

**T.C.  
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**SAF ALÜMİNYUM VE SAF BAKIRIN  
DİFÜZYON KAYNAĞINDA  
ARAFAZLARIN OLUŞUMU VE ETKİSİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**MAK.MÜH. LEVENT FİDAN**

**BALIKESİR, KASIM 2006**

**T.C.  
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**SAF ALÜMİNYUM VE SAF BAKIRIN  
DİFÜZYON KAYNAĞINDA  
ARAFAZLARIN OLUŞUMU VE ETKİSİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**MAK.MÜH. LEVENT FİDAN**

**BALIKESİR, KASIM 2006**

**T.C.  
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**SAF ALÜMİNYUM VE SAF BAKIRIN  
DİFÜZYON KAYNAĞINDA  
ARAFAZLARIN OLUŞUMU VE ETKİSİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**MAK.MÜH. LEVENT FİDAN**

**TEZ DANIŞMANI : YRD. DOÇ. DR SARE ÇELİK**

**SINAV TARİHİ: 22.11.2006**

**JÜRİ ÜYELERİ: Doç. Dr. İrfan AY**

**Doç. Dr. Ramazan YAMAN**

**Yrd. Doç. Dr. Sare ÇELİK**



**BALIKESİR, KASIM 2006**

## ÖZET

### SAF ALÜMİNYUM VE SAF BAKIRIN DİFÜZYON KAYNAĞINDA ARAFAZLARIN OLUŞUMU VE ETKİSİ

Levent Fidan  
Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Sare ÇELİK

Balıkesir, Kasım 2006

Difüzyon Kaynağı, aynı ya da farklı cins iki malzemenin katı halde birleştirilebildiği gelişmiş bir birleştirme metodudur. Bu yöntem, özellikle, geleneksel kaynak yöntemleri ile kaynak edilmesi güç ya da imkansız olan, yüksek karbonlu çelikler, seramikler, kompozitler ve bimetel ya da farklı malzemelerin birleştirilmesi için alternatif ya da en uygun kaynak yöntemidir.

Bu çalışmada, ergitme kaynağı ile birleştirilmesi mümkün olmayan saf Al-Saf Cu'nun difüzyon kaynağı ile birleştirilmesi incelenmiştir. Daha önce fakültemiz laboratuvarında imalatı gerçekleştirilen difüzyon kaynağı cihazı ile Al-Cu'nun difüzyon kaynağı çalışmaları yapılmıştır. Bu çalışmanın devamı olarak, elde edilen optimum şartlar (560°C kaynak sıcaklığı, 4,5MPa kaynak basıncı, 60 dakika kaynak süresi) alınarak, birleşme bölgesinde oluşan ara fazların belirlenmesi amaçlanmıştır. Kaynak işleminden sonra, numuneler kaynak birleşme ara yüzeyine dik olarak kesilmiştir. Birleşme ara yüzeylerinde mikro yapı, SEM, EDS analizi çalışmaları yapılmıştır.

Çalışmanın 1. bölümünde konu ile ilgili literatür çalışması verilmiştir. 2. bölümde difüzyon teorisi hakkında bilgi verilmiş, 3. bölümde ise difüzyon kaynağı işlenmiştir. 4. bölümde yapılan deneysel çalışmalar verilmiş, 5. bölümde ise elde edilen sonuçlar tartışılmıştır. 6. bölümde çalışmanın sonuçları irdelenmiştir.

ANAHTAR SÖZCÜKLER : İntermetalik Faz / Difüzyon / Bakır / Alüminyum / Kaynak / Difüzyon Kaynağı

## **ABSTRACT**

### **FORMATION AND EFFECT OF BETWEEN PHASE WITH DIFFUSION WELDING PURE ALUMINUM AND PURE COPPER**

**Levent Fidan**

**Balıkesir University, Institute of Science**

**Department of Mechanical Engineering**

**Master Thesis / Supervisor : Asst.Prof.Dr.Sare ÇELİK**

**Balıkesir, November 2006**

Diffusion welding is one of the advanced bonding processes in which two materials, similar or dissimilar, can be bonded in solid state. This method is suitable especially for the materials that cannot be bonded with conventional welding methods such as high carbon steels, ceramics, composites and bimetallic or dissimilar materials.

In this study, it was observed that aluminium and copper metals were combined by diffusion welding, because this operation is not possible with melting weld methods. Before, studies with machine of diffusion welding that has been made in the faculty laboratory of aluminium and copper were made. After this study determine of between phases has been intended that were being at combination area. Optimum conditions that have been achieved, welding temperature was 560 °C, welding pressure was 4,5MPa and welding time was 60 minutes for this operation. After welding operation, the samples were cut vertically by breaking step surface. The zone at combination were made micro hardness, SEM and EDS analysis.

In the first chapter of this study, a literature research within interested on subject is given. In the second chapter, the knowledge about diffusion theory is given. In the third chapter, diffusion welding is examined. In the fourth chapter, experimental studies are explained. In the fifth chapter, obtained conclusions are discussed. In the last chapter, general results of study are criticised.

**KEY WORDS : Intermetallic phase / Diffusion / Copper / Aluminum / Weld / Diffusion Welding**

<b>İÇİNDEKİLER</b>	<b>Sayfa</b>
<b>ÖZET, ANAHTAR SÖZCÜKLER</b>	<b>i</b>
<b>ABSTRACT, KEY WORDS</b>	<b>ii</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b>	<b>iii</b>
<b>ÇİZELGELERİN LİSTESİ</b>	<b>v</b>
<b>ŞEKİLLERİN LİSTESİ</b>	<b>vi</b>
<b>SEMBOLLER VE LİSTESİ</b>	<b>x</b>
<b>TEŞEKKÜR</b>	<b>xi</b>
<b>GİRİŞ</b>	<b>xii</b>
<b>1 LİTERATÜR TARAMASI</b>	<b>1</b>
<b>2 DİFÜZYON TEORİSİ</b>	<b>8</b>
2.1 Giriş	8
2.2 Enerji Konumları	9
2.3 Difüzyon Katsayısı	11
2.4 Kendi Kendine Difüzyon	13
2.5 Aşımelerde Difüzyon	14
2.6 Difüzyon Mekanizmaları	14
2.6.1 Yeralan Difüzyon Mekanizması	15
2.6.2 Arayer Difüzyonu Mekanizması	16
2.6.3 Boşluk Mekanizması	18
2.6.4 Karşılıklı Yer Değiştirme Mekanizması	18
2.6.5 Halka Mekanizması	18
2.7 Difüzyon Çeşitleri	19
2.8 Aktivasyon Enerjisi	20
2.9 Difüzyon Kanunları	21
2.9.1 I. Fick Kanunu	21
2.9.2 II. Fick Kanunu	22
2.10 Difüzyonu Etkileyen Mekanizmalar	23
2.10.1 Sıcaklık	24
2.10.2 Konsantrasyon	25
2.10.3 Kristal Dokusu	26
2.10.4 Aşım Elementleri	26

2.10.5 Tane Boyutu	27
2.11 Kimyasal Difüzyon (Kirkendall Etkisi)	27
<b>3 DİFÜZYON KAYNAĞI</b>	<b>30</b>
3.1 Giriş	30
3.2 Katı Hal Birleştirme Yöntemleri	32
3.3 Difüzyon Kaynağı Bağlantı Çeşitleri	33
3.4 Difüzyon Kaynağında Bağ Oluşturan Süreç ve Faktörler	34
3.5 Difüzyon Kaynağına Etki Eden Faktörler	37
3.5.1 Kaynak Sıcaklığı	38
3.5.2 Kaynak Süresi	39
3.5.3 Kaynak Basıncı	40
3.5.4 Yüzey Şartları	43
3.5.5 Kaynak Ortamı (Atmosferi)	45
3.6 Difüzyon Kaynağı Yapılabilen Malzemeler	46
3.7 Avantaj ve Dezavantajları	50
3.8 Difüzyon Kaynağı Teknikleri	52
3.9 Difüzyon Kaynağı Uygulama Alanları	53
3.10 Difüzyon Kaynağının Diğer Kaynak Metotlarıyla Karşılaştırılması	59
<b>4 DENEYSEL ÇALIŞMALAR</b>	<b>62</b>
4.1 Çalışmanın amacı	62
4.2 Deney Düzenineğinin Kurulması	62
4.3 Deneylerde kullanılan malzemeler	65
4.3.1 Alüminyum	65
4.3.2 Bakır	66
4.4 Deney Numunelerinin Hazırlanması	67
4.5 Deneyin Yapılışı	67
4.6 Mikroyapı İncelemeleri	69
4.7 Sertlik Ölçümleri	69
4.8. Elektron Mikroskobu (SEM) ve Enerji Dağıtım Spectrometre (EDS) İncelemeleri	72
<b>5 DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA</b>	<b>73</b>
5.1 Kaynağın Makro İncelemesi	73
5.2 Kaynakta Mikro yapı İncelemeleri	74
5.2.1 Kaynaklı bölgedeki yapıların (Al-Cu) denge diyagramındaki karşılıkları	78
5.2.2 Elektron Mikroskobu (SEM) ve Enerji Dağıtım Spectrometre (EDS) İncelemeleri	87
5.3 Mikro sertlik Deneyi	113
<b>6 GENEL SONUÇLAR ve TARTIŞMA</b>	<b>117</b>
<b>7 SONUÇLAR</b>	<b>120</b>
<b>KAYNAKLAR</b>	<b>122</b>

## ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge No	Çizelge Adı	Sayfa
Çizelge 2.1	Bazı malzemelerde, difüzyon katsayısı ve miktarının sıcaklıkla değişimleri	25
Çizelge 3.1	Difüzyon kaynağı safhaları	37
Çizelge 3.2	Metal ve alaşımlarının difüzyon kaynak yöntemi ile ara yüzey levhasız ve ara yüzey levha kullanılarak kaynak edilebilirliği	47
Çizelge 4.1	Difüzyon kaynağı deney düzeneğinin malzeme listesi	64
Çizelge 4.2	Alüminyumun fiziksel ve mekaniksel özellikleri	66
Çizelge 4.3	Bakırın fiziksel ve mekaniksel özellikleri	67
Çizelge 4.4	Kaynak öncesi malzemelerin sertlik değerleri	70
Çizelge 5.1	Al-Cu oranına bağlı olarak kristal yapı verileri	76
Çizelge 5.2	Al-Cu difüzyon kaynaklı numunede difüzyon bölgesinin, EDS analizi alınmış bölgelerinin tanımı	87
Çizelge 5.3	Al-Cu difüzyon kaynaklı başka bir numunedeki difüzyon bölgesinin, EDS Analizi alınmış bölgelerinin tanımı	95
Çizelge 5.4	Kaynaklanmamış malzemelerin kopma dayanımları	103
Çizelge 5.5	Difüzyon kaynaklı (Al-Cu) deney numunelerinin kopma dayanımları	103
Çizelge 5.6	Kırılma yüzeyinde, 3 bölgeden alınan EDS analiz sonuçları	108
Çizelge 5.7	Al-Cu difüzyon kaynaklı numunede difüzyon bölgesindeki, kaynak bölgesinden alınan sertlik değerleri	114
Çizelge 5.8	Al-Cu difüzyon kaynaklı başka bir numunedeki difüzyon bölgesindeki, kaynak bölgesinden alınan sertlik değerleri	115

## ŞEKİL LİSTESİ

Şekil No	Şekil Adı	Sayfa
Şekil 2.1	Metallerde öz difüzyon süreci: Atomik dağılma difüzyon süreci içinde konsantrasyon eğrileri	9
Şekil 2.2	Atom mesafesinin bir fonksiyonu olarak potansiyel enerji değişim şeması.	10
Şekil 2.3	Atom enerjilerinin şematik dağılımı.	10
Şekil 2.4	Serbest enerjinin durum değişimine bağlılığı.	11
Şekil 2.5	Konsantrasyon değişiminin şematik gösterimi.	12
Şekil 2.6	Kendi kendine difüzyonun şematik görünümü.	13
Şekil 2.7	a-) Bakır nikel çifti sıcaklık uygulanmadan önce, b-) Bakır nikel çifti sıcaklık uygulandıktan sonra Cu-Ni konsantrasyonu.	14
Şekil 2.8	YMK kafes içerisinde atomun boş bir konuma hareketi.	16
Şekil 2.9	Arayer difüzyonunun oluşumu.	16
Şekil 2.10	Doğrudan yer değiştirme.	17
Şekil 2.11	Kristal kafeste atomların hareket mekanizmaları.	19
Şekil 2.12	Toryumun wolfram içinde difüzyonu.	21
Şekil 2.13	Yer alan ve ara yer difüzyonu için gerekli olan aktivasyon enerjisi(Q) değişimi.	
Şekil 2.14	Kararsız hal difüzyonu için konsantrasyon profili.	23
Şekil 2.15	Kararsız hal difüzyonunda üç farklı sıcaklıkta oluşan konsantrasyon profili.	23
Şekil 2.16	927°C 'de demir içinde difüze olan karbon için D'nin konsantrasyonla değişimi.	25
Şekil 2.17	Kirkendall etkisinin gösterimi.	28
Şekil 2.18	(Cu-Ni)'de kirkendall olayı.	29
Şekil 3.1	Difüzyon kaynağı mekanizması.	32
Şekil 3.2	Kaynak basıncı ve kaynak sıcaklığı arasında ilişki.	36
Şekil 3.3	Metal kristalleri arasındaki karşılıklı etkileşim halinde potansiyel enerjideki değişimler.	36
Şekil 3.4	Sıcaklık ve uygulanan basıncın sürünme etkisi.	38
Şekil 3.5	Sıcaklığın birleşme alanı üzerindeki etkisi.	39
Şekil 3.6	Bağlantının kayma mukavemeti ile kaynak stresi arasındaki ilişki.	40
Şekil 3.7	Yüzey kusurları.	44
Şekil 3.8	Yüzey deformasyonu ile pürüzlülük arasında sıcaklığa bağlı değişme.	44
Şekil 3.9	Roket başlığı pencere çerçevesi kanal uygulaması.	55
Şekil 3.10	Sıvı roket motorunun yanma odasındaki, silindir gömleğinde bulunan kanallara difüzyon kaynağı uygulaması.	56

Şekil 3.11	a-) Yüksek hassasiyetli alüminyum malzeme, b-) Yüksek hassasiyetli paslanmaz çelik malzeme	58
Şekil 4.1	Difüzyon kaynağı deney düzeneğinin genel görünüşü	63
Şekil 4.2	Difüzyon kaynağı deney düzeneğinin şematik resmi	63
Şekil 4.3	Difüzyon kaynağı deney düzeneğinin kesit resmi	64
Şekil 4.4	Kaynak işlemi için hazırlanan numunelerin görünümü	67
Şekil 4.5	Alüminyum ve bakır numunelerinin cihaz içine yerleştirilmiş şeklinin şematik gösterimi	68
Şekil 4.6	Kaynaklanmamış alüminyum'un mikro yapısı (100X)	70
Şekil 4.7	Kaynaklanmamış bakır'ın mikro yapısı (500X)	71
Şekil 4.8	Mikro yapı, SEM, EDS, Mikro sertlik ve Ara yüzey incelemesi için hazırlanan numuneler	71
Şekil 5.1	Kaynak sonrası numunelerin görünümü	73
Şekil 5.2	Al-Cu difüzyon numunesindeki bağlantı bölgesinin mikro yapısı	74
Şekil 5.3	a- ) %95 Al + %5 Cu'lu alaşım. Homojen $\chi$ kristalleri b- ) Kaynaklanmış numunenin difüzyon bölgesi.	76
Şekil 5.4	a-) %67 Al + %33 Cu'lu alaşım . ( $\chi + \theta$ ) ötektik b- ) Kaynaklanmış numunenin difüzyon bölgesi	77
Şekil 5.5	a- ) %85 Al + %15 Cu'lu alaşım. Ötektik ( $\chi + \theta$ )'lı homojen. X karışım kristalleri. b- ) Kaynaklanmış numunenin difüzyon bölgesi	77
Şekil 5.6	a- ) %67 Al + %33 Cu'lu alaşım. Ötektik ( $\chi + \theta$ ) içinde primer $\theta$ kristalleri b- ) Kaynaklanmış numunenin difüzyon bölgesi	78
Şekil 5.7	Al-Cu Faz diyagramı [98] ve kaynaklanma bölgesinde oluşan fazların tanımı	79
Şekil 5.8	Difüzyon bölgesinde oluşan fazların tamamı (100X)	81
Şekil 5.9	1 no'lu bölge. Bakır ana metali	81
Şekil 5.10	2 no'lu bölge. $\alpha$ fazı bölgesi	81
Şekil 5.11	3 no'lu bölge. $\gamma$ fazı bölgesi	82
Şekil 5.12	4 no'lu bölge. $\theta + \theta$ Ötektik bölgesi	82
Şekil 5.13	5 no'lu bölge. Ötektik içinde $\theta + \chi$ bölgesi	82
Şekil 5.14	6 no'lu bölge. Al içinde Cu'nun çözündüğü bölge	82
Şekil 5.15	7 no'lu bölge. Alüminyum ana metali	83
Şekil 5.16	Al-Cu difüzyon kaynağı sonucu oluşan difüzyon bölgesinin dağlanmış görüntüsü. Cu'ya yakın dendrit bölgesi (100X)	83
Şekil 5.17	Al-Cu difüzyon kaynağı sonucu oluşan difüzyon bölgesinin dağlanmış görüntüsü. Alüminyuma ile dendrit bölge geçiş bölgesi (100X)	84
Şekil 5.18	Al-Cu difüzyon kaynağı sonucu oluşan difüzyon bölgesinin dağlanmış görüntüsü. Cu'ya yakın Al <sub>2</sub> Cu oluşan dendrit bölge (100X)	84
Şekil 5.19	Al-Cu difüzyon kaynağı sonucu oluşan difüzyon bölgesinin dağlanmış görüntüsü. Al'ye yakın dendrit bölge (200X)	85
Şekil 5.20	Al-Cu difüzyon kaynağı sonucu oluşan difüzyon bölgesinin dağlanmış görüntüsü (500X)	85
Şekil 5.21	Al-Cu difüzyon kaynağı sonucu oluşan difüzyon bölgesinin dağlanmış görüntüsü. Al'ye yakın	86

	dentrit bölge (500X)	
Şekil 5.22	Al-Cu difüzyon kaynağı sonucu oluşan difüzyon bölgesinin dağlanmış görüntüsü. Al'ye yakın dentrit bölgede oluşan bir yapı (500X)	86
Şekil 5.23	Al-Cu difüzyon kaynaklı numunede difüzyon bölgesinin, EDS Analizi alınmış bölgelerinin gösterimi (220X)	87
Şekil 5.24	Al-Cu difüzyon kaynaklı numunede difüzyon bölgesindeki, 1 nolu bölgenin Spektro analizi (220X görüntü resmi)	88
Şekil 5.25	Al-Cu difüzyon kaynaklı numunede difüzyon bölgesindeki, 2 nolu bölgenin Spektro analizi (2000X görüntü resmi)	89
Şekil 5.26	Al-Cu difüzyon kaynaklı numunede difüzyon bölgesindeki, 3 nolu bölgenin Spektro analizi (2000X görüntü resmi)	90
Şekil 5.27	Al-Cu difüzyon kaynaklı numunede difüzyon bölgesindeki, 4 nolu bölgenin Spektro analizi (220X görüntü resmi)	91
Şekil 5.28	Al-Cu difüzyon kaynaklı numunede difüzyon bölgesindeki, 5 nolu bölgenin Spektro analizi (220X görüntü resmi)	92
Şekil 5.29	Al-Cu difüzyon kaynaklı numunede difüzyon bölgesindeki, 6 nolu bölgenin Spektro analizi (220X görüntü resmi)	93
Şekil 5.30	Al-Cu difüzyon kaynaklı numunede difüzyon bölgesindeki, 7 nolu bölgenin Spektro analizi (220X görüntü resmi)	94
Şekil 5.31	Al-Cu difüzyon kaynaklı başka bir numunedeki difüzyon bölgesinin, EDS Analizi alınmış bölgelerinin gösterimi (750X görüntü resmi)	95
Şekil 5.32	Al-Cu difüzyon kaynaklı başka bir numunedeki difüzyon bölgesindeki, 1 nolu bölgenin Spektro analizi (220X görüntü resmi)	96
Şekil 5.33	Al-Cu difüzyon kaynaklı başka bir numunedeki difüzyon bölgesindeki, 2 nolu bölgenin Spektro analizi (220X görüntü resmi)	97
Şekil 5.34	Al-Cu difüzyon kaynaklı başka bir numunedeki difüzyon bölgesindeki, 3 nolu bölgenin Spektro analizi (220X görüntü resmi)	98
Şekil 5.35	Al-Cu difüzyon kaynaklı başka bir numunedeki difüzyon bölgesindeki, 4 nolu bölgenin Spektro analizi (220X görüntü resmi)	99
Şekil 5.36	Al-Cu difüzyon kaynaklı başka bir numunedeki difüzyon bölgesindeki, 5 nolu bölgenin Spektro analizi (220X görüntü resmi)	100
Şekil 5.37	Al-Cu difüzyon kaynaklı başka bir numunedeki difüzyon bölgesindeki, 6 nolu bölgenin Spektro analizi (220X görüntü resmi)	101

Şekil 5.38	Al-Cu difüzyon kaynaklı numunede difüzyon Bölgesindeki Al-Cu'nun konsantrasyon değişimi	102
Şekil 5.39	Al-Cu difüzyon kaynaklı başka bir numunedeki difüzyon bölgesindeki, Al-Cu'nun konsantrasyon değişimi	102
Şekil 5.40	Çekme numunesinin gevrek kırılma resmi	104
Şekil 5.41	Çekme deney numunesinin kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü	104
Şekil 5.42	Çekme deney numunesinin kırılma yüzeyinin 1. bir başka bölgesinin SEM görüntüsü	105
Şekil 5.43	Çekme deney numunesinin kırılma yüzeyinin 2. bir başka bölgesinin SEM görüntüsü	105
Şekil 5.44	Çekme deney numunesinin kırılma yüzeyinin 3. bir başka bölgesinin SEM görüntüsü	106
Şekil 5.45	Çekme deney numunesinin kırılma yüzeyinin 4. bir başka bölgesinin SEM görüntüsü	106
Şekil 5.46	Çekme deney numunesinin kırılma yüzeyinin 5. bir başka bölgesinin SEM görüntüsü	107
Şekil 5.47	Çekme deney numunesinin kırılma yüzeyinin 6. bir başka bölgesinin SEM görüntüsü	107
Şekil 5.48	Çekme deney numunesinin kırılma yüzeyinin 7. bir başka bölgesinin SEM görüntüsü	108
Şekil 5.49	1 no'lu kırılma yüzeyinin spektro analizi	110
Şekil 5.50	2 no'lu kırılma yüzeyinin spektro analizi	111
Şekil 5.51	3 no'lu kırılma yüzeyinin spektro analizi	112
Şekil 5.52	Al-Cu difüzyon kaynaklı numunedeki difüzyon bölgesindeki T: 560°C, P: 4,5 MPa, t: 60 dakika kaynak şartındaki numunenin sertlik verileri	114
Şekil 5.53	Al-Cu difüzyon kaynaklı başka bir numunedeki difüzyon bölgesindeki T: 560°C, P: 4,5 MPa, t: 60 dakika kaynak şartındaki numunenin sertlik verileri	115
Şekil 5.54	Ölçülen mikro sertlik sonucu oluşan ölçüm izleri (200X)	116

## SEMBOL LİSTESİ

Simge	Simge Adı	Birimi
E	Serbest Enerji	kJ/mol
U	Sistemin İç enerjisi	kJ/mol
S	entropi	kJ/kgK
T	Sıcaklık	°C,K,F
n	Atom Sayısı	
Q	Aktivasyon Enerjisi	kJ/mol
C	Konsantrasyon	
$\rho$	Yoğunluk	g/cm <sup>3</sup>
D	Difüzyon Katsayısı	cm <sup>2</sup> /(sm <sup>2</sup> /s)
t	Zaman	san, dak
P	Basınç	N/mm <sup>2</sup> , Pa
G	Enerji	kJ/mol
M	Kütle	
J	Akı veya akış	
dc/dx	Yoğunlaşma Gradyantı	(m <sup>3</sup> /m) <sup>-1</sup>
Cs	Yüzeydeki Konsantrasyon	
erf	Hata Fonksiyonu	
Do	Titreşim frekansına bağlı difüzyon katsayısı	
q	Difüze olan malz. miktarı	g/s
R	Gaz Sabiti	8,314 Jmol <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
V	Hacim	cm <sup>3</sup>
c	Özgül Isı	
Ra	Yüzey Pürüzlülüğü	$\mu$ m
$\epsilon$	Sürünme Hızı	
Tm	Ergime Sıcaklığı	

## TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın yapılması ve yürütülmesinde yoğun çalışmalarına rağmen, bana ilmen ve fikren desteklerini esirgemeyerek, bu çalışmanın sonuçlanmasını sağlayan çok kıymetli danışman hocam Yrd.Doç.Dr. Sare ÇELİK'e, manevi desteğini benden esirgemeyen çok değerli hocam Doç.Dr. İrfan AY'a, yoğun doktora çalışmasına rağmen her yanına gittiğimde bilgilerini benimle paylaşmaktan kaçınmayan , örnek aldığım hocam Araş.Gör. Alaaddin TOKTAŞ'a, Araş.Gör. T.Kerem DEMİRCİOĞLU ve diğer araştırma görevlisi arkadaşlarıma, laboratuvar çalışmalarım boyunca beraber çalıştığım, çalışma arkadaşım Dinçer DİNÇ'e, yeni ve eski ev arkadaşlarıma, deney sonuçlarının incelenmesi esnasında yardımcı olan Marmara Araştırma Merkezi çalışanlarına içtenlikle teşekkürümü sunuyorum.

Çalışmalarım süresince beni sabırla bekleyen, en büyük destekçim, nişanlım ve sevdiğim insan Ceyda KABAÇ'a, bugünlere gelmemdeki en büyük katkısı olan çok kıymetli aileme teşekkürü bir borç bilirim.

## GİRİŞ

Günümüzün gelişen teknolojisi, hem malzeme hem de kaynak alanında yeni yöntemlerin kullanılması mecburiyetini doğurmuştur. Difüzyon kaynağı 1960 'lı yıllarda özellikle klasik tekniklerle birleştirilmesi zor olan malzeme ya da malzeme çiftlerinde uygun olduğu anlaşılmıştır. Yeni ve gelişmiş malzemelerin üretilmesiyle ve bunların diğer kaynak yöntemleri ile kaynak edilememeleri difüzyon kaynağına önem kazandırmıştır.

Difüzyon kaynağı, birbiriyle temasta olan yüzeyler arasında minimum makroskobik deformasyon verecek bir basınç ve ısı uygulayarak kontrollü difüzyonla gerçekleştirilen katı hal kaynağıdır. Difüzyon, atomların, malzemenin serbest enerjisini (kimyasal potansiyel farkını) azaltmak amacıyla yüksek enerjili bölgelerden düşük enerjili bölgelere göçmesi olayıdır. Kaynak sıcaklığı, bağlanacak parçaların erime sıcaklığının altındadır. Malzemelerde difüzyon yeniden kristalleşme sıcaklığında başlamaktadır. Bu nedenle birleştirmelerde bu özel yöntem ergitme kaynağının kullanılmadığı yerlerde etkili olarak kullanılabilir. Difüzyon kaynağının kullanımında en önemli parametreler; kaynak sıcaklığı, basınç süresi, şekil değiştirme miktarı, yüzey kalitesi ve koruyucu atmosferdir. Bu parametreler, difüzyon kaynağının kalitesini etkilemektedir [2].

Difüzyon kaynağı ile, benzer metalleri veya farklı metalleri bir katı hal kaynağı formunda birleştirme imkânı vardır. Birleştirilecek metal yüzeylerinin düzgünlüğü, oksitlenme veya kimyasallarla etkileşimi, yağ, pislik gibi istenmeyen katı maddelerin barındırılması veya yüzeye absorbe olmuş olan gaz veya nem durumu birleşmeyi olumsuz yönde etkileyecektir. Olumsuz etkiyi bertaraf etmek için kaynak edilecek metale uygun, yüzey hazırlama işlemleri, büyük bir dikkatle uygulanmalıdır.

Difüzyon kaynağında işlemin düşük sıcaklıklarda yapılması, ön ve son tavlama ihtiyacı duyulması, birleştirilecek parçalarda deformasyonun az olması ve çok değişik malzeme çiftlerinin birleştirilebilmesi, bir kere de karmaşık şekilli parçaların birleştirilebilmesi, bu yöntemin avantajlarıdır. İşlemin yavaş oluşu, büyük parçalara uygulama zorluğu ve tahribatsız kontrol imkânının sınırlı oluşu, dezavantajlarını teşkil eder [2].

Difüzyon kaynak işlemleri, daha önce tasarlanıp imal edilen, basınç, sıcaklık ve koruyucu atmosfer ortamı hazırlanmış olan difüzyon kaynak cihazında yapılmıştır [1]. Elde edilen kaynaklı birleştirmelere mikro sertlik, optik mikroskop ve elektron mikroskopunda (SEM) incelemesi, EDS analizleri yapılmıştır. Kaynak şartları sabit tutularak kaynak sonrası, difüzyon bölgesinde oluşan intermetalik fazlar incelenmiştir.

## 1. LİTERATÜR TARAMASI

Difüzyon kaynağı eski Mısırlılar zamanından beri uygulanan bir sanat / bilim dalıdır [3]. Louvre Müzesi'nde Babil uygarlığına ait gümüş bir kupadaki ek yerleri, M.Ö. 2300 yıllarında katı hal kaynak yönteminin bilindiğini göstermiştir [4]. Yaklaşık M.Ö. 1500 tarihli kıymetli taşlı kutular da bu kaynak yönteminin uygulandığını göstermiştir [3]. Orta bronz çağda M.Ö. 1400-1000 'de İngiliz odalarında bulunan altın ziynet eşyaları ve Dublin 'de İrlanda Milli Müzesinde bulunan geç bronz çağa ait 4 altın kutudaki birleştirmeler katı hal kaynaklarının bu devirlerde de kullanıldığını doğrulamaktadır. Dünyanın 7 harikasından biri sayılan, M.Ö. 280 yıllarında Rodos'ta yapılmış Apollon heykeli de aynı yöntemle eklenerek yapılmıştır [4]. Keskinliği ile ünlü Damaskus (Şam) ve Japon kılıçlarının sert ve yumuşak çeliklerin lamine edilmesiyle üretildiğini 1820 'de M. Faraday, 1956 'da Coughlan ve 1962 'de Bain yaptıkları deneysel çalışmalarla kanıtlamışlardır [4,5]. Difüzyon kaynağının, eski zamanlarda yaygın olarak kullanılmış olması etkili ve basit bir yöntem olduğunun göstermektedir [6].

Yaklaşık 1966 yılında difüzyon kaynağının özellikle klasik tekniklerle birleştirilmesi zor olan malzeme ya da malzeme çiftlerinde uygun olduğu kabul edildi. Ama difüzyon kaynağı geniş bir kullanım alanı olan klasik yöntemlerin ne rakibi ne de büyük skalalı montajların birleşimine uygun olarak görüldü [7]. Geçen 25 – 30 yıldan beri ise difüzyon kaynağı ve tesisatı üzerinde yapılan çalışmalar kaynak endüstrisinde gittikçe artış göstermiş ve ilgi hızla büyümüştür.

Difüzyon kaynağı konusunda ilk çalışmalardan birisi 1963 yılında R.L. Coble tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada polikristalin malzemelerde kafes ve sınır difüzyonu modelleri esas alınarak kıyaslamalar yapılmış, sınır difüzyon modellerinde kontrollü sürünme olayı için bir formül geliştirilmiştir. Formüldeki

sürünme hızının, ortalama tane boyutu, sınır genişliği, gerilmeler, boşluklar ve difüzyon katsayısının bir fonksiyonu olduğu belirtilmiştir [8].

Difüzyon kaynağının önemli parametrelerini inceleyen ilk çalışmalardan birisi de B.S. Kasatkin ve çalışma arkadaşları tarafından Paton Institute of Electric Welding 'de (1966) yapılmıştır. Çalışmada kaynak bölgesindeki plastik deformasyonun iki tipinin var olduğu, birincisinin taneler arası kayma ile birlikte poligonizasyon ve alt tanelerin oluşumu, ikincisi ise tane sınırları boyunca kayma ve göç olayını kapsadığını, plastik deformasyonun rekristalizasyonla birlikte oluştuğunu, buna bağlı olarak rekristalizasyon hızının kaynaklı birleştirmede tanelerin boyutunu belirlediğini incelemiştir. Yüksek sıcaklıkta deformasyonun ve rekristalizasyonun hızının gelişimini, sıcaklığa, o sıcaklıkta durma süresine, deformasyonun büyüklüğüne, metalin kimyasal kompozisyonuna ve malzemenin saflığına bağlı olduğunu vurgulamışlardır [9].

N.F. Kazakov (1967), non-metal ve metallerin vakum altında difüzyon kaynağını incelemiş, ergime kaynağı ve lehimleme ile non-metal ve metaller arasında yapılamayan kaynağın vakum altında difüzyonla mümkün olduğunu görmüştür. Sadece düzgün yüzeyler değil karışık yüzeylere sahip parçalarda da difüzyon kaynağının uygulanabilirliğini vurgulamıştır [10].

E.G. Signes (1968), düşük karbonlu bir çeliğin havada difüzyonla kaynağını incelemiş, sonuçta kaynak yerinin çekme ve çentik özelliklerinin çeliğinkine eşit ya da daha üstün olduğunu göstermiştir. Ancak eğme mukavemetinde yetersiz bir kaynak bağlantısıyla karşılaşmış, bunun içinde 1650 °F 'de bir saatlik normalizasyon ile istenen özelliklere ulaşılmıştır [11].

N.F. Kazakov ve ç.a. (1972) ise, alüminyum bakır alaşımlarına Ni aratabakası kullanarak yaptığı çalışmada alüminyum baz metaline eşit mukavemette birleştirme mukavemeti elde etmişlerdir. Gevrek intermetaliklerin oluşumunu önlemek için nikel, çinko, gümüş kullanılabileceğini, yalnızca vakum altında iyi bir difüzyon kaynağının elde edilebileceğini ileri sürmüşlerdir [12].

A.V. Abramtsev ve ç.a. (1972), yüzey hazırlamanın önemi üzerine yaptıkları çalışmalarda kaynak yüzeylerinin kaplanarak bir ara film tabakasıyla yapılan difüzyon

işleminde, difüzyonun tane sınırlarında geliştiği, kaynaklı birleşmenin oluşumuna deformasyonun bir sonucu olarak gelişen rekristalize olmuş tane bantlarının eşlik ettiği, rekristalize tanelerinin varlığının kaynaklı birleşmenin mukavemetini düşürmediği, yüzey iyileştikçe arttığını bulmuşlardır [13].

S. Elliot ve ç.a. (1980), yumuşak çelikte difüzyonla bağlantılı ara yüzeylerdeki boşlukların şekil olarak kanal ya da yağ delikleri formunda olduğu ve bu boşlukların büyüklüğünün de % 20 'ye ulaştığında bağlantının mekanik özelliklerini azalttığı, dairesel çentik etkisi gösterdiği sonucunu çıkarmışlardır [14].

DR Spriggs ve M.C. Muth (1982), su soğutmalı gaz türbinlerinde üç farklı malzemeyi (nikel, bakır ve azotla sertleştirilmiş paslanmaz çelik) HIP difüzyon kaynağı yöntemi ile mukavemeti yüksek bağlantı sağlandığını, nikel plakanın çekme mukavemetinin ve sünekliğinin arttığını göstermişlerdir [15].

Calderon ve ç.a. (1985), 316 tipi paslanmaz çeliği, saf ve alaşımli alüminyumla difüzyon kaynağı yapıp, yaşlandırma sıcaklığı ve zamanının mekanik özellikler üzerindeki etkisini incelemişlerdir [16].

V.V. Peshkov ve S.I. Gusev (1985), titanyumlu difüzyonla bağlantılarda depolanmış deformasyonu azaltmak için bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada, bağlantının yüksek reaktif özelliğe sahip yüzeyler arasındaki fiziksel teması geliştirerek yapılması gerektiğini ve bunu da ya düşük bağlantı basıncı tatbik edilerek ya da sıcaklık 950°C'ye ulaştıktan sonra basınç tatbik edilerek sağlandığını belirtmişlerdir [17]. Klaphaak (1987), yüzey pürüzlüğünün matematiki modellenmesini yapmış ve işleme izlerinin periyodik ve tekrarlı bir sinüs dalgası şeklinde olduğunu göstermiştir [18].

G.R. Gamat (1988), bir nükleer reaktörde kullanılan parçada paslanmaz çeliğin nikel ile difüzyon kaynağı ile birleşmesi sonucu kaynak mukavemetinin fevkalade iyi olduğunu belirtmiştir. Ayrıca sağlanan optimum şartları belirten özel bir standart hazırlamıştır [19].

Calvo ve ç.a. (1988), bakır ile demirin difüzyon kaynağında difüzyon bölgesi oluşumunun bakırdaki oksitten fazla etkilenmediğini ileri sürmektedir. Oksijenin demire

olan difüzyonunun daha yüksek olması sebebiyle, bilhassa düşük sıcaklıklarda, demirin bakırdaki çözünürlüğünün azalması ile demir oksit oluşumu artmaktadır diye bahseder [20]. Yine ayrı bir çalışmasında Calvo ve ç.a. (1988), Al ile Cu'ı difüzyon kaynağıyla 520°C'lik sabit sıcaklık 15 dakikalık süre ve 0,25 ila 1,60 Mpa'lık basınçlarla birleştirerek difüzyon kaynağı üzerinde çalışmış, katı halde birbiri içinde tamamen çözülmeyen bu metalleri, bilhassa, metallere arası bileşiklerin ve ara fazların oluşması açısından inceleyerek, en büyük problemin intermetalik bileşik ve ara fazlar olduğunu tesbit etmişlerdir [21].

Salehi (1990), günümüze kadar difüzyon kaynağında çeşitli malzemeler için uygulanan basınç değerlerinin 41 Kpa ile 27 Mpa arasında olduğunu söylemekte ise de, Walsh (1986) 32 Mpa ve Meada (1988) 50 Mpa'lık kaynak basınçları kullanmışlardır.

D.V. Dunford ve P.G. Partridge (1992), Al-Li alaşımlarında süperplastik şekil verme ile difüzyonla bağlantının mümkün olduğunu çalışmaları sonucunda tespit etmişlerdir. Ayrıca Al-Li alaşımlarının Al-Cu alaşımlarından daha mukavemetli olduğunu vurgulamışlardır [22].

A. Urena ve ç.a. (1992), düşük alaşımlı bir çeliği alüminaya araya ince bir bakır folye koyarak difüzyon bağlantısı yapmışlardır. Bu bağlantıda mukavemetin, büyük ölçüde alumina-bakır ara yüzeyinde, hem bakır folyedeki hem de bağlantı çevresindeki oksijen konsantrasyonuna bağlı olduğunu vurgulamışlardır. Ayrıca en yüksek eğme mukavemeti, bakırla alumina arasında oluşan  $CuAlO_2$ , spinel reaksiyon katmanının oluşumu ile alakalı olduğu belirtilmiştir [23].

Sharp (1993), sertliği birbirinden farklı olan iki malzeme statik basmaya maruz kaldıklarında, birleşen alanı hesaplarken, daha yumuşak olan malzemenin akma mukavemetinin dikkate alınması gerektiğini ifade etmiştir [24].

Sunwoo (1994), alüminyum alaşımlarının difüzyon kaynağında vakum altında bile alüminyum oksiti çözümlenmenin mümkün olmadığını belirtmiştir. Yalnız, alüminyum lityum alaşımlarının difüzyon kaynağında oksit tabakası yerine Al-Li spinalleri oluştuğu tespit etmiştir [25].

Urena ve ç.a. (1996), yaptıkları çalışmada 2014 Al alaşımı içerisine %13 SiCp takviye elemanı katarak döküm yöntemi ile MMK malzeme üretmişlerdir. Bu malzemeye, 3 mikron kalınlığında Al – Si aratabaka levha kullanılarak 480 – 520°C’de  $10^{-3}$  Pa vakumda, 3-6 MPa yük altında 60 – 120 dakika sürelerde difüzyon kaynak işlemi yapmışlardır. Ayrıca saf gümüş aratabaka kullanarak iyi bir birleştirme elde etmişlerdir. Bu kaynaklı birleştirmelerin kesme dayanımları Al – Li aratabakalı birleştirmede 50 MPa ve gümüş aratabaka kullanılarak elde edilen birleştirmenin de kesme dayanımını 36 MPa olarak ölçmüşlerdir [26].

Zhang ve ç.a. (1999), vakum altında difüzyonla parçacık takviyeli Al – MMK birleştirilmesinde zımparalama ve temizlemede aşırı dikkat gerektirdiğini, difüzyon için numunelerin fırına çok kısa bir zamanda yerleştirilmesi gerektiğini belirtmişlerdir. 2024Al – SiC (%5,10,15,20,25) ve 6061Al – SiC (%10,20) alaşımlarını birleştirmek için 540°C sıcaklık, 0,08 – 0,09 MPa yük,  $5 \times 10^{-4}$  Pa vakum ve 15 dakika süre kullanmışlardır. Çalışması neticesinde, SiCp hacminin artması ile kaynaklı birleştirmenin dayanımının azaldığını tespit etmişlerdir [27].

Liming, L. ve ç.a. (2001) Difüzyon kaynağında kaynak sıcaklığının, SiC parçacıklar ilave ederek toz metalurjisi yöntemi ile üretilen matrisin sıvı faz sıcaklığına ulaşması durumunda, kaynaklı birleşmenin dayanımının daha fazla artmadığını, aksine deformasyonun arttığını tespit etmişlerdir [28].

O.Yılmaz (1999), Östenitik paslanmaz çelik (AISI 304) ve elektrolitik bakırın birleştirilmesinde kaynak parametrelerinin birleşmeye etkisi incelenmiş ve en uygun difüzyon kaynağının 800°C sıcaklık, 30 dak., kaynak süresi ve 1,2 Mpa basınçta gerçekleştiğini tespit etmiştir. Aynı çalışmasında lehimli birleştirme ile bir mukayese yapabilmek amacıyla, difüzyon kaynağı ve sert lehim ile birleştirilen numuneler arasındaki elektriksel iletkenlik farkları ve intermetalik fazların iletkenlik üzerindeki etkisini incelemiştir. Sonuç olarak, difüzyon kaynaklı metal çiftin lehimli çiftin yerine kullanılabileceğini tesbit etmiştir [29]

E.Mutlu (2005), AISI 1010 çelik ile ticari saflıktaki bakır çiftinin birleştirilmesinde, allotropik dönüşüm sıcaklığının difüzyon miktarına etkisini incelemiştir. AISI 1010 için dönüşüm sıcaklığı olan 845°C’de çelik tarafından bakır

tarafına difüze olan karbon miktarının 770°C’de difüze olan karbon miktarından daha az olduğunu gözlemlemiştir. 845°C’de daha az karbon difüzyonunun olmasının nedenini, enerjinin faz dönüşümüne harcanması olarak belirtmiştir [30].

B.Kurt ve İ Somunkıran (2006), AISI 304 tipi paslanmaz çelik ve orta karbonlu çelik difüzyon kaynağı birleştirilmiş ve birleşme bölgesinde mikro yapıları ve mekanik dayanımı incelemiştir. Sonuç olarak 900° C ve 475 Mpa kesme dayanımı elde etmeyi başarmışlardır. Bu sıcaklıkta meydana gelen birleşme ara bölgesinde herhangi bir mikro çatlak ve mikro boşluk olmadığını tespit etmişlerdir [31].

M.Taşkın ve ç.a. (2006), Toz metalürjisi ile üretilmiş Ni-Ti kompozitinin difüzyon kaynak yöntemi ile birleştirilmesine çalışmışlardır. 850-875°C’de yapılan kaynaklarda süre artışına paralel olarak birleşme kalitesinin arttığını gözlemlemiştir. Fakat 925°C’de yapılan kaynaklarda ise tane irileşmesi gözlemlemiştir [32].

U. Çalığülü ve ç.a. (2006), Sıcak presleme yöntemiyle üretilen, AlMgSi-SiCp takviyeli kompozitlerin, difüzyon kaynağıyla birleştirilmesi sonucunda kaynak bölgesinde homojen SiCp dağılımı ve yüksek yoğunluk gözlemlemişler ve tüm numunelerde SiCp oranındaki artışa paralel olarak, kaynağın mekanik özelliklerinin düştüğünü tespit etmişlerdir [33].

M.Ghosh ve S.Chatterjee (2004), Saf titanyum ve 304 paslanmaz çeliğin katı durumdaki difüzyon kaynağı tek eksenli yükleme (vakum) altında 950°C’de ve 30-120 dakika arasında gerçekleştirildi. Kaynak bölgesinde  $\sigma$ ,  $\lambda$ , x, FeTi,  $\beta$ -Ti ve Fe<sub>2</sub>Ti<sub>4</sub>O intermetalik fazlar oluşmuştur. Bu fazlar gevrektiler ve yüzey alanının zayıflamasına neden olur. Daha iyi intermetalik, yaklaşık %71 max. Bağ kuvvetine sahip titanyumun, 30 dakikalık ikili işlemlerle difüzyon uygulamasında kullanılmasıyla elde edilir. İşlem süresindeki artış intermetaliklerin ve boşluk oluşumlarının büyümesine ve ilerlemesine neden olduğunu belirtmişlerdir [34].

H.Miyamoto ve ç.a (2004), difüzyon kaynağı ile üretilen CuZnSn alaşım difüzyon çiftlerinin ( $\alpha/\beta$ ), ( $\beta/\gamma$ ), ( $\gamma/\alpha$ ) arafaz sınırlarının kayma davranışlarını incelemiştir. Üç tip arafaz sınırındaki kayma, yumuşak kayma olarak

isimlendirilmişlerdir. Yumuşak kayma kayma oranları birbirinden oldukça farklıdır. Benzer olmayan iki faz arasındaki kayma oranına göre daha düşüktür. Farklı sertlikler arasındaki arafaz sınırındaki kaymalar, arafaz sınırlarına bitişik daha yumuşak yüzeylerde yerel plastik deformasyonlara neden olur. Kaymanın ara yüzey sınırlarına bitişik daha yumuşak fazlarda ince katmanlarda gerçekleştiğini belirtmişlerdir [35].

S.D.Chen ve ç.a. (2005), Cu-Ag metallerinin difüzyon kaynağını moleküler dinamik simülasyonlar yapmıştır. Simülasyonlar sonuçlarında, kaynak basıncının çok önemi olduğu, basıncında 100 MPa'dan küçük olduğu zaman, ara yüzey alanında yayılmanın az olduğunu görmüşlerdir. Ara yüzey alanının kalınlığı basınca bağlı olarak değişir. Basınç ne kadar yüksekse, kalınlık o kadar fazla olduğunu bildirmişlerdir [36].

M.Ghosh ve ç.a. (2004), Saf titanyum ve 304 paslanmaz çelik arasındaki difüzyon kaynağı 850°C ve 30-150 dakika arasında, tek eksenli yükleme (vakum) altında gerçekleştirildi. Difüzyon bölgesi incelendiğinde  $\sigma$ ,  $\alpha$ -Fe+x,  $x+\lambda$ ,  $\lambda$  +FeTi+  $\beta$ -Ti ve  $\beta$ -Ti intermetalik fazların oluştuğu görülmüştür. Elektron Probe Mikroanaliz cihazıyla, difüzyon bölgesindeki intermetalik formların konsantrasyon aralıklarının profilleri çıkarılmıştır. 90 dakikalık işlem zamanında intermetalik fazların genişliği maksimuma ulaşır, sonrasında düşer ve 150 dakikalık işlem zamanında tekrar yükselir. İntermetalikler hacimce büyük olmalarına rağmen %76'lık max. Bağ kuvvetiyle, 90 dakikalık uygulamada ara yüzeyde daha iyi bir birleşme yüzeyi elde edildiğini belirtmişlerdir [37].

## 2. DİFÜZYON TEORİSİ

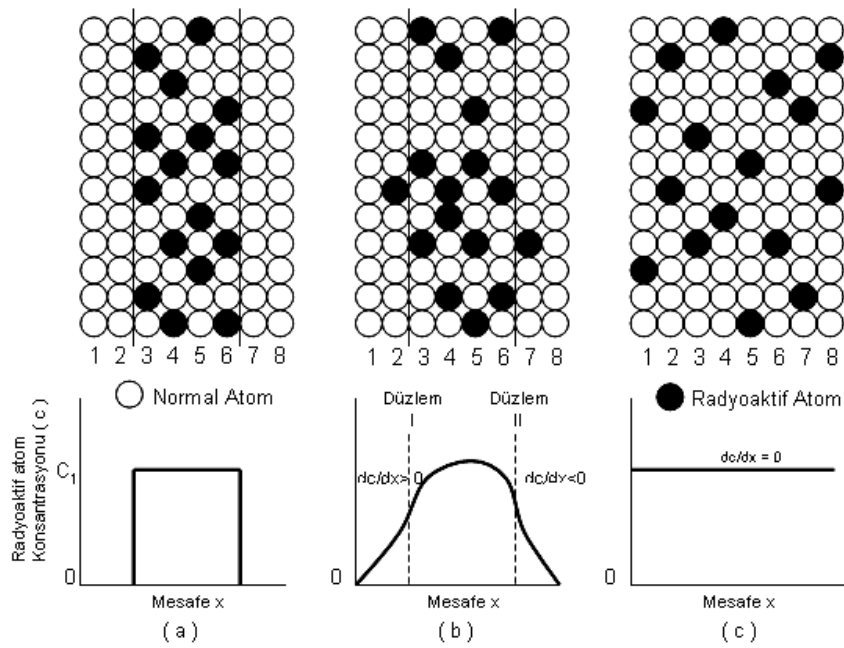
### 2.1 Giriş

Atomların, moleküllerin ve iyonların sıcaklığa bağlı olarak yer değiştirmeleri sonucu meydana gelen kütle akışı difüzyon ( yayınma ) olarak adlandırılır [38,39]. Difüzyon, moleküllerin rast gele hareketinin meydana getirdiği, kendiliğinden oluşan yayılma, dağılma ya da madde hareketidir. Atomlar yüksek konsantrasyonda buldukları bir bölgeden konsantrasyonlarının daha düşük olduğu bir bölgeye göç ederler [40]. Homojen malzemelerde tümüyle aynı olan parçacıkların yer değiştirme olayları düzensizdir. Öz difüzyon denen bu olayda atomların hareketi radyoaktif izotoplar ile saptanabilir. Homojen olmayan malzemelerdeki difüzyon olayları ( hetero difüzyon ) ise teknik açıdan daha önemlidir. Her iki difüzyonda da atomların kafes içindeki göçlerini sağlayacak bir enerji birikimi gereklidir [41]. Gereken enerji atomdan atoma farklılık gösterir.

En hızlı difüzyon gazlarda meydana gelir. Difüzyon, sıvı ve katılarda daha yavaş olur. Difüzyon katılarda, atomların titreşimleri ve etraflarındaki boş noktalara sıçraması ile meydana gelir. Elektrik ve magnetik atomlar gibi değişik tipte kuvvetlerin varlığı molekül hareketlerini etkileyebilir. Difüzyon, sıcaklıkla doğru orantılı olarak artar. Sıcaklık arttıkça moleküllerin hareket alanı artar ve difüzyon için gerekli olan moleküllerin yer değişim hızı artar.

Şekil 2.1, merkezde üniform C, radyoaktif atomlar içeren bir merkez bölgesiyle, sadece normal atomlar içeren iki komşu bölge arasındaki öz difüzyonun bir şemasıdır [38,42]. Her atom Şekil 2.1 a 'da gösterildiği gibi kendi pozisyonundan komşu pozisyonların birine atlamak eğiliminde olacaktır. Şekil 2.1 b' de gösterilen atomik dağılım, atomların atlamasından sonra oluşur. Radyoaktif atomlara gelince, baştaki her sütunda dörder tane mevcuttur ve her atom yukarı,

aşağı, sağa ve sola atlamak olanağına sahiptir. Rast gele atlama sütun 4 ve 5 'deki radyoaktif atom sayısını değiştirmez. Bununla birlikte, bir radyoaktif atom sütun 3 'ü terk edip sütun 2 'ye gidecek ve benzer şekilde bir atom sütun 6 'yı terk edip sütun 7 'ye girecektir. Daha ileri atlamalarla sonunda radyoaktif atomlar homojen dağılımı elde edinceye kadar (Şekil 2.1 c) yayılmaya devam eder. Bu aşamanın sonunda, atomlar hareketlerini sürdürseler de konsantrasyon eğrisi değişmeden kalır ve bundan böyle konsantrasyon eğrisinde bir değişme olarak difüzyonu gözlemek artık mümkün olmaz.



Şekil 2.1 Metallerde öz difüzyon süreci: Atomik dağılıma (üstte). Difüzyon süreci içinde konsantrasyon eğrileri (altta) [38,42].

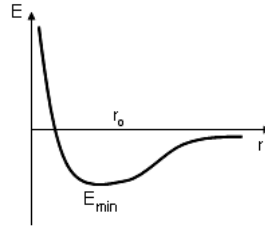
## 2.2 Enerji Konumları

İki yüzeyin birleşmesi için atomların kuvvetli bir bağ oluşumuna yetecek kadar birbirine yaklaşması gereklidir. Atomların etkileşimi için gerekli minimum enerji,

$$E = U - TS$$

[2.1]

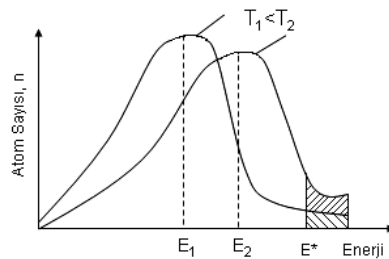
ile verilmektedir [43]. Burada E sabit bir hacim için serbest enerji, U sistemin iç enerjisi, T ara yüzeyin sıcaklığı ve s entropisidir. Kararlı bir sistemi oluşturmak üzere atomlar  $r_0$  mesafesi kadar yakınlaştığında mesafedeki en ufak bir artma ya da azalma enerjii arttıracaktır (Şekil 2.2). Pratikte bu olayın gerçekleşmesi ancak özel şartlardaki örneğin iyi hazırlanmış ve yüksek vakumda ( $1.33 \times 10^{-6}$  Pa) tutulmuş yüzeyler için geçerlidir.



Şekil 2.2 Atom mesafesinin bir fonksiyonu olarak potansiyel enerji değişim şeması.

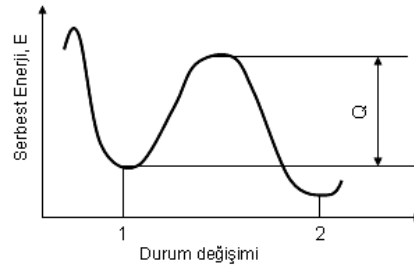
Bir kütle içinde bulunan atomlar veya moleküller herhangi bir anda aynı enerjiye sahip olmayacaklardır. Şekil 2.3 'de görülen enerji dağılımı eğrisine göre bir  $T_1$  sıcaklığında bazı atomların enerjisi sıfıra yakınken bazılarınınınki ise çok yüksek olabilir ve çoğununki ortalama  $E_1$  enerjisi civarındadır. Sıcaklık arttıkça ortalama enerji de artar. Uygulamada belirli bir  $E^*$  enerjisinden fazla enerjiye sahip atomların sayısı önemlidir. Bu da şekildeki gibi eğrinin altında kalan taralı alanla gösterilir. Sıcaklık arttıkça yüksek enerjiye sahip atomların sayısı da artar.

Gazlar için verilen bu enerji dağılımı katılar için de geçerli sayılır. Katı yapı içinde yeterli düzeyde yüksek enerjiye sahip atomlar bir denge konumundan diğerine atlayarak atomsal yayınımlı oluşturur.



Şekil 2.3 Atom enerjilerinin şematik dağılımı.

Atomların yer değiştirmesi kademeli olarak ve sistemin serbest enerjisinin azalması koşuluyla devam edebilir (şekil 2.4). Böylece kararlı (stabil) denge durumuna ulaşıldığında serbest enerji minimumuna ulaşır (2. durum). Yüksek enerjili kademeler ise (1. durum) yarı kararlı (metastabil) denge olarak adlandırılır. 1'den 2'ye geçiş için sisteme önce Q enerjisinin verilmesi gerekir, ancak o zaman serbest enerjide gerekli azalmayla 2 durumuna ulaşılabilir. Yani yayınan bir atomun bir enerji engelinin aşması için atomların aktive edilmesi gerekmektedir ve bu Q değerine aktivasyon enerjisi denir.



şekil 2.4 Serbest enerjinin durum değişimine bağlılığı.

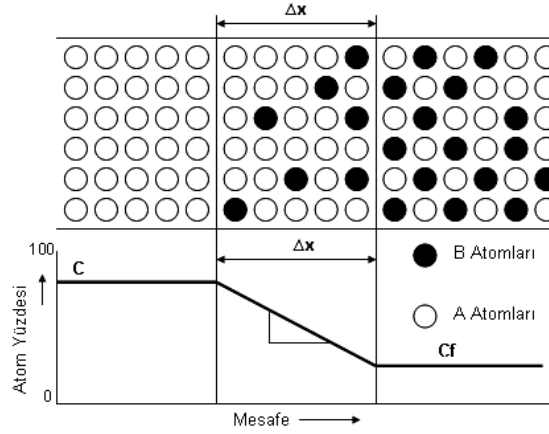
### 2.3 Difüzyon Katsayısı

Difüzyon katsayısı, birim yüzey arasından akan malzeme miktarının, bu yzeeye dikey konsantrasyon gradyanına oranıdır. Bu katsayı bilindiğinde, difüze olan bir sistem için konsantrasyonlar ve geçiş oranları matematik analizle saptanabilir.

Difüzyonun en basit hali bir cismin, örneğin gazın, sükunette olan bir sistem üzerinde hiçbir dış kuvvet olmadan homojen katı bir ortamın içine yayınması (difüze olması)'dır. Bu, deneysel çalışmaların sonucu olarak aşağıda verildiği gibidir.

Difüze olan cismin konsantrasyonunun her yerde aynı olması halinde, hiçbir difüzyon oluşmaz. Difüze olan cismin konsantrasyonunun farklı noktalarda değişik olması halinde daha öncede açıklandığı gibi difüzyon, yüksek konsantrasyonlu noktadan düşük konsantrasyonluya doğru olacak ve konsantrasyon her yerde aynı olana kadar devam edecektir. Bunun sonucu olarak herhangi bir nokta ve yönde, yayılan cismin akış derecesi, bu nokta ve yöndeki konsantrasyon gradyanına bağlı olacaktır. Bu nedenle difüzyon katsayısı, herhangi bir küçük kesit arasından birim alan başına akan toplam kütlenin, bu kesite dikey yönde mesafeyle konsantrasyon

azalma derecesinin oranı olarak tanımlanabilir. Şekil 2.5 'de konsantrasyon değişimi şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.5 Konsantrasyon değişiminin şematik gösterimi.

X eksenine paralel bir sabit ( aynı ölçüde kalan ) difüzyon durumunda,  $\rho$  difüze olan cismin yoğunluğu,  $\rho$ 'da birim sürede x eksenine dikey bir düzlemdeki birim alan içinde akan kütle ise, konsantrasyon gradyanı  $-(d\rho / dx)$  ve  $q$ 'nun konsantrasyon gradyanına oranı difüzyon katsayısı D,

$$q = -D(d\rho / dx) \quad [2.2]$$

olur. Ayrıca x ve x+dx mesafeleri arasında bir kütle içindeki cismin miktarının artış derecesi, iki yüzün iç ve dışında akış derecelerinin farkına eşit olup hidrodinamikte olduğu gibi,

$$d\rho / dt = -dq / dx \quad [2.3]$$

yazılır. Bunun sonucu olarak da difüzyon denklemi, aşağıda verildiği şekilde olur.

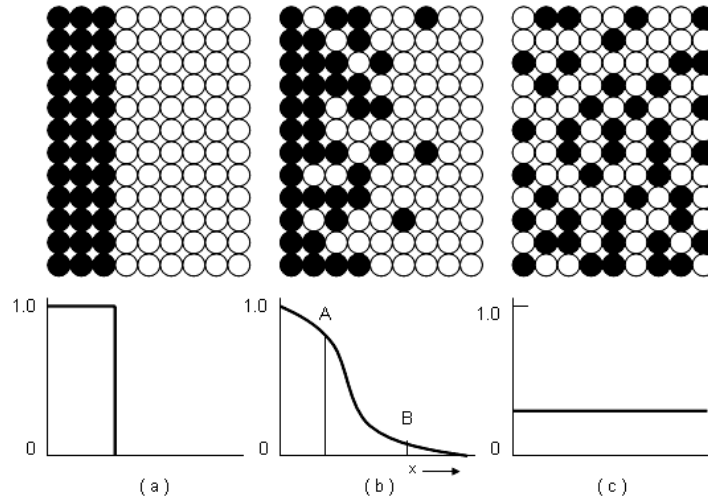
Difüzyon katsayısı D 'nin değeri  $10^5 \text{ cm}^2 / \text{s}$  'den fazla  $10^{11} \text{ cm}^2 / \text{s}$  'den azına kadar geniş sınırlar içinde değişir. Bu farklılığa bağlı olarak difüzyonun her ölçümü kendine özgü sorun ve özellikler gösterip kendi özel tekniklerini gerektirir. Örneğin, sıvılar içinde difüzyonun ölçülmesinde, konveksiyon çok rahatsızlık verici bir olayken katılarda başlıca sorun, uygun süre periyotları içinde etkinin çok ufak oluşudur. Konsantrasyon değişimlerinin ölçüldüğü analitik yöntemler de çok sayıda

mevcuttur. Gazlar ya da eriyikler içinde konsantrasyon, kimyasal analiz, refraktometre, polarimetre veya kütle spektrometresi yardımıyla bulunabilir. İnce metal dilimlerinde konsantrasyon X-ışın difraksiyonu ile spektrografik olarak, radyoaktif indikatörler yardımıyla ya da kimyasal analizle saptanabilir [42].

## 2.4 Kendi Kendine Difüzyon

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 difüzyonu düşünürsek; üç boyutlu kristal yapıdaki çevre atomunun her biri mevcut nikel içerisinde, mevcut boşluklara hareket etme olasılığı eşittir. Nikel'deki bir boşluğun komşu kafes noktasının içerisine hareketi de eşit orandadır.

Normal olarak saf nikel'de geliş 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 (nikel 59) normal nikel'in üzerine difüze olabilir. Bu durum Şekil 2.6'da görülmektedir [44].

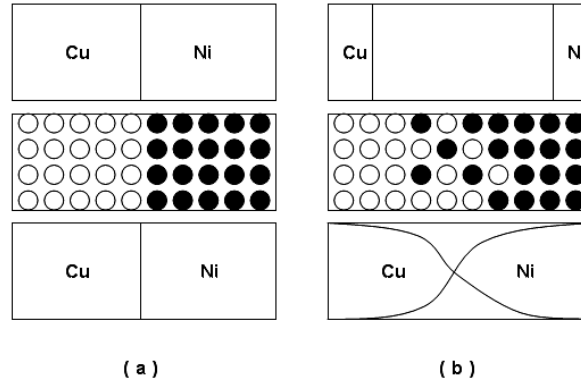


Şekil 2.6 Kendi kendine difüzyonun şematik görünümü. Radyoaktif  $Ni^{63}$  saf  $Ni^{59}$  yüzeyine difüze olmaktadır. a-) zaman  $t=t_0$ , b-) Difüzyon eğimi  $t_0 < t < t_\infty$ , c-) Homojenleşmiş  $t=t_\infty$

## 2.5 Alaşımlarda Difüzyon

Metal alaşımlarında ve seramik malzemelerde farklı atomların birbirine difüzyonu gerçekleşmektedir. Alaşımlarda meydana gelen difüzyon bakır ve nikel çiftinde şematik olarak gösterilmiştir. Şekil 2.7 a 'da bakır-nikel difüzyon çifti yüksek sıcaklık uygulanmadan durumu ve Şekil 2.7 b 'de yine bakır-nikel çiftinin yüksek sıcaklık uygulandıktan sonraki difüzyon durumu görülmektedir [45]. Bu difüzyon çiftinin yüksek sıcaklıklarda (her iki metalin ergime sıcaklığının altında) ısıtılıp, oda sıcaklığında soğutulduğunda Şekil 2.7'de görüldüğü gibi bir konsantrasyon durumu ortaya çıkar. Burada görüldüğü gibi bakır atomları nikel içerisine nikel atomları da bakır içerisine difüze olmuş olarak görülmektedir [45].

Sıcaklık arttığı zaman atomun kafes içerisinde küçük titreşimleri de artar. Elbette bu hem sıcaklığa hem de birleşme bölgesindeki atomların ne kadar sıkı ve yakın olduğuna bağlıdır.



Şekil 2.7 a-) Bakır nikel çifti sıcaklık uygulanmadan önce, b-) bakır nikel çifti sıcaklık uygulandıktan sonra Cu-Ni konsantrasyonu.

## 2.6 Difüzyon Mekanizmaları

Atomların hareketini ele alan pek çok mekanizma vardır. Genel olarak denge konumundaki atomların, iyonların ve diğer parçacıkların sıcaklığının artmasına bağlı olarak yer değiştirmeleri istatistiksel bir olay olup, yani atomların bir yerden başka bir yere geçmeleri katılarda difüzyon olayıdır [46]. Difüzyon olayı özellikle katı içerisinde kütle taşınmasını sağlayacak ölçekteki hareketleri ifade eder. Homojen malzemelerde, yer değiştirme olayları istatistiksel olarak düzensizdir ve bu olay

esnasında kütle taşınımı görülmez. Homojen olmayan malzemelerdeki difüzyon ise teknik açıdan daha önemlidir. Katı malzemelerde difüzyonu gerçekleştiren mekanizmalar vardır [44,47,48,49].

### 2.6.1 Yeralan Difüzyonu Mekanizması

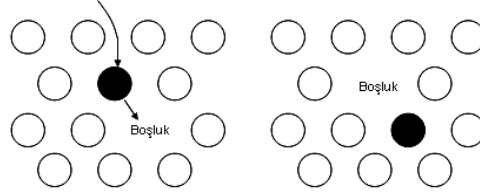
Bu difüzyon mekanizmasında kafes içerisinde mevcut bir boşluğun olması gerekir. Bu yüzden yeralan difüzyonunun oluşması arayer difüzyonuna göre daha zordur. Arayer difüzyonunda yeterli enerjiye sahip olduğunda atom difüze olabilir. Yeralan difüzyonunda ise, atom, ancak komşu kafes noktalarından birinin boş olması halinde sıçrayabilir. 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 [48].

Yeralan atomları ekseriyetle bir boşluk mekanizması ile difüze olurken, daha küçük çaptaki arayer atomları, daha büyük çaplı atomlar arasında zorlanarak ilerlerler. Normal olarak, bir arayer atomunun hareketi, komşular tarafından sınırlandırılmıştır ve atom bir başka kafes noktasına hareket edemez. Bununla birlikte komşu nokta boş ise Şekil 2.8’ de 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. Bir atomun katı içerisinde göç edebilme oranı boşluk konsantrasyonuna bağlıdır. Boşluğa sıçrama ihtimali ve boşluk konsantrasyonu sıcaklıkla yakından ilişkilidir. [50,51].

Yeralan difüzyonunun olabilmesi için;

- Atomal çapları farkının % 15’ten küçük olması (  $r_A - r_B \leq \% 15$  )
- Malzemelerin aynı kristal kafes yapısına sahip olması,
- Elektronegativite farkının küçük olması,
- Valans elektronların eşit olması gerekir.

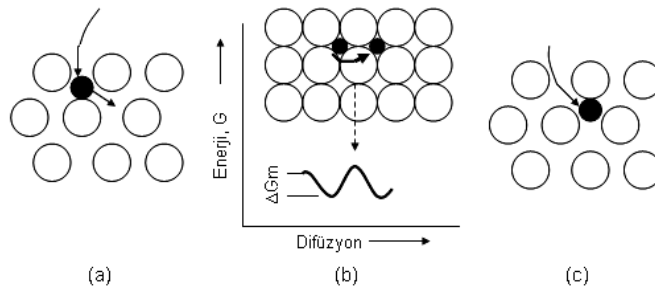
Yeralan difüzyonuna örnek olarak Cu-Ni, Au-ag, Fe-Cr, Ti-Zr v.b. alaşımlar gösterilebilir.



Şekil 2.8 YMK kafes içerisinde atomun boş bir konuma hareketi.

### 2.6.2 Arayer Difüzyonu Mekanizması

Arayer difüzyonu mekanizmasında, kristal yapıda küçük bir arayer atomu varsa, atom bir arayerden diğerine hareket eder. Arayer atomlarının yoğunluğu, genelde oldukça düşüktür [51]. Dolayısıyla mevcut arayer noktalarının az bir kısmını işgal ederler. Yani her bir arayer atomu daima boşluk noktaları ile kuşatılmış olup ısı enerjisinin, deformasyon enerjisi engelini aşmaya izin verdiği oranda başka bir pozisyona atlar. İşte, arayer atomlarının kafes örgüsü içindeki başka bir arayer noktasına transferi şeklinde gerçekleşen difüzyona “arayer difüzyonu” denir. Şekil 2.9’da arayer difüzyonunun oluşumu şematik olarak görülmektedir.



Şekil 2.9 Arayer difüzyonunun oluşumu. Atom, a’da denge pozisyonunda olup, b’de maksimum kafes distorsiyonuna erişmiştir. C’de ise kafesin serbest enerjisindeki değişim görülmektedir [44,50,52].

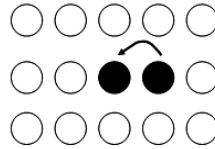
Arayer atomlarının denge pozisyonları en az potansiyel enerjiye sahip oldukları ( a ) pozisyonudur. Bir arayer atomunu komşu bir arayera hareket ettirmek için, komşu kafesin atomları arasından geçmeye zorlaması gerekir. Neticede ( b )

pozisyonunda olduğu gibi bir durum olur ve en yüksek enerji seviyesine ulaşır. Bu olayın gerçekleşmesi için verilen iç, sistemin serbest enerjisindeki değişimi oluşturur ve ( c )'de ki gibi  $\Delta G_m$  kadar arttırır.  $\Delta G$  Gibbs enerjisi olarak bilinir.

Fe, Cr, Ni, Mn, W, Ti gibi geçiş elementleri B, C, H, N, ve F gibi atom yarı çapı kk elementlerle arayer katı ozeltisi oluşturur. Malzemelerde, arayer noktaları kübik kafesin köşeleri arasındaki mesafenin ortasıdır. Bunlar oktahedral noktalar olarak bilinir.

Katının termal enerjisi sebebi ile, bütün atomlar denge durumunda titreşirler ve arda sırada bir arayer atomunun büyük orandaki titreşimi ile ya da matrisin hareketi ile arayer atomlarının hareketinin aynı anda olması bir sıçrama ile sonuçlanır. Arayer difüzyonunun olabilmesi için kk atom çaplarının büyük atom çaplarına oranının 0,4'den daha kk olması gerekir [53].

Arayer difüzyonu olma ihtimali aynı türden atomlar için doğrudan teorik olarak yer değiştirmesi de mümkündür. Ancak enerji nedenlerinden dolayı doğrudan yer değiştirme ihtimali düşüktür. Gerçekte ise dislokasyonlar oldukça fazla olduğundan gerekli de değildir. Şekil 2.10'da bu değişim Şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.10 Doğrudan yer değiştirme [53].

Ancak çapları ana kafesin atomlarından kk olan yabancı atomlar için (karbon, azot, hidrojen v.b.) büyük önem taşır. nemli nokta, bu mekanizmanın ideal yanı tümüyle kusursuz kristallerde daha etkin olabilmesidir [44,50,52].

### 2.6.3 Boşluk Mekanizması

Kristallerin tümünde kafes pozisyonlarının bazıları atomlar tarafından doldurulmamış olabilir. Bu yerlere “boşluk“ adı verilir. Bir atomun bitişik pozisyondaki bir boşluğa sıçrayarak atlamasına boşluk mekanizmasıyla difüzyon denir. Boşlukların yer değiştirmesi atomların hareketinin tersi yöndedir ( Şekil 2.11. (Halka Mekanizması). Atomu hareket ettirmek için gerekli distorsiyon enerjisi küçüktür. Örneğin, bir demir atomunun bitişik bir boşluğa hareket ettirmek için demir kristal kafesine verilecek distorsiyon enerjisi, karbon atomunu aynı kafeste bir ara yerden diğer ara yere hareket ettirmek için gerekli olan enerjiye eşittir. Demir atomlarının karbon atomlarına oranla daha yavaş difüze etmelerinin nedeni yeterli boşluk oluncaya kadar belli bir süre beklemek zorunda olmalarıdır. [38,46].

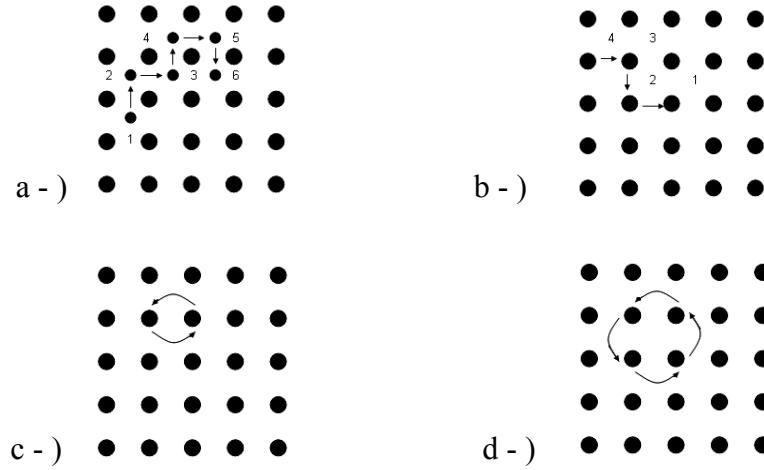
Bu mekanizma y.m.k (yüzey merkezli kübik) metallerde çok önemli bir mekanizma olduğu gibi h.m.k (hacim merkezli kübik) metallerde, iyonik bileşikler ve oksitler gibi hegzagonal kristal kafesli metallerde de başarılı bir yöntem olduğu gösterilmiştir.

### 2.6.4 Karşılıklı Yer Değiştirme Mekanizması

Enerji nedeniyle iki atomun karşılıklı olarak doğrudan yer değiştirme olasılığı düşüktür (Şekil 2.11.c). Metallerde iç yapı kusurları oldukça yüksek olduğundan gerekli de değildir. Çünkü her atom iki atom çapı kadar hareket edebilir. Ayrıca mekanizmanın oluşabilmesi için kafesin bölgesel olarak çarpılması da gereklidir.

### 2.6.5 Halka Mekanizması

1940' larda çarpılma ve Kirkendall etkisinden ötürü halka mekanizmasının çok güç olduğu kanıtlanmıştır. 1950' de Zeger iki atomun karşılıklı yer değiştirmesi yerine üç veya dört atomun dairesel düzende yer değiştirmesi sonucu, çok fazla çarpılma oluşmadan difüzyonun mümkün olabileceğini ileri sürmüştür [38]. Bu sıkı yapıli kafesler için söz konusudur. Bu model Şekil 2.11'de gösterilmiştir.



Şekil 2.11 Kristal kafeste atomların hareket mekanizmaları.

Bakırın öz difüzyonu için gerekli aktivasyon enerjisi çeşitli mekanizmalarda ayrı ayrı teorik olarak hesaplandığında, yukarıda açıklanan 1. tip için 966 kJ/mol, 2. tip için 269 kJ/mol, 3. tip için 1008 kJ/mol, 4. tip için 378 kJ/mol bulunmuştur. [4,41]. Deneysel olarak bulunan aktivasyon enerjisinin 210 kJ/mol olduğu göz önünde bulundurulursa yer alan katı çözeltili şeklindeki saf metal ve alaşımları için 2. tip mekanizmanın (boşluk mekanizmasının) tercih edildiği anlaşılmaktadır. Bu mekanizma sayesinde kafesteki bir atom karşısındaki yere atlayabilmektedir. Hareketin başlayabilmesi için difüze olacak atom, konumlar arasındaki potansiyel engelini ( barrier ) aşmak üzere, ısı olarak aktive edilmelidir.

## 2.7 Difüzyon Çeşitleri

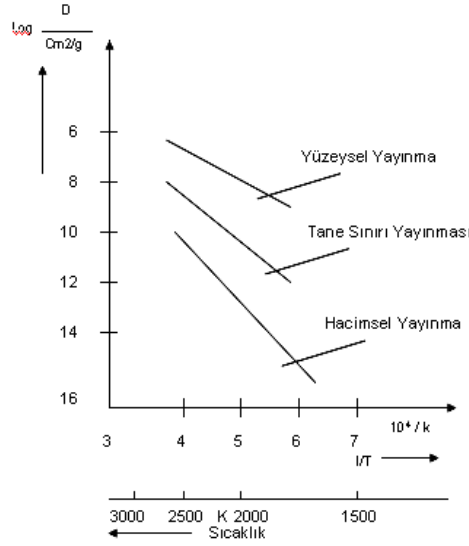
Katılarda difüzyonu, "hacimsel difüzyon" adı verilen kristal kafes içindeki difüzyona ek olarak "tane sınırı difüzyonu" ve "yüzey difüzyonu" olarak üç grupta toplamak mümkündür. Tane sınırları malzemelerin diğer bölgelerine göre atomik seviyede hatalı birer bölge oldukları için bir difüzyon olayı tane sınırları boyunca daha kolay gerçekleşir. Tane sınırı difüzyonu tane içinde olan difüzyona göre milyon kez daha hızlı olur. Tane sınırları boyunca difüzyon için gerekli aktivasyon enerjisi de, hacim difüzyonu için gerekli aktivasyon enerjisinin yarısı kadar olduğu bildirilmektedir [38,42].

Bir metalin yüzeyinde atomlar, kafes içinde belli bir pozisyona daha zayıf bağlı olup yüzey difüzyonu tane sınırları difüzyonundan da daha hızlıdır. Her ne kadar

yüzey ve tane sınırları difüzyonunun hızı hacim difüzyonundan çok daha yüksek ise de, bunların toplam difüzyona katkısı, yüzey ve tane sınır bölgelerinde atom sayısının az olması nedeniyle daha az olur. Yüzey difüzyonu için gerekli aktivasyon enerjisi:

AQ Yüzey Dif. < AQ Tane Sınırı Dif < AQ Hacim Dif. şeklinde yazılabilir.

Şekil 2.12, toryumun wolframda çeşitli difüzyon davranışlarını göstermektedir [4,39]. Hacimsel difüzyon, yüzey difüzyonundan çok daha yavaş olmasına rağmen yayınan madde miktarı çok daha büyüktür. Çünkü yüzey difüzyonunda yayınma kesiti çok küçüktür, yani tanelerin toplam hacmi, tane sınırlarının hacminden çok daha büyüktür.

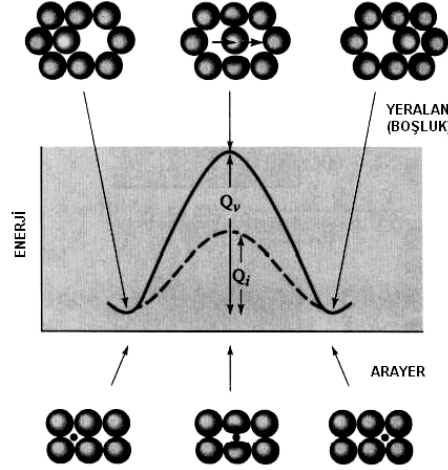


Şekil 2.12 Toryumun Wolfram içinde difüzyonu.

## 2.8 Aktivasyon Enerjisi

Difüze eden bir atom yeni yerine ulaşmak için komşu atomlarını sıkıştırıp geçmek zorundadır. Bunun gerçekleşebilmesi için atomların yeni yerine geçmesini sağlayacak enerjiye ihtiyaç vardır. Bu durum Şekil 2.13 'de yer alan ve ara yer 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 ara yer atomunun, komşu atomları geçmek için sıkıştırması daha az enerji gerektirir. Bunun sonucu olarak ta, ara yer difüzyonu için gerekli olan aktivasyon enerjisi, yer alan difüzyonu için gerekli alandan daha azdır. Düşük bir aktivasyon enerjisi daha kolay bir difüzyon gerçekleştiğini gösterir [47].



Şekil 2.13 Yeralan ve arayer difüzyonu için gerekli olan aktivasyon enerjisi (Q) değişimi [47].

## 2.9 Difüzyon Kanunları

### 2.9.1 I. Fick Kanunu

Homojen olmayan malzemelerdeki difüzyon olayları teknik açıdan daha önemlidir. I.Fick Kanunu ile sabit bir kesitinden geçen, difüze eden malzeme miktarının belirlenmesi yapılabilir. Burada bulunan konsantrasyon farkları parçacıkların belirli yönde hareket etmelerine neden olur. I.Fick Kanunu olarak bilinen matematiksel ifade ile aşağıdaki gibi belirtilmiştir [44,47,48,50,54,55].

$$J_A = - D.(dc/dx) \quad [2.4]$$

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

[56].  $D$ ; difüzyon katsayısı( $m^2/s$ ), ve  $dc/dx$  yoğunlaşma gradyantıdır ( $m^3/m$ )-<sup>1</sup>. Difüzyon esnasında atomların akışını etkileyen bir çok faktör vardır.

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

## 2.9.2 II. Fick Kanunu

Eğer bir yayınma olayında kararlı bir durum yoksa, örneğin sabit konsantrasyon farkında kütle akışının tespitinin zor olması ve metallerde difüzyon olaylarının çözümünde I.Fick Kanununun yetersiz kalması dolayısıyla, difüzyon katsayısının deneysel tespitinde ve bir çok kullanımda II.Fick Kanunundan yararlanılmaktadır. I.Fick Kanununun II.Fick Kanununa dönüştürülmesi için, aralarında  $dx$  kadar mesafe bulunan iki paralel yüzeyle sınırlandırılmış hacim elemanı kullanılır [56]. Bu durumda konsantrasyon  $x$  ve  $t$ 'ye bağımlı kalacağından, bir çok pratik problemler için şu matematiksel ifade kullanılır;

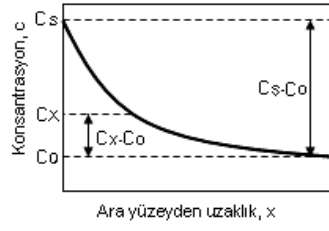
$$dc.dt = D.(d^2c/dx^2) \quad [2.5]$$

Bu denklemin çözümü bazı sınır değerlerine bağlıdır ve bu da;

$$(Cs - Cx) / (Cs - Co) = \text{erf} ( x / (2\sqrt{Dt}) ) \quad [2.6]$$

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

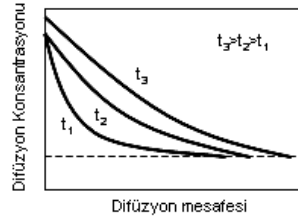
Bu eşitlikte verilen konsantrasyon parametreleri Şekil 2.14 'de konsantrasyon profili olarak görülmektedir. Burada konsantrasyon ve difüzyon mesafesi arasındaki ilişki görülmektedir.



Şekil 2.14 Kararsız hal difüzyonu için konsantrasyon profili.

Ayrıca difüzyon mesafesinin konsantrasyona bağlı olarak süreyle değişimi de Şekil 2.15' de verilmiştir. Burada sıcaklığın artması ile birlikte birim alanda difüzyon miktarının arttığı görülmektedir [56,57].

II Fick kanunu zaman ve sıcaklığa bağlı olarak malzeme yüzeyine difüze eden atomların konsantrasyonunu hesaplamayı sağlar. Burada difüzyon katsayısı D'nin sabit ve yüzeyde difüze eden atomun konsantrasyonu Cs ve malzemede Co değişmeden sabit kalmasıyla denklemin çözümü elde edilir. Bu kanunun uygulanması, D sabit kaldıkça, değişik şartlarda aynı konsantrasyon profilinin elde edilebilmesidir. Bu özellik, belirli bir ısıl işlemin uygulanabilmesi için gerekli zamanda, sıcaklığın etkisini belirlemeyi sağlamaktadır [55].



Şekil 2.15 Kararsız hal difüzyonunda üç farklı sıcaklıkta oluşan konsantrasyon profili.

## 2.10 Difüzyonu Etkileyen Faktörler

D difüzyon katsayısı genellikle sabit değildir. D; sıcaklık, konsantrasyon ve kristal dokusu gibi birçok değişkenin fonksiyonudur. Bütün bu değişkenler birer sabit katsayı vereceği için difüzyon katsayısını, hepsini içeren bir sabit olarak düşünmek mümkündür.

### 2.10.1 Sıcaklık

Sıcaklık difüzyonu etkileyen en önemli parametredir. Mesela  $\alpha - \text{Fe}$ 'nin de  $\text{Fe}$ 'nin difüzyonu için ( kendi kendine )  $500^\circ \text{C}$  'den  $900^\circ \text{C}$ 'ye sıcaklık arttırıldığında yaklaşık olarak difüzyon miktarı  $10^6$  kat artar (  $3.0 \times 10^{-21}$  'den  $1.8 \times 10^{-15} \text{ m}^2/\text{s}$  ). Çizelge 2.1 'de ki değerlere bakıldığında sıcaklığın difüzyon üzerindeki etkisi görülmektedir. [44,47,48,57].

Aşağıdaki formüle göre sıcaklık difüzyon miktarı ilişkilendirilirse;

$$D = D_0 \cdot \exp(-Q/RT) \quad [2.7]$$

Burada;  $D_0$ : yayınan atomların titreşim frekansına bağlı olarak yayınma katsayısı ( $\text{cm}^2/\text{S}$ ),  $Q$ : Aktivasyon enerjisi ( $\text{J/mol}$ ,  $\text{Kcal/mol}$ ),  $R$ : Gaz sabiti, ( $8.31 \text{ J/mol.K}$ ),  $T$ : mutlak sıcaklık ( $\text{K}$ ).

Bir malzemenin sıcaklığı arttırıldığı zaman, difüzyon katsayısı ve atomların akışı ( $J$ ), artar. Yüksek sıcaklıklarda atomların difüzyonu için sağlanan enerji, atomların aktivasyon enerjisi engelini aşmasını ve daha kolaylıkla yeni kafes yerlerine hareket etmesini sağlar.

Düşük sıcaklıklarda, genellikle mutlak ergime sıcaklığının ( $T_m$ ) yaklaşık  $0.4 T_m$  katı altında difüzyon çok yavaştır ve etkili olmayabilir. Bu nedenle seramiklerin işleme ve metallerin ısıtılması işlemi, yüksek sıcaklıklarda yapılır. Bu sıcaklıklarda, atomlar reaksiyonlarını tamamlamak veya denge şartlarına ulaşmak için daha hızlı hareket ederler [50].

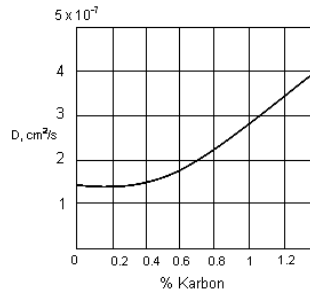
Difüzyon sabitinin her  $20^\circ \text{C}$ 'lik sıcaklık artışı ile iki kat büyüdüğü düşünüldüğünde, sıcaklığın difüzyonda ne kadar etkili olduğu görülür.

Çizelge 2.1 Bazı malzemelerde, difüzyon katsayısı ve miktarının sıcaklıkla değişimleri [44,47].

Difüze olan element	Ana metal	Do (m <sup>2</sup> /s)	Aktivasyon enerjisi		
			Q (kJ/mol)	T (°C)	Hesaplanan Değerler
Fe	α - Fe	2.8 x 10 <sup>-4</sup>	251	500	3.0 x 10 <sup>-21</sup>
Fe	α - Fe	2.8 x 10 <sup>-4</sup>	251	900	1.8 x 10 <sup>-15</sup>
Cu	Cu	7.8 x 10 <sup>-5</sup>	211	500	4.2 x 10 <sup>-19</sup>
zn	Cu	2.4 x 10 <sup>-5</sup>	189	500	4.0 x 10 <sup>-18</sup>
Al	Al	2.3 x 10 <sup>-4</sup>	144	500	4.2 x 10 <sup>-14</sup>
Cu	Al	6.5 x 10 <sup>-5</sup>	136	500	4.1 x 10 <sup>-14</sup>
Mg	Al	2.8 x 10 <sup>-4</sup>	131	500	1.9 x 10 <sup>-13</sup>
Cu	Ni	2.7 x 10 <sup>-5</sup>	256	500	1.3 x 10 <sup>-22</sup>
C	α - Fe	6.2 x 10 <sup>-7</sup>	80	500	2.4 x 10 <sup>-12</sup>
C	α - Fe	6.2 x 10 <sup>-7</sup>	80	900	1.7 x 10 <sup>-10</sup>

### 2.10.2 Konsantrasyon

Konsantrasyon, malzeme kompozisyonunun mesafeye bağlı olarak nasıl değiştiğini gösterir [47]. Matematiksel kolaylık açısından difüzyon katsayısının, konsantrasyondan bağımsız kabul edilmiş olmasıyla hatalı olduğu bilmek faydalı olur. Konsantrasyonun etkisi arayer katı eriyiklerinde daha kolay incelenebilir. Çünkü bu durumda ergiten atomların yayınmasının tesiri ihmal edilebilir. Şekil 2.16'da karbonun östenit içerisinde 927°C sıcaklıkta eriyebilmesinin sınırı olan % 1,3 C' a kadar difüzyon katsayısında az bir değişme olduğu bilinmektedir [50]. D'nin büyük ölçüde konsantrasyona bağlı olduğu sistemlerde bile, difüzyonun hafif eriyik içinde veya küçük bir konsantrasyon alanı içinde olması kaydıyla, D'yi sabit kabul etmekle büyük bir hata yapılmış olmaz.



Şekil 2.16 927°C 'de demir içinde difüze olan karbon için D'nin konsantrasyonla değişimi [50].

### 2.10.3 Kristal Dokusu

Kristal kafes yapısının sıcaklıkla değişiminin önemi nedeniyle, kristal yapının değişiminin ergimiş demirde difüzyon derecesi üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Yüksek sıcaklıklarda HMK yapıdan YMK yapıya Allotropik bir dönüşüm ile kristal yapıdaki karbon ergitebilirliğini değiştirmiştir. Belli bir sıcaklıkta demir atomlarının difüzyon hızı ferrit'te (HMK), östenit'ten (YMK) yaklaşık 102, 103 fazladır [42,48].

Kristal dokusunun bir başka etkisi de, ana metalin tek bir kristali içinde kristal yönüyle difüzyon katsayısının değişmesidir. Kübik metallerde bu tür anizotropi görülmez. Ancak bismut ( eşkenar dörtgen, aralıklı ağ ), karbon eksenine paralel ve dikey yönlerde ölçülmüş öz difüzyon katsayılarında yaklaşık binde bir gibi bir oran ortaya çıkmıştır [42].

### 2.10.4 Alaşım Elementleri

Metallerde alaşım elementleri ya da impuritelere, difüzyon katsayısını çok fazla etkiler. Demir alaşımlarının ısıl işlemi, diğer metallere nazaran daha fazla alaşım elementlerinden etkilenmektedir. Demir atomlarının yer değiştirme kabiliyetine, alaşım elementlerinin etkisi oldukça önemlidir ve karbon çok kuvvetli etki yapar. Östenitte karbon miktarı yükseldiğinde, Q ve Do değerlerinin azalması ile difüzyon artar. Krom ve vanadyum gibi alaşım elementleri de difüzyon katsayısını belirgin olarak iyileştirirler. Farklı bir yer değiştirme mekanizmasına sahip ara yer atomu olarak bor, hidrojen, karbon, azot ve oksijenin demirdeki difüzyon kabiliyetleri oldukça iyidir. Hidrojenin küçük atom çapı, kafeste büyük bir hareketliliğe imkân sağlar.

Kuvvetli karbür teşekkül ettiren elementler, Q değerini önemli ölçüde arttırlar ve bundan dolayı, karbonun östenit içerisinde difüzyonunu yavaşlatırlar. En önemli etkiyi krom ve volfram oluşturur. Silisyum, alüminyum ve manganın önemli bir etkisi yoktur. Nikel ve kobalt ise, karbonun östenit içerisindeki difüzyonunu iyileştirirler[56].

### 2.10.5 Tane Boyutu

Tane sınır difüzyonu, tanelerin içindekinden daha hızlı olduğundan genel difüzyon derecesinin ince taneli metalde daha yüksek olması beklenir. Bununla birlikte alışılmış, tane boyları ölçülerinde, difüzyon hesapları yapılırken tane boyutunu hesaba katmak gerekmez.

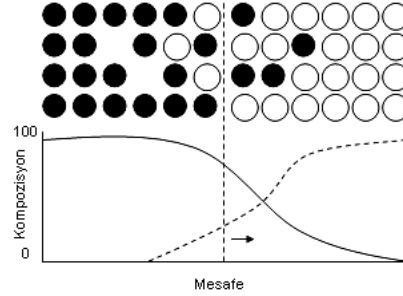
Tane sınırı çevrelerinde, metal kafesinin en azından iki ile üç bölgesinde düzensizlikler mevcuttur. Bu nedenle tane sınırları, belirli bir boş hacim içerirler ve difüzyon için ayrıca enerjiye gerek yoktur. Tane sınırı boşlukları daha büyük olduğu için, aktifleştirme enerjisi hacim difüzyonuna nazaran yaklaşık yarı değerdedir. Tane sınırı difüzyonunun etkin olabildiği durumlarda, düşük sıcaklıklarda difüzyon hızlı olabilir.

Tane sınırı için belirtilen esaslar, benzer şekilde dislokasyonlar için de geçerlidir. Dislokasyonlarda da tane sınırlarına benzer olarak etkinliğin artmasıyla, gerekli aktifleştirme enerjisi yan değerine düşer. Bu nedenle, dislokasyonların da özellikle düşük sıcaklıklarda, difüzyon reaksiyonları için önemi fazladır. Ayrıca plastik deformasyon sonrası dislokasyon yoğunluğunun artması difüzyonu kolaylaştırır. Bu açıklamalardan da anlaşılabilceği gibi, difüzyon katsayısı  $D$ 'nin kullanılmasında, malzemenin hangi aşamalardan geçtiğine dikkat etmek gerekir [56].

### 2.11 Kimyasal Difüzyon (Kirkendall Olayı)

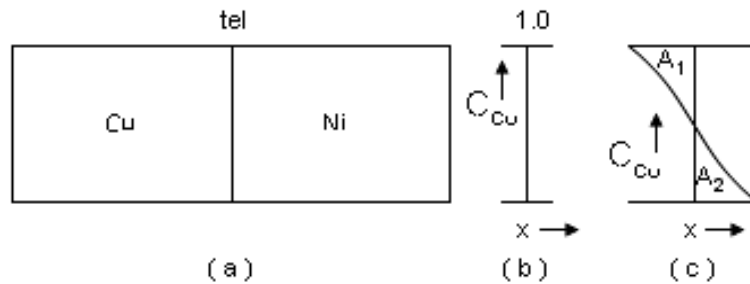
İkili bir alaşımda konsantrasyon farkı olduğunda, temas eden yüzeylerin difüzyon katsayısı farklılığından dolayı akış meydana gelir. Eğer iyi bir temas olursa difüzyon bölgesinde madde taşınımı meydana gelir [38,46,58]. Difüze eden iki atom birbirleri ile pozisyonlarını değiştirmez ancak bunun yerine boşlukları doldurarak hareket eder [50]. Kirkendall bu olayı 1947 yılında bakır (A) ve pirinç (B) çifti için incelemiştir ve bu ikiliyi yüksek sıcaklıklarda ısıttıktan sonra teller arasındaki mesafenin arttığını gözlemlemiştir. Bu olay Kirkendall olayı olarak bilinmektedir. Kirkendall olayının etkisi Al-Au çiftinde incelenirse, alüminyum atomlarının altına difüzyonunun, altın atomlarının alüminyuma difüzyonundan daha hızlı olduğu bulunur. Sonunda daha fazla atom, orijinal alüminyum ara yüzeyinden daha çok altın tarafında bulunacaktır (Şekil 2.17). Bu sonuç orijinal ara yüzeyin önceki

fiziksel konumunun, çiftin alüminyum tarafına doğru hareket etmesine neden olur. Ara yüzeyde, önce sıkışmış yabancı parçacıklar da ara yüzeyle beraber hareket ederler. Farklı difüzyon hızlarından dolayı, difüzyon çifti ara yüzeyinin hareketi Kirkendall etkisi olarak adlandırılır.



Şekil 2.17 Kirkendall etkisinin gösterimi. Farklı malzemelerde difüzyon iki metal arasındaki orijinal ara yüzeyin kaymasına neden olur [50].

Bakır ve Nikel metallere yüksek sıcaklıkta bir difüzyon çifti oluşturulması da Kirkendall olayına örnek olarak verilebilir. Cu-Ni birbirleri içerisinde % 100 eriyen metaller olduğundan difüzyon meydana gelir. Difüzyondan önce konsantrasyon eğrisi Şekil 2.18'deki gibidir. Daha sonra (c) 'deki duruma gelir. Belli bir ısıtma süresi sonunda ara yüzeye konan telin bakıra doğru kaydığı gözlenir. Bunun nedeni bakır atomlarının nikel'e oranla daha hızlı yayındıklarından, nikel tarafındaki boşlukların bakır tarafına kaymasındandır. Bu durum da ara yüzeydeki tel bakıra doğru hareket ettirmektedir [38].



Şekil 2.18 (Cu - Ni) 'de Kirkendall olayı [38].

Genel olarak bir difüzyon çiftinde, düşük ergime noktalı malzeme atomlarının yüksek bir difüzyon hızına ( $D$ ) sahip oldukları tespit edilmiştir [50]. Belirli durumlarda Kirkendall etkisinin bir sonucu olarak ara yüzeyin hemen yakınlarında boşluklar oluşur [47].

### 3. DİFÜZYON KAYNAĞI

#### 3.1 Giriş

Uluslar arası Kaynak Enstitüsü tarafından kabul edilmiş tanıma göre difüzyon kaynağı, birleştirilecek parçaların ara yüzey tabakalarında difüzyonu sağlayacak kadar yüksek sıcaklıklarda, aradaki boşlukların plastik deformasyonla kapanmasıyla atomik seviyede bağların oluştuğu bir katı hal sürecidir [41]. İngiliz standartları 499'da difüzyon kaynağı birleştirilmek üzere eşleşmiş iki yüzeyin, malzemelerin ergime noktaları altındaki bir sıcaklıkta, malzemelerde tespit edilebilir. Plastik akmaya sebep olmayan basınç altında, katı hal difüzyonu yoluyla malzemeler arasında metalürjik bir bağ oluşuncaya kadar, malzemenin özelliklerini önemli ölçüde etkilemeyecek bir süre tutulmasıyla uygulanan kaynak yöntemi olarak tanımlanmaktadır [59]. Malzemelerin ara yüzeylerinde uygulanan sıcaklıkla ergiyen bir ara tabaka kullanıldığı taktirde, buna "Sıvı Faz Difüzyon Kaynağı" denir. Difüzyon kaynağı yerine kullanılan eş anlamlı ifadeler, difüzyon bağlantısı, katı-hal bağlantısı, basınçlı bağlantı, izostatik bağlantı ve sıcak pres bağlantısıdır [5,60].

Difüzyon kaynağı son yıllarda gelişen, çok fazla kaynak ekipmanı gereksinimi olmayan ve yüksek kalitede birleşme sağlayan bir kaynaktır. Bununla birlikte, bakır, titantum ve değişik çeliklerin difüzyon kaynağı kolaydır. Alüminyum alaşımlarının difüzyon kaynağı alüminyumun stabilizesi ve difüzyon iç yüzeyinde ve metal metale birleşme yapısında oluşan direngen oksit filminden dolayı zordur. Oksit filmleri alüminyum alaşımlarının yüzeyinde atmosfere temasla oluşacaktır. Filmler, ergime sıcaklığı 2050°C olan  $Al_2O_3$  bileşimindedir. Başarılı bir birleştirme gerçekleştirmek için oksit tabakasının oluşumu kesinlikle önlenmelidir [61].

Bununla beraber, alüminyum alaşımlarının difüzyon birleştirmesi için geliştirilen yüzey işlemleri ile problemler giderilememektedir. Örneğin, mekanik

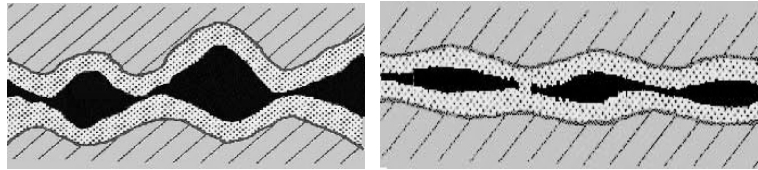
temizleme ile kimyasal temizlemenin bir arada kullanılması oksit gidermeyi önlemez. Ayrıca mikro yapı ve birleştirme mukavemeti zayıf olur. Metal kombinasyonlarının birçok şekli difüzyon kaynağı ile birleştirilebilir.

Difüzyon kontrollü birleşme işlemini başlatabilmek için, iki yüzey artıklarından ve makro pürüzlülüklerden arındırılmış bir şekilde temas haline getirilmelidir. Bu temas, atomlar arasında bağ oluşumuna imkan verecek bir yakınlıkta olmalıdır. İlk bağ oluşuktan sonra, sıcaklık yardımıyla difüzyon başlar ve yüzeylerin ara kesitindeki boşluklar doldurulur.

Bir difüzyon kaynağı mekanizması şu şekilde genelleştirilebilir.

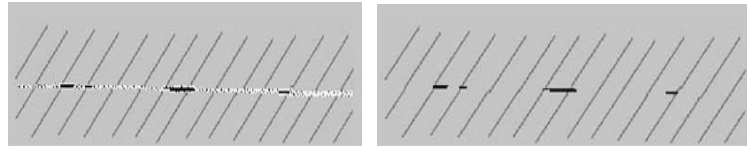
- 1-Yük altında plastik deformasyon,
- 2-Sürünme deformasyonu,
- 3-Difüzyon,
- 4-Yeniden kristalleşme ve tane sınır göçü.

Son yıllarda Guo (1985) ve Salehi (1990) gibi araştırmacılar, difüzyon mesafesi ve süperplastiklik gibi hususları da hesaba katan araştırmalar yapmışlardır. Aşağıdaki şekilde Spanswick (1989) tarafından verilen difüzyon kaynağı mekanizmaları görülmektedir.



(a)

(b)



(c)

(d)



( e )

Şekil 3.1. Difüzyon kaynağı mekanizması : a-) İlk nokta teması ve oksit tabakası; b-) Plastik deformasyon ve sürünme sonrası, daha ince bir oksit tabakası ve geniş boşluklar; c-) Nihai sürünme ve akma sonrası; d-) Yüzey ve hacim difüzyonu ile boşlukların doldurulması; e-) Tamamlanmış kaynak [62].

### 3.2 Katı Hal Birleştirme Yöntemleri

Günümüze kadar farklı bir çok kaynak metodu geliştirilmiştir. Bunlar;

1-Ergitme kaynağı,

2-Lehimleme,

3-Katı hal kaynağı olmak üzere üç ana grupta toplanabilir [63].

Katı hal kaynağı, iki benzer ya da farklı malzemenin, malzemelerin ergime sıcaklıkları altındaki bir sıcaklıkta, malzemelerde makroskobik plastik bir deformasyon meydana getirmeyen bir basınç uygulanarak birleştirilmesi yöntemlerinin genel adıdır.

Katı hal kaynağını yapmak için iki malzemenin temiz yüzeylerini, aralarında bir bağ oluşturacak kadar birbirlerine yaklaştırmak gerekir. Bunu sağlamak için birçok teknik uygulanmakta ise de bütün işlemlerde esas olan, üzerinde bir tabaka bırakmayacak şekilde iki yüzeyi deforme edecek bir basınç uygulamaktır [64].

Başlıca katı hal kaynak işlemleri şu şekilde sınıflandırılabilir.

1- Yüksek sıcaklık katı hal kaynağı,

a- Difüzyon kaynağı,

b- Sürtünme kaynağı,

c- Ultrasonik kaynak,

d- Saplama kaynağı

2- Difüzyon lehimlemesi,

3- Soğuk basınç kaynağı.

### 3.3 Difüzyon Kaynağı Bağlantı Çeşitleri

Birçok benzer ya da farklı malzeme kombinasyonları difüzyon kaynağı ile bağlanabilir. Ergime noktası, yoğunluk, lineer genleşme katsayısı, kafes şekli ve kafes katsayıları farklı olduğu için farklı metal ve alaşımların birleştirilmesi zordur. Bu etkileri azaltabilmek için geliştirilen difüzyon kaynağı çeşitleri aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir [60].

1. Benzer metaller katı hal kaynağı şeklinde direkt bağlanabilirler. Bu durumda kaynaklanma parametrelerini malzemenin metalürjik ve mekanik özellikleri, geometrik veriler ve malzemenin kullanım yeri belirler.

2. Benzer metaller aralarına farklı bir metalden ince bir tabaka konularak bağlanabilir. Kaynaklanma parametrelerini ara tabaka malzemesinin özellikleri belirler. Bu durumda ara tabaka daha hızlı bir difüzyon sağlar veya yüzeyler arasındaki tam teması sağlamak için bağlantıda artan mikro deformasyona izin verir.

3. İki farklı metal kontrollü difüzyon olayı ile bir bağ oluşturarak direk bağlanabilir. Mekanizma, farklı metallerin meydana getirdiği etkilerin ilavesi ile 1. gruba benzerdir. Kaynaklanma parametrelerini birleştirilecek çiftlerin özellikleri belirler.

İntermetalik faz oluşturan malzeme kombinasyonları ergitme kaynağı ile bağlanamazlar ve difüzyon kaynağı gibi özel yöntemlerle birleştirilebilirler. Difüzyon kaynağında inter metalik fazların oluşumu tamamen engellenemez, ancak uygun işlemlerle kalınlıkları mekanik olarak zararsız olan değerlere indirgenebilir. Böylelikle alüminyum-çelik kombinasyonu, çok sert Fe-Al fazlarının oluşmasına rağmen difüzyon kaynağı ile alüminyum dayanımından yüksek olan genleşme ve dayanım değeri ile bağlanabilir.

İntermetalik faz oluşturan metal kombinasyonlu birleştirmeler yüksek gerilmeler için uygun değildir. Alüminyum-bakır, alüminyum-demir gibi bazı özel kombinasyonlarda kırılğan intermetalik faz oluşumu önlenemese de, iyi birleştirmeler yapılabilir. Bu durumlarda intermetalik fazı minimum kalınlığa indirmek için birleştirmede öngörülen tüm parametrelerin kesin olarak yerine getirilmesi gerekir.

4. Farklı metaller, ilk tam teması sağlamak, difüzyonu hızlandırmak için temas yüzeyleri arasına her iki kısım ile bağlantı oluşturabilen üçüncü bir metal ile bağlanabilir. Güç eriyen metallerdeki işlem genellikle, esas malzemenin yeniden kristalleşme sıcaklığının altında, kaynak sıcaklığından daha düşük bir ara tabaka malzemesinin kullanımı ile ilgilidir.

Ara tabakayı oluşturan malzemeler, difüzyon bölgesindeki kadar fiziksel özellik göstermeli, yüke dayanıklı uygun bir mikro yapı elde edilmesini sağlamalıdır. Ara metal tabakalarının sayısı esas malzemelerin özellikleri arasındaki farka ve birleşimin geometrik şekline bağlıdır. Esas malzemeler arasındaki fark fazla ise birkaç difüzyon birleştirme işlemi yapılmalıdır.

5. Farklı kimyasal ve fiziksel özelliklere sahip metal ve ametallerin ara tabakalı veya ara tabakasız birleştirilmesinde elverişli kaynaklanma parametrelerinin az olmasına rağmen difüzyon kaynağı ile örneğin, metal-seramik bağlantıları gerçekleştirilebilir. Birleşmenin gerçekleştirilebilmesi için farklı ısıl genleşmelerin dengelenmesi gerekir.

### 3.4 Difüzyon Kaynağında Bağ Oluşturan Süreç ve Faktörler

Difüzyon kaynağında birkaç fiziko – mekanik süreç aynı anda etkili olmaktadır. Bu süreçler, difüzyon, rekristalizasyon, sürünme, dislokasyonların oluşumu ve hareketi, boşlukların ve arayerlerin oluşumu ve hareketi gibi süreçlerdir. Bu süreçlerden her biri değişen doğruluk dereceleriyle aşağıdaki bilinen eşitliklerle elde edilebilir [4,41].

$$\left. \begin{aligned} A_1 &= B_1 e^{-Q_1/E_0} \\ A_2 &= B_2 + C_2 e^{-Q_2/E_0} \end{aligned} \right\} A_i = B_i + C_i e^{-Q_i/E_0} \quad [3.1]$$

Bu ifadelerde  $Q_i$  , ilgili sürecin aktivasyon enerjisi;  $E_0$  , verilen ısı enerjidir.  $Q / E$  oranı boyutsuzdur ve ait oldukları süreçlerde bir benzerlik ölçütü olarak rol oynarlar. Sonuçta değerlendirmeleri sadece fiziko – mekanik süreçlerle bağlantılı ısı büyüklüklerle sınırlamak yeterli olmamaktadır. Mekanik enerji ve ısı enerjisi daima iki ayrı faktör olara karşımıza çıkmaktadır. Bir  $V$  hacmini deforme etmekte kullanılan mekanik enerji ile ilgili faktör  $M$  olsun. O halde difüzyon kaynağı  $p$  ve akma dayanımı  $\sigma_1$  cinsinden  $M$  aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$pV / \sigma_a \cdot V = M \quad [3.2]$$

Benzer olarak  $N$ 'de aynı hacme verilen ısı enerjisiyle ilgili bir faktör olsun. Bu durumda  $T$ , o andaki sıcaklık,  $T_m$  ergime sıcaklığı olmak koşuluyla  $T / T_m$  oranı cinsinden  $N$ , aşağıdaki şekilde tanımlanabilir. Burada  $\gamma$  yoğunluk,  $c$  özgül ısıdır.

$$T\gamma cV / T_m\gamma cV = N \quad [3.3]$$

$M$  ve  $N$  faktörleri birbirine ilave edilerek (3.2) ve (3.3) denklemleri yeniden düzenlendiğinde dik koordinatlarda bir doğru denklemi elde edilir. ( Şekil 3.2 'deki kesikli çizgi).

$$p / (M+N) \sigma_a + T / (M+N) T_m = 1 \quad [3.4]$$

$p$  ' nin  $T$  'ye bu şekilde bağlı olması gerçekte mümkün değildir. Gerçek uygulamalardaki durum Şekil 3.2'deki sürekli çizgi ile gösterilmiştir.

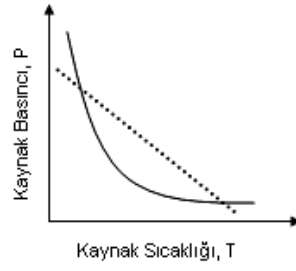
Mekanik ve ısı enerjisi faktörleri birlikte göz önüne alındığında,

$$MN = pT / \sigma_a \cdot T_m \quad [3.5]$$

Şeklinde  $p$  ve  $t$ 'ye ait hiperbolik bir bağıntı elde edilir.

$$pT = / MN \cdot \sigma_a \cdot T_m = \text{sabit} \quad [3.6]$$

Bu denkleme göre yapılan birçok difüzyon kaynağı deneyleriyle,  $p$  basıncı ve  $T$  sıcaklığının birbirine bağlı olduğu doğrulanmıştır.

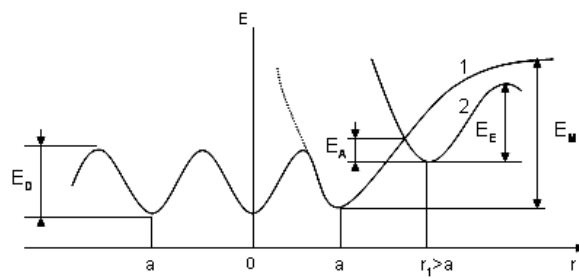


Şekil 3.2. Kaynak basıncı ve kaynak sıcaklığı arasındaki ilişki [41].

Difüzyon kaynağı işlemlerini analiz kolaylığı bakımından iki kısma ayırmak mümkündür:

- 1- Yüzey atomlarının enerji bakımından durağan hal gösterdikleri durum,
- 2- Birleşim bölgesindeki bütün fiziksel proseslerin tamamlandığı durum.

Şekil 3.3'e göre kristaller bir araya getirildiğinde metaller arasındaki yakınlık kafes sabiti ile kıyaslanabilecek gibi olmalıdır. Bu takdirde bağ oluşumu enerji bakımından kolaylaşır ( 1 no'lu eğri ). Bununla beraber, adsorbe tabakaların varlık nedeniyle, polikristallerin gerçek yüzeylerindeki atomların potansiyel enerjisi metalik bağ oluşturmada yetersizlik gösterebilirler. Bu nedenle başlangıçtaki temas etkileşimi metal numunelerinin ve yüzeylerindeki adsorbe tabakalarının elektromanyetik alanlarıyla ilişkilidir. ( 2 no'lu eğri ) [4,41].



Şekil 3.3. Metal kristalleri arasındaki karşılıklı etkileşim halinde potansiyel enerjideki değişimler [4,41].

$E_c$  : Elektrostatik etkileşimin enerjisi ( Van der Waals )

$E_m$  : Metalik bağın ayrışma enerjisi

$E_a$  : Metalik bağın oluşum enerjisi

$E_d$  : Difüzyon için aktivasyon enerjisi

a: Metalsel kafes sabiti

r : Yaklaşım mesafesi

olarak verilmiştir.

Isı ve deformasyon, yüzeylerdeki potansiyel enerjii  $E_a$  kadar artırır. Öyle ki, arada metalsel bir bağ oluşur. Gerçekte difüzyon kaynağında ilk temas önce izole alanlar arasında kurulur ve giderek temas alanı bütün yüzeye yayılır. Difüzyon kaynağının safhaları Çizelge 3.1 ile incelenebilir. Bu tabloda, her iki safhada da çeşitli difüzyon tiplerinin hâkimiyetinin ön planda olduğu görülmektedir [8,43].

Çizelge 3.1. Difüzyon kaynağı safhaları [8,43].

Safha	Bağ oluşumunu sağlayan faktörler	Difüzyon şekli	Aktivasyon Parametreleri
1. Yüzeyler arasındaki gerçek temasın oluşumu ve gelişimi	Çıkıntılardan deformasyonu	Yüzey difüzyonu ve $T > 0.5T_m$ de kütleli difüzyon	$T, p$
2. Arada bağ oluşumu ve kütleli etkileşimin ilerlemesi	Atom grupları arasında metalsel bağ oluşumu, boşlukların dışa kapanması, yapısal kusurların derişiminin azalması, bağ bölgelerindeki gerilmelerin gevşemesi	Kütleli olarak ve tane sınırlarında öz difüzyon, hetero difüzyon, dislokasyonların hareketi	$T, \epsilon$ (deformasyon), ortamın bileşimi

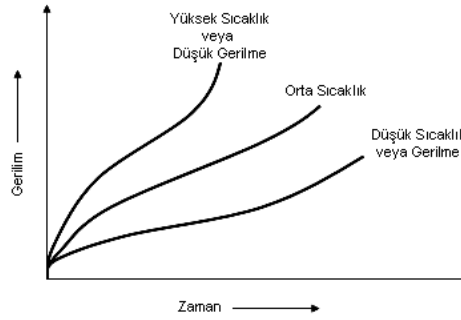
### 3.5 Difüzyon Kaynağına Etki Eden Faktörler

Difüzyon kaynağında, temas yüzeyleri küçük bir basınç altında rekristalizasyon sıcaklığının altında veya üzerindeki sıcaklıklara ısıtılır. Bazı sebeplerden dolayı kaynak işleminin sonucu iyi veya kötü olabilmektedir. Kaynak esnasında uygulanacak olan sıcaklık, zaman, basınç, yüzey pürüzlülüğü, kaynak atmosferi gibi faktörler birbirleriyle ilişkili olup, kaynak yapılacak malzeme ve çiftinin özelliklerine bağlıdır. Diğer yandan malzemelerin tane boyutu, kristal yapısı, atom yarıçapı, yeniden kristalleşme sıcaklıkları, yüzey enerjileri gibi her iki malzemenin fiziksel ve kimyasal farklı ya da aynı olması gibi metalürjik faktörlerde etki eder.

### 3.5.1 Kaynak Sıcaklığı

Difüzyon kaynağında sıcaklık, deformasyona, oksit çözünürlüğüne, allotropik dönüşümlere, yeniden kristalleşmeye, işlemin kısa sürede yapılmasına etkidiğinden, sürünme ve difüzyon mekanizmaları sıcaklığa bağlı olduklarından; sıcaklık, difüzyon kaynağının en önemli parametresidir. [65].

Sıcaklık arttıkça ana malzemelerin akma gerilmeleri azalır. Böylece hem ilk deformasyon hem de yüzey pürüzlerinin sürünmesi kolaylaşır. Dolayısıyla kaynak için gerekli temas alanını elde etme süresi azalır. Pratikte, difüzyon kaynağında kullanılan sıcaklığın değeri  $T > 0,5.T_e$ 'dir (T: Kaynak Sıcaklığı,  $T_e$ : Kaynak yapılan malzemenin ergime sıcaklığı). Sıcaklık ve uygulanan basıncın sürünme eğrisine tesiri Şekil 3.4'deki grafikte görülmektedir.

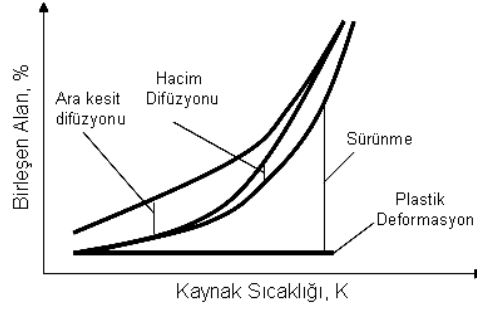


Şekil 3.4. Sıcaklık ve uygulanan basıncın sürünme etkisi [66].

Diğer yandan  $D = D_0 \cdot \exp \cdot (-Q/RT)$  denkleminde (D:T sıcaklığında difüzyon katsayısı,  $D_0$ : Atomik titreşim frekans faktörü, Q:Aktivasyon enerjisi ( $Jmol^{-1}$ ), R: Gaz sabiti ( $8,314 Jmol^{-1}K^{-1}$ )). Difüze olabirliğin, sıcaklıkla eksponiyel olarak değiştiği görülmektedir [66].

Burada difüzyon kontrollü işlemlerde sıcaklıktaki küçük değişiklikler, işlemin kinetiğinde önemli değişmeye neden olur [67,68]. Yüksek sıcaklıklarda difüzyon kaynağı yapmanın iki önemli etkisi vardır. Bunlar, birleşme ara yüzeyinde atomların hareketini hızlandırmak ve yüzey deformasyonu için metalin yumuşamasını sağlamaktadır. Bu sayede yüzeyler, birleşme ara yüzeyinde daha iyi temas sağlayarak, daha iyi atom taşınımını sağlar [69].

Pratikte difüzyon kaynağında kullanılan sıcaklığın değeri malzemenin mutlak ergime sıcaklığından daha küçük olan sıcaklık değerleridir. Bu sıcaklığın, mümkün olduğu kadar yüksek, sabit ve üniform olarak uygulanması gerekir [70]. Sıcaklığın birleşen alan üzerindeki etkisi Şekil 3.5’de görülmektedir.



Şekil 3.5. Sıcaklığın birleşme alanı üzerindeki etkisi [70].

### 3.5.2 Kaynak Süresi

Kontrollü difüzyon reaksiyonlarında zamanın büyük önemi vardır. Difüzyon kaynağında zaman, bağımlı bir işlem parametresidir. Kaynak işlemi için yeterli zaman, yüzeylerde karşılıklı temas sağlanarak atomların hareketine yetecek ve bu aşamada tutularak birleşmenin sağlanabildiği süre kadardır. Düzgün bir bağlantı elde etmek için gerekli süre, sıcaklık ve basınca bağlıdır. Kaynak süresi, sıcaklık ve basınç artırılarak kısaltılabilir. Düşük sıcaklıkta çalışılması durumunda süre uzamaktadır. Örneğin; çelik ve alüminyum birleştirilmesi için sıcaklığın 50°C artmasıyla bağlama süresinin 30 dakikadan 10 dakikaya kısaldığı gösterilmiştir [71].

Sabit basınç ve sıcaklıkta birleşme süresini uzatmanın, bağlantı mukavemetini bir noktaya kadar arttırdığı görülmüştür [10].

Bağlantı mukavemeti ile kaynak süresi arasındaki ilişki, aslında bu kadar basit değildir. Metaller arası bileşiklerin meydana gelmesi, tane büyümesi, özellikle süper plastik şekillenme performansı, boşlukların oluşumu ve bağlantı mukavemeti süre uzadıkça olumsuz bir şekilde gelişmektedir.

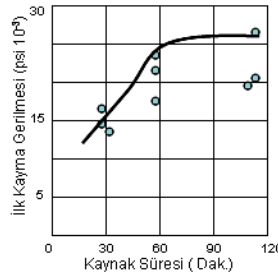
Difüzyon zamanı sıcaklıkla yakından ilişkili olup, difüzyon kontrollü birçok reaksiyon, zamanla değişmektedir. Difüzyon mesafesi X, difüzyon işlemi sırasında ortalama nüfuz eden atom mesafesidir. B aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$X = C.(D.t)^{1/2} \quad [3.7]$$

Burada; X: Difüzyon mesafesi, D: Difüzyon katsayısı, t: zaman (sn), C: Bir sabit .

Bu ifadeden, difüzyon reaksiyonları zamanın karekökü ile ilerler. Bu da zamanın difüzyondaki etkisini göstermektedir [67]. Sabit basınç ve sıcaklıkta birleştirme süresini arttırmanın bağlantı mukavemetini bir noktaya kadar arttırabileceği belirtilmiştir [29].

Difüzyon kaynağında geçen süre iki evre olarak tanımlanmaktadır. Birinci evre bir olgunlaşma (kuluçka) sürecidir. Burada yüzeyler arasında temas alanı artmakta ve aşırı difüzyon burada yüzeyler arasında temas alanı artmakta ve aşırı deformasyon bölgeleri oluşmaktadır. İkinci evre de ise kayma ve tane sınırı göçünün görüldüğü yoğun sürünme ile birlikte yeniden kristalleşme olayları hakimdir [72].



Şekil 3.6. Bağlantının Kayma Mukavemeti ile Kaynak süresi arasındaki ilişki [72].

### 3.5.3 Kaynak Basıncı

Difüzyon kaynak işleminde basınç uygulanmasının ana sebebi, yeterli birleşme olması için iki yüzeyin tam temasını sağlamaktır. Yeterli basınç, normal boşluk alanlarını doldurmak için plastik akışın, deformasyonun oluşmasını engelleyecek miktarda olması gerekir. Basınç çok düşük olursa, küçük boşluklar ara yüzeyde kalır ve kaynaklı birleştirmenin mekanik ve mikro yapı özelliklerini olumsuz yönde etkiler. Basınç uygulanmasının ikinci bir fonksiyonu da, birleşme ara

yüzeyinde temiz bir ara yüzey elde etmek için yüzey oksitlerinin kırılmasını sağlamaktır [69].

Uygulanacak olan basıncın değeri, parçalarda makro deformasyon oluşturmayacak bir değerde seçilir [73]. Birleştirilecek yüzeyler arasında ilk temasın sağlanması ve atomik difüzyon için kimyasal potansiyel farkı oluşturmada basınç gereklidir. Uygulanan basınç ile yüzey pürüzlerinin plastik akışı kolaylaşırken, yüzeyde çözünmeyen oksit filmleri kırılarak iki yüzey arasında atom akışı sağlanır. İyi bir birleşme sağlanabilmesinde basıncın izostatik uygulanması büyük fayda sağlar.

Kaynak esnasında uygulanması gereken basıncın difüzyon kaynağına etkisini maddelersek;

- 1- Yüzey pürüzlerinin plastik akmasına yardım eder.
- 2- Çözülmesi mümkün olmayan yüzey oksitlerini metalin metalle temasını sağlamak için kırar ve temas alanını artırır.
- 3- Birleşecek yüzeyleri birbirlerine atomlar arası mesafede yaklaştırarak, atomlar arası çekim kuvvetlerinin faaliyete geçmesini temin eder.
- 4- Difüzyon için kimyasal potansiyel farkı meydana getirir.

Uygulanacak basıncın olumsuz tesirlere sebep olmaması için aşağıdaki hususlara da dikkat edilmelidir.

- 1- Uygulanacak basınç, yüzey pürüzlerinin sürünme hızı ve plastik deformasyonunu arttıracak kadar büyük, kaynak edilecek parçaların makroskobik deformasyonuna yol açmayacak kadar küçük seçilir [70].
- 2- Kaynak basıncı, birleştirilecek parçaların plastik hacim deformasyonunu en aza indirmek için, akma gerilmesinin belirgin şekilde altında tutulur.

3- Uygulanacak basınç izostatiktir. Salehi basıncın uygulama hızının kaynak deformasyonu veya mukavemeti üzerinde herhangi bir tesiri olmadığını bildirmiştir [70].

Dubrovsky (1986), temas alanındaki deformasyon miktarı arttıkça difüzyon hızının arttığını belirtmektedir. Aynı araştırmacı bakır ve demirin difüzyon kaynağı üzerinde yaptığı çalışmada basıncın difüzyon kaynağı üzerindeki etkisini efektif difüzyon katsayısı ile tanımlamıştır. Buna göre;

$$\text{Efektif Dif. Kts.} = \frac{\text{Deformasyonlu Dif. Kts.} - \text{Deformasyonsuz Dif. Kts.}}{\text{Deformasyonsuz Difüzyon Katsayısı}} \quad [3.8]$$

Uygulanan basınç malzemede kusurlar ve arakesit bölgesinde nispeten daha küçük bir tane yapısı meydana getirerek kısa devre difüzyon yolları da indükleyebilmektedir.

Uygulanan basıncın allotropik dönüşüm gösteren Fe gibi metallerde, allotropik dönüşüm sıcaklıklarında, yavaşlayan difüzyonu hızlandırdığı da söylenebilir.

Kaynak esnasında uygulanan basınç malzemelere göre değişik oranlarda uygulanır. Kullanılan basınç genellikle kaynaklama sıcaklığında malzemenin akma gerilmesini geçmez [7,60]. Yapılan araştırmalarda 0,007-4000 Mpa arasında değişen basınçlarda başarılı denemeler yapılmakla beraber pratikte başarılı sonuçlar 15-300 mpa arasında alınmaktadır [4].

Bartle'e göre ise 7-21 Mpa arasındaki basınçlar yeterli olmaktadır [7]. Farklı metaller birleştiğinde, bağlantı basıncının seçimi iki malzemenin en dayanıksızına göre belirlenir [41]. Kurt [50], toz metalürjisi ile ürettiği bronz malzemeyi düşük karbonlu çelikle difüzyon kaynağıyla birleştirmede 15 Mpa, Yılmaz ve Çelik [74,75], elektrolitik bakır ile östenitik paslanmaz çeliğin difüzyon kaynağında 1,2-0,65 Mpa kaynak basıncını kullanmışlardır.

### 3.5.4 Yüzey Şartları

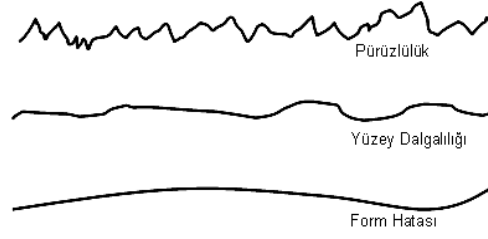
Difüzyon kaynağının kalitesine tesir eden yüzey şartları şunlardır.

- 1- Yüzey pürüzlülüğü,
- 2- Yüzey filmleri,
- 3- Yüzey artıkları [76].

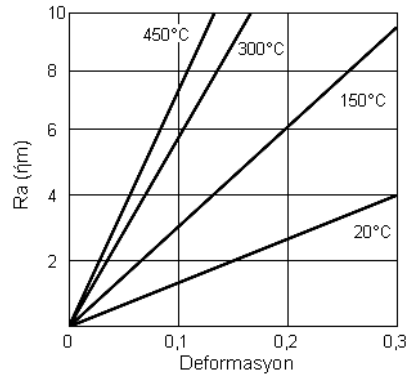
Difüzyon kaynağı yapılacak kısımların yüzeyleri bağlantı yapılmadan önce dikkatle hazırlanmalıdır. Yüzey hazırlama, temizlemeden daha fazla şeyleri içine alır. Buna son durumun kabul edilebilir düzgünlüğü, kimyasal yolla oluşmuş filmlerin (oksitlerin) yerini değiştirmesi ve gazlı, sulu veya organik yüzey filmlerini temizleme de dâhildir. Asıl yüzey hazırlama genellikle işleme, aşındırma, taşlama veya parlatma ile oluşturulur. Tam olarak hazırlanmış bir yüzeyin önemli bir özelliği düz ve pürüzsüz olmasıdır. Düzlüğün ve pürüzsüzlüğün minimum derecesi, difüzyon kaynağında üniform bir temas temin edilmesi için gerek duyulur [60]. Düzgünlük (dalgalılık) makro geometri, pürüzlülük ise mikro geometri olarak sınıflandırılabilir [41]. Temiz, ideal bir durumda, dalgalanma eğrisi ve pürüzlülük frekans eğrisinin her biri çizilerek profilin mikro profil veya makro profil olduğuna karar verilebilir.

Pürüzlülük, yüzeyler arasında tam temasa ulaşmak için gereken süreyi etkiler. Pratikte bir metal, yükseklik ve dalga boyu küçük olan bir yüzey pürüzlülüğüne sahiptir, yani yüzey dalgalılığı hakim özelliktir. Difüzyon kaynağında ise, özellikle, uzun dalga boyuna sahip olan pürüzler önemlidir. Çünkü, difüzyon kaynağının kendisi sıcaklık ve mesafeye bağlı olduğundan, boşlukların yok edilmesi için hem çok yönlü basınç uygulaması hem de uzun zamana gerek olmaktadır [70].

Yüzey pürüzleri 1. safha sonundaki kalıntı gözeneklerinin başlıca sebebidir. Pürüzlülük, sıcaklık ve deformasyonla artarak, tane sınırı hareketine katılmaktadır. Şekil 3.7 ve Şekil 3.8'de sırasıyla, yüzey kusurlarını ve pürüzlülüğün sıcaklıkla değişimini göstermektedir.



Şekil 3.7. Yüzey Kusurları.



Şekil 3.8. Yüzey deformasyonu ile pürüzlülük arasında sıcaklığa bağlı değişim [72].

Yüzey artıkları deneysel değişkenler olmakla beraber, hemen hemen bütün yüzeylerde, bazı şekillerde mevcuttur. Bunlar iki gruba ayrılırlar.

- 1- Normalde çok kırılman olan oksit filmleri.
- 2- Yağ, gres, toz gibi organik ya da inorganik tabakalar.

Oksit filmleri; yaklaşık olarak 10-20 atom mertebesinde bir derinliğe nüfuz eden tabakalardır. Bütün sıcaklık değerlerinde H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> ve SO<sub>2</sub> gibi gazlar, oksit film kalınlığını arttırmaktadır. Oksit tabakaları birleşecek yüzeylerin temasını önleyip, birleşme esnasında difüzyon yoluyla sinterlemeye yol açarak, bağ teşekkülünü geciktirir ve ara kesitte tane sınırı difüzyonunu engelleyerek, boşluk kalmasına sebep olur [76]. Oluşması muhtemel makro, mikro ve başlangıç teması boşluklardan sonucunun sebebi oksit filmleridir [72].

Yağ giderme, yüzey temizleme işleminin genel bir parçasıdır. Alkol, trikloretilen, aseton, arıtıcılar ve diğer birçok temizleme aracı kullanılabilir.

Genellikle tavsiye edilen yağ giderme teknikleri karışıktır ve çeşitli çözücülerde kademeli olarak asitle temizleyip suda durulama işlemlerini kapsar. Bu temizleyicilerin bazıları zehirli olduğundan kullanıldıklarında emniyet için tedbirler alınmalıdır [60]. Ayrıca temiz yüzeyler elde etmek için vakumda ısıtma da kullanılabilir. Bu metodun faydalı olması yüzeydeki filmlerin yapısına ve metal tipine büyük ölçüde bağlıdır. Organik, sulu veya gazlı adsorbe edilen tabakalar, yüksek sıcaklıkta vakum ısı transferi ile kolayca ortadan kaldırılabilir. Yüksek sıcaklıkta bazı metallere bağlı oksitleri çözmek mümkündür. Zirkonyum, titanyum, tantalyum, kolombiyum gibi bazı malzemeler buna örnektir. Yüzey adsorpsiyonunun veya kimyasal adsorpsiyonlu tabakaların oluşmasını engellemek için dikkatli kullanılmalıdır [60].

Sonuç olarak, daha düşük sıcaklık ve basınçla daha iyi hazırlanmış ve korunmuş yüzeylerle daha iyi kaynaklanmış yüzeyler elde edilmektedir.

### **3.5.5 Kaynak Ortamı ( Atmosferi )**

Difüzyon kaynağında parça yüzeylerinde 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.

Temiz yüzeyin korunması genellikle yüzey hazırlamayı takip eder. Vakumlu bir ortam kirlilikten korumanın devamını sağlar [5,7,41]. Saf hidrojen atmosferi, oksit miktarını minimuma indirir ve yüksek sıcaklıkta bir çok metalin mevcut yüzey oksitlerini azaltır. 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 edilmemektedir. Argon, azot, helyum ve bazen nitrojen yüksek sıcaklıklarda temiz yüzeyleri korumak için çok uygundur. Bu gazlar kullanıldığında yeniden kirlenmeden kaçınmak için gazların saflığı çok yüksek olmalıdır [60].

Soygazlar ise, 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 sağlayabilmekte ise de, uygulamada  $1.3 \times 10^{-2}$  ile  $1.3 \times 10^{-5}$  Pa'lık basınçlar kullanılmaktadır [77].

Vakum sırasında parçanın kaynaklanacak yüzeyi oksitlenmeden korunduğu gibi yüzeydeki maddelerin temizlenmesini de sağlamaktadır [3,7]. Sıcak metal vakumda tutulduğunda gaz çıkışı olur. Difüzyon esnasında numune yüzeylerine doğru metalden büyük kısmında gazların transferi ilerler ve gaz çıkışı devam eder. Metalden çıkan gaz miktarı, çözülmüş olan gaz miktarına, sonraki işlemdeki metalden sıcaklığına ve metalden metale değişen difüzyon hızına bağlıdır. Bu yüzden gaz çıkışı, yüksek sıcaklıklarda mikro çatlakların iyileşmesini artırır. Difüzyon bağlantılı kaynakların yüksek dayanımı ve yumuşaklığı için önemli bir faktördür [3], Vakumda yüksek sıcaklıkta bakır numuneyi tutma dayanımını % 20-25 değerinde artırır. St45 Çeliğini vakumda 10 dakika tutma, dayanımını %10-15 değerinde arttırmaktadır [3].

Çözülmüş gazların miktarı ve yüzey filmlerinin kalınlığı ile belirlenen bir limit için vakumun işlem esnasında değerinin artırılmasının yararlı olacağı görülmüştür.

Avantajlarına rağmen vakum pahalı olabilir, özellikle vakum ortamının ilk yatırım masrafı yüksek olmaktadır. Tatmin edici bir difüzyon kaynağı, koruyucu gaz ortamlarının iyi kullanımı ve doğru yöntemlerle elde edilebilir. Bazı durumlarda koruma olmaksızın yapılan birleştirmeler önemli derecede hızlı bir şekilde küçük parçaların birleştirilmesinin mümkün olduğu kanıtlanmıştır [7,9].

### **3.6 Difüzyon Kaynağı Yapılabilen Malzemeler**

Günümüzde difüzyon kaynağı çok sayıda ve değişik malzemeye farklı alanlarda ve amaçlarla geniş bir şekilde uygulanmaktadır. Birbirinin aynı ya da farklı bir çok malzeme bu kaynak yöntemiyle birleştirilmektedir. En başarılı ve yaygın uygulama titanyum alaşımlarından uçak parçaları yapımında görülmektedir.

Son zamanlarda Ti-alüminidleri, yüksek mukavemetli Al-alaşımları, Ni-esaslı alaşımlar, Metal-matrisli kompozitler difüzyon kaynağıyla birleştirilmiştir [78].

Benzer olmayan metal ve alaşımlarda, kaynak sonrası birleşme bölgesinde kırılğan intermetalik faz oluşuyor ya da yeniden ergime ile malzeme gevrekleşiyorsa, ya da dayanım azalıyorsa difüzyon kaynak yöntemi tercih edilmektedir.

Çizelge 3.2 Metal ve alaşımlarının difüzyon kaynak yöntemi ile ara yüzey levhasız ve ara yüzey levha kullanılarak kaynak edilebilirliği [29].

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	
1	x	x		x		x	x					x					x	x	x	x						1
2		x			x	x							x							x						2
3																x								x		3
4				x				x		x																4
5	x	x			x	x	x	x	x				x		x				x	x	x				x	5
6						x		x																		6
7							x	x																		7
8							x	x	x	x		x		x	x				x	x						8
9				x			x	x	x	x		x	x	x	x				x	x	x	x		x	x	9
10								x	x				x	x	x				x	x			x		x	10
11											x					x			x	x						11
12												x				x										12
13	x												x		x						x					13
14									x					x	x				x					x	x	14
15					x										x		x		x	x			x	x		15
16						x										x			x		x			x		16
17	x																x									17
18																	x									18
19	x				x			x	x						x				x		x				x	19
20	x			x				x	x						x					x	x			x	x	20
21									x										x	x	x					21
22																						x			x	22
23																										23
24									x		x									x					x	24
25																										25
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	
1	Alüminyum ve alaşımları											14	Tantal ve alaşımları													
2	Berilyum ve alaşımları											15	Titanyum, zirkonyum ve alaş.													
3	Krom ve alaşımları											16	Tungsten ve alaşımları													
4	Kobalt ve alaşımları											17	Uranyum ve alaşımları													
5	Bakır ve alaşımları											18	Vanadyum ve alaşımları													
6	Altın ve alaşımları											19	Düşük karbonlu çelikler													
7	Magnezyum ve alaşımları											20	Paslanmaz çelik													
8	Molibden ve alaşımları											21	Dökme demir													
9	Nikel ve alaşımları											22	Karbürler													
10	Niobyum ve alaşımları											23	Grafit													
11	Paldyum ve alaşımları											24	Seramikler													
12	Platin, İridyum ve alaşımları											25	Cam													
13	Gümüş ve alaşımları																									

Diğer malzemelere de uygulanmakla beraber, difüzyon kaynağının en çok uygulandığı metal, titanyumdur. Titanyum alaşımları ara tabakaya ihtiyaç göstermeden kolayca kaynatılabilmektedir.

Titanyumun bu tür kaynaktaki en elverişli yönü, kendi oksiti de dahil olmak üzere, yüzey atıklarını, yüksek sıcaklıklarda basınç uygulandığı zaman, çözme kabiliyetidir. Titanyumda, katı çözelti içindeki oksijen, sertliği artırıp, kararlı fazı

oluşturarak, kaynağı güçleştirmekte ve yüzeyde çatlığa yol açmaktadır. Bu sebeple, titanyumun difüzyon kaynağında koruyucu atmosfere ya da vakuma gerek duyulmaktadır. Koruyucu gaz olarak argon kullanıldığı taktirde, titanyumda çözünmeyen argonun arakesite hapis olarak, boşluk meydana getirmesini önlemek için, argonun kaynak bölgesinde hareketliliğinin sağlanması gerektiği belirtilmiştir [70].

Titanyumu difüzyon kaynağı açısından cazip kılan diğer bir tesir, yüzeyinin temizlemeye ihtiyaç göstermemesidir. Bununlar beraber, ergitme kaynağına yatkın olmaması, bu metalin difüzyon yoluyla birleştirilmesini zorunlu kılmaktadır.

Titanyumun, yüksek bir mukavemet-yoğunluk oranına, uzun bir yorulma ömrüne, iyi bir korozyon direnci ve yüksek sıcaklıkta mukavemet özelliklerine sahip olması, havacılık sanayinde geniş bir tarzda kullanılmasına sonuç vermiştir. Kaynak esnasında nispeten yüksek sıcaklık uygulanmasının getirdiği maliyet artışı, bu sebeple göz ardı edilmektedir.

Ti –alaşımları için kaynak parametreleri, birçok araştırmacı tarafından verilmiştir. Kaynak, yüksek sürünme sıcaklığı gerekmektedir. Sürünme hızı, tane boyutu ve mikro yapıya bağlı olup, kaynak kalitesini etkilemektedir. Sürünme hızı tane büyüklüğü arttıkça ya da iğnemsî bir mikro yapı bulunduğu zaman azalmaktadır. Ti-6 Al-4 V, Ti-6Al-2 Sn-4 Zr-2 Mo ve Ti-4 Al-4 Mo-2 Sn-0,55 gibi çift fazlı, süper plastik titanyum alaşımları 880°C ile 940°C sıcaklıklarda, 0,6 ile 2 Mpa basınç altında, 3 saat içinde kolayca birleştirilebilmektedir [70].

Titanyum'un difüzyon kaynağında, küçük boşlukların, bağlantının çekme, kayma ve yorulma özelliklerini fazla etkilemediği tespit edilmiştir.

Ti-alaşımlarının difüzyon kaynağında kullanılan ara tabakalar, saf titanyumdan oluşmaktadır. Titanyum alaşımından mamul fan kanatçıklarının difüzyonla lehimlenmesinde ise Cu ve Ni ara tabakalar kullanılmaktadır. İri taneli titanyum alaşımları için, düşük basınç altında, ince taneli, süper plastik bir Ti-alaşımı ara tabaka olarak kullanıldığı zaman, mukavim bir komşu metal elde edilmektedir.

Nikel esaslı alaşımlar, süper plastik malzemelerin titanyumdan sonraki en önemli grubudur. Nikel esaslı alaşımların difüzyon kaynağıyla birleştirilip, süper plastik olarak şekillendirildiği gösterilmiştir.

Titanyum alaşımları ile, paslanmaz çelik arasında da yüksek mukavemetli katı hal difüzyon kaynağı gerçekleştirilmiştir. Yalnız TiFe, TiFe<sub>2</sub>, TiCr<sub>2</sub>, Ti<sub>2</sub>Ni gibi bileşiklerle, ana metaller arasında intermetalik yapıların oluşması sebebiyle bağlantının mukavemeti azalmaktadır [70].

Yine kısa veya uzun fiberli, metal matrisli kompozitlerin, seramiğin seramikle ve metallerin seramiklerle difüzyon kaynağında, son yıllarda önemli ilerlemeler sağlanmıştır.

Seramiklerin ( Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiC, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ) difüzyon kaynağı, seramiklerin mükemmel korozyon ve aşınma dirençleri sebebiyle, birçok ülkede, geniş bir şekilde çalışılmıştır. Bunların dezavantajları ise, süneklik yetersizliği, kusur hassasiyeti ve çok değişken olmalarıdır. Bunun için seramiklerle metallerin difüzyon kaynağı çıkar yol olarak gözükmektedir. Ayrıca, tokluğu geliştirmek için de seramik matris seramik fiberli kompozitler üretmek gerekmektedir.

Ti alaşımları, birçok seramiği katı halde redüklemektedir. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ile 945°C sıcaklıkta ve vakum altında 2 saat bekletildiklerinde, 2ηm kalınlıkta bir reaksiyon tabakası oluştuğu tespit edilmiştir. Sıcaklık 1500° C'ye çıkarıldığında, tabaka 70ηm'ye ulaşmaktadır. 1000°C gibi yüksek sıcaklıklarda çalışıldığında, termal gerilme problemleri oluşmaktadır. Bu problemler, çok katlı ara tabakalar kullanılarak çözülmektedir.

Seramiklerde en heyecan verici gelişmelerden birisi, stabilize edilmiş zirkonyum (Yttria ile) TZP ve TZP + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kompozitlerinin süper plastik hale getirilebilmesidir. Bunun, difüzyon kaynağı için doğrudan bazı göstergeleri vardır. Çünkü, süper plastik şartlar altında gayet iyi ara yüzey temasına ulaşılmaktadır.

Mutah v. D (1989), BaCO<sub>3</sub>, Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve CuO'in uygun oranlarda karıştırılıp havada 12 saat süreyle 930°C 'de kalsine edilmesiyle elde edilen YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-y</sub>

seramiğinin difüzyon kaynağını incelemiş ve ara tabaka kullanmadan 930°C ile 950°C 2de 4 saatten uzun kaynak süresiyle birleştirmeyi başarmışlardır.

Alüminyum ile metalürjik olarak uyum göstermeyen bakır arasında da difüzyon kaynağı uygulanmıştır. Calvo (1988), Al ile Cu'ı difüzyon kaynağı ile 520°C 'lik sabit sıcaklık 15 dakikalık süre ve 0,25 ile 1,60 Mpa'lık basınçlarla birleştirerek, en büyük problemin intermetalik bileşik ve ara fazlar olduğunu tespit etmişlerdir [22].

### **3.7 Avantaj ve Dezavantajları**

Difüzyon kaynağının uygulanmasında dezavantajları olduğu gibi bilinen diğer kaynak işlemlerine göre daha fazla sayıda avantajlara sahiptir. Difüzyon kaynağının avantajları aşağıda belirtildiği gibidir.

- 1- Çok farklı malzemelerde, homojen ve gerilmesiz bağlantılar hazırlanmasını mümkün kılar.
- 2- Birleştirilen parçalar, minimum distorsiyon ve sonradan işleme ve düzeltme gerektirmeksizin birleştirilebilirler.
- 3- Ergitme kaynağı ile birleştirilemeyen malzemelerin birleştirilmesine imkan verir.
- 4- Herhangi bir özel ihtiyaca cevap vermeyen farklı yüzey geometrilerine sahip parçaların birleştirilmesini mümkün kılar. Bununla beraber basınç uygulanması sınırlayıcı bir faktör olabilir.
- 5- Malzemeler katı halde birleştirilirler.
- 6- Sınırlı kenarlı parçalar birleştirilebilirler.
- 7- Difüzyon kaynağı malzemelerde yüksek bağlantı kalitesi sağlamaktadır. Birleştirme, ana metalin kendisinin mikro yapısına ve özelliklerine çok benzer gerçekleşir. Bu özellikle hafif sanayide çok önemlidir. Ek yerinin mukavemeti ana metalin mukavemetine yaklaşmaktadır.

8- Ergitme kaynağı için yaygın bir şekilde ön ısıtmaya gerek duyan metallerin büyük bir bölümü difüzyon kaynağı ile birleştirilebilir. Örneğin, bakırın kalın kısımları. Ayrıca uygulanan kaynak sıcaklığının düşük olması bu ısının aynı zamanda bir ısı işlem olarak ta kullanılabilmesini sağlar.

9- Ergitme kaynağı ile yapılan birleştirmelerde görülen kusurlarla karşılaşmaz. Sıcak plastik değiştirmeye kazanılmış anizotropik özellikler (lifli yapı, uzamış kalıntılar gibi ) kaynak ile bozulmaz.

10- Birleştirilen parçalar ağırlık kazanmaz. Özellikle hafif olması gereken bal peteği ve sandviç panellerde önemlidir.

Difüzyon kaynağı uygulamalarında görülen bazı sınırlamalarda aşağıdaki gibidir.

1- Kaynak ekipmanlarının maliyeti genelde fazladır. Bu ekonomik olarak üretilen maksimum parça boyutunu sınırlandırır. Parça boyutları büyüdükçe maliyet artar.

2- Isıl çevrim geleneksel kaynak işlemlerinkinden daha uzundur.

3- İşlem büyük üretim miktarlarına uygulanamaz. Buna rağmen, belirli sayıdaki bir grup aynı anda birleştirilebilirler.

4- Vakum ve koruyucu atmosferin sınırlayıcı ortamında, ısı ve yüksek sıkıştırma kuvvetinin aynı anda uygulanmasının gerekliliği difüzyon kaynağında en temel ekipman problemidir.

5- Kalite kontrol için, tahribatsız muayene yöntemleri kullanışlı değildir. Fakat kaynak kalitesinin yüksekliği nedeniyle güvenilirlik gerektiren birçok yerde kullanılmaktadır.

6- Birleştirme yüzeyleri ve birleştirme parçalarının dolgusu, geleneksel sıcak basınç kaynağına göre daha fazla yüzey hazırlama özeni gösterilir. Bağlantı temizliğinin uniform olması ve düzlemlilik, difüzyon kaynağının kalite kontrolünde önemli faktörlerdir.

Bu eksikler, işlemin klasik kaynak yöntemlerinin yerini almasına engeldir. Fakat özel kaynak problemlerini çözmeye de bu yöntemi kullanmak gerçekten etkileyicidir.

### **3.8 Difüzyon Kaynağı Teknikleri**

Difüzyon kaynağı günümüzde şu maksatlarla yapılmaktadır.

- a- Bilimsel çalışmalar için ( araştırma amacıyla ),
- b- Mevcut bir tekniği kullanarak bir parçayı üretmek içindir,
- c- İleri teknoloji kullanılan sistemlerde ( genel mühendislik, havacılık ve uzay sanayi, savunma sanayi, nükleer sanayi, elektronik sanayi ).

Bunların birincisi ile teste tabi tutulabilecek difüzyon kaynağı tipleri geliştirilirken, ikincisi ile istenen elemanı elde etmek mümkündür. Birleştirilen malzemeler arasında ilave bir malzeme kullanılıp kullanılmamasına göre difüzyon kaynağı;

- 1- Difüzyon lehimleme ( Folyo kullanılan ),
  - a- Tek ara tabaka kullanılan difüzyonla lehimleme,
  - b- Birden çok ara tabaka kullanılan difüzyonla lehimleme.
- 2- Ani sıvı faz kaynağı,
- 3- Direkt difüzyon kaynağıdır.

Difüzyonla lehimlemede birleştirilecek yüzeyler arasına, ergime sıcaklığı ana malzemeninkinden daha düşük, levha şeklinde ilave bir malzeme yerleştirilir. Çok katlı ara tabakalar, hem termal gerilmeyi, hem de diğer gerilmeleri giderici ek bir etkiye de sahiptirler. Ani sıvı faz kaynağı, ilk safhasında hızlı ısıtma ile yüzeylerden biri ya da her ikisinin basınç altında çok kısa bir süre için ergitilip hızlı soğutulduğu bir difüzyon kaynağı olarak tanımlanmaktadır. Hem difüzyon lehimleme, hem de difüzyon kaynağında yüzeylerin çok hassas bir şekilde işlenmiş olmaları gerekirken ani sıvı faz kaynağında 80 numara zımpara ile ya da ya da hassas tornalama ile işlenmesinin yeterli olduğu bilinmektedir.

Difüzyon kaynağı, uygulama ortamına göre iki grupta incelenir;

- 1- Koruyucu gaz atmosferinde difüzyon kaynağı,
- 2- Vakum altında difüzyon kaynağı olmak üzere ikiye ayrılır.

Endüstriyel maksatlarla uygulanan difüzyon kaynağı, büyük kütleli parçalara uygulanan difüzyon kaynağı ve ince parçalara uygulanan difüzyon kaynağı olarak ikiye ayrılır. Büyük kütleli difüzyon kaynağı, kalın kesitli işlenmiş parçaların, mekanik olarak uygulanan nispeten büyük (14 Mpa) basınç altında birleştirilmesini ihtiva etmektedir. Japon araştırmacılar, Ti-6Al-4V alaşımından birçok uçak parçasını  $10^{-3}$  Pa vakum altında, 900°C sıcaklıkta, 2,94 Mpa bir basınç uygulayarak 2 saatte kaynak etmişlerdir. Difüzyon kaynağı ile üretilen ağır parçalar malzeme kullanım ve masrafını azaltmak üzere, karmaşık şekilli, işlenmiş ya da dövülmüş parçaların yerini almaktadırlar [72]

İnce Ti-6Al-4V alaşımlı levhalara da 2 Mpa'lık gaz basıncı ile difüzyon kaynağı uygulanabilmektedir.

Özetle, difüzyon kaynağı teknikleri aşağıdaki faktörlere göre uygulanmaktadır [70]:

- a- Kaynak atmosferi; hava, soy gaz veya vakumdur.
- b- Kaynak basıncı, mekanik, hidrolik, izostatik ve diferansiyel termal genişleme şeklinde uygulanabilmektedir.
- c- Isıtma; dirençle ısıtma, atmosfer kontrollü fırında ısıtma ya da endüksiyonla ısıtma şeklinde yapılabilmektedir.

### **3.9 Difüzyon Kaynağı Uygulama Alanları**

Daha önce ifade edildiği gibi, difüzyon kaynağı birçok avantajlara sahip bir imal usulüdür. Yüksek dayanımlı kaynaklara ihtiyaç duyulan karmaşık ve pahalı malzemelerin kullanıldığı uygulama alanları;

- Genel mühendislik,
- Havacılık ve uzay sanayi,
- Savunma sanayi,

- Nükleer sanayi,

- Elektronik sanayi şeklinde ana gruplara ayrılabilir [4,5,45,79].

Genel mühendislik alanında difüzyon kaynağı, kaynak çatlama, gevrek metallar arası yapıların oluşması tehlikesinin bulunduğu durumlarda kullanılmaktadır. Difüzyon kaynağının özel avantajlar sunduğu bağlantı türleri şunlardır.

- Yüzey kaplama.

- Difüzyon kaynağıyla bir defada birleştirilmesi mümkün karmaşık şekilli ve içi boş yapı ve elemanlar.

- Döküm ve dövme parçalarda difüzyon kaynağı. Dökümde karmaşık maçalardan, dövmede girinti açılardan doğan problemlerin üstesinden gelmede kullanılabilir.

Difüzyon kaynağı ile piston, silindir blokları gibi hidrolik elemanlar da üretilmiştir. Burada esas gaye çeliklerin yüzeyinin bronz (%80 Cu - %10 Sn - %10 Pb) ile kaplanarak, ağırlıktan tasarruf sağlamaktadır.

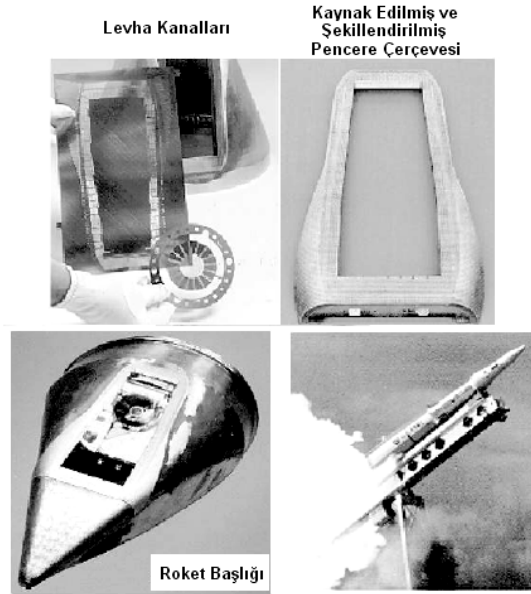
Özellikle de Rusya'da difüzyonla kaynak, pahalı olan büyük skalalı ve büyük kütleli üretimlerde kullanılmaktadır. Yüksek hızlı makinelerde, traktörlerde, arabalarda ve uçaklarda basınç plakaları ve fren pabuçları için seramiğin çeliğe, dökme demirin çeliğe bağlanması birer örnektir. Yöntem sert metallar için ve kömür kesicilerin üzerindeki yivlerin kesici takımlara, karşılıklı seramiklere yerleştirilmesi için, yüksek hız çeliklerinin delme işlemi, raybalama işlemi ve frezeleme işlemi için, kalıp setleri için sert alaşımlar ve yapı çeliğinin kaynağı söz konusu olduğunda, berilyum bronzunun seramik alaşımla yerleştirilmesinde metal sifon diyagramları için kullanılır [71].

Difüzyon kaynağı havacılık sanayinde, daha ucuz, daha verimli, daha hafif ve dizayna daha yatkın parçaların üretimini mümkün kılarak, adeta bir çığır açmıştır. Havacılık sanayi difüzyon kaynağını, yüzey - yüzeye ya da kenar kenara temas eden bağlantıların üretiminde, genellikle dövme ve geleneksel kaynak usullerinin yerine

kullanılmaktadır. Havacılık sanayinde difüzyon kaynağı uygulamalarına ait örnekler şunlardır.

Amerika’da aralarında Northrop, Rockwell, Douglas Aircraft gibi şirketlerin bulunduğu 12 firma, 1000 ila 5000 tonluk presler kullanarak, difüzyon kaynağı ve süper plastik şekillendirme ile, Ti alaşımlarından F15, füze yuvası, B1 bombardıman uçağı için patlama lülesi, T 38 uçağı için ana iniş arka kapısı, rüzgar kanatçıkları, imal etmişler ve maliyette %40'lara varan tasarruflar sağlamışlardır [80].

Difüzyon kaynağıyla roket başlığı için uygun malzemeler yapılabilir. Bunlardan bir tanesi Şekil 3.9’da görüldüğü gibi roket başlığı içindeki sensörler için soğutma sağlayan pencere çerçevesindeki noktalar difüzyon kaynağı ile yapılabilir [81].



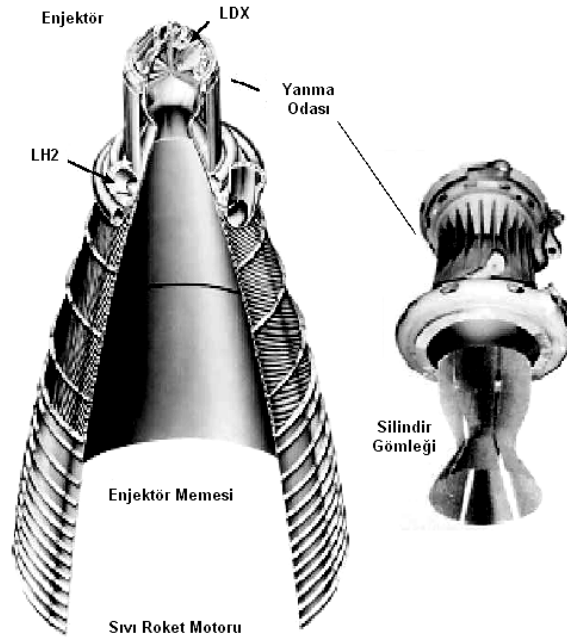
Şekil 3.9. Roket başlığı pencere çerçevesi kanal uygulaması [81].

Yine Amerika’da Rhor şirketi (California), petek şeklinde dizayn edilmiş olan bir hava kanalını, difüzyon kaynağı ile bir defada işleme üretmeyi başarmıştır [76].

F 104 uçağının gövde halkası, H53 helikopteri için helikopter poyrası, Boing 747 için iniş takımları, roket motoru için itici, USA uzay mekiği için radyoaktif ısı kalkan paneli, JT 90-70/59 motorun içi boş fan göbeği, TF 30-P100 jet motorunun ateşleme odası sayılabilir [5,45]. B1 bombardıman uçağı için de birçok parça difüzyon

kaynağı ile üretilmiştir. Kritik kanadı oluşturan bölüm, dengeleyici destek çerçevesi, diğer çeşitli karmaşık parçaları, bölümleri ve kanat kirişini içine alan 66 farklı parça başarıyla difüzyon kaynağı ile kaynaklanmıştır. Ayrıca 25 adet difüzyon kaynaklı parçalardan oluşan USA uzay mekiğinin ana motor itici bölümü üretilmiştir.

[81], Yüksek sıcaklık ve basınca maruz kalmasından dolayı sıvı roket motoru (Şekil 3.10) uygulamaları yapılmıştır.



Şekil 3.10. Sıvı roket motorunun yanma odasındaki, silindir gömleğinde bulunan kanallara difüzyon kaynağı uygulaması [81].

SNAP – 10A reaktöründeki NaK akışkanının pompalanması için dizayn edilen termoelektrik pompa üretimi de değişik bir uygulamadır [45].

İngiltere’de Rolls Royce şirketi, uçak türbin kanatlarını (Ti alaşımı ), “uyarılmış difüzyon kaynağı” adını verdiği; (Cu ve Ni’den mamul ara tabakaları, iki panel arasına, mikro işlemci kontrollü bir elektro kaplama metoduyla yerleştirip, basınç altında ve vakumda, yine mikroişlemci kontrollü bir ısıtma işlemi birleştirmişlerdir) bir yöntemle üretmiştir [59].

Bu yöntem, avantajları sayesinde süper alaşım içinde bulunması gereken özel çökelti fazları, kaynak sonrasında dağılımlarını koruyabildiklerinden tercih edilir

[3,4]. Süper alaşımların türbin kanat malzemelerinin difüzyon kaynağı uygulanan tipleri Udimet 700, In 718, Reni 41, Reni 80, Reni 95 ve MA 6000'dir [82].

Difüzyon kaynağının silah sanayindeki uygulamalarında amaç; diğer tekniklerle daha ekonomik ve entegre olarak üretilemeyen yapı ve elemanları üretmektir. Mesela, hidrojen mevcudiyetinin bir problem olduğu, martenzitik yapıdaki kaynaklı bağlantılarda, geleneksel kaynak usulleri yerine difüzyon kaynağı uygulanmaktadır. Yine planör tipi uçakların üretiminde, çelik ve alüminyumun difüzyon kaynağıyla birleştirilmesi, büyük kolaylıklar sağlamaktadır [76].

Nükleer endüstride difüzyon kaynağı çok yaygın olarak kullanılmamakla beraber, Barttle “ Sıcak – İzostatik Difüzyon Kaynağı” nı, küçük  $UO_2$  levhacıklarıyla düz plaka tipi yakıt elemanları üretiminde kullanmışlardır. Bu elemanlar da Westinghouse Bettis basınçlı su reaktöründe ikinci çekirdek yüklemesi için kullanmışlardır. İkinci bir uygulama, Amerikan ordusu için seyyar güç reaktörlerinin, tüp şeklindeki paslanmaz çelik ve  $UO_2$ 'den oluşan yakıt elemanlarının üretilmesidir [70].

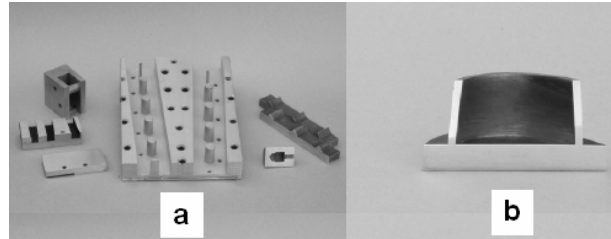
Yine, sıcak izostatik difüzyon kaynağı ile, alüminyum kaplanmış tüp şeklindeki uranyum alaşımı yakıt elemanları da üretilmiştir [70,76]. Bunların dışında bir başka reaktör için tek parça termoelektrik bir pompa, elemanları difüzyon kaynağı ile birleştirilmek suretiyle, imal edilmiştir. Nükleer güç reaktörlerinde yaşanan tip Al (SAP 895) alaşımı ile 300 serisinden paslanmaz çelikler arasındaki tüp geçişi difüzyon kaynağı ile yapılmış, Fe – Al metaller arası bileşiklerin oluşmasını önlemek için kaynak bölgesinde, tungsten bir difüzyon engeli kullanılmıştır [76]. Yine Hindistan'da ağır su ile çalışan nükleer santrallerde kullanılacak bimetal keçe üretiminde difüzyon kaynağı başarıyla uygulanmıştır [83].

Elektronik devre üreticileri, silikon bir parçadan entegre devre üretildikten sonra, çipin bir alt tabakaya bağlanması gibi işlerde birçok birleşme tekniği kullanmaktadır. Mikro elektrik sanayinde, silikon çiplerin bakır veya Ni – Fe esaslı led çerçevesine bağlanmasında, ara tabaka olarak devre paketlerinin imalinde kullanılan usullerden biri de difüzyon kaynağıdır [84].

Elektriksel vakum ekipman parçaları genellikle difüzyon kaynağı ile yapılır. Difüzyon kaynağı sıkı vakumlu, ısıtmaya titreşime ve deformasyona dayanıklı birleştirmelerin olduğu yerler için yapılır. Elektronik ekipmanın güvenilirliği difüzyon kaynağı kullanmakla % 300-400 iyileştiği ve katodik, anodik, elektrik zaman gecikme sistemleri, X ışını depolama tüpleri ve diğer birimlerin ömürlerinin de 10 -12 kez uzadığı görülmüştür. Elektron mikroskobu ve elektrik otomasyonu üzerine yapılan çalışmalarda elektron mikroskop parçaları yapmak için difüzyon kaynağı kullanılır. Askeri alanda da, tabanca namlusu, top mermileri, roketlere başarılı bir şekilde difüzyon kaynağı uygulanmıştır [5,45].

Son yıllarda difüzyon kaynağının uygulama alanlarına, referans ve kalibrasyon bloklarının üretimi de girmiştir. Özellikle, hassasiyetin ve mukavemetin sağlanması amacıyla, farklı malzemeler birleştirilerek imal edilen, bileşik malzemeler, bu konuda difüzyon kaynağını avantajlı kılmaktadır.

Yüksek hassasiyette Şekil 3.11 a’da ki alüminyum parça ve Şekil 4.11 b’de ki paslanmaz çelik örnek numuneler üretilmiştir.



Şekil 3.11. a- Yüksek hassasiyetli alüminyum malzeme, b- Yüksek hassasiyetli paslanmaz çelik malzeme [85].

Elektrik alanında esnek elektrikli iletkenlerin, çok sayıda levhacığın birleşmesinden meydana gelen yapısı, uçların difüzyon kaynağı ile birleştirilmesi sonucu üretilebilmiştir.

Difüzyon kaynağının diğer uygulanma alanı biyomedikal mühendisliktir. Özellikle, çeşitli metal protezlerin, seramiklere kaynağı veya kaplanması bu konudaki yeni alanlardan birisidir.

### 3.10 Difüzyon Kaynağının Diğer Kaynak Metotlarıyla Karşılaştırılması

Difüzyon kaynağı, diğer kaynak yöntemleri ile kıyaslandığında birçok ayırıcı etken ve özellik göze çarpmaktadır. Bu kaynak, son derece spesifik bir kaynak yöntemi olup, önemli yerlerde (sanayi, mühendislik uygulamaları v.s.) kullanılır. Elbette her kaynak yönteminde olduğu gibi, bu kaynak yönteminin de hem avantajları hem de dezavantajları mevcuttur.

Difüzyon kaynağı, diğer kaynak yöntemleriyle karşılaştırılarak hangi durumda hangi kaynağın daha iyi olacağına karar verilir.

Difüzyon kaynağı, çok farklı malzemelerde homojen ve gerilmemiş bağlantılar hazırlanmasını mümkün kılar. Diğer kaynak yöntemlerinde en büyük problem, oluşan gerilmelerin fazlalığı ve ısı sebebiyle malzemede meydana gelen mikro yapı bozukluklarıdır. Difüzyon kaynağında bu problemler büyük ölçüde ortadan kalkmaktadır.

Birleştirme esnasında, ana malzemede istenmeyen metalürjik yapıların oluşma ihtimali difüzyon kaynağında düşüktür. Ana malzemede oluşan bu istenmeyen metalürjik yapılar malzeme yapısını bozmakta ve kötü bir kaynak elde edilmesine sebep olmaktadır.

Bazı malzemelerin ergitme kaynağı ile birleştirilmesi mümkün olamamaktadır. Ergitme kaynağında ısının tesiri altındaki bölgede malzemelerin ergimesi sebebiyle malzeme mikro yapısı değişmektedir. Bu da homojenliği bozmaktadır. Homojenlik söz konusu olduğunda difüzyon kaynağı tercih edilmelidir. Çünkü difüzyon kaynağı, malzemeler arasındaki potansiyel farkıyla yapılan bir kati hal birleştirme kaynağıdır.

Difüzyon kaynağı, herhangi bir özel ihtiyaca cevap vermeyen farklı yüzey geometrilerine sahip parçaların birleştirilmesini mümkün kılar. Birleşme süresi, bağlantı alanından bağımsızdır. Dolayısıyla bir kerede geniş alanı ya da karmaşık şekilli bağlantılar birleştirilebilmektedir. Bununla beraber basınç uygulanması sınırlayıcı bir faktör olabilir.

Malzemeler katı halde birleştirilir. Metalürjik şartlar genellikle uygun ve kolayca etkilenebilir durumdadır. Çünkü çekme az, gerilmeler küçüktür. İşte bu durum da difüzyon kaynağını diğer kaynak yöntemlerinden ayırır.

Difüzyon kaynağı, uzay (yerçekimsiz) ortamda bile iyi bir birleştirmeye imkân sağlamaktadır. Fakat bununla birlikte koruyucu gaz atmosferi kullanılması da kaynak kalitesinin daha iyi olmasını sağlar. Diğer kaynaklar ortamı seçerler.

Parçalardaki deformasyon, difüzyon kaynağında çok küçük sınırlar içerisinde tutulabilir, dolayısıyla da pek çok uygulamada ikinci bir işleme gereksinim duyulmaz. Ergitme kaynağında öngörülen deformasyonlar, ön ve son tavlama ihtiyaçları, bu teknikte görülmez.

Kaynak işlemi, difüzyon kaynağında tam otomatik hale getirilebilir. Dolayısıyla, kalifiye eleman ihtiyacı diğer kaynak yöntemlerine göre azalır.

Metalürjik açıdan uyumsuz ve birbirinden tamamen farklı iki metal ya da bir metalle, metal olmayan bir malzeme birleştirilebilir.

Katı hal kaynakları ile kıyaslandığında difüzyon kaynağı, esas itibari ile difüzyon kontrollü bir tekniktir.

Seramik ve kompozitlerin, metal ve diğer malzemelerle birleştirilmesinde, günümüzde en verimli ve en etkili metottur. Seramiklerin kaynak tekniğini belirleyen en önemli faktör, bu malzemelerin gevrekliğidir. Bu durum, kaynaktaki deformasyon kullanmanın mümkün olmadığı anlamına gelir. Dolayısıyla, seramiklerin kaynağında difüzyon kaynağı katı hal kaynakları içerisinde mümkün tek metottur.

Bu yöntemin dezavantajlarını da söyle sıralayabiliriz; diğer kaynak yöntemlerine göre donanım maliyeti yüksektir. Çok temiz ve hassas yüzey hazırlanmasına ihtiyaç gösterir ve koruyucu (gaz) atmosferi gerektirir. Bu kaynak işleminde bazen çok uzun süreler gerekebilir. Özel bir kaynak hücresi gerektiği için parça boyutları büyüdükçe maliyet artar ve son olarak metalürjik açıdan dikkat

edilmesi gereken en önemli yönü ise, ara kesitte metaller arası bileşiklerde ara fazların oluşması ihtimalinin yüksek oluşudur.

Bu eksikler, işlemin klasik kaynak yöntemlerinin yerini almasına engeldir. Fakat özel kaynak problemlerini çözmede bu yöntemi kullanmak gerçekten etkileyicidir.

## **4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR**

### **4.1 Çalışmanın amacı**

Bu çalışmanın amacı, ergitme kaynağı ile birleştirilmesi mümkün olmayan alüminyum ve bakır malzeme çiftinin difüzyon kaynağı yöntemi ile argon koruyucu gaz atmosferi altında, optimum birleşme şartları kullanarak yapmak ve oluşan intermetalik fazların incelenmesidir.

### **4.2 Deney Düzenekinin Kurulması**

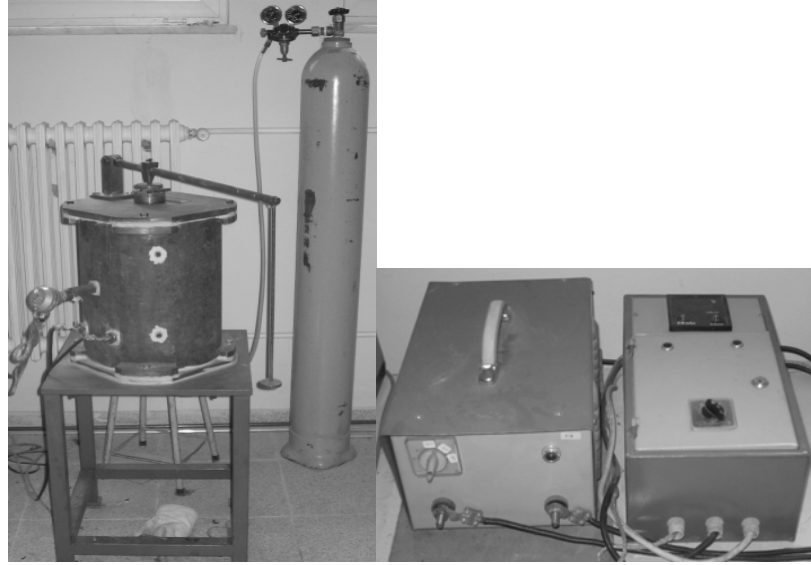
Difüzyon kaynak işlemi ile parçalar birleştirilmeye başlandığı tarihten itibaren bir çok cihaz geliştirilmiş [1,50,86] fakat birçok durumda da difüzyon kaynak işlemi için ısıtma fırını da kullanılmıştır [10,29,50].

Geçmişte difüzyon kaynağını etkileyen faktörlerin (sıcaklık, basınç, gaz veya vakum) hepsinin birlikte kontrolünü sağlamak oldukça zor olmuştur. Sıcaklık, basınç ve gaz basıncını kontrol edebilen difüzyon kaynağı cihazı imalatı gerçekleştirmiştir. BAÜ-Müh Fak'de [1] bu difüzyon kaynağı cihazı deneysel çalışmaları da yapılmaktadır.

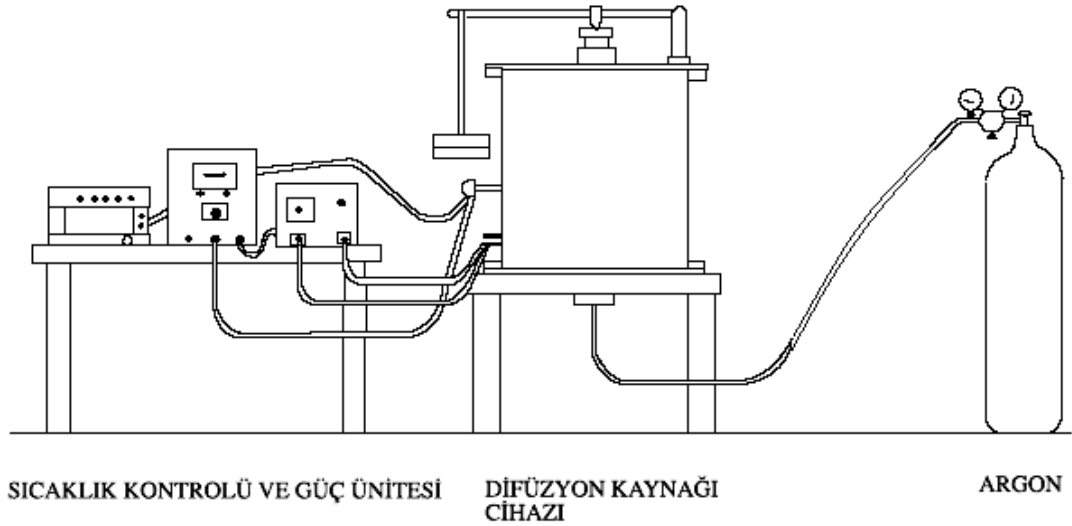
Kullanılan difüzyon kaynak cihazının fotoğrafı şekil 4.1'de, şematik resmi ise şekil 4.2'de görülmektedir. Difüzyon kaynak işleminin gerçekleştiği fırın ve iç bölümleri şekil 4.3'de kesit olarak verilmiştir.

Cihaz, yüksek sıcaklığa dayanıklı paslanmaz çelikten yapılmış tutuculara numuneler takılarak alın yüzeylerini merkezleyip ısıtıcı içine koyabilecek şekilde tasarlanmıştır [1].

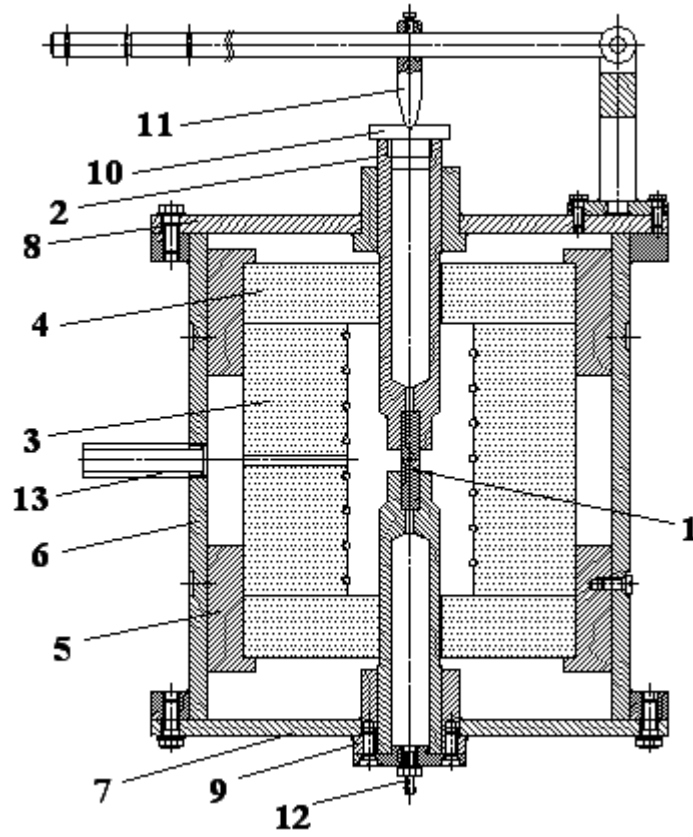
Isıtmanın sağlandığı güç ünitesi 220 V'u 34 V'a indirgeyecek özel bir voltaj ayarlayıcısı içermektedir. Sıcaklık ölçümü, S tipi Platin %10 Rodyum - Platin alaşımli termokupl ile numunelerin dış yüzeylerinden ölçülerek yapılmaktadır.



Şekil 4.1 Difüzyon kaynağı deney düzeneğinin genel görünüşü.



Şekil 4.2 Difüzyon kaynağı deney düzeneğinin şematik resmi.



Şekil 4.3 Difüzyon kaynağı deney düzeneğinin kesit resmi.

Çizelge 4.1 Difüzyon kaynağı deney düzeneğinin malzeme listesi

1	Termokupl Giriş Parçası	13	St 37
1	Gaz Giriş Parçası	12	St 37
1	Mekanik Baskı Mekanizması	11	St 60
2	Piston Kapağı	10	316 Paslanmaz Çelik
2	Piston Tutucu	9	316 Paslanmaz Çelik
1	Üst Kapak	8	St 60
1	Alt Kapak	7	St 60
1	Silindirik Gövde	6	St 60
6	Pabuç	5	Dökme Demir
2	Isıtıcı Kapağı	4	
1	Isıtıcı (RAC 100/200)	3	
2	Piston	2	316 Paslanmaz Çelik
2	Numuneler	1	Cu-Al
Parça Sayısı	Parça Adı	No	Malzemesi
DİFÜZYON KAYNAK CİHAZI			

Birleştirilecek parçalara uygulanan basınç manivela kolu vasıtasıyla yapılmaktadır. Manivela kolu uç kısmına asılan yükün ve diğer parçaların numuneler üzerine yaptığı baskı kuvveti hesaplanarak kaynaklama basıncı bulunmuştur. Koruyucu ortam olarak literatürde genellikle belirtilen vakum yerine % 99,99 saflıkta olan “argon gazı” kullanılmıştır. Koruyucu ortamın devamlılığı için cihazın bağlantı yerleri, termokupl ve gaz giriş yerleri sızdırmaz yapılmıştır.

### **4.3 Deneylerde Kullanılan Malzemeler**

Deneyde alüminyum ve bakır malzemeler kullanıldı. Deney malzemelerinin kimyasal analiz sonucunda bakır malzemenin saf olduğu, alüminyum malzeme ise %0,62 Si, %0,20 Mg ve geri kalanın %99,18 Al olduğu saptandı. Teknik açıdan alüminyum malzeme de saf olarak kabul edildi.

#### **4.3.1 Alüminyum**

Alüminyum ve alaşımları günümüzde yaşamımızın ayrılmaz bir parçası haline gelmiş malzemelerdendir. Alüminyum ağırlık olarak hafiftir. Bazı alüminyum alaşımları yumuşak çelikle mukayese edilecek kadar sağlamdır. Sıfır derecenin altında şekil değiştirme kabiliyetine sahiptir. Korozyon direnci fazladır. Zehirleyici değildir. Elektrik ve ısı iletkenliği iyidir. Isı ve ışığı iyi yansıtır. Manyetik değildir.

Alüminyum imali kolaydır. Bükülebilir, haddelenebilir, preslenebilir, çekilebilir, bükülüp uzatılabilir ve rulo haline getirilebilir. Metal ayrıca çekiçle dövülüp, kızdırılıp işlenebilir veya kalıptan çekilerek çok büyük şekiller verilebilir [87].

Düşük ısı (soğuk) üretimini ortaya koyan teknikler birçok alanda kullanılır. Kutu içeceklerin kutusunun yapımında, folye yapımında, tıp ve cerrahlıkta, elektronikte, kimyada, metalürjide, havacılık, uzay ve nükleer endüstrilerde, otomotiv ve gemi endüstrisinde, makine yapımında, mimari (dış yüzey dekorasyonları) ve inşaat alanında geniş bir çapta kullanılmaktadır.

Alüminyum ve alaşımlarının kaynağı pek çok malzemeye göre zor ve sorunludur. Yüksek ısı iletimi fazla ısı girdisine ihtiyaç gösterdiğinden, yüksek ısıl genleşme, çarpılmalara ve kendini çekmelere neden olduğundan kaynak için dezavantajdır.

Alüminyum diğer metallerle birleştirilmesi incelenecek olursa görülür ki asıl zorluk alüminyumun kimyasal olarak çok yüksek aktiviteli olmasında yatar. Diğer metallerle gevrek katı bileşik olan (alüminitler) ve güçlü katı oksit filmleri şeklinde reaksiyona girer. Bağlantının olduğu geçiş bölgesi ve bu alüminit ve toplu halde oksit ara katmanlarını gösterir. Bu oksit ve alüminitler, mukavemet ve çentik enerjisinin göze çarpacak şekilde azalmasından sorumludur. Aynı durum mekanik özellikler için de söz konusudur [87].

Çizelge 4.2 Alüminyumun fiziksel ve mekaniksel özellikleri [39].

Yoğunluk	g/cm <sup>3</sup>	2,70
Elektrik Direnci	( $\Omega$ mm <sup>2</sup> /m)x10 <sup>2</sup>	2,66
Isı İletkenliği	cal/cm <sup>2</sup> /cm°Cs	0,52
Isıl Genleşme Katsayısı	(mm/mm°C)x10 <sup>-6</sup>	24,00
Erime Sıcaklığı	°C	660,00
Çekme Dayanımı	N/mm <sup>2</sup>	91,50
Uzama	%	40,00
Sertlik	BHN	19,00

#### 4.3.2 Bakır

Bakır ve alaşımları yüksek elektrik ve ısı iletkenliğine, korozyon direncine ve yatak olmaya elverişlilik (kayma-sürtünme özelliği) özelliklere sahiptir [88] ve bu özelliklere bağlı olarak ihtiyaç duyulan yerlerde kullanılmaktadır.

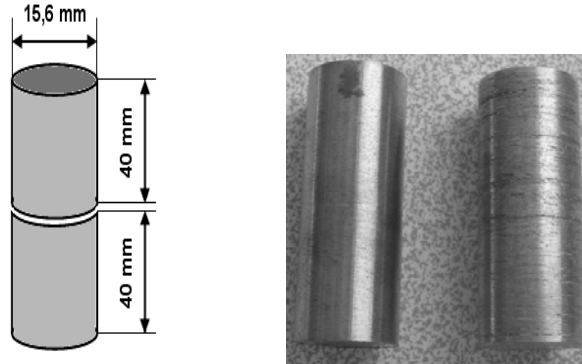
Yüksek elektrik ve ısı iletkenliği özellikleri bakırı, elektrik santralleri ve iletken malzemenin vazgeçilmez girdisi haline getirmektedir. Soğuk hava makine ve teçhizatında, vasıta kaplamalarında bakırın büyük kullanım alanları bulunmaktadır. Bunlara ilaveten bakırın kaynak işlerinde, metalürjide ve bronz üretiminde, kimya, gıda endüstrisinde önemli yeri olup, birçok kullanımı vardır. Ayrıca havacılık endüstrisinde yoğunluğun önemli olduğu uçak, helikopter ve uzay araçlarındaki bağlantı elemanlarında da bu yöntem kullanılabilir.

Çizelge 4.3. Bakırın fiziksel ve mekaniksel özellikleri [39].

Yoğunluk	$g/cm^3$	8,94
Elektrik Direnci	$(\Omega mm^2/m) \times 10^2$	1,68
Isı İletkenliği	$cal/cm^2/cm^\circ Cs$	0,92
Isıl Genleşme Katsayısı	$(mm/mm^\circ C) \times 10^{-6}$	16,70
Erime Sıcaklığı	$^\circ C$	1083,00
Çekme Dayanımı	$N/mm^2$	220,50
Uzama	%	45,00
Sertlik	BHN	25,00

#### 4.4 Deney Numunelerinin Hazırlanması

Difüzyon kaynağı cihazı, laboratuvar şartlarına uygun imal edilmiş olduğundan numunelerin boyutları da difüzyon cihazına uygun olacak şekilde, kaynak işlemi için Şekil 4.4'de ki boyutlarda hazırlandı. Yapılan deneylerde kullanılmak üzere 16 mm çapında alüminyum ve bakır malzemeler piyasadan satın alınarak torna tezgahı yardımıyla işlenerek istenilen boyutlara indirildi.

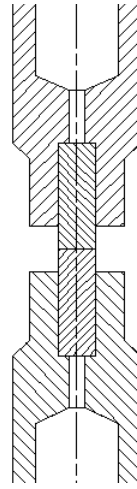


Şekil 4.4. Kaynak işlemi için hazırlanan numunelerin görünümü.

#### 4.5 Deneyin Yapılışı

Difüzyon kaynağında, alüminyum ve bakırın birleştirilmesinde parametre olarak; sıcaklık [ $T^\circ$ ], basınç [MPa] ve basınçta tutma süresi [dak] seçilmiştir. Bu parametrelerin başlangıç değerlerinin seçimi önceki araştırmalar ve en uygun kaynak mukavemetinin olduğu parametreler esas alınarak göre seçilmiştir. Kaynak sıcaklığı  $560^\circ C$ , kaynak basıncı 4,5 Mpa ve basınç tutma süresi 60 dakika olarak alınmıştır [1].

Termokupl ile ölçülen fırın iç sıcaklığı 200°C’de iken ortama argon gazı verildi ve kaynak edilebilme şartlarına uygun hale getirilen numunelerin birleştirilecek olan aln yüzeylerine Metkon Gripo 2V marka zımpara cihazında 600 devirde kademeli olarak 180, 240, 400, 600, 800 ve 1000 numaralı SiC (silisyum karbür) zımparalar ile zımparalandı. Son olarak 1200 grit zımpara ile zımpara yapılmış ve alkol ile temizlenip kurutulularak zaman geçirmeden bakır numune alta, alüminyum üste gelecek şekilde zımpara çizgileri birbirlerini dik kesecek şekilde 300°C’de deney düzeneğine Şekil 4.5’de ki gibi cihaz içine yerleştirilmişlerdir.



Şekil 4.5 Alüminyum ve bakır numunelerinin cihaz içine yerleştirilmiş şeklinin şematik gösterimi.

Sıcaklığın deney sıcaklığına ulaşması 30 dakika sürmüş olup, argon gazının kontrolü tüp üzerindeki manometreden yapılmıştır.

Sıcaklık, deney sıcaklığına ulaştığında, kaynak basıncı 4,5 MPa basınç uygulandı ve basınçta tutma süresinin sonunda cihazın ısıtması kapatılarak soğumaya bırakıldı. 300°C’de basınç kaldırıldı. Sonrasında numunelerin serbest olarak 200°C’ye soğuyuncaya kadar tutulmuş daha sonra fırından çıkarılmıştır.

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

değişir. Difüzyon kalınlığı ise, zamana ve sıcaklığa göre de değişir. Yukarıda belirtilen nedenlerden dolayı daha önce bu konudaki çalışmalar genellikle vakum altında yapılmıştır [89].

#### **4.6 Mikroyapı İncelemesi**

Kaynak öncesi deney numunelerine dik olan kesitin alın yüzeylerine Metkon Gripo 2V marka zımpara cihazında 600 devirde dönen ve kademeli olarak 180, 240, 400, 600, 800 ve 1000 numaralı SiC (silisyum karbür) zımparalar takılarak zımparalanmıştır. Son olarak 1200 grit zımpara ile zımpara yapılmış ve 1 ve 0,25 µm elmas pasta ve 0,05 µm alümina (Al<sub>2</sub>O) solüsyonu ile parlatılmıştır.

Sonrasında uygun dağlama çözeltileri ile dağlanarak optik mikroskopta mikro yapı görüntüleri alınmıştır. Kaynaklanmamış alüminyum ve bakır malzemelerin mikro yapıları Şekil 4.6 ve Şekil 4.7 'de verilmiştir

Alüminyum numunesi için "Keller" [2 ml HF, 3 ml HCl, 5 ml HNO<sub>3</sub>, 190 ml H<sub>2</sub>O'dan oluşan] dağlama çözeltisi kullanılmıştır.

Bakır numunesi için bakır amonyum klorür – amonyum hidroksit çözeltisi; Bakır amonyum klorürün sudaki %10'luk çözeltisi nötr hale gelinceye kadar sodyum hidroksit (NH<sub>4</sub>OH) katılarak hazırlanmıştır.

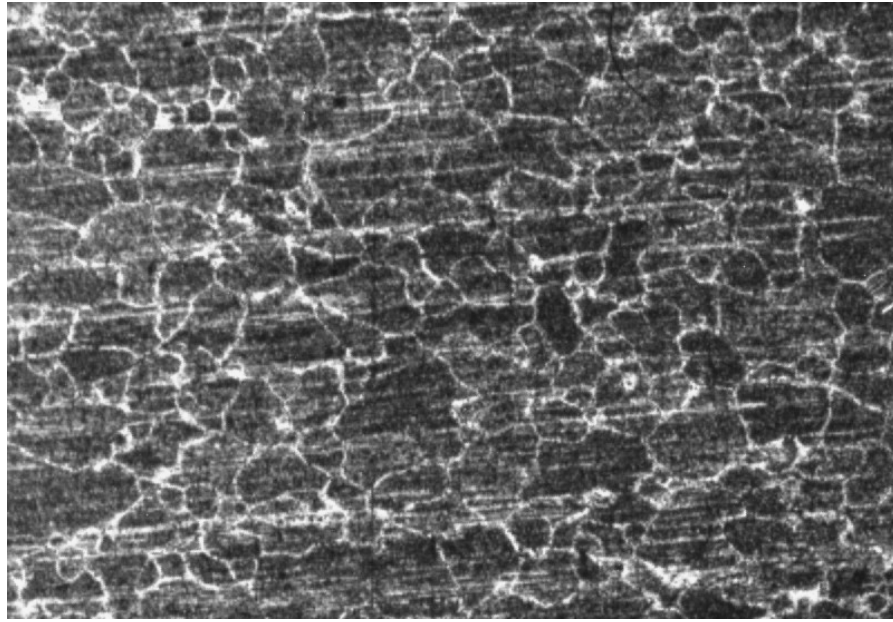
#### **4.7 Sertlik Ölçümleri**

Kaynak öncesi esas metal sertlikleri, Vickers sertlik (HV<sub>1</sub>) metoduyla 1 kgf yükün 20 sn süre ile uygulanması suretiyle "Dia Testor 2 RcS" marka sertlik ölçme cihazında sertlik değerleri ölçülmüştür. Ölçümler sonucunda alüminyum ve bakır malzemelerin sertlik değerleri çizelge 4.4'de verilmiştir.

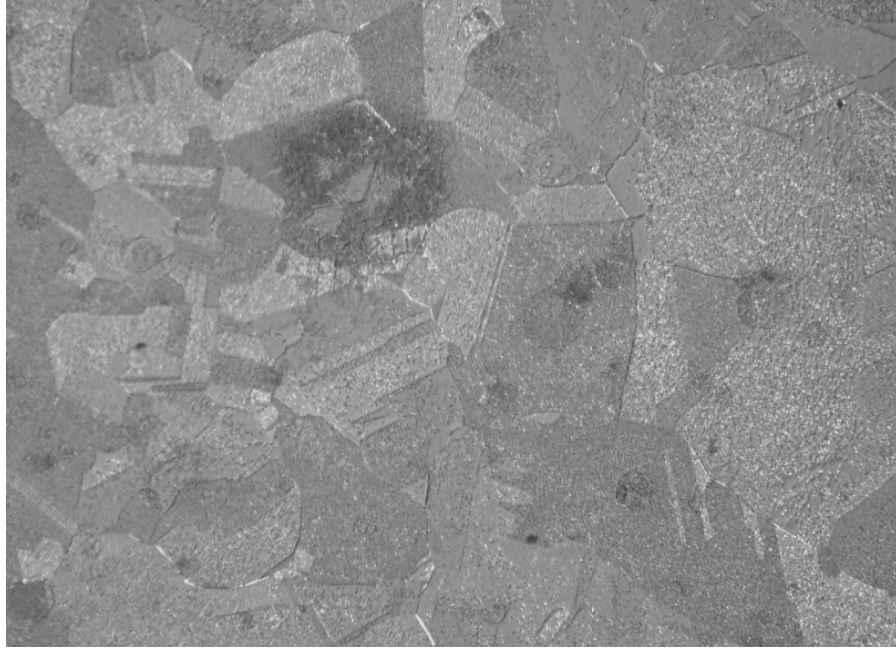
Çizelge 4.4 Kaynak öncesi malzemelerin sertlik değerleri

Malzeme	Alüminyum	Bakır	
Sertlik Hv	1	25,90	59,20
	2	25,20	58,25
	3	24,30	52,50
	4	25,20	57,20
	5	27,00	56,00

Kaynak sonrası difüzyon bölgesindeki yatay sertlik değişimleri ise kaynak doğrultusuna dik olan kesitin orta bölgesinden aynı sertlik ölçme cihazında 1kgf yükün 20 sn süreyle uygulanmasıyla Vickers sertlik ( $HV_1$ ) olarak ölçülmüştür. Vickers sertlik ölçümleri öncesinde kaynaklı yüzeyler zımpara ve parlatma işlemlerine tabi tutulmuşlardır.

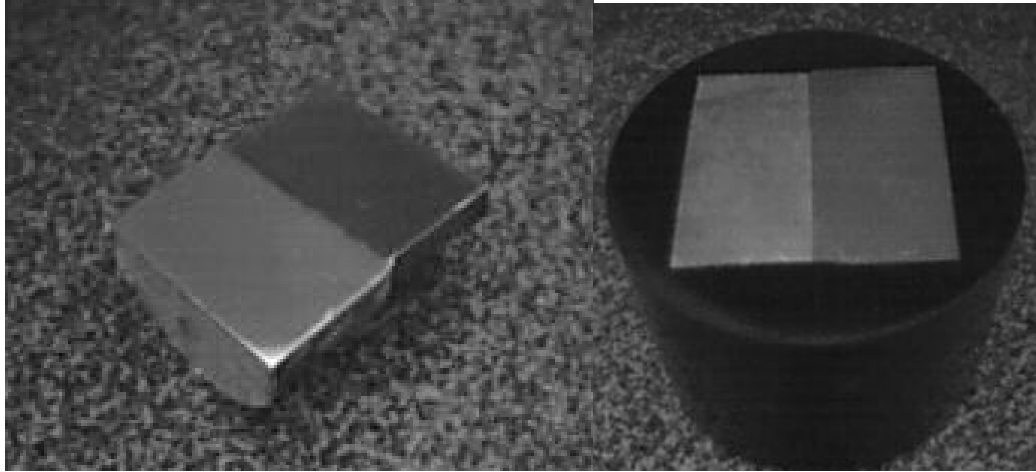


Şekil 4.6 Kaynaklanmamış alüminyum'un mikro yapısı (100X).



Şekil 4.7 Kaynaklanmamış bakır'ın mikro yapısı (500X).

Kaynak sonrası numuneler frezede iç yapı incelemeleri için difüzyon bölgesi Şekil 4.8'da görüldüğü gibi kaynaklı birleştirmeye dik olarak kesilmiş ve bakalite alınmıştır. Bu numuneler mikro yapı, SEM, EDS ve mikro sertlik incelemeleri için kullanılmıştır.



Şekil 4.8 Mikro yapı, SEM, EDS, Mikro sertlik ve Ara yüzey incelemesi için hazırlanan numuneler.

#### **4.8 Elektron Mikroskobu (SEM) ve Enerji Dağıtım Spectrometre (EDS) İncelemeleri**

Kaynaklı birleştirilmesi yapılan numunelerin SEM ve EDS fotoğraflarını çekebilmek için Şekil 6.9'da ki şekilde numuneler hazırlanmıştır. Daha sonra (Tübitak) Marmara Araştırma Merkezinde bulunan JEOL JSM-6335 S FIELD EMISSION SCANNING ELEKTRON MICROSCOPE marka SEM cihazında fotoğraflar çekilmiştir. Aynı cihaz ile numuneler üzerinde, oluşan difüzyon bölgesine dik bir doğrultu boyunca malzeme bileşimindeki değişim çizgisel analiz yapılarak EDS analiz ünitesi ile incelenmiştir. Bir tane çekme numunesinin kırılma yüzeyinden SEM görüntüsü alınmış ve EDS analizi yapılmıştır.

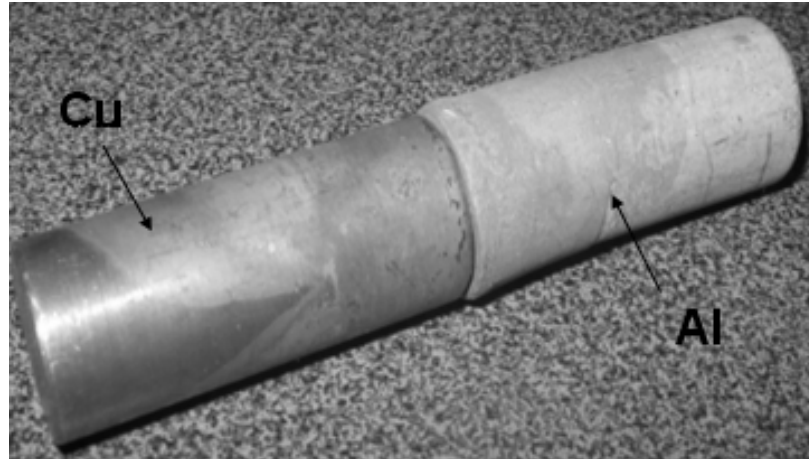
## 5. DENEY SONUÇLARI ve TARTIŞMA

### 5.1 Kaynağın Makro İncelemesi

Genel olarak kaynak sonrası malzemelerde gözle yapılan değerlendirmede, Al-Cu malzemelerinin difüzyon kaynağı boyutları bilinen diğer yöntemlere göre daha düzgün olduğu görülmüştür.

Sıcaklığın bir miktar daha arttırılmasıyla birleşme yüzeyine yakın kısımda, alüminyum tarafında bir miktar deformasyon olduğu görüldü [1].

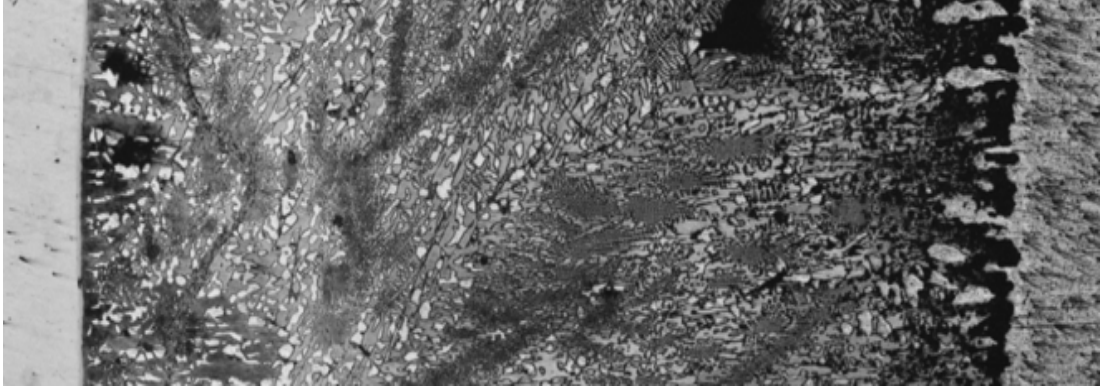
Parçaların dış yüzeylerine baktığımızda ise alüminyumda hafif kararma ve matlaşma, bakır numunede ise ince bir tufal tabakası meydana gelmiştir. Kaynak sonrası birleşen numunelerin görünüşleri Şekil 5.1’de görülmektedir.



Şekil 5.1 Kaynak sonrası numunelerin görünümü

## 5.2 Kaynakta Mikro yapı İncelemeleri

Mikro yapı için, difüzyon kaynağı yapılmış Al-Cu numunelerde oluşabilecek fazların yapı ve dağılımları, yüzeyde oluşabilecek ara yüzey boşluklarının durumu incelenmiştir. Sonuçta, alınan görüntüler ve oluşan fazların mikro yapıları incelenerek değerlendirmeleri aşağıda verilmiştir. Mikro yapılardaki incelemelerde aynı şartlarda olmasına rağmen birleşme bölgesinin değişik kalınlıklarda olduğu gözlenmiştir. Bu kalınlık farklılığı, yüzey düzgünlüğünün tam sağlanamaması ve yüzeylerin birbirine tam alın altına oturtulamaması, yüzey pürüzlülüğü, numunelerin cihaza yerleştirilmesi esnasında geçen süre farklılığından meydana geldiği düşünülmüştür. Genel olarak, alüminyumun bakıra kısa mesafelerde ve yüksek oranlarda; bakırın ise alüminyuma daha uzun mesafelerde ve düşük oranlarda nüfuz ettiği saptanmıştır (Şekil 5.2, 5.37, 5.38)



Şekil 5.2 Al-Cu difüzyon numunesindeki bağlantı bölgesinin mikro yapısı

Bunun nedeni atom çaplarındaki ve difüzyon katsayılarındaki farklılık ile açıklanabilir. Alüminyum atomları boyut olarak bakır atomlarından  $\approx$  %11 daha büyük olduğundan [82] ( $r_{Al}=1,4315$ ,  $r_{Cu}=1,2780$  [53]) bakır atomlarının alüminyum içlerine doğru difüzyonu daha kolay olmakta ve dolayısıyla geçiş bölgesi büyümektedir. Bakır tarafında ise bu geçiş daha güç olmakta, geçiş bölgesinin dar olmasına neden olmaktadır. Bunu difüzyon katsayısı (D) ile de açıklayabiliriz. Bu katsayı ana metal bakır olduğunda, alüminyumun bakıra geçişi daha az ( $500^{\circ}C$  'de  $D=10^{-12,6} \text{ cm}^2 / \text{s}$ ), ana metal alüminyum olduğunda bakırın alüminyuma geçişi daha fazla ( $500^{\circ}C$  'de  $D=10^{-10,3} \text{ cm}^2 / \text{s}$ )'dır [57].

Kazakov [41], yüksek sıcaklıklarda Al ve Cu çeşitli gevrek intermetalik bileşikler oluşturduğunu literatürde ifade etmektedir. Kazakov [41], 150 °C’de Al<sub>2</sub>Cu (θ) fazı oluştuğundan bahsetmiştir. R. Bonnet ve ç.a [92], Al<sub>2</sub>Cu ana kristal fazının çoğu açık bir şekilde köşeli ve bazen de dikdörtgen şeklinde olduğunu ifade etmişlerdir. Spearer ve ç.a, Auger Spectroskopy’de çalışmış ve bir saatten kısa sürede 100 ve 200°C arasında ince film çiftleri içinde Al<sub>2</sub>Cu arafazını bulmuşlardır [96].

Kazakov [41], 350°C’de ilave bir faz olan Al<sub>4</sub>Cu<sub>9</sub> oluştuğunu söylemiştir. Rojen ve Wallach [93], 500°C’de Al<sub>2</sub>Cu ve Al<sub>4</sub>Cu<sub>9</sub> arafazlarını ince film tabakaları şeklinde tanımlamıştır. Gweshinski ve ç.a [94] ve Compisano ve ç.a. [95], çalışmalarında Al<sub>2</sub>Cu ve AlCu faz çiftinin bir arada oluşabileceğini saptamışlardır.

Kazakov [41], 400°C’de AlCu fazı, Al<sub>2</sub>Cu ile Al<sub>4</sub>Cu<sub>9</sub> arasında oluşan bir yapıdan bahsetmiştir. Gweshinski ve ç.a [94] ve Compisano ve ç.a. [95], çalışmalarında AlCu ve Al<sub>2</sub>Cu faz çiftinin bir arada oluştuğunu gözlemlemişlerdir.

Hasırcı H. ve ç.a. [90] AlCu<sub>4</sub> (β) fazı da muhtemel oluşabilecek fazlar arasında sayılabilir olacağını söylemiş fakat başka bir bilgi vermemiştir.

Oğuz B., [40] %16’dan az alüminyum içeren alaşımlar içinde, saf bakırdan hareketle 1047°C’de bir ötektik ve AlCu<sub>3</sub> bileşimi oluştuğunu belirtmiştir.

Oluşan bu intermetalik fazlar çok yüksek sertliğe sahiptir. Yapılan sertlik ölçümleri de bu doğrultudadır. 10µm kalınlığa eriştiği zaman bağlantının mukavemeti keskin bir şekilde azaldığı tespit edilmiştir [41]. Ayrıca 100 ve 500°C arasında difüzyon sıcaklığının önemli olmasına ve arafaz yapılarının olmasına rağmen, faz çiftlerindeki yapıların farklı olabileceğini öne sürmüşler ve tartışmalara sebep olmuşlardır [89].

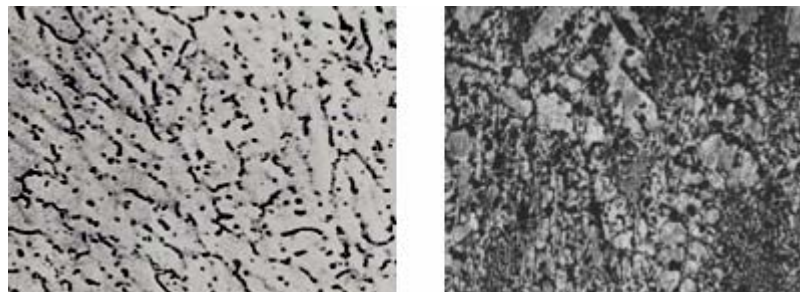
Yukarıda belirttiğimiz gibi Al-Cu arasında çeşitli fazlar oluşabilmektedir. Ancak, çalışmamızda kaynak sıcaklığı 560°C’yi geçmediğinden Al<sub>2</sub>Cu, Al<sub>4</sub>Cu<sub>9</sub> ve AlCu intermetalik fazları oluşmasının muhtemel olduğu düşünülmüştür. Bu ara fazların muhtemel oluşumu SEM görüntüleri ve EDS analizleri ile desteklenecektir.

Çizelge 5.1 Al-Cu oranına bağlı olarak kristal yapı verileri [97]

Al-Cu Kristal Yapı Verileri		
Faz	% Cu Bileşimi	Oluşan Yapı
(Al)	0 to 2.48	Cu
$\theta$	31.9 to 33.0	$Al_2Cu$
$\eta_1$	49.8 to 52.4	...
$\eta_2$	49.8 to 52.3	...
$\zeta_1$	55.2 to 59.8	...
$\zeta_2$	55.2 to 56.3	...
$\delta$	59.3 to 61.9	...
$\gamma_2$	62.5 to 69	$Al_4Cu_9$
$\beta_0$	67.6 to 70.2	...
$\beta$	70.6 to 82.0	W
$\alpha_2$	76.5 to 78	...
(Cu)	80.3 to 100	Cu

Çizelge 5.1’de Al-Cu alaşım oranlarına bağlı olarak  $Al_2Cu$  ve  $Al_4Cu_9$  ara fazların oluştuğu görülmektedir. Al-Cu denge diyagramından da sıcaklığa bağlı olarak oluşan fazlar irdelenmektedir. Optik mikroskop incelemesi olarak Şekil 5.20’ye bakıldığında, görülen köşeli ve dikdörtgene benzer, koyu renkli yapının  $Al_2Cu$  olabileceği tahmin edilmiş ve literatürde [92] aynı yapıyı bu şekilde ifade etmişlerdir.

Şekil 5.3’de a no’lu resimde; Literatürde %95Al + %5Cu ihtiva eden Şekil 5.7’deki denge diyagramından  $\chi$  fazının iç yapısı görülmektedir. Difüzyon bölgesinin dışındaki Al tarafına karşılık gelmektedir [81]. b’de ise, bizim çalışmamızda Şekil 5.7’deki difüzyon kaynağı sonucunda elde edilmiş olup Al tarafına yakın bölgeden görüntü alınmıştır ve literatür ile kıyaslanmıştır. Benzerlik açıkça görülmektedir.

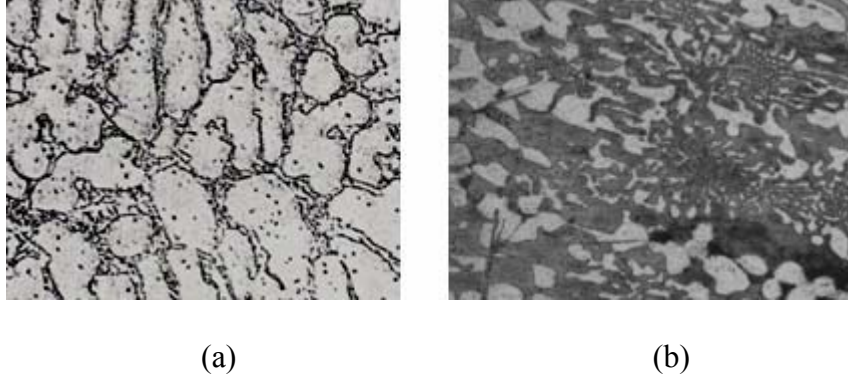


(a)

(b)

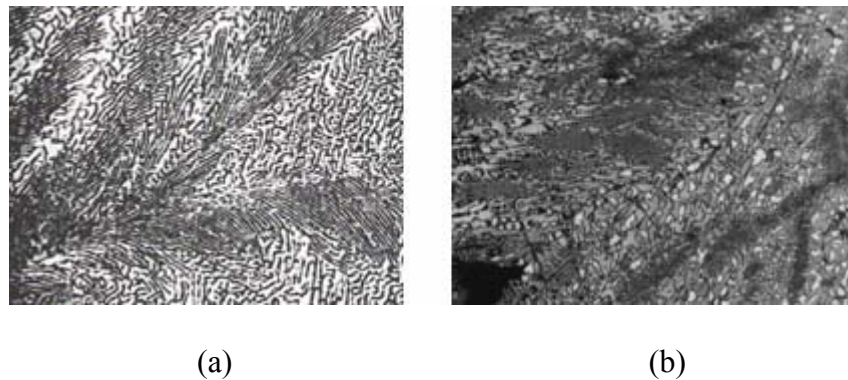
Şekil 5.3 a- ) %95 Al + %5 Cu’lu alaşım. Homojen  $\chi$  kristalleri  
b- ) Kaynaklanmış numunenin difüzyon bölgesi.

Alüminyum, %33 Cu ve 548C°'de ara metal bağı  $Al_2Cu$  ile bir ötektik oluşturmaktadır [81]. Şekil 5.4 a'da, literatürde %67Al + %33Cu'lu saf ötektik alaşımın iç yapısı gösterilmektedir. Bu iç yapının benzeri difüzyonlu kaynak bölgesinin  $(\theta + \chi)$  fazının bazı kısımlarında görülmektedir [81]. b'de ise bizim çalışmamızdaki Şekil 5.7'da difüzyon kaynağı sonucunda elde edilmiş olup difüzyon bölgesinden görüntü alınmıştır ve görüldüğü gibi yapı benzerlik göstermektedir.



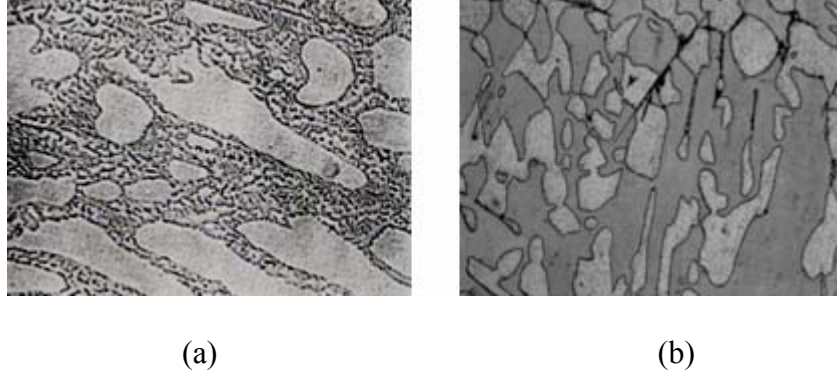
Şekil 5.4 a-) %67 Al + %33 Cu'lu alaşım .  $(\chi + \theta)$  ötektik  
b- ) Kaynaklanmış numunenin difüzyon bölgesi

Şekil 5.5'te a no'lu resimde, literatürde %15Cu'lu bir alaşımda gerisi alüminyum olan bir yapı gösterilmektedir. Bu yapının karşılığı ötektik içinde  $(\theta + \chi)$  bölgesidir.  $\theta$  kristalleri az miktardadır [81]. Bizim çalışmamızdaki b no'lu resim ise Şekil 5.7'daki difüzyon kaynağı sonucunda elde edilmiş olup difüzyon ara bölgesinden görüntü alınmıştır ve görüldüğü gibi literatürle uyum göstermektedir.



Şekil 5.5 a- ) %85 Al + %15 Cu'lu alaşım. Ötektik  $(\chi + \theta)$ 'lı homojen.  $\chi$  karışım kristalleri. b- ) Kaynaklanmış numunenin difüzyon bölgesi

Literatürde daha yüksek bakır oranlarında primer sert  $Al_2Cu$  ayrılmaktadır (Şekil 5.6a). Bu yapının karşılığı ise  $\theta$  kristallerinin artış göstermesiyle kendini belli ettiği ( $\theta + \text{ötektik}$ ) bölgesidir [81]. Bizim çalışmamızda b no'lu resim ise şekil 5.7'deki difüzyon kaynağı sonucunda elde edilmiş olup difüzyon ara bölgesinden görüntü alınmıştır. Bu bölgede ve görüldüğü gibi literatürdeki yapılarla uyumlu olduğu görülmektedir.



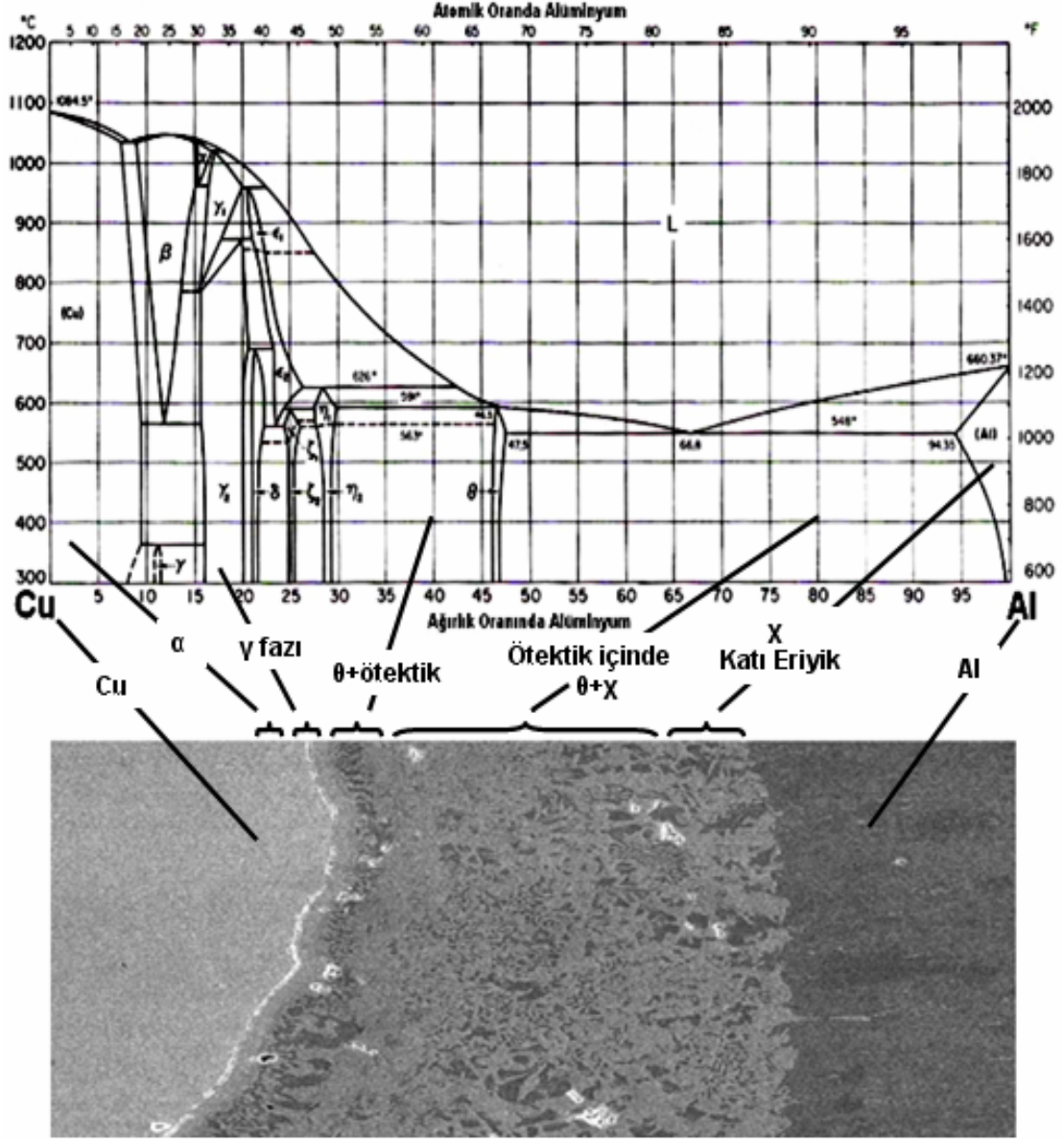
Şekil 5.6 a- ) %60 Al + %40 Cu'lu alaşım. Ötektik ( $\chi + \theta$ ) içinde primer  $\theta$  kristalleri  
b- ) Kaynaklanmış numunenin difüzyon bölgesi

### 5.2.1 Kaynaklı bölgedeki yapıların (Al-Cu) denge diyagramında karşılıkları

Al-Cu denge diyagramına [80,81] bağlı olarak ara bölgede oluşan fazların tanımı Şekil 5.8'de gösterilmiştir. Sağdaki alüminyum bölgesinde bakırın çözünürlüğü sıcaklık derecelerine göre  $548^{\circ}C$ 'de %5.7,  $500^{\circ}C$ 'de %4.4,  $400^{\circ}C$ 'de %1.6,  $300^{\circ}C$ 'de %0.6 oranındadır [51,80].

Şekil 5.7'deki Al-Cu denge diyagramına bakılarak mikroyapıda verilen fazların daha büyük ve ayrıntılı mikroyapı olarak Şekil 5.8'de verilmiştir. Görüntülerin alındığı noktalarda ayrıca Şekil 5.8'de görülmektedir.

Şekil 5.9'de yapı olarak sadece ana metal olan Cu mevcuttur. Bu bölgenin ana metal olduğu Şekil 5.7'deki denge diyagramında açıkça görebiliriz. Şekil 5.23 ve Şekil 5.31'deki 1 no'lu bölgelerden alınan EDS analizleri incelendiğinde ve oluşturulan Şekil 5.38 ve Şekil 5.39'daki konsantrasyon eğrilerine bakıldığında bu bölgenin ana metal Cu olduğunu rahatlıkla söyleyebiliriz.



Şekil 5.7 Al-Cu Faz diyagramı [98] ve kaynaklanma bölgesinde oluşan fazların tanımı

Şekil 5.10'daki yapı literatürde [98],  $\alpha$  fazı olarak tanımlanmış ve alüminyumun bakır içine kadar çözünebildiği oran olarak %(10-30) oranında Al bulunduğu ifade edilmiştir. Çizelge 5.1'de ise Cu oranına bağlı olarak incelendiğinde  $\alpha_2$  fazına karşılık gelmektedir. Denge diyagramında bu ifadeleri desteklemektedir. Kaynaklı numunelerin difüzyon bölgesinden alınan EDS analiz sonuçlarına göre oluşturulan konsantrasyon eğrileri incelendiğinde, Şekil 5.8'de 2 no'lu bölgenin  $\alpha$  fazı olduğunu göstermektedir.

Şekil 5.11,  $\gamma$  fazı bölgesidir. Difüzyon kaynağı sınır bölgesidir. Çizgisele yakın bir şekilde görülür. İçerik olarak bakır oranı daha fazladır[51,99]. Şekil 5,7'deki denge diyagramında da Cu oranının fazla olduğu görülmektedir. Numunelerden alınan sınır bölgesindeki EDS analizleri, Şekil 5.23'deki 2 no'lu bölge ve Şekil 5.31'da 2 ve 3 no'lu bölgelerdeki bakır oranlarına bakıldığında bu açıkça görülmektedir. Şekil 5.38 ve Şekil 5.39'deki konsantrasyon eğrilerinden de sınır bölgesinin oranları belirtilebilir.

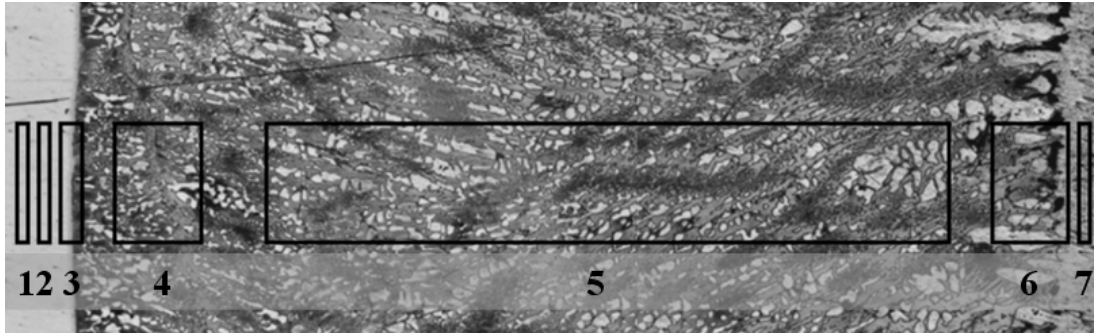
Şekil 5.12, dentrit bölge olarak tanımlanan bölgedir. Bakıra yakın difüzyon sınırına yakın ve ötektik yapısı vardır [51,99]. Şekil 5.12 ve Şekil 5.20'da köşeli ve dikdörtgen şeklinde yapı meydana gelmiş ve literatürde [92], böyle bir yapının  $Al_2Cu$  olduğu söylenmiştir. Bunu destekleyecek şekilde Şekil 5.23 ve Şekil 5.31'deki 4 numara ile gösterilen bölgeden aldığımız EDS analizleri sonuçlardaki alaşım oranları Çizelge 5.1 ve Şekil 5.7 ile karşılaştırıldığında bu yapının  $Al_2Cu$  olduğu rahatlıkla söylenebilir. Numunelerden alınan mikrosertlik değerleri bu bölgede ani bir şekilde yükseldiğini, Şekil 5.52 ve Şekil 5.53'de görülmektedir. Bunu da gevrek ve sert olan intermetalik fazların olduğunu ve bu sertlik artışına sebep olduğunu söyleyebiliriz.

Şekil 5.13, Bu ara bölgenin yapı karşılığı ötektik içinde ( $\chi + \theta$ ) bölgesidir.  $Al_2Cu$  kristalleri az miktardadır. Daha yüksek bakır oranlarında primer sert olan  $Al_2Cu$  ayrılmaktadır. Bu yapının karşılığı ise  $Al_2Cu$  kristallerinin artış göstermesiyle kendini belli ettiği ( $\chi + \theta$ ) bölgesidir [51,99]. Şekil 5.23'de 5 ve 6 no'lu bölgelerden alınan EDS analiz sonuçları Şekil 5.7'deki denge diyagramıyla karşılaştırıldığında bu bölgenin doğruluğunu göstermektedir. Çok az  $Al_2Cu$  kristalinin bu bölgede bulunması yaptığımız sertlik ölçümlerinde de Şekil 5.52 ve Şekil 5.53'de görüldüğü gibi sertlik değerleri yüksektir.

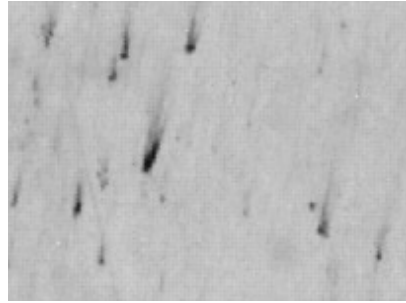
Şekil 5.14'de Al-difüzyon bölgesi sınırır.  $\chi$  katı eriyik bölgesidir [51,99]. Şekil 5.17'de bu yapı açıkça görülmektedir. Cu oranının çok az olduğu, büyük bir çoğunluğu Al olan bir yapıdır. Şekil 5.7'de de görülmektedir. Sertlik değerleri de bu bölgede düşmeye başlar.

Şekil 5.15 ise, yapı olarak ana metal olan alüminyum metali vardır. Şekil 5.7'da açıkça ana metal Al olduğu görülmektedir. Şekil 5.23 ve Şekil 5.31'da bu bölgeden alınan EDS analizleri ana metal olduğunu ispatlamaktadır.

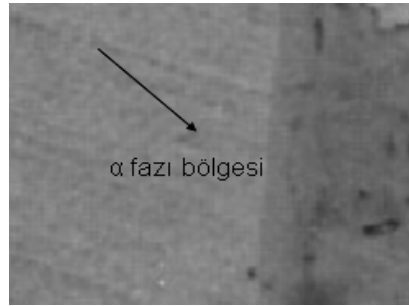
Cu'ya yakın  $Al_2Cu$  oluşan dentrit bölge şekil 5.20'da verilmiştir.  $\theta + \text{Ötektik}$  bölgesidir. %67Al, %33Cu bileşiminde olduğu EDS analizi sonucu belirlenmiş, köşeli veya dikdörtgen bir yapıya sahip intermetalik faz görüntüsüne sahip olduğu literatürden desteklenmiştir.



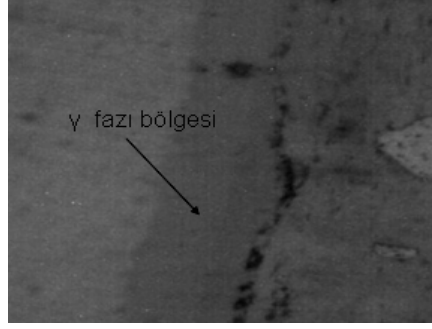
Şekil 5.8 Difüzyon bölgesinde oluşan fazların tamamı (100X)



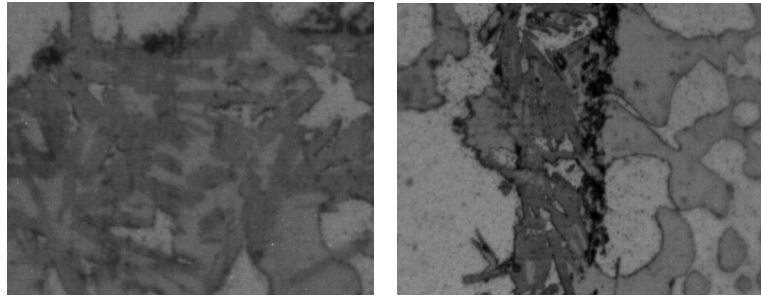
Şekil 5.9 1 no'lu bölge. Bakır ana metali



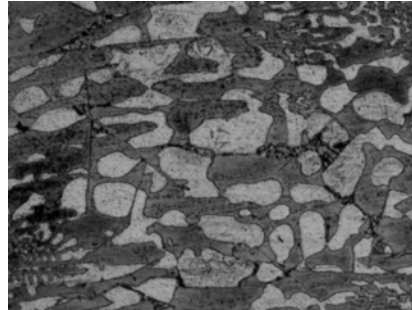
Şekil 5.10 2 no'lu bölge.  $\alpha$  fazı bölgesi



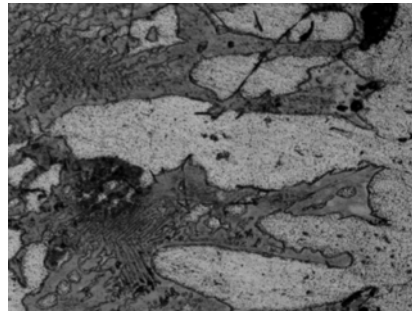
Şekil 5.11 3 no'lu bölge.  $\gamma$  fazı bölgesi



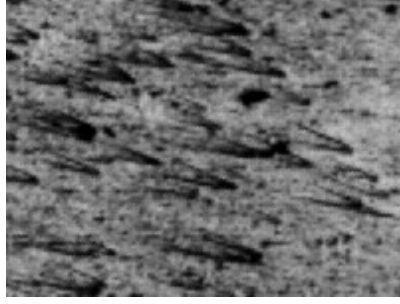
Şekil 5.12 4 no'lu bölge.  $\theta$  + Ötektik bölgesi



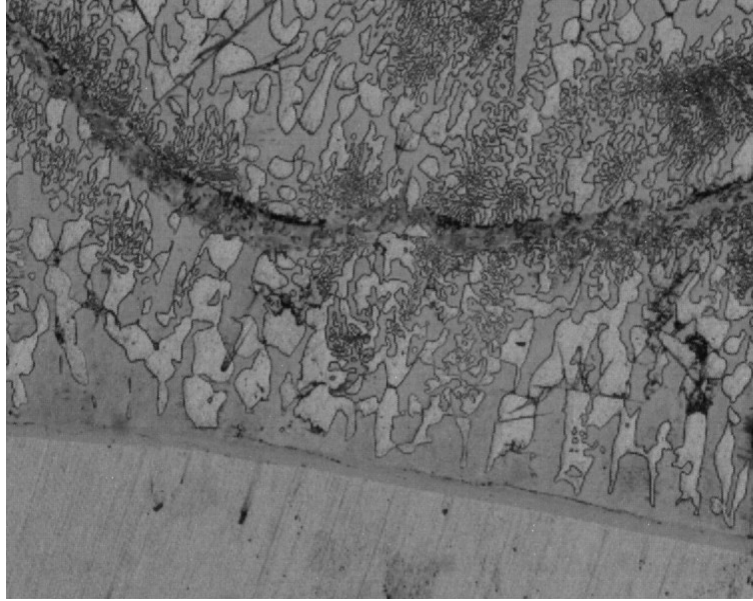
Şekil 5.13 5 no'lu bölge. Ötektik içinde  $\theta$  +  $\chi$  bölgesi



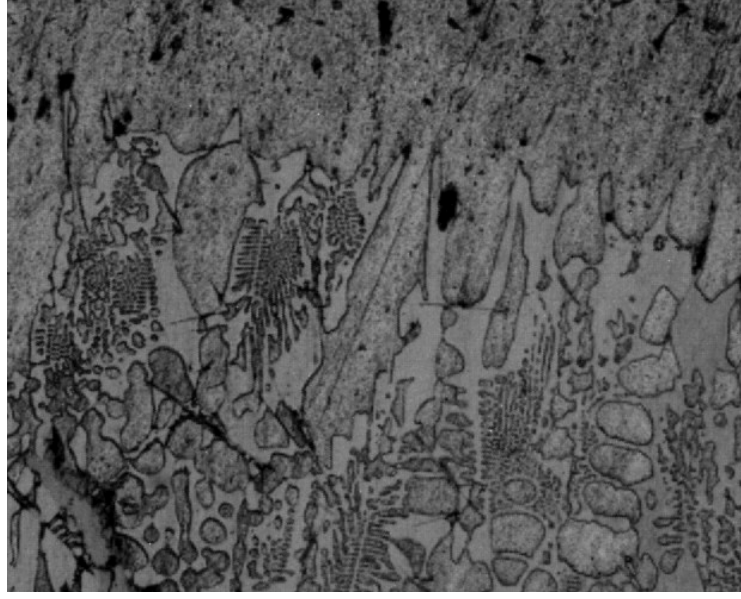
Şekil 5.14 6 no'lu bölge. Al içinde Cu'nun çözündüğü bölge



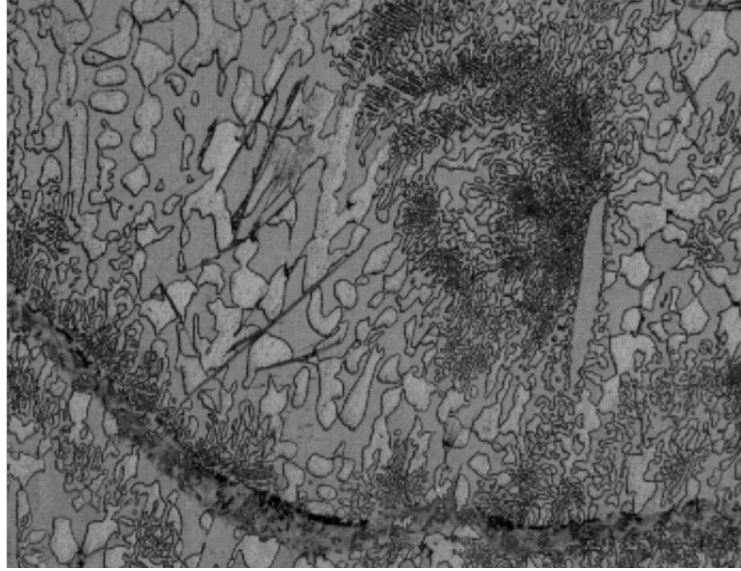
Şekli 5.15 7 no'lu bölge. Alüminyum ana metali



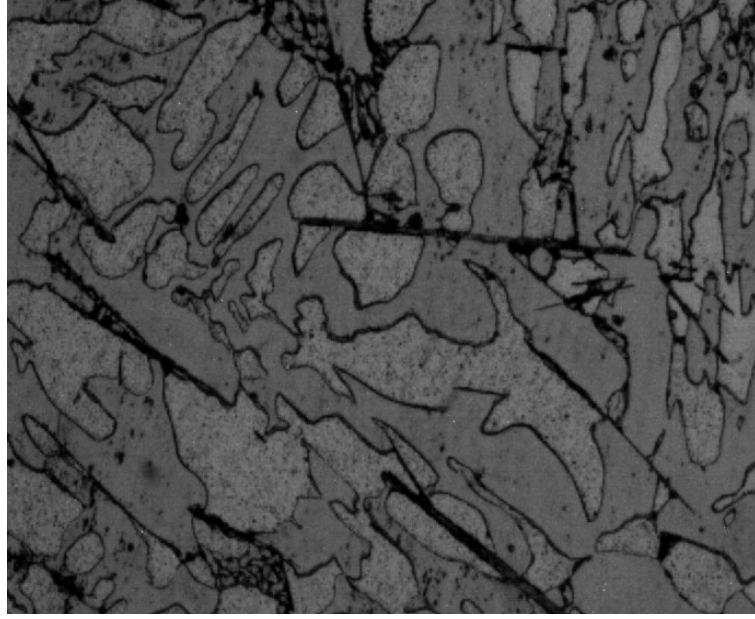
Şekil 5.16 Al-Cu difüzyon kaynağı sonucu oluşan difüzyon bölgesinin dağlanmış görüntüsü. Cu'ya yakın dentrit bölgesi (100X)



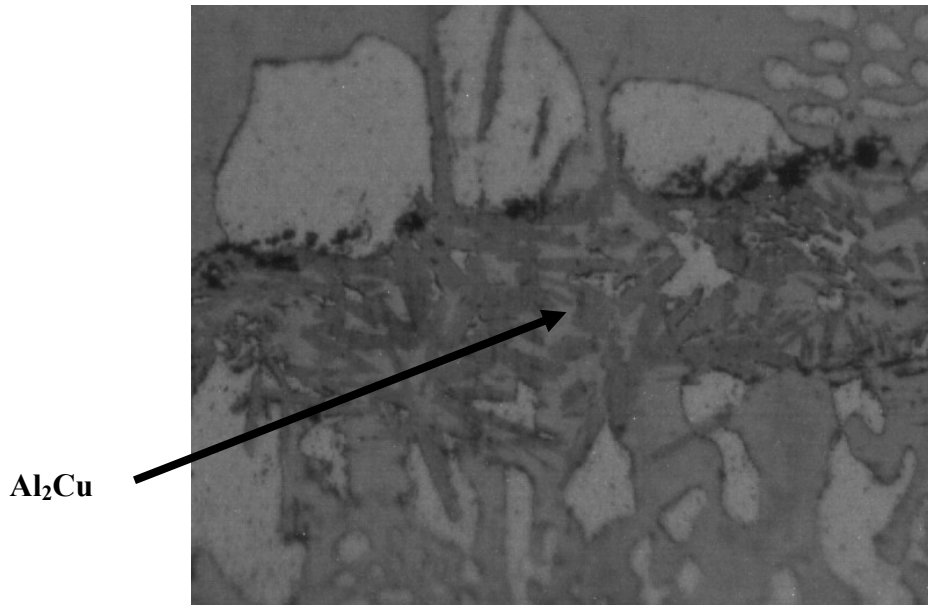
Şekil 5.17 Al-Cu difüzyon kaynağı sonucu oluşan difüzyon bölgesinin dağlanmış görüntüsü. Alüminyuma ile dentrit bölge geçiş bölgesi (100X)



Şekil 5.18 Al-Cu difüzyon kaynağı sonucu oluşan difüzyon bölgesinin dağlanmış görüntüsü. Cu'ya yakın  $Al_2Cu$  oluşan dentrit bölge (100X)

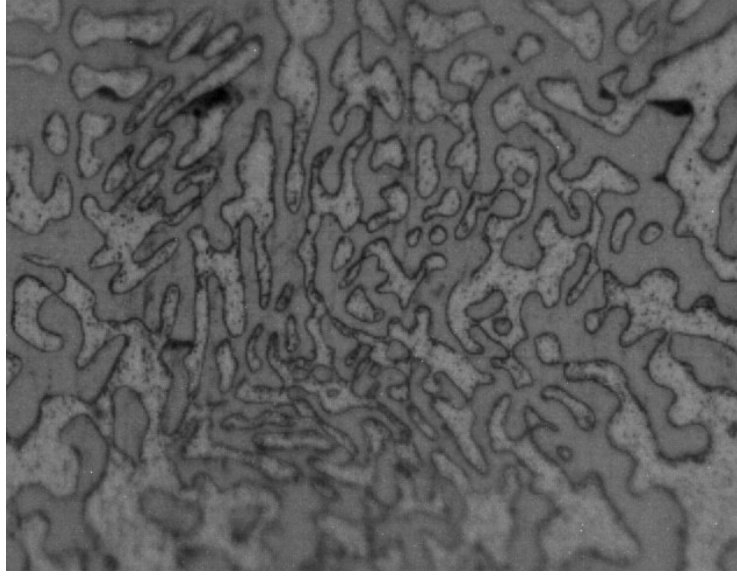


Şekil 5.19 Al-Cu difüzyon kaynağı sonucu oluşan difüzyon bölgesinin dağlanmış görüntüsü. Al'ye yakın dentrit bölge (200X)

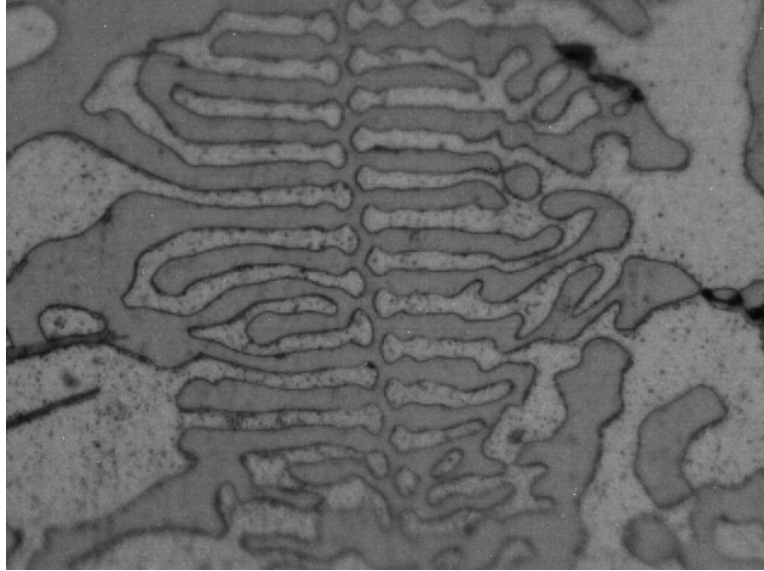


$Al_2Cu$

Şekil 5.20 Al-Cu difüzyon kaynağı sonucu oluşan difüzyon bölgesinin dağlanmış görüntüsü (500X)



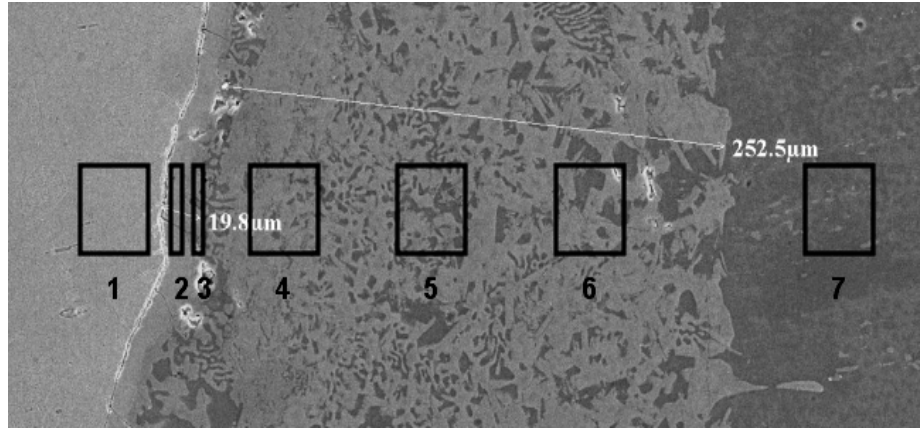
Şekil 5.21 Al-Cu difüzyon kaynağı sonucu oluşan difüzyon bölgesinin dağlanmış görüntüsü. Al'ye yakın dentrit bölge (500X)



Şekil 5.22 Al-Cu difüzyon kaynağı sonucu oluşan difüzyon bölgesinin dağlanmış görüntüsü. Al'ye yakın dentrit bölgede oluşan bir yapı (500X)

## 5.2.2 Elektron Mikroskobu (SEM) ve Enerji Dağıtım Spectrometre (EDS) İncelemeleri

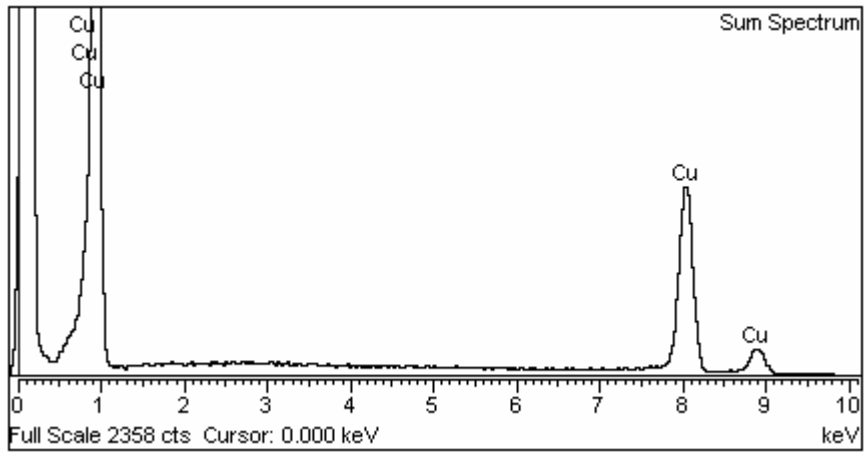
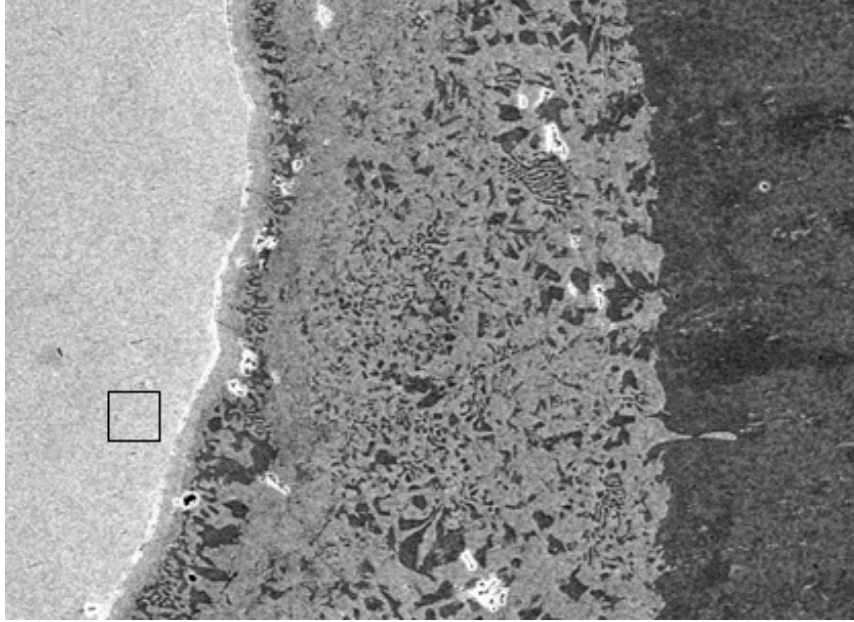
Yapılan spektral analizlerin hangi bölgeden yapıldığı Şekil 5.23’de gösterilmiştir. Ayrıca bu bölgelerin tanımı da Çizelge 5.2’de yapılmıştır. Yapılan analizler sonucunda literatür, çizelge 5.1 ve Al-Cu denge diyagramı göz önünde tutularak oluşabilecek faz yapıları aşağıdaki çizelge 5.2 ve çizelge 5.3’de belirtilmiştir. EDS analiz sonuçları incelendiğinde, alüminyumun bakıra kısa mesafelerde ve yüksek oranlarda, bakırın alüminyuma daha uzun mesafelerde ve düşük oranlarda difüze olduğu saptanmıştır. Şekil 5.38 ve Şekil 5.39’deki Al-Cu konsantrasyon eğrilerinden görülmektedir. Bu EDS analiz sonuçları çizelge 5.1 ile karşılaştırıldığında difüzyon bölgesinde intermetalik faz olan  $Al_2Cu$ ’nun kaynak esnasında difüzyon bölgesinde oluştuğu söylenebilir.



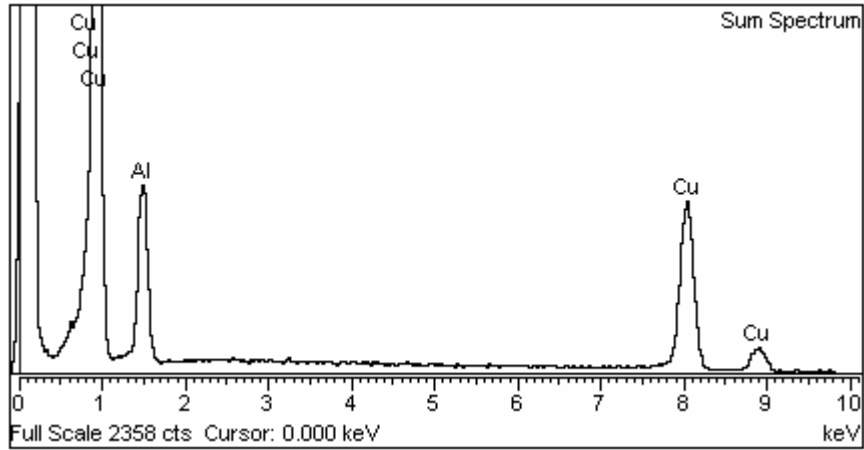
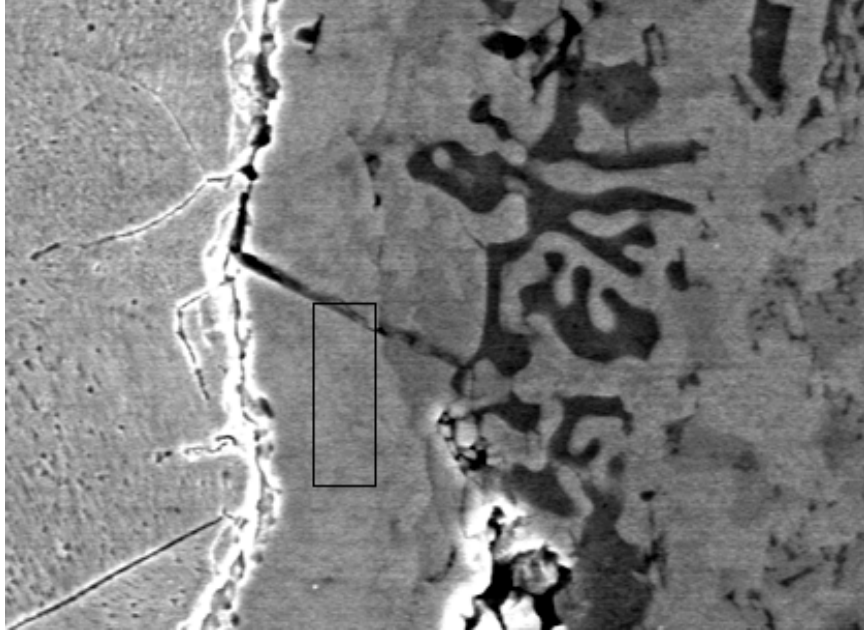
Şekil 5.23 Al-Cu difüzyon kaynaklı numunede difüzyon bölgesinin, EDS Analizi alınmış bölgelerinin gösterimi (220X)

Çizelge 5.2 Al-Cu difüzyon kaynaklı numunede difüzyon bölgesinin, EDS Analizi alınmış bölgelerinin tanımı

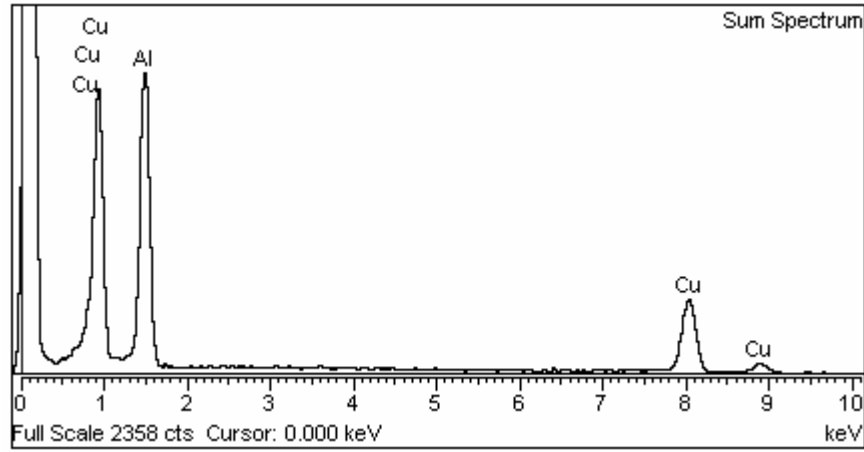
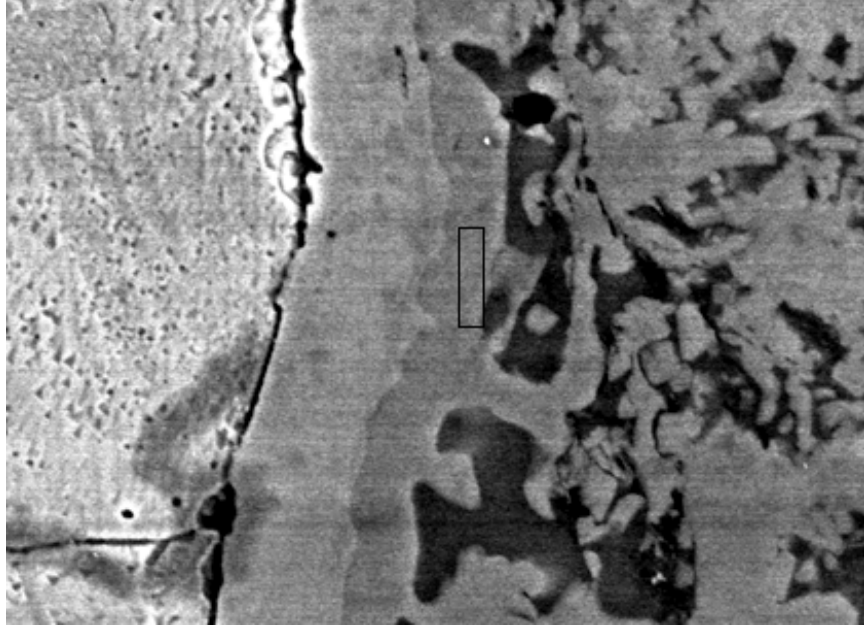
Analiz Yeri No	Birleşme Bölgesinden Uzaklık (μm)	Al	Cu	Oluşan Faz
1	50	0	100	Cu
2	20	39,58	60,42	δ
3	30	66,08	33,92	θ
4	80	74,68	19,32	-
5	140	78,4	18,18	-
6	190	76,05	19,24	-
7	290	100	0	Al



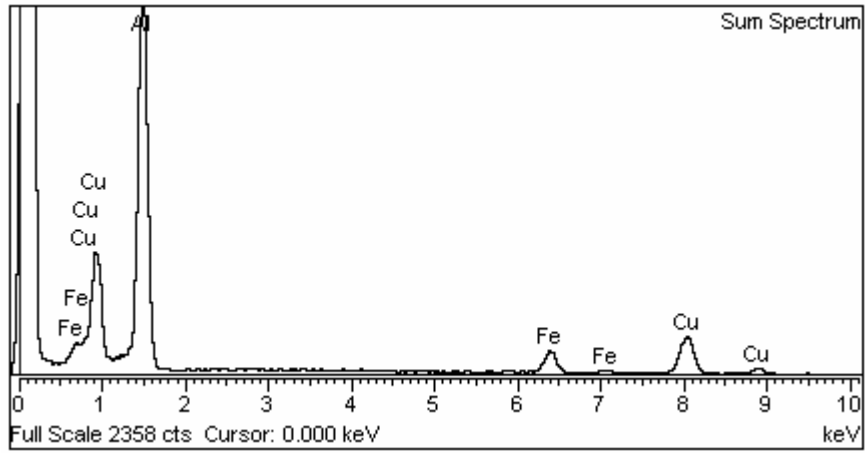
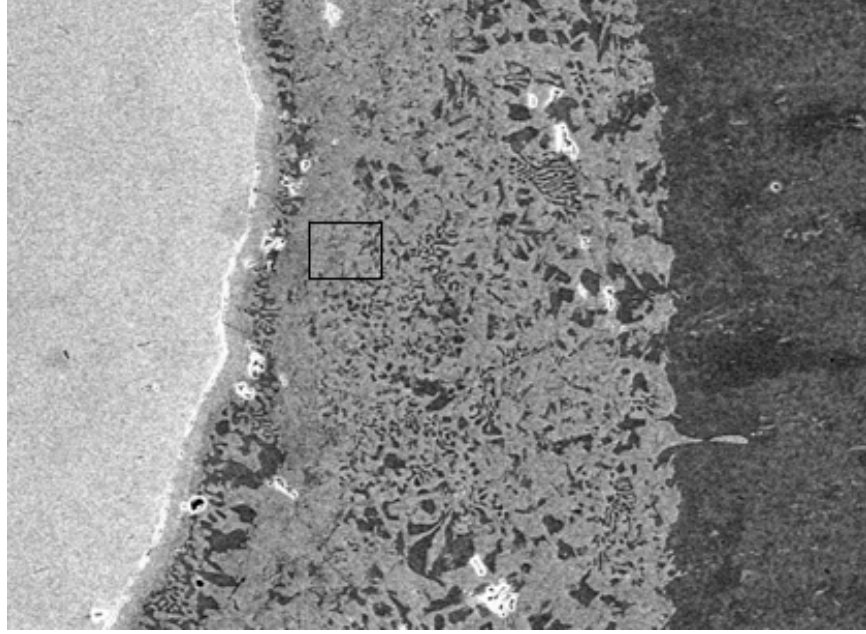
Şekil 5.24 Al-Cu difüzyon kaynaklı numunede difüzyon bölgesindeki, 1 nolu bölgenin Spektro analizi (220X görüntü resmi)



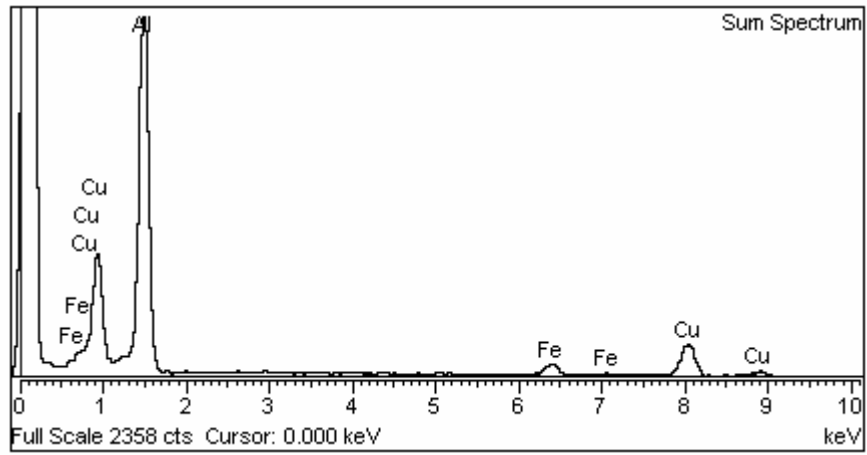
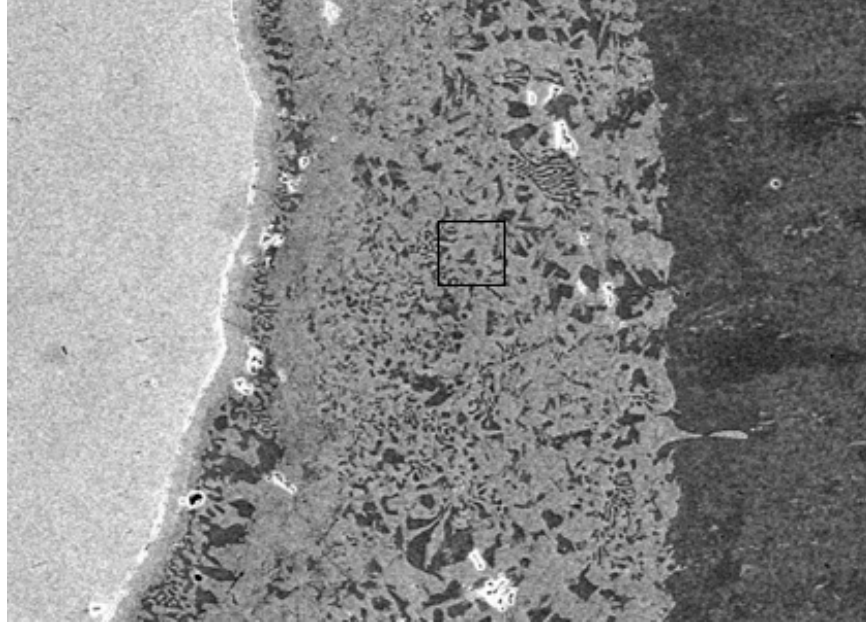
Şekil 5.25 Al-Cu difüzyon kaynaklı numunede difüzyon bölgesindeki, 2 nolu bölgenin Spektro analizi (2000X görüntü resmi)



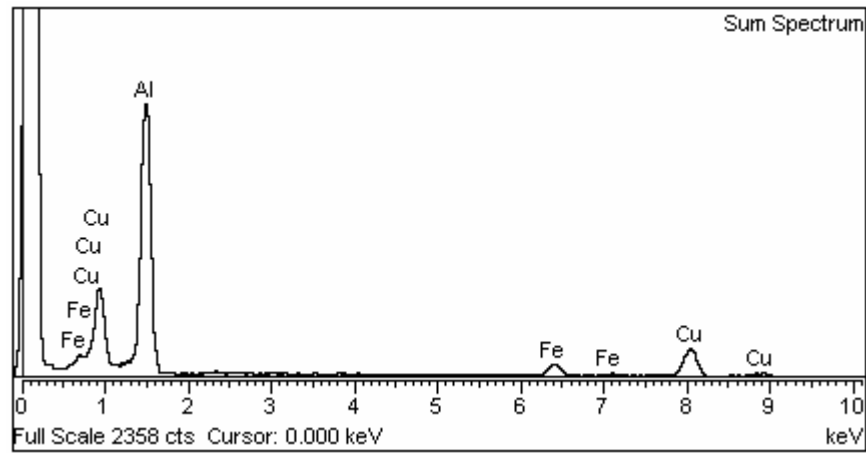
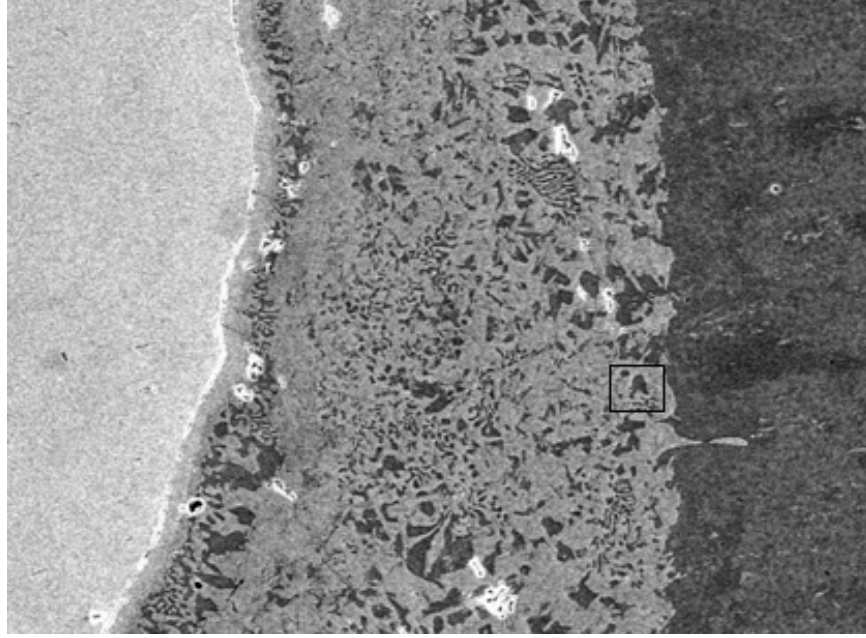
Şekil 5.26 Al-Cu difüzyon kaynaklı numunede difüzyon bölgesindeki, 3 nolu bölgenin Spektro analizi (2000X görüntü resmi)



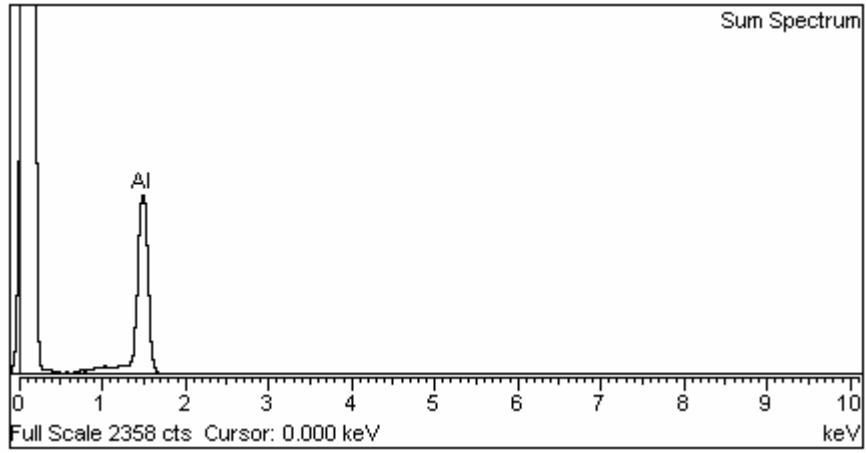
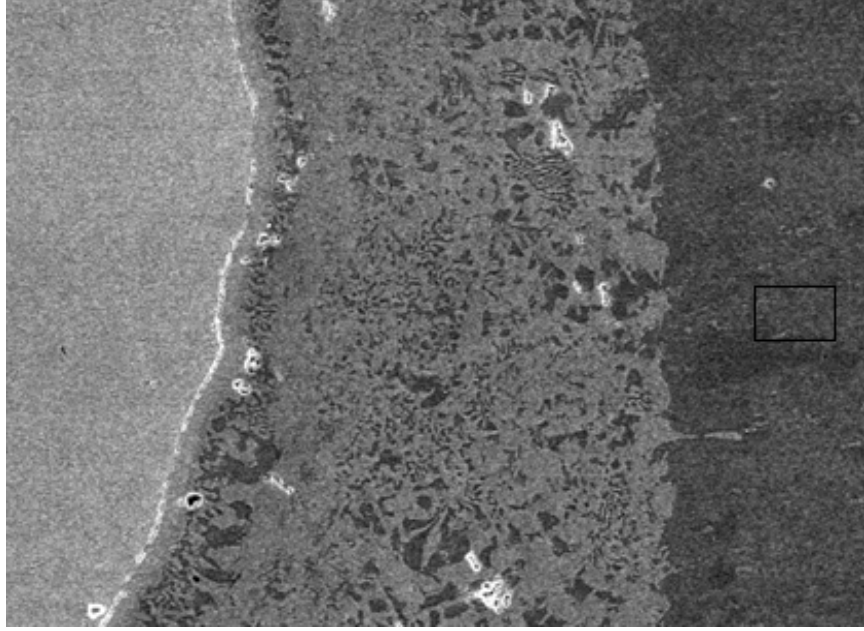
Şekil 5.27 Al-Cu difüzyon kaynaklı numunede difüzyon bölgesindeki, 4 nolu bölgenin Spektro analizi (220X görüntü resmi)



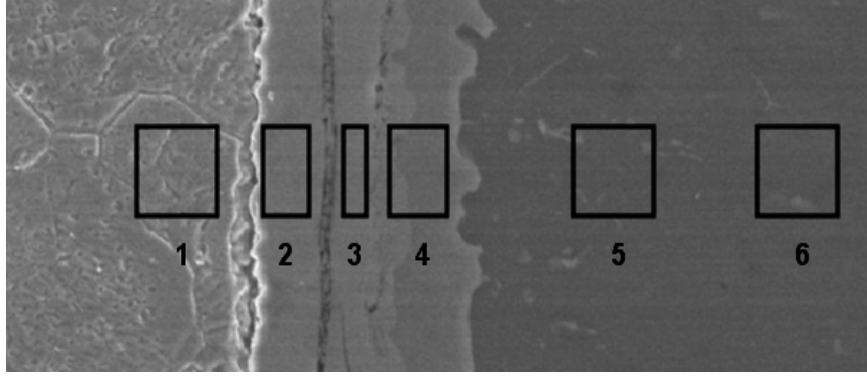
Şekil 5.28 Al-Cu difüzyon kaynaklı numunede difüzyon bölgesindeki, 5 nolu bölgenin Spektro analizi (220X görüntü resmi)



Şekil 5.29 Al-Cu difüzyon kaynaklı numunede difüzyon bölgesindeki, 6 nolu bölgenin Spektro analizi (220X görüntü resmi)



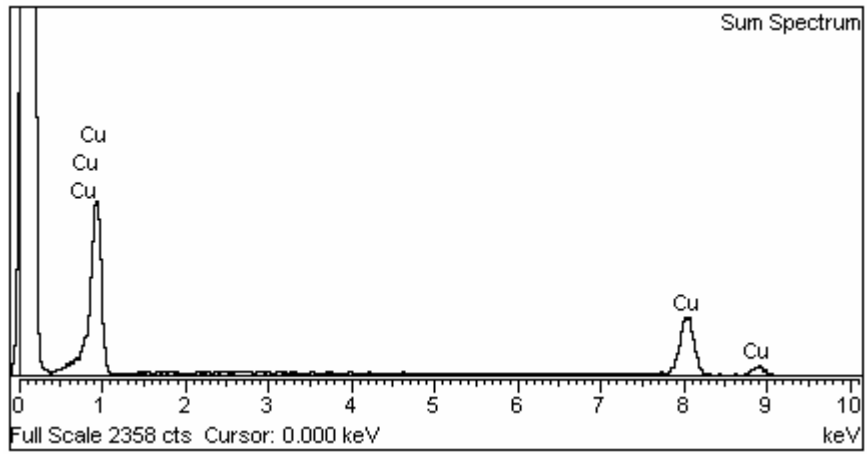
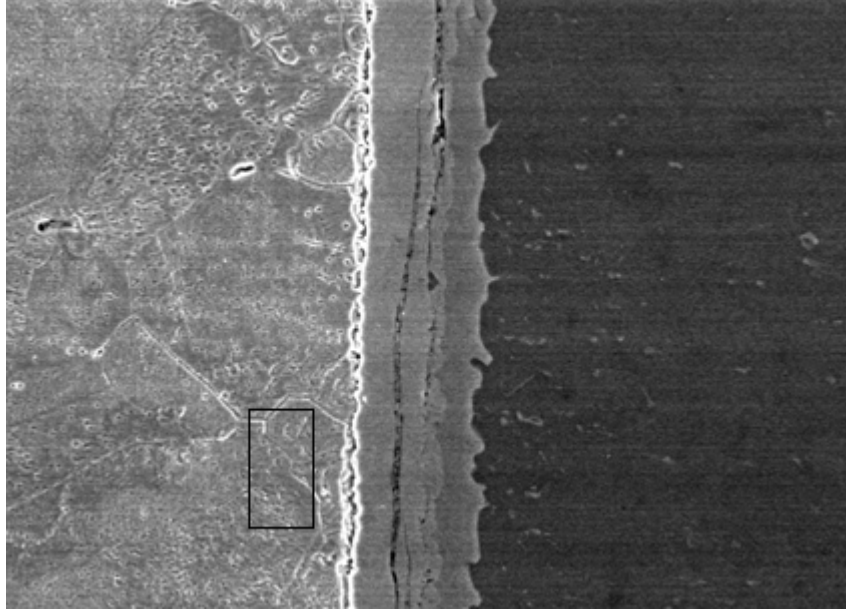
Şekil 5.30 Al-Cu difüzyon kaynaklı numunede difüzyon bölgesindeki, 7 nolu bölgenin Spektro analizi (220X görüntü resmi)



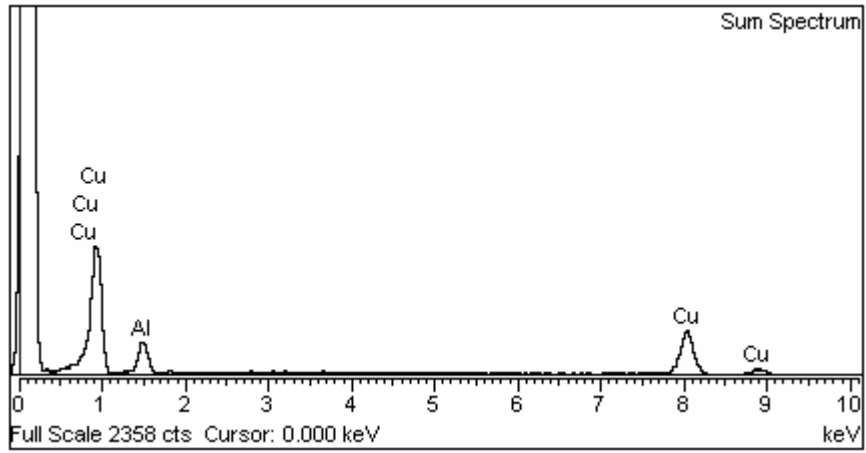
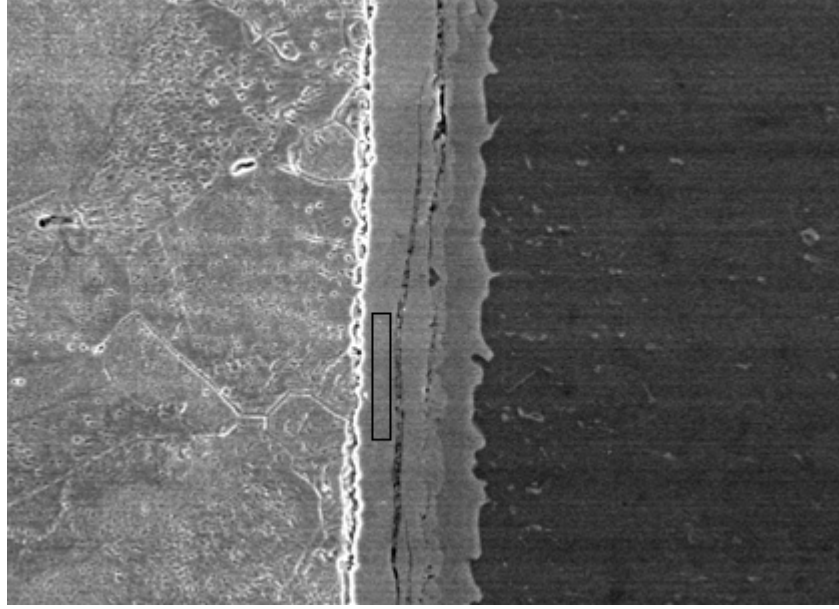
Şekil 5.31 Al-Cu difüzyon kaynaklı başka bir numunedeki difüzyon bölgesinin, EDS Analizi alınmış bölgelerinin gösterimi (750X görüntü resmi)

Çizelge 5.3 Al-Cu difüzyon kaynaklı başka bir numunedeki difüzyon bölgesinin, EDS Analizi alınmış bölgelerinin tanımı

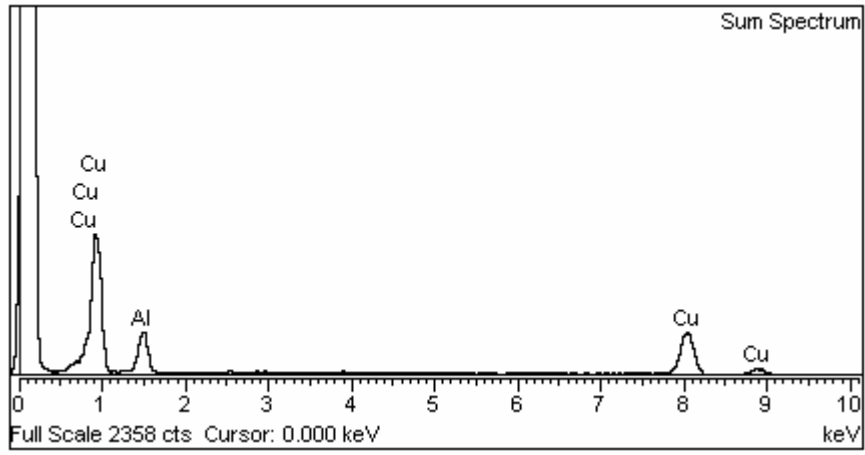
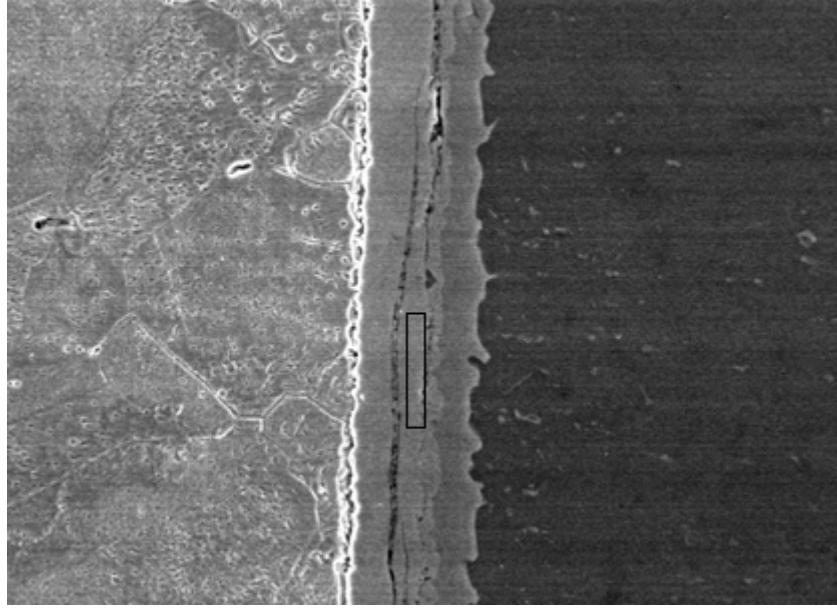
Analiz Yeri No	Birleşme Bölgesinden Uzaklık ( $\mu\text{m}$ )	Al	Cu	Oluşan Faz
1	100	0	100	Cu
2	30	32,84	67,16	$\gamma_2$
3	70	37,56	62,44	$\gamma_2$
4	100	67,18	32,82	$\theta$
5	180	98,79	1,21	-
6	250	100	0	Al



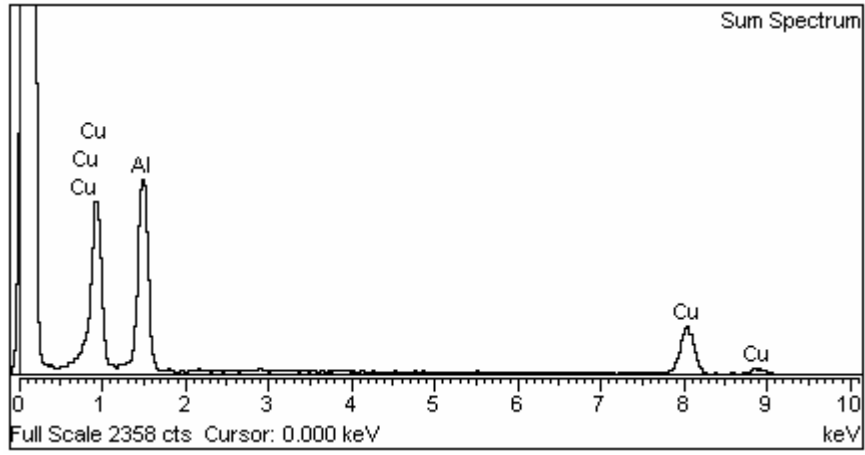
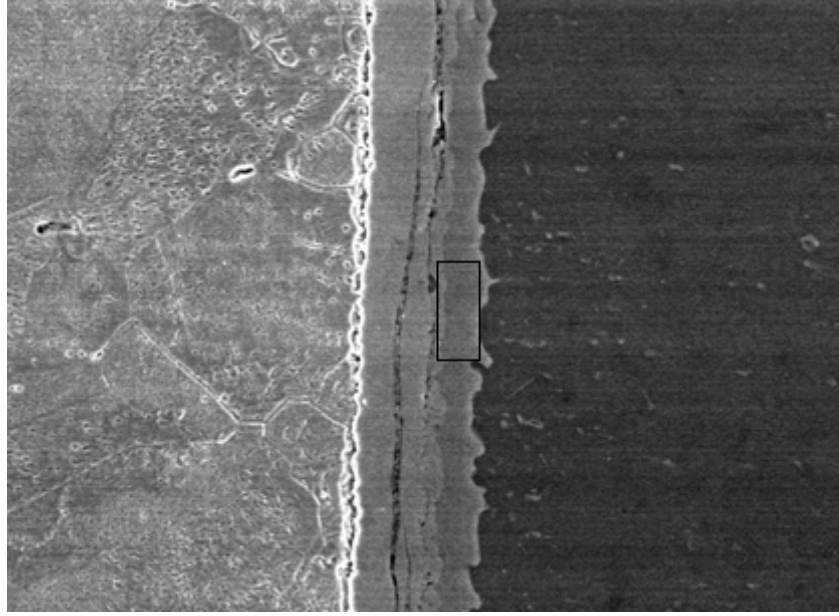
Şekil 5.32 Al-Cu difüzyon kaynaklı başka bir numunedeki difüzyon bölgesindeki, 1 nolu bölgenin Spektro analizi (220X görüntü resmi)



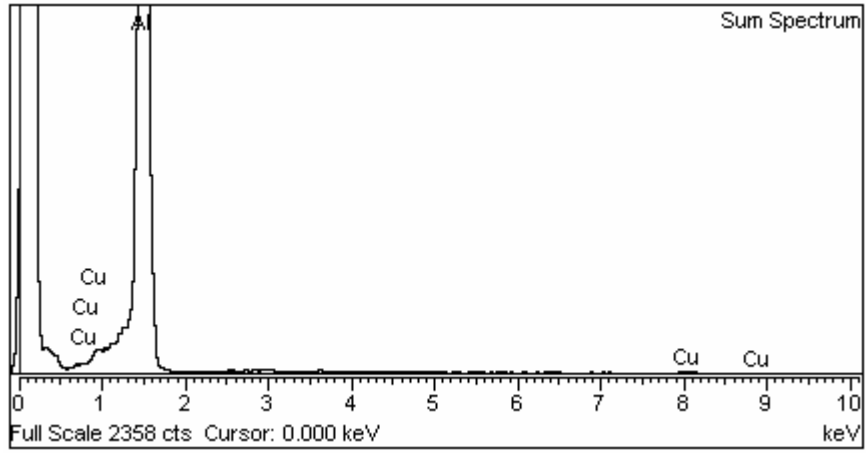
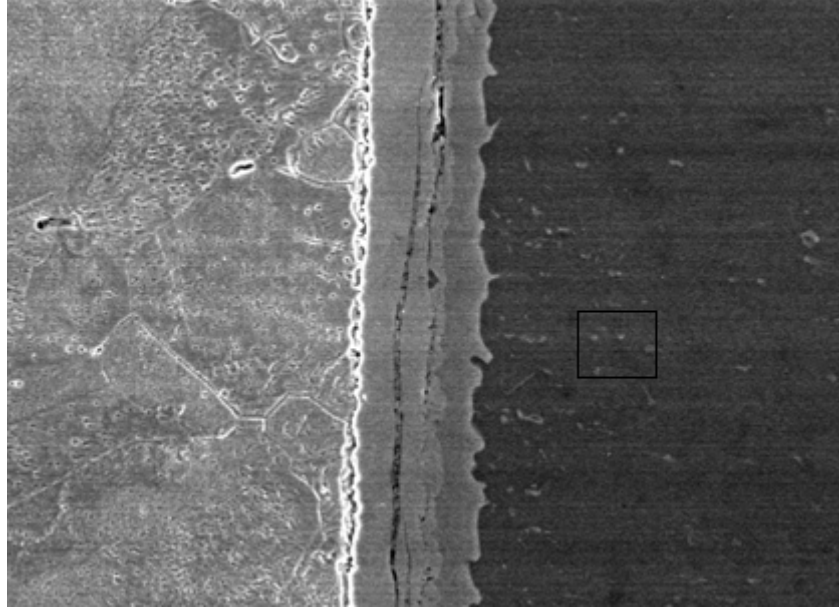
Şekil 5.33 Al-Cu difüzyon kaynaklı başka bir numunedeki difüzyon bölgesindeki, 2 nolu bölgenin Spektro analizi (220X görüntü resmi)



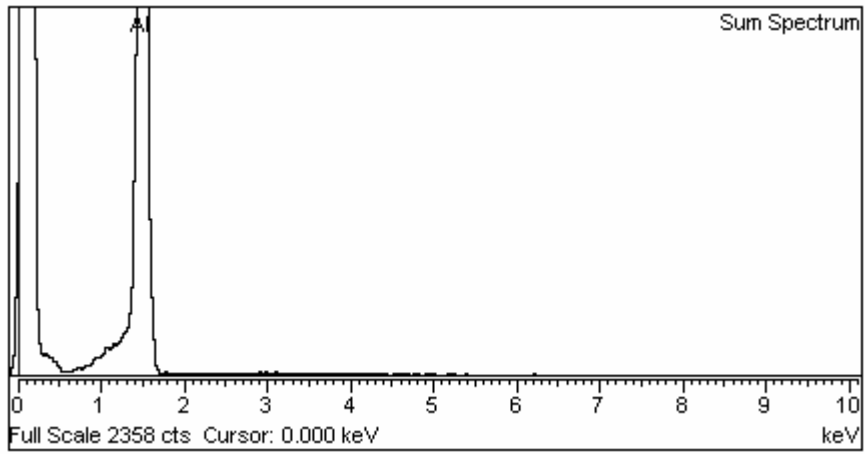
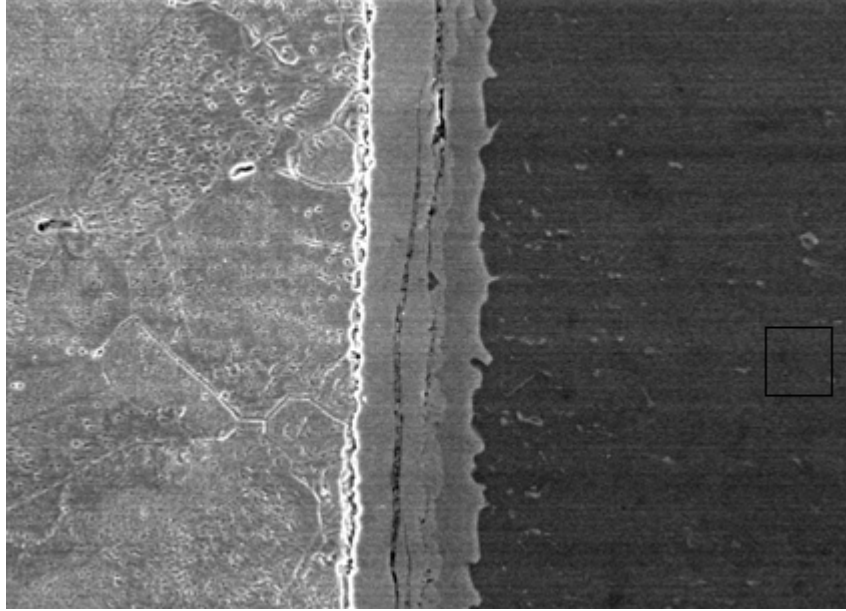
Şekil 5.34 Al-Cu difüzyon kaynaklı başka bir numunedeki difüzyon bölgesindeki, 3 nolu bölgenin Spektro analizi (220X görüntü resmi)



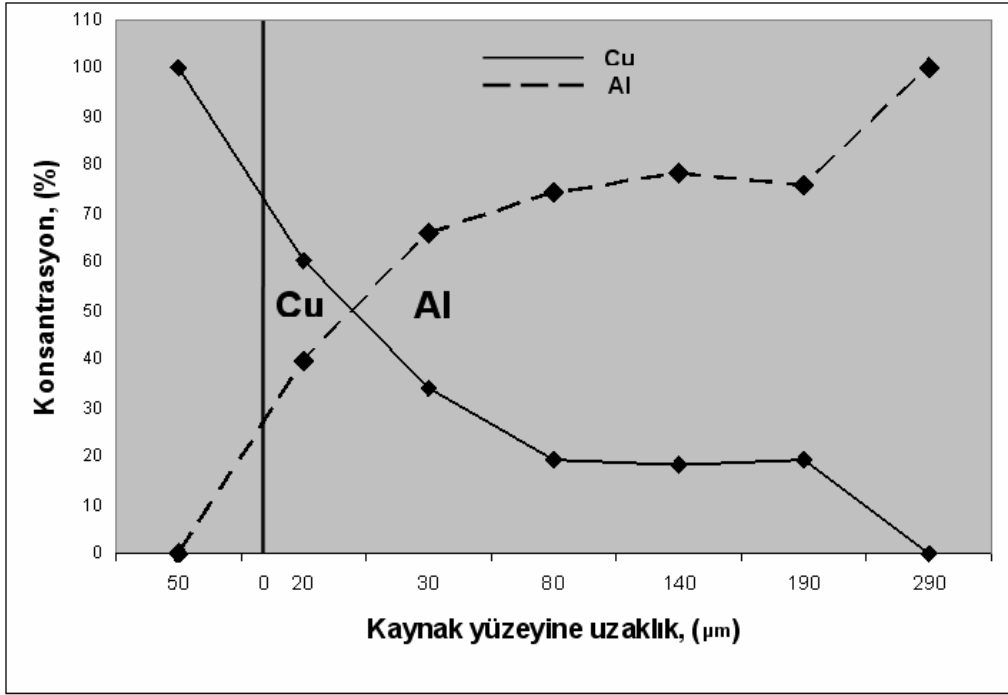
Şekil 5.35 Al-Cu difüzyon kaynaklı başka bir numunedeki difüzyon bölgesindeki, 4 nolu bölgenin Spektro analizi (220X görüntü resmi)



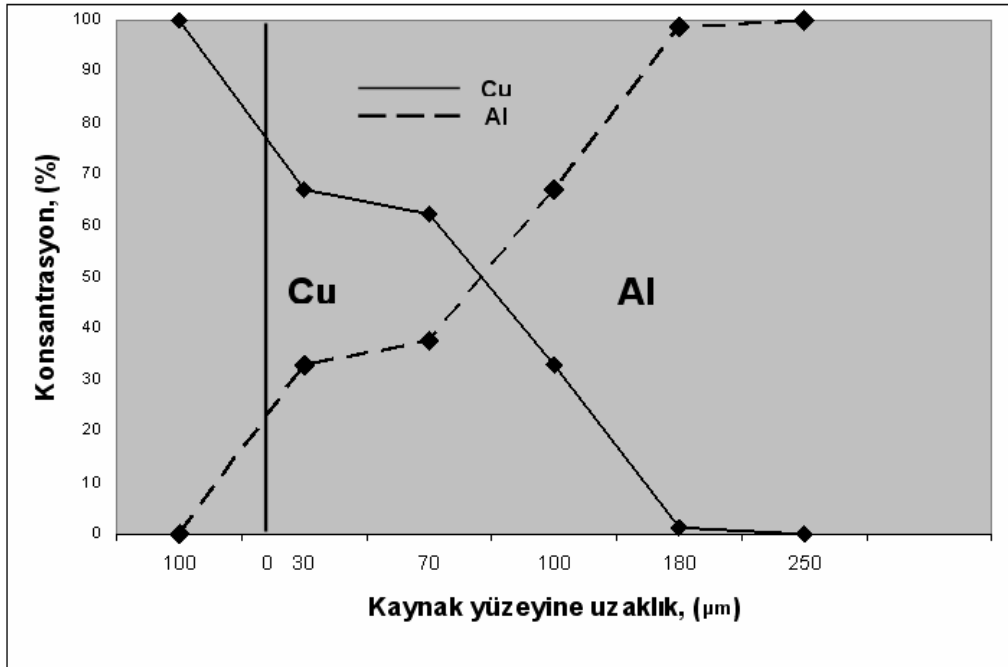
Şekil 5.36 Al-Cu difüzyon kaynaklı başka bir numunedeki difüzyon bölgesindeki, 5 nolu bölgenin Spektro analizi (220X görüntü resmi)



Şekil 5.37 Al-Cu difüzyon kaynaklı başka bir numunedeki difüzyon bölgesindeki, 6 nolu bölgenin Spektro analizi (220X görüntü resmi)



Şekil 5.38 Al-Cu difüzyon kaynaklı numunede difüzyon bölgesindeki Al-Cu'nun konsantrasyon değişimi



Şekil 5.39 Al-Cu difüzyon kaynaklı başka bir numunede difüzyon bölgesindeki, Al-Cu'nun konsantrasyon değişimi

Aynı şartlarda daha önce yapılan difüzyon kaynaklı çekme deneyi numuneleri kırılma yüzeyleri incelenmiştir. Kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri alınmış ve EDS analizleri yapılmıştır.

560°C sıcaklık, 4,5 MPa basınç ve 60 dakika süre ile kaynaklanan numunelerin çekme deneyi sonucunda kopma mukavemeti bulunmuştur [1]. Bu mekanik özelliklerin elde edildiği çekme deneyi sonucundaki kırılma yüzeyleri incelenmiştir. TS 138'e [91] göre yapılan kaynaklı parçaların çekme deneyi sonuçları Çizelge 5.4'de verilmiştir. Kaynak sonrası elde edilen kopma dayanımları [1] Çizelge 5.5'de verilmiştir.

Çizelge 5.4 Kaynaklanmamış malzemelerin kopma dayanımları

Malzeme	Kopma Dayanımı, Mpa	
Alüminyum	1	102,4
	2	98,2
	3	99,6
Bakır	1	216,4
	2	219,4
	3	218,5

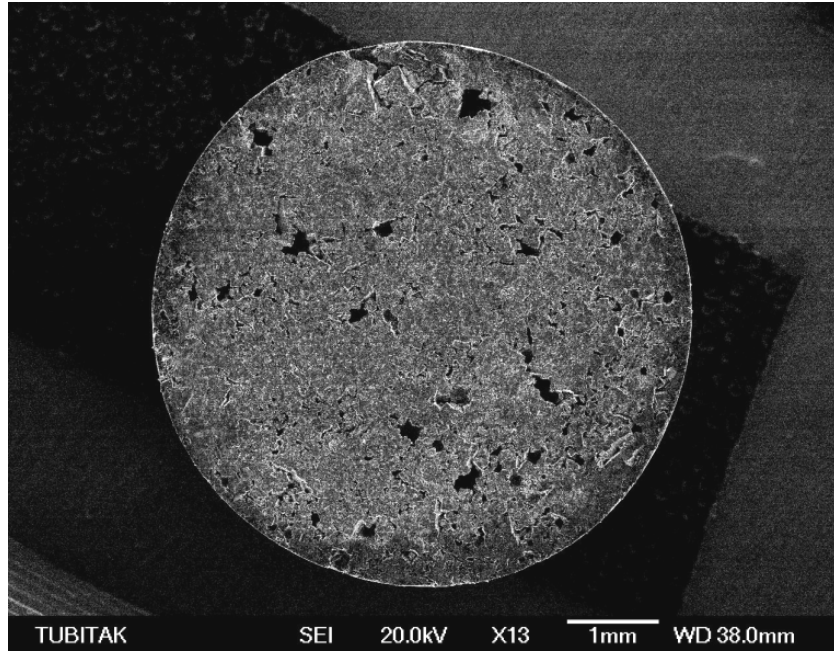
Çizelge 5.5 Difüzyon kaynaklı (Al-Cu) deney numunelerinin kopma dayanımları

Malzeme	Kopma Dayanımı, Mpa	
Al-Cu (kaynaklanmış numune)	1	60,45
	2	62,1
	3	59,86

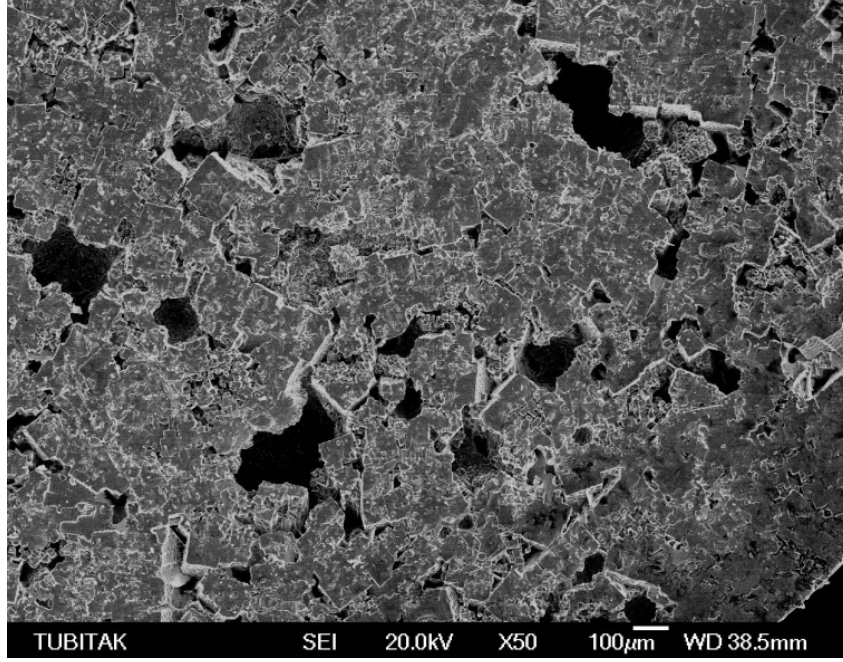
Çekme deney numuneleri çıplak gözle incelendiğinde Şekil 5.40'daki gibi kırılmanın plastik deformasyon göstermeyen yüzeyi düz bir şekilde gevrek kırılma tipinde olduğu görülmüştür. Çizelge 5.5'de görüldüğü gibi kopma dayanımı düşüş göstermiştir. Kırılma yeri, birleşme yerine yakın alüminyum bölgesindedir. EDS analizi sonucu incelendiğinde bu bölgede oluşan intermetalik fazların meydana geldiği ve bu gevrek kırılma sebebinin intermetalik fazlar olduğu söylenebilir.



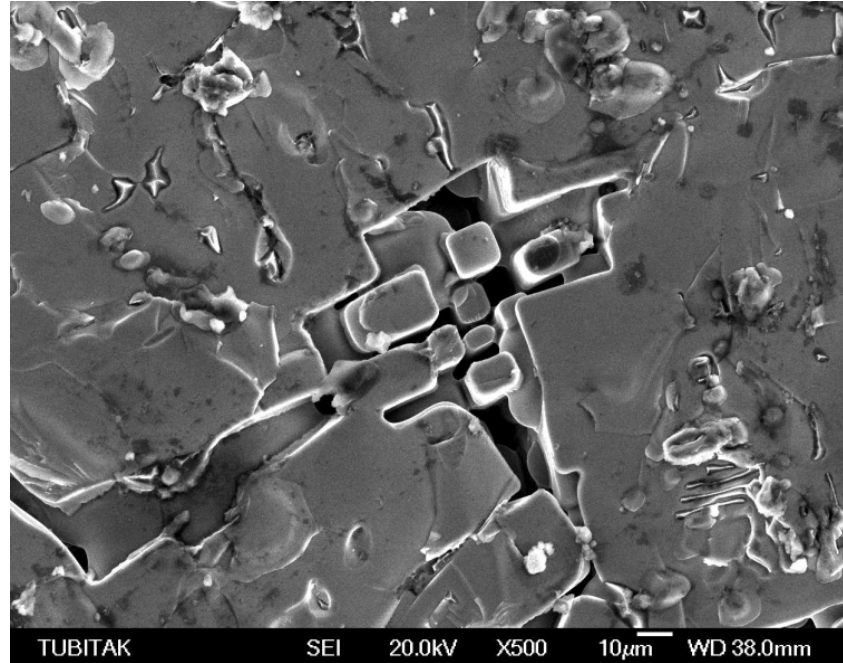
Şekil 5.40 Çekme numunesinin gevrek kırılma resmi



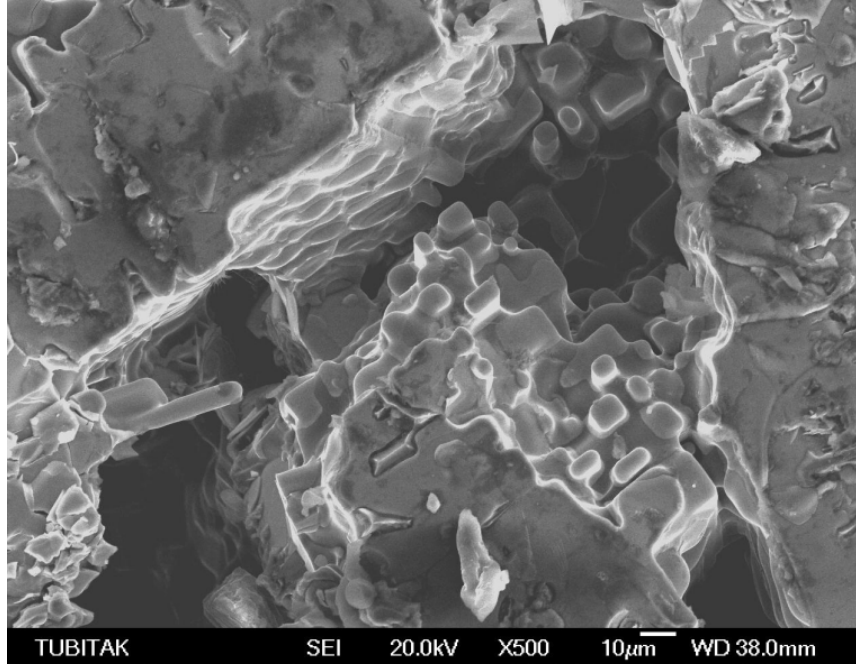
Şekil 5.41 Çekme deney numunesinin kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü



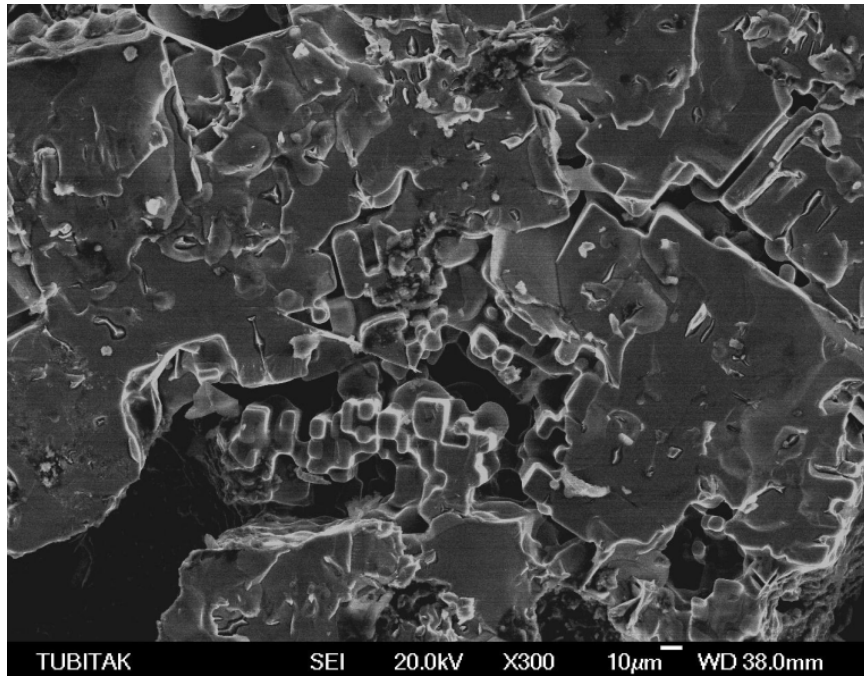
Şekil 5.42 Çekme deney numunesinin kırılma yüzeyinin 1. bir başka bölgesinin SEM görüntüsü



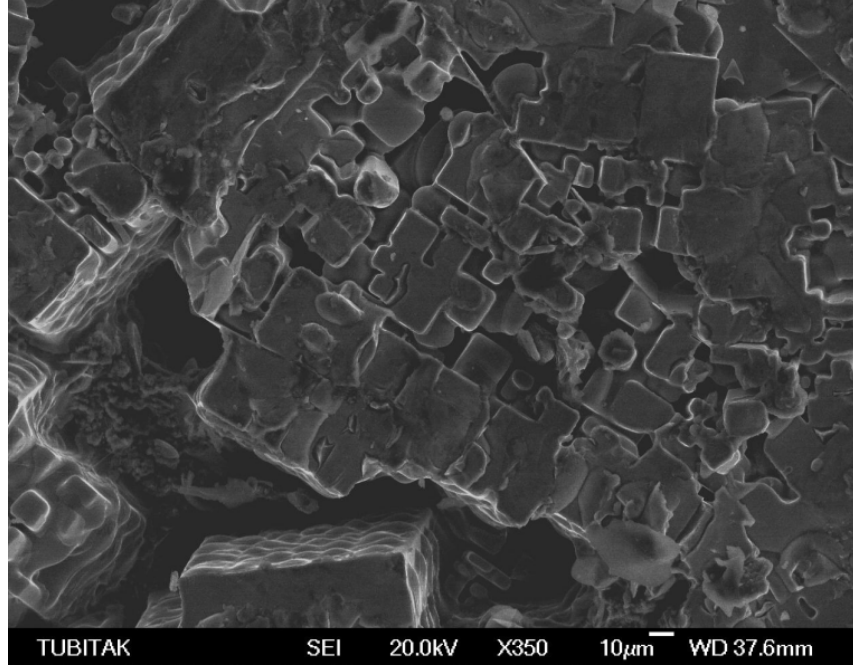
Şekil 5.43 Çekme deney numunesinin kırılma yüzeyinin 2. bir başka bölgesinin SEM görüntüsü



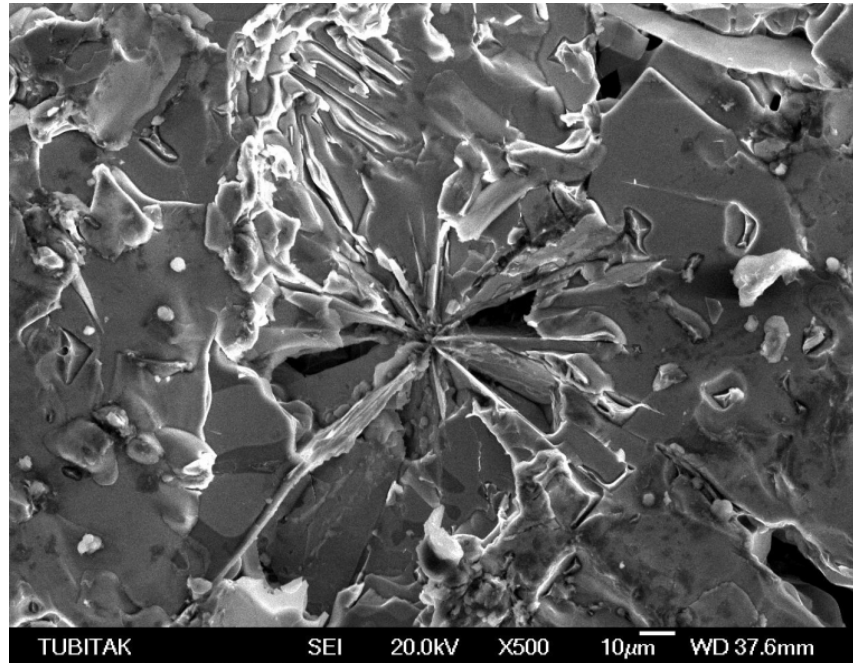
Şekil 5.44 Çekme deney numunesinin kırılma yüzeyinin 3. bir başka bölgesinin SEM görüntüsü



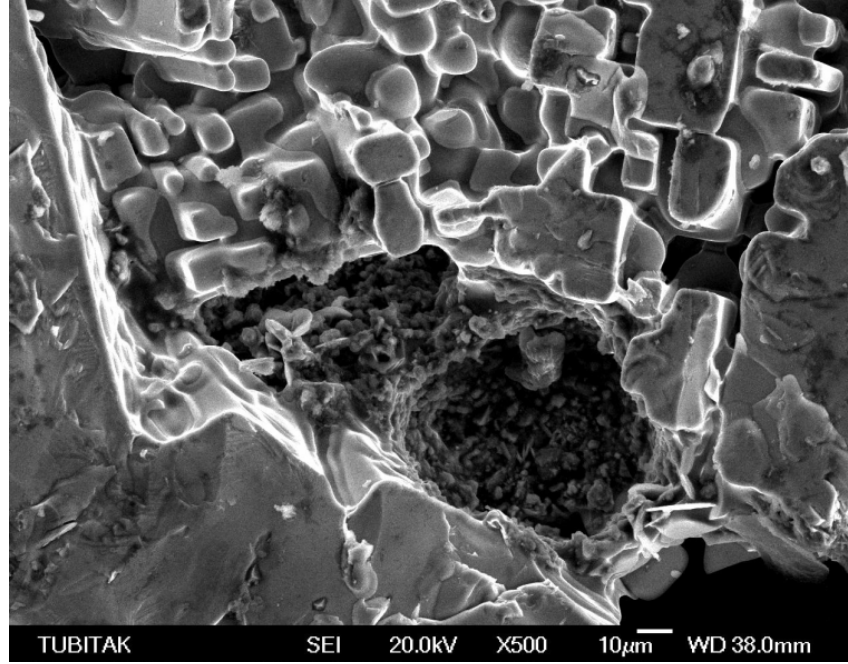
Şekil 5.45 Çekme deney numunesinin kırılma yüzeyinin 4. bir başka bölgesinin SEM görüntüsü



Şekil 5.46 Çekme deney numunesinin kırılma yüzeyinin 5. bir başka bölgesinin SEM görüntüsü

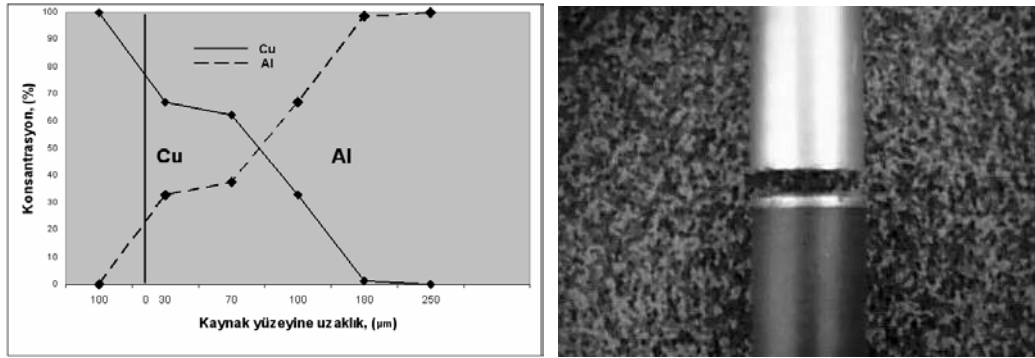


Şekil 5.47 Çekme deney numunesinin kırılma yüzeyinin 6. bir başka bölgesinin SEM görüntüsü



Şekil 5.48 Çekme deney numunesinin kırılma yüzeyinin 7. bir başka bölgesinin SEM görüntüsü

Çizelge 5.6 Kırılma yüzeyinde, 3 bölgeden alınan EDS analiz sonuçları

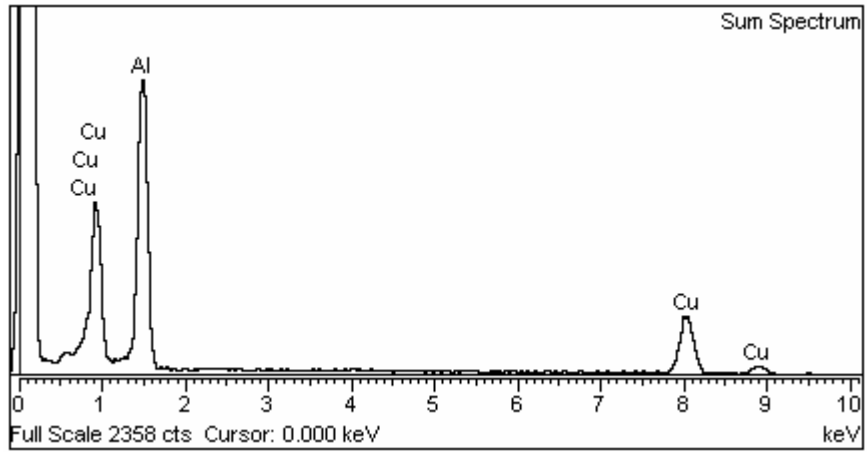
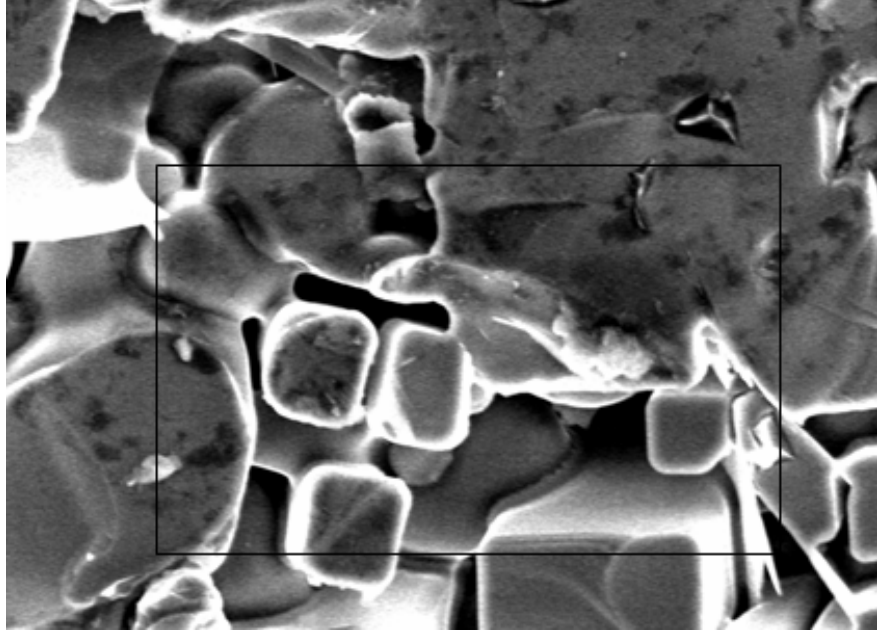


Kırılma Yüzeyi No	Al	Cu
1	70,12	29,88
2	69,44	30,56
3	68,77	31,23

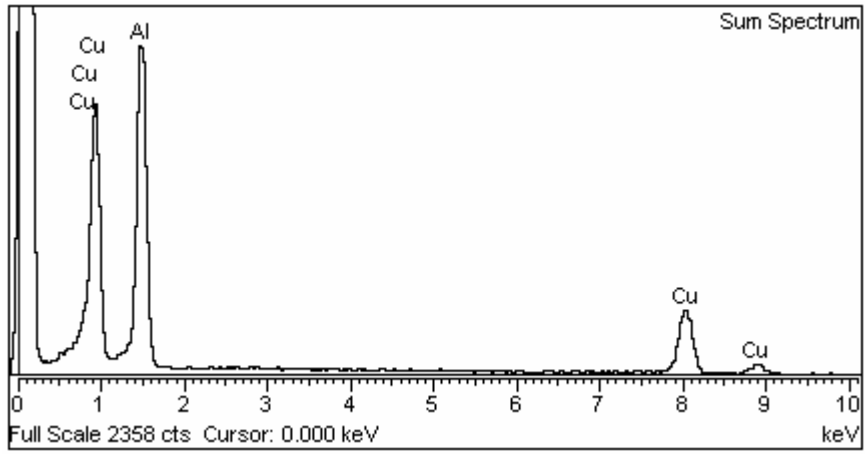
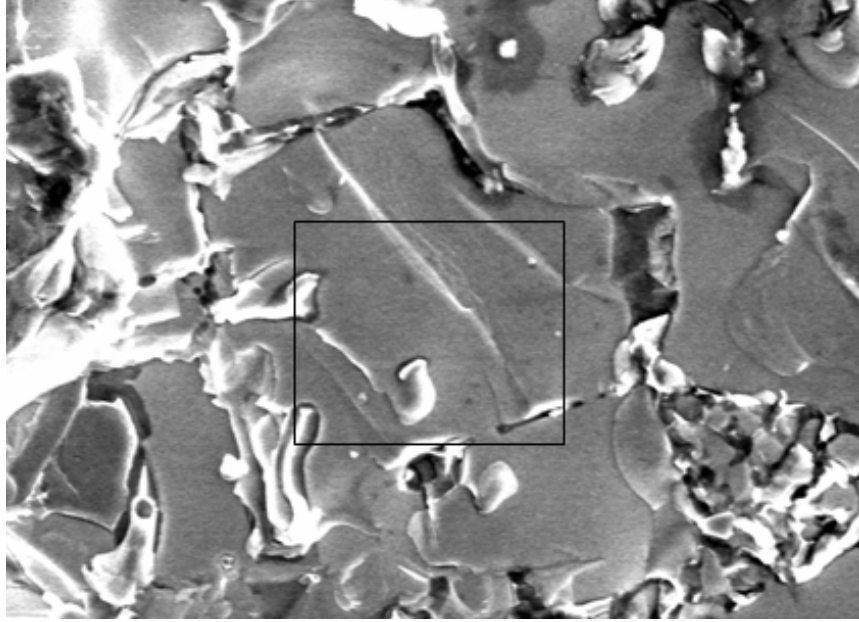
Kırılma yüzeyinin 3 farklı EDS analizi alınmıştır (Çizelge 5.6). Bu analiz sonucunda Al ve Cu oranları incelenmiş ve çizelge 5.1 ile karşılaştırdığımızda kırılma yüzeyinde intermetalik faz olan  $Al_2Cu$  fazının oluştuğu söylenebilir.

Konsantrasyon eğrisinden oluşma oranları olarak da bunu görebilmek mümkündür. Yukarıdaki resimde de görüldüğü gibi düz bir yüzey oluşturarak gevrek kırılma olduğu ve alüminyum tarafından olduğu görülmektedir. Bütün bu veriler ele alındığında bu gevrek kırılma ve kırılma sonucu düzgün bir kırılma yüzeyinin oluşma sebebinin kaynak esnasında oluşan intermetalik faz olan  $Al_2Cu$  fazının sebep olduğu söylenebilir.

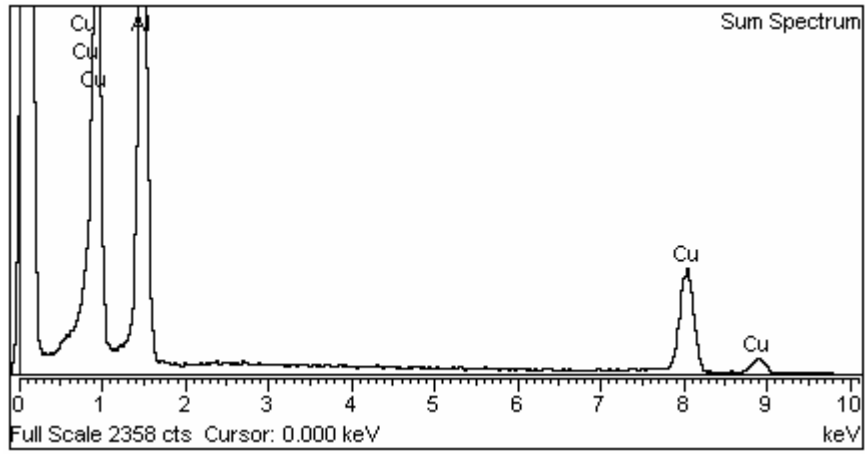
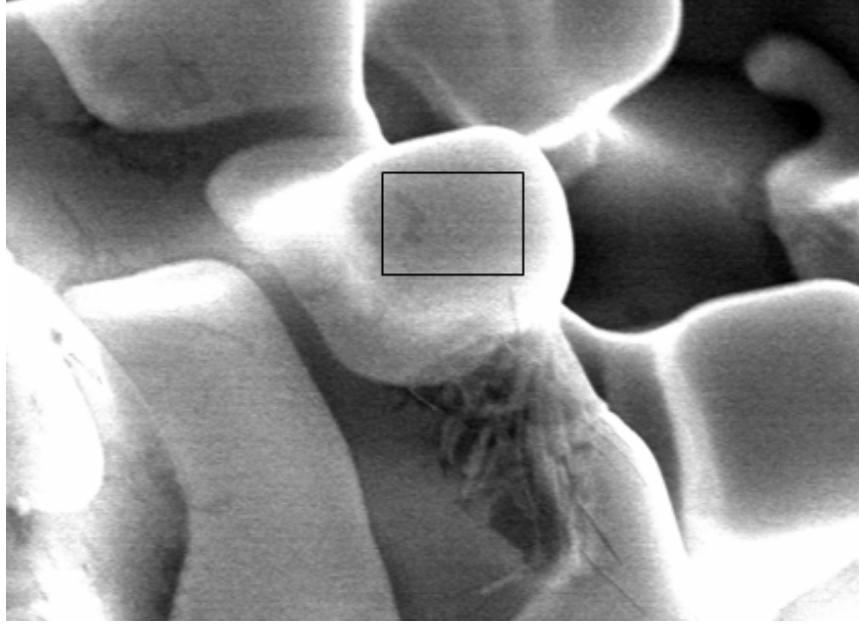
Oluşan intermetalik faz malzemeyi gevrek hale getirdiği görülmüştür. Optik mikroskopta kırılma yüzeyinin alüminyum tarafından koptuğu belirtilmiş ve EDS analizi sonucunda, yüzde oranları incelendiğinde alüminyum oranının fazla olduğu, ancak bu bölgeye kadar Cu atomlarının difüze olduğu görülmüştür.



Şekil 5.49 1 no'lu kırılma yüzeyinin spektro analizi



Şekil 5.50 2 no'lu kırılma yüzeyinin spektro analizi



Şekil 5.51 3 no'lu kırılma yüzeyinin spektro analizi

### 5.3 Mikrosertlik Deneyi

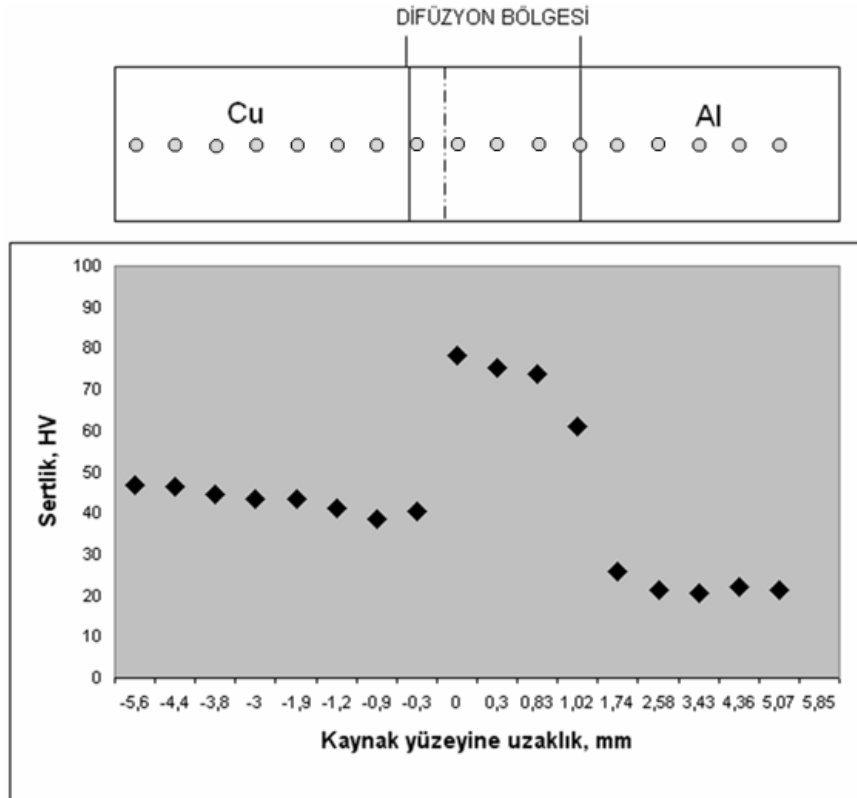
Deney sonrası numuneler üzerinde difüzyon bölgesinde alınan sertlik değerleri Çizelge 5.7 ve 5.8’de verilmiştir. Kullanılan deney şartlarındaki numunelerin birleşme bölgesinden her iki tarafa doğru (sağa-sola) sertlik ölçümleri yapılmıştır. İki farklı numuneden alınan bu sertlik değişimleri Şekil 5.52 ve Şekil 5.53’de verilmiştir. Şekil 5.54’de ise mikrosertlik sonucu oluşan ölçüm izleri görülmektedir.

Sertlik ölçümleri yapıldıktan sonra bu değerlere göre grafikler çizilmiştir. Bu grafiklerden de görüldüğü gibi kaynak şartlarının sertlik üzerine etkileri değerlendirildiğinde, birleşme bölgesinde oluşan ara tabaka da sertlik artışı meydana geldiği görülmüştür. Kaynak bölgesi dışındaki ana malzemelerde ise, Çizelge 4.4’te görülen kaynak öncesi Al’un sertliği ile kaynak sonrası Al’un sertlikleri karşılaştırıldığında, sertlikte herhangi bir değişim olmamasına rağmen, bakır metalinde ise sertlikte bir düşüş meydana gelmiştir. Bunun sebebi, kaynak öncesi soğuk çekilerek üretilen bakırın içindeki gerilmelerin kaynak sonrası azalması, bir nevi gerilim giderme tavlama olarak açıklanabilir.

Özellikle, difüzyon ara bölgesinin bakıra çok yakın kısmında ince bir bölgede ani sertlik artışı olduğu gözlenmiştir. Difüzyon ara bölgesinin saf alüminyum tarafına doğru gidildikçe difüzyon bölgesi boyunca yüksek sertliğin devam ettiği ve alüminyuma doğru yaklaştıkça sertliğin azaldığı görülmüştür. Daha önceki incelemelere dayanarak [41] bunun nedeninin birleşme bölgesinde intermetalik fazların ( $Al_2Cu$ ,  $Al_4Cu_9$ ) oluşumundan meydana geldiği sonucuna varılabilir. İntermetalik fazlar sert ve gevrek olduklarından, intermetalik faz kalınlıkları belirli bir kalınlığı ( $\approx 5\mu m$ ) geçince buldukları tabaka boyunca aşırı bir gevrekleşme gösterirler[94]. Fakat literatürde [41], İntermetalik faz kalınlığı  $10\mu m$ ’den fazla olduğunda, kaynak dayanımının keskin bir şekilde azaldığı belirtilmiştir. Bunun için faz kalınlığının ölçülmesi ve bu fazın içyapısının iyice irdelenmesi gerekmektedir. Bundan sonra çalışma bu yönde yapılmalı şeklinde önerisinde bulunabiliriz. Şekil 5.54’deki sertlik izlerine bakıldığında ana metal ile difüzyon bölgesinde ani sertlik artışının izlerle alakası vardır. Sertlik yüksek olduğunda iz küçük, sertlik düşük olduğunda iz büyük olarak görülmektedir.

Çizelge 5.7 Al-Cu difüzyon kaynaklı numunede difüzyon bölgesindeki, kaynak bölgesinden alınan sertlik değerleri

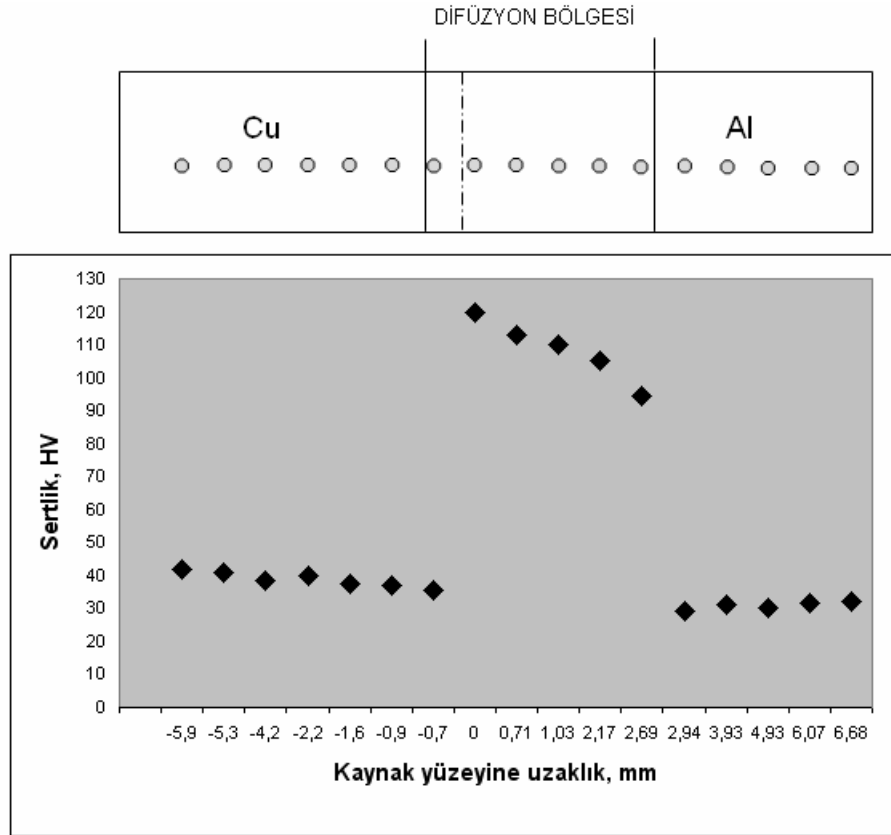
Difüzyon bölgesinden uzaklık (mm)	Sertlik Değeri (HV <sub>1</sub> )
-5,623	46,8
-4,414	46,4
-3,78	44,6
-2,963	43,5
-1,927	43,3
-1,158	41,1
-0,943	38,7
-0,305	40,3
0	78,2
0,295	75,2
0,831	73,95
1,02	60,95
1,74	26
2,579	21,5
3,431	20,6
4,355	22,1
5,066	21,4



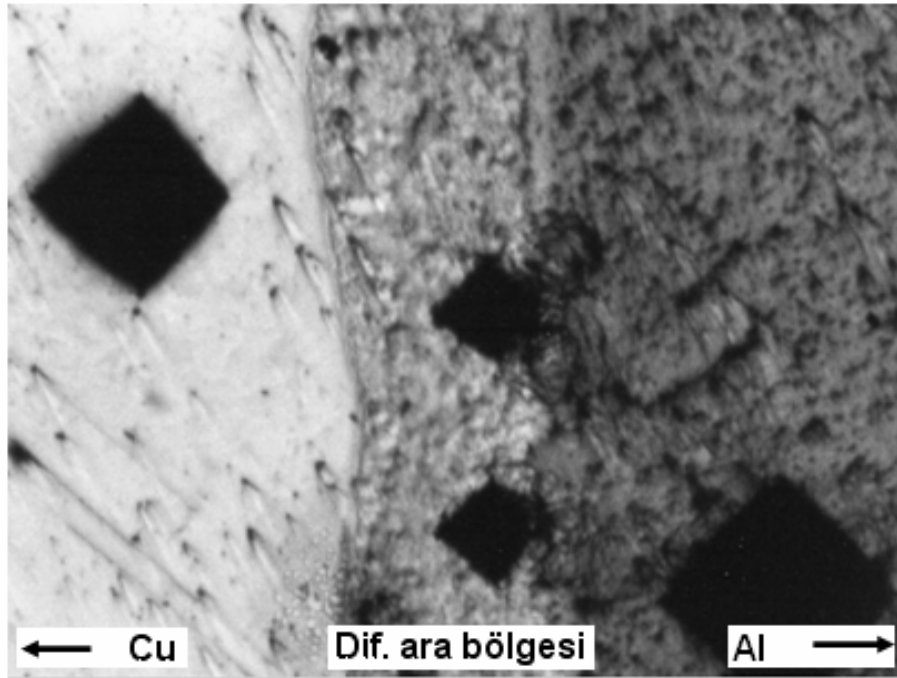
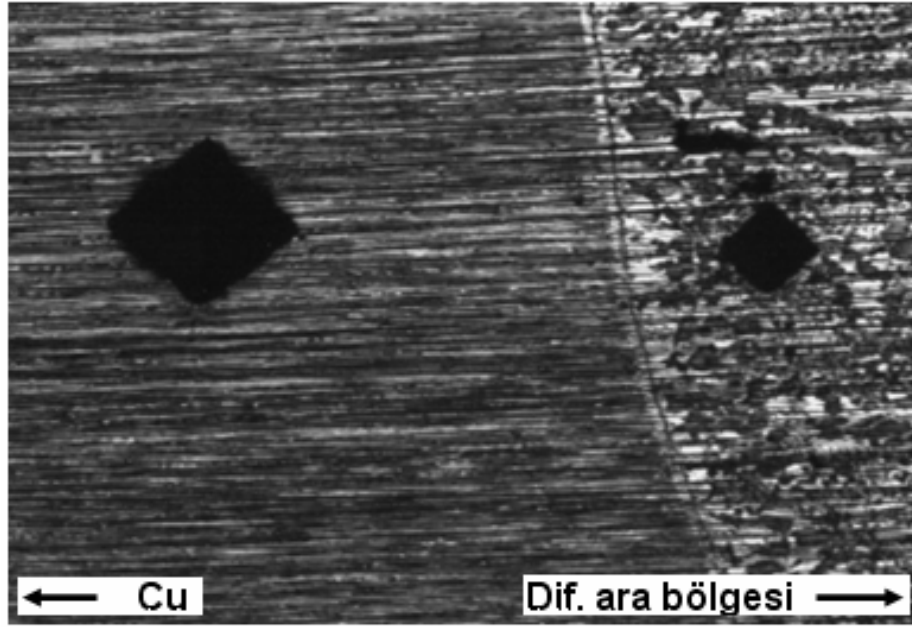
Şekil 5.52 Al-Cu difüzyon kaynaklı numunedeki difüzyon bölgesindeki T: 560°C, P: 4,5 MPa, t: 60 dakika kaynak şartındaki numunenin sertlik verileri

Çizelge 5.8 Al-Cu difüzyon kaynaklı başka bir numunedeki difüzyon bölgesindeki, kaynak bölgesinden alınan sertlik değerleri

Difüzyon bölgesinden uzaklık (mm)	Sertlik Değeri (HV <sub>1</sub> )
-5,90	42,1
-5,30	40,9
-4,21	38,3
-2,15	39,9
-1,59	37,3
-0,87	37
-0,67	35,4
0,00	120
0,71	113
1,03	110
2,17	105
2,69	94,6
2,94	29,3
3,93	31,4
4,93	30,3
6,07	31,7
6,68	31,9



Şekil 5.53 Al-Cu difüzyon kaynaklı başka bir numunedeki difüzyon bölgesindeki T: 560°C, P: 4,5 MPa, t: 60 dakika kaynak şartındaki numunenin sertlik verileri.



Şekil 5.54 Ölçülen mikro sertlik sonucu oluşan ölçüm izleri (200X)

## 6 GENEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

1- Bu çalışmada, ergitme kaynağı ile birleştirilmesi mümkün olmayan alüminyum ve bakır malzeme çiftinin difüzyon kaynağı yöntemi ile argon koruyucu gaz atmosferi altında, belirlenmiş olan optimum birleşme şartları kullanarak kaynaklanmış ve oluşan ara fazlar incelenmiştir.

2- Al-Cu numunelere difüzyon kaynağı uygulamaları, BAÜ Müh-Mim Fak'de bulunan; sıcaklık, basınç ve koruyucu gaz atmosferinin kontrol edilebildiği difüzyon kaynağı cihazı ile çalışmalar yapılmıştır. Difüzyon kaynağında, alüminyum ve bakırın birleştirilmesinde parametre olarak; daha önce [1] yapılan çalışma esas alınarak kaynak sıcaklığı 560°C, kaynak basıncı 4,5 Mpa ve basınç tutma süresi 60 dakika olarak alınmıştır.

3- Kaynak sonrasında numuneler incelendiğinde boyutlarının bilinen diğer yöntemlere göre daha düzgün olduğu görülmüştür. Birleşme yüzeyine yakın kısımda, alüminyumun hafif bir deformasyona uğradığı, bakırda bir değişim olmadığı gözlenmiştir. Alüminyumda hafif kararma ve matlaşma, bakır numunede ise ince bir tufal tabakası meydana geldiği görülmüştür. (Şekil 5.1)

4- İncelemeler esnasında aynı şartlarda olmasına rağmen değişik kalınlıklarda difüzyon bölgesinin oluştuğu gözlemlenmiştir. Bu farklılığın, yüzey düzgünlüğünün tam sağlanamaması ve yüzeylerin birbirine tam alın alına oturtulamaması, yüzey pürüzlülüğü, numunelerin cihaza yerleştirilmeleri esnasında geçen süre farklılığından kaynaklanabileceği düşünülmüştür.

5- Mikro yapı incelemelerinde ve EDS analiz sonuçlarında, alüminyumun bakıra kısa mesafelerde ve yüksek oranlarda, bakırın ise alüminyuma daha uzun mesafelerde ve düşük oranlarda nüfuz ettiği görülmüştür (Şekil 5.38 ve Şekil 5.39). Difüzyon

kaynağı sonucundaki bu sonuçlar, malzemelerin atom çaplarına ve difüzyon katsayısına bağlıdır. Alüminyum atomları boyut olarak bakır atomlarından  $\approx$  %11 daha büyük olduğundan [82] bakır atomlarının alüminyuma doğru difüzyonu daha kolay olmakta ve dolayısıyla geçiş bölgesi büyümektedir. Alüminyumun bakıra geçişi zor olmakta ve geçiş bölgesinin dar olmasına neden olmaktadır. Difüzyon katsayısı ana metal bakır olduğunda, alüminyumun bakıra geçişindeki difüzyon katsayısı daha az ( $500^{\circ}\text{C}$  'de  $D=10^{-12,6} \text{ cm}^2 / \text{s}$ ), ana metal alüminyum olduğunda bakırın alüminyuma geçişindeki difüzyon katsayısı daha fazla ( $500^{\circ}\text{C}$  'de  $D=10^{-10,3} \text{ cm}^2 / \text{s}$ ) olmasıyla açıklanabilir [57].

6- Konu ile ilgili literatür incelemelerinde Al-Cu arasında oluşabilecek arafazlar incelenmiştir. Yaptığımız çalışmalarda kaynak sıcaklığı  $560^{\circ}\text{C}$  'yi geçmediğinden ancak  $\text{Al}_2\text{Cu}$ ,  $\text{Al}_4\text{Cu}_9$  ve  $\text{AlCu}$  arafazları oluşmasının mümkün olabileceği görülmüştür.

7- Değişik bölgelerdeki mikro yapı incelemeleri sonucunda %Cu ve %Al oranlarına bağlı olarak elde edilen mikro yapılarla, verilen mikro yapılar oluşan faz ve yapıların belirlenmesi amacıyla karşılaştırılmıştır. Literatür ile elde ettiğimiz mikro yapı görüntülerinde büyük benzerlik gözlenmiştir (Şekil 5.3-Şekil 5.6). Difüzyon bölgesinde oluşan arafazlarda  $\theta$  ( $\text{Al}_2\text{Cu}$ ), ötektik ( $\chi + \theta$ ) ve  $\chi$  fazları belirlenmiştir.

8- Mikro yapı görüntüleri, SEM görüntüleri ve EDS analiz sonuçlarına bağlı olarak Al-Cu denge diyagramındaki yapılarla da karşılaştırılmıştır (Şekil 5.7). Al-Cu denge diyagramındaki oranlara bağlı olarak oluşan yapıların mikroyapı görüntüleri ile uyumlu olduğu görülmüştür. Ayrıca difüzyon bölgesinin Al ana metalden Cu ana metale kadar değişik noktalardan farklı büyütme oranlarında incelenmiştir (Şekil 5.9-Şekil 5.21). Köşeli ve dikdörtgen şeklinde oluşan  $\text{Al}_2\text{Cu}$  arafazı belirlenmiştir (Şekil 5.12, 5.20)

9- Çekme deney numuneleri, kırılma yüzeyleri incelendiğinde kırılmanın plastik deformasyon göstermeyen düz yüzeyli bir gevrek kırılma tipinde olduğu görülmüştür. Kırılma yeri birleşme yerine yakın Al bölgesindedir. EDS analiz sonuçları incelendiğinde Al oranının yüksek olduğu ancak bu bölgede ortalama %30

kadar Cu bulunduğundan, Cu 'ın bu bölgeye kadar difüze ettiği görülmüştür (Şekil 5.38, 5.39). Bu oranlarda, kırılma yüzeyinde belirlenen arafazların meydana geldiğini ve bu gevrek kırılma sebebinin arafazların olabileceğini destekler niteliktedir (Şekil 5.49-Şekil 5.51).

10- Kaynak bölgesinde sertlik ölçüleri yapılmış ve bu değerlere göre sertlik değişim grafikleri (Şekil 5.52, 5.53) çizilmiştir. Bu grafiklerden de görüldüğü gibi birleşme bölgesinde sertlik artışı meydana geldiği görülmüştür. Özellikle Cu tarafında ince bir bölgede ani sertlik artışı olduğu görülmüştür. Difüzyon bölgesinde Cu tarafından, Al tarafına doğru gidildikçe difüzyon bölgesinde sertliğin azaldığı görülmüştür. Sertlik ölçümünde kullanılan Vickers ucunun bıraktığı iz büyüklüklerinden de (Şekil 5.54) görülebilmektedir. Birleşme bölgesinde, arafazların olduğu buradan da açıkça söylenebilir.  $Al_2Cu$  kristallerinin az olduğu (Şekil 5.23) Al-Cu denge diyagramından ve EDS analizi ile karşılaştırılan sertliğin azalma gösterdiği, Al oranının fazla olduğu bölgelerde ise de sertliğin daha da azaldığı görülmüştür

11- Saf Al ve saf Cu 'ın 560 °C sıcaklık, 4,5 Mpa basınç ve 60 dakika kaynak süresi şartlarında yapılan difüzyon kaynağında, difüzyon kaynak bölgesinin mikro yapı görüntüleri incelemelerinden, EDS analizlerinden ve sertlik ölçülerinden  $Al_2Cu$ ,  $Al_4Cu_9$  ve AlCu arafazlarının oluştuğunu söyleyebiliriz.

## 7 SONUÇLAR

1- Al ve Cu'nun difüzyon kaynağı daha önceki optimum şartlar (560°C sıcaklık, 4,5 Mpa basınç ve 60 dk kaynak süresi) sabit tutularak yapılmıştır.

2- Kaynak süresince makro inceleme sonucunda Al'un deformasyona uğradığı ve bir miktar aktığı, Cu'nun pek fazla değişmediği görülmüştür.

3- Difüzyon bölgesinin kalınlığı yüzey pürüzlülüğü, numunelerin alın alına oturtulamaması, yüzey düzgünlüğü vb. gibi dış etkenlere bağlı olduğu ifade edilmiştir.

4- Alüminyumun bakıra, bakırın alüminyuma farklı mesafe ve yoğunlukta difüze etmesinin temel nedenlerinin atom çapları ve difüzyon katsayısı olduğu belirtilmiştir.

5- Literatür incelemelerinde beş farklı fazın oluştuğu görülmüştür. Bunlar Al<sub>2</sub>Cu, AlCu, Al<sub>4</sub>Cu<sub>9</sub>, AlCu<sub>4</sub> ve AlCu<sub>3</sub> ara fazlarıdır.

6- Literatür ile mikro yapı görüntüleri, EDS analizleri ve SEM görüntüleri karşılaştırıldığında alaşım oranlarına bağlı olarak arafaz olan Al<sub>2</sub>Cu'nun net bir şekilde görüldüğü ifade edilmiştir.

7- Al-Cu'nun difüzyon kaynak bölgesinde oluşan fazlar literatürdeki faz diyagramı ve mikro yapı görüntüleri ile uyumlu olduğu, mikro yapı, SEM ve EDS analiz sonuçları ile tesbit edilmiştir.

8- Çekme numunesinin kırılma yüzeyinden alınan SEM görüntülerine bakılarak ara fazların etkisi ile gevrek kırılmaya maruz kaldığı görülmüştür. EDS analiz

sonuçlarına bakıldığında, alaşım oranlarına bağlı olarak, kırılma yüzeyinde Al<sub>2</sub>Cu ara fazının oluştuğu görülmüştür.

9- Difüzyon kaynağı numunelerinin alın yüzeyinden alınan sertlik değerleri incelendiğinde difüzyon bölgesinde ani sertlik artışı meydana geldiği görülmüştür. Bunun sebebinin bu bölgede oluşan ara fazlardan kaynaklandığı söylenmiştir. Ayrıca sertlik izleri de bu ani sertlik artışını gösterdiği tespit edilmiştir.

## KAYNAKLAR

- [1] Çelik, S., “Koruyucu gaz altında saf alüminyum ve bakırın difüzyon kaynağı şartlarının belirlenmesi”, Doktora Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 21-25 (1996)
- [2] K. Bhanumurthy, R. V. Patil, D. Srivatsava, P. S. Gawde and G. B. Kale, “Diffusion reaction between Zr-2.5 wt% Nb alloy and martensitic grade 403 stainless steel” *Journal of Nuclear Materials, Volume 297, Issue 2, August 2001, Pages 220-229*
- [3] Owczarski, W.A., Duvall, “Advanced Diffusion Welding Processes”, *New Trend in Materials Processing*. (1976), 301-329
- [4] Tuncel, S., “Yüksek Alaşımli Bir Takım Çeliği ile Az Alaşımli Bir Islah Çeliğinin Difüzyon Kaynağı ile Birleştirilmesi Üzerine Deneysel Çalışmalar”, Ph. D. Tezi, TÜBİTAK Gebze Araştırma Merkezi,(1989)
- [5] Albom, M.J., “Solid State Bonding”, *Welding J.*, (June 1964), 491-504
- [6] Lee, C. S., Li, H. and Chandel, R. S., “Vacuum-free diffusion bonding of aluminium metal matrix composite”, *Journal of Materials Processing Technology*, 89-90, 326- 330 (1999).
- [7] Bartle, P.M., “Diffusion Bonding : A Look at The Future” , *Welding J.*(1972), 799-804
- [8] Coble, R.L., “Model for Boundry Diffusion Controlled Creep in Polycrystalline Materials”, *Journal of Applied Physics*, vol. 34, no 6, (1963), 1679-1682
- [9] Kasatkin, B.S., Tsaryuk, A.K., Kharchenko, G.K. Korab, G.N., “Characteristic of Plastic Deformation in Non-Fusion Welding”, *Welding Production*, 11, (1966), 4-8
- [10] Kazakov, N.F., “ Vauum Diffusion Welding of Metals and Non-metals”, *Welding Production*, 11, (1967), 83-86
- [11] Kasatkin, B.S., Korab, G.N., “Determining The Welding Condition Parameters for The Diffusion Welding of Steel”, *Automatic Welding*, 3, (1969), 10-13
- [12] Kazakov, N.F., Samoilov, V.S., Polyakova ,M.L.,”Vacuum Diffusion Bonding of VK20 Hard Alloy to Stell”, *Welding Production*,2,(1972), 31-33
- [13] Abromtsev,A.V.,Kedrin,I.D.,Nichhushkin,V.V.,”Effects of Preparation of The Surface of VNZ Alloy on The Formation of Permanent Joints in It by Vacuum Diffusion Welding “, *Welding Production*, 5,(1972),40-43
- [14] Elliot, S.,Bucklow, I.A., Wallach, E.R., “An Examination of Diffusion Bonding Interfaces in A Mild Steel”, *J. of Materials Science*, 15, (1980), 2823-2833
- [15] Springs, D.R., Muth, M.C., “Diffusion Welding for Water-Cooled Gas Turbine Applications”, *Welding J.*, (Nov. 1982), 41-48
- [16] Calderon, P.D., Walmsley, D.R., Munir Z.A., “An Investigation of Diffusion Welding of Pure and Alloyed Aluminum to Type 316 Stainless Steel”, *Welding J.* (Apr. 1985), 104s-112s

- [17] Peshkov, V.V., Rodionov, V.N., Nikgolov, M.B., “Diffusion Bonding of Titanium With Low Stored Strain Bonded Components”, *Welding production*, (Sep. 1985), 19-21
- [18] KLAPHAAK, D.J., (1987) Coated Tools for Machining Aerospace Materials. *Carbide and Tool Journal*. 19:5:14-16
- [19] Kamat G.R., “Solid – State Diffusion Welding of Nichel to Stainless Stell”, *Welding J.*, (June 1988), 44-46
- [20] CALVO,F.A., URENA, A., GOMEZ, M.A., (1998). Diffusion Bonding of Gray Cast Iron and Carbon Stell. *Journal of Metarials Science*. 24:11:4152–4159
- [21] CALVO,F.A., (1988). Special Features of the Formations of the Diffusion bonded Joints between Copper and Aluminium *Journal of Metarials Science*. 24:11:4152-4159
- [22] Dunford, D.V., Partridge, P.G., “Diffusion Bonding of Al-Li Alloys”, *Material science and Tecnology*, vol.8, (May 1992), 385-398
- [23] Urena, A., Gomez de Salazar, J.M., Quinones, J., “Diffusion Bonding of Alumina to Steel Using Soft Copper Interlayer”, *J. of Materials Science*, 27, (1992), 599-606
- [24] SHARP, S.J., ASHBY, M.F., FLECK, N.A., (1993). Material Respond Under Static and Sliding Indentation Loads. *Acta Metallurgica Mater*.41:3:685–692
- [25] Sunwoo, A., “Diffusion Bonding of Aluminum Alloy, 8090”, *Scripta Metallurgica et Materialia*, vol.31, no 4, (1994), 407-412
- [26] Urena, A., Gomez, S., Escalera, M.D., “Diffusion bonding of an aluminium-copper alloy reinforced with silicon carbide particles (AA20214/SiC/13p) using metallic interlayers”, *Scripta Materialia*, No 11, 1285-1293 (1996).
- [27] Zhang, X.P., Ye, L., Mai, Y.W., “Investigation on Diffusion bonding characteristics of SiC particulate reinforced aluminium metal matrix composites (Al/ SiCP-MMC) *Composites Applied Science and Manufacturing*, Part A 30,1415-1421 (1999)
- [28] Liming, L., Meili, Z., Longxiu, P., Ln, W., “Studing of micro-bonding in diffusion welding joint for composite”, *Materials Science and Engineering, A* 315, 103-107 (2001).
- [29] Yılmaz, O., “Östenitik Paslanmaz Çelik ve Bakır Çiftinin difüzyon Kaynağı ile Birleştirilmesinde Kaynak Parametrelerinin Birleşmeye Etkisi”, *Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi*, (1999)
- [30] Mutlu, E., “Difüzyon Kaynağında Allotropik Dönüşüm Sıcaklığının Difüzyon Miktarına Etkisinin İncelenmesi”, *Fırat Üniversitesi, Metal Bölümü, Yüksek Lisans*, (2005)
- [31] B.Kurt, İ. Somunkıran, “Diffusion Bonding of Austenitic Stainless Steel and Medium Carbon Steel Couple”, *Proceedinngs of 11<sup>th</sup> International Materials Symposium*, April 19-21, 2006, Denizli, Turkey
- [32] M.Taskın, H. Dikbas, U. Caligulu, A.K.Gur, S.Ozan& V.V.Cay, “The Investigation of Joinability of Nitinol Alloy TM Method With The Diffusion Bonding”, *Proceedinngs of 11<sup>th</sup> International Materials Symposium*, April 19-21, 2006, Denizli, Turkey
- [33] U.Caligulu, H.Dikbas, A.K.Gur, “Investigation of Bondability of AlMgSi-SiCp Reinforced by Hot Pressing Method with Diffusion Bonding”, *Proceedinngs of 11<sup>th</sup> International Materials Symposium*, April 19-21, 2006, Denizli, Turkey

- [34] M. Ghosh, S., S. Chatterjee,” Effect of interface microstructure on the bond strength of the diffusion welded joints between titanium and stainless steel” *Materials Characterization* 54 (2005) 327– 337
- [35] H. Miyamoto, T. Tanaka, T. Mimaki, R. Matsubara, N. Ashie, S. Miura,” Interphase boundary sliding of two-phase ( $\alpha/\beta$ ), ( $\beta/\gamma$ ) and ( $\gamma/\alpha$ ) CuZnSn alloy couples produced by solid-to-solid diffusion bonding” *Materials Science and Engineering A* 380 (2004) 34–40
- [36] S.D. Chen, A.K. Soh, F.J. Ke” Molecular dynamics modeling of diffusion bonding” *Scripta Materialia* 52 (2005) 1135–1140
- [37] M. Ghosh, Samar Das, P.S. Banarjee, S. Chatterjee” Variation in the reaction zone and its effects on the strength of diffusion bonded titanium–stainless steel couple” *Materials Science and Engineering A* 390 (2005) 217–226
- [38] Tekin, A., *Malzemelerin Elektronik Özellikleri*, İTÜ yayını, (1986)
- [39] Bargel, H.J., Schulze, G., çev: Güleç, Ş., Aran, A., *Malzeme Bilgisi I ve II*, TÜBİTAK Yayınları, Gebze, (1985-1987)
- [40] Oğuz, B., *Demir dışı metaller kaynağı*, Oerlikon Yayını, İstanbul, 468-469 (1990).
- [41] Kazakov, N.F., Translated from Russian: Kuznetsov, B.V., *Diffusion Bonding of Materials*, Pergamon Pres, First Ed., (1985)
- [42] Oğuz, B., *Sertlehimleme*, Oerlikon Yayınları, İstanbul, (1988)
- [43] Ushakova, S.E., Kotelnikov, A.A., “The Vacuum Diffusion Welding of Grade 15 Steel to Ams Alloy or ADI Aluminium Using An Interlayer of Nickel”, *Automatic Welding*, 10, (1970), 52-53
- [44] Lawrance, H., Vlack, V., “Elements of materials science and engineering”, sixth edition, University of Michigan, Addison – Wesley Publishing, 200-214 (1989)
- [45] Owczarski, W.A., Paulonis, D.F., “Applications of Diffusion Welding in USA”, *Welding J.*, (Feb. 1981), 22-33
- [46] Shewmon, P.G., *Diffusion in Solids*, Mc Grow – Hill Book Company, (1964)
- [47] Erdoğan, M., “Malzeme Bilimi ve Mühendislik Malzemeleri” Nobel Yayın Dağıtım, 3. Baskı, Ankara, 76-93 (1998)
- [48] Güleç, Ş., Aran, A., “Malzeme Bilgisi I”, İTÜ, İstanbul, 34-40 (1993)
- [49] Bartle, P.M., “Diffusion Bonding : a look at the future”, *Elding Journal*, (54),11, 799-804 (1975)
- [50] 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)
- [51] 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)
- [52] Föll, H., “Diffusion Machanism”, Universty of Kiel, [www.Techfak.unikiel.de/matwis/amat/def-en](http://www.Techfak.unikiel.de/matwis/amat/def-en).
- [53] Onaran,K., “Malzeme Bilimi”, Bilim Teknik Yayınevi, (1997)
- [54] Tekin, A., “Çelik ve Isıl İşlemi”, İTÜ, İstanbul, 22-236 (1987)
- [55] James, F.S., “Introduction materials science for engineering – Points defect and solid – state diffusion”, fourty edition, University of California, Macmillan Publishing Company, 112-124 (1985)

- [56] Topbaş, M.A., “Isıl İşlemler”, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, 34-40 (1993)
- [57] Callistar, W.D., “materials science and engineering an introduction – Diffusion Mechanism”, 5<sup>th</sup> Edition, The Universty of Utah Johnwiley, 94-111(2000)
- [58] Gustav, E.R. Schilze, Metallphysik Springer – Verlag, Wien New York, (1972)
- [59] FITZPATRICK, G.A., BROUGHTON, T., (1988). Diffusion Bonding Aeroengine Components. Defence Science Journal. 38.477–485
- [60] Welding Handbook, vol. 2, Eight Edition, (1987)
- [61] HUANG, Y.HUMPREYS, F.J., RIDLEY, N., WANG, Z.C., 1997, Diffusion Bonding of Hot Rolled 7075 Aluminium Alloy, Metarial Science and Technology, May vol. 14, 405–410,568
- [62] Spanswick, O. S., “ Diffusion Bonding – Engineering applications”, Production Engineer, April, 45-51 (1989)
- [63] MEAHARA, Y.,KOMIZO, Y., LANGDON, T.G., (1989). Principles of Superplastic Diffusion Bonding Materials Science and Technology, 4.669–674
- [64] LANCASTER, J.F., (1987). Metallurgy of Welding. Allen and Unwin Ltd. London
- [65] HAASEN, P., (1986). Physical Metallurgy. Cambridge University Press. Dördüncü Baskı. Cambridge
- [66] ASKELAND.D.R., (1989). The Science and Engineering of Metarials. Van Nostrand. Reinhold Co. Ltd. İkinci Metrik baskı. Hong Kong
- [67] Kearns, W.H., “Diffusion welding and brazing-fundamentals of the processes”, 7.th, vol 3, chapter 10, AWS Welding Handbook, Florida, 313-335 (1980)
- [68] Azamatov, Z.T., Mamatzhanov, F.D., Rasulov, K.H., Taspulatov, Z., “Aparatus for diffusion welding in vacuum”, Translated from Priboryi Technika Eksperimentai no 1, 211-213 (1990)
- [69] Alm, G.V., “Desing feature space-age bonding techiques: part 1,” Mechanical Engineering, 24-32 (1970)
- [70] SALEHİ, M.T., (1990) Isostatic Diffusion Bonding of Some Superplastic Alloys. Doktora Tezi. UMIST. Manchester
- [71] Felikson, E.I., Finkelstein, M.L., “Diffusion Welding Materials in Liquid Media”, Welding Production, I, (1971), 37-38
- [72] PARTRIDGE, P.G., (1989]. Diffusion Bonding of Metals. Agard 168. NATO Yayını. Essex
- [73] Dunkerton, S.B., “Diffusion Bonding-an Overview”, Diffusion Bonding, 2, Stephenson, D.J., Elsevier Applied Science. Newyork, 1-11 (1991)
- [74] Yılmaz, O., Çelik, H., “Difüzyon kaynağı ile birleştirilen Cu-paslanmaz çelik ikilisinde teorik difüzyon dağılımı ve EDS ile tespit edilen sonuçların karşılaştırılması”, 10.th. International Metallurgy and Materials Congress, İstanbul, 1291-1298 (2000)
- [75] Yılmaz, O., Çelik, H., “Difüzyon kaynağı ile birleştirilen östenitik paslanmaz çelik ve elektrolitik bakırda kaynak bölgesinin incelenmesi”, F.Ü. Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 11 (2), 179-187 (1999)
- [76] GUO,Z.X., (1985). Diffusion Bonding of Superplastic Metarials. Yüksek Lisans Tezi. UMIST. Manchester

- [77] ANDREJEZEVSKI,H., BADAWI, K.F., ROLAND, B., (1983). The Roughness in Diffusion Welding of Ti-6Al4V Alloy. *Welding Journal*. 435-s
- [78] OSTYN, K.M., (1987). Diffusion Bonding. *Proc. of Int. Conf. SIS*. 183.Cranfield
- [79] Buck, O., Thompson, R.B., rehbein, D.K., Palmer, D.D., Brasche, L.J.H., “Contacting Surfaces: A Problem in Fatigue and Diffusion Bonding”, *Metallurgical Transactions A*, vol. 20 A, (Apr. 1989), 627-636
- [80] WILLAMSON, J.R., (1986). Superplastic Forming Diffusion Bonding of Titanium. *Proc. The Ist. Int. Cant. Materials in Areospace*. 2.Konf. No. 10817:373–394
- [81] <http://www.vacets.org/vtic97//ttnguyen.htm>.
- [82] Calvo, F.A., Urena, A., Gomez de Salazar, Carrion J.G., Perosanz, F., “Diffusion Bonding of Ti-6Al-4V Alloy at Low Temperature: Metalurgical Aspects”, *J. of Materials Science*, 27, (1992), 391-398
- [83] KAMAT, G.R.,(1988). Solid State Diffusion Welding of Nickel to Stainless Stell. *Welding Journal*.67:6:44–46
- [84] RICHES, S.T., (1989) Microjoining for Electronics. *Production Engineer*.46.
- [85] <http://www.msm.cam.ac.uk/phase-trans/2005/Amir/bond.html>
- [86] <http://atpmw3.tuwien.ac.at/materiaLAB/LectureContent/lecture4.pdf#search=%22diffusion%20bonding%20powerpoint%22>
- [87] M.Van Lancker, *Metallurgy of Aluminium Alloys* Chapman and Hall Ltd.
- [88] Selda Akgün,”Bakır ve Bakır Alaşımları” Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü., [Odevsitesi.com](http://Odevsitesi.com)\_8499
- [89] Dennis R. Olsen, Kristi L. James,”Effect of Ambient Atmosphere on Aluminum – Copper Wirebond Reliability” *IEEE Transactions on Components, Hybrids and Manufacturing Technology*, Vol, Chmt-7, No:4, December 1984
- [90] H.Hasırcı, F.Gül,”Effects of Ni and Mg on the Abrasive Wear Behaviour of Al-Cu Casting Alloys”,*Proceedings of 11<sup>th</sup> International Materials Symposium*, April 19-21, 2006, Denizli,Turkey
- [91] TS 138, Çekme Deneyleri (Metalik Malzemeler için), Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, (1978)
- [92] R. Bonnet, M. Loubradou,” Crystalline Defects in a B.C.T. Al<sub>2</sub>Cu(θ) Single Crystal Obtained by Unidirectional Solidification along“,*Institut National Polytechnique (LTPCM, CNRS)/ENSEEG, Domaine Universitaire, BP 75, 38402 Saint Martin d'Hères, France*, 6 May 2002
- [93] K.Rajan and E. R. Wallach, “A transmission electron microscopy study of intermetallic formation in aluminum-copper thin film couples”, *J. Crystal Growth*, vol.49,pp. 297-302, 1980
- [94] A. E. Gershinskii, B. I. Formin, E. J. Cherepov, and F. L. Edelman, “Thin Solid Films”, vol.42, pp. 269-275, Apr. 1977
- [95] S. U. Campisano, E. Castanzo, F. Scaccianoce, and R. Cristofolini, “Thin Solid Films”, vol. 52 pp. 97-101, June 1978
- [96] M. P. Spearer, C. L. Bauer, and A. G. Jordon, “ Investigation of interdiffusion in thin film couples of aluminum and copper by Auger electron spectroscopy, “*Thin Solid Films*, vol61, pp. 273-279, Aug. 1979
- [97] [www.owl.net.rice.edu](http://www.owl.net.rice.edu)
- [98] “Welding, Brazing and Soldering-Solide State Welding”, *ASM, Handbook*, 7.th, vol 6, Ohio, (1983)

- [99] Shackelford, J.F., Introduction to Materials Science of Engineers, Second Ed., Macmillan Publishing Company, (1990)