

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

KORUYUCU GAZ ALTINDA  
SAF ALÜMİNYUM VE BAKIR 'IN DİFÜZYON KAYNAĞI  
ŞARTLARININ BELİRLENMESİ

DOKTORA TEZİ

Mak.Yük.Müh. Sare ÇELİK

Balıkesir, Mart - 1996

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

KORUYUCU GAZ ALTINDA  
SAF ALÜMİNYUM-BAKIR 'IN DİFÜZYON KAYNAĞI  
ŞARTLARININ BELİRLENMESİ

DOKTORA TEZİ

Mak.Yük.Müh. Sare ÇELİK

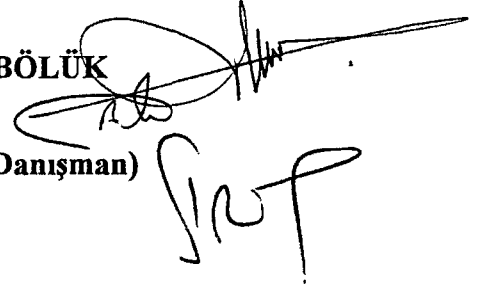
Tez Danışmanı: Yrd.Doç.Dr. İrfan AY

Sınav Tarihi : 19 / 04 / 1996

Jüri Üyeleri : Prof.Dr. Naci OTMANBÖLÜK

Prof.Dr. Ahmet TOPUZ

Yrd.Doç.Dr. İrfan AY (Danışman)



ÖZ

**KORUYUCU GAZ ALTINDA  
SAF ALÜMİNYUM VE BAKIR 'IN DİFÜZYON KAYNAĞI  
ŞARTLARININ BELİRLENMESİ**

Mak.Yük. Müh. Sare ÇELİK  
Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,  
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı  
(Doktora Tezi / Tez Danışmanı: Yrd. Doç.Dr. İrfan AY)

Balıkesir, 1996

Teknolojideki gelişmeler değişik malzemeleri ve bunların birleştirilerek kullanımını gerektirmektedir. Bilinen yöntemlerle birleştirilmesi çok güç, hatta imkansız olan malzeme çiftlerinde dahi başarıyla uygulanabilen difüzyon kaynağının kullanım alanları, özellikle havacılık, uzay ve nükleer teknoloji, elektronik ve savunma araçlarında giderek artmaktadır.

Bu çalışmada, eritme kaynağı yöntemleri ile birleştirilmesi mümkün olmayan ve birleştirilmeleri işlev bakımından gerekli olan alüminyum ve bakırın difüzyon kaynağı yöntemiyle birleştirilebilmesi için optimum kaynak parametrelerinin belirlenmesi esas alınmıştır. Deneysel çalışmaların yapılabilmesi için ilk aşamada difüzyon kaynak cihazı tasarlanmış ve imal edilmiştir. Kaynak parametreleri olarak sıcaklık, basınç ve sürenin etkileri incelenmiştir. Alüminyum ve bakırın difüzyon kaynağının yapıldığı deneysel çalışmalar sonunda, 560 °C, 4.5 MPa, 60 dakikalık şartların en uygun özellikleri verdiği görülmüştür. Deneysel koruyucu gaz (argon) altında yapılmış, birleştirilen numunelerin yüzeyleri 1200 grit zımpara ile zımparalanmış ve asetonla temizlendikten hemen sonra cihaza yerleştirilmişlerdir.



Birleştirilen numunelerin birleştirme kalitesini belirlemek amacıyla mekanik deneyler yapılmıştır. Çekme deneyleri sonunda kopma birleştirme bölgesinden 1-2 mm alüminyum tarafında olmuştur. Birleştirme kesitine dik doğrultuda ölçülen mikrosertlik dağılımları grafik üzerine aktarılmıştır. Arayüzey kesitleri ve kırılma yüzeyleri üzerinde optik ve elektron mikroskobundan iç yapı görüntüleri alınarak EDS (Energy Dispersive Spectrometer) analizleri yapılmış ve değerlendirilmiştir. Ayrıca en geniş uygulama alanı olan borularda kullanılabilirliğini göstermek için alüminyum ve bakır boru numuneler hazırlanarak daha önceki deneysel çalışmalarda belirlenen ve en uygun sonuçları veren şartlarda deneyler yapılmıştır. Bu numunelere çalışma alanlarındakine benzer olarak çekme ve basınç deneyleri uygulanmıştır.

Yapılan tüm çalışmalar sonucunda, alüminyum ve bakır malzemelerin difüzyon kaynağı ile başarılı bir şekilde birleştirilebileceği görülmüştür.



**ANAHTAR SÖZCÜKLER:** Difüzyon / kaynak / difüzyon kaynağı / alüminyum / bakır.

## **ABSTRACT**

### **AN INVESTIGATION OF DIFFUSION WELDING PARAMETERS FOR PURE ALUMINUM AND COPPER IN INERT GAS**

Sare ÇELİK

BSc.,MSc.(Mech. Eng.)

Balıkesir University, Institute of Science, Department of Mechanical Engineering

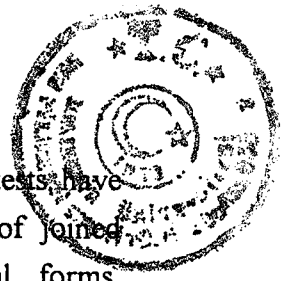
(Ph.D. Thesis / Supervisor: Asst.Prof.Dr. İrfan AY)

Balıkesir - TURKEY, 1996

Achievements of technology need to join different material couples which can not be weld using conventional methods. Diffusion welding can be applied for couple of materials which can not be weld using conventional welding methods, especially in aerospace engineering, nuclear technology, and electronic and defense industry.

In this study, optimal parameters of diffusion welding were investigated for aluminum and copper material couples which can not be join with conventional methods in industry.

First stage of the experimental study was design and manufacture of test rig of diffusion welding. Temperature, pressure and time have been taken as parameters of diffusion welding. Experiments have been carried out in inert gas (argon) and before the diffusion also the surfaces of specimens have been processed using 1200 grit paper and acetone, these processes have been followed with placement of specimens in test rig as soon as possible. Results of experiments of diffusion welding show that for the diffusion in 560 °C temperature, 4.5 MPa pressure, and 60 minutes welding time have produced best weld materials couples.



For the determination of quality of welded specimens, some mechanical tests have been done. Tension tests have been done, the failure point is 1-2 mm above of joined surface. Joined section hardness distribution is shown by graphical forms. Furthermore interfaces of failure surfaces were identified using optical microscopy and normal section of tension band (diffusion area) has been analyzed by electron fractography and also EDS (Energy Dispersive Spectrometer) analysis has been carried out. This type of welding process finds wide range application area for aluminium and copper pipes. For this reason, pipe specimens have been prepared and tested due to best conditions which have been determined from previous tests of the specimens. After welding process of pipe specimens, tension and pressure tests have been done in near to working conditions of the pipes.

The results of the test shown that aluminum and copper can be welded successfully using diffusion welding process.



**KEY WORDS:** Diffusion / welding/ diffusion welding/ aluminum/ copper



## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
<b>ÖZ, ANAHTAR SÖZCÜKLER</b>	i
<b>ABSTRACT, KEY WORDS</b>	iii
<b>İÇİNDEKİLER</b>	v
<b>SEMBOL LİSTESİ</b>	vii
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b>	viii
<b>ÇİZELGE LİSTESİ</b>	xi
<b>ÖNSÖZ</b>	xii
<b>1. GİRİŞ</b>	1
<b>2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI</b>	3
<b>3. DİFÜZYON TEORİSİ</b>	11
3.1 Giriş	11
3.2 Enerji Konumları	12
3.3 Difüzyon katsayısı	14
3.4 Difüzyon Mekanizmaları	15
3.4.1 Arayer Mekanizması	16
3.4.2 Boşluk Mekanizması	16
3.4.3 Karşılıklı Yer Değiştirme Mekanizması	17
3.4.4 Halka Mekanizması	17
3.5 Difüzyon Çeşitleri	18
3.6 Fick Kanunları	19
3.6.1 I. Fick Kanunu	19
3.6.2 II. Fick Kanunu	20
3.7 Difüzyonu Etkileyen Faktörler	21
3.7.1 Sıcaklık	22
3.7.2 Konsantrasyon	22
3.7.3 Kristal Dokusu	23
3.7.4 Saflığı Bozan Maddeler	23
3.7.5 Tane Boyutu	24
3.8 Kimyasal Difüzyon	24



<b>4. DİFÜZYON KAYNAKLI BİRLEŞTİRMELER</b>	
4.1 Açıklama ve Genel Tanımlar	26
4.2 Difüzyon Kaynaklı Bağlantı Çeşitleri	27
4.3 Difüzyon Kaynağında Bağ Oluşturan Süreç ve Faktörler	29
4.4 Kaynak Değişkenlerinin Etkileri	32
4.4.1 Sıcaklığın Etkisi	32
4.4.2 Basıncın Etkisi	33
4.4.3 Bağlama ve Soğutma Zamanının Etkisi	34
4.4.4 Yüzey Koşulları	35
4.4.5 Atmosfer	37
4.5 Avantaj ve dezavantajları	38
4.6 Uygulamalar	39
4.7 Difüzyon Kaynaklı Bağlantıların Test Yöntemleri	41
<b>5. ARAŞTIRMANIN AMACI</b>	42
5.1 Alüminyum	42
5.2 Bakır	43
<b>6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR</b>	45
6.1 Deney Düzenekinin Kurulması	45
6.2 Deneylerde Kullanılan Malzemeler ve Deney Numunelerinin Hazırlanması	52
6.3 Deneylerin Yapılışı	55
6.4 İnceleme ve Testler	56
6.4.1 Makroskopik İnceleme	56
6.4.2 Çekme Deneyi	56
6.4.3 Mikrosertlik Deneyi	63
6.4.4 Optik Mikroskopla İnceleme	69
6.4.5 Tarama Elektron Mikroskobu (SEM) İncelemeleri	72
6.5 Endüstri Uygulaması	87
<b>7. İRDELEME</b>	89
<b>8. GENEL SONUÇLAR</b>	92
<b>EKLER:</b>	
EK A Difüzyon Kaynağı Cihazının Teknik Resmi	93
EK B Recorder 'dan Alınan Sıcaklık Değişim Eğrisi	94
EK C Mikroyapı Fotoğrafları	95
<b>KAYNAKÇA</b>	99



## SEMBOL LİSTESİ

Simge	Adı	Tanımı/Değeri	Birimi
E	Serbest enerji	$E = U - TS$	kJ / mol
U	Sistemin iç enerji		kJ / mol
S	Entropi		kJ / kg K
D	Difüzyon katsayısı	$D = D_0 e^{-Q/RT}$	cm <sup>2</sup> / s
D <sub>0</sub>	Titreşim frekansına bağlı difüzyon katsayısı		cm <sup>2</sup> / s
R	Gaz sabiti	1.987	cal / mol K
T	Sıcaklık		°C, K
Q	Aktivasyon enerjisi		kJ / mol
q	Difüze olan malzeme miktarı	$q = -D(dp/dx)$	g/s
ρ	Yoğunluk	$\rho = m / V$	g / cm <sup>3</sup>
x	Difüzyon derinliği		mm
t	Zaman		s,dak
v	Yer değiştirme hızı	$v = (D_A - D_B)\delta x_A / \delta \xi$	mm / s
ξ	Konsantrasyon farkı		
P	Basınç		N/mm <sup>2</sup> (MPa)
σ <sub>a</sub>	Akma gerilmesi		N/mm <sup>2</sup> (MPa)
σ <sub>c</sub>	Çekme gerilmesi		N/mm <sup>2</sup> (MPa)
T <sub>m</sub>	Ergime sıcaklığı		°C,K



## ŞEKİL LİSTESİ

Şekil No	Adı	Sayfa
Şekil 1.1	Difüzyon kaynağı ile diğer katı hal kaynaklarının karşılaştırılması	2
Şekil 3.1	Metallerde öz difüzyon süreci	12
Şekil 3.2	Atom mesafesinin bir fonksiyonu olarak potansiyel enerji değişimi	13
Şekil 3.3	Atom enerjilerinin dağılımı	13
Şekil 3.4	Serbest enerjinin durum değişimine bağlılığı	14
Şekil 3.5	Kristal kafeste atomların hareket mekanizmaları	17
Şekil 3.6	Toryumun volfram içinde difüzyonu	19
Şekil 3.7	I. Fick Kanunu ile ilgili büyüklükler	20
Şekil 3.8	Kararsız difüzyon	21
Şekil 3.9	927 °C 'de demir içinde difüzyon olan karbon için D 'nin konsantrasyon ile değişimi	23
Şekil 3.10	Kirkendall olayının deney düzeneği	25
Şekil 3.11	Cu-Ni ' de Kirkendall olayı	25
Şekil 4.1	Difüzyon kaynağı için üç aşamalı mekaniksel model	27
Şekil 4.2	Kaynak basıncı ve kaynak sıcaklığı arasındaki ilişki	30
Şekil 4.3	Metal kristalleri arasındaki karşılıklı etkileşim halinde potansiyel enerjideki değişimler	31
Şekil 4.4	$\alpha$ demirinde sıcaklığa bağlı olarak difüzyon katsayısının değişimi	33
Şekil 4.5	Difüzyon kaynağı parametrelerinin mekanik özelliklerle ilişkisi	34
Şekil 4.6	Metal bir yüzeyin tabakalarının şematik kesiti	36
Şekil 6.1	Difüzyon kaynağı deney düzeneğinin genel görünüşü	46
Şekil 6.2	Difüzyon kaynağı deney düzeneğinin şematik resmi	47
Şekil 6.3	Isıtmada kullanılan rezistanslı ısıtıcının özellikleri	48
Şekil 6.4	Voltaj ayarlayıcısı ve sıcaklık göstergesi	48
Şekil 6.5	Recorder	49
Şekil 6.6	Recorder'a çizdirilen voltaj-mesafe grafiği	49
Şekil 6.7	Mesafe-sıcaklık, mesafe-voltaj grafiği	50
Şekil 6.8	Argon gazı arıtma ünitesi	51
Şekil 6.9	Bakır malzemenin mikro yapısı	54
Şekil 6.10	Alüminyum malzemenin mikro yapısı	54
Şekil 6.11	Deney numunelerinin ölçüleri	55
Şekil 6.12	Deney numunelerinin kaynaklanma öncesi ve sonrası görünümleri	56



Şekil No	Adı	Sayfa
Şekil 6.13	Çekme deney numunesinin kopmadan sonraki görünümü	58
Şekil 6.14	Kırılma yüzeylerinin stereo mikroskopta görünüşü 550 °C, 6.6 MPa, 30 dak şartlarında	59
Şekil 6.15	Kırılma yüzeylerinin stereo mikroskopta görünüşü 560 °C, 4.5 MPa, 60 dak şartlarında	59
Şekil 6.16	Sıcaklık değişiminin kopma dayanımı üzerindeki etkileri	60
Şekil 6.17	Basınç değişiminin kopma dayanımı üzerindeki etkileri	61
Şekil 6.18	Sürenin değişiminin kopma dayanımı üzerindeki etkileri	62
Şekil 6.19	Mikrosertlik ölçüm cihazı	63
Şekil 6.20	550 °C, 4.5 MPa, 120 dak kaynak şartlarında birleşme bölgesindeki mikrosertlik değişimi	64
Şekil 6.21	550 °C, 6.6 MPa, 60 dak kaynak şartlarında birleşme bölgesindeki mikrosertlik değişimi	65
Şekil 6.22	560 °C, 4.5 MPa, 60 dak kaynak şartlarında birleşme bölgesindeki mikrosertlik değişimi	66
Şekil 6.23	560 °C, 6.6 MPa, 30 dak kaynak şartlarında birleşme bölgesindeki mikrosertlik değişimi	67
Şekil 6.24	Mikrosertlik ölçüm izleri	68
Şekil 6.25	Optik mikroskop	69
Şekil 6.26	%95 Al+%5 Cu 'lu alaşım	70
Şekil 6.27	%67 Al+%33 Cu 'lu alaşım	70
Şekil 6.28	%85 Al+%15 Cu 'lu alaşım	70
Şekil 6.29	%60 Al+%40 Cu 'lu alaşım	70
Şekil 6.30	Kaynaklanma bölgesinde oluşan fazların tanımı	71
Şekil 6.31	EDS analiz bölgelerinin şematik gösterimi	72
Şekil 6.32	Birleşme bölgesindeki Al-Cu konsantrasyon değişimi	73
Şekil 6.33	550 °C, 4.5 MPa, 120 dak kaynaklanma şartındaki numunenin SEM mikroyapı fotoğrafları	75
Şekil 6.34	Birleşme bölgesindeki Al-Cu konsantrasyon değişimi	76
Şekil 6.35	550 °C, 6.6 MPa, 60 dak kaynaklanma şartındaki numunenin SEM mikroyapı fotoğrafları	78
Şekil 6.36	Birleşme bölgesindeki Al-Cu konsantrasyon değişimi	79
Şekil 6.37	560 °C, 4.5 MPa, 60 dak kaynaklanma şartındaki numunenin SEM mikroyapı fotoğrafları	81
Şekil 6.38	Birleşme bölgesindeki Al-Cu konsantrasyon değişimi	82
Şekil 6.39	560 °C, 6.6 MPa, 30 dak kaynaklanma şartındaki numunenin SEM mikroyapı fotoğrafları	83
Şekil 6.40	560 °C, 4.5 MPa, 60 dak deney şartlarında kaynak edilmiş çekme deney numunesinin SEM görüntüsü	84
Şekil 6.41	Şekil 6.40 'da verilen kırılma yüzeyinin mikroyapısı	85
Şekil 6.42	Şekil 6.41 'de verilen kırılma yüzeyinin "backscattered electron" görüntüsü	85



Şekil No	Adı	Sayfa
Şekil 6.43	Şekil 6.41 'de verilen kırılma yüzeyinin daha yüksek büyütme görüntüsü	86
Şekil 6.44	Şekil 6.43 'deki kırılma yüzeyinin "backscattered electron" görüntüsü	86
Şekil 6.45	Boru difüzyon kaynağı numuneleri	87
Şekil 6.46	Kaynaklanmış boru numunelerin basınç deneyi	88
Şekil A.1	Difüzyon kaynağı deney cihazının teknik resmi	93
Şekil B.1	Recorder 'a çizdirilen sıcaklık değişim eğrisi	94
Şekil C.1	550 °C, 4.5 MPa, 120 dak şartlarında difüzyon kaynaklı parçaların mikroyapıları	95
Şekil C.2	550 °C, 6.6 MPa, 60 dak şartlarında difüzyon kaynaklı parçaların mikroyapıları	96
Şekil C.3	560 °C, 4.5 MPa, 60 dak şartlarında difüzyon kaynaklı parçaların mikroyapıları	97
Şekil C.4	560 °C, 6.6 MPa, 30 dak şartlarında difüzyon kaynaklı parçaların mikroyapıları	98



## ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge no	Adı	Sayfa
Çizelge 3.1	Bazı difüzyon çiftleri için $D_0$ , $Q$ ve 500 °C deki $D$ değerleri	22
Çizelge 4.1	Difüzyon kaynağı safhaları	31
Çizelge 4.2	Metallerde oksit filmi oluşum süreleri	36
Çizelge 5.1	Alüminyumun fiziksel ve mekaniksel özellikleri	42
Çizelge 5.2	Bakırın fiziksel ve mekaniksel özellikleri	43
Çizelge 6.1	Kullanılan termokupl'un sıcaklık-voltaj dönüşüm tablosu	50
Çizelge 6.2	Kaynaklanmamış malzemelerin kopma dayanımı	52
Çizelge 6.3	Malzemelerin sertlik değerleri	53
Çizelge 6.4	Difüzyon kaynaklı (Al-Cu) deney numunelerinin kopma dayanımları	57
Çizelge 6.5	EDS analiz bölgelerinin tanımı	72
Çizelge 6.6	550 °C, 4.5 MPa, 120 dak 'lık kaynaklanma şartlarındaki numunenin EDS analiz sonuçları	73
Çizelge 6.7	550 °C, 6.6 MPa, 60 dak 'lık kaynaklanma şartlarındaki numunenin EDS analiz sonuçları	76
Çizelge 6.8	560 °C, 4.5 MPa, 60 dak 'lık kaynaklanma şartlarındaki numunenin EDS analiz sonuçları	79
Çizelge 6.9	560 °C, 6.6 MPa, 60 dak 'lık kaynaklanma şartlarındaki numunenin EDS analiz sonuçları	82
Çizelge 6.10	Kaynaklanmış boru numunelerinin çekme deneyi sonuçları	87



## ÖNSÖZ

Tez çalışma konumun, bana, öğrencilerimize ve daha sonra bu konuda çalışma yapacak kişilere ışık tutmasını ve faydalı olmasını istedim. Uzun araştırmalarım sonucu ülkemizde çok iyi tanınmayan, uygulanmayan difüzyon kaynağının deneysel olarak incelenmesi konusunu seçtim. Bu konuda, deney düzeneğinin kurulması ve deneysel çalışmalarım esnasında büyük destek ve yardımını gördüğüm Dekanımız Prof. Dr. Naci OTMANBÖLÜK' e, bu konuyu seçmemde beni teşvik eden hocam Prof. Dr. Ahmet TOPUZ' a ve yönetici hocam Yrd. Doç. Dr. İrfan AY' a içtenlikle teşekkürlerimi sunuyorum.

Deney düzeneğinin imalatında yardımcı olan tüm 1012. Ana Tamir Fabrikası çalışanlarına, deney sonuçlarının incelenmesi esnasında yardımcı olan 9 Eylül Üniversitesi Metalografi Laboratuvarı elemanlarına, tarama elektron mikroskobu çalışmalarım esnasında yardımcı olan Arçelik A.Ş. Ar-Ge Merkezi'ne, bütün hocalarıma, çalışma arkadaşlarıma ve fakülte teknisyenimiz Hüseyin TEKİN'e teşekkür ediyorum.

Çalışmalarım süresince beni büyük bir sabır ve anlayışla destekleyen eşime, aileme ve kendisine ayırmam gereken zamanı çalışarak geçirdiğim için oğlum Sanberk' e bu fedakarlıklarından dolayı teşekkürü bir borç bilirim.

Balıkesir, 1996

Mak. Yük. Müh. Sare ÇELİK



## 1. GİRİŞ

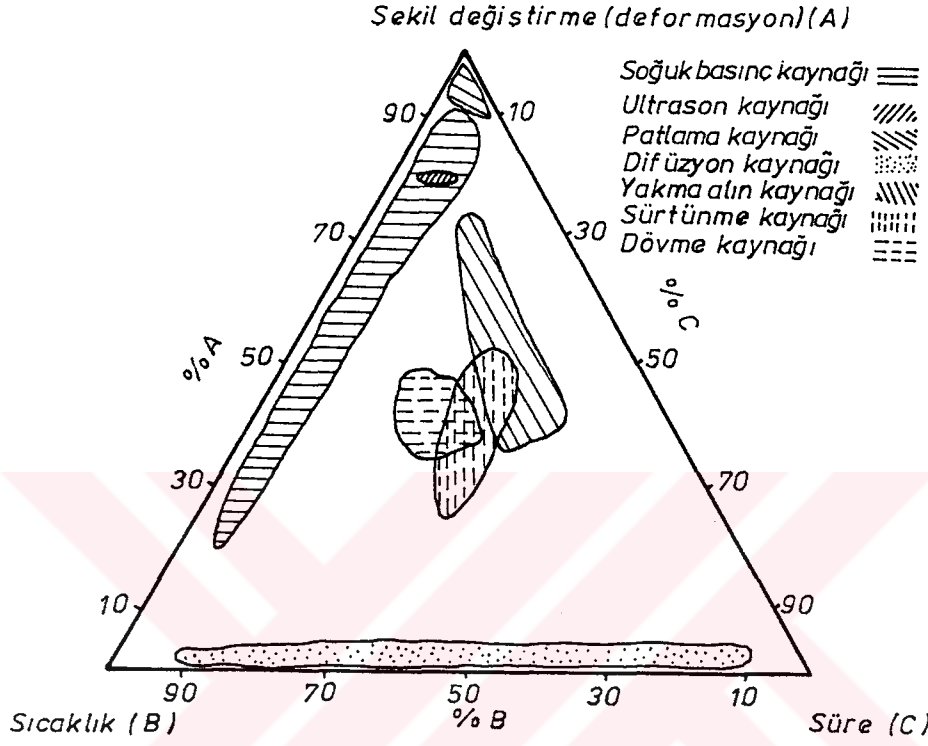
Difüzyon kaynağı, ısı ve basınç altında belirli bir zamanda difüzyon ile, önemsiz sayılan bir makro deformasyonla yapılan bir birleştirme şeklidir [1]. Bazı durumlarda bağlanmanın oluşumu arayüzeyin tamamen yok olması sonucunda oluşur ve genellikle de % 100 verim elde edilebilir [2]. Kaynak sıcaklığı, bağlanacak parçaların erime sıcaklığının altındadır. Bu nedenle birleştirmelerde bu özel yöntem ergitme kaynağının kullanılmadığı yerlerde etkili olarak kullanılabilir.

Ayrıca difüzyon kaynağı ile birçok metal ve metal olmayan farklı malzemeler ve malzeme kombinasyonları gerilimsiz ve değişik durumda homojen olarak birleştirilebilir. Bunun dışında çok farklı geometriye sahip malzemelerin birleştirilmesine olanak sağlar. Modern birleştirme tekniklerinin kullanılması ile bazı durumlarda ortalama % 40 oranında ağırlık, % 60 oranında maliyet azalmasına ulaşılabilmektedir. Bu yüzden de düşüncede çok basit olan fakat çok geniş malzemelere uygulanabilen ideal kaynak yöntemi olarak düşünülmelidir. Bütün bu özelliklere ve eski Mısırlılar zamanından beri uygulanan en eski kaynak yöntemlerinden birisi olmasına rağmen hala tam manasıyla gelişmemiş ve kullanılmamıştır [2,3]. Bugüne kadar en yavaş gelişen proseslerden biri olmuştur. Fakat elektronik, uzay ve nükleer alanlardaki imalatların gelişmesiyle önemi artmıştır. Bu endüstri dallarında yüksek performanslı malzemelerin geliştirilmesi, kompleks imatlı yapılarda yüksek performanslı malzemelere ihtiyaç duyulması ve bunların imalatı, işlenebilmesi diğer tüm birleştirme, şekil verme yöntemlerine göre difüzyon kaynağının kullanımını teşvik etmiştir [3,4]. Difüzyon kaynağı üzerine yapılan son çalışmaların sonuçları da bu ilgiyi arttırmıştır [2].

Farklı metal ya da metal olmayan malzemelerin birleştirilmesi için kullanılan katı hal difüzyon kaynağı, sistem için gerekli pahalı cihazlar ve uzun imalat süresi ile maliyeti arttırmaktadır. Ancak başka bir birleştirme yöntemi ile birleştirilemeyecek parçalarda bu bir zorunluluktur. Birleşim parametrelerinin kontrolü ve birleşmenin gerçekleşebilmesi için gerekenler, diğer kaynak yöntemlerine göre daha zordur. Birleşim sahasında bir difüzyon bölgesi oluşur. Bu bölgenin yapısı ve kalınlığı uygun birleşim parametrelerinin seçimi ile kontrol edilmelidir.



Difüzyon kaynağı, kaynak yöntemlerinin sınıflandırılmasında sürtünme kaynağı, patlama kaynağı, soğuk basınç kaynağı ve ultrason kaynağının dahil olduğu katı hal birleştirme yöntemlerinden biridir [3,5]. Difüzyon kaynağının diğer katı hal kaynakları arasındaki konumu Şekil 1.1 deki diyagramda gösterilmiştir [6,7].



Şekil 1.1 Difüzyon kaynağı ile diğer katı hal kaynaklarının karşılaştırılması [6,7]

Difüzyon kaynağı basınç ve ek ısı ile çalışan diğer katı hal kaynak yöntemlerinden uzun kaynak süresi, düşük deformasyon derecesi ve düşük kaynak sıcaklığı ile ayrılabilir.

Bu çalışmada, saf alüminyum ile saf bakırın difüzyon kaynağı ile birleştirilmesinde gerekli şartları sağlamak üzere tasarlanıp, imal edilen difüzyon kaynağı cihazında, işlem parametrelerinin araştırılması ve en uygun kaynaklanabilme şartlarının belirlenmesi amaçlanmıştır.





## 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

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 [6]. 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 [6]. 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 [4,6].

1743 'de Bolsever, gümüş ve bakır plakaları bir arada haddeleyerek difüzyon kaynağı literatürüne temel oluşturan ilk araştırmaları yapmıştır. 1878 'de Spring bakır ile çinko, kadmiyum, indiyum, bizmut, kurşun, antimuan ve alüminyum; kurşun ile çinko, bizmut, antimuan ve kalayı; demir ile çinkonun bağlantılarını incelemiştir [6].

1896 - 1900 yıllarında Roberts ve Austen, 18 °C 'de kurşun ve altın arasında bir birleştirme denemesi yapmışlardır. 4 yıl süreyle uygulanan basınç sonunda kurşun içine 7.65 mm mesafede altın difüzyonu saptanmıştır. Fakat üniformluk tam olarak sağlanamadığı için kaynaklama başarısız olmuştur. 1902 'de Retjo, yeni kesilmiş kurşun yüzeylerine 48 saat basınç uygulayarak başarılı bir uygulama elde etmiştir [6]. 19. yüzyıl sonlarında ergime kaynak yöntemlerinin yaygınlaşması ve ark kaynağının pratiklik kazanması karşısında katı hal kaynakları önemini kaybetmiştir.

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 [2]. Geçen 25-30 yıldan beri ise difüzyon kaynağı ve tesisatı üzerinde yapılan çalışmalar kaynak



endüstrisinde gittikçe artış göstermiş ve ilgi hızla büyümüştür. Büyük skalalı, büyük alanlı bağlantıların yapılması için iyi bir çözüm artık bu yöntemle düşünülmektedir.

Elimizdeki mevcut literatürler son 30 yılı kapsamaktadır. 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 Elektrik 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 incelemişlerdir. 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. Kazokov (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 komplike yüzeylere sahip parçalarda da difüzyon kaynağının uygulanabilirliğini vurgulamıştır [10]. G. K. Kharchenko 'da (1969), farklı metallerin difüzyon kaynağındaki problemleri inceleyerek ergime kaynağı yöntemi ile birleştirilmesi zor ya da mümkün olmayan pek çok farklı metalin difüzyon kaynağı ile birleştirilerek difüzyon bölgesinin boyutlarının ve o bölgenin özelliklerinin kaynağın kalitesi üzerinde etkisi olduğunu göstermiştir [11].

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 [12]. H. Kato ve ç. a. 'da (1986), Ti - Ti'u ve Ti - paslanmaz çeliği havada



faz dönüşümü altında difüzyonla kaynaklamışlardır. Her iki bağlantı için mekanik özellikleri incelemişler, Ti - paslanmaz çelik kaynağının kalitesinin, Ti - Ti kaynağının kalitesinden daha düşük olduğunu belirtmişlerdir [13].

P.A. Kammer ve ç.a. (1969), difüzyon kaynağında aratabaka kullanımını denemişlerdir. İki altın (Au) parça arasına bakır (Cu) arametali konarak 1000 °F sıcaklık ve 15 dakikalık bağlantı zamanıyla 20 000 psi 'den daha büyük çekme dayanımları elde edilen difüzyon bağlantısı sağlamışlardır [14]. Yine S.E. Ushakova ve A.A. Kotel'nikov (1970), Kurak Polytechnic Institute 'de alüminyum ile çeliğin vakum altında difüzyon kaynağında gevrek ara fazların oluşmaması için Ni aratabakası kullanarak bu fazların önlendiğini göstermişlerdir [15]. N.F. Kazakov ve ç. a. (1972) ise, alüminyumu 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 [16].

I.G. Korsunkaya ve ç. a. (1970), saf magnezyum ile saf alüminyumun vakum difüzyon kaynağını incelemişler ve bağlantı esnasında oluşacak oksit filmlerini kırmak için dışardan kuvvet uygulanmasının gerekmediğini, temas yüzeylerinin birbirine değmesinin yeterli olduğunu savunmuşlardır [17].

V.N. Stolyarov (1971), Ni alaşımlarında difüzyon ve basınçla lehimli birleştirmelerdeki yüksek sıcaklık mukavemetini incelemiş, gevrek intermetalik bileşiklerin oluşması sebebi ile mekanik özelliklerin geniş bir dağılım aralığı gösterdiğini vurgulamıştır [18].

G.S. Hoppin ve T.F. Berry (1970), Ni esaslı süper alaşımların kaynağının zorluklarını ortadan kaldıran "activated diffusion bonding" adlı yeni bir proses geliştirmişlerdir. Bu prosesin özelliği difüzyon ve lehimlemenin birlikte olması, maksimum birleşme mukavemeti elde edebilmek için de yaşlandırma ısıl işleminin yapılmasını içermektedir. Bu sayede geleneksel dolgu metalleri ile yapılan lehimli birleştirmelerin birkaç katı daha mekanik özellikler elde edilebilmiştir [19].

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 [20]. Yine H.A. Mohamed ve Washburn (1975), bir katı hal kaynağı olan basınç kaynağında oksit filmlerinin yüzey pürüzlülüğünün kaynak üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Oksitle metal bağlantısı yapmanın kaynak mukavemetine bir katkısı olmadığını bulmuşlardır [21]. Z.A. Munir (1983) ise, metallerin difüzyon kaynağı esnasında yüzeydeki oksit katmanlarını düz, silindirik ve küresel geometriye parçalarda oksitlerin erimesi için gerekli zaman hesabını seçtiği malzemeler için analitik olarak denklemlerini çıkartarak yapmıştır [22]. V.V. Frolov ve ç.a. (1985), vakumda difüzyon kaynağı için önemli bir parametre olan yüzey hazırlamayı titanyum için kimyasal çözeltilerle incelemişlerdir. Oksit filmlerinin yüzeyden uzaklaştırmak için optimum çözelti ve şartlarını belirlemişlerdir [23].

J.L. Jellison ve C.F. Huff (1980), General Elektrik firması için gaz basıncı altında toz metalurjisi ile imal edilen elmas kesicilerin tutturulması için gaz basıncıyla difüzyon bağlantısını araştırmışlardır. Gaz basıncının kullanılması mükemmel bir yöntem olarak gözükmeye karşılık, minimum bağlantı şartlarının iyice tanımlanması gerektiği üzerinde durulmuştur [24].

S. Elliot ve ç.a. (1980), yumuşak çelikte difüzyonla bağlantılı arayüzlerdeki 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 [25].

D.R. 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 [26].

C.E. Thornton ve E.R. Wallach (1983), difüzyonla kaynaklanmış En8 çeliğinin çentik darbe mukavemeti üzerinde durmuşlar ve çentik darbenin sünek-gevrek dönüşüm sıcaklığının üstünde yapıldığı zaman kaynak bölgesinin düzlemsel kırıldığı, sebebinin ise yüksek inklüzyon ve mikro boşluk yoğunluğunun varlığı olarak gösterilmiştir. Çentik darbe testi sünek-gevrek dönüşüm sıcaklığının altında yapıldığı zaman bağlantı bölgesinden biraz uzakta yarılma kırılması meydana geldiği görülmüştür [27]. P.D Calderon ve ç.a. (1985), 316 tipi paslanmaz çeliği, saf ve alaşımlı alüminyumla difüzyon kaynağı yapıp, yaşlandırma sıcaklığı ve zamanının mekanik özellikler üzerindeki etkisini incelemişlerdir [28].



B. Derby ve ç.a. (1983) ise, difüzyon bağlantılarında hataların değerlendirilmesini tahribatsız muayene yöntemlerinden radyografi ve akustik mikroskopta çok yüksek frekanslı ultrasonik ses kullanarak yapmışlardır [29]. Aynı araştırmacılar 1984 yılında demir ve düşük alaşımlı çeliklerin difüzyon bağlantısında beş farklı difüzyon mekanizmasının (plastik deformasyon, creep, yüzey difüzyonu, tane sınırı difüzyonu ve hacimsel difüzyon) etkisini incelemişlerdir [30]. Yine 1984 yılında buhar fazında kütle taşınımı ile difüzyon modeline "power law creep mass transport" modelini ilave ederek eski modeli revize etmişlerdir [31].

V.V. Peshkov ve S.I. Gusev (1984), Voronezh Polytechnical Institute 'de titanyum alaşımlarından yapılmış bal peteğimsi yapıların difüzyonla kaynaklanmasındaki teknolojik parametrelerin neler olduğunu incelemişler ve bu parametrelerin bağlanan parçaların başlangıçtaki mikro yapısı ile uygulanan ani basınç olduğunu öne sürmüşlerdir [32]. Yine aynı araştırmacılar 1985 yılında, 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 [33].

General Elektrik firmasında çalışan C. Scott ve V.B. Tran (1985), difüzyonla bağlantıyı seramiklere özel bir yöntemle uygulama başarısı göstermişlerdir. Ayrıca MgO ilavesinin yekpare bir içyapı elde etmede çok önemli olduğu vurgulanmıştır [34].

E.S. Karakozov ve ç.a. (1984), nikel esaslı sürünmeye dayanıklı dispersiyonla sertleştirilmiş bir alaşımda deformasyonla yapılan difüzyon bağlantısında hassaslık katsayısı olan,

$$m = \frac{\log P_1 / P_2}{\log \epsilon_1' / \epsilon_2'}$$

nün maksimum değerini elde etmek için gerekli şartları araştırmışlardır [35]. T.J. Moore ve T.K. Glasgow 'da (1985), nikel esaslı süper alaşım ile oksit dispersiyonu ile güçlendirilmiş MA 6000 malzemelerinin difüzyon kaynağı ile birleştirme yapıp yapılamayacağını incelemişler ve sonuçta MA 6000 'in kendisi ile olan difüzyon kaynağı 1000 °C 'de başarılı bir şekilde yapıldığını, fakat MA 6000 ile nikel esaslı Udimet 700 malzemenin difüzyon kaynağı mümkün görülmesine rağmen birleşmenin zayıf kaldığını kaynaklı parçaların kayma kırılması testlerinde gözlemişlerdir [36].



J. Godziemba ve Malizewski (1987), difüzyon kaynağında termal dalganın kaynağı üzerindeki olası etkilerini incelemişler ve matematiksel bir model esas alarak termal etki, termal gradient ve ısı akışının tesirlerini araştırmışlardır [37]. Z.X. Guo ve N. Ridley de (1987), metallerin difüzyonla bağlantısı için gerçekçi geometrik kabüllerin esas alındığı matematiksel bir model geliştirmişlerdir. Etkili difüzyon mesafesi, tane boyutu, faz oranları, gerilme durumu kantitatif olarak göz önüne alınmış, Cu ve Ti-6Al-4V alaşımları için yapılan deneysel sonuçlarla karşılaştırıldığında uyumlu olduğu gösterilmiştir [38]. J. Pilling (1988) ise, süperplastik malzemelerin izostatik gerilim şartlarında difüzyonla bağlantı esnasında tam bir iç yüzey teması elde etmek için gereken zamanı önceden tespit eden bir model geliştirmiştir. Bu modelin, önemli ölçüde yüzey pürüzlülüğü ve yüzey gerilmesi için seçilen değerlere, süperplastik bölge içindeki basınç ve sıcaklığa karşı hassas olmadığını göstermiştir. Bununla ilgili matematiksel modelin henüz yapılmadığını da vurgulamıştır [39].

G.R. Gamat (1988), bir nükleer reaktörde kullanılan parçada paslanmaz çeliğin nikel difüzyon kaynağı ile birleşmesi sonucu kaynak mukavemetinin fevkalade iyi olduğunu belirtmiştir. Ayrıca sağlanan optimum şartları belirten özel bir standart hazırlamıştır [40].

F.A. Calvo ve ç.a. (1988), bakırın demirle difüzyon bağlantısı esnasındaki katı hal dönüşümleri üzerine çalışma yapmışlardır. Bakırın farklı oksijen içermesi sonucu iki farklı bakırla (ETPC ve OFLPC) çalışılmış, demir içersinde bakır partiküllerinin oluşması iki şekilde açıklanmıştır. Birincisi, demirin içinde bakırın katı hal çökeltisi şeklinde, diğeri ise 900 °C 'nin üzerindeki bağlama sıcaklıklarında ötektoid reaksiyon tarzındadır ( $\gamma \rightarrow \epsilon + \alpha$ ) [41]. Aynı araştırmacılar 1992 yılında Ti-6Al-4V alaşımının difüzyonla bağlantısını yüksek sıcaklıklar yerine 850 °C gibi düşük bir sıcaklıkta hem süperplastik şekil vermeyi hem de difüzyonla bağlanmasını sağlayacak bir çalışma yapmışlardır. Sonuçta, çalışmalarını metalografik incelemeler üzerinde yoğunlaştırmışlardır [43].

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 [44].

O. Buck ve ç.a. (1989), difüzyon kaynağında temas yerinin tahribatsız yöntemle değerlendirilmesi ve bu temas noktalarında doğan yüklerin mekanik özellikler üzerine



etkilerinin önceden bilinmesi ile ilgili bir çalışma yapmışlardır. Yorulma çatlak ile bağlantısını kırılma mekaniğini kullanarak incelemiştirler [45].

O.M. Akselsen (1992), difüzyon kaynağını seramiğin seramiğe ve seramiğin metale uygulamasını incelemiş ve değişik malzeme çiftleri için optimum parametreleri tespit etmişlerdir [46].

Y. Takahashi ve ç.a. (1992), difüzyonla bağlantı esnasında oksit filmlerinin erime prosesi (Cu ve Ti 'da) ile ilgilenmişler, oksit filmlerinin erimesi ile ilgili iki model geliştirmişlerdir. Birisinde kir ve pisliklerin etkisi esas alınmıştır. Diğerinde ise reaksiyon difüzyonu esas alınmıştır. Her iki modelde de oksitlerin erime zamanları hesaplanmıştır [47].

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 arayüzeyinde, 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 [48].

A. Sunwoo (1994), 8090 alüminyum alaşımını hem direk aratabaka kullanmadan hem de aratabaka kullanarak numune yüzey kimyasının bağlantı özellikleri üzerine etkisini incelemiştir. Aratabaka olarak bakır ve çinko kullanmış, bakır aratabakalı numunelerin çekme özelliklerinin çinko aratabakalı ve çıplak yüzle birleştirilen bağlantıların çekme mukavemetinden daha iyi olduğu bulunmuştur. Al alaşımlarının difüzyonla bağlantısında çinkonun etkisini incelemek için başka çalışmalara ihtiyaç olduğu vurgulanmıştır [49].

B.T.J. Stoop ve G. Den Ouden (1995), ostenitik paslanmaz çelikle silikon nitrit'i metal aratabaka kullanarak difüzyon kaynağı yapmışlardır. Aratabaka olarak Fe, Ni, invar ve kovar kullanılmış, fakat en iyi sonuçlar invar tabakası ile elde edilmiştir. Bağlantının mekanik mukavemetinin, difüzyon bağlantı sıcaklığından oda sıcaklığına doğru soğurken seramik ve metal arasındaki termal büzülmenin farkından dolayı ortaya çıkmış olan artık gerilmelere güçlü bir şekilde bağlı olduğu belirtilmiştir [50].

K. Kotani ve ç.a. (1995), Mg, Si, Cu, Zn içeren alüminyum alaşımlarının difüzyonla bağlantılı olduğu arayüzeylerde yüzeydeki oksit filminin davranışı, Al alaşımının bağlanabilme kabiliyeti üzerine alaşım elemanlarının etkisini açıklamak için TEM



(transmisyon elektron mikroskobu) de inceleme yapmışlardır. Yaklaşık 873 K  
bağlanma sıcaklığında bağlantı arayüzeyinde kalmış olan oksit Mg içeriğini esas alan  
bir katsayıya göre sınıflandırılmıştır. Sonuç olarak, alüminyum alaşımının difüzyonla  
bağlantısında, bağlantının oluşumunda oksitin kontrol faktörü olduğunu ileri  
sürmüşlerdir [51].







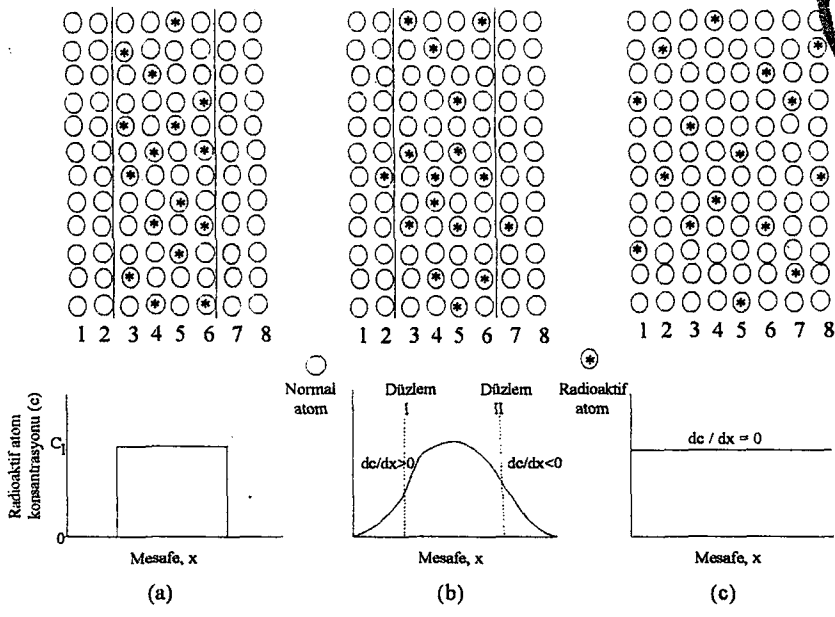
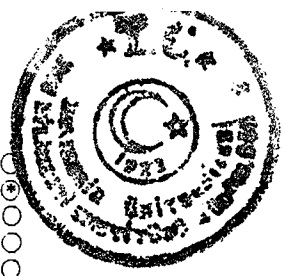
### 3. DİFÜZYON TEORİSİ

#### 3.1 Giriş

Atomların, moleküllerin ve iyonların sıcaklığa bağlı olarak yer değiştirmeleri sonucu meydana gelen kütle akışı olayı difüzyon (yayınma) olarak adlandırılır [52,53]. Homojen malzemede tümüyle aynı olan parçacıkların yer değiştirme olayları düzensizdir. Öz (self) 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 [54]. Gereken enerji atomdan atoma farklılık gösterir.

Şekil 3.1, merkezde üniform  $C_1$  radyoaktif atomlar içeren bir merkez bölgesiyle, sadece normal atomlar içeren iki komşu bölge arasındaki öz difüzyonun bir şemasıdır [52,55]. Her atom Şekil 3.1.a 'da gösterildiği gibi kendi pozisyonundan komşu pozisyonların birine atlamak eğiliminde olacaktır. Şekil 3.1.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. Rastgele atlama sütun 4 ve 5 'deki radyoaktif atom sayısını değiştirmez. Bununla birlikte, bir radyoaktif atom sütun 3 'ü terkedip sütun 2 'ye gidecek ve benzer şekilde bir atom sütun 6 'yı terkedip sütun 7 'ye girecektir. Daha ileri atlamalarla sonunda radyoaktif atomlar homojen dağılımı elde edinceye kadar (Şekil 3.1.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.

Difüzyon bir konsantrasyon gradyanından hareket eder, yani moleküller yüksek konsantrasyonda buldukları bir bölgeden konsantrasyonlarının daha düşük olduğu bir bölgeye göç ederler. İki alan arasında konsantrasyon farkı ne kadar büyük olursa, yüksek konsantrasyonlu alandan düşük konsantrasyonlu alana moleküller o kadar hızlı yayılır. Difüzyon, ayrıca sıcaklığa da bağlıdır. Sıcaklık arttıkça moleküller daha hızlı hareket ederler [55].



Şekil 3.1. Metallerde öz difüzyon süreci: Atomik dağılıma (üstte) Difüzyon süreci içinde konsantrasyon eğrileri (altta) [52,55]

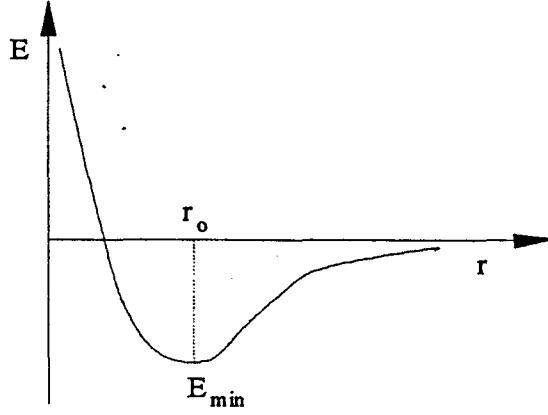
En hızlı difüzyon gazlarda olup bu, sıvılarda daha yavaştır. Difüzyon katılarda da meydana gelir. Buna, atomlara birbirlerinin etrafında hareket edip yer değiştirme olanağını sağlayan kristal kafes kusurları neden olur. Gaz ve sıvıların katılar içine difüzyonu da gözlenir. Özellikle kaynakta büyük önemi olan hidrojen, azotun kaynak metaline difüzyonu buna örnek gösterilebilir.

### 3.2 Enerji Konumları

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

$$E = U - TS \quad (3.1)$$

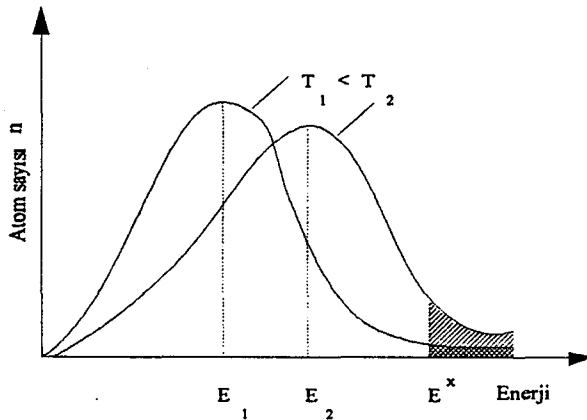
ile verilmektedir [68]. Burada E sabit bir hacim için serbest enerji, U sistemin iç enerjisi, T ara yüzeyin sıcaklığı ve S entropisidir. Kararlı bir sistemi oluşturmak üzere atomlar  $r_0$  mesafesi kadar yaklaştığında mesafedeki en ufak bir artma ya da azalma enerjii arttıracaktır (Şekil 3.2). Pratikte bu olayların gerçekleşmesi ancak özel şartlarda, örneğin iyi hazırlanmış ve yüksek vakumda ( $1.33 \times 10^{-6}$  Pa) tutulmuş yüzeyler için geçerlidir.



Şekil 3.2. Atom mesafesinin bir fonksiyonu olarak potansiyel enerji değişim şeması

Bir kütle içinde bulunan atomlar veya moleküller herhangi bir anda aynı enerjiye sahip olmayacaklardır. Şekil 3.3 'de görülen enerji dağılımı eğrisine göre bir  $T_1$  sıcaklığında bazı atomların enerjisi sıfıra yakinken bazılarınınki ise çok yüksek olabilir ve çoğunluğununki 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 yayılımı oluşturur.

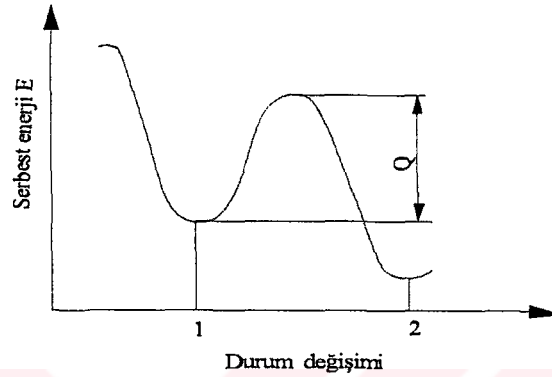


Şekil 3.3 Atom enerjilerinin şematik dağılımı

Atomların yer değiştirmesi kademeli olarak ve sistemin serbest enerjisinin azalması koşuluyla devam edebilir (Şekil 3.4). Böylece kararlı (stabil) denge durumuna



ulaşıldığında serbest enerji minimuma 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 yayılan bir atomun bir enerji engelini aşması için atomların aktive edilmesi gerekmektedir ve bu  $Q$  değerine aktivasyon enerjisi denir.



Şekil 3.4 Serbest enerjinin durum değişimine bağılılığı

### 3.3 Difüzyon Katsayısı

Difüzyon katsayısı, birim yüzey arasından akan malzeme miktarının, bu yüzeye 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 yayılması (difüze olması) dır. Bu, deneysel çalışmaların sonucu olarak aşağıda verildiği gibidir.

1. Difüze olan cismin konsantrasyonunun her yerde aynı olması halinde, hiçbir difüzyon oluşmaz.
2. 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 bağılı 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.

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

$$q = -D (d\rho / dx) \quad (3.2)$$

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,

$$d\rho / dt = -dq / dx \quad (3.3)$$

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

$$-\frac{\delta\rho}{\delta t} = \frac{\delta}{\delta x} (D \frac{\delta\rho}{\delta x}) \quad (3.4)$$

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 endikatörler yardımıyla ya da kimyasal analizle saptanabilir [55].

### 3.4 Difüzyon Mekanizmaları

Denge konumundaki atomlar ısıtıldıkları zaman titreştikleri bilinmektedir. Bazen bu titreşimler o kadar şiddetli olur ki atomlar yer değiştirir. Atomların bir yerden başka bir yere geçmeleri katılarda difüzyon olayıdır. Bu difüzyon mekanizmaları 4 grupta toplanır [52,54,56].



### 3.4.1 Arayer Mekanizması

Bu mekanizmada matriks atomları yer değiştirmezler. Sadece arayere sıkışmış atomlar yer değiştirirler. Arayerlerden birindeki bir atomun başka bir arayer pozisyonuna geçmesi atomun sıçraması ile gerçekteşmektedir. Atomun sıçrama işleminin tamamlanmasında, sıçrama öncesi atomların hareketi büyük önem kazanır. Bir atom, kafeste, örneğin 1 no'lu konumdan 2 no'lu komşu bir pozisyona sıçramayla atlayabilir. Sıçramanın gerçekteşebilmesi için matriks atomlarının (örneğin 1 no'lu atomun 2 no'lu konuma) geçebileceği dar bir tünel mevcuttur (şekil 3.5.a).

Arayer mekanizması, atomların genellikle arayer pozisyonlarını işgal ettikleri alaşımlarda (örneğin,  $\alpha$  ve  $\gamma$  demirinde C atomlarının difüzyonu) düşünülür. Difüzyonu küçük arayer atomları gerçekteştiriyorsa, kafesi çok fazla çarpıtmayan bu difüzyon mekanizması hakimdir. Eğer difüze eden arayer atomu matriks atomu kadar büyükse çarpılma (distorsiyon ) çok büyük olur. O zaman da bu olay aşağıda açıklanan diğer mekanizmalarla açıklanır.

### 3.4.2 Boşluk Mekanizması

Kristallerin tümünde kafes pozisyonlarının bazıları atomlar tarafından doldurulmamış olabilir. Bu yerlere "boşluk" adı verilir. Bir atomun bitişik pozisyonadaki bir boşluğa sıçrayarak atlamasına boşluk mekanizmasıyla difüzyon denir. Boşlukların yer değiştirmesi atomların hareketinin tersi yöndedir (şekil 3.5.b). Atomu hareket ettirmek için gerekli distorsiyon enerjisi küçüktür. Örneğin, bir demir atomunu bitişik bir boşluğa hareket ettirmek için demir kristal kafesine verilecek distorsiyon enerjisi, karbon atomunu aynı kafeste bir arayerden diğer arayere 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 [52,56].

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 hegzogonal kristal kafesli metallerde de başarılı bir yöntem olduğu gösterilmiştir.

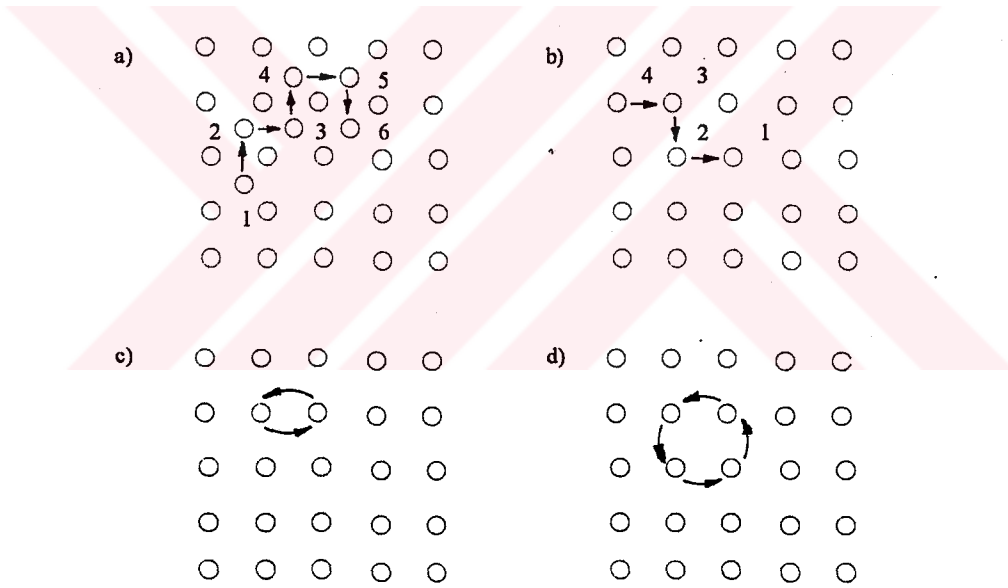


### 3.4.3 Karşılıklı Yer Değiştirme Mekanizması

Enerji nedenleriyle iki atomun karşılıklı olarak doğrudan yer değiştirme olasılığı düşüktür (Şekil 3.5.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.

### 3.4.4. Halka Mekanizması

1940 'larda çarpılma ve Kirkendall etkisinden ötürü halka mekanizmanın 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 [52]. Sıkı yapılı kafesler için söz konusudur. Bu model Şekil 3.5.d 'de gösterilmiştir.



Şekil 3.5 Kristal kafesde 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 [6,54]. 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.

### 3.5 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 [52,55].

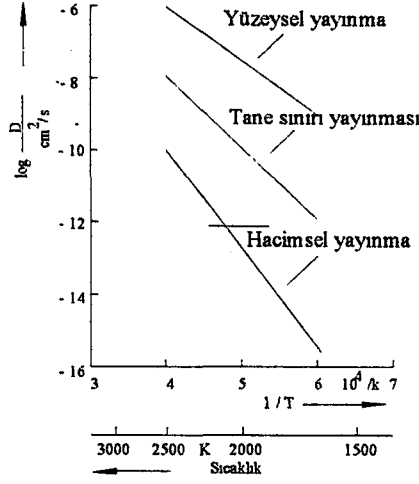
Bir metalin yüzeyinde atomlar, kafes içinde belli bir pozisyona daha zayıf bağlı olup yüzey difüzyonu-tane sınırları difüzyonundan da daha hızlıdır. Her ne kadar yüzey ve tane sınırları difüzyonunun hızı hacim difüzyonundan çok daha yüksek ise de, bunların toplam difüzyona katkısı, yüzey ve tane sınır bölgelerinde atom sayısının az olması nedeniyle daha az olur. Yüzey difüzyonu için gerekli aktivasyon enerjisi:

$$\Delta Q_{\text{Yüzey dif.}} < \Delta Q_{\text{Tane sınırı dif.}} < \Delta Q_{\text{Hacim dif.}}$$

şeklinde yazılabilir.

Şekil 3.6, toryumun wolframda çeşitli difüzyon davranışlarını göstermektedir [6,53]. 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 3.6 Toryumun wolfram içinde difüzyonu

### 3.6 Difüzyon Kanunları

#### 3.6.1 I. Fick Kanunu

Homojen olmayan malzemelerdeki difüzyon olayları teknik açıdan daha önemlidir. Burada bulunan konsantrasyon farkları parçacıkların belirli yönde hareket etmelerine neden olur. Bu olay matematiksel olarak I. Fick Kanunu ile ifade edilebilmektedir (Şekil 3.7).

$$dm_A = -D \frac{d\rho_A}{dx} S dt \quad (3.5)$$

Burada;  $dm_A$ , konsantrasyon gradyanının  $d\rho_A / dx$  olması durumunda,  $dt$  süresinde ve yayınma yönüne dik  $S$  yüzeyinden geçen  $A$  atom türünün difüzyon kabiliyeti için bir ölçüdür ve dolayısıyla bu malzemeye özgü bir değerdir [53,55]. Buradan da,

$$\frac{1}{S} \frac{dm_A}{dt} = -D \frac{d\rho_A}{dx} \quad (3.6)$$

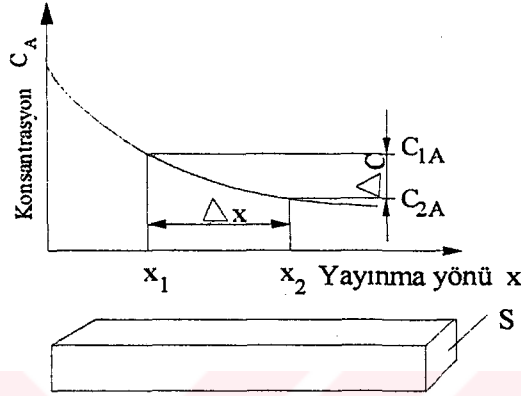
elde edilir. Bu bağıntıya göre  $D$  değeri,  $d\rho_A / dx$  konsantrasyon gradyanında difüzyon olayının hızını belirler.

I. Fick Kanunu'nun diğer bir ifadesi de,

$$q = -D (d\rho / dx) \quad (3.2)$$



şeklindedir. Bu ifade de  $q$ ,  $dA$  birim alanından  $dt$  süresince,  $dx$  mesafesinde difüze olarak geçen madde miktarıdır. Görüldüğü gibi  $q$ , ilgili maddenin konsantrasyon gradyanının bir fonksiyonudur. Bu konsantrasyon gradyanı  $dp / dx$ , arayüzey düzlemine dik doğrultuda ölçülmektedir.  $q$  aynı zamanda  $D$ , difüzyon katsayısı (konu 3.3) ile doğru orantılıdır. Her iki ifadedeki negatif işaret difüzyonun yüksek konsantrasyonlu yerden düşük konsantrasyonlu yere doğru gelineceğini göstermektedir [54].



Şekil 3.7 I. Fick Kanunu ile ilgili büyüklükler

### 3.6.2 II. Fick Kanunu

Eğer bir yayınma olayında kararlı bir durum mevcut değilse, örneğin, konsantrasyon zamanla değişiyorsa I. Fick Kanunu difüzyonun açıklanması için geçerlidir. Ancak bu konuda yeterli bilgi sağlamak için ikincil diferansiyel denkleme gerek vardır. Kararlı olmayan bir yayınmayı (non - seady state) ifade eden II. Fick Kanunu, I. Fick Kanunu'nun birinci türevi alınarak çıkarılır.

$$\frac{\delta \rho}{\delta t} = \frac{\delta}{\delta x} \left( D \frac{\delta \rho}{\delta x} \right) \quad (3.7)$$

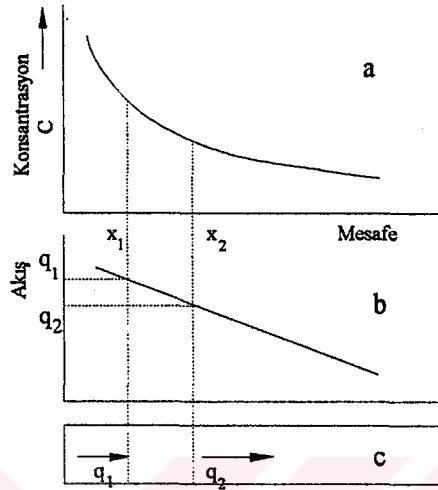
Denklemin bu şekli  $D$ 'nin konsantrasyonla değişimini gösterir. Bununla birlikte uygulanması hayli zor olduğundan  $D$ 'yi sabit kabul ederek basitleştirmeye gidilir.

Böylece bu denklem ,

$$\frac{\delta \rho}{\delta t} = D \frac{\delta^2 \rho}{\delta x^2} \quad (3.8)$$



şeklini alır. Denklemin fiziksel anlamına göre yayılım olayı başlangıçta çok hızlıdır, zamanla konsantrasyon gradyanı azaldığından hız düşer ve tam homojen yapı için sonsuz süreye gerek vardır [57]. Difüzyonda konsantrasyon mesafe eğrileri Şekil 3.8 'de gösterildiği gibidir [52,56].



Şekil 3:8 Kararsız difüzyon

- a) Konsantrasyonun mesafeyle değişimi
- b) Akış miktarının mesafeyle değişimi
- c) Birim hacime giren ( $q_1$ ) ve çıkan ( $q_2$ ) akış miktarı

II. Fick Kanunu aşağıdaki uygulama alanlarına sahiptir:

1. Çeliğin karbürlenmesi (sementasyon),
2. Çeliğin dekarbürizasyonu,
3. Kaynak ve lehimleme,
4. Galvanizasyon.

### 3.8 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.



### 3.8.1 Sıcaklığın Etkisi

Difüzyon katsayısının her 20 °C 'lik sıcaklık yükselmesiyle iki kat büyüdüğü düşünüldüğünde sıcaklığın etkisi ortaya çıkar. Daha doğru olarak bu difüzyon katsayısı, sıcaklıkla,

$$D = D_0 e^{-Q/RT} \quad (3.9)$$

bağıntısına bağlı olarak değişir.

Burada,

$D_0$  : Yayınan atomların titreşim frekansına bağlı yayınma katsayısı ( $\text{cm}^2 / \text{s}$ )

$Q$  : Aktivasyon enerjisi (kcal/mol)

$R$  : Gaz sabiti (1.987 cal / mol)

$T$  : Mutlak sıcaklık (K) 'dir.

$D_0$ ,  $Q$  ve  $R$  sıcaklıktan bağımsızdır. Başka bir açıdan bakıldığında  $D_0$  ve  $Q$  metallerin birleşmesinin karakteristik büyüklüklerindedir. Çizelge 3.1 'de çeşitli ortamdaki  $D_0$ ,  $Q$  ve 500 °C 'deki  $D$  değerleri verilmiştir [55,58,59].

Çizelge 3.1 Bazı difüzyon çiftleri için  $D_0$ ,  $Q$  ve 500 °C 'deki  $D$  değerleri

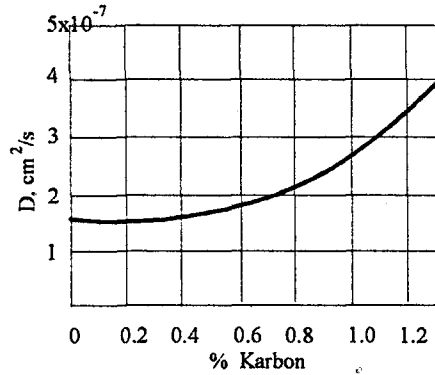
Difüze olan metal	Ana metal	$D_0$ $\text{cm}^2 / \text{s}$	$Q$ kJ/mol	$D_{500^\circ\text{C}}$ $\text{cm}^2 / \text{s}$
Karbon	$\gamma$ demir	0.21	142	$10^{-10.4}$
Karbon	$\alpha$ demir	0.0079	122	$10^{-6.4}$
Demir	$\gamma$ demir	5.8	240	$10^{-16.9}$
Demir	$\alpha$ demir	0.58	268	$10^{-20.0}$
Bakır	Bakır	0.2	197	$10^{-14.0}$
Bakır	Aluminyum	0.08	126	$10^{-10.3}$
Aluminyum	Bakır	0.38	179	$10^{-12.6}$

### 3.8.2 Konsantrasyon

Matematiksel kolaylık açısından difüzyon katsayısının , konsantrasyondan bağımsız kabul edilmiş olmasıyla hatalı olduğunu bilmek faydalı olur.Bazı sistemlerde  $D$ , konsantrasyonla belirgin şekilde değişir. Şekil 3.9 'da austenit içinde, 927 °C sıcaklıkta % 1.3 karbona kadar difüzyon katsayısındaki değişimin az olduğu gösterilmiştir [55].  $D$  'nin büyük ölçüde konsantrasyona bağlı olduğu sistemlerde



bile, difüzyonun hafif eriyik içinde veya küçük bir konsantrasyon alanı içinde olabileceği kaydıyla, D 'yi sabit kabul etmekle büyük bir hata yapılmış olmaz.



Şekil 3.9 927 °C 'de demir içinde difüze olan karbon için D 'nin konsantrasyonla değişimi

### 3.8.3 Kristal Dokusu

Kristal kafes yapısının sıcaklıkla değişiminin önemi nedeniyle, kristal dokunun bu değişimin demir içinde, erimiş atomların difüzyon derecesi üzerindeki etkisi araştırılmıştır.  $\gamma$  demirinde y.m.k. kafesin sıkı düzeninden ötürü demirin öz difüzyonu ile çeliklerdeki diğer asalyer atomlarının difüzyonu bütün sıcaklıklar için h.m.k. kafese sahip  $\alpha$  demirinkinden yaklaşık  $10^2$  ile  $10^3$  kez daha küçüktür. h.m.k. yapı daha az kararlıdır, ısıl aktive edilmiş yer değiştirme olayları bu kafeste kolaylıkla gerçekleşebilir [53,55].

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 [55].

### 3.8.4 Saflığı Bozan Maddeler

Az miktarda ilave metallerin varlığı genellikle ana metal içinde eriyen atomların difüzyonu üzerinde az etki yapar. Bu olgu çoğu kez, difüzyonun çok sayıda değişkenden sadece biri olduğu durumlardaki sorunların çözümünde yararlı olmaktadır. Örneğin, çeliğin sertleşebilme kabiliyeti üzerinde alaşım elementlerinin

kuvvetli etkilerinin, karbon difüzyonu derecesinde geniş değişimlerden başka faktörlerin sonucu olduğu kanısına varılır.



### 3.8.5 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.

### 3.9 Kimyasal Difüzyon (Kirkendall Olayı)

İkili bir alaşımda konsantrasyon farkı olduğunda, temas eden yüzeylerin difüzyon katsayısı farklılığından dolayı akış olur. Eğer iyi bir temas olursa difüzyon bölgesinde madde taşınımı meydana gelir. Bu deneylerle belirlenmiştir [52,56,58].

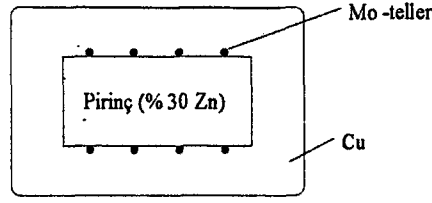
Kirkendall (1947), böyle bir denemeyi ilk olarak metallerde, bakır ile pirinç arasında araştırmıştır ve sınır yüzeyini molibden tel ile işaretlemiştir. Düzenek Şekil 3.10 'da gösterilmiştir. Pirinç bloğu, molibden teli ile sarılarak üzerine 0.1 inç' lik saf bakır tabakası elektrolitik olarak kaplanmıştır. Birçok çinko atomu pirinç bloğundan bakırın içine doğru yayılacağı için difüzyonun hızlanmasından sonra karşılıklı duran molibden telleri açıklığının azaldığı görülmüştür. İşaretlemenin yerinin değişmesi doğal olarak çok azdır. Bu yer değiştirme mesafesi, 785 °C difüzyon sıcaklığında 30 'lu gruplar halinde 57 denemede pirinç'e doğru 0.12 mm olmuştur [56,58]. İşaretlenen yüzeyin yer değiştirme hızı :

$$v = (D_A - D_B) \frac{\partial x_A}{\partial \xi} \quad (3.10)$$

olarak ifade edilebilir. Bu, kısmi difüzyon katsayıları  $D_A$  ve  $D_B$  farkıyla orantılıdır.  $x_A$ , difüzyon derinliği;  $\xi$ , konsantrasyon farkıdır. Bir difüzyon çiftinin ( Örneğin, Cu-Pirinç ) difüzyon katsayısı  $D$  ise,

$$D = X_{Pirinç} D_{Cu} + X_{Cu} D_{Pirinç} \quad (3.11)$$

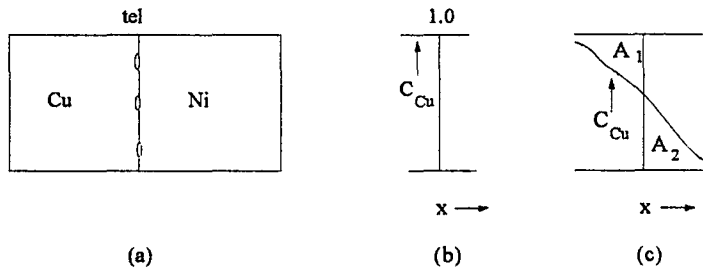
şeklinde verilir.



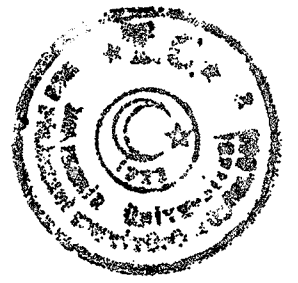
Şekil 3.10 Kirkendall olayının deney düzeneği

Eğer pirinç bloğundan dışarı doğru akan çinko atomlarının akıcılığı içeri doğru akan bakır atomlarının akıcılığından daha büyükse, pirinç içerisinde boş yer sayısı artar. Buna karşın bakır tabakasında boş yer sayısı azalır. Kirkendall etkisi olan alaşımlarda difüzyon, atom çiftlerinin karşılıklı olarak yer değiştirme mekanizmasından daha çok boşluk mekanizmasıyla oluşmaktadır.

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 3.11.b 'deki gibidir. Daha sonra (c) 'deki duruma gelir. Belli bir ısıtma süresi sonunda arayüzeye konan telin bakıra doğru kaydığı görülür. Bunun nedeni bakır atomlarının nikel'e oranla hızlı yayındıklarından, nikel tarafındaki boşlukların bakır tarafına kaymasındandır. Bu durum da arayüzeydeki teli bakıra doğru hareket ettirmektedir [52].



Şekil 3.11 ( Cu - Ni ) 'de Kirkendall olayı



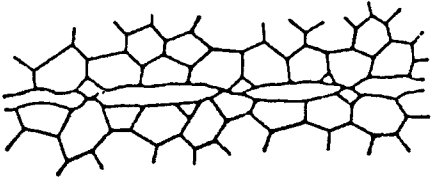
## 4. DİFÜZYON KAYNAKLI BİRLEŞTİRMELER

### 4.1 Açıklama ve Genel Tanımlar

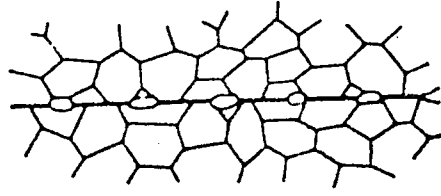
Katı hal kaynağı basınç altında, ergime olmaksızın atomlar arası bağ oluşumu ile elde edilmektedir. Başlangıçta belirtildiği gibi bir katı hal kaynağı olan difüzyon kaynağı için de yapılmış çeşitli tanımlar vardır. Kazakov'un önerisiyle Uluslararası Kaynak Enstitüsü tarafından kabul edilmiş tanıma göre difüzyon kaynağı, birleştirilecek parçaların arayüzey tabakalarında difüzyonu sağlayacak kadar yüksek sıcaklıklarda, aradaki boşlukların plastik deformasyonla kapanmasıyla atomik seviyede bağların olduğu bir katı hal sürecidir [54]. İngiliz standartlarına göre ise difüzyon kaynağı, ölçülebilir bir plastik akma meydana gelmeksizin, malzemelerin erime noktasının altında bir sıcaklıkta birbirlerine bastırılmasıyla orada oluşturulan katı hal difüzyonu ile sağlanır. Ara yüzeydeki difüzyon, bir sıvı faz oluşumuna neden olursa bu "sıvı faz difüzyon kaynağı" sıvı faz olmaksızın difüzyon meydana gelirse "katı hal difüzyon kaynağı" olarak adlandırılır [61,62]. Difüzyon kaynağı yerine kullanılan eş anlamlı ifadeler, difüzyon bağlantısı, katı-hal bağlantısı, basınçlı bağlantı, izostatik bağlantı ve sıcak pres bağlantısıdır [4,5].

Yeterli bir difüzyon kaynağının yapılabilmesi için metalin metale temasında mekaniksel yakınlık sağlanmalıdır ve engel teşkil eden yüzey pislikleri bozulmalı, oluşan metalik bağlantıda yayılmasına izin verilmelidir. Bir difüzyon kaynağı için üç aşamalı bir mekaniksel modelde kaynak oluşumu tam olarak Şekil 4.1 'de gösterildiği gibi tanımlanır [3,5]. İlk aşamada, temas eden pürüzlerin deformasyonu, arayüzey alanının büyük bir sürtünmeyle temas üzerinde sürünme (creep) mekanizmasının sağlanması ve sünmesi ile oluşur. Bu aşamanın sonunda bağlantı, bu temas alanları arasındaki tane sınırlarındadır. İkinci aşama esnasında, deformasyondan daha önemli olarak difüzyon oluşur ve tane sınırlarındaki boşlukların birçoğu ortadan kalkar. Aynı zamanda arayüzeydeki tane sınırları, bağlantının orijinal düzleminden uzağa dengeli bir şekilde kayar. Üçüncü aşamada dar olan boşluklar atomların bu boşluklara difüzyonu ile bertaraf edilir. Bu aşamalar gerçek sistemde üst üste gelir ve mekanizmada bir safha esnasında bazı büyüklükler oluşurken diğer bir aşamaya hakim olunabilir.

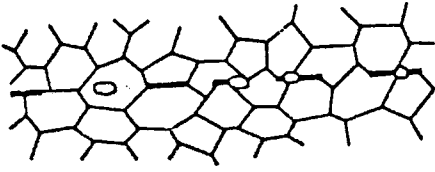




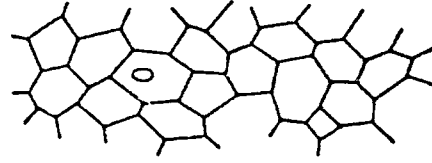
İlk pürüzlülük teması



İlk aşama,deformasyon ve arayüzey sınırlarının ortaya çıkması



İkinci aşama, tane sınırı kayması ve gözeneklerin bertaraf edilmesi



Üçüncü aşama, difüzyonla gözeneklerin azaltılması

Şekil 4.1 Difüzyon kaynağı için üç aşamalı mekaniksel modeli

## 4.2 Difüzyon Kaynağı Bağlantı Çeşitleri

Birçok benzer ya da farklı malzeme kombinasyonları difüzyon kaynağı ile bağlanabilir. Ergime noktası, yoğunluk, lineer genişleme 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 [5].

1. Benzer metaller katı hal kaynağı şeklinde direkt bağlanabilirler. Bu durumda kaynaklanma parametrelerini malzemenin metalurjik 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 işlemlerde 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 ısı genleşmelerin dengelenmesi gerekir.



### 4.3 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 edilebilirler [6,54].

$$\begin{aligned} A_1 &= B_1 e^{-Q_1/E_0} \\ A_2 &= B_2 + C_2 e^{-Q_2/E_0} \\ &\dots\dots\dots \\ A_i &= B_i + C_i e^{-Q_i/E_0} \end{aligned} \quad (4.1)$$

Bu ifadelerde  $Q_i$ , ilgili sürecin aktivasyon enerjisi;  $E_0$ , verilen ısı enerjisi.  $Q/E_0$  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 olarak karşımıza çıkmaktadır. Bir  $V$  hacmini deforme etmekte kullanılan mekanik enerji ile ilgili faktör  $M$  olsun. O halde difüzyon kaynağı  $p$  ve akma dayanımı  $\sigma_a$  cinsinden  $M$  aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$\frac{pV}{\sigma_a V} = M \quad (4.2)$$

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.

$$\frac{T\gamma cV}{T_m\gamma cV} = N \quad (4.3)$$

$M$  ve  $N$  faktörleri birbirine ilave edilerek (4.2) ve (4.3) denklemleri yeniden düzenlendiğinde dik koordinatlarda bir doğru denklemi elde edilir ( Şekil 4.2 'deki kesikli çizgi ).

$$\frac{p}{(M+N)\sigma_a} + \frac{T}{(M+N)T_m} = 1 \quad (4.4)$$



p 'nin T 'ye bu şekilde bağılı olması gerçekte mümkün değildir. Gerçek uygulamalardaki durum Şekil 4.2' deki sürekli çizgi ile gösterilmiştir.

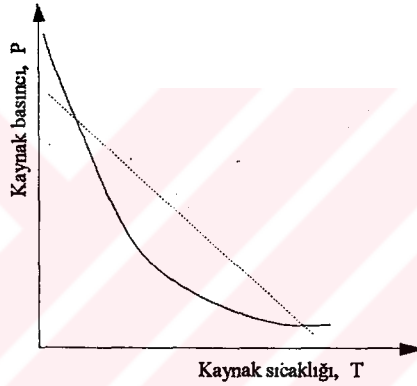
Mekanik ve ısı enerjisi faktörleri birlikte göz önüne alındığında,

$$MN = \frac{pT}{\sigma_a T_m} \quad (4.5)$$

şeklinde, p ve T 'ye ait hiperbolik bir bağıntı elde edilir.

$$pT = MN\sigma_a T_m = \text{sabit} \quad (4.6)$$

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

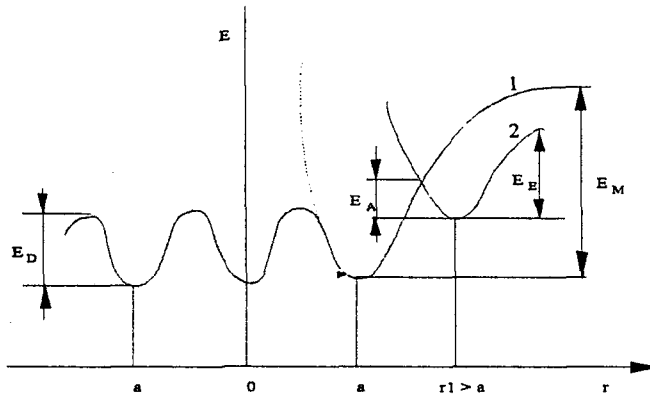


Şekil 4.2 Kaynak basıncı ve kaynak sıcaklığı arasındaki ilişki

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 4.3' e göre kristaller biraraya getirildiğinde metaller arasındaki yakınlık kafes sabiti ile kıyaslanabilecek gibi olmalıdır. Bu taktirde bağ oluşumu enerji bakımından kolaylaşır (1 no'lu eğri). Bununla beraber, adsorbe tabakaların varlığı 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) [6,54].



Şekil 4.3 Metal kristalleri arasındaki karşılıklı etkileşim halinde potansiyel enerjideki değişimler

- $E_E$  : 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 enerjiyi  $E_A$  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 4.1 ile incelenebilir. Bu tabloda, her iki safhada da çeşitli difüzyon tiplerinin hakimiyetinin ön planda olduğu görülmektedir [8,68].

Çizelge 4.1 Difüzyon kaynağı safhaları

Safha	Bağ oluşumunu sağlayan etkenler	Difüzyon şekli	Aktivasyon parametreleri
1. Yüzeyler arasındaki gerçek temasın oluşumu ve gelişimi	Çıkıntıların 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



#### 4.4 Kaynak Değişkenlerinin Etkileri

Difüzyon kaynağında, temas yüzeyleri küçük bir basınç altında rekristalizasyon sıcaklığının altında veya üzerindeki sıcaklıklara ısıtılır. Bu şartlarda, metaller ve alaşımlar fiziko - mekaniksel özelliklerine belirli bir etkisi olmaksızın birleştirilebilirler. Değişen ısınma sıcaklığı, bağlantı basıncı, işlem odasındaki atmosfer, basınçta tutma süresi ve kullanılan yüzey hazırlamanın değişik şekilleri ile bağlantı işleminin ilerlemesi kolayca izlenebilir. Bununla birlikte optimal şartlar altında işleme yapılırsa değişkenler arasındaki ilişki hakkında açıkça fikir edinilebilir.

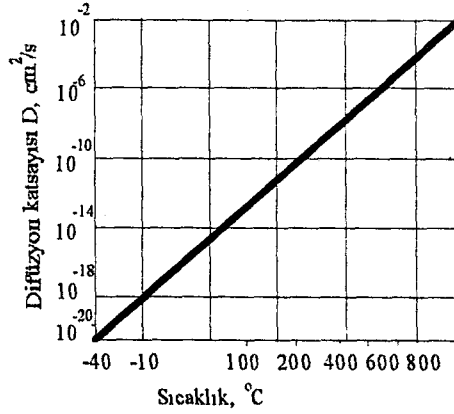
##### 4.4.1 Sıcaklığın Etkisi

Difüzyon kaynağında sıvı bir fazın yokluğu kabul edildiğinden, sıcaklıklar solid eğrisinin üzerinde veya çok yönlü bileşik sistemler için ötektik sıcaklığının üzerinde olmalıdır. Kaynaklama işleminde malzeme, difüzyondan başka tane büyümesi, rekristalizasyon davranışı gösterir. Bu yüzden bağlantı sıcaklığı rekristalizasyon sıcaklığının üzerinde olmalıdır [1]. Bu sıcaklık genellikle  $0.5 T_m$  (ergime sıcaklığı) üzerinde alınmaktadır [5,44]. Birçok metal ve alaşımları  $(0.6 - 0.8) T_m$  arasında difüzyon kaynağı yapılabilir [1,5,10,31,63,]. Bunun yanında  $(0.5 - 0.9) T_m$  gibi geniş bir çalışma aralığında birleştirmeler yapan araştırmacılar bulunmaktadır [3,6,]. Son günlerdeki çalışmalardan, kristal yapıya sahip olsun olmasın, birçok metal için bağlantı sıcaklığının  $(0.2-0.4)T_m$  'ye kadar düşürülebileceği sonucuna varılmaktadır [54].

Bir katının ısınmasının en önemli sonucu malzeme içindeki atomların hareket kabiliyetini arttırmasıdır. Bu öz difüzyon ve hetero difüzyonun her ikisi için de geçerlidir. Sıcaklıktaki küçük bir artışla uzun zaman artabilen difüzyon mekanizması ile fiziksel ve kimyasal değişme hızları artar. Sıcaklıktaki ani bir artış, birbirine yaklaşmayı sağlayan temas yüzeylerinde tek bölgelerde olduğu gibi yeniden dağılımı hızlandırır, bağlantı bölgesindeki çeşitli kafes kusurlarının yer değişimini iletir, difüzyon hızını yükseltir ve malzemede deformasyon artışına neden olabilir. Bu, meydana gelen herhangi bir bağlantıda düşük deformasyon hızı ve düşük sıcaklıklarda deneysel olarak bulunur. Diğer bir deyişle, sıcaklıktaki aşırı artış, benzer metaller birleştirildiğinde tane büyümesine veya farklı metaller birleştirildiğinde intermetalik tabakanın şekillenmesine etki eder. Her iki faktör difüzyon bağlantılı birleştirmenin kalitesini bozar [54]. Şekil 4.4 'de  $\alpha$  demirinde sıcaklık artışının difüzyon katsayısı üzerindeki etkisi gösterilmektedir [6].



Endüstriyel çalışmalar için dakikada 50 °C 'lik ısıtma hızı uygun görülmüştür. Çelikler için ısıtma periyodu 20 dakika verilebilir [2]. Farklı metallerin kaynağında lineer ısıl genleşme katsayılarına bağlı kalmak üzere dakikada 15 °C 'lik maksimum bir hız önerilmektedir [6,54].



Şekil 4.4  $\alpha$  demirinde sıcaklığa bağlı olarak difüzyon katsayısının değişimi

#### 4.4.2 Basınçın Etkisi

Basınç, difüzyon kaynağı için önemli bir değişkendir. Basınçla malzemedeki difüzyon oranı kontrol edilir. Metal ve alaşımların kaynağında basınç işlemi çeşitli yönlerden etkiler [5,54]. Uygulanan basınç ilk olarak, kırılğan oksit filmi yüzeyini ve kirleri parçalar ve yok eder. İkinci olarak, temas yüzeylerinin birbirine kapanmasına bu suretle artan temas ve atomik etkileşimine neden olur. Üçüncü olarak, sonraki kütle işlemlerini (difüzyon, rekristalizasyon) harekete geçirir. Vakumda veya koruyucu bir ortamda parçalar ısınmayla oksitlenmezler ve metalin akmasında belirgin bir artma gösteren deformasyona gerek yoktur. Deformasyona sadece temas yüzeylerindeki pürüzlülükleri ezme için ihtiyaç vardır. Yani, basma yükünün amacı temas yüzeyleri arasındaki maksimum temas alanını sağlayan mikroplastik deformasyonu sağlamak ve iç difüzyonu kolaylaştırmaktır.

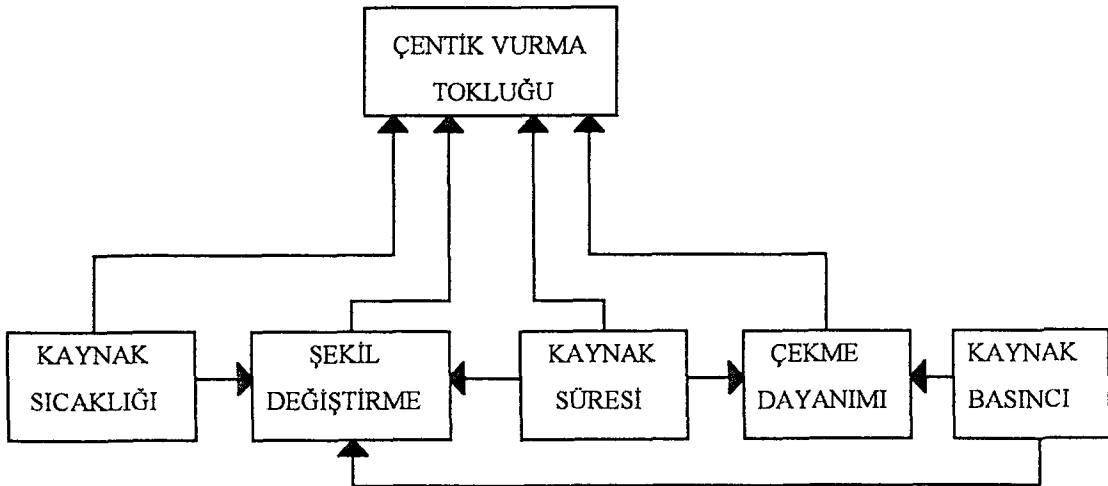
İyi bir kaynaklama için ihtiyaç duyulan basınç, sıcaklık ve zamanla yakından ilgilidir. Kullanılan basınç genellikle kaynaklama sıcaklığında malzemenin akma gerilmesini geçmez [2,5]. Yapılan araştırmalarda 0.007 - 4000 MPa arasında değişen basınçlarda başarılı denemeler yapılmakla birlikte pratikte başarılı sonuçlar 15 - 300 MPa arasında alınmaktadır [6]. Bartle'e göre ise 7 - 21 MPa arasındaki basınçlar yeterli olmaktadır [2]. Farklı metaller birleştirildiğinde, bağlantı basıncının seçimi iki malzemenin en dayanıksızına göre belirlenir [54].



#### 4.4.3 Bağlama ve Soğutma Zamanının Etkisi

Kontrollü difüzyon reaksiyonlarında zamanın büyük önemi vardır. Difüzyon süresi ile ilgili bağıntılarda, difüzyon reaksiyonlarının zamanın karekökü ile ilerlediği gösterilmiştir [5]. Zamanın daha önceden de belirtildiği gibi sıcaklıkla yakın bağıntısı vardır. Örneğin, çelik ve alüminyumun birleştirilmesi için sıcaklığın 50 °C artmasıyla bağlama süresinin 30 dakikadan 10 dakikaya kısaltıldığı gösterilmiştir [1]. Pratikte, zaman saniyeden saate kadar geniş bir alanda değişebilir. Üretim faktörleri pratik zamanı etkiler. Sistem termal, mekaniksel veya hidrostatik ataletle sahip olduğunda değişkenlerin ani değişmelerinin elverişsizliği nedeniyle kaynaklama süresi uzundur. Atalet problemleri olmadığında kaynak süresi 0.3 dakika gibi kısa olabilir. Difüzyona yardımcı olan zirkonyum ile kolombiyum'un kendi kendine bağlanmasında olduğu gibi kaynaklama süresi 4 saatlik uzun bir süre olabilir [5,6].

Sürenin uzun olmasının ekonomik açıdan dezavantajı vardır. Ayrıca uzun sürelerin boşlukların oluşumuna, bileşimin değişimine ve metaller arası kırılabilir bileşiklerin oluşumuna yol açtığı durumlar da vardır. Yapılan çalışmalarda kaynaklama yapıldıktan sonra vakum veya koruyucu gaz odasında kademeli soğutmanın, difüzyon bağlantılı kaynaklamaların dayanımını ve yumuşaklığını arttırdığı görülmüştür [54]. Düşük karbonlu, düşük alaşımlı ve paslanmaz çeliklerin difüzyon kaynağında yapılan deneysel çalışmalar kaynak sıcaklığı, basıncı ve bu basınçta tutma zamanı arasında Şekil 4.5'te gösterilen ilişkinin varlığını ortaya koymuştur [6,54].



Şekil 4.5 Difüzyon kaynağı parametrelerinin mekanik özelliklerle ilişkisi





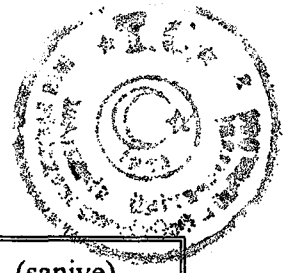
#### 4.4.4 Yüzey Koşulları

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 dahildir. 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 uniform bir temas temin edilmesi için gerek duyulur [5]. Düzgünlük (dalgalılık) makro geometri, pürüzlülük ise mikro geometri olarak sınıflandırılabilir [54]. Temiz, ideal bir durumda, dalgalanma eğrisi ve pürüzlülük frekans eğrisinin herbiri çizilerek profilin mikroprofil veya makroprofil olduğuna karar verilebilir.

Pürüzlülük, pürüzler arasındaki mesafe, pürüz yüksekliği ve pürüz şekli ile genellikle değişebilir. Uygulanan işleme şekline göre pürüzlülük dereceleri de değişiktir. Örneğin, taşlama ile ayrılan pürüzlerin yüksekliği 40 -120  $\mu\text{m}$ , tornalama ve planyalama ile 20-40  $\mu\text{m}$ , parlatma ile 0.3  $\mu\text{m}$ 'dir [54]. Metal yüzeyler arasında bağ oluşumu için yüzeydeki metal atomlarının birbirine birkaç atom mesafesi kadar yaklaşması gerekmektedir. Halbuki endüstrideki üretim imkanları ile ancak 0.2-0.4  $\mu\text{m}$  CLA\* kalitesinde bir yüzey elde edilebilmektedir. Bu da pürüzler arasında yaklaşık 10000 Å 'luk bir aralık kalmasına neden olmaktadır [2]. Yüzeyler arasında birleşmenin olabilmesi için bu mesafe oldukça fazladır. Normal oksit filmleri 10 Å ile 1000 Å kalınlığındadır. Kirli yüzeylerin gerçek teması görünen temas alanının çok küçük bir yüzdesi kadardır.

Gerçekte, yüzeydeki yabancı madde tabakalarının kaynaktaki olumsuz etkisi sadece fiziksel bir engelin oluşturulması değildir. Atomlar arasındaki çekim kuvvetleri şöyle bir etkileşim içindedir : Yüzeydeki atomlar elektronlarını diğer atomlarla paylaşmak isterler. Halbuki yüzeyler kirli olduğunda bu yüzey kirleri metalin atomlarıyla elektronları paylaşarak doymuş hale gelirler. Böylece yüzeydeki çekim kuvvetleri (yüzey enerjileri) azalmış olur. Yarım atom tabakalık bir oksijen kalınlığının dahi adhezyon kuvvetini büyük oranda düşürdüğü gösterilmiştir [6]. Altın haricinde bütün metallerin oda sıcaklığında yüzeyleri bir oksit filmiyle kaplıdır. Çeliklerde görülen oksit tabakaları 0.04 - 0.05  $\mu\text{m}$  kalınlıktadır [54]. Demir ve zirkonyum yüzey kirlerini çözme özelliğine sahiptir. Çeşitli metallerde belirli bir film kalınlığının oluşması için geçen süreler Çizelge 4.2 'de gösterilmiştir [6,54].

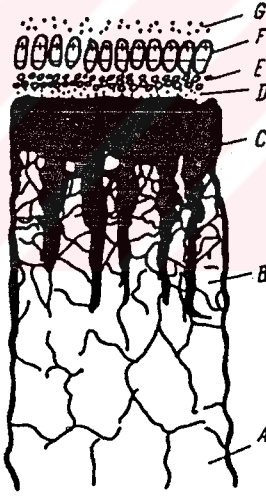
\* Center Line Anerage: ANSI B46.1' de aritmetik ortalamaya eşdeğer olduğu belirtilmiştir.



Çizelge 4.2 Metallerde oksit filmi oluşum süreleri [6,54]

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

Bir metal yüzeyinde, özenli bir çalışma ile hazırlanmış olsa da, çeşitli yabancı maddeler bulunmaktadır. Bu maddelerin yüzey tabakalarındaki bulunuşları Şekil 4.6 da şematik olarak gösterilmiştir. A bölgesi plastik deformasyonun görülmediği ana metali temsil etmektedir. B, oksit tabakalarıyla birlikte bulunan, tamamen yönlenmemiş kristallerden oluşan bölgeyi, C ise oksit tabakasını göstermektedir. D, oksijen iyonlarının adsorbe edildiği tabaka, E su molekülleri tabakası, F yağ molekülleri ve G iyonlaşmış toz parçacıklarıdır [54].



Şekil 4.6 Metal bir yüzeyin tabakalarının şematik kesiti

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

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



edilen yağ giderme teknikleri karışıktır ve çeşitli çözücülerde kademeli olarak oksitlenmiş yüzeyleri temizleyip suda durulama işlemlerini kapsar. Bu temizleyicilerin bazıları oksitlenmiş olduğundan kullanıldıklarında emniyet için tedbirler alınmalıdır [5]. 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 kaldırılabılır. 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 [5].

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

#### 4.4.5 Atmosfer

Temiz yüzeyin korunması genellikle yüzey hazırlamayı takip eder. Bunu sağlamak için difüzyon kaynağı işlemleri esnasında koruyucu atmosfer kullanımı etkilidir. Vakumlu bir ortam kirlilikten korunmanın devamını sağlar [2,4,54]. Saf hidrojen atmosferi, oksit miktarını minimuma indirir ve yüksek sıcaklıkta bir çok metalin mevcut yüzey oksitlerini azaltır. Bununla birlikte hidrojen atmosferi tantalyum, kolombiyum ve zirkonyumla birleşerek zararlı etki oluşturabilir. 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 [5].

Vakum sırasında parçanın kaynaklanacak yüzeyi oksitlenmeden korunduğu gibi yüzeydeki maddelerin temizlenmesini de sağlamaktadır [2,3]. Sıcak metal vakumda tutulduğunda gaz çıkışı olur. Difüzyon esnasında numune yüzeylerine doğru metalin büyük kısmında gazların transferi ilerler ve gaz çıkışı devam eder. Metalden çıkan gaz miktarı, çözülmüş olan gaz miktarına, sonraki işlemdeki metalin 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. 45 Çeliğini vakumda 10 dakika tutma, dayanımını % 10-15 değerinde arttırmaktadır [3].



Çözünmüş 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 [2,12,13].

#### 4.5 Avantaj ve Dezavantajları

Difüzyon kaynağının uygulamasında belli sayıda sınırlaması olduğu gibi bilinen diğer kaynak işlemlerine göre daha fazla sayıda avantajlara sahiptir. Difüzyon kaynağının avantajları aşağıda belirtildiği gibidir [5,44]:

1. Difüzyon kaynağı malzemelerde yüksek bağlantı kalitesi sağlamaktadır. Ana metalin mikroyapı ve özelliklerine çok benzer bağlantılar sağlanabilir. Ek yerinin mukavemeti ana metalin mukavemetine yaklaşmaktadır .
2. Bileşenleri daha sonra işlemeye veya şekil vermeye gerek kalmaz, parça ölçüleri nettir. Çok düşük deformasyonla büyük alan birleştirmeli üretimler yapılabilir.
3. Ergime işlemleri ile veya eksenel simetriye ihtiyaç duyulan işlemlerle kaynaklanma kabiliyeti olmayan farklı metaller bu yöntemle birleştirilebilir. Örneğin, seramiklerle metallerin kaynağı bir ara malzeme kullanılarak yapılabilir.
4. Bir montajdaki çok sayıda bağlantı aynı zamanda yapılabilir ve çok kompleks geometrili parçalar bir işlemle birleştirilebilir.
5. Sınırlı girişli bileşenlerin bağlantıları difüzyon kaynağı ile birleştirilebilir.
6. Ergime 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 da kullanılabilmesini sağlar.



7. Ergime kaynağı ile yapılan birleştirmelerde görülen kusurlarla karşılaşılma sıcak plastik değiştirmeyle kazanılmış anizotropik özellikler (lifli yapı, uzamış kalınlık) kaynak ile bozulmaz.

8. Birleştirilen parçalar ağırlık kazanmaz. Özellikle hafif olması gereken balpeteği ve sandviç panellerde önemlidir.

Difüzyon kaynağı uygulamalarında görülen bazı sınırlamalar da aşığıdaki gibidir [1,2,4,5,]:

1. Genellikle termal periyot süresi bilinen kaynak işlemlerinden daha uzundur.
2. Uygulama sıcaklığıyla aynı zamanda ihtiyaç duyulan ve sınırlayıcı bir vakum ortamının veya koruyucu atmosferin oluşturulması ve yüksek sıkıştırma kuvveti difüzyon kaynağında başlıca ekipman problemidir. Ücretleri genellikle yüksektir. Bu, parçaların büyüklüğü sınırlanarak ekonomiklik sağlanabilir.
3. Kaliteli bir güven için uygun tahribatsız muayene yöntemleri mevcut değildir. Fakat kaynak kalitesinin yüksekliği nedeniyle güvenilirlik gerektiren birçok yerde kullanılmaktadır.
4. Birleştirilmiş yüzeylerin ve temas kısımlarının donanımını hazırlamak genellikle bilinen sıcak basınç kaynağından daha fazla dikkat gerektirir. Bağlantı temizliğinin üniform olması ve düzlemsellik, difüzyon kaynağının kalite kontrolünde önemli faktörlerdir.
5. Uygun dolgu metalleri ve işlemler bütün alaşım yapıları için henüz geliştirilmemiştir.

#### 4.6 Uygulamalar

Difüzyon kaynağının kullanıldığı birçok alan vardır. Bunların en yaygın uygulamaları yüksek dayanımlı kaynaklara ihtiyaç duyulan karmaşık ve pahalı malzemelerin kullanıldığı havacılık sanayii, mermi ve roketler, elektronik, nükleer ve uzay teknolojisidir [4,6,45,64]. Uzay ve havacılık endüstrisindeki uygulama örnekleri olarak F 104 uçağının gövde halkası, H 53 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 motorunun içi boş fan göbeği, TF 30-P100 jet motorunun ateşleme odası sayılabilir [4,64]. B1 bombardıman uçağı için de birçok parça difüzyon



kaynağı ile üretilmiştir. Kritik kanadı oluşturan bölüm, dengeleyici destek çerçevesi, diğer çeşitli kompleks 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. SNAP-10A reaktöründeki NaK akışkanının pompalanması için dizayn edilen termoelektrik pompa üretimi de değişik bir uygulamadır [64].

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 şekilde difüzyon kaynağı uygulanmıştır [4,64].

Bu yöntem, avantajları sayesinde süper alaşım içinde bulunması gereken özel çökelti fazları, kaynak sonrasında dağılımlarını koruyabildiklerinden tercih edilir [3,6,]. Süper alaşımların türbin kanat malzemelerinin difüzyon kaynağı uygulanan tipleri Udimet 700, In 718, Reni 41, Reni 80,-Reni 95 ve MA 6000 'dir [19,36,43].

Özellikle Rusya'da difüzyonla kaynak, pahalı olan büyük skalalı ve büyük kütleli üretimlerde kullanılmaktadır. Yüksek hızlı makinalarda, traktörlerde, arabalarda ve uçaklarda basınç plakaları ve fren pabuçları için seramiğin çeliğe, dökme demirin çeliğe bağlanması birer örnektir. Yöntem sert metaller 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 [1].

Bütün bu özel uygulamaların yanında birçok farklı alaşım veya metal ve metal olmayan malzemeler difüzyon ile birbirlerine bağlanırlar. Özellikle stellite-paslanmaz çelik, alüminyum-paslanmaz çelik, karbon çeliği-paslanmaz çelik, bakır-paslanmaz çelik, alüminyum-bakır, dökme demir-çelik, grafit-çelik, metal-cam, metal-seramik, metal-plastik, alüminyum-çelik, platin-titanyum, bor/alüminyum kompoziti-titanyum, Cu/Zn alaşımı-titanyum, bakır-çelik, altın-alüminyum, titanyum-paslanmaz çelik, sert



metal-çelik, titanyum-çelik ilginç kombinasyonlardır [1,34,46,48,63]. Bugüne kadar 475 malzeme çifti difüzyon kaynağı ile birleştirilmiştir [6,10,65]. Kazakov'un hesaplamaları, sadece frenler için dökme demir-çelik ve seramik- çelik parçaların difüzyon kaynağının bir yılda 28 milyon dolar'lık kaybı önlediğini göstermiştir [1].

#### 4.7 Difüzyon Kaynaklı Bağlantıların Test Yöntemleri

Difüzyon kaynağı bağlantısının özelliğini tespit etmek için tahribatlı ya da tahribatsız çeşitli testler yapılabilir. Bu testlerin en çok kullanılanı metalografi, elektron mikroskobu, spektral analiz, X ışınları mikro analizi, X ışını saptırıcıları ile ölçüm, mikro sertlik ölçümü, düşük ve yüksek sıcaklıklarda mekanik özellikleri belirleme, yorulma ve sürünme için testler, korozyon direnci v.b. dir [54]. Kullanılan tekniklerin hepsi istenen özelliklere karar vermeye uygun olmalıdır. Difüzyon bağlantılı bölgenin tam değerlendirilebilmesi için çeşitli teknikler aynı zamanda kullanılabilir.

Difüzyon kaynaklı birleştirmelerin değerlendirilmesinde mekaniksel testler önemli rol oynar. Standart malzeme testlerinden çekme, kesme ve bükme testleri kullanılabilir [44,54]. Kullanım yerine göre çentik darbe, yorulma ve kırılma tokluğu [71] testleri de uygulanabilir. Ayrıca dizayn amaçlarına göre yorulma çatlak büyümesi, vurma ve ağırlık kaybı, pitting ve gerilme korozyonu gibi korozyon testleri de vardır [44].

Difüzyon kaynağı bağlantısının kalitesini tespit etmek pratik tahribatsız muayene yöntemleriyle zordur. Çünkü difüzyon kaynağı için önem taşıyan yapısal hataların boyutları çok küçüktür [5]. Ultrasonik muayene ise iç muayeneler için en faydalı uygulamadır. Fakat ultrasonik muayene, bağlantı ile onun yakın teması arasını ayırt etmeyebilir. Bu durumda en kullanışlı metot metalografik incelemedir [5]. Metalografik analiz fazların ve bileşenlerin sayısını, büyüklüğünü, şeklini, bağlı pozisyonlarını ve izafi miktarlarını ortaya çıkarır [54]. Ses dalgalarının daha yüksek frekansta kullanıldığı yeni bir yöntem olan akustik mikroskop ile oldukça iyi sonuçlar alınmaktadır [6,29,72]. Derby ve grubu, Kapranos ve Priestner difüzyon kaynaklı birleştirmelerin tahribatsız muayenelerle incelenmesi konusunda birçok araştırmalar yapmışlardır [45].



## 5. ARAŞTIRMANIN AMACI VE KAPSAMI

Bu çalışmanın yapılmasındaki amacı iyi vurgulayabilmek için difüzyon kaynağını uygulayacağımız alüminyum ve bakırın önemli özelliklerini kısaca irdelemek faydalı olacaktır.

### 5.1 Alüminyum

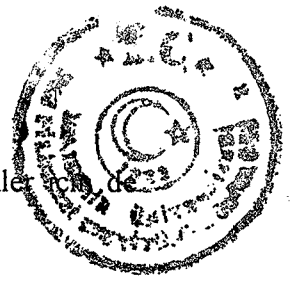
Alüminyum ve alaşımları günümüzde yaşamımızın ayrılmaz bir parçası haline gelmiş malzemelerdendir. Hafifliği, iyi ısı iletkenliği ve elektrik iletkenliğinin yoğunluğa oranının yüksek oluşu ve korozyona karşı dayanıklılığı nedeniyle (Çizelge 5.1), gıda ve kimya endüstrisi, otomotiv ve gemi endüstrisi, makina ve cihaz yapımı, mimari ve inşaat alanında geniş çapta kullanılmaktadır.

Çizelge 5.1 Alüminyumun fiziksel ve mekanik özellikleri [77,53]

Yoğunluk	$g / cm^3$	2.70
Elektrik direnci	$(\Omega mm^2 / m) \times 10^2$	2.66
Isı iletkenliği	$cal / cm^2 / cm^{\circ}C s$	0.52
Isıl genleşme katsayısı	$(mm / mm^{\circ}C) \times 10^{-6}$	24.0
Erime sıcaklığı	$^{\circ}C$	660
Çekme dayanımı	$N / mm^2$	91.5
Uzama	%	40
Sertlik	BHN	19

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

## 5.2 Bakır

Bakır da alüminyum gibi korozyona karşı dayanıklılığı, iyi elektrik ve ısı iletkenliği nedeniyle özellikle kimya, gıda endüstrisinde ve elektroteknik alanında geniş bir kullanıma sahiptir. Ayrıca gayet iyi plastik şekillenebilme ve uzama kabiliyetine de sahiptir. Çizelge 5.2 'den de görüldüğü gibi bakırın kaynak kabiliyetini etkileyecek fiziksel parametreler burada da mevcuttur.

Çizelge 5.2 Bakırın fiziksel ve mekanik özellikleri [77,53]

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

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

Al-Cu 'nun difüzyonla birleştirilmesinde asıl güçlük alüminyumun yüzeyindeki oksit tabakasını ( $Al_2 O_3$ ) uzaklaştırmadaki zorlukta ve bağlantı bölgesindeki oksit inklüzyonların ve gevrek intermetalik katmanların oluşmasında yatmaktadır. Al-Cu kaynağının mukavemetine geçiş bölgesinin durumuyla karar verilir. Çünkü kaynak bölgesi faz kompozisyonuna, iç yapıya ve difüzyon kalınlığına bağlı olarak değişir. Aynı zamanda, zamana ve sıcaklığa göre de değişir.



Yüksek sıcaklıklarda Al ve Cu çeşitli gevrek inter metalik bileşikler oluşturur. 350 °C de  $Al_2Cu$ , 350 °C 'de ilave bir tabaka olan  $Al_4Cu_9$  oluşur. 400 °C de  $Al_4Cu_9$  ara tabakası  $Al_4Cu_9$  ile  $Al_2Cu$  arasında bir yapıdır. Bu ara katman çok yüksek sertliğe sahiptir. 10  $\mu m$  kalınlığa eriştiği zaman bağlantının mukavemeti keskin bir şekilde azalır [54].

Bu çalışma, erime kaynağı ile birleştirilmesi mümkün olmayan alüminyum ve bakır malzeme çiftinin koruyucu gaz (argon) altında difüzyon kaynağı yöntemi ile optimum birleşme şartlarını belirlemek için yapılmıştır. Yukarıda belirtilen nedenlerden dolayı daha önce bu konudaki çalışmalar vakum altında yapılmıştır [5,54,63]. Amacımız üstün birleşme verimi olan difüzyon kaynağı yöntemi ile bu malzeme çiftinin koruyucu gaz altında en uygun birleşme koşullarını deneysel olarak saptamaktır.

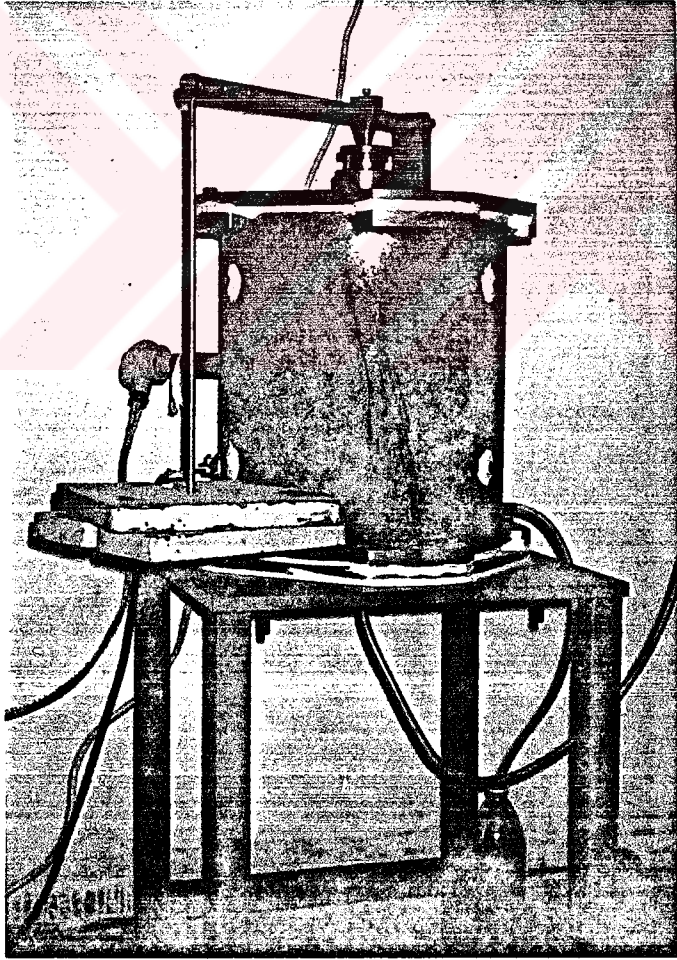
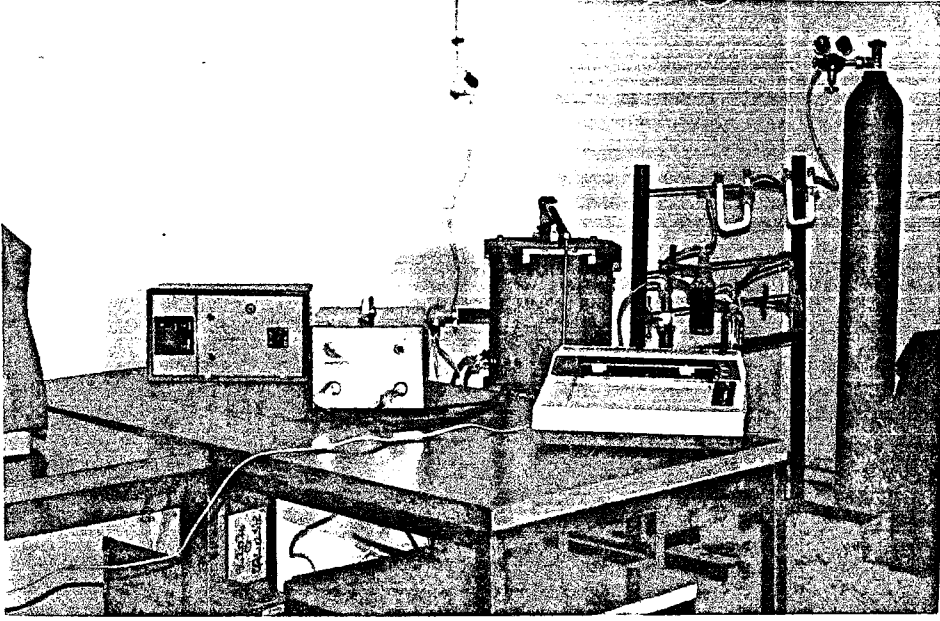


## 6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

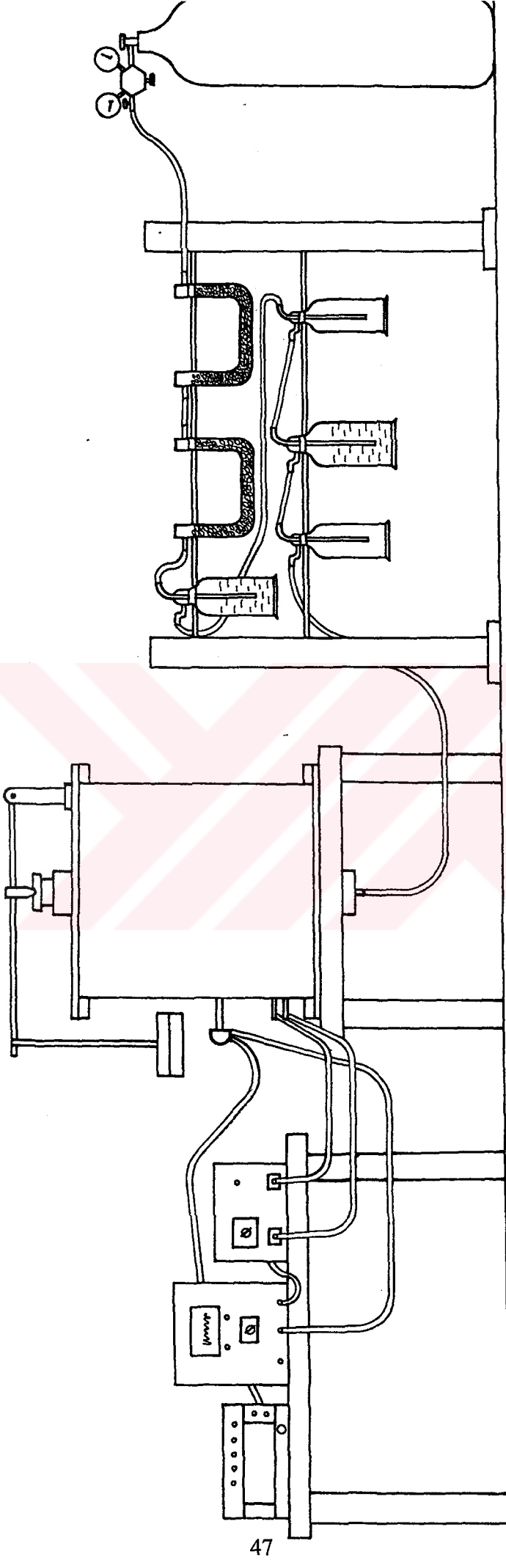
### 6.1 Deney Düzeneginin Kurulması

Deneysel çalışmaların yapılabilmesi için difüzyon kaynağının ana parametreleri olan sıcaklık, basınç ve koruyucu ortamı sağlayabilecek bir difüzyon kaynağı düzenegi tasarlanmış ve imal edilmiştir (Şekil 6.1). Bu sistem, daha sonraki çalışmalarda da kullanılabilmek üzere parametreleri geniş bir aralıkta değiştirmeyi sağlayabilecek şekilde yapılmıştır. Deney düzeneginin şematik resmi Şekil 6.2 'de teknik resmi ise Ek A 'da gösterilmiştir.

Numuneler, yüksek sıcaklığa dayanıklı paslanmaz çelikten yapılmış pistonlara takılarak alın yüzeyleri merkezlenmiş bir şekilde ısıtıcı içine yerleştirilmiştir. Isıtma için Kanthal firmasının Fibrothal RAC 100/200 tipi (2100W, 34V) özel olarak yalıtılmış rezistanslı bir fırın kullanılmıştır (Şekil 6.3). Isıtıcı voltajının ayarlanması için 220V 'yi 34V 'ye çeviren özel bir voltaj ayarlayıcısı imal edilmiştir. Sıcaklık ölçümü, platin %10 rodyum-platin termokupl ile numunelerin dış yüzeylerinden ölçülerek yapılmıştır. Termokupldan alınan sıcaklığın kontrolü ise dijital gösterge ile sağlanmıştır (Şekil 6.4). Ayrıca sıcaklık değişimleri recorder'a (Şekil 6.5) çizdirilerek dönüşüm tablosu ile sıcaklık kalibrasyonu yapılmıştır. Bu kalibrasyon ve sıcaklık kontrolü için, ayarlanarak mV cinsinden belirli büyüklüklerde verilen voltajlar recorder'a çizdirilmiştir (Şekil 6.6). Çizdirilen bu voltajların kaç mm 'ye karşılık geldiği bir grafik üzerine çizilmiştir. Termokupl 'un alındığı firmadan temin edilen sıcaklık - votaj dönüşüm tablosundaki (Çizelge 6.1) değerler ikinci bir eksen olarak aynı grafik üzerine taşınmıştır (Şekil 6.7). Deney esnasında recorder'a çizdirilen sıcaklık değişimlerinin kontrolü, çizilen bu grafiklerin vasıtası ile yapılmıştır. Deney esnasında recorder'a çizdirilen sıcaklık değişim eğrilerinden bir örnek Ek B 'de verilmiştir.



Şekil 6.1 Difüzyon kaynağı deney düzeneğinin genel görünüşü

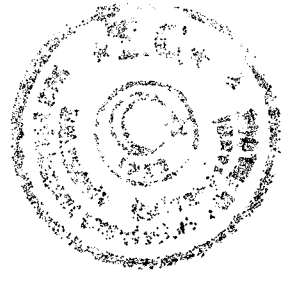


SICAKLIK KONTROLÜ VE GÜC ÜNİTESİ

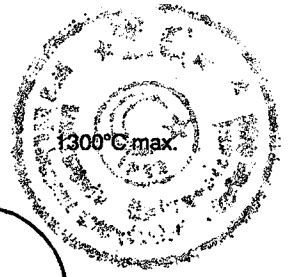
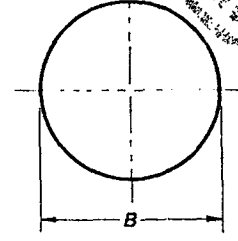
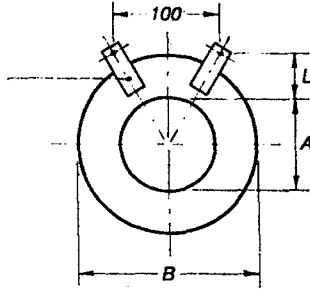
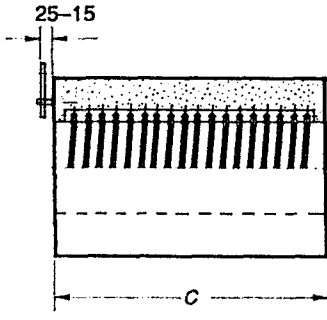
DİFÜZYON KAYNAĞI CİHAZI

GAZ ARITMA ÜNİTESİ

ARGON



Şekil 6.2 Difüzyon kaynağı deney düzenineşinin şematik resmi



### Endpieces AC 200

Type	Inner-Ø A mm	Outer-Ø B mm	Length C mm	Power W	Voltage V	Weight kg	Terminal length L mm	Outer-Ø mm	Thickness mm	Weight kg
RAC 40/200	40	160	220	860	15	1.60				
RAC 40/500	40	160	520	1350	30	3.80	85	160	50	0.20
RAC 70/200	70	240	220	1400	24	2.90				
RAC 70/500	70	240	520	2215	48	6.90	100	240	50	0.45
+ RAC 100/200	100	270	220	2100	34	3.60				
RAC 100/500	100	270	520	2880	64	8.50	100	270	50	0.60
RAC 150/200	150	350	220	2600	44	5.10				
RAC 150/500	150	350	520	4300	95	12.50	140	350	50	1.00
RAC 200/200	200	450	220	3400	57	7.70				
RAC 200/500	200	450	520	5550	123	18.70	140	450	50	1.60

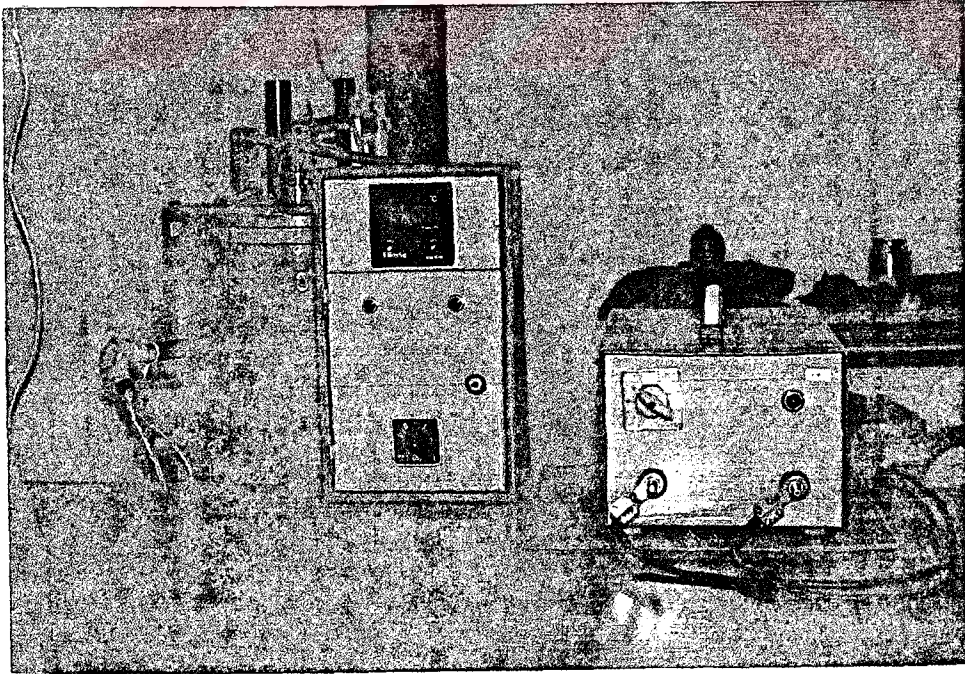
**Remarks:**  
Heating elements uncovered.  
Terminals 20x3 mm.

**Tolerances:**  
Inner-Ø +8 mm -2 mm  
Outer-Ø ±10 mm  
Length +15 mm

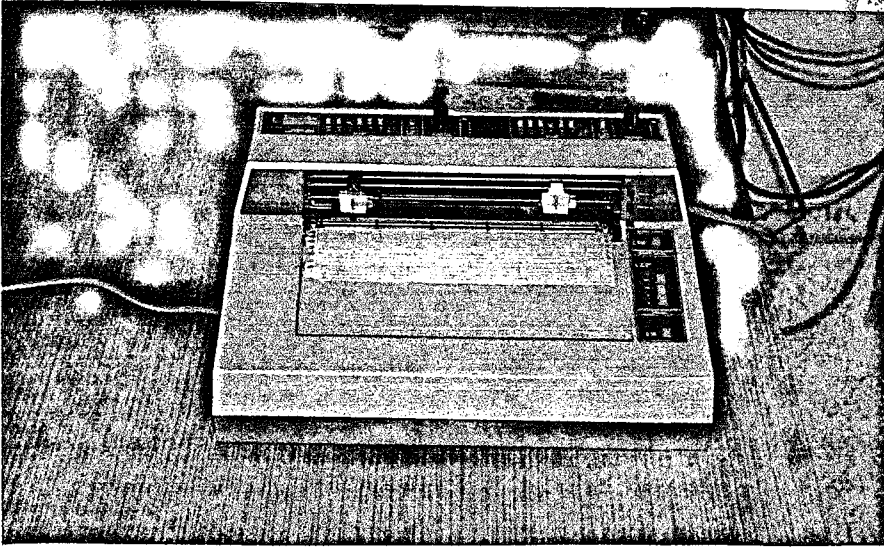
**Remarks:**  
Endpieces without holes,  
but can be supplied drilled.

**Tolerances:**  
Outer-Ø ≤350 mm ±5 mm  
>350 mm - = 450 mm ±10 mm  
Thickness ±3 mm

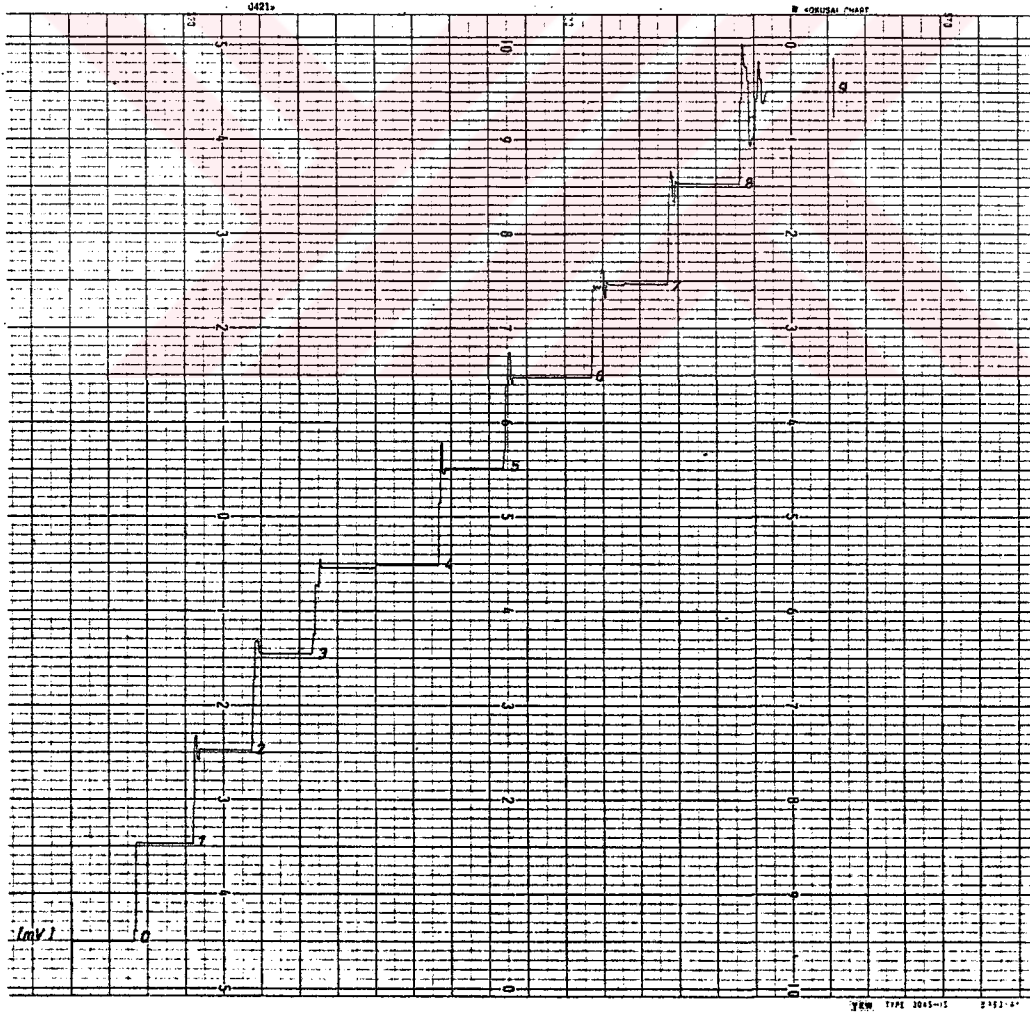
Şekil 6.3 Isıtmada kullanılan rezistanslı ısıtıcının özellikleri



Şekil 6.4 Voltaj ayarlayıcısı ve sıcaklık göstergesi



Şekil 6.5 Recorder



Şekil 6.6 Recorder'a çizdirilen voltaj-mesafe grafiği

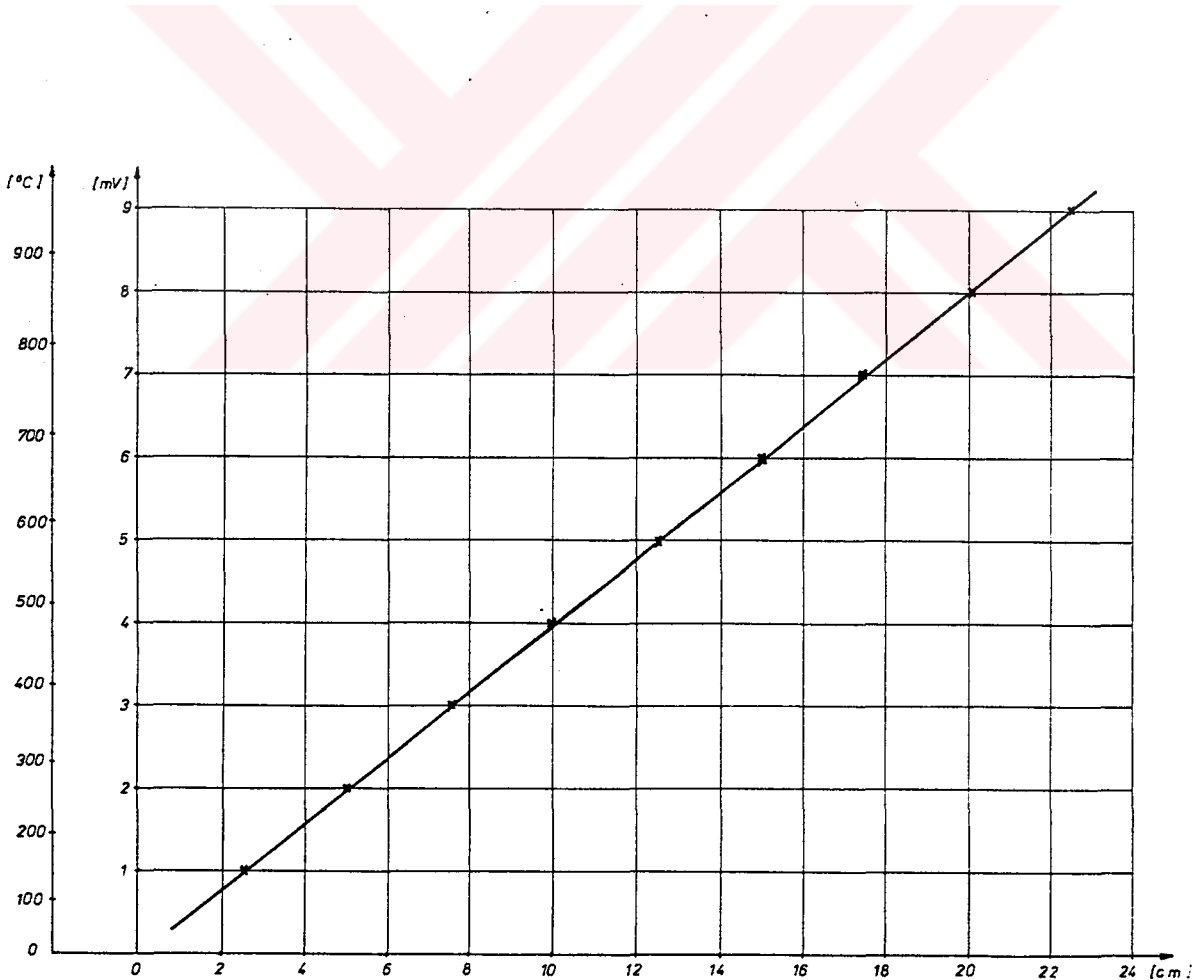


Çizelge 6.1 Kullanılan termokupl'un sıcaklık-voltaj dönüşüm tablosu

S TİPİ PLATİN % 10 RODYUM -PLATİN TERMOKUPL

Pt %10 Rh-Pt

°C	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	°C
0	0.000	0.645	1.440	2.323	3.260	4.234	5.237	6.274	7.345	8.448	9.585	10.754	11.947	13.155	14.368	15.576	16.771	17.942	0
10	0.055	0.719	1.525	2.414	3.356	4.333	5.339	6.380	7.454	8.560	9.700	10.872	12.067	13.276	14.489	15.697	16.890	18.056	10
20	0.0113	0.795	1.611	2.506	3.452	4.432	5.442	6.486	7.563	8.673	9.816	10.991	12.188	13.397	14.610	15.817	17.008	18.170	20
30	0.173	0.872	1.698	2.599	3.549	4.532	5.544	6.592	7.672	8.786	9.932	11.110	12.308	13.519	14.731	15.937	17.125	18.282	30
40	0.235	0.950	1.785	2.692	3.645	4.632	5.643	6.599	7.782	8.899	10.048	11.229	12.429	13.640	14.852	16.057	17.243	18.394	40
50	0.299	1.029	1.873	2.786	3.743	4.732	5.751	6.805	7.882	9.012	10.165	11.348	12.550	13.761	14.973	16.176	17.360	18.504	50
60	0.365	1.109	1.962	2.880	3.840	4.832	5.855	6.913	8.003	9.126	10.282	11.467	12.671	13.883	15.094	16.296	17.477	18.612	60
70	0.432	1.190	2.051	2.974	3.938	4.933	5.960	7.020	8.114	9.240	10.400	11.587	12.792	14.004	15.205	16.415	17.594		70
80	0.502	1.273	2.141	3.069	4.036	5.034	6.064	7.128	8.225	9.355	10.517	11.707	12.913	14.125	15.336	16.534	17.711		80
90	0.573	1.356	2.232	3.164	4.135	5.166	6.169	7.236	8.336	9.470	10.635	11.827	13.034	14.247	15.456	16.653	17.825		90
100	0.645	1.440	2.323	3.260	4.234	5.237	6.274	7.345	8.448	9.585	10.754	11.947	13.155	14.368	15.576	16.771	17.942		100

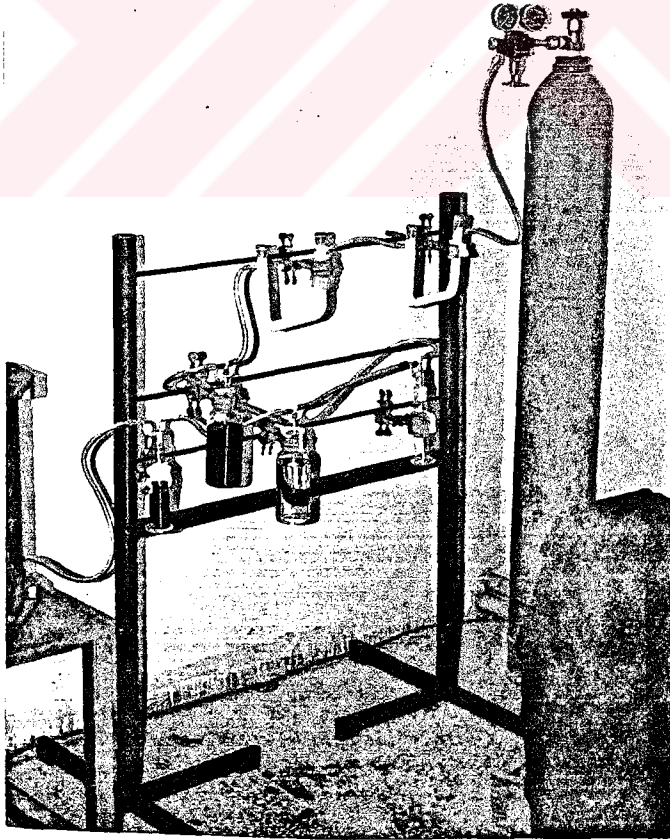


Şekil 6.7 Mesafe-Sıcaklık, mesafe-voltaj grafiği





Birleştirilecek parçalara uygulanan basınç mekanik bir kol vasıtasıyla sağlanmıştır. Kolun uç kısmına asılan yükün ve diğer parçaların numuneler üzerine yaptığı baskı kuvveti hesaplanarak kaynaklama basıncı bulunmuştur. Koruyucu ortam olarak literatürlerde belirtilen vakum kullanılmasının aksine argon gazı kullanılmıştır. Argon gazı % 99.99 saflıkta olmasına rağmen Şekil 6.8 'de gösterilen nem ve oksijen tutucu maddelerden geçirilerek deney düzeneğinin alt kısmından kaynak bölgesine gönderilmiştir. Nem alıcı olarak NaOH, CaCl<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> SO<sub>4</sub> kullanılmıştır. Bu kurutucular tarafından 1 l havada bırakılan su buharı miktarı CaCl<sub>2</sub> için (1.25-1.5) mg, NaOH için 0.8 mg ve H<sub>2</sub> SO<sub>4</sub> için 0.3 mg 'dir. Oksijen tutucu olarak kullanılan pirogallol ise %30 'luk pirogallik asit ve %60 'lık KOH çözeltisinin 2:7 oranında karıştırılması ile hazırlanmıştır. Karışım 100 ml havadaki oksijenin tümünü, havayı 6-7 kez geçirmekle tamamen absorplayabilmektedir. 20 °C ve bunun üstündeki sıcaklıklarda %25 'ten fazlası oksijen olan bir karışımdaki oksijenin tamamını absorplayabilmektedir [80]. Koruyucu ortamın devamlılığı için cihazın bağlantı yerleri, termokupl ve gaz giriş yerleri sızdırmaz yapılmıştır.



Şekil 6.8 Argon gazı arıtma ünitesi

## 6.2 Deneylerde Kullanılan Malzemeler ve Deney Numunelerinin Hazırlanması



Birleştirme şartlarını belirlemek için yapılan deneylerde kullanılmak üzere 16 mm çapında alüminyum ve bakır çubuklar piyasadan satın alınarak temin edilmiştir. Deney malzemelerinin kimyasal analiz sonucunda bakır malzemenin saflığının tam olduğu, alüminyum malzemede ise % 0.62 Si, % 0.20 Mg ve geri kalan % 99.18 Al olduğu saptanmıştır. Teknik açıdan alüminyum malzeme de saf olarak kabul edilebilmektedir.

Deneyler sonucunda elde edilen parçaların mekanik özelliklerini karşılaştırabilmek amacıyla alüminyum ve bakır malzemelerin kaynaksız, yekpare durumdaki dayanımlarını belirlemek için çekme deneyleri yapılmıştır. Yekpare parçalar, kaynak sırasında etkiyen şartlara tabi tutulmuşlardır. Buradaki sıcaklık, süre ve basınç kaynaklı parçaların deneylerinin değerlendirilmesinde en iyi sonucu sağlayanlar ile aynı seçilmiştir. TS 138 'e [81] göre yapılan kaynaksız parçaların çekme deneyi sonuçları Çizelge 6.2 'de verilmiştir.

Çizelge 6.2 Kaynaklanmamış malzemelerin kopma dayanımları

Malzeme	Kopma dayanımı, MPa		% Uzama
Alüminyum	1	102.40	29.80
	2	98.20	30.78
	3	99.60	29.72
Bakır	1	216.40	37.16
	2	219.40	36.20
	3	218.50	36.66

Malzemelerin sertlik değerleri, Carlzeiss Jena mikro sertlik ölçüm cihazı ile vickers cinsinden ölçüldü. Ölçümlerde 40 g 'lik yük kullanıldı. Ölçümler sonucunda alüminyum ve bakır malzemelerin sertlik değerleri Çizelge 6.3 'te gösterildiği gibi bulunmuştur.



Çizelge 6.3 Malzemelerin sertlik değerleri

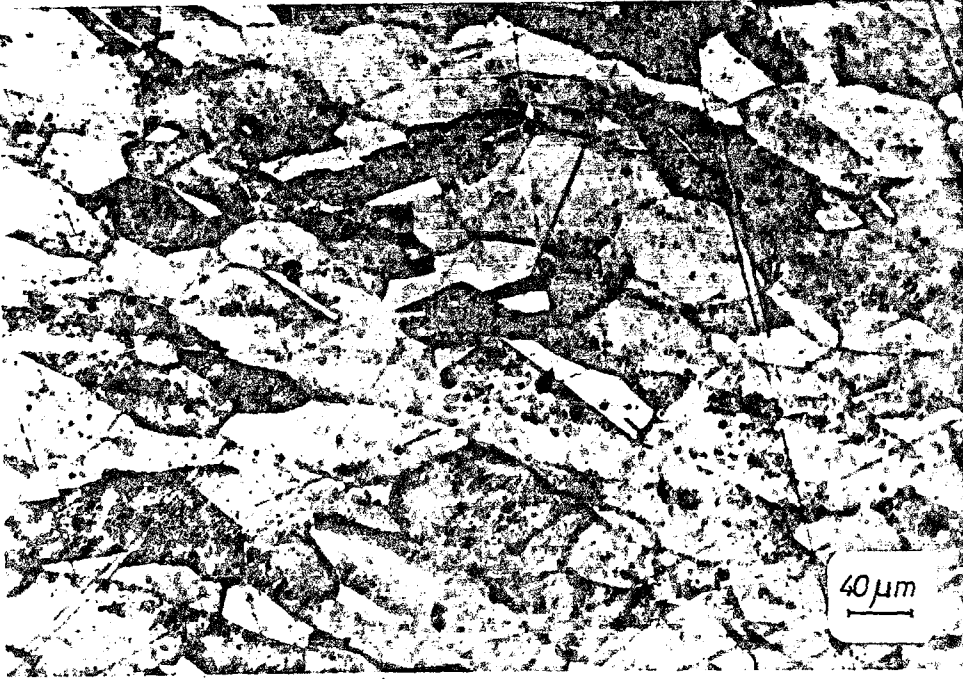
Malzeme	Sertlik, HV	
	1	2
Alüminyum	1	62.57
	2	55.69
	3	55.69
Bakır	1	105.82
	2	107.44
	3	107.44

Deney malzemelerinin kaynak öncesi mikro yapılarını belirlemek amacıyla da metalografik incelemeleri yapılmıştır. Deney parçalarının boyuna kesitlerinden alınan numuneler zımparalama ve parlatma işleminden sonra uygun ayıraçlarla dağlanarak mikroskopta fotoğrafları çekilmiştir. Alüminyum numune için Keller dağlama çözeltisi, bakır numune için bakır amonyum klorür-amonyum hidroksit çözeltisi kullanılmıştır [77,82]. Kaynaklanmamış bakır ve alüminyum malzemelerin mikro yapıları Şekil 6.9 ve Şekil 6.10 'da verilmiştir.

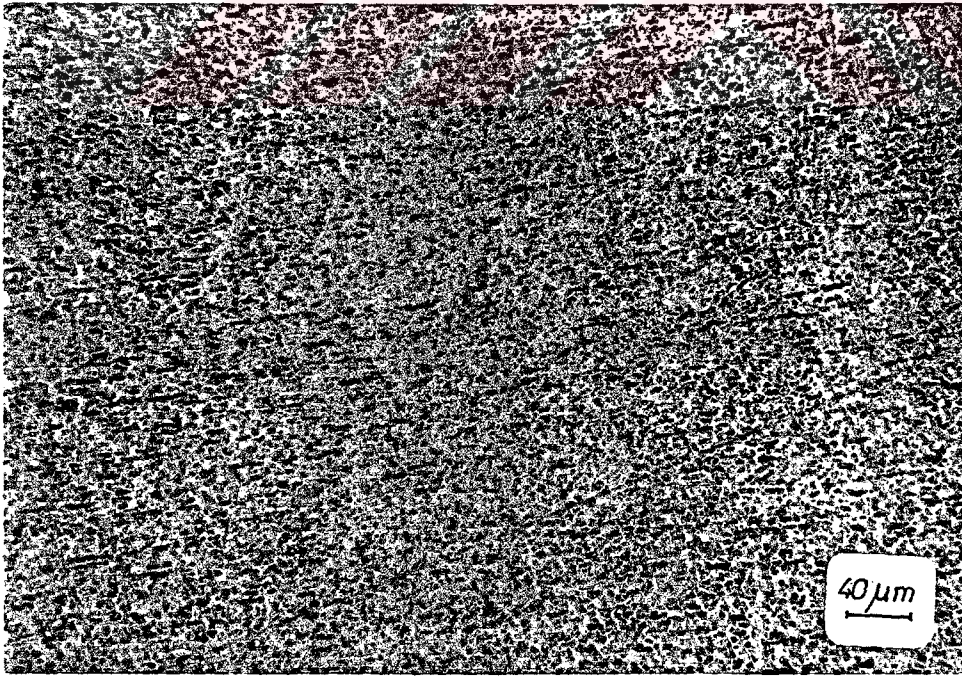
Keller dağlama çözeltisi    2 ml HF  
    3 ml HCl  
    5 ml HNO<sub>3</sub>  
    190 ml H<sub>2</sub> O

Bakır amonyumklorür-  
amonyum hidroksit        : Bakır amonyumklorürün sudaki % 10 'luk çözeltisi  
    nötr hale gelinceye kadar NH<sub>4</sub> OH katımı

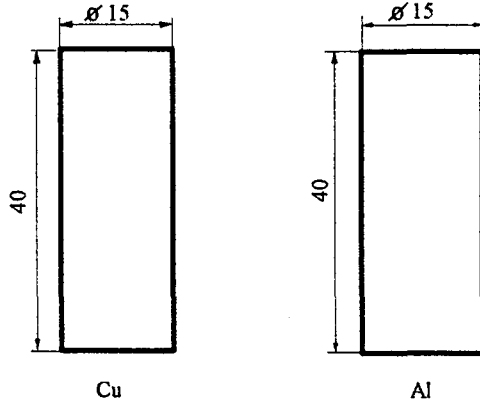
Deney numuneleri daha önce yapılan çalışmaların incelenmesi sonucunda ve daha sonra uygulanacak mekanik deneylerin yapılmasına olanak sağlayacak şekilde tasarlanmış ve Şekil 6.11 'de gösterilen ölçülerde tornada işlenerek hazırlanmıştır. İşlenen numunelerin birleştirilecek olan alın yüzeylerine kademeli olarak 280, 320, 400, 600, 800, 1000 grit silisyum karbür zımpara ile zımparalama yapılmıştır. Son zımparalama işlemi 1200 grit silisyum karbür zımpara ile yapılmış ve asetonla silinerek bir kurutma makinesi ile kurutulmuştur. Son zımparalama işleminden sonra Mituyoto Surfrest cihazı ile ölçülen yüzey pürüzlülüğü alüminyum için R<sub>a</sub> =0.90 µm, bakır için R<sub>a</sub> =1.0 - 1.20 µm olarak bulunmuştur. Kurutulan numuneler hemen bakır numune alt kısma, alüminyum numune üst kısma ve zımparalama çizgileri birbirine dik gelecek şekilde difüzyon kaynağı cihazının içine yerleştirilmişlerdir.



Şekil 6.7 Bakırın mikro yapısı -



Şekil 6.8 Alüminyumun mikro yapısı

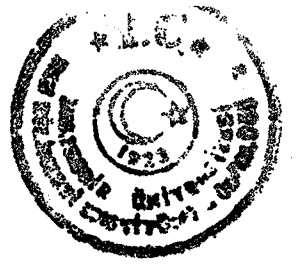


Şekil 6.11 Deney numunelerinin ölçüleri

### 6.3 Deneylerin Yapılışı

Alüminyum ve bakır malzemelerin difüzyon kaynağı için kaynaklama sıcaklığı, basıncı ve basınçta tutma süreleri esas parametreler olarak seçilmiştir. Bu parametrelerin başlangıç değerlerinin seçimi önceki araştırmalara [1,5,54,63] ve laboratuvarında kurduğumuz difüzyon kaynağı deney düzeneğinde yapılan ön çalışmalar sonucunda olmuştur. Kaynak sıcaklıkları 550, 560, 570 °C, kaynak basınçları 4.5 ve 6.6 MPa ve kaynaklama süreleri 30, 60, 120 dakika olarak seçilmiştir. Ön çalışmalar esnasında 540 °C 'de de çalışmalar yapılmış, belirli bir kaynaklanma olduğu halde numunelerin işlenmesi esnasında kaynak yerinden ayrıldığı için sonraki inceleme programına alınmamıştır. Yine yüksek basınç ve uzun süreli çalışmalarda alüminyum malzemede yüksek deformasyon olduğu için, çok düşük basınç ve kısa süreli çalışmalarda yeterli kaynaklanma olmadığı için inceleme programına alınmamışlardır.

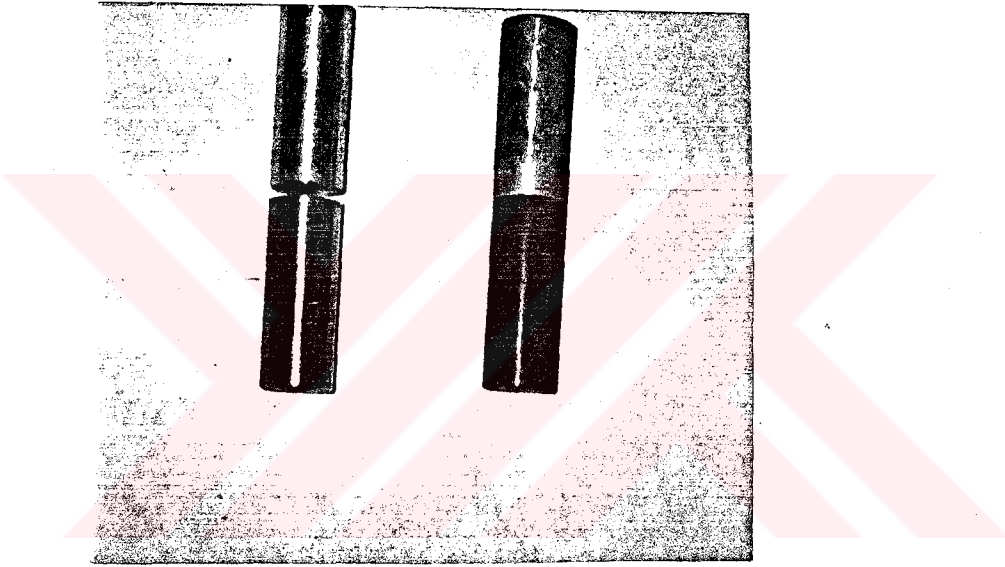
Hazırlanıp, temizlenen numuneler deney düzeneğine yerleştirilmiş, hemen ısıtmaya başlanmış ve argon gazı gönderilmiştir. Argon gazının kontrolü tüp üzerindeki manometreden yapılmıştır. Sıcaklığın deney sıcaklığına ulaşması yaklaşık 30 dakika sürmüştür. Deney sıcaklığına ulaşıldığında basınç uygulanmış ve basınçta tutma süresinin sonunda basınç alınmış, numuneler serbest olarak 200 °C 'ye soğuyuncaya kadar tutulmuş daha sonra fırından çıkarılmıştır.



## 6.4 İnceleme ve Testler

### 6.4.1 Makroskobik İncelemeler

Kaynak sonrasında parçada gözle yapılan değerlendirmede, boyutların bilinen diğer yöntemlere göre oldukça düzgün olduğu görülmüştür. 570 °C sıcaklıkta yapılan deneylerde alüminyum parçada, birleşme yüzeyine yakın kısımda deformasyon, bir miktar akma olmuştur. Parçaların dış yüzeylerinde ise alüminyumda hafif kararma, matlaşma, bakırda ise çok ince bir tufal tabakası görülmüştür. Deney numunelerinin kaynaklanma öncesi ve kaynak sonrası görünüşleri Şekil 6.12 'de verilmiştir.



Şekil 6.12 Deney numunelerinin kaynaklanma öncesi ve sonrası görünüşleri

### 6.4.2 Çekme Deneyi

Kaynaklanmış parçaların dayanımlarını belirlemek için çekme deneyi yapılmıştır. TS 138 ' e [81] göre, birleştirme yeri numunenin orta kısmına gelecek şekilde çekme deneyi numuneleri çekme test cihazında çekilmiştir. Deney sonuçları Çizelge 6.4 'de verilmektedir.



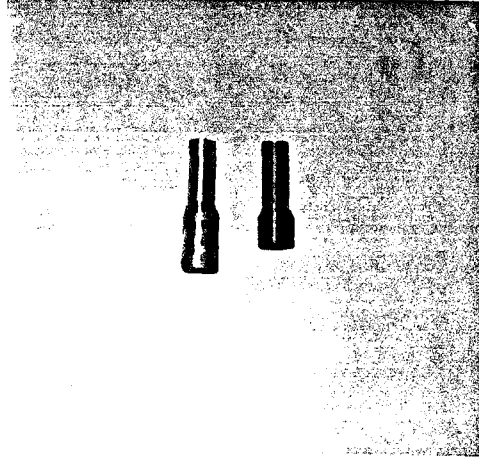
Çizelge 6.4 Difüzyon kaynaklı (Cu-Al) deney numunelerinin kopma dayanımı

Deney no	Kaynak şartları					Kopma dayanımı, $R_m$ (MPa)
	Kaynak sıcaklığı, T (°C)	Kaynak basıncı, P (MPa)	Kaynak süresi, t (dak)	Kaynak atmosferi	Zımpara no	
1	550	6.6	30	Argon	1200	33.62
2	550	"	"	"	"	35.30
3	550	"	"	"	1200	38.22
4	"	6.6	60	"	"	58.70
5	"	"	"	"	"	60.20
6	"	"	"	"	"	57.50
7	"	4.5	60	"	"	26.65
8	"	"	"	"	"	29.55
9	"	"	"	"	"	28.24
10	"	4.5	120	"	"	43.60
11	"	"	"	"	"	45.32
12	"	"	"	"	"	43.95
13	560	6.6	30	"	"	47.17
14	560	"	"	"	"	46.38
15	560	"	"	"	"	49.53
16	"	4.5	30	"	"	35.19
17	"	"	"	"	"	36.75
18	"	"	"	"	"	37.18
19	"	4.5	60	"	"	60.45
20	"	"	"	"	"	62.10
21	"	"	"	"	"	59.86
22	570	4.5	30	"	"	24.90
23	570	"	"	"	"	26.23
24	570	"	"	"	"	26.38

Çekme deneyleri sonunda kaynaklı parçalarda kopma, birleşme yerinden 1-2 mm ötesinde alüminyum tarafında meydana gelmiştir. Test parçalarında herhangi bir kesit daralması görülmemekte ve parçalar deney öncesi silindirik formunu aynen korumaktadır. Çekme deneyi sonunda elde edilen test numunelerinden örnek



Şekil 6.13 'de gösterilmiştir. Bütün deneylerde kopma bu karakterdedir. Numunelerin kopma yüzeylerinin Carlzeiss Jena stereo mikroskopta çekilmiş fotoğrafları Şekil 6.14 ve Şekil 6.15 'de verilmiştir.

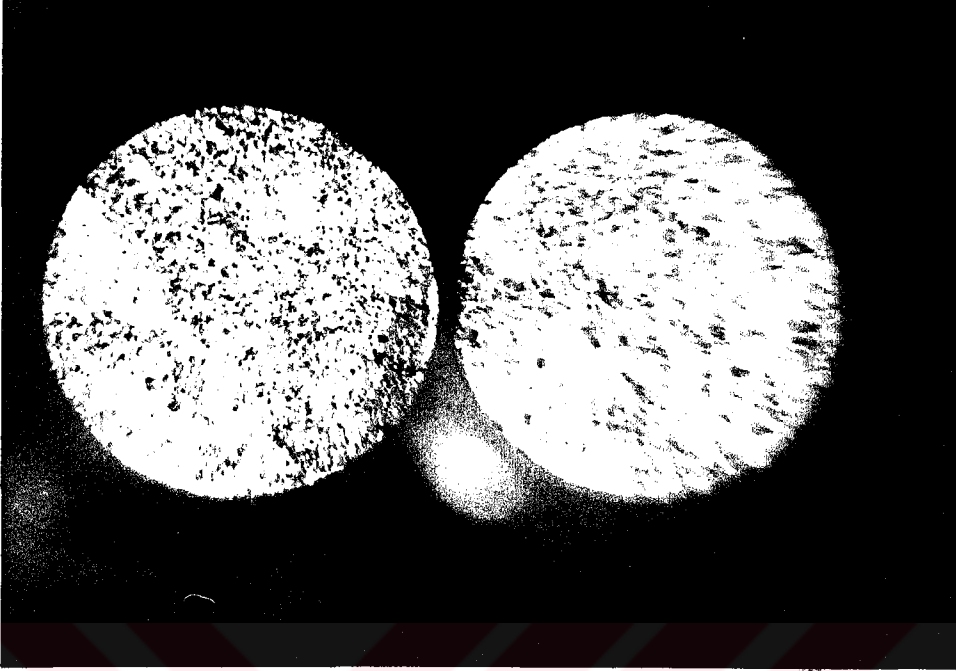


Şekil 6.13 Çekme deney numunesinin kopmadan sonraki görünüşü

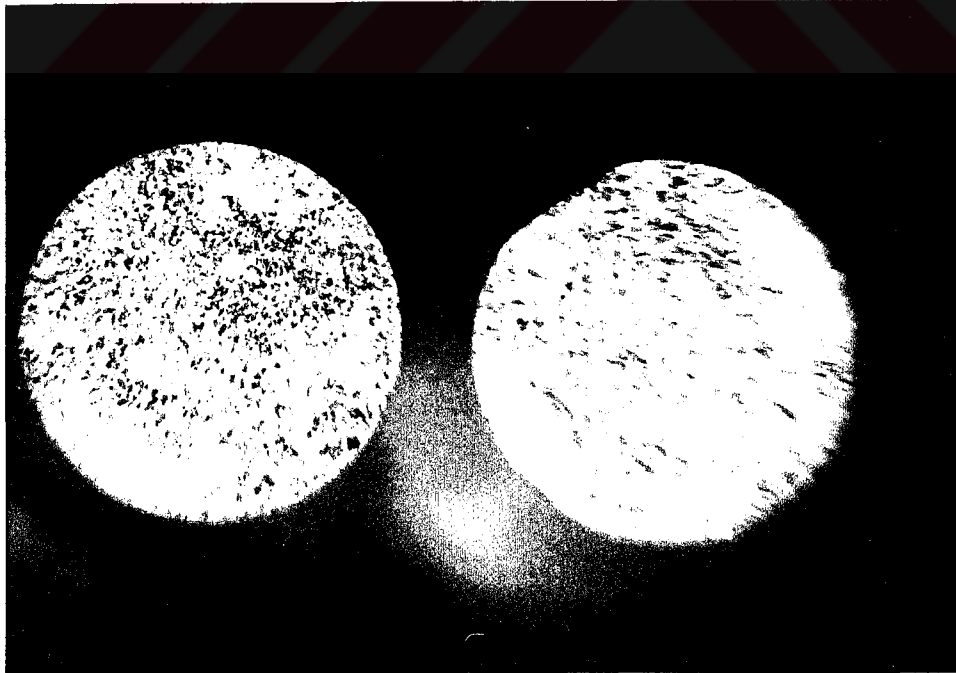
Deney sonuçlarının kaynak parametrelerine göre değerlendirilmesi için grafik üzerine aktarılmıştır. Şekil 6.16 'daki grafiklerde sıcaklık artışının kopma dayanımı üzerindeki etkisi belirlenmiştir. 60 dakikalık kaynaklama süresinde sıcaklığın 550 °C 'den 560 °C 'ye artmasıyla kaynak mukavemetinin arttığı görülmektedir. Bu sürede ya da yüksek basınçta sıcaklığın 570 °C 'ye çıkmasıyla alüminyumda deformasyon olmaktadır. 560 °C 'den 570°C 'ye sıcaklık arttırıldığında daha az sürede bile mukavemette bir düşme gözlenmektedir. 550 °C 'de sürenin 30 dakikadan 60 dakikaya çıkartılmasıyla mukavemette yine bir artış olmaktadır.

Kaynak basıncının birleştirmenin kopma dayanımı üzerindeki etkileri Şekil 6.17 'de görülmektedir. 4.5 MPa basınç uygulanarak yapılan deneylerde kaynaklama süresinin artmasıyla kaynak mukavemetinde artma olduğu görülmektedir. Aynı sürede basıncın 4.5 MPa 'dan 6.6 MPa 'ya artmasıyla da kaynak mukavemetinde artış olmuştur. Sürenin ve sıcaklığın her ikisinin de düşük olduğu durumlarda kaynak mukavemeti de düşmektedir. Yüksek basınçta sıcaklık ve süre arttırıldığında ise 6.6 MPa, 560 °C ve 60 dakikada olduğu gibi alüminyum malzemede deformasyon gözlenmiştir.

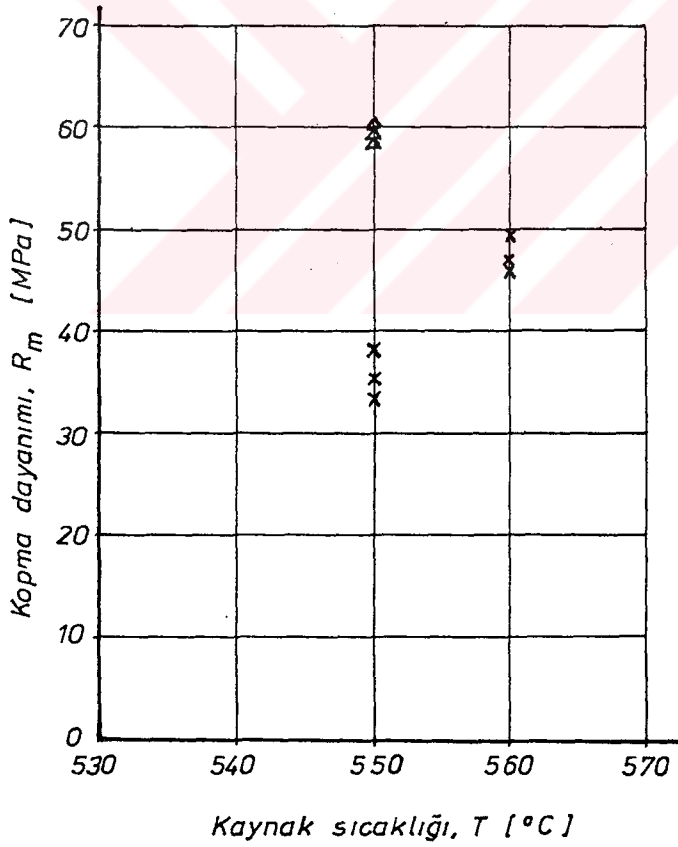
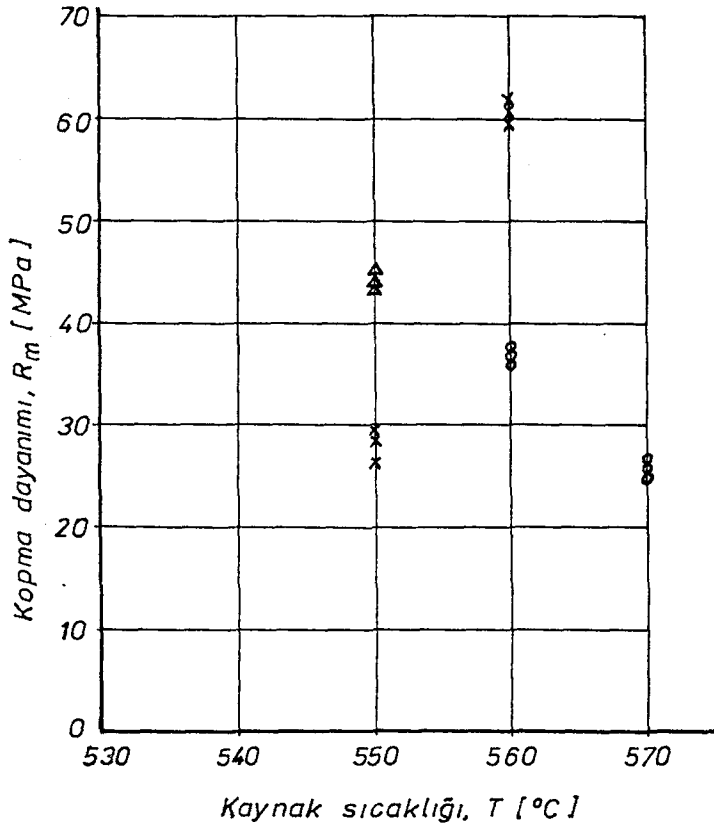
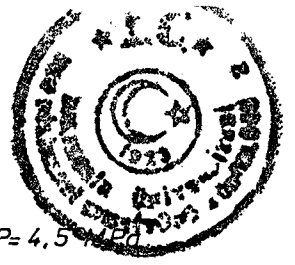




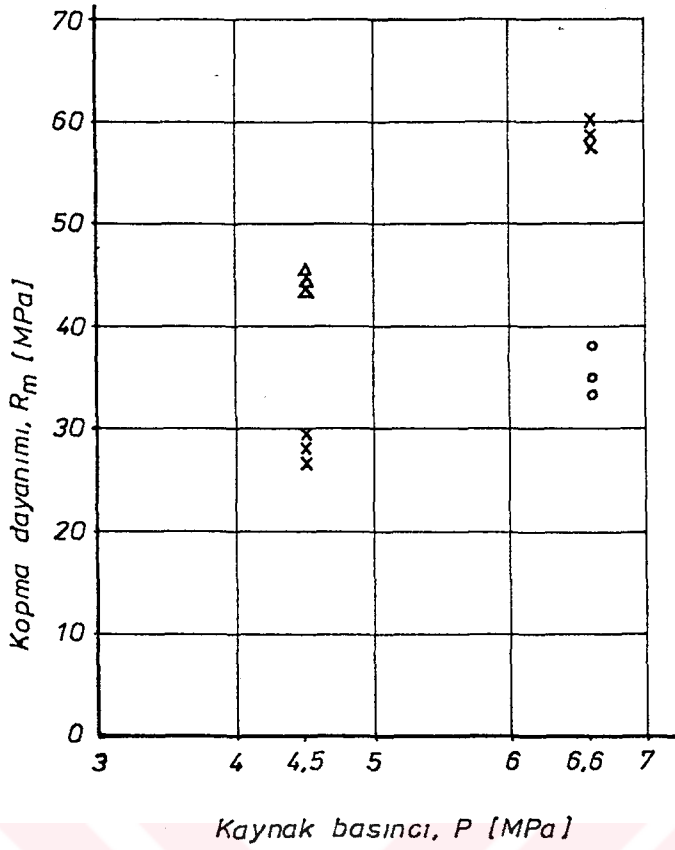
Şekil 6.14 Kırılma yüzeylerinin stereo mikroskopta görünüşü  
Kaynak şartları: T= 550 °C, P= 6.6 MPa, t= 60 dak



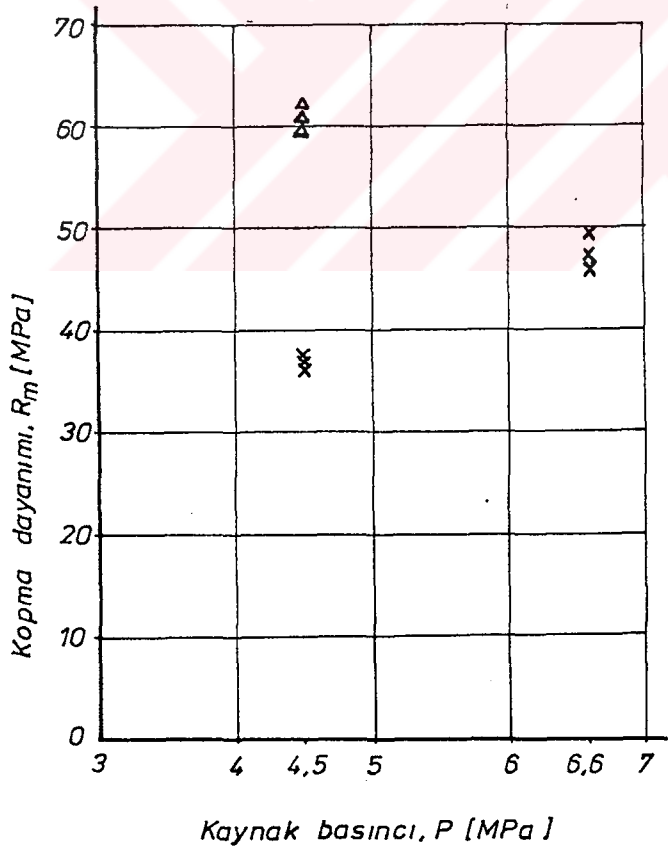
Şekil 6.15 Kırılma yüzeylerinin stereo mikroskopta görünüşü  
Kaynak şartları: T= 560 °C, P= 4.5 MPa, t= 60 dak



Şekil 6.16 Sıcaklık değişiminin kopma dayanımı üzerindeki etkileri

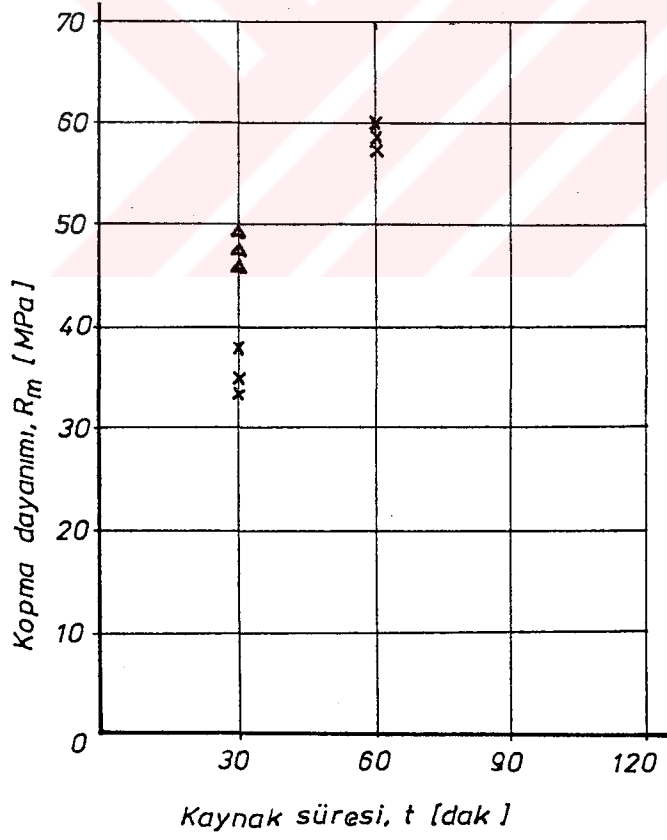
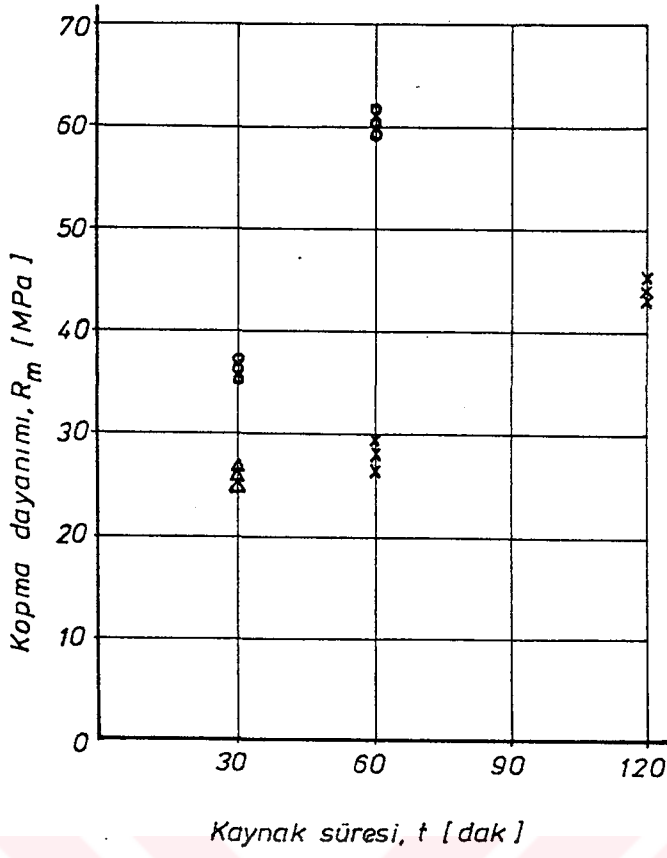


- o  $T = 550\text{ }^{\circ}\text{C}$   
 $t = 30\text{ dak}$
- x  $T = 550\text{ }^{\circ}\text{C}$   
 $t = 60\text{ dak}$
- △  $T = 550\text{ }^{\circ}\text{C}$   
 $t = 120\text{ dak}$



- x  $T = 560\text{ }^{\circ}\text{C}$   
 $t = 30\text{ dak}$
- △  $T = 560\text{ }^{\circ}\text{C}$   
 $t = 60\text{ dak}$

Şekil 6.17 Basınç değişiminin kopma dayanımı üzerindeki etkileri



Şekil 6.18 Sürenin kopma dayanımı üzerindeki etkileri

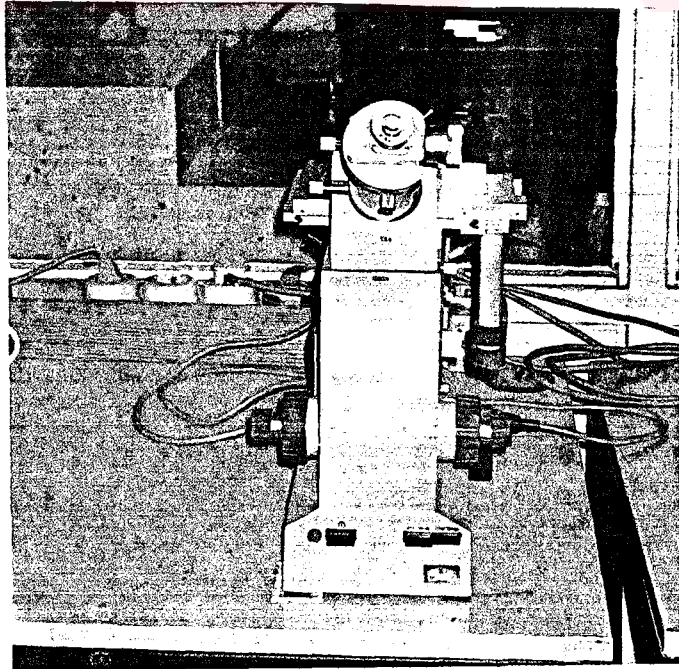


Şekil 6.18 'deki grafiklerde kaynak süresinin kaynak dayanımı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Diğer şartlar sabit tutulup sürenin artırılmasıyla dayanımda artış gözlenmiştir. Aynı sürede sıcaklığın 560 °C 'den 570 °C 'ye artmasıyla dayanımda düşüş olmuştur. Yüksek sıcaklık ve basınçta sürenin uzatılması, örneğin 560 °C sıcaklık, 6.6 MPa basınçta 120 dakika tutulması alüminyum parçanın deforme olmasına neden olmaktadır.

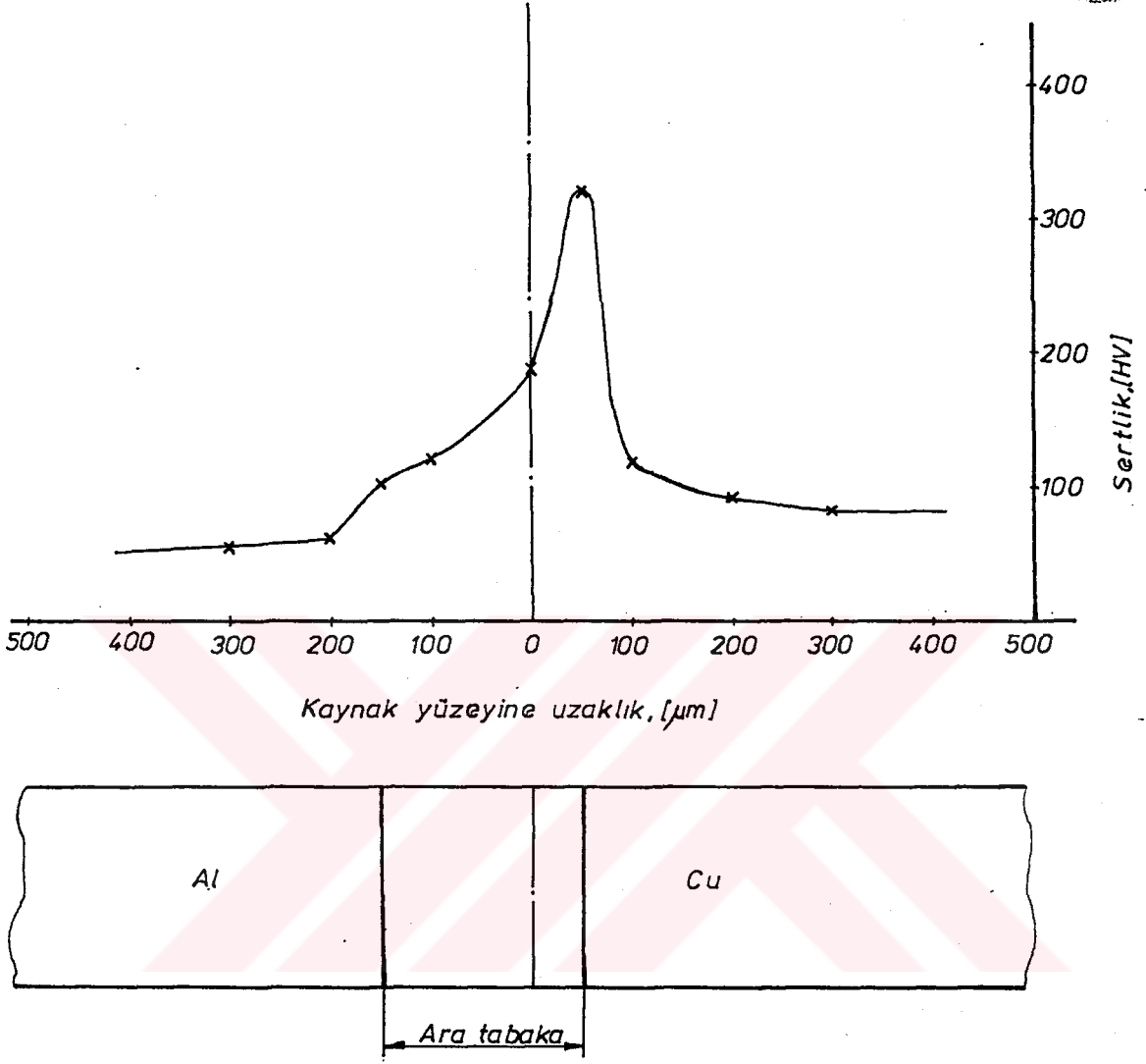
Difüzyon kaynak sıcaklığının, kaynak basıncının ve kaynak süresinin kopma dayanımı üzerindeki etkileri grafikler de göz önünde bulundurularak değerlendirildiğinde 560 °C, 4.5 MPa, 60 dakika şartlarında difüzyon kaynağı yapılmış alüminyum ve bakır numunelerin en iyi sonuçları verdiği anlaşılmaktadır.

### 6.4.3 Mikrosertlik Deneyi

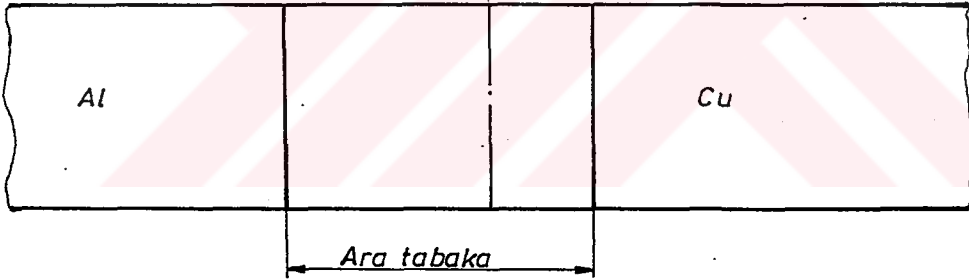
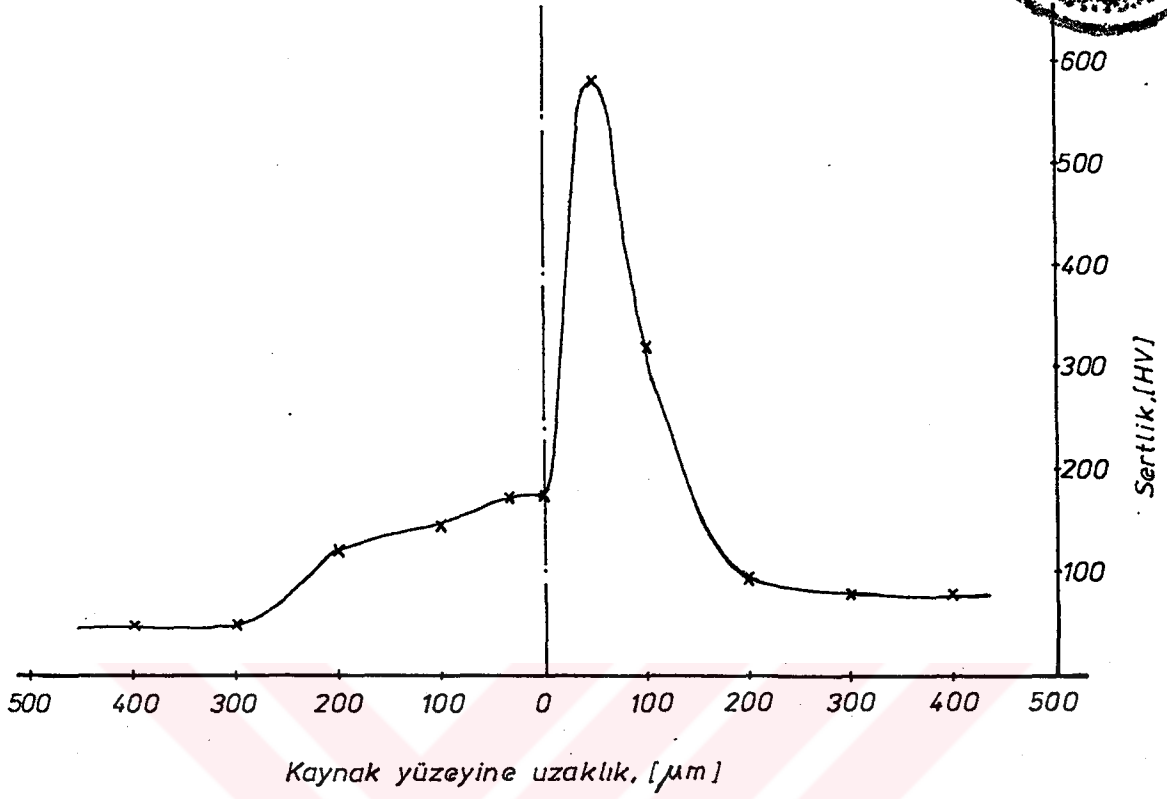
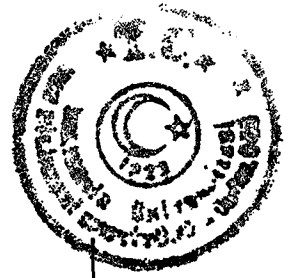
Kaynaklanmış numunelerin birleşme bölgesine dik olarak alınan kesit üzerinde mikrosertlik ölçümleri yapılmıştır. 9 Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalografi Laboratuvarı'nda yapılan deneylerde Carlzeiss Jena mikrosertlik ölçüm cihazı kullanılmıştır (Şekil 6.19). Sertlik ölçümleri esnasında 40 g 'lik yük uygulanmıştır. Değişik deney şartlarındaki numunelerin birleşme bölgesinden ana metallere doğru ölçülen sertlik değişimleri Şekil 6.20, Şekil 6.21, Şekil 6.22 ve Şekil 6.23 'de verilmiştir.



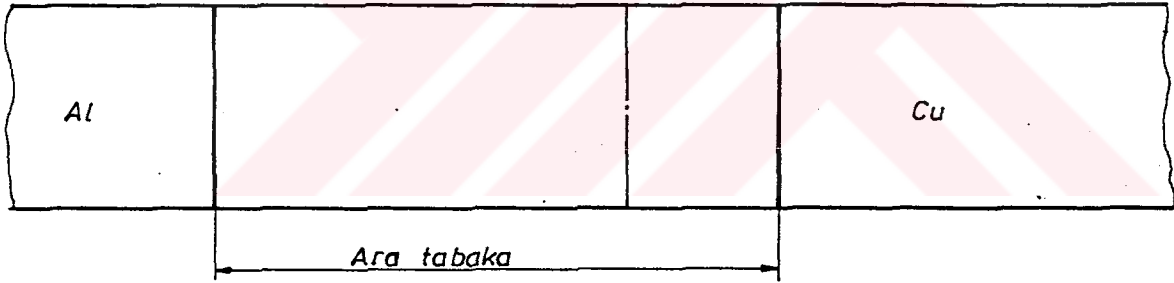
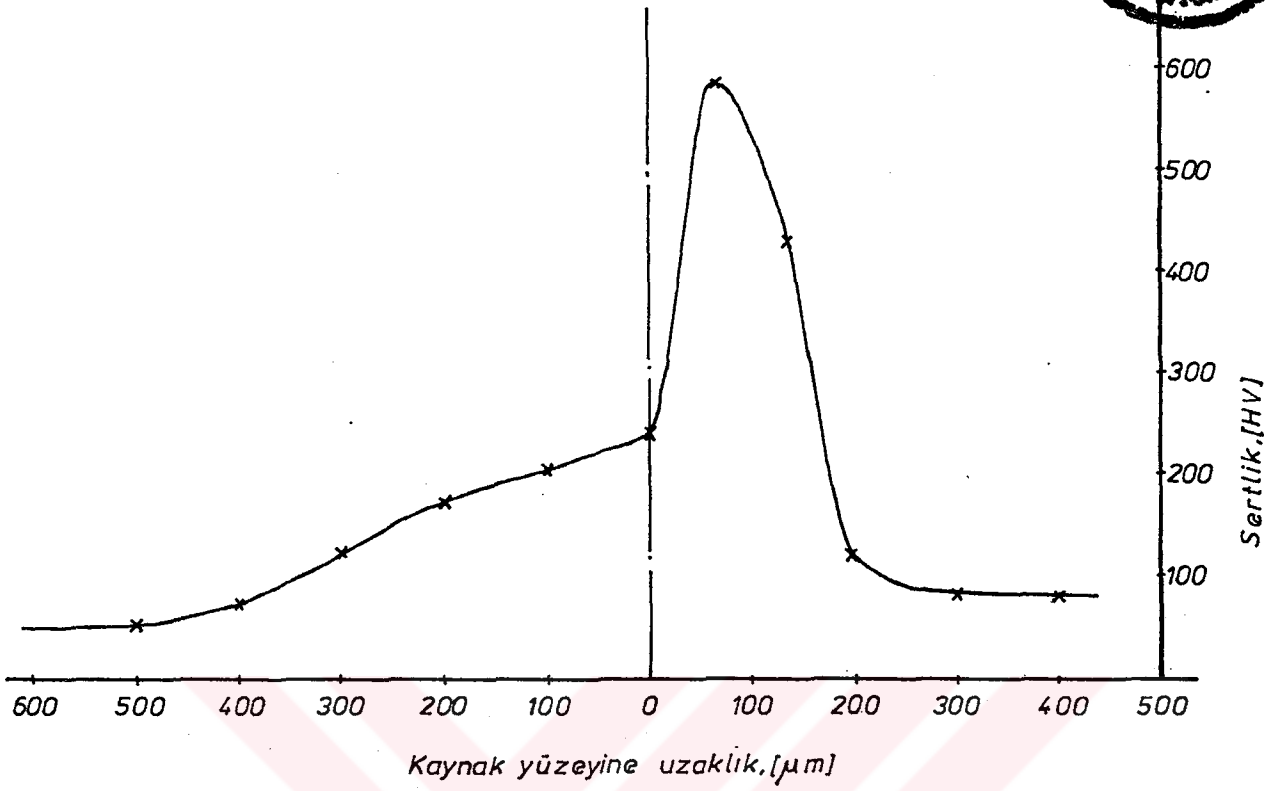
Şekil 6.19 Mikrosertlik ölçüm cihazı



Şekil 6.20  $T= 550\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $P= 4.5\text{ MPa}$ ,  $t= 120\text{ dak}$ , kaynak şartlarında birleşme bölgesindeki mikrosertlik değişimi

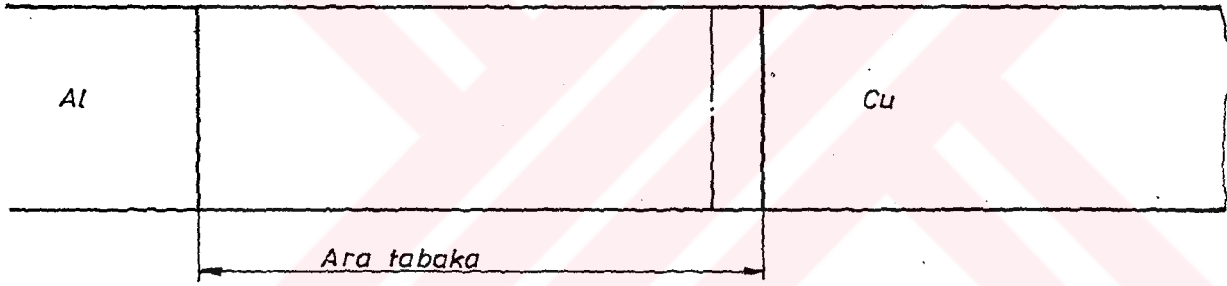
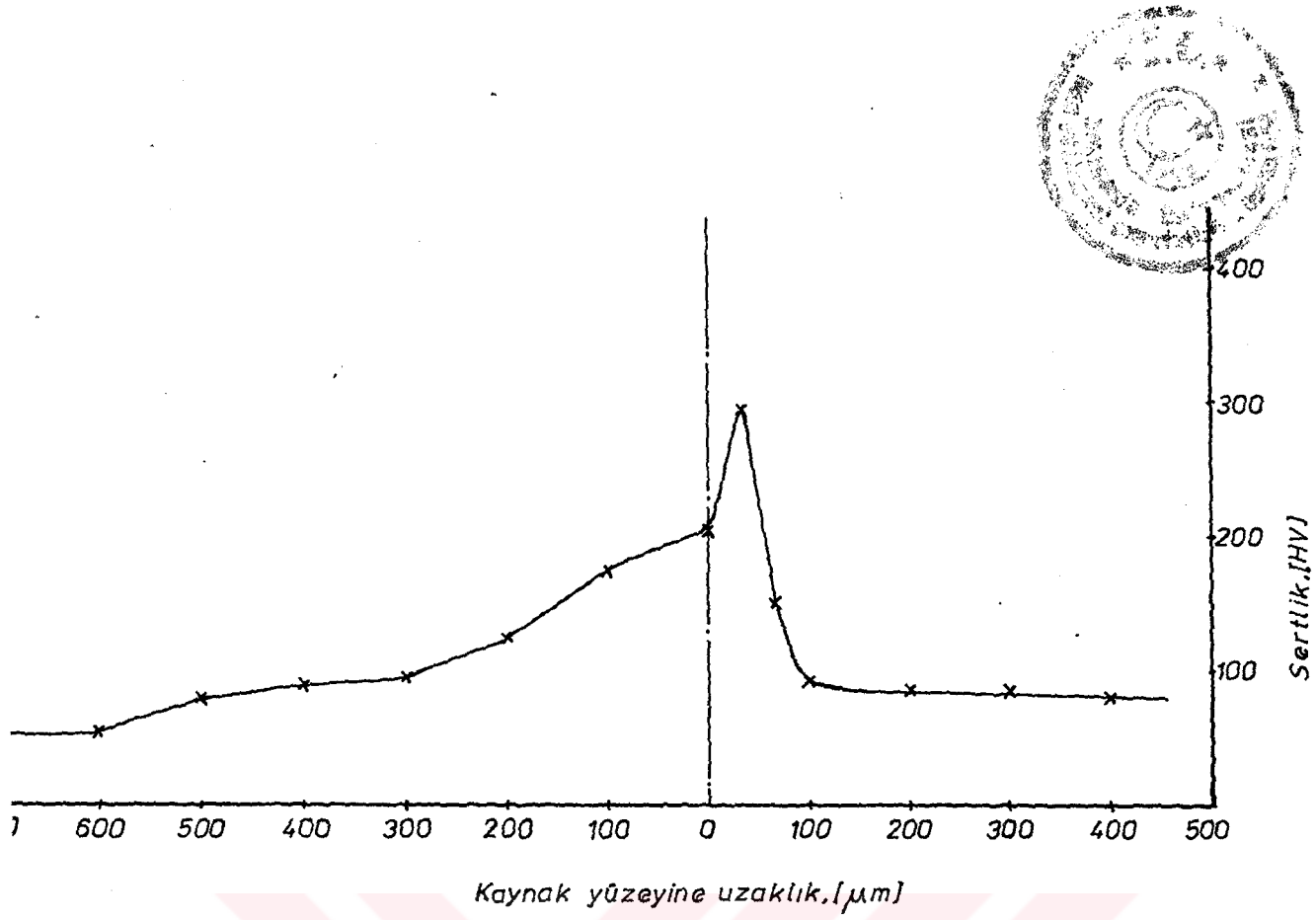


Şekil 6.21  $T= 550\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $P= 6.6\text{ MPa}$ ,  $t= 60\text{ dak}$ , kaynak şartlarında birleşme bölgesindeki mikrosertlik değişimi



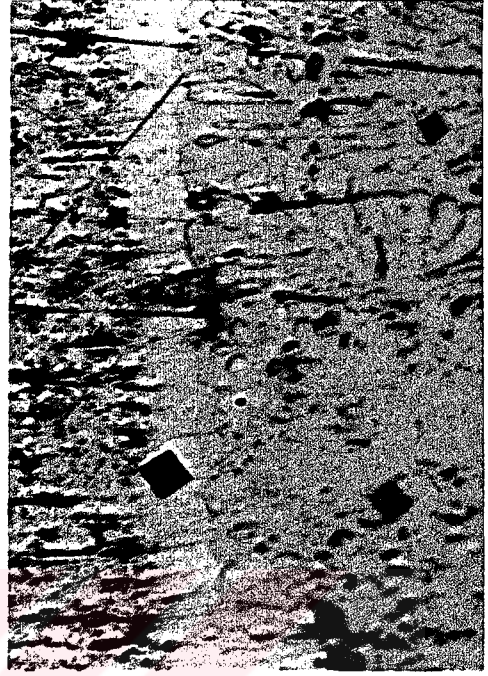
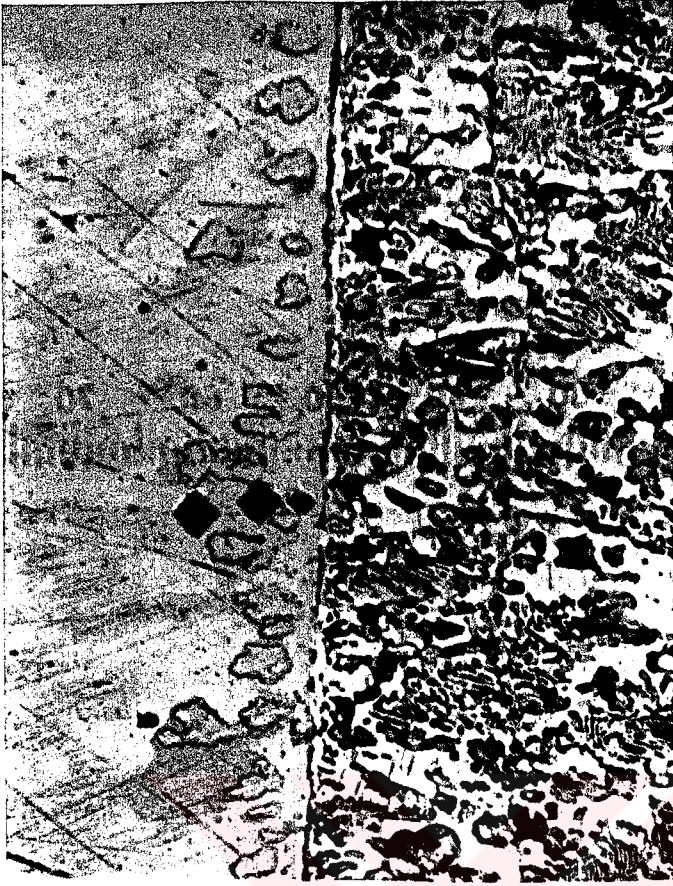
Şekil 6.22  $T= 560\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $P= 4.5\text{ MPa}$ ,  $t= 60\text{ dak}$ , kaynak şartlarında birleşme bölgesindeki mikrosertlik değişimi





Şekil 6.23  $T= 560\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $P= 6.6\text{ MPa}$ ,  $t= 30\text{ dak}$ , kaynak şartlarında birleşme bölgesindeki mikrosertlik değişimi

Kaynak şartlarının sertlik üzerine etkileri değerlendirildiğinde çizilen grafiklerden de görüldüğü gibi birleşme bölgesindeki ara tabakada sertlik artışı meydana gelmiştir. Özellikle bakır tarafında ince bir bölgede Şekil 6.24 'deki sertlik izlerinden de anlaşılacağı gibi ani sertlik artışı olmuştur. Mikroyapılara ve yapılan incelemelere dayanarak [54,83], bunun nedenininin yüksek sıcaklıklarda birleşme bölgesinde intermetalik fazların ( $\text{Al}_2\text{Cu}$ ,  $\text{Al}_4\text{Cu}_9$ ) oluşumundan olduğu sonucuna varılmıştır.

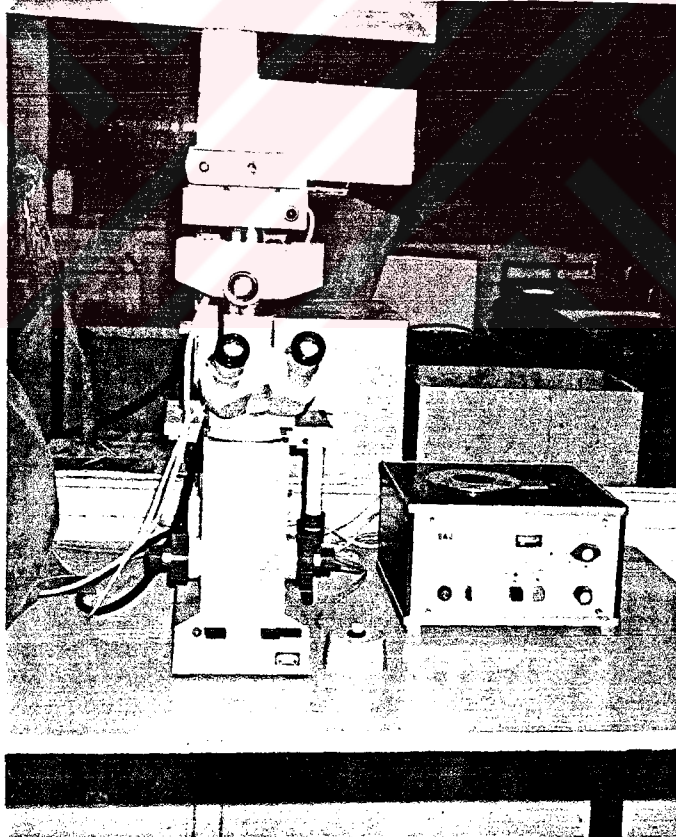


Şekil 6.24 Mikrosertlik ölçüm izleri



#### 6.4.4 Optik Mikroskopla İnceleme

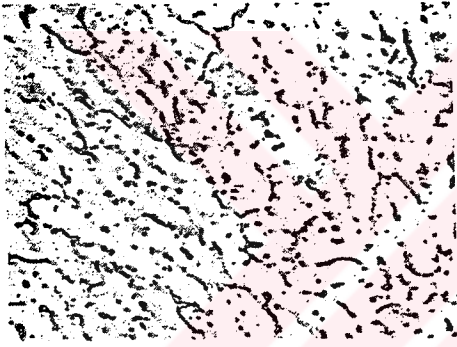
Difüzyon kaynağı esnasında uygulanan işlem parametrelerinin, parçaların yüzey pürüzlülüklerinden kaynaklanan arayüzey boşluklarının durumunu ve arayüzeyde oluşan fazların yapı ve dağılımlarını incelemek üzere değişik şartlarda kaynaklama yapılmış numuneler kullanılmıştır. Birleşme bölgesine dik kesitte alınan numuneler polyestere gömüldükten sonra zımparalanmış ve parlatılmışlardır. 9 Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalografi Laboratuvarı'nda Carlzeiss Jena optik mikroskobunda (Şekil 6.25) yapılan incelemeler sonucu alınan fotoğraflar ve oluşan fazların mikro yapıları incelenerek [83,85] alınan görüntülerin değerlendirilmesi Ek C 'de verilmiştir. Mikroyapılardaki incelemeler sonucunda deney şartlarına bağlı olarak değişik kalınlıklarda birleşme bölgesinin oluştuğu gözlenmiştir. Birleşme bölgesinde özellikle alüminyum tarafına doğru yüzeyde boşlukların oluştuğu saptanmıştır. Çekme deneyi esnasında kopmanın bu bölgede oluşmasının nedeni bu boşluklara ve gevrek intermetalik fazlara bağlanmıştır.



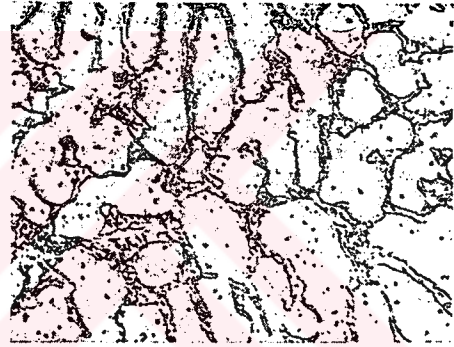
Şekil 6.25 Optik mikroskop



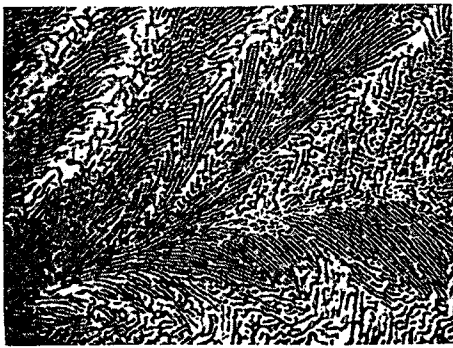
Ayrıca Al-Cu denge diyagramına [84,85] bağlı olarak ara bölgede oluşan fazların tanımı Şekil 6.30 'da gösterilmiştir. Sağdaki alüminyum bölgesinde bakırin çözünürlüğü sıcaklık derecelerine göre 548 °C 'de %5.7, 500 °C 'de %4.4, 400 °C 'de %1.6, 300 °C 'de %0.6 nispetindedir [53,84]. Şekil 6.26 'da %95 Al+ %5 Cu ihtiva eden  $\kappa$  fazının iç yapısı, difüzyon bölgesinin dışındaki Al tarafına karşılık gelmektedir. Alüminyum, %33 Cu ve 548 °C 'de ara metal bağı  $Al_2Cu$  ile bir ötektik oluşturmaktadır. %67 Al+% 33 Cu 'lu saf ötektik alaşımın iç yapısı Şekil 6.27 'de gösterilmektedir. Bu iç yapının benzeri difüzyonlu kaynak bölgesinin ( $\theta+\kappa$ ) fazının bazı kısımlarında görülmektedir. Şekil 6.28 'de %15 Cu 'lu bir alaşımda artık alüminyum gösterilmektedir. Bu yapının karşılığı ötektik içinde ( $\theta+\kappa$ ) bölgesidir.  $\theta$  kristalleri az miktardadır. Daha yüksek bakır oranlarında ise primer-sert  $Al_2Cu$  ayrılmaktadır (Şekil 6.29). Bu yapının karşılığı ise  $\theta$  kristallerinin artış göstermesiyle kendini belli ettiği ( $\theta+$  ötektik) bölgesidir.



Şekil 6.26 %95 Al+ %5 Cu 'lu alaşım.  
Homojen  $\kappa$  kristalleri



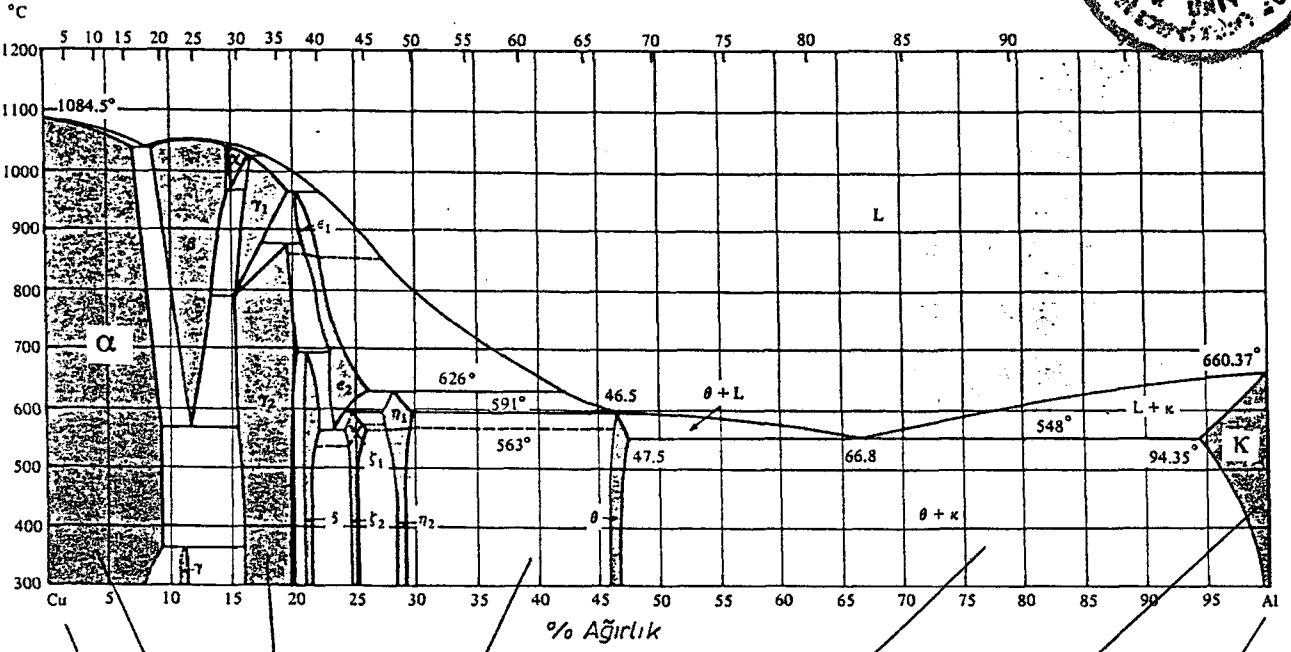
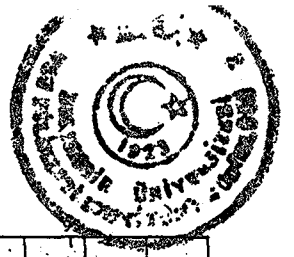
Şekil 6.27 %67 Al+ %33 Cu 'lu alaşım.  
( $\kappa+\theta$ ) ötektik



Şekil 6.28 %85 Al+ %15 Cu 'lu alaşım.  
Ötektik ( $\kappa+\theta$ ) lı homojen  
 $\kappa$  karışım kristalleri



Şekil 6. 29 %60 Al+ %40 Cu 'lu alaşım .  
Ötektik ( $\kappa+\theta$ ) içinde primer  
 $\theta$  kristalleri



Cu  $\alpha$   $\gamma$  fazı  $\theta + \text{Ötektik}$  Ötektik içinde  $\theta + \kappa$   $\kappa$  katı eriyik Al



Cu  $\leftarrow$   $\rightarrow$  Al

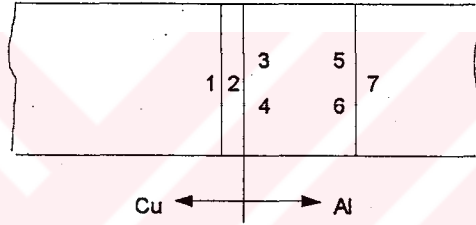
Şekil 6.30 Kaynaklanma bölgesinde oluşan fazların tanımı



#### 6.4.5 Tarama Elektron Mikroskobu (SEM) İncelemeleri

Alüminyum ve bakırın difüzyon kaynağı birleştirmesi ile oluşan arayüze dik bir doğrultu boyunca malzeme bileşimindeki değişim Arçelik A.Ş. ARGE bölümünde JEOL JSM-6400 Scanning Electron Microscope 'a bağlı Tracor Voyager 2110 Energy Dispersive Spectrometer (EDS) analiz ünitesi ile incelenmiştir. Birleşme arayüzüne dik doğrultuda SEM 'de mikroyapı fotoğrafları çekilmiştir. İncelemelerde optik metalografi için hazırlanmış numuneler kullanılmıştır.

Değişik kaynaklanma şartlarındaki numunelerde, difüzyon kaynak arayüzeyinden alüminyum ve bakır tarafına doğru farklı mesafelerdeki 7 değişik bölgenin EDS analizi yapılmıştır. Analizlerin hangi bölgelerden yapıldığı Şekil 6.31 'de şematik olarak gösterilmiştir. Ayrıca bu bölgelerin tanımı Çizelge 6.5 'de yapılmıştır.



Şekil 6.31 EDS analiz bölgelerinin şematik gösterimi

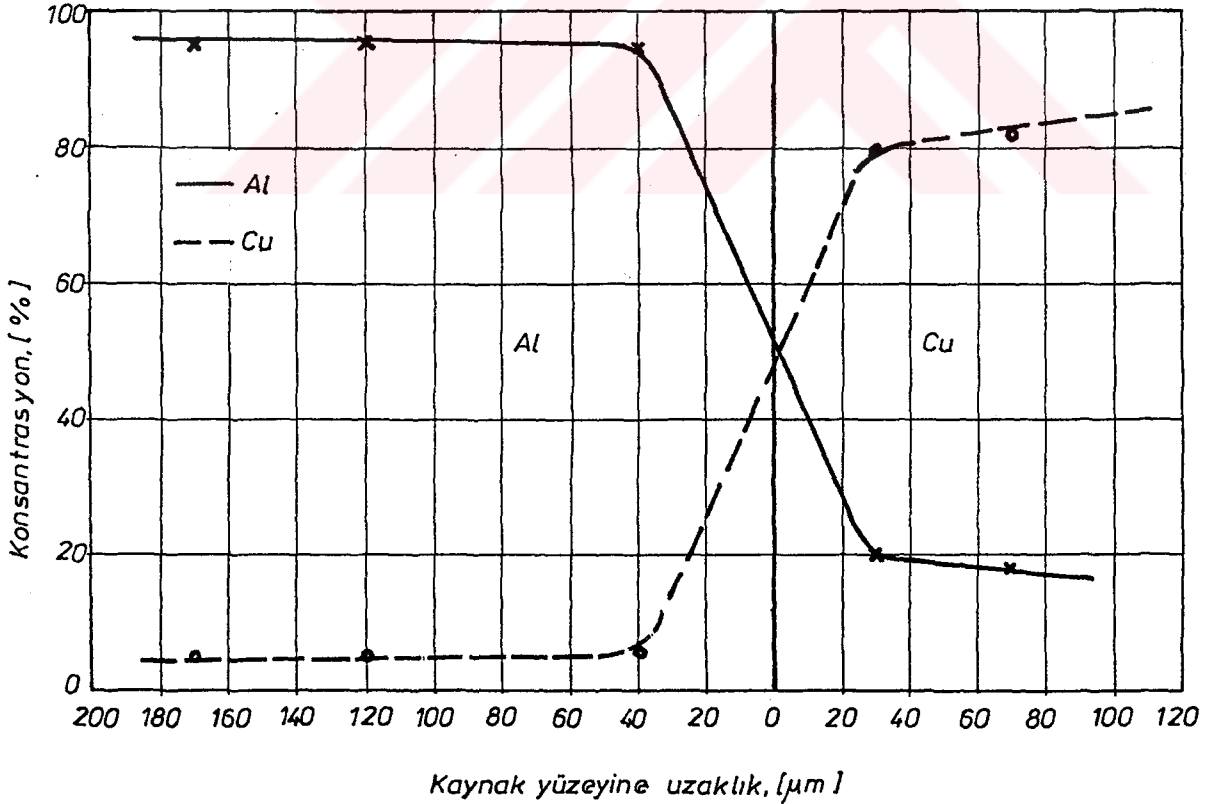
Çizelge 6.5 EDS analiz bölgelerinin tanımı

Analiz Yeri No	Tanımı
1	Cu içinde Al 'nin çözüldüğü bölge
2	Cu içinde Al 'nin çözüldüğü bölgenin hemen altındaki ince bölge
3	Cu 'ya yakın dendirit bölgesi, Al <sub>2</sub> Cu (Cu ile aynı renk, açık)
4	Cu 'ya yakın dendirit bölgesi, (Al ile aynı renk, koyu)
5	Al 'ye yakın dendirit bölgesi, Al <sub>2</sub> Cu (Cu ile aynı renk, açık)
6	Al 'ye yakın dendirit bölgesi, Al ile aynı renk, koyu)
7	Al içinde Cu 'nun çözüldüğü bölge

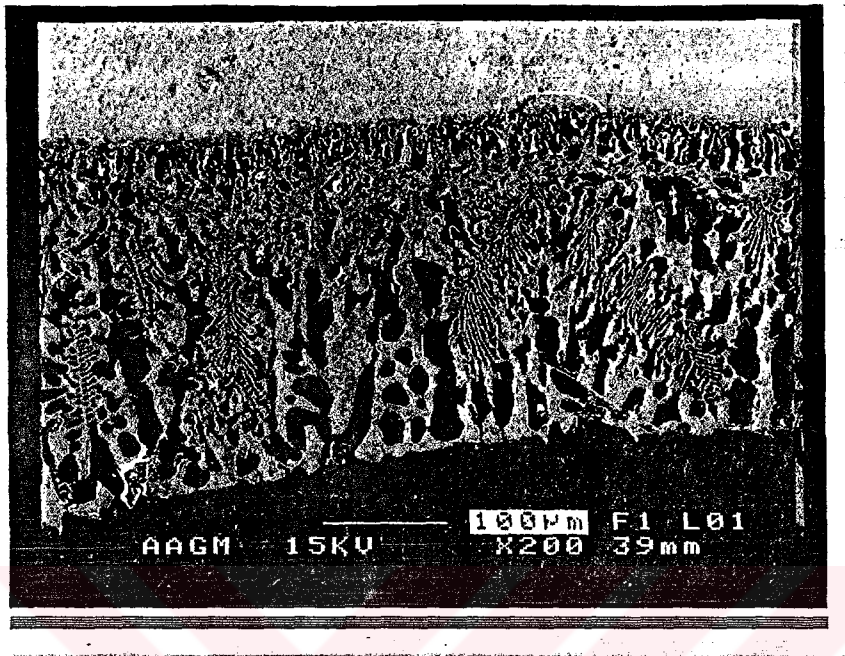
550 °C, 4.5 MPa, ve 120 dak 'lık kaynaklanma şartlarındaki numunelerden alınan analiz sonuçları Çizelge 6.6 'da verilmiştir. Bu sonuçlara dayanarak elde edilen alüminyum ve bakır elementlerinin konsantrasyon değişimleri mesafeye bağlı olarak çizilmiştir (Şekil 6.32). Aynı şartlardaki numunenin birleşme bölgesine ait SEM içyapı fotoğrafları Şekil 6.33 'de görülmektedir.

Çizelge 6.6 550 °C, 4.5 MPa, 120 dak 'lık kaynaklanma şartlarındaki numunenin EDS analiz sonuçları

Analiz Yeri No	Birleşme Bölgesinden Uzaklık ( $\mu\text{m}$ )	Al	Cu
1	70	17.78	82.22
2	30	20.12	79.88
3	40	44.50	55.50
4	40	94.52	5.48
5	120	46.02	53.98
6	120	95.12	4.88
7	170	94.90	5.10



Şekil 6.32 Birleşme bölgesindeki Al-Cu konsantrasyon değişimi

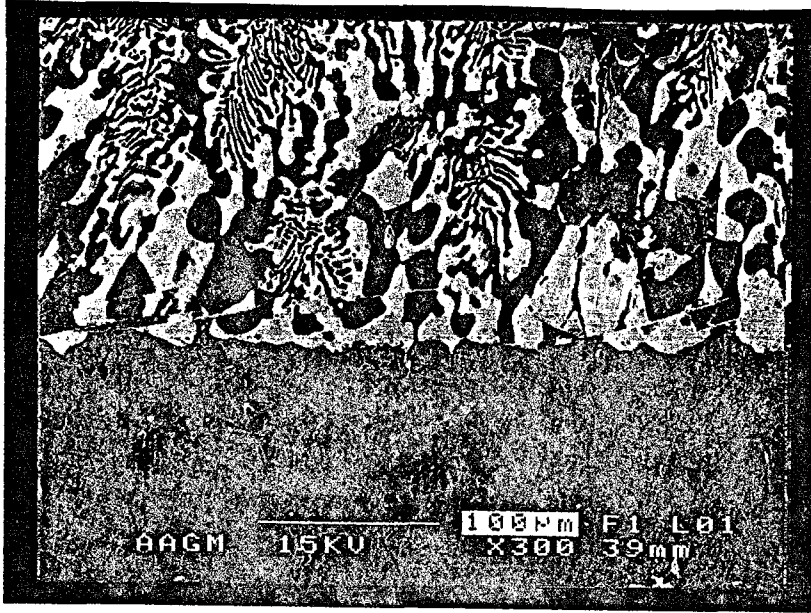


(a)

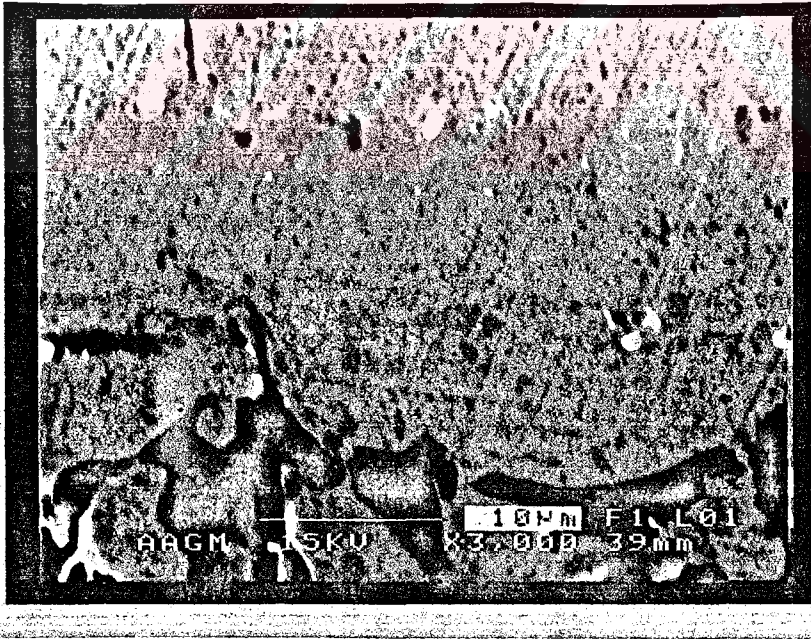


(b)





(c)



(d)

Şekil 6.33 550 °C, 4.5 MPa, 120 dak kaynaklanma şartındaki numunenin SEM mikroyapı fotoğrafları :

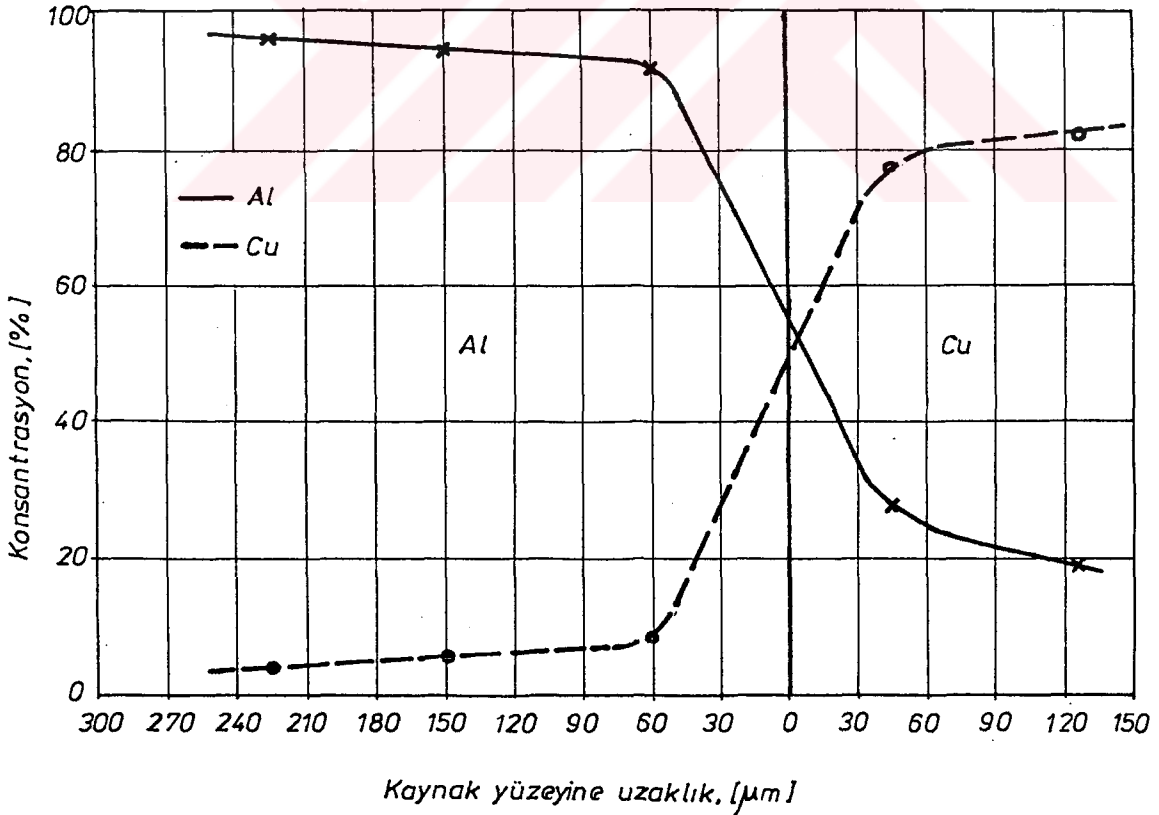
- a) Difüzyon bölgesinin tümü ; b) Cu bölgesi ile difüzyon bölgesi arası ;  
c) Al bölgesi ile difüzyon bölgesi arası ; d) Tanımı verilen 2. bölge .



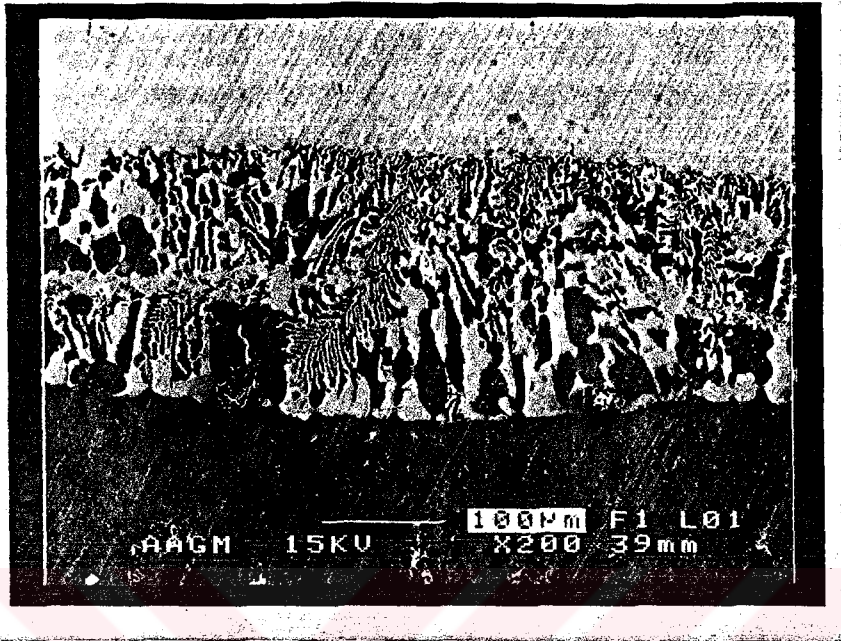
550 °C, 6.6 MPa, 60 dak kaynaklanma şartlarındaki numuneden alınan analiz sonuçları Çizelge 6.7 'de, Al-Cu konsantrasyon değişim eğrileri Şekil 6.34 'de ve difüzyon bölgesine ait mikroyapı fotoğrafları ise Şekil 6.35 'de verilmiştir.

Çizelge 6.7 550 °C, 6.6 MPa, 60 dak 'lık kaynaklanma şartlarındaki numunenin EDS analiz sonuçları

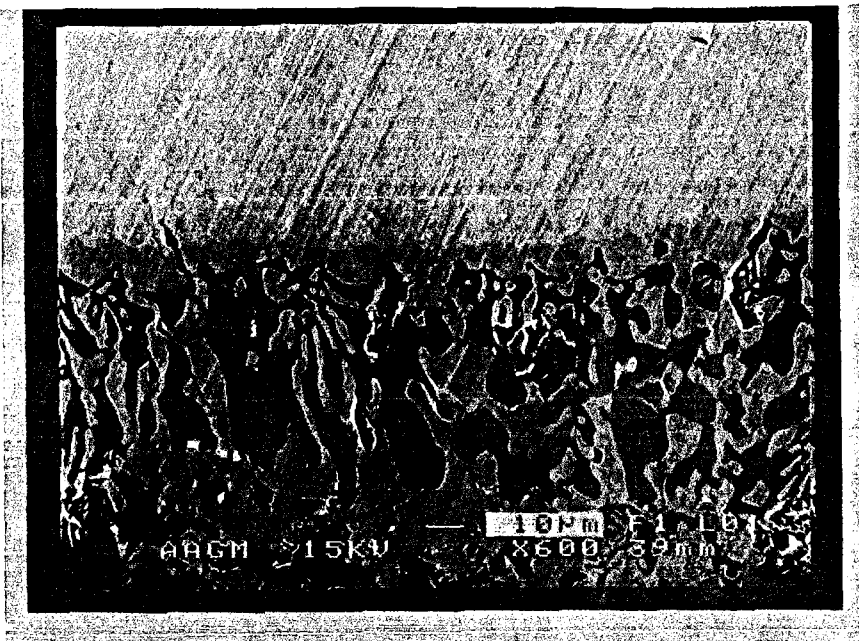
Analiz Yeri No	Birleşme Bölgesinden Uzaklık ( $\mu\text{m}$ )	Al	Cu
1	130	18.80	81.20
2	50	27.37	72.63
3	60	43.53	56.47
4	60	91.54	8.46
5	150	46.13	53.87
6	150	94.62	5.38
7	220	95.82	4.18



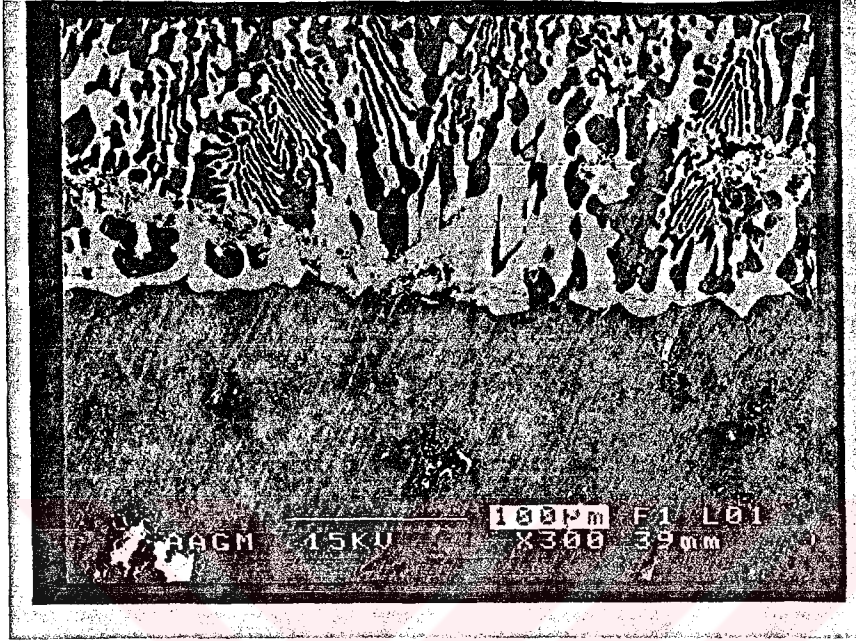
Şekil 6.34 Birleşme bölgesindeki Al-Cu konsantrasyon değişimi



(a)



(b)



(c)

Şekil 6.35 550 °C, 6.6 MPa, 60 dak kaynaklanma şartındaki numunenin SEM mikroyapı fotoğrafları :

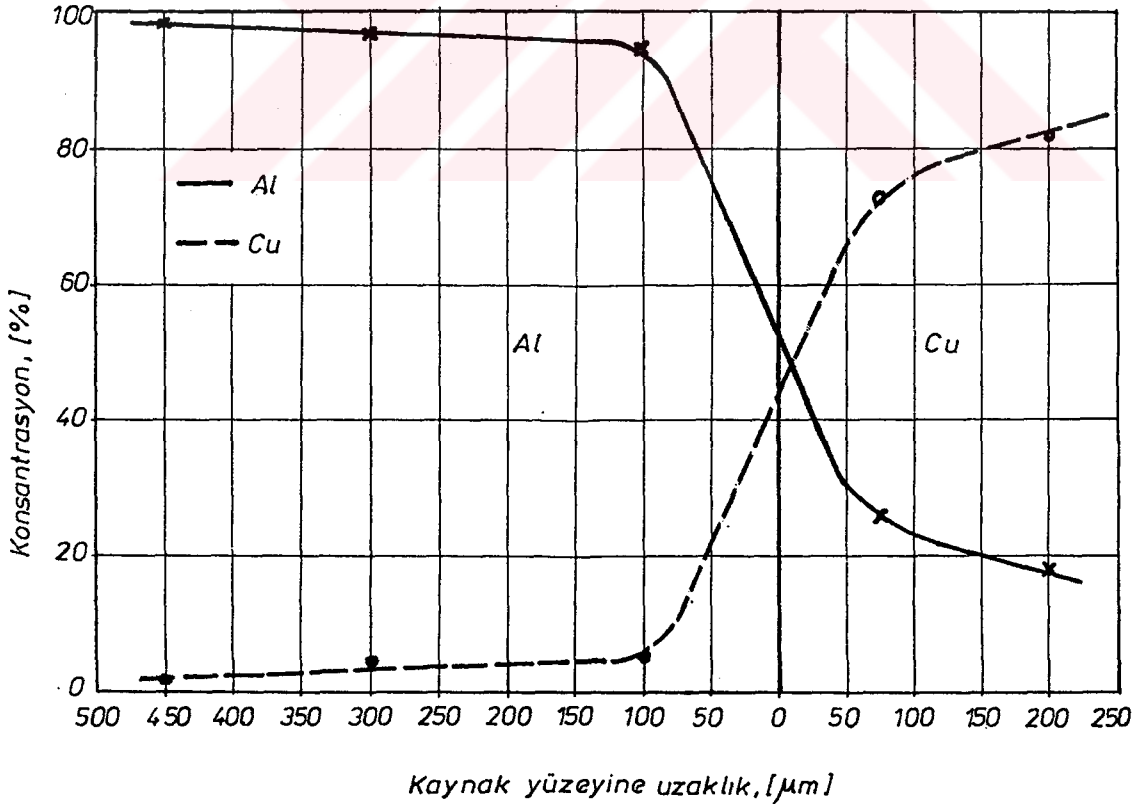
- a) Difüzyon bölgesinin tümü ;                      b) Cu bölgesi ile difüzyon bölgesi arası ;  
c) Al bölgesi ile difüzyon bölgesi arası .



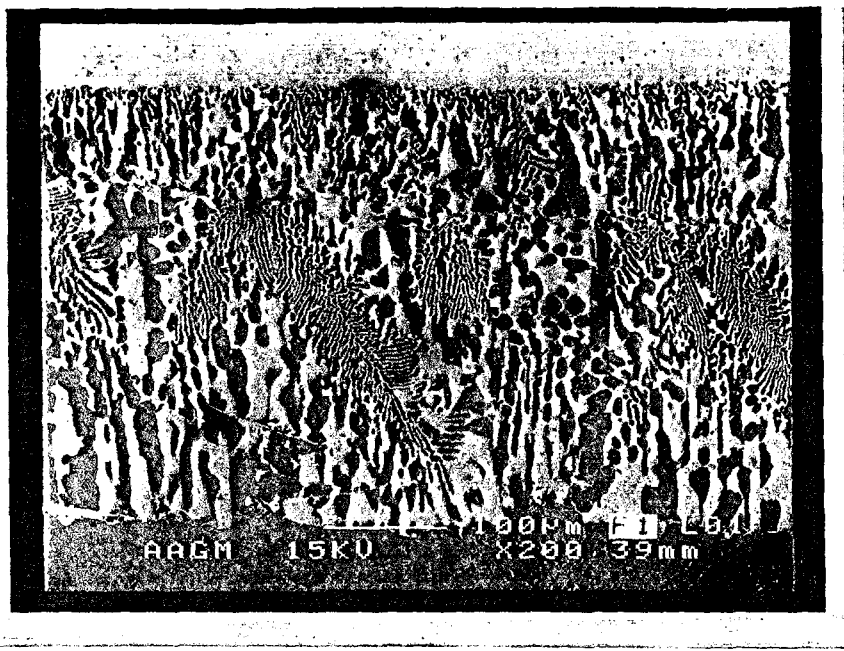
560 °C, 4.5 MPa, 60 dak kaynaklanma şartlarındaki numuneden alınan analiz sonuçları Çizelge 6.8 'de, Al-Cu konsantrasyon değişim eğrileri Şekil 6.36 'da ve difüzyon bölgesine ait mikroyapı fotoğrafları ise Şekil 6.37 'de verilmiştir.

Çizelge 6.8 560 °C, 4.5 MPa, 60 dak 'lık kaynaklanma şartlarındaki numunenin EDS analiz sonuçları

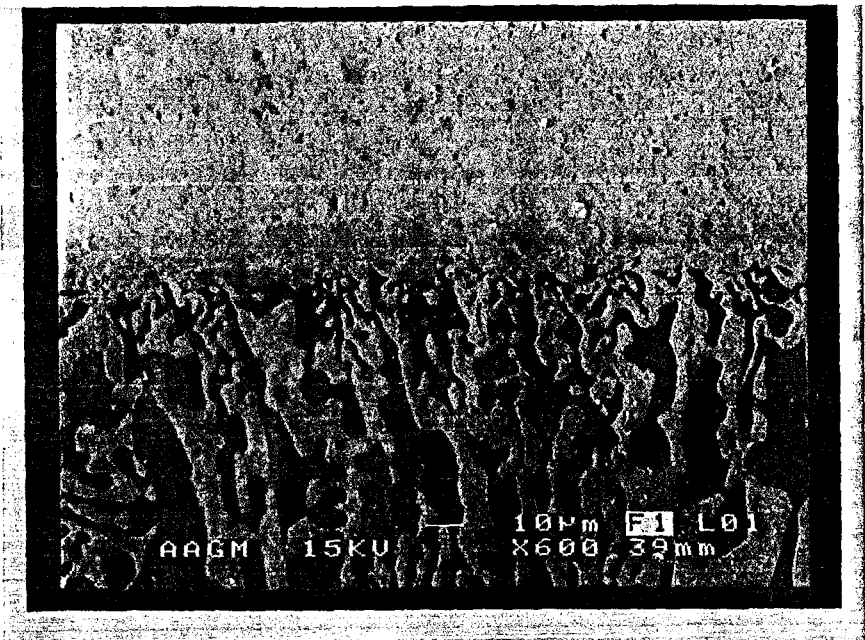
Analiz Yeri No	Birleşme Bölgesinden Uzaklık ( $\mu\text{m}$ )	Al	Cu
1	200	17.95	82.05
2	80	26.23	73.27
3	100	45.78	54.22
4	100	95.50	5.50
5	300	45.28	54.72
6	300	95.43	4.57
7	450	98.65	1.35



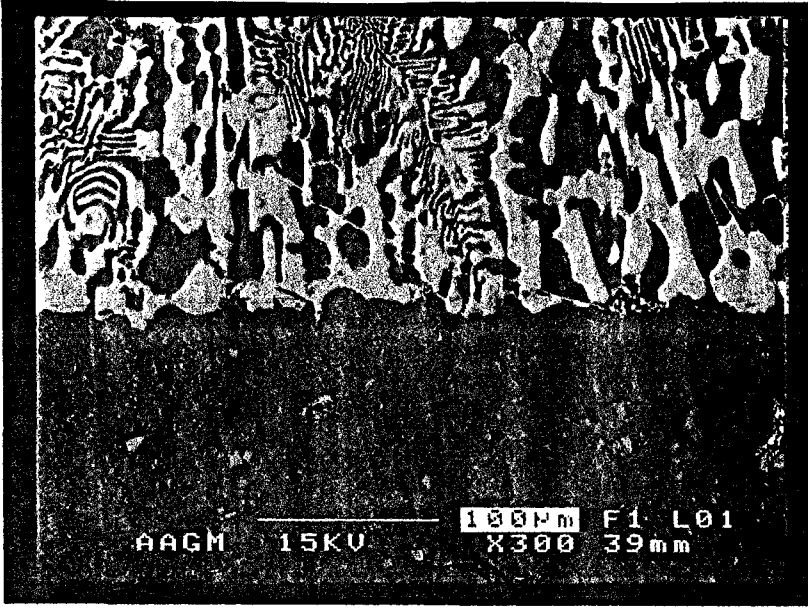
Şekil 6.36 Birleşme bölgesindeki Al-Cu konsantrasyon değişimi



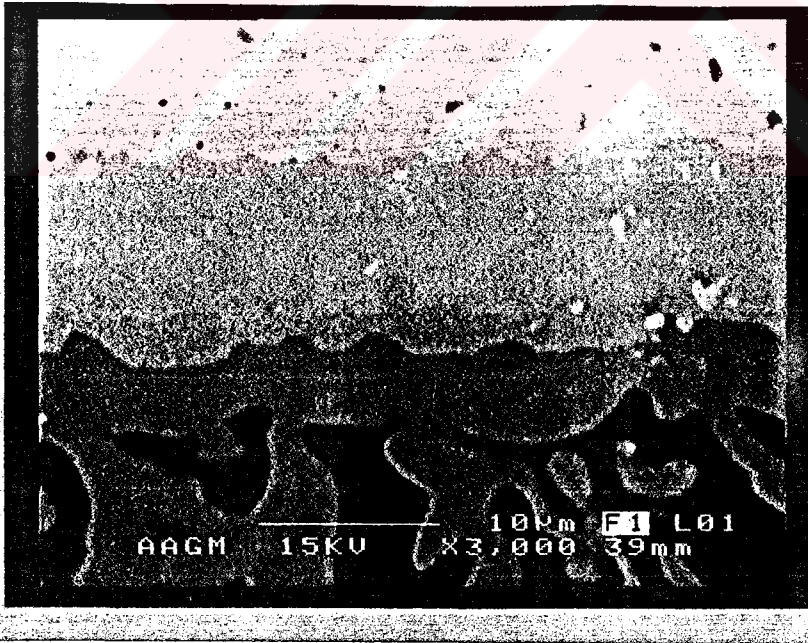
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 6.37 560 °C, 4.5 MPa, 60 dak kaynaklanma şartındaki numunenin SEM mikroyapı fotoğrafları :

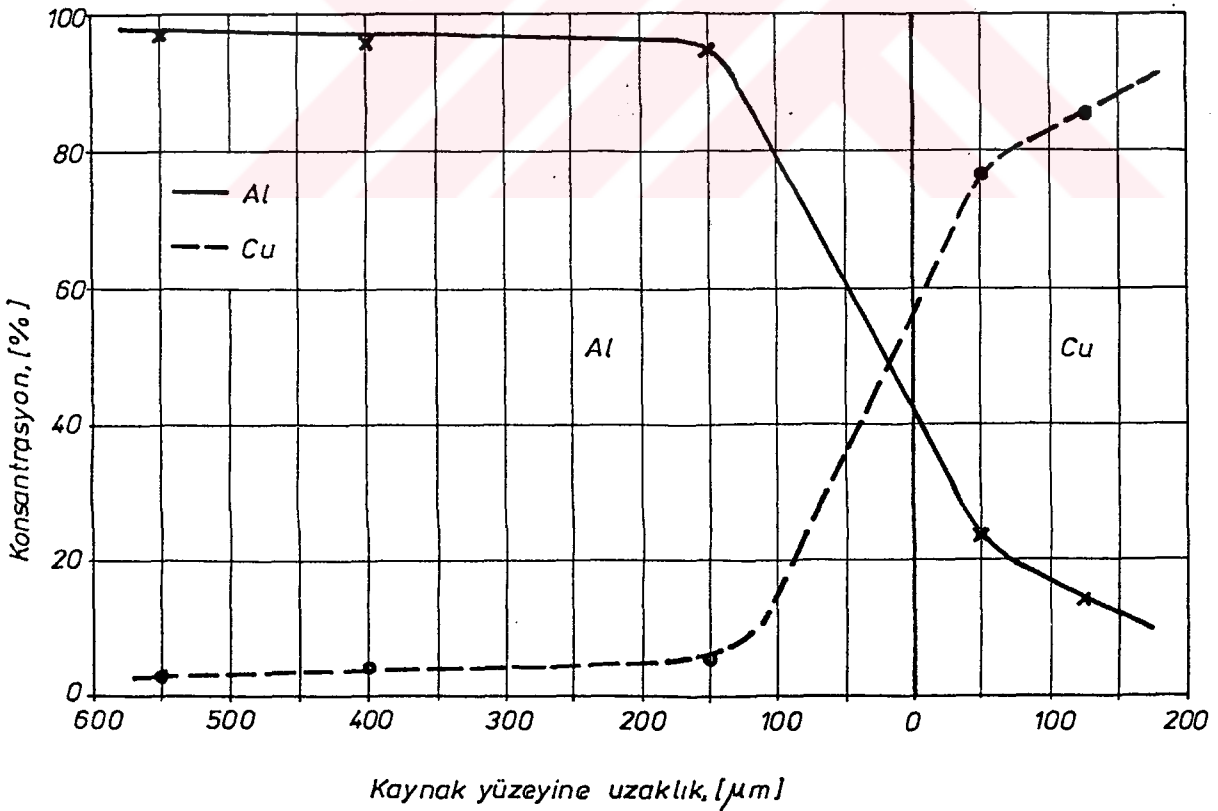
- a) Difüzyon bölgesinin tümü ;                      b) Cu bölgesi ile difüzyon bölgesi arası ;  
c) Al bölgesi ile difüzyon bölgesi arası ; d) Tanımı verilen 2. bölge .



560 °C, 6.6 MPa, 30 dak kaynaklanma şartlarındaki numuneden alınan EDS analiz sonuçları Çizelge 6.9 'da, Al-Cu konsantrasyon değişim eğrileri Şekil 6.38 'de ve difüzyon bölgesine ait mikroyapı fotoğrafları ise Şekil 6.39 'da verilmiştir.

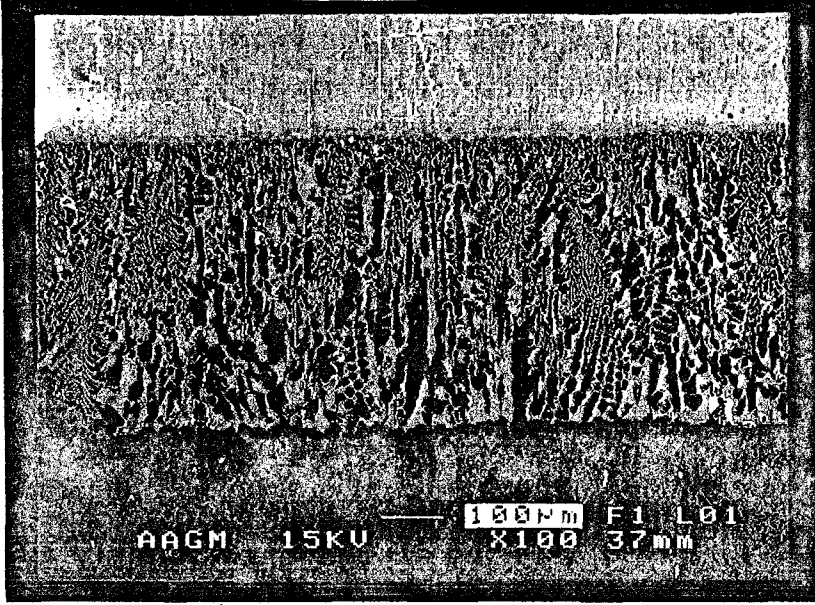
Çizelge 6.9 560 °C, 6.6 MPa, 30 dak 'lık kaynaklanma şartlarındaki numunenin EDS analiz sonuçları

Analiz Yeri No	Birleşme Bölgesinden Uzaklık ( $\mu\text{m}$ )	Al	Cu
1	120	14.47	85.53
2	50	23.32	76.68
3	150	44.44	55.56
4	150	94.59	5.41
5	400	43.37	56.63
6	400	95.58	4.42
7	550	97.21	2.79

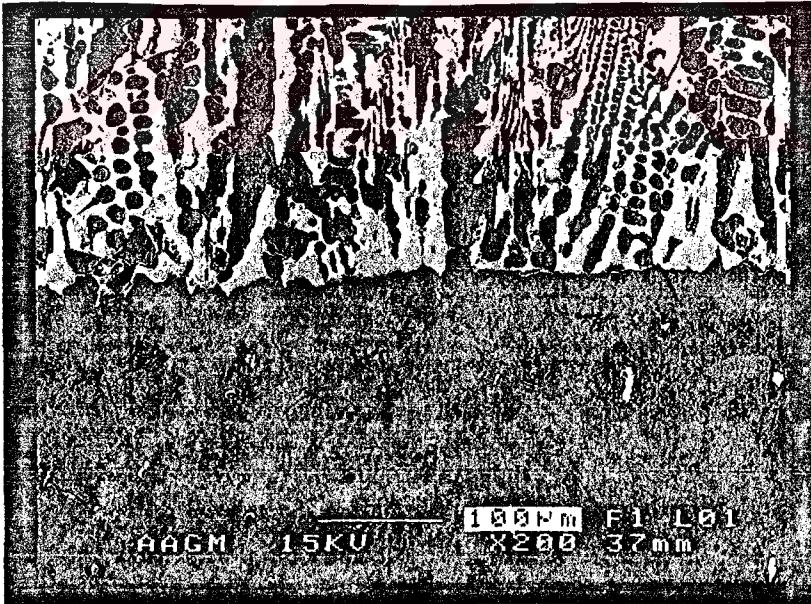


Şekil 6.38 Birleşme bölgesindeki Al-Cu konsantrasyon değişimi





(a)



(b)

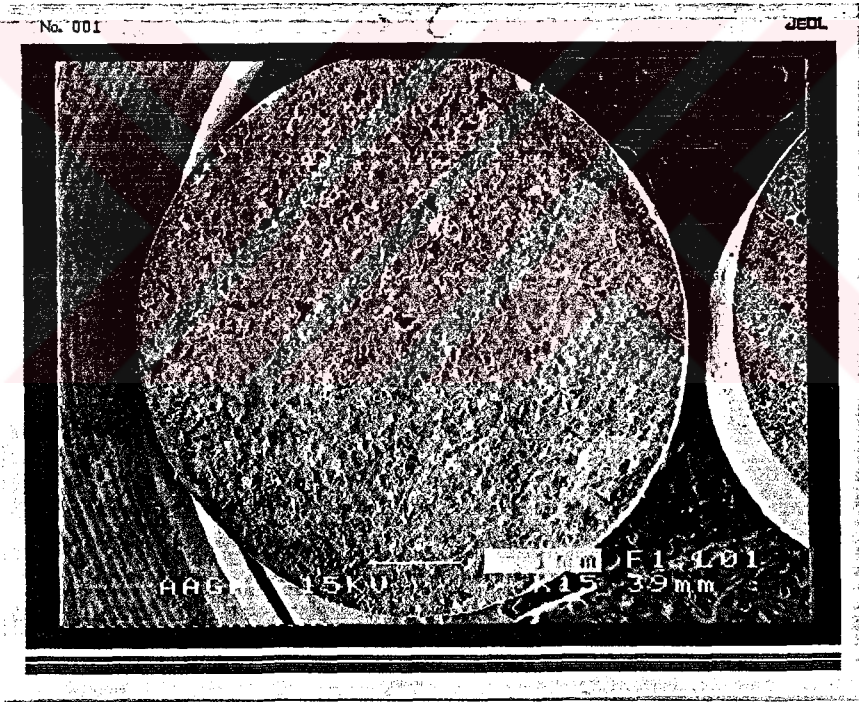
Şekil 6.39 560 °C, 6.6 MPa, 30 dak kaynaklanma şartındaki numunenin SEM mikroyapı fotoğrafları :

a) Difüzyon bölgesinin tümü ;

b) Al bölgesi ile difüzyon bölgesi arası .

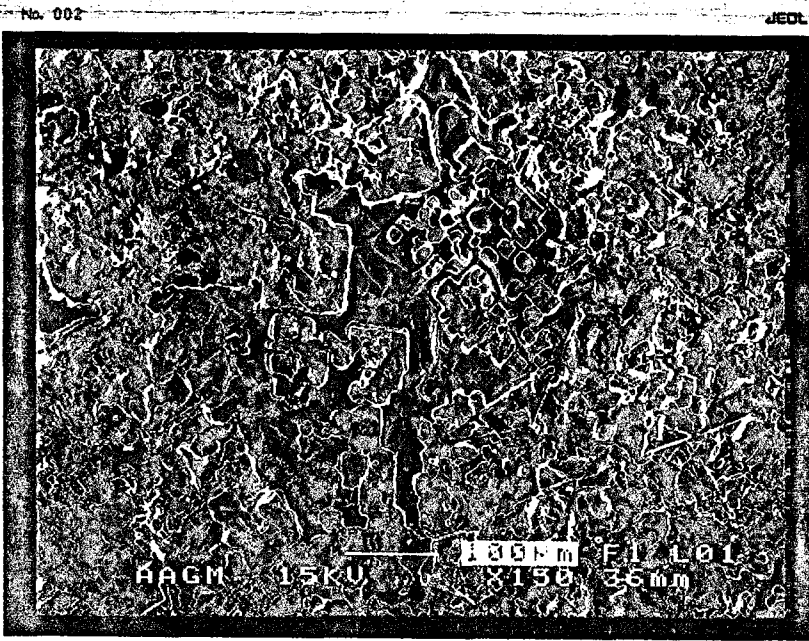
EDS analiz sonuçları incelendiğinde, bakırın alüminyuma daha uzun mesafelerde, alüminyumun bakıra ise daha kısa mesafelerde fakat daha yüksek oranlarda difüze ettiği saptanmıştır. Bu EDS analiz sonuçlarının ve SEM 'den alınan mikroyapı fotoğraflarının, metalografik inceleme sonuçları ile elde edilen alüminyum ve bakırın yüzde difüzyon oranlarıyla (Şekil 6.30) uyum içinde olduğu görülmektedir.

Çekme deney numuneleri, çıplak gözle incelendiğinde kırılmanın hiçbir plastik deformasyon göstermeden, düz yüzeyli gevrek kırılma tipinde olduğu görülmüştür. Kırılmanın yeri ise hemen hepsi alüminyum bölgesinde meydana gelmiştir. Bu durum stereo mikroskopta (Şekil 6.14, 6.15) ve SEM 'de (Şekil 6.40) çekilen kırılma yüzeyi fotoğraflarında da görülmektedir. Ancak SEM 'de kırılma yüzeylerinin yüksek büyültmeli mikroyapı fotoğrafları çekilerek incelenmiştir (Şekil 6.41, 6.42, 6.43, 6.44).

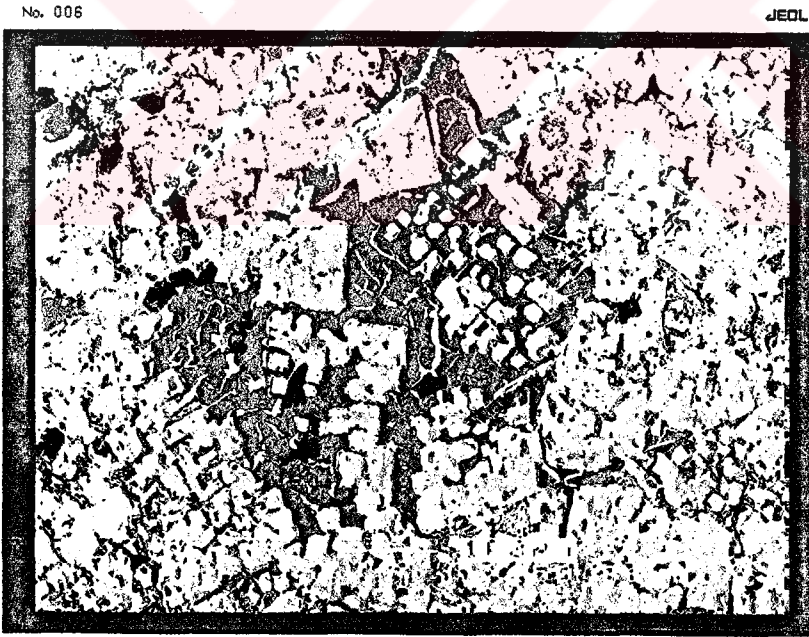


Şekil 6.40 560 °C, 4.5 MPa, 60 dak deney şartlarında kaynak edilmiş çekme deney numunesinin SEM görüntüsü

Şekil 6.42 'de, Şekil 6.41 'deki mikroyapı fotoğrafının (secondary electron görüntüsü) geri sıçrayan elektron görüntüsü (backscattered electron) verilmektedir. Burada açık renk olan yerler atom no'su yüksek olan elementten (bakır), koyu renk olan yerler atom no'su düşük olan elementten (alüminyum) oluşmaktadır.



Şekil 6.41 Şekil 6.40 'da verilen kırılma yüzeyinin mikroyapısı



Şekil 6.42 Şekil 6.41 'de verilen kırılma yüzeyinin "backscattered electron" görüntüsü

Şekil 6.43 'de, Şekil 6.41 'de verilen kırılma yüzeyinin daha yüksek büyütme mikroyapı fotoğrafı (secondary electron görüntüsü) görülmektedir. Şekil 6.44 'de ise Şekil 6.43 'deki fotoğrafın "backscattered electron" görüntüsü verilmiştir.

No. 004

JEOL



Şekil 6.43 Şekil 6.41 'de verilen kırılma yüzeyinin daha yüksek büyütme görüntüsü

No. 005

JEOL

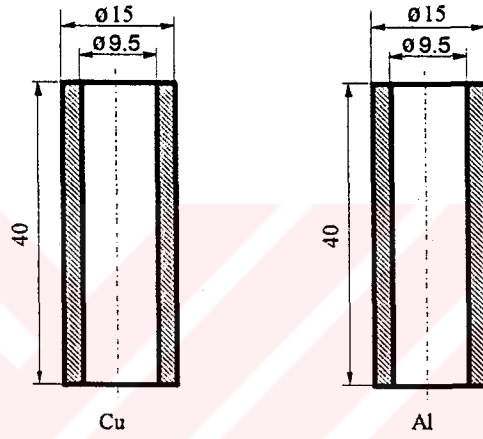


Şekil 6.44 Şekil 6.43 'deki kırılma yüzeyinin "backscattered electron" görüntüsü

Şekil 6.44 'deki fotoğrafın bir bölgesinden element analizi yapıldığında, % 15.62 oranında difüze olmuş bakır elementine rastlanmıştır. Fotoğraflardan ve analiz sonucundan kırılmanın bakırın difüzyonunun henüz sona ermediği kısımdan olduğunu söyleyebiliriz.

## 26.5 Endüstri Uygulaması

Endüstride, özellikle dondurucularda, soğuk hava depolarında, gaz dolun tesislerinde bakır ve alüminyum boruların birlikte kullanımı söz konusu olmaktadır. Bu yüzden alüminyum ve bakırın birleştirilmesi gerekliliği ve en çok kullanım alanının borularda olmasından dolayı bakır ve alüminyum boruların difüzyonla kaynaklanması da denenmiştir. Deney düzeneğine uyacak boru şeklinde hazırlanan numunelere, daha önceki içi dolu silindirik numunelerde denenerak elde edilen en uygun şartlarda (560 °C, 4.5 MPa, 60 dak) difüzyon kaynağı yapılmıştır. Hazırlanan boru numunelerin şematik resmi Şekil 6.45 'te verilmiştir.



Şekil 6.45 Boru difüzyon kaynağı numuneleri

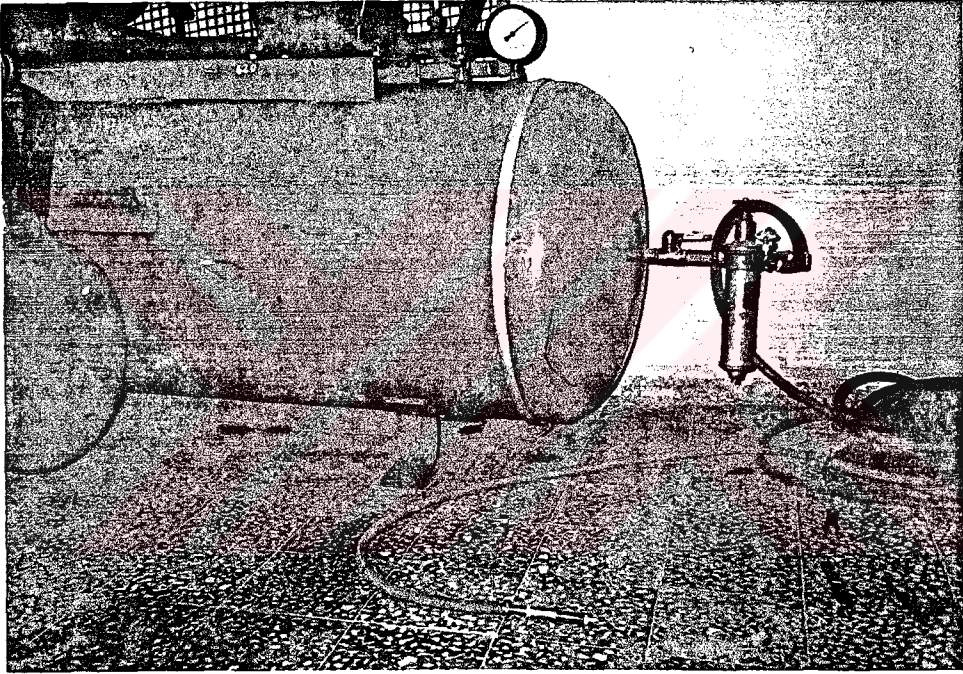
Kaynaklanmış boru numunelerin kontrolü amacıyla TS 138 ' [81] uygun olarak çekme deneyine tabi tutulmuşlardır. Deney sonucunda elde edilen değerler Çizelge 6.10 'da görülmektedir.

Çizelge 6.10 Kaynaklanmış boru numunelerin çekme dayanımları

Deney No	Kopma Dayanımı, (MPa)
1	47.35
2	46.83
3	50.17



Endüstrideki kullanım yerlerinde borular basınca maruz kaldıklarından birleşme bölgesinin basınca dayanıp dayanmadığını kontrol etmek için kaynaklanmış numuneler basınç deneyine tabi tutuldular. Bu deney için başlangıçta numuneler hazırlanırken birer uçlarına dış açılarak difüzyon kaynağı yapıldı. Sonra bir ucu kör tapa ile kapatıldı, diğer ucuna ise nipel bağlanarak kompresörle atmosfere açık olarak ve sızmanın olup olmadığının kontrolü için suya daldırarak hava basıncı uygulandı (Şekil 6.46). Kompresörün maksimum basıncı olan 9 kg/cm<sup>2</sup> 'ye ulaşıldığı halde kaynak yerinde herhangi bir kopma olmadığı görüldü. Bu basıncın alüminyum-bakır kaynaklı boruların kullanım yerleri için yeterli olduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 6.46 Kaynaklanmış numunelerin basınç deneyi



## 7. İRDELEME

1. Difüzyon kaynağı yapılmış alüminyum ve bakır parçalar birleştirme sonunda incelendiğinde, bilinen ergime kaynağı yöntemleri ile elde edilemeyecek temiz ve düzgün yüzeylerin olduğu görülmüştür.
2. Koruyucu ortam olarak yüzeylerin hava ile teması sonucu özellikle alüminyum malzemede oksit tabakasının oluşumunu engellemek için daha önceki çalışmalarda vakum kullanılması öngörülmüştür. Vakumlu ortamın oluşturulmasının güçlüğü göz önünde bulundurularak yüzeylerdeki oksit tabakasının oluşumunu engellemek için koruyucu ortam olarak argon gazı kullanılmıştır. Yapılan deneylerdeki kaynaklı parçaların incelenerek sağlıklı sonuçların alınmasıyla amaca ulaşılmıştır.
3. Yüzey kalitesinin iyi olması, kaynaklanma işlemine yardımcı olabilmesi için temas yüzeylerinin pürüzlülük değerlerine büyük ölçüde bağlıdır. Bilindiği gibi yüzey pürüzlülüğü çok düşük olan yüzeylerin difüzyonla kaynağı daha kolay olmaktadır. Bu çalışmada, numune yüzeyleri kademeli olarak 1200 grit zımparaya kadar zımparalanmış ve asetonla temizlenerek zımpara izleri birbirine dik gelecek şekilde üst üste konup hemen deney cihazına yerleştirilmişlerdir.
4. Seçilen 550 °C ve 560 °C sıcaklıklar difüzyon kaynağı için uygun sonuçlar vermiştir. Süre 120 dak olursa 550 °C difüzyon kaynağı için yeterli görülmektedir. 120 dak, 560 °C 'de yapılan kaynakta Al deforme olmakta, şekil değiştirmektedir. Bu süre için optimum kaynak sıcaklığı 550 °C 'dir. 60 dak, 560 °C 'de yapılan kaynağın mukavemeti yüksek değere erişmektedir. 550 °C 'de de kaynak sağlam olmaktadır, ancak mukavemet değeri 560 °C dekine göre düşüktür. 570 °C 'de ise bu sürede Al deforme olmaktadır. 30 dak sürede yapılan çalışmalarda 550 °C 'de tüm yüzeyde birleşme sağlanamamıştır. 560 ve 570 °C 'dekilerde ise birleşme olmuş ve çekme mukavemeti 560 °C 'de yapılan işlemde daha yüksek değer olarak elde edilmiştir.

Sonuç olarak, 560 °C 'de yapılan difüzyon kaynağı ile mukavemet değerleri maksimuma erişmektedir. Ancak bu sıcaklıkta sabit baskı kuvveti altında kaynak süresinin uzaması, yani 120 dak 'ye varması ile yumuşak metal olan alüminyumda



deformasyon gözlenmiştir. Sağlıklı birleştirmelerin 560 °C 'de, bu kesit ve bu metaller için 60 dak 'lik süre en uygun değerler olarak görülmektedir.

5. Kaynaklanma basıncı olarak 4.5 MPa ve 6.6 MPa üzerinde durulmuştur. 4.5 MPa 'lık basınçta 550 °C ve 560 °C sıcaklıklarda yüksek mukavemet değerleri elde edilmiştir. Ancak bu basınçta en yüksek mukavemet değerleri 560 °C 'de sağlanmıştır. 6.6 MPa basınçta da 550 °C ve 560 °C 'de kaynak mukavemetleri yüksek değerlere erişmesine rağmen maksimum değere 550 °C 'de ulaşılmıştır.

Basınç ve sıcaklık yönünden değerlendirildiğinde en yüksek kaynak dayanımına 560 °C 'de 4.5 MPa 'lık kaynak basıncı ile ulaşılmaktadır (Şekil 6.16 Şekil 6.17).

6. Seçilen 30, 60, 120 dak 'lik kaynaklanma süresi incelenirse 4.5 MPa ve 6.6 MPa basınçlarda başarılı deneyler yapılmıştır. 120 dak 'lik kaynak süresi için 6.6 MPa 'lık basınç fazla gelmektedir. Bu süre ve basınçta alüminyum malzemede deformasyon olduğundan bu şartlarda çalışılmamıştır. 4.5 MPa ve 6.6 MPa basınçlarda en yüksek dayanımlara 60 dak 'lik sürede ulaşıldığı görülmüştür.
7. Kaynaklama işleminden sonra parçalara uygulanan çekme deneyleri sonucunda kopma genellikle alüminyum tarafında birleşme bölgesinden yaklaşık 1-2 mm mesafede olmuştur. Çekme numunelerinde herhangi bir uzama görülmemiş, gevrek kırılma formunda kopma olmuştur (Şekil 6.13). Kırılma yerinin alüminyum ile difüzyon bölgesi sınırında meydana gelmesi, geçiş bölgesi ve gevrek yapılı ara faz oluşumu ile izah edilebilir. Burada difüzyonun zayıf oluşu mikron boyutunda boşlukları doğurmakta, kırılma sebebi olmaktadır. Kırılmanın gevrek oluşuna da difüzyon bölgesinin gevrek intermetalik fazları içermesinin sebep olduğu düşünülmüştür.
8. Kaynaklanma işleminden sonra numunelerde birleşme bölgesinden ana malzemeye doğru yapılan mikrosertlik ölçümlerine göre, birleşme bölgesinde bir sertlik artışı görülmüştür. Özellikle bakır tarafına yakın dar bir bölgede ani sertlik artışı olmuştur. Al ve Cu sıcaklık artışıyla beraber çeşitli gevrek intermetalik bileşikler oluşturmaktadır. 150 °C 'de  $Al_2 Cu$ , 350 °C 'de  $Al_4 Cu_9$ , 400 °C 'de  $Al_2 Cu$  ile  $Al_4 Cu_9$  arasında bir intermetalik bileşik yapı doğar [54]. Bu yapılar da çok sert tabakalardır. Yapılan değerlendirmelere göre, difüzyon bölgesindeki sertlik artışının bu nedenlerle oluştuğu sonucuna varılmıştır.

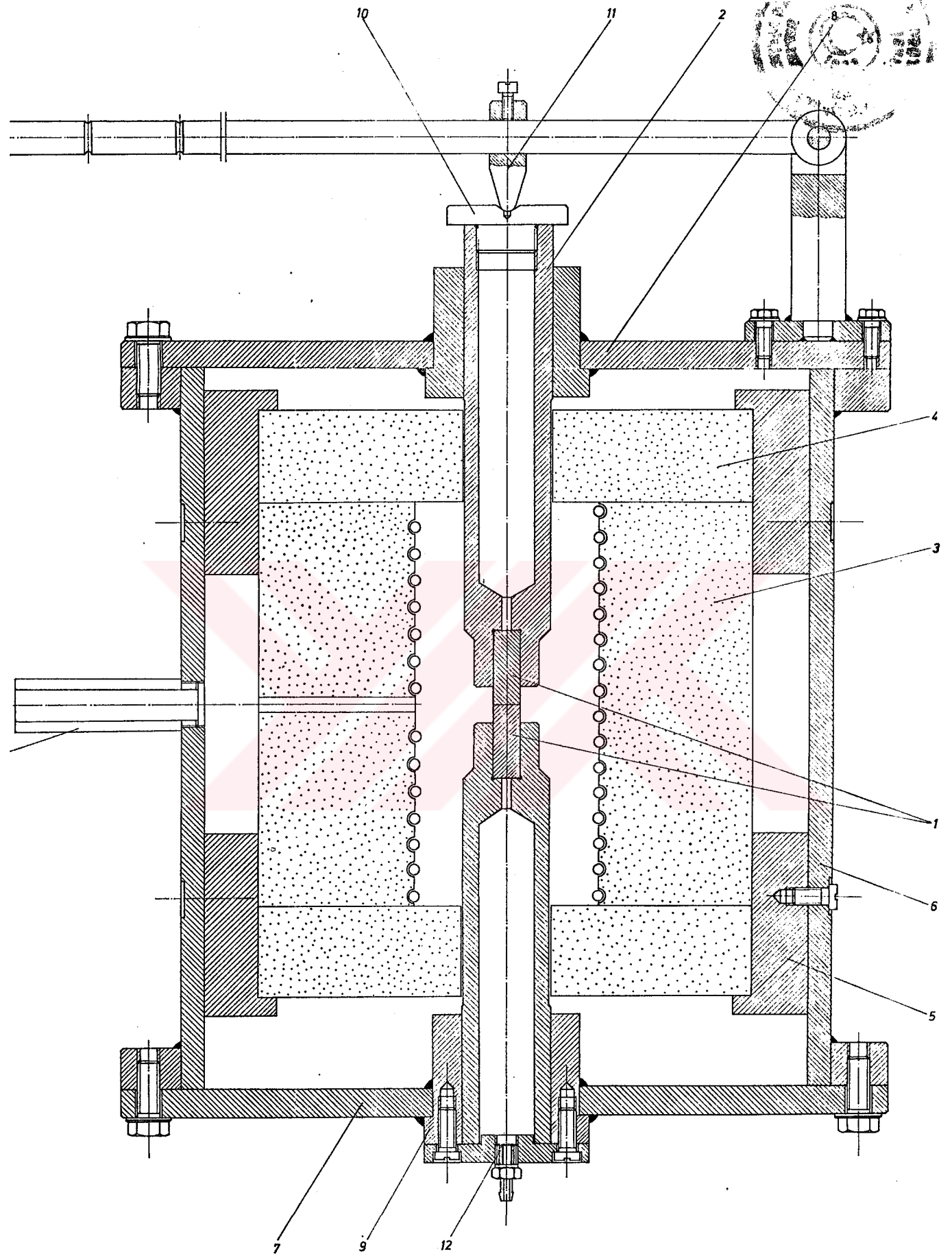




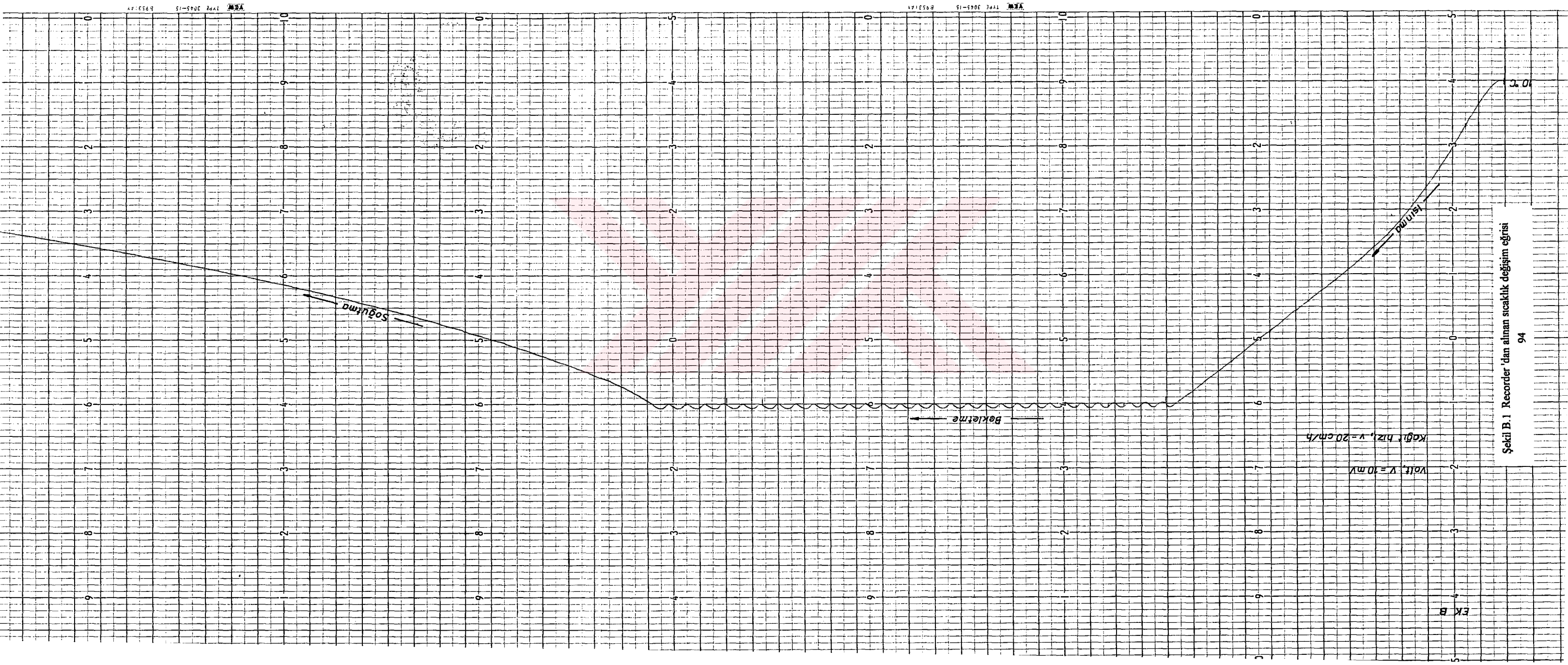
9. Optik mikroskopta 4 değişik birleşme şartında yapılan incelemede birleşme bölgesinde bir ara tabakanın oluştuğu görülmüştür. Bu ara bölgede değişik intermetalik fazların oluştuğu izlenebilmektedir ve bu ara bölgenin genişliği kaynaklanma şartlarına göre değişmektedir (Şekil C.1, C.2, C.3, C.4). Ayrıca optik mikroskopla alınan bu fotoğraflardan görüleceği gibi Cu tarafına difüze olan Al 'li bölge ile Al tarafına difüze olan Cu 'lu bölgenin mesafeleri farklıdır. Bakır tarafındaki bölge daha küçük ve dar görünürken, alüminyum tarafındaki bölge daha geniştir. Bunun sebebi iki şekilde açıklanabilir. Birincisi, alüminyum atomları boyut olarak bakır atomlarından  $\approx$  %11 daha büyük olduğundan [86] bakır atomlarının alüminyumun 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. İkincisi ise, difüzyon katsayısı (D) ile ilgilidir. Bu katsayı ana metal bakır olduğunda, alüminyumun bakıra geçişi daha az ( $500\text{ }^{\circ}\text{C}$  'de  $10^{-12.6}\text{ cm}^2 / \text{s}$ ) ana metal alüminyum olduğunda bakırın alüminyuma geçişi daha fazla ( $500\text{ }^{\circ}\text{C}$  'de  $10^{-10.3}\text{ cm}^2 / \text{s}$ ) dır [59].
10. Kaynaklanma işleminden sonra tarama elektron mikroskobunda yapılan EDS analiz sonuçları ve SEM fotoğrafları, optik mikroskopla elde edilen görüntülerle uyumlu olarak bakırın alüminyuma daha uzun mesafelerde, alüminyumun bakıra ise daha kısa mesafelerde fakat daha yüksek oranlarda difüze ettiği görülmüştür.
11. Al-Cu 'ın difüzyonla kaynak bölgesinde oluşan fazların literatürde çizilen Al-Cu alaşımına ait faz diyagramı ile uyumlu olduğu, optik mikroskopta ve SEM 'de çekilen mikro yapı fotoğrafları ve EDS analiz sonuçları ile tespit edilmiştir.
12. Kaynaklanmış parçaların çekme deneyi sonucu kırılmanın birleşme bölgesinden 1-2mm alüminyum tarafında olmasına rağmen kırılma yüzeyinin yüksek büyütme SEM görüntüsü ve EDS analizi sonucu, kırılma yerinde bakır difüzyonunun devam ettiği (%15 Cu) saptanmıştır.
13. Deney sonuçları bir bütün olarak değerlendirildiğinde, kullandığımız alüminyum ve bakır malzemelerin koruyucu gaz (argon) ortamında difüzyon kaynağında yaptığımız incelemelere göre en iyi sonuçların  $560\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 4.5 MPa ve 60 dak şartlarında yapılan birleştirmelerle elde edildiği görülmektedir.

## 8. GENEL SONUÇLAR

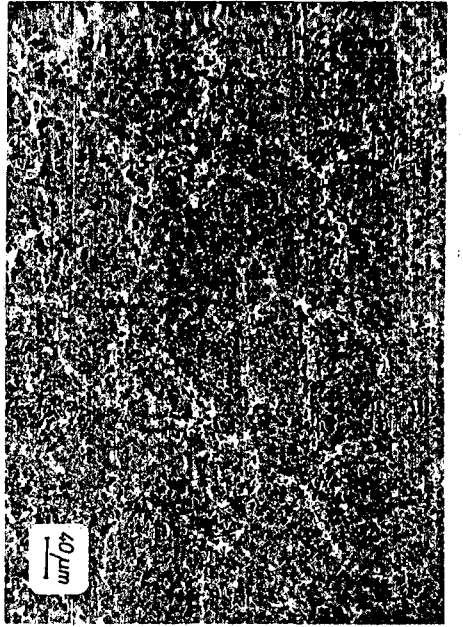
1. Kaynaklı parçaların değerlendirilmesinde önemli bir ölçüt olan çekme deneyinde kopma tam ara bölgeden olmamış, uzama olmamasına rağmen alüminyum tarafından olmuştur. Bu durumda incelenen şartlarda % 100 birleşme sağlanmıştır denilebilir.
2. Yapılan çalışma ile optimum kaynak şartları kullanıldığında görünümü düzgün, temiz, parça ölçülerinde değişimi çok az olan silindirik kaynak bağlantılı parçalar elde edilebilmektedir.
3. Alüminyum ve bakırın difüzyon kaynağında şimdiye kadar olan çalışmalarda vakum şart koşulmasına rağmen, bu çalışmada koruyucu gaz (argon) ortamında malzemelerin difüzyon kaynağının başarılı bir şekilde yapılacağı gösterilmiştir.
4. Yapılan çalışmada diğer kaynak yöntemleriyle yapılması zor ya da imkansız ve birleştirilmesi özellikle soğutma üniteleri ve havacılık endüstrisindeki parçaların korozyon ve dayanım açısından en iyi sonucu sağlayan alüminyum ve bakır malzeme çifti seçilmiş ve amaca ulaşılmıştır.
5. Al-Cu malzeme çiftinin difüzyonla kaynaklanmasında kullandığımız süreler üretim hızını düşürdüğü için önemli bir geciktirici faktör olarak görülebilir. Ancak her iki malzeme çiftinin de çok aktif olduğu göz önüne alınırsa difüzyonun tam oluşması için gerekli olduğu söylenebilir.
6. Bu çalışmada, alüminyum ve bakır malzeme çiftinin optimum 560 °C, 4.5 MPa, 60 dak 'lık kaynak şartlarında ve argon gazı ortamında yapılan difüzyon kaynağı birleştirmelerinde mekanik özellikler açısından iyi bağlantılar elde edilmiştir. Birleştirmelerde kaynak öncesi numuneler, 1200 grit zımparaya kadar zımparalanmış ve arkasından asetonla temizlenmişlerdir. Bu işlem, yüzeylerin temizlenmesi için yeterli olmuştur.
7. Alüminyum ve bakır malzeme çiftinin birlikte en çok kullanıldığı boru parçalarda da deneylerle belirlenen şartlarda difüzyon kaynağı yapılabileceği saptanmıştır.



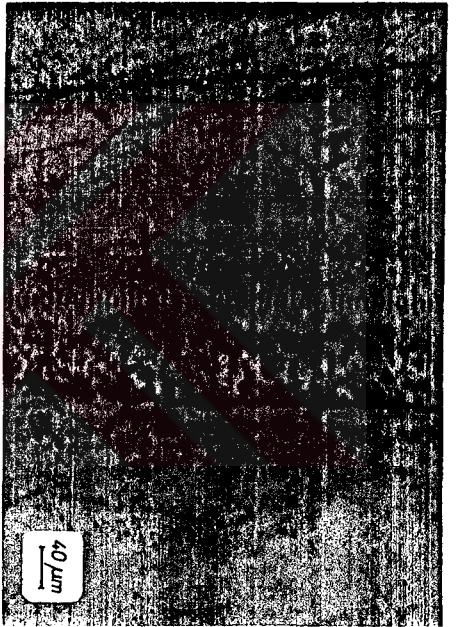
1	Terrazolül çirisi parçası	13	Si 37	
1	Gas giris parçası	12	Si 37	
1	Mekanik bası mekanizması	11	Si 50	
2	Piston kapağı	10	310 Pas Çelik	
2	Piston tutucu	9	310 Pas Çelik	
1	Laf kapağı	8	Si 50	
1	Laf kapağı	7	Si 50	
1	Silindirik gövde	6	Si 60	
6	Pabuç	5	Çinko demir	
2	Tutucu kapağı	4	Fibrolit	
1	Tutucu (NAC 100/200)	3	Fibrolit	
2	Piston	2	315 Pas Çelik	
7	Numuneler	1	Cu-Ar	
Parça adı	Resm no	No	Gereç	Açıklamalar
1:2			Diffüzyon Kaynağı Deney Çizisi	
	Temmuz 1995	Sare	CELİK	3AU Mak Mun Fon



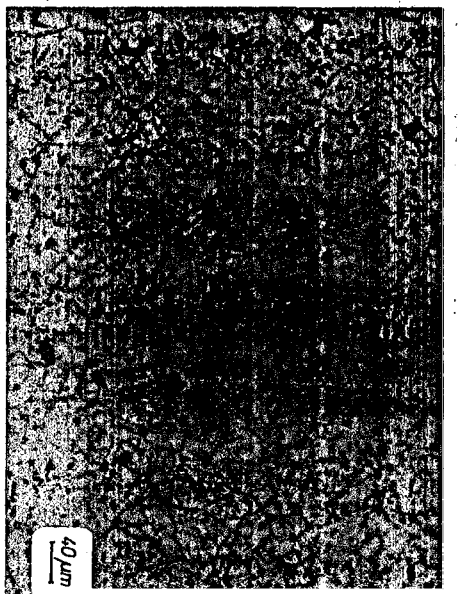
Şekil B.1 Recorder'dan alınan sıcaklık değişim eğrisi



(a)

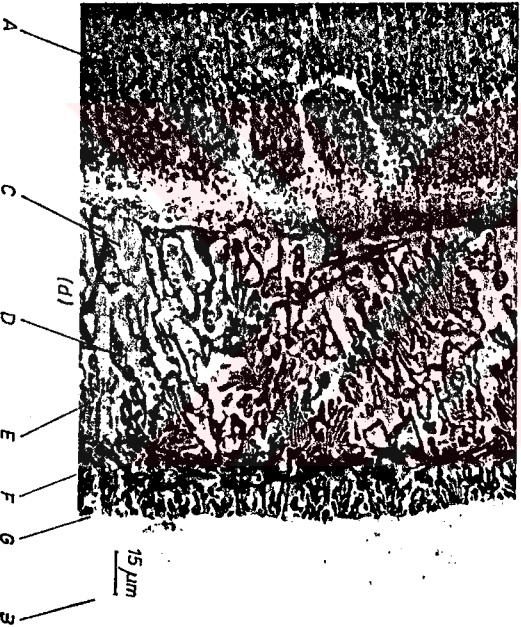


(b)



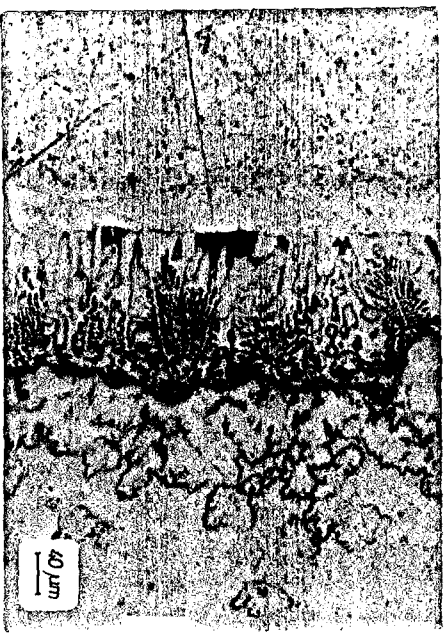
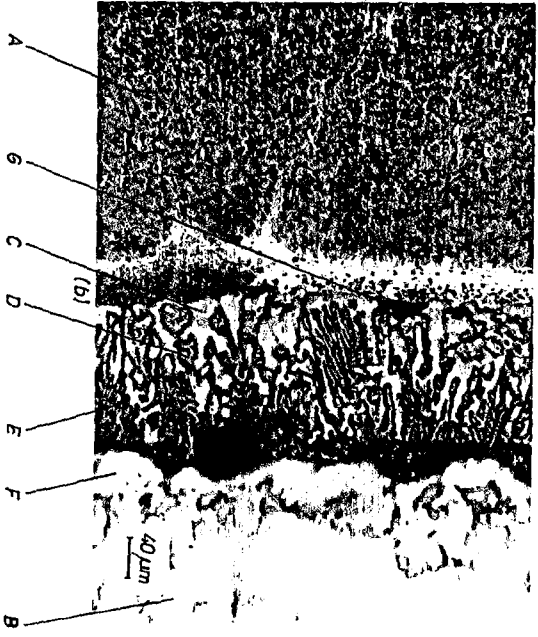
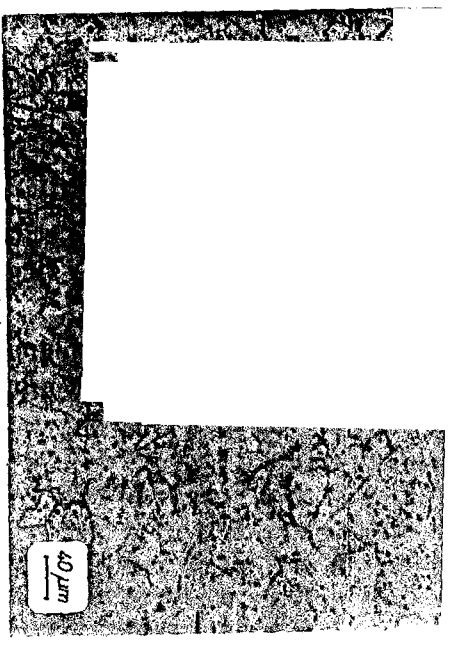
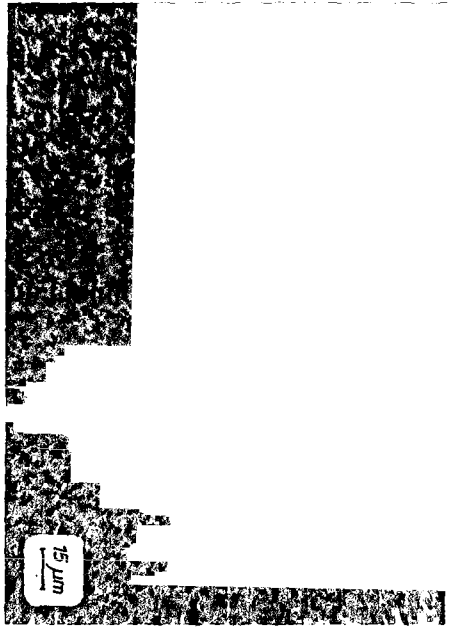
(c)

A, alüminyum ana malzeme; B, bakır ana malzeme; C, ara tabaka alüminyum matris; D, ötektilik içinde  $\theta+k$  fazı; E, ( $\theta+k$ ) ötektilik; F,  $\theta$ +ötektilik; G,  $\gamma$  fazı



Şekil C.1 550 °C, 4.5 MPa, 120 dak şartlarında difüzyon kaynaklı parçaların mikro yapıları:  
 (a) Keller dağılama malzemesi ile dağılanmış Al bölgesi;  
 (b) Dağılanmış birleşme bölgesi; (c) Bakır amonyum-klorür-amonyumhidroksit dağılayıcı ile dağılanmış Cu bölgesi; (d) Keller dağılama malzemesi ile dağılanmış birleşme bölgesi.



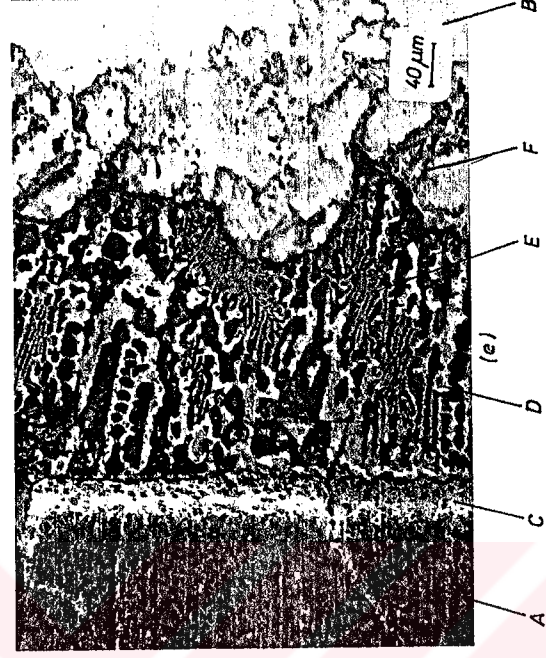


A, alüminyum ana malzeme; B, bakır ana malzeme; C, ara tabaka alüminyum matrisi; D, öteklik içinde Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Cu fazı; E, (θ+κ) öteklik; F, γ fazı; G, difüzyon yüzeyinde kalın boşluklar

Şekil C.2 550 °C, 6,6 MPa, 60 dak şartlarında difüzyon kaynaklı parçaların mikroyapıları :  
 (a) Keller dağılama malzemesi ile dağılanmış Al malzeme; (b) Keller dağılama malzemesi ile dağılanmış birleşme bölgesi; (c) Keller amonyumklorür- amonyumhidroksit dağılayıcı ile dağılanmış ara bölge; (d) Dağılanmamış ara bölge; (e) Keller dağılama malzemesi ile dağılanmış ara bölge; (f) Bakır amonyumklorür amonyumhidroksit dağılayıcı ile dağılanmış Cu malzeme; (g) Dağılanmamış ara bölge;



(d)



(e)

A, alüminyum ana malzeme; B, bakır ana malzeme; C, κ kat eniyik; D, ara tabaka alüminyum matris; E, (θ+κ) ötektik; F, γ fazı

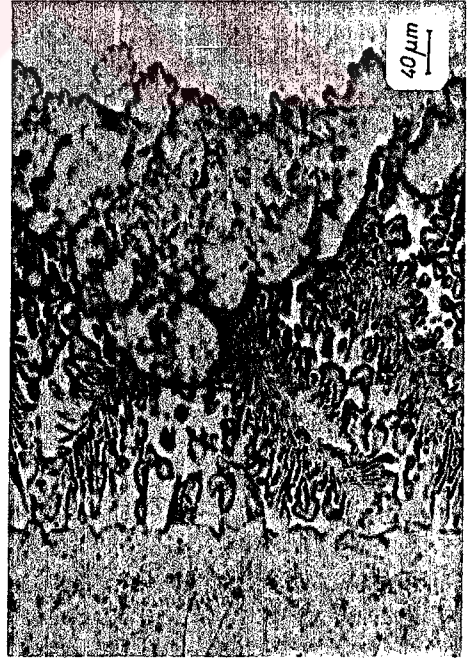
Şekil C.3 560 °C, 4.5 MPa, 60 dak şartlarında difüzyon kaymaklı parçaların mikroyapıları :  
(a), (b), (c) Dağılanmamış birleşme bölgesi (değişik büyütme ve değişik bölgelerden); (d), (e) Keller dağılama malzemesi ile dağılanmış birleşme bölgesi (değişik büyütme) .



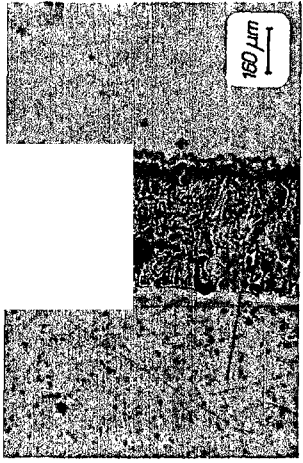
(a)



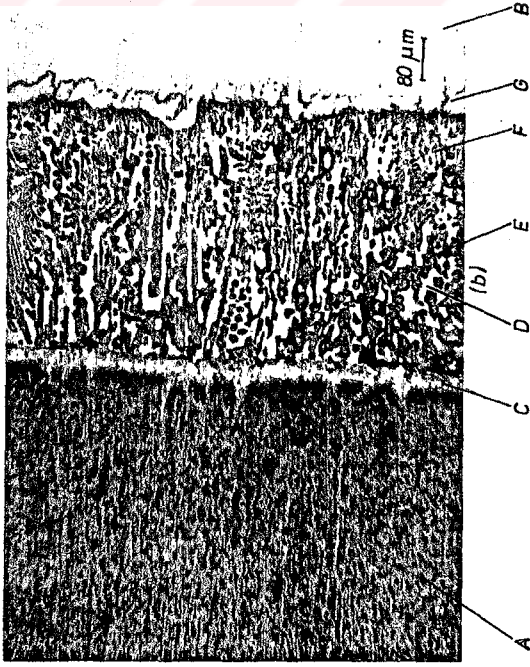
(b)



(c)



(a)



(b)



(c)

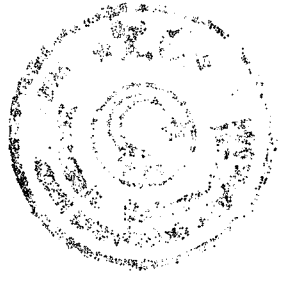
Şekil C.4 560 °C, 6.6 MPa, 30 dak şartlarında difüzyon kaynaklı parçaların mikroyapıları :

(a) Dağılanmamış birleşme bölgesi; (b) Keller dağılama malzemesi ile dağılanmış birleşme bölgesi; (c) Dağılanmamış birleşme bölgesi; (d) Keller dağılama malzemesi ile dağılanmış birleşme bölgesi.

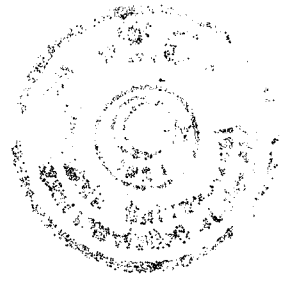
A, alüminyum ana malzeme; B, bakır ana malzeme; C, κ katı eriyik; D, ara tabaka alüminyum matrisi; E, ötektik içinde Al<sub>2</sub> Cu fazı; F, θ+ötektik fazı; G, γ fazı



(d)





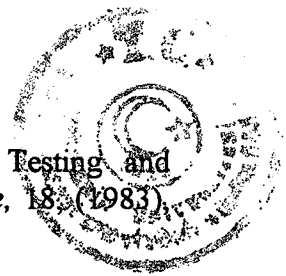


## KAYNAKÇA

- [1] Felikson, E.I., Finkelstein, M.L., "Diffusion Welding Materials in Liquid Media", *Welding Production*, 1, (1971), 37-38
- [2] Bartle, P.M., " Diffusion Bonding : A Look at The Future" , *Welding J.*, (1972), 799-804
- [3] Owczarski, W.A., Duvall, D.S., "Advanced Diffusion Welding Processes", *New Trend in Materials Processing*", (1976), 301-329
- [4] Albom, M.J., "Solid State Bonding", *Welding J.*, (June 1964), 491-504
- [5] Welding Handbook, vol. 2, Eight Edition, (1987)
- [6] 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)
- [7] Tuncel, S., "Diffusion Welding of DIN X210Cr12 Tool Steel and DIN 25MoCr4 Low Alloy Steel", (1990), 159-165
- [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*, 7, (1966), 4-8
- [10] Kazakov, N.F., " Vacuum Diffusion Welding of Metals and Non-Metals", *Welding Production*, 11, (1967), 83-86
- [11] Makara, A.M., Nazarchuk, A.T., " Diffusion Welding Mechanism and Improving The Quality of Joints", *Automatic Welding*, 4, (1969), 25-31
- [12] Kasatkin, B.S., Korab, G.N., "Determining The Welding Condition Parameters for The Diffusion Welding of Steel", *Automatic Welding*, 3, (1969), 10-13
- [13] Kato, H., Shibata, M., Yoshikawa, K., " Diffusion Welding of Ti / Ti and Ti /Stainless Steel Rods Under Phase Transformation in Air", *Materials Science and Technology*, vol.2, (Apr. 1986), 405-409



- [14] Signes, E.G., " Diffusion Welding of Steel in Air", *Welding J.*, (Dec. 1968), 571-574
- [15] Afanasev, I.V., Trafimov, A.P., " Diffusion Welding of Die Parts ", *Welding Production*, 1, (1970), 56-58
- [16] Kazakov, N.F., Samoilov, V.S., Polyakova, M.L., " Vacuum Diffusion Bonding of VK20 Hard Alloy to Steel", *Welding Production*, 2, (1972), 31-33
- [17] Kellerer, H.G., Milacek, L.H., " Determiation of Optimum Diffusion Welding Temperatures for Ti-6Al-4V", *Welding J.*, (May. 1970), 219s-224s
- [18] Wiesner, P., "Diffusion Bonding", *Metal Construction and British Welding J.*, (March 1971), 91-93
- [19] Hoppin, G.S., Berry, T.F., "Activated Diffusion Bonding", *Welding J.*, (Nov. 1970) 505s-509s
- [20] Abromtsev, A.V., Kedrin, I.D., Nichushkin, 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
- [21] Mohamed, H.A., Wachburn, J., "Mechanism of Solid-State Pressure Welding", *Welding J.*, (Sept. 1975), 302s-310s
- [22] Munir, Z.A., "A Theoretical Analysis of The Stability of Surface Oxides During Diffusion Welding of Metals", *Welding J.*, (Dec. 1983), 333s-336s
- [23] Frolov, V.V., "Pickling Titanium for Vacuum Diffusion Bonding", *Welding Production*, (June 1985)
- [24] Jellison, J.L., Huff, C.F., "A Review of Attachment of Stratapax Using Gas Pressure Diffusion Bonding", *J. of Energy Resources Technology*, vol. 102, (June 1980), 70-76
- [25] 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
- [26] Spriggs, D.R., Muth, M.C., "Diffusion Welding for Water-Cooled Gas Turbine Applications", *Welding J.*, (Nov. 1982), 41-48
- [27] Thornton, C.E., Wallach, E.R., "Impact Strenght of En8 Steel Diffusion Bonds", *J. of Materials Science*, 18, (1983), 1433-1442
- [28] 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



- [29] Derby, B., Briggs, G.A.D., Wallach, E.R., "Non-Destructive Testing and Acoustic Microscopy of Diffusion Bonds", *J. of Materials Science*, 18, (1983), 2345-2353
- [30] Derby, B., Wallach, E.R., "Diffusion Bonding in Iron and A Low-Alloy Steel", *J. of Materials Science*, 19, (1984), 3149-3158
- [31] Derby, B., Wallach, E.R., "Diffusion Bonding: Development of Theoretical Model", *Metal Science*, (Sept. 1984), 427-431
- [32] Peshkov, V.V., Gusev, S.I., "Technological Parameters of The Process of Diffusion Bonding Honeycomb Structures Made of Titanium Alloys", *Welding Production*, (Oct. 1984), 24-27
- [33] 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
- [34] Scott, C., Tran, V.B., "Diffusion Bonding of Ceramics", *Ceramic Bulletin*, vol. 64, no 8, (1985), 1129-1131
- [35] Karakozov, E.S., Ternovskii, A.P., Samsonova, T.S., Davidyan, E.V., Khayurov, S.S., Polkin, I.S., "Diffusion Bonding With Forced Deformation of A Nickel-Based Creep-Resisting Dispersion-Hardened Alloy", *Welding Production*, (June 1984), 25-27
- [36] Moore, T.J., Glasgow, T.K., "Diffusion Welding of MA 6000 and A Conventional Nichel-Base Superalloy" *Welding J.*, (Aug. 1985), 219s-226s
- [37] Godziemba, J., Malizewski, "Thermal Surge in Diffusion Welding - Generation, Inrush Characteristic and Effects", *Welding J.*, (June 1987), 174s-190s
- [38] Guo, Z.X., Ridley, N., "Modelling of Diffusion Bonding of Metals", *Materials Science and Technology*, vol. 3, (Nov. 1987), 945-953
- [39] Pilling, J., "The Knetics of Izostatik Diffusion Bonding in Superplastic Materials", *Materials Science and Engineering*, 100, (1988), 137-144
- [40] Kamat, G.R., "Solid-State Diffusion Welding of Nichel to Stainless Steel" *Welding J.*, (June 1988), 44-46
- [41] Calvo, F.A., Urena, A., Gomez de Salazar, J.M., Molleda, F., "Solid-State Transformations During Diffusion Bonding of Copper to Iron", *J. of Materials Science*, 23, (1988), 1231-1236
- [42] Calvo, F.A., Urena, A., Gomez de Salazar, J.M., Molleda, F., "Diffusion Bonding of Grey Cast Iron to ARMCO Iron and A Carbon Steel", *J. of Materials Science*, 24, (1989), 4152-4159

T.G. YUKSEKOKUL  
DOKÜMANİSTON M



- [43] Calvo, F.A., Urena, A., Gomez de Salazar, Carrion J.G., Perosanz, E., "Diffusion Bonding of Ti-6Al-4V Alloy at Low Temperature: Metallurgical Aspects", *J. of Materials Science*, 27, (1992), 391-398
- [44] Dunford, D.V., Partridge, P.G., "Diffusion Bonding of Al-Li Alloys", *Material science and Technology*, vol. 8, (May. 1992), 385-398
- [45] 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. 20A, (Apr. 1989), 627-636
- [46] Akselsen, O.M., "Review Diffusion Bonding of Ceramics", *J. of Materials Science*, 27, (1992), 569-579
- [47] Takahashi, Y., Nakamura, T., Nishiguchi, K., "Dissolution Process of Surface Oxide Film During Diffusion Bonding of Metals", *J. of Materials Science*, 27, (1992), 485-498
- [48] 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
- [49] Sunwoo, A., "Diffusion Bonding of Aluminum Alloy, 8090", *Scripta Metallurgica et Materialia*, vol. 31, no 4, (1994), 407-412
- [50] Stoop, B.T.J., Den Ouden, G., "Diffusion Bonding of Silicon Nitride to Austenitic Stainless Steel With Metallic Interlayers", *Metallurgical and Materials Transactions A*, vol. 26A, (Jan. 1995), 203-208
- [51] Kotani, K., Ikeuchi, K., Matsuda, F., "Transmission Electron Microscopic Study of Interfacial Phases in Diffusion Bonding of Commercial Aluminum Alloys", Japon, (1995)
- [52] Tekin, A., Malzemelerin Elektronik Özellikleri, İTÜ yayını, (1986)
- [53] Bargel, H.J., Schulze, G., çev: Güleç, Ş., Aran, A., Malzeme Bilgisi I ve II, Tübitak Yayınları, Gebze, (1985-1987)
- [54] Kazakov, N.F., Translated from Russian: Kuznetsov, B.V., Diffusion Bonding of Materials, Pergamon Press, First Ed., (1985)
- [55] Oğuz, B., Sertlehimleme, Oerlikon Yayınları, İstanbul, (1988)
- [56] Shewmon, P.G., Diffusion in Solids, Mc Grow -Hill Book Company, (1964)
- [57] Onaran, K., Malzeme Bilimi, İstanbul, (1985)
- [58] Gustav, E.R. Schulze, Metallphysik, Springer-Verlag, Wien New York, (1972)



- [59] Van Vlack, L.H., *Materials Science for Engineers*, 1970, 168-185
- [60] Eckman, D.C., Rosenblum, B.Z., Bowles, C.Q., "Diffusion Bonding of Br - Copper Alloys", *J. of Materials Science*, 27, (1992), 49-54
- [61] "British Standard" BS 499, Part I, *Welding Terms and Symbols*, (1991)
- [62] "British Standard" BS 499, Part I, *Welding Terms and Symbols*, (1992)
- [63] "Metals Handbook", vol. 6, American Metals Society, Metals Park, Ohio, (1983), 672-691
- [64] Owczarski, W.A., Paulonis, D.F., "Applications of Diffusion Welding in USA", *Welding J.*, (Feb. 1981), 22-33
- [65] Konyushkov, G.V., "Equipment for Vacuum Diffusion Bonding", *Welding Production*, 12, (1972), 94-96
- [66] Kasatkin, B.S., Korab, G.N., "Formation of Joint During Welding Without Melting", *Automatic Welding*, 4, (1967), 35-40
- [67] Kazakov, N.F., "Vacuum Diffusion Bonding of L62 Brass to Type AMts Alloy Via A Nickel Interlayer", *Welding Production*, 10, (1972), 25-27
- [68] Ushakova, S.E., Kotelnikov, A.A., "The Vacuum Diffusion Welding of Grade 15 Steel to AMts Alloy or AD1 Aluminium Using An Interlayer of Nickel", *Automatic Welding*, 10, (1970), 52-53
- [69] Thornton, C.E., Wallach, E.R., "Impact Strengths of Steel Diffusion Bonds", *Metals Construction*, (July 1985), 450-455
- [70] Kapralov, B.P., Sigachev, A.P., Kozlovskii, V.I., "Technique of Vacuum Diffusion Bonding Bodies of Electropneumatic Valves", *Welding Production*, (May. 1985), 11-12
- [71] Hariprasad, S., Sastry, S.M.L., Jerina, K.L., "Preparation by Diffusion Bonding of Aluminium Alloy Specimen for Fracture Toughness and Fatigue Crack Growth Resistance Measurement in Different Orientations", *Materials Science and Engineering A*, vol. A169, (1993), L13-L16
- [72] Konovalov, E.G., Galkov, V.S., "Acoustic Emission Recording As A Means of Investigating Solid- State Welding Processes", *Welding Production*, 6, (1972), 82-85
- [73] Sudenkov, E.G. "Effects of Diffusion Welding Conditions on The Strength of Joint Between Cast Iron and Steel", *Automatic Welding*, 8, (1972), 56-58



- [74] Lindemer, T.B., Guy, A.G., "Technical Note: Apparatus for Bonding and Diffusion Metal Specimens Under Pressure", *Welding J.*, (May. 1968), 240s
- [75] Kharchenko, G.K., "Problems in The Diffusion Welding of Dissimilar Metals", *Automatic Welding*, 4, (1969), 25-31
- [76] Korsunkaya, I.G., Lyulichev, A.N., Maksimenko, G.I., "Vacuum Diffusion Welding Magnesium to Aluminium", *Welding Production*, 7, (1970), 30-31
- [77] Tekin, E., *Demir Dışı Metaller ve Alaşımlarının Uygulamalı Optik Metalografisi*, SEGEM yayınları, no. 101, Ankara, (1982)
- [78] Kittel, C., *Introduction to Solid State Physics*, Fourth Ed., John Wiley & Sons. Inc., (1971), 649-692
- [79] Moore, T.J., Holko, K.H., "Solid-State Welding of TD-Nickel Bar", *Welding J.*, (Sep. 1970), 395s-409s
- [80] Alper, S.,R., Hakdiyer, İ., Bigat, T., *Sınai Kimya Analiz Metodları*, İstanbul Üniv. Yayını, İstanbul, (1971)
- [81] TS 138, *Çekme Deneylemleri (Metalik Malzemeler İçin)*, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, (1978)
- [82] Schrader, A., Çeviren: Anık, S., *Dağlama Broşürü*, İTÜ, 1968
- [83] *Metals Handbook*, Eighth Ed., vol. 7, Metals Park, Ohio, (1972)
- [84] Shackelford, J.F., *Introduction to Materials Science for Engineers*, Second Ed., Macmillan Publishing Company, New York, (1990)
- [85] Schumann, H., *Metallographie*, 9. Unveränderte Auflage, Leipzig, (1975), 553-556
- [86] Smith, W.F., *Principles of Materials Science and Engineering*, Second Ed., McGraw-Hill Publishing Company, (1990)