirme yüzeyinde iyi bir ıslanabilirliğe sahip olmalıdır. Bu, dolgu metalinin yüzeye yapışmasını ve bağlantı kalitesinin iyileştirilmesini sağlar.

4. Element geçişi: Dolgu metalindeki alaşım elementleri, katı hal difüzyonu veya tane sınırı nüfuzu yoluyla ana metale geçebilir. Bu, dolgu metali ile ana metal arasındaki bağlantı noktasında homojen bir alaşım dağılımının sağlanmasına yardımcı olur.

5. Erozyon Kontrolü: Sert-lehimin ana metal üzerinde veya kontrol edilebilir sınırlar içinde aşınmaması önemlidir. Bu, bağlantının kalitesi ve dayanıklılığı için kritik öneme sahiptir.

Lehimleme alaşımları tel, folyo, toz, macun, bant ve levha gibi çeşitli fiziksel formlarda ve boyutlarda mevcuttur. Kullanım amacına ve uygulamaya bağlı olarak farklı şekiller tercih edilmektedir. Örneğin filmler, esnek olmaları, parçaları sarmaları ve yüzeylere daha iyi uymaları nedeniyle havacılıkta yaygın olarak kullanılmaktadır[9]. Şekil 2.1. de endüstride kullanılan farklı sert lehim alaşımlarını göstermektedir.



Şekil 2.1. Sert lehimde kullanılan ilave metal çeşitleri

Sert lehimin ana metal üzerinde aşındırıcı etkisinin olmaması önemlidir. Bu nedenle, ilave metali seçerken, kırılğan intermetalik fazların oluşmasını veya tane sınırlarının korozyona karşı hassaslaşmasını önlemek için özen gösterilmelidir.

Bağlantı için seçilen sert-lehim alaşımı, ana metalinkine benzer veya yakın dayanım ve süneklik özelliklerine sahip olmalıdır. Kaynak dolgu malzemesinin yapıştırma işlemine ve çalışma sıcaklıklarına dayanıklı olması da önemlidir. Katılaşma sırasında intermetalik bileşiklerin oluşumu veya büzülme gibi koşullar, tasarımda kaçınılması gereken stres konsantrasyonları yaratabilir. Ayrıca sert lehim alaşımları sağlık yönetmeliklerine uygun olmalıdır. Örneğin bazı dolgu metallerinde kullanılan kadmiyum gibi elementler toksik olabilir ve özel önlemler alınmasını gerektirir. [9]

Lehim dolgu metalini seçerken ilk kriter genellikle lehimleme sıcaklığıdır. Sert-lehim, ana metalin katılaşma sıcaklığının altında erime özelliklerine sahip olmalıdır. Genel olarak daha düşük lehimleme sıcaklıkları enerji tasarrufu sağladığı, ısıнын ana metal üzerindeki etkisini en aza indirdiği, ana metal ile dolgu metali arasındaki etkileşimleri en aza indirdiği ve donanım ömrünü uzattığı için tercih edilir. Bununla birlikte, bazen lehimleme sıcaklığının, ana metalin mukavemetini kaybettiği veya oksitlerin azaldığı bir sıcaklık aralığında olması gerekir. Sert lehimleme ile birlikte ana metale tavlama, gerilim giderme veya ısıl işlem uygulamak için yüksek lehimleme sıcaklıkları tercih edilebilir. [9]

Lehimli bağlantıların kalite kontrolü için tahribatsız muayene yöntemleri kullanılabilir. Çekme testi, alın bağlantıları için ASTM E8 standardına göre yapılır ve metallerin çekme testi için standart yöntemidir. Lehimli bağlantıların kayma mukavemetini belirlemek için çeşitli çalışmalarda tek bindirmeli bağlantılar kullanılmıştır. Lehimleme işleminin deneysel değişkenliği göz önüne alındığında, numunenin eksantrikliği genellikle kesme mukavemeti üzerinde daha az etkiye sahiptir. Bu nedenle, Peaslee tarafından açıklanan tek turlu test parçası, sert lehimli bağlantıların kayma mukavemetini ölçmek için standart test parçası olarak kabul edilir[9].

2.3.1. Gümüş ilaveli sert lehim teli

Gümüş (Ag), pahalı olması nedeni ile saf olarak dolgu malzemesi amacıyla nadiren tercih edilir. Ancak alaşımlanarak kullanımı oldukça yaygındır. Gümüş oranının yüksek olduğu ilave telin kullanılması ile bu işlem gümüş kaynağı olarak ifade edilmektedir. Gümüş alaşımlı sert lehim telleri oldukça geniş kullanım alanına sahiptir. Bu teller gümüş içeriği sebebiyle hem mekanik hem de kimyasal olarak çok iyi difüzyon sağlamaktadır. Dökme demirlerin, çeliklerin bakır alaşımlarının lehimlenmesinde kullanılır. Oldukça yüksek boşluk doldurma özelliğine sahiptir. Pirinç ve bronz malzemelerin yüzey kaplaması işlemlerinde tercih edilir. Oldukça iyi elektriksel iletkenliğe de sahip olması sebebiyle elektik alanında da sık tercih edilen ilave metaldir.

2.3.2. Bakır ilaveli sert lehim teli

Bakır (Cu), gümüşten oldukça ucuzdur ve uygulamalarda çok tercih edilen dolgu maddesi olarak kullanılır. Lehim işlem sıcaklığı gümüşten oldukça yüksektir. Özel bazı durumlar dışında bakır alaşımlanarak ek dolgu maddesi olması için kullanılır. Çeliğin yüzeyini oldukça iyi ısıtırılar, sıvıdırılar ve büyük boşlukları kolayca doldurabilirler. Alaşımlar, ek dolgunun özelliklerini geliştirmek için kullanıldığı yere bağlı olarak bakıra fosfor, nikel, gümüş ve çinko ilave edilerek yapılır. Oldukça uzun zamandan beri bilinen pirinç alaşımları genellikle lehimleme için kullanılmaktadır. 800°C ve daha fazla sıcaklıkta %40-60 erimiş çinko eklenerek pirinç doldurma. Bakıra fosfor eklenmesi erime sıcaklığını düşürür. Bu alaşımın özelliği, herhangi bir akı gerektirmemesidir. Katkılar, farklı ihtiyaçları karşılamak için farklı unsurlar eklenerek güçlendirilir. Bakır-çinko alaşımlı lehim teli; Katılma sıcaklıkları 950 °C'nin üzerinde olan çelik, sfero, bakır ve bakır alaşımlarının kılcal lehimleme, lehimleme ve yüzey kaplama işlemlerinde kullanılır. Galvanizli sac lehimleme, galvanizli çeliğe zarar vermeden lehimlemede mükemmeldir. Otomotiv sanayi havalandırma sistemlerinde, boru ve davlumbaz birleşimlerinde, dekorasyonda, metal mobilyalarda, hastane ekipman ve mobilyalarında, kumanda panolarında, otobüs kazanlarında, hidrolik pnömatik ekipmanlarda, tekstil makinelerinde kullanılmaktadır. Lehimli bakır-fosfor alaşımlı telin kılcal fenomeni iyidir. Bakırı bakırla birleştirmek için ideal lehim telidir.

Bu tel akı gerektirmemektedir. Pirinç ve bronz malzemelerin kılcal lehimlenmesi için uygundur. F-SH 2 tipi fluxlar bakır-çinko ve bakır-nikel-çinko alaşımlı lehim tellerinin kullanılmak istendiği kombinasyonlarda kullanılmaktadır. Bu fluxlar, lehimlemeden önce yüzeyini temizler ve lehimleme esnasında ekstra telin malzeme üzerine yayılmasını destek olur. Lehimlemeden sonra yüzeyde bir flux kalıntısı oluşur. Flux kalıntısı, kaynar su ile ovarak, parçayı sıcak suya daldırarak veya özel bir temizleme solüsyonu kullanarak mekanik olarak temizlenebilir.

2.4. Lehimleme işlemini etkileyen etkenler

Lehimleme işlemi için önemli hazırlık adımları şunlardır:

1. Malzeme Hazırlığı: Lehimleme işleminde kullanılacak parçalar doğru şekil, boyut ve toleranslarda olmalıdır. Parçalar kesilebilir ve şekillendirilebilir, delikler açılabilir veya başka işlemler uygulanabilir.

2. Temizleme: Lehimleme sırasında temiz bir yüzey önemlidir. Parçalardan gres, yağ, kir ve oksitlerin tamamen çıkarılması önemlidir. Bu temizleme işlemi özel temizleyiciler, ultrasonik temizleme veya asitli temizleme banyoları gibi yöntemlerle gerçekleştirilebilir.

3. Yüzey hazırlığı: Lehimlenecek parçaların yüzeyleri kumlama gibi yöntemlerle hazırlanabilir. Pürüzlü bir yüzey, lehim çubuğunu daha iyi hale getirebilir.

4. Fikstür tasarımı: Fikstürler, karmaşık montajlarda lehimleme için kullanılabilir. Armatürler, parçaların doğru konumda tutulmasını sağlar ve lehimleme işlemini kolaylaştırır. Daha basit montajlar için punta kaynağı gibi basit birleştirme yöntemleri kullanılabilir.

5. Flux kullanımı: Flux, oksit oluşumunu önlemek veya lehimlemeden önce oksit tabakasını temizlemek için kullanılabilir. Akılar, oksitleri önleyen veya çözen veya oksit tabakasının çıkarılmasını kolaylaştıran minerallerden oluşur. Flux'lar çalışma sıcaklığından önce eriyerek temizlenecek parçaların yüzeyinde oksit tabakası oluşturur ve işlem sırasında yeni oksit oluşumunu engeller[9].

Tüm bu ön adımlar, lehimleme işleminin sorunsuz ve güvenli bir şekilde yürütülmesini sağlar. Temiz, oksitsiz ve uygun yüzey hazırlığı, lehimleme işleminin verimini ve kalitesini artırır.

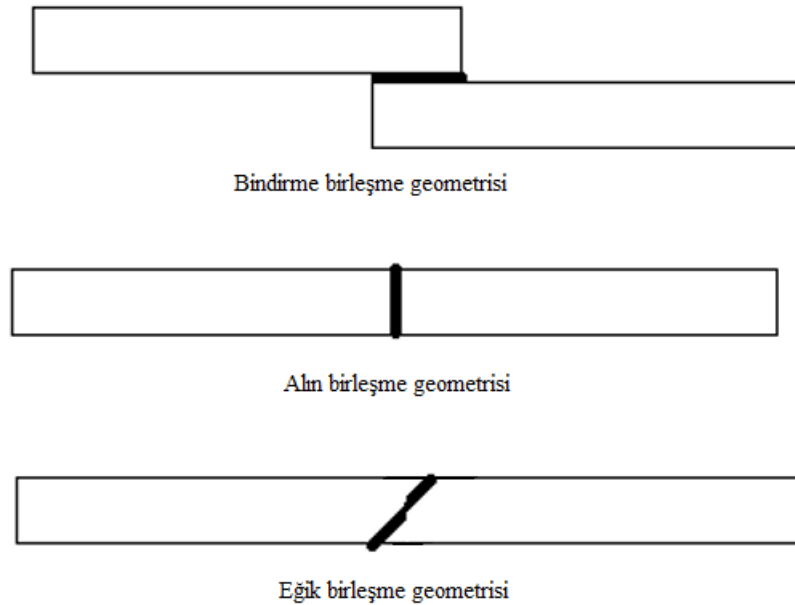
2.5. Lehim bağlantı aralığı

Ek yeri aralığı, lehimleme işleminde önemli bir faktördür. Küçük derz açıklıklarının kullanılması tercih edilir, çünkü bu durumda kapiler etki dolgu metalinin derz bölgesinde dağılmasını kolaylaştırır. En uygun bağlantı, tüm bağlantı alanının kaplandığı ve sert-lehim ile doldurulduğu bir bağlantıdır.

Lehimleme işleminin her aşamasında bağlantı aralığı aynı olmayabilir. Karışıklığı önlemek için, lehimlemeden önce oda sıcaklığında derz aralığı değeri belirlenir. Belirli bir uygulama için en

uygun derz aralığı dikkatlice belirlenmelidir. Tipik olarak, lehim delikleri en iyi kılcal hareket ve en yüksek bağ kuvveti için 0,02 ila 0,1 mm (0,002 ila 0,005 inç) aralığında tasarlanır. Daha dar veya daha geniş açıklıklar ile lehim alaşımının akışı kısıtlanır ve daha zayıf bağlantılar veya gözenekli yapılar oluşabilir.

Sonuç olarak, bağlantı boşluğunun lehimleme bölgesinin mekanik performansı üzerinde önemli bir etkisi vardır. Çekme mukavemeti, yorulma mukavemeti, darbe mukavemeti ve diğer mekanik özellikler gibi faktörler eklem oynamasından etkilenebilir. Bu nedenle lehimleme işlemi sırasında doğru bağlantı boşluğunu seçmek önemlidir. Lehimli bağlantılarda bir bağlantı türü olarak en yaygın olarak kullanılan iki temel tip alın ve bindirmeli bağlantılardır. Bağlantı tipi seçimi, parçaların konumu, bağlantı dayanımı, elektriksel iletkenlik, basınç dayanımı ve görünüm gibi operasyonel gereksinimlerden etkilenebilir. Ayrıca sert-lehimin imalat teknikleri, üretim miktarları ve besleme yöntemleri de birleştirme tipinin seçiminde önemli olabilir. Bindirme bağlantıları, üst üste binen bir enine kesitle birbirine bağlanan iki parçanın geometrisi ile tanımlanır. Bu tip birleştirmeler genellikle lehimleme işlerinde tercih edilir çünkü birleştirmenin en az zayıf olan kısım kadar sağlam olması gerekir. Ancak bindirme birleştirmelerde derz mesafesi artar ve bindirme mesafesi sonunda kesitte ani bir değişiklik olur. Bu, aşırı çalışma koşullarında stres konsantrasyonlarına ve arızaya neden olabilir[2].



Şekil 2.2. Sertlehim birleştirme tipleri

Birleştirme tipi seçimi, özel uygulama ve tasarım gereksinimlerine bağlı olarak dikkatli bir şekilde yapılmalıdır. Şekil 2.2. de birleştirme tiplerine örnek şematik gösterim verilmiştir. Doğru

bağlantı tipi, mekanik performans, sağlamlık, dayanıklılık ve diğer fonksiyonel özellikleri dikkate alarak seçilmelidir [10].

Ek yerinin açıklığının kesme kuvveti üzerindeki etkisine bağlı olarak lehim ağırları üç farklı bölgeye yayılır. Bu bölümler:

1. Küçük alanlar alanı: Bu sınırlar ne kadar küçük olursa, bağlantı kuvveti o kadar düşük olur. Gözeneklerin neden olduğu dolgu eksikliği ve uygun dolgu olmayan metali beklentileri, düşük aşınma dayanımına neden olur. Ayrıca intermetalik ölçümlerin yapımında küçük bir boyutta, kırılma hassasların daha büyük bir hacme sahip olmasına neden olur ve bu da taşıma özelliklerini azaltır.

2. Spesifik istilalar bölgesi: Bu bölge bağ kuvveti, belirli bir zamanlar için ana metal linkine yakın bir değere çıkıyor. Boşluğun büyükse, dolgu metalinin daha mekanik özelliklerinin bağlantının sağlamlığını belirleyecektir.

3. Geniş açılım alanı: Bu sınırlar boyunca dolgu metalinin mekanik özelliklerini bağlantının sağlamlığını belirler. Ayrıca bu alandaki sert verilerin elde edilmesi ve boşlukların yapısının bağlantı özelliklerinin etkilenmesi[10].

2.6. Oksi-Gaz Alevi ile Sert Lehimleme

Sert lehimleme işleminde, birleştirilecek parçaların ve ilave dolgu metalinin ısıtılması gereklidir. Bu işlem genellikle kalın kesitli parçalar için üfleç ile yapılır. Üfleç ile yapılan lehimleme işlemlerinde, oksijen-gaz kaynağının tüm ekipmanları kullanılır. Bu ekipmanlar, yanıcı bir gazın (asetilen veya propan) basınçlı oksijen ile yakılmasıyla oluşan alevi kullanarak lehimleme için gerekli olan ısıyı sağlar.

Oksi-gaz kaynağında üç farklı alev türü vardır:

Normal alev: Oksijen ve yanıcı gaz oranları eşittir. Bu alevin sıcaklığı, alev konisinin ön kısmında yer alan çekirdek adı verilen bölgede 3500°C'dir. Alev konisinin uç kısımlarına doğru sıcaklık 1200°C'ye düşer ve bu kısma "alev yelpazesi" denir.

Karbürleyici alev: Yanıcı gaz oranı normal alevden daha fazladır. Alev konisi normal alevden daha uzundur ve sakin bir yanma şekli gösterir.

Oksitleyici alev: Oksijen oranı normal alevden daha fazladır. Bu alevin özelliği, sert ve yüksek sesli bir yanmadır ve en yüksek sıcaklığı sağlar.

Sert lehimlenecek metallerin özelliklerine göre doğru alev seçimi yapılmalıdır. Örneğin, çelik ve bakır gibi metallerin sert lehimlenmesinde normal alev kullanılırken, pirinçlerin sert lehimlenmesinde oksitleyici alev tercih edilir. Alüminyumun sert lehimlenmesinde ise karbürleyici alev kullanılır.

Üfleç seçimi, lehimlenecek metallerin kalınlığına ve büyüklüğüne göre yapılmalıdır. Lehimlenecek bölge, lehimleme sıcaklığına kadar ısıtılır ve dekapanın ergimesiyle birleşme

sıcaklığına ulaşıldığı anlaşılır. Bu noktadan sonra ısıtma işlemi daha dikkatli yapılmalı ve metallerin aşırı ısınmaması için alev yelpaze bölümünden yararlanılmalıdır.

İlave dolgu metalinin lehimleme bölgesine verilerek birleşme tamamlanır. Ancak alev direkt olarak ilave metale tutulmamalıdır, çünkü bu durumda ilave metal yanabilir. Lehim alevi, ana metale yelpaze hareketi uygulayarak ilave metalin ilerlemesini sağlar. Böylelikle lehimleme işlemi tamamlanmış olur. [11].

2.7. İndiyum ve özellikleri

İndiyum, kimyasal sembolü "In" olan bir elementtir. Atom numarası 49, atom ağırlığı ise 114.82'dir. Yoğunluğu 7.31 g/cm³tür. Erime noktası 156 C°, kaynama noktası ise 2027 C° derecedir. Periyodik tablonun 3A grubunda, zayıf metaller sınıfında bulunur[12].

İndiyum, gümüş beyazı renkte olan bir geçiş metalidir. Çok yumuşak bir yapıya sahiptir ve kolayca dövülebilir, şekillendirilebilir bir metaldir. Kurşundan daha yumuşaktır ve tırnakla dahi çizilebilir, bıçakla kesilebilir. Kâğıt üzerinde belirgin bir iz bırakabilir. Kimyasal özellikleri bakımından galyum ve talyuma benzer. Erime noktası galyum ve sodyumdan daha yüksek, lityum ve kalaydan ise daha düşüktür. Ana spektral çizgileri, parlak bir indigo mavisi rengindedir. Kristal yapısı yüzey merkezli tetragonaldir[12].

İndiyum, ısıtıldığında oksitlenir. Havada oldukça kararlıdır ve düşük sıcaklıklarda havadan etkilenmez. Yüksek sıcaklıklarda ise mavi menekşe renginde bir alevle yanar ve sarı renkli bir oksit oluşturur. Alkalilere karşı dayanıklıdır ve asitlerde çözünür. Mineral asitlerden etkilenmez. Birçok çözünebilir bileşik oluşturabilir. Suda çözünen renksiz bileşikler olan 3+ değerlikli bileşikler bulunur. Bileşiklerinin çoğu güçlü bir indirgeyici ajandır. Bazı bileşikler yarı iletken özellik gösterir. Oksitleri, "n-tipi" yarı iletken özelliktedir. Fosfor ile birlikte süper yarı iletken bileşikler oluşturabilir. Halojenler ve kükürt ile ısıtıldığında doğrudan bileşikler oluşturabilir[12].

İndiyum oksit, sıcak asitlerde çözünebilir ancak suda çözünmeyen beyaz bir toz formundadır. İndiyum fluorür ise suda çok az çözünebilir ve sıcak veya soğuk su etkileşiminden etkilenmez. İndiyum sülfat ise suda çözünebilir ve nem çekici özellikte olan beyaz bir tozdur. Elektromotor serisinde kurşun ve kalayın üzerinde, demirin altında yer alır. Yüksek eşik gerilimi sayesinde kolayca kaplanabilen bir metaldedir.

Dünyada en bol bulunan elementler arasında 68. sırada yer alır. Doğada kendine özgü bir minerali bulunmamakla birlikte genellikle çinko minerallerinde bulunur. Genellikle "sphalerite" veya "çinko blendi" adı verilen cevherlerden elektrolitik yöntemle yan ürün olarak elde edilir. Doğal indiyum, In-115 (% 95.71) ve In-113 (% 4.29) olmak üzere iki izotopun karışımından oluşur. Ayrıca, 39 adet izotopu daha bulunur, kütle numaraları 39-97 arasında değişir. İndiyum, 49 elektron, 49 proton ve 66 nötron içerir[12].

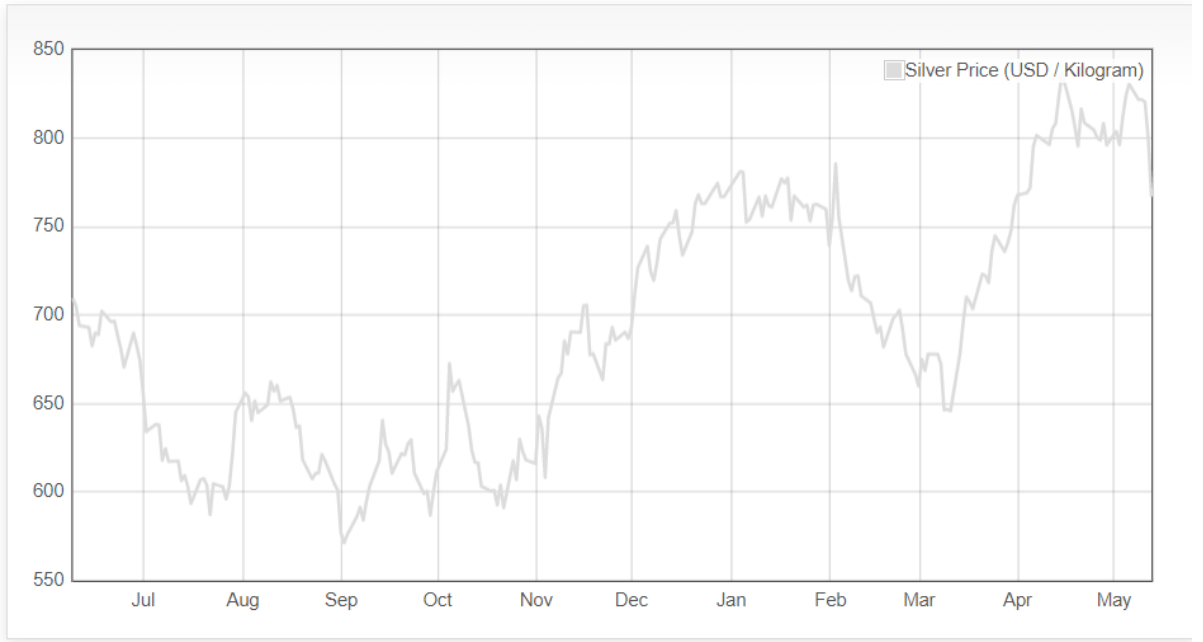
İndiyum, diğer metallerle uyumlu bir şekilde kullanılabilen bir metaldir. Çeşitli metallerle alaşımları önemli ve kullanışlı malzemeler oluşturur. Özellikle düşük sıcaklıklarda eriyebilen alaşımlar ve lehimler için ideal bir metaldir. Atmosferik etkilere karşı dayanıklı kaplamalar oluşturur. Motor ve makine yatak alaşımlarında, çeşitli dişli alaşımlarında, yarı iletkenlerde kullanılır. Hareketli metallerin yüzeylerine ince bir film tabakası olarak uygulandığında dayanıklı bir kaplama sağlar. İndiyum içeren bu film tabakası, metal veya camın yüzeyini korur ve gümüşe göre daha dayanıklı bir malzeme sunar. Bu nedenle optik cihazlarda kullanılan aynalar genellikle indiyum kaplamalardan oluşur. İndiyum kaplamalar, yüzeye düşük sürtünme katsayısı, düşük yapışma ve asitlere karşı dayanıklılık gibi özellikler katar. Ayrıca, altın ve gümüş kaplamaların sertliğini artırabilir[12].

2.8. Alaşım elementlerinin maliyet hesapları

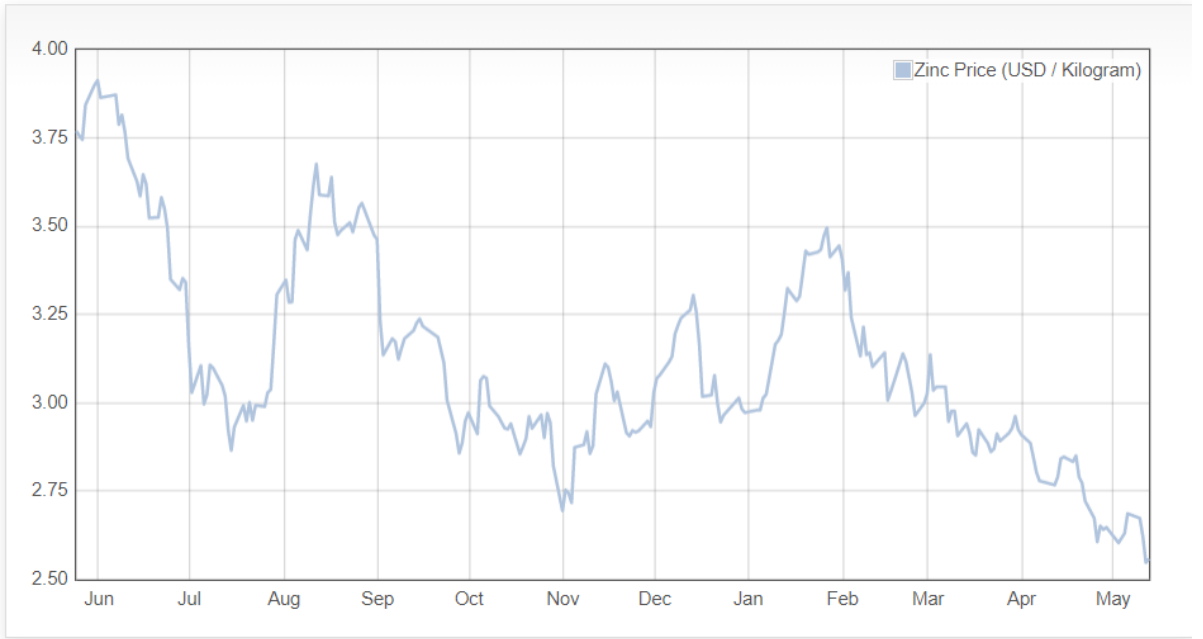
Çalışmada kullanılan Cu, Ag, Zn ve In alaşımlarının maliyet etkileri aşağıda hesaplanmıştır.



Şekil 2.3. İndiyum alaşımlarının 2022 yılına ait fiyat değişim grafiği [13]



Şekil 2.4. Gümüş alaşımının 2022 yılına ait fiyat değişim grafiği [14]



Şekil 2.5. Çinko alaşımının 2022 yılına ait fiyat değişim grafiği [15]



Şekil 2.6. Bakır alaşımının 2022 yılına ait fiyat değişim grafiği [16]

Şekil 2.3.-Şekil 2.6. da verilen elementlere ait fiyat dağılımları ve Tablo 2.1. ve Tablo 2.2. deki veriler incelendiğinde en yüksek maliyeti gümüş oluştururken indiyumun maliyetinin gümüşün yaklaşık 1/3 oranında olduğu anlaşılmaktadır.

Tablo 2.1. Kullanılan elementlerin Mayıs 2023' ait kg fiyatları

Gümüş (USD/Kg)	İndiyum (USD/Kg)	Bakır (USD/Kg)	Çinko (USD/Kg)
760	215	8,25	2,56

Tablo 2.2. Merkez Bankası verilerine göre Amerikan Doları alış-satış fiyatları[17]

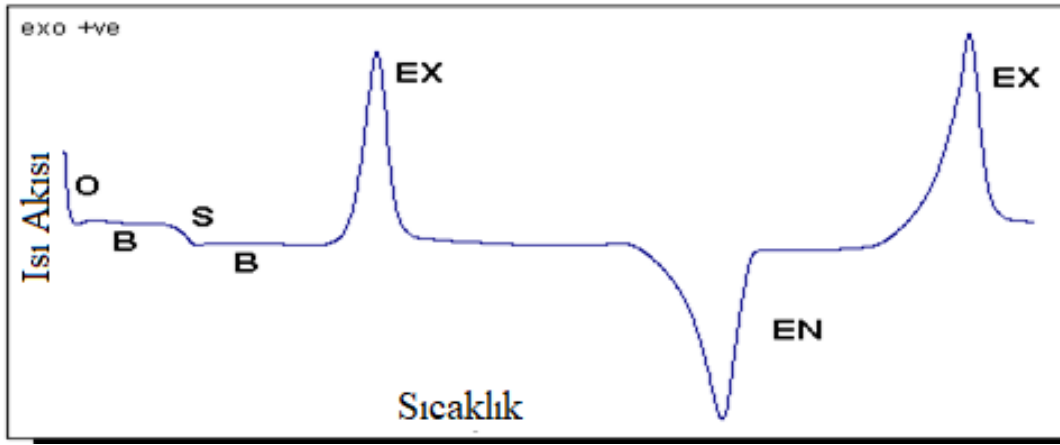
Amerikan Doları (USD)	
Alış	Satış
19.5091	19.5095

2.9. Termal Analiz

Termal analiz yöntemleri, numunenin fiziksel özelliklerindeki değişikliklerin sıcaklıkla ilişkisini ölçerek kullanılan tekniklerdir. Bu yöntemlerde, numunenin belirli bir sıcaklık aralığında erime noktası, kaynama noktası, dehidrasyon noktası ve izomer geçiş noktası gibi fiziksel özelliklerindeki değişimler izlenir.

Termal analizde, değişken parametreler arasında ısıtma hızı ve belirli bir sıcaklıkta tutma süresi bulunur. Isıtma hızı, farklı sıcaklık bölgelerinde farklı olabilir. Tipik olarak, termal analiz cihazlarında tarama sıcaklığı 20 - 1200 °C arasında seçilebilir. Termal tepkimeler, numune hücresindeki atmosfer koşullarına bağlı olarak farklılık gösterebilir[18].

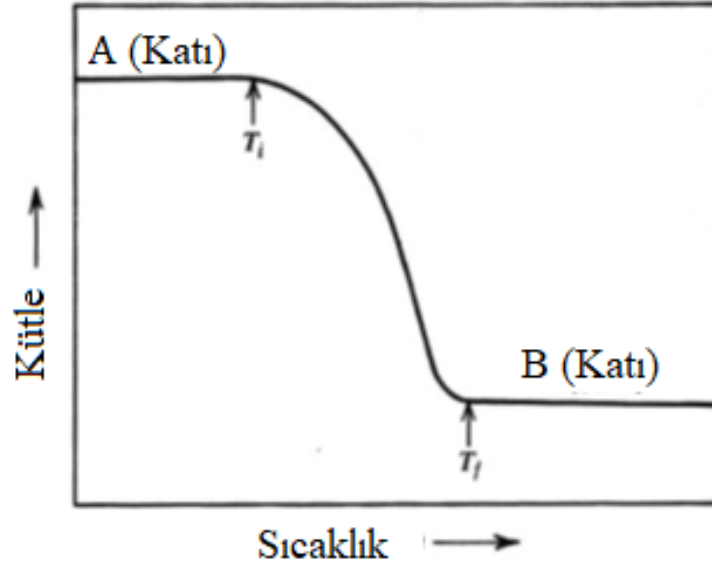
DTA (Diferansiyel Termal Analiz) termogramlarında, ekzotermik pikler genellikle kimyasal reaksiyonlara, polimerizasyon veya kristalleşme süreçlerine işaret ederken, endotermik pikler ise faz değişiklikleri, dehidrasyon, indirgeme veya bozunma gibi süreçlerle ilişkilendirilir. Farklı termal analiz cihazlarında, endotermik ve ekzotermik piklerin yönleri farklılık gösterebilir. Bu şekilde, termal analiz yöntemleri numunenin sıcaklığa bağlı davranışını izleyerek fiziksel ve kimyasal değişimleri belirlemeye yardımcı olur. Şekil 2.7. de şematik bir DTA örneği gösterilmiştir.



Şekil 2.7. DTA grafiğine ait bir görsel[18]

Termal analiz yöntemleri, bir maddenin yapısal analizi, saflık kontrolü ve kil, seramik, cam gibi dolgu maddelerinin incelenmesi gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılır.

Termogravimetrik analiz (TG) veya TGA (Termogravimetri Analizi), bir reaksiyonun stokiyometrisini doğrudan takip etme imkanı sağlar. Örneğin, $A \text{ (katı)} \rightarrow B \text{ (katı)} + C \text{ (gaz)}$ şeklinde bir reaksiyon olduğunda, ağırlık kaybı meydana gelir. Diğer bir durumda ise $C \text{ (gaz)} + B \text{ (katı)} \rightarrow A \text{ (katı)}$ reaksiyonunda ağırlık artışı görülür. Sıcaklık ve ağırlık veya kütle yüzdesi arasında çizilen grafik, termogram veya termal bozunma eğrisi olarak adlandırılır. TG eğrilerinde numune ağırlığı (ΔW) y eksenini üzerine, sıcaklık (T) ise x eksenini üzerine kaydedilir. Isıtma hızı ($^{\circ}\text{C}/\text{dt}$) belirli bir sıcaklık (T) için sağlanmalıdır. Bu şekilde termal analiz yöntemleri, maddelerin termal davranışlarını izleyerek yapısal ve kimyasal değişimleri belirlemeye yardımcı olur. Özellikle termogravimetrik analiz, reaksiyonların stokiyometrisini ve termal bozunma eğrisini takip etmek için kullanılan bir yöntemdir. Şekil 2.8. de TG analiz grafiğine ait bir görsele yer verilmiştir.



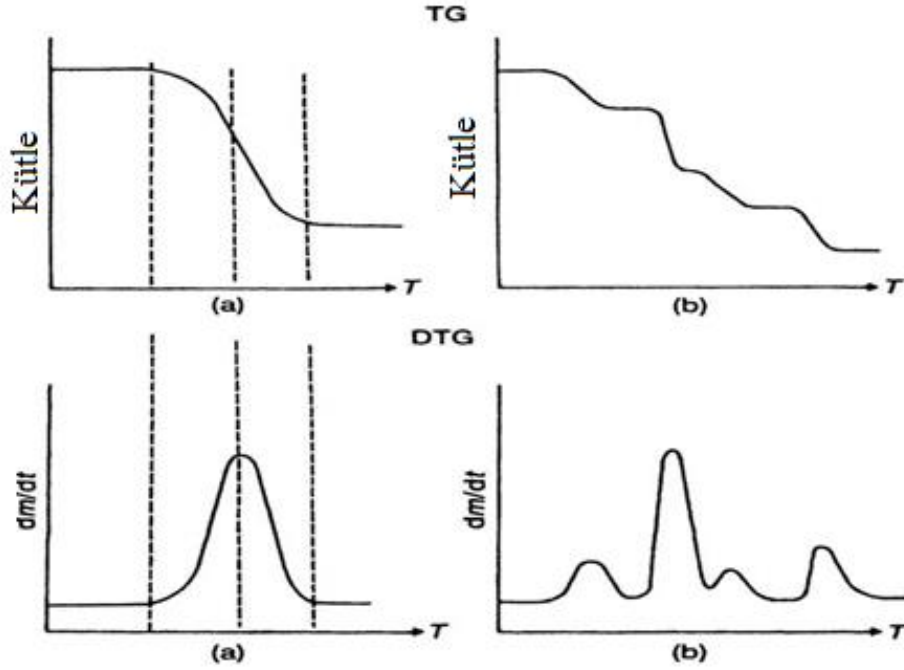
Şekil 2.8. TG analiz grafiğine ait bir görsel[18]

TGA (Termogravimetrik Analiz), bir materyalin ağırlık kaybının olduğu sıcaklıkları belirlemek için kullanılır. Bu ağırlık kaybı, materyalin bozunduğunu veya buharlaştığını gösterir. Ayrıca, ağırlık kaybının olmadığı sıcaklık aralıklarını da gösterir ve bu durum materyalin kararlı olduğunu ifade eder. Örneğin, belirli bir sıcaklığa ısıtılan bir örnek, TGA ile belirlenen ağırlık kaybı bilgisi sayesinde bileşiğin bileşimini belirlemek ve bozunma sırasındaki reaksiyonları izlemek kolaylaşır. Ayrıca, bir karışımda bulunan belirli bir bileşiğin yüzdesini de belirlemeye yardımcı olur.

TGA deneylerinde kullanılan numune miktarı genellikle miligram (mg) veya gram (g) aralığında olabilir. Numune miktarının artması, homojen ısıtma sağlamada zorluklara veya reaksiyon sonucu oluşabilecek gazların uzaklaştırılmasında güçlüklerle neden olabilir. Bu durumda deneyin hassasiyeti azalabilir.

Isıtma hızı, TGA deneyinde kullanılan numunenin ısıtılma hızını belirler ve genellikle 1-100 °C/dakika arasında değişir. Yavaş ısıtma hızları daha homojen bir ısıtma sağlar ve daha doğru ölçümler elde etmeye yardımcı olur.

Sonuç olarak, TGA (Termogravimetrik Analiz), materyallerin ağırlık kaybını ve kararlılık durumunu belirlemek, bileşim analizi yapmak ve reaksiyonları izlemek için kullanılan bir termal analiz yöntemidir. Deney koşullarının dikkatli bir şekilde seçilmesi, doğru ve güvenilir sonuçlar elde etmek için önemlidir[18]. Şekil 2.9. da TG ve DTA grafiklerinin şematik gösterimleri yer almaktadır.

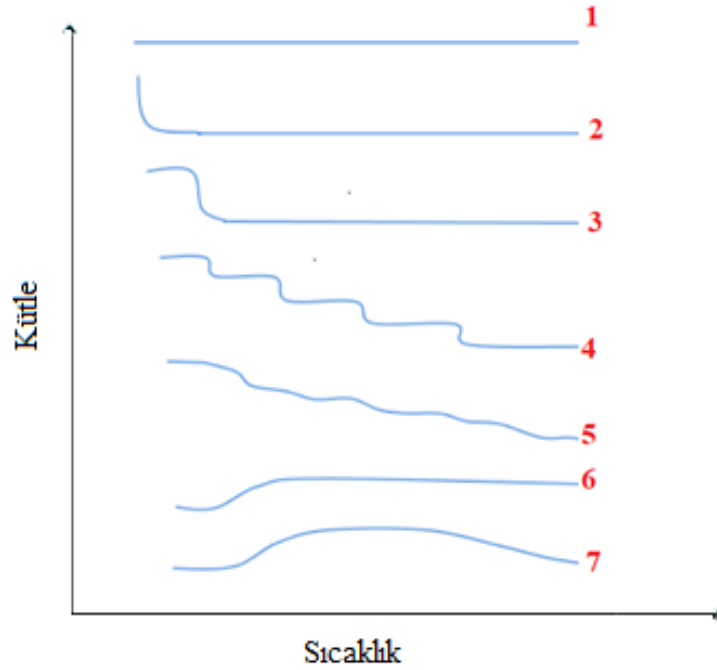


Şekil 2.9. TG ve DTA grafiklerinin şematik gösterimleri

TG analizinde, ağırlık değişimleri sıcaklığın fonksiyonu olarak kaydedilebilirken, aynı zamanda dW/dT olarak da kaydedilebilir. Bu durumda yapılan analiz DTG (diferansiyel termal gravimetri) analizi olarak adlandırılır. DTG analizinde, ağırlık kaybı hızı, sıcaklık veya süre gibi değişkenlere bağlı olarak kaydedilir.

DTG analizinin temel amacı, ağırlık kaybının en fazla olduğu (maksimum) sıcaklığı görsel olarak gözlemlemeyi kolaylaştırmaktır. Bu şekilde, numunenin termal davranışındaki önemli değişiklik noktaları daha belirgin hale getirilir. DTG grafiği, ağırlık kaybının hızının sıcaklığa bağlı olarak nasıl değiştiğini gösterir.

Bu analiz yöntemi, özellikle malzemenin termal bozunum davranışının incelenmesinde, reaksiyonların hızının ve mekanizmasının anlaşılmasında ve farklı bileşenlerin termal davranışlarının karşılaştırılmasında kullanılır. DTG analizi, termal analiz verilerinin daha ayrıntılı bir şekilde analiz edilmesine ve yorumlanmasına olanak tanır[18].



Şekil 2.10. TG analizinde karşılaşılan grafik örnekleri

Şekil 2.10. da verilen grafik örneklerinin yorumları aşağıda değerlendirilmiştir.

1. Yatay eğri, numunede bozunumun olmadığını gösterir. Bu durumda numunenin ağırlığı sabit kalır ve herhangi bir ağırlık kaybı meydana gelmez.
2. Isıtmanın başlangıcında hızlı ağırlık kaybı, numunenin kuruması veya absorbe ettiği sıvının geri verilmesi (desorpsiyon) gibi nedenlerden kaynaklanabilir. Bu ağırlık kaybı genellikle hızlı bir şekilde gerçekleşir.
3. Tipik bir TG eğrisi, malzemenin tek aşamalı bozunumun olduğu ve stabil olduğu sıcaklık aralığını gösterir. Bu sıcaklık aralığında ağırlık kaybı sabit bir hızla gerçekleşir.
4. Çoklu bozunum basamakları, numunenin ara bozunum ürünlerinin belirli sıcaklık aralıklarında stabil olduğunu gösterir. Bu durumda ağırlık kaybı birden fazla adımda gerçekleşir.
5. Çoklu bozunum basamakları, ara ürünlerin stabil olmadığı durumları gösterebilir. Bu tip eğriler, numunenin daha yüksek ısıtma hızlarında elde edilebilir.
6. Kimyasal reaksiyon sonucunda ağırlık artışı, örneğin metallerin oksidasyonu gibi durumlarda görülebilir. Bu durumda numunenin ağırlığı artar.
7. Ağırlıkta önce artış sonra azalış, nadir görülen bir eğri şeklidir. Bu durumda numunenin ağırlığı başlangıçta artar, sonra bir süre sonra azalmaya başlar.

Bu bilgiler, TG eğrilerinin farklı şekillerini ve bu şekillerin hangi durumları temsil ettiğini açıklamaktadır. Her bir eğri, numunenin termal davranışını ve olası kimyasal reaksiyonları göstermektedir.

2.10. Literatür incelemeleri

X. P. Zhang ve arkadaşları Sn-Pb katkılı lehim teline Ag, In ve Bi alaşım elementlerini ekleyerek malzemedeki yüzey gerilim ve ıslatılabilirlik kavramlarındaki değişimleri gözlemlemişlerdir. Çalışma sonucunda Bi ve In elementlerinin bakır (Cu) esaslı malzeme yüzeyinde yüzey geriliminin azaltılmasında etkili olduğu dile getirilmiştir. Ayrıca Ag, Bi ve In ilaveli lehim alaşımının ıslatma kabiliyetlerinde gelişim olduğu grafiklerle ifade edilmiştir [19].

L. Sisamouth ve arkadaşları kadmiyum içermeyen gümüş sert lehim dolgu metalleri geliştirme girişiminde, üçlü Ag-Cu-In alaşımlarını araştırmışlar. Yaptıkları çalışmada Ag-In-Bi alaşım elementlerinin kapiler etkisi ile çalışma sıcaklığı üzerine etkileri irdelenmiştir. Ag-Cu-In'deki indiyum içeriğinin artmasıyla dolgu metallerinin katılma ve sıvılaşma sıcaklıklarının düştüğünü göstermiştir. Bununla birlikte, indiyum içeriğindeki artışın kapileritede önemli bir gelişme göstermediğine değinilmiştir. İndiyum ilavesinin etkisiyle birleşim bölgesinde intermetalik fazların oluştuğu ve bu nedenle birleşimde istenmeyen sertliğe bağlı negatif difüzyon oluştuğu belirtilmiştir. Bundan dolayı kayma mukavemetinde indiyum miktarının artmasıyla azaldığı bakır miktarının artmasıyla yükseldiği dile getirilmiştir [20].

E. Çelik'in yüksek lisans tezinde gümüş-indiyum (Ag-In) alaşımının intermetalik fazlarının termofiziksel özelliklerini incelediği belirtilmiştir. Literatürde bu intermetalik fazlar hakkında yeterli bilgi olmadığı için, %99.99 saflıkta metaller kullanılarak Ag-In intermetalik fazlar elde edilmeye çalışılmıştır. Ag-In intermetalik fazlarının elde edilmesi için belirlenen miktarlardaki elementler hassas bir terazi yardımıyla tartılmış ve ardından ark fırınına yerleştirilerek uygun şartlarda alaşım oluşumu sağlanmıştır. Ark fırınında yüksek akım kaynağı kullanılarak tungsten uçlarda bir ark meydana getirilerek alaşımların erime işlemi gerçekleştirilmiştir. Ag-%26 ağırlıkça In (Ag₃In), Ag-%34 ağırlıkça In (Ag₂In) ve Ag-%68.1 ağırlıkça In (AgIn₂) alaşımları oluşturulduktan sonra, her bir alaşımın mikroyapısı taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiş, kimyasal bileşim analizi enerji dağılımı spektroskopisi (EDS) ile yapılmış, sertlik testleri ve faz değişimi diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) ile incelenmiştir. Bu çalışma, Ag-In intermetalik fazlarının termofiziksel özelliklerini karakterize etmeyi ve alaşımların yapısal özelliklerini analiz etmeyi amaçlamaktadır[21].

V.S. Zhuravlev ve arkadaşları çalışmalarında VK94-1 ve VK100 alümina seramiklerin ve lökosafrin VT1-0 titanyum ile sert lehimlenmesinde ötektik Ag-28 ağırlıkça % Cu dolgu maddesindeki nikel, kalay ve indiyum ilavelerinin kapiler ve temas süreçleri üzerindeki etkisi incelemişlerdir. Yüksek sıcaklıkta kapiler, optik ve taramalı mikroskopi yöntemleri, ötektik Ag-Cu

eriğiğine küçük nikel, kalay veya indiyum ilavelerinin bile titanyum çözünme hızını ve metal olmayan alt tabakanın başlangıçtaki ıslanma sıcaklığını belirgin şekilde etkilediğini ortaya koymuşlardır. Bu çalışma sonuçlar, temas eden yapıların termodinamik özelliklerini içerecek şekilde tartışılmıştır. Çalışmada Ag-28 ağırlıkça %Cu dolguya yapılan ilavelerin sert lehim mukavemeti üzerindeki etkisini incelemişlerdir. İndiyum en yüksek Gümüş-bakır dolgu maddesine en umut verici katkı olduğu ve sert lehimleme sıcaklığını düşürerek lehimli bağlantıların mekanik mukavemetinde önemli rol oynadığı ifade edilmiştir[22].

A. M. ERER'in çalışmasında, Sn-3Ag-0.5Cu (SAC305) kurşunsuz lehim alaşımına indiyum ilavesinin bazı özellikler üzerindeki etkisini araştırdığı belirtilmektedir. Çalışmada, indiyum ilavesinin lehim alaşımının ıslatabilirliği üzerindeki etkileri incelenmiştir. Deneysel sonuçlara göre, indiyum ilavesi ağırlıkça %1,0 olduğunda, Sn-2Ag0.5Cu-1In (SAC-1In) lehim alaşımının ergime sıcaklığındaki değişimin ihmal edilebilir olduğu görülmüştür. Ancak, Cu altlık üzerinde önceden belirlenen sıcaklıklarda (250, 280 ve 310 °C) elde edilen lehim alaşımının temas açısı değerleri (θ) azalmıştır. Yani, indiyum ilavesi lehim alaşımının ıslatma kabiliyetini artırmıştır. Lehim alaşımının metalik fazları, mikroyapısı ve ergime sıcaklığı X-ışını difraksiyonu (XRD), taramalı elektron mikroskobu ve enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (SEM + EDS) ile karakterize edilmiştir. İndiyum miktarının mikroyapı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. En düşük θ açısı değeri 310 °C'de 35.55 ° olarak elde edilmiştir. Ayrıca, kurşunsuz lehim alaşımı ve Cu altlık arasında intermetalik bileşiklerin (IMC) oluşumu gözlenmiştir. Sonuç olarak, çalışmada SAC-1In lehim alaşımının ıslatma kabiliyetinin SAC305 alaşımından daha iyi olduğu sonucuna varılmıştır. Bu çalışma, indiyum ilavesinin lehim alaşımının özelliklerine etkisini anlamak ve daha iyi performansla sahip lehim alaşımlarının geliştirilmesine yönelik bir adımdır[23].

Siddharth Tamang ve arkadaşları çalışmalarında, cBN'nin WC-Co'ya sert lehimlenmesi, Ag-Cu-In-Ti (APA7) sert lehim alaşımı kullanılarak mikrodalga hibrit ısıtma ile gerçekleştirmişlerdir. Ti'nin cBN ile bir reaksiyon tabakası TiB₂, TiB ve TiN üretmek için cBN'ye doğru yayıldığı gözlemlenmiştir. Bu reaksiyon tabakası, sert lehim alaşımıyla uyumluluğu artırarak cBN'nin WC-Co ile birleşmesine yardımcı olduğu ifade edilmiştir. Sert lehimli eklemin kesme mukavemetinin, 12 dakikanın üzerindeki mikrodalga maruziyet süresi için cBN'den daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Bu sonuç, üretkenliği en az %70 oranında artırarak cBN uçlu WC-Co takımlarının maliyetini düşürmeyi vaat ettiği dile getirilmiştir[24].

Miller ve Schwanke'nin çalışmasında, gümüş içermeyen dolgu metallerinin bakır esaslı ve çelik metallerin lehimlenmesinde çözünürlük veya arayüzey bileşiklerinin oluşabilmesi için çözünebilir olması veya belirli elementler içermesi gerektiği sonucuna varılmıştır. Ayrıca ara yüzey reaksiyonlarının zaman ve sıcaklığa bağlı olduğu belirlenmiştir. Çalışmanın sonunda, dolgu metallerinde bağlayıcılığı artıracak takviye elementlerin kullanılmasının faydalı olduğu vurgulanmıştır. Ayrıca gümüş içeren dolgu metallerinin Cu-Mn-Zn içeren dolgu metallerine göre

daha yüksek mukavemet, düşük ergime noktası ve daha iyi ıslanabilirlik özellikleri sergilediği gözlemlenmiştir. Pb, Bi, Cd, Zn veya Ag ilavelerinin ergime noktasını düşürebileceği ancak ıslanabilirliği azaltmadan düşürdüğünü söyleyebilmek için daha fazla çalışmanın gerektiği belirtilmiştir[25].

Long ve arkadaşlarının çalışmasında, yüksek çinko içerikli AgCuZn alaşımının indüksiyon lehimleme işlemi sırasında AgCu/ZnCu/AgCu sandviç tabakası kullanılarak yerinde sentezlendiği belirtilmektedir. Sonuçlar, AgCu ve ZnCu alaşımlarının eridikten sonra kapsamlı bir şekilde kaynaşabileceğini ve üstün bir metalurjik birleşim sağlayabilen uniform bir kompozisyona sahip lehimleme dikişleri oluşturduğunu göstermektedir. Elde edilen lehimlenmiş bağlantıların mukavemetinin, yaygın olarak kullanılan AgCuZn alaşımı ile lehimlenen bağlantılardan çok daha yüksek olduğu belirlenmiştir[26].

Shabtay ve arkadaşlarının "tavlamaya dayanıklı olan bakır ve pirinçlerin sert lehimleme yöntemleri" adlı çalışmasında ise bakır ve pirinç alaşımlarının yüksek mukavemetlerini değerlendirerek, bu alaşımların yüksek sıcaklıktaki sert lehimleme işlemlerinde önemli mukavemet kaybına maruz kalıp kalmadığı araştırılmıştır. Bu çalışmada, sert lehimleme işlemlerinin gelişmiş ısı değiştiricilerin üretiminde kullanıldığı ve sert lehimleme fırınlarının tüm üretim seviyeleri için geliştirildiği vurgulanmıştır. Ayrıca fırın seçimi, dolgu malzemelerinin uygulanma alanları, parçaların birleştirilmesi ve sert lehimleme işlemlerinin kontrolü üzerinde durulmuştur[27].

Xue ve arkadaşlarının yayınladığı makalede, alaşım tellerindeki Ga (Galyum) oranının lehimleme üzerindeki etkisini inceledikleri belirtilmektedir. Yaptıkları çalışmada, esas dolgu metali olarak 7AgCuZnSn gümüş, bakır ve çinko bazlı katı çözelti kullanılmış ve bu alaşıma Ga ilavesinin etkisi gözlemlenmiştir. Araştırmada Ga oranının artmasıyla birlikte lehimin ıslanabilirliği ve korozyon dayanımının pozitif yönde etkilendiği görülmüştür. Ga ilavesi ile dolgu metalindeki pirinç fazının belirgin şekilde azaldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, mikrosertlik ve kesme dayanımının da Ga ilavesi yüksek olan alaşımlarda arttığı saptanmıştır. Yapılan deneyler sonucunda en yüksek kesme dayanımının %2 Ga ilavesiyle elde edildiği belirlenmiştir. Ancak Ga ilavesinin sürekli olarak artması durumunda kesme dayanımının azalmaya başladığı ve mikrosertliğin arttığı tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, Ga ilavesinin lehimleme performansını ve mekanik özellikleri etkileyebileceğini göstermektedir[28].

Zahra B. ve arkadaşları, Ag-Cu-In sisteminin faz diyagramını, toz X-ışını kırınımı (XRD), diferansiyel taramalı kalorimetri (DSC) ve elektron prob mikroanalizi (EPMA) kullanılarak incelenmişlerdir. İki izotermal kesit (510 ve 607 °C'de) ve 15 izopleitik kesit incelenmiştir. Sonuçlar yedi üçlü peritektik, bir üçlü ötektik ve bir üçlü metatektik göstermişlerdir. Tam bir reaksiyon şeması oluşturulmuş, vadiler çizilmiş ve likidus yüzeyleri tüm bileşim aralığında DSC verilerinden türetmişlerdir. Üçlü Ag-Cu-In faz diyagramını belirlemek için on üç vertikal kesit ve iki izotermal kesit incelenmiştir. Bileşim ve sıcaklıkta dokuz üçlü değişmez tespitolduğunu tespit etmişlerdir ki

bunlar; bir üçlü ötektik, dört geçici peritektik, üç üçlü peri-tektik ve bir üçlü metatektik. Hiçbir üçlü bileşik tespit edemediklerini ifade etmişlerdir. DSC ölçümlerinden elde edilen likidus verileri, tüm bileşim aralığı için likidus yüzey izotermi elde etmek üzere ilgili ikili sistemler için likidus sıcaklıkları ile birleştirilmiştir. Ag-Cu-In faz diyagramının tam olarak elde edilmesi, ikili fazların üçlü sisteminde ve tekli fazlarda çok sayıda katı çözelti aralığının bulunması nedeniyle karmaşık olduğu dile getirilmiştir. [29]

Czepe T ve arkadaşları, Cu-Zn-In sisteminde faz oluşumu, izotermal koşullarda difüzyonlu çoğullar kullanılarak incelemişlerdir. İn ve Zn erime sıcaklıklarının altında ve üstünde artan sıcaklıklarda (130, 350, 450 °C) üç farklı birleşim konfigürasyonunun tavlama işlemi gerçekleştirilmiştir. İn, tane sınırları boyunca Zn'ye tercihli difüzyon yeteneğini ortaya koymuş ve eutektik fazı oluşturmuştur. Uygulanan tüm sıcaklıklarda, saf Cu, İn difüzyonunun engeli olmuş, Zn difüzyonu ise kolayca gerçekleşerek ikili CuZn fazlarının oluşumuna yol açmıştır; Cu-In sistemine ait fazlar bulunamamıştır. Üçlü Cu-Zn-In fazları, 350 ve 450 °C sıcaklıklarında, Cu içinde eş zamanlı İn ve Zn difüzyonu gerçekleşirken, sıvı haldeki İn ve Zn'nin katılımıyla oluşmuştur. Elde edilen sonuçlar, Cu-Zn-In faz diyagramının hesaplanmasının başlangıç noktasını oluştururken, Cu-Zn, İn-Zn ve Cu-In ikili diyagramlarının tamamının bilindiği gerçeğine rağmen Cu-Zn-In faz diyagramının henüz mevcut olmadığını dile getirmişlerdir. [30]

Christopher P. Muzzillo ve arkadaşı, Ag-Cu-In termodinamik malzeme sistemi sert lehim alaşımları için kalkopirit ince film fotovoltailer üzerine bir çalışma yürütmüşlerdir. Bu çalışmalarında Ag-Cu-In değerlendirilmiş ve bir Calphad modeli geliştirilmiştir. İkili Ag-Cu ve Cu-In parametreleri önceki değerlendirmelerden alınmış, Ag-In ise yeniden değerlendirilmiştir. β -bcc(A2)-Ag₃In, γ -Ag₉In₄ ve AgIn₂ için yapı tabanlı modeller kullanılarak Ag-In için entalpi, faz sınırı ve kesintisiz reaksiyon verilerine iyi uyum sağlandığı ifade edilmiştir. Üçlü Ag-Cu-In parametreleri, aktivite ve entalpiye mükemmel uyum sağlamak için optimize edilmiştir, ve kapsamlı faz dengesi verileri. Önceki Ag-Cu-In ile karşılaştırıldığında, daha az parametre kullanılarak uyum iyileştirilmiştir[31].

Bang J. ve arkadaşları çalışmalarında, Cu/Cu-In/Cu lehim bağlantıları geçici faz sinterleme (TLPS) işlemi ile başarılı bir şekilde hazırlanmıştır. Yapıştırma basıncı ve bekletme süresinin 260 ve 320°C'de Cu-In TLPS bağlantılarının mikroyapısı ve kesme mukavemeti üzerindeki etkileri incelenmiştir. Sonuçlar, yapıştırma basıncı 0,1-0,6 MPa arasında arttıkça, gözenekliliğin azaldığını ve kesme mukavemetinin önemli ölçüde arttığını göstermiştir. Yapıştırma basıncı 1 MPa'ya yükselmeye devam ettikçe belirgin bir değişiklik bulunmamıştır. 260°C'de bekletme süresi arttıkça, Cu₁₁In₉ oluşmuş ve kademeli olarak yüksek sıcaklığa dayanabilen Cu₂In'e dönüşmüştür. Bu arada, kesme mukavemeti artarken gözeneklilik azalmıştır. Cu₁₁In₉'dan Cu₂In'e faz geçişi sırasında hacim genişlemesinin (%12,74) meydana geldiği hesaplanmıştır. Yapıştırma sıcaklığı 320°C'ye yükseldiğinde, sadece Cu₂In tespit edildi ve daha sonra artan bekletme süresi ile kademeli olarak

Cu_7In_3 'e dönüştü. Bekletme süresi 120 dakikaya ulaştığında, gözeneklilikleri artmış ve Cu_2In 'den Cu_7In_3 'e faz geçişi sırasında hacim büzülmesi (%15,43) nedeniyle zayıf kesme mukavemetine yol açmıştır [32].

Li Yang ve arkadaşları hazırladıkları makalede, Cu/In-45Cu/Ni lehim bağlantılarının mikroyapısı ve kayma özelliği geçici sıvı faz ile incelemiştir. İntermetaliklerin (IMC) büyüme mekanizması araştırılmıştır. Sonuçlar göstermiştir ki lehim bağlantılarının IMC hacim oranının önce arttığını ve daha sonra artan yapıştırma süresi ile azaldığını göstermiştir, ve IMC hacim oranı 60 dakikada maksimum %95,8 değerine ulaşmıştır. Lehimin Cu arayüzey IMC'si yoğun mikroyapıya sahip eklem 60. dakikada Cu_2In fazıydı ve Ni arayüzey IMC'si Ni_3In_7 idi. Maksimum Lehim bağlantılarının kesme mukavemeti 60 dakikada 15,21 MPa olarak elde edilmiştir. Kesme kırılması ortaya çıktı bal peteği yapısı ve kırılma $\text{Ni}_3\text{In}_7/\text{Cu}_{11}\text{In}_9$ faz arayüzünde meydana gelmiştir. Kalınlığı arayüzey IMC'leri ve Cu partikülleri (Cu-IMC) etrafındaki beyaz IMC'ler artan bağlanma süresi ve böylece Cu-Ni alt tabakaların birbirine bağlanması nihai olarak gerçekleştirilmiştir[33].

Hua Yu ve arkadaşları çalıştıkları makalede, lehimleme üretim süreçlerinin otomatik üretimini kolaylaştırabilecek çevre dostu BAg25Cu40Zn34Sn (BAg-25) ve BAg30Cu37Zn32Sn (BAg-30) flux-core lehim metali hazırlamışlar. Çalışmalarında BAg-25 ve BAg-30 ile alt tabaka üzerinde alın ve bindirmeli indüksiyon lehimleme testleri gerçekleştirilmiştir. Ana metal üzerindeki lehimlerin ıslanabilirliği, mikroyapısı ve mekanik özellikleri alan emisyon taramalı elektron mikroskobu (SEM-EDS), elektron geri saçılım kırınımı (EBSD), çekme test cihazı ve mikrosertlik test cihazı ile incelenmiştir. Sonuçlar, %30 gümüş içerikli BAg-30'un ısıtma özelliğinin %25 gümüş içerikli BAg-25'ten daha iyi olduğunu belirtmişlerdir. Aynı zamanda, bakır ve gümüş bazlı katı çözeltilerin yanı sıra, BAg-30 lehiminin lehimli bağlantısı da $\text{Cu} + \text{Ag}$ ötektik fazı içerdiğini göstermişlerdir. BAg-25 lehiminin lehimli bağlantısında, tane boyutu daha küçüktür, bu da bağlantıların gerilme mukavemetini ve kesme mukavemetini daha iyi hale getirdiği anlatılmaktadır. Bu nedenle, BAg-25 flux-core lehim metali endüstriyel maliyeti daha da azaltacak ve mekanik özelliklerin gereksinimlerini karşılayacağını ifade etmektedirler[34].

3. MATERYAL VE METOD

Bu bölümde sertlehim ilave metalinin imal edilişı, St37 çeliğinin sertlehimlenmesi işlemi ve gerçekleştirilen analiz ve testler ifade edilmiştir.

3.1. Malzeme Seçimi ve Yöntem

Gümüş sert lehim dolgu metalleri, bakır, yumuşak çelik, paslanmaz çelik ve diğer alaşımların birleştirilmesinde yaygın olarak kullanılan dolgu malzemeleridir. Bu dolgu metalleri yüksek mukavemet, termal iletkenlik, elektrik iletkenliği, oksidasyon direnci ve uygun erime noktası gibi özelliklere sahiptir [1,2]. Gümüş içeriği %20-45 olan dolgu metalleri, östenitik paslanmaz çelik ve bakırın yüksek hassasiyetli bağlantılarında sert lehimleme için sıkça tercih edilir [1,2]. Ancak, gümüşün fiyatı uluslararası siyasi ve ekonomik durumdan ve makroekonomik politikalardan kolayca etkilenir. Bu da yüksek gümüş içeren sert lehim dolgu metallerinin fiyatının pahalı ve dalgalı olmasına neden olur. Bu nedenle, düşük gümüş içeren ve kadmiyum içermeyen sert lehim dolgu metallerinin geliştirilmesi ve pazar taleplerini karşılaması büyük bir ilgi görmektedir.

Bu çalışmanın amacı, %20 gümüşlü kadmiyum içermeyen 20Ag-Cu-Zn dolgu metali referans alınarak Ag miktarının belirli oranlarda düşürülmesi ve yerine In ilave edilmesiyle lehimleme işlemi sonrasında lehimli bağlantıların kopma mukavemeti ve mikroyapısal etkisinin araştırılmasıdır. Lehimlenecek malzeme olarak St37 çelik altlıklar kullanılmıştır. Tablo 3.1 de kullanılan alaşım elementlerine ait erime sıcaklığı ve sertlik dağılımları verilmiştir.

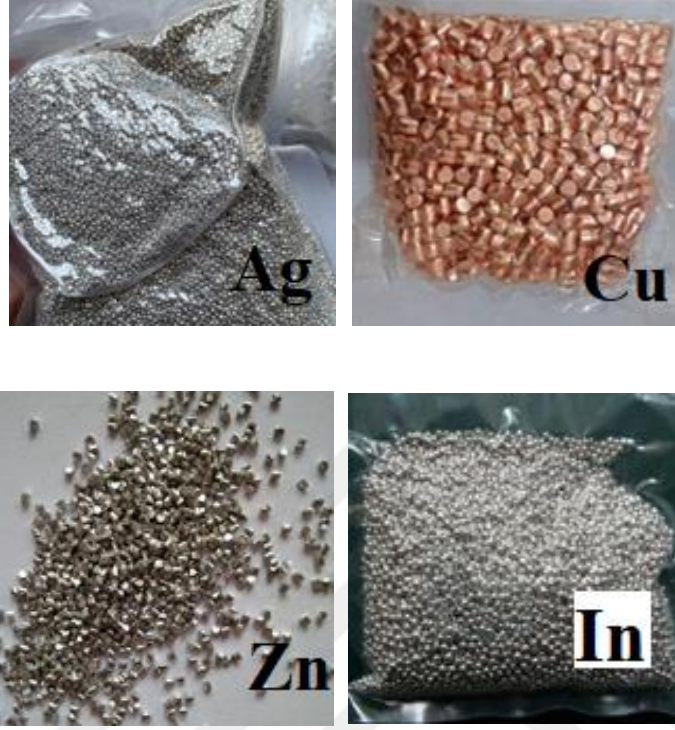
Tablo 3.1. Kullanılan alaşım elementlerine ait erime sıcaklığı ve sertlik dağılımları

	Cu	Ag	Zn	In
Erime Sıcaklığı °C	1085	962	420	156
Sertlik (mohs)	2,5-3	2,5	1,5	1,2

3.2. Alaşımlama işlemi

%99 ve üzeri saflığa sahip gümüş, bakır, çinko ve indiyum metallerine ait pelet ve granül formundaki alaşım elementleri Selvi Kimya kimyevi maddeler A.Ş. den temin edilmiştir. Şekil 3.1 de kullanılan alaşım elementleri gösterilmiştir. İndüksiyonla eritme yöntemi kullanılarak bakır matris içerisinde alaşımlama yapılarak eritilen numuneler alaşım elementleri ve oranlarına göre kategorize edilmiş ve metalürjik testlere tabi tutulmuşlardır. Yapılan alaşımlama işleminde bakır oranı %45, çinko %35 olarak sabit tutulmuş gümüş ve indiyum miktarı literatürde ifade edilen çalışmalar göz önünde bulundurularak [19,20, 23] %0-20 aralığında belirli oranlarda değiştirilerek 9 adet sert lehim ilave metal numuneleri oluşturulmuştur. İmal edilen numuneler ve içerikleri Tablo

3.2 de verilmiştir. Farklı bileşim ve oranlara sahip bu 9 adet lehim ilave metali deneysel incelemelere tabi tutulmuşlardır.



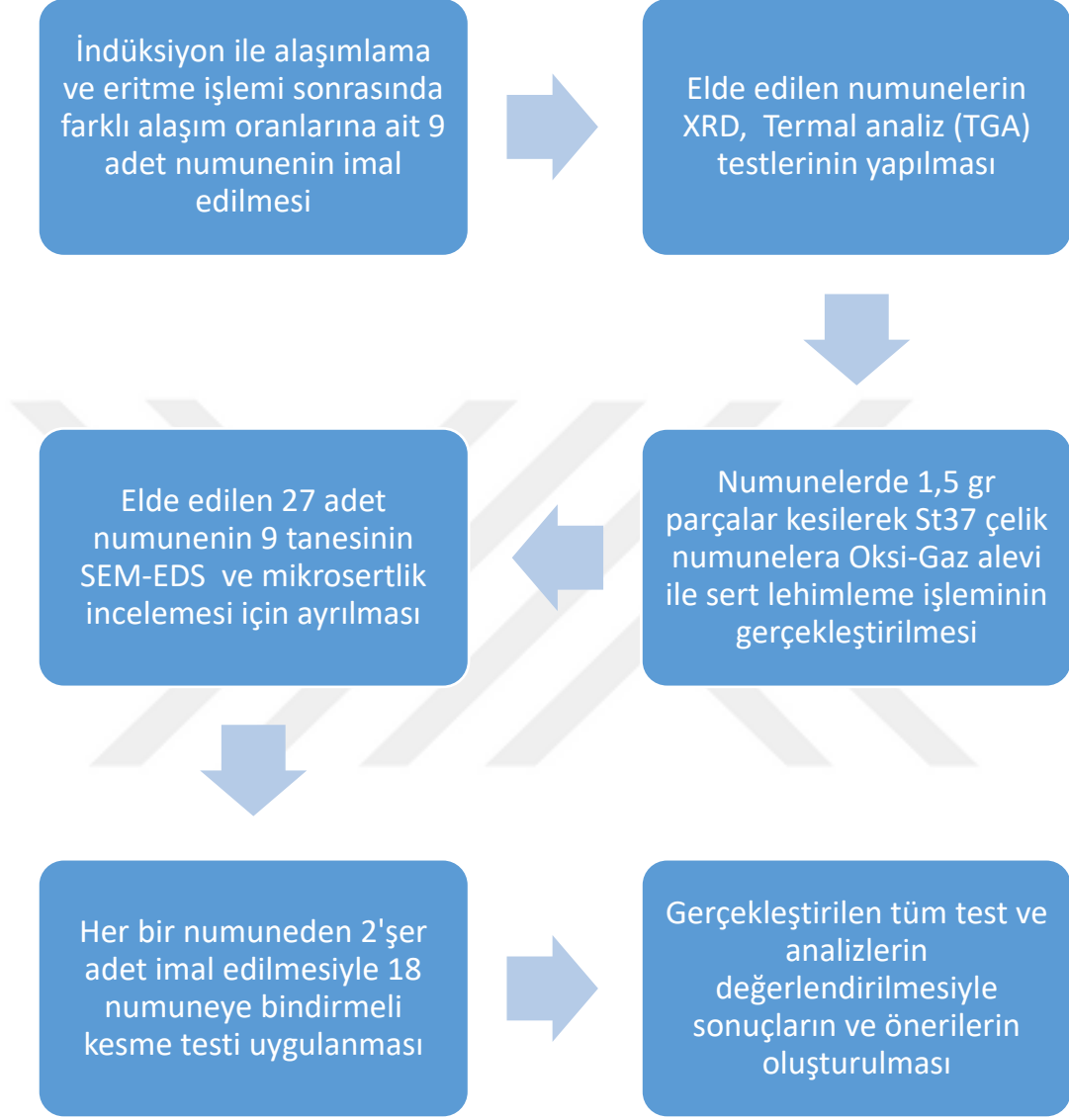
Şekil 3.1. Sert lehim ilave metal imalatında kullanılan alaşım elementleri

Tablo 3.2. Elde edilen sert lehim ilave metallerine ait içerik oranları

Numune	%Cu	%Zn	%Ag	%In
1	45	35	20	-
2	45	35	19	1
3	45	35	18	2
4	45	35	15	5
5	45	35	13	7
6	45	35	10	10
7	45	35	7	13
8	45	35	5	15
9	45	35	-	20

Uygulanacak işlemler kısaca Şekil 3.2. de ifade edilmiştir. İç piyasadan temin edilen yüksek saflıktaki Cu, Ag, Zn ve In alaşım elementleri indüksiyon ergitme ocağında Tablo 3.2 de belirtilen miktarlarda toplamda 100 gr üzerinden hesaplanarak grafit pota içerisinde sırasıyla bakır gümüş ve çinko eritildikten sonra indiyum ilavesi yapılarak grafit potada eritilmiştir. Şekil 3.3. de

indüksiyonla eritme işlemi gösterilmiştir. Şekil 3.4. de elde edilen numunelere ait görseller verilmiştir.



Şekil 3.2. Uygulanan işlem basamaklarının kısa tanımı



Şekil 3.3. İndüksiyonla eritme ve alaşımlama işlemi



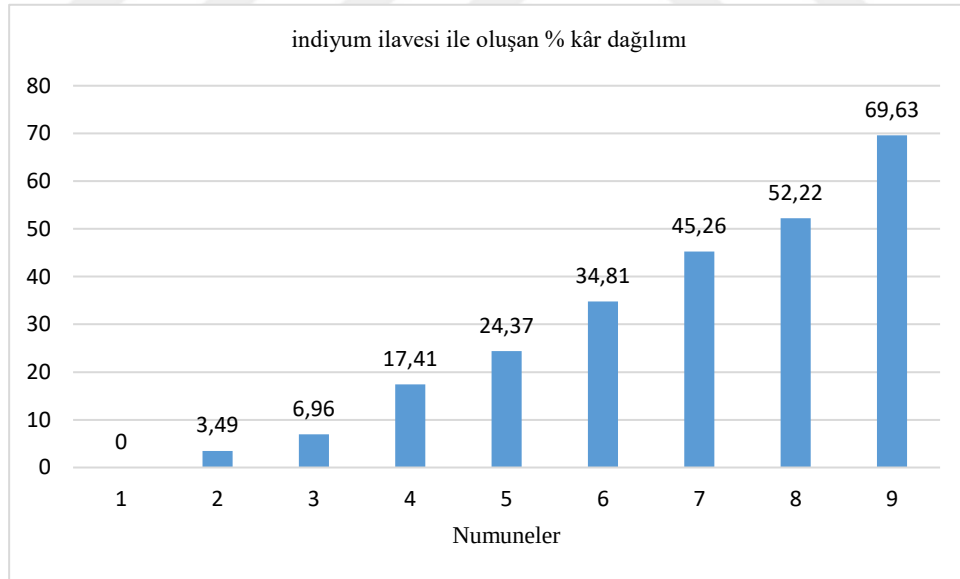
Şekil 3.4. İndüksiyonla eritme işlemi sonrası elde edilen numunelere ait görseller;

3.3. İmalat Maliyetlerinin Hesaplanması

Tablo 3.3. Alaşım elementlerinin 1 kg numuneye göre fiyat dağılım Tablosu

	Cu 160TL/kg)	Zn (50TL/kg)	Ag (14820TL/kg)	In (4190TL/kg)	Toplam Fiyat (TL)
1	72 TL	17,5 TL	2964 TL	-	3053.5 TL
2	72 TL	17,5 TL	2815,8 TL	41,6 TL	2946,9 TL
3	72 TL	17,5 TL	2667,6 TL	83,8 TL	2840,9 TL
4	72 TL	17,5 TL	2223 TL	209,5 TL	2840,9 TL
5	72 TL	17,5 TL	1926,6 TL	293,3 TL	2522 TL
6	72 TL	17,5 TL	1482 TL	419 TL	2309,4 TL
7	72 TL	17,5 TL	1037,4	544,7 TL	1990,5 TL
8	72 TL	17,5 TL	741	628,5 TL	1671,2 TL
9	72 TL	17,5 TL	-	838 TL	1459 TL

Yukarıdaki Tablo 3.3. de kullanılan alaşımların güncel döviz kurundaki Türk Lirası karşılığı göze alınarak kg bazında maliyet hesabı çıkartılmıştır.

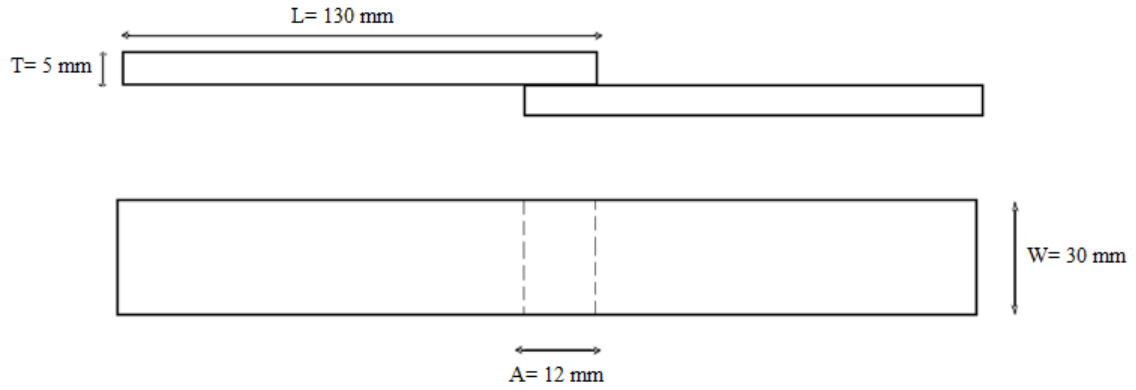


Şekil 3.5. İndiyum miktarı ile oluşan kâr dağılım grafiği

Şekil 3.5. de indiyum miktarının artması ve gümüş miktarının azalması ile imal edilen numunelerden elde edilen maliyetlerdeki kâr miktarları gösterilmiştir. Bu dağılım gümüşün yerine belirli oranda indiyum miktarının eklenmesi ile elde edilecek imalat kazancının oldukça yüksek olduğunu göstermektedir.

3.4. Sert Lehimleme İşlemi

- 3x30x130 ebatlarındaki St37 çelik numuneler, ÇEL-MAK A.Ş. de 9 adet numunenin her birinden 1,5 gr parça kesilerek oksî-gaz üfleçle sert lehimleme metodu ile birbirine lehimlenmiştir. St37 çelik numunenin lehimleme öncesi ve sonrasına ait görselleri Şekil 3.7. de verilmiştir.
- Lehimleme öncesi St37 üzerinde lehimlenecek kısımlar taşlanarak temizlenmiş ve dekapan uygulamasıyla ile sertlehim öncesi işleme hazır hale getirilmiştir.
- Lehimleme aşamasında lazer termometre kullanılarak çalışma sıcaklığı 800-850 C° aralığında tutulmuştur.
- 9 farklı alaşım oranlarına sahip 9 adet numuneden 1,5 gr kesilerek elde edilen sert lehim ilave metalleri ile her birinden 3'er adet olmak üzere toplamda 27 adet lehimlenmiş St37 numuneleri elde edilmiştir. Bunlardan 9'u mikroyapı, SEM-EDS analizlerinde kullanılmıştır.
- 18 adet numune bindirmeli kesme testine tabi tutulmuştur. Şekil 3.6 da bindirmeli kesme test numunesine ait şematik gösterim verilmiştir.



Şekil 3.6. Bindirmeli kesme test numunesi şematik gösterimi [9]



Şekil 3.7. St37 çeliğinin lehimlenmesi ile elde edilen numune örnekleri

3.5. Metalografik İşlemler

St37 çeliğinin oksî-gaz üfleçle lehimlenmesi sonrası sulu kesme makinası ile lehim bölgesinden Şekil 3.8. deki gibi metalografik inceleme için kesilmiştir. Zımparalama ve parlatma işlemlerinden sonra dağlama işlemi ile numunelerin yüzeyler mikroyapı incelemelerine hazır hale getirilmiştir. Dağlayıcı solüsyon: 15 gr $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$, 2 ml NH_4OH ve 100 ml saf su karışımıyla ile hazırlanmıştır. Metalografik hazırlık basamaklarından sonra mikroyapı incelemesine hazır hale getirilen numunelere ait görsel Şekil 3.8. de gösterilmiştir.



Şekil 3.8. Kesilmiş, parlatılmış ve dağlanmış numuneler

3.6. Bindirmeli Kesme Testi

Tüm numunelere ait bindirmeli kesme testi sonuçları aşağıda sıralanmıştır. 9 adet numune sonuçlardan emin olmak için ikişer defa teste tabii tutularak 18 test yapılmıştır. Bindirmeli kesme testi dakikada 5 mm yük uygulanarak gerçekleştirilmiştir. 5 mm kalınlığındaki test numuneleri ile bindirmeli kesme testi tekrarlanmıştır. Şekil 3.9. ve Şekil 3.10. da 5 mm kalınlığındaki St37 çeliğinin sert lehim sonrası bindirmeli kesme testi uygulamasına ait görsel verilmiştir.



Şekil 3.9. 5 mm kalınlığındaki St37 çeliği bindirmeli kesme testine tabi tutulurken



Şekil 3.10. 5 mm kalınlığındaki St37 çeliğine ait bindirmeli kesme test sonucu kesme anı

Elde edilen 18 adet çekme numunesi teker teker bindirmeli kesme testinde dakikada 5 mm çekme kuvveti uygulanarak bu işlem gerçekleştirilmiştir. Tüm numuneler beklenildiği üzere lehimlenen bağlantı bölgesinden kopmuştur.

3.7. Mikrosertlik Ölçümü

Bu kısımda lehimlenen St37 metalleri arasındaki lehim bölgesinden alınan mikrosertlik yerleri gösterilmiştir. Mikrosertlik ile ilgili değerlendirmeler bulgular başlığı altında irdelenmiştir.

1. Bölge	✦	St37
2. Bölge	✦	Lehim Alanı
3. Bölge	✦	Lehim Alanı
4. Bölge	✦	Lehim Alanı
5. Bölge	✦	St37

Şekil 3.11. Lehim bölgesinden alınan sertliklerin şematik gösterimi

Sert lehim uygulamasının yapıldığı bölgeden alınan sertliklerin şematik gösterimi Şekil 3.11.te verilmiştir.

3.8. Kullanılan Cihaz ve Ekipmanlar

Gerçekleştirilen imalat ve inceleme süreçlerinde kullanılan cihaz ve ekipmanlar aşağıda sıralanmıştır.

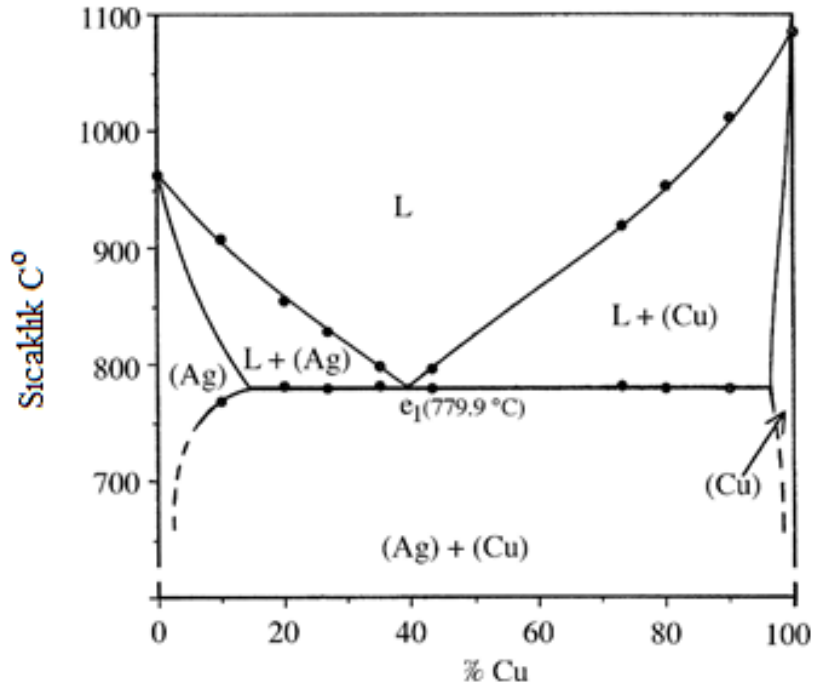
- İmal edilen sert lehim ilave metallerinin çalışma sıcaklıklarının ölçülmesi için Cem DT836 Dairesel Lazer Işıklı Termometre kullanılmıştır.
- Numunelerin hazırlanmasında kullanılan tartım işlemi için AND Gr/200 model 10^{-5} hassasiyetindeki terazi kullanılmıştır.
- Tartımı yapılan alaşım metallerinin eritilmesi işlemi için 110x60x40 mm ölçülerindeki grafit pota ve Taipan Induction 15 KW yüksek frekans indüksiyon ertitme makinası kullanılmıştır.
- Eritme işlemi sonrası elde edilen numuneler sulu kesme makinası ile istenilen ebatlara küçültülmüştür.
- St37 çeliğine lehimlenmeden önce DIN 8511-F-HS 2 standardındaki Magmaweld BF-11 dekapanı kullanılmıştır
- Numuneler, 400-800-1000 ve 1200 mesh'lik zımparalar ile önceden hazırlanmıştır.
- Parlatma işlemi için Tech Diamond Tools 14,000 grit / 0-1 mikronluk elmas pasta kullanılmıştır.
- Optik mikroskop görüntüleri için EVO MA10 model SEM cihazı kullanılmıştır.
- Termal analiz işlemi, azot gazı ortamında Seiko Exstar SII TG/DTA 6300 cihazıyla gerçekleştirilmiştir. Sıcaklık, 20°C/dakika artırılarak kontrol edilmiştir.
- X-ışınları difraksiyon (XRD) analizi için ST-70 marka difraktometre kullanılmıştır. Analizde Cu K α ışıması ve 2 θ (4-90°) açıları kullanılmıştır.
- Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) incelemeleri için EVO MA10 (FU MERLAB) model cihazlar kullanılmıştır.
- Mikrosertlik ölçümleri Kronic HV-1000 model cihazla 0.254 kgF yük altında 15 saniye boyunca Vickers Sertliği cinsinden yapılmıştır.
- Bindirmeli kesme testi, Shimadzu AGX-V serisi çekme cihazı ve TRAPEZIUMX-V yazılımıyla 5 mm/dakika hızında ve 100 kN'nin altındaki yükle gerçekleştirilmiştir.

4. BULGULAR

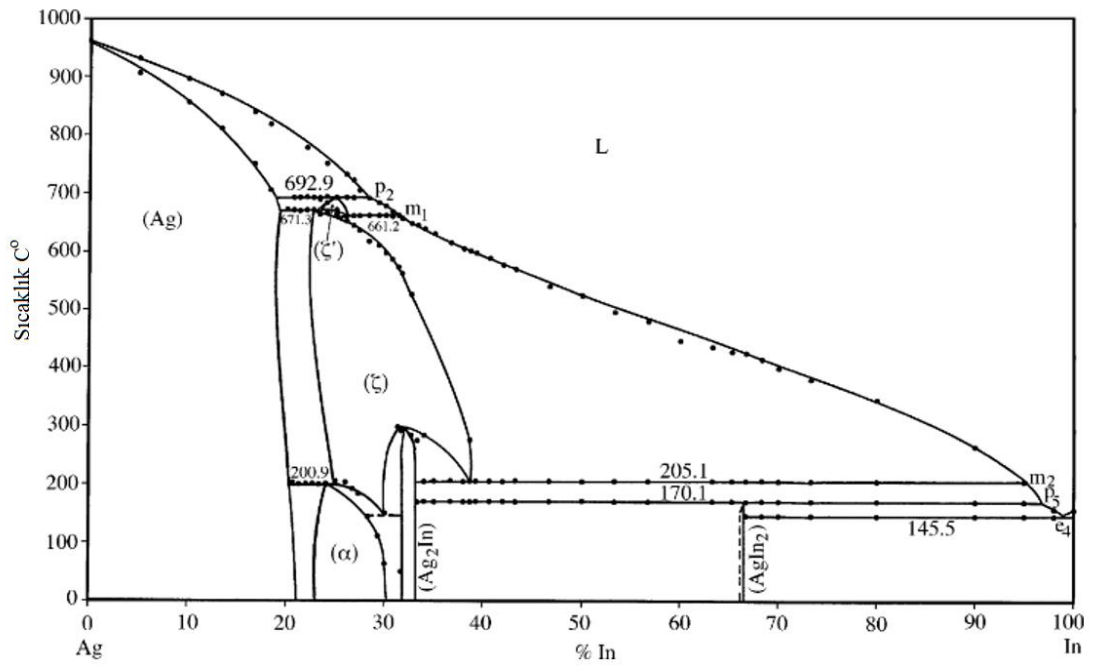
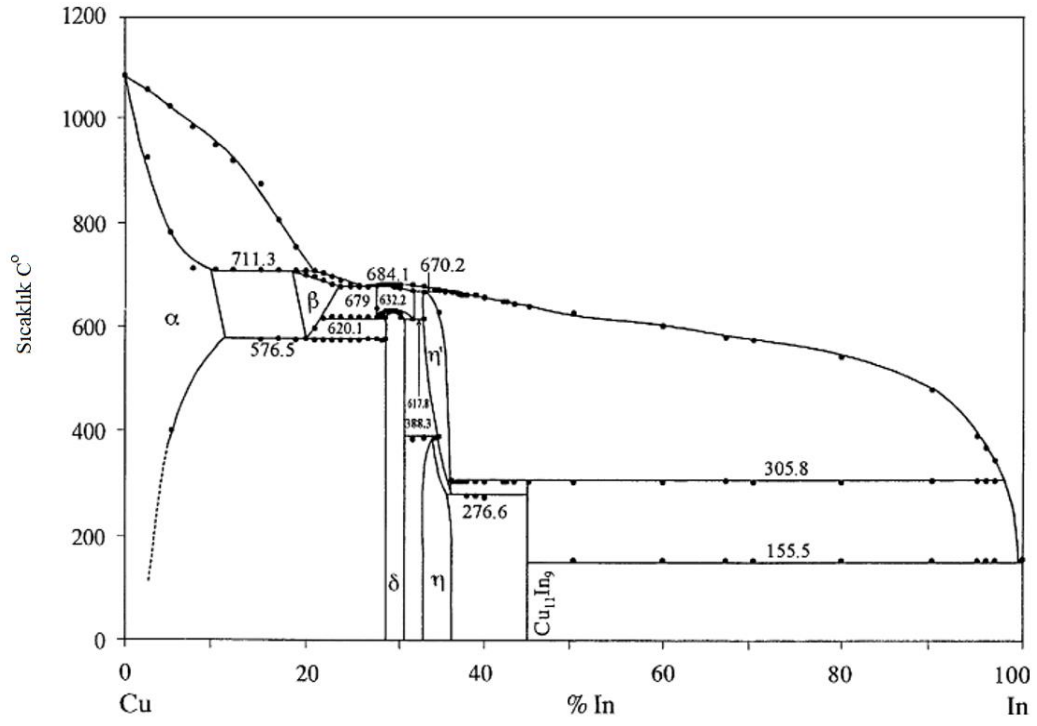
Bu kısımda tez çalışmasında elde edilen numunelere uygulanan testler ve sonuçları irdelenmiştir. Literatür çalışmalarından elde edilen veriler ile tez çalışmasına ait veriler ilişkilendirilerek kıyaslanmıştır.

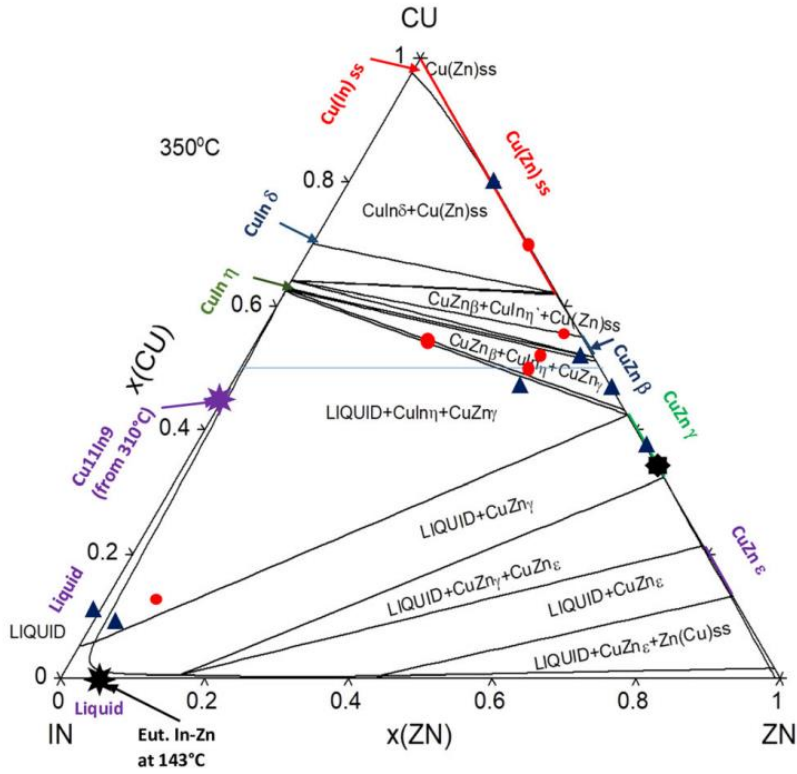
4.1. Mikroyapı İncelemeleri

Bu kısımda St37 çeliklerinin sert lehimleme işlemi sonrasında lehim bölgesinden alınan SEM analizi sonuçlarına dayanarak elde edilen mikroyapı görüntüleri incelenmiştir. Elde edilen mikroyapı görüntülerindeki farklı fazlar, EDS analiziyle yapı içinde bulunan elementlere (Cu, Zn, Ag, In) ait yüzdesel elemental analiz oranlarına göre yorumlanmıştır. Literatür çalışmalarından [10,21,29-32] elde edilen bilgilerle birlikte Cu-Ag denge diyagramına ait Şekil 4.1., Cu-In denge diyagramına ait Şekil 4.2., Ag-In denge diyagramına ait Şekil 4.3. ve Cu-Zn-In üçlü denge diyagramına ait Şekil 4.4. kullanılmıştır. Bu diyagramlar, XRD ve EDS analiz sonuçları göz önünde bulundurularak, mikroyapılardaki farklı fazlar üzerindeki bileşiklerle ilgili yorumlar yapılmıştır.

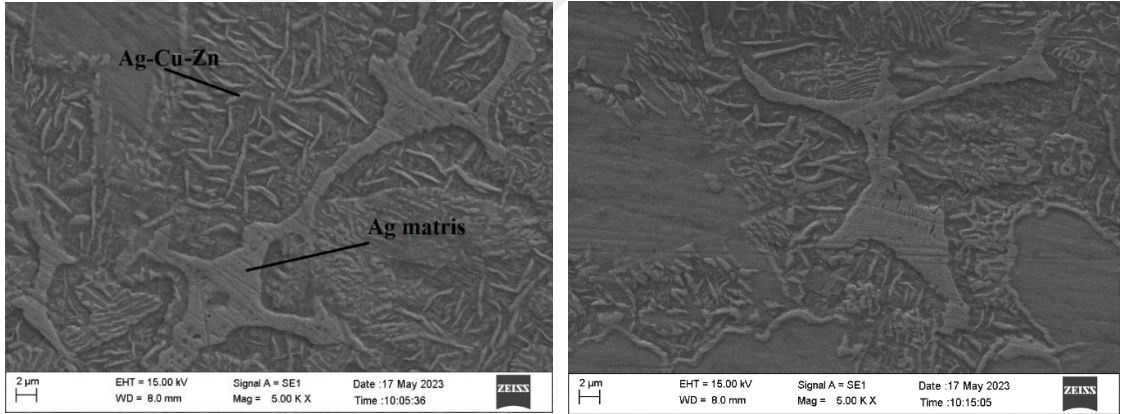


Şekil 4.1. Cu-Ag denge diyagramı[29]



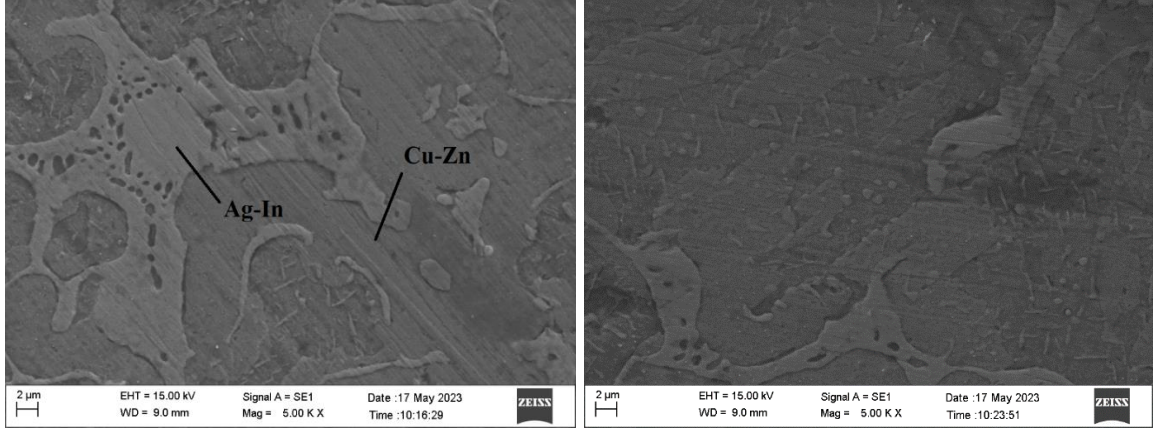


Şekil 4.4. Cu-Zn-In üçlü denge diyagramı [30]



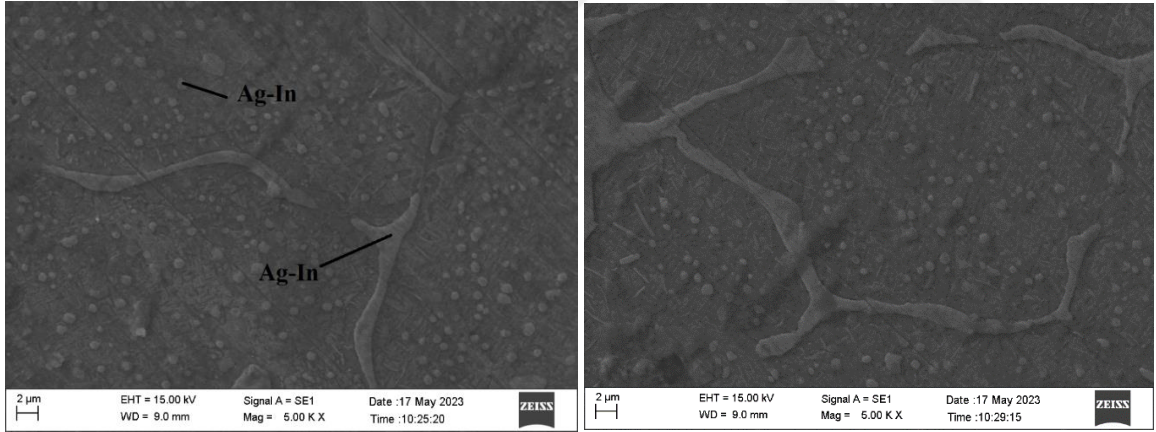
Şekil 4.5. 1 Numaralı 20Ag-Cu-Zn numunesine ait mikroyapı görüntüsü

Şekil 4.5.de 1 Numaralı 20Ag-Cu-Zn numunesine ait mikroyapı görüntüsünde Cu-Ag-Zn bileşikler fazların üzerinde gösterilmiştir. İlgili fazlara ait içerikler SEM-EDS görüntülerinde irdelenmiştir. EDS analiz değerleri Şekil 4.20 ve Şekil 4.21 de gösterilmiştir. Gümüş miktarının %20 olduğu bu numunenin içeriğinde iğnemsı yapıların Ag-Cu, CuZn bileşiklerini içerdiği görülmektedir. Açık renkli geniş ölçekli bölgenin ise Ag matris içerikli faz olduğu görülmektedir.



Şekil 4.6. 2 Numaralı 19Ag-Cu-Zn-1In numunesine ait mikroyapı görüntüsü

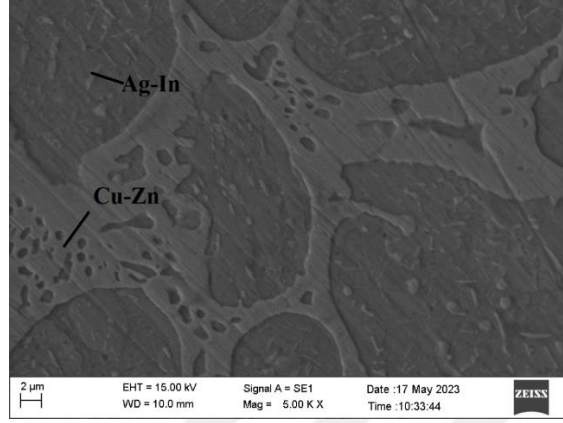
2 Numaralı 19Ag-Cu-Zn-1In numunesine ait mikroyapı görüntüsü Şekil 4.6.de yer almaktadır. Ag-In ve Cu-Zn bileşikler fazların üzerinde gösterilmiştir. İlgili fazlara ait EDS analiz içerikleri Şekil 4.23 ve Şekil 4.24 de verilmiştir. Şekil 4.6 deki görüntüler matris içeriğinde CuZn bileşiği yer aldığını göstermektedir. Açık renkli geniş ölçekli bölgenin ise Ag_3In içerikli faz olduğu görülmektedir. İndiyum ilavesi ile matris içerisindeki iğnemsiz fazların azaldığı ve geometrik olarak daha kararlı bir hal aldıkları anlaşılmaktadır.



Şekil 4.7. 3 Numaralı 18Ag-Cu-Zn-2In numunesine ait mikroyapı görüntüsü

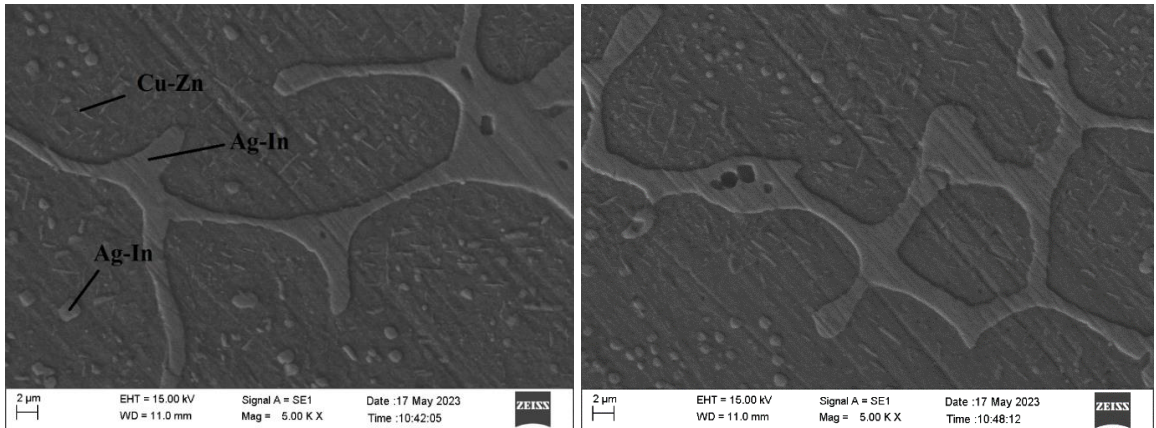
3 Numaralı %18 Ag, %2 In içerikli numuneye ait mikroyapı görüntüsünde Ag-In bileşikler fazların üzerinde Şekil 4.7.te gösterilmiştir. İşaretli fazlar içeriğindeki elementlere ait EDS analiz değerleri Şekil 4.26 ve Şekil 4.27 'te yer almaktadır. Görüntüler matris içeriğinde küçük taneciklerin Ag_3In bileşiklerini içerdiği göstermektedir. Açık renkli daha geniş bölgenin de Ag-In içerikli faz olduğu görülmektedir. İndiyum miktarının yükselmesi ile matriste yer alan iğnemsiz fazların daha da azaldığı ve büyük bir kısmının küresel form kazandığı net şekilde anlaşılmaktadır.

Bu yapısal değişikliğin bakır etrafında indiyumun bağ oluşturarak intermetalik bileşikler meydana getirmesi ile olduğu düşünülmektedir[33].



Şekil 4.8. 4 Numaralı 15Ag-Cu-Zn-5In numunesine ait mikroyapı görüntüsü

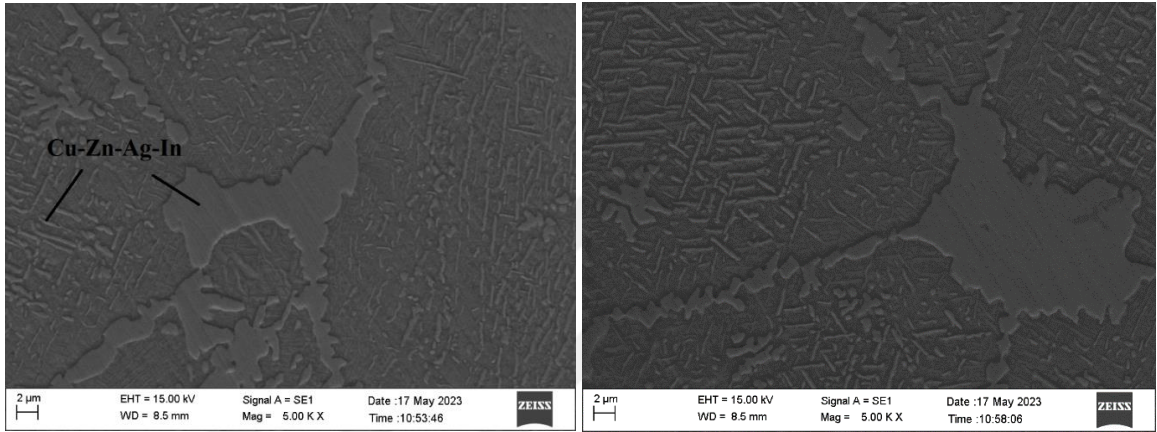
%5 In ve %15 Ag içeriğine sahip 4 numaralı numunenin Şekil 4.8.teki mikroyapı görüntüsünde Ag-In ve Cu-Zn bileşikler işaretli fazların üzerinde gösterilmiştir. Bu numuneye ait EDS analizi Şekil 4.29 ve Şekil 4.30 da verilmiştir. Bu değerlere göre matris içeriğinde küçük taneciklerin Ag-In elementlerini içerdiğini göstermektedir. Tane sınırı olarak ifade edebileceğimiz geniş bölgenin ise Cu-Zn içerikli faz olduğu görülmektedir. İndiyum miktarının %5 olduğu bu numunede tane sınırını oluşturan fazlarda küresel yapıların meydana geldiği gözlemlenmektedir. Tane sınırlarındaki fazlarda meydana gelen bu küresel formların malzemenin çekme dayanımına katkısı olduğu düşünülmektedir.



Şekil 4.9. 5 Numaralı 13Ag-Cu-Zn-7In numunesine ait mikroyapı görüntüsü

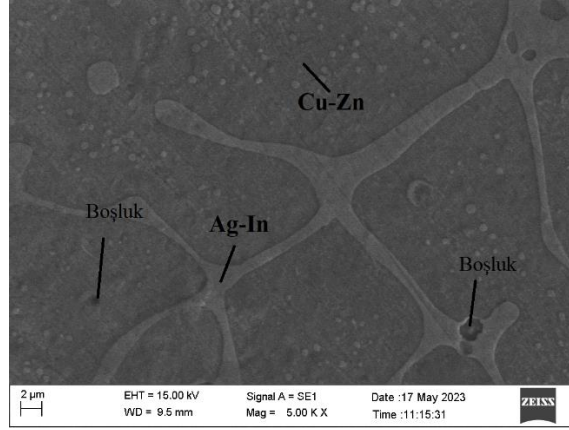
13Ag-Cu-Zn-7In içerikli 5 Numaralı numuneye Şekil 4.9.teki mikroyapı görüntüsünde Ag-In ve Cu-Zn bileşikler fazların üzerinde gösterilmiştir. Numune üzerinde işaretli bölgelere ait EDS

analiz değerleri Şekil 4.32 ve Şekil 4.33 da verilmiştir. EDS analiz değerlerine göre Matris içeriğinde küçük taneciklerin Ag-In elementlerini içerdiği görülmektedir. Matris içindeki iğnemi fazların ise Cu-Zn içerikli olduğu anlaşılmaktadır. Açık renkli geniş ölçekli bölgenin ise Ag-Zn içerikli faz olduğu görülmektedir. İndiyum miktarının %5 ten daha yüksek miktarlarda artması ile matris içeriğindeki küresel taneciklerin tekrar iğnemi forma dönüştüğü görüntülerden anlaşılmaktadır. Ayrıca tane sınırındaki fazların incelendiği de yine mikroyapı görüntüsü ile belirgin şekilde gözlemlenebilmektedir.



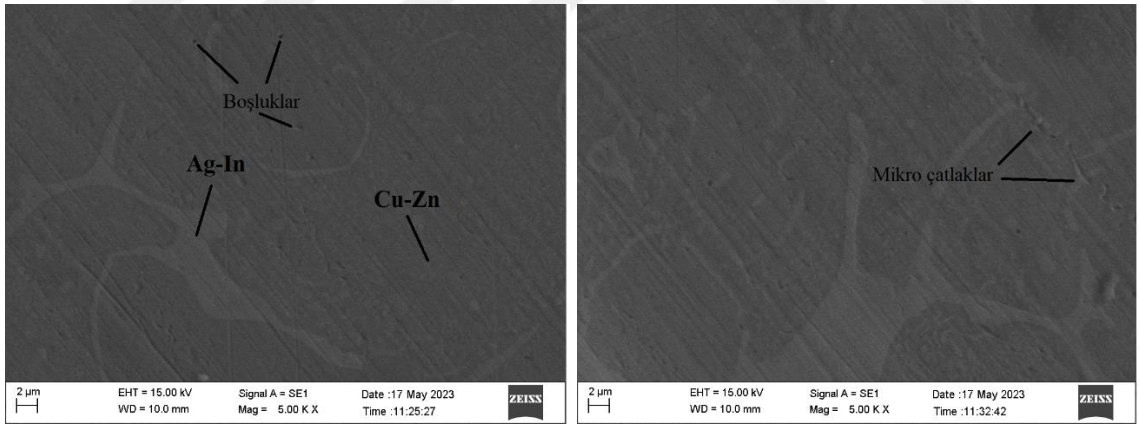
Şekil 4.10. 6 Numaralı 10Ag-Cu-Zn-10In numunesine ait mikroyapı görüntüsü

Şekil 4.10.da 6 Numaralı 10Ag-Cu-Zn-10In numunesine ait mikroyapı görüntüsü verilmiştir. EDS analizi sonrası elde edilen veriler Şekil 4.35 ve Şekil 4.36 d verilmiştir. Elde edilen EDS verilerine göre Ag-In ve Cu-Zn bileşiklerine sahip olduğu düşünölen fazlar mikroyapı üzerinde gösterilmiştir. İlgili görselde matris içeriğinde lamel şekilli fazların ve açık renkli geniş ölçekli bölgenin Ag-In-Cu-Zn içerikli faz olduğu görülmektedir. İndiyum miktarının %10'a yükseltildiği bu numunede matris içeresindeki küresel formların yoğun şekilde iğnemi lamellere dönüştüğü anlaşılmaktadır. Bu da yapının çekme dayanımına olumsuz etki yaratacağını düşündürmektedir. Ayrıca tane sınırlarındaki fazın ise köşeli geometrik bir form kazandığı gözlemlenmektedir.



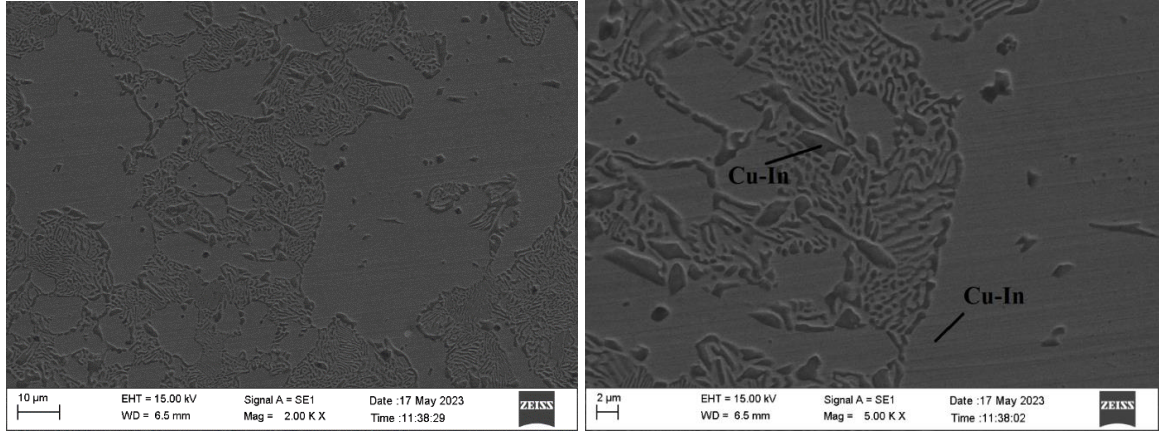
Şekil 4.11. 7 Numaralı 7Ag-Cu-Zn-13In numunesine ait mikroyapı görüntüsü

Şekil 4.11.de 7 Numaralı 7Ag-Cu-Zn-13In numunesine ait mikroyapı görüntüsünde Ag-In ve Cu-Zn bileşikleri işaretli fazların üzerinde gösterilmiştir. Bu fazlara ait ilgili bileşiklerin varlığı Şekil 4.38 ve Şekil 4.39 te verilen EDS analiz değerlerinden elde edilmiştir. Elde edilen EDS değerlerine göre matris içeriğinin Cu-Zn elementlerinden oluştuğu söylenebilir. Açık renkli tane sınırlarındaki bölgenin ise Ag-In içerikli faz olduğu ifade edilmektedir. İndiyum miktarında %13 oranındaki artışla istenmeyen boşluk yapılarının da meydana geldiği gözlemlenmektedir.



Şekil 4.12. 8 Numaralı 8Ag-Cu-Zn-15In numunesine ait mikroyapı görüntüsü

8 Numaralı 8Ag-Cu-Zn-15In numunesine ait Şekil 4.12.deki mikroyapı görüntüsü yer almaktadır. İşaretli fazlardaki bileşiklerin varlıkları yapılan EDS analiz değerleri ile Şekil 4.41 ve Şekil 4.42 de belirtilmiştir. Bu bileşiklerin Ag-In ve Cu-Zn bileşikleri olarak ilgili fazların üzerinde gösterilmiştir. Ayrıca matris içeriğinde bölgenin Cu-Zn elementlerini içerdiği görülmektedir. %15 In içerikli 8 numaralı numunenin mikroyapı görüntülerinde yapıda oluşan boşluk ve mikro çatlaklar gözlemlenmektedir. Bu istenmeyen yapısal boşlukların malzemenin çekme dayanımına olumsuz etkiler oluşturması kaçınılmazdır.

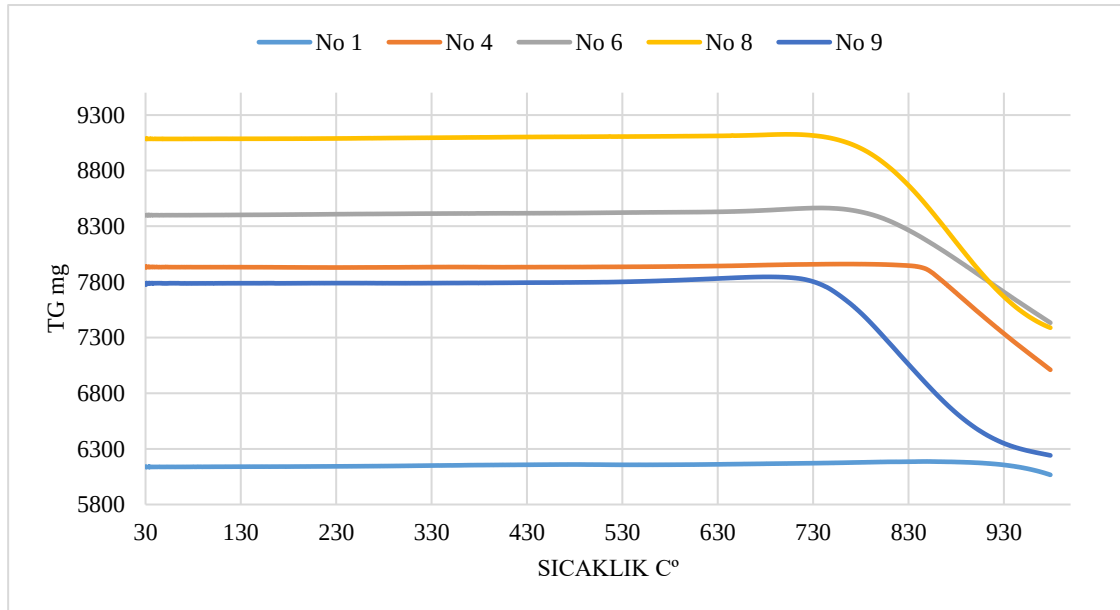


Şekil 4.13. 9 Numaralı Cu-Zn-20In numunesine ait mikroyapı görüntüsü

9 numaralı %20 In içerikli numunenin mikroyapı görüntüsü Şekil 4.13 da verilmiştir. EDS analiziyle elde edilen verilere göre Cu-In ve Cu-Zn bileşikleri fazların üzerinde gösterilmiştir. İlgili EDS analiz verileri Şekil 4.45 ve Şekil 4.46 de gösterilmektedir. Ag içermeyen bu numunenin mikroyapısını gözenekli bir hal kazandığı anlaşılmaktadır.

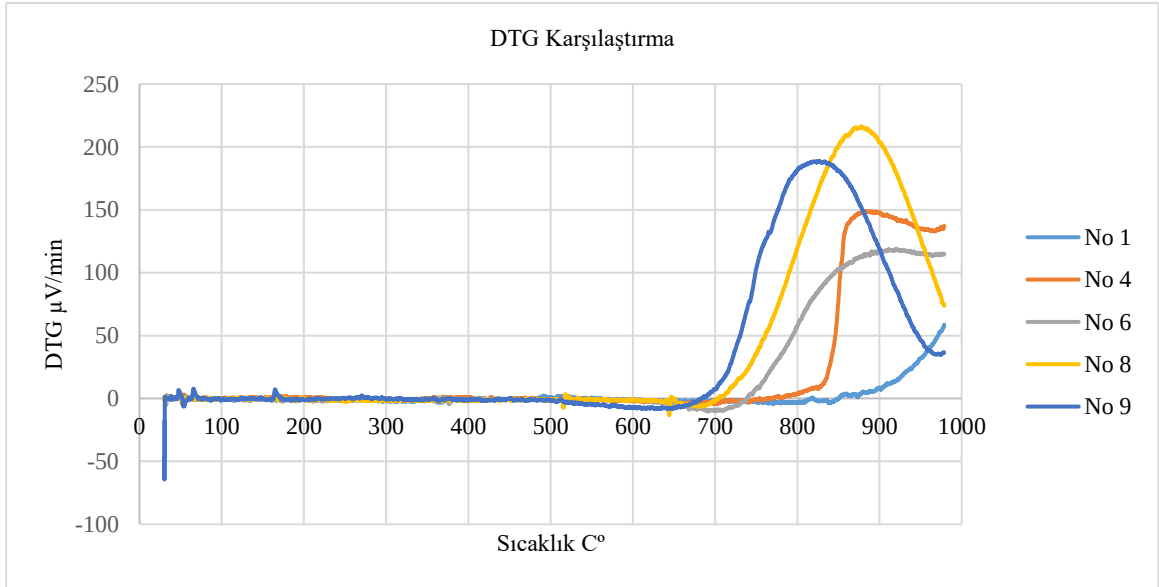
4.2. Termal Analiz (TGA-DTA)

Bu bölümde numunelere uygulanan Termogravimetrik ve Diferansiyel Termal Analiz testlerine ait sonuçlar irdelenmiştir. Analiz sonuçlarının orijinal çıktılar Ek'ler bölümünde verilmiştir.



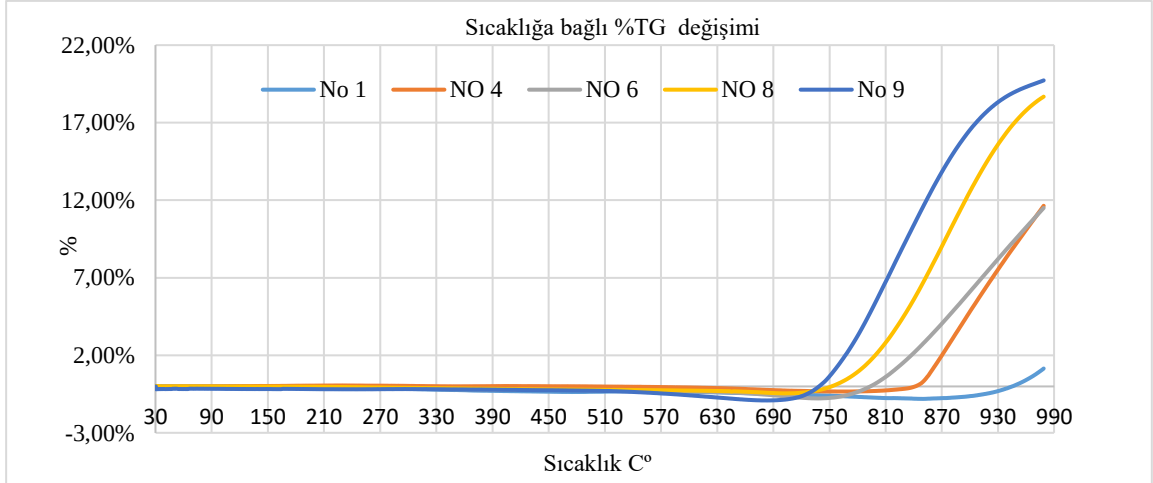
Şekil 4.14. 1,4,6,8 ve 9 numaralı numunelere ait TGA değerleri

Şekil 4.14.de TGA (termogravimetrik analiz) eğrileri incelendiğinde 700 C° sıcaklık eşiğine kadar tüm malzemelerde kütlenin korunduğu görülmektedir. 700 C°- 850 C° aralığında ise indiyum miktarının artması ile kütle kaybı başlangıç sıcaklığının düştüğü gözlemlenmektedir. En düşük kütle kaybı başlangıç sıcaklığı 20 %In içerikli 9 nolu numunede en düşük kütle kaybı başlangıç sıcaklığının ise indiyum içermeyen %20 Ag içerikli 1 nolu numunede olduğu anlaşılmaktadır. İndiyum miktarının artışıyla orantılı olarak kütle kaybı başlangıç sıcaklığın düşmesi sert lehim ilave metali olan numunelerin sıcaklık artışı ile bünyelerinde meydana gelen hal değişimlerinin daha düşük sıcaklıklarda meydana geldiğini göstermektedir. Kütle kaybının yaşanması için gerekli olan termal enerjinin daha düşük sıcaklıklarda sağlanması atomlar arası bağların daha hızlı kopmasına neden olmaktadır[35].



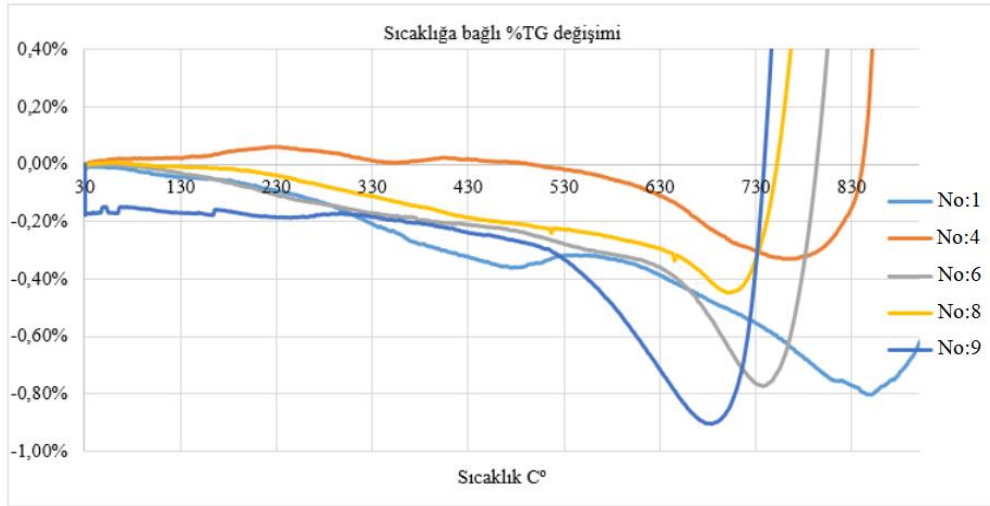
Şekil 4.15. 1,4,6,8 ve 9 numaralı numunelere ait zamana bağlı termogravimetrik analiz grafiği

Şekil 4.15.de sıcaklık ve birim zamana bağlı TGA değerleri incelendiğinde kütle kaybının maksimum yaşandığı sıcaklıklar görülmektedir. %20 Ag içerikli 1 numaralı numunede kütle kaybının hız kazandığı sıcaklığın yaklaşık 850 C° iken indiyum miktarının artması ile bu sıcaklığın düştüğü gözlemlenmektedir. Öyle ki 1 numaralı numuneden sonra %5 In içerikli 2 numaralı numune yaklaşık 800 C° civarında kütle kaybını hızlandırmıştır. In miktarı %10 olan 6 numaralı numunede kütle kaybının logaritmik olarak artmaya başladığı sıcaklık yaklaşık 750 C°, In miktarının %15 olduğu 8 numaralı numunede bu sıcaklık yaklaşık 700 C° ve son olarak Ag içermeyen ve %20 In içerikli 9 numaralı numunede ise kütle kaybının yüksek ivme kazandığı sıcaklığın yaklaşık 680 C° civarında olduğu anlaşılmaktadır[35].



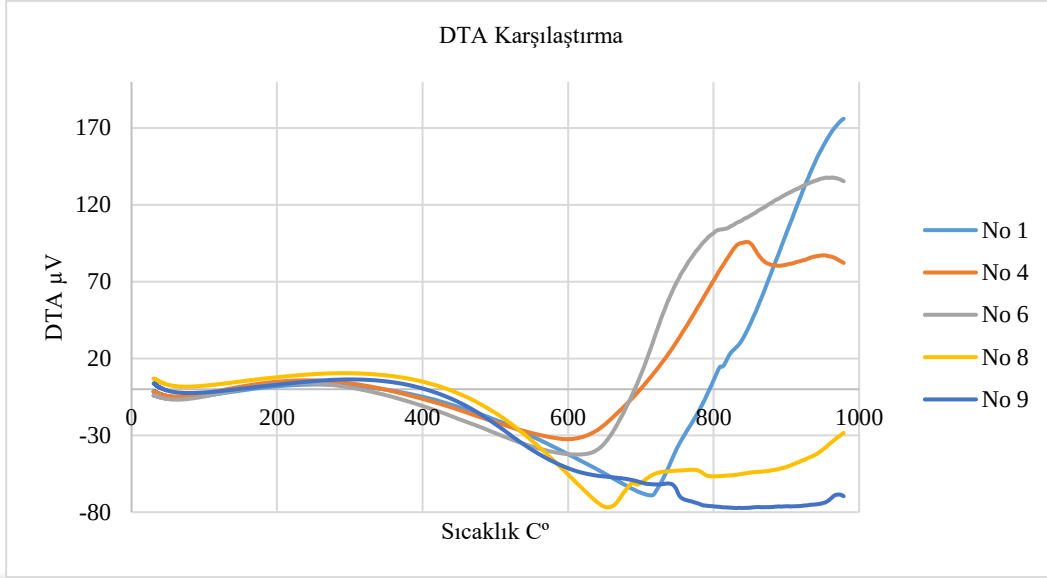
Şekil 4.16. 1,4,6,8 ve 9 numaralı numunelere ait zamana bağlı yüksek oranlı %TGA değişim grafiği

Yüksek oranlı % TGA değerlerinin verildiği Şekil 4.16. daki grafik irdelendiğinde yüksek kütle belirlenen bir sıcaklıktaki maksimum yüksek kütle kaybı ve numunelerin oksitlenme aralıkları görülmektedir. 950C° referans alındığında maksimum kütle kaybı yaşayan numunenin yaklaşık %20 kütle kaybı ile 9 numaralı Ag içermeyen %20 In içerikli numune olduğu anlaşılmaktadır. En düşük kütle kaybının ise In içermeyen %20 Ag içerikli 1 numaralı numunede meydana geldiği görülmektedir. İndiyum miktarının artışı ile kütle kaybının da arttığı belirgin biçimde grafik üzerinde görülmektedir. 950 C° sıcaklıkta 1 numaralı numunenin ardından yaklaşık %11 kütle kaybı oranıyla 4 numaralı %5 İndiyum içerikli numune gelirken onun hemen beraberinde %10 içerikli 6 numaralı numune gelmektedir. Sonrasında ise %20 ye yakın bir kütle kaybı oranıyla %15 indiyum içerikli 8 numaralı numune gelmektedir. Elde edilen verilere göre yaklaşık 830 C° sıcaklıkta 1 ve 4 numaralı numunelerde kütle kaybı henüz başlamamışken 6,8 ve 9 numaralı numunelerde kütle kaybı önemli ölçüde artış göstermeye başlamıştır. Bu durum indiyum miktarının artmasıyla beraber sert lehim ilave metallerinin yüksek sıcaklıklarda kullanım ömrünü azaltmaktadır. Ancak 4 numaralı %5 In içerikli numunenin yaklaşık 830 C° kütle kaybına başlamasına karşın 1 numaralı İndiyum içermeyen referans numunesinin ise yaklaşık 930 C° de kütle kaybına uğramaya başladığı anlaşılmaktadır. Kütle kaybına uğramaya başladıkları sıcaklık aralığının yaklaşık olarak 100 C° olması çalışma ömürleri açısından bir dezavantaj olarak görülse de, %5'e kadar indiyum içerikli bir sert lehim ilave metalinin daha düşük sıcaklıklarda çalışma imkanı vermesi enerji maliyetleri açısından önem arz etmektedir.



Şekil 4.17. 1,4,6,8 ve 9 numaralı numunelere ait zamana bağlı düşük oranlı %TGA değişim grafiği

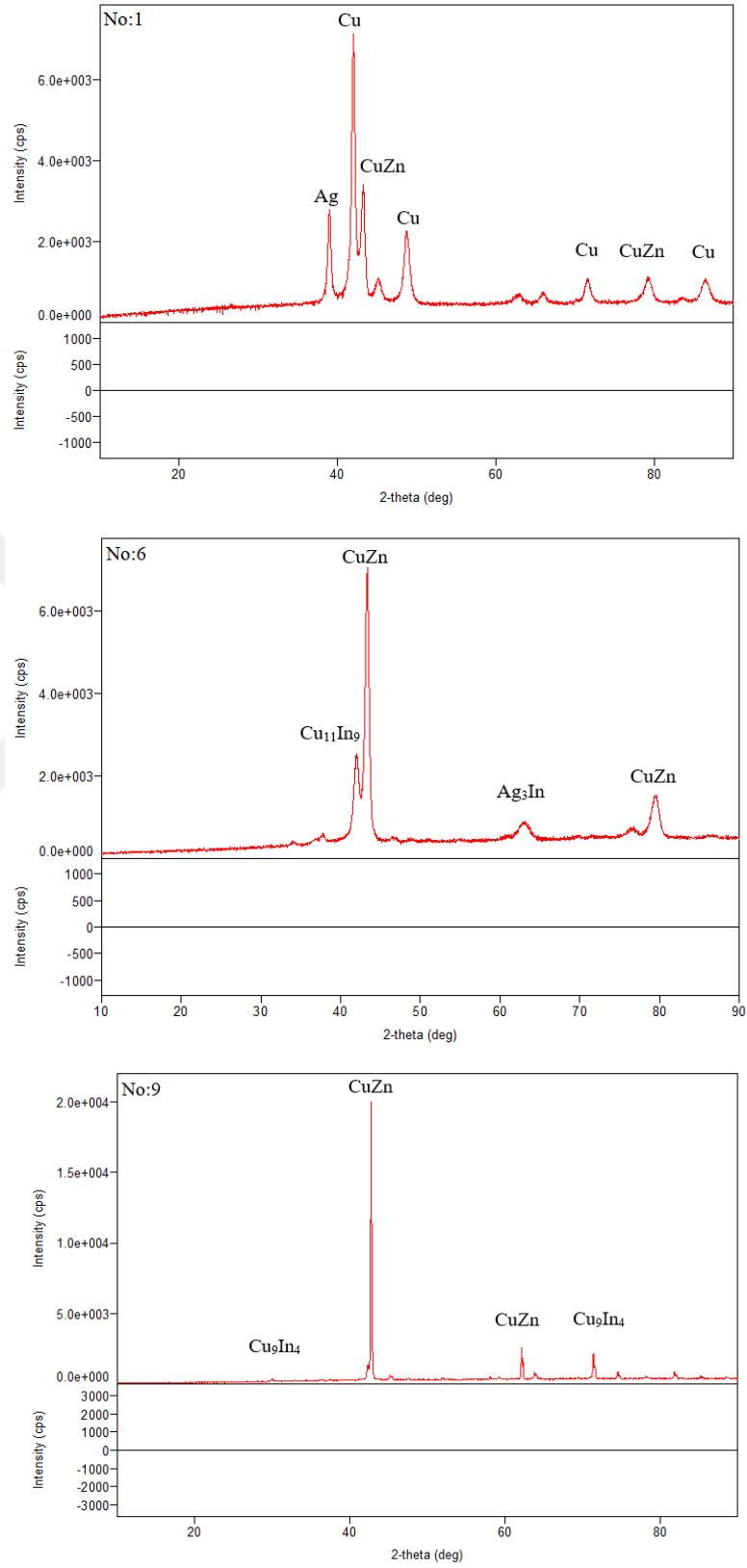
Düşük kütle kaybı oranlı %TGA değişim grafiği irdelendiğinde numunelerin oksitlenme sıcaklık başlangıç ve bitiş aralığı daha net Şekil 4.17. de görülmektedir. Yaklaşık 530 C° civarında tüm numunelerin oksitlenmeye bağlı kütler artışı dikkate değer bir miktarda artmadığı görülmektedir. Ancak 530 C° ve üzeri sıcaklıklarda oksitlenme tüm numunelerde ivme kazanmaktadır. İndiyum miktarının artması ile oksitlenme sıcaklıklarının da daha düşük sıcaklıklarda oluşmaya başladığı grafik üzerinden değerlendirilebilmektedir. Ancak indiyum içermeyen 1 numaralı numunenin oksitlenmeye %5 indiyum içerikli 4 numaralı numuneye göre daha erken başladığı da yine grafik üzerinden anlaşılmaktadır. Ayrıca tüm sıcaklık aralıkları baz alındığında en yüksek oksidasyona bağlı kütle artışının indiyum içermeyen numuneden olduğu ve indiyum miktarı %5 olan 4 numaralı numunede ise en düşük oksidasyonun meydana geldiği görülmektedir. İndiyum miktarının artmasıyla da yine oksitlenmenin arttığı anlaşılabilir ancak indiyum içerikli numunelerde oksitlenmenin daha düşük olması da yine malzemenin yüksek sıcaklıklara ulaşmadan kütle kaybı göstermeleri bu numunelerin hal değişimine daha erken maruz kaldığını ifade etmektedir. Hal değişiminde ihtiyaç duyulan bağ enerjisinin artması termal enerjinin artması ile doğru orantılı olduğu düşünüldüğünde kütle kaybı da ancak atomlar arası bağ enerjisinin artması ile mümkündür. Bu doğrultuda indiyum miktarı artışı ile sert lehim ilave metallerinde düşük sıcaklıklarda hal değişimlerinin meydana geldiği söylenebilir.



Şekil 4.18. 1,4,6,8 ve 9 numaralı numunelere ait DTA grafiği

DTA (Diferansiyel Termal Analiz) grafiğinin yer aldığı Şekil 4.18. incelendiğinde, indiyum miktarının %5 ve %10 olduğu numunelerde endotermik ve egzotermik reaksiyonların daha kontrollü gerçekleştiği ancak indiyum miktarının artmasıyla malzeme içerisindeki kararsızlığın sıcaklıkla arttığı belirgin şekilde görülmektedir. Hal değişim sıcaklığını yine %5 ve %10 indiyum içeren numunelerde referans numunesi olan %20 Ag içerikli 1 numaralı numuneye göre daha düşük gerçekleştiği de diyagram üzerinden okunmaktadır. İndiyum içermeyen referans numunesi %20 Ag içerikli 1 numaralı numunede ekzotermik dönüşüm 800 C° civarında başlarken indiyum miktarı %5 olan 4 numaralı numunede ve indiyum miktarı %10 olan 6 numaralı numunede 700 C° de gerçekleşmektedir. 8 ve 9 numaralı numunelerde ise hal değişim reaksiyonları ve ekzotermik dönüşümler içyapılarındaki kararsız dönüşüm ve intermetalik fazların artması sebebiyle kontrolsüz oluşmaktadır[35].

4.3. XRD Analizi

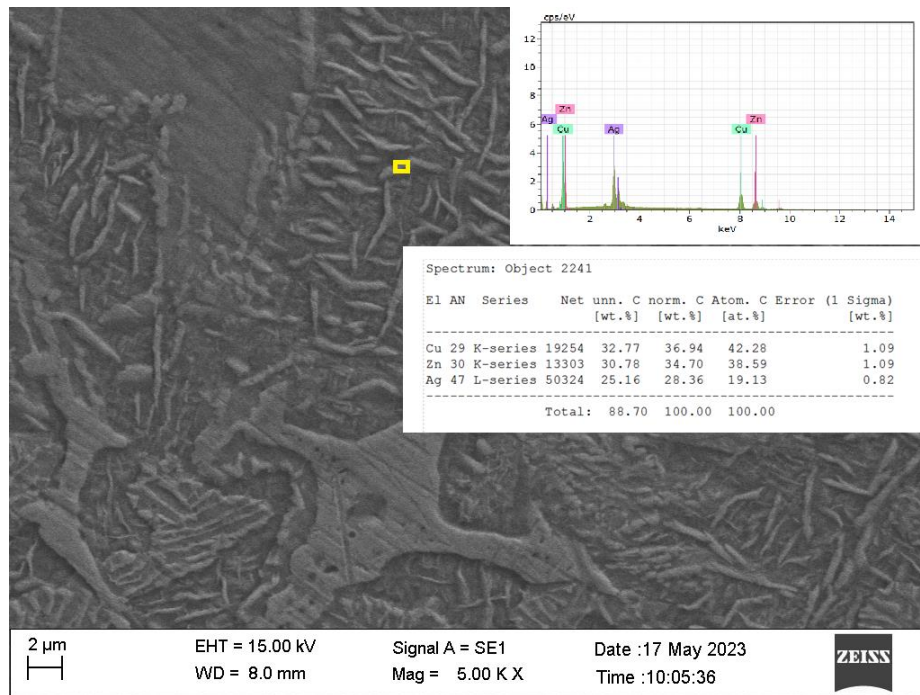


Şekil 4.19. 1, 6 ve 9 numaralı numunelere ait XRD diyagramları

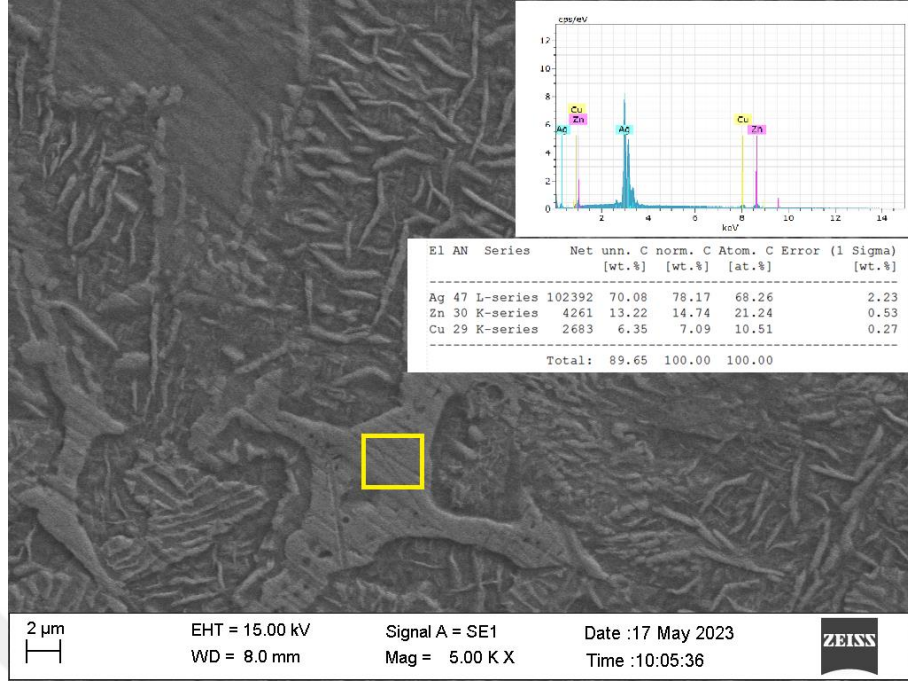
Şekil 4.19. da 1,6 ve 9 numaralı numunelere ait XRD değerleri gösterilmektedir. 1 numaralı numunede indiyum bulunmayıp sadece gümüş, bakır ve çinko yer almaktadır. Analiz raporunda yer alan elementler ve bileşikler piklerle gösterilmiştir. 6 numaralı numunede ise bakır ve çinkonun yanı sıra %10 Ag ve %10 In yer almaktadır. indiyum-gümüş ve indiyum-bakır bileşikleri piklerde gösterilmiştir. Son olarak 9 numaralı numune de ise gümüş içermediğinden sadece bakır, çinko ve %20 indiyum bulunmaktadır. Bu raporda ise indiyum-bakır bileşikleri ilgili piklerde gösterilmiştir. Literatür çalışmalarında [21,31,32,33] belirtilen fazlar (Ag_3In , $CuZn$, Cu_9In_4 , $Cu_{11}In_9$) buradaki XRD sonuçlarında da görülmektedir. Böylece elde edilen numunelerin element ve bileşik içeriklerinin literatürle uyumlu olduğu anlaşılmaktadır.

4.4. SEM-EDS Analizi

Aşağıdaki görüntüler, St37 çeliklerinin sert lehimleme işlemi sonrasında lehim bölgesinden alınan SEM analizi sonuçlarına dayanarak elde edilen mikroyapı görüntüleridir. Elde edilen mikroyapı görüntülerindeki farklı fazlar, EDS analiziyle yapı içinde bulunan elementlere (Cu, Zn, Ag, In) ait yüzdesel elemental analiz oranlarına göre yorumlanmıştır. Taranan literatür çalışmalarından [10,21,29-32] elde edilen bilgilerle birlikte Cu-Ag denge diyagramına ait Şekil 4.1, Cu-In denge diyagramına ait Şekil 4.2, Ag-In denge diyagramına ait Şekil 4.3 ve Cu-Zn-In üçlü denge diyagramına ait Şekil 4.4 kullanılmıştır. Bu diyagramlar ve EDS analiz sonuçları göz önünde bulundurularak, mikroyapılardaki farklı fazlar üzerindeki bileşiklerle ilgili yorumlar yapılmıştır.

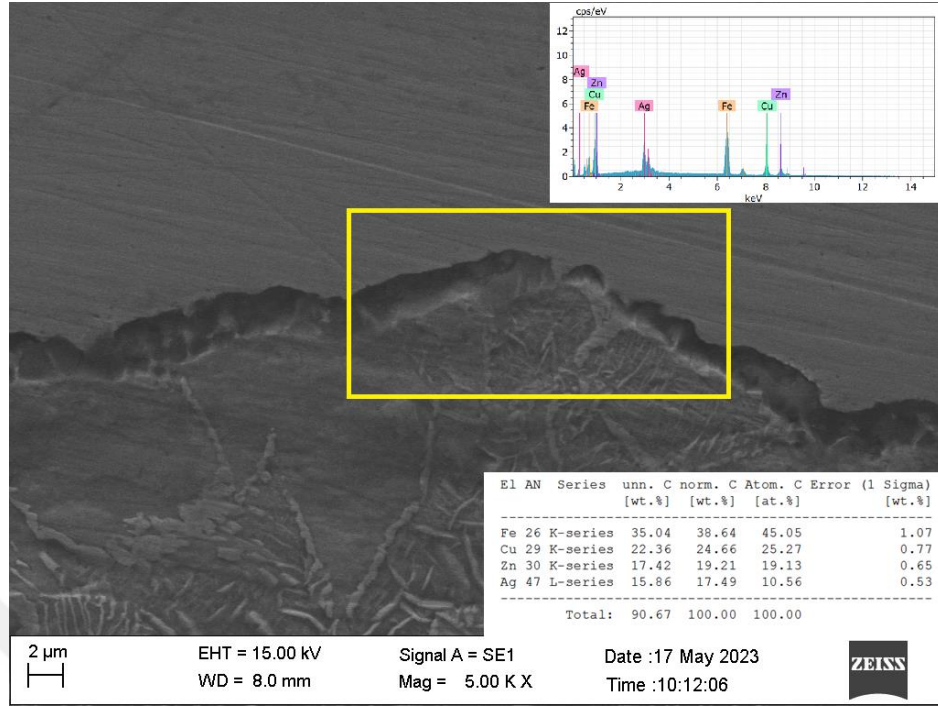


Şekil 4.20. 1 numaralı 20Ag-Cu-Zn alaşımlı numunenin SEM-EDS görüntüsü



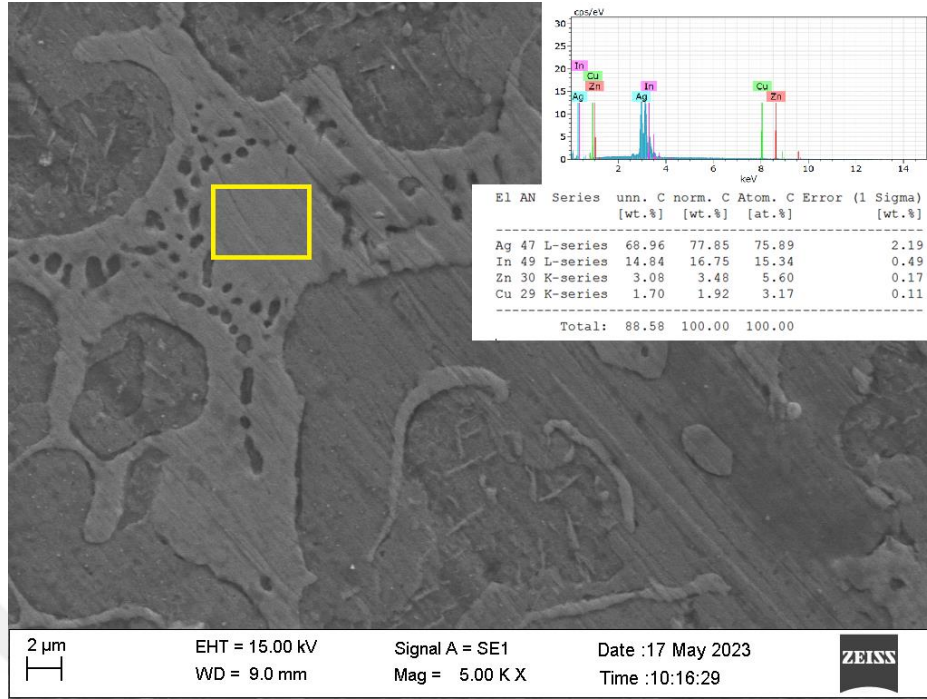
Şekil 4.21. 1 numaralı 20Ag-Cu-Zn alaşımlı numunenin SEM-EDS görüntüsü

1 numaralı referans numunesine ait SEM görüntüleri Şekil 4.20 ve Şekil 4.21 de verilmiştir. İndiyum içermeyen bu numunede %20 Ag, %45 Cu ve %35 Zn yer almaktadır. Şekil 4.20.de görüldüğü üzere SEM görüntüsünde yer alan işaretli alanın EDS verilerinde iğnemi yapı içeriğinde gümüş oranının bakır ve çinko elementlerinden daha fazla olduğu anlaşılmaktadır. Bu fazların CuZn ve CuAg bileşiklerinden [32] oluştuğu düşünülmektedir. Şekil 4.21.de ise EDS analizinin yapıldığı işaretli bölgede gümüş oranının %70 olarak ölçüldüğü görülmektedir. Gümüşten sonra %13 ile Zn, %6 oranında da Cu gelmektedir. Eldeki oranlar dikkate alındığında bu bölgede CuAg Ag-Cu ve Ag-Zn alaşımlı fazların yer aldığı düşünülmektedir[26].

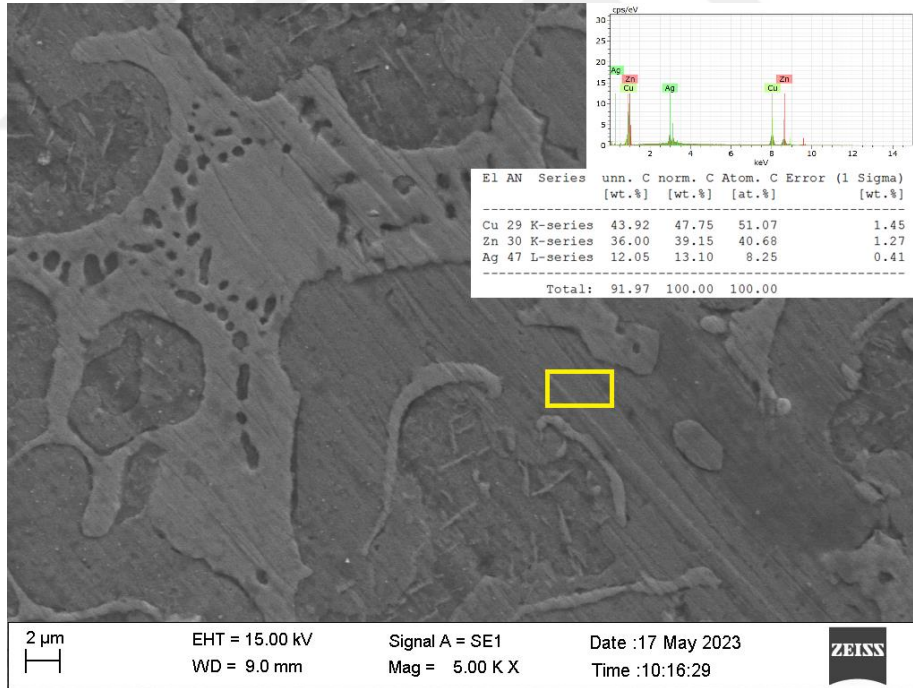


Şekil 4.22. 1 numaralı 20Ag-Cu-Zn alaşımlı numunenin SEM-EDS görüntüsü

1 numaralı 20Ag-Cu-Zn alaşımlı numunenin St37 çeliğine sert lehimlenmesi sonrasında lehim geçiş bölgesinin SEM görüntüsü Şekil 4.22.de gösterilmiştir. İlgili görselde sert lehimlenen St37 çeliği ile ilave metalin iyi bir lehim bağlantısı oluşturduğu gözlemlenmektedir. SEM görüntüsünde lehim geçiş bölgesi üzerinde yer alan işaretli alanın EDS verilerine göre geçiş bölgesindeki yapı içeriğinde bakır oranının gümüş ve çinko elementlerinden daha fazla olduğu anlaşılmaktadır. Fe miktarı da geçiş bölgesinde %35 olarak ölçülmüştür.



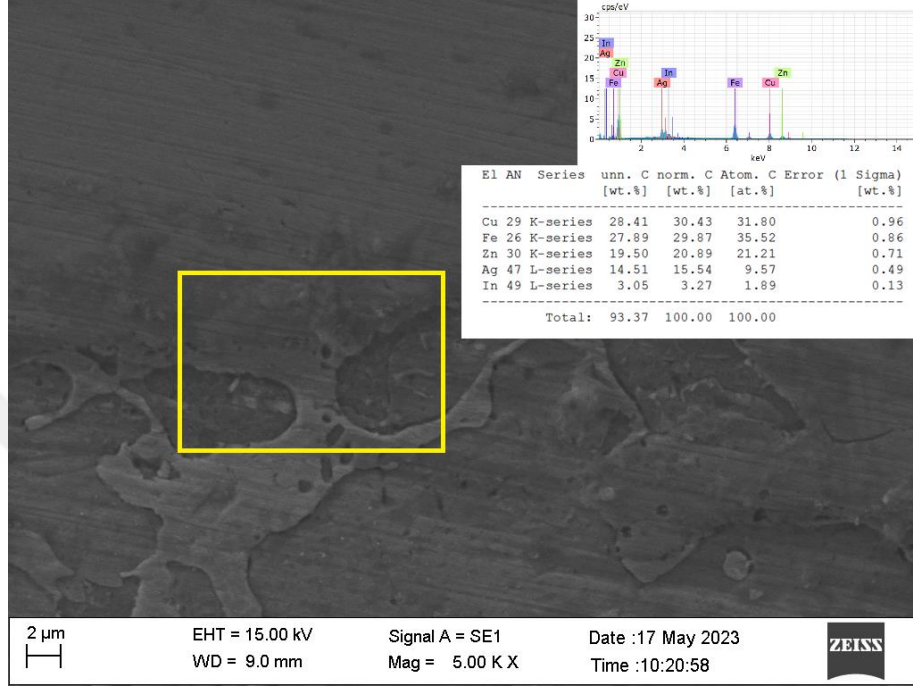
Şekil 4.23. 2 numaralı 19Ag-Cu-Zn-In alaşımlı numunenin SEM-EDS görüntüsü



Şekil 4.24. 2 numaralı 19Ag-Cu-Zn-In alaşımlı numunenin SEM-EDS görüntüsü

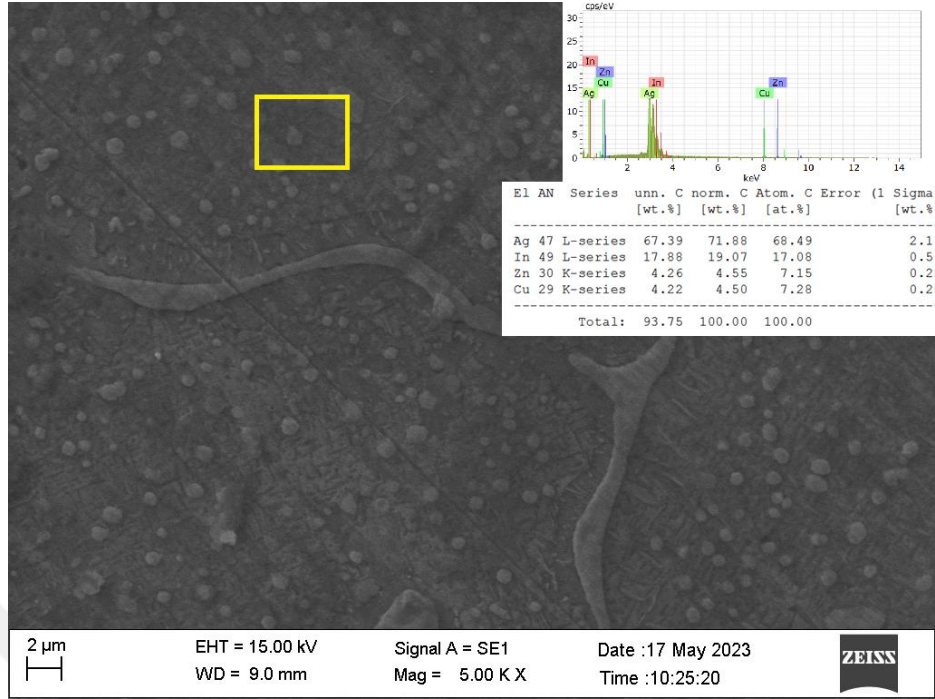
%1 indiyum ve %19 gümüş ilavesi ile elde edilen 2 numaralı numuneye ait SEM görüntüleri Şekil 4.23 ve 4.24 de verilmiştir. Şekil 4.23.de işaretli alanın EDS analizi bu faz içerisinde Ag miktarından sonra en yüksek elementin In olduğu ve bu fazın Ag_3In bileşiğinden oluşabileceği ilgili EDS değerleri dikkate alınarak söylenebilir[21]. Şekil 4.24.de ise işaretli alanın

EDS analizi bu yapı içerisinde Ag miktarının Cu ve Zn elementlerine göre oldukça az olduğu ve In elementinin matris içerisinde yer almadığı görülmektedir. Dolayısıyla bu bölgenin CuZn bileşiğini içerdiği anlaşılmaktadır[30].

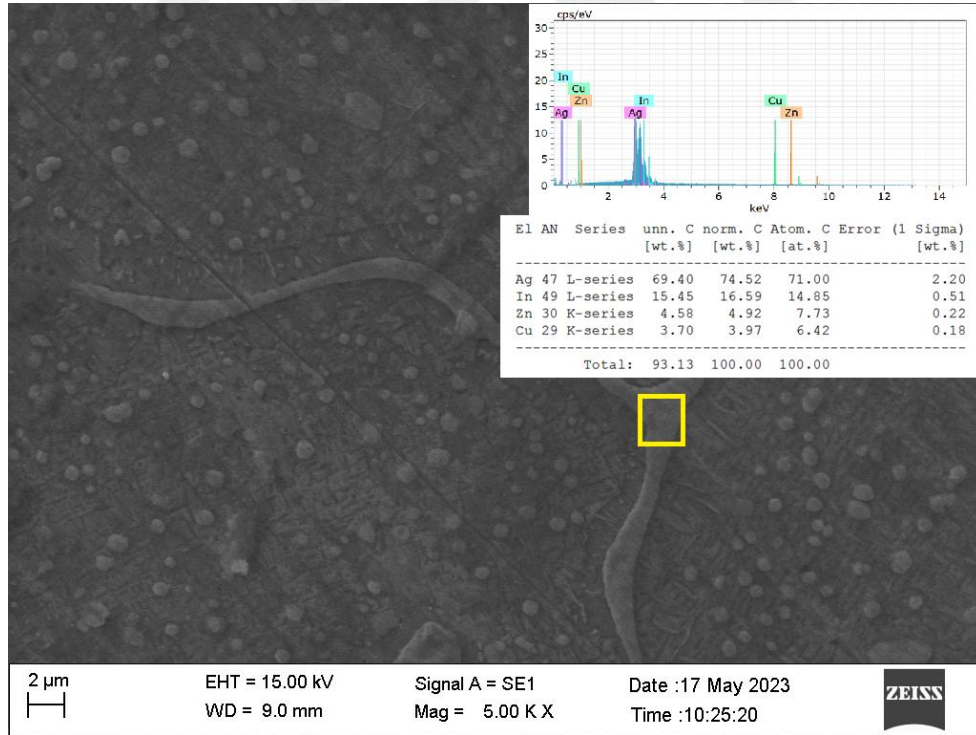


Şekil 4.25. 2 numaralı 19Ag-Cu-Zn-1In alaşımlı numunenin SEM-EDS görüntüsü

Şekil 4.25.de 2 numaralı 19Ag-Cu-Zn-1In içerikli ilave metal ile St37 çeliğinin lehim geçiş bölgesine ait SEM görseli verilmiştir. Geçiş bölgesinin 1 numaralı numuneye nazaran daha iyi olduğu görselden anlaşılmaktadır. %1 indiyum ilavesi ile çelik yüzeyinde sert lehimleme işleminin başarılı olduğunu söylemek mümkündür. İşaretli alanın EDS analizi bu faz içerisinde Ag miktarının Cu ve Zn elementlerine göre nispeten daha düşük kaldığını, In elementinin ise en az miktara yer aldığı anlaşılmaktadır. Bu da bize geçiş bölgesinde CuZn ve CuAg bileşiklerinin bulunduğunu göstermektedir.



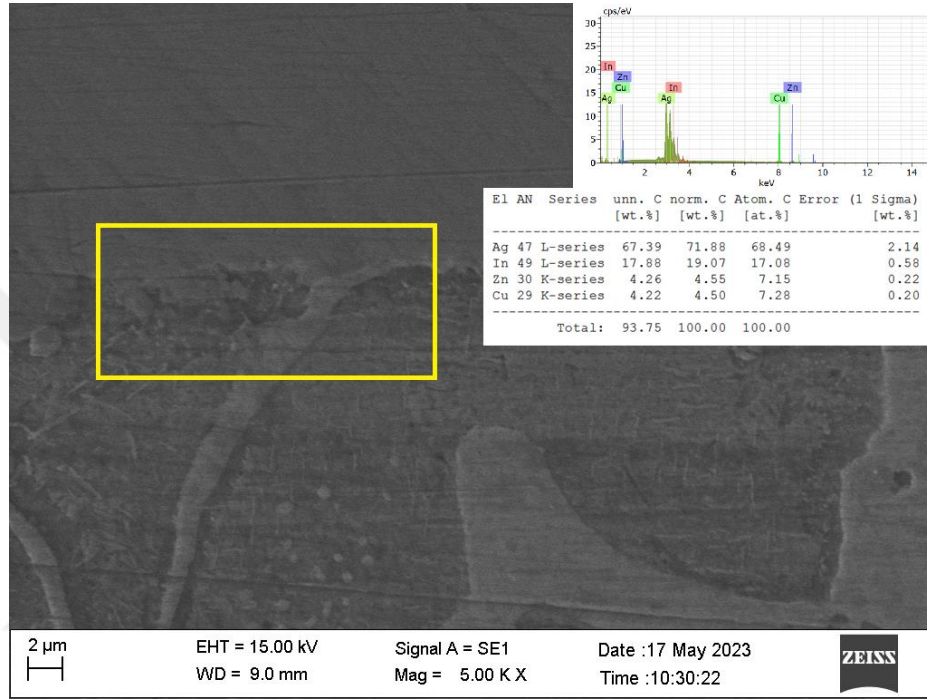
Şekil 4.26. 3 numaralı 18Ag-Cu-Zn-2In alaşımlı numunenin SEM-EDS görüntüsü



Şekil 4.27. 3 numaralı 18Ag-Cu-Zn-2In alaşımlı numunenin SEM-EDS görüntüsü

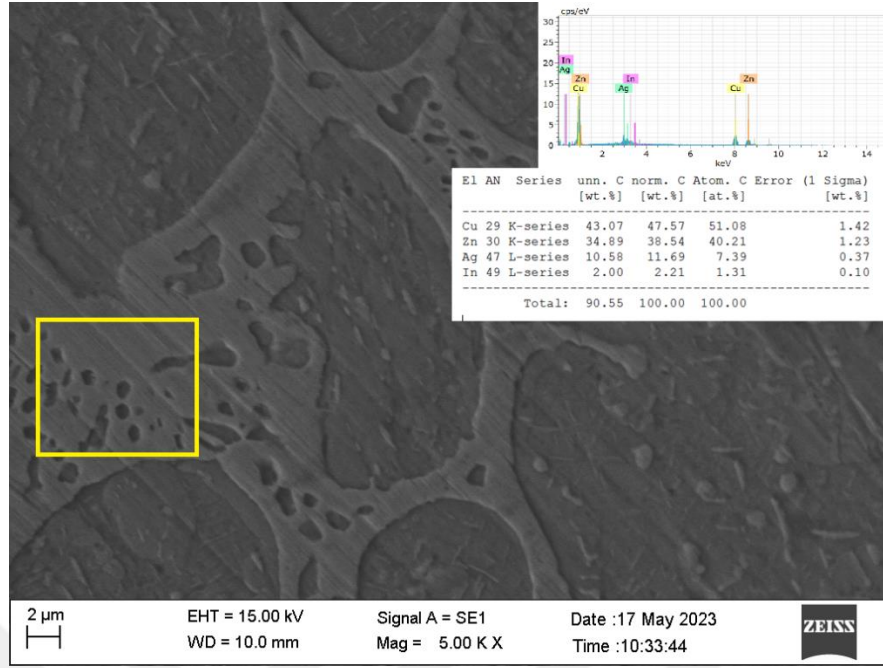
Şekil 4.26. ve Şekil 4.27.de 3 numaralı 18Ag-Cu-Zn-2In içerikli numunenin SEM görüntüsü verilmiştir. İndiyum miktarının %2'ye yükseldiği ve gümüş miktarının %18'e düştüğü bu numunede işaretli bölgenin EDS analizinde yüksek miktarda Ag ve In elementleri yer

almaktadır. Bu bölgedeki fazın Ag_3In [21] içerikli bileşiklerden oluştuğu düşünülmektedir. Şekil 4.27.de işaretli bölgenin EDS analizinde yine yüksek miktarda Ag ve In elementleri yer almaktadır. Bu bölgedeki faz Ag_3In içerikli bileşiklerden meydana geldiği söylenebilir. Her iki yapının benzer oranlarda gümüş ve indiyum değerleri vermesi her iki yapının da farklı görünmesine karşı hem matris içinde hem de tane sınırlarında yüksek miktarda gümüş içerdiğini düşündürmektedir.

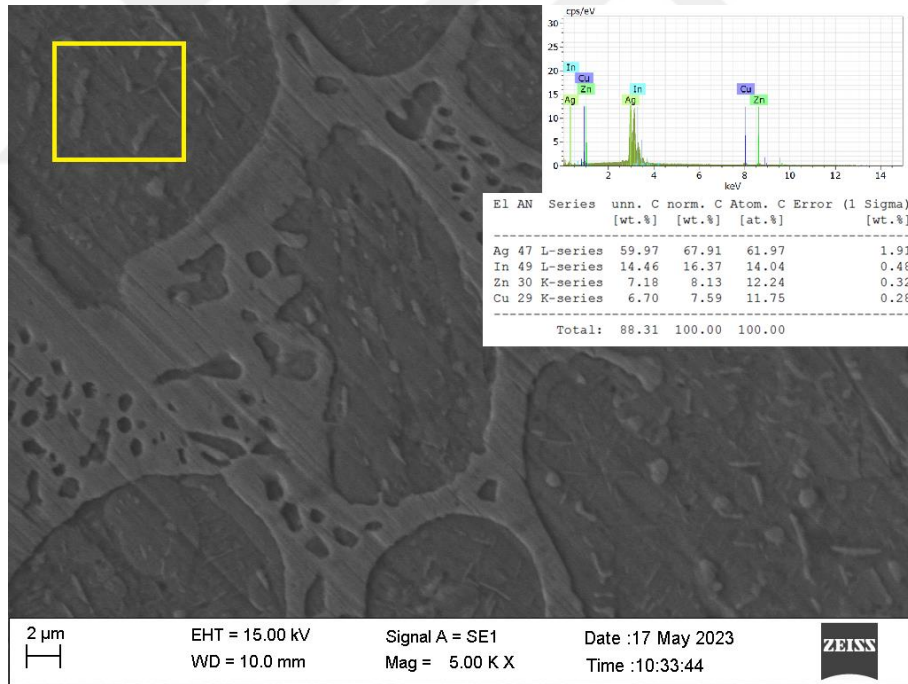


Şekil 4.28. 3 numaralı 18Ag-Cu-Zn-2In alaşımlı numunenin SEM-EDS görüntüsü

3 numaralı 18Ag-Cu-Zn-2In içerikli numunenin St37 çeliği ile lehimlendiği bölgeye ait SEM görüntüsü Şekil 4.28.de verilmektedir. İşaretli bölgenin EDS analizinde yüksek miktarda Ag ve In elementleri yer almaktadır. Bu bölgede Ag-In içerikli bileşiklerin yer aldığı ilgili EDS değerlerinden anlaşılmaktadır.



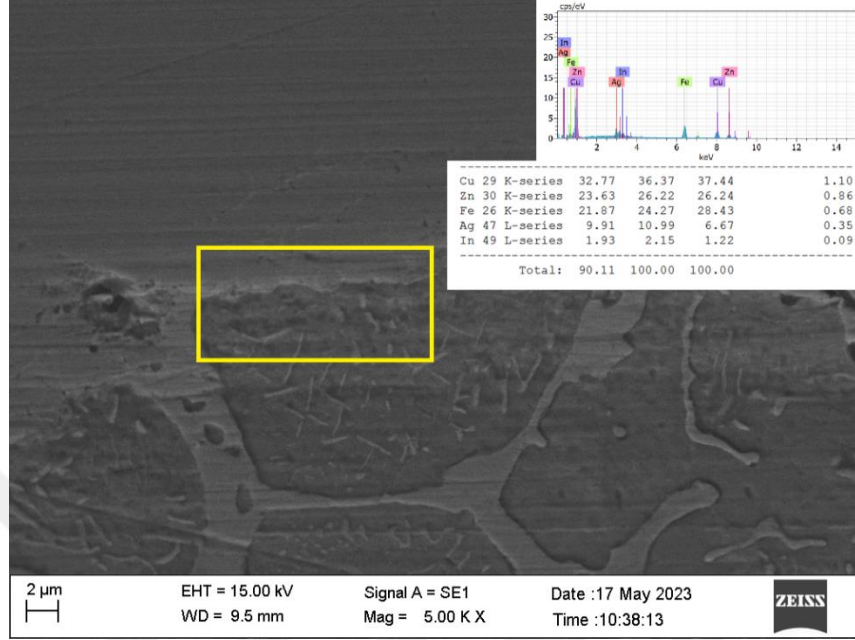
Şekil 4.29. 4 numaralı 15Ag-Cu-Zn-5In alaşımlı numunenin SEM-EDS görüntüsü



Şekil 4.30. 4 numaralı 15Ag-Cu-Zn-5In alaşımlı numunenin SEM-EDS görüntüsü

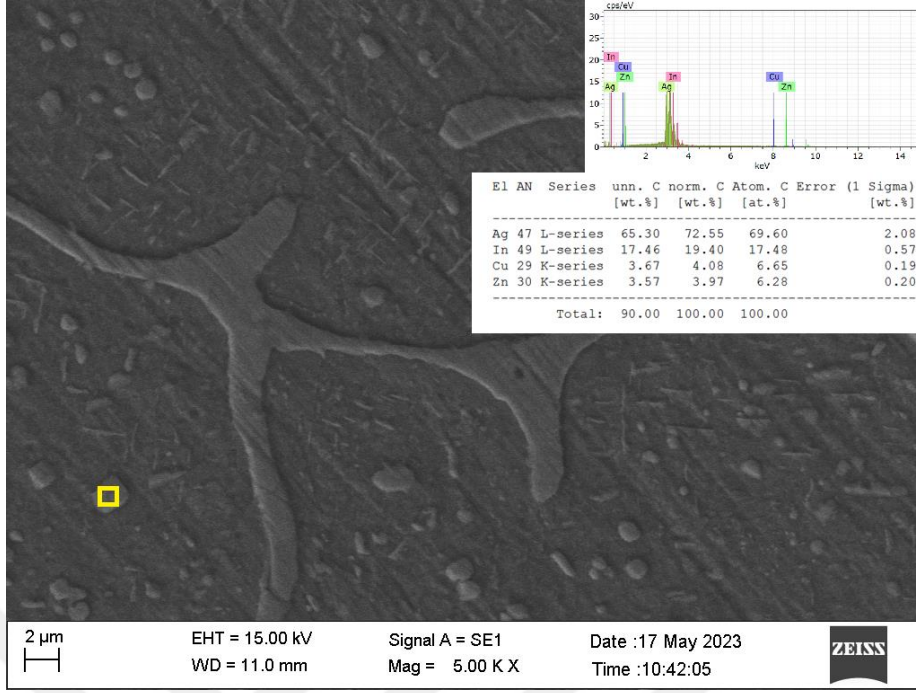
15Ag-Cu-Zn-5In içerikli 4 numaralı numunenin Şekil 4.29.da SEM görüntüsündeki işaretli bölgenin EDS analizinde yüksek oranda Cu ve Zn içerdiği an miktarda Ag ve In yer aldığı görülmektedir. Bu fazın CuZn bileşiklerinden ve CuAg bileşiklerinden meydana geldiği düşünülmektedir[26]. Şekil 4.30.da 4 numaralı 15Ag-Cu-Zn-5In içerikli numuneye ait SEM görselinde işaretlenen bölgenin EDS analizinde ise %60 oranında Ag yer almaktadır. Gümüşten

sonra en çok gözlenen element ise %14 ile In elementidir. Dolayısıyla bu bölgedeki fazların Ag-In bileşiklerinden olduğu düşünülmektedir[29].

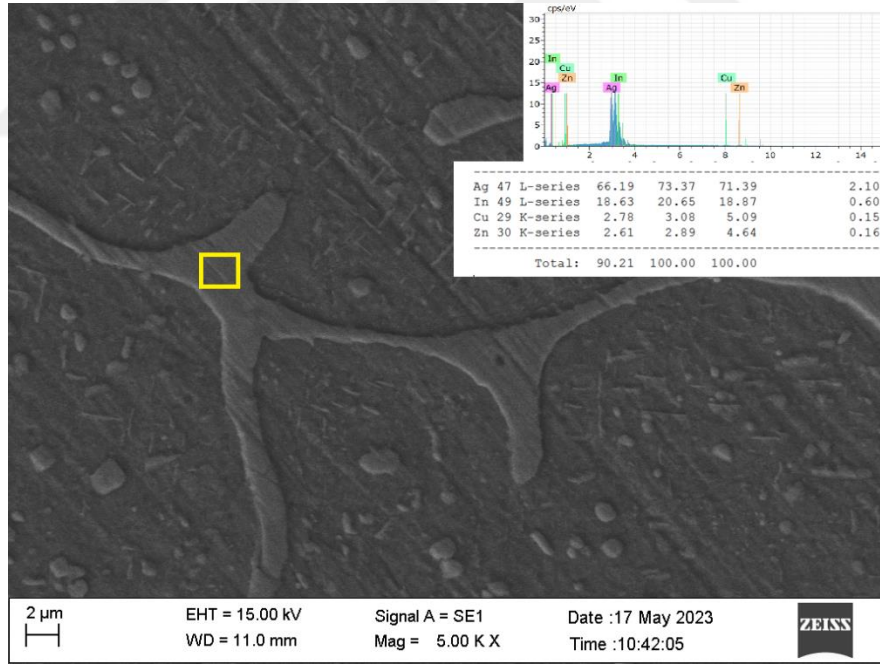


Şekil 4.31. 4 numaralı 15Ag-Cu-Zn-5In alaşımlı numunenin SEM-EDS görüntüsü

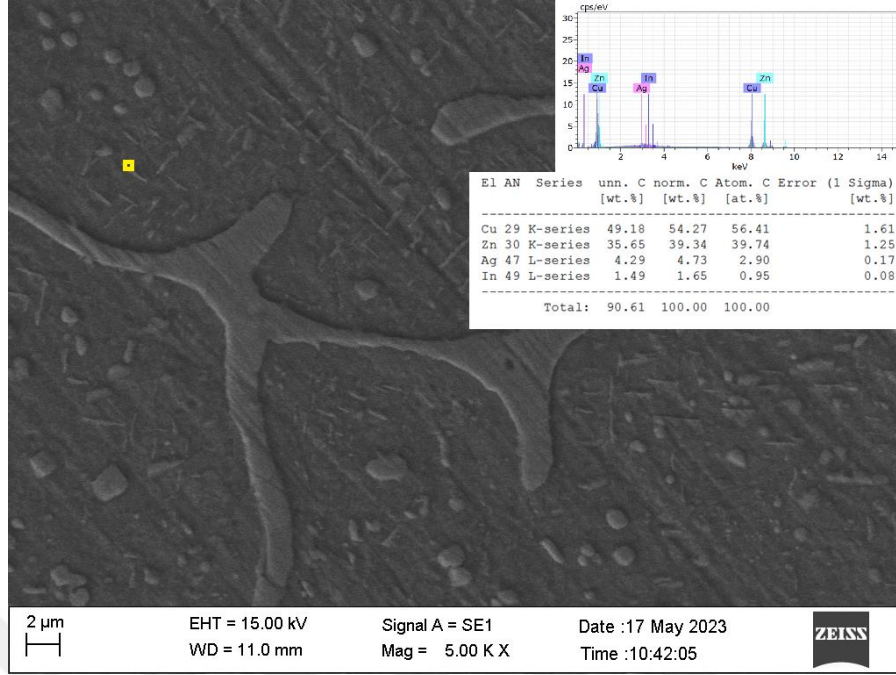
Şekil 4.31. de 4 numaralı 15Ag-Cu-Zn-5In içerikli numune ile St37 çeliğinin lehimlendiği bölgeye ait SEM görselinde işaretlenen bölgenin EDS analizinde %33 oranında Cu ve %23 oranında Zn ve %21 oranında Fe yer almaktadır. Bu verilere göre geçiş bölgesinde CuZn bileşiklerinin ve Fe elementinin yer aldığı anlaşılmaktadır[30].



Şekil 4.32. 5 numaralı 13Ag-Cu-Zn-7In alaşımlı numunenin SEM-EDS görüntüsü

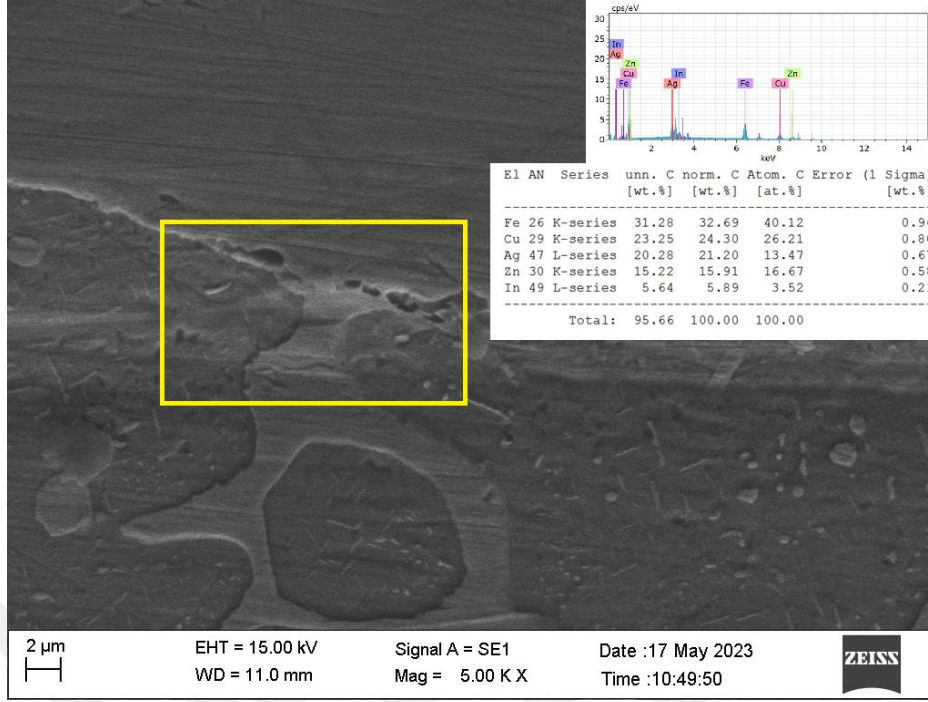


Şekil 4.33. 5 numaralı 13Ag-Cu-Zn-7In alaşımlı numunenin SEM-EDS görüntüsü



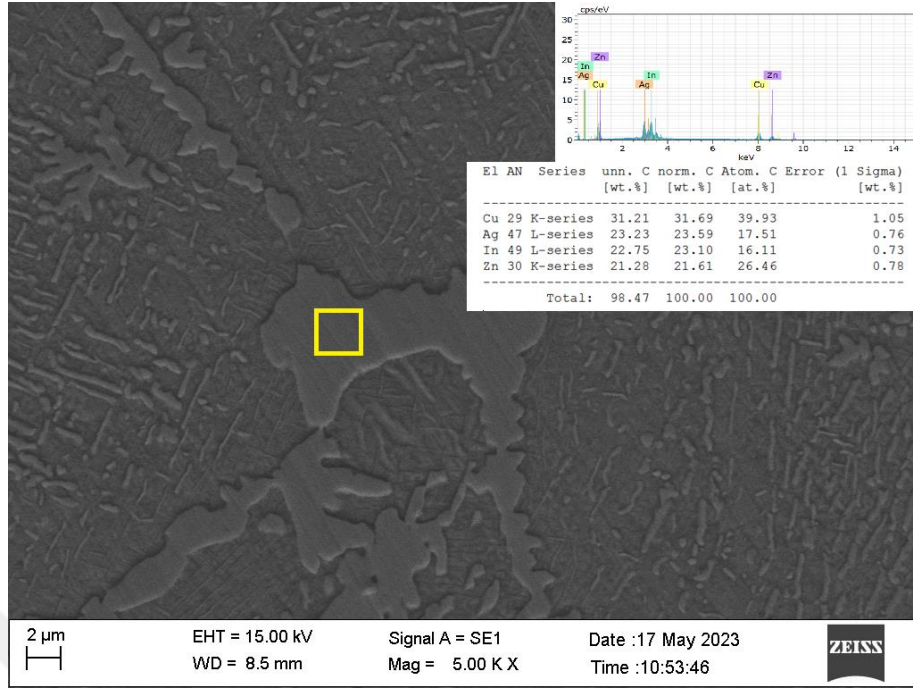
Şekil 4.34. 5 numaralı 13Ag-Cu-Zn-7In alaşımlı numunenin SEM-EDS görüntüsü

Şekil 4.32.de 5 numaralı 13Ag-Cu-Zn-7In içerikli numuneye ait SEM görselinde işaretlenen bölgenin EDS analizinde %65 oranında Ag yer almaktadır. Gümüşten sonra en çok gözlenen element ise %17 ile In elementidir. Bu bölgede Ag-In bileşiklerinden meydana geldiği düşünülmektedir[29]. Şekil 4.33.de ise işaretlenen bölgenin EDS analizinde %60 oranında Ag yer almaktadır. Gümüşten sonra en çok gözlenen element ise %14 ile In elementidir. Bu verilere göre bu yapının da içeriğinde yine Ag-In bileşikleri mevcuttur denilebilir[29]. Şekil 4.34.de matris içerisinde yer alan iğnemsî küçük yapı üzerinde işaretlenen bölgenin EDS analizinde %49 oranında Cu yer almaktadır. Bakırdan sonra en çok gözlenen element ise %35 ile In elementidir. Bu verilere göre bu bölgedeki fazların CuZn bileşiklerinden olduğu anlaşılmaktadır[30].

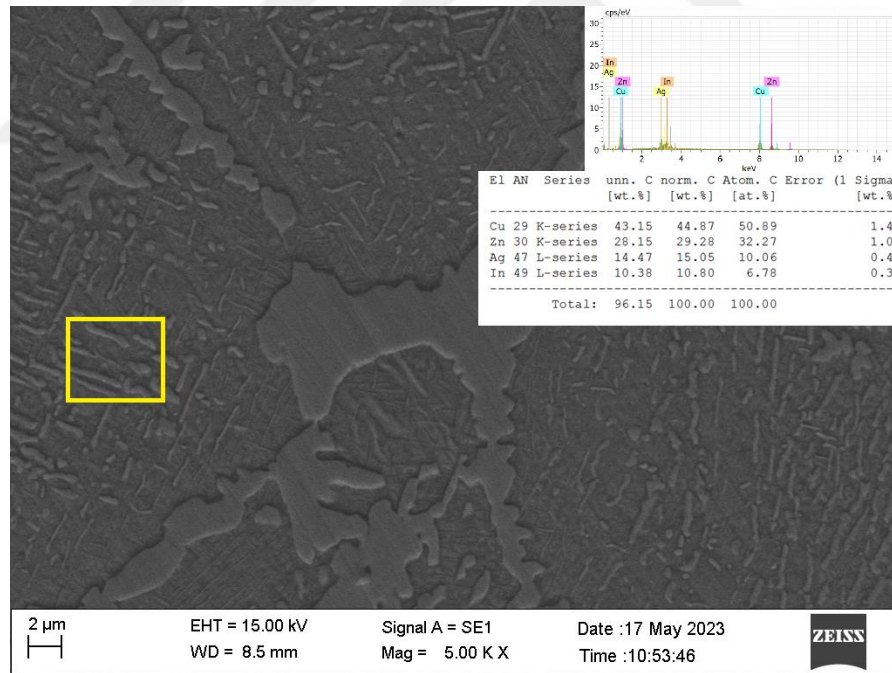


Şekil 4.35. 5 numaralı 13Ag-Cu-Zn-7In alaşımlı numunenin SEM-EDS görüntüsü

13Ag-Cu-Zn-7In içerikli 5 numaralı numune ile sert lehim işleminin uygulandığı St37 çeliğine ait lehim geçiş bölgesi Şekil 4.35.de verilmiştir. SEM görselinde işaretlenen bölgede %31 oranında Fe yer almaktadır. Demirden sonra en çok gözlenen element ise sırasıyla %23 Cu, %20 Ag ve %15 Zn elementleridir. Ayrıca In %6 civarındadır. Literatürdeki ilgili çalışmaların [29,31], XRD ve EDS analizlerinin verdiği sonuçlara göre bu yapının CuAg ve CuZn bileşiklerinden olduğu anlaşılmaktadır[26].



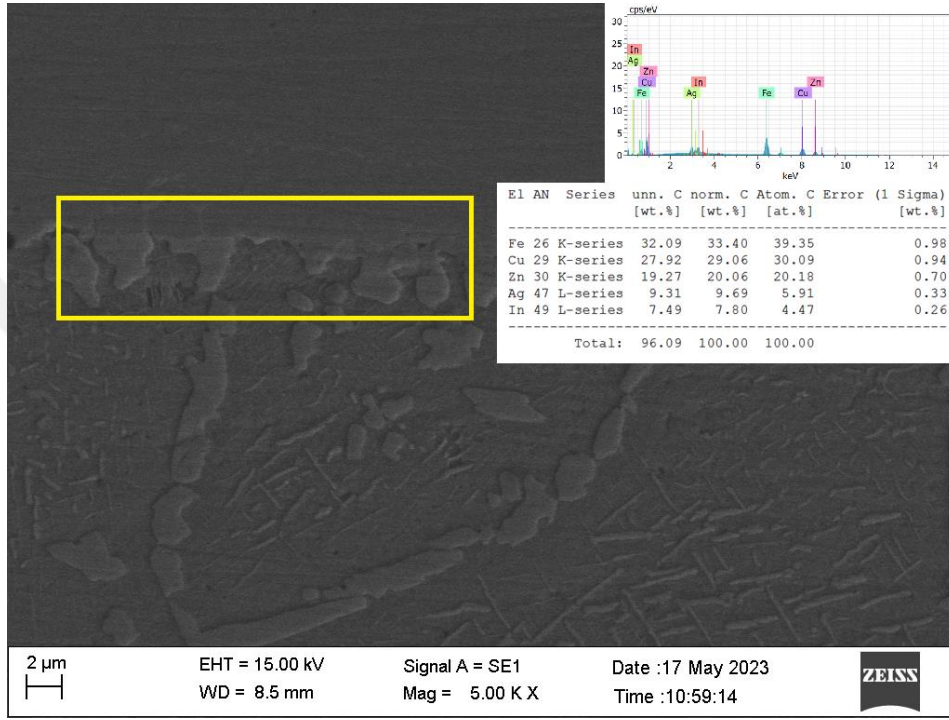
Şekil 4.36. 6 numaralı 15Ag-Cu-Zn-5In alaşımlı numunenin SEM-EDS görüntüsü



Şekil 4.37. 6 numaralı 15Ag-Cu-Zn-5In alaşımlı numunenin SEM-EDS görüntüsü

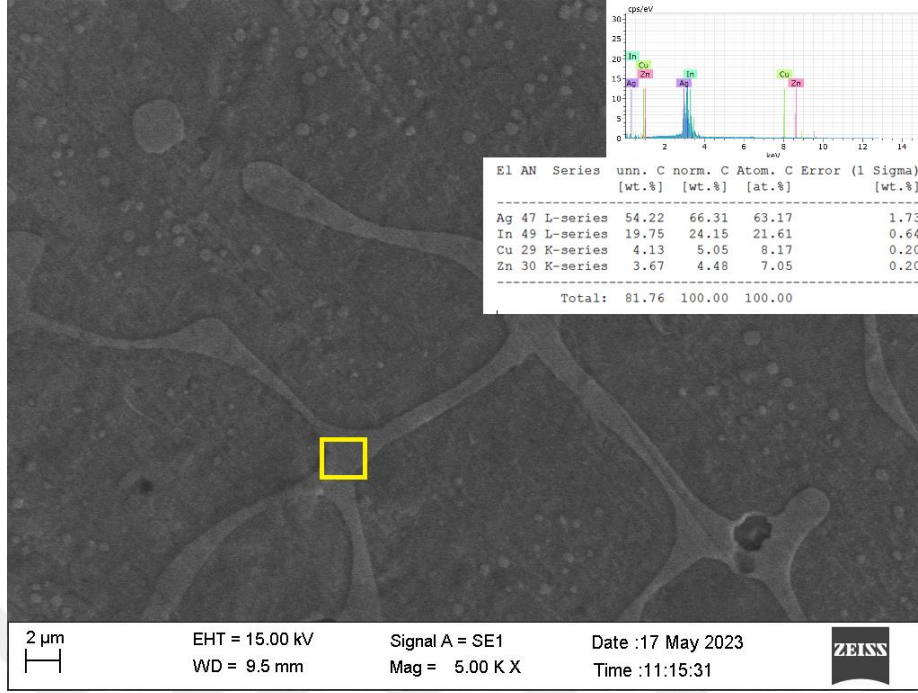
Şekil 4.36.de 6 numaralı 15Ag-Cu-Zn-5In içerikli numuneye ait SEM görselinde işaretlenen bölgenin EDS analizinde %31 oranında Cu yer almaktadır. Bakırdan sonra en fazla gözlenen elementler ise sırasıyla %23 Ag, %22 In ve %20 Zn elementleridir. Dolayısıyla bu bölgedeki bileşiklerin Cu-Ag ve Cu-In olduğu anlaşılmaktadır[29]. Şekil 4.37.de 6 numaralı 15Ag-

Cu-Zn-5In içerikli numuneye ait SEM görselinde işaretlenen bölgenin EDS analizinde %43 oranında Cu yer almaktadır. Gümüşten sonra en çok gözlenen elementler ise %28 ile Zn ve %14 Ag elementleridir. Dolayısıyla bu bölgedeki fazların Cu-Zn Cu-Ag ve Cu-In bileşiklerine sahip olduğu düşünülmektedir[26,29,30]. XRD analizinde çıkan sonuçlar ve literatürdeki çalışmalar [29-33] da incelendiğinde belirtilen fazların $\text{Cu}_{11}\text{In}_9$, Ag_3In ve CuZn olması muhtemeldir[21,29,31].

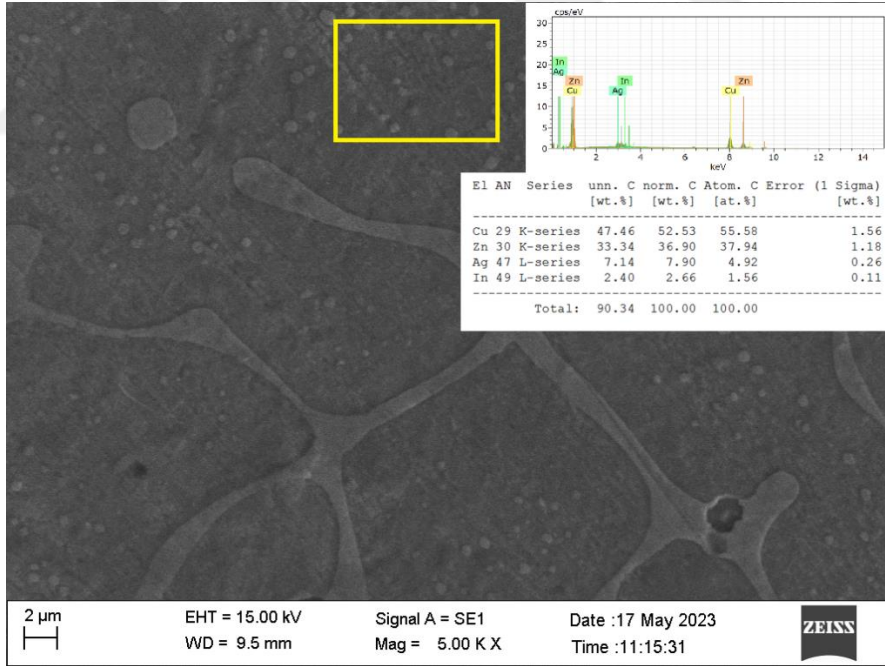


Şekil 4.38. 6 numaralı 15Ag-Cu-Zn-5In alaşımlı numunenin SEM-EDS görüntüsü

Şekil 4.38.de 6 numaralı 15Ag-Cu-Zn-5In içerikli numuneye ait SEM görselinde işaretlenen bölgenin EDS analizinde %32 Fe, %27 oranında Cu %19 Zn yer almaktadır. Diğer gözlenen elementler ise %9 ile Ag ve %7 In elementleridir. Dolayısıyla bu bölgedeki fazların Cu-Zn, Cu-Ag ve Cu-In bileşiklerine sahip olduğu söylenebilir[26,29].



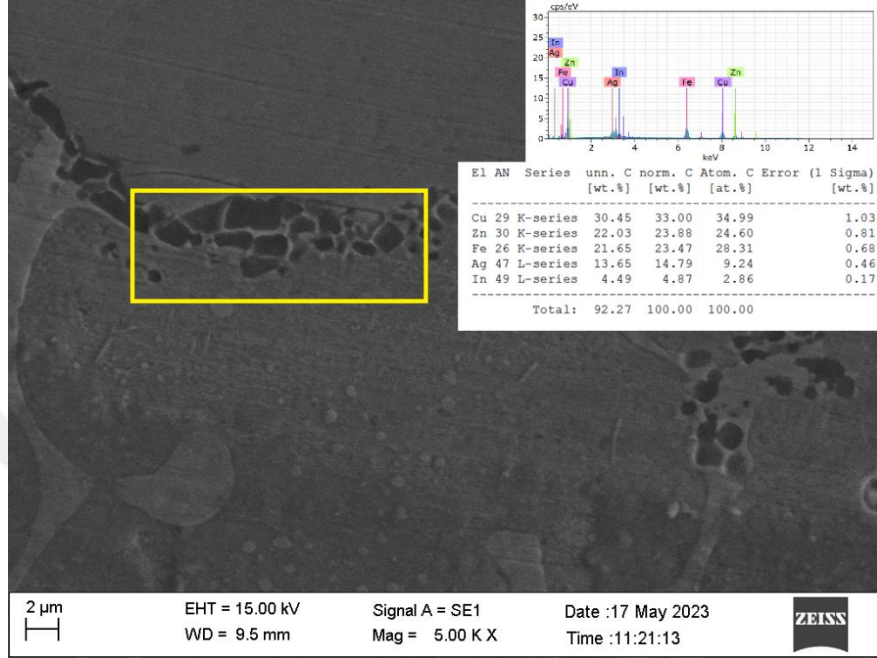
Şekil 4.39. 7 numaralı 7Ag-Cu-Zn-13In alaşımlı numunenin SEM-EDS görüntüsü



Şekil 4.40. 7 numaralı 7Ag-Cu-Zn-13In alaşımlı numunenin SEM-EDS görüntüsü

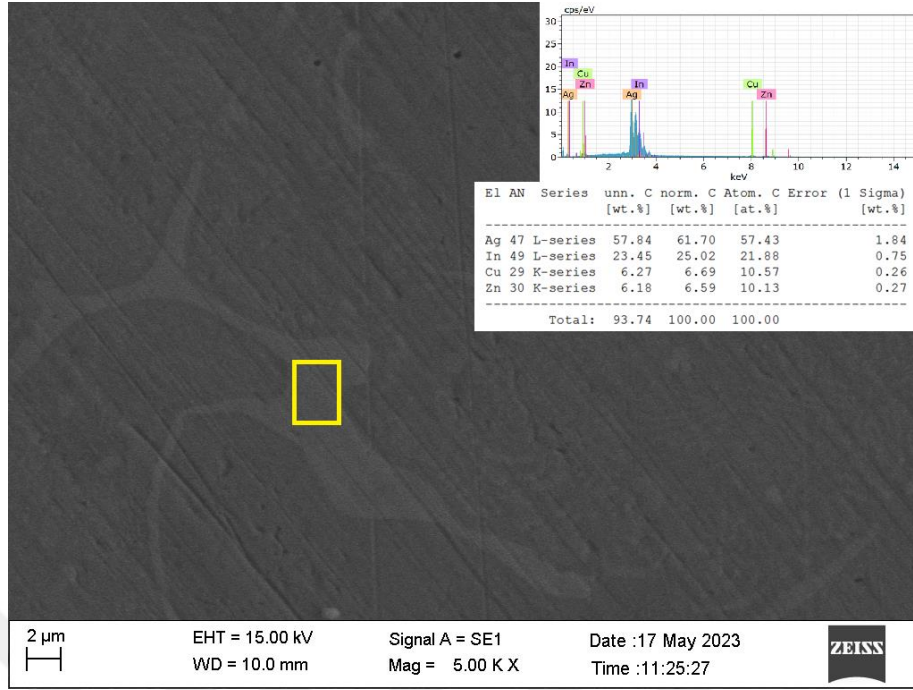
Şekil 4.39.da 7 numaralı 7Ag-Cu-Zn-13In alaşımlı numunenin SEM görselinde işaretlenen bölgenin EDS analizinde %54 oranında Ag yer almaktadır. Gümüşten sonra en çok gözlenen element ise %19 ile In elementidir. Dolayısıyla bu bölgedeki fazların Ag_3In bileşiklerinden olduğu anlaşılmaktadır[21]. Şekil 4.40.da 7 numaralı 7Ag-Cu-Zn-13In içerikli numuneye ait SEM

görselinde işaretlenen bölgenin EDS analizinde %47 oranında Cu, %33 Zn yer almaktadır. Diğer gözlenen elementler ise %7 ile Ag ve %2 In elementleridir. Bu bölgedeki fazların Cu-Zn, Cu-Ag ve Cu-In bileşiklerine sahip olduğu söylenebilir[29,30].

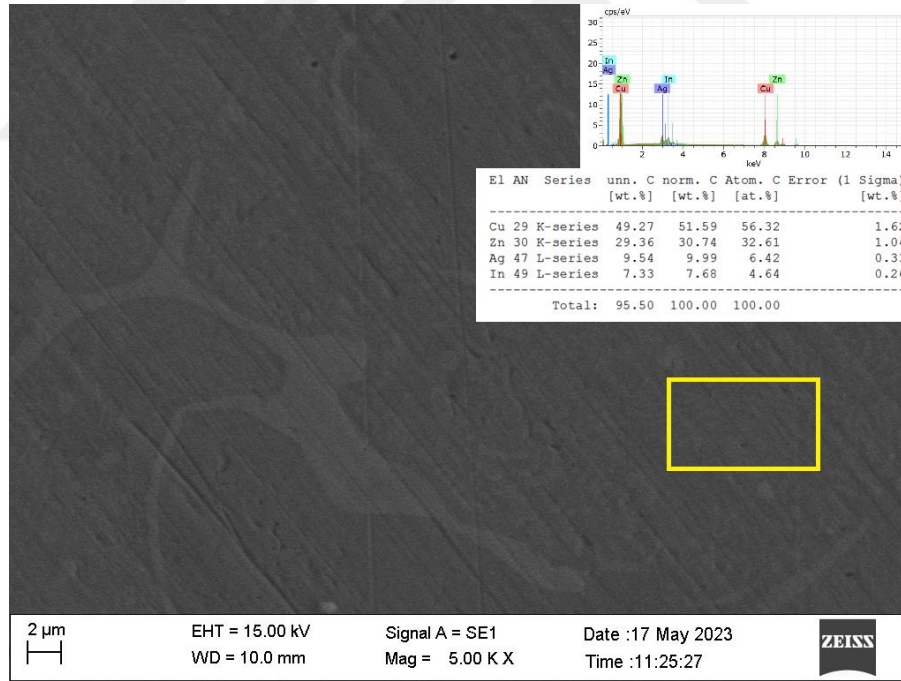


Şekil 4.41. 7 numaralı 7Ag-Cu-Zn-13In alaşımlı numunenin SEM-EDS görüntüsü

Şekil 4.41.de 7 numaralı 7Ag-Cu-Zn-13In içerikli numunenin St37 çeliği ile lehimlenen geçiş bölgesine ait SEM görseli verilmiştir. Görselde geçiş bölgesinde mikro boşlukların yer aldığı net şekilde görülmektedir. Bu durum %13 indiyum ilaveli bu numunenin lehimleme kabiliyetinin zayıfladığının bir göstergesidir. İşaretlenen bölgenin EDS analizinde %30 oranında Cu, %23 Zn ve %23 Fe yer almaktadır. Diğer gözlenen elementler ise %13 ile Ag ve %4 In elementleridir. Bu bölgedeki fazların Cu-Zn, Cu-Ag ve Cu-In bileşiklerine sahip olduğu söylenebilir[26,29].



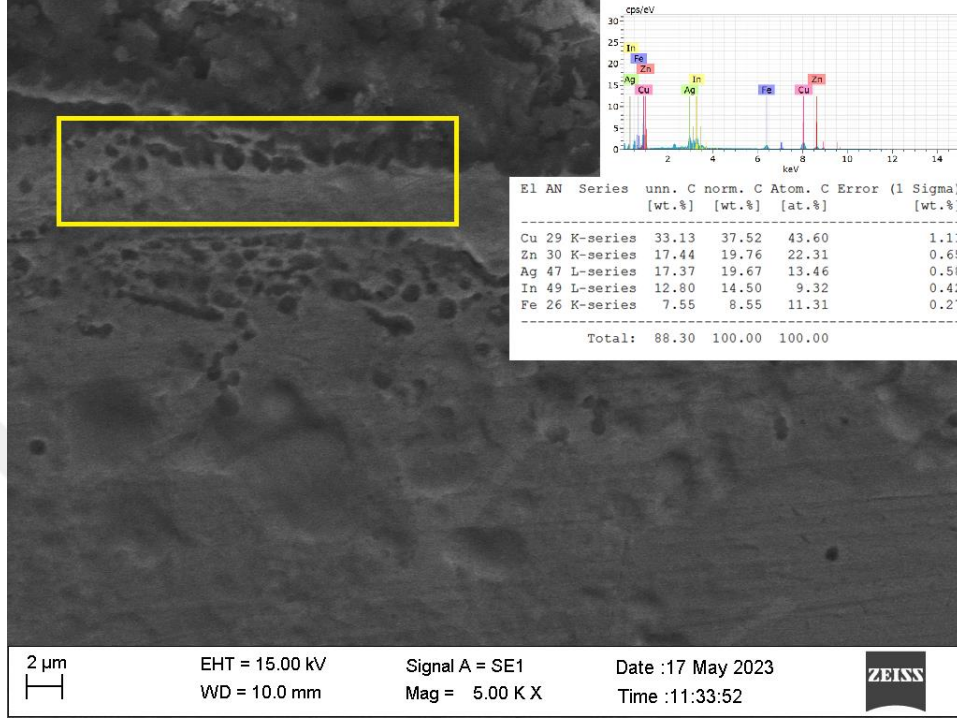
Şekil 4.42. 8 numaralı 5Ag-Cu-Zn-15In alaşımlı numunenin SEM-EDS görüntüsü



Şekil 4.43. 8 numaralı 5Ag-Cu-Zn-15In alaşımlı numunenin SEM-EDS görüntüsü

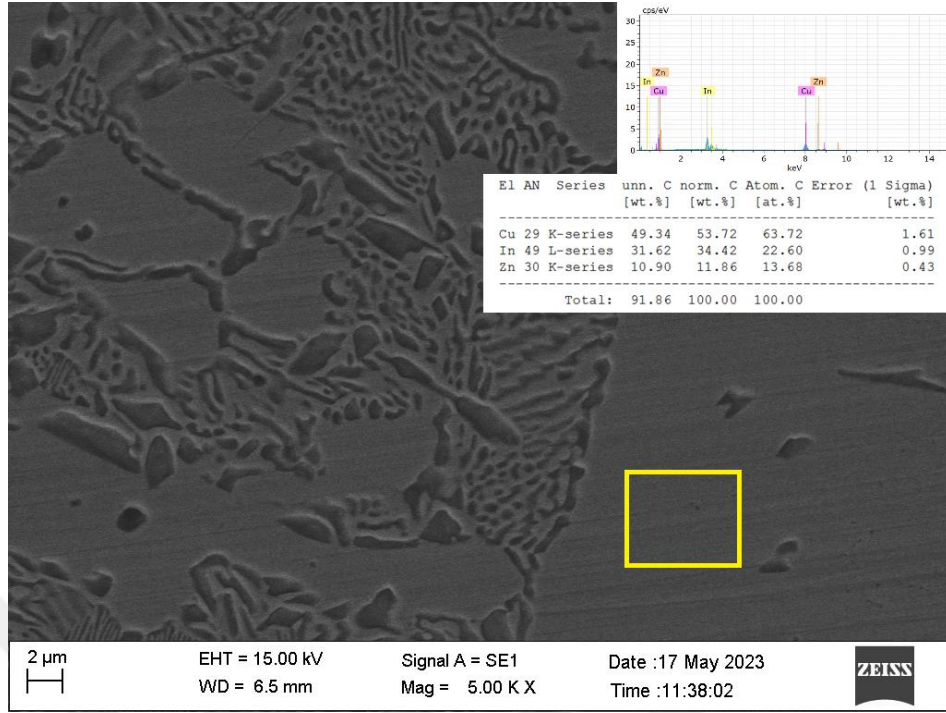
Şekil 4.42.de 8 numaralı 5Ag-Cu-Zn-15In alaşımlı numuneye ait SEM görselinde işaretlenen bölgenin EDS analizinde %57 oranında Ag, %23 In elementleri belirgindir. Bu bölgede Ag₃In bileşiğinin bulunduğu olduğu anlaşılmaktadır. Şekil 4.43.de 8 numaralı 5Ag-Cu-Zn-15In alaşımlı numuneye ait SEM görselinde işaretlenen bölgenin EDS analizinde %49 oranında Cu,

%29 Zn elementleri belirgindir. Bu bölgede Cu-Zn ve Cu-In bileşiğinin bulunduğu anlaşılmaktadır[30].

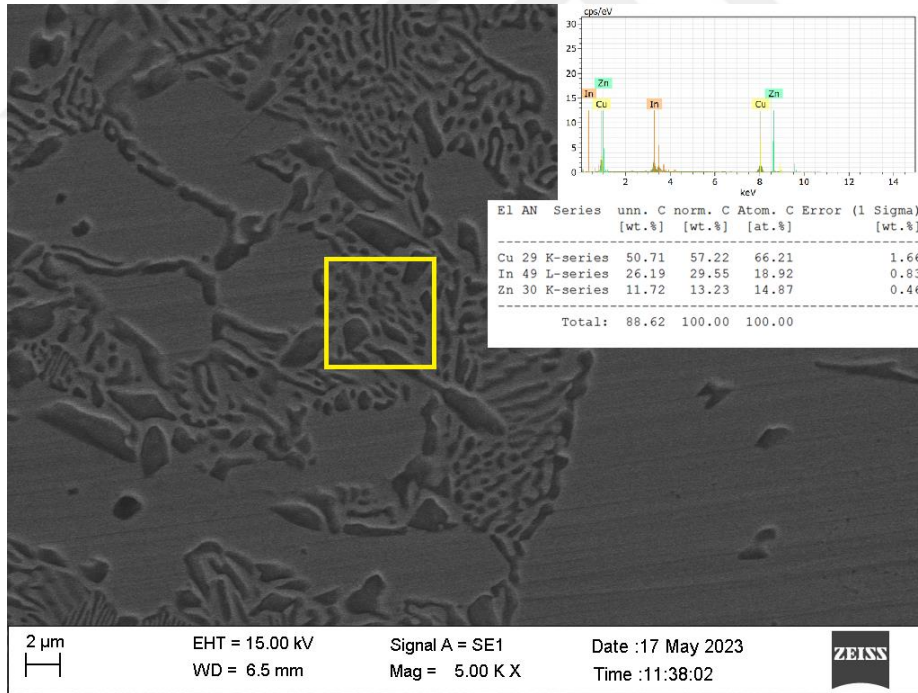


Şekil 4.44. 8 numaralı 5Ag-Cu-Zn-15In alaşımlı numunenin SEM-EDS görüntüsü

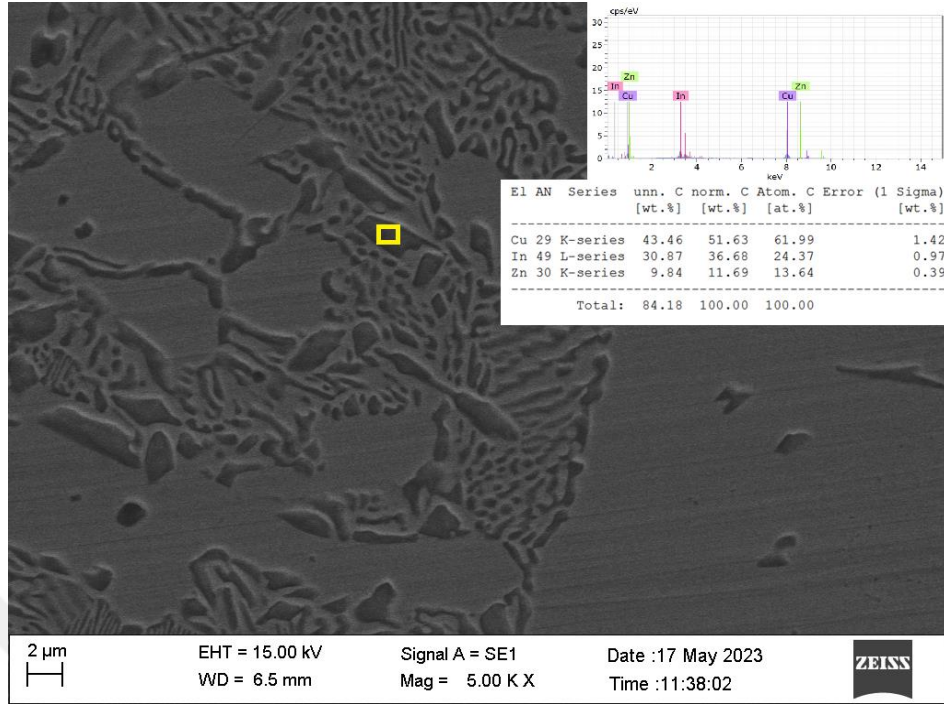
Şekil 4.44.te St37 çeliğine sert lehim işleminin yapıldığı 8 numaralı 5Ag-Cu-Zn-15In alaşımlı numuneye ait SEM görselinde geçiş bölgesinin oldukça kötü şekilde lehim bağlantısı oluşturduğu anlaşılmaktadır. Yapı içerisindeki mikro boşlukların arttığı da yine ilgili görselde görülmektedir. İşaretlenen bölgenin EDS analizinde %33 oranında Cu, %17 Zn, %17 Ag ve %12 In ile % %7 Fe elementleri yer almaktadır. Bu bölgede Cu-Zn ve Cu-In bileşiğinin yanı sıra Cu-Ag bileşiğinin de bulunduğu anlaşılmaktadır[29].



Şekil 4.45. 9 numaralı Cu-Zn-20In alaşımlı numunenin SEM-EDS görüntüsü

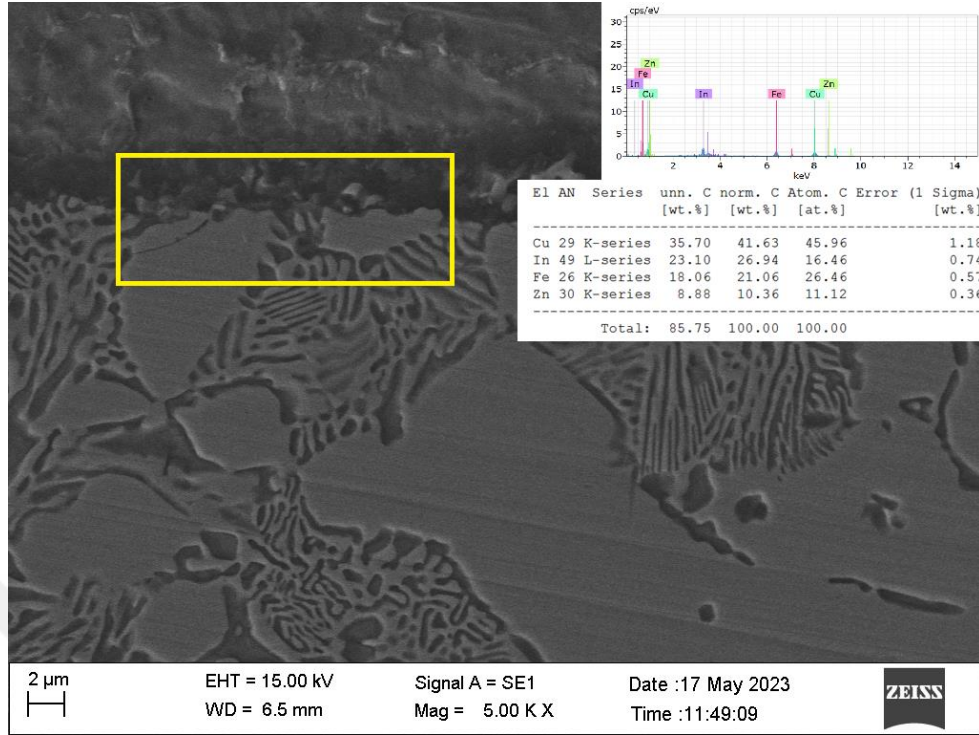


Şekil 4.46. 9 numaralı Cu-Zn-20In alaşımlı numunenin SEM-EDS görüntüsü



Şekil 4.47. 9 numaralı Cu-Zn-20In alaşımlı numunenin SEM-EDS görüntüsü

Şekil 4.45.de 9 numaralı Cu-Zn-20In alaşımlı numunenin SEM görselinde işaretlenen bölgenin EDS analizinde %49 oranında Cu, %31 In ve %10 Zn elementleri belirgindir. Bu bölgede CuZn ve Cu₉In₄ bileşiğinin bulunduğu olduğu XRD analiz değerlerinde çıkan veriler dikkate alındığında düşünülmektedir. Şekil 4.46.da işaretli bölgenin EDS analizinde %43 oranında Cu, %30 In ve %9 Zn elementleri belirgindir. Bu bölgede CuZn ve Cu₉In₄ bileşiğinin bulunduğu olduğu anlaşılmaktadır. Şekil 4.47. de bölgenin EDS analizinde %50 oranında Cu, %26 In ve %11 Zn elementleri belirgindir. Bu bölgede CuZn ve Cu₉In₄ bileşiğinin bulunduğu olduğu anlaşılmaktadır[30,32].



Şekil 4.48. 9 numaralı Cu-Zn-20In alaşımlı numunenin SEM-EDS görüntüsü

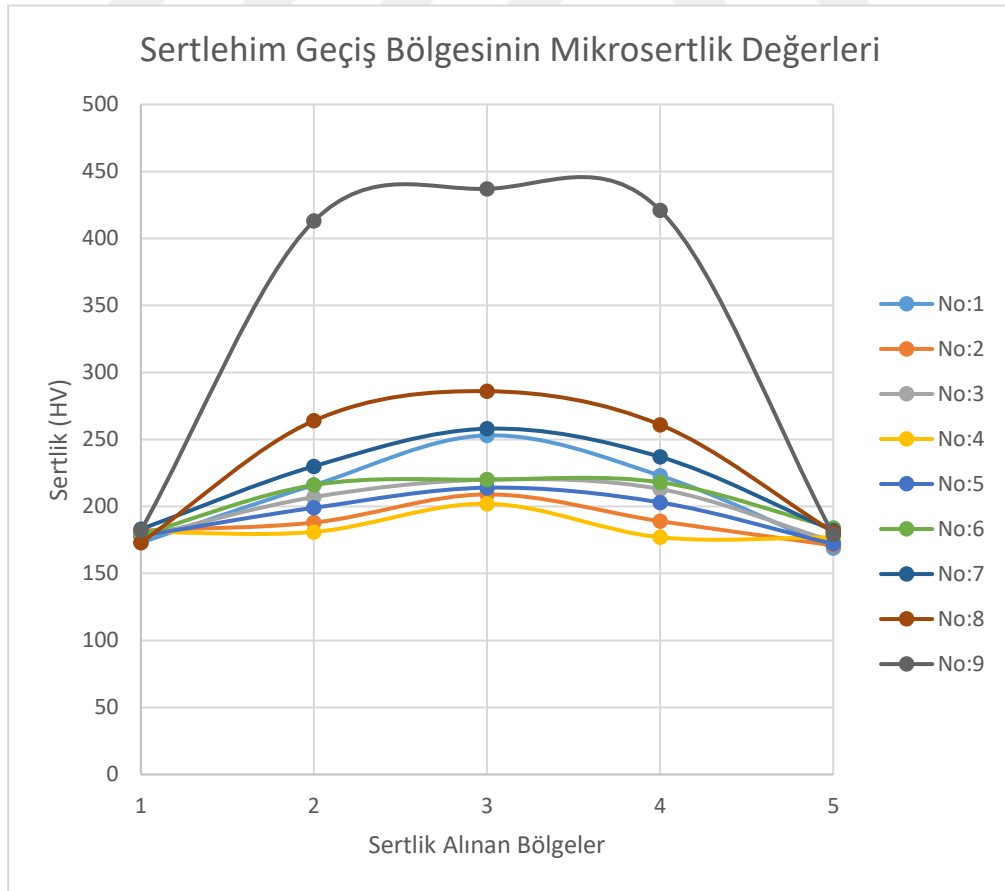
Şekil 4.48.de 9 numaralı Cu-Zn-20In alaşımlı numunenin St37 ile lehimlendiği geçiş bölgesine ait SEM görselinde işaretlenen bölgenin EDS analizinde %35 oranında Cu, %23 In ve %18 Fe ve %8 Zn elementleri belirgindir. Bu bölgede CuZn ve Cu₉In₄ bileşiğinin bulunduğu olduğu anlaşılmaktadır[31,32].

4.5. Mikrosertlik Ölçüm Sonuçları

Bu kısımda lehimlenen St37 metalleri arasındaki lehim bölgesinden alınan sertlik değerleri incelenmiştir. Bu bölgelerden alınan sertlik dağılımları Tablo 4.1. de gösterilmektedir.

Tablo 4.1. Lehim bölgesinden alınan sertliklerin dağılım tablosu

Sertlik Testinin Yapıldığı Bölgeler					
Numuneler	1. Bölge	2. Bölge	3. Bölge	4. Bölge	5. Bölge
1	173	216	253	223	169
2	177	207	220	213	174
3	182	188	209	189	171
4	181	181	202	177	177
5	178	199	214	203	172
6	179	216	220	218	184
7	183	230	258	237	182
8	173	264	286	261	181
9	182	413	437	421	179

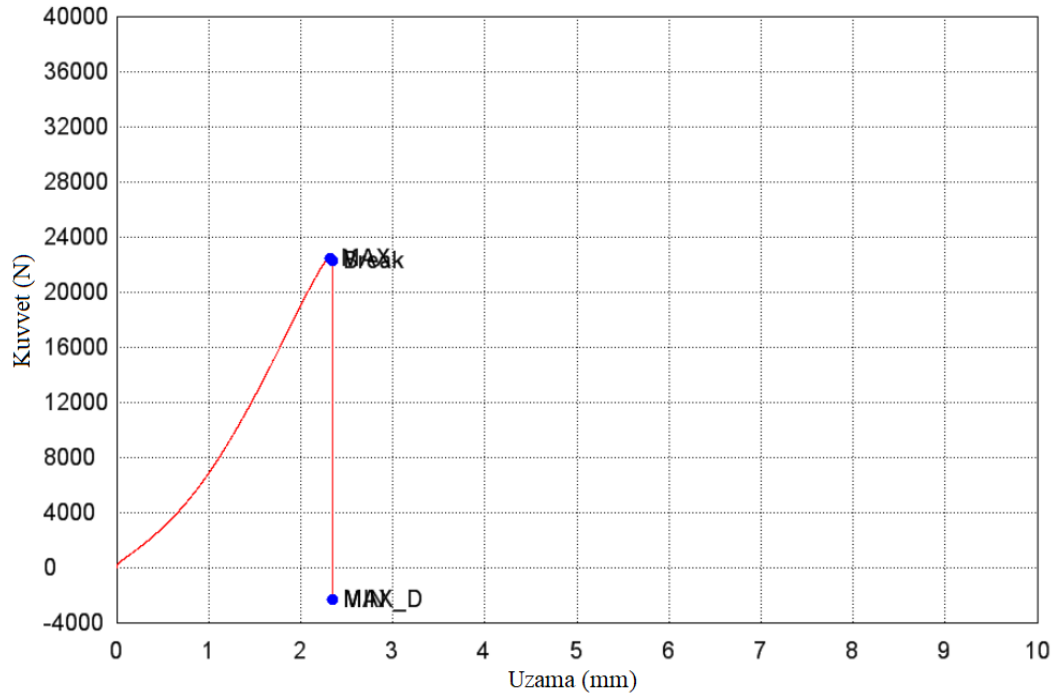


Şekil 4.49. Lehim bölgesinden alınan sertliklerin dağılım grafiği

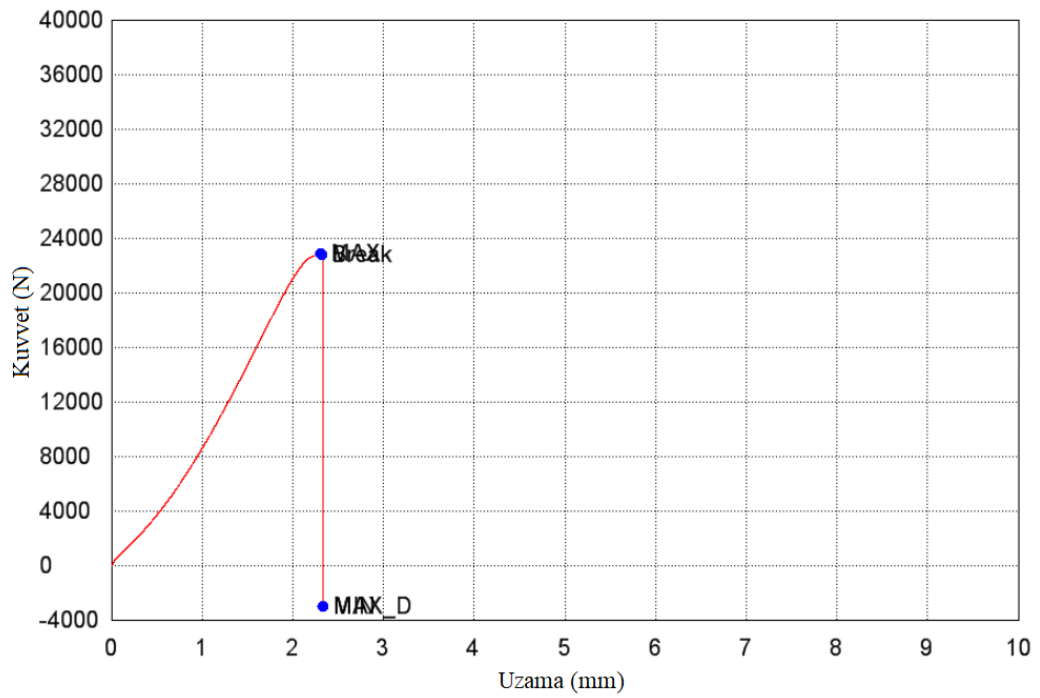
Lehimlenen St37 çeliklerinin lehim geçiş bölgesinden 0.254 N ve 15 sn. yükleme ile HV cinsinden alınan sertlikler Şekil 4.49 da incelendiğinde indiyum miktarının %10'dan itibaren önemli ölçüde lehim bölgesinde sertliğin arttığı gözlemlenmektedir. %10 ve üzerinde eklenen indiyumun özellikle %20 In içeren 9 numaralı numunedeki sertlik artışı düşünüldüğünde malzeme içerisinde intermetalik faz (Cu_9In_4 , $\text{Cu}_{11}\text{In}_9$ vb.) oluşumunu artırmasıyla bu sertliği artırdığı düşünülmektedir[23,32,33]. Literatür çalışmalarındaki veriler ve yapılan XRD analiz değerlerinden de anlaşıldığı üzere In, Cu ile $\text{Cu}_{11}\text{In}_9$, Cu_9In_4 gibi fazlar oluşturabilmektedir. Bu intermetaik fazlar düşünüldüğünde en yüksek sertlik değerlerini Ag içermeyen %20 oranında maksimum indiyum miktarına sahip 9 numaralı numune göstermiştir. En düşük sertlik değerini ise %5 indiyum ilaveli 4 numaralı numune vermiştir. Dolayısıyla %5'e kadar indiyum ilavesi ile mikrosertlik bir yükseliş gözlemlenmeyip aksine sertlik değerlerinde azalma meydana getirmiştir. Sertlehimleme işlemi ok-gaz üfleç ile gerçekleştiğinden sertlik değerlerindeki yükselişin oksi-gaz üfleç yöntemin ile de gerçekleşmesi muhtemeldir. Bakır alaşımlı sert ilave metalindeki artan Ag içeriğinin mikrosertlik değişimi üzerine yapılan bir çalışmada[10] geçiş bölgesinin sertliğinin gümüş miktarına bağlı olarak değişiminde % 40 Ag içerikli numunede sertliğin 259 HV olarak ölçüldüğü ifade edilmiştir. Aynı çalışmada %4,8 Ag oranına sahip Cu esaslı sertlehim ilave metalinin sertlehimlenme sonrasında ki sertliğinin 155 HV olarak ölçüldüğü belirtilmiştir. Ayrıca bir diğer literatür çalışmasında[34] %25 ve %30 gümüş içerikli iki ayrı sert lehim ilave metali ile gerçekleştirilen çalışmada gümüş miktarının artmasıyla sertliğin azaldığı ifade edilmektedir. Dolayısıyla bu doktora çalışması ile ortaya konulan farklı gümüş ve indiyum oranlarına sahip 9 adet numuneden elde edilen veriler literatürdeki benzer çalışmalarda kullanılan bakır esaslı sert lehim ilave metalleri ile örtüşmektedir.

4.6. Bindirmeli Kesme Testi Sonuçları

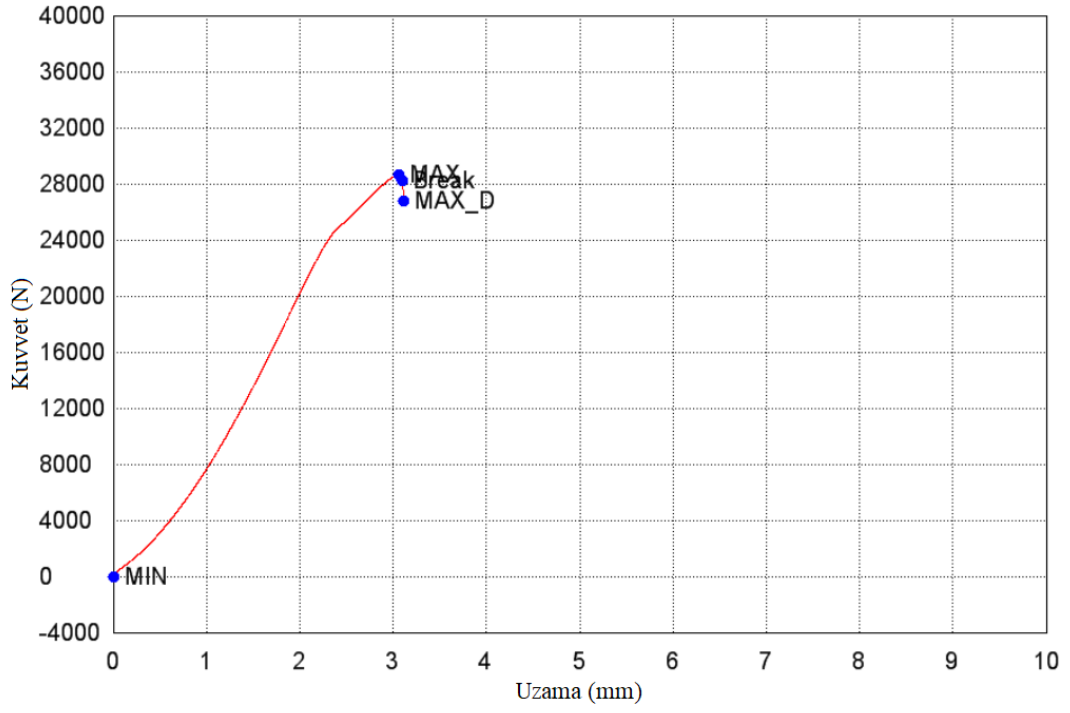
Birinci tur bindirmeli kesme testi sonuçlarına ait grafikler Şekil 4.50-Şekil 4.58 de gösterilmiştir.



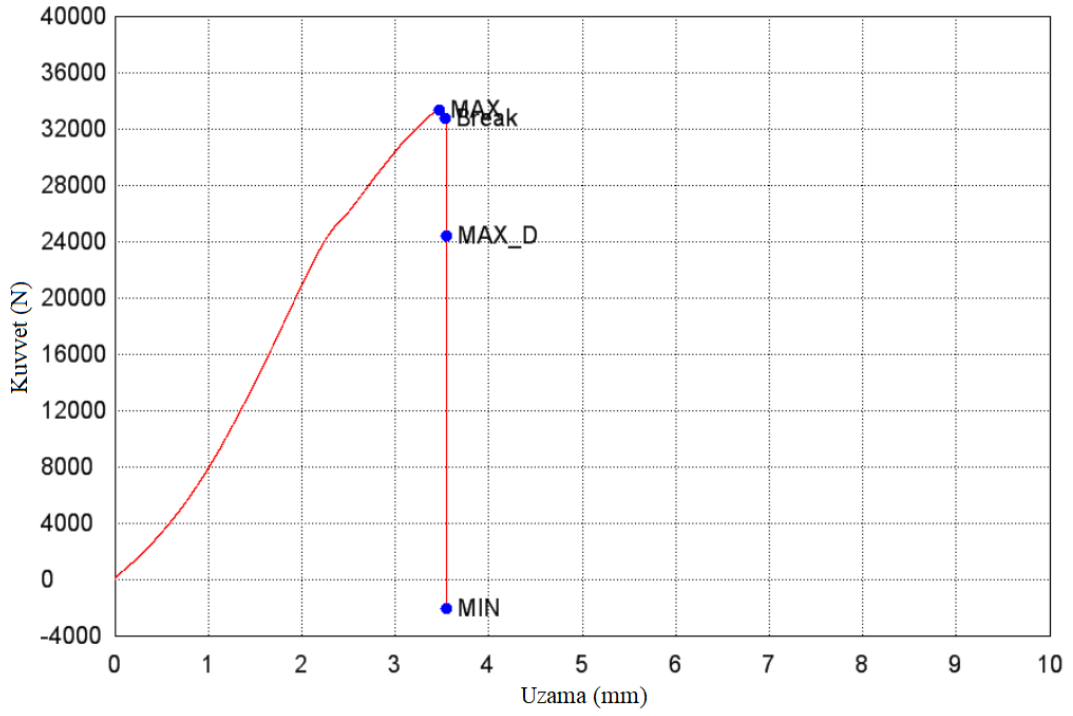
Şekil 4.50. 1 numaralı 20Ag-Cu-Zn numunesine ait bindirmeli kesme diyagramı



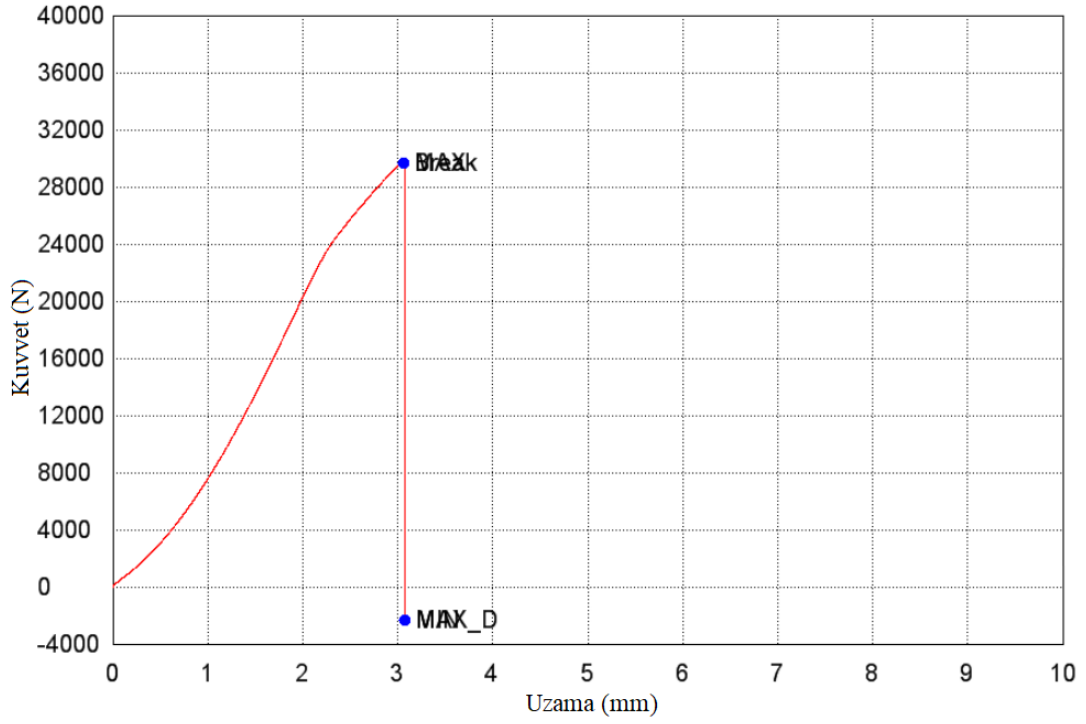
Şekil 4.51. 2 numaralı 19Ag-Cu-Zn-1In numunesine ait bindirmeli kesme diyagramı



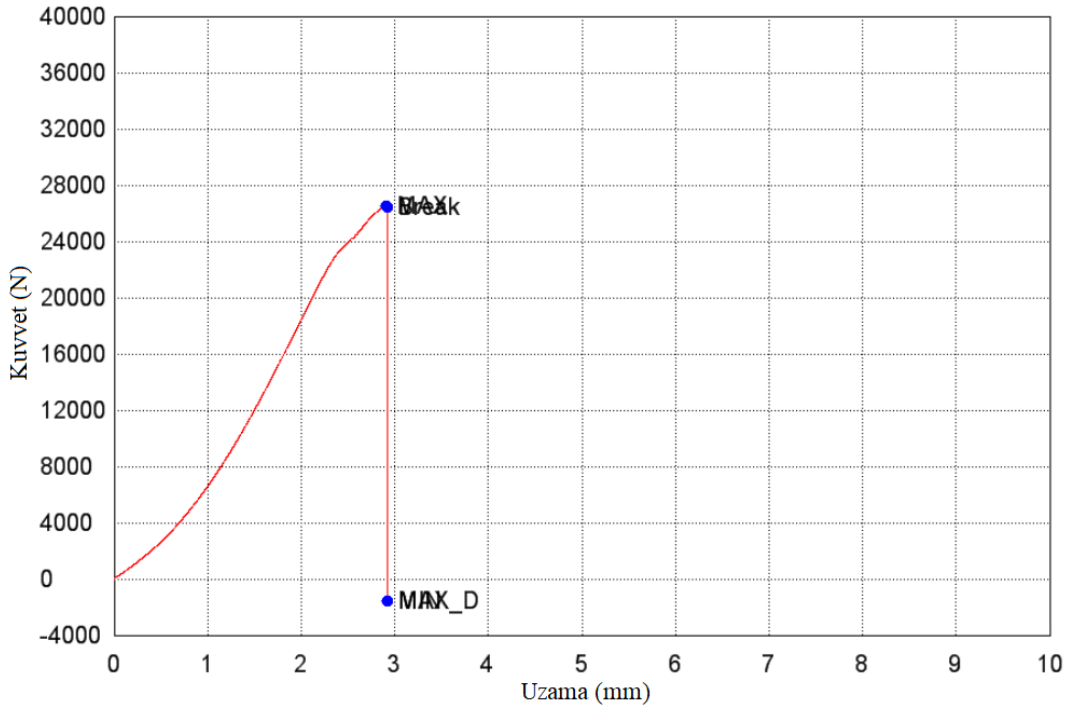
Şekil 4.52. 3 numaralı 19Ag-Cu-Zn-2In numunesine ait bindirmeli kesme diyagramı



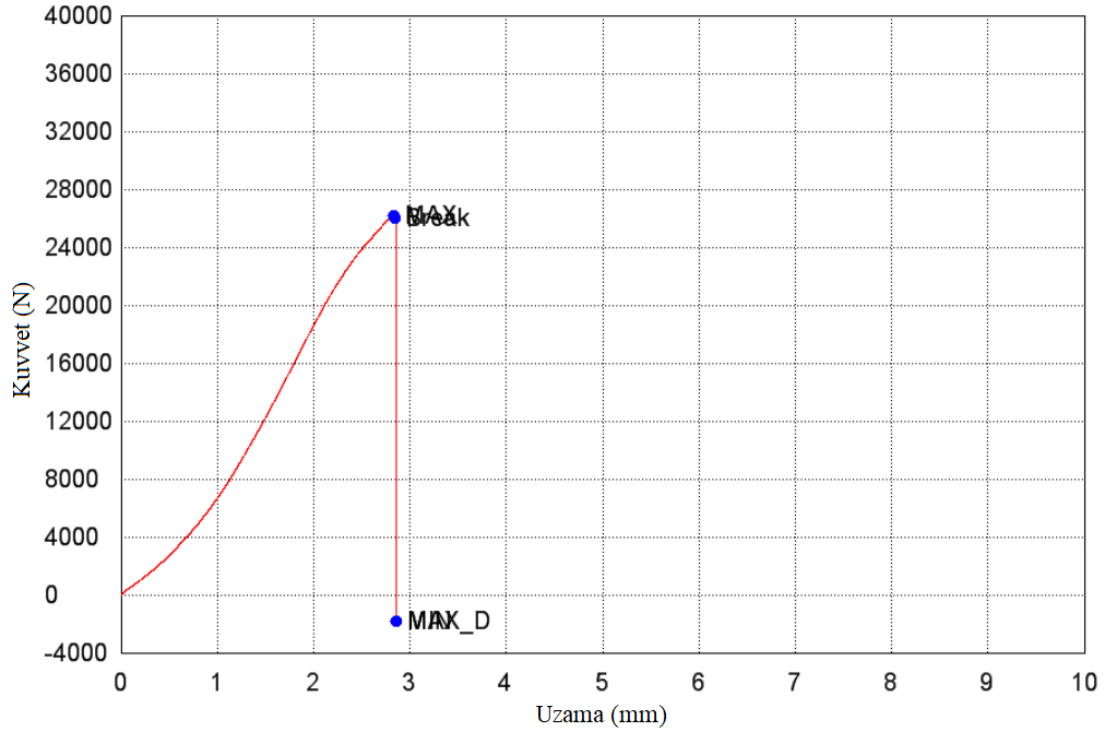
Şekil 4.53. 4 numaralı 19Ag-Cu-Zn-5In numunesine ait bindirmeli kesme diyagramı



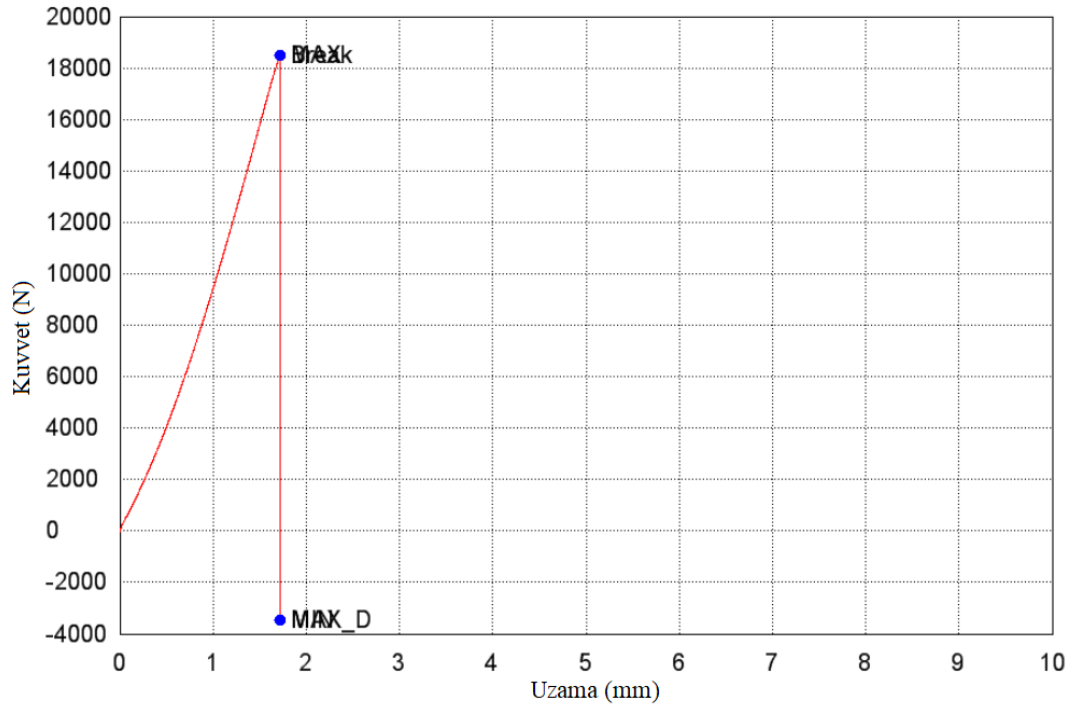
Şekil 4.54. 5 numaralı 19Ag-Cu-Zn-7In numunesine ait bindirmeli kesme diyagramı



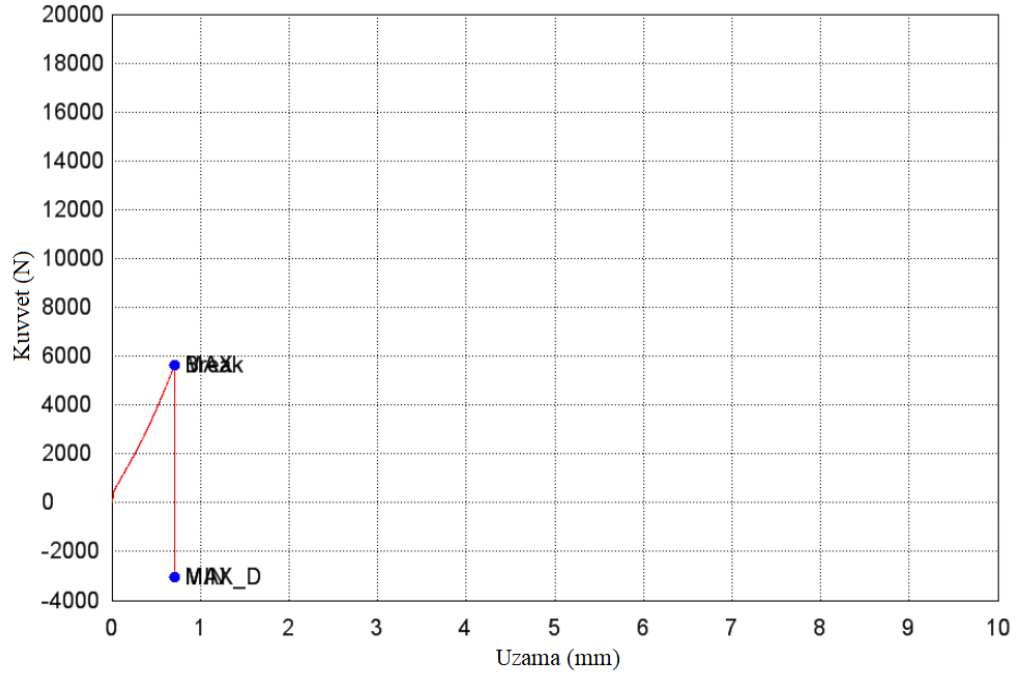
Şekil 4.55. 6 numaralı 19Ag-Cu-Zn-10In numunesine ait bindirmeli kesme diyagramı



Şekil 4.56. 7 numaralı 19Ag-Cu-Zn-13In numunesine ait bindirmeli kesme diyagramı

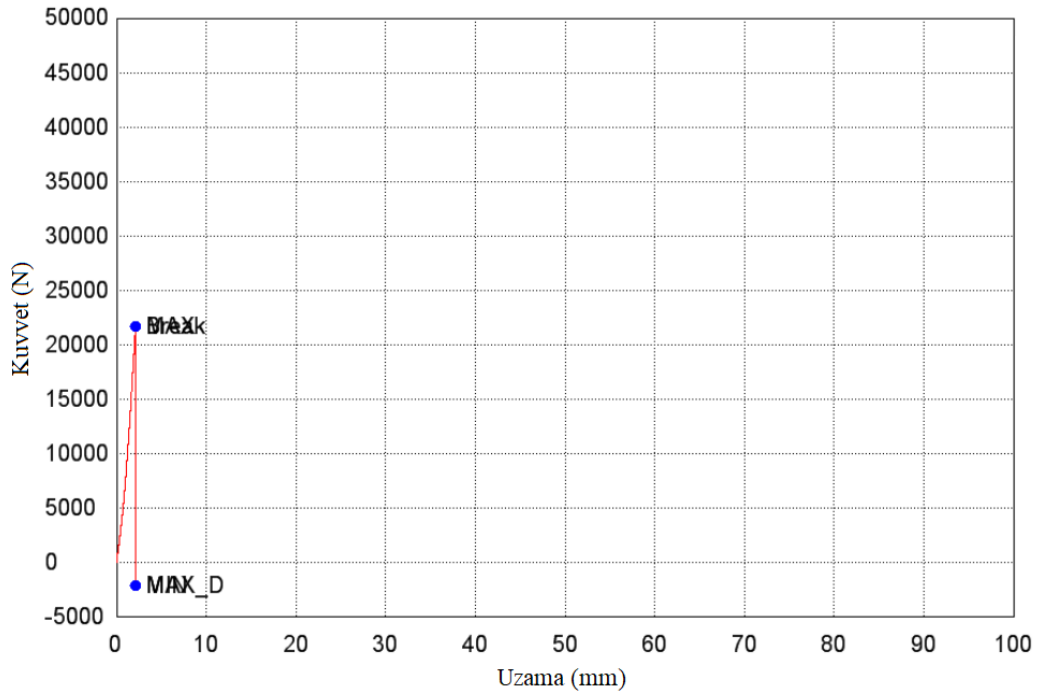


Şekil 4.57. 8 numaralı 19Ag-Cu-Zn-15In numunesine ait bindirmeli kesme diyagramı

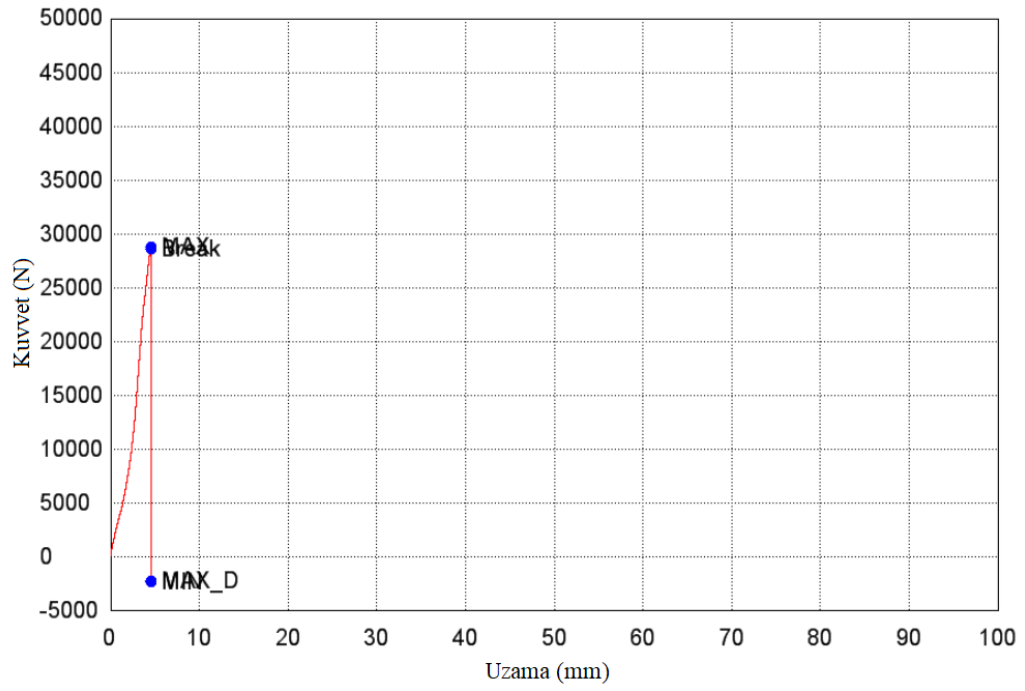


Şekil 4.58. 9 numaralı 19Ag-Cu-Zn-20In numunesine ait bindirmeli kesme diyagramı

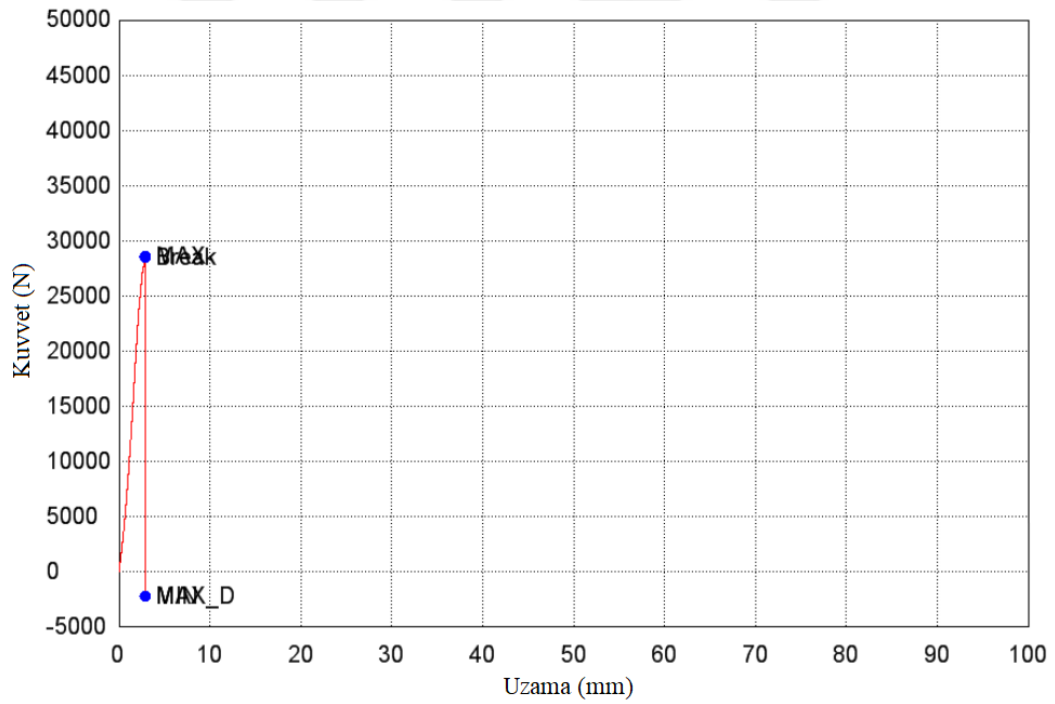
İkinci tur bindirmeli kayma testi sonuçları Şekil 4.59-Şekil 4.67 de gösterilmiştir.



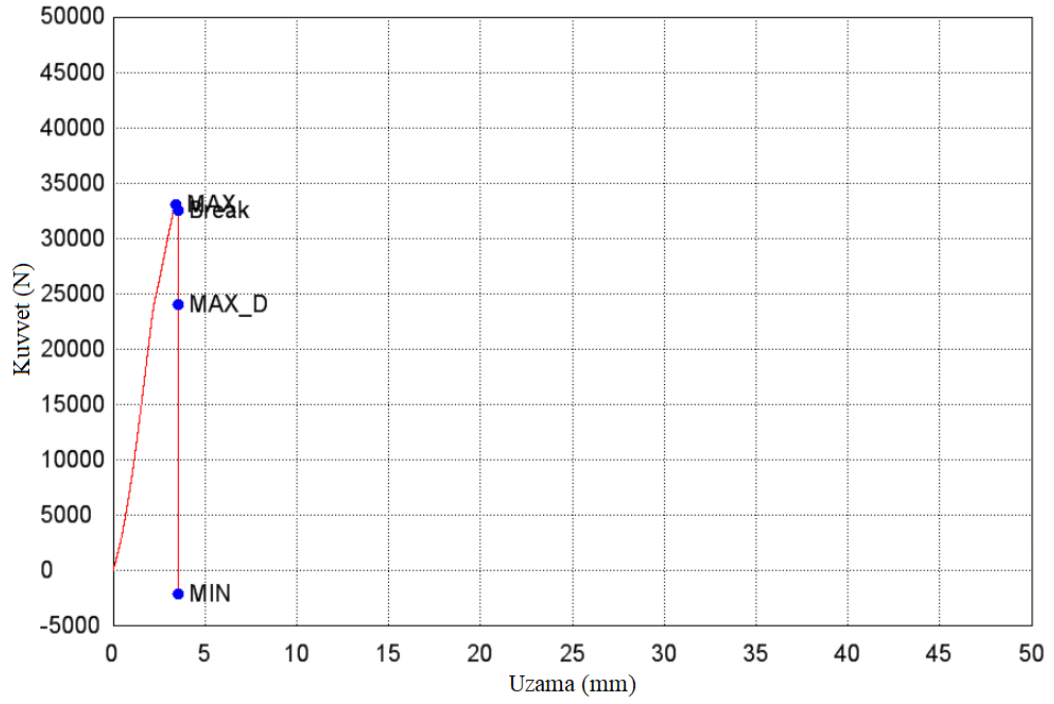
Şekil 4.59. 1 numaralı 20Ag-Cu-Zn numunesine ait bindirmeli kesme diyagramı



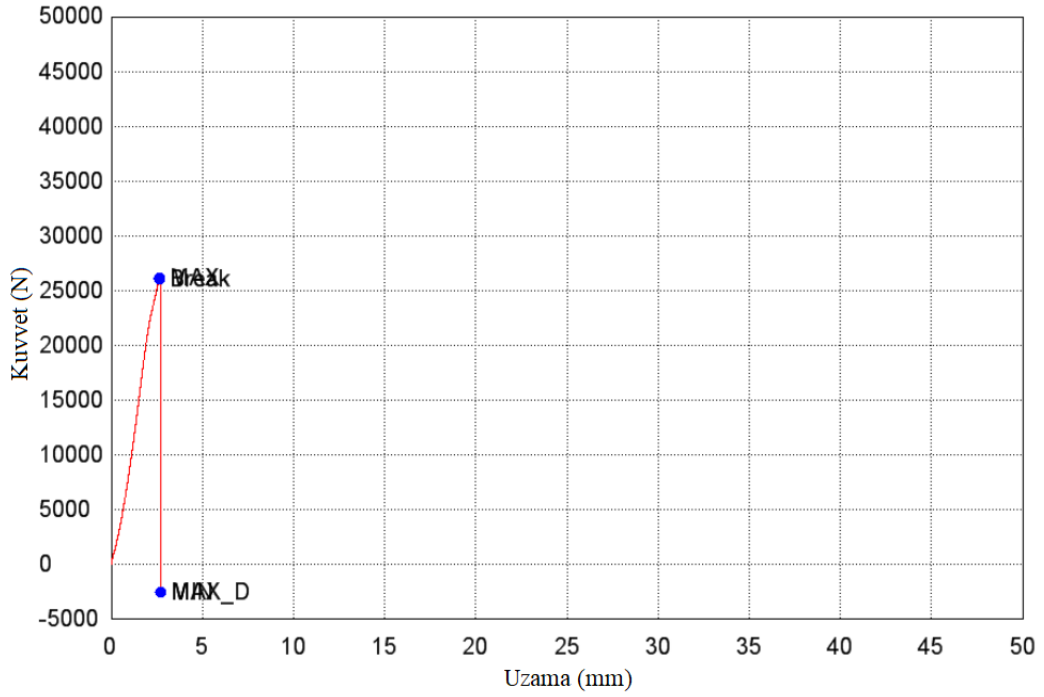
Şekil 4.60. 2 numaralı 19Ag-Cu-Zn-20In numunesine ait bindirmeli kesme diyagramı



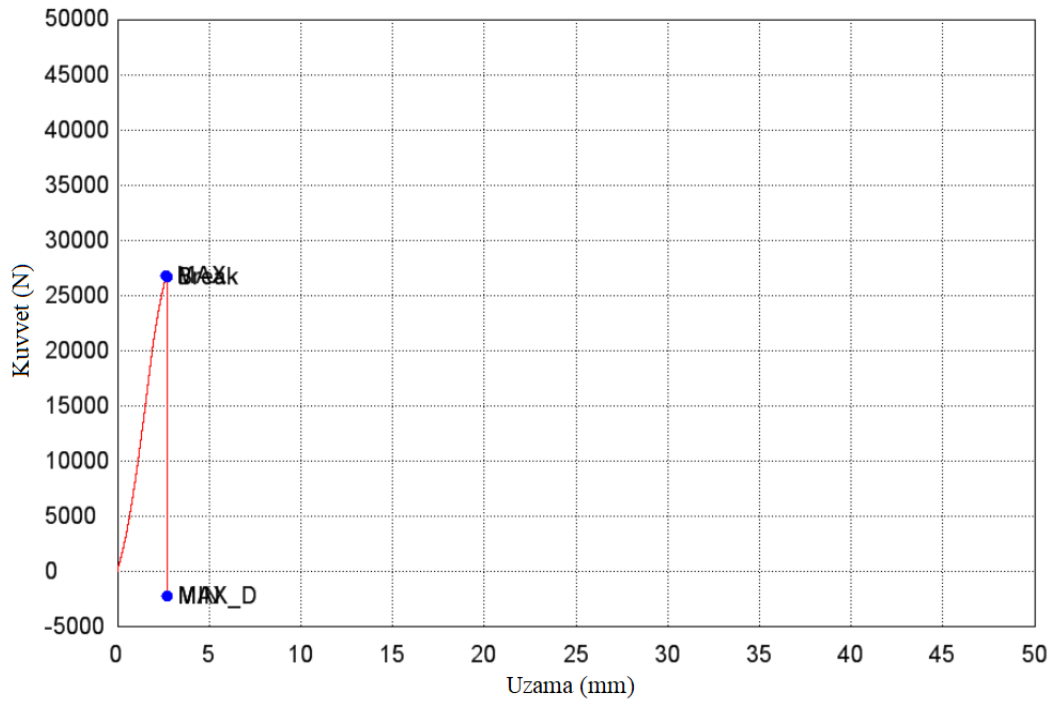
Şekil 4.61. 3 numaralı 18Ag-Cu-Zn-2In numunesine ait bindirmeli kesme diyagramı



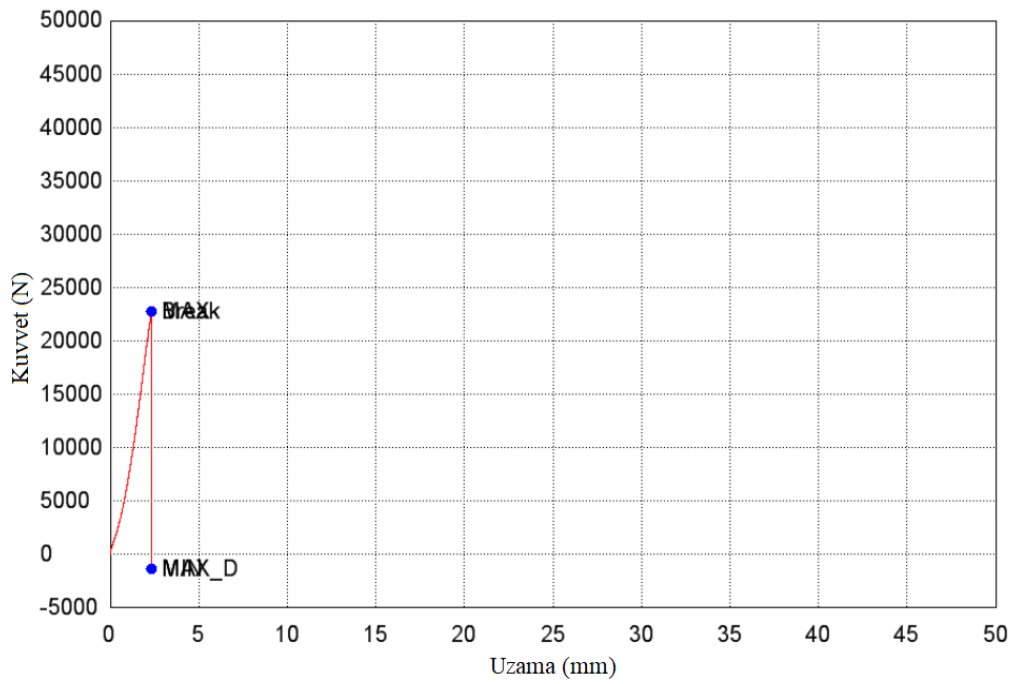
Şekil 4.62. 4 numaralı 15Ag-Cu-Zn-5In numunesine ait bindirmeli kesme diyagramı



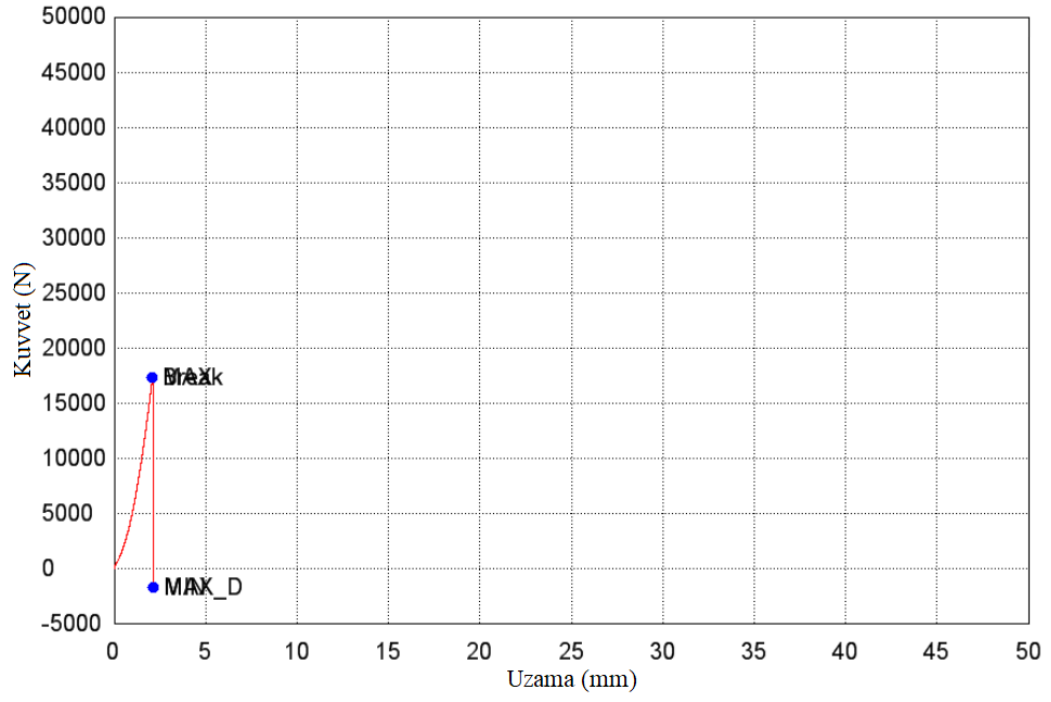
Şekil 4.63. 5 numaralı 13Ag-Cu-Zn-7In numunesine ait bindirmeli kesme diyagramı



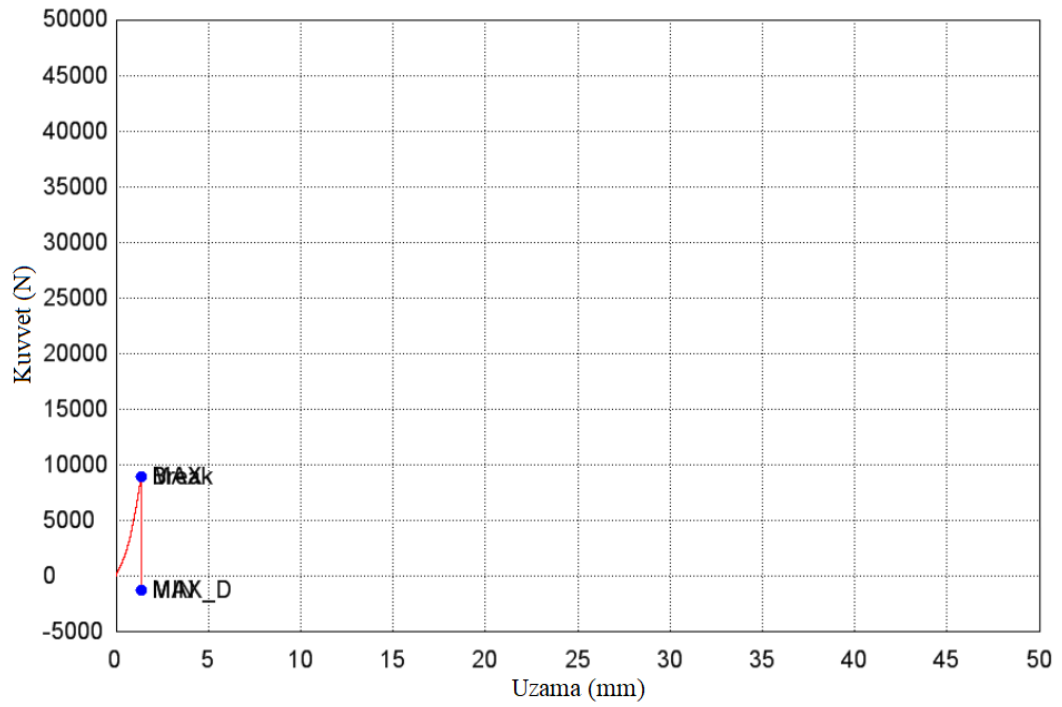
Şekil 4.64. 6 numaralı 10Ag-Cu-Zn-10In numunesine ait bindirmeli kesme diyagramı



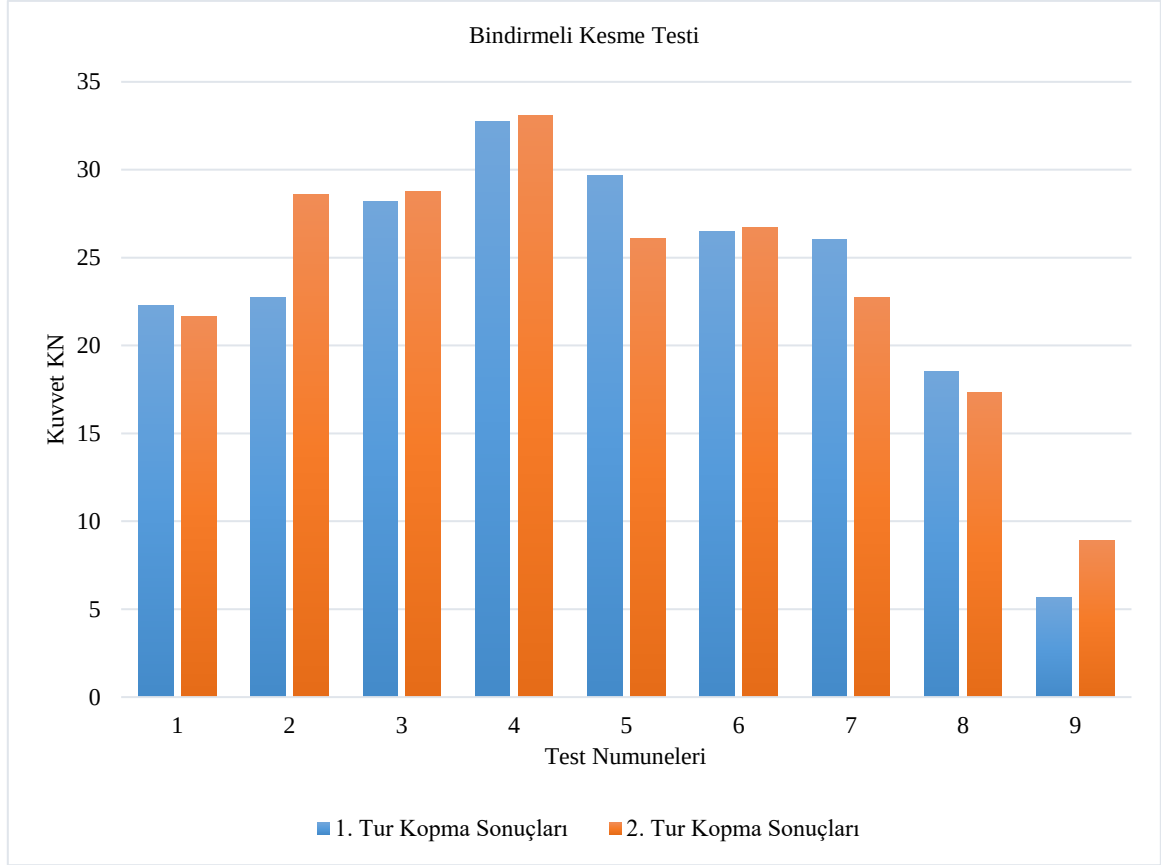
Şekil 4.65. 7 numaralı 7Ag-Cu-Zn-13In numunesine ait bindirmeli kesme diyagramı



Şekil 4.66. 8 numaralı 5Ag-Cu-Zn-15In numunesine ait bindirmeli kesme diyagramı



Şekil 4.67. 9 numaralı Ag-Cu-Zn-20In numunesine ait bindirmeli kesme diyagramı



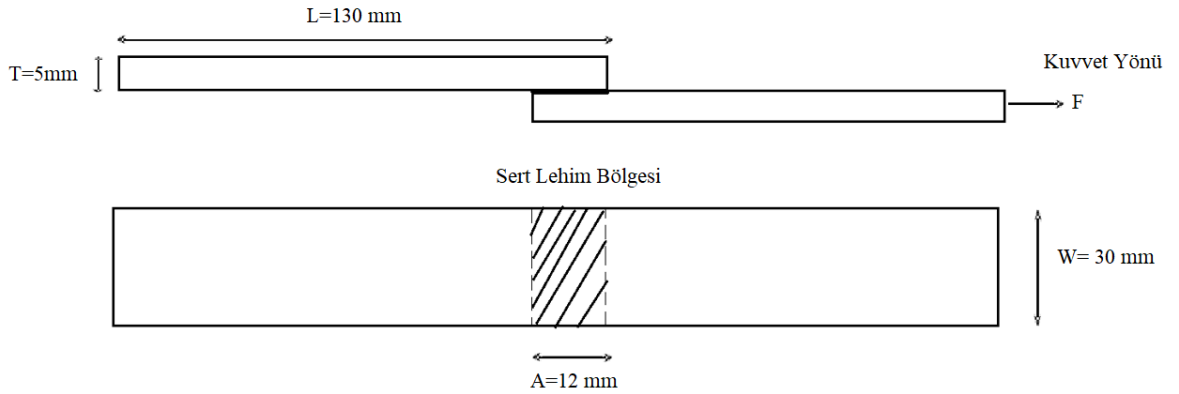
Şekil 4.68. Lehimlenen St37 çelik numunelerine ait bindirmeli kesme test sonuçları

Her bir numuneden iki adet elde edilen çekme numuneleri iki kez çekme testine tabi tutularak yanlış bir sonuç elde etmemek için sonuçlar iki kez çekim işlemi ile teyit edilmiştir. Bindirmeli kesme testi sonuçları irdelendiğinde Şekil 4.68.daki grafik karşımıza çıkmaktadır. Grafikten de anlaşıldığı üzere en yüksek kesme dayanımına 4 numaralı %5 indiyum-%15 Ag içerikli numune göstermiştir. İndiyum miktarının %5'ten sonra artması intermetalik fazların daha fazla çoğalmasıyla yapı içerisindeki kararsızlığın artmasına sebep olduğundan numunelerin kopma dayanımları da düşmektedir. Gümüş içeriksiz %20 indiyum içerikli 9 numaralı numune ise en kötü kopma dayanımı sergilemiştir. Gümüş miktarının %5 miktarda bile olsa indiyum ile beraber bulunması malzemenin kopma dayanımına önemli bir destek sağladığı anlaşılmaktadır.

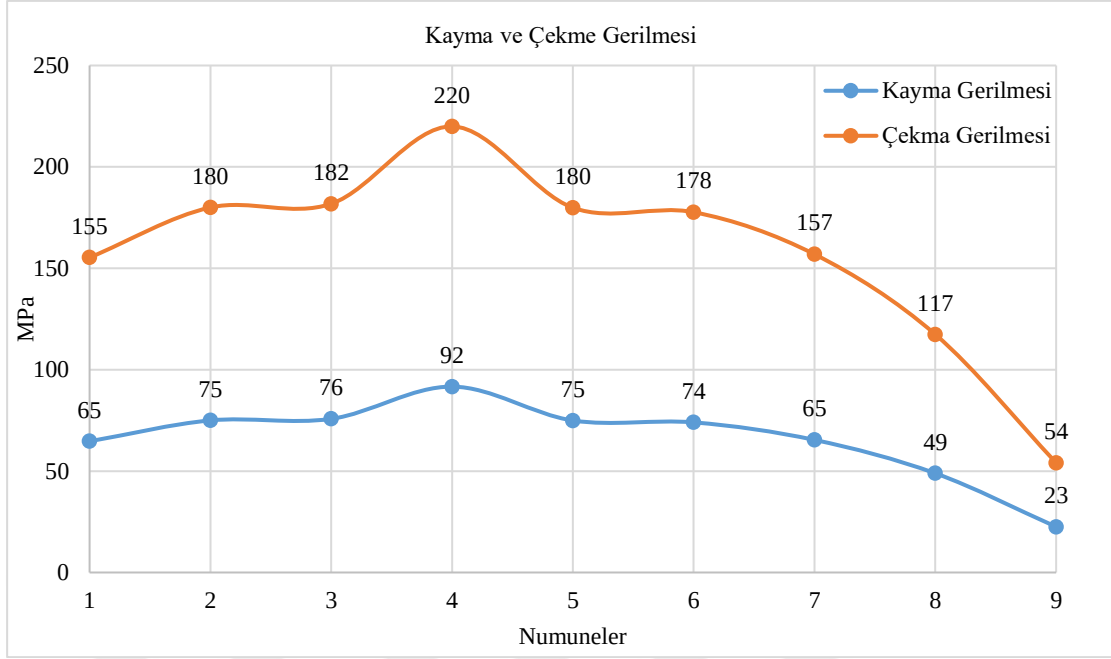
Tablo 4.2. Ortalaması alınan bindirmeli kesme testine ait kayma gerilmesi ve çekme gerilmesi

Numuneler	Fmax (N)	T (mm)	W (mm)	A (mm)	WxA (mm ²)	Kayma Gerilmesi (MPa)	WxT (mm ²)	Çekme Gerilmesi (MPa)
1	23296	5	30	12	360	65	150	155
2	27000	5	30	12	360	75	150	180
3	27274	5	30	12	360	76	150	182
4	32996	5	30	12	360	92	150	220
5	26983	5	30	12	360	75	150	180
6	26651	5	30	12	360	74	150	178
7	23538	5	30	12	360	65	150	157
8	17610	5	30	12	360	49	150	117
9	8112	5	30	12	360	23	150	54

Birinci tur ve ikinci tur kopma sonuçlarının ortalaması alınarak oluşturulan Tablo 4.2.de tüm numunelerin kayma ve çekme gerilmeleri hesaplanmıştır[9]. Şekil 4.69 da hesaplamaların yapıldığı kısımlara ait şematik gösterim mevcuttur. Elde edilen veriler incelendiğinde en yüksek kayma ve çekme gerilim değerini 4 numaralı numune vermiş en düşük kopma-çekme gerilim değerini ise 9 numaralı numune sergilemiştir.



Şekil 4.69. Kayma ve çekme gerilmesinin hesaplandığı test numunesinin şematik gösterimi



Şekil 4.70. Kayma ve çekme gerilmelerinin numunelere göre dağılımı

Kayma ve çekme gerilmelerinin karşılaştırmalı olarak verildiği şekil 4.70 te 4 numaralı numunenin en yüksek kayma ve çekme gerilim değerini verdiği görülmektedir. İndiyum miktarının % 5'e kadar kayma ve çekme gerilmelerinde olumlu sonuç vermesine karşın indiyum miktarındaki artış ile bu olumlu durum tersine dönerek hızla gerilemiştir. En kötü sonuç 9 numaralı gümüş içermeyen %20 indiyum içerikli numunede gözlemlenmiştir.

5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada %20Ag, %45 Cu ve %35 Zn içerikli sert lehim telinin imalatında gümüşün oluşturduğu maliyeti azaltmak amacıyla gümüş miktarının belirli oranlarda azaltarak yerine İndiyum ilave edilmesiyle sert lehim ilave metalinde meydana gelen mikroyapısal, termal değişimler ve mekanik etkiler deneysel olarak değerlendirilmiştir. Yapılan farklı test ve analizler neticesinde aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

1. Gümüş indiyumdan yaklaşık olarak üç kat daha pahalı bir alaşım malzemesidir. Literatür çalışmalarında[28] gümüşlü sert lehim ilave metallerine farklı elementlerin etkileri incelenmiştir. Bu tez çalışmasında sert lehim imalatında gümüşün yerine alternatif bir element olarak indiyum kullanılması belirlenmiş ve kısmen olumlu yönde ekonomik katkılar sağladığı ortaya konmuştur. Gümüş miktarının %20'lerden %15'e düşürülmesi ile imalat maliyetlerinde %17 kâr elde edilebileceği deneysel çalışmalar neticesinde ortaya konmuştur.
2. Termal analiz (TGA) değerlerinin incelenmesiyle elde edilen verilere göre yaklaşık 830 C° sıcaklıkta 1 ve 4 numaralı numunelerde kütle kaybı henüz başlamamışken 6,8 ve 9 numaralı numunelerde kütle kaybı önemli ölçüde artış göstermeye başlamıştır. Bu durum indiyum miktarının artmasıyla beraber sert lehim ilave metallerinin yüksek sıcaklıklarda kullanım ömrünü azaltmaktadır. Ancak 4 numaralı %5 In içerikli numunenin yaklaşık 830 C° kütle kaybına başlamasına karşın 1 numaralı İndiyum içermeyen referans numunesinin ise yaklaşık 930 C° de kütle kaybına uğramaya başladığı anlaşılmaktadır. Kütle kaybına uğramaya başladıkları sıcaklık aralığının yaklaşık olarak 100 C° olması çalışma ömürleri açısından bir dezavantaj olarak görülse de, %5'e kadar indiyum içerikli bir sert lehim ilave metalinin daha düşük sıcaklıklarda çalışma imkanı vermesi enerji maliyetleri açısından önem arz etmektedir.
3. İndiyum ilavesi ile gümüş alaşımlı sert ilave metallerinin erime sıcaklıkları önemli ölçüde düşürülmüştür. Literatürdeki çalışmaların bir kısmında [22,24,25] da indiyum ilavesi ile erime sıcaklığının düşürdüğü vurgulanmış ancak indiyum miktarları değişkenlik gösterdiği için makro ölçekte indiyumun gümüşün yerine kullanılması ile ilgili çalışmalar eksik kalmıştır. Termal analiz değerleri incelendiğinde katılaşma ve sıvılaşma sıcaklıklarındaki bu düşüşle uygulamada enerji maliyetlerinde önemli kâr sağlayacağını göstermektedir.
4. TGA ve DTA test değerlerinin incelenmesiyle indiyum içerikli sert lehim ilave malzemelerinin oksidasyon dayanımının da yükseldiği gözlemlenmiştir. Bu durum

indiyum ilavesi ile beraber sert lehim ilave metalinin kullanım ömrünün de arttığını ortaya koymaktadır.

5. Uygulanan sert lehim işleminde literatürdeki [19,20,23] çalışmalarla paralel şekilde Cu matrisli sert lehim ilave metaline uygulanan indiyum ilavesi ile yüzey ıslatabilirliğinin ve kapiler etkiye olumlu gelişim gösterdiği St37 çelik yüzeyine sert lehim uygulaması %5 indiyum ilavesine kadar oldukça başarılı gerçekleştirilmesi ile ifade etmek mümkündür.
6. St37 çeliğine uygulanan sert lehim işleminde lehim bölgesinden alınan sert lehim değerlerine göre %5 indiyum içeren sert lehim ilaveli 4 numaralı numunenin sertlik değerleri diğer numunelere göre en düşük değeri vermiştir. Literatür çalışmalarında [20,21,24,29,30,31] belirtildiği üzere indiyum ilavesi ile intermetalik fazların artış gösterdiği bu tez çalışması ile de gözlemlenmiştir. Elde edilen verilerle de artan intermetalik fazların meydana getirdiği çekme dayanımındaki olumsuz etkilerde bindirmeli kesme testi ile ortaya konmuştur.
7. İndiyum miktarının %5 ve üzerine çıkılması sonucunda sert lehim ilave metalinde intermetalik fazların çoğalmasıyla malzeme sertliğinin yükselmesine sebep olmuştur.
8. Termal analiz DTA ve TGA verilerine göre indiyum miktarının artması ile daha düşük sıcaklıklarda numuneler kütle kaybına uğramaya başlamışlardır. Bu durum indiyumun ergime sıcaklığını düşürmesiyle ve malzeme içerisinde kararsızlık oluşturmaya açıklanabilir.
9. Yeniden hazırlanan 5 mm kalınlığındaki St37 çelik numuneleriyle yapılan bindirmeli kesme testi sonuçları irdelendiğinde en yüksek kayma ve çekme gerilmesini 4 numaralı %5 indiyum %15 gümüş içerikli numunenin verdiği görülmüştür. İmalat aşamasında yaklaşık %20 kâr sağlayan bu numunenin daha iyi verim vermiş olması da tez çalışmasının sanayiye yönelik sağladığı katma değeri ifade etmektedir.
10. İndiyum ilavesinin %5 ten sonra çekme gerilmesi üzerinde olumsuz etkileri test sonuçlarında belirgin şekilde görülmüştür. İndiyumun intermetalik faz oluşturmaya numunelerin sertliğini artırması sebebiyle çekme dayanımları üzerinde de olumsuz etkiler meydana getirmiştir. Her ne kadar daha ekonomik sert lehim ilave metali elde edilmiş olsa da % 5 ve üzerinde indiyum ilavesinin malzemenin çekme dayanımına olumsuz etkileri test sonuçlarıyla açıkça ortaya konmuştur.
11. İndiyumun gümüşlü sert lehim metali imalatında önemli katkıları olduğu bu çalışma ile ifade edilmeye çalışılmıştır. Hem ekonomik hem de metalürjik anlamda olumlu etkiler sağlayan indiyumun katkı elementi olarak %15 Ag, %45 Cu ve % 35 Zn

içeren sert lehim ilave metaline olumlu katkısı maksimum %5 civarında olduğu bu tez çalışması ile ortaya konulmuştur.

12. İndiyum miktarının artması ile metalografik incelemede malzeme yüzeyinin parlatılması sonrası dağlama işleminde tüm numunelerde aynı dağlayıcı kullanılmıştır. Ancak numunelere dağlama işlemi uygulanırken %5ten fazla indiyum içeren numunelerin dağlama sürelerinde belirgin artış meydana gelmiştir. İlk 4 numune 2 sn. içinde dağlanırken 5 ten 8 e kadarki numunelerin dağlama süreleri sırasıyla 3 saniyeden 5 saniyeye kadar yükselmiştir. Öyle ki 9 numaralı numune 12 saniyede dağlanabilmiştir. Bu durum numunelerin indiyum miktarının artmasına paralel olarak malzemede dağlayıcıya karşı direnç geliştiğini göstermektedir.



ÖNERİLER

Numunelerin imalatı ve elde edilen mikroyapı, TGA ve DTA incelemeleri, SEM-EDS sonuçları, mikrosertlik değerleri ve bindirmeli kesme testi sonuçları ile gümüş ilaveli sert lehim ilave metallerine indiyum ilavesi ile gümüşün meydana getirdiği yüksek maliyetin düşürülebileceği sonucuna varılmıştır. Bu tez çalışması sonucunda ki verilere göre aşağıdaki çalışmaların yürütülmesi önerilmektedir.

1. %20 gümüş içerikli sert lehim ilave metali referans alınarak imal edilen numuneler gümüş oranları farklı oranlarda olan diğer sert lehim ilave metalleri ile karşılaştırılarak yeni çalışmalar yapılabilir.
2. Tez içeriğinde imal edilen numuneler, St37'den farklı çelikler ya da demir dışı metaller altlık malzemeler olarak tercih edilerek sert lehimleme işlemi gerçekleştirip sert lehim ilave metallerinin metalürjik etkileri incelenebilir.
3. Sanayicilerin ihtiyaçları belirlenerek sert lehim ilave metallerinin basınç dayanımları, korozyon dayanımları ve sızdırmazlık özellikleri incelenerek ihtiyaç duyulan alanlarda yeni çalışmalar yapılabilir.
4. İndüksiyon eritme veya oksî-gaz üfleç haricindeki eritme ve sert lehimleme yöntemleri ile elde edilecek sert lehim ilave metallerinin metalürjik etkileri test edilerek incelenebilir.
5. Elde edilen sert lehim ilave metali olan numunelere Sn gibi farklı elementlerin ilave edilmesi ile indiyumun diğer alaşımlarla ilişkisi değerlendirilerek yeniden testlerin yapılması ile sonuçları gözden geçirilebilir. İlgili sanayi kollarında kullanıldığı alanlara göre sert lehim ilave metallerinin çeşitliliği artırılabilir.
6. Üzerinde çalışılması mümkün farklı uygulamalar, testler ve imalat yöntemleri bulunan ve farklı kullanım ihtiyacına göre imal edilebilir bir imkana sahip olan sert lehim ilave metallerinin tel, çubuk, toz vb. formlara getirilebilir özelliklerde olup olmadığı yeni bir inceleme konusu olabilir.

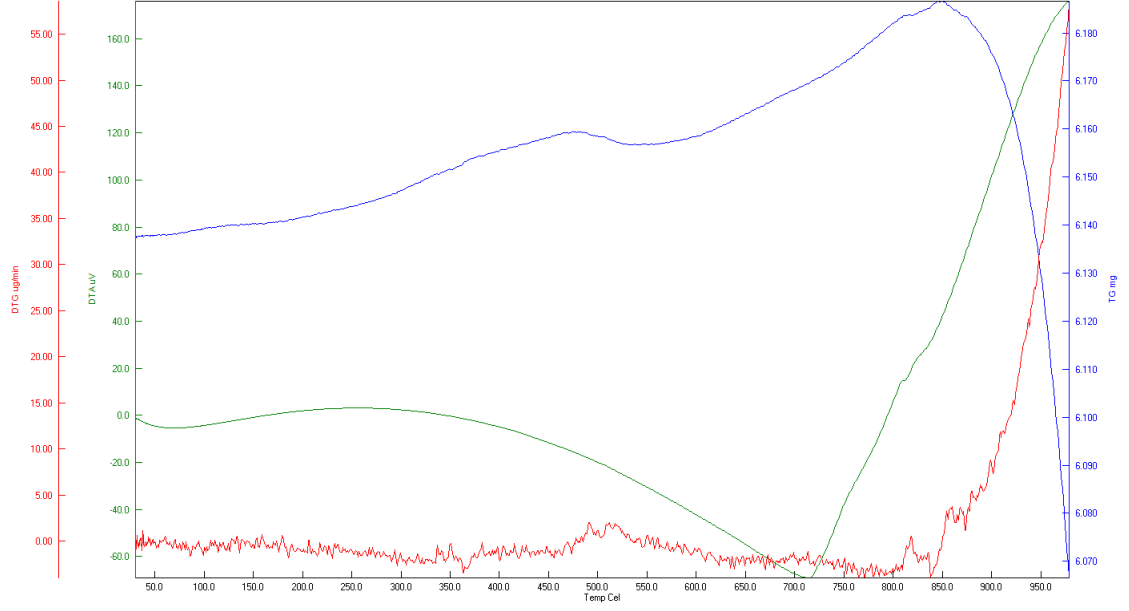
KAYNAKLAR

- [1] Winiowski, A.; Rózanski, M. Kalay ve nikelin gümüş dolgu metallerinin sert lehimleme özellikleri ve paslanmaz çeliklerden yapılan sert lehimli bağlantıların mukavemeti üzerindeki etkisi. Arch. Metall. Mater. 2013, 58, 1007-1011.
- [2] Long, W.M.; Zhang, G.X.; Zhang, Q.K. İndüksiyon lehimleme işlemi sırasında yüksek mukavemetli Ag lehim dolgu metallerinin yerinde sentezi. Scr. Mater. 2016, 110, 41-43.
- [3] Lu, B.; Xu, C.; Yang, J.X. Çin'de AEEE akışı ve azaltıcı önlemler. Atık Yönetimi. 2008, 28, 1589-1597.
- [4] Wierzbicki, L.; Malec, W.; Stobrawa, J.; Cwolek, B.; Ju, B. Düşük gümüş içerikli yeni, çevre dostu Ag-Cu-Zn-Sn sert lehim alaşımları üzerine çalışmalar. Arch. Metall. Mater. 2011, 56, 147-158.
- [5] Ma, C.L.; Xue, S.B.; Wang, B. Ga taşıyan yeni Ag-Cu-Zn-Sn sert lehim dolgu metali üzerine çalışma. J. Alaşım. Compd. 2016, 688, 854-862.
- [6] Ma, C.L.; Xue, S.B.; Wang, B.; Wang, J.X.; Hu, A.M. Ce ilavesinin Ag₁₇CuZnSn dolgu metalinin mikroyapısı ve özellikleri üzerindeki etkisi. J. Mater. Eng. Perform. 2017, 26, 3180-3190.
- [7] Çınar S. (2010), Bakır ve Alaşımlarının Sert Lehimlenmesinde Farklı Kimyasal Kompozisyonlara Sahip İlave Tellerin Bağlantının Mekanik ve Mikroyapı Özelliklerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- [8] Özdemir A, (2022), Bakır elektro kaplama parametrelerinin etkisi Al-Cu lehiminin mikroyapısı ve mekanik özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimler Enstitüsü
- [9] Deniz İ.B., (2021), Farklı havacılık malzemelerinin vakum altında sert lehimlenmesi, metalürjik ve mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
- [10] Şafak G. (2019), Bakır, pirinç ve St37 Malzemelerinin Farklı Bileşimlere Sahip Tellerle Lehiminde Mekanik ve Metalurjik Özelliklerin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- [11] TC. MEB. Metal Teknolojileri “Lehimleme 521MMI536”, Ankara, 2011
- [12] <https://www.makaleler.com/indiyum-nedir-ozellikleri-kullanimi>, Erişim Mayıs 2023
- [13] <http://www.dailymetalprice.com/metalpricecharts.php?c=in&u=kg&d=240>, Erişim Mayıs 2023
- [14] <http://www.dailymetalprice.com/metalpricecharts.php?c=ag&u=kg&d=240>, Erişim Mayıs 2023
- [15] <http://www.dailymetalprice.com/metalpricecharts.php?c=zn&u=kg&d=240>, Erişim Mayıs 2023
- [16] <http://www.dailymetalprice.com/metalpricecharts.php?c=cu&u=kg&d=240>, Erişim Mayıs 2023
- [17] <https://www.tcmb.gov.tr/wps/wcm/connect/tr/tcmb+tr/main+menu/istatistikler/doviz+kurlari/saat+basi+belirlenen+doviz+kurlari+ve+altin+fiyatları>, Erişim Mayıs 2023
- [18] Düz M., Termal analiz Metotları, <https://view.officeapps.live.com/op/view.aspx?src=https%3A%2F%2Fkimya.aku.edu.tr%2Fwp-content%2Fuploads%2Fsites%2F125%2F2017%2F02%2Ftermal-analiz.ppt&wdOrigin=BROWSELINK> 20232023, Erişim 10 Mayıs 2023
- [19] Zhang X. P., H. W. Wang & Y. W. Shi., 2004, Influence of minute amount of elements Bi, Ag and In on surface tension and soldering process performance of tin-lead based solders, Journal of Materials Science: Materials in Electronics volume 15 pages511-517
- [20] Sisamouth L., Hamdi M., Ariga T., 2010, Investigation of gap filling ability of Ag-Cu-In brazing filler metals, Journal of Alloys and Compounds, Volume 504, Issue 2, Pages 325-329
- [21] Çelik E., (2019), Gümüş İndiyum İntermetalik Fazların Termal, Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- [22] V.S. Zhuravlev, T. Sydorenko, O.Yu. Koval, “Effect of Nickel, Tin, and Indium Doping of the Eutectic Silver-Copper Filler on the Capillary and Contact Processes in Brazing of Nonmetallic Alumina-Based Materials with Titanium”, Powder Metallurgy and Metal Ceramics 2022,61,8

- [23] Erer A.M., “Effect of bismuth addition on the corrosion dynamics of Sn–3Ag–0.5Cu solder alloy in Hydrochloric Acid Solution” *International Journal of Innovative Engineering Applications*, 2021, Volume: 5 Issue: 1, 40 - 44,
- [24] Tamang S., Aravindan S., “Brazing of cBN to WC-Co by Ag-Cu-In-Ti alloy through microwave hybrid heating for cutting tool application”, *Materials Letters* 254, 2019 145–148
- [25] Miller, V. R., & Schwaneke, A. E., “Interfacial Compositions of Silver Filler Metals on Copper, Brass, and Steel”. *Weld. J.* 1978, 57.
- [26] Long, W., Zhang, G., & Zhang, Q., “In situ synthesis of high strength Ag brazing filler metals during induction brazing process”. *Scripta Materialia*. 2016, 110, 41-43.
- [27] Shabtay, Y., Ainali, M., ve Lea, A., “New brazing processes using annealresistant copper and brass alloys. *Materials and Design*”. 2004, 1 (25), 83- 39.
- [28] Ma, C., Xue, S., & Wang, B., “Study on novel Ag-Cu-Zn-Sn brazing filler metal bearing Ga. *Journal of Alloys and Compounds*”, 2016, 688, 854-862.
- [29] Zahra B., Mohamed E., Jacques R., Jérôme D., “Experimental study of the ternary Ag–Cu–In phase diagram”, *Journal of Alloys and Compounds*, volume 477, Issues 1–2, 27 May 2009, Pages 152-165
- [30] Czeppe T , Sypien A, Anna Wierzbicka-M., Grzegorz G., Marek K. “Phase Formation and Diffusivity in the Ternary Cu-Zn-In System”, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2022, 31:6962–6969
- [31] Christopher P. M., Tim A., “Thermodynamic Assessment of Ag-Cu-In”, May 2018 *Journal of Materials Science* 53(9)
- [32] Bang J. , Qiaoxin Z., Lin S., Chundong Z., Zhiwen C., Li L., Yan S., “Microstructure Evolution and Shear Property of Cu-In Transient Liquid Phase Sintering Joints”, *Sec. Environmental Degradation of Materials*, 2021, Volume 8
- [33] Li Y., Shiyuan Z., Yaocheng Z., Yifeng X., Wei J., Sai S., “Microstructure and mechanical property of Cu/In–45Cu/Ni solder joints formed by transient liquid phase bonding” *Journal of Material Research*, 2020, Page 194
- [34] Hua Y., Liangliang Z., Fangfang C., Sujuan Z., Jia M., Li B., Yongtao J., Bingli H., Shizhong W., Weimin L., “Microstructure and mechanical properties of brazing joint of silver-based composite filler metal”, *Nanotechnology Reviews*, 2020, volume 9
- [35] Canbay Aksu C. (2010), Bakır Bazlı Şekil Hatırlamalı Alaşım Üretimi ve Alaşımların Yapısal, Termal ve Elektriksel Özelliklerinin İncelenmesi, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü

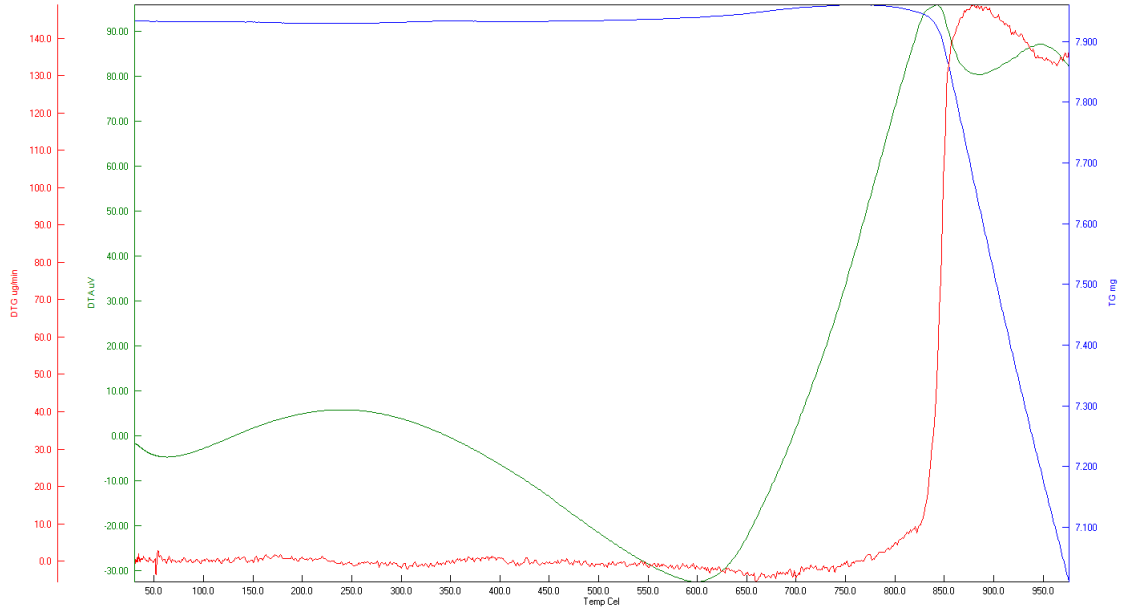
EKLER

EK-1: 1 NUMARALI NUMUNEYE AİT TERMAL ANALİZ ÇIKTISI



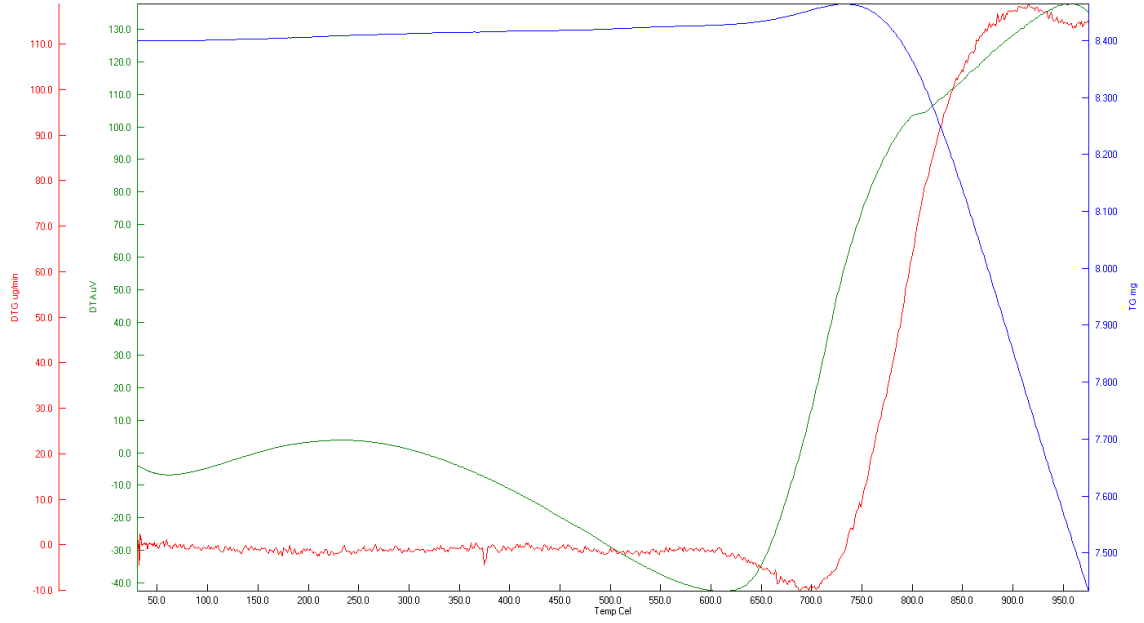
Şekil E1.1. 1 Numaralı numenin TGA, DTG ve DTA eğrileri

EK-2: 4 NUMARALI NUMUNEYE AİT TERMAL ANALİZ ÇIKTISI



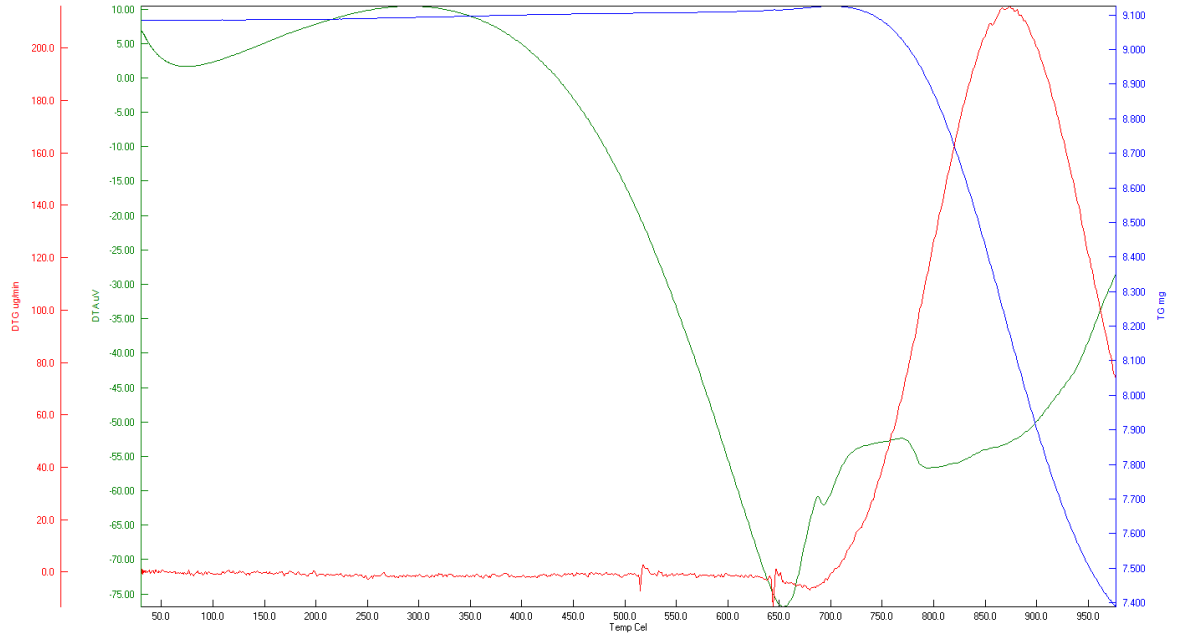
Şekil E1.2. 4 Numaralı numenin TGA, DTG ve DTA eğrileri

Ek-3: 6 NUMARALI NUMUNEYE AİT TERMAL ANALİZ ÇIKTISI



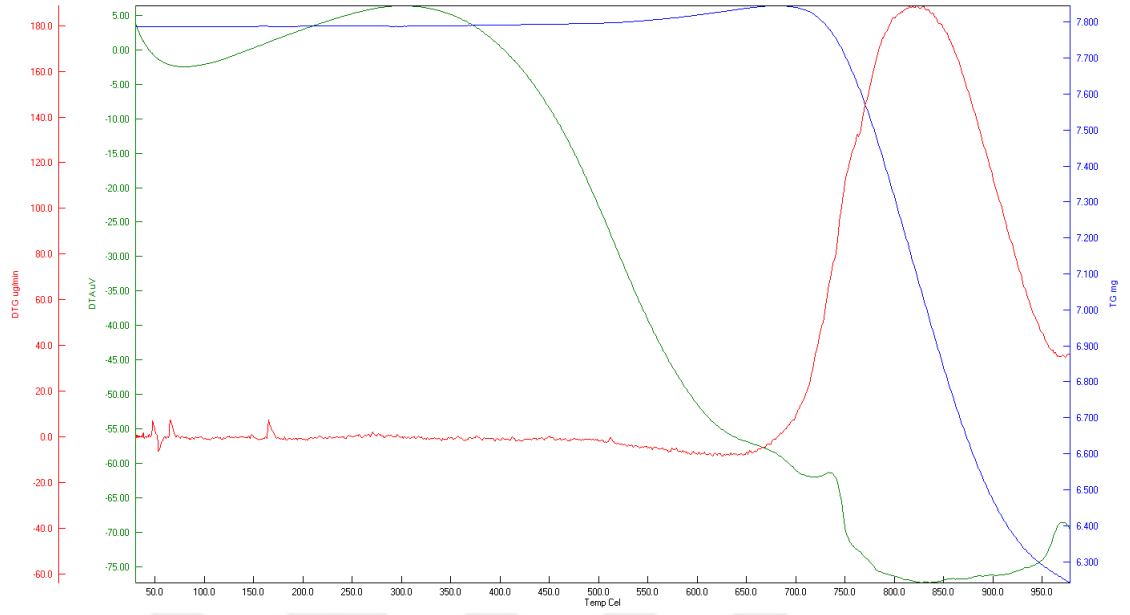
Şekil E1.3. 6 Numaralı numenin TGA, DTG ve DTA eğrileri

Ek-4: 8 NUMARALI NUMUNEYE AİT TERMAL ANALİZ ÇIKTISI



Şekil E1.4. 8 Numaralı numenin TGA, DTG ve DTA eğrileri

Ek-5: 9 Numaralı Numuneye Ait Termal Analiz Çıktısı



Şekil E1.5. 9 Numaralı numenin TGA, DTG ve DTA eğrileri

ÖZGEÇMİŞ

Yusuf DONAT

[REDACTED]	
[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	
[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	
[REDACTED]	[REDACTED] [REDACTED] [REDACTED] [REDACTED] [REDACTED] [REDACTED] [REDACTED] [REDACTED] [REDACTED]
[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	
[REDACTED]	[REDACTED]