

**TİTANYUM VE FERRİTİK PASLANMAZ  
ÇELİK MALZEMELERİN NİKEL ARABAĞLAYICI  
KULLANILARAK DİFÜZYON KAYNAK YÖNTEMİ  
İLE BİRLEŞTİRİLEBİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

**2014  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
İMALAT MÜHENDİSLİĞİ**

**Aydan YILDIZ**

**TİTANYUM VE FERRİTİK PASLANMAZ ÇELİK MALZEMELERİN  
NİKEL ARABAĞLAYICI KULLANILARAK DİFÜZYON KAYNAK  
YÖNTEMİ İLE BİRLEŞTİRİLEBİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

**Aydan YILDIZ**

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

**KARABÜK  
Haziran 2014**

Aydan YILDIZ tarafından hazırlanan “TİTANYUM VE FERRİTİK PASLANMAZ ÇELİK MALZEMELERİN NİKEL ARABAĞLAYICI KULLANILARAK DİFÜZYON KAYNAK YÖNTEMİ İLE BİRLEŞTİRİLEBİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylanm.

Prof. Dr. Nizamettin KAHRAMAN

Tez Danışmanı, İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile İmalat Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 27/ 06/ 2014

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

Başkan : Prof. Dr. Ramazan KAÇAR (KBÜ)

Üye : Prof. Dr. Nizamettin KAHRAMAN (KBÜ)

Üye : Doç. Dr. Ahmet DURGUTLU (GÜ)

İmzası

.... / .... / 2014

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

Prof. Dr. Mustafa BOZ  
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

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

Aydan YILDIZ

## ÖZET

**Yüksek Lisans Tezi**

### **TİTANYUM VE FERRİTİK PASLANMAZ ÇELİK MALZEMELERİN NİKEL ARABAĞLAYICI KULLANILARAK DİFÜZYON KAYNAK YÖNTEMİ İLE BİRLEŞTİRİLEBİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

**Aydan YILDIZ**

**Karabük Üniversitesi**

**Fen Bilimleri Enstitüsü**

**İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı:**

**Prof. Dr. Nizamettin KAHRAMAN**

**Haziran 2014, 105 sayfa**

Bu çalışmada, saf titanyum ile ferritik paslanmaz çelik sac malzemeler farklı sıcaklık (800, 825, 850 ve 875 °C) ve farklı bekleme süreleri kullanılarak (15, 30, 60 ve 120 dk), sabit basınç altında (3 MPa), argon atmosferi ortamında ve nikel arabağlayıcı kullanılarak difüzyon kaynak yöntemi ile birleştirilmiştir. Kaynaklı birleştirmelere, arayüzey dayanımının belirlenebilmesi için çekme-makaslama testi ile sertlik testleri uygulanmıştır. Ayrıca, kaynaklı bağlantıların arayüzeyinde meydana gelen reaksiyon bölgesinin mikroyapı özellikleri, optik ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak analiz edilmiştir.

Çekme-makaslama deneyleri sonunda, düşük sıcaklıklarda birleştirilen kaynaklı birleştirmelerde genellikle kopma, kaynak bölgesinin nikel-ferritik paslanmaz çelik arayüzeyinde, yüksek sıcaklıklarda ise arayüzeyin titanyum tarafında olduğu belirlenmiştir.

Kaynaklı numunelerden, en yüksek arayüzey dayanımı 30 dakika süre ve 850 °C sıcaklıkta birleştirilen numuneden, 214 MPa olarak ölçülmüştür. Sertlik deneyleri sonucunda en yüksek sertlik değerinin birleşmenin arayüzeye en yakın titanyum tarafında olduğu, ayrıca sıcaklık ve sürenin artmasına bağlı olarak sertlik değerlerinin arttığı belirlenmiştir.

SEM/EDS çalışmaları sonucunda, artan sıcaklık ve süreye bağlı olarak difüz eden atom miktarının ve difüzyon mesafesinin arttığı görülmüştür. Ayrıca yapılan noktasal ve çizgisel analizler sonucunda elde edilen kimyasal içeriğe ve Ti-Ni-Fe denge diyagramından faydalanılarak birleşme arayüzeyinde NiTi<sub>2</sub>, Ni<sub>3</sub>Ti, TiNi, Ti<sub>2</sub>Ni, TiFe, TiFe<sub>2</sub>, FeTi, Fe<sub>2</sub>Ti fazlarının meydana gelebileceği sonucuna varılmıştır.

**Anahtar Sözcükler** : Difüzyon kaynağı, titanyum, ferritik paslanmaz çelik, SEM, çekme-makaslama testi ve sertlik.

**Bilim Kodu** : 915.3.019

## **ABSTRACT**

**M. Sc. Thesis**

### **AN INVESTIGATION INTO THE JOINING OF TITANIUM WITH FERRITIC STAINLESS STEEL THROUGH DIFFUSION WELDING USING A NICKEL INTERLAYER**

**Aydan YILDIZ**

**Karabük University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Manufacturing Engineering**

**Thesis Advisor:**

**Prof. Dr. Nizamettin KAHRAMAN**

**June 2014, 105 pages**

In this study, pure titanium and ferritic stainless steel plates were joined through diffusion welding using a nickel interlayer at various temperatures (800, 825, 850 and 875 °C), holding time (15, 30, 60 and 120 min) and under constant pressure (3 MPa) under argon shielding media. The welded joints were subjected to tensile-shear tests and hardness 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).

The tensile-shear test results showed that the fractures occurred mostly in the interface of the Ni-ferritic stainless steel web at lower temperatures. However, the fractures occurred only at the titanium side of the interface at higher temperatures.

The work showed that the highest interface strength (214 MPa) was obtained for the specimens joined at 850 °C for 30 min. It was seen from the hardness results that the highest hardness value was obtained for the titanium side and the hardness values increased with increasing welding temperature and holding time.

SEM/EDS examinations showed that the diffused atoms and diffusion distance increased depending on the increasing temperature and holding time. The formed structures in the reaction areas were determined with the help of Ti-Ni-Fe equilibrium diagram and the chemical composition. It is thought that these structures can be NiTi<sub>2</sub>, Ni<sub>3</sub>Ti, TiNi, Ti<sub>2</sub>Ni, TiFe, TiFe<sub>2</sub>, FeTi, and Fe<sub>2</sub>Ti intermetallic phases in the bonding interface.

**Key Words** : Diffusion welding, titanium, ferritic stainless steel, SEM, tensile-shearing tests and hardness.

**Science Code** : 915.3.019



## TEŞEKKÜR

Bu tez alıőmasının planlanmasında, araőtırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, ilminden faydalandığım, insani ve ahlaki değerleri ile de örnek aldığım ve göstermiş olduğu hoőęörü ve sabırdan dolayı değerli Hocam Sayın Prof. Dr. Nizamettin KAHRAMAN'a sonsuz teőekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışmalarda değerli tecrübe ve desteklerinden dolayı Arő Gör. Yakup KAYA ve emeği geçen arkadaşlarım, Eda ESKİ, Boray TÜRKİLİ ve Kadir İMDAT'a teőekkürlerimi sunarım.

Ve son olarak maddi ve manevi yardımı esirgemedен yanımda oldukları için ve benim bu günlere gelmemde büyük emeği olan annem Fatma YILDIZ, babam Halil YILDIZ ve abim Orhan YILDIZ'a çok teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER .....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	xvi
BÖLÜM 1 .....	1
GİRİŞ .....	1
BÖLÜM 2 .....	4
DİFÜZYON .....	4
2.1. SAF SİSTEMLERDE KENDİ KENDİNE DİFÜZYON.....	6
2.2. ALAŞIMLARDA DİFÜZYON .....	7
2.3. DİFÜZYON MEKANİZMALARI .....	7
2.3.1. Arayer Difüzyon Mekanizması.....	8
2.3.2. Yeralan Difüzyon Mekanizması.....	9
2.4. AKTİVASYON ENERJİSİ .....	10
2.5. KARARLI HAL DİFÜZYONU (I FICK KANUNU) .....	11
2.6. KARARSIZ HAL DİFÜZYONU (II FICK KANUNU).....	11
BÖLÜM 3 .....	14
DİFÜZYON KAYNAĞI.....	14
3.1. DİFÜZYON KAYNAĞI ÇEŞİTLERİ.....	17
3.1.1. Katı Hal Difüzyon Kaynağı.....	17
3.1.2. Sıvı Hal Difüzyon Kaynağı ve Difüzyon Lehimleme .....	18

	<b><u>Sayfa</u></b>
3.1.3. Süperplastik Şekil Verme ve Difüzyon Kaynağı Kombinasyonu .....	18
3.2. DİFÜZYON KAYNAK PARAMETRELERİ .....	19
3.2.1. Kaynak Sıcaklığı.....	19
3.2.2. Kaynak Basıncı.....	22
3.2.3. Kaynak Süresi .....	23
3.2.4. Yüzey Şartları .....	25
3.2.5. Kaynak Ortamı.....	27
3.2.6. Birleştirilecek Malzemenin Tane Boyutları ve Mikroyapısı .....	28
3.3. DİFÜZYON KAYNAĞI BAĞLANTI TÜRLERİ.....	28
3.3.1. Difüzyon Kaynağında Ara Tabaka .....	28
3.4. DİFÜZYON KAYNAĞI İLE BİRLEŞTİRİLECEK MALZEMELER.....	31
3.5. TİTANYUM VE TİTANYUM ALAŞIMLARININ DİFÜZYON KAYNAĞI.....	32
3.6. DİFÜZYON KAYNAĞININ GENEL ÖZELLİKLERİ.....	34
3.7. DİFÜZYON KAYNAĞININ DİĞER KAYNAK YÖNTEMİ İLE KARŞILAŞTIRILMASI (AVANTAJLARI).....	35
 BÖLÜM 4 .....	 37
TİTANYUM VE ALAŞIMLARI .....	37
4.1. TİTANYUM VE ALAŞIMLARININ ÖZELLİKLERİ .....	39
4.2. TİTANYUM VE ALAŞIMLARININ KAYNAK EDİLEBİLİRLİĞİ .....	40
4.3. TİTANYUM ALAŞIMLARININ KATI HAL KAYNAK YÖNTEMLERİ. 42	42
4.3.1. Sürtünme Kaynağı .....	42
4.3.2. Patlama Kaynağı .....	43
4.3.3 Difüzyon Kaynağı.....	45
 BÖLÜM 5 .....	 46
PASLANMAZ ÇELİKLER VE ÇEŞİTLERİ.....	46
5.1. FERRİTİK PASLANMAZ ÇELİKLER .....	46
5.1.1. % 12-14 Krom (Cr) İçeren Ferritik Paslanmaz Çelikler.....	47
5.1.2. % 17-19 Krom (Cr) İçeren Ferritik Paslanmaz Çelikler.....	48
5.1.3. % 22-27 Krom (Cr) İçeren Ferritik Paslanmaz Çelikler.....	48
5.2. MARTENZİTİK PASLANMAZ ÇELİKLER.....	48

	<u>Sayfa</u>
5.3. ÖSTENİTİK PASLANMAZ ÇELİKLER .....	49
5.4. ÇÖKELTMEYLE SERTLEŞTİRİLEN PASLANMAZ ÇELİKLER .....	51
5.4.1. Yarı Östenitik Tip Paslanmaz Çelikler .....	51
5.4.2. Yarı Martenzitik Tip Paslanmaz Çelikler .....	52
5.5. DUPLEKS PASLANMAZ ÇELİKLER .....	52
BÖLÜM 6 .....	54
DENEYSEL ÇALIŞMALAR .....	54
6.1. KAYNAKLARIN YAPILIŞI .....	55
6.2. ÇEKME-MAKASLAMA TESTİ .....	58
6.3. SERTLİK ÖLÇÜMÜ .....	59
6.4. METALOGRAFİK ÇALIŞMALAR .....	60
6.5. TARAMALI ELEKTRON MİKROSKOBU İNCELEMESİ .....	62
BÖLÜM 7 .....	64
DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA .....	64
7.1. ÇEKME-MAKASLAMA DENEYİ .....	64
7.2. SERTLİK ÖLÇÜMÜ .....	68
7.3. OPTİK MİKROSKOP ÇALIŞMALARI .....	73
7.4. TARAMALI ELEKTRON MİKROSKOBU (SEM) ÇALIŞMALARI .....	77
7.4.1. 800 °C’de Yapılan Çalışmalar .....	78
7.4.2. 825 °C’de Yapılan Çalışmalar .....	82
7.4.3. 850 °C’de Yapılan Çalışmalar .....	88
7.4.4. 875 °C’de Yapılan Çalışmalar .....	89
BÖLÜM 8 .....	97
SONUÇLAR .....	97
KAYNAKLAR .....	99
ÖZGEÇMİŞ .....	106

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

Şekil 2.1. Serbest enerjinin durum değişimine bağlılığı .....	4
Şekil 2.2. Konsantrasyon gradyanının şematik gösterimi .....	5
Şekil 2.3. Kendi kendine difüzyonun şematik görünümü .....	6
Şekil 2.4. Bakır nikel çift sıcaklık uygulanmadan önce, Bakır nikel çifti sıcaklık uygulandıktan sonra Cu-Ni konsantrasyonu .....	7
Şekil 2.5. Arayer difüzyonunun oluşumu.....	8
Şekil 2.6. YMK kafes içerisinde atomun boş bir konuma hareketi.....	10
Şekil 2.7. Yeralan ve arayer difüzyonunda aktivasyon enerjisi değişimi .....	10
Şekil 2.8. Kararsız hal difüzyonunda konsantrasyon profili .....	12
Şekil 2.9. Kararsız hal difüzyonunda farklı sıcaklıklarda oluşan konsantrasyon.....	13
Şekil 3.1. Difüzyon kaynağının üç aşamalı mekanizması.....	15
Şekil 3.2. Difüzyon kaynağı mekanizması.....	16
Şekil 3.3. Süperplastik şekil verme difüzyon kaynağı kombinasyonu klasik petek panel ve sandviç petek panel.....	19
Şekil 3.4. Sıcaklık ve uygulanan basıncın sürünme eğrisine tesiri .....	20
Şekil 3.5. Sıcaklığın birleşebilirlik üzerine etkisi.....	20
Şekil 3.6. Bağlantının kayma mukavemeti ile kaynak süresi arasındaki ilişki .....	24
Şekil 3.7. Metal bir yüzeyin tabakalarının şematik kesiti .....	26
Şekil 3.8. Difüzyon kaynağında ara tabaka şematik ve Ti-Cu makroyapı.....	29
Şekil 3.9. Ara tabakanın kaynak bölgesine tesiri .....	30
Şekil 4.1. Sürtünme kaynağı mekanizması .....	42
Şekil 4.2. Patlamalı kaynağın şematik resmi paralel düzlemde eğik düzlemde .....	44
Şekil 4.3. Patlamalı kaynak ile elde edilmiş dalgalı arayüzey görünümü.....	44
Şekil 6.1. Difüzyon kaynak setinin fotoğraf ve şematik görünümü.....	56
Şekil 6.2. Birleştirme İşleminin şematik gösterimi .....	56
Şekil 6.3. Çekme-makaslama test cihazı görüntüsü.....	59
Şekil 6.4. Mikrosertlik ölçüm yapılan bölgeler ve ölçüm izleri ( $\mu\text{m}$ ).....	60
Şekil 6.5. Mikrosertlik ölçüm cihazı .....	60

## Sayfa

Şekil 6.6. Kaynaklı numunelerin soğuk kalıba alınmış şekli .....	61
Şekil 6.7. Metalografik incelemede kullanılan optik mikroskop görüntüsü. ....	62
Şekil 6.8. Çalışmalarda kullanılan taramalı elektron mikroskobu .....	62
Şekil 7.1. 15 dakika süre ile birleştirilmiş numunelerin çekme dayanımı test grafikleri .....	65
Şekil 7.2. Çekme–makaslama deney sonuçları .....	66
Şekil 7.3. 800 °C birleştirilen numunelerden elde edilen sertlik değerleri .....	69
Şekil 7.4. 825 °C birleştirilen numunelerden elde edilen sertlik değerleri .....	70
Şekil 7.5. 850 °C birleştirilen numunelerden elde edilen sertlik değerleri .....	70
Şekil 7.6. 875 °C birleştirilen numunelerden elde edilen sertlik değerleri .....	71
Şekil 7.7. 800 °C ‘de birleştirilmiş numunelerin mikroyapısı .....	74
Şekil 7.8. 825 °C ‘de birleştirilmiş numunelerin mikroyapısı .....	75
Şekil 7.9. 850 °C ‘de birleştirilmiş numunelerin mikroyapısı .....	76
Şekil 7.10. 875 °C ‘de birleştirilmiş numunelerin mikroyapısı .....	77
Şekil 7.11. Noktasal SEM/EDS analiz sonuçları (800 °C ve 30 dk) .....	78
Şekil 7.12. Çizgisel SEM/EDS analiz sonuçları (800 °C ve 30 dk) .....	79
Şekil 7.13. Noktasal SEM/EDS analiz sonuçları (800 °C ve 60 dk) .....	80
Şekil 7.14. Çizgisel SEM/EDS analiz sonuçları (800 °C ve 60 dk) .....	80
Şekil 7.15. Noktasal SEM/EDS analiz sonuçları (800 °C ve 120 dk) .....	81
Şekil 7.16. Çizgisel SEM/EDS analiz sonuçları (800 °C ve 120 dk) .....	81
Şekil 7.17. Noktasal SEM/EDS analiz sonuçları (825 °C ve 15 dk) .....	83
Şekil 7.18. Çizgisel SEM/EDS analiz sonuçları (825 °C ve 15 dk) .....	83
Şekil 7.19. Noktasal SEM/EDS analiz sonuçları (825 °C ve 30 dk) .....	84
Şekil 7.20. Çizgisel SEM/EDS analiz sonuçları (825 °C ve 30 dk) .....	84
Şekil 7.21. Noktasal SEM/EDS analiz sonuçları (825 °C ve 60 dk) .....	85
Şekil 7.22. Çizgisel SEM/EDS analiz sonuçları (825 °C ve 60 dk) .....	86
Şekil 7.23. Noktasal SEM/EDS analiz sonuçları (825 °C ve 120 dk) .....	86
Şekil 7.24. Çizgisel SEM/EDS analiz sonuçları (825 °C ve 120 dk) .....	87
Şekil 7.25. Noktasal SEM/EDS analiz sonuçları (850 °C ve 15 dk) .....	88
Şekil 7.26. Çizgisel SEM/EDS analiz sonuçları (850 °C ve 15 dk) .....	89

**Sayfa**

Şekil 7.27. Noktasal SEM/EDS analiz sonuçları (875 °C ve 15 dk).....	90
Şekil 7.28. Çizgisel SEM/EDS analiz sonuçları (875 °C ve 15 dk).....	90
Şekil 7.29. Noktasal SEM/EDS analiz sonuçları (875 °C ve 30 dk).....	91
Şekil 7.30. Çizgisel SEM/EDS analiz sonuçları (875 °C ve 30 dk).....	91
Şekil 7.31. Noktasal SEM/EDS analiz sonuçları (875 °C ve 60 dk).....	92
Şekil 7.32. Çizgisel SEM/EDS analiz sonuçları (875 °C ve 60 dk).....	93
Şekil 7.33. Ni-Cr,Ti-Cr, Ti-Ni,Ti-Fe, Fe-Ni elementlerinin ikili denge diyagramları.....	95
Şekil 7.34. Ti-Fe-Ni üçlü faz diyagramları .....	95

## ÇİZELGELER DİZİNİ

### Sayfa

Çizelge 3.1. Difüzyon kaynağı yapılabilen malzeme kombinasyonları .....	32
Çizelge 3.2. Titanyum alaşımlarının sert lehimlenmesinde kullanılan ilave dolgu metaller .....	33
Çizelge 4.1. Bazı titanyum ve alaşımları için mekanik özellikler .....	38
Çizelge 4.2. Biyomedikal uygulamalarda kullanılan titanyum alaşımları.....	39
Çizelge 4.3. Titanyum ve alaşımlarının kaynak edilebilirliği .....	41
Çizelge 5.1. Ferritik paslanmaz çelik tipleri .....	47
Çizelge 5.2. Dövme martenzitik paslanmaz çeliklerin kimyasal kompozisyonları ...	49
Çizelge 5.3. Östenitik paslanmaz çeliklerin kimyasal kompozisyonları .....	50
Çizelge 5.4. Bazı çökelti sertleştirilmiş yarı östenitik paslanmaz çeliklerin nominal kimyasal birleşimleri .....	51
Çizelge 5.5. Bazı çökelti sertleştirilmiş martenzitik paslanmaz çeliklerin nominal kimyasal birleşimleri .....	52
Çizelge 5.6. Dupleks paslanmaz çeliklerin kimyasal bileşimleri (% bileşim ).....	53
Çizelge 6.1. Titanyumun kimyasal analizi (% ağırlık) .....	54
Çizelge 6.2. Ferritik paslanmaz çeliğin kimyasal analizi (% ağırlık) .....	54
Çizelge 6.3. Arabağlayıcı nikelin kimyasal analizi ( % ağırlık) .....	54
Çizelge 6.4. Deneylerde kullanılan kaynak parametreleri .....	57
Çizelge 7.1. SEM/EDS çalışması gerçekleştirilen kaynaklı numuneler .....	78



## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### SİMGELER

C : Karbon

Cr : Krom

Fe : Demir

Mn : Mangan

N : Azot

Ni : Nikel

O : Oksijen

Ti : Titanyum

$\alpha$  : Alfa

$\beta$  : Beta

### KISALTMALAR

AISI : American Iron and Steel Institute (Amerika Demir ve Çelik Enstitüsü)

ASTM : American Society for Testing and Materials

AWS : American Welding Society (Amerika Kaynak Topluluğu )

DIN : Deutch Industrie Normen (Alman Endüstri Normları)

EDS : Energy Dispersive Spectrum (Enerji Dağıtıcı Spektrum)

EN : Europa Norm (Avrupa Normu)

HMK : Hacim Merkezli Kübik

HSP : Hegzagonal Sıkı Paket

SEM : Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskop)

## 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 elde edilmesi, bilinen kaynak yöntemleri ile zordur. Bu sebeple, yeni ve uygulaması yüksek bilgi ve teknoloji gerektiren kaynak yöntemleri geliştirilmiştir. Bu yöntemlerde, ana metal ergimedığı için bu işleme “katı hal kaynağı” denilmektedir [1].

Difüzyon kaynağı, bir katı hal kaynak yöntemidir. Yöntem, 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 kimyasal derişim farkı difüzyonu etkileyen başlıca parametrelerdir. İşte bu parametreler, dolayısıyla difüzyon kaynağını da etkilemektedir. Difüzyon kaynağının mekanizmaları ise plastik deformasyon, sürünme, difüzyon ve yeniden kristalleşmedir [2].

Difüzyon kaynak yöntemi ile aralarında seramik ve kompozitlerinde yer aldığı, birçok yeni ve birbiriyle birleştirilmeleri ergitme 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 birleştirilememeleri, difüzyon kaynağına önem kazandırmıştır. Difüzyon kaynağı ile yapılan bileştirmelerde, ana metaller

ergimedenden birleştirme sağlandığı, ön ve son tavlamaya ihtiyaç duyulmadığı, bir kerede karmaşık şekilli birleştirmeler yapılabilirdiği, istenmeyen faz dönüşümleri 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 distorsiyonla, benzer ve benzer olmayan malzemelerin birleştirilmesinde alışılmışın dışında bir birleştirme imkanı sağlar [3].

Titanyum ve alaşımları; endüstriyel uygulamalarda kullanılan en iyi mühendislik malzemelerinden biridir. Titanyum mükemmel korozyon direnci ve özel dayanım istenilen yapılar için idealdir. Ticari saf titanyum; tank üretiminde, ısı değiştiricilerde, kimyasal işlem için reaktör gemileri ve güç üretim tesisinde kullanılır. Titanyum ve alaşımları yüksek sıcaklıklarda son derece kimyasal reaktiftirler. Kaynak süresince, atmosferden kolaylıkla oksijen ve azot emerler. Bu yüzden bu malzemelerin kaynağı zordur. Titanyum ve alaşımlarının kullanımının artışıyla, bu malzemelerin kaynağı daha önemli hale gelmiştir [4].

Bu çalışmada, difüzyon, difüzyon kaynağı ve difüzyon kaynağı esnasında kullanılan kaynak parametreleri ile kaynak mekanizmaları, daha önce yapılmış bilimsel çalışmalar da gözden geçirilerek incelenmiş ve bu kaynak yönteminin önemi ve gerekliliği yinelenmeye çalışılmıştır. Bunun yanında deneysel çalışmada kullanılan malzemelerle ilgili (titanyum ve ferritik paslanmaz çelik) kapsamlı bir literatür bilgisi verilmeye çalışılmıştır. Ayrıca çalışmada, difüzyon kaynağında arabağlayıcı kullanılması ve arabağlayıcı kullanımının sağladığı avantajlar tanıtılmıştır.

Hazırlanan bu çalışma, genel olarak literatür ve yapılan deneysel çalışmalar olmak üzere iki ana başlık altında toplanmıştır. Çalışmanın literatür kısmı beş alt başlık altında toplanmıştır. Bunlar; giriş, difüzyon, difüzyon kaynak yöntemi, titanyum ve alaşımları, paslanmaz çelikler ve çeşitleridir. Çalışmanın altıncı bölümünde deneysel çalışmalarda kullanılan malzemelerin fiziksel ve bazı mekanik özellikleri (titanyum, ferritik paslanmaz çelik ve nikel) verilmiştir. Ayrıca kaynak işlem şartları ve birleştirme esnasında kullanılan kaynak parametreleri ve kaynak işleminin gerçekleşme aşamaları bu bölüm içerisinde sunulmuştur. Bunun yanında, farklı sıcaklık ve sürelerde difüzyon kaynağı yapılan birleştirmelerin kalitesini belirlemek için uygulanan mekanik testler (çekme-makaslama ve sertlik testi) ve taramalı elektron mikroskop (SEM) çalışmaları bu bölümde detaylı bir şekilde anlatılmıştır.

Deneysel sonuçlar ve tartışma başlıklı yedinci bölümde, kaynaklı numunelere uygulanan çekme-makaslama testlerinden elde edilen veriler, grafiksel olarak değerlendirilmiştir. Ayrıca kaynaklı numuneler üzerinden yapılan sertlik ölçüm sonuçları grafik üzerine aktararak değerlendirilmeye çalışılmıştır. Sonuçlar ve tartışma bölümünde son olarak, optik mikroskop ve SEM çalışmalarından elde edilen mikroyapı incelemeleri ile SEM/EDS analiz sonuçları verilerek yorumlanmıştır. Deneysel çalışmalardan elde edilen tüm veriler, daha önce yapılmış çalışmalarla “Neden-Sonuç” ilişkisi içerisinde değerlendirilmiştir.

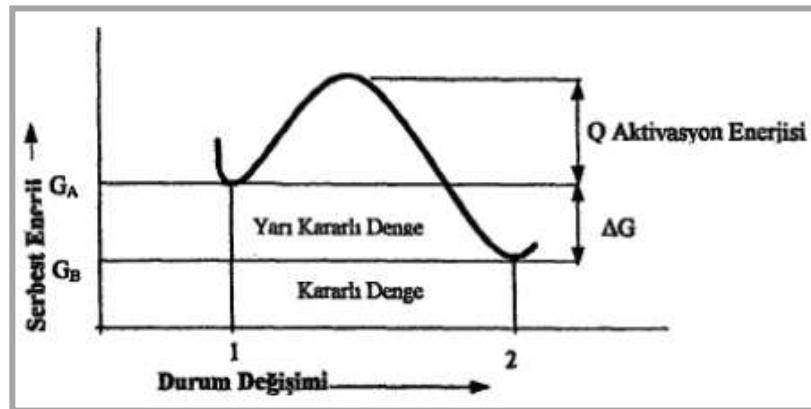
Bu çalışma neticesinde elde edilen bilimsel verilerin özetle açıklandığı yedinci ve son bölümde ise, deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen veriler, deneysel çalışmanın amacına uygun bir biçimde özetlenmiştir.

## BÖLÜM 2

### DİFÜZYON

Difüzyon; atomik bir işlem olup, yüksek konsantrasyonlu bölgeden daha düşük konsantrasyonlu bölgeye atomların hareket etmesiyle oluşur ve kimyasal derişim farklılığı her yerde aynı olana kadar difüzyon devam eder [5]. Difüzyon sıcaklık, basınç ve konsantrasyon farkı ile doğrudan ilgilidir. Sıcaklık yükseldikçe, atomların hareket kabiliyeti artar ve dolayısıyla da difüzyon için gerekli olan atomların yer değişimi hızı da artar [6].

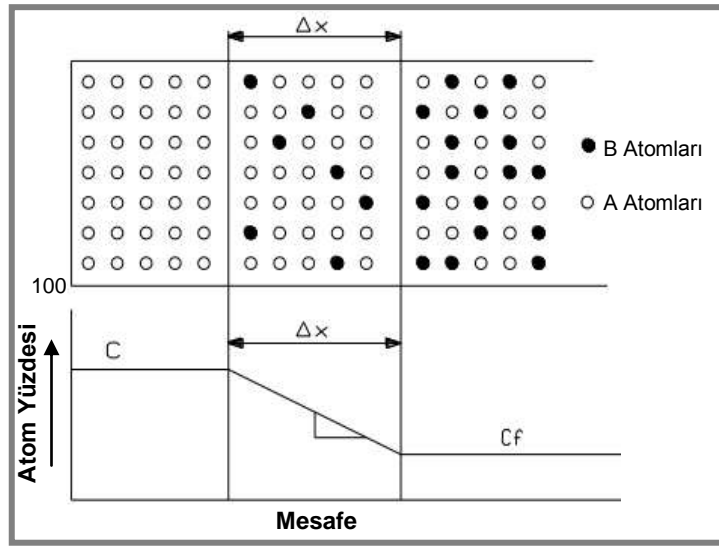
Difüzyon olayları, metallerin ısıl işlemleri esnasında birçok durumda görülür, hatta eğer ani soğutma işlemi istisna tutulursa, bütün ısıl işlemler difüzyon olayı ile meydana gelmektedir denilebilir [7]. Kafes yapısı içerisinde her atom belirli bir yer işgal eder. Sıcaklığın artmasıyla atomların enerjileri artar ve kafesteki yerlerini değiştirebilir. Çok sayıdaki atom sıçramalarına karşılık, her hacim birimi için kütle sabittir. Difüzyonun meydana gelme sebebi atomların sahip oldukları Gibbs serbest enerjilerini azaltma eğilimleridir. Difüzyon, kararlı denge durumuna vardığında, serbest enerji en alt seviyeye ulaşır. Şekil 2.1’de bu kararlı durum 2. durum olarak görölmektedir [8].



Şekil 2.1. Serbest enerjinin durum değişimine bağlılığı.

Burada 1 numara ile gösterilen durum, yarı kararlı durum olarak adlandırılır. Birinci durumdan 2. duruma geçiş için sisteme Q aktivasyon enerjisinin verilmesi zorunludur. Ancak o zaman serbest enerji azalma göstererek 2. duruma ulaşabilir. Burada Q enerjisine aktivasyon enerjisi denir ve bu enerji; sıcaklığın artması, pekleşme oluşturacak şekil değişimi ve elektrik ve manyetik alanlar yardımı ile sağlanabilir [8].

Atomların ve boş yerlerin yer değiştirmesine ısıl aktivasyon adı verilir. Toparlama, yeniden kristalleşme, sürünme ve difüzyon birer ısıl aktivitedir [9]. Difüzyon katsayısı, herhangi bir alandan akan toplam kütlenin, bu kesite dik yöndeki mesafe ile yoğunluk değişimine oranı olarak tanımlanır. Şekil 2.2’de konsantrasyon gradyanı şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Konsantrasyon gradyanının şematik gösterimi.

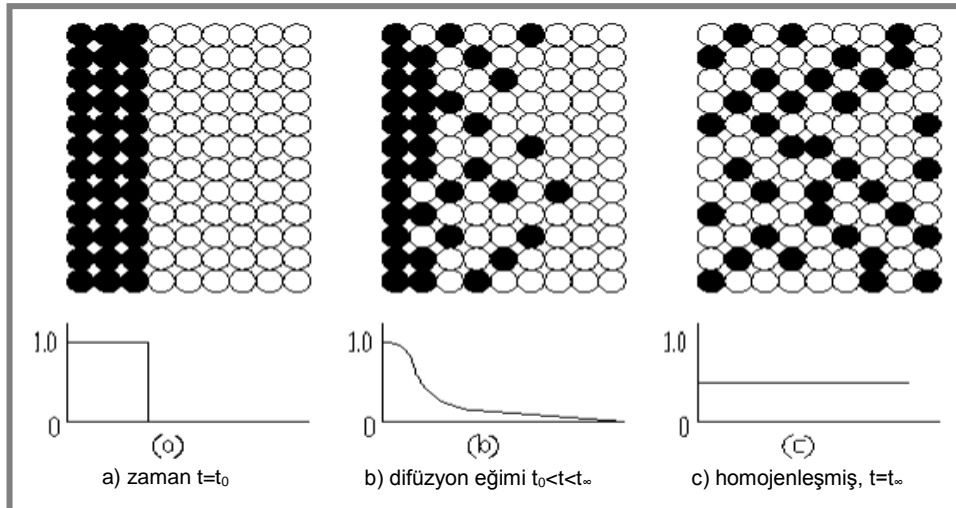
En hızlı difüzyon gazlarda meydana gelirken, bu olay sıvı ve katılarda ise daha yavaş meydana gelmektedir. Katılarda difüzyon atomların veya boşlukların titreşimleri ve etrafındaki boşluklara ya da kafes noktalarına sıçramaları ile meydana gelir. Normalde bir yer alan atomu komşu atomlar tarafından kuşatılmıştır ve atom bir başka kafes noktasına hareket edemez. Boş olması durumunda komşu boşluğa atlayabilir. Difüzyon kaynağında da ara yüzeydeki ilk bağ oluşumu atomlar arasındaki çekimle oluşur [6,10].

Malzemelere uygulanan pek çok işlem için atomların hareketleri gereklidir. Karbürleme, nitrürasyon, sementasyon, tavlama vb. işlemler difüzyon olayına örnek verilebilir. Metallerin ısıl işlemi, seramiklerin üretimi, malzemelerin katılaşması, transistör üretimi, güç pilleri vb. birçok işlemde difüzyona ihtiyaç vardır [11].

## 2.1. SAF SİSTEMLERDE KENDİ KENDİNE DİFÜZYON

Malzemeler katı halde ve saf iken, düzenli malzemelerde atomlar buldukları kafes pozisyonundan diğer bir kafese hareket ederler. Bu harekete “kendi kendine difüzyon” denir. Bu işlem radyoaktif izler kullanılarak tespit edilebilir. Metalik nikelde difüzyonu düşünürsek; üç boyutlu kristal yapıdaki çevre atomlarının her birinin mevcut boşluklara hareket etme olasılığı eşittir. Nikeldeki bir boşluğun komşu kafes noktasının içerisine hareketi de eşit orandadır.

Normal olarak saf nikelde, gelişmiş güzel atomlarda veya benzer atomlarda atom hareketleri gözlenir. Bununla birlikte radyoaktif izotopların kullanımıyla atomların sahip oldukları yapıdaki atom difüzyonunu belirlemek mümkün olmaktadır. Mesela; radyoaktif nikel (radyoaktif nikel 63), nikelin (saf nikel 59) üzerine difüze olabilir. Bu durum Şekil 2.3’de görülmektedir [12].



Şekil 2.3. Kendi kendine difüzyonun şematik görünümü [13].

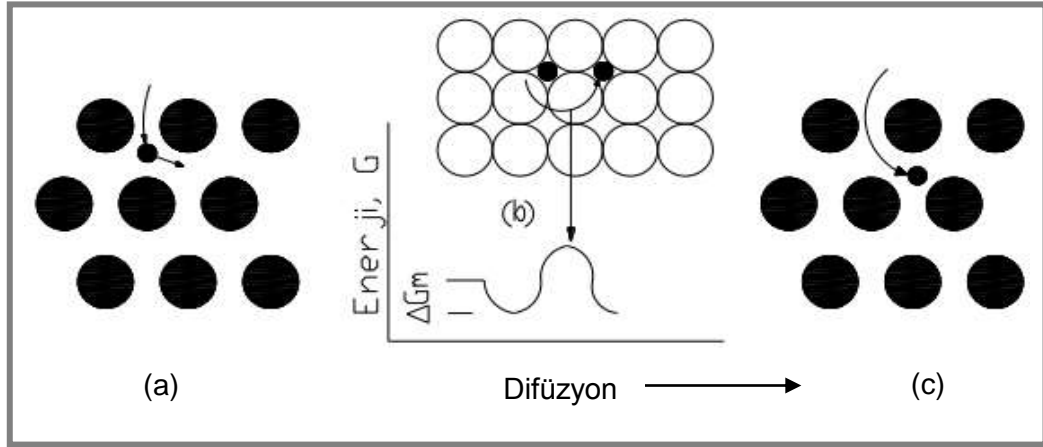




kütle taşınmasını sağlayacak ölçekteki hareketleri ifade eder. Homojen malzemelerde, yer değiştirme olayları istatistiksel olarak düzensizdir ve bu olay esnasında kütle taşınım görülmez. Homojen olmayan malzemelerdeki difüzyon ise teknik açıdan daha önemlidir. Katı malzemelerde difüzyonu gerçekleştiren iki temel mekanizma vardır. Bunlar yeralan ve arayer difüzyonu mekanizmalarıdır [9,15].

### 2.3.1. Arayer Difüzyonu Mekanizması

Arayer difüzyonu mekanizmasında, kristal yapıda küçük bir arayer atomu varsa, atom bir arayerden diğerine hareket eder. Arayer atomların yoğunluğu genellikle düşüktür [6]. Arayer difüzyonu mekanizmasında çözünen malzemenin atomlarının çapı (yaklaşık % 40), çözüldüğü malzemenin atomların çapından küçükse, çözüldüğü atomların arasındaki mevcut boşluklardan birine geçerek boşluğu doldurur. Şekil 2.5’de arayer difüzyonunun oluşumu şematik olarak görülmektedir.



Şekil 2.5. Arayer difüzyonunun oluşumu.

Arayer atomlarının denge pozisyonları en az potansiyel enerjiye sahip oldukları (a) pozisyonudur. Bir arayer atomunu komşu bir arayerde hareket ettirmek için, komşu kafesin atomları arasından geçmeye zorlanması gerekir. Neticede (b) pozisyonunda olduğu gibi bir durum oluşur ve en yüksek enerji seviyesine ulaşır. Bu olayın gerçekleşmesi için verilen iş, sistemin serbest enerjisindeki değişimi oluşturur ve Şekil 2.5 (c)'deki gibi  $\Delta G_m$  kadar artırır.  $\Delta G$  Gibbs Enerjisi olarak bilinir. Bir arayer atomu boşluklarla kuşatılmış olup, ısı enerjisinin deformasyon enerji engelini aşması

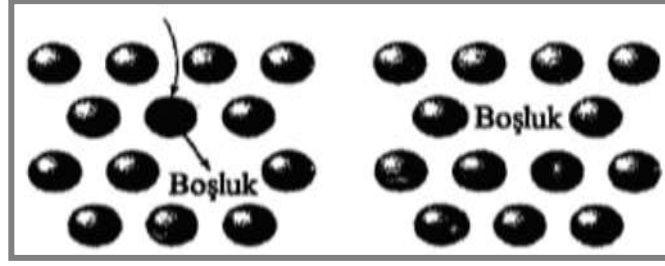
ile başka bir arayere atlar [6]. İşte arayer atomlarının kafes yapısı içerisindeki başka bir arayer noktasına göçü şeklinde oluşan difüzyona “arayer difüzyonu” denilmektedir. Fe, Cr, Ni, Mn, W, Ti gibi geçiş elementleri B, C, H, N, gibi atom yarıçapı küçük elementlere arayer katı çözeltisi oluştururlar. Malzemelerde arayer noktaları, kübik kafesin köşeleri arasındaki mesafenin ortasıdır. Bunlar oktahedral noktalar olarak bilinir.

Arayer difüzyonu olma ihtimali aynı türde atomlar için yüksek sıcaklıklarda daha fazladır. Ancak çapları ana kafesin atomlarından küçük olan yabancı atomlar için (C, N, H vb.) büyük önem taşır. Önemli nokta: bu mekanizmanın ideal yanı tümüyle kusursuz kristallerde daha etkin olabilmesidir [9].

### **2.3.2. Yeralan Difüzyon Mekanizması**

Bu difüzyon mekanizmasında kafes içerisinde mevcut bir boşluğun olması gerekir. Bu yüzden yeralan difüzyonunun oluşması arayer difüzyonuna göre daha zordur. Arayer difüzyonunda yeterli enerjiye sahip olduğunda atom difüze olabilir. Yeralan difüzyonu mekanizmasında, boş yerler yardımı ile yer değiştirme çok küçük bir aktivasyon enerjisi gerektirir. Artan sıcaklıkla birlikte atomların titreşim ve boş yer yoğunluğu artar, dolayısıyla yayınma kolaylaşır [9].

Normal olarak bir yeralan atomunun hareketi bitişik komşu atomlar tarafından sınırlandırılmıştır ve atom başka kafes noktasına geçemez. Bununla birlikte komşu nokta boş ise Şekil 2.6’da görüldüğü gibi (koyu) atom bu boşluğa atlayabilir. Atlamanın meydana gelebilmesi koyu renkli atomun komşu atomların arasından geçmesini sağlayacak yeterli titreşim enerjisini elde etme ihtimaline bağlıdır. Boşluğa sıçrama ihtimali ve boşluk konsantrasyonu sıcaklıkla yakından ilişkilidir [5,6]. Boşluğun yanındaki atomun yerinden ayrılabilmesi için aşması gereken aktivasyon enerji engelini yenecek temel enerjiye sahip olması şartıyla bir sıçrama yapabilir.

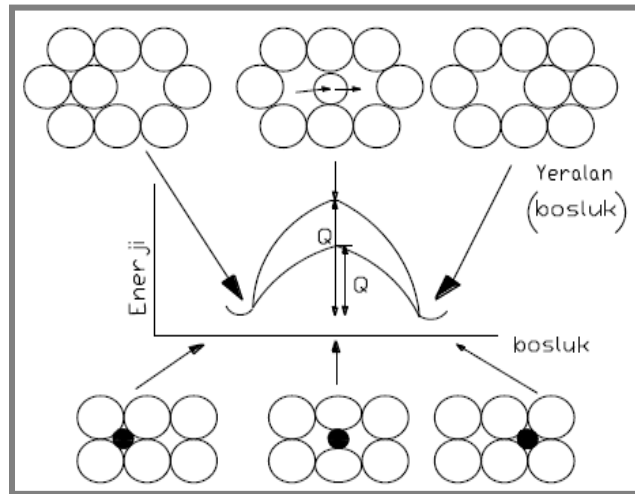


Şekil 2.6. YMK kafes içerisinde atomun boş bir konuma hareketi.

## 2.4. AKTİVASYON ENERJİSİ

Difüze eden bir atom yeni yerine ulaşmak için komşu atomların sıkıştırıp geçmek zorundadır. Bunu gerçekleştirebilmesi için atomların yeni yerine geçmemesini sağlayacak enerjiye ihtiyaç vardır. Bu durum Şekil 2.7’de yeralan ve arayer difüzyonu için şematik olarak gösterilmiştir. Burada atom, orijinal olarak nispeten kararlı konumda ve düşük enerjili haldedir. Yeni bir noktaya hareket etmek için, enerji engelini aşmak zorundadır. Bu gerekli olan enerjiye “aktivasyon enerjisi” denir ve  $Q$  ile gösterilir. Bu enerji engeli sınırını aşması için atomun ısıtılması gerekir.

Normal olarak bir arayer atomunun, komşu atomları geçmek için sıkıştırılması daha az enerji gerektirir. Bunun sonucu olarak da, arayer difüzyonu için gerekli olan aktivasyon enerjisi, yeralan difüzyonu için gerekli olandan daha azdır. Düşük bir aktivasyon enerjisi daha kolay bir difüzyon gerçekleşeceğini gösterir.



Şekil 2.7. Yeralan ve arayer difüzyonunda aktivasyon enerjisi değişimi.

## 2.5. KARARLI HAL DİFÜZYONU ( I. Fick Kanunu )

I. Fick Kanunu ile sabit bir A kesitinden geçen, difüze eden malzeme miktarının belirlenmesi yapılabilir. I. Fick Kanunu olarak bilinen matematiksel ifade aşağıdaki gibi belirtilmiştir [15].

$$J_A = -D \frac{dc}{dx} \quad (2.1)$$

Eğer konsantrasyon gradyanı  $dc/dx$  sıfırdan farklı bir değerde ise, bir difüzyon hızı mevcuttur,  $dc/dx=0$  ise konsantrasyon değişimi yoktur. Burada  $dc/dx$ , konsantrasyon gradyanına  $x$  mesafesindeki difüzyon miktardır.  $J$ ; metal kütlenin ( $m$ ) akışı,  $t$  zamanı içerisinde  $A$  yüzeyinden bu düzleme dik olarak difüzyon doğrultusunda yer değiştirme değeridir [7].  $D$ ; difüzyon katsayısı ( $m^2/s$ ), ve  $dc/dx$  yoğunlaşma gradyanıdır ( $m^3/m$ )<sup>-1</sup>. Difüzyon esnasında atomların akışını etkileyen çok faktör vardır.

Akış malzeme içerisinde konsantrasyon homojen oluncaya kadar devam eder. Konsantrasyon gradyanı da,  $t$  birim zamanda bir nokta boyunca difüzyon alanındaki değişikliklerdir. Konsantrasyon gradyanı, malzeme kompozisyonunun uzaklık ile nasıl değiştiğini gösterir.  $dc$ ;  $dx$  mesafelerindeki konsantrasyondaki farktır.

## 2.6. KARARSIZ HAL DİFÜZYONU (II. Fick Kanunu)

Sabit konsantrasyon farkında kütle akışının tespitinin zor olması ve metallerde difüzyon olaylarının çözümünde I. Fick Kanunu'nun yetersiz kalması sebebiyle, difüzyon katsayısının deneysel tespitinde ve bir çok kullanımda II. Fick Kanunu'ndan yararlanılmaktadır. I. Fick Kanunu'nun II. Fick Kanunu'na dönüştürülmesi için, aralarında  $dx$  kadar mesafe bulunan iki paralel yüzeyle sınırlanmış hacim elemanı kullanılır. Bu durumda konsantrasyon  $x$  ve  $t$ 'ye bağımlı kalacağından, bir çok pratik problemler için şu şematik ifade kullanılır;

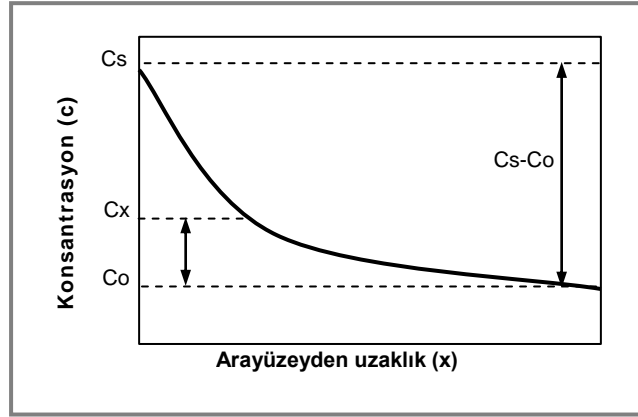
$$\frac{dc}{dt} = D \frac{d^2c}{dx^2} \quad (2.2)$$

Bu denklem çözümü bazı sınır değerlerine bağlıdır ve bu da;

$$C_s - C_x / C_s - C_o = 1 - \text{erf} ( x / 2 \sqrt{Dt} ) \quad (2.3)$$

şeklinde ifade edilir. Burada;  $C_s$ : yüzeydeki difüze eden atom konsantrasyonu,  $C_x$ : yüzeyden veya ara kesitten  $x$  kadar mesafedeki bir noktanın difüz eden yoğunluğu,  $C_o$  difüzyon çiftinden birinin ilk yoğunluğu,  $x$ :  $C_x$ 'in ölçüldüğü noktanın yüzeye olan uzaklığı,  $D$ : ortak difüzyon katsayısı,  $t$ : difüzyon süresi,  $1 - \text{erf}$ : hata fonksiyonudur.

Bu eşitlikte verilen konsantrasyon parametreleri Şekil 2.8’de konsantrasyon profili olarak görülmektedir. Burada konsantrasyon ve difüzyon mesafesi arasındaki ilişki görülmektedir.

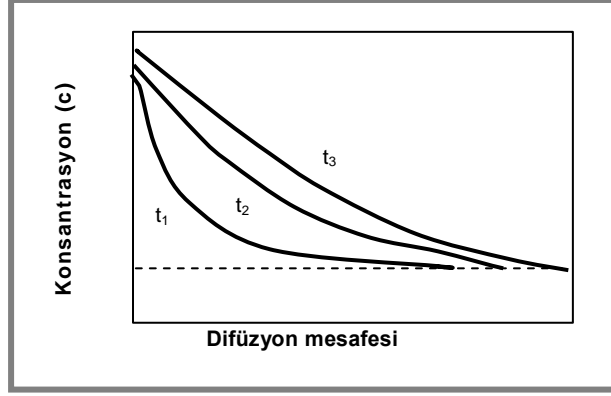


Şekil 2.8. Karasız hal difüzyonda konsantrasyon profili.

Ayrıca difüzyon mesafesinin konsantrasyonuna bağlı olarak süreyle değişimi de Şekil 2.9’da verilmiştir. Burada sıcaklığın artması ile birlikte birim alanda difüzyon miktarının arttığı görülmektedir [14].

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  $C_s$  ve malzemede  $C_o$  değişmeden sabit kalmasıyla denklemin çözümü elde edilir. Bu kanunun uygulanması,  $D$  sabit kaldıkça, değişik şartlarda aynı konsantrasyon profilinin elde

edilebilmesidir. Bu özellik, belirli bir ısı işlemi uygulanabilmesi için gerekli zamanda, sıcaklığın etkisini belirlemeyi sağlamaktadır [15].



Şekil 2.9. Karasız hal difüzyonunda farklı sıcaklıklarda oluşan konsantrasyon.

## BÖLÜM 3

### 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 [16].

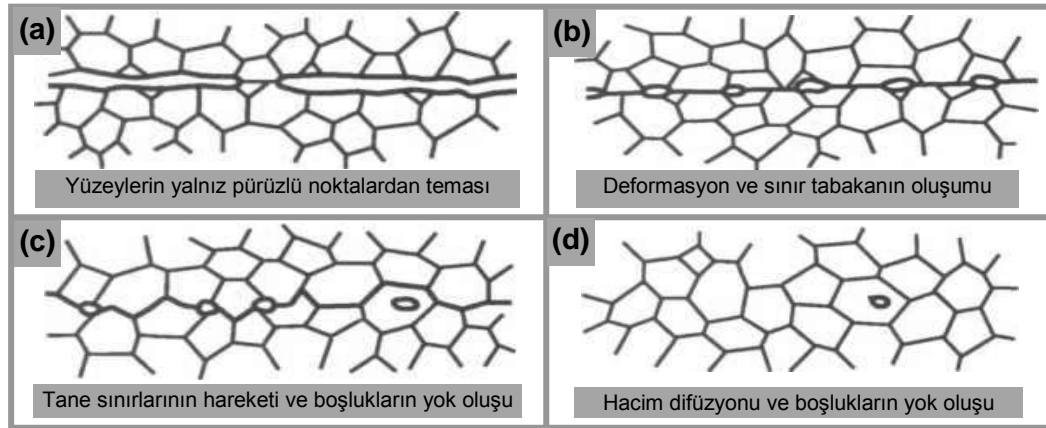
Difüzyonla birleştirme işleminde, birleştirme sırasında birleştirilecek malzemeler arasında ara tabaka kullanılmıyorsa katı hal difüzyon kaynağı adı verilir. Katı hal difüzyon kaynağı vakum ya da koruyucu gaz atmosferi altında yapılır. Şayet birleştirme işlemi sırasında ergiyen bir ara tabaka kullanılıyorsa sıvı hal difüzyon kaynağı adı verilir. Genellikle, benzer olmayan malzemelerin birleştirilmesinde ara tabaka kullanılır [1,16].

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 [16].

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

Literatürde belirtildiğine göre [1,17]; 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. Şekil 3.1’de difüzyon kaynağının üç aşamalı mekanizması verilmiştir.



Şekil 3.1. Difüzyon kaynağının üç aşamalı mekanizması [18].

İpekoğlu'nun 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 [19]. 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 [16,19].

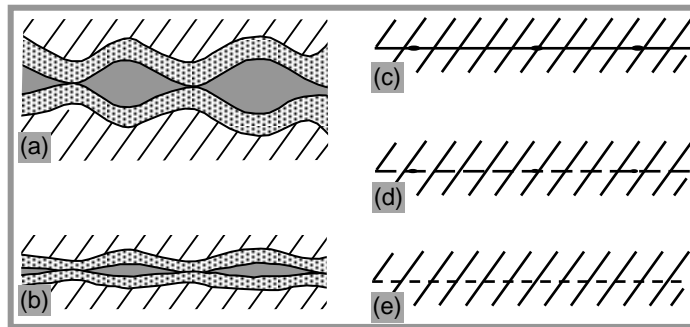


Araştırmacılar, başlangıç safhasında plastik deformasyonun; birleşecek yüzeylerin büyük bir kısmı temas ettiği zaman ise, yüzeyden kaynaklanan ve ara yüzey mekanizmalarının etkili olduğu konusunda hem fikirdirler. Sıvı faz kütle transferi, ancak yüksek sıcaklıklara çıkıldığı zaman söz konusudur.

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 3.2), difüzyon kaynağı mekanizması şu şekilde genelleştirilebilir [19].

- ✓ 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 3.2. Difüzyon kaynağı mekanizması.

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

- ✓ Yüzeyler 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.

### **3.1. DİFÜZYON KAYNAĞI ÇEŞİTLERİ**

Birçok benzer ya da farklı malzeme kombinasyonları difüzyon kaynağı ile birleştirilebilirler. Ergime noktası, yoğunluk, lineer genleşme katsayısı, kafes şekli ve kafes katsayıları farklı olduğu için farklı metal ve alaşımların birleştirilmesi zordur [18]. Bu etkileri azaltabilmek için geliştirilen difüzyon kaynağı, ara tabaka kullanılıp kullanılmamasına göre aşağıdaki şekilde sınıflandırılabilir:

1. Katı hal difüzyon kaynağı,
2. Sıvı hal difüzyon kaynağı ve difüzyon lehimleme,
3. Süperplastik şekil verme-difüzyon kaynağı kombinasyonu.

#### **3.1.1. Katı Hal Difüzyon Kaynağı**

Katı hal difüzyon kaynağı, genellikle vakum veya argon gibi koruyucu gaz atmosferi altında yapılır. Isı radyasyonla, direkt veya endirekt rezistansla ya da indüksiyon ile sağlanır. Basınç, tek eksenli veya izostatik bir şekilde uygulanabilir. Tek eksenli basınç uygulamasında, parçaların makro deformasyonunu (% 1-2 şekil değişikliği) önlemek için düşük bir basınç değeri (3-10 MPa) kullanılır. Bu tip işlemler, difüzyon kaynağı mekanizmasına plastik akma katkısının az olmasından dolayı birleştirilecek yüzeylerin iyi hazırlanmasını gerektirir. Zor malzemelerin, katı halde birleştirilmelerinin gerektiği durumlarda (özellikle metal seramik birleştirilmelerinde) difüzyon prosesine yardımcı olmak ve parçalarda birleştirme sonrası oluşabilecek gerilmeleri azaltmak için farklı malzemelerden bir veya birkaç ara tabaka kullanılabilir [19].

### **3.1.2. Sıvı Hal Difüzyon Kaynağı ve Difüzyon Lehimleme**

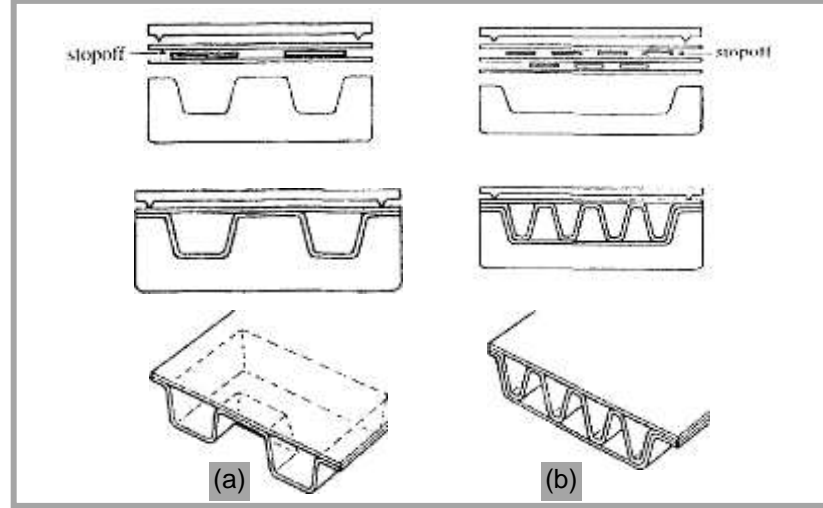
Geçiş sıvı faz kaynağı olarak da bilinen, sıvı hal difüzyon kaynağı ve sert lehimleme yalnızca değişik malzemelerin birleştirilmesi veya farklı malzemelerin ara tabaka olarak kullanılması durumunda uygulanabilir. Katı hal difüzyon kaynağı işlemleri kaynak yüzeylerinde bir bileşim değişimine sebep olur ve burada uygulanan kaynak sıcaklığı, yeni oluşacak faz bu sıcaklıkta sıvılaşıp şekil seçilir. Bu durumda ara tabaka daha hızlı bir difüzyon sağlar veya yüzeyler arasındaki tam teması sağlamak için bağlantıda mikro deformasyona izin verir [18]. Bu ince sıvı katman ana metallerin ikisinin de ergime sıcaklığından daha düşük bir sıcaklıkta birleştirme olacak şekilde araya yayılır.

### **3.1.3. Süperplastik Şekil Verme ve Difüzyon Kaynağı Kombinasyonu**

Süperplastik şekil verme ve difüzyon kaynağı (SPŞ-DK) kombinasyonu özellikle uzay endüstrisi için geliştirilmiştir ve bu kombinasyon o kadar önemlidir ki, farklı bir difüzyon kaynağı prosesi olarak değerlendirilir. Bu yöntem özellikle belirli yüklenme hızı şartlarında, yüksek sıcaklıklarda, süperplastik özellik gösteren Ti ve alaşımlarında ticari olarak uygulanmaktadır. Süperplastik şekil verme sıcaklık ve basınç şartları, difüzyon kaynağı için gerekli şartlarla benzerlik gösterdiğinden iki proses tek üretim işlemi haline getirilmiştir [19].

Havacılık endüstrisinde yüksek sıcaklıkta kendi oksidini absorbe eden titanyumun difüzyon kaynağındaki kolaylığından faydalanılarak süperplastik şekil verme ve difüzyon kaynağı kombinasyonu ile hafif petek paneller üretilmektedir. Bu uygulamaların bir sonucu olarak kaynak edilmesi istenmeyen bölgede seramik esaslı stopoff (durdurma) malzemesi kullanımı gereklidir (Şekil 3.3).

SPŞ-DK prosesi uçak parçalarının imalatında çok önemli maliyet ve ağırlık tasarrufu sağlandığı için süperplastik alüminyum alaşımlarına da uygulanmak istenmiş fakat bu alaşımların yüzeylerindeki kararlı oksit filminden dolayı uygulanamamıştır. Al alaşımlarının katı hal kaynağındaki en büyük zorluk, yüzeylerindeki kararlı ve yapışkan oksit tabakasıdır. Bu kararlı oksit normal difüzyon kaynağı koşullarında engellenememektedir [20].



Şekil 3.3. Süperplastik şekil verme-difüzyon kaynağı kombinasyonu a) klasik petek panel ve b) sandviç petek panel.

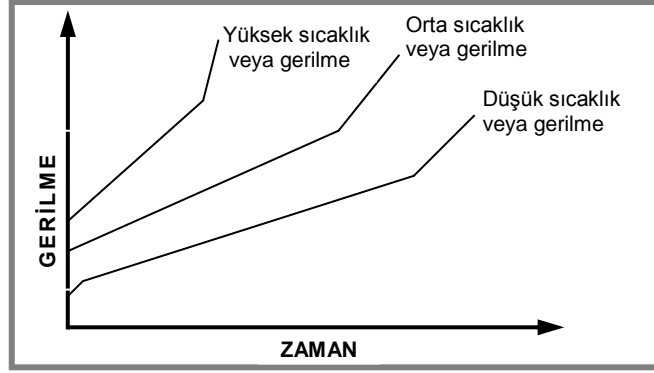
### 3.2. DİFÜZYON KAYNAK PARAMETRELERİ

Difüzyon kaynak yönteminin temel parametreleri sıcaklık, süre ve basınçtır. Ancak birleştirilecek parçaların yüzey şartları, kaynak atmosferi, birleştirilecek malzemelerin tane boyutları ve mikro yapıları birleştirme kalitesine etki eden önemli faktörlerdir.

#### 3.2.1. Kaynak Sıcaklığı

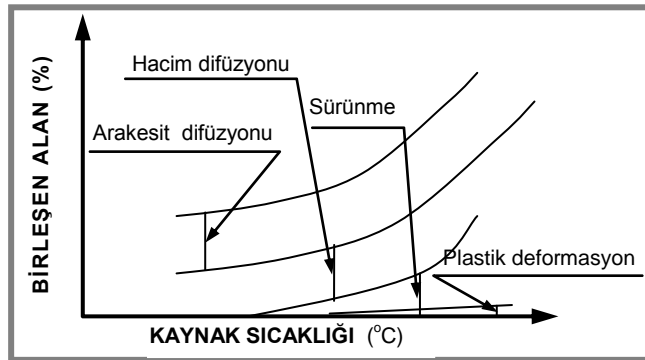
Kaynak sıcaklığı; deformasyona, oksit çözünürlüğüne, allotropik dönüşüme, yeniden kristalleşmeye, difüzyona ve işlemin kısa sürede oluşmasına etkili olduğundan en önemli parametredir. Yöntemde sıcaklık genellikle indüksiyon, direnç veya yüksek frekans teknikleriyle sağlanır. Difüzyon sıcaklığı genellikle solidüs çizgisinin altında veya yeniden kristalleşme sıcaklığının üstündedir. Aynı cins metallerin birleştirilmesinde işlem sıcaklığı metalin ergime sıcaklığının 0.5-0.7 katı olarak alınır. Farklı metallerin birleştirilmesinde bu sıcaklığın bir miktar daha üzerine çıkılabilir. Ayrıca yöntemde sıcaklık kadar, kaynak esnasındaki ısıtma ve soğutma hızları da önemlidir. Literatürde, her 20 °C'lik sıcaklık artışında, difüzyon katsayısı veya difüzyon hızının ikiye katlandığı belirtilmiştir. Kaynak esnasında gereğinden yüksek sıcaklıklar, tane irileşmesine ve dayanımın düşmesine neden olur [21].

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 kısalır. Şekil 3.4’de uygulanan basınç ve sıcaklığın sürünme eğrisine tesiri görülmektedir.



Şekil 3.4. Sıcaklık ve uygulanan basıncın sürünme eğrisine tesiri.

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 alttaki Şekil 3.5’de görülmektedir.



Şekil 3.5. Sıcaklığın bileşebilirlik üzerine etkisi.

Elrafaey ve Tillmann çalışmalarında birbirine benzemeyen titanyum ve çelik metalleri bakır arabağlayıcı katı hal difüzyon kaynak yöntemi ile birleştirilebilirliğini incelemiştir. Kaynak sonrası birleşme ara yüzeyinde meydana gelen mikroyapı değişiklikleri, taramalı elektron mikroskobu (SEM), mikrosertlik ölçme, kesme testi

ve X-Ray kırınımı (XRD) analizleri ile incelenmiştir. Bütün kaynaklarda, artan sıcaklığa paralel olarak birleştirmenin mekanik özelliklerinin iyileştiği gözlenmiştir. 180 dakika bekleme süresinde 800 °C'den düşük sıcaklıklarda titanyum ve çeliğin difüzyon kaynağı gerçekleştirilememiştir. Bununla beraber, 850 °C'de tüm bekleme sürelerinde kaynak başarıyla gerçekleştirilmiştir [22].

Rahman ve Cavalli çalışmalarında bakır arabağlayıcı kullanarak ticari saf nikelin difüzyon kaynağını incelemiştir. Ni-Cu çiftli alaşım sistemlerinin değişkenlik parametreleri (mobility parameters) birbirini takip eden kimyasal difüzyon katsayıları DICTRA/THERMOCALC yazılımı kullanılarak optimize edilmiştir. Optimize edilmiş değişkenlik parametreleri DICTRA/THERMOCALC yazılımı kullanılarak Ni-Cu difüzyon kaynak bölgesinin benzer konsantrasyon profillerinde kullanılmıştır. Hesaplanan ve deneysel çalışmalar sonucunda en iyi kaynak sıcaklığının 1100 °C olduğu kanaatine varılmıştır. Deneysel çalışmalarda difüzyonun tane sınırı katkısından dolayı 1050 °C'de daha az kaynak olduğu görülmüştür. Yapılan çalışmalar sonucunda en iyi kaynak, 1100 °C'de elde edilmiştir. 1050 °C'de elde edilen simülasyon ve deneysel profiller arasında bazı farklılıklar gözlemlenmiştir. Bu farklılığın muhtemelen 1050 °C'deki tane sınırı difüzyonundan kaynaklandığı belirtilmiştir [23].

Zhang ve arkadaşları, Mo/Cu malzemeleri nikel ara bağlayıcı kullanılarak, difüzyon kaynak yöntemi ile birleştirerek, birleştirmelerin kaynak dayanımını ve mikroyapısını incelemiştir. Bu kaynak işlemi 10 µm kalınlığında nikel arabağlayıcı kullanılarak ve vakumda 5 MPa tek eksenli basınç altında 10-60 dakika süre boyunca 730-850° C'de sıcaklıkları arasında gerçekleştirilmiştir. Kaynak yapılan bağlantıların mikroyapı, SEM, EPMA ve XRD difüzyon kaynak işlemini etkileyen başlıca faktörleri analiz edilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde difüzyon kaynak işlemi sırasında her iki Mo-Cu ve Cu-Ni arayüzeylerinde oluşan katı çözeltiler ve metaller arası bileşikler ortaya çıkmıştır. Nikel ara bağlayıcının kalınlığı kaynak sıcaklığı yükseldikçe azalmıştır. Kaynak süresi sabit olup kaynak sıcaklığı arttıkça kaynak etkisi sürenin artmasına bağlı olarak sıcaklığın kaynak etkisi daha büyük olduğu gözlenmiştir [24].

Kundu ve Chatterjee, titanyum ve 304 paslanmaz çelik malzemeleri nikel arabağlayıcı kullanarak farklı sıcaklıklarda difüzyon kaynak yöntemi ile birleştirilebilirliğini incelemiştir. Kaynak işlemi vakumlu ortamda, 3 MPa basınç altında, 10.8 ks (3 saat) sürede 800, 850, 900 ve 950 °C sıcaklık aralığında gerçekleştirilmiştir. Arayüzey mikroyapı görüntüleri taramalı elektron mikroskobu (SEM-BSE) ile gerçekleştirilmiştir. Kaynak arayüzey dayanımları çekme-makaslama, çekme ve % uzama ile karakterize edilmiş ve her üç mekanik özelliğin de 850 °C'de en yüksek değerde olduğu ve 900°C ve üstündeki sıcaklıklarda  $\lambda+\chi+\alpha$ -Fe,  $\lambda+ FeTi$  and  $\lambda+ FeTi+\beta$ -Ti fazlarının olduğu rapor edilmiştir. Kaynak bölgesindeki sertlik test sonuçlarında en yüksek sertlik değerinin arayüzeyden ölçüldüğü ve arayüzeyden uzaklaştıkça azaldığı belirlenmiştir [25].

### 3.2.2. Kaynak Basıncı

Kaynak basıncı parçalar arasında sıkı teması sağlamak için gereklidir. Basınç değeri uygulanacak kaynak sıcaklığında, birleştirilecek malzemelerin mekanik özelliklerine ve gerekli olan biçimlendirme derecesine bağlıdır. Uygulamalarda genellikle basınç üst sınırı olarak malzemenin kaynak sıcaklığındaki akma dayanımı alınmaktadır. Kaynak esnasında basınç, hidrolik, pnömatik veya mekanik olarak uygulanır [21].

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 [16].

Uygulamada basıncın olumsuz tesirlere sebep olmaması için aşağıdaki hususlara dikkat edilmelidir [17].

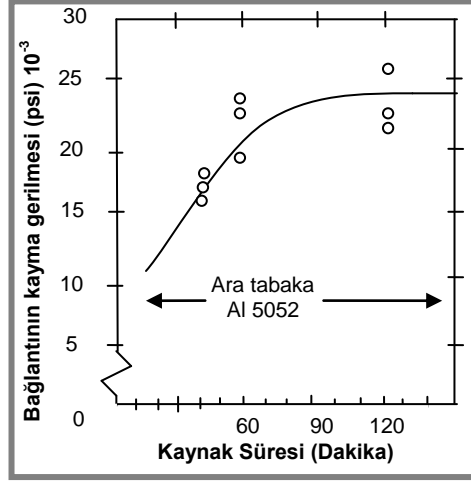
- ✓ Uygulanacak basınç ve yüzey pürüzlülüklerinin sürünme hızı ve plastik deformasyonunu artıracak kadar büyük; kaynak edilecek parçaların mikroskobik deformasyonuna yol açmayacak kadar küçük seçilir.
- ✓ Kaynak basıncı, birleştirilecek parçaların plastik hacim deformasyonunu en aza indirmek için akma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

Zhang ve arkadaşları alüminyum ve magnezyum malzemeleri nikel arabağlayıcı kullanarak difüzyon kaynak yöntemi ile birleştirmişlerdir. Kaynak işlemleri  $6 \times 10^{-3}$  Pa bir vakum içinde 1 MPa basınç altında, farklı süreler için 440 °C’de gerçekleştirilmiştir. Kaynak yüzeyleri SEM, EPMA, XRD ve Vickers sertlik testi ile incelenmiştir. Tüm kaynaklar incelendiğinde alüminyum, magnezyum ve 440 °C sıcaklıkta 1 MPa basınç altında ve farklı birleştirme sürelerinde bir nikel arabağlayıcı kullanarak difüzyon kaynak yöntemi ile başarılı bir şekilde birleştirilmiştir. Kaynak sonrasında arayüzeyde  $Mg_2Ni$  kırılğan bir faz oluşmuş ve kırılma Al ve Mg yüzeylerinde meydana gelmiştir [26].

### 3.2.3. 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 [27]. Kaynak süresinin uzun olması kaynak maliyeti açısından bir dezavantaj oluştururken, boşlukların oluşumunu, bileşimin değişimini ve kırılğan intermetalik bileşiklerin oluşumunu teşvik etmesi gibi bağlantının mekanik özelliklerini bozan olumsuzluklara da neden olur. Sonuç olarak; kaynak işlemi için yeterli süre, yüzeylerde karşılıklı temas sağlanarak, atomların hareketine yetecek ve bu aşamada tutularak birleşmenin sağlanabildiği zaman dilimidir [21]. Sabit basınç ve sıcaklıkta birleştirme süresini uzatmanın, bağlantı mukavemetini bir noktaya kadar artabileceği belirlenmiştir [17]. Bu durum Şekil 3.6’da görülmektedir.





Sekil 3.6. Bağlantının kayma mukavemeti ile kaynak süresi arasındaki ilişki.

Metalurjik tesirlerin birleşme süresi üzerinde fazla etkili olmadığı tespit edilmiştir. Endüstriyel uygulamalarda birleşme süresini kısa tutmak, ekonomiklik açısından önemlidir. Kaynak süresinin uzun olması kaynak ekonomisi açısından bir dezavantaj oluştururken, boşlukların oluşumunu, bileşimin değişimini ve kırılgan metaller arası bileşiklerin oluşumunu teşvik etmesi gibi bağlantının mekanik özelliklerini bozan olumsuzluklara da neden olabilir [17].

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 hakimdir [16].

Nami vd., Al/Mg<sub>2</sub>Si metal matrisli kompozit malzemelerin bakır arabağlayıcı kullanarak difüzyon kaynak yöntemi ile mikro yapı ve mekanik özelliklerini incelemiştir. Kaynaklanmış yüzeylere XRD ve EDS deneyleri yapılmıştır. Kaynaklanma süresinin etkisini değerlendirmek için numunelere mikrosertlik ve kayma testleri yapılmıştır. Birbirinden farklı difüzyon tabakaları birleştirme süresine bağlı olarak kaynak bölgede bulunmaktadır. Birleşme yerinin kırılgan CuAl<sub>2</sub> kesme dayanımının etkisinin kaldırılması için difüzyon kaynaklanma süreleri artırılmıştır. Yapılan kaynaklar sonucunda kesme dayanımının etkisiyle kırılgan CuAl<sub>2</sub> tabakasının ortadan kaldırılması nedeniyle kaynaklanma süresi artırıldıkça arttırıldı.

Kaynak merkezi mesafe arttıkça, sertlik değeri arayüzeyde artmış ve arayüzeyden uzaklaştıkça ana malzemelerde gidildikçe yavaş yavaş azalmıştır. Al/Mg<sub>2</sub>Si MMC katı hal difüzyon kaynağı ile başarılı bir şekilde ve yeni geliştirilmiş yöntemle vakum altında gerçekleştirilmiştir [28].

Peng ve arkadaşları, titanyum alaşımı ile paslanmaz çelik malzemenin nikel arabağlayıcı ile difüzyon kaynak yöntemi ile birleştirilebilirliğini araştırmışlardır. Difüzyon kaynak bölgelerindeki kaynağı engelleyen faktörleri incelemek için mikroyapı, SEM ve EPMA deneyleri gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde optimum kaynak parametreleri; kaynak sıcaklığı 850 °C, kaynak süresi ise 10-15 dakika olarak belirlenmiştir. Ayrıca Ni arabağlayıcı kullanımı ile (TiFe, TiFe<sub>2</sub> ve TiC) sert ve kırılğan fazların oluşumunun azaltılabileceğini rapor etmişlerdir. Bunun yanında düşük sıcaklıklarda ve sürelerde sadece TiNi tabaka oluştuğunu ve kaynağın daha zayıf olduğu gözlemlenmiştir [29].

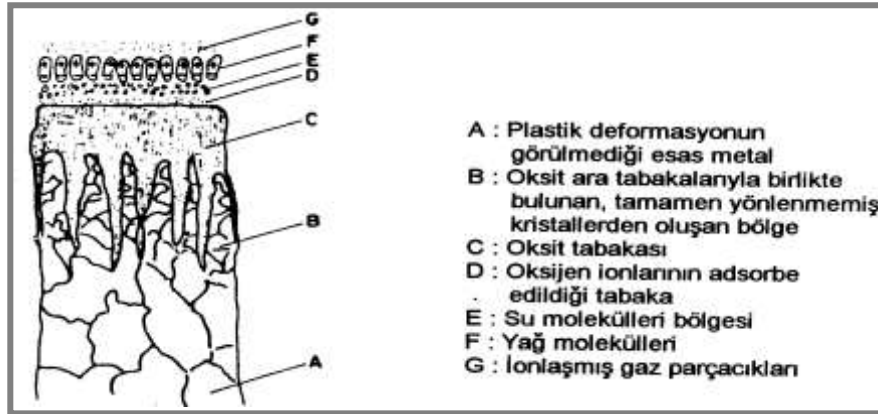
### **3.2.4. Yüzey Şartları**

Difüzyon kaynağında, kaynak edilecek malzemelerin yüzey şartları iki metal arasında temasın sağlanması ve dolayısıyla kaliteli birleştirme açısından oldukça önemlidir [19]. Difüzyon kaynağının kalitesine tesir eden yüzey şartları, yüzey pürüzlüğü, yüzey filmleri ve yüzey aralıklarıdır. Pürüzlükler, yüzeyler arasında tam temasa ulaşmak için gereken süreyi etkiler. Pratikte, bir metal, yükseklik ve dalga boyu küçük olan yüzey pürüzlüğüne sahiptir. Difüzyon kaynağında, özellikle, uzun dalga boyuna sahip pürüzler önemlidir. Çünkü bu durumda boşlukların yok edilmesi için, hem çok yönlü basınç uygulanması hem de uzun zamana gerek olacaktır. Yüzey pürüzleri, kalıntı gözeneklerin başlıca sorumlusudur. Bunun yanında oksit tabakaları, birleşecek yüzeylerin temasını önleyip, bağ teşekkülünü geciktirir ve arakesitte tane sınırı difüzyonunu engelleyerek boşluk kalmasına sebep olur. Yağ, gres, toz gibi aralıklarda oksit filmleriyle aynı etkiye sahiptir. Oksit filmlerinin kaldırılması için, kimyasal dağlama ve asitle temizleme yöntemleri kullanılır [21].

Bir metal yüzeyinde, özenli bir çalışma ile hazırlanmış olsa da, çeşitli yabancı maddeler bulunmaktadır. Bu maddelerin yüzey tabakalarındaki bulunışları Şekil

3.7'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.

(+) ve (-) işaretleri, tabakaların karakteristik kutuplarını vermektedir. Metal yüzeylerindeki yabancı madde filmleri kaldığında davranışları değişik olmaktadır. İnorganik filmler kırılırlar, organik filmler ise birleştirme sırasında yer değiştirirler ve sıvanma eğilimindedirler [18].



Şekil 3.7. Metal bir yüzeyin tabakalarının şematik kesiti.

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

- ✓ Normalde oldukça kırılğan olan oksit filmler,
- ✓ 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.

### 3.2.5. Kaynak Ortamı

Difüzyon kaynağında parça yüzeylerini ve ara kesitte oluşacak oksidasyonu önlemek için koruyucu bir atmosfer altında kaynak işlemini gerçekleştirmek gerekir. Bu amaçla ya vakum altında ya da bir soygaz atmosferinde kaynak işlemi gerçekleştirilir [27]. Soygaz olarak argon veya helyum gazları kullanılabilir. Oksijen miktarını 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 [19]. Argon, azot ve helyum yüksek sıcaklıklarda temiz yüzeyleri korumak için çok uygundur. Bu gazlar kullanıldığında yeniden kirlenmeden kaçınmak için gazların saflığı çok yüksek olmalıdır [18].

Soy gazlar atmosferik oksijenin tesirini ancak belli bir dereceye kadar azalttığından, kararlı oksitlere sahip metallerde vakum kullanılmaktadır.  $1.3 \times 10^{-3}$  Pa'dan daha fazla bir vakum oksit filmlerinin çözünmesini sağlayabilse de, uygulamada  $1.3 \times 10^{-2}$  ile  $1.3 \times 10^{-5}$  Pa'lık basınçlar kullanılmaktadır. Vakum sırasında parçanın birleştirilecek arayüzeyi 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 [17].

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, sürenin daha da artması durumunda dayanımın 129 MPa'ya düştüğünü belirtmişlerdir. Bu keskin düşüşün sebebinin de arabileşik büyümesi ve boşlukların oluşumundan kaynaklandığını rapor etmişlerdir [30].

### **3.2.6. Birleştirilecek Malzemelerin Tane Boyutları ve Mikroyapıları**

Difüzyon kaynağına tesir eden birçok yapı vardır. Bunlar, mikroyapı, tane boyutu ve ilave metal (ara tabaka) kullanılması şeklinde sınıflandırılabilir. Difüzyon kaynağı için en ideal yapının ince tane yapılı olduğu tespit edilmiştir. Bu yapı süper plastik alaşımlarında mevcuttur. Tane boyutunun hem kaynak esnasında, hem de kaynak sonrasında bağlantının mukavemeti açısından büyük önemi vardır. Kaynağın ilk safhalarında boşluklar daha çok tane sınırıyla kesişir. Dolayısıyla boşluğu önlemek için birden çok tane sınırı etki eder. Atomlar bu tane sınırlarından boşluğa difüze olarak onu küçültürler. Tane boyutu küçülüp, tane sayısı artıkça, boşlukların difüzyonla doldurulması kolaylaşmakta ve arakesitte kalması ihtimali azalmaktadır [21].

### **3.3. DİFÜZYON KAYNAĞI BAĞLANTI TÜRLERİ**

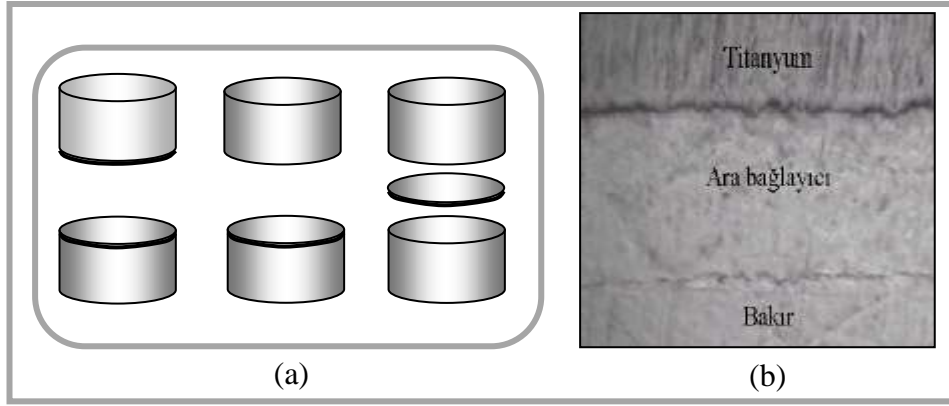
Difüzyon kaynağının uygulamasında, özellikle farklı metal ve alaşımlarının birleştirilmesinde genellikle bir ara tabaka kullanılır. Ara tabakalar kaynak alanındaki hidrojeni minimuma indirir ve birleştirmenin oluşumunu kolaylaştırır. Ara tabakalar folyo şeklinde, elektrolitik kaplama veya püskürtme tarzı olabilir. Yumuşak, aynı tür folyo kullanılması durumunda yüzey pürüzlüğü daha büyük olan yüzeylere sahip parçalar da kaynaklanabilir [20].

#### **3.3.1. Difüzyon Kaynağında Ara Tabaka**

- ✓ Karşılıklı iki yüzeyde,
- ✓ Yalnız bir yüzeyde,
- ✓ Araya ayrı bir tabaka koyma şeklinde.

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

Difüzyon bölgesindeki kaçınılmayan metaller arası fazlar ile malzeme kombinasyonlarının bileşimi için ara tabaka kullanılması gereklidir (Şekil 3.8). Ara metal tabakalarının sayısı esas malzemelerin özellikleri arasındaki farka ve birleşimin geometrik şekline bağlıdır.

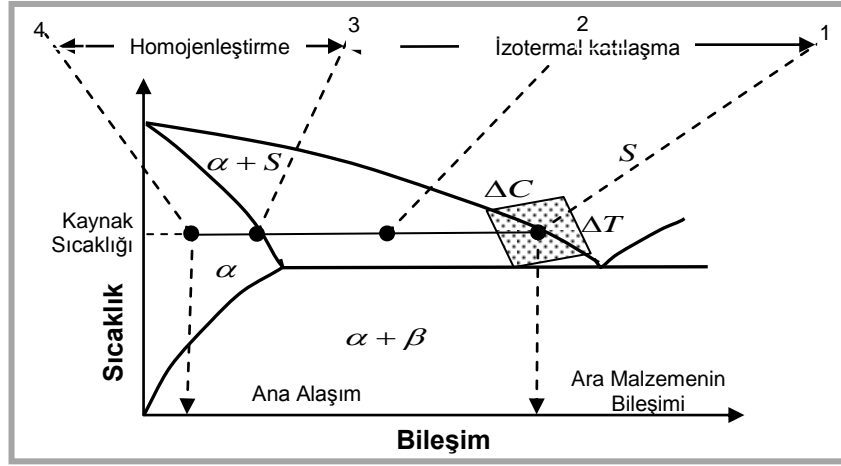


Şekil 3.8. Difüzyon kaynağında ara tabaka, a) şematik ve b) Ti-Cu makroyapı.

Difüzyon kaynağında birleşme işlemini hızlandırmak, bağlantının mekanik özelliklerini geliştirmek veya birbirinden farklı metal, metal olmayan malzemelerin kaynağında karşılıklı difüzyon oluşturmak için ara malzeme kullanılır [31]. Genel olarak ilave (ara) malzemenin kaynaktaki faydaları şunlardır.

- ✓ Mekanik bağ oluşturmak için ana metalde çözünmek.
- ✓ 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 yada 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 3.9’da belirtilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi, kullanılacak ara tabakanın erime sıcaklığının ana metale göre daha düşük olması ve ana metalde çözünebilir olması istenir.



Şekil 3.9. Ara tabakanın kaynak bölgesine tesiri [17].

Benzer olmayan metal ve alaşımlarda, kaynak sonrasında birleştirme bölgesinde kırılgan metaller arası faz oluşmuyor yada yeniden ergime ile malzeme gevrekleşiyorsa veya dayanım azalıyorsa difüzyon kaynak yöntemi tercih edilmektedir.

Birbirinin aynı yada farklı birçok malzeme difüzyon kaynak yöntemiyle birleştirilebilmektedir. Bu yöntem en çok titanyum ve alaşımları, zirkonyum ve alaşımları ve nikel esaslı alaşımlarda uygulanmıştır. Karbon, Bor, Alümina, Silisyum karbür gibi malzemelerin takviye olarak kullanıldığı metal matrisli kompozit malzemelerin birleştirilmesinde de kullanışlı bir yöntem olduğu kabul edilmektedir.

Li ve arkadaşları, Nb-Cu-Ni çoklu arabağlayıcı kullanarak paslanmaz çelik ile titanyumun difüzyon kaynağını incelemişlerdir. Kaynak sıcaklığı (850 °C, 875 °C, 900 °C, 925 °C ve 950 °C) ve kaynak süresinin (850 °C’de 15, 30, 45 ve 60 dk) etkisi SEM ve EDS ile analiz edilmiştir. Ayrıca kaynak mukavemeti çekme testi ile değerlendirilmiştir. Sonuçlar, en çok nikel atomunun Cu-Nb arayüzeyinde toplanmış olduğunu göstermiştir. Bu durum arayüzeyde Cu-Nb mukavemetlenme etkisi oluşturmuştur. Kaynak sıcaklığının artmasına bağlı olarak çekme dayanımının

azaldığı ve sürenin artmasına bağlı olarak ise 45 dakikaya kadar dayanımın arttığı ancak süre 60 dakikaya yükseltildiğinde intermetalik oluşumundan dolayı dayanımın düştüğü rapor edilmiştir [32].

### **3.4. DİFÜZYON KAYNAK YÖNTEMİ İLE BİRLEŞTİRİLECEK MALZEMELER**

Daha önce belirtildiği gibi birbirinin aynı yada farklı birçok malzeme difüzyon kaynak yöntemi ile birleştirilebilmektedir. Bu yöntem en çok titanyum ve alaşımları ve 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.

Daha önce ifade edildiği gibi benzer olmayan metal ve alaşımların da, kaynak sonrası birleşme bölgesinde kırılğan intermetalik faz oluşuyor yada yeniden ergime ile malzeme gevşiyorsa, yada dayanım azalıyorsa difüzyon kaynak yöntemi tercih edilmektedir.

Alüminyum alaşımlarının difüzyon kaynağı, kararlı yüzey oksitleri yüzünden güçleşmektedir. Bununla beraber, birleşme bölgesinde yüksek sıcaklık ve büyük ölçekli deformasyon uygulanmasının, inatçı oksit tabakalarını kırdığı ve yüzey kaplama yada ara tabaka kullanılması ile daha düşük basınç altında difüzyon kaynağı yapmanın kolaylaştığı tespit edilmiştir. Öte yandan, süperplastik alüminyum alaşımlarının ve Al-metal matrisli kompozitlerin geliştirilmesi, yüksek mukavemetli difüzyon kaynağı ihtiyacını arttırmaktadır [27].

Çizelge 3.1'de de difüzyon kaynağı ile ara bağlayıcı ve ara bağlayıcısız olarak birleştirilebilen malzeme kombinasyonları verilmiştir.



Çizelge 3.1. Difüzyon kaynağı yapılabilen malzeme kombinasyonları [1].

		A r a T a b a k a s ı z																									
		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	
A r a T a b a k a l ı	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)

### 3.5. TİTANYUM VE TİTANYUM ALAŞIMLARININ DİFÜZYON KAYNAĞI

Diğer malzemelere uygulanmakla beraber, difüzyon kaynağının en çok uygulandığı metal, titanyumdur. Titanyumun difüzyonla birleştirilmesine yatkın olmasının en önemli sebebi; kendi oksidini ve yüzey artıklarını, yüksek sıcaklıklarda basınç uygulandığında çözebilme kabiliyetinin olmasıdır. Titanyumda, katı çözelti içindeki oksijen sertliği artırıp, kararlı fazı oluşturarak kaynak edilebilirliği güçleştirmekte ve yüzeyde çatlakların oluşmasına yol açmaktadır. Bu sebeple, titanyumun difüzyonla birleştirilmesi sırasında koruyucu atmosfer yada vakum altında çalışmak gerekir. Her iki çalışma ortamı, difüzyonla kaynak metodunun maliyetinin yüksek olmasının en

büyük nedenlerindedir. Koruyucu gaz olarak argon kullanılması durumunda titanyumda çözünmeyen argonun arakesite hapis olarak, boşluk meydana getirmesini önlemek için, argonun kaynak bölgesinde hareketliliğinin sağlanması gerekir [16].

Bu alaşımların bir çoğunun ısıl işlem ile mukavemetleri arttırılamaz. Dolayısıyla sert lehimleme sıcaklığı, titanyumun mekanik özelliklerini etkilemez. Çizelge 3.2’de titanyum ve alaşımları için kullanılan elementleri hem ilave dolgu metal hem de ana metale difüze olurlar. Böylece ara yüzeyde bir reaksiyon tabakası meydana gelir. Bu tabaka gevrek metaller arası fazlar içerir. Bakır, nikel alüminyum ve gümüş elementleri, titanyum ile birleşerek bu gevrek metaller arası fazların oluşmasını sağlar. Bu elementlerin miktarları oldukça düşük tutulursa, metaller arası faz miktarı azalır.

Titanyum ve alaşımlarının sert lehimlemesi koruyucu bir atmosfer içersinde fırın veya indiksiyon teknikleriyle yapılır. Lehimleme atmosferi olarak vakum kullanıldığında, basınç 13 MPa ( $10^{-4}$  torr)’dan düşük olmalıdır. Soy bir atmosfer kullanılacaksa, çığ noktası  $-55$  °C den daha düşük olmalıdır [33].

Çizelge 3.2. Titanyum alaşımlarının sert lehimlemesinde kullanılan ilave dolgu metalleri.

İlave dolgu metal	Servis sıcaklığı, °C	Lehimleme sıcaklığı, °C
Ag	425	925
Ag -5Al,Ag-7.5Cu	425	870 – 925
Ag -5Al - 7.5Mn	425	870 - 900
Al-Si (4040),Al-Mn (3003)	265	650 – 690
Ti-48Zr-4Be Ti-43Zr-12Ni-2Be	400	870 – 1095
Ag-9Pd-Ga	-	880 – 920

Titanyumu difüzyon kaynağı açısından cazip kılan diğer bir tesir, yüzeyinin temizlemeye ihtiyaç göstermemesidir. Bununla beraber, ergime kaynağına yatkın olmaması, bu metalin difüzyon yoluyla birleştirmesini zorunlu kılmaktadır. Titanyumun, yüksek bir mukavemet-yoğunluk oranına, uzun bir yorulma ömrüne, iyi bir korozyon direnci ve yüksek sıcaklıkta mukavemet özelliklerine sahip olması,

havacılık sanayisinde geniş bir alanda kullanılmasının ana sebebidir. Kaynak esnasında nispeten yüksek sıcaklık uygulanmasının getirdiği maliyet artışı, bu sebeple, göz ardı edilmektedir [34].

Yapılan literatür araştırmalarında son zamanlarda genellikle titanyum malzemeler arabağlayıcısız olarak titanyum-bakır [35], alüminyumlu nikel (Ni75Al25)-titanyum [36], TiAl alaşımı-Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub> seramik [37], Ti-6Al-4V-microduplex paslanmaz çelik [38], malzemeler ile birleştirilmektedir. Bunun yanında Zr ve Ni arabağlayıcı kullanarak TiAl/Ti<sub>3</sub>AlC<sub>2</sub> alaşımı malzemeleri [39], nikel arabağlayıcı kullanılarak titanyum alaşımı-micro-duplex paslanmaz çelik [40], Ag-Cu arabağlayıcı kullanılarak Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Ti6Al4V alaşımı [41], gümüş arabağlayıcı kullanılarak titanyum-düşük karbonlu çelik [42], çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

### **3.6. DİFÜZYON KAYNAĞININ GENEL ÖZELLİKLERİ**

- ✓ Sabit halde atom difüzyon yolu ile metalürjik bağlantının olduğu difüzyon kaynağı, sıcak pres kaynağının bir şeklidir.
- ✓ Difüzyon kaynağında soğuk pres kaynağının aksine, yeniden kristalleşme sıcaklığının üstündeki sıcaklıklarda, daha az basınç kuvveti ve şekil değişimi ile çalışılır.
- ✓ Difüzyon kaynağı aynı veya farklı, çoğunlukla metalik malzemelerin birleştirilmesinde kullanılır. Bu yöntem, uçak ve uzay sanayi ile nükleer sanayi ile nükleer teknoloji için geliştirilmiştir. Çünkü bu alanda, örneğin kesitlerin ulaşılabilir yerlerde olmaması veya malzemelerin farklı olması gibi nedenlerle alışagelmış kaynak yöntemlerinin kullanılması mümkün değildir.
- ✓ Aynı malzemelerin difüzyon kaynağında, esas malzemenin dayanım değerlerine yaklaşık olarak ulaşmak mümkündür.
- ✓ Birbiriyle kırılğan metaller arası faz oluşturan malzemeler, ergime sıcaklıkları ve elastiklik sınırları çok farklı malzemeler, metal ve metal olmayan malzemelerde bu yöntemle birleştirilebilir.
- ✓ Özellikleri birbirlerinden çok farklı malzemelerin birleştirilmesinde, kolay kırılabilir gevrek bir intermetalik oluşmaması için kaplama veya folyo halinde aratabaka kullanılabilir. Bu durumda kullanılacak olan aratabaka

malzemesinin, birleştirilecek olan her iki malzeme ile uyuşabilir olması gerekmektedir.

### **3.7. DİFÜZYON KAYNAĞININ DİĞER KAYNAK YÖNTEMLERİYLE KARŞILAŞTIRILMASI (AVANTAJLARI)**

Ergitmeli kaynak yöntemleri ile difüzyon kaynağı mukayese edildiğinde, bu yöntemin bir çok avantajı vardır. Bu avantajlardan bazıları;

- ✓ Ergitme kaynağında görülen deformasyonlar, ön ve son tavlama ihtiyaçları, bu teknikte görülmez.
- ✓ Metalurjik açıdan uyumsuz, birbirinden tamamen farklı iki metal yada bir metalle, metal olmayan bir malzeme bu yöntemle kolaylıkla birleştirilebilir.
- ✓ Birleşme süresi, bağlantı alanından bağımsızdır. Dolayısıyla bir defada geniş alanlı yada karmaşık şekilli bağlantılar birleştirilebilmektedir.
- ✓ Birleşmede ana malzemelerde istenmeyen metalurjik yapılar oluşmaz.
- ✓ Seramik ve kompozitlerin, metal ve diğer malzemelerle birleştirilmesinde, günümüzde en verimli ve etkili yöntem difüzyon kaynağıdır.
- ✓ İşlem için kalifiye elemana ihtiyaç yoktur.

Difüzyon kaynağı, diğer katı hal kaynak teknikleriyle karşılaştırıldığında ise başlıca şu avantajlara sahiptir.

- ✓ 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.

Bu avantajlarının yanı sıra, difüzyon kaynak yönteminin bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Bunlardan bazıları;

- ✓ Yüksek donanım maliyeti,
- ✓ Özel ortam ve aparat gerektirmesi,
- ✓ Koruyucu gaz atmosferi veya vakum ortamı gerektirmesi,
- ✓ Çok temiz ve hassas yüzey hazırlama ihtiyacı,
- ✓ Kaynak arayüzeyinde metaller arası bileşiklerle, azda olsa, ara fazların oluşma ihtimali,
- ✓ Kaynak işlemi için bazen çok uzun sürelerle ihtiyaç olması [21].

## BÖLÜM 4

### TİTANYUM VE ALAŞIMLARI

1791 yılında İngiliz malzeme bilimcisi Wilhelm Gregor Madakaskar'da çalışırken esasını belirleyemediği bir metal olan titanyumu bulmuş ve Menachon şehrinden esinlenerek Menakirit adını vermiştir. Bundan dört yıl sonra Alman kimyacı Martin Heinric Klaproth yaptığı çalışma sonucunda, bu metalin yeni bir element olduğunu keşfetmiş ve Yunan mitolojisinde toprağın ilk oğulları anlamına gelen "Titan" isminden esinlenerek bu yeni elemente "Titanyum" ismini vermiştir.

Yer kabuğunun % 6'sı titanyumdan oluşmasına rağmen, saflaştırılmasının zorluğu ve ileri teknoloji gerektirmesi nedeni ile 1940'lı yıllara kadar endüstriyel bir malzeme olarak kullanılmamıştır. Bu yıllarda Wilhelm Kroll'un geliştirdiği kroll adı verilen bir yöntemle teknik üretime geçilmiştir [43].

Saf titanyum mükemmel biyolojik uyumluluğu ve uygun mekanik özelliklerinden dolayı medikal alanda geniş bir kullanım alanına sahiptir. Titanyum alaşımları yüksek korozyon dayanımı özellikleri nedeniyle insan vücudunda implant olarak kullanılan en önemli metallerdir. Ayrıca fiziksel ortamlarda mükemmel korozyon direnci göstermesi, düşük yoğunluğu, kimyasal durgunluğu, kimyasal tepkimeye girmemesi, zehirli olmaması ve mekanik dayanımının iyi olması bu metali daha cazip hale getirmektedir [44,45].

Titanyum, yüksek yorulma ömrü, tokluğun iyi olması, kaynak yapabilme imkanının olması ve yoğunluğunun düşük olması nedeniyle askeri alanda, deniz ile temas eden yapılarda ve kimyasal etkilerin olduğu ortamlarda kullanılan en iyi mühendislik malzemesidir [46]. Titanyum ve alaşımlar için mevcut pek çok alaşımların bazıları ve mekanik özellikleri Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Bazı titanyum ve alaşımları için mekanik özellikler [46,47].

Malzeme		Çekme Dayanımı (MPa)	Akma Dayanımı (MPa)	Uzama (%)
Ticari saflıkta Ti	% 99,5 Ti	241	172	24
	% 99 Ti	552	483	15
$\alpha$ Ti alaşımları	% 5 Al-% 2,5 Sn	862	779	15
$\beta$ Ti alaşımları	% 13V-% 11Cr-% 3Al	1290	1214	5
$\alpha'$ ya yakın Ti alaşımları	% 8Al-% 1Mo-% 1V	966	828	14
	% 6Al-% 4Zr-% 2Sn-% 2Mo	1007	993	3
$\alpha$ - $\beta$ Ti alaşımları	% 8Mn	996	862	15
	% 6Al-%4V	1034	966	8
	% 7Al-% 4Mo	1172	1034	10
	% 6Al-% 6V-% 2Sn	1103	1034	12

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 [48].

Saf titanyum esasen saf elementel titanyum olmayıp, özellikle implatın yüzeysel tabakasında oksijen ve titanyum oluşturduğu bir kompozittir. Belirli sınırlar içinde oksijen, titanyumun mekanik özelliklerini olumlu yönde etkiler. Fakat yüksek konsantrasyonlarda titanyum mekanik gücünü azaltır. ASTM F-67 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 % 0.007 oranında azot, % 0.15 oranında karbon, % 0.015 oranında hidrojen ve % 0.35 oranında demirdir. Bu elementlerden herhangi birinin konsantrasyonunun fazla olması halinde malzemelerin performansı düşer. Saf titanyum, ortopedi ve travmatolojide yaygın olarak kullanılmaz. Günümüzdeki en önemli kullanım yeri titanyum alaşımlı çimentosuz protezlerin gözenekli tabasıdır. Ayrıca titanyum alaşımları biyomedikal uygulamalarda 16 farklı tiplerde alaşımlandırılabilirler [48]. Bunlar Tablo 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Biyomedikal uygulamalarda kullanılan titanyum alaşımları [48].

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

#### 4.1. TİTANYUM VE ALAŞIMLARININ ÖZELLİKLERİ

Ticari saf titanyum, diğer alternatifleri ile aynı düzeyde mekanik özellik 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 [48].

25 °C’deki yoğunluğu 4,5 gr/cm<sup>3</sup> 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/m<sup>2</sup>) olup, bu büyüklük paslanmaz çelik (200 GN/m<sup>2</sup>) ve kobalt- krom (200-230 GN/m<sup>2</sup>) alaşımlarının elastisite modülünün yaklaşık yarısı kadardır. Titanyumda bu değer düşük olması oldukça önemlidir [31]. Zira böylece titanyum diğer metallere göre oldukça önemli sünekliğe sahiptir ve ortopedide de bu esnekliğe büyük ihtiyaç vardır. Kemiğin elastisite modülü metallere göre oldukça düşüktür (10 GN/m<sup>2</sup>). Bu arada esnekliğin elastisite modülüyle ilgili olduğu kadar protezin geometrisi ile ilgili olduğu da unutulmamalıdır.

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.

#### **4.2. TİTANYUM VE ALAŞIMLARININ KAYNAK EDİLEBİLİRLİĞİ**

Alaşımsız titanyum ve  $\alpha$  titanyum alaşımlarının tümü kaynak edilebilir.  $\alpha+\beta$  titanyum alaşımı Ti-6Al-4V ve diğer zayıf  $\beta$  kararlaştırıcı elementler içeren alaşımlar bile kaynak edilebilir ancak güçlü  $\beta$  kararlaştırıcı elementler içeren  $\alpha+\beta$  alaşımları kaynak edildiklerinde gevrekleşirler. Pek çok  $\beta$  alaşımları başarılı bir şekilde kaynak edilebilir. Bununla birlikte, yaşlanma sertleşmesi ile mukavemeti sağlamak için yapılacak ısıtma işlemi dikkatli uygulanmalıdır. Çünkü yaşlandırılan birleştirmeler bazı  $\beta$  alaşımlarında oldukça kırılabilir olabilir. Ticari saf titanyumun kaynağında, düşük demir içerikli dolgu metalleri kullanılmalı ve kaynak bölgesinin demirle temasını sağlayacak tüm uygulamalardan kaçınılması gerekir. % 98.5-99.5 saflıkta bulunan alaşımsız titanyumların tümü soğuk işlenmiş durumdan çok tavllanmış durumda kaynak edilebilir [49].

$\alpha$  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  $\alpha$  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  $\alpha$  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  $\alpha$  alaşımları kaynak edilebilir, fakat kaynak gerilmeleri yüksek olabilir. Bu yüzden kaynak sonrası bu gerilmelerin giderilmesi önerilir [49]. 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 ısıl işlemi uygulanmış durumda kaynak edilebilir. Yaşlanma, kaynak sonrası gerilim giderme ısıl işlemi sırasında tamamlanabilir. Yalnızca soğuk şekillendirme ile mukavemetlendirilebilen  $\alpha$  ve alaşımsız titanyuma kıyasla  $\alpha+\beta$  ve  $\beta$  alaşımları ısıl işlemle mukavemetlendirilebilir [49]. Yüksek miktarda  $\beta$  kararlaştırıcı element içeren  $\alpha+\beta$  alaşımları kaynak edilebilirliği sınırlandırır. Kaynak bölgesinde küçük kusurların varlığında yada 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 [50].  $\alpha+\beta$  alaşımları, alaşımsız titanyum yada  $\alpha$  titanyum dolgu metali ile kaynak edilebilir. Bu sayede ergiyik bölgedeki  $\beta$  içeriği azaltılır ve süneklik daha iyi hale getirilir. Bu tür dolgu metallerinin kullanımı, duyarlı alaşımlarda ısıdan etkilenen bölgede oluşacak gevrekliği önlemez. Çizelge 4.3'de bazı titanyum ve alaşımlarının kaynak edilebilirlikleri verilmiştir.

Çizelge 4.3. Titanyum ve alaşımlarının kaynak edilebilirliği [50].

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

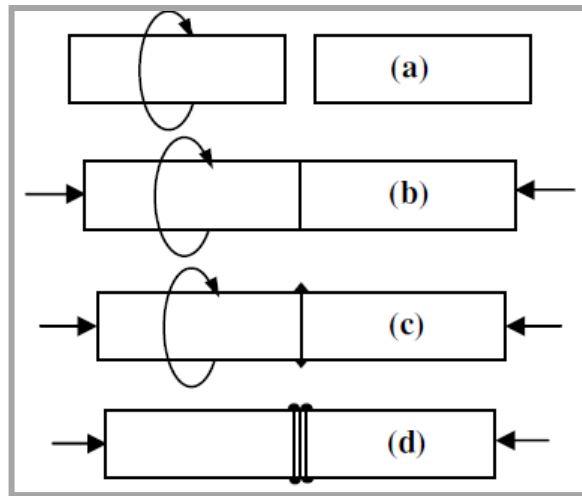
### 4.3. TİTANYUM ALAŞIMLARININ KATI HAL KAYNAK YÖNTEMLERİ

Titanyum ve alaşımları ergitmeli kaynakların yanı sıra katı hal kaynak yöntemleriyle de kolayca birleştirilebilmektedirler. Titanyum ve alaşımlarının birleştirilmesinde en çok kullanılan katı hal kaynak yöntemleri, sürtünme kaynağı, patlamalı kaynak ve difüzyon kaynağıdır [43].

#### 4.3.1. Sürtünme Kaynağı

Sürtünme kaynağı, elektrik enerjisi veya diğer kaynaklardan ısı enerjisi uygulamadan malzeme yüzeyleri arasındaki mekanik dönme hareketinin ısı enerjisine dönüşmesi ile kaynak için gerekli ısının elde edilerek yapıldığı bir katı hal kaynak yöntemidir [51].

Sürtünme kaynağında kaynak süresi boyunca sürtünen yüzeyler aksel basınç altındadır. Bu süreç birleşme bölgesinde plastik deformasyon sıcaklığına ulaşıncaya kadar devam eder. Bu sıcaklıkta dönme hareketi ani frenleme yapılarak durdurulur ve aksel basınç iki kat artırılarak yığıma oluşturulur. Bu kaynak yönteminde ilave metal ve koruyucu gaza gerek yoktur. Yöntem dairesel kesitli parçaların kaynağında büyük öneme sahiptir ve otomatik olarak uygulanan bir işlemdir [52]. Şekil 4.1’de sürtünme kaynağı mekanizması görülmektedir.



Şekil 4.1. Sürtünme kaynağı mekanizması [51].

Sürtünme kaynağında kaliteli bir bağlantı oluşması için;

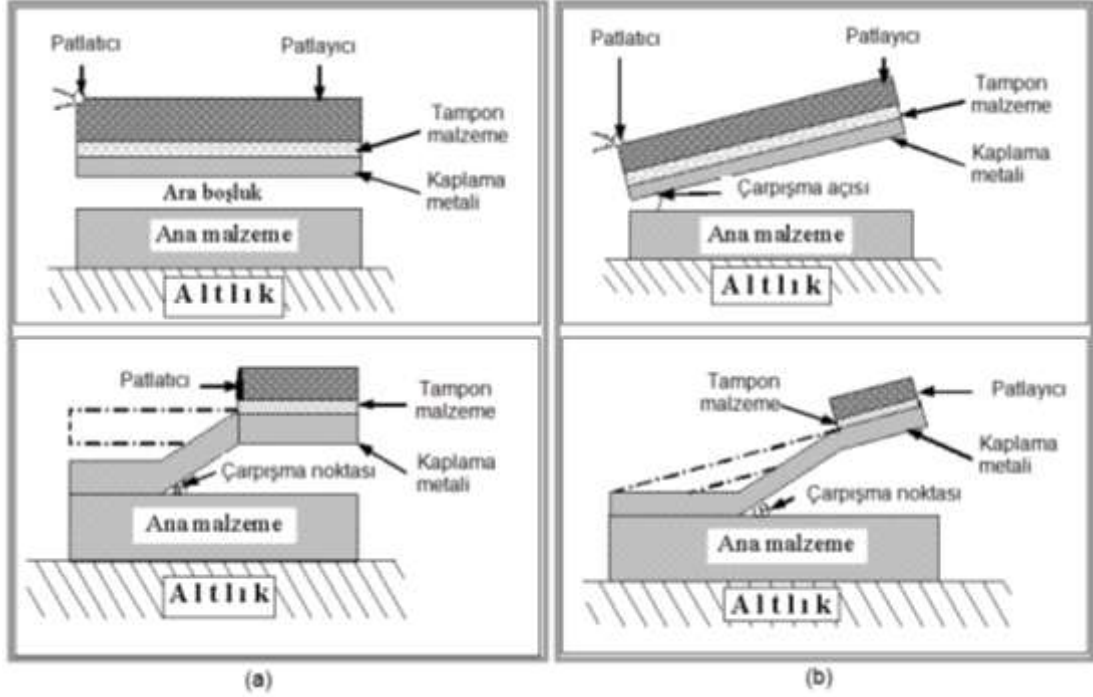
- ✓ Sürtünme hareketi ile bütün oksit ve diğer tabakalar parçalanarak yüzeyden uzaklaştırılır. Sürtünen yüzeyler arasındaki sürekli temas kaynak sırasında oksit filmlerinin oluşmasını engeller.
- ✓ Sürtünme kaynağı sırasında inklizyonların büyük bir kısmı elimine edilir.
- ✓ Bağlantı bölgesi, hızlı bölgesel ısıtma ve soğutma sonrası uygulanan yüksek basınç nedeni ile ince taneli bir yapıya sahiptir.
- ✓ Hızlı bölgesel ısıtma ve ayrıca bağlantıya bitişik relatif olarak geniş ısıtılmamış alanların ısıyı bölgesel ısınmış alanlardan hızlı çekmesi sonucunda çok dar bir ITAB oluşur [53].

Genellikle tüpleri, boruları ve çubuk malzemeleri birleştirmede kullanılan bu kaynak yönteminin ITAB'ı dar olduğundan titanyum ve alaşımlarının kaynağında büyük avantajlar sağlar. Bu yöntemde gaz koruması gerekmezken titanyumun kaynağında düşük temas basıncı ve yüksek dönme hızı tavsiye edilir [43,54].

#### **4.3.2. Patlama Kaynağı**

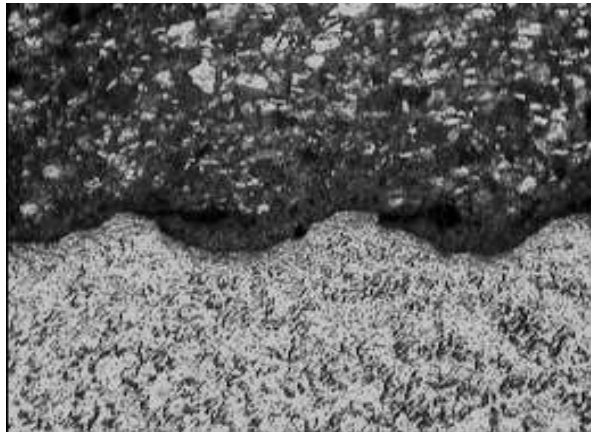
Titanyum ve alaşımları patlamalı kaynak yöntemi ile birçok metal ve alaşımına kolaylıkla kaynatılabilmektedir. Patlamalı kaynak, patlayıcıların patlama etkisinden yararlanılarak iki veya daha fazla metalin kompozit bir malzeme üretmek üzere, yüksek kalitede metalurjik bir bağ ile birleştirildiği bir katı hal kaynak yöntemidir. Kaynak sonrasında metal çiftleri arasında dalgalı bir arayüzey meydana gelir. Bu yöntemin en belirgin özelliği alışımlı kaynak yöntemleri ile birleştirilemeyen farklı özellikteki metallerin (titanyumun alüminyuma kaynağı) kolaylıkla birleştirilebilmesidir [55,56]. Şekil 4.2.(a)'da paralel düzlem ve Şekil 4.2.(b)'de eğik düzlemde patlamalı kaynağın şematik resmi görülmektedir [51].

Son yıllardaki yeni gelişmeler, patlama ile kaynak (explosive welding/bonding) işleminin yanında, patlama ile sertleştirme (explosive hardening) ve patlama ile şekillendirme (explosive forming) işlemlerinin endüstride kullanılabildiğini göstermektedir [51].



Şekil 4.2. Patlamalı kaynağın şematik resmi a) paralel düzlemde, b) eğik düzlemde.

Patlamalı kaynak işleminde bütün kaynak parametreleri uygun biçimde seçilip kontrol edildiğinde Şekil 4.3'de görüldüğü gibi bir kaynak arayüzeyi elde edilir. Patlamalı kaynak arayüzeyinin dalgalı görüntüsü bu kaynak yönteminin en belirgin özelliğidir. Kaynak yüzeyinin bu ilginç görüntüsü patlamalı kaynağa olan ilgiyi teşvik eder. Dalga yapısının gelişimi fişkırmaya oluşumuna bağlı olarak değişiklik gösterir [43].



Şekil 4.3. Patlamalı kaynak ile elde edilmiş dalgalı arayüzey görünümü [26].

### 4.3.3. 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 [57].

## BÖLÜM 5

### PASLANMAZ ÇELİKLER VE ÇEŞİTLERİ

Gelişmekte olan ülkemiz endüstrisinin paslanmaz çeliklere olan gereksinimi her geçen gün artmaktadır. Özellikle petro-kimya, kimya, gıda endüstrisinde kullanılan depolama tankları, basınçlı kaplar, ısı değiştiricileri ve paslanmaz boruların üretiminde çok çeşitli türlerde paslanmaz çelik kullanılmaktadır. Kristal yapısına ve mukavemetlenme mekanizmasına bağımlı olarak beş çeşit paslanmaz çelik mevcuttur. Bunlar; ferritik, martenzitik, östenitik, çökelti sertleştirilmiş ve dupleks paslanmaz çeliklerdir.

#### 5.1. FERRİTİK PASLANMAZ ÇELİKLER

İçerisinde % 18-30 krom bulunduran çeliklerdir. Karbon miktarının az oluşu sebebiyle ısıl işlemler ile sertleştirilemez. Bu tip çeliklerin en önemli özelliği yüksek sıcaklıklarda korozyon ve oksitlenmeye dirençlerinin fazla oluşudur. Ferritik paslanmaz çeliklerin sertleştirilebilmeleri ancak az oranda ve soğuk şekillendirme ile mümkündür. Bu çelikler yumuşak iken daha fazla korozyon direnci gösterirler. Bu tip çelikler 750-850 °C sıcaklıkta yumuşatmaya tabi tutulurlar [58].

Ferritik paslanmaz çeliklerin akma gerilmesi östenitik paslanmaz çeliklerinkinden daha büyüktür. Buna karşın, ferritik çeliklerin, östenitik çeliklere oranla deformasyonla sertleşebilme yetenekleri daha azdır. Bununla beraber çekme süneklikleri ve özellikle darbe dirençleri östenitik çeliklerinkinden daha düşüktür. Yüksek Cr'lu ferritik paslanmaz çelikler gevrek olup, sünek - gevrek geçiş sıcaklığı gösterirler. Sigma ( $\sigma$ ) fazı % 17'den fazla krom içerdiklerinde görülür. Bu faz 600 °C'den daha düşük sıcaklıklarda çökeler. Çökeltme hızı çok yavaştır. Ferrit oluşturucu elementler ve soğuk deformasyon bu fazın çökeltmesini hızlandırır [59].

Bu tür çelikler tasarım mühendisliği açısından önemlidir. Tavlama ve serleştirme kutuları, otomobil egzozt sistemleri dönüştürücüleri, kondansatör kılıfları, yanma çemberleri, ısıtıcılar, motor kapakları, mutfak ekipmanları, otomobil süslemeleri gibi genel korozyon ve ısı direnci gereken yerlerde kükürt atmosferinde maruz ekipmanların yapılarında kullanılır. Ferritik paslanmaz çelik tipleri ve bu çeliklerin kimyasal kompozisyonları Çizelge 5.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 5.1. Ferritik paslanmaz çelik tipleri.

AISI tipi	Kimyasal kompozisyon ( % )				
	Cr	C (max)	Mo	Al	Diğerleri
405	13.0	0.08	-	0.2	-
409	11.0	0.08	-	-	Ti 6xC
430	17.0	0.12	-	-	-
434	17.0	0.12	1.0	-	-
436	17.0	0.12	1.0	-	Nb 5xC
442	20.5	0.20	-	-	-
446	25.0	0.20	-	-	-

### 5.1.1. % 12-14 Krom (Cr) İçeren Ferritik Paslanmaz Çelikler

Bu çelikler yüksek kromlu çeliklere nazaran daha düşük korozyon direncine sahiptirler. AISI 405 tipi çeliğin imalatının kolay olması ve düzgün şekil verebilmesi açısından buhar türbinlerinin yapımında ve petrol rafinelerinde kullanılmaktadır. Bu çeliklerin kaynak kabiliyeti iyi sayılır. Isının tesiri altındaki bölgede genellikle taneler birleşerek büyüme eğilimi gösterirler. AISI 405 tipi çeliğin daha da cazip olması düşük maliyete sahip olmasından kaynaklanmaktadır. AISI 409 tipi çelik, tamamen ferritiktir. Bu nedenle bu çelik şerit ve levhalar şeklinde imal edilebilir. Bu çelikler otomobil endüstrisinde egzozt parçaları ve çalışan birçok aksamın yapımında kullanılmaktadır. AISI 409 tipi çelik kolay kaynak edilebilir ve şekillendirilebilir. Bu çeliğin korozyon ve oksidasyon direnci parçanın kullanım ömrü için yeterli sayılır. Otomobillerin egzozt bölgelerinde yüksek sıcaklık olması dolayısıyla bu çelikler tercih edilir. Bu çeliğe oksidasyon direncini artırmak için % 1 alüminyum katılır.



Yüksek sıcaklıklarda mukavemetin artması için ise % 0.75 Cb (Colombium) ilave edilmektedir.

### **5.1.2. % 17-19 Krom (Cr) İçeren Ferritik Paslanmaz Çelikler**

AISI 403, 434 ve 436 tipi çelikler otomotiv aksamaları, ev gereçleri mutfak eşyaları ve bütün dekoratif eşyalarla ilgili geniş uygulamalarda kullanılmaktadır. AISI 430 tipi çelik ilk olarak otomobiller üzerinde kullanılmıştır. Fakat kışın yollarda kullanılan tuz miktarının artmasıyla bu çeliğin korozyon direncini yükseltme gereksinimi doğmuştur. % 1 mobilden AISI 434 tipi çelik, AISI 430 tipi çelik yerine kullanılmak üzere geliştirilmiştir. Yüksek sıcaklıklarda bir kısım östenit şeklinde teşekkül eden bütün bu alaşımlar oda sıcaklığının üzerindeki bir sıcaklığa soğutulurken gevrek martensite dönüştürülmüş olur. Bu sebeple bu alaşımların kaynak edilebilirliği iyi değildir. Diğer taraftan AISI 439 tipi çelik tamamen ferritik olup, taneler arası korozyon için titanyum ile kararlı hale getirilir ve kaynaklı birleştirme uygulamalarında kullanılır.

### **5.1.3. % 22-27 Krom (Cr) İçeren Ferritik Paslanmaz Çelikler**

AISI 442 ve 446 tipi çelikler bu guruba girmektedir. Fakat bunlardan sadece AISI 446 gurubu çelikler endüstriyel öneme sahiptir. AISI 446 gurubu bu çelik çok iyi oksidasyon direncine sahiptir. Yüksek sıcaklıklarda düşük gerilmeli durumlarda her zaman kullanılır. Bu çeliğin mukavemeti düşük sayılır [60].

## **5.2. MARTENZİTİK PASLANMAZ ÇELİKLER**

Martenzitik paslanmaz çelikler esas olarak % 12-17 Cr ve östenitli bölgede su verildiğinde martenzitli bir yapı oluşturması için yeterli düzeyde karbon (% 0.15-1.0 C) içeren çeliklerdir. Bu çeliklere martenzitik denmesinin nedeni, östenitleme ve su verme ısı işlemlerinden sonra martenzitik bir yapı geliştirebilmeleridir [61].

Dayanım ve sertliği arttırmak için martenzitik paslanmaz çeliklere uygulanan ısı işlemi, esas olarak sade karbonlu veya düşük alaşımlı çeliklere uygulananla aynıdır.

Bu işlemde alaşım östenitlenir ve martenzitik yapı üretmek için yeterince hızlı soğutulur ve daha sonra da tokluğu arttırmak için temperlenir ve gerilim azaltılır. Martenzitik paslanmaz çeliklerin korozyon dirençleri ferritik ve östenitik paslanmaz çeliklere göre nispeten zayıftır [62].

Martenzitik paslanmaz çelikleri yaygın olarak buhar türbin kanatları, jet motorları, pompa şaftları, maden makineleri, çatal, kaşık, cerrahi aletler, aşınma dirençli parçalar, yaylar, civatalar, makaslar, uçak donanımları, kağıt makineleri, bilyeler, yataklar, valf parçalarında kullanılır [62]. Çizelge 5.2'de dövme martenzitik paslanmaz çeliklerin kimyasal kompozisyonları verilmiştir.

Çizelge 5.2. Dövme martenzitik paslanmaz çeliklerin kimyasal kompozisyonları.

AISI tip	% Cr	% C	% Ni	% Mo	% V
403	12.2	0.15	-	-	-
410	12.5	0.15 max	-	-	-
414	12.5	0.15max	-	-	-
420	13	> 0.15	-	-	-
422	12	0.22	1	0.25	1
431	16	0.20max	1.8	-	-
440 A	17	0.72	-	-	-
440 B	17	0.85	-	-	-
440 C	17	1.07	-	-	-

### 5.3. ÖSTENİTİK PASLANMAZ ÇELİKLER

Östenitik paslanmaz çelikler aslında bir demir-krom-nikel alaşımıdır ve yaklaşık % 16-25 Cr, %7-20 Ni içerir. Bu alaşımlara östenitik denmesinin nedeni, yapılarının normal ısı işlem sıcaklıklarında östenitik fazda olmasıdır. Yüzey merkezli kübik (YMK) kristal yapısındaki nikel, kafes yapısını oda sıcaklığında bile korur. Östenitik paslanmaz çeliklerin yüksek şekillenebilirliği kristal yapısı nedeniyledir [63].

Östenitik paslanmaz çeliklerin süneklik, şekillendirilebilirlik ve korozyon dirençleri mükemmeldir. Mukavemet, yoğun katı eriyik mukavemetleşmesi ile elde edilir ve östenitik paslanmaz çeliklerin soğuk deformasyonu sonucu pekleşmesi ferritik paslanmaz çeliklerden daha fazla olabilir. Östenitik çelikler belirgin bir geçiş

sıcaklıklarına sahip olmadıkları için, düşük sıcaklıktaki darbe özellikleri mükemmeldir. % 0.03 C'dan fazla karbon içeren östenitik paslanmaz çelikler, taneler arası korozyona karşı hassas olabilirler. Çelik yaklaşık 870 ile 420 °C'ler arasında yavaş soğutulduğunda tane sınırlarında krom karbürler çökeler. Daha sonra bu tane sınırları bölgesinde korozyon oluşur. Su verme tavlama ısıl işlemi, korozyonu önlemek için kullanılabilir. Bir başka çözüm ise çeliğe titanyum veya niyobyum katmaktadır [37].

Östenitik paslanmaz çelikler ferritik çeliklerde olduğu gibi 475 °C temper gevrekliği göstermezler. Ancak 700-950 °C sıcaklıklarda genellikle bir metaller arası birleşik oluşur.  $\sigma$  fazı adı verilen bu fazın oluşmasını krom hızlandırmakta, ferrit oluşturucu elementler de bu faza fazla ilgi duymaktadır.  $\sigma$  fazının çökmesi hem süneklik hem de tokluk özelliklerini azaltır.  $\sigma$  fazının göstermiş olduğu bu zararlı etkiler sıcakta değil, çeliğin soğutulması sonucu ortaya çıkmaktadır [59].

Östenitik paslanmaz çelikler yaygın olarak tren yolu arabaları, uçak parçaları, yaylar, antenler, ev aletleri, soğuk kaplar, yağmur olukları, sıvı gübreleme ve lapa domates tankları, fırın parçaları, pompa parçaları, ısı değiştiriciler, türbin bıçakları, basınçlı kaplar, kaynatma kazanları, uçak egzost bacaları, jet motor parçaları, çatal, kaşık süt taşıma malzemelerinde kullanılır. Çizelge 5.3'de piyasada en çok kullanılan östenitik paslanmaz çelikler ve kimyasal kompozisyonları verilmiştir [64].

Çizelge 5.3. Östenitik paslanmaz çeliklerin kimyasal kompozisyonları.

Tip	Cr	Ni	C (max)	Mn	Diğerleri++
301	17	7	0.15	-	-
302	18	9	0.15	-	-
304	19	9	0,08	-	-
304L	19	10	0,03	-	-
309	23	13.5	0.20	-	-
310	25	20.5	0.25	-	-
316	12	0.08	2.5	-	-
316L	12	0.03	2.5	-	-
321	18	10.5	0.08	-	Ti 5XC
347	18	11	0.08	-	Nb 10XC

## 5.4. ÇÖKELTMEYLE SERTLEŞTİRİLEN PASLANMAZ ÇELİKLER

Bu paslanmaz çeliklerin en önemli özellikleri; kolay üretim, yüksek dayanım, nispeten yüksek süneklik ve mükemmel korozyon direncidir. Bu çelikler iki grupta incelenir. Bu gruplar yarı östenitik ve martensitik tiplerdir.

### 5.4.1. Yarı Östenitik Tip Paslanmaz Çelikler

Bu alaşımlar tavllanmış şartlarda esas olarak östenitik ancak nispeten basit ısı ve termo-mekaniksel ısı işlemlerle martenzite dönüşebildiği için yarı östenitik olarak adlandırılır. Bu tip alaşımı yapmak için östenit veya ferrit arasındaki dengenin çok sıkı korunması gerekir. Östenit veya ferrit çok yüksekse östenit martenzite dönüşmeyecek kadar kararlı olacaktır. Östenit oranı çok düşükse kısmi veya tamamen martenzite dönüşüme direnç gösteren tavllanmış şartlardaki kararlı östenit üretilmez. Bu alaşımların bir avantajı olan yumuşak şartlarda üretimden sonra östenit, martenzite dönüşümü sağlamak için şartlandırılır. Şartlandırma işlemi karbonu katı eriyikten uzaklaştırmak için yeterince yüksek sıcaklığa ısıtma ve karbonu krom karbür ( $Cr_{23}C_6$ ) şeklinde çökeltmeden meydana gelir. Çökeltme ilk olarak ferrit-östenit arayüzeyinde olur. Östenitik matristen karbon ve bir miktar kromun uzaklaştırılması östeniti kararsız hale getirir. Martenzit başlangıç  $M_s$  sıcaklığına soğutma sonucu östenit martenzite dönüşür. Çizelge 5.4'de çökelti sertleştirilmiş bazı yarı östenitik paslanmaz çeliklerin nominal kimyasal bileşimleri verilmiştir [64].

Çizelge 5.4. Bazı çökelti sertleştirilmiş yarı östenitik paslanmaz çeliklerin nominal kimyasal bileşimleri.

Sınıf	% C	% Mn	% Si	% Cr	% Ni	% Mo	% Al	% N
17-7PH <sup>+</sup>	0.07	0.50	0.30	17.0	7.1		1.2	0.04
PH 15-7 Mo <sup>+</sup>	0.07	0.50	0.30	15.2	7.1	2.2	1.2	0.04
PH-14-8 Mo <sup>+</sup>	0.04	0.02	0.02	15.1	8.2	2.2	1.2	0.005
AM-350 <sup>±</sup>	0.10	0.75	0.35	16.5	4.25	2.75	-	0.10
Am-355 <sup>±</sup>	0.13	0.85	0.35	15.5	4.25	2.75	-	0.12

#### 5.4.2. Yarı Martenzitik Tip Paslanmaz Çelikler

Kullanım ağırlığı bakımından martenzitik-çökeltme sertleştirilmiş paslanmaz çelikler diğer çeliklerden daha fazla kullanılır. Çözündürme uygulanmış şartlardaki nispeten yüksek sertliklerinden dolayı, bu çelikler prensip olarak çubuk, tel ve ağır dövülmüş şekilde kullanılır. Levha şeklinde kullanımı ise azdır. Çözündürme ısıl işlemi ve oda sıcaklığında soğutmadan sonraki bu çeliklerdeki östenit ve ferrit dengesi martenzitik şartlarındadır [62]. Çizelge 5.5’de bazı çökelti sertleştirilmiş martenzitik paslanmaz çeliklerin kimyasal bileşimleri verilmiştir.

Çizelge 5.5. Bazı çökelti sertleştirilmiş martenzitik paslanmaz çeliklerin nominal kimyasal bileşimleri.

Sınıf	% C	% Mn	% Si	% Cr	% Ni	% Mo	% Al	% Cu	% Ti	% Nb
<b>Orta Dayanım</b>										
17-4PH <sup>+</sup>	0.04	0.30	0.60	16.0	4.2	-	-	3.4	-	0.25
15-5PH <sup>+</sup>	0.04	0.30	0.40	15.0	4.5	-	-	3.4	-	0.25
Custom 450 <sup>*</sup>	0.03	0.25	0.25	15.0	6.0	0.8	-	1.5	-	0.3
Paslanmaz W <sup>†</sup>	0.06	0.50	0.50	16.75	6.25	-	0.2	-	0.8	-
<b>Yüksek Dayanım</b>										
PH 13-8 Mo <sup>+</sup>	0.04	0.03	0.03	12.7	8.2	2.2	1.1	-	-	-

#### 5.5. DUPLEKS PASLANMAZ ÇELİKLER

Dupleks paslanmaz çelikler, Fe, Cr, Ni sistemine dayalı iki fazlı alaşımlardır. Bu alaşımlar, mikroyapıda eşit oranda HMK (hacim merkezli kübik) ferrit ve YMK (yüzey merkezli kübik) östenit bulundurulur. Dupleks paslanmaz çelikler düşük karbon içeriği (% < 0.03), Mo, N, W ve Cu katkılarıyla bilinirler. Genellikle % 20-30 Cr ve % 5-10 Ni içerirler. Dupleks paslanmaz çeliklerin geleneksel 300 serisi paslanmaz çeliklerden üstün özellikleri; gerilme korozyon direnci, mukavemet ve çukurcuk (pitting) korozyon direncidir.

Dupleks paslanmaz çeliklerin alaşım katkıları hem ferrit hem de östenit oluşturuculardır. Dupleks paslanmaz çeliklerde kullanılan ana alaşım elementleri içerisinde Cr ve Mo ferrit oluşturucu, Ni, C, N ve Cu östenit oluşturucudur. Östenit

ve ferrit oluşturucu alaşım elementlerinin dengesi malzeme mikroyapısını oluşturmaktadır.

Dupleks paslanmaz çeliklerin sahip olduğu yuğsek alaşım içeriği ve ferritik bir matris gevreklemeye karşı hassasiyeti ve mekanik özellikleri de tokluğu düzeltir. Bu elikler özellikle yağ, gaz, petrokimya ve kağıt endüstrisi gibi uygulama alanlarında kullanılmaktadır. Çizelge 5.6'da bazı dupleks paslanmaz çeliklerin kimyasal bileşimleri verilmiştir [64].

Çizelge 5.6. Dupleks paslanmaz çeliklerin kimyasal bileşimleri ( % bileşim).

	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	N	ekme dayanımı (MPa)	Akma Dayanımı (MPa)
S31200	0.03	2.0	1.0	24-36	5.5-6.5	1.2-2.0	0.14-0.20	690	450
S31500	0.03	1,2-2	1.4-2	18-19	4.25-5.25	2.5-3.0	0.05-0.1	630	450
S31803	0.03	2.0	1.0	21-29	4.5-6.5	2.5-3.5	0.08-0.2	620	450
S32304	0.03	2.5	1.0	21-24	3.0-5.5	0.05-0.6	0.05-0.2	600	400
S32550	0.03	1.5	1.0	24-27	4.5-6.5	2.9-3.9	0.1-0.2	760	550
S32750	0.03	1.2	1.0	24-26	6.0-8.0	3.0-5.0	0.24-0.32	800	500
S32760	0.03	1.0	1.0	24-26	6.0-8.0	3.0-4.0	0.3	750	550
S32900	0.03	1.0	0.75	23-28	2.5-5.0	1.0-2.0	-	620	485
S32950	0.03	2.0	0.60	26-29	3.5-5.2	1.0-2.5	0.15-0.35	690	480

## BÖLÜM 6

### DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada, titanyum ve ferritik paslanmaz çelik malzemeler nikel arabağlayıcı kullanılarak difüzyon kaynak yöntemi ile birleştirilmiş, bağlantıların mekanik özellikleri (çekme-makaslama ve sertlik) ile mikroyapı (optik mikroskop, SEM/EDS) özellikleri incelenmiştir. Deneylerde kullanılmak üzere 1 mm kalınlığında saf titanyum (ASTM Grade 2) ve aynı kalınlıkta ferritik paslanmaz çelik temin edilmiştir. Difüzyon kaynağı yöntemiyle titanyum ve ferritik paslanmaz çeliğin direkt olarak birleştirilmesi mümkün olmadığından, ara bağlayıcı olarak 100 µm kalınlığında, folyo formunda nikel kullanılmıştır. Bu çalışma kapsamında kullanılan titanyum, ferritik paslanmaz çelik ve arabağlayıcı nikelin kimyasal analizleri sırasıyla Çizelge 6.1, Çizelge 6.2 ve Çizelge 6.3’de verilmiştir.

Çizelge 6.1. Titanyumun kimyasal analizi (% ağırlık).

Element	ASTM Standardı	Alaşım elementleri (ağırlıkça %)					
		N	C	H	Fe	O	Ti
Ağırlıkça (%)	Grade 2	0.03	0.10	0.015	0.30	0.25	Kalan

Çizelge 6.2. Ferritik paslanmaz çeliğin kimyasal analizi (% ağırlık).

Element	AISI	C	Mn	Si	P	S	Cr	Fe
Ağırlıkça (%)	430	0.12	1.0	1.0	0.04	0.03	16-18	Kalan

Çizelge 6.3. Arabağlayıcı nikelin kimyasal analizi (% ağırlık)

Element	O	Ni
Ağırlıkça (%)	0.02-0.30	99.99

Deney numunelerinin kesilmesi için, uygun bir tekniğin kullanılması gerekir. Aksi halde yanlış seçilmiş kesme tekniği, malzemenin içyapısında değişikliklere ya da bir takım kusurlara neden olabilir. Bu nedenle 1000x500x1 mm ebatlarında olan malzemeler giyotin makas yardımıyla 500x40x1 mm ebatlarda kesilmiş, diğer kesme işlemleri ise laboratuvar ortamında silisyum karbür kesici disk ile ve soğutma sıvısı kullanılarak 40x10x1 mm ebatlarında yapılmıştır. Arabağlayıcı olarak kullanılan nikel folyonun kesimi ise 10x10 mm ebatlarında makas yardımıyla gerçekleştirilmiştir.

## **6.1. KAYNAKLARIN YAPILIŞI**

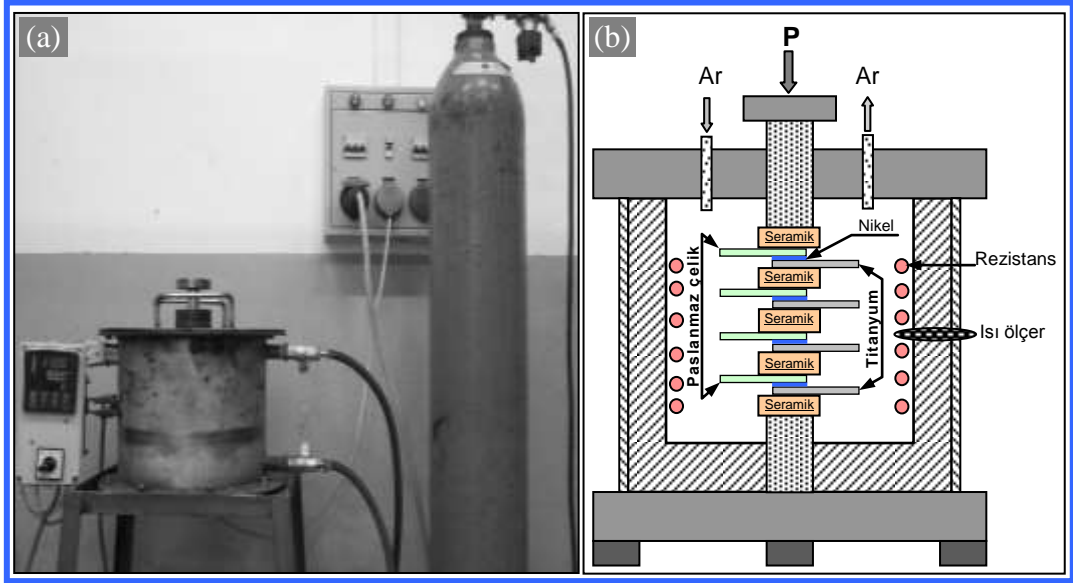
Difüzyon kaynak işlemi için hazırlanan numunelerin birleştirilecek olan yüzeylerine, kademeli olarak 240, 400, 600, 800, 1000, 1200 grit silisyum karbür zımpara ile zımparalama yapılmıştır. Daha sonra saf su, aseton ve saf alkolle temizlenerek kurutulmuşlardır. Zımpara işlemi biten numuneler mümkün olduğunca en kısa süre içerisinde kaynak cihazına yerleştirilmesine özen gösterilmiştir.

Öncelikle kaynak parametre aralığını (sıcaklık-süre-basınç) belirlemek için değişik parametrelerde ön hazırlık deneyleri yapılmıştır. Elde edilen birleştirmeler, tecrübeler sonucu değerlendirilerek deneyler sonucunda 800-875 °C sıcaklık aralığı, 3 MPa basınç ile 15, 30, 60 ve 120 dakika süreler seçilmiştir.

Deneysel çalışmalar Şekil 6.1'de fotoğraf ve şematik görüntüsü verilen TR2002 02710 U patent numaralı, Karabük Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Kaynaklı İmalat Laboratuvarındaki difüzyon kaynak cihazı ile gerçekleştirilmiştir.

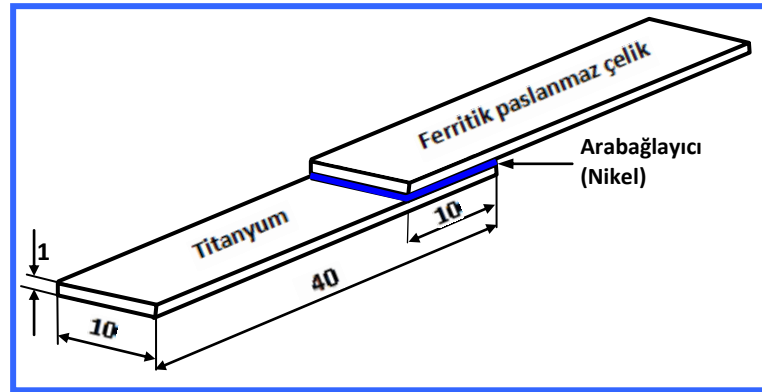
Kaynak esnasında malzeme çiftlerinin birbirlerine, fırın zeminine ve basınç uygulama aparatına yapışmasını önlemek için çiftler arasına 5 mm kalınlığında seramik malzemeler kullanılmıştır. Şekil 6.2'de birleştirme işleminde bir kaynak çifti ve arabağlayıcının konumlandırılması şematik olarak gösterilmiştir.





Şekil 6.1. Difüzyon kaynak setinin a) fotoğraf ve b) şematik görünümü.

Çalışma kapsamında değişik sıcaklık ve süre kombinasyonları kullanılarak, aynı parametre seti ile dört adet numune, difüzyon kaynağı ile birleştirilmiştir. Çizelge 6.4'te deneysel çalışmalar esnasında kullanılan kaynak parametreleri verilmiştir. Böylece tüm kaynaklar, bir seti metalografik işlem için, diğer üç set ise çekme-makaslama testi için kullanılmıştır. Metalografik ve sertlik testleri için kullanılacak numune kesme diski ile kesiti boyunca tam merkezden ikiye ayrılmış ve bu parçalardan birisi metalografi diğeri ise sertlik ölçümü için kullanılmıştır.



Şekil 6.2. Birleştirme işleminin şematik gösterimi.

Çizelge 6.4. Deneylerde kullanılan kaynak parametreleri.

Malzeme	Kaynak Parametreleri		Süre (dakika)	Kaynak ortamı
	Sıcaklık (°C)	Basınç (MPa)		
Ti-Ni-SS	800	3	15	Argon
Ti-Ni-SS	800		30	
Ti-Ni-SS	800		60	
Ti-Ni-SS	800		120	
Ti-Ni-SS	825	3	15	Argon
Ti-Ni-SS	825		30	
Ti-Ni-SS	825		60	
Ti-Ni-SS	825		120	
Ti-Ni-SS	850	3	15	Argon
Ti-Ni-SS	850		30	
Ti-Ni-SS	850		60	
Ti-Ni-SS	850		120	
Ti-Ni-SS	875	3	15	Argon
Ti-Ni-SS	875		30	
Ti-Ni-SS	875		60	
Ti-Ni-SS	875		120	

Difüzyon kaynak işlemine başlamadan önce birleştirme işlemi yapmak için zımparalanmış numuneler son kez sıra ile ferritik paslanmaz çelik, nikel ve titanyum 1200 grit silisyum karbür zımpara ile zımparalanmıştır. Daha sonra sırayla saf su, aseton ve saf alkolle temizlenerek saç kurutma makinesi ile kurutulmuştur. Bu zımparalama işlemindeki amaç özellikle Ti ve Ni yüzeyindeki oksit film tabakasını en aza indirmektir. Hazırlanan numunelerin difüzyon kaynak cihazına yerleştirilmesi aşamasında, kaymayı engellemek amacıyla gerekli önlemler alınmıştır. Birleşecek numuneler üst üste, profilden bakıldığında bir z harfi oluşturacak şekilde fırına yerleştirilmiştir.

Kaynak esnasında kullanılacak parametre değerlerine göre, difüzyon kaynak cihazı programlanmıştır. Bu programlama 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 ve kaynak odacığının kapağı kapatılarak argon gazı verilmiş ve ısıtma öncesinde gaz çıkış vanası bir kaç defa açılıp kapatılarak içeride kalan havanın temizlenmesi sağlanmış ve daha sonra bu oran kontrol edilebilecek minimum değere indirilmiştir. Bu

işlemden sonra sıcaklık istenilen değere getirilerek kontrol altında beklenmiştir. Numuneler, istenilen sıcaklık değerine ulaştığında, belirli bir süre bekletildikten (15, 30, 60 ve 120 dk) sonra basınçta herhangi bir değişiklik yapılmaksızın sıcaklık 20 °C/dk soğutma hızı ile oda sıcaklığına düşürülmüştür. Kaynak esnasında gaz tahliye musluğundan içeriye istenmeyen gaz girişini önlemek için çıkış musluğuna bir hortum bağlanmış ve hortum ucu su içerisine batırılarak gaz çıkışı su içerisine verilmiştir. Kaynak esnasındaki gaz koruması fırın sıcaklığı oda sıcaklığına düşene kadar devam ettirilmiştir.

Difüzyon kaynak yönteminde değişik kaynak parametrelerinin kullanıldığı deneysel çalışmalarda difüzyon sıcaklığının en düşük (800 °C) seçildiği ve süre olarak 15 dakikanın kullanıldığı durumlarda birleşme elde edilemez iken, 875 °C sıcaklıkta 120 dakikada malzeme birleştirilmiş fakat yüksek sıcaklık ve süre nedeni ile difüzyon kaynak kabul kriteri sınırlarından çıkmış malzeme deformasyona uğramış ve parça kalınlığı azalmıştır. Diğer tüm parametrelerde olumlu sonuçlar alınmıştır.

## **6.2. ÇEKME-MAKASLAMA TESTİ**

Difüzyon kaynak yöntemi ile birleştirilen numunelerin birleştirme dayanımları çekme-makaslama testi ile belirlenmiştir. Kaynaklı numuneler Karabük Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği Laboratuvarında AG-50 kN SHIMADZU Autograph çekme/basma cihazında çekme-makaslama testine tabi tutulmuştur (Şekil 6.3). Test esnasında çekme hızı 0.5 mm/dk ve çene mesafesi 40 mm olarak seçilmiştir.

Kaynaklı numunelere uygulanan çekme-makaslama testi, her bir parametreden üç adet yapılmış ve ortalamaları değerlendirilmiştir. Tüm kaynaklı numunelerin çekme-makaslama testlerinden elde edilen gerilim-uzama eğrileri otomatik olarak bilgisayara aktarılmış ve grafikleri çizilmiştir.

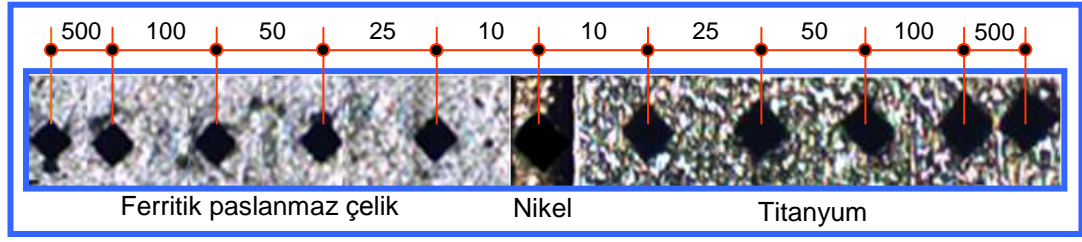


Şekil 6.3. Çekme-makaslama test cihazı görüntüsü.

### 6.3. SERTLİK ÖLÇÜMÜ

Sertlik izafi bir ölçü olup malzemelerin çizilmeye, kesilmeye, aşınmaya ve delinmeye karşı gösterdiği dirence denir. Laboratuarlarda özel cihazlarla yapılan sertlik ölçümlerindeki değer, malzemenin plastik deformasyona karşı göstermiş olduğu direnç olarak tanımlanabilir.

Mikrosertlik testi için ayrılan kaynaklı numuneler öncelikle bakalite alınmışlar ve metalografik kurallara uygun olarak (standart zımparalama, parlatma ve dağlama) hazırlanmışlardır. Kaynaklı numunelerin mikrosertlikleri Şekil 6.4’de şematik olarak gösterilen doğru boyunca yapılmış ve her bir numuneden en az üç sertlik alınıp ortalamaları değerlendirilmiştir. Sertlik ölçümleri SHIMADZU mikrosertlik ölçüm cihazı ile yapılmış ve test esnasında 0.5 kg’lık yük 10 sn uygulanmıştır. Ölçüm işlemi başta arabağlayıcı olmak üzere, kaynak merkezinden başlayarak her iki metale doğru (titanyum ve ferritik paslanmaz çelik) sırasıyla 10, 25, 50, 100 ve 500  $\mu\text{m}$  aralıklarla yapılmıştır. Şekil 6.4’de kaynaklı numune üzerinde bir sıra halinde gerçekleştirilen ölçüm izlerinin fotoğraf görüntüleri ve ölçüm aralıkları şematik olarak, Şekil 6.5 ise sertlik ölçümlerinin yapıldığı mikrosertlik cihazının görüntüsü gösterilmiştir.



Şekil 6.4. Mikrosertlik ölçüm yapılan bölgeler ve ölçüm izleri (µm).



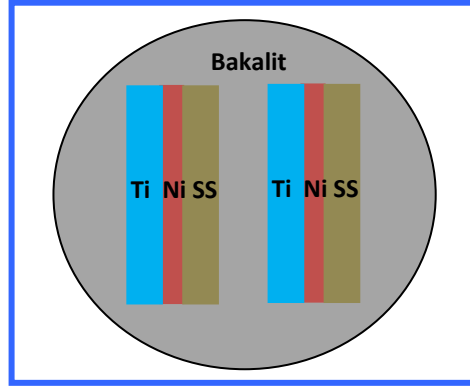
Şekil 6.5. Mikrosertlik ölçüm cihazı.

#### 6.4. METALOGRAFİK ÇALIŞMALAR

Metalografi; optik mikroskop, elektron mikroskobu ve X ışınları gibi fiziksel tekniklerle malzemelerin içyapılarının incelenmesidir. Laboratuvar ortamında silisyum karbürlü taş kullanılarak su soğutmalı ortamda kesilen kaynak numuneleri Şekil 4.6'da gösterildiği gibi reçine ile soğuk gömme işlemine tabi tutulmuşlardır. Gömme işlemi, numuneler ufak olduklarından elle tutup parlatılmalarını kolaylaştırmak amacı ile yapılmıştır. Kalıba 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 ve sırasıyla 6, 3 ve 1 µm bir keçe ile gerçekleştirilmiş ve bu keçe üzerine sırasıyla 6, 3 ve 1 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.



Şekil 6.6. Kaynaklı numunelerin soğuk kalıba alınmış şekli.

Parlatma işlemi tamamlanan numuneler mikroyapılarının görülebilmesi için dağlama işlemine tabi tutulmuşlardır. Dağlama işleminde amaç tane sınırları ve arayüzeyi daha iyi görebilmektir. Bu amaç ile ferritik paslanmaz çelik için 10 ml oksalik asit 90 ml saf su ve titanyum için % 73 H<sub>2</sub>O - % 16 HF - % 6 HNO<sub>3</sub> - % 5 HCl karışımı kimyasal dağlayıcılar hazırlanmıştır. Dağlayıcı titanyum için malzeme yüzeylerine bölgesel olarak damlatılmış, ferritik paslanmaz çelik tarafı daldırma suretiyle 2 dakika süre ile (+) kutup ve oda sıcaklığında elektrolitik olarak dağlanıp optik mikroskoba hazır hale getirilmiştir.

Mikroyapı için hazırlanan numuneler bilgisayara görüntü aktarabilen 1000 büyütme kapasiteli NIKON Epiphot 200 marka (Şekil 6.7) optik mikroskop ile görüntülenmiştir. Görüntülerin, birleştirilmiş numunelerin arayüzeylerini tam olarak yansıtan bölgeden yapılmasına özen gösterilmiştir.



Şekil 6.7. Metalografik incelemede kullanılan optik mikroskop görüntüsü.

### 6.5. TARAMALI ELEKTRON MİKROSKOBU İNCELEMESİ

SEM (taramalı elektron mikroskobu) çalışmaları, Karabük Üniversitesi Demir Çelik Enstitüsü laboratuvarında bulunan CARL ZEISS ULTRA PLUS GEMINI FESEM model cihazda yapılmıştır (Şekil 6.8). Deneysel çalışmalarda, cihaza bağlı olan bilgisayar ekran görüntüsü üzerinden yararlanılarak nokta, çizgi, alan ve haritalama yöntemleriyle analizler yapılmıştır. Cihaz üzerindeki EDX dedektörü ile kalitatif ve kantitatif kimyasal analizler yapılmakta olup, ayrıca EDX dedektörü ile bir yüzeyin elementel haritasının çıkarılması mümkündür.



Şekil 6.8. Çalışmalarda kullanılan taramalı elektron mikroskobu.

EDS çalışmaları, birleşme arayüzeyi merkezinden ve arayüzeyden her iki yönde olmak üzere farklı aralıklarla yapılmıştır. Kaynaklı numunelerin tümü üzerinden nokta analizleri gerçekleştirilmiş, böylece karşılıklı difüzyon miktar ve mesafeleri ölçülmeye çalışılmıştır. Ayrıca, tüm numunelerden çizgisel analizler yapılarak kaynak parametrelerinin etkileri belirlenmeye çalışılmıştır. EDS analiz sonucu elde edilen veriler incelenerek, ilgili faz diyagramları yardımıyla kıyaslanmış ve arayüzeyde oluşan fazların elementer içerikleri ile arayüzeyde oluşan intermetalikler tespit edilmeye çalışılmıştır.



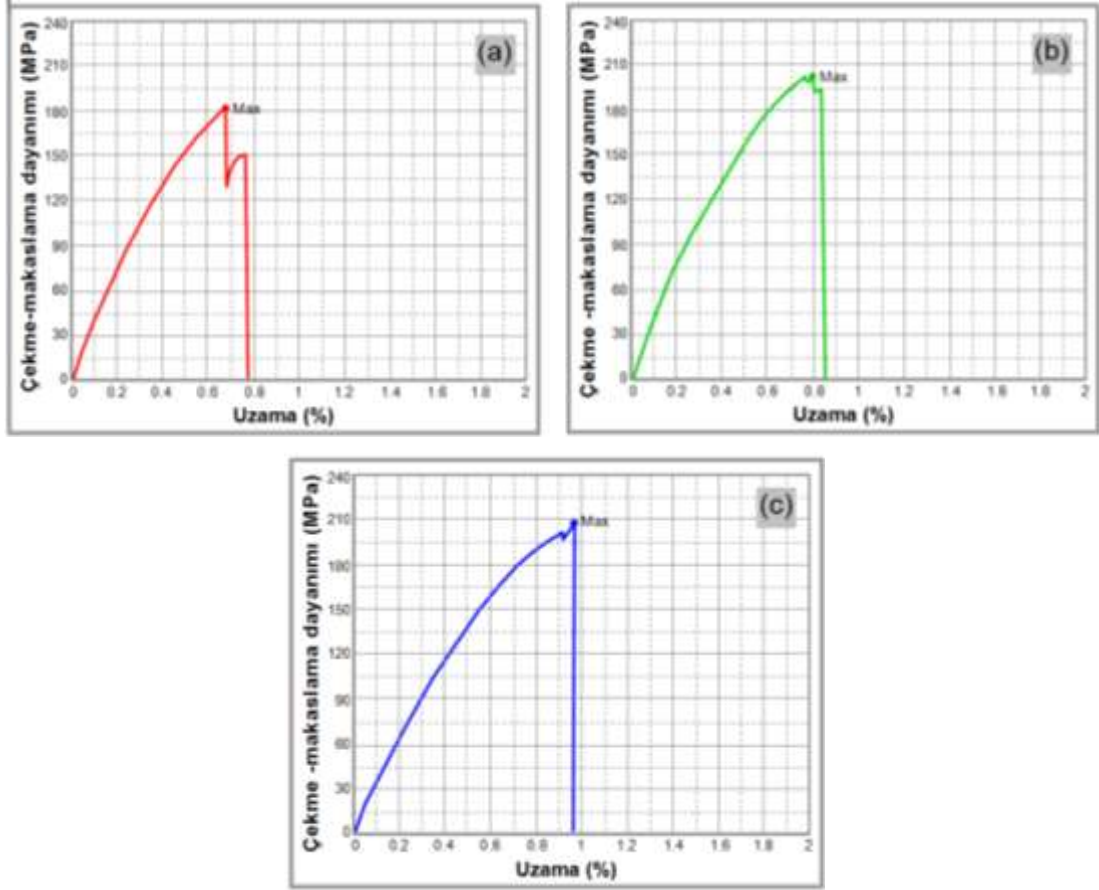
## BÖLÜM 7

### DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Difüzyon kaynağı ile farklı süre ve sıcaklıklarda gerçekleştirilen kaynak işlemleri sonucu 800 °C’de 15 dakika süre ile kaynak işlemine tabi tutulan numunelerde birleşme gerçekleşmezken, diğer bütün parametreler için birleştirme gerçekleştirilmiştir. 800 °C’de 15 dakikada kaynak yapılan numunede birleşmenin olmamasına sebep olarak hem sıcaklığın düşük olması hem de sürenin az olması gösterilebilir. Nitekim süre 30 dakikaya çıkartıldığında veya süre sabit tutulup sıcaklık 825 °C’ye çıkartıldığında kaynak işlemi gerçekleşmiştir. Diğer yandan 875 °C’de 120 dakika süre ile birleştirilen numunede tam bir birleşme gerçekleşmiş ancak, yüksek sıcaklıktan dolayı her iki malzeme deformasyona, dolayısıyla da şekil değişimine uğramıştır. Bilindiği gibi bu kaynak yönteminde atomların yayınabilmesi için yeterli sıcaklık, süre ve basınç ihtiyacı 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 [47]. 875 °C ve 120 dk sürede kaynak yapılan numune, akma sınırını geçtiğinden şekil değişimine uğramış, haliyle deneysel çalışmalarda kullanılmamıştır.

#### 7.1. ÇEKME-MAKASLAMA TESTİ

Difüzyon kaynağı yöntemi ile farklı kaynak parametreleri (sıcaklık ve süre) kullanılarak yapılan birleştirmelerden elde edilen numunelere çekme test cihazında, çekme-makaslama testi uygulanmış ve test esnasında arayüzey dayanımlarının grafikleri otomatik olarak çizilmiştir. Her bir numune için çekme yapılan üç numunenin ortalamaları alınarak grafik üzerine aktarılmıştır. Şekil 7.1’de örnek olması açısından 15 dakika süre ile değişik sıcaklıklarda (825 °C, 850 °C ve 875 °C) elde edilmiş bağlantıların çekme-makaslama grafikleri verilmiştir.

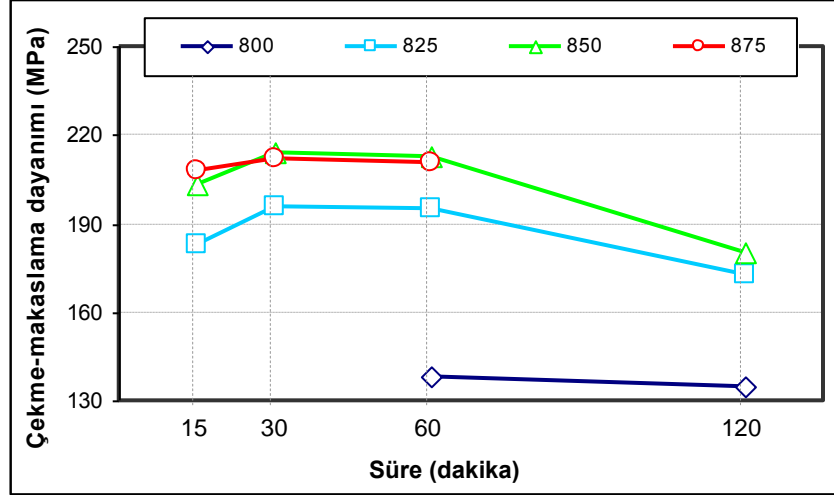


Şekil 7.1. 15 dakika süre ile birleştirilmiş numunelerin çekme makaslama test grafikleri a) 825 °C, b) 850 °C ve c) 875 °C.

Çekme-makaslama deneyleri sonucunda, tüm birleştirmelerde kopmanın arayüzeyde meydana geldiği, ancak ferritik paslanmaz çeliğin yüzeyinde bir miktar nikelin kaldığı gözlenmiştir. Buradan, titanyum-nikel arayüzeyinin, ferritik paslanmaz çelik-nikel arayüzeyinden daha dayanıklı olduğu sonucu çıkarılabilir.

Çekme-makaslama deneyleri sonucunda kırık yüzeyler üzerinde gözle yapılan muayenede, nikelin arayüzeyde tabaka olarak kaldığı numunelerde, kopma birleşmenin ferritik paslanmaz çelik-nikel arayüzeyinden gerçekleşmiştir. Ancak, kaynak arayüzeyinde nikelin tabaka olarak kalmadığı numunelerde kopma genellikle birleşme arayüzeyinin titanyum tarafından gerçekleşmiştir. Düşük sıcaklıklarda kopmanın nikel-paslanmaz çelik arayüzeyinden gerçekleşmesine sebep olarak bu arayüzeydeki difüzyonun yetersiz olması gösterilebilir. Yüksek sıcaklıklarda ise kopmanın genellikle titanyum tarafından gerçekleşmesine sebep olarak bu birleşme arayüzeyinde yoğun intermetalik oluşumu gösterilebilir.

Difüzyon kaynağı ile dört farklı sıcaklık (800, 825, 850 ve 875 °C) ve sürenin (15, 30, 60 ve 120 dakika) kullanılarak birleştirildiği ve çekme-makaslama testleri sonucunda elde edilen veriler kullanılarak oluşturulan grafik, parametreler arasındaki kıyaslamayı daha kolay anlaşılabilir hale getirmek için Şekil 7.2’de verilmiştir.



Şekil 7.2. Çekme-makaslama deney sonuçları.

Şekil 7.2. incelendiğinde, 800 °C ve 15 dakika sürede, kaynak işleminin gerçekleşmediği görülmektedir. 800 °C ve 30 dakika sürede ise kaynak işlemi gerçekleşmiş fakat numune çekme cihazına bağlanırken kopmuştur. Bu sıcaklıkta birleşme işleminin tam olarak gerçekleşmemesinin sebebi olarak yeterli difüzyon şartlarının sağlanamamış olması düşünülmektedir. Çünkü özellikle difüzyon şartlarından biri olan sıcaklık parametresi malzemenin akma gerilmesini azaltarak ilk plastik deformasyonu sağlar. Yüzey pürüzlerini gidererek gerçek temas alanını elde etme zamanı kısaltır. Ayrıca sürünme ile şekil değiştirme oranı artırır. Bu yüzden yüzeylerde yeterli deformasyonun gerçekleşmemesi nedeni ile yeterli yüzey teması sağlanmamış ve buda arayüzeyde zayıf bir bağ oluşumuna neden olmuştur. Dolayısıyla bu numuneden de çekme-makaslama testi için bir veri alınamamıştır.

Şekil 7.2’de kaynak esnasında kullanılan farklı deney parametrelerinin çekme-makaslama test sonuçlarını etkilediği açıkça görülmektedir. Burada en yüksek çekme-makaslama dayanımı 850 °C’de 30 dakika sürede 214 MPa olarak tespit edilmiştir. En düşük dayanım ise 800 °C’de 120 dakika süre ile gerçekleştirilmiş

birleştirmelerden 135 MPa olarak tespit edilmiştir. Grafik dikkatli bir şekilde incelendiğinde artan sıcaklık ile beraber çekme-makaslama dayanımının 15 dakikalık sürede giderek arttığı, ancak diğer sürelerde dayanımın bir noktaya kadar arttığı (850 °C), bu sıcaklıktan sonraki sıcaklıkta ise azaldığı tespit edilmiştir. Benzer şekilde grafikte sıcaklık sabit tutulup süre değişkeni incelendiğinde sürenin artışına bağlı olarak dayanımın bir noktaya kadar arttığı (30 dakika), bundan sonraki sürede (60 dakika) yaklaşık aynı dayanımı korumaya çalıştığı ve süre daha da arttırıldığında (120 dakika) ve bütün sıcaklıklarda dayanımın düştüğü görülmüştür. Kısa kaynak sürelerinde kaynak dayanımının düşük olmasının sebebi yeterli difüzyonun olmamasından kaynaklanmaktadır. Benzer malzemeler üzerinde yapılan literatür araştırması göstermiştir ki; arayüzeyde sadece Ti-Ni tabaka oluşumu, kaynağın daha zayıf olmasına sebep olmaktadır [29]. Uzun kaynak sürelerinde birleştirilen kaynaklı numunelerdeki çekme-makaslama dayanımının düşmesine neden olarak ise kaynak arayüzeyinde intermetalik bileşik oluşumu ve tane irileşmesi gösterilebilir.

Peng et al, 14x30 mm ebatlarındaki titanyum (Ti-6Al-4V) ve paslanmaz çelik (18Cr10Ni) malzemeleri 30 µm kalınlığında saf nikel arabağlayıcı kullanarak farklı sıcaklık ve sürelerde birleştirmişlerdir. Çalışma sonucunda artan difüzyon sıcaklığı ve süresi ile birlikte kesme dayanımının belirli bir noktaya kadar arttığı, ancak sıcaklık ve sürenin daha da yükselmesi durumunda intermetalik bileşiklerinin oluşumundan dolayı dayanımın azaldığını belirtmişlerdir [29].

Ghosh et al, 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 birleştirmelerden elde edildiğini, daha yüksek sıcaklıklarda aşırı tane büyümesi ve ara bileşik oluşumu nedeniyle mukavemetin azaldığını belirtmişlerdir [65].

Ghosh and Chatterjee, 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 30 dakika sürede yapılan birleştirmelerde ve 225 MPa elde edildiğini belirtmişlerdir. Süre 60 dakikaya çıktığında mukavemetin 183 MPa'ya düştüğünü, sürenin daha da artması durumunda dayanımın 129 MPa'ya düştüğünü

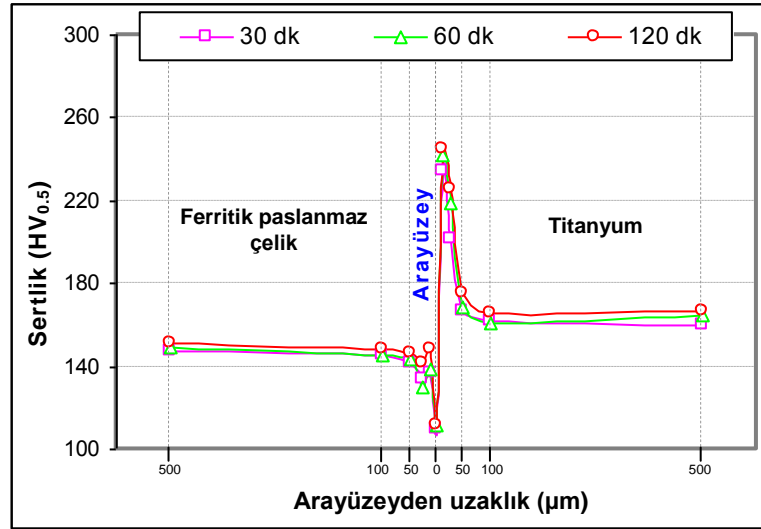
belirtmişlerdir. Bu keskin düşüşün sebebinin de arabileşik oluşumu ve boşlukların oluşumundan kaynaklandığını rapor etmişlerdir [66].

Kundu et al; Ti6Al4V alaşımı ve 17-4PH paslanmaz çelik çiftini nikel alaşımlı arabağlayıcı kullanılarak, 800-900 °C sıcaklık aralığında ve 5, 10, 15, 30 ve 45 dakika süre ile difüzyon kaynak yöntemi ile birleştirmişlerdir. Kaynak işlemleri sonucunda kaynak bölgesi arayüzey reaksiyonlarını ve mukavemet özelliklerini çekme testi ile incelemişlerdir. 900° C’de birleştirilmiş numunelerin çekme deneylerinden elde edilen sonuçlara göre 5 dakikada 330 MPa, 10 dakikada 420 MPa, 15 dakikada 470 MPa’ya kadar yükselmiş ancak süre 30 dakikaya yükseltildiğinde 420 MPa’ya ve süre 45 dakikaya yükseltildiğinde ise 430 MPa’ya düştüğünü tespit etmişlerdir. Sonuçları genel olarak değerlendirdiklerinde ise sürenin artmasına bağlı olarak çekme mukavemetinin belli bir noktaya kadar arttığı ve süre daha da arttırıldığında çekme mukavemetinin düştüğünü rapor etmişlerdir. Sıcaklık değerlendirildiğinde ise en düşük kesme mukavemetinin 800 ° C’de 340 MPa ve en yüksek çekme mukavemetinin ise 875 ° C’de 510 MPa olduğu tespit edilmiştir. Sıcaklığın daha da yükselmesi ile birlikte çekme mukavemetinin azaldığı rapor etmişlerdir [67].

## 7.2. SERTLİK ÖLÇÜMÜ

Mikrosertlik ölçümleri öncelikle difüzyon kaynağı ile birleştirilecek ana malzemeler ferritik paslanmaz çelik ile titanyum malzemedeki gerçekleştirilmiş ve sertlik değerleri sırasıyla 146±4 HV ve 165±4 HV olarak ölçülmüştür.

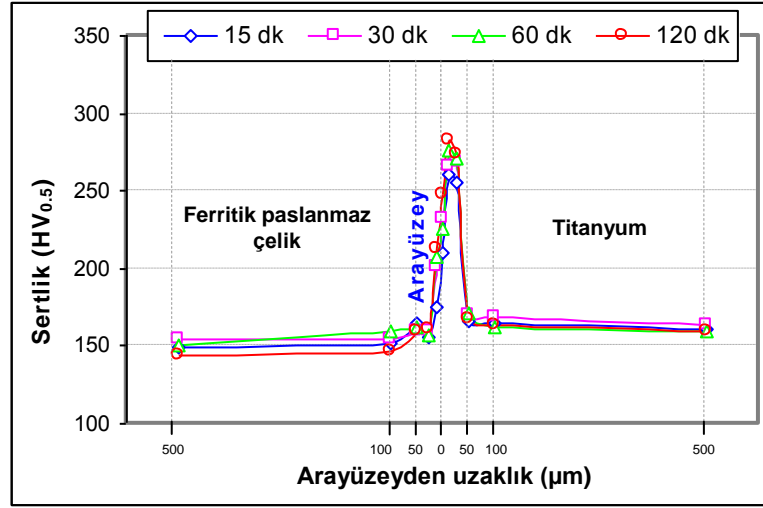
Mikrosertlik ölçümleri, difüzyon kaynağı ile birleştirilmiş numunelerin birleşme bölgesi merkezinden başlayarak her iki malzeme tarafına doğru (titanyum ve paslanmaz çelik) sırasıyla 10, 25, 50, 100 ve 500 µm aralıklarla yapılmıştır. Elde edilen sonuçlardan faydalanarak her bir kaynaklı bağlantıya ait mikrosertlik grafikleri belirlenmiş olup, bu grafikler sırasıyla Şekil 7.3 ve Şekil 7.6 aralığında gösterilmiştir. Grafiklerin anlaşılmasını kolaylaştırmak için her bir sıcaklık için tek bir grafik çizilmiş ve bu grafik üzerinde tüm süreler (15, 30, 60 ve 120 dk) verilmiştir.



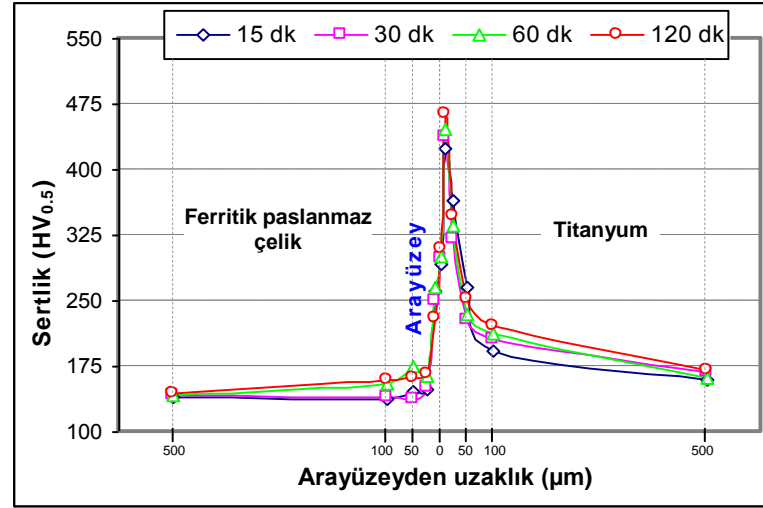
Şekil 7.3. 800 °C'de birleştirilen numunelerden elde edilen sertlik değerleri.

Şekil 7.3'de 800 °C'de 30, 60 ve 120 dakika süre ile difüzyon kaynağı işlemine tabi tutulan kaynaklı numunelerden elde edilmiş mikrosertlik grafiği gösterilmiştir. Sertlik ölçümleri esnasında arayüzeyde nikelin varlığını koruduğu görülmüş ve bu sebep ile sertlik ölçümleri nikel üzerinden yapılmıştır. Bir başka ifade ile grafikte 0 (sıfır) ile gösterilen ölçüm sonuçları tamamen nikel arabağlayıcının sertliğini ifade etmektedir. Grafik incelendiğinde en düşük sertliğin bu bölgede olduğu açıkça görülmektedir. En yüksek sertlik değeri ise titanyum-nikel arayüzeyinden 10 µm uzaklıkta 245 HV olarak ölçülmüştür. Sertlik grafiği genel olarak değerlendirildiğinde birleştirmenin titanyum-nikel arayüzeyinden 25 µm mesafede sertliğin ana malzemedan (titanyum) daha yüksek olduğu, ancak birleştirmenin paslanmaz çelik-nikel arayüzeyinden 10 µm uzaklıkta bile sertliğin orijinal malzeme sertliğinde olduğu tespit edilmiştir. Buradan kullanılan kaynak parametrelerinde arabağlayıcının özellikle paslanmaz çelik tarafına yeterince difüze olamadığı sonucu çıkarılabilir. Çekme-makaslama testinde bu sıcaklık ve sürelerde birleştirilen numunelerin düşük çekme-makaslama dayanımı göstermeleri yeterli difüzyonun olmadığına bir göstergesi olarak değerlendirilebilir. Sonuç olarak sertlik sonuçları ile çekme-makaslama sonuçları birbirlerini destekler niteliktedir.

Şekil 7.4'te 825 °C'de, Şekil 7.5'te 850 °C'de ve Şekil 7.6'da ise 875 °C'de difüzyon kaynağı birleştirilen numunelerden elde edilen sertlik grafikleri ayrı ayrı gösterilmiştir.

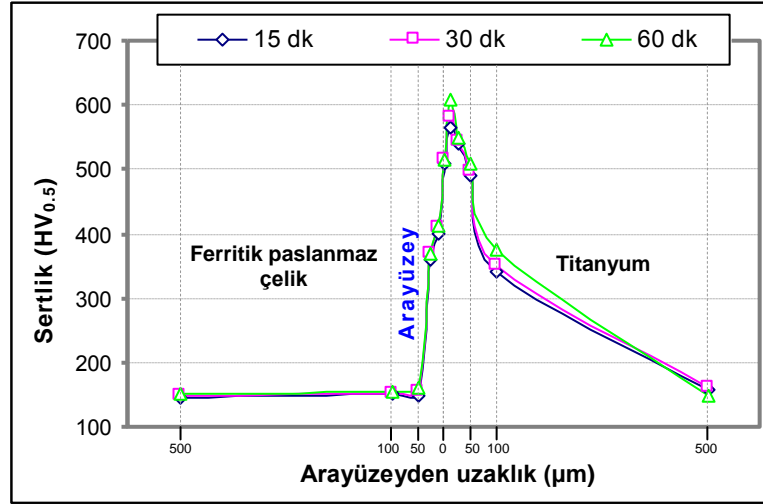


Şekil 7.4. 825 °C’de birleştirilen numunelerden elde edilen sertlik değerleri.



Şekil 7.5. 850 °C’de birleştirilen numunelerden elde edilen sertlik değerleri.

825 °C’de birleştirilen kaynaklı numunede sertlik ölçüm esnasında arayüzeyde nikel arabağlayıcının kısmen varlığını koruduğu ancak 850 °C’de birleştirilen numunede ise arabağlayıcının tamamen arayüzeyden kaybolduğu görülmüştür. Şekil 7.4 ve Şekil 7.5 incelendiğinde sıcaklığın artışıyla birlikte sertlik değerlerinin arttığı tespit edilmiştir. Örneğin 825 °C’de titanyum nikel arayüzeyinden 50 μm uzaklıkta ana malzemenin sertliği ile aynı değeri koruduğu gözlenirken, 850 °C’de aynı uzaklıkta sertlik değerinde artış göstermiş ve arayüzeyden 100 μm uzaklıkta aynı artış devam etmiştir. Ayrıca şekiller incelendiğinde, sıcaklığın artışıyla birlikte sertliğin arayüzeyin her iki tarafında da artarak devam ettiği açıkça görülmektedir.



Şekil 7.6. 875 °C’de birleştirilen numunelerden elde edilen sertlik değerleri.

Şekil 7.6’da verilen grafik incelendiğinde titanyum tarafında 100 μm uzaklıkta dahi yüksek bir sertlik değerinin elde edildiği tespit edilmiştir. Ayrıca arayüzeyden birleştirmenin paslanmaz çelik tarafına doğru 25 μm mesafede sertliğin arttığı belirlenmiştir.

Grafikler genel olarak değerlendirildiğinde, bütün sıcaklık ve bekleme sürelerinde yapılmış kaynaklı bağlantıların sertlik profilleri incelendiğinde; genelde tüm birleştirmelerin benzer özellikler gösterdikleri gözlenmiştir. Kaynaklı numunelerin tümünde en fazla sertliğin titanyum-nikel arayüzeyinde olduğu tespit edilmiştir. Düşük sıcaklıklarda nikel arabağlayıcı üzerinden yapılan sertlik ölçümlerinde bu bölge en düşük sertlik değeri gösterir iken, sıcaklık ve süre arttığında arayüzey sertlik değerleri artış göstermiştir. Grafiklerde göze çarpan dikkat çekici bir husus da sertliğin birleştirmenin titanyum-nikel arayüzeyinden 100 μm mesafeye kadar arttığı, ancak birleştirmenin paslanmaz çelik-nikel arayüzeyinden ise sadece 25 μm mesafeye kadar arttığı tespit edilmiştir. Buradan birleştirmenin titanyum-nikel arayüzeyinde daha fazla intermetalik oluştuğu ve birleşmenin paslanmaz çelik-nikel arayüzeyinde daha az intermetalik faz oluştuğu sonucuna varılabilir.

Kaynaklı numunelerden ölçülen sertlik değerleri kıyaslandığında, sıcaklık artışına bağlı olarak sertlik değerlerinin belirgin bir biçimde arttığı, ancak süreye bağlı olarak sertlik değerlerinin daha az arttığı gözlenmiştir. Bunun sebebi olarak difüzyon



kaynağı esnasındaki sıcaklık parametresinin süreye göre daha etkili olduğu söylenilebilir. Yapılan literatür araştırmalarında da her 20 °C'lik sıcaklık artışında, difüzyon katsayısı veya difüzyon hızının ikiye katlandığı belirtilmiştir [1].

Ekrami, nikel bazlı süper alaşımı (Rene 80) malzemeleri yine nikel alaşımı bir ara bağlayıcı kullanarak argon atmosferi altında ve vakum altında birleştirmişlerdir. Çalışmaları sonucunda en yüksek sertliğin arayüzeyde olduğunu ve de arayüzeyden uzaklaştıkça sertliğin azaldığını, bunun sebebinin de B, Si alaşım elementlerinin etkili olduğunu belirtmişlerdir [68].

Dikbaş, toz metalürjisiyle ürettiği Ti ve Ni alaşımlarını 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 [48].

Li et al; Ti-Ni alaşımı ve paslanmaz çelik malzemeleri Ni ara bağlayıcı kullanarak lazer kaynak yöntemi ile birleştirilmesini araştırmış, sertlik testleri uygulamış ve ortalama sertlik değeri 10 test noktası üzerinde belirlenmiştir. Bu ortalama sertlik dağılımı düzgün olmayan ve Ni ara bağlayıcı kalınlığı mikro sertlik üzerinde büyük bir etkiye sahip olduğu anlaşılmıştır. Nikel arabağlayıcı kalınlığı 20 µm iken kaynak bölgesinin ortalama sertlik değeri 656 HV olarak ölçülmüştür ve intermetalik fazların kaynak bölgesinde görülen koyu yerlerinde ise 786 HV olarak ölçülmüştür. Arabağlayıcı kalınlığı 50 µm arttırıldığında ortalama sertlik değeri açıkça bir azalma göstererek ortalama 335 HV ve 669 HV'ye düşmüştür. En yüksek sertlik değeri TiNi alaşım tarafında ölçülmüştür. Buna sebep olarak  $\gamma$ -Fe faz arttırılması ve kaynak bölgesinde kırılğan intermetalik fazların (TiFe<sub>2</sub> ve TiCr<sub>2</sub>) azalması gösterilmiştir. Ni arabağlayıcı kalınlığının 80 µm'ye arttırılması, kaynak bölgesinin sertlik değerlerini 676 HV ve 692 HV'ye düşürmüştür. Buna sebep olarak (TiNi<sub>3</sub>) intermetalik fazının oluşması gösterilmiştir [69].

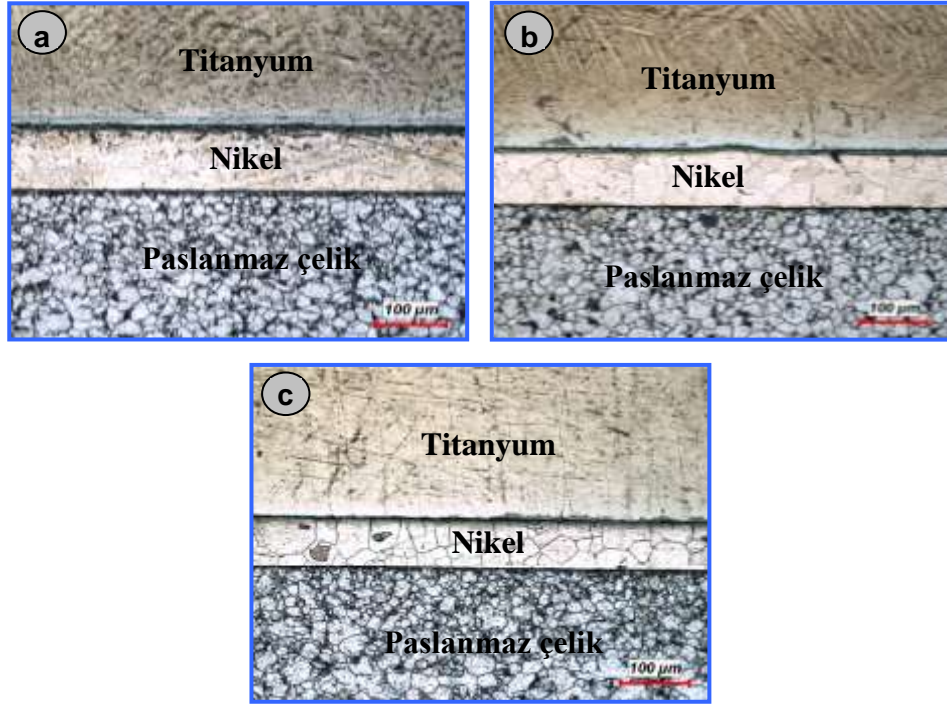
Zhong et al, tugsten ve ferritik paslanmaz çelik malzemelerin nikel arabağlayıcı kullanılarak difüzyon kaynak yöntemi ile birleştirilebilirliğini incelemişlerdir. 900°C sıcaklıkta 30 dakika ve 120 dakika süreler arasında vakum altında

birleştirmeler gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalarda birleşmenin gerçekleştiği ve kaynakların dayanıklılığı 1 saat süreye kadar artmış ve süre daha da arttıkça azalmıştır. Ni<sub>4</sub>W intermetalik bileşiği kaynakların gerilme dayanımı azalmıştır. W, Ni ve SS sertlik değeri kaynak süresi ile neredeyse bağımsız olmuştur. Bunun sebebinin de mesafeye bağlı sertlik W/Ni ve Ni/SS arayüzeylerinde hem de bileşik oluşumu ve katı eriyik sertleşirmesi kaynaklandığı gözlenmiştir [70].

### **7.3. OPTİK MİKROSKOP ÇALIŞMALARI**

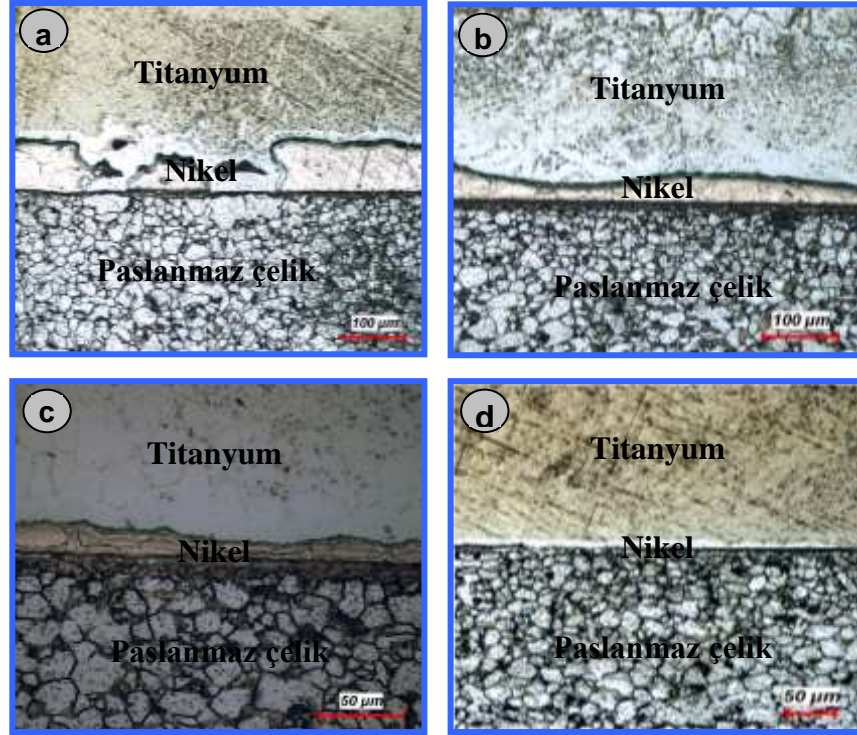
Optik mikroskop ile mikroyapı çalışmalarında amaç, difüzyon kaynağı yapılmış numunelerde oluşabilecek fazların yapı ve dağılımları ile arayüzeyde oluşabilecek boşluklarının durumunu incelemektir.

Şekil 7.7’de 800 °C’de üç farklı süre (30, 60 ve 120 dakika) ile birleştirilmiş numunelerin mikroyapı görüntüsü verilmiştir. Fotoğrafa bakıldığında birleşme işleminin olumlu gerçekleştiği ancak arabağlayıcı yüzeyinde, hem titanyum-nikel arayüzeyinde hem de paslanmaz çelik-nikel arayüzeyinde ince bir oksit tabakasının olduğu görülmektedir. Fotoğraflar dikkatli bir biçimde incelendiğinde sürenin artışına bağlı olarak arayüzeyde varlığını koruyan nikel folyonun kalınlığının azaldığı rahatlıkla görülebilir. Orijinal nikel folyo kalınlığı 100 µm olduğu bilindiğinden 30 dakika süre ile birleştirilen numunede bu kalınlık yaklaşık 80 µm’ye, süre 60 dakikaya çıkarıldığında 70 µm’ye ve son olarak süre 120 dakikaya çıkarıldığında ise 60 µm’ye düştüğü görülmüştür. Buradan, kaynak esnasında kullanılan sıcaklık (800 °C) değerinin yeterli olmadığı sonucu çıkarılabilir.



Şekil 7.7. 800 °C’de a) 30, b) 60 ve c) 120 dakika sürede birleştirilmiş numunenin mikroyapısı.

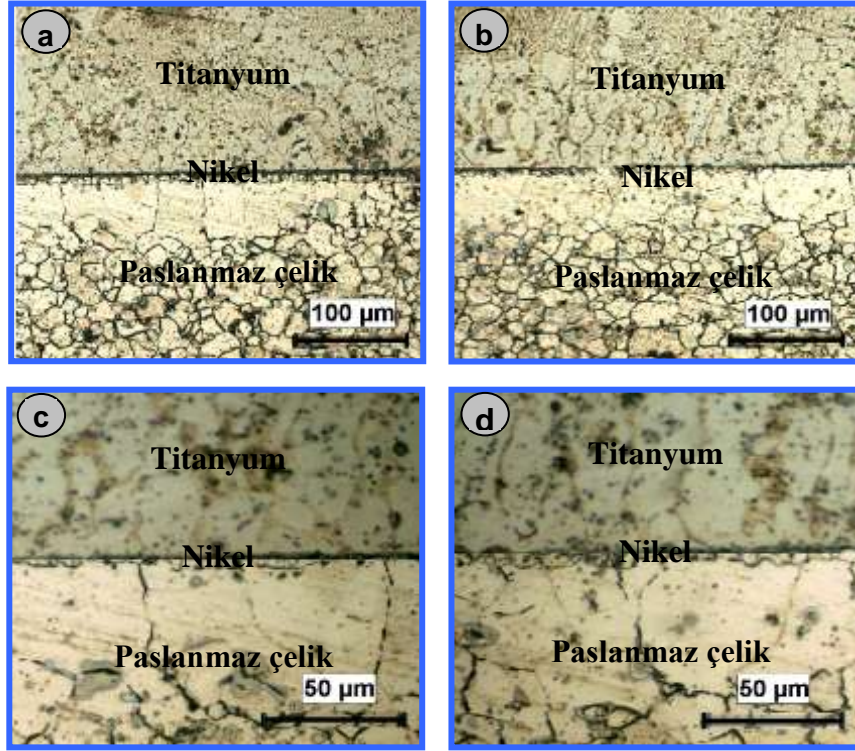
Şekil 7.8’de 825 °C’de dört farklı süre (15, 30, 60 ve 120 dakika) ile birleştirilmiş numunelerinin mikroyapı görüntüsü gösterilmiştir. Bu sıcaklıkta elde edilen mikroyapıların 800 °C’de elde edilen mikroyapılardan farklı olduğu, artan sıcaklığa ve süreye bağlı olarak ferritik paslanmaz çelik yüzeyinde 800 °C’de alınan görüntüye göre bir miktar tane irileşmesinin meydana geldiği görülmektedir. Arabağlayıcı olarak kullanılan nikel folyo kalınlığı, sürenin artmasıyla birlikte 100 µm’den yaklaşık 20-30 µm civarına düşmüş ve süre arttıkça nikel, titanyum ve paslanmaz çeliğin içine difüze olmuştur.



Şekil 7.8. 825 °C’de a) 15, b) 30, c) 60 ve d) 120 dakika sürede birleştirilmiş numunenin mikroyapısı.

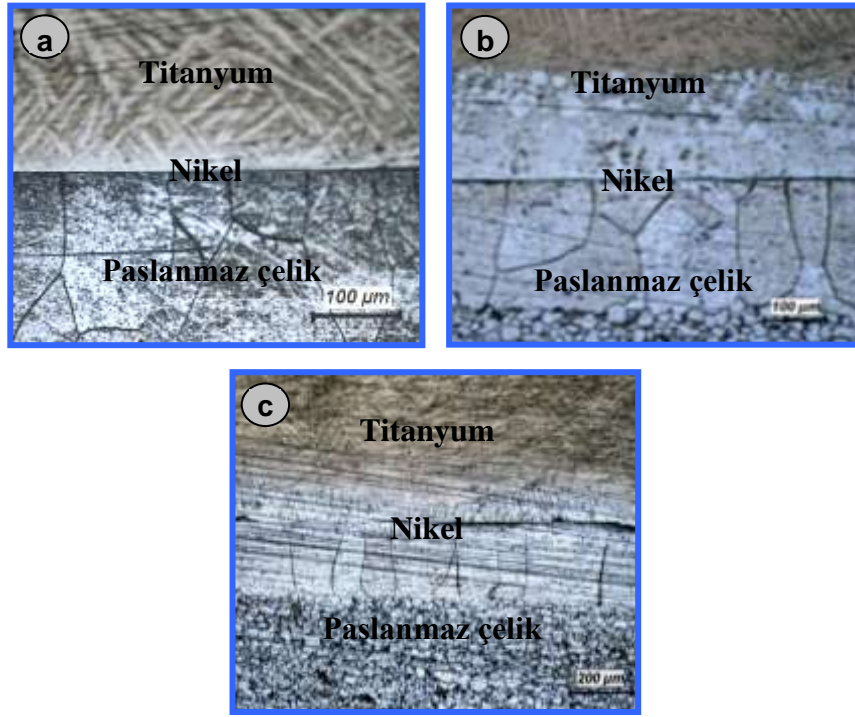
Şekil 7.8’de göze çarpan en belirgin husus, 15 dakika süre ile birleştirilen numunede meydana gelmiştir. Bu numunede difüzyon kaynağının tipik bir örneği gerçekleşmiş ve nikel folyo kısmen parçalanarak bu kısımdan atom göçü başlamıştır. Bu durumda süre yeterli olmadığından difüzyon işlemi kısmen gerçekleşmiş ve arayüzeydeki nikel aratabaka varlığını parçalanarak korumaya çalışmıştır. Literatürde [21] çok kristalli malzemelerde difüzyon; kaynatılacak malzemelerin temas noktalarındaki oksitlerin parçalanmasıyla birlikte öncelikle malzeme yüzeylerinde başlayarak devam eder. Kısacası difüzyon (D); “(D Yüzey) > (D Tane sınırı) > (D tane içi)” olarak sıralanabilir. Bir başka ifade ile kaynağın birinci aşamasında; yüzeydeki pürüzlülüklerde akma ve sürünme mekanizmaları ile arayüzeyde büyük bir alanda temas sağlanır ve birleşme genelde tane sınırlarında oluşur. Basıncın etkisi ile yüzeydeki oksit filmi kırılarak oksitlerin kırılmış olan noktalarından atom akışı başlar. Kaynağın ikinci aşamasında; difüzyonun etkisi deformasyondan daha önemlidir. Kaynağın üçüncü aşaması ise birleşmenin tamamlandığı birleştirilecek malzemeler arasındaki atomik bağın tamamlandığı aşamadır. Bu durumda elde edilen sonuçlar literatürle paralellik göstermektedir [21].

Şekil 7.9’da 850 °C’de dört farklı süre (15, 30, 60 ve 120 dakika) ile birleştirilmiş numunelerinin mikroyapı görüntüsü gösterilmiştir. Görüntü incelendiğinde, sıcaklığın artışına bağlı olarak nikel her iki tarafa da difüze etmiş ve paslanmaz çelik tarafında tane irileşmesi, süre ve sıcaklığa bağlı olarak daha belirgin hale gelmiştir.



Şekil 7.9. 850 °C’de a) 15, b) 30, c) 60 ve d) 120 dakika sürede birleştirilmiş numunenin mikroyapısı.

Şekil 7.10’da 875 °C’de üç farklı süre (15, 30 ve 60 dakika) ile birleştirilmiş numunelerin optik mikroskop görüntüsü gösterilmiştir. Görüntüler incelendiğinde, sıcaklığın artışına bağlı olarak nikelin tamamen her iki tarafa da difüze olduğu ve ayrı bir faz bölgesi (farklı bir renkte) oluşturduğu görülmektedir. Ayrıca yüksek sıcaklığın etkisi ile özellikle birleştirmenin paslanmaz çelik tarafında tane irileşmesinin net olarak belirginleştiği görülmüştür.



Şekil 7.10. 875 °C’de a) 15, b) 30 ve c) 60 dakika sürede birleştirilmiş numunenin mikroyapısı.

Mikroyapıların tümü (Şekil 7.7-7.10) genel olarak değerlendirildiğinde kaynak sıcaklık ve birleştirme süresinin artmasına bağlı olarak tane boyutu ferritik paslanmaz çelik 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 [47].

#### 7.4. TARAMALI ELEKTRON MİKROSKOBU (SEM) ÇALIŞMALARI

Difüzyon kaynak yöntemi ile farklı kaynak parametrelerinin kullanıldığı çalışmalar sonucunda, tüm numunelere bölgesel EDS analizi yapılması mümkün olmadığından sıcaklık ve sürelerin artışına bağlı olarak meydana gelebilecek difüzyonel değişimleri

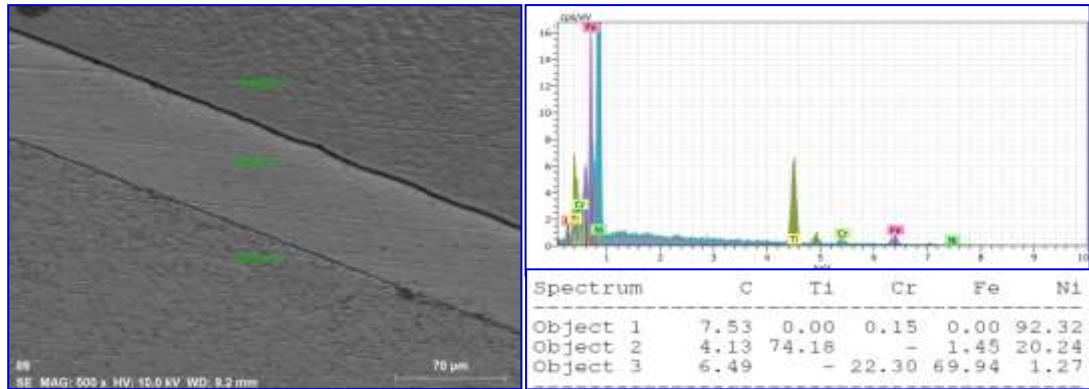
izlemek için Çizelge 7.1’de gösterilen numunelere SEM/EDS çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 7.1. SEM/EDS çalışması gerçekleştirilen kaynaklı numuneler.

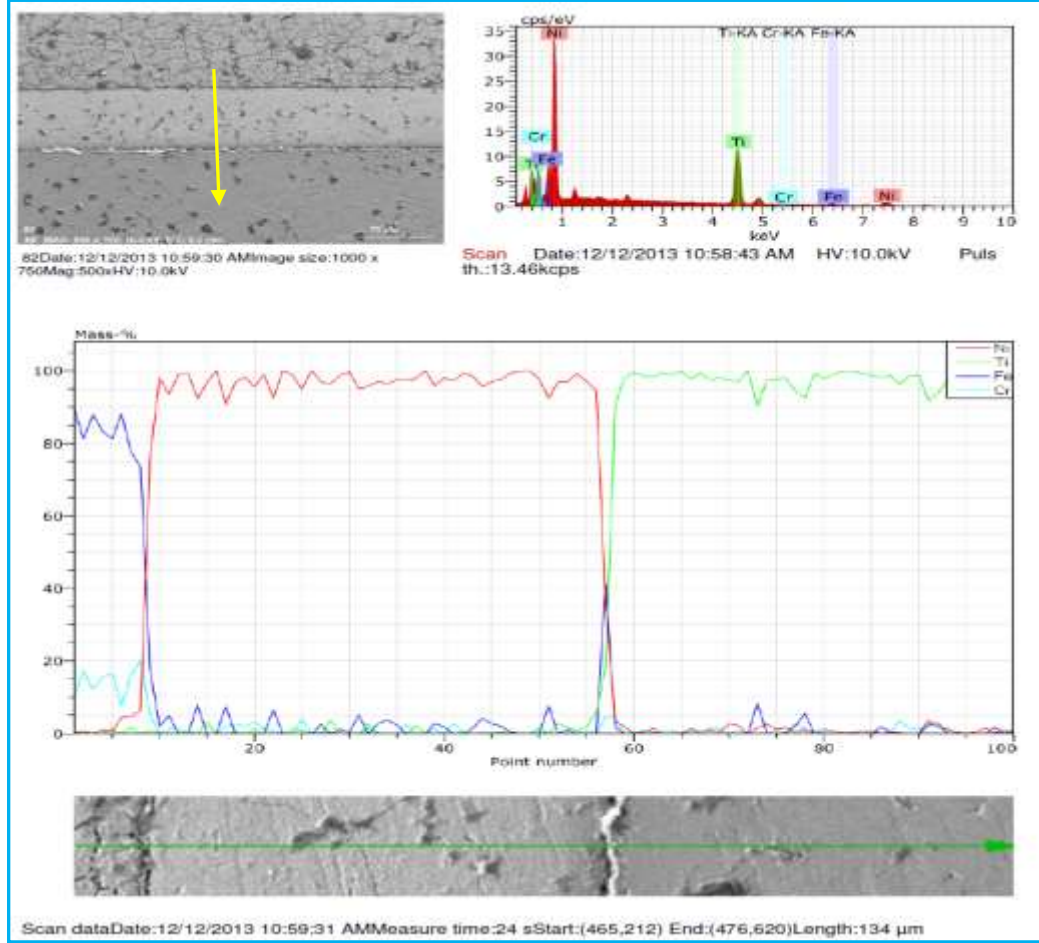
Süre (Dakika)	Sıcaklık (°C)			
	800	825	850	875
15	-	X	X	X
30	X	X	-	X
60	X	X	-	X
120	X	X	-	-

#### 7.4.1. 800 °C’de Yapılan Çalışmalar

Difüzyon kaynak yöntemi ile 800 °C’de 30, 60 ve 120 dakika süre ile birleştirilen numunelerin SEM’de yapılan EDS bölgesel analiz sonuçlarına göre her bir süre için kaynak bölgesinden alınan EDS analiz bölgeleri ve SEM görüntüsü verilmiştir. Yapılan analizler sonucunda Titanyum-Nikel-Paslanmaz çelik denge diyagramı göz önünde tutularak oluşabilecek faz yapıları belirlenmeye çalışılmıştır.



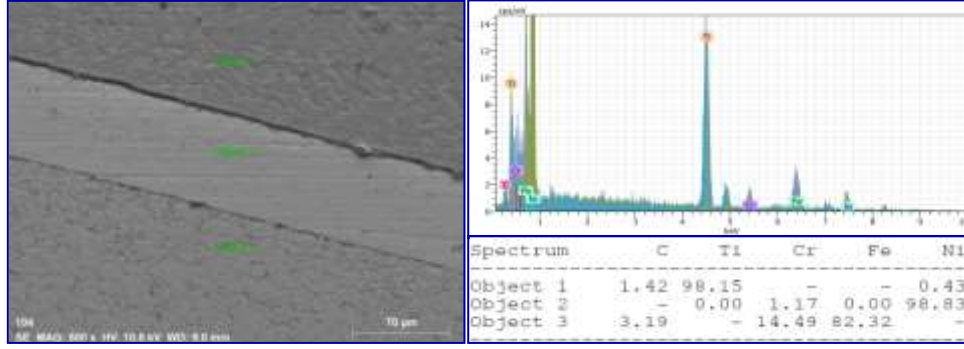
Şekil 7.11. Noktasal SEM/EDS analiz sonuçları (800 °C ve 30 dk).



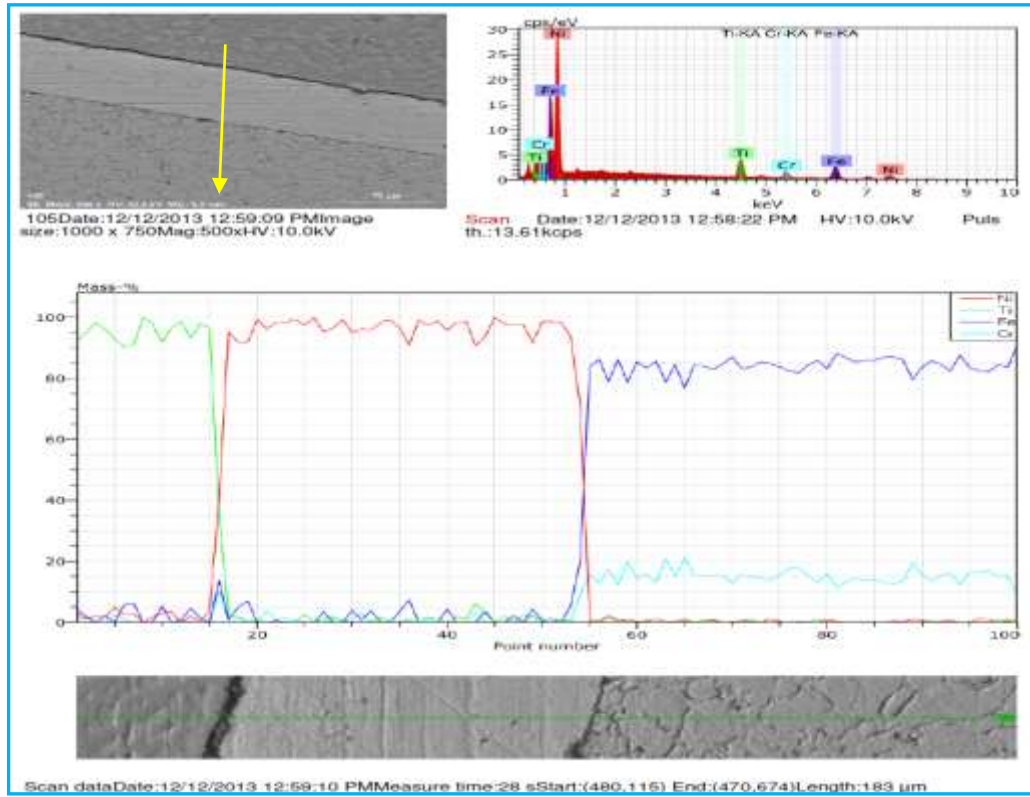
Şekil 7.12. Çizgisel SEM/EDS analiz sonuçları (800 °C ve 30 dk).

Şekil 7.11. ve Şekil 7.12. incelendiğinde 800 °C’de 30 dakika süre ile birleştirilen numunede arabağlayıcı 1. ile gösterilen kısımda nikel miktarı ağırlıkça % 92.32 olarak görülmektedir. Özetle 1. nolu kısım sadece nikel folyodan oluşmakta ve bu bölgeye ferritik paslanmaz çelik ve titanyum malzemeden herhangi bir atom göçünün olmadığı açıkça görülmektedir. 2. ile gösterilen kısımda nikel titanyum arayüzeyinden yaklaşık 40  $\mu$ m uzaklıkta titanyum miktarı ağırlıkça % 74.18, demir miktarı ağırlıkça % 1.45, nikel miktarı ağırlıkça % 20.24 olarak tespit edilmiştir. 3. ile gösterilen kısımda nikel paslanmaz çelik arayüzeyinden yaklaşık 40  $\mu$ m uzaklıkta demir miktarı ağırlıkça % 69.94, nikel miktarı ağırlıkça % 1.27, krom miktarı ağırlıkça % 22.3 olarak tespit edilmiştir.





Şekil 7.13. Noktasal SEM/EDS analiz sonuçları (800 °C ve 60 dk).

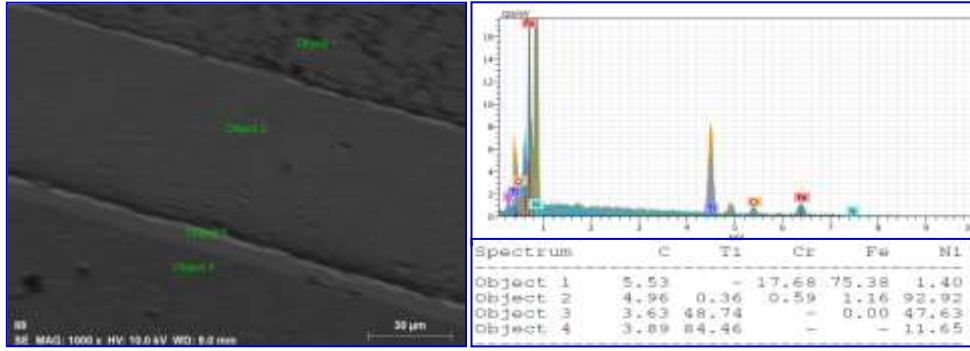


Şekil 7.14. Çizgisel SEM/EDS analiz sonuçları (800 °C ve 60 dk).

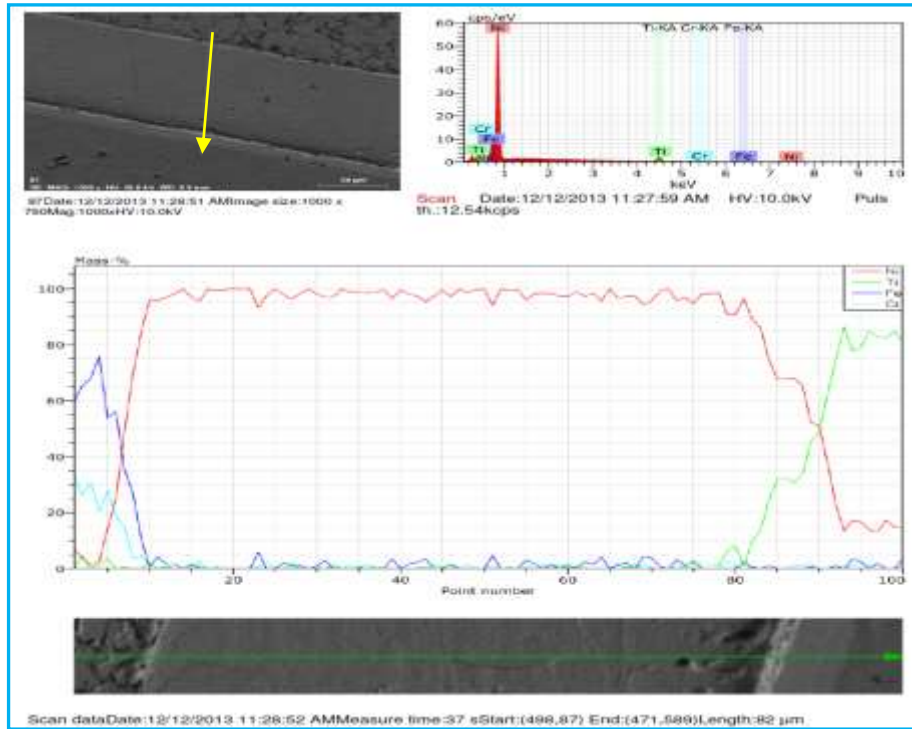
Şekil 7.13 ve Şekil 7.14’de 800 °C’de 60 dakika sürede birleştirilen numunelerin SEM/EDS analiz grafikleri verilmiştir. Grafikler incelendiğinde, 800 °C’de 60 dakika ile birleştirilen numunede arabağlayıcı 2. ile gösterilen noktada nikel miktarı ağırlıkça % 98.83, krom miktarı ağırlıkça % 1.17 olduğunu göstermektedir. 1. ile gösterilen noktada nikel titanyum arayüzeyinden yaklaşık 40 µm uzaklıkta titanyum miktarı ağırlıkça % 98.15, nikel miktarı ağırlıkça % 0.43 olarak tespit edilmiştir. 3 ile gösterilen noktada ise nikel paslanmaz çelik arayüzeyinden yaklaşık 40 µm uzaklıkta

demir miktarı ağırlıkça % 82.32, krom miktarı ağırlıkça % 14.49 olduğu tespit edilmiştir. Buradan anlaşılmaktadır ki; sabit sıcaklıkta sürenin artmasına bağlı olarak difüzyon artmaktadır. Şekil 7.14’de verilen çizgisel analiz grafiği incelendiğinde her iki arayüzeyden de (Ti-Ni ve Ni-SS) atom göçünün meydana geldiği görülmektedir.

Şekil 7.14’de verilen çizgisel analiz grafiği incelendiğinde birleştirmenin hem paslanmaz çelik, hem de titanyum tarafında sınırlı miktarda ve mesafede difüzyon olduğu açıkça görülmüştür. Burada özellikle sıcaklığın düşük olması difüzyon miktar ve mesafesini sınırlandırmış bulunmaktadır.



Şekil 7.15. Noktasal SEM/EDS analiz sonuçları (800 °C ve 120 dk).



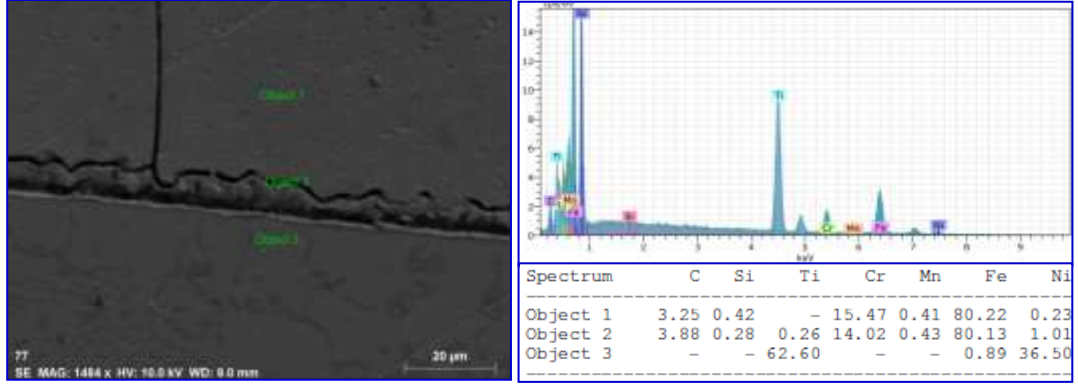
Şekil 7.16. Çizgisel SEM/EDS analiz sonuçları (800 °C ve 120 dk).

Şekil 7.15 ve Şekil 7.16'da 800 °C'de 120 dakika ile birleştirilen kaynaklı numunelerin SEM/EDS analiz grafikleri gösterilmiştir. Grafikler incelendiğinde numunede arabağlayıcı 2. gösterilen yerde nikel miktarı ağırlıkça % 92.92, demir miktarı ağırlıkça % 1.16, krom miktarı ağırlıkça % 0.59 olduğu tespit edilmiştir. 1. ile gösterilen yerde nikel paslanmaz çelik arayüzeyinden yaklaşık 20 µm uzaklıkta demir miktarı ağırlıkça % 75.38, krom miktarı ağırlıkça % 17.68, nikel miktarı ağırlıkça % 1.40 olduğu tespit edilmiştir. 3. ile gösterilen yerde nikel titanyum arayüzeyinden yaklaşık 5 µm uzaklıkta titanyum miktarı ağırlıkça % 48.74, nikel miktarı ağırlıkça % 47.63 olduğu tespit edilmiştir. 4. ile gösterilen yerde nikel titanyum arayüzeyinden yaklaşık 20 µm uzaklıkta titanyum miktarı ağırlıkça % 84.76, nikel miktarı ağırlıkça % 11.65 olduğu tespit edilmiştir.

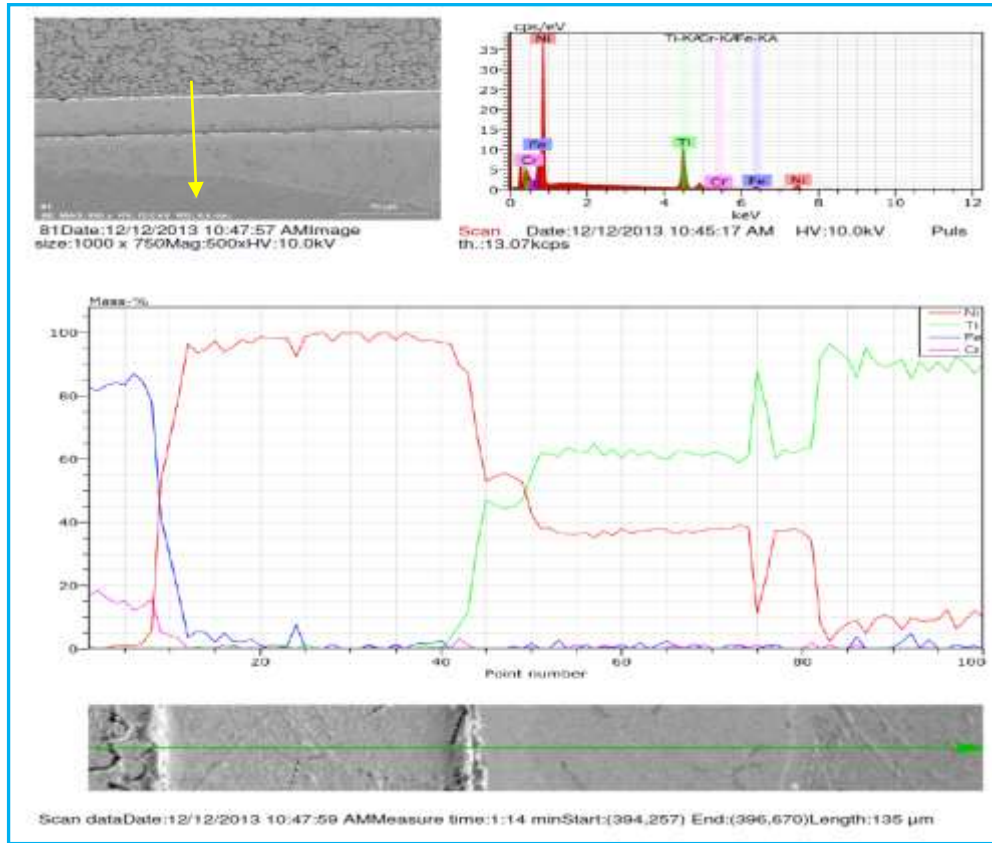
800 °C'de 30, 60 ve 120 dakika süre birleştirilen numuneler, genel olarak zaman açısından değerlendirildiğinde artan süreye bağlı olarak difüzyonun arttığı rahatlıkla söylenebilir. Örneğin 800 °C'de 30 dakika süre ile birleştirilen numunede nikel titanyum arayüzeyinden yaklaşık 40 µm uzaklıkta % 74.18 titanyuma rastlanırken, süre 60 dakikaya yükseltildiğinde bu değer % 98.15 yükseldiği ve süre 120 dakikaya yükseltildiğinde ise nikel titanyum arayüzeyinden yaklaşık 20 µm uzaklıkta % 84.46 olduğu tespit edilmiştir. 800 °C'de 30 dakika süre ile birleştirilen numunede nikel paslanmaz çelik arayüzeyinden yaklaşık 40 µm uzaklıkta % 69.94 demir'e rastlanırken süre 60 dakikaya yükseltildiğinde bu değer % 82.32 yükseldiği ve süre 120 dakikaya yükseltildiğinde ise nikel paslanmaz arayüzeyinden yaklaşık 20 µm uzaklıkta % 75.38 demir olduğu tespit edilmiştir.

#### **7.4.2. 825 °C'de Yapılan Çalışmalar**

Difüzyon kaynağı ile 825 °C'de 15, 30, 60 ve 120 dakika süre ile birleştirilen numunelerin tümünden SEM'de farklı mesafelerden EDS analizleri yapılmıştır. Ayrıca her bir kaynak parametresi için kaynak arayüzeyinin özelliklerini yansıtacak bir bölgeden çizgisel analiz yapılarak sonuçlar değerlendirilmeye çalışılmıştır.



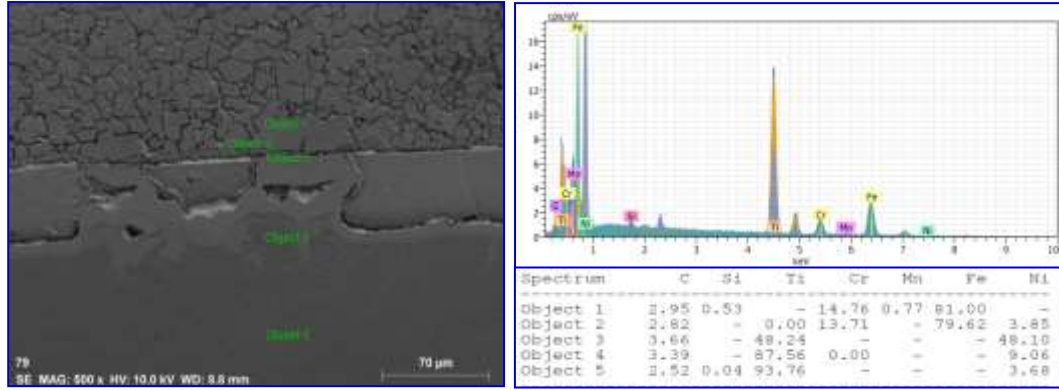
Şekil 7.17. Noktasal SEM/EDS analiz sonuçları (825 °C ve 15 dk).



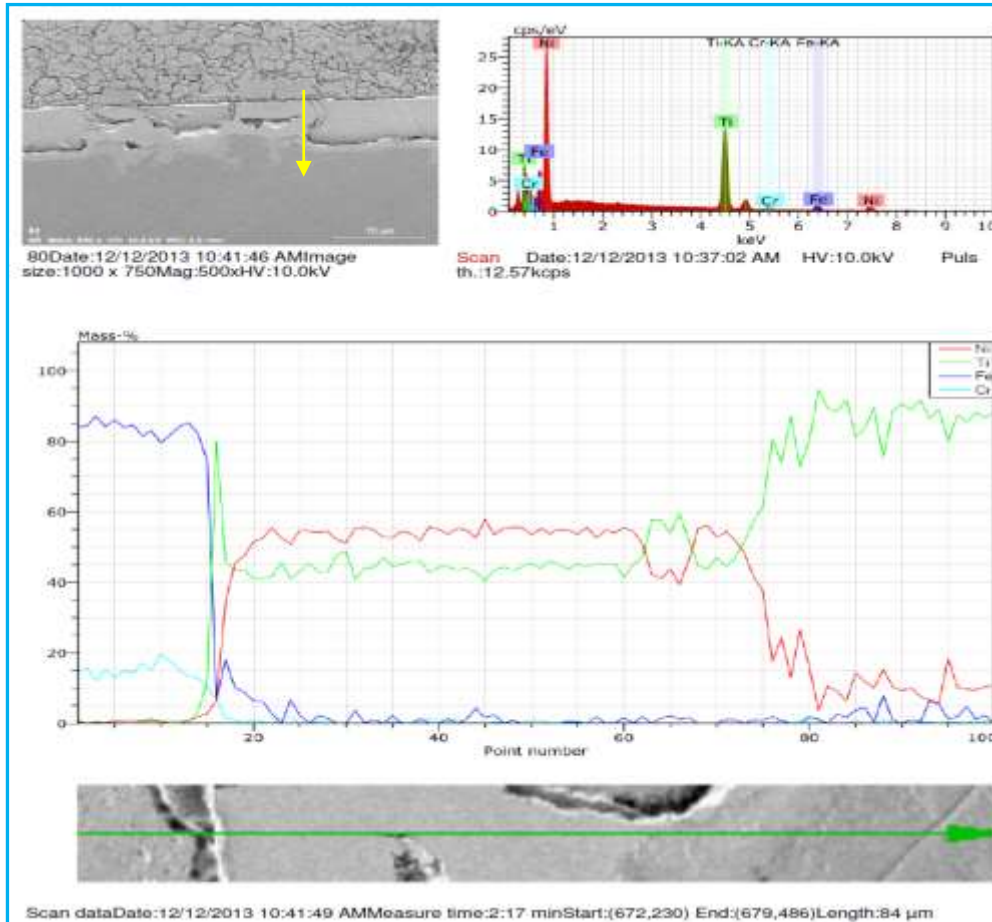
Şekil 7.18. Çizgisel SEM/EDS analiz sonuçları (825 °C ve 15 dk)

Şekil 7.17 ve Şekil 7.18 incelendiğinde 2. ile gösterilen noktada nikel paslanmaz çelik arayüzeyinden yaklaşık 10 µm uzaklıkta ağırlıkça % 80.13 demir, % 1.01 nikel ve % 14.02 krom atomuna rastlanmıştır. 1 ile gösterilen noktada nikel paslanmaz çelik arayüzeyinden yaklaşık 30 µm uzaklıkta ağırlıkça % 80.22 demir, % 0.23 nikel ve % 15.47 krom atomları olduğu tespit edilmiştir. 3 ile gösterilen noktada ise nikel

titanyum arayüzeyinden yaklaşık 10 µm uzaklıkta ağırlıkça % 62.60 titanyum, % 0.89 demir ve % 36.50 nikel elementleri bulunmuştur. Buradan, özellikle 3 nolu bölgede, titanyum içerisine yüksek miktarda nikelin difüz ettiği açıkça görülmektedir.



Şekil 7.19. Noktasal SEM/EDS analiz sonuçları (825 °C ve 30 dk).



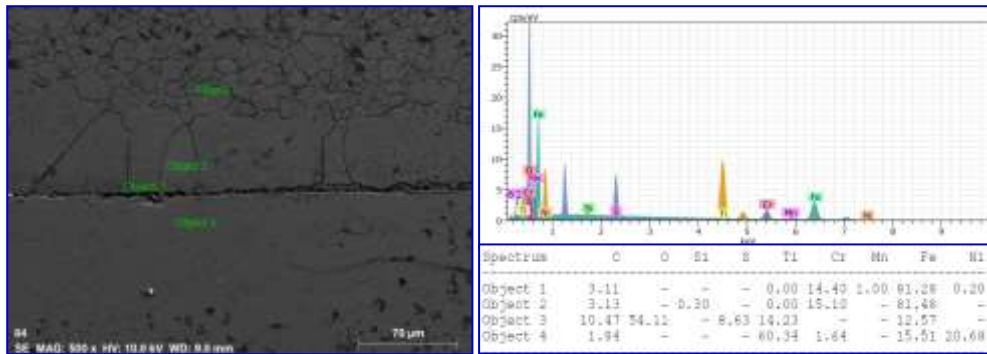
Şekil 7.20. Çizgisel SEM/EDS analiz sonuçları (825 °C ve 30 dk).

Şekil 7.19 ve Şekil 7.20 incelendiğinde, 825 °C’de 30 dakika ile birleştirilen numunede 1 ile gösterilen noktada nikel paslanmaz çelik arayüzeyinden yaklaşık 10 µm uzaklıkta ağırlıkça % 81 demir ve % 14.76 krom atomlarına rastlanırken 2 ile gösterilen noktada 5 µm uzaklıkta ağırlıkça % 79.62 demir, % 13.71 krom ve % 3.85 nikel elementlerinin olduğu tespit edilmiştir. 3 ile gösterilen noktada ise nikel titanyum arayüzeyinden yaklaşık 5 µm uzaklıkta ağırlıkça % 48.24 titanyum ve % 48.10 nikel atomlarına rastlanırken arayüzeyden yaklaşık 70 µm uzaklıkta ağırlıkça % 87.56 titanyum ve % 9.06 nikel atomları ve arayüzeyden yaklaşık 140 µm uzaklıkta ağırlıkça % 93.76 titanyum ve % 3.68 nikel atomlarının olduğu tespit edilmiştir.

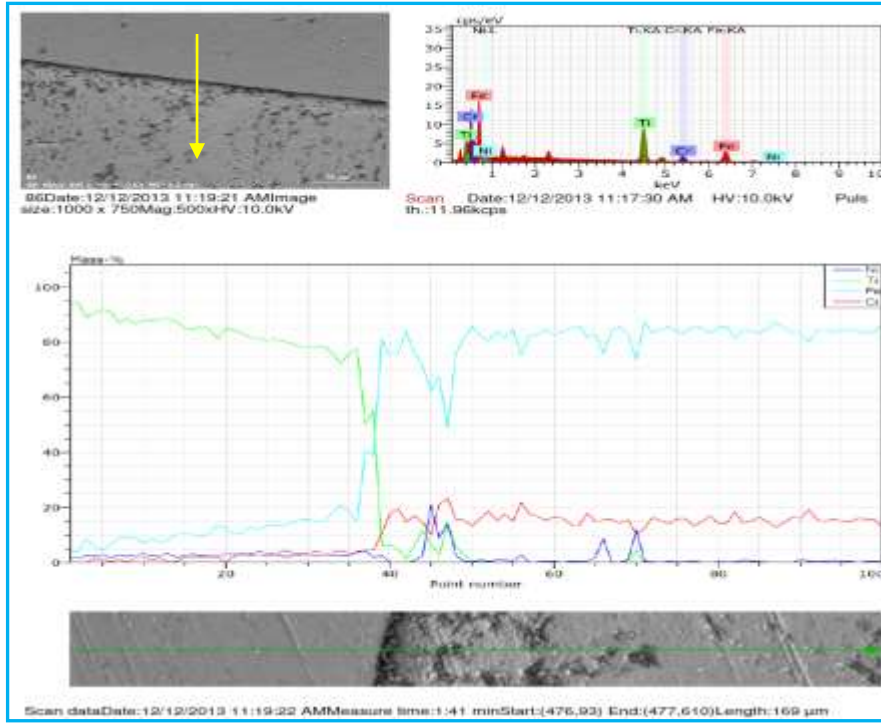
Görüntüler ve veriler incelendiğinde birleşmenin özellikle titanyum tarafına nikelin yoğun bir biçimde difüze olduğu, hatta arayüzeyde yaklaşık olarak aynı miktarda oldukları belirlenmiştir. Buradan, deneysel çalışmalarda kullanılan malzemelerin difüzyon kaynağı ile birleştirilebilmeleri için gerekli parametrelerin bu sıcaklık ve sürede uygun olduğu sonucuna varılabilir.

Şekil 7.20’da çizgisel SEM/EDS analiz sonuçları verilen grafik incelendiğinde, arayüzeyde yaklaşık nikel folyo kalınlığında bir bölgenin atomlarının bir biri içerisine göç ederek faz bölgesi oluşturduğu görülmektedir.

Şekil 7.21 ve Şekil 7.22’de 825 °C’de 60 dakika süre ile birleştirilen, Şekil 7.23 ve Şekil 7.24’de ise 825 °C’de 120 dakika süre ile birleştirilen numunelerin SEM/EDS analiz sonuç ve grafikleri verilmiştir.

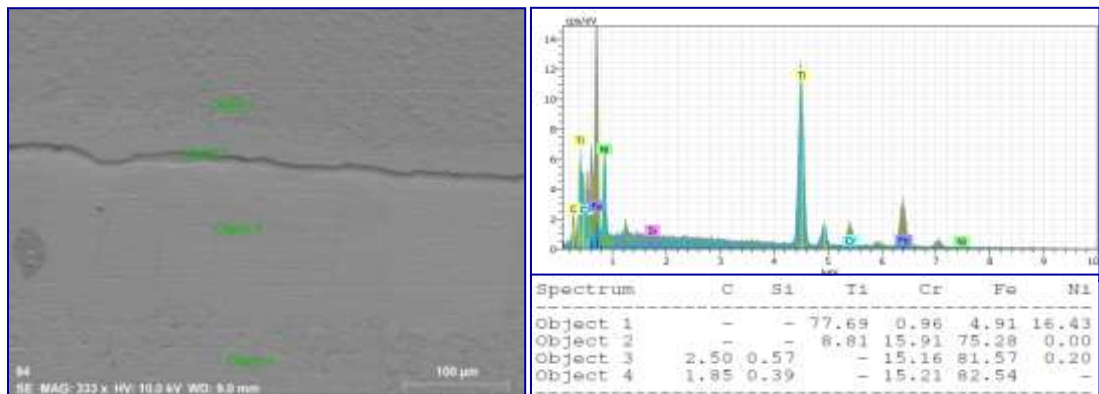


Şekil 7.21. Noktasal SEM/EDS analiz sonuçları (825 °C ve 60 dk).

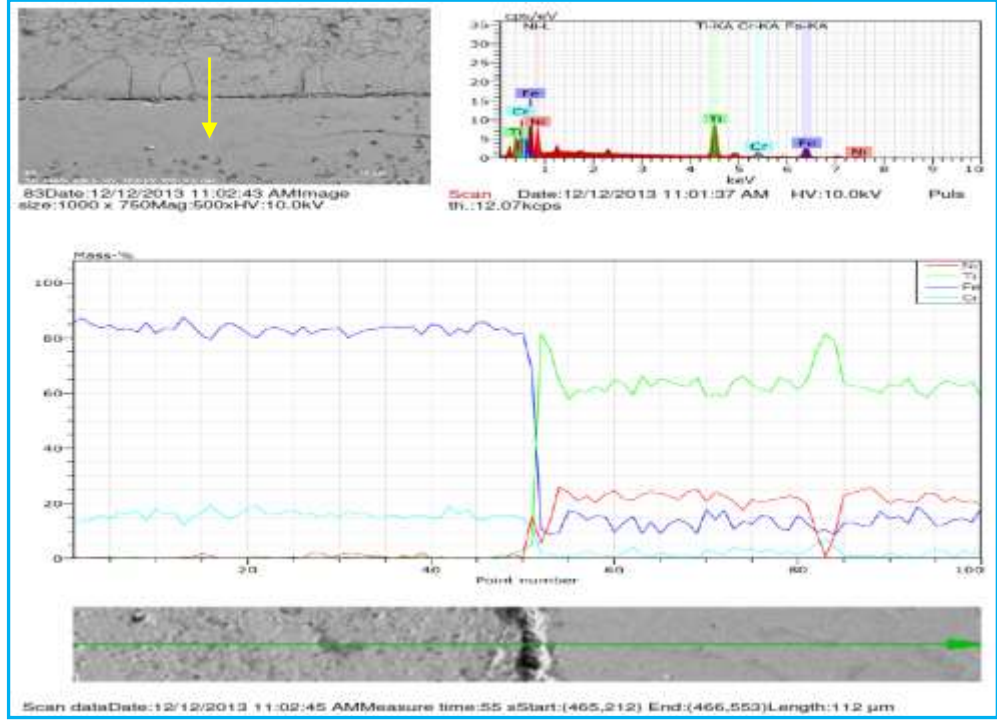


Şekil 7.22. Çizgisel SEM/EDS analiz sonuçları (825 °C ve 60 dk).

Şekil 7.21 ve Şekil 7.22 incelendiğinde 825 °C 60 dakika ile birleştirilen numunedeki 1 ile gösterilen noktada nikel paslanmaz çelik arayüzeyinden yaklaşık 70  $\mu\text{m}$  uzaklıkta ağırlıkça % 81.28 demir, % 14.40 krom ve % 0.20 nikel atomlarına ve de yaklaşık 10  $\mu\text{m}$  uzaklıkta ağırlıkça % 81.48 demir ve % 15.10 krom atomlarına rastlanılmıştır. 3 ile gösterilen noktada arayüzeyde ağırlıkça % 14.23 titanyum ve % 12.57 demir elementleri olduğu tespit edilmiştir. 4 ile gösterilen yerde nikel titanyum arayüzeyinden yaklaşık 10  $\mu\text{m}$  uzaklıkta ağırlıkça % 60.34 titanyum, % 15.51 demir ve % 1.64 krom atomları olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 7.23. Noktasal SEM/EDS analiz sonuçları (825 °C ve 120 dk).



Şekil 7.24. Çizgisel SEM/EDS analiz sonuçları (825 °C ve 120 dk).

Şekil 7.23 ve Şekil 7.24 incelendiğinde 825 °C’de 120 dakika ile birleştirilen numunede 1 ile gösterilen yerde nikel titanyum arayüzeyinden yaklaşık 50 µm uzaklıkta ağırlıkça % 77.69 titanyum, % 0.96 krom, % 4.91 demir ve % 16.43 nikel atomlarına rastlanılmıştır. 2 ile gösterilen yerde arayüzeyde ağırlıkça % 75.28 nikel, % 8.81 titanyum ve % 15.91 krom atomları olduğu tespit edilmiştir. 3 ile gösterilen yerde nikel paslanmaz çelik arayüzeyinden yaklaşık 70 µm uzaklıkta ağırlıkça % 81.57 demir, % 15.16 krom ve % 0.27 nikel atomlarına rastlanılmıştır. 4 ile gösterilen yerde nikel paslanmaz çelik arayüzeyinden yaklaşık 200 µm uzaklıkta ağırlıkça % 82.54 demir ve % 15.21 krom atomlarına rastlanılmıştır.

825 °C’de 15, 30, 60 ve 120 dakika süre ile birleştirilen numunelerde değerler kıyaslandığında sürenin artmasına bağlı olarak difüzyonun arttığı rahatlıkla söylenilebilir. Örneğin, 825 °C’de 15 dakikada birleştirilen numunede nikel paslanmaz çelik arayüzeyinden yaklaşık 10 µm uzaklıkta ağırlıkça % 80.22 demir atomuna rastlanırken süre 30 dakikaya yükseltildiğinde ağırlıkça % 81 demir, süre 60 dakikaya yükseltildiğinde nikel paslanmaz çelik arayüzeyinden yaklaşık 70 µm uzaklıkta ağırlıkça % 14.40 krom ve süre 120 dakikaya yükseltildiğinde ise ağırlıkça

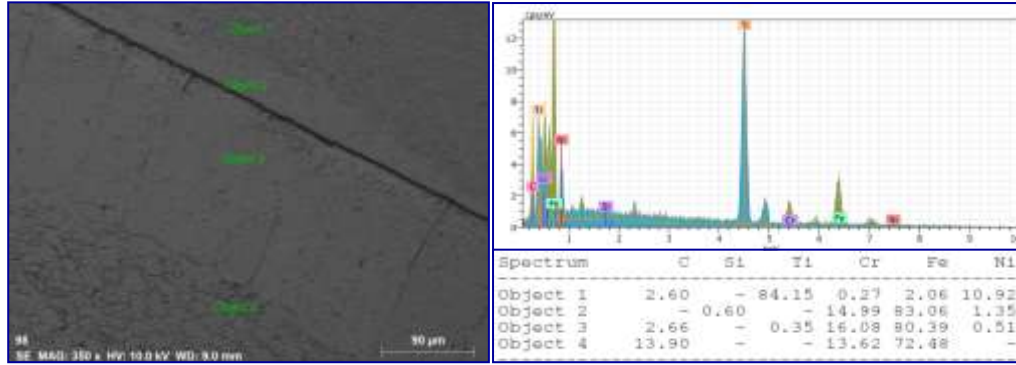


% 15.16 krom atomlarına rastlanılmıştır. 825 °C'de 60 dakika süre ile birleştirilen numunede nikel titanyum arayüzeyinden 10 µm uzaklıkta ağırlıkça % 60.34 titanyum ağırlıkça % 15.51 demir ve ağırlıkça % 1.64 krom atomlarına rastlanılmıştır.

Sonuçlar genel olarak değerlendirildiğinde artan sıcaklığa ve süreye bağlı olarak nikel paslanmaz çelik arayüzeyinde demir ve krom miktarının ağırlıkça arttığı ve nikel titanyum arayüzeyinde demir ve kromun titanyum içine difüz ettiği açıkça görülmektedir.

### 7.4.3. 850 °C'de Yapılan Çalışmalar

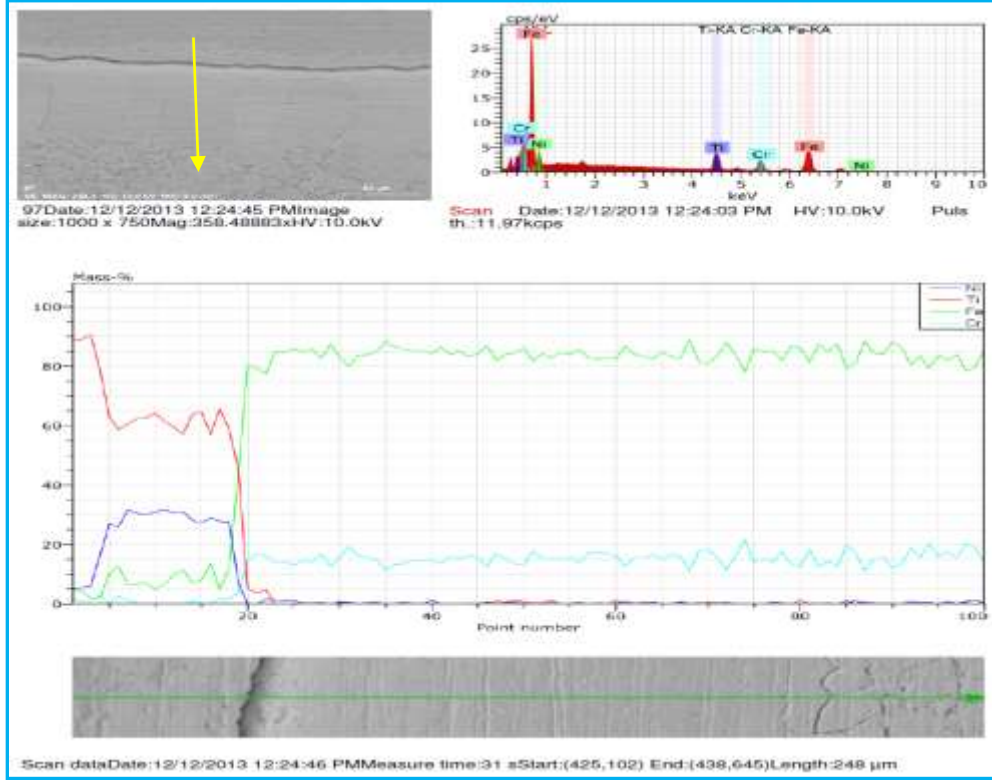
Difüzyon kaynağı ile 850 °C'de 15 dakika süre ile birleştirilen numuneden SEM'de farklı mesafelerden alınan EDS bölgesel analiz sonucu elde edilen verilerin kaynak bölgesinden ve her iki yönden alınan % element miktarlarını gösteren grafikler Şekil 7.25 ve 7.26'da verilmiştir.



Şekil 7.25. Noktasal SEM/EDS analiz sonuçları (850 °C ve 15 dk).

Şekil 7.25 incelendiğinde 1 ile gösterilen noktada nikel titanyum arayüzeyinden yaklaşık 70 µm uzaklıkta ağırlıkça % 84.15 titanyum, % 10.92 nikel, % 2.06 demir ve % 0.27 krom atomlarına rastlanılmıştır. 2 ile gösterilen noktada nikel paslanmaz çelik arayüzeyinden yaklaşık 5 µm uzaklıkta ağırlıkça % 83.06 demir, % 14.99 krom ve % 1.35 nikel atomlarının olduğu tespit edilmiştir. 3 ile gösterilen noktada ise nikel paslanmaz çelik arayüzeyinden yaklaşık 70 µm uzaklıkta ağırlıkça % 80.39 demir, % 16.09 krom, %0.35 titanyum ve % 0.51 nikel atomlarının olduğu gözlenmiştir. 4 ile

gösterilen noktada nikel paslanmaz çelik arayüzeyinden yaklaşık 200 µm uzaklıkta ağırlıkça % 72.48 demir ve % 13.62 krom atomlarına rastlanılmıştır.

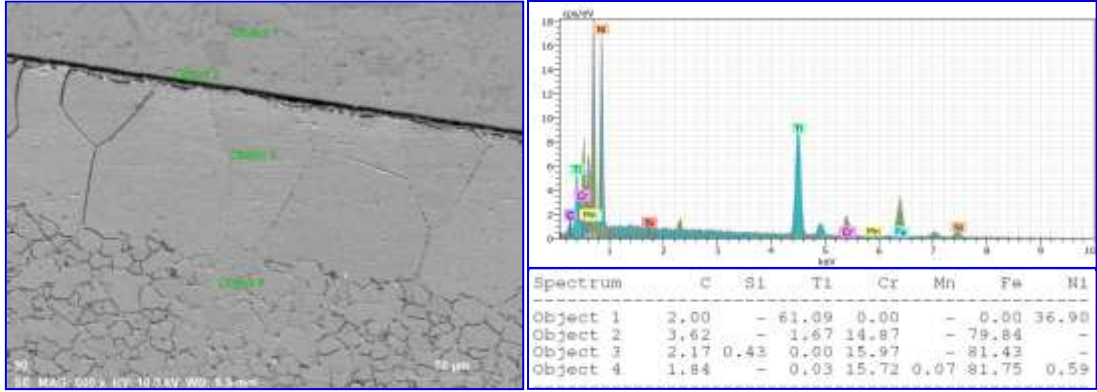


Şekil 7.26. Çizgisel SEM/EDS analiz sonuçları (850 °C ve 15 dk).

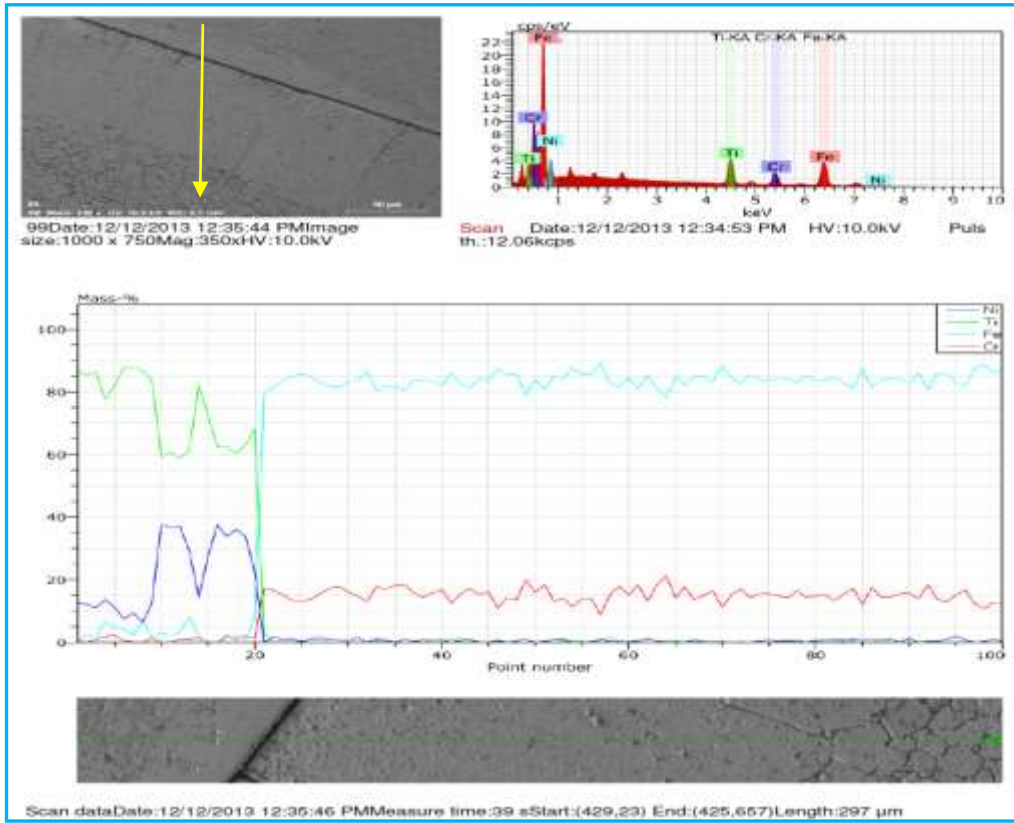
Şekiller incelendiğinde süre seçilen en kısa süre olmasına rağmen tam bir birleşmenin gerçekleştiği ve arayüzeyde mevcut nikel folyonun tamamen kaybolduğu görülmektedir. Ayrıca 825 °C’de 15 dakika süre ile birleştirilen numune ile kıyaslandığında bu sıcaklıkta difüzyonun daha ilerlediği analiz sonuçlarından açıkça görülebilmektedir.

#### 7.4.4. 875 °C’de Yapılan Çalışmalar

Difüzyon kaynağı ile 875 °C’de 15, 30 ve 60 dakika süre ile birleştirilen numunelerden, SEM’de farklı mesafelerden alınan EDS noktasal analiz sonuçları ve arayüzeylerden alınan çizgisel analiz grafikleri Şekil 7.27 ve Şekil 7.32 aralığında verilmiştir.



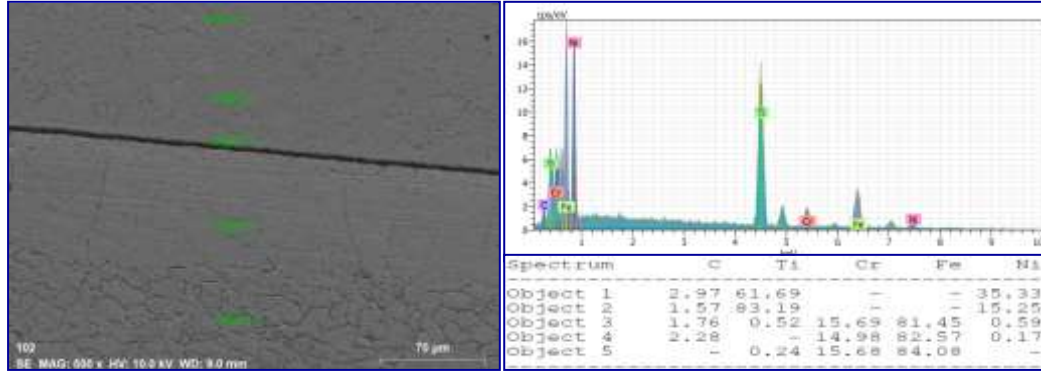
Şekil 7.27. Noktasal SEM/EDS analiz sonuçları (875 °C ve 15 dk).



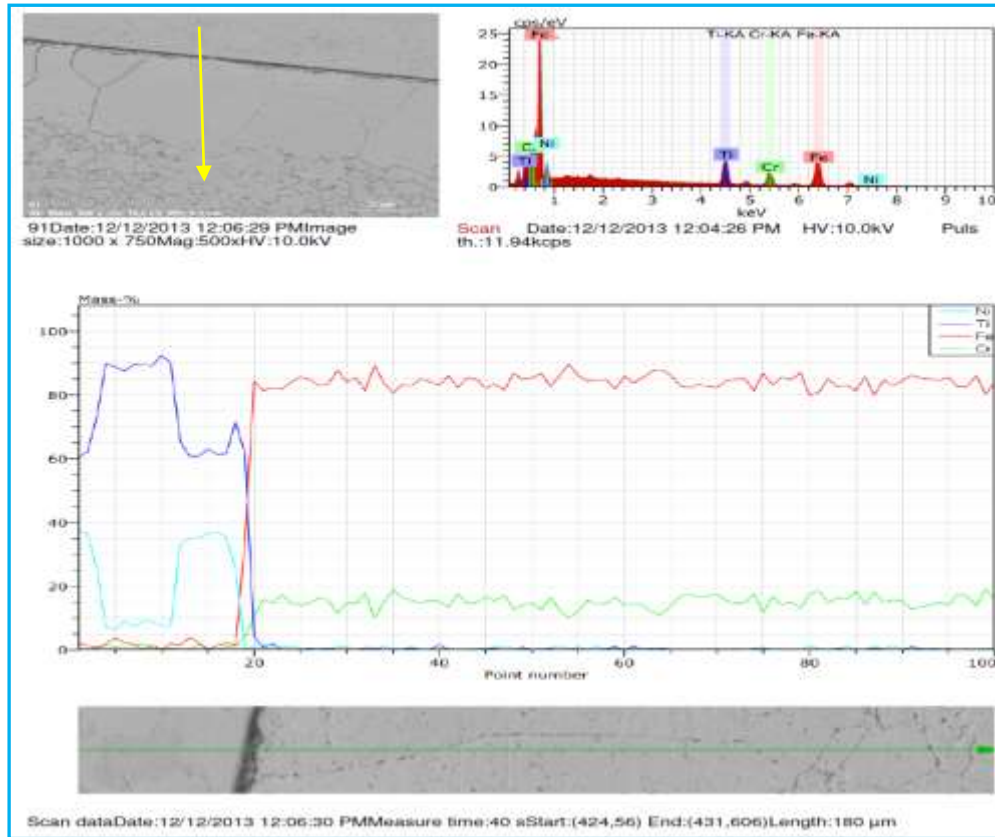
Şekil 7.28. Çizgisel SEM/EDS analiz sonuçları (875 °C ve 15 dk).

Şekil 7.27 ve Şekil 7.28 incelendiğinde 875 °C 15 dakika ile birleştirilen numunede 1 ile gösterilen noktada nikel titanyum arayüzeyinden yaklaşık 40 µm uzaklıkta ağırlıkça % 61.09 titanyum, ağırlıkça % 36.90 nikel atomlarına rastlanılmıştır. 2 ile gösterilen noktada nikel paslanmaz çelik arayüzeyinden yaklaşık 5 µm uzaklıkta ağırlıkça % 79.84 demir, ağırlıkça % 14.87 krom ve % 1.67 titanyum atomlarının

olduğu tespit edilmiştir. 3 ile gösterilen noktada nikel paslanmaz çelik arayüzeyinden yaklaşık 50 µm uzaklıkta ağırlıkça % 81.43 demir, % 15.97 krom atomlarının olduğu görülmüştür. 4 ile gösterilen noktada ise nikel paslanmaz çelik arayüzeyinden yaklaşık 140 µm uzaklıkta % 81.75 demir, % 15.72 krom, % 0.03 titanyum ve % 0.59 nikel atomlarına rastlanılmıştır.

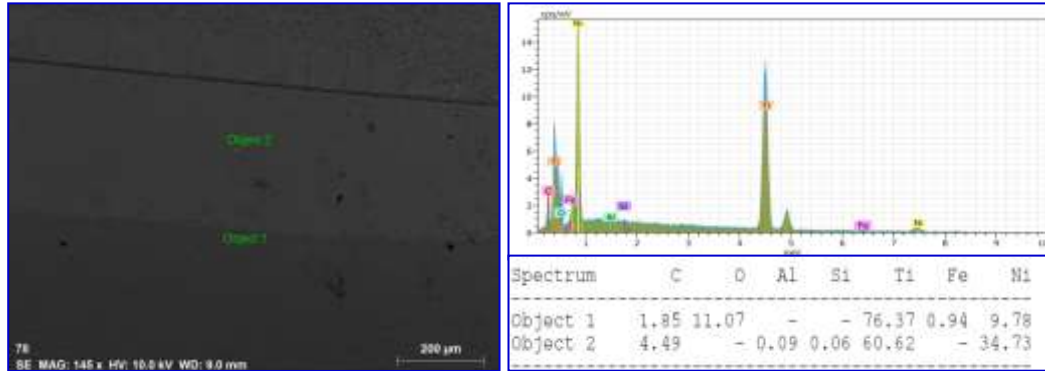


Şekil 7.29. Noktasal SEM/EDS analiz sonuçları (875 °C ve 30 dk).



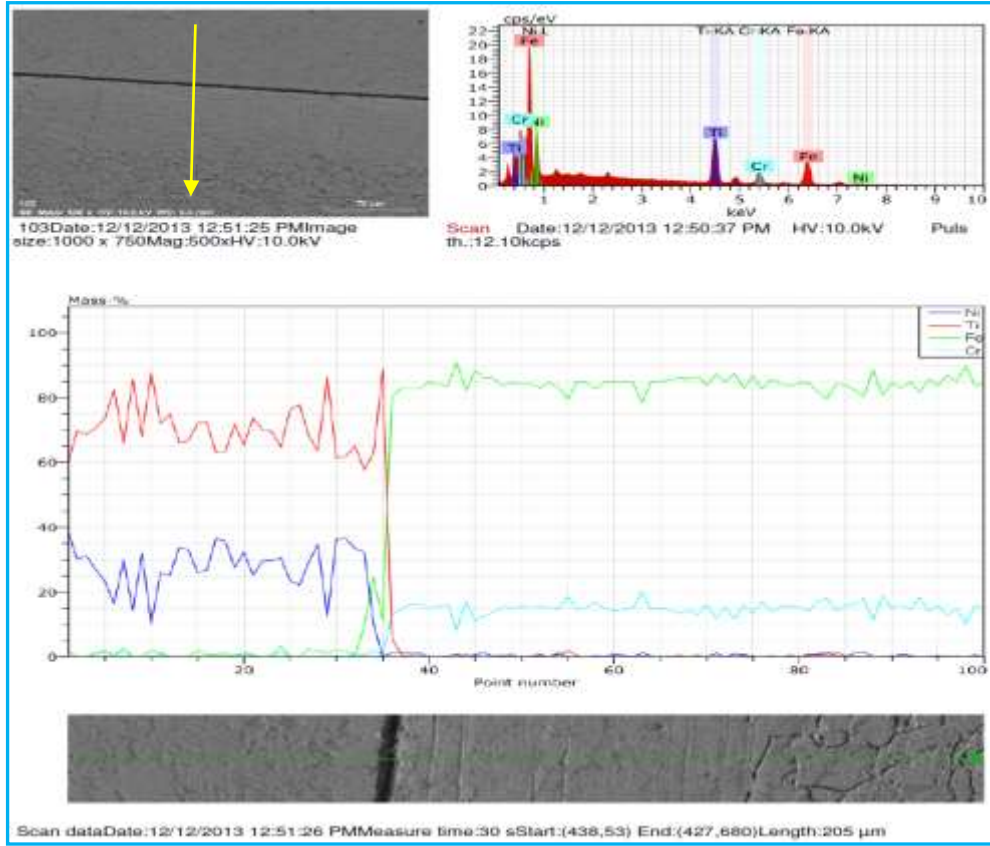
Şekil 7.30. Çizgisel SEM/EDS analiz sonuçları (875 °C ve 30 dk).

Şekil 7.29 ve Şekil 7.30 incelendiğinde 875 °C’de 30 dakika ile birleştirilen numunede 1 ile gösterilen noktada nikel-titanyum arayüzeyinden yaklaşık 90 µm uzaklıkta ağırlıkça % 61.69 titanyum ve ağırlıkça % 35.33 nikel atomlarına rastlanılmıştır. 2 ile gösterilen noktada nikel titanyum arayüzeyinden yaklaşık 30 µm uzaklıkta ağırlıkça % 83.19 titanyum ve % 15.25 nikel atomlarının olduğu tespit edilmiştir. 3 ile gösterilen noktada nikel paslanmaz çelik arayüzeyinden yaklaşık 5 µm uzaklıkta ağırlıkça % 81.45 demir, ağırlıkça % 15.69 krom, ağırlıkça % 0.52 titanyum ve ağırlıkça % 0.59 nikel atomlarına rastlanılmıştır. 4 ile gösterilen noktada nikel paslanmaz çelik arayüzeyinden yaklaşık 70 µm uzaklıkta ağırlıkça % 82.57 demir, ağırlıkça % 14.98 krom ve ağırlıkça % 0.17 nikel atomlarının olduğu tespit edilmiştir. 5 ile gösterilen noktada ise nikel paslanmaz çelik arayüzeyinden yaklaşık 140 µm uzaklıkta ağırlıkça % 84.08 demir, % 15.68 krom ve % 0.24 titanyum atomlarına rastlanılmıştır.



Şekil 7.31. Noktasal SEM/EDS analiz sonuçları (875 °C ve 60 dk).

Şekil 7.31 incelendiğinde 875 °C 60 dakika ile birleştirilen numunede 1 ile gösterilen noktada nikel-titanyum arayüzeyinden yaklaşık 350 µm uzaklıkta ağırlıkça % 76.37 titanyum, ağırlıkça % 9.78 nikel ve ağırlıkça % 0.94 demir atomlarına rastlanılmıştır. 2 ile gösterilen noktada ise nikel-titanyum arayüzeyinden yaklaşık 150 µm uzaklıkta ağırlıkça % 60.62 titanyum ve ağırlıkça % 34.73 nikel atomlarının bulunduğu tespit edilmiştir. Buradan bileştirmenin titanyum tarafına nikel atomlarının yüksek mesafelere dahi geç edebildiği sonucu söylenebilir.



Şekil 7.32. Çizgisel SEM/EDS analiz sonuçları (875 °C ve 60 dk).

Şekil 7.31’de verilen noktasal EDS sonucu ile Şekil 7.32’de verilen çizgisel EDS sonuç grafiğinin uyum içerisinde olması, elde edilen sonuçların birbirlerini doğrulaması açısından son derece önemlidir.

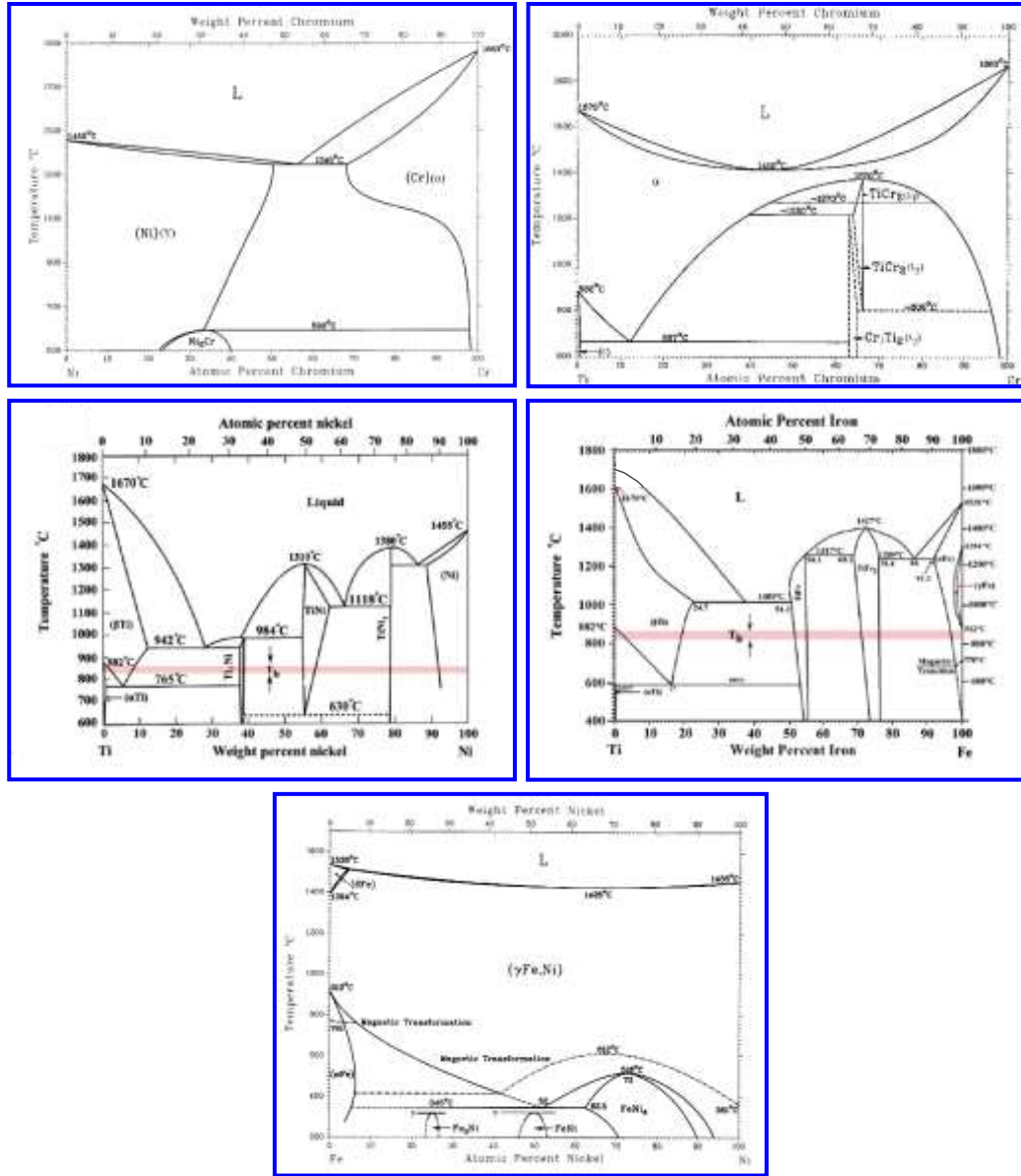
875 °C’de yapılan çalışmaların tümü incelendiğinde her üç sürede de tam bir birleşmenin gerçekleştiği ve arayüzeyden nikel folyonun kaybolduğu açıkça görülmektedir. Burada ve diğer bütün arayüzeyden nikel folyonun kaybolduğu numunelerde nikelin bir miktarı malzemelere (ferritik paslanmaz çelik ve titanyum) difüze olur iken bir kısmı da kaynak esnasındaki difüzyon şartlarından dolayı, özellikle basıncın etkisiyle arayüzeyden dışarıya taşma şeklinde kendini göstermiştir. Arayüzeyin tek olarak görüldüğü tüm kaynaklı numunelerde (800 °C hariç diğer tüm sıcaklıklarda) bu taşma olayı kaynak sonrasında göz ile görülebilmektedir.

SEM/EDS grafikleri genel olarak incelendiğinde birleştirmenin titanyum tarafına nikel atomlarının yoğun bir şekilde ve arayüzeyden uzak mesafelere göç ettiği görülebilir. Burada nikelin titanyum tarafına yoğun bir şekilde göç etmesinin sebebi; elementlerin atomik ağırlıklarının farklı olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Literatürlerde nikelin atomik ağırlığı 58.7 g/mol, titanyumun atomik ağırlığı ise 47.9 g/mol olarak verilmektedir [71]. Titanyumun atomik ağırlığının, nikelin atomik ağırlığından düşük olmasından dolayı, nikel atomları birleştirmenin titanyum tarafında daha fazla difüz ettiği görülmüştür.

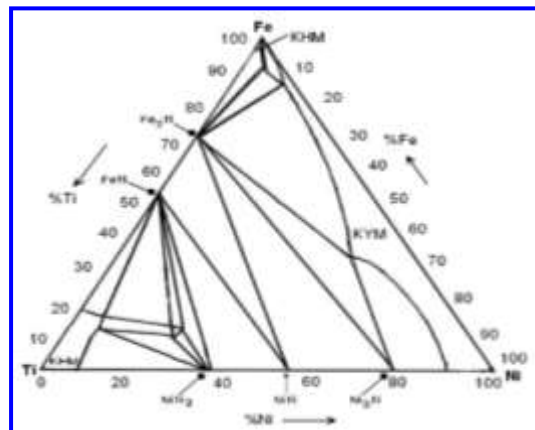
Titanyum ve bakır malzemelerin difüzyon kaynak yöntemi ile birleştirildiği bir çalışmada, bakırın titanyuma farklı mesafe ve yoğunlukta difüze etmesinin temel nedenlerinin atom çapları, aktivasyon enerjileri ve kafes yapılarından kaynaklandığı rapor edilmiştir [72]. Literatürlerde difüzyon kaynağında artan süreye bağlı olarak difüzyonun arttığı birçok araştırmacı tarafından rapor edilmiştir [1,35,72]. Ayrıca literatürde yayınma katsayısı ve hızı üzerinde en büyük etkinin sıcaklığa ait olduğu belirtilmektedir [71].

Titanyum ve ferritik paslanmaz çelik malzemelerin, nikel arabağlayıcı ile farklı sıcaklık ve sürelerde birleştirildiği ve kaynaklı numuneler üzerinde yapılan SEM/EDS çalışmalarının tümü genel olarak değerlendirildiğinde, arabağlayıcı olarak kullanılan nikelin ferritik paslanmaz çelik malzemeye kısa mesafelerde ve düşük oranlarda, titanyuma ise daha uzun mesafelerde ve yüksek oranlarda difüze olduğu saptanmıştır. Ayrıca tüm kaynaklı numunelerde artan sıcaklık ve süreye bağlı olarak difüzyonun arttığı bir gerçektir. Daha önce yapılan çalışmalarda bu sonucu doğrulamaktadır [1,64,72].

Kaynaklı numunelerin tümünün SEM/EDS analiz sonuçlarının değerlendirilmesi için deneysel çalışmalarda kullanılan ana malzemelerde (titanyum, ferritik paslanmaz çelik ve nikel) bulunan alaşım elementlerinin kendi aralarında yapmış oldukları arabileşiklerin oluşumunu belirlemek için bu elementlerin literatürde var olan [73,74] ikili denge diyagramları Şekil 7.33'de, aynı elementlerin üçlü diyagramları ise Şekil 7.34'de verilmiştir.



Şekil 7.33. Ni-Cr, Ti-Cr, Ti-Ni, Ti-Fe, Fe-Ni elementlerinin ikili denge diyagramları.



Şekil 7.34. Ti-Fe-Ni üçlü faz diyagramları [75].



Şekil 7.33 ve Şekil 7.34’de verilen faz diyagramları incelendiğinde birleştirmenin ferritik paslanmaz çelik-nikel arayüzeyinde ( $\gamma$ Fe,Ni), Ni<sub>2</sub>Cr, FeNi, Fe<sub>3</sub>Ni, FeNi<sub>3</sub> arabileşiklerinin, birleştirmenin titanyum-nikel arayüzeyinde ise NiTi<sub>2</sub>, Ni<sub>3</sub>Ti, TiNi, Ti<sub>2</sub>Ni, TiFe, TiFe<sub>2</sub>, FeTi, Fe<sub>2</sub>Ti arabileşiklerinin oluşabileceği kolaylıkla görülebilir. Yapılan SEM/EDS çalışmalar sonucunda kaynak arayüzeyinden titanyum-nikel arayüzeyinde arabileşiklerin oluştuğu ancak birleştirmenin ferritik paslanmaz çelik-nikel arayüzeyinde ise arabileşiklerin oluşmadığı kanaatine varılmıştır. Bu kanaat sertlik test sonuçlarında birleştirmenin arayüzeye en yakın mesafesinde kendini göstererek SEM/EDS sonuçlarını desteklemektedir.

Zhong vd., tungsten ve ferritik paslanmaz çelik malzemelerin nikel arabağlayıcı kullanılarak 900°C sıcaklıkta 30 dakika ve 120 dakika süreler arasında vakum altında difüzyon kaynak yöntemi ile birleştirilebilirliğini incelemişlerdir. Yapılan deneysel çalışmalarda birleşmenin iyi gerçekleştiği ve W/Ni arayüzeyi için, W ve Ni arasında oluşan Ni (W) katı çözültisinin 1,5 saat ve altındaki sürelerde, Ni<sub>4</sub>W tabakası nedeniyle tavlama üzerinde W ve Ni (W) arasında peritektoid reaksiyon oluşmuştur. Difüzyon tabakasının hacmi büyümüş tane sınırı difüzyonu ile kontrol edilmiştir. Nikel paslanmaz çelik arayüzeyinde difüzyon olmasına rağmen, intermetalik reaksiyon ürünleri gözlenmemiştir. Bu intermetalik fazın oluşmamasını Ni-Fe ve Ni-Cr faz diyagramlarından doğruladığını rapor etmişlerdir [70].

## BÖLÜM 8

### SONUÇLAR

Titanyum ve ferritik paslanmaz çelik malzemelerin arabağlayıcı nikel kullanılarak, farklı sıcaklık ve süreler kullanılarak birleştirildiği bu çalışma sonucunda;

- ✓ Titanyum ve ferritik paslanmaz çelik malzemeleri nikel arabağlayıcı kullanarak difüzyon kaynağı ile birleştirebilmek için, uygun kaynak parametrelerinin belirlenmesi gerekmektedir. Aksi halde düşük sıcaklık yetersiz bir birleşmeye sebep olabilmektedir.
- ✓ Çekme-makaslama testleri sonucunda en yüksek arayüzey dayanımının 214 MPa ile 850 °C'de 30 dakika süre ile birleştirilen numunede olduğu görülmüştür. Bunun yanında gerek sıcaklığın yüksek olması, gerekse sürenin gereğinden fazla seçilmesi arayüzey dayanımını düşürmektedir.
- ✓ Yapılan çekme-makaslama test sonuçlarına göre tüm sıcaklıklarda en yüksek arayüzey dayanımlarının 30 dakika süre ile birleştirilen numunelerde olduğu belirlenmiştir. Bunun yanında sürenin artmasına bağlı olarak arayüzey dayanımının giderek azaldığı tespit edilmiştir.
- ✓ Yapılan sertlik ölçümleri sonucunda en yüksek sertlik değerinin birleşme arayüzeyinin titanyum malzeme tarafında ve arayüze en yakın mesafede olduğu, buradan ferritik paslanmaz çelik malzeme tarafına doğru sertlik değerinin giderek azaldığı tespit edilmiştir.
- ✓ Mikroyapı çalışmaları sonucunda, düşük sıcaklıklarda arabağlayıcı olarak kullanılan nikel folyonun arayüzeydeki varlığını koruduğu, ancak yüksek sıcaklıklarda tamamen arayüzeyden kaybolduğu tespit edilmiştir. Burada nikelin bir kısmı her iki malzemeye difüz olur iken, bir kısmının da kaynak bölgesi dışarısına taşıdığı gözlemlenmiştir.
- ✓ Difüzyon kaynağı ile farklı sıcaklık ve sürelerde birleştirilen kaynaklı numuneler üzerinden yapılan SEM/EDS analiz sonuçlarına göre artan sıcaklık

ve süreye bağılı olarak difüze olan atom miktarı ve difüzyon mesafesinin arttığı tespit edilmiştir. Kaynak sıcaklık ve süresinin artmasına bağılı olarak difüzyon mesafesi ve miktarının artması olumlu bir gelişme gibi görünmekte, ancak kaynak arayüzeyinde intermetalik oluşumu açısından sakıncalı olabilmektedir.

- ✓ Kaynak yapılan malzemelerin faz diyagramları incelendiğinde birleştirmenin ferritik paslanmaz çelik-nikel arayüzeyinde  $Ni_2Cr$ ,  $FeNi$ ,  $Fe_3Ni$ ,  $FeNi_3$  arabileşiklerinin, birleştirmenin titanyum-nikel arayüzeyinde ise  $NiTi_2$ ,  $Ni_3Ti$ ,  $TiNi$ ,  $Ti_2Ni$ ,  $TiFe$ ,  $TiFe_2$ ,  $FeTi$ ,  $Fe_2Ti$  arabileşiklerinin oluşabileceği belirlenmiştir.

## 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. Kaya, Y. ve Kahraman., N., “Titanyum sacların nokta direnç kaynağı ile birleştirilmesinde kaynak parametrelerinin çekirdek oluşumuna etkisi”, **Politeknik Dergisi**, Gazi Üniversitesi, Ankara, 263-270 (2011).
5. Kurt, A., “Toz metalden üretilen bronz yatağın düşük karbonlu çeliğe difüzyon kaynağı ile birleştirilmesi”, Doktora Tezi, **Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Elazığ, 9-47 (1996).
6. Buytoz, S., “Alüminyum matrisli Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli kompozit malzemelerin katı hal birleştirme teknikleri ile kaynak edilebilirliğinin araştırılması”, **Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Elazığ, 35-76 (1999).
7. Topbaş, M. A., “Isıl İşlemler”, **Yıldız Teknik Üniversitesi**, İstanbul, 65-76 (1993).
8. Tekin, A., “Çelik ve Isıl İşlemi”, **İstanbul Teknik Üniversitesi**, İstanbul, 22-236 (1987).
9. Güleç, Ş. ve Aran, A., “Malzeme Bilgisi I”, **İstanbul Teknik Üniversitesi**, İstanbul, 34-40 (1993).
10. Lancaster, J. F., “Metallurgy of Welding”, **Allen and Unwin Ltd. London**, 675-684 (1987).
11. Erdoğan, M., “Malzeme Bilimi ve Mühendislik Malzemeleri, 3. Baskı”, **Nobel Yayın Dağıtım**, Ankara, 76-93 (1998).
12. Lawrance, H., and Vlack, V., “Elements of metaterials science and engineering”, Sixth Ed., **University of Michigan, Addison Wesley Publishing**, 200-214 (1989).

13. Aydın, M., “SiC parçacık takviyeli 7075 alüminyum alaşım kompozit malzemelerin difüzyon kaynağı”, Doktora Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara (2003).
14. Callistar, W. D., “Materials science and engineering an introduction- Diffusion Mechanism, 5th Edition,” , **The University of Utah Johnwiley**, 94-111 (2000).
15. James, F. S., “Introduction to materials science for engineering-Point defect and solid-state diffusion, Fourth edition”, **University of California, Macmillan Publishing Company**, 112-124 (1985).
16. 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).
17. 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).
18. Çelik, S., “Koruyucu gaz altında saf alüminyum ve bakırın difüzyon kaynağı şartlarının belirlenmesi”, Doktora Tezi, **Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Balıkesir, 15-53 (1996).
19. 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).
20. Kurşungöz, N., ve Kurşungöz., H., “Difüzyon kaynağı”, Uluslar arası Kaynak Teknolojisi 96 Sempozyumu, **Gedik Eğitim Vakfı**, İstanbul, 203-212 (1996).
21. Kahraman N., ve Gülenç B., “Modern Kaynak Teknolojisi” 2. Baskı, **Epa-Mat Basım Yayım**, Ankara, (2013)
22. Elrefaey A, and Tillmann W., “Solid state diffusion bonding of titanium to steel using a copper base alloy as interlayer”, **Materials Characterization**, 209 (5): 2746-2752 (2006).
23. Rahman A, and Cavalli M.N., “Diffusion bonding of commercially pure Ni using Cu interlayer”, **Materials Characterization**, 69: 90-96 (2012).
24. Zhang J, Shen Q, and Luo G., “Microstructure and bonding strength of diffusion welding of Mo/Cu joints with Ni interlayer”, **Meterials and Design**, 39: 81-86 (2012).
25. Kundu S, and Chatterjee S., “Characterization of diffusion bonded joint between titanium and 304 stainless steel using a Ni interlayer”, **Materials Characterization**, 59 (5): 631-637 (2008).

26. Jian Z, and Luo G., “An investigation on diffusion bonding of aluminum and magnesium using a Ni interlayer”, *Materials Letters*, 83: 189-191 (2012).
27. 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).
28. Nami H, and Halvae A., “Investigation on microstructure and mechanical properties of diffusion bonded Al/Mg<sub>2</sub>Si metal matrix composite using copper interlayer”, *Journal of Materials Processing Technology*, 210 (10): 1282-1289 (2010).
29. Peng H., Jiuhai Z, Ronglin, Z. and Xiaoqiang L., “Diffusion Bonding Technology of A Titanium Alloy to a Stainless Steel Web With an Ni İnterlayer”, *Materials Characterization* 43 (5): 287-292 (1999).
30. 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).
31. Torun, O., “Fe<sub>3</sub>Al (Fe-26Al) alaşımlarının difüzyon kaynağı”, Doktora Tezi, *Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Eskişehir, 28-72 (2003).
32. Peng Li, Jinglong Li, Jiangtao X, Fusheng Z and Syed H., “Diffusion bonding titanium to stainless stell using Nb/Cu/Ni multi-interlayer”, *Materials Characterization*, 68: 82-87 (2012).
33. Uzun, H., “Sert Lehimleme Teknikleri”, *Değişim Yayınları*, Sakarya, 205-208 (2002).
34. Koçer, S., “Yüksek krom nikel alaşımlı paslanmaz çeliğin alaşımsız düşük karbonlu çelikle difüzyon kaynağının araştırılması” Yüksek Lisans Tezi *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ, 3-30 (1998).
35. Aydın, K, Kaya, Y, and Kahraman, N., “Experimental study of diffusion welding/bonding of titanium to copper”, *Materials & Design*, 37: 356-368 (2012).
36. Torun, O., “Microstructure and bond strength of diffusion-bonded nickel alumine-titanium joints”, *Intermetallics*, 17 (3): 179-181, (2009).
37. Liu, J., Cao, J., Song, X., Wang, Y., and Feng, J., “Evaluation on diffusion bonded joints of TiAl alloy to Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub> ceramic with and without Ni interlayer: Interfacial microstructure and mechanical properties”, *Materials & Design*, 57: 592-597, (2014).
38. Kundu, S., Sam, S. and Chatterjee, S., “Interface microstructure and strength properties of Ti–6Al–4V and microduplex stainless steel diffusion bonded joints”, *Materials & Design*, 5 (32): 2997-3003 (2011).

39. Liu, J., Cao, J., Lin, X., Chen, H., Wang, J., and Feng, J., “Interfacial microstructure and joining properties of TiAl/Ti<sub>3</sub>AlC<sub>2</sub> diffusion bonded joints using Zr and Ni foils as interlayer”, *Vacuum*, 102: 16-25 (2014).
40. Sam, S. Kundu, S. and Chatterjee, S., “Diffusion bonding of titanium alloy to micro-duplex stainless steel using a nickel alloy interlayer: Interface microstructure and strength properties”, *Materials & Design*, 40: 237-244 (2012).
41. Barrena, M. I., Matesanz, L., Gómez de Salazar, J. M., “Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Ti6Al4V diffusion bonding joints using Ag–Cu interlayer”, *Materials Characterization*, 60 (11): 1263-1267 (2009).
42. Atasoy, E. and Kahraman N., “Diffusion bonding of commercially pure titanium to low carbon steel using a silver interlayer”, *Materials Characterization*, 59 (10): 1481-1490 (2008).
43. Kahraman, N., “Titanyum levhaların patlamalı kaynak yöntemi ile farklı metallerle birleştirilmesi ve arayüzey özelliklerinin incelenmesi”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 1-23 (2003).
44. Aparicio, C. F., Gil, J., Fonseca, C., Barbosa, M., and Planell, J.A., “Corrosion behaviour of commercially pure titanium shot blasted with different materials and sizes of shot particles for dental implant applications”, *Biomaterials*, 24 (2): 263-273 (2003).
45. Gurrappa, L., and Gogia, A. K., “Development of oxidation resistant coatings for titanium alloys”, *Materials Science and Technology*, 17 (5): 581-586 (2001).
46. Barreda, J. L., Santamaria, F., Azpiroz, X., Irisarri, A. M. and Varona, J. M., “Electron beam welded high thickness Ti6Al4V plates using filler metal of similar and different composition to the base plate” *Vacuum*, 62 (2-3): 143-150 (2001).
47. Gökdemir, Y., “Saf Ti ve Ti6Al4V alaşımının yüksek sıcaklıkta oksidasyon davranışı”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 3-26 (2006).
48. 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).
49. 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).
50. Kahraman, N., “Titanyum ve bakır çiftinin ara bağlayıcı difüzyon sert lehimlemesi ile fırında birleştirilmesi ve mekanik özelliklerinin incelenmesi”, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 611-618 (2003).

51. Kahraman, N., ve Gülenç B., “Modern Kaynak Teknolojisi”, 1. Baskı, **Epa-Mat Basın Yayın Ltd. Şti.**, Ankara, 1-99 (2009).
52. Elmer, J. W., and Kautz, D. D., “Fundamentals of friction welding”, Welding, Brazing and Soldering, 8<sup>th</sup> edition, **ASM Metals Handbook**, 6, 150-155 (1993).
53. Ateş, H., “Ferritik süper alaşımlarının sürtünme kaynağı ile kaynaklanabilirliğinin araştırılması”, Doktora Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 16-17 (2002).
54. Williams, J. L., and Belov, A. F., “Titanium and Titanium Alloys, Volume 1”, **Titanium org.**, 1107-1119 (1996).
55. Doğan, İ., “Titanyum malzemelerin (kalite 265.2) TIG kaynak yöntemi ile kaynaklanabilirliğinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 1-4 (2002).
56. Anon, W., “Explosive welding”, **Welding Journal**, 80 (5): 50-51 (2001).
57. Kaya, Y., “Titanyum saclarının nokta direnç kaynağı ile kaynaklanabilirliğinin araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, **Karabük üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Karabük, 30-61 (2010).
58. Baydur, G., “Malzeme”, 5. Basım, **Milli Eğitim Basımevi**, İstanbul, 86-167 (1987).
59. Tekin, A., “Çeliklerin Metalurjik Dizaynı”, **Doyuran Matbaası**, İstanbul, 176-236 (1981).
60. Korkut, M H., “Ferritik paslanmaz çeliklerin mikroyapısı ve aşınması üzerine karbür yapıcı elementlerin etkilerinin araştırılması”, Doktora Tezi, **Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Elazığ, 5-10 (1997).
61. Kınıkoğlu, N. G., “Malzeme Bilimi ve Mühendisliği”, **Literatür Yayıncılık Dağıtım Pazarlama San. ve Tic. Ltd. Şti.**, ISBN No: 975-8431-03-X, İstanbul, 514-518 (2001).
62. Erdoğan, M., “Mühendislik Alaşımlarının Yapı ve Özellikleri – Demir Alaşımları Cilt I”, **Nobel Yayın Dağıtım Ltd. Şti.**, ISBN 975-591-083-2, Ankara, 174-213 (2000).
63. 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).
64. Yıldız, A, Kaya, Y, Durgutlu, A, Gülenç, B, ve Kahraman, N., “Paslanmaz çelik ile bakırın difüzyon kaynak yöntemi ile birleştirilebilirliğinin araştırılması”, 2. **Uluslararası Kaynak Teknolojileri Konferansı ve Sergisi**, ICWET12, Ankara, 516-528, (2012).



65. 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).
66. Ghosh, M., Bhanumurthy, K. and Kale, G. B., “Krishnan, J. and Chatterjee, S. Diffusion bonding of titanium to 304 stainless steel”, *Journal of Nuclear Materials*, 322: 235–241 (2003).
67. Kundu, S, Mishra, B, Olson, D. L, and Chatterjee, S., “Interfacial reactions and strength properties of diffusion bonded joints of Ti64 alloy and 17-4PH stainless steel using nickel alloy interlayer” *Materials and Design*, 51: 714–722, (2013).
68. Ekrami, A., Moeinifar, S. and Kokabi, A. H. “Effect of transient liquid phase diffusion bonding on microstructure and properties of a nickel base superalloy Rene 80”, *Materials Science And Engineering A* ,456: 93–98 (2007).
69. Li, H. M, Sun, D. Q, Cai, X. L, Dong, P, and Wang, W. Q., “Laser welding of TiNi shape memory alloy and stainless steel using Ni interlayer”, *Materials and Design*, 39: 285–293 (2012).
70. Zhong Z, Hinoki T, Kohyama A., “Effect of holding time on the microstructure and strength of tungsten/ferritic steel joints diffusion bonded with a nickel interlayer”, *Materials Science and Engineering A*, 518: 167–173 (2009).
71. Callister W. D, and Rethwisch D. G., “Materials Science and Engineering, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği”, Çeviri Editörü: Kenan Genel, *Nobel Akademik Yayıncılık*, Ankara, 122-149 (2013).
72. Aydın, K., “Titanium ve bakır malzemelerin difüzyon kaynak yöntemi ile birleştirilebilirliğinin araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, 58-90 (2011).
73. Gupta K. P., “Phase Diagram Evaluations” *The Indian Institute of Metals, Journal of Phase Equilibria*, 24 (1): 86-89 (2003).
74. Atabaki M. M., Bajgholi M. E., Dehkordi E. H., “Partial transient liquid phase diffusion bonding of zirconium alloy (Zr–2.5Nb) to stainless steel 321”, *Materials Science and Technology*, 42: 172-183 (2012).
75. Gür A. K, Orhan A, Çalgülü U., “Ni/Ti tozlarının PTA yöntemiyle AISI 1020 yüzeyindeki kaplamalarının mikroyapı özellikleri”, *Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları*, Elazığ, 125-131 (2008).

## ÖZGEÇMİŞ

Aydan YILDIZ 24.08.1986 tarihinde ORDU 'da doğdu. İlköğretim ve lise öğrenimini aynı şehirde tamamladı. 2004 yılında Erciyes Üniversitesi Yozgat Meslek Yüksek Okulu Makine Resim Konstrüksiyon Bölümünü kazandı ve 2006 yılında mezun oldu. 2007 yılında Dikey Geçiş sınavını kazanarak Karabük Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Metal Öğretmenliği Bölümü'ne yerleşti. 2011 yılında mezun oldu. Aynı yıl Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İmalat Mühendisliği Dalı'nda başlamış olduğu yüksek lisans programına halen devam etmektedir.

## İLETİŞİM BİLGİLERİ

Tel : (545) 645 06 52

E-posta : [aydan\\_ydz@windowslive.com](mailto:aydan_ydz@windowslive.com)