

**TİTANYUM VE DÜŞÜK KARBONLU ÇELİK ÇİFTİNİN ARABAĞLAYICI
KULLANILARAK DİFÜZYON KAYNAĞI İLE BİRLEŞTİRİLEBİLİRLİĞİNİN
ARAŞTIRILMASI**

Evren ATASOY

**Zonguldak Karaelmas Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Metal Eğitimi Anabilim Dalında
Bilim Uzmanlığı Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

KARABÜK

Haziran 2007

KABUL:

Evren ATASOY tarafından hazırlanan "TİTANYUM VE DÜŞÜK KARBONLU ÇELİK ÇİFTİNİN ARABAĞLAYICI KULLANILARAK DİFÜZYON KAYNAĞI İLE BİRLEŞTİRİLEBİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI" başlıklı bu çalışma jürimiz tarafından değerlendirilerek, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metal Eğitimi Anabilim Dalında Bilim Uzmanlığı Tezi olarak oybirliğiyle kabul edilmiştir.

15/06/2007

Başkan: Doç. Dr. Ramazan KAÇAR

Z.K.Ü

Üye : Doç Dr. Nizamettin KAHRAMAN

Z.K.Ü

Üye : Yrd. Doç. Dr. Behçet GÜLENÇ

G.Ü

İmzası

ONAY:

Yukarıdaki imzaların, adı geçen Öğretim üyelerine ait olduğunu onaylarım. 19.07.2007

...../...../2007

Doç. Dr. Mustafa SÖZEN

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ÖZET

Bilim Uzmanlığı Tezi

TİTANYUM VE DÜŞÜK KARBONLU ÇELİK ÇİFTİNİN ARABAĞLAYICI KULLANILARAK DİFÜZYON KAYNAĞI İLE BİRLEŞTİRİLEBİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

Evren ATASOY

Zonguldak Karaelmas Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Metal Eğitimi Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Nizamettin KAHRAMAN

Haziran 2007, 107 sayfa

Difüzyon kaynağı, birbirleriyle temasta olan yüzeyler arasında minimum deformasyon ile belirli bir süre ısı ve basınç uygulayarak kontrollü difüzyon ile oluşturulan bir katı hal kaynak yöntemidir. Birbirinin aynı yada farklı birçok malzeme difüzyon kaynak yöntemi ile birleştirilebilmektedir. Bugün farklı metallerin birleştirilmesinde % 40 bu yöntem kullanılırken, bu yöntemle birleştirilmiş malzemelerin yaklaşık % 20'sini de titanyum ve alaşımları oluşturmaktadır. Difüzyon kaynağının uygulanmasında, özellikle farklı metal ve alaşımlarının birleştirilmesinde kaynak bölgesindeki heterojenliği minimuma indirmek için genellikle bir arabağlayıcı kullanılır.

Bu çalışmada, titanyum ve düşük karbonlu çelik levhalar gümüş bir arabağlayıcı kullanılarak farklı sıcaklık ve sürelerde birleştirilmişlerdir. Elde edilen birleştirmelerin mukavemetini belirlemek için çekme-makaslama testi ve sertlik testi uygulanmıştır. Ayrıca bağlantının arayüzey özelliklerinin belirlenmesi amacıyla optik mikroskop ve SEM çalışmaları ile SEM'e monte edilmiş EDS ünitesinde element analizleri yapılmıştır.

ÖZET (devam ediyor)

Yapılan çalışmalar sonucunda, bu çalışmada kullanılan kaynak parametreleri dahilinde, en yüksek arayüzey dayanımı 850 °C'de ve 90 dakika süre ile birleştirilen numunelerde elde edilmiştir. Ayrıca artan sıcaklık ve süre ile birlikte mukavemetin bir noktaya kadar arttığı, ancak bu noktadan sonra mukavemetin azaldığı belirlenmiştir. Yapılan sertlik ölçümleri sonucunda en yüksek sertlik değerinin arabağlayıcı malzemede olduğu ve ara bağlayıcının her iki tarafındaki sertlik değerlerinin giderek azaldığı tespit edilmiştir. Makro ve mikroyapı çalışmaları sonucunda, farklı kaynak şartlarında birleştirilen numunelerin tümünde, artan sıcaklık ve süre ile birlikte birleşme bölgesinin (arabağlayıcı) daraldığı ve de tane irileşmesinin meydana geldiği gözlemlenmiştir. EDS analiz çalışmalarında, sıcaklığın artışına bağlı olarak arabağlayıcıdaki gümüş miktarının % ağırlık olarak belirgin şekilde azaldığı, ancak difüzyon süre artışına bağlı olarak çok az miktarda azaldığı görülmüştür. Ayrıca, kaynak arayüzeyinden uzaklaştıkça yayılım miktarının giderek azaldığı tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Difüzyon kaynağı, titanyum, arabağlayıcı ve mikroyapı

Bilim Kodu : 626.20.01

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

INVESTIGATION OF JOINABILITY OF THE TITANIUM AND LOW CARBON STEEL USING AN INTERLAYER BY DIFFUSION WELDING

Evren ATASOY

**Zonguldak Karaelmas University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Metallurgy**

Thesis Advisor: Assoc. Prof. Nizamettin KAHRAMAN

June 2007, 107 pages

Diffusion welding is a solid state welding process in which heat and pressure are applied for some time to affect the bonding between the contacting surfaces through controlled diffusion with minimum deformation. Many similar or dissimilar materials can be bonded by diffusion welding process. Today, 40 % of dissimilar materials bonded to each other are joined with this method while 20 % of these joints consist of titanium and its alloys. In diffusion bonding applications, an interlayer is used in order to minimise the inconsistency in the weld zone especially when bonding different metals and their alloys.

In this study, titanium and low carbon steel plates were joined using a silver interlayer at different temperatures for different durations. In order to determine the strength of joints, tensile-shear tests and hardness tests were applied. Additionally, optical and SEM microscopy examinations and EDS element analyses were carried out in order to determine the interface properties of the joint.

ABSTRACT (continued)

The work carried out showed that the highest interface strength was obtained for the specimens joined at 850 °C for 90 min. In addition, it was determined that the strength increased with increasing temperature and time until a maximum value beyond which it decreased. The hardness measurements indicated that the highest hardness value was obtained for the interlayer material and the hardness values on the both sides of the interlayer decreased gradually. Macro and microstructural examinations results revealed that the joining area (interlayer) decreased and the grain size increased with increasing temperature and time for all the specimens joined at different welding conditions. In EDS analyses, it was seen that amount of silver in the interlayer decreased markedly as weight percentage depending on the temperature rise. In addition, it also decreased slightly with increasing diffusion time. The amount of diffusion showed a decreasing trend with increasing distance from the welding interface.

Key Words : Diffusion welding/bonding, titanium, interlayer and microstructure.

Science Code : 626.20.01

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın meydana gelmesinde büyük emeği olan, tecrübesi, sabrı ve çalışma disiplini ile beni her zaman olumlu yönde etkileyen değerli hocam Sayın Doç. Dr. Nizamettin KAHARAMAN 'a şükranlarımı sunarım. Deneysel çalışmalar sırasında değerli tecrübe ve desteklerinden dolayı Sayın Doç. Dr. Ramazan KAÇAR ve Sayın Doç. Dr. Süleyman GÜNDÜZ'e, ve de labaratuvar çalışmalarında yardımlarını esirgemeyen Arkadaşım ve kadim dostum Arş. Gör. Mustafa TÜRKMEN'e, teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca deney numunelerinin temininde yardımlarını dolayı Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi öğretim üyesi Yrd. Doç. Dr. Behçet GÜLEÇ'e en içten dileklerle teşekkürlerimi sunarım. Bana sunduğu imkanlardan dolayı başta olmak üzere K.T.E.F. Metal Eğitimi Ana Bilim Dalı Başkanı Sayın Prof. Dr. Ercan CANDAN ve bütün Hocalarıma teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak, bu günlere gelmemde büyük emeği olan, beni her yönden iyi bir insan olarak yetiştiren ve destekleyen annem ve babama en içten saygı ve şükranlarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiii
SİMGELER VE KISLTMALAR DİZİNİ	xiv
BÖLÜM 1 GİRİŞ	1
BÖLÜM 2 DİFÜZYON TEORİSİ	3
2.1 GİRİŞ	3
2.2 DİFÜZYON KATSAYISI.....	6
2.3 DİFÜZYON MEKANİZMALAR	8
2.3.1 Arayer Mekanizması	8
2.3.2 Boşluk Mekanizması	9
2.3.3 Halka Mekanizması.....	10
2.3.4 Karşılıklı Yer Değiştirme Mekanizması.....	10
BÖLÜM 3 DİFÜZYON KAYNAĞI	11
3.1 DİFÜZYON KAYNAĞI ÇEŞİTLERİ.....	15
3.1.1 Katı Hal Difüzyon Kaynağı	15
3.1.2 Sıvı Hal Difüzyon Kaynağı ve Difüzyon Lehimleme	15
3.1.3 Süperplastik Şekil Verme ve Difüzyon Kaynağı Kombinasyonu.....	16
3.2 DİFÜZYON KAYNAK PARAMETRELERİ	17
3.2.1 Kaynak Sıcaklığı	18

İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

	<u>Sayfa</u>
3.2.2 Yüzey Şartları	19
3.2.3 Basıncın Etkisi	22
3.2.4 Kaynak süresi.....	23
3.2.5 Kaynak ortamı.....	24
3.2.6 Birleştirilecek Malzemelerin Tane Boyutları ve Mikroyapıları	25
3.3 DİFÜZYON KAYNAĞI BAĞLANTI TÜRLERİ	26
3.3.1 Difüzyon Kaynağında Ara Tabaka	26
3.4 SERT LEHİMLEME	28
3.4.1 Sert ve Yumuşak Lehimle Tekniklerinin Karşılaştırılması	29
3.4.2 Lehimde Karakteristik Sıcaklıklar	30
3.4.2.1 Çalışma Sıcaklığı	30
3.4.2.2 Maksimum Lehim Sıcaklığı.....	30
3.4.3 Gümüş Esaslı Lehimler	30
3.5 DİFÜZYON KAYNAĞINDA KULLANILAN ÖZEL EKİPMANLAR.....	31
3.6 UYGULAMA ŞEKİLLERİ VE ALANLARI.....	32
3.7 DİFÜZYON KAYNAK YÖNTEMİ İLE BİRLEŞTİRİLECEK MALZEMELER	35
3.8 TİTANYUM VE TİTANYUM ALAŞIMLARININ DİFÜZYON KAYNAĞI	38
3.9 DEMİR ESASLI ALAŞIMLARIN DİFÜZYON KAYNAĞI	40
3.10 KOMPOZİT MALZEMELERİN DİFÜZYON KAYNAĞI.....	41
3.11 DUBLEKS PASLANMAZ ÇELİKLERİN DİFÜZYON KAYNAĞI.....	41
3.12 BENZER OLMAYAN MALZEMELERİN DİFÜZYON KAYNAĞI İLE BİRLEŞTİRİLMESİ	41
3.13 DİFÜZYON KAYNAĞININ DİĞER KAYNAK METOTLARIYLA KARŞILAŞTIRILMASI	42
3.14.DİFÜZYON KAYNAĞI TEKNİKLERİ	44
BÖLÜM 4 DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	46
4.1 KAYNAKLARIN YAPILIŞI.....	47
4.2 KESME-MAKASLAMA TESTİ	50

İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

	<u>Sayfa</u>
4.3 MİKROSERTLİK TESTİ	50
4.4 METALOGRAFİK ÇALIŞMALAR.....	51
 BÖLÜM 5 DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	 53
5.1 KESME-MAKASLAMA TESTİ	53
5.2 SERTLİK TESTİ.....	58
5.3 MAKROSKOBİK İNCELEME	61
5.4 MİKROYAPI İNCELEMESİ.....	62
5.5 TARAMALI ELEKTRON MİKROSKOBU İNCELEMESİ	67
 BÖLÜM 6 SONUÇLAR.....	 74
 KAYNAKLAR.....	 76
EKLER DİZİNİ	79
ÖZGEÇMİŞ.....	107

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 Serbest Enerjinin Durum Değişimine Bağlılığı.....	4
2.2 Aktivasyon Enerjisinin Arrhenius Denklemi Yardımıyla Saptanması.....	4
2.3 Alaşımların Molar Serbest Enerji Diyagramı.....	5
2.4 Konsantrasyon değişiminin şematik gösterimi.....	6
2.5 Arayer atomu yer değiştirmesi ve aktivasyon enerjisi değişimi.....	8
2.6 Boşluk mekanizmasında atomların yer değiştirmesi	9
2.7 Halka mekanizmasında atomların yer değiştirmesi	10
2.8 Atomların karşılıklı yer değiştirmesi	10
3.1 Difüzyon kaynağının üç aşamalı mekanizması	13
3.2 Difüzyon kaynağı mekanizması	14
3.3 Süperplastik şekil verme-difüzyon kaynağı kombinasyonu.....	16
3.4 Sıcaklık ve uygulanan basıncın sürünme eğrisine tesiri	18
3.5 Sıcaklığın bileşebilirlik üzerine etkisi.....	19
3.6 Metal bir yüzeyin tabakalarının şematik kesiti.....	20
3.7 Yüzey kusurları.....	21
3.8 Yüzey gerilmesi ile pürüzlülük arasında sıcaklığa bağlı değişme.....	22
3.9 Bağlantının kayma mukavemeti ile kaynak süresi arasındaki ilişki.....	24
3.10 Difüzyon kaynağında ara tabaka	27
3.11 Ara tabakanın kaynak bölgesine tesiri	28
3.12 Deneylerde kullanılan fırının şematik gösterimi	32
3.13 Difüzyon kaynak yönteminin uygulanış şekilleri.....	35
3.14 Uçak yapımında difüzyon kaynaklı yapı elemanları	35
3.15 Difüzyon kaynaklarının mikro yapısı.....	40
3.16 Difüzyon kaynak yönteminin ve diğer katı hal kaynak yöntemlerinin Sıcaklık, deformasyon ve süre açısından karşılaştırılması.....	44
4.1 Difüzyon kaynak seti	47
4.2 Birleştirme işleminin şematik gösterimi	48
4.3 Çekme-makaslanmanın yapıldığı test cihazı	50

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
4.4 Mikrosertlik ölçüm yapılan bölgeler ve ölçüm izleri.....	51
4.5 Mikrosertlik ölçüm cihazı	51
4.6 Ti-Ag-Fe bakalite alınış şekli	52
5.1 120 dakika süre ile birleştirilmiş çekme-makaslama test grafikleri (a) 700 °C, (b) 750 °C, (c) 800 °C ve (d) 850 °C	54
5.2 Kesme-makaslama deney sonuçları	55
5.3 700 °C’de birleştirilen numunelerden elde edilen sertlik değerleri	58
5.4 750 °C’de birleştirilen numunelerden elde edilen sertlik değerleri	59
5.5 800 °C’de birleştirilen numunelerden elde edilen sertlik değerleri	59
5.6 850 °C’de birleştirilen numunelerden elde edilen sertlik değerleri	60
5.7 Farklı kaynak parametrelerinde kaynak yapılan numune görüntüleri	62
5.8 Orijinal malzemelerin mikroyapı görüntüleri.....	63
5.9 700 °C’de 90 ve 120 dakika sürede birleştirilmiş numunenin mikroyapısı	63
5.10 750 °C’de birleştirilmiş numunelerin mikroyapıları (a) 30, (b) 60, (c) 90 ve (d) 120 dakika	64
5.11 800 °C’de birleştirilmiş numunelerin mikroyapıları (a) 30, (b) 60, (c) 90 ve (d) 120 dakika	65
5.12 850 °C’de birleştirilmiş numunelerin mikroyapıları (a) 30, (b) 60, (c) 90 ve (d) 120 dakika	66
5.13 700 °C ve 120 dakika süre ile birleştirilmiş arabağlayıcı üzerinden alınan EDS ve çizgi boyunca ağırlıkça % element analiz taraması.....	67
5.14 850 °C ve 120 dakika süre ile birleştirilmiş arabağlayıcı üzerinden alınan EDS ve çizgi boyunca ağırlıkça % element analiz taraması.....	68
5.15 (a) Sıcaklığa ve süreye bağlı ara bağlayıcıdaki gümüş miktarı ve (b) 120 dakika süredeki sıcaklığa bağlı gümüş ve bakır miktarı (% ağırlıkça).....	69
5.16 850 °C’de süre değişimine göre % ağırlıkça gümüş ve bakır değişimi.....	70
5.17 120 dakika süre ve farklı sıcaklıklarda bakır ve gümüşün % ağırlık değişimi	71
5.18 850 °C’de farklı sürelerde bakır ve gümüşün % ağırlık değişimi.....	71
5.19 850 °C’de 90 dakika süre ile birleştirilmiş numunelerin analiz sonuçları.....	73

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
3.1 Metallerde oksit filmi oluşum süreleri	20
3.2 Difüzyon kaynak yöntemine uygun metal çiftleri ve ara tabaka malzemeleri	36
3.3 Metal çiftleri için difüzyon kaynağı işlem parametreleri	37
3.4 Difüzyon kaynağı yapılabilen malzeme kombinasyonları	38
3.5 Titanyum alaşımlarının sert lehimlemesinde kullanılan ilave dolgu metalleri	39
3.6 Benzer olmayan malzemelerin difüzyon kaynağı için parametreler ve kesme mukavemetleri	42
4.1 Titanyumun kimyasal analizi (% ağırlık)	46
4.2 Düşük karbonlu çeliğin kimyasal analizi (% ağırlık)	46
4.3 Arabağlayıcı gümüş alaşımının kimyasal analizi (% ağırlık)	46
4.4 Deneylerde kullanılan kaynak parametreleri	49
5.1 Difüzyon kaynaklı (Ti-Ag-Fe) deney numunelerinin kopma dayanımı	56
5.2 Kaynak öncesi malzemelerden ölçülen sertlik değerleri (HV _{0,2})	58

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Ag	: Gümüş
Al	: Alüminyum
Ao	: Malzemeye verilen sabit
D	: Difüzyon katsayısı
DK	: Difüzyon kaynağı
MPa	: Mega paskal
N	: Newton
Q	: Aktivasyon enerjisi
R	: Gaz sabiti
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
SPF	: Süperplastik şekil verme
T	: Mutlak sıcaklık
Ti	: Titanyum
Tk	: İşlem sıcaklığı
Tm	: Metalin ergime sıcaklığı
μm	: Mikron metre

BÖLÜM 1

GİRİŞ

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

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

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

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

Difüzyon kaynağı ile yapılan birleştirmelerde, ana metaller ergimeden birleştirme sağlandığı, ön ve son tavlama ihtiyacı duyulmadığı, bir kerede karmaşık şekilli

birleştirmeler yapılabilđiđi, istenmeyen faz dönüşümleşiri engellendiği, seramik ve kompozitlerin metal ve diğer malzemelerle birleştirilmesi sađlanabilđiđi için bu yöntem üstün bir kaynak yöntemidir. İşte bu üstünlükleri neticesinde, özellikle uzay ve nükleer enerji alanında geniş çapta kullanılmaktadır.

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

Bu çalışmada, difüzyon kaynağı parametreleri ve kaynak mekanizmaları önceden yapılmış deneysel çalışmalar da gözden geçirilerek incelenmiş ve bu kaynak yönteminin önemi ve gerekliliği yinelenmiştir. Ayrıca arabağlayıcı kullanılarak farklı sıcaklıklarda titanyum-düşük karbonlu çelik birleştirmeleri yapılmış olup, değişik parametrelerle elde edilen kaynakların kalitesini belirlemek için optik ve elektron mikroskobu ile kaynak bölgesinde incelemeler yapılmış ve buna ilaveten mekanik özelliklerin tespiti için, numuneler kesme-makaslama ve sertlik testleri uygulanmıştır.

BÖLÜM 2

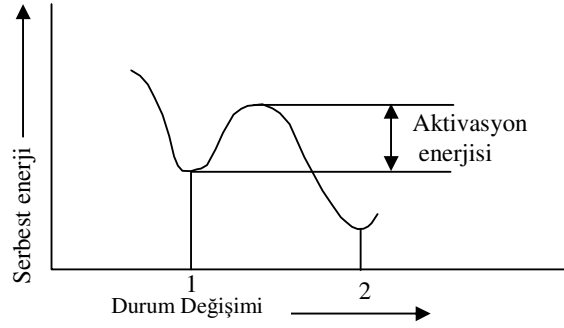
DİFÜZYON TEORİSİ

2.1 GİRİŞ

Difüzyon bir konsantrasyon gradyanından hareket eder, yani atomların yüksek konsantrasyonda bulundukları bir bölgeden konsantrasyonlarının daha düşük olduğu bir bölgeye göç ederler. İki alan arasında konsantrasyon farkı ne kadar büyük olursa, yüksek konsantrasyonlu alandan düşük konsantrasyonlu alana atomların o kadar hızlı yayılır (difüze olur) (Çelik, 1996). Elektrik ve magnetik alanlar gibi değişik tipte kuvvetlerin varlığı atom hareketlerini etkileyebilir.

En hızlı difüzyon gazlarda meydana gelir. Difüzyon, sıvı ve katılarda daha yavaş olur. Katı halde difüzyondan söz edilebilmesi için bir anafaz (eriten matriks malzemesi) içerisinde, heterojen dağılım gösteren yabancı atomların (eriyen atomlar) oluşturduğu, farklı “yabancı atom konsantrasyonu”na sahip kristal bölgeleri var olmalıdır. Bu iki komponent bir difüzyon sistemini oluşturur (Demirci, 2004).

Difüzyon bir parçacık hareketidir ve difüzyon sıcaklıkla doğru orantılı olarak artar. Sıcaklık arttıkça atomların hareket alanı artar ve difüzyon için gerekli olan atomların yer değişim hızı artar. Katılarda martenzitik faz dönüşümleri dışında diğer bütün durum değişimlerinde dönüşümler difüzyon esastır. Bu dönüşümler kademeli olarak ve sistemin serbest enerjisinin azalması ile devam eder.

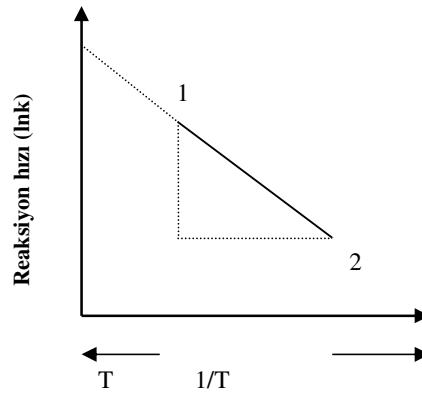


Şekil 2.1 Serbest Enerjinin Durum Değişimine Bağlılığı (Çelik, 1996).

Şekil 2.1’ de serbest enerjinin durum değişimine bağlılığı görülmektedir. Kararlı denge durumuna varıldığında serbest enerji en alt seviyeye ulaşır (2. Durum). Şekil 2.1’de 1 numara ile gösterilen durum, yarı kararlı durum olarak adlandırılır. 1. durumdan 2. duruma geçiş için sisteme Q aktivasyon enerjisinin verilmesi zorunludur. Ancak o zaman serbest enerji azalma göstererek 2. duruma ulaşabilir. Burada Q enerjisine aktivasyon enerjisi adı verilir. Bu enerji:

- a) Sıcaklık artması.
- b) Pekleşme oluşturacak şekil değişimi.
- c) Elektrik ve manyetik alanlar yardımıyla sağlanabilir.

Atomlar ve boş yerlerin yer değiştirme hızına “ k ” dersek, “ k ” değeri Arrhenius denklemi ile tanımlanır. Eşitlikte Arrhenius denklemi verilmiştir.



Şekil 2.2 Aktivasyon Enerjisinin Arrhenius Denklemi Yardımıyla Saptanması.

$$k = A_o . e^{\left(-\frac{Q}{RT}\right)} \quad (2.1)$$

A_0 = Malzemeye verilen sabit,

Q =Aktivasyon enerjisi (malzemeye bağlı),

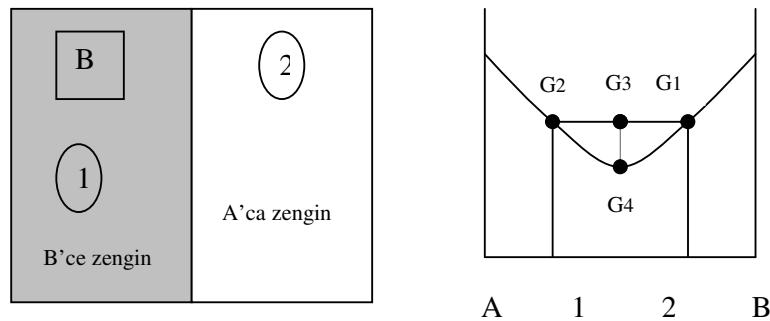
$R = \text{Gaz sabiti,}$

T= Mutlak sıcaklık şeklinde ifade edilir.

(k) değeri, artan sıcaklıkla sürekli artar, mutlak sıfır sıcaklığında ise sıfır olur. Atomların ve boş yerlerin yer değiştirmelerine ısıl aktivite adı verilir. Toparlanma, yeniden kristalleşme, sürünme ve difüzyon birer ısıl aktivitedir.

Difüzyon, sonuçta atomların yoğunluk düzensizliğinin yok olduğu bir süreçtir. Gaz ve sıvıların katılar içinde difüzyonu da gözlenir. Özellikle kaynakçılıkta büyük önemi olan hidrojen ve azot difüzyonu buna örnek olarak gösterilebilir.

Difüzyon meydana gelme sebebi, Gibbs serbest enerjisini azaltma isteğidir. Şekil 2.2 ‘de bu duruma bir örnek verilmiştir.



Şekil 2.3 Alaşımların Molar Serbest Enerji Diyagramı (Yıldırım, 2001).

B'ce zengin molar serbest enerji	G1
A'ca zengin molar serbest enerji	G2
Başlangıçtaki toplam serbest enerji	G3

Şekil 2.3' de görüldüğü gibi konsantrasyon farkını azaltmak için difüzyon başlarsa serbest enerji G4'e doğru azalır. Yani homojen bir alaşımın serbest enerjisi haline gelir. Bu

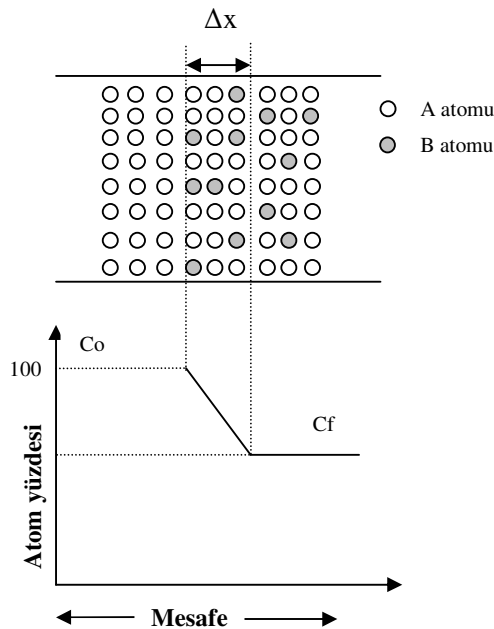
durumda yüksek konsantrasyonlu kısımdan düşük konsantrasyonlu kısma yayılan A ve B atomları serbest enerjide bir düşüş meydana getirirler.

Difüzyon, kimyasal potansiyeli yüksek olan bölgeden kimyasal potansiyeli düşük olan bölgeye doğru meydana gelir. Yalnız bu durum özel şartlar altında doğrudur. Bu sebeple difüzyon meydana getiren ana ilke olarak kimyasal potansiyel göz önüne alınır. Kimyasal potansiyel her yerde aynı olunca difüzyon durur.

2.2 DİFÜZYON KATSAYISI

Difüzyon katsayısı birim yüzeyden geçen malzeme miktarının, bu yüzeye dik konsantrasyon değişimine oranıdır. Bu katsayı bilindiğinde, difüze olan ve bir sistem için konsantrasyonlar ve geçiş oranları matematiksel analizle belirlenebilir.

Yayınan cismin yoğunluğunun farklı noktalarda değişik olması halinde, yüksek yoğunluklu noktadan düşük yoğunlukluya doğru difüzyon başlar ve konsantrasyon her yerde aynı oluncaya kadar devam eder. Bunun sonucu olarak difüzyon hızı herhangi bir nokta ve yönde, yoğunluk değişimine bağlı olur. Bu nedenle difüzyon katsayısı, herhangi bir kesit alanında akan toplam kütlenin, bu kesite dik yöndeki mesafeyle, yoğunluk değişimine oranı olarak tanımlanır. Şekil 2.4'te konsantrasyon değişimi şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.4 Konsantrasyon değişiminin şematik gösterimi (Yıldırım, 2003).

X eksenine dik bir doğrultuda difüze olan cismin yoğunluğu, P ve birim sürede x eksenine dik bir düzlemde bir birim alandan akan kütle q ve yoğunluk değişimi de $- dp/dx$ ise q'nün buna oranı, difüzyon katsayısını verir. Buna göre difüzyon katsayısını veren denklem:

$$q = - D \frac{dp}{dx} \quad (2.2)$$

şeklinde ifade edilir.

Ayrıca x ve x+dx mesafeleri arasında bir element içerisinde iki yüzeyin her iki tarafındaki akış derecelerinin farkına eşit olup hidrodinamikte olduğu gibi,

$$dp/dt = - dq/dx \text{ olur} \quad (2.3)$$

Bunun sonucu olarak da difüzyon denklemi bu durumda,

$$-\frac{\delta p}{\delta t} = \frac{\delta}{\delta x} \left(\nabla \frac{\delta p}{\delta .dx} \right) \quad (2.4)$$

Şeklini alır ki; bu da ısıнын kondüksiyonunu, elektrik akışı ve diğer fiziksel olayları veren denklemlerin benzeridir.

Difüzyon katsayısı D 'nin değeri $10^5 \text{ cm}^2 / \text{s}$ 'den fazla $10^{-11} \text{ cm}^2 / \text{s}$ 'den azına kadar geniş sınırlar içinde değişir. Bu farklılığa bağlı olarak difüzyonun her ölçümü kendine özgü sorun ve özellikler gösterip kendi özel tekniklerini gerektirir. Örneğin, sıvılar içinde difüzyonun ölçülmesinde, konveksiyon çok rahatsızlık verici bir olayken katılarda başlıca sorun, uygun süre periyotları içinde etkinin çok ufak oluşudur. Konsantrasyon değişimlerinin ölçüldüğü analitik yöntemler de çok sayıda mevcuttur. Gazlar ya da eriyikler içinde konsantrasyon, kimyasal analiz, refraktometre polarimetre veya kütle spektrometresi yardımıyla bulunabilir. İnce metal dilimlerinde konsantrasyon X-ışın difraksiyonu ile spektrografik olarak, radyoaktif endikarörle yardımıyla ya da kimyasal analizle saptanabilir (Çelik, 1996).

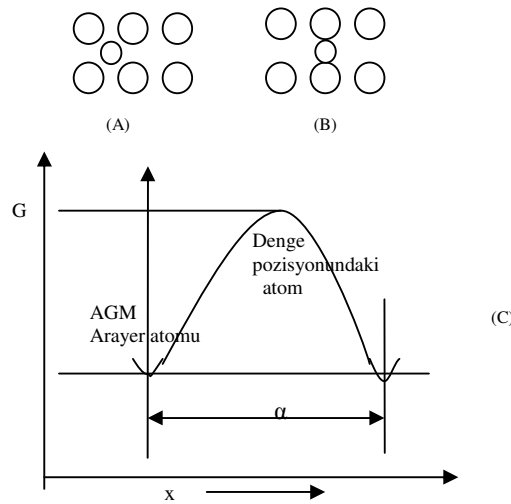
2.3 DİFÜZYON MEKANİZMALARI

Denge konumundaki atomlar ısıtıldıkları zaman titreştikleri bilinmektedir. Bazen bu titreşimler o kadar şiddetli olur ki atomlar yer değiştirir. Atomların bir yerden başka bir yere geçmeleri katılarda difüzyon olayıdır. Bu difüzyon mekanizmaları 4 grupta toplanır (Çelik, 1996).

- a) Arayer mekanizması
- b) Boşluk mekanizması
- c) Halka mekanizması
- d) Karşılıklı yer değiştirme mekanizması

2.3.1 Arayer Mekanizması

Arayer atomlarının yoğunluğu, genelde oldukça düşüktür. Dolayısıyla mevcut arayer noktalarının az bir kısmını işgal ederler. Yani, her bir arayer atomu daima boşluk noktaları ile kuşatılmış olup ısı enerjisinin, deformasyon enerjisi engelini aşmaya izin verdiği oranda başka bir pozisyona atlar. İşte, arayer atomlarının kafes örgüsü içindeki başka bir arayer noktasına göçü şeklinde gerçekleşen difüzyona arayer difüzyonu denir. Bir arayer atomunun difüzyonuna ait şematik resim ve serbest enerji değişimi Şekil 2.5’de gösterilmiştir. Arayer atomunun serbest enerjisi uygulanan gerilme ile ya da verilen enerji ile artar, atom komşu arayere ulaştığında, serbest enerjisini en aza indirerek denge konumuna varır.



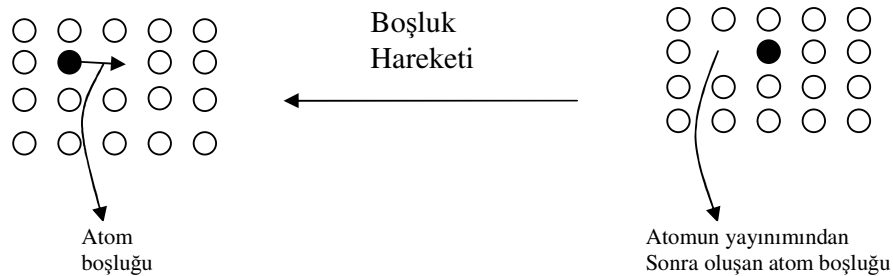
Şekil 2.5 Arayer atomu yer değiştirmesi ve aktivasyon enerjisi değişimi (Yıldırım, 2001).

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

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

2.3.2 Boşluk Mekanizması

Eğer kristal kafesi içerisinde bir atom boşluğu varsa, komşu atomlardan bir tanesi kendi yerini terk ederek bu boşluğu doldurur. Hareket eden atomun kendi yeri ise boş kalır. Atomların bu şekildeki hareketlerine boşluk difüzyonu denir. Kristal kafesi içerisinde ne kadar atom boşluğu varsa, boşluk difüzyonu o kadar çok etkilidir. Metaller yüksek sıcaklıklara çıkartıldıkları zaman, atom boşlukları artmaktadır. Dolayısıyla metallerin yüksek sıcaklıklardaki difüzyonunda, bu mekanizma oldukça önemli bir rol oynar. Şekil 2.6'de boşluk difüzyon mekanizması şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 2.6 Boşluk mekanizmasında atomların yer değiştirmesi (● Arayer atomu , ○ komşu kafes atomlar) (Demirci, 2004).

Boşluk difüzyonunun olabilmesi için:

- (a) Atom çapları farkının % 15'den küçük olması,
- (b) Malzemelerin aynı kristal yapıya sahip olması,
- (c) Elektronegativite farkının küçük olması,
- (d) Valans elektronların eşit olması gerekir.

2.3.3 Halka Mekanizması

Metallerde en yaygın olarak boşluk ve ara yer difüzyon mekanizmaları görüldüğü halde, nadiren de olsa karşılaşılan diğer bir difüzyon mekanizması ise, halka difüzyonudur. Kristal yapı içerisinde birbirlerine temas halinde halka oluşturan atomların, aynı anda ve aynı yönde hareket etmeleri suretiyle birbirlerinin yerini almaları ve yeni konumlarına geçebilmeleridir. Şekil 2.7'de halka mekanizması modeli gösterilmiştir.



Şekil 2.7 Halka mekanizmasında atomların yer değiştirmesi (● Arayer atomu , ○ komşu kafes atomlar) (Demirci, 2004).

2.3.4 Karşılıklı Yer Değiştirme Mekanizması

Enerji nedenleriyle iki atomun karşılıklı olarak doğrudan yer değiştirme olasılığı düşüktür (Şekil 2.8). Metallerde iç yapı kusurları oldukça yüksek olduğundan gerekli de değildir. Çünkü her atom iki atom çapı kadar hareket edebilir. Ayrıca mekanizmanın oluşabilmesi için kafesin bölgesel olarak çarpılması da gereklidir (Çelik, 1996).



Şekil 2.8 Atomların karşılıklı yer değiştirmesi (Demirci, 2004).

BÖLÜM 3

DİFÜZYON KAYNAĞI

Difüzyon kaynağı, alın altına getirilmiş iki malzemeyi malzemelerin ergime sıcaklıklarının altındaki bir sıcaklıkta, gözle görülebilir bir plastik deformasyona maruz kalmayacak bir basınç altında, malzemeler arası metalürjik bir bağ oluşturacak kadar bir süre bekleterek yapılan bir birleştirme yöntemidir. Yöntem difüzyon esastır ve birleşme katı halde meydana gelir. Yöntemin en büyük avantajı benzer olmayan malzeme çiftlerinden yeni bir malzeme üretmektir (Kurt ve Orhan, 2005).

Difüzyonla birleştirme işleminde, birleştirme sırasında birleştirilecek malzemeler arasında ara tabaka kullanılmıyorsa katı hal difüzyon kaynağı adı verilir. Katı hal difüzyon kaynağı vakum ya da koruyucu gaz atmosferi altında yapılır. Şayet birleştirme işlemi sırasında ergiyen bir ara tabaka kullanılıyorsa sıvı hal difüzyon kaynağı adı verilir. Genellikle, benzer olmayan malzemelerin birleştirilmesinde ara tabaka kullanılır (Özdemir, 2003).

Difüzyon kaynağı ile birleştirilebilecek metal kombinasyonları aşağıdaki şekildedir:

1. Benzer metaller, bir katı hal kaynağı formunda doğrudan birleştirilebilir.
2. Benzer metaller, kaynak yüzeyi arasında farklı bir metalin ince bir tabaka halinde olacağı bir dolgu metali kullanılarak birleştirilebilirler.
3. İki farklı metal, bir metalik birleştirme oluşturacak şekilde doğrudan birleştirilebilir.
4. Farklı metaller, yüzeyler arasında dolgu metali olarak adlandırılan başka bir metal kullanılarak birleştirilebilirler (İpek, 2003).

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

Kristal yapıya sahip katı bir malzemenin atomları arasındaki çekim kuvveti, kohezyon kuvvetini meydana getirir. Normal olarak her bir atom, üzerine tesir eden kuvvetin sıfır

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

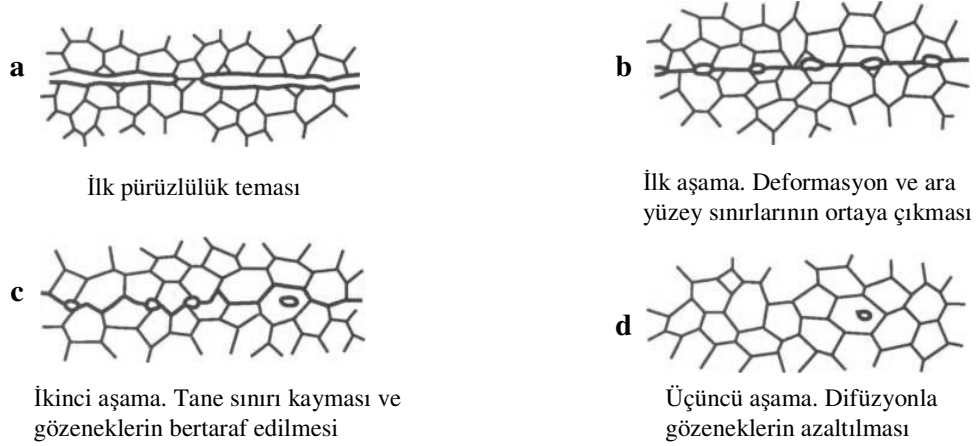
İki katı malzemenin difüzyonla birleştirilmesinde, birleştirme davranışını önemli, ölçüde etkileyen diğer bir kuvvet ise kimyasal yapısına bağlı olmadan, atomların arasında meydana gelen Van der Waals kuvvetleridir. Van der Waals kuvvetleri; gres, su buharı gaz gibi metal yüzeyindeki yabancı atomların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

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

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

Bu konudaki ilk teorik yaklaşım 1944 yılında Kinzel tarafından sunulmuştur. Daha sonra Gerken; 1965 yılında Owczarski üç safhalı bir mekanizma ileri sürmüşlerdir. Sonraki yıllarda Shvartz, King ve Owczarski birbirlerinininkiyle aynı olan bir model sunarak, kendi modellerinin son safhalarıyla, Gerken ve Owczarski modelinin ilk safhasını birleştirmişlerdir. Bu modele göre ilk safhayı, birleştirilecek yüzeylerin basınç altında ilk teması ve sürünme meydana getirmektir. Bağlantı arakesiti de esas itibarıyla, tane sınırı

olarak tanımlanmıştır. İkinci safhada, birinci safhada yok edilemeyen arakesit boşlukları difüzyon yoluyla yok edilmekte ve arakesit tane sınırları daha düşük bir enerji seviyesine, yani arakesit düzlemi dışına geçmektedirler. Buradaki hakim mekanizma tane sınırı difüzyonudur. Son safha ise tane içindeki boşlukların hacim difüzyonu ile doldurulmasıdır (Yılmaz, 1999).



Şekil 3.1 Difüzyon kaynağının üç aşamalı mekanizması (Çelik, 1996).

Güven ipek'in çalışmasında bulunan Mc Keag, saf titanyum ve bakır difüzyon çiftini incelemiş ve altı safhalı bir mekanizma ortaya koymuştur (İpek, 2003). Bu mekanizmaya göre; birinci safhada, sıcaklık altında ve yüzey pürüzlerinin teması esnasında, metal oksitleri çözünmekte ve ara kesitin her iki tarafında yeniden kristalleşmiş ince bir tabaka meydana gelmektedir. Enerji engelini kıran bu tabakadır. İkinci safhada, daha hakim bir tabaka yeniden kristalleşmektedir. Üçüncü safhada ana metal yeniden kristalleşirken daha alt tabaka kristalleri yok edilir. Dördüncü aşamada ara kesitleri daha önce kristalleşen taneler yok olurken, küçük fakat görülebilir boşluklar oluşur. Beşinci safhada ara kesitteki boşlukların sayıları azalırken, boyutları büyür. Altıncı safhada orijinal ara kesit düzlemine tane sınırı göçü ve tane büyümesi başlar (İpek, 2003).

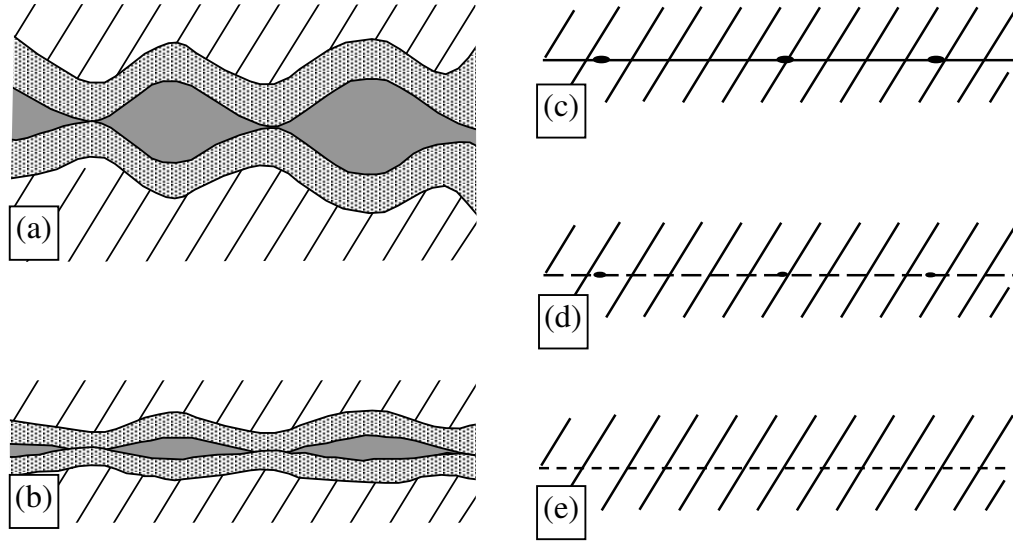
Araştırmacılar, başlangıç safhasında plastik deformasyonun; birleşecek yüzeylerin büyük bir kısmı temas ettiği zaman ise, yüzeyden kaynaklanan ve ara yüzey mekanizmalarının etkili olduğu konusunda hem fikirdirler. Sıvı faz kütle transferi, ancak yüksek sıcaklıklara çıkıldığı zaman söz konusudur.

Difüzyon kaynağı konusunda yapılan çalışmalarda, mekanizma ve modellerdeki ilişkiler her bir mekanizmanın boşluğu doldurmasına farklı bir şekilde tesir ettiği farz edilerek geliştirilmiştir. Bu yaklaşım, mekanizmaların farklı tesirlerini ihmal eder durumda olup,

bağ oluşumu üzerinde bazı mekanizmaların tesirlerinin abartılı tahminine yol açabilir. Araştırmacıların çalışmalar göz önünde bulundurulduğunda difüzyon kaynağı mekanizması şu şekilde genelleştirilebilir (İpek, 2003).

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

1990 yılında difüzyon kaynağı mekanizmasını aşağıdaki gibi tanımlamıştır (Yılmaz, 1999).



Şekil 3.2 Difüzyon kaynağı Mekanizması (Yılmaz, 1999).

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

3.1 DİFÜZYON KAYNAĞI ÇEŞİTLERİ

Birçok benzer ya da farklı malzeme kombinasyonları difüzyon kaynağı ile bağlanabilir. Ergime noktası, yoğunluk, lineer genleşme katsayısı, kafes şekli ve kafes katsayıları farklı olduğu için farklı metal ve alaşımların birleştirilmesi zordur (Çelik, 1996). Bu etkileri azaltabilmek için geliştirilen difüzyon kaynağı, ara tabaka kullanılıp kullanılmamasına göre aşağıdaki şekilde sınıflandırılabilir:

1. Katı hal difüzyon kaynağı
2. Sıvı hal difüzyon kaynağı (transient liquid phase bonding) ve difüzyon lehimleme
3. Süperplastik şekil verme-difüzyon kaynağı kombinasyonu

3.1.1 Katı Hal Difüzyon Kaynağı

Katı hal difüzyon kaynağı, genellikle vakum veya argon gibi koruyucu gaz atmosferi altında yapılır. Isı radyasyonla, direkt veya endirekt rezistansla ya da indüksiyon ile sağlanır. Basınç, tek eksenli veya izostatik bir şekilde uygulanabilir. Tek eksenli basınç uygulamasında, parçaların makro deformasyonunu (% 1-2 şekil değişikliği) önlemek için düşük bir basınç değeri (3-10 MPa) kullanılır. Bu tip işlemler, difüzyon kaynağı mekanizmasına plastik akma katkısının az olmasından dolayı birleştirilecek yüzeylerin iyi hazırlanmasını gerektirir.

Zor malzemelerin, katı halde birleştirilmelerinin gerektiği durumlarda (özellikle metal seramik birleştirilmelerinde) difüzyon işlemine yardımcı olmak ve parçalarda birleştirme sonrası oluşabilecek gerilmeleri azaltmak için farklı malzemelerden bir veya birkaç ara tabaka kullanılabilir (İpek, 2003).

3.1.2 Sıvı Hal Difüzyon Kaynağı ve Difüzyon Lehimleme

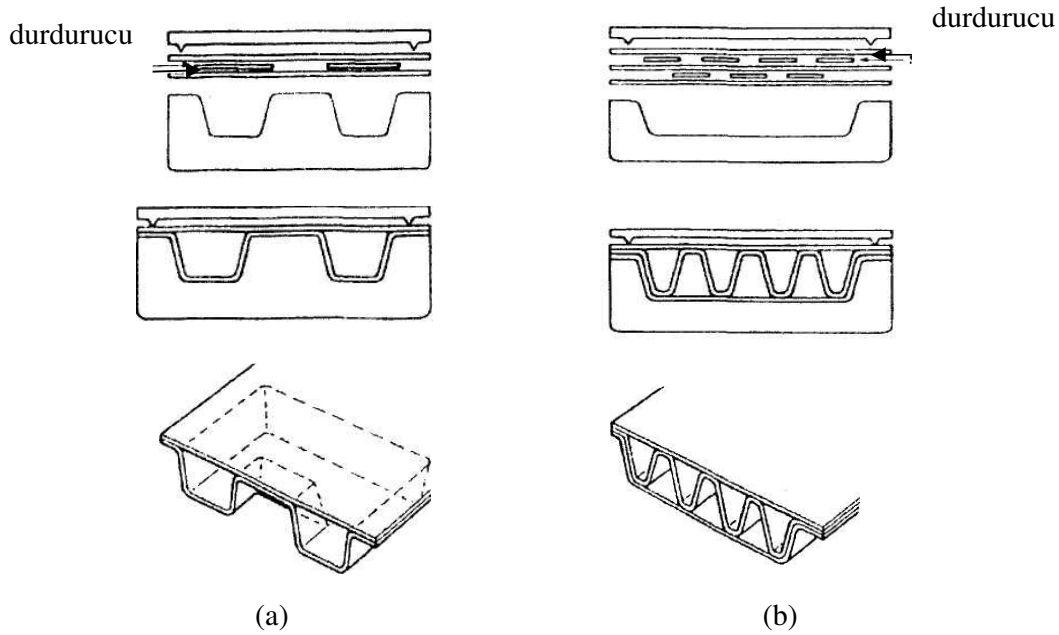
Geçiş sıvı faz kaynağı olarak da bilinen, sıvı hal difüzyon kaynağı ve sert lehimleme yalnızca değişik malzemelerin birleştirilmesi veya farklı malzemelerin ara tabaka olarak kullanılması durumunda uygulanabilir. Katı hal difüzyon kaynağı işlemleri kaynak yüzeylerinde bir bileşim değişimine sebep olur ve burada uygulanan kaynak sıcaklığı, yeni oluşacak faz bu sıcaklıkta sıvılaşacak şekilde seçilir. Bu durumda ara tabaka daha hızlı bir

difüzyon sağlar veya yüzeyler arasındaki tam teması sağlamak için bağlantıda mikro deformasyona izin verir (Çelik, 1996). Bu ince sıvı katman ana metallerin ikisinin de ergime sıcaklığından daha düşük bir sıcaklıkta birleştirme olacak şekilde araya yayılır.

3.1.3 Süperplastik Şekil Verme ve Difüzyon Kaynağı Kombinasyonu

Süperplastik şekil verme ve difüzyon kaynağı (SPF-DK) kombinasyonu özellikle uzay endüstrisi için geliştirilmiştir ve bu kombinasyon o kadar önemlidir ki, farklı bir difüzyon kaynağı işlemi olarak değerlendirilir. Bu yöntem özellikle belirli yükleme hızı şartlarında, yüksek sıcaklıklarda, Süperplastik özellik gösteren Ti ve alaşımlarında ticari olarak uygulanmaktadır. Süperplastik şekil verme sıcaklık ve basınç şartları, difüzyon kaynağı için gerekli şartlarla benzerlik gösterdiğinden iki işlem tek üretim işlemi haline getirilmiştir (İpek, 2003).

Havacılık endüstrisinde yüksek sıcaklıkta kendi oksidini absorbe eden titanyumun difüzyon kaynağındaki kolaylığından faydalanılarak süperplastik şekil verme ve difüzyon kaynağı kombinasyonu ile hafif petek paneller üretilmektedir. Bu uygulamalarda bir sonucu olarak kaynak edilmesi istenmeyen bölgede seramik esaslı durdurucu malzemesi kullanımı gereklidir (Şekil 3.3) (İpek, 2003).



Şekil 3.3 Süperplastik şekil verme-difüzyon kaynağı kombinasyonu (a) Klasik petek panel (b) Sandviç petek panel.

SPF-DK işlemleri uçak parçalarının imalatında çok önemli maliyet ve ağırlık tasarrufu sağlandığı için süperplastik alüminyum alaşımlarına da uygulanmak istenmiş fakat bu alaşımların yüzeylerindeki kararlı oksit filminden dolayı uygulanamamıştır. Al alaşımlarının katı hal kaynağındaki en büyük zorluk, yüzeylerindeki kararlı ve yapışkan oksit tabakasıdır ki bu normal difüzyon kaynağı koşullarında engellenememektedir (Kurşungöz ve Kurşungöz, 1996).

3.2 DİFÜZYON KAYNAK PARAMETRELERİ

Difüzyon kaynak yönteminin temel parametreleri sıcaklık, süre ve basınçtır. Ancak birleştirilecek parçaların yüzey şartları ve kaynak atmosferi de birleştirme kalitesine etki eden önemli faktörlerdir. Difüzyon kaynağında sıcaklık, deformasyona, oksit çözünürlüğüne, allotropik dönüşüme, yeniden kristalleşmeye, difüzyona ve işlemin kısa sürede oluşmasına etkili olduğundan en önemli parametredir. Aynı cins metallerin birleştirilmesinde işlem sıcaklığı metalin ergime sıcaklığının 0.5-0.7 katı olarak alınır. Ayrıca yöntemde sıcaklık kadar ısıtma ve soğutma hızları da önemlidir.

Difüzyon kaynağı aşağıdaki faktörlerin tesiri altındadır.

1- Kaynak şartları

- a) Sıcaklık,
- b) Zaman
- c) Basınç
- d) Yüzey pürüzlülüğü
- e) Çalışma ortamı

2- Birleştirilecek malzemelerin fiziksel ve kimyasal özellikleri: Mekanik özellikler, kristal yapıları, tane boyutu, atom yarıçapı, yeniden kristalleşme sıcaklıkları ve yüzey enerjileri,

3- Metalürjik özellikler: Farklı metal yada malzeme çiftlerinin karşılıklı çözünabilirliği ve metaller arası bileşik teşekkülü (Yılmaz, 1999).

3.2.1 Kaynak Sıcaklığı

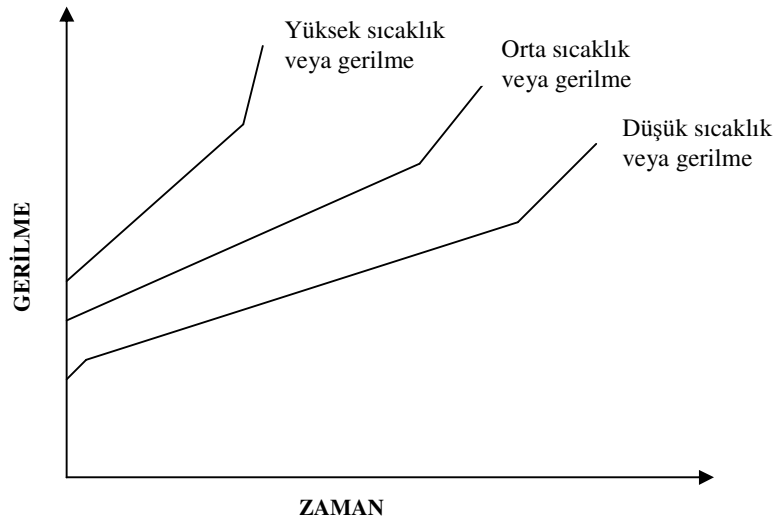
Difüzyon kaynağında sıcaklık, deformasyon oksit çözünürlüğü, allotropik dönüşüm yeniden kristalleşme, sürünme difüzyon en önemli kaynak parametreleridir. Aynı cins metallerin birleşmesinde işlem sıcaklığı T_k ve metalin ergime sıcaklığı T_m olarak adlandırılırsa;

$$T_k \approx (0.5-0.7)T_m \quad (3.1)$$

alınır.

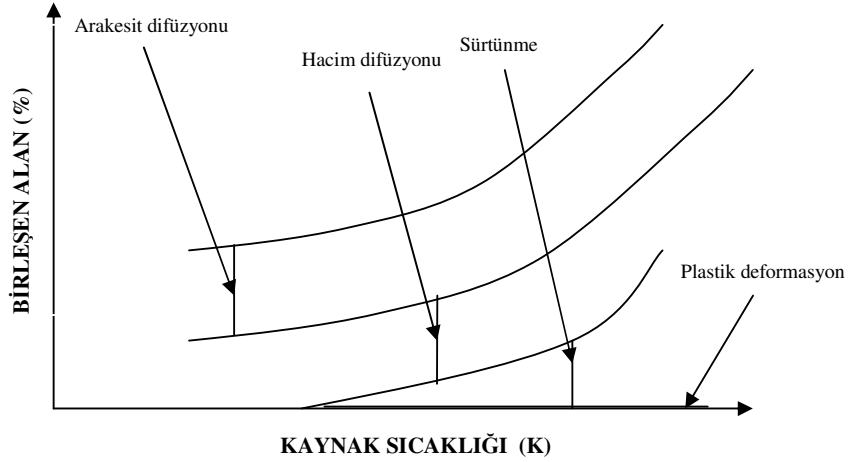
Difüzyon kaynağında sıcaklık kadar ısıtma ve soğutma hızı da önemlidir. Endüstriyel çalışma için 50 °C/dakikalık ısıtma hızı olumlu sonuçlar verirken farklı metallerin birleştirilmesinde doğrusal ısıl genleşme katsayılarına bağlı olarak 15°C/dakikalık bir maksimum ısıtma hızı önerilmektedir.

Sıcaklık arttıkça ana malzemelerin akma gerilmeleri azalır. Böylece hem ilk plastik deformasyon hem de yüzey pürüzlerinin şekil değiştirmesi kolaylaşır. Dolayısıyla kaynak için gerekli temas alanını elde etme süresi kısalmır. Şekil 3.4 de uygulanan basınç ve sıcaklığın sürünme eğrisine tesiri görülmektedir.



Şekil 3.4 Sıcaklık ve uygulanan basıncın sürünme eğrisine tesiri (Pakdil, 2001).

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



Şekil 3.5 Sıcaklığın bileşebilirlik üzerine etkisi (İpek, 2003).

3.2.2 Yüzey Şartları

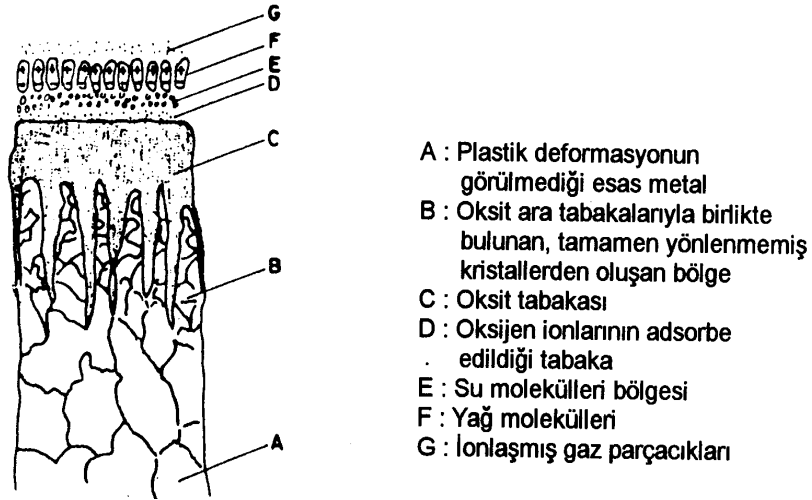
Difüzyon kaynağında, kaynak edilecek malzemelerin yüzey şartları iki metal arasında temasın sağlanması ve dolayısıyla kaliteli kaynak edilmesi açısından oldukça önemlidir (İpek, 2003). İyi bir kaynak için engelleyici yüzey filmleri genellikle oksit tabakalarıdır. Yüzeylerin oksitten korunması için kaynak vakum veya indirgeyici ortamda yapılmalıdır. Soy gaz olarak helyum, argon ve azot kullanılır.

Bir metalin yüzeyi önemli bir çalışmayla hazırlanmış olsa da, üzerinde çeşitli yabancı maddeler bulunabilir. Kaynak yapılacak metallerin bağlantı yüzeyinin yeteri kadar kir ve oksit artıklarından temizlenmesi gerekir. Birleşme yüzeylerinde oksit oluşumunu sağlayan gazlar giderilmelidir. Bu nedenle kaynak işlemi vakum ya da koruyucu gaz altında yapılmalıdır (Yılmaz, 1999). Çeşitli metallerde belirli bir film kalınlığının oluşması için geçen süreler Çizelge 3.1 'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1 Metallerde oksit filmi oluşum süreleri (Çelik, 1996).

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

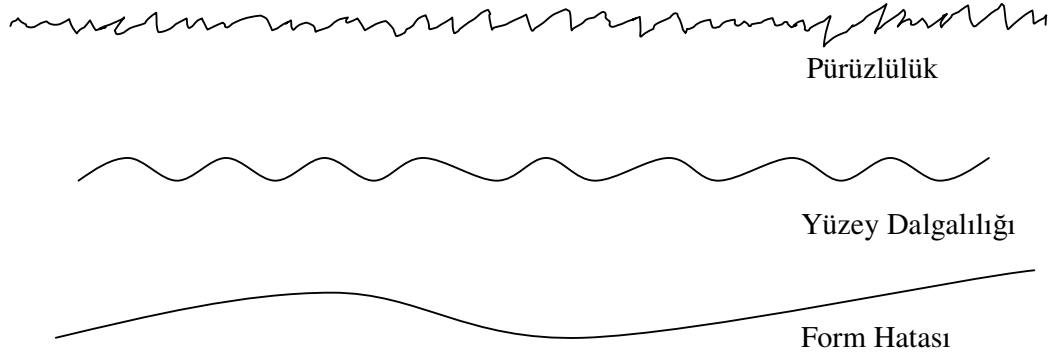
Bir metal yüzeyinde, özenli bir çalışma ile hazırlanmış olsa da, çeşitli yabancı maddeler bulunmaktadır. Bu maddelerin yüzey tabakalarındaki bulunuşları Şekil 3.6 da şematik olarak gösterilmiştir. A bölgesi plastik deformasyonun görülmediği ana metali temsil etmektedir. B, oksit tabakalarıyla birlikte bulunan, tamamen yönlenmemiş kristallerden oluşan bölgeyi, C ise oksit tabakasını göstermektedir. D, oksijen iyonlarının adsorbe edildiği tabaka, E su molekülleri tabakası, F yağ molekülleri ve G iyonlaşmış toz parçacıklarıdır.



Şekil 3.6 Metal bir yüzeyin tabakalarının şematik kesiti (Çelik, 1996).

(+) ve (-) işaretleri, tabakaların karakteristik kutuplarını vermektedir. Metal yüzeylerindeki yabancı madde filmleri kaldığında davranışları değişik olmaktadır, inorganik filmler kırılındırlar, organik filmler ise birleştirme sırasında yer değiştirirler ve sıvılaşma eğilimindedirler (Çelik, 1996).

Yüzey pürüzlülükleri kalıntı gözeneklerin başlıca sebepleridir. Pürüzlülük sıcaklık ve deformasyonla artar. Süper plastik deformasyon esnasında, yüzey pürüzlülüğü artarak tane sınır hareketine katılır. Şekil 3.7 ve şekil 3.8 'de görüleceği gibi, yüzey kusurları ve pürüzlülüğün sıcaklıkla değişimi gösterilmektedir.



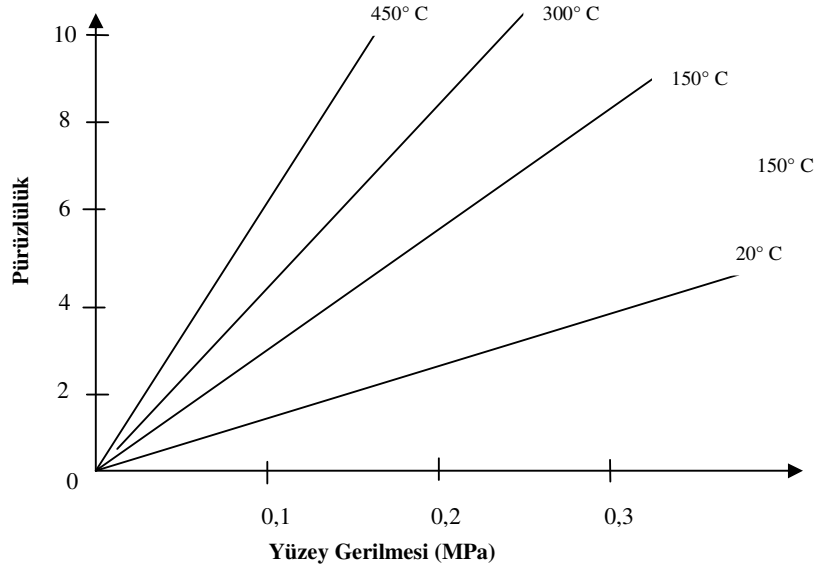
Şekil 3.7 Yüzey kusurları (Yılmaz, 1999).

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

Yüzey artıkları hemen hemen bütün yüzeylerde, yüzeyde bazı şekillerde mevcuttur. Bunlar iki gruba ayrılabilir.

1. Normalde oldukça kırılgan olan oksit filimleri,
2. Yağ, gres toz gibi organik ya da inorganik tabakalar.

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



Şekil 3.8 Yüzey gerilmesi ile pürüzlülük arasında sıcaklığa bağlı değişme (Yılmaz, 1999).

3.2.3 Basıncın Etkisi

Basıncı, difüzyon kaynağı için önemli bir değişkendir. Basıncıla malzemedeki difüzyon oranı kontrol edilir. Metal ve alaşımların kaynağında basınç işlemi çeşitli yönlerden etkiler (Çelik, 1996). Difüzyon kaynağında basınç, iki yüzey arasında teması ve difüzyon işlemini başlatmak üzere kimyasal bir potansiyel fark yaratmak için gereklidir. Yüzey oksitlerini kırmadan temas başlatmak mümkün değildir (Özdemir, 2003).

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

1. Çözülmesi mümkün olmayan yüzey oksitlerini kırar ve metalin metale temas alanını artırır.
2. Birleşecek yüzeyleri birbirlerine atomlar arası mesafede yaklaştırarak, atomlar arası çekim kuvvetini faaliyete geçirir.
3. Difüzyon için kimyasal potansiyel farkı meydana getirir.
4. Yüzey pürüzlerinin plastik akışına yardım eder (Özdemir, 2003).

Uygulamada basıncın olumsuz tesirlere sebep olmaması için aşağıdaki hususlara dikkat edilmelidir (Yılmaz, 1999).

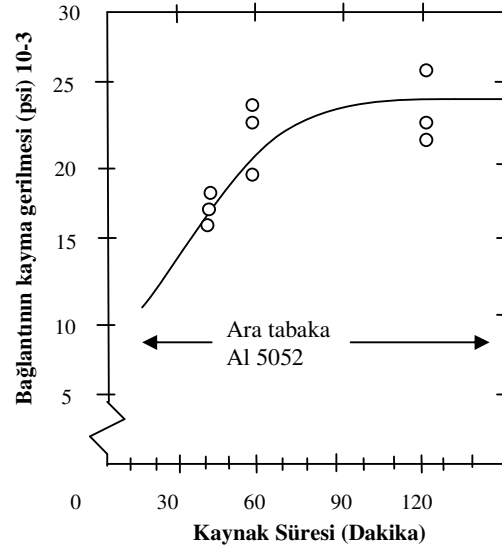
- a. Uygulanacak basınç ve yüzey pürüzlülüklerinin sürünme hızı ve plastik deformasyonunu artıracak kadar büyük; kaynak edilecek parçaların mikroskobik deformasyonuna yol açmayacak kadar küçük seçilir.
- b. Kaynak basıncı, birleştirilecek parçaların plastik hacim deformasyonunu en aza indirmek için akma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

Dubrovsky, temas alanındaki deformasyon miktarı arttıkça difüzyon hızının arttığını belirtmektedir. Aynı araştırmacı bakır ve demirin difüzyon kaynağı üzerinde yaptığı çalışmada basıncın difüzyon kaynağı üzerindeki etkisini efektif difüzyon katsayısı ile tanımlamıştır (Yılmaz, 1999).

3.2.4 Kaynak süresi

Kaynak süresi bağımlı bir işlem parametresi olup; sıcaklık, basınç ve birleşme türü ile ilişkilidir. Süre, basınç ve sıcaklıkla ters orantılıdır. Her malzeme ya da malzeme çifti için gerekli süre birkaç saniyeden, birkaç saate kadar değişebilir. Kaynak süresi, basınç ve sıcaklığın artırılması ile azaltılabilmekle beraber, kirli yüzeyler ve düşük sıcaklıklar ile çalışıldığında süre uzatılmalıdır (İpek, 2003).

Sabit basınç ve sıcaklıkta birleştirme süresini uzatmanın, bağlantı mukavemetini bir noktaya kadar artabileceği belirlenmiştir (Yılmaz, 1999). Bu durum şekil 3.9'de görülmektedir.



Sekil 3.9 Bağlantının kayma mukavemeti ile kaynak süresi arasındaki ilişki.

Endüstriyel uygulamalarda birleşme süresini kısa tutmak, ekonomiklik açısından önemlidir. Kaynak süresinin uzun olması kaynak ekonomisi açısından bir dezavantaj oluştururken, boşlukların oluşumunu, bileşimin değişimini ve kırılğan metaller arası bileşiklerin oluşumunu teşvik etmesi gibi bağlantının mekanik özelliklerini bozan olumsuzluklara da neden olabilir (Yılmaz, 1999).

Difüzyon kaynağında geçen süre iki evre olarak tanımlanmaktadır. Birinci evre bir olgunlaşma (kuluçka) sürecidir. Bu aşamada yüzeyler arasında temas alanı artmakta ve aşırı deformasyon bölgeleri oluşmaktadır. İkinci evrede ise kayma ve tane sınırı göçünün görüldüğü, yoğun sürünme ile birlikte yeniden kristalleşme olayları hakimdir (Özdemir, 2003).

3.2.5 Kaynak ortamı

Difüzyon kaynağında parça yüzeylerini ve ara kesitte oluşacak oksidasyonu önlemek için koruyucu bir atmosfer altında kaynak işlemini gerçekleştirmek gerekir. Bu amaçla ya vakum altında ya da bir soygaz atmosferinde kaynak işlemi gerçekleştirilir (Pakdil, 2001).

Soy gaz olarak argon, azot veya helyum gazlarından herhangi birisi kullanılabilir. Oksijen miktarının en aza indirmeye yardım eden hidrojenin redükleyici bir atmosfer ortamı olduğu

düşünülebilir. Ancak hidrojen, titanyum, zirkonyum, hafniyum, kolombiyum ve tantal alaşımlarında hidrat oluşturduğundan bu malzemelerin kaynağında tercih ve tavsiye edilmez (İpek, 2003). Argon, azot, helyum ve bazen azot yüksek sıcaklıklarda temiz yüzeyleri korumak için çok uygundur. Bu gazlar kullanıldığında yeniden kirlenmeden kaçınmak için gazların saflığı çok yüksek olmalıdır (Çelik, 1996) .

Soy gazlar atmosferik oksijenin tesirini ancak belli bir dereceye kadar azalttığından, kararlı oksitlere sahip metallerde vakum kullanılmaktadır. 1.3×10^{-3} Pa'dan daha fazla bir vakum oksit filmlerinin çözünmesini sağlayabilmekte ise de, uygulamada 1.3×10^{-2} ile 1.3×10^{-5} Pa'lık basınçlar kullanılmaktadır. Vakum sırasında parçanın birleştirilecek ara yüzeyi oksitlenmeden korunduğu gibi, yüzeydeki yabancı maddelerin süblimasyonu da sağlanmaktadır. Vakum ortamında yapılan kaynaklı birleştirmeler, vakum çok yüksek olmasa bile, yeterince saf olmayan asal gazların koruyuculuğu altında yapılan birleştirmelerden daha iyi dayanım sağlamaktadır (Yılmaz, 1999) .

3.2.6 Birleştirilecek Malzemelerin Tane Boyutları ve Mikroyapıları

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

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

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

1. İnce taneli küresel, (eşeksenli)
2. Lamelli,
3. Tabaka tipi olmak üzere üç grupta incelenir (Çelik, 1990) .

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

Tabaka tipi yapıda tane sayısı arttıkça sürünme hızı azalmakta ve sonuçta ara kesitte boşluklar kalmaktadır.

Lamelli yapının, diğer iki yapı ile karşılaştırıldığında daha düşük sürünme hızına sahip olduğu görülür.

İki fazlı alaşımlarda, iki fazın oranı difüze olabilme ve sertlik üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Yüksek difüzyon hızına sahip fazın, düşük difüzyon hızına sahip faza oranı, sıcaklığın tesiriyle arttıkça bağ oluşumu olumlu yönde etkilenmektedir (Çelik, 1990).

3.3 DİFÜZYON KAYNAĞI BAĞLANTI TÜRLERİ

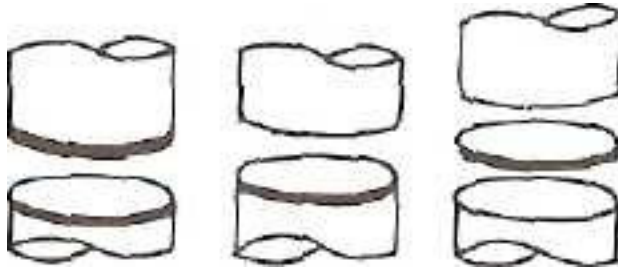
Difüzyon kaynağının uygulamasında, özellikle farklı metal ve alaşımlarının birleştirilmesinde genellikle bir ara tabaka kullanılır. Ara tabakalar kaynak alanındaki hidrojenliği minimuma indirir ve birleştirmenin oluşumunu kolaylaştırır. Ara tabakalar folyo şeklinde, elektrolitik kaplama veya püskürtme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

3.3.1 Difüzyon Kaynağında Ara Tabaka:

- 1- Karşılıklı iki yüzeyde,
- 2- Yalnız bir yüzeyde,
- 3- Araya ayrı bir tabaka koyma şeklindedir. Şekil 3.10 da görülmektedir.

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

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



(a)



(b)

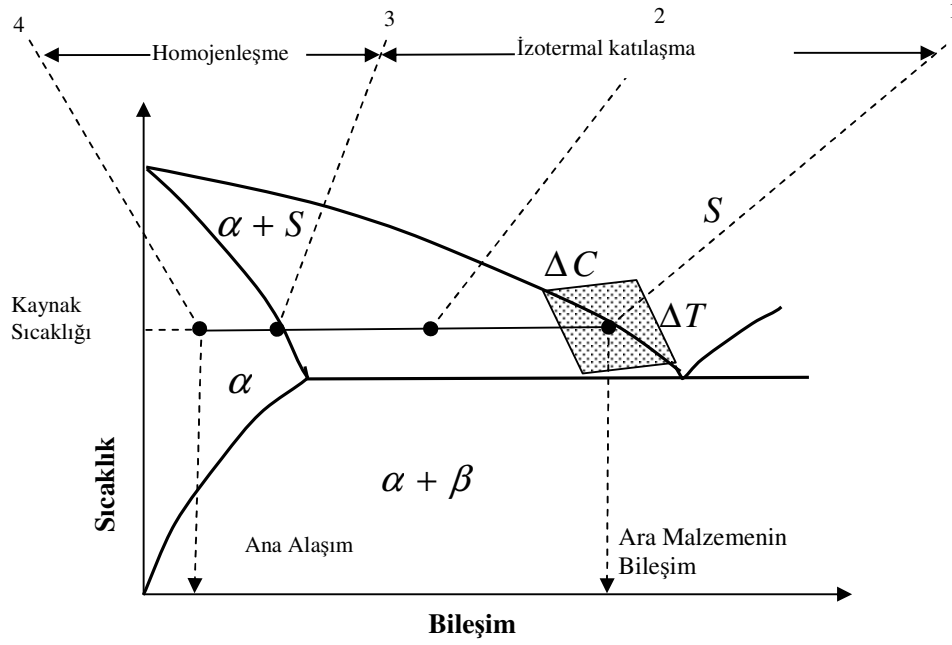
Şekil 3.10 Difüzyon kaynağında ara tabaka (Torun, 2003).

Difüzyon kaynağında birleşme işlemini hızlandırmak, bağlantının mekanik özelliklerini geliştirmek veya birbirinden farklı metal, metal olmayan malzemelerin kaynağında karşılıklı difüzyon oluşturmak için ara malzeme kullanılır (Torun, 2003).

Genel olarak ilave (ara) malzemenin kaynaktaki faydaları şunlardır.

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

Ara tabaka kullanmanın şekli denge diyagramı üzerinde, Şekil 3.11 de belirtilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi, kullanılacak ara tabakanın erime sıcaklığının ana metale göre daha düşük olması ve ana metalde çözünebilir olması istenir.



Şekil 3.11 Ara tabakanın kaynak bölgesine tesiri (Yılmaz, 1999).

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

Birbirinin aynı ya da farklı birçok malzeme difüzyon kaynak yöntemiyle birleştirilebilmektedir. Bu yöntem en çok titanyum ve alaşımları, zirkonyum ve alaşımları ve nikel esaslı alaşımlarda uygulanmıştır. C, Bor, Alümina, SiC gibi malzemelerin takviye olarak kullanıldığı metal matrisli kompozit malzemelerin birleştirilmesinde de kullanışlı bir yöntem olduğu kabul edilmektedir. Benzer olmayan metal ve alaşımların da, kaynak sonrası birleşme bölgesinde kırılgan intermetalik faz oluşuyor ya da yeniden ergime ile malzeme gevrekleşiyor veya mukavemeti azalıyorsa difüzyon kaynak yöntemi tercih edilmektedir (İpek, 2003).

3.4 SERT LEHİMLEME

Lehimleme termik bir yöntem olarak tanımlanır; malzemeye bağlı birleştirme yöntemlerindendir. Lehimlemede sıvı faz lehim malzemenin eritilmesi ile (eritme lehim) veya sınır yüzeylerde difüzyonla olur (difüzyon lehim). Lehimlemede esas malzemenin ergime sıcaklığına erişilmez. Bu tanım hem birleşmeyi hem de lehimle kaplamayı kapsar.

3.4.1 Sert ve Yumuşak Lehimle Tekniklerinin Karşılaştırılması

Sert lehimleme ile yumuşak lehimleme arasındaki farklılık ve benzerlikler şunlardır:

1. Yumuşak ve sert lehimlemeyi birbirinden ayıran en bariz özellik, ilave dolgu metalinin ergime sıcaklığıdır. Amerikan Kaynak Derneği (AWS) tanımlamasına göre, dolgu metali 450°C 'nin üzerinde ergirse sert lehimleme, bu sıcaklığın altında ergirse yumuşak lehimleme adını alır.
2. Yumuşak ve sert lehimlemede, aynı bağ mekanizması geçerlidir. Her iki teknikte de ara yüzeyde bir metalik bağ oluşur.
3. Her iki teknikte de uygun dekapın, dolgu metali ve lehimleme aralığı kullanıldığında, iyi bir ıslatma meydana gelebileceği gibi, kaliteli ve yüksek mukavemetli birleştirmeler de elde edilir.
4. Ticari olarak piyasada bulunan yumuşak ve sert lehimleme dolgu metallerinin arasında 161°C 'lik ergime sıcaklık farklılığı vardır. Yumuşak lehimlemede en yüksek ergime sıcaklığına sahip dolgu alaşımı Au-3Si'dir (ergime sıcaklığı, 363°C 'dir). En düşük ergime sıcaklığına sahip sert lehimlemede kullanılan ilave dolgu metali ise AL-4Cu-10Si'dir (ergime sıcaklığı, 524°C 'dir). Yumuşak lehimlemede kullanılan en yüksek ergime sıcaklığına sahip dolgu metali ile sert lehimlemede kullanılan en düşük ergime sıcaklığına sahip dolgu metali arasında 161°C 'lik bir sıcaklık farklılığı doğmakta.
5. Gerçek sert ve gerekse yumuşak lehimlemede kullanılan dolgu metallerinin bazıları, insan sağlığına Zararlı Mg, Cd, Zn gibi maddeler içermektedir.
6. Yumuşak lehimleme ilave dolgu alaşımları, sert lehimleme ilave dolgu alaşımlarından daha fazladır. Çünkü lehimlemede ötektik ilave dolgu alaşımı tercih edildiğinden, ilave dolgu metalinin ergime sıcaklığı çeşitli alaşım elementleri ilavesiyle 450°C 'nin altına çekile bilmektedir.
7. Yüksek ısıya dayanıklı malzemelerin ve yüksek sıcaklık ortalamalarında kullanılacak malzemelerin lehimlenmesinde sert lehimleme kullanılabilir. Yumuşak lehimleme ise kullanılmaz. Yumuşak lehimleme genellikle elektronik parçaların lehimlenmesinde kullanılır (Uzun, 2002).

3.4.2 Lehimde Karakteristik Sıcaklıklar:

3.4.2.1 Çalışma Sıcaklığı

Çalışma sıcaklığı lehimin yüzeyini ısıttığı veya sınır yüzeyi difüzyonu ile sıvı faz oluşturduğu en düşük yüzey sıcaklığıdır. Çalışma sıcaklığı daima lehimin solidüs sıcaklığından daha yüksektir, yani katılaşma sıcaklığından veya ısıtmada ise ergimenin başladığı sıcaklıktan; çalışma sıcaklığı lehimin solidüs sıcaklığı altında olamaz. Fakat lehim ısıtma veya ergime sırasında bileşimini değiştirmemelidir. Örneğin, eğer aşırı ısıtma ile veya aşırı bekletme ile alaşım elemanlarının bazıları buharlaşırsa bu durum ortaya çıkabilir. Aynı şekilde eğer esas malzeme tarafından alaşımlandırılırsa yine lehim alaşımının bileşimi değişebilir. Sonuç olarak çalışma sıcaklığı uluslar arası tanımlanmış bir büyüklüktür.

3.4.2.2 Maksimum Lehim Sıcaklığı

Maksimum lehim sıcaklığının daha üstüne çıkılınca esas malzemenin veya lehimin etkin bir şekilde zarar gördüğü sıcaklıktır. Bu sıcaklık lehime, esas malzemeye, lehim yöntemine ve iş parçasının boyutlarına bağlıdır. Buna göre her lehim ısıtması öyle ayarlanmalı ki, lehim sıcaklığı çalışma sıcaklığı ile maksimum lehim sıcaklığı arasında bulunsun. Buradan yola çıkarak lehim için gerekli ısı memba seçimi de yapılır. Birçok durumda ısı memba yardımı ile belirli sıcaklık aralığı kontrol edilebilir. Bu lehim sıcaklığı bölgesi üstten ve alttan sınırlıdır: alttan çalışma sıcaklığı ile üstten ise maksimum lehim sıcaklığıdır.

3.4.3. Gümüş Esaslı Lehimler

Genel olarak gümüş lehimleri en az % 8 gümüş içerir. Çalışma sıcaklığı yaklaşık 600 ile 1000 °C arasındadır. Diğer lehim guruplarına göre karakteristik özellikleri şunlardır:

- a- Düşük ergime buna bağlı olarak düşük çalışma ve düşük lehimleme sıcaklığı,
- b- Birçok esas malzemeyi iyi ısıtabilmesi,
- c- Özgül birleştirme işlemlerine çok uyabilmesi,
- d- Yüksek mukavemet ve iyi şekil değiştirme kabiliyeti ve çeşitli ortamlarda korozyona dayanıklılık,

- e- İyi ısı ve elektriği iletkenliği,
- f- Hızlı lehimleme olanağı,
- g- Lehimleme yerinin rengine uyma olanağı,
- h- Lehimlemeden sonra minimum temizleme gerektirmesidir.

Mahsuru ise gümüş lehimlerin pahalı olmasıdır.

Gümüş lehimler alüminyum ve magnezyum dışında demir dışı ve demir esaslı metallerin ısıtma metodu kullanılarak lehimlenmesinde kullanılır. Gümüş lehimleri lehim yerine lehimleme işlemi sırasında sevk edilebileceği gibi önceden de ön şekillendirilmiş lehim metalleri olarak yerleştirilebilir. Bindirme tipi bağlantılarda mineral esaslı dekapanlar kullanıldığında 0,05-0,13 mm, gaz esaslı dekapanlar kullanıldığında 0,05 mm ye kadar aralık kullanılabilir. Dekapanlar genellikle gereklidir. Ancak kadmiyumsuz ve çinkosuz lehimlerle, soy veya indirgeyici atmosferde (kuru hidrojen, kuru argon, vakum v.b...) çoğu metal dekapansız olarak lehimlenebilir.

Gümüş lehimler, bazı istisnalar dışında bakır içerir. Bakırsız olan çok az sayıda gümüş lehimini “ gümüş, çinko, kadmiyum “ alaşım sistemi ile sınırlıdır. Bunun dışında gümüş lehimleri aşağıdaki gibi sınıflandırılır.

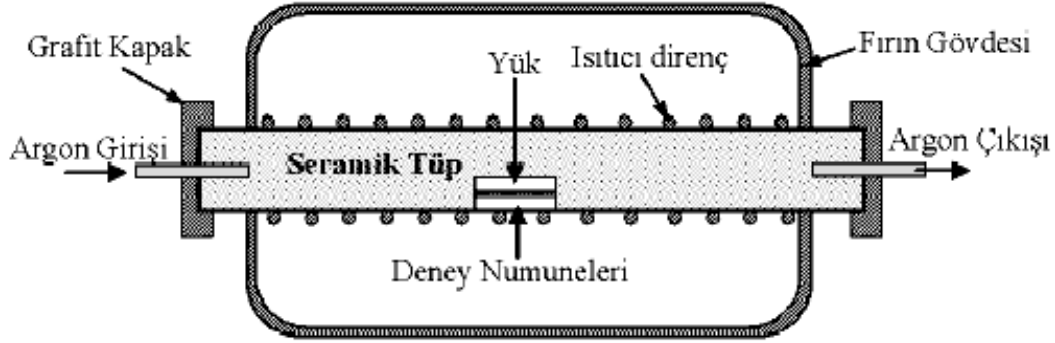
- a- Saf gümüş, gümüş-bakır ve diğer ikili gümüş lehimleri,
- b- Gümüş-bakır-çinko lehimleri,
- c- Dört veya daha fazla malzeme içeren gümüş-bakır-çinko lehimleri,
- d- Fosforlu gümüş lehimleri,

Gümüş 960,5 °C erir, saf olarak çok ender lehimcilikte kullanılır. Gümüş bakırla % 28 Cu oranında 779 °C eriyen bir ötektik oluşturur. Gümüş lehimlemesi bakır ve çinko eklenmesi ergime sıcaklığını düşürür ve özellikleri değiştirir.

3.5 DİFÜZYON KAYNAĞINDA KULLANILAN ÖZEL EKİPMANLAR

Difüzyon kaynağı ısı ve basınç uygulanmasını gerektirdiğinden, parçanın şekline ölçülerine ve istenen atmosfer tipiyle sıcaklığına bağlı olarak bir takım özel ekipmanlar gerektirir. Diğer kaynak yöntemlerinde yöntemine ait cihaz ve donanımlar benzer yapı

gösterirken difüzyon kaynağında bu durum söz konusu değildir. Her malzemeye göre parça büyüklüğü, parça sayısı, kaynak sıcaklığı veya kaynak atmosferleri için kullanılan cihaz farklıdır. Şekil 3.12’de (Kahraman, 2003) tarafından difüzyon kaynağında kullanılan fırın görülmektedir.



Şekil 3.12 Deneylerde kullanılan fırının şematik gösterimi (Kahraman, 2003).

Kaynak; vakumda, koruyucu gaz atmosferinde veya son zamanlarda tuz banyosunda yapılmaktadır. Koruyucu hücre, sabit bir fırın veya genellikle az karbonlu çelik ya da 304 paslanmaz çeliği gibi uygun bir alaşımdan yapılmış pota olabilir. Temas yüzeylerine uygulanan yük; gaz basıncı, hidrolik pres, hadde ruloları veya özel düzenlenmiş mekanik sıkma araçları vasıtası ile sağlanabilir. Parçaların bölgesel veya tamamen ısıtılması yüksek frekanslı indüksiyon ısıtma veya direkt direnç ısıtma ünitesiyle gerçekleştirilir.

3.6 UYGULAMA ŞEKİLLERİ VE ALANLARI

Difüzyon kaynağı, konstrüktif olarak 3 şekilde uygulanabilir. Bunlar alan bindirme ve konik birleştirmeler olup, alın ve bindirme şeklindeki birleştirmeleri düz yüzeylerde, konik birleştirmeler ise silindirik parçalara uygulanır. Silindirik yüzeylerde de bindirme şeklinde birleştirmeler yapılabilir Şekil 3.13’de görülmektedir. Ancak bu durumda parçalar arasında farklı genleşmeler sonucu oluşacak gerilmeler nedeniyle çalışma basıncını iyi ayarlamak gerekir. Ayrıca özel önlemler yada değişik biçimler vererek çok karışık birleştirme yüzeylerine sahip parçalar da kaynak yapılabilir Şekil 3.14’de görülmektedir.

Difüzyon kaynağının uygulama alanlarını şöyle sıralayabiliriz:

- 1- Havacılık ve uzay Sanayi,
- 2- Nükleer Sanayi,
- 3- Elektronik Sanayi,
- 4- Savunma Sanayi,
- 5- Genel Mühendislik

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

1. Yüzey kaplama,
2. Difüzyon kaynağıyla bir defada birleştirilmesi mümkün karmaşık şekilli ve içi boş yapı elemanları,
3. Döküm ve dövme parçalarda difüzyon kaynağı; dövmede girinti açılardan doğan problemlerin üstesinden gelmede kullanılabilir.

Difüzyon kaynağı, havacılık sanayinde daha ucuz, daha verimli, daha hafif ve dizaynı kolay parçaların üretimini mümkün kılarak, adeta bir çığır açmıştır. Havacılık sanayisi, difüzyon kaynağını, yüzey-yüzeye ya da kenar kenara temas eden bağlantıların üretiminde, genellikle dövme ve geleneksel kaynak usullerinin yerine kullanılmaktadır. (Yıldırım, 2001).

Amerika’da aralarında Northrop, Rockwell, Douglas Aircraft gibi şirketlerin bulunduğu 12 firma 1000 ile 5000 tonluk presler kullanılarak difüzyon kaynağı ve süper plastik şekillendirme ile Ti alaşımlarından F 15 füze yuvası, B1 bombardıman uçağı için patlama lülesi, T38 uçağı için ana iniş arka kapısı, rüzgâr kanatçıkları imal etmişler ve maliyette düşüş sağlamışlardır (İpek, 2003).

Difüzyon kaynağının silah sanayinde uygulamalarında amaç; diğer tekniklerden daha ekonomik ve entegre olarak üretilmeyen yapı ve elemanları üretmektir. Mesela, hidrojen mevcudiyetinin bir problem olduğu martenzitik yapıdaki kaynaklı bağlantılarda, geleneksel kaynak usulleri yerine difüzyon kaynağı uygulanmaktadır. Yine planör tipi uçakların

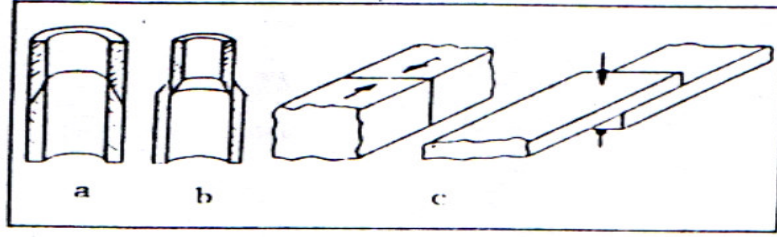
üretiminde kullanılan, çelik ve alüminyum difüzyon kaynağıyla birleştirilmesi, büyük kolaylık sağlamaktadır (Yılmaz, 1999).

Elektronik devre üreticileri, silikon parçadan entegre devre üretildikten sonra çipin bir alt tabakaya bağlanması, çip ve devrelerin elektrikli iletken malzemelerle bağlanması gibi işlerde bir çok birleşme tekniği kullanılmaktadır. Mikro elektronik sanayisinde, silikon çiplerin bakır veya Ni-Fe esaslı çerçevesine bağlanmasında ara tabaka olarak altın bir folyo kullanılarak, difüzyon kaynağı uygulanmaktadır.

Difüzyon kaynağı, plastik sanayide, ekstrüzyon hatlarında kullanılan basınca dayanıklı ve tam sızdırmaz, enjektörlerin üretiminde de kullanılmaktadır. Difüzyon kaynağının uygulama alanlarına, referans ve kalibrasyon bloklarının üretimi de girmiştir. Özellikle hassasiyetin ve mukavemetin sağlanması amacıyla farklı malzemeler birleştirilerek imal eden, bileşik malzemeler, bu konuda difüzyon kaynağını avantajlı kılmaktadır (Koçer, 1998).

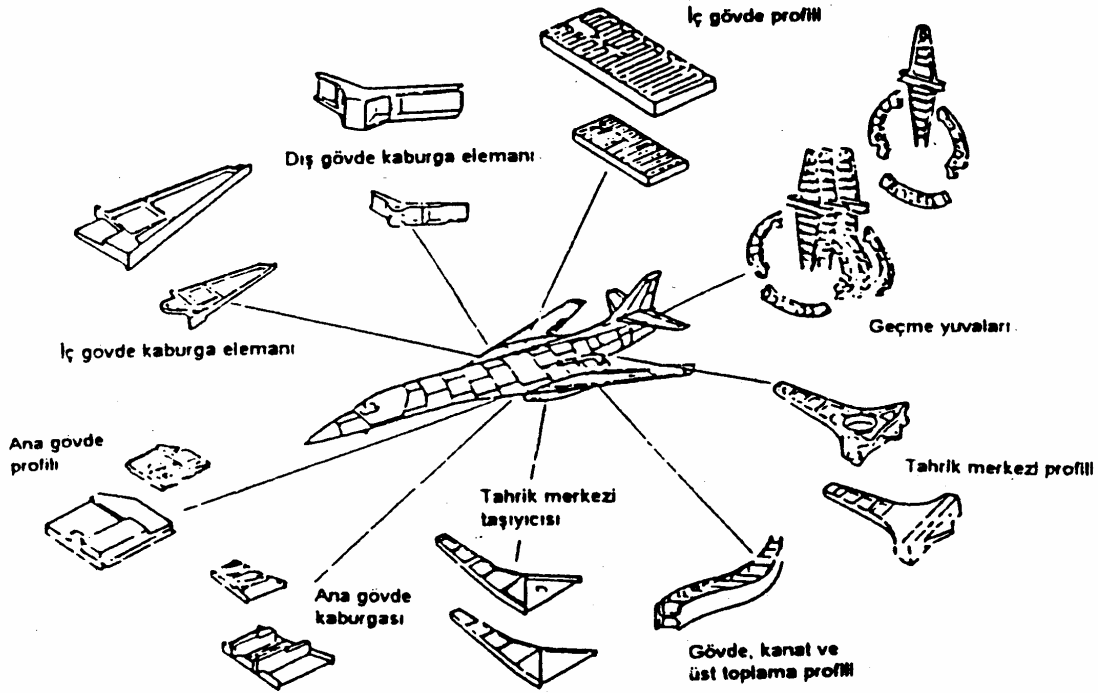
Aşağıdaki uygulamalar örnek olarak verilebilir:

- B-1 bombardıman uçakların da çeşitli parçalar
- F-104 uçak gövdelerinde şeklindeki destekler (Ti6Al-6V-2Sn)
- H-53 helikopterleri için rotor göbeği imali bu amaçla titanyum alaşımı (Ti6Al-4V) levhalar difüzyon kaynak yöntemi ile üst üste bindirirler.
- Boeing 747 uçağının iniş takımlarını destek kirişi
- JT9D-70/59 turbo fan için içi boş fan göbekleri
- TF30-P100 jet motorunun tutuşma kabini uzay mekiği için itme sistemi parçaları ve ısı yayıcı koruyucu panel.
- Kompozit malzemeler olarak A1/B Kompozit fan ve Ti/B kompozit paneller
- Minyatür ısıtıcılar (Ni-Cr), ısı değiştirgeçleri, jet motoru yakıt denetimleri için servovalfler.



A: Konik yüzeyler B: Silindirik yüzeyler C: Düz yüzeyler

Şekil 3.13 Difüzyon kaynak yönteminin uygulanış şekilleri.



Şekil 3.14 Uçak yapımında difüzyon kaynaklı yapı elemanları.

3.7 DİFÜZYON KAYNAK YÖNTEMİ İLE BİRLEŞTİRİLECEK MALZEMELER

Birbirinin aynı yada farklı birçok malzeme difüzyon kaynak yöntemi ile birleştirilebilmektedir. Bu yöntem en çok titanyum ve alaşımları ve nikel esaslı alaşımlarda uygulanmıştır. Karbon, bor, alüminyum oksit, silisyum karbür gibi malzemelerin destek olarak kullanıldığı metal matrisli kompozit malzemelerin birleştirilmesinde de kullanışlı bir yöntem olduğu kabul edilmektedir.

Benzer olmayan metal ve alaşımların da, kaynak sonrası birleşme bölgesinde kırılğan intermetalik faz oluşuyor yada yeniden erğime ile malzeme gevşiyorsa, yada dayanım azalıyorsa difüzyon kaynak yöntemi tercih edilmektedir. Alüminyum alaşımlarının difüzyon kaynağı, inatçı yüzey oksitleri yüzünden güçleşmektedir. Bununla beraber, birleşme bölgesinde yüksek sıcaklık ve büyük ölçekli deformasyon uygulanmasının, inatçı oksit tabakalarını kırdığı ve yüzey kaplama ya da ara tabaka kullanılması ile daha düşük basınç altında difüzyon kaynağı yapmanın kolaylaştığı tespit edilmiştir. Öte yandan, süperplastik alüminyum alaşımlarının ve Al-metal matrisli kompozitlerin. geliştirilmesi, yüksek mukavemetli difüzyon kaynağı ihtiyacını arttırmaktadır (Pakdil, 2001).

Ti alaşımları ile, paslanmaz çelik arasında yüksek mukavemetli katı hal difüzyon kaynağı gerçekleştirilmiştir. Ancak TiFe, TiFe₂, TiCr₂, Ti₂Ni gibi bileşiklerle ana metaller arasında intermetalik fazların oluşması sebebiyle bağlantının mukavemeti azalmaktadır (Yıldırım, 2001).

Çizelge 3.2’de Difüzyon kaynak yöntemine uygun metal çiftleri ve ara tabaka malzemeleri ve de Çizelge 3.3’de metal çiftleri için difüzyon kaynağı işlem parametreleri verilmiştir.

Çizelge 3.2 Difüzyon kaynak yöntemine uygun metal çiftleri ve ara tabaka malzemeleri.

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

Çizelge 3.3 Metal çiftleri için difüzyon kaynağı işlem parametreleri.

Metal 1	Metal 2	Arametal	Sıcaklık	Basınç (N/Mm²)	Zaman (Dak)
Bakır	Molibden	-	900	7.35	10
Bakır	Çelik	-	900	4.9	10
Bakır	Nikel	-	900	14.7	20
Bakır	Bakır	-	800–850	4.9–6,9	15–20
Titanyum	Nikel	-	800	9.8	10
Titanyum	Bakır	Molibden	950	4.9	30
Titanyum	Bakır	Niobyum	950	4.9	30
Titanyum	Bakır	-	800	4.9	30
Molibden	Molibden	Titanyum	915	6860	20
Molibden	Çelik	-	1200	4.9	10
Tugsten Tantal	Tugsten	Niobyum	925	6860	20
Niobyum	Tantal	Zirkonyum	870	-	-
Zırcaloy-2	Niobyum	Zirkonyum	870	-	-
Çelik	Zırcaloy-2	Bakır	1040	20.6	30–120
Berilyum	Aliminyum	Bakır	550	4.9	10
Bakır	Berilyum	63-Ag-27	800	-	30
Kovar	Bakır	Cu-10-In	-	-	-
Çelik	Kovar	-	1000–1110	24.5–10,6	20–25
Çelik	Dökmedemir	-	850–950	14.7	5–7
	Aliminyum	-	500	7.35	30

Çizelge 3.4 Difüzyon kaynağı yapılabilen malzeme kombinasyonları.

Ara Tabakasız																										
Ara Tabak a ile		Alüminyum	Alüminyum Alaşımları	Berilyum	Berilyum Alaşımları	Bakır	Bakır Alaşımları	Kobalt	Kobalt Alaşımları	Demir	Demir Alaşımları	Molibden	Molibden Alaşımları	Nikel	Nikel Alaşımları	Niobyum	Niobyum Alaşımları	Tantal	Tantal Alaşımları	Titanyum	Titanyum Alaşımları	Volfram	Volfram Alaşımları	Zirkonyum	Zirkonyum Alaşımları	Seramik
	Al	■				■								■						■	■			■	■	
	Al Alaş	■	■			■																			■	■
	Be			■																						
	Be Alaş																									
	Cu	■				▲				■	■	■		■			■				■	■	■			■
	Cu Alaş						▲				■						■				■					
	Kobalt																									
	Co Alaş								■						■											
	Demir									■	■	■		■								■				
	Fe Alaş		■							■	■	■		■		■						■		■		■
	Mo											■	■				■						■			
	Mo Alaş													▲												
	Nikel										■	■			▲							■	■			
	Ni Alaş						■									■										
	Niobyum											■					■									
	Nb Alaş																	▲								
	Tantal																■		■							
	Ta Alaş																			▲						
	Titan																				■					
	Ti Alaş	■					■	■			■	■										■				■
	Volfram																						■			
	W Alaş																									
	Zirkon																								▲	
	Zr Alaşım																									
	Seramik											■														

(■ kaynak edilebilir malzeme ve alaşımları göstermektedir).

3.8 TİTANYUM VE TİTANYUM ALAŞIMLARININ DİFÜZYON KAYNAĞI

Diğer malzemelere de uygulanmakla beraber, difüzyon kaynağının en çok uygulandığı metal, titanyumdur.

Titanyumun difüzyonla birleştirilmesine yatkın olmasının en önemli sebebi; kendi oksidini ve yüzey artıklarını, yüksek sıcaklıklarda basınç uygulandığında çözebilme kabiliyetinin olmasıdır. Titanyumda, katı çözelti içindeki oksijen sertliği artırıp, kararlı fazı oluşturarak kaynak edilebilirliği güçleştirmekte ve yüzeyde çatlakların oluşmasına yol açmaktadır. Bu sebeple, titanyumun difüzyonla birleştirilmesi sırasında koruyucu atmosfer ya da vakum altında çalışmak gerekir. Her iki çalışma ortamı, difüzyonla kaynak metodunun maliyetinin yüksek olmasının en büyük nedenlerindendir. Koruyucu gaz olarak argon kullanılması durumunda titanyumda çözünmeyen argonun arakesite hapis olarak, boşluk meydana getirmesin önlemek için, argonun kaynak bölgesinde hareketliliğinin sağlanması gerekir (Özdemir, 2003).

Bu alaşımların ısı işlem ile mukavemetleri arttırılamaz. Dolayısıyla sert lehimleme sıcaklığı, titanyumun mekanik özelliklerini etkilemez. Çizelge 3.5’de titanyum ve alaşımları için kullanılan elementleri hem ilave dolgu metal hem de ana metale difüze olurlar. Böylece ara yüzeyde bir reaksiyon tabakası meydana gelmektedir. Bu tabaka gevrek metaller arası fazlar içerir. Bakır, nikel alüminyum ve gümüş elementleri, titanyum ile birleşerek bu gevrek metaller arası fazların oluşmasını sağlar. Bu elementlerin miktarları oldukça düşük tutulursa, metaller arası faz miktarı azalır.

Titanyum ve alaşımlarının sert lehimlemesi koruyucu bir atmosfer içersinde fırın veya indiksiyon teknikleriyle yapılır. Lehimleme atmosferi olarak vakum kullanıldığında, basınç 13 MPa (10^{-4} torr)’dan düşük olmalıdır. Soy bir atmosfer kullanılacaksa, çığ noktası -55°C den daha düşük olmalıdır (Uzun, 2002).

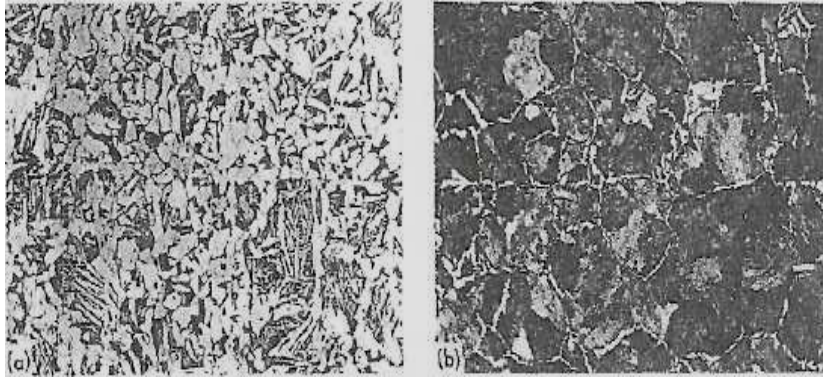
Çizelge 3.5 Titanyum alaşımlarının sert lehimlemesinde kullanılan ilave dolgu metalleri

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

Titanyumu difüzyon kaynağı açısından cazip kılan diğer bir tesir, yüzeyinin temizlemeye ihtiyaç göstermemesidir. Bununla beraber, ergime kaynağına yatkın olmaması, bu metalin difüzyon yoluyla birleştirmesini zorunlu kılmaktadır. Titanyumun, yüksek bir mukavemet - yoğunluk oranına, uzun bir yorulma ömrüne, iyi bir korozyon direnci ve yüksek sıcaklıkta mukavemet özelliklerine sahip olması, havacılık sanayisinde geniş bir tarzda kullanılmasını sonuç vermiştir. Kaynak esnasında nispeten yüksek sıcaklık uygulanmasının getirdiği maliyet artışı, bu sebeple, göz ardı edilmektedir (Koçer, 1998).

3.9 DEMİR ESASLI ALAŞIMLARIN DİFÜZYON KAYNAĞI

Çelikler ergitme kaynağı ile kolayca kaynak edilebildiklerinden difüzyon kaynağı bu konuda pek gelişmemiştir. Bununla birlikte, Rusya'daki bazı araştırmacılar difüzyon kaynağı ile yüksek ekonomik kazançlar ve düşük maliyetli çelik parçalar elde ettiklerini iddia etmektedirler. Düşük karbonlu çeliklerin ve % 0,45 C'lu çeliğin difüzyon kaynağı sırasındaki foto - mikro grafikleri Şekil 3.15 da gösterilmiştir.



a) Düşük karbonlu çelik numune(100 x), b) % 0,45 C ' tu çelik numune (125 x).

Şekil 3.15 Difüzyon kaynaklarının mikro yapısı.

Çelikler, genelde difüzyon kaynağına iyi uyum gösterirler. Bu nedenle parçaların karmaşık tasarımlarında veya büyük kaynak alanları ve kritik performans gerektiren montajlarda ekonomiklik gösterirler (Yılmaz, 1999).

3.10 KOMPOZİT MALZEMELERİN DİFÜZYON KAYNAĞI

Kompozitlerin imalatında difüzyon kaynağı ana işlemlerden birisidir. Titanyum ve alüminyum kompozitlerin matrisleri, difüzyon kaynağı ile üretilmiş BORSİC (Silisyum-karbür-bor kaplı fiberler) ile desteklenir. Halen hem parçacık hem de fiber takviyeli kompozitlerin difüzyon kaynağı üzerindeki çalışmalar sürdürülmektedir (Koçer, 1998).

3.11 DUBLEKS PASLANMAZ ÇELİKLERİN DİFÜZYON KAYNAĞI

Dubleks paslanmaz çelikler ferrit-östenit mikroyapısına sahip çelikler olarak bilinmektedir. Pratikte dubleks paslanmaz çelik terimi, içinde ferrit ve östenit fazlarının geniş oranda ve hacimsel olarak yaklaşık aynı değerde olduğu çelikler için kullanılmaktadır. Dubleks paslanmaz çelikler % 18 ile 25 krom içerirler. Ergime sıcaklıkları 1900°C'nin altındadır.

Dubleks paslanmaz çeliklerin östenitik paslanmaz çeliklerle karşılaştırılmasında; dubleks paslanmaz çeliklerin daha yüksek mekanik dayanım, çok daha iyi korozyon direnci ve Ni içeriğinin daha az olması nedeniyle daha ekonomik oldukları görülmektedir. Daha sonraları, gerilmeli korozyon nedeniyle östenitik paslanmaz çeliklerin uygun olmadığı ortamlarda dubleks paslanmaz çeliklerin kullanılabileceğinin farkına varılmıştır. Son zamanlarda, petrokimya ve deniz araçlarında klorürün sebep olduğu korozyona karşı yüksek alaşımlı dubleks paslanmaz çelikler kullanılmaktadır. Diğer bir gelişme de karbon oranının düşürülüp azot miktarının artırılmasıyla kaynak kabiliyetinin geliştirilmesidir (Koçer, 1998).

3.12 BENZER OLMAYAN MALZEMELERİN DİFÜZYON KAYNAĞI İLE BİRLEŞTİRİLMESİ

Difüzyon kaynak metodu, benzer malzemelerin birleştirilmesinde çok iyi sonuçlar verirken benzer olmayan malzemelerin birleştirilmesinde birtakım zorluklarla karşılaşmaktadır. Bu zorlulardan ilki kaynak işlemi sırasında birleşme bölgesinde gevrek intermetalik fazların oluşmasıdır. Birçok malzeme çiftinde bu fazlar oluştuğu için, normal ergitme kaynağı ile farklı metalik malzemelerin birleştirilmesi imkansız hale gelmektedir. Benzer olmayan malzemelerin difüzyonla birleştirilmesi işleminde ortaya çıkan diğer önemli sorun,

birleştirme işlemi sonunda kaynak bölgesinde meydana gelen kalıntı gerilmelerdir. Bunun nedeni, birleştirilen malzemelerin farklı ısıl genleşme miktarına sahip olmasıdır .

Benzer olmayan metal ve alaşımların birleştirilmesi işlemi sonunda, malzemelerin birleşme bölgelerinde kırılğan intermetalik faz oluşması, yeniden ergime neticesinde malzemede gevrekleşme gözlenmesi veya dayanımın azalması gibi sorunların ortaya çıkması kaynak kalitesini olumsuz etkilemektedir. Bu sorunların büyük oranda giderilmesi için alternatif çözüm birleştirme işleminin difüzyon kaynak yöntemi ile yapılmasıdır (Özdemir, 2003). Benzer bazı malzemelerin kesme mukavemetleri Çizelge 3.6’da verilmiştir.

Çizelge 3.6 benzer olmayan malzemelerin difüzyon kaynağı için parametreler ve kesme mukavemetleri (Torun, 2003)

Malzeme Kombinasyonu	Ara Tabaka	Sıcaklık °C	Süre, saat	Test Sıcaklığı °C	Kesme Mukavemeti MPa
Cb1Zr-Cu	Cb-1Zr	982	4	Oda Sıc.	40
Cb1Zr-Cu	Cb-1Zr	982	4	-73	49
Cu-316SS	Cu	982	2	Oda Sıc.	101
Cu-316SS	Cu	982	2	-73	110
Cb1Zr-316SS	Cb-1Zr	982	4	Oda Sıc.	74
Cb1Zr-316SS	Cb-1Zr	982	4	315	79

3.13 DİFÜZYON KAYNAĞININ DİĞER KAYNAK METOTLARIYLA KARŞILAŞTIRILMASI

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

Difüzyon kaynağını, diğer kaynak yöntemleriyle karşılaştırarak hangi durumda hangi kaynağın daha iyi olduğuna karar verilir.

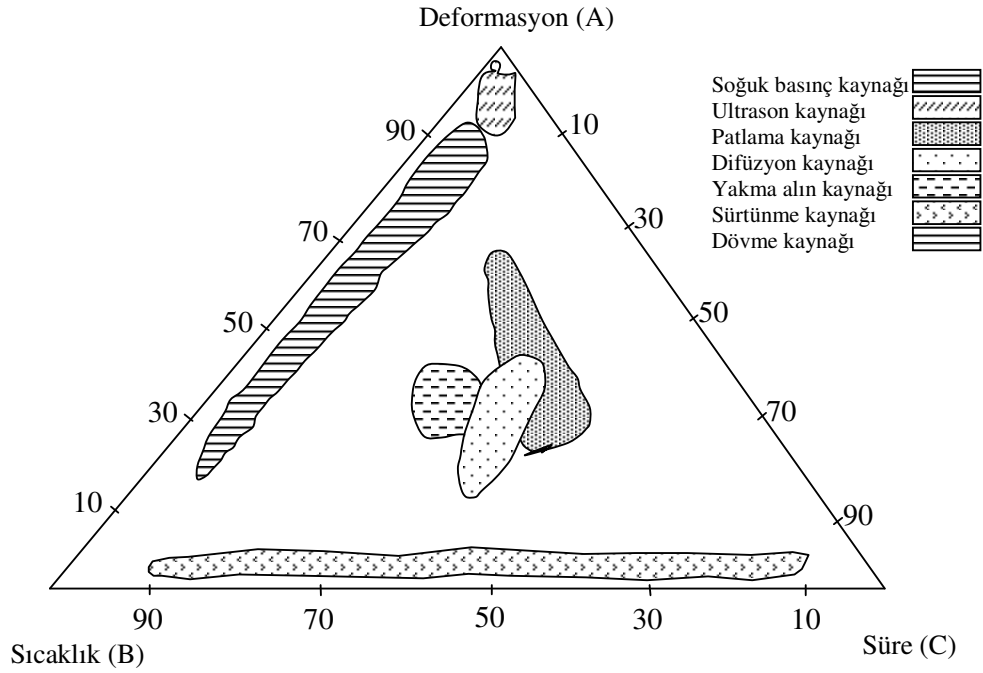
Ergitmeli kaynak yöntemleri ile difüzyon kaynağının mukayesesinde göze çarpan farklar şunlardır:

1. Ergitme kaynağında görülen deformasyonlar, ön ve son tavlama ihtiyaçları, bu teknikte görülmez.
2. Metalürjik açıdan uyumsuz, birbirinden tamamen farklı iki metal yada bir metalle, metal olmayan bir malzeme birleştirilebilir.
3. Birleşme süresi, bağlantı alanından bağımsızdır. Dolayısıyla bir defada geniş alanlı yada karmaşık şekilli bağlantılar birleştirilebilmektedir.
4. Birleşmede ana malzemelerde istenmeyen metalürjik yapılar oluşmaz. 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 itibariyle difüzyon kontrollü bir tekniktir.
- b. Seramiklerin kaynak tekniğini belirleyen en önemli faktör bu malzemelerin gevrekliğidir. Bu ise kaynakta deformasyon kullanımının mümkün olmadığı anlamına gelir. Seramiklerin kaynağında difüzyon kaynağı mümkün olan tek metottur. Bunların yanı sıra, bu yöntemin özel ortam ve aparat gerektirmesi, bu nedenle pahalı olması ve kaynak ara yüzeyin de metaller arası bileşiklerle, azda olsa, ara fazların oluşma ihtimali difüzyon kaynak yönteminin dezavantajları olarak sayılabilir.

Difüzyon kaynağı %100 birleşme veriminin sağlandığı bir katı hal süreci olup, bu birleştirme yönteminin ve diğer katı hal kaynak yöntemlerinin sıcaklık, deformasyon ve süre açısından karşılaştırılması Şekil 3.18'de verilmiştir.



Şekil 3.16 Difüzyon kaynak yönteminin ve diğer katı hal kaynak yöntemlerinin Sıcaklık , deformasyon ve süre açısından karşılaştırılması (Tuncel ve Topuz, 1996).

3.14 Difüzyon Kaynağı Teknikleri

Difüzyon kaynağı, günümüzde iki maksatla yapılmaktadır:

- Bilimsel çalışmalar için araştırma gayesiyle.
- Bu tekniği kullanarak, bir parçayı üretmek için.

Bunlardan birincisi ile teste tabi tutulabilecek difüzyon kaynağı tipleri eleştirilirken; ikincisi ile istenen elemanı elde etmek mümkün olur.

Birleştirilen malzemeler arasında ilave bir malzeme (levha) kullanılıp kullanılmamasına göre difüzyon kaynağı üçe ayrılabilir;

- Difüzyon lehimleme (Ara tabaka kullanılan),
 - Tek ara tabaka kullanılan difüzyonla lehimleme,
 - Birden çok ara tabaka kullanılan difüzyonla lehimleme,

2. Ani sıvı faz kaynağı
3. Direkt difüzyon kaynağı.

Difüzyonla lehimlemede, birleştirilecek yüzeyler arasına, ergime sıcaklığı ana malzemelerinkinden daha düşük, levha şeklinde bir ilave malzeme yerleştirilir. Çok katlı ara tabakalar, hem termal gerilmeyi, hem de diğer gerilmeleri giderici ek bir etki yede sahiptir. Ani sıvı faz kaynağı, ilk safhasında hızlı ısıtmayla, yüzeylerden biri ya da her ikisinin basınç altında, çok kısa bir süre için ergitilip hızla soğutulduğu bir difüzyon kaynağı olarak tanımlanmaktadır. Hem difüzyonla lehimleme, hem de difüzyon kaynağında, yüzeylerin çok hassas bir şekilde işlenmiş olmaları gerekirken, ani sıvı faz kaynağında 80 numara zımpara ya da hassas tornalama ile işlenmesinin yeterli olduğu bildirilmektedir. Difüzyonla lehimlemede ara tabaka olarak, herhangi bir kaplama (iyonik-elektro v.s.) da kullanılmaktadır (Yılmaz, 1999).

Difüzyon kaynağı, uygulanma ortamına göre;

- 1) Koruyucu gaz atmosferinde difüzyon kaynağı.
- 2) Vakum altında difüzyon kaynağı, olarak ikiye ayrılabilir.

Özetle, difüzyon kaynağı aşağıdaki faktörlere göre uygulanmaktadır:

1. Kaynak atmosferi; hava, soy gaz ve vakumdur.
2. Kaynak basıncı; mekanik, hidrolik, sabit yüklemeli ve diferansiyel termal genleşme şeklinde uygulanabilmektedir.
3. Isıtma; dirençle ısıtma yada endüksiyonla ısıtma şeklinde yapılabilmektedir.

BÖLÜM 4

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada titanyum ve düşük karbonlu çelik levhalar arabağlayıcı difüzyon kaynağı yöntemi ile birleştirilerek bağlantıların mikroyapıları ile mekanik özellikleri incelenmiştir. Birleştirme şartlarını belirlemek için yapılan deneylerde kullanılmak üzere 1,5 mm kalınlığında saf titanyum (ASTM Grade 2) ve düşük karbonlu sac çelik levhalar temin edilmiştir. Difüzyon kaynağı yöntemiyle titanyum ve düşük karbonlu çeliğin direkt olarak birleştirilmesi mümkün olmadığından uygun bir ara bağlayıcı olarak gümüş alaşımı kullanılmıştır. Titanyum, düşük karbonlu çelik ve arabağlayıcı gümüş levhanın kimyasal analizi sırasıyla Çizelge 4.1, Çizelge 4.2 ve Çizelge 4.3 'de verilmiştir.

Çizelge 4.1 Titanyumun kimyasal analizi (% ağırlık).

Element	ASTM Standardı	Dönüşüm sıcaklıkları (°C)		Alaşım elementleri (ağırlıkça %)				
		Alfa (α)	Beta (β)	N	C	H	Fe	O
Ağırlıkça (%)	Grade 2	913	890	0.03	0.10	0.015	0.30	0.25

Çizelge 4.2 Düşük karbonlu çeliğin kimyasal analizi (% ağırlık).

Element	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Al	Ti	Fe
Ağırlıkça (%)	0,0986	0,022	0,0307	0,015	0,0183	0,0363	0,0233	0,006	0,026	0,0586	0,001	Kalan

Çizelge 4.3 Arabağlayıcı gümüş alaşımının kimyasal analizi (% ağırlık).

Element	Ag	Cu	Zn	Fe	Ti
Ağırlıkça (%)	51,043	36,730	11,810	0,294	0,124

Bilindiği gibi test numunelerinin çıkarılması işlemi için, uygun bir kesme tekniği kullanılmalıdır. Aksi halde yanlış seçilmiş kesme tekniği, malzemenin içyapısında değişikliklere ya da bir takım kusurlara neden olabilir. Örneğin, oksit-asetilen ile kesme metodu kullanılarak numune almada malzemenin iç yapısı yüksek ısı girdisi dolayısıyla değişikliğe uğradığından, kırarak numune alma yöntemi ikizlenme ve makaslanma olayları oluştuğundan, testere ile keserek numune çıkarma ise sert malzemelerde soğuk sertleşme (pekleşme) gibi durumların söz konusu olması nedeniyle kesme işlemi laboratuvar ortamında silisyum karbürü taş ile yapılmıştır. Bu kesme yönteminde soğutma işlemi %10 bor yağı ile sağlanmıştır. Bu kesme yöntemiyle 40x10x1,5 mm ebatlarında titanyum ve düşük karbonlu sac levhalar kesilmiştir.

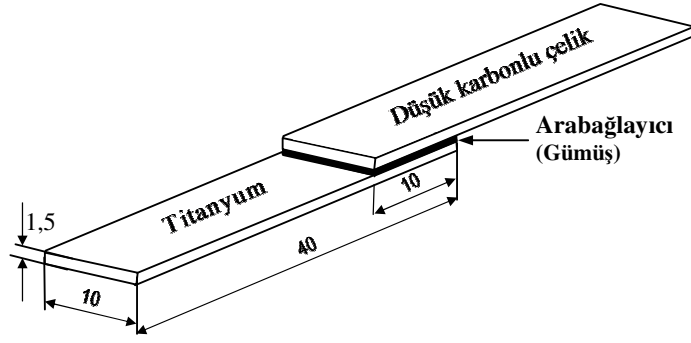
Numunelerin birleştirilecek olan yüzeylerine kademeli olarak 240, 400, 600, 800, 1000, 1200 grit silisyum karbür zımpara ile zımparalama yapılmıştır. Daha sonra saf su, aseton ve saf alkolle temizlenerek saç kurutma makinesi ile kurutulmuştur.

4.1 KAYNAKLARIN YAPILIŞI

Deneyisel çalışmalar Şekil 4.1’de görüntüsü verilen difüzyon kaynak cihazı ile ve Şekil 4.2’de şematik olarak gösterildiği gibi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.1 Difüzyon kaynak seti.



Şekil 4.2 Birleştirme işleminin şematik gösterimi.

Değişik sıcaklık ve süre kombinasyonları kullanılarak, aynı parametre seti ile, her parametre değeri için dört adet numune, difüzyon kaynağı ile birleştirilmiştir (Çizelge 4.1). Böylece tüm kaynaklar dört set halinde hazırlanmış, bir seti metalografik işlem için diğer üç set ise kesme-makaslama testine tabi tutulmuştur. Deneysel çalışmalar, ZKÜ Karabük Teknik Eğitim Fakültesi, Metal Eğitimi Bölümü Laboratuvarları (difüzyon kaynak cihazı, mikrosertlik ölçme cihazı ve çekme cihazı) ile Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Metal Eğitimi Bölümü Laboratuvarlarında (SEM ve EDS çalışmaları) gerçekleştirilmiştir.

Difüzyon kaynağı ile birleştirilecek numuneler üst üste, profilden bakıldığında bir z harfi oluşturacak şekilde yerleştirilmiştir. Kaynak işlemine başlamadan önce birleştirme işlemi yapmak için zımparalanmış numuneler son kez sırayla düşük karbonlu çelik, gümüş ve titanyum 1200 grit silisyum karbür zımpara ile zımparalama yapılmıştır. Daha sonra sırayla saf su, aseton ve saf alkolle temizlenerek saç kurutma makinesi ile kurutulmuştur. Bu zımparalama işlemini yapmadaki amaç özellikle Ti ve Ag yüzeyindeki oksit film tabakasını en aza indirmek için yapılmıştır. Hazırlanan numunelerin difüzyon kaynak cihazına yerleştirilmesi aşamasında, kaymayı engellemek amacı ile gerekli önlemler alınmıştır. Zımpara işlemi bittikten sonra numune mümkün olduğunca en kısa süre içerisinde kaynak cihazına yerleştirilmesine özen gösterilmiştir.

Kaynak parametrelerini belirlemek için değişik parametrelerde ön hazırlık deneyleri yapılmış ve elde edilen birleştirmelerin mukavemetleri değerlendirilerek deneyler sonucunda 700-850 °C sıcaklık aralığı ve basınç olarak da 3 MPa seçilmiştir.

Kaynak esnasında kullanılacak parametre değerlerine göre, difüzyon kaynak cihazı programlanmıştır. Bu programlama işlemi sayesinde hassas bir şekilde ısıtma ve soğutma yapılmıştır. Kaynak esnasında istenilen değerde basınç ve koruyucu ortam sağlanmıştır. Numuneler üzerine 3 MPa'luk bir basınç uygulanmış, daha sonra başlangıçta 5 dk kadar kaynak ortamına 1 bar argon gazı verilmiş ve daha sonra bu oran kontrol edilebilecek minimum değere indirilmiştir. Bu işlemden sonra sıcaklık istenilen değere getirilerek kontrol altında beklenmiştir. Numuneler, istenilen sıcaklık değerlerine ulaştığında, belirli bir süre bekletildikten (30, 60, 90 ve 120 dk) sonra basınçta herhangi bir değişiklik yapılmaksızın sıcaklık, 20°C/dk soğutma hızı ile oda sıcaklığına düşürülmüştür. Kaynak esnasındaki gaz koruması fırın sıcaklığı oda sıcaklığına düşene kadar devam ettirilmiştir.

Difüzyon kaynak yönteminde değişik kaynak parametrelerinin kullanıldığı deneysel çalışmalarda difüzyon sıcaklığının 700°C seçildiği ve süre olarak 30 ve 60 dakikanın kullanıldığı durumlarda birleşme elde edilemez iken diğer bütün şartlarda olumlu sonuçlar alınmıştır.

Çizelge 4.4 Deneylerde kullanılan kaynak parametreleri.

Malzeme	Kaynak Parametreleri		Süre (dakika)	Kaynak ortamı
	Sıcaklık (°C)	Basınç (MPa)		
Ti-Ag-Fe	700	3	30	Argon
Ti-Ag-Fe	700		60	
Ti-Ag-Fe	700		90	
Ti-Ag-Fe	700		120	
Ti-Ag-Fe	750	3	30	Argon
Ti-Ag-Fe	750		60	
Ti-Ag-Fe	750		90	
Ti-Ag-Fe	750		120	
Ti-Ag-Fe	800	3	30	Argon
Ti-Ag-Fe	800		60	
Ti-Ag-Fe	800		90	
Ti-Ag-Fe	800		120	
Ti-Ag-Fe	850	3	30	Argon
Ti-Ag-Fe	850		60	
Ti-Ag-Fe	850		90	
Ti-Ag-Fe	850		120	

4.2 KESME-MAKASLAMA TESTİ

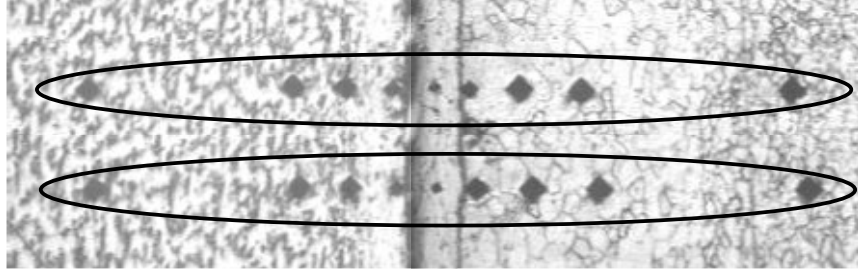
Optimum kaynak parametrelerini belirlemek için değişik kaynak parametreleri kullanılarak difüzyonla birleştirilmiş kaynaklı numuneler, ZKÜ Karabük Teknik Eęitim Fakóltesi Metal Eęitimi Laboratuvarı'nda SHIMADZU kesme-makaslama testine tabi tutulmuşlardır (şekil 4.3). Test esnasında kesme hızı 0,5 mm/dk ve kesme mesafesi 40 mm olarak sečilmiřtir. kesme-makaslama testi her bir parametreden üç adet yapılmış ve ortalamaları değerlendirilmiştir.



şekil 4.3 Kesme-makaslamanın yapıldığı test cihazı.

4.3 MİKROSERTLİK TESTİ

Mikrosertlik testi için ayrılan kaynaklı numuneler bakalite alınmışlar ve metalografik kurallara göre hazırlanarak hazır hale getirilmişlerdir. Kaynaklı numunelerin mikrosertlikleri şekil 4.4'de şematik olarak gösterilen doğrultu boyunca yapılmış ve her bir numuneden en az üç sertlik alınıp ortalamaları değerlendirilmiştir. Sertlik ölçümlerinde SHIMADZU Mikrosertlik ölçüm cihazı ve 200 N'luk yük kullanılmıştır (şekil 4.5). Ölçüm işlemi başta arabağlayıcıdan olmak üzere, kaynak merkezinden başlayarak her iki metale doğru sırayla 25, 40, 40 ve 200 µm aralıklarla yapılmıştır.



Şekil 4.4 Mikrosertlik ölçüm yapılan bölgeler ve ölçüm izleri.



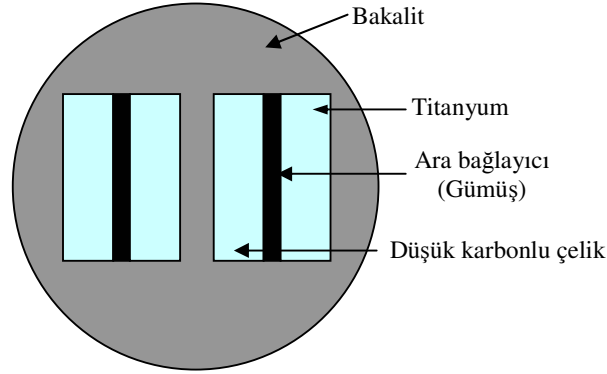
Şekil 4.5 Mikrosertlik ölçüm cihazı.

4.4 METALOGRAFİK ÇALIŞMALAR

Metalografi; optik mikroskop, elektron mikroskobu ve X ışınları gibi fiziksel tekniklerle malzemelerin içyapılarının incelenmesidir. Üzerinde metalografik muayene yapılacak olan kaynak numuneleri, öncelikle laboratuvar ortamında kaynak merkezinden ikişer adet silisyum karbürlü taş ile kesilmiştir. Kesilen bu iki numune Şekil 4.6’da gösterildiği gibi bakalite alınmışlardır. Bakalite alma işlemi, numuneler ufak olduklarından elle tutup parlatılmalarını kolaylaştırmak amacı ile yapılmıştır. Bakalite alınan numuneler yüzeylerinin çizilmemesi için su zımparası ile zımparalanmışlardır. Zımparalama işlemi sırasıyla olmak üzere 180, 240, 400, 600, 800, 1000 ve 1200 gritlik silisyum karbür su zımparası ile ve de her zımparalama arasında 90^0 çevrilerek tamamlanmıştır. Zımparalama işlemi biten numuneler malzeme yüzeyini hazırlamada son basamak olan parlatma işlemine tabi tutulmuşlardır. Parlatma işleminde amaç düzgün yüzeyli, çizik olmayan ve ayna gibi bir görünüm sağlamaktır. Parlatma işlemi, dönen bir disk üzerine yerleştirilmiş 3

μm bir keçe ile gerçekleştirilmiş ve bu keçe üzerine de 3 μm 'lik elmas pasta emdirilmiştir. Parlatma işlemleri esnasında 600 dev/dk hız kullanılmış olup, her bir numune 5 dakika süreyle disk üzerinde yük uygulanmaksızın tutulmuştur.

Parlatma işlemi tamamlanan numuneler mikro yapılarının görülebilmesi için dağlama işlemine tabi tutulmuşlardır. Dağlama işleminde amaç tane sınırları ve arayüzeyi daha iyi görebilmektir. Bu amaç ile düşük karbonlu çelik için 2 ml nitrik asit 98 ml metanol ve titanyum için % 73 H_2O - % 16 HF - % 6 HNO_3 - % 5 HCl karışımı kimyasal dağlayıcılar hazırlanmış ve hazırlanan dağlayıcılar malzeme yüzeylerine bölgesel olarak damlatılmıştır.



Şekil 4.6 Ti-Ag-Fe bakalite alınış şekli.

Mikroyapı için hazırlanan numuneler bilgisayara görüntü aktarılabilen 1000 büyütme kapasiteli NIKON Epiphot 200 marka optik mikroskop ile görüntülenmişlerdir. Görüntülerin, birleştirilmiş numunelerin ve arayüzeylerinin karakteristik özelliklerini tam olarak yansıtan bölgeden yapılmasına özen gösterilmiştir. SEM çalışmaları Gazi Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi'nde JEOL 6060 LV marka taramalı elektron mikroskobu ile gerçekleştirilmiştir. Ayrıca aynı cihaza (SEM) monte edilmiş XRF sistemi EDS ünitesinde element analizleri yapılmıştır. Çalışmalar, birleşme arayüzeyi merkezinden (arabağlayıcı merkezi) ve arayüzeyden her iki yönde olmak üzere 25, 40 ve 40 μm aralıklarla yapılmıştır. Dolayısıyla bir numune üzerinden toplam beş adet bölgesel alan analizi ve bir adet çizgi boyunca ağırlıkça element analizi yapılmıştır. SEM ve EDS çalışmaları 850 °C'de tüm sürelerde birleştirilen tüm numunelere uygulanırken, diğer sıcaklıklarda sadece en düşük ve en yüksek parametrelerde birleştirilmiş numunelere uygulanmıştır.

BÖLÜM 5

DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Difüzyon kaynağı ile değişik süre ve sıcaklıklarda gerçekleştirilen kaynak işlemleri sonucu 30 ve 60 dakika süre ile 700 °C’de kaynak işlemine tabi tutulan numunelerde birleşme gerçekleşmezken, diğer bütün şartlar için olumlu sonuçlar alınmıştır. 700 °C’de 30 ve 60 dakika süre ile kaynak yapılan numunelerde birleşmenin olmamasına sebep olarak hem sıcaklığın düşük olması hem de sürenin az olması gösterilebilir. Nitekim süre 90 dakikaya çıkarıldığında veya süre sabit kalıp sıcaklık 750 °C’ye çıkarıldığında kaynak işlemi gerçekleşmektedir. Bilindiği gibi bu kaynak yönteminde atomların yayınabilmesi için yeterli sıcaklık, süre ve basınç ihtiyacı vardır. Süre, bağımlı bir işlem parametresi olup, sıcaklık, basınç ve birleştirme türü ile ilişkilidir. Her malzeme yada malzeme çifti için gerekli süre birkaç saniyeden, birkaç saate kadar değişebilir. Kaynak süresinin uzun olması kaynak ekonomisi açısından bir dezavantaj oluştururken, boşlukların oluşumunu, bileşimin değişimini ve kırılğan intermetalik bileşiklerin oluşumunu teşvik etmesi gibi bağlantının mekanik özelliklerini bozan olumsuzluklara da neden olmaktadır (Kahraman, 2007).

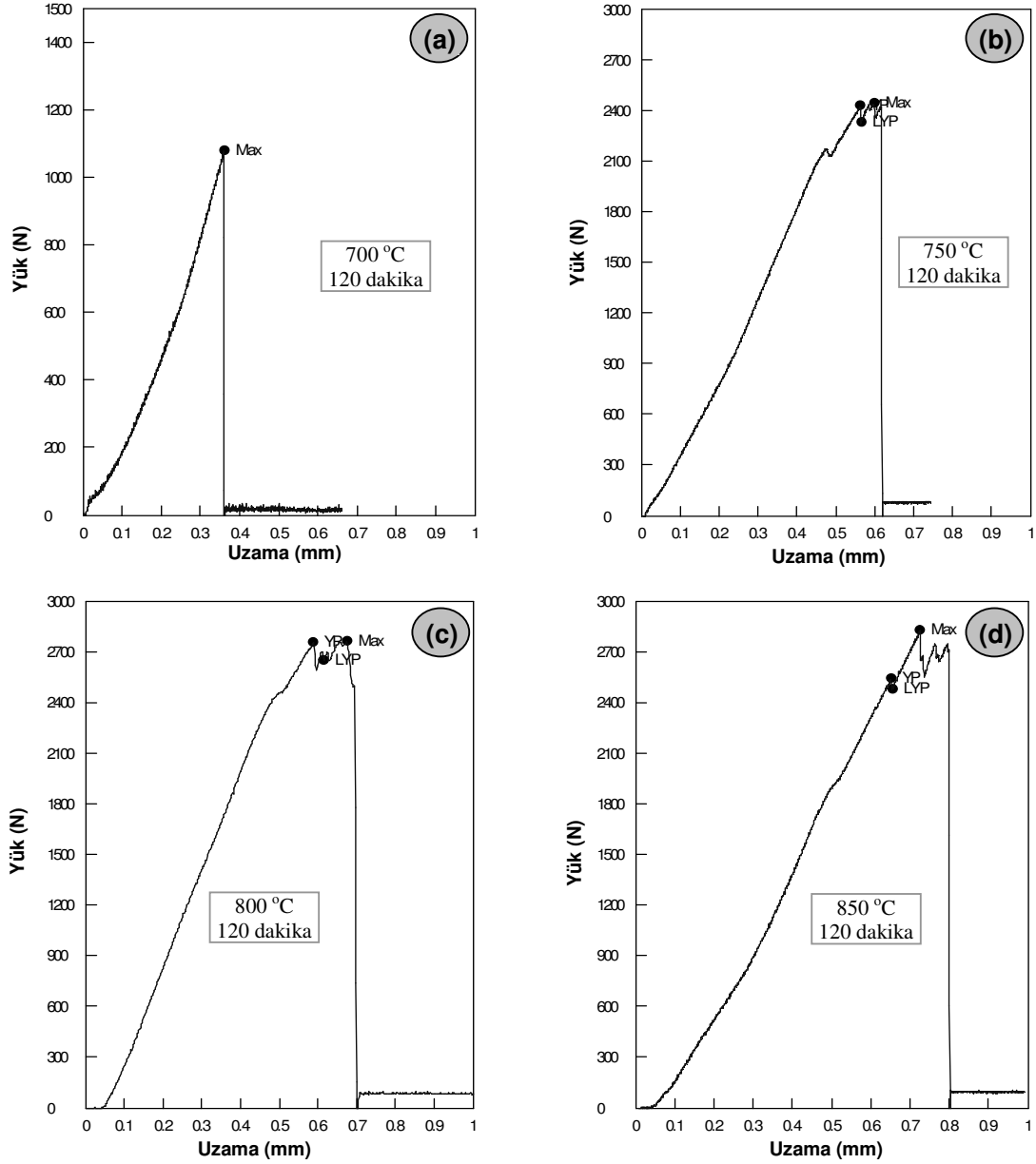
Bu çalışma sonucu elde edilen veriler; kesme-makaslama test sonuçları, sertlik test sonuçları, mikroyapı inceleme sonuçları ve EDS sonuçları olmak üzere dört başlık altında değerlendirilmiştir. Ayrıca deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen veriler, daha önce yapılmış çalışmalarla karşılaştırılmalı olarak değerlendirilerek tartışılmıştır.

5.1 KESME-MAKASLAMA TESTİ

Difüzyon kaynağı yöntemi ile değişik kaynak parametrelerinin (sıcaklık ve süre) kullanılarak yapılan birleştirmelerden elde edilen kesme-makaslama test sonuçlarının tamamı Çizelge 5.1’de verilmiştir. Ayrıca Şekil 5.1’de 120 dakika süre ile değişik sıcaklıklarda elde edilmiş kesme-makaslama grafikleri (700 °C, 750 °C, 800 °C ve 850 °C)

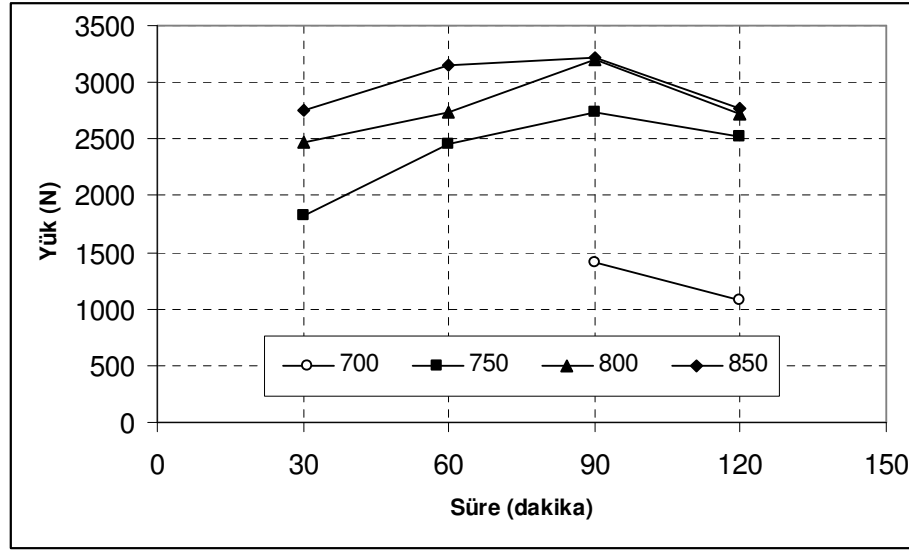
ile Şekil 5.2’de de test sonuçlarının ortalamaları kıyaslamaların kolay yapılabilmesi için grafik halinde verilmiştir.

Kesme-makaslama deneyleri sonunda, kopma düşük karbonlu çelik-gümüş arayüzeyinden gerçekleştiği görülmüştür. Ayrıca kopma sonrası test parçalarında herhangi bir kesit daralmasının olmadığı ve parçaların deney öncesi formunu aynen koruduğu gözlenmiştir.



Şekil 5.1 120 dakika süre ile birleştirilmiş kesme -makaslama test grafikleri (a) 700 °C, (b) 750 °C, (c) 800 °C ve (d) 850 °C.

Şekil 5.1'deki kesme grafikleri incelendiğinde artan sıcaklığa bağlı olarak kopmaya kadar olan % uzama miktarının arttığı görülmektedir. 700 °C'de uzama miktarı % 0,4 iken bu değer 850 °C'de % 8'e çıkmıştır. Böylece artan sıcaklık ve süre ile birlikte kaynaklı numunelerdeki % uzama miktarlarının kesme-makaslama mukavemetine bağlı olarak arttığı tespit edilmiştir.



Şekil 5.2 Kesme-makaslama deney sonuçları.

Bu test sonuçlarına göre, değişen kaynak parametrelerinin kaynak performansını nasıl etkilediği tespit edilmiştir. 700 °C'de 3 MPa basınç altında 90 dk'da kesme-makaslama dayanımı 1077,9 N iken, 120 dk' da kesme-makaslama dayanımı çizelge 5.2.'de de görüldüğü üzere 1105 N'a düşmektedir. Aynı şekilde 750 °C, 800 °C ve 850 °C'de 3 MPa basınç altında arabağlayıcı difüzyon kaynağı yöntemiyle kaynak yapılan numuneler incelendiğinde 30, 60 ve 90 dakikaya kadar kesme-makaslama dayanımı düzenli bir şekilde artış göstermektedir. Fakat 90 dk'dan sonra Çizelge 5.1.'de de görüldüğü üzere dayanım düşmektedir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda sıcaklık artışına bağlı olarak kesme-makaslama dayanımının arttığı tespit edilmiştir. Ancak sıcaklık artışına bağlı olarak mukavemetin artışındaki hızın azaldığı Şekil 5.2'de açıkça görülmektedir. 800 °C'de 90 dakika süre ile yapılan numunedeki mukavemet 3194,7 N iken, sıcaklık 850 °C'ye çıktığında aynı sürede mukavemet 3222,8 N olarak ölçülmüştür. Burada mukavemet hızının azalmasına sebep olarak, yüksek sıcaklıklarda oluşmaya başlayan intermetalik oluşumu ve tane irileşmesinin etkisinin olabileceği düşünülmektedir. Bilindiği gibi intermetalik oluşumu ve tane irileşmesi malzemelerin mukavemetini düşüren bir olgudur.

Çizelge 5.1 Difüzyon kaynaklı (Ti-Ag-Fe) deney numunelerinin kopma dayanımı.

Sıcaklık (°C)	Süre (dk)	Kopma Yüğü (N)	Ortalama kopma Yüğü (N)
700	30	-	Birleşme gerçekleşmedi
		-	
		-	
	60	-	Birleşme gerçekleşmedi
		-	
		-	
	90	1426,5	1415,7
		1364,9	
		1456,6	
	120	1023,8	1077,9
		1124,6	
		1085,4	
750	30	1285,9	1828,1
		1862,5	
		2335,9	
	60	2585,9	2460,6
		2332,8	
		2463,2	
	90	2765,6	2733,3
		2559,3	
		2875	
	120	2831,2	2515,3
		2256,2	
		2458,6	
800	30	2403,1	2470,8
		2542,1	
		2467,4	
	60	2754,6	2731,2
		2995,3	
		2443,7	
	90	3428,1	3194,7
		3234,3	
		2921,8	
	120	2930	2712,3
		2522,1	
		2684,8	
850	30	2595,3	2750,6
		2867,1	
		2789,5	
	60	2962,5	3146,6
		3318,7	
		3158,7	
	90	3004,6	3222,8
		3457,8	
		3206,2	
	120	2365,6	2768,8
		3145,3	
		2795,7	

Birleştirilen numunelere uygulanan kesme -makaslama test sonuçlarına göre en yüksek kesme-makaslama dayanımı 850 °C’de 90 dakika sürede 3222,8 N olarak tespit edilmiştir. En düşük dayanım ise 700 °C’de 120 dakika sürede gerçekleştirilmiş birleştirmelerden (1077,9 N) elde edilmiştir. Grafik dikkatli bir şekilde incelendiğinde artan sıcaklıkla beraber kesme -makaslama dayanımının arttığı ancak artan süre ile beraber dayanımın bir noktaya kadar arttığı (90 dakika) ve bundan sonraki sürede (120 dakika) bütün sıcaklıklarda dayanımın düştüğü görülmüştür. (Peng et al.,1999) 14x30 mm ebatlarındaki titanyum (Ti-6Al-4V) ve paslanmaz çelik (18Cr10Ni) malzemeleri 30 µm kalınlığında saf nikel arabacı kullanılarak değişik sıcaklık ve sürelerde birleştirmişlerdir. Çalışma sonucunda artan difüzyon sıcaklığı ile birlikte kesme dayanımının belirli bir noktaya kadar arttığı, ancak sıcaklığın daha da yükselmesi durumunda intermetalik bileşiklerinin oluşumundan dolayı dayanımın azaldığını belirtmişlerdir. Aynı şekilde artan difüzyon süresi ile birlikte dayanımın bir noktaya kadar arttığı ve bir noktadan sonra azaldığını belirtmişlerdir.

(Kundu et al., 2005) ϕ 15*30 mm ebatlarındaki saf titanyum ile 304 paslanmaz çelik malzemeleri 300 µm kalınlığında bakır folyo (% 99,95 saflıkta) kullanarak difüzyon kaynağı ile birleştirmişlerdir. Kaynak işlemlerini 3 MPa basınç altında ve 850, 900 ve 950 °C’de gerçekleştirmişler ve birleştirmeler üzerinde metalografi çalışması, X ışınları ve kesme testi uygulamışlardır. Çalışmalar sonucunda, maksimum dayanımın 900 °C’de elde edildiğini daha yüksek sıcaklıklarda kırılan ara bileşiklerin oluştuğunu belirtmişlerdir.

(Ghosh et al., 2003) saf titanyum ve 304 paslanmaz çelik çiftlerini 3 MPa basınç altında 2 saat süre ile ve de 850, 900 ve 950 °C’ de arabacı kullanmaksızın vakum altında birleştirmişler ve en yüksek mukavemetin (222 MPa) 850 °C’ de yapılan birleştirmelerde olduğunu, daha yüksek sıcaklıklarda aşırı tane büyümesi ve ara bileşik oluşumu nedeniyle mukavemetin azaldığını belirtmişlerdir.

(Ghosh and Chatterjee, 2005) saf titanyum ve 304 paslanmaz çelik çiftlerini 3 MPa basınç altında 950 °C’ de 30, 60, 90 ve 120 dakika süre ile vakum altında birleştirmişler ve en yüksek mukavemetin (225 MPa) 30 dakika sürede yapılan birleştirmelerde olduğunu belirtmişlerdir. Süre 60 dakikaya çıktığında mukavemetin 183 MPa’ya düştüğünü ve de sürenin daha da artması durumunda dayanımın 129 MPa’ya düştüğünü belirtmişlerdir. Bu

keskin düşüşün sebebinin de arabileşik büyümesi ve boşlukların oluşumundan kaynaklandığını rapor etmişlerdir.

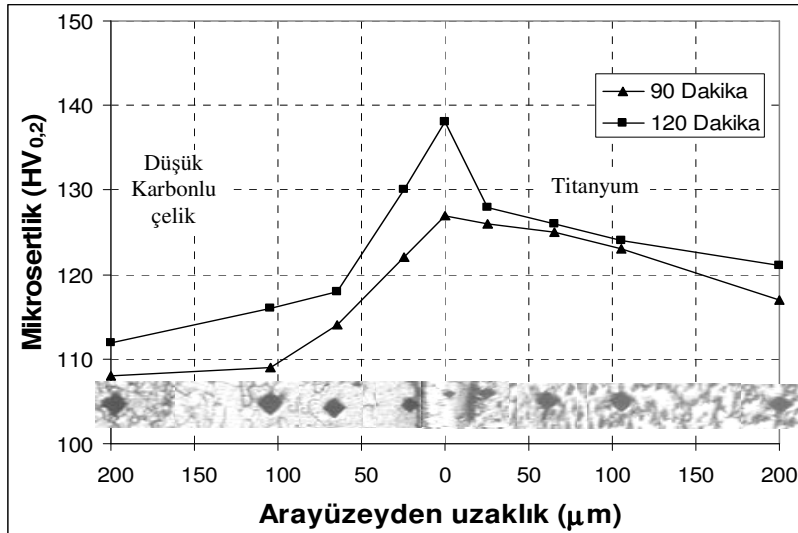
Benzer çalışmada (Kurt ve Somunkıran, 2006) ve (Liming et al., 2001) farklı metalik malzemeleri değişik difüzyon sıcaklıklarında birleştirmişler ve artan difüzyon sıcaklığı ile kesme dayanımının arttığını belirtmişlerdir.

5.2 SERTLİK TESTİ

Difüzyon kaynağı yöntemi ile değişik kaynak parametrelerinin (sıcaklık ve süre) kullanılarak yapılan birleştirmelerden elde edilen sertlik test sonuçları Şekil 5.3-Şekil 5.6’da verilmiştir. Ayrıca Çizelge 5.2’de kaynak öncesi deneysel çalışmalarda kullanılan malzemelerden ölçülen sertlik değerleri verilmiştir.

Çizelge 5.2 Kaynak öncesi malzemelerden ölçülen sertlik değerleri ($HV_{0.2}$).

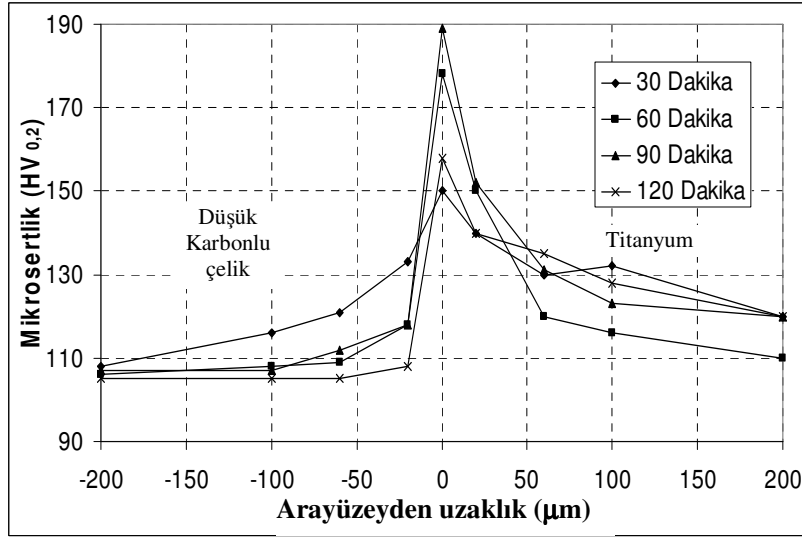
Düşük karbonlu çelik	Titanyum	Gümüş (arabağlayıcı)
122	132	268



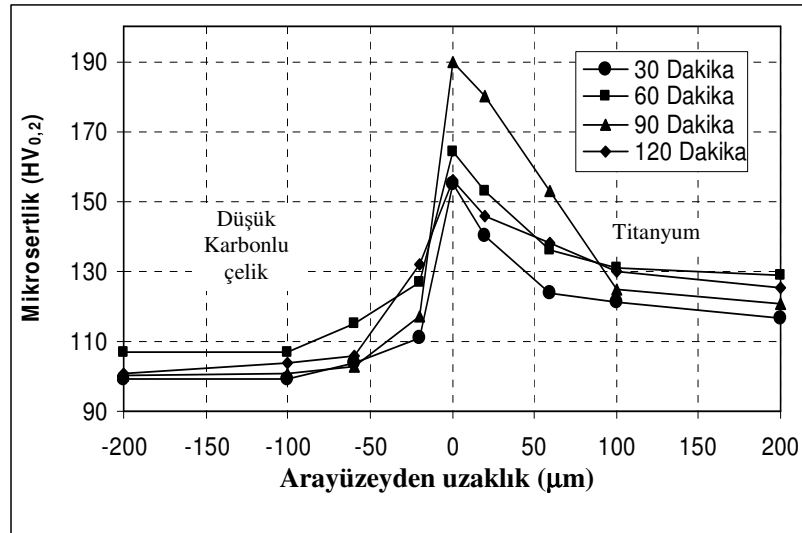
Şekil 5.3 700 °C’de birleştirilen numunelerden elde edilen sertlik değerleri.

Şekil 5.3’de 700 °C’de 90 ve 120 dakika süre ile difüzyon kaynağı işlemine tabi tutulan kaynaklı numunelerden elde edilmiş mikrosertlik grafiği verilmiştir. Şekil incelendiğinde

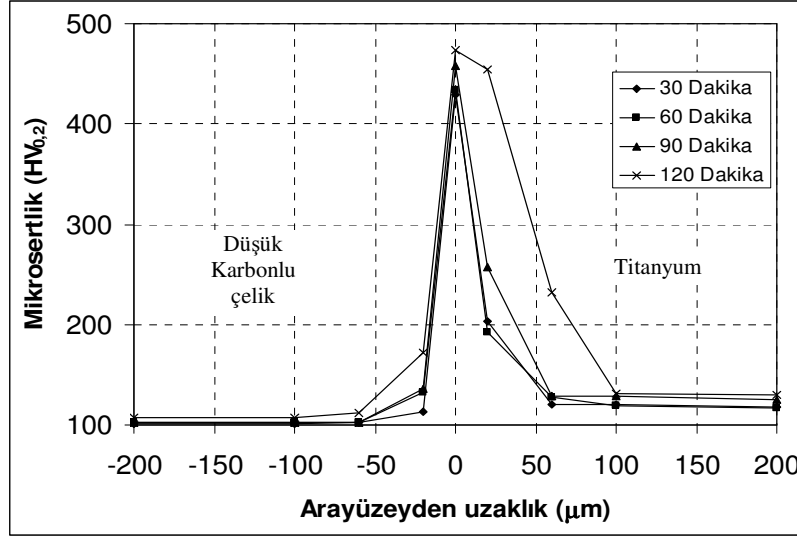
en yüksek sertliğin arabağlayıcı merkezinde olduğu ve de her iki arayüzeyden uzaklaştıkça sertliğin giderek azaldığı görülmektedir.



Şekil 5.4 750 °C’de birleştirilen numunelerden elde edilen sertlik değerleri.



Şekil 5.5 800 °C’de birleştirilen numunelerden elde edilen sertlik değerleri.



Şekil 5.6 850 °C’de birleştirilen numunelerden elde edilen sertlik değerleri.

Grafikler genel olarak değerlendirildiğinde, bütün numunelerde en yüksek sertlik değerinin arabağlayıcı malzemede olduğu ve ara bağlayıcının her iki tarafındaki sertlik değerlerinin giderek azaldığı tespit edilmiştir. Ayrıca 700, 750 ve 800 °C’de birleştirilen kaynaklı numunelerden ölçülen sertlik değerlerinin (titanyum, düşük karbonlu çelik ve ara bağlayıcı gümüş) çizelge 5.2’de kaynak işlemine tabi tutulmamış orijinal numunelerden ölçülen sertlik değerlerinden daha düşük olduğu ancak 850 °C’de birleştirilen numunelerde ise sertlik değerinin sadece arabağlayıcıda olmak üzere çok yükseldiği (yaklaşık 450 HV) tespit edilmiştir. Kaynakla birleştirilen ana malzemelerdeki (titanyum ve düşük karbonlu çelik) kaynak sonrasındaki sertlik değerlerindeki düşüşün sebebi, orijinal malzemelerde var olan yapı kusurlarının (dislokasyon vb.) kaynak sırasında toparlanması ve azalması olarak gösterilebilir. Ayrıca bu sertlik artışına sebep olarak, kaynak esnasında malzemelere uygulanan yüksek sıcaklık ve süreden dolayı, her iki malzemede meydana gelen tane irileşmesi gösterilebilir.

Kaynaklı numunelerden ölçülen sertlik değerleri kıyaslandığında, sıcaklık artışına bağlı olarak sertlik değerlerinin arttığı, ancak süreye bağlı olarak sertlik değerlerinin arttığı ve/veya azaldığına dair bir sonuca rastlanılmamıştır. Kaynaklı numunelerden ölçülen sertlik değerlerinin, sıcaklığın artışı ve arayüzeydeki sertlik artışına sebep olarak arabileşiklerin oluşum ihtimali gösterilebilir.

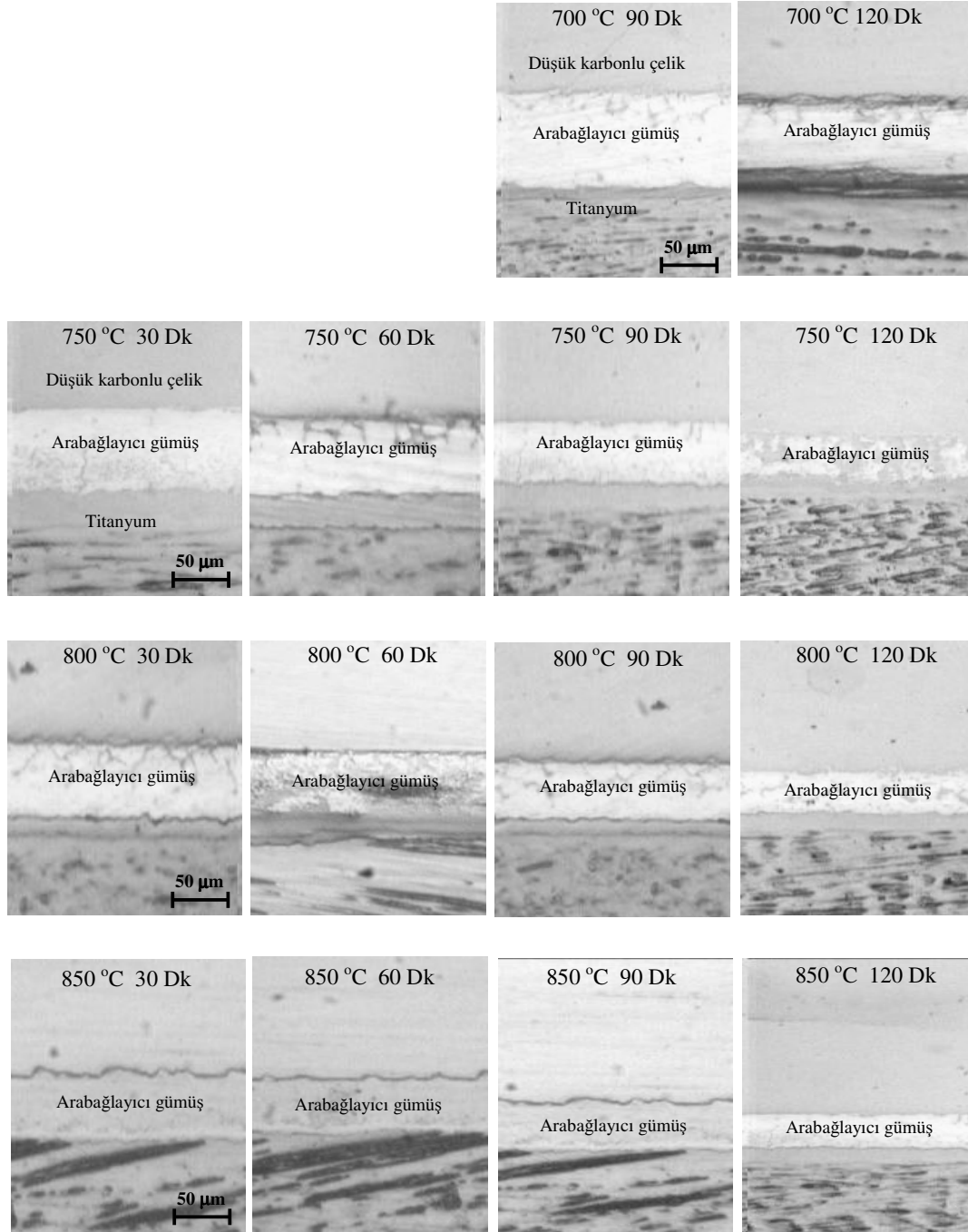
(Kolukısa, 2007) paslanmaz çelik ve dökme demir malzemeleri değişik sıcaklıklarda sabit basınç altında, 20 dakika difüzyon süresi kullanarak argon gaz korumasında birleştirmiş ve mikroyapı ve bazı mekanik özelliklerini araştırmıştır. Sertlik inceleme sonuçlarına göre en yüksek sertliğin arayüzeyde olduğunu ve sertliğin arayüzeyden uzaklaştıkça azaldığını belirtmiştir.

(Orhan vd., 2001) ve (Yıldırım ve Keleştemur, 2005) farklı malzemeleri değişik sıcaklıklarda difüzyon kaynağı ile birleştirmişler ve sertlik ölçümleri sonucunda en yüksek sertliğin arayüzeyde olduğunu ve arayüzeyden uzaklaştıkça sertliğin azaldığını rapor etmişlerdir.

Benzer şekilde (Ekrami et al., 2007) nikel bazlı süper alaşımı (Rene 80) malzemeleri yine nikel alaşımı bir ara bağlayıcı kullanarak değişik ortamlarda birleştirmişlerdir. Çalışmaları sonucunda en yüksek sertliğin arayüzeyde olduğunu ve de arayüzeyden uzaklaştıkça sertliğin azaldığını gözlemlemişlerdir.

5.3. MAKROSKOPİK İNCELEME

Difüzyon kaynak yöntemiyle ile kaynak yapılan numunelerin sıcaklık ve sürenin birleşme bölgesi üzerindeki etkisi optik mikroskopta detaylı bir şekilde incelenerek dağlama öncesi fotoğrafları çekilmiş ve Şekil 5.7’de verilmiştir. Görüntülerde üstte görülen malzeme düşük karbonlu çelik, ortadaki malzeme arabağlayıcı gümüş ve alttaki malzeme ise titanyum levhadır. Yapılan bu incelemede farklı kaynak şartlarında birleştirilen numunelerin tümünde, artan sıcaklık ve süre ile birlikte birleşme bölgesinin daraldığı gözlemlenmiştir. Difüzyon kaynağının genel olarak dört aşamada gerçekleştiği düşünülürse, (1. Yük altında plastik deformasyon, 2. sürünme deformasyonu, 3. difüzyon, ve 4. yeniden kristalleşme ve tane sınır gücü) artan sıcaklık ve sürenin birleşme bölgesini daraltması gayet doğal bir sonuç olarak karşımıza çıkar. Çünkü yük altında sıcaklık ve sürenin artmasıyla arabağlayıcı malzemeden her iki malzemeye de atom göçü atmakta ve sonuçta da arabağlayıcı kalınlığı azalmaktadır. Yapılan literatür araştırmaları da bu sonucu desteklemektedir (ASM Handbook, 2000).

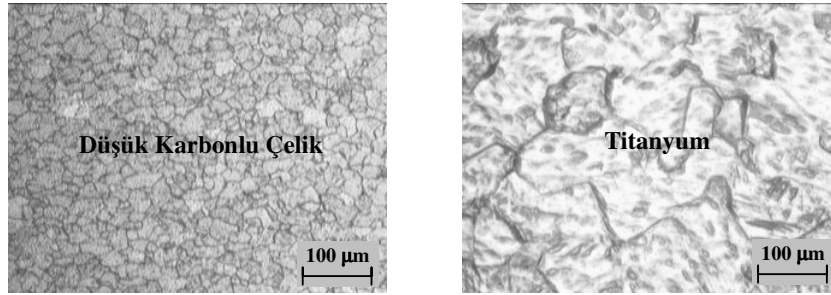


Şekil 5.7 Farklı kaynak parametrelerinde kaynak yapılan numune görüntüleri.

5.4 MİKROYAPI İNCELEMESİ

Difüzyon kaynağı ile birleştirilecek olan düşük karbonlu çelik ve titanyum malzemelerin kaynak öncesi mikroyapı görüntüleri Şekil 5.8’de verilmiştir. Fotoğraflar incelendiğinde

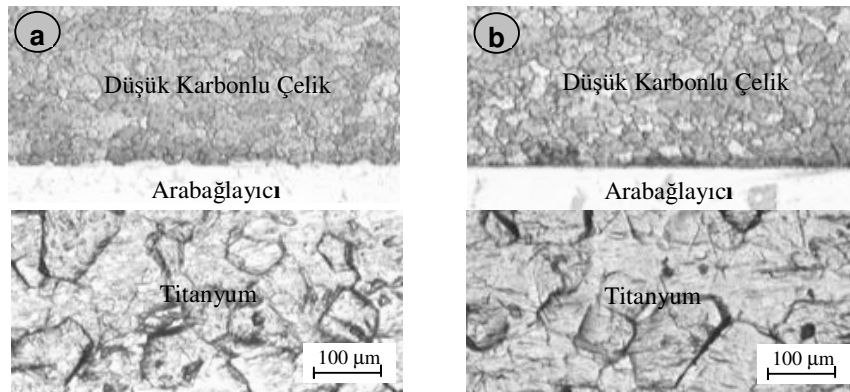
her iki malzemenin de eş eksenli tanelerden oluştuğu ve tane ebadının malzemenin her yerinde benzer olduğu görülmektedir.



Şekil 5.8 Orijinal malzemelerin mikroyapı görüntüleri.

Difüzyon kaynak yöntemi ile değişik kaynak parametrelerinin kullanıldığı düşük karbonlu çelik-titanyum birleştirmelerinden elde edilen optik mikroskop görüntüleri Şekil 5.9-5.12’de verilmiştir. Görüntülerde üstte görülen malzeme düşük karbonlu çelik ve alttaki malzeme titanyum levhadır. Ortadaki malzeme ise ara bağlayıcı olarak kullanılan gümüşdür.

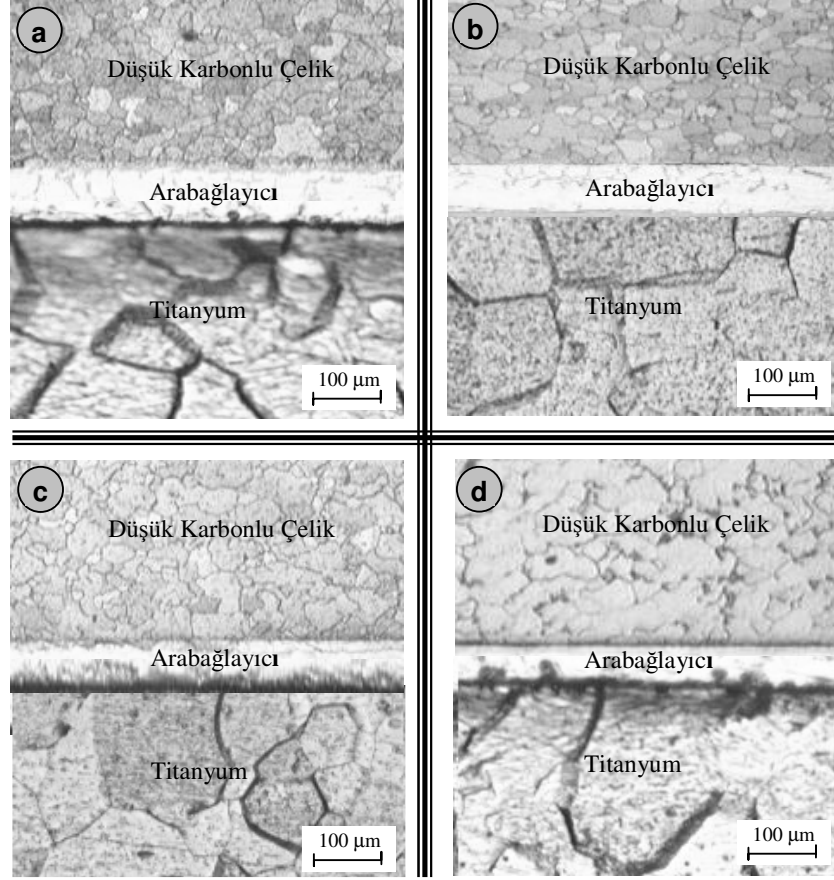
Şekil 5.9’da 700 °C’de 90 ve 120 dakika sürede birleştirilmiş numunenin mikroyapısı verilmiştir. Kaynaklı numunelerin mikroyapıları incelendiğinde orijinal malzemelerin mikroyapılarına benzedikleri ve tane ebatlarının kaynak öncesi morfolojilerini koruduğu görülmüştür.



Şekil 5.9 700 °C’de (a) 90 ve (b) 120 dakika sürede birleştirilmiş numunenin mikroyapısı.

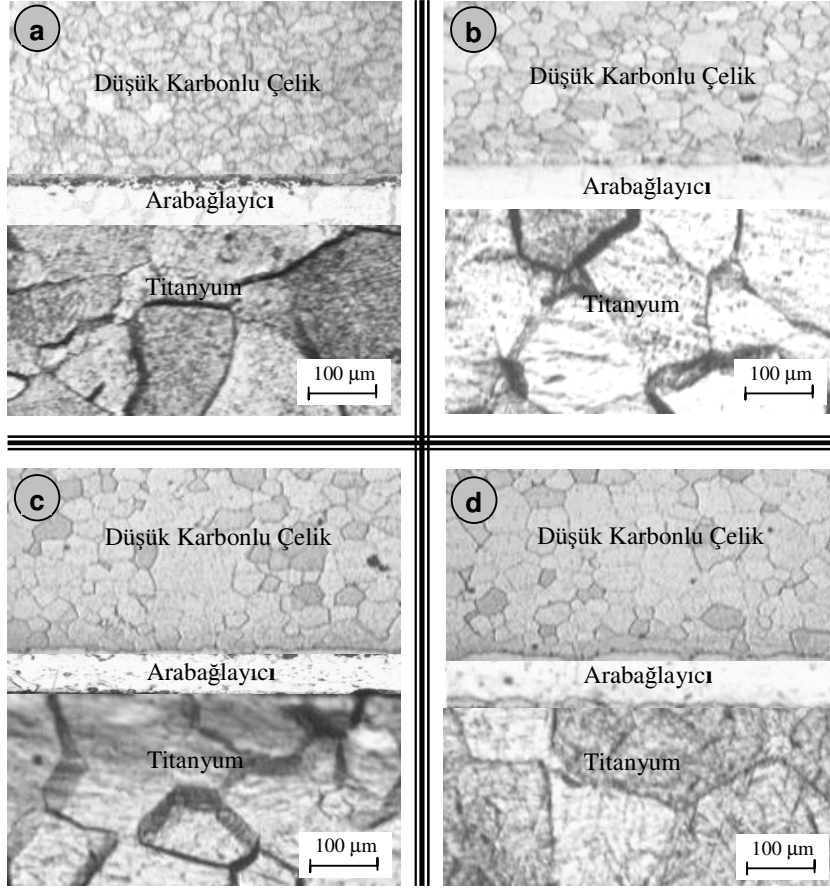
Şekil 5.10’da 750 °C’de ve dört farklı sürede birleştirilmiş numunelerin mikroyapısı görülmektedir. Bu sıcaklıklarda elde edilen mikroyapıların 700 °C’de elde edilen

mikroyapılardan farklı olduğu, gerek düşük karbonlu çelik gerekse titanyumda tane irileşmesinin meydana geldiği tespit edilmiştir. Ayrıca 750 °C’de sürenin artmasına paralel olarak tane irileşmesinin de arttığı fotoğraflarda açıkça görülmektedir.



Şekil 5. 10 750 °C’de birleştirilmiş numunelerin mikroyapıları (a) 30, (b) 60, (c) 90 ve (d) 120 dakika.

Şekil 5.11’de 800 °C’de (a) 30, (b) 60, (c) 90 ve (d) 120 dakikada farklı kaynak sürelerinde birleştirilmiş numunelerin mikroyapıları görülmektedir. Fotoğraflar incelendiğinde artan süreye bağlı olarak gerek titanyumda gerekse düşük karbonlu çelik malzemede orijinal malzemelere ve daha düşük sıcaklıklarda yapılan numunelere göre tane irileşmesinin meydana geldiği tespit edilmiştir.

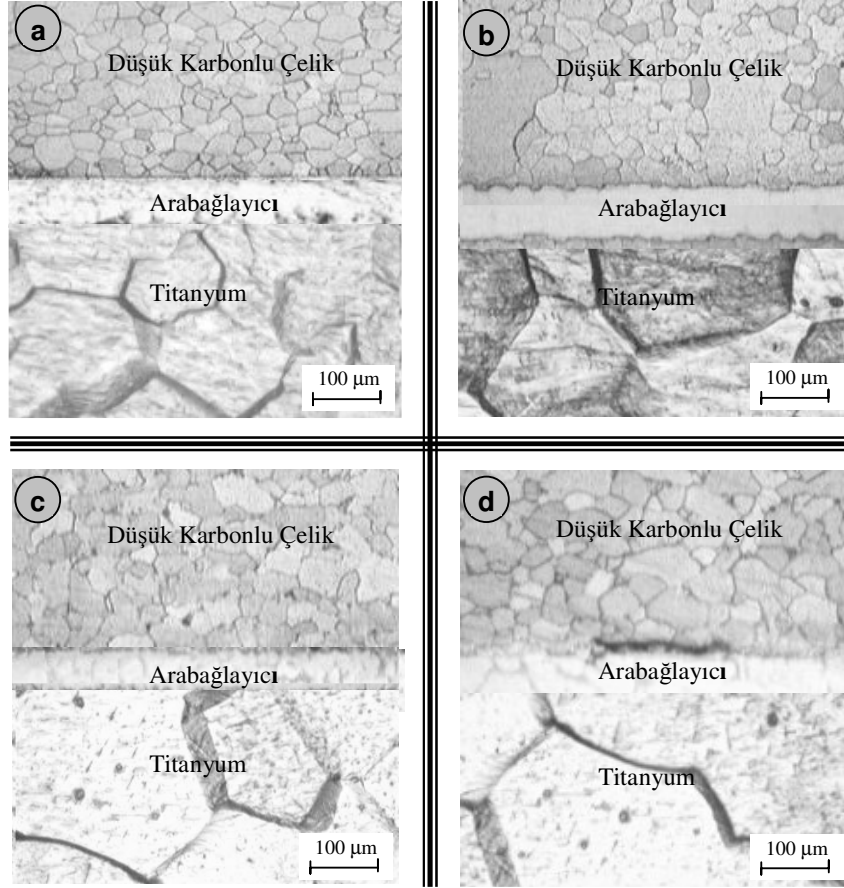


Şekil 5. 11 800 °C’de birleştirilmiş numunelerin mikroyapıları (a) 30, (b) 60, (c) 90 ve (d) 120 dakika.

Şekil 5.12’de 850 °C’de (a) 30, (b) 60, (c) 90 ve (d) 120 dakika süre ile birleştirilmiş numunelerin mikroyapıları verilmiştir. Mikroyapılar incelendiğinde, sıcaklığın artışına bağlı olarak meydana gelen olan tane irileşmesi bu numunelerde daha da belirgin hale gelmiştir. Mikroyapıların tümü (Şekil 5.9- 5.12) genel olarak değerlendirildiğinde kaynak sıcaklık ve birleştirme süresinin artmasına bağlı olarak tane boyutu titanyum malzemede daha belirgin olmak üzere değiştiği tespit edilmiştir. Yalnız bu kaynak yönteminde ergitmeli kaynak yöntemlerinde var olan ITAB’ın olmamasından dolayı numunelerin hemen her yerinde ve eş eksenel bir tane yapısının olduğu tespit edilmiştir.

Kaynaklı malzemelerdeki tane büyümesine sebep olarak, malzemelerin yeniden kristalleşmesi ve büyük tanelerin küçük taneleri yutması gösterilebilir. Malzemelerin yeniden kristalleşmeden sonra tane irileşmesine yönelmesi, tane sınırı enerjileriyle ilgilidir. Daha düşük enerji seviyesine geçmek için, malzeme birim hacimdeki toplam tane sınırını

düşürmek istemekte ve bu sonuç da tanelerin büyümesini gerektirmektedir. Ancak endüstriyel malzemelerde tane irileşmesinin istenmediği de malzeme bilgisi ile ilgilenen herkes tarafından bilinmektedir. Yapılan literatür araştırmaları da bu sonucu doğrulamaktadır (Demirci, 2004 ve Erdoğan, 1998).



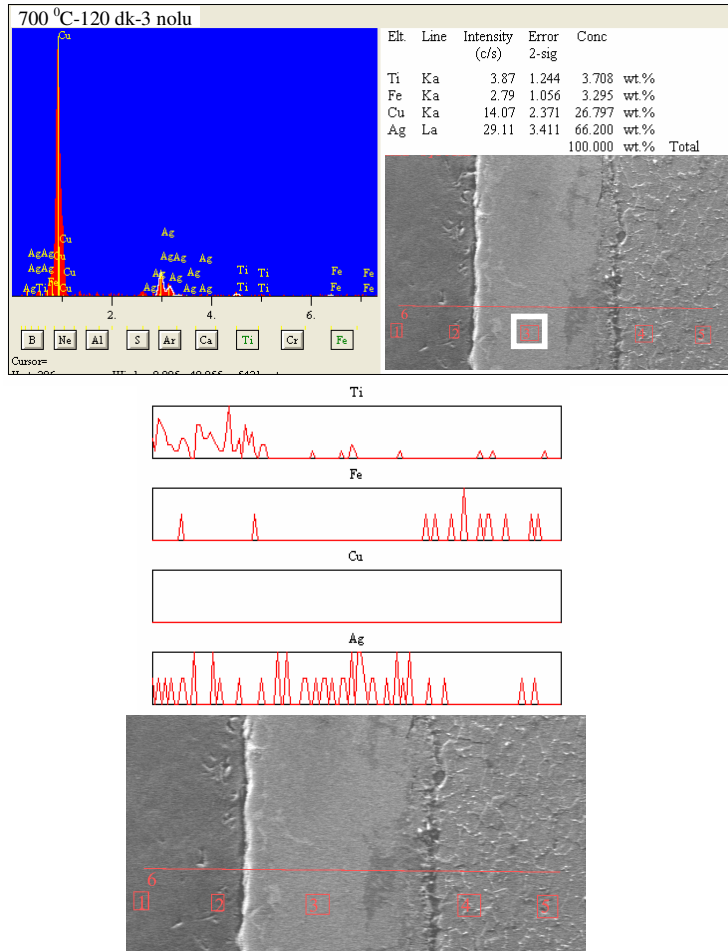
Şekil 5.12 850 °C’de birleştirilmiş numunelerin mikroyapıları (a) 30, (b) 60, (c) 90 ve (d) 120 dakika .

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

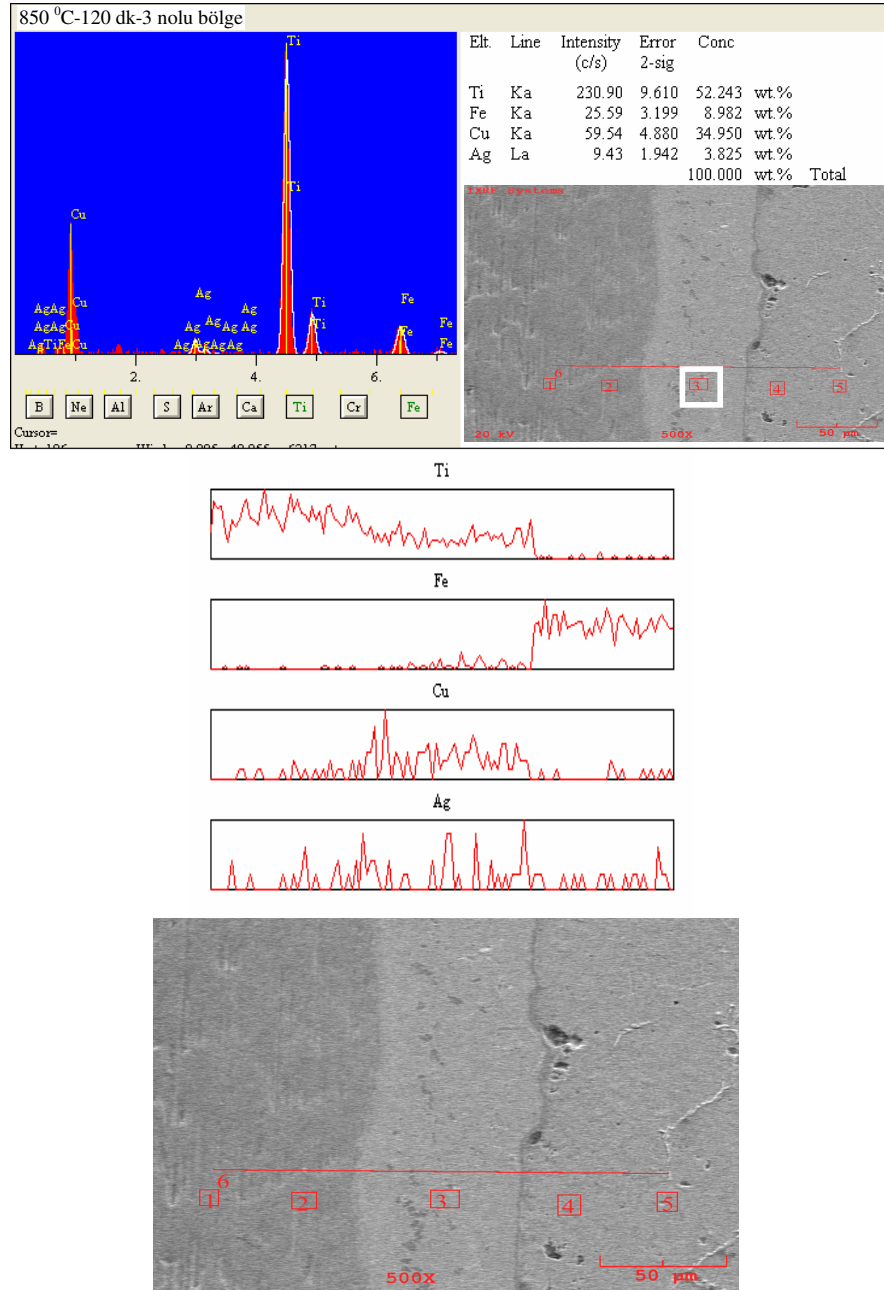
arakesit düzlemine tane sınırı göçünün olduğu ve de bu aşamada tane büyümesinin başladığı belirtilmiştir (Kahraman, 2007).

5.5 TARAMALI ELEKTRON MİKROSKOBU İNCELEMESİ

Difüzyon kaynak yöntemi ile değişik kaynak parametrelerinin kullanıldığı çalışmalar sonucunda, en düşük ve en yüksek parametrelerin kullanıldığı numunelerin tümünden (700, 750 ve 800 °C’de 30 ve 120 dakika süre ile birleştirilmiş) ve de 850 °C’de birleştirilmiş numunelerin tümünden (30, 60, 90 ve 120 dakika süre ile birleştirilmiş) SEM ve EDS (hem bölgesel hem de çizgisel olarak) analizleri yapılmıştır. Burada örnek olması açısından sadece 700 ve 850 °C’de 120 dakika süre ile birleştirilen numunelerin görüntülerinin sadece arabağlayıcıdan alınanları (3 nolu bölge) verilmiştir (Şekil 5.13 ve Şekil 5.14). Ayrıca tezin ekler kısmına bu görüntülerin tümü ilave edilmiştir.



Şekil 5.13 700 °C ve 120 dakika süre ile birleştirilmiş arabağlayıcı üzerinden alınan EDS ve çizgi boyunca ağırlıkça % element analiz taraması.

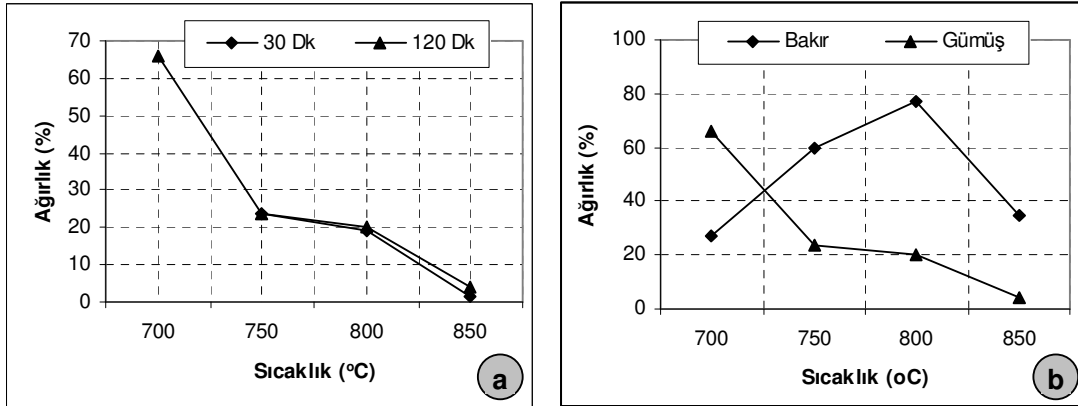


Şekil 5.14 850 °C ve 120 dakika süre ile birleştirilmiş arabağlayıcı üzerinden alınan EDS ve çizgi boyunca ağırlıkça % element analiz taraması.

Şekil 5.13 ve Şekil 5.14 incelendiğinde artan difüzyon sıcaklığı ile ara bağlayıcıda bulunan gümüş miktarının % ağırlıkça ciddi derecede azaldığı (% 66,2'den % 3.825'e düşmüş) ve de % titanyum (% 3.708'den % 52.243'e) ve demir miktarının ise (% 3.295'den 8.982'ye arttığı) ciddi derecede arttığı görülmüştür. Ayrıca her iki şekildeki çizgi boyunca ağırlıkça % element analiz taraması sonuçlarında da bu olay açıkça görülmektedir.

Grafikler incelendiğinde titanyumun difüzyonunun demirin difüzyonuna göre daha yüksek olduğu açıkça görülmektedir. Bunun sebebinin de titanyumun atomik ağırlığının (atom kütlesi) demirden daha düşük olması gösterilebilir. Nitekim analizi yapılan elementlerin atomik ağırlıklarına bakıldığında titanyum 47.9, demir 55.85, bakır 63.54 ve gümüş 107.87 g/mol olduğu görülmüştür.

Şekil 5.15’de sıcaklık artışına bağlı olarak ara bağlayıcıda değişen gümüş ve bakır elementlerinin % ağırlıkça değişimi verilmiştir.

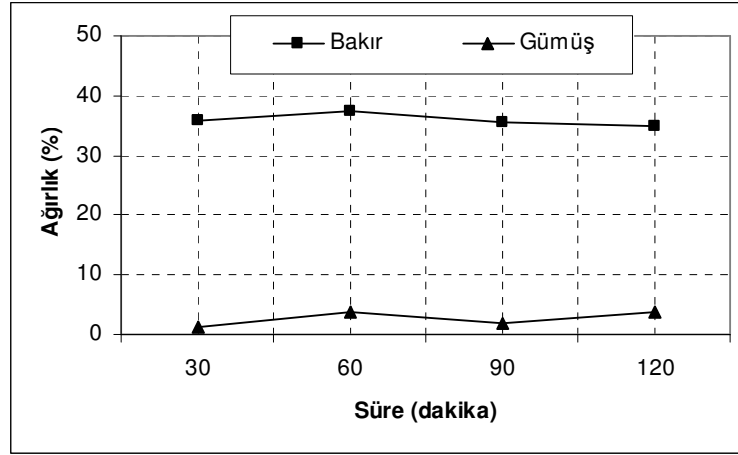


Şekil 5.15 (a) Sıcaklığa ve süreye bağlı ara bağlayıcıdaki gümüş miktarı ve (b) 120 dakika süredeki sıcaklığa bağlı gümüş ve bakır miktarı (% ağırlıkça).

Şekil 5.15 (a) incelendiğinde sıcaklığın artışına bağlı olarak arabağlayıcıdaki gümüş miktarının % ağırlık olarak belirgin şekilde azaldığı ancak difüzyon sürenin artışına bağlı olarak çok az miktarda azaldığı görülmektedir. Kaynaklı numuneler üzerinde gözle yapılan muayenede yüksek sıcaklıklarda ve de sürenin artmasına bağlı olarak kaynak arayüzeyinden dışarıya metal taşmalarının arttığı gözlemlenmiştir. Buradan, sıcaklık ve sürenin artmasına bağlı olarak arayüzeyden dışarıya taşan malzemenin çoğunlukla gümüş olduğu söylenebilir. Şekil 5.15 (b) incelendiğinde 120 dakika süre ile gerçekleştirilmiş numunelerde sıcaklığın artışına bağlı olarak arabağlayıcıdaki gümüş miktarının % ağırlık olarak sürekli olarak düştüğü, ancak bakır miktarın % ağırlık olarak sıcaklığın 800 °C'ye kadar artmasına bağlı olarak arttığı ancak 850 °C'de önemli ölçüde azaldığı görülmüştür.

Şekil 5.16'da örnek olarak 850 °C'de süre değişimine göre arabağlayıcıdaki % ağırlıkça gümüş ve bakır değişimi miktarını gösteren grafik verilmiştir. Grafik incelendiğinde arabağlayıcıdaki ağırlıkça % bakır miktarının orijinal malzemedeki bakır miktarına yakın

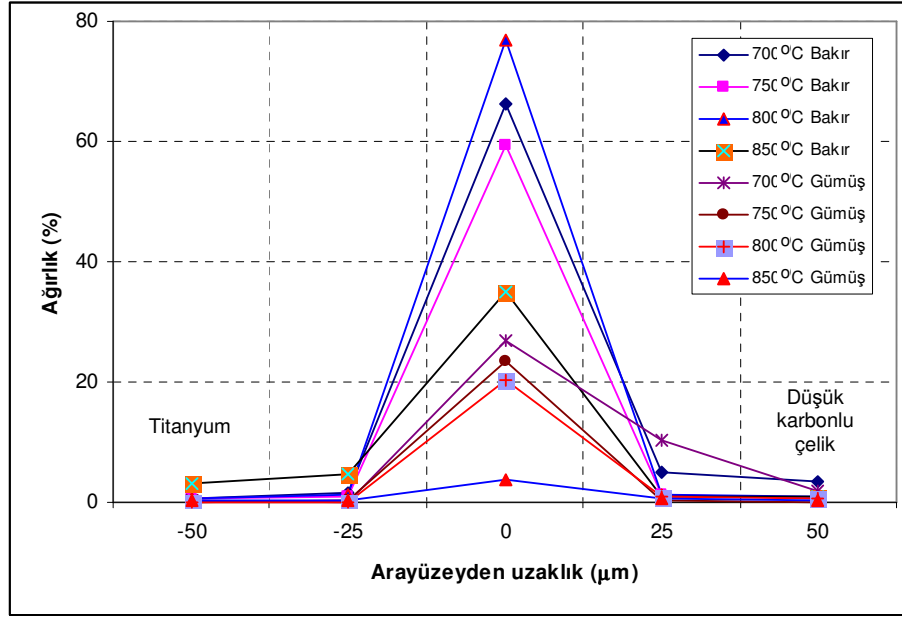
(orijinal malzemedeki ağırlıkça bakır miktarı % 36,730) bir miktar olduğu görülmektedir. Değişik sürelerde birleştirilmiş numunelerin bu bölgelerindeki EDS analiz grafikleri incelendiğinde arayüzeyde % ağırlıkça titanyum 54.539-50.722, demir 8.982-7.846, bakır 37.454-34.940 ve gümüş 1.830-3.825 sınırları arasında olduğu görülmektedir. Buradan, artan difüzyon süresi ile birlikte arayüzeydeki % ağırlıkça element miktarının çok fazla değişim göstermediği sonucuna varılmıştır.



Şekil 5.16 850 °C'de süre değişimine göre % ağırlıkça gümüş ve bakır değişimi.

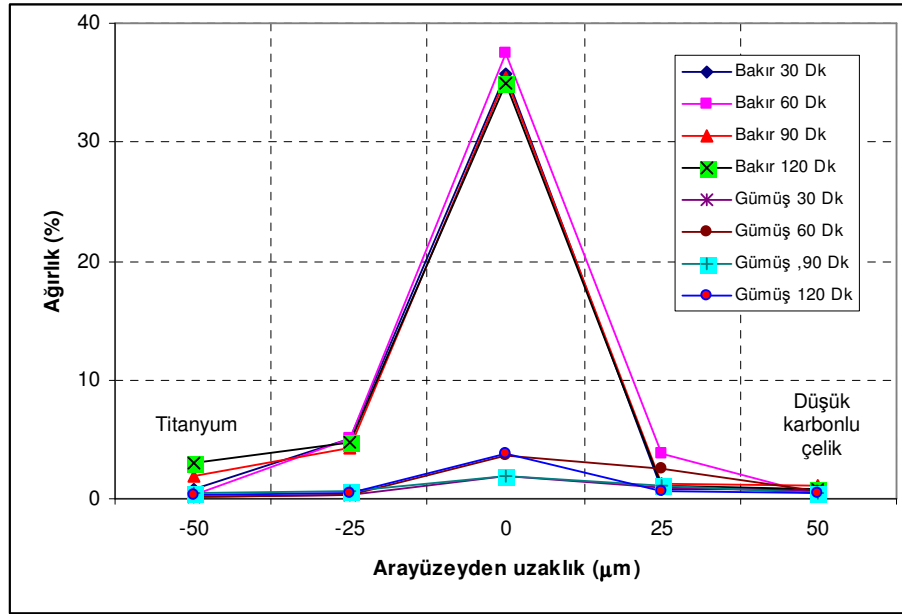
Benzer şekilde arabağlayıcıdaki % ağırlıkça gümüş miktarına bakıldığında, bakır miktarının aksine, bütün sürelerdeki gümüş miktarının orijinal malzemedeki gümüş miktarından önemli derecede azaldığı görülmektedir. Orijinal malzemede mevcut % ağırlıkça gümüş miktarı 51.043 iken bu değer kaynak sonrası 1.830-3.825 değerleri arasına düştüğü tespit edilmiştir. Yüksek sıcaklıklarda kaynak yapılmış numunelerdeki arayüzeyde gümüş miktarının bu derece düşük çıkmasına sebep olarak, arabağlayıcının kaynak esnasında kısmi olarak ergimesi ve de ergiyen metalin arayüzeyden taşarak uzaklaşması gösterilebilir.

Şekil 5.17'de 120 dakika süreyle 700, 750, 800 ve 850 °C'de birleştirilmiş numunelerin arayüzey ve arayüzeyden her iki metal tarafına doğru bakır ve gümüşün % ağırlık değişimleri verilmiştir.



Şekil 5.17 120 dakika süre ve farklı sıcaklıklarda bakır ve gümüşün % ağırlık değişimi.

Grafik incelendiğinde, genel olarak bakır ve gümüş miktarının arabağlayıcıda en yüksek değerde olduğu ve arabağlayıcı malzemenin her iki tarafındaki arayüzeylerden uzaklaştıkça yayılımının azaldığı tespit edilmiştir. Ayrıca arayüzeydeki bakır miktarının gümüş miktarından daha fazla olduğu ve de genelde her iki elementin artan sıcaklıkla arayüzeyde azaldığı gözlenmiştir.



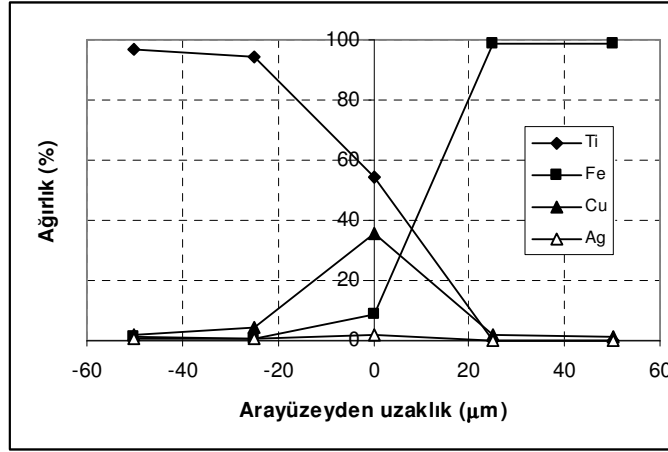
Şekil 5.18 850 °C'de farklı sürelerde bakır ve gümüşün % ağırlık değişimi.

Şekil 5.18’de ise 850 °C’de ve 30, 60, 90 ve 120 dakika süre ile birleştirilmiş numunelerin arayüzey ve arayüzeyden her iki metal tarafına doğru bakır ve gümüşün % ağırlık değişimleri verilmiştir. Sıcaklık değişim grafiğinde olduğu gibi bu grafikte de yüksek değerli eğrilerin bakır miktarını, düşük olanlar ise gümüş miktarını gösterdiği görülmüştür. Benzer şekilde arayüzeyden her iki metal tarafına doğru difüz eden atom konsantrasyonunun azalarak devam ettiği ve de arabağlayıcı malzemenin daha yoğunluklu olarak düşük karbonlu çelik malzemedan ziyade titanyum malzemeye daha çok yayındığı gözlenmiştir.

Analiz sonuçları genel olarak değerlendirildiğinde, orijinal arabağlayıcı malzeme içerisinde en fazla miktarda gümüş bulunmasına rağmen bütün grafiklere bakıldığında gerek arabağlayıcı içerisindeki gümüş gerekse difüz eden gümüş (% ağırlıkça) miktarının bakır miktarından az olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca genel olarak sıcaklık ve sürenin artmasına bağlı olarak da gümüş miktarının azaldığı tespit edilmiştir.

Sıcaklık ve süreler göz önüne alındığında, difüzyonun daha çok sıcaklığa bağlı olduğu ve süreyi uzatmakla da difüzyonun arttığı ancak bu artışın çok daha yavaş olduğu tespit edilmiştir. Zaten II. Fick Kanunu da konsantrasyonun zamana göre değişimini vermektedir. Konsantrasyon farkı başlangıçta büyük olduğundan difüzyon da hızlı başlamakta ve yayının ilerlemesiyle düşen konsantrasyon gradyanının yayının hızını gittikçe düşüreceği ve ideal eşit dağılımlı (homojen) bir yapının oluşması için sonsuz sürenin gerektiğini belirtilmiştir (Demirci, 2004).

Son olarak, deneysel çalışmalar sonucu en yüksek mukavemet değerlerinin elde edildiği, 850 °C’de 90 dakika süre ile birleştirilmiş numunelerin % element analiz sonuçları (Ti, Fe, Cu ve Ag) Şekil 5.19’da verilmiştir.



Şekil 5.19 850 °C’de 90 dakika süre ile birleştirilmiş numunelerin analiz sonuçları

Grafik incelendiğinde kaynak merkezinde yüksek miktarda titanyum bulunurken (% 54,205) onu sırasıyla bakır (% 35,482), demir (% 8,482) ve gümüş (% 1,82) takip etmektedir. Ayrıca kaynak merkezinden uzaklaştıkça arabağlayıcı malzeme içerisinde bulunan gümüş ve bakır miktarının azaldığı tespit edilmiştir. Grafikte göze çarpan diğer bir husus ise kaynak merkezine göç eden Ti miktarının Fe miktarından daha fazla olmasıdır. Bunun sebebi daha önce de belirtildiği gibi titanyumun atomik ağırlığının demirden daha düşük olması gösterilebilir. Bu sonuçlar kesme-makaslama test sonuçları ile beraber değerlendirildiğinde 850 °C’de 90 dakika süre ile birleştirilmiş numunelerde (bu çalışmada belirlenen optimum kaynak parametresi) difüzyonun yeterli olduğu ve bu nedenle mukavemetlerinin fazla bulunduğu sonucu çıkarılabilir.

BÖLÜM 6

SONUÇLAR

Titanyum ve düşük karbonlu çelik levhaların arabağlayıcı difüzyon kaynağı yöntemi ile farklı sıcaklık ve sürelerde birleştirilerek, değişen kaynak parametrelerinin kaynak performansını nasıl etkilediğinin araştırıldığı bu çalışmada;

1. Titanyum ve düşük karbonlu çelik malzemeleri difüzyon kaynağı ile birleştirebilmek için, uygun arabağlayıcı ve kaynak parametreleri seçilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır.
2. Bu çalışmada kullanılan kaynak parametreleri dahilinde, en yüksek arayüzey dayanımı 850 °C’de ve 90 dakika süre ile birleştirilen numunelerde elde edilmiştir.
3. Yapılan çalışmalar sonucunda, artan sıcaklık ile birlikte mukavemetin arttığı ancak, artan süre ile mukavemetin bir noktaya kadar arttığı, ancak bu noktadan sonra azaldığı belirlenmiştir.
4. Yapılan sertlik ölçümleri sonucunda en yüksek sertlik değerinin arabağlayıcı malzemede olduğu ve ara bağlayıcının her iki tarafındaki sertlik değerlerinin giderek azaldığı tespit edilmiştir.
5. Makro ve mikroyapı çalışmaları sonucunda, farklı kaynak şartlarında birleştirilen numunelerin tümünde, artan sıcaklık ve süre ile birlikte birleşme bölgesinin (arabağlayıcı) daraldığı gözlemlenmiştir.
6. Mikroyapı çalışmaları sonucunda, kaynaklı numunelerde gerek düşük karbonlu çelik, gerekse titanyumda tane irileşmesinin meydana geldiği ve sıcaklık ve sürenin artmasıyla da arttığı tespit edilmiştir.
7. Kaynaklı numuneler üzerinde gözle yapılan muayenede yüksek sıcaklıklarda ve de sürenin artmasına bağlı olarak kaynak arayüzeyinden dışarıya metal taşmalarının arttığı gözlemlenmiştir.
8. EDS analiz çalışmalarında, sıcaklığın artışına bağlı olarak arabağlayıcıdaki gümüş miktarının % ağırlık olarak belirgin şekilde azaldığı, ancak difüzyon sürenin artışına

bağlı olarak çok az miktarda azaldığı görülmüştür. Ayrıca, kaynak arayüzeyinden uzaklaştıkça yayının miktarının giderek azaldığı tespit edilmiştir.

KAYNAKLAR

- ASM Handbook** (2000) Volume 6, Welding, Brazing and Soldering, *ASM International Materials Park, Usa*, pp 156-159.
- Atabay, M.** (1999) Difüzyon Kaynağı; Laboratuvar Çalışması; Alüminyum Alaşımlar Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir,
- Aydın, M.** (2005) Al-SiC Malzemenin Difüzyon Kaynağı İle Birleştirilebileceği ve Arayüzeyin İncelenmesi, *Kaynak Teknolojisi V. Ulusal Kongresi*, Sayfa 99-107, Kocaeli.
- Baştuğ, K.** (2001) Farklı Malzemelerin Kaynağı, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, *Yüksek Lisans Tezi*, Eskişehir.
- Bodur, O.** (1996) “Sert Lehimleme” *Askaynak Yayınları*, Sayfa 10-12, İstanbul.
- Çelik, S.** (1996) Koruyucu Gaz Altında Saf Alüminyum ve Bakırın Difüzyon Kaynağı Şartlarının Belirlenmesi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, *Doktora Tezi*, Balıkesir.
- Demirci, A. H.** (2004) Malzeme Bilgisi ve Malzeme Muayenesi, *Alfa Basım Yayın Dağıtım Şti*, İstanbul, Sayfa 88-94.
- Ekrami, A., Moeinifar, S. and Kokabi, A. H.** (2007) Effect of Transient Liquid Phase Diffusion Bonding on Microstructure and Properties of a Nickel Base Superalloy Rene 80, *Materials Science And Engineering A* 456 pp.93–98.
- Erdoğan, M.** (1998) Malzeme Bilimi ve Mühendislik Malzemeleri, Cilt 1, *Nobel Yayın Dağıtım*, Ankara, Sayfa 76-94.
- Ghosh, M. and Chatterjee, S.** (2005) Effect of Interface Microstructure on the Bond Strength of the Diffusion Welded Joints Between Titanium and Stainless Steel, *Materials Characterization* 54, pp. 327– 337.
- Ghosh, M., Bhanumurthy, K. Kale, G. B., Krishnan, J. and Chatterjee, S.** (2003) Diffusion Bonding of Titanium to 304 Stainless Steel, *Journal Of Nuclear Materials* 322, s.235–241.
- İpekoğlu, G.** (2003) “Difüzyon Kaynaklı TiAl- TiAl Alaşımlarının İçyapı ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi” Mustafa Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, *Yüksek Lisans Tezi*, Antakya.
- Kahraman, N.** (2007) Katı Hal Kaynak Teknikleri, *Yüksek Lisans Ders Notları*, ZKÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metal Eğitimi Anabilimdalı.
- Kahraman, N.** (2003) Titanyum ve Bakır Çiftinin Ara Bağlayıcı Difüzyon Sert Lehimlemesi ile Fırında Birleştirilmesi ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 16(3), s.611-618,.
- Koçak, M. ve Çam, G.** (2003) Difüzyon Kaynaklı TiAl-Ti6Al4V Alaşımlarının İçyapı ve Mekanik Karakterizasyonu, *4.Ulusal Kaynak Teknolojisi Kongresi*, Kocaeli.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

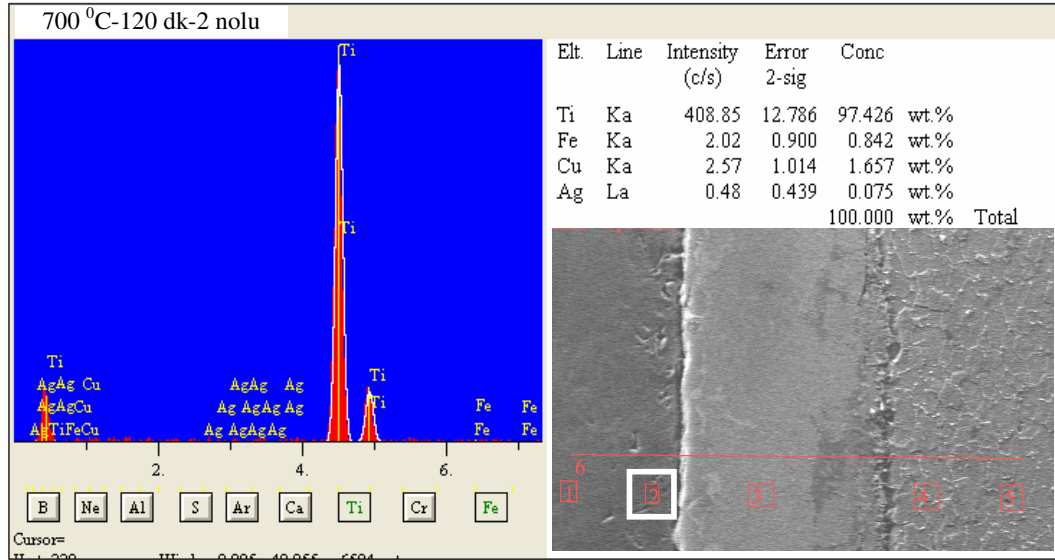
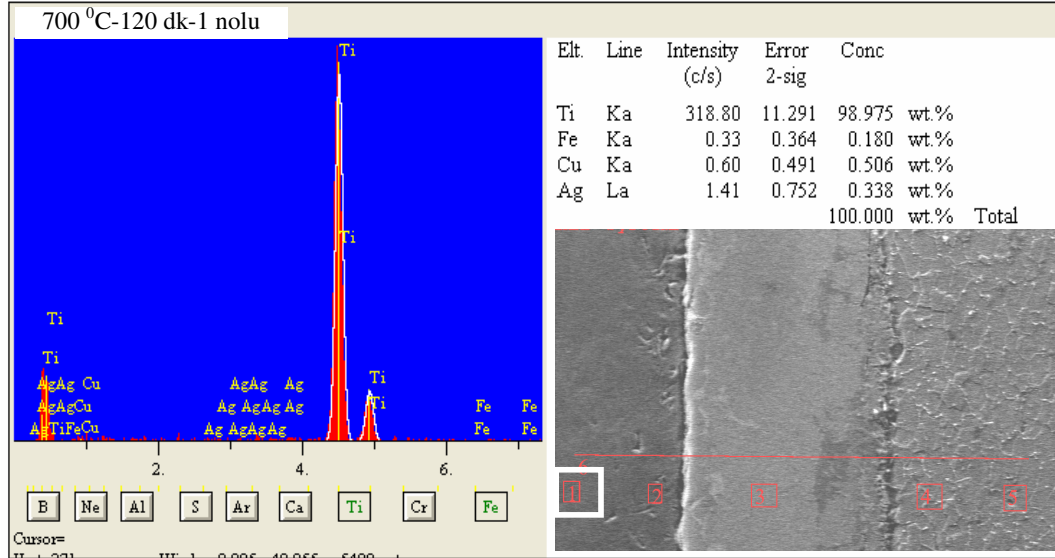
- Koçer, S.** (1998) “Yüksek Krom Nikel Alaşımlı Paslanmaz Çeliğin Alaşımsız Düşük Karbonlu Çelikle Difüzyon Kaynağının Araştırılması” Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Elazığ.
- Kolukisa, S.** (2007) The Effect of the Welding Temperature on the Weldability in Diffusion Welding of Martensitic (AISI 420) Stainless Steel With Ductile (Spheroidal Graphite-Nodular) Cast Iron, *Journal of Materials Processing Technology* 186 pp.33–36.
- Kundu, S. Ghosh, M. Laik, A. Bhanumurthy, K., Kale, G.B. and Chatterjee, S.** (2005) Diffusion Bonding of Commercially Pure Titanium Stainless Steel Using Copper Interlayer, *Materials Science And Engineering A* 407 pp.154–160.
- Kurşungöz, N. ve Kurşungöz, H.** (1996) Difüzyon Kaynağı, Uluslar arası Kaynak teknolojisi 96 Sempozyumu, *Gedik Eğitim Vakfı, İstanbul*, sayfa 203-212.
- Kurt, B. ve Somunkıran, İ.** (2006) Ostenitik Paslanmaz ve Orta Karbonlu Çelik Çiftinin Difüzyon Kaynağı, *Materials 2006, 11. Uluslar Arası Malzeme Sempozyumu*, Denizli, s.936-940.
- Kurt, B. ve Orhan, N.** (2005) Dupleks Paslanmaz Ve AISI 4140 Çeliğinin Difüzyon Kaynağı Tekniği İle Birleştirilebilirliğinin Araştırılması, *1. Uluslar Arası Mesleki Ve Teknik Eğitim Teknolojileri Kongresi*, Eylül, Marmara Üniversitesi, İstanbul, Sayfa 1280-1286.
- Liming, L, Meili, Z. Longxiu, P. and Lin, W.** (2001) Studying of Micro-Bonding in Diffusion Welding Joint for Composite, *Materials Science And Engineering A* 315 pp.103–107.
- Mollaoğlu, H.** (2004) “SiC Partikül Takviyeli Al Metal Matrisli Kompozitlerin Difüzyon Kaynağı” Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul.
- Oğuz, B.** (1988) “Sert Lehimleme Teori Uygulama” *Oerlikon Yayınları*, Sayfa 123-127, İstanbul.
- Orhan, N. Khan T. I. and Eroğlu, M.** (2001) Diffusion Bonding of a Microduplex Stainless Steel to Ti–6Al–4V, *Scripta Materialia*, Volume 45, Issue 4, Pages 441-446.
- Ozan, S.** (2000) “Metallerarası Fazların Çökelme Sıcaklıklarının Difüzyon Kaynağı Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması” Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, *Doktora Tezi*, Elazığ.
- Özdemir, U., Koçak, M. ve Çam, G.** (2003) “Difüzyon Kaynağı TiAl Alaşımlarının İçyapı ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi” *Kaynak Teknolojisi IV. Ulusal Kongresi*, Sayfa 147-166, Kocaeli.
- Özdemir, U.** (2003) “Difüzyon Kaynaklı Tial ve Ti6al4V Alaşımlarının İçyapı ve Mekanik Karakterizasyonu” Mustafa Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, *Yüksek Lisans Tezi*, Antakya.
- Pakdil, M.** (2001) “Difüzyon Kaynağı İle Birleştirilmiş Ti-Alaşımlarının Kırılma Davranışlarının İncelenmesi” Mustafa Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, *Yüksek Lisans Tezi*, Antakya.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

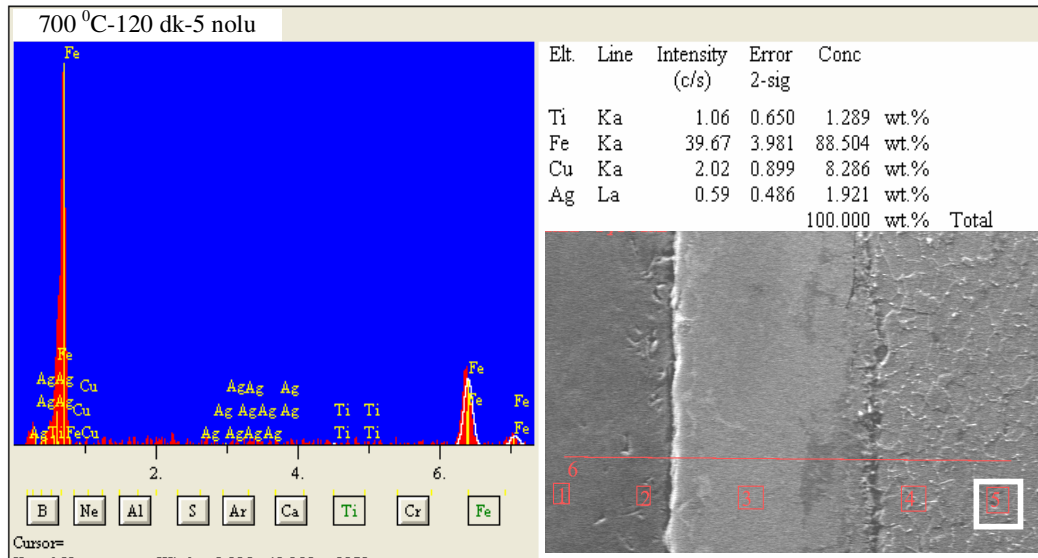
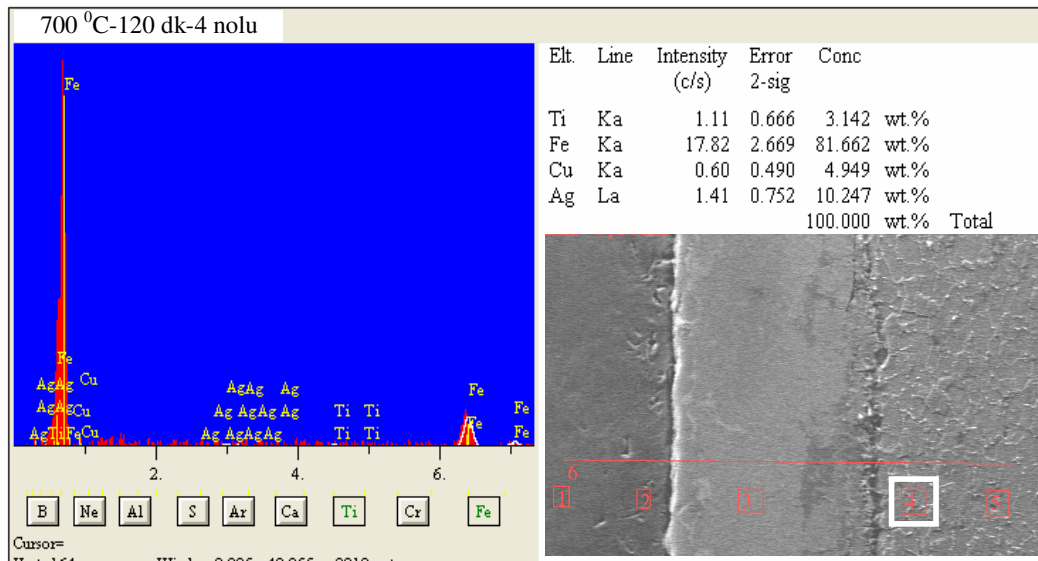
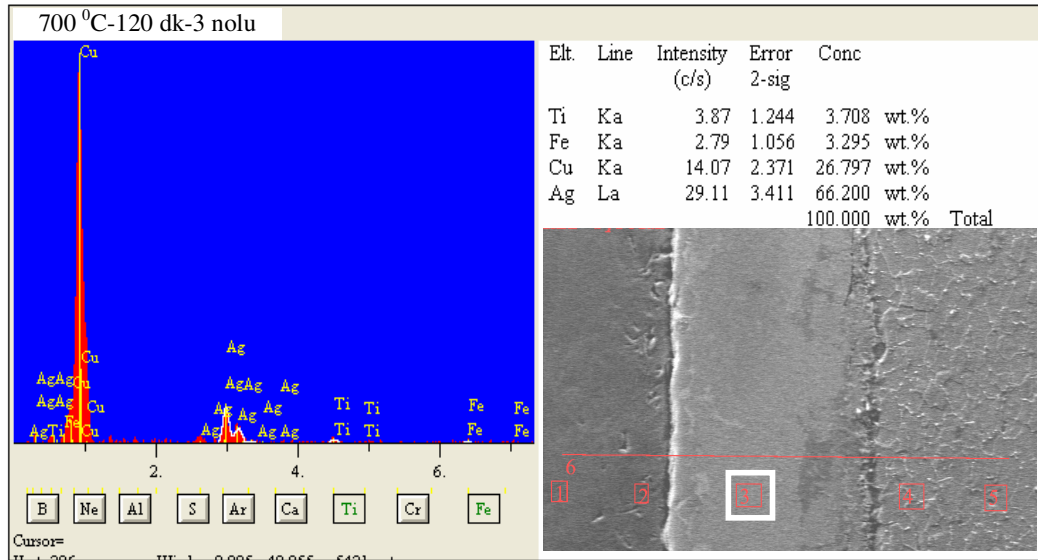
- Peng H., Jiuhai Z, Ronglin, Z. and Xiaoqiang L.** (1999) Diffusion Bonding Technology of A Titanium Alloy to a Stainless Steel Web With an Ni Interlayer, *Materials Characterization* 43 pp.287–292.
- Taşgetiren, S. Çakmakkaya, M.** (2000) “Difüzyon Kaynağı İle Birleştirilmiş Malzemelerin Çiftlerinde Kalıcı Gerilmeler” 8. *Denizli Malzeme Sempozyumu*, 26-27-28, Nisan.
- Taşkın, M.** (2000) “Yüksek Karbonlu Çeliklerin Süper Plastik Halde Difüzyon Kaynağı İle Birleştirilebilirliğinin Araştırılması” Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, *Doktora Tezi*, Elazığ, Sayfa 25-48.
- Torun, O.** (2003) “Fe₃Al (Fe-26Al) Alaşımlarının Difüzyon Kaynağı” Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, *Doktora Tezi*, Eskişehir.
- Tuncel, S. ve Topuz, A.** (1996) X210Cr12 Takım Çeliği ile 25MoCr4 düşük Alaşımlı Çeliğin Difüzyon Kaynağı, Uluslar arası Kaynak teknolojisi 96 Sempozyumu, *Gedik Eğitim Vakfı*, İstanbul, sayfa 212-222.
- Uzun, H.** (2002) “Sert Lehimleme Teknikleri” *Değişim Yayınları*, Sakarya, Eylül.
- Uzun, H., Fındık, F. ve Salman S.** (2003) “Malzeme Biliminin Temelleri” *Değişim Yayınları*.
- Yıldırım, S. and Keleştemur, M. H.** (2005) A Study on the Solid-State Welding of Boron-Doped Ni₃Al–AISI 304 Stainless Steel Couple, *Materials Letters* 59, pp.1134–1137.
- Yıldırım, Ş.** (2003) “Ni₃Al Metaller Arası Bileşiğinin AISI 304 Paslanmaz Çelik ve Ti-6Al-4V Alaşımı İle Difüzyon Kaynağı” Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Elazığ.
- Yıldırım, B. Z.** (2001) “ Difüzyon Kaynağının Demir Dışı Hafif Malzemelere Uygulanması” Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, Sayfa 5-20.
- Yılmaz, O.** (1999) “ Östenitk Paslanmaz Çelik ve Bakır Çiftinin Difüzyon Kaynağı İle Birleştirilmesinde Kaynak Parametrelerinin Birleştirilmeye Etkisi” Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, *Doktora Tezi*, Elazığ, Sayfa 50-70.

EK AÇIKLAMALAR A

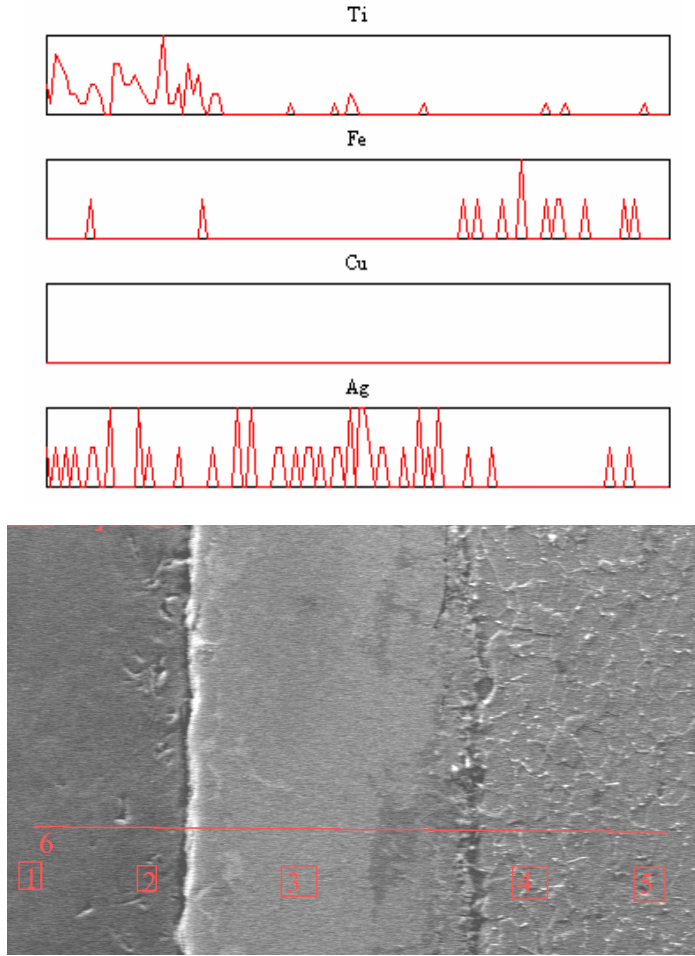
Şekil A.1 : 700 °C ve 120 dakika süre ile birleştirilmiş arabağlayıcı üzerinden alınan EDS ve çizgi boyunca ağırlıkça % element analiz taraması



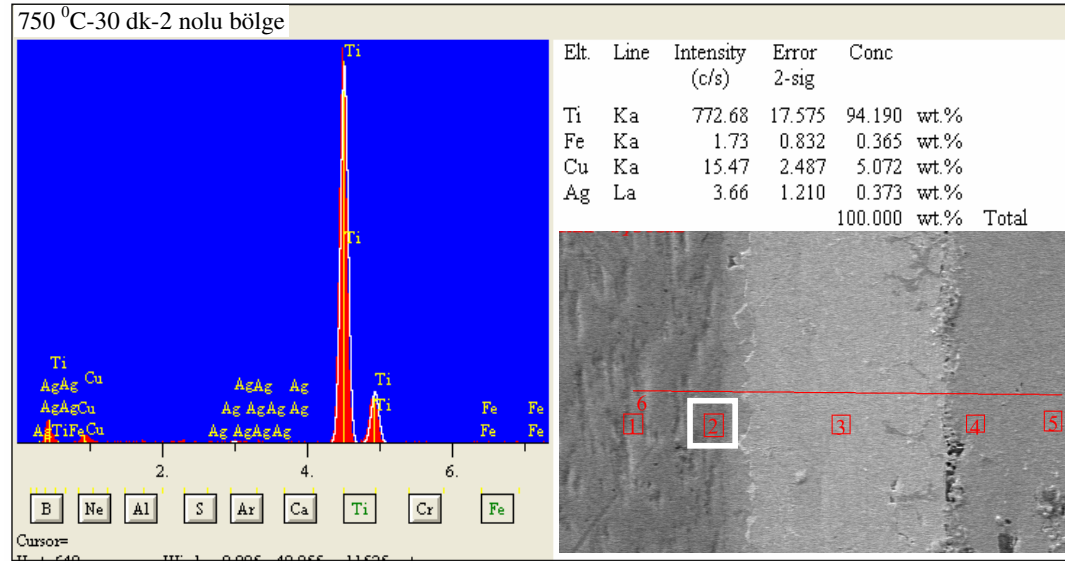
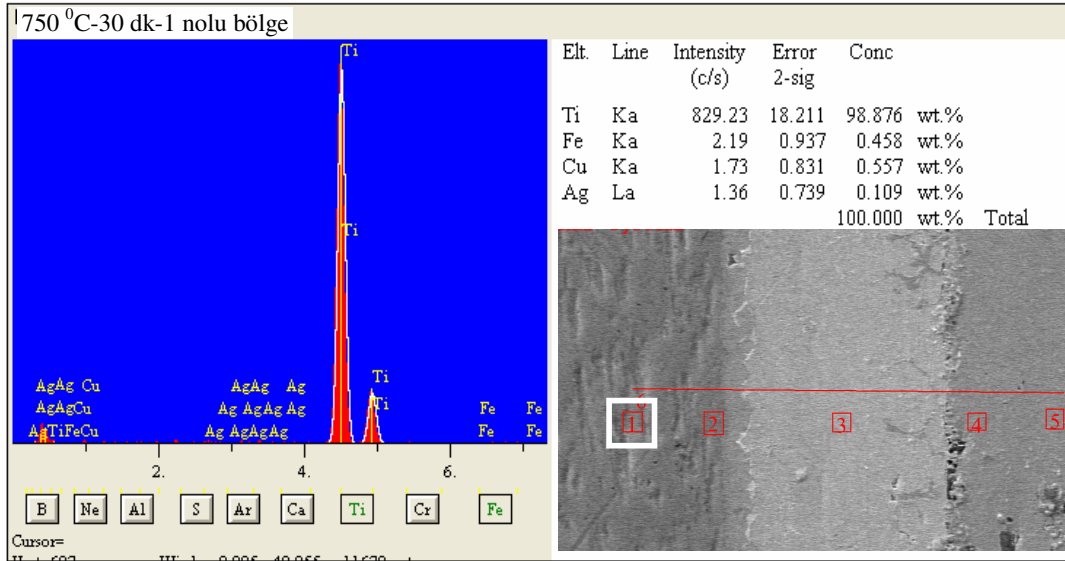
Şekil A.1 : (devam ediyor)



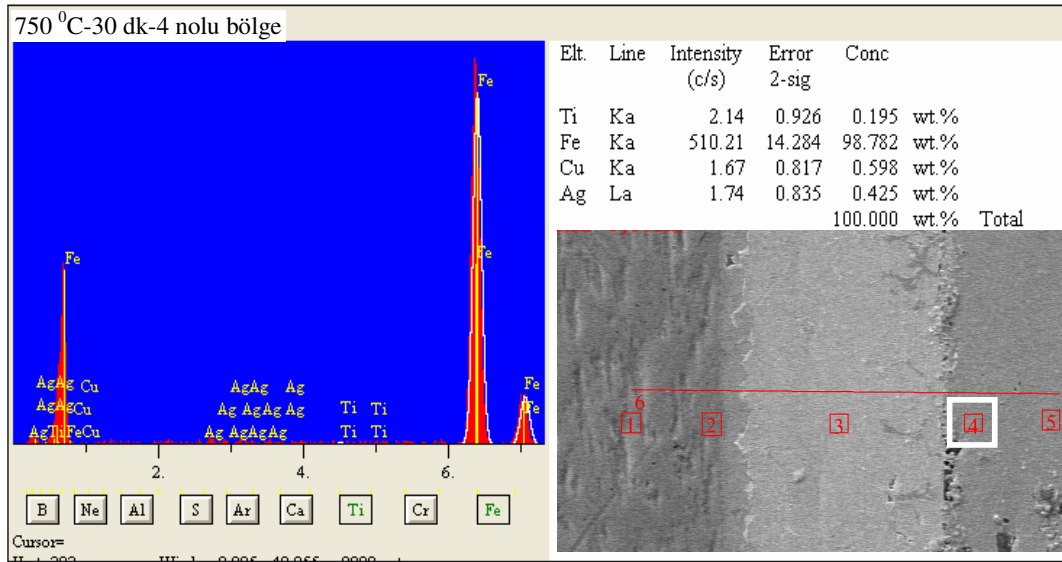
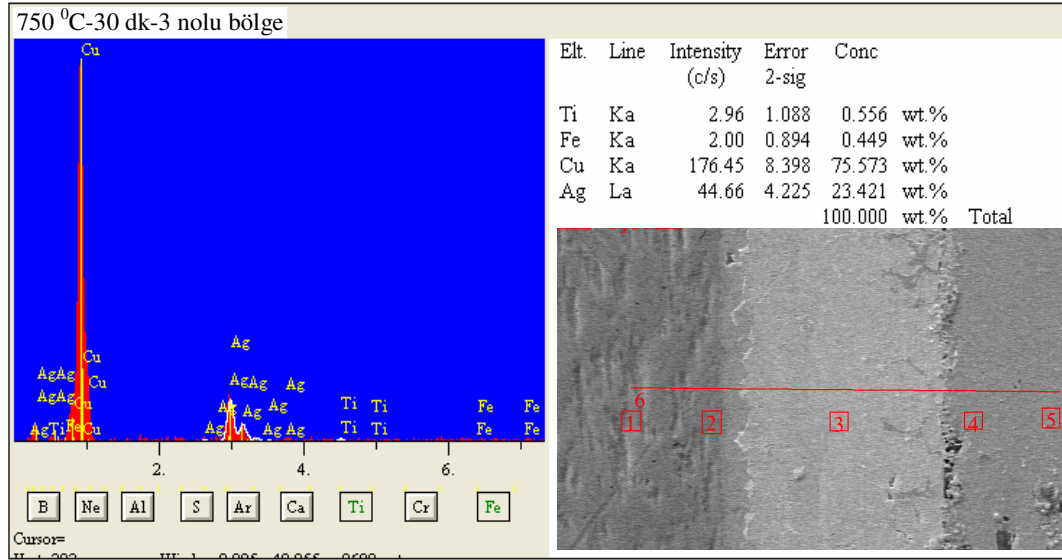
Şekil A.1 : (devam ediyor)



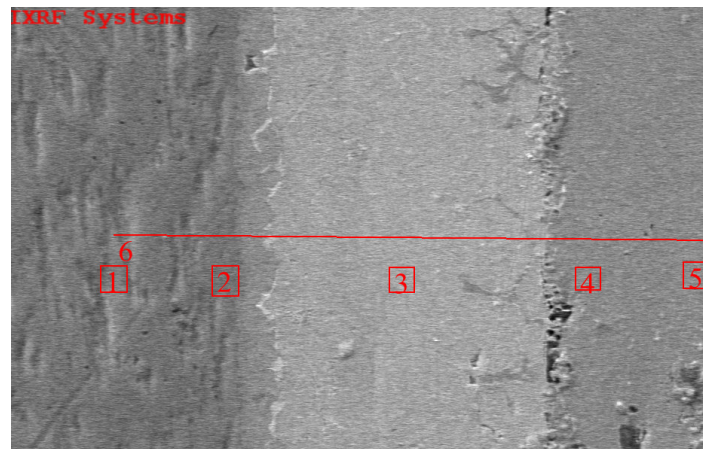
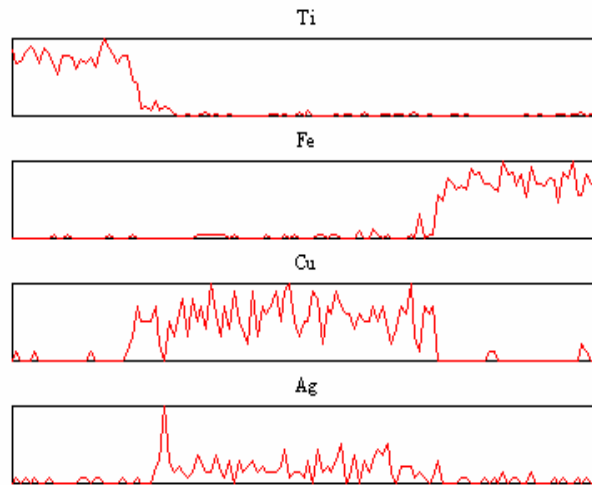
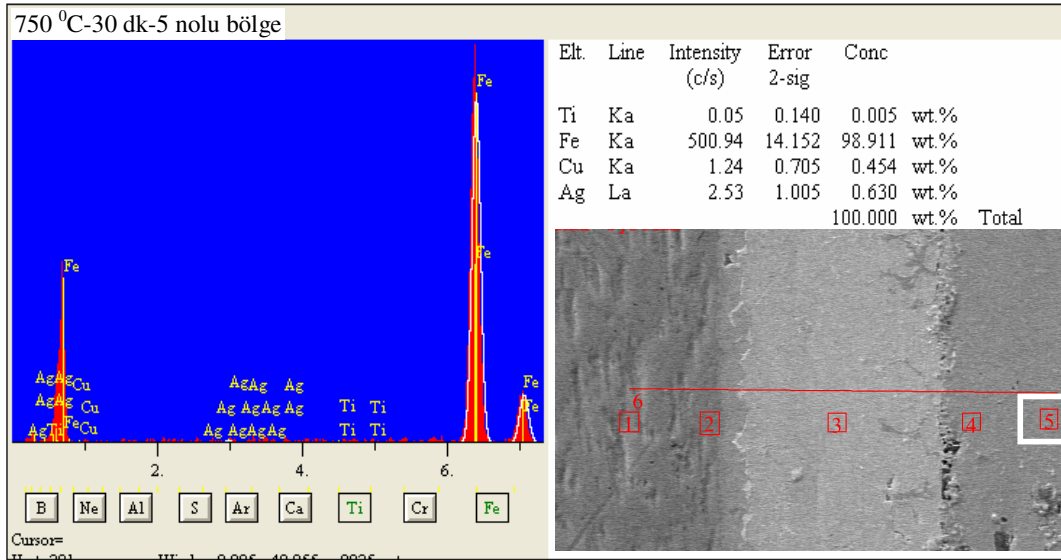
Şekil A.2: 750 °C ve 30 dakika süre ile birleştirilmiş arabağlayıcı üzerinden alınan EDS ve çizgi boyunca ağırlıkça % element analiz taraması



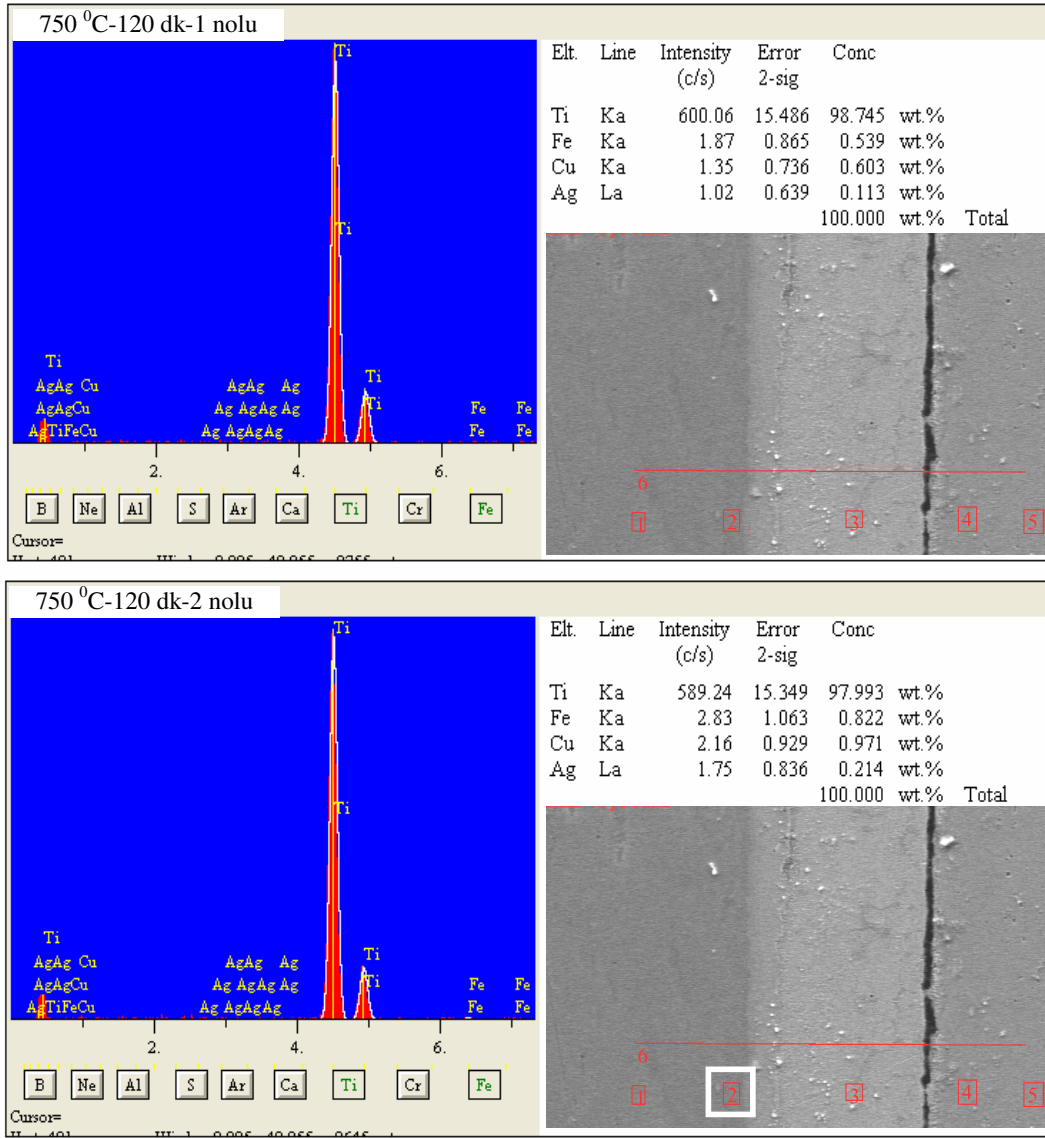
Şekil A.2: (devam ediyor)



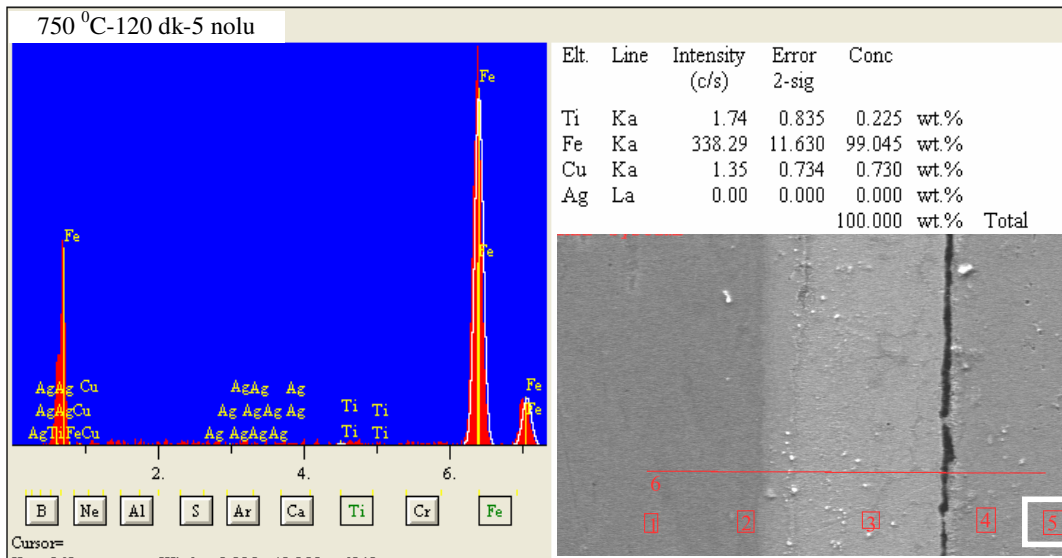
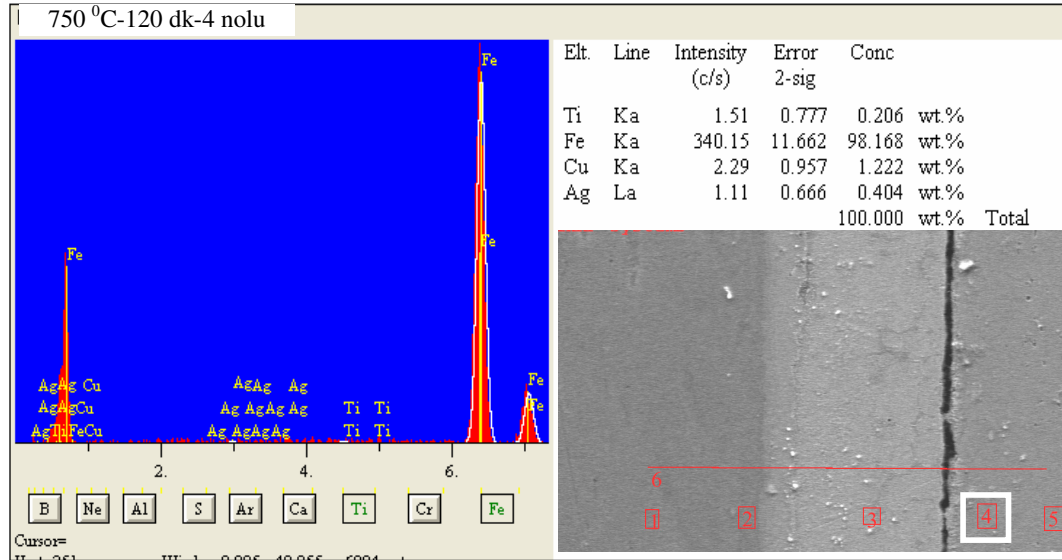
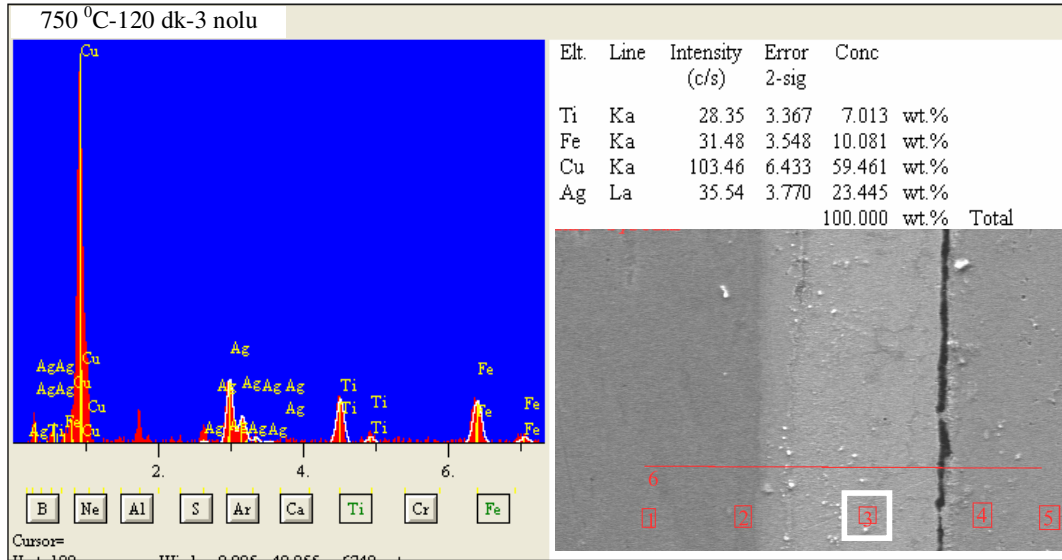
Şekil A.2: (devam ediyor)



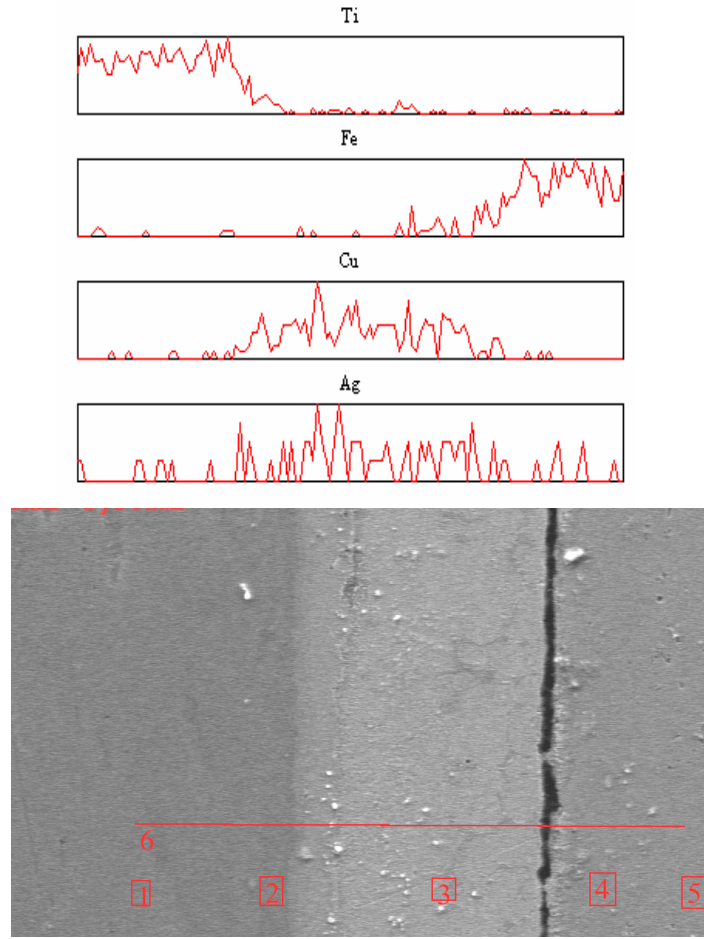
Şekil A.3: 750 °C ve 120 dakika süre ile birleştirilmiş arabağlayıcı üzerinden alınan EDS ve çizgi boyunca ağırlıkça % element analiz taraması



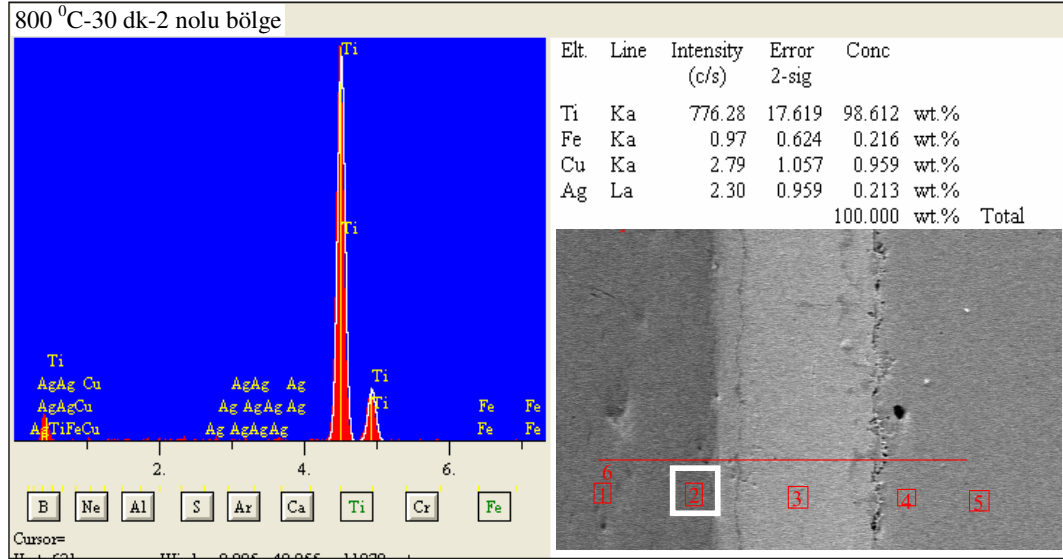
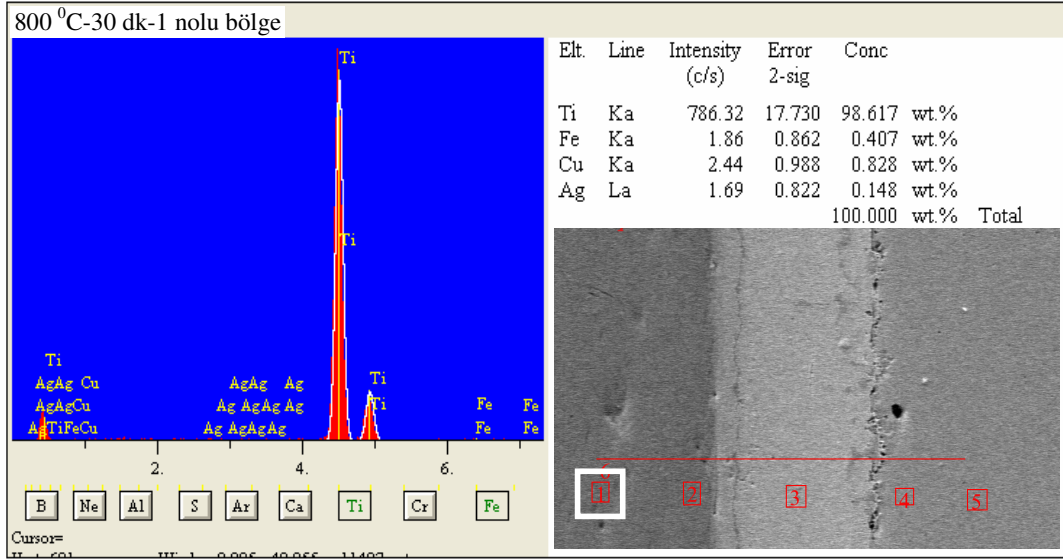
Şekil A.3: (devam ediyor)



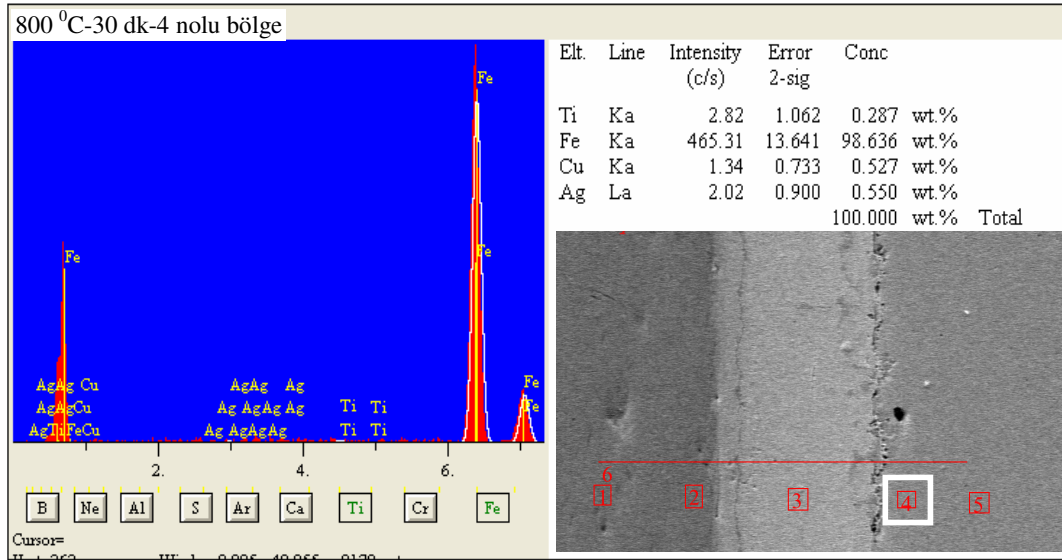
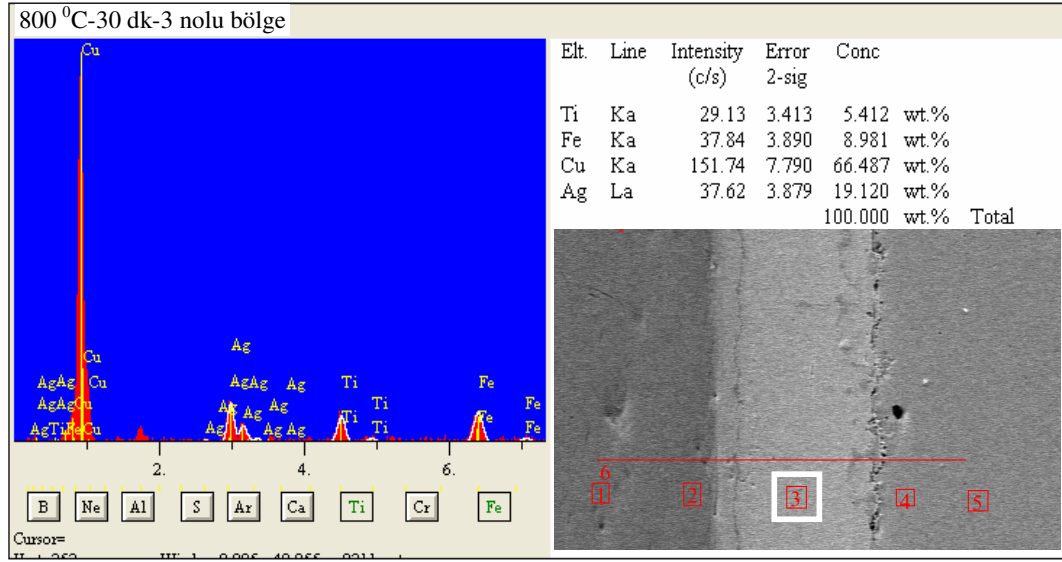
Şekil A.3: (devam ediyor)



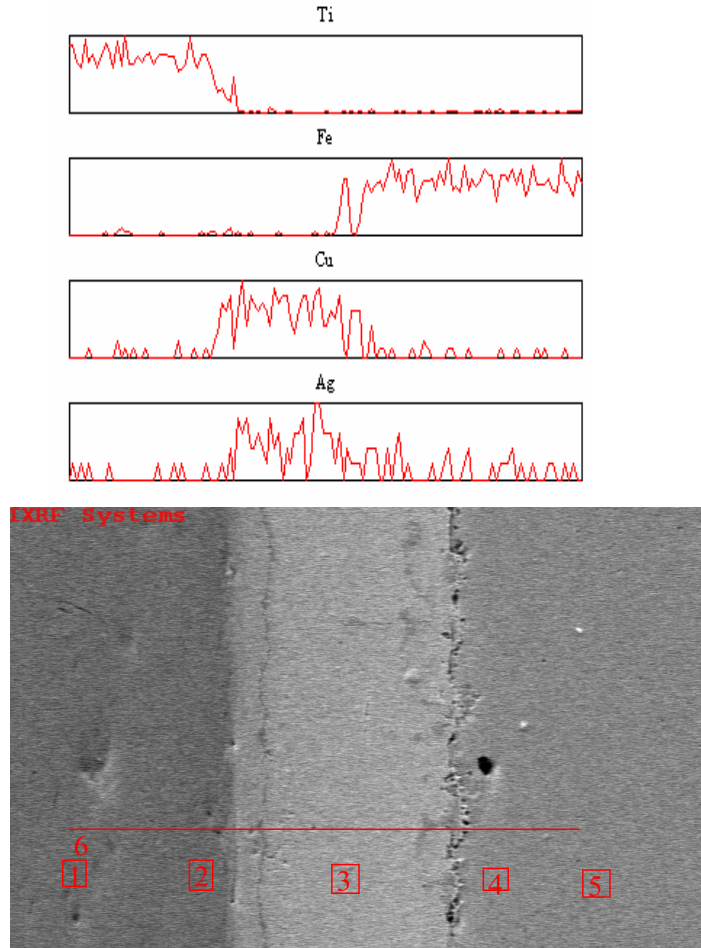
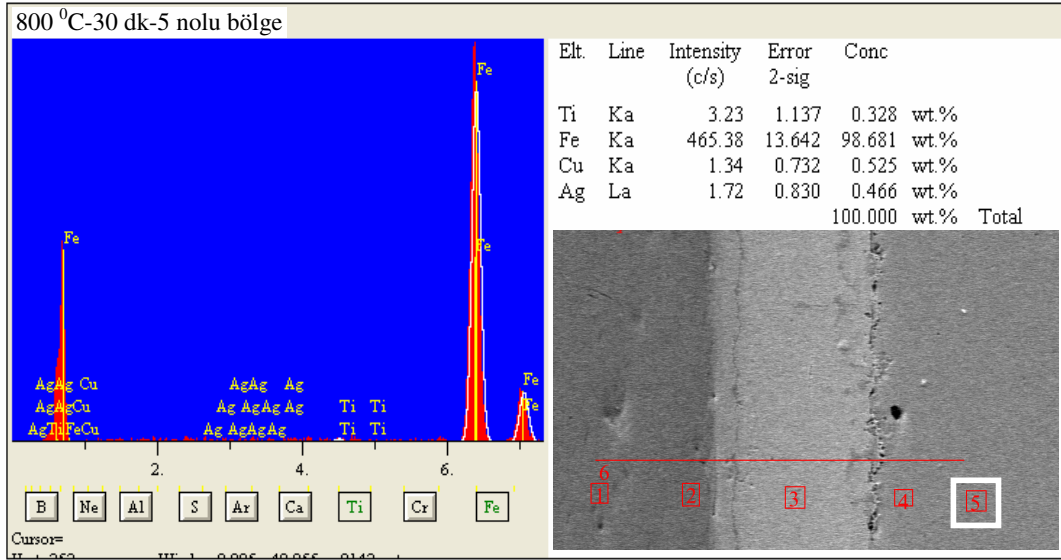
Şekil A.4: 800 °C ve 30 dakika süre ile birleştirilmiş arabağlayıcı üzerinden alınan EDS ve çizgi boyunca ağırlıkça % element analiz taraması



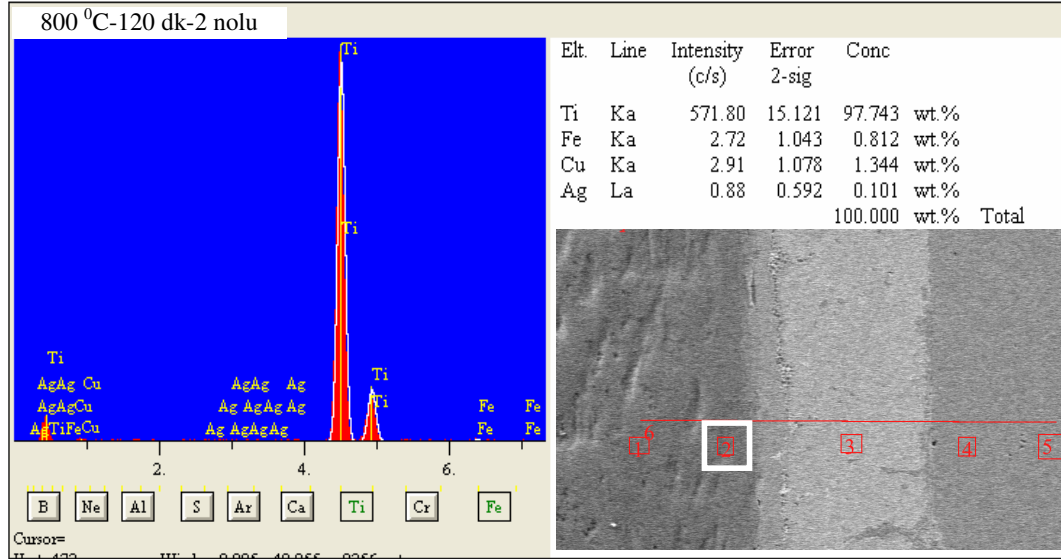
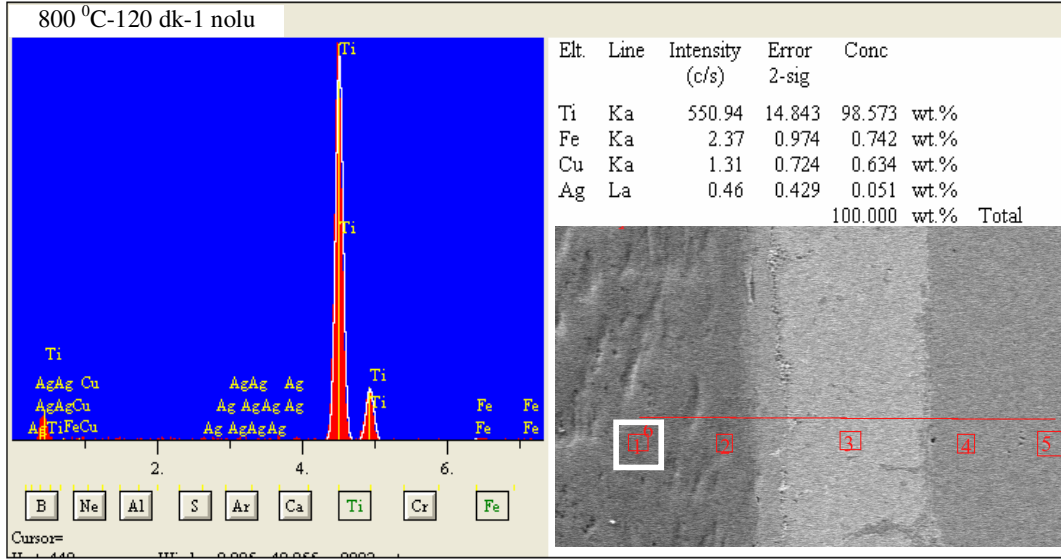
Şekil A.4: (devam ediyor)



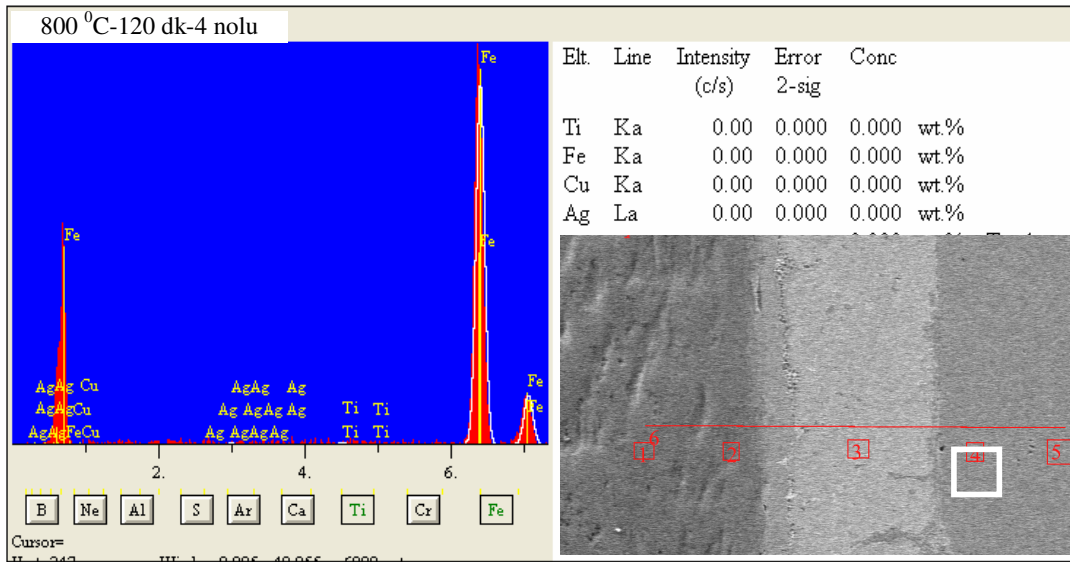
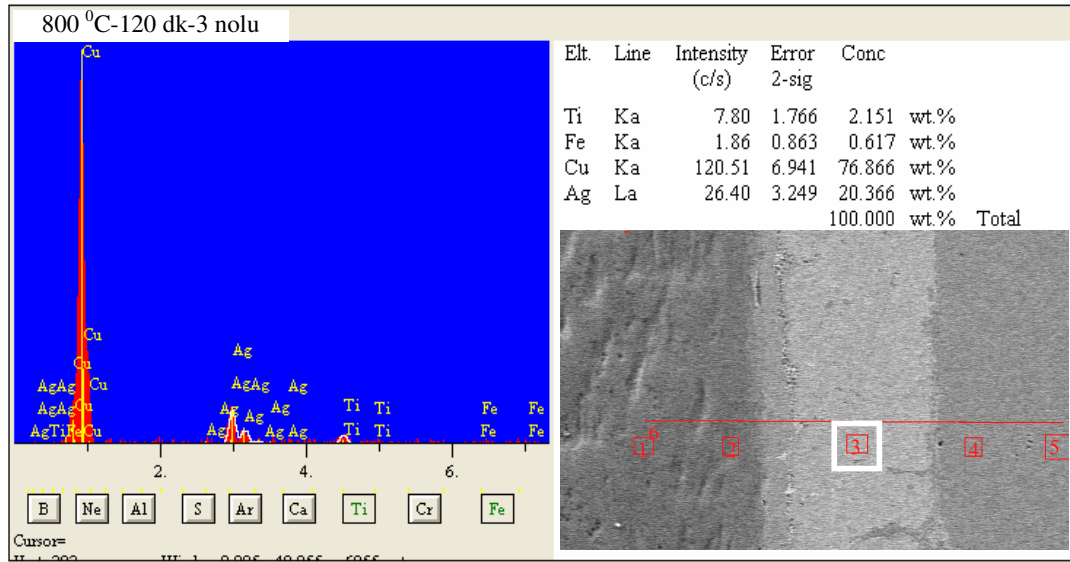
Şekil A.4: (devam ediyor)



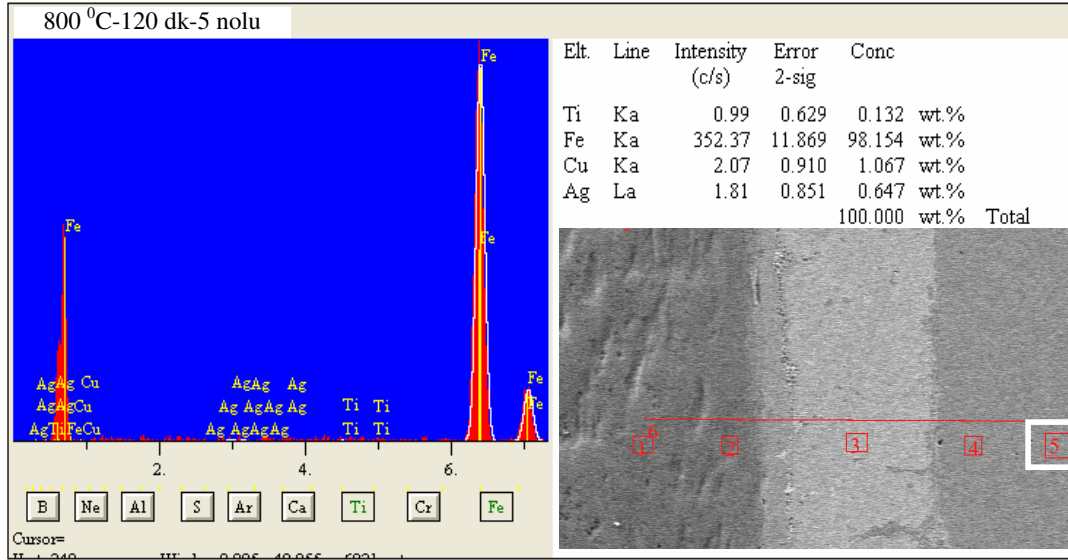
Şekil A.5: 850 °C ve 30 dakika süre ile birleştirilmiş arabağlayıcı üzerinden alınan EDS ve çizgi boyunca ağırlıkça % element analiz taraması



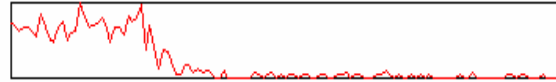
Şekil A.5: (devam ediyor)



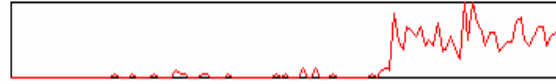
Şekil A.5: (devam ediyor)



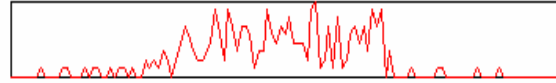
Ti



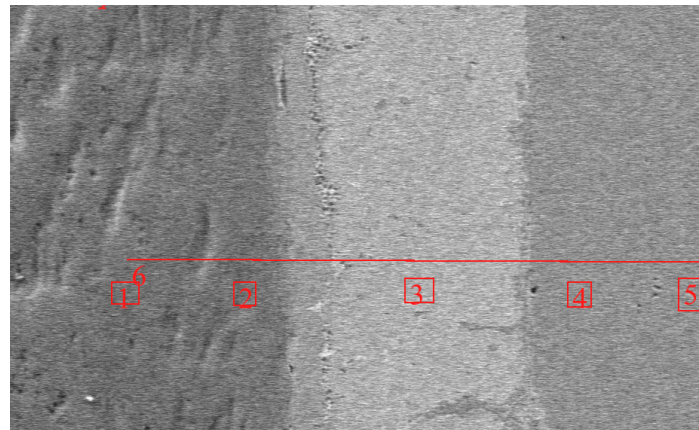
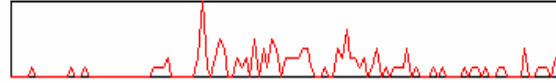
Fe



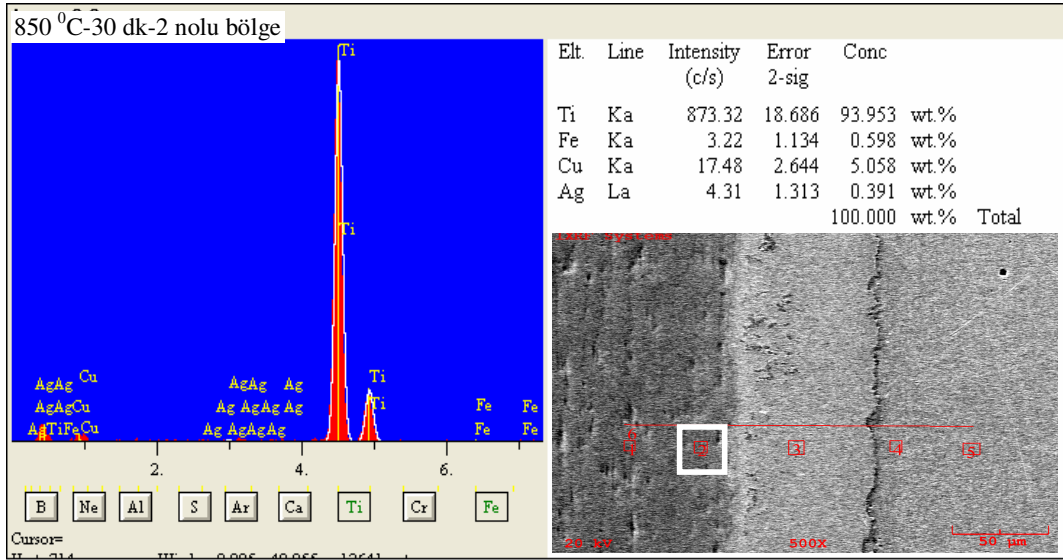
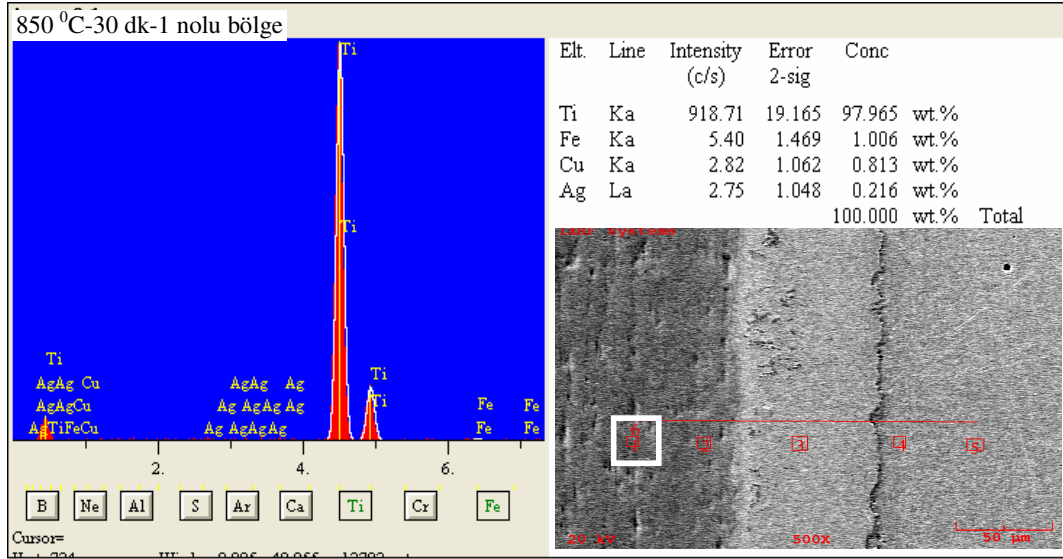
Cu



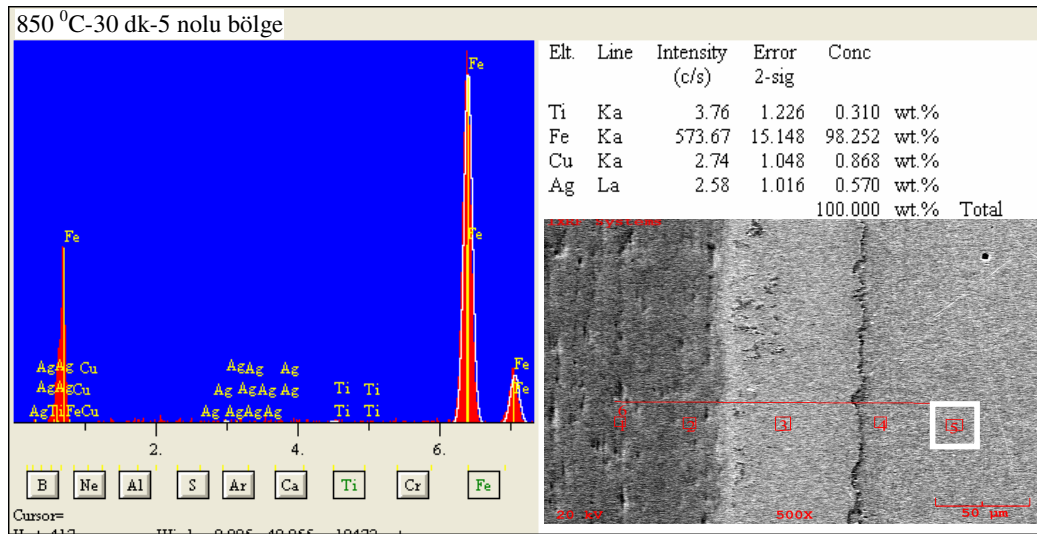
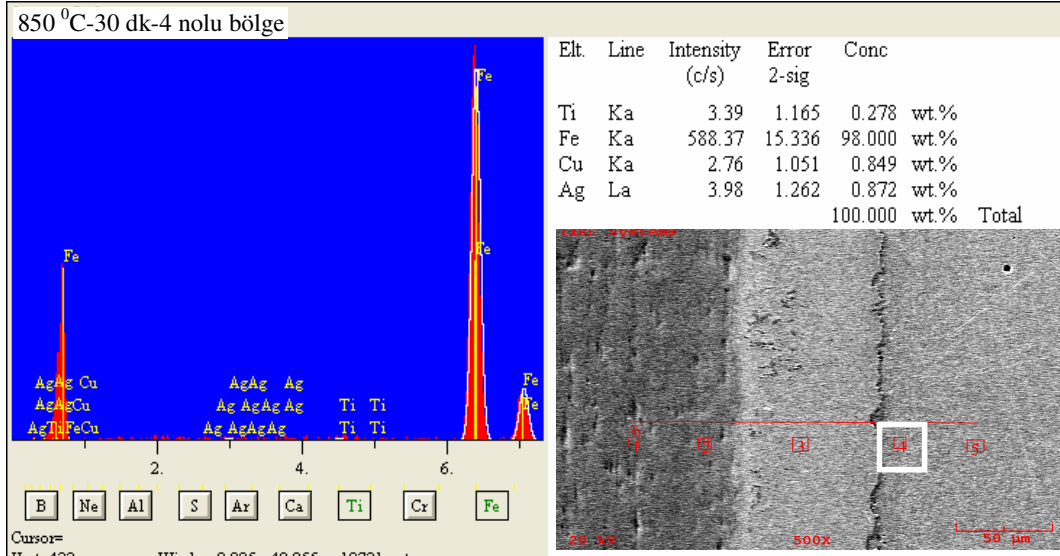
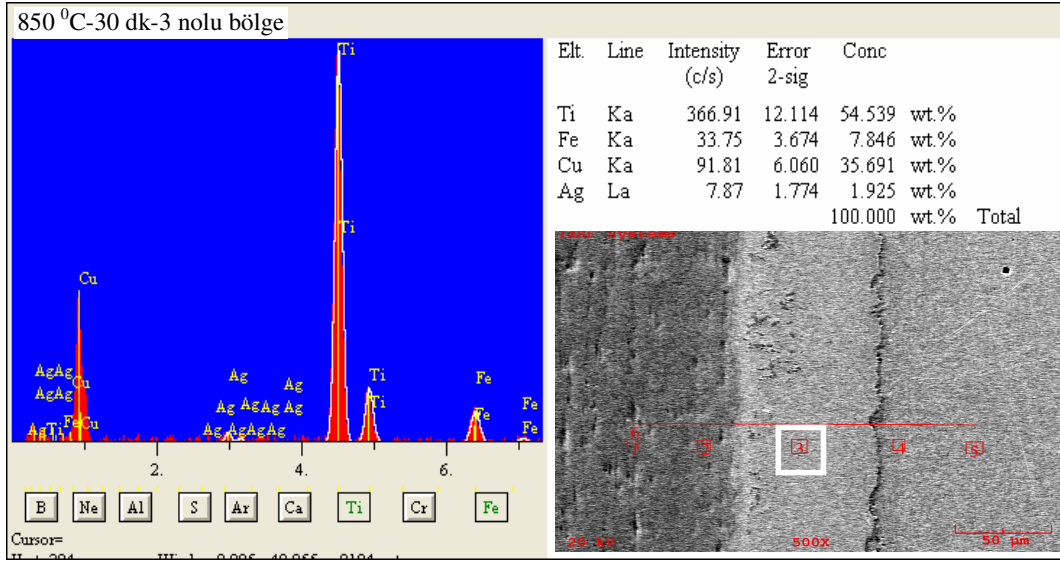
Ag



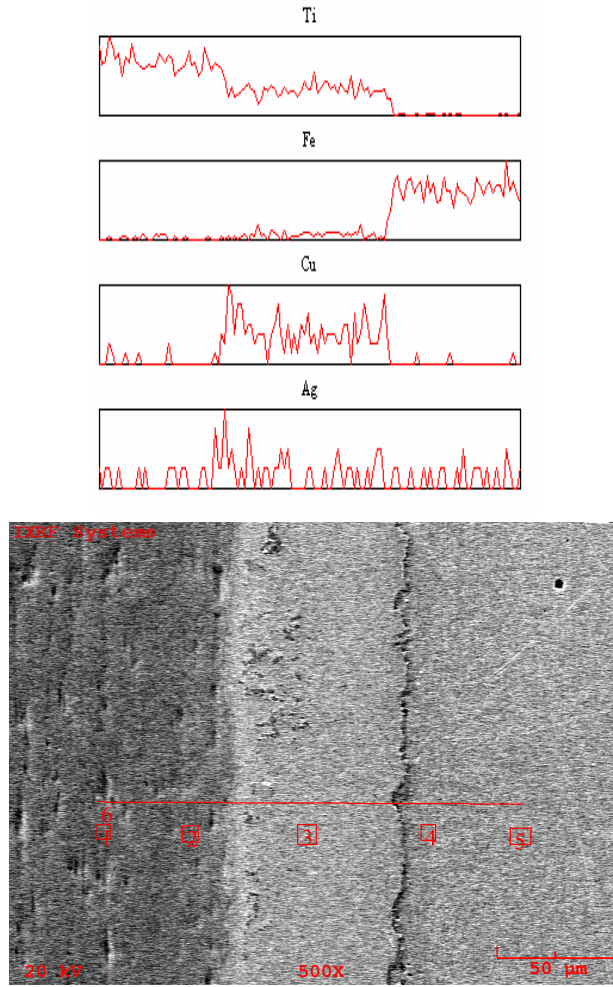
Şekil A.6: 850 °C ve 30 dakika süre ile birleştirilmiş arabağlayıcı üzerinden alınan EDS ve çizgi boyunca ağırlıkça % element analiz taraması



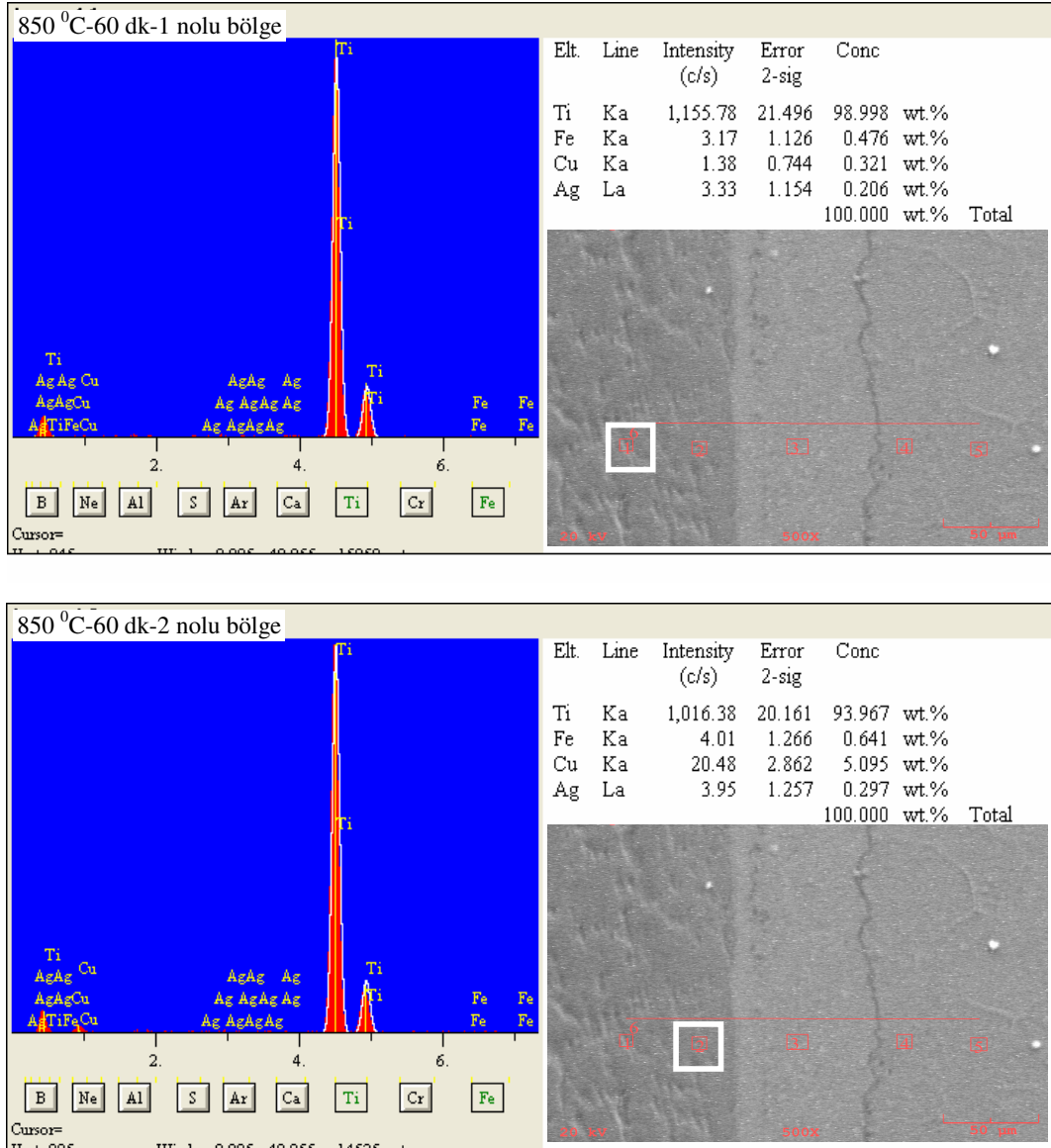
Şekil A.6: (devam ediyor)



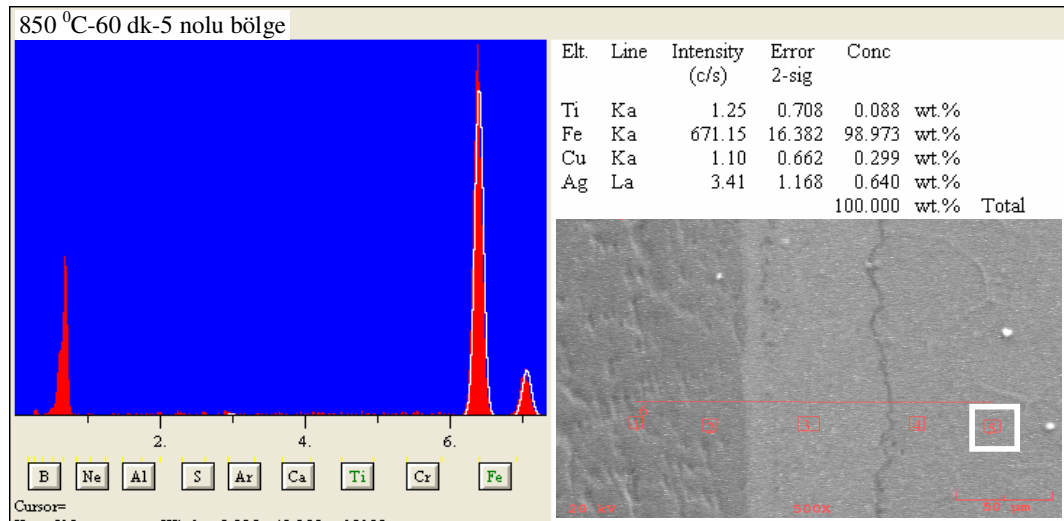
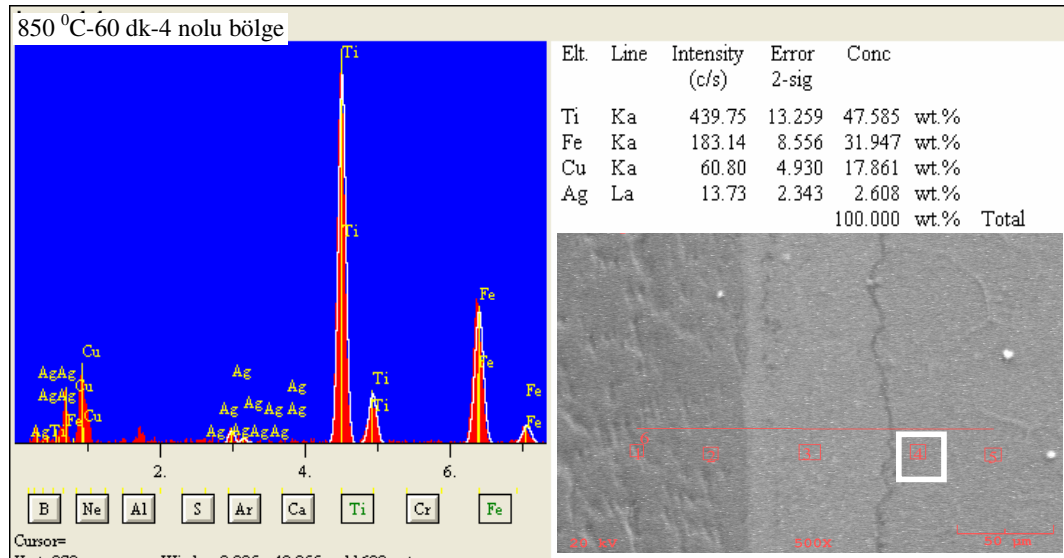
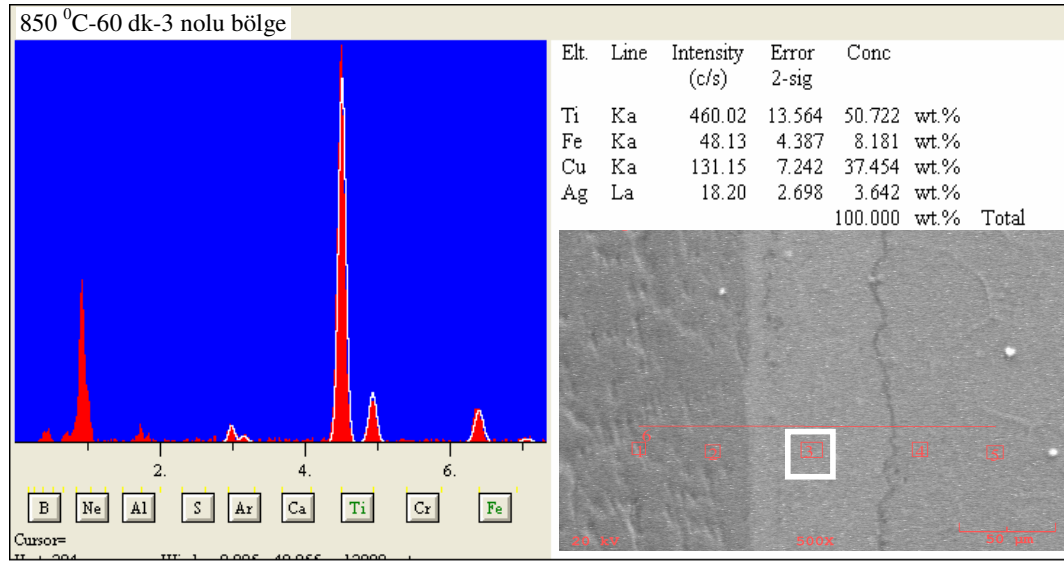
Şekil A.6: (devam ediyor)



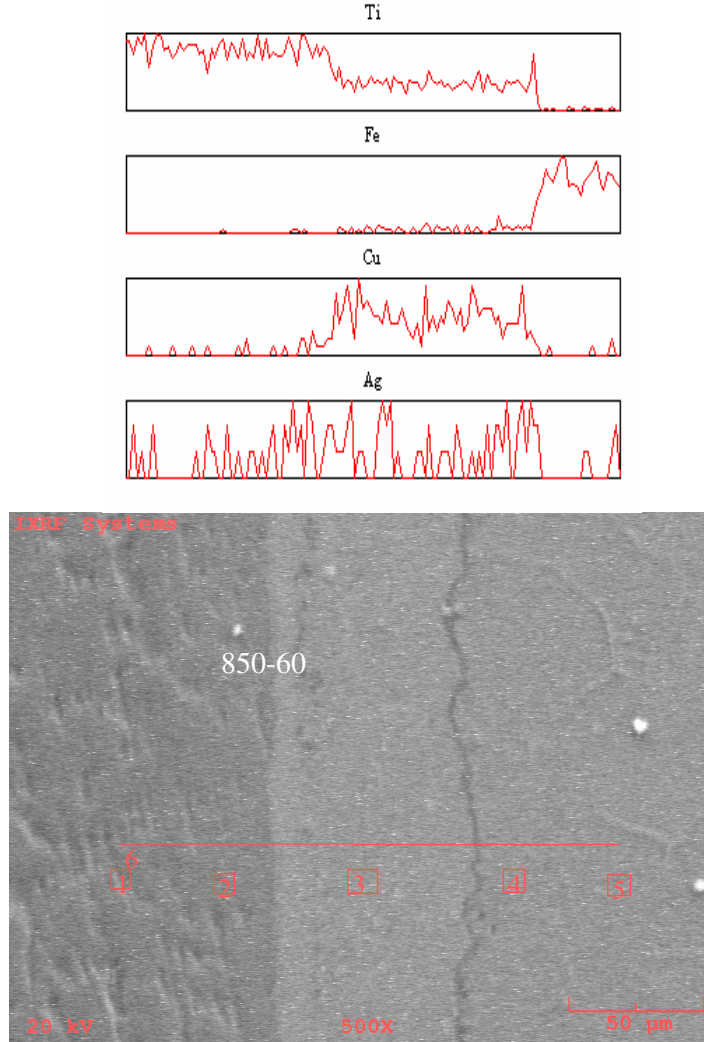
Şekil A.7: 850 °C ve 60 dakika süre ile birleştirilmiş arabağlayıcı üzerinden alınan EDS ve çizgi boyunca ağırlıkça % element analiz taraması



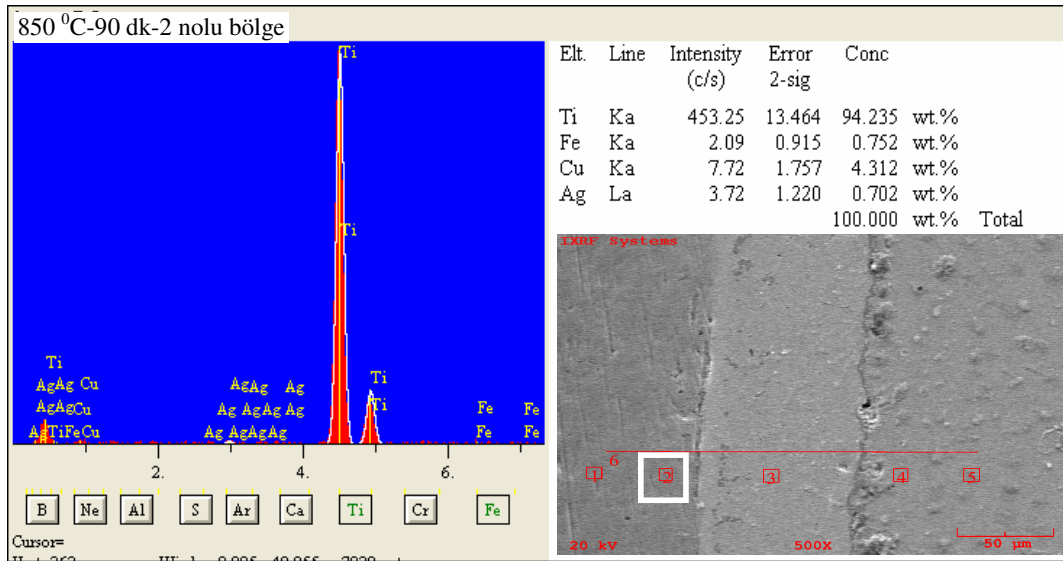
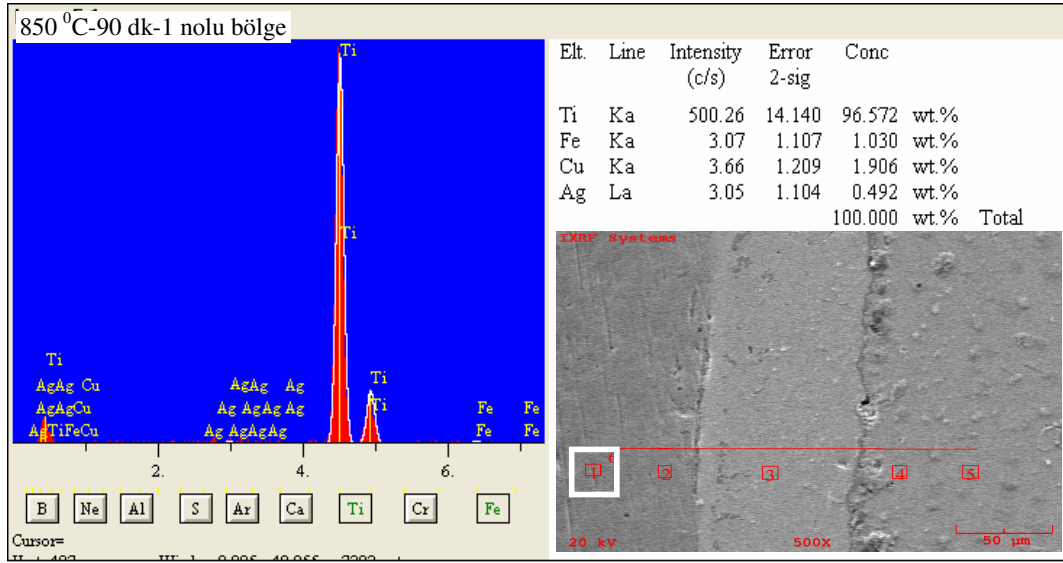
Şekil A.7: (devam ediyor)



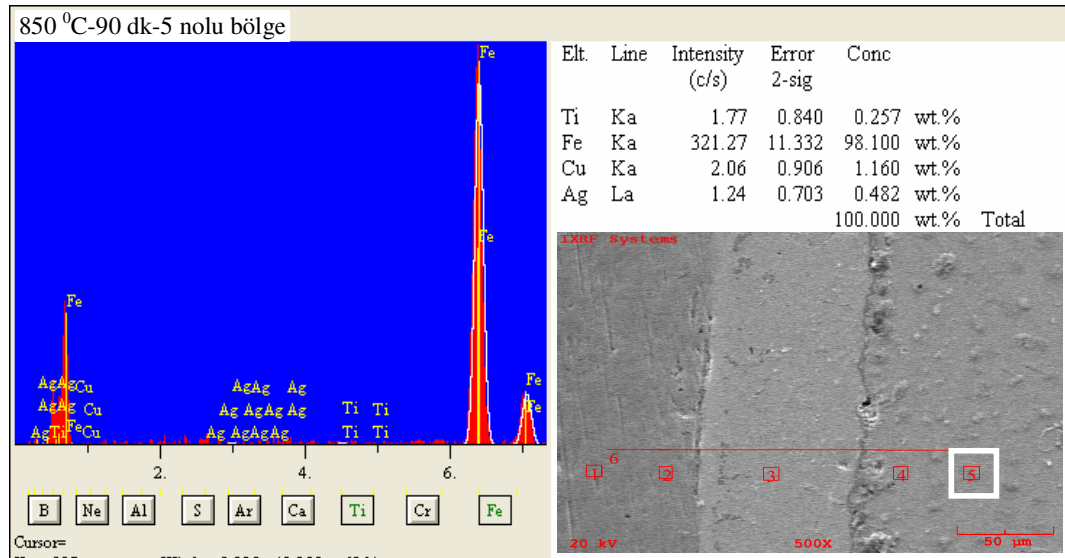
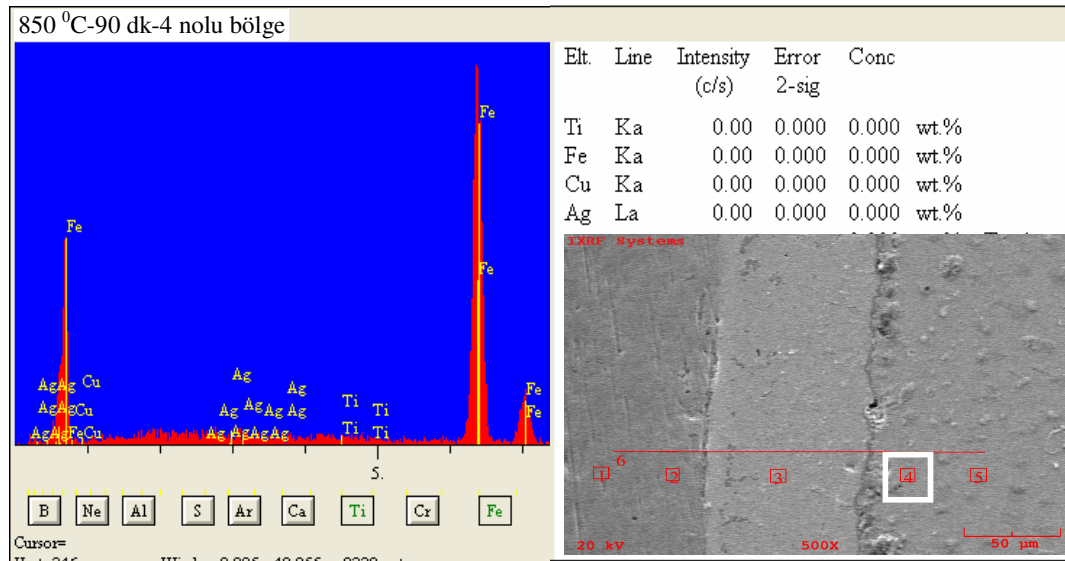
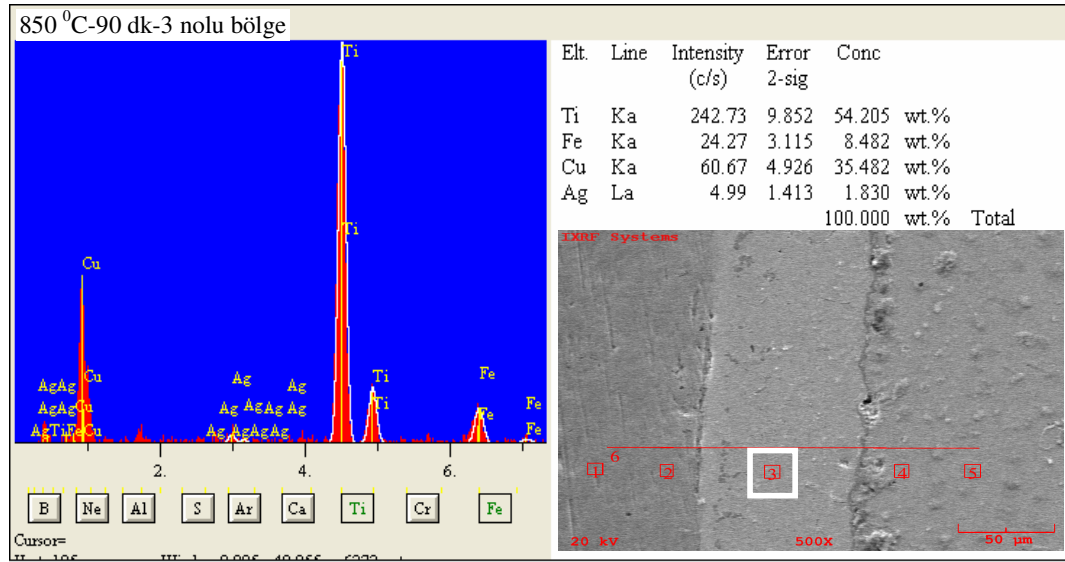
Şekil A.7: (devam ediyor)



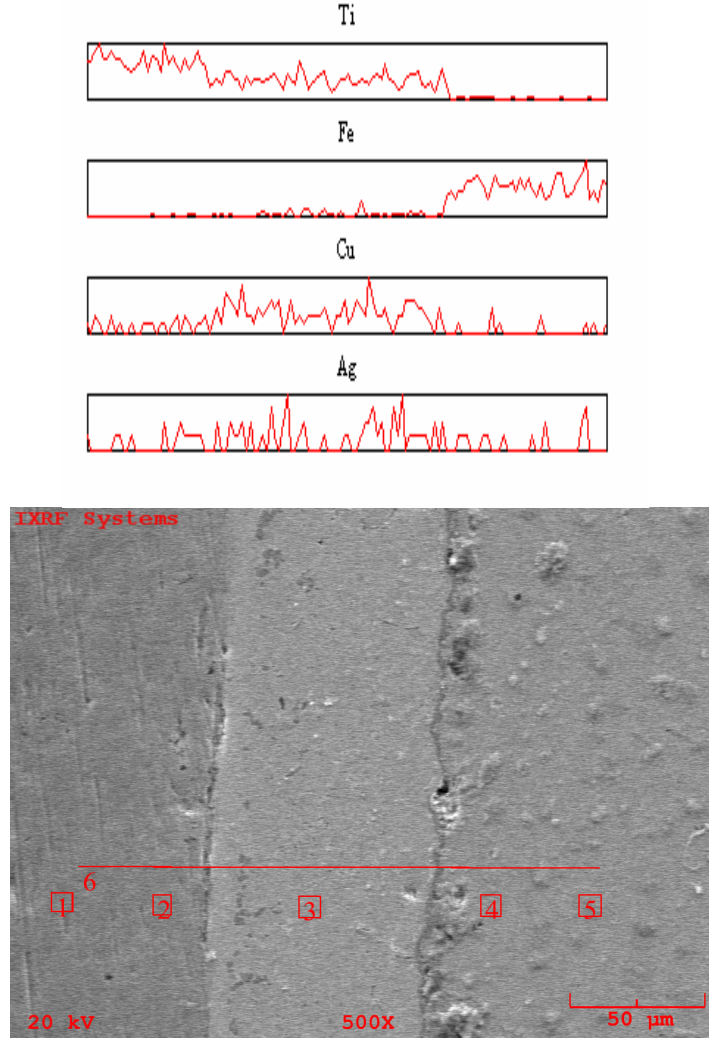
Şekil A.8: 850 °C ve 90 dakika süre ile birleştirilmiş arabağlayıcı üzerinden alınan EDS ve çizgi boyunca ağırlıkça % element analiz taraması



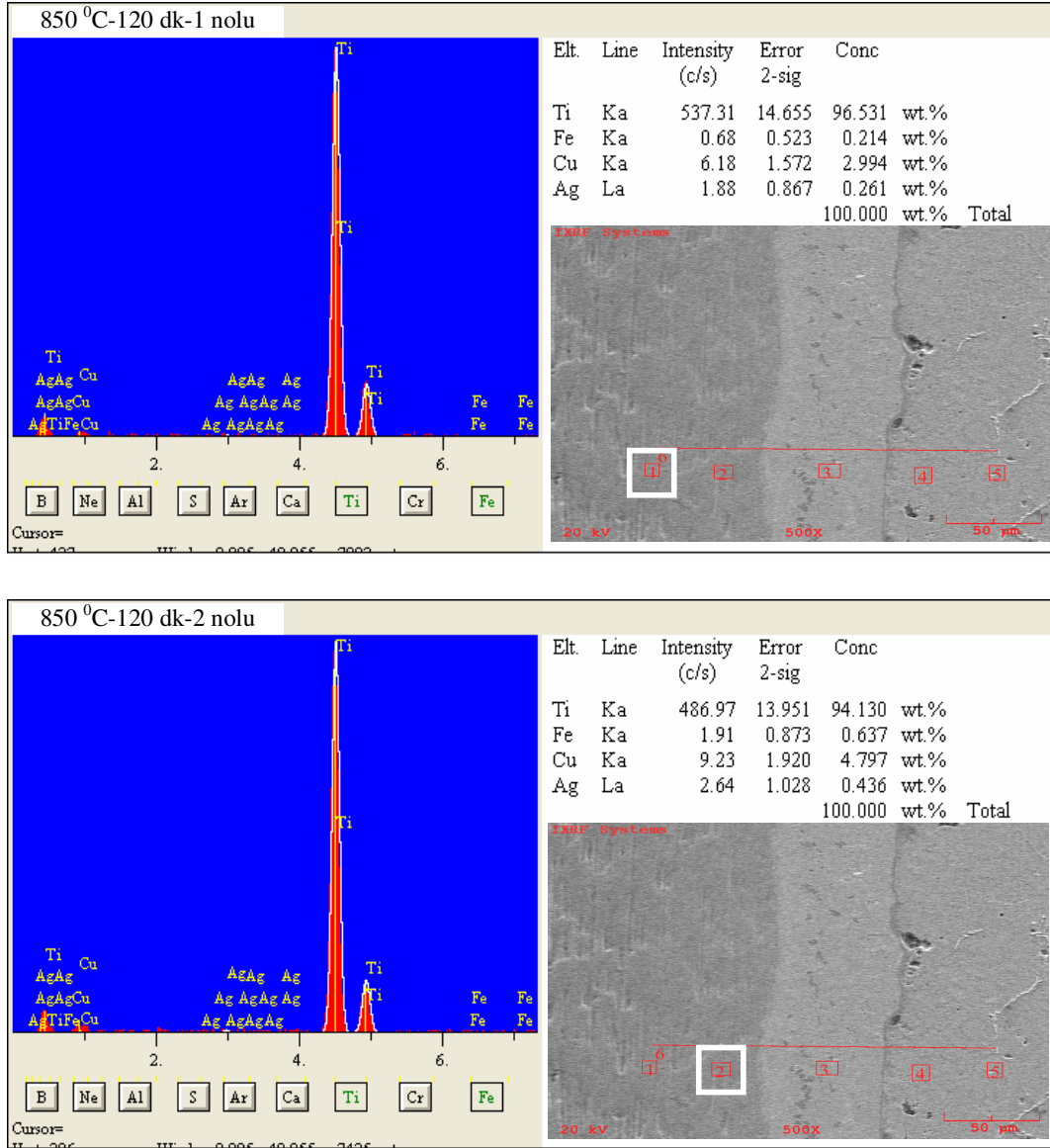
Şekil A.8: (devam ediyor)



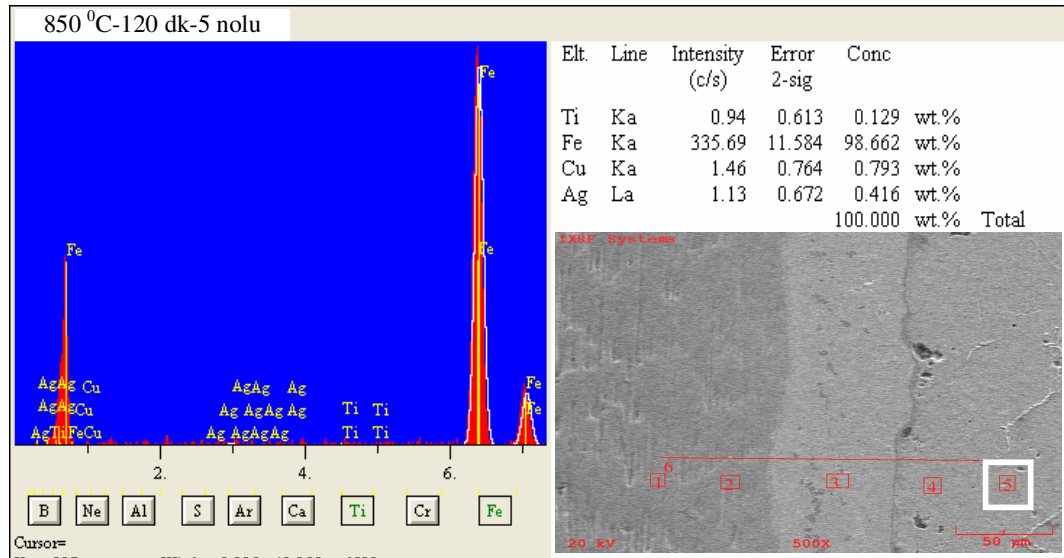
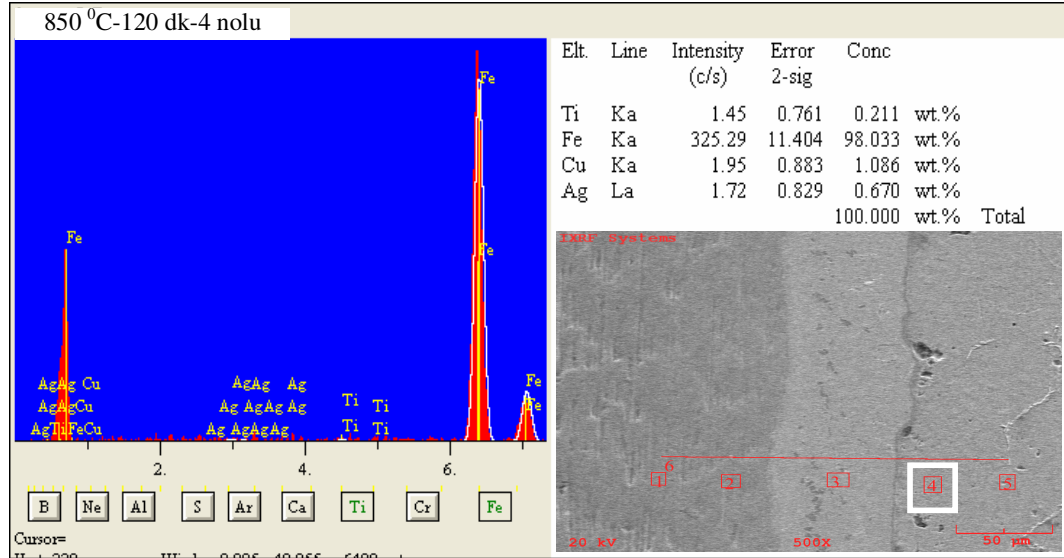
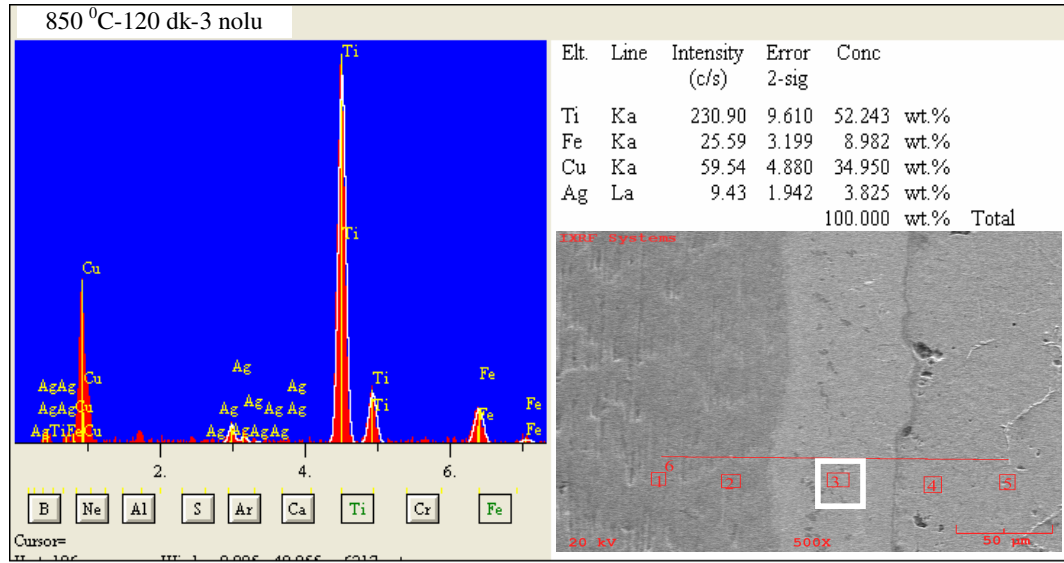
Şekil A.8: (devam ediyor)



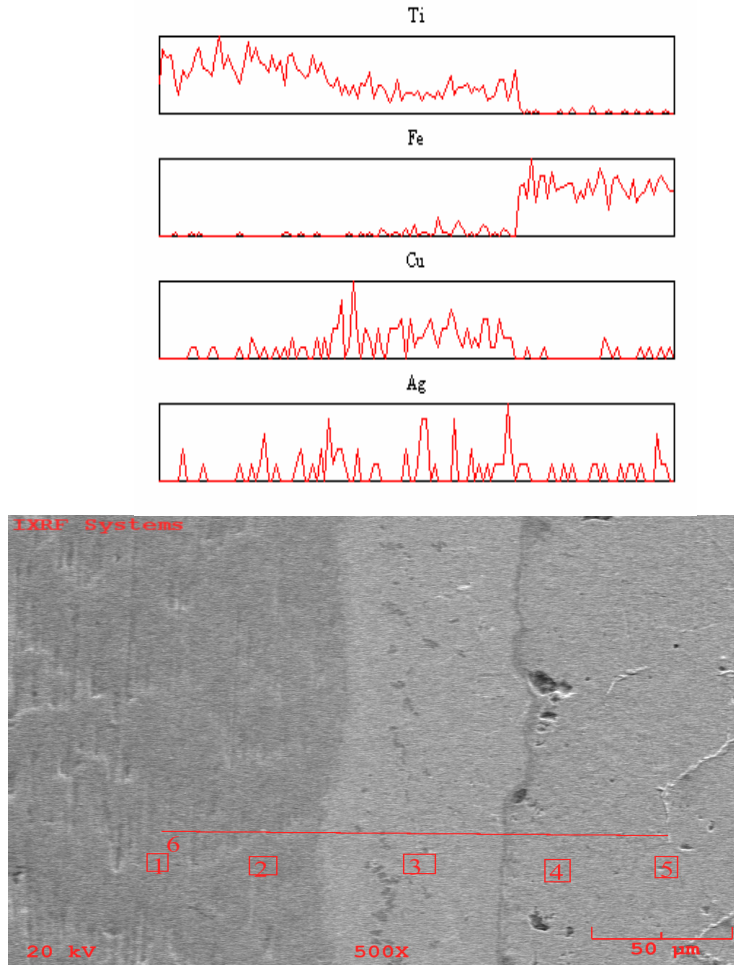
Şekil A.9: 850 °C ve 120 dakika süre ile birleştirilmiş arabağlayıcı üzerinden alınan EDS ve çizgi boyunca ağırlıkça % element analiz taraması



Şekil A.9: (devam ediyor)



Şekil A.9: (devam ediyor)



ÖZGEÇMİŞ

Evren ATASOY, 1980’de Tokat’da doğdu; ilk öğrenimini Alparslan İlköğretim Okulunda, Ortaokul öğrenimini Plevne Orta okulunda, Lise öğrenimini Tokat Endüstri Meslek Lisesi Elektrik Bölümünde tamamladı.

Tokat Endüstri Meslek Lisesi’nden mezun olduktan sonra 2000 yılında Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Karabük Teknik Eğitim Fakültesi, Metal Eğitimi Bölümü, Metal Öğretmenliği Programına girdi. 2004 yılında bu programından mezun oldu; yine aynı yıl Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Metal Eğitimi Anabilim Dalı Yüksek Lisans programa başladı.

Şu an Tokat Adoçim Çimento Fabrikası Mekanik Proje Bölümünde, Mekanik Bakım Mühendisliği ve Kalite Kontrol Elemanı olarak çalışmaktadır.

ADRES BİLGİLERİ

Adres: 600 Evler Kavşağı Kordon Sitesi A/1 No:5
TOKAT

Tel: 0(356)2286516
0(544)6544408

E-posta: eatasoy_60@hotmail.com
evrenatasoy@maynet.com
evren.atasoy@adoçim.com