

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TİTANYUM ve ALAŞIMLARININ TUNGSTEN İNERT
GAZ (TIG) KAYNAĞI**

Metalurji Mühendisi Ayşe EKMEKÇİOĞLU

**FBE Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı Malzeme Programında
Hazırlanan**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
154308**

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Ahmet KARAASLAN (YTÖ)

Prof. Dr. Nispet Sönmez

Prof. Nurullah Gültekin

İSTANBUL, 2004

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
KISALTMA LİSTESİ	iv
ŞEKİL LİSTESİ.....	v
ÇİZELGE LİSTESİ	vi
ÖNSÖZ	vii
ÖZET	viii
ABSTRACT.....	ix
1. GİRİŞ	1
2. TİTANYUM ve ALAŞIMLARININ ÖZELLİKLERİ	2
2.1 Ticari Saflıktaki Titanyum.....	8
2.2 Alfa Titanyum Alaşımları	8
2.3 Beta Titanyum Alaşımları.....	9
2.4 Alfa-Beta Titanyum Alaşımları	10
2.5 Titanyum ve Alaşımlarının Kullanım Alanları	12
2.5.1 Havacılıkta Kullanılan Titanyum Alaşımları	14
2.5.2 Tıbbi İmplantlar ve Dental Protez Malzemelerde Kullanılan Titanyum Alaşımları.....	17
2.5.3 Otomotiv Endüstrisinde Kullanılan Titanyum Alaşımları	17
2.6 Titanyum Alaşımlarının Mekanik Özellikleri ve Yapıları	17
2.7 Alaşımlandırmanın ve Isıl İşlemin Etkileri	22
2.8 Sıcaklığın Etkisi	23
3. TİTANYUM VE ALAŞIMLARININ KAYNAK KABİLİYETLERİ.....	26
3.1 Titanyum ve Titanyum Alaşımlarında Kaynak Bölgesinin Metalografik Olarak İncelenmesi	29
3.2 Titanyum ve Alaşımlarının Kaynağında Ek Kaynak Metalinin Seçimi	30
4. TİTANYUM VE ALAŞIMLARININ KAYNAĞINDA UYGULANABİLECEK YÖNTEMLER	33
4.1 Katı Hal Kaynak Yöntemleri	33
4.1.1 Sürtünme Kaynağı	33
4.1.2 Basınç Kaynağı	34
4.1.3 Difüzyon Kaynağı.....	35
4.1.4 Ultrason Kaynağı	35
4.2 Ergitme Kaynak Yöntemleri	36
4.2.1 MIG (Metal İnert Gaz) Kaynak Yöntemi	36
4.2.2 Plazma Kaynağı	38
4.2.3 Elektron Işın Kaynak Yöntemi (EB Kaynak Yöntemi)	38

4.2.4	TIG (Tungsten İnert Gaz) Kaynak Yöntemi	41
4.2.4.1	Koruyucu Gazlar	43
4.2.4.2	İlave Metal (Kaynak Teli).....	44
4.2.4.3	Kaynak Makinesi	44
4.2.4.4	Ark Boyu.....	44
4.2.4.5	Koruyucu Gaz Kamaraları	45
4.2.4.6	Kaynak Ön Temizliği.....	45
4.2.4.7	Kaynak Sonu Temizliği	46
4.2.4.8	Darbeli TIG Kaynak Yöntemi	47
4.2.4.9	TIG Kaynağında Kaynak Hataları	48
4.2.5	Laser Işın Kaynağı	49
5.	DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	51
5.1	Ti / Ti Malzeme Çiftinin İlave Metal Kullanılarak Yapılan TIG Kaynağı.....	53
5.1.1	Mikroyapılar	53
5.1.2	Mikrosertlik.....	57
5.2	Ti / Ti Malzeme Çiftinin İlave Metal Kullanılmadan Yapılan TIG Kaynağı	58
5.2.1	Mikroyapılar	58
5.2.2	Mikrosertlik.....	61
5.3	Ti / Ti6Al4V Malzeme Çiftinin İlave Metal Kullanılarak Yapılan TIG Kaynağı	62
5.3.1	Mikroyapılar	62
5.3.2	Mikrosertlik.....	72
6.	GENEL SONUÇ ve İRDELEME	74
	KAYNAKLAR	75
	ÖZGEÇMİŞ	78

KISALTMA LİSTESİ

EBW	Elektron Işın Kaynağı
EBW-HV	Yüksek Vakum Altında Yapılan Elektron Işın Kaynağı
HSP	Hegzagonal Sıkı Paket
KHM	Kübik Hacim Merkezi
LBW	Laser Işın Kaynağı
MIG	Metal İnert Gaz Kaynağı
TIG	Tungsten İnert Gaz Kaynağı



ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Titanyum ile alfa stabilizörü (alüminyum) arasındaki ikili faz diyagramı	5
Şekil 2.2 Titanyum ile beta stabilizörü (krom) arasındaki ikili faz diyagramı	6
Şekil 2.3 Titanyum ile beta stabilizörü (vanadyum) arasındaki ikili faz diyagramı	7
Şekil 2.4 Al-Ti-V alaşımasının 980 °C deki üçlü faz diyagramı	7
Şekil 2.5 Tavllanmış ve hızla soğutulmuş α -Ti'un mikroyapısı	9
Şekil 2.6 (a) Tavlama ve (b) α - β titanyum alaşımasının mikroyapısı	10
Şekil 2.7 (a) Isıl işlem ve (b) α - β titanyum alaşımlarının mikroyapısı	11
Şekil 2.8 Temperlemenin α - β titanyum alaşımları üzerine etkisi	12
Şekil 2.9 Ticari saflıktaki titanyumun farklı sıcaklıklarda özelliklerinin değişimleri	20
Şekil 2.10 Bazı titanyum alaşımlarının akma dayanımları üzerine sıcaklığın etkisi	21
Şekil 4.1 Sürtünme kaynağının prensip şeması	33
Şekil 4.2 Basınç kaynağının prensip şeması	34
Şekil 4.3 MIG/MAG kaynağının şematik görünümü	36
Şekil 4.4 Plazma kaynağının şematik görünümü	38
Şekil 4.5 Elektron ışın kaynağı cihazının şematik görünümü	40
Şekil 4.6 TIG kaynağının şematik görünümü	41
Şekil 4.7 Laser ışın kaynağının şematik görünümü	49
Şekil 5.1 TIG kaynak cihazı	51
Şekil 5.2 Ticari saflıktaki titanyumun mikroyapısı	54
Şekil 5.3 ITAB bölgesinin mikroyapısı	55
Şekil 5.4 Kaynak dikişinin mikroyapısı	56
Şekil 5.5 Ticari saflıktaki titanyumun ticari saflıktaki titanyum ile dolgulu TIG kaynağının mikrosertlik değerleri	57
Şekil 5.6 ITAB bölgesinin mikroyapısı	59
Şekil 5.7 Kaynak dikişi	60
Şekil 5.8 Ticari saflıktaki titanyumun ticari saflıktaki titanyum ile dolgusuz TIG kaynağının mikrosertlik değerleri	61
Şekil 5.9 Ticari saflıktaki titanyum ana malzeme	63
Şekil 5.10 Ti6Al4V ana malzeme	64
Şekil 5.11 ITAB bölgesi mikroyapısı	65
Şekil 5.12 ITAB bölgesi mikroyapısı	66
Şekil 5.13 Kaynak dikişi mikroyapısı	67
Şekil 5.14 Kaynak dikişi mikroyapısı	68
Şekil 5.15 Kaynak Dikişi	69
Şekil 5.16 Kaynak dikişi mikroyapısı	71
Şekil 5.17 Ticari saflıktaki titanyumun Ti6Al4V titanyum alaşımı ile dolgulu TIG kaynağının mikrosertlik değerleri	72

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 2.1 Bazı titanyum alaşımlarının özellikleri.....	4
Çizelge 2.2 Havacılıkta yaygın kullanıma sahip titanyum alaşımları	15
Çizelge 2.3 Havacılıkta önemi artan titanyum alaşımları	15
Çizelge 2.4 Havacılıkta kullanımları az olan ama kritik yerlerde kullanılan titanyum alaşımları	16
Çizelge 2.5 Alaşımsız titanyumun sınıflandırılması.....	18
Çizelge 2.6 Titanyum alaşımları	19
Çizelge 3.1 Titanyum alaşımlarının kaynak edilebilirlikleri	27
Çizelge 3.2 Titanyum ve alaşımlarının kaynağında kullanılan ek kaynak metallerinin bileşim yüzdeleri	31
Çizelge 4.1 Ti6Al4V plakanın elle ve otomatik MIG kaynağındaki kaynak parametreleri	37
Çizelge 5.1 Numunelerin kimyasal bileşim yüzdeleri	52
Çizelge 5.2 TIG kaynak parametreleri.....	52



ÖNSÖZ

Yüksek lisans tez çalışmam boyunca, değerli bilgilerini ve tecrübelerini bana aktaran ve yol gösteren değerli hocam Yrd. Doç. Dr. Ahmet Karaaslan'a teşekkür ederim.

Hayatım boyunca her türlü konuda maddi ve manevi desteğini esirgemeyen ve bana destek olan sevgili aileme çok teşekkür ederim.

Haziran 2004

Ayşe Ekmekçioğlu



ÖZET

Titanyum ve alaşımlarının havacılık, otomotiv, kimya gibi dev endüstrilerde kullanım oranının gün geçtikçe artması; kaynak edilmiş titanyum malzemelere olan talebi de hızla arttırmaktadır.

Titanyumun kaynağı, yüksek sıcaklıkta veya ergimiş haldeki yüksek reaktifliği nedeni ile oldukça zordur. 500 °C den itibaren atmosferik gazları absorbe etmesi nedeni ile sertleşme artar, tokluk düşer. Kaynak sırasında oluşan bu imalat problemleri, titanyumun kullanılabilirliğinin düşmesine neden olmaktadır.

Bu çalışmada; 2 mm kalınlığında ticari saflıktaki titanyum çifti önce Ti6Al4V dolgu metali kullanılarak, daha sonra ise dolgu metali kullanılmaksızın tungsten inert gaz (TIG) kaynak yöntemi ile kaynak edilmiştir. Yine aynı kaynak yöntemi kullanılarak, 2 mm kalınlığında ticari saflıktaki titanyum 0,8 mm kalınlığındaki Ti6Al4V alaşımı ile Ti6Al4V dolgu metali kullanılarak kaynak edilmiştir. Kaynak sonrası yapılar ışık metal mikroskobu ile incelenmiş; mikrosertlik değerleri ölçülmüştür.

Titanyumun kaynağında seçilen dolgu metalleri ve kaynak parametreleri çok önemli rol oynamaktadır. Dolgu metalinin kimyasal bileşimi ve ergime sıcaklığı kaynak parametrelerini doğrudan etkilediğinden, elde edilen özellikler dolgu metaline bağlı olmaktadır. Kaynaklı titanyumun kullanım yerine göre dolgulu veya dolgusuz birleştirmelerinde gerekli görüldüğü hallerde yapılacak son tavlama ile homojen bir mikroyapının dolayısıyla da homojen mekanik özellik dağılımının elde edilmesi sağlanmış olacaktır. Uygun parametrelerin ve uygun bileşimdeki dolgu metallerinin seçilmesi ile titanyum ve alaşımlarının TIG kaynak yöntemi ile başarılı şekilde birleştirilmesi mümkün olmaktadır.

Anahtar kelimeler: Titanyum, titanyum alaşımları, tungsten inert gaz (TIG) kaynak yöntemi, dolgu metali

ABSTRACT

The wide and diversified range of successful applications of titanium and its alloys in major industries such as aerospace, automotive and chemical plant has been increasing the demand to titanium welds.

Welding of titanium is difficult because of its high reactivity. At temperatures above 500 °C, titanium can absorb harmful gases easily and many problems such as low mechanical properties and unstable structures would appear. These manufacturing problems which appear during the welding processes decrease the industrial applicability of titanium.

In this study, 2 mm thick sheets of commercially pure titanium were welded by gas tungsten arc welding (TIG) with and without filler metal Ti6Al4V. 2 mm thick sheet of commercially pure titanium and 0.8 mm thick sheet of Ti6Al4V were also welded by gas tungsten arc welding with filler metal Ti6Al4V. The microstructures of the welds were observed by optical microscope and microhardness values were measured.

The results indicate that filler metals and welding parameters are very important factors for titanium welding. The final mechanical properties are related to the filler metal, since chemical composition and melting point of filler metal directly affect welding parameters. According to the application field, homogenous microstructures and homogenous mechanical properties in titanium welds joined with or without filler metals can be obtained by heat treatment. Reliable titanium welds can be produced by gas tungsten arc welding technique when suitable parameters and filler metals are chosen.

Keywords: Titanium, titanium alloys, gas tungsten arc welding (TIG), filler metal

1. GİRİŞ

Titanyum 200 yıldır bilinen bir element olduğu halde, ancak 50 yıl kadar önce stratejik önem kazanabilmiştir. 1939 yılında geliştirilen Kroll yöntemine göre, 1947 de teknik üretime geçilebilmiştir (ASM Handbook, Vol.2, 1993).

Titanyum ve alaşımları yüksek dayanım/ağırlık oranları, mükemmel korozyon dirençleri ve çok iyi kaynak edilebilirlikleri nedeni ile havacılık, gemi, otomotiv ve kimya gibi dev endüstrilerde başarı ile kullanılmaktadır.

Titanyum ve alaşımlarına olan talebin gün geçtikçe artması, bu metalin en uygun şekilde nasıl birleştirilebileceği sorununu ortaya çıkartmıştır. Bu soruna gelişmekte olan kaynak teknolojileri en iyi çözümleri üretmektedir.

Titanyum endüstrilerinin gelişmesi; tungsten inert gaz (TIG), ışın kaynağı, direnç kaynağı ve difüzyon kaynağı gibi kaynak yöntemlerinin gelişmesine neden olmuştur. Titanyum alaşımları yüksek kimyasal aktiviteleri nedeni ile oksijen, hidrojen ve azot gibi zararlı gazları kolayca absorbe ederler. Ayrıca düşük mekanik özellikleri ve kararlı olmayan yapıları onların en önemli problemlerini oluşturmaktadır (Disheng, 1987; Yunlian vd., 2000).

Titanyum ve alaşımları, tungsten inert gaz kaynağı (TIG), metal inert gaz kaynağı (MIG), plazma ark kaynağı, laser ışın kaynağı ve elektron ışın kaynağı gibi ergitme kaynak yöntemleri kullanılarak kaynak edilir.

Günümüzde, özellikle levha şeklindeki titanyum ve alaşımlarının kaynağında çoğunlukla TIG kaynak yöntemi kullanılmaktadır. Laser ışın kaynağı (LBW), yüksek enerji yoğunluğu ve kaynak hızı ile yeni yeni kullanılmaya başlayan bir kaynak yöntemidir. Yüksek vakum altında yapılan elektron ışın kaynağı (EBW-HV) yöntemi de kaynak dikişlerini gaz kirlenmelerine karşı koruyabildiğı için titanyum ve alaşımlarının kaynağında tercih edilen bir diğerkaynak yöntemidir.

Bu çalışmada farklı bileşim ve kalınlıklardaki titanyum levhalar tungsten inert gaz (TIG) yöntemi kullanılarak kaynak edilmiştir. Kaynak işlemi sırasında dolgu malzemeleri ve kaynak parametreleri değiştirilerek kaynak sonrası oluşan yapı ve özellikler incelenmiştir.

2. TİTANYUM ve ALAŞIMLARININ ÖZELLİKLERİ

Titanyum fiziksel ve kimyasal açıdan üstün özellikler gösteren bir metaldir. Ancak elde edilmesi ve işlenmesi çok zor olduğundan metal olarak kullanılması çok özel alanlarla sınırlandırılmıştır. Buna karşılık, gerek titanyum mineralleri gerekse titanyum oksitin (TiO_2) geniş kullanım alanları vardır. Titanyumun ticari metal olarak kullanılmaya başlaması yeni olmasına rağmen mühendislik uygulamalarında önemli bir yere sahiptir. Titanyum metali hafifliği, yüksek mukavemeti, mükemmel korozyon direnci nedeni ile kimya, havacılık, denizcilik sanayiinde ve askeri alanlarda çok değerli bir konumdadır [1].

Titanyum nadir bir element olarak bilinirse de yer kabuğunda en çok bulunan altıncı elementtir. Dünyada demir, alüminyum ve magnezyumdan sonra en bol bulunan metaldir ve krom, bakır, nikel, kurşun, çinkonun toplam miktarından daha fazla titanyum bulunduğu düşünülmektedir. Cevher yoğunlaşmasının seyrek olması ve cevherden titanyum eldesinin çok zor olması onu değerli bir metal yapar [1].

Titanyum cevheri ya ilmenit ($\text{TiO}_2\text{-FeO}$) ya da rutil (TiO_2) durumundadır. En zengin titanyum yatakları Kanada, Virginia, New York, Wyoming, Florida, Kuzey Carolina ve Kaliforniya'da bulunmaktadır. Bu doğal bolluk gözleri titanyumun üzerine çekmiştir.

Titanyum, periyodik cetvelin 4. grubunda yer alan, çok sert, gümüşü beyaz, parlak bir elementtir. Ergime noktası $1660\text{ }^\circ\text{C}$, kaynama noktası $3287\text{ }^\circ\text{C}$ dir. Yükselen sıcaklıkla birlikte allotropik dönüşümler meydana gelir. Özgül ağırlığı $4,5\text{ g/cm}^3$ tür. Bu değer, yaklaşık olarak çeliğin %60 ı, alüminyumun ise 1,5 katıdır. Metalik halde kuvarsı çizecek kadar serttir. Bu üstün metalik özelliklerine karşın oksijene ilgisi çok yüksek olduğundan cevher üretiminin çoğu metale indirgenmeden TiO_2 biçiminde kullanılır (Weissbach, 1998).

Titanyum tuz veya oksitleyici asit çözeltilerinde yüksek korozyon dayanımına sahiptir. Madeni asitlere dayanımı biraz daha düşüktür. Saf titanyum çok yumuşaktır ve düşük bir kopma mukavemeti vardır (yaklaşık 206 N/mm^2). Saf titanyuma oksijen, azot ve az miktarda karbon eklenerek dayanımı artırılır ve gevrekleşir. Bu elementler imalat sırasında genellikle istenmeden hava teması ile nüfuz ederler. Bilerek eklenen diğer elementler sayesinde kopma mukavemeti 1648 N/mm^2 gibi değerlere yükseltilebilir. $535\text{ }^\circ\text{C}$ 'nin altında yapışkan, koruyucu TiO_2 filmi, titanyumu korozyona karşı mükemmel dirençli hale getirir. 585°C 'nin üzerinde ise oksit filmi kırılır ve karbon, oksijen, azot ve hidrojen gibi küçük atomlar titanyumu kırılganlaştırır (Askeland, 2002).

Saf titanyum oda sıcaklığında hegzagonal sıkı paket (HSP) düzenindedir ve c/a aksel oranı yaklaşık 1,58 A°'dur. 885 °C civarında yapı allotropik dönüşümle kübik hacim merkezli (KHM) kafes yapısına döner. Hacim değişimi bu sıcaklıkta yaklaşık % 0,1 dir. Düşük sıcaklıklardaki yapı α -Ti'dur ve yüksek sıcaklıklarda β -Ti yapısına dönüşür. Yüksek sıcaklıktaki β -Ti yapısının 885 °C üzerinden itibaren yüksek soğuma hızları ile α -Ti'a dönüşmesi engellenemez. Fakat dönüşümün olduğu sıcaklık seviyesi aşırı soğuma hızıyla bir miktar aşağı kayar. Buradan da anlaşılabileceği gibi saf titanyuma veya yüksek ticari saflıktaki titanyuma ısıtma işlemi yapılamaz. Buna rağmen mikroskobik yapıda ve α fazının düzenlenmesinde yüksek sıcaklıklardaki β fazından itibaren uygulanan değişik soğuma hızlarının etkisi vardır (Boyer, 1993; Destefani, 1993; Weissbach, 1998).

Hızlı soğuma sonucunda çeliklerdeki martenzitik yapıda olduğu gibi iğnecikli bir yapı, yavaş soğuma sonucunda ise düşük karbonlu çeliklerde olduğu gibi eşdağılımlı bir yapı meydana gelir. Yapıdaki ufak bazı değişimler titanyumun dönüşüm sıcaklığının altına kadar yapılan tavlama ile oluşturulabilir (Metals Handbook, Vol. 2, 1983; Boyer, 1993).

Titanyuma alaşım elementlerinin eklenmesi katı ergiyik mukavetlenmesi sağlar ve allotropik dönüşüm sıcaklığını değiştirir. Kalay gibi ilaveler, dönüşüm sıcaklığını etkilemeksizin katı ergiyik mukavetlenmesi sağlar. Alüminyum, oksijen, hidrojen ve diğer α dengeleyici (kararlaştırıcı) elementler α 'dan β 'ya dönüşüm sıcaklığını yükseltir. Yüksek sıcaklıklardan itibaren yapılan soğutmalarda dönüşüm saf titanyumun normal dönüşüm sıcaklığından daha yüksek sıcaklıklarda meydana gelir. Bu şekilde olan yapı ısıtma işlemi uygulanmayan titanyum alaşımları yapısıdır (Metals Handbook, Vol. 2, 1983; Boyer, 1993; Weissbach, 1998).

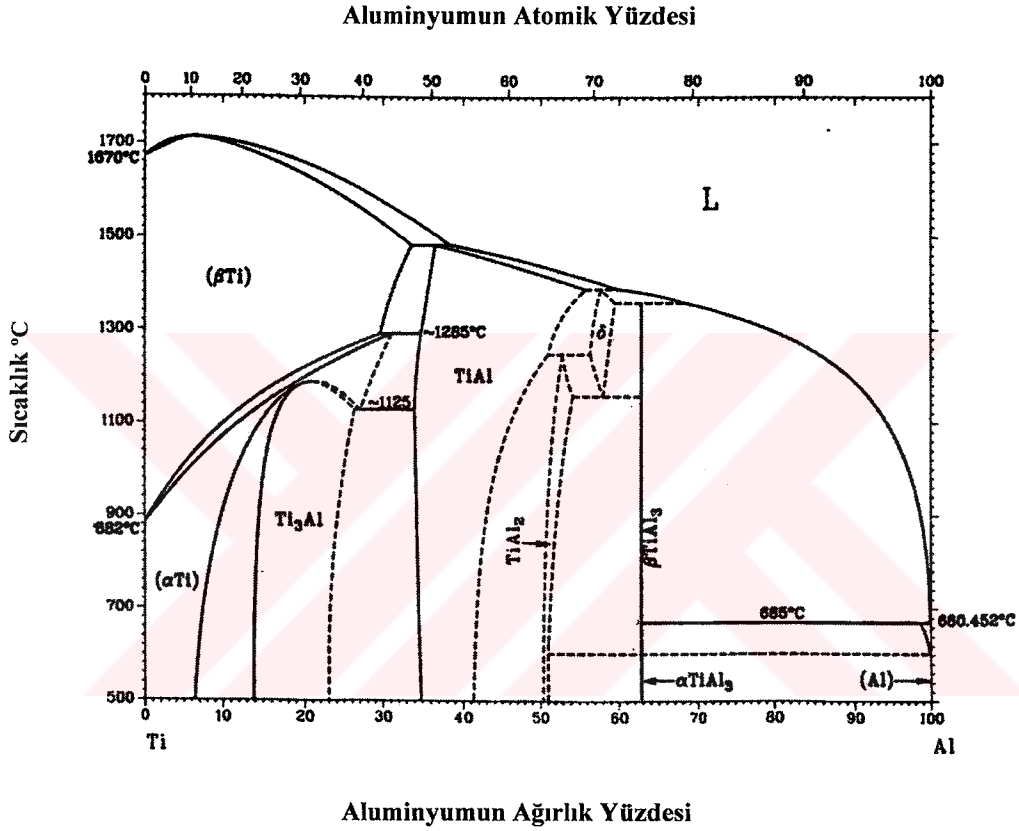
Vanadyum, tantal, molibden ve niobyum gibi β dengeleyici elementler dönüşüm sıcaklığını düşürürler, hatta β 'nın oda sıcaklığında dengeli kalmasına neden olurlar. Son olarak mangan, krom ve demir ötektoid reaksiyon sağlarlar; α - β dönüşüm sıcaklığını düşürürler ve oda sıcaklığında iki faz oluştururlar. Titanyum ve alaşımları için mevcut pekçok sınıf ve alaşımları Çizelge 2.1 de özetlenmiştir (Askeland, 2002).

Çizelge 2.1 Bazı titanyum alaşımlarının özellikleri (Metals Handbook, Vol.3, 1980)

Malzeme	Çekme Dayanımı (MPa)	Akma Dayanımı (MPa)	Uzama (%)
<i>Ticari Saflıkta Ti</i>			
%99.5 Ti	241	172	24
%99 Ti	552	483	15
<i>α-Ti Alaşımları</i>			
%5 Al - %2.5 Sn	862	779	15
<i>β-Ti Alaşımları</i>			
%13V-%11Cr-%3Al	1290	1214	5
<i>α'ya Yakın Ti Alaşımları</i>			
%8Al-%1Mo-%1V	966	828	14
%6Al-%4Zr-%2Sn-%2Mo	1007	993	3
<i>α-β Ti Alaşımları</i>			
%8 Mn	996	862	15
%6Al-%4V	1034	966	8
%7Al-%4Mo	1172	1034	10
%6Al-%6V-%2Sn	1103	1034	12

Düşük sıcaklıklarda oluşan dönüşümler için yavaş soğuma ile oluşan α yapısı ara mikroyapıdadır. Bu şekildeki yapı, daha yüksek sıcaklıklarda oluşan α yapısından daha değişik özelliklere sahiptir. Yeterli miktarda eklenen β stabilizör elemanlar β yapısının oda sıcaklığında kalmasını sağlar. Bu alaşımlar oda sıcaklığında yarı kararlı β alaşımlarıdır ve endüstride β stabilizör elemanlar olarak bilinirler. Bu durum çeliği ısıtılabilir konuma sokan $\gamma - \alpha$ dönüşümünde olduğu gibi titanyum alaşımları ile ısıtılabilir yapılabildiğini gösterir (Metals Handbook, Vol. 2, 1983; ASM Handbook, Vol.6, 1993).

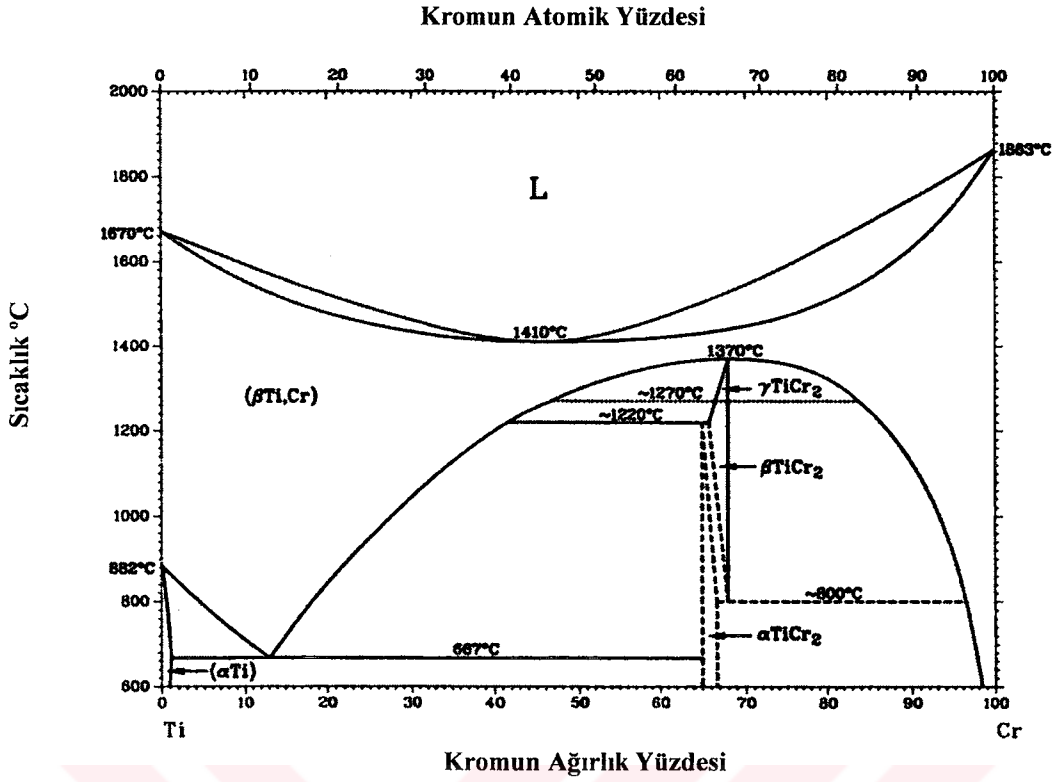
Titanyuma eklenen alaşım elemanları iki sınıfa ayrılmaktadır; büyük çoğunluğu β stabilizördür ve küçük bir miktarı ise α stabilizördür. Bu her iki sınıflandırmada da alaşım elemanları kendi içinde ara veya yeralan alaşım elemanları olarak ikiye ayrılırlar. Hafif olmayan metaller ara alaşımları oluştururlar ve genellikle α stabilizörüdürler. Hidrojen ara eleman olmasına rağmen β fazının oluşumunu kolaylaştırır (ASM Handbook, Vol.2, Vol.9, 1993). Şekil 2.1 deki faz diyagramı titanyum ile α stabilizörü bir eleman için ikili faz diyagramını göstermektedir (ASM Handbook, Vol.3, 1993).



Şekil 2.1 Titanyum ile alfa stabilizörü (aluminyum) arasındaki ikili faz diyagramı

$\alpha + \beta$ ve α alanlarını ayıran hattın eğimini değiştirebilen ve peritektik sıcaklığı (α fazının olmadığı alandaki sabit sıcaklık) maksimuma götürebilen ilave elemanlar titanyumun en etkili α stabilizörleridir (ASM Handbook, Vol.3, 1993).

Şekil 2.2 de ötektoid reaksiyon sağlayarak α - β dönüşüm sıcaklığını düşüren ve oda sıcaklığında iki faz oluşturan β stabilizörü bir element ile titanyum arasındaki faz diyagramı verilmiştir (ASM Handbook, Vol.3, 1993).

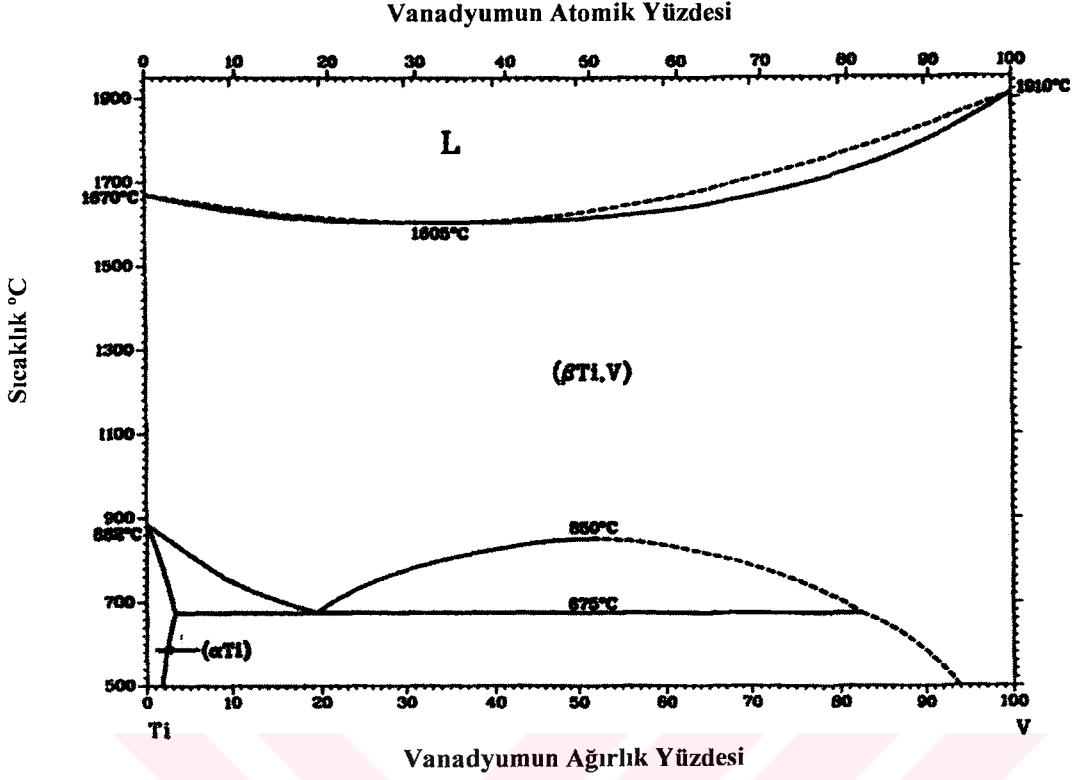


Şekil 2.2 Titanyum ile beta stabilizörü (krom) arasındaki ikili faz diyagramı

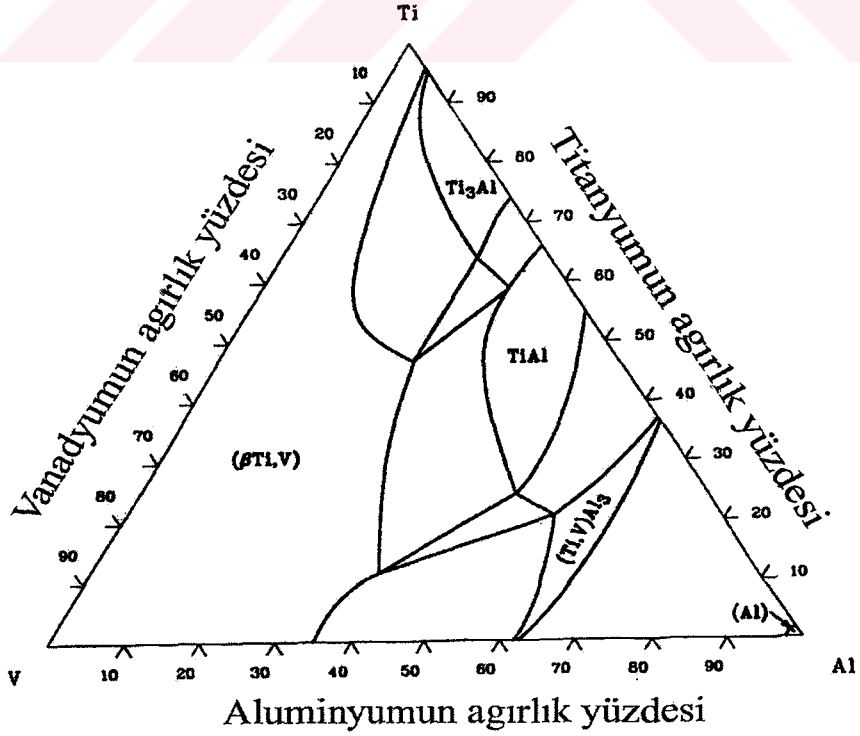
Bu bileşik genelde β ötektoit bileşik fazı olarak adlandırılır. Herhangibir β stabilizörü elemanın etkinliği birim hacim ilave element için α 'nın bulunduğu sıcaklıktaki düşüm seviyesi ve denge şartlarında β 'nın bulunabileceği (ötektoit sıcaklıklar) en alt sıcaklık seviyesine kadar düşüm uzunluğu ile belirlenir. Yüksek sıcaklıklarda β fazında tamamen çözünürken ötektoit sıcaklığın üzerinde kalan daha düşük sıcaklıklarda çözünürlüğü azalan β stabilizörü bir element ile titanyum arasındaki ikili faz diyagramı verilmektedir (ASM Handbook, Vol.3, 1993).

Şekil 2.3 de titanyum ile β fazında karışık çözelti oluşturan β stabilizörü bir elementin faz diyagramı verilmiştir. Burada β ötektoit katı çözelti tipi söz konusudur (ASM Handbook, Vol. 3, 1993).

En çok kullanılan titanyum alaşımı Ti6Al4V'dur. Ti6Al4V, % 6 oranında alüminyum, % 4 oranında ise vanadyum elementlerini içeren bir α - β alaşımıdır. Şekil 2.4 de Ti-Al-V alaşımının 980 °C'deki üçlü faz diyagramı verilmiştir (ASM Handbook, Vol. 3, 1993). Alüminyum β dönüşüm sıcaklığını yükselterek α fazını kararlı hale getirir. Ayrıca alaşımın yoğunluğunu da düşürür. Vanadyum ise β stabilizör bir element olduğundan, sıcak şekil verme sırasında daha çok sünek β oluşturur [2].



Şekil 2.3 Titanyum ile beta stabilizörü (vanadyum) arasındaki ikili faz diyagramı



Şekil 2.4 Al-Ti-V alaşımlarının 980 °C'deki üçlü faz diyagramı

Bu diyagramlar periyodik tablodaki tüm elementler ile titanyum arasındaki diyagramların hepsini temsil etmemesine rağmen, bütün titanyum alaşımlarını ilgilendiren temel tipleri vermektedir.

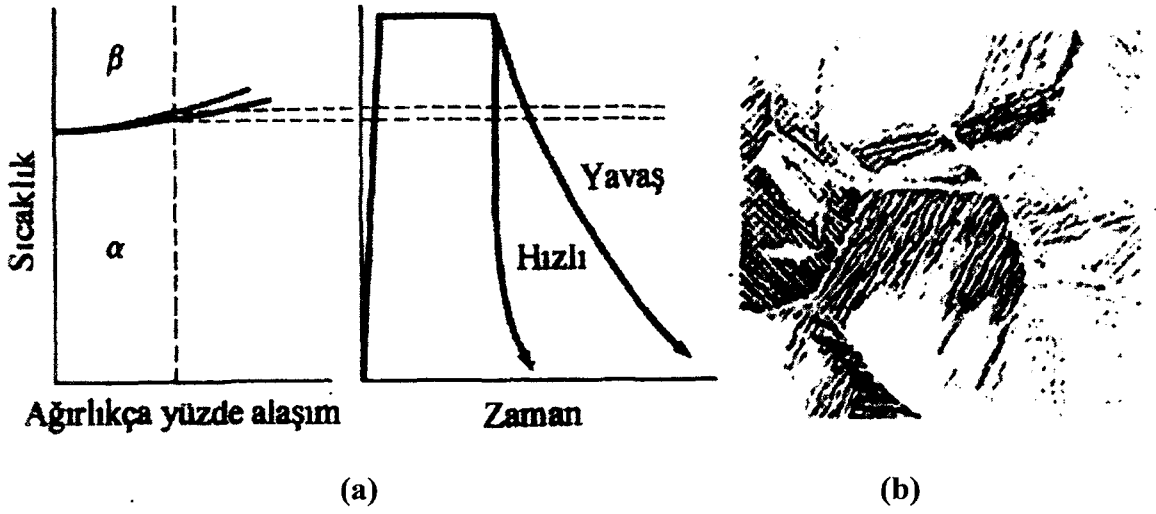
2.1 Ticari Saflıktaki Titanyum

Ticari saflıktaki titanyum malzemeler yüksek korozyon dirençleri, ısıl dayanımları, iyi kaynak edilebilirlikleri ile tanınmaktadırlar. Ayrıca 294-726 N/mm² arasında değişen mukavemet değerlerine bağlı olarak oda sıcaklığında ve 300 °C a kadar yükselen sıcaklıklarda iyi şekil alabilmektedirler. Mekanik gerilim altındaki uygulamalarda düşen mukavemet nedeni ile uygulama sınırı 300 °C lik sıcaklık değeridir. Mekanik gerilim sözkonusu olmazsa bu sınır 600 °C a kadar çıkar (Metals Handbook, Vol.2, 1983).

Oksijen gibi empüriteler, titanyumun mukavemetini oldukça artırır. Ticari saflıktaki titanyum yüksek sıcaklıklarda dayanımı kaybeder, fakat çok iyi korozyon direncine sahiptir. Isı eşanjörleri, boru donanımları, reaktörler, pompalar ile kimya ve petrol endüstrilerindeki valflerde kullanılmaktadır (Askeland, 2002).

2.2 Alfa Titanyum Alaşımları

Çok bilinen alfa alaşımlarının hepsi %5 Al ve %2,5 Sn içerir. Bunların her ikisi de alfa katı ergiyik (karışık kristal) mukavemetlenmesi sağlar. Bu alaşımlar HSP yapılarına rağmen yüksek sıcaklıklarda dayanımlarını korurlar, korozyon ve oksidasyon dirençleri ve kaynaklanabilirlikleri iyidir. Normal olarak iyi süneklik ve şekillendirilebilirliğe sahiptirler. Alfa alaşımları, β bölgesindeki yüksek sıcaklıklarda tavlanır ve sonra soğutulurlar. Hızlı soğutmada çok ince iğnesel şekilli α tane yapısı oluşur. Fırında soğutma ise daha çok levha şeklinde yapı oluşturur. Şekil 2.5 deki tane sınırı çökeltisi ve Widmanstatten plakalarının her ikisi de α 'dır (Askeland, 2002).



Şekil 2.5 Tavlanmış ve hızla soğutulmuş α -Ti'un mikroyapısı (Metals Handbook, Vol 7, 1983)

α alaşımları 550 °C a kadar çok iyi sıcak mukavemet, sürünme direnci ve ısı kararlılığına sahiptirler. Yüksek miktarda alüminyum içerenler (Ti-8Al-1Mo-1V) gerilme korozyonuna karşı daha dirençlidirler. Kaynak kabiliyeti iyiye yakındır. Çökelme sertleşmesi yapabilirlikleri çok sınırlıdır (Metals Handbook, Vol.2, 1983).

Sac şeklindeki alaşımların oda sıcaklığındaki şekillendirme kabiliyetleri çok iyidir (Ti-2,5Cu); bununla birlikte yaklaşık 700 °C sıcaklığa kadar iyi sonuçlar alınabilir (Ti-5Al- 2,5 Sn). Ti-8Al-1Mo-1V ve Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo alaşımlarının yükselen sıcaklıklardaki yüksek mukavemet değerleri ve ısı kararlılıkları sayesinde uçak motorlarında 550 °C'a kadar olan uygulamalar mümkün olabilmektedir (Süataç, 1985).

2.3 Beta Titanyum Alaşımları

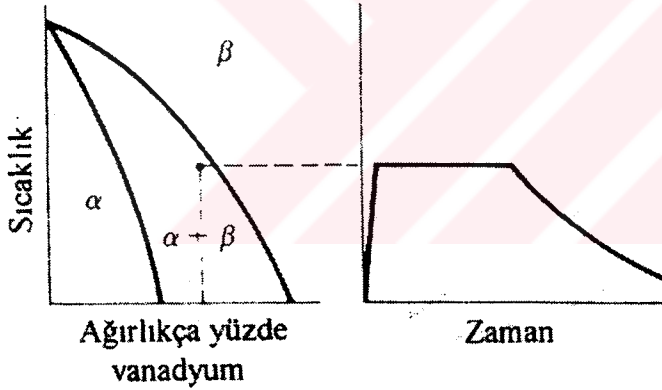
Vanadyum veya molibdenin büyük oranlarda ilavesi ile oda sıcaklığında tamamen bir β yapısı oluşmakla birlikte beta olarak adlandırılan alaşımların hiçbiri gerçekten bu miktarlarda alaşımlanmazlar. Bunun yerine, bu alaşımlar β dengeleyicilerle zenginleştirilirler ve hızlı soğutma ile hepsi β 'dan oluşan dengesiz bir faz oluşturulur. Tavlanmış şartlarda mikroyapıda sadece β vardır. Dayanım, katı ergiyik mukavemetlenmesinden kaynaklanır. Alaşımları yüksek dayanım sağlamak için yaşlandırılabilir. Yüksek dayanımlı bağlama elemanlarında, kirişler ve diğer uzay uygulamaları bağlantılarında kullanılmaktadır. (Askeland, 2002)

β titanyum alaşımları çökelme ile sertleştirilebilirler. Temel stabiliteleri sınırlıdır; bu nedenle yükselen sıcaklıklarda yüksek mukavemet özelliklerine sahip değildirler. Bu alaşımlar karışık

kristallerinin yapısına bağı olarak 600 °C sıcaklığa kadar şekillendirilebilirler ve kaynak edilebilirler. Özgül ağırlıkları α ve α - β alaşımlarından daha büyük ve elastiklik modülleri daha düşüktür. Belirtilen özelliklere bağı olarak β alaşımları da (Ti-3Al-13V-11Cr) roketlerde ve uçaklarda kullanılabilir. Günümüzde 1373 N/mm² dayanıma kadar ulaşılabilen titanyum alaşımları elde edilmeye çalışılmaktadır (Metals Handbook, Vol.2, 1983).

2.4 Alfa-Beta Titanyum Alaşımları

α ve β dengeleyicilerin uygun dengesi ile oda sıcaklığında bir α ve β karışımı üretilir. Tavlama, yüksek süneklik, üniform özellikler ve iyi dayanım kombinasyonunu oluşturur. β dönüşüm sıcaklığının hemen altında alaşımı ısıtma, küçük bir miktar α 'nın kalmasını ve tane büyümesini önlemeyi sağlar (Şekil 2.6). Yavaş soğutma, küçük β faz adalarını kuşatan eş taneli α tanelerini, hızlı soğutma ise iğne şeklinde bir α fazı oluşturur (Şekil 2.6 b). Şekil 2.6 b'de görüldüğü gibi beyaz fazlar α 'dır. Sadece küçük bir miktar alfa fazı içeren "yakın alfa" alaşımları tavllanmış olarak kullanılırlar.



(a)

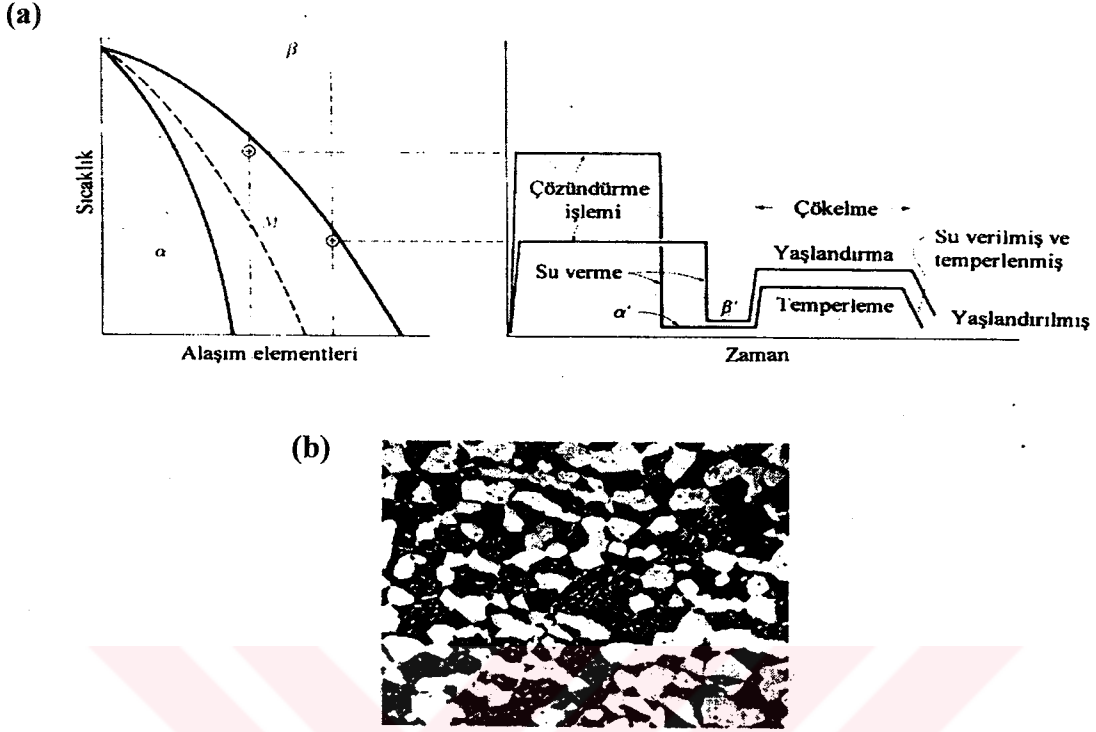


(b)

Şekil 2.6 (a) Tavlama ve (b) α - β titanyum alaşımının mikroyapısı (Metals Handbook, Vol 7, 1983)

Daha fazla alaşımlanmış alfa-beta alaşımları yüksek dayanımlar elde etmek için ısıtma işlemi görebilir. Alaşıma β 'ya dönüşüm sıcaklığına yakın bir sıcaklıkta çözündürme uygulanabilir (Şekil 2.7). Daha sonra alaşım dengersiz aşırı doymuş bir katı ergiyik β' veya titanyum martenzit α' oluşturmak için hızla soğutulur. Sonra alaşım 500 °C ye yakın sıcaklıklarda yaşlandırılır veya temperlenir. Yaşlandırma sırasında çok iyi dağılmış α ve β' veya α' 'den çökelerek alaşımın dayanımını artırır (Şekil 2.8). α' , çelik martenzitteki durumun tam tersi

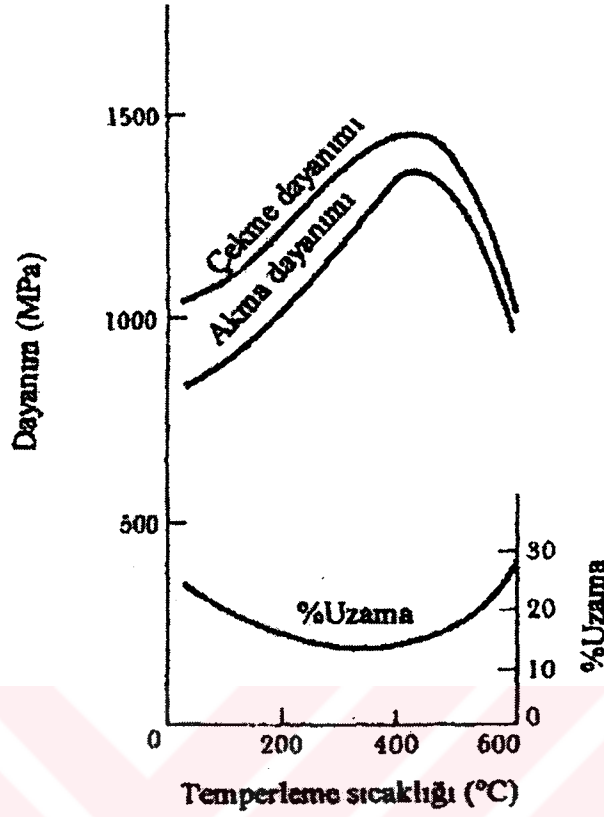
yumuşak bir fazdır.



Şekil 2.7 (a) Isıl işlem ve (b) α - β titanyum alaşımlarının mikroyapısı (Metals Handbook, Vol 7, 1983)

Şekil 2.7 deki yapı, ilk α 'yı (büyük beyaz taneler) ve yaşlandırma sırasında oluşan iğnesel α tanecikli koyu β matrisi içermektedir.

Normal olarak titanyum martenzit biraz daha az alaşımlandırılmış alfa-beta alaşımlarından oluşur. Ne var ki aşırı doyurulmuş β , tamamen β 'dan oluşan alaşımlara çok yakın alaşımlarda daha kolay kalır. Titanyum martenzit tipik olarak iğne şeklinde bir görüntüye sahiptir. Yaşlandırma sırasında alaşımların hem çekme dayanımını hem de kırılma tokluğunu iyileştiren (Şekil 2.8) bir Widmanstätten yapıda α çöker. Uçak iskeleti, roketler, jet motorları ve iniş takım dişlileri için parçalar, ısıtılma işlem görmüş α - β alaşımları için tipik uygulamalardır (Askeland, 2002).



Şekil 2.8 Temperlemenin α - β titanyum alaşımları üzerine etkisi (Askeland, 2002)

α - β alaşımları oda sıcaklığında α alaşımlarından daha yüksek mukavemete sahiptirler ve çökelme sertleşmesi ile sertleştirilebilirler. β stabilizörü katışkıların miktarına bağlı olarak ısı kararlılıkları 300-350 °C civarında sınırlanmaktadır. Oda sıcaklığındaki şekil değiştirme kabiliyetleri zayıftır. Buna rağmen 600 °C civarında iyileşmektedir. Kaynak kabiliyetleri iyidir. Ti-6Al-4V alaşımından kaynak edilemeyen Ti-6Al-6V-2Sn alaşımına kadar çeşitli değerleri içerir. Maksimum çalışma sıcaklıkları yüksek sertleşebilirliğe sahip alaşımlar (Ti-6Al-4V ve Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo) için 450 °C arasında değişmektedir (Metals Handbook, Vol.6, 1983).

2.5 Titanyum ve Alaşımlarının Kullanım Alanları

Titanyum yüksek dayanım/ağırlık oranı ve üstün korozyon direnci nedeni ile alüminyum alaşımlarının fazla hafif; paslanmaz çeliklerin ise fazla ağır bulunduğu uygulamalar için ideal bir metaldir [8].

Titanyum gösterdiği üstün fiziksel ve kimyasal özellikler nedeni ile yaygın olarak havacılık

endüstrisinde kullanılmaktadır; uzay aracı, uçak ve füze yapımında yeri doldurulamaz bir metaldir. Yüksek hız, titreşim ve yüksek sıcaklığın söz konusu olduğu araç kısımlarında, motor türbin kanatlarında ve benzeri aşırı yüklenen diğer araç bölümlerinde çok kullanılmaktadır. Kimyasal dayanıklılığı nedeni ile aşındırıcı kimyasal madde üreten fabrikalarda kullanılmaktadır.

Titanyumdioksit önemli bir pigment boyasıdır ve kısmen de olsa çinko oksitin yerini almıştır. Ferrotitan çeliklerin alaşımlanmasında ve deoksidasyonunda kullanılmaktadır. Titanyum karbür ise sert sinter malzemelerinin bileşenlerindendir (Weissbach, 1998).

Titanyumun genel kullanım alanları Türkiye için de geçerlidir; kaynak elektrodları endüstrisi, boya endüstrisi, tekstil endüstrisi başlıca kullanım alanlarıdır. Bunların yanısıra deri, yapay elyaf, matbaa mürekkebi, lastik, likid gaz, çelik ve seramik endüstrilerinde de kullanılır.

Genel olarak titanyum alaşımlarının kullanım alanları aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Gaz türbin makinaları ve türbin kanat donanımları
- Havacılıkta kullanılan şasi ve aksanlar
- Metal çekme donanımları
- Anotlar
- Dental malzemeler
- Denizcilik ve gemicilik sektörü
- Buhar türbinleri
- Ultra santrifujlar (yüksek devirli makinalar)
- Tıbbi implantlar
- Kondanserler
- Yaylar
- Petrokimya rafinerileri
- Isı değıştirciler
- Nükleer atık depolanması

- Otomotiv
- Spor malzemeleri
- Yiyecek, biracılık ve farmokoloji (eczacılık)
- Mimari uygulamalar
- Mücevherat

2.5.1 Havacılıkta Kullanılan Titanyum Alaşımları

Titanyum alaşımları yüksek dayanım ve düşük yoğunlukları nedeni ile uçak motoru ve iskeletinde kullanılmaktadır. 0 °C'nin altından 600 °C'ye varan sıcaklık aralığında çalışabilen titanyum alaşımları motorlarda ön fanın disk, pervane, şaft ve gömleklerinden yüksek basınçlı kompresörün son kısmına kadar bulunan parçalarda yer almakta; ayrıca motorun en arka bölümünde tapa ve meme gibi hafif yüke maruz kalan kısımların montajında da kullanılmaktadır.

Dayanım değerleri 1200 MPa'ı geçen alaşımlar, sadece birkaç gram ağırlığa sahip küçük civatalardan 1 ton ağırlığındaki iniş takımı taşıyıcıları ve geniş kanat kirişleri gibi çok geniş uygulama alanlarına sahiptir. Günümüzde, Boeing 777 gibi bir uçağın boş ağırlığının yaklaşık % 10'luk kısmı titanyumdan oluşmaktadır (Titanium Information Group, 2002).

Çizelge 2.2, 2.3, 2.4 de havacılık uygulamalarında kullanılan titanyum alaşımları verilmiştir. Alaşımlar kullanımlarına göre gruplanmıştır (Titanium Information Group, 2002).

Çizelge 2.2 Havacılıkta yaygın kullanıma sahip titanyum alaşımları

Titanyum Alaşımları	Kullanım Alanları
Ti-6Al-4V	Genel amaçlı kullanılan yüksek dayanımlı alaşım
Ti-6Al-2Sn-4Zr -2Mo (6-2-4-2)	Sürünme ve oksidasyon dirençli motor alaşımı
Ti-6Al-2Sn-4Zr -6Mo (6-2-4-6)	Sürünme ve oksidasyon dirençli motor alaşımı
Ti-3Al-8V-6Cr-4Zr-4Mo (Beta C)	Yay uygulamaları için β alaşımı
Ti-10V-2Fe-3Al (10-2-3)	777 iniş takımında kullanılan β dövme alaşımı
Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al (15-3-3-3)	Yüksek dayanımlı, ısıtılabilir β levha alaşımı
Ti-3Al-2.5V	Hidrolik tüpleme için orta dayanımlı alaşım
Ti-4Al-4Mo-2Sn (550)	Yüksek dayanımlı, ısıtılabilir motor ve iskelet alaşımı
Ti-5.5Al-3.5Sn-3Zr-1Nb (829)	İleri motor alaşımı, sürünme ve oksidasyon dirençli
Ti-5.8Al-4Sn-3.5Zr-0.7Nb (834)	İleri motor alaşımı, sürünme ve oksidasyon dirençli
Ti-5Al-2Sn-4Mo-2Zr-4Cr (Ti 17)	İleri motor alaşımı, sürünme ve oksidasyon dirençli
Ti-15Mo-3Nb-3Al-0.2Si (21S)	Oksidasyon ve korozyon dirençli β levha alaşımı

Çizelge 2.3 Havacılıkta önemi artan titanyum alaşımları

Titanyum Alaşımları	Kullanım Alanları
Ti-6Al-2Zr -2Sn-2Mo-2Cr-0.25Si (6.22.22)	F22 ve JSF projeleri için iskelet alaşımı
Ti-4.5Al-3V-2Mo-2Fe (SP 700)	SPF ve genel kullanım için Ti6Al4V alaşımının rakibi

Çizelge 2.4 Havacılıkta kullanımları az olan ama kritik yerlerde kullanılan titanyum alaşımları

Titanyum Alaşımları	Kullanım Alanları
Ti-2Cu (230)	Isıl işlenebilir levha alaşımı
Ti-4Al-4Mo-4Sn-0.5Si (551)	Yüksek dayanımlı iskelet alaşımı (sınırlı kullanım)
Ti-8Al-1Mo-1V (8-1-1)	Yedek parçalar için kullanılan alaşım
Ti-6-6-2	Özel kullanım alanları olan yüksek dayanımlı alaşım
Ti-11Sn-5Zr -2.5Al-1Mo-0.2Si (679)	Yeni kullanımlarda yer bulamayan eski motor alaşımı
Ti-6Al-5Zr -0.5Mo-0.25Si (685)	Günümüzde yedek parçalar için kullanılan eski motor alaşımı

Ticari saflıktaki titanyum, iyi işlenebilirlik ve orta düzeyde dayanım özelliklerine sahiptir. Uçaklarda yanma duvarları, kompresör kaplamaları, egzoz çıkış kaplamaları, gövde bölme duvarlarında geniş oranlarda kullanılır.

Ti6Al4V alaşımı, 315 °C ve biraz daha yüksek sıcaklıklara kadar yüksek mukavemete sahiptir. Uçakların gaz türbin kompresör kapakçıklarında ve disklerinde, dövme uçak bağlantılarında, preslenmiş uçak çatısı yüzeylerinde, metal levha halindeki çatı parçalarında kullanılır.

Ti5Al2,5Sn alaşımı, uçak egzoz bağlantılarında ve diğer dövme levha parçalarında 480 °C'a kadar kullanılır. Roket yakıt tanklarında, uçak gaz türbini kompresörlerinin yataklarında, kaynaklı statör bağlantılarında ve içi boş kompresör kanatçıklarında, kaynaklı borularda geniş çapta kullanılır. Ti6Al2Sn4Zr2Mo alaşımı uzay laboratuvarlarında ve gaz depolarında kullanılmaktadır (Li vd., 1997).

Ti8Mn alaşımı, 93-315 °C arasında çalışan uçak kaplama ve birincil yapı elemanlarında kullanılır. Ergitme kaynağı uygulanamaz ancak nokta kaynağı dikkatlice yapılmış konstrüksiyonlarda kullanılabilir. Ti7Al4Mo alaşımı uçak çatı elemanlarında kullanılır (Titanium Information Group, 2002).

2.5.2 Tıbbi İmplantlar ve Dental Protez Malzemelerde Kullanılan Titanyum Alaşımları

Titanyum alaşımlarının implant malzemesi olarak kullanılmaya başlama nedenleri arasında biyolojik uyumlarının çok iyi olması, korozyon dirençlerinin diğer implant malzemelerden yüksek olması, vücutta uzun süre işlevlerini yerine getirmeleri, yenilenme gereksinimlerinin oldukça az olması sayılabilir.

Titanyum genel olarak implantlarda, cerrahi aletlerde ve eklem yerleri bağlantılarında kullanılır. Ticari saflıktaki titanyum dışında Ti6Al4V alaşımı vücutla uyumu oldukça yüksek bir alaşımdır. Alüminyum ve vanadyum alaşımının içinde yer alan katı ergiyiği oluşturur ve vücut sıcaklığında yapıdan ayrılması ancak mikro hareketler sonucu oluşan aşınmalar ile gerçekleşebilir. Ti6Al4V alaşımı bu özellikleri dışında yüksek elektronegativitesi ve yüzey pasifliği nedeniyle damar içi uygulamalarında oldukça güvenilirdir. Ayrıca Ti6Al4V alaşımı alerjik duyarlılığa neden olmayan tek implant malzemedir (Ünal, 2001).

Titanyum nikel alaşımları, uğradıkları deformasyonlardan sonra ısıtıldıklarında tekrar eski şekillerine döndüklerinden hafızalı metaller olarak adlandırılırlar. Bu özellikleri nedeni ile titanyum nikel alaşımları ortodontik diş tellerinde, kafatası penslerinde, toplardamar filtrelerinde ve yapay kalplerde kullanılmaktadır (Bhadeshia, 2004).

Titanyumun dayanıklılığı ve rijit yapısı diş hekimliğinde yaygın olarak kullanılmasına neden olmuştur (Titanium Information Group, 2001).

2.5.3 Otomotiv Endüstrisinde Kullanılan Titanyum Alaşımları

Otomotiv endüstrisinde daha az yakıt harcayan ve çevreyi kirletmeyen araçlara olan talep gittikçe artmaktadır. Bu talepler doğrultusunda, ağırlık azaltma ve performans geliştirme çalışmaları yoğunluk kazanmıştır. Titanyum; yüksek dayanımı, düşük yoğunluğu ve mükemmel korozyon ve oksidasyon direnci nedeniyle otomotiv endüstrisinde tercih edilmektedir. Titanyum uzun süredir yarış arabalarında başarıyla uygulanmaktadır. Egzos sistemlerinde, süspansiyon bağlantılarında, direksiyonda, yaylarda, tekerleklerde, vites kutularında ve disklerde titanyum alaşımları kullanılmaktadır (Titanium Information Group, 2001).

2.6 Titanyum Alaşımlarının Mekanik Özellikleri ve Yapıları

Titanyum metali uygulamada saf veya alaşımlı olarak kullanılmaktadır. Ticari saflıktaki titanyum ASTM (American Society For Testing Materials) ve ASME (American Society Of

Mechanical Engineers) standardlarında 4 sınıfta toplanmaktadır (Çizelge 2.5). Maksimum saflık derecesi % 99,5 ile Sınıf-1'e aitken, minimum değer ise % 99,3 ile Sınıf-3'e aittir (Metals Handbook, Vol.6, 1983).

Çizelge 2.5 Alaşımsız titanyumun sınıflandırılması

ASTM Sınıfı	C	O	H	N	Fe	Alaşım Kalıntısı (%)	Titanyum (%)
1	0,10	0,18	0,015	0,03	0,20	-	Kalan
2	0,10	0,25	0,015	0,03	0,30	-	Kalan
3	0,10	0,35	0,015	0,05	0,30	-	Kalan
7	0,10	0,25	0,015	0,03	0,30	0,12-0,25	Kalan

Saf titanyumun düşük mekanik dayanımı alaşımlandırılarak yükseltilir. Hatta bu dayanım değeri 1275 N/mm^2 'ye ulaşarak çeliği bile geçer. Mukavemet/ağırlık oranı bu kadar yükselen bir metal de özellikle havacılık sanayi için vazgeçilmez bir malzemedir. Çizelge 2.6 da görüldüğü gibi titanyum alaşımları α , β , $\alpha + \beta$ olmak üzere üçe ayrılabilir. Burada alaşımın isimlendirilmesinde her elementten önce gelen sayı onun yüzdesi; geri kalan ise titanyumun yüzdesidir. Bu alaşımların kimyasal yapıları farklı olduğu için kaynak edilebilirlikleri de farklı olmaktadır (Metals Handbook, Vol. 2, Vol.6, 1983; Boyer, 1993).

Çizelge 2.6 Titanyum alaşımları

α Alaşımları	α-β Alaşımları	β Alaşımları
Ti-5Al-2,5Sn	Ti-6Al-4V	Ti-3Al-13V-11Cr
Ti-5Al-5Sn-2Zr-2Mo	Ti-7Al-4Mo	Ti-8Mo-8V-2Fe-3Al
Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo	Ti-4Al-4Mn	Ti-11,5Mo-6Zr-4,5Sn
Ti-6Al-2Cb-1Ta-1Mo	Ti-6Al-6V-2Sn	Ti-3Al-8V-6Cr-4Zr-4Mo
Ti-8Al-1Mo-1V	Ti-6Al-2Sn-2Zr-2Cr-2Mo	Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn
Ti-2,5Cu	Ti-3Al-2,5V	Ti-10V-2Fe-3Al
Ti-6Al-2Nb-1Ta-0,8Mo	Ti-8Al-1Mo-1V	

Genel olarak kaynak edilebilir titanyum alaşımları ve yapıları şunlardır:

1. 245-549 N/mm² çekme dayanımına sahip, α yapısındaki titanyum alaşımları
2. 373 N/mm² çekme dayanımına sahip, % 0,15 paladyum içeren α yapısındaki titanyum alaşımları
3. 824 N/mm² çekme dayanımına sahip, ısıt işlem yapılmayan Ti-5Al-2,5Sn α titanyum alaşımları
4. Isıt işlem görebilir Ti-6Al-4V α - β alaşımı, tavlı durumda 892 N/mm², ısıt işlem sonucu ise 1098 N/mm² çekme dayanımına sahiptir.

Yukarıda sayılanlara ek olarak, aşırı soğuk uygulamalar için kullanılabilen 4-5 çeşit titanyum alaşımı vardır. Titanyum hidrojen, azot ve oksijene karşı ilgisi çok yüksek olan bir metaldir.

Bu nedenle çok yüksek sıcaklıklardaki uygulamalara uygun değildir. 500 °C nin altında, saf titanyumun yüzeyinde koruyucu bir oksit filmi oluşur. 500 °C nin üzerinde ise koruyucu olmayan curuf oluşur ve imalat problemleri yaratarak kullanılabilirliği düşürecek miktardaki oksijen, malzemeye nüfuz eder (Şekil 2.9). Birçok titanyum alaşımında da bu durum meydana gelir. Titanyum sürekli 500 °C nin üzerinde kullanılacaksa oksidasyona dirençli bir kaplama malzemesi uygulanmalıdır. Sürekli kullanmalarda 425 °C, aralıklı kullanmalarda ise 1090 °C uygun sonuçlar vermektedir (Uzunov vd., 1998).

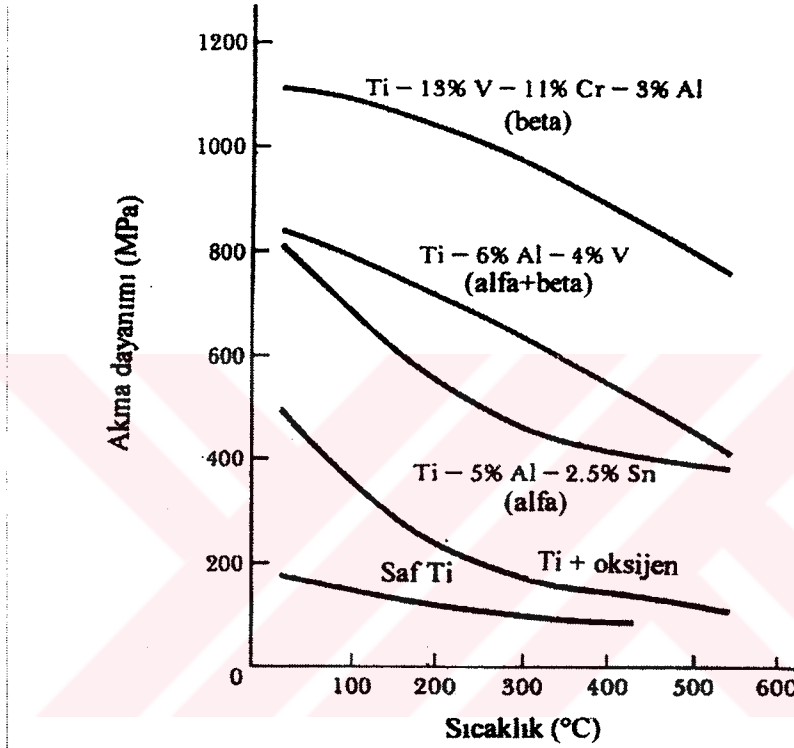


Şekil 2.9 Ticari saflıktaki titanyumun farklı sıcaklıklarda özelliklerinin değişimleri (ASM Handbook, Vol. 2, 1993)

Ticari saflıktaki titanyum genelde yumuşaktır ve çentiklere karşı aşırı hassas değildir. Buna rağmen düşük sıcaklıkta küçük açılı çentikler sorun yaratır. α alaşımları daha az yumuşak ve çentiğe daha hassastırlar (Metals Handbook, Vol. 2, 1983).

α - β alaşımlarının oda sıcaklığında hassasiyetleri az olmasına rağmen sıcaklık düştükçe hassasiyetleri de yükselir. α - β alaşımları özellikle mukavemetleri 1030 N/mm²'yi geçtiğinde daha hassas bir duruma gelirler. Çentik hassasiyetinde ara empüritelerin etkisi büyüktür. Karbon, azot ve oksijen bir dereceye kadar zararlıdır. Fakat hidrojenin etkisi çok büyüktür. 20 ppm'lik hidrojen miktarı dayanımda düşme meydana getirir. Ticari saflıktaki titanyum 20

ppm'in altında bir hidrojen seviyesine sahiptir (Grossbeck vd., 2000). Yüksek sıcaklıklarda meydana gelen yapı kirlenmesi ve oksidasyonu problemine ek olarak dayanım değerlerinde düşme olur. Şekil 2.10 da sıcaklığın farklı titanyum alaşımlarının akma dayanımlarına olan etkisi görülmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi Ti-13V-11Cr-3Al β titanyum alaşımı en yüksek akma mukavemetine sahiptir.



Şekil 2.10 Bazı titanyum alaşımlarının akma dayanımları üzerine sıcaklığın etkisi (Askeland, 2002)

Ara alaşımların etkisi özellikle kaynak için uygun cihazın dizaynında çok önemlidir. İmalatın başından sonuna kadar bütün aşamalarda düşük hidrojen miktarının sözkonusu olması çeşitli şartnamelerde belirtilmiştir. Ticari saflıktaki titanyum alaşımlarındaki hidrojen miktarı çekme gibi mekanik özelliklerini etkiler durumda olmasa bile darbeli yüklerde gevrekleşme sözkonusu olur. Bu gevrekleşme yapıdaki titanyum hidrat çökelmeleri nedeni ile olmaktadır. Hidrojenin yapıdan kaynak öncesinde çıkarılması istenirse vakumda tavlama yöntemi uygulanabilir. Ti-5Al-2,5Sn alaşımının hidrojenin etkilerine dayanıklılığı ticari saflıktaki titanyumdan daha fazladır.

Karbon, oksijen ve azot bütün titanyum alaşımları için artık empürite durumundadır. Karbon

ergiyik bölgede titanyum karbür oluşturur ve hatalar genellikle bu karbür bölgelerindedir. Kaynak metali ve ITAB'da oksijen ve azot toplanmaları yumuşaklığın azalmasına ve mikroçatlakların açıkça görülmesine yol açar. Kaynaktaki büzülme gerilmeleri ve aşırı katı çözelti sertleşmesi çatlakların oluşumuna neden olur.

Aşırı ara katışkılar içeren titanyum ve titanyum alaşımlarının kaynaklı bağlantılarını sertlikçe daha uygun hale getirmek için ısıtma işlemi uygulamak bir çözüm oluşturmamaktadır.

Mukavemete en büyük etkiyi azot yapmakta, onu oksijen ve karbon takip etmektedir. Ayrıca yumuşaklık üzerine en büyük etkiyi yine bu element yapmaktadır (Metals Handbook, Vol. 2, 1983).

Ark kaynağı yapılmış bir bağlantıda minimum % 10 eğilme uzaması isteniyorsa diğer elementler uygun miktarda kalmak şartı ile karbon maksimum % 0,16, azot maksimum % 0,06 ve oksijen maksimum % 0,16 olmalıdır (Süataç, 1985).

2.7 Alaşımlandırmanın ve Isıl İşlemin Etkileri

Titanyuma eklenen alaşım elemanları iki sınıfa ayrılabilir;

a- α stabilizörler

b- β stabilizörler

Bunlar ara veya yeralan olma durumlarına; yani kafes yapısındaki pozisyonlarına göre de sınıflara ayrılabilirler. Oksijen, azot ve karbon ara α stabilizörleri iken, alüminyum, kurşun ve kalay yeralan α stabilizörleridir. Alaşım elemanlarının büyük çoğunluğu yeralan β stabilizör elemanlar grubuna dahildir. Bunlar arasında gümüş, altın, krom, kobalt, bakır, demir, mangan, molibden, nikel, platin, tantal, tungsten, vanadyum, zirkonyum sayılabilir. Buna karşılık hidrojen ara β stabilizördür.

Hafniyum ve zirkonyum hem α hem de β fazında her oranda karışabilmektedir. Krom, kolombiyum, molibden, toryum, uranyum ve vanadyum β -Ti fazında tamamen çözünebilirken, bu elemanların α -Ti içinde çözünebilirlikleri çok küçük yüzdelerde kalmaktadır.

β fazında kobalt, bakır, demir, mangan, nikel, paladyum ve platin alaşımları ile tamamlanmamış katı çözünebilirlik meydana gelir. Bu elementlerin α titanyumdaki çözünebilirliği çok küçüktür. Bunların hepsi ve β fazında tamamen çözünebilir olanlar α

titanyum ile bir veya birden fazla metaller arası bileşik oluşturmaktadırlar. Bu metallerarası bileşiklerin çoğu sert ve çok gevrektrir.

Titanyum, kullanılan metallerin çoğu ile direkt olarak kaynak edilemez; çünkü iki farklı metal kaynağında metallerarası bileşik oluşumu engellenememektedir. Bazı alaşımlar ısı işlem sonucu metallerarası çökelmiş bileşikler meydana getirirler. Bunun sonucunda ise sertleşme ve gevrekleşme görülür.

α stabilizör elemanlar α fazında kısmi çözünürlük gösterirken β fazındaki çözünürlükleri daha azdır. Kimi elemanlar ise β fazındaki yüksek çözünebilirlik göstermektedir (Metals Handbook, Vol.6, 1983; ASM Handbook, Vol. 2, Vol. 6, 1993; Lathabai vd.,2000).

2.8 Sıcaklığın Etkisi

Kaynağın soğuma hızına bağlı olarak oluşan tane boyutu ve martenzit miktarı alaşımların çekme dayanımını etkiler. Yüksek soğuma hızlarında, uzama miktarı ve dolayısıyla da kaynak sünekliği artar (Yung vd., 1997).

Ticari saflıktaki titanyum β fazından α fazına hızlı bir şekilde soğutulursa yapının iğnecikli veya kaba sepet örgüsü fazında olduğu görülür. Bu yapı üst α bölgelerinden tavlamaı takiben alt α bölgelerindeki sıcaklıklarda çalışma sonucu elde edilen eş dağılımlı yapıya göre daha düşük mukavemet ve yumuşaklığa sahiptir. Ticari malzemelerin çoğu en iyi özellikleri verdiği için bu en son durumda alınır.

Titanyumun kaynağında en az miktarda kaba sepet örgüsü yapısını sağlamak için kaynak sırasında bölgeye ısı girişi minimumda tutulmalıdır. Böylece kaynak sıcaklığında harcanan zaman da minimum olur.

Titanyum ve alaşımlarında uygulanan ısı işlemler gerilim giderme veya sertlik, dayanım gibi özellikleri geliştirme amaçlıdır.

Tavlama sıcaklığı ticari saflıktaki titanyum için her 25 mm kalınlık için ½ saat olmak şartı ile 650 °C iken, bu sıcaklık ortalama miktarda alaşım elemanı içeren α titanyum alaşımları için 900 °C dir. Isıl işlem tane boyutunu büyötmektedir; fakat çeliklerde uygulanabilen ısı işlemler ile tane boyutunu küçöltme yöntemleri titanyum için geçersiz kalmaktadır. Tane küçöltme ancak yeniden kristalleşme tavlamaının ardından yapılan soğuk şekillendirme ile olmaktadır ve bu nedenle tavlama sıcaklığı çok iyi seçilmelidir.

Yüksek sıcaklıkta tavlama % 7-8 Al içeren α tipine yakın titanyum alaşımlarında

kullanılmaktadır (Ti-7Al-2Cb-1Ta ve Ti-8Al-1Mo-1V). β dönüşüm bölgesinde (1010-1050 °C) veya civarında yapılan tavlama, bu alaşımlarda da çekme dayanımını azaltmakla birlikte daha iyi sertlik ve tokluk sağlamaktadır.

Yapılan birçok çalışma, yüksek dayanımlı α - β titanyum alaşımlarının kaynağında başarılı özellikler elde etmenin oldukça zor olduğunu göstermektedir. α - β faz dönüşümlerini ve kaynak kalitesini olumsuz yönde etkileyen çökelme reaksiyonlarını kontrol etmek için ortak kaynak prosedür ve teknikleri geliştirmek gerekli hale gelmiştir (Yung vd., 1997).

α - β alaşımları için sertleşme ısısal işlemi sadece β fazından itibaren soğuma sonucu olan dönüşümün çok zayıf olduğu alaşımlar üzerinde etkilidir. Isıl işlem sonucu oluşan yüksek dayanımın nedeni kararlı olmayan bir yüksek sıcaklık fazının daha sert diğer bir faza dönüşmesidir. Bu yeni faz, β matrisinin çökmesi veya yarı kararlı bir ara fazın dönüşümünden olabilir. Genel olarak ısısal işlem sonucu elde edilen yüksek dayanım, ısısal işlem görmüş α - β alaşımlarında yumuşaklığın azalmasını da beraberinde getirmektedir. Sertleştirme ısısal işlemi β fazından itibaren su vermeyi, ardından da çökelme oluşturmak için alaşımın alt α - β dönüşüm sıcaklığının yaklaşık 150 °C üzerine ısıtmayı içerebilir.

$\alpha + \beta$ alanındaki yüksek bir sıcaklığa ısıtma daha düşük bir sertlik oluşturmakla birlikte yükselen sıcaklıklarda daha kararlı kullanım imkanı veren yapıya olanak tanımaktadır. Birçok durumda bu alaşımlar mukavemet ve yumuşaklık arasında en iyi uyumu sağlamak ve gerilme uygulamaları ile birlikte aşırı dönüşümün oluşmasını önlemek için kararlı durumda kullanılırlar.

α - β alaşımlarının tavlama sırasında tane kabalaşmasını minimumda tutmak için sıcaklık kontrolü iyi yapılmalıdır. Alaşıma bağlı olmak şartı ile tavlama 600-700 °C arasında olmalıdır. Eğer çalışma anında yüksek sıcaklık söz konusu ise tane kabalaşması olmaktadır. Bu sıcaklıklardan itibaren yavaş soğuma sonucunda tane sınırlarındaki α dönüşümü nedeni ile malzemede sertlik artışı olmaktadır. Bu son durumu düzeltmek için 600-650 °C arasında yapılan uzun süreli bir ısısal işlem α 'nın toplanmasına neden olacak ve kısmi yumuşaklık meydana gelecektir. Bu ısısal işlem uzun zamana (bazen 48 saat) ve dikkatli bir kontrole ihtiyaç gösterdiğinden malzemede tane kabalaşmasının ve ince dağılmış α - β yapısının oluşmasına dikkat edilmelidir.

İngotların haddelenmesi ile oluşan ürünler ince taneli bir yapıya sahip olması için son işlem düşük bir dövme sıcaklığında olmalıdır. Bu titanyum alaşımlarında kaynak yapıldığı zaman ısısal işlem periyotları sonucu ITAB'da kaba taneler ve ergime bölgesinde sütunsal kaba taneler

meydana gelmektedir.

Tane sınırlarındaki α çökmesi, sertleştirme reaksiyonlarında olduğu gibi kaynakta bir sertlik artmasına sonuçta da malzemenin gevrekleşmesine neden olur. Isıl işlemle, elde edilen sertlik tekrar düşürülebilir (Metals Handbook, Vol.6, 1983; ASM Handbook, Vol. 2, Vol. 6, 1993; Li vd., 1995; Yung, 1997; Lathabai vd.,2000; Yunlian vd., 2000).



3. TİTANYUM VE ALAŞIMLARININ KAYNAK KABİLİYETLERİ

Titanyumun kaynağı, yüksek sıcaklıkta veya ergimiş haldeki yüksek reaktifliği nedeni ile zordur. 500 °C den itibaren atmosferik gazları absorbe etmesi nedeni ile sertleşme artar, tokluk düşer. Oksijen, azot ve hidrojeni uzaklaştırmak için yüksek saflıkta soygazlarla TIG kaynağı yapılır. Titanyumun yüksek sıcaklıklarda oksijeni çözme kapasitesi yüksektir. Ancak bu durumda kendi oksitleri de çözünür. Bu nedenle iş parçası son derece temiz olmalıdır. İlave metalin de aynı koşulları sağlaması gerekir. Temizleme amacı ile kullanılacak asit çözeltilerinin kullanımında da dikkatli olunmalıdır; çünkü kullanılan asit çözeltisinden hidrojen kapma sonucu malzeme gevrekleşebilir (Anık, 2000).

Genel olarak alaşımsız titanyumun ve tüm α titanyum alaşımlarının kaynak kabiliyetlerinin iyi olduğu söylenebilir. Ti6Al4V α - β alaşımı ve diğer zayıf β stabilizör alaşımlar da kaynak edilebilmekle birlikte, kuvvetli β stabilizör α - β alaşımlarında kaynak nedeniyle gevrekleşme görülür. β alaşımlarının çoğu başarılı bir şekilde kaynak edilebilir. Bunun dışında dayanımı arttırmak için yapılan çökelme sertleşmesi ısıtılmasında β alaşımlarının kaynak bölgelerinde kuvvetli gevrekleşme gözlenmektedir (Metals Handbook, Vol 6, 1983).

Genel olarak alaşımsız titanyumun %98,5 den %99,5 e kadar saflığa sahip olanları kaynağa uygundur. Bütün alaşımsız titanyum malzemeler soğuk şekillendirilebilmelerine rağmen çok nadir kullanılırlar. Bütün oranlardaki saf titanyumun kaynağı ısıtılma ile birlikte yapılır. Soğuk şekillendirilmiş alaşımların kaynağı sırasında ITAB'da ısıtılma etkisi görülür ve bu nedenle soğuk şekil verme ile oluşan sertlik azalır. Aşağıda verilen titanyum alaşımlarının kaynağı ısıtılma ile birlikte mümkün olmaktadır (Metals Handbook, Vol 6, 1983).

α alaşımları:

Ti-5Al-2.5Sn, Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo, Ti-5Al-5Sn-2Zr-2Mo, Ti-6Al-2Cb-1Ta-1Mo, Ti-8Al-1Mo-1V daima ısıtılma işlemi yaparak kaynak edilirler (Metals Handbook, Vol 6, 1983).

α - β alaşımları:

Ti-6Al-4V alaşımı tavllanmış durumda kaynak edilir. α - β alaşımlarının birçoğundaki düşük kaynak sünekliği, kaynak bölgesindeki ya da ITAB'daki faz dönüşümlerinden kaynaklanır. α - β alaşımları ya kendiliğinden ya da çeşitli metal elektrotlarla kaynak edilir. α - β alaşımlarının kaynağında ilave metal olarak alaşımsız titanyum veya α titanyum kullanılır. Böylece ergime bölgesinde β miktarı azaldığı gibi dikişin yumuşaklığı da artar. Sertliğin önemli olmadığı durumlarda ve daha çok tokluk istendiğinde, alaşımsız α -Ti dolgu metalleri kullanılabilir. Bu

çeşit ilave metalleri kullanmak kritik alaşımlarda ITAB'ın gevrekleşmesini engellemez. Düşük alaşımlı kaynak dikişleri hidrat çökmesi nedeni ile gevrekleşebilirler. Buna karşılık dolgu metalin koruması sayesinde bu çökme bertaraf edilebilir (Metals Handbook, Vol 6, 1983).

β alaşımları:

Ti-3Al-13V-11Cr, Ti-11,5Mo-6Zr-4.5Sn, Ti-8Mo-8V-2Fe-3Al, Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn ve Ti-3Al-8V-6Cr-4Zr-4Mo tavllanmış durumda kaynak edilebilirler. Kaynak dikişinin mukavemeti düşük, fakat sünektir. Tam bir sertlik eldesi için orta kararlı β alaşımları tavllanmış olarak kaynak edilir. Soğuk şekil verme işlemlerine tabi tutulmuş kaynağa daha sonra ısı işlem ve yaşlandırma işlemleri uygulanır. Bu işlemler kaynakta uygun sünekliğin elde edilmesini sağlar (Metals Handbook, Vol 6, 1983). Titanyum ve alaşımlarının kaynak edilebilirlik oranları Çizelge 3.1 de verilmiştir.

Çizelge 3.1 Titanyum alaşımlarının kaynak edilebilirlikleri (Şirin vd., 1997)

Alaşım	Kaynak Edilebilirlik
<i>Ticari saflıktaki α alaşımları</i>	
Ti-0,2Pd	A
Ti-5Al-2,5Sn	B
Ti-5Al-2,5Sn ELI	A
<i>α'ya yakın fazlı alaşımlar</i>	
Ti-8Al-1Mo-1V	A
Ti-6Al-2Cb-1Ta-0,8Mo	A
Ti-6Al-4Zr-2Mo	B
Ti-6Al-4V	B
Ti-6Al-4V ELI	A
Ti-7Al-4Mo	C
Ti-6Al-6V-2Sn	C
Ti-8Mn	D
<i>β alaşımları</i>	
Ti-13V-11Cr-3Al	B

Daha genel bir bakışla titanyum ve alaşımlarının kaynağındaki önemli faktörleri şöyle sıralanabilir:

1- Titanyum, ergimiş bölge ve hatta ITAB sıcaklığında hava ve birçok element ile reaksiyona girebilir.

2- Titanyum çok az miktarda bile olsa empuritelere etkilenir ve gevrekleşir. Özellikle azot, oksijen, karbon ve hidrojen bu konuda çok etkilidir. Titanyum bu elementlere karşı kaynak sıcaklığında aşırı yüksek bir afiniteye sahiptir. Titanyumun kaynak sıcaklığında bu empuriteleri içermemesi için çok iyi bir gaz koruması sağlanmalıdır. Bütün kaynak bölgesi metalin az sıcak olan kısımları da dahil olmak üzere korunmalıdır.

Titanyumun alüminyum, bakır, demir, nikel ve krom ile katı fazdaki çözünübilirliği sınırlıdır. Ergitme kaynağı yöntemlerinde, çözünübilirlik sınırı aşıldığı zaman, gevrek intermetalik bileşenler meydana gelir. Bu ve benzeri bileşenleri bünyesinde barındıran kaynak metali de şekilsel uygulamalar için yetersiz genleşme özelliğine sahiptir. Vanadyum, titanyum ve demir ile uyumlu bir metal olduğu kadar, titanyumun çeliğe kaynağında ilave malzeme olarak veya bir ara tabaka olarak da görev alabilir. Titanyumun, yalın karbonlu çelik veya 302 tip paslanmaz çelik ile nokta direnç kaynağıyla birleştirilmesinde, vanadyum ara tabaka kullanılması, bazı uygulamalar için uygun kesme dayanımına sahip olunmasını sağlar (Jeffus, 1993).

Metallurjik olarak titanyum, kolombiyumla uyumlu bir elementtir ve bu metallerin birçok alaşımlarının ergitme kaynağı teknikleri ile birleştirilmesi ile güçlü ve genleşebilirlik özelliğine sahip bağlantılar elde edilebilir. Bu nedenle kolombiyum, titanyumun diğer demirdışı metallerle kaynağında ara tabaka olarak kullanılabilir. Örneğin bir bağlantı elemanı olarak kolombiyum ve bakır alaşımlı malzeme kullanılarak, titanyum ve nikel alaşımlarının kaynak işlemi ile birleştirilmesi mümkündür. Bu kaynak işleminde titanyum kolombiyum malzemeye ve nikel alaşımlı malzeme de bakır alaşımlı malzemeye kaynak edilir. Benzer bağlantılar elektron ışın kaynağı yöntemi ile de gerçekleştirilmiş ve 2mm'ye kadar olan sac kalınlıklarında başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Bakır ve titanyum malzemelerin beraber kaynak edilmesi çok zordur. Bu bakımdan iki genel yaklaşımın gerçekleştirilmesine çalışılır. Bu iki metallsel ara tabaka olarak kolombiyum kullanılması ile gaz tungsten ark kaynağı prosesiyle birleştirilmesinde elverişli özellikler bulunabilir. Diğer bir yaklaşım ise beta titanyumun bakır malzemedeki çözünübilirlik avantajından yararlanmaktır. Titanyum malzemenin alüminyum malzemeye ergitme kaynağı yöntemi ile birleştirilmesinde

malzemelerin ergitme sıcaklıkları arasındaki büyük farklılıklardan dolayı ve meydana gelen gevrek intermetalik bileşenler sebebi ile bazı problemler ortaya çıkmaktadır (Aslan, 2001).

TiAl esaslı alaşımlar, iyi sürünme dayanımları ve oksidasyon dirençleri nedeni ile havacılık ve otomotiv gibi endüstrilerde giderek artan oranlarda kullanılmaktadır. Bu alaşımların endüstriyel kullanımları, kendileriyle ya da farklı malzemelerle etkin ve başarılı bir biçimde kaynak edilmelerine bağlıdır. Elektron ışın kaynağı, difüzyon kaynağı ve sürtünme kaynağı gibi kaynak yöntemleri kullanılarak yapılan çalışmalarda başarılı sonuçlar elde edilmiştir. TiAl esaslı alaşımların kaynak işlemleri çok dikkatli bir şekilde yapılmalıdır. Bu alaşımların kaynağında oluşan düşük sünellik büyük bir sorun oluşturmaktadır. Kaynak sonrası yapılacak uygun bir ısıl işlemle TiAl kaynaklarının mekanik özellikleri iyileştirilebilir (Chaturvedi vd., 1997; Arenas ve Acoff, 2001).

Titanyum kaynak kabiliyetini iyileştirmek ve daha iyi sonuçlar alabilmek için uygun bir alaşım türü seçmek kadar çevre şartlarını ve kaynak yöntemlerini seçmek de önemlidir. Titanyum ve alaşımlarının kaynağında argon veya helyumun kullanıldığı koruyucu gaz kaynak yöntemleri oldukça uygundur. CO₂ ve N₂ gibi gazlar titanyuma karşı ilgisiz kalmadıkları için kesinlikle kullanılamazlar. Oksiasetilen ve çubuk elektrodla yapılan kaynak yöntemleri de uygun değildir. Titanyum ve alaşımlarının kaynak kabiliyetinde alınacak çeşitli özel önlemlerin büyük rolü bulunmaktadır (Süataç, 1985).

3.1 Titanyum ve Titanyum Alaşımlarında Kaynak Bölgesinin Metalografik Olarak İncelenmesi

Ticari saflıktaki titanyum ve α alaşımları yapıdaki empüritelere bağlı olarak genellikle α fazı ve diğer fazlar olarak görülmektedir. Sadece yüksek saflıktaki titanyum, çökelen parçacıklar içermeyen bir α fazındadır. Mikroyapıdaki küçük değişiklikler her zaman mümkündür ve bunlar üretim nedeni ile oluşan tane boyutu ve şeklindeki değişiklikleri de içermektedir.

α alaşımlarında α - β alanından itibaren soğuma sonucu oluşan yapılarda farklılıklar mümkündür. Yapı daha sonra α yapısına sahip olan, fakat kaldıraç kuralına göre farklı kimyasal yapısı bulunan eş eksenli α ve dönüşmüş α' 'yı içerecektir.

α alaşımlarına β alanından itibaren su verme sonucu alaşımsız titanyuma benzer şekilde lamelli, zigzaglı bir yapı meydana gelir. Fakat alaşımlı titanyumda lamelleri görmek daha kolaydır. Oksijen veya azot diğer ara alaşım elemanları ile normal miktarlarda bulunursa iğnecikli bir dönüşüm yapısı sergilenir.

Karbon % 0,2 civarında ise TiC parçacıkları çöker. Hidrojenin oda sıcaklığındaki çözünübilirliği 30 ppm'den daha az ise TiH parçacıkları normal olarak mevcut olacaktır. Yeter miktardaki beta stabilizör elementlerin empüriteler halinde bulunduğu alfa alaşımları ve ticari saflıktaki malzemede az miktarda β fazı bulunabilir.

Kaynak dikişinin mikroyapısına bakılırsa 3 ayrı alan göze çarpar. Ergimiş bölge, ITAB ve esas metal ticari saflıktaki malzeme de yapı oldukça basittir. Kaynak işlemi bir döküm işlemi gibi görüldüğünde belli bir periyotta ergime, daha sonra ise soğuma esnasında katılaşmayı farkedilir. Tane boyu büyük ve yapı da dendritler halindedir. Normal miktardaki hidrojen ve oksijen yapıyı çok az etkilemekle birlikte yüksek karbon (% 0,2'nin üstünde) ergimiş bölge dışında TiC çökmesine neden olur. Sonuç ise çatlak oluşumuna olan eğilimdir.

ITAB ergime sıcaklığından oda sıcaklığına varana kadar TiC içerebilir. ITAB'ın dönüşüm sıcaklığını geçen kısmı dönüşmüş α , geri kalan bölge ise esas metalden daha büyük tane boyuna sahip eş eksenli α 'dır. Esas metalin soğuk şekillendirme nedeni ile uzamış şekildeki tanelere sahip kısmına kaynak yapıldığında esas metale yakın ITAB bölgesinde küçük boyutlu, eş eksenli α taneleri bulunacaktır.

Titanyum alaşımlarında kaynağın yapısı alaşım elemanlarına göre farklılık gösterir. Kaynak, alaşıma bağlı olarak değişik dönüşüm yapıları gösteren büyük taneli döküm durumunda olacaktır. Ek olarak alaşımın katı ve sıvı fazları arasında bileşim farkından dolayı da katılaşma esnasında segregasyon söz konusu olacaktır. Çeşitli mikroyapılarda çökelmiş parçacıklar ve artık β fazı da görülebilir (Metals Handbook, Vol.6, 1983; ASM Handbook, Vol. 2, Vol. 6, 1993).

3.2 Titanyum ve Alaşımlarının Kaynağında Ek Kaynak Metalinin Seçimi

Genel olarak kaynak ek metali ve ana metalin aynı bileşimde olması istenir. Ek kaynak metali, kullanılan kaynak yöntemine ve uygulama türüne (elle, otomatik, yarı otomatik) göre seçilir. Kaynak ek metali çubuk veya tel biçiminde olup standart bileşimleri Çizelge 3.2 de verilmiştir.

Çizelge 3.2 Titanyum ve alaşımlarının kaynağında kullanılan ek kaynak metallerinin bileşim yüzdeleri (Metals Handbook, Vol. 6, 1983)

AWS Sınıflandırması	Kimyasal Bileşim (%) (a)														
	C	O	H	N	Al	V	Sn	Cr	Fe	Mo	Nb	Ta	Pd	Ti	
ERTi-1 (b)	0,03	0,10	0,005	0,012	.....	.....	.....	.....	0,10	.....	.....	.....	.....	K	
ERTi-2	0,05	0,10	0,008	0,020	.....	.....	.....	.....	0,20	.....	.....	.....	.....	K	
ERTi-3	0,05	0,10-0,15	0,008	0,020	.....	.....	.....	.....	0,20	.....	.....	.....	.....	K	
ERTi-4	0,05	0,10-0,25	0,008	0,020	.....	.....	.....	.....	0,30	.....	.....	.....	.....	K	
ERTi-0,2Pd	0,05	0,15	0,008	0,020	.....	.....	.....	.....	0,25	.....	.....	0,15-0,25	.....	K	
ERTi-3Al-2,5V	0,05	0,12	0,008	0,020	2,5-3,5	2,0-3,0	.....	.....	0,25	.....	.....	.....	.....	K	
ERTi-3Al-2,5V-1 (b)	0,04	0,10	0,005	0,012	2,5-3,5	2,0-3,0	.....	.....	0,25	.....	.....	.....	.....	K	
ERTi-5Al-2,5Sn	0,05	0,12	0,008	0,030	4,7-5,6	.....	2,0-3,0	.....	0,40	.....	.....	.....	.....	K	
ERTi-5Al-2,5Sn-1 (b)	0,04	0,10	0,005	0,012	4,7-5,6	.....	2,0-3,0	.....	0,25	.....	.....	.....	.....	K	
ERTi-6Al-2Nb-1Ta-1Mo	0,04	0,10	0,005	0,012	5,5-6,5	.....	.....	.....	0,15	0,5-1,5	1,5-2,5	0,5-1,5	.....	K	
ERTi-6Al-4V	0,05	0,15	0,008	0,020	5,5-6,75	3,5-4,5	.....	.....	0,25	.....	.....	.....	.....	K	
ERTi-6Al-4V-1 (b)	0,04	0,10	0,005	0,012	5,5-6,75	3,5-4,5	.....	.....	0,15	.....	.....	.....	.....	K	
ERTi-8Al-1Mo-1V	0,05	0,12	0,008	0,03	7,35-8,35	0,75-1,25	.....	.....	0,25	0,75-1,25	.....	.....	.....	K	
ERTi-13V-11Cr-3Al	0,05	0,12	0,008	0,03	2,5-3,5	12,5-14,5	.....	10-12	0,25	.....	.....	.....	.....	K	
(a) Tek rakamlar maksimum değeri gösterir (b) Ana metale benzer kaynak için çok düşük ara yer katışkıları															
K:Geri kalan kısmı titanyumun oranını gösterir															

Kaynak bölgesinin tokluğunun mukavemetten daha önemli olduğu durumlarda, alaşımsız kaynak dolgu teli kullanılır. Düşük servis sıcaklıklarında kullanılan ELI türü ana metalden oluşturulan kaynak bağlantılarında dolgu metalinin ELI içeriği de düşük olmalıdır.

Ek kaynak metalinin kalitesi ve yüzey temizliği son derece önemlidir. Aksi halde, ana metal yüzeyine kaynak dolgu metalinden kirlilik geçebilir. Bu da kaynak dikiş kalitesini önemli ölçüde etkiler. Yaygın olarak kullanılan ve yüksek yüzey alanı/hacim oranına sahip olan tel

veya çubukların boyutları da çok önemlidir. Kaynak dolgu metalinde bulunan çatlak, pullanma gibi fiziksel hatalar yüzeyin kirlenmesine neden olurken, bunların giderilmesi de oldukça zor ve olanaksızdır. Tel ya da çubuk biçiminde olan dolgu metalleri özenle kontrol edilmeli ve uygun koşullarda depolanmalıdır (irin vd., 1997)



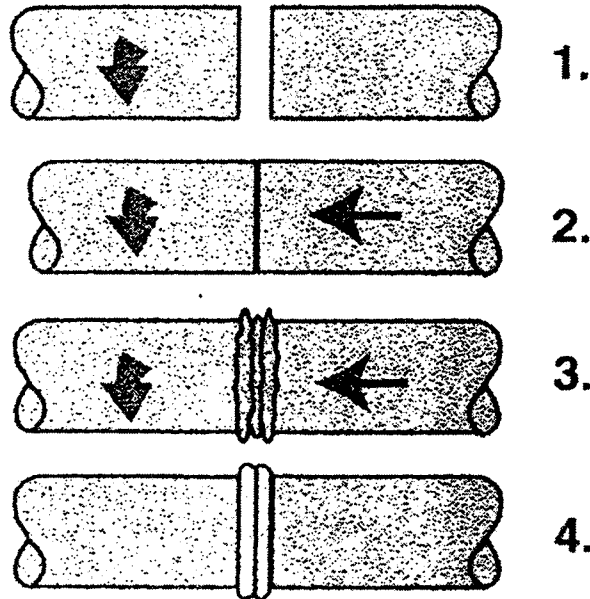
4. TİTANYUM VE ALAŞIMLARININ KAYNAĞINDA UYGULANABİLECEK YÖNTEMLER

Titanyum metalinin ve kaynağı için gerekli olan ekipmanların yüksek maliyetleri nedeni ile uzun yıllar boyunca bu metalin kaynağı yalnızca yüksek teknoloji merkezlerinde yapılmıştır. Aslında bu metalin kaynağı uygun prosedür ve teknikler uygulandığında oldukça kolaydır (Sharpe, 2000). Titanyum ve alaşımlarının kaynağında özel kaynak yöntemlerine ihtiyaç duyulduğu ve bunların kaynak kalitesini doğrudan etkiledikleri bilinmektedir.

4.1 Katı Hal Kaynak Yöntemleri

4.1.1 Sürtünme Kaynağı

Sürtünme kaynağı, iki metal parçasını birleştirmek için sürtünme tarafından üretilen ısıyı kullanır. Bu işlem esas olarak geniş, büyük çubukların ve boruların alın kaynağı için kullanılır. Şekil 4.1 sürtünme kaynağının prensip şemasını göstermektedir. İşlem sırasında dış bir ısı kaynağı kullanılmaz. Birleştirilecek parçaların uçları düşük bir basınçla biraraya getirilir. Hareketli ve sabit parçalar arasındaki sürtünme, kaynak oluşumu için gerekli ısıyı üretir. Metal yüzeyleri plastik hale geldiğinde döndürme hareketi durdurulur ve büyük bir basınçla birbirlerine bastırılır (Anık vd., 1999).



Şekil 4.1 Sürtünme kaynağının prensip şeması (Anık vd., 1999)

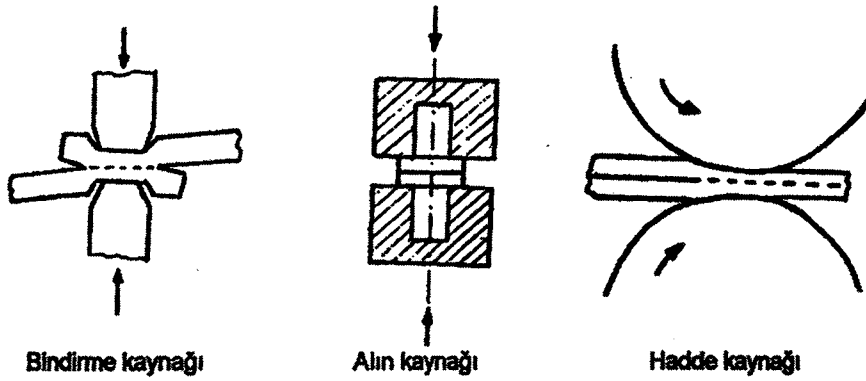
Kaynak ekipmanı, gerekli sıkıştırma aygıtlarından, parçalardan birini döndürme mekanizmasından ve sürtünen yüzeyleri birbirine bastırmak için bir bastırma düzeneğinden oluşur. Sürtünme kaynağı sırasında büyük oranda kıvılcım üretildiğinden çalışan personelin bunlardan korunması gerekir (Anık vd., 1999).

Sürtünme kaynağında ITAB çok dar olduğundan titanyum ve alaşımlarının kaynak edilmesi durumunda çok büyük avantaj sağlamaktadır. Parçalar birbirleri ile çok sıkı temasta olduklarından dikişi korumak için soygaz atmosferi gerekmez. Her ne kadar parçaları birbirine bastırırken oluşan çapak, hava ile kirlenmiş ise de daha sonra mekanik olarak alınacaktır. Titanyumun sürtünme kaynağında düşük temas basıncı ve yüksek dönme hızı tavsiye edilir (Vairis ve Frost, 1998).

4.1.2 Basınç Kaynağı

Bu kaynak yönteminde bir dış ısı kaynağı kullanılmaz. Soğuk basınç kaynağında, metalleri birleştirmek için büyük basınçlar kullanılır. Sadece yüzey molekülleri ısıtılır ve bir kaynak oluşturmak üzere birleştirilir. Bu yöntem genellikle alüminyum-alüminyum, bakır-bakır ve alüminyum-bakır gibi yumuşak metalleri birleştirmek için kullanılır. Güvenilir kaynak dikişleri elde edilir. Alın ve bindirme tipi birleştirmeler yapılabilir. Birleştirilecek metal yüzeyleri çok temiz olmalıdır (Anık vd., 1999).

Kaynağı oluşturan enerji, genellikle hidrolik preslerle sağlanan yüksek seviyeli basınçtır. Şekil 4.2, yöntemin prensip şemasını vermektedir. Kaynak, metalle temas halindeki kalıp yüzeyleri ve hidrolik basınç tarafından kontrol edilir (Anık vd., 1999).



Şekil 4.2 Basınç kaynağının prensip şeması (Anık vd., 1999)

4.1.3 Difüzyon Kaynağı

Difüzyon kaynağı, aynı veya farklı, çoğunlukla metal malzemelerin birleştirilmesinde kullanılır. Özellikle uçak-uzay ve nükleer teknoloji için geliştirilmiştir (Anık vd., 1999).

Bu yöntemde en önemli kaynak parametreleri; kaynak sıcaklığı, basınç süresi, şekil değiştirme oranı, yüzey kalitesi veya koruyucu atmosferdir. Kaynak sıcaklığı $0,7T_e(K)$ 'dir. Bu sıcaklık, atomların hareketini (difüzyon) ve birleştirilecek yüzeylerin temizlenmesini kolaylaştırır. Gerektiğinden yüksek sıcaklıklar, tane irileşmesine ve dayanımın düşmesine yol açar. Isıtma genellikle elektriksel indüksiyon, direnç ve yüksek frekans teknikleri ile gerçekleştirilir (Anık vd., 1999).

Kaynak basıncı $1-30 \text{ N/mm}^2$ 'dir. Yüksek sıcaklıkta etkiyen bu basınç, yüzeylerdeki pürüzlülük tepelerinin plastik şekil değişimini sağlar. Bu şekilde arttırılan temas yüzeyi, madde bağlarının oluşumuna yol açar. Kaynak basıncı, hidrolik, pnömatik veya elektrik olarak uygulanır. Kaynak süresi 10 dakika ile birkaç saat arasında değişebilir (Anık vd., 1999).

Titanyum kendisi ile aynı veya farklı metallere bu yöntemle kaynak edilebilir. Yöntemde yüzeyler birbiri ile temas ettirilir, daha sonra ergime derecesinin birkaç yüz derece altına kadar ısıtılır.

Difüzyon kaynağı iki sınıfa ayrılır; bunlar katı hal difüzyon kaynağı ve geçici sıvı faz difüzyon kaynağıdır. Bunlardan ilkinde katı hal difüzyonu sözkonusu iken, ikincisinde ötektik oluşumu söz konusudur. Daha sonra bu düşük ergime dereceli ötektik ergir ve diğer metal yüzeyine nüfuz eder. Sadece katı hal difüzyonunun sözkonusu olduğu hallerde (Ti-Zr) yüzeyler iyice temizlenmelidir.

Ti-5Al-2,5Sn malzemesini kendisi ile kaynak ederken $1010 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de 1 saat vakum altında tutmak gerekir. Esas metalle aynı kesme dayanımı elde edilirken temas yüzeylerinde tane kabalaşması ve dolayısı ile ayırım hattının kaybolduğu gözlenmektedir (Süataç, 1985).

4.1.4 Ultrason Kaynağı

Ultrasonik kaynak yönteminde parçalar, ultrasonik alandaki mekanik titreşimler ve hafif bir basınç yardımı ile birleştirilir. Bu amaçla bir elektro-akustik dönüştürücüden yararlanılır. Birleştirilecek parçalar bir örs üzerindedir. Sonotrod yardımı ile teğetsel titreşimler parçaya aktarılır. Sıkıştırma kuvveti ve kaynak yüzeyleri arasındaki bağıl hareketlerin genliği yeterince yüksek ise akma başlar. Kir, su ve oksit filmleri yırtılır. Yüzeyler ısınır, düzlenir, birbirlerine yaklaşarak bağ kuvvetleri etkin hale gelir. Isınma sadece çok ince bir tabaka ile

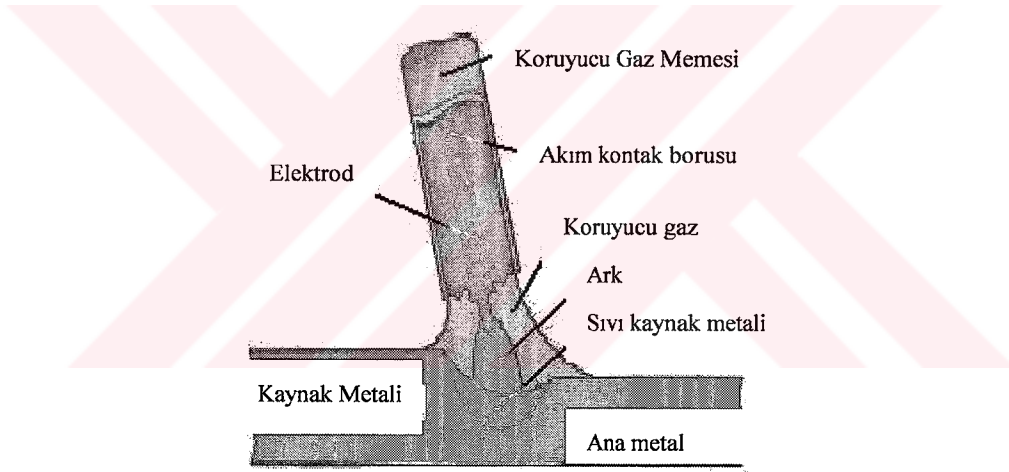
sınırlıdır (Anık vd., 2000).

Bu yöntemle yumuşak metallerden ince sacların, folyoların veya tellerin, daha kalın çelik, demirdışı metaller, cam veya seramik gibi malzemeler üzerine kaynağı yapılır. Bu kaynak yöntemi titanyuma uygulanabilmektedir. Ti-6Al-4V malzemenin kaynağında yaklaşık 980 °C sıcaklık elde edilmektedir (Anık vd., 2000).

4.2 Ergitme Kaynak Yöntemleri

4.2.1 MIG (Metal İnert Gaz) Kaynak Yöntemi

MIG/MAG kaynağı, koruyucu gaz kullanılarak yapılan (gazaltı) ark kaynak yöntemleri arasında yer alır. Koruyucu gaz türüne göre MIG (Metal İnert Gaz) veya MAG (Metal Aktif Gaz) kaynağı olarak ayrılır. MAG kaynağı kendi içinde kullanılan koruyucu gaz türüne göre MAGC (CO₂) kaynağı ve MAGM (Karışım gaz) kaynağı olarak ikiye ayrılır (Anık vd., 1999).



Şekil 4.3 MIG/MAG kaynağının şematik görünümü [3]

Şekil 4.3 MIG/MAG kaynağının prensibini vermektedir. Bu yöntemde ark, eriyen bir tel elektrod ile iş parçası arasında yanar; koruyucu gaz inert (soy) ve aktif olabilir. Bir tel makarasından gelen tel üfleçe iletilir. Telin bu dış ucunda akım kontak borusu yer alır. Kontak borusu, gaz memesinin içinde eşeksenli olarak bulunur. Kontak borusunun alt ucundan arka kadar olan tel boyunun uzunluğu mm cinsinden tel çapının 10-12 katı olmalıdır. Kontak borusunun mesafesi, serbest tel boyu ile ark boyunun toplamıdır. Ark ve kaynak bölgesi, gaz memesinden çıkan koruyucu gaz tarafından örtülür (Anık vd., 1999).

MIG/MAG kaynağının uygulanma oranı, diğer ergitme kaynak yöntemleri arasında günümüzde %70'in üzerine çıkmıştır. Kısmi veya tam mekanize veya otomatik olarak

uygulanabilir. Günümüzde kaynak robotlarının en çok uygulandığı yöntemler arasındadır (Anık vd., 1999).

MIG kaynağı normal olarak kalınlığı 3 mm veya daha fazla titanyum ve titanyum alaşımlarına uygulanabilir.

MIG kaynak yönteminde arktaki sıçrama kayıpları fazla olduğundan kaynak kalitesi, ark stabilitesi düşmekte, dikişte hatalar ve kirlenme oluşmaktadır. Çoğu kez parça kalın olsa bile MIG yöntemi yerine TIG yöntemi tercih edilmektedir.

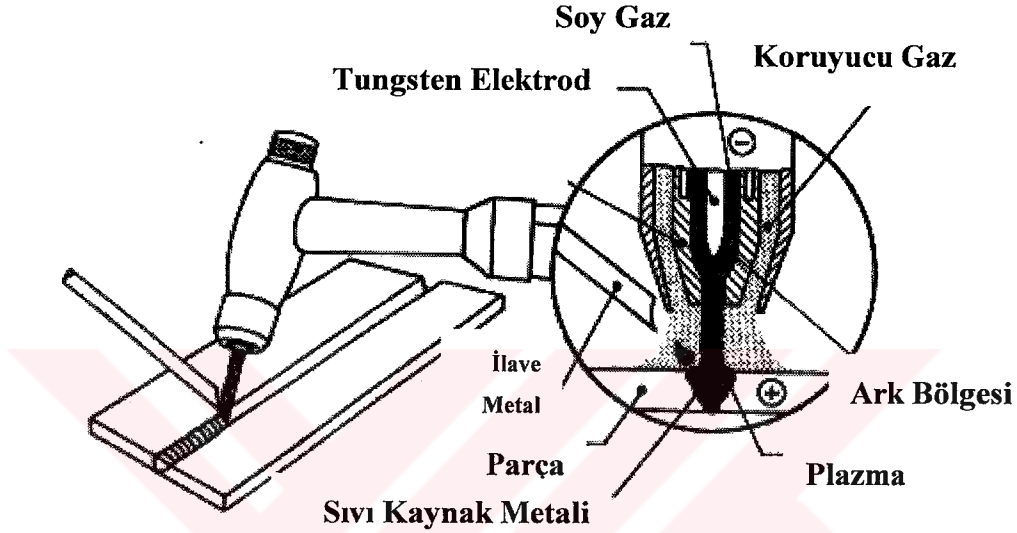
MIG kaynak yönteminde ağız hazırlama ve temizlik işleri TIG ile aynıdır, koruyucu gaz sistemi de aynı şekilde birinci, ikinci ve geri koruma şeklindedir. MIG kaynağında kirlenmeyi ve poroziteyi önlemek için ikinci koruma yönlendirici koruma ve kuyruk koruma olarak ikiye ayrılır. Yönlendirici koruma sıçrayan parçacıkların kaynak bölgesinde ergimeden önce oksitlenmesini önler. Çizelge 4.1 de Ti6Al4V plakanın elle ve otomatik MIG kaynağında kullanılan kaynak parametrelerini göstermektedir (Süataç, 1985; ASM Handbook, Vol.6, 1993).

Çizelge 4.1 Ti6Al4V plakanın elle ve otomatik MIG kaynağındaki kaynak parametreleri

	Elle Kaynak	Otomatik Kaynak
Plaka Kalınlığı (mm)	19	19
	50	50
Akım (A)	310	360
	310	325
Gerilim (V)	38	45
	38	33
Kaynak Hızı (m/dak)	-	0.37
	-	0.62
Torç	18	23
	18	-
İkinci Koruma	-	26
	-	-
Geri Koruma	-	2
	-	-

4.2.2 Plazma Kaynağı

Plazma kaynak yöntemi, ergimeyen bir tungsten elektrod ve soy bir koruyucu gaz yardımı ile yapılır. Ark özel bir torç yapısı tarafından sınırlanmış ve büzülmüştür. Arkın sınırlanması, özel torç konstrüksiyonu sayesinde gerçekleşir. Bu mekanik sınırlamaya eş olarak ark, meme dışından akan soğuk koruyucu gaz tarafından da termik olarak büzülür. Şekil 4.4 de plazma kaynağının prensip şeması verilmiştir (Anık vd., 1999).



Şekil 4.4 Plazma kaynağının şematik görünümü (Todd vd., 1994)

Plazma kaynak donanımı, TIG kaynak donanımına benzer. Akım üretici olarak redresör veya düşen statik karakteristikli inverter kullanılır. Yüksek ısıl yükleme nedeniyle elektrod, akım üreticinin negatif kutbuna bağlanır. Koruyucu gaz olarak Ar/He karışımı kullanılır (Anık vd., 1999).

Plazma kaynağında, TIG kaynağının aksine tungsten kalıntısına rastlanmaz. Plazmanın basıncı nedeniyle kök dikişlerinde sarkma oluşması mümkündür. Burada plazma gazının debisinin düşürülmesiyle sorun çözülebilir (Anık vd., 1999).

Kalın sacların anahtar deliği tekniği ile plazma kaynağında, dikiş sonunda akım düşürülerek ve plazma gaz basıncı azaltılarak anahtar deliğinin kapatılması gerekir. Aksi halde gözenekli bölgeler oluşabilir (Anık vd., 1999).

4.2.3 Elektron Işın Kaynak Yöntemi (EB Kaynak Yöntemi)

Elektron ışınları ile kaynak uygulaması, uygun bir enerji kaynağından yararlanılarak milimetrenin onda biri düzeyinde kontrol edilebilen elektron demetinin birleştirilecek bölgeye

hızlandırılarak gönderilmesi esasına dayalı, ergitme ile kaynak dikişleri oluşturulan bir birleştirme yöntemi olarak tanımlanabilir (Gültekin, 1991).

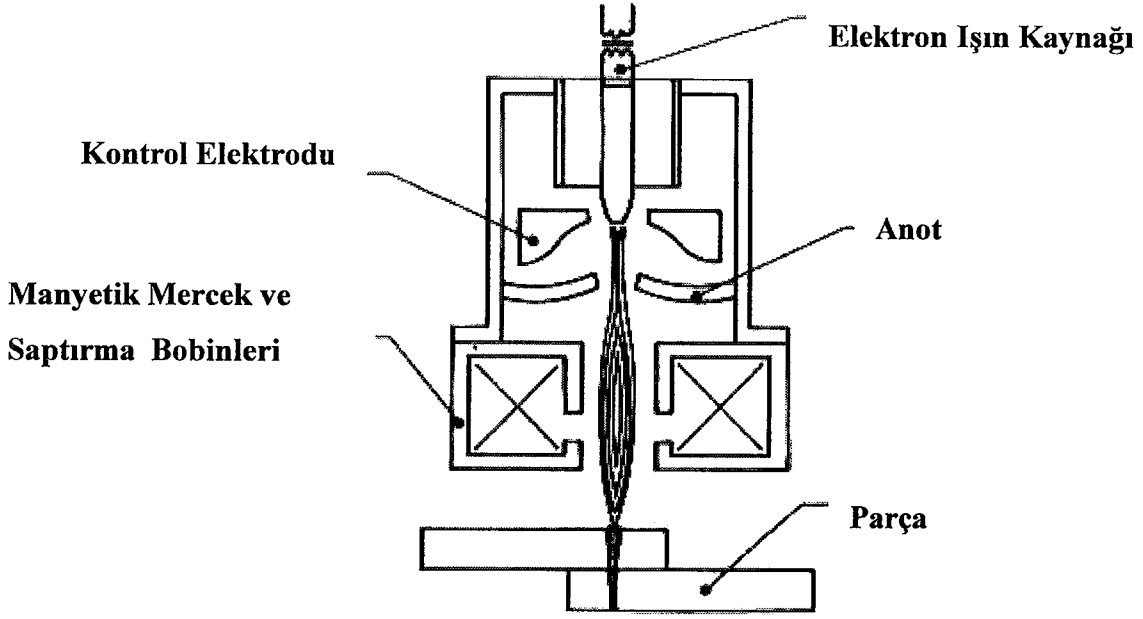
Yöntemin diğer ergitme esaslı kaynak uygulamalarına göre tercih edilmesinde başlıca etkenler arasında; şekil ve boyutsal hassasiyet, birleştirmede ulaşılan dayanım, kaynak kabiliyeti düşük eş, benzer ya da farklı malzemelerin birleştirilmesine olan yatkınlık ve diğer koşullara bağlı olarak ortaya çıkan ekonomiklik sayılabilir (Gültekin, 1991; Anık vd., 2000).

Elektron ışın kaynak yöntemi ile tüm eş malzemelerin birleştirilmesinde herhangi bir zorluk bulunmamaktadır. Yüzeylerde bulunabilecek bir oksit tabakası da bir engel oluşturmamaktadır. Kaynak işlemi vakum ortamında yapıldığı için işlem sürecinde bir oksitlenme ortaya çıkmamaktadır. Bu yöntemle özellikle atmosfere karşı duyarlılığı fazla olan titanyum ve alaşımlarının kolaylıkla ve kusursuz birleştirilmeleri mümkün olmaktadır (Gültekin, 1991).

Yöntemde birleşme bölgesindeki ergime oranlarının ayarlanabilme serbestliği de bulunmaktadır. Bu özellik, farklı malzemelerin birleştirilmesinde daha büyük anlam taşımaktadır. Farklı malzemelerde, eş sürede ergime sıcaklıklarına ulaşamaması ya da malzemelerden birinin daha iletken olması engelleri, ışın demetinin uygun tarafa kaydırılması ile ortadan kaldırılmaktadır (Gültekin, 1991).

Bu kaynak yöntemi titanyum malzemelerin kaynağında oldukça avantajlı bir yöntemdir. Parçalar, içinde 10^{-4} mmHg civarında vakum bulunan bir kamaraya yerleştirilir ve kaynak edilecek kısım yüksek yoğunluklu elektron bombardımanına tabi tutulur. Çok dar bir alanda yüksek enerji yoğunluğundan dolayı dikişteki hata oranı oldukça düşüktür. Sistemin ilk kuruluş maliyeti oldukça yüksek olduğu için ticari uygulamalarda bu bir engel oluşturmaktadır. Günümüzde üretim hacminin büyük olduğu uygulamalarda tercih edilmektedir. Son yıllarda vakum gerektirmeyen EB kaynağı üzerinde çalışılmaktadır.

EB kaynak yönteminin titanyum ve alaşımlarına uygulanması özellikle uçak sanayiinde karşımıza çıkmaktadır. Örnek olarak kanatların gövdeye bağlantı yerleri uçakta en önemli yerlerden biridir. Bu kısım düşük bir alana sahip olmalı, dayanımı yüksek olmalıdır. Bu amaç için Ti6Al4V malzeme seçilmiştir. Bu malzeme bünyesinde iyi korozyon direnci ve iyi sürünme özellikleri taşımaktadır. Bütün bunların dışında da titanyum yüksek statik ve dinamik dayanıma sahiptir. Ağırlığına göre maksimum çekme dayanımı ve yorulma dayanımı çok iyidir. Bunun dışında Ti6Al4V alaşımı tavllanmış durumda 981 N/mm^2 çekme dayanımı ve 883 N/mm^2 akma dayanımı gösterebilmektedir.



Şekil 4.5 Elektron ışın kaynağı cihazının şematik görünümü (Todd vd., 1994)

Titanyum parça TIG kaynağı veya plazma kaynağı ile de birleştirilebilir. Ancak her iki teknikte de özellikle çok pasolu durumlarda ITAB çok büyüktür. Öte yandan EB kaynağı yapılmış dikiş dar ve dikdörtgen şeklindedir. Sonuçta da riski oldukça az, distorsiyon olmamış parçalar elde edilmektedir. Dikişin statik dayanımı esas metalle aynı iken, dinamik dayanımı esas metalinkinin yaklaşık % 60'ıdır. EB kaynağında yüksek gerilim donanımı ile çok dar dikişler elde edilebilir.

Yüksek güçlü, düşük gerilimli ışınları kalın kesitlerde dahi çok kaliteli kaynak dikişleri elde edecek şekilde ayarlamak için modern cihazlar geliştirilmiş ve kullanılmaktadır.

Dar kaynak dikişi elde etmek için ışın çok hassas pozisyonlanmalıdır. Bu nedenle; video kamerası ve elektronik gözleyiciye ihtiyaç vardır. Böylece yüksek kaynak hızlarında karmaşık parçalar bile aynı mükemmellikte kaynak edilebilir.

Kaynak dikişinin genişliği çok az olduğu için parçalar arasındaki aralık 1/10 mm'den daha az olmalıdır. Bu yüzden kaynak yapılacak parçalar çok hassas bir şekilde tutturulmalı ve bu tutucular kaynak esnasında oluşan ısıya rağmen bu ısıyı sağlamalıdır. Tutucular ferromanyetik olmayan bir malzemeden yapılmalıdır. Aksi halde ışınların saçılmasını önlemek mümkün olmaz.

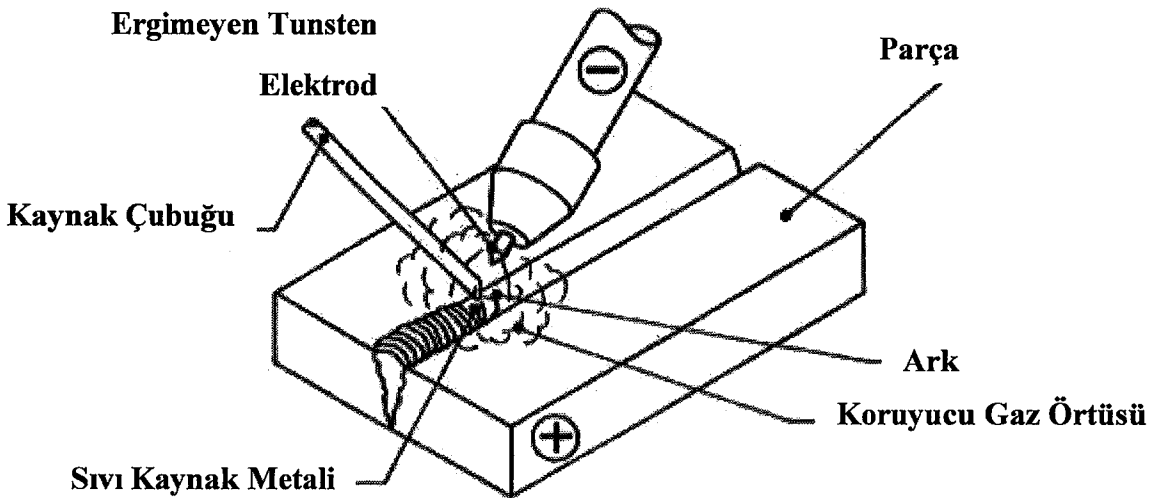
Kaynağı yapılan parçaların temizlenen ve dağlanan alınları tutucuya monte edilmeden önce asetonla tekrar temizlenir. Daha sonra parça tutucuya bağlı durumda kamaraya yerleştirilir; kamara kapatılır ve pompa çalıştırılır. Kaynak parametreleri bilgi formundaki testler sonucu elde edilmiş verilere göre programlanır. Işın kaynağı kamara ve gözleyici ile pozisyonlanır. Pozisyonlama küçük punta kaynakları ile denenir ve ardından kaynak yapılır.

EB kaynağının maliyeti klasik kaynak yöntemleri ile kıyaslandığında arada büyük fark görülmektedir. Bu nedenle kaynak maliyetini düşürmek için çeşitli önlemler alınabilir. Düz ve eş eksenli simetrik dikişler, bükümlü olanlardan daha kolay kaynak edilir. Işın kaynağının dikiş boyunca pozisyonlanması daha kolaydır. Bu yüzden dizayn yapılırken bükümlü dikişlerin sayısı azalmalı, dikiş pozisyonları optimize edilmelidir.

Sonuç olarak EB kaynak yönteminin titanyum ve alaşımlarında uygulanmasında çok başarılı sonuçların alındığını fakat maliyet faktörünü sürekli olarak gözönünde tutmak gerektiği söylenebilir (Süataç, 1985; ASM Handbook, Vol.6, 1993).

4.2.4 TIG (Tungsten İnert Gaz) Kaynak Yöntemi

TIG kaynağının prensibi Şekil 4.6 da gösterilmiştir. Ark, tungsten ergimeyen bir elektrod ile iş parçası arasında yanar. Tungsten elektrodla eşeksenli olarak beslenen koruyucu gaz (argon, helyum) hem ergimiş kaynak banyosunu hem de elektrodu korur. Kaynak ilave malzemesi olarak, kaynak bölgesine elle beslenen çubuk formundaki teller kullanılır (Anık vd., 1999).



Şekil 4.6 TIG kaynağının şematik görünümü (Todd vd., 1994)

Titanyum ve alaşımlarının kaynağında TIG kaynağı genellikle kullanılan kaynak yöntemidir ve birçok malzemenin kaynağında olduğu gibi titanyum malzemenin kaynağında da oldukça iyi sonuçlar vermektedir. Gerekli önlemler alındığında, hassas çalışılıp temizliğe önem verildiğinde ve hassas ayarlı, iyi kaliteli bir kaynak makinesi kullanıldığında kaynağın sonucundan endişe etmemek gerekir. Bu yöntemle dar bir alanda yüksek ısı yoğunluğu elde edilir. Sonuçta da yüksek kaynak hızlarına ve yaklaşık minimum deformasyona ulaşılır. Kullanılan gazın kaynak kalitesindeki önemi çok büyüktür ve bol miktarda kullanılmalıdır.

Çelik, alüminyum gibi malzemelerin kaynağında olduğu gibi yöntem aynen uygulanırsa dikiş kalitesi düşük olmaktadır. Bunun esas nedeni üfleçten gelen gaz miktarının titanyum malzemenin kaynağı için yeterli olmamasıdır. En iyi sonuçlar soygazla doldurulmuş odacıklarda elde edilir. Buna rağmen korumalı kamara dışında yapılan kaynaklarda da çok iyi sonuçlar alınabilmektedir. Açık havada (odacık dışında) yapılan kaynaklarda en büyük problem dikişin korunmasıdır (Metals Handbook, Vol.6, 1983; ASM Handbook, Vol. 2, Vol. 6, 1993; Lathabai vd.,2000).

Koruma 3 kısıma ayrılabilir;

- a- Birinci koruma
- b- İkinci koruma
- c- Geri koruma

Birinci koruma doğrudan üfleçten gaz iletimi ile yapılan korumadır. Burada da üflecin çanağının çapına dikkat edilmelidir. Titanyumun kaynağında kullanılabilecek çanak çapları 13-19 mm arasında olabilmektedir. Çanağın geniş olması ve içinde basamak içermemesi gerekmektedir. Bu şekilde gazın dalgalanması sonucu havanın dikişe karışması önlenmiş olur. Yapılan çalışmalar, Ø 0,8 mm elektrod için Ø 14 mm ve Ø 1,6 mm elektrod için Ø 19 mm çanağın en iyi sonuçları verdiğini göstermektedir. Plastik çanaklar kullanılmamalı yerine seramik çanaklar tercih edilmelidir.

İkinci koruma katılaştıran ve sıcaklığı azalmakta olan kaynak dikişi ile ITAB için geçerli olmaktadır. Titanyumun ısı iletkenliği düşük olduğundan kaynak dikişi karbonlu çeliklerde olduğundan daha uzun süre sıcak kalacaktır. Bu hem avantaj hem de dezavantaj olmaktadır. Örneğin ITAB daralacak ve sadece dikişin her iki yanında ince bir şerit halinde kalacaktır. Diğer avantaj ise üflecin önündeki kısımda koruma gereksiz olacaktır. Bunun yanı sıra düşük ısı iletkenliğin sonucu olarak korunması gereken dikiş uzunluğu bir dezavantajdır.

Geri koruma düzeneği kaynak dikişinin alt kısmının korunması için geliştirilmiştir. Tam nüfuziyet halinde kök pasonun korunması gerekmektedir. Tam nüfuziyetin olmadığı durumlarda, dikişin alt kısmı 300°C'lik sıcaklık seviyesinin üstünde bulunduğu anda koruma şart olmaktadır.

Geri koruma düzeneğinde malzeme olarak bakır kullanılmaktadır. Alüminyum da kullanılır. Fakat bu malzeme düşük ergime noktasına sahip olduğu için tehlikelidir. Isının düzgün bir şekilde dağılması için blok titanyum ile temasta olmalıdır. Bloğun yeri de çok önemlidir. Kaynak dikişine mümkün olduğunca yakın olmalıdır. Bu nedenle de malzeme kalınlığı arttıkça kullanışlığında azalma olur.

Yarı otomatik TIG kaynağının uygulamasında düşük ısı girişli ark kullanılır. Yüksek ısı girişi için tam otomatik kaynak yöntemi tercih edilmelidir.

Otomatik TIG kaynak yönteminde aynı şekildeki gaz koruma düzeneklerinden yararlanılabilir. Kaynağı yapılacak parçalar ya bağlayıcılarla pozisyonuna göre sabitlenir ya da çok hafif serbest bırakılır ve izleme sistemine sahip kaynak kafası kullanılarak kaynak yapılır. Kalın parçalarda sıkı bağlama uygun olmazken ince parçalarda gereklidir. Kaynak üfleci dikiş boyunca sabit uniform bir hareket yapacak şekilde olması için bu hareketi verecek bir taşıyıcıya bağlanmaktadır. Birinci ve ikinci koruma aynen elle kaynaktaki gibidir. Otomatik TIG kaynağında çevresel dikişlerde meydana gelen sorunlar düz dikişlerde olanlardan fazladır. Kaynaklar düz yuvarlanır pozisyonda olur. Kaynak tekniği açısından kullanılan gazlar çok önemlidir (Metals Handbook, Vol.6, 1983; ASM Handbook, Vol. 2, Vol. 6, 1993; Lathabai vd.,2000).

4.2.4.1 Koruyucu Gazlar

Titanyumun koruyucu gaz altındaki kaynağında sadece argon, helyum ve bunların karışımı kullanılmaktadır. Helyum argondan daha pahalı olmasına rağmen verilen bir kaynak akımı için daha fazla ark gerilimine dayanıklıdır. Argon ince sacların kaynağında etkili olurken helyum derin nüfuziyet özelliğinden dolayı kalın parçaların kaynağında da kullanılır. Bu özelliğinin bir sonucu olarak helyumda kaynak hızı daha büyük olmaktadır.

Argon havadan daha ağırdır. Düz pozisyonlarda kaynak yapılırken argon kaynak bölgesinde kalma eğilimine sahiptir. İki gazın karışımını kullanırken az olan gazın miktarı en az karışımın %25'i olmalıdır (Metals Handbook, Vol 6, 1983).

Koruyucu gazın saflığı kaynak kalitesinde çok etkilidir. Hem hava hem de su buharı oldukça

zararlıdır. Ticari saflıktaki gazlar kullanım amacına uygundur. Ayrıca donanım sistemindeki hataların ve sızıntıların problem olmamasına dikkat edilmelidir. Koruyucu gazlarda önemli faktörlerden biri onların yoğunlaşma noktasıdır (Metals Handbook, Vol 6, 1983).

4.2.4.2 İlave Metal (Kaynak Teli)

Titanyumun kaynak kabiliyetine etkileyen diğer bir faktör de ilave metaldir. Titanyum malzemeyi kaynak ederken bu malzemenin özelliklerine uygun ilave metali seçmek gerekmektedir. Bu nedenle ilk önce ilave metallerin sınıflandırılmasının ve yapılarının bilinmesi gerekmektedir.

3 mm'den kalın parçaların TIG kaynağı ile birleştirilmesinde kaynak teli kullanılmalıdır. Elle TIG kaynağında kaynak teli sürekli verilmelidir. Kaynak metali de kullanılma anında ısı etkisi altında kaldığından havanın etkisi ile kirlenmektedir. Bu durumda tekrar kullanım anında kaynak dikişini de kirleteceği için kullanımdan önce telin ucundan yaklaşık 10-15 mm kesilmelidir (Metals Handbook, Vol 6, 1983).

4.2.4.3 Kaynak Makinesi

TIG kaynağı için DC kaynak makinası tercih edilir. Kutuplama düz olmalıdır. Böylece derin penetrasyon ve dar dikiş elde edilir. Ark boyunda olduğu gibi kaynak akımı hassas ayarlanabilmelidir. Çünkü titanyumun kaynağında 5-10 A'lık akım değişimi kaynak kalitesini çok etkiler. En önemli ünitelerden biri de yüksek frekans ünitesidir. Böylece elektrodun parçaya temas etmesine gerek kalmadan ark başlatılabilir. Öte yandan kaynağın bitirilmesi durumunda üflecin parçadan uzaklaştırılmasına gerek duyulmadan ark söndürülebilir. Aksi takdirde dikiş atmosferik kirlenme etkisinde olacaktır. Elle kaynak yöntemi ayak kumandalı akım kontrol pedalı ile kombine edilir. Bu pedal sayesinde akımı kademeli olarak azaltmak mümkündür. Sabit veya hafif yükselen tip karakteristiğe sahip kaynak makineleri ile ark stabilitesi daha iyi sağlanmaktadır (Metals Handbook, Vol.6, 1983; ASM Handbook, Vol. 6, 1993).

4.2.4.4 Ark Boyu

Paslanmaz çelikte ve nikel alaşımlı malzemelerde olduğu gibi kaynak için maksimum ark boyu (ilave metal kullanmadan) yaklaşık olarak elektrod çapına eşit olmalıdır. Ark boyu büyüdükçe türbülans tehlikesi artar. Ayrıca dikişin genişliği kısa ark boyuna göre daha büyük olur. Kaynak teli kullanıldığında ark boyu elektrod çapının 1 ½'si kadardır (Metals Handbook, Vol 6, 1983).

4.2.4.5 Koruyucu Gaz Kamaraları

TIG kaynak yönteminin titanyuma uygulanmasının hem kamara (odacık) içinde hem de kamara dışında olabilir. Bu kamaralar metal veya plastik olabilmektedir. Parça kamara dışında kaynak edilmek için çok karmaşık ise bu tip kamaralar kullanılır. Kamaralar sayesinde çok iyi bir kaynak atmosferi sağlanır ve elle kaynak yapmaya çok elverişlidir. İlk kademede hava tahliye edilir daha sonra argon veya helyum ile doldurulur. Kaynakçı kamaraya tesbit edilmiş eldivenler sayesinde elini içeri sokabilir; üfleci, ilave metali tutarak kaynak işlemini yapar. Bu sırada içeri hava girme tehlikesi de yoktur.

Genel olarak metal kamaralarda kaynak yaparken kaynak üfleçinden koruyucu gaz gelmesi gerekmez ve kamara atmosferi korunursa çok iyi sonuçlar elde edilir. Buna rağmen uzun dikişlerde koruma kapasitesini arttırmak için üfleçten gaz verilmektedir. Metal kamaralar pahalı olmalarına rağmen uçak sanayiinde kullanılmaktadır.

Bu tip soygaz kamaralarında kaynaktan önce atmosferi denemek için bir parça titanyum kaynak edilir. Şartlar uygunsa kaynağa geçilir. Burada şart olarak kaynağın rengi ele alınmaktadır. Ayrıca soygaz atmosferini kontrol etmek için bir tungsten flaman ısıtılır ve kamarada gezdirilir. Flamanın rengindeki herhangi bir değişme sıcaklık azalmasını gösterir.

Sabit veya sökülebilir plastik kamaralar üretimin küçük, parçaların büyük ve karmaşık olduğu durumlarda elle kaynak yapmada çok uygundur. Sabit plastik kamaralar helyum veya argonla kamara hacminin 5-10 katı kadar doldurulur. Sökülebilir tiplerde gaz ihtiyacı daha azdır. Plastik kamaranın avantajı ucuz olması ve parçanın kamara dışında da görünebilir olmasıdır. Buna karşın içerideki gazın dışarı sızma ihtimali büyük olduğundan dolayı atmosfer kontroluna önem verilmelidir. Genellikle üfleçten gaz verilmesi gerekir. Kamaralara mekanik donanımlar ilavesi ile otomatik kaynak gerçekleştirilmektedir. Bu tip kamaralarda kaynakçının hareket sahası daraldığından kaynak işlemi zorlaşır (Metals Handbook, Vol.6, 1983; ASM Handbook, Vol. 6, 1993).

4.2.4.6 Kaynak Ön Temizliği

Titanyumun kaynağında kaynak yapılacak yerin temizliği çok önemlidir. İyi bir kaynak elde etmek için kaynak ağzı ve ağzın her iki yanına doğru 25 mm kadar olan bölge çok iyi temizlenmelidir. Temizlik işlemi kaynak ağzındaki oksit tabakasının durumuna bağlıdır.

Parçayı işleme sırasında oluşan yağ ve kir tabakası çıkarılmalıdır. Üzerinde çapak olmayan metal sadece yağ gidermeye tabi tutulur. Çapak varsa yağ gidermeden sonra bunlar çıkarılır.

Yağ giderme işlemi; buhar temizleme, alkali temizleme, buğu tatbiki, çözücü ile temizleme şeklinde olabilmektedir (Metals Handbook, Vol 6, 1983).

Buğu tatbiki yönteminde klorlu çözücüler yerine toluen tercih edilir. Çünkü klorlu çözücülerden oluşan artık maddeler çatlamaya neden olabilir. Büyük parçalarda çözücü ile temizleme yöntemi kullanılır. Bunlar metil etil keton, toluen aseton ve diğer klorsuz çözücülerdir. Metil alkolün uçak sanayiinde kullanılması yasaklanmıştır. Kaynak ağzı kaynaktan önce lif bırakmayan bir bez veya selulozik sünger ile çözücü tatbik etmek sureti ile temizlenmelidir. Kauçuk eldiven kullanılmamalıdır.

Hafif oksitlenmiş bölge yağ giderme işlemine tabi tutulduktan sonra dağlanmalıdır. %4 HF ve %40 HNO₃ tipik bir örnektir. Dağlama yaparken hidrojenin titanyum üzerindeki olumsuz etkisini gözönüne almak gerekir. Endüstriyel tecrübeler bize %30 veya daha fazla HNO₃ içeren asit banyosu kullanımının uygun olduğunu göstermiştir. Ağırlığın %30'u oranında HNO₃ kullanılırsa HNO₃ / HF oranı 15-1 arasında değişir. Eğer HNO₃ miktarı %30 ve HNO₃ / HF oranı 10-1'in altına düşerse aşırı hidrojen toplanması mümkündür (Metals Handbook, Vol 6, 1983).

Hafif okside olmuş kısımlar paslanmaz çelik tel fırça ile temizlenebilir. Buna karşın kaynağın korozyon direnci önemli olduğu durumlarda bu temizlikten sonra asitle dağlama gerekir. Kirlenme tehlikesinden dolayı çelik yün kullanılmamalıdır (Metals Handbook, Vol 6, 1983).

500°C'nin üzerindeki sıcaklıkta oluşan oksit tabakası daha kalındır. Dolayısıyla bunu çıkarmak için daha karmaşık bir işlem gerekir. Kimyasal işlem, tuz banyosu veya mekanik işlemler kullanılır. Tuz banyoları esasen sodyum hidrat oluşturmak için hidrojen ve oksitleyici eklenmiş sodyum hidroksittir. Temizlik yönteminin seçimi parçaların boyuna, şekline ve uygulanabilirliğine bağlıdır (Metals Handbook, Vol 6, 1983).

4.2.4.7 Kaynak Sonu Temizliği

Kaynak sonunda renklenmiş kısımlar ortadan kaldırılır. Taşlama veya parlatma yöntemleri bu amaçla kullanılabilir. Kimyasal temizlik yöntemleri de kullanılabilir. Yüzey taşlama ince çukurcuklar oluşturabileceğinden dolayı buralarda çentik etkisi söz konusu olur ve dayanım düşer. Taşlamadan sonra yapılan parlatma işlemi bu etkiyi azaltır.

Kaynak sonunda dikişin rengi ikinci koruyucu gazın etki derecesini gösterir ve kaynağın kirlenmesinde (bulaşmasında) bir ölçü niteliğindedir. Parlak gümüş rengi iyi bir koruma olduğunu gösterir. Buna karşılık koruma iyi olsa bile eğer gaz saf değilse ve malzeme

temizlenmemişse renklenme barizdir.

TIG kaynak yönteminin titanyuma uygulanmasında kaynak dikişindeki boşluk teşekkülü; bir problem teşkil etmektedir. Bu boşluklar soğuma sırasında meydana gelen gaz habbecikleri nedeni ile olmaktadır. Boşluk oluşumunu kaynak tekniği de etkilemektedir.

Hidrojen eğer uygun sınırlar içerisinde ise kaynak dikişinde porozite ihtimali düşer. Birçok şartnamede titanyum içindeki hidrojen miktarı 20 ppm olarak sınırlanmaktadır. Bu sınırlar içinde hidrojen ihtiva eden malzemede boşluk hemen hemen görülmez. Nem de aynı sebepten porozite oluşumuna olanak verir ve bu yüzden bir ön ısıtma tavsiye edilmektedir.

Kaynak ağzının temizliği, porozite üzerine etkisi olan faktörlerden biridir ve temizlik ne kadar iyi olursa porozite o kadar az olur. Kalın kesitlerde ve çok az poroziteye izin veren yerlerde çok hassas temizlik gerekmez. Yabancı maddelerde porozite oluşumuna imkan sağlayanların sayısı sınırsızdır. Örnek olarak taşlama artıkları, parmak izleri, eldivendeki lifler vb. kaynaktan önce kaynak ağzı ile temasta olurlarsa poroziteye neden olurlar.

Titanyum levhalar kesildikten sonra kenarında oluşan çapaklar temizlenmezse poroziteye sebep olur. Bu nedenle bunlar çıkarılmalıdır. Kaynak atmosferindeki kükürt veya hava, dikişi gevrekleştirir fakat porozite oluşturmaz.

Kaynaktan önce kaynak ağzının kimyasal ve mekanik yöntemlerle temizliği iyi sonuçlar verir. En çok kullanılan kimyasal yöntem hidroflorik asit ile dağlamaktır.

İlave metal olarak kullanılan telin, tel çekme işlemi ile imali sırasında oluşan yüzey ve yüzey altı toplanmalar porozite oluşturur. Bu toplanmalar işlem anında kullanılan yağlar nedeniyledir. Bu nedenle dikkat edilmelidir.

Ergimiş bölgenin sıcaklığı ve soğuma hızı poroziteyi kontrol eden bir faktör olarak görülebilir. Soğuma hızı azaldıkça porozite azalır, kaynak hızı arttıkça da porozite artmaktadır. Birçok durumda kaynak hızındaki ani düşmeler porozite oluşumunda azalmaya sebebiyet vermektedir. Bu ise kaynak bölgedinin yavaş soğuması ve gazların ergimiş metalden daha kolay çıkması nedeniyledir (Metals Handbook, Vol.6, 1983; ASM Handbook, Vol. 6, 1993).

4.2.4.8 Darbeli TIG Kaynak Yöntemi

Modern TIG kaynak tesisleri, özellikle de tam otomatik TIG kaynağı uygulamaları, darbeli bir doğru akım kullanmaktadır. Darbeli TIG kaynağında birkaç Hz'lik bir frekansta bir düşük

“temel akım” ve yüksek bir darbe üstüste bindirilir. Gerilim de akım darbesi ile aynı ritme sahiptir. Temel akım, ark sönmeyecek dereceye ayarlanır. Nüfuziyet için darbe akımı gerekir. MIG/MAG darbeleri ark kaynağının aksine TIG darbeleri ark kaynağında çok daha düşük darbe frekansı ayarlanır (Anık vd., 1999).

Makina, taşıt ve uçak sanayilerinde titanyum ve alaşımlarının kullanılabilmesi, kaynak kabiliyeti problemine bağlı olarak belirlenmektedir. Kaynak akımı, soygazın saflık derecesi ve akış hızı, soğuyan dikişteki gaz koruması kaynaklı bağlantının kalitesi üzerinde etkilidir.

Yüksek ısı girişi titanyum ve alaşımlarında tane büyümesine neden olduğundan kaynaklı bağlantının mukavemet özellikleri ve dayanımı düşer. Bu nedenle elektron ışın kaynağının uygulamalardaki önemi artmaktadır. Öte yandan özellikle büyük parçalar için elektron ışın kaynak yönteminin ilk maliyeti çok büyük olduğu için uygun bir çözüm olarak görülmemektedir. Darbeleri TIG kaynağı bu soruna bir ölçüde çözüm olabilmektedir. Bu teknik ile kaynak akımı ayarlanabilir bir frekans dahilinde çeşitli değerler almaktadır.

Akımın üst değerinde kaynak metali erimekte ve akımın alt değerinde ise bir çeşit tavlama meydana gelmektedir. Böylece dikişin özelliklerinde iyileşme görülür. Darbe frekansının artması ile eriyik havuzu daha sürekli olmaya başlar. Fakat çalkalanmalar çoğalır. Bu yöntemde klasik TIG kaynağına aykırı olarak kaynak özellikleri, kaynak akımı, darbe frekansı ve alt-üst seviye arasındaki orana bağlı olmaktadır. Akım seviye oranını ve darbe frekansını ayarlamak sureti ile nüfuziyet derinliği uygun bir hale getirilir. Darbeleri TIG kaynağı üzerindeki araştırmalar göstermiştir ki darbeleri arkın metal üzerine etkisi sonucu uygun katılaşmalar ve yapı özellikleri sağlanabilmektedir. Buna rağmen ark parametrelerinin birbirleri ile olan ilişkileri karmaşık olduğundan iyi bir sonuca ulaşmak için ayrı bir özen sarfedilmelidir. Darbe frekansındaki değişim sonucunda da sertlikte herhangi bir değişim saptanmamaktadır (Metals Handbook, Vol.6, 1983; ASM Handbook, Vol. 6, 1993).

4.2.4.9 TIG Kaynağında Kaynak Hataları

TIG kaynağı, hata oluşturmaya eğilimli değildir. Yönteme özgü hatalar (süreksizlikler), gözenek, tungsten kalıntısı ve oksit kalıntılarıdır. Alüminyumun kaynağında gözenekğin nedeni hidrojenidir. Esas metalin ve kaynak çubuğunun üzerindeki oksit tabakası higroskopiktir. Bu nedenle kaynak metaline hidrojen girme eğilimi çok kuvvetlidir. Kaynaktan önce fırçalama veya taşlama ile oksit tabakalarının uzaklaştırılması gerekir (Anık vd., 1999).

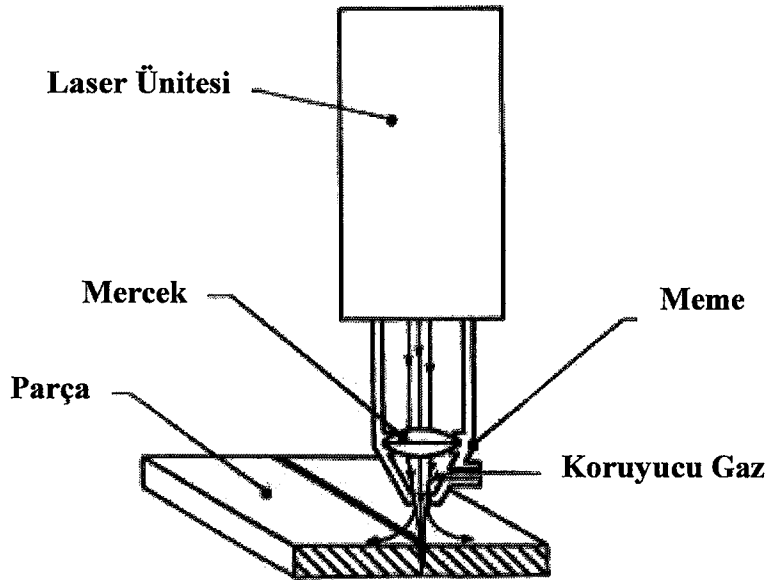
Tungstenin yüksek ergime sıcaklığı nedeni ile kaynak sırasında nadiren tungsten kalıntısı oluşabilir. Bu kalıntılar, röntgen filmlerinde aydınlık lekeler halinde görülür. Tungsten kalıntılarının nedenleri, aşırı akım yüklemesi sonucu elektrod ucunun ergimesi veya kaynak sırasında ya da tekrar tutuşma sırasında elektrod ucunun kaynak banyosuna temas etmesidir (Anık vd., 1999).

Oksit kalıntıları genellikle ilave telin ucundak damlaların oksitlenmesi nedeni ile kaynak banyosuna karışabilir. Bu nedenle ilave telin kızgın ucu, koruyucu gaz örtüsünün dışına çıkarılmamalıdır (Anık vd., 1999).

4.2.5 Laser Işın Kaynağı

Laser adı, “Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation” kelimelerinin baş harflerinden oluşmuştur (Uyarılmış Işınım Yoluyla Yükseltilmiş Işık).

Laser ışını ile kaynak bir ergitme kaynağıdır. Güç yoğunluğu, malzeme kuvvetle buharlaşmadan ergiyecek şekilde ayarlanmalıdır. Teorik olarak ilave metal kullanılmadan kaynak yapıldığı için parçalar birbirlerine tam olarak yaklaştırılmalıdır. Ağızlar arasındaki açıklığın miktarı, ergimiş banyo genişliğinin 1/5 i kadar olmalıdır. Ergimiş banyo genişliği ise 100 mikron civarındadır (Anık vd., 2000). Şekil 4.7 de laser ışın kaynağının şematik görünümü verilmiştir.



Şekil 4.7 Laser ışın kaynağının şematik görünümü (Todd vd., 1994)

Laser kaynağında enerji sevkini ve zamana bağlı kumandanın basit olması nedeni ile hemen hemen bütün malzemeler birbirleri ile kaynak edilebilirler. Ayrıca bu kaynak iyi bir şekilde otomatize edilebilir. İş parçasının üzerine hiçbir kuvvetin etkisi yoktur. Atmosferde çalışma imkanı vardır. Hiçbir takım aşınması yoktur. Büyük çalışma aralıkları imkanı vardır. ITAB bölgesi dardır. Zor ulaşılan yerlerde kaynak yapma olasılığı vardır. Yüksek hassasiyette monte edilmiş yapı gruplarında, elektrik, manyetik ve mekanik özellikler bozulmadan laser ışını ile kaynak mümkündür (Anık vd., 2000).

CO₂-laser, metalsel malzemelerin dikiş, nokta ve köşe birleştirmelerinde uygulanabilmektedir. Yöntemde elektron ışın kaynağında olduğu gibi derin nüfuziyet etkisi ile işlem gerçekleştirilmektedir. Özellikle havacılık ve uzay endüstrilerinde bu yöntem kullanılmaktadır (Gültekin, 1991).

Titanyum ve alaşımlarının kaynağında laser ışın kaynak yönteminin kullanımı gün geçtikçe artmaktadır. Kare kaynak dikişleri kullanılabilir ve kaynak sırasında vakum kamaralarına ihtiyaç duyulmaz. Bu yöntem ana metalin kalınlığına bağlı olduğundan (13 mm'i aşmamalı) elektron ışın kaynağından daha sınırlı bir kullanımı vardır [2].

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada, 2 mm kalınlıkta ticari saflıkta titanyum ve 0,8 mm kalınlıkta Ti6Al4V titanyum alaşımlı numuneler kullanılmıştır. Numuneler TIG (Tungsten İnert Gaz) kaynak yöntemi ile Doğruyol Kaynak Merkezi Limited Şirketi'nde kaynak edilmiştir. TIG kaynak cihazı Şekil 5.1'de verilmiştir.



Şekil 5.1 TIG kaynak cihazı

TIG yöntemi ile üç farklı kaynak yapılmıştır. Bunlar şöyle sıralanabilir;

- Ticari saflıktaki Ti / Ticari saflıktaki Ti malzeme çifti, Ti6Al4V dolgu metali ile
- Ticari saflıktaki Ti / Ticari saflıktaki Ti malzeme çifti, dolgu metali kullanılmaksızın
- Ticari saflıktaki Ti / Ti6Al4V malzeme çifti, Ti6Al4V dolgu metali ile

Kullanılan numunelerin kimyasal bileşimleri Çizelge 5.1 de verilmiştir.

Çizelge 5.1 Numunelerin kimyasal bileşim yüzdeleri

Ticari Safılıktaki Titanyum	Ti6Al4V
0,03 N	5,5 – 6,75 Al
0,1 C	3,5 – 4,5 V
0,015 H	0,30 Fe
0,18 O	0,0125 H
0,20 Fe	kalan Ti
0,10-0,40 diğer elementler (toplam)	
99,175 Ti	

Çizelge 5.2, numunelere uygulanan TIG kaynak yönteminin parametrelerini göstermektedir. Kaynak işleminin ardından numuneler oda sıcaklığında soğutulmuş ve kaynak sonrası herhangi bir ısıtım işlemi yapılmamıştır.

Çizelge 5.2 TIG kaynak parametreleri

Numune	Voltaj (V)	Akım (A)
Ticari Safılıktaki Ti / Ticari Safılıktaki Ti (Ti6Al4V ilave malzeme ile)	9	32
Ticari Safılıktaki Ti / Ticari Safılıktaki Ti (ilave malzeme yok)	9	26
Ticari Safılıktaki Ti / Ti6Al4V (Ti6Al4V ilave malzeme ile)	8	20

Kaynak sonrası metalografik olarak hazırlanan numunelerin mikroyapıları optik mikroskopla incelenmiştir. Kaynak bölgesinin mekanik özellikleri ise mikrosertlik yöntemi ile

belirlenmiştir.

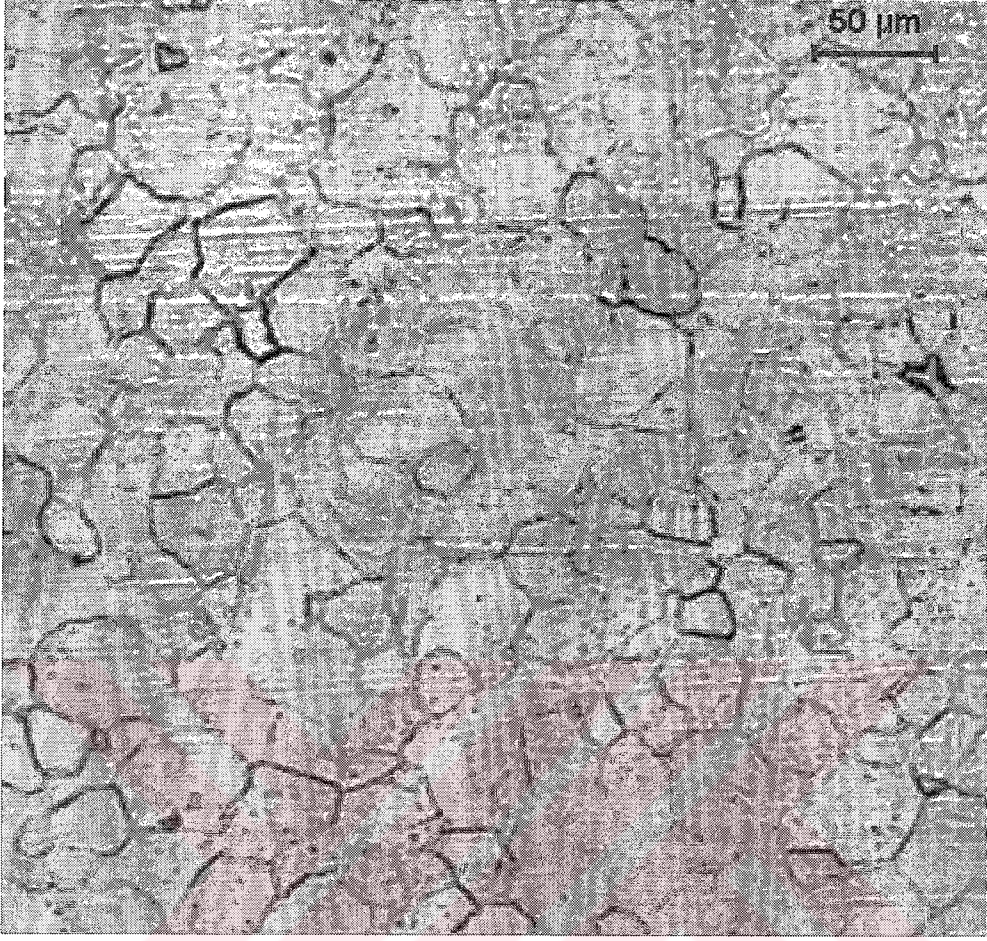
5.1 Ti / Ti Malzeme Çiftinin İlave Metal Kullanılarak Yapılan TIG Kaynağı

2 mm kalınlığında olan ticari saflıktaki titanyum çifti Ti6Al4V ilave metal kullanılarak TIG kaynak yöntemi ile birleştirilmiştir. Kaynak işlemi sırasında 9 V'luk akım gerilimi ve 32 A'lık akım şiddeti uygulanmıştır. Kaynak işlemi ortalama saniyede 8 mm hızla yapılmıştır. Kullanılan ilave metalin çapı yaklaşık olarak 0,7 mm kadardır. Kaynak işlemi sırasında ilave metalin kullanılmasının nedeni gerek kaynak dikiş kalitesini iyileştirmek, gerekse bazı durumlarda kaynak işlemini mümkün hale getirebilmek veya kolaylaştırmaktır. Özellikle kalın kesitlerde ve temiz olmayan yüzeylerde ilave malzemeli olarak TIG'den yararlanılmaktadır. İlave metalin kullanılmadığı hallerde elektrod eksenlerinin oluşturduğu düzlemin konumunun öngörülen kaynak dikiş derinliği, dikiş yüksekliği ve kesit biçimine göre seçilmesi gerekir.

Kaynak işlemine tabi tutulan ticari saflıktaki titanyum α yapıya sahipken; ilave metal olarak kullanılan Ti6Al4V alaşımı α - β yapısındadır. Dolgu malzemesi olarak kullanılan Ti6Al4V, kaynak dikişinde martenzitik dönüşüm oluşturduğundan sertlikte yükselme ve toklukta düşme meydana gelmektedir. Kaynak yapılan numune metalografik olarak hazırlanmış ardından bileşimi 40 ml HNO₃, %40 lık 10 ml HF ve 50 ml saf su olan dağlayıcı ile dağlanmıştır.

5.1.1 Mikroyapılar

Ti/Ti malzeme çiftinin seçilen dolgu metali ile kaynağında elde edilen özellikler; ana malzeme, ısı tesiri altındaki bölge, kaynak dikişi bölgelerinde karşılaştırmalı olarak ışık metal mikroskobu ile incelenmiştir. Aşağıda ışık metal mikroskobu ile alınan yapılar sırasıyla (ana malzeme, ısı tesiri altındaki bölge, kaynak dikişi) verilmiştir.

Ana Malzeme

Şekil 5.2 Ticari saflıktaki titanyumun mikroyapısı

Malzeme şekillenme sonrasında ısıt işlemleri gördüğü için yeniden kristalleşmiş eş eksenli küresel α yapısındadır. Şekil 5.2 ticari saflıktaki titanyumun mikroyapısını göstermektedir.

Isı Tesiri Altındaki Bölge (ITAB)



Şekil 5.3 ITAB bölgesinin mikroyapısı

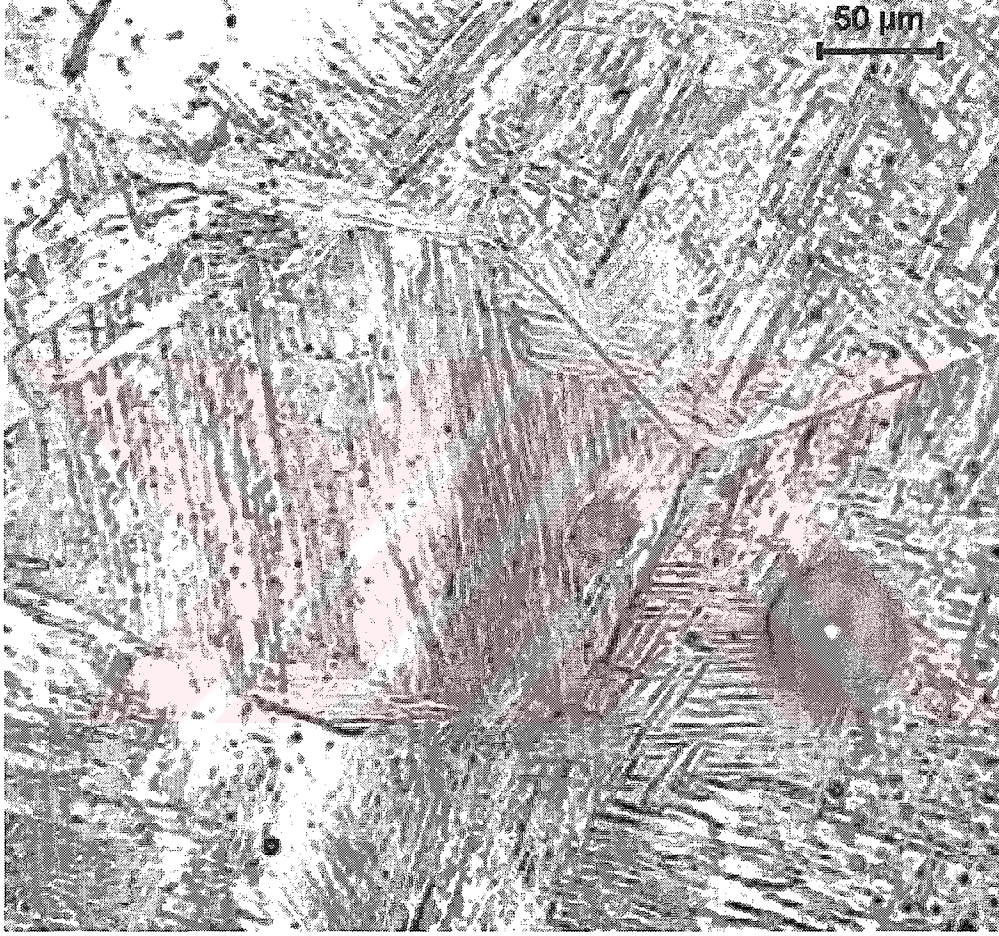
Kaynak metali döküm yapısı şeklinde katılaşır. Kristaller, esas metalden itibaren ısı iletim yönünün zıt yönünde ergiyik ortasına doğru büyür. Bu kristaller genellikle uzundur ve dendritik yapıdadır. Termik dengesizlik ve heterojen eleman dağılımı nedeni ile kristal segregasyonu meydana gelir. Malzeme ve imalat şartlarına bağlı olarak yerel ısınma nedeni ile kaynak metali, ısı tesiri altındaki bölge ve esas metalin yapısal özellikleri bakımından birbirlerinden farklı dokulara ve farklı mekanik özelliklere sahiptirler. Malzeme özelliklerinin bu yerel değişimi, dikiş çevresinde olumsuzluk yaratmaktadır.

Şekil 5.3 de yine aynı numunenin ısı tesiri altındaki bölgesinin mikroyapısı görülmektedir. Isı tesiri altındaki bölgede, kaba taneler oluşmuş, ana malzeme dokusu bozularak mikroyapı özellikleri değişmiştir.

Genellikle ergiyen ve ısı tesiri altındaki bölgede mümkün olduğu kadar ince taneli bir doku elde edilmeye çalışılır. Bu sayede dayanım ve şekil değiştirme kabiliyeti aynı anda

iyileştirilmiş olur. Bu duruma, herşeyden önce kısa süreli kaynak ısı çevrimiyle, çok pasolu kaynakla ulaşılabilir. Bu durumda alttaki pasolar ince taneli, yeniden kristalleşmiş yapı oluşturabilir veya daha sonradan uygulanacak bir ısıl işlemle örneğin normalizasyon veya yeniden kristalleşme tavlama ile ince taneli yapı elde edilebilir. Ancak ikinci seçenek maliyetlerin düşürülmesi amacına uygun düşmez ve bu nedenle nadiren uygulanır.

Kaynak Dikişi

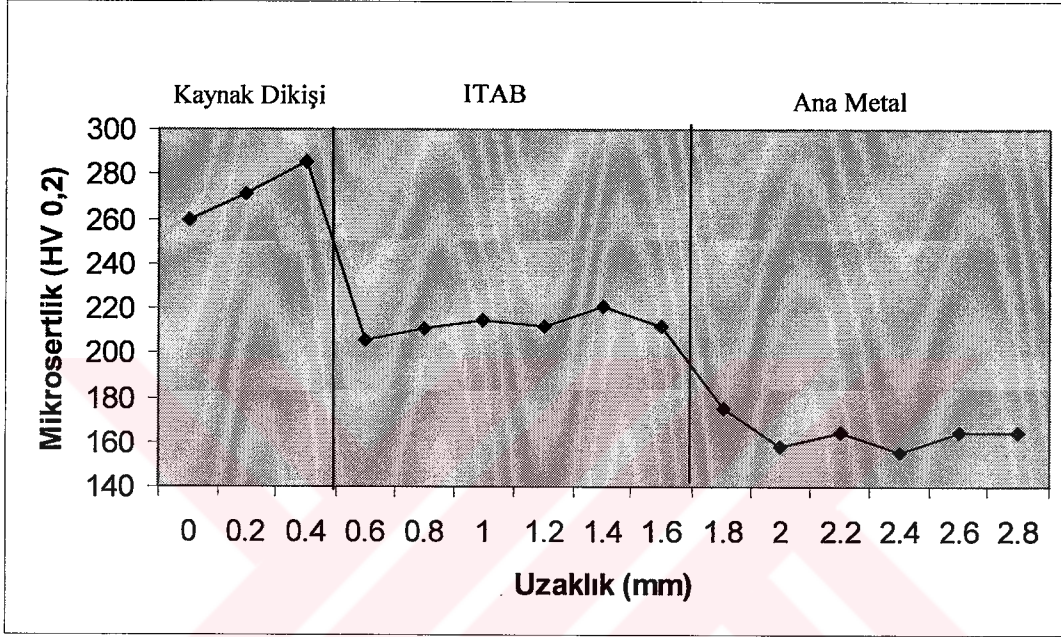


Şekil 5.4 Kaynak dikişinin mikroyapısı

Şekil 5.4 te Ti6Al4V ilave metal ile kaynak edilmiş olan ticari saflıktaki titanyum numunenin kaynak dikişinin mikroyapısı verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi dolgu malzemesi kullanılarak yapılan TIG kaynağında kaynak dikişinin bazı bölgelerinde gözenekler ortaya çıkmaktadır. Kaynak dikişinde elde edilen bu gözeneklerin ortalama çapı 0,6 mm kadar olup, malzemenin kaynaklı olarak çalışmasını engelleyecek büyüklüktedir. Kaynak dikişinde oluşan gözenekliliğin nedenlerinin başında ana metalin kimyasal bileşimi, ilave metalin kimyasal bileşimi, elektrod örtüsünün nemli olması, düşük akım şiddeti ile çalışma, çok uzun veya kısa

ark boyları ile kaynak yapma, ergimiş kaynak banyosunun çabuk soğuması, kaynak ağzının kirli, yağlı ve paslı olması sayılabilir (Anık vd., 2000). Bu numunede gözenek oluşmasının nedeni, kullanılan ilave malzemenin saf titanyumun ergime sıcaklığını artırarak kaynak sırasında nüfuz eden gazların çözünürlüğünün artmasıdır. İç yapıya nüfuz eden atmosfer gazları gevrekleşmeye yol açmaktadır.

5.1.2 Mikrosertlik



Şekil 5.5 Ticari saflıktaki titanyumun ticari saflıktaki titanyum ile dolgulu TIG kaynağının mikrosertlik değerleri

Ti/Ti malzeme çiftinin Ti6Al4V dolgu metali ile yapılan TIG kaynağında elde edilen mekanik özellikler; kaynak dikişi, ısı tesiri altındaki bölge (ITAB), ana malzeme hattında mikrosertlik yardımı ile belirlenmiştir. Elde edilen mikrosertlik dağılımı Şekil 5.5 de verilmiştir.

Şekil 5.5 e göre, en yüksek sertlik kaynak dikişinde elde edilmiş; buna karşın ısı tesiri altındaki bölge ve ana malzemenin sertlik değerleri daha düşük bulunmuştur. Kaynak dikişinde elde edilen yüksek sertliğin, soğuma sırasında ilave malzemenin etkisiyle yapmış olduğu α - β dönüşümünün bir sonucudur. Bu bölgede elde edilen sertlik değeri ortalama 273 HV 0,2 dir. Kaynak dikişinin genişliği ise yaklaşık 1,2 mm kadardır.

ITAB'da elde edilen sertlik değeri ana malzemeye göre daha yüksektir ve ortalama 213 HV 0,2 dir. ITAB bölgesindeki sertlik düşüşünün temel nedeni; bu bölgede oluşan yeniden kristalleşmedir. Özellikle kaynak dikişi sınırlarına komşu bölgelerde sıcaklığın kaynak

dikişine daha uzak olan bölgelere göre nispeten daha yüksek olması, tanelerin irileşmesine ve sertliğin daha da düşmesine neden olmaktadır. Isı tesiri altındaki bölgenin genişliği kaynak dikişinin sağ ve solunda toplam olarak yaklaşık 2,6 mm kadardır. Ticari saflıktaki titanyumun ortalama sertliği 164 HV 0,2 dir.

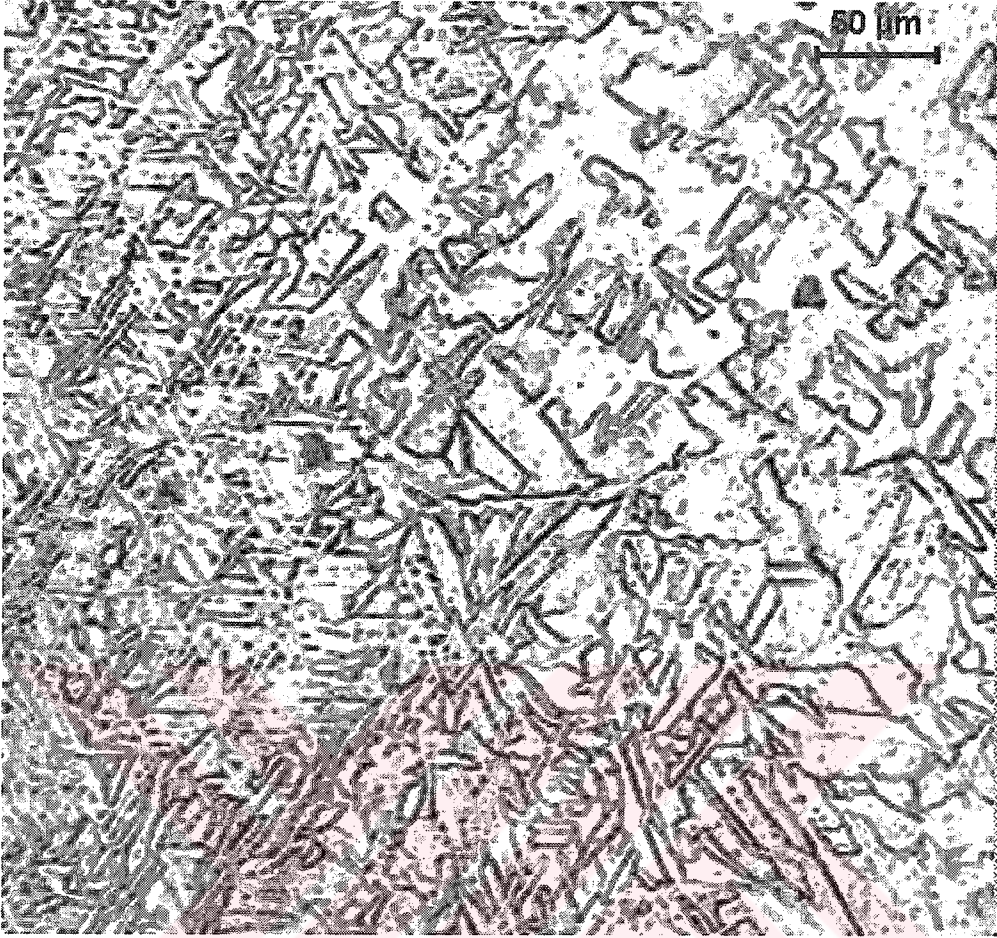
Ti/Ti ikilisi bir Ti6Al4V ilave metali kullanılarak birleştirildiğinde, kaynak dikişi - ısı tesiri altındaki bölge - ana malzeme bölgelerinde heterojen bir mekanik özellik dağılımı tespit edilmiştir. Kullanım yerine göre bu birleşme sonrasında kaynak dikişinde uygun bir ısıl işlem önerilebilir.

5.2 Ti / Ti Malzeme Çiftinin İlave Metal Kullanılmadan Yapılan TIG Kaynağı

2 mm kalınlığında olan ticari saflıktaki titanyum çifti ilave metal kullanılmaksızın TIG kaynak yöntemi ile birleştirilmiştir. Dolgusuz TIG kaynağı yapılmasının nedeni; Ti6Al4V ilave metali kullanılarak yapılan TIG kaynak işleminde kaynak dikişinde oluşan gözenekli yapının ortadan kaldırılmasıdır. Kaynak sırasında 9 V'luk akım gerilimi ve 26 A'lık akım şiddeti uygulanmıştır. Herhangi bir dolgu metali kullanılmadığından yapıda dönüşümün olmaması ve tipik döküm yapısının oluşması, dikişin mekanik özelliklerin belirlenmesinde etkili olmuştur. Kaynak yapılan numune metalografik olarak hazırlanmış ve 40 ml HNO₃, %40 lık 10 ml HF ve 50 ml saf su olan dağlayıcı ile dağlanmıştır.

5.2.1 Mikroyapılar

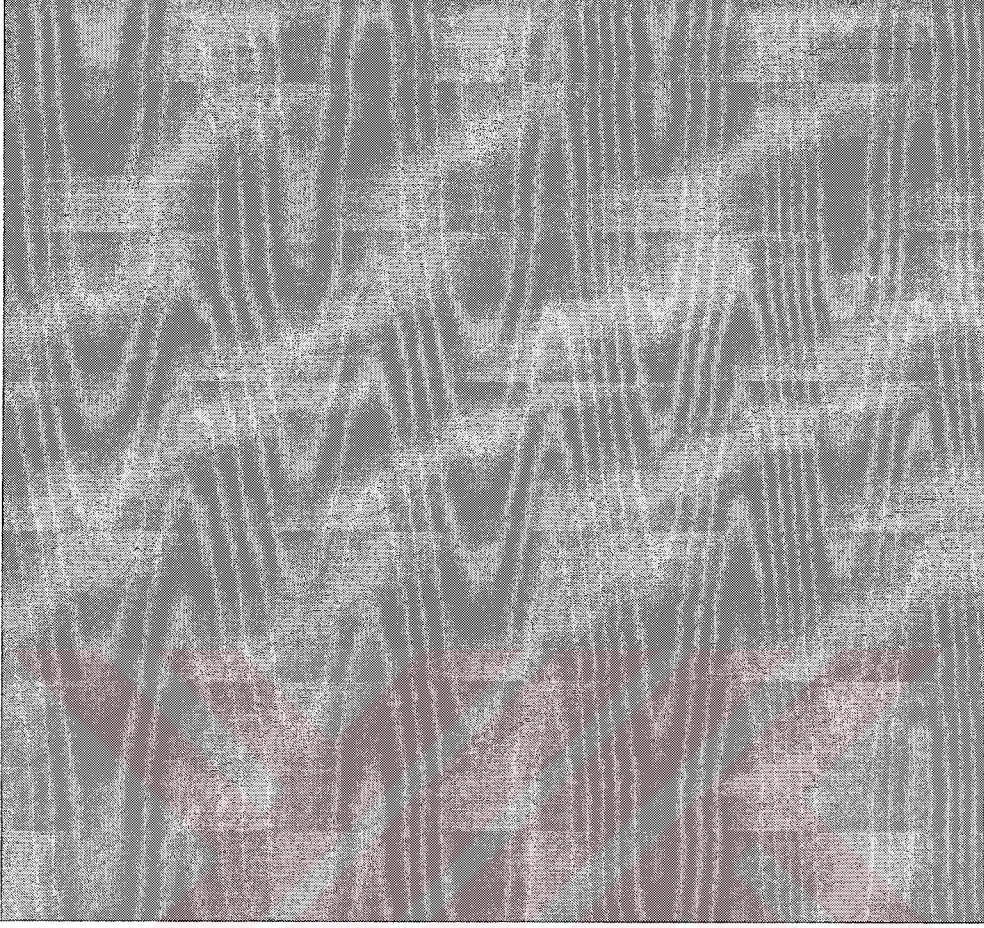
Ti/Ti malzeme çiftinin dolgu metali kullanılmadan yapılan TIG kaynağında elde edilen özellikler; ana malzeme, ısı tesiri altındaki bölge, kaynak dikişi bölgelerinde karşılaştırmalı olarak ışık metal mikroskobu ile incelenmiştir. Aşağıda, ışık metal mikroskobu ile alınan dokular sırasıyla (ısı tesiri altındaki bölge, kaynak dikişi) verilmiştir.

Isı Tesiri Altındaki Bölge (ITAB)

Şekil 5.6 ITAB bölgesinin mikroyapısı

Şekil 5.6 ticari saflıktaki titanyumun ilave malzeme kullanılmadan yapılmış kaynağın ısı tesiri altındaki bölgenin mikroyapısını göstermektedir. İlave malzeme kullanılmadığından gözenek oluşmamıştır. Kaynak sırasında numune yüksek sıcaklığa maruz kaldığından, yapıda tane büyümesi görülmektedir. Şekil 5.6 da görüldüğü gibi, genel olarak ITAB bölgesi iğnesel dokuya sahiptir.

Kaynak Dikişı

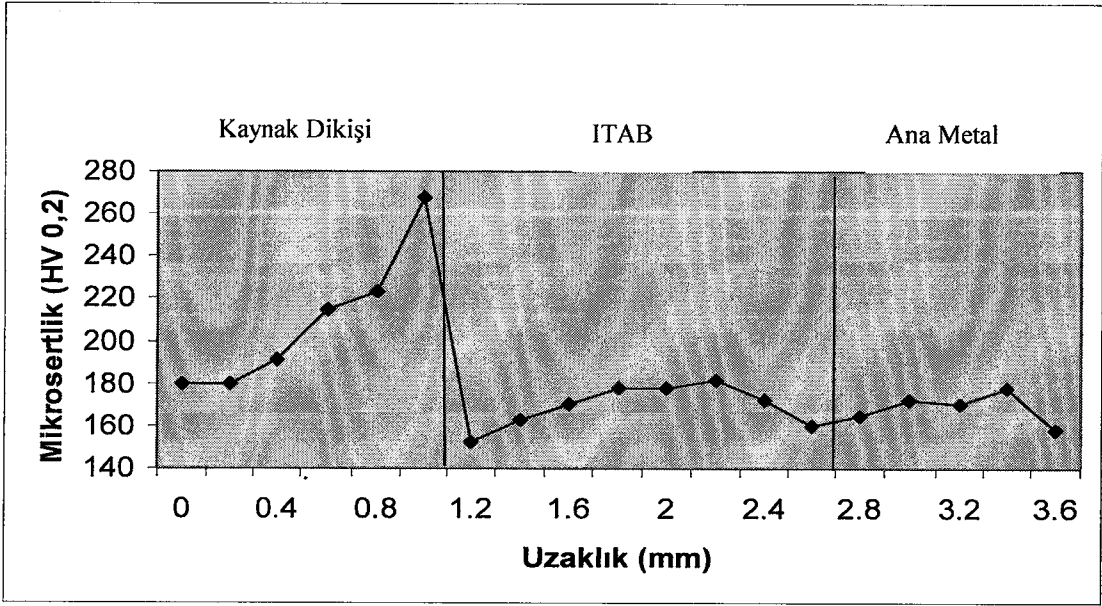


Şekil 5.7 Kaynak dikişı

Şekil 5.7 de ticari saflıktaki titanyum malzeme çiftinin kaynak dikiş bölgesi verilmiştir. Yapıda eksik nüfuziyet görülmektedir. Bu durum, ergimenin bütün malzeme kalınlığı boyunca olmaması sonucunda meydana gelir ve bağlantının alt kısımlarında kırılmayı arttıran oyuk ve çentikler oluşur.

Kaynağı yapılan Ti / Ti malzeme çiftinde meydana gelen nüfuziyet azlığı kırılmaya neden olacak boyutta olmadığından, kaynaklı numunenin kullanımını engelleyecek bir unsur oluşturmamaktadır.

5.2.2 Mikrosertlik



Şekil 5.8 Ticari saflıktaki titanyumun ticari saflıktaki titanyum ile dolgusuz TIG kaynağının mikrosertlik değerleri

Ti / Ti malzeme çiftinin ilave metal kullanılmadan yapılan TIG kaynağında elde edilen mekanik özellikler; kaynak dikişi – ısı tesiri altındaki bölge (ITAB) – ana metal hattında mikrosertlik ile belirlenmiştir. Elde edilen mikrosertlik dağılımı Şekil 5.8 de verilmiştir.

Şekil 5.8 den de görüldüğü gibi, mikrosertlik değerleri kaynak dikişinin merkezinden ana metale doğru azalmaktadır. Kaynak dikişinde en yüksek sertlik değeri elde edilirken; buna karşılık, ısı tesiri altındaki bölge ve ana metalin sertlik değerleri daha düşük bulunmuştur. Bu bölgede elde edilen ortalama sertlik değeri 210 HV 0,2 dir. Kaynak dikişinin genişliği ise yaklaşık 2 mm kadardır.

Isı tesiri altındaki bölgede elde edilen sertlik değeri ortalama 170 HV 0,2 kadardır. Genişliği ise yaklaşık 3 mm kadardır. Ticari saflıktaki titanyum ana malzemenin ortalama sertliği 168 HV 0,2 dir.

Ti/Ti ikilisi ilave metal kullanılmadan birleştirildiğinde kaynak dikişi - ısı tesiri altındaki bölge - ana malzeme bölgelerinde heterojen bir mekanik özellik dağılımı söz konusudur. Kullanım yerine göre bu birleşme sonrasında kaynak dikişinde uygun bir ısıl işlem önerilebilir.

Bu kaynak işlemi ilave malzeme kullanılmadan yapılmıştır. Ana metalin sertlik değerleri ile

kaynak dikiş bölgesinin sertlik değerleri arasındaki artış oranı, ilave metal kullanılarak kaynak edilmiş olan numuneninkine göre daha düşüktür. Sertlik artışı yaklaşık olarak 1,24 kattır. Bu iki sertlik diyagramı karşılaştırıldığında, ilave metal kullanımının kaynak dikiş bölgesinde daha büyük oranlarda sertlik artışı sağladığı görülmektedir. Aynı malzemelerin TIG kaynağı ile birleştirilmesinde; ilave metal kullanılarak kaynak edildiğinde ana metal ile kaynak dikişi arasındaki sertlik artışı 1,67 kat olarak hesaplanmıştır.

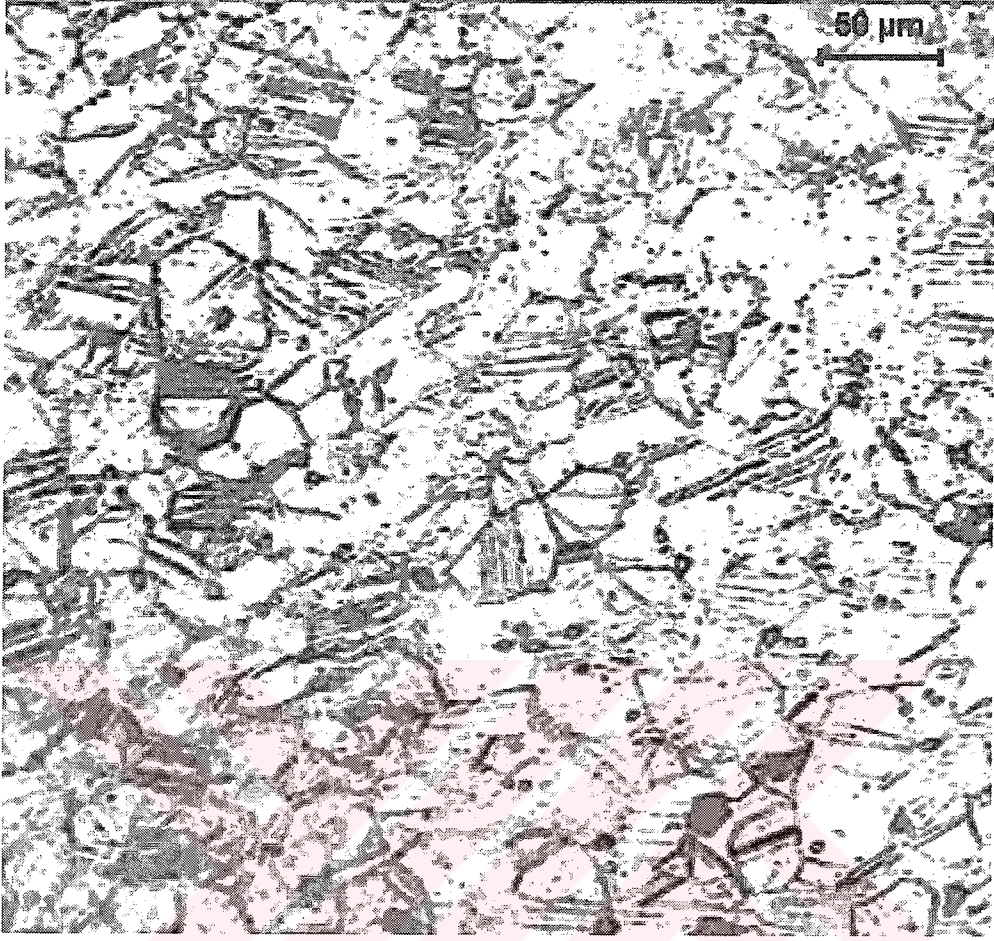
5.3 Ti / Ti6Al4V Malzeme Çiftinin İlave Metal Kullanılarak Yapılan TIG Kaynağı

Ticari saflıktaki titanyum ile Ti6Al4V malzeme çifti, Ti6Al4V ilave metal kullanılarak TIG kaynak yöntemi ile birleştirilmiştir. Kaynak işlemi sırasında 8 V luk akım gerilimi ve 20 A lik akım şiddeti uygulanmıştır. Kullanılan ilave metalin çapı yaklaşık olarak 0,7 mm olarak seçilmiştir. Kaynak işlemi ortalama saniyede 8 mm hızla yapılmıştır. Kaynak edilen malzemelerden ticari saflıktaki titanyum 2 mm kalınlığa sahipken, Ti6Al4V alaşımının kalınlığı 0,8 mm'dir. Kaynak işlemine tabi tutulan ticari saflıktaki titanyumun dokusu α , ilave metal olarak kullanılan Ti6Al4V alaşımının dokusu ise α - β 'dir. Dolgu malzemesi olarak kullanılan Ti6Al4V, kaynak dikişinde martenzitik dönüşüm oluşturarak sertlikte yükselme ve toklukta düşmeye neden olmuştur. Kaynak yapılan numune metalografik olarak hazırlanmış, ardından bileşimi 40 ml HNO₃, %40 lık 10 ml HF ve 50 ml saf su olan dağlayıcı ile dağlanmıştır.

5.3.1 Mikroyapılar

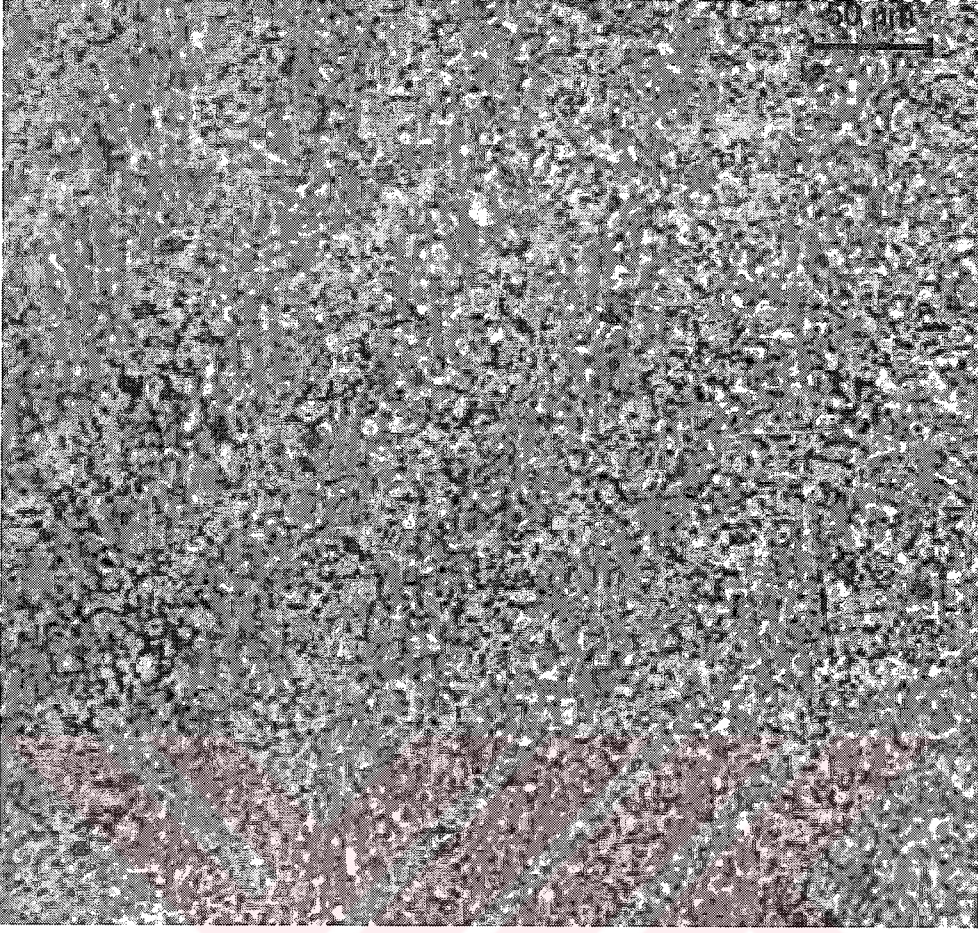
Ti / Ti6Al4V malzeme çiftinin Ti6Al4V dolgu metali ile kaynağında elde edilen özellikler; ana malzeme, ısı tesiri altındaki bölge, kaynak dikişi bölgelerinde karşılaştırmalı olarak ışık metal mikroskobu ile incelenmiştir. Farklı alaşımlar kaynak edildiğinden her bir bölge için iki farklı mikroyapı görüntülenmiştir. Aşağıda ışık metal mikroskobu ile alınan yapılar sırasıyla (ana malzeme, ısı tesiri altındaki bölge, kaynak dikişi) verilmiştir.

Ana Malzeme



Şekil 5.9 Ticari saflıktaki titanyum ana malzeme

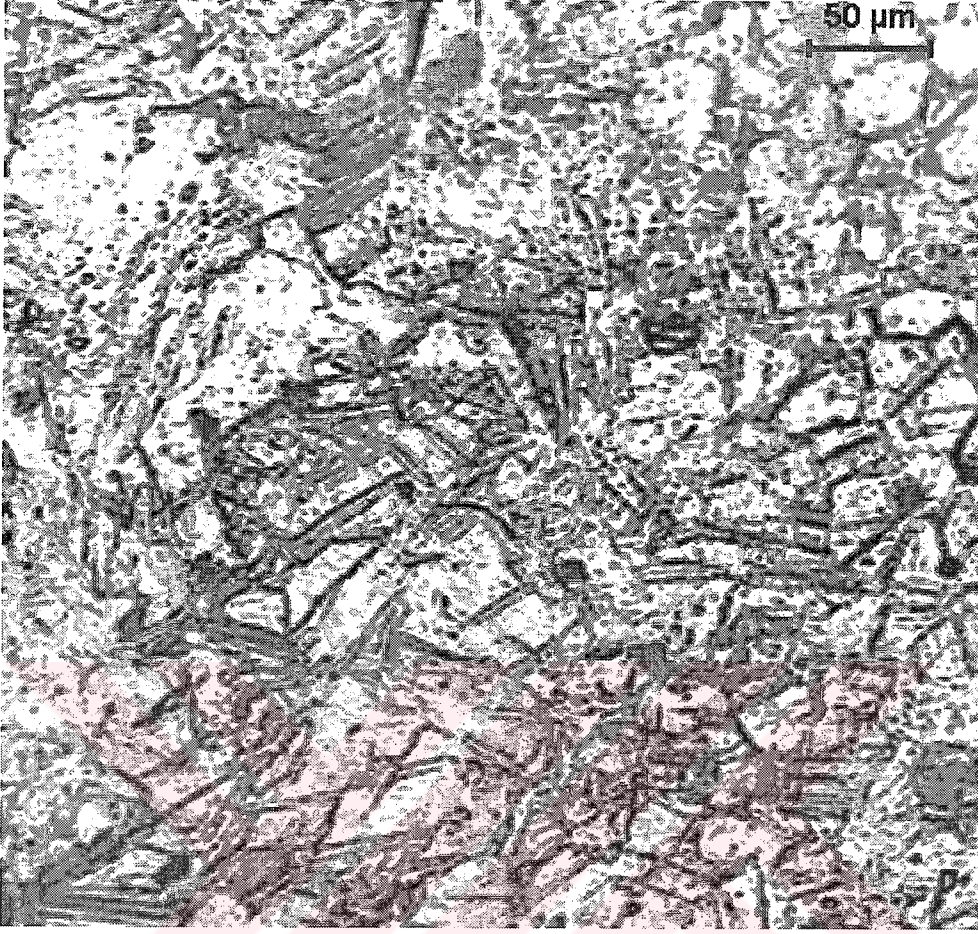
Şekil 5.9 da ticari saflıktaki titanyum ana metalin mikroyapısı görülmektedir. Yapıyı oluşturan taneler eş eksenli α taneleridir. Mikroyapıda ikizlenmeler de göze çarpmaktadır. İkiz oluşumunda bir çekirdeğin parçaları, itme kuvvetlerinin etkisi altında birbirlerinin aynadaki görünümü şeklinde açılırlar. Bu sayede daha çok hegzagonal olarak kristalleşen metallerde diğer bir şekil değiştirme imkanı doğmuş olur. Ticari saflıktaki titanyum da hegzagonal sıkı paket yapıda olduğundan ikizlenme görülmektedir.



Şekil 5.10 Ti6Al4V ana malzeme

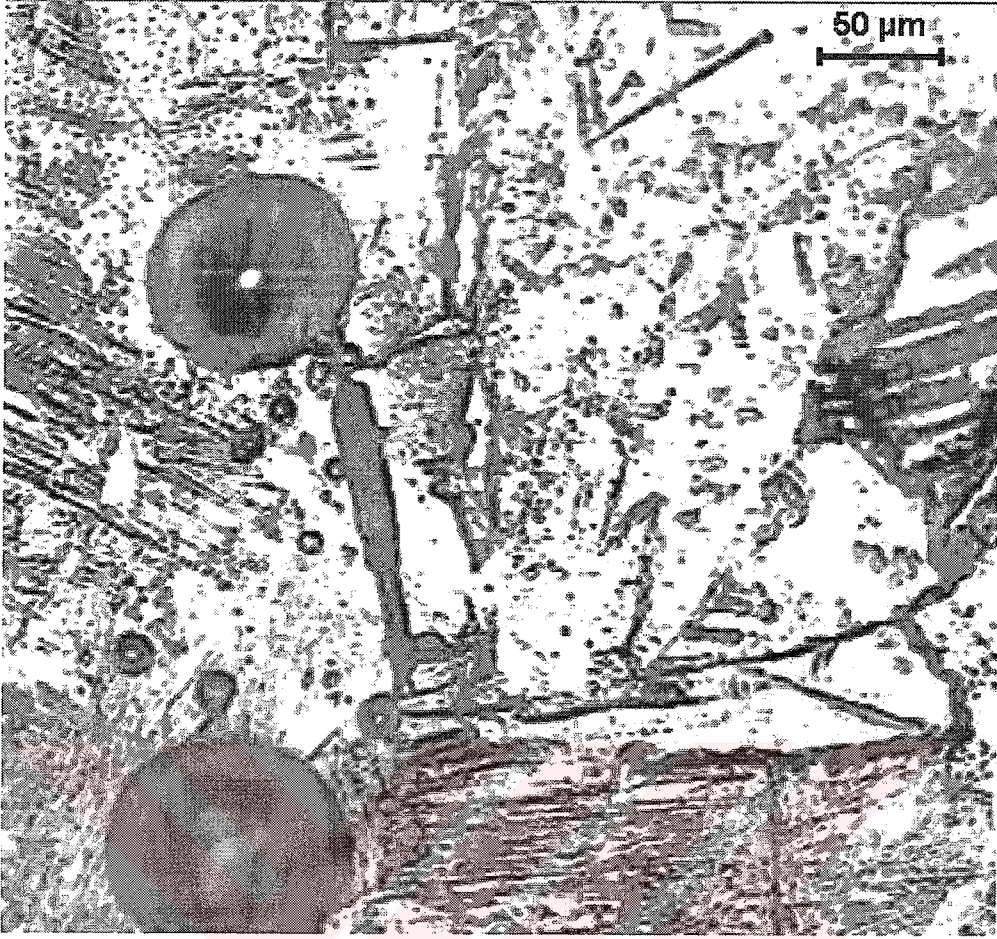
Şekil 5.10 da görülen Ti6Al4V ana metali α - β yapısındadır. Açık renkli bölgeler α , koyu renkli bölgeler ise β fazındadırlar.

Isı Tesiri Altındaki Bölge



Şekil 5.11 ITAB bölgesi mikroyapısı

Şekil 5.11 de ticari saflıktaki titanyum ile kaynak edilen Ti6Al4V alaşımının ısı tesiri altındaki bölgesinin mikroyapısı görülmektedir. Kaynak dikişi sınırlarına komşu bölgelerde sıcaklığın etkisiyle tane büyümesi görülürken, kaynak dikişinden uzaklaştıkça daha küçük taneler doku içinde yer almaktadırlar. Yeniden kristalleşme sıcaklığının üzerindeki sıcaklığa maruz kalan iri taneli bölgelerde sertlik değerleri daha düşük bulunmuştur.



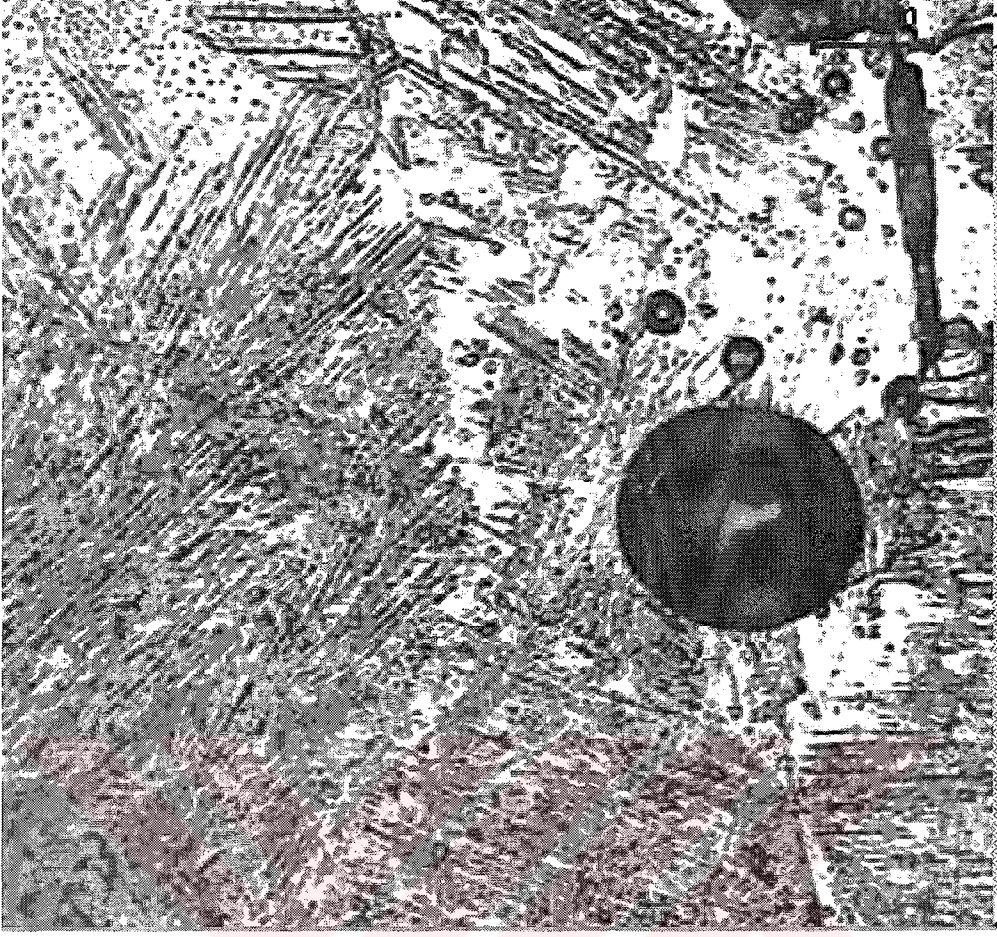
Şekil 5.12 ITAB bölgesi mikroyapısı

Şekil 5.12 de ticari saflıktaki titanyum ile kaynak edilen Ti6Al4V alaşımının ısı tesiri altındaki bölgesinin mikroyapısı görülmektedir. Yapıda ortalama çapları 32 mm olan büyük boyutta gözenekler göze çarpmaktadır. Gözeneklerin oluşma nedeni kullanılan Ti6Al4V ilave metalinin ergime sıcaklığını yükselterek iç yapıya nüfuz eden gazların çözünürlüklerinin artmasıdır.

Kaynak Dikişı

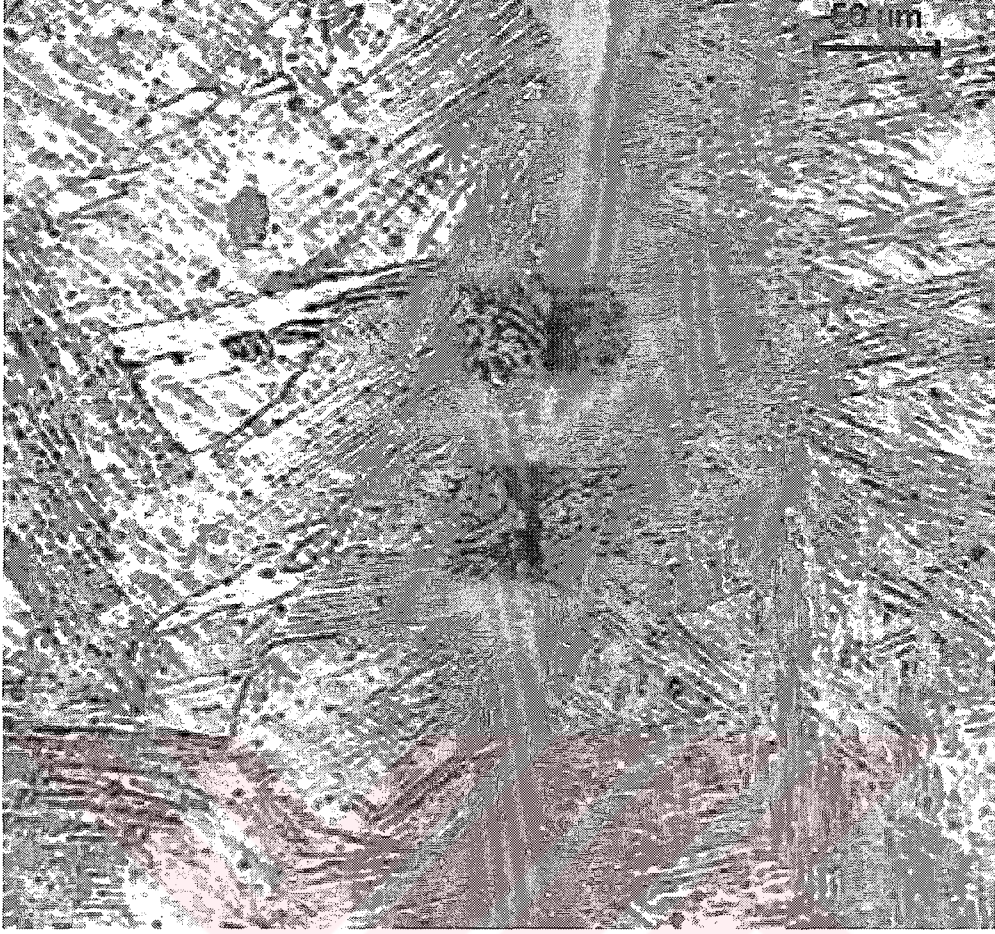
Şekil 5.13 Kaynak dikişı mikroyapısı

Şekil 5.13 de kaynak dikiş bölgesinin mikroyapısı görülmektedir. Yapıda martenzitik dönüşüm sonucunda sertlik artışı görülmektedir.



Şekil 5.14 Kaynak dikişi mikroyapısı

Şekil 5.14 de ortalama çapı 32 mm olan gözenekler mevcuttur. Gözenek oluşumunun nedeni daha önce de belirtildiği gibi ilave malzemesinin ergime sıcaklığını yükselterek numune içerisine nüfuz eden gazların çözünürlüğünü arttırmasıdır.



Şekil 5.15 Kaynak dikişi

Şekil 5.15 te Ti / Ti6Al4V malzeme çiftinin Ti6Al4V ilave metali kullanılarak yapılan TIG kaynağındaki kaynak dikiş bölgesini göstermektedir. Şekilden de görüldüğü gibi yapıda sıcak çatlama oluşmuştur.

Kaynak dikişinde çatlakların oluşmasına dikişteki gerilmeler neden olmaktadır. Kaynak sırasındaki ısı gerilme ve sonuçta ortaya çıkan çarpılmalara karşı koyan kuvvetler, iç gerilmelerin doğmasında önemli rol oynarlar. Bu nedenle parçaların olabildiğince serbest hareket edebilecek konumda olmaları istenir. Kaynak yerinin bir hava akımı ile çabuk soğutulması veya düşük ortam sıcaklıkları çatlama olayını kolaylaştırır. Birbirine tam uymayan parçalarda ve düzgün olmayan kaynak ağızlarında nüfuziyet azlığı, kötü birleşme ve curuf kalıntıları gibi hatalar görülür. Bu hatalar zamanla kılcal çatlakların oluşmasına yol açar (Anık vd., 2000).

Boylamasına çatlaklar genellikle kök pasolarında oluşurlar. Eğer bu kök pasoları tamamen sökülüp yeniden kaynak yapılmazsa, çatlak sonraki pasolarda da kendini gösterir.

Boylamasına çatlaklar, bazen dikişlerde krater çatlaklarının devamı olarak da oluşabilirler. Enine çatlaklar ise kaynak sırasında hareket olanağı en az olan dikişlerde ortaya çıkarlar (Anık vd., 2000).

Kaynakta çatlak oluşmasını önlemede en önemli unsur kaynak işlemi sırasında dikişin kendini kolayca çekebilmesidir. Dikişin çekme gerilmelerine dayanabilmesi için kaynak pasoları yeter derecede geniş çekilmelidir. Bu nokta özellikle kalın sacların ve sabit parçaların kaynağında önemli bir rol oynamaktadır. Boylamasına çatlak çoğu kez birbirine uymayan dikiş kesitleri ile yanlış bir kaynak sırasının uygulamasından ileri gelir. Böyle bir durumla karşılaşıldığında çalışma yöntemi değiştirilmelidir. Kök pasolarında oluşan çatlak tamir edilmeden bir sonraki paso çekilmemelidir. Enine çatlakların oluşmasını önlemek için bazı durumlarda çentik hassasiyeti az ve sıcak çatlamaya karşı dayanımı yüksek, özel elektrotlar kullanılmalıdır. Örneğin östenitik ve bazı örtülü elektrotlar gibi (Anık vd., 2000).

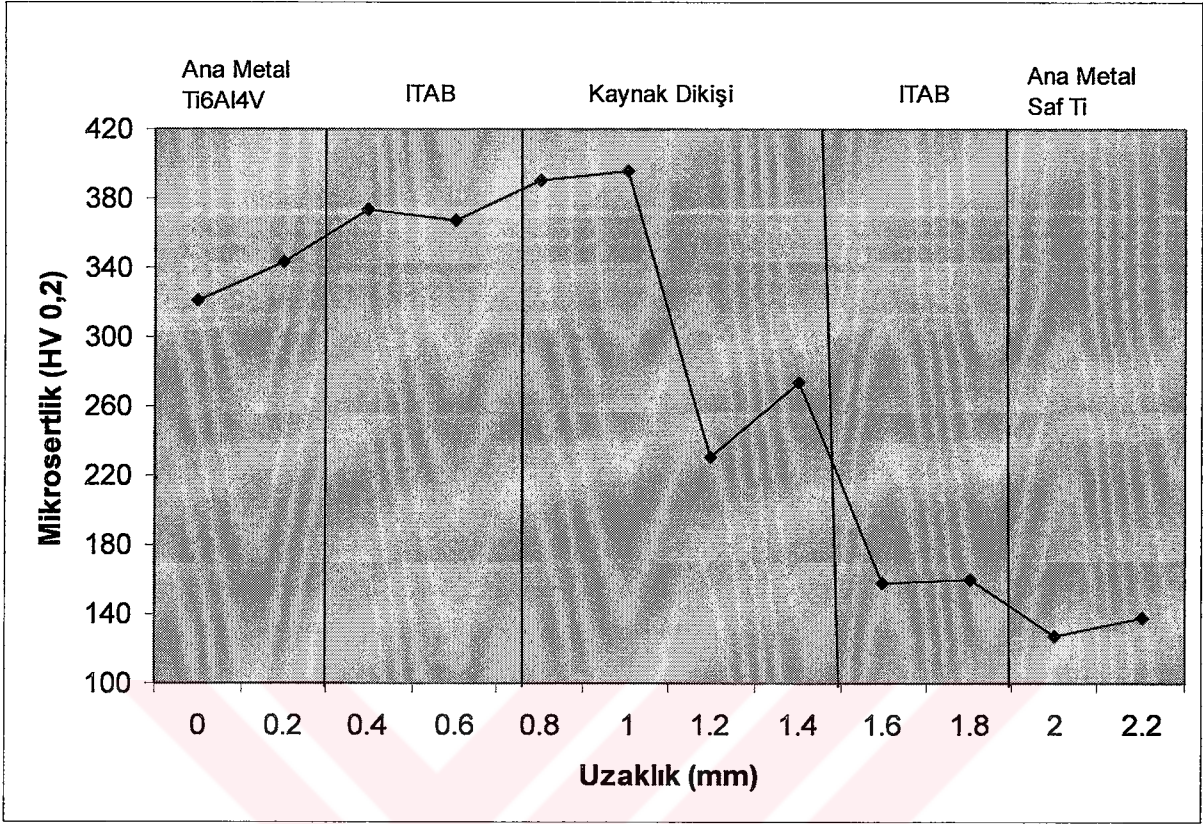
Numunede çıplak gözle de görülebilen boyuna bir çatlak meydana gelmiştir. Çatlak oluşumunun muhtemel nedeni dikiş kesitlerinin birbirine uymaması ve yanlış bir kaynak sırasının izlenmesidir. Bu da ancak kaynak parametreleri değiştirilerek giderilebilir. Yeniden kaynak işlemi hatalı yer sökülüp çıkartılarak yapılmalıdır. Bu işlem yapılırken yeniden kaynak yapılacak yer çok iyi temizlenmelidir. Bazen aynı hatanın tekrarını önlemek için yeniden kaynak yapıldığında başka bir yöntem uygulanması gerekebilir. Çatlaklar bağlantının dayanım değerini düşürdüğünden kaynakta çatlamaya izin verilmemelidir.



Şekil 5.16 Kaynak dikişi mikroyapısı

Ticari saflıktaki titanyum ile Ti6Al4V ilave metali kullanılarak kaynak edilen Ti6Al4V'un mikroyapısında ortaya çıkan gözeneklilik ve sıcak çatlama nedeni ile malzeme daha yüksek parametreler kullanılarak kaynak işlemine tabi tutulmuştur. Numune kaynak işleminin ardından 1050 °C de 1 saat kadar bekletilmiş; ardından havada soğutulmuştur. Sonuçta Şekil 5.16 da görülen yapı elde edilmiştir. Bu parametreler kullanılarak yapı iğnesel α yani dönüşmüş β 'dan oluşmaktadır. Tane sınırlarında β yapısı görülmektedir.

5.3.2 Mikrosertlik



Şekil 5.17 Ticari saflıktaki titanyumun Ti6Al4V titanyum alaşımı ile dolgulu TIG kaynağının mikrosertlik değerleri

Ti / Ti6Al4V malzeme çiftinin Ti6Al4V dolgu metali ile yapılan TIG kaynağında elde edilen mekanik özellikler; ana malzeme - ısı tesiri altındaki bölge (ITAB) - kaynak dikişi - ısı tesiri altındaki bölge (ITAB) - ana malzeme hattında mikrosertlik yardımı ile belirlenmiştir. Ölçüm hattının bu şekilde belirlenmesinin nedeni kullanılan ana malzemelerin bileşimlerinin birbirlerinden farklı olmasıdır. Ana malzemelerden biri 0,8 mm kalınlığındaki Ti6Al4V iken diğeri ise 2 mm kalınlığındaki ticari saflıktaki titanyumdur. Elde edilen mikrosertlik dağılımı Şekil 5.17 de verilmiştir.

Şekil 5.17 den de görüldüğü gibi en yüksek sertlik kaynak dikişinde elde edilmiştir. Mikrosertlik değerleri her iki ana metalden kaynak dikişinin merkezine doğru artmaktadır. Kaynak dikişinde elde edilen yüksek sertliğin nedeni, soğuma sırasında ilave malzemenin etkisiyle yapmış olduğu α - β dönüşümünün bir sonucudur. Bu bölgede elde edilen sertlik değeri ortalama 323 HV 0,2 dir. Kaynak dikişinin genişliği ise yaklaşık 1,6 mm kadardır.

Alaşımları farklı titanyum malzemeler kaynak edilmesi ile iki farklı ITAB bölgesi oluşmuştur.

Ti6Al4V alaşımının ITAB'ında elde edilen sertlik değeri, Ti6Al4V ana metaline göre daha yüksektir ve ortalama 371 HV 0,2 civarındadır. Bu bölgedeki yeniden kristalleşme sonucu ortaya çıkan kaba taneler, bazı bölgelerde kısmi sertlik düşüşüne neden olmuştur. Isı tesiri altındaki bölgenin genişliği yaklaşık 0,5 mm kadardır.

Ticari saflıktaki titanyumun ITAB'ında elde edilen sertlik değeri, saf titanyum ana malzemesinkine göre daha yüksektir ve ortalama değeri 159 HV 0,2 kadardır. Bu bölgenin ortalama genişliği ise 0,5 mm civarındadır.

Ticari saflıktaki titanyum ana malzemenin ortalama sertliği 133 HV 0,2 dir. Diğer bir ana malzeme olan Ti6Al4V alaşımının ortalama sertliği ise yaklaşık 332 HV 0,2 dir. Şekil 5.17 den de görüldüğü gibi Ti6Al4V alaşımının ortalama sertlik değeri ticari saflıktaki titanyumunkinin yaklaşık 2,5 katı kadardır.

Ti / Ti6Al4V ikilisi bir Ti6Al4V ilave metali kullanılarak birleştirildiğinde kaynak dikişi - ısı tesiri altındaki bölge - ana malzeme bölgelerinde heterojen bir mekanik özellik dağılımı söz konusudur. Kullanım yerine göre bu birleşme sonrasında kaynak dikişinde uygun bir ısııl işlem önerilebilir.

6. GENEL SONUÇ ve İRDELEME

Ticari saflıktaki titanyum çiftinin Ti6Al4V ilave metal kullanılarak TIG kaynak yöntemi ile birleştirilmesinde dolgu malzemesine bağlı olarak kaynak dikişinde martenzitik dönüşüm sonucunda sertlik artmış buna karşılık tokluk düşmüştür. Ayrıca yapıda, malzemenin kaynaklı olarak çalışmasını engelleyecek boyutta gözenekler oluşmuştur.

Bu problemin çözümü için ticari saflıktaki titanyum çiftinin ilave metal kullanılmadan TIG kaynağı yapılmıştır. Kaynak sonucunda mikroyapı incelendiğinde yapıda gözenekliliğe rastlanmamıştır. Ayrıca dolgu metali kullanılmadığından martenzitik dönüşüm gerçekleşmemiş; kaynak dikişinde tipik döküm yapısı gözlenmiştir.

Ticari saflıktaki titanyum ile Ti6Al4V çifti Ti6Al4V ilave metal kullanılarak TIG kaynak yöntemi ile birleştirilmiş ve yine dolgu malzemesine bağlı olarak kaynak dikişinde martenzitik dönüşüm sonucunda sertlik artışı meydana gelmiştir. Buna karşılık tokluk düşmüştür. Ayrıca yapıda, malzemenin kaynaklı olarak çalışmasını engelleyecek boyutta gözenekler oluşmuştur. Tüm bunlara ek olarak kaynak dikişinde boyuna çatlak meydana gelmiştir. Bu problemleri gidermek için daha yüksek parametrelerde TIG kaynağı yapılmış ve tüm bu hatalar giderilebilmiştir.

Uçak, otomotiv gibi dev endüstrilerde kullanımı gittikçe artan titanyumun kaynağında seçilen dolgu malzemeleri ve kaynak parametreleri çok önemli rol oynamaktadır. Bu nedenle bunların en uygun değerlerini saptamak gerekmektedir. Dolgu metalinin kimyasal bileşimi ve ergime sıcaklığı kaynak parametrelerini doğrudan etkilediğinden elde edilen özellikler doğrudan dolgu metaline bağlı olmaktadır. Kaynaklı titanyumun kullanım yerine göre dolgulu ve dolgusuz birleştirmelerinde gerekli görüldüğünde kaynak sonrası ısıtılabilir.

Kaynak dikişi, ısı tesiri altındaki bölge ve ana malzeme bölgelerindeki değişik dokular farklı mekanik özellikler ortaya çıkardığından, gerekli görüldüğü taktirde yapılacak son tavlama sözü edilen bölgelerde homojen bir mikroyapı ve dolayısıyla homojen mekanik özellik dağılımını sağlayacaktır.

Özellikle yüksek teknoloji gerektiren kullanımlarda, titanyum ve titanyum alaşımlarının birleştirilmesi laser ışını ile daha yüksek bir kalite elde edilmesini mümkün kılması nedeniyle tercih edilmektedir. Bununla birlikte, uygun parametrelerin ve uygun bileşimdeki dolgu metallerinin seçilmesi ile bu malzemelerin TIG kaynak yöntemi ile de birleştirilmesi mümkün olmaktadır.

KAYNAKLAR

- Anık, S. ve Vural, M. (2000), 1000 Soruda Kaynak Teknolojisi El Kitabı, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- Anık, S., Dikicioğlu, A. ve Vural, M., (1999), İmal Usulleri, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- Arenas, M.F. ve Acoff, V.L., (2002), "The Effect of Postweld Heat Treatment on Gas Tungsten Arc Welded Gamma Titanium Aluminide", Scripta Materialia, 46:241-246.
- Askeland, D.R., (2002), Malzeme Bilimi ve Mühendislik Malzemeleri Cilt 1 (Çev., M. Erdoğan), Nobel Yayın Dağıtım, Ankara.
- Aslan, U.E., (2001), "Farklı Metalsel Malzemelerin Kaynağı", Yüksek Lisans Tezi, Makina Fakültesi, YTÜ, 102.
- ASM Committee on Arc Welding of Titanium, (1983), "Arc Welding of Titanium Titanium Alloys", Metals Handbook, Vol. 6, ASM International, Metals Park, OH, USA, 446-456.
- ASM Committee on Titanium, (1983), "Titanium and Titanium Alloys", Metals Handbook, Vol. 2, ASM International, Metals Park, OH, USA, 1147-1156.
- ASM Committee on Titanium, (1983), Metals Handbook, Vol. 7, ASM International, Metals Park, OH, USA.
- Baker, H., (1993), "Introduction to Alloy Phase Diagrams", ASM Handbook, Vol. 3, ASM International, Metals Park, OH, USA, 1.21-1.23,3.22.
- Bhadeshia, H.K.D.H., (2003), "Metallurgy of Titanium and Its Alloys", University of Cambridge, England.
- Bhadeshia, H.K.D.H., (2003), "Metallurgy of Titanium and Its Alloys: Applications", University of Cambridge, England.
- Boyer, R.R., (1993), "Titanium and Titanium Alloys", ASM Handbook, Vol. 9, ASM International, Metals Park, OH, USA, 458-476.
- Chaturverdi, M.C., Richards, N.L. ve Xu, Q., (1997), "Electron Beam Welding of a Ti-45Al-2Nb-2Mn+0,8 vol.% TiB₂ XD Alloy", Materials Science and Engineering, A239-240:605-612.
- Destefani, J.D., (1993), "Introduction to Titanium and Titanium Alloys", ASM Handbook, Vol. 2, ASM International, Metals Park, OH, USA, 586-592.
- Disheng, G., (1987), "Nonferrous Metal Welding", Mechanical Industry Press, Beijing, 206.
- Grossbeck, M.L., King, J.F. ve Hoelzer, D.T., (2000), "Impurity Effects on Gas Tungsten Arc Welds in V-Cr-Ti Alloys", Journal of Nuclear Materials, 283-287:1356-1360.
- Gültekin, N., (1991), Kaynak Tekniği, Engin Ofset, İstanbul.
- Jeffus, L., (1993), Welding Principles and Applications, Delmer Publishers, Albany.
- Lampman, S., (1993), "Wrought Titanium and Titanium Alloys", ASM Handbook, Vol. 2, ASM International, Metals Park, OH, USA, 592-633.
- Lathabai, S., Jarvis, B.L. ve Barton, K.J., (2001), "Comparison of Keyhole and Conventional Gas Tungsten Arc Welds in Commercially Pure Titanium", A299:81-93.

Li, Z., Gobbi, S.L., Norris, I., Zolotovskiy, S. ve Richter, K.H., (1997), "Laser Welding Techniques For Titanium Alloy Sheet", Journal of Materials Processing Technology, 65:203-208.

Sharpe, J., (2000), Take The Fear Out Of Welding Titanium, Haesung Oriental, Korea.

Sundaresan, S., Ram, G.D.J. ve Reddy, G.M., (1999), "Microstructural Refinement of Weld Fusion Zones in α - β Titanium Alloys Using Pulsed Current Welding", Materials Science and Engineering, A262:88-100.

Süataç, M., (1985), "Titanyum Alaşımlarının Kaynak Kabiliyeti", Yüksek Lisans Tezi, Makina Fakültesi, İTÜ, 6-34.

Şirin, Ş., Kaluç, E. ve Sarı N., (1997), "Titanyum ve Alaşımlarının Kaynağı 1,2", İmalat ve Fabrika Dergisi, İstanbul.

Titanium Information Group, (2001), "Automotive Applications", England.

Titanium Information Group, (2001), "Titanium for Medical Applications", England.

Titanium Information Group, (2002), "Aerospace Alloys and Applications", England.

Todd, R.H., Allen, D.K. ve Alting L., (1994), Manufacturing Processes Reference Guide, Industrial Press Inc., USA.

Uzunov, T.D., Stojanov, S.P. ve Lambov, S.I., (1999), "Contact-Reactive Welding Via A Copper Layer", Vacuum, 52:365-368.

Ünal, A., (2001), "Biyomedikal Malzemeler Ders Notları", YTÜ, İstanbul.

Vairis, A. ve Frost, M., (1998), "High Frequency Linear Friction Welding of A Titanium Alloy", Wear, 217:117-131.

Webster, R.T., (1993), "Welding of Titanium Alloys", ASM Handbook, Vol. 6, ASM International, Metals Park, OH, USA, 783-787.

Weissbach, W., (1998), Malzeme Bilgisi ve Muayenesi (Çev., S. Anık, E. S. Anık, M. Vural), Birsen Yayınevi, İstanbul.

Yung, W.K.C., Ralph, B., Lee, W.B. ve Fenn, R., (1997), "An Investigation into Welding Parameters Affecting The Tensile Properties of Titanium Welds", Journal of Materials Processing Technology, 63:759-764.

Yunlian, Q., Ju, D., Quan, H. ve Liying Z., (2000), "Electron Beam Welding, Laser Beam Welding and Gas Tungsten Arc Welding of Titanium Sheet", Materials Science and Engineering, A280:177-181.

İNTERNET KAYNAKLARI

[1]<http://www.maden.org.tr/www/7.BYKP/ekutup96/o480/titanyum/titanyum.htm>

[2]www.key-to-metals.com

[3]www.weldingengineer.com

[4]www.class.et.byu.edu

[5]www.titaniuminfogroup.co.uk

[6]www.materialsengineer.com

[7]www.welding-advisers.com

[8]www.tpub.com



ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi	01.01.1979	
Doğum yeri	İstanbul	
Lise	1989-1997	Özel İtalyan Lisesi
Lisans	1997-2001	Yıldız Teknik Üniversitesi Kimya-Metalurji Fak. Metalurji Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans	2002-2004	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Müh. Anabilim Dalı, Malzeme Programı

