

**TİTANYUM VE BAKIR MALZEMELERİN
DİFÜZYON KAYNAK YÖNTEMİ İLE
BİRLEŞTİRİLEBİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

**2011
YÜKSEK LİSANS TEZİ
METAL EĞİTİMİ**

Kemal AYDIN

**TİTANYUM VE BAKIR MALZEMELERİN DİFÜZYON KAYNAK
YÖNTEMİ İLE BİRLEŞTİRİLEBİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

Kemal AYDIN

**Karabük Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Metal Eğitimi Anabilim Dalında
Yüksek Lisans Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

KARABÜK

Haziran 2011

Kemal AYDIN tarafından hazırlanan “TİTANYUM VE BAKIR MALZEMELERİN DİFÜZYON KAYNAK YÖNTEMİ İLE BİRLEŞTİRİLEBİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Nizamettin KAHRAMAN
Tez Danışmanı, Metal Eğitimi Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Metal Eğitimi Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 20/06/2011

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

Başkan : Prof. Dr. Ramazan KAÇAR (KBÜ)

Üye : Doç. Dr. Nizamettin KAHRAMAN (KBÜ)

Üye : Doç. Dr. Behçet GÜLENC (GÜ)

İmzası

/ /2011

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

Doç. Dr. Nizamettin KAHRAMAN
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

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

Kemal AYDIN

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

TİTANYUM VE BAKIR MALZEMELERİN DİFÜZYON KAYNAK YÖNTEMİ İLE BİRLEŞTİRİLEBİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

Kemal AYDIN

**Karabük Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Metal Eğitimi Anabilim Dalı**

Tez Danışmanı:

Doç. Dr. Nizamettin KAHRAMAN

Haziran 2011, 127 sayfa

Bu çalışmada, Ti-6Al-4V ile bakır malzeme, sabit basınç (3 MPa), dört farklı kaynak sıcaklık (825, 850, 875 ve 890 °C) ve üç farklı bekleme süresi (15, 30 ve 60 dak.) kullanılarak argon atmosferi altında difüzyon kaynak yöntemi ile birleştirilmiştir. Kaynaklı birleştirmelere, arayüzey dayanımının belirlenebilmesi için sertlik ve kesme testi uygulanmıştır. Ayrıca, birleştirilmiş Ti-Cu kaynaklı bağlantıların arayüzeyinde meydana gelen reaksiyon bölgesinin mikroyapı özellikleri, optik ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak analiz edilmiştir. Analizlerde, reaksiyon bölgesinden çizgisel ve/veya bölgesel analizler yapılarak bu bölgelerin EDS grafikleri ve difüzyon haritaları çıkarılmıştır.

Kaynaklı numunelere yapılan kesme testleri sonucunda, artan sıcaklık ve süre ile birlikte kesme mukavemetin arttığı belirlenmiştir. Yapılan sertlik ölçümleri sonucunda en yüksek sertlik değerinin titanyum malzemedeki ara bölgeye doğru arttığı, ara bölgeden bakır bölgesine doğru ise sertlik değerinin giderek azaldığı tespit edilmiştir.

Yapılan EDS analiz çalışmalarında, kaynaklı numunelerde sıcaklık ve süreye bağlı olarak farklı reaksiyon bölgelerinin oluştuğu tespit edilmiştir. Tespit edilen reaksiyon bölgelerinde oluşan yapıların, Ti-Cu denge diyagramından faydalanarak $\beta\text{Cu}_4\text{Ti}$, Cu_2Ti , Cu_3Ti_2 , Cu_4Ti_3 , CuTi , CuTi_3 ve αTi intermetalik bileşikler olabileceği düşünülmektedir.

Anahtar Sözcükler : Titanyum, bakır, difüzyon kaynağı, EDS analizi, kesme testi, sertlik ve mikroyapı.

Bilim Kodu : 710.3.019

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

AN INVESTIGATION INTO THE JOINING OF TITANIUM WITH COPPER THROUGH DIFFUSION WELDING

Kemal AYDIN

**Karabük University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Metallurgy Education**

Thesis Advisor:

Assoc. Prof. Dr. Nizamettin KAHRAMAN

June 2011, 127 pages

In this study, Ti-6Al-4V and copper were joined through diffusion welding method under argon shielding. The joining were carried out at different welding temperatures (825, 850, 875 and 890 °C) under a constant pressure of 3 MPa. Three different holding times (15, 30 and 60 min) were employed. The welded joints were subjected to hardness and shearing tests in order to determine their interfacial strength. In addition, microstructural properties of the joined interface were examined using optical and scanning electron microscope (SEM). EDS graphs and diffusion maps of the interface were obtained by carrying out line and elemental analyses.

The shearing tests revealed that increasing welding temperature and holding time increased the shearing strength of joined parts. The hardness tests indicated that hardness values increased with increasing distance from titanium to the interface and decreased with increasing distance from the interface to the copper.

EDS analyses showed that different reaction areas took place in the welded parts depending on the temperature and holding time. The formed structures in the reaction areas were determined with the help of Ti-Cu equilibrium diagram. It is thought that they can be $\beta\text{Cu}_4\text{Ti}$, Cu_2Ti , Cu_3Ti_2 , Cu_4Ti_3 , CuTi , CuTi_3 and αTi intermetallics.

Key Words : Titanium, copper, diffusion welding, EDS analysis, shearing tests, hardness and microstructure.

Science Code : 710.3.019

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının planlanmasında, araştırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalışmamı bilimsel temeller ışığında şekillendiren, en önemlisi bana çalışmayı öğreten ve hayatım boyunca örnek alacağım, sayın hocam Doç. Dr. Nizamettin KAHRAMAN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışmalar sırasında yardımlarını esirgemeyen, Karabük Üniversitesi İmalat Mühendisliği öğretim üyeleri, çok kıymetli hocalarım Sayın Prof. Dr. Ramazan Kaçar'a, Prof. Dr. Süleyman Gündüz'e, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği öğretim üyeleri, Doç. Dr. Ali Güngör, Yrd. Doç. Dr. Fatih Hayat'a, deneylerin yapılmasında yardımcı olan Mehtap Hıdıroğluna, her zaman yanımda olan arkadaşlarım ve hocalarım olan, Arş. Gör. Ali Kalyon, Arş. Gör. Erkan Koç'a, tez çalışmalarımında yardımlarını esirgemeyen çok değerli arkadaşım Arş. Gör. Murat Aydın'a ve son olarak yüksek lisans çalışmamın her anında yanımda olan ve benim için çok değerli olan arkadaşım Arş. Gör. Yakup Kaya'ya teşekkürü bir borç bilirim.

Üniversite hayatım boyunca her zaman benim yanımda hissettiğim, bana yardımcı olan değerli halam Sayın Güngör Aydın'a, benim için çok kıymetli olan biricik yengelerim Aysel Aydın ve Zinnet Aydın'a teşekkür ederim.

Son olarak, beni büyütüp bu günlere getiren ve üzerimdeki desteliğini hiçbir zaman esirgemeyen, benim için baba kelimesini dolduran ve o anlamı taşıyan Sayın Babama ve biricik Anneme maddi ve manevi hiçbir yardımı esirgemediği yanımda oldukları için tüm kalbimle teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xvi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xvii
BÖLÜM 1.	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2.	4
DİFÜZYON KAYNAĞI.....	4
2.1. DİFÜZYON KAYNAK PARAMETRELERİ.....	8
2.1.1. Kaynak Sıcaklığı.....	9
2.1.2. Yüzey Şartları	10
2.1.3. Basıncın Etkisi	13
2.1.4. Kaynak Süresi	14
2.1.5. Kaynak Ortamı.....	15
2.1.6. Birleştirilecek Malzemelerin Tane Boyutları ve Mikroyapıları	16
2.2. DİFÜZYON MEKANİZMALARI.....	17
2.2.1. Arayer Mekanizması.....	17
2.2.2. Boşluk Mekanizması	18
2.2.3. Halka Mekanizması	19
2.2.4. Karşılıklı Yer Değiştirme Mekanizması.....	20
2.3. DİFÜZYON KAYNAĞININ UYGULANDIĞI ALANLAR VE MALZEMELER	21

	<u>Sayfa</u>
2.4. DİFÜZYON KAYNAĞININ DİĞER KAYNAK METODLARIYLA KARŞILAŞTIRILMASI	24
2.5. DİFÜZYON KANUNLARI	25
2.5.1. I. Fick Kanunu	25
2.5.2. II. Fick kanunu	26
2.6. DİFÜZYON KAYNAĞINA UYGULANAN TESTLER	28
2.6.1. Tahribatsız Muayene Testleri	28
2.6.2. Tahribatlı Muayene Testleri	28
2.7. DİFÜZYON KAYNAĞININ BAĞLANTI TÜRLERİ.....	29
2.7.1. Difüzyon Kaynağında Ara Tabaka	29
 BÖLÜM 3.	 33
TİTANYUM VE ALAŞIMLARI	33
3.1. TİTANYUM VE ALAŞIMLARININ MİKROYAPISI VE ÖZELLİKLERİ	34
3.2. TİTANYUMUN KOROZYON DAVRANIŞI VE BİYOLOJİK UYUMLULUĞU	36
3.3. NİKEL-TİTANYUM ALAŞIMLARI.....	38
3.4. TİTANYUM VE ALAŞIMLARININ KAYNAK EDİLEBİLİRLİĞİ	40
3.5. TİTANYUM VE ALAŞIMLARINA UYGULANAN KAYNAK YÖNTEMLERİ	42
3.5.1. Gaz Tungsten Ark Kaynağı	42
3.5.2. Gaz Metal Ark Kaynağı.....	43
3.5.3. Plazma Ark Kaynağı.....	44
3.5.4. Elektron Işın Kaynağı	45
3.5.5. Lazer Kaynağı.....	47
3.5.6. Difüzyon Kaynağı.....	48
3.6. DEMİR ESASLI ALAŞIMLARIN DİFÜZYON KAYNAĞI.....	49
3.7. BAKIR.....	49
 BÖLÜM 4.	 51
DİFÜZYON KAYNAĞI İLE YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	51

	<u>Sayfa</u>
BÖLÜM 5.	60
DENEYSEL ÇALIŞMALAR	60
5.1. KAYNAKLARIN YAPILIŞI.....	61
5.2. KESME TESTİ.....	63
5.3. MİKROSERTLİK TESTİ	64
5.4. METOLOGRAFİK ÇALIŞMALAR	65
5.5. OPTİK MİKROSKOP ÇALIŞMALARI	67
5.6. TARAMALI ELEKTRON MİKROSKOBU İNCELENMESİ	67
5.7. X-RAY ANALİZ ÇALIŞMASI.....	68
BÖLÜM 6.	69
SONUÇLAR VE TARTIŞMA	69
6.1. KESME TESTİ.....	69
6.2. MİKROSERTLİK TESTİ	74
6.3. OPTİK MİKROSKOP ÇALIŞMALARI	77
6.4. TARAMALI ELEKTRON MİKROSKOBU (SEM) ÇALIŞMALARI.....	80
6.4.1. Mikroyapı incelenmesi	80
6.4.2. Analiz incelenmesi.....	86
6.4.3. X-ray çalışması	120
BÖLÜM 7.	121
SONUÇLAR	121
KAYNAKLAR	123
ÖZGEÇMİŞ	128

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Difüzyon kaynağının üç aşamalı mekanizması.....	6
Şekil 2.2. Difüzyon kaynağı mekanizması.....	7
Şekil 2.3. Sıcaklık ve uygulanan basıncın sürünme ergisine tesiri	9
Şekil 2.4. Sıcaklığın bileşebilirlik üzerine etkisi.....	10
Şekil 2.5. Metal bir yüzeyin tabakalarının şematik kesiti	11
Şekil 2.6. Yüzey kusurları.....	12
Şekil 2.7. Yüzey gerilmesi ile pürüzlülük arasında sıcaklığa bağlı değişme	13
Şekil 2.8. Bağlantının kayma mukavemeti ile kaynak süresi arasındaki ilişki	15
Şekil 2.9. Arayer atomu yer değiştirmesi ve aktivasyon enerjisi değişimi	18
Şekil 2.10. Boşluk mekanizmasında atomların yer değiştirmesi	19
Şekil 2.11. Halka mekanizmasında atomların yer değiştirmesi.....	20
Şekil 2.12. Atomların karşılıklı yer değiştirmesi	20
Şekil 2.13. Difüzyon mekanizmalarının şematik gösterimi.....	20
Şekil 2.14. Difüzyon kaynak yönteminin ve diğer katı hal kaynak yöntemlerinin sıcaklık, deformasyon ve süre açısından karşılaştırılması.....	25
Şekil 2.15. Kararsız hal difüzyonu için konsantrasyon profili.....	27
Şekil 2.16. Kararsız hal difüzyonunda üç farklı sıcaklıkta oluşan konsantrasyon profili.....	27
Şekil 2.17. Difüzyon kaynağında ara tabaka.....	30
Şekil 2.18. Ara tabakanın kaynak bölgesine tesiri	31
Şekil 3.1. TIG kaynağının şematik gösterimi	42
Şekil 3.2. MIG kaynağının şematik gösterimi	43
Şekil 3.3. Plazma kaynağı	44
Şekil 3.4. Elektron ışın kaynağı	46
Şekil 3.5. Lazer kaynağının şematik gösterimi	47
Şekil 3.6. Difüzyon kaynağının şematik resmi.....	48
Şekil 3.7. Difüzyon kaynaklarının mikroyapısı.	49
Şekil 5.1. Difüzyon kaynak setinin (a) fotoğraf ve (b) şematik görünümü.....	62
Şekil 5.2. Kesme testinde kullanılan kalıbın şematik görünümü	63

Sayfa

Şekil 5.3. Kesme testinin yapıldığı cihaz fotoğrafı	64
Şekil 5.4. Otomatik sertlik cihazı	65
Şekil 5.5. Mikrosertlik ölçüm izleri	65
Şekil 5.6. Kaynaklı numunelerin bakalite alınmış şekli.....	66
Şekil 5.7. Optik mikroskop	67
Şekil 5.8. X-Ray analiz cihazı.....	68
Şekil 6.1. 30 dakika süre ile birleştirilmiş numunelerin kesme dayanımı test grafikleri (a) 825 °C (b) 850 °C, (c) 875 °C ve (d) 890 °C.....	70
Şekil 6.2. Kesme dayanımı sonuçları.....	71
Şekil 6.3. (a) ve (b) Mikrosertlik ölçüm yapılan bölgeler ve elde edilen sertlik izleri	74
Şekil 6.4. 825 °C’de (a) 30 ve (b) 60 dakikada birleştirilen numunelerin sertlik değerleri.....	75
Şekil 6.5. 850 °C (a) 15 dakika ve (b) 30 dakikada birleştirilen numunelerin sertlik değerleri	76
Şekil 6.6. 875 °C’de (a) 15 ve (b) 30 dakika süre ile birleştirilen numunelerin sertlik değerleri.....	76
Şekil 6.7. 890 °C’de (a) 15 ve (b) 30 dakika süre ile birleştirilen numunelerin sertlik değerleri	76
Şekil 6.8. 825 °C’de 30 dakika süre ile birleştirilmiş numunenin optik mikroskop görüntüsü	78
Şekil 6.9. 850 °C 30 dakika süre ile birleştirilmiş numunenin optik mikroskop görüntüsü	78
Şekil 6.10. 875 °C’de 30 dakika süre ile birleştirilmiş numunenin optik mikroskop görüntüsü.....	79
Şekil 6.11. 890 °C’de 30 dakika süre ile birleştirilmiş numunenin optik mikroskop görüntüsü.....	79
Şekil 6.12. 825 °C’de 60 dakika süre ile birleştirilmiş numunenin SEM görüntüsü	81
Şekil 6.13. 850 °C’de 15 dakika süre ile birleştirilmiş numunenin SEM görüntüsü	82
Şekil 6.14. 850 °C’de 60 dakika süre ile birleştirilmiş numunenin SEM görüntüsü	82
Şekil 6.15. 875 °C’de 15 dakika süre ile birleştirilmiş numunenin SEM görüntüsü	83
Şekil 6.16. 875 °C’de 60 dakika süre ile birleştirilmiş numunenin SEM görüntüsü	83

Şekil 6.17. 890 °C’de 15 dakika süre ile birleştirilmiş numunenin SEM görüntüsü	84
Şekil 6.18. 890 °C’de 60 dakika süre ile birleştirilmiş numunenin SEM görüntüsü	85
Şekil 6.19. 825 °C’de 30 dakika süre ile birleştirilmiş numunenin EDS analizi yapılan bölgelerin görüntüsü	86
Şekil 6.20. 825 °C 30 dakika süre ile birleştirilmiş numunenin EDS analiz grafikleri	88
Şekil 6.21. 825 °C’de 60 dakika süre ile birleştirilmiş numunenin EDS analiz yönü	89
Şekil 6.22. 825 °C ve 60 dakika süre ile birleştirilmiş olan numunelerden elde edilen EDS analizi sonuçları	89
Şekil 6.23. 825 °C ve 60 dakikadaki EDS analiz sonucu elde edilen element haritası	90
Şekil 6.24. 850 °C’de 15 dakika süre ile birleştirilmiş numunenin EDS analizi yapılan bölgelerin görüntüsü.....	91
Şekil 6.25. 850 °C 15 dakika süre ile birleştirilmiş numunenin EDS analiz grafikleri.	92
Şekil 6.26. 850 °C ve 30 dakika süre ile birleştirilmiş numunenin EDS analiz yönü.....	93
Şekil 6.27. 850 °C ve 30 dakika süre ile birleştirilmiş olan numunelerden elde edilen çizgisel EDS analizi sonuçları.....	93
Şekil 6.28. 850 °C ve 30 dakikadaki EDS analiz sonucu elde edilen element haritası.....	94
Şekil 6.29. 850 °C’de 60 dakika süre ile birleştirilmiş numunenin EDS analizi yapılan bölgelerin görüntüsü.	95
Şekil 6.30. 850 °C’de 60 dakika süre ile birleştirilmiş numunenin EDS analiz grafikleri	96
Şekil 6.31. Cu-Ti ikili faz diyagramı	98
Şekil 6.32. 875 °C’de 15 dakika süre ile birleştirilmiş numunenin EDS analiz yapılan bölgelerin görüntüsü	98
Şekil 6.33. 875 °C’de 15 dakika süre ile birleştirilmiş numunenin EDS analiz grafikleri.....	99
Şekil 6.34. 875 °C’de 30 dakika süre ile birleştirilmiş numunenin EDS analizi yapılan bölgelerin görüntüsü.....	100
Şekil 6.35. 875 °C 30 dakika süre ile birleştirilmiş numunenin EDS analiz grafikleri.....	101

Şekil 6.36. 875 °C’de 60 dakika süre ile birleştirilmiş numunenin EDS analizi yapılan bölgelerin görüntüsü.....	102
Şekil 6.37. 875 °C’de 60 dakika süre ile birleştirilmiş numunenin EDS analiz grafikleri.....	103
Şekil 6.38. 890 °C’de 15 dakika süre ile birleştirilmiş numunenin EDS analizi yapılan bölgelerin görüntüsü.....	104
Şekil 6.39. 890 °C’de 15 dakika süre ile birleştirilmiş numunenin EDS analiz grafikleri.....	105
Şekil 6.40. 890 °C’de 15 dakika süre ile birleştirilmiş numunenin 5. bölgesinden elde edilen EDS analiz grafiği.	106
Şekil 6.41. 890 °C ve 30 dakika süre ile birleştirilmiş numunenin çizgisel EDS analizi yapılan bölgelerin görüntüsü	107
Şekil 6.42. 890 °C ve 30 dakika süre ile birleştirilmiş olan numunelerden elde edilen EDS çizgisel analizi grafikleri.	107
Şekil 6.43. 890 °C’de 30 dakikadaki EDS analiz sonucu elde edilen element haritası	108
Şekil 6.44. 890 °C ve 30 dakika süre ile birleştirilmiş numunenin difüzyon bölgesinden EDS analizi yapılan bölgelerin görüntüsü	109
Şekil 6.45. 890 °C 30 dakika süre ile birleştirilmiş numunenin EDS analiz grafikleri.	110
Şekil 6.46. 890 °C’de 60 dakika süre ile birleştirilmiş numunenin EDS analizi yapılan bölgelerin görüntüsü.....	111
Şekil 6.47. 890 °C’de 60 dakika süre ile birleştirilmiş numunenin bakır tarafının EDS analiz grafikleri.....	112
Şekil 6.48. 890 °C ve 60 dakika süre ile birleştirilmiş numunenin EDS analizi yapılan (a) bölgenin görüntüsü ve (b) spektro analizi.....	113
Şekil 6.49. 890 °C ve 60 dakika süre ile birleştirilmiş numunenin EDS analizi yapılan (a) bölgenin görüntüsü ve (b) spektro analizi.....	114
Şekil 6.50. 890 °C ve 60 dakika süre ile birleştirilmiş numunenin EDS analizi yapılan (a) bölgenin görüntüsü ve (b) spektro analizi.....	115
Şekil 6.51. 890 °C ve 60 dakika süre ile birleştirilmiş numunenin EDS analizi yapılan (a) bölgenin görüntüsü ve (b) spektro analizi.....	116
Şekil 6.52. 890 °C ve 60 dakika süre ile birleştirilmiş numunenin EDS analizi yapılan (a) bölgenin görüntüsü ve (b) spektro analizi.....	116
Şekil 6.53. 890 °C ve 60 dakika süre ile birleştirilmiş numunenin EDS analizi yapılan (a) bölgenin görüntüsü ve (b) spektro analizi.....	117
Şekil 6.54. 890 °C ve 60 dakika süre ile birleştirilmiş numunenin EDS analizi yapılan (a) bölgenin görüntüsü ve (b) spektro analizi.....	118
Şekil 6.55. X-Ray analiz grafiği.....	120

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1. Metallerde oksit filmi oluşum süreleri.....	11
Çizelge 2.2. Difüzyon kaynak yöntemine uygun metal çiftleri ve ara tabaka malzemeleri.....	22
Çizelge 2.3. Metal çiftleri için difüzyon kaynağı işlem parametreleri	22
Çizelge 2.4. Difüzyon kaynağı yapılabilen malzeme kombinasyonları.....	23
Çizelge 3.1. Biyomedikal uygulamalarda kullanılan titanyum alaşımları.....	34
Çizelge 3.2. Biyomedikal uygulamalarda kullanılan titanyumun mekanik özellikleri.....	35
Çizelge 3.3. Dişçilik uygulamalarında kullanılan titanyumun mekanik özellikleri.	36
Çizelge 3.4. Bazı metal çiftlerindeki sürtünme katsayıları.....	36
Çizelge 3.5. Titanyum ve alaşımlarının kaynak edilebilirliği	41
Çizelge 3.6. Titanyumun TIG kaynağı kaynak değişkenleri.....	43
Çizelge 3.7. Titanyum alaşımının MIG kaynağı kaynak değişkenleri.....	44
Çizelge 3.8. Titanyum alaşımlarının plazma kaynağı kaynak değişkenleri.....	45
Çizelge 3.9. Titanyum alaşımlarının elektron ışın kaynağı kaynak değişkenleri.....	46
Çizelge 3.10. Ti-6Al-4V için tipik lazer kaynağı parametreleri	48
Çizelge 3.11. Bakırın fiziksel ve mekanik özellikleri	49
Çizelge 5.1. Titanyumun kimyasal analizi (% ağırlık)	60
Çizelge 5.2. Bakırın kimyasal analizi (% ağırlık)	60
Çizelge 5.3. Deneyleerde kullanılan kaynak parametreleri	62

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

Ti	: Titanyum
Al	: Alüminyum
Cu	: Bakır
Ar	: Argon
He	: Helyum
V	: Vanadyum
μm	: Mikron metre
Mo	: Molibden
Si	: Silisyum
Mn	: Mangan
α	: Alfa
β	: Beta

KISALTMALAR

EDS	: Energy Dispersive Spectroscopy
X-Ray	: X-ışınları
ASTM	: American Society for Testing and Materials
SEM	: Scanning Electron Microscopy
MPa	: Megapaskal
T _m	: Ergime sıcaklığı
T _k	: İşlem sıcaklığı
Q	: Aktivasyon enerjisi
EPMA	: Electron Probe Microanalysis
DIN	: Deutch Industrie Normen (Alman Endüstri Normları)
ITAB	: Isı Tesiri Altında Kalan Bölge
XRD	: X ışınları kırınımı

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Gelişmiş makine elemanları konstrüksiyonlarında, yüksek sıcaklıklarda meydana gelen faz dönüşümlerinin ve deformasyonların oluşmaları istenmediğinden, bu konstrüksiyonlar, düşük sıcaklıkta gerçekleştirilen birleştirme işlemini gerektirmektedirler. Ancak bu birleştirmelerin yapılması, bilinen kaynak yöntemleri ile zordur. Bu sebeple, yeni ve uygulaması yüksek bilgi ve teknoloji gerektiren kaynak metotları geliştirilmiştir. Bu metotlarda, ana metal ergimediği için bu işleme “katı hal kaynağı” denilmiştir [1].

Difüzyon kaynağı, bir katı hal kaynak yöntemidir. Bu kaynak yöntemi, katı halde gerçekleşen katı hal difüzyonuna dayanmaktadır. Difüzyon, malzemenin serbest enerjisini (kimyasal potansiyel farkını) azaltmak amacıyla atomların, yüksek enerjili bölgelerden düşük enerjili bölgelere göç etmesi olayıdır. Malzemede difüzyon, yeniden kristalleşme sıcaklığında hızlanmaya başlar. Sıcaklık, zaman, difüzyon edilen ortam ve potansiyel farkı difüzyonu etkileyen başlıca parametrelerdir. İşte bu parametreler, dolayısıyla difüzyon kaynağını da etkilemektedir. Difüzyon kaynağının mekanizmaları ise kısaca şöyle sıralayabiliriz; plastik deformasyon, sürünme, difüzyon ve yeniden kristalleştirme [2].

Difüzyon kaynak yöntemi ile aralarında seramik ve kompozitlerinde yer aldığı, birçok yeni ve birbiriyle birleştirilmeleri ergime kaynağı ile mümkün olmayan demir esaslı ve demir dışı metal ve alaşımların birleştirilmesi mümkündür.

Bu kaynak yöntemi, ilk kez 1940’larda uygulanmaya başlanmış olmasına rağmen önemi 1970’lerden sonra anlaşılmıştır. Yeni ve gelişmiş malzemelerin üretilmesiyle ve bunların diğer kaynak yöntemleri ile kaynak edilememeleri, difüzyon kaynağına önem kazandırmıştır. Difüzyon kaynağı ile yapılan birleştirmelerde, ana metaller

ergirmeden birleştirme sağlandığı, ön ve son tavlamaya ihtiyaç duyulmadığı, bir kerede karmaşık şekilli birleştirmeler yapılabilirdiği, istenmeyen faz dönüşümleşiri engellendiği, seramik ve kompozitlerin metal ve diğer malzemelerle birleştirilmesi sağlanabilirdiği için bu yöntem üstün bir kaynak yöntemidir. İşte bu üstünlükleri neticesinde, özellikle uzay ve nükleer enerji alanında geniş çapta kullanılmaktadır.

Difüzyon kaynağı uygulamasında, özellikle de farklı metal ve alaşımların birleştirilmesinde ilave bir ara tabaka kullanılır. Ara tabakalar, kaynak alanındaki heterojenliği minimuma indirir ve birleşmenin oluşumunu kolaylaştırır [1,2].

Difüzyon kaynağı, elektronik, nükleer ve uzay endüstrisinde kullanılan önemli bir üretim tekniğidir. Bu teknik, yakın boyut toleransı ve küçük bir mikroskobik arpılmayla, benzer ve benzer olmayan malzemelerin birleştirilmesinde alışılmışın dışında bir birleştirme işlemi sağlar [3].

Bu çalışmada, difüzyon kaynağı parametreleri ve kaynak mekanizmaları önceden yapılmış deneysel çalışmalar da gözden geçirilerek incelenmiş ve bu kaynak yönteminin önemi ve gerekliliği yinelenmeye çalışılmıştır. Bu kaynak yönteminde titanyum ve bakır çiftinin farklı sıcaklık ve sürelerde elde edilen kaynakların kalitesini belirlemek için optik ve elektron mikroskobu ile kaynak bölgesinde incelemeler yapılmış ve buna ilaveten mekanik özelliklerin tespiti için, numunelere kesme ve sertlik testleri uygulanmıştır.

Hazırlanan bu çalışma, genel olarak literatür ve yapılan deneysel çalışmalar olmak üzere iki ana başlık altında toplanmaktadır. Ayrıca literatür ve deneysel çalışmalar altı bölüm içerisinde verilmiştir. Bu konu başlıklarından birinci bölüm “Giriş” olup burada çalışmanın kısa özeti verilmiştir. İkinci bölümde difüzyon kaynak yöntemi hakkında genel bilgi verilmiş, üçüncü bölümde ise titanyum ve alaşımlarının hakkında literatür bilgileri sunulmuştur.

Dördüncü bölümde, difüzyon kaynak yöntemi ile yapılan çalışmalar hakkında literatür taraması yapılmış ve önceden benzer konuda yapılan çalışmalar anlatılmıştır. Beşinci bölümde, deneysel çalışmalarda kullanılan malzemeler, kaynak işleminin nasıl

gerçekleştigi, kaynaklı bağlantılara uygulanan mekanik testler ve metalografik çalışmalar hakkında bilgiler verilmiştir.

Altıncı bölümde, kaynaklı numunelere uygulanan kesme testlerinden elde edilen veriler, değerlendirmede kolaylık sağlaması amacıyla grafik olarak çizilmiş ve değerlendirmeler bu grafikler üzerinden gerçekleştirilmiştir. Kaynaklı numuneler üzerinden yapılan sertlik ölçümleri ve sertlik sonuçları resim ve grafikler halinde sunularak değerlendirmelerde bulunulmuştur. Ayrıca optik mikroskop ve SEM çalışmalarından elde edilen görüntüler ve difüzyon haritaları yorumlanmıştır. Yapılan deneyler sonucunda elde edilen bulgular daha önce yapılmış çalışmalarla “Neden-Sonuç” ilişkisi içerisinde değerlendirilmiştir.

Deneysel çalışmaların nihai sonuçlarının açıklandığı yedinci ve son bölümde ise, deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen bulgular, deneysel çalışmanın amacına uygun bir biçimde yorumlanarak sonuçlandırılmıştır.

BÖLÜM 2

DİFÜZYON KAYNAĞI

Difüzyon kaynağı, alın altına getirilmiş iki malzemeyi, malzemelerin ergime sıcaklıklarının altındaki bir sıcaklıkta, gözle görülebilir bir plastik deformasyona maruz kalmayacak bir basınç altında, malzemeler arası metalürjik bir bağ oluşturacak kadar bir süre bekleterek yapılan bir birleştirme yöntemidir. Yöntem difüzyon esaslıdır ve birleşme katı halde meydana gelir. Yöntemin en büyük avantajı benzer olmayan malzeme çiftlerinden yeni bir malzeme üretmektir [4].

Difüzyonla birleştirme işleminde, birleştirme sırasında birleştirilecek malzemeler arasında ara tabaka kullanılmıyorsa katı hal difüzyon kaynağı adı verilir. Katı hal difüzyon kaynağı vakum ya da koruyucu gaz atmosferi altında yapılır. Şayet birleştirme işlemi sırasında ergiyen bir ara tabaka kullanılıyorsa sıvı hal difüzyon kaynağı adı verilir. Genellikle, benzer olmayan malzemelerin birleştirilmesinde ara tabaka kullanılır [1-4].

Difüzyon kaynağı ile birleştirilebilecek metal kombinasyonları aşağıdaki şekildedir:

- Benzer metaller, bir katı hal kaynağı formunda doğrudan birleştirilebilir.
- Benzer metaller, kaynak yüzeyi arasında farklı bir metalin ince bir tabaka halinde olacağı bir dolgu metali kullanılarak birleştirilebilirler.
- İki farklı metal, bir metalik birleştirme oluşturacak şekilde doğrudan birleştirilebilir.
- Farklı metaller, yüzeyler arasında dolgu metali olarak adlandırılan başka bir metal kullanılarak birleştirilebilirler [4].

Difüzyon ile birleştirme esnasında iki malzemenin birleştirme davranışını etkileyen faktörler; kohezyon veya adhezyon kuvvetleri ve Van der Waals kuvvetleridir.

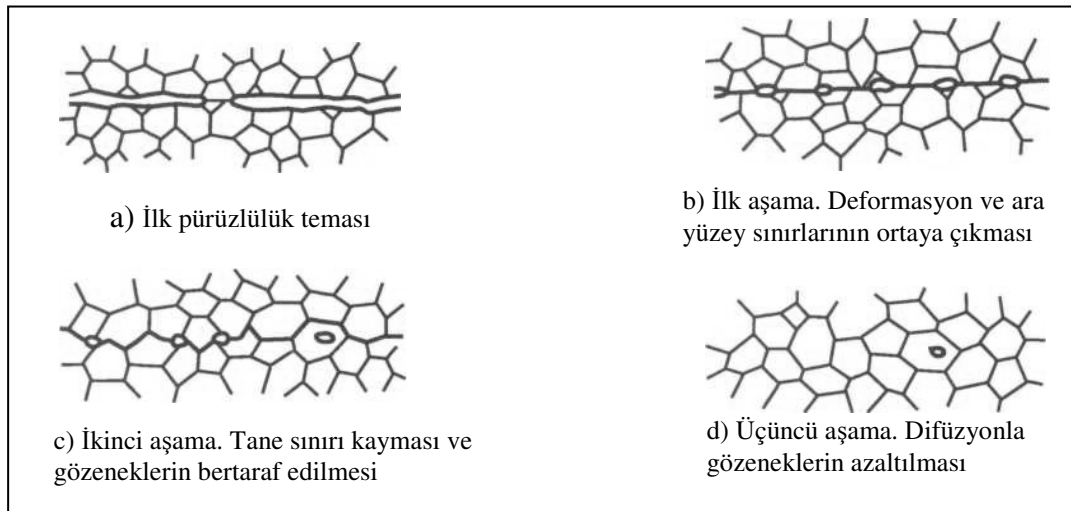
Kristal yapıya sahip katı bir malzemenin atomları arasındaki çekim kuvveti, kohezyon kuvvetini meydana getirir. Normal olarak her bir atom, üzerine tesir eden kuvvetin sıfır olduğu dengeli bir pozisyonda bulunur. Katı malzemeler, dış kuvvetlerin etkisi altında kalırsa, atomların denge pozisyonları bozulur. Katı malzemenin kristallerinin içinde, dış kuvvet tarafından dengelenen bir kuvvet meydana gelir. Atomlar arasındaki oluşan bu çekim kuvveti, atomların birbirlerinden uzaklaşma dereceleri ile orantılı olarak artar. Farklı iki katının yüzeyleri arasındaki çekim kuvveti ise adhezyon olarak adlandırılır. Aynı anda farklı iki katının bir araya getirilmesi, yüzeyleri arasında bağ oluştururken, aynı cins katı yüzeyler arasında kohezyon, farklı cins yüzeyler arasında adhezyon işi yapar. Kohezyon ve adhezyon işi serbest yüzey enerjisinin bir fonksiyonudur. Ayrıca iki gevrek malzeme ya da bir gevrek bir sünek malzemedan oluşan bir bağlantı için adhezyon işi, bağlantı kuvvetinin bir ölçüsüdür.

İki katı malzemenin difüzyonla birleştirilmesinde, birleştirme davranışını önemli, ölçüde etkileyen diğer bir kuvvet ise kimyasal yapısına bağlı olmadan, atomların arasında meydana gelen Van der Walls kuvvetleridir. Van der Walls kuvvetleri; gres, su buharı gaz gibi metal yüzeyindeki yabancı atomların absorbe edilmesinin en önemli sebebidir. Aynı zamanda metalik malzemelerin yüzeyleri birbirlerine temas ettirildiğinde Van der Walls kuvvetleri birleşmeyi sağlayan önemli unsurlardan biridir.

Difüzyon kaynağı ile birleştirme işlemini başlatabilmek için; iki malzeme yüzeylerinin, artıklarından ve makro pürüzlülüklerden arındırılmış bir şekilde temas haline getirilmelidir. Bu temas, atomlar arasında bağ oluşumuna imkân verecek kadar yakınlıkta olmalıdır. İki yüzey arasında bağ oluştuktan sonra, sıcaklık yardımıyla difüzyon başlar ve yüzeylerin ara kesitindeki boşluklar doldurulur [5].

Difüzyon kaynağı mekanizması ile ilgili günümüze kadar birbirinden farklı birçok model sunulmuştur. Çünkü sınırlı bir süre için basınç ve ısının birlikte uygulanmasıyla bağ oluşturma mekanizmaları oldukça karmaşıktır.

Bu konudaki ilk teorik yaklaşım 1944 yılında Kinzel tarafından sunulmuştur. Daha sonra Gerken; 1965 yılında Owczarski üç safhalı bir mekanizma ileri sürmüşlerdir. Sonraki yıllarda Shvvartz, King ve Owczarski birbirlerinininkiyle aynı olan bir model sunarak, kendi modellerinin son safhalarıyla, Gerken ve Owczarski modelinin ilk safhasını birleştirmişlerdir. Bu modele göre ilk safhayı, birleştirilecek yüzeylerin basınç altında ilk teması ve sürünme meydana getirmektir. Bağlantı arakesiti de esas itibarıyla, tane sınırı olarak tanımlanmıştır. İkinci safhada, birinci safhada yok edilemeyen arakesit boşlukları difüzyon yoluyla yok edilmekte ve arakesit tane sınırları daha düşük bir enerji seviyesine, yani arakesit düzlemi dışına göçmektedirler. Buradaki hakim mekanizma tane sınırı difüzyonudur. Son safha ise tane içindeki boşlukların hacim difüzyonu ile doldurulmasıdır [1-5]. Şekil 2.1’de difüzyon kaynağının üç aşamalı mekanizması verilmiştir.



Şekil 2.1. Difüzyon kaynağının üç aşamalı mekanizması [6].

İpek’in çalışmasına göre; birinci safhada, sıcaklık altında ve yüzey pürüzlerinin teması esnasında, metal oksitleri çözünmekte ve ara kesitin her iki tarafında yeniden kristalleşmiş ince bir tabaka meydana gelmektedir [7]. Enerji engelini kıran bu tabakadır. İkinci safhada, daha hâkim bir tabaka yeniden kristalleşmektedir. Üçüncü safhada ana metal yeniden kristalleşirken daha alt tabaka kristalleri yok edilir. Dördüncü aşamada ara kesitleri daha önce kristalleşen taneler yok olurken, küçük fakat görülebilir boşluklar oluşur. Beşinci safhada ara kesitteki boşlukların sayıları azalırken,

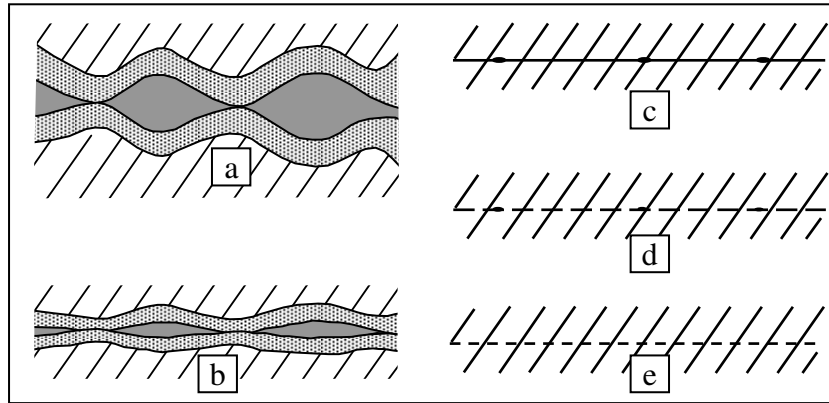
boyutları büyür. Altıncı safhada orijinal ara kesit düzlemine tane sınırı göçü ve tane büyümesi başlar [4–7].

Araştırmacılar, başlangıç safhasında plastik deformasyonun; birleşecek yüzeylerin büyük bir kısmı temas ettiği zaman ise, yüzeyden kaynaklanan ve ara yüzey mekanizmalarının etkili olduğu konusunda hem fikirdirler. Sıvı faz kütle transferi, ancak yüksek sıcaklıklara çıkıldığı zaman söz konusudur.

Difüzyon kaynağı konusunda yapılan çalışmalarda, mekanizma ve modellerdeki ilişkiler her bir mekanizmanın boşluğu doldurmasına farklı bir şekilde tesir ettiği farz edilerek geliştirilmiştir. Bu yaklaşım, mekanizmaların farklı tesirlerini ihmal eder durumda olup, bağ oluşumu üzerinde bazı mekanizmaların tesirlerinin abartılı tahminine yol açabilir. Araştırmacıların çalışmaları göz önünde bulundurulduğunda (Şekil 2.2), difüzyon kaynağı mekanizması şu şekilde genelleştirilebilir [7].

- Yük altında plastik deformasyon,
- Sürünme deformasyonu,
- Difüzyon,
- Yeniden kristalleşme ve tane sınırı göçüdür.

Çok kristalli malzemelerde difüzyon; “D Yüzey > D Tane sınırı > D tane içi” olarak sıralanabilir.



Şekil 2.2. Difüzyon kaynağı mekanizması.

1990 yılında difüzyon kaynağı mekanizmasını aşağıdaki gibi tanımlamıştır [1].

- Yüzeyle arasında ilk noktasal temas ve kalın bir oksit tabakası varlığı,
- Plastik deformasyon ve sürünme sonrası, daha ince bir oksit tabakası ve geniş boşluklar,
- Akma ve sürünme sonrası, boşluk kalıntıları ve çok ince bir oksit tabakası,
- Yüzey ve hacim difüzyonu sonrası, oksit tabakasının tamamen yok olması; küçük ve az sayıda boşluk kalıntıları,
- Tamamlanmış kaynak.

2.1. DİFÜZYON KAYNAK PARAMETRELERİ

Difüzyon kaynak yönteminin temel parametreleri sıcaklık, süre ve basınçtır. Ancak birleştirilecek parçaların yüzey şartları ve kaynak atmosferi de birleştirme kalitesine etki eden önemli faktörlerdir. Difüzyon kaynağında sıcaklık, deformasyona, oksit çözünürlüğüne, allotropik dönüşüme, yeniden kristalleşmeye, difüzyona ve işlemin kısa sürede oluşmasına etkili olduğundan en önemli parametredir. Ayrıca yöntemde sıcaklık kadar ısıtma ve soğutma hızları da önemlidir.

Difüzyon kaynağı aşağıdaki faktörlerin tesiri altındadır.

- Kaynak şartları
 - Sıcaklık,
 - Zaman,
 - Basınç,
 - Yüzey pürüzlülüğü,
 - Çalışma ortamı.
- Birleştirilecek malzemelerin fiziksel ve kimyasal özellikleri: Mekanik özellikler, kristal yapıları, tane boyutu, atom yarıçapı, yeniden kristalleşme sıcaklıkları ve yüzey enerjileri.
- Metalürjik özellikler: Farklı metal ya da malzeme çiftlerinin karşılıklı çözünebilirliği ve metaller arası bileşik teşekkülü [5].

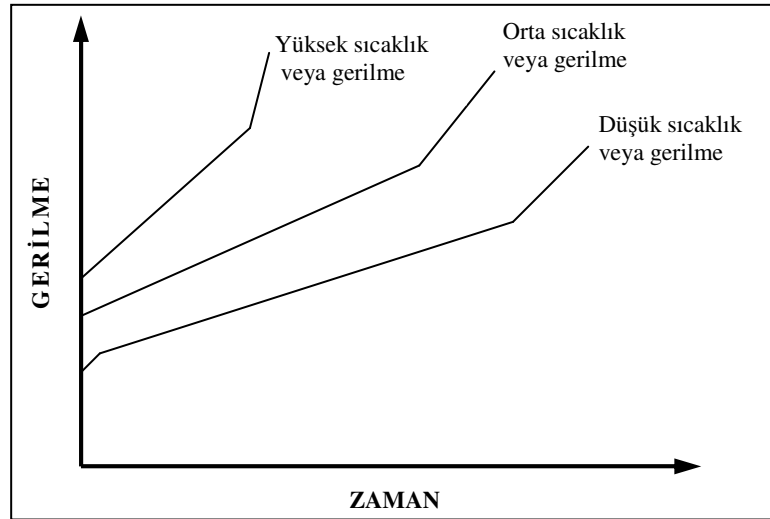
2.1.1. Kaynak Sıcaklığı

Difüzyon kaynağında sıcaklık, deformasyon oksit çözünürlüğü, allotropik dönüşüm yeniden kristalleşme, sürünme ve difüzyon en önemli kaynak parametreleridir. Aynı cins metallerin birleşmesinde işlem sıcaklığı T_k ve metalin ergime sıcaklığı T_m olarak adlandırılırsa;

$T_k \approx (0.5-0.7) T_m$ alınır [8].

Difüzyon kaynağında sıcaklık kadar ısıtma ve soğutma hızı da önemlidir. Endüstriyel çalışma için $50\text{ }^\circ\text{C/dakikalık}$ ısıtma hızı olumlu sonuçlar verirken farklı metallerin birleştirilmesinde doğrusal ısıl genleşme katsayılarına bağlı olarak $15\text{ }^\circ\text{C/dakikalık}$ bir maksimum ısıtma hızı önerilmektedir.

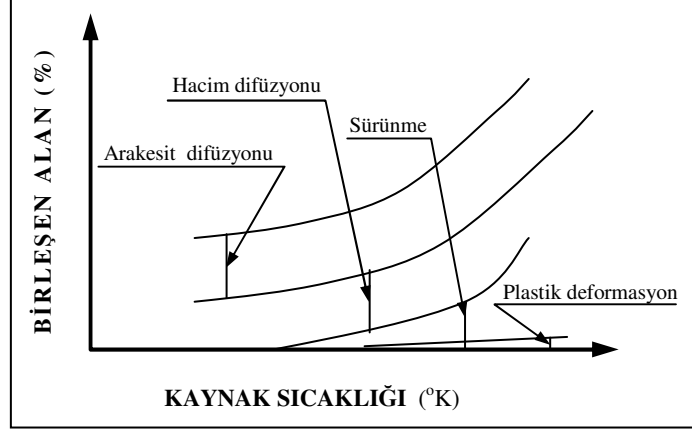
Sıcaklık arttıkça ana malzemelerin akma gerilmeleri azalır. Böylece hem ilk plastik deformasyon hem de yüzey pürüzlerinin şekil değiştirmesi kolaylaşır. Dolayısıyla kaynak için gerekli temas alanını elde etme süresi kısalmır. Şekil 2.3’de uygulanan basınç ve sıcaklığın sürünme eğrisine tesiri görülmektedir.



Şekil 2.3. Sıcaklık ve uygulanan basıncın sürünme eğrisine tesiri [8].

Pratikte difüzyon kaynağında kullanılan sıcaklığın değeri, malzemenin mutlak ergime sıcaklığından daha küçük olan sıcaklık değeridir. Bu sıcaklığın mümkün

olduğu kadar yüksek sabit ve homojen olarak uygulanması gerekir. Sıcaklığın alan üzerindeki etkisi Şekil 2.4'de görülmektedir.



Şekil 2.4. Sıcaklığın bileşebilirlik üzerine etkisi [7,8].

2.1.2. Yüzey Şartları

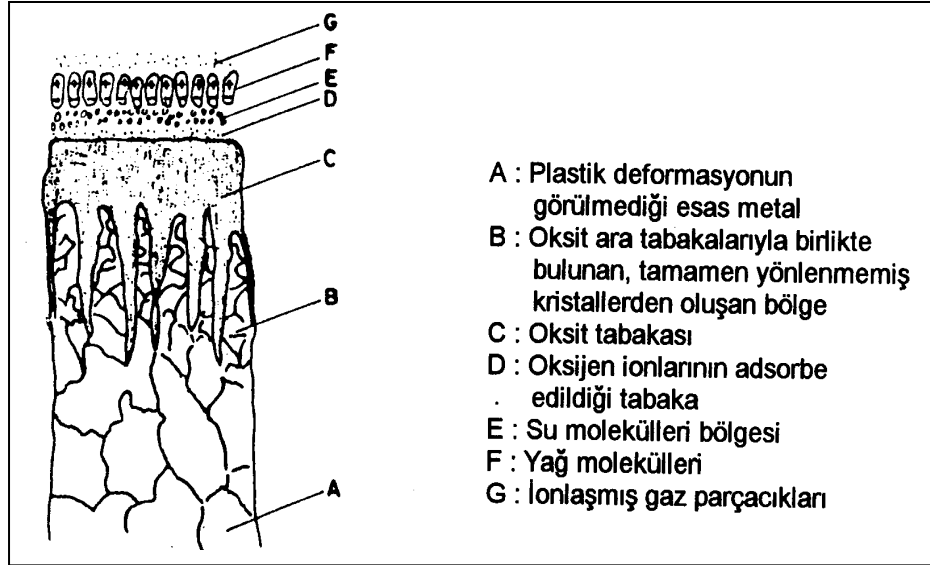
Difüzyon kaynağında, kaynak edilecek malzemelerin yüzey Şartları iki metal arasında temasın sağlanması ve dolayısıyla kaliteli kaynak edilmesi açısından oldukça önemlidir [7]. İyi bir kaynak için engelleyici yüzey filmleri genellikle oksit tabakalarıdır. Yüzeylerin oksitten korunması için kaynak vakum veya indirgeyici ortamda yapılmalıdır. Soy gaz olarak helyum ve argon kullanılır.

Bir metalin yüzeyi önemli bir çalıŐmayla hazırlanmış olsa da, üzerinde çeşitli yabancı maddeler bulunabilir. Kaynak yapılacak metallerin bağlantı yüzeyinin yeteri kadar kir ve oksit artıklarından temizlenmesi gerekir. Birleşme yüzeylerinde oksit oluşumunu sağlayan gazlar giderilmelidir. Bu nedenle kaynak işlemi vakum ya da koruyucu gaz altında yapılmalıdır [5]. Çeşitli metallerde belirli bir film kalınlığının oluşması için geçen süreler izelge 2.1 'de gösterilmiştir.

Çizelge 2.1. Metallerde oksit filmi oluşum süreleri [6].

Metal	Film kalınlığı (μm)	Süre, (sn)
Bakır	3×10^{-3}	30
Alüminyum	12×10^{-4}	15
Demir	2×10^{-3}	40
Molibden	$2 \times 10^{-3} - 3 \times 10^{-3}$	40
Germanyum	$2 \times 10^{-3} - 3 \times 10^{-3}$	80

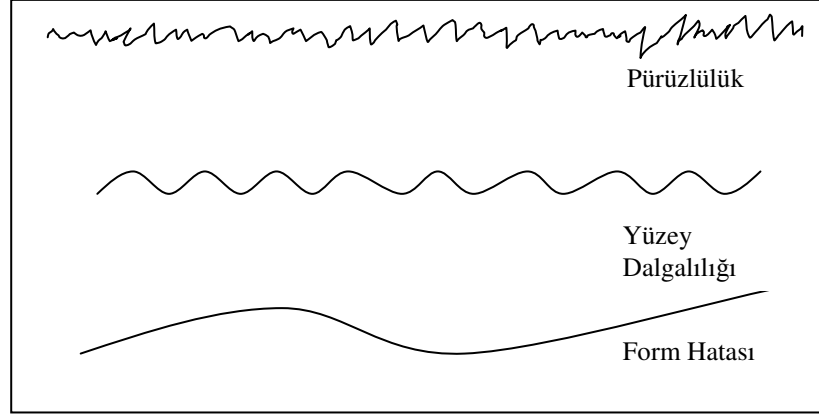
Bir metal yüzeyinde, özenli bir çalışma ile hazırlanmış olsa da, çeşitli yabancı maddeler bulunmaktadır. Bu maddelerin yüzey tabakalarındaki bulunuşları Şekil 2.5’de şematik olarak gösterilmiştir. (A) bölgesi plastik deformasyonun görülmediği ana metali temsil etmektedir. (B), oksit tabakalarıyla birlikte bulunan, tamamen yönlenmemiş kristallerden oluşan bölgeyi, (C) ise oksit tabakasını göstermektedir. (D), oksijen iyonlarının adsorbe edildiği tabaka, (E) su molekülleri tabakası, (F) yağ molekülleri ve (G) iyonlaşmış toz parçacıklarıdır.



Şekil 2.5. Metal bir yüzeyin tabakalarının şematik kesiti [6].

(+) ve (-) işaretleri, tabakaların karakteristik kutuplarını vermektedir. Metal yüzeylerindeki yabancı madde filmleri kaldığında davranışları değişik olmaktadır, inorganik filmler kırılındırlar, organik filmler ise birleştirme sırasında yer değiştirirler ve sıvaşma eğilimindedirler [1-6].

Yüzey pürüzlülükleri kalıntı gözeneklerin başlıca sebepleridir. Pürüzlülük, sıcaklık ve deformasyonla artar. Süper plastik deformasyon esnasında, yüzey pürüzlülüğü artarak tane sınır hareketine katılır. Şekil 2.6'da yüzey kusurları ve Şekil 2.7'de pürüzlülüğün sıcaklıkla değişimi gösterilmektedir.



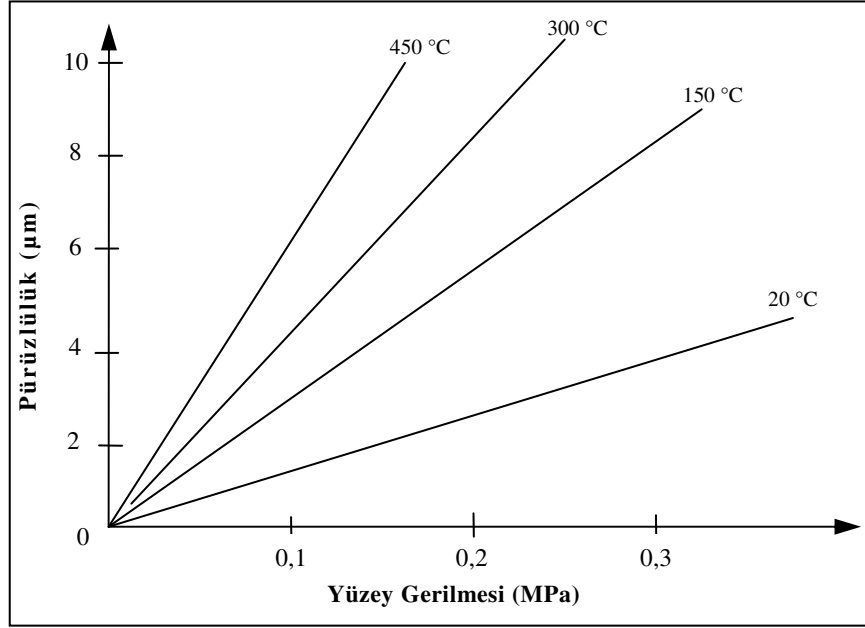
Şekil 2.6. Yüzey kusurları [5].

Metaller genelde, dalga boyu küçük olan yüzey pürüzlülüğüne sahiptir. Söz konusu pürüzlülük, yüzeyler arasında tam temasa ulaşmak için gereken süreyi etkiler. Difüzyon kaynağında, özellikle uzun dalga boyundaki pürüzler önemlidir. Çünkü difüzyon kaynağının kendisi sıcaklık ve mesafeye bağlı olduğundan, boşlukların yok edilmesi için, hem çok yönlü basınç uygulaması hem de uzun zamana gerek olmaktadır.

Yüzey artıkları hemen hemen bütün yüzeylerde bazı şekillerde mevcuttur. Bunlar iki guruba ayrılabilir.

- Normalde oldukça kırılğan olan oksit filimler,
- Yağ, gres toz gibi organik ya da inorganik tabakalar.

Yağ gres, toz, hatta parmak izi gibi artıklar, aşağı yukarı oksit filmleri ile aynı etkiye sahiptirler. Dolayısıyla kaynaktan önce yüzeyden uzaklaştırılmalıdır. Oksit filmlerinin kaldırılması için, kimyasal dağlama ve asitle temizleme yöntemleri kullanılır. Diğer artıklar yıkama ve 300 °C'ye kadar sıcaklıkta kurutma ile uzaklaştırılır.



Şekil 2.7. Yüzey gerilmesi ile pürüzlülük arasında sıcaklığa bağlı değişme [5].

2.1.3. Basıncın Etkisi

Basınç, difüzyon kaynağı için önemli bir değişkendir. Basınçla malzemedeki difüzyon oranı kontrol edilir. Metal ve alaşımların kaynağında basınç, işlemi çeşitli yönlerden etkiler [6]. Difüzyon kaynağında basınç, iki yüzey arasında teması ve difüzyon işlemini başlatmak üzere kimyasal bir potansiyel fark oluşturmak için gereklidir. Yüzey oksitlerini kırmadan temas başlatmak mümkün değildir [4].

Kaynak esnasında uygulanması gereken basınç, difüzyon kaynağına aşağıdaki şekillerde tesir eder:

- Çözülmesi mümkün olmayan yüzey oksitlerini kırar ve metalin, metale temas alanını artırır.
- Birleşecek yüzeyleri birbirlerine atomlar arası mesafede yaklaştırarak, atomlar arası çekim kuvvetini faaliyete geçirir.
- Difüzyon için kimyasal potansiyel farkı meydana getirir.
- Yüzey pürüzlerinin plastik akışına yardım eder [4].

Uygulamada basıncın olumsuz tesirlere sebep olmaması için aşağıdaki hususlara dikkat edilmelidir [5].

- Uygulanacak basınç ve yüzey pürüzlülüklerinin sürünme hızı ve plastik deformasyonunu artıracak kadar büyük; kaynak edilecek parçaların mikroskobik deformasyonuna yol açmayacak kadar küçük seçilir.
- Kaynak basıncı, birleştirilecek parçaların plastik hacim deformasyonunu en aza indirmek için akma gerilmesinin belirgin şekilde altında tutulur.
- Uygulanacak basınç izostatiktir. Basıncın uygulanma hızının, kaynak deformasyonu veya mukavemeti üzerinde herhangi bir tesiri yoktur.

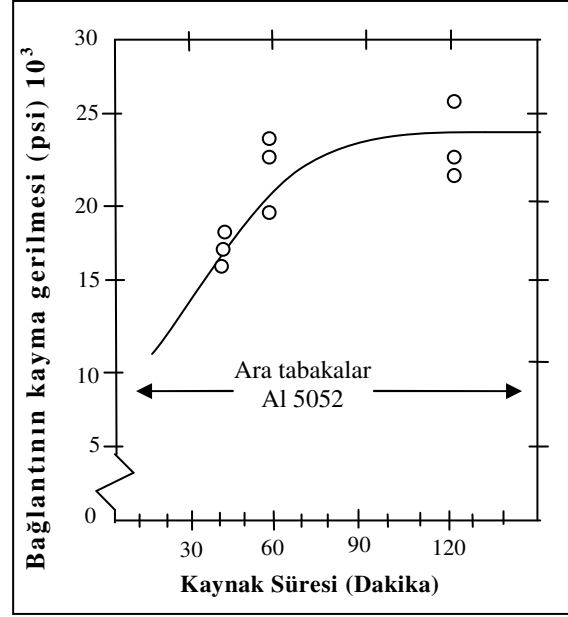
Dubrovsky, temas alanındaki deformasyon miktarı arttıkça difüzyon hızının arttığını belirtmektedir. Aynı araştırmacı bakır ve demirin difüzyon kaynağı üzerinde yaptığı çalışmada basıncın difüzyon kaynağı üzerindeki etkisini efektif difüzyon katsayısı ile tanımlamıştır [5].

2.1.4. Kaynak süresi

Kaynak süresi bağımlı bir işlem parametresi olup; sıcaklık, basınç ve birleşme türü ile ilişkilidir. Süre, basınç ve sıcaklıkla ters orantılıdır. Her malzeme ya da malzeme çifti için gerekli süre birkaç saniyeden, birkaç saate kadar değişebilir. Kaynak süresi, basınç ve sıcaklığın artırılması ile azaltılabilmekle beraber, kirli yüzeyler ve düşük sıcaklıklar ile çalışıldığında süre uzatılmalıdır [6].

Sabit basınç ve sıcaklıkta birleştirme süresini uzatmanın, bağlantı mukavemetini bir noktaya kadar artabileceği belirlenmiştir [5]. Bu durum şekil 2.8'de görülmektedir.

Endüstriyel uygulamalarda birleşme süresini kısa tutmak, ekonomiklik açısından önemlidir. Kaynak süresinin uzun olması kaynak ekonomisi açısından bir dezavantaj oluştururken, boşlukların oluşumunu, bileşimin değişimini ve kırılğan metaller arası bileşiklerin oluşumunu teşvik etmesi gibi bağlantının mekanik özelliklerini bozan olumsuzluklara da neden olabilir [5].



Şekil 2.8. Bağlantının kayma mukavemeti ile kaynak süresi arasındaki ilişki [1].

Difüzyon kaynağında geçen süre iki evre olarak tanımlanmaktadır. Birinci evre bir olgunlaşma (kuluçka) sürecidir. Bu aşamada yüzeyler arasında temas alanı artmakta ve aşırı deformasyon bölgeleri oluşmaktadır. İkinci evrede ise kayma ve tane sınırı göçünün görüldüğü, yoğun sürünme ile birlikte yeniden kristalleşme olayları hâkimdir [4-8].

2.1.5. Kaynak ortamı

Difüzyon kaynağında parça yüzeylerini ve ara kesitte oluşacak oksidasyonu önlemek için kaynak işlemini koruyucu bir atmosfer altında gerçekleştirmek gerekir. Bu amaçla kaynak işlemi ya vakum altında ya da bir soygaz atmosferinde gerçekleştirilir [8].

Soy gaz olarak argon, azot veya helyum gazlarından herhangi birisi kullanılabilir. Oksijen miktarının en aza indirmeye yardım eden hidrojenin redükleyici bir atmosfer ortamı olduğu düşünülebilir. Ancak hidrojen, titanyum, zirkonyum, hafniyum, kolombiyum ve tantal alaşımlarında hidrat oluşturduğundan bu malzemelerin kaynağında tercih ve tavsiye edilmez [7]. Argon, helyum ve bazen de azot yüksek

sıcaklıklarda temiz yüzeyleri korumak için çok uygundur. Bu gazlar kullanıldığında yeniden kirlenmeden kaçınmak için gazların saflığı çok yüksek olmalıdır [6] .

Soy gazlar atmosferik oksijenin tesirini ancak belli bir dereceye kadar azalttığından, kararlı oksitlere sahip metallerde vakum kullanılmaktadır. 1.3×10^{-3} Pa'dan daha fazla bir vakum oksit filmlerinin çözünmesini sağlayabilmekte ise de, uygulamada genellikle 1.3×10^{-2} ile 1.3×10^{-5} Pa'lık basınçlar kullanılmaktadır. Vakum sırasında parçanın birleştirilecek ara yüzeyi oksitlenmeden korunduğu gibi, yüzeydeki yabancı maddelerin süblimasyonu da sağlanmaktadır. Vakum ortamında yapılan kaynaklı birleştirmeler, vakum çok yüksek olmasa bile, yeterince saf olmayan asal gazların koruyuculuğu altında yapılan birleştirmelerden daha iyi dayanım sağlamaktadır [5].

2.1.6. Birleştirilecek Malzemelerin Tane Boyutları ve Mikroyapıları

Difüzyon kaynağına tesir eden birçok metalurjik faktör mevcuttur. Bu faktörlerden en büyük etkiyi yapanlar kısaca şöyle özetlenebilir.

- Mikroyapı,
- Tane boyutu,
- İlave metal (ara tabaka) kullanılması.

Çift fazlı titanyum alaşımları üzerinde yapılan araştırmalar, farklı mikroyapıların farklı sürünme hızına sahip olduğunu göstermiştir. Bu yapılar;

- İnce taneli küresel, (eşeksenli)
- Lamelli,
- Tabaka tipi olmak üzere üç grupta incelenir [6].

Difüzyon kaynağı için en ideal yapının ince taneli yapı olduğu tespit edilmiştir. Bu yapı süperplastik alaşımlarda mevcuttur.

Tabaka tipi yapıda tane sayısı arttıkça sürünme hızı azalmakta ve sonuçta ara kesitte boşluklar kalmaktadır. Lamelli yapının, diğer iki yapı ile karşılaştırıldığında daha düşük sürünme hızına sahip olduğu görülmüştür.

İki fazlı alaşımlarda, iki fazın oranı difüze olabilme ve sertlik üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Yüksek difüzyon hızına sahip fazın, düşük difüzyon hızına sahip faza oranı, sıcaklığın tesiriyle arttıkça bağ oluşumu olumlu yönde etkilenmektedir [6].

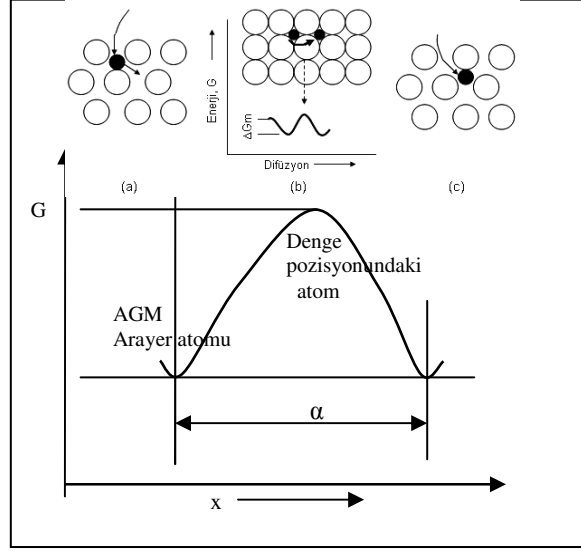
2.2. DİFÜZYON MEKANİZMALARI

Denge konumundaki atomlar ısıtıldıkları zaman titreştikleri bilinmektedir. Bazen bu titreşimler o kadar şiddetli olur ki atomlar yer değiştirir. Atomların bir yerden başka bir yere geçmeleri katılarda difüzyon olayıdır. Bu difüzyon mekanizmaları 6 grupta toplanır [6].

- Arayer mekanizması
- Boşluk mekanizması
- Halka mekanizması
- Karşılıklı yer değiştirme mekanizması
- Arayerimsi difüzyon mekanizması
- Tırmanmalı difüzyon mekanizması

2.2.1. Arayer Mekanizması

Arayer atomlarının yoğunluğu, genelde oldukça düşüktür. Dolayısıyla mevcut arayer noktalarının az bir kısmını işgal ederler. Yani, her bir arayer atomu daima boşluk noktaları ile kuşatılmış olup ısı enerjisinin, deformasyon enerjisi engelini aşmaya izin verdiği oranda başka bir pozisyona atlar. İşte, arayer atomlarının kafes örgüsü içindeki başka bir arayer noktasına göçü şeklinde gerçekleşen difüzyona arayer difüzyonu denir. Bir arayer atomunun difüzyonuna ait şematik resim ve serbest enerji değişimi Şekil 2.9'da gösterilmiştir. Arayer atomunun serbest enerjisi uygulanan gerilme ile ya da verilen enerji ile artar, atom komşu arayere ulaştığında, serbest enerjisini en aza indirerek denge konumuna varır.



Şekil 2.9. Arayer atomu yer değiştirmesi ve aktivasyon enerjisi değişimi [9].

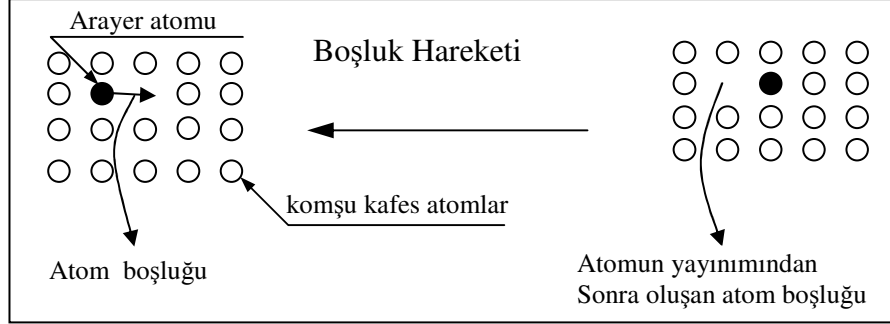
- Denge pozisyonunda,
- Maksimum kafes distorsiyonu pozisyonunda,
- Arayer pozisyonunun bir fonksiyonu olarak, kafesin serbest enerjisindeki değişme,

Katının termal enerjisi sebebi ile, bütün atomlar denge durumunda titreşirler ve arada sırada bir arayer atomunun büyük orandaki titreşimi ile ya da matrisin hareketi ile arayer atomlarının hareketinin aynı anda olması bir sıçrama ile sonuçlanır. Arayer difüzyonunun olabilmesi için küçük atom çaplarının büyük atom çaplarına oranının 0,41'den daha küçük olması gerekir [1].

2.2.2. Boşluk Mekanizması

Eğer kristal kafesi içerisinde bir atom boşluğu varsa, komşu atomlardan bir tanesi kendi yerini terk ederek bu boşluğu doldurur. Hareket eden atomun kendi yeri ise boş kalır. Atomların bu şekildeki hareketlerine boşluk difüzyonu denir. Kristal kafesi içerisinde ne kadar atom boşluğu varsa, boşluk difüzyonu o kadar çok etkilidir. Metaller yüksek sıcaklıklara çıkartıldıkları zaman, atom boşlukları artmaktadır. Dolayısıyla metallerin yüksek sıcaklıklardaki difüzyonunda, bu mekanizma oldukça

önemli bir rol oynar. Şekil 2.10'da boşluk mekanizmasında atomların yer değiştirmesi şematik olarak gösterilmiştir.



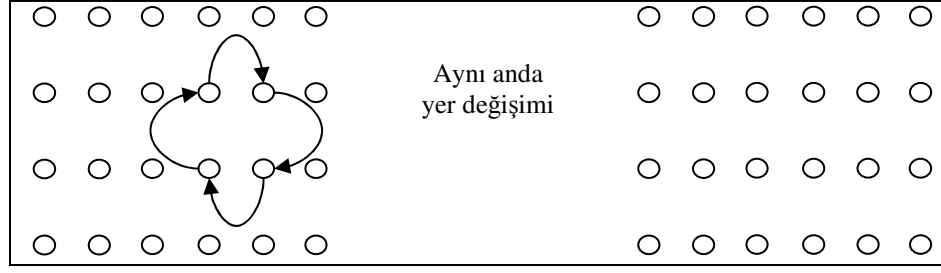
Şekil 2.10. Boşluk mekanizmasında atomların yer değiştirmesi [10].

Boşluk difüzyonunun olabilmesi için [1]:

- Atom çapları farkının % 15'den küçük olması,
- Malzemelerin aynı kristal yapıya sahip olması,
- Elektronegativite farkının küçük olması,
- Valans elektronların eşit olması gerekir.

2.2.3. Halka Mekanizması

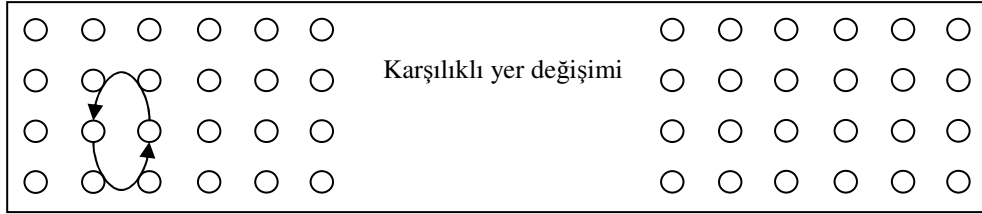
Metallerde en yaygın olarak boşluk ve ara yer difüzyon mekanizmaları görüldüğü halde, nadiren de olsa karşılaşılan diğer bir difüzyon mekanizması ise, halka difüzyonudur. Kristal yapı içerisinde birbirlerine temas halinde halka oluşturan atomların, aynı anda ve aynı yönde hareket etmeleri suretiyle birbirlerinin yerini almaları ve yeni konumlarına geçebilmeleridir. Şekil 2.11'de halka mekanizması modeli gösterilmiştir.



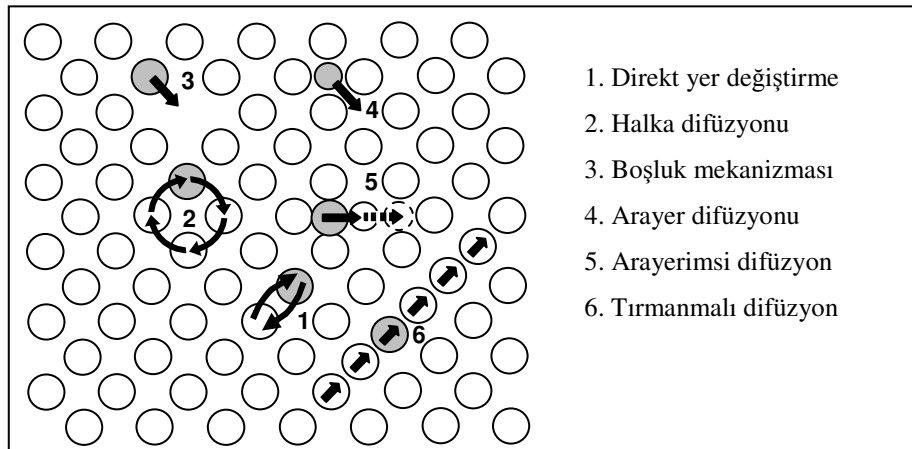
Şekil 2.11. Halka mekanizmasında atomların yer değişimi [10].

2.2.4. Karşılıklı Yer Değiştirme Mekanizması

Enerji nedenleriyle iki atomun karşılıklı olarak doğrudan yer değiştirme olasılığı düşüktür. Metallerde içyapı kusurları oldukça yüksek olduğundan gerekli de değildir. Çünkü her atom iki atom çapı kadar hareket edebilir. Ayrıca mekanizmanın oluşabilmesi için kafesin bölgesel olarak çarpılması da gereklidir [6]. Şekil 2.12’de karşılıklı yer değiştirme mekanizması ve Şekil 2.13’de ise difüzyon mekanizmalarının tümü şematik olarak verilmiştir.



Şekil 2.12. Atomların karşılıklı yer değişimi [10].



Şekil 2.13. Difüzyon mekanizmalarının şematik gösterimi [11].

2.3. DİFÜZYON KAYNAĞININ UYGULANABİLDİĞİ ALAN VE MALZEMELER

Günümüzde difüzyon kaynağı çok sayıda ve değişik malzemeye farklı alanlarda ve farklı amaçlarla geniş bir şekilde uygulanmaktadır. Birbirinin aynı ya da farklı birçok malzeme difüzyon kaynak yöntemi ile birleştirilebilmektedir. Bu yöntem en çok titanyum ve alaşımları ile nikel esaslı alaşımlarda uygulanmıştır. Karbon, bor, alüminyum oksit, silisyum karbür gibi malzemelerin destek olarak kullanıldığı metal matrisli kompozit malzemelerin birleştirilmesinde de kullanışlı bir yöntem olduğu kabul edilmektedir [4].

Benzer olmayan metal ve alaşımların da, kaynak sonrası birleşme bölgesinde kırılğan intermetalik faz oluşuyor ya da yeniden ergime ile malzeme gevrekleşiyorsa, ya da dayanım azalıyorsa difüzyon kaynak yöntemi tercih edilmektedir. Alüminyum alaşımlarının difüzyon kaynağı, inatçı yüzey oksitleri yüzünden güçleşmektedir. Bununla beraber, birleşme bölgesinde yüksek sıcaklık ve büyük ölçekli deformasyon uygulanmasının, inatçı oksit tabakalarını kırdığı ve yüzey kaplama ya da ara tabaka kullanılması ile daha düşük basınç altında difüzyon kaynağı yapmanın kolaylaştığı tespit edilmiştir. Öte yandan, süper plastik alüminyum alaşımlarının ve Al-metal matrisli kompozitlerin geliştirilmesi, yüksek mukavemetli difüzyon kaynağı ihtiyacını arttırmaktadır [2].

Ti alaşımları ile, paslanmaz çelik arasında yüksek mukavemetli katı hal difüzyon kaynağı gerçekleştirilmiştir. Ancak TiFe, TiFe₂, TiCr₂, Ti₂Ni gibi bileşiklerle ana metaller arasında intermetalik fazların oluşması sebebiyle bağlantının mukavemeti azalmaktadır [12].

Çizelge 2.2'de difüzyon kaynak yöntemine uygun metal çiftleri ve ara tabaka malzemeleri, Çizelge 2.3'de metal çiftleri için difüzyon kaynağı işlem parametreleri ve Çizelge 2.4'de ise difüzyon kaynağı yapılabilen malzeme kombinasyonları verilmiştir [1].

Çizelge 2.2. Difüzyon kaynak yöntemine uygun metal çiftleri ve ara tabaka malzemeleri [1].

Metal 1	Ara Tabaka	Metal 2
Molibden	Titanyum	Molibden
Mo-% 0.5 Ti	Titanyum	Mo-% 0.5 Ti
Tungsten	Niobyum	Tungsten
Niobyum	Zirkonyum	Niobyum
Tantalyum	Zirkonyum	Tantalyum
Yüksek Alaşımli Çelik	Berilyum	Yüksek Alaşımli Çelik
Yüksek Alaşımli Çelik	Niobyum- Berilyum	Yüksek Alaşımli Çelik
Titanyum	Molibden	Bakır
Titanyum	Niobyum	Bakır
Molibden	Nikel	Yüksek Alaşımli Çelik
Zırcaloy	Bakır	Zırcaloy
Berilyum	Altın	Bakır
Berilyum	Ag-Cu	Bakır
Berilyum	Ag-Cu-In	Bakır
Aliminyum	Bakır	Kovar
(%53 Fe, %29 Ni, %17 Co)		

Çizelge 2.3. Metal çiftleri için difüzyon kaynağı işlem parametreleri [1].

Metal 1	Metal 2	Arametal	Sıcaklık	Basınç (N/mm²)	Zaman (dk)
Bakır	Molibden	-	900	7.35	10
Bakır	Çelik	-	900	04.9	10
Bakır	Nikel	-	900	14.7	20
Bakır	Bakır	-	800–850	4.9–6,9	15–20
Titanyum	Nikel	-	800	09.8	10
Titanyum	Bakır	Molibden	950	04.9	30
Titanyum	Bakır	Niobyum	950	04.9	30
Titanyum	Bakır	-	800	04.9	30
Molibden	Molibden	Titanyum	915	6860	20
Molibden	Çelik	-	1200	04.9	10
Tugsten Tantal	Tugsten	Niobyum	925	6860	20
Niobyum	Tantal	Zirkonyum	870	-	-
Zırcaloy-2	Niobyum	Zirkonyum	870	-	-
Çelik	Zırcaloy-2	Bakır	1040	20.6	30–120
Berilyum	Aliminyum	Bakır	550	04.9	10
Bakır	Berilyum	63-Ag-27	800	-	30
Kovar	Bakır	Cu-10-In	-	-	-
Çelik	Kovar	-	1000–1110	24.5–10,6	20–25
Çelik	Dökmedemir	-	850–950	14.7	5–7
	Aliminyum	-	500	7.35	30

Çizelge 2.4. Difüzyon kaynağı yapılabilen malzeme kombinasyonları [1].

		A r a T a b a k a s ı z																									
A r a T a b a k a l ı		Alüminyum	Alüminyum Alış.	Berilyum	Berilyum Alış.	Bakır	Bakır Alış.	Kobalt	Kobalt Alış.	Demir	Demir Alış.	Molibden	Molibden Alış.	Nikel	Nikel Alış.	Niobyum	Niobyum Alış.	Tantal	Tantal Alış.	Titanyum	Titanyum Alış.	Volfram	Volfram Alış.	Zirkonyum	Zirkonyum Alış.	Seramik	
		Al	■				■								■						■	■				■	
	Al Alış.	■	■			■																					
	Be			■																							
	Be Alış.																										
	Cu	■				▲				■	■	■		■			■			■	■	■					■
	Cu Alış.						▲				■					■					■						
	Co																										
	Co Alış.								■																		
	Fe									■	■	■		■							■						
	Fe Alış.		■							■	■	■		■		■					■			■		■	■
	Mo											■				■							■				
	Mo Alış.												▲														
	Ni									■	■			▲							■	■					
	Ni Alış.						■								■												
	Nb										■					■											■
	Nb Alış.																▲										
	Ta																										■
	Ta Alış.																			▲							
	Ti																				■						■
	Ti Alış.	■				■	■			■	■											■					
	W																						■				
	W Alış.																										
	Zi																								▲		
	Zi Alış.																										
	Seramik										■															■	■

(■ kaynak edilebilir malzeme ve alaşımlarını göstermektedir)

2.4. DİFÜZYON KAYNAĞININ DİĞER KAYNAK METOTLARIYLA KARŞILAŞTIRILMASI

Difüzyon kaynağı, diğer kaynak yöntemleri ile karşılaştırıldığında birçok ayırıcı etken ve özellik göze çarpmaktadır. Bu kaynak son derece spesifik bir kaynak yöntemi olup, önemli yerlerde (sanayi, mühendislik uygulamaları vs.) kullanılır. Her kaynak yönteminde olduğu gibi bu kaynak yönteminin avantajları ve dezavantajları vardır.

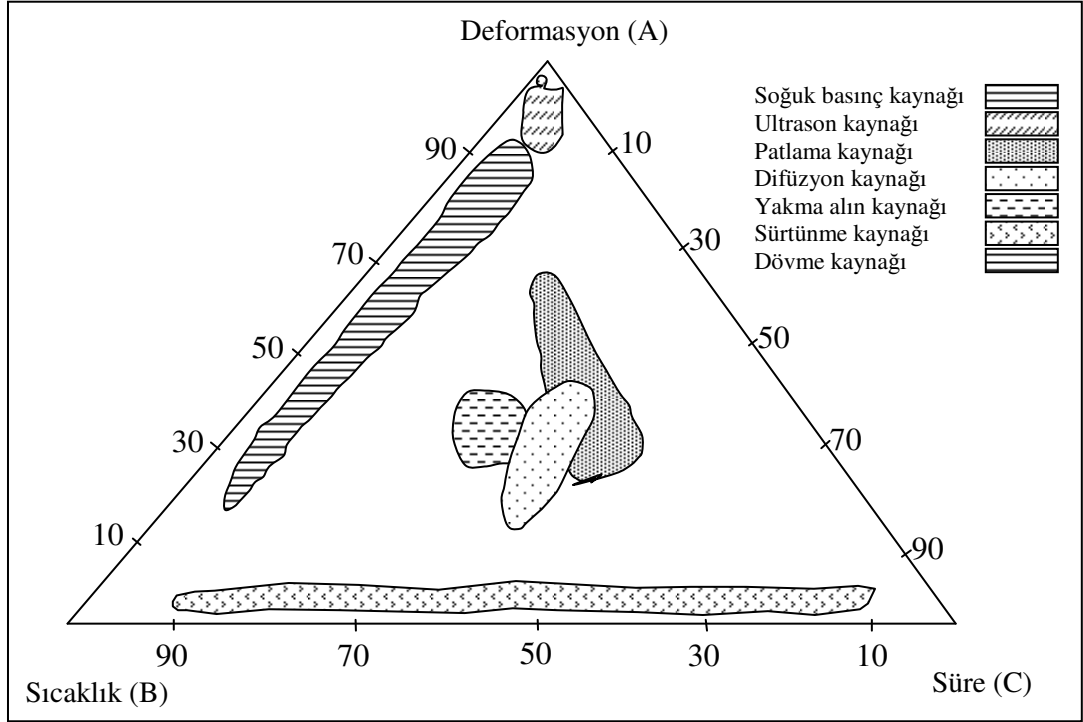
Difüzyon kaynağını, diğer kaynak yöntemleriyle karşılaştırarak hangi durumda hangi kaynağın daha iyi olduğuna karar verilir. Ergitmeli kaynak yöntemleri ile difüzyon kaynağının mukayesesinde göze çarpan farklar şunlardır:

- Ergitme kaynağında görülen deformasyonlar, ön ve son tavlama ihtiyaçları, bu teknikte görülmez.
- Metalürjik açıdan uyumsuz, birbirinden tamamen farklı iki metal ya da bir metalle, metal olmayan bir malzeme birleştirilebilir.
- Birleşme süresi, bağlantı alanından bağımsızdır. Dolayısıyla bir defada geniş alanlı ya da karmaşık şekilli bağlantılar birleştirilebilmektedir.
- Birleştirilmede istenmeyen metalürjik yapılar oluşmaz.

Difüzyon kaynak yöntemi diğer katı hal kaynak teknikleriyle karşılaştırıldığında ise başlıca şu farklar görülebilir.

- Difüzyon kaynağı, esas itibariyle difüzyon kontrollü bir tekniktir.
- Seramiklerin kaynak tekniğini belirleyen en önemli faktör bu malzemelerin gevrekliğidir. Bu ise kaynakta deformasyon kullanımının mümkün olmadığı anlamına gelir. Seramiklerin kaynağında difüzyon kaynağı mümkün olan tek metottur. Bunların yanı sıra, bu yöntemin özel ortam ve aparat gerektirmesi, bu nedenle pahalı olması ve kaynak ara yüzeyin de metaller arası bileşiklerle, azda olsa, ara fazların oluşma ihtimali difüzyon kaynak yönteminin dezavantajları olarak sayılabilir.

Difüzyon kaynağı % 100 birleşme veriminin sağlandığı bir katı hal süreci olup, bu birleştirme yönteminin ve diğer katı hal kaynak yöntemlerinin sıcaklık, deformasyon ve süre açısından karşılaştırılması Şekil 2.14'de verilmiştir.



Şekil 2.14. Difüzyon kaynak yönteminin ve diğer katı hal kaynak yöntemlerinin sıcaklık, deformasyon ve süre açısından karşılaştırılması [13].

2.5. DİFÜZYON KANUNLARI

2.5.1. I. Fick Kanunu

Homojen olmayan malzemelerdeki difüzyon olayları teknik açıdan daha önemlidir. I.Fick Kanunu ile sabit bir (a) kesitinden geçen, difüze eden malzeme miktarının belirlenmesi yapılabilir. Burada bulunan konsantrasyon farkları parçacıkların belirli yönde hareket etmelerine neden olur. I. Fick Kanunu olarak bilinen matematiksel ifade $J = -D_x \frac{dc}{dx}$ olarak belirtilmiştir [2].

Eğer konsantrasyon gradyanı dc/dx sıfırdan farklı bir değerde ise, bir difüzyon hızı mevcuttur, $dc/dx = Q$ (Aktivasyon enerjisi) ise konsantrasyon değişimi yoktur. Burada dc/dx , konsantrasyon gradyanında x mesafesindeki difüzyon miktarıdır. J; akı veya akış, yani metal kütlelerinin (m), t zamanı içerisinde (a) yüzeyinden bu düzleme dik olarak difüzyon doğrultusunda yer değiştirme değeridir.

Akı, malzeme içerisinde konsantrasyon homojen oluncaya kadar devam eder. Konsantrasyon gradyanı da, t birim zamanda bir nokta boyunca difüzyon alanındaki değişiktir. Konsantrasyon gradyanı, malzeme kompozisyonunun uzaklık ile nasıl değiştiğini gösterir. dc/dx mesafesindeki konsantrasyondaki farktır.

2.5.2. II. Fick Kanunu

Eğer bir yayınma olayında kararlı bir durum yoksa, örneğin sabit konsantrasyon farkında kütle akışının tespitinin zor olması ve metallerde difüzyon olaylarının çözümünde I. Fick Kanununun yetersiz kalması dolayısıyla, difüzyon katsayısının deneysel tespitinde ve bir çok kullanımda II. Fick Kanunundan yararlanılmaktadır. I. Fick Kanununun, II. Fick Kanununa dönüştürülmesi için, aralarında dx kadar mesafe bulunan iki paralel yüzeyle sınırlandırılmış hacim elemanı kullanılır [2]. Bu durumda konsantrasyon x ve t'ye bağımlı kalacağından, bir çok pratik problemler için şu matematiksel ifade kullanılır;

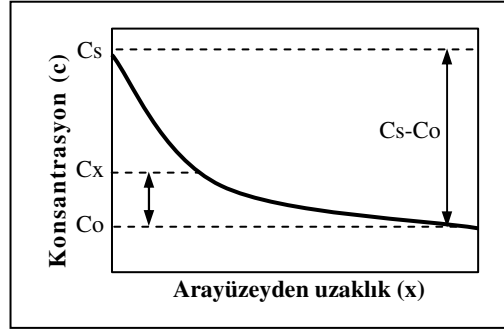
$$dc/dt = D.(d^2c/dx^2) \quad (2.1)$$

Bu denklemin çözümü bazı sınır değerlerine bağlıdır ve bu da;

$$(C_s - C_x) / (C_s - C_o) = 1 - \text{erf} (x / (2\sqrt{Dt})) \quad (2.2)$$

şeklinde ifade edilir. Burada; C_s : yüzeydeki konsantrasyon, C_x : yüzeyden veya ara kesitten x kadar mesafedeki bir noktanın yoğunluğu, C_o : difüzyon çiftinden birinin ilk yoğunluğu, x: C_x 'in ölçüldüğü noktanın yüzeye olan uzaklığı, D: ortak difüzyon katsayısı, t: difüzyon süresi, erf: hata fonksiyonudur.

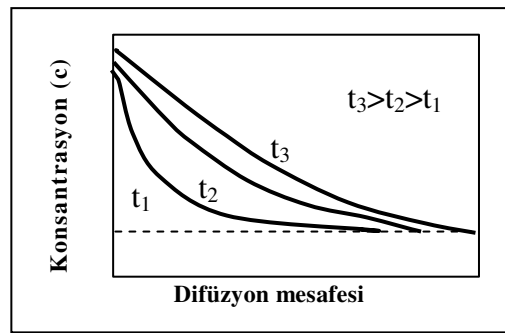
Bu eşitlikte verilen konsantrasyon parametreleri Şekil 2.15'de konsantrasyon profili olarak görülmektedir. Burada konsantrasyon ve difüzyon mesafesi arasındaki ilişki görülmektedir.



Şekil 2.15. Kararsız hal difüzyonu için konsantrasyon profili.

Ayrıca difüzyon mesafesinin konsantrasyona bağlı olarak süreyle değişimi de Şekil 2.16'da verilmiştir. Burada sıcaklığın artması ile birlikte birim alanda difüzyon miktarının arttığı görülmektedir [2].

II. Fick kanunu zaman ve sıcaklığa bağlı olarak malzeme yüzeyine difüze eden atomların konsantrasyonunu hesaplamayı sağlar. Burada difüzyon katsayısı D'nin sabit ve yüzeyde difüze eden atomun konsantrasyonu Cs ve malzemede Co değişmeden sabit kalmasıyla denklemin çözümü elde edilir. Bu kanunun uygulanması, D sabit kaldıkça, değişik şartlarda aynı konsantrasyon profilinin elde edilebilmesidir. Bu özellik, belirli bir ısıl işlemin uygulanabilmesi için gerekli zamanda, sıcaklığın etkisini belirlemeyi sağlamaktadır [2].



Şekil 2.16. Kararsız hal difüzyonunda üç farklı sıcaklıkta oluşan konsantrasyon profili.

2.6. DİFÜZYON KAYNAKLI BAĞLANTILARA UYGULANAN TESTLER

Difüzyon kaynağında, bağlantının kalitesini tespit için iki türlü test kullanılmaktadır. Bunlar:

- Tahribatlı muayene testleri,
- Tahribatsız muayene testleridir.

2.6.1. Tahribatlı Muayene Testleri

Bunlar; çekme, bindirme-kayma, kesme/makaslama, darbe ve eğme testleridir. Çekme testi, çekme numunesi yapılabilecek uzunluktaki difüzyon kaynaklı malzemeler için uygulanmaktadır. Bindirme-kayma testi, levha şeklindeki malzemelerin bağlantı mukavemetini tespit etmek için kullanılmaktadır. Numuneler; bağlantının mukavemeti ana metalinkinden daha düşük olduğu zaman bile, çentikten kırılmaktadırlar. Bindirme alanı, genellikle, test esnasında eğilmektedir. Bu sebeple, kırılma yükünden doğrudan doğruya hesaplanan kayma mukavemeti, bağlantının mukavemetini vermektense uzaktır [14].

Darbe testi birçok araştırmacı tarafından kullanılmış olmasına rağmen, çentiği birleşme hattına yerleştirme güçlüğü vardır. Bu test daha çok çelikler için kullanışlıdır. Bağlantının darbe mukavemeti, arakesitteki mikro boşluklar yüzünden, birçok halde, ana metalinkinden düşüktür.

Eğme testi, genellikle, numune yuvarlak bir parça tarafından U şeklinde eğilerek uygulanmaktadır. Eğme anında, numunelerin çatlama durumlarına göre, bağlantı kalitesi tayin edilir.

2.6.2. Tahribatsız Muayene Testleri

Bu muayeneler; metalografi, potansiyel düşmesi (elektrik direnç değişmesi), transmisyon akustik mikroskopi, elektron mikroskobisi, fotoemisyonlu elektron mikroskobisi diye sınıflandırılabilir.

Metalografi, difüzyon kaynaklı bağlantıların mikro yapılarının muayenesinde esas metod olmasına rağmen; küçük boşlukların optik mikroskopla tayin güçlüğü, bağlantı kalitesini anlamada etkili bir yol olmasını engellemektedir.

Potansiyel Düşmesi Metodu (verilen akımdaki değişme), daha çok yorulma çatlak büyümesini tespit için kullanılır. Boşluk tespitinde kullanıldığı zaman ise, ancak büyük boşluklarda iyi sonuç vermektedir.

Geleneksel X ışını ve ultrasonik muayeneler, difüzyon kaynağının iç kesitini muayenede ve mevcut kusurların tespitinde oldukça faydalıdır. Elektron mikroskopisi, bağlantıdaki ara tabakaların kalınlıklarının tespitinde faydalı olurken, bağlantı mukavemeti hakkında fikir vermektedir.

Fotoemisyonlu elektron mikroskopisi, yüksek sıcaklıklarda, dinamik metalurjik gözlem yapılmasını ve difüzyon kaynağının safha safha izlenmesini mümkün kılmaktadır [14].

2.7. DİFÜZYON KAYNAĞI BAĞLANTI TÜRLERİ

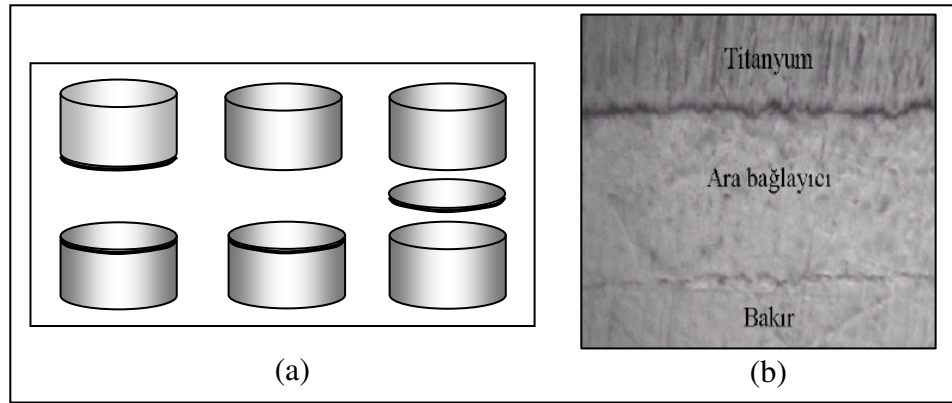
Difüzyon kaynağının uygulamasında, özellikle farklı metal ve alaşımlarının birleştirilmesinde genellikle bir ara tabaka kullanılır. Ara tabakalar kaynak alanındaki heterojenliği minimuma indirir ve birleştirmenin oluşumunu kolaylaştırır. Ara tabakalar folyo şeklinde, elektrolitik kaplama veya püskürtme tarzı olabilir. Yumuşak, aynı tür folyo kullanılması durumunda yüzey pürüzlüğü daha büyük olan yüzeylere sahip parçalar da kaynaklanabilir [15].

2.7.1. Difüzyon Kaynağında Ara Tabaka

Difüzyon kaynağında birleşme işlemini hızlandırmak, bağlantının mekanik özelliklerini geliştirmek veya birbirinden farklı metal, metal olmayan malzemelerin kaynağında karşılıklı difüzyon oluşturmak için ara malzeme kullanılır [15].

Katı hal kaynak yöntemlerinden biri olan difüzyon kaynağında ara tabaka (ara bağlayıcı veya ara metal) kullanımı;

- Karşılıklı iki yüzeyde,
- Yalnız bir yüzeyde,
- Araya ayrı bir tabaka koyma şeklindedir. Şekil 2.17a'da ara tabaka kullanımı Şekil 2.17b'de ise titanyum ve bakır malzemelerin kaynağında gümüş arabağlayıcı görülmektedir.



Şekil 2.17. Difüzyon kaynağında ara tabaka [15].

Farklı kimyasal ve fiziksel özelliklere sahip malzemelerin ara tabakalı veya ara tabakasız birleştirilmesinde elverişli yöntem parametrelerinin az olmasına rağmen difüzyon kaynağı ile örneğin metal-seramik bağlantıları gerçekleştirilebilir. Birleştirmenin gerçekleştirilmesi için farklı ısıl genleşmelerin dengelenmesi gerekmektedir.

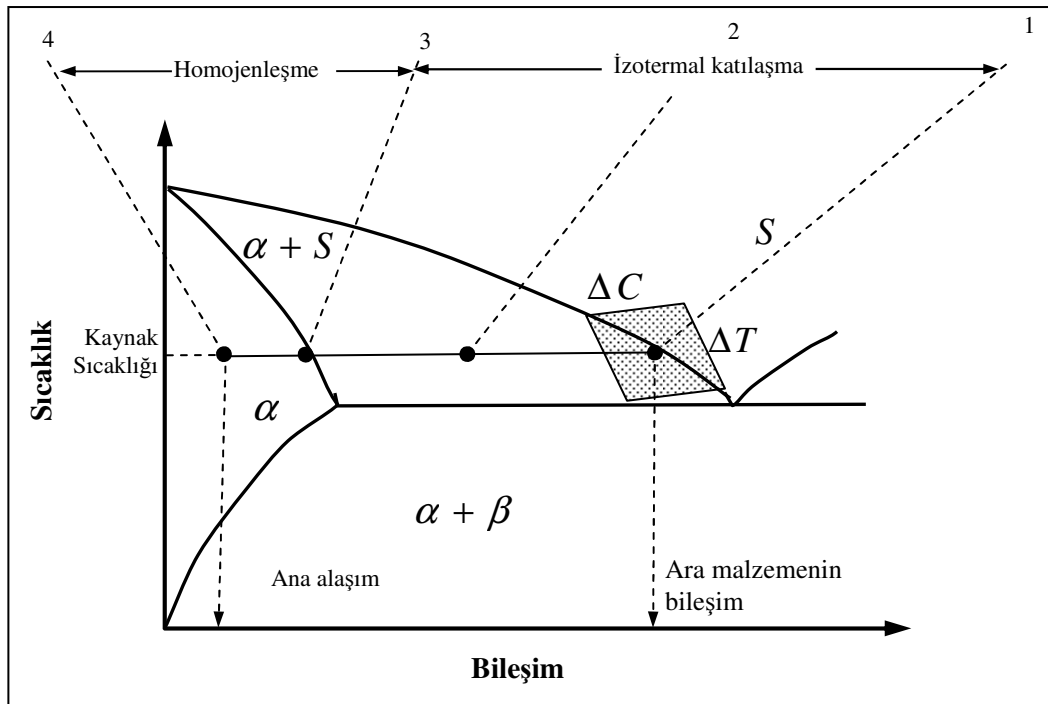
Difüzyon bölgesindeki kaçınılmayan metallere arası fazlar ile malzeme kombinasyonlarının bileşimi için ara tabaka kullanılması gereklidir. Ara metal tabakalarının sayısı esas malzemelerin özellikleri arasındaki farka ve birleşimin geometrik şekline bağlıdır.

Genel olarak ilave (ara) malzemenin kaynaktaki faydaları şunlardır:

- Mekanik bağ oluşturmak için ana metalde çözünme.

- Birbirinden farklı malzemelerin birleştirilmesi halinde intermetalik fazların oluşumunu önlemek.
- Ön ısıtma esnasında, yüksek sıcaklıklarda birleştirilecek yüzeyleri oksidasyona karşı korumak.
- Elektro-kaplama veya iyon kaplama ile malzemenin difüzyon özelliğini geliştirmek.
- Düşük akma gerilimli malzeme ya da sıvılar ihtiva eden bölgeler oluşturarak, oksit filmlerinin bozulmasını sağlamak.
- Arakesit boşluklarında, geçici sıvı fazlar oluşturacak yüzey pürüzlerinin olumsuz tesirlerini en aza indirmek.

Ara tabaka kullanmanın şekli denge diyagramı üzerinde, Şekil 2.18’de belirtilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi, kullanılacak ara tabakanın ergime sıcaklığının ana metale göre daha düşük olması ve ana metalde çözünebilir olması istenir.



Şekil 2.18. Ara tabakanın kaynak bölgesine tesiri [1].

Benzer olmayan metal ve alaşımlarda, kaynak sonrasında birleştirme bölgesinde kırılğan metaller arası faz oluşmuyor ya da yeniden ergime ile malzeme

gevrekleşiyorsa ya da dayanım azalıyorsa difüzyon kaynak yöntemi tercih edilmektedir [7].

Birbirinin aynı ya da farklı birçok malzeme difüzyon kaynak yöntemiyle birleştirilebilmektedir. Bu yöntem en çok titanyum ve alaşımları, zirkonyum ve alaşımları ve nikel esaslı alaşımlarda uygulanmıştır. C, Bor, Alümina, SiC gibi malzemelerin takviye olarak kullanıldığı metal matrisli kompozit malzemelerin birleştirilmesinde de kullanılışlı bir yöntem olduğu kabul edilmektedir.

BÖLÜM 3

TİTANYUM VE ALAŞIMLARI

Biyolojik uyumlulukları nedeni ile titanyum ve alaşımları son zamanlarda en çok gündemde olan malzemelerdir. Bu malzemelerin korozyona karşı dirençleri paslanmaz çelik ve kobalt bazlı alaşımlar ile kıyaslandığında daha fazladır. Nötral pH ve izotonik tuzlu suda korozyon hemen hemen yok denecek kadar azdır. Çukurcuk, taneler arası ve aralık korozyonlarına karşı direnci de çok yüksektir. Hayvan deneyleri ve insan uygulamaları biyolojik uyumlulukları konusunda şu ana kadar olumlu izlenimler vermiştir.

Titanyumun zor imalatı ve paslanmaz çeliğin zayıf korozyon direnci yeni araştırmaların gelişimini teşvik etmiştir. Böylece titanyumun ilk olarak hayvan vücudunda kullanımı denenmiş ve vücut tarafından çok iyi tolere edildiği görülmüştür. Ardından titanyum, kalp ve diğer yumuşak dokularda protez malzemesi olarak kullanılmıştır. Farklı tipte pek çok titanyum alaşımlarından en yaygın kullanım alanı bulan ise Ti-6Al-4V olmuştur. Mekanik yapısının oldukça iyi olması, hafifliği ve müstesna korozyon direnci gibi sebepler, bu alaşımın protez malzemesi olarak kullanımını desteklemiştir. Günümüzde titanyum ve alaşımları tüm dünyada çok yoğun ve yaygın olarak, farklı tipte ve yerde cerrahi amaçlı olarak kullanılmaktadır. Bu konudaki daha başarılı sonuçların elde edilebilmesi için; malzemeler üzerinde yapılan, biyometalurji ve klinik türdeki araştırma çalışmaları halen devam etmektedir [14].

Saf titanyum esasen saf elementel titanyum olmayıp, özellikle implantın yüzeysel tabakalarında oksijen ve titanyumun oluşturduğu bir kompozittir. Belirli sınırlar içinde oksijen, titanyumun mekanik özelliklerini olumlu yönde etkiler. Fakat yüksek konsantrasyonlarda titanyumun mekanik gücünü azaltır. ASTM F-67 tip III'de 345 MPa, tip IV'de 485 MPa minimum akma dayanımı elde edilecek şekilde oksijen

kullanımını öngörmektedir. Saf titanyum içinde az miktarda diğer elementler de bulunmaktadır. Bunlar % 0.07 oranında azot, % 0.15 oranında karbon, % 0.015 oranında hidrojen ve % 0.35 oranında demirdir. Bu elementlerden herhangi birinin konsantrasyonunun fazla olması halinde malzemenin performansı düşer. Saf titanyum, ortopedi ve travmatolojide yaygın olarak kullanılmaz. Günümüzdeki en önemli kullanım yeri titanyum alaşımlı çimentosuz protezlerin gözenekli tabakasıdır. Ayrıca titanyum alaşımları biyomedikal uygulamalarda 16 farklı tiplerde alaşımlandırılmaktadır [14]. Bunlar Tablo 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Biyomedikal uygulamalarda kullanılan titanyum alaşımları [14].

1- Saf titanyum (ASTM F67): 1, 2, 3 ve 4 dereceleri	9- Ti-13Nb-13Zr: β tipine yakın (USA), düşük modül
2- Ti-6Al-4V ELI (Dövülmüş : ASTM F136 ve dökülmüş: ASTM F620): $\alpha+\beta$ tipte	10- Ti-12Mo-6Zr-2Fe: β tipte (USA), düşük modül
3- Ti-6Al-4V (Döküm: F1108): $\alpha+\beta$ tipte	11- Ti-15Mo: β tipte (USA), düşük modül
4- Ti-6Al-7Nb (ASTM F1295): $\alpha+\beta$ tipte (İsviçre)	12- Ti-16Nb-10Hf: β tipte (USA), düşük modül
5- Ti-5Al-2,5Fe (ISO: DIS 5832-10): β rich $\alpha+\beta$ tipte (Almanya)	13- Ti-15Mo-5Zr-3Al: β tipte (Japonya), düşük modül
6- Ti-5Al-3Mo-4Zr: $\alpha+\beta$ tipte (Japonya)	14- Ti-15Mo-3Nb: β tipte (USA), düşük modül
7- Ti-15Sn-4Nb-2Ta-0,2Pd: $\alpha+\beta$ tipte (Japonya)	15- Ti-35,3Nb-5,1Ta-7,1Zr: β tipte (USA), düşük modül
8- Ti-15Zr-4Nb-2Ta-0,2Pd: $\alpha+\beta$ tipte (Japonya)	16- Ti-29Nb-13Ta-4,6Zr: β tipte (Japonya), düşük modül

3.1. TİTANYUM VE ALAŞIMLARININ MİKROYAPISI VE ÖZELLİKLERİ

Ticari saf titanyum, diğer alternatifleri ile aynı düzeyde mekanik yapı gösteremediğinden, alaşım olarak kullanılmasına ihtiyaç duyulmuştur. 1970’lerde üretim özelliklerinin değiştirilmesinden sonra, vida olarak da üretilebilen titanyumun saf türü, kırığın sabitlenmesinde plaka ve vida olarak kullanırken, daha yumuşak olan alaşım türleri ise, eklemlerde protez malzemesi olarak kullanılma alanı bulmuştur. Bu alaşımlar ağırlıkları ile oranlandığında, eşsiz bir dayanıma sahiptir. Proteze verilen geometrik şekil ve boyutun da dayanıma şüphesiz önemli katkısı vardır [14].

25 °C'deki yoğunluğu 4,5 gr/cm³ olan titanyum hafif bir malzemedir. Alüminyumun Ti ve V'un her ikisinden de hafif oluşu, alaşımın yoğunluğunu saf titanyumun yoğunluğundan daha da aşağıya düşürmektedir. Titanyumun elastisite modülü (107 GN/m²) olup, bu büyüklük paslanmaz çelik (200 GN/m²) ve kobalt- krom (200-230 GN/m²) alaşımlarının elastisite modülünün yaklaşık yarısı kadardır. Titanyumda bu değerlerin düşük olması oldukça önemlidir [14]. Zira böylece titanyum diğer metallere göre oldukça önemli sünekliğe sahiptir ve ortopedide de bu esnekliğe büyük ihtiyaç vardır. Kemikğin elastisite modülü metallere göre oldukça düşüktür (10 GN/m²). Bu arada esnekliğin elastisite modülüyle ilgili olduğu kadar protezin geometrisi ile ilgili olduğu da unutulmamalıdır. Tablo 3.2'de biyomedikal uygulamalarda kullanılan titanyumun mekanik özellikleri ve Tablo 3.3'de de dişçilik uygulamalarında kullanılan titanyumun mekanik özellikleri verilmiştir.

Çizelge 3.2. Biyomedikal uygulamalarda kullanılan titanyumun mekanik özellikleri [14].

ALAŞIM	Gerilme Dayanımı (UTS) (Mpa)	Eğilme Dayanımı σ	Uzama %	RA(%)	Modülü (Gpa)	Alaşım Tipi
1. I.derecede saf Titanyum	240	170	24	30	102.7	α
2. II.derecede saf Titanyum	345	275	20	30	102.7	α
3. III.derecede saf Titanyum	450	380	18	30	103.4	α
4. IV.derecede saf Titanyum	550	485	15	25	104.1	α
5. Ti-6Al-4V	860-965	795-875	10-15	27-47	101-110	$\alpha + \beta$
6. Ti-6Al-4V	895-930	825-869	6-10	20-25	110-114	$\alpha + \beta$
7. Ti-6Al-7Nb	900-1050	880-950	8.1-15	25-45	114	$\alpha + \beta$
8. Ti-5Al-2.5Fe	1020	895	15	35	112	$\alpha + \beta$
9. Ti-5Al-1.5B	925-1080	820-930	15-17.0	36-45	110	$\alpha + \beta$
10. Ti-15Sn- 4Nb-2Ta-0.2Pd (tavlanmış)	860	790	21	64	89	
11. Ti-15Zr-4Nb-4 Ta-2 Pd (tavlanmış)	715	693	23	67	94	$\alpha + \beta$
12.Ti-13Nb-13Zn	973-1037	336-903	10-16	27-53	79-84	
13.TMZF (Ti-12Mo-6Zr-2Fe) (tavlanmış)	1060-1100	100-1060	18-22	64-73	74-85	β
14. Ti-15 Mo (tavlanmış)	874	544	21	82	78	β
15.Tiadyne 1610 (tavlanmış)	851	736	10		81	β
16. Ti-15Mo-5Zr-3Al (ST)	852	835	25	43	80	β
17. 21RX(tavlanmış) (Ti-15 Mo-2.8Nb-0.3Si)	919-999	945-987	16-18	60	83	β
18. Ti-35.3Nb-5.ITa-7.IZr	596.7	547.1	19,0	63.0	55.0	β
19. Ti-29Nb-13Ta-4.6Zr	911	864	13.2		80	β

Çizelge 3.3. Dişçilik uygulamalarında kullanılan titanyumun mekanik özellikleri[14].

Alaşım	Yöntemi	Gerilme Dayanımı (MPa)	Eğilme Dayanımı (MPa)	Uzama (%)	Vickers Sertliği (HV)
1. Ti-20Cr-0.2Si	Döküm	874	669	6	318
2. Ti-25Pd-5Cr	Döküm	830	659	5	261
3.Ti-13Cu-4,5Ni	Döküm	703	-	2.1	-
4. Ti-6Al-4V	Döküm	976	847	5.1	-
5. Ti-6Al-4V	Süperplastik	954	729	10	346
6. Ti-6Al-7Nb	Döküm	933	817	7.1	-
7. Ti-Ni	Döküm	470	-	8	190

Titanyumun tribolojik (sürtünme, aşınma, yağlama vb.) yapısı, benzer alanlarda kullanılan diğer metallere göre oldukça farklılık gösterir ve bu nedenle yoğun araştırmalara neden olmuştur. Saf titanyum çok reaktif bir metal olduğundan bir oksit tabakası ile pasifleştirilip incelendiğinde farklı bir davranışla karşılaşılır. Titanyumun (Ti-Ti) sabit bir sürtünme katsayısı mevcuttur. Bu değer Çizelge 3.4’de görüldüğü gibi çoğu benzer metal kombinasyonlarına göre daha düşüktür.

Çizelge 3.4. Bazı metal çiftlerindeki sürtünme katsayıları [14].

Malzeme çiftleri	Sürtünme katsayısı (μ)
Altın – altın	4.0
Platin – platin	3.0
Alüminyum - alüminyum	1.9
Gümüş – gümüş	1.5
Bakır – bakır	1.1
Molibden – molibden	0.8
Çelik – çelik	0.53
Titanyum - titanyum	0.47

3.2. TİTANYUMUN KOROZYON DAVRANIŞI VE BİYOLOJİK UYUMLULUĞU

Titanyum, korozyona karşı en dirençli mühendislik malzemelerindendir. Titanyum, başlıca bazı güçlü asitler (sülfürik, hidroklorik, fosforik ve formik v.b.) dışında özellikle nötr sıvılarda hemen hemen hiç bozulmayabilir ve çoğu metali bozan klor iyonlarına karşı da korozyon direnci çok iyidir [14].

Ayrıca titanyumun serum sıvısı içinde gösterdiği korozyon direnci ile, protez malzemesi olarak kullanımda tercih sebebi olmuştur. Alaşım elementlerinin katkısına rağmen, korozyon direncinin düşmemesi de titanyumun bir diğer olumlu yanıdır.

Titanyum, Pourbaix diyagramında pasifliğin (oksit tabakasının artışı ile başlayan korozyonun yavaşlaması) genişlediği birkaç metalden biridir. Titanyum yüzeyinde oluşan ve pasiflik olarak bilinen, kararlı oksit tabakasının varlığı devam ettiği sürece korozyon aktif hale geçemez. Vücut sıvısına eşdeğer sıvıda yapılan deneylerde, oldukça kararlılık gösteren titanyumun, bu karakteri sayesinde cerrahi kullanım için mükemmel bir pasif malzeme olduğu görülür. Alaşım halindeki titanyumlarda ise kararlı oksit tabakasının saf titanyumdan daha da iyi olduğu görülmektedir. Bu metal ve alaşımlar, korozyona karşı dirençli pasif metaller olarak adlandırılırlar.

Araştırmalarda, Ti-6Al-4V alaşımına yapılan iyon implantasyonu sonucu, aşınmalı korozyon oranını sıfıra yakın bir seviyeye indirmek mümkün olmuştur.

Ti-6Al-4V alaşımının çok üstün vasıflarına rağmen, aşınma direncinin düşük olduğu bilinmektedir. Klasik yüzey sertleştirme işlemleri aşınma direncini artırmakta, ancak yorulma mukavemetini yarıya indirmektedir. Bor, karbon, azot ve oksijen gibi iyonların aşılınması yöntemi, çok ince bir yüzeyi etkilediğinden, yorulma mukavemetini düşürmeden aşınma direncini geliştirmektedir. Ayrıca iyon aşılamanın korozyon direncini de artırdığı görülmüştür [14].

Titanyumun dokularda tolere edilmesi oldukça iyidir. Mide-bağırsak yolu ile emilmenin çok zayıf olmasına karşılık akciğer tarafından emilmesi kayda değer durumdadır. Metalin devamlı diyet halinde alınması durumunda ise; kalp, akciğer, dalak ve böbreklerde birikim yaptığı görülmüş, fakat raporlarda çok kötü bir etkisine rastlanılmamıştır. Sadece TiO₂ tozlarının akciğerde hafif bir tahriş edici özelliğinden söz edilmiştir.

Böylece saf titanyumun pek çok yönden toksit özellikli olmadığı ve uygun özelliklere sahip olduğu görülmüştür. Fakat titanyumun mekanik özelliklerini

iyileştirmek için katılan diğer alaşım elementlerinden alüminyum ve vanadyum gibi elementler için, toksitliğin potansiyel problem olduğu bilinmektedir.

Farklı çalışmalarda, protez çevresindeki reaktif bağ dokularda titanyum partiküllerine rastlanılmıştır. Bağ dokunun kalınlığı, protezin dokuda kalma süresine göre, 1 ila 6 mm arasında değişerek, her bir test numunesinde farklılık göstermektedir. Son yıllarda gözenekli yüzeye sahip numunelerin kullanımındaki avantajın fark edilmesi de titanyumun tercih edilmesindeki bir başka biyolojik etken olmuştur.

Ti-6Al-4V alaşımının korozyon direncini artırmak için yapılan, oksit kaplama işleminin, biyolojik uyumluluğa da olumlu katkısının olduğu, SEM (Scanning Electron Microscopy), AES (Auger Electron Spectroscopy) ve X ışını yöntemleri kullanılarak yapılan daha sonraki incelemelerden de anlaşılmıştır [14].

Alüminyumun, osteomalacia (kemik yumuşaması)'na, microcytic anemia (eritrosit azalması)'na, beyin dokusunda bozulmaya yol açan değişikliklere ve böbrek yetmezliği olan hemodiyaliz hastalarında da değişik nörolojik hastalıklara sebep olduğu günümüzde yeni yeni anlaşılmaktadır.

Nikel ve kromdan çok daha toksit etkili olduğu bilinen vanadyumun ise kemik dokuda, böbreklerde, karaciğerde ve dalakta yoğunlaştığı anlaşılmıştır. Ti-6Al-4V (ELI) alaşımındaki, Al ve V'un sayılan olumsuzluklarına rağmen, bu alaşımın korozyon direncinin çok iyi olması nedeniyle, yerine geçecek alaşımlarda bu özelliğinin göz önünde bulundurulması gerekmektedir [14].

3.3. NİKEL-TİTANYUM ALAŞIMLARI

Şekil hafızalı metallerden Ni-Ti alaşımlı biyomalzemelere olan ilgi, biyomedikal uygulamalarda giderek artmaktadır. Ni-Ti alaşımları çok iyi bilinen ve geniş kapsamda kullanılmakta olan iyi mekanik ve korozyon karakteristiklerine sahip şekil hafızalı malzemelerdir. Ni-Ti implantları, doğal olarak çevresel korozyon dayanımına sahiptir. Titanyum alaşımları düşük özgül ağırlığa, yeterince fazla

elastiklik modülüne, uygun yüksek dayanım ve iyi korozyon özelliklerine sahiptir. Kompozit biyomalzemelerde yeni nesil olarak tanımlanan, Ni-Ti, Al₂O₃ ve titanyum alaşımları ve bunların sorunlu kemiğe veya kalça, diz v.s bölgele ve doku kemik etkileşmeleri bilim adamları tarafından geniş olarak incelenmektedir [14].

Şimdiye kadar şekil hafızalı malzemelerden olan gözenekli Ni-Ti alaşımlarının detaylı olarak incelenmesi yapılmıyordu, fakat şimdilerde şekil hafızalı Ni-Ti alaşımlar implantlarında biyomalzeme olarak kullanımları büyük önem kazanarak mükemmel mekanik özellikleri, iyi korozyon dayanımları, yüksek biyouyumluluk gibi etkenler sebebiyle; biyomedikal uygulamalarda çok önemli yere sahip olmuştur. Bu alaşımın gözenekli yapısı, kemiğin doku içindeki hareketine ve vücudun gelişimine imkan sağlamaktadır. Ayrıca Ni-Ti alaşımlarda, farklı gözeneklilik tipleri üretilebilmektedir. Gözenekli Ni-Ti alaşımlarının elastiklik modülünü insan kemiğine göre ayarlanması mümkündür. Bunlara ilaveten yük taşımalı malzemeler (ağaç, mercan ve hayvan kemiği) bu gözenekli yapıya sahiptir. Ni-Ti şekil hafızalı alaşımlar, suni kemik üretiminde ve birçok uygulamalarda göz önüne alınmaktadır. Örneğin; bel kemiği cerrahisi, plastik cerrahi, dişçilik uygulamaları vb.

Ni-Ti alaşımlarının üretimine gelince; bunlar birkaç toz metalürji yöntemidir ki, bunlar Ni-Ti şekil hafızalı alaşımlar üzerine odaklanmış ve bu Ni-Ti şekil hafızalı alaşımların üretimini geliştirmiştir. Bunlardaki en çok bilinen üretim şekli pres altında soğuk kalıplama yöntemidir. Fakat gözenekli şekil hafızalı alaşımların hazırlanmasındaki zorluk gözenekli Ni-Ti alaşımlar hakkındaki çalışmaları ve uygulamaları sınırlandırmıştır. Böylece gözenekli Ni-Ti şekil hafızalı alaşımların yeni teknikte üretim gelişimi, şimdilerde enteresan bir konu başlığıdır.

Ni-Ti alaşımlarda biyolojik uyumluluk, sınırlı çalışmalardan elde edilen verilerle kıyaslandığında, kemiklere göre fazla farklılık ve ihtilaf oluşturmamakta, ayrıca köpek femuru üzerinde titanyum (% 55 Co, % 35 Cr, % 10 Mo) ve diğer titanyum alaşımlarına göre kıyaslandığı zaman daha uyumlu olduğu görülmektedir. Alaşımlardaki toksit özellikli malzemeler biyolojik başarısızlıklara neden olmaktadır. Bu gibi olumsuzluklar dokuda alerjik etkilere neden olarak iltihaplanmalara kadar

sürmektedir. Bunlar da kemiğin gelişimine engel olan biyokimyasal ve biyofiziksel etkilere sebep olan başarısızlıklar olarak ortaya çıkmaktadır [14].

3.4. TİTANYUM VE ALAŞIMLARININ KAYNAK EDİLEBİLİRLİĞİ

Alaşımız titanyum ve α titanyum alaşımlarının tümü kaynak edilebilir. $\alpha+\beta$ titanyum alaşımı Ti-6Al-4V ve diğey zayıf β kararlaştırıcı elementler içeren alaşımlar bile kaynak edilebilir ancak güçlü β kararlaştırıcı elementler içeren $\alpha+\beta$ alaşımları kaynak edildiklerinde gevrekleşirler. Pek çok β alaşımları başarılı bir şekilde kaynak edilebilir. Bununla birlikte, yaşlanma sertleşmesi ile mukavemeti sağlamak için yapılacak ısı işlem dikkatli uygulanmalıdır. Çünkü yaşlanan kaynaklar bazı β alaşımlarında oldukça kırılğan olabilir. Ticari saf titanyumun kaynağında, düşük demir içerikli dolgu metalleri kullanılmalı ve kaynak bölgesinin demirle teması sağlayacak tüm uygulamalardan kaçınılması gerekir. % 98.5-99.5 saflıkta bulunan alaşımsız titanyumların tümü soğuk işlenmiş durumdan çok tavllanmış durumda kaynak edilebilir [16].

α alaşımları yüksek sünekliklerinden dolayı daha iyi kaynak edilebilirliğe sahiptirler. Kaynak işleminin, tavllanmış malzemenin mekanik özellikleri üzerinde etkisi azdır. Ancak soğuk işlem görmüş bir malzemenin mukavemeti üzerindeki etkisi bu mukavemeti azaltıcı yöndedir. Bu nedenle α alaşımları tavllanmış koşullarda kaynak edilebilirler. Ti-0.2Pd ve Ti-0.3Mo-0.8Ni alaşımı çatlak korozyonuna karşı iyi bir dirence sahiptir. Ti-5Al-2.5Sn alaşımı iyi kaynak edilebilirliğin yanında iyi mukavemet ve tokluğun istendiği yerlerde kullanılabilirler. Düşük arayer elementleri içeren α alaşımları yüksek tokluk gösterir ve düşük sıcaklık uygulamaları için uygundur. Ti-5Al-2.5Sn, Ti-8Al-5Sn-5Zr, Ti-7Al-12Zr, Ti-6Al-2Cb-1Ta-1Mo ve Ti-8Al-1Mo-1V alaşımları tavllanmış durumda kaynak edilebilirler. Yakın α alaşımları kaynak edilebilir, fakat kaynak gerilmeleri yüksek olabilir. Bu yüzden kaynak sonrası bu gerilmelerin giderilmesi önerilir [16]. Bazı durumlarda kaynakta oluşacak çatlakları önlemek için özel kaynak yöntemlerine gereksinim duyulabilir. Bu alaşımlarda demirin varlığı sürünme dayanımını azaltır.

Ti-6Al-4V alaşımı en iyi kaynak edilebilirliğe sahiptir. Hem tavllanmış durumda hem de çözüldürme ısı işlemi uygulanmış durumda kaynak edilebilir. Yaşlanma, kaynak sonrası gerilim giderme ısı işlemi sırasında tamamlanabilir. Yalnızca soğuk işleme ile mukavemetlendirilebilen α ve alaşımsız titanyuma kıyasla $\alpha+\beta$ ve β alaşımları ısı işlemle mukavemetlendirilebilir [16]. Yüksek miktarda β kararlaştırıcı element içeren $\alpha+\beta$ alaşımları kaynak edilebilirliği sınırlandırır. Kaynak bölgesinde küçük kusurların varlığında ya da yüksek sınırlama altında kaynak edildiklerinde çatlama eğilim gösterirler. Ti-7Al-4Mo ve Ti-6Al-4V-2Sn bu tür alaşımlardandır. 150-170 °C’de ön ısıtma yaparak çatlama karşı direnç en iyi duruma getirilebilir. Kaynaktan hemen sonra gerilim giderme tavlama yapılmalıdır [17]. $\alpha+\beta$ alaşımları, alaşımsız titanyum yada α titanyum dolgu metali ile kaynak edilebilir. Bu sayede ergiyik bölgedeki β içeriği azaltılır ve süneklik daha iyi hale getirilir. Bu tür dolgu metallerinin kullanımı, duyarlı alaşımlarda ısıdan etkilenen bölgede oluşacak gevrekliği önlemez. Çizelge 3.5’de titanyum ve alaşımlarının kaynak edilebilirlikleri verilmiştir.

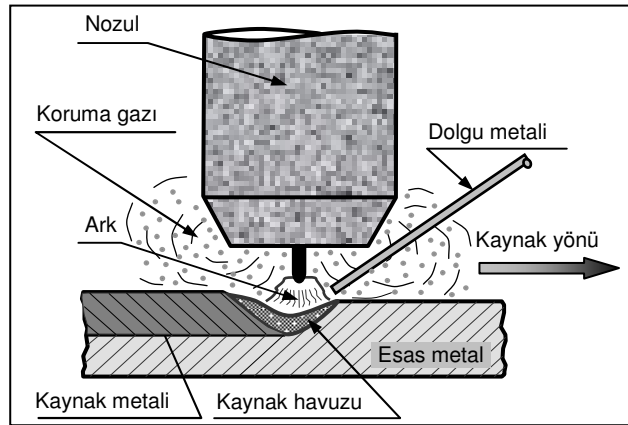
Çizelge 3.5. Titanyum ve alaşımlarının kaynak edilebilirliği [17].

Alaşım	Kaynak Edilebilirlik
Ticari saf Titanyum	A
Alfa alaşımları	
Ti-0.2Pd	A
Ti-5Al-2.5Sn	B
Yakın alfa alaşımları	
Ti-8Al-1Mo-1V	A
Ti-6Al-2Cb-1Ta-0.8Mo	A
Ti-6Al-4Zr-2Mo-2Sn	B
Alfa-Beta alaşımları	
Ti-6Al-4V	B
Ti-7Al-4Mo	C
Ti-6Al-6V-2Sn	C
Ti-8Mn	D
Beta alaşımları	
Ti-13V-11Cr-3Al	B
A: Mükemmel B: İyi C: Özel uygulamalarla sınırlı D: Kaynağı önerilmez	

3.5. TİTANYUM VE ALAŞIMLARINA UYGULANAN KAYNAK YÖNTEMLERİ

3.5.1. Gaz Tungsten Ark Kaynağı

TIG kaynağı, titanyum ve alaşımlarının kaynağında yaygın olarak kullanılır (Şekil 3.1). Özellikle 3 mm kalınlığındaki parçalar için uygundur. Bu kaynak yönteminde alın kaynağı gerçekleştirilir. Kaynak pozisyonu kaynak metalindeki porozite miktarını etkileyebilir. Doğru akım düz kutuplama yöntemi (elektrot negatif) uygulanıp EWth-2 tipi tungsten elektrotlar kullanılarak kaynak işlemi gerçekleştirilir. Tungsten elektrodun kaynak bölgesi ile temasından kaçınılmalıdır. Çünkü titanyumun gevrekleşmesine neden olur. Titanyumun kaynağında porozite önemli bir sorundur. Poroziteyi önlemek için, kaynak bölgesi ve dolgu metali gerektiği gibi temizlenmelidir. Katılaşmayı geciktirecek ve kaynak banyosunda hapsolan gazların çıkmasına olanak sağlayacak yavaş kaynak hızının kullanılması ile porozite azaltılabilir ya da tamamen ortadan kaldırılabilir [16].



Şekil 3.1. TIG kaynağının şematik gösterimi [18].

Ti-6Al-4V TIG kaynak yöntemiyle darbeli akım kullanılarak kaynak edilmiştir. Elde edilen kaynağın gerilme özellikleri üzerine kaynak parametrelerinin etkisi araştırılmıştır. Sonuç olarak, tane boyutu ve martenzit oluşum miktarı alaşımın gerilme dayanımını etkilemektedir ve bunlar soğutma oranları ile ilişkilidir. Kaynak ısı girişinde artışla gerilme dayanımında bir azalmaya eğilim ve kaynak soğutma

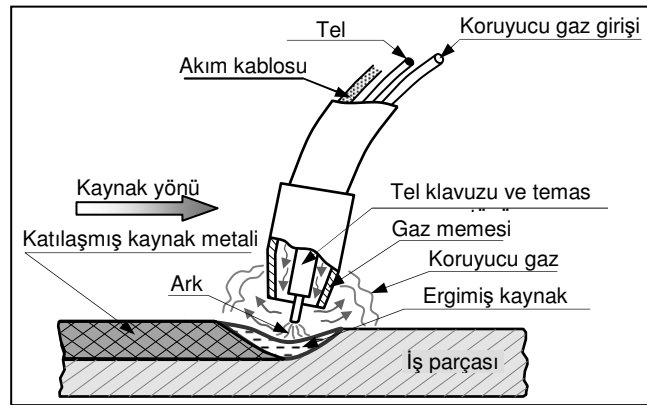
oranında artışı ile gerilme dayanımında bir artış gözlenmiştir. Soğutma oranının süneklik üzerinde etkisi göz önüne alındığında, daha yüksek soğutma oranlarının daha yüksek uzamayı sağladığını ve bununda daha yüksek kaynak sünekliği ile sonuçlandığı tespit edilmiştir [16]. Çizelge 3.6'da farklı kalınlıktaki titanyum malzemenin TIG kaynağında, bazı kaynak parametreleri verilmiştir.

Çizelge 3.6. Titanyumun TIG kaynağı kaynak değişkenleri [16].

Malzeme kalınlığı (cm)	Koruyucu gaz	Ark voltajı (V)	Kaynak akımı (A)	Kaynak hızı (cm/dak.)
0.02	He	14	10	41
0.7	Ar	10	25-30	25
0.1	Ar	10	90-100	25
0.1	Ar	10	120-130	30
0.2	Ar	12	190-200	25
0.2	Ar	12	200-210	30
0.3	Ar	12	220-230	25

3.5.2. Gaz Metal Ark Kaynağı

Gaz metal ark kaynağı (MIG) normal olarak 3 mm ve daha yukarı kalınlıkta Ti ve alaşımlarında kullanılır (Şekil 3.2). Yöntem 12,5 mm kalınlığındaki levhaların kaynağında geniş ölçüde yer almıştır. Bu kaynak yöntemi TIG kaynağından daha ekonomiktir. Tel elektrodun temizliği ve homojenliği son derece önemlidir. Kullanılan koruyucu gaz, argon, helyum yada her ikisinin karışımı olabilir. Oksijen, azot, hidrojen, karbondioksit gazları titanyumda gevrekliğe yol açtığından soy gaza eklenmemelidir. Kullanılan koruyucu gaz hava ve nemin yol açtığı kirlenmelerden korunmalıdır. Titanyum dolgu metali dört yolla transfer edilir. Bunlar kısa devre iletim, iri damla iletimi, darbeli akım ve sprey iletimi şeklindedir [16].



Şekil 3.2. MIG kaynağının şematik gösterimi [18].

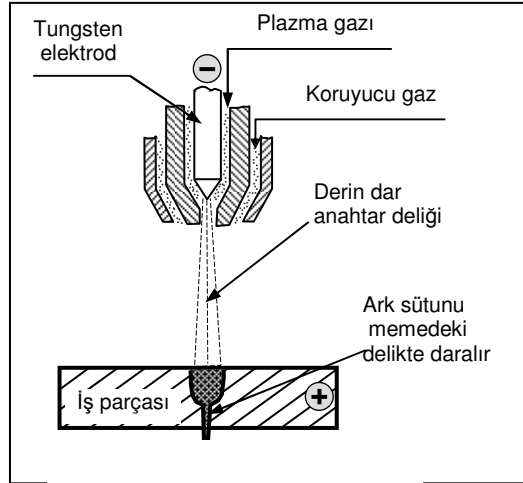
Çizelge 3.7’de farklı kalınlıktaki titanyum malzemenin MIG kaynağında, bazı kaynak parametreleri verilmiştir.

Çizelge 3.7. Titanyum alaşımının MIG kaynak değişkenleri [19].

Malzeme kalınlığı (cm)	Kaynak pozisyonu	Koruyucu gaz	Ark Volatajı (V)	Kaynak akımı (A)	Kaynak hızı (cm/dak)
0.3	Yatay	75Ar-25He	20	250-260	38
0.6	Yatay	75Ar-25He	30	300-320	38
0.9	Yatay	85He-15Ar	33	350-360	64
1.2	Yatay	75Ar-25He	40	340-360	38
1.5	Yatay	75Ar-25He	45	350-370	38
2.5	Yatay	Ar	36-37	320-350	51-58
2.5	Yatay	Ar	31-33	315-340	33
2.5	Yatay	75Ar-25He	22-24	-	10

3.5.3. Plazma Ark Kaynağı

Plazma ark kaynağının (şekil 3.3) başlıca uygulamalarından biri, Ti alaşımlarının birleştirilmesidir. Anahtar deliği kaynağı, paslanmaz ve düşük alaşımlı çeliklere göre titanyumda daha kalın küt alın birleştirmelerine uygulanabilir [20]. Koruyucu gaz olarak genelde argon kullanılır. Helyum- argon karışımı özel olarak kullanılabilir. Titanyumu gevreklettiği için koruyucu gaza hidrojen eklenmemelidir.



Şekil 3.3. Plazma kaynağının şematik gösterimi [21].

Çizelge 3.8’de farklı kalınlıktaki titanyum malzemenin plazma ark kaynağında, bazı kaynak parametreleri verilmiştir.

Çizelge 3.8. Titanyum alaşımlarının plazma kaynağı kaynak değişkenleri [22].

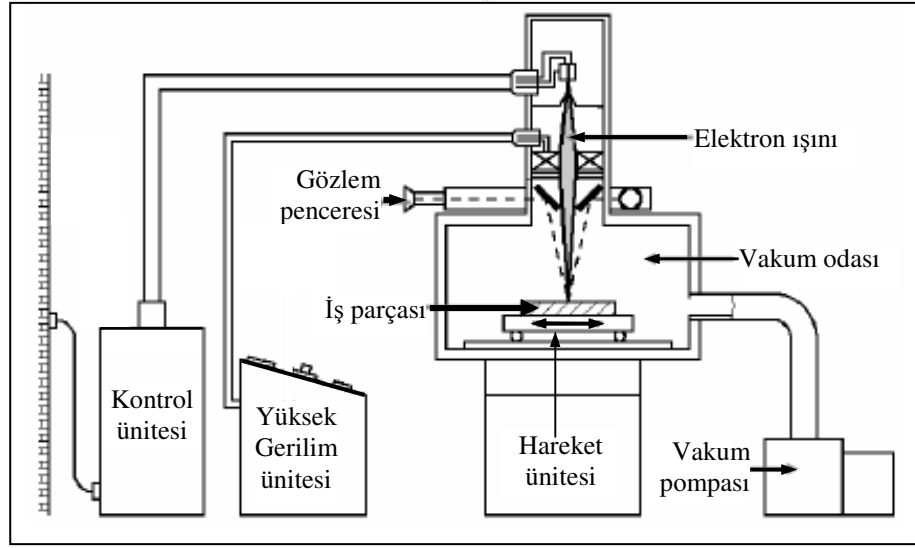
Malzeme kalınlığı (cm)	Koruyucu gaz	Kaynak akımı (A)	Ark voltajı (V)	Kaynak Hızı (cm/ dak)
0.02	Ar	5	-	-
0.03	Ar	6	-	-
0.03	Ar	150	24	102
0.04	Ar	175	30	107
0.6	Ar	160	30	114
0.7	Ar	172	30	122
0.9	75He-25Ar	225	38	-
1.2	50He-50Ar	270	36	-

3.5.4. Elektron Işın Kaynağı

Elektron ışın kaynağı, elektronların yüksek vakum altında hızlandırılmaları sonucu kazandıkları kinetik enerji kullanılarak gerçekleştirilen bir kaynak yöntemidir. Elektron ışın kaynağı yoğunlaştırılmış ve yönlendirilmiş elektron demetinin sahip olduğu enerjinin metallerin ergitilerek kaynak edilmesini sağlayan bir işlemdir. Şekil 3.4'de elektron ışın kaynağının şematik gösterimi verilmiştir.

Bu kaynak yönteminde genellikle dolgu metali kullanılmaz ve ön ısıtma gerekmez. Optimum sonuçlar için kaynak vakumlu ortamda yapılmalıdır. Orta derecedeki vakumlu ortamdaki kaynaklar çoğu uygulamada iyi sonuçlar sağlamaktadır. Titanyumun elektron ışın kaynağı ile diğer metallerle birleştirilmesinde porozite, yetersiz nüfuziyet, büzülme boşlukları gibi problemler oluşmaktadır. Elektron ışın kaynağı, gas tungsten ark kaynağı (TIG) ile karşılaştırıldığında daha düşük bir ısı girdisine sahiptir [16].

Elektron ışın kaynaklarında mikroyapı ve mikro segregasyon, hem kaynak yapılmış durumda hem de kaynak sonu ısıtma işleminden sonra yapının mekanik özelliklerini etkiler. α - β alaşımlarında, kaynakta mikroyapı bileşimi olarak martenzit hakimdir. Kaynak metali ve ısıdan etkilenen bölge genellikle yaşlanmanın doğrudan bir sonucu olarak esas metale oranla daha yüksek akma dayanımı ve daha düşük süneklikler gösterir.



Şekil 3.4. Elektron ışın kaynağı [21].

Yaygın kullanıma sahip Ti-6Al-4V hem tavllanmış hem de çözündürme ısıl işlemine tabi tutulmuş ve yaşlandırılmış durumda elektron ışın kaynağı ile kaynak edilebilir. Yüksek sıcaklıklara sahip çalışma koşulları altında çalışacak kaynaklı parça için önerilen işlem sırası; tavlama, kaynak, çözündürme ısıl işlemi ve yaşlandırmadır. Diğer çalışma koşulları için, uygulanan çözündürme ısıl işlemi, yaşlandırma ve kaynak işlem sırası kırılma tokluğunda bir miktar azalma ile sonuçlanır. Çizelge 3.9'da farklı kalınlıktaki titanyum malzemenin elektron ışın kaynağında, bazı kaynak parametreleri verilmiştir.

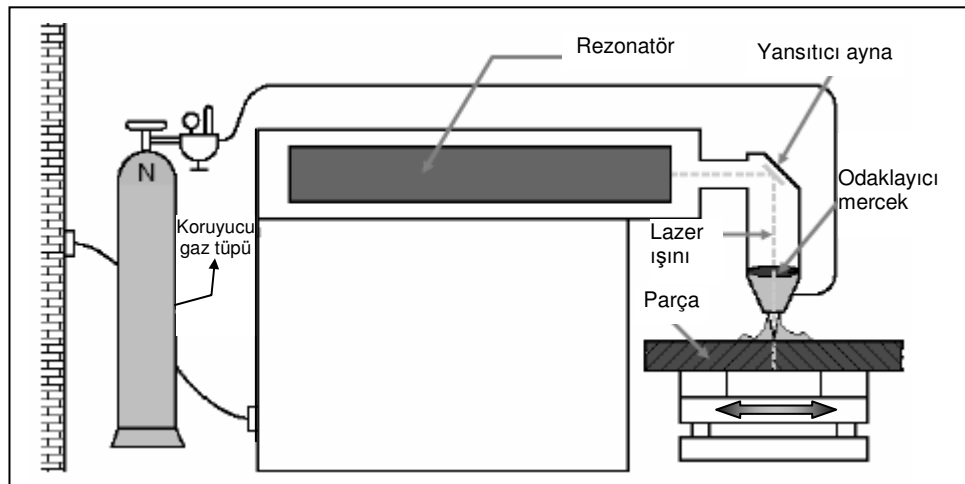
Çizelge 3.9. Titanyum alaşımlarının elektron ışın kaynak değişkenleri [16].

Malzeme kalınlığı (cm)	Hızlandırma Voltajı (kV)	Işın akımı (mA)	Kaynak hızı (cm/dak)
0.07	30	26	214
0.12	85	4	153
0.31	20	95	76
0.88	130	35	102
5	45	450	66

3.5.5. Lazer Kaynağı

Uzay ve havacılık endüstrisinde titanyum ve alaşımlarını birleştirmek için lazer kaynağının kullanılmasının sebebi, kolay otomasyon ve ısı girişinin kontrol altında tutulabilmesindedir. Ti-6Al-4V'un lazer kaynağı ile birleştirilmesi otomotiv ve havacılık alanı için daha önemli bir noktadır [16]. Kaynak hızının yüksek ve kaynak süresinin de kısa olması kaynak bölgesinin yüksek sıcaklıklara maruz kalma süresini azaltmaktadır. Bunun sonucunda ısıdan etkilenen bölge daha dar olur, kaynak sonrası gerçekleşen çatlamlar ortadan kaldırılabilir ve tane büyümesi de engellenmiş olur.

Titanyumun kaynağında meydana gelebilecek kirlenme ve gevrekliklerden kaçınmak için helyum ya da helyum-argon gaz karışımı kullanılabilir. Kaynak ve ısının tesiri altında kalan bölge, esas metalden daha yüksek gerilme dayanımına sahiptir, ancak kırılma tokluğu değeri daha düşüktür. Ti-6Al-4V'da kırılma tokluğundaki azalma elektron ışın kaynağı ile yaklaşık olarak benzerdir. Genelde titanyum alaşımlarının kaynağında çelikte oluşan martenzitten farklı bir martenzit oluşur. Bu martenzit daha yüksek tokluğa sahip ve çatlamaya karşı daha az duyarlıdır. Lazer kaynağı sonucunda oluşacak martenzit iğneleri ark kaynağı ile karşılaştırıldığında daha küçüktür. Lazer ışın donanımının şematik görüntüsü Şekil 3.5'de verilmiştir.



Şekil 3.5. Lazer ışını kaynak donanımı [1].

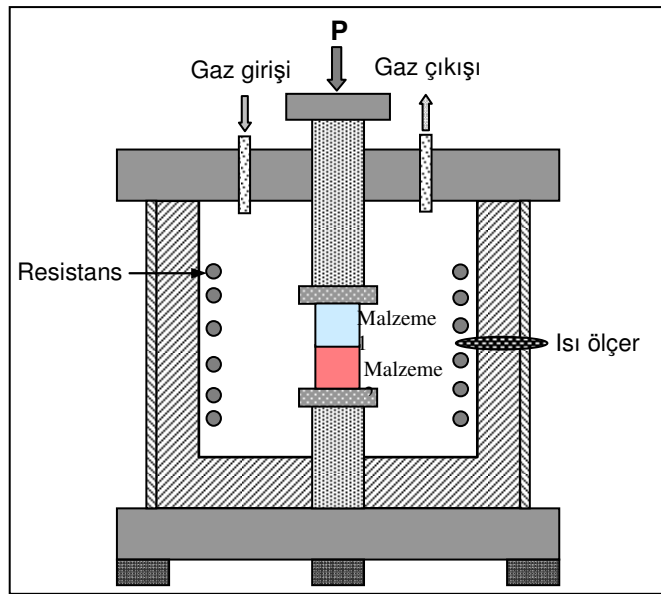
Çizelge 3.10'da Ti-6Al-4V malzemenin lazer ışın kaynağında, bazı kaynak parametreleri verilmiştir.

Çizelge 3.10. Ti-6Al-4V için tipik lazer kaynak parametreleri [16].

Kalınlıklar (mm)	Lazer	Güç (kW)	Hız (m/dak)
4	CO ₂	5	2.0
8	Fiber	7	1.5
6	Nd:YAG	4	1.0
3	Nd:YAG	4	2.5

3.5.6. Difüzyon Kaynağı

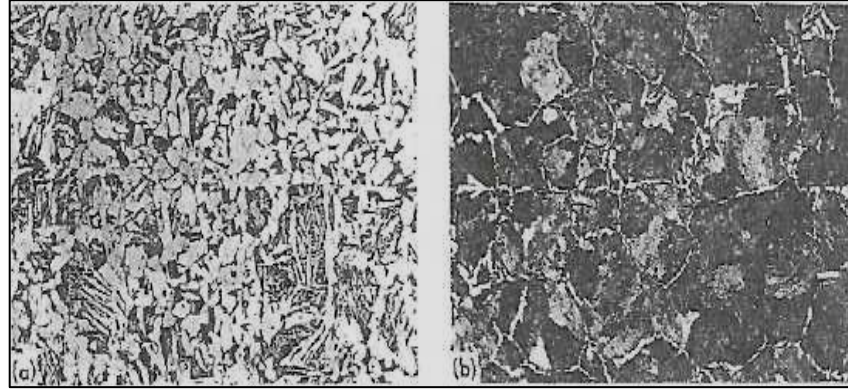
Günümüz endüstrisinde kullanılan malzeme çeşitlerinin artması, farklı özellikler gerektiren yerlerde farklı metal bağlantılarının gerekliliği ve özellikle son yıllarda ekonomik faktörlerin giderek önem kazanması farklı özelliklere sahip malzemelerin birbirleriyle birleştirilmesi zorunluluğunu doğurmaktadır. Daha çok uzay ve uçak sanayinde kullanılan gelişmiş malzemelerin birleştirilmeleri katı hal kaynak teknikleri olarak bilinen, difüzyon kaynağını da kapsayan yöntemlerle mümkündür. Bugün farklı metallerin birleştirilmesinde % 40 bu yöntem kullanılırken, bu yöntemle birleştirilmiş malzemelerin yaklaşık % 20'sini de titanyum ve alaşımları oluşturmaktadır [18].



Şekil 3.6. Difüzyon kaynak makinesinin şematik resmi [23].

3.6. DEMİR ESASLI ALAŞIMLARIN DİFÜZYON KAYNAĞI

Çelikler ergitme kaynağı ile kolayca kaynak edilebildiklerinden difüzyon kaynağı bu konuda pek gelişmemiştir. Bununla birlikte, Rusya'daki bazı araştırmacılar difüzyon kaynağı ile yüksek ekonomik kazançlar ve düşük maliyetli çelik parçalar elde ettiklerini iddia etmektedirler. Düşük karbonlu çeliklerin ve % 0,45 C'lu çeliğin difüzyon kaynağı sonrasındaki mikroyapı görüntüleri Şekil 3.7'de gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Difüzyon kaynaklarının mikro yapısı, a) Düşük karbonlu çelik numune (100 x), b) % 0,45 C ' tu çelik numune (125 x).

3.7. BAKIR

Bakır, korozyona karşı dayanıklılığı, iyi elektrik ve ısı iletkenliği nedeniyle özellikle kimya, gıda endüstrisinde ve elektroteknik alanında geniş bir kullanıma sahiptir [6]. Ayrıca gayet iyi plastik şekillenebilme ve uzama kabiliyetine de sahiptir. Çizelge 3.11'de bakırın kaynak kabiliyetini etkileyecek fiziksel parametreler verilmiştir.

Çizelge 3.11. Bakırın bazı fiziksel ve mekanik özellikleri [24].

Yoğunluk	g/cm^3	8.94
Elektrik direnci	$(Qmm^2/m) \times 10^2$	1.68
Isı iletkenliği	$cal / cm^2 / cm \text{ } ^\circ C \text{ s}$	0.92
Isıl genleşme katsayısı	$(mm/mm^\circ C) \times 10^{-6}$	16.7
Erime sıcaklığı	$^\circ C$	1083
Çekme dayanımı	N/mm^2	220.5
Uzama	%	45
Sertlik	BHN	25

Özellikle buzdolabı ve soğuk hava depolarındaki soğutma ünitelerinin boru bağlantılarında kolay şekil alabilen bakırın alüminyuma kaynak edilmesi difüzyon kaynağı ile daha iyi olacaktır. Ayrıca havacılık endüstrisinde yoğunluğun önemli olduğu uçak, helikopter ve uzay araçlarındaki bağlantı elemanlarında da bu yöntem kullanılabilir.

Al-Cu 'nun difüzyonla birleştirilmesinde asıl güçlük alüminyumun yüzeyindeki oksit tabakasını (Al_2O_3) uzaklaştırmadaki zorlukta ve bağlantı bölgesindeki oksit inklüzyonlarının ve gevrek intermetalik katmanların oluşmasında yatmaktadır. Al-Cu kaynağının mukavemetine geçiş bölgesinin durumuyla karar verilir. Çünkü kaynak bölgesi faz kompozisyonuna, içyapıya, difüzyon kalınlığına, sıcaklık ve zamana bağlı olarak değişir.

Yüksek sıcaklıklarda Al ve Cu çeşitli gevrek intermetalik bileşikler oluşturur ve 180 °C'de Al_2Cu , 350°C 'de ilave bir tabaka olan Al_4Cu_9 oluşur. 400°C de Al-Cu ara tabakası Al_4Cu_9 ile Al, Cu arasında bir yapıdır. Bu ara katman çok yüksek sertliğe sahiptir. 10 um kalınlığa eriştiği zaman bağlantının mukavemeti keskin bir şekilde azalır [6].

BÖLÜM 4

DİFÜZYON KAYNAĞI İLE YAPILAN ÇALIŞMALAR

Bilgin, çalışmasında, Ti-6Al-4V/304L ostenitik paslanmaz çelik çiftini bakır ara tabaka kullanılarak 830, 850 ve 870 °C'lik sıcaklıklar, 1 MPa basınç ve 50, 70 ve 90 dakikalık sürelerde, argon gazı atmosferinde difüzyon kaynağı tekniği kullanılarak birleştirilmiş ve birleştirmelerin mekanik/mikroyapı özelliklerini araştırmıştır [16].

Deneysel çalışmalar sonucunda, kaynaklı bağlantılara uygulanan bindirme-kayma test sonuçlarından, en yüksek kesme dayanımı 870 °C sıcaklık ve 90 dakikalık sürede 118 MPa olduğunu, en yüksek sertlik değerlerinin ise Ti-6Al-4V tarafından ölçüldüğünü ve bütün sıcaklık ve sürelerde yapılan kaynaklı bağlantılarda, ostenitik paslanmaz çelik ve Cu arayüzeyinde önemli bir difüzyonun olmadığını belirtmiştir. Kaynak sonrası birleşme bölgesinde meydana gelen en önemli yapısal değişimin Cu/Ti-6Al-4V arayüzeyinde meydana geldiğini, bu değişimin, Ti-6Al-4V alaşımının hacim merkezli kübik kafes yapısına sahip olması, Cu'nun Ti-6Al-4V içerisinde yayılım hızını artırması sonucu ortaya çıktığını rapor etmiştir. Ayrıca, Cu/Ti-6Al-4V ara yüzeyinde meydana gelen reaksiyon bölgesinde Cu-Ti bileşiklerinden oluşan fazlar görüldüğünü ve bu fazların kalınlıklarının kaynak sıcaklığı ve bekletme süresine bağlı olarak artış gösterdiğini belirtmiştir.

Kundu vd., çalışmasında saf ticari Ti/304 ostenitik paslanmaz çelik çiftini Cu ara tabaka kullanarak gerçekleştirdikleri difüzyon kaynağında 318 MPa'lık bir gerilme dayanımı elde ettiklerini ifade etmişlerdir. Ayrıca, yaptıkları saf ticari Ti/304 ostenitik paslanmaz çelik çiftini Ni ara tabaka kullanarak gerçekleştirdikleri difüzyon kaynağında 302 MPa'lık bir gerilme dayanımı ve 219 MPa'lık kesme dayanımı elde ettiklerini ifade etmişlerdir [25].

Dikbaşı, çalışmasında toz metalurjisi yöntemi ile üretilmiş Ni-Ti kompozitinin difüzyon kaynağında sıcaklığın birleşme üzerindeki etkisi incelenmiştir. Ni-Ti kompoziti 45 µm tane boyutundaki tozlardan ağırlıkça % 51 Ni ve % 49 Ti tozu karıştırılarak üretilmiştir. Difüzyon kaynakları, özel olarak hazırlanmış difüzyon kaynak aparatında 20 dk'lık sabit süre, 850, 875, 900, 925 °C'lik sıcaklıklarda ve argon atmosferinde, 6.6 MPa'lık dinamik yüklerle yapılmıştır. Kaynak sonrası birleşme ara yüzeyinde meydana gelen mikroyapı değişiklikleri optik mikroskop, SEM ve X-Ray analizleri ile incelenmiştir. Ayrıca kaynak sonrası numunelere, bindirme-kayma testleri uygulanarak numunelerin birleşme mukavemetleri tespit edilmiştir. Bütün kaynaklarda, artan sıcaklığa paralel olarak birleştirmenin mekanik özelliklerinin iyileştiği gözlenmiştir. 875 ve 900 °C'lik sıcaklıklar uygulanarak yapılan difüzyon kaynaklarının 825 ve 925 °C'de yapılanlara göre, metalografik açıdan daha iyi olduğu görülmüştür [14].

Fidan, çalışmasında, ergitme kaynağı ile birleştirilmesi mümkün olmayan alüminyum ve bakır malzeme çiftinin difüzyon kaynağı yöntemi ile argon koruyucu gaz atmosferi altında, belirlenmiş olan optimum birleşme şartları kullanarak kaynaklanmış ve oluşan ara fazları incelemiştir. Difüzyon kaynağında alüminyum ve bakırın birleştirilmesinde parametre olarak daha önce yapılan çalışma esas alınarak kaynak sıcaklığı 560 °C, kaynak basıncı 4.5 MPa ve tutma süresi 60 dk olarak alınmıştır [2].

İncelemeler esnasında aynı şartlarda olmasına rağmen değişik kalınlıklarda difüzyon bölgesinin oluştuğu gözlemlenmiştir. Mikroyapı görüntüleri, SEM görüntüleri ve EDS analiz sonuçlarına bağlı olarak Al-Cu denge diyagramındaki yapılarla da karşılaştırılmıştır. Al-Cu denge diyagramındaki oranlara bağlı olarak oluşan yapıların mikroyapı görüntüleri ile uyumlu olduğu görülmüştür. Ayrıca difüzyon bölgesinin Al ana metalden Cu ana metale kadar değişik noktalardan farklı büyütme oranlarında incelenmiştir. Çalışma sonucunda köşeli ve dikdörtgen şeklinde oluşan Al₂Cu arafazı belirlenmiştir [2].

Pakdil, çalışmasında, difüzyon kaynaklı saf Ti-Ti64 alaşımı sandviç yapıların kırılma davranışları incelemiştir. Saf Ti ve Ti64 alaşımı arasında difüzyon kaynağı 875°C sıcaklıkta 1 saat süre ile 5 MPa basınç uygulanarak yapılmıştır [8].

Kaynak kalitesini tespit etmek için kaynak bölgesi optik mikroskop ile detaylı bir şekilde incelenmiş ve alın kaynaklı saf Ti-Ti64 birleştirme çekme deneyine tabii tutulmuştur. Çalışma sonucunda kaynak bölgesinde herhangi bir kaynak hatası gözlenmediğini rapor etmiştir. Ayrıca, çalışmada, plastik şekil değiştirmenin daha kolay olduğu ymk ve gevrek kırılmaya geçiş gösteren hmk yapıdaki ara tabaka içeren numunelerde, ara tabaka kalınlığı ile kırılma davranışının nasıl değiştiğinin incelenmesi oldukça yararlı olacağı rapor edilmiştir.

Çelik, alüminyum ve bakır malzemelerin koruyucu gaz (argon) ortamında yapılan difüzyon kaynağında farklı sıcaklık ve sürelerde birleştirilmesi incelenmiştir [6]. İncelemelere göre en iyi sonuçların 560 °C 4.5 MPa ve 60 dk şartlarında yapılan birleştirmelerle elde edildiğini belirtmiştir. Kaynaklanmış parçaların çekme deneyi sonucu kırılmanın birleşme bölgesinden 1-2 mm alüminyum tarafında olmasına rağmen, kırılma yüzeyinin yüksek büyütme SEM görüntüsü ve EDS analizi sonucu, kırılma yerinde bakır difüzyonunun devam ettiği rapor edilmiştir [6].

Üngören, Ti-6Al-4V alaşımlarının katı hal kaynak yöntemi olan difüzyon kaynağı ile kaynak edilebilirliğinin belirlenmesi amacıyla yapılan bu araştırmada, Ti6Al4V malzemeden hazırlanan numuneler, daha önceden belirlenen çeşitli parametreler ışığında difüzyon kaynağı işlemine tabii tutulmuştur. Yapılan birleştirmeler sonucunda, difüzyon kaynağı sonucu birleşme bölgesinde ısıdan etkilenmiş bölge oluşmamasının bu yöntemin en büyük avantajı olduğu detaylı incelemelerle saptanmıştır [26].

Bu çalışmada özenle hazırlanan Ti6Al4V numunelerinin, 655 °C - 900 °C proses sıcaklığı aralığında, 1,36-5 MPa basınç altında, 60 - 90 dakika süre zarfında difüzyon kaynağı deneyleri yapılmıştır. Deneyler sonrası yapılan makroskobik, mikroskobik ve sertlik incelemeleri sonucunda, Ti6Al4V malzeme için başarılı difüzyon kaynağı parametrelerinin 800–850 °C sıcaklık, 2,72-4 MPa basınç, 60-90 dakika süre ve

etkili bir vakum atmosferi olması gerektiği saptanmıştır. 900 °C ve 5 MPa parametrelerinden daha yukarılara çıkıldığında kaynak veriminin olumsuz etkilendiği rapor edilmiştir.

Yıldırım, çalışmasında metaller arası bileşik olan Ni_3Al+B ile AISI 304 ostenitik paslanmaz çelik ile Ti-6Al-4V alaşımlarının difüzyon kaynağı gerçekleştirilmiş ve birleştirilen bu çiftlerde metalografik karakteristikler, ara yüzey özellikleri ve kalıntı termal gerilmeler SEM, EDS ve nümerik gerilme analiz çalışmaları ile karakterize edilmiştir. Ayrıca difüzyon kaynağı sonrasında meydana gelen termal gerilmelerin Ni_3Al metaller arası bileşiğinin, AISI 304 paslanmaz çelik birleşme çiftine göre yaklaşık 3 kat daha fazla olduğunu göstermiştir. Bunun nedeni Ni_3Al metaller arası bileşiği, Ti-6Al-4V alaşımı birleşme çifti arasında termal genleşme katsayısının, AISI 304 paslanmaz çelik birleşme çifti arasındaki termal genleşme katsayısından daha yüksek olmasından kaynaklandığı rapor edilmiştir [12].

Özdemir vd., çalışmasında TiAl alaşımı ile Ti64 alaşımı değişik sıcaklık, basınç ve süre kullanılarak difüzyon kaynağı ile birleştirilmiştir. Yapılan elektron mikroskop incelemelerinde, tüm kaynaklarda kaynak bölgesinde kimyasal kompozisyonun başlıca % 72-77 Ti ve % 16-20 Al'dan oluşan yeni bir fazın oluştuğu tespit edilmiştir. Ayrıca yapılan kesme testi sonuçlarına göre, 825 °C/5MPa ve 850 °C/5MPa kaynak parametreleri sabit tutulduğunda, kaynak süresinin arttırılması kesme dayanımını düşürdüğü rapor edilmiştir [27].

İpekoğlu, çalışmasında TiAl ve TiAl alaşımlarının difüzyon kaynağı sonrası iç yapı ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Yapılan incelemeler sonucu, 1000 °C'nin 950 °C'den daha iyi bir sonuç verdiği tespit edilmiştir. 950 °C'nin kaliteli bir kaynak için yeterli bir sıcaklık olmadığı görülmüştür. Ayrıca, artan difüzyon süresi ile beraber kaynak bölgesinde tane büyümesi meydana gelmektedir. Kaynak sonrası yapılan ısıtma işlemi sonucu, değişik parametreler ile elde edilen tüm kaynaklarda kesme dayanım değeri artmıştır. Artan basınç değeri ile kesme dayanım değerinin arttığı tespit edilmiştir. Ancak kullanılan en yüksek basınç değeri (20 MPa) ile beraber kullanılan kaynak sürelerinin (1 ve 3 saat) yetersiz kalması nedeniyle, bu basınç değerinde iyi bir sonuç elde edilememiştir. Bu durumda, 1000 °C/ 20 MPa /5 saat parametreleri

kullanılarak bu çalışmada elde edilen sonuçlardan daha iyi bir sonuç elde edilebileceği rapor edilmiştir [7].

Kejanlı vd., çalışmalarında, $Ti_{45}Ni_{49.6}Cu_{5.4}$ kompozitinin Cu-Ni ara tabaka kullanılarak difüzyon kaynağı ile birleştirilmesinde kaynak sıcaklığının ve süresinin bağlantı karakteristiği üzerine etkisi araştırılmıştır. Kompozit malzemeler ortalama 44 μm boyutlarında toz malzemelerden üretilmiştir. Homojen dağılım sağlamak için tozlar, karıştırıcıda 250 dev/dk.'da 30 dakika süreyle karıştırılmıştır. Karıştırılan tozlar 900 MPa basınçta soğuk preslenmiş, soğuk presleme sonrası numuneler 830 °C sıcaklıkta 30 dk sinterlenerek $\varnothing 10 \times 11 mm$ boyutlarında kaynak numuneleri elde edilmiştir [28].

Difüzyon kaynakları argon koruyucu gaz atmosferinde, 5 MPa'lık dinamik yükleme ile 910-940-970 °C'lik sıcaklıklarda, 40 ve 60 dk'lık sürelerde, nikel ve bakır aratabaka kullanılarak yapılmıştır. Deneyler sonucunda mikroyapı özellikleri optik mikroskop, SEM ve X-Ray analizleri ile incelenmiştir. Kaynaklı numunelere bindirme kayma ve mikrosertlik testleri uygulanmıştır. Yapılan incelemeler sonucunda homojen Ni-Ti-Cu dağılımı gözlenmiştir. Bütün birleştirmelerde, artan sıcaklığa ve süreye paralel olarak kaynağın mekanik özelliklerinin iyileştiği rapor edilmiştir.

Yılmaz, çalışmasında, paslanmaz çelik ve bakırın difüzyon kaynağında farklı metotlar kullanılarak Kirkendal etkisi ve bu etkinin kullanılmasıyla gerçek difüzyon sabitleri hesaplanmaya çalışılmıştır. Deney malzemeleri olarak, AISI 304 kalite paslanmaz çelik ve elektrolitik bakır seçilmişlerdir. Kaynak işlemleri 700, 800, 900 °C sıcaklıklarda, 0.2, 0.6, 1.2 MPa basınçlarda ve 5, 15, 30 dakika sürelerde gerçekleştirilmişlerdir. Elde edilen numunelerden metalografik incelemelerle çatlak ve yapı kontrolü, EDS analizleri ile difüzyon mesafesi ve faz tayini incelemeleri yapılmıştır. Ayrıca, bir kısım numune çekme deneyine tabi tutularak kırık yüzey incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Bu incelemeler neticesinde, farklı kaynak şartlarında gerçekleştirilen kaynaklarda gerçek difüzyon sabitlerinin oranları tespit edilmiş, kaynak şartına göre Kirkendal etkisi tespit edilmeye çalışılmıştır. 700, 800 °C sıcaklık, 5, 15 dakika ve 0.25, 0.65 MPa basınç altında birleştirilen bütün

numunelerde birleşme bölgesinde çatlaklar görülmüş ve birleşme bölgesinde yer yer boşluklara rastlanılmıştır. Bakır tarafında tane sınırlarında küçük boşluklar ve çatlaklara rastlanılmıştır. Çatlakların küçük boşlukların birleşmesiyle meydana geldiği rapor edilmiştir [5].

Atasoy, titanyum ve düşük karbonlu çelik levhaların arabağlayıcı difüzyon kaynağı yöntemi ile farklı sıcaklık ve sürelerde birleştirilerek, değişen kaynak parametrelerinin kaynak performansını nasıl etkilediğini araştırmıştır. Çalışmada; titanyum ve düşük karbonlu çelik malzemeleri difüzyon kaynağı ile birleştirebilmek için, uygun arabağlayıcı ve kaynak parametreleri seçilmesi gerektiğini belirtmiştir. En yüksek arayüzey dayanımının 850⁰C ve 90 dakika süre ile birleştirilen malzemelerde olduğu ve son olarak da EDS analiz çalışmalarında, sıcaklığın artışına bağlı olarak ara bağlayıcıdaki gümüş miktarının % ağırlık olarak belirgin şekilde azaldığını, ancak difüzyon sürenin artışına bağlı olarak çok az miktarda azaldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, çalışma sonucunda, kaynak arayüzeyinden uzaklaştıkça yayılım miktarının giderek azaldığı rapor edilmiştir [1].

Kurt, difüzyon kaynağı tekniği kullanılarak birleştirilen, Ti-6Al-4V alaşımı ile 316L paslanmaz çelik çiftinin, farklı sıcaklıklar uygulanarak birleştirilebilirliği incelenmiştir. Ti-6Al-4V alaşımı tarafında 885, 930 ve 980 °C'lerinde sırasıyla 10, 18 ve 22 µm'luk mesafede tamamen dönüşüme uğramış bir mikroyapı görülmektedir. Bu bölgenin tamamen β-Ti yapısına sahip olduğu ve bu oluşuma paslanmaz çelik tarafından yayılan Fe ve Cr elementlerinin yol açtığı düşünülüyor rapor edilmiştir [29].

Berrana vd., çalışmasında, alüminyum ve titanyumun bakır ve gümüş ara tabaka kullanılarak difüzyon kaynağı kullanılarak, 750 °C 3 MPa basınç ve 10 dk ile 60 dk sürelerle birleştirilebilirliği incelenmiştir. En iyi sertlik sonucunun 750 °C, 3 MPa ve 60 dk süre ile birleştirilen numunede gerçekleştiği rapor edilmiştir [30].

Ghosh vd., saf titanyum ve 304 paslanmaz çelik çiftlerini 3 MPa basınç altında 2 saat süre ile ve de 850, 900 ve 950 °C' de arabağlayıcı kullanmaksızın vakum altında birleştirmişler ve en yüksek mukavemetin (222 MPa) 850 °C'de yapılan

birleştirmelerde olduğunu, daha yüksek sıcaklıklarda aşırı tane büyümesi ve ara bileşik oluşunu nedeniyle mukavemetin azaldığını belirtmişlerdir [31].

Ustinov vd., çalışmasında titanyum ve alüminyum malzemelerin nano folyo ile birleştirilebilirliğinin incelenmesi araştırılmıştır. Sertlik ve çekme deneyleri uygulanarak mekanik özellikleri incelenmiştir. Çalışma sonucunda 1200 °C sıcaklık, 10 PMa basınç ve 60 dk sürede en iyi sonucu verdiği rapor edilmiştir [32].

Fukumoto vd., çalışmasında SiC ve Ti6Al4V kompozitlerinin birleştirilebilirliği incelenmiştir. Bu birleştirme için farklı sıcaklık ve basınç değerleri uygulanmıştır. Yapılan alışmalar ve mikroskopik görüntüler sonucunda, en uygun birleşmenin 850 °C, 3 MPa ve 30 dk'da gerçekleştiği rapor edilmiştir [33].

Orhan vd., bir çalışmada Ti-6Al-4V ile ferritik paslanmaz çeliğin difüzyon kaynağı ile birleştirilebilirliği incelenmiştir. Mikroyapı analizi ve mekanik testler uygulanmıştır. Sonuç olarak kaynak arayüzünde karşılıklı difüzyon etkileşimi olduğu rapor edilmiştir [34].

Kolukısa, çalışmasında martenzit (AISI 420) paslanmaz elik ile (grafit notler-sfero) dökme demirin difüzyon kaynağı ile birleştirilmesinde sıcaklığın etkisi incelenmiştir. Çeşitli sıcaklık (800, 900, 1000, 1100 °C) ve basınç değerlerinde birleştirme işlemi gerçekleşmiştir. Mikroskopik alışmalar SEM ve EDS yapılmıştır. Sertlik değerleri ölçülmüştür ve en yüksek sertliğin dökme demir tarafında olduğu belirlenmiştir. Tüm değerlendirme ve testler sonucunda en iyi rneğin 1100 °C, 20 dk ve 12 MPa olduğu rapor edilmiştir [35].

zdemir vd., çalışmalarında gri dökme demir ile nodüler dökme demirin difüzyon kaynağında, difüzyon bağı ve grafit Şekil etkisini incelemişlerdir. 900, 950 ve 1000 °C sıcaklıklarda ve 15 MPa basınç uygulanarak birleştirmeler gerçekleştirilmiştir. Mikroyapı ve sertlik ölçümleri birleştirilen malzemeler üzerine uygulanmıştır. Yüksek sıcaklıklarda birleşmenin daha iyi gerçekleştiği belirlenmiştir. Yapılan sertlik ölçümlerinde en yüksek sertlik değerinin 1000 °C ve 15 MPa değerlerinde olduğu tespit edilmiştir. Grafit yüzey alanları malzemelerin difüzyon davranışları üzerinde

etkisi gözlenmiştir. Sonuç olarak gri dökme demirden karbon çözünerek, nodüler dökme demir tarafına doğru bir karbon göçü olduğu rapor edilmiştir [36].

Jiangweii vd., çalışmalarında titanyum ve alüminyumun birleştirilmesi ve birleştirilen bölgedeki arayüzey bölgesinde mikroyapı özellikleri incelenmesi amaçlanmıştır. 640 °C, 90 dk ve 24 MPa basınç ile birleşme gerçekleşmiştir. Taramalı elektron mikroskobu (SEM), mikrosertlik ölçme ve X-Ray incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak yapılan çalışmalar neticesinde, alüminyum yüzey üzerinde $TiAl_3$ gibi intermetalik fazların olduğu rapor edilmiştir [37].

Yuan vd., çalışmalarında titanyum alaşımlı TA17 malzeme ile Cr18Ni9Ti bir östenitik paslanmaz çelik malzemenin difüzyon kaynak yöntemiyle birleştirilebilirliği incelenmiştir. 825 °C sıcaklıkta ve 5 ile 8 MPa basınç aralığında değerler uygulanarak birleştirmeler gerçekleştirilmiştir. Birleştirilen ara yüz bölgeleri elektron taramalı mikroskopu (SEM), EPMA (Electron Probe Microanalysis) ve X ışınımı kırınımı (XRD) ile incelemeler gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak titanyum bölgesinde süneklilik ve Ti intermetalik fazların olduğu rapor edilmiştir [38].

Berrana vd., çalışmalarında WC-Co malzeme ile Ti6Al4V titanyum malzemeyi gümüş ara tabaka kullanarak difüzyon kaynak yöntemiyle birleştirilebilirliği incelenmiştir. 825-850 °C'de 30, 15 dk sürelerde ve 2 MPa yük basıncı altında gerçekleştirilmiştir. Birleştirilen malzemelere, kesme, mikrosertlik ve mikroskopik incelemeler yapılmıştır. Bunun sonucunda en iyi birleşmenin 850 °C ve 30 dk'da ve 2MPa yük altında gerçekleştiği görülmüştür. Malzemelere uygulanan kayma dirençlerinde görülmüştür ki, kayma direncinin yüksek olması birleştirilen malzemelerin ara yüzeydeki intermetalik fazların varlığına bağlı olduğu rapor edilmiştir [39].

Sabetghadam vd., çalışmalarında paslanmaz çelik (410) ile bakır malzemeyi nikel folyo ara tabaka kullanılarak birleştirilebilirliği incelenmiştir. 800–950 °C aralığında, 12 MPa basınç ve 60 dk süre kullanılarak birleştirmeler gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda arayüzeyler taramalı elektron mikroskobunda (SEM), optik mikroskop, X-Ray ve elementel analiz dağılımlı spektrometre kullanılarak

incelemeler yapılmıştır. Çalışma sonucunda ara yüzlerde (Fe-Ni), (Fe-Cr-Ni) ve (Fe-Cr) kimyasal sistemleri bulunduğunu belirtmişlerdir. EPMA ve EDS analizleri sonucunda $FeNi_3$, αFe , $\sigma FeCrNi$ ve $\alpha NiCu$ arafazları oluştuğunu ve maksimum kesme direncinin 900 °C'de gerçekleştiğini ve de SS-Ni arayüzeyinde yaklaşık olarak 432 HV sertliğinde olduğunu rapor etmişlerdir [40].

Ghosh and Chatterjee, çalışmalarında saf titanyum ve 304 paslanmaz çelik çiftlerini 3 MPa basınç altında 950 °C' de 30, 60, 90 ve 120 dakika süre ile vakum altında birleştirmişler ve en yüksek mukavemetin (225 MPa) 30 dakika sürede yapılan birleştirmelerde olduğunu belirtmişlerdir. Süre 60 dakikaya çıktığında mukavemetin 183 MPa'ya düştüğünü ve de sürenin daha da artması durumunda dayanımın 129 MPa'ya düştüğünü belirtmişlerdir. Bu keskin düşüşün sebebinin de arabileşik büyümesi ve boşlukların oluşumundan kaynaklandığını rapor etmişlerdir [41].

BÖLÜM 5

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada, titanyum ve bakır malzemeler, difüzyon kaynak yöntemi ile birleştirilerek, bağlantıların mikroyapıları ile bazı mekanik özellikleri incelenmiştir. Birleştirme şartlarını belirlemek için yapılan deneylerde kullanılmak üzere 10 mm çapında saf titanyum (ASTM Grade 5) ve aynı çapta bakır temin edilmiştir. Titanyum ve bakır malzemelerin kimyasal analizi sırasıyla Çizelge 5.1 ve Çizelge 5.2’de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Titanyumun kimyasal analizi (% ağırlık).

ASTM Standardı	Dönüşüm sıcaklıkları (°C)		Alaşım elementleri (% ağırlık)		
	Alfa (α)	Beta (β)	Ti	V	Al
Grade 5	913	890	90.02	4.14	5.84

Çizelge 5.2. Bakırın kimyasal analizi (% ağırlık).

Standardı	Element	O	Cu
ASTM B49/92	Ağırlıkça (%)	0.02-0.35	99.99

Bilindiği gibi test numunelerinin çıkarılması işlemi için, uygun bir kesme tekniği kullanılmalıdır. Aksi halde yanlış seçilmiş kesme tekniği, malzemenin içyapısında değişikliklere ya da bir takım kusurlara neden olabilir. Örneğin, oksitlenmiş ile kesme metodu kullanılarak numune almada malzemenin içyapısı yüksek ısı girdisi dolayısıyla değişikliğe uğradığından, kırarak numune alma yöntemi ikizlenme ve makaslanma olayları oluştuğundan, testere ile keserek numune çıkarma ise sert malzemelerde soğuk sertleşme (pekleşme) gibi durumların söz konusu olması nedeniyle kesme işlemi laboratuvar ortamında silisyum karbür kesici disk ile ve

soğutma sıvısı kullanılarak yapılmıştır. Bu kesme yönteminde soğutma işlemi % 10 bor yağı ile sağlanmıştır. ø10 x10 mm ebatlarında 52 adet titanyum ve 52 bakır adet olmak üzere toplam 104 adet numune kesilmiştir.

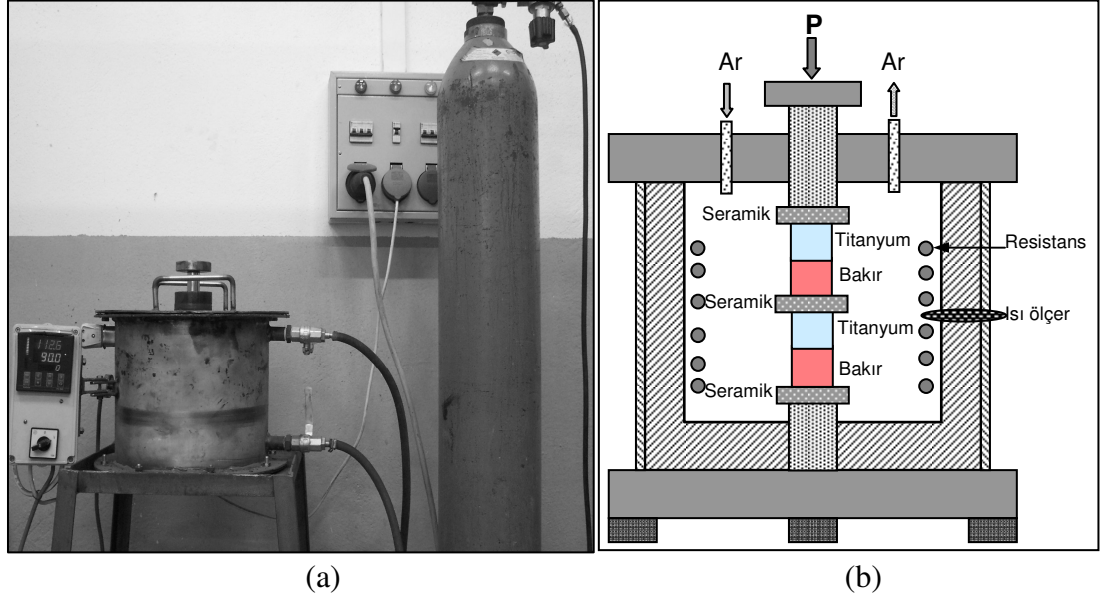
Numunelerin birleştirilecek olan yüzeylerine kademeli olarak 240, 400, 600, 800, 1000, 1200 grit silisyum karbür zımpara ile zımparalama yapılmıştır. Daha sonra saf su, aseton ve saf alkolle temizlenerek saç kurutma makinesi ile kurutulmuştur. Zımpara işlemi bittikten sonra numuneler mümkün olduğunca en kısa süre içerisinde kaynak cihazına yerleştirilmesine özen gösterilmiştir.

Kaynak parametrelerini belirlemek için değişik parametrelerde ön hazırlık deneyleri yapılmış ve elde edilen birleştirmelerin mukavemetleri değerlendirilerek deneyler sonucunda 825-890°C sıcaklık aralığı ve basınç olarak da 3 MPa seçilmiştir.

5.1 KAYNAKLARIN YAPILIŞI

Deneysel çalışmalar Şekil 5.1’de fotoğraf ve şematik görüntüsü verilen difüzyon kaynak cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Kaynak işlemleri bir defada 2 numune birleştirilecek biçimde olacak şekilde her bir parametreden iki kez gerçekleştirilmiştir. Kaynak esnasında bir malzeme çiftinin diğerine birleşmesini önlemek için iki çift arasında seramik bir malzeme kullanılmıştır.

Değişik sıcaklık ve süre kombinasyonları kullanılarak, aynı parametre seti ile her parametre değeri için 4 adet numune, difüzyon kaynağı ile birleştirilmiştir (Çizelge 5.3). Böylece tüm kaynaklar dört set halinde hazırlanmış, bir seti metalografik işlem için diğer üç set ise kesme testine tabi tutulmuştur. Deneysel çalışmalar, KBÜ Teknik Eğitim Fakültesi, Metal Eğitimi Bölümü Laboratuvarlarında bulunan difüzyon kaynak cihazı ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.1. Difüzyon kaynak setinin a) fotoğraf ve b) şematik görünümü [42].

Çizelge 5.3. Deneilerde kullanılan kaynak parametreleri.

Malzeme	Sıcaklık (°C)	Basınç (MPa)	Süre (dakika)	Kaynak ortamı
Ti-Cu	825	3	15	Argon
Ti-Cu	825		30	
Ti-Cu	825		60	
Ti-Cu	850	3	15	Argon
Ti-Cu	850		30	
Ti-Cu	850		60	
Ti-Cu	875	3	15	Argon
Ti-Cu	875		30	
Ti-Cu	875		60	
Ti-Cu	890	3	15	Argon
Ti-Cu	890		30	
Ti-Cu	890		60	
Ti-Cu	900	3	15	Argon

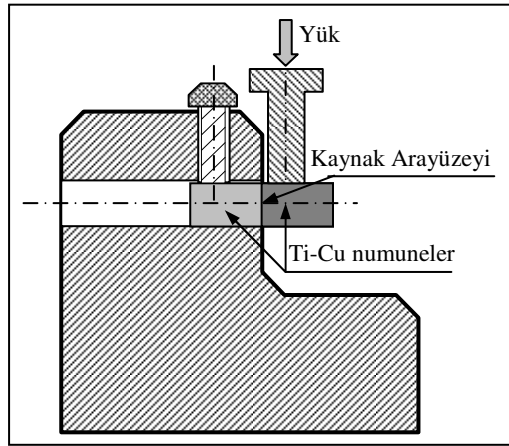
Kaynak esnasında kullanılacak parametre değerlerine göre, difüzyon kaynak cihazı dakikada 20 °C/dk ısıtma hızına programlanmıştır. Bu programlama işlemi sayesinde hassas bir şekilde ısıtma ve soğutma yapılmıştır. Kaynak esnasında istenilen değerde basınç ve koruyucu ortam sağlanmıştır. Numuneler üzerine 3 MPa'lık bir basınç uygulanmış, daha sonra başlangıçta 5 dakika kadar kaynak ortamına 1 bar argon gazı verilmiş ve daha sonra bu oran kontrol edilebilecek minimum değere indirilmiştir. Bu işlemten sonra sıcaklık istenilen değere getirilerek kontrol altında beklenmiştir.

Numuneler, istenilen sıcaklık değerlerine ulaştığında, belirli bir süre bekletildikten (15, 30 ve 60 dk.) sonra basınçta herhangi bir değişiklik yapılmaksızın sıcaklık, 20 °C/dk soğutma hızı ile oda sıcaklığına düşürülmüştür. Kaynak esnasındaki gaz koruması fırın sıcaklığı oda sıcaklığına düşene kadar devam ettirilmiştir.

Difüzyon kaynak yönteminde değişik kaynak parametrelerinin kullanıldığı deneysel çalışmalarda difüzyon sıcaklığının 825°C ve süre olarak 15 dakikanın kullanıldığı durumlarda birleşme elde edilememiştir. 900°C sıcaklık ve 15 dakikalık en düşük sürenin kullanıldığı çalışmada, kaynak sonrasında bakır malzemenin deformasyona uğradığı, bu yüzden kaynaklı numunelerin boyutlarında şişme meydana geldiği tespit edilmiştir. Bu nedenle 900°C sıcaklık değerinin fazla olduğu düşünülerek bu sıcaklıkta diğer iki sürede çalışma yapılmamıştır.

5.2 KESME TESTİ

Difüzyon kaynağı yapılmış numunelerin kesme kuvvetine karşı göstermiş olduğu direnci belirlemek amacıyla kesme testi yapılmıştır. Test numuneleri, mikroyapı numuneleri ile aynı parametrelerde hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler, yalnızca bağlantı bölgesine kesme kuvveti uygulayacak bir aparat kullanılarak teste tabi tutulmuştur. Aparat, ara bölgede her iki taraftan 1'er mm boşluk kalacak şekilde tasarlanmış, böylece basma esnasında yükün tamamen ara bölgeye odaklanması sağlanmıştır.



Şekil 5.2. Kesme testinde kullanılan kalıbın şematik görünümü.

Optimum kaynak parametrelerini belirlemek için değişik kaynak parametreleri kullanılarak difüzyonla birleştirilmiş kaynaklı numuneler, KBÜ Teknik Eğitim Fakóltesi Mobilya Dekorasyon Eğitimi Laboratuvarı'nda Fotoğrafı Şekil 5.3'de verilen SWICK/ROELL çekme-basma cihazında kesme testine tabi tutulmuşlardır. Test esnasında kesme hızı 0,5 mm/dk olarak seçilmiştir. Kesme testi her bir parametreden üç adet yapılmış ve ortalamaları değerlendirilmiştir.

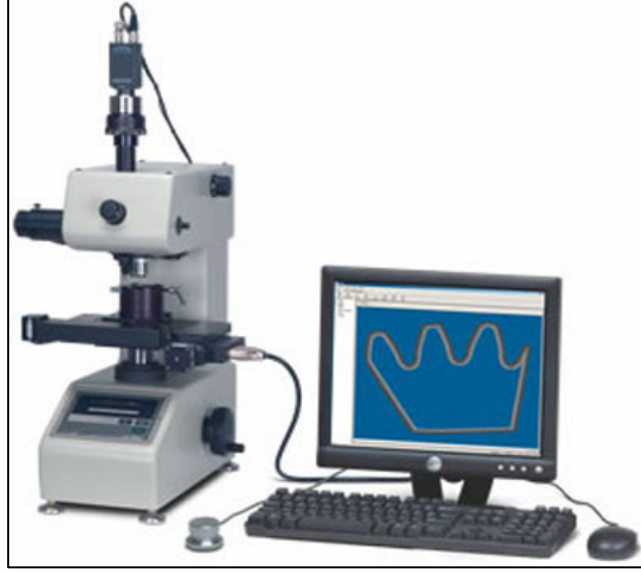


Şekil 5.3. Kesme testinin yapıldığı cihaz fotoğrafı

5.3 MİKROSERTLİK TESTİ

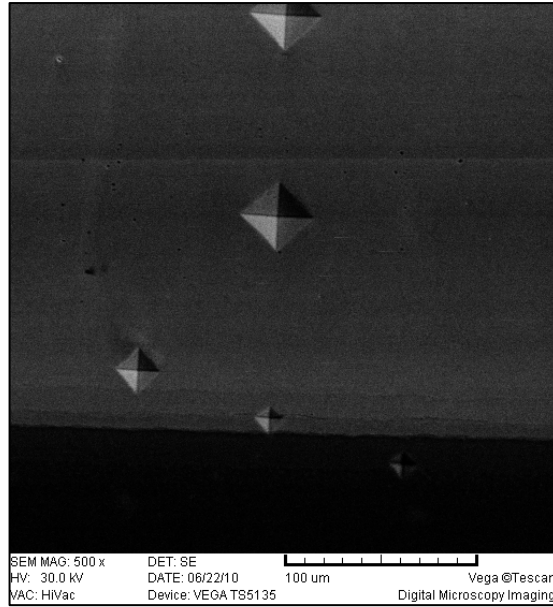
Bir malzemenin çizilmeye, kesilmeye, aşınmaya ve delinmeye karşı gösterdiği dirence sertlik denir.

Mikrosertlik testi için ayrılan kaynaklı numuneler bakalite alınmışlar ve metalografik kurallara göre hazırlanarak hazır hale getirilmişlerdir. Sertlik ölçümlerinde University of Defence in Bruno'de LECO marka AHM43 model mikrosertlik ölçülmüş ve 10 gr yük uygulanmıştır (Şekil 5.4).



Şekil 5.4. Otomatik sertlik test cihazı

Ölçüm işlemi kaynak merkezinden başlayarak her iki metale doğru farklı aralıklarla yapılmıştır. Şekil 5.5’de kaynaklı numune üzerinde yapılan mikrosertlik ölçüm izleri görülmektedir.

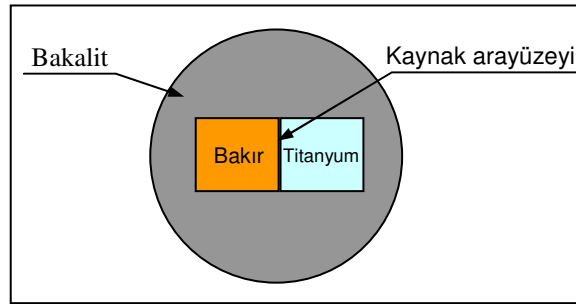


Şekil 5.5. Mikrosertlik ölçüm izleri.

5.4 METALOGRAFİK ÇALIŞMALAR

Metalografi; optik mikroskop, elektron mikroskobu ve X ışınları gibi fiziksel tekniklerle malzemelerin içyapılarının incelenmesidir. Üzerinde metalografik muayene yapılacak olan kaynak numuneleri, öncelikle laboratuvar ortamında kaynak merkezinden ikişer adet silisyum karbürü taş ile kesilmiştir. Kesilen bu iki numune Şekil 5.6’da gösterildiği gibi bakalite alınmışlardır. Bakalite alma işlemi, numuneler ufak olduklarından elle tutup parlatılmalarını kolaylaştırmak amacı ile yapılmıştır. Bakalite alınan numuneler yüzeylerinin çizilmemesi için su zımparası ile zımparalanmışlardır. Zımparalama işlemi sırasıyla olmak üzere 180, 240, 400, 600, 800, 1000 ve 1200 gritlik silisyum karbür su zımparası ile ve de her zımparalama arasında 90° çevrilerek tamamlanmıştır. Zımparalama işlemi biten numuneler malzeme yüzeyini hazırlamada son basamak olan parlatma işlemine tabi tutulmuşlardır. Parlatma işleminde amaç düzgün yüzeyli, çizik olmayan ve ayna gibi bir görünüm sağlamaktır. Parlatma işlemi, dönen bir disk üzerine yerleştirilmiş 3 µm bir keçe ile gerçekleştirilmiş ve bu keçe üzerine de 3 µm’lik elmas pasta emdirilmiştir. Parlatma işlemleri esnasında 600 dev/dk hız kullanılmış olup, her bir numune 5 dakika süreyle disk üzerinde yük uygulanmaksızın tutulmuştur.

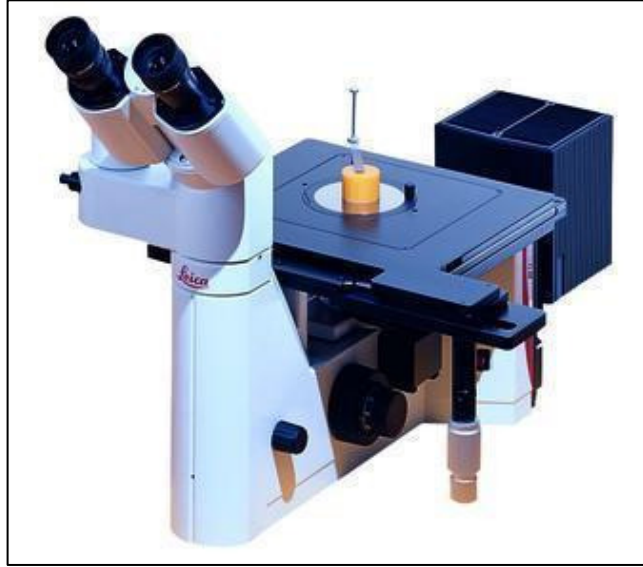
Parlatma işlemi tamamlanan numuneler mikroyapılarının görülebilmesi için dağlama işlemine tabi tutulmuşlardır. Dağlama işleminde amaç tane sınırları ve arayüzeyi daha iyi görebilmektir. Bu amaç ile bakır için kroll neagent ve titanyum için % 73 H₂O - % 16 HF - % 6 HNO₃ - % 5 HCl karışımı kimyasal dağlayıcılar hazırlanmış ve hazırlanan dağlayıcılar malzeme yüzeylerine bölgesel olarak damlatılmıştır.



Şekil 5.6. Kaynaklı numunelerin bakalite alınış şekli.

5.5. OPTİK MİKROSKOP ÇALIŞMALARI

Difüzyon kaynağı sonrasında numunelerin kaynak bölgeleri, bilgisayara görüntü aktarılabilen 50 büyütme kapasiteli LEICA model DM ILM marka ve Şekil 5.7’de görüntüsü verilen optik mikroskop ile gerçekleştirilmiştir. Çalışmalar, birleşme arayüzeyi merkezinden ve arayüzeyden farklı aralıklarla gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.7. Optik mikroskop

5.6. TARAMALI ELEKTRON MİKROSKOBU İNCELENMESİ

SEM çalışmaları, University of Defence in Bruno ve TÜBİTAK Araştırma Merkezinde (MAM), JEOL JSM 6335F marka taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile gerçekleştirilmiştir. Görüntülerin, birleştirilmiş numunelerin ve arayüzeylerinin karakteristik özelliklerini tam olarak yansıtan bölgeden yapılmasına özen gösterilmiştir.

Gerek optik mikroskop gerekse taramalı elektron mikroskop çalışmalarında, tane ebadı ve reaksiyon (difüzyon) bölgesi genişliğinin belirlenmesinde orijinal skala dikkate alınarak değerlendirilmiştir.

EDS çalışmaları, birleşme ara yüzeyi merkezinden ve ara yüzeyden her iki yönde olmak üzere farklı aralıklarla yapılmıştır. Kaynaklı numunelerin tümü üzerinden alan analizleri gerçekleştirilmiş ve difüzyon miktar ve mesafeleri ölçülmeye çalışılmıştır. Ayrıca, seçilen üç örnek numune üzerinde difüzyon bölgesinde çizgisel analiz yapılmış ve bu numunelerin, her bir element için difüzyon haritaları çıkarılmıştır. EDS analiz sonucu elde edilen veriler incelenerek, ilgili faz diyagramları kullanılarak kıyaslanmış ve arayüzeyde oluşan fazların elementer içerikleri ile intermetalikler tespit edilmeye çalışılmıştır.

5.7. X-RAY ANALİZ ÇALIŞMASI

X Ray çalışmaları ile farklı parametrelerde difüzyon kaynağı ile birleştirilen numuneler üzerinde, birleşme arayüzeyindeki faz yapılarının dağılımı belirlenmeye çalışılmıştır. Bu sonuçlar kullanılarak, kaynak bölgesinde oluşan muhtemel intermetalik fazlar, literatürde verilen faz diyagramları yardımıyla kıyaslanması amaçlanmıştır. X-Ray analizleri PANALYDICAL-X'PERT PRO marka cihaz ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.8'de analiz işlemlerinde kullanılan cihazın resmi verilmiştir.



Şekil 5.8. X-Ray analiz cihazı.

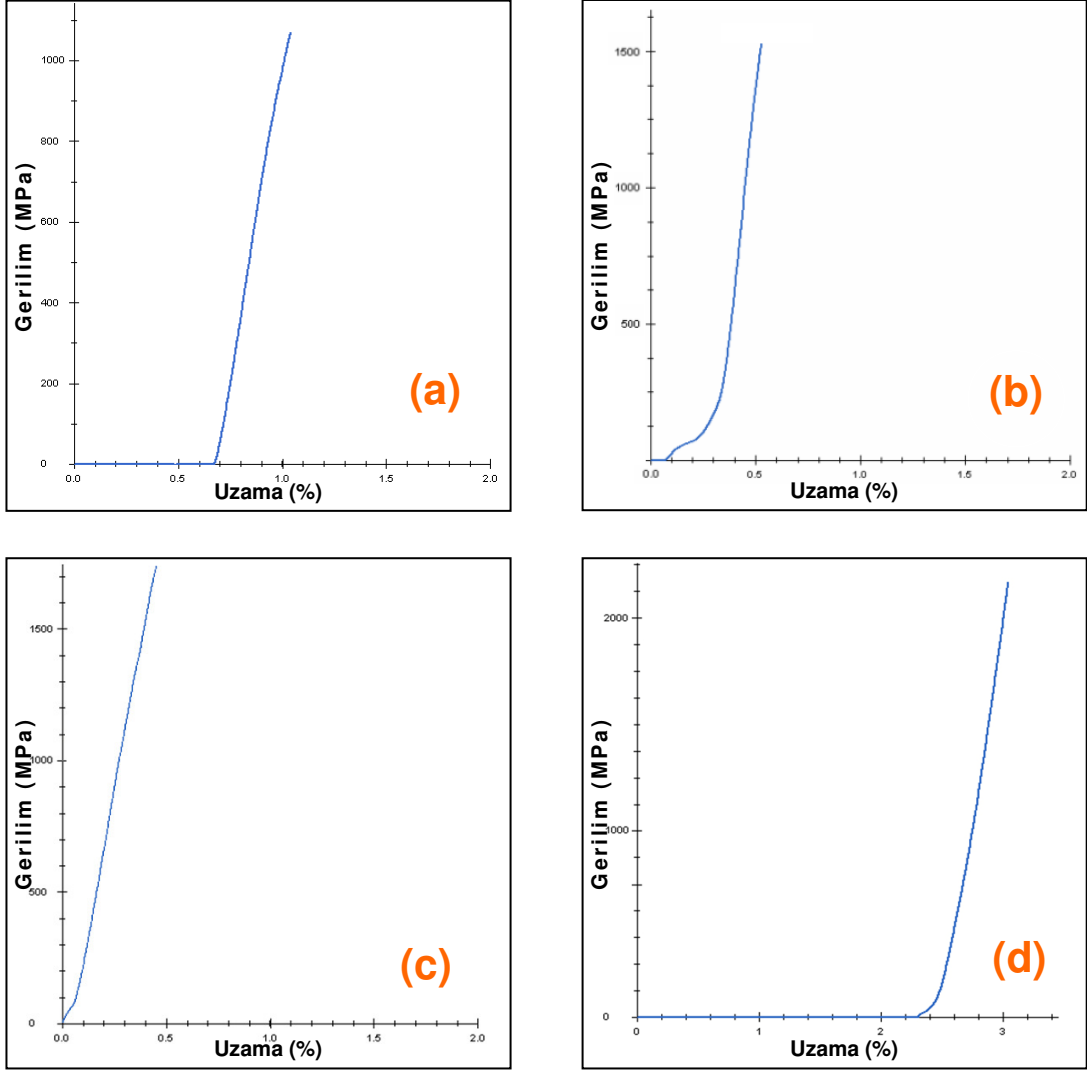
BÖLÜM 6

SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Difüzyon kaynağı ile değişik süre ve sıcaklıklarda gerçekleştirilen kaynak işlemleri sonucu 15 dakika süre ile 825 °C'de kaynak işlemine tabi tutulan numunede birleşme gerçekleşmezken, diğer bütün şartlar için olumlu sonuçlar alınmıştır. 825 °C'de 15 dakika süre ile kaynak yapılan numunede birleşmenin olmamasına sebep olarak hem sıcaklığın düşük olması hem de sürenin az olması gösterilebilir. Nitekim süre 30 dakikaya çıkarıldığında veya süre sabit tutulup sıcaklık 850 °C'ye çıkarıldığında kaynak işlemi gerçekleşmektedir. 900 °C'de 15 dakika süre ile birleştirilen numunede tam bir birleşme gerçekleşmiş ancak, yüksek sıcaklıktan dolayı bakır malzeme deformasyona, dolayısıyla da şekil değişimine uğramıştır. Bu yüzden bu sıcaklıkta yapılan deney, çalışma dışı bırakılmıştır. Bilindiği gibi bu kaynak yönteminde atomların yayınabilmesi için yeterli sıcaklık, süre ve basınca ihtiyaç vardır. Difüzyon zaman gerektirir. Üniform bir yapı oluşturmak için çok sayıda atomun difüze etmesi gerekiyorsa, yüksek sıcaklıklarda bile uzun zaman gerekebilir. İşlem zamanı, yüksek sıcaklıklar kullanılarak veya difüzyon mesafesi mümkün olduğu kadar kısaltılarak azaltılabilir [43].

6.1 KESME TESTİ

Titanyum ve bakır malzemelerin difüzyon kaynağı ile farklı parametrelerde birleştirildiği bu çalışma sonucunda, kaynaklı birleştirmelere çekme-basma test cihazında, basma yönünde kesme testi uygulanmış ve test esnasında arayüzey dayanımlarının grafikleri otomatik olarak çizilmiştir. Her bir numune için basma yapılan üç numunenin ortalamaları alınarak grafik üzerine aktarılmıştır. Şekil 6.1'de örnek olması açısından 30 dakika süre ile değişik sıcaklıklarda (825 °C, 850 °C, 875 °C ve 890 °C) elde edilmiş bağlantıların kesme dayanımı grafikleri verilmiştir.



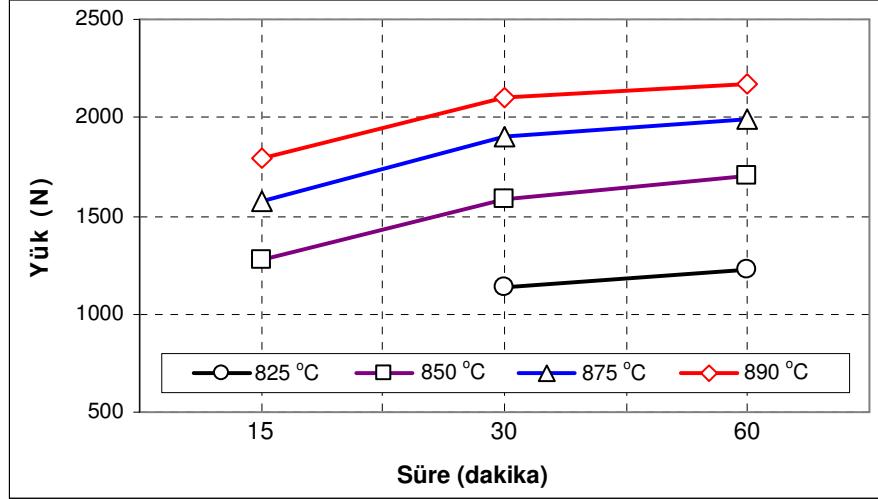
Şekil 6.1. 30 dakika süre ile birleştirilmiş numunelerin kesme dayanımı test grafikleri a) 825 °C b) 850 °C, c) 875 °C ve d) 890 °C.

Kesme deneyleri sonunda, tüm birleştirmelerde kopmanın arayüzeyde meydana geldiği, ancak titanyum malzeme yüzeyinde bir miktar bakırın kaldığı gözlenmiştir. Bilindiği gibi bakır malzemenin sünekliği titanyum malzemedenden daha yüksektir. Bu yüzden bir miktar bakırın titanyumun yüzeyinde kalması beklenen bir sonuçtur.

Kırık yüzeyler üzerinde gözle yapılan muayenede titanyum yüzeyinde kalan bakır miktarları incelendiğinde, kaynak esnasında uygulanan ısı girdisinin ve sürenin artmasına bağlı olarak arttığı dikkat çekmiştir.

Difüzyon kaynağı ile dört farklı sıcaklık (825, 850, 875 ve 890 °C) ve üç farklı sürenin (15, 30 ve 60 dakika) kullanılarak birleştirildiği ve kesme testleri sonucundan

elde edilen veriler kullanılarak oluşturulan grafik, parametreler arasındaki kıyaslamayı daha kolay anlaşılabilir hale getirmek için Şekil 6.2’de verilmiştir.



Şekil 6.2. Kesme dayanımı sonuçları.

Şekil 6.2. incelendiğinde, 825 °C ve 15 dakika sürede, kaynak işleminin gerçekleşmediği görülmektedir. Bu sıcaklıkta birleşme işleminin gerçekleşmemesinin sebebi, uygulanan basınca göre sıcaklığın düşük oluşudur. Çünkü sıcaklık malzemenin akma gerilmesini azaltarak ilk plastik deformasyonu sağlar. Yüzey pürüzlerini gidererek gerçek temas alanını elde etme zamanını kısaltır. Ayrıca sürünme ile şekil değiştirme oranını artırır [44]. Yüzeylerde yeterli deformasyonun gerçekleşmemesi nedeni ile yeterli yüzey teması sağlanamamış ve bu da ara yüzeyde zayıf bir bağ oluşumuna neden olmuş ve kaynak sonrası numune yaklaşık 2 m yükseklikten sert bir zemine serbest bırakıldığında numuneler arayüzeyden ayrılmıştır. Bu serbest düşürme testi bütün numunelere birkaç kez uygulanmış ve birleşmelerin güvenli olduğu sonucuna varılmıştır.

Şekil 6.2. incelendiğinde kaynak esnasında kullanılan farklı deney parametrelerinin kesme test sonuçlarını etkilediği açıkça görülmektedir. Burada en yüksek kesme mukavemetinin en yüksek sıcaklık (890 °C) ve sürenin (60 dakika) uygulandığı kaynaklı numunelerden ölçüldüğü görülmektedir. Grafik detaylı bir şekilde incelendiğinde, 825 °C’de 3 MPa basınç altında 30 dakika sürede, kesme dayanımı 1140 N iken, bu değer sürenin 60 dakikaya yükseltilmesiyle 1223 N’a yükselmiştir.

Benzer biçimde bu çalışmada kullanılan en yüksek sıcaklıkta (890 °C) 15 dakika süre ile birleştirilen numunede kesme dayanımı 1791 N iken süre iki katına çıkarıldığında kesme dayanımı 2098 N'a yükselmiştir. Süre iki kat daha arttırıldığında kesme dayanımı daha da artmış ve 2171 N olarak ölçülmüştür.

Şekil 6.2. süre açısından genel olarak değerlendirildiğinde, difüzyon kaynağı sonrasında kesme deneyinden elde edilen sonuçlara göre difüzyon kaynağında uygulanan süre arttığında, kesme mukavemetinde artış olduğu gözlemlenmiştir. Bunun nedeni olarak süre uzadığında difüzyonun daha iyi bir şekilde gerçekleşmesidir.

Difüzyon kaynağında süre; bağımlı bir işlem parametresi olup, sıcaklık, basınç ve birleştirme türü ile ilişkilidir. Bu kaynak yönteminde sürenin üst değeri uygulayıcıya bırakılmıştır. Ancak, kaynak süresinin uzun olması kaynak ekonomisi açısından bir dezavantaj oluştururken, boşlukların oluşumunu, bileşimin değişimini ve kırılma intermetalik bileşiklerin oluşumunu teşvik etmesi gibi bağlantının mekanik özelliklerini bozan olumsuzluklara da neden olabilir [42]. Bu çalışmada literatür bilgileri dikkate alınmış ve sürenin gereğinden fazla uzatılmasının meydana getireceği olumsuz etkiler azaltılmaya çalışılmıştır.

Şekil 6.2. sıcaklık olarak değerlendirilecek olursa; artan sıcaklıkla birlikte kesme mukavemetinin arttığı açıkça söylenebilir. 850 °C ve 15 dakika süre ile birleştiriliş numuneden ölçülen kesme mukavemeti 1273 N iken, bu değer sıcaklık 875 °C'ye yükseltildiğinde 1578 N'a, 890 °C'de ise 1791 N'a yükselmiştir. Benzer biçimde 30 ve 60 dakikalık sürelerde elde edilen kesme mukavemetlerinin de sıcaklığın artışına bağlı olarak arttığı grafikte açıkça görülebilir. Ancak, grafikteki sıcaklık artış aralıklarına göre kesme dayanımı artış hızları incelendiğinde, artan sıcaklığa bağlı olarak kesme dayanımındaki artış hızının azaldığı söylenebilir.

Bir malzemenin sıcaklığı arttığı zaman, difüzyon katsayısı ve atomların akısı da artar. (Akı; her birim zamanda bir birim alan düzleminden geçen atomların sayısıdır). Yüksek sıcaklıklarda atomların difüzyonu için sağlanan enerji, atomların aktivasyon

enerji engelini aşması ve daha kolaylıkla yeni kafes yerlerine hareket etmesini sağlar [43].

Bütün bunların yanında, difüzyon kaynak yöntemi ile birleştirilen malzemelerin ergime sıcaklıkları farklarının yüksek olmasının, birleşme performansını olumsuz yönde etkileyeceği bir gerçektir. Çünkü kaynak esnasında kullanılan kaynak parametrelerinin seçimi, ergime sıcaklığı düşük olan malzeme göz önünde bulundurularak yapılmaktadır. Bu durumda titanyum ve bakır malzemeler arasındaki fiziksel özelliklerden ergime sıcaklığı farkının belirgin bir şekilde yüksek olması (yaklaşık 650 °C) birleşme arayüzey mukavemetini önemli derecede etkilemektedir.

Mahendran vd., magnezyum ve bakır malzemeleri difüzyon kaynak yöntemi ile birleştirmişler ve yaklaşık 400 °C ergime sıcaklığı farkının kaynak mikroyapısını ve performansını etkilediğini belirtmiştir [45].

Alimünyum metal köpüklerinin difüzyon kaynağı davranışının incelenmesi üzerine yapılan bir çalışmada, sabit sıcaklık ve farklı sürelerde difüzyon kaynağı yapılan alimünyum köpük çiftlerinin kesme kuvvetlerine karşı göstermiş oldukları dirençleri belirlemek amacıyla testler yapılmıştır. Alimünyum köpük parçaların, artan birleşme sürelerine paralel olarak, kesme kuvvetlerine karşı gösterdikleri dayanımda bir artış olmuştur. Kesme dayanımında görülen bu artışın nedeni, artan deney sürelerinde birleşmenin daha iyi olması ve birleşen ara tabakanın birleşme çizgisi boyunca homojen dağılımı olduğunu belirtmişlerdir [46].

Bir başka çalışmada Alüminyum-silisyumnitrür kompozit malzemenin difüzyon kaynağı ile birleştirilebilirliğini araştırmış, kesme deneyinde elde edilen sonuçlara göre difüzyon kaynağında uygulanan süre arttığında kesme kuvvetinde artış olduğu gözlenmiştir. Bunun nedeni olarak süre uzadığında difüzyonun daha iyi bir şekilde gerçekleşmesi olduğu ve aynı zamanda Si₃N₄ miktarı arttıkça kesme mukavemetinde artış olduğu belirtilmiştir [47].

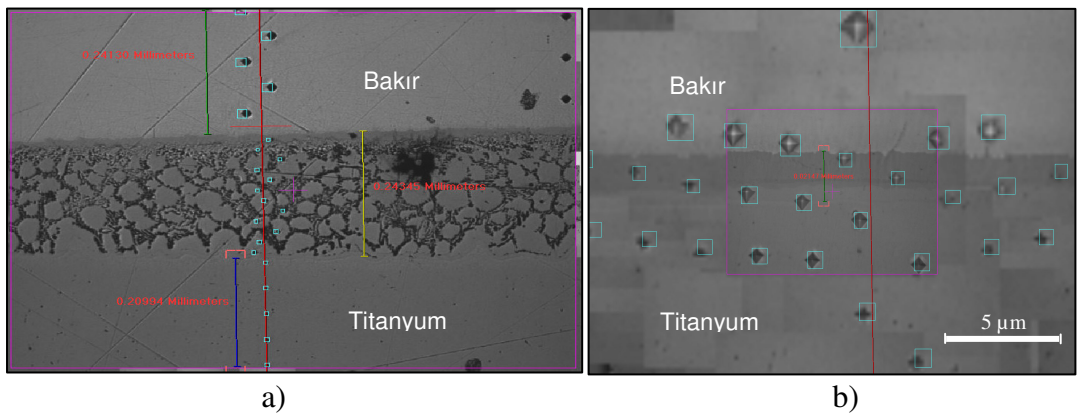
Benzer çalışmada Kurt ve Somunkıran, farklı metalik malzemeleri değişik difüzyon sıcaklıklarında birleştirmişler ve artan difüzyon sıcaklığı ile kesme dayanımının arttığını belirtmişlerdir [48].

Arık vd., alüminyum ve Al_4C_3 kompozit malzemeyi değişik sıcaklık ve sürelerde difüzyon kaynak yöntemi ile birleştirmişler ve kaynak arayüzey dayanımını kesme testi ile belirlemeye çalışmışlardır. Çalışmaları sonucunda, kaynak esnasında kullanılan sıcaklık ve sürenin artmasına bağlı olarak kesme dayanımında artış olduğunu belirtilmişlerdir [49].

Diğer bir çalışmada Çetin, ferritik ve perlitik dökme demir numuneleri difüzyon kaynak yöntemi ile farklı kaynak parametrelerinde birleştirmiş ve kesme testi sonucunda artan süre ve sıcaklıkla kesme dayanımının da arttığını rapor etmiştir [50].

6.2 MİKROSERTLİK TESTİ

Mikrosertlik ölçümleri, birleşme bölgesinin her iki tarafından ve farklı aralıklarla yapılmıştır. Mikrosertlik ölçümleri 825 °C’de 30 ve 60 dakika süre ile birleştirilmiş numunelerden, diğer üç sıcaklıkta da (850 °C, 875 °C ve 890 °C) sadece 15 dakika ve 60 dakika süre ile birleştirilmiş kaynaklı numunelerden yapılarak, hem sürenin hem de sıcaklığın etkileri belirlenmeye çalışılmıştır. Farklı kaynak parametrelerinin (sıcaklık ve süre) kullanılarak yapılan birleştirmelerden elde edilen sertlik test ölçümlerinin nasıl ve hangi kriterlere göre yapıldığı ve de elde edilen sertlik izleri Şekil 6.3’de gösterilmiştir.

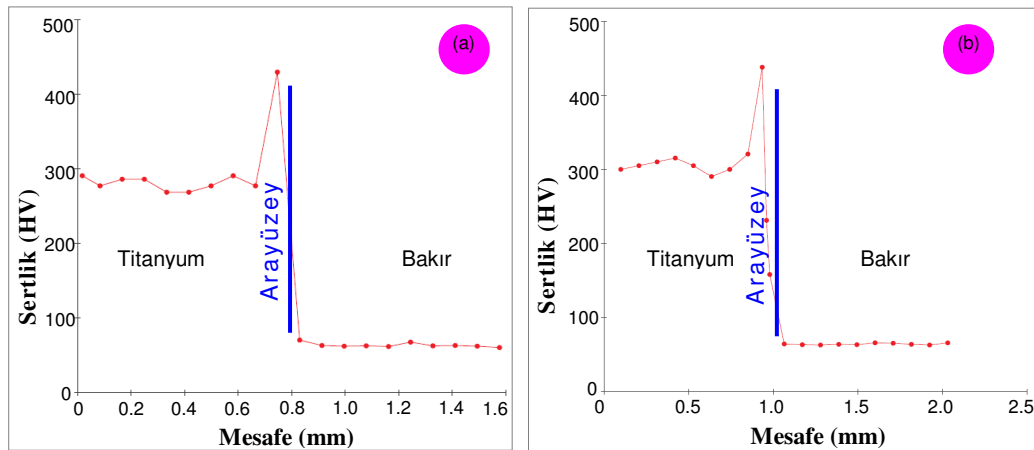


Şekil 6.3. (a) ve (b) mikrosertlik ölçüm yapılan bölgeler ve elde edilen sertlik izleri.

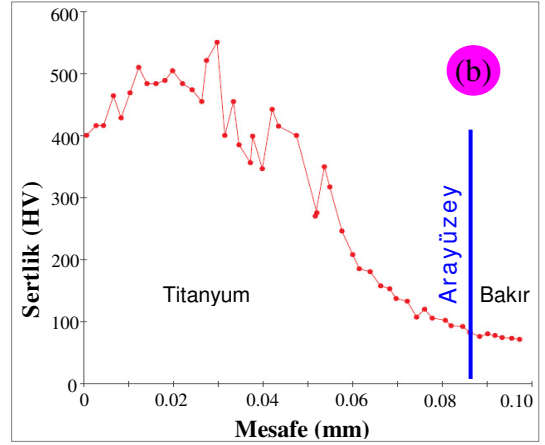
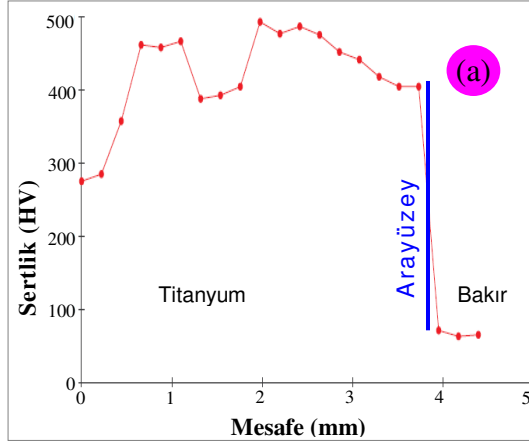
Elde edilen sonuçlardan faydalanarak her kaynaklı bağlantıya ait mikrosertlik eğrileri belirlenmiştir. Mikrosertlik profilleri, difüzyon kaynak yöntemi ile birleştirilmiş numunelerin bağlantı bölgesinden, karşılıklı olarak çizgisel bir hat üzerinde, ara bölgedeki konsantrasyon farkının, malzemenin sertliğine etkisi ve ara yüzeyde oluşması muhtemel fazları belirlemek amacıyla alınmıştır.

Şekil 6.3 incelendiğinde, bakır malzemedan (üstte) elde edilen sertlik izlerinin, titanyum malzemedan (altta) elde edilen izlerden daha büyük olduğu görülmektedir. Resim üzerinde 0.24345 mm'lik konsantrasyon farkının olduğu ara bölgede elde edilen iz büyüklüklerinin ise izin vurulduğu yerin yapısına bağlı olarak farklılıklar gösterdiği gözlenmiştir.

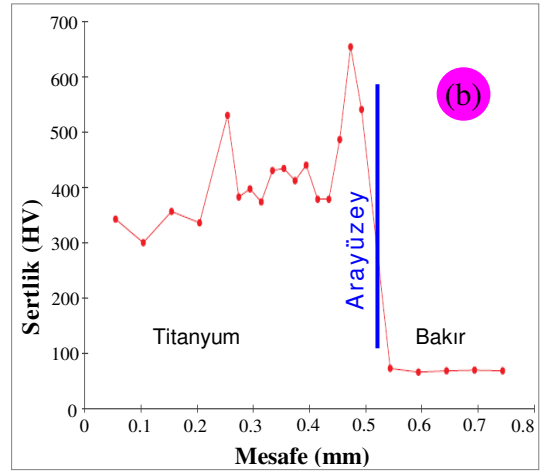
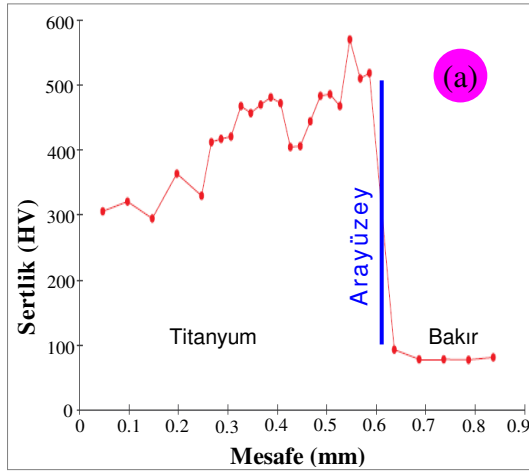
Şekil 6.4 ve Şekil 6.7 aralığında difüzyon kaynak yöntemi ile farklı sıcaklık ve sürelerde birleştirilmiş titanyum ve bakır malzemelere ait sertlik grafikleri verilmiştir. Sertlik ölçme cihazından elde edilen sertlik değerleri direkt olarak bilgisayara aktarma yapabilen bir sistem vasıtasıyla ekrana aktarılmış ve grafikler otomatik olarak çizilmiştir. Böylece, sertlik ölçme esnasında kişiye bağlı olarak meydana gelebilecek hatalar azaltılarak, elde edilen sonuçların doğruluk payı artırılmıştır.



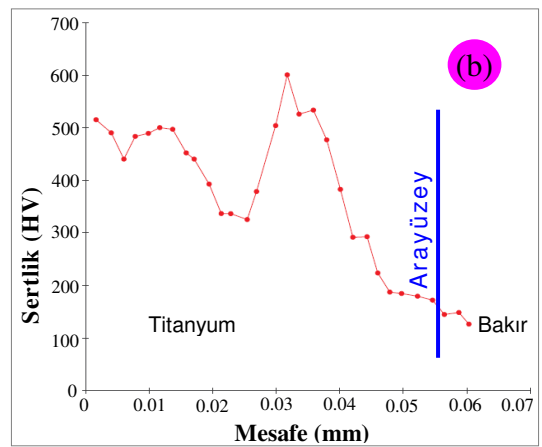
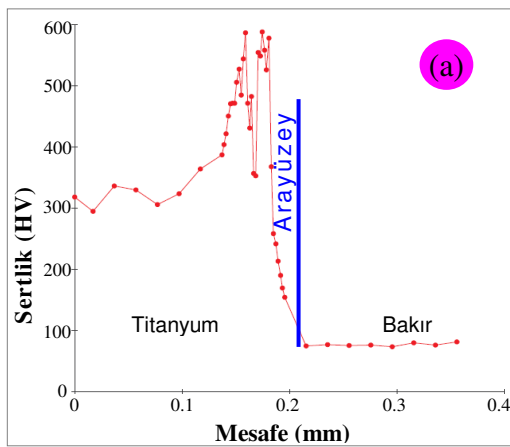
Şekil 6.4. 825 °C'de a) 30 ve b) 60 dakika süre ile birleştirilen numunelerin sertlik değerleri.



Şekil 6.5. 850 °C'de a) 15 ve b) 60 dakika süre ile birleştirilen numunelerin sertlik değerleri.



Şekil 6.6. 875 °C'de a) 15 ve b) 60 dakika süre ile birleştirilen numunelerin sertlik değerleri.



Şekil 6.7. 890 °C'de a) 15 ve b) 60 dakika süre ile birleştirilen numunelerin sertlik değerleri.

Bütün sıcaklık ve bekletme sürelerinde yapılmış olunan kaynaklı bağlantıların sertlik profilleri incelendiğinde; temelde tüm birleştirmelerin benzer özellikler gösterdikleri gözlenmiştir. Birleştirmenin bakır tarafından birbirine yakın değerlerde ölçülen düşük sertlik değerleri, arayüze gelindiğinde yükselişe geçmekte ve arayüzeyde tavan yapmaktadır. Sertlik değerleri arayüzeydeki faz bölgesi geçilip saf titanyuma gelindiğinde ise tekrar düşüş göstermektedir. Titanyum-bakır arayüzey bölgesinde elde edilen sertlik değerleri diğer bölgelerle karşılaştırıldığında daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu sonuç, bütün numunelerde Cu ve Ti'nin bir biri içerisinde yüksek yayılabileme özelliklerinin sonucu olarak oluşan CuTi intermetalik bileşiklerinin varlığını doğrulamaktadır. Yapılan literatür araştırmaları sonucunda kaynak bölgesinde $\beta\text{Cu}_4\text{Ti}$, Cu_2Ti , Cu_3Ti_2 ve CuTi_3 intermetalik fazların bulunabileceği tespit edilmiştir [51].

Yıldırım ve Keleştemur, Ni_3Al ile AISI 304 ostenitik paslanmaz çelik malzemeleri farklı sıcaklıklarda katı hal kaynağı ile birleştirmişler ve sertlik ölçümleri sonucunda en yüksek sertliğin ara yüzeyde olduğunu ve ara yüzeyden uzaklaştıkça sertliğin azaldığını rapor etmişlerdir [52].

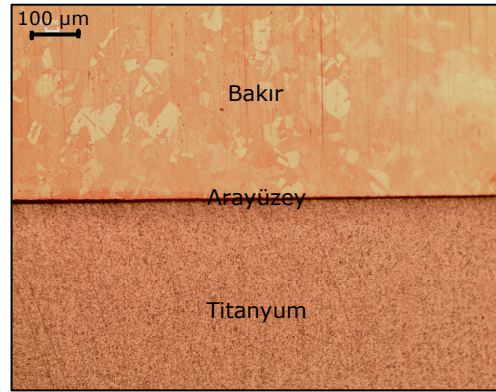
Dikbaş, toz metalürjisiyle üretilmiş Ti ve Ni alaşımlarının difüzyon kaynak yöntemi ile birleştirmiş ve sertlik ölçümleri sonunda artan sıcaklık ile beraber sertliğin bir noktaya kadar arttığı daha sonra sıcaklık artışıyla sertlik değerlerinde belirgin bir azalma olduğunu tespit etmiştir [14].

6.3. OPTİK MİKROSKOP ÇALIŞMALARI

Optik mikroskop ile mikroyapı çalışmalarında amaç, difüzyon kaynağı yapılmış numunelerde oluşabilecek fazların yapı ve dağılımları ile arayüzeyde oluşabilecek boşluklarının durumunu incelemektir.

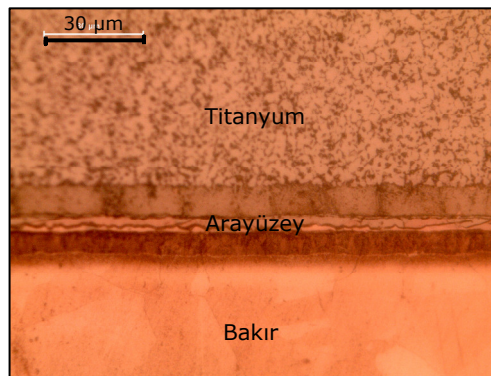
Şekil 6.8'de 825 °C'de 30 dakika süre ile birleştirilmiş numunenin mikroyapı görüntüsü verilmiştir. Fotoğrafa bakıldığında birleşme işleminin olumlu gerçekleştiği ve kaynak arayüzeyinde çizgi halinde ince bir oksit filminin olduğu (koyu renkli kısım) görülmektedir. Daha önce belirtildiği gibi bu çalışma dâhilinde en düşük

parametre ile birleştirilmiş numune bu numunedir. Bu yüzden kaynak arayüzeyinde hapsolmuş olan oksit tabakası gerek sürenin artması, gerek sıcaklığın yükseltilmesiyle parçalanmakta ve farklı malzemelerin adhezyon kuvvetlerinden dolayı arayüzey bağ dayanımı arttırılabilmektedir. Malzeme yüzeyleri arasında birleşmenin sağlanması, yani farklı malzemelerde adhezyon ve benzer (aynı) malzemelerde kohezyon kuvvetlerinin teşekkülü için, malzeme yüzeylerinin atomlar arası bağın oluşabileceği yakınlıkta temasını sağlamak gerekir [16].



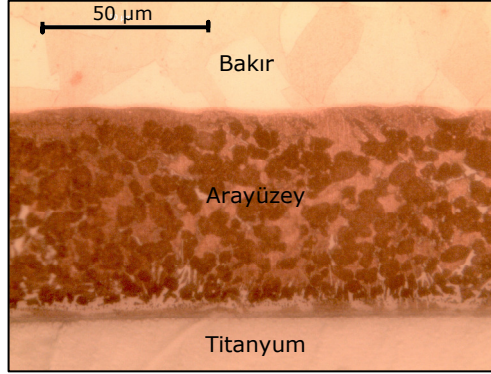
Şekil 6.8. 825 °C’de 30 dakika süre ile birleştirilmiş numunenin optik mikroskop görüntüsü.

Şekil 6.9’da 850 °C’de 30 dakika süre ile birleştirilmiş numunenin mikroyapı görüntüsü verilmiştir. Bu sıcaklıklarda elde edilen mikroyapıların 825 °C’de elde edilen mikroyapılardan farklı olduğu, titanyum ve bakırda arayüzeyinde yaklaşık 30 μm ebatlarında üç farklı faz bölgesinin oluştuğu görülmektedir. Ayrıca birleşmenin bakır tarafındaki tanelerin yaklaşık olarak 20-30 μm civarında olduğu gözlenmektedir.



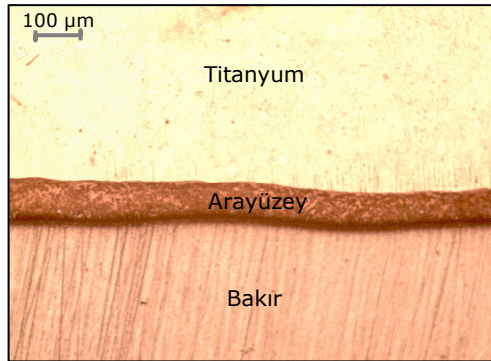
Şekil 6.9. 850 °C’de 30 dakika süre ile birleştirilmiş numunenin optik mikroskop görüntüsü.

Şekil 6.10'da 875 °C'de 30 dakika süre ile birleştirilmiş numunenin mikroyapı görüntüsü verilmiştir. Görüntü incelendiğinde, sıcaklığın artışına bağlı olarak birleşmenin bakır tarafında tane irileşmesi daha belirgin hale gelmiş ve yaklaşık olarak 30-40 µm civarında olduğu tespit edilmiştir. Benzer biçimde birleşme arayüzeyinde meydana gelen faz bölgesi daha da artmış ve yaklaşık olarak 50-55 µm civarına ulaşmıştır.



Şekil 6.10. 875 °C'de 30 dakika süre ile birleştirilmiş numunenin optik mikroskop görüntüsü.

Şekil 6.11'de 890 °C'de 30 dakika süre ile birleştirilmiş numunenin optik mikroskop görüntüsü verilmiştir. Fotoğraf incelendiğinde, sıcaklığın artışına bağlı olarak birleşme arayüzeyinde meydana gelen faz bölgesinin genişlediği ve yaklaşık olarak 75-100 µm'ye yükseldiği açıkça görülmektedir.



Şekil 6.11. 890 °C'de 30 dakika süre ile birleştirilmiş numunenin optik mikroskop görüntüsü.

Mikroyapıların tümü (Şekil 6.8-6.11) genel olarak değerlendirildiğinde kaynak sıcaklık ve birleştirme süresinin artmasına bağlı olarak tane boyutu bakır malzemede daha belirgin olmak üzere değiştiği tespit edilmiştir. Kaynaklı malzemelerdeki tane büyümesine sebep olarak, malzemelerin yeniden kristalleşmesi ve büyük tanelerin küçük taneleri yutması gösterilebilir. Malzemelerin yeniden kristalleşmeden sonra tane irileşmesine yönelmesi, tane sınırı enerjileriyle ilgilidir. Daha düşük enerji seviyesine geçmek için, malzeme birim hacimdeki toplam tane sınırını düşürmek istemekte ve bu sonuç da tanelerin büyümesini gerektirmektedir. Ancak endüstriyel malzemelerde tane irileşmesinin istenmediği de malzeme bilgisi ile ilgilenen herkes tarafından bilinmektedir. Yapılan literatür araştırmaları da bu sonucu doğrulamaktadır [43].

Katı hal kaynak yöntemlerinde ve özellikle de çalışmanın yapıldığı difüzyon kaynak yönteminde, ergitmeli kaynak yöntemlerinde var olan ITAB'ın olmamasından dolayı kaynaklı numunelerin hemen her yerinde eş eksenel bir tane yapısının olduğu tespit edilmiştir.

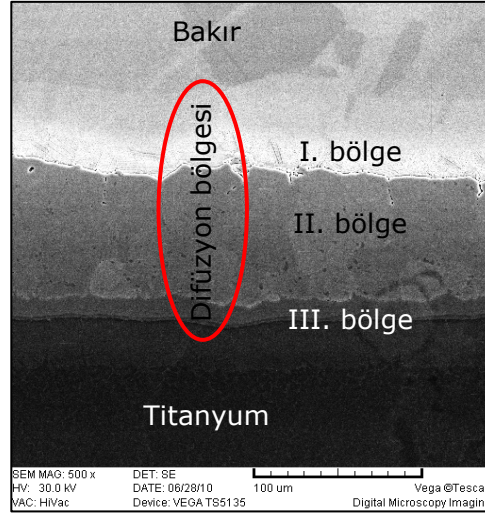
6.4. TARAMALI ELEKTRON MİKROSKOBU (SEM) ÇALIŞMALARI

6.4.1. Mikroyapı İncelemesi

SEM'de mikroyapı çalışmaları, difüzyon kaynağı ile birleştirilmiş titanyum ve bakır malzeme birleşme bölgelerinde oluşabilecek fazların yapı ve dağılımları, yüzeyde oluşabilecek ara yüzey boşluklarının durumunun incelenmesi amacıyla gerçekleştirilmiştir. Ayrıca kaynak bölgesinde meydana gelen farklı faz bölgeleri değerlendirilmiştir. Mikroyapı incelemeleri sonucunda farklı kaynak şartlarındaki (sıcaklık ve süre) kaynaklı numunelerde birleşme bölgesinin farklı kalınlıklarda olduğu gözlenmiştir. Bu kalınlık farklılığında, yüzey düzgünlüğünün tam sağlanamaması ve yüzeylerin birbirine tam alın alına oturtulamaması, yüzey pürüzlülüğü, numunelerin cihaza yerleştirilmesi esnasında geçen süre farklılığının da etkisinin olabileceği düşünülmüştür. Taramalı elektron ile mikroyapı çalışmaları en düşük (15 dakika) ve en yüksek (60 dakika) parametrelerde birleştirilmiş

numunelerden gerçekleştirilerek kaynak süresi ve sıcaklığının etkileri belirlenmeye çalışılmıştır.

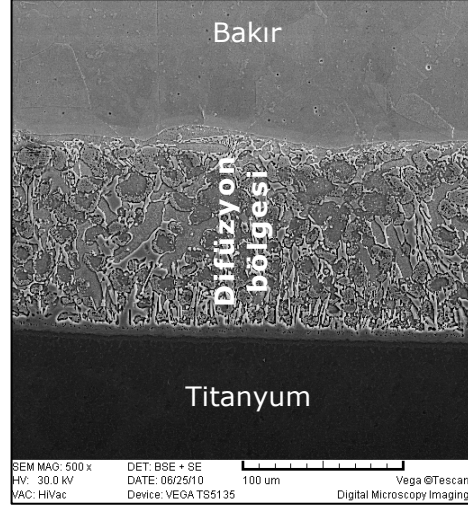
Şekil 6.12’de 825 °C’de 60 dakika sürede birleştirilmiş numunenin SEM mikroyapı görüntüsü verilmiştir. Üngörenin benzer çalışmasında değişik parametreler ile elde edilen tüm kaynaklar üzerinde yapılan SEM incelemelerinde, birleşme ara yüzeyinde kırılğan α_2 (Ti_3Al) fazının oluşumundan dolayı, belirgin bir birleşme çizgisi mevcut olduğu görülmüştür [26]. Fakat genel olarak herhangi bir kaynak hatası (boşluk, gözenek vb) tespit edilmemiştir.



Şekil 6.12. 825 °C’de 60 dakika süre ile birleştirilmiş numunenin SEM görüntüsü.

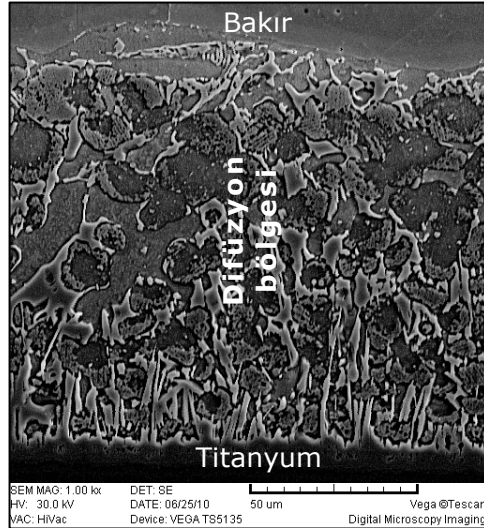
Şekil 6.12’de kaynak bölgesi incelendiğinde, arayüzeyde üç farklı bölgenin oluştuğu ve bu bölgenin 100 μm ’den daha fazla olduğu dikkat çekmektedir. Burada, I. bölgenin bakırca zengin difüzyon bölgesini, III. bölge ise titanyumca zengin difüzyon bölgesini gösterdiği düşünülmektedir.

Şekil 6.13’da 850 °C’de 15 dakikada süre ile birleştirilmiş numunenin mikroyapı görüntüsü görülmektedir. Fotoğraf incelendiğinde 100 μm ’den daha fazla bir difüzyon bölgesinin oluştuğu görülmektedir.



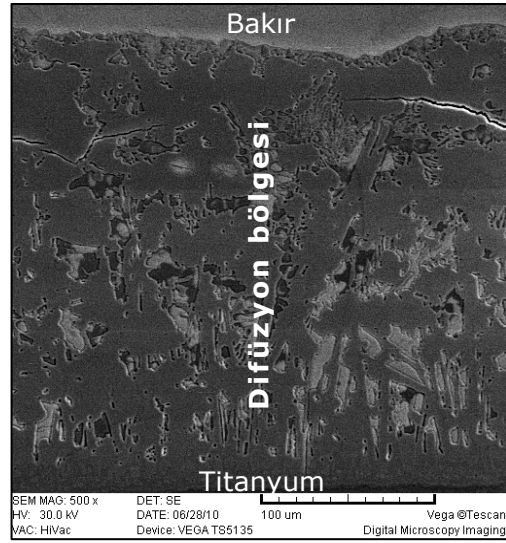
Şekil 6.13. 850 °C’de 15 dakika süre ile birleştirilmiş numunenin SEM görüntüsü.

Şekil 6.14’de 850 °C’de ve 60 dakika süre ile birleştirilmiş numunenin mikroyapı görüntüsü verilmiştir. SEM mikroyapı fotoğrafından, malzeme çifti arayüzeyinde elementlerin karşılıklı difüzyonu sonucu meydana gelen yapısal değişim 850 °C’de 15 dakika süreyle yapılan kaynaklı bağlantıyla temelde benzer görünümündedir. Ancak süre ile birlikte difüzyon bölgesinin daha da genişlediği açıkça görülmektedir.



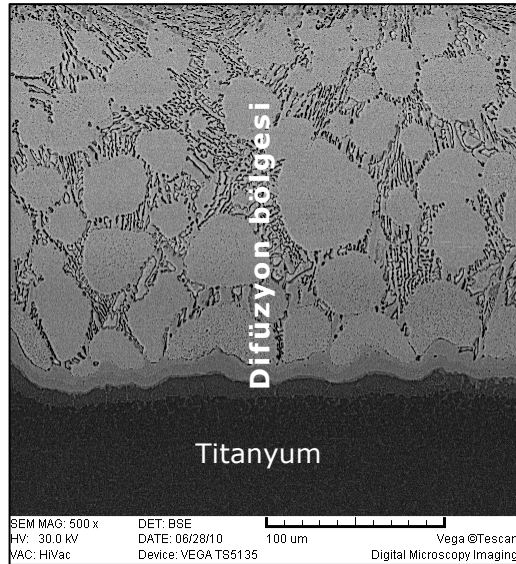
Şekil 6.14. 850 °C’de ve 60 dakika süre ile birleştirilmiş numunenin SEM görüntüsü.

Şekil 6.15’de 875 °C’de 15 dakika süre ile birleştirilmiş numunenin mikroyapısı verilmiştir. Kaynak bölgesindeki difüzyon bölgesi genişliğinin yaklaşık olarak 250 µm civarında olduğu görülmektedir.



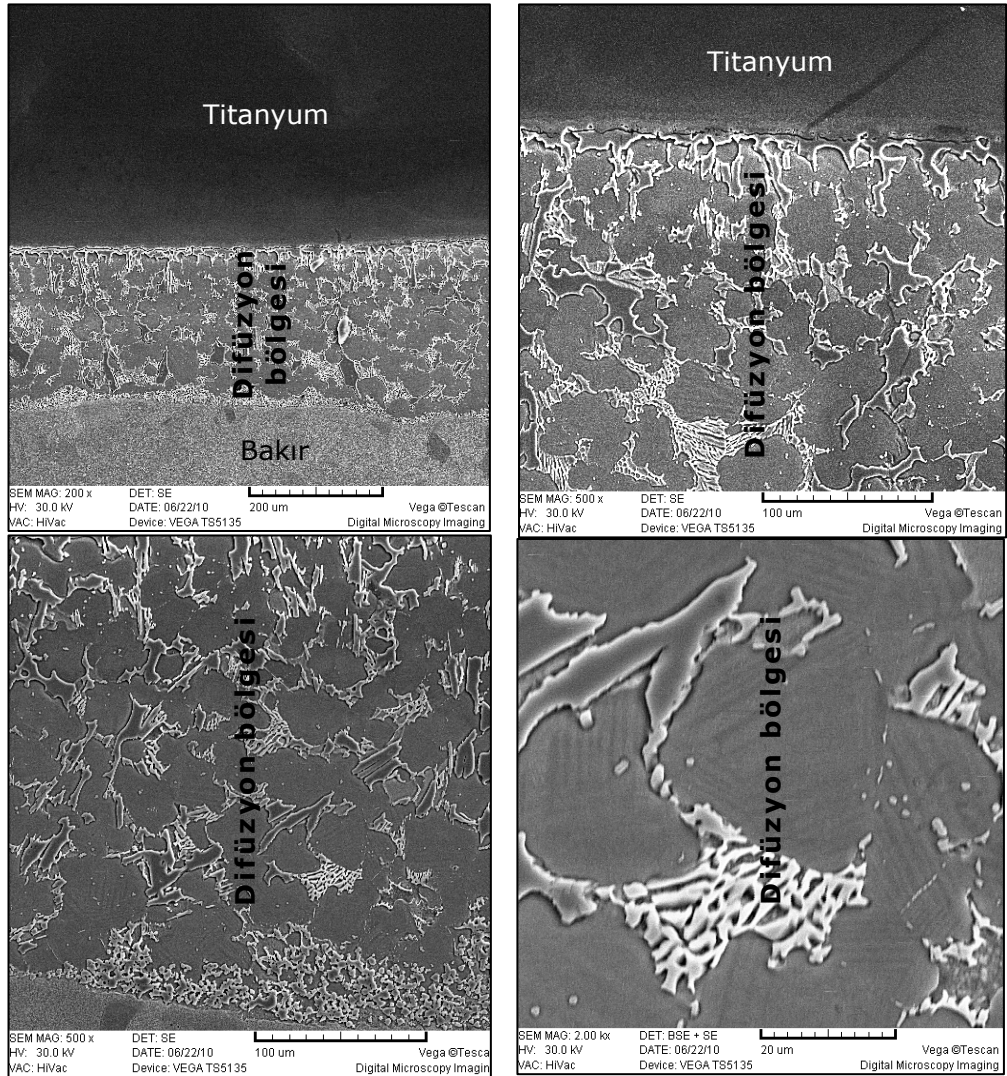
Şekil 6.15. 875 °C’de ve 15 dakika süre ile birleştirilmiş numunenin SEM görüntüsü.

Şekil 6.16’da 875 °C’de ve 60 dakika süre ile birleştirilmiş numunenin mikroyapı görüntüsü verilmiştir. Şekilden açıkça görüldüğü gibi artan sıcaklığa bağlı olarak reaksiyon bölgesinin genişlediği gözlenebilmektedir. Mikroyapı görüntüsü incelendiğinde, birleşme bölgesinde oluşan farklı kimyasal bileşimden dolayı üç farklı difüzyon bölgesinin oluştuğu görülmektedir.



Şekil 6.16. 875 °C’de 60 dakika süre ile birleştirilmiş numunenin SEM görüntüsü.

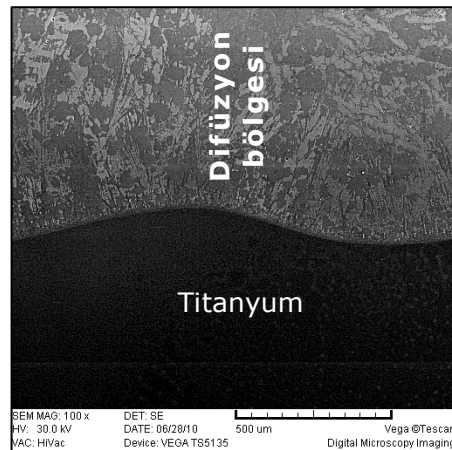
Şekil 6.17’de 890 °C’de 15 dakikada süre ile birleştirilmiş numunenin farklı bölgelerinden farklı büyütme oranlarında alınan mikroyapı görüntüleri verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde kaynak bölgesindeki difüzyon bölgesinin yaklaşık olarak 250 µm civarında olduğu görülmektedir. Ayrıca yüksek büyütmedeki fotoğraflar incelendiğinde difüzyon bölgesinde oluşan yeni tanelerin etrafında (tane sınırları) farklı bir yapının oluştuğu ve oluşan tanelerin eş dağılımlı yapıya sahip olduğu belirlenmiştir. Bilgin, paslanmaz çelik ile titanyum malzemeleri bakır arabağlayıcı kullanarak birleştirmiş ve bakır ile titanyum arayüzünde sıcaklık ve elementlerin karşılıklı difüzyonu sonucu farklı faz bölgelerinin oluştuğunu rapor etmiştir [16].



Şekil 6.17. 890 °C’de 15 dakika süre ile birleştirilmiş numunenin SEM görüntüsü.

Literatürde verilen bilgilere göre, Mckeag yapmış olduğu saf titanyum ve bakır üzerinde kendi içerisindeki difüzyon kaynağını inceleyen çalışmada, altı safhalı bir modelini sunmuştur. Bu modele göre birinci safhada sıcaklık tesiri ile yüzey pürüzlerinin teması sırasında metal oksitleri çözünmekte ve arakesitin her iki tarafında yeniden kristalleşmiş ince bir tabaka meydana gelmektedir. Enerji engelini kıran bu tabakadır. İkinci safhada daha kalın bir tabaka yeniden kristalleşmekte ve üçüncü safhada ana metal yeniden kristalleşirken, daha alt tabaka kristalleri yok edilir. Dördüncü safhada ara kesitleri daha önce kristalleşen taneler yok olurken, küçük fakat görülebilen boşluklar oluşur. Beşinci safhada arakesitteki boşlukların sayıları azalırken boyutlarının büyüdüğü ve son safhada arakesit düzlemine tane sınırı göçünün olduğu ve de bu aşamada tane büyümesinin başladığı belirtilmiştir [21].

Şekil 6.18’de 890 °C’de 60 dakika süre ile birleştirilmiş numunenin SEM mikroyapı görüntüsü görülmektedir. 60 dakika süre ile birleştirilmiş SEM fotoğrafı, 15 dakika süre ile birleştirilmiş SEM fotoğrafı ile kıyaslandığında; artan bekleme süresine bağlı olarak elementlerin karşılıklı difüzyon mesafelerinde önemli artışların olduğu görülmektedir. Burada, difüzyon bölgesi genişliğinin 15 dakika süre ile birleştirilmiş numuneden en az iki kat daha fazla olduğu açıkça görülebilmektedir.



Şekil 6.18. 890 °C’de 60 dakika süre ile birleştirilmiş numunenin SEM görüntüsü.

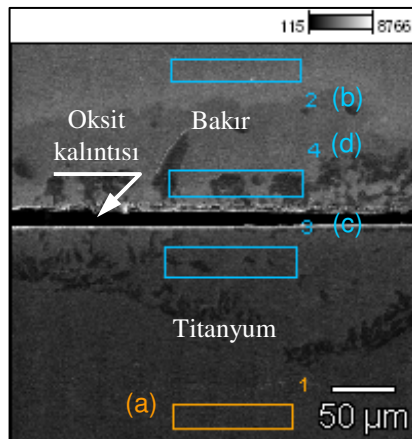
Farklı sıcaklık ve sürelerde difüzyon kaynak yöntemi ile birleştirilen kaynaklı bağlantıların SEM mikroyapı görüntüleri genel olarak değerlendirildiğinde, reaksiyon bölgesinde meydana gelen yapısal değişimlerin, kaynak sıcaklık ve

süresinin difüzyon üzerinde ne derece önemli olduğunun bir göstergesi olarak değerlendirilebilir. Ayrıca, bakır-titanyum kaynak arayüzeyinde meydana gelen reaksiyon bölgesinde farklı Cu-Ti bileşiklerinden oluşan değişik fazlar (farklı renkte) görülmektedir ve bu fazların kalınlıkları kaynak sıcaklığı ve bekletme süresine bağlı olarak artış göstermektedir. Çalışma sonucu elde edilen bulgular, benzer konuda yapılmış bir çalışma ile uyum içerisinde [16].

6.4.2. EDS Analiz İncelemeleri

Difüzyon kaynak yöntemi ile değişik kaynak parametrelerinin kullanıldığı çalışmalar sonucunda, numunelerin tümünden (825, 850, 875 ve 890 °C’de 15, 30 ve 60 dakika süre ile birleştirilmiş) SEM ve EDS (hem bölgesel hem de çizgisel olarak) analizleri yapılmıştır. Yapılan analizler sonucunda Titanyum-Bakır denge diyagramı göz önünde tutularak oluşabilecek faz yapıları belirlenmeye çalışılmıştır. Bölgesel EDS analiz sonuçlarına göre fazların tespitinde, grafiklerin sol tarafındaki skala (full scala counts) değerleri dikkate alınarak o bölgedeki titanyum (Ti+Al+V) ve bakır oranları yaklaşık olarak belirlenmeye çalışılmıştır.

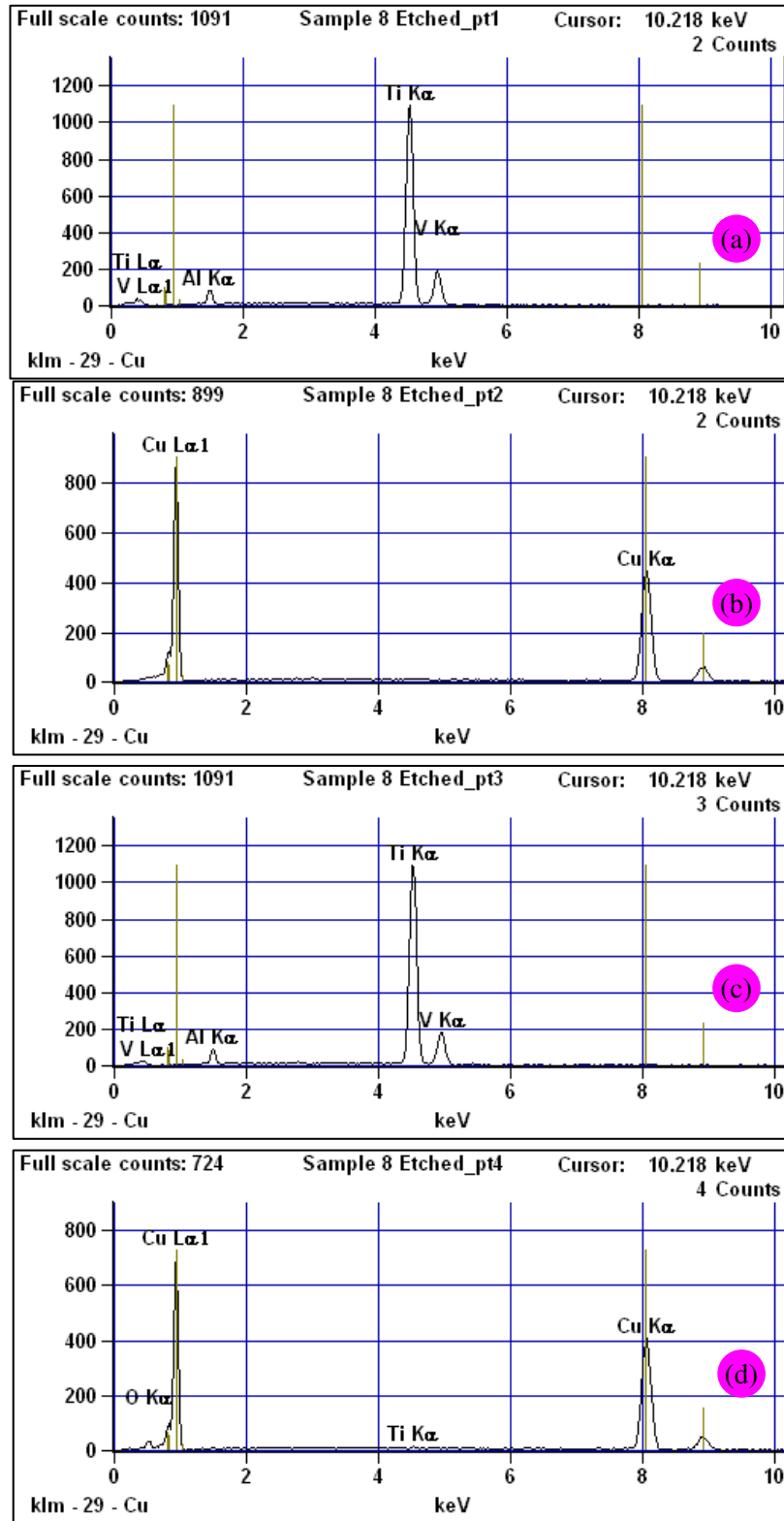
Şekil 6.19’da 825°C 30 dakika süre ile birleştirilmiş numunenin SEM’de EDS analizi yapılan bölgelerin görüntüsü verilmiştir.



Şekil 6.19. 825 °C’de 30 dakika süre ile birleştirilmiş numunenin EDS analizi yapılan bölgelerin görüntüsü.

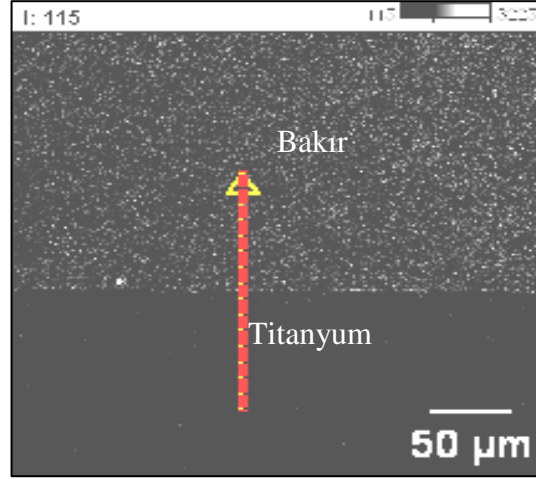
Görüntü incelendiğinde Ti-Cu arayüzeyinde oksit tabakasının varlığını koruduğu ve tam birleşmenin olmadığı açıkça görülmektedir. Bunun nedeni araştırıldığında, difüzyon kaynak parametrelerine bakılarak, kaynak işleminin neden istenilen yeterlilikte olmadığı söylenebilir. Çünkü aynı sıcaklıkta 15 dakika süre ile birleştirilmeye çalışılmış numunede birleşme gerçekleşmez iken, bu numunede birleşme kısmen gerçekleşmiştir. Bu yüzden bu numunede de sıcaklığın yanında sürenin de tam bir birleşme için yeterli olmadığı söylenebilir.

Şekil 6.19'da görüntüsü verilen birleştirmeden alınan ve Şekil 6.20'de verilen EDS analiz sonuçlarına göre, titanyum tarafından alınan birinci (a) ve üçüncü (c) bölgede sadece titanyum atomlarına rastlandığı, ayrıca bu bölgede titanyum içerisinde var olan alüminyum ve vanadyum elementlerinin varlığını koruduğu görülmektedir. Birleştirmenin bakır tarafından yapılan ikinci bölgedeki analiz sonuçlarında ise sadece bakır atomlarına rastlanıldığı görülmektedir. Yine birleştirmenin bakır tarafında arayüze yakın dördüncü bölge incelendiğinde bakır elementleri arasında az da olsa titanyum elementleri olduğu görülmektedir. Buradan, kaynak yapılan bu en düşük sıcaklıkta, sadece titanyumun bakır tarafına kısmen difüze olduğu, ancak bakırın titanyuma difüzyonunun tam olarak gerçekleşmediği sonucu çıkarılabilir.

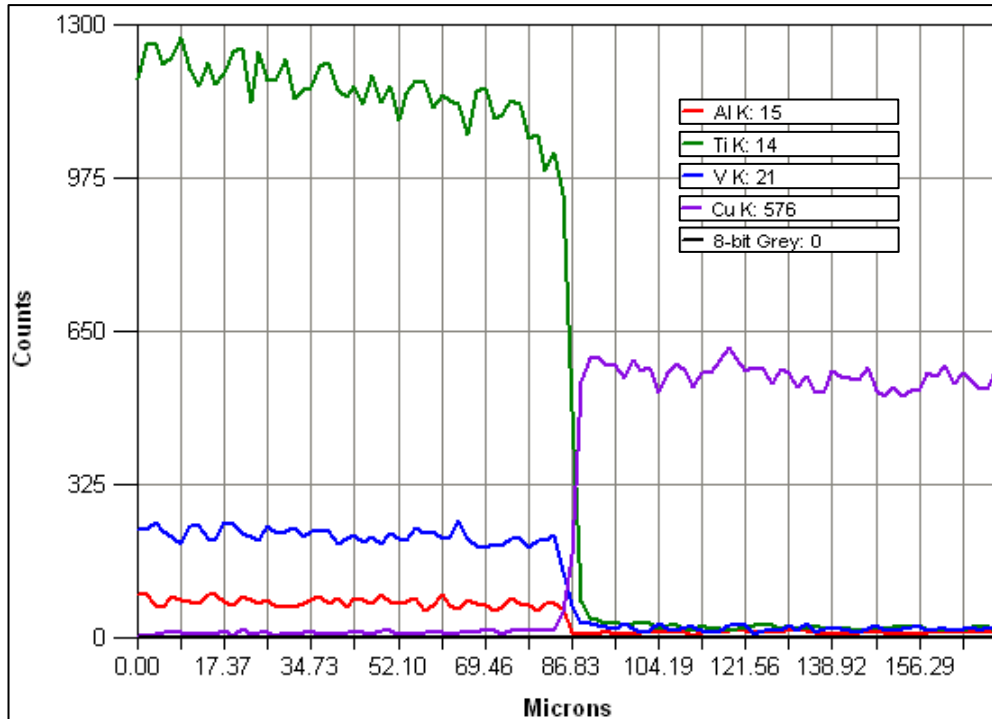


Şekil 6.20. 825 °C’de 30 dakika süre ile birleştirilmiş numunenin EDS analiz grafikleri (a) 1, (b) 2, (c) 3 ve (d) 4 bölgeler.

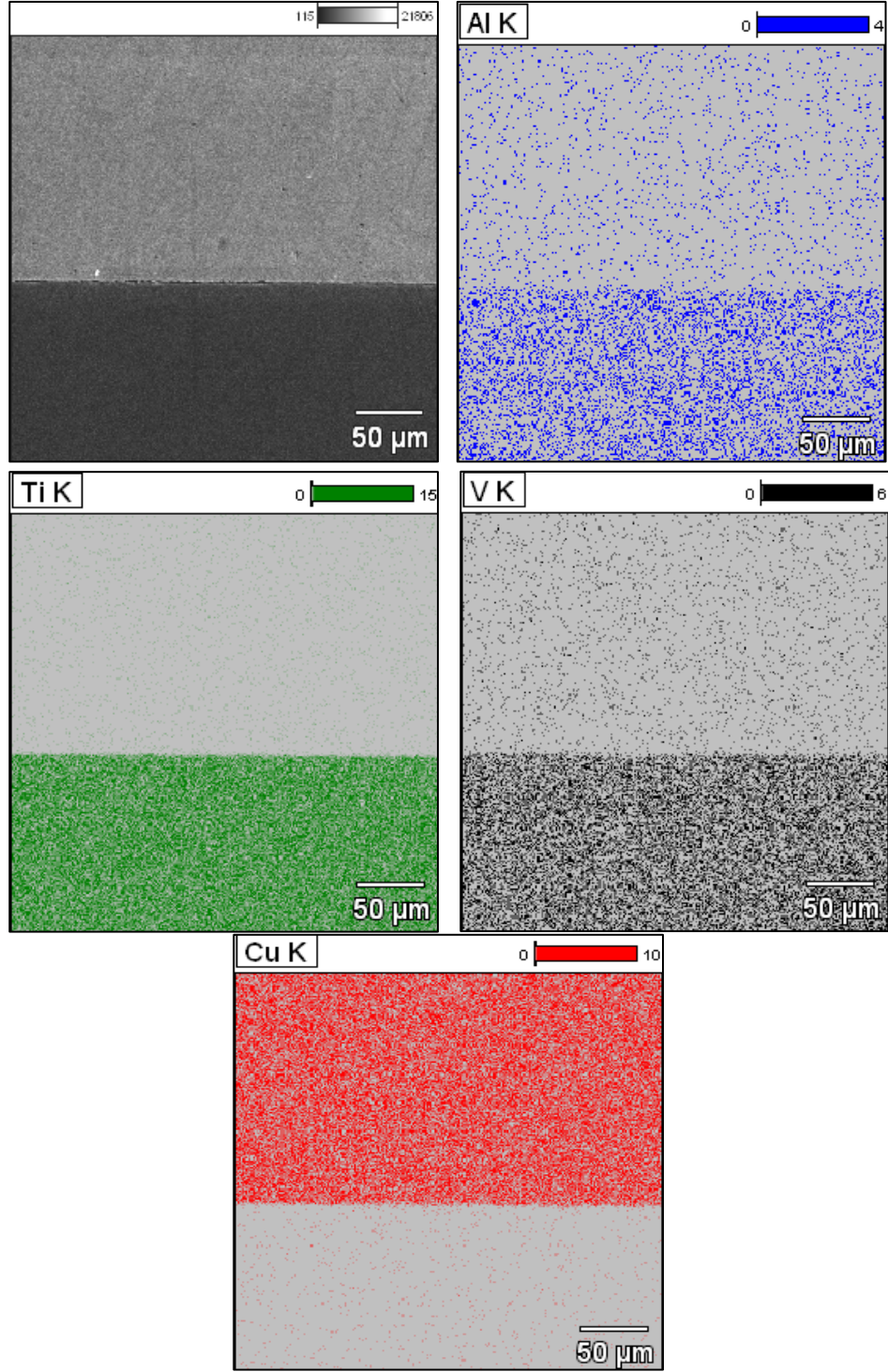
Şekil 6.21’de 825 °C’de 60 dakika süre ile birleştirilmiş numunenin titanyum tarafından başlayarak bakır tarafında sonlandırıldığını gösteren çizgisel EDS analiz yönünü, Şekil 6.22 çizgisel tarama analiz grafiğini ve Şekil 6.23’de ise EDS analiz sonucu elde edilen element haritasını göstermektedir.



Şekil 6.21. 825 °C’de 60 dakika süre ile birleştirilmiş numunenin EDS analiz yönü.



Şekil 6.22. 825 °C ve 60 dakika süre ile birleştirilmiş olan numunelerden elde edilen çizgisel EDS analizi sonuçları.



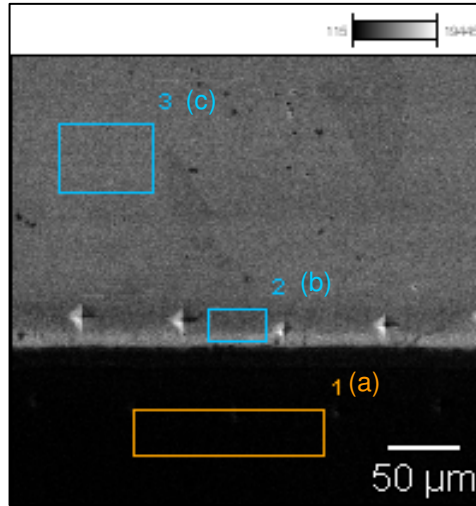
Şekil 6.23. 825 °C ve 60 dakikadaki EDS analiz sonucu elde edilen element haritası.

Şekil 6.22 incelendiğinde, titanyum bölgesinde titanyum içerisinde mevcut olan alüminyum ve vanadyum elementinin yanında çok az miktarda bakır elementinin yayındığı görülmektedir. Birleşmenin bakır tarafındaki çizgisel analiz grafikleri incelendiğinde ise az miktardaki titanyum, alüminyum ve vanadyum elementinin

bakır matris malzemesi içerisine yayıldığı açıkça görülmektedir. Kaynak arayüzeyi incelenecek olursa difüzyonun yaklaşık 15 µm'lik bir bölgede (80-95 µm arasında) etkili olduğu söylenebilir.

Şekil 6.23'de verilen analiz sonucu elde edilen EDS difüzyon element haritası incelendiğinde matris malzemeler bakır ve titanyum elementinin yanında titanyum içerisinde mevcut alüminyum ve vanadyum elementinin de bakır içerisinde yayıldığı ve kaynak işleminin olumlu olarak gerçekleştiği söylenebilir.

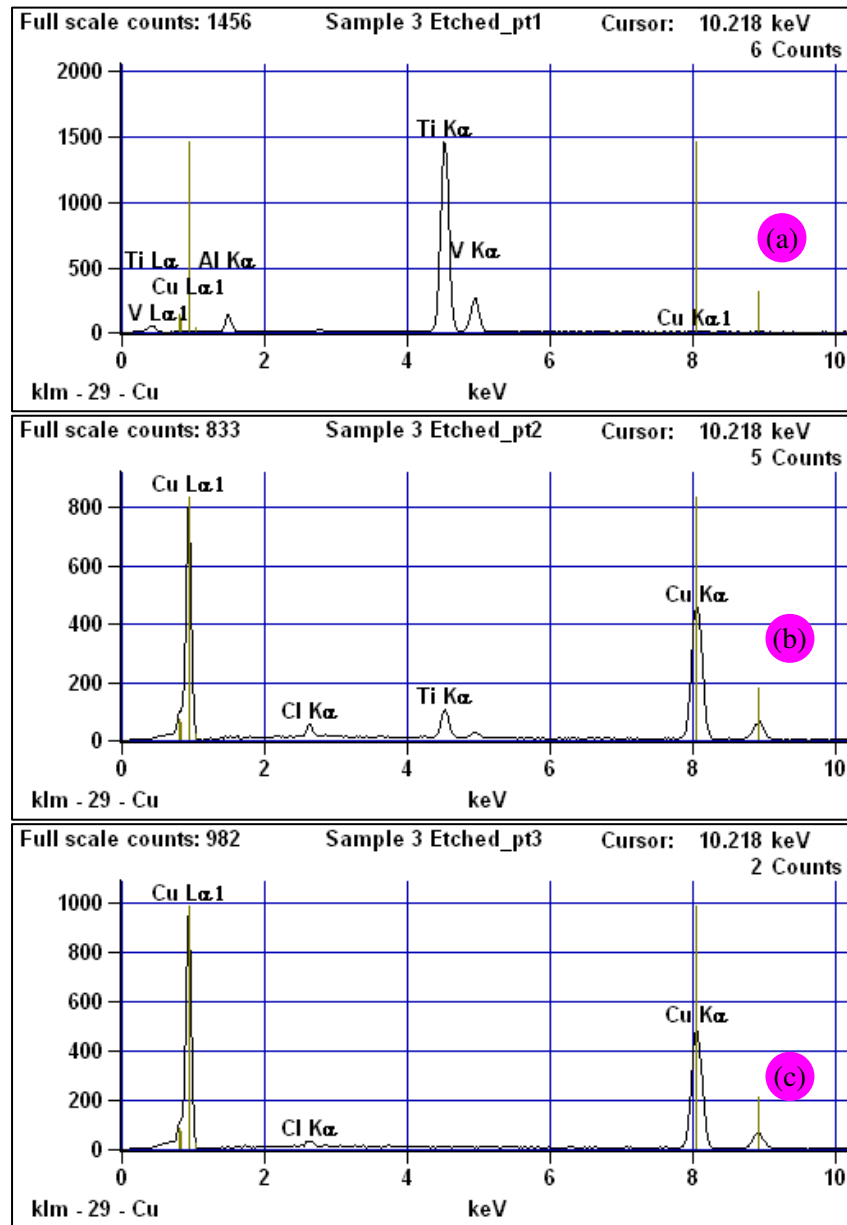
Şekil 6.24'de 850 °C'de 15 dakika süre ile birleştirilmiş numunenin EDS analizi yapılan bölgelerin görüntüsü ve Şekil 6.25'de ise bu bölgelerden alınan EDS analiz grafikleri verilmiştir. Analizler, birleşmenin arayüzeyi ile titanyum ve bakır taraflarından birer adet olmak üzere toplam üç adet olarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6.24. 850 °C'de 15 dakika süre ile birleştirilmiş numunenin EDS analizi yapılan bölgelerin görüntüsü.

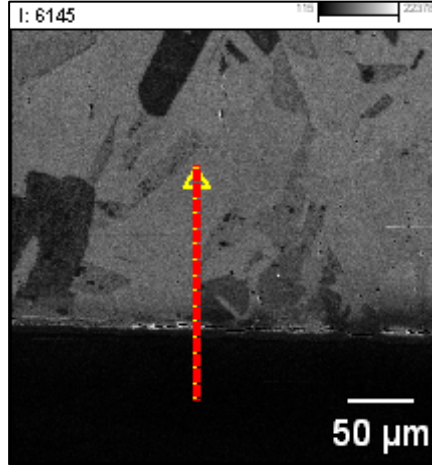
Şekil 6.24'de birleşmenin titanyum tarafına bakılacak olunursa, 1. bölge titanyumun yanında titanyum içerisinde mevcut alüminyum ve vanadyum elementlerinin olduğu, bunun yanında önemsiz miktarda da bakır elementlerine rastlandığı görülmektedir. Birleşmenin arayüzeyine yakın bakır tarafında ise bakır elementinin yanında az miktarda titanyum elementinin olduğu gözlenmektedir. Birleşmenin arayüzeyden uzak bakır tarafında yapılan analiz sonucunda ise yapının sadece bakırdan oluştuğu görülmektedir. Deneysel çalışmalarda kullanılan kaynak parametreleri dâhilinde, 825

°C’de 15 dakikalık sürede birleşmenin gerçekleşmediği dikkate alındığında, sıcaklığın 25 °C artırılmasıyla aynı sürede difüzyonun dar bir alanda gerçekleşmiş olması beklenen bir sonuç olarak değerlendirilebilir. Literatür bilgisi olarak belirtilen [53], her 20 °C’lik sıcaklık artışında difüzyon katsayısı veya difüzyon hızı ikiye katlanır bilgisinin çalışmamız ile paralellik gösterdiği bir gerçektir. Atomlar kafesteki denge konumları etrafında sürekli titreşim hareketi yaparlar ve sıcaklık arttıkça titreşimin genliği artar. Isı enerjisi olarak bilinen ve atomun ısıl titreşimi ile ilgili enerji, atomun başka bir kafes konumuna atlaması için yeterli olur.

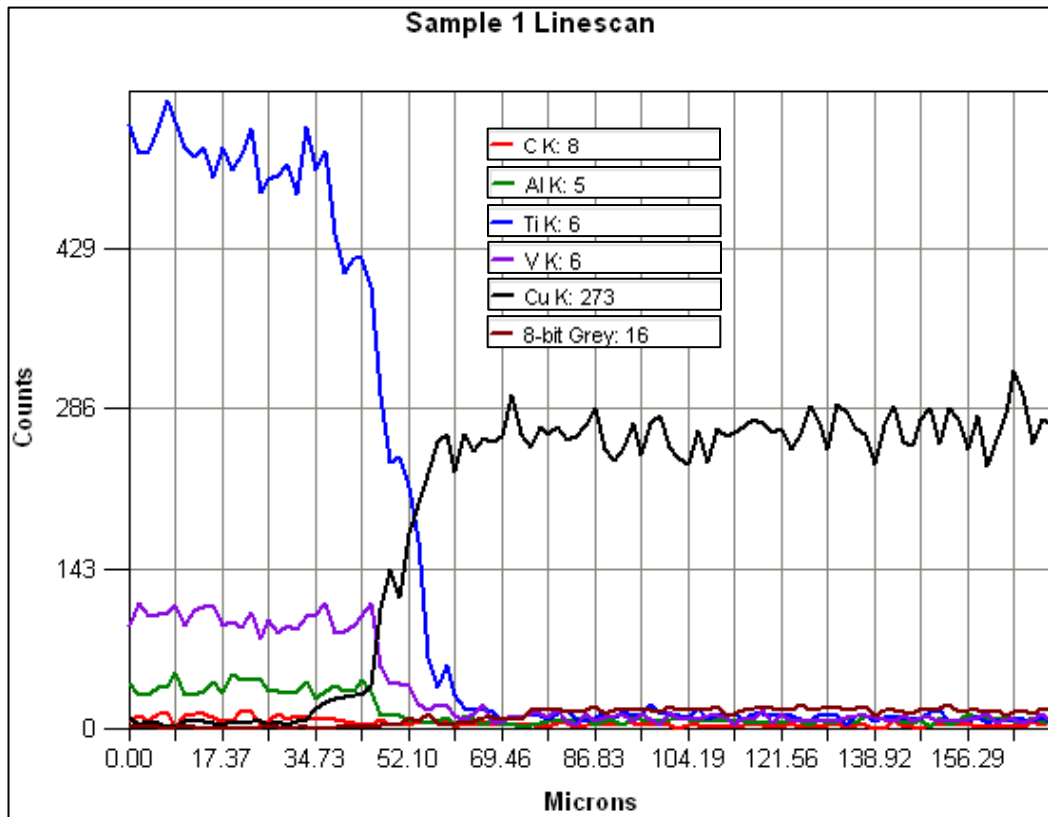


Şekil 6.25. 850 °C 15 dakika süre ile birleştirilmiş numunenin EDS analiz grafikleri (a) 1, (b) 2 ve (c) 3 bölgeler.

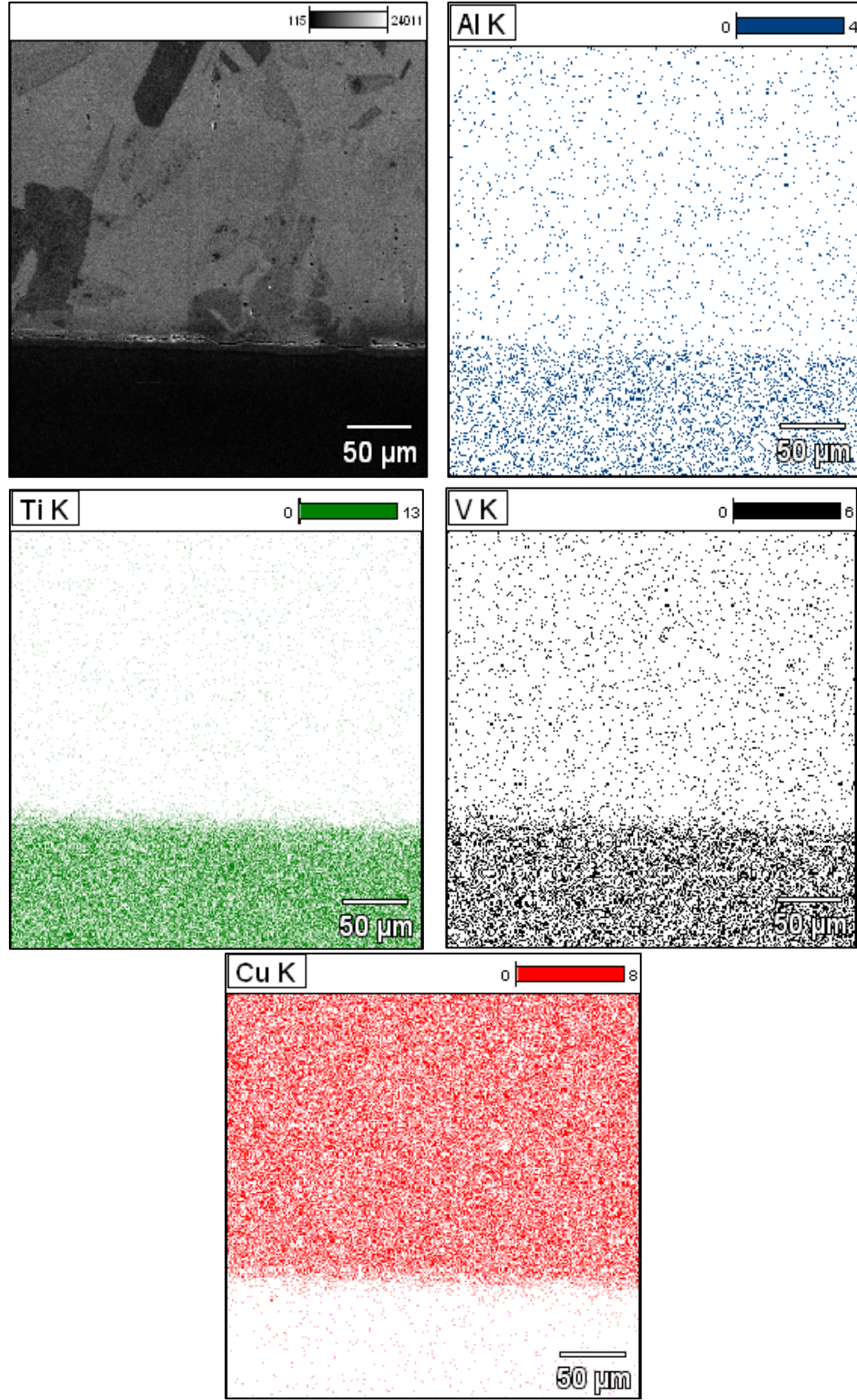
Şekil 6.26'de 850 °C'de ve 30 dakika süre ile birleştirilmiş numunenin titanyum tarafından başlayarak bakır tarafında sonlandırıldığını gösteren çizgisel EDS analiz yönünü, Şekil 6.27 çizgisel tarama analiz grafiğini ve Şekil 6.28 ise EDS analiz sonucu elde edilen element haritasını göstermektedir.



Şekil 6.26. 850 °C ve 30 dakika süre ile birleştirilmiş numunenin EDS analiz yönü.



Şekil 6.27. 850 °C ve 30 dakika süre ile birleştirilmiş olan numunelerden elde edilen çizgisel EDS analizi sonuçları.

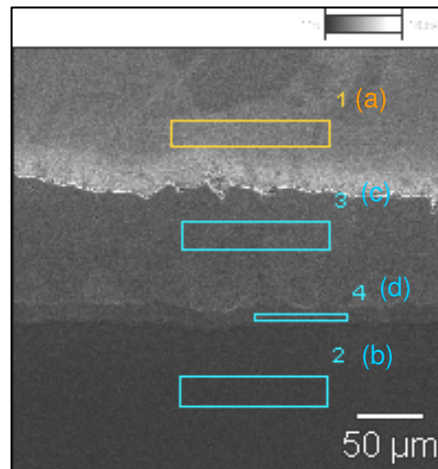


Şekil 6.28. 850 °C ve 30 dakikadaki EDS analiz sonucu elde edilen element haritası.

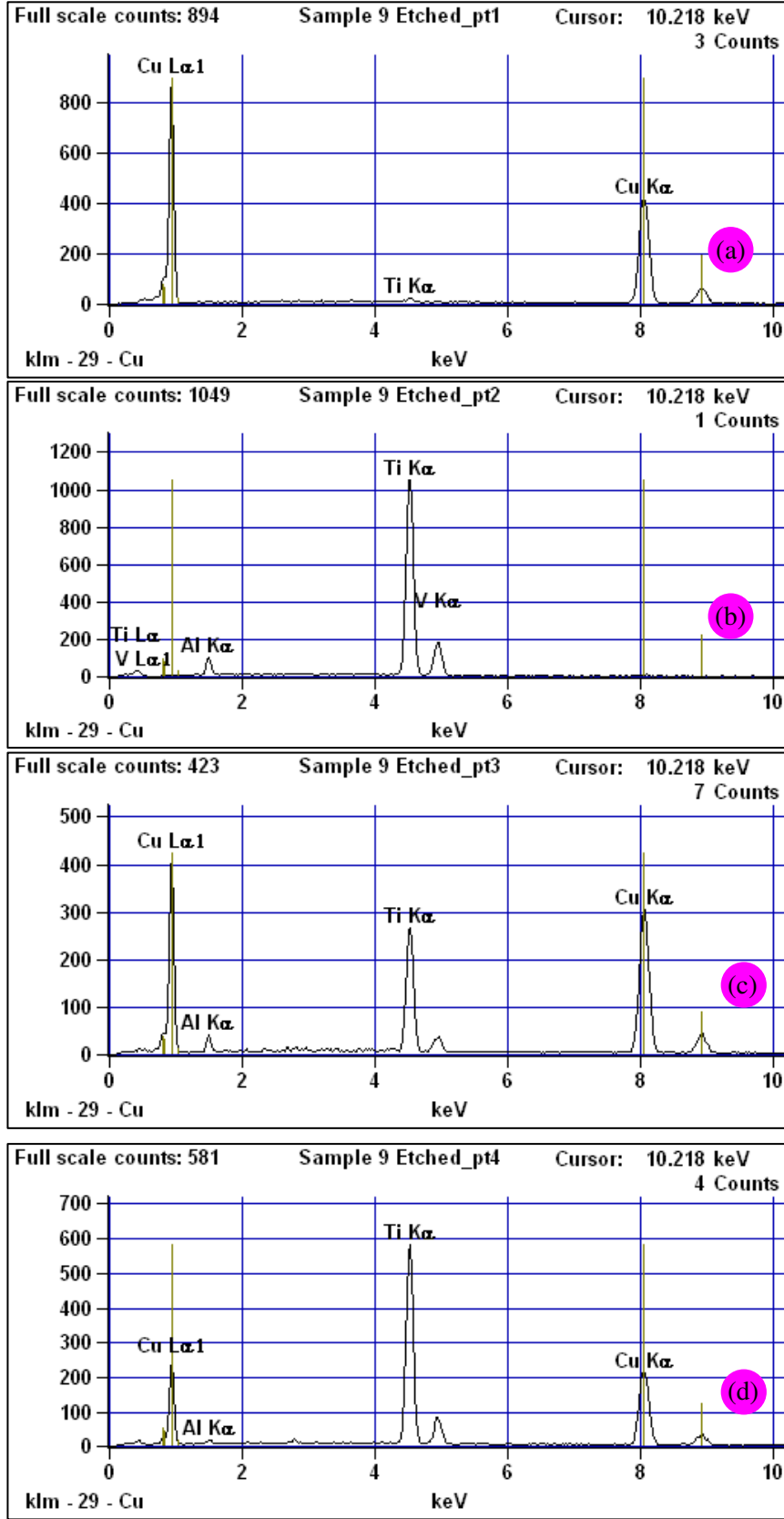
850 °C’de 30 dakikada süre ile birleştirilen kaynaklı numune için Şekil 6.27’de verilen çizgisel analiz grafiği incelendiğinde titanyum içerisinde az miktarda Cu

elementinin olduğu benzer biçimde bakır içerisinde de az miktarda Ti, Al ve V elementlerinin bulunduğu görülmektedir. Analiz grafiğine bakılacak olursa (Şekil 6.27) yaklaşık 35 μm 'den sonra karşılıklı difüzyonunun yoğunlaşmaya başladığı ve bu yoğunluğun yaklaşık 70 μm 'ye kadar devam ettiği gözlenebilmektedir. Bu sonuçlardan kaynak işleminin olumlu olarak gerçekleştiği ve yaklaşık 35 μm 'lik bir difüzyon bölgesinin olduğu görülmektedir. Grafikte dikkat çekici bir nokta vanadyum elementinin alimünyum miktarından daha fazla olduğu görülmektedir. Ancak deneysel çalışmalarda kullanılan titanyum malzeme içerisinde % 6 oranında Al, ve % 4 oranında V bulunmaktadır. Böyle bir durum olduğu halde V oranının yüksek olmasının nedeni, titanyumun alimünyumu bağlayıp difüzyon olmasına engel olduğu söylenebilir. Ayrıca literatürde alimünyumun aktivasyon enerjisi 144 kJ/mol, bakırın 211 kJ/mol [43], titanyumun 192.8 kJ/mol [54] ve vanadyumun aktivasyon enerjisi 274 kJ/mol [55] olarak verilmektedir. Bu verilerden yararlanılarak yapılan değerlendirmeler sonucunda, aktivasyon enerjisi büyük olan elementin difüzyon hızının daha düşük olacağı, böylece elementler arasındaki aktivasyon enerji farkının titanyumun grafikte daha yoğun bir şekilde görülmesine sebep olabileceğini akla getirmektedir. Bir başka ifadeyle aktivasyon enerjisi düşük olan elementin difüzyonunun kolay olacağı söylenebilir.

Şekil 6.29'de 850 °C'de 60 dakika süre ile birleştirilmiş numunenin EDS analizi yapılan bölgelerin görüntüsü ve Şekil 6.30'da ise bu bölgelerden alınan EDS analiz grafikleri verilmiştir.



Şekil 6.29. 850 °C'de 60 dakika süre ile birleştirilmiş numunenin EDS analizi yapılan bölgelerin görüntüsü.

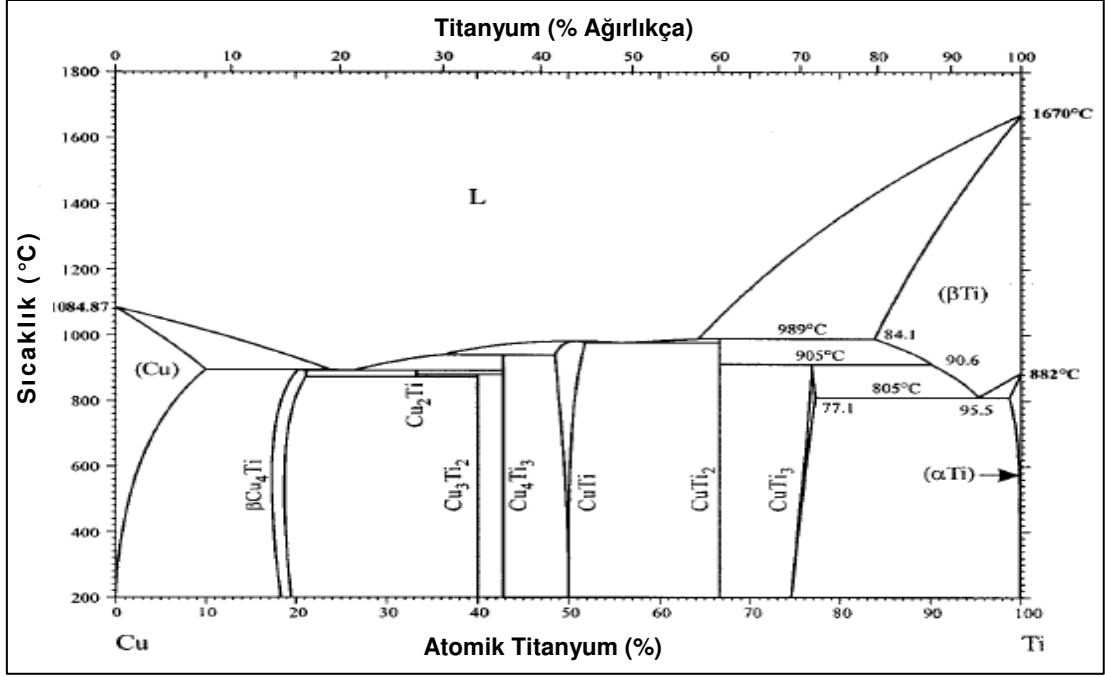


Şekil 6.30. 850 °C’de 60 dakika süre ile birleştirilmiş numunenin EDS analiz grafikleri (a) 1, (b) 2, (c) 3 ve (d) 4 bölgeler.

Şekil 6.29'da 850 °C'de 60 dakika süre ile birleştirilen numunenin EDS analizi yapılan bölgeleri incelenecek olursa (şekil 6.30), birleşme arayüzeyinin dört farklı bölgeden oluştuğu rahatlıkla görülebilir. EDS analizinin özellikle bu bölgelerden yapıldığı ve 1 nolu bölgenin bakır malzeme olduğu ve bakır matris malzeme içerisinde önemsiz miktarda Ti elementine rastlandığı görülmektedir. 2. titanyum bölgesine bakıldığında yapıda sadece Ti, Al ve V elementlerinin olduğu ve bakır elementlerinin bu bölgede bulunmadığı görülmektedir. Burada bakır elementine rastlanılmamasının iki nedeni olabilir. Bunlardan birincisi; 850 °C ve 60 dakika sürede bu bölgeye bakır atomları erişememiş olabilir. İkincisi ise kaynak işlemi esnasında bakır elementinin titanyumun bu bölgesine difüze ettiği, ancak kaynak sonrası kontrollü soğuma sırasında bu atomların tekrar bakır tarafına göç ederek bu bölgede varlığını sürdüremediği söylenebilir.

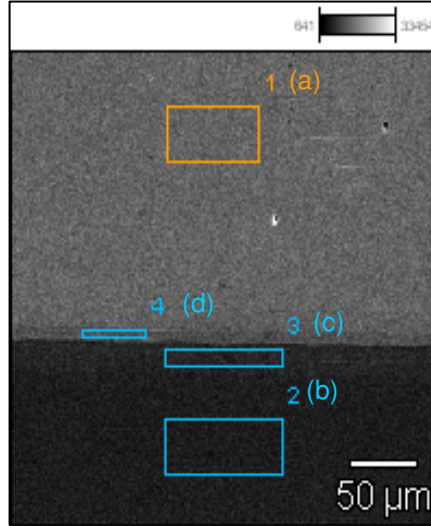
Birleşmenin bakır tarafında arayüze yakın 3. bölgeye bakıldığında yapının bakır ağırlıklı olmak üzere Cu-Ti ve az miktarda Al ve V'den oluştuğu, bunun yanında titanyum tarafındaki 4. bölgeye bakıldığında ise bakır oranında azalma olmakta ve titanyum miktarında dikkate değer bir artış görülmektedir. Bir başka ifadeyle 3. bölgenin yaklaşık olarak % 60 Cu ve % 40 Ti+Al+V elementlerinden oluştuğu, 4. bölgede ise bunun tam tersine yapının yaklaşık % 30 Cu ve % 70 Ti+Al+V elementlerinden oluştuğu söylenebilir. Şekil 6.27'de verilen Cu-Ti ikili faz diyagramı incelendiğinde oda sıcaklığında $\beta\text{Cu}_4\text{Ti}$, Cu_2Ti , Cu_3Ti_2 , Cu_4Ti_3 , CuTi , CuTi_3 ve αTi intermetalik fazların bulunabileceği görülmektedir [51].

Elde edilen EDS analizleri sonucunda Cu oranının yaklaşık % 65 olarak bulunduğu 3 nolu bölgede, bulunan sonuçlar ışığında oluşacak fazın Cu_3Ti_2 intermetalığı olduğu düşünülmektedir. Benzer biçimde Cu oranının yaklaşık % 27 olarak bulunduğu 4 nolu bölgede ise oluşan yapının CuTi_3 intermetalik bileşiğinden oluştuğu tespit edilmiştir. Bilgin çalışmasında Ti-6Al-4V ile ostenitik paslanmaz çelik çiftini bakır ara tabaka kullanılarak difüzyon kaynağı ile birleştirmiş olması ve benzer sonuçlar elde etmiş olmaları bu sonuçları doğrulamaktadır [16].

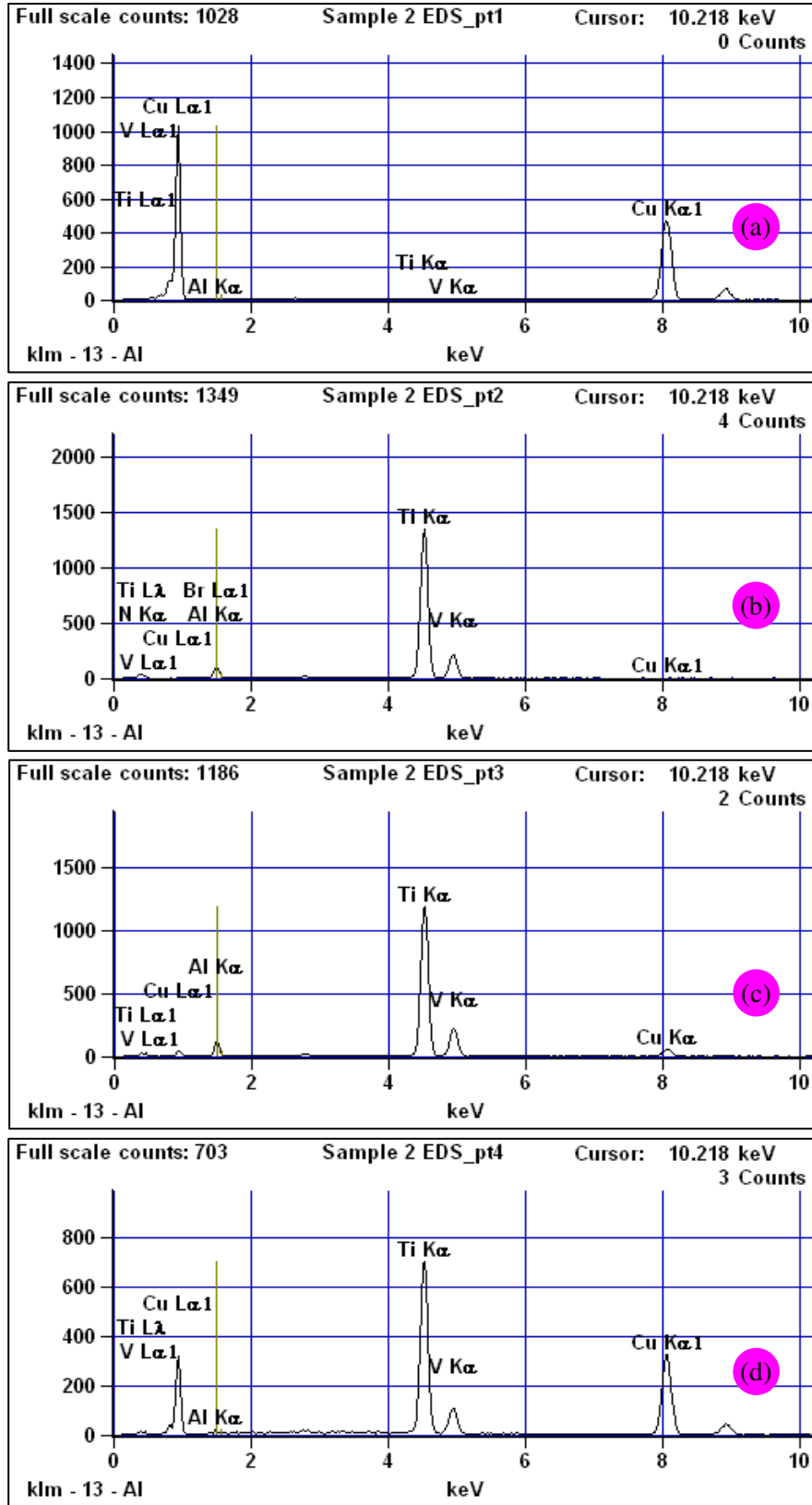


Şekil 6.31. Cu-Ti ikili faz diyagramı [51].

Şekil 6.32’de 875 °C’de 15 dakika süre ile birleştirilmiş numunenin EDS analizi yapılan bölgelerin görüntüsü ve Şekil 6.33’de ise bu bölgelerden alınan EDS analiz grafikleri verilmiştir.



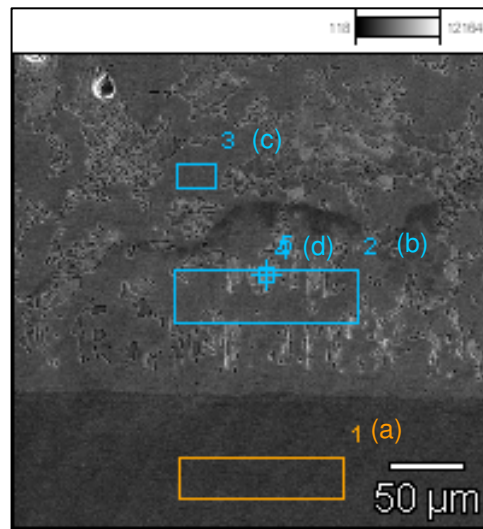
Şekil 6.32. 875 °C’de 15 dakika süre ile birleştirilmiş numunenin EDS analizi yapılan bölgelerin görüntüsü.



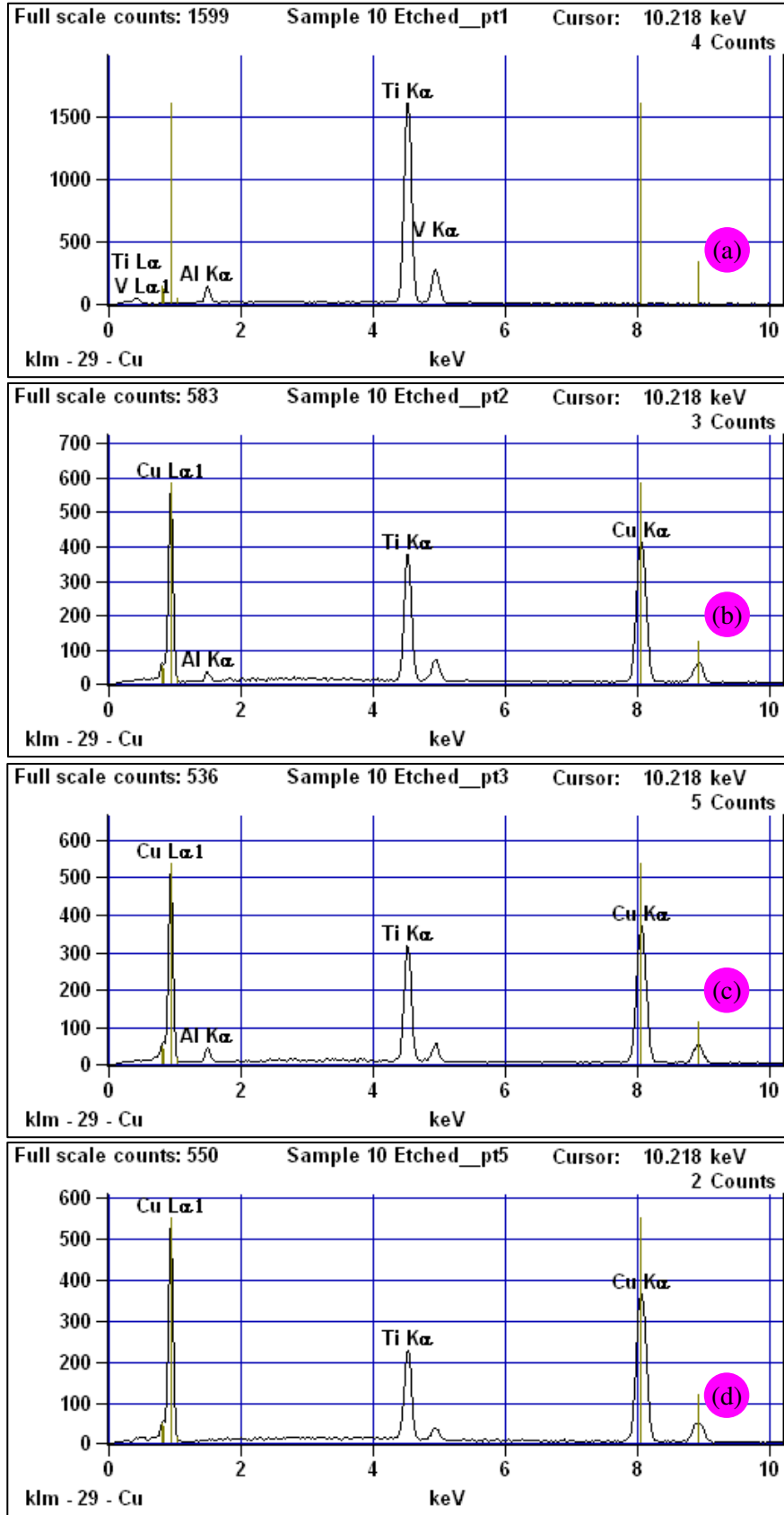
Şekil 6.33. 875 °C’de 15 dakika süre ile birleştirilmiş numunenin EDS analiz grafikleri (a) 1, (b) 2, (c) 3 ve (d) 4 bölgeler.

Şekilde yaklaşık 150 µm uzaklıkta 1 numara ile verilen bölgenin EDS analiz grafiği incelendiğinde bakır matris içerisinde az miktarda Ti, Al ve V elementlerine rastlandığı, bunun yanında benzer şekilde yaklaşık 80 µm uzaklıkta 2 numara ile verilen bölgede de titanyum matris içerisinde yine az miktarda Cu elementine rastlandığı görülmektedir. Kaynak birleşme arayüzüne yakın 3 numaralı bölgenin EDS analiz sonuçları incelendiğinde matris yapının ağırlıklı olarak titanyumdan oluştuğu, ancak 2 numaralı bölgeye göre Cu oranının bir miktar arttığı gözlemlenmiştir. Arayüzeyin bakır tarafında gibi görünen 4 numaralı bölge incelendiğinde ise bu bölgenin tam bir yayılım bölgesi olduğu ve bu bölge Ti gibi görünmesine rağmen Cu elementinin daha fazla olduğu açıkça görülmektedir. Burada titanyumun bakır numune tarafında daha yoğun bir şekilde görülmesinin nedeni atomik ağırlıklarından (atom kütlesi) kaynaklandığı düşünülmektedir. Literatürde [1] titanyumun atomik ağırlığı 47.9 g/mol ve bakırın atomik ağırlığı 63.54 g/mol olarak verilmektedir. Titanyumun atomik ağırlığının, bakırın atomik ağırlığından düşük olduğundan dolayı bakır numune tarafında daha yoğun bir şekilde titanyumun difüzyonunun gerçekleştiği görülmüştür.

Şekil 6.34'da 875 °C'de 30 dakika süre ile birleştirilmiş numunenin EDS analizi yapılan bölgelerin görüntüsü ve Şekil 6.35'de ise bu bölgelerden alınan EDS analiz grafikleri verilmiştir.



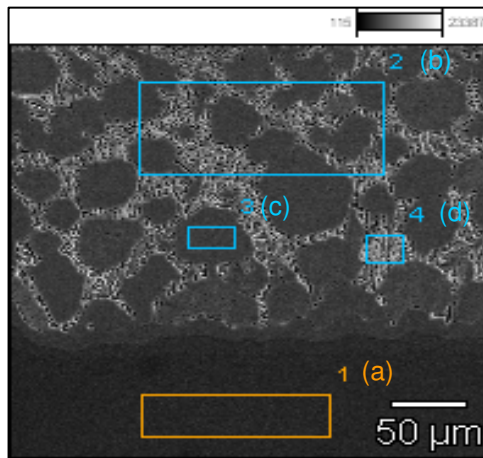
Şekil 6.34. 875 °C'de 30 dakika süre ile birleştirilmiş numunenin EDS analizi yapılan bölgelerin görüntüsü.



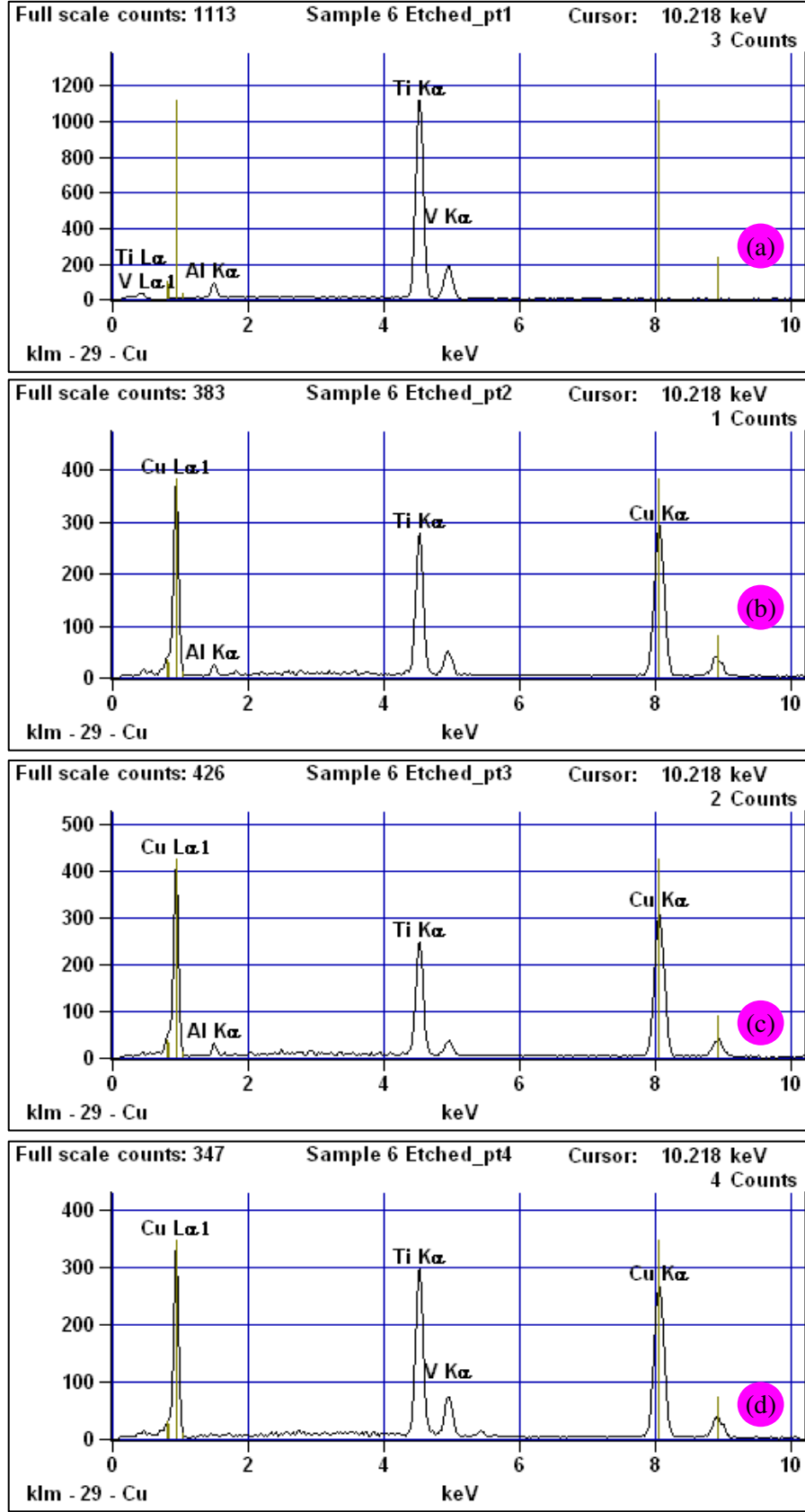
Şekil 6.35. 875 °C 30 dakika süre ile birleştirilmiş numunenin EDS analiz grafikleri (a) 1, (b) 2, (c) 3 ve (d) 4 bölgeler.

Şekil 6.34'de 875 °C'de 30 dakika süre ile birleştirilen numunenin EDS analizi yapılan bölgeleri gösterilmektedir. Birleştirilen numune üzerinde dört ayrı bölgeden EDS analizleri gerçekleştirilmiştir. Birleşmenin titanyum tarafındaki 1. bölge titanyum olup, titanyum içerisinde Al ve V elementlerinin aynen varlıklarını korudukları ancak bu bölgeye bakırın difüze edemediği veya kontrollü soğuma esnasında tersine göç sonucunda bu bölgede bulunmadığı tespit edilmiştir. Birleşmenin bakır tarafındaki 2. bölge olan ara bölgeye bakıldığında yapının yaklaşık % 60'ını, benzer biçimde 3. bölgenin yaklaşık % 55'ini ve son olarak 4. bölgenin % 65'ini Cu elementinden oluştuğu görülmektedir. Buradan 2. ve 3. bölgelerde Cu_4Ti_3 ve 4. bölgede ise Cu_3Ti_2 ara bileşiklerinin oluştuğu Ti-Cu denge diyagramından görülebilir. Sonuç olarak, gerek bir önceki sıcaklıktaki (850 °C) numuneye, gerekse bir önceki süredeki (15 dakika) numuneye bakılarak bu numunede difüzyon miktarı ve mesafesinin dikkate değer bir biçimde arttığı tespit edilmiştir.

Şekil 6.36'da 875 °C'de 60 dakika süre ile birleştirilmiş numunenin EDS analizi yapılan bölgelerin görüntüsü ve Şekil 6.37'de ise bu bölgelerden alınan EDS analiz grafikleri verilmiştir. Şekil 6.36. incelendiğinde birleşme arayüzeyinin bakır tarafında farklı bir yapının oluştuğu ve/veya tane sınırlarında bazı elementlerin çökelediği görülmektedir. EDS analizi için, birleştirmenin özellikle bakır tarafından seçilen 2 nolu bölge genel olarak, 3 ve 4 nolu bölgeler ise farklı renklerde görülen bölgelerden seçilmesine özen gösterilmiştir. Böylece renk farkının neden kaynaklandığının belirlenmesi amaçlanmıştır.



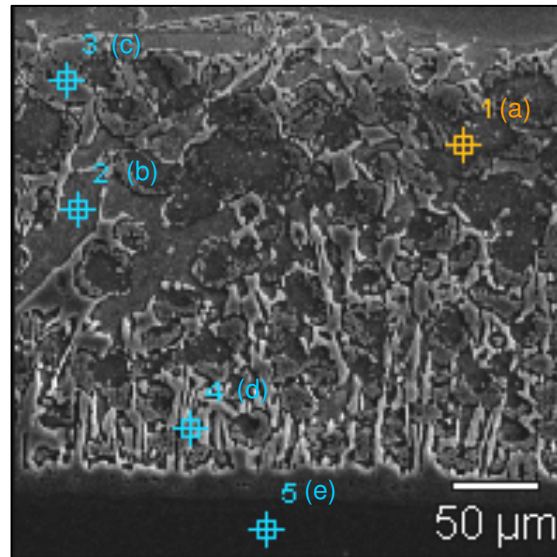
Şekil 6.36. 875 °C'de 60 dakika süre ile birleştirilmiş numunenin EDS analizi yapılan bölgelerin görüntüsü.



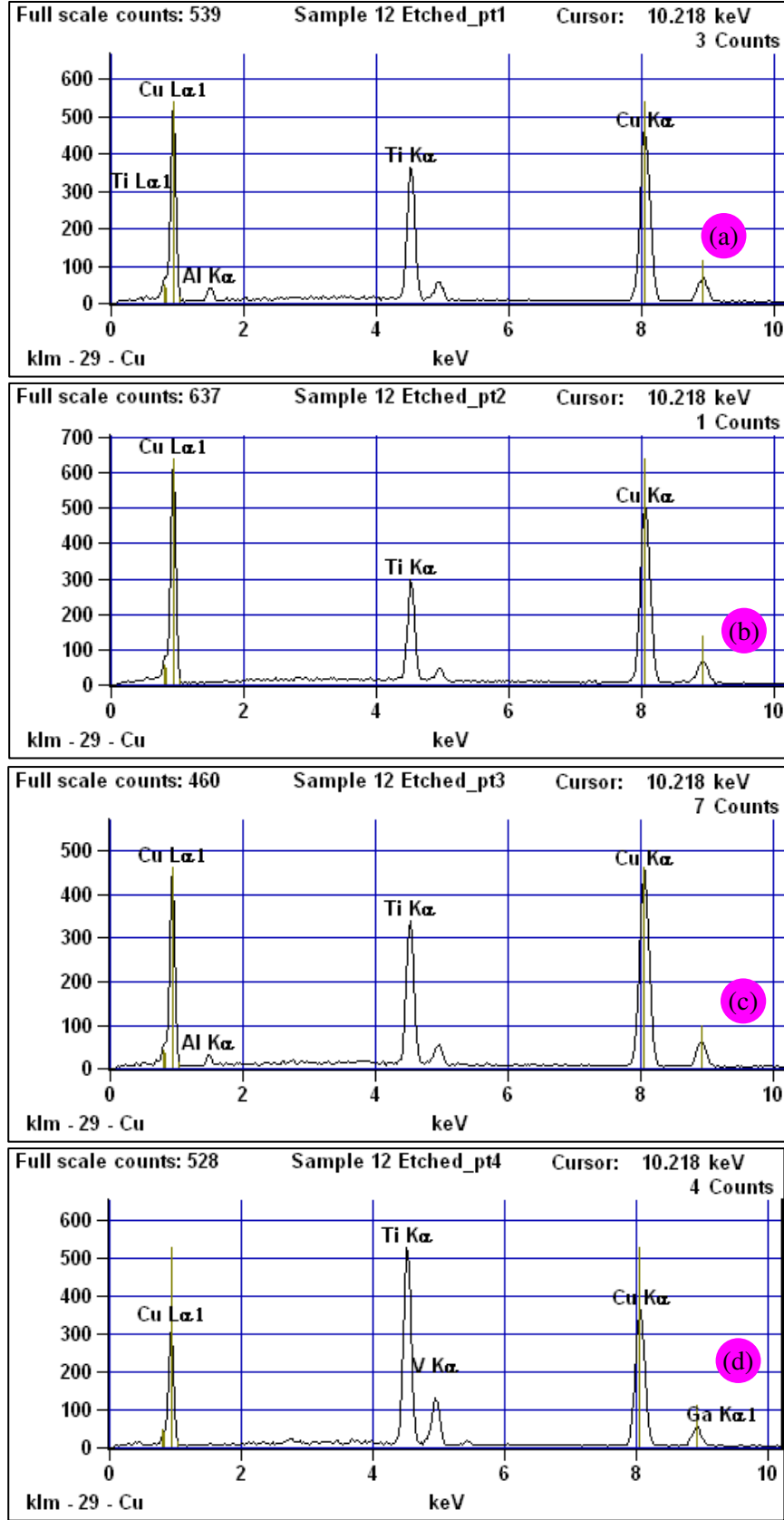
Şekil 6.37. 875 °C’de 60 dakika süre ile birleştirilmiş numunenin EDS analiz grafikleri (a) 1, (b) 2, (c) 3 ve (d) 4 bölgeler.

Şekil 6.37’de birleştirilen numunelerin dört farklı bölgede gerçekleştirilen EDS analiz bölgeleri incelendiğinde 1 nolu bölgenin titanyumdan oluştuğu ve içerisinde mevcut Al ve V’yi koruduğu, ancak bu bölgede Cu’ya rastlanılmadığı görülmektedir. Arayüzeyin bakır tarafındaki 2. bölge incelendiğinde yaklaşık % 60 Cu olduğu, ayrıca az değerlerde de olsa ikinci bölgede titanyum numuneden difüzyon bölgesine yayılmış olan Al elementlerine rastlanmaktadır. 3. bölge incelendiğinde (siyah bölge), bu bölgenin yaklaşık olarak % 65 Cu’dan oluştuğu ancak 4. bölgenin (beyaz bölge) ise yaklaşık % 52 Cu’dan oluştuğu görülmektedir. Ti-Cu denge diyagramına bakıldığında 3. bölgede Cu_3Ti_2 intermetalığının 4. bölgede ise Cu_4Ti_3 intermetalığının oluşabileceği görülmektedir. Bu yüzden farklı intermetalik bileşiklerin farklı renklerde görülmesi beklenen bir sonuç olarak karşımıza çıkmaktadır. Ayrıca 4. bölgede beyaz bölge olarak görülen kısımların tane sınırlarına çökelmiş Al, V ve Ti olabileceği düşünülmektedir.

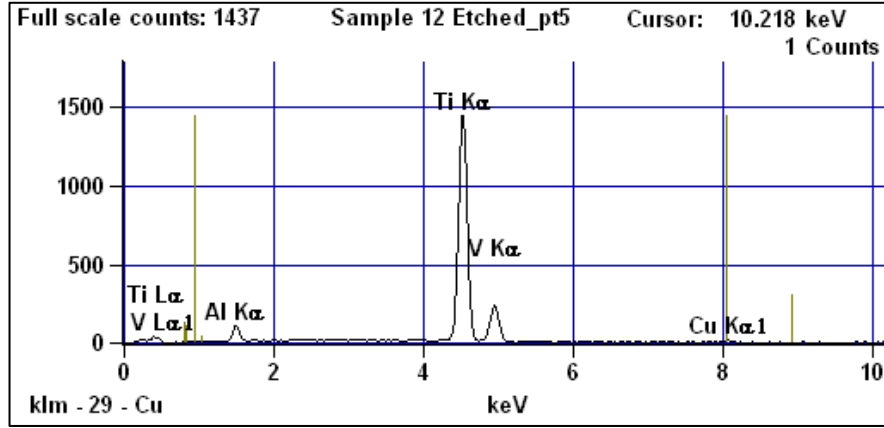
Şekil 6.38’de 890 °C’de 15 dakika süre ile birleştirilmiş numunenin EDS analizi yapılan bölgelerin görüntüsü ile Şekil 6.39 ve Şekil 6. 40’da ise bu bölgelerden alınan EDS analiz grafikleri verilmiştir. Şekil 6.38’de verilen analiz bölgelerinin seçiminde, arayüzeye yakın difüzyon bölgesinde farklı renklerdeki bölgelerden analiz yapılmasına özen gösterilmiştir.



Şekil 6.38. 890 °C’de 15 dakika süre ile birleştirilmiş numunenin EDS analizi yapılan bölgelerin görüntüsü.



Şekil 6.39. 890 °C’de 15 dakika süre ile birleştirilmiş numunenin EDS analiz grafikleri (a) 1, (b) 2, (c) 3 ve (d) 4 nolu bölgeler.



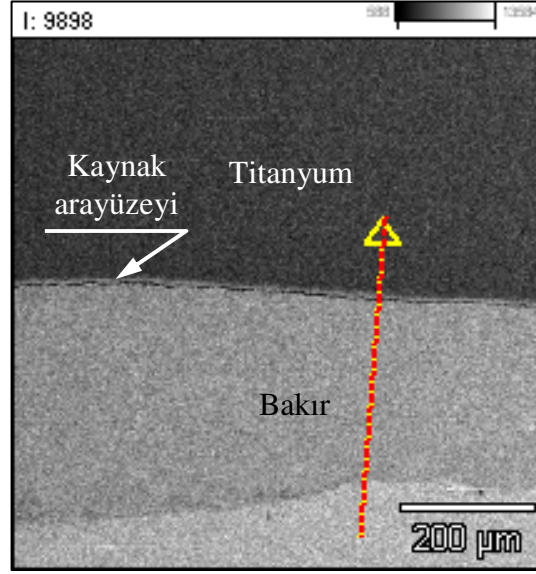
Şekil 6.40. 890 °C’de 15 dakika süre ile birleştirilmiş numunenin 5. bölgesinden elde edilen EDS analiz grafiği.

Şekil 6.38. incelendiğinde 1. bölgenin yaklaşık olarak % 60 Cu, 2. bölgenin % 70 Cu, 3. bölgenin % 55 Cu ve 4. bölgenin de yaklaşık olarak % 45 Cu içerdikleri görülmektedir. Bu veriler dikkate alındığında 1. ve 2. bölgede Cu_3Ti_2 , 3. bölgede Cu_4Ti_3 ve son olarak da 4. bölgede CuTi arafazlarının oluştuğu kanaatine varılmıştır.

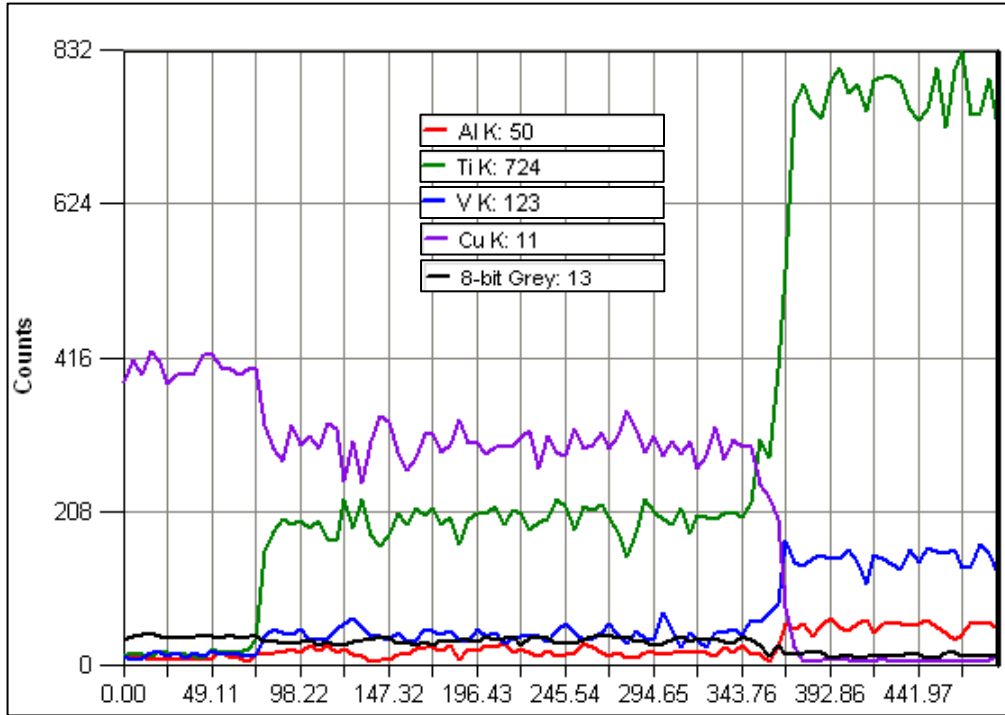
Şekil 6.38’de 890 °C’de 15 dakika süre ile birleştirilmiş numunenin titanyum tarafındaki 5. bölgeden alınan analiz sonucu incelendiğinde titanyum içerisinde Al ve V’nin yanında eser miktarda Cu’nun bulunduğu gözlenmektedir. Buradan birleşmenin arayüzeyinden titanyum tarafına Cu’nun yayılımının çok sınırlı olduğu sonucu çıkarılabilir.

890 °C’de 15 dakika süre ile birleştirilmiş numunenin tümünden alınan analiz sonuçlarına bakıldığında, titanyum atomlarının bakır içerisinde çok miktarda ve daha uzak mesafelere kolayca yayıldığı ancak, aynı durumun bakırın titanyuma difüze olması için yeterli olmadığı sonucunu ortaya çıkarmaktadır.

Şekil 6.41’de 890 °C’de ve 30 dakika süre ile birleştirilmiş numunenin titanyum tarafından başlayarak bakır tarafında sonlandırıldığını gösteren çizgisel EDS analiz yönünü, Şekil 6.42 çizgisel tarama analiz grafiğini ve Şekil 6.43 ise EDS analiz sonucu elde edilen element haritasını göstermektedir. Şekil 6. 41 incelendiğinde birleşme arayüzeyinin bakır tarafında çok geniş bir alanda (yaklaşık 300 μm) farklı renkte bir faz bölgesinin oluştuğu görülmektedir.



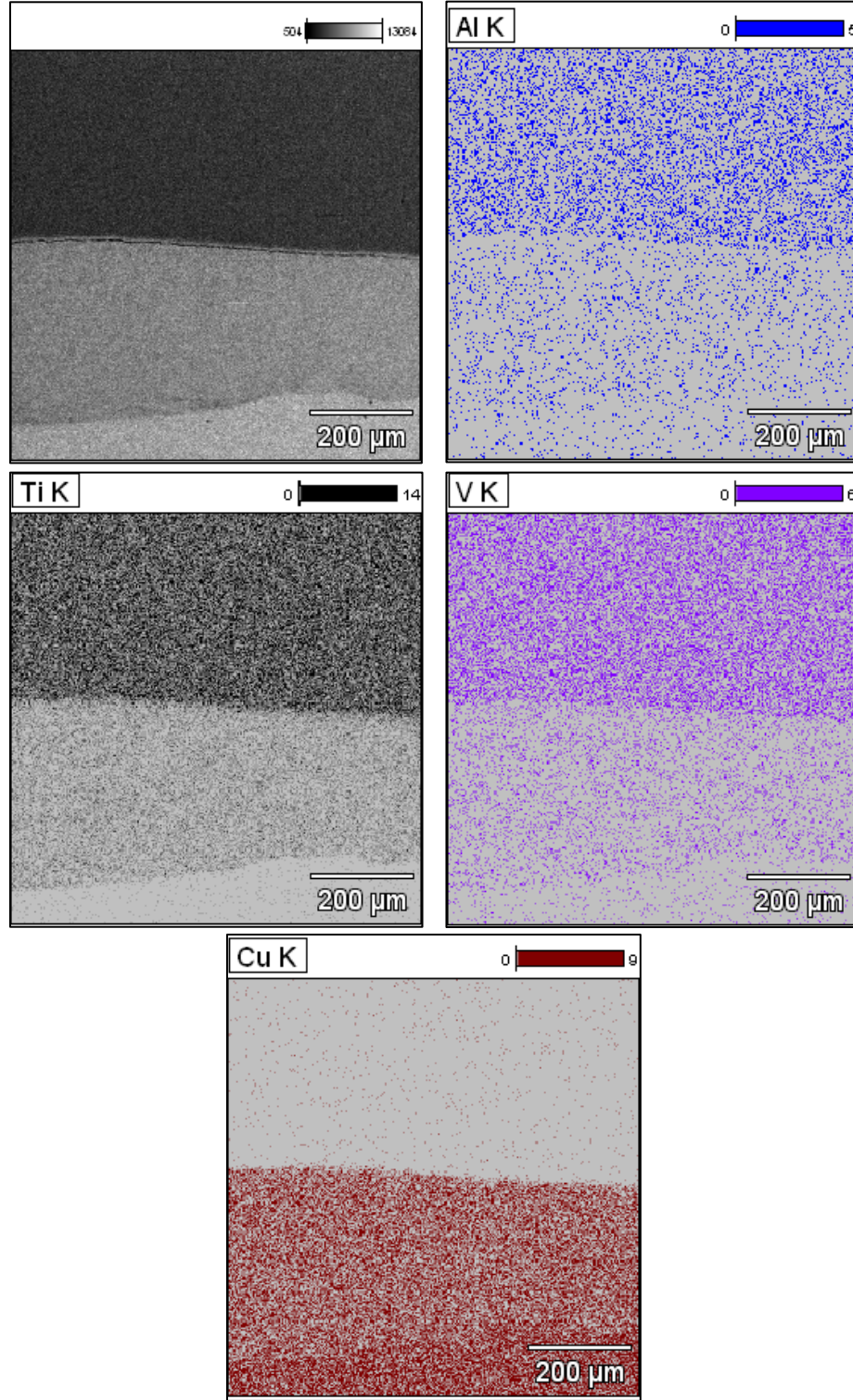
Şekil 6.41. 890 °C’de 30 dakika süre ile birleştirilmiş numunenin çizgisel EDS analizi yapılan bölgelerin görüntüsü.



Şekil 6.42. 890 °C ve 30 dakika süre ile birleştirilmiş olan numunelerden elde edilen EDS çizgisel analizi grafikleri.

Şekil 6.42 incelendiğinde, Şekil 6. 41’de görülen difüzyon bölgesinin burada da aynı mesafede (55 µm’den başlayıp 355 µm’de biten) görüldüğü dikkat çekmektedir. Grafik daha düşük sıcaklıklarda yapılan çizgisel grafiklerle kıyaslandığında (Şekil 6. 22 ve Şekil 6.27) gerek sürenin gerekse sıcaklığın artmasına bağlı olarak difüzyon

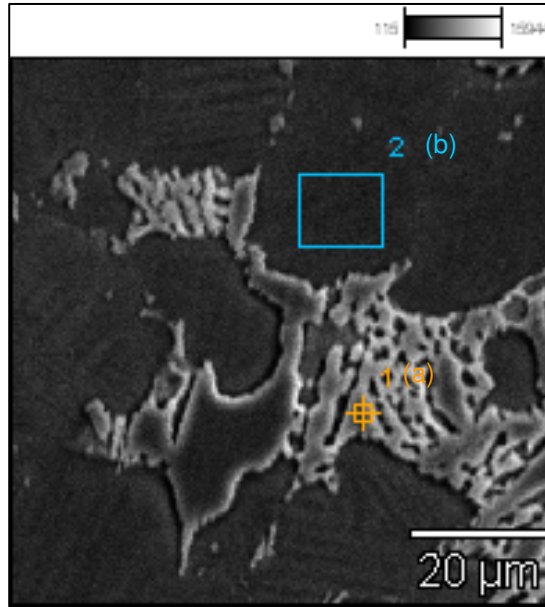
bölgesinin hızla genişlediği sonucu çıkarılabilir. Literatürde, bu durumun nedeninin, Ti ve Cu'nun birbiri içerisinde yüksek çözünürlüğe sahip olmasından kaynaklandığı belirlenmiştir [16].



Şekil 6.43. 890 °C’de 30 dakikadaki EDS analiz sonucu elde edilen element haritası.

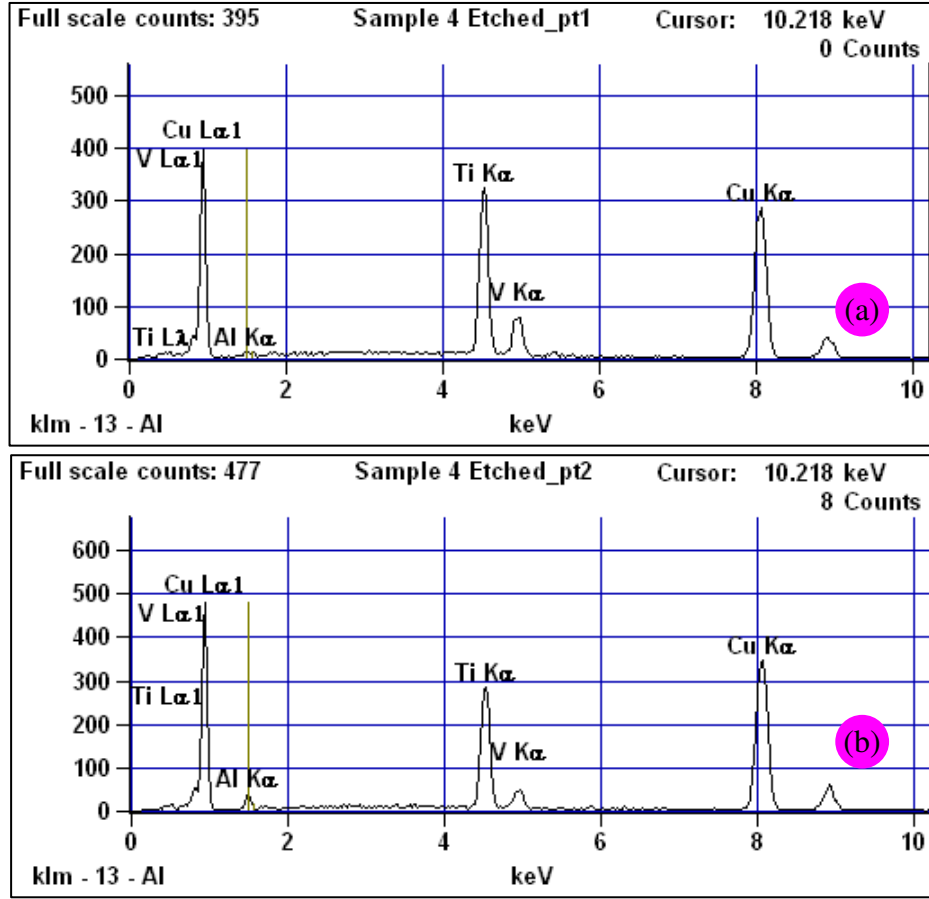
Şekil 6.43’de verilen analiz sonucu elde edilen EDS difüzyon element haritası incelendiğinde, matris malzemeler bakır ve titanyum elementinin yanında titanyum içerisinde mevcut Al ve V elementinin de bakır içerisinde görülmektedir. Ayrıca element haritaları incelendiğinde kaynak arayüzeyindeki difüzyon bölgesinin daha yoğun olduğu gözlenebilmektedir.

Şekil 6.44’de 890 °C’de 30 dakika süre ile birleştirilmiş numunenin EDS analizi yapılan bölgelerin görüntüsü ve Şekil 6.45’de ise bu bölgelerin karakteristik özelliklerini en iyi yansıtan bölgelerinden alınan EDS analiz grafiklerini göstermektedir.



Şekil 6.44. 890 °C ve 30 dakika süreyle birleştirilen numunenin difüzyon bölgesinden EDS analizi yapılan bölgelerin görüntüsü.

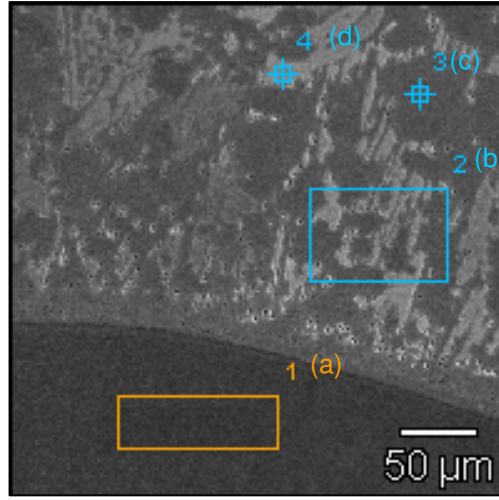
Şekil 6. 44’de difüzyon bölgesindeki görüntüsü verilen alanların analiz sonuçları incelendiğinde (Şekil 6.45) 1. bölgede yapının ağırlıklı olarak bakırdan oluştuğu, bunun yanında 2. bölgenin ise bakırın oranının daha da arttığı görülmektedir. Bir başka ifadele 1. bölgenin yaklaşık olarak % 52 Cu’dan ve 2. bölgenin ise yaklaşık olarak % 65 Cu’dan meydana geldiği söylenebilir. Bu durumda tane sınırı gibi görünen 1. bölgede Cu_4Ti_3 ve tane içi gibi görünen 2. bölgede ise Cu_3Ti_2 intermetalik arabileşiminin meydana geldiği tahmin edilmektedir.



Şekil 6.45. 890 °C 30 dakika süre ile birleştirilmiş numunenin EDS analiz grafikleri a) 1 ve b) 2 nolu bölgeler.

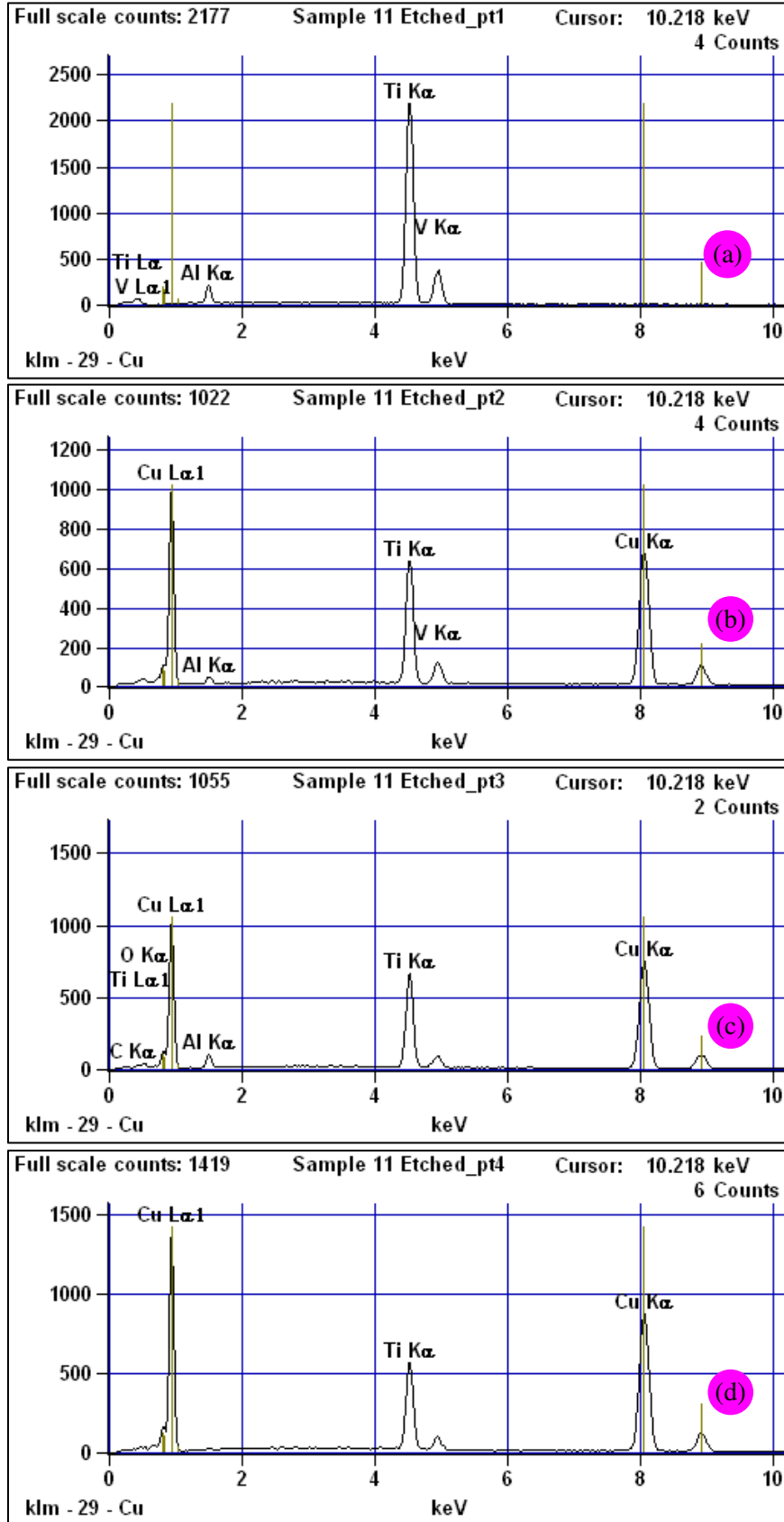
Şekil 6.45’de verilen analiz grafiğine bir başka açıdan bakılacak olunursa, her iki bölgede de V değerlerinin Al değerlerinden daha yüksek olmasıdır. Bu durumun atomların kafes sistemlerindeki yer değiştirme hızlarına bağlı olarak gelişebilen bir durum olabileceği düşünülmektedir. Literatürde alüminyumun aktivasyon enerjisi 144 kJ/mol [43], vanadyumun aktivasyon enerjisi 274 kJ/mol olarak verilmiştir [55]. Bu verilerden yararlanılarak yapılan değerlendirmeler sonucunda aktivasyon enerjisinin büyük olanın difüzyon hızının daha düşük olacağından vanadyum değerinin yüksek olabileceği sonucu çıkarılabilir.

Şekil 6.46'da 890 °C'de 60 dakika süre ile birleştirilmiş numunenin EDS analizi yapılan bölgelerin görüntüsü ve Şekil 6.47'de ise bu bölgenin özelliklerini doğru olarak değerlendirilmesinde yardımcı olacak EDS analiz grafiklerini göstermektedir.



Şekil 6.46. 890 °C'de 60 dakika süre ile birleştirilmiş numunenin EDS analizi yapılan bölgelerin görüntüsü.

Şekil 6. 47'de kaynak arayüzeyine yakın analiz sonuçları incelendiğinde, 1 nolu bölgenin tipik titanyum olduğu ve içerisinde mevcut Al ve V'yi koruduğu görülmektedir. Birleştirmenin difüzyon bölgesinden elde edilen üç farklı bölümden alınan EDS analiz sonuçlarına bakıldığında, her üç bölgede de Cu'nun Ti'den daha fazla miktarda olduğu ve sırasıyla 2. bölgede yaklaşık % 60, 3. bölgede % 55 ve son olarak 4. bölgede % 70 Cu olarak ölçüldüğü belirlenmiştir. Bu bilgiler ışığı altında 2. bölgede Cu_3Ti_2 , 3. bölgede Cu_4Ti_3 ve son olarak 4. bölgede tıpkı 2. bölgede olduğu gibi Cu_3Ti_2 fazlarının oluştuğu tahmin edilmektedir. Literatür ve daha önce benzer konuda yapılan araştırmalar incelendiğinde çalışma sonuçlarının geçmiş verilerle uyum içerisinde olduğu tespit edilmiştir [16,25,56].

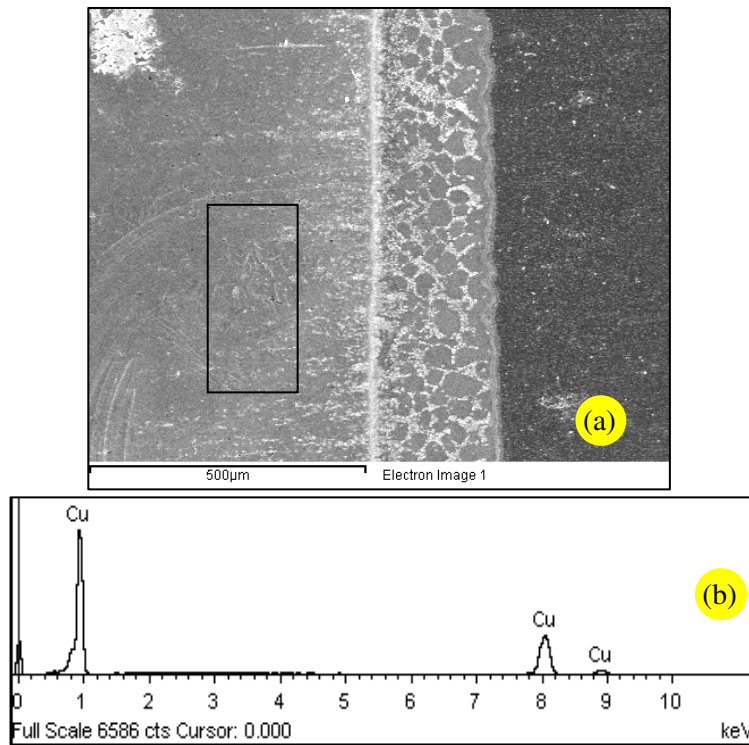


Şekil 6.47. 890 °C’de 60 dakika süre ile birleştirilmiş numunenin bakır tarafının EDS analiz grafikleri (a) 1, (b) 2, (c) 3 ve (d) 4 nolu bölgeler.

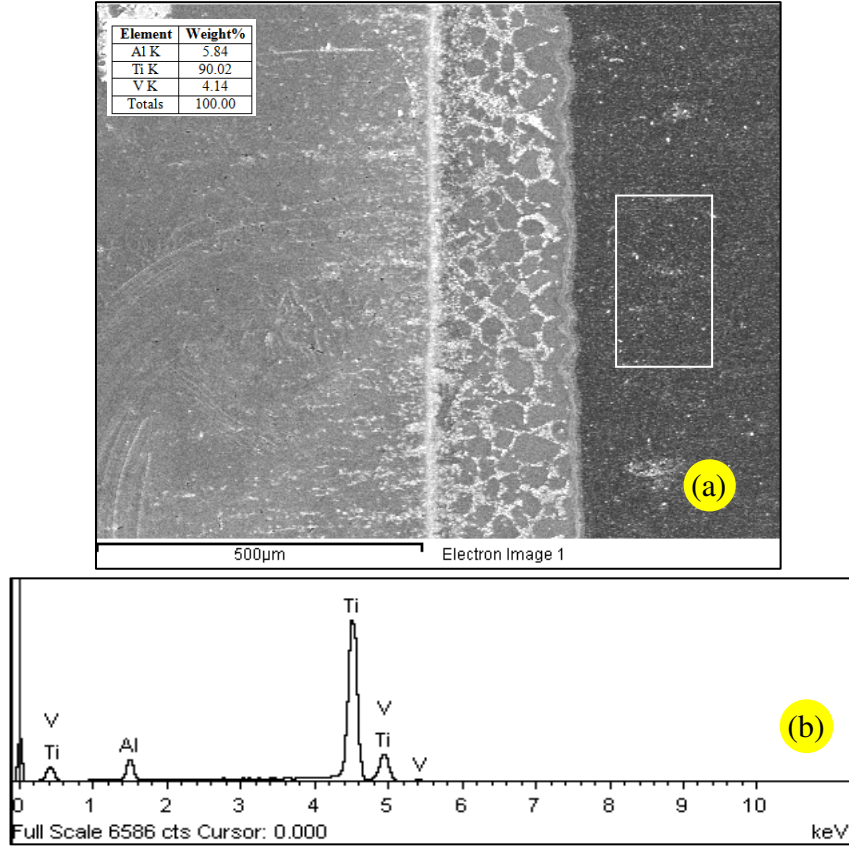
Difüzyon kaynak yöntemi ile farklı sıcaklık ve sürelerde birleştirilen kaynaklı bağlantıların EDS analiz ve görüntüleri genel olarak değerlendirildiğinde, birleştirilen numunelerin reaksiyon bölgelerinde önemli bir değişikliğin söz konusu olduğu görülmektedir. Bu değişimin, artan kaynak sıcaklığı ve bekleme süresine bağlı olarak Cu'nun Ti6Al4V içerisinde yüksek yayınma özelliğinden kaynaklanmakta ve CuTi intermetalik bileşiklerin türlerini ve oranlarını etkilemektedir.

890 °C'de 60 dakika süre ile birleştirilmiş numunenin, çalışmaya farklılık getirmesi ve farklı bir SEM ile verilerin doğruluğunun rakamsal değerlerle bir kez daha vurgulanması için (Tübitak) Marmara Araştırma Merkezinde bulunan JEOL JSM-6335S marka SEM cihazında farklı bölgelerinden fotoğraflar çekilmiş ve EDS ile bölgesel ve çizgisel analizleri gerçekleştirilmiştir.

Şekil 6.48'de kaynaklı numunenin bakır tarafından alınan EDS analizde yapının tamamının (% 100 Cu) bakır olduğu ve bu bölgeye Ti, Al ve V difüzyonunun olmadığı tespit edilmiştir.

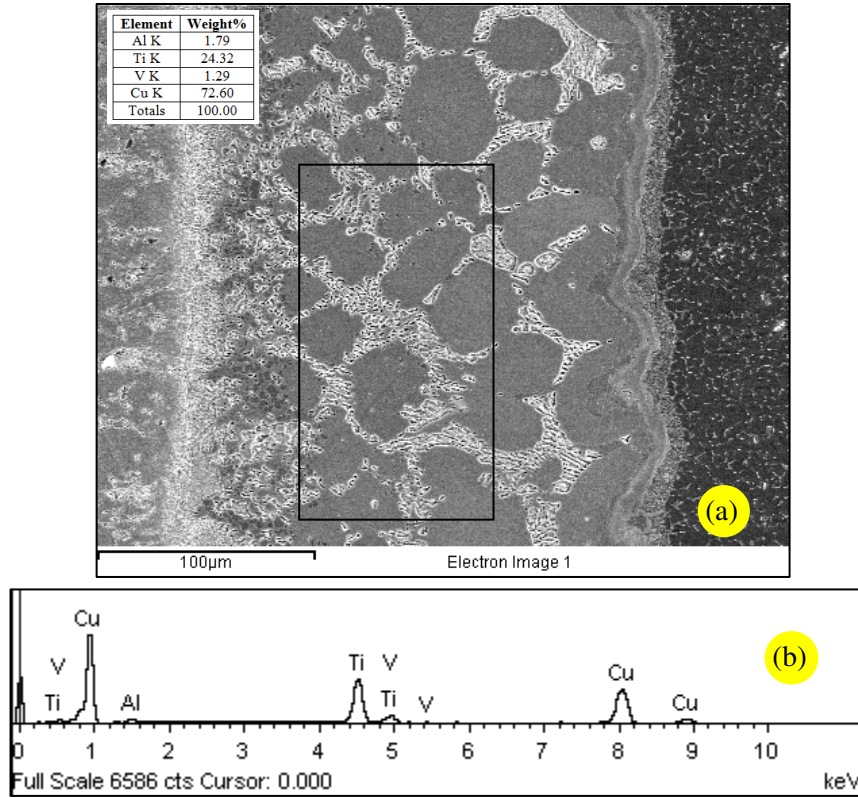


Şekil 6.48. 890 °C'de 60 dakika süre ile birleştirilmiş numunenin EDS analizi yapılan (a) bölgenin görüntüsü ve (b) spektro analizi.



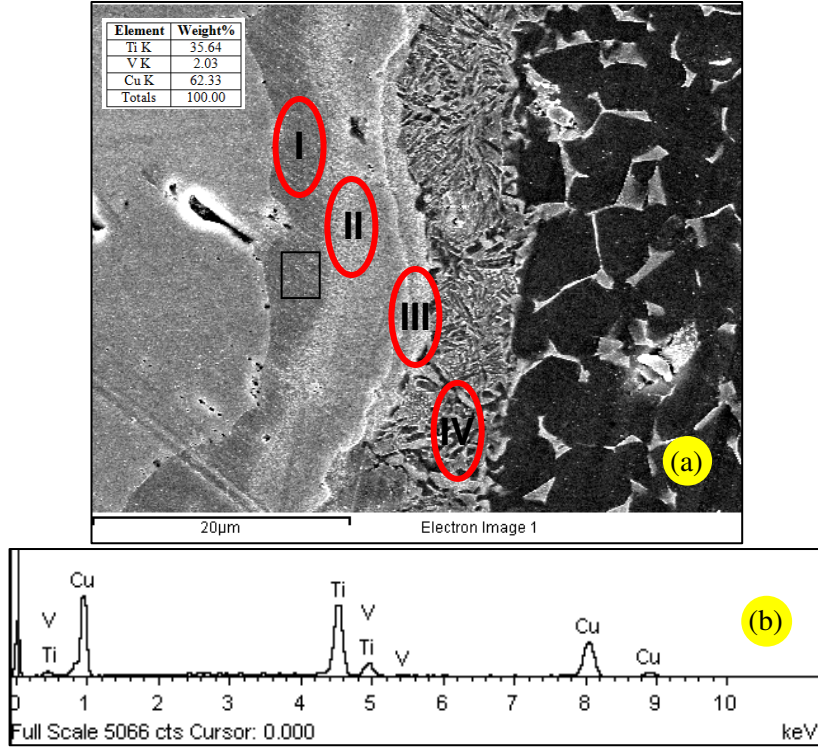
Şekil 6.49. 890 °C’de 60 dakika süre ile birleştirilmiş numunenin EDS analizi yapılan (a) bölgenin görüntüsü ve (b) spektral analizi.

Şekil 6.49’da birleştirmenin titanyum tarafından EDS analizi yapılan bölgenin görüntüsü ve spektral analizi verilmiştir. Yapılan analiz sonucunda birleşmenin difüzyon bölgesine yakın titanyum tarafında, ağırlık olarak; % 5.84 Al, % 90.02 Ti ve % 4.14 V değerleri bulunmuştur. Analiz sonucu bulunan bu değerler, çalışmada kullanılan Grade 5 titanyum malzemenin özelliklerini (Ti-6Al-4V) kanıtlar niteliktedir.

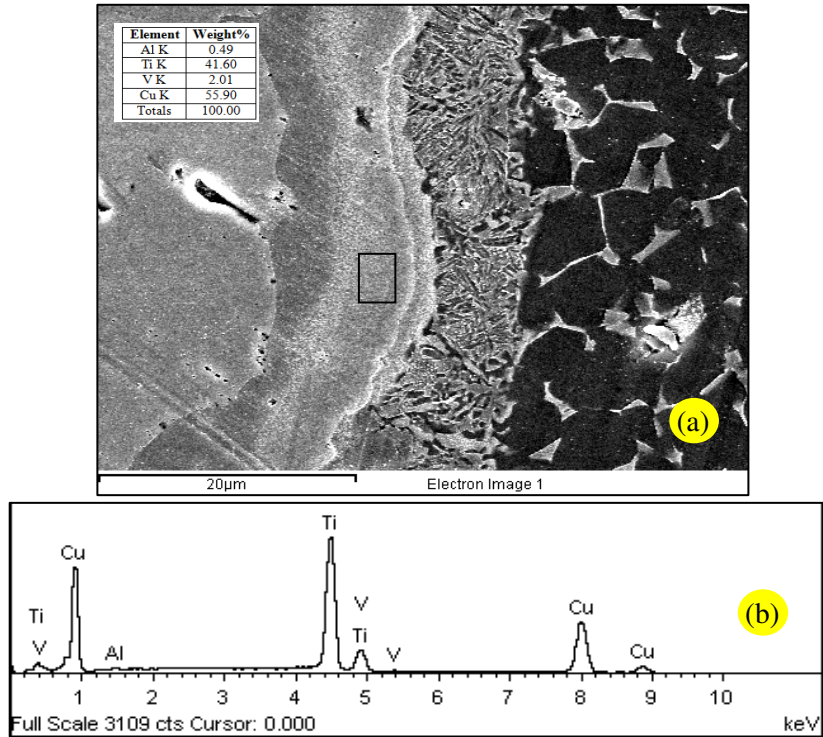


Şekil 6.50. 890 °C’de 60 dakika süre ile birleştirilmiş numunenin EDS analizi yapılan (a) bölgenin görüntüsü ve (b) spektral analizi.

Şekil 6.50. 890 °C’de 60 dakika süre ile birleştirilmiş numunenin EDS analiz yapılan bölgenin görüntüsünü ve spektral analizini göstermektedir. Analiz yapılan bölge reaksiyon bölgesi olup, analiz geniş bir alanda gerçekleştirilmiş ve elde edilen verilerin doğruluk seviyesinin artırılması amaçlanmıştır. Ara bölgede yapılan analizler sonucunda elde edilen değerler ağırlık olarak % 1.79 Al, % 24.32 Ti, % 1.29 V ve % 72.60 Cu’dur. EDS sonucu elde edilen veriler, Ti-Cu denge diyagramına yerleştirildiğinde oluşacak fazın Cu_3Ti_2 intermetalliği olabileceği düşünülmektedir.



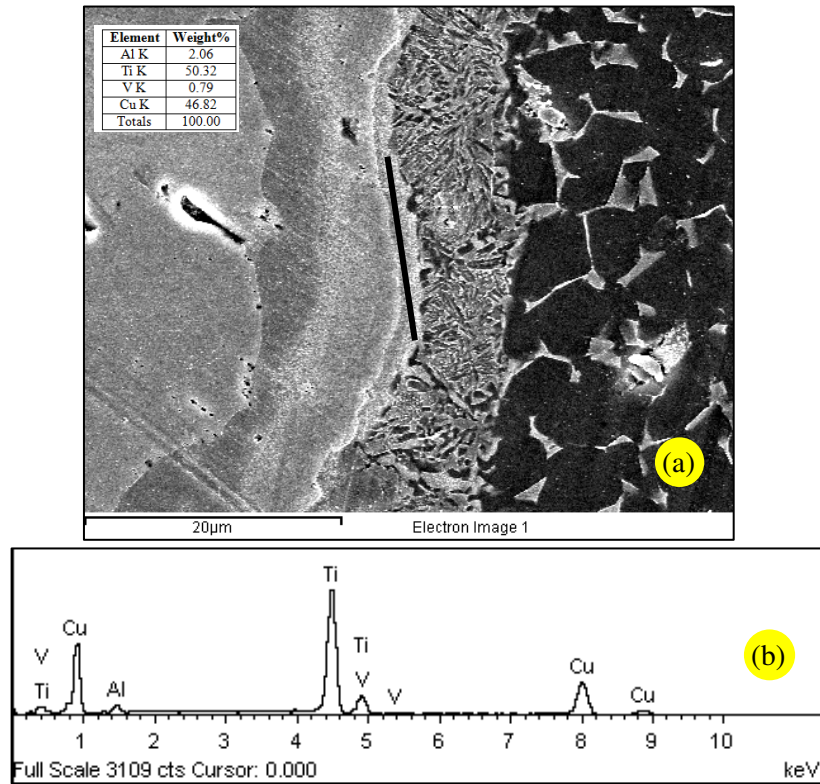
Şekil 6.51. 890 °C'de 60 dakika süre ile birleştirilmiş numunenin EDS analizi yapılan (a) bölgenin görüntüsü ve (b) spektral analizi.



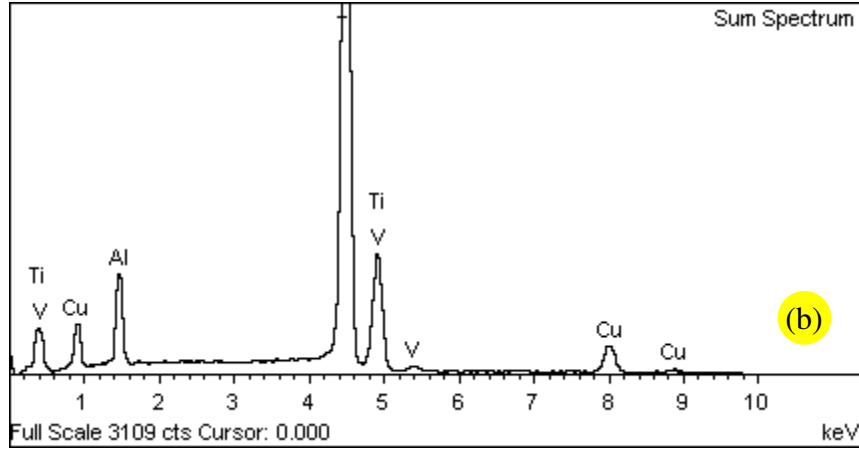
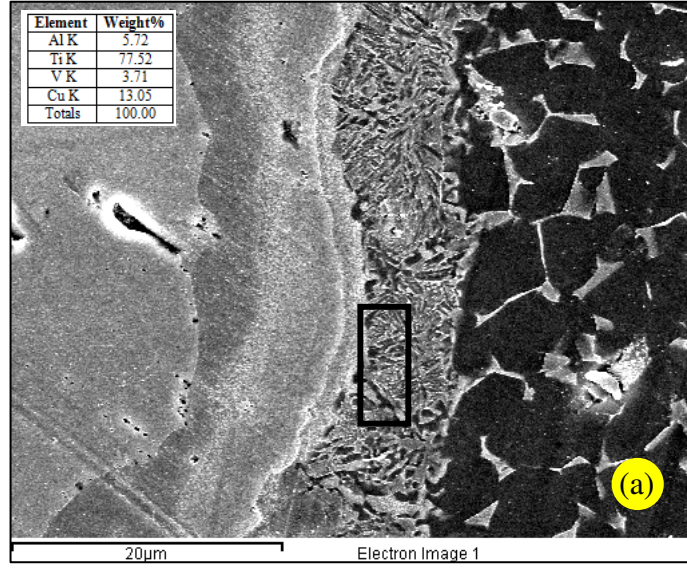
Şekil 6.52. 890 °C'de 60 dakika süre ile birleştirilmiş numunenin EDS analizi yapılan (a) bölgenin görüntüsü ve (b) spektral analizi.

Şekil 6.51 ve Şekil 6.52’de kaynak arayüzeyinin değişik bölgelerinden alınmış olan EDS görüntüleri ve spektral analizleri verilmiştir. Şekil 6.51’deki analiz sonucunda bu bölgede ağırlık olarak % 35.64 Ti, % 2.03 V ve % 62.33 Cu olarak bulunmuştur. Bulunan bu değerler sonucunda oluşabilecek intermetalik fazın Cu_3Ti_2 olabileceği düşünülmektedir. Benzer şekilde Şekil 6.52’de ara bölgeden alınmış olan EDS görüntüsü ve spektral analizi sonucu incelendiğinde yapının % 41.60 Ti, % 2.01 V, % 0.49 Al ve % 55.90 Cu’dan oluştuğu ve bu bileşimdeki bir bileşiğin Cu_4Ti_3 olabileceği düşünülmektedir. Bu iki analiz sonucu değerlendirildiğinde birleşmenin titanyum tarafına gidildikçe Cu miktarının azaldığı, V miktarının değişmediği bunların yanında Al’nin bu bölgede olmadığı görülmektedir.

Şekil 6.53’de dar bir bölge olarak görülen ara bölgeden alınmış olan EDS analiz sonucu değerlendirildiğinde bu bölgenin % 50.32 Ti, % 0.79 V, % 2.06 Al ve Cu % 46.82 olarak bulunmuştur. Bulunan bu değerler sonucunda oluşabilecek intermetalik fazın, CuTi olabileceği düşünülmektedir.



Şekil 6.53. 890 °C’de 60 dakika süre ile birleştirilmiş numunenin EDS analizi yapılan (a) bölgenin görüntüsü ve (b) spektral analizi.



Şekil 6.54. 890 °C’de 60 dakika süre ile birleştirilmiş numunenin EDS analizi yapılan (a) bölgenin görüntüsü ve (b) spektral analizi.

Şekil 6.54’de kaynak arayüzeyinde oluşan son bölgeden alınan analiz sonuçları verilmiştir. Analiz sonucunda bu bölgede % 77.52 Ti, % 3.71 V, % 5.72 Al ve % 13.05 Cu bulunduğu tespit edilmiştir. Bulunan bu değerler sonucunda oluşabilecek intermetalik fazın, α Ti olabileceği görülmektedir.

Şekil 6.48 ve Şekil 6.54 arasındaki veriler incelendiğinde, titanyum ve Ti içerisinde mevcut Al ve V ile bakır malzemelerin yoğunluk farkı ve difüzyon katsayılarından dolayı reaksiyon bölgesinde dört farklı difüzyon bölgesinin oluştuğu tespit edilmiştir. Tüm bu veriler ışığında, kaynak işlemi esnasında sıcaklığın etkisiyle temas eden yüzeyler arasında bir akışın olduğu söylenebilir. Difüzyon çiftlerinin temas yüzeyleri iyi olduğunda, difüze olan iki atomun birbirleriyle yer değiştirmesi gerektiği halde

atomların pozisyonlarını değiştirmediği, bunun yerine boşlukları doldurarak hareket ettiği bilinmektedir. Ayrıca tđm kaynaklı numune arayđzeyleri incelendiğinde orijinal arayđzeyin fiziksel konumunun bakır numune tarafına doğru hareket ettiği tespit edilmiştir. Sonuç olarak bu durumun difúzyon hızlarından kaynaklandiğı, difúzyon çifti arayđzeyinin hareketi sonucunda Kirkendall etkisinin olduğu saptanmıştır. Farklı malzemeler úzerinde yapılan benzer çalışmalar incelendiğinde, çalışma neticesinde elde edilen sonuçların, literatúre uyum içerisinde olduğu tespit edilmiştir [2,16,44,45].

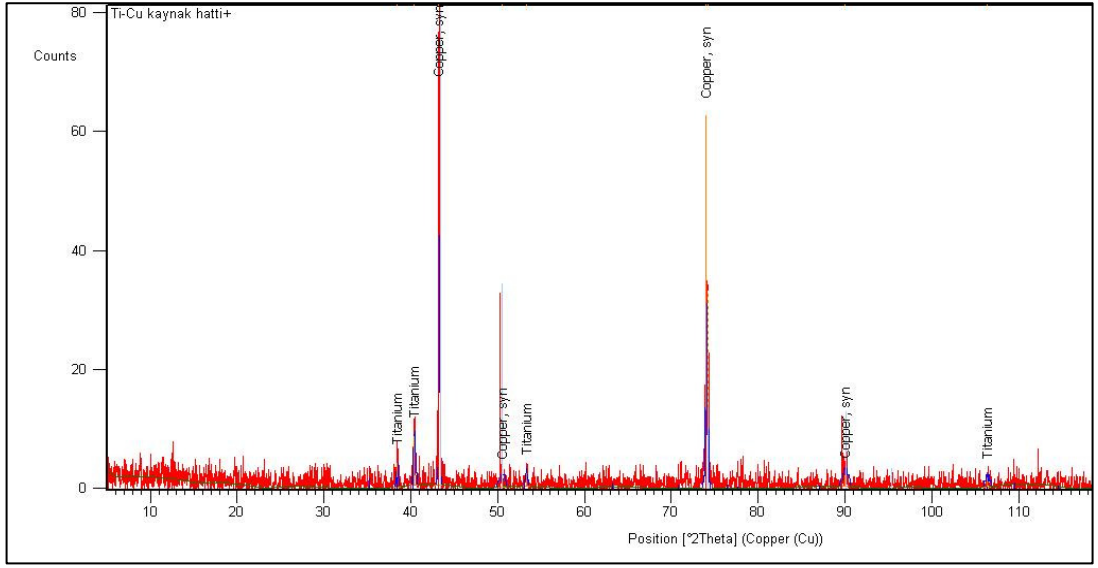
Sonuçlar genel olarak değerlendirildiğinde, EDS analiz sonuçları incelendiğinde, bakırın titanyuma kısa mesafelerde ve dúřuk oranlarda, titanyumun bakıra daha uzun mesafelerde ve yúysek oranlarda difúze olduğu saptanmıştır. Kaynak sonrası reaksiyon bđlgesinde meydana gelen en önemli yapısal değişimin ise kaynak arayđzeyinde meydana geldiği ve bu değişimin Ti-6Al-4V alaşımının hegzagonal sıkı paket kafes yapısına, Cu'nun ise yúzey merkezli kúbik kafes yapısına sahip olmasından kaynaklandiğı belirlenmiştir. Yúzey merkezli kúbik kafes yapısına sahip malzemelerde yayınım olayının, hegzagonal sıkı paket yapılardan daha kolay olduğu bir gerçektir. Ayrıca hegzagonal kafes yapısına sahip metallerde, taban dözlemlerine paralel yđndeki difúzyon hızı, aynı difúzyon ve kafes sistemine ait dik yđne gđre 1000 katına ulaşılabilir [10]. Deneysel çalışmalarda kullanılan titanyumun, bakır içerisinde yayınımının daha hızlı ve/veya fazla olması bu sonucu doğrulamaktadır.

Titanyumun bakır malzemeye, bakırın titanyum malzemeye farklı mesafe ve yoğunlukta difúze olmasının temel nedeninin bu malzemelerin atom ağırlıkları ve difúzyon katsayıları olduğu belirlenmiştir. Daha önceki çalışmalarda titanyumun atomik ağırlığı 47.9 gr/mol, bakırın ise 63.54 gr/mol [1] ve aktivasyon enerjileri ise titanyumun 192.8 kJ/mol [54] bakırın ise 211 kJ/mol [43] olarak verilmiştir. Bu veriler dikkate alındığında atom ağırlığı ve aktivasyon enerjisi dúřuk olan elementin difúzyon yoğunluğu yúysek olacağından, titanyumun bakıra difúzyonu daha yúysek oranlarda bulunmuştur. Alınan SEM gđrúntüleri ve EDS analizleri incelendiğinde, artan súreye bağlı olarak elementlerin karşılıklı difúzyonlarında önemli bir değişimin olduğu gđzlenmiřtir. Son olarak kaynak sıcaklığı ve súresinin artırılması ile karşılıklı difúzyonunun hızlandiğı, dolayısıyla birleştirilebilme kabiliyetinin (kesme dayanımı)

arttığı tespit edilmiştir. Kesme testi sonucu elde edilen veriler bu sonucu desteklemektedir.

6.4.3. X-Ray çalışması

Şekil 6.55’de 890 °C ve 60 dakika süre ile birleştirilmiş numunenin X-Ray analizi grafiği verilmiştir.



Şekil 6.55. X-Ray analiz grafiği

Şekil 6.55’de verilen X ışınları taraması incelendiğinde, kaynak bölgesi etrafında yoğunlukla titanyum ve bakır elementlerine rastlanmıştır. Ayrıca, bakır elementlerinin sinyal oranları titanyuma göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Yapılan analiz sonucunda, birleştirilen numunelerin kaynak alanı küçük olduğundan, titanyum ve bakır elementlerinin sinyallerinin, kaynak arayüzeyinde oluşan fazların içerisinde mi, yoksa kaynak numunelerinden mi geldiği tam olarak belirlenememiştir. Bu nedenle diğer kaynak parametrelerinde birleştirilen numuneler üzerinde bu çalışma gerçekleştirilmemiştir.

BÖLÜM 7

SONUÇLAR

Titanyum ve bakır malzemelerin difüzyon kaynak yöntemi ile farklı sıcaklık ve sürelerde birleştirilerek, değişen kaynak parametrelerinin kaynak performansını nasıl etkilediğinin araştırıldığı bu çalışmada;

- Titanyum ve bakır malzemeleri difüzyon kaynağı ile birleştirebilmek için, uygun kaynak parametrelerinin seçilmesine özen gösterilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır.
- 825 °C sıcaklık ve 15 dakika süre ile çalışılan numunelerde yeterli birleşmenin olmadığı, 900 °C sıcaklık ve 15 dakika süre ile çalışılan numunede ise kaynak sıcaklığı yüksek gelmiş olup, kaynaklı numunelerde plastik deformasyon gözlenmiş ve bu çalışmalar pilot çalışmalar olarak değerlendirilmiştir.
- Bu çalışmada kullanılan kaynak parametreleri dâhilinde, en yüksek arayüzey dayanımı 890 °C'de ve 60 dakika süre ile birleştirilen numunelerden elde edilmiştir.
- Yapılan çalışmalar sonucunda, reaksiyon bölgesinde oluşan intermetaliklerden dolayı, artan sıcaklık ve süre ile birlikte kesme mukavemetinin arttığı belirlenmiştir.
- Yapılan sertlik ölçümleri sonucunda en yüksek sertlik değerinin titanyum malzemedен ara bölgeye doğru arttığı, ara bölgeden bakır bölgesine doğru ise sertlik değerinin giderek azaldığı tespit edilmiştir.
- Titanyumun bakıra, bakırın titanyuma farklı mesafe ve yoğunlukta difüze etmesinin temel nedenlerinin atom çapları, aktivasyon enerjileri ve kafes yapılarından kaynaklandığı gözlemlenmiştir.

- İncelemeler sonucunda birleşme arayüzeyinde, $\beta\text{Cu}_4\text{Ti}$, Cu_2Ti , Cu_3Ti_2 , Cu_3Ti_2 ve CuTi ara fazlarının oluşabileceği sonucuna varılmıştır.
- Titanyum ve bakırın kaynak bölgesinde oluşan fazların, literatürdeki faz diyagramı ve mikroyapı görüntüleri ile uyumlu olduğu, mikroyapı, SEM ve EDS analizleri ile tespit edilmiştir.
- Öneri olarak; kaynak esnasında sıcaklık yükselmesine ve artan süreye bağlı olarak artan difüzyon miktarı, kontrollü soğuma esnasında geriye dönme şüphesi meydana getirmektedir. Bu durumu engellemek için difüzyon kaynak işlemi sonrasında; numuneler farklı ortamlarda soğutularak (yağda, suda ve havada) difüze olan elementlerin geriye dönüşü engellenebilir.
- Ayrıca; mevcut parametreler ışığında Ti6Al4V ile bakır malzemenin, uygun bir vakum atmosferi altında birleştirilerek elde edilen sonuçlar bu çalışmadan elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılabilir.

KAYNAKLAR

1. Atasoy, E., “Titanyumun ve düşük karbonlu çelik çiftinin arabağlayıcı kullanılarak difüzyon kaynağı ile birleştirilebilirliğinin araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, 38-40 (2007).
2. Fidan, L., “Saf alüminyum ve saf bakırın difüzyon kaynağında arafazların oluşumu ve etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Balıkesir, 1-70 (2006).
3. Kurt, B. ve Orhan, N., “Dubleks paslanmaz ve AISI 4140 çeliğinin difüzyon kaynağı tekniği ile birleştirilebilirliğinin araştırılması”, *1. Uluslar Arası Mesleki Ve Teknik Eğitim Teknolojileri Kongresi*, Marmara Üniversitesi, İstanbul, 1280-1286 (2005).
4. Özdemir, U., “Difüzyon kaynaklı TiAl ve Ti6Al4V alaşımlarının içyapı ve mekanik karakterizasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, *Mustafa Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Antakya, 7-40 (2003).
5. Yılmaz, O., “Östenitik Paslanmaz çelik ve bakır çiftinin difüzyon kaynağı ile birleştirilmesinde kaynak parametrelerinin birleştirilmeye etkisi”, Doktora Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ, 50-70 (1999).
6. Çelik, S., “Koruyucu gaz altında saf alüminyum ve bakırın difüzyon kaynağı şartlarının belirlenmesi”, Doktora Tezi, *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Balıkesir, 15-53 (1996).
7. İpekoğlu, G., “Difüzyon kaynaklı TiAl-TiAl alaşımlarının içyapı ve mekanik özelliklerinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Mustafa Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Antakya, 1-62 (2003).
8. Pakdil, M., “Difüzyon kaynağı ile birleştirilmiş Ti ve alaşımlarının kırılma davranışlarının incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Mustafa Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Antakya, 20-45 (2001).
9. Yıldırım, B. Z., “Difüzyon kaynağının demir dışı hafif malzemelere uygulanması”, Yüksek Lisans Tezi, *Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Eskişehir, 5-20 (2001).
10. Demirci, A. H., “Malzeme bilgisi ve malzeme muayenesi”, *Alfa Basım Yayın Dağıtım Şti*, İstanbul, 72-94 (2004).

11. Akbulut H., “Fiziksel metalürji lisans ders notları”, *Mühendislik Fakültesi, Metalurji Malzeme Mühendisliği Bölümü*, Sakarya Üniversitesi <http://web.sakarya.edu.tr/~akbulut/diffusion.pdf> (2006).
12. Yıldırım, Ş., “Ni₃Al metaller arası bileşiğinin AISI 304 paslanmaz çelik ve Ti-6Al-4V alaşımı ile difüzyon kaynağı”, Yüksek Lisans Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ, 25-45 (2003).
13. Tuncel, S. ve Topuz, A., “X210Cr12 takım çeliği ile 25MoCr4 düşük alaşımlı çeliğin difüzyon kaynağı”, *Uluslar arası Kaynak Teknolojisi 96 Sempozyumu*, Gedik Eğitim Vakfı, İstanbul, 212-222 (1996).
14. Dikbaş, H., “Toz metalurjisi (TM) ile üretilmiş Ni-Ti alaşımlarının difüzyon kaynak yöntemiyle birleştirilebilirliğinin araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ, 25-65 (2005).
15. Torun, O., “Fe₃Al (Fe-26Al) alaşımlarının difüzyon kaynağı”, Doktora Tezi, *Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Eskişehir, 28-72 (2003).
16. Bilgin, B., “Ti-6Al-4V/300L malzeme çiftinin bakır ara tabaka kullanılarak difüzyon kaynağı ile birleştirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ, 1-48 (2007).
17. Kahraman, N., “Titanyum ve bakır çiftinin ara bağlayıcılı difüzyon sert lehimlemesi ile fırında birleştirilmesi ve mekanik özelliklerinin incelenmesi”, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 611-618 (2003).
18. Kaya, Y., “Titanyum saclarının nokta direnç kaynağı ile kaynaklanabilirliğinin araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Karabük üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, 30-61 (2010).
19. Kearns, W.H., “Metals and their weldability”, American Welding Society, *Welding Handbook*, Miami, FL/USA, 434-473 (1981).
20. Oğuz, B., “Demir dışı metallerin kaynağı”, *Oerlikon Kaynak Elektronik Yayınları*, Can Matbaa, İstanbul, 1-74 (1998).
21. Kahraman, N., ve Gülenç B., “Modern kaynak teknolojisi”, *Epa-Mat Basım Yayın Ltd. Sti.*, Ankara, 1-99 (2009).
22. Kaluç, E., “Plazma arkı ile kesme ve kaynak işleri”, *Endüstride Bizim Dünyamız Dergisi*, (12): 13-24 (1986).
23. Aydın, M., TR2002 02710 U patentli difüzyon kaynak makinesi, Dumlupınar Üniversitesi, *Ulusal Patent*, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Kütahya, Türkiye, (2002).
24. Bargel, H.J., Schulze, G., çev: Güleç, Ş., Aran, A., “Malzeme bilgisi”, *Tübitak Yayınları*, Gebze, 1-25 (1987).

25. Kundu, S., Ghosh, M., Laik, A., Bhanumurthy, K., Kale, G.B. and Chatterjee, S., “Diffusion bonding of commercially pure titanium stainless steel using Copper interlayer”, *Materials Science And Engineering* A407 (1-2): 154–160 (2005).
26. Üngören, S., “Ti-Al-V alaşımlarının difüzyon kaynaklı bağlantılarının mekanik ve mikroyapısal özelliklerinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kocaeli, 1-70 (2007).
27. Özdemir, N., Aksoy, M., Orhan, N., “Effect of graphite shape in vacuum-free diffusion bonding of nodular cast iron with gray cast iron”, *Journal of Materials Processing Technology*, 141 (2): 228-233 (2003).
28. Kejanlı H., Taşkın M., Çalgülü U., “Ti_{45,0}Ni_{49,6}Cu_{5,4} kompozitinin Cu ve Ni aratabaka kullanılarak difüzyon kaynağı ile birleştirilmesinde kaynak sıcaklığının ve süresinin bağlantı karakteristiği üzerine etkisi”, *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 6 (1): 1-9 (2009).
29. Kurt, B., Orhan, N., Evin, E., and Çalık, A., “Diffusion bonding between Ti–6Al–4V alloy and ferritic stainless steel”, *Materials Letters*, 32 (5): 1747-1750 (2007).
30. Barrena, M.I., Matesanz, L. and Gómez de Salazar J.M., “Al₂O₃/Ti6Al4V diffusion bonding joints using Ag-Cu interlayer”, *Materials Characterization*, 60 (11): 1263-1267 (2009).
31. Ghosh, M., Bhanumurthy, K., Kale, G. B., Krishnan, J. and Chatterjee, S., “Diffusion bonding of titanium to 304 stainless steel”, *Journal of Nuclear Materials*, 407 (1-2): 235–241 (2003).
32. Ustinov, A.I., Falchenko, Yu.V., Ishchenko, A.Ya., Kharchenko, G.K., Melnichenko, T.V. and Muraveynik, A.N., “Diffusion welding of γ -TiAl based alloys through nano-layered foil of Ti/Al system intermetallics”, *Journal of Nuclear Materials*, 16 (8): 1043-1045 (2008).
33. Fukumoto, S., Hirose, A. and Kojiro F. Kobayashi., “An effective joint of continuous SiC/Ti-6Al-4V composites by diffusion bonding”, *Journal of Nuclear Materials*, 5 (8): 1081 1089 (1995).
34. Orhan, N. Khan T. I. and Eroğlu, M., “Diffusion bonding of a microduplex stainless steel to Ti–6Al–4V”, *Scripta Materialia*, 45 (4): 441-446 (2001).
35. Kolukısa, S., “The effect of the welding temperature on the weldability in diffusion welding of martensitic (AISI 420) stainless steel with ductile (Spheroidal Graphite-Nodular) cast iron”, *Journal of Materials Processing Technology*, 186 (1-3): 33–36 (2007).
36. Özdemir, N., Aksoy, M., Orhan, N., “Effect of graphite shape in vacuum-free diffusion bonding of nodular cast iron with gray cast iron”, *Journal of Materials Processing Technology*, 141 (2): 228-233 (2003).

37. Jiangweii, R., Yajiang, L. and Tao, F., “Microstructure characteristics in the interface zone of Ti/Al diffusion bonding”, *Materials Letters*, 56 (5): 647-652 (2002).
38. Yuan, X.J., Sheng, G.M., Qin, B., Huang, W.Z. and Zhou, B., “Impulse pressuring diffusion bonding of titanium alloy to stainless steel”, *Materials Characterization*, 59 (7): 930-936 (2008).
39. Barrena, M.I., Gómez de Salazar, J.M., Merino, N. and Matesanz, L., “Characterization of WC-Co/Ti6Al4V diffusion bonding joints using Ag as interlayer”, *Materials Characterization*, 59 (10): 1407-1411 (2008).
40. Sabetghadam, A., Hanzaki, Z. and Araee, A., “Diffusion bonding of 410 stainless steel to copper using a nickel interlayer”, *Materials Characterization*, 61 (6): 626-634 (2010).
41. Ghosh, M. and Chatterjee, S., “Effect of interface microstructure on the bond strength of the diffusion welded joints between titanium and stainless steel”, *Materials Characterization*, 54 (4-5): 327– 337 (2005).
42. Kahraman, N., “Katı hal kaynak teknikleri”, *Yüksek Lisans Ders Notları*, KBÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metal Eğitimi Anabilimdalı, 1-43 (2007).
43. Erdoğan, M., “Malzeme bilimi ve mühendislik malzemeleri”, *Nobel Yayın Dağıtım*, Ankara, 1:76-94 (1998).
44. Yılmaz O ve Aksoy M., “Paslanmaz çelik ve bakırın difüzyon kaynağında Kirkendall etkisinin kullanılmasıyla gerçek difüzyon sabitlerinin hesaplanması”, *Kaynak Teknolojisi 2. Ulusal Kongresi*, Ankara 53-62 (1999).
45. Mahendran, G., Balasubramanian, V. and Senthilvelan, T. “Influences of diffusion bonding process parameters on bond characteristics of Mg-Cu dissimilar joints”, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 20 (6): 997-1005 (2010).
46. Bilhan, S., “Alimünyum metal köpüklerinin difüzyon kaynağı davranışının incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ, 1-48 (2005).
47. Erden O. İ., “Alimünyum silisyumnitrür kompozit malzemenin difüzyon kaynağı ile kaynaklanabilirliğinin araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ, 1-65 (2005).
48. Kurt, B. ve Somunkıran, İ., “Ostenitik paslanmaz ve orta karbonlu çelik çiftinin difüzyon kaynağı”, *11. Uluslar Arası Malzeme Sempozyumu*, Denizli, 936-940 (2006).

49. Arik, H., Aydın, M., Kurt, A. ve Turker, M., “Weldability of Al_4C_3 -Al composites via diffusion welding technique”, *Materials & Design*, 26 (6): 555-560 (2005).
50. Çetin, M., “Ferritik ve perlitik demir malzemelerin difüzyon kaynağı yöntemiyle birleştirilebilirliğinin araştırılması”, *Journal Engineering Manufacture*, V 225 part B, DOI: 10.1177/2041297510394080, 1-12 (2010).
51. Reza, B. M., Szpunar, J. A., Ashrafizadeh, F and Zandrahimi, M., “The effect of novel Ti -Cu intermetallic compound coatings on tribological properties of copper”, *National Tribology Conference (ROTRIB'03)*, Craiova, Romania, 55-62 (2003).
52. Yıldırım, S. and Kelestemur, M.H., “A study on the solid-state welding of boron-doped Ni_3Al -AISI 304 stainless steel couple”, *Materials Letters*, 59 (10): 1134-1137 (2005).
53. Savaşkan, T., “Malzeme bilgisi ve muayenesi”, *Akademi LTD.ŞTİ. Yayınları*, Trabzon, 129-131 (2004).
54. Anıl K. N., Kuvup P. and Vakıl S., “Effect of heat treatment on tensile behaviour of Ti-6Al-5Zr-0.5Mo-0.25Si alloy”, *Bulletion of Materials Science*, 29 (2): 147-154 (2006).
55. Güzdüz, S. and Cochrane R.C., “Clustering effect on hight temperature tensile behaviour of vanadium microalloyed steel”, *Journal of Materials Processing Technology*, 19 (4): 246-252 (2006).
56. Raghavan, V., Cu-Fe-Ti (Copper-Iron-Titanium), Section II, Phase Diagram Evaluations, *Journal of Phaze Equilibria*, 23 (2): 172-174, (2002).

ÖZGEÇMİŞ

Kemal AYDIN 1987 yılında Trabzon'da doğdu; ilk ve orta öğrenimini aynı şehirde tamamladı. Erdoğan Lisesi Fen Bilimleri Bölümü'nden mezun oldu. 2004 yılında Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Karabük Teknik Eğitim Fakültesi Metal Eğitimi Bölümü'nde öğrenime başlayıp 2008 yılında iyi derece ile mezun oldu. Aynı yıl Karabük üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metal Eğitimi Anabilim Dalı'nda başlamış olduğu yüksek lisans programını, 2011 yılında başarıyla tamamladı.

İLETİŞİM BİLGİLERİ

Tel : (535) 982 5128

E-posta : kemal_616@hotmail.com