

50975

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TOZ METALDEN ÜRETİLEN BRONZ YATAĞIN DÜŞÜK
KARBONLU ÇELİĞE DİFÜZYON KAYNAĞI İLE
BİRLEŞTİRİLMESİ

Adem KURT

DOKTORA TEZİ
METALURJİ EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

ELAZIĞ

1996



T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TOZ METALDEN ÜRETİLEN BRONZ YATAĞIN DÜŞÜK
KARBONLU ÇELİĞE DİFÜZYON KAYNAĞI İLE
BİRLEŞTİRİLMESİ

Adem KURT

DOKTORA TEZİ
METALURJİ EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

Bu Tez, 26.12.1996 Tarihinde, Aşağıda Belirtilen Jüri Tarafından
Oybirliği / Çokluğu ile Başarılı / Başarısız Olarak Değerlendirilmiştir.

İmza

S. Sarıtaş

Prof. Dr. Süleyman SARITAŞ

İmza

Prof. Dr. M. Mustafa YILDIRIM

İmza

Yrd. Doç. Dr. Mustafa YILDIRIM

ÖZET

Doktora Tezi

**TOZ METALDEN ÜRETİLEN BRONZ YATAĞIN DÜŞÜK KARBONLU ÇELİĞE
DİFÜZYON KAYNAĞI İLE BİRLEŞTİRİLMESİ**

Adem KURT

Fırat Üniversitesi

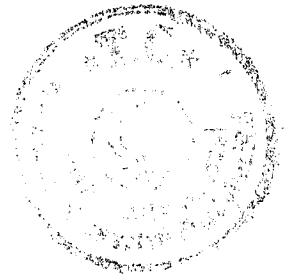
Fen Bilimleri Enstitüsü

Metallurji Eğitimi Anabilim Dalı

1996, Sayfa: 95

Bu çalışmada kendinden yağlamalı yatak malzemesi olarak kullanılan %90 Cu ve %10 Sn alaşımlı toz metal bronz ile düşük karbonlu (SAE 1010) çelik difüzyon kaynağı ile birleştirilmişlerdir. Toz metal bronz numuneler gözenekliliğin ve grafitin difüzyona etkisini belirlemek amacıyla %25 ve %35 gözenekli ayrıca grafitsiz ve ağırlıkça % 1 grafit ilaveli olarak üretilmiştir. Kaynak işlemi 15 MPa sabit basınçta ,650,740,800 °C de ve her sıcaklık için 90,120,150 dakikada gerçekleştirilmiştir.Böylece sıcaklık ve sürenin difüzyon miktarına etkisi ayrı ayrı incelenmiştir.Kaynaklı numunenin her iki clamanının yüzeylerinden mikrofilm, mikrosertlik, EDAX analizleri alınarak değerlendirilmişlerdir.

Sonuç olarak artan kaynak sıcaklığı ve kaynak süresi ile difüzyon miktarında artış görülmüş, grafit ve gözenekliliğin difüzyon miktarına azaltıcı etki yaptığı tesbit edilmiştir. Kaynak bölgesi sertliğinin malzemelerin sertliklerinden düşük olduğu görülmüştür.



SUMMARY

Ph.D Thesis

***DIFFUSION WELDING OF LOW CARBON STEEL TO POWDER
METALLURGY PRODUCTION OF BRONZE BEARING MATERIAL***

Adem KURT

Firat University

Science and Technology Institute

Metallurgy Education Department

1996, Sayfa: 95

In this study, diffusion welding of low carbon steel (SAE 1010) to bronze (%90 Cu-% 10 Sn alloys) produced by P/M techniques and used as self lubricating bearing material was studied. In order to understand the effect of porosity and graphite on diffusion, samples with % 25- % 35 porosity and samples with (wt.) % 1 graphite and graphiteless were produced . Diffusion welding is conducted at 15 MPa constant pressure at the temperatures of 650,740,800 °C and the times of 90,120 and 150 minutes for each temperature. Thus, the effect of time and temperature on diffusion have been investigated. Optic and electron micrographs, microhardness and EDAX analysis of the interfaces have been carried out after diffusion welding and evaluated.

It has been found that, increase in temperature and time resulted in the increase of diffusion, however porosity and graphite contents reduced the amount of diffusion. Microhardness profile of the welded area is found to be lower than that was found in both samples.

TEŞEKKÜR

Doktora Çalışmamın başlangıcından son safhasına kadar tüm konulardaki yardım ve desteklerini hep yanımda gördüğüm danışmam hocam Yrd. Doç. Dr. Mustafa AKSOY'a çalışmalarımın her safhasında maddi ve manevi yardımlarını esirgemeyen hocam Prof. Dr. Süleyman SARITAŞ'a, ilgilerinden dolayı Muş Meslek Yüksek Okulu Md. Prof. Dr. M. Mustafa YILDIRIM'a, Gazi Üniversitesi Tek. Eğt. Fak. Metal Eğitimi Bölümü Başkanı Doç. Dr. Mehmet TÜRKER beye, literatür taramasındaki destekleri için Yrd. Doç. Dr. Nuri ORHAN beye, tezin yazım safhasındaki yardımlarından dolayı Dr. Yusuf ÖZÇATALBAŞ ile Arş. Gör. Ramazan Çıtak'a ve Bölümümüzün öğretim elemanlarına en içten teşekkürlerimi sunarım.



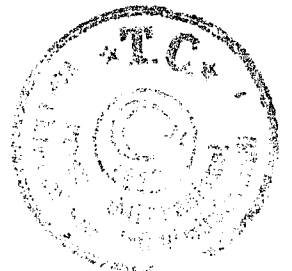
İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZ.....	II
SUMMARY.....	III
TABLolar LİSTESİ.....	IX
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	X
BÖLÜM 1.....	1
1. GİRİŞ.....	1
BÖLÜM 2.....	4
Toz Metalurjisi Üretim Teknikleri.....	4
2.1. Toz Üretim Teknikleri.....	5
2.2. Tozların Şekillendirilmesi (Briktleme).....	5
2.3. Sinterleme.....	5
2.4. Toz Metal Malzemelerin Uygulamaları.....	7
2.5. Toz Metal Malzemelerin Kaynağı.....	8
BÖLÜM 3.....	11
DİFÜZYON.....	12
3.1. Difüzyonun Atomik Mekanizmaları.....	15
3.1.1. Arayer Difüzyonu.....	21
3.1.2. İkame (Yeralan) Difüzyonu.....	25
3.2. Kararlı Hal Difüzyonu (1. FİCK KANUNU).....	26
3.3. Kararsız Hal Difüzyonu (2. FİCK KANUNU).....	29
3.4. Difüzyona Etki Eden Faktörler.....	30
3.4.1. Sıcaklık.....	30
3.4.2. Konsantrasyon.....	31
3.4.3. Kristal Yapı.....	31

Sayfa

	<u>Sayfa</u>
3.4.4. İmpuriteler.....	31
3.4.5. Tane Boyutu.....	31
3.5. Difüzyon Kusurları.....	31
BÖLÜM 4.....	34
4.DİFÜZYON KAYNAĞI.....	34
4.1. Katı Hal Kaynak Yöntemleri ve Difüzyon Kaynağı.....	34
4.2. Difüzyon Kaynağı Mekanizması.....	35
4.3. Difüzyon Kaynağına Tesir Eden Faktörler.....	40
4.3.1. Kaynak Sıcaklığı.....	41
4.3.2. Kaynak Basıncı.....	42
4.3.3. Kaynak Süresi.....	43
4.3.4. Yüzey Şartları.....	45
4.3.5. Kaynak Ortamı.....	47
4.4. Difüzyon Kaynağı Uygulanan Malzemeler.....	47
4.5. Difüzyon Kaynağı Uygulamaları.....	50
4.6. Difüzyon Kaynağının Diğer Kaynak Metodlarıyla Karşılaştırılması.....	52
4.7. Difüzyon Kaynağı Teknikleri.....	53
4.8. Difüzyon Kaynaklı Birleştirmelerin Muayyeneleri.....	55
4.8.1. Tahribatlı Muayyeneler.....	55
4.8.2. Tahribatsız Muayyeneler.....	56
BÖLÜM 5.....	57
5. DENEY ÇALIŞMALARI.....	57
5.1. Toz Metal Numunenin Hazırlanması.....	57
5.2. Düşük Karbonlu Çelik Malzemenin Özellikleri.....	59
5.3. Difüzyon Kaynağının Yapılması.....	59



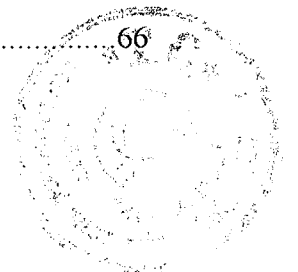
BÖLÜM 6.

6. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞILMASI.....	62
6.1. Kaynak Bölgesinin Mikroyapısına Gözenekliliğin Etkisi.....	62
6.2. Gözenekliliğin Difüzyona Etkisi.....	66
6.3. Sıcaklığın Difüzyona Etkisi.....	67
6.4. Kaynak Süresinin Difüzyona Etkisi.....	78
6.5. Grafitin Difüzyona Etkisi.....	80
6.6. Mikro Sertlik İncelenmesi.....	81
6.7. Genel Değerlendirme.....	84
KAYNAKLAR.....	87

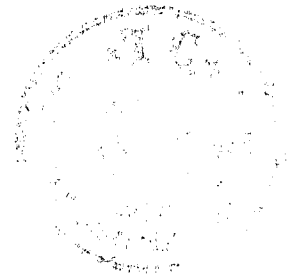


ŞEKİLLERİN LİSTESİ**Sayfa**

Şekil 2.1. Sinterleme Aşamaları.....	6
Şekil 3.1. Difüzyon Sırasında Serbest Enerji ve Kimyasal Potansiyel Değişimi.....	11
Şekil 3.2. YMK kafeste bir atomun bir boşluğa hareketi.....	13
Şekil 3.3. YMK ve HMK kafeste oktahedral arayerler.....	14
Şekil 3.4. YMK kafeste (100) Düzleminde arayer mekanizması ile difüze olan bir arayer atomu.....	14
Şekil 3.5. Bir Konsantrasyon Farkında gelişmiş atlama şeklinde arayer difüzyonu.....	17
Şekil 3.6. Atomların bir yönde sıçraması, boşlukların diğer yönde sıçraması.....	19
Şekil 3.7. YMK bir kafeste bir atomun bitişik bir boşluğa hareketi.....	23
Şekil 3.8. Kararlı Hal Difüzyonu.....	23
Şekil 3.9. Fick'in 2. Kanunun Çıkarılması.....	27
Şekil 3.10. Kirkendall Etkisini Gösteren Deneysel Uygulama.....	40
Şekil 4.1. Difüzyon Kaynağı Mekanizması.....	41
Şekil 4.2. Difüzyon Kaynağının üç aşamalı mekanizması.....	42
Şekil 4.3. Bağlantının Kaynak Mukavemeti ile Kaynak süresi Arasındaki ilişki.....	44
Şekil 4.4. Yüzey Kusurları.....	46
Şekil 4.5. Difüzyon Kaynağı Düzenegi.....	55
Şekil 5.1. Tozların Tane Boyut Dağılımı.....	58
Şekil 5.4. Difüzyon Kaynağının Yapıldığı Tüp Fırın.....	60
Şekil 5.5. Difüzyon Kaynağı İçin Basınç Uygulama Aparatı.....	60
Şekil 6.1. 650 °C de 90 Dakika da Kaynaklı Numune x 200 (% 25 Gözenekli).....	63
Şekil 6.2. 650 °C de 120 Dakika da Kaynaklı Numune x 200 (% 25 Gözenekli).....	63
Şekil 6.3. 650 °C de 150 Dakika da Kaynaklı Numune x 200 (% 25 Gözenekli).....	64
Şekil 6.4. 650 °C de 90 Dakika da Kaynaklı % 35 Gözenekli Numune x 200.....	64
Şekil 6.5. 650 °C de 120 Dakika da Kaynaklı % 35 Gözenekli Numune x 200.....	65
Şekil 6.6. 650 °C de 150 Dakika da Kaynaklı % 35 Gözenekli Numune x 200.....	65
Şekil 6.7. Gözenekliliğin Difüzyon Miktarına Etkisi.....	66

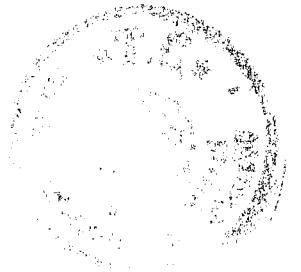


Şekil 6.8. 650 °C de 120 Dakika Şartlarında Kaynak Arayüzeyi x 200.....	67
Şekil 6.9. 740 °C de 120 Dakika Kaynak Şartlarındaki Arayüzeyi x 200.....	68
Şekil 6.10. 800 °C de 120 Dakika Şartlarında Birleştirilmiş Kaynak Arayüzeyi.....	68
Şekil 6.11. 650 °C, 150 Dakikalık Süre de Kaynaklı Numunenin EDAX Analizi.....	70
Şekil 6.12. 740 °C, 150 Dakikalık Süre de Kaynaklı Numunenin EDAX Analizi.....	71
Şekil 6.13. 800 °C, 150 Dakikalık Süre de Kaynaklı Numunenin EDAX Analizi.....	72
Şekil 6.14. 650 °C 150 Dakikada Fe ve Cu'ın Karşılıklı Difüzyonu.....	73
Şekil 6.15. 740 °C 150 Dakikada Fe ve Cu'ın Karşılıklı Difüzyonu.....	74
Şekil 6.16. 800 °C 150 Dakikada Fe ve Cu'ın Karşılıklı Difüzyonu.....	74
Şekil 6.17. 150 Dakikalık Sürede Kaynatılan Numune de Sıcaklığa Bağlı Olarak Bronz İçinde Fe'in Difüzyon Miktarı.....	75
Şekil 6.18. 150 Dakikalık Sürede Kaynatılan Numune de Sıcaklığa Bağlı Olarak Çelik İçerisinde Cu'ın Difüzyon Miktarı.....	76
Şekil 6.19. Çelik Tarafında Çökelmiş Cu'ın EDAX Analizi.....	76
Şekil 6.20. 800 °C 150 Dakikada Kaynaklı Numunede Cu Çökeltileri x 500.....	77
Şekil 6.21. Kaynak Arayüzeyinde Oluşan Aratabakaların EDAX Analizi.....	77
Şekil 6.22. 740 °C, 150 Dakikalık Kaynak Süresinde Çelik İçerisindeki Cu Difüzyonunun Değişimi.....	78
Şekil 6.23. Farklı Sıcaklıklarda Fe Miktarının Süreye Bağlı Olarak Değişimi.....	79
Şekil 6.24. 800 °C 150 Dakika Kaynak Süresince Grafitli ve Grafitsiz Numunelerde Fe miktarının Mesafeye Bağlı Değişimi.....	81
Şekil 6.25. 650 °C de 90 Dakika Süre de Kaynatılmış Parçanın Mikrosertlik Değişimi.....	82
Şekil 6.26. 800 °C 90 Dakika Sürede Kaynatılmış Parçaların Mikrosertlik Değişimi....	82
Şekil 6.27. 90 Dakika Kaynak Süresinde Çelik İçerisinde Bakırın Sıcaklığa Bağlı Değerleri.....	83
Şekil 6.28. Bakır Difüzyonu İle Ferritleşen Bölge.....	84



TABLolar LİSTESİ***Sayfa***

Tablo 4.1. Amerika’da Difüzyon Kaynağı ile Kaynatılan Malzemeler.....	48
Tablo 5.1. Toz Tane Boyut Analizi.....	57
Tablo 5.2. Difüzyon Çiftinde Kullanılan Çeliğın Kimyasal Analizi.....	59



SEMBOLLER LİSTESİ

T / M	: Toz Metalurjisi
TİG	: Tungsten İnert Gaz
MAG	: Metal Aktif Gaz
J	: Atom Akısı
J _B	: B atomlarının akısı
Γ	: Atomların Sıçrama Sayısı (Frekansı)
n ₁	: 1 nolu düzlemdeki atom sayısı
α	: Atomların sıçrama mesafesi
C _B	: B atomlarının konsantrasyonu
D _B	: B atomlarının difüzyon katsayısı
t	: Zaman
r	: t anında atomun orjinal yerinden kat ettiği mesafe
ΔG; Q	: Aktivasyon Enerjisi
z	: Boş nokta sayısı
v	: Atomların Sıçramaya kalkışma sayısı
ΔH	: Entalpi
TΔS	: Entropi
R	: Gaz Sabiti
T	: Sıcaklık Kelvin
υ	: Titreşim Frekansı
X _v	: Herhangi bir noktanın boş olma ihtimali
C _s	: Yüzeydeki Atom yoğunluğu
C _x	: Yüzeyden x kadar uzaklıktaki yoğunluk
C ₀	: Difüzyon çiftinden birinin ilk yoğunluğu
D	: Ortak Difüzyon Katsayısı
erf	: Hata fonksiyonu

N_A : A atomunun mol oranı
 N_B : B Atomunun mol oranı
 T_M : Metalin Ergime Sıcaklığı
 Pa : Paskal
 MPa : Mega Paskal
 μm : Mikrometre



BÖLÜM 1

1. GİRİŞ

Toz Metalurjisi; (T/M) metal tozlarının şekillendirilip ,sinterlenmesi yöntemi ile metalik parça üretme teknolojisidir. Aynı zamanda bilinen en eski metal şekillendirme yöntemidir(Metals Handbooks, Cilt :7, 1984)

M.Ö. Hindistan'da 6 ton ağırlığında demir toz kütle yapıldığı bilinmektedir. Ancak onlar tozu üretmek yerine hazır tozu sıkıştırarak elde etmişlerdir. Günümüzde toz metalurjisi ile seramik teknolojisi birleşmiş durumdadır, ikisi de aynı üretim aşamalarını kullanır. Toz metalurjiye ihtiyaç duyulmasının bir takım nedenleri vardır. Bazı parçaların döküm yolu ile elde edilme imkanı yoktur. Örneğin tungstenin dökümle elde edilmesi imkansızdır, çünkü 3200°C gibi yüksek ergime derecesine sahiptir, ancak toz metalurjisi ile üretilir.

Bazı özellikleri sadece toz metal yöntemlerinin vermesi ve ekonomik olması diğer bir tercih sebebidir. Kendi kendini yağlayan yataklar, sert metaller sadece T/M yöntemi ile üretilir. Talaşlı imalatı yok etmesi, işçiliği azaltması ekonomik üstünlükler sağlamaktadır.

T/M üretim yöntemleri diğer metal şekillendirme yöntemlerinden farklıdır ve seramik parça üretim teknolojisine benzemektedir (Dixon,1963).

Her iki halde de tozlar bir kalıp içerisinde sıkıştırılır, elde edilen şekilli parçalar sinterlenerek gerekli mukavemete kavuşturulurlar. Seramik tozların şekillendirilmesi ile metal tozlarının şekillendirilmesi arasındaki en önemli fark metal tozlarından üretilmiş parçaların kuvvet karşısında kolayca plastik şekil değiştirebilmeleridir.

T/M yönteminde modern gelişmeler Birinci Dünya Savaşı yıllarında başlamıştır. Gözenekli gereçler, mıknatıslar ve yağ emdirilmiş demir tozu parçalar bu yıllarda üretilmiştir. Otomotiv sanayiinde olan büyük gelişmeler toz metal yöntemlerini de birlikte büyüttüştür. 1940 'lı yıllarda toz metal ürünü olarak en fazla kendi kendini yağlayan yataklar üretilmiştir. 1950 'li yıllardan itibaren demir tozu ve çelik tozundan üretilen dişliler, kamlar ve çeşitli şekiller piyasaya hakim olmaya başlamış, 1960 'larda tam yoğun toz metal parçalar, takım çelikleri, yayılma sertleştirilmiş bakır ve izostatik preslenmiş süper alaşımlar üretilmişlerdir.

Dünya toz metal piyasası yıllık %12 oranında genişlemektedir (Gorham). En çok kullanılan metal tozu %85 oranla demir çelik tozudur. İkinci sırada %6 - %7 ile bakır alaşımları gelmektedir. Bakırın çeşitli oranlardaki alaşımları yatak imalinde kullanılmaktadır. Genellikle %90 bakır, %10 kalay alaşımı bronz tozları kendinden yağlamalı yatak üretiminde başarıyla kullanılmaktadır.

T/ M yöntemi ile üretilen gözenekli yataklar genellikle otomotiv endüstrisinde ve çamaşır makinası ,buz dolabı, elektrik süpürgesi gibi ev aletlerinin elektrik motorlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. %20 - 25 gibi gözenekliliğe sahip olduklarından ağır yüklerin uygulandığı yerlerde, gözeneklerin sebep olduğu düşük mukavemet , kullanımlarını sınırlamaktadır. Bununla beraber toz metal malzemelerde gözeneklilik özellikle istenmektedir. Çünkü, bu gözenekler yataklarda yağ deposu görevi yapmaktadır. Çalışma sırasında mil ile yatak arasındaki yağ filminin hidrodinamik basınç değişikliği ve metal ile yağın genleşme katsayısı farkından dolayı yağ gözeneklerden mile doğru emilerek yağlama görevi yapar. Dönme hareketi durduğunda yatak soğur ve kılcallık etkisi ile yağ tekrar gözeneklere absorbe edilir.

Kendinden yağlamalı toz metal yataklar bir çelik tutucu ile desteklenmektedir.

T/M parçalar çoğunlukla küçük ebatlı olduklarından kırılma ve bozulmaları durumunda yenisinin temin edilme kolaylığı bu parçaların kaynaklı birleştirilmelerinde fazla gelişme sağlamamıştır. Ancak 1981 'den sonra Rusyada (Malevkii, 1981), (Movchan, 1987) bronz çeliğe difüzyon kaynağı ile birleştirmişlerdir, fakat bu araştırmacılar hadde çeliğini hadde bronz ile birleştirmişlerdir.

Bu çalışmada toz metal yatakların kullanım alanlarını daha fazla yaygınlaştırmak ve ağır yüklerin kullanıldığı yerlerde de kullanılabilirliğini sağlamak amaçlanmıştır. Bunun da T/M yatakları bir çelik malzeme ile birleştirmekle sağlanacağı düşünülerek bunun için katı hal kaynak yöntemlerinden difüzyon kaynağı metodu seçilmiştir.

Difüzyon kaynağı, malzemelerin ergime derecelerinin yaklaşık 1/2 si bir sıcaklıkta gerçekleştirildiğinden malzemelerde istenmeyen faz dönüşümlerine imkan vermemektedir. Bu ise malzemelerin metalurjik ve mekanik özelliklerini etkilemeden birleşmenin gerçekleşmesini sağlamaktadır. Difüzyon kaynağı ile ilgili geniş bilgi Bölüm 4. de verilmiştir.

BÖLÜM 2

2. TOZ METALURJİSİ ÜRETİM TEKNİKLERİ

2.1 Toz Üretim Teknikleri

Metal tozu üretim teknikleri tozlara ait bazı özellikleride belirlemektedir. Parçacık şekli, parçacık boyutu üretim tekniklerine göre değişiklik göstermektedir. Genellikle toz üretimi şu yöntemlerden birisi veya birkaçı ile yapılmaktadır:

A - Mekanik metodlar

- a. Ani darbe
- b. Oğuşturma
- c. Öğütme
- d. Sıkıştırma

B - Elektrolitik metod

C - Kimyasal metodlar

- a. İndirgeme yöntemi
- b. Karbonil yöntemi
- c. Çökeltme yöntemi

D - Atomizasyon yöntemi

- a. Su atomizasyonu
- b. Gaz atomizasyonu
- c. Döner disk atomizasyonu
- d. Döner elektrod atomizasyonu

Dünyada üretilen tozların %80 den fazlası atomizasyon yöntemi ile üretilmektedir. Bu yöntem eritilebilen tüm metallerden ve alaşımlardan toz üretmede kullanılabilen bir

yöntemdir (BEDDOW,1978). Atomizasyon yöntemi ile üretilen tozların %80 'i ise su atomizasyonu ile üretilmektedir.

2.2. Tozların Şekillendirilmesi (Briktleme)

Metal tozlarından parça üretmek için tozları, üretimi istenen parçanın şekline biçimlendirmek, tozları arasında bağ oluşturmak ve istenen oranda gözeneklilik sağlamak amacıyla tozlar sıkıştırılırlar. Sıkıştırma (briktleme) ile parçaya sadece şekil verilmiş olur. Gerekli mukavemet ancak sinterlemeden sonra elde edilir.

Tozların şekillendirilmesinde pek çok yöntem vardır. Ancak genelde basınçsız yöntemler ve basınçlı yöntemler diye ikiye ayrılabilir. Basınçsız yöntemlerde ya toz bir kalıp içine doldurulur gevşek halde doğrudan sinterlenir veya çok ince küresel tozlar bir akışkan taşıyıcı ile karıştırılıp döküm yoluyla şekillendirilir. Ancak bu metodun bugün ticari kullanım alanı yok denecek kadar azdır. Basınçlı yöntemler soğuk veya sıcak olarak gerçekleştirilebilir.

Genelde basınçlı yöntemler şunlardır:

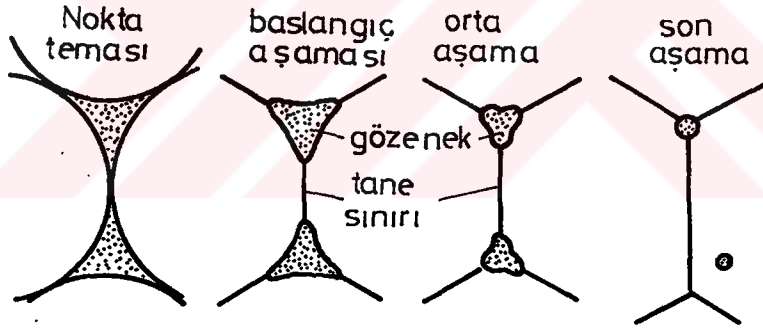
- a. Metal kalıplarda presleme
- b. İzostatik presleme
- c. Haddeleme
- d. Ekstrüzyon
- e. Metal Enjeksiyon Kalıpları

2.3. Sinterleme

Sıkıştırma ile şekillendirilen parçalar toz şekline göre, küresel olmayan tozlarda mekanik kilitleme ile mukavemet kazanır. İkinci olarak toz yüzeylerinde sürtünmeden dolayı soğuk kaynak oluşur. Ham mukavemetteki amaç parçanın bozulmadan kalıptan çıkmasını sağlamaktır. Kullanıldığı yerdeki gerekli mukavemet

sinterleme ile sağlanır. Ham mukavemet ile sinterlenmiş mukavemet arasında 100 kat'ın üzerinde fark vardır. sinterleme ile toz taneleri arasında metalurjik bağ oluşur (Sarıtış, 1992).

Sinterleme ; sıkıştırılarak geometrik şekli verilmiş parçaya malzemenin ergime sıcaklığının altında ısıtılarak mukavemet kazandırma işlemidir. Genelde bu sıcaklık malzemenin ergime sıcaklığının $\frac{2}{3}$ veya $\frac{4}{5}$ 'i alınarak tesbit edilir. Demir ve çelik malzemeler için $1100 - 1250$ °C de, bronz için 800 °C ideal sinterleme sıcaklıklarıdır (Kurt,1992). Sinterleme süresi ile sinterleme sıcaklığı arasında yakın bir ilişki vardır. Süre kısa tularsa sıcaklık fazla alınır, sıcaklık az alınırsa süre fazla tutulmalıdır.



Şekil 2.1. Sinterleme aşamaları (German,1984)

Sinterleme başlayınca şekil 2.1.'de görüldüğü gibi taneciklerin nokta teması halinde oldukları kabul edilerek, sinterleme zamanı ile malzemede; başlangıç, orta ve

son aşama olmak üzere üç aşamada sinterlemenin gerçekleştiği kabul edilir (Kurt, Sarıtaş,1992).

Başlangıç aşamasında temas noktalarında boyun büyümesi oluşur. Bu kademede boyun büyüme ve büzülme oranı azdır.

Orta aşamada ilerleyen sinterleme zamanı ile gözeneklerde büzülme olur,gözenekler pürüzsüz fakat birbirleri arasında hala tam bağ mevcuttur.

Son aşamada gözenekler küreselleşir ve kapanarak birbirinden bağımsız hale gelirler .Gözenekler içindeki hapsedilen gazlar son yoğunlaşma kademesinin miktarını sınırlarlar. Son aşamada %92'yi geçen teorik yoğunluk elde edilir.

Sinterleme sırasında koruyucu atmosfer kullanılmalıdır. Sinterleme atmosferi olarak indirgeyici gazlar kullanılmakta ve böylece toz yüzeylerinde önceden oluşmuş oksitler sinterleme sırasında indirgenmektedir. En iyi indirgeyici gaz hidrojen olmakla beraber pahalıdır. Bunun yerine kırılmış amonyak kullanılmaktadır. Kırılmış amonyakta % 25 azot, %75 indirgeyici hidrojen vardır.

2.4. Toz Metal Malzemelerin Uygulamaları

Toz metal malzemeler günümüzde pek çok malzeme ile başabaş mücadele etmektedir.Toz metal parçaların sayıları artık binlerle ifade edilmektedir. Uygulama alanları;

- 1- Talaşlı imalat gerektirmeyen makina parçaları
- 2- Takım çelikleri
- 3- Sert metaller
- 4- Sermetler
- 5- Kaymalı yataklar

6- Gözenekli metaller

7- Sürtünme elamanları

8- Elektrik ve mağnetik malzemeler

Çeşitli yakıt ve patlayıcı sistemlerinde Al, Zr, Mg ve Titanyum gibi yüksek yanma sıcaklıkları olan metallerin tozları kullanılmaktadır. Metal tozları patlayıcılarda gaz oluşmasını engelleyici ,roket yakıtlarında şiddetli enerji verici ve işaret fişeklerinde ışık oluşturunu olarak kullanılırlar.

Demir tozu gıda sanayiinde de gıda zenginleştirici olarak kullanılmaktadır. Demir eksikliğinin kansızlığa yol açtığı bilinmektedir. Demir sülfat,saf demir ve çeşitli demir tozları doğrudan gıda zenginleştirici olarak kullanılmaktadır . A.B.D.'de yılda 500 ton demir tozu gıda zenginleştirici olarak kullanılmaktadır (Santaş, 1992).

Diş dolgu amalgamlarının önemli bileşimi gümüş esaslı metal tozlarıdır. Toz sıvı civa ile karıştırıldığında gümüş ve kalay civa içinde çözülür ancak çözünürlük sınırlı olduğundan tekrar çökelme ile metaller arası bileşik oluşturarak ayrışırlar.

Çeşitli metalik boyalar ve yaldızlarının üretiminde de metal tozları kullanılmaktadır. Halen bronz , bakır, alüminyum, nikel, çinko, gümüş ve paslanmaz çelik tozları çeşitli metalik boyaların esasını teşkil etmektedir.

Çeşitli ferro alaşımlar ve metal tozları kaynak elektrodu örtüsü olarak kullanılmaktadır. Krom, manganez ve vanadyumun ferro alaşımlarının ve nikel, manganez, krom ve demir metallerinin tozları elektrod örtüsünde kullanılmaktadır. Bu amaçla kullanılan demir tozlarının miktarı toplam demir tozu tüketiminin %10'u nu oluşturur.

Sert yüzey kaplamalarda, aşınmaya dayanıklı alaşımların tozları kullanılmaktadır. Bu kaplamalar alaşım tellerindende yapılmaktadır ancak toz kullanılması yapıyı homojen yapmaktadır.

2.5. Toz Metal Malzemelerin Kaynağı

T/M parçaların kullanım alanları her geçen gün genişlemekte , hadde veya döküm yoluyla imal edilen makina parçalarına karşı belirgin bir avantaj sağlamaktadır. Buna rağmen T / M malzemelerin gerek birbirleri ile gerekse diğer yöntemlerle imal edilmiş parçalar ile zaman zaman birleştirilmeleri gerektiği halde bu parçaların birleştirilmesi veya kaynağı fazla anlaşılmamıştır. Hadde yoluyla üretilmiş malzemelerin birleştirilmesi veya kaynağı ile ilgili pek çok teknikler mevcuttur (Linnert,1967).

T / M parçaların kaynaklanabilirliğini bir çok fiziksel özellik belirlemekle beraber en önemli özellik bu parçaların gözenekliliğidir. Gözenek miktarı ısı transferini etkiler ve dolayısıyla kaynak parametrelerini değiştirebilir. Kaynak esnasında,eriyik ilave metalin gözeneklere filtrasyonu sonucu gözeneklilik oranı düşer ve ITAB'da çekme ve büzülmelerin artmasına sebep olur, buda geçiş bölgesindeki çatlak riskini artırır. Gözeneklerin ısı yalıtkanlık yapmaları , T/ M parçaların kaynağında iletkenliği düşürerek soğumayı yavaşlatır. Kaynak bölgesinde artan yoğunluk sertleşebilirliği artırır ve geçiş bölgesinde çatlaklara sebebiyet verir (Hamill,1993).

T/ M metodu ile üretilen parçaların kaynağında, kaynak bölgesinde bulunan gözenek içerisinde kalma ihtimali olan bazı elementlerin ve partiküllerin elimine edilmesi için tedbir alınmalıdır. Bu partiküller; yağlayıcı kalıntıları, soğutma sıvısı veya kalıcı kütleler olabilir.

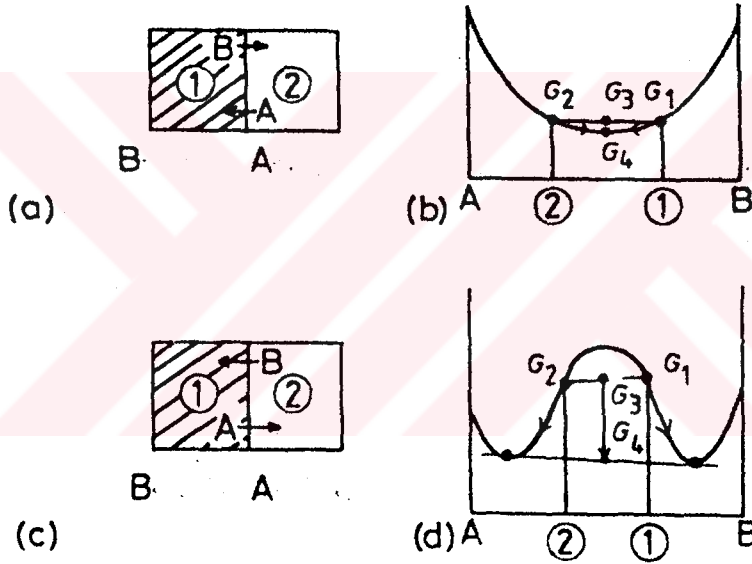
Ergitmeli ve katı hal kaynak yöntemleri toz metal parçaların kaynağında da başarılı bir şekilde kullanılmaktadır. Yoğunlukları 6.5 g / cm^3 'e kadar olan parçalar genellikle katı hal birleştirme yöntemleri ile, 6.9 g / cm^3 yoğunluktaki parçalar hem ergitmeli hemde katı hal kaynak yöntemleri ile birleştirilebilmektedir. Yüksek yoğunluktaki ($>7.0 \text{ g / cm}^3$) parçalar ise T.İ.G., M.A.G. gibi ergitmeli yöntemler ile başarılı bir şekilde kaynatılabilmektedir. Katı hal kaynak yöntemleri, difüzyon kaynağı, sürtünme kaynağı, basınç kaynağı ve lehimleme gibi malzemelerin ergime derecelerinin altında bir sıcaklıkta yapılan birleştirme yöntemleridir.

T/M parçaların ergitmeli yöntemlerden MAG kaynağı ile kaynaklanabilirliği araştırılmış, mekanik özellikler ve metalurjik açıdan uyumsuzluk görülmemiştir. Çekme testinde kopma toz metal tarafında olmuştur. Toz metal parçada ısının tesiri altındaki bölgede (ITAB) gözenek miktarında ve boyutunda azalma gözlenmiştir. Kaynak metali ince dentritik yapıdan oluşmuştur (Kurt v.d. 1996). Bu yapı hadde malzemelerin kaynak bölgesi mikro yapısı ile benzerlik göstermektedir (Gülenç, 1995).

BÖLÜM 3

3. DİFÜZYON

Difüzyon, bir element atomunun bir başka elementin kafes yapısı içerisinde kendine yer bulma olayıdır. Metalurjik dönüşümlerin meydana geldiği hızı kontrol eden en temel hadise atomların difüzyonudur. Difüzyonun meydana gelme sebebi atomların Gibbs serbest enerjisini azaltma isteğidir.



Şekil 3.1. Difüzyon Sırasında Serbest Enerji ve Kimyasal Potansiyel Değişimi
(Porter, 1984)

Şekil 3.1. a'da görüldüğü gibi difüzyon başlarsa serbest enerji G_4 'e doğru azalır, yani homojen bir alaşımın serbest enerjisi haline gelir. Bu durumda yüksek konsantrasyonlu bölgeden düşük konsantrasyonlu bölgeye difüze olan A ve B atomları serbest enerjide bir düşüş meydana getirirler. Bir başka ifade ile konsantrasyon gradyentini düşürürler. Eğer, A - B alaşımı için şekil 3.1.a'daki serbest enerji ve

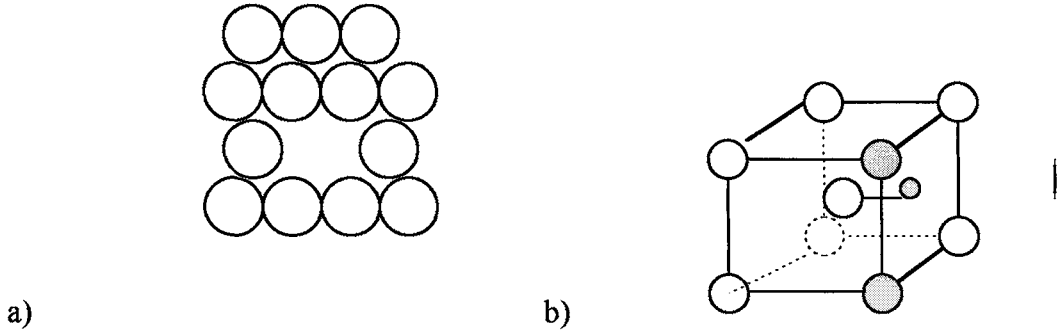
bileşim, şekil 3.1.d'deki gibi çizilmiş olsaydı A ve B atomları yüksek konsantrasyonlu bölgelere doğru difüze olacaktı, yani konsantrasyon gradyenti yükselecekti. Halbuki en tabii hal serbest enerjinin G3 den tekrar G4'e doğru azaldığı haldir.

Difüzyon, kimyasal potansiyeli yüksek olan bölgeden kimyasal potansiyeli düşük olan bölgeye doğru meydana gelir. Kimyasal potansiyel her yerde aynı olunca difüzyon olayı durur.

3.1. Difüzyonun Atomik Mekanizmaları

Katılarda malzemelerin difüze olabildikleri iki ana mekanizma vardır. Bunlar ikame (yeralan) ve arayer mekanizmalarıdır. Yeralan atomları genellikle bir boşluk mekanizması ile difüze olurken daha küçük çaptaki arayer atomları içinde çözündüğü daha büyük çaplı atomlar arasında zorlanarak ilerler.

Herhangi bir kristal içindeki bir yeralan atomu bulunduğu yerde salınır ve benzer yerlerdeki komşu atomlar tarafından kuşatılmış durumdadır. Her atom tarafından gösterilen ortalama titreşim enerjisi 3 kT kadardır. Dolayısıyla titreşim mutlak sıcaklıkla orantılı olarak artma gösterir. Normal olarak bir yeralan atomu komşu atomlar tarafından sınırlandırılmışlardır (kuşatılmışlardır), ve atom bir başka kafes noktasına hareket edemez. Ancak komşu nokta boş ise şekil 3.2.de gösterildiği gibi atom bu boşluğa atlayabilir.



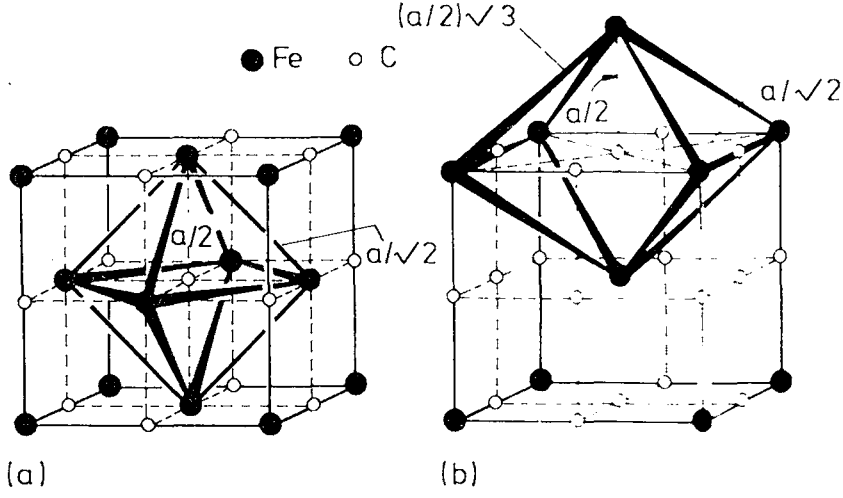
Şekil 3.2. YMK kafeste bir atomun bitişik bir boşluğa hareketi
(Shewman,1963).

a - Bir sıkı paket düzlemi

b - Atlama meydana gelmeden önce yer değiştirmesi gereken
dört atomu gösteren bir birim kafes (taralı atomlar).

Şekil 3.2.b'de atlamanın meydana gelebilmesi için taralı atomların, göç eden atomların aralarından geçmesini sağlayacak şekilde bir boşluk açmaları gerekir. Buna göre herhangi bir atomun boşbir kafes noktasına atlama ihtimali yeterli titreşim enerjisini elde etme ihtimaline; katı içerisindeki hareketinin hızı da boşluk sayısına bağlıdır. Hem atlama ihtimali hemde boşluk sayısı ise doğrudan sıcaklığa bağlıdır.

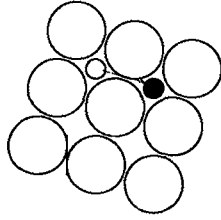
Bir alaşımın çözünen atomları, içinde çözündüğü alaşımın atomlarından çok küçük ise $\leq (\% 41)$, (Yıldırım, 1994) çözündüğü atomlar arasındaki arayer noktalarından birini işgal edeler. YMK yapı malzemelerde, arayer noktaları, kübik kafesin köşeleri arasındaki mesafenin ortasıdır. Şekil 3.3.a. Bunlar okta hedral nokta olarak bilinirler. HMK yapılarda ise arayer atomları çoğunlukla bir oktahedron oluştururlar. Oktahedron noktaları Şekil 3.3.b. de görüldüğü gibi köşelerde ve ortayüzey merkezinde yer almaktadırlar.



Şekil 3.3. (a) YMK kafeste Oktahedral arayerler

(b) HMK kafeste oktahedral arayerler (Haasen, 1978).

Arayer atomlarının yoğunluğu genellikle mevcut noktaların sadece küçük bir kesrini dolduracak kadar düşüktür. Bu da her bir arayer atomunun daima boşluk noktaları ile kuşatıldığı ve ısı enerjisinin gerilim enerji engelini aşması oranında başka bir pozisyona atlayabileceği manasına gelir. Şekil 3.4.



Şekil 3.4. Y.M.K. Kafeste A {100} düzleminde arayer mekanizması ile difüze olan bir arayer atomu (Porter, 1984).

3.1.1. Arayer Difüzyonu

Bu mekanizmada çözünen bir malzemenin atomları, içerisinde çözündüğü diğer malzemenin atomlarından çok küçük ise çözündüğü atomlar arasındaki arayer noktalarından birini doldururlar. YMK yapıya sahip malzemelerde arayer noktaları kübik kafesin köşeleri arasındaki mesafenin ortasıdır. Bu durum şekil 3.3.a. ve b’de gösterilmiştir.

Arayer difüzyonu, atomların gelişigüzel atlaması şeklinde ve sıcaklığın tesiri ile olmak üzere iki şekilde meydana gelir. Önce komşu atomların (yani atomların içinde çözündüğü) basit bir kübik şeklinde düzenlendiği ve çözünen B atomlarının ana yapıda herhangi bir distorsiyona sebep olmadan arayerlere mükemmel olarak denk geldiği ve çözeltisinde, her arayer atomunun 6 adet boş arayer noktası ile kuşatılacak kadar seyreltik olduğu kabul edilirse; B atomları yoğunlukları her yerde eşit oluncaya kadar bir X yönünde malzeme içinde difüze olabilir. Şekil 3.5.’deki 1 ve 2 düzlemi arasındaki atom değişimi incelenecek olursa; bir arayer atomunun saniyede Γ_B kere sıçradığı ve her sıçrayışın gelişigüzel olarak 6 adet boş noktadan herbirine sıçrama ihtimalinin eşit olduğu görülür. Eğer 1 düzlemi m^2 de n_1 sayıda B atomu ihtiva ediyorsa; 1 nolu düzlemde 2 nolu düzleme atlayacak atomların sayısı şöyle verilir;

3.1

$$J_B = \frac{1}{6} \cdot \Gamma_B \cdot n_1$$

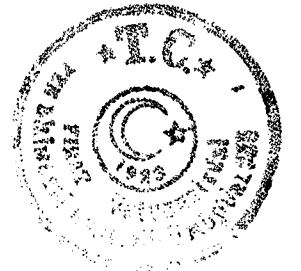
J_B ; 1 nolu düzlemde 2 nolu düzleme geçen B atomlarının sayısı

Γ_B ; B atomlarının sıçrama sayısı

n_1 ; 1 nolu düzlemdeki B atomunun sayısı

$1/6$; ihtimal oranı

Aynı zaman diliminde 2 nolu düzlemde 1 nolu düzleme atlayan atom sayısı Γ_B ’nin konsantrasyonuna bağlı olmadığı kabul edilerek şöyle bulunur.



$$J_B = \frac{1}{6} \cdot \Gamma_B \cdot n_2 \quad \text{atom m}^{-2} \text{s}^{-1}$$

$n_1 > n_2$ olduğundan soldan sağa doğru bir atom akışı meydana gelecektir.

$$J_B = \frac{1}{6} \cdot \Gamma_B \cdot (n_1 - n_2) \quad 3.2$$

1 ve 2 nolu düzlemlerin aralarındaki B'nin sıçrama mesafesi α ise

$$\begin{aligned} C_B(1) &= \frac{n_1}{\alpha} \text{atom}^{-3} \\ C_B(2) &= \frac{n_2}{\alpha} \text{olur} \\ C_B(1) - C_B(2) &= \frac{n_1}{\alpha} - \frac{n_2}{\alpha} \\ C_B(1) - C_B(2) &= -\alpha \frac{\partial C_B}{\partial x} \end{aligned} \quad 3.3$$

Bu denklem 2.2. nolu denklemde yerine konacak olursa

$$\begin{aligned} \alpha \left(-\alpha \frac{\partial C_B}{\partial x} \right) &= (n_1 - n_2) \\ -\alpha^2 \frac{\partial C_B}{\partial x} &= (n_1 - n_2) \\ J_B &= \frac{1}{6} \Gamma_B (n_1 - n_2) \\ J_B &= -\left(\frac{1}{6} \Gamma_B \alpha^2 \right) \frac{\partial C_B}{\partial x} \text{atom}^{-2} \text{s}^{-1} \\ D_B &= \frac{1}{6} \Gamma_B \alpha^2 \text{denirse} \\ J_B &= -D_B \frac{\partial C_B}{\partial x} \end{aligned} \quad 3.4$$

Bu son denklem FİCK'in 1. Difüzyon Kanunu olarak bilinir.

Burada;

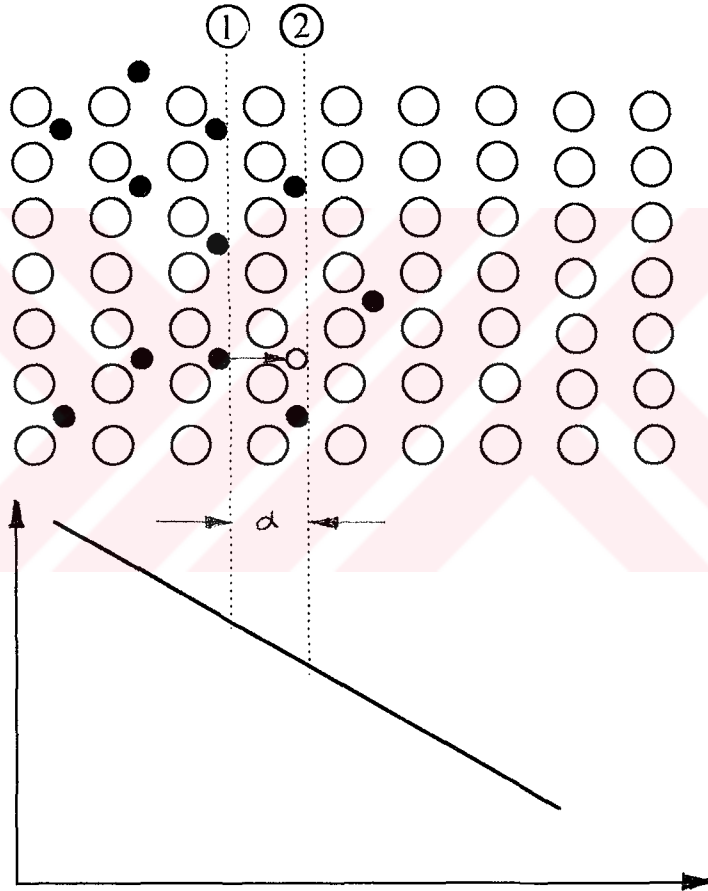
J_B ; Yayınma düzlemini geçen atom miktarı

D_B ; B atomlarının difüzyon katsayısı ($m^2.s^{-1}$)

$\frac{\partial C_B}{\partial X}$; Konsantrasyon gradyenti (değer $\times m^{-4}$)

∂X

* değer; atom, mol, kg. olabilir.



Şekil 3.5. Bir Konsantrasyon Farkında, Gelişi Güzel Atlama Şeklinde Arayer Difüzyonu (Easterling,1984).



B atomlarının sıçraması, konsantrasyonundan bağımsız bir şekilde tamamen gelişigüzel olarak meydana geldiğinde D_B 3.3. nolu denklemden hesaplanır. D_B 'nin hesaplanmasında kullanılan bu denklem basit kübik bir kafes içinde arayer difüzyonu için çıkartılmış olsa da sıçrama mesafesi α doğru kullanılmak şartıyla herhangi bir kübik sistem için kullanılabilir. Kübik olmayan kafeslerde farklı yönlerde sıçrama ihtimali eşit olmayıp, D yöne bağlı olarak değişmektedir.

Difüzyon olayını bir tek atomun difüzyonu olarak düşünmekte ilginçtir. Eğer her bir yeni sıçrayışın yönü bir önceki sıçrayışın yönünden bağımsız ise; bu yürümeye gelişigüzel yürüme denir. Gelişigüzel yürüme için α uzunluktaki n adım sonunda ortalama atom $\alpha \sqrt{n}$ kadar orjinal pozisyonundan uzaklaşmış olacaktır. Buna göre, t gibi bir andan sonra ortalama atom, orjininden r gibi bir mesafe kat etmiş olur.

$$r = \alpha \sqrt{\Gamma t} \quad 3.5$$

Bu eşitlik 3.3 nolu denklemde yerine yazılırsa;

$$r^2 = \alpha^2 (\Gamma t)$$

$$\Gamma t = \frac{r^2}{\alpha^2}$$

$$D = \frac{1}{6} \Gamma_t \cdot \alpha^2$$

$$D_t = \frac{1}{6} \cdot \frac{r^2}{\alpha^2} \cdot \alpha^2$$

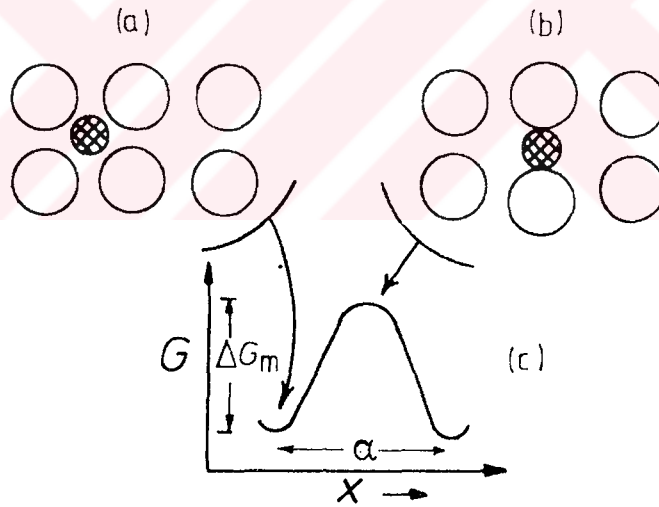
α^2 lersadeleştğinde

$$\Gamma^2 = 6 \cdot D_t$$

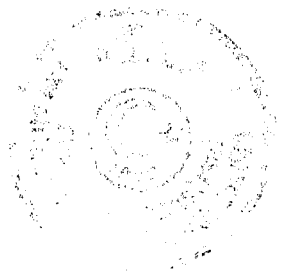
$$\Gamma = 2.4 \sqrt{(D_t)}$$

Görüleceği gibi $\sqrt{Dt}$, difüzyon problemlerinde çok önemli bir değer durumundadır.

Bir arayer atomunun gerçek atlama işlemine bakıldığında sıcaklığın tesiri veya termal aktivasyonun etkisini görmek mümkündür. Arayer atomlarının denge pozisyonları en az potansiyel enerjisine sahip oldukları pozisyonlardır (Şekil 3.6.a). Bir arayer atomunu komşu bir arayere hareket ettirmek için komşu kafes örgüsündeki atomların şekil 3.6.b'de gösterildiği gibi daha yüksek enerji pozisyonlarına doğru zorlanması gerekir. Bu işlemi yapmak için verilen gerekli iş, sistemin serbest enerjisini şekil 3.6.c'de ki gibi ΔG , kadar artırır. ΔG , aktivasyon enerjisi olarak bilinir. Termal denge durumundaki herhangi bir sistemde atomlar birbirleriyle sabit olarak etkileşmekte ve titreşim enerjilerini değiştirmektedirler. Genel bir ifade ile ΔG 'lik ya da ortalama enerjiden fazlasına sahip olan atomların oranı $(\exp) \left(- \frac{Q}{RT} \right)$ denklemi ile verilmektedir.



Şekil 3.6. Arayer atomu; (a) Denge pozisyonu (b) Maksimum kafes distorsiyonu, (c) Arayer pozisyonun bir fonksiyonu olarak kafesin serbest enerjisindeki değişim (Shewman, Cohn, 1974).



Üç boyutlu bir düzlemde gelişigüzel bir şekilde titreşen bir atom, atlayabileceği boşluklar tarafından kuşatıldığı kabul edilirse atlama (sıçrama) frekansı;

$$\Gamma = zv \exp \frac{-\Delta G}{RT} \quad 3.7$$

Burada;

Γ ; sıçrama frekansı

z ; boş nokta sayısı

v ; kalkışma sayısı

ΔG geniş bir aktivasyon entalpisinin ΔH , ve küçük bir aktivasyon entropisinin ($-T\Delta S$) toplamı olarak düşünülebilir. Bu eşitliğin 3.3 nolu denklem ile birleştirilmesi difüzyon katsayısı için aşağıdaki denklemi verir.

$$D = \left[\frac{1}{6} \alpha^2 zv \exp \frac{\Delta S}{R} \right] \exp \frac{-\Delta H}{RT} \quad 3.8$$

Bu denklem Arrhenius tipi bir denkleme dönüştürülerek basitleştirilebilir.

$$D = D_o \exp \frac{-Q}{RT} \quad 3.9$$

Burada;

$$D_o = \frac{1}{6} \alpha^2 z.v. \exp \frac{\Delta S}{R} \quad 3.10$$

$$Q = \Delta H \quad 3.11$$

zamandan bağımsız olan terimler tek bir malzeme katsayısı içinde, D_0 , da toplanmışlardır (Malevski,1981). Dolayısıyla D veya r aktivasyon entalpisi Q tarafından tayin edilen bir hızda sıcaklık arttıkça eksponansiyonel olarak artar.

3.1.2. İkame (Yeralan) Difüzyonu

İkame difüzyonuna göre arayer difüzyonu nisbeten basittir. Çünkü, difüze olan atomlar hareket etmelerine mani olan enerji engellerini aşacak, enerjiye sahip oldukları anda boşluklarla kuşatılmış durumdadırlar. İkame difüzyonunda ise atom, ancak komşu kafes noktalarından birinin boş olması halinde sıçrayabilir (Şekil 3.2.). İkame difüzyonun en basit hali bir saf metaldeki atomların tabii (kendi kendine) difüzyonlarıdır.

Tabii difüzyon esnasında bütün atomlar kimyasal olarak tanımlıdır. Bu nedenle herhangi bir atoma komşu olan bir boşluğun bulunma ihtimali ile, atomun boşluğa bir sıçrama yapabilme ihtimali bütün atomlar için eşittir. İkili ikame alaşımlarında durum biraz daha karmaşıktır. Genelde çözücü A atomları ile çözünen B atomlarının bir boşluğa hareket edebilme hızları eşit değildir.

A ve B atomları farklı hızlarda sıçradıkları zaman, konsantrasyon gradyentlerinin varlığı, A ve B atomlarının difüze olduğu kafes örgüsünün hareket etmesine sebep olur.

D_A ve D_B , Fick'in 1. Kanunu, kafes örgüsüne göre izafi olarak difüzyonu uygulanarak tanımlanır.

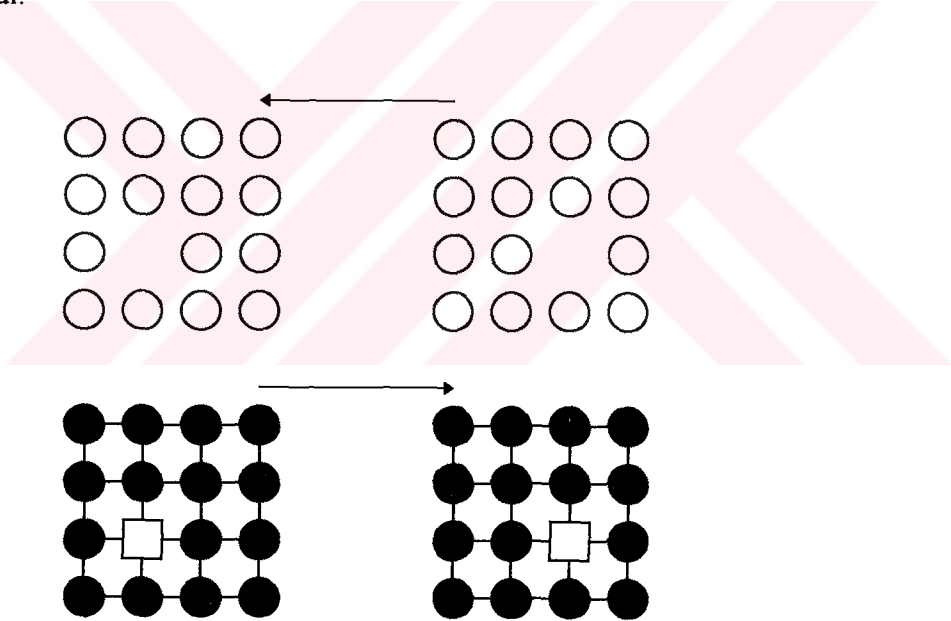
$$J_A = -D_A \frac{\partial C_A}{\partial x} \quad 3.12$$

$$J_B = -D_B \frac{\partial C_B}{\partial x}$$

3.13

Burada, J_A ve J_B verilen bir kafes düzlemine doğru A ve B atomlarının akısıdır. Arayer difüzyonu halinde bu noktanın vurgulanmasına gerek yoktur. Çünkü, komşu atomların kafes düzlemleri difüzyondan etkilenmezler.

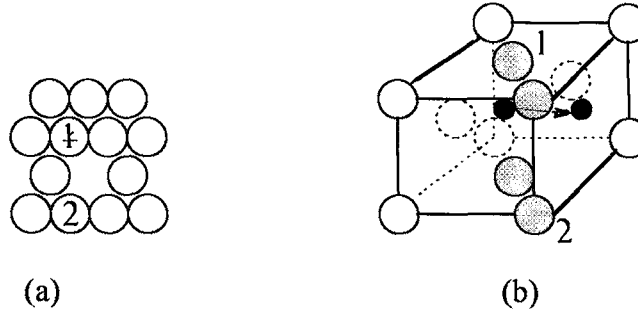
Atomlar boşluk mekanizması ile göç ettikleri taktirde bir atomun bir boşluğa sıçraması, bir boşluğun bir atomun üzerine sıçraması şeklinde de düşünülebilir (Şekil 3.7). Başka bir ifade ile bir yönde net bir atom akısı varsa ,aksi yönde de eşit bir boşluk akısı vardı.



Şekil 3.7. Atomların bir yönde sıçraması, boşlukların diğer yönde sıçraması (Christian, 1981)

Genellikle bir ikame atomu komşu atomlar tarafından sınırlandırılmışlardır ve atom bir başka kafes noktasına hareket edemez. Ancak komşu nokta boş ise şekil 3.8. de gösterildiği gibi atom bu boşluğa atlayabilir.





Şekil 3.8. YMK bir kafeste bir atomun bitişik bir boşluğa hareketi a) Bir sıkı paket düzlemi, b) Atlama meydana gelmeden önce yerdeğiştirmesi gereken dört atomu gösteren bir birim kafes (taralı atomlar) (Shewmon, 1963, Brter and Easterling, 1984).

Şekil 3.8.a'daki atomik sıçrama göz önüne alınırsa, bir boşluğun yanındaki atomun yerinden ayrılabilmesi için aşması gereken aktivasyon enerjisi (ΔG_m) engelini yenecek temel enerjiye sahip olması şartıyla bir sıçrama yapabilir. Bu sebeple başarıyla sıçrama teşebbüs ihtimali ($-\Delta G_m/RT$) ile verilebilir. Bununla birlikte çoğu zaman komşu nokta boş olmaz ve sıçrama imkansız hale gelir. Komşu bir noktanın boş olma ihtimali zX_v ile verilir.

$$zX_v \exp\left(-\frac{\Delta G_m}{RT}\right) \text{ şeklinde verilir.}$$

Burada;

z ; en yakın komşuların sayısı

X_v ; herhangi bir noktanın boş olma ihtimalidir.

Atomlar bağımsız bir v frekansında titreştiklerinden herhangi bir atomun 1 sn içinde yapacağı başarılı sıçrama sayısı aşağıdaki gibi bulunur.

$$\Gamma = v.z. X_v \exp \frac{-\Delta G_m}{RT}$$

3.14

Burada;

Γ = sıçrama sayısı

v = titreşim frekansı

z = en yakın komşuların sayısı

X_v = herhangi bir noktanın boş olma ihtimali

Eğer boşluklar termodinamik dengede iseler; $X_v = X_v^\circ$ alınarak

$$X_v^\circ = \exp \frac{-\Delta G_m}{RT}$$

3.15

Burada; X_v° dengedeki boşlukların mol kesiri

$$\Delta G_v = \Delta H_v - T\Delta S_v$$

3.16

ΔH_v ; ilave edilen her boşluk için entalpideki artıştır, yukarıdaki denklemlerin birleştirilmesi ile ;

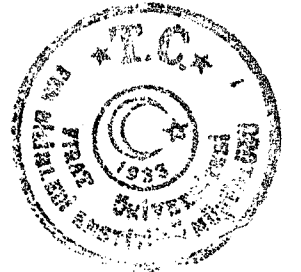
$$DA = \frac{1}{6} \alpha^2 Z_v \exp \frac{-(\Delta G_m + \Delta G_v)}{RT}$$

3.17

$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$ yazılırsa

$$DA = \frac{1}{6} \alpha^2 Z_v \exp \frac{\Delta S_m + \Delta S_v}{R} - \exp \left(-\frac{\Delta H_m - \Delta H_v}{RT} \right)$$

3.18



Birçok metaller için $v \approx 10^{13}$ değerindedir. YMK metallerde $z = 12$ ve

$\alpha = \frac{a}{\sqrt{2}}$ atlama mesafesidir. Buna göre denklem;

$$D_A = D_0 \exp - \frac{Q_{SD}}{RT} \text{ şeklinde yazılabilir.}$$

3.19

Burada;

$$D_0 = \frac{1}{6} \alpha^2 v \exp \frac{\Delta S_m + \Delta S_v}{R}, \text{ dir.}$$

3.20

$$Q_{SD} = \Delta H_m + \Delta H_v$$

3.21

3.19 nolu denklem tabii difüzyon için ekstra bir ΔH_v terimi hariç arayıcı difüzyonu için elden edilenle aynıdır.

3.2. Kararlı Hal Difüzyonu (1. Fick Kanunu)

Difüzyonun en basit tipi kararlı bir halin yani konsantrasyonun her noktada zamanla değişmediği durumda meydana gelen şeklidir. Buradan hareketle 1885’de FİCK, çıkarılışını 3.4. nolu formülde verdiğimiz aşağıdaki denklemi teklif etti. (Giles, 1979, Rotery, 1966, Guy, 1974, Verkseven, 1975, Ralls, Shewmon, 1963, Grifalco, 1964, Guy, 1972).

$$J_B = - D_B \frac{\partial C_B}{\partial x}$$

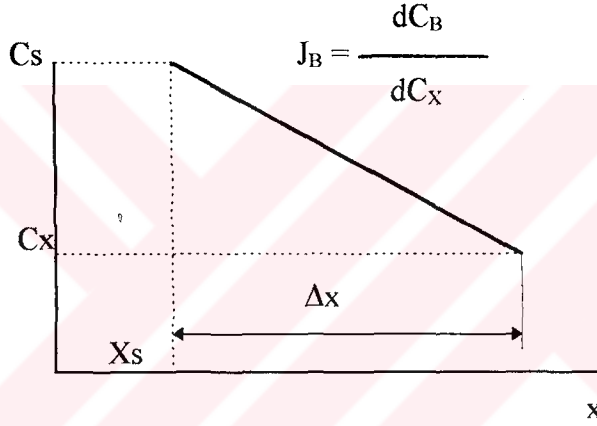
Burada;

J_B = Yayınma düzlemini geçen B atomlarının miktarı ($\text{gr.cm}^2/\text{sn}$)

D_B = B atomlarının saniyede cm^2 den geçiş difüzitesi (cm^2/sn)

$\frac{dC_B}{dx}$; yoğunluk değişiminin eğimi, yoğunluk gradyanı

Şekil 3.9'da difüzyonun başlangıç konsantrasyonu C_s 'den daha düşük konsantrasyon C_x 'e Δx aralığında kararlı durum şartlarında hareket ettiklerinden yayınan türlerin akısı J_B soldan sağa artıdır. (Onaran,1986). Atom akısı, akıya dik yöndeki birim alandan, birim zamanda geçen net atom miktarı olarak tanımlanır. C_s ve C_x sabittirler konsantrasyon gradyanı soldan sağa eksidir. Şekil 3.9'daki alandan geçen malzeme (atom) miktarı artan alan A ve artan eksi gradyanı dC/dX ile artar

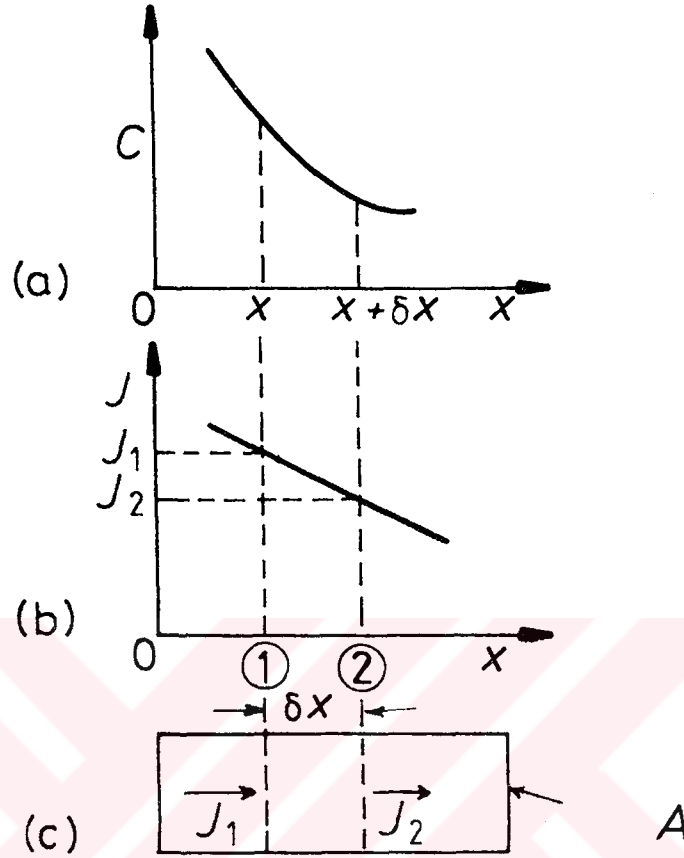


Şekil 3.9. Kararlı hal difüzyonu (Onaran, 1986)

3.3.Kararsız Hal Difüzyonu (2.Fick Kanunu)

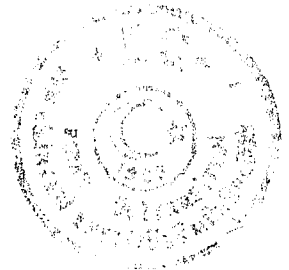
Pratikte çoğu zaman kararlı hal şartları sağlanamamaktadır. Yani konsantrasyon hem mesafe, hemde zamanla değişmekte ve Fick'in 1. Kanunu kullanılamamaktadır. Şekil 3.10.a'da görüleceği gibi sadece x yönünde bir konsantrasyon gradyanı söz konusudur. x eksenini boyunca meydana gelen akı D_B 'nin değeri ile şekil 3.10.b'de gösterildiği gibi $\partial C_B / \partial t$ 'e bağlıdır.





Şekil 3.10. Fick'in 2. Kanunun çıkarılması (Porter, 1984)

B atomlarının konsantrasyonunun zamana bağlı olarak herhangi bir noktada nasıl değiştiğini hesaplamak için şekil 3.10 c'deki gibi A yüzeyli δx kalınlıklı çok ince bir malzeme dilimi incelendiğinde; B atomlarının sayısı (1. düzleminde difüze olacak) δt aralığında $J_1 \cdot A \cdot \delta t$ olacaktır. 2. düzleminden geçen atom sayısı $J_2 \cdot A \cdot \delta t$ olur. 1. düzleminden geçen akı J_1 , 2. düzleminden geçen J_2 den büyük olduğundan malzeme dilimindeki B'nin konsantrasyonu aşağıdaki şekilde olur.



$$\delta C_B = \frac{(J_1 - J_2) \cdot A \cdot \delta t}{A \delta x}$$

3.22

δx küçük olduğundan

$$J_2 = J_1 + \frac{\partial J}{\partial x} \delta x$$

3.23

$\delta t \rightarrow 0$ ' giderken limiti alınır

$$\frac{\partial C_B}{\partial t} = - \frac{\partial J_B}{\partial x} \text{ olur.}$$

3.24

Bu denklem 1. FİCK konununa uygulanırsa

$$\frac{\partial C_B}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_B \frac{\partial C_B}{\partial x} \right) \text{ olur.}$$

3.25

Buna 2. FİCK kanunu denir (Porter,1984). Eğer D_B 'nin konsantrasyona göre değişimi ihmal edilirse bu denklem şu şekilde yazılabilir ki bütün kaynaklarda FİCK'in 2. kanunu böyle kabul edilir.

$$- \frac{\partial C_B}{\partial t} = D_B \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$

3.26

Birçok difüzyon çiftinde D_B bileşime bağlı olarak değişirse de Fick'in ikinci kanunu D_B 'nin belli bir sıcaklıkta sabit olduğunu varsayar ve bileşimine göre değişmediğine kabul ederek çözümünü şu şekilde verir (Gles,1979).



$$\frac{C_s - C_x}{C_s - C_o} = \text{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right)$$

3.27

Burada;

C_s ; yüzeydeki yoğunluk

C_x ; yüzeyden veya arakesitten x kadar uzaklıkta bir noktadaki yoğunluk

C_o ; Difüzyon çiftlerinden birinin ilk yoğunluğu

X ; C_x 'in ölçüldüğü noktanın yüzeye olan uzaklığı

D ; Ortak difüzyon katsayısı

t ; Difüzyon süresi

erf ; Hata fonksiyonu

Burada verilen difüzyon denklemleri uygulamada segrerasyonların yok edilmesi amacıyla yapılan homojenleştirme ve çeliğin karburizasyonunda önemlidir. Ayrıca bunlara ilave olarak difüzyon kaynağı uygulamalarda kabul edilebilir.

3.4. Difüzyona Tesir Eden Faktörler

Difüzyon katsayısı D genellikle bir sabit değildir. Difüzyon katsayısı sıcaklık, konsantrasyon ve kristal yapı gibi birçok değişkenin bir fonksiyonudur (Guy, 1974). Belli bir durumda bütün bu değişkenlerin özgül değerlere sahip bulundukları kabul edilirse bu taktirde difüzyon katsayısı belli bu sayıya varılırken çoğu zaman bu değişkenlerin bir yada daha fazlasının tek başına etkilerinin dikkate alınması gerekir.

3.4.1. Sıcaklık

Difüzyon sabitinin her 20°C lik sıcaklık artışı ile iki kat büyüdüğü düşünüldüğünde, sıcaklık etkisinin ne kadar büyük olduğu görülür. Difüzyon sabiti mutlak sıcaklığa

$$(C + 273) D = D_0 \cdot e^{-Q/RT}$$

denklemleriyle bağlıdır. Bu denklemde D_0 , Q ve R sıcaklıktan bağımsızdır. Aktivasyon enerjisi Q , gram molekül başına kalori olarak verildiğinde gaz sabitesi $R = 1.987$ kal/gram - mol /K olmaktadır.

Frekans faktörü, Q difüze olan atomların titreşim frekansına bağlı olup Q , difüzyonun meydana gelmesini önleyen enerji engelini bir ölçüsüdür. (Guy ,1974, Verhseven, 1975, Oğuz, 1988).

3.4.2. Yoğunluk (Konsantrasyon)

Yoğunluk değişimi, bir difüzyon çiftinde, kimyasal bileşimin mesafeye bağlı olarak değişimidir. Difüzyon katsayısının yoğunlukla değişimi hakkında çok az bilgi mevcuttur. Genel olarak yoğunlaşmanın değişmesi ile katsayının değerinde büyük değişimler görülür. Yoğunlaşmanın tesiri arayer katı eriyiklerinde daha kolay incelenebilir. Çünkü; bu halde eriten atomların yayınmasının tesiri ihmal edilebilir. Karbonun östenit içinde söz konusu sıcaklıkta eriyebilmesinin sınırı olan % 1.3 C'a kadar difüzyon katsayısında az değişme olduğu bilinmektedir. D'nin büyük ölçüde yoğunluğa bağlı olduğu sistemlerde bile difüzyonun küçük bir yoğunluk alanı içinde olmak şartıyla D değeri sabit kabul edilebilir (Guy, 1974, Oğuz,1988).

3.4.3. Kristal Yapı

Demirin yüksek sıcaklıklarda hacim merkezli kübikten yüzey merkezli kübik yapıya allotropik bir dönüşüm ile geçmesinin önemi göz önünde tutularak kristal yapısındaki bu değişimin, demirde eriyen atomların yayınma hızı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Belli bir sıcaklıkta demir atomlarının difüzyon hızı ferritte (HMK) östenittekinden (YMK) yaklaşık yüz katıdır (Guy, 1979).

3.4.4. İmpuriterler (Saflığı Bozan Maddeler)

Genellikle az miktarlarda yabancı atomları varlığı eriyen metal atomlarının eriten metal içinde difüzyonu üzerinde önemsizde olsa bir tesiri vardır. Difüzyonun birkaç değişkenken birisi olduğunun bilinmesi problemlerde çözümü kolaylaştırır. Örneğin çeliğin sertleşebilme kabiliyeti üzerinde alaşım elementlerinin kuvvetli etkilerinin karbonun difüzyon hızındaki büyük değişimlerden başka faktörlerin sonucu olduğu kanısına varılır. (Guy, 1979)

3.4.5. Tane Büyüklüğü

Tane sınırı difüzyonu, tane içi difüzyonundan daha hızlı olduğundan küçük taneli metalde difüzyon hızının artması beklenebilir. Bununla beraber genelde difüzyon hesaplarında tane büyüklüğü dikkate alınmamaktadır.

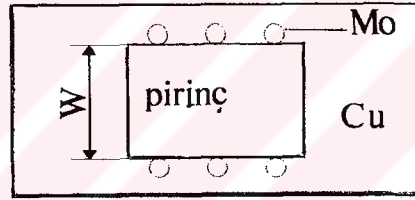
3.5. Difüzyon Kusurları; (Hartley-Kirkendal Etkisi)

Eğer A ve B malzemelerinden oluşan bir ikili difüzyon çifti yanyana getirilirse ve B, A içinde tersinden çok daha hızlı difüze olursa bazı kusurlar ortaya çıkar. Difüzyon hızlarındaki büyük fark orjinal A - B ara yüzeyinden gerçek kütle taşınmasına ve ara yüzeyi belirleyen işaretlerin yer değiştirmesine neden olur. Kütle



taşınması öyle bir hızla meydana gelebilirki çok hızlı difüze olan malzeme tarafında boşluklar oluşur. 1947’de bakır (A) ve pirinç (B) kullanan Kirkendall tarafından tesbit edilen bu etki genel olarak boş kafes köşesi mekanizması için bir örnek olarak görülür. Smigelskas ve Kirkendall deneylerinde α - pirinç (Cu + % Zn) bir bloku molibden tel ile sarıp şekil 3.11de gösterildiği gibi saf bakırdan bir blok içine yerleştirmişler ve yüksek bir sıcaklıkta tavlandıktan sonra teller arasındaki mesafenin (W)arttığını gözlemişlerdir

Bunun sebebi Çinkonun difüzivitesinin etkisinin, bakırın difüzivitesinden fazla olması ($D_{Zn} > D_{Cu}$) ve çinko atomlarının merkezi bloktan, Cu atomlarından daha hızlı bir şekilde dışarı doğru difüze olmalarıdır. Benzer deneyler başka alaşımlarda da yapılmış aynı etkiler onlarda da görülmüştür. Genel olarak bir difüzyon çiftinde düşük ergime noktalı malzeme atomlarının yüksek bir difüziviteye (D) sahip oldukları tesbit edilmiştir.



Şekil 3.11. Kirkendall etkisini gösteren deneysel uygulama (Porter, 1984)

Ancak D 'nin tam değeri alaşımın bileşimine bağlı olarak değişir. İki bileşenli alaşımlarda ortak difüzyon katsayısı $\tilde{D}$, 1948 yılında Darken'ın bulduğu iki denklemlle tesbit edilebilir.

$$\tilde{D} = N_B \cdot D_A + N_A D_B \dots \dots \left(\frac{\text{cm}^2}{\text{sn}} \right)$$

Burada;

N_A ; A atomunun mol oranı

N_B ; B atomunun mol oranı

D_A ; A atomunun difüzyon katsayısı

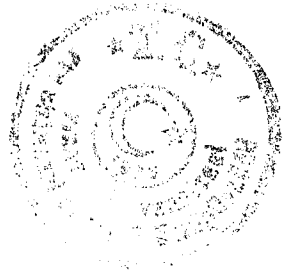
D_B ; B atomunun difüzyon katsayısı

Buna 1. Darken denklemi denir. Arayüzeyden yavaş hareketle ayrılan boşlukların hızını ise 2. Darken denklemi vermektedir.

$$V = (D_A - D_B) \frac{\partial N_A}{\partial x} \quad 3.29$$

D_A , ve D_B ; A ve B atomlarının doğal difüzyon katsayılarıdır.

$\frac{\partial N_A}{\partial x}$; Kirkendall arakesitindeki yoğunluk değişimi eğrisinin eğimi.



BÖLÜM 4

4. DİFÜZYON KAYNAĞI

4.1. Katı Hal Kaynak Yöntemleri ve Difüzyon Kaynağı

İleri teknolojilerin uygulandığı gelişmiş makina elemanlarının kaynaklı birleştirmelerinde faz dönüşümleri ve deformasyon istenmeyen bir durumdur. Bunları gidermek düşük sıcaklıklarda birleştirme işlemleri ile mümkündür. Örneğin; metal matriksli kompozitlerle seramiklerin, metal bir malzeme ile metal olmayan bir malzemenin birleştirmeleri birçok durumda gerekli olmaktadır. Bu örneklerde olduğu gibi malzemelerin düşük sıcaklıklarda birleştirilmeleri dizayn ve konstrüksiyon açısından gereklilik arz etmektedir. (Nichting, 1986) Sözü edilen malzemeleri ergitmeli kaynak yöntemleri ile birleştirmek zor ve bazen imkansızdır.

Difüzyon kaynağı bir katı hal kaynak yöntemidir. Günümüze kadar birçok farklı kaynak metodu geliştirilmiştir. Bunlar Ergime kaynağı, lehimleme ve katı hal kaynağı olmak üzere üç grupta toplanabilir. (Meahara 1989) Katıhal kaynağının esası, iki malzemenin temiz yüzeylerini aralarında bir bağ oluşacak kadar birbirlerine yaklaştırmaktır (Lancaster 1987).

Katı hal kaynak yöntemleri şu şekilde gruplandırılabilir.

1. Sıcak basınç kaynağı
2. Soğuk basınç kaynağı
3. Sürtünme kaynağı
4. Ultrasonik kaynak
5. Difüzyon kaynağı

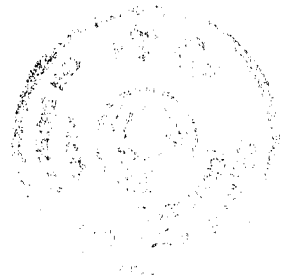


Yukarıdaki kaynak türlerinden ilk dördü plastik deformasyon kaynağı adı altında gruplandırılmaktadır (Meahara 1989).

Difüzyon Kaynağı; birleştirmek üzere eşleşmiş iki yüzeyin, malzemelerin ergime noktaları altındaki bir sıcaklıkta malzemelerde tesbit edilebilir. Plastik akmaya sebep olmayan bir basınçta katı hal difüzyonu yoluyla malzemeler arasında metalurjik bir bağ oluşuncaya kadar, malzemelerin özelliklerini önemli ölçüde etkilemeyecek bir süre tutulmasıyla uygulanan, bir kaynak yöntemidir. (BS, 499), (Fitzpatrick, 1988). Malzemelerin ara yüzeyinde uygulanan sıcaklıkla eriyen bir ara tabaka kullanıldığı takdirde buna sıvı faz difüzyon kaynağı denir (Zhag,1987)

Kristal yapılı malzemelerde atomlar arası çekimden dolayı kohezyon kuvvetleri meydana gelir. Normal olarak atomların denge şartı, üzerlerine tesir eden kuvvetin sıfır olduğu durumdur. Ancak katı malzeme, dış kuvvetlerin tesiri ile gerildiği zaman atomlar denge durumlarını terk ederek kristal içinde dış kuvvet tarafından dengelenen bir gerilme meydana getirirler. Atomlar arasındaki çekim kuvveti, birbirlerinden uzaklaşma dereceleri ile orantılı olarak artar, bir maksimumdan geçtikten sonra tekrar azalır.

Farklı iki katı malzemenin yüzeyleri arasındaki çekim ise adhezyon olarak tanımlanır (Orhan, 1996). Aynı cins katı yüzeyleri arasında kohezyon kuvvetlerinden dolayı kohezyon oluşurken, farklı katı yüzeyleri arasında da adhezyon kuvvetlerinden dolayı adhezyon işi yapılmış olur (Adams, 1983). Gerek kohezyon ve gerekse adhezyon olayı, yüzeyin serbest enerjisinin bir fonksiyonudur. Ayrıca iki gevrek malzeme yada bir gevrek bir sünek malzemeden oluşan bir bağlantı için (metal - seramik) adhezyon olayı, bağlantı mukavemetinin bir ölçüsüdür (Lancaster, 1987).



Malzeme yüzeyleri arasında birleşmenin sağlanması, yani adhezyon ve kohezyon kuvvetlerinin teşekkülü için, malzeme yüzeylerinin atomlar arası bağın oluşabileceği yakınlıkta temasını sağlamak gerekir.

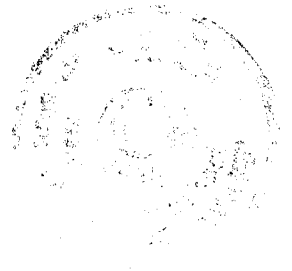
İki malzemenin difüzyonla birleştirilmesinde, birleşmenin davranışını önemli derecede etkileyen diğer bir kuvvet ise malzemelerin kimyasal yapısına bağlı, olarak moleküller arasında etki eden Van Der Waals kuvvetleridir. Bu kuvvetler, gres, su buharı, gaz gibi metal yüzeyindeki moleküllerin adsorbsiyonunun baş sebebidir (Lancaster 1987). Diğer yandan metalik malzemelerin yüzeyleri temas ettirildiğinde Van der Waals kuvvetleri birleşmeyi sağlayan önemli unsurlardan birisidir (Guo, 1985).

4.2. Difüzyon Kaynağı Mekanizması

Günümüze kadar difüzyon kaynağı mekanizması ile ilgili birbirinden farklı birçok model sunulmuştur. Çünkü, sınırlı bir süre için basınç ve ısı birlikte uygulanmasıyla bağ oluşturma mekanizmaları oldukça karmaşıktır (Egan, 1980).

Bu konudaki ilk teori 1944 de Kinzel tarafından sunulmuştur. Daha sonra Gerken ve Owczakski 1965’de üç safhalı bir mekanizma ileri sürmüşlerdir. Sonraki yıllarda Shwartz, King ve Owczarski birbirlerinininkiyle aynı olan bir model sunarak kendi modellerinin son safhaları ile Gerken ve Owczarski modelinin ilk safhasını birleştirmişlerdir. Bu modele göre ilk safhayı, birleşme yüzeylerinin basınç altında ilk teması sürünme meydana getirmektedir.

İkinci safhaya, birinci safhada yok edilemeyen arakesit boşlukları difüzyon yolu ile yok edilmekte, ve arakesit tane sınırları daha düşük bir enerji seviyesine, yani arakesit düzlemi dışına göç etmektedirler. Buradaki hakim mekanizma tane sınırı difüzyonudur. Son safhayı oluşturan Üçüncü safhada ise tane içindeki boşlukların hacim difüzyonu ile doldurulmasıdır.



Bortle, Hrivnak ve Hauser(1963) ilk safhada birleşmeye yardım eden başlıca faktörün deformasyon mekanizması olduğunu ileri süren bir model sunmuşlardır. Hauser büyük deformasyonların var olduğu yerde, birleşme mekanizması bir enerji engeli teorisinin izah etmesi gerektiğini düşünmüştür. Artan sıcaklık, basınç ve başlangıçtaki plastik deformasyon bu enerji engelini aşmaya yardım etmektedir. Daha sonraki safhalarda difüzyon işlemleri yani sürünme ve boşlukların doldurulması hakim faktörler olmaktadır.

Saf titanyum ve bakır üzerinde kendi içerisindeki difüzyon kaynağını inceleyen McKeag altı safhalı bir model sunmuştur. Bu modele göre birinci safhada sıcaklık tesiri ile yüzey pürüzlerinin teması sırasında metal oksitleri çözünmekte ve arakesitin her iki tarafında yeniden kristalleşmiş ince bir tabaka meydana gelmektedir. Enerji engelini kıran bu tabakadır. İkinci safhada daha kalın bir tabaka yeniden kristalleşmektedir. Üçüncü safhada ana metal yeniden kristalleşirken, daha alt tabaka kristalleri yok edilir. Dördüncü safhada ara kesitleri daha önce kristalleşen taneler yok olurken, küçük fakat görülebilen boşluklar oluşur. Beşinci safhada arakesitteki boşlukların sayıları azalırken boyutları büyür. Altıncı safhada arakesit düzlemine tane sınırı göçü ve tane büyümesi başlar (Egan 1980).

Derby ve Wallach difüzyon kaynağını, basınç altında sinterlemeye benzer bir işlem olarak incelemişler ve aşağıdaki mekanizmaları ileri sürmüşlerdir (Guo 1985).

1. Yüzeyden kaynaklanan mekanizmadır. Bunlar arakesitteki boşluk yüzeyinden boşluk uzunluğu boyunca yüzey difüzyonu ve hacim difüzyonudur. Burada tahrik edici kuvvet, bir ara yüzey boşluğunun yüzeyindeki eğrilik farkıdır.

2. Arakesitteki yüzeylerden kaynaklanan mekanizmalar birleşme hattı boyunca kimyasal potansiyel değişiminin belirlediği tane sınırı difüzyonu ve hacim difüzyonu.

3. Uygulanan kaynak basıncında kaynaklanan akma ve sürünmenin yol açtığı plastik deformasyon.

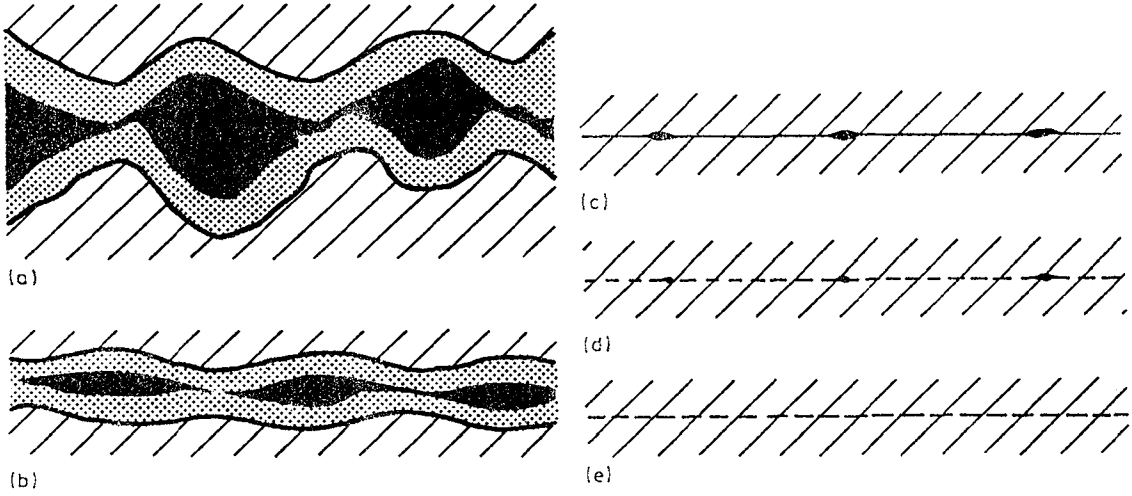
4. Sıvı faz kütle transferi Gibbs - Thomson etkisi, yani yüzey eğriliğindeki bölgesel farklardan doğan basınç farkı.

Difüzyon kaynağı mekanizması ile ilgili model sunan yazarlar başlangıç safhasında plastik deformasyonun, yüzeylerin büyük bir kısmı temas ettiğinde ise yüzeyden kaynaklanan ve arayüzey mekanizmalarının etkili olduğu konusunda fikir birliği içindedirler. Sıvı faz kütle transferi ise ancak yüksek sıcaklıklarda çalışıldığı zaman söz konusudur.

Şimdiye kadar açıklanan mekanizmaların ortak noktaları ışığında difüzyon kaynağı mekanizmasını aşağıdaki şekilde genelleştirmek mümkündür.

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

Metal folyo veya kaplama şeklindeki ara tabakalar kullanarak kaynak için gerekli olan sıcaklık, basınç ve zaman değerlerini azaltmak mümkün olmaktadır. (Patridge 1989) Şekil 4.1.'de difüzyon kaynağının mekanizmaları gösterilmiştir (Dunkerton, 1982), (Spanswick 1989), (Salehi, 1990).



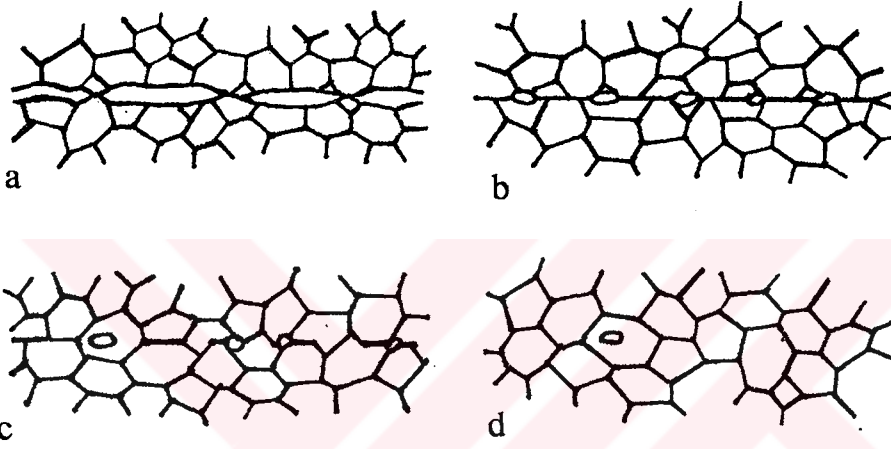
Şekil 4.1. Difüzyon Kaynağı Mekanizması

a - İlk nokta teması ve oksit tabakası, b - Plastik deformasyon ve sürünme sonrası, daha ince bir oksit tabakası ve geniş boşluklar c - Son sürünme ve akma noktası, d - Yüzey ve hacim difüzyonu ile boşlukların doldurulması e - Tamamlanmış kaynak (Spanswick 1989, Dunkerton, 1982).

Şekil 4.2. de verilen benzer bir üç aşamalı difüzyon kaynak mekanizmasında Schwartz(1982) vermiştir. Bu mekanizmaya görede diğer mekanizmalarda olduğu gibi birleştirilecek yüzeylerin birbirleri ile teması sağlanıp kaynak için gerekli sıcaklık ve zamana ulaşılması ile yüzeyler arasında temas alanı artar. Kaynağın birinci aşamasında yüzeydeki pürüzlülüklerde akma ve sürünme mekanizmaları ile arayüzeyde büyük bir alanda temas sağlanır. Bu aşamanın sonunda birleşme genelde tane sınırlarında oluşur. Basıncın etkisi ile yüzeydeki oksit filmi kırılarak oksitlerin kırılmış olan noktalarından atom akışı başlar. İkinci aşamada difüzyonun etkisi deformasyondan daha önemlidir. Birçok gözenek bu aşamada tane sınırı difüzyonu neticesinde kaybolur. Gözenekler tane sınırı gücü ile birleşme yerinden tane içine geçer ve tane içinde oluşur. Bunların tane sınırlarını hareketsiz hale getirme etkisi azdır. Başlangıçta düz olan birleşme çizgisi üçlü noktalarda bir malzemenin diğerine birkaç mikron kadar nüfuz etmesi ile eğrilir. Birleşme sınırı hareket ederken geride kalan gözenekler tanelerin içerisinde kalır ve burada tane sınırı ile temaslarını kaybederler. Difüzyonal işlemler bu gibi boşlukları küçülterek ortadan kaldırmaya yardımcı olur (Murray,1984).



Üçüncü aşama birleşmenin tamamlandığı, birleştirilecek malzemeler arasındaki atomik bağın tamamlandığı aşamadır. İkinci aşama sonunda tane sınırlarından yok edilemeyip tane içine taşınan gözenekler bu aşamada hacim difüzyonu ile büyük oranda yok edilir. Yok edilemeyen gözenek miktarının oranı kaynak sıcaklığı ile ilişkilidir.



Şekil 4.2. Difüzyon kaynağının üç aşamalı mekanizması (Scwartz,1982, Owczarks,1981).

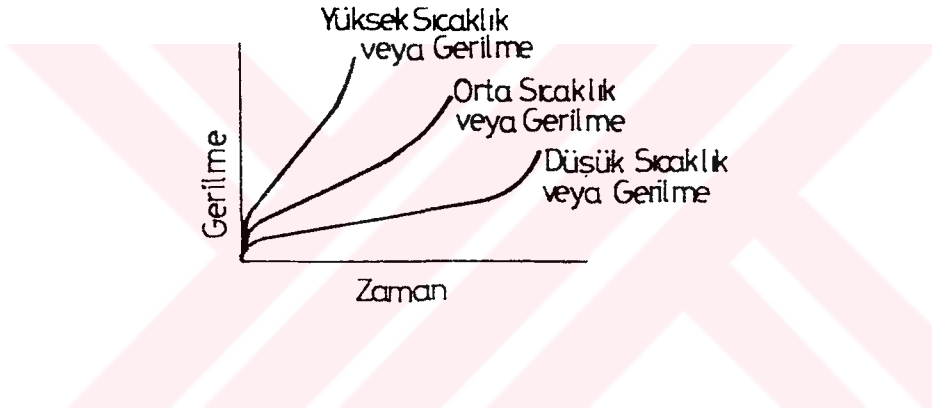
- a - yüzey pürüzlerinin başlangıç teması
- b - Birinci aşama deformasyon ve sınır bağ düzeni
- c - ikinci aşama tane sınırı gücü ve gözeneklerin yok edilmesi
- d - Üçüncü aşama hacim difüzyonu ve gözeneklerin yok edilmesi

4.3. Difüzyon Kaynağına Tesir Eden Faktörler

Difüzyon Kaynağı; sıcaklık, basınç, zaman, yüzey pürüzlülüğü, kaynak ortamı gibi kaynak şartlarının, tane boyutu, kristal yapı, atom yarıçapı, yeniden kristalleşme sıcaklıkları, yüzey enerjileri gibi malzemelerin fiziksel ve kimyasal özelliklerinin, farklı yada aynı cins malzeme olma gibi metalurjik özelliklerin etkisi altındadır.

3.3.1. Kaynak Sıcaklığı

Sıcaklık difüzyon kaynağının en önemli parametresidir. Difüzyon mekanizmaları ve sürünme doğrudan sıcaklığa bağlıdır. (Aksoy, 1987 Haasen 1986, Guo 1985, Salehi 1990). Artan sıcaklıkla malzemelerin akma gerilmeleri azaldığından hem ilk plastik deformasyon hem de yüzey pürüzlerinin sürünmesi kolaylaşır. Dolayısıyla kaynak için gerekli temas alanını elde etme süresi kısalmır. Şekil 4.3.'de sıcaklığın sürünme eğrisine etkisi görülmektedir.



Şekil 4.3. Sıcaklığın Sürünme Eğrisine Etkisi (Askeland, 1989)

Difüzyonun kinetik teorisi, difüzyon kaynağındaki sıcaklık etkisini sayısal olarak belirlemeyi sağlar. Difüzyonun sıcaklığın bir fonksiyonu olarak tanımlanır ve şöyle verilir. (Schwartz, 1982, Askeland, 1989, Salehi 1990, Oğuz, 1988 Manas 1979).

$$D = D_0 \cdot \exp^{-Q/RT}$$

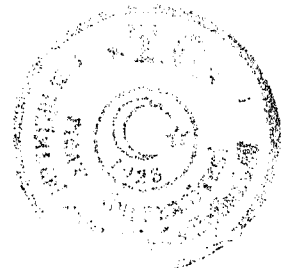
Burada;

D; T sıcaklığında difüzyon katsayısı

D_0 ; Atomik titreşim frekans faktörü

Q; Aktivasyon enerjisi (J mol^{-1})

R; Gaz sabiti $8.314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$



Difüzyon kaynağında kullanılan sıcaklığın değeri $0.5 T_m$ kadardır. Burada T_m metalin ergime sıcaklığıdır. Birçok metali ve alaşımı için en iyi difüzyon kaynağı $0.6 - 0.8 T_m$ arası sıcaklıkta yapılabilir. Şekil 4.4 de sıcaklığın birleşme alanı üzerindeki tesiri verilmiştir.



Şekil 4.4 Sıcaklığın Birleşme Alanı Üzerindeki Tesiri (Partridge, 1989)

4.3.2. Kaynak Basıncı

Birleştirilecek yüzeyler arasında ilk temasın sağlanması ve atomik difüzyon için kimyasal potansiyel farkı oluşturmada basınç gereklidir. Uygulanan basınç parçaların makro deformasyonun altında olmalıdır.



Basınç ile yüzey pürüzlerin plastik akışı kolaylaşırken yüzeyde çözünemeyen oksit filimleri kırılarak iki yüzey arasında atom akışı sağlanır. İyi bir birleşme sağlanabilmesi için basıncın izostatik uygulanmasında büyük fayda vardır.

Uygulanan basıncın olumsuz tesirlerin önlemek için şu hususlara dikkat edilmelidir.

a - Uygulanacak basınç yüzey pürüzlerin sürünme hızı ve plastik deformasyonunu artıracak kadar büyük; kaynak edilecek parçaların makroskopik $\times$ deformasyonuna yol açmayacak kadar küçük seçilmelidir (Nichting, 1986, Lancaster 1987, Guo 1985, Egan 1980).

b - Kaynak basıncı birleştirilecek parçaların akma gerilmelerinin belirgin şekilde altında tutulmalıdır.

Temas alanındaki deformasyon miktarı arttıkça difüzyon hızının arttığını Dubronswky (1986) belirtmektedir. Uygulanan basınç malzemedeki kusurlar ve arakesit bölgesinde nisbeten daha küçük bir tane yapısı meydana getirerek kısa devre difüzyon yolları da indükleyebilmektedir. (Haufer, 1986). Aynı zamanda allotropik dönüşüm gösteren Fe gibi metallerde allotropik dönüşüm sıcaklıklarında yavaşlayan difüzyonu hızlandırdığı söylenebilir (Orhan, 1996).

Kaynak basıncının artması, yüzeydeki oksit tabakasını kırmasının yanında, yapıda arakesite yakın sert oluşumların kopması ya da kırılması sonucu kaynak süresinin kısılmasına yol açmaktadır (Calvo, 1989).

Kaynak basıncı çeşitli malzemeler için farklılıklar gösterir. Salehi (1990) 41 KPa ile 27 MPa arasındaki basınçların kullanıldığını söylerken Walsh (1986) 32 MPa, Meada (1989) ise 50 MPa olarak ifade etmektedirler. Tuncel ve Topuz (1996)



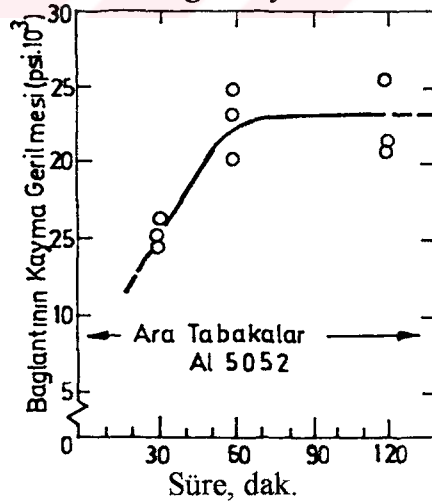
çalışmalarında 5.7 ile 11.4 MPa basınçlar kullanmışlardır. Ancak bu tez konusunu oluşturan toz metal parçaların çeliğe kaynağında 15 MPa sabit basınç kullanılmıştır.

4.3.3. Kaynak Süresi

Kaynak süresi kaynak kalitesini tek başına belirleyici bir etken değildir. İyi bir kaynaklı bağlantı elde etmede süre, sıcaklık ve basınca bağlıdır. Sıcaklık ve basıncı artırarak süre kısaltılabilir.

Eğer birleştirilecek yüzeyler kirli, sıcaklık düşük ise kaynak süresi uzamaktadır. Kaynak sıcaklığı 0.5 - 0.8 Tm arasında alındağında kaynak süresi 100 dakikaya kadar uzayabilmektedir. (Dunckertan 1982) iyi bir birleşme sağlamak için uygun kaynak süresi önemlidir. Süre kısa tutulduğunda iyi bir birleşme elde edilemezken, sürenin gereğinden uzun tutulmasında metaller arası bileşik oluşumuna ve tane büyümesine sebep olur.

Salahi (1990), Sabit basınç ve sıcaklıkta birleşme süresini uzatmanın bağlantı mukavemetini bir noktaya kadar artırdığını söylemektedir. Şekil.4.5.



Şekil 4.5. Bağlantının Kaynak Mukavemeti ile Kaynak Süresi Arasındaki ilişki
(Partridge, 1989)

Difüzyon işlemlerinde difüzyon mesafesi x 'in zaman ile değiştiğini aşağıdaki formül ifade etmektedir.

$$X = C(Dt)^{\frac{1}{2}}$$

Burada;

X ; difüzyon mesafesi

D ; T sıcaklığında difüzyon katsayısı

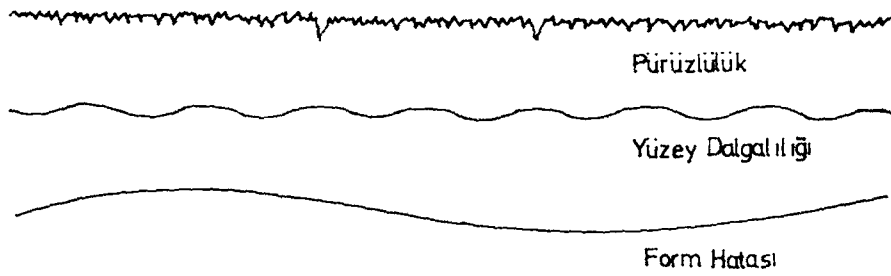
t ; Süre, dk.

C ; Bir sabit

Burada görüldüğü gibi difüzyon reaksiyonları süre ile eksponansiyonel olarak ilerler.

4.3.4. Yüzey Şartları

Kaynakla birleştirilecek parçalarda yüzey pürüzlülüğü; yüzey filimleri ve yüzey artıkları kaynak kalitesine olumsuz etki eden faktörlerdir. Yüzey pürüzleri genellikle kaynağın birinci aşamasında olumsuz etki yapmaktadır. Yüzeylerin tam temas sağlanmasında pürüzlülük bir engeldir. Yüzey yüzeye temas süresini uzatır. Genelde bir metal yükseklik ve dalga boyu küçük olan pürüzlülüğe sahiptir. Difüzyon kaynağında özellikle dalga boyu uzun olan pürüzler önemlidir. Bu durumdaki yüzeyler çok yönlü basınç ve uzun zaman gerektirirler Şekil 4.6.'da yüzey kusurları verilmiştir. Klaphaak (1987) yüzey pürüzlülüğünün matematik modellemesini yapmış ve işleme izlerinin periyodik ve tekrarlı bir sinüs dalgası şeklinde olduğunu göstermiştir.



Şekil 4.6. Yüzey Kusurları

İyi bir kaynak için engelliyici yüzey filimleri genellikle oksit tabakalarıdır. Yüzeylerin oksitten korunması için kaynak vakum veya indirgeyici ortamda yapılmalıdır (Munır 1983). Oksit filminin bozulup dağılması iki şekilde olur. Birincisi kaynak sırasında oksitlerin erimesi şeklinde, ikincisi oksit filimlerinin toparlanması veya yuvarlaklaşmasıdır. Oksit filimleri titanyum, tantalyum, kolumbiyum, zirkonyum ve diğer arayer elementleri içerisinde son derece iyi eriyebilirler. Eğer oksit metal içerisinde çözünemiyorsa bozulma hareketi oksit yuvarlaklaşması şeklindedir.

Oksit filimleri yaklaşık 10 - 20 atom mertebesinde bir derinliğe nüfuz ederek tabaka oluştururlar. Bütün sıcaklık değerlerinde H_2O , CO_2 ve SO_2 gibi gazlar oksit filim kalınlığını artırmaktadır. Oksit tabakaları birleşerek yüzeylerin temasını önleyip, bağ teşekkülünü geciktirir ve ara kesitte tane sınırı difüzyonunu engelleyerek boşluk kalmasına sebep olur (Guy, 1985).

Oksit filimlerinin bozulmasıyla ilgili her iki olayda difüzyonu gerektirir. Metal içindeki çözünüm arayer atomlarının difüzyonu ile oluşur ve küreselleşme ince oksit filminin fazla miktardaki yüzey enerjisinden dolayı difüzyonla meydana gelir.

Bazı metal oksitleri ise vakum altında bile çözünmemektedir. Sunwoo (1994) alüminyum alaşımlarının difüzyon kaynağında vakum altında bile alüminyum oksiti çözmenin mümkün olmadığını belirtmiştir. Calvo (1988) bakır ile demirin difüzyon kaynağında difüzyon bölge oluşumunun bakırdaki oksitten fazla etkilenmediğini ileri sürmektedir. Yağ, gres, toz/ve parmak izi gibi artıklarda oksit filimleriyle aynı etkiyi gösterebildiklerinden kaynak öncesi yüzeyler bu tür artıklardan temizlenmelidir. Oksit filimlerinin kaldırılması için, kimyasal dağlama ve asitle temizlenmelidir.

4.3.5. Kaynak Ortamı (Atmosferi)

Difüzyon kaynağında en önemli problem kaynak sırasında kaynak yüzeylerinin oksitlenmesidir. Bu olumsuzluğu gidermek için kaynak koruyucu atmosfer altında yapılmalıdır. Bu amaçla ya vakum veya soygaz ortamında çalışılır (Azamatov, 1988).

Soygaz olarak helyum, argon ve azot kullanılabilir. Hidrojende, oksijen miktarını azaltmak amacıyla kullanılmakla beraber Ti, Zr, Ta, gibi bazı alaşımlarda hidrat oluşturmaktadır. Soygazlar atmosferik oksijenin tesirini ancak belli bir dereceye kadar azalttığından, kararlı oksite sahip metallerde vakum kullanılmaktadır. 1.3×10^{-3} Pa.'dan fazla bir vakum oksit filimlerinin çözünmesini sağlıyorsa da uygulamada 1.3×10^{-2} ile 1.3×10^{-5} Pa'lık basınçlar kullanılmaktadır. (Maeda, 1988, Andrzejewski, 1993)

4.4. Difüzyon Kaynağı Uygulanan Malzemeler

Bugüne kadar difüzyon kaynağı birçok değişik malzemeye farklı alanlarda ve amaçlarla geniş bir şekilde uygulanmaktadır. En çok titanyum alaşımlarından uçak

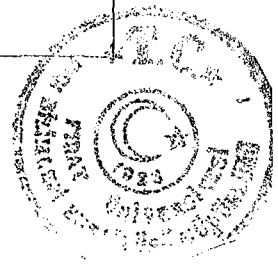


parçaları yapımında başarılı bir şekilde kullanılmaktadır. Son yıllarda Ti - Alüminidleri, Ni esaslı alaşımlar, metal - matriksli kompozitler difüzyon kaynağı ile birleştirilmişlerdir (Ostyn 1987).

Başka malzemelerde uygulanmakla beraber, bir ara tabakaya ihtiyaç göstermediklerinden titanyum alaşımlarında en çok kullanılmaktadır. Son yıllarda Amerikada difüzyon kaynağı ile kaynatılan malzemelerin listesi Tablo 4.1.'de verilmiştir.

Tablo 4.1. Amerikada difüzyon kaynağı ile kaynatılan malzemeler (Owczarski, 1981).

MALZEMELER	
<i>Aynı Metallerin Kaynağı</i>	<i>Farklı Metallerin Kaynağı</i>
<u>Ti alaşımları</u> T/D Ni ve T/D Ni - Cr Be Ni esaslı super alaşımlar Çelikler <u>Al alaşımları</u> Au Cu Co Mo Ta ZrC	Ti/Çelik Ti/Be Ti/B Ti/Al₂O₃ Al/Ni Al/Ti Al/Ta Al/Çelik <u>Ni alaşımları / Çelik</u> ZrC / ZrB₂ ZrN / ZrB₂ ZrC / ZrN ZrN/Al₂O₃ ZrB₂/Al₂O₃ ↓ ↓



Titanyum, yüksek sıcaklıklarda basınç uygulandığı zaman kendi oksidi de dahil yüzey artıklarını kolayca çözdüğünden difüzyon kaynağı için uygun bir malzemedir. Yalnız titanyumda katı çözelti içindeki oksijen, sertliği artırıp kararlı faz oluşturarak kaynağı güçleştirmekte ve yüzeyde çatlaklara yol açmaktadır. Bu nedenle titanyumun difüzyon kaynağında vakum yada koruyucu atmosfere gerek duyulmaktadır. Koruyucu gaz olarak argon kullanıldığında, titanyumda çözünmeyen argonun arakesite hapsolarak, boşluk oluşturmasını önlemek için Partridge ve Salehi (1990) kaynak bölgesinde argonun hareketliliğinin sağlanması gerektiğini söylemektedirler.

Difüzyon kaynağı açısından titanyumun bir diğer cazip tarafı da yüzeyinin temizlemeye ihtiyaç duyulmaması ve ergitme kaynağına yatkın olmamasıdır. Titanyumun, yüksek mukavemet - yoğunluk oranına, uzun bir yorulma ömrüne, iyi korozyon direnci ve yüksek sıcaklıkta mukavemet özelliklerine sahip olması havacılık sahasında geniş bir şekilde kullanılmasını sağlamaktadır.

Alüminyumun difüzyon kaynağı inatçı yüzey oksitleri yüzünden güçlükler meydana getirmektedir. Ancak basınç ve sıcaklığın yüksek tutulması ile bu oksit tabakalarını kırmak mümkün olmaktadır. Ayrıca yüzey kaplama veya ara tabaka kullanılması ile bu malzemelere daha düşük basınç altında difüzyon kaynağı yapımını kolaylaştırmaktadır (Salehi 1990, Bartle 1969, Naiman, 1981, Serino 1991).

Calvo (1988) ve arkadaşları Al ve Cu'nun difüzyon kaynağını 520°C de 15 dakikalık sürede 0.25 ile 1.60 MPa basınçlarda gerçekleştirmişler ve yapıda intermetalik bileşik ve ara fazlar oluştuğunu tesbit etmişlerdir. Kardashova v.d. (1994) Ti - 47.5 % Al' un difüzyon kaynağında γ - α_2 intermetalik bileşik oluştuğunu ifade etmektedir.

Difüzyon kaynağının en çok kullanıldığı malzemelerden biride seramiklerdir. Seramiklerin korozyon ve aşınma dirençlerinin çok yüksek olması nedeni ile bir çok ülkede bunların kaynağı çalışılmaktadır. Yetersiz sünekliğe sahip olduklarından seramik metal kaynağı bu dezavantajı giderici bir yol olarak görülmektedir. Ayrıca seramiklerde tokluğu geliştirmek için seramik matris / seramik fiberli kompozitler üretilmektedir (Patridge 1989, Greenhut, 1986). Mutoh vd (1989) BaO_3 Y_2O_3 ve CuO 'nun uygun oranlarda karıştırılıp havada 12 saat süreyle $930\text{ }^{\circ}C$ de kalsine edilerek $YBa_2\text{ }CuO_{3-7}$ -Y seramiğinin difüzyon kaynağını incelemiş ve ara tabaka kullanmadan $900\text{ }^{\circ}C$ ile $950\text{ }^{\circ}C$ de 4 saatten uzun kaynak süresi ile birleştirmeyi başarmışlardır.

4.5. Difüzyon Kaynağı Uygulamaları

Difüzyon kaynağının yüksek maliyeti dışındaki avantajları daha önce ifade edilmişti. Yüksek teknoloji gerektiren yerlerde tek birleştirme yöntemi olması pahalı olmasını önemsizleştirmiştir. Kullanım alanları genel mühendislik, havacılık ve uzay sanayi, savunma sanayi, nükleer sanayiler ve elektronik sanayi gibi gruplandırılabilir.

Genel mühendislik alanında; kaynak çatlaması, metaller arası yapıların oluşma tehlikesinin bulunduğu durumlarda difüzyon kaynağı kullanılmaktadır.

Yüzey kaplama, bir defada birleştirilmesi gereken karmaşık şekilli ve içi boş yapı elemanlarının difüzyon kaynağı ile gerçekleştirilebilmesi bu kaynak yönteminin özel avantajlarıdır.

Difüzyon kaynağı havacılık sanayinde daha ucuz, daha verimli, daha hafif ve dizayna daha yatkın parçaların üretimini mümkün kılarak, adeta bir çığır açmıştır. Havacılık sanayi difüzyon kaynağını yüzey - yüzeye yada kenar kenara temas eden

bağlantıların üretiminde, genellikle dövme ve geleneksel kaynak yöntemlerinin yerine kullanılmaktadır (Orhan 1996).

Amerika'da aralarında Rockwell, Northrop, Douglas Aircraft gibi şirketlerin bulunduğu 12 firma 1000 ile 5000 tonluk presler kullanarak difüzyon kaynağı ve süperplastik şekillendirme ile; Ti alaşımlarından F15, füze yuvası, B1 bombardıman uçağı için patlama lülesi, T 38 uçağı için ana iniş arka kapısı, rüzgar kanatları, imal etmişler ve maliyette % 40'lara varan tasarruflar sağlamışlardır. (Willamson, 1986). Yine Amerika'da Rhor şirketi (California), petek şeklinde dizayn edilmiş olan bir hava kanalını difüzyon kaynağı ile bir tek işlemle üretmeyi başarmışlardır (Guo, 1985).

İngiltere'de Rolls Royce şirketi, uçak türbin kanatlarını (Ti alaşımı), “uyarılmış difüzyon kaynağı “ adını verdiği; (Cu ve Ni'den mamul ara tabakaları, iki panel arasına, mikro işlemci kontrollü bir elektrokaplama metoduyla yerleştirilip, basınç altında ve vakumda, yine mikroişlemci kontrollü bir ısıl işlemle birleştirmişlerdir) bir yöntemle üretmiştir (Fitzpatric, 1988).

Difüzyon kaynağı ile piston, silindir blokları gibi hidrolik elemanları, ağırlıktan tasarruf sağlamak amacıyla çelik yüzeyler bronzla (% 80 Cu - % 10 Sn - % 10 Pb) kaplanarak üretilmişlerdir.

Nükleer endüstride Battle UO₂ levhacıkları ile düz plaka tipi yakıt elemanları üretiminde difüzyon kaynağını kullanmıştır (Salehi 1990, Guo 1985). Hindistan da su ile çalışan nükleer santrallerde kullanılan bir metal keçe üretiminde de difüzyon kaynağı başarı ile uygulanmıştır (Kamat 1988).

Mikro elektronik sanayinde silikon çiplerin bakır veya Ni - Fe esaslı led çerçevesine bağlanmasında ara, tabaka olarak devre paketlerinin imalinde kullanılan yöntemlerden biride difüzyon kaynağıdır (Richs 1989).

Difüzyon kaynağının bir diğer uygulama alanında biyokmedikal mühendisliktir. Özellikle çeşitli metal protezlerin, seramiklerle kaynağı veya kaplanması bu konudaki yeni ve ilginç alanlardan birisidir.

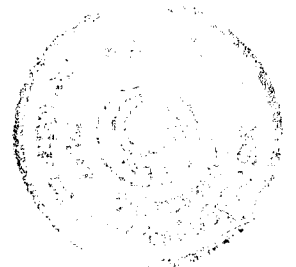
4.6. Difüzyon Kaynağının Diğer Kaynak Metodlarıyla Karşılaştırılması

Ergitmeli kaynak yöntemleri ile difüzyon kaynağının mukayesesinde göze çarpan farklar şunlardır.

- a. Ergitme kaynağında görülen deformasyonlar, ön ve son tavlama ihtiyaçları, bu teknikte görülmez.
- b. Metalurjik açıdan uyumsuz, birbirinden tamamen farklı iki metal yada bir metalle, metal olmayan bir malzeme birleştirilebilir.
- c. Birleşme süresi, bağlantı alanından bağımsızdır. Dolayısıyla bir defada geniş alanlı yada karmaşık şekilli bağlantılar birleştirilebilmektedir.
- d. Birleşme esnasında, ana malzemelerde istenmeyen metalurjik yapıların oluşma ihtimali düşüktür.
- e. Seramik ve kompozitlerin, metal ve diğer malzemelerle birleştirilmesinde, günümüzde en verimli ve etkili bir metottur.

Diğer katı hal kaynak teknikleriyle karşılaştırıldığında ise başlıca şu farklar görülebilir.

- a. Difüzyon kaynağı, esas itibarıyla difüzyon kontrollu bir tekniktir.
- b. Seramiklerin kaynak tekniğini belirleyen en önemli faktör bu malzemelerin gevrekliğidir. Bu ise kaynakta deformasyon kullanımının mümkün olmadığı anlamına gelir. Dolayısıyla seramiklerin kaynağında difüzyon kaynağı mümkün olan tek metottur.



Bunların yanı sıra, bu yöntemin özel ortam ve aparat gerektirmesi, bu nedenle pahalı olması ve kaynak arayüzeyin de matellar arası bileşiklerle, azda olsa, ara fazların oluşma ihtimali difüzyon kaynak yönteminin dezavantajları olarak sayılabilir.

4.7. Difüzyon Kaynağı Teknikleri

Günümüzde difüzyon kaynağı, bilimsel araştırmalar, ve mevcut bir tekniği kullanarak parça üretmek için yapılmaktadır.

Birleştirilen malzemeler arasında ilave bir malzeme kullanıp, kullanılmamasına göre difüzyon kaynağı ;

1. Difüzyon Lehimleme (ara tabaka kullanılan)

- a. Tek tabaka kullanarak
- b. Birden çok ara tabaka kullanarak

2. Ani sıvı faz kaynağı (Zhang 1987)

3. Direk difüzyon kaynağı olarak gruplandırılabilir.

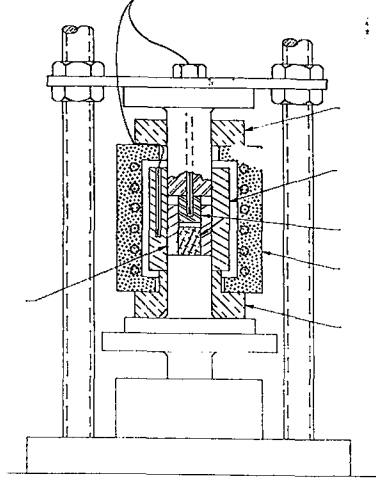
Difüzyonla lehimlemede, birleştirilecek yüzeyler arasına, ergime sıcaklığı, birleştirilecek malzemelerinkinden daha düşük levha şeklinde bir ilave malzeme yerleştirilir. Difüzyon kaynağında ara tabaka, birleşme işlemini hızlandırmak, bağlantının mekanik özelliklerini geliştirmek veya birbirinden farklı metal - metal olmayan (seramik, cam, kompozitler) malzemelerin kaynağında karşılıklı difüzyon oluşturmak için kullanılır. Enjo v.d. (1987) Kompozit malzemelerin difüzyon kaynağında ara tabaka kullanılması halinde basınç ve sıcaklığın ancak sınırlı ve dar bir bölgede uygulanabildiğini tesbit etmişlerdir.

Genel olarak ara tabakanın fonksiyonları şöyle sıralanabilir (Guo, 1985).

- a. Metalik bir bağ oluşturmak için ana metalde çözünmek
- b. Farklı malzemelerin birleştirilmesinde, intermetalik fazın oluşumunu önlemek
- c. Ön ısıtma sırasında, yüksek sıcaklıkta birleştirilerek malzemeleri oksidasyona karşı korumak
- d. Elektro - kaplama, veya iyon kaplama ile malzemenin difüzyon özelliğini geliştirmek
- e. Düşük akma gerilmeli malzeme yada sıvılar ihtiva eden bölgeler oluşturarak, oksit filimlerinin bozulmasını sağlamak.
- f. Ara kesit boşluklarında sıvı fazlar oluşturarak yüzey pürüzlerinin birleşmeye olan olumsuzluğunu en aza indirmek.

Ani sıvı faz kaynağını Zhag (1987) ilk safhasında hızlı ısıtma ile yüzeylerden biri veya her ikisinin basınç altında çok kısa bir süre için ergitilip hızla soğutulduğu bir difüzyon kaynağı olarak tanımlamaktadır. Hem difüzyonla lehimleme, hem de difüzyon kaynağında yüzeyler çok hassas bir şekilde hazırlanmış olmaları gerekirken, ani sıvı faz kaynağında 80 numara zımparalama veya hassas tornalama ile işlenmiş yüzeyler yeterli olmaktadır.

Difüzyon kaynağı uygulanma ortamına göre; koruyucu gaz atmosferinde ve vakum altında olmak üzere iki şekilde yapıldığı Bölüm 4.3.6.'da söylemişti. Bu ortamları temin etmek şartıyla değişik şekillerde difüzyon kaynağı düzeneği oluşturmak mümkündür. Şekil 4.7.'de bir difüzyon kaynağı düzeneği verilmiştir.



Şekil 4.7. Difüzyon Kaynağı düzeneği (Dını, 1984)

4.8. Difüzyon Kaynaklı Birleştirmelerin Muayeleri

Difüzyon kaynağında da bağlantının kalitesini tesbit etmek için diğer malzeme metodlarında olduğu gibi tahribatlı ve tahribatsız olmak üzere iki şekilde test kullanılmaktadır.

4.8.1. Tahribatlı Muayeneler

Çekme testi

Bindirme kayma testi

Darbe testi

Eğme testi gibi malzeme tahrip edilerek kaynak bağlantı testleri yapılmaktadır.

Çekme testi çekme numunesi yapılabilecek uzunluktaki difüzyon kaynaklı malzemeler için uygulanmaktadır.

Bindirme kayma testi, levha şeklindeki malzemelerin bağlantı mukavemetini tesbit etmek için kullanılır.

Darbe testi birçok araştırmacı tarafından kullanılmış olmasına rağmen, çentiği birleştirme hattına yerleştirme güçlüğü vardır. Bu test daha çok çelikler için faydalıdır. Bağlantının darbe mukavemeti, arayüzeydeki mikroboşluklar yüzünden, birçok durumda, ana metalinkinden düşüktür.

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

4.8.2. Tahribatsız Muayyeneler

Bu muayyeneler aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir (Guo 1985).

- Metalografi
- Potansiyel değişmesi (Elektrik direnç değişmesi)
- Transmisyon akustik mikroskobisi
- Elektron mikroskobisi
- Fotoemisyonlu elektron mikroskobisi

Metalografi, difüzyon kaynaklı bağlantıların mikroyapılarını muayyenede esas metod olmasına rağmen, küçük boşlukların optik mikroskopta tayin güçlüğü bağlantı kalitesini anlamada etkili bir yol olmasını engellemektedir.

Potansiyel düşmesi metodu daha çok yorulma çatlağı büyümesini tesbitle kullanılır. Boşluk tesbitinde kullanıldığı zaman ise; ancak büyük boşluklarda iyi sonuç vermektedir.

Elektron mikroskobisi, bağlantıdaki ara tabakaların kalınlıklarının tesbitinde faydalı olurken, bağlantı mukavemeti hakkında fikir vermemektedir.

Fotoemisyonlu elektron mikroskobisi, yüksek sıcaklıklarda dinamik metalurjik gözlem yapılmasını ve difüzyon kaynağının safha safha izlenmesini mümkün kılmaktadır.

Geleneksel X ışını ve ultrasonik muayyeneler difüzyon kaynağının iç kesitini muayyenede, mevcut kusurlarının tesbitinde oldukça faydalıdır.

BÖLÜM 5

5. DENEY ÇALIŞMALARI

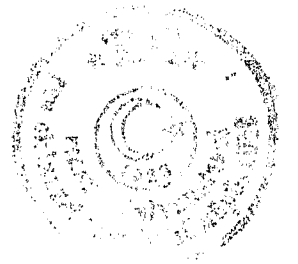
5.1. Toz Metal Numunenin Hazırlanması

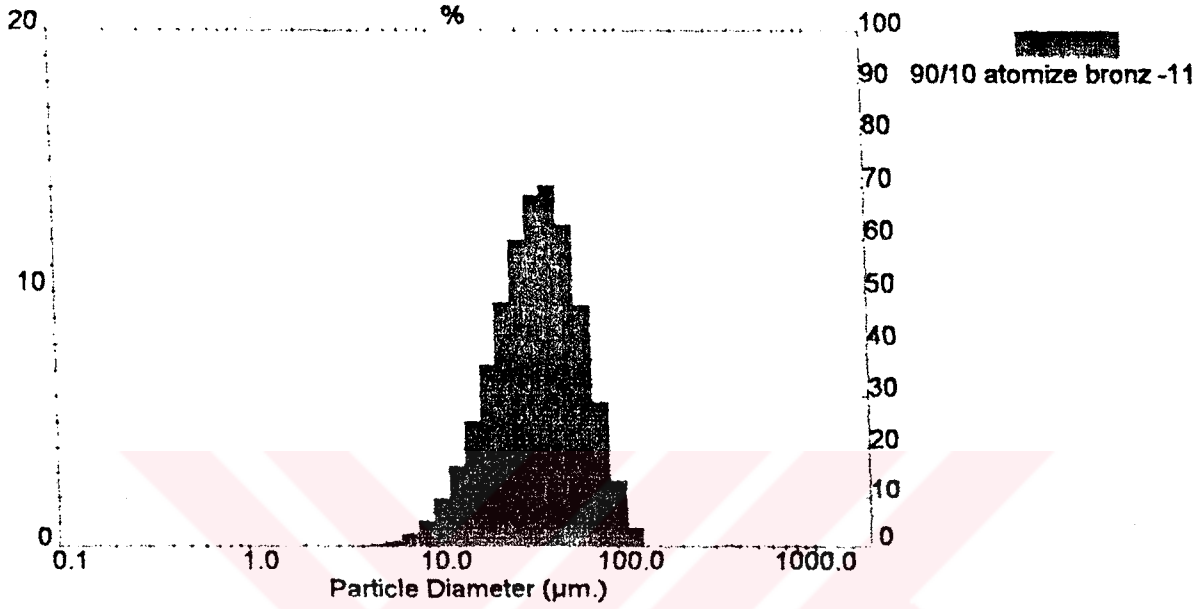
Bu çalışmada difüzyon çiftini oluşturan toz metal malzemesi olarak % 90 Cu, % 10 Sn alaşımlı bronz tozları, toz metali üretimi yapan Sinter Metal'den temin edilmiştir. Bu tozlara ait boyut analizi Tablo 5.1'de verilmiştir. Tozların ortalama tane büyüklüğü 35,38 mikron olarak ölçülmüştür. Şekil 5.1'de ise tane boyut dağılımı görülmektedir.

Tablo 5.1. Toz Tane Boyut Analizi

Presentation: 20HD		Volume Result		Focus = 0 mm.	
Polydisperse model		Concentration = 0.000 %		Obscuration = 0.00 %	
Residual = 0.000 %		d (0.1) = 15.80 µm		d (0.9) = 67.15 µm	
D [4, 3] = 39.24 µm		Span = 1.45		Mode = 39.82 µm	
Sauter Mean (D[3,2]) = 27.93 µm				Density = 1.00 gm / c.c.	
~~Specific Surface Area = 0.2148 sq. m / gm~~					

Size (Lo) µm	Result In %	Size (Hi) µm	Result Below %	Size (Lo) µm	Result In %	Size (Hi) µm	Result Below %
0.50	0.00	1.32	0.00	25.46	11.94	31.01	41.04
1.32	0.02	1.60	0.02	31.01	13.63	37.79	54.67
1.60	0.03	1.95	0.05	37.79	14.00	46.03	68.67
1.95	0.04	2.38	0.09	46.03	12.54	56.09	81.22
2.38	0.05	2.90	0.13	56.09	9.48	68.33	90.69
2.90	0.05	3.53	0.18	68.33	5.77	83.26	96.46
3.53	0.06	4.30	0.24	83.26	2.66	101.44	99.12
4.30	0.11	5.24	0.35	101.44	0.78	123.59	99.90
5.24	0.24	6.39	0.58	123.59	0.00	150.57	99.90
6.39	0.52	7.78	1.10	150.57	0.00	183.44	99.90
7.78	1.05	9.48	2.15	183.44	0.00	223.51	99.90
9.48	1.92	11.55	4.07	223.51	0.00	272.31	99.90
11.55	3.25	14.08	7.32	272.31	0.00	331.77	99.90
14.08	5.00	17.15	12.32	331.77	0.09	404.21	100.00
17.15	7.18	20.90	19.50	404.21	0.00	492.47	100.00
20.90	9.60	25.46	29.10	492.47	0.00	600.00	100.00





Şekil 5.1. Tozların Tane Boyut Dağılımı

Bronz tozların bir kısmına ağırlıkça % 1 grafit tozu ilave edilerek karıştırılmıştır. Bir kısım numune ise grafit tozu ilave edilmeden hazırlanmıştır. Numunelerin şekillendirilmesi için şekil 5.2 de verilen kalıp tasarlanıp imal edilmiştir.

Grafit ilaveli bronz tozları gözeneklilik tesbiti için kalıp içerisinde 307, 615 MPa da sıkıştırılarak şekillendirilmişlerdir.

Kalıpta sıkıştırılarak şekillendirilen numuneler Şekil 5.3. de verilen azot gazı kontrollü fırında 800 °C de 45 dakika süre ile sinterlenmişlerdir. Soğutma atmosfere açık ortamda gerçekleştirilmiştir.



5.2. Düşük karbonlu Çelik Malzemenin Özellikleri

Difüzyon çiftinin diğer parçasını oluşturan düşük karbonlu çelik malzeme SAE 1010 çeliğidir. Bu malzemeye ait kimyasal analiz Tablo 5.2’de verilmiştir. Çelik malzeme 720 °C ye kadar ferrit + perlit fazına sahiptir. 740 °C’de östenit kalan ise ferrit fazından oluştuğu hesaplamalarla yaklaşık olarak bulunmuştur.

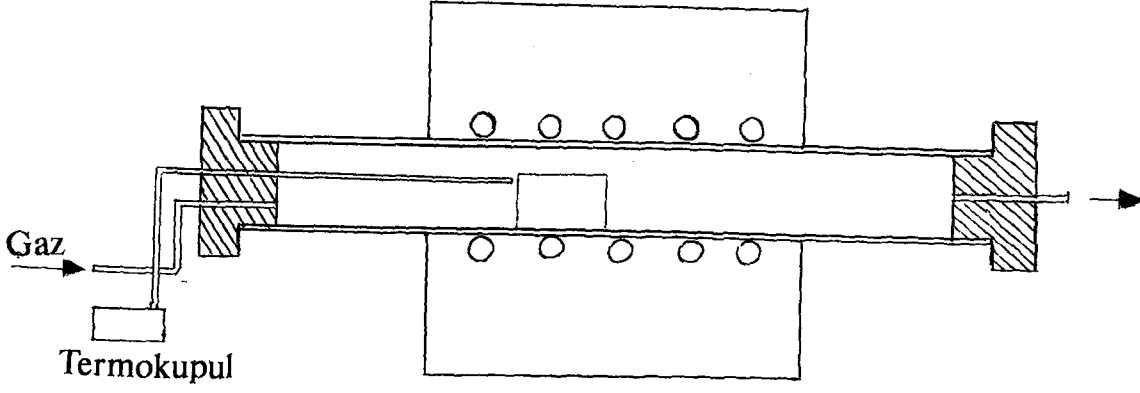
Tablo 5.2. Difüzyon Çiftinde Kullanılan Çeliğin Kimyasal Analizi (%)

C %	Si %	Mn %	P %	S %
0.08	0.25	0.44	0.01	0.06

5.3. Difüzyon Kaynağının Yapılması

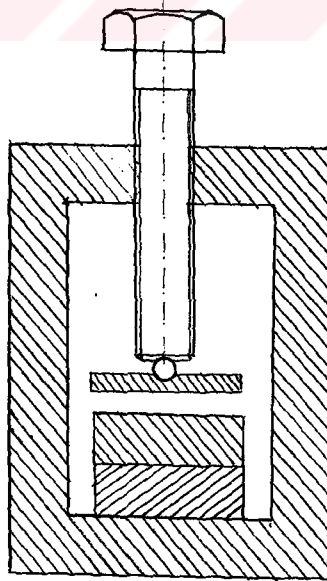
Kaynak yapılacak numuneler 240 - 1200 meslik zımpara kademesinden geçirilmiş yüzey pürüzlülüğü çelik numunelerde 0.4 - 0.6 Ra, Toz Metal numunelerde 0.7 - 0.9 Ra arasında tesbit edilmiştir.

Difüzyon Kaynağının yapıldığı atmosfer kontrollü tüp fırın şematik olarak Şekil 5.4.’de gösterilmiştir.

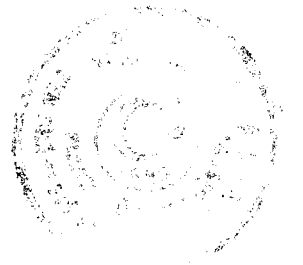


Şekil 5.4. Difüzyon Kaynağının Yapıldığı Tüp Fırın

Birleştirilecek numuneler Şekil 5.5.'de gösterilen mengene arasında sıkıştırılarak tork anahtarları ile 15 Mpa'lık sabit kaynak basıncı uygulanmıştır.



Şekil 5.5. Difüzyon Kaynağı İçin Basıncı Uygulama Aparatı



Basınç Uygulanmış numuneler mengene ile beraber fırın içerisine yerleştirilip ortam azot gazı ile kontrol altında tutulmuştur. Kaynak sıcaklıkları sırası ile 650 °C - 740 °C ve 800 °C olup kaynak süresi 90, 120, ve 150 dakika olarak seçilmiştir.

Kaynağı gerçekleştirilen numuneler mikrosertlik, metalografi, EDAX analizleri için hazırlanmışlardır. Bu maksatla numune yüzeyleri 3mm işlenmiş ve metalografik olarak parlatılmıştır. Çelik tarafı % 5'lik nitale, bronz tarafı % 8'lik Amonyum hidroksit + % 8'lik CuCl_2 ile dağlanmışlardır.



BÖLÜM 6

6. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞILMASI

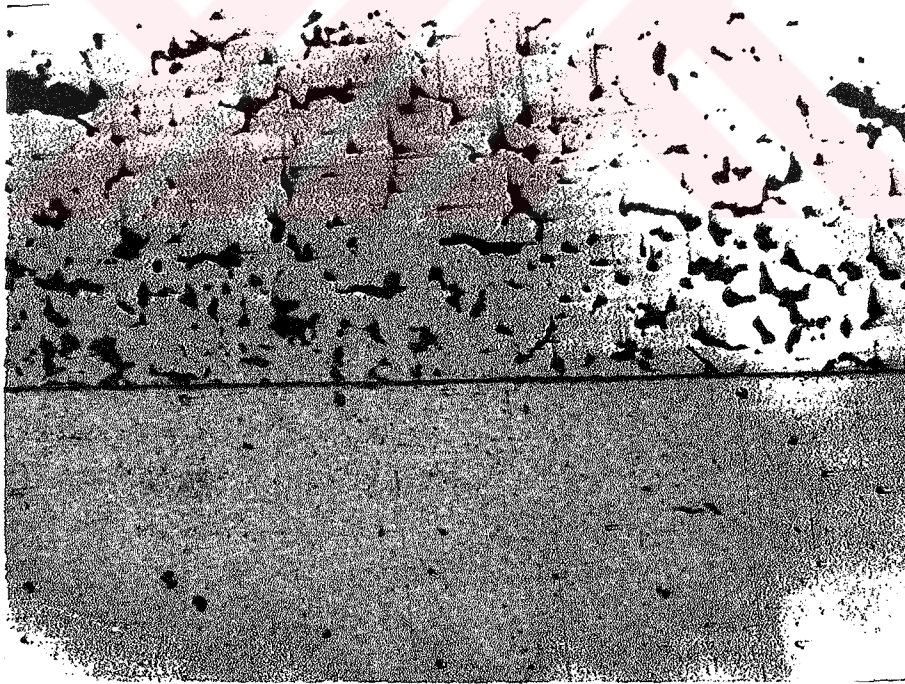
Difüzyon kaynağı ile birleştirilmiş parçalar parlatılıp hazırlandıktan sonra kaynak arayüzey incelemesi çelik tarafından bakır, bronz tarafında demir analizi sıcaklık ve zamana bağlı olarak yapılmış, kaynak bölgesinde metalografik inceleme ve her iki malzemede mikrosertlik ölçümü yapılmıştır. Ayrıca kaynaklı bölgenin mikroyapısına gözenekliliğin etkisi incelenmiştir.

6.1. Kaynak Bölgesinin Mikroyapısına Gözenekliliğin Etkisi

Kaynak bölgesinin mikroyapısına gözenekliliğin etkisini incelemek maksadıyla % 25 gözenekliliğe sahip olan numuneler 650 °C de 90, 120, 150 dakikalık sürelerde kaynak işlemine tabi tutulduktan sonra ki mikroyapıları Şekil 6.1, Şekil 6.2, Şekil 6.3’de, % 35 gözenekli numunelerin mikroyapı fotoğrafları ise Şekil 6.4., Şekil 6.5. ve Şekil 6.6.’da verilmiştir. Şekil 6.1, Şekil 6.2 ve Şekil 6.3.’de görüleceği gibi kaynak süresi arttıkça gözenek göçü kaynak arayüzeyine doğru olmakla birlikte, gözenekler artan süre ile küçülmekte ancak aynı etki büyük gözeneklerde fark edilememektedir.



Şekil 6.1. 650 °C de 90 Dakikada Kaynaklı Numune x 200 (% 25 Gözenekli)



Şekil 6.2. 650 °C de 120 Dakika da Kaynaklı Numune x 200 (% 25 Gözenekli)

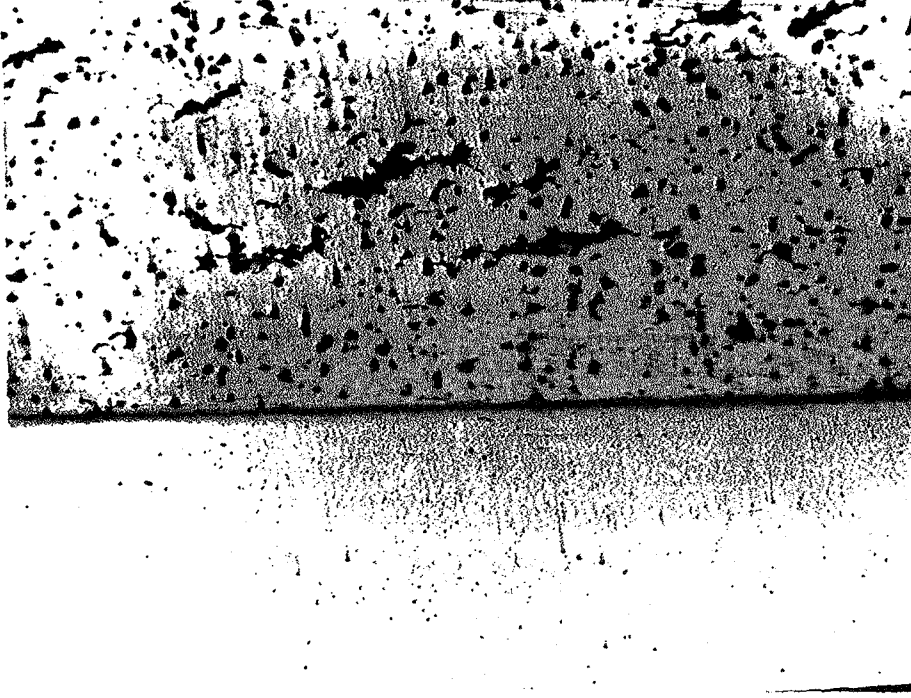




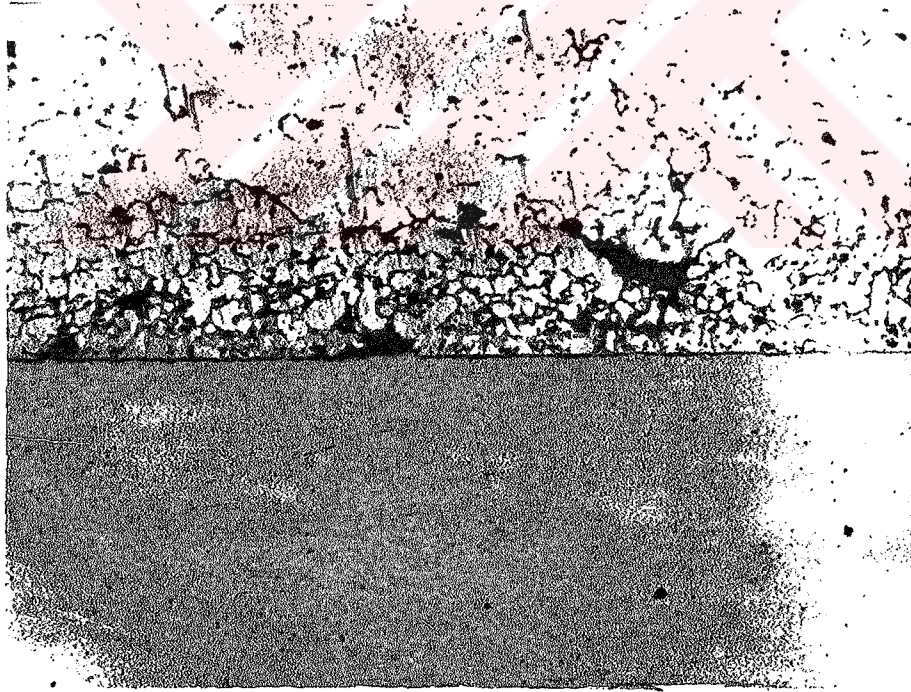
Şekil 6.3. 650 °C, 150 Dakikada Birleştirilmiş Numune x 200 (% 25 Gözenekli)



Şekil 6.4. 650 °C 90 Dakikada Kaynaklı % 35 Gözenekli Numune x 200



Şekil 6.5. 650 °C de 120 Dakikada Birleştirilmiş % 35 Gözenekli Numune x 200

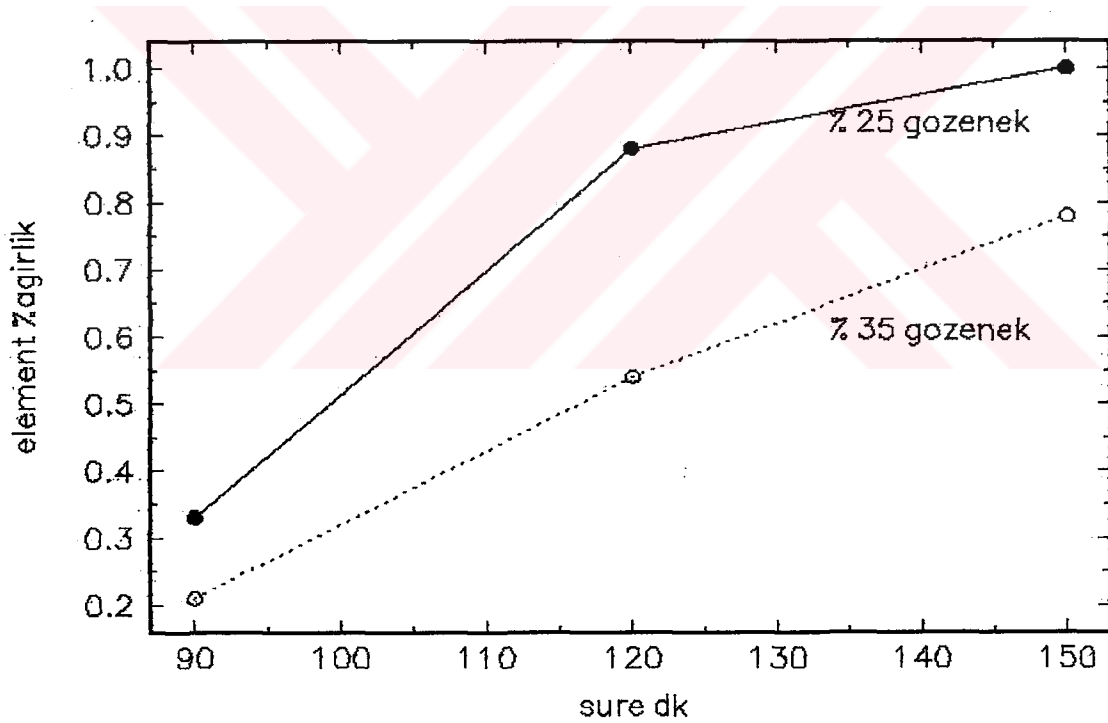


Şekil 6.6. 650 °C de 150 Dakikada Birleştirilmiş % 35 Gözenekli Numune x 200

Şekil 6.4, Şekil 6.5 ve Şekil 6.6.'da görüldüğü gibi artan kaynak süresi gözenek boyutuna küçültücü etki yaptığı gibi gözeneklerin kaynak arayüzeyine doğru göçünde gerçekleştirmiştir. Bu durum Şekil 6.6.'da açıkça görülmektedir.

6.2. Gözenekliliğin Difüzyona Etkisi

Gözeneklilik oranı % 25 ve % 35 olan numunelerde kaynak süresinin kaynak çiftlerindeki difüzyon miktarına etkisi yapılan EDAX analiz sonuçlarından grafik halinde çıkartılmış ve Şekil 6.7'de verilmiştir.

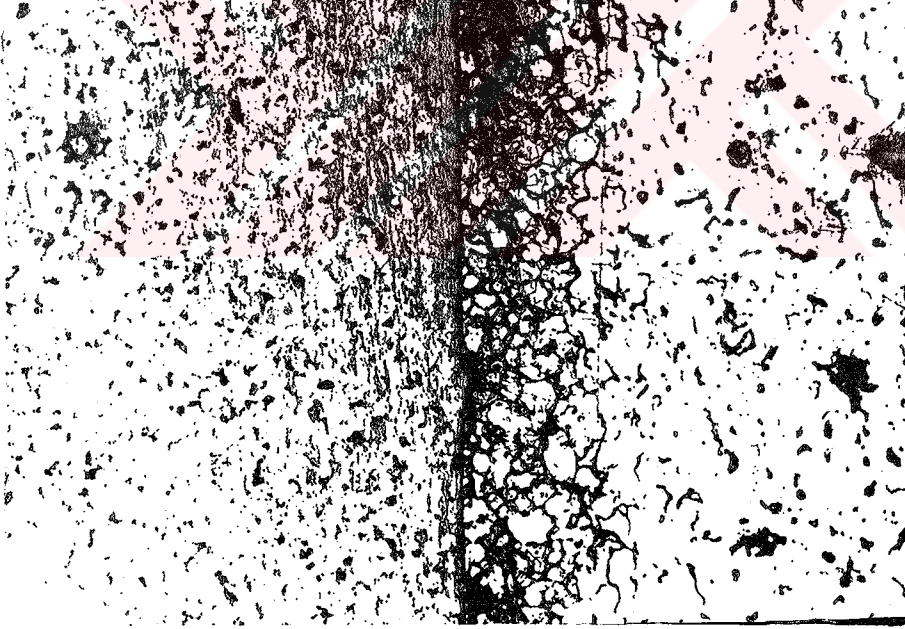


Şekil 6.7. Gözenekliliğin Fe'in Difüzyon Miktarına Etkisi

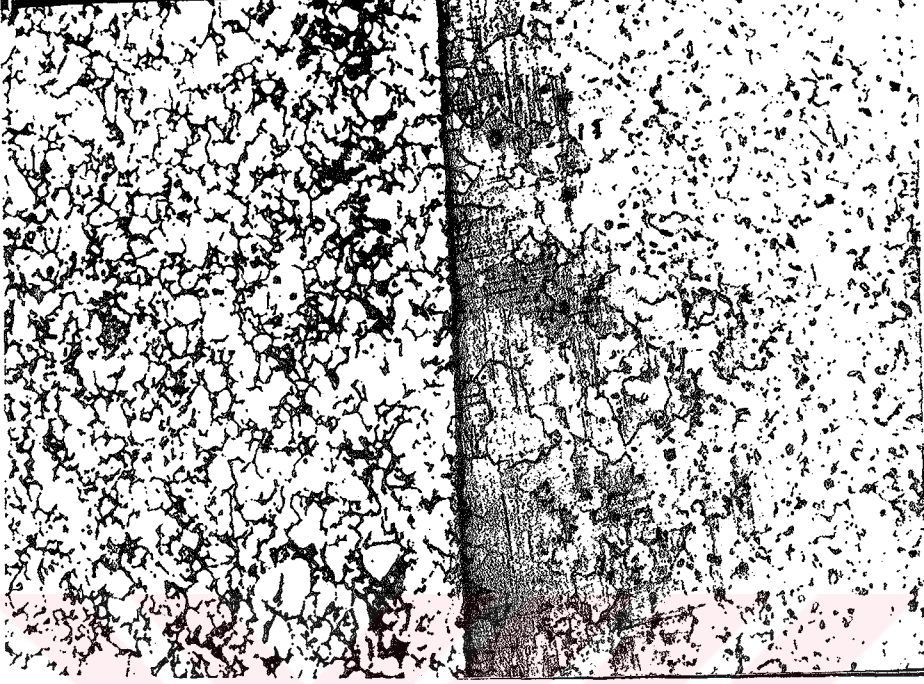
Şekilden de görüleceği gibi difüzyon miktarı bütün sürelerde, düşük gözeneklilik oranlarında daha yüksektir. Dolayısıyla difüzyon miktarı toz metal malzemede gözeneklilik arttıkça, azalmaktadır. Buradan hareketle sıcaklık ve zamanın difüzyona etkisinin incelenmesinde % 25 gözenekli numuneler kullanılmıştır.

6.3. Sıcaklığın Difüzyona Etkisi

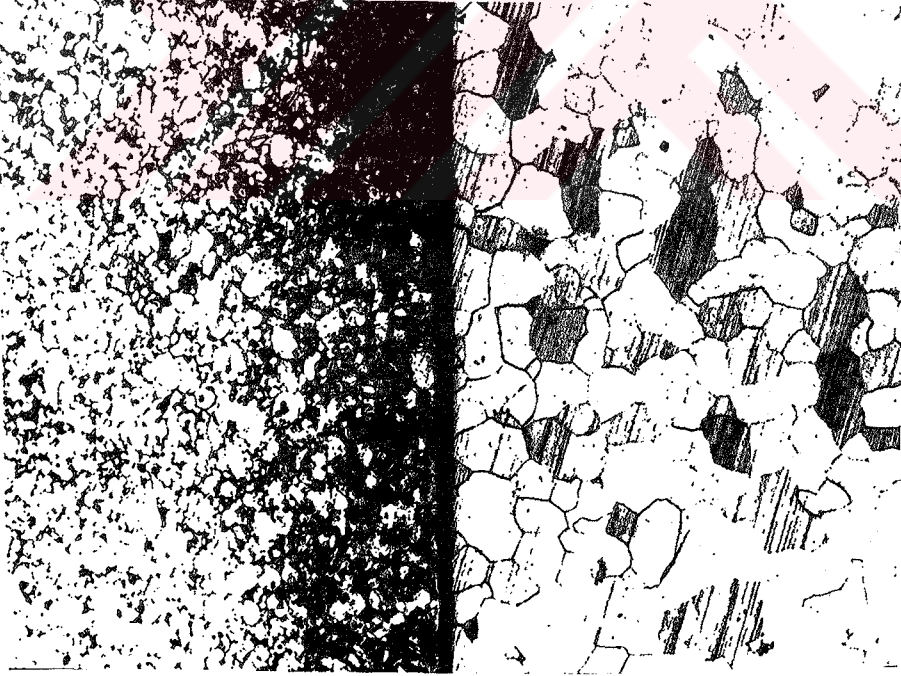
Sıcaklığın difüzyonun en önemli parametrelerinden birisi olduğu Bölüm 3.3.1 de ifade edilmişti. Difüzyon kaynaklı birleştirmelerde sıcaklığın difüzyon miktarına etkisi yapılan EDAX analizlerinde ve optik mikroskop incelemelerinde görülmüştür. Optik mikroskop sonuçları Şekil 6.8’de 650 °C de 120 dakikada yapılan difüzyon kaynağı arayüzeyi için, Şekil 6.9’da 740 °C de Şekil 6.10 da ise 800 °C de yapılan kaynaklı birleştirmelerin arayüzey fotoğrafları verilmiştir.



Şekil 6.8. 650 °C de 120 Dakikada Şartlarında Kaynak Arayüzeyi x 200



Şekil 6.9. 740 °C - 120 Dakika Kaynak Şartlarındaki Arayüzey x 200



Şekil 6. 10. 800 °C - 120 Dakika Şartlarında Birleştirilmiş Kaynak Arayüzeyi

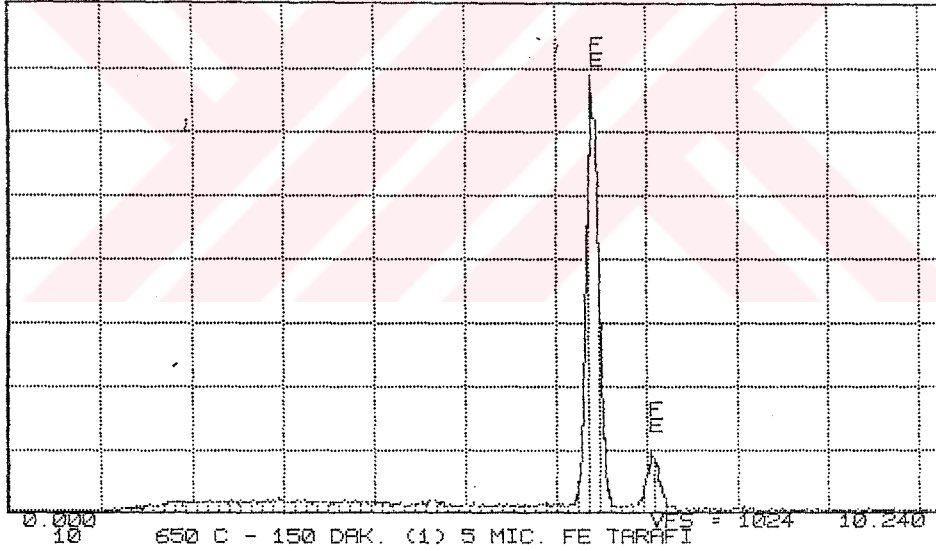


Kaynak sıcaklığı arttıkça bronz tarafındaki difüzyon bölgesi genişlerken, çelik tarafında 740 °C ve 800 °C de birleştirilmiş numunelerde kaynak arayüzeyine yakın bölgede iri taneli ve perlitsiz bir bölge oluşturmuştur. Bu bölgenin genişliği Şekil 6.9. ve Şekil 6.10 da görüleceği gibi 800 °C de daha fazladır. Bu bölgede tane irileşmesinin ve perlit teşekkülünün engellenmesinin sebebi bakırın perlit büyümesini ve soğuma sırasında oluşan ferrit fazının çekirdeklenmesini yavaşlatmasına bağlanabilir (Çiğdemoğlu, 1971). Çünkü 740 ve 800 °C sıcaklıklarda yapı $\alpha + \text{östenit}$ tir. Soğuma sırasında östenit, $\alpha + \text{perlit}$ e dönüşmektedir. Burada yeni α teşekkül ederken çekirdeklenme hızı yavaş olduğundan iri α taneleri oluşmaktadır. Aynı zamanda bakırın yüksek olduğu bu bölgede östenit fazından dönüşen perlitin oluşumu yavaşlatılmakta veya engellenmektedir.

Demirin atom yarıçapı 1.26 Å, bakırın atom yarıçapı ise 1.28 Å'dur. Difüzyon mekanizmaları açıklanırken atom yarıçapları aynı veya birbirine yakın olan elementlerde yeralan mekanizması ile difüzyonun gerçekleştirildiği ifade edilmişti. Bu çalışmada kullanılan çelik ve bronz çiftinde de difüzyon yeralan mekanizması şeklindedir. Arayer mekanizmasına göre yeralan mekanizması daha fazla aktivasyon enerjisi gerektirir. Bu nedenle atom yarıçapı azda olsa bakırdan daha küçük olan Fe atomlarının Cu'a oranla daha kolay difüze olduğu söylenebilir. Yapılan EDAX analizlerinde de çelik içerisinde Cu'ın ancak 800 °C sıcaklıkta pik verdiğini görmekteyiz. Elde edilen pikler Şekil 6.11, Şekil 6.12 ve Şekil 6.13 de verilmiştir.

Element	K-ratio	Z	A	F	ZAF	Atom%	Wt%
Fe-K	0.987	0.999	1.001	0.999	0.999	98.96	98.60
Cu-K	0.008	1.028	1.096	1.000	1.127	0.81	0.92
Sn-L	0.004	1.139	0.991	0.967	1.091	0.23	0.49
Total= 100.00%							

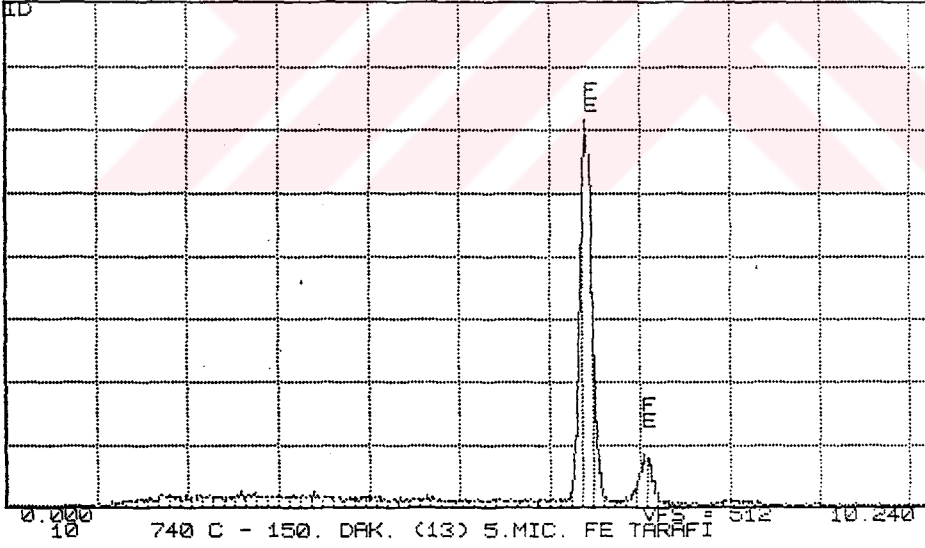
TPAO ARASTIRMA MERKEZİ M.Bulbul SAT 26-OCT-95 03:59
 Cursor: 0.000keV = 0



Şekil 6.11 650 °C, 150 Dakikalık Süre de Kaynaklı Numunenin EDAX Analizi

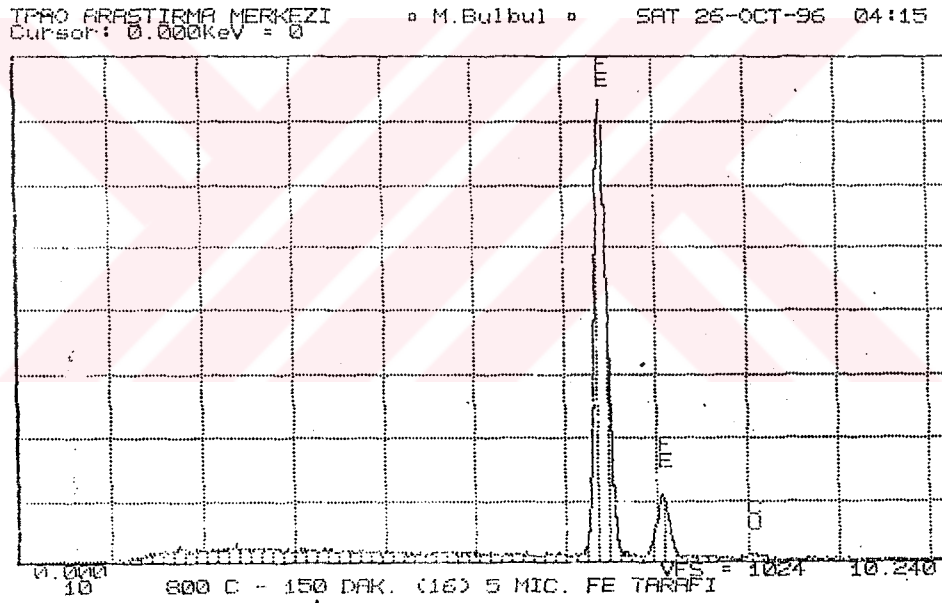
Element	K-ratio	Z	A	F	ZAF	Atom%	Wt%
Fe-K	0.972	0.998	1.002	0.998	0.998	97.77	97.02
Cu-K	0.018	1.027	1.095	1.000	1.125	1.76	1.98
Sn-L	0.009	1.138	0.992	0.968	1.092	0.47	1.00
Total= 100.00%							

TPAO ARASTIRMA MERKEZİ • M.Bulbul • THU 24-OCT-96 00:18
 Cursor: 0.000keV = 0



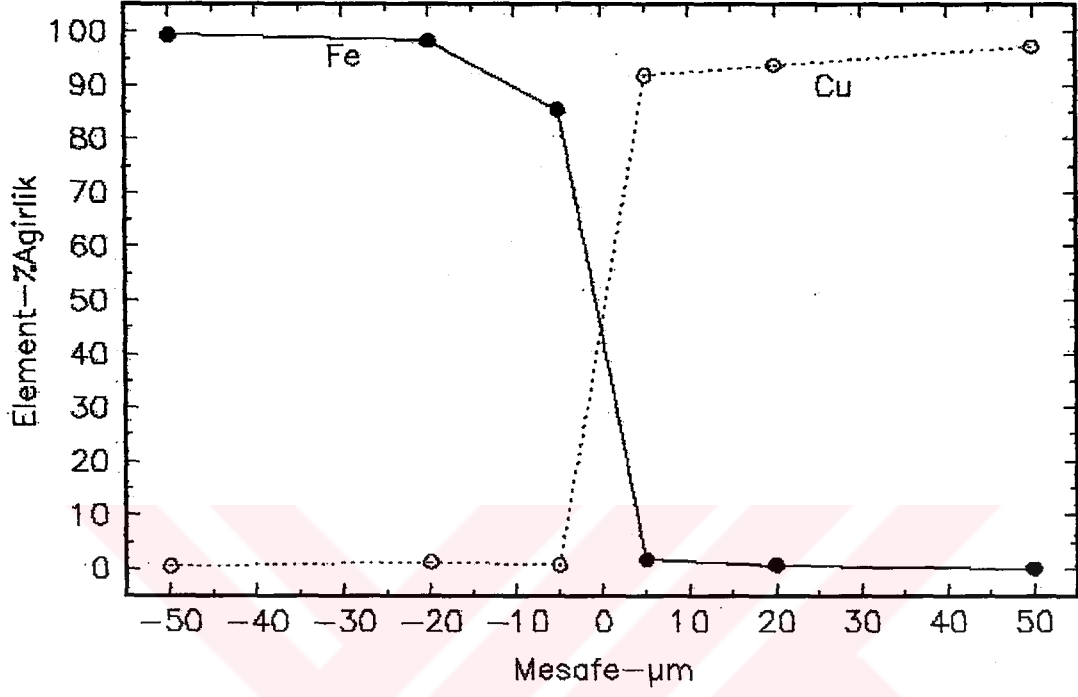
Şekil 6.12. 740 °C 150 Dakika Sürede Kaynaklı Numunenin EDAX Analizi

Element	K-ratio	Z	A	F	ZAF	Atom%	Wt%
Fe-K	0.978	0.999	1.000	0.998	0.997	97.87	97.59
Cu-K	0.021	1.028	1.095	1.000	1.126	2.13	2.41
Sn-L	0.000	1.139	0.992	0.967	1.092	0.00	0.00
Total= 100.00%							

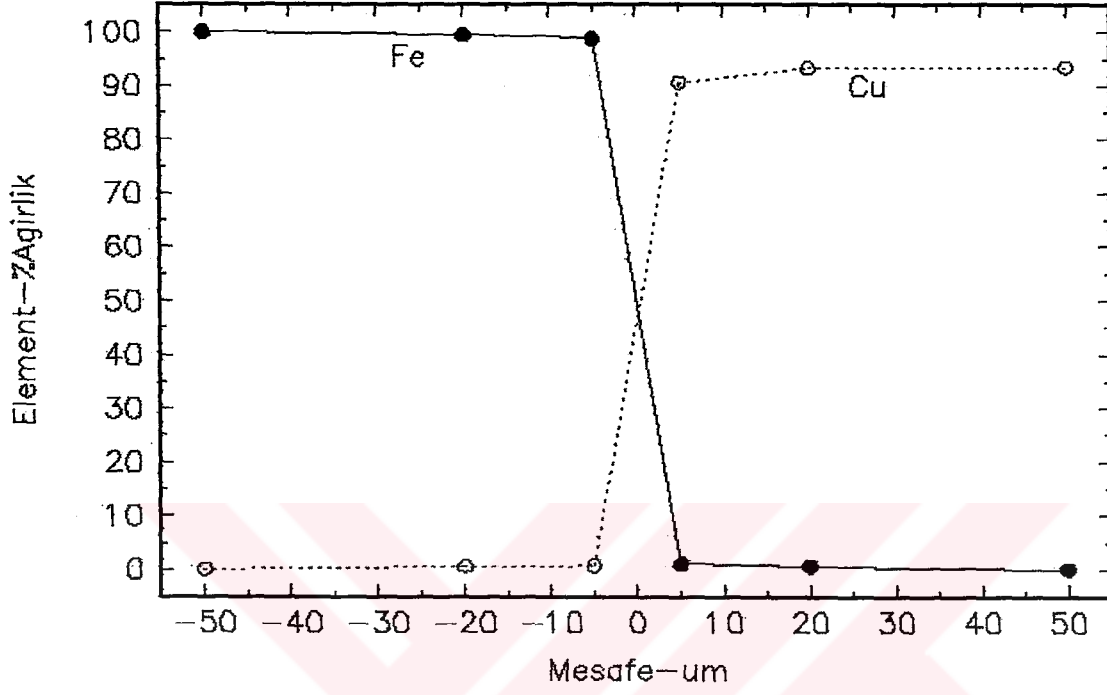


Şekil 6.13. 800 °C de 150 Dakika Sürede Kaynaklı Numunenin EDAX Analizi

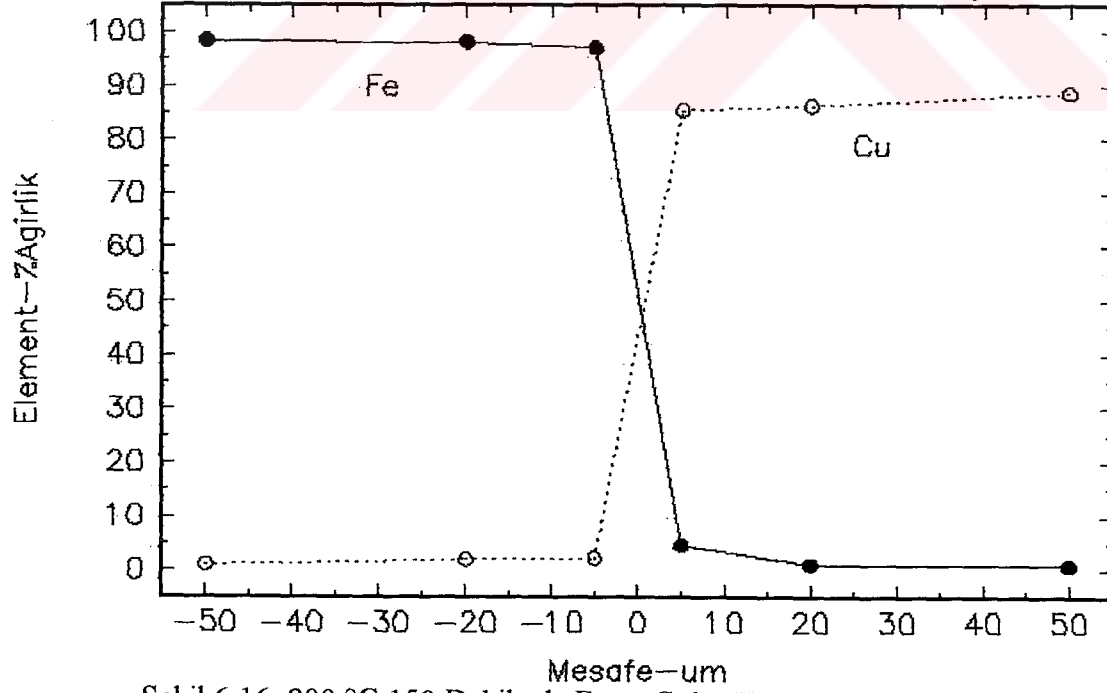
Analiz sonuçlarına göre çizilen Fe ve Cu'nun karşılıklı difüzyon miktarı grafikleri Şekil 6.14, Şekil 6.15 ve Şekil 6.16 da verilmiştir.



Şekil 6.14. 650 °C 150 Dakikada Fe ve Cu'nun Karşılıklı Difüzyonu

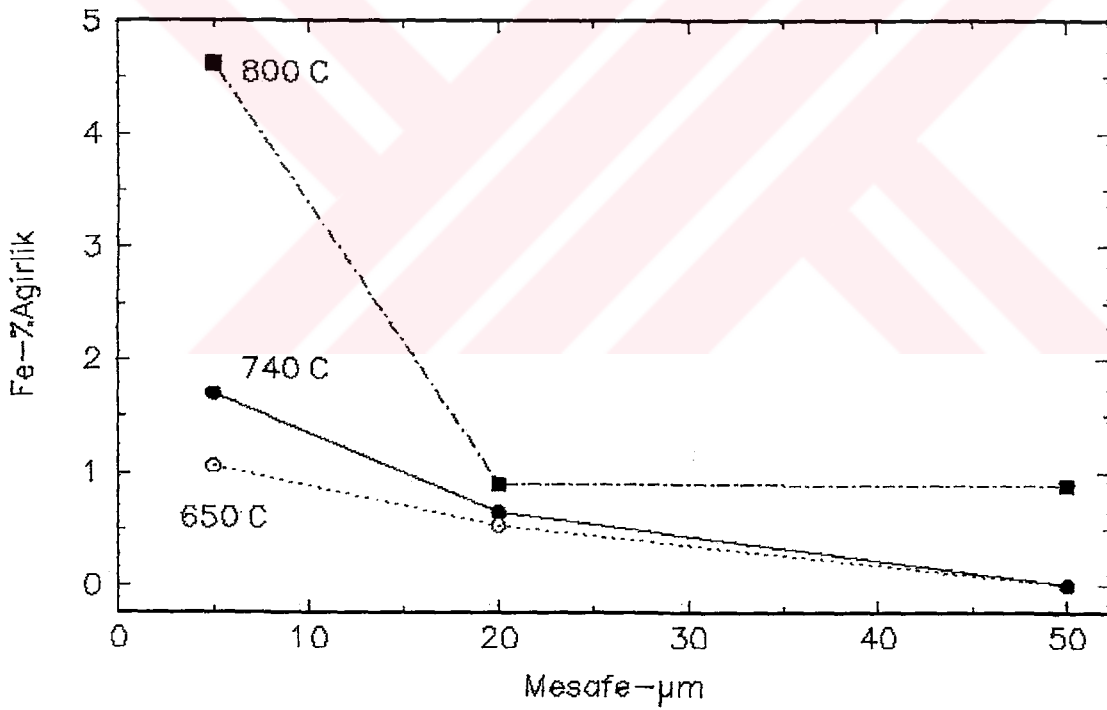


Şekil 6.15. 740 °C de 150 Dakikada Fe ve Cu'nun Karşılıklı Difüzyonu

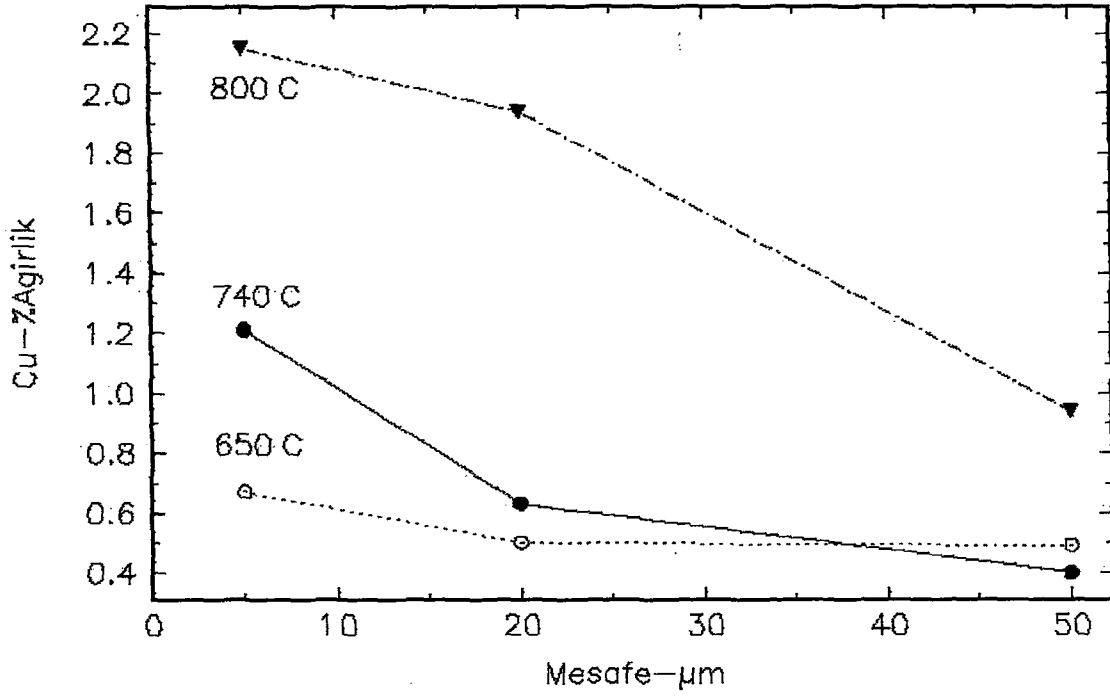


Şekil 6.16. 800 °C 150 Dakikada Fe ve Cu'nun Karşılıklı Difüzyonu

Fe'in bronz içerisinde ve Cu'n da çelik içerisindeki difüzyonu sıcaklık arttıkça artmakla birlikte miktar olarak Fe'in bronz içerisinde daha fazla difüze olduğu Şekil 6.17 ve Şekil 6.18'de görülmektedir. Bu elde edilen değerler matris içindeki element miktarını göstermektedir. Bunun dışında çelik tarafında bakırca zengin fazlara rastlanmıştır. Bu fazların EDAX analizleri ve yapıdaki görünüşleri Şekil 6.19 ve Şekil 6.20 de görülmektedir. Aynı şekilde bronz tarafında arayüzeyde ve arayüzeye yakın bölgelerde demirce zengin faza rastlanmıştır. Şekil 6.21 de bu bölgelere ait EDAX sonuçları görülmektedir. Şekil 6.10'da ise sözü edilen bölgeler siyah renkler halinde görülmektedir.



Şekil 6.17. 150 Dakikalık Sürede Birleştirilen Numunede Sıcaklığa Bağlı Olarak Bronz İçinde Fe'in Difüzyon Miktarı



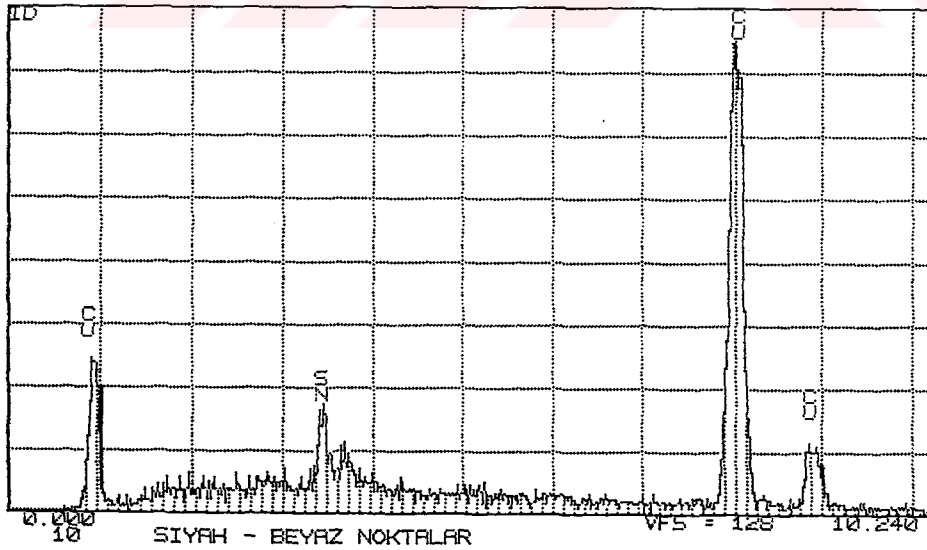
Şekil 6.18. 150 Dakikalık Sürede Birleştirilen Numunede Sıcaklığa Bağlı Olarak Çelik İçerisinde Cu'nın Difüzyon Miktarı

Element	K-ratio	Z	A	F	ZAF	Atom%	Wt%
Fe-K	0.000	0.965	1.024	0.842	0.832	0.00	0.00
Cu-K	0.906	0.989	1.007	1.000	0.996	94.57	90.32
Sn-L	0.085	1.103	1.046	0.991	1.143	5.43	9.68
Total= 100.00%							

TPAO ARASTIRMA MERKEZİ
Cursor: 0.000keV = 0

• M.Bulbul •

THU 24-OCT-96 00:41

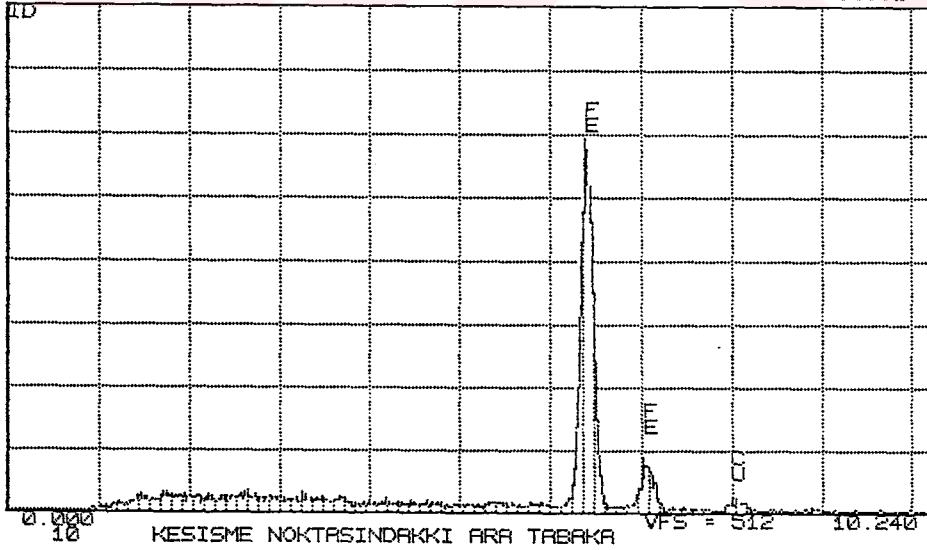


Şekil 6.19. Çelik Tarafında Çökelmiş Cu'nın EDAX Analizi



Şekil 6.20. 800 °C de 150 Dakikada Kaynaklı Numunede Cu Çökeltileri x 500

Element	K-ratio	Z	A	F	ZAF	Atom%	Wt%
Fe-K	0.941	0.997	1.003	0.995	0.995	94.89	93.62
Cu-K	0.045	1.026	1.092	1.000	1.120	4.46	5.01
Sn-L	0.013	1.136	0.994	0.970	1.095	0.65	1.37
Total=							100.00%

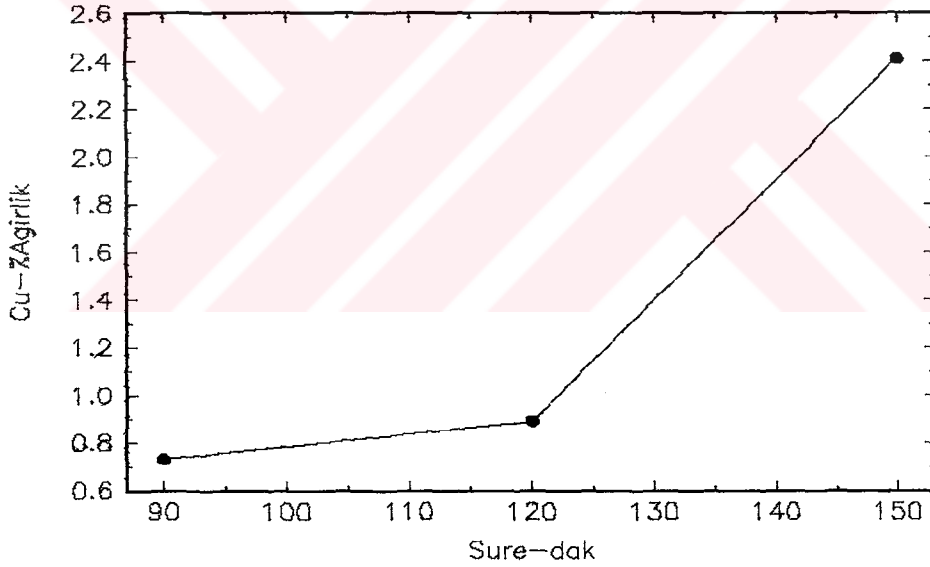


Şekil 6.21. Kaynak Arayüzeyinde Oluşan Aratabakaların EDAX Analizi

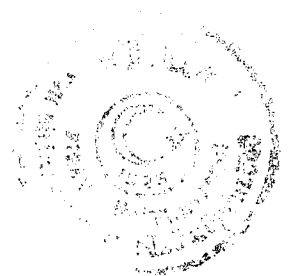


6.4. Kaynak Süresinin Difüzyona Etkisi

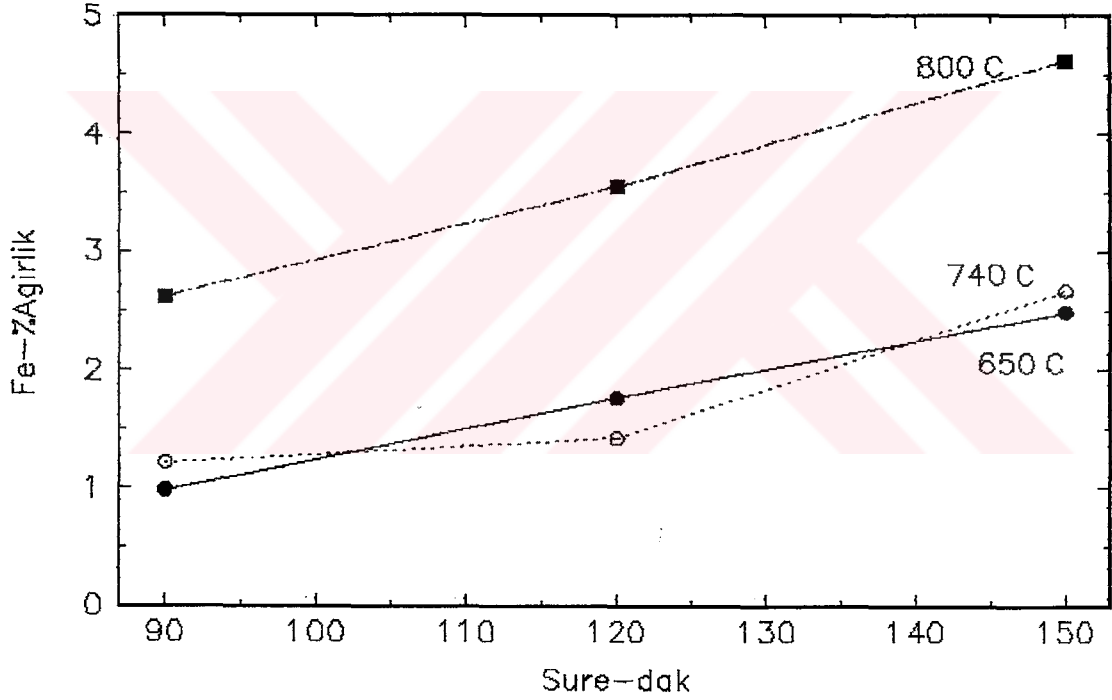
Kaynak süresinin difüzyonu tek başına belirleyici bir etkisi yoktur. Süre, sıcaklık ve kaynak basıncı ile değişebilmektedir. Yüksek sıcaklıklarda daha az bir süre gerekirken, düşük sıcaklıklarda daha uzun süreye ihtiyaç duyulur. Bu çalışmada kaynak basıncı 15 Mpa sabit basınç alınmış ve 90, 120, 150 dakikalık değişik süreler kullanılmıştır. 740 °C de birleştirilen kaynaklı numunelerde EDAX analiz sonuçlarındaki değerler incelendiğinde, çelik tarafında Cu miktarının 90 dakikada ağırlıkça % 0,73, 120 dakikada % 0,89 ve 150 dakikalık kaynak süresinde % 2,41'e yükseldiği görülmektedir. Şekil 6.22.'de 90, 120, 150 dakika kaynak sürelerinde çelik içindeki Cu miktarı grafik olarak gösterilmiştir. Buradan da görüleceği gibi kaynak süresi uzadıkça karşı tarafa difüze olan element miktarı artmaktadır.



Şekil 6.22. 740 °C, 150 Dakikalık Kaynak Süresinde Çelik İçerisindeki Cu Difüzyonunun Değişimi



Ayrıca bronz tarafındaki Fe miktarında süreye bağlı olarak değişimi Şekil 6.23’de verilmiştir. Sıcaklıkta olduğu gibi artan kaynak süresi ile de difüzyon miktarı bronz ve çelik tarafında artmakla birlikte Fe’in bronz içindeki difüzyon miktarı süreye bağlı olarak, Cu’nun çelik içindeki difüzyon miktarından daha fazladır. Şekil 6.23’de farklı sıcaklıklarda birleştirilen numunelerde süreye bağlı Fe miktarının değişimi görülmektedir.

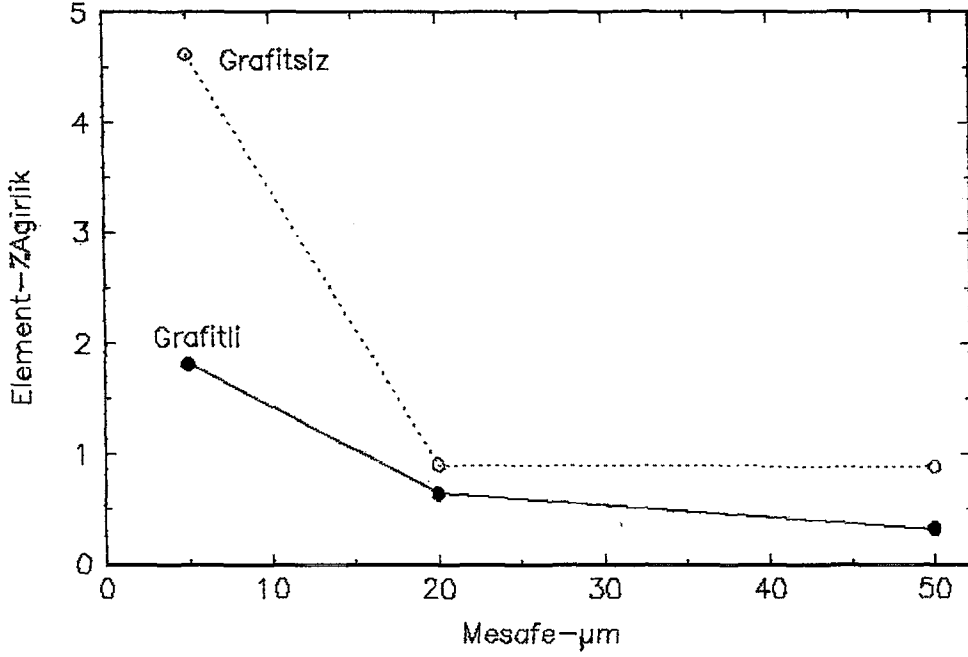


Şekil 6.23. Farklı Sıcaklıklarda Fe Miktarının Süreye Bağlı Olarak Değişimi

6.5. Grafitin Difüzyona Etkisi

Kendinden yağlamalı bronz yatakların ASTM B 438’de grafitli ve grafitsiz olarak iki türde üretildiği belirtilmektedir. Grafitli sınıfta ağırlıkça en fazla % 1,75 grafit ilave edildiği ifade edilmektedir. Bu bilgiler dikkate alınarak bu çalışmada da grafitli ve grafitsiz iki tür numune hazırlanmış, grafitli sınıfa ağırlıkça % 1 grafit ilave edilmiştir. Grafitli ve grafitsiz numuneler 650, 740, 800 °C sıcaklıklarda, 90, 120, 150 dakikalık sürelerde düşük karbonlu çeliğe difüzyon kaynağı ile birleştirilmişlerdir.

Kaynaklı numunelerde yapılan EDAX analiz sonuçlarına göre hem grafitli, hem de grafitsiz numunelerde Fe difüzyonu görülmekle birlikte, grafitsiz numunelerde Fe miktarı, grafitli numunelere göre daha fazla olduğu görülmüştür. Grafitli numunelerdeki ve gözeneklerde yer alan grafitin Fe’in bronz içine difüzyonuna engel oluşturduğu şeklinde düşünülmektedir. Şekil 6.24’de 800 °C de 150 dakikada grafitli ve grafitsiz numunelerde Fe miktarının mesafeye bağlı değişimi verilmiştir.

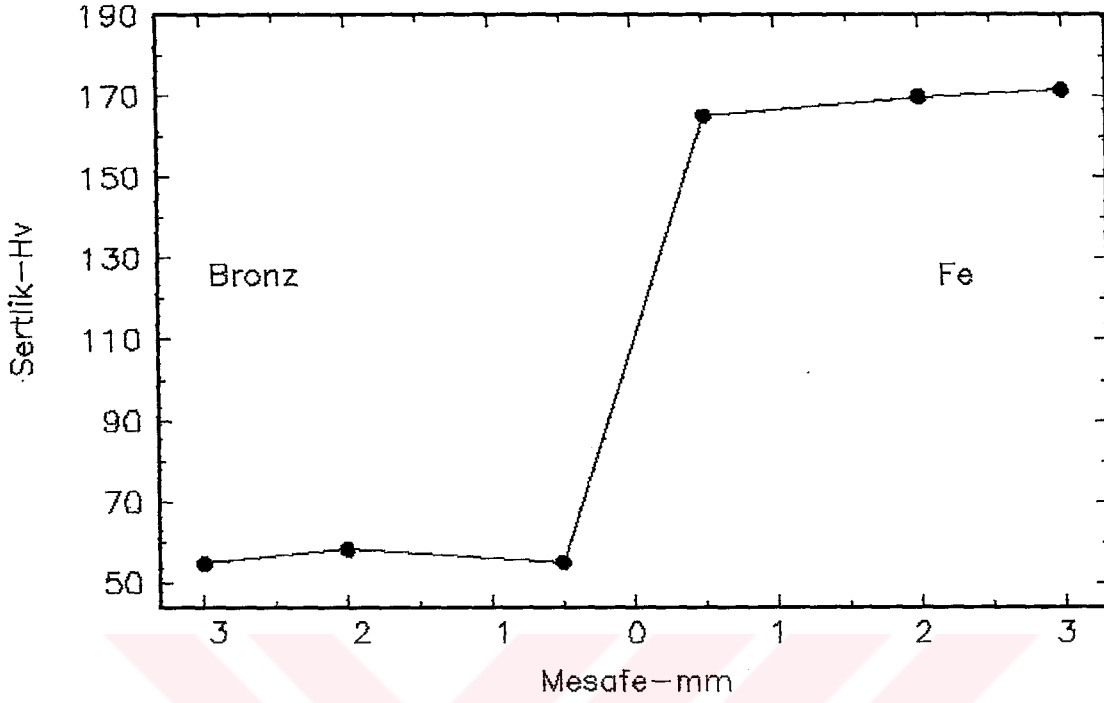


Şekil 6.24. 800 °C 150 Dakika Kaynak Süresinde Grafitli ve Grafitsiz Numunelerde Fe Miktarının Mesafeye Bağlı Değişimi

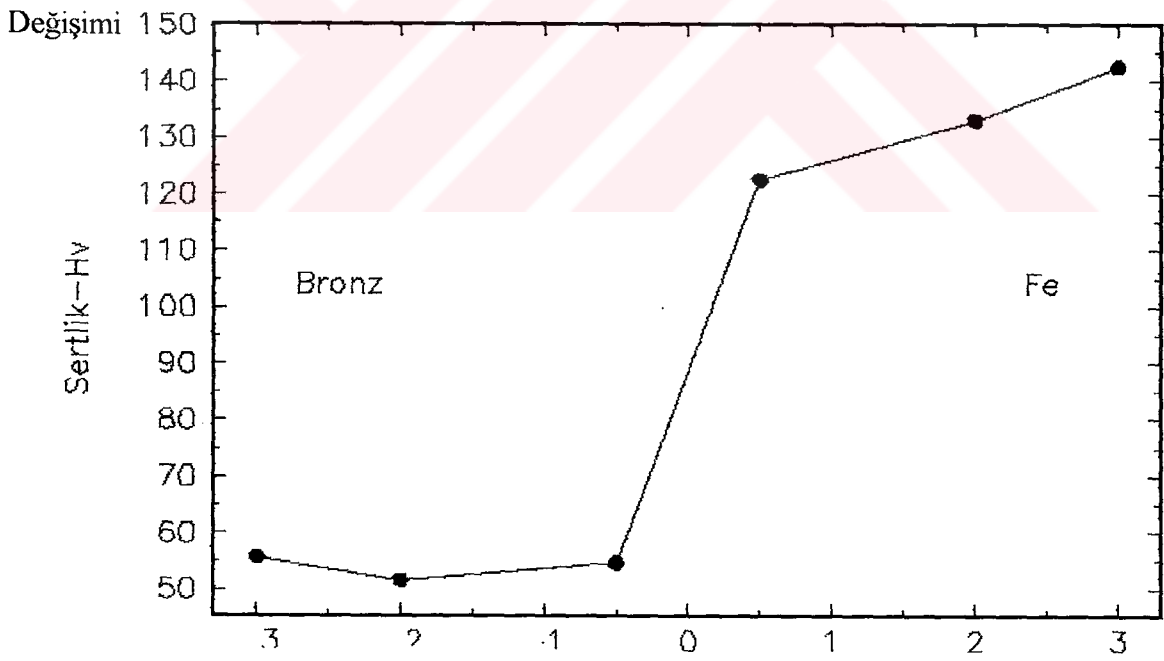
Benzer durum çelik içerisindeki Cu difüzyonu içinde tesbit edilmiştir. Burada da grafit Cu'nun çelik tarafına geçen miktarını azaltmıştır.

6.6. Mikrosertlik İncelenmesi

% 25 gözenekli bronz ile birleştirilmiş Çelik / Toz Metal bronz malzeme çiftinde kaynak bölgesinde yapılan mikrosertlik ölçüm sonuçları, 650 °C de 90 dakika için Şekil 6.25 de, 800 °C, 90 dakika kaynak şartları için Şekil 6.26 da verilmiştir. 650 °C de kaynaklı parçalarda çelik tarafında ve bronz tarafında aşırı bir değişme gözlenmemiştir. Sadece çelik tarafında sertlikte çok az bir artma görülmektedir.



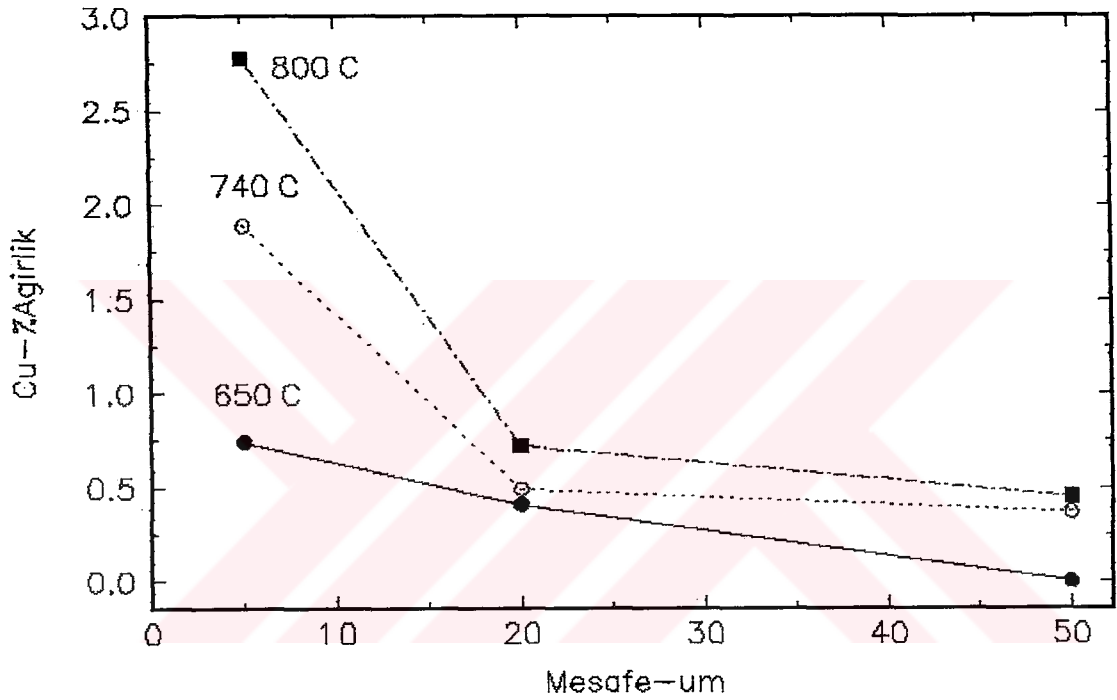
Şekil 6.25. 650 °C de 90 Dakika Sürede Birleştirilmiş Parçaların Mikro Sertlik



Şekil 6.26. 800 °C de 90 Dakika Sürede Birleştirilmiş Parçaların Mikrosertlik

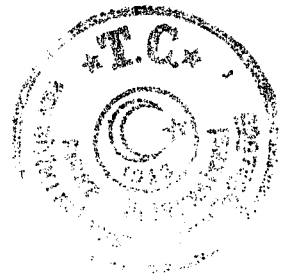
Değişimi

Sertlikteki bu artış çelik tarafına difüzyonla giren bakırın düşük oranlardaki varlığına bağlanmaktadır. 800 °C de çelik tarafında, sertlik arayüzeyden itibaren önemli ölçüde artarak değişmektedir. Bu değişiklik sıcaklığın yükselmesiyle çelik taraafına geçen $\times$ Cu miktarınca bağlanmıştır. Her iki numune için sıcaklıkla çelik tarafındaki bakır değişimi Şekil 6.27’de verilmiştir.

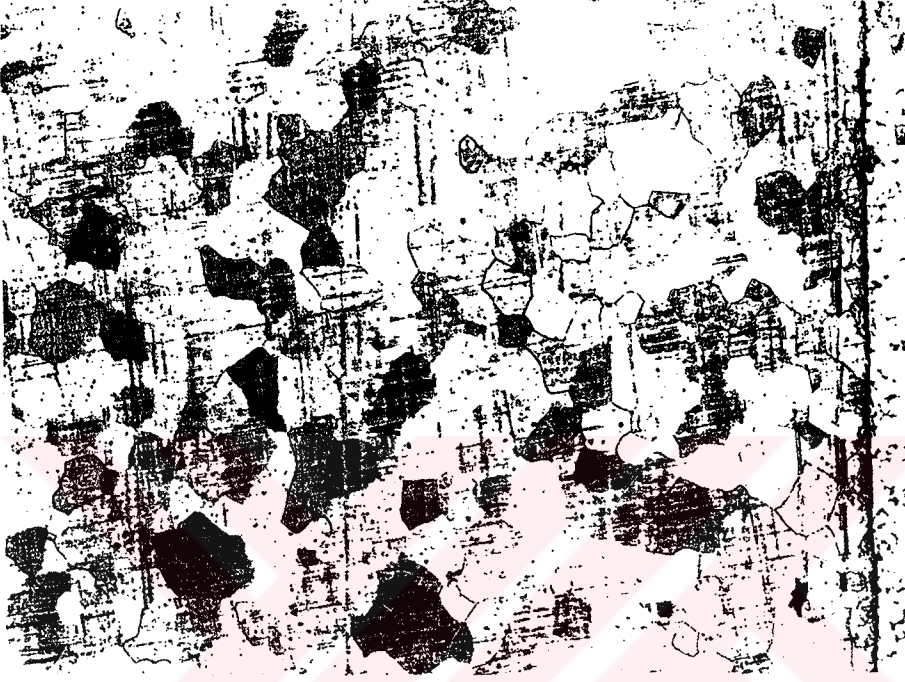


Şekil 6.27. 90 Dakika Kaynak Süresinde Çelik İçinde Bakırın Sıcaklığa Bağlı Değerleri

800 °C de çelik tarafına geçen bakır arayüzeye yakın bölgelerde ferrit fazının tane yapısını büyütme ve bu bölgede perlit fazının oluşumunu engellemektedir. Arayüzeyden uzaklaştıkça bakır miktarı azalmakta ve perlit fazı yapıda bulunmaktadır. Bu 466



Bu sebeple sertlik arayüzeyden itibaren çelik tarafına doğru artış göstermektedir. Şekil 6.28’de çelik tarafına difüze olan bakırın ferritleştirdiği geniş alan görülmektedir.



Şekil 6.28. Bakır Difüzyonu ile Ferritleşen Bölge

6.7. Genel Değerlendirme

Kaynak sıcaklığı, kaynak süresi ve kaynak basıncı difüzyon kaynağının en önemli parametreleridir. Bu çalışmada kaynak basıncı sabit tutulduğundan sıcaklık ve sürenin difüzyonuna etkisi incelenmiştir. Artan kaynak sıcaklığı ile toz metal bronz tarafında difüzyon bölgesi genişlemiş, çelik tarafında ise 740 °C ve 800 °C kaynak sıcaklıklarında kaynak arayüzeyine yakın bölgeder tane irileşmesi gözlenmiştir. Tane irileşmesinin sebebi

bronz tarafından çelik tarafına difüze olan bakırın perlit oluşumunu engellediği şeklinde düşünülmektedir.

Difüzyon çiftini oluşturan çelik ve toz metal bronz içindeki ara elementler olan Fe ve Cu atomlarının yarıçapları birbirine çok yakın değerdedir (Fe = 1.26 Å, Cu = 1.28 Å) atomların difüzyonu, yeralan difüzyonu mekanizması ile meydana gelmektedir. Yeralan mekanizmasında ise difüzyon, arayer ve boşluk difüzyonundan daha zor gerçekleşmesine rağmen birleşme sağlanmıştır.

Kaynak sıcaklığı arttıkça karşılıklı difüze olan atom miktarları artmakla birlikte; artış miktarı bakıra göre demirde daha fazladır. Bunun nedeni de 740 ve 800°C kaynak sıcaklıkları Cu'nun ergime derecesine yakın olduğundan Fe atomları Cu içinde daha hızlı difüze olmasına bağlanmaktadır.

Kaynak süresi arttıkça karşılıklı difüze olan atom miktarlarında süreye bağlı olarak artmaktadır. Toz metal numunelerde gözenek göçü kaynak süresine bağlı olarak, kaynak arayüzeyine doğru olmaktadır. Kaynak süresi arttıkça, 740 ve 800 °C kaynak sıcaklıklarında gözenekler küçülmeğe ve gözenek şekil küreselleşmektedir. Gözeneklilik difüzyon miktarını azaltmaktadır. % 25 gözenekli numunelerde ölçülen difüzyon miktarı % 35 gözenekli numunelerde ölçülen miktardan daha fazladır.

Toz metal içinde bulunan grafit demirin bronz tarafına difüzyonuna az da olsa olumsuz etki yapmaktadır. Bronz da tane sınırlarında ve gözeneklerde yerleşen grafit'in demir difüzyonuna engel oluşturduğu ve boşluk gibi davrandığı düşünülmektedir.

Kaynaklı parçaların mikro sertlik ölçümlerinde sertlik değişimi özellikle çelik tarafında, arayüzeye yakın bölgede gözle görülür bir anlama gelmektedir. Bu da çelik tarafına bakır difüzyonu ile kaynak bölgesinin ferritten oluşmasına bağlanabilir.

Ülkemizde henüz endüstriyel uygulaması bulunmayan difüzyon kaynağı, bu çalışma ile laboratuvar şartlarında başarı ile gerçekleştirilmiştir. Kaynak süresinin en az seviyelere düşürülerek verimliliği ve ekonomikliği artırıldığı takdirde ülkemizde endüstriyel sahada da uygulama alanı bulacağı düşünülmektedir.

Diğer kaynak metodlarında olmayan aynı sürede çok fazla parçayı kaynatabilme avantajı difüzyon kaynağının endüstriyel uygulamasında büyük tasarruf imkanı sunacaktır.



KAYNAKLAR

ADAMS, R.D., WAKE, D.C, (1984) Structural Adhesiue Joints in Engineering, *Elsevier Applied Science* Publishers.

AKSOY, M. (1987) Çeliklerin Isıl İşlemleri. *Yüksek Lisans Ders Notları*. F. Ü. Elazığ

ANDRZEJEWSKI, H. BADAWI, K.F., ROLAND, B; (1993) The Roughness in Diffusion Welding of Ti - 6 Al - 4 V Alloy. *Welding Journal*. 435.

ASKELAND, D.R., (1989) *The Science and Engineering of Materials*. Van Nostrand. Reinhold Co. Ltd. İkinci Metrik Baskı, Hong Kong

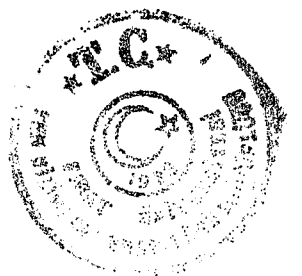
ASTM (1984), *Standart Specitication for Sintered Bronse Bearings (Oil - İmpregated) (Metric), B 438*

AZAMATOW, Z.T., MAMATDZHANOV F.D., RASULOV K.H., TASHPULATOV, Z., Aparatus for Diffusion Welding in Vacuum, *Instruments Expmatl. Tech.* Vol 33. p. 229 - 31, 1990

BARTLE, P.M., AMELDI, L., (1969) Introduction to Diffusion Bonding. *Metal Construction and British Welding Journal*.

BEDDOW, J.K., (1978)., The Production of Metal Powders by Atomization, *Heiden Ltd*, London

BS 499, British Standarts, Weldings Terms, 1985



CALVO F.A., URENA, A., GOMEZ, M.A., (1989) Diffusion Bonding of Gray Cast Iron to Armco Iron and Carbon Steel. *Journal of Materials Science* 24: 11:

CALVO, F.A., (1988) Special Features of the Formation of the Diffusion Bonded Joints between Copper and Aluminum. *Journal of Material Science* 28: 2273 - 2280 4152 - 4159

CHAN, R.W., (1974) *Physical Metallurgy*, North - Holland,

CHRISTIAN, J.W., (1981), *Diffusion In the Solid State The Theory of Transformations in Metals and Alloys*, U.K.

ÇİĞDEMOĞLU, M. (1971), Pik ve Çelikte Alaşım Elemanları, Mak. Müh. Odası Yayını, Yayın No 31

DINI, J.W., KELLEY, W.K., COMDEN, W.C., LOPEZ, E.M., (1984). Use of Electrodeposited Silver as an Aid in Aid in Diffusion Welding. *Welding Research Supplement*, January

DIXON, R.H.T., (1963) *Powder metallurgy For Engineers*, The Machinery Publishing Co

DUBROVSKY, R., (1986) Solid State Bonding of Cooper - Iron Alloy Under Deformation. *Advances In Welding Science and Technology TWR 86*. Proceed of an International Conference Trends in Welding Research.

DUNKERTON, S.B., Solid State Processes for Dissimilar Metal Welding, *Reprinted from The Melding Institute Research Bulletin* V. 23. (1982) Cambridge, U.K.



EGAN, P.W., (1980) Diffusion Bonding of Mild Steel *Yüksek Lisans Tezi*. University of Belfast.

ENJO, I., IKEGUCHI, M., (1987) Diffusion Bonding of Al - Mg - Si Series 6063 Alloy Reinforced With Alumina Short Fibers. *Trans. of Japanese Welding Research Inst.* 16: 2: 57 - 64

FITZPATICK, G.A., BROUGHTON, T., (1988) Diffusion Bonding Aeroengine Components. *Defence Science Journal* 38: 477 - 485

GERMAN, M.R., (1984), *Powder Metallurgy Science. MPIF, ABD.*

GILES, F.C., (1979), Principles of Physical and Chemical Metallurgy, *ASM.*

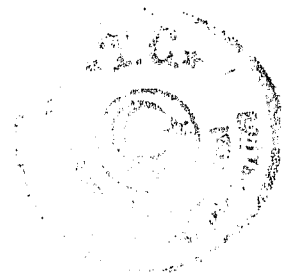
GIRIFALCO, L.A. Atomic Migration in Crystals, *Blaisdell, N.Y.* 1964

Gorham Market Report, *P / M prosesing*

GREENHUT V.A., Joining of Ceramic - Metal Systems *Encyclopedia of Materials Science and Engineering* V. 4. pp 2463 - 2467.

GUO, Z.X., Diffusion Bonding of Superplastic Materials *Yüksek Lisans Tezi*, UMITS. Manchester.

GUY, G. (1974), Elements of Physical Metallurgy, *USA*



GUY, G., (1972) Introduction to Materials Science, **TOKYO**

GÜLENÇ, B. (1995). MİG - MAG Kaynağında Koruyucu Gaz Karışımının Kaynak Metalinin Mekanik Özelliklerine Etkisi, **Doktora Tezi** Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mayıs, 1995

HAASEN, P., (1978) Physical Metallurgy, **Cambridge University Press**, Cambridge, U.K.

HAASEN, P., (1986) Physical Metallurgy. **Cambridge University Press**. Cambridge

HAMİLL, J.A. (1993) What Are the Joining Processes, Materials and Techniques, for Powder Metal Parts, **Welding Journal**, February

HAUFLER G., MAYER, H., (1986) Diffusion Bonding of Cast and EB Welding. Proceed of A Conference High Temperature Alloys for Gas Turbines and Other Applications 801 - 810

HERMAN, S., (1978), **Sintering an Economical Process For the Manufacture of Metallic precesion Parts**, Mannesman, ALMANYA

KAMAT, G.R., (1988) Solid State Diffusion Welding of Nickel to Stainless Steel. **Welding Journal** 67: 6: 44 - 46

KARDASHOVA, S.I., LOZOVOL, A.Y., RAZUMOVSKII, I.M., Diffusion Coarsening of The Lamellar Structure TWO - Phase Ti - 47,5 at % Al Intermetalik Alloy **Acta Metallurjia Materials** V. 42. No. 10, pp. 3341 - 3348 1994



KLAPHAACK, D.J., (1987) Coated Tools for Machining Aerospace Materials. *Carbide and Tool Journal* 19: 5: 14 - 16

KURT, A., GÜLENÇ, B., TÜRKER, M., (1996), Saf Demir Tozlarından Üretilen Parçaların MAG Kaynak Yöntemi İle Kaynaklanabilirliği, *1. Ulusal Toz Metalurjisi Konferansı*, ANKARA

KURT, A. (1992), Toz Metal Bronz Yatak Malzemelerin Özellikleri, *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi, ANKARA

KURT, A., SARITAŞ, S. (1992). Toz Metal Yatak Malzemelerin Özellikleri, *5 Ulusal Makina Tasarım ve İmalat Kongresi*, ODTÜ - ANKARA

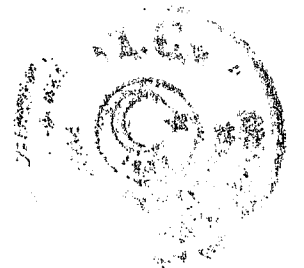
LANCESTER, J.F., (1987) Metallurgy of Welding. *Allen and Unwin Ltd.* LONDON

LINNERT, G.E., (1967), Welding Metallurgy, Vol. 1 - 2 *American Welding Society*, Miami

MALEVSKİİ, Y.B., NESMİKİH, V.S, (1981), Pressure Wolding of Bronze to Steel Metallurgia, Moscow

MANAS, C., (1979) Structure of Matter, Science of Engineering Materials, *Indian Institute of Science* Banglone.

MEAHARA, Y. KOMIZO, Y., LANGDON, T.G., (1989) Principles of Superplastic, Diffusion Bonding, *Materials Science and Technology*. 4: 669 - 674



MEADA, R., HIDEO, Y., (1988) Effect of Atmosphere, Load and Temperature on the Bonding of Pure Copper and Aluminium Alloy in a Ultrahigh Vacuum. *Kitai Gijutsu Knenkyyusho Shoho / Journal of Mechanic Engineering Laboratuary*. Tokyo 42:2: 75 - 81

Metals Handbooks, (1984), Welding and Brazing, *ASM*, OHIO

Metals Handbooks, (1984), Powder metallurgy, *ASM*, Ohio, USA

MOVCHAN, V.I., PEDAN, L.G., GAIDAMAKIN, V.S., Structural Features of the Transition Layer Formed in Diffusion Welding of Bronze To Steel, *Metal Science Treatment* V. 29. (553 - 555)

MUNIR, Z.A., A Teorical Analysis of the Stability of Surface Oxides During Diffusion Welding of Metals Supplement To The *Welding Journal*. Descember, 1983

MURRAY W., CLIFFC., Fundamentals of Diffusion Bonding., *ASM Handbook* V.6.

MUTOH, Y., EBIHARA, T., AIZAVA., (1989) *Japanese Journal of Applied Physics*. 28 (2) - 6: 959 - 961

NAIMON, E.R., DOYLE, J.H., RICE, C.R., VIGIL, D. WALMSEY, D.R., Diffusion Welding of Aluminium to Stainless Steel. *Welding Journal*, November

NICHTING, R.A., EDWARDS, G.R., OLSON, D.L., RATH, B.B., (1986) Theories of Low Temperature Solid State Bonding. *Advances in Welding Science and*



OĞUZ, B. Sert Lehimleme, **OERLİKON** Yayınları 1988, İST.

ONARAN, K., ALTINTAŞ, S. (1986) Malzemelerin Yapı ve Özellikleri, **İstanbul Teknik Üniversitesi Yayınları**, İSTANBUL

ORHAN, N., (1996) Difüzyon Kaynağı İçin Yeni Bir Model ve Duplex Alaşımlara Uygulanması, **Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi**, Fen Bilimleri Enstitüsü

OSTYN, K.M., (1987) Diffusion Bonding. Proc. of **Int. Conf. SIS**. 183. Cranfield

OWCZARSKI, W.A., PAULONIS, D.F., Application of Diffusion Welding in the USA. **Welding Journal** February 1981.

PARTRIDGE, P.G., (1989) Diffusion Bonding of Metals **Agard 168. Nato Yayınları**, Essex

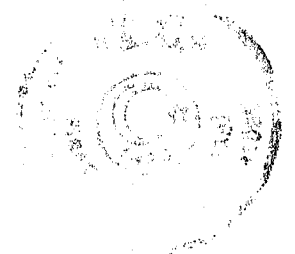
PORTER, D.A, EASTERLING, K.E. Phase Transformation in Metals and Alloys 1984, **London Y.K.**

RALLS, COURTNEY, WULFF, An Introduction to Materials Science and Engineering, **N.Y.**,

RICHES, S. T., (1989). Microjoining for Electronics. **Production Engineer**. 46.

ROTHERY, W.H., (1996), **The Structures of Alloys of Iron, LONDON**

SALEHI, M.T., (1990) Isostatic Diffusion Bonding of Some Superplastic Alloys. **Ph.T. Thesis** UMIST. Manchester



SARITAŞ, S., (1992) Toz Üretim Teknikleri, *Yüksek Lisans Ders Notları*, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, ANKARA

SERINO M., MASUMOTO, H., ASADA, A., NISHIO, K., MUKAE, S., KATOH, M., HONDA, T., Diffusion Bonding of Aluminum Bronze to Stainless and Improvement of the Weldability, *Transaction of the Japan Welding Society*, Vol. 22 No.1., April 1991

SCHWARTZ, M.M. POULONIS, D.F., Diffusion Welding and Brazing, *Welding Handbook_ V. 3. 312 - 335 Technology Proc of an International. Conferance on Trends in Welding Research. 733 - 738*

SHEWMAN, P.G. (1963), Diffusion in Solids. Mc Grow Hill N.Y., USA

SHEWMON, P.G. Diffusion in Solids, *Mc Graw Hill*, N.Y. 1963

SPANSWICK, O.S. (1989). Diffusion Bonding - Engineering Appl. *Production Engineer.* 68.

SUNWOO, A., (1994). Diffusion Bonding of Al Alloy 8090. *Scripta Metallurgica et Materialia.* 31: 4: 407 - 412

TUNCEL, S. TOPUZ, A. (1996), X210 Cr 12 Takım Çeliği ile 25 MoCr₄ Düşük Alaşımlı Çeliğin Difüzyon Kaynağı, *Uluslararası Kaynak Teknolojisi Sempozyumu, 15 - 17 Mayıs 1996. İSTANBUL*



VERKSEVEN, J.D. (1975)., Fundamentals of Physical Metalurgy, *N.Y. USA*.

VERHSEVEN, D.J. (1975), Diffusion, *Fundamentals of Physical Metalurgy*, N.Y.

VİLLAMSON, J.R., (1986) Superplastic Forming Diffusion Bonding of Titanium. Proc. *The Ist. Int. Cant. Materials in Aerospace*. 10817 : 373 - 394

WALSH, D.W. BALAGUER, J.P, (1986) Diffusion Bonding of Ti - 6 Al - 4 V. *Advances In Welding Science and Technology. TWR. 86*. Proceed of an International Conferance on Tr. İn Research. Gattinburg - Tenesse

YILDIRIM, M.M. (1994), Alaşım Tekniği, F.Ü. Tek. Eğt. Fak. Yayını No:28, Sayfa, 4 Elazığ

ZHANG, Y.C., NAKAGAWA, H., (1987). Proposal of New Bonding Tecnigue - Instantaneous Liquid Phase Bonding. *Trans of J.W.R.* 1. 16.(1): 17 - 29