

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**Ti-Al-V ALAŞIMLARININ DİFÜZYON KAYNAKLI
BAĞLANTILARININ MEKANİK VE MİKROYAPISAL
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS

Makine Müh. Serkan ÜNGÖREN

Ana Bilim Dalı: Makine Mühendisliği

Danışman: Prof. Dr. Erdiñç KALUÇ

KOCAELİ, 2007

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**Ti-Al-V ALAŞIMLARININ DİFÜZYON KAYNAKLI
BAĞLANTILARININ MEKANİK VE MİKROYAPISAL
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

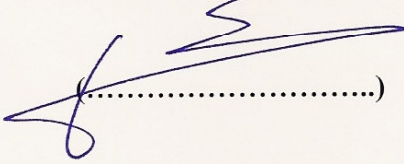
YÜKSEK LİSANS

Makine Müh. Serkan ÜNGÖREN

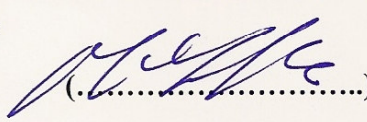
Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 15 Mayıs 2007

Tezin Savunulduğu Tarih: 12 Haziran 2007

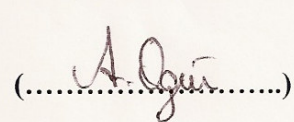
**Tez Danışmanı
Prof.Dr.Erdiñç KALUÇ**


(.....)

**Üye
Prof.Dr.Muharrem YILMAZ**


(.....)

**Üye
Prof.Dr.Ahmet OĞUR**


(.....)

KOCAELİ, 2007

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

Difüzyon kaynağı günümüz endüstrisinde, uzay ve nükleer enerji alanında geniş çapta uygulanan bir kaynak yöntemidir. Prensibi çok eskiden beri bilinmesine rağmen bu kaynak yöntemi son 30 yıl içerisinde tam olarak uygulanabilmiştir. Benzer ya da benzer olmayan malzemelerin katı halde birleştirilmeleri teknolojideki önemli gelişmelerden birisi sayılmaktadır. Bu kaynak yöntemi ile diğer ergitmeli kaynak yöntemlerinde meydana gelen, esas metalden farklı bölge oluşmamakta ve faz dönüşümü olmamaktadır. Ayrıca ergime dereceleri farklı olan metallerin ya da metal ile metal olmayan malzemelerin birleştirilmesinin, bilinen ergitme kaynak yöntemleri ile mümkün olmaması da difüzyon kaynağını endüstride ön plana çıkarmıştır. Uzay ve havacılık sektörlerinde malzeme olarak hafif ama dayanımları yüksek Ti alaşımlarının kullanılması ve bu alaşımlarla oluşturulan kaynaklı yapılarda büyük çoğunlukta difüzyon kaynağının kullanılması, konu hakkındaki araştırmaları bu yöne çevirmiştir. Sonuç olarak yapılan birçok araştırma ve endüstrideki başarılı uygulamaları ile difüzyon kaynağı vazgeçilmez katı hal kaynak yöntemi olarak yerini almıştır.

Ti-Al-V alaşımlarının difüzyon kaynağının yapılması ve mekanik özelliklerinin incelenmesi konusunda, bana başından sonuna kadar destek veren, fikirleri ile beni yönlendiren KOÜ Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nden, Mühendislik Fakültesi Dekan Yrd. Sn. Prof. Dr. Erdinç KALUÇ' a teşekkür ederim.

Malzeme temini ve numune hazırlanmasında yardımlarıyla beni destekleyen Sn. Mak. Yük. Müh. Halit GÜLOĞLU'na, laboratuvarlarındaki deney teçhizatlarını kullanmam ve deneylerimi gerçekleştirmem için yardımlarını eksik etmeyen YTÜ Davutpaşa Malzeme ve Metalurji Bölümü'nden Sn. Prof. Dr. Ahmet TOPUZ' a, Arş. Gör. Hatice MOLLAOĞLU'na, doküman temini konusunda eşsiz yardımları olan, ülkemizde bu konudaki öncü çalışmalarıyla tanınan Sn. Mak. Yük. Müh. Suat TUNCEL' e, Tübitak MAM laboratuvar teknisyeni Aygün GÜNGÖR' e teşekkür ederim.

Ayrıca hayatım boyunca beni destekleyen babam Sabri ÜNGÖREN ve annem Mensure ÜNGÖREN' e, yüksek lisans eğitimim boyunca her türlü fedakârlığa katlanan arkadaşım Esra BAYRAKTAR' a sonsuz minnet duygularımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ	iv
TABLolar DİZİNİ	vii
SİMGELER	viii
ÖZET	ix
İNGİLİZCE ÖZET	x
1. GİRİŞ	1
2. DİFÜZYON KAYNAĞI.....	3
2.1. Tarihçe	5
2.2. Difüzyon Kaynağının Teorisi ve Temel Bilgiler	6
2.2.1. Film hipotezi.....	9
2.2.2. Rekrizalizasyon hipotezi	9
2.2.3. Enerji hipotezi	9
2.2.4. Dislokasyon hipotezi	9
2.2.5. Elektron hipotezi.....	10
2.2.6. Difüzyon hipotezi	10
2.3. Diğer Birleştirme Yöntemleri İle Karşılaştırma	11
2.4. Difüzyon Kaynağına Tesir Eden Faktörler	14
2.4.1. Sıcaklık	14
2.4.2. Zaman	15
2.4.3. Kaynak basıncı	15
2.4.4. Yüzey durumu	17
2.4.5. Kaynak ortamı	18
2.4.6. Atmosferin etkisi	19
2.5. Difüzyon Kaynağı Bağlantı Türleri ve Kaynak Edilebilen Malzemeler	21
2.5.1. Eş metalsel çiftlerin ara tabakasız kaynaklanması	22
2.5.2. Farklı metallerin ara tabakasız kaynaklanması	22
2.5.3. Eş metalsel çiftlerin ara tabaka üzerinden kaynaklanması	22
2.5.4. Farklı metallerin ara tabaka üzerinden kaynaklanması	22
2.5.5. Metallerle ametallerin ara tabakalı ya da ara tabakasız kaynaklanması	23
2.6. Difüzyon Kaynağı Uygulamaları	24
2.7. Difüzyon Kaynağının Avantajları ve Dezavantajları.....	29
2.8. Difüzyon Kaynağı Donanımları	31
3. TİTANYUM ALAŞIMLARI VE BU ALAŞIMLARIN KAYNAK KABİLİYETLERİ.....	35
3.1. Titanyum Malzeme Kodları ve Standartlar	45
3.1.1. Alman standartları	45
3.1.2. Amerikan standartları	46
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	49
4.1. Malzeme Temini ve Deney Numunelerinin Hazırlanması	49
4.2. Deney Düzenineğinin Kurulması.....	53

5. DİFÜZYON KAYNAĞI İŞLEMLERİ	61
6. SONUÇLAR	63
6.1. Makroskobik İncelemeler.....	63
6.2. Mikroskobik İncelemeler	67
6.3. Mikrosertlik İncelemeleri.....	81
6.4. Kesme Dayanımı İncelemeleri.....	85
7. GENEL SONUÇLAR.....	89
KAYNAKLAR.....	91
ÖZGEÇMİŞ.....	93

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Çeşitli katı hal kaynak tekniklerinin sıcaklık, süre ve deformasyon açısından karşılaştırılması	4
Şekil 2.2. Difüzyon kaynağının üç aşamalı mekanizması.....	7
Şekil 2.2.a. Yüzey pürüzlerinin başlangıç teması.....	7
Şekil 2.2.b. Birinci aşama deformasyon ve sınır bağ düzeni	7
Şekil 2.2.c. İkinci aşama tane sınırı göçü ve gözeneklerin yok edilmesi.....	7
Şekil 2.2.d. Üçüncü aşama hacim difüzyonu ve gözeneklerin elimine edilişi.....	7
Şekil 2.3. Difüzyon kaynaklı bir parçada ara yüzeye olan mesafeye bağlı olarak bölgesel deformasyonun değişimi.	16
Şekil 2.4. Difüzyon kaynağında kaynak basıncı, kaynak sıcaklığı ve kaynak süresinin dayanıma etkisi	16
Şekil 2.5. Metal yüzey pürüzlülüğü ve kırılmış oksit tabakası	17
Şekil 2.6. Seramik ve metalin difüzyon kaynağında aşamalı bağlantının oluşumu ...	18
Şekil 2.7. Difüzyon kaynağı parametrelerinin mekanik özellikler ile etkileşimi	20
Şekil 2.8. Difüzyon kaynağı ile imal edilmiş helikopter rotor göbeği.....	24
Şekil 2.9. Aynı anda birçok parçanın birleştirilmesiyle üretilmiş difüzyon kaynaklı hidrolik ısı eşanjörü	24
Şekil 2.10. Uzay mekiği imalatında kullanılan difüzyon kaynaklı yapı elemanları...	25
Şekil 2.11. B1 tipi uçak yapımında kullanılan difüzyon kaynaklı Ti6Al4V yapı elemanları	26
Şekil 2.12. Sıvı roket motorlarında kullanılan difüzyon kaynaklı yapı elemanları....	26
Şekil 2.13. En basit difüzyon kaynağı donanımının şematik gösterimi.....	33
Şekil 2.14. Hidrolik basınç sistemine sahip komplike bir difüzyon kaynağı makinesi	34
Şekil 2.15. Laboratuvar ortamında oluşturulmuş difüzyon kaynağı aparat düzeneği ..	34
Şekil 3.1. Titanyumda α - β geçiş sıcaklığı üzerine alaşımlandırmanın etkileri.....	37
Şekil 3.2. Ti alaşımlarında Ti - Al denge diyagramı	43
Şekil 3.3. Ti6Al4V alaşımının üç boyutlu iç yapısı	43
Şekil 3.4. Alaşım elementlerinin ve saflığı bozan maddelerin titanyumun mekanik özellikleri üzerine etkileri a- araya sıkışma katı eriyikleri oluşturan elementler b- yerine geçme katı eriyikler oluşturan elementler	44
Şekil 3.5. Rolls Royce uçak motorunun Ti6Al4V' dan imal edilmiş türbin kanatları	48
Şekil 3.6. Rolls Royce uçak kanadındaki difüzyon kaynaklı Ti6Al4V yapı elemanı	48
Şekil 4.1. Ti6Al4V malzemenin çeşitli fazlarda sıcaklık ile dayanımının değişimi ..	51
Şekil 4.2. Deneyde kullanılacak numunelerin borudan kesilerek istenilen ölçülere getirilmesi.....	51
Şekil 4.3. Ti6Al4V malzemenin içyapı görüntüsü	52
Şekil 4.4. Deneylerde kullanılan difüzyon kaynağı teçizatı.....	53

Şekil 4.5. Baskı kuvvetini sağlayan sonsuz vida mekanizması mekanik kontrol kolları	54
Şekil 4.6. Ölçme saati ve dinamometre ile kuvvet kalibrasyonu	55
Şekil 4.7. Pirinçten imal edilmiş hücre	56
Şekil 4.8. Numunelerin numune tutucuya yerleştirilme şekli	57
Şekil 4.9. Deney teçhizatı numune tutucu imalat resmi.....	57
Şekil 4.10. Baskı elemanı imalat resmi.....	58
Şekil 4.11. Numune tutucu içinde numunelerin üç boyutlu yerleşim şekli	58
Şekil 4.12. Deney teçhizatının deneye başlamadan önceki monte edilmiş son durumu.....	59
Şekil 4.13. Jumbo Itron dijital sıcaklık ölçme cihazı.....	59
Şekil 4.14. Deneyde kullanılan Edwards marka vakum pompası	60
Şekil 6.1. Difüzyon kaynağı sonrası numunelerin bakalite alınmış görüntüsü.....	63
Şekil 6.2. Çeşitli parametreler ile birleştirilen numuneler	64
Şekil 6.3. Birleştirme sonrası parlatılan yüzeyin fotoğrafı	64
Şekil 6.4. Birleştirilen numunelerin sertlik ölçümleri sonrası görüntüleri.....	65
Şekil 6.5. Bakalit içindeki numunelerin birleşme bölgesi görüntüsü	65
Şekil 6.6 Çeşitli parametreler ile birleştirilen numunelerdeki plastik deformasyon görüntüleri	66
Şekil 6.7 Çeşitli parametrelerde birleştirilen numunelerin deney sonrası görüntüleri	66
Şekil 6.8 Çeşitli parametrelerde birleştirilen numunelerin deney sonrası görüntüleri	67
Şekil 6.9. 800°C – 1,36Mpa – 90 Dak. parametreleri ile kaynatılan numunenin 2,5X optik mikroskop görüntüsü	68
Şekil 6.10. 800°C – 1,36Mpa – 90 Dak. parametreleri ile kaynatılan numunenin 5X optik mikroskop görüntüsü.....	69
Şekil 6.11. 800°C – 1,36Mpa – 90 Dak. parametreleri ile kaynatılan numunenin 50X optik mikroskop görüntüsü.....	69
Şekil 6.12. 800°C – 1,36Mpa – 90 Dak. parametreleri ile kaynatılan numunenin 50X optik mikroskop görüntüsü.....	70
Şekil 6.13. 850°C – 1,36Mpa – 90 Dak. parametreleri ile kaynatılan numunenin 2,5X optik mikroskop görüntüsü.....	70
Şekil 6.14. 850°C – 1,36Mpa – 90 Dak. parametreleri ile kaynatılan numunenin 50X optik mikroskop görüntüsü.....	71
Şekil 6.15. 815°C – 2,72Mpa – 90 Dak. parametreleri ile kaynatılan numunenin 2,5X optik mikroskop görüntüsü.....	71
Şekil 6.16. 815°C – 2,72Mpa – 90 Dak. parametreleri ile kaynatılan numunenin 5X optik mikroskop görüntüsü.....	72
Şekil 6.17. 815°C – 2,72Mpa – 90 Dak. parametreleri ile kaynatılan numunenin 50X optik mikroskop görüntüsü	72
Şekil 6.18. 815°C – 2,72Mpa – 90 Dak. parametreleri ile kaynatılan numunenin SEM görüntüsü	73
Şekil 6.19. 815°C – 2,72Mpa – 90 Dak. parametreleri ile kaynatılan numunenin SEM görüntüsü	73
Şekil 6.20. 850°C – 1,36Mpa – 90 Dak. parametreleri ile kaynatılan numunenin SEM görüntüsü	74
Şekil 6.21. 850°C – 1,36Mpa – 90 Dak. parametreleri ile kaynatılan numunenin SEM görüntüsü	74

Şekil 6.22. 800°C – 1,36Mpa – 90 Dak. parametreleri ile kaynatılan numunenin SEM görüntüsü ...	75
Şekil 6.23. 800°C – 1,36Mpa – 90 Dak. parametreleri ile kaynatılan numunenin SEM görüntüsü ...	75
Şekil 6.24. 815°C – 2,72Mpa – 90 Dak. parametreleri ile kaynatılan numunenin SEM görüntüsü ve sertlik ölçülen noktadaki iz görüntüsü ...	76
Şekil 6.25. 900°C – 5Mpa – 90 Dak. parametreleri ile kaynatılan numunenin SEM görüntüsü ...	76
Şekil 6.26. 900°C – 5Mpa – 90 Dak. parametreleri ile kaynatılan numunenin SEM görüntüsü ...	77
Şekil 6.27. 600°C – 2,72Mpa – 60 Dak. parametrelerinde birleşmenin gerçekleşmediği numunede kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü ...	77
Şekil 6.28. 655°C – 2,72Mpa – 60 Dak. parametreleri ile kaynatılan numunenin SEM görüntüsü ...	78
Şekil 6.29. 655°C – 2,72Mpa – 60 Dak. parametreleri ile kaynatılan numunenin SEM görüntüsü ...	78
Şekil 6.30. 710°C – 2,72Mpa – 60 Dak. parametreleri ile kaynatılan numunenin SEM görüntüsü ...	79
Şekil 6.31. 710°C – 2,72Mpa – 60 Dak. parametreleri ile kaynatılan numunenin SEM görüntüsü ...	79
Şekil 6.32. 710°C – 2,72Mpa – 60 Dak. parametreleri ile kaynatılan numunenin SEM görüntüsü ...	80
Şekil 6.33. 800°C – 3Mpa – 90 Dak. parametreleri ile kaynatılan numunenin SEM görüntüsü ...	80
Şekil 6.34. 800°C – 3Mpa – 90 Dak. parametreleri ile kaynatılan numunenin SEM görüntüsü ...	81
Şekil 6.35. 800°C – 1,36Mpa – 90 Dak. parametreleri ile kaynatılan numunenin mikrosertlik değerleri grafiği ...	82
Şekil 6.36. 850°C – 1,36Mpa – 90 Dak. parametreleri ile kaynatılan numunenin mikrosertlik değerleri grafiği ...	83
Şekil 6.37. 815°C – 2,72Mpa – 90 Dak. parametreleri ile kaynatılan numunenin mikrosertlik değerleri grafiği ...	83
Şekil 6.38. 800°C – 1,36Mpa – 90 Dak. parametreleri ile kaynatılan numunenin birleşme çizgisi boyunca ölçülen sertlik değerleri grafiği ...	84
Şekil 6.39. 850°C – 1,36Mpa – 90 Dak. parametreleri ile kaynatılan numunenin birleşme çizgisi boyunca ölçülen sertlik değerleri grafiği ...	84
Şekil 6.40. 815°C – 2,72Mpa – 90 Dak. parametreleri ile kaynatılan numunenin birleşme çizgisi boyunca ölçülen sertlik değerleri grafiği ...	85
Şekil 6.41. Kesme deneyi aparatı ve kesme deneyinin şematik gösterimi ...	85
Şekil 6.42: Kesme Dayanımı Değerleri Grafiği.....	88

TABLolar DİZİNİ

Tablo 2.1. Difüzyon kaynağının diğer kaynak yöntemleri ile karşılaştırılması	13
Tablo 2.2. Belli basınçlarda birim hacimde % olarak gaz içeriği	19
Tablo 2.3. Difüzyon kaynağı ile kaynaklanabilen malzeme grupları	21
Tablo 2.4. Difüzyon kaynağı yöntem olasılıkları	23
Tablo 2.5. Daha önceki çalışmalarda başarıyla uygulanmış çeşitli malzeme kombinasyonlarında difüzyon kaynağı şartları	28
Tablo 2.6. Difüzyon kaynağı donanımının çalışma grupları şeması	32
Tablo 3.1. α , β ve $\alpha+\beta$ Ti alaşımları ve bu alaşımların endüstrideki mekanik özellikleri	42
Tablo 3.2. Titanyum alaşımlarının endüstrilerdeki isimlendirilmeleri	46
Tablo 4.1. ASME SB 348, ASTM B 348 Grade 5 malzemenin alaşım miktarları tablosu	49
Tablo 4.2. ASME SB 348 (Ti6Al4V) malzemenin mekanik özellikleri	50
Tablo 4.3. Dinamometre ve ölçme saati kullanılarak yapılan kuvvet ölçüm değerleri ..	54
Tablo 5.1. Ti6Al4V numunelerin difüzyon kaynağında kullanılan deney parametreleri ..	62
Tablo 6.1: Kesme Deneyi Sonuçları	86

SEMBOLLER

- A : Angstrom
E : Sabit bir hacim için serbest enerji
U : Sistemin iç enerjisi
T : Sıcaklık
S : Entropi
D : T sıcaklığında difüzyon katsayısı
D₀ : Atomik titreşim frekans faktörü
Q : Aktivasyon enerjisi (Jmol⁻¹)
R : Gaz sabiti (8,314 Jmol⁻¹ K⁻¹)
T_M : Metalin ergime sıcaklığı
x : Difüzyon mesafesi
D : T sıcaklığında difüzyon katsayısı
t : Zaman
C : Bir sabit

KISALTMALAR

- ASTM : American Society for Testing Materials
AWS : American Welding Society
Ti : Titanyum
V : Vanadyum
Al : Alüminyum
Zr : Zirkonyum
Hf : Hafniyum
Ni : Nikel
Cu : Bakır
Cr : Krom
W : Volfram
Mo : Molibden
Be : Berilyum
Nb : Niobyum
DB : Diffusion Bonding

Ti-Al-V ALAŞIMLARININ DİFÜZYON KAYNAKLI BAĞLANTILARININ MEKANİK VE MİKROYAPISAL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Serkan ÜNGÖREN

Anahtar Kelimeler : Difüzyon Kaynağı, Ti-Al-V Alaşımları, Ti6Al4V Alaşımı, Mekanik Özellikler, Yüksek Sıcaklık, Metallerarası Bileşikler

Özet : Ti-Al-V alaşımları düşük yoğunluk ve üstün yüksek sıcaklık özellikleri ile uzay ve havacılık sektörlerinde kullanılmaktadır. Bu alaşımların kaynak kabiliyetlerinin iyi olması, ticari kullanımlarını arttıracak önemli bir faktördür. Difüzyon kaynağının, tüm Ti alaşımlarında olduğu gibi, döküm veya özel plastik şekil verme işlemleri ile üretilmiş TiAl alaşımlarında da başarıyla uygulanabildiği belirlenmiştir. Çalışmamızda difüzyon kaynağının seçilmesinin nedeni, bu yöntemde malzemelerin ergime sıcaklıklarına çıkılmaması ve birleşme yerinde ana metalde ITAB olmamasıdır.

Bu çalışmada, plastik şekil verme ile üretilmiş ASME SB 348 Grade 5 (Ti6Al4V) boru malzemesinden alınmış numunelerin, ticari difüzyon kaynağı ekipmanlarının kapasiteleri sınırlarında kaynak parametreleri kullanılarak kaynak edilebilirliği araştırılmıştır. Değişik kaynak parametreleri ile elde edilen birleştirmelerin kaynak bölgesinde oluşan içyapı incelenmiş ve herhangi bir kaynak hatası olup olmadığı tespit edilmiştir. Ayrıca, bu birleştirmelerin mekanik özellikleri, kesme testi yapılarak belirlenmiş ve optimum kaynak parametreleri tespit edilmeye çalışılmıştır.

INVESTIGATION OF MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF DIFFUSION BONDED Ti-Al-V ALLOYS

Serkan ÜNGÖREN

Keywords : Diffusion Welding, Ti-Al-V Alloys, Ti6Al4V Alloy, Mechanical properties, High temperature, Intermetallics

Abstract : Ti-Al-V alloys are used for space and aviation sectors by low density and high temperature properties. It has been well demonstrated that diffusion bonding, that is a commonly used joining technology in conventional Ti alloys, can successfully be used in joining of Ti-Al alloys both in as cast or special rolled conditions. We have chosen diffusion bonding in our study because the bonding temperature doesn't increase from the melting point of materials and there isn't HAZ (Heat Affected Zone) on materials by bonding.

In this study, diffusion bondability of Ti6Al4V (ASME SB 348 Grade 5 Pipe Material) alloy specimens manufactured by special rolled condition using bonding parameters in the range of commercially available equipments was studied. Microstructural investigations in the joint area of the bonds were conducted to observe the presence of any weld defect. Additionally, the mechanical behaviour of the bonds was determined by shear testing to find out of the optimum bonding parameters.

1. GİRİŞ

Bu çalışmada, ergitmesiz katı hal kaynak yöntemlerinden biri olan ve endüstride kullanılan malzemelerin çoğu için, belli koşullar altında kullanılabilir olan difüzyon kaynağı yöntemi araştırılmıştır. Geçmişte yapılan çalışmalar incelendiğinde; difüzyon kaynağının birçok malzemeye uygulanabilirliği ve olumlu sonuçlar elde edildiği görülmüştür. Çalışmamızda, şu anda özellikle uzay ve havacılık sektörlerinde sıkça kullanılmakta olan ve düşük yoğunluk ile yüksek sıcaklık dayanımı özellikleri ile dikkat çeken Ti6Al4V alaşımı kullanılmıştır.

Seçilen malzeme detaylı olarak incelenmiş, difüzyon kaynağı yapılabilirliği araştırılmış ve mevcut bir teçhizat kullanılarak, bu malzemenin en uygun difüzyon kaynağı parametreleri bulunmaya çalışılmıştır. Kaynak içyapı incelemelerinde; optik mikroskop görüntüleri ile elektron tarama mikroskobu görüntülerinden yararlanılmıştır. Kaynak dayanımının ve mekanik özelliklerin belirlenmesinde; mikrosertlik yöntemi ile kesme deneyi yöntemlerinden yararlanılmıştır.

Çeşitli parametreler altında yapılan birleştirmelerden elde edilen mikrosertlik ve kesme dayanımı değerleri belli sıralamalarla analiz edilerek, yöntemin olumlu ve olumsuz sonuçları rapor edilmiş, Ti6Al4V malzeme için en uygun difüzyon kaynağı parametreleri belirlenmiştir.

Makine konstrüksiyonlarında, iki ayrı bölgede farklı mekanik özelliklere sahip olması istenen parçaların, birbirlerine mekanik yöntemlerle bağlanmaları bazı durumlarda (parça boyutları bakımından) olanaksız, bazen de yetersiz olmaktadır.[1] Yüksek sıcaklıklarda uygulanan kaynak yöntemleri parçaların mikro yapılarını dolayısıyla mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkileyebilmekte; bu nedenle daha düşük sıcaklıklarda uygulanan birleştirme yöntemleri böyle konstrüksiyonlarda, amaçlanan işlev bakımından, daha çok tercih edilmektedir.[1]

Malzemeler kaynakla iki tür yöntemle birleştirilebilirler. Bunlar ergitmeli kaynak yöntemleri ve ergitmesiz kaynak yöntemleri olarak bilinmektedirler. Ergitmeli yöntemler; elektrik ark, oksijen gaz alevi ve lazer gibi yöntemlerle yapılmaktadır. Daha çok uzay ve uçak sanayinde kullanılan ve de difüzyon kaynağını da içine alan gelişmiş malzemelerin birleştirilmeleri katı hal kaynak teknikleri ile yapılmaktadır. Farklı metallerin veya farklı malzemelerin birleştirme tekniklerinin yaklaşık % 40' ını difüzyon kaynağı oluşturmaktadır. Difüzyon kaynağı ile birleştirilmiş malzemelerin de yine % 20' ini Titanyum ve alaşımları oluşturmaktadır. [2]

Malzemelerin katı halde birleştirilmeleri teknolojideki önemli gelişmelerden birisidir. Ergitmeli birleştirmelerde malzemelerin birleşme bölgelerinde ergime-katılaşma sırasında bir faz dönüşümünün olduğu bilinmektedir. Bunun sonucu olarak esas metalden farklı yapıda bir bölge meydana gelmektedir. Bu da malzemenin fiziksel, mekanik ve mekanik özellikleri bakımından farklı bir bölgenin malzemedeki bulunması demektir. Ayrıca ergime dereceleri birbirlerinden farklı metallerin ve metalle metal olmayan malzemelerin kaynakla birleştirilmeleri ergitmeli yöntemlerle zor, hatta mümkün olmamaktadır. Bu anlatılanlara imkan sağlayan, katı hal kaynak tekniğı de Difüzyon Kaynağı' dır. [3]

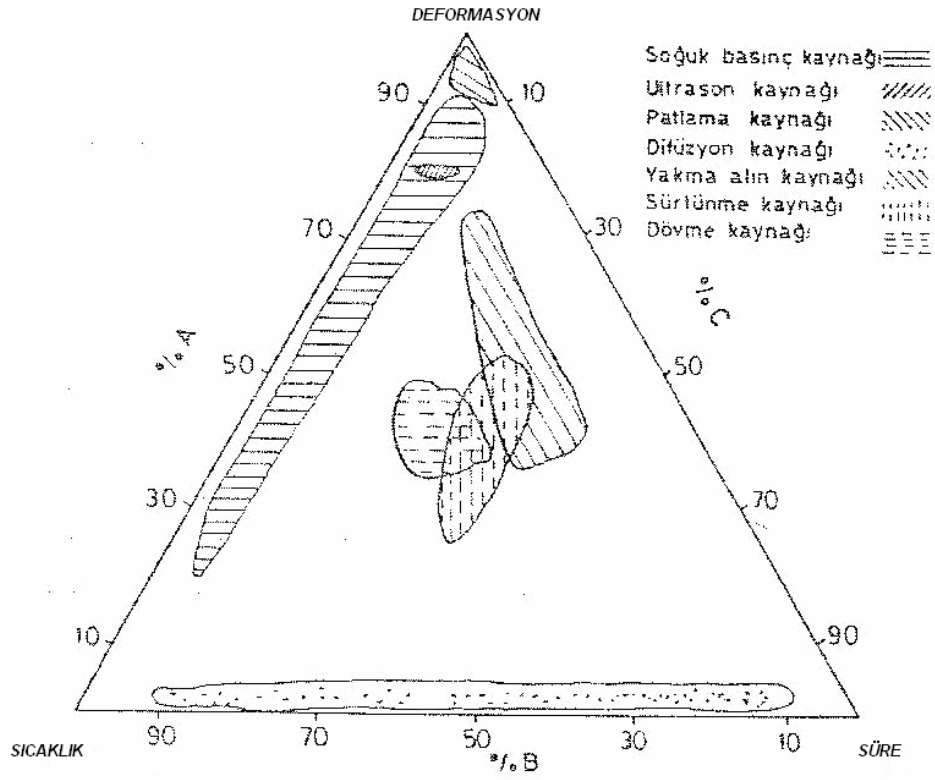
2. DİFÜZYON KAYNAĞI

Katı hal birleştirmeler aynı veya farklı iki malzemenin, malzemeler ergitilmeksizin, birleşmenin iki katı yüzey arasında meydana geldiği bir kaynak yöntemidir. Katı hal kaynağını sağlayabilmek için birleştirilecek malzemelerin birleştirme yüzeyleri temizlenerek, yüzeyleri aralarında bir bağ olacak kadar birbirlerine yaklaştırıp bir basınç uygulamak gerekmektedir. Katı hal kaynak yöntemleri başta difüzyon kaynağı olmak üzere; yüksek sıcaklıkta basınç kaynağı, soğuk basınç kaynağı, sürtünme kaynağı, patlamalı kaynak ultrasonik kaynak olmak üzere sıralanabilir. Bunlardan difüzyon kaynağı eski Mısırlılar zamanında beri bilinen bir sanat bilim dalı olarak bilinmektedir. Bu denli eski bir yöntem olmasına ve kavram olarak basitliğine rağmen, çağdaş uygulaması oldukça yüksek bir teknolojiyi gerektiren difüzyon kaynağı % 100 birleşme veriminin sağlandığı bir katı hal kaynak sürecidir. [2]

1949 yılına kadar AWS (American Welding Society) tarafından yapılan sınıflandırmada difüzyon kaynağı yer almamıştır.[5] Difüzyon kaynağı, silah ve nükleer, mikro elektronik, plastik endüstrisi, referans ve kalibrasyon bloklarının üretimi gibi alanlarda uygulama alanı bulmaktadır. [7]

Difüzyon kaynağı için yapılmış çeşitli çeşitli tanımlar vardır. Uluslararası Kaynak Enstitüsü tarafından Kazakov' un önerisiyle kabul edilmiş tanıma göre; difüzyon kaynağı; birleştirilecek parçaların arayüzey tabakalarında difüzyonu sağlayacak kadar yüksek sıcaklıklarda, aradaki boşlukların plastik deformasyonla kapanmasıyla, atomik seviyede bağların oluştuğu bir katı hal sürecidir. [5,7]

Difüzyon kaynağının diğer katı hal kaynak tekniklerinin arasındaki konumu Şekil 2.1.' de görülmektedir.



Şekil 2.1: Çeşitli katı hal kaynak tekniklerinin sıcaklık, süre ve deformasyon açısından karşılaştırılması [5]

İngiliz standartlarına göre ise difüzyon kaynağı; ölçülebilir bir plastik akma gelmeksizin, malzemelerin erime noktasının altında bir sıcaklıkta birbirlerine bastırılmasıyla arada oluşan katı hal difüzyonu ile sağlanır. Ara yüzeydeki difüzyon, bir sıvı faz oluşumuna neden olursa bu 'sıvı faz difüzyon kaynağı' olarak adlandırılır. [2,8,9] Tylecote difüzyon kaynağını, malzemeler arasındaki alışveriş ile diğer katı hal kaynaklarından ayırmaktadır. [5]

2.1. Tarihçe

Louvre Müzesi' nde Babil uygarlığına ait gümüş bir kupada belirlenen ek yerleri M.Ö. 2300 yıllarında katı hal kaynak yönteminin bilindiğini göstermektedir. [2,13] M.Ö. 1500 yıllarına ait olduğu sanılan Fırat vadisindeki buluntular da aynı tür kaynak yönteminin uygulandığını göstermektedir. [2,1,15] Orta bronz çağda M.Ö. 1400 – 1000' de İngiliz Adaları' nda, Country Roscommon' da bulunan altın ziynet eşyaları ve keza Dublin2 de İrlanda Milli Müzesi' nde bulunan geç bronz çağa ait dört altın kutudaki birleştirmeler katı hal kaynaklarının bu devirlere kadar uzandığını doğrulamaktadır. [2,10] Dünya' nın yedi harikasından biri sayılan, M.Ö. 280 yıllarında Rodos' ta yapılmış 7,5 tonluk, 36,5 metre yüksekliğindeki Apollon heykeli de aynı yöntemle ekli olarak yapılmıştır. [5,13] Ayrıca keskinliği ve tokluğu ile ünlü Davascus (Şam) ve Japon kılıçlarının sert ve yumuşak çeliklerin lamine edilmesiyle üretildiğini 1820' de M. Faraday, 1956' da Coughian ve 1962' de Bain yaptıkları deneysel çalışmalarla kanıtlamışlardır. [5,16,10]

Difüzyon kaynağı literatüründe temeli oluşturan ilk araştırmaları 1743' de Bolsever, gümüş ve bakır plakaları bir arada haddeleyerek yapmıştır. 1878' de Spring bakır ile çinko, kadmiyum, indiyum, bizmut, antimuan ile kalayın ve demir ile çinkonun bağlantılarını incelemiştir. [2]

19. yüzyıl sonlarında eritme kaynak yöntemlerinin yaygınlaşması ve ark kaynağının giderek pratikleşmesi karşısında, katı hal kaynak yöntemleri önemini kaybetmiştir. [5,13,16]

Son otuz yıldır ise difüzyon kaynağı, avantajlı yönlerinin değerlendirilmesiyle ileri teknoloji ürünü malzemelerin birleştirilmesinde vazgeçilmez bir önem kazanmaya başlamıştır ve bu önem giderek artmaktadır. [5]

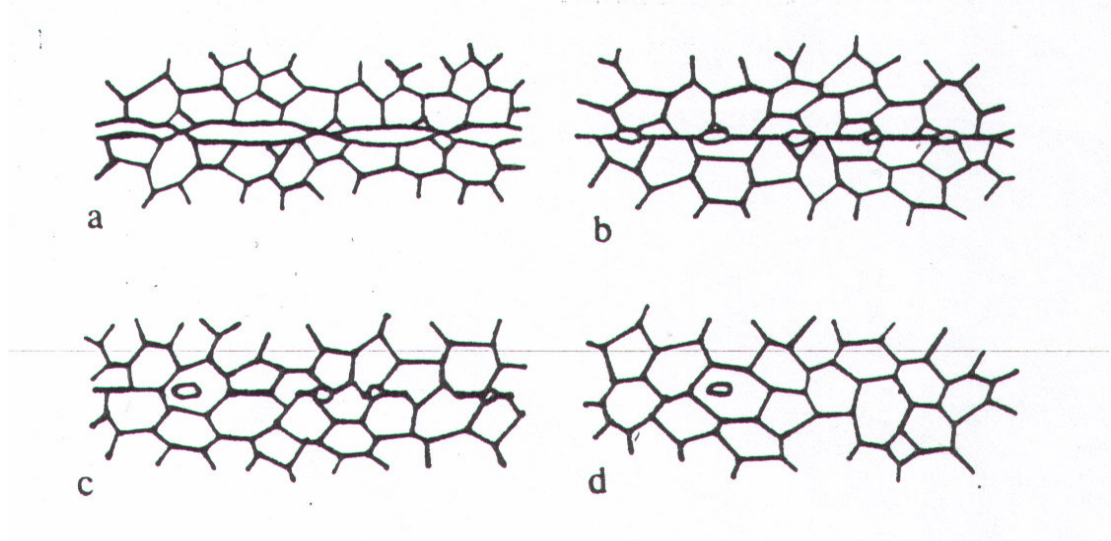
2.2. Difüzyon Kaynağının Teorisi ve Temel Bilgiler

Difüzyon kaynağı; birleştirilmek üzere hazırlanmış malzemelerin ergime derecelerinin altında bir sıcaklıkta, malzemedeki makro deformasyona sebep olmayacak bir basınçta, iki malzeme arasında metalurjik bir bağ oluşuncaya kadar, malzeme özelliklerini önemli ölçüde etkilemeyecek bir süre tutulması ile uygulanan bir kaynak metodudur. [9]

Sıcaklık, basınç ve zaman difüzyon kaynağının üç önemli parametreleridir. Bunların dışında malzemelerin birleşme yüzeylerinin özellikleri de difüzyon kaynağına doğrudan tesir eden faktörlerdendir. Difüzyon kontrollü birleşme işlemini başlatabilmek için iki yüzey; makro pürüzlülüklerden, kir, yağ ve oksit gibi yüzey kirliliklerinden arındırılmış halde, atomlar arasında bağ oluşumuna imkan verecek bir yakınlıkta olmalıdır. [9]

İşlem sonunda orijinal ara yüzey tamamen kaybolur ve %100 birleşme verimi (joint efficiency) elde edilir. Bu nedenle yönteme 'ideal kaynak' denilebilir. [1]

Şekil 2.2.a' da yüzeydeki mikroskobik çıkıntılarının küçük bölgeler halinde temas ettiği ilk safha görülmektedir. Yüzeyler üzerine uygulanan kuvvet nedeniyle bu çıkıntılarda büyük basınçlar oluşmakta ve sıcaklığın da etkisiyle akma ve sürünme başlamaktadır. (Şekil 2.2.b) İlk safhanın sonunda yüzeyler arasındaki temas bölgesi her iki taraftaki çıkıntılarının deformasyonları ile bir dereceye kadar genişleyecektir.



Şekil.2.2: Difüzyon kaynağının üç aşamalı mekanizması 2.2.a: Yüzey pürüzlerinin başlangıç teması 2.2.b: Birinci aşama deformasyon ve sınır bağ düzeni 2.2.c: İkinci aşama tane sınırı göçü ve gözeneklerin yok edilmesi 2.2.d: Üçüncü aşama hacim difüzyonu ve gözeneklerin elimine edilişi

Prosesin ileri safhalarında (Şekil 2.2.c ve 2.2.d) deformasyon olayı ön planda değildir. Difüzyon ile tane sınırları yeniden düzenlenmekte ve boşluklar yok olmaktadır. Şekil 4.1.c' de tane sınırı difüzyonu, Şekil 2.2.d' de hacimsel difüzyon mekanizması hakimdir. İşlemin devamında küçük gözeneklerin kalması bazı gayrisafı elementlerin bu bölgeye birikmesi (segregasyon) nedeniyledir. Tabî ki bu tür boşlukların fazlalığı halinde esas metal özellikleri asla elde edilememektedir. [1]

Yüzeyleri yeterli derecede temiz ve düzgün iki yüzey, yeterli basınçta temas ettirildiğinde belki oda sıcaklığında dahi kaynayacaktır. [5] Difüzyon ile bir bağ oluşumunun başlayabilmesi için yüzeyler birkaç Å kadar yakın olmalıdır. Halbuki, endüstride uygulanan hassas taşlama işlerinde bile yüzey pürüzlerindeki yükseklik 100.0 Å' dan fazladır (1 angstrom = 1.0×10^{-10} meters). İki yüzey karşılıklı olarak birbirlerine dokunduğunda, çöküntülerin bazıları ancak uç noktalarından oldukça sınırlı bir alanda birbirlerine temas ederler. [5]

Ayrıca yüzeylerde, çok kısa sürelerde kalınlıkları 10 – 1000 Å arasında değişebilen oksit tabakaları meydana gelmektedir. Ortama sıcaklık uygulanmasıyla, yüzeylerdeki bu ince oksit filmleri esas metal tarafından çözündürülmektedir. İlâveten, yüzeylere uygulanan basınç etkisiyle bu oksit filmleri kırılmakta ve prosesin ileri kademelerinde kaynak bölgesi dışına itilmektedirler. Aslında bazı durumlarda, aradaki oksit filmine rağmen difüzyon olayı başlamaktadır. Fakat bu durum çeliklerdeki birleşmelerde pek önemli değildir. [5]

Seçilen parametreler arasında sıcaklık en önemlisidir. Genel olarak, ergime noktasının 0,7' si çalışma sıcaklığı olarak seçilmektedir. Sıcaklığın azaltılması isteği, mikro yapıda olumsuz dönüşümlerin istenmemesi ve kullanılan ekipmanların kapasitesi dolayısıyladır. [5]

Basınç genellikle sıcağıdaki akma sınırının altında tutulur. Böylece işlem sırasında parçalarda mikroskobik bir deformasyon oluşmamaktadır. Basıncın büyük seçilmesi, kaynak işleminin daha kısa sürelerde bitmesini sağlamaktadır. Küçük basınçlarda ise, yüzey temizliği ve pürüzlülüğüne daha fazla itina etmek gerekmektedir. Küçük basınçlarda bağ oluşumunun tamamlanabilmesi için gereken süre uzayabilir. Yüksek sıcaklıkların uzun süre uygulanabilmesinin bir maliyet sorunu olduğu düşünülerek basınç seçimi yapılmalıdır. Uygulanan basınç esas olarak prosesin ilk safhalarında temas alanını arttırmak suretiyle etkindir. İlk safhaların bitiminde basıncın kaldırılması mümkündür. Bu safhanın bitiş zamanı bilinmediği için; bazı hallerde basıncın erken kaldırılmasıyla birleştirmenin bütünlüğü aksayabilmektedir. [5]

Metalsel malzemelerde, katı halde birleşmenin oluşumunu açıklayan çeşitli hipotezler mevcuttur. Bunlar; film hipotezi, rekristalizasyon hipotezi, enerji hipotezi, dislokasyon hipotezi, elektron hipotezi ve difüzyon hipotezidir.

2.2.1. Film hipotezi

Bu hipoteze göre bütün metal ve alaşımlar temiz yüzeylere sahip iseler birleşebilmektedirler. Birleşmeyi, yüzeylerin atomlar arası kuvvetlerin alanına girmesi sağlar. Gerçek uygulamalarda birleşme kalitesinin farklılık göstermesi yüzey filmlerindeki farklılıktan ileri gelmektedir. Yüzeyler soğuk olarak zorlandığında, filmler sert ve kırılabilir iseler kırılırlar ve altlarındaki temiz yüzeyler açığa çıkar. Bu durumda ortaya çıkan bağlantı sağlamdır. Yüzeydeki oksit filmi kırılabilir değil de plastik ise, film yüzeye iyice yayılır ve bağ oluşmaz. [5]

2.2.2. Rekristalizasyon hipotezi

Deformasyonun ardından, gerinim sertleşmesi oluşumu ve ilaveten yüksek sıcaklığa maruz kalma, malzeme kafesindeki atomların diğer yerlere hareketine yol açar. Bu hipotezi her zaman doğrulamak mümkün olmamıştır.[5]

2.2.3. Enerji hipotezi

Birleştirilecek parçalar, arada meydana gelecek adezyon için gerekli enerji eşiğine yükseltilmelidir. Bu eşikte atomik bağın oryantasyonu artık bir faktör değildir. Yüzeylerde, atomlar arasında metalik bağ oluşur ve aradaki ara yüzey kaybolur. Atomların enerjisi arttıkça adezyon için gerekli plastik deformasyon gereksinimi azalır. Bu hipotezin zayıf tarafı, aradaki adezyonun derecesinin malzemenin hangi özellikleri tarafından belirlendiğini açıklayamamasıdır. [5]

2.2.4. Dislokasyon hipotezi

J. Freidel ve E. Astrov' a göre ara yüzeydeki plastik deformasyon, dislokasyonların yüzeye hareketine yol açar. Dislokasyonların bu hareketiyle yüzeyde her biri bir atom yükseklikte basamaklı bir yapı oluşur ve koruyucu oksit filmi kırılır. Temas yüzeyinde dislokasyonların doğuşu plastik deformasyona direnci azaltır ve birleşime yardımcı olur. Ya da dislokasyonların doğuşu yüzey üzerindeki girinti çıkıntı sayısını

arttırarak daha büyük plastik deformasyona yol açar. Adhezyonun ardından bir difüzyon sürecinin de etkili olabileceği kabul edilmektedir. [5]

2.2.5. Elektron hipotezi

Hipotezi geliştiren G.V. Samsonov' a göre yüzeylerin adezyonu, temas halindeki metal atomları ile ilgili stabil elektron konfigürasyonlarının oluşumu ile sağlanır. [5]

2.2.6. Difüzyon hipotezi

Temastaki yüzeyler arasında sağlam bir bağ oluşumu, bu malzeme içindeki atomlar arasındaki difüzyona bağlıdır. Metallerin yüzeyindeki atomlar, serbest ve açık bağlara sahiptir. Bu atomlar, atomlar arası kuvvetlerin etki menzili içindeki herhangi bir atomu tutabilirler. Serbest bir atom, yoğunlaşmış sistemdeki atoma göre fazla enerjiye sahiptir. Atomun bir yere tutunması bu enerjinin serbest kalması ile neticelenir. Bu anlık birleşme, homojen bir sıvının karışmasında rahatça gözlenir. Durum katılarda farklıdır; bu defa, esaslı bir miktar ilave enerjinin verilmesi ve bazı özel tekniklerin kullanımı gerekmektedir. [5] Bu hipotezlerin birbirleriyle çelişen kısımlarına karşın; ortak bir görüş belirlemektedir. Basınç kaynağında oluşan bağ metalik bağlıdır. [5]

Sonuçta, yüzeylerin birleşmesi için gerekli iki ön şart vardır. Bunlar;

- 1-) Yüksek basınçla yüzeyleri atomlar arası etkileşim mesafesine kadar yaklaştırmak.
- 2-) Kristal kafesinde aktivite ve hareketliliği sağlayacak kadar yüksek ısı uygulamak. (Mobilite)

Atomların etkileşimi için gerekli minimum enerji;

$$E = U - T.S \quad (2.1)$$

ile verilmektedir. [2] Burada; E, sabit bir hacim için serbest enerji, U, sistemin iç enerjisi, T, ara yüzeyin sıcaklığı ve S, entropisidir.

2.3. Diğer Birleştirme Yöntemleri İle Karşılaştırma

Difüzyon kaynağında parça ölçüleri nettir, ayrıca kaynak payı bırakmaz gerekmez. Birleştirilen parçalar ağırlık kazanmaz; bu özellik hafif olması gereken sandviç panellerde önemlidir. Eritme kaynağında ortaya çıkan metalurjik problemler (istenmeyen metaller arası fazlar) difüzyon kaynağında yoktur. Yüksek mekanik ve ısı özellikler sağlamak için kazandırılmış çökelti fazlarını bozmadan birleştirme yapmak olasıdır. Zararlı ışınlar, zararlı gazlar içermemesi bakımından en iyi yöntemlerden birisidir. Uygulanan kaynak sıcaklığının düşük olması bu ısının aynı zamanda bir ısı işlem olarak da kullanılabilmesini sağlar. Birçok parçayı üst üste koyarak yapılacak paket presleme ile üretilen parça sayısını arttırmak da mümkündür. İnce parçalar kalın parçalar ile problemsiz olarak birleştirilebilmektedir. Sıcak plastik şekil değiştirme ile kazanılmış anizotropik özellikler (lifli yapı; uzamış kalıntılar gibi) kaynak ile bozulmaz. Difüzyon kaynağı korozyon riskini en az taşıyan kaynak yöntemidir. [1]

Literatür araştırmaları, difüzyon kaynağının bugüne kadar 475 malzeme çiftinde uygulanabildiğini göstermektedir. Birleştirilmesi en sorunlu malzemeler bile ara tabaka yardımıyla birleştirilebilmektedir. Ara tabakaların kullanılması, kaynak parametreleri ve birleşme bölgesinde temas oranları üzerinde olumlu etki yapar. Ayrıca ara tabaka kullanımı ile kaynak sıcaklığının düşmesi bazı metallerde, örneğin Molibden' de rekristalizasyon tehlikesini azaltmaktadır. [10]

Seramiklerin metallerle kaynağında sorun yaratan ısı genleşme farkları, arada genleşme gerilmelerini dengeleyecek bir ara malzeme kullanılmasıyla, difüzyon kaynağında etkisiz hale getirilmiştir. Ara tabaka, yeterince temizleme yapılmamış kaba yüzeyli malzemelerin birleştirilmesinde de faydalı olmaktadır. [1]

Difüzyon kaynağı, birleştirme kalitesinin yüksekliği nedeniyle güvenilirlik gerektiren kullanım yerlerinde rakipsizdir. [1]

Tüm bu üstünlüklerinin yanında, difüzyon kaynağının dezavantajlarıyla da karşılaşmaktadır. Hazırlık işlemlerinin yüksek maliyetli olması, birleştirilecek yüzeylerin yüksek hassasiyette temizleme işlemlerine tabi tutulması, kaynak atmosferinin özenle seçilmesi ve vakuma altında kaynak yapılması gereklilikleri, yöntemin zorluklarıdır. [10]

İki farklı metalin difüzyon kaynağı esnasında, eşlerden birinin yayınma miktarının diğerine oranla çok büyük olduğu durumlarda, hızlı yayınan metal tarafından kapatılan kaynak bölgesinde Kirkendal etkisi veya boşluk yoğunlaşması meydana gelir. Atom çapları arasındaki büyük farklar da bu tip gözenekliliğe yardım ederler. Bu gözenek oluşumu kaynak sıcaklığının ve süresinin sınırlandırılması ile engellenebilir veya minimize edilebilir. [10]

Ti, Zr, Hf, V ve Ni gibi dokular arasına girme kabiliyeti olan malzemeler ara tabaka olarak yaygın biçimde kullanılırlar. Bu malzemeler doğru kullanılmadığı zaman, kaynaklı birleştirilmelerdeki difüzyon bunları dokular arası gevrek bileşimlere dönüştürür. [10]

Tablo 2.1: Difüzyon kaynağının diğer kaynak yöntemleri ile karşılaştırılması

Kaynak Yöntemleri	Eritme Kaynağı	Difüzyon Kaynağı	Lehimleme
Bağlantının Oluşturulması	Otojen kaynağı ve Basınç	Basınç (Eritme yok)	Ergitmeli bağlantı, Basınç ve Ergitmeli bağlantı
Isıtma	Bölgesel	Bölgesel, Bütün	Bölgesel, Bütün
Sıcaklık	Metallerin ergime noktaları	Metallerin ergime noktalarının 0.5-0.7' si	Lehimin ergime noktasının üstünde bir sıcaklık
Yüzey Özellikleri	Düşük hassasiyet	İtinalı yüzeyler, hassas	Düşük hassasiyet
Malzemeler	Metaller, Alaşımlar	Metaller, Alaşımlar, Metal Olmayan Malzemeler	Metaller, Alaşımlar, Metal Olmayan Malzemeler
Poroziteler	Bazı fireler, Hava boşlukları	yok	Hava boşlukları, Fireler, difüze olan elementler
Dayanım	Metallere yakın dayanım	Metallerin mukavemetinde	Lehimin dayanımı kadar
Ek Yerinin Kopması	Yok	Yok	Var

2.4. Difüzyon Kaynağına Tesir Eden Faktörler

Difüzyon kaynağı sıcaklık, basınç, yüzey pürüzlülüğü, kaynak atmosferi ve zamanın tesiri altındadır.

2.4.1. Sıcaklık

Sıcaklık difüzyon kaynağının en önemli parametresidir. Difüzyon parametreleri ve sürünme doğrudan sıcaklığa bağlıdır. Artan sıcaklıkla malzemelerin akma gerilmeleri azaldığından hem ilk plastik deformasyon hem de yüzey pürüzlerinin sürünmesi kolaylaşır.[1,2]

Difüzyonun kinetik teorisi, difüzyon kaynağındaki sıcaklık etkisini sayısal olarak belirlemeyi sağlar. Difüzyonun sıcaklığın bir fonksiyonu olarak tanımlanır ve şöyle verilir ;

$$D = D_0 \cdot \exp^{-Q/RT} \quad (2.2)$$

Burada ;

D ; T sıcaklığında difüzyon katsayısı

D_0 ; Atomik titreşim frekans faktörü

Q ; Aktivasyon enerjisi (Jmol⁻¹)

R ; Gaz sabiti (8,314 Jmol⁻¹ K⁻¹)

Difüzyon kaynağında kullanılan sıcaklığın değeri T(0.5 TM)' dir. Burada TM metalin ergime sıcaklığıdır. Birçok metal ve alaşımı için en iyi difüzyon kaynağı 0.6 – 0.8 TM arası sıcaklıkta yapılabilmektedir.

2.4.2. Zaman

Kaynak zamanı, kullanılan sıcaklık ve basınca göre değişir. Yüksek sıcaklık ve yüksek basınçta kaynak süresi kısaldır. Eğer birleştirilecek yüzeyler kirli, sıcaklık düşük ise kaynak süresi uzamaktadır. Kaynak sıcaklığı 0.5 – 0.8 TM alındığında kaynak süresi 100 dakikaya kadar uzatılabilmektedir. İyi bir birleşme sağlamak için uygun kaynak zamanı önemlidir. Zaman kısa tutulduğunda iyi bir birleşme elde edilemezken, sürenin gereğinden uzun tutulması da metaller arası bileşik oluşumuna ve tane büyümesine sebep olur.[6]

Difüzyon işlemlerinde difüzyon mesafesi x' in kaynak zamanı ile değiştiği aşağıdaki formülde de görülmektedir ;

$$x = C. (D_t)^{1/2} \quad (2.3)$$

Burada ;

x ; Difüzyon mesafesi

D ; T sıcaklığında difüzyon katsayısı

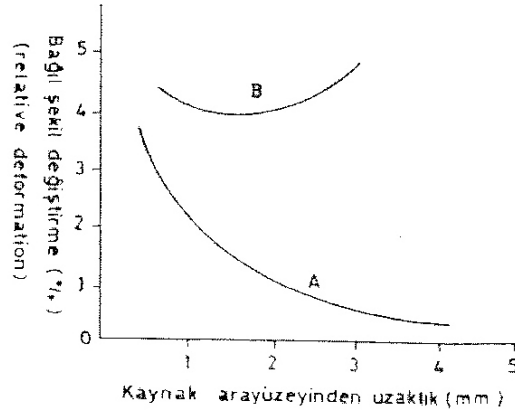
t ; Zaman

C ; Bir sabit

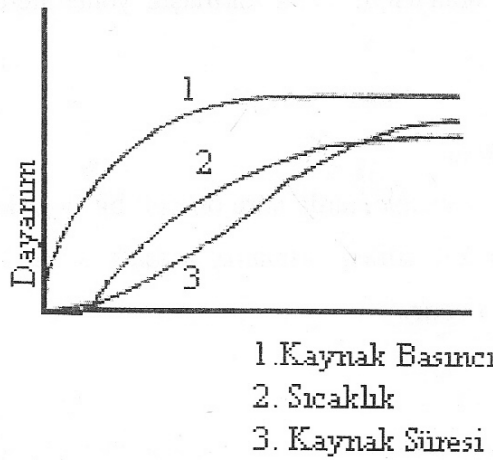
2.4.3. Kaynak basıncı

Birleştirilecek yüzeyler arasında temasın sağlanması ve atomik difüzyon için kimyasal potansiyel farkı oluşurmada basınç gereklidir. Uygulanan basınç parçaların makro deformasyonunun altında olmalıdır. Basınç ile yüzey pürüzlerinin plastik akışı kolaylaşırken yüzeyde çözünmeyen oksit filmleri kırılarak iki yüzey arasında atom akışı sağlanır. İyi bir birleşme sağlanabilmesi için basıncın izostatik uygulanmasında büyük fayda vardır.[6]

Kaynak basıncı her malzeme için farklılık gösterir. Literatürlerde çeşitli malzemeler için uygulanan kaynak basıncı 27 MPa ile 41 MPa arasında verilmektedir. Daha düşük basınçlarda da birleştirme sağlamak mümkündür. V.I. Movchan ve L.G. Pedan bronz çeliğe 16 – 17 MPa basınçta birleştirmişlerdir. Bu makalenin yazarı da toz metal bronz düşük karbonlu çeliğe 15 MPa sabit basınçta difüzyon kaynağı ile birleştirmiştir.



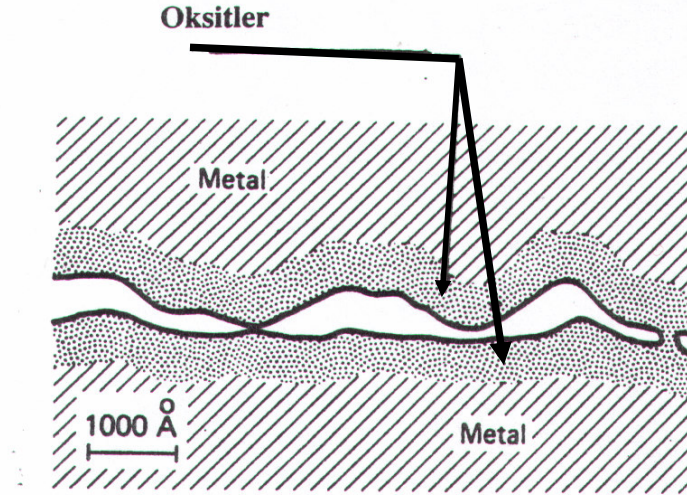
Şekil 2.3: Difüzyon kaynaklı bir parçada ara yüzeye olan mesafeye bağlı olarak bölgesel deformasyonun değişimi



Şekil 2.4: Difüzyon kaynağında kaynak basıncı, kaynak sıcaklığı ve kaynak süresinin dayanıma etkisi

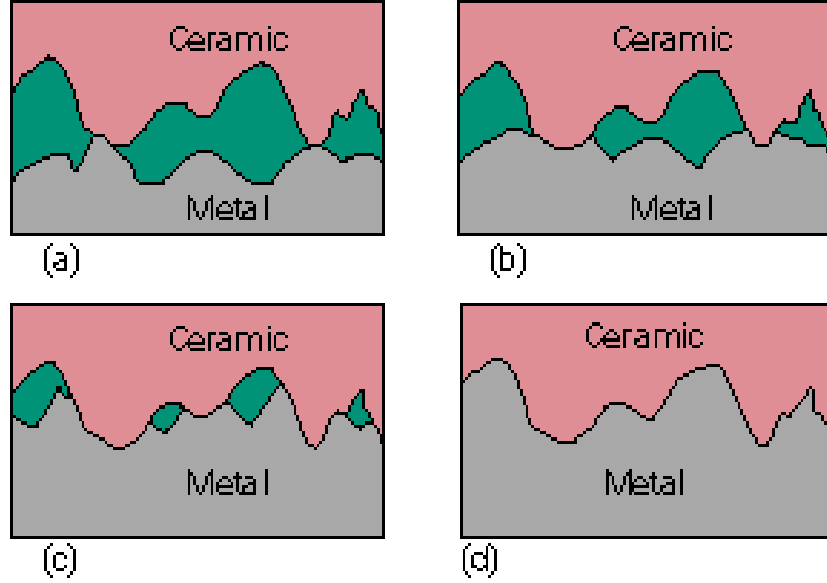
2.4.4. Yüzey durumu

Yüzey pürüzlülüğü, yüzey filmleri ve yüzey artıkları kaynak kalitesine tesir eden etkenlerdir. Yüzey pürüzleri genellikle kaynağın birinci aşamasında birleşmeye olumsuz etki yapar. Yüzeylerin tam temasa ulaşmasında pürüzlülük bir engeldir. Yüzeyin yüzeye temas süresini uzatır. Genelde bir metal yükseklik ve dalga boyu küçük olan pürüzlülüğe sahiptir. Difüzyon kaynağında özellikle dalga boyu uzun olan pürüzler önemlidir. Bu durumdaki yüzeylerin birleştirilmesi için çok yönlü basınç ve uzun zamana ihtiyaç duyulur. Şekilde bir yüzeyin pürüzlülüğü, oksit tabakası ve uygulanan basınç ile kırılan oksit tabakası görülmektedir.[9]



Şekil 2.5: Metal yüzey pürüzlülüğü ve kırılmış oksit tabakası

Etkili bir kaynak için engelleyici yüzey filmleri genellikle oksit tabakalarıdır. Yüzeylerin oksitten korunması için kaynak ortamı vakum veya indirgeyici olmalıdır. Oksit filminin bozulup dağılması iki şekilde olur. Birisi kaynak sırasında metal içinde oksitlerin erimesi şeklinde, diğeri ise oksit filmlerinin toparlanması veya yuvarlaklaşmasıdır. Oksit filmleri titanyum, tantalyum, kolombiyum, zirkonyum ve diğeryer elementleri içerisinde son derece iyi eriyebilirler. Eğer, oksit metal içerisinde çözünemiyorsa bozunma hareketi oksitin yuvarlaklaşması şeklinde olur.



Şekil 2.6: Seramik ve metalin difüzyon kaynağında aşamalı bağlantının oluşumu

Oksit filmlerinin bozunması ile ilgili her iki olay da difüzyonu gerektirir. Metal içindeki çözünüm, arayer atomlarının difüzyonu ile oluşur. Yuvarlaklaşma ise ince oksit filminin fazla miktardaki yüzey enerjisinden dolayı meydana gelir. X kalınlığındaki bir oksitin erime zamanı X^2/D ile orantılıdır. Burada, D difüzyon katsayısıdır. Eğer oksit çok ince ise, küreleşme çok çabuk oluşur. Yüzey pürüzlülüğü, 0.4 mm' den küçük olan yüzeyler difüzyon kaynağı uygulamalarında iyi sonuçlar vermektedir.[6]

2.4.5. Kaynak ortamı

Difüzyon kaynağında en önemli problem kaynak sırasında yüzeylerin oksitlenmesidir. Bu olumsuzluğu gidermek için kaynak koruyucu atmosfer altında yapılmalıdır. Bu amaçla ya vakum veya soygaz ortamında çalışılır. Soygaz olarak Helyum, Argon ve Azot kullanılabilir. Hidrojen de Oksijen miktarını azaltmak amacıyla kullanılmakla beraber Ti, Zr, Ta gibi bazı alaşımlarda hidrat oluşturmaktadır. Kararlı okside sahip metallerde 1.3×10^{-3} Pa' dan daha fazla bir vakum kullanılmaktadır.[6]

2.4.6. Atmosferin etkisi

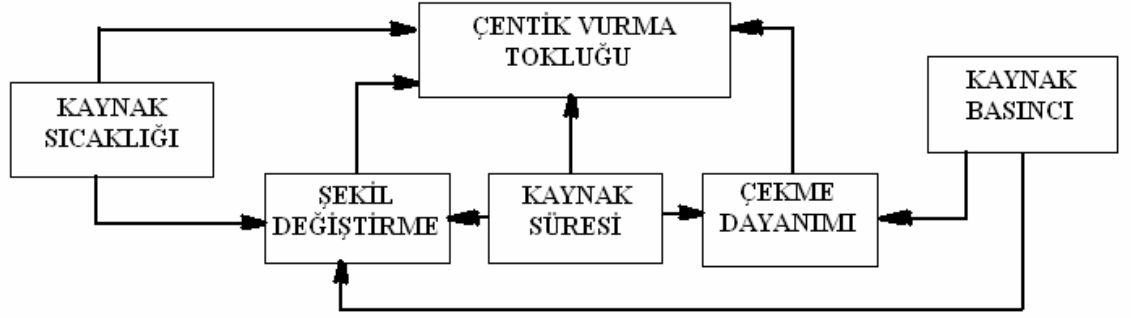
Difüzyon kaynağında kaynak bölgesinde atmosfer açısından en uygun ortam sağlanmalıdır. Oksitlenmeden koruyacak herhangi bir gaz ortamı; örneğin argon ya da azot gibi inert bir gaz bu amaç için kullanılabilir. Difüzyon kaynağında koruyucu ortam olarak vakum da uygulanmaktadır. Kazakov, orta karbonlu çeliklerde yaptığı deneysel çalışmalarda, vakum kaynaklarında yekpare duruma göre zaman zaman görülen dayanım artışlarını vakum sırasında sağlanan ‘gaz giderilmesine’ bağlamaktadır. Vakum sırasında parçanın kaynaklanacak yüzeyi oksitlenmeden korunduğu gibi, yüzeydeki yabancı maddelerin süblimasyonu da sağlanmaktadır. Vakum ortamında yapılan kaynaklar, vakum çok yüksek olmasa bile, yeterince saf olmayan inert gazlarda yapılanlardan daha iyi dayanım sağlamaktadır. Aşağıdaki tabloda çeşitli vakum derecelerine karşılık gelen gaz yüzdeleri verilmiştir.[9]

Tablo 2.2: Belli basınçlarda birim hacimde % olarak gaz içeriği

BASINÇ (Pa)	Birim Hacimde % olarak gaz içeriği		
	TOPLAM	O ₂	N ₂
101080	100	20,1	79,9
133	0,13	0,03	0,1
13,3	0,013	0,003	0,01
1,3	0,0013	0,0003	0,001
0,13	0,00013	0,00003	0,0001
0,013	0,000013	0,000003	0,00001

Örneğin 133 Pa’lık bir vakum ortamında bulunan oksijen % 0.03 oranındadır. Bu durumda bu basınçta bir vakum ortamı, ticari saflıkta bir argondan daha iyi sonuç verecektir.

Vakumda yapılan bazı kaynaklarda oksit filminin kaynak sırasında yok olduğu görülmektedir. Bazı araştırmacılarca kabul gören bir görüşe göre; vakum hücrelerinde kalmış bulunan aktif gazlar bu oksitleri redüklemektedirler.



Şekil 2.7: Difüzyon kaynağı parametrelerinin mekanik özellikler ile etkileşimi

2.5. Difüzyon Kaynağı Bağlantı Türleri ve Kaynak Edilebilen Malzemeler

Difüzyon kaynağı eş ya da farklı malzemelerin direkt ya da ara tabaka üzerinden kaynağına imkân veren bir yöntemdir. Difüzyon kaynağı ile çok çeşitli malzemeler birleştirilebilmektedir. Bu malzemelere örnek olarak; Al ve alaşımları, Ti ve alaşımları, Cu ve alaşımları, Cr, Ni alaşımları, çelik alaşımları, Al veya Ti matrisli kompozitler ve refrakter metaller (Zr, Nb, W, Mo...) verilebilir. [6]

Difüzyon kaynağı ile kaynaklanabilen malzeme grupları tablo 2.3' de verilmiştir.

Tablo 2.3: Difüzyon kaynağı ile kaynaklanabilen malzeme grupları [6]

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	Direkt
1	■	■			■		■		■				■		■			■	■	■						1 Alüminyum ve alaşımları
2	■	■			■	■							■							■						2 Berilyum ve alaşımları
3			■													■								■		3 Krom ve alaşımları
4			■					■		■																4 Kobalt ve alaşımları
5	■	■			■	■		■	■	■			■		■			■	■	■					■	5 Bakır ve alaşımları
6					■			■	■	■																6 Altın ve alaşımları
7							■		■	■																7 Magnezyum ve alaşımları
8							■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	8 Molibden ve alaşımları
9				■				■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	9 Nikel ve alaşımları
10									■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	10 Niyobyum ve alaşımları
11										■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	11 Paladyum ve alaşımları
12											■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	12 Platin-İridyum ve alaşımları
13	■												■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	13 Gümüş ve alaşımları
14										■															■	14 Tantal ve alaşımları
15					■										■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	15 Titanyum-Zirkonyum ve alaşımları
16					■											■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	16 Tungusten ve alaşımları
17	■																■	■	■	■	■	■	■	■	■	17 Uranyum ve alaşımları
18																		■	■	■	■	■	■	■	■	18 Vanadyum ve alaşımları
19	■				■			■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	19 Düşük karbonlu ve alaşımlı çelikler
20	■			■				■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	20 Paslanmaz çelik
21									■											■	■	■	■	■	■	21 Dökme demir
22																						■	■	■	■	22 Karbürler
23																								■	■	23 Grafit
24								■		■					■					■				■	■	24 Seramikler
25																								■	■	25 Cam
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	
	İndirekt																									

2.5.1. Eş metalsel çiftlerin ara tabakasız kaynaklanması

Aynı tür malzemelerin direkt olarak birleştirilmesidir. Yöntem parametrelerini, kaynak edilecek malzemenin mekanik ve metalurjik özellikleri ve geometrik veriler belirlemektedir.

2.5.2. Farklı metallerin ara tabakasız kaynaklanması

Birbiri ile uyumlu, intermetalik faz oluşturmeyen farklı metallerin direkt olarak kaynağı bu gruba girmektedir. Yöntem parametrelerini birleştirilecek malzeme çiftlerinin özellikleri belirler. Örneğin kaynak sıcaklığı, ergime sıcaklığı düşük olan metale göre seçilmelidir. Aynı şekilde kaynak esnasında uygulanacak basınç ve bunun sonunda ortaya çıkan deformasyon miktarı da malzeme çiftinden yumuşak olan malzemeye göre belirlenmelidir. Seçilen kaynak parametreleri, metal çifti arasında intermetalik bir tabaka oluşmasına neden olmayacak ya da oluşacak tabaka kalınlığını 20 µm' nin altında sınırlayacak şekilde olmalıdır.[6]

2.5.3. Eş metalsel çiftlerin ara tabaka üzerinden kaynaklanması

Bazı durumlarda kaynak işlemini kolaylaştırmak için eş metalsel malzemelerin kaynağında kaplama ya da ince folyo şeklindeki ara tabakalar kullanılır. Kaynak işlemi, birleştirilecek yüzeyler arasına konulan ya da kaplanan bu tabaka üzerinden gerçekleştirilir. Yöntem parametrelerini ara tabaka malzemesinin özelliklerini belirler.

2.5.4. Farklı metallerin ara tabaka üzerinden kaynaklanması

Özellikle birbiri ile intermetalik faz oluşturan farklı metallerin kaynağında, kaynak işlemini kolaylaştırmak için bu yöntem kullanılır. Ara tabaka olarak kullanılacak malzemenin her iki malzeme ile de uyumlu olmasına dikkat edilmelidir.

2.5.5 Metallerle ametallerin ara tabakalı ya da ara tabakasız kaynaklanması

Farklı fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip malzemelerin ara tabakalı ya da ara tabakasız birleştirilmesine elverişli yöntem parametrelerinin azlığına rağmen difüzyon kaynağında örneğin metal – seramik bağlantıları gerçekleştirilebilmektedir. Ancak gerçekleştirilmesi için farklı ısıl genleşmelerin dengelenmesi gerekmektedir.

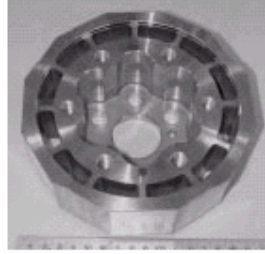
Difüzyon kaynağının yöntem olasılıkları aşağıda tablo 2.4 ile verilmektedir.

Tablo 2.4: Difüzyon kaynağı yöntem olasılıkları

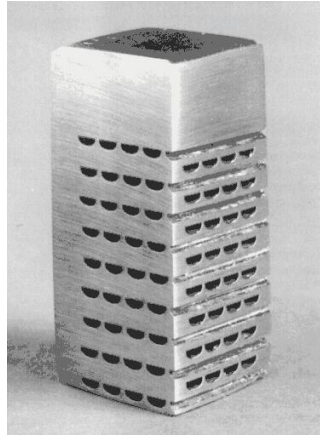
Birleştirme Bölgesi		Isı verilışı	
		Tek kademeli (P, T ile 1)	İki kademeli (P1, T1 ile 1) (P2, T2 ile 2)
Ara Tabakasız			
Ara Tabakalı			
Farklı Ara Tabakalı	Aynı anda kaynaklanmış		
	Arka arkaya kaynaklanmış		

2.6. Difüzyon Kaynağı Uygulamaları

Difüzyon kaynağının en yaygın uygulaması karmaşık ve pahalı malzemelerin kullanıldığı havacılık ve uzay teknolojisinde, ya da nükleer santralarda olmuştur. Havacılık endüstrisindeki uygulama örnekleri için F101, F104, F106, F14, F15 savaş uçakları, B1 bombardıman uçağı, Boeing 747 ve A-300 Airbus yolcu uçakları sayılabilir. Bu uçaklarda motordaki çoğu parçalar, iniş takımlarının destek kirişleri ve bor – alüminyum kompozit malzemelerden üretilmiş aksamlar difüzyon kaynağı ile birleştirilmektedir. Bir çok helikopterin rotor göbeğı, motorların sızdırmazlık parçaları, motorun fan göbekleri ve jet motorlarının tutuşma kabinleri de örneklere katılabilir.[6]

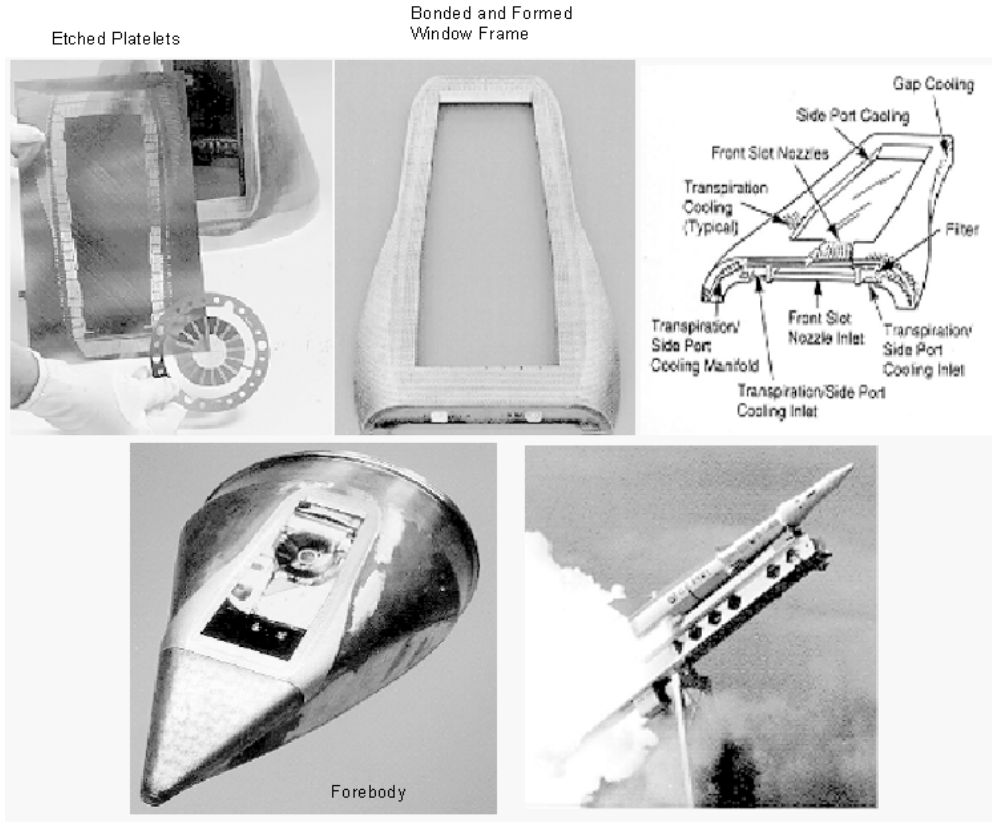


Şekil 2.8: Difüzyon kaynağı ile imal edilmiş helikopter rotor göbeğı



Şekil 2.9: Aynı anda birçok parçanın birleştirilmesiyle üretilmiş difüzyon kaynaklı hidrolik ısı eşanjörü

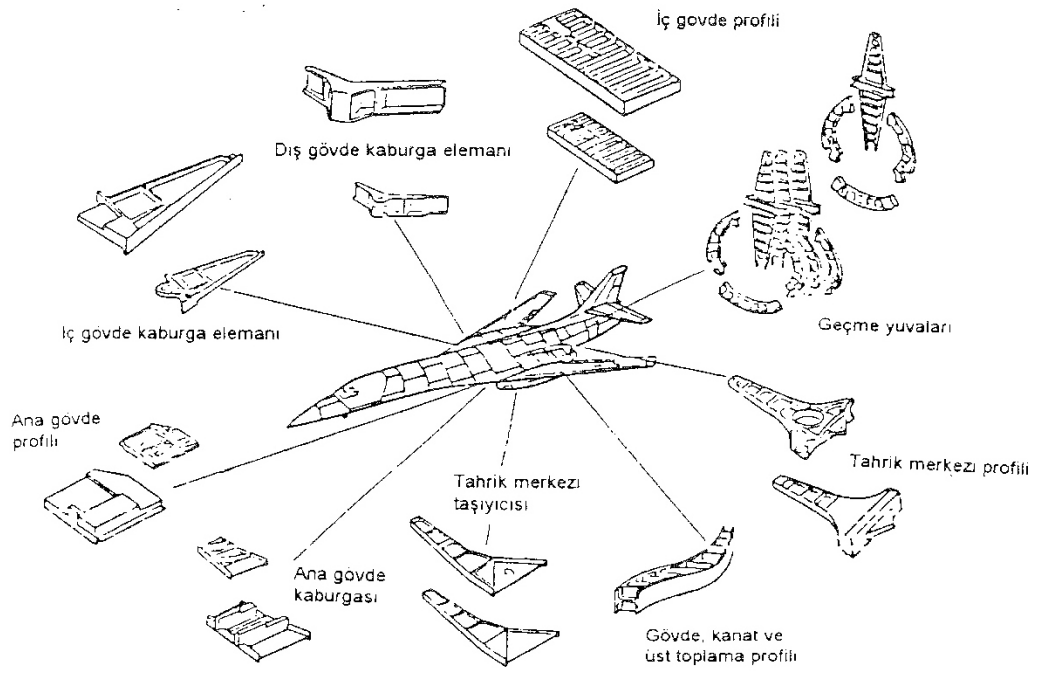
Uzay mekiğı araçlarında da birçok parça difüzyon kaynağı ile birleştirilmiştir.



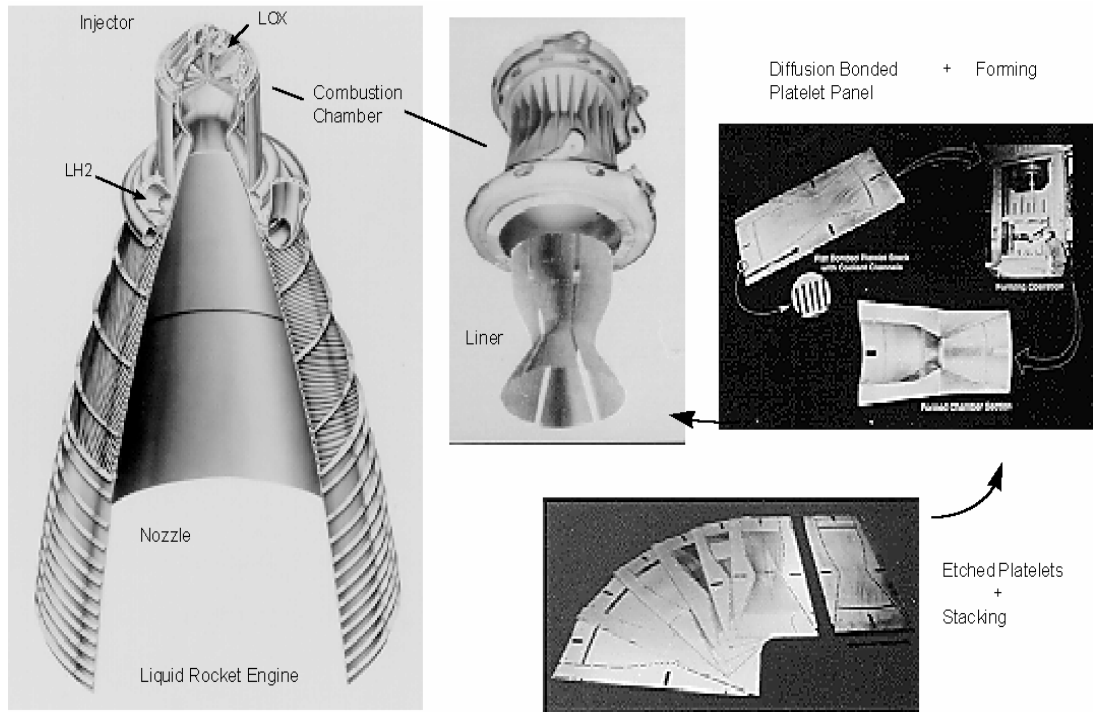
Şekil 2.10: Uzay mekiği imalatında kullanılan difüzyon kaynaklı yapı elemanları

Nükleer santralarda en yaygın uygulamalar; yakıt elementlerinde, termoelektrik NaK pompalarında, tesisat bağlantılarında yapılmaktadır.

Askeri alanda da ; roketler, top namluları ve top mermileri çeşitli bölgelerinden difüzyon kaynağı ile birleştirilmiştir. Türbin kanatlarının soğutma kanallı tipleri, çoğu önemli uygulamalarda difüzyon kaynaklı olarak üretilmektedir.



Şekil 2.11: B1 tipi uçak yapımında kullanılan difüzyon kaynaklı Ti6Al4V yapı elemanları [8]



Şekil 2.12: Sıvı roket motorlarında kullanılan difüzyon kaynaklı yapı elemanları

Bu yöntemin avantajları sayesinde süper alaşım içinde bulunması gereken özel çökelti fazları kaynak sonrasında dağılımlarını koruyabilirler. Difüzyon kaynağı ayrıca, seramiklerin metallerle birleştirilmesinde de kullanılmaktadır.

Bütün bu özel uygulamaların yanında Al, Be, Mo, W, Ti alaşımlarının birleştirilmesi üzerine çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Ayrıca otomat çelikleri, yüksek hız çelikleri ve maryaşlanmış çelikler üzerinde yapılan çalışmalardan da olumlu sonuçlar alınmıştır.

Farklı malzemelerden; stellite – paslanmaz çelik, alüminyum – paslanmaz çelik, zirkonyum – paslanmaz çelik, bakır – paslanmaz çelik, karbon çeliği – paslanmaz çelik, alüminyum – çelik, platin – titanyum, titanyum – bor / alüminyum kompozitleri, Cu / Zn alaşımı – titanyum, bakır – çelik, kobalt alaşımı – paslanmaz çelik, altın – alüminyum, titanyum – paslanmaz çelik, sert metal – çelik, titanyum – çelik çiftlerinin difüzyon kaynağı geçmişte denenmiş ve her birinde başarılı birleştirmeler elde edilmiştir. [12]

Tablo 2.5: Daha önceki çalışmalarda başarıyla uygulanmış çeşitli malzeme kombinasyonlarında difüzyon kaynağı şartları

MALZEME ÇİFTİ	ARA TABAKA MALZEMESİ	BASINÇ (Mpa)	SICAKLIK (°C)	SÜRE (Dak)	ATMOSFER
Mo / Mo	Ti Folyo	69	920	120	ARGON
Ta / Ta		69	1300-1410	180	İNERT
Ta / Ta	Ti Folyo	69	860	10	VAKUM
Ti-75A / Ti-75A		27-69	700	10	VAKUM
Ti-75A / Ti-75A	Al Folyo	69	560	10	VAKUM
W / W	Ni - Pd	69	970	90	HİDROJEN
W / W	Re - Ta	140	1000	30	
Zirkolay / 302 SS			10270	80	VAKUM
Zr / Zr		69	835	210	İNERT
Zr / U		152	835	2160	İNERT
Zr / U-10Mo		69	640	360	İNERT
Alumina / Ta		69	1520	120	İNERT
Al / Al	Si Folyo	41-82	580	1	VAKUM
Al / Cu		276	470	4	VAKUM
Al / Cu		152-345	530	15	VAKUM
Al / Ni		152-359	490	4	VAKUM
Al / U	Ni Plaka	35	180		
Be / Be		69	8-890	240	İNERT
Be / Be	Ag Folyo	69	700	10	VAKUM
Nb / Nb		69	1140-1300	180	İNERT
Nb / Nb	Zr	69	830	240	ARGON
Cu / Cu		140	310	1	HİDROJEN
Cu / Ti		5	840	15	VAKUM
Cu / Al		7	500	15	VAKUM
Cu / 316 SS			970	120	VAKUM
Inc / Inc		3,5	1080-1140	10	VAKUM
Ti6Al4V / Ti6Al4V		5	700	30	VAKUM
TiAl / TiAl Alaşımı		5	1000	300	VAKUM
Fe ₃ Al / Q235 C.S.		8-9	1080	60	VAKUM
X210Cr12 / 25MoCr4		11,4	950	4	ARGON
X210Cr12 / 20CrMo2		11,4	950	4	ARGON

2.7. Difüzyon Kaynağının Avantajları ve Dezavantajları

Difüzyon kaynağı yönteminin bilinen diğer ergitme kaynak yöntemlerine göre birçok avantajları bulunmaktadır. Bunlardan en önemlileri aşağıda sıralanmıştır.

- Birleştirme, ana metalin mikro yapısına ve özelliklerine çok benzer gerçekleşir. Bu durum özellikle hafif sanayide çok önemlidir.
- Birleştirme, minimum distorsiyon ile gerçekleşmekte ve parçalar üzerinde sonradan bir işlem yapmaya gerek kalmamaktadır.
- Füzyon işlemi veya aksel simetri gerektiren işlemlerle kaynak edilemeyen farklı alaşımlar bu yöntem ile kaynak edilebilirler.
- Bir grup parçanın çok sayıdaki birleşmesi aynı anda yapılabilir.
- Sınırlı kenarlı parçalar da bu yöntemle birleştirilebilir.
- Kapsamlı bir ön ısıtma gerektiren parçalar bu yöntemle kolayca birleştirilebilirler.
- Birleşme bölgesinde sıcaklığın sürekli olarak kontrol altında olması ve vakum sağlanması sayesinde kaynak hataları minimuma indirilebilir.
- Diğer ergitme kaynak yöntemleri ile birleştirilmesi çok zor olan farklı metallerin kaynağı bu yöntemle, yüksek verimle gerçekleştirilebilir.

Difüzyon kaynağının sayılabilen birçok avantajının yanı sıra bazı sınırlamaları da vardır. Bu sınırlamalar aşağıda sıralanmıştır.

- Difüzyon kaynağındaki ısı çevrim, geleneksel kaynak işlemlerinden daha uzundur.
- Kaynak ekipmanlarının maliyetleri genelde fazladır. Bu ekonomik olarak üretilen maksimum parça boyutunu sınırlandırır.

- İşlem büyük üretim miktarlarına uygulanmaz. Buna rağmen, belirli sayıdaki bir grup aynı anda birleştirilebilmektedir.
- Kalite kontrol için, uygun tahrip etmeyen denetim yöntemleri kullanışlı değildir.
- Birleştirilecek parçaların yüzeyleri, geleneksel sıcak basınç kaynaklarına göre çok daha fazla yüzey hazırlama özeni gerektirir.
- Vakum veya koruyucu gaz ortamında, ısı ve basınç kuvvetinin aynı anda uygulanmasının gerekliliği, difüzyon kaynağında en temel ekipman problemidir.

Bu yöntemin avantajları sayesinde süper alaşımlar içinde bulunması gereken özel çökelti fazları kaynak sonrasına dağılımlarını koruyabilirler. Difüzyon kaynağı korozyon riskini en az taşıyan kaynak yöntemidir. Birleştirmesi en sorunlu malzemeler dahi ara tabaka yardımıyla birleştirilebilir.

Difüzyon kaynağı, birleştirme kalitesinin yüksekliği nedeniyle güvenilirlik gerektiren kullanım yerlerinde rakipsizdir.

Difüzyon kaynağının bu sayılan önemli özelliklerine karşın, hazırlık işlemlerinin yüksek maliyetli bir özen gerektirmesi en önemli dezavantajıdır. Ancak yine de diğer yöntemlerde kullanılan pahalı elektrotların, lehim malzemelerinin, dekapanların ve koruyucu gazların gerekmediği unutulmamalıdır.

2.8. Difüzyon Kaynağı Donanımları

Difüzyon kaynağı ısı ve basınç gerektiren bir kaynak yöntemi olduğundan kaynak işlemi, kaynak edilecek parçaların şekil ve boyutlarına, işlemin gerektirdiği atmosfer ve sıcaklığa uygun olarak dizayn edilmiş özel ekipmanlara ihtiyaç duyulmaktadır. Çoğu durumda kaynak cihazı kullanıcı tarafından ya da kullanıcının gereksinimlerine cevap verecek şekilde tasarlanır. Kaynak işlemi her durumda mutlaka vakum ortamı gerektirir.[4]

Kaynak sıcaklığının eldesinde ısıtma işlemi için genellikle elektrik enerjisi kullanılır. Çoğu zaman da kaynak haznesinin ısıtılması için elektrik enerjisi dirençlerden geçirilir. Isıtma bu hazne etrafına sarılan resistanslar ile sağlanır.

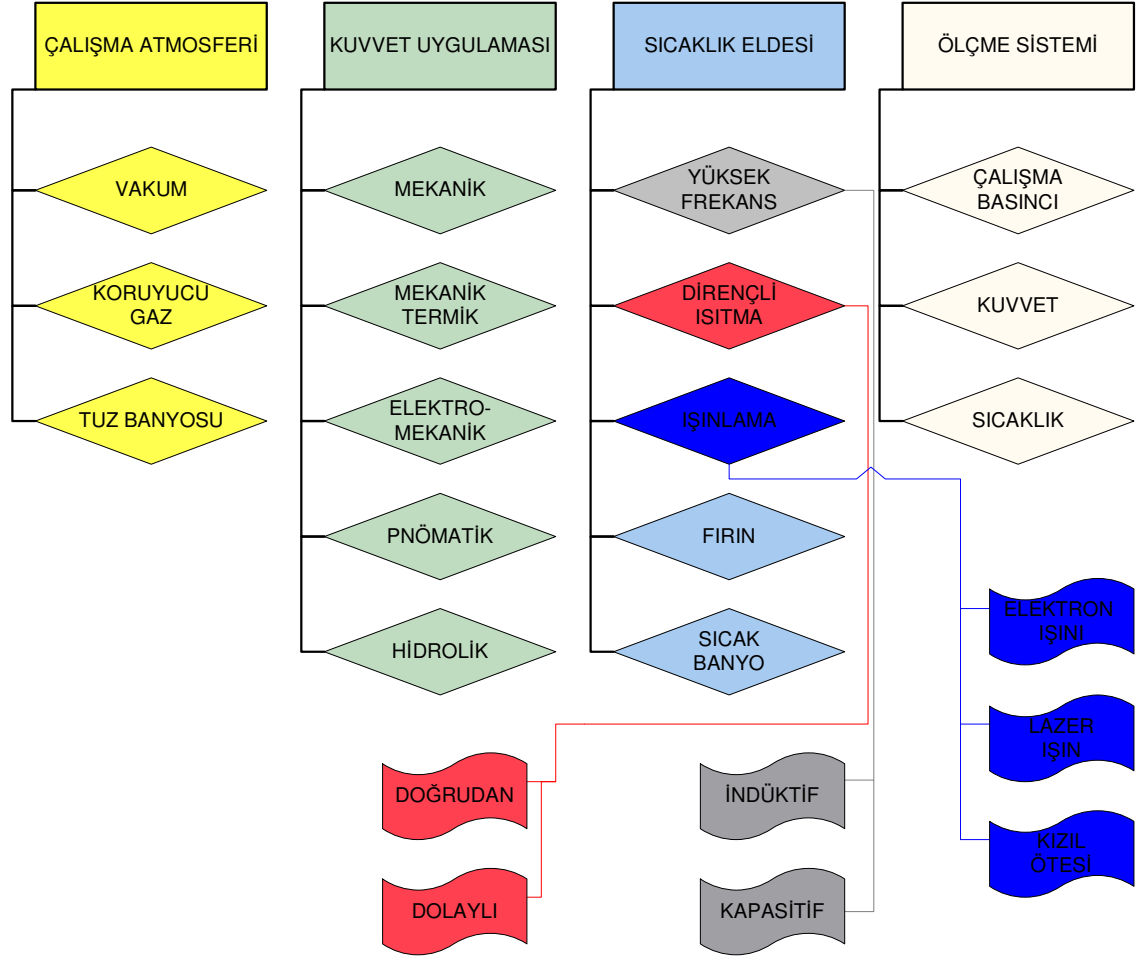
Nadir durumlarda, birleştirme işlemi hazırlanan özel aparatlar ile numunelerin, fırın ortamında ısıtılması işlemi ile gerçekleştirilir.

Bir diğer ısıtma yöntemi de indüksiyondur. İndüksiyon kullanımının en büyük avantajı, farklı malzemelere göre farklı sarım sayılarında bobin kullanılabilmesidir.[8]

Difüzyon kaynağında sıcaklığın elde edilebilmesi kadar önemli olan bir diğer husus da sıcaklığın sabit derecelerde kontrol edilmesidir. Diğer birleştirme yöntemlerine göre daha uzun süreler gerektiren difüzyon kaynağı yönteminde işlem süresi boyunca sıcaklığın sabit kalması gerekmektedir.

Kaynak basıncını oluşturmak için gerekli olan kuvvetin uygulanmasında çeşitli sistemler kullanılmaktadır. Bu sistemler mekanik, hidrolik ve izostatik sistemler olarak sayılabilir. Küçük parçaların kaynağında daha çok mekanik ya da hidrolik sistemler kullanılmaktadır. Daha karmaşık şekilli ve büyük parçaların kaynağında ise kaynak yüzeyi boyunca eş basıncın sağlanması zor olmaktadır. Bu nedenle genellikle izostatik gaz basınç sistemleri bu parçaların kaynağında uygulanmaktadır.[6]

Tablo 2.6: Difüzyon kaynağı donanımının çalışma grupları şeması



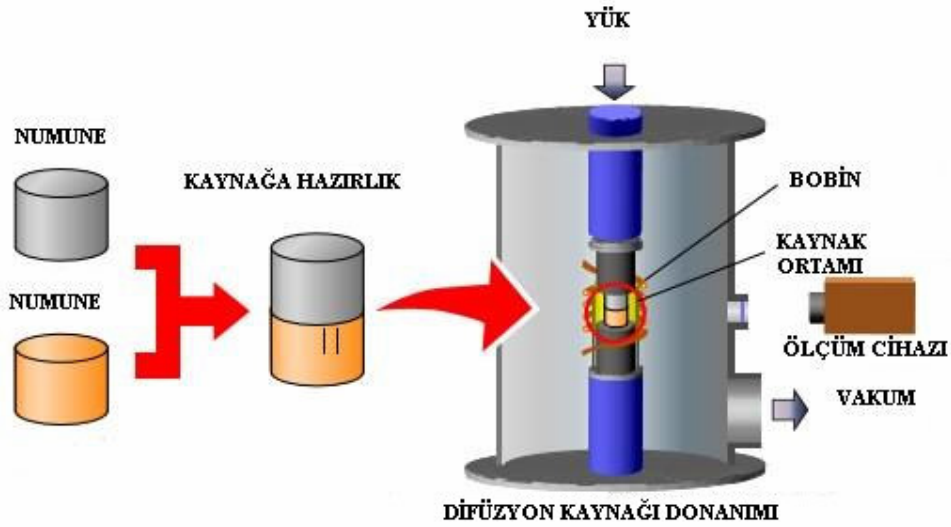
İzostatik sistemlerde kaynak işlemi önceden havası boşaltılmış bir ortamda ya da koruyucu bir zarf içerisinde gerçekleştirilir. Bu yöntem, kolay kırılabilen metallerin kaynak işlemlerinde, ya da metallerle seramik malzemeler arasında yapılan kaynak işlemlerinde kullanılmaktadır. Bu sistem ayrıca, malzemedeki basma gerilmelerini ortadan kaldırmasıyla da üstünlük sağlamaktadır.[6]

Mekanik ve hidrolik sistemlerde, basıncın sağlanması için uygun presler kullanılmaktadır. Bu presler yeterli yük kapasitesine ve boyutlara sahip olmalıdır. En önemlisi basıncı belli bir süre boyunca sabit tutabilmelidir. Pres sisteminin en önemli avantajı sağladığı kullanım kolaylığıdır ve üretimin bu sistemle mükemmel bir şekilde kontrol edilmesidir.

Kuvvetin preslerle uygulandığı sistemlerde pres kalıpları sıcaklık ve basınca dayanıklı olmalı ve kaynaklanacak malzeme ile uyumlu olmalıdır.

Difüzyon kaynağında kaynak prosesi kapalı alanlarda, koruyucu ortam olarak genellikle vakum kullanılarak gerçekleştirilir. Basınç ve sıcaklığı ayarlayan çeşitli ayar ve ölçüm gereçleri, difüzyon kaynağı cihazını komplike hale getirir. [8]

Bir difüzyon kaynak donanımının en basit şematik gösterimi Şekil 2.13' de gösterilmektedir.

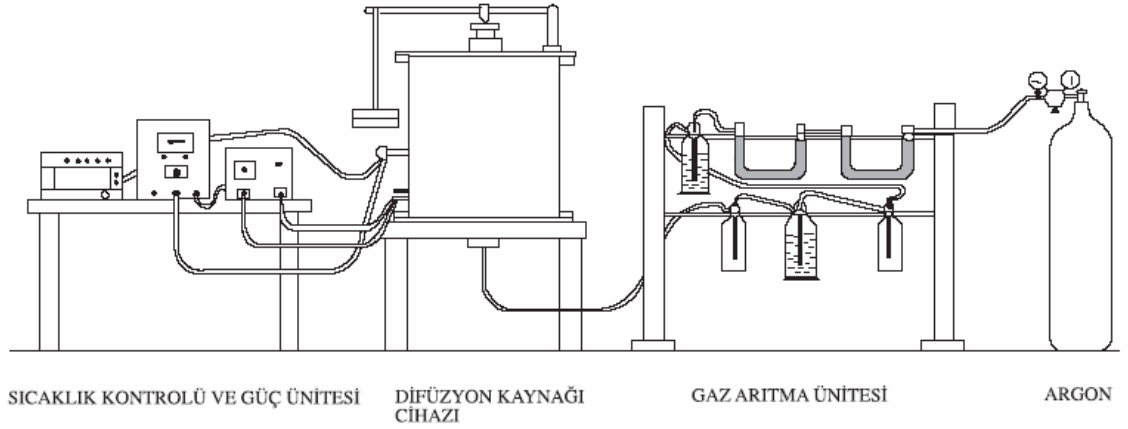


Şekil 2.13: En basit difüzyon kaynağı donanımının şematik gösterimi

Çeşitli numunelerin difüzyon kaynağı deneylerinde kullanılmış, hidrolik basınç sistemine, vakum atmosferine ve koruyucu gaz ortamına, elektrik enerjisi ile sıcaklık kontrolüne sahip, komplike bir difüzyon kaynağı makinesi Şekil 2.14' de gösterilmektedir.[2]



Şekil 2.14: Hidrolik basınç sistemine sahip komplike bir difüzyon kaynağı makinesi



Şekil 2.15: Laboratuvar ortamında oluşturulmuş difüzyon kaynağı aparat düzeneği

Günümüz teknolojisinde, difüzyon kaynağı için de seri üretim yapabilen sistemler geliştirilmiş olup aynı anda karmaşık şekilli birçok parçayı aynı anda birleştirmek mümkün olmaktadır.

3. TİTANYUM ALAŞIMLARI VE BU ALAŞIMLARIN KAYNAK KABİLİYETLERİ

Titanyum, zirkonyum, molibden, tantal gibi özel metaller, gazlara karşı duyarlı malzemeler grubuna dahildirler. Gazlara karşı duyarlılıktan; nispeten alçak sıcaklıklarda (yaklaşık 570°K) gazlarla, örneğin; çevre havasıyla kimyasal birleşmeye giren malzemeler anlaşılır.[9]

Oksijenle, azot ve hidrojenle birleşme bu malzemeleri önemli ölçüde gevrekleştirir. Bu bakımdan bu malzemelerin kaynağında gaz korumasının ileri derecede olması gerekir. Göreceli olarak iyi kaynak kabiliyetli metaller titanyum, zirkonyum, tantal, vanadyum ve niobyumla bunların alaşımları olup buna karşılık molibden, tungsten ve berilyum önemli ölçüde gevrekleşirler. Bunlar ön ısıtma ile kaynak edileceklerdir.

Titanyum, dünya yüzünde en çok rastlanan malzemeler arasında alüminyum ve demirden sonra üçüncü sırada yer alır. Ancak son eli yıl içinde teknik ve ekonomik önem kazanmıştır. Aşağıdaki nitelikler titanyum ve çok sayıda alaşımlarını belirgin kılmaktadır.

1. Alçak özgül ağırlığı: 4.5 gr/cm³,
2. 126 kp / mm² ye varan yüksek akma sınırı değeri,
3. -253°C' den yaklaşık + 500°C' ye kadar bir ısı aralığında yüklenebilme kabiliyeti,
4. 18/8 krom nikel çelikleri gibi kısmen yüksek korozyona mukavemet,
5. +300°C' nin üstünde, havada hızla tokluk niteliğini kaybetmesi.

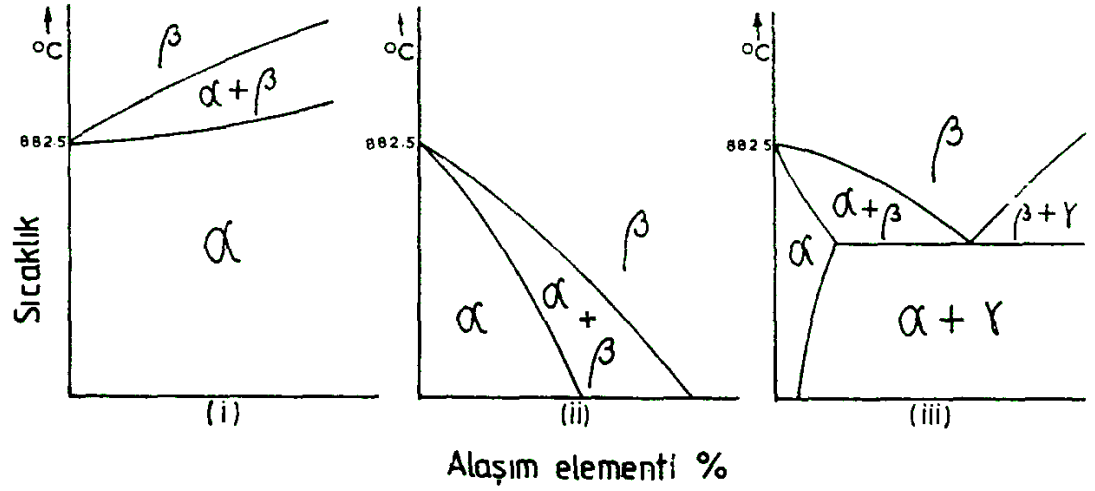
Bu nitelikleri sayesinde Ti ve alaşımlarının, kimya, denizcilik, havacılık ve uzay endüstrilerinde, motor ve türbin imalatında ve özellikle askeri endüstri dallarında önemi her gün artmakta ve bunlar stratejik değer taşıyan malzeme özelliğini kazanmaktadırlar.

Ti, çeliğe katılan bir alaşım elementi olmasının yanı sıra, saf veya alaşım halinde temel yapı elemanı olarak kullanılmaktadır. Doğada rutil (TiO₂) ve ilmenit (FeTiO₃) şeklinde bulunan titanyum cevheri, % 99 saflığında titanyum süngeri haline getirilir, bunların da ardı ardına ergitilmesiyle masif blokları elde edilir. Bloklardan çeşitli yarı mamuller imal edilir.

Titanyum, göreceli olarak yüksek ergime noktasına (1727°C), alçak özgül ağırlığa (4.53 gr/cm³) ve yaklaşık 425°C veya 540°C sıcaklıkların altında mükemmel korozyon mukavemetine sahiptir. Ti alaşımlarının mekanik mukavemeti Al alaşımlarınınkinin iki, üç katı olup bazı alaşımlı çeliklerinkine eşittir. Titanyumun elastiklik modülü 11.200.000 kg/cm² dir ve bu da Al alaşımlarından daha yüksek tokluğa sahip olduğunu göstermektedir. Ancak maliyeti yüksektir. Deniz atmosferi ve suyunda Ti, östenitik paslanmaz çelikler ve monel metalden daha üstündür.

Bunlara karşılık Ti ve alaşımlarının sakıncası da, yaklaşık 425°C' nin üstünde sıcaklıklarda başka elementlerle reaksiyona girmeleri olup bu nedenle yüksek sıcaklıklarda kullanılmaları sınırlıdır. Titanyumun yüksek sıcaklıklarda reaksiyon karakteristikleri, şekillendirme işlemlerinde hayli zorluklar çıkarır.

Beyaz gümüş renge sahip ve parlatıldığında, görünürde çeliğe benzeyen titanyum, yüksek safiyette nispeten düşük bir çekme mukavemetine (216 N/mm²) ve yüksek sünekliğe (% 50) sahip olmakla birlikte ticari dereceleri safiyeti bozan elementler içerip bunlar çekme mukavemetini 700 N/mm²' ye kadar yükseltir ve sünekliği % 20' ye indirirler.



Şekil 3.1: Titanyumda α - β geçiş sıcaklığı üzerine alaşımlandırmanın etkileri

Titanyum iki allotropik şekilde mevcuttur; 885°C ' ye kadar, sıkı paketlenmiş altı köseli içyapıda olan α fazı ile bu sıcaklığın üstünde, stabil olan hacim merkezli kübik içyapıda β fazıdır.

Allotropik değişme noktası alaşımlamayla, demirde A_3 noktasında olduğu gibi, etkilenir. Böylece, β fazına göre α fazında daha büyük erime kabiliyeti olan alaşım elementleri, α fazını daha büyük bir sıcaklık aralığında stabil kılma eğiliminde olurlar. (Şekil 3.1)

Bu elementler, araya sıkışma şeklinde eriyen, oksijen, azot, karbon ve hayli miktarda eriyen alüminyum gibi elementlerdir. β içinde erime eğiliminde olup da onu sonuç olarak stabil kılan elementler, mutad olarak β gibi hacim merkezli kübik içyapıda olanlardır. Bunlar başlıca "intikal elementleri" demir, krom, molibden vb. olup sonuçta mevcut olan denge diyagramları yukarıdaki şekil -ii veya iii tipinde olurlar. Yukarıdaki şekil-iii tipinde bir denge diyagramıyla temsil edilmiş alaşımlar, çökelme sertleşmesi şekliyle ısıtılma tabii tutulabilirler.

Gerçekten O, N ve Al, dönüşüm sıcaklığını yükseltirler. Bununla birlikte O ve N bir yandan sertlik ve çekme mukavemetini artırırken sünekliği ve dolayısıyla şekil alma kabiliyetini azaltırlar.

Alüminyumun α fazı üzerinde stabil kılıcı etkisi, daha yüksek sıcaklıklarda stabiliteyi teşvik eder; Al böylece, Ti alaşımlarının bir çoğunda önemli bir element haline gelir. Fe, Mn, Cr, Mo, V, Nb ve Ta, β fazını stabil kılarlar ve böylece de α - β dönüşüm sıcaklığını indirirler. Kolombiyum ve tantal ilavesi, mekanik mukavemeti artırır ve Ti ve Al bileşiklerinin varlığı dolayısıyla var olan gevrekleşmeyi önlemeye yardımcı olur. Ni, Cu ve Si elementleri, etkili ötektoid yapıcılarıdır; oysa ki Mn, Cr ve Fe, bir ötektoid oluşmasında ağır davranırlar.

Kalay ve zirkonyum elementleri hem α , hem de β içyapılarında eriyebilirler. İçyapılarına göre Ti alaşımları üç genel tipe ayrılır; tüm α , α + β , tüm β . Tüm α alaşımları ısı işleme cevap vermezler ve dolayısıyla başka alaşımlarda mümkün olan mukavemet düzeyine erişemezler, α + β alaşımları ısı işleme tabi tutulabilirler ve iyi bir sünekliğe sahiptirler. β alaşımları, başka alaşımlarla kıyaslanabilir, mukavemetlerde göreceli olarak aşağı sünekliğe sahiptirler, α + β alaşımları, yaşlandırılma ile sertleştirilebilirler.

Alaşımlarda β fazı sert, kuvvetli ve nispeten yumuşak α fazına göre daha az sünek olmak eğilimindedir. β fazı iyi dövülebilir şöyle ki ticari alaşımların çoğu, α + β tipinden olup β alanında sıcak çalışılmışlardır. Yüksek mukavemetli I.M.I. Ti 680 alaşımı (% 11 Sn; % 2.25 Al; % 4 Mo; % 0.2 Si) uygun ısı işleme tabi tutulduğunda 1300 N/mm² gibi yüksek bir mukavemete erişir ve İngiliz-Fransız işbirliği ürünü "Concorde" uçağının yolcu taşıyıcı kabuğunun konstrüksiyon düğümleri şeklinde kullanılmıştır. %6 Al;% 5 Zr; % 3 Mo ve % 1 bakır içeren bir başka I.M.I. EX 700 alaşımı 1540 N/mm² çekme mukavemetine sahiptir.

α alaşımları genellikle en yüksek mukavemeti 315 - 595°C sıcaklık aralığında sağlarlar; keza bu sıcaklık aralığında oksitlenmeye en iyi mukavemeti gösterirler. En kuvvetli alaşımlar yukarda söylendiği gibi, ısı işleme cevap veren α + β tipinde olanlardır. Bu alaşımlar α alaşımlarından daha fazla şekil alabilirlerse de, kaynak edilemezler, α - β dönüşüm sıcaklığının üstüne ısıtıldıklarında, tane irileşmesi sonucu sünekliğini kaybederler.

Titanyumun özgül ağırlığı sadece 4.53 gr/cm³ olduğuna göre, bu metal esaslı alaşımlar bir yüksek mukavemet / ağırlık oranına sahiptirler. Ayrıca, 500°C' ye kadar sürünme nitelikleri çok memnuluk verici olup yorulma sınırı yüksektir. Dolayısıyla titanyum uçak jet motorlarının kompresörlerinde uygulama yeri bulur; bu kompresörlerde güncel eğilim basma (kompresyon) oranını artırmak ve bunun sonucunda da termodinamik ısıtmayı yükseltmektir.[13]

Titanyumun havacılık endüstrisinde her gün daha önemli bir rol oynamaya aday olduğundan şüphe yoktur. Böylece de Amerikan Boeing 2707 süpersonik nakliye uçağı geniş ölçüde titanyum alaşımına dayanmaktadır. Ancak çok ucuzlayacağı da söylenemez şöyle ki ergimiş titanyum oksijen ve azotla hızla birleştiğinden, vakumda ergitilmesi gerekir. O, bilinen bütün refrakter maddelerle de kolaylıkla reaksiyona girdiğinden, su ile soğutulan bakır potada elektrik arkıyla ergitilir; ergimis Ti, bakır potayla kaynaşmaz. Ti, yüksek sıcaklıklarda ne kadar aktif ise düşük sıcaklıklarda o denli inerttir. Onu çekici kılan özelliklerinin başında oda sıcaklığında birçok kimyasal ortama, klorürler ve oksitleyici koşullara, gösterdiği direnç gelir. Oksitleyici asitlere, örneğin nitrik asitin sulu çözeltilerine, düşük konsantrasyondaki sülfürik asite, hidroklorik asite ve organik asitlerin çoğuna, yine düşük konsantrasyonlarda olmak kaydıyla alkalilere karşı alçak sıcaklıklarda mükemmel bir direnç gösterir. Kaynar sıcaklığa kadar düşük konsantrasyonlu klor bileşiklerine mükemmel direnir. 400°C sıcaklığa kadar buhara da karşı koyar.[14]

Kısaca Ti, yerine göre 300 - 400° C sıcaklığa kadar korozyon mukavemeti en yüksek olan metallere biri olmakla kimya ve petrokimya sanayilerinde önemli yeri vardır. Bütün bu nitelikleri sayesinde Ti ve alaşımları, yukarıda sayılmış uygulamaların (havacılık endüstrisi) yanı sıra roket tasarımında (2. ve 3. kademe motor mahfazaları, basınçlı ve sıvılaştırılmış gazlı silindirler, memeler vb.), nükleer yakıt işlenmesi için teçhizat, kimyasal teçhizat tasarımında, gemi inşasında (pervaneler, gemi, denizaltı ve torpidolarda, tekne kaplamaları) ve daha nice uygulamalarda yer alır.[15]

Titanyum korozyon mukavemetini, yüzeyinde kolaylıkla oluşan oksit filmine borçludur. O, kavitasyon korozyonu ve gerilim (voltaaj) altında korozyona karşı da stabildir. 500°C' nin üstündeki sıcaklıklarda oksit filmi çatlar ve Ti alaşımları derhal oksitlenip hidrojen hapsederler, bu da gevrekleşmeye neden olur (hidrojen gevrekliği).

Titanyumdan bahsedildiği zaman özellikle Alüminyum elementinin adı çok geçmektedir. Bunun sebebi; titanyum esaslı alaşımlarda alüminyum başlıca element olmaktadır.

Başlıca titanyum alaşımları olarak aşağıdaki alaşımlar sıralanabilmektedir;

1) α alaşımları:

% 5 Al; % 5 Sn; % 5 Zr

% 7 Al; % 12 Zr

% 6 Al; % 2 Cd; % 1 Ta; % 1 Mo

% 8 Al; % 1 Mo; % 1 V

2) $\alpha + \beta$ alaşımları:

% 7 Al; %4 Mo

% 5 Al; % 4 V

3) β alaşımları:

% 4.5 Sn; % 6 Zr; % 11.5 Mo

% 8 Mo; % 8 V; % 2 Fe; % 3 Al

% 3 Al; % 8 V; % 6 Cr; % 4 Zr; % 4 Mo

Titanyum alaşım çeşitlerinin özelliklerini kısaca özetlersek;

Alaşımsız-ticari saflıkta titanyum: Korozyon dirençleri yüksektir, ancak, mukavemetleri alaşımlı olanlara göre düşüktür. Soğuk alışma ortamlarında tercih edilirler.

α -fazlı alaşım: α -fazı sabitleyicileri olarak bilinen Al gibi elementler ile Sn gibi nötr elementler içerirler (Ti-5Al-2.5Sn gibi). Saf titanyuma yakın özellikler gösterirler, ancak farklı olarak, 300 C'ye kadar iyi bir çekme mukavemetine sahiptirler. Soğuk alışma ortamlarında tercih edilirler.

Yakın α -fazlı alaşım: α -fazı sabitleyicileri olarak bilinen Al, O gibi elementleri fazla miktarda, Mo, V gibi β -fazı sabitleyicilerini ise düşük miktarda içerirler (Ti-8Al-1Mo-1V gibi). α -fazlı titanyuma yakın özellikler gösterirler, ancak farklı olarak, çalışma sıcaklığı 400-520 C'ye varan ortamlarda da kullanılabilirler.

$\alpha + \beta$ fazlı alaşım: α ve β -fazı sabitleyicilerini bulundururlar. En sık kullanılan ve en eski titanyum alaşımı olan Ti-6Al-4V, bu gruba dâhildir. Düşük yoğunluklu bu malzemeler, mukavemet ve korozyona dayanıklılık özelliklerini yüksek sıcaklıklara kadar korurlar.

β -fazlı alaşım: Yüksek miktarda β -fazı sabitleyicilerini bulundururlar. Yüksek sertlikleri ve mukavemetleri, soğuk Şekil verilebilirlikleri genel özellikleridir. Çalışma sıcaklıkları $\alpha + \beta$ -fazlı alaşımlardan yüksek olsa da, metal matris kompozitler ve buhar türbinli güç santralleri örneklerinde olduğu gibi yeni yeni kullanım alanı bulabilmektedirler.

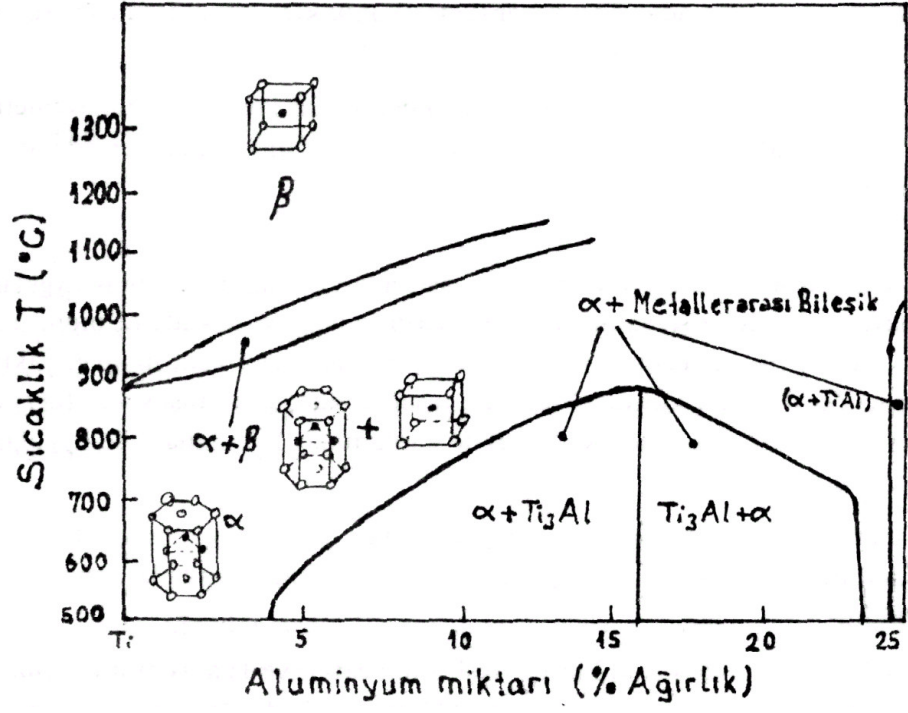
Tablo 3.1: α , β ve $\alpha+\beta$ Ti alaşımları ve bu alaşımların endüstrideki mekanik özellikleri

Alaşımsız Ti	Ticari şekilleri(*) Koşul(**)	Deney şekli	Çekme muk. (kg/mm ²)	Akma sınırı (kg/mm ²)	Uzama %
Yüksek safiyet (%99.9)	Tavlanmış	—	24	14	54
ASTM Grade 2 (%99.2)	Tavlanmış BSTW	—	41.4	28	28
ASTM Grade 3 (%99.0)	Tavlanmış BSTW	—	55.4	44.2	27
ASTM Grade 4 (%99.0)	Tavlanmış BSTW	—	66.5	56	25
α Titanium alaşımları					
% 6 Al; % 4 Zr; % 1 V	Tavlanmış S	Saç	100	97	17
% 5 Al; % 2.5 Sn	Tavlanmış BSTW	—	87.5	84	18
% 8 Al; % 1 Mo; % 1 V	981°C, 5 dak. AC B,S } 593°C, 8 sa. AC }	Saç	106	94.5	16
% 8 Al; % 2 Cb; % 1 Ta	900°C, 1 sa tavl. AC BSW	Çubuk	88.5	84	17
% 8 Al; % 8 Zr; % 1 (Cb+Ta)	Vakum tavl. 870°C, 8 sa.;315°C'a kadar FC B	Çubuk	94.5	87.5	16
$\alpha - \beta$ Titanium alaşımları					
% 3 Al; % 2.5 V	Tavlanmış S, T	Band	70	59.5	15
% 5 Cr; % 3 Al	Tavlanmış B, S	Çubuk	108.5	103	14
% 8 Mn	Tavlanmış S	Saç	96.7	87.5	15
% Fe; % 2 Cr; % 2 Mo	Tavlanmış B,S,T 804°C, 1 sa WQ } 482°C, 24 sa AC }	Çubuk	96	87.5	18
% 4 Al; % 4 Mn	Tavlanmış B, S, W 787°C, 2 sa WQ } 482°C, 24 sa AC }	Çubuk	125.5	120.5	13
% 4 Al; % 3 Mo % 1 V	Tavlanmış B, S, W 787°C, 2 sa WQ } 482°C, 24 sa AC }	Çubuk	104	92	16
% 4 Al; % 3 Mo % 1 V	885°C, 2 1/2 dak. WQ S 885°C, 2 1/2 dak. WQ } 495°C, 12 sa. AC }	Saç	113.5	98	9
% 4 Al; % 4 Mo; % 4V	842°C, 1 sa. WQ B } 538°C, 6 sa. AC }	Saç	98	66.6	15
% 4 Al; % 4 Mo; % 4V	842°C, 1 sa. WQ B } 538°C, 6 sa. AC }	Çubuk	137	117	6
% 5 Al; % 2.75 Cr; % 1.25 Fe	Tavlanmış B, S 800°C, 6 dak. WQ } 482°C, 5 sa. AC }	Saç	119.2	105	6
% 5 Al; % 2.75 Cr; % 1.25 Fe	Tavlanmış B, S 800°C, 6 dak. WQ } 482°C, 5 sa. AC }	Saç	108.5	94.5	14
% 5 Al; % 1.5 Fe; %1.4 Cr;% 1.2Mo	Tavlanmış BS 898°C, 1 sa. WQ } 538°C, 24 sa. AC }	Çubuk	136.5	116	6
% 5 Al; % 1.5 Fe; %1.4 Cr;% 1.2Mo	Tavlanmış BS 898°C, 1 sa. WQ } 538°C, 24 sa. AC }	Çubuk	108	103	16
% 6 Al; % 4V	Tavlanmış B, S, T, W 925°C, 20 dak. WQ } 523°C, 8 sa. AC }	Saç	136.5	129	9
% 6 Al; % 4V	Tavlanmış B, S, T, W 925°C, 20 dak. WQ } 523°C, 8 sa. AC }	Saç	94.5	84	11
% 7 Al; % 4 Mo	Tavlanmış BT 898°C, 20 dak. WQ } 482°C, 16 sa. AC }	Saç	119	105	7
% 7 Al; % 4 Mo	Tavlanmış BT 898°C, 20 dak. WQ } 482°C, 16 sa. AC }	Çubuk	112	105	15
% 2.5 Al; % 16V	748°C, 20 dak. WQ BSW } 748°C, 20 dak. WQ } 515°C, 4 sa. AC }	Çubuk	133	123	12
% 2.5 Al; % 16V	748°C, 20 dak. WQ BSW } 748°C, 20 dak. WQ } 515°C, 4 sa. AC }	Saç	73.5	31.5	16
% 2.5 Al; % 16V	748°C, 20 dak. WQ BSW } 748°C, 20 dak. WQ } 515°C, 4 sa. AC }	Saç	125.2	116	6
β Titanium alaşımları					
% 13V; % 11 Cr; % 3 Al	760°C, 30 dak. AC BSW } 760°C, 30 dak AC } 482°C, 16 sa. AC }	Saç	94.5	91	16
% 13V; % 11 Cr; % 3 Al	760°C, 30 dak. AC BSW } 760°C, 30 dak AC } 482°C, 16 sa. AC }	Saç	126	119.2	6

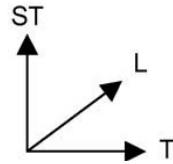
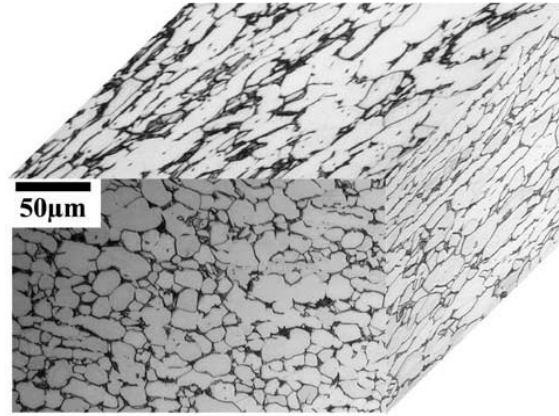
(*) Ticari şekiller B = Çubuk ve kütükler; S = haddelenmiş yassı mamuller (saç, band, levha);

W = tel; T = borular ve ekstrüzyon ürünleri

(**) Isıl işlem AC = havada soğuma; WQ = suya daldırma; FC = fırında soğuma

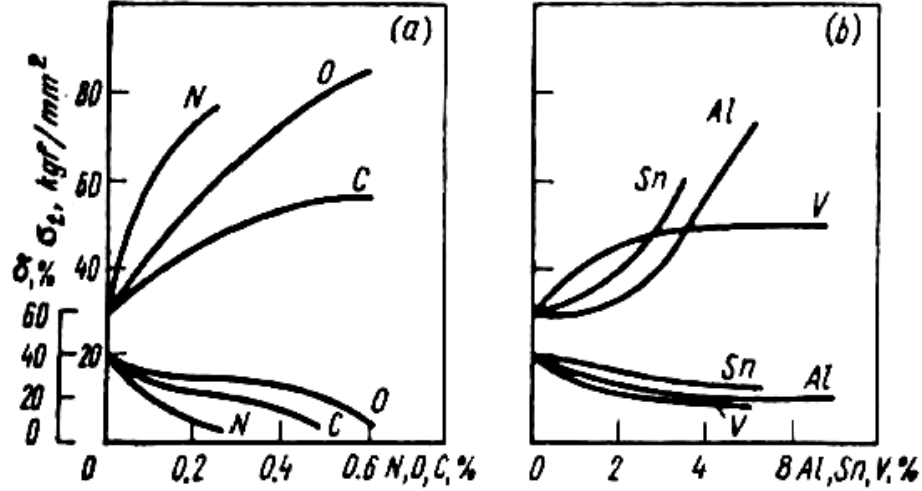


Şekil 3.2: Ti alaşımlarında Ti - Al denge diyagramı



Şekil 3.3: Ti6Al4V alaşımının üç boyutlu iç yapısı [13]

Titanyumu alaşımlandırmadaki esas amaç genellikle, korozyon mukavemetini artırmaktan çok mekanik nitelikleri yükseltmektir. Alaşımlandırmanın çekme mukavemeti ve kopma uzaması üzerindeki etkilerini grafiklerle görmek mümkün olmaktadır.



Şekil 3.4: Alaşım elementlerinin ve saflığı bozan maddelerin titanyumun mekanik özellikleri üzerine etkileri a- araya sıkışma katı eriyikleri oluşturan elementler b- yerine geçme katı eriyikleri oluşturan elementler

Sonuçta anlaşılmıştır ki, ticari Ti alaşımlarının hepsi kural olarak içlerinde alaşım elementi olarak mutlaka Al elementini bulundurmaktadırlar. Yukarıda anlatılan Ti alaşımlarına göre, endüstride en yaygın kullanılan alaşımlar $\alpha + \beta$ ve α alaşımlarıdır.

Titanyum, özellikle karbon ve oksijene olmak üzere, birçok elemente karşı yüksek afinitesi, yani yüksek reaksiyon eğilimi olan bir malzemedir. Bu sebeple, karbona maruz kalması sonucu titanyumun kolayca gevrekleşeceği; ısının yükseldiği ve oksijence zengin bir ortamda titanyum talaşlarının kolayca tutunabileceği ve iş parçasının neredeyse tüm takım malzemeleri ile reaksiyona girerek kimyasal tabanlı aşınmalara yol açacağı söylenebilir. Saf titanyumun oda sıcaklığındaki, α -fazı adı verilen hegzagonal yapısı, 882 °C'de β -fazı adı verilen hacim merkezli kübik yapıya dönüşür.

Al, O, N gibi α -fazı sabitleyicileri dönüşüm sıcaklığını yükseltirken, V, Nb ve Ta gibi β -fazı sabitleyicileri bu sıcaklığı düşürür. Sn ve Zr elementleri ise, α -fazında kullanılırsalar da, α ve β fazları içinde büyük oranda çözündükleri için, nötr elementler olarak adlandırılırlar.

Faz sabitleyici olarak alüminyum, oda sıcaklığından 550 °C'ye kadar geniş bir aralıkta etkin olarak kullanılabilmesi ve düşük yoğunluğu ile dikkat çeker. Oksijen ise, ticari saflıktaki titanyum malzemelerde mukavemet ve imalat kolaylığı özelliklerinin elde edilmesinde kullanılmaktadır. Aslında, saf titanyum, büyük oranda kullanıldığı çevrelerin gözüyle bakılırsa, çok değerli bir malzeme değildir. Tercih edilmesini sağlayan asıl özelliklerini, düşük oranlarda eklenen alaşım elemanları ile kazanır.

3.1. Titanyum Malzeme Kodları ve Standartlar

3.1.1. Alman standartları

DIN 17850 Titanyum; bileşim

DIN 17860 Şekillendirilmiş Ti ve Ti alaşımı sac ve band

DIN 17863 Ti teller

DIN 17864 Şekillendirilmiş Ti ve Ti alaşımı dövme malzemeler

WL 3.7024 Blatt 1 Yaklaşık % 0.1 O₂' li alaşımsız Ti; sac

WL 3.7024 Blatt 2 Yaklaşık % 0.1 O₂' li alaşımsız Ti; ilave kaynak metali

WL 3.7034 Blatt 1 Yaklaşık % 0.2 O₂' li alaşımsız Ti; sac

WL 3.7034 Blatt 2 Yaklaşık % 0.2 O₂' li alaşımsız Ti; çubuk malzemeler

WL 3.7034 Blatt 3 Yaklaşık % 0.2 O₂' li alaşımsız Ti; ilâve kaynak metali

WL 3.7064 Blatt 1 Yaklaşık % 0.3 O₂' li alaşımsız Ti; sac

WL 3.7064 Blatt 2 Yaklaşık % 0.3 O₂' li alaşımsız Ti; çubuklar ve dövme malzemeler

VdTÜV 230 Alaşımsız titanyum malzeme listesi

VdTÜV 1153 kaynak üzerine yönetmelik; ilave metallerin uygunluğu için kod

AWS A 5.16 Ti ve Ti alaşımı; çubuklar, kaynak çubukları ve elektrodlar

AWS 4951 Ti tel, kaynak [18]

3.1.2. Amerikan standartları

ANSI B.5-1977 Petrol rafinerisi boru donanımı

ASME Section VIII ve IX, Buhar kazanı ve basınçlı kaplar; kaynak yöntemi kalifikasyonu

ve kaynakçı yetenek sınavı

ASTM E-165 Penetrant muayene

1917-U1a Malzeme şartnamesi 1917-U1b Malzeme şartnamesi

Tablo 3.2: Titanyum alaşımlarının endüstrilerdeki isimlendirilmeleri

Ti ALAŞIMI	ADLANDIRMA
Ti-5.8Al-4Sn-3.5Zr-.7Nb-.5Mo-.35Ti-.06C	IMI 834
Ti-8Al-1Mo-1V	8-1-1
Ti-5Al-2.5Sn	UNS R5421
Ti-6Al-7Nb	IMI 367
Ti-6Al-5Zr-.6Mo-.2Si	IMI 685
Ti-5.5Al-3.5Sn-3Zr-1Nb-.25Mo-.3Si	IMI 829
Ti-6Al-1Nb-1Ta	6-2-1-1
Ti-6Al-2.75Sn-4Zr-.4Mo-.4Si	Ti1100
Ti-6Al-4V	IMI 318
Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo-.09Si	6-2-4-2Si
Ti-4Al-2Sn-4Mo-.4Si	IMI 550
Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo	6-2-4-6
Ti-2.25Al-11Sn-1Mo-Ti-5Zr-.25Si	IMI 679
Ti-6Al-6V-2Sn	06.06.2002
Ti-4.4Al-5Mo-1.5Cr	Corona-5
Ti-6Al-4V-2.5Mo	Kobe alloy
Ti-3Al-2.5V	IMI 325
Ti-4.5Al-3V-2Fe-2Mo	SP-700
Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Mo-4Cr	Ti-17
Ti-3Al-10V-2Fe	10.02.2003
Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr	Beta C
Ti-3Al-8V-8Mo-2Fe	UNS R58010
Ti-4.5Sn-11.5Mo-6Zr	Beta III
Ti-2.7Al-7Sn-13V-2Zr	Transage 175
Ti-3Al-3Sn-15V-3Cr	15-3-3-3
Ti-2Al-2Sn-11.5V-11Zr	Transage 129

Ti ve alaşımlarının gazlara karşı duyarlılığı, çeşitli kaynak yontemlerinin kullanılmasını sınırlamakta ve bir dizi ek onlemin alınmasını zorunlu kılmaktadır. Bu sınırlamalar bir yana bırakılarak, bütun Ti malzemelerinin büyük bölümünün iyi bir kaynak kabiliyetine sahip olduğu söylenebilir.[17]

Kaynak tekniğinin bilinen temel esasları, temizlik, birleşme yeri düzeni (iç gerilme yığılmalarından kaçınma) vb.' ne uyulduğunda gözeneklilik ve çatlak beklenmez. Sadece, örneğin TiA17Mo4, TiA16VSn2 ve TiA14MoV3 gibi bazı yüksek mukavemetli alaşımlar, yüksek akma sınırı / çekme mukavemeti oranları dolayısıyla, gecikmeli (soğuk) çatlak oluşturma, gerilme korozyonu ve sertleşme eğiliminde olurlar. Bir gerilim giderme tavlama veya mümkünse, tam bir ısıl işlem, bunları önlemede yardımcı olabilir.

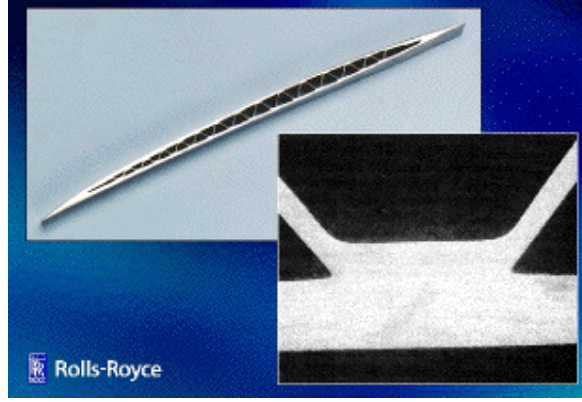
Özetle, alaşımsız Ti ve bütun α alaşımları kaynak edilebilirler. Ti6Al4V $\alpha + \beta$ alaşımı ile diğer hafifçe $\alpha + \beta$ stabilleştirilmiş alaşımlar da kaynak edilebilirler, ancak kuvvetli β stabilleştirilmiş $\alpha + \beta$ alaşımları kaynakta gevrekleşirler. $\alpha + \beta$ alaşımlarının çoğu başarıyla kaynak edilebilirler. Bununla birlikte kaynağın yaşlandırma sertleştirilmesiyle kuvvetlendirme işlemi dikkatle uygulanacaktır, şöyle ki bazı β alaşımlarında yaşlandırılmış kaynaklar tamamen gevrek hale gelebilir.

Sonuç olarak sanayide özellikleri ve kullanım alanları bakımından en çok tercih edilen Ti, Al, V alaşımı olarak Ti6Al4V tercih edilmektedir. Bu alaşım, yüksek dayanımı, yüksek korozyon mukavemeti ve kolay şekil alabilme kabiliyetleri ile neredeyse çelik ile benzer özelliklere sahip görölmektedir. Bunun yanı sıra hafifliği ile çeliklerden de fazla birçok avantaja sahiptir. CCT soğuma ve TTT sıcaklık, zaman, dönüşüm eğrileri de çelik ile benzerdir. [16]

Bu özellikleri ile de bu alaşım, özellikle düşük ve orta basınçlı gaz türbinleri ve bal peteği şekilli yapılarda vazgeçilmez bir kullanım alanına sahiptir. Ti6Al4V yüksek korozyon (325 °C üzeri) , erozyon mukavemeti, oda sıcaklığındaki yorulma dayanımı ve sertliği ile endüstride kimyasal boru hatlarında (tuzlu su soğutma hatları, bakır bromür hatları) sıklıkla kullanılmaktadır.



Şekil 3.5: Rolls Royce uçak motorunun Ti6Al4V' dan imal edilmiş türbin kanatları



Şekil 3.6: Rolls Royce uçak kanadındaki difüzyon kaynaklı Ti6Al4V yapı elemanı

Geçmişte, difüzyon kaynaklı bağlantılar üzerine yapılan araştırmaların çoğunda Ti6Al4V ile paslanmaz 300 serisi çeliklerin ve diğer metallerin birleşme kabiliyetleri araştırılmış ve çoğu deneyde olumlu sonuçlar ve sağlıklı birleştirmeler kaydedilmiştir. Yukarıda bahsedilen Ti, Al, V alaşımları için kullanılabilen kaynak yöntemleri ASME, ASTM ve AISI Standartlarında aşağıdaki gibi sıralamıştır:

Gas Metal Arc Welding (GMAW) / Metal Inert Gas (MIG); Plasma Arc Welding (PAW); Electron Beam Welding (EBW); Laser Beam Welding (LBW); Resistance Spot / Seam Welding (SPOT); Flash Welding (FW); Explosion Welding (EW); Submerged Arc Welding (SAW); Diffusion Bonding (DB) and Brazing.

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1. Malzeme Temini ve Deney Numunelerinin Hazırlanması

Deneysel çalışmalarda Ti, Al, V alaşımı olarak DUSA fabrikasından 3'' boru olarak temin edilen ASME Standartları'nda Grade 5 malzemeye denk gelen, Ti6Al4V alaşımı kullanılmış olup, deneye uygun numuneler borudan kesilip, preste düzeltilerek elde edilmiştir.

ASME Standartları'ndan bu malzemenin alaşım ve mekanik özellikleri araştırılarak kayıtlara alınmış, difüzyon kaynağı için uygun parametreler araştırılmıştır.

Tablo 4.1: ASME SB 348, ASTM B 348 Grade 5 malzemenin alaşım miktarları tablosu

ASTM Grade	UNS Number	N max	C max	H max	Fe max	O max	Al	V	Mo	Ni	Other each	Other max	Ti
5	R56400	0.05	0.08	0.015	0.40	0.20	5.5 6.5	3.5 4.5			0.10	0.40	REMAIN

Deneylerde kullanılmak üzere temin edilen 3'' boru bir dizi işlemde geçirilerek asıl ölçülerdeki numuneler elde edilmiştir.

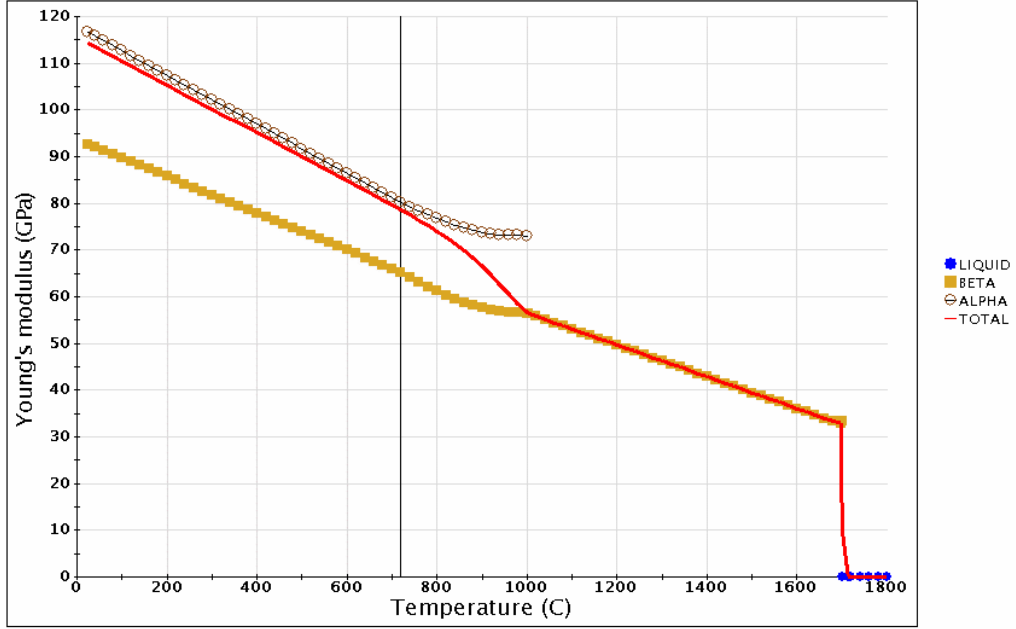
Borudan ilk olarak atölyede şekilde görüldüğü gibi şerit çıkartılmış, bu şerit istenilen numune ölçülerinde dilimlere ayrılmıştır. Çıkartılan parçaların borudan gelen kavisli yapıları pres kullanılarak düzeltilmiştir.

Elde edilen bu parçalar üzerinde hassas son düzeltme işlemleri yapılarak 12 mm x 12 mm ölçülerinde 8 mm kalınlığında numuneler elde edilmiştir.

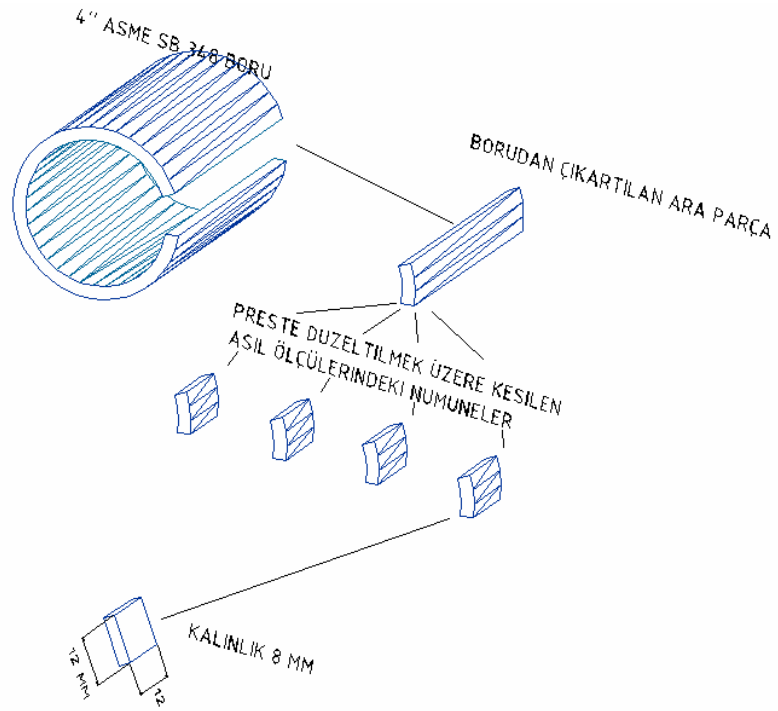
Tablo 4.2: ASME SB 348 (Ti6Al4V) malzemenin mekanik özellikleri

TİTANYUM ASME SB 348 (Ti6Al4V) MEKANİK ÖZELLİKLERİ	DEĞER
Hardness, Brinell	379
Hardness, Knoop	414
Hardness, Rockwell C	41
Hardness, Vickers	396
Tensile Strength, Ultimate, MPa	1170
Tensile Strength, Yield, MPa	1100
Elongation at Break, %	10
Modulus of Elasticity, GPa	114
Compressive Yield Strength, MPa	1070
Notched Tensile Strength, MPa	1550
Ultimate Bearing Strength, MPa	2140
Bearing Yield Strength, MPa	1790
Poissons Ratio	0.33
Charpy Impact, J	23
Fatigue Strength, MPa	700
Fatigue Strength, MPa	160
Fracture Toughness, MPa-m ^{1/2}	43
Shear Modulus, GPa	44
Shear Strength, MPa	760

Ti-6Al-4V heat treated at 720C



Şekil 4.1: Ti6Al4V malzemenin çeşitli fazlarda sıcaklık ile dayanımının değişimi



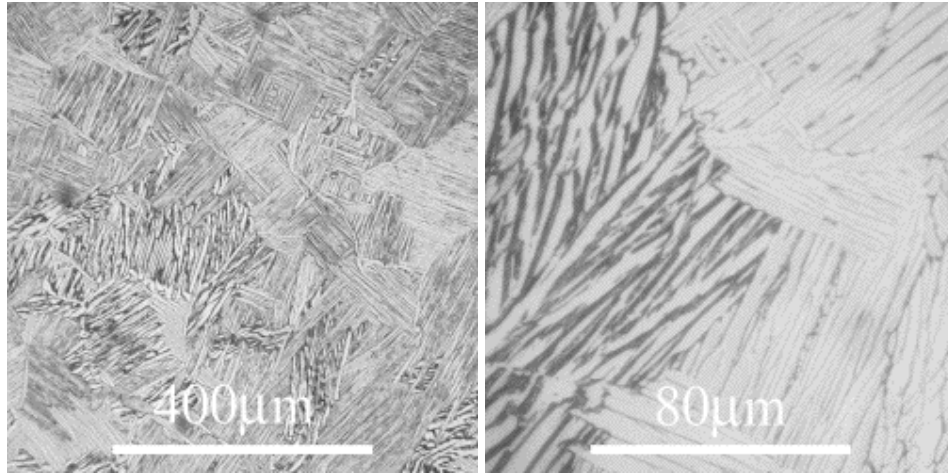
Şekil 4.2: Deneyde kullanılacak numunelerin borudan kesilerek istenilen ölçülere getirilmesi

Kullanılacak deney teçhizatının numune tutucu parçasına uygun ölçülerde oluşturulan numunelerin, numune tutucudaki konumlarına göre, birleşmenin meydana geleceği yüzeyleri seçilmiş ve bu yüzeylerde difüzyon kaynağının gereksinimi olan temizleme ve parlatma işlemleri yapılmıştır.

Birleşecek yüzeyler sıra ile 800 grid ve 1000 grid değerindeki zımparalar ile döner parlatma tezgahında zımparalanmıştır. Sonra bu yüzeyler yine döner parlatma tezgahında, kısa tüylü kumaş üzerine belli aralıklarla alumina solüsyonu dökülerek birleşme öncesi son parlatma işlemi yapılmıştır.

Parlatma işlemi sırasında kontrol amaçlı olarak numuneler belli aralıklarla su ile yıkanmış ve kurutma makinesinde kurutulmuştur. Bu haliyle numuneler difüzyon kaynağı deneyi için hazır hale gelmiştir.

Deney için birleşme yüzeyleri parlatılan numunelerden bir tanesi bu haliyle bakalite alınmış ve içyapısı hakkında bilgi alınabilmesi için elektron mikroskobu altında incelenmiş ve görüntü alınmıştır. (Şekil 13.3)



Şekil 4.3: Ti6Al4V malzemenin içyapı görüntüsü

Elektron mikroskobunda içyapının incelenmesi öncesinde de aynı parlatma işlemleri sonrasında numuneler alkol ile iyice yıkanmış ve makinede kurutulmuştur.

4.2 Deney Düzeneğinin Kurulması

Difüzyon kaynağı genellikle, kaynak edilecek parçaların şekli ve büyüklüğüne uygun olarak dizayn edilen kaynak cihazları ile gerçekleştirildiğinden deneysel çalışmaların ilk basamağı deney düzeneğinin hazırlanması olmuştur.

Deneysel çalışmaları gerçekleştirebilmek için difüzyon kaynak yönteminin ana parametreleri olan sıcaklık, basınç ve koruyucu atmosferi sağlayabilen bir düzeneğe ihtiyaç duyulmuştur.

Deney düzeneği olarak, bazı çalışmalarda daha önce kullanılmış, Yıldız Teknik Üniversitesi Davutpaşa Metalurji ve Malzeme Kampüsü' nde mevcut bulunan difüzyon kaynağı makinesi kullanılmıştır (Şekil 3.4). Düzenek deneyden önce bir kısım bakım işlemlerine tabi tutulmuştur ve deney için gerekli teçhizatlar bir araya getirilmiştir.



Şekil 4.4: Deneylerde kullanılan difüzyon kaynağı teçhizatı

Bu teçhizatta birleştirilecek parçalara uygulanan basınç elle ayarlanabilen sonsuz vida mekanizması ile sağlanmaktadır. Deneylerde kullanılan basınç değereri ölçme saatinin yardımı ile kontrol edilmektedir.



Şekil 4.5: Baskı kuvvetini sağlayan sonsuz vida mekanizması mekanik kontrol kolları

Deneyler öncesinde cihaza bir dinamometre bağlanmış ve dinamometre ile ölçme saati yardımıyla kuvvet değerlerine karşılık gelen ölçme saati taksimat sayısı belirlenerek kaydedilmiştir.

Tablo 4.3: Dinamometre ve ölçme saati kullanılarak yapılan kuvvet ölçüm değerleri

DİNAMOMETRE TAKSİMATI	KG (KP)	MAKİNE İLERLEME TAKSİMATI
33	5	24
66,5	10	43
100,7	15	61
135,8	20	79
171,5	25	99
207,8	30	-

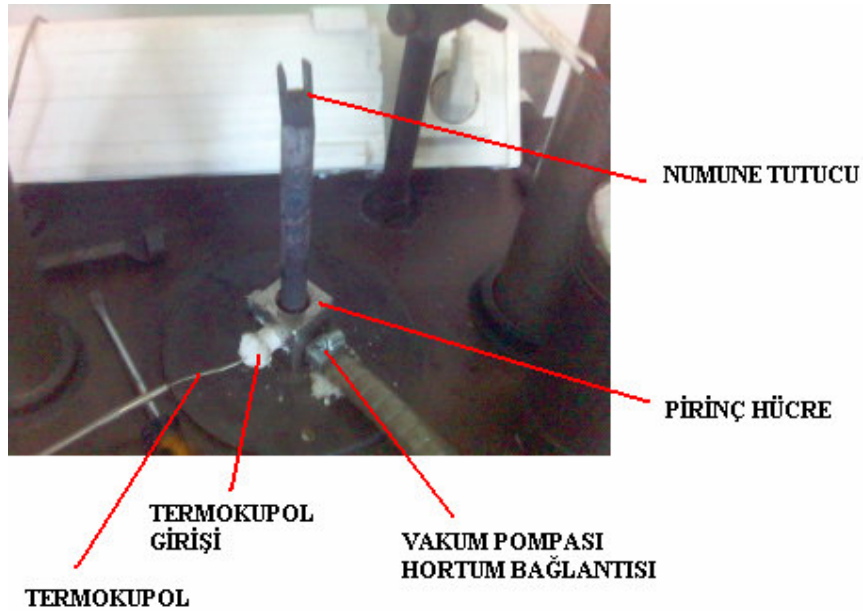


Şekil 4.6: Ölçme saati ve dinamometre ile kuvvet kalibrasyonu

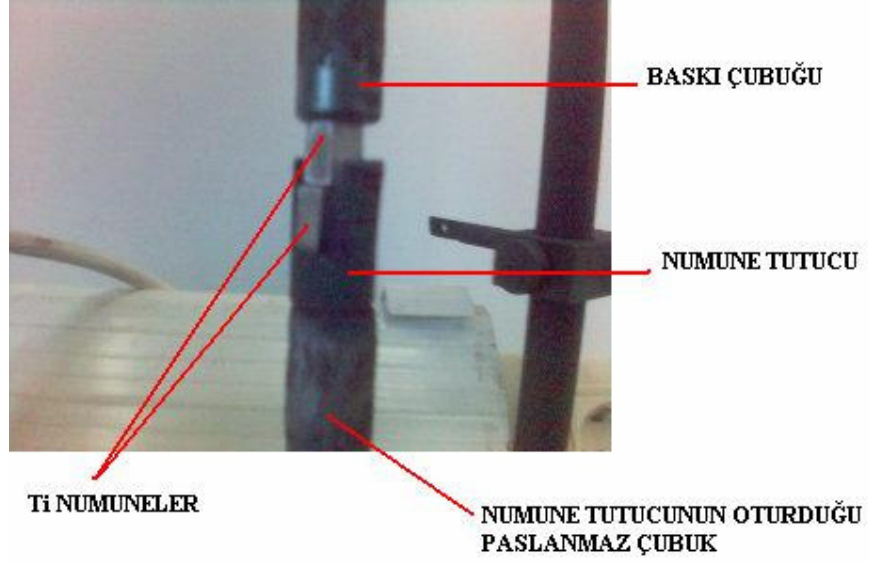
Isıtma için alümina tüp üzerine sarılmış elektrik dirençli bir fırın kullanılmıştır. Fırın üzeri uygun bir izolasyon malzemesi ile sarılarak ısı kayıpları minimuma indirilmiştir. Deney sıcaklığının ayarlanan değerde sabit tutulabilmesi için fırın ve sıcaklığı ölçmekte kullanılan termokupol Jumbo Itrom 16 marka PID kontrollü sıcaklık ölçer ve kontaktörden oluşan bir sisteme bağlanmıştır. Ortam sıcaklığının deneylerde kullanılan sıcaklık değerine çıkması dakikada 20°C' lik bir artışla sağlanmaktadır. Bu zaman da yaklaşık 30 dakika sürmektedir. Ortam sıcaklığı kaynak edilmek üzere üst üste yerleştirilen numunelerden alta olanın alt kısmından 2 mm kalınlığında mineral izoleli NiCr – Ni termokupol ile ölçülmüştür.

Birleştirilecek parçaları oksitlenmeden koruyabilmek için numuneler paslanmaz çelikten yapılmış bir boru içine yerleştirilmiştir. Baskı kuvveti bu boru üzerine sızdırmazlığı sağlayacak şekilde yerleştirilen, daha önce açıklandığı gibi elle ayarlanabilen hareketli bir piston ve baskı plakası yardımıyla numuneler üzerine iletilmektedir. Paslanmaz çelikten yapılan bu boru, pirinçten yapılmış bir hücre üzerine oturmaktadır. Hücre üzerinde ayrıca, vakum, manometre ve termokupol girişleri bulunmaktadır. Numuneler paslanmaz çelik boru içerisinde hücre üzerine oturan numune tutucu üzerine yerleştirilmektedir.

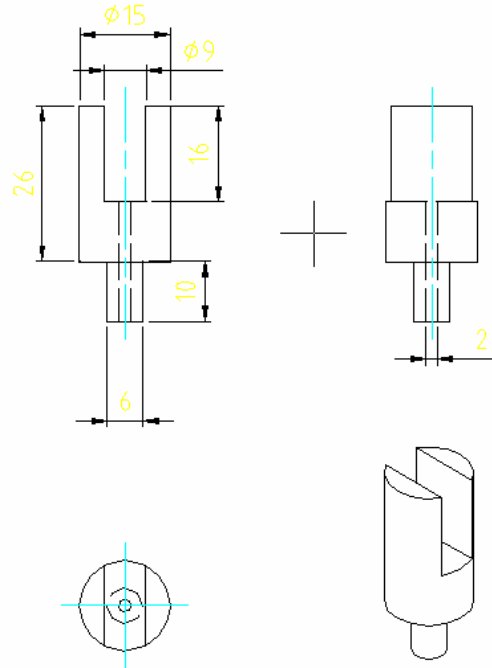
Kaynak haznesi olarak kullanılan paslanmaz çelik boru, koruyucu bir ortamın sağlanabilmesi için Edwards High Vacuum Pump Stage II makinesi ile vakuma alınmıştır. Ortamın vakum değeri yaklaşık 5.10^{-3} mbar' dır. Ulaşılan vakum değeri Pakkens marka vakum manometresi ile kontrol edilmiştir.



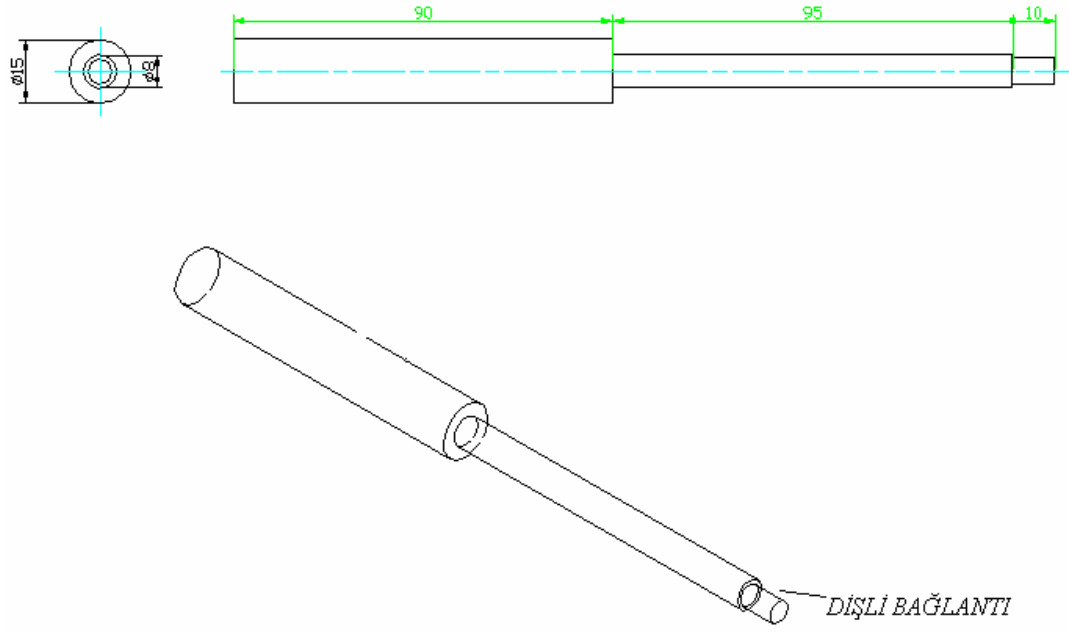
Şekil 4.7: Pirinçten imal edilmiş hücre



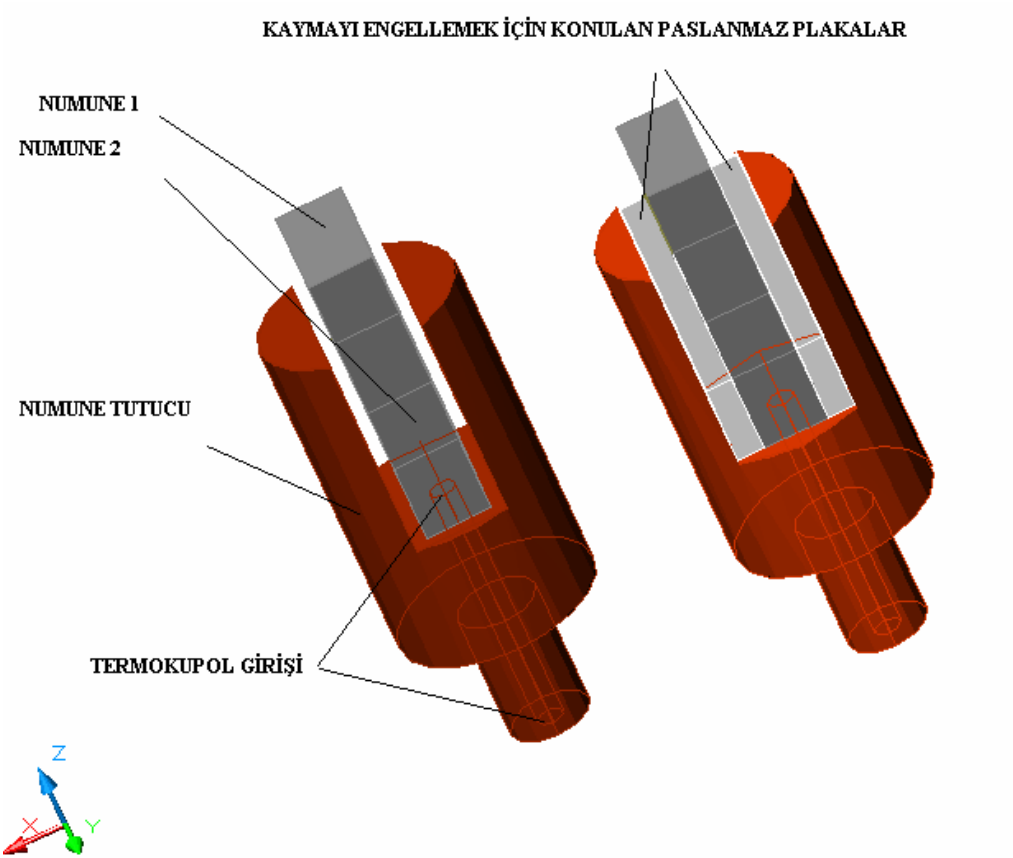
Şekil 4.8 : Numunelerin numune tutucuya yerleştirilme şekli



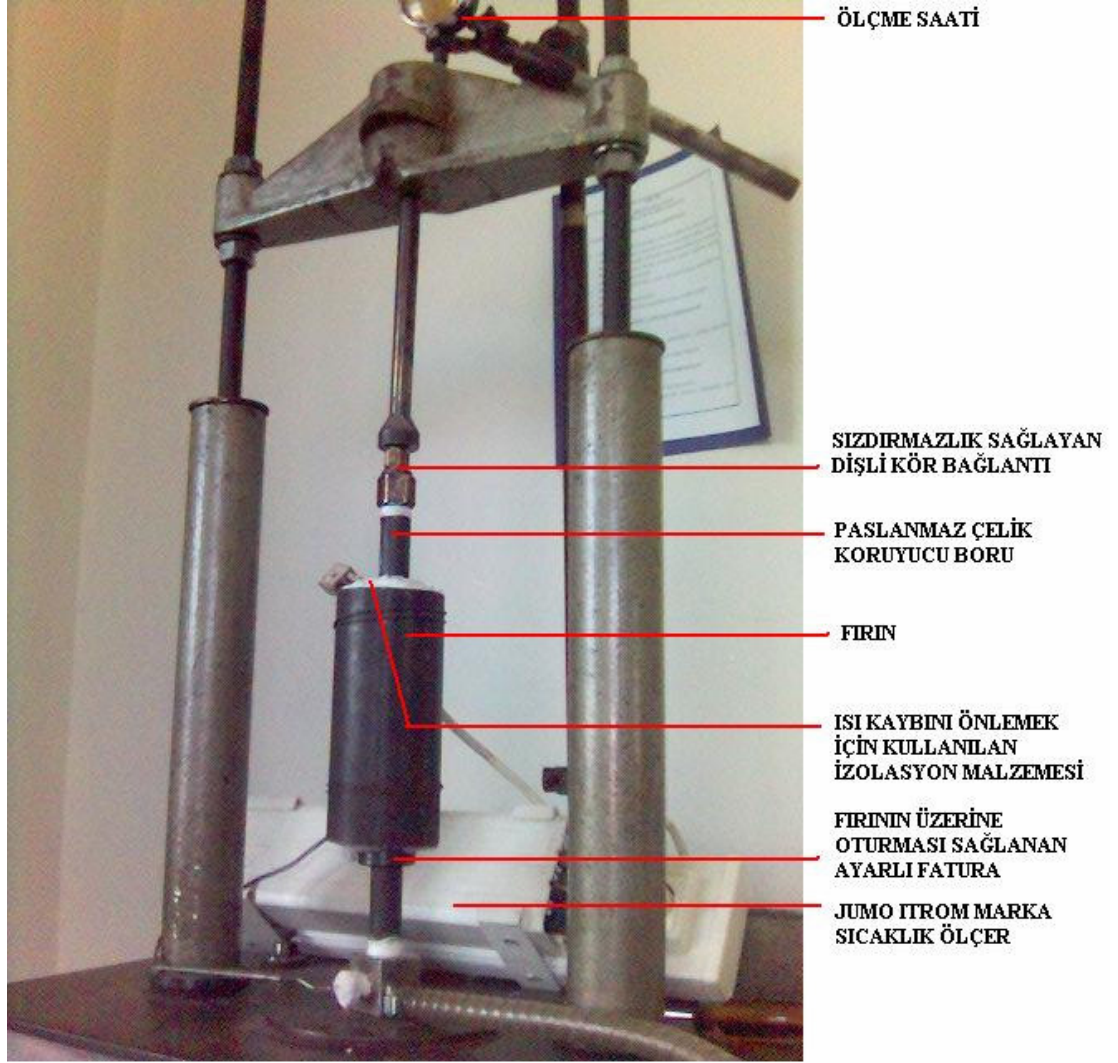
Şekil 4.9: Deneş teğizatu numune tutucu imalat resmi



Şekil 4.10: Baskı elemanı imalat resmi



Şekil 4.11: Numune tutucu içinde numunelerin üç boyutlu yerleşim şekli



Şekil 4.12: Deney teçhizatının deneye başlamadan önceki monte edilmiş son durumu



Şekil 4.13: Jumbo Itron dijital sıcaklık ölçme cihazı



Şekil 4.14: Deneyde kullanılan Edwards marka vakum pompası

Deneyden önce hazır olan numuneler, mikroyapı incelemeleri için metalografik hazırlama işlemine tabi tutulmuşlardır. Numuneler döner disklerde su ile 1000 gradelik zımparaya kadar kabadan inceye doğru zımparalanmıştır. Parlatma işleminde 1 μm ' lik elmas pasta kullanılmıştır. Yüzeyleri parlatılan numuneler 40°C' a ısıtılan 10 ml HF, 30 ml HNO₃ ve 50 ml su çözeltisi ile dağlanmıştır. Ti malzemenin dağlanmasında çok zorlanıldığından çözeltinin ısıtılması çözümüne gidilmiştir. Metalografik incelemeler ışık metal mikroskobu ve elektron tarama mikroskobu ile yapılmıştır.

5. DİFÜZYON KAYNAĞI İŞLEMLERİ

Difüzyon kaynağında kaynak edilecek yüzeylerin birbirine atomik kuvvetlerin etki edebileceği kadar yakın olması ve her türlü kirlilikten ve oksit tabakasından muaf olması gerektiğinden kaynak işlemi öncesinde numunelerin yüzeyleri itina ile hazırlanmıştır.

Kaynak işlemi öncesinde parlatılmış numuneler son olarak tekrar elmas pasta ile kısa bir süre parlatılmış, aseton içerisinde yıkanmış ve kurulanmıştır. Birleşme işlemi için numunelerin birbiri üzerine en iyi oturan yüzeyleri seçilmiş ve numune tutucu içine yerleştirilmiştir.

Ti ve alaşımlarının difüzyon kaynağı üzerine, bu güne kadar bir çok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalar itina ile incelendikten sonra kaynak parametrelerine karar verilmiştir.

Yine bu çalışmalar vasıtasıyla kaynak ortamında vakuma ihtiyaç duyulacağına fakat koruyucu gaz ortamının şart olmadığına karar verilmiştir.

Deney için uygun parametreler olarak; 600°C - 900°C sıcaklık aralığı, 1,36 – 5 MPa basınç aralığı ve 60 – 90 dakika kaynak süresi aralığı seçilmiştir. Tablo 5.1' de deney numaralarına göre kullanılan parametreler verilmiştir.

Difüzyon kaynağına başlamadan önce tüm techizatlar tekrar gözden geçirilmiş, özellikle termokupol bağlantıları hem deneyin sağlığı açısından hem de emniyet açısından kontrol edilmiştir. Numuneler itina ile belirlenen birleşme yüzeyleri birbirine bakacak şekilde numune tutucu içerisine yerleştirilmiştir. Numune tutucuya yerleştirilen numunelerin, techizatın kapatılmasında birbirleri üzerinde kaymalarını önlemek amacıyla, numunelerin iki tarafına 1 mm sactan kesilen paslanmaz çelik parçalar koyulmuş ve numuneler sabitlenmiştir.

Tablo 5.1: Ti6Al4V numunelerin difüzyon kaynağında kullanılan deney parametreleri

DENEY NO	SICAKLIK (°C)	BASINÇ (MPa)	SÜRE (Dakika)	VAKUM ORTAMI
1	655	2,72	60	5.10^{-3} mbar
2	600	2,72	75	5.10^{-3} mbar
3	600	2,72	60	5.10^{-3} mbar
4	710	2,72	60	5.10^{-3} mbar
5	700	1,36	60	5.10^{-3} mbar
6	750	1,36	60	5.10^{-3} mbar
7	800	2,72	90	5.10^{-3} mbar
8	800	1,36	90	5.10^{-3} mbar
9	815	2,72	90	5.10^{-3} mbar
10	850	1,36	90	5.10^{-3} mbar
11	850	1,36	75	5.10^{-3} mbar
12	850	3	75	5.10^{-3} mbar
13	900	5	90	5.10^{-3} mbar

Kaynak haznesini kapatacak olan dişli bağlantılar teflon bantlar ile iyice sarılarak tam sızdırmazlık sağlanmıştır. Kapatılan tehzizatın üzerine fırın itina ile yerleştirilmiştir. İstenilen kaynak basıncına denk gelen kuvvet taksimatı ayarlandıktan sonra, sıcaklık ayarı yapılmış ve yaklaşık 20°C dakika sıcaklık artışı ile ortam ısıtılmaya başlanmıştır.

Sıcaklık değeri 100°C' a geldiğinde, vakum pompası 5.10^{-3} mbar basınçla çalıştırılmıştır. Kaynak süresi için seçilen zaman, sıcaklık değeri istenilen kaynak sıcaklık değerine gelip sabit kaldığında tutulmaya başlanmıştır.

Sürenin dolması ile ilk olarak ısıtıcılar devreden çıkarılmış ve sıcaklık değeri oda sıcaklığına düşene kadar numunelere basınç ve vakum uygulamasına devam edilmiştir.

6. SONUÇLAR

6.1 Makroskobik İncelemeler

Yapılan ilk inceleme kaynak edilen numunelerin gözle kontrolüdür. Gözle muayene ile kaynak işlemi sonrasında numunelerde makro boyutta herhangi bir deformasyon meydana gelip gelmediği saptanmıştır.

Çeşitli parametreler altında yapılan birleştirmelerin çoğunda aşırı bir plastik deformasyonla karşılaşılmaştır. Fakat birleşmenin gerçekleşmediği deneylerde numuneler, numune tutucu içerisinde çıkarıldıktan sonra birbirlerinden hemen ayrılmışlardır. Bekleme süresinin kısa tutulduğu deneylerde başarı sağlanamamıştır. Aşağıda yapışmanın gerçekleştiği haldeki numunelerin fotoğrafları görülmektedir.



Şekil 6.1: Difüzyon kaynağı sonrası numunelerin bakalit içine alınmış görüntüsü



Şekil 6.2: Çeşitli parametreler ile birleştirilen numuneler



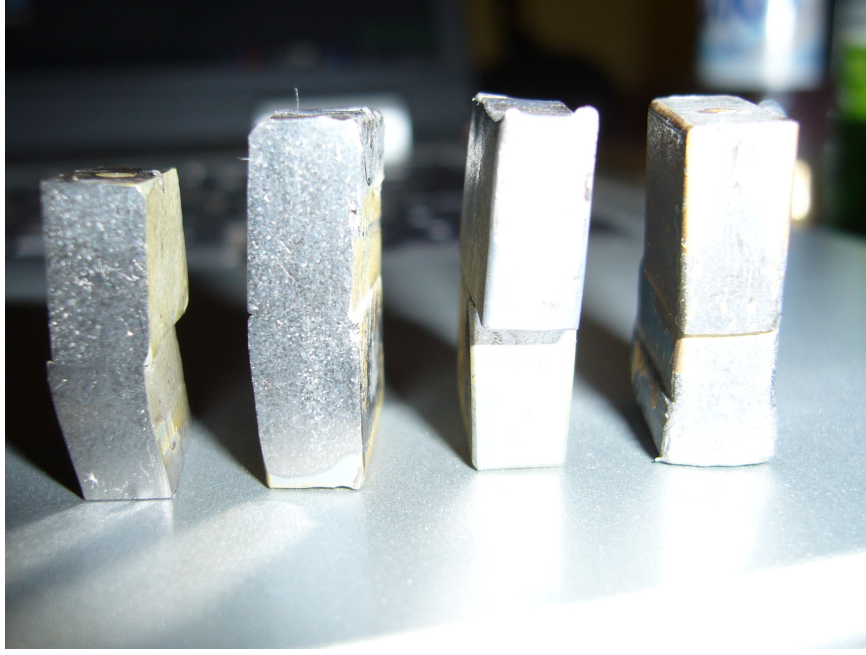
Şekil 6.3: Birleştirme sonrası parlatılan yüzeyin fotoğrafı



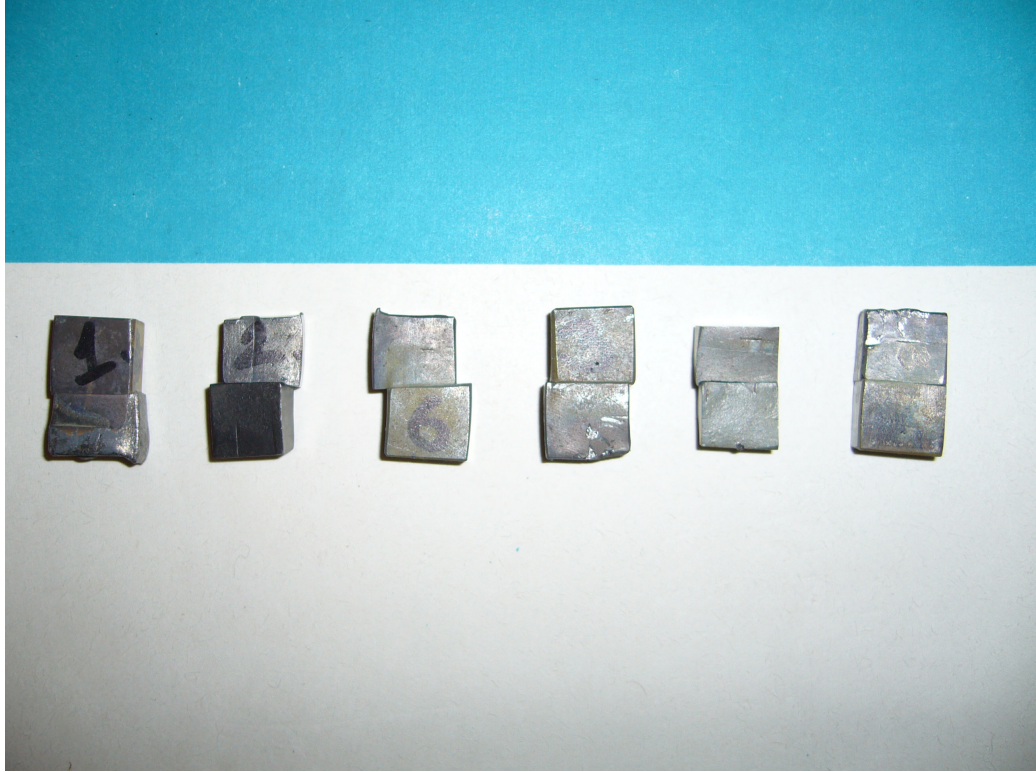
Şekil 6.4: Birleştirilen numunelerin sertlik ölçümleri sonrası görüntüleri



Şekil 6.5: Bakalit içindeki numunelerin birleşme bölgesinin görüntüsü



Şekil 6.6: Çeşitli parametrelerde birleştirilen numunelerdeki plastik deformasyon görüntüleri



Şekil 6.7: Çeşitli parametrelerde birleştirilen numunelerin deney sonrası görüntüleri



Şekil 6.8: Çeşitli parametrelerde birleştirilen numunelerin deney sonrası görüntüleri

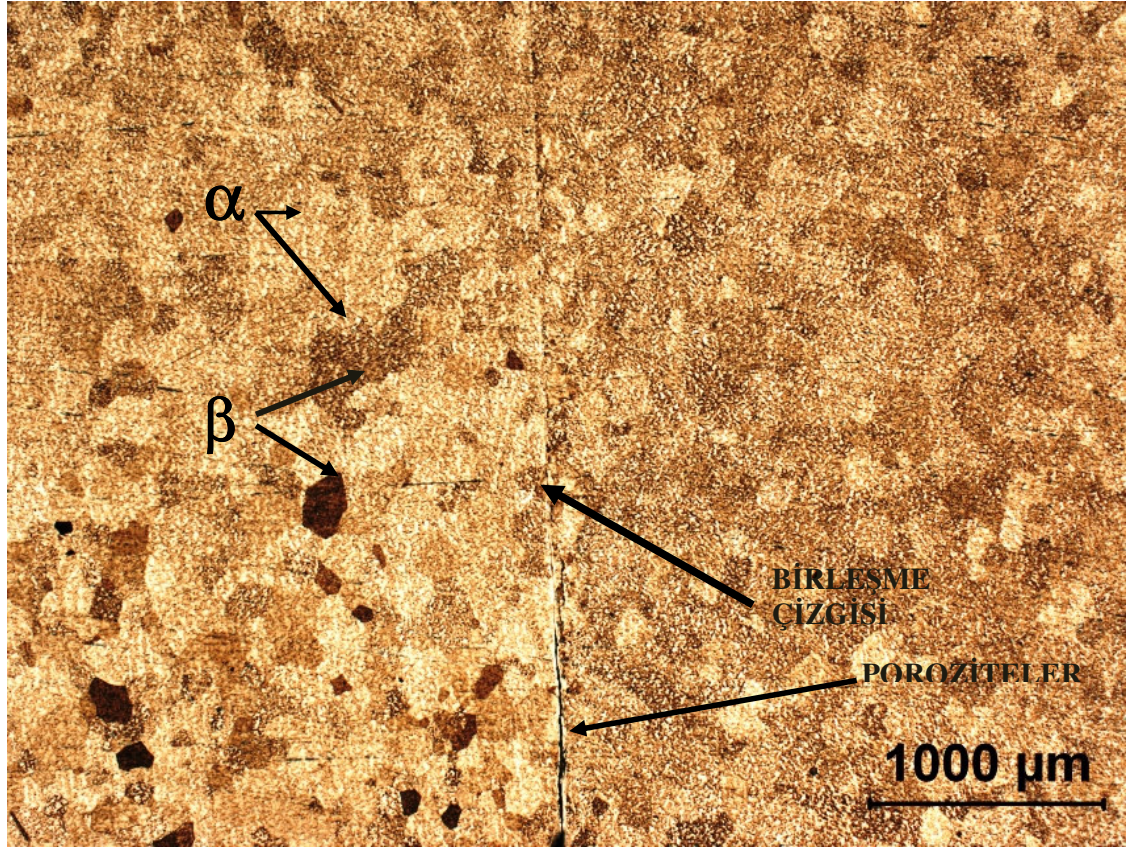
Basıncın yüksek tutulduğu deneylerde numunelerde bir miktar kayma ve deformasyon gözlenmiştir. Bu küçük deformasyonlar birleşmeyi engellemekle beraber optik mikroskop görüntülerinde daha net gözlenmektedir.

6.2 Mikroskobik İncelemeler

Gözle yapılan kontrollerden sonra numuneler soğuk halde, incelemelerin yapılacağı yüzeyleri belirlenerek, bakalite alınmıştır. Bakalite alınan numunelerin incelenecek yüzeyleri, döner disklerde 1200 grade' lik zımparaya kadar zımparalanmış, ardından 1 μm ' lik elmas pasta ile parlatılmıştır. Yüzeyleri parlatılan numuneler 40°C' a ısıtılan 10 ml HF, 30 ml HNO₃ ve 50 ml su çözeltisi ile dağlama işlemine tabi tutulmuşlardır. [11]

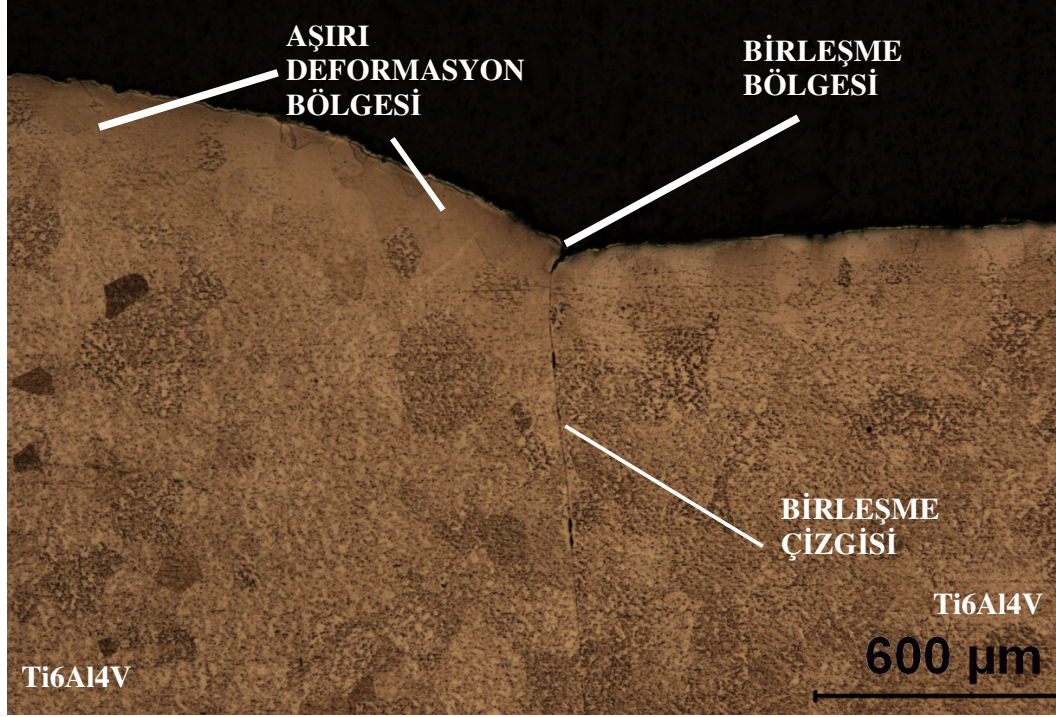
Dağlanan numunelerin makro fotoğrafları çekilmiştir. Daha sonra numuneler mikroskobik incelemeye tabi tutulmuşlardır.

Ti-6Al-4V numunelerin birleşme yerlerinden optik mikroskopta alınan görüntüler (Şekil 6.9 – 6.17) ve elektron tarama mikroskobunda alınan görüntüler (Şekil 6.18 – 6.34) aşağıda sıra ile gösterilmiştir.

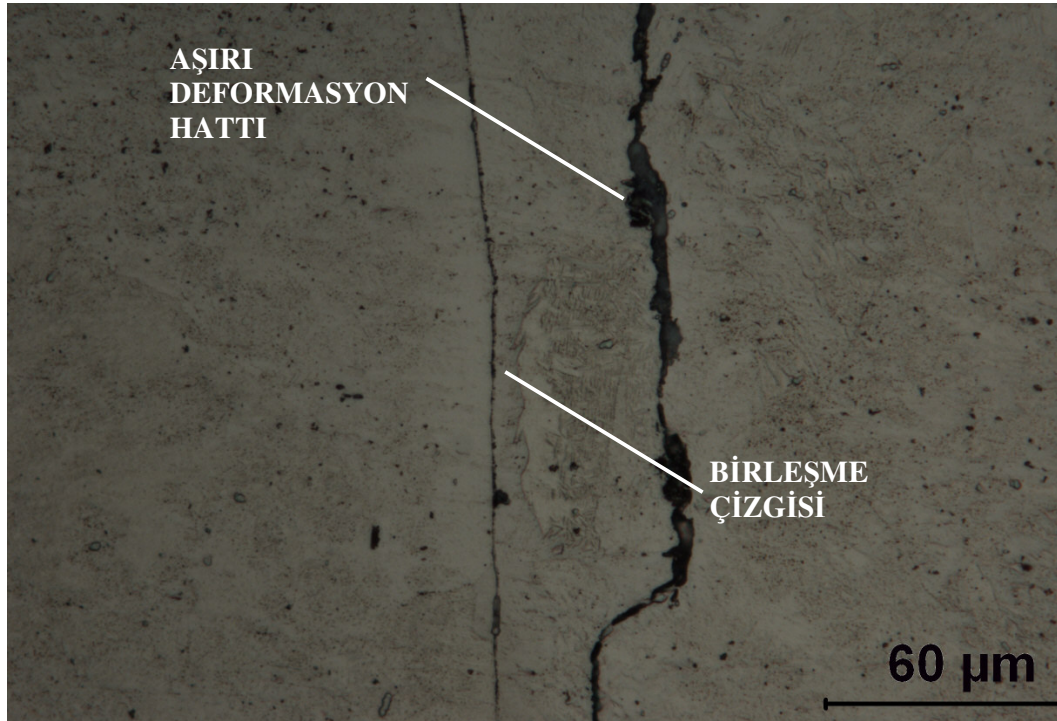


Şekil 6.9: 800°C – 1,36Mpa – 90 Dak. parametreleri ile kaynatılan numunenin 2,5X optik mikroskop görüntüsü

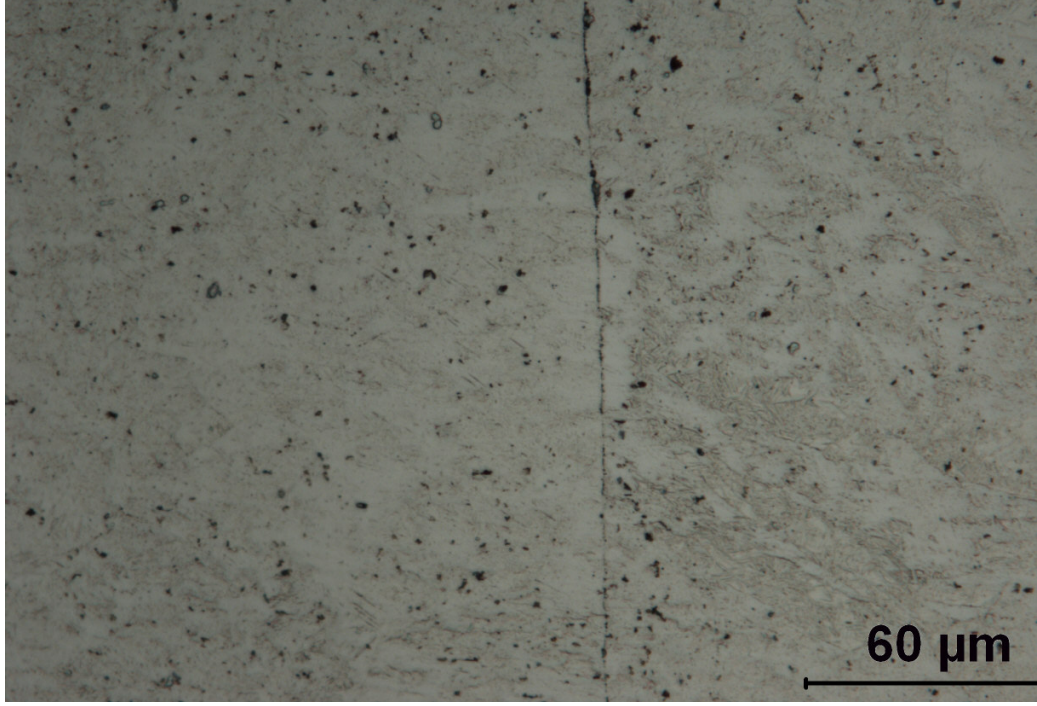
Ti6Al4V alaşımı ince yapılı α ve β fazlarından oluşan iki fazlı bir içyapıya sahiptir. Deneylerse difüzyon sıcaklığı mümkün olduğunca düşük alınmıştır. (700-900°C arası) Değişik parametreler ile elde edilen tüm kaynaklar üzerinde yapılan optik mikroskop incelemelerinde, birleşme ara yüzeyinde kırılğan α_2 (Ti₃Al) fazının oluşumundan dolayı, belirgin bir birleşme çizgisi mevcut olduğu görülmüştür. Fakat genel olarak herhangi bir kaynak hatası tespit edilmemiştir. Bazı birleştirmelerde birleşme ara yüzeyinde poroziteler ve yapışmayan bölgeler bulunmaktadır.



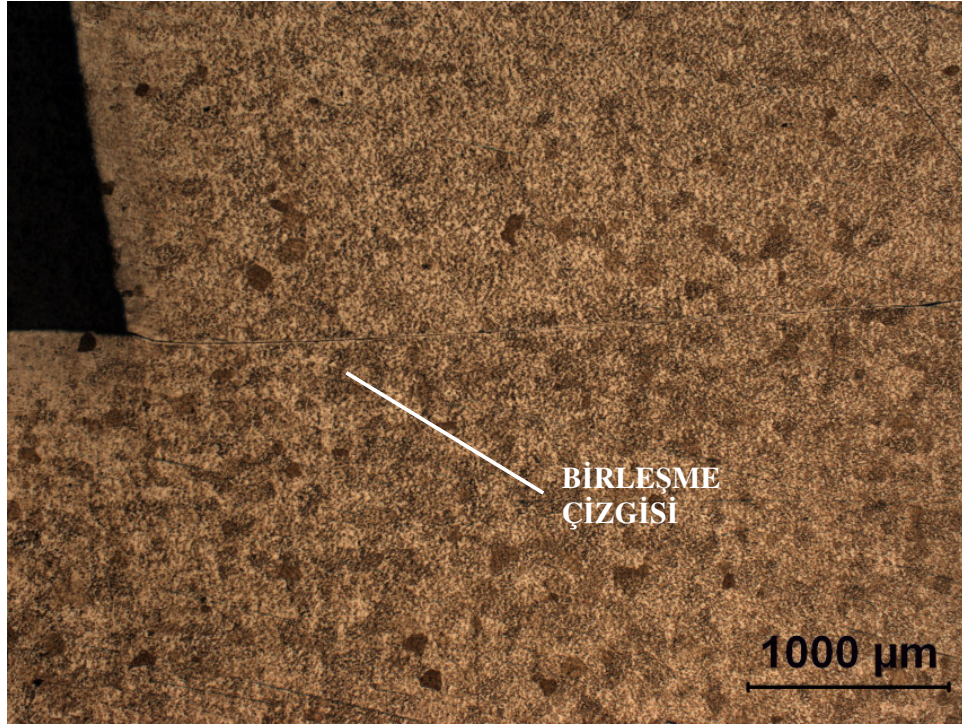
Şekil 6.10: 800°C – 1,36Mpa – 90 Dak. parametreleri ile kaynatılan numunenin 5X optik mikroskop görüntüsü



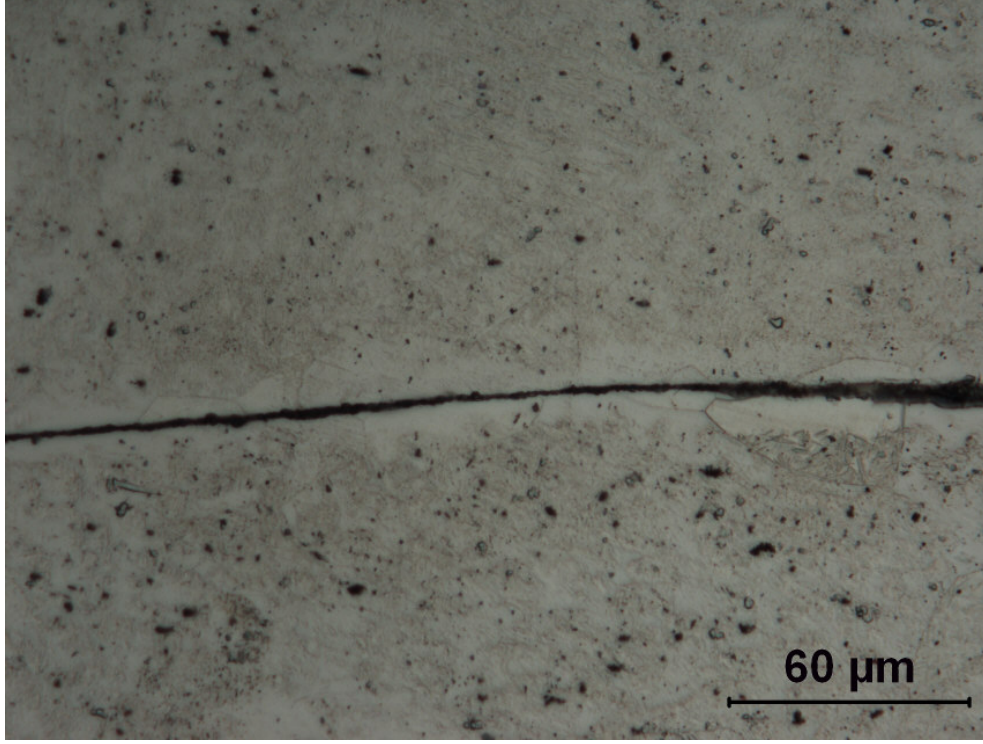
Şekil 6.11: 800°C – 1,36Mpa – 90 Dak. parametreleri ile kaynatılan numunenin 50X optik mikroskop görüntüsü



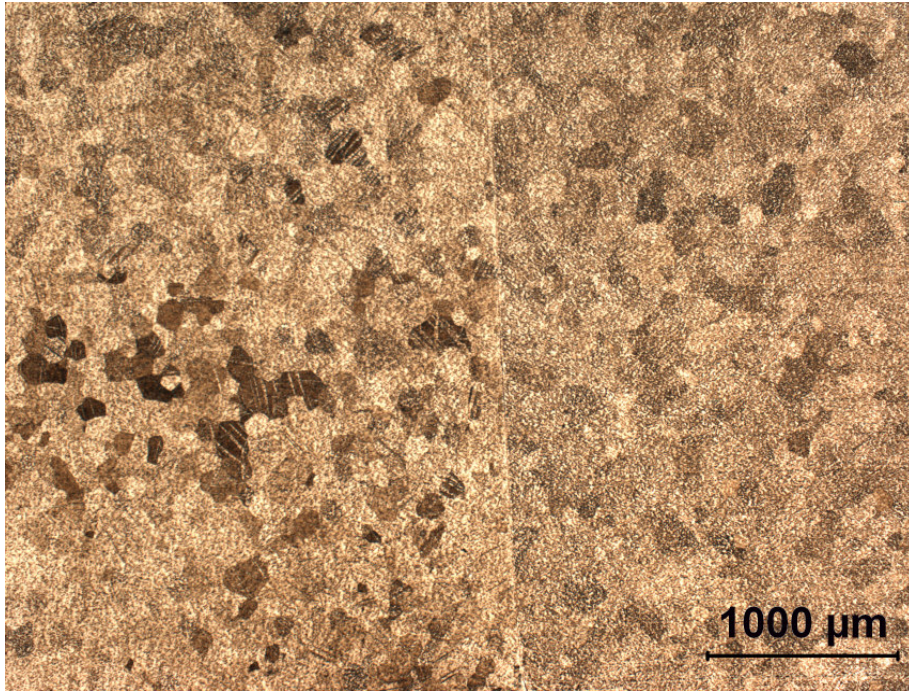
Şekil 6.12: 800°C – 1,36Mpa – 90 Dak. parametreleri ile kaynatılan numunenin 50X optik mikroskop görüntüsü



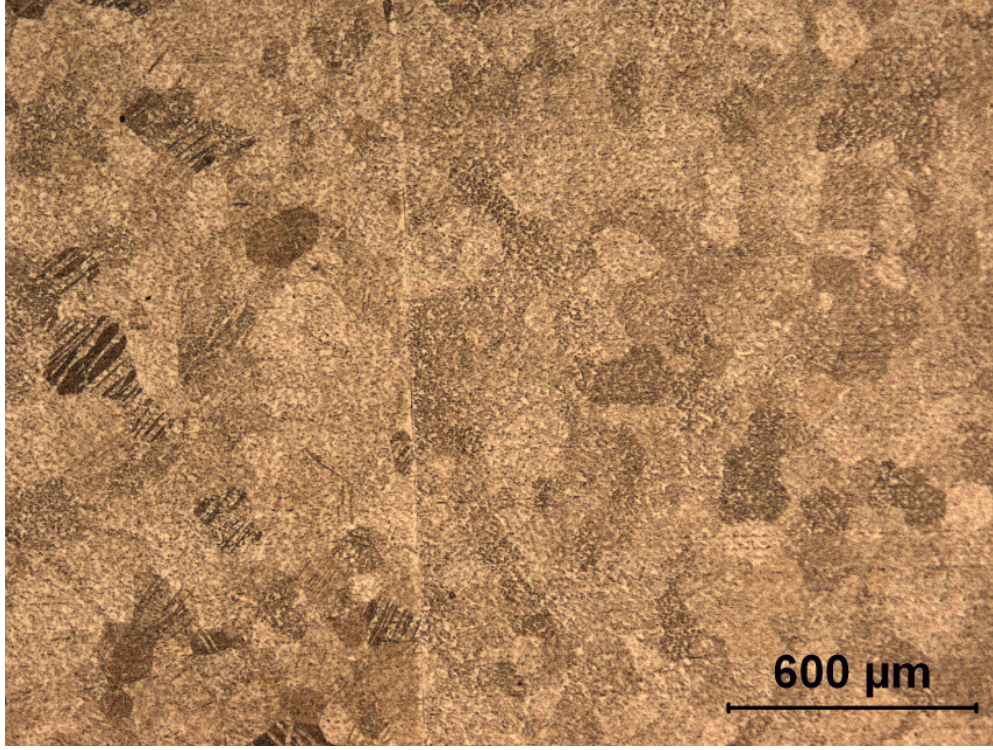
Şekil 6.13: 850°C – 1,36Mpa – 90 Dak. parametreleri ile kaynatılan numunenin 2,5X optik mikroskop görüntüsü



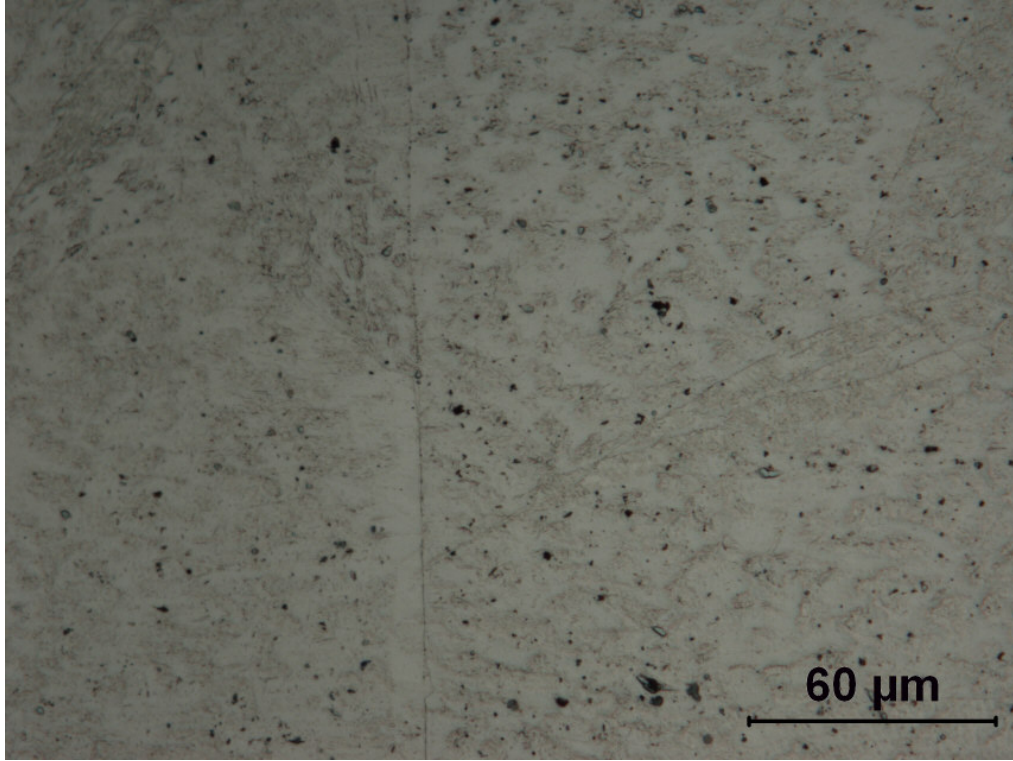
Şekil 6.14: 850°C – 1,36Mpa – 90 Dak. parametreleri ile kaynatılan numunenin 50X optik mikroskop görüntüsü



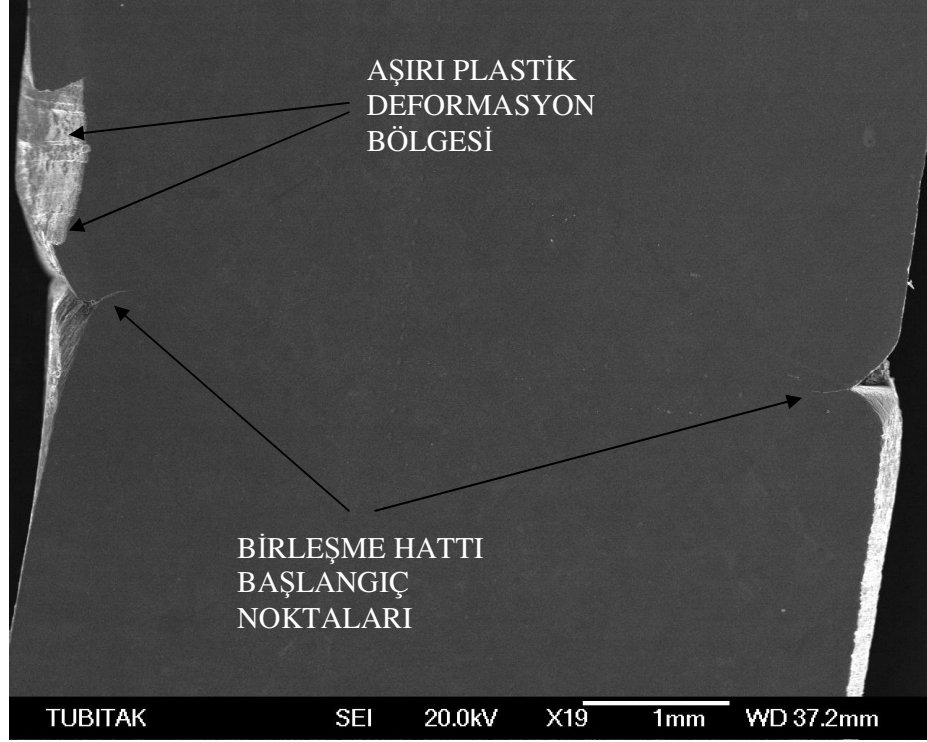
Şekil 6.15: 815°C – 2,72Mpa – 90 Dak. parametreleri ile kaynatılan numunenin 2,5X optik mikroskop görüntüsü



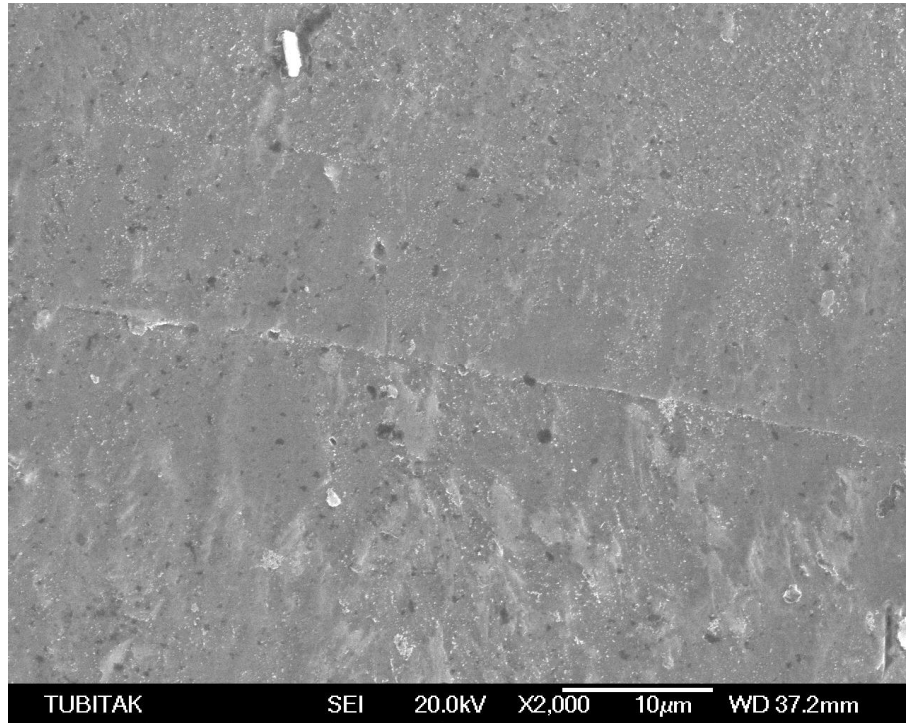
Şekil 6.16: 815°C – 2,72Mpa – 90 Dak. parametreleri ile kaynatılan numunenin 5X optik mikroskop görüntüsü



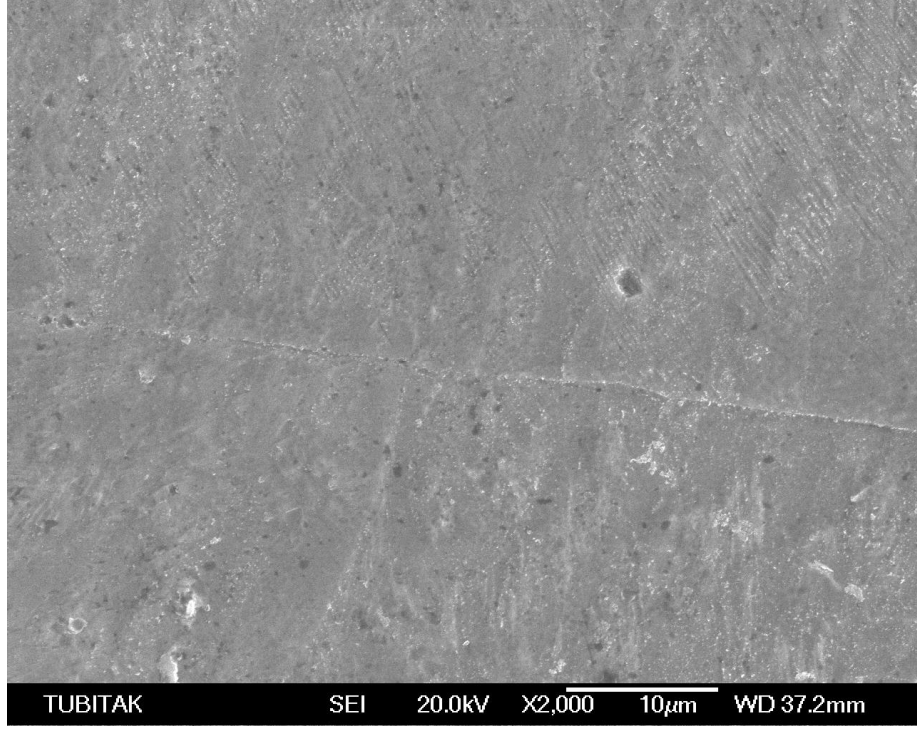
Şekil 6.17: 815°C – 2,72Mpa – 90 Dak. parametreleri ile kaynatılan numunenin 50X optik mikroskop görüntüsü



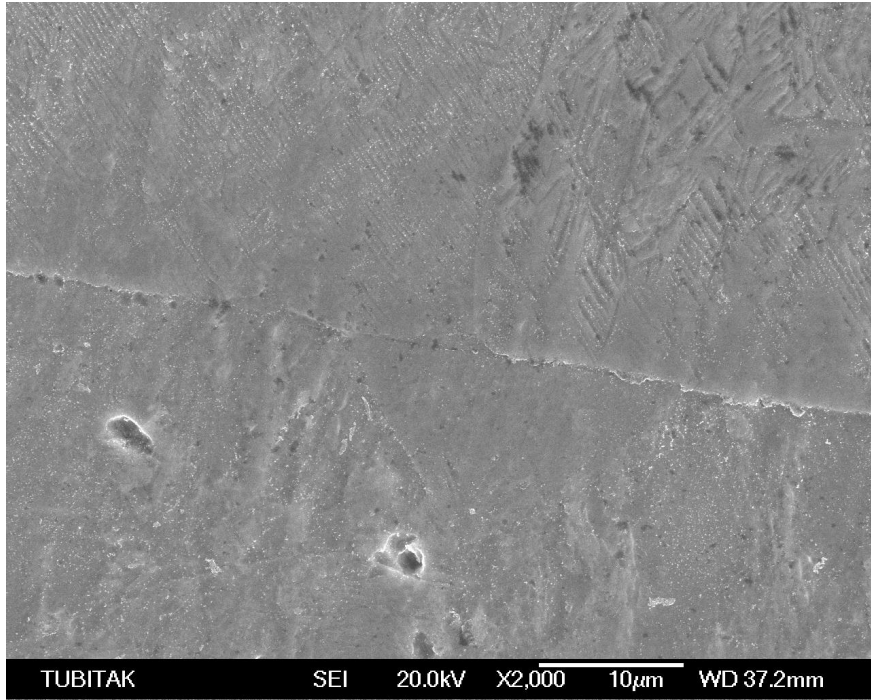
Şekil 6.18: 815°C – 2,72Mpa – 90 Dak. parametreleri ile kaynatılan numunenin SEM görüntüsü



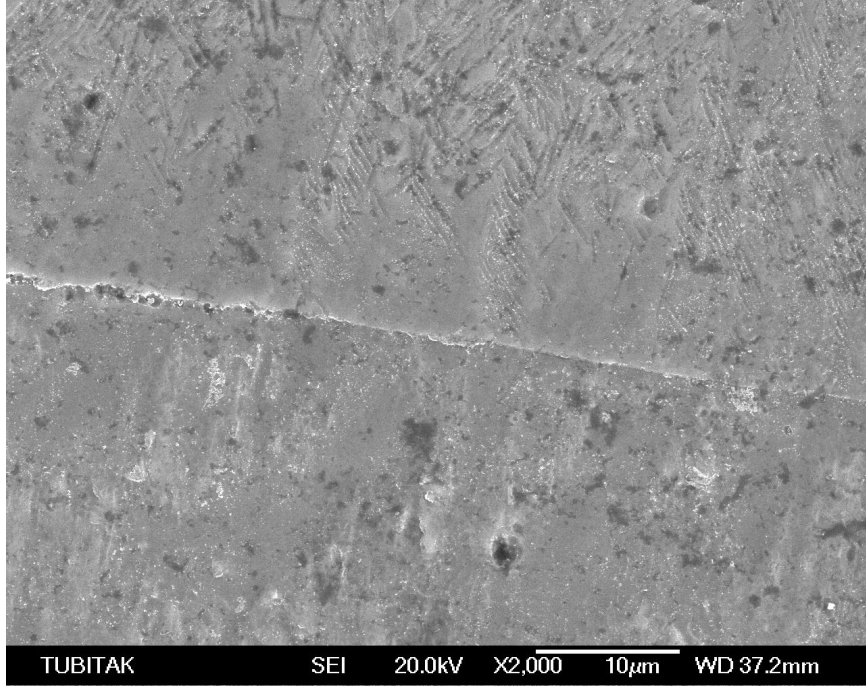
Şekil 6.19: 815°C – 2,72Mpa – 90 Dak. parametreleri ile kaynatılan numunenin SEM görüntüsü



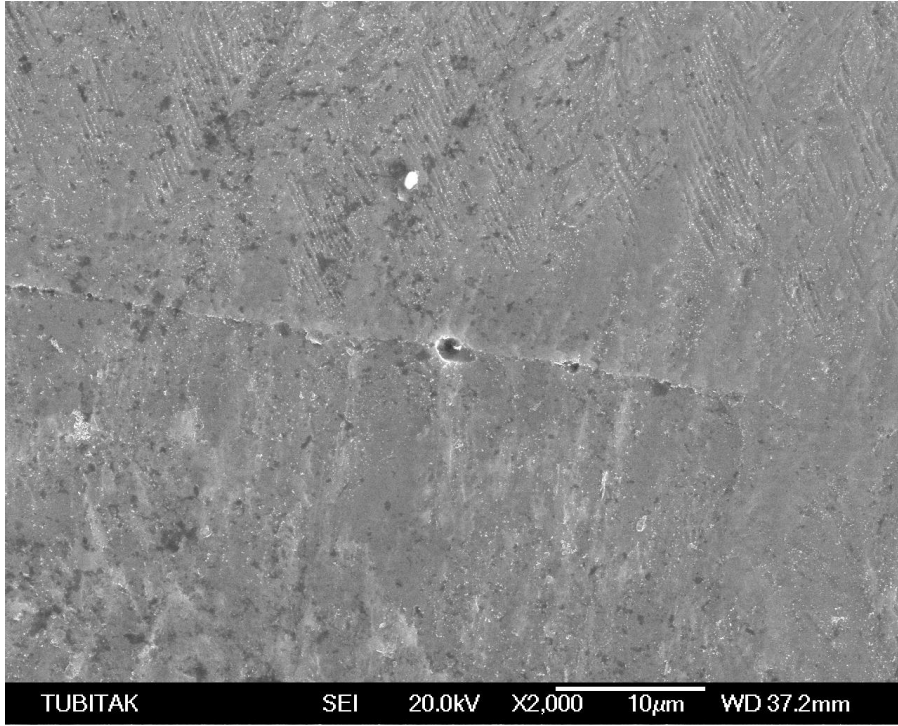
Şekil 6.20: 850°C – 1,36Mpa – 90 Dak. parametreleri ile kaynatılan numunenin SEM görüntüsü



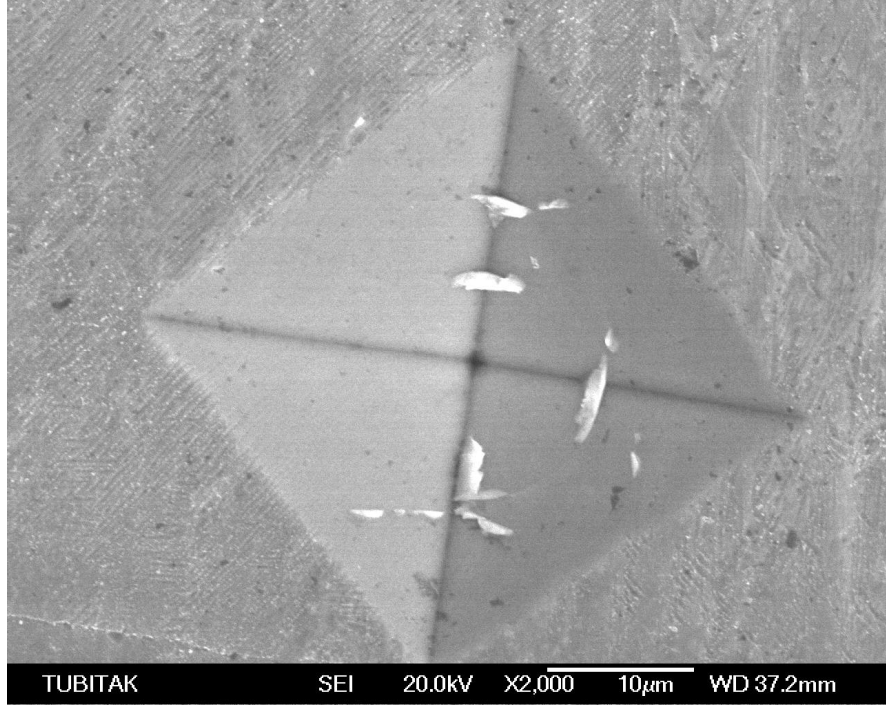
Şekil 6.21: 850°C – 1,36Mpa – 90 Dak. parametreleri ile kaynatılan numunenin SEM görüntüsü



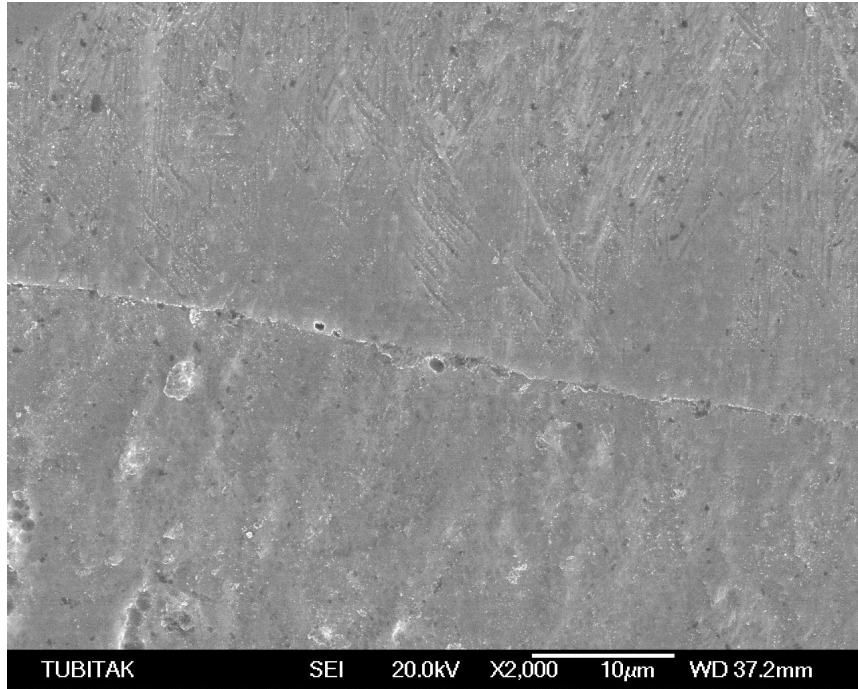
Şekil 6.22: 800°C – 1,36Mpa – 90 Dak. parametreleri ile kaynatılan numunenin SEM görüntüsü



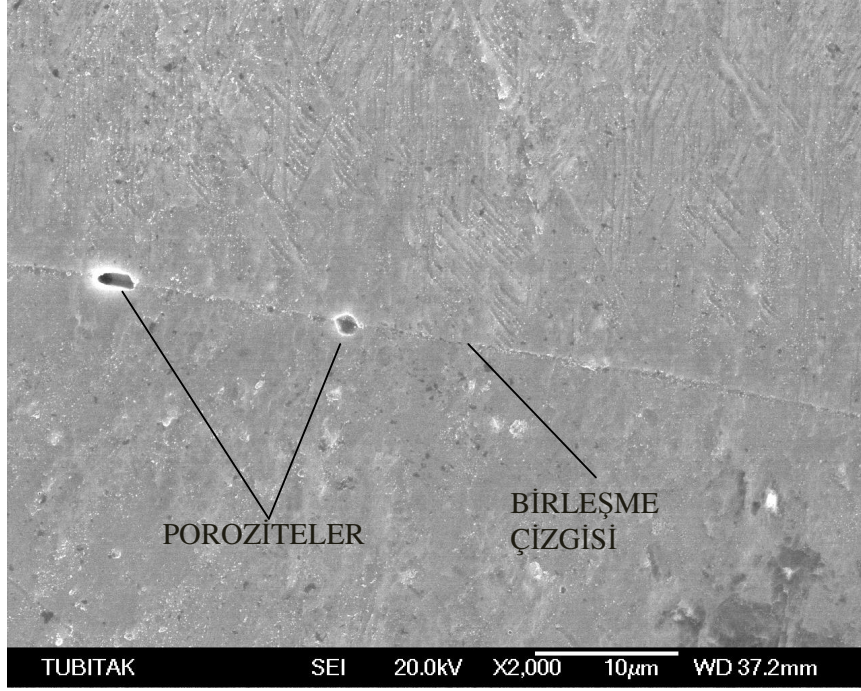
Şekil 6.23: 800°C – 1,36Mpa – 90 Dak. parametreleri ile kaynatılan numunenin SEM görüntüsü



Şekil 6.24: 815°C – 2,72Mpa – 90 Dak. parametreleri ile kaynatılan numunenin SEM görüntüsü ve sertlik ölçülen noktadaki iz görüntüsü



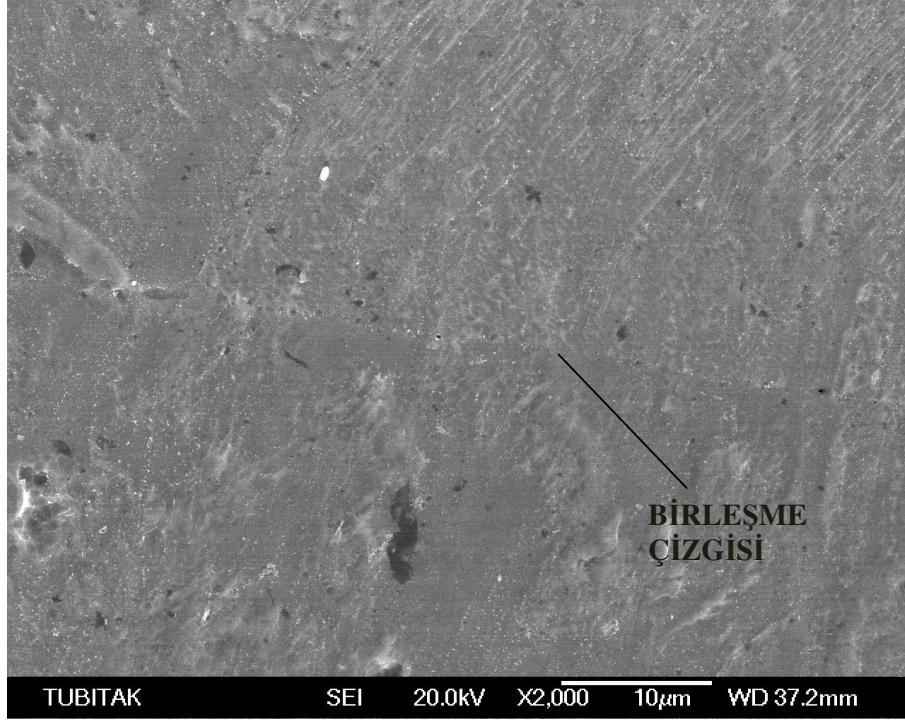
Şekil 6.25: 900°C – 5Mpa – 90 Dak. parametreleri ile kaynatılan numunenin SEM görüntüsü



Şekil 6.26: 900°C – 5Mpa – 90 Dak. parametreleri ile kaynatılan numunenin SEM görüntüsü



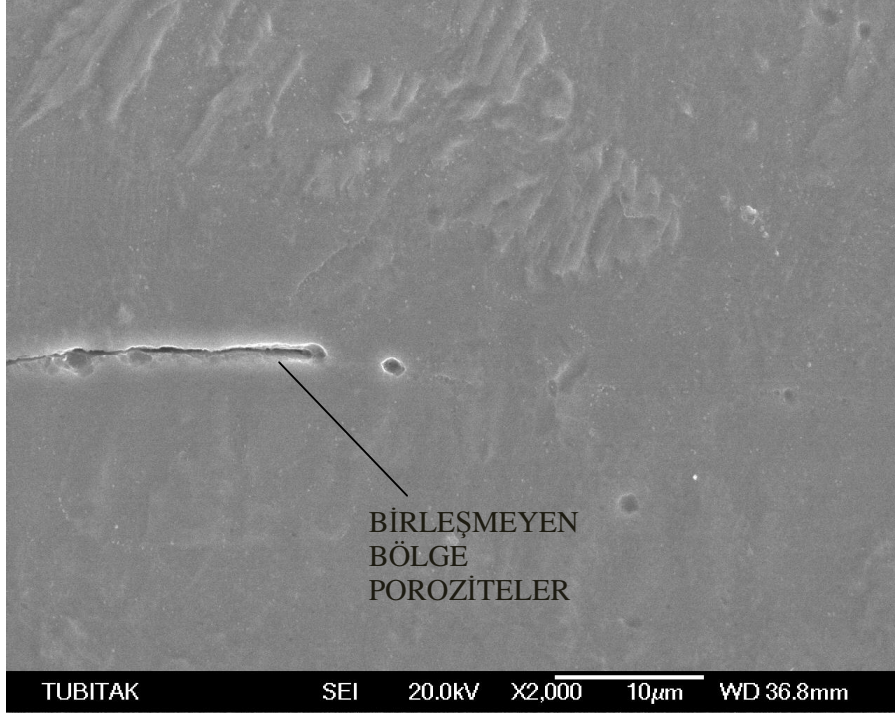
Şekil 6.27: 600°C – 2,72Mpa – 60 Dak. parametrelerinde birleşmenin gerçekleşmediği numunede kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü



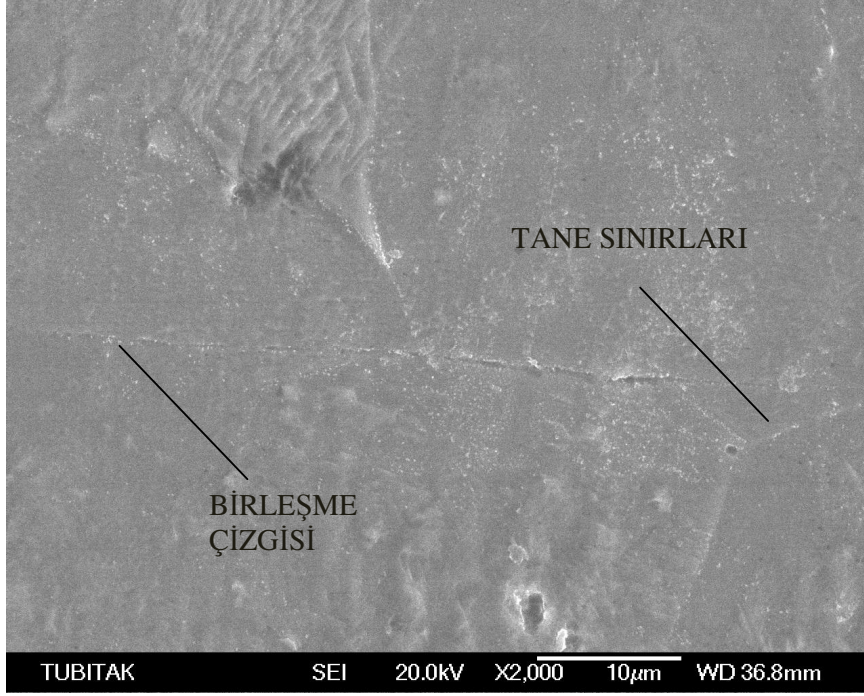
Şekil 6.28: 655°C – 2,72Mpa – 60 Dak. parametreleri ile kaynatılan numunenin SEM görüntüsü



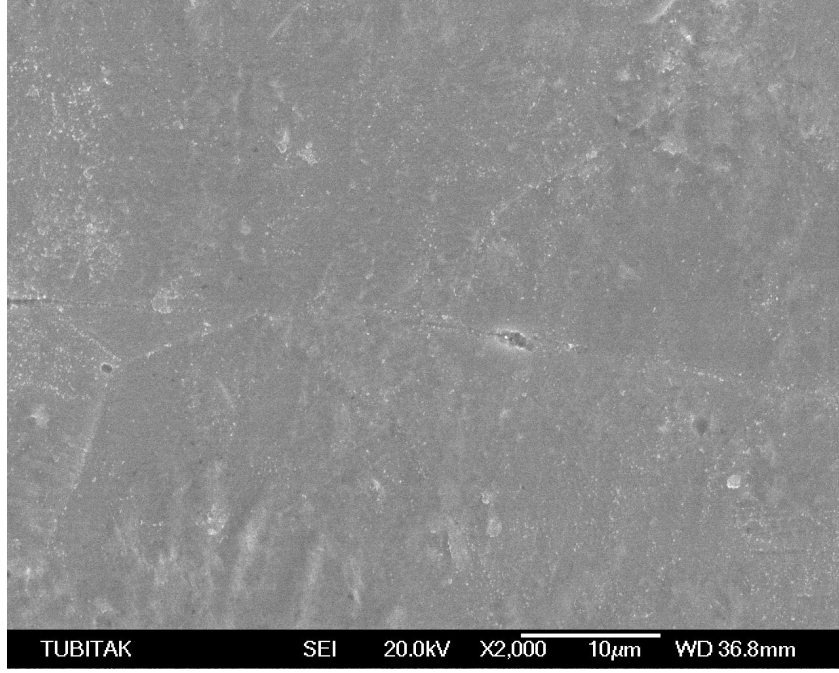
Şekil 6.29: 655°C – 2,72Mpa – 60 Dak. parametreleri ile kaynatılan numunenin SEM görüntüsü



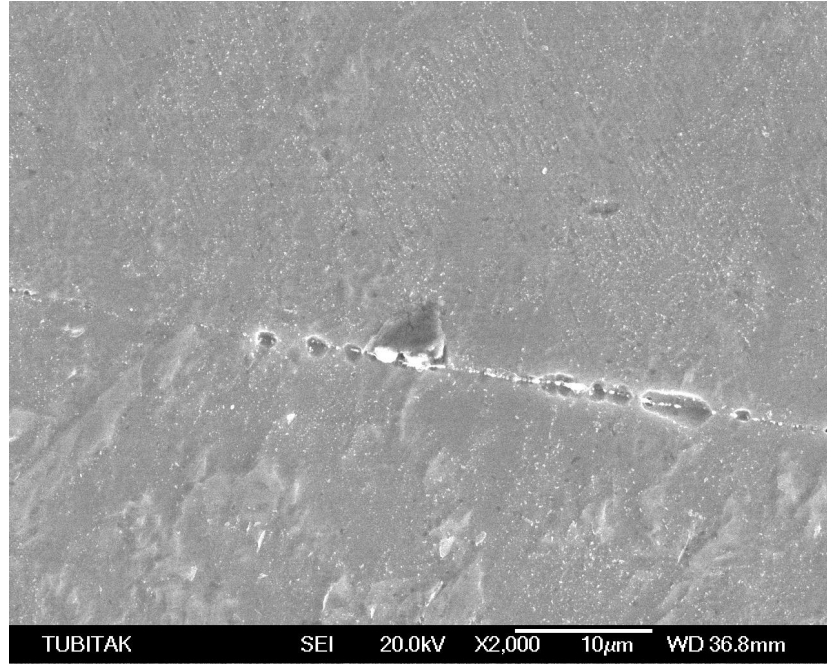
Şekil 6.30: 710°C – 2,72Mpa – 60 Dak. parametreleri ile kaynatılan numunenin SEM görüntüsü



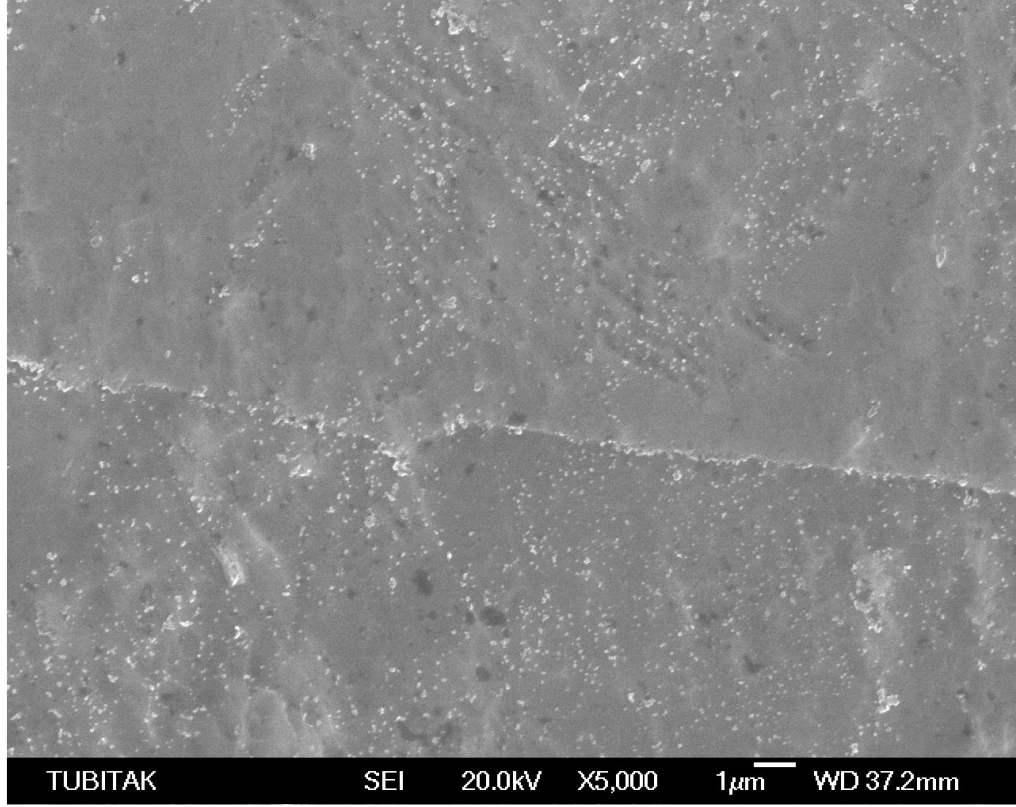
Şekil 6.31: 710°C – 2,72Mpa – 60 Dak. parametreleri ile kaynatılan numunenin SEM görüntüsü



Şekil 6.32: 710°C – 2,72Mpa – 60 Dak. parametreleri ile kaynatılan numunenin SEM görüntüsü



Şekil 6.33: 800°C – 2,72Mpa – 90 Dak. parametreleri ile kaynatılan numunenin SEM görüntüsü



Şekil 6.34: 800°C – 2,72Mpa – 90 Dak. parametreleri ile kaynatılan numunenin SEM görüntüsü

6.3. Mikrosertlik İncelemeleri

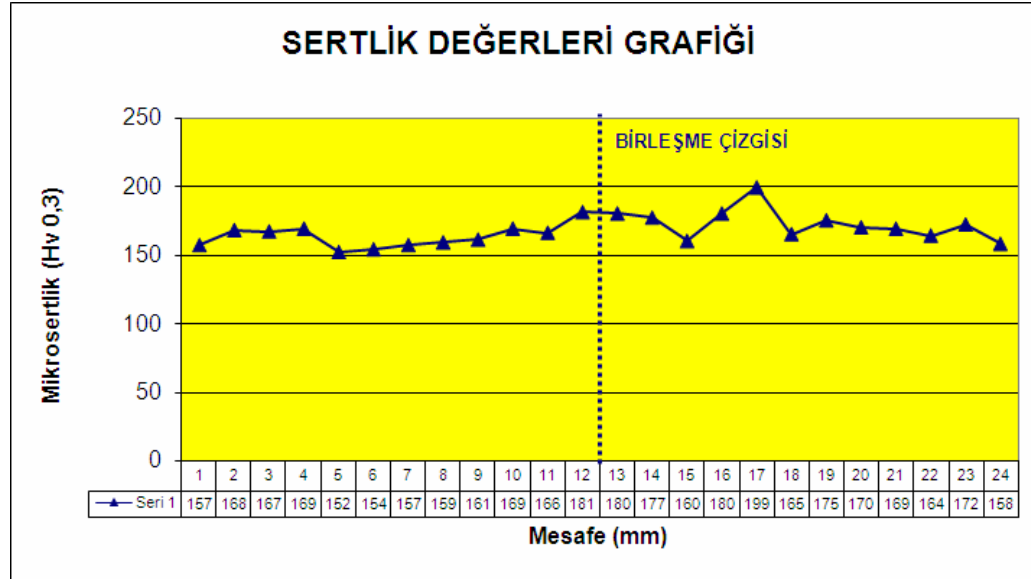
Makroskobik ve mikroskobik incelemelerin ardından difüzyon kaynağı ile birleştirilen numunelerde ara yüzey ve ana malzeme arasında sertlik farkı olup olmadığının belirlenebilmesi ve sertlik bilgilerinden yola çıkarak, malzemenin çekme dayanımı hakkında bilgi edinebilmek için mikrosertlik yöntemi ile sertlik değerleri tespit edilmiştir.

Difüzyon kaynağı ile birleştirme gerçekleştirilmiş numune, sağlıklı sertlik ölçümü yapılabilmesi için tekrar temiz ve düzgün olarak epoksi bakalit içine alınmıştır.

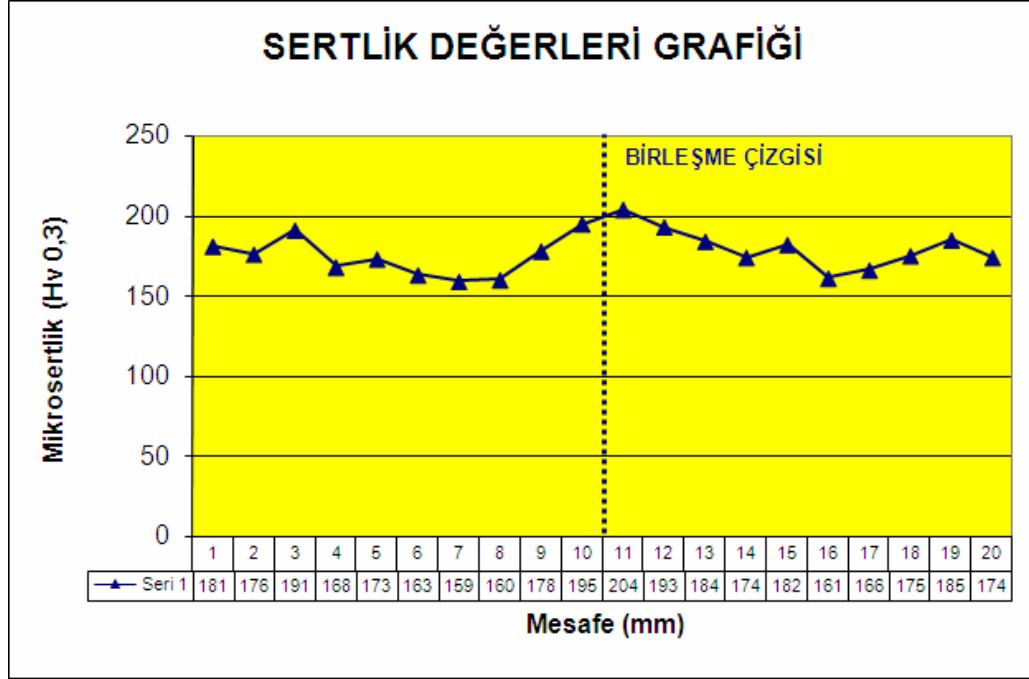
Zwick marka sertlik ölçüm cihazı ile elde edilen sonuçlar aşağıda grafikler ile gösterilmiştir. Numunelerden, birleşme bölgesinden en az dört adet olmak üzere toplam 20 değer alınmıştır.

Elde edilen değerler sonrası, ana metal ile kaynak geçiş bölgesi arasında fazla bir sertlik değişikliği olmadığı görülmüştür. Bu da kaynak bölgesinin istenilen toklukta olduğunu göstermektedir. Birleşme hattından geçen mikrosertlik ölçümü yanında, numunelerin birleşme hattı boyunca çeşitli yerlerde de sertlik ölçümleri yapılmıştır. Bu ölçümlerde de fazla bir sertlik farkı görülmemiştir. Sertlik ölçümleri 300 gr yükte yapılmıştır. Alınan sertlik değerleri aşağıda grafikler ile gösterilmiştir.

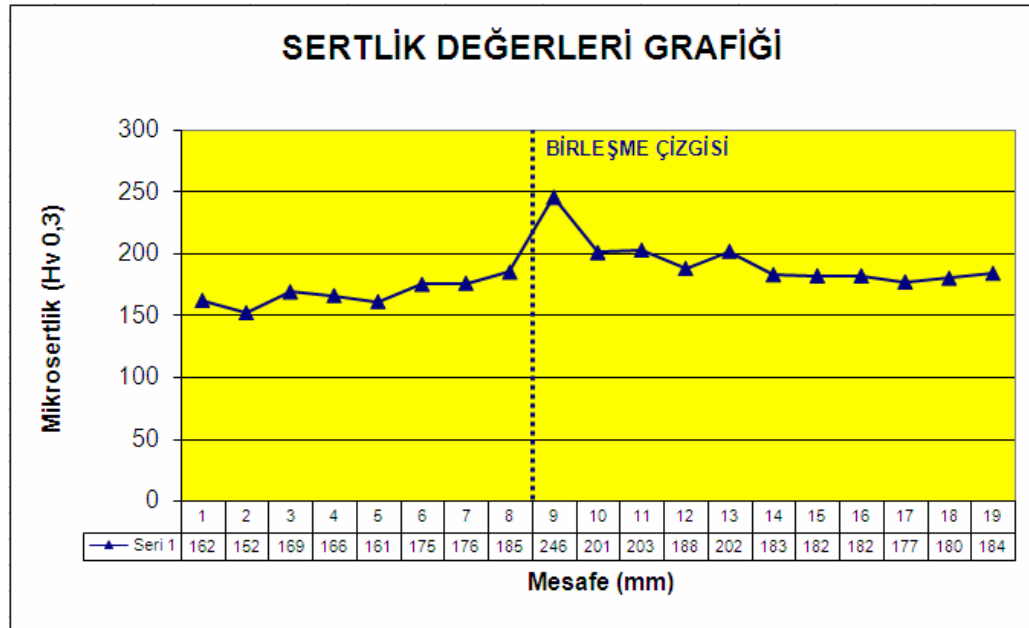
Birleşme bölgesindeki sertlik değerlerinde, tüm numunelerde az miktarda artış gözlenmektedir fakat genel olarak sertlik ve mukavemet çok fazla değişmemiştir. Bunun nedenlerinden birisi; kaynak bölgesinde oluşan kırılğan α_2 (Ti_3Al) fazının oluşması ve bu bölgeden mikrosertlik ölçümü yapılamamasıdır.



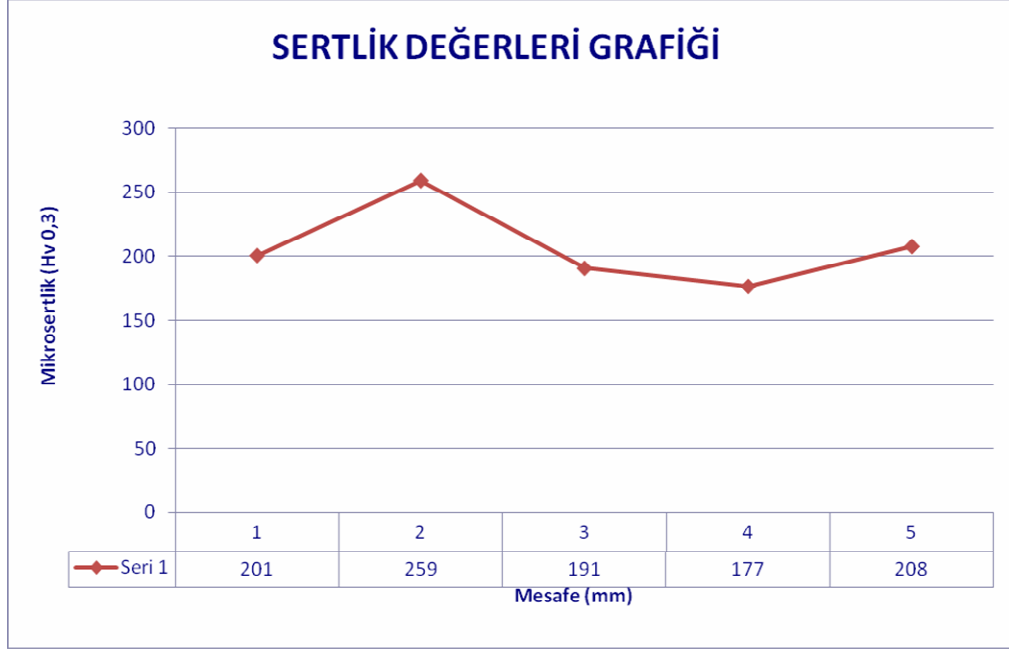
Şekil 6.35: 800°C – 1,36Mpa – 90 Dak. parametreleri ile kaynatılan numunenin mikrosertlik değerleri grafiği



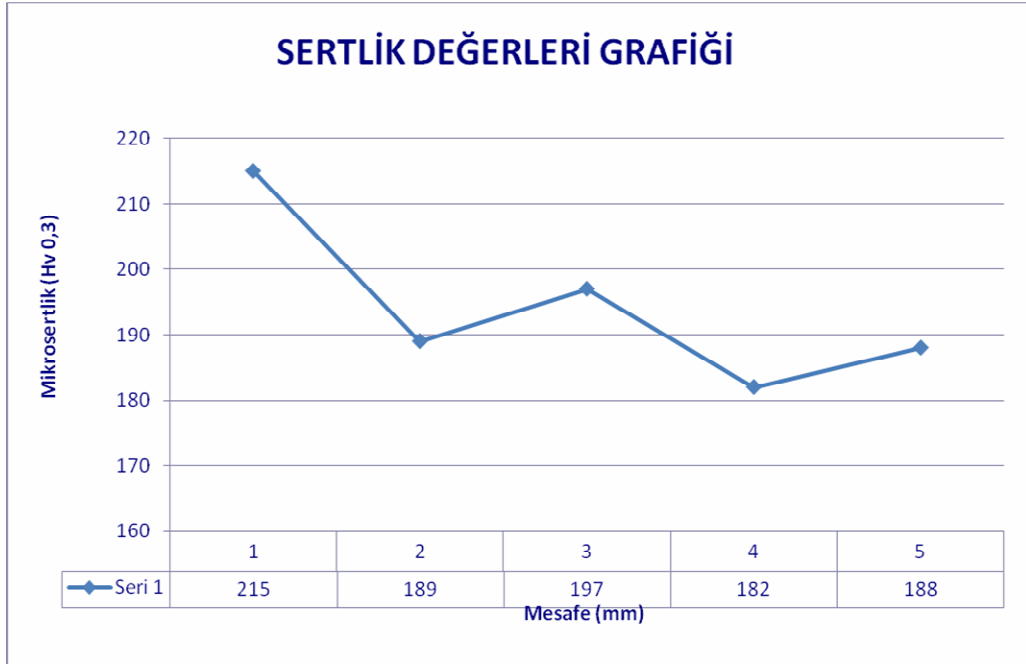
Şekil 6.36: 850°C – 1,36Mpa – 90 Dak. parametreleri ile kaynatılan numunenin mikrosertlik değerleri grafiği



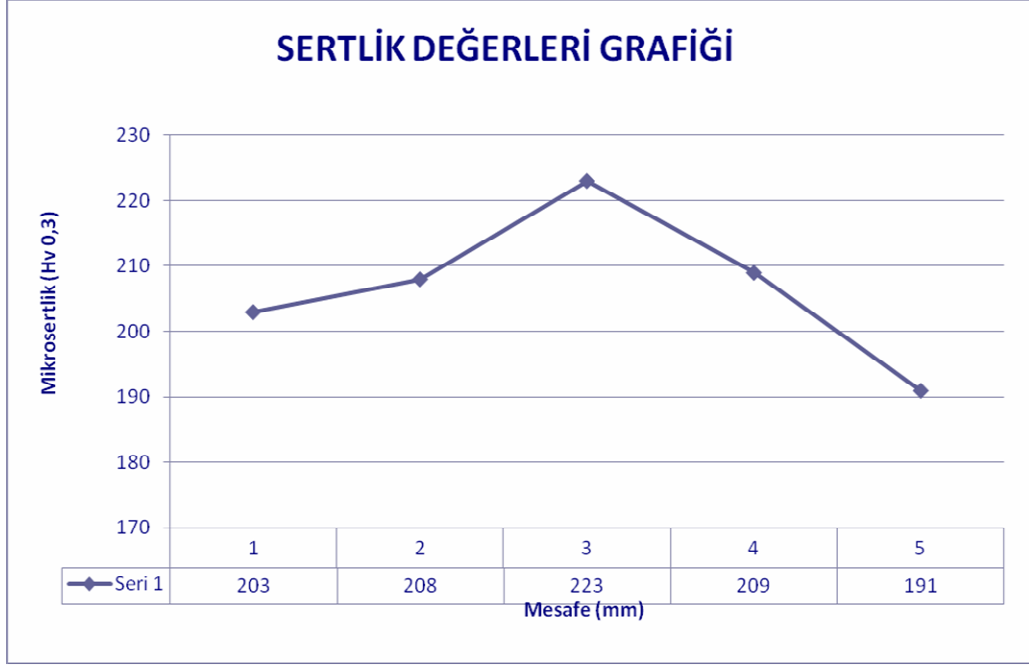
Şekil 6.37: 815°C – 2,72Mpa – 90 Dak. parametreleri ile kaynatılan numunenin mikrosertlik değerleri grafiği



Şekil 6.38: 800°C – 1,36Mpa – 90 Dak. parametreleri ile kaynatılan numunenin birleşme çizgisi boyunca ölçülen sertlik değerleri grafiği



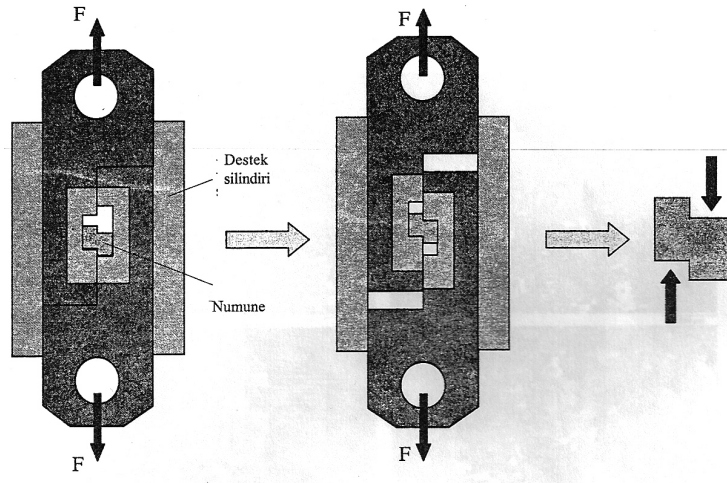
Şekil 6.39: 850°C – 1,36Mpa – 90 Dak. parametreleri ile kaynatılan numunenin birleşme çizgisi boyunca ölçülen sertlik değerleri grafiği



Şekil 6.40: 815°C – 2,72Mpa – 90 Dak. parametreleri ile kaynatılan numunenin birleşme çizgisi boyunca ölçülen sertlik değerleri grafiği

6.4. Kesme Deneyi İncelemeleri

Mikrosertlik incelemeleri sonrasında değişik parametrelerde kaynak edilen numunelere, kaynak performanslarını belirlemek amacıyla kesme testleri aşağıda şekilde gösterilen aparata benzer bir aparat ile uygulanmıştır.



Şekil 6.41: Kesme deneyi aparatı ve kesme deneyinin şematik gösterimi

Tablo 6.1’ de çeşitli parametreler ile birleştirilmiş numunelerin kesme dayanımı değerleri ortalama olarak gösterilmektedir. En yüksek kesme dayanımını, 815°C – 2,72MPa – 90 dakika parametreleri ile kaynatılan numuneler göstermiştir.

Tablo 6.1: Kesme Deneyi Sonuçları

DENEY NO	KAYNAK PARAMETRELERİ (°C/Mpa/Dak.)	KESME DAYANIMLARI (MPa)
1	655 / 2,72 / 60	273
2	600 / 2,72 / 75	BAŞARISIZ
3	600 / 2,72 / 60	BAŞARISIZ
4	710 / 2,72 / 60	285
5	700 / 1,36 / 60	256
6	750 / 1,36 / 60	380
7	800 / 2,72 / 90	458
8	800 / 1,36 / 90	445
9	815 / 2,72 / 90	564
10	850 / 1,36 / 90	475
11	850 / 1,36 / 75	462
12	850 / 3 / 75	486
13	900 / 5 / 90	520

Baz malzeme olan Ti6Al4V’ un deneyden önceki kesme dayanımının 760 MPa civarında olduğu hatırlanırsa, Tablo 6.1’ de görülen değerlerin, baz malzemenin kesme dayanımından düşük olduğu tespit edilmiştir. Bunun nedeni de yine deney sırasında, birleşme ara yüzeyinde oluşan kırılğan α_2 (Ti3Al) fazıdır.

600°C – 2,72MPa parametreleri ile 60 ve 75 dakika sürelerde yapılan deneylerde başarılı birleştirmeler sağlanamamıştır. Bunun nedeni sıcaklığın yeterli derecede yüksek olmamasıdır.

655°C – 2,72MPa – 60 dakikada yapılan deney ile minimum derecede parametrelerle başarılı bir birleştirme sağlanmıştır. Bu parametreler ile yapılan birleştirmeye yapılan kesme deneyinde elde edilen dayanım oldukça düşüktür. Bu parametreler ışığında basınç ve sürenin sabit tutulmasıyla ve sıcaklığın artırılmasıyla 710°C – 2,72MPa – 60 dakika parametreleri ile yapılan deney sonucu kesme dayanımında bir miktar artış saptanmıştır.

Bir sonraki deneyde sıcaklık ve süre sabit tutulmuş, basınç bir miktar düşürülmüştür. 700°C – 1,36MPa – 60 dakika parametreleri ile yapılan deneyde, bağlantının kesme dayanımı değerinde düşüş saptanmıştır. Yine burada basınç ve süre sabit tutulup, tekrar sıcaklık artışı ile 750°C – 1,36MPa – 60 dakika parametreleri ile bir deney yapılmış ve bağlantının kesme dayanımı değerinde artış saptanmıştır. Bu değerlerden 700 – 750°C sıcaklıklarda yapılan birleştirmelerde, sıcaklık ve basıncın artırılmasıyla, bağlantının kesme dayanımının da artacağı sonucuna varılmıştır.

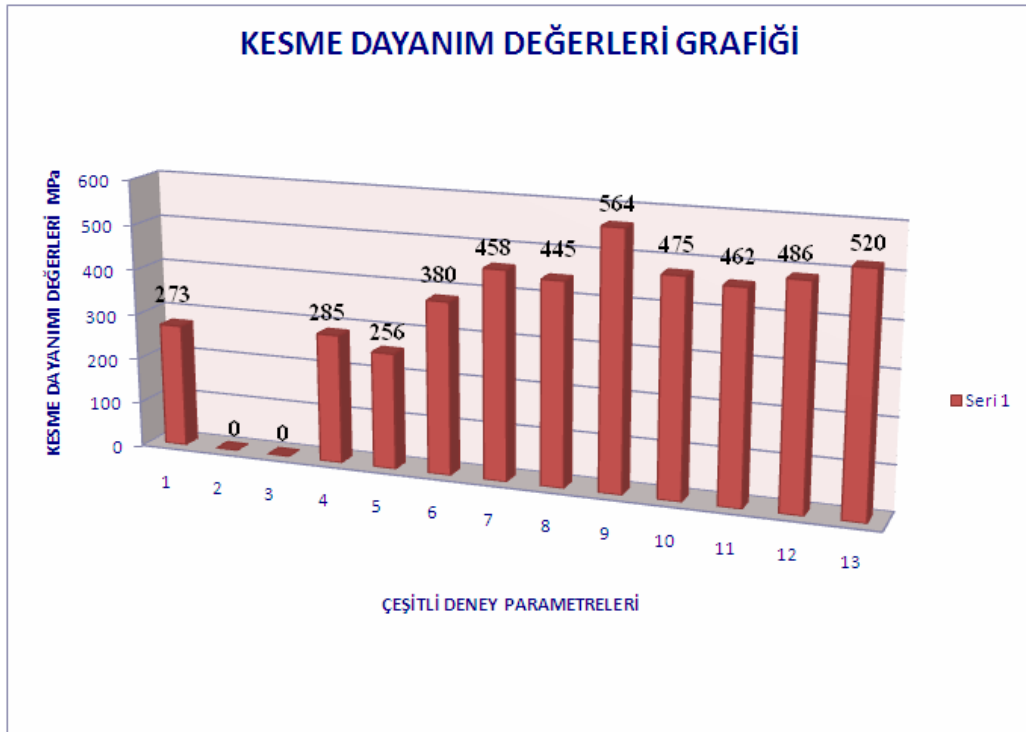
Bir sonraki aşamada parametrelerden sıcaklık daha da artırılarak, 800°C – 1,36MPa – 90 dakika ile birleştirme yapılmıştır. Bu parametreler ile yapılan birleştirmenin kesme dayanımı diğerlerine göre daha fazla çıkmıştır. (445MPa) Bu aşamada, bir sonraki deneyde basınç biraz artırılmış ve 800°C – 2,72MPa – 90 dakika parametreler ile yapılan birleştirmede kesme dayanımında artış gözlenmiştir. (458MPa) Sıcaklık biraz daha artırıldığında 815°C – 2,72MPa – 90 dakika parametreleri ile yapılan deneyde kesme dayanımı, yapılan birleştirmeler arasında maksimum değere ulaşmıştır. (564MPa) 800°C’ lerde yapılan birleştirmelerde sıcaklık ve basıncın artırılmasıyla kesme dayanımı değerlerinde artış saptanmıştır.

850°C – 1,36MPa – 75 dakika parametreleri ile yapılan birleştirmede 462 MPa kesme dayanımı saptanmıştır. Sıcaklık ve basıncın sabit tutulması ve kaynak süresinin bir miktar artırılmasıyla 850°C – 1,36MPa – 90 dakika parametreleri ile yapılan kaynakta, bağlantının kesme dayanımında artış gözlemlenmiştir. (475 MPa) Bu sıcaklıklarda yine sıcaklık ve süre sabit tutulup basınç artırıldığında 850°C – 3Mpa – 75 dakika parametreleri ile yapılan deneyin bağlantı dayanımında da artış saptanmıştır. (486MPa) Kısaca kaynak süresinin aşırı olmayacak derecede artırılmasıyla, kaynak dayanımında da artış gözlenmiştir. Burada dikkat çeken bir

diğer husus sıcaklığın belli bir değerden sonra artması, bağlantı dayanımına çok fazla etki etmemektedir. Bunun nedeni $\alpha - \beta$ geçiş sıcaklığına yaklaşılmaması ve birleştirme ara yüzeyinde oluşacak olan kırılğan fazların, bu sıcaklıklarda daha kolay meydana gelmesidir.

Son olarak 900°C – 5MPa – 90 dakika parametreleri ile yapılan birleştirmede, kaynak parametrelerinin maksimum sınırı belirlenmeye çalışılmıştır. Bu parametrelerde yapılan birleştirmede, 520 MPa kesme dayanımı sağlanmıştır. Bu değer 815°C’ de yapılan birleştirmenin kesme dayanımından daha düşüktür. Bunun sebebi yüksek sıcaklıklarda iç yapının daha çok β fazlı bir yapıya dönmesi ve kaynakta gevrekleşme oluşmasıdır.

Sonuç olarak; Şekil 6.42. ‘de görülen kesme dayanımı değerleri incelendiğinde, sıcaklığın belli sıcaklığı geçmemesi kaydıyla, kaynak parametrelerinin artırılmasıyla ,kaynak bağlantı dayanımının da arttığı sonucuna varılmıştır.



Şekil 6.42: Kesme Dayanımı Değerleri Grafiği

7. GENEL SONUÇLAR

Ti-Al-V alaşımlarının katı hal kaynak yöntemi olan difüzyon kaynağı ile kaynak edilebilirliğinin belirlenmesi amacıyla yapılan bu araştırmada, Ti6Al4V malzemedan hazırlanan numuneler, daha önceden belirlenen çeşitli parametreler ışığında difüzyon kaynağı işlemine tabi tutulmuştur.

Bu araştırmada bir katı hal kaynak yöntemi olan difüzyon kaynağının seçilmesinin nedeni; Ti – Al alaşımlarının bilinen ergitmeli kaynak yöntemleri ile birleştirilmesinde birtakım sorunlarla karşılaşılması ve günümüz uzay ve havacılık sektörlerinde difüzyon kaynağının bir çok malzeme çifti için sıkça kullanılmasıdır. Yapılan birleştirmeler sonucunda, difüzyon kaynağı sonucu birleşme bölgesinde ısıdan etkilenmiş bölge oluşmamasının bu yöntemin en büyük avantajı olduğu detaylı incelemelerle saptanmıştır.

Elde edilen birleştirmelerde nadiren porozite ve kaynak hatasına rastlanmıştır. Ayrıca tüm kaynaklarda kaynak ara yüzeyinde kırılğan α_2 fazının oluşumu tespit edilmiştir. Kaynak ara yüzeyinde oluşan bu fazın büyüklüğü kaynak süresi ile artmakta ve irileşme sonucu süreksiz hale gelmektedir.

Bu çalışmada özenle hazırlanan Ti6Al4V numunelerinin, 655°C - 900°C proses sıcaklığı aralığında, 1,36 – 5 MPa basınç altında, 60 – 90 dakika süre zarfında difüzyon kaynağı deneyleri yapılmıştır. Deneyler sonrası yapılan makroskobik, mikroskobik ve sertlik incelemeleri sonucunda, Ti6Al4V malzeme için başarılı difüzyon kaynağı parametrelerinin 800-850°C sıcaklık, 2,72-4 Mpa basınç, 60-90 dakika süre ve etkili bir vakum atmosferi olması gerektiği saptanmıştır. 900°C ve 5 MPa parametrelerinden daha yukarılara çıkıldığında kaynak veriminin olumsuz etkilendiği tespit edilmiştir.

600°C – 2,72Mpa – 75 dakika ve 600°C – 2,72Mpa – 60 dakika parametreler ile yapılan birleştirmelerde gerek kaynak sıcaklığının gerekse kaynak süresinin birleştirme için yeterli olmadığı saptanmıştır.

Numunelerin deneyden sonraki deformasyonları da göz önüne alındığında en ideal kaynak parametreleri olarak; 815°C – 2,72Mpa – 90 dakika parametreleri saptanmıştır. Bu parametreler ile yapılan birleştirmenin kesme dayanımı 564 MPa olarak ölçölmüştür. Ti6Al4V malzeme için daha önce araştırılan difüzyon kaynağı işlemlerinde elde edilen sonuçlar incelendiğinde, deneylerde elde ettiğimiz kesme dayanımları değerleri istenilen düzeyde sağlanmıştır.

Kaynak parametrelerinden herhangi ikisinin sabit tutulup diğerinin arttırılması durumunda kesme dayanımının artmakta olduğu saptanmıştır.

Elde edilen tüm kaynaklarda kaynak ara yüzeyinde kırılđan α_2 (Ti₃Al) fazının olduğu ve bu fazın kalınlığının belli bir sıcaklık değerinin üzerinde, artan sıcaklık ve kaynak süresi ile arttığı tespit edilmiştir. İçyapının da ince taneli dubleks yapıdan, lamelli bir yapıya dönmesi de malzemeyi gevrekleştirmiştir.

Deney sonrası elde edilen sonuçlarda; özellikle deney öncesi yüzey hazırlığının çok önemli olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca deneyin sadece vakum ortamında gerçekteştirilmiş olması, Ti-Al-V alaşımlarının difüzyon kaynağında, bir koruyucu gaz ortamına ihtiyaç duyulmadan birleştirmelerin yapılabileceğini göstermiştir.

Deney süresinin fazla uzun tutulması durumunda numune yüzeylerinde titanyum oksit tabakası gözlenmiştir. Basınç ve sıcaklığın aşırı yüksek seçilmesi ise numunelerde aşırı plastik deformasyona neden olmakta, birleşmeyi olumsuz yönde etkilemektedir.

Sonuç olarak mevcut parametreler ışığında Ti6Al4V malzemesinin, uygun bir vakum atmosferi altında difüzyon kaynağı yöntemi ile birleştirilmesinin mümkün olduğu gösterilmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] TUNCEL H.S. , “Mekanik Özellikleri Farklı İki Çeliğin Birleştirilmesinde Difüzyon Kaynağı Uygulaması”, *1. Ulusal Makine Tasarım ve İmalat Kongresi*, TÜBİTAK – MBEAE, ODTÜ ANKARA, 413 – 419, 19-21 Eylül (1984)
- [2] GÜLENÇ B. , “Difüzyon Sert Lehimlemesi ile Titanyum ve Düşük Karbonlu Çelik Malzemelerin Birleştirilmesi ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi”, *Makine Tasarım ve İmalat Dergisi*, Cilt 5 – Sayı 1, 22-28, Mayıs (2003)
- [3] BAKER T.S. , MOORE P.S. , “Strength of Solid State Diffusion Bonded Joints Between Stainless Steel (304L) and Ti – 6Al – 4V (IMI318) and Between Ti-4Al-4Mo-2Sn-0.5Si (IMI550) Alloy Bars”, *Farnborough Metalurji laboratuvarı*, UK, 87 – 90, (1999)
- [4] ÇELİK, S. , AY, İ. , “Koruyucu Gaz Altında Difüzyon Kaynağı Uygulaması”, *TR J. of Engineering and Environmental Science*, 23, 63 – 70, TÜBİTAK, (1999)
- [5] TUNCEL H. S. , “Yüksek Alaşımli Bir Takım Çeliği ile Az Alaşımli Bir Islah Çeliğinin Difüzyon Kaynağı ile Birleştirilmesi Üzerine Deneysel Çalışmalar”, *Tübitak Gebze Araştırma Merkezi Malzeme Araştırma Bölümü*, KOCAELİ, Mart (1989)
- [6] MOLLAOĞLU H. , “SiC Partikül Takviyeli Al Metal Matrisli Kompozitlerin Difüzyon Kaynağı”, Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İSTANBUL, (2004)
- [7] YILMAZ O. , AKSOY M. , “Paslanmaz Çelik ve Bakırın Difüzyon Kaynağında Kırkendal Etkisinin Kullanılmasıyla Gerçek Difüzyon Sabitlerinin Hesaplanması”, *Kaynak Teknolojisi II. Ulusal Kongresi*, TMMOB Makine Mühendisleri Odası, 53-62, ELAZIĞ, (1999)
- [8] DAĞLILAR S. , “AISI 304 Tipi Paslanmaz Çelik ile 6101 No’ lu Alüminyum Alaşımının Katı Hal Difüzyon Kaynağı ile Birleştirilmesi”, Doktora Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İSTANBUL, Şubat (1994)
- [9] KURT A. , “Katı Hal Birleştirmeler İçin Difüzyon Kaynağının İncelenmesi”, *Kaynak Teknolojisi II. Ulusal Kongresi*, TMMOB Makine Mühendisleri Odası, Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi ANKARA, (1997)
- [10] ÖZDEMİR U. , KOÇAK M. , ÇAM G. , “Difüzyon Kaynaklı TiAl – Ti6Al4V Alaşımının İçyapı ve Mekanik Karakterizasyonu”, *Kaynak Teknolojisi VI. Ulusal Kongresi*, TMMOB Makine Mühendisleri Odası, 147-163, KOCAELİ, (2003)

- [11] İPEKOĞLU G. , KOÇAK M. , ÇAM G. , “Difüzyon Kaynaklı TiAl Alaşımının İyapı ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi”, *Kaynak Teknolojisi VI. Ulusal Kongresi*, TMMOB Makine Mühendisleri Odası, 127-145, KOCAELİ, (2003)
- [12] CLAPP R. A. , MOUNTFORD J. A. , “Titanium Alloys – How to Capitalize on the Performance in Demanding Corrosive Applications While Assuring Against Failure”, *2001 Chemical Show Javits Convention Center 49*, 1-20, 23-25 Ekim (2001)
- [13] TUPPEN S. J. , BACHE M. R. , VOICE W. E. , “A Fatigue Assessment of Dissimilar Ti Alloys Diffusion Bonds”, *International Journal of Fatigue*, SWANSEA, 14 Ocak (2004)
- [14] ÇAM G. , CLEMENS H. , GERLING R. , KOÇAK M. , “Diffusion Bonding of γ – TiAl Sheets”, *Intermetallics Elsevier 7*, (1999)
- [15] NORRIS B. , “Liquid Interface Diffusion (LID) Bonding of Ti Structures”, *Rohr Industries*, CALIFORNIA, USA, (1998)
- [16] OĞUZ B. , “Demir Dışı Metallerin Kaynağı”, *Oerlikon Yayınları*, (1995)
- [17] FROST B. , JAMSHIDI M. , “Advances in Materials and Automation”, *Manufacturing International 90*, Volume IV, ATLANTA, GEORGIA, 25-28 Mart (1990)
- [18] ASME SPECIFICATIONS HAND BOOK, “Specification for Titanium and Titanium Alloy Bars and Pipes”, *ASME*
- [19] KOU Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Ders Notları, “Genel Malzeme Laboratuvarı II”, *KOU YAYINLARI*, 119, KOCAELİ, (2004)
- [20] L.I. Duarte, A.S. Ramos, M.F. Vieira, F. Viana, M.T. Vieira and M. Koçak, 2006, Solid-state diffusion bonding of gamma-TiAl alloys using Ti/Al thin films as interlayers, www.sciencedirect.com , (*Ziyaret Tarihi: 2 Şubat 2004*)
- [21] TİMED TİC. VE SAN. LTD. ŞTİ. ,2004<http://timed.com.tr/tr/urunlerimiz.html> (*Ziyaret Tarihi: 10 Mart 2005*)
- [22] TWI.LTD, Diffusion bonding - Ceramics and ceramic/metal joints, 2000, http://www.twi.co.uk/j32k/protected/band_3/ksjaf005.html , (*Ziyaret Tarihi: 27 Şubat 2004*)
- [23] Wang, X.F.; Luo, Z.C.; Yu, G.S.; Lin, J.G., Application of diffusion bonding model to superplastic γ -TiAl alloys, 2006, http://www.twi.co.uk/j32k/protected/band_3/ksjaf005.html , (*Ziyaret Tarihi: 15 Nisan 2004*)

ÖZGEÇMİŞ

1981 yılında Karabük' te doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Karabük' te tamamladı. 1999 yılında girdiği KOÜ Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü' nden 2003 yılında Makine Mühendisi olarak mezun oldu. 2003 – 2007 yılları arasında, KOÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı' nda yüksek lisans eğitimini tamamladı. Bu süre zarfında, 2003 – 2004 yılları arasında Kösmak Makine Ltd. Şti.' de Makine Mühendisi İmalat Şefi olarak, 2004 – 2006 yılları arasında Alarko Afken Adi Ortaklığı İzmit Tüpraş Şantiyesi DHRP Diesel Kükürt Giderme Projesi' nde Mekanik Borulama Bölüm Şef Yardımcısı olarak çalışmıştır. 2006 – 2007 yılları arasında Çolakoğlu Metalurji A.Ş. Dilovası Şantiyesi Yeni Kütük Döküm, Slab Döküm ve Oksijen Tesisleri Yatırımı' nda, Entek Enerji Çevre Mühendislik İnş. Mon. ve San. Ltd. Şti. Şantiye Şefi Makine Mühendisi olarak çalışmıştır. Şu anda; KUANTUM MAKİNE MÜHENDİSLİK PROJE ÇELİK KONSTRÜKSİYON BORULAMA İNŞ. ve SAN. LTD. ŞTİ. adı altında iki mühendis arkadaş ile kurdukları kendi şirketlerini idare etmektedir.