

133434

**TİTANYUM LEVHALARIN PATLAMALI KAYNAK YÖNTEMİ
İLE FARKLI METALLERE BİRLEŞTİRİLMESİ VE ARAYÜZEY
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Nizamettin KAHRAMAN

**DOKTORA TEZİ
(METAL EĞİTİMİ)**


**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Aralık 2003

ANKARA

133434
**T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ**

Nizamettin KAHRAMAN tarafından hazırlanan "TİTANYUM LEVHALARIN PATLAMALI KAYNAK YÖNTEMİ İLE FARKLI METALLERE BİRLEŞTİRİLMESİ VE ARAYÜZEY ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ" adlı bu tezin, Doktora tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.


Yrd. Doç. Dr. Behçet GÜLENC

Tez Yöneticisi

Bu çalışma, jürimiz tarafından Metal Eğitimi Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Fehim FINDIK

Üye : Prof. Dr. Mehmet TÜRKER

Üye : Doç. Dr. Adem KURT

Üye : Yrd. Doç. Dr. Behçet GÜLENC

Üye : Yrd. Doç. Dr. Ramazan KAÇAR

Bu tez, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygundur.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	iii
TEŞEKKÜR.....	v
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	vi
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	viii
RESİMLERİN LİSTESİ.....	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	x
1. GİRİŞ	1
2. TİTANYUM ALAŞIMLARI VE KAYNAK KABİLİYETLERİ.....	5
2.1. Titanyum ve Alaşımları.....	5
2.1.1. Titanyum ve alaşımlarının sınıflandırılması.....	7
2.2. Titanyum ve Alaşımlarının Kaynağı.....	12
2.2.1. Titanyum ve alaşımlarının ergitmeli kaynak yöntemleri.....	14
2.2.2. Titanyum ve alaşımlarının katı hal kaynak yöntemleri.....	19
3. PATLAMA KAYNAĞI.....	24
3.1. Patlamalı Kaynağın Tarihçesi.....	24
3.2. Patlamalı Kaynak İşlemi ve Mekanizması.....	25
3.3. Patlamalı Kaynak İşlem Parametreleri.....	30
3.4. Metalurjik Özellikler.....	33
3.5. Patlamalı Kaynağın Avantaj ve Dezavantajları.....	35
3.6. Patlamalı Kaynak Yöntemi ile Birleştirilebilen Malzemeler.....	37

3.7. Patlamalı Kaynakta Kullanılan Patlayıcılar.....	38
3.8. Patlamalı Kaynak Uygulamaları.....	39
3.9. Önceden Yapılan Çalışmalar.....	42
4. KOROZYON.....	47
4. 1. Korozyonun Ekonomik Boyutu.....	48
4.1.1. Tesisin servis dışı kalması.....	49
4.1.2. Ürün kaybı.....	49
4.1.3. Ürün kirlenmesi.....	49
4.1.4. Korozyon için alınan aşırı önlemler.....	49
4.1.5. Boya ve kaplamalar.....	50
4.2. Korozyon Çeşitleri.....	50
4.2.1. Homojen dağılımlı (Üniform) korozyon.....	51
4.2.2. Galvanik korozyon.....	51
4.2.3. Stres (gerilmeli) korozyonu.....	52
4.3. Deniz Suyu İçinde Korozyon ve Önlenmesi.....	53
4.4. Titanyumun Korozyon Davranışı.....	54
4.4.1. Titanyumda galvanik korozyon.....	55
4.4.2. Titanyumda gerilme korozyonu.....	56
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	57
5.1. Deneyleerde Kullanılan Malzemeler	57
5.2. Deneyleerde Kullanılan Patlayıcılar.....	58
5.3. Deneyleerin Yapılışı.....	59
5.4. Numune Hazırlama	60

5.4.1. Metalografik muayene ve sertlik deneyi.....	60
5.4.2. Çekme-makaslama testi.....	62
5.4.3. Eğme Deneyi.....	63
5.4.4. Korozyon testi	63
6. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	65
6.1. Metalografik Deney Sonuçları ve Tartışılması	65
6.1.1. Paslanmaz çelik-titanyum birleştirmeleri.....	67
6.1.2. Düşük karbonlu çelik-titanyum birleştirmeleri.....	71
6.1.3. Alüminyum-titanyum birleştirmeleri.....	75
6.2. Çekme-Makaslama Test Sonuçları ve Tartışılması.....	79
6.2.1. Paslanmaz çelik-titanyum birleştirmeleri.....	79
6.2.2. Düşük karbonlu çelik-titanyum birleştirmeleri.....	80
6.2.3. Alüminyum-titanyum birleştirmeleri.....	81
6.3. Eğme Test Sonuçları ve Tartışılması.....	82
6.4. Sertlik Test Sonuçları ve Tartışılması.....	83
6.4.1. Paslanmaz çelik-titanyum birleştirmeleri.....	84
6.4.2. Düşük karbonlu çelik-titanyum birleştirmeleri.....	86
6.4.3. Alüminyum-titanyum birleştirmeleri.....	88
6.5. Korozyon Deney Sonuçları ve Tartışılması.....	90
6.5.1. Paslanmaz çelik-titanyum birleştirmeleri.....	90
6.5.2. Düşük karbonlu çelik-titanyum birleştirmeleri.....	92
6.5.3. Alüminyum-titanyum birleştirmeleri.....	94

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	97
KAYNAKLAR.....	100
ÖZGEÇMİŞ.....	111



**TİTANYUM LEVHALARIN PATLAMALI KAYNAK YÖNTEMİ İLE
FARKLI METALLERE BİRLEŞTİRİLMESİ VE ARAYÜZEY
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

(DOKTORA TEZİ)

Nizamettin KAHRAMAN

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Aralık 2003**

ÖZET

Bu çalışmanın amacı, ülkemiz endüstrisinde istenilen yeri alamayan ve büyük öneme sahip, özellikle gelişmiş ülkelerde yaygın bir biçimde kullanılan patlamalı kaynak yöntemi ile kompozit levha üretmektir. Bu çalışmada patlamalı kaynak yöntemi ile eğik geometri kullanılarak, değişik patlayıcı oranlarında paslanmaz çelik-titanyum, düşük karbonlu çelik-titanyum ve alüminyum-titanyum birleştirmeleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen birleştirmeler optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskopunda (SEM) incelenmiş, ayrıca çekme-makaslama, eğme, sertlik ve korozyon testleri yapılmıştır.

Çalışmalar sonucunda, optik mikroskop ve SEM incelemelerinde artan patlayıcı oranı ile birlikte düz birleşme arayüzeyinden dalgalı birleşme arayüzeyine geçildiği ve arayüze yakın bölgedeki tanelerin patlama yönüne paralel uzadığı görülmüştür. Çekme-makaslama testleri sonucunda numunelerin arayüzeylerinden sıyrılmaması, dayanımı diğerine göre düşük olan malzemedan kopma gerçekleşmiştir. Eğme testlerinde de birleşme arayüzeyinde ayrılma, yırtılma vb. bir hataya rastlanmamıştır. Kaynaklı numuneler üzerinde yapılan mikro sertlik ölçümlerinde artan patlayıcı oranı ile birlikte sertliklerin arttığı ve ayrıca en yüksek sertlik değerlerinin birleşme

arayüzeyine yakın bölgelerde olduğu belirlenmiştir. Korozyon testleri sonucunda paslanmaz çelik-titanyum birleştirmelerinde oluşan kararlı oksit tabakası sebebiyle ağırlık artışı olurken, diğer birleştirmelerde ağırlık kaybının olduğu ve bu ağırlık kayıplarının artan patlayıcı oranı ile arttığı tespit edilmiştir.

Bilim kodu : 710
Anahtar Kelimeler : Patlama kaynağı, titanyum, korozyon, arayüzey
Sayfa Adedi : 111
Tez Yöneticisi : Yrd. Doç. Dr. Behçet GÜLENC



**JOINING OF TITANIUM PLATES TO DIFFERENT METALS BY
EXPLOSIVE WELDING METHOD AND INVESTIGATION OF THEIR
INTERFFACE PROPERTIES**

(Ph.D Thesis)

Nizamettin KAHRAMAN

**GAZI UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

December, 2003

ABSTRACT

The purpose of this study is to produce composite plates through explosive welding process widely used in developed countries and is of great importance to produce such plates and unfortunately currently its use in our country is not common. In this study, stainless steel-titanium, low carbon steel-titanium and aluminium-titanium plates were joined explosively employing oblique geometry route at different explosive ratios. The bondings were investigated using optical and scanning electron microscopy and tensile-shearing, bending, hardness and corrosion tests were carried out.

Optical and scanning electron microscopy examinations showed that a transition was observed from smooth bonding interface to a wavy one with increasing explosive ratio. It was also observed that grains near the interface were elongated parallel to the explosion direction. No shearing within the interface was seen from the tensile-shear tests and fracture took place within the low strength material. The bended specimens showed that defects such as separation and tearing were not observed. It is seen from microhardness measurements on the welded specimens that hardness was increased with increasing explosive ratio and the highest hardness values were obtained near

the bonding interface. Weight increase due to formation of a stable oxide layer on the welded stainless steel-titanium plates was seen from corrosion tests while weight loss was seen from the other specimens and this loss was increased with increasing explosive ratio.

Science Code : 710
Key words : Explosive welding, titanium, corrosion, interface
Page Number : 111
Adviser : Assoc. Prof. Dr. Behçet GÜLENC



TEŞEKKÜR

Bu tezin hazırlanmasında, çalışmalarım süresince hiçbir fedakarlıktan kaçınmayan, ilgi ve yardımlarını her zaman yanımda hissettiğim tez yürütücüsü hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Behçet GÜLENÇ'e sonsuz teşekkür ederim. Ayrıca tez danışmanlarımdan hocam Sayın Prof. Dr. Kutsal TÜLBENTÇİ'yi rahmetle anıyorum. Tez çalışmalarım süresince her türlü yardımı gösteren başta Metal Eğitimi Bölüm Başkanı Sayın Prof. Dr. Mehmet TÜRKER'e ve bütün bölüm çalışanlarına ve ayrıca TİK üyelerinden Doç. Dr. Adem KURT ve Yrd. Doç. Dr. Ramazan KAÇAR'a teşekkürü bir borç bilirim. Deneylerin yapılması esnasındaki yardımlarından dolayı Yrd. Doç. Dr. Mustafa ACARER, Arş. Gör. Ahmet DURGUTLU ve Elmadağ MKE Barutsan AŞ. çalışanlarına teşekkürlerimi arz ederim. Metalografik incelemelerdeki yardımlarından dolayı Kırıkkale Üniversitesi Fizik Mühendisliği Bölümü Araştırma Görevlilerine ve özellikle Yrd. Doç. Dr. Selçuk AKTÜRK'e, çalışmalarımın her safhasında bana moral kaynağı olan Arş. Gör. Mustafa BOZ, Arş. Gör. Kubilay KARACİF ve Arş. Gör. İbrahim ÇİFTÇİ'ye teşekkür ederim.

Ayrıca bu günlere gelmemde desteğini esirgemeyen sevgili Aileme sonsuz şükranlarımı sunarım. Ve tez çalışmalarım esnasında beni sabırla destekleyen ve bu günlerimi benimle paylaşan çok özel iki kişiye eşim Kevser ve kızım Beyza'ya teşekkür ederim.

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Bazı Titanyum ve Alaşımları için Mekanik özellikler.....	6
Çizelge 2.2. Ticari saflıktaki titanyum alaşımlarının genel özellikleri.....	8
Çizelge 2.3. Bazı yakın-alfa alaşımlarının mekanik özellikleri	9
Çizelge 2.4. α ve β dengeleyici elementler.....	9
Çizelge 2.5. Bazı β alaşımlarının mekanik özellikleri.....	12
Çizelge 2.6. Bazı titanyum alaşımlarının kaynak edilebilirlikleri.....	13
Çizelge 3.1. Titanyum ile birleştirilen bazı malzemelerin minimum kaynak hızları.....	32
Çizelge 3.2. Patlamalı kaynak yapılabilen metal ve alaşımları	37
Çizelge 3.3. Değişik kaplama malzemeleri ve kalınlıkları.....	38
Çizelge 3.4. Kaplamaların maliyet analizi.....	45
Çizelge 5.1. Deneilerde kullanılan titanyumun kimyasal bileşimi.....	57
Çizelge 5.2. Deneilerde kullanılan alüminyumun kimyasal bileşimi.....	57
Çizelge 5.3. Deneilerde kullanılan paslanmaz çelik ve düşük karbonlu çelik malzemelerin kimyasal bileşimi.....	57
Çizelge 5.4. Numunelere göre kullanılan patlayıcı oranları.....	59
Çizelge 5.5. Dağlama işleminde kullanılan kimyasal dağlayıcıların bileşimleri.....	61
Çizelge 6.1. Orijinal malzemelerin çekme mukavemetleri.....	79
Çizelge 6.2. Patlayıcı oranına göre paslanmaz çelik-titanyum birleştirmelerinin çekme-makaslama test sonuçları.....	79
Çizelge 6.3. Değişik patlayıcı oranlarındaki düşük karbonlu çelik-titanyum birleştirmelerinin çekme-makaslama test sonuçları.....	80
Çizelge 6.4. Patlayıcı oranına göre alüminyum-titanyum birleştirmelerinin çekme-makaslama test sonuçları.....	81

Çizelge 6.5. Paslanmaz çelik-titanyum birleştirmesinin sertlik değerleri.....	84
Çizelge 6.6. Düşük karbonlu çelik-titanyum birleştirmesinin sertlik değerleri.....	86
Çizelge 6.7. Alüminyum-titanyum birleştirmesinin sertlik değerleri.....	88
Çizelge 6.8. Patlayıcı oranına göre paslanmaz çelik-titanyum birleştirmelerindeki korozyon değişim miktarları.....	90
Çizelge 6.9. Patlayıcı oranına göre düşük karbonlu çelik-titanyum birleştirmelerindeki korozyon değişim miktarları.....	92
Çizelge 6.10. Patlayıcı oranına göre alüminyum-titanyum birleştirmelerindeki korozyon değişim miktarları.....	94



ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Sürtünme kaynağı mekanizması	20
Şekil 3.1. Paralel düzlemde patlamalı kaynağın şematik gösterimi.....	25
Şekil 3.2. Eğik düzlemde patlamalı kaynağın şematik gösterilimi.....	26
Şekil 3.3. Patlamalı kaynak esnasında parçalar arasındaki birleşme şekli.....	28
Şekil 3.4. Patlamalı kaynak işlem parametrelerinin şematik gösterimi	31
Şekil 3.5. Patlama hızına bağlı olarak oluşan akış modeli.....	35
Şekil 3.6. Patlamalı kaynakta borudan boruya birleştirme	40
Şekil 3.7. Patlamalı kaynak ile bindirme kaynağının şematik gösterimi.....	41
Şekil 3.8. Tüplerin patlamalı kaynağı	41
Şekil 3.9. Arabağlayıcı kullanılarak yapılan patlamalı kaynağın şematik gösterimi.....	42
Şekil 4.1. Malzeme seçimine etki eden faktörler.....	48
Şekil 4.2. İki farklı metalin teması ile oluşan galvanik korozyon.....	51
Şekil 5.1. ASTM standardına göre makaslama testi	62
Şekil 5.2. Eğme deneyinin yapılışı.....	63
Şekil 6.1. Paslanmaz çelik-titanyum birleştirmesinin sertlik ölçümleri.....	84
Şekil 6.2. Düşük karbonlu çelik-titanyum birleştirmesinin sertlik ölçümleri.....	86
Şekil 6.3. Alüminyum-titanyum birleştirmesinin sertlik ölçümleri.....	88
Şekil 6.4. Orijinal malzemeler ile paslanmaz çelik-titanyum birleştirmelerindeki korozyon değişimleri.....	91
Şekil 6.5. Orijinal malzemeler ile düşük karbonlu çelik-titanyum birleştirmelerindeki korozyon değişimleri.....	93
Şekil 6.6. Orijinal malzemeler ile alüminyum-titanyum birleştirmelerindeki korozyon değişimleri.....	95

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 3.1. Patlamalı kaynak ile elde edilmiş dalgalı arayüzey görünümü.....	29
Resim 5.1. Altlık üzerine patlayıcı ve birleştirilecek malzemelerin yerleştirilmesi.....	58
Resim 5.2. Patlama anından bir fotoğraf.....	60
Resim 6.1. Deneyleerde kullanılan malzemelerin optik mikroskop görüntüleri a) titanyum, b) paslanmaz çelik, c) düşük karbonlu çelik ve d) alüminyum.....	66
Resim 6.2. Paslanmaz çelik-titanyum birleştirmelerinin a)R=1,2, b) R=1,5, c)R=2, d)R=2,5 ve e)R=3 patlayıcı oranındaki optik mikroskop görüntüleri	68
Resim 6.3. a)R=1,2, b)R=1,5, c)R=2, d)R=2,5 ve e)R=3 patlayıcı oranlarında paslanmaz çelik-titanyum birleştirmelerinin SEM görüntüleri.....	70
Resim 6.4. Düşük karbonlu çelik-titanyum birleştirmelerinin a) R=1,2, b) R=1,5, c)R=2, d)R=2,5 ve e)R=3 patlayıcı oranındaki optik mikroskop görüntüleri.....	72
Resim 6.5. a)R=1,2, b)R=1,5, c)R=2, d)R=2,5 ve e)R=3 patlayıcı oranlarında elde edilen düşük karbonlu çelik-titanyum birleştirmelerinin SEM görüntüleri.....	74
Resim 6.6. Alüminyum-titanyum birleştirmelerinin a) R=1 b) R=1,2 c)R=1,5 d)R=2 ve e)R=2,5 patlayıcı oranındaki optik mikroskop görüntüleri.....	76
Resim 6.7. a)R=1 b)R=1,2, c)R=1,5, d)R=2 ve e)R=2,5 patlayıcı oranlarında elde edilen alüminyum-titanyum birleştirmelerinin SEM görüntüleri.....	78
Resim 6.8. Eğme testi yapılan a)paslanmaz çelik-titanyum, b) düşük karbonlu çelik-titanyum ve c) alüminyum-titanyum numunelerin görüntüleri.....	83

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
R	Patlayıcı oranı
Vd	Patlayıcıların patlama hızı
Vp	Üst levhanın hızı
s	Ara boşluk mesafesi
β	Çarpışma açısı
Vw	Kaynak hızı
α	Eğik düzlemlerde çarpma açısı

Kısaltmalar

ITAB	Isı tesiri altında kalan bölge
GTAW	Gaz tungsten ark kaynağı
GMAW	Gaz metal ark kaynağı
PAW	Plazma ark kaynağı
LBW	Lazer ışın kaynağı
EBW	Elektron ışın kaynağı
TNT	Trinitrotulene patlayıcı
RDX	Cyclotrimethylene-Trinitramine patlayıcı

1. GİRİŞ

Malzemelerin yüzey özelliklerini değiştirerek yeni özellikler kazandırmak veya dekoratif açıdan çekici kılmak insanoğlunun eski çağlardan beri süregelen amaçlarından biri olmuştur. Günümüzde, malzeme yüzeylerinin değiştirilmesine yönelik işlemler, “yüzey ve taban malzemenin tasarımını bir arada ele alan ve her ikisinin tek başlarına sağlayamayacağı özellikleri ekonomik olarak sağlayabilen” işlemler olarak tanımlanabilir. Yüzey işlem teknolojileri ve yüzey mühendisliği, özellikle 90’lı yıllardan sonra önemli hale gelmiştir. Halen hem klasik hem de modern teknolojilere dayanan yüzey işlemlerinin önemi artmaya devam etmektedir. Yüzey işlemleri, taban malzemeye kitlesel olarak sahip olmadığı nitelikler kazandırmakta, daha ucuz ve daha kolay üretilebilen bir malzemenin yüzeyini değiştirerek istenilen amaca ulaşılabilmesini sağlamaktır (1,2).

Günümüzdeki konstrüksiyonlar iş verimi ve güvenliğini arttırmaya, boyutları ve ağırlığı küçültmeye, aynı zamanda malzeme ve üretim masraflarını azaltmaya yöneliktir. Buna paralel olarak birleştirme teknolojisi de gelişmesine rağmen sürekli bir şekilde yeni problemlerle karşı karşıya kalmaktadır (2).

Endüstride kullanılan imalat yöntemleri arasında kaynak, en çok kullanılan birleştirme tekniklerinden birisidir. Teknolojinin ilerlemesiyle yeni kaynak yöntemleri geliştirilmiş ve klasik kaynak yöntemleri ilerletilmiştir. Yapılan araştırmalar sonucu elde edilen malzeme gruplarını işleme ve birleştirmeye yönelik çalışmalarda buna paralel olarak gelişmiş ve bu doğrultuda metallerin özelliklerini kaybetmeden birbirleriyle birleştirme gereksinimi ortaya çıkmıştır.

Gelişen günümüz endüstrisinde ihtiyaç duyulan malzeme özelliklerinin çok çeşitli olması da farklı özelliklere sahip bu metalik malzemelerin en uygun biçimde nasıl birleştirilebileceği sorusunu ortaya çıkarmaktadır. Bu soruya, gelişmekte olan kaynak teknolojisi en iyi cevabı verebilmektedir. Günümüzde katıhal kaynak teknikleri farklı metalik malzemelerin birleştirilmesinde başarı ile kullanılabilir (3).

Bugün çok sayıda birleştirme tekniği vardır ve günümüzdeki sorun birleştirmenin nasıl yapılacağı değil, en iyi birleştirme yönteminin nasıl seçileceğidir. Bronz çağı insanı birleştirme yöntemi olarak sadece kama kullanma veya deri şeritle bağlama arasında seçim yapmak zorunda iken, günümüzde bir tasarım mühendisi, aynı derecede uygun dört veya beş değişik birleştirme tekniğinin olduğu durumlarla kolaylıkla karşılaşılabilir. Her yöntemin kendine has özellikleri vardır ve en uygun seçim için birçok hususun değerlendirilmesi gerekir. Mukavemet, üretim kolaylığı, maliyet, ömür, korozyon dayanımı ve görünüş gibi faktörlerin göreceli önemi büyük ölçüde göz önüne alınan uygulamaya bağlıdır (4).

Birleştirme teknolojisinin tarihçesi, gerçekte bir grup insan kütesinin tarihidir. Bunların büyük bir kısmı ufak tamircilik yapan, bir kısmı da hayal kuranlardır desek daha uygun olur. Bütün bunların hepsi de kendilerine göre bir katkıda bulunmuşlardır. Bu insanlar, sık sık kazançlı olmayan araştırmalarla, arkadaşlarının alaylarına bile maruz kalmışlardır. Fakat bütün bunlara rağmen neye inanmışlar ise, onun için savaştan bu insanlar, ufak katkıları ile dünyamıza iyi bir metal birleştirme usulünü armağan etmişlerdir. Bunların başlıcaları ise, lehimleme veyahut da demirci kaynağı ile yapılan birleştirmelerdir. Günümüzde demirci kaynağı, pratikte her ne kadar unutulmuş ise de, orijinal bir metal birleştirme işlemi olarak nazari itibara alınabilir. Birinci Dünya Savaşından sonra kaynak teknolojisi ilerlemelerini sağlamlaştırmış ve tamir yöntemi olarak kullanılmasının yanında, üretim aracı haline de gelmiştir. Kaynak endüstrisinde önceleri az, sonraları da daha çok bir talep görünmeye başlandı 1941 ila 1942 yılları arasında kaynak endüstrisi % 350 nispetinde fazla bir kapasiteye erişti. Bu ise, geleceğin ancak bir kısmı idi. Türkiye’de kaynağın gelişmesi 1950’li yılların ortasından itibaren olmuştur. İstanbul Teknik Üniversitesi eğitim planına kaynağı 1951’de almıştır. Makine Malzeme ve İmal Usulleri Enstitüsü, endüstriye ilk kaynak kurslarını 1955 yılında açmıştır (5,6). Ayrıca, Ankara’da önceleri Yüksek Teknik Öğretmen Okulu’nda daha sonraları Teknik Eğitim Fakültesi bünyesinde kaynak eğitimi ile ilgili çeşitli dersler verilmiş ve 2000 yılında kaynak alanındaki gelişmeleri duyurmak ve iletişimi sağlamak üzere Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi’nde Kaynak Teknolojisi Derneği kurulmuştur.

1950'li yıllarda geliştirilen patlamalı (İnfilak) kaynak yönteminin endüstriye girişi yavaş olmuştur. Her ne kadar patlamalı şekil verme ile ilgili patentler 1900 yıllarında alınmış ise de, patlamalı kaynak yöntemi yeni yeni çeşitli uygulama alanlarına girmiştir. Uzun menzilli roket ağızlarına ve uçak gövdesinin petek yapılarına uygulanan patlamalı şekil verme yöntemi çok iyi sonuçlar vermiştir. Günümüzde patlamalı kaynak yöntemi farklı metallerin birleştirilmesinde geniş çapta kullanılmaktadır (6,7).

Patlamalı kaynak yönteminin kullanımıyla ilgili ilk patent başvurusu 1950'lerin sonunda ve 1960 yılının başında DuPont Company tarafından alınmıştır. Patlamalı kaynak ilk olarak I. Dünya Savaşı sırasında bombalardan kopan küçük parçacıkların etrafındaki metal yapılara yapışması ile dikkat çekmiştir. Bu zamana kadar endüstride bu olay fark edilememiştir. Bir mühendislik şirketi olan DuPont Company patlamalı kaynak işlem parametrelerinin kontrolüne ve geliştirilmesine katkı sağlamıştır. O zamanlarda ilk olarak uzay sanayinde kullanılmış olan kaynak yöntemi daha sonra endüstride birçok alanda kullanılmaya başlanmıştır. Bugün patlama ile kaynak (kaplama) ve şekil verme işlemi, gemi yapımı, elektronik sanayi ve uzay mekikleri yapımı gibi alanlarda kullanılmaktadır (8).

Titanyum ve alaşımları katı hal kaynak yöntemleriyle kolayca birleştirilebilirler. Sonuçta, bu işlemler titanyumdan yapılan yeni ürünler için üretim tekniklerinin geliştirilmesinde cazip olmaktadır. Katı hal birleştirme teknikleri titanyum ve alaşımlarına uygulanabilmektedir. Dolayısıyla titanyum malzemeler gelecekteki üretim için büyük çeşitlilik sağlamaktadır. Titanyumun yeni bir alana sunulmasında birleştirmenin önemli olduğu durum dikkate alınmalıdır. Bu durum titanyum boruların deniz endüstrisi için birleştirilmesidir. Burada katı hal kaynak tekniğinin kullanılması kaynak zamanını önemli derecede azaltabilir. Bu uygulama için birçok yöntem geliştirilmesine rağmen gerekli teknolojinin varlığı, tecrübe, işlemin ekonomikliği ve kaynağın özellikleri gibi faktörler düşünülmelidir (9).

Titanyum ve alaşımları, patlamalı kaynak yöntemi ile zirkonyum, magnezyum, gümüş, kolombiyum, tantal, karbonlu çelik, alaşımlı çelikler, paslanmaz çelik, bakır

ve alaşımları, alüminyum ve alaşımları, nikel ve alaşımları ile birleştirilebilirler (10,11).

Patlamalı kaynak çoğunlukla iki metali birleştirmek için kullanılır. Bu yöntem bir katı hal kaynağı olduğu için farklı malzemelerin birleştirilmesinde tercih edilir. Ayrıca patlamalı kaynak yöntemi soğuk bir işlem olduğundan birleştirilecek malzemelerin kaynak öncesi özellikleri, kaynak sonrası da metalurjik olarak değişim göstermez (12,13). Patlama kaynağı esas olarak korozyona dayanıklı tabakaların ağır alt metal tabakaya birleştirmek için kullanılır. Özellikle birleştirilecek alanlar çok büyük ise patlama sonucu basma gerilme dalgası plakaların yüzeyine etki eder. Bu etki sonucu yüzeydeki oksit tabakaları sıvılaşır veya metalden dışarı atılır. Atılma sonucu elde edilen temiz yüzeyler yüksek basınç altında birleştirilirler. Sonuç olarak, kenetlenen bir seri arayüzeyden oluşan ve düşük sıcaklıkta elde edilen bir kaynak oluşur. Birleştirme dayanımı oldukça yüksektir ve patlama ile elde edilen tabakalar, kalınlığının haddelme ile inceltilmesi gibi bir takım işlemler tabi tutulabilir (14).

Bu çalışmanın amacı, ölkemiz endüstrisinde istenilen yeri alamayan ve büyük öneme sahip özellikle gelişmiş ölkelerde yaygın bir biçimde kullanılan patlamalı kaynak yöntemi ile kompozit levha üretmektir. Tek malzeme yerine kompozit levha kullanımının nedeni; daha iyi korozyon direnci, arttırılmış ısı transfer karakteristikleri, düşük maliyette kabul edilebilir dayanım yada rijitlik, geliştirilmiş elektriksel özellikler yada daha iyi aşınma ve erozyon direncine sahip malzemeleri düşük maliyetle üretmektir. Bu amaç ile, düşük karbonlu çelik, paslanmaz çelik ve alüminyum levhalar üzerine patlamalı kaynak yöntemi ile titanyum levha kaplanmıştır. Kaynak işlemleri, alt levha ile kaplama levhası arasında 5⁰'lik eğim verilerek değişik patlayıcı oranlarında gerçekteştirilmiştir. Çalışmalar sonucunda elde edilen birleştirmelerin mikroyapı ve mekanik özellikleri ile korozyon dayanımları incelenmiştir.

2. TİTANYUM ALAŞIMLARI VE KAYNAK KABİLİYETLERİ

2.1. Titanyum ve Alaşımları

1791 yılında İngiliz malzeme bilimcisi Wilhelm Gregor Madakaskar'da çalışırken esasını belirleyemediği bir metal olan titanyumu bulmuş ve Menachon şehriden esinlenerek Menakirit adını vermiştir. Bundan dört yıl sonra Alman kimyacı Martin Heinric Klaproth yaptığı çalışma sonucunda, bu metalin yeni bir element olduğunu keşfetmiş ve yunan mitolojisinde toprağın ilk oğulları anlamına gelen "Titan" isminden esinlenerek bu yeni elemente "Titanyum" ismini vermiştir.

Yer kabuğunun % 6'sı titanyumdan oluşmasına rağmen, saflaştırılmasının zorluğu ve ileri teknoloji gerektirmesi nedeni ile 1940'lı yıllara kadar endüstriyel bir malzeme olarak kullanılmamıştır. Bu yıllarda Wilhelm Kroll'un geliştirdiği kroll adı verilen bir yöntemle teknik üretime geçilmiştir (15).

Titanyum ve alaşımları sadece 1952 yılından beri yapısal malzemeler olarak kullanımda olduğu için nispeten yeni mühendislik malzemeleridir. Titanyum alaşımları, yüksek bir dayanımın ağırlığa oranına, yaklaşık 550 °C'ye kadar yüksek sıcaklık özelliklerine ve özellikle oksitleyici asitlerde ve klorit maddelerinde ve de çoğu tabii ortamlarda mükemmel korozyon dirençlerine sahiptirler (16,17).

Titanyum 4,5 g/cm³ özgül ağırlığı, 126 kg/mm²'ye varan yüksek akma dayanımı, 253 °C'den yaklaşık 500 °C'ye kadar bir ısı aralığında yüklenebilme kabiliyeti, bakır ve krom-nikelli çeliklerden daha fazla korozyon direnci titanyumu diğer metallere ayıran en belirgin özelliklerdendir (15). Titanyum ve alaşımları uzay araçları, kimyasal endüstri ve bazı spor aletleri yapımında geniş bir kullanım alanına sahiptir (18). Bununla birlikte titanyum ve alaşımları genelde oksijeni kolayca emerler ve 500 °C'dan yüksek sıcaklıklarda açık havada kullanıldıklarında oksidasyona maruz kalırlar. Aynı zamanda titanyum ve alaşımları yüksek sıcaklığa maruz kaldıklarında yüzeylerinde titanyum oksit oluşumu etkin olduğu bilinmektedir (19).

Saf titanyum mükemmel biyolojik uyumluluğu ve uygun mekanik özelliklerinden dolayı medikal alanda geniş bir kullanım alanına sahiptir. Ayrıca fiziksel ortamlarda mükemmel korozyon direnci göstermesi, düşük yoğunluğu, kimyasal durgunluğu, kimyasal tepkimeye girmemesi, zehirli olmaması ve mekanik dayanımının iyi olması bu metali daha cazip hale getirmektedir (20,21). Titanyum, yüksek yorulma ömrü, tokluğunun iyi olması, kaynak yapılabilme imkanının olması ve yoğunluğunun düşük olması nedeniyle askeri alanda, deniz ile temas eden yapılarda ve kimyasal etkilerin olduğu ortamlarda kullanılan en iyi mühendislik malzemesidir (22). Titanyum ve alaşımları için mevcut pek çok sınıf ve alaşımların bazıları Çizelge 2.1' de verilmiştir (23).

Çizelge 2. 1. Bazı titanyum ve alaşımları için mekanik özellikler.

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

Titanyum düşük sıcaklıklarda HSP (Hegzogonal sıkı paket) yapılı (α) ve 882 °C'ın üzerinde HMK (Hacim merkezli kübik) (β) allotropik bir metaldir. Alaşım elementleri katı eriyik mukavemetlenmesi sağlar ve allotropik dönüşüm sıcaklığını düşürür (23-25). Kalay gibi ilaveler, dönüşüm sıcaklığını etkilemeksizin katı eriyik mukavemetlenmesi sağlar. Alüminyum, oksijen, hidrojen ve diğer alfa dengeleyicileri (kararlaştırıcı) elementler (α)'dan (β)'ya dönüştüğü sıcaklığı yükseltir. Vanadyum, tantalyum, molibden ve niyobyum gibi β dengeleyici

elementler dönüşüm sıcaklığını düşürür, hatta (β)'nın oda sıcaklığında dengeli kalmasına neden olur. Son olarak mangan, krom ve demir ötektoid reaksiyon sağlar, α - β dönüşüm sıcaklığını düşürür ve oda sıcaklığında iki faz oluşturur (23,26).

2.1.1. Titanyum ve alaşımlarının sınıflandırılması

Titanyum alaşımları yapılarındaki faz varlıklarına göre sınıflandırılırlar. Esas olarak başlıca α fazından oluşan alaşımlar α alaşımı olarak adlandırılırken küçük miktarlardaki β kararlaştırıcı elementlerle birlikte prensip olarak α fazı içerenler yakın β titanyum alaşımları olarak adlandırılırlar. α + β karışımından oluşan alaşımlar α + β alaşımlar olarak sınıflandırılırlar. Son olarak çözündürme ısıl işleminden soğutmadan sonra oda sıcaklığında β fazının kararlı hale getirildiği titanyum alaşımları β alaşımları olarak sınıflandırılırlar (16,17).

2.1.1.1 Ticari saf titanyum

Ticari saf titanyum; titanyumun oksijen, azot, hidrojen, karbon ve demir ile birlikteki çok seyreltik alaşımı olarak görülür. Oksijen, azot ve karbon sünekliği azaltırken aynı zamanda malzemeyi kuvvetlendirir. Bu malzemenin mikroyapısı tamamen alfa fazından ibarettir. Saf titanyumun 650-700 $^{\circ}$ C'de tavlanarak kullanılması çok yaygındır. Böyle bir ısıl işlemten sonra mikroyapı ince eşeksenli alfa taneciklerinden oluşmaktadır. Şayet saf titanyum beta alanı içinde ısıtılırsa (900-950 $^{\circ}$ C) hızlı bir tane büyümesi meydana gelir ve soğumayla birlikte kaba tırtıllı alfa şekillendirilir (27).

Ticari saf titanyum pek çok kimyasal ortamlara karşı mükemmel dirence sahiptir. Nitrik asit, nemli klor, klor çözeltileri, klorlanmış organize bileşikler ve inorganik klor çözeltileri ve de özellikle sıcak klor çözeltilerine karşı dirençlidirler. Titanyum kullanımında artışın görüldüğü yer petrol proses endüstrisi ve ısı değiştiricileridir. Titanyum rafinerilerde kullanılır çünkü sülfidler, kloritler ve petrol rafine etmede

karşılaşılan pek çok diğer kimyasallara karşı dirençlidirler (16). Çizelge 2.2’de ticari saflıktaki titanyum alaşımlarının genel özellikleri verilmiştir.

Çizelge 2. 2. Ticari saflıktaki titanyum alaşımlarının genel özellikleri (15).

ASTM Standardı	Akma Dayanımı	Çekme Dayanımı	Dönüşüm sıcaklıkları		Alaşım elementleri				
			Alfa	Beta	N	C	H	Fe	O
Grade 1	170 MPa	240 MPa	888	880	0,03	0,10	0,015	0,20	0,18
Grade 2	280 MPa	340 MPa	913	890	0,03	0,10	0,015	0,30	0,25
Grade 3	380 MPa	450 MPa	920	900	0,05	0,10	0,015	0,30	0,35
Grade 4	480 MPa	550 MPa	950	905	0,05	0,10	0,015	0,50	0,40

2.1.1.2. Yakın α titanyum alaşımları

Yakın α titanyum alaşımları bir başka tüm α faz yapısında bir miktar β fazı dağılımını içeren alaşımlardır. β kararlaştırıcı elementler olan küçük miktarlardaki molibden ve vanadyum (yaklaşık % 1-2) oda sıcaklığında bu alaşımların bir miktar β fazı bırakması için ilave edilir. Kalay ve zirkonyum bu alaşımların pek çoğuna ilave edilir böylece alüminyum içerikleri azaltılabilirken dayanımları hala korunabilir (16,28).

Yakın α alaşımlarının yapısındaki α fazı yüksek kararlılığa sahiptir ve sınırlı miktarda β fazını kararlaştıran elementler içerebilir. Ti-8Al-1Mo-1V, Ti-6Al-5Zr-0,5Mo-0,25Si gibi malzemeler yakın-alfa alaşımlarına birer örnektir. Bu alaşımlar α alaşımlarına benzer özellikler göstermekle birlikte 400-500 °C sıcaklık aralığında yüksek dayanım gerektiren uygulamalarda kullanılmaktadırlar (15). 8Al-1Mo-1V alaşımı orijinal olarak jet motorlarının kompresör kısmında orta yüksek sıcaklık uygulamaları için geliştirilmiş ve uçak dış kaplama parçaları için kullanılmıştır. Bu alaşım iyi kaynaklanabilirlik, iyi sürünme direnci ve tokluk, yüksek dayanım ve düşük süneklik gibi istenen özelliklere sahiptir. Bu alaşımın bir dezavantajı tuz

ortamında gerilim korozyonuna karşı hassas olmasıdır (16). Bazı yakın-alfa alaşımlarının mekanik özellikleri Çizelge 2. 3'de verildiği gibidir.

Çizelge 2.3. Bazı yakın-alfa alaşımlarının mekanik özellikleri (16).

Kompozisyon (%)	Şartlar	Oda sıcaklığı				Fazla sıcaklıklar				
		Çekme Dayanımı (psi)	Akma Dayanımı (psi)	Uzama (%)	Kesit Daral (%)	Deney Sıcaklığı (°F)	Çekme Dayan. (psi)	Akma Dayan. (psi)	Uzama (%)	Kesit Dar. (%)
8Al-1Mo-1V	Çift tavlınmış	145.000	138.000	15	28	600	115.000	90.000	20	38
6Al-2Sn-4Zr-2Mo	-	142.000	130.000	15	35	600	112.000	85.000	16	42
						800	102.000	75.000	21	55
						1000	94.000	71.000	26	60
5Al-5Sn	975 °C 1/2saat havada soğutulma	152.000	140.000	13	-	600	115.000	82.000	15	-
2Zr-2Mo-0,25Si	600 °C 2 saat havada soğutulmuş	-	-	-	-	800	113.000	77.000	17	-
6Al-1Mo-2Cb-1Ta	-	-	-	-	-	1000	100.000	73.000	19	-

2.1.1.3. α - β Titanyum alaşımları

α ve β dengeleyicilerinin uygun dengesi ile oda sıcaklığında α ve β 'nin bir karışımı üretilir. Çizelge 2. 4'de α ve β dengeleyici elementler görülmektedir.

Çizelge 2. 4. α ve β dengeleyici elementler (15).

Alaşım elementi	Alaşım elementi miktarı (Ağırlıkça %)	Yapı hatası
Alüminyum	2-7	Alfa dengeleyici
Kalay	2-6	Alfa dengeleyici
Vanadyum	2-15	Alfa dengeleyici
Molibden	2-13	Alfa dengeleyici
Krom	2-12	Alfa dengeleyici
Bakır	1-3	Alfa dengeleyici
Zirkonyum	2-8	Sürünme dayanımını artırır
Silisyum	0,05-1	Sürünme dayanımını artırır

Tavlama, yüksek süneklik üniform özellikler ve iyi dayanım kombinasyonunu oluşturur. β dönüşüm sıcaklığının hemen altına alaşımı ısıtma, küçük bir miktar α 'nın kalmasını ve tane büyümesini önlemeyi sağlar. Yavaş soğutma, küçük β faz adalarını kuşatan eş eksenli α taneleri, hızlı soğutma ise iğne şeklinde bir α fazı oluşturur (23).

α - β titanyum alaşımlarına çözündürme ısıl işlemi uygulanabilir, su verilebilir ve dayanımı arttırmak için yaşlandırma yapılabilirler. Bu alaşımların mikroyapıları öncelikle (a) kimyasal kompozisyona, (b) işlemin geçmişine ve (c) ısıl uygulamalara bağlıdır. Alaşımların mikroyapıları genelde çifttir. Farklı mikroyapısal oluşumlardan meydana gelmektedir (17).

Uygulamada kullanılan titanyum alaşımlarının % 70'i α - β alaşımlarından oluşmaktadır. α - β alaşımlarının en yaygın olarak kullanılan türü Ti-6Al-4V alaşımıdır ve bu alaşım sahip olduğu üstün özellikler sebebi ile yaygın olarak kullanılmaktadır (15). Ti-6Al-4V alaşımı mükemmel çekme, yorulma dayanımı ve korozyon direncine sahiptir. Alaşım genellikle uçak sanayi, makine parçaları, petrokimyasal fabrikalar için malzemeler ve tıbbi implant endüstride kullanılmaktadır. Ekstrüze edilmiş veya haddelenmiş işlem ürünleri geniş çapta uçak parçalarında kullanılırken hassas döküm daha düşük maliyet ve yüksek hasar toleransı özelliğinden dolayı karmaşık (komplike) parçaların üretimi için mükemmel bir teknolojidir. Bu alaşımdaki bir çok döküm hataları sıcak izostatik presleme işlemi ile giderilebilir. Bu malzemenin birleştirilmesi için kaynak teknolojisine ihtiyaç vardır (29).

Ti-6Al-4V alaşımı kolaylıkla kaynaklanabilir ve işlenebilir. Levha, ekstrüzyon, tel ve çubuk şeklinde çok çeşitli fabrika ürünleri bulunur. Bu alaşıma 165 ksi'lik (1138 Mpa) bir çekme dayanımı için ısıl işlem uygulanabilir ve 482 °C'ye kadar iyi bir metalurjik kırılma sahasına sahiptir. Bunun dezavantajlarından birisi düşük sertleşebilirliğe sahip olması ve bu nedenle 25,4 mm kadar olan kısmının sertleşebilir olmasıdır (16).

α - β titanyum alaşımları içerisinde çok iyi Şekil verilebilme özelliğine sahip Ti-6Al-4V alaşımının çok iyi mekanik özellikler verdiği bilinmektedir. Bunun sebebi alüminyum güçlü bir katı ozelti sertleŐme etkisi gösterirken, vanadyum oda sıcaklığında β fazını stabilize ederek yüksek sıcaklıklarda sünekliği iyileŐtirmesindedir (30).

2.1.1.4. β Titanyum alaşımları

Bu alaşımlar önemli miktarda β fazı kararlaştırıcı elementler olan vanadyum ve molibden içerirler. SertleŐtirilebilme, dövülebilirlik, soğuk Şekil verebilme ve de yüksek yoğunluk gibi özelliklere sahiptirler (15). Beta alaşımları β dengeleyicilerle zenginleŐtirilmiŐlerdir. Bu nedenle hızlı soğuma ile hepsi β 'dan oluşan dengesiz bir faz oluşur. Tavlanmış Şartlarda mikroyapıda sadece β fazı vardır. β matrisi içinde α fazının okelmesi ile sertleŐtirilebilirler. Asıl dayanım katı eriyik mukavemetlenmesi ile sağlanır (15,31).

β titanyum alaşımları yüksek kırılma tokluğuna sahiptirler ve molibden içeren β alaşımlarının korozyona karşı dirençleri yüksektir. Őartlı olarak kaynak edilebilen β alaşımları α - β alaşımlarına göre ısıl işleme yatkın olup, iyi iŐlenebilmektedirler. Şu anda büyük miktarlarda üretilen sadece bir tane β titanyum alaşımı, Ti-%13V-%11Cr-%3Al vardır. Bu alaşımlar genellikle en yüksek dayanımlarını elde etmek için zndrme ısıl işlemi uygulanmış ve yaşlandırılmış Şartlarda kullanılırlar. Bu alaşımlar 210 ksi'ye (1448 Mpa) kadar ulaŐan bütün titanyum alaşımlarının en yüksek dayanımlarına sahiptirler (16). Bazı β titanyum alaşımlarının mekanik özellikleri izelge 2. 5'de verilmiştir.

Çizelge 2. 5. Bazı β alaşımlarının mekanik özellikleri (16).

Kompozisyon (%)	Şartlar	Oda sıcaklığı			Fazla sıcaklıklar			
		Çekme Dayanımı (psi)	Akma Dayanımı (psi)	Uzama (%)	Deney Sıcaklığı (°F)	Çekme Dayanımı (psi)	Akma Dayanımı (psi)	Uzama (%)
13V-11Cr-3Al	Çözündürme+yaşlandırma	177.000	170.000	8	600	128.000	115.000	19
8 Mo-8V-	Çözündürme+yaşlandırma	185.000	175.000	8	800	160.000	120.000	12
2Fe-1Al	Çözündürme+yaşlandırma	190.000	180.000	8	600	164.000	142.000	15
3Al-8V-6Cr	Çözündürme+yaşlandırma	210.000	200.000	7	600	150.000	130.000	20
					800	136.000	110.000	17
11,5Mo-6Zr-4,5Sn	Tavlanmış	128.000	121.000	15	600	105.000	95.000	22
	Çöz+yaşlan.	201.000	191.000	11	600	131.000	123.000	16

2.2. Titanyum ve Alaşımlarının Kaynağı

Titanyum ve titanyum alaşımlarının çoğu alüminyum veya ostenitik paslanmaz çeliklerin kaynağında kullanılan aletler ile ve benzer şekilde gaz metal ark kaynağı, gaz tungsten ark kaynağı, plâzma ark kaynağı ile kaynaklanabilmektedirler. Bununla beraber titanyum ve alaşımlarının gazlara karşı duyarlılığı, çeşitli kaynak yöntemlerinin kullanılmasını sınırlamakta ve bir dizi ek önlem alınmasını zorunlu kılmaktadır. Bütün bu sınırlamalara rağmen, titanyum alaşımlarının büyük bölümünün iyi bir kaynak kabiliyetinin olduğu söylenebilir (32).

Alaşımsız titanyum ve bütün α alaşımları kaynak edilebilirler. Ti 6Al 4V α - β alaşımı ile diğer hafifçe β kararlaştırılmış alaşımlar da kaynak edilebilirler. Ancak, kuvvetli β kararlaştırılmış α - β alaşımları kaynak esnasında gevrekleşirler. β alaşımlarının çoğu başarıyla kaynak edilebilirler. Bununla birlikte kaynağın yaşlandırma sertleşmesiyle kuvvetlendirme işlemi dikkatle uygulanmalıdır aksi halde bazı β alaşımlarında yaşlandırılmış kaynaklar tamamen gevrek hale gelebilir (33).

Alaşımsız titanyumlar % 98,5 ila % 99,5 oranında saflıktadırlar. Saf titanyumun bütün türleri genellikle tavlanmış şartlarda soğuk işlem görmüş olanlardan daha iyi kaynak edilebilirler. α alaşımları Ti-5Al-20Sn, Ti-5Al-5Sn-5Zr, Ti-7Al-12Zr,

Ti-6Al-2Cb-1Ta-1Mo ve Ti-8Al-1Mo-1V daima tavllanmış şartlarda kaynak edilebilirler. α - β alaşımlarından Ti-6Al-4V alaşımı özellikle tavllanmış şartlarda veya eriyik işlem ve kısmi yaşlanma koşulunda kaynak edilebilir. Yaşlandırma kaynak sonrası gerilim giderme işlemi sırasında tamamlanır (32,33).

Yakın α titanyum alaşımları genel olarak kaynak edilebilirler. Ancak bazı alaşımlar iyi derecede kaynak kabiliyetine sahipken bazılarının kaynak kabiliyeti biraz daha düşüktür (34). Yakın α titanyum alaşımlarından Ti-8Al-1Mo-1V iyi bir kaynak kabiliyetine sahiptir (16). Çizelge 2. 6'da bazı titanyum alaşımlarının kaynak edilebilirlikleri verilmiştir.

Çizelge 2. 6. Bazı titanyum alaşımlarının kaynak edilebilirlikleri (15)

Alaşım Türü	Alaşım Sembolü	Kaynak Edilebilirlik
Ticari saflıktaki Ti	-	Çok iyi
α Alaşımları	Ti-0,2Pd	Çok iyi
	Ti-5Al-2,5Sn	İyi
	Ti-5Al-2,5Sn-ELI	Çok iyi
α ya yakın Ti Alaşımları	Ti-8Al-1Mo-1V	Çok iyi
	Ti-66Al-2Cb-1Ta-0,8Mo	Çok iyi
	Ti-6Al-4Zr-2Mo-2Sn	İyi
α - β Ti Alaşımları	Ti-6Al-4V	İyi
	Ti-6Al-4V-ELI	Çok iyi
	Ti-7Al-4Mo	Özel uygulamalar için sınırlandırılmış
	Ti-6Al-4V-2Sn	Özel uygulamalar için sınırlandırılmış
	Ti-8Mn	Kaynak yapılması önerilmez
β Alaşımları	Ti-13V-11Cr-3Al	İyi

α - β alaşımlarının çoğunun düşük kaynak sünekliğine sahip olması, kaynak bölgesi veya ısının tesiri altında kalan bölgede meydana gelen faz dönüşümlerinden ileri gelmektedir. Bu nedenle α - β alaşımları, ergime bölgesinin β içeriğini düşürüp kaynağın sünekliğini arttırmak üzere alaşımsız Ti veya α Ti alaşımı ilave metalleriyle kaynak edilirler. Ancak hassas alaşımlarda bu tür ilave metallerin kullanılması, ısının tesiri altında kalan bölgenin gevrekleşmesini önlemez (33).

Titanyum ve alaşımlarının kaynağında kaynak kabiliyetini iyileştirmek ve daha iyi sonuçlar alabilmek için uygun bir alaşım türü seçmek kadar çevre şartlarını ve kaynak yöntemini seçmek de önemlidir. Titanyumun ısı iletkenliği düşük olduğundan, kaynak dikişi uzun süre yüksek sıcaklıkta kalmakta, dolayısıyla havanın etkisinden korunması gereken dikiş uzunluğu artmakta ve ITAB daralmaktadır. Yavaş soğuma tane büyüklüğü üzerinde etkili olduğundan soğuma süresinin artması tane irileşmesine neden olmaktadır. Titanyumun kaynağında soğuma hızını arttırmak için kaynak bölgesinde ısı yoğunluğu dar bir alanda artırılmalı ve kaynak hızı da yükseltilmelidir. Bu yüzden titanyumun kaynağında ITAB'ın dar bir alanda tutulabildiği kaynak yöntemleri uygulanır (35).

2.2.1. Titanyum ve alaşımlarının ergitmeli kaynak yöntemleri

Titanyum ve alaşımları ergitmeli kaynak yöntemlerinden; gaz tungsten ark kaynağı (GTAW), gaz metal ark kaynağı (GMAW), plazma ark kaynağı (PAW), lazer ışın kaynağı (LBW) ve elektron ışın kaynağı (EBW) ile kaynaklanabilmektedir (36).

2.2.1.1. Titanyum ve alaşımlarının TIG kaynağı

Titanyum ve alaşımlarının kaynağında en çok kullanılan ve ergitmeli kaynak yöntemlerinden olan TIG kaynağı tükenmeyen bir elektrod, gerektiğinde ilave bir metal ve koruyucu gaz olarak argon gazının kullanıldığı bir kaynak yöntemidir. Bu kaynak yönteminde kaynak akımının artmasıyla malzemeye verilen ısı artacağından bu artış da ITAB'ın genişlemesine sebep olacaktır (37). Titanyum ve alaşımlarının kaynağında en büyük problem, yükseltile sıcaklıklarda titanyumun içerisindeki oksijen, azot ve hidrojenin çözülmesidir. Küçük miktarlardaki oksijen ve azot artışı sertliği artırır. Yüksek miktarlardaki yağ ve rutubet gibi istenmeyen artıklar veya elementler titanyumun kırılgan olmasına neden olurlar (38).

Titanyum ve alaşımlarının TIG kaynağında ilave önlemlerle havanın sadece kaynak yerine girişini değil, ITAB'a da girişi önlenmelidir. Kaynak koruyucu gazı ve kök koruyucu gazı olarak normal argon gazı değil, yüksek saflıktaki argon gazı kullanılmalıdır. Titanyum'un oksijen, azot ve hidrojene ilgisi özellikle çok yüksektir. Kaynak banyosuna gaz girişi, tam bir gevrekleşmeye yol açabilir. Bundan başka, titanyum katı halde yaklaşık 250 °C'nin üzerine kadar oksijenle reaksiyona girer. Bunun için kaynak dikişinin yanında uzanan bölgenin de gerekli önlemler alınarak korunması gerekir (39).

Titanyum ve alaşımlarının TIG kaynağında sadece argon, helyum ve bunların karışımı kullanılmalıdır. Argon ince sacların kaynağında etkili olurken, helyum derin nüfuziyet kabiliyetinden dolayı kalın parçaların kaynağında kullanılır. Bu özelliğinin bir sonucu olarak helyum gazı kullanımında kaynak hızı daha büyük olmalıdır. Koruyucu gaz olarak helyumun kullanıldığı durumlarda, ark kararlılığını sağlamak için % 2-5 argon ilave edilir. Argon gazının havadan ağır olması yatay pozisyonda daha iyi kaynak koruması sağlar. Helyum gazının da havadan hafif olması nedeniyle tavan ve dik kaynak pozisyonlarında daha verimli koruma sağlar. Titanyum ve alaşımlarının TIG kaynak işleminde iyi bir kaynak kalitesi elde etmek için kaynak işlemi mümkünse argonla doldurulmuş kaynak odalarında yapılmalıdır (15).

Thomas ve arkadaşları (40), 2,6 mm kalınlığındaki Ti-6Al-4V alaşımının TIG kaynağında optimum kaynak parametreleri üzerine bir çalışma yapmışlardır. Çalışma sonucunda kaynak sağlamlığı için; ark voltajı, kaynak akımı, kaynak hızı, elektrodun iş parçasına olan mesafesi, iki parça arasındaki boşluk, elektrod şekli, koruyucu gaz akış oranı ve kaynak öncesi temizliğin optimum kaynak parametrelerini belirlemede etkili olduklarını belirtmişlerdir. Ayrıca bu kalınlıktaki titanyum malzeme için 125-130 Amper akım, 75-90 mm/dk kaynak hızı ve 2 ila 3 mm arasında ark mesafesi önermişlerdir.

Zhou ve Chew (41), TIG kaynağı ile kaynaklanan Ti-6Al-4V alaşımına, mikrosertlik ve mikroyapı çalışmaları yapmışlar, ayrıca oda sıcaklığında çentik darbe testi uygulamışlardır. Çalışmalar sonucunda kaynak metali tokluğunun esas metal ve

ITAB'dan % 50 daha yüksek olduğunu tespit etmişlerdir. Darbe testinde bu değerin yüksek olmasının sebebi kaynak metali içerisinde oluşan birincil alfa tanelerinin miktarının azalmasından kaynaklandığının belirtmişlerdir. Birincil alfa tanelerinin sınırları mikro çatlak oluşumunun başlaması için tercihli yerler olarak gözlenmiş ve kırılmanın yayılması için kısmen kolay yol sağladığını belirtmişlerdir.

Yung ve arkadaşları (42), değişik titanyum alaşımlarını TIG kaynağı ile birleştirerek mekanik özelliklerini incelemişlerdir. İnceleme sonucunda en iyi mukavemet 1048 MPa olarak ölçülmüştür. Bu değer esas metalin değerinden % 3,2 daha düşüktür. Düşük soğuma hızı seçildiğinde oksijen ve azot gibi elementlerin tane sınırlarındaki varlığı azaldığından daha homojen bir yapı elde edilmektedir. Sonuç olarak, yüksek soğuma hızının göreceli olarak sünekliği arttırdığı belirtilmiştir.

2.2.1.2. Titanyum ve alaşımlarının MIG kaynağı

Gaz metal ark kaynağı (MIG), 13 mm'den daha kalın titanyum ve alaşımlarının kaynağında kullanılır. Yüksek dolgu oranına sahip olduğundan TIG kaynağına göre daha ekonomiktir. Bu yöntemde ark tüketilebilir bir elektrod ile iş parçası arasında meydana gelir (43).

MIG kaynağında yüksek ısı girdisi ve ince damla geçişi dolgu metalinin kirlenmesine neden olacağından bu olumsuzlukları gidermek amacı ile kaynak bölgesini bir asal gaz ile koruma gereklidir. MIG kaynağında kaynak dikişinin daha geniş olması ve daha yavaş soğumasından dolayı TIG kaynağına oranla daha geniş ve uzun koruma aparatları kullanılmalıdır. Koruyucu gaz olarak helyum, argon veya bunların karışımı kullanılır. Ayrıca titanyumun gevrekleşmesine neden olan oksijen, hidrojen ve azot'un gaz içinde bulunmamasına dikkat edilmelidir (15).

Titanyum ve alaşımlarının MIG kaynağında dolgu metalinin kaynak bölgesine geçişi kısa ark, damla ark ve sprej ark olarak üç şekilde olmaktadır. Damla ark geçişi yetersiz ergime ve sıçramaya neden olduğundan genellikle önerilmez. Kısa ark, ince parçaların kaynağında her pozisyonda uygulanırken kalın parçaların oluk

pozisyonunda kullanılmaz. Ayrıca kısa ark düşük ısı girdisine neden olduğundan yetersiz ergimeye neden olur. Sprey ark ise sağladığı yüksek ısı girdisi ve dolgu oranlarına sahip olduğundan kalın parçaların yatay kaynağında oldukça uygundur. Ayrıca sprey ark darbeli ark geçişi sağladığından ince parçaların kaynağında tercih edilir (35).

2.2.1.3. Titanyum ve alaşımlarının plazma ark kaynağı

Plazma ark kaynağı endüstriyel uygulamalarda TIG kaynağının yerine kullanılan yeni bir kaynak yöntemidir. Bu kaynak yöntemi daha yüksek kaynak hızı, daha iyi kaynak kalitesi ve dışarıdan meydana gelebilecek işlem parametrelerine daha az duyarlı olması sebebiyle tercih edilmektedir. Plazma ark kaynağı, plazmanın yüksek enerji yoğunluğundan faydalanılarak gerçekleştirilen bir yöntem olması nedeniyle, kaynak için kaynak yerine verilen enerji dar bir bölgeye verilmektedir. Bu sayede kaynak için verilen enerji küçük tutulabilmektedir ve neticede kaynak işlemi esnasında iş parçasına yapılan olumsuz etki azalmakta, dolayısıyla kaynak dikişi kalitesi artmaktadır (44,45)

Plazma ark kaynağının başlıca uygulamalarından biri, titanyum ve alaşımlarının birleştirilmesidir. Anahtar deliği kaynağı paslanmaz ve düşük alaşımlı çeliklere göre titanyumda daha kalın küt alın birleştirmelere uygulanabilir. TIG kaynağında olduğu gibi plazma ark kaynağı da alt destek ve sürekli gaz koruması gerekir (33).

2.2.1.4. Titanyum ve alaşımlarının lazer ışın kaynağı

Bu kaynak türünde kaynak anında ısınma alanı çok küçük olduğundan kaynak esnasında oluşan deformasyon çok azdır. Bundan dolayı ısı işlem görmüş alaşımlar genel özellikleri bozulmaksızın kaynak edilebilirler (32,43).

Lazer ışın kaynağı ince titanyum ve alaşımlarının birleştirilmesinde artan bir şekilde kullanılmaktadır. Kaynak sürecinde vakum odalarının kullanımı gerekmezken gaz koruması gerekir. Maliyetinin yüksek olması sebebiyle hava ve uzay sanayi dışındaki

diğer kaynak yöntemlerine nazaran daha az kullanılır. Bu yöntemde yüksek kalitede kaynak dikişi elde edilir ancak, diğer yöntemlere nazaran daha pahalıdır (15).

Tsay ve Tsay (46), Ti-6Al-4V alaşımını lazer kaynağı ile birleştirmişler ve mikroyapının yorulma çatlaklarının büyüme oranına etkisini incelemişlerdir. Çalışmalar sonucunda kaynaklı numunelerdeki bölgesel çekme gerilmeleri dar ergime bölgesi içinde bulunan martenzit sebebi ile daima ana malzemeden olduğu ve değişik sıcaklıklarda yaşlandırılan kaynaklarda gerilme özelliklerinin küçük farklılıklar gösterdiği belirtilmiştir. Ayrıca, değişik ısıl işlemlerin yorulma çatlaklarının büyüme oranını önemli derecede etkilediğini ve yaşlandırılmış ergime bölgesindeki martenzitin çözülmesi karışık türdeki kırılma ile karakterize edilen kaynakta yorulma çatlaklarının büyüme oranını geciktirdiğini rapor etmişlerdir.

Wang ve arkadaşları (47), Ti-6Al-4V alaşımını lazer ışın kaynağı ile birleştirmişler ve 450 °C'nin altında çekme özelliklerini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda kaynak metali çekme mukavemetinin ana metalden daha iyi olduğunu fakat uzama miktarının % 5 daha düşük olduğunu belirlemişlerdir. En yüksek sertlik ergime bölgesinde olmakta ve sıcaklığın artmasıyla kaynak genişliği ve derinliğinin arttığını tespit etmişlerdir.

2.2.1.5. Titanyum ve alaşımlarının elektron ışın kaynağı

Elektron ışın kaynağı, yüksek değerlerdeki elektron ışınlarının kaynak alanına mercekle yöntemi ile yönlendirilmesinden oluşur. Yüksek hıza sahip elektronlar metal yüzeyine çarparak kinetik enerjinin ısı enerjisine dönüşmesini sağlarlar. Böylece metale etki ederek eriyik ortamı oluşur. Bu kaynak yöntemi 6 ila 75 mm kalınlığındaki titanyum levhaların kaynağında çok sık kullanılmaktadır. Bu yöntemin en büyük avantajı minimum kaynak hazırlığı, düşük çarpılma, yüksek nüfuziyet kalitesi ve dar bir ITAB oluşumudur. En büyük dezavantajı ise yüksek kaynak soğuma hızı ve işlem aletlerinin pahalı oluşudur (43).

Yunlian ve arkadaşları (48), ticari saflıktaki titanyum 0,5 mm kalınlığındaki levhaları, elektron ışın kaynağı, lazer ışın kaynağı ve TIG kaynağı ile birleştirmişler ve mikroyapı ile mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda, bu üç yöntemden en uygun kaynak yönteminin elektron ışın kaynağı olduğu, bunun sebebinin de kaynak dikişinde herhangi bir kusur bulunmadığı belirtilmektedir.

Barreda ve arkadaşları (22), 17 mm kalınlığındaki Ti-6Al-4V alaşımını benzer ve farklı kompozisyonlarda dolgu metali kullanarak birleştirmişler ve endüstriyel uygulamalarda tel morfolojisinin çok önemli olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca levha dolgu malzemesinin deformasyon olmaksızın plakaları birleştirmeye öncülük ettiğini ve birleştirme hazırlığının tel dolgu metali kullanımına göre daha kolay olduğunu ve de elde edilen kaynaktaki mikroyapıların yüksek toklukla ilişkili olduğunu belirtmişlerdir.

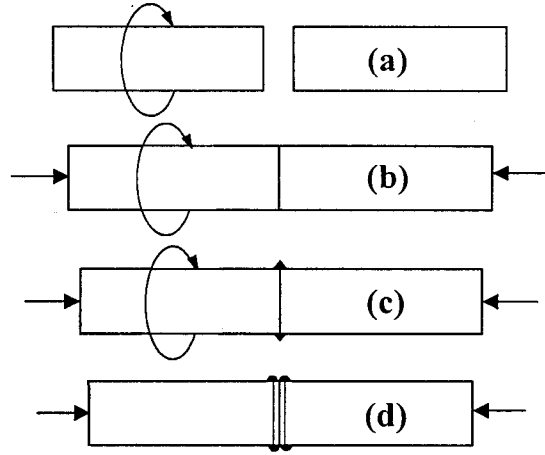
2.2.2. Titanyum ve alaşımlarının katı hal kaynak yöntemleri

Titanyum ve alaşımları ergitmeli kaynakların yanı sıra katı hal kaynak yöntemleri ile de kolayca birleştirilebilmektedirler. Titanyum ve alaşımlarının birleştirilebildiği katı hal kaynak yöntemleri, sürtünme kaynağı, patlamalı kaynak ve difüzyon kaynağıdır.

2.2.2.1. Titanyum ve alaşımlarının sürtünme kaynağı

Sürtünme kaynağı, biri sabit diğeri dönel harekete sahip iki parçanın arayüzeylerinde sürtünme yolu ile oluşan ısı ve haricen uygulanan aksel basınç altında birleştirildiği bir katı hal kaynak yöntemidir (49). Sürtünme kaynağında kaynak süresi boyunca sürtünen yüzeyler aksel basınç altındadır. Isıtma fazı yada sürtünme fazı olarak adlandırılan bu süreç birleşme bölgesinde plastik deformasyon sıcaklığına ulaşıncaya kadar devam eder. Bu sıcaklıkta dönme hareketi ani frenleme yapılarak durdurulur ve aksel basınç iki kat artırılarak yığıma oluşturulur. Normal şartlar altında arayüzey ergimez. Bu kaynak yönteminde ilave metal ve koruyucu gaza gerek yoktur. Yöntem dairesel kesitli parçaların kaynağında büyük öneme

sahiptir ve otomatik olarak uygulanan bir işlemdir (50). Şekil 2. 1’de sürtünme kaynağı mekanizması görülmektedir.



Şekil 2.1. Sürtünme kaynağı mekanizması

Sürtünme kaynağında kaliteli bir bağlantı oluşması için;

- (a) Sürtünme hareketi ile bütün oksit ve diğer tabakalar parçalanarak yüzeyden uzaklaştırılır ve sürtünen yüzeyler arasındaki sürekli temas kaynak sırasında oksit filmlerinin oluşmasını engeller.
- (b) Sürtünme kaynağı sırasında inklizyomların büyük bir kısmı elimine edilir.
- (c) Bağlantı bölgesi, hızlı bölgesel ısıtma ve soğutma sonrası uygulanan yüksek basınç nedeni ile ince taneli bir yapıya sahiptir.
- (d) Hızlı bölgesel ısıtma ve ayrıca bağlantıya bitişik relatif olarak geniş ısıtılmamış alanların ısıyı bölgesel ısınmış alanlardan hızlı çekmesi sonucunda çok dar bir ITAB oluşur (51).

Genellikle tüpleri, boruları ve çubuk malzemeleri kaynatmada kullanılan bu kaynak yönteminin ITAB'ı dar olduğundan titanyum ve alaşımlarının kaynağında büyük avantajlar sağlar. Bu yöntemde gaz koruması gerekmezken titanyumun kaynağında düşük temas basıncı ve yüksek dönme hızı tavsiye edilir (15).

Nessler ve arkadaşları (52), Ti-6Al-4V alaşımını sürtünme kaynağı ile birleştirmişler ve birleşme kalitesini belirlemek için çekme, darbe ve yorulma mukavemetlerini

incelemişlerdir. Kaynak parametrelerini % 10 değiştirerek minimum değerlerde daha iyi sonuçlar almışlardır. İstatistik analizler göstermiştir ki yeterli apak yüksekliği elde edildiği zaman parametre seçimine bağlı olarak özellikler iyidir. Fakat apak yüksekliği kabul edilebilir özelliklerin tek kriteri değildir. Çekme ve yorulma test sonucunda ana metalle aynı veya ona yakın değerlerin elde edilebileceği görülmektedir. Kaynak bölgesi merkezinde birincil alfa yapısı görülmüş bir ITAB elde edilmiştir. Tahribatsız test metodlarından ultrasonik yöntemle inceleme yapıldığında dşuk paklı birleştirmelerde kalıntı yabancı elemanlara rastlanılmadığı rapor edilmiştir.

Varis ve Frost (53), serbest doğrusal sürtünme kaynak makinasını tanıtmış ve kabul edilebilir sürtünme ve yığma basınçlarında değişik frekans ve salınımla kaynak kabiliyetini incelemişlerdir. Deneyle Ti-6Al-4V alaşımına 119 Hz frekans ve iki salınım (3 ve 0,92 mm) da yapılmıştır. Elde edilen kaynak şartlarında frekans ve salınının her ikisine birden bağlı olarak minimum güç girişi gerektiği görülmüştür. Kaynağın darbe mukavemetinin geniş bir aralıkta uygulanan sürtünme basıncına bağlı olduğu ve bu durumun optimum kaynak şartlarında gerçekleştiğini belirtmişlerdir.

2.2.2.2. Titanyum ve alaşımlarının patlama kaynağı

Titanyum ve alaşımları patlamalı kaynak yöntemi ile birçok metal ve alaşımına kolaylıkla kaynatılabilmektedir. Patlamalı kaynak, patlayıcıların patlama etkisinden yararlanılarak iki veya daha fazla metalin kompozit bir malzeme üretmek üzere, yüksek kalitede metalurjik bir bağ ile birleştirildiği bir katı hal kaynak yöntemidir. Kaynak sonrasında metal çiftleri arasında dalgalı bir arayüzey meydana gelir. Bu yöntemin en belirgin özelliği alışılmış kaynak yöntemleri ile birleştirilemeyen farklı özellikteki metallerin (titanyumun alüminyuma kaynağı) kolaylıkla birleştirilebilmesidir (54,55). Patlamalı kaynak konusu çalışmanın en belirgin kısmı olduğundan bir sonraki bölümde geniş bir şekilde sunulmaktadır.

2.2.2.3. Titanyum ve alaşımlarının difüzyon kaynağı

Günümüz endüstrisinde kullanılan malzeme çeşitlerinin artması, farklı özellikler gerektiren yerlerde farklı metal bağlantılarının gerekliliği ve özellikle son yıllarda ekonomik faktörlerin giderek önem kazanması farklı özelliklere sahip malzemelerin birbirleriyle birleştirilmesi zorunluluğunu doğurmaktadır (56). Daha çok uzay ve uçak sanayinde kullanılan gelişmiş malzemelerin birleştirilmeleri katı hal kaynak teknikleri olarak bilinen ve de difüzyon kaynağını da kapsayan yöntemlerle mümkündür. Bugün farklı metallerin birleştirilmesinde % 40 bu yöntem kullanılırken, bu yöntemle birleştirilmiş malzemelerin yaklaşık % 20'sini de titanyum ve alaşımları oluşturmaktadır (57).

Difüzyon kaynağında en önemli kaynak parametreleri; kaynak sıcaklığı, kaynak ve basınç süresi, şekil değiştirme miktarı, yüzey kalitesi ve koruyucu atmosferdir. Difüzyon kaynağının uygulanmasında, özellikle farklı metal ve alaşımlarının birleştirilmesinde genellikle bir ara tabaka kullanılır. Ara tabakalar kaynak alanındaki heterojenliği minimuma indirir ve birleştirmenin oluşumunu kolaylaştırır (58).

Saf titanyum ve bakır üzerinde kendi içerisindeki difüzyon kaynağını inceleyen Mekeag (59) altı safhalı bir model sunmuştur. Bu modele göre birinci safhada sıcaklık tesiri ile yüzey pürüzlerinin teması sırasında metal oksitleri çözünmekte ve arakesitin her iki tarafında yeniden kristalleşmiş ince bir tabaka meydana gelmektedir. Enerji engelini kıran bu tabakadır. İkinci safhada daha kalın bir tabaka yeniden kristalleşmektedir. Üçüncü safhada ana metal yeniden kristalleşirken, daha alt tabaka kristalleri yok edilir. Dördüncü safhada arakesitleri daha önce kristalleşen taneler yok olurken, küçük fakat görülebilen boşluklar oluşur. Beşinci safhada arakesitteki boşlukların sayıları azalırken boyutları büyür. Altıncı safhada arakesit düzlemine tane sınırı göçü başlar ve tane büyümesi meydana gelir.

Titanyum, yüksek sıcaklıklarda basınç uygulandığı zaman kendi oksidi de dahil yüzey artıklarını kolayca çözdüğünden difüzyon kaynağı için uygun bir malzemedir.

Ancak titanyumda katı çökelti içindeki oksijen, sertliği artırıp kararlı faz oluşturarak kaynağı güçleştirmekte ve yüzeyde çatlaklara yol açmaktadır. Bu nedenle de titanyumun difüzyon kaynağında vakum yada koruyucu atmosfere gerek duyulmaktadır. Koruyucu gaz olarak argon kullanıldığında, titanyumda çözünmeyen argonun arakesite hapsolarak, boşluk oluşmasını önlemek için, Patridge ve Salehi kaynak bölgesinde argonun hareketliliğinin sağlanması gerektiğini söylemektedirler (59).

Orhan ve arkadaşları (60), Ti-6Al-4V alaşımı ile mikrodubleks paslanmaz çeliği difüzyon kaynağı ile 30 dakika süre ile 800 °C sıcaklıkta kaynak işlemine tabi tutmuşlar ve iyi bir bağ elde etmişlerdir. Daha düşük birleştirme sıcaklığı ve daha kısa birleştirme zamanı kullanılması mikrodubleks paslanmaz çelikler içindeki α fazının oluşumunu azaltır. Birleştirmenin titanyum tarafındaki intermetalik bileşikler Fe-Cr-Ti esaslıdır. Fe-Cr-Ti intermetaliklerinin oluşumu bu iki alaşımın difüzyon kaynağı ile bağlanması göz önüne alındığında sigma fazına göre daha önemlidir. Bu sert intermetalikler mekanik dayanımı ve birleştirme kalitesi üzerinde etkili olur. Bu çalışma sonucunda ısıtma hızının sigma fazının oluşumunda önemli olduğu ve mikrodubleks paslanmaz çelikler için sigma fazının oluşumu engellenmesi için ısıtma hızının optimum olması gerektiği belirtilmektedir.

Gülenç (61), yaptığı bir çalışmada titanyum malzemeleri düşük karbonlu çelik malzemelere ara bağlayıcı gümüş levha kullanarak 700 °C'da ve sabit yük altında birleştirmiş ve mekanik özelliklerini incelemiştir. Mekanik incelemeler sonucunda kaynak süresinin artmasıyla makaslama kuvvetinin arttığı ve hem kaynaklı numunelerde hem de kaynak ara yüzeyinde sertliğin düştüğü tespit edilmiştir. Optik mikroskop görüntülerine göre lehimleme süresinin artmasıyla ara bağlayıcı folyo kalınlığının azaldığını rapor etmiştir.

3. PATLAMA KAYNAĞI

3.1. Patlamalı Kaynağın Tarihçesi

Patlamalı kaynak ilk olarak I. Dünya Savaşı sırasında bombalardan kopan küçük parçaların çevresindeki metal yapılara yapışmasıyla fark edilmiştir. Ancak bu konuda 1962 yılına kadar herhangi bir pratik çalışmanın olmadığı belirtilmektedir. Bu yıllarda patlamalı kaynak yönteminin ticari olarak kullanımıyla ilgili olarak ilk patent başvurusu Philipchuk ve Bois tarafından olmuştur. Daha sonra, DuPont firması patlamalı kaynak yöntemi ile ilgili çalışmalar yapmış ve 1964 yılında patent almıştır (62). Patlamalı kaynak yöntemi 1950'lerde metal levhaların kaplanması ve kaynaklanmasında kullanım alanı bulmuştur. Bu yıllarda güçlükle patlamalı kaynak yöntemi ile sürekli dikiş kaynağı (Explosion seam welding) denemeleri yapılmış ve bazı güçlüklerle karşılaşmıştır. Ancak, daha sonraları bu güçlükleri çözmek için yeni yaklaşımlar geliştirilmiş ve alüminyum ve bakır alaşımları, titanyum ve alaşımları ile belirli uzunluklarda başarılı bir şekilde birleştirilmiştir (63).

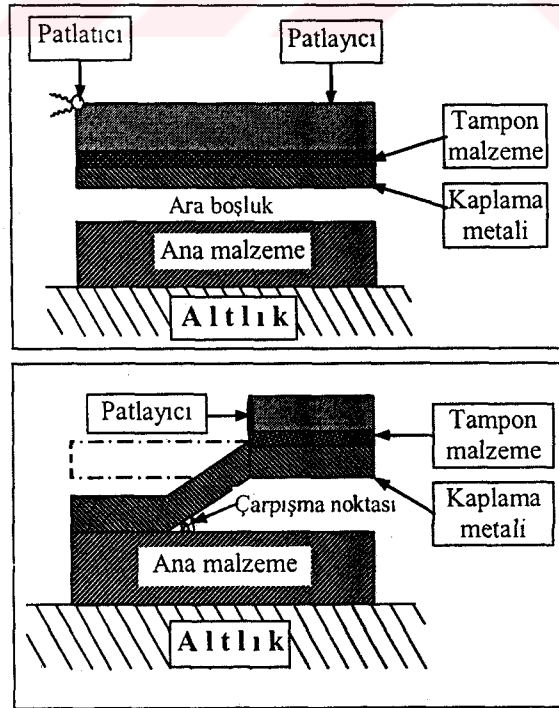
Patlamalı kaynağın bir tür endüstriyel kullanımı, ısı değiştirici boru hatlarının birleştirilmesinde olmuştur. Patlayıcılar ile metalleri birleştirme işlemlerinin gelişmeleri ise 1940'lı yıllarda başlamıştır. Bu gelişimler daha sonraları çeşitli çalışmalarda belirtilmiştir. Patlamalı kaynak işleminin detaylı tanımlaması Bahrani ve arkadaşları tarafından yapılmıştır (64). Patlamalı kaynağın bağlanma mekanizmasının yöntemi ve arayüzeyin farklı birleşme çeşitleri Cowan ve Holtzman tarafından tanımlanmıştır. Daha sonraları da patlamalı kaynak işleminin özellikleri ve uygulama alanlarına literatürlerde rastlanmaktadır (65).

Bu yöntem ilk olarak standart kaynak malzemelerinin konfigürasyonlarında doğabilecek zorlukları aşmak için kullanılabilecek bir üretim aracı olarak ve uzak konumlardaki kaynaklar için geleneksel kaynak yöntemlerine alternatif bir yöntem olarak görülmüştür. Bununla beraber, çok farklı ergime noktalarına, farklı sertliklere sahip ve ısıl genleşmeleri büyük farklılıklar gösteren metal kombinasyonlarıyla çalışıldığında arzu edilen dayanıma sahip kaynakların elde edilmesiyle endüstrinin

bu kaynak yöntemine olan ilgisinin arttığı görülmüştür. 1970'lerde yapılan literatür taramasına göre aynı yada farklı özelliklerdeki metallerin 260'dan fazla kombinasyonunun bu yöntemle başarılı bir şekilde birleştirildiği görülmüştür. Bu konuda yapılan ilk çalışmalar sadece düz levha kaplamalarını kapsamalarına rağmen daha sonraki ticari gelişmeler tüplerin ve eğimli yüzeylerin kaplanması ile boruların uç kaynaklarını ve geçiş bağlantılarının kaynağını içermektedir (66).

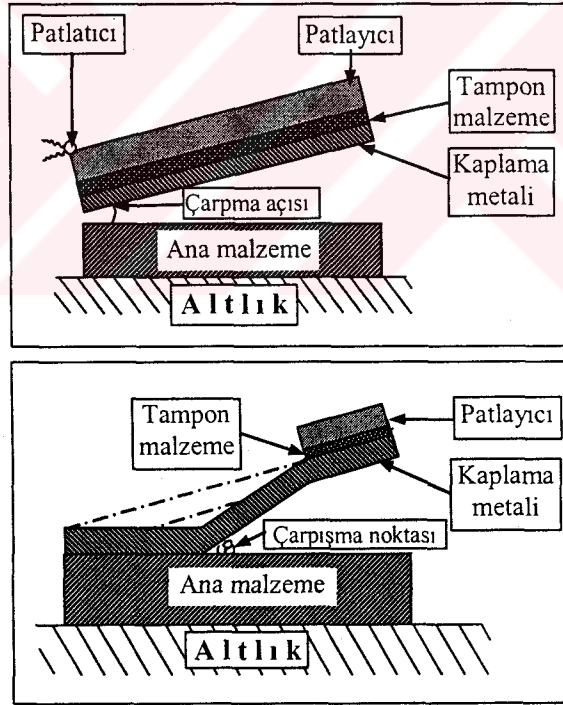
3.2. Patlamalı Kaynak İşlemi ve Mekanizması

Patlamalı kaynak veya kaplama, diğer geleneksel kaynak yöntemleri ile birleştirilemeyen hem benzer hem de farklı metallerin kontrol edilen koşullar altında bir metalik kütlenin diğer bir metalik kütle üzerinde patlamalı bir etki ile bir bağ oluşturma işlemidir (67,68). Bu kaynak yönteminde arayüzeyde hiç veya en az seviyede ergime meydana gelip iki parça arasında metalurjik bir bağ oluşur (69). Patlamalı kaynak tekniği benzer veya benzer olmayan metal ve alaşımlarının birleştirilmesinin yanında çok katlı (multilayered) ve tel ile güçlendirilmiş (wire-reinforced) kompozit malzemeler üretmek için de kullanılabilir (70,71).



Şekil 3.1. Paralel düzlemde patlamalı kaynağın şematik gösterimi (72)

Patlamalı kaynak işleminin temel üç elemanı vardır. Bunlar; taban malzemesi, üst parça ve patlayıcıdır. Kaynak işlemi esnasında taban malzemesi sabit olarak durur ve üst parça buna kaynaklanır. Bu taban malzemesi büyük bir altlık yardımıyla desteklenmelidir. Üst parça ise kaynak esnasında patlayıcı yardımıyla taban malzemesi üzerine doğru hareket ettirilir. Bu üst parça genellikle taban malzemesine paralel konumdadır. Bununla birlikte bazı özel uygulamalarda her parça için değişik açılar oluşturularak yapılan işlemler vardır. Burada bir altlık üzerine sırasıyla: ana malzeme (taban malzemesi), belirli bir boşluk, ana metale göre eğimli veya paralel yerleştirilmiş kaplama malzemesi (üst parça), malzemelerin kaplama sırasında hasara uğramasını önleyen tampon tabaka, patlayıcı malzeme ve patlatıcı yerleştirilmektedir. Şekil 3. 1'de patlamalı kaynağın paralel düzlemlerde yapılış şeklini ve Şekil 3.2 eğik düzlemlerde yapılış şeklini şematik olarak göstermektedir (72).



Şekil 3.2. Eğik düzlemde patlamalı kaynağın şematik gösterilimi (72)

Patlamalı kaynak, iki metali birleştirmek için patlayıcıların, patlama enerjisinden yararlanılarak yapılan bir tür kaynak işlemidir. Patlama, parçaların yüksek bir hıza ulaşarak çarpışmaları esnasında metalik birleşmeyle, şekillenmelerini sağlar. Bu işlem, birleştirilecek parçalara herhangi bir ısı uygulanmaksızın yapılır (11,73).

Kaynak esnasında oluşan temas basıncı oldukça yüksektir ve üst tabakanın kinetik enerjisi dalgalı bir arayüzey oluşturur. Bu darbe iki yüzeyi birbirine mekanik olarak kilitler. Burada, plastik deformasyon sonucu soğuk basınç kaynağı oluşur (74).

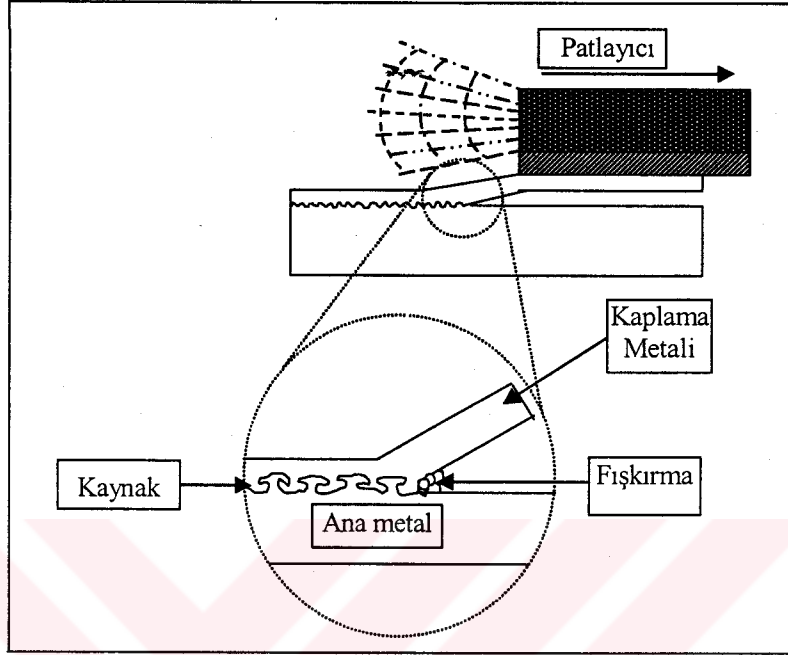
Gerekli yüksek basınç, işlem gören parçalardan patlayıcı madde ile yüklü birinin patlaması ile diğerine karşı 2 ila 25⁰ lik bir açı altında ve 100 ila 1000 m/sn hıza kadar hızlandırılması suretiyle ortaya çıkar. Bu sırada çarpma basıncı 10 ila 100 K bar'a kadar çıkar. Şekil 3.1'de görüldüğü gibi hızlandırma mesafesi için önceden ayarlanmış bir mesafe gereklidir. Çarpma yüzeyinde metalde bir plastik deformasyon meydana gelir ve karşılıklı yığıma ile dalgalı bir birleşme arayüzeyi elde edilir (6,75).

Patlamalı kaynak tekniği kompozit malzemeleri üretmek için her geçen gün artışla kullanılmaktadır. Kaplama için sınırlandırmalar klasik metotlarla kuşatılmadıkları için, kırılğan intermetalik bileşikler oluşturmak yada yaygın mekanik özellikler sahip metal çiftlerini kaplamak mümkün olmaktadır. Yüksek hız eğilimindeki çarpışma, yüksek basınç, yüksek sıcaklık ve çok kısa bir süre içinde çarpışma noktası yanında yüksek kesme gerilmesine sahip bölge üretecektir. Patlamalı kaynak veya kaplama arayüzeyinin metalurjik bağlanması yerel ergime ve difüzyon işlemi ile gerçekleştirilir (76).

Bu kaynak yönteminde çarpışmanın etkisiyle meydana gelen sıcaklığa rağmen normal olarak arayüzeyde çoğu zaman difüzyon meydana gelmez. Ancak bölgesel olarak çok küçük miktarlarda ergimeler olabilir. Difüzyon olmamasının sebebi; sıcaklığın çok dar bir alanda çok kısa bir sürede meydana gelmesinden dolayıdır. Kaynak sonrası birleştirilen malzemeler sıcak olmayıp soğuk bir durum sergiler. Ancak bazı durumlarda kaynak esnasında 0.1 µm difüzyon olduğu bazı araştırmacılar tarafından belirtilmiştir (77).

Patlama, parçaların yüksek bir hıza ulaşarak çarpışmaları esnasında metalik birleşmeyle şekillenmelerini sağlar. Kaynak yüzeyleri, çarpmanın verdiği ısı sayesinde bir miktar ısınırlar ve kaynak metalin yüzeyindeki plastik akış sayesinde tamamlanır. Kaynak işlemi patlama ve bu baskı ile gerçekleşir. Patlama ve baskının

neden olduğu ilerlemeyle parçalardan biri diğerine kaynaklanır. Kaynak işlemi açık havada, vakumda ve diğer atmosfer şartlarında da gerçekleştirilebilir (11).



Şekil 3.3. Patlamalı kaynak esnasında parçalar arasındaki birleşme şekli (11)

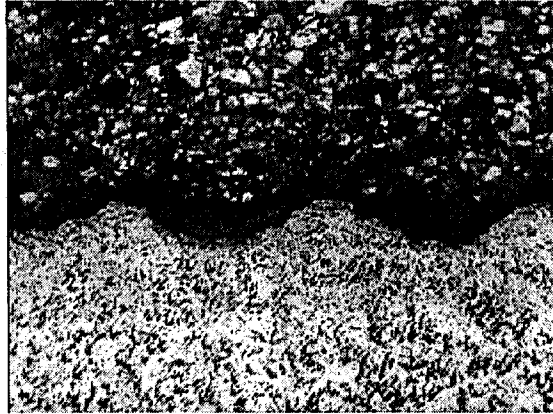
Metal yüzeylerin yüksek hızda çarpışması sırasında, yüksek hızla ilerleme, eğer çarpışma açısı ve çarpışma hızı kaplama için gerekli değerler arasında ise metal yüzeyler arasında kolayca oluşturulur. Metaller üzerindeki yüzey tabakaları, oksit filmlerinin metalik bir bağ kurmak için zarar verdiği metalik olmayan filmler fışkıрма ile uzaklaştırılır. Şekil 3. 3'de parçalar arasında fışkıрма oluşumu görülmektedir. Jet çarpışması ile yüzey filmlerinin temizlenen metal plakaların kendisi çarpışma bölgesinin yanında elde edilen çok yüksek basıncın etkisi altındaki bir noktada birleştirilir. Bu yüksek basınç ayrıca birleşme bölgesi alanı içindeki metallerin yerel plastik deformasyona uğramasına da sebep olur. Arayüzeyde oluşan bağ metalurjik bir bağ olup, bağ mukavemeti düşük olan malzemenin mukavemetinde4n daha yüksektir (65,68).

Patlamalı kaynak, geniş skalalı ısıtma yada difüzyon mekanizmalarına etken olmayan bir katı hal kaynak yöntemi olduğundan, fark edilmeyen değişimler fiziksel özelliklerin geleneksel içeriğinde meydana gelir. Çok sayıdaki sistemler içinde,

patlamalı kaynak yöntemi, kabul edilebilir kaynak kalitesi üretilirken tolere edilebilen şartlar ve parametreler dahilinde büyük serbestlik (great latitude) sergiler. Kaynak altı (underwelding) yada düşük çarpışma enerjisi şartları standart altı bağlanmayı yada bağlanmamayı sağlayabilir. Aşırı kaynak (overwelding) yada aşırı çarpışma enerjisi fişkırmada bölgelerinde büyük erime hacimlerini üretebilir yada benzer olmayan bir sistem içinde çok kırılğan intermetalik bileşikler oluşmasına sebep olan arayüzeydeki ergimeyi tamamlayabilir. Bunlar şüphesiz kaynağın kalitesini büyük oranda etkilemektedir.

Bundan dolayı, iyi bir bağlanma daima bu işlemin karakteristik ölçüsü olan arayüzeydeki düzenli dalga oluşumu ile ilgilidir. Bu doğru şekil, sık dalga oluşumu ve dalga genliği özel metal kombinasyonunun, kaplama içeriğinin kalınlığı ve çarpışma şartlarının bir fonksiyonudur (68).

Patlamalı kaynak işleminde bütün kaynak parametreleri uygun biçimde seçilip kontrol edildiğinde Resim 3.1'de görüldüğü gibi bir kaynak arayüzeyi elde edilir. Patlamalı kaynak arayüzeyinin dalgalı görüntüsü bu kaynak yönteminin en belirgin özelliğidir. Kaynak yüzeyinin bu ilginç görüntüsü patlamalı kaynağa olan ilgiyi teşvik eder. Dalga yapısının gelişimi fişkırmada oluşumuna bağlı olarak değişiklik gösterir (66).



Resim 3.1. Patlamalı kaynak ile elde edilmiş dalgalı arayüzey görünümü.

Covan ve Holtzman patlamalı kaynakla birleştirilmiş malzemelerin arayüzey morfolojisini metalografik olarak incelemişler ve üç değişik birleşme arayüzeyinin elde edildiğini belirtmişlerdir (78). Bunlar;

- (i) Düz bir arayüzey,
- (ii) Ergiyip-katılmış üniform bir tabaka
- (iii) Ergiyip-katılmış dalgalı bir arayüzey içeren birleşmedir.

Patlamalı kaynaktaki dalgalı ara yüzey oluşum mekanizması ile ilgili çok sayıda çalışma yapılmıştır. Yüksek deformasyon hızından dolayı katı bir malzemenin sıvı olarak kabul edildiği çeşitli kabuller rapor edilmiştir. Dalgalı arayüzey oluşumu ile ilgili mekanizmaların çoğu literatüre göre yapılan gruplamalardan birinin kapsam alanına girer. (i) Çentik mekanizması: arayüzey karakteristik şeklini ana malzemenin periyodik çentiklemesinden ve kaplanan malzeme tarafından durgunluk noktasının önünde tümsek oluşmasından dolayı elde eder. (ii) Helmholtz kararsızlık mekanizması: dalga oluşumu ileri fişkırmaya (reentrant jet) ve levha arasındaki Helmholtz kararsızlığıyla olur. (iii) Seyrekleşme (Rarefaction) dalga mekanizması: dalgalı arayüzey, darbe olarak durgunluk noktasından kaynaklanan basıncı şok dalgalarıyla serbest yüzeyde şok dalgası yansımasıyla oluşan seyrekleşmeyle oluşan etkileşimle oluşur. (iv) Girdap (vortex) atlatma mekanizması: dalgalı arayüzey durgunluk noktası yakınında ergime bölgesi gibi bir engelin gerisinde Von Karman girdap alanı gibi bir akışla olur. Bununla birlikte yukarıda bahsedilen mekanizmalar (i) - (iii) doğru değildir çünkü deneysel bulgular arayüzeyin iki kaplama malzemesinin simetrik darbesiyle olduğunu göstermektedir (71).

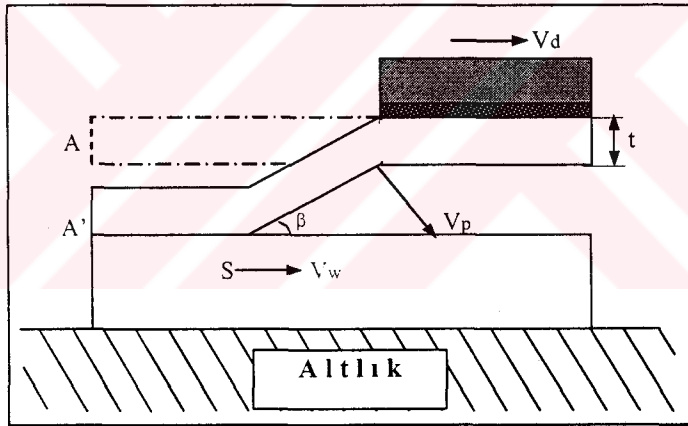
3.3. Patlamalı Kaynak İşlem Parametreleri

Her kaynak yönteminde olduğu gibi patlamalı kaynak yönteminde de birleştirmeye etki eden kaynak parametreleri vardır. Bunlar;

- Patlayıcı kütesinin, giydirilen malzeme ve tampon malzeme kütleleri toplamına oranı olan “patlama yükü” R,

- Patlayıcıların patlama hızı V_d ,
- Üst levhanın hızı V_p ,
- Ara boşluk mesafesi s ,
- Çarpışma açısı β ,
- Kaynak hızı V_w ,
- Eğik düzlemlerde çarpma açısı α ,
- Birleştirilecek malzemelerin özellikleridir (63,66).

Patlamalı kaynak işleminde kabul edilebilir nitelikte kaliteli kaynaklar elde edebilmek için kaynak işlemini kontrol altında tutabilecek parametrelerin belirlenmesi gerekir. Patlamalı kaynak işlem parametreleri İnal ve Zimmerly'e göre bağımlı ve bağımsız kaynak parametreleri olmak üzere iki gruba ayrılabilirler.



Şekil 3.4. Patlamalı kaynak işlem parametrelerinin şematik gösterimi (66).

Şekil 3.4'de gösterilen bu parametrelerden araboşluk mesafesi s veya d , eğimli düzlemlerde başlangıç açısı (paralel düzlemler için bu değer $\alpha=0'$ dir), patlayıcının patlama hızı V_d ve üst levha çarpma hızı V_p bağımsız kaynak parametreleridir. Bağımlı kaynak parametreleri ise; çarpışma açısı β , kaynak hızı V_w ve çarpma noktası S 'ye göre üst levha hızı V_f 'dir (66,79). Patlama kaynağında çarpma açısının değişiminden dolayı, kaynak arayüzey değişimi meydana gelmektedir. Çarpışma açısı arttığında, dalga yüzeyinin genliği maksimuma doğru artar. Çarpma açısı daha fazla arttığında bu genlik sıfıra doğru azalır.

Pratikte, patlayıcı yüklemesini minimize etmek, malzeme maliyetini düşürmek ve gürültü seviyesini azaltmak arzu edilirken, özellikle ticari kaplama işlerinde, değişik yüzey işlemleriyle kaynağın kararlılığının sağlanması istenir. 2 mm ve daha üst kalınlıklarda çeşitli kaplama malzemeleri için genellikle çelik alt levha olarak kullanılır. Bazı ticari kaplamalarda kullanılan hızlar;

Bakır ve nikel bakırı.....400 m/sn

Paslanmaz çelik, nikel ve monel.....440 m/sn

Titanyum.....600 m/sn' dir.

Çizelge 3.1'de titanyumun bazı malzemelerle kaynağında kaynak için minimum kaynak hızları verilmiştir.

Çizelge 3.1. Titanyum ile birleştirilen bazı malzemelerin minimum kaynak hızları.

Metal bileşimi	Yoğunluk Kg/m ³	Akma dayanımı (MN/m ²)	V _p (min) (m/sn)	
			Hesaplanan	Ölçülen
Titanyum-Titanyum	4500	250	182	220
Alüminyum-Titanyum	2700/4500	35/250	236	-
Titanyum-Çelik	4500/7870	250/200	144	200

Patlamalı kaynak işleminde paralel kaynak düzenlemesinde alt ve üst levha arasındaki boşluk, levhaların maksimum hıza ulaşmasını sağlayacak şekilde üst levha kalınlığının yarısını aşmalıdır. Başlangıçta üst levha patlama basıncı ile oluşan şok dalgası ve yine patlama ile oluşan gazın genişlemesiyle hızlandırılır. Eğer alt ve üst levha arasındaki mesafe yeterince geniş ise üst levha son hıza ulaşacaktır (66).

Genelde yüksek patlama hızlı patlayıcıların kullanılmasından sakınılmalıdır. Çünkü üst levhalardan oluşan çok yüksek basınç, yansıyan bir gerilme dalgası üretebilir. Bu da dönüşte üst levhanın kalınlığının yaprak yaprak dökülmesiyle azalmasına yol açabilir. Ayrıca çok hızlı patlayıcıların kullanılması, birleştirilen parçalarda istenmeyen hacim değişikliklerine neden olabilir.

Gevrek metallerrarası bileşiklerin ortaya çıktığı durumlarda basınç kritik bir değeri aşmamalıdır. Böylece malzemenin yerel olarak ergimesi ve gevrek metallerrarası bileşiklerin oluşması engellenebilir. Patlama kaynak işleminde kullanılan altlık kaynak kalitesini değil, kaynak sonrası parçaların geometrisini etkilemektedir (80).

Patlamalı kaynak işleminde kaynatılacak/kaplanacak üst levhanın kalınlığının artmasıyla patlayıcı miktarı, dolayısıyla patlama enerjisi artırılmalıdır. Ancak bu artış artan üst levha kalınlığıyla orantılı olarak lineer bir şekilde değişim göstermez (63).

3.4. Metalurjik Özellikler

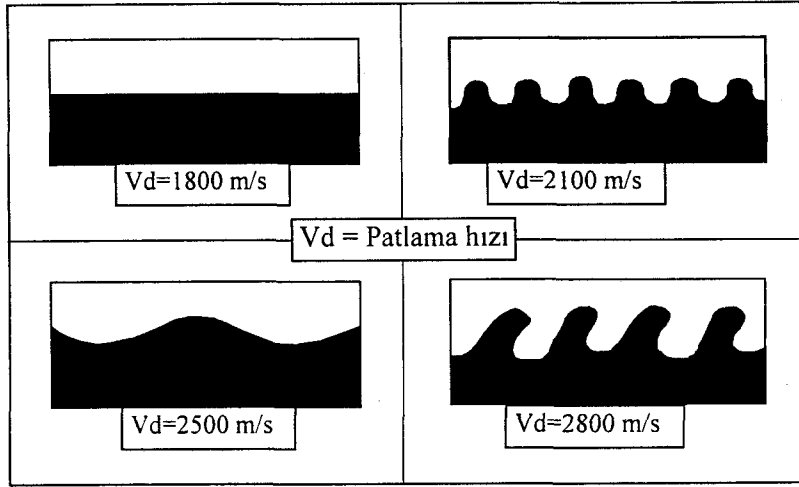
Metallerin patlamalı kaynağı sonrasında elde edilen bağın metalurjik özellikleri kaynak parametreleriyle yakından ilgilidir. Özellikle yüksek hızlı patlayıcıların kullanılması, birleşme yüzeyinde yüksek ısılarda oluşmasına ve yerel ergimelere neden olmaktadır. Metallerin yerel olarak da olsa ergimeleri bu bölgelerde metallerrarası bileşiklerin, birincil kristalleşmiş bir döküm mikroyapısının, çekme boşluklarının ve kararsız fazların ortaya çıkması sonucunu doğurmaktadır.

Patlamanın hemen sonrasında arayüzeyde oluşan yüksek hızdaki metal jeti, birleşme yüzeylerini ovalayarak bağ oluşumunu engelleyen oksit, pislik gibi maddeleri temizlemektedir. Bu jet aynı zamanda birleşen metallerin birleşme yüzeylerinde yaklaşık 10 µm kalınlığında plastik şekil değişimine uğramış bölge oluşturmaktadır. Yaklaşık 15° açıyla yapılan birleştirmelerde metal jeti yüzeylerle herhangi bir fiziksel etkileşime girmemekte, 5° ve daha düşük açılı birleştirmelerde ise arayüzeyde birleşen metalleri içeren ve 200-300 µm kalınlığında olan girdap şeklinde cepler oluşmaktadır. Bu bölgelerde metal kısmen ergimiş olduğundan, içyapı hem ergiyerek hem de katı halde oluşmuş bağların özelliklerini taşımaktadır. Bazı durumlarda ergimiş bölge sürekli dahi olabilmektedir.

Kaynak arayüzeyinden uzaklaştıkça patlamanın şok etkisiyle oluşmuş ikizlenmelere ve şekil değişimi sonucu ortaya çıkmış martenzitik içyapılara rastlanmaktadır. Ayrıca üst levhanın kaynak bölgesi dışında birleşme yüzeyine paralel yerel ayrılmalar (spalling) görülebilir.

Aşırı miktarda metallerarası bileşikler veya sürekli döküm içyapısı içermeyen patlamalı kaynak birleştirmeleri üzerinde yapılan çekme, kesme ve sıyırma gibi deneyler, bu bağın dayanımının birleştirilen metallerin en düşük dayanımlı olanı ile aynı düzeyde olduğunu göstermiştir. Dinamik zorlamalar altında yorulma çatlağının arayüzeyden başlamasına rağmen yüksek yorulma dayanımları elde edilebilmektedir. Birleşme bölgesinin kırılma tokluğu ise sünekliğe paralel olarak düşmekte ve daha sonra uygulanacak ısıl işlemler ile iyileştirilememektedir. Genel kural olarak, patlamalı kaynak yöntemi ile birleştirilecek metallerin kopma uzamasının en az % 5 ve Charpy darbe değerinin ise 15 J'un üzerinde olması istenmektedir (80).

Patlamalı kaynak ile birleştirilmiş malzemeler, genellikle dalgalı birleşim bölgesi arayüzeyi sergiler. Kaliteli bir patlamalı birleştirmenin elde edilmesi doğrudan dalgalı birleşme arayüzey oluşumu ile ilgilidir. Oluşan bu dalgalı birleşme arayüzeyini, patlama hızı (Vd), yüklenen patlayıcı miktarı, yüzeyler arasındaki boşluk gibi üç önemli parametre belirlemektedir. Kaynak işlemi boyunca bu üç parametre dalga modelinin periyodunu ve genişliğini kontrol eder. Çoğu zaman birleşme bölgesindeki bu dalga modeli, bir engel etrafında akan bir akışkana benzetilmiştir. Burada bahsedilen engel, patlamalı birleştirme için çarpışma bölgesindeki en yüksek basınç noktasıdır. İki metal, reaksiyon bölgesinde laminar veya türbülans akışkan olarak düşünülebilir. Akış hızı düşük olduğunda, akışkan engel etrafında daha düzgün akar. Hız arttığında akış bir dalga modeli gösterir. Hız kesin bir değere ulaştığında, akış modeli türbülans bir hal alır (66). Şekil 3. 5. patlama hızına bağlı olarak birleşmenin akış modelini göstermektedir.



Şekil 3.5. Patlama hızına bağlı olarak oluşan akış modeli

3.5. Patlamalı Kaynağın Avantaj ve Dezavantajları

Patlamalı kaynak yöntemi birkaç alan haricinde çok fazla kullanım alanına sahip değildir. En çok kullanıldığı alanlar ince bir özellikteki metali diğer bir malzemeye kaplamak, ısı değiştiricilerinde kullanılan boruları birbirine birleştirmek, birbirine birleştirilmiş boruların sızıntı yapan kısımlarının tamirinde ve ek bilezikli boruların birleştirilmesinde kullanılmaktadır. Bu gibi yerlerde diğer kaynak yöntemlerinin kullanılması sınırlı olduğundan bu yöntemin gelecekte kullanımı daha da artacaktır (81).

- Geleneksel kaynak yöntemleri ile birleştirilemeyen çok farklı kombinasyonlardaki metal ve alaşımları bu yöntemle kolayca birleştirilebilmektedirler.
- Patlama kaynağı için gerekli patlayıcılar düşük maliyete temin edilebilir
- Bu yöntem tamir ve bakım masraflarını azaltıcı bir birleşme sunar.
- Bu yöntemle birleştirilen ısı değiştiriciler herhangi bir sızıntı olmaksızın en zor koşullarda bile çalışabilme yeteneğine sahiptirler.
- İnsan sağlığına zararlı (nükleer reaktörler gibi) çalışma ortamlarında uzaktan işlem kontrolü ile birleşme gerçekleştirilebilir.

- Patlamalı kaynak yöntemi, soğuk bir işlem olduğu için birleştirilen malzemelerin özelliklerinde herhangi bir değişim olmaz.
- Soğuk işlem olduğu için karbonun difüzyonu olmaksızın metalurjik bir sınır form elde edilebilir.
- Diğer birleştirme yöntemlerinde olduğu gibi özel ekipmanlara gerek yoktur.
- Farklı ergime sıcaklıklarına sahip malzemeler bu yöntemle kolayca birleştirilebilirler.
- Patlamalı kaynak işlemi birleştirilecek malzeme ebatları bakımından sınırlı değildir. 0.5 mm² ebatlarındaki parçalar birleştirilebildiği gibi 90-120 m² gibi büyük ebatlardaki malzemeler de birleştirilebilir.
- Bu yöntemde 0.02-63.5 mm kalınlıktaki kaplama malzemeleri ile alt levha kalınlıkları çok inceden 450 mm kalınlığa kadar değişebilir.
- Bu yöntemde birleşme esnasında fışkırma meydana geldiğinden yüzeylerinde oksit tabakası bulunan metallerin birleştirilmesi mümkündür.
- Kaynak birleştirmenin dayanımı en az ana malzemenin dayanımı kadardır ve çalışma esnasındaki gerilmelere karşı oldukça iyi dayanım sergiler (82).

Patlamalı kaynak yöntemi yukarıda sıralanan olumlu özellikleri yanında bazı olumsuz özellikler de sahiptir.

- Patlamalı kaynak işleminin hassasiyetinden dolayı üretim hatlarında kullanımı uygun değildir.
- Bu yöntemde gevrek metaller birleştirilemez (66,8).
- Bu yöntemde güvenlik çok önemlidir. Kaynak işlemleri ya güvenlik çemberi içinde yada açık alanda yapılabilir. Çok az kullanım alanı olmakla beraber su altında da güvenli bir birleştirme yapılabilir.

Süneklik, ergime ve katılma noktası, her iki bileşenden birisinin kalınlığı ve yoğunluğu kaynaklanabilirliği belirleyen faktörlerdir. Arzu edilen bir kompozitin bileşenlerinden birisi diğerine göre gevrek olduğu durumlarda, uygulamada bileşenin alt levha olarak kullanılması daha uygundur. İki metal arasında belirli bir yoğunluk farkının olması önerilmektedir. Yoğunluğun önemi çarpışma noktasının etrafında malzemenin verdiği karşılıktan ileri gelir. Çarpışma noktasındaki basınç akma dayanımına göre çok yüksek ise malzemeler çarpışma noktasının etrafında bir akışkan gibi hareket eder ve çarpışma noktasından uzaklaşır. Bileşenler benzer yoğunlukta olduklarında, kaynak arayüzeyi simetrik bir dalga görüntüsü sergiler. Çizelge 3.3' de görüldüğü gibi 0.4 mm ile 50 mm arasındaki üst levha kalınlığı ticari uygulamalarda kullanılır. Küçük ölçekli testlerde 0.025 mm incelikteki üst levhalar ve 50 mm kalınlığındaki çelik levhalar başarılı bir şekilde birleştirilmiştir (66).

Çizelge 3.3. Değişik kaplama malzemeleri ve kalınlıkları.

Kaplama malzemesi	Kaplama kalınlığı (mm)	
	Minimum	Maksimum
Alüminyum	6	50
Alüminyum-bronz	1.5	20
Pirinç	1.5	20
Bakır	1.5	22
Hasteloy	1.5	13
Nikel	1.5	20
Nikel-gümüş	1.5	20
Platinyum	1.5	-
Silikon bronz	0.4	16
Paslanmaz çelik	1.5	25
Tantalyum	1.5	6
Titanyum	1.5	20
Zirkonyum	-	12

3.7. Patlamalı Kaynakta Kullanılan Patlayıcılar

Patlamalı kaynak işleminde patlayıcılar üst levhanın (kaplama malzemesi) üzerine yerleştirilmektedir. Bu işlemde kullanılan patlayıcılar genelde taneseli veya sıvı olmak üzere ve üst levhanın şeklinin verildiği kutular içerisinde olabilmektedir. Patlamalı kaynak işlemi için gerekli patlayıcılar çoğu ticari şirket tarafından (amonyum nitrat, dinamit gibi) üretilmektedir (83).

Endüstriyel uygulamalarda patlayıcı olarak TNT, amonyum nitrat, nitroguanidin gibi maddeler kullanılmakta ve bunların seçiminde ise iş emniyeti, patlama hızı, maliyet ve kullanım kolaylığı gibi faktörler önemli rol oynamaktadır (80).

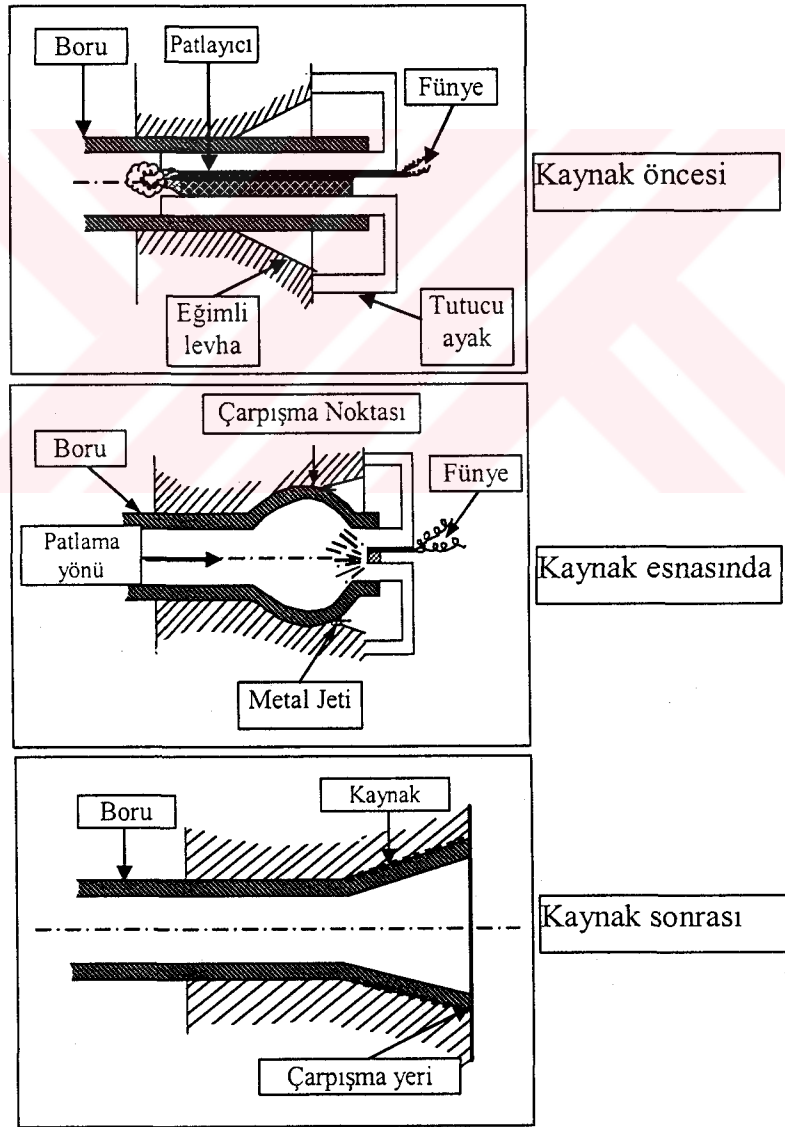
Patlayıcılar üst tabakaya yerleştirilen esnek plastik tabaka üzerine, bükülmüş ince uzun şeritler, toz, sıvı veya gaz halinde yerleştirilebilir (74). Katı, sıvı ve gaz halinde bulunan patlayıcılar, kimyasal reaksiyon hızına bağlı olarak düşük ve yüksek patlayıcılar olmak üzere iki çeşittirler. Düşük patlayıcılar daha çok silah ve roketlerde kullanılırlar. Patlamalı kaynak ve şekil vermede kullanılan patlayıcılar ve bazı özellikleri şunlardır:

- TNT [Trinitrotulene): 23000 ft/sn`lik (7010 m/sn) bir patlama hızına sahip askeri bir patlayıcıdır. Suda çok az çözünür. Hassas olmamasından dolayı çok güçlü bir patlatıcı kapsüle gerek duyulur.
- RDX [Cyclotrimethylene-Trinitramine): Saf halde 204 °C`de erir ve 1.816 g/cm³ yoğunluktadır. Patlam hızı 27500 ft/sn (8382 m/sn) olup suda çok az çözünür.
- PETN [Pentaerythritol-Tetranitrate): Saf halde 141.3 °C`de erir ve 1.765 g/cm³ yoğunluktadır. Patlama hızı 27200 ft/sn (8290 m/sn) olup suda çok az çözünür. Genelde su altı patlatmalarında kullanılır.
- C3-C4 Kompozisyonu: 1.60 g/cm³ yoğunlukta sarımsı bir macundur. Patlama hızı 27200 ft/sn (8290 m/sn) olup sudan etkilenmez. C3 tipi aşırı derecede zehirlidir.
- Anfo [Amonyumnitrat-%6 fuel oil): Anfo, fuel oil ve amonyum nitrattan oluşan bir karışımdır. Fuel oil buharlaştığı için kapalı ortamda korunmalıdır (66).

3.8. Patlamalı Kaynak Uygulamaları

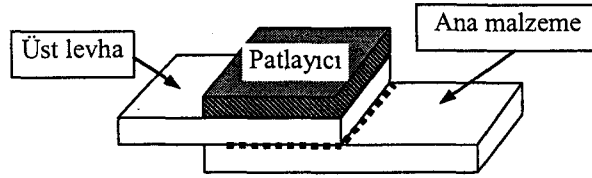
Korozyonun önemli olduğu kimyasal donanım parçaları, iki veya daha fazla metal içeren karma malzemeler ile elyaf takviyeli karma malzemeler de bu yöntem kullanılarak üretilirler. Ayrıca, silindirik parçaların ve boruların iç ve dış yüzeylerinin kaplanması, boru ve levha bağlantıları ve de bindirme kaynağı bu yöntemin başarıyla uygulandığı alanlardandır. Teknolojisinin oldukça tehlikeli ve zor

olması nedeniyle yaygın bir kullanım alanı bulamayan patlamalı kaynak yöntemi, özellikle geniş levhaların ve silindirik parçaların kaplanması, farklı metallerden oluşan parçaların birleştirilmesinde başarılı bir şekilde kullanılabilir. Metalurjik sorunları ergitme kaynağı yöntemlerine göre çok daha az olan bu yöntem Şekil 3.6'de görüldüğü gibi ısı eşanjörlerindeki boruların birleştirilmesinde çok sık kullanılmaktadır (80). Borudan boruya bağlantı birleştirmeleri birçok patlamalı kaynak uygulamasında boru çapları 12.7-38.1 mm arasında olabilmektedir. Metal bileşimleri çelikten paslanmaz çeliğe, alüminyum ve nikelten titanyuma gibi birçok bileşimi içerebilmektedir (11).



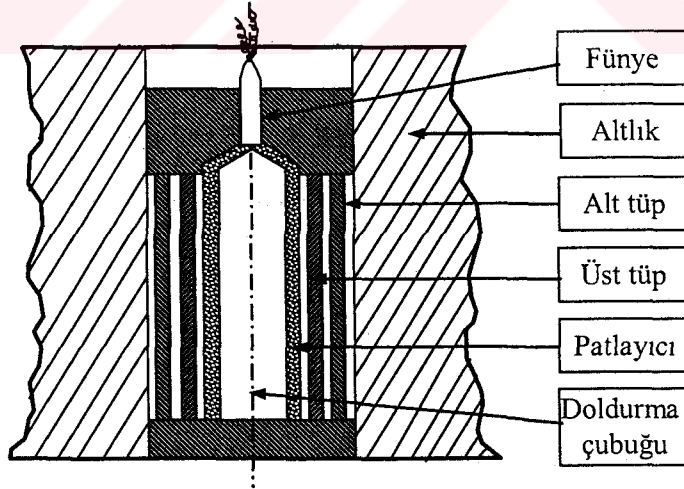
Şekil 3.6. Patlamalı kaynakta borudan boruya birleştirme (11)

Patlamalı kaynak yöntemi, boruların birleştirilmesinin yanında levha malzemelerin bindirme kaynağı ile birleştirilmesinde de kullanılmaktadır. Levhaların bu yöntem ile birleştirilmesi Şekil 3.7’de şematik olarak verilmiştir. Bu yöntemde genelde şerit biçiminde patlayıcılar kullanılmaktadır.



Şekil 3.7. Patlamalı kaynak ile bindirme kaynağının şematik gösterimi

Silindirik yüzeylerin patlama ile kaplanması, patlamalı kaynağın ilk gelişme alanlarından biridir. Başlangıçta buharlı elektrik santrallerinde nozullara uygulanmıştır. Buradaki nozulların korozyon direncine sahip olması istenir. Bakır-alüminyum yada diğer kompozit malzemeli içi boş silindire, örs görevini üstlenecek olan bir dış silindir kullanılarak iç kaplama yada iç tüpte bozulmayı engellemek için içe yerleştirilecek dolu bir çubuk kullanılarak dış kaplama üretilmiş olur. Şekil 3.8 silindirik yüzeylerin patlama kaynağını şematik olarak göstermektedir.

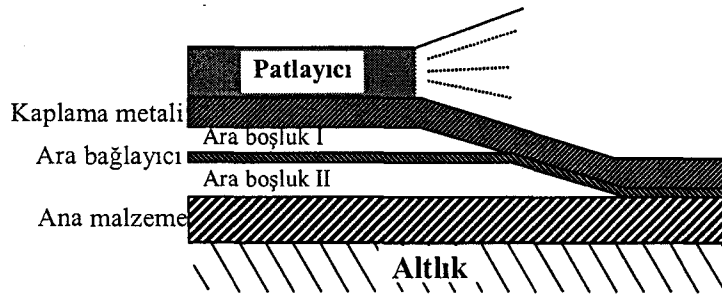


Şekil 3.8. Tüplerin patlamalı kaynağı.

Burada patlayıcı alt tüpün içerisine yerleştirilir ve üst tüp destek vazifesi göreceği olan bir silindire desteklenir. Üst tüpün destek silindire kaynağını engellemek için lastik, boya, kauçuk gibi bir ara malzeme kullanmak gereklidir (66).

3.9. Önceden Yapılan Çalışmalar

Hokamoto ve arkadaşları (84), 4 mm kalınlığında alaşımlı alüminyum ile 9 mm kalınlığında paslanmaz çelik levhaları ara bağlayıcı ince bir paslanmaz çelik (0.1-1.0 mm) levha kullanarak birleştirmişlerdir. Birleştirme işlemi Şekil 3.9'da görüldüğü gibi iki adet ara boşluk bırakılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.9. Arabağlayıcı kullanılarak yapılan patlamalı kaynağın şematik gösterimi

Çalışmalarının sonucunda arabağlayıcı olarak ince bir levha kullanımı ile çarpışma esnasında açığa çıkan enerjinin etkilerinin azaldığı tespit edilmiştir. Ayrıca çeşitli alüminyum alaşımlarının kaynak bölgesinde çarpışma ile kinetik enerji kaybı ve çarpışma hızı değişiminin azaldığı ve alüminyum alaşımlarının dayanımlarının artması ile kaynaklı bölgenin azaldığını rapor etmişlerdir.

Changqing ve Zhanpeng (85), patlamalı kaynak yöntemi ile 2.1 mm kalınlığında molibden (% 99.78 Mo) ile 7.5 mm kalınlığında çelik (% 0.2 C) kompozitini üretmişler ve 973 ile 1273 K sıcaklıkta fırında ısıl işleme tabi tutarak arayüzeyi metalografik olarak incelemişlerdir. İncelemeler sonucunda ısıl işlem sıcaklığının değişmesiyle arayüzey mikroyapısının değiştiğini ve arayüzeyde karbür tabakasının oluştuğunu ve karbür tabakasının da kompozitlerin bağ dayanımını azalttığını belirtmişlerdir.

Han ve arkadaşları (86), 5 mm kalınlığında AA 5083 alüminyum alaşımı ile 9 mm kalınlığında SS 41 çelik levhaları arabağlayıcı levha (0.2-2.0 mm) kullanarak patlamalı kaynak yöntemi ile birleştirmişler ve AA 1050 arabağlayıcı kalınlığının makaslama mukavemetine etkilerini incelemişlerdir. Araştırma sonucunda

arabağlayıcı kullanılmayan birleştirmelerin mukavemetlerinin çok düşük olduğu ve arabağlayıcı tabaka kalınlığının 0.2 mm'den 2.0 mm'ye artmasına paralel olarak makaslama mukavemetinin arttığını tespit etmişlerdir. Ayrıca arabağlayıcı levha kalınlığının artmasıyla maksimum makaslama mukavemetinin arttığı ve buna paralel olarak toplam uzamanın azaldığı belirtilmiştir. Mikroyapı incelemeleri sonucunda patlamalı kaynak ile elde edilmiş birleştirmelerin yapılarında arayüzeyde çatlakların olduğu tespit edilmiştir.

Li ve arkadaşları (87), patlamalı kaynak ile alüminyum ve çelik levhaları üç değişik patlayıcı oranında birleştirilmişler ve birleşmenin arayüzeyini SEM, TEM ve elektron ışın yöntemleri ile incelemişlerdir. Araştırma neticesinde sürekli reaksiyon bölgesi ve süperplastik akma bölgesinin patlayıcı miktarı ve ara boşluk mesafesinin artması ile genişlediğini ve reaksiyon bölgesinin Al_6Fe , Al_3Fe ve Al_2Fe içerdiğini tespit etmişlerdir. Ayrıca, süperplastik akma bölgesinin çeliğin süperplastik deformasyonu ile oluştuğu ve bu bölgenin çita tipi martenzit ile perlit içerdiği ve de bu bölgedeki demir kristallerinin boyutunun reaksiyon bölgesi yakınlarında büyük olduğu (genişlediği) bulunmuştur.

Yang ve arkadaşları (88), ticari saflıkta (α -Ti) ile düşük karbonlu çelik malzemeleri patlamalı kaynak yöntemi ile paralel düzlemde 608 m/sn üst levha hızı (basınç hızı) kullanarak birleştirmişler ve optik mikroskop, SEM ve TEM incelemesi yapmışlardır. Sonuçta, α -Ti-düşük karbonlu çelik kompozit malzemesinde α -Ti matriksine ve arayüzeyde bir çok ısı geçirmeyen kesme bantlarının (Adiabatic shear band) olduğunu ve düşük karbonlu çelik üzerinde bu bantların oluşmadığını rapor etmişlerdir. SEM ile elde edilen görüntülerden, kesme bantlarının genişliklerinin 4-8 μ m arasında olduğu ve bu bantların içerisinde deformasyon ikizlenmelerine rastlanmadığı tespit edilmiştir.

Khokhlov ve arkadaşları (89), yaptıkları bir araştırmada patlamalı kaynak sırasında titanyum ve alaşımlarında meydana gelen yapısal değişimler ve geçişler, elde edilen birleştirmelerin uygulama aralığı kadar kaynağın sınır şartları, birleştirmelerin

dayanımı ve homojenliği üzerinde önemli bir etkisi olduğunu belirtmişlerdir. Araştırmalarında patlama ile birleştirilmiş VT23 Ti alaşımının yapı özellik değişimini X ışınları ile faz analizi ve metalografik olarak incelemişlerdir. İnceleme sonucunda patlamalı kaynak işleminden sonra kaplama levhasında yapısal dönüşümler olduğunu ve bu faz kompozisyonlarının birbirinden ve ilk yapıdan farklı olduğu sonucuna varmışlardır. VT23-VT23 birleştirmesindeki yapı homojensizliği, metaldeki sıcaklık ve birim şekil değiştirme alanlarından kaynaklanmaktadır.

Richman ve arkadaşları (90), patlamalı kaynak yöntemi ile çelik levhalara kaynaklanan NiTi alaşımının kavitasyon erozyonunu incelemişlerdir. Yapmış oldukları deneysel çalışmada, eşit atomik kompozisyonda iki NiTi alaşımı olan martenzitik NiTi-çelik ve östenitik NiTi-çelik birleşmeleri yapmışlar ve sertlik, ağırlık kaybı ölçümü ve yüzey mikroyapı incelemeleri gerçekleştirmişlerdir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, martenzitik NiTi alaşımına ısıl işlemin etkisi belirsiz iken östenitik NiTi alaşımında erozyon direncini koruduğu gözlenmiştir. Ayrıca, her iki alaşımın da kavitasyon erozyonuna dirençli olduğu ve sertliklerinin arttığı tespit edilmiştir.

Trutnev ve arkadaşları (91), alüminyumun titanyum, çelik ve nikel birleştirilebilirliğini belirlemek üzere bir paralel düzlem yöntemi kullanarak bir çalışma yapmışlar ve birleştirmelerde amonyum nitrat ve 6ZhV toz patlayıcı kullanmışlardır. Çalışma sonucunda alüminyumun titanyuma kaynaklanabilirliğinin çelik ve nikelden daha iyi olduğunu ve ara boşluk mesafesi ve patlayıcı miktarının artmasıyla birleşme kalitesinin arttığını rapor etmişlerdir. Ayrıca kaynaklı bölgelerdeki sertliğin malzemelerin kaynak öncesi sertliğinden daha fazla olduğunu ve çarpışma esnasında temas eden yüzeylerde çalışma sertleşmesinin olduğu (alüminyum hariç) tespit etmişlerdir.

Williams (92), çelik levhaları korozyondan korumak amacıyla patlamalı kaynak yöntemi ile titanyum kaplamıştır. Ayrıca bir basınç tankının yüzeyleri 316L paslanmaz çelik, Hastelloy B, nikel ve titanyum ile kaplanmış ve maliyetleri hesaplanmıştır. Kullanılan malzemeler ve maliyetleri Çizelge 3.4.'te verildiği gibidir.

Çizelge 3.4. Kaplamaların maliyet analizi.

Malzeme	Maliyeti \$/lb	
	Katı (tamamı)	Kaplama
316L SS	1.00	0.43 (%10)
Nikel	1.60	0.59 (%10)
Hastelloy B	3.00	1.04 (%5)
Titanyum	5.00	1.12 (%3)

Bu sonuçlar değerlendirildiğinde titanyum kaplanmış bir tankın maliyeti paslanmaz çelik kaplanmış bir tankın maliyetinden üç kat daha fazladır. Ancak, titanyumdan yapılmış bir tank yerine kaplanmış bir tank maliyeti yaklaşık % 75 azalmaktadır. Kullanılan bu kaplama malzemeleri arasında korozyona en dayanıklı titanyum olduğundan bu malzemenin kullanımı maliyetleri ciddi derecede azaltmaktadır.

Mamalis ve arkadaşları (93), titanyum ile nikeli patlamalı kaynak ile birleştirmişler ve haddeleme işlemine tabi tutarak, kaplama metali ve ana metalde Ni/Ti kaplamasında intermetalik bileşikler, dalgalı arayüzeyde EDX, optik ve SEM kullanılarak açıklanmıştır. İncelemeler sonucunda, kaynak parametrelerinin uygun seçilip yüksek patlama enerjili patlayıcılar kullanıldığında birleştirmenin her yerindeki dayanımın ilk hallerinden daha iyi olduğu ve soğuk haddeleme işlemi sonrasında kompozitlerdeki düzleştirme ve çalışma sertleşmesi herhangi bir metalurjik değişmeye ve kusura sebep olmadığı tespit edilmiştir.

Ma ve Zhou (94), çelik levhaları patlamalı kaynak yöntemi ile titanyum kaplamışlar ve birleşme arayüzeyinin deforme edilebilirliğini araştırmışlardır. Ayrıca, kaynaklı malzemelerin çelik tarafında plastik deformasyon ve titanyum tarafında adyabatik kayma bantlarının işlem parametreleri ile değişimi araştırılmıştır. Sonuçlar arayüzeydeki hataların deformasyonla ilgili olduğunu göstermiştir. Deformasyon özelliği 50-200 µm genişliğinde ve adyabatik kayma bantlarının 1000 µm uzunluğun altında tutularak kontrol edilmesi gerektiğini rapor etmişlerdir.

Li ve arkadaşları (95), patlamalı kaynak yöntemi ile üretilmiş Al/çelik birleşme arayüzeyinde değişik fazların morfolojisini ve yapısını incelemişlerdir. Çalışmalarında üç farklı parametre kullanmışlar ve birleşme arayüzeyini SEM ve TEM ile incelemişlerdir. Sonuçlar tüm arayüzeylerin dalgalı ve süreksiz bölgelere sahip olduğunu göstermiştir. Bu bölgeler amorf ve nano boyutlu kristaller ve AlFe, Al₂Fe, Al₃Fe ve Al₆Fe gibi bileşikler içerdiği ve arayüzeyin çelik tarafında martenzit ve perlit fazlarının oluştuğu tespit edilmiştir. Bu martenzit ve perlit süperplastik işlem sonucu deforme olmuştur. Patlamalı kaynak işlemi esnasındaki aktif bölgenin boyutunun patlayıcı miktarının ve ara boşluk mesafesinin artması ile arttığını belirtmişlerdir.

Wronka (96), yaptığı çalışmada patlamalı kaynak ile birleştirme işleminde kullanılan parçaların kalınlığının ve altlık tipinin etkisini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda patlamalı kaynak işleminde bu iki faktörün dikkate alınması gerektiğini belirtmişlerdir. Bu faktörlerin ilişkisi parça çarpışma geometrisi üzerinde analiz edilmiş ve zayıf şok dalgaları teorisi ve ultrasonik dalga teorilerini ortaya atmışlardır. Parça kalınlığı ve altlık tipinin dalga oluşumu üzerine etkisi hakkındaki bu hipotez kabul edilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda teorik varsayımlar deneysel çalışmalar ile doğrulanmıştır.

Gerland ve arkadaşları (97), bir alüminyum alaşımının ince bir nikel filmi ile patlamalı kaynak yöntemi kullanılarak kaplanmasını araştırmışlardır. Kaplama için 50 ve 100 µm olmak üzere iki farklı kalınlık ve dört farklı patlayıcı bileşimi kullanmışlardır. Kaplama özellikleri, yüzey durumu, mikrosertlik ölçümü, optik ve SEM, kalıntı gerilme ve X ışınları yöntemlerini kullanarak karakterize edilmiştir. Çalışmalar sonucunda bütün kaynak şartlarında iyi kalitede bir birleşme ve düşük yüzey pürüzlülüğüne sahip bir film elde edilmiştir.

4. KOROZYON

Korozyon, metal ile çevresi arasında oluşan kimyasal veya elektrokimyasal etkileşmeler ile, metalin aşınması olayıdır (98). Metallerin büyük bir kısmı su ve atmosfer etkisine dayanıklı olmayıp normal koşullar altında bile korozyona uğrayabilir. Bütün metaller doğada mineral olarak buldukları hale dönüşmek eğilimindedirler. Doğada buluna mineraller, söz konusu metalin en düşük enerji taşıyan bileşiği yani en kararlı halidir. Bu mineraller özel metalurjik yöntemlerle ve enerji harcanarak metal haline getirilir. Ancak metallerin çoğu element halinde termodinamik olarak kararlı değildir. Uygun bir ortamın bulunması halinde üzerinde taşınmış oldukları kimyasal enerjiyi geri vererek yeniden minimum enerji taşıyan kararlı bileşikler haline dönüşmek isterler. Bu nedenle korozyon olayları enerji açığa çıkararak kendiliğinden yürür. Bazı soy metaller hariç teknolojik öneme sahip bütün metal ve alaşımları korozyona uğrayabilir (99).

Korozyon genellikle iki türdür. Birincisi kimyasal eriyiklerin oluşturduğu doğrudan korozyon diğeri çevre şartlarının meydana getirdiği elektrokimyasal korozyondur. Sonuncusu herhangi bir özel eriyiğe gerek kalmadan sürekli oluşur. Bunun en ilginç örneği havanın rutubeti ve oksijeni etkisinde oluşan demirin korozyonu, diğeri bir deyimle paslanmasıdır. Üstün mekanik özellikleri nedeni ile endüstrinin en değerli ve en çok kullanılan malzemesi olan çelik açık havada korumasız halde bırakılacak olursa zamanla paslanarak yok olur (100).

Korozyon ve korozyon kontrolü çok önemli bir konu olduğu halde ne yazık ki pratikte yeteri kadar üzerinde durulmamaktadır. Korozyon, endüstriyel yatırımların ve üretimin maliyetini etkileyen en önemli faktördür. Bunun dışında, emniyet, sağlıklı işletme ve verimlilik de ancak korozyona karşı önlem alınarak sağlanabilir. Korozyonu tam olarak yok etmek çoğu zaman mümkün olmaz. Alınan çeşitli önlemler ile korozyon hızı önemsiz sayılan derecelere indirilebilir. Korozyonla mücadelenin temeli ekonomidir. Pratikte problemlerin en ekonomik olarak ve yeterli emniyeti sağlayacak şekilde çözülmesi istenir. Bu çözüm her zaman en iyisi olmayabilir. Bazı halde biraz paslanmaya göz yumularak daha ucuz olan çözüm

seçilebilir. Örneğin, düşük karbonlu çelik gibi düşük maliyetli ve düşük performanslı malzemeleri kullanmak ve bunları paslandıkça değiştirmek de bir çözüm olabilir.

Korozyonun söz konusu olduğu bir ortamda malzeme seçimi tamamen ekonomik temele dayandırılır. Malzeme maliyetine korozyonu önlemek üzere yapılan bütün harcamalar da dahildir. Malzemeler üzerinde relatif korozyon dayanıklılıkları göz önüne alınarak seçim yapılır. Ancak korozif ortamların birinden diğerine önemli farklar vardır. Malzeme seçimine etki eden faktörler Şekil 4.1’de görüldüğü gibidir (101).



Şekil 4.1. Malzeme seçimine etki eden faktörler (101)

Bir korozyon uzmanının yapması gereken malzemenin ortam koşullarına uygun olarak geliştirilmesini ve kullanılmasını sağlamak, çalışan sistemler için korozyon önlemlerini almak ve denetlemektir (102).

4. 1. Korozyonun Ekonomik Boyutu

Korozyon harcamaları ilk bakışta pek önemli görünmüyorsa da, yapılan detaylı çalışmalar bu harcamaların ülke ekonomisine büyük yük getirdiğini ortaya çıkarmıştır. Korozyon harcamalarının ülke ekonomisindeki payları genel olarak Gayri Safi Milli Hasıla'nın % 3-5'i arasında değişmektedir (103). Bu değer teknolojik olarak az gelişmiş olan ülkelerde daha da fazla olması doğaldır. Hangi yöntem uygulanırsa uygulansın korozyon kayıplarının maliyetinin hesabı çok zordur.

Bu zorluk korozyon nedeni ile meydana gelen malzeme ve işçilik kaybı yanında gözle görülmeyen bazı yan kayıpların belirlenmesinden kaynaklanır. Korozyonun doğrudan neden olduğu malzeme ve işçilik kaybına, korozyon nedeni ile ortaya çıkan diğer kayıplarında dahil edilmesi gerekir. Korozyonun neden olduğu dolaylı kayıpları şu şekilde sıralayabiliriz.

4. 1. 1. Tesisin servis dışı kalması

Korozyon sonucu meydana gelen arızanın tamiri için geçen süre içinde tesis stop ederek üretim duracaktır. Bu işlem, büyük boyutlarda ekonomik kayıplara yol açar. Örneğin bir termik santralin bir gün devre dışı kalmasında çok büyük ekonomik kayıplar ortaya çıkabilir.

4. 1. 2. Ürün kaybı

Bir deponun, tankın veya boru hattının korozyon sonucu delinmesi halinde, olayın farkına varılıncaya kadar ürün kaybı söz konusu olur. Bu kayıplara korozyon kaybı olarak bakmak gerekir. Ürün kaybının yanında çevre kirlenmesi ve eğer ürün yanıcı bir madde ise yangın tehlikesi de söz konusudur. Örneğin benzin istasyonlarındaki yer altı yakıt tanklarının delinmesi sonucu büyük tehlikeler doğmaktadır.

4. 1. 3. Ürün kirlenmesi

Çözünen korozyon ürünleri, elde edilen kimyasal madde içerisine karışarak onun kirlenmesine neden olur. Özellikle gıda maddeleri, ilaçlar ve kozmetik ürünleri içine pas karışarak kaliteyi bozabilir. Örneğin, kurşun borular içme suyu içine zehirli kurşun bileşiklerinin karışmasına neden olur.

4. 1. 4. Korozyon için alınan aşırı önlemler

Çoğu zaman korozyonun hızının başlangıçta tam olarak bilinmesi mümkün olmaz. Bu nedenle tasarım sırasında gereğinden kalın malzemeler veya emniyetli olması için

çok pahalı malzemelerin kullanılması yoluna gidilir. Korozyon olayı meydana gelmediği halde yapılan bu masrafların da korozyon kaybı olarak kabul edilmesi gerekir (101).

4. 1. 5. Boya ve kaplamalar

Metalleri korozyondan korumak üzere kullanılan boyalar, kalay ve çinko ile yapılan kaplamalar da korozyon kaybı olarak kabul edilmelidir. Üretilmekte olan boyaların büyük bir kısmı korozyonu önlemek amacı ile kullanılmaktadır (99).

4. 2. Korozyon Çeşitleri

Temel reaksiyonları aynı olmakla beraber, korozyon olayı pratikte çeşitli mekanizmalarla oluşur. Korozyona uğramış metalin görüntüsü de farklıdır (104). Genel bir sınıflama yapılacak olursa korozyon çeşitleri şu biçimde sınıflandırılabilir (101).

- | | |
|---|---------------------------------|
| 1. Homojen dağılımlı (Üniform) korozyon | 8. Erozyon korozyonu |
| 2. Galvanik korozyon | 9. Aşınmalı korozyon |
| 3. Çatlak korozyonu | 10. Stres (gerilmeli) korozyonu |
| 4. Filiform korozyon | 11. Yorulmalı korozyonu |
| 5. Çukur korozyonu | 12. Hidrojen kırılganlığı |
| 6. Tanelerarası korozyon | 13. Mikrobiyolojik korozyon |
| 7. Seçimli korozyon | 14. Yüksek sıcaklık korozyonu |

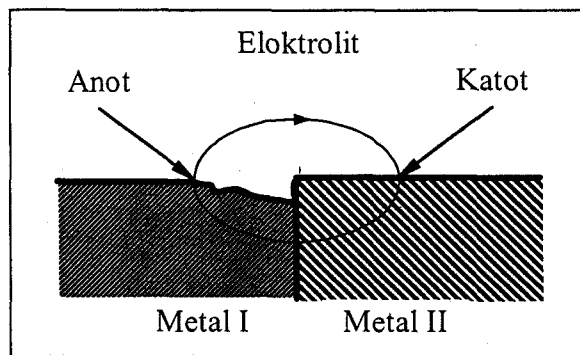
Korozyon çeşitlerinin bu kadar fazla olmasına rağmen çalışmamız gereği burada sadece homojen dağılımlı (Üniform) korozyon, galvanik korozyon ve stres (gerilmeli) korozyonu kısaca anlatılmıştır.

4. 2. 1. Homojen dağılımlı (Üniform) korozyon

Metallerin yüzeyinde eşdeğer şiddette oluşan korozyon türüdür. Korozyon sonucu metal kalınlığı her noktada aynı miktarda azalır. Atmosferde bırakılan bir metal genellikle üniform biçimde korozyona uğrar. Mekanik açıdan en zararlı olan korozyon çeşidi üniform korozyondur. Çünkü metal delinmeden ve kırılmadan uzun süre işletmede kalabilir (104). Bu tip korozyon çok sık olarak açık yerlerde atmosfere maruz sistemlerde ve üniform ortama tamamen daldırılmış sistemlerde görülür. Üniform korozyon (a) uygun yüzey kaplamaları, (b) ortama ilave edilen inhibitörler ve (c) katodik koruma ile kontrol edilebilir (105). Korozyon hızının hesaplanmasında kullanılan bağıntılar, korozyonun üniform şekilde yürüdüğü kabulüne dayandırılır (101).

4. 2. 2. Galvanik korozyon

Galvanik korozyon hem endüstriyel hem de yaşamsal alanlarda büyük olumsuzluklar etkisiyle meydana gelir. Bu tür korozyon 1700'lü yılların başlarında gemi iskeletlerindeki demirin yüzeyine kaplanan bakır kaybıyla alttaki demirin hızlı bir şekilde korozyona uğramasının anlaşılmasından bu yana bilinmektedir (106). Galvanik korozyon, iki farklı metal korozif bir ortama daldırılır veya elektriksel bir bağ ile birbirlerine bağlanırlarsa meydana gelir (Şekil 4.2). Bu metallerden elektrod potansiyeli daha elektronegatif olan metal anot olarak korozyona uğrar ve de korozyon hızı iki metal arasında oluşan potansiyel farkına bağlıdır (107-109).



Şekil 4.2. İki farklı metalin teması ile oluşan galvanik korozyon.

Sonuç olarak korozif bir ortamda bulunan bir metal çiftini teşkil eden metallerden biri anot olarak davranırken, diğeri de katot olarak davranmaktadır. Katot davranışı gösteren metal hiç korozyona uğramaz iken, anot olarak davranan metalin korozyon hızı artar (103). Galvanik korozyonun önlenmesinde kullanılan başlıca yöntemler şunlardır (101,110).

- * Galvanik seride birbirinden uzak konumda olan metallerin teması önlenmelidir.
- * Eğer bu iki metalin bir arada kullanılması zorunlu ise, büyük katot-küçük anot yüzeyinden kaçınılmalıdır.
- * İki metal arasındaki bağlantılar izole flanşlarla elektriksel olarak yalıtılmalıdır.
- * Metal yüzeyleri boya veya kaplama yapılarak izole edilmelidir.
- * Tasarım sırasında anot olan parçanın daha kolayca yenisi ile değiştirilebilmesi için önlem alınmalıdır. Veya bu parça daha kalın olarak imal edilmelidir. Veya sisteme her iki metalden de daha anodik karakterde olan üçüncü bir metal bağlanmalıdır.
- * Eğer kapalı bir sistem söz konusu ise inhibitör kullanılmalıdır. İnhibitör korozif ortamlarda korozyon hızını yavaşlatan kimyasal maddeler olarak tanımlanır. Kapalı devre çalışan sulu sistemlerde inhibitörlerle koruma yapılabileceği gibi sulu olmayan ortamlarda da inhibitörler kullanılabilir (111). Ancak sık kullanılan bazı inhibitörler sağlığa zararlı olduğu için her ortamda kullanılamazlar.

4. 2. 3. Stres (gerilmeli) korozyonu

Gerilmeli korozyon, kalıcı veya uygulanan gerilmeden dolayı, korozyon ve metal geriliminin birlikte olduğu bir korozyon türüdür (98). Gerilmeli korozyonu başlatabilecek birkaç mekanizma vardır. Bu yüksek enerji noktalarındaki film içinde veya üzerindeki özel iyonik türlerin tercih edilen yüze toplama veya emilmesi boyunca oksit filmindeki gerilme konsantrasyonu noktasındaki konsantrasyonu ikinci-safha parçacıkların varlığı veya sigma fazı, karbürler, martenzit, metal olmayan kalıntılar gibi bölgeler ile bağlantılı olabilir (112).

Korozif ortamda bulunan bir metal aynı zamanda gerilme altında ise korozyon hızında artış olur ve çatlama şeklinde kırılma olur. Başlangıçta çukur biçiminde olan korozyon gerilmenin etkisiyle çatlak halini alır. Gerilmeli korozyonun oluşması metal cinsine ve çevrenin bileşimine bağlıdır (104).

4. 3. Deniz Suyu İçinde Korozyon ve Önlenmesi

İletkenliği oldukça yüksek olan deniz suyu, temas ettiği metal yapılar için şiddetli bir korozif ortam oluşturur. İletkenliğin yüksek oluşu korozyon hücresinin oluşumunu kolaylaştırır. Diğer taraftan deniz suyu içinde bulunan klorür iyonları pasifleşmeyi önleyerek korozyon hızını artırıcı etki yapar. Deniz suyu içinde korozyona etki yapan diğer faktörler; sıcaklık, pH, çözülmüş oksijen konsantrasyonu ve hareket hızıdır. Bütün bunların yanında metal yapının karakteristik özellikleri de korozyon hızı üzerinde etkili olur (99).

Deniz ortamında dikkate alınması gereken en önemli husus deniz suyunun iletkenliği nedeniyle meydana gelen galvanik korozyondur. İletkenliği yüksek olan deniz suyu birbirlerinden uzak olan metaller arasında galvanik korozyona yol açabilir. Deniz ortamında galvanik korozyonun önüne geçebilmek için doğru eşleme yapmak gerekir (113). Galvanik korozyonu minimuma indirmek için dikkate alınacak hususlar şunlardır:

- a)- Mümkün ise deniz ortamındaki bütün sistem veya deniz ortamında terk edilen kısım aynı malzemedan yapılmalıdır.
- b)- Eğer bütün sistem aynı malzemedan yapılamıyor ise perçin, kaynak gibi kısımların daha soy malzemedan olmasına özen gösterilmelidir.
- c)- Galvanik eşleme sonucu korozyona uğraması beklenen parçaların geniş yüzeyli ve yeterli bir et kalınlığına sahip olması iyi olur.
- d)- Galvanik bir eşleşmenin yapıldığı deniz ortamında aktif olan malzeme yerine daha soy metalin kaplanması uygun olur. Böylece koruyucu tabakasının çatlaklık yerlerinde korozyonun tehlikeli biçimde yerleşmesi önlenmiş olur (103).

4. 4. Titanyumun Korozyon Davranışı

Kimyasal alanda üretim yapan fabrikalarda bir çok kullanım alanına sahip olan titanyum ve alaşımları yüksek korozyon dirençleri sebebiyle asitli ortamlarda, biomedikal uygulamalarda, uzay ve uçak sanayiinde, deniz suyuna temas eden ortamlarda yoğun bir kullanım alanına sahiptir (114,115,116).

Titanyum ve alaşımları memnuniyet verici mekanik özellikleri, rahat kaynaklanabilirliği, kolay işlenebilirliği ve benzeri nedenlerle medikal alanda kullanılan metalik malzemeler içerisinde önemli bir yere sahiptir. Biokimya alanında kullanılacak malzemeler seçilirken kullanılacak malzemelerin korozyon dirençlerinin ve de malzeme yüzeyinde oluşan pasif tabakanın koruma gücü dikkate alınmalıdır (117).

Malzemelerin uygulama alanlarındaki durumları düşünüldüğünde onların korozyon dayanımı ve aşınma davranışları çok önemlidir. Bu durumlarda titanyum ve alaşımları statik yükler altında yüksek korozyon direncine sahiptirler (118,119). Titanyum standart elektrod potansiyeli 1.63 V olan ve oksijene karşı yüksek affinitesinden dolayı çok reaktif bir elementtir. Bu metalin yüzeyinde çok kolay bir şekilde oksit filmi oluştuğundan korozyona karşı oldukça dayanıklıdır. Titanyum kimyasal tuzlara karşı korozyon yönünden çok dayanıklı bir metaldir. Onun en önemli avantajı galvanik serilerde kendisinden hiçbir şey kaybetmemesidir (120). Eğer titanyumun yüzeyindeki oksit tabakası kullanım esnasında herhangi bir şekilde zarar görürse altlık metal oksitleyici çevreden hemen uzaklaştırılarak gerekli önlemler alınmalıdır (121).

Titanyum ve alaşımlarının oksijene olan aşırı ilgisinden dolayı yüzeyde oluşan oksit tabakası korozyona çok dirençli bir tabaka olduğundan, oksijenin de bolca bulunduğu sulu asit ortamlarda, titanyum indirgendikçe potansiyel sürekli iner ve çıkar. Böylece değişen potansiyel ile oksit filmi kararsız bir hal almış olur. Fakat bu film ancak olağanüstü durumlarda kararsız hale geçebilir ve nadiren de olsa korozyon ihtimali vardır. Titanyumun yüzeyinde oluşan ve pasiflik olarak bilinen, kararlı oksit

tabakasının varlığı devam ettiği sürece korozyon aktif hale geçemez. Vücut sıvısına eşdeğer sıvıda yapılan deneylerde oldukça kararlılık gösteren titanyum, bu karakteri sayesinde cerrahi kullanımı için mükemmel bir malzeme olarak görülür. Alaşım haldeki titanyumlarda ise kararlı oksit tabakasının daha da iyi olduğu ve korozyona karşı dirençli pasif metaller olarak adlandırıldığı belirtilmektedir (122).

Bonilla ve arkadaşları (123), asitlerin azalması ile korozyon direncinin arttığının yanında palladyum alaşımı ilavesinin de korozyon direncini geliştirdiğini, bunda sebebinin düşük hidrojen aşırı gerilimin (with a low hydrogen overvoltage) korozyon potansiyelini pasif bölgeye kaydırıldığını belirtmişlerdir.

Galvanetto ve arkadaşları (124), plazma nitrülenmiş Ti6Al4V alaşımını, farklı konsantrasyonlardaki hidroklorik çözeltileri içerisinde korozyon davranışları değişik yöntemlerle (ağırlık kaybı, polarisasyon eğrileri ve potansiyel taraması) çalışmışlardır. Elde edilen sonuçlar aynı şartlarda test edilen, işlem görmemiş alaşım ile karşılaştırılmıştır. Nitrülenmiş numunelerin korozyon dirençleri yüzey filminin kalitesine bağlıdır ve film kalınlığı arttıkça korozyon direnci artmaktadır. Oksitlerin büyümesi oksit tabakasının çatlamasına ve yeni TiN yüzeyinin açığa çıkmasına sebep olur.

Cai ve arkadaşları (125), titanyum alaşımlarının elektrokimyasal karakterizasyonu üzerine bir araştırma yapmışlar ve yüzey durumunun korozyon üzerinde birçok etkisi olduğunu ve de oksitli yüzeylerin mükemmel korozyon direnci gösterdiğini belirtmişlerdir.

4. 4. 1. Titanyumda galvanik korozyon

Titanyumun diğer metaller ile oluşturduğu alaşımlarda, potansiyel değerlerinde eski seviyesinden bir düşme görülmez. Fakat birbiri ile temas halindeki diğer metallerin potansiyellerindeki değişim ve korozyondaki artışın görülmesinde sonra cerrahide farklı metallerin birbirlerine temasından kaçınılmıştır. Yapılan araştırmalarda bazı metal kombinasyonlarının ortopedik amaçlı kullanımından sonra galvanik korozyon

problemleri ortaya çıkmıştır. Bu problemlerin çözümü için yapılan laboratuvar ve klinik çalışmalar sonucunda ortaya; anodik koruma, katodik koruma veya iki pasif metalin oluşturduğu çiftleri kullanma gibi çözüm yolları bulunmuştur (122).

Dahshan ve arkadaşları (113), deniz suyunda titanyum ile 316L paslanmaz çelik ve alüminyum bronz çiftlerinin 25 ve 65 °C galvanik korozyon davranışlarını incelemiştir. Çalışma sonucunda tuzlu suyun oksijen miktarı azaldığında korozyon ilerleme hızının azaltılabildiğini ifade etmişlerdir.

Horasawa ve arkadaşları (107), titanyum ve galyumun galvanik korozyonunu incelemiştir. İncelemeler sonucunda Ti alaşım oranı arttıkça galvanik potansiyel ve akım yoğunluğunun arttığını ve titanyum ve dolgu alaşımı arasındaki galvanik korozyonun küçük olduğunu bildirmişlerdir.

4. 4. 2. Titanyumda gerilme korozyonu

Yüksek mekanik gerilim ve muhtemel korozif ortam, metallerde bozulmaya sebep olmaktadır. Bu olay özellikle paslanmaz çeliklerde klörür sıvısında meydana gelir. Gerilmeli korozyon olarak bilinen bu olağanüstü duruma, saf metallerde ve titanyumda hemen hemen hiç rastlanmaz. Bu konuda literatürde yer alan vücut sıvısına eşdeğer % 0,9'luk NaCl çözeltisinde yapılmış pek çok araştırma bulunmaktadır (122).

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

5.1. DeneYlerde Kullanılan Malzemeler

Bu çalışmada 100 x 150 mm ebatlarında kimyasal bileşimleri Çizelge 5.1-5.3'de verilen (Grade 23) 1,5 mm kalınlığında α - β faz yapılı titanyum (Ti 6Al 4V) levhalar ile 2 mm kalınlığında ticari saflıkta alüminyum, 1,5 mm kalınlığında 304 östenitik paslanmaz çelik ve 1,5 mm kalınlığında düşük karbonlu çelik sac levhalar patlamalı kaynak yöntemi ile birleştirilmiştir. Birleştirmelerde kullanılan malzemelerin sertlikleri; titanyum 210 HV, östenitik paslanmaz çelik 280 HV, düşük karbonlu çelik 142 HV ve alüminyum 42 HV olarak ölçülmüştür. Birleştirme işlemlerinde patlayıcı oranının birleşme arayüzeyine etkisini görmek amacıyla literatürde verilen bilgiler ışığında 5⁰'lik eğik geometri ile değişik patlayıcı oranları kullanılmıştır. Çalışmalar sonucunda elde edilen birleştirmelerin mikroyapıları, mekanik özellikleri ve korozyon davranışları incelenmiştir.

Çizelge 5.1. DeneYlerde kullanılan titanyumun kimyasal bileşimi (ağırlıkça %)

	C	Al	V	Fe	N	O	H	Ti
Titanyum	0,08	5,5-6,5	3,5-4,5	0,25	Max 0,03	Max 0,13	Max 0,012	Kalan

Çizelge 5.2. DeneYlerde kullanılan alüminyumun kimyasal bileşimi (ağırlıkça %)

	Mn	Si	Mg	Zn	Cu	Ti	Fe	Al
Alüminyum	0,0111	0,163	0,0365	0,0241	0,146	0,0237	0,516	Kalan

Çizelge 5.3. DeneYlerde kullanılan paslanmaz çelik ve düşük karbonlu çelik malzemelerin kimyasal bileşimi (ağırlıkça %)

Malzeme	C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	Mo	Co	Fe
Paslanmaz çelik	0,0237	1,46	0,299	17,99	9,78	0,022	0,261	0,191	Kalan
Düşük karbonlu çelik	0,061	0,299	0,028	0,028	0,001	0,070	0,001	0,002	Kalan

5.2. Deneylerde Kullanılan Patlayıcılar

Birleştirme işlemleri esnasında patlayıcı olarak M.K.E. Barutsan A.Ş'nin üretmiş olduğu Elbar-5 (% 92 Amonyum Nitrat, % 5 Motorin ve % 3 TNT) toz patlayıcı kullanılmıştır. Ayrıca patlatma esnasında patlayıcıların patlatılabilmesi için gerekli olan füne ve füne ile toz patlayıcı arasındaki intikali sağlamak için de yine aynı firmanın üretmiş olduğu jelatinit dinamit (her patlatma için 8 gram) kullanılmıştır. Toz patlayıcılar 150x100x50 mm ebatlarında hazırlanan karton kutular içerisine doldurulmuş ve füne ve jelatinit, yerlerine yerleştirildikten sonra toz patlayıcıların etrafa sıçramasını önlemek için kutunun ağzı kapatılmıştır. Resim 5.1'de patlama işlemi için hazırlanan patlayıcılar ve patlama öncesi altlık üzerine yerleştirilmesi görülmektedir.



Resim 5. 1. Altlık üzerine patlayıcı ve birleştirilecek malzemelerin yerleştirilmesi

Malzemelerin birleştirilmesinde kullanılan patlayıcı miktarı, patlatma esnasında kullanılan üst levha ile tampon sac levhaların toplam ağırlığıyla orantılı olarak belirlenmiştir. Alüminyum-titanyum birleştirmeleri haricindeki birleştirmelerde üst levha olarak titanyum kullanılmış ve titanyumun üzerine 1 mm kalınlığında çelik sac tampon konulmuştur. Titanyum ile alüminyumun birleştirilmesinde ise alüminyumun yoğunluğunun daha az oluşundan dolayı üst levha olarak bu malzeme seçilmiş olup patlayıcı miktarı ona göre seçilmiştir. Çizelge 5.4'de malzemelere göre kullanılan patlayıcı miktarları verilmiştir.

Çizelge 5.4. Numunelere göre kullanılan patlayıcı oranları

Üst parça ağırlığı (g)			Toplam ağırlık (m)		Patlayıcı oranı (R)	Patlayıcı miktarı (m×R) (g)	
Titanyum	Alüminyum	Tampon sac (Fe)	Ti+Fe	Al+Fe		Ti	Al
100	80	115	215	195	1	215	195
100	80	115	215	195	1,2	270	235
100	80	115	215	195	1,5	322	292
100	80	115	215	195	2	430	390
100	80	115	215	195	2,5	537	487
100	80	115	215	195	3	645	-

Yukarıdaki Çizelge’de patlatma işlemlerinde titanyum-östenitik paslanmaz çelik ve titanyum-düşük karbonlu çelik birleştirmelerinde titanyum + tampon sac ağırlığının patlayıcı oranı ile çarpımı kadar patlayıcı miktarı kullanılırken, titanyum-alüminyum birleştirmelerinde ise alüminyum + tampon sac ağırlığının patlayıcı oranı ile çarpımı kadar patlayıcı miktarı kullanılmıştır.

5.3. Deneilerin Yapılışı

Patlatma işlemleri M.K.E. Barutsan A.Ş.’nin yetkili bir teknik elemanı gözetiminde Ankara-Elmadağ’daki tesislerinin bulunduğu açık arazisinde ve uzaktan manyetolu bir sistem ile gerçekleştirilmiştir. Deneilerde, kum havuzu içerisine yerleştirilmiş 1500x2000x150 mm ebatlarında çelik bir altlık tabla kullanılmış olup alt malzemenin zarar görmemesi için altlık ile birleştirilecek alt levha arasına 6 mm kalınlığında lastik bir tabaka yerleştirilmiştir. Lastik tabaka üzerine birleştirilecek alt levha (düşük karbonlu çelik, östenitik paslanmaz çelik veya titanyum) konulmuş ve üzerine üst birleştirme levhası ile (titanyum veya alüminyum) 5° açı yapacak şekilde metal pullar yerleştirilmiş ve üst levha pullar üzerine konulmuştur. Üst birleştirme levhası üzerine de zarar görmemesi ve üst levhanın hızını artırması için tampon bir çelik sac konulmuş ve üzerine patlayıcılar hassas bir biçimde yerleştirilmiştir. Patlama ile birleştirilmiş kaynaklı numuneler kendi halinde açık havada soğumaya bırakılmıştır.

Patlatma işlemleri her bir numuneden üçer adet olarak yapılmıştır. Resim 5.2.'de patlamalı kaynak işlemi esnasında çekilen bir fotoğraf görülmektedir.



Resim 5.2. Patlama anından bir fotoğraf

5.4. Numune Hazırlama

Öncelikle 150x100 mm ebatlarında elde edilen birleştirmeler dört kenarından 10'ar mm kesilerek atılmıştır. 130x80 mm ebatlarındaki numunelerden mikroyapı, mekanik özellik ve korozyon testleri için gerekli ebatlarda ve patlama yönüne paralel olacak şekilde numuneler kesilmişlerdir. Kesme işlemi esnasında malzemelerin yapısını bozmamak ve zarar görmemesi için gerekli itina gösterilmiştir.

5.4.1 Metalografik muayene ve sertlik deneyi

Metalografik muayene ve sertlik deneyleri için 2'şer adet 15x10 mm ebatlarında ve patlama yönüne paralel olacak şekilde kesilen numuneler elde tutulamadığı için sıcak gömme yöntemi ile bakalite alınmışlardır. Bu numunelerden bir tanesi mikroyapı için kullanılırken diğeri sertlik ölçümlerinde kullanılmıştır. Bakalite alınan numuneler yüzeylerinin çizilmemesi için su zımparası ile zımparalanmışlardır. Zımparalama işlemi sırasıyla olmak üzere 180, 240, 400, 600, 800, 1000 ve 1200 gritlik silisyum karbür su zımparası ile ve de her zımparalama arasında 90° çevrilerek tamamlanmıştır. Zımparalama işlemi biten numuneler malzeme yüzeyini hazırlamada son basamak olan parlatma işlemine tabi tutulmuşlardır. Parlatma

işleminde amaç düzgün yüzeyli, çizik olmayan ve ayna gibi bir görünüm sağlamaktır. Parlatma işlemi, dönen bir disk üzerine yerleştirilmiş 3 µm bir keçe ile gerçekleştirilmiş ve bu keçe üzerine de 3 µm'lik elmas pasta emdirilmiştir. Parlatma işlemleri esnasında 600 dev/dk hız kullanılmış olup, her bir numune 5 dakika süreyle disk üzerinde yük uygulanmaksızın tutulmuştur.

Parlatma işlemi tamamlanan numuneler mikroyapılarının görülebilmesi için dağlama işlemine tabi tutulmuşlardır. Dağlama işleminde amaç tane sınırları ve arayüzeyi daha iyi görebilmektir. Bu amaç ile her bir malzeme için Çizelge 5.5'de verilen kimyasal dağlayıcılar hazırlanmış ve hazırlanan dağlayıcılar malzeme yüzeylerine bölgesel olarak damlatılmıştır. Dağlama işlemleri öncelikle metal çiftlerinden titanyumun karşısındaki metale (östenitik paslanmaz çelik, düşük karbonlu çelik ve alüminyum) uygulanmıştır.

Çizelge 5.5 Dağlama işleminde kullanılan kimyasal dağlayıcıların bileşimleri

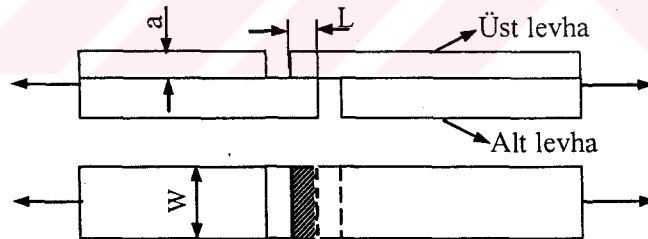
Malzeme	Kimyasal bileşimi	Süre (sn)
Titanyum	45 ml HCl, 15 ml HF, 15 ml Nitrik asit ve 25 ml saf su	5
Paslanmaz çelik	5 g pikrik asit 95 ml metanol	5
Düşük karbonlu çelik	2 ml nitrik asit 98 ml metanol	8
Alüminyum	5 ml HF, 95 ml saf su	5

Mikroyapı için hazırlanan numuneler bilgisayara görüntü aktarılabilen 1000 büyütme kapasiteli PRIOR marka optik mikroskop ile görüntülenmişlerdir. Görüntülerin, birleştirilmiş numunelerin ve arayüzeylerinin karakteristik özelliklerini tam olarak yansıtan bölgeden yapılmasına özen gösterilmiştir. Optik mikroskop görüntüleri alınan numuneler SEM çalışmaları için bakalitlerden çıkartılmıştır. SEM çalışmaları Kırıkkale Üniversitesi Fizik Mühendisliği Bölümünde Jeol JSM-5600 tipi cihaz ile gerçekleştirilmiştir.

Mikrosertlik ölçümleri Ankara Türk Traktör Fabrikası kalite kontrol laboratuvarlarında Zwick marka 3212002/00 tipi cihazda yapılmış ve 200 gram yük uygulanmıştır. Ölçümler birleştirilmiş numunelerin arayüzey ve dış yüzeylerinden 200 μm uzaklıktan ve de birleşmiş durumdaki iki malzemenin her birinin merkezinden olmak üzere 6 farklı noktadan 3'er adet ölçüm yapılmış ve ortalamaları alınmıştır.

5.4.2 Çekme-makaslama testi

Patlamalı kaynak ile birleştirilmiş numunelerden patlama yönüne paralel olacak şekilde ve her bir numuneden 3'er adet olmak üzere toplam 45 adet numune kesilmiştir. Kesilen numuneler (126) ASTM D 3165-95'de belirtilen şartlarda (Şekil 5.1) freze tezgahında işlenerek hazırlanmıştır. Burada numune genişliği $W=25,4$ mm ve 1,62 mm kalınlığında bir kaplama malzemesi (a) için 12,7 mm sıyrma genişliği (L) tavsiye edilmektedir. Verilen ölçülerde numuneler hazırlanmış ve teste tabi tutulmuştur.



Şekil. 5.1. ASTM standardına göre makaslama testi (ASTM D 3165-95)

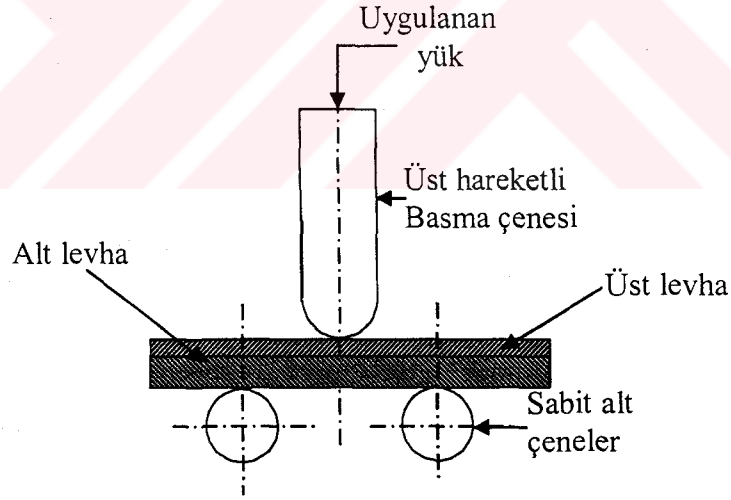
Ayrıca, ASTM D 3165-95'de belirtilen şartlarda ve aynı ölçülerde yalnızca L genişliğinin kaplama metali kalınlığına eşit olduğu ($L=a$) sıyrma numuneleri hazırlanmış ve literatürde verilen bilgiler ışığında (11) standart testlere ilave bu testler yapılmıştır.

Patlamalı kaynak işlemi ile elde edilip gerekli standarda göre hazırlanmış numuneler INSTRON MFL SYSTEM tipi çekme cihazı ile 1mm/dk ilerleme hızında çekme-

makaslama testine tabi tutulmuşlardır. Çekme-makaslama testi için her bir numuneden üç adet ölçüm yapılmıştır.

5.4.3. Eğme Deneyi

Patlamalı kaynak yöntemi ile elde edilmiş titanyum-östenitik paslanmaz çelik, titanyum-düşük karbonlu çelik ve titanyum-alüminyum kompozitlerinin her birinden 4'er adet olmak üzere eğme testi numuneleri hazırlanmıştır (Şekil 5.2). Hazırlanan kaynaklı numunelerin genişlikleri 25 mm ve eğme çapı 20 mm olarak seçilmiştir. Eğme testi için hazırlanan kaynaklı numunelerin tümünde test esnasında titanyum kaplama levhası hem iç kısımda hem de dış kısımda kalacak şekilde eğme işlemleri yapılmıştır. Eğme testlerinde her bir numuneden her iki yöne ikişer adet numune işleme tabi tutulmuştur. Eğme testleri, çekme-makaslama testlerinin yapıldığı cihazda ve 0,5 mm/dk ilerleme hızında yapılmıştır.



Şekil 5.2. Eğme deneyinin yapılışı

5.4.4 Korozyon testi

Patlamalı kaynak işlemi ile birleştirilmiş farklı özellik ve kimyasal bileşimdeki kompozit levhalar TS 8589'da belirtilen şartlarda (127) (suni atmosfer içinde yapılan korozyon deneyleri için genel kurallar) 15x15 mm ebatlarında ve her

birinden 9'ar adet olmak üzere toplam 135 adet deney numunesi hazırlanmıştır. Ayrıca işlem görmemiş (orijinal) malzemelerden de 9'ar adet (titanyum, östenitik paslanmaz çelik, düşük karbonlu çelik ve alüminyum) numune aynı ölçülerde hazırlanmışlardır. Patlamalı kaynak işleminde kullanılan malzeme kalınlıklarının ve patlayıcı oranlarının farklı olması nedeniyle elde edilen malzemelerin kalınlık farkından dolayı bütün numunelerin yüzey alanları ayrı ayrı hesaplanmıştır. Yüzey alanı hesaplanan numuneler 1/10000 gram hassasiyetli elektronik terazide tartılarak rapor edilmiştir.

Korozyon testi için hazırlanan numunelerin yüzeyleri TS 8589 'da belirtildiği gibi temizlenmiştir. Temizlenen numuneler içerisinde % 3,5'lik NaCl çözeltisinin (korozyon biliminde deniz suyu olarak bilinen) bulunduğu cam kaplar içerisine konulmuştur. Patlamalı kaynak ile birleştirilmiş numunelerin her yerinde korozif etkinin aynı olması için numuneler dikey ile 15-30⁰ açı yapacak şekilde yerleştirilmişlerdir. Her numune ayrı bir kaba konulmuş ve kaplara, numunelerin hava ile temasını önlemek için numune seviyesinin üzerinde çözelti ilave edilmiştir.

TS 8589'da, deneyin toplam süresinin, deneye tabi tutulan malzemelerin cinsine, çevre şartlarına, uygulanan deney metoduna ve deney değerlendirme kriterlerine bağlı olduğu belirtilmektedir. Burada deney süresi olarak 24, 48, 96, 240, 480, 720 ve 2016 saatten birinin seçilmesi uygun görülmektedir. Çalışmalarımızda hata payının en uzun süreli şartlarda daha az olacağı düşünüldüğünden deney süresi olarak 2016 saat seçilmiştir. Bu süre üç eşit parçaya bölünmüş ve (672, 1344 ve 2016 saat) ölçümler bu zamanlarda gerçekleştirilmiştir.

Test süresi biten korozyon numuneleri (her ölçüm için üç numune) buldukları korozif ortamdan çıkartılmış ve musluk suyu altında, sabunla fırçalanarak yıkanmış ve durulanmıştır. Daha sonra durulanmış deney numuneleri damıtılmış suya daldırılarak tekrar durulanmış ve kurutulmuştur. Kurulanmış deney numuneleri daha önceden ölçümlerde kullanılan elektronik terazi ile tartılarak ağırlık değişimleri rapor edilmiştir. Deneylerde kullanılan sonuçlar alınan üç ölçüm sonucunun ortalaması alınarak hesaplanmıştır.

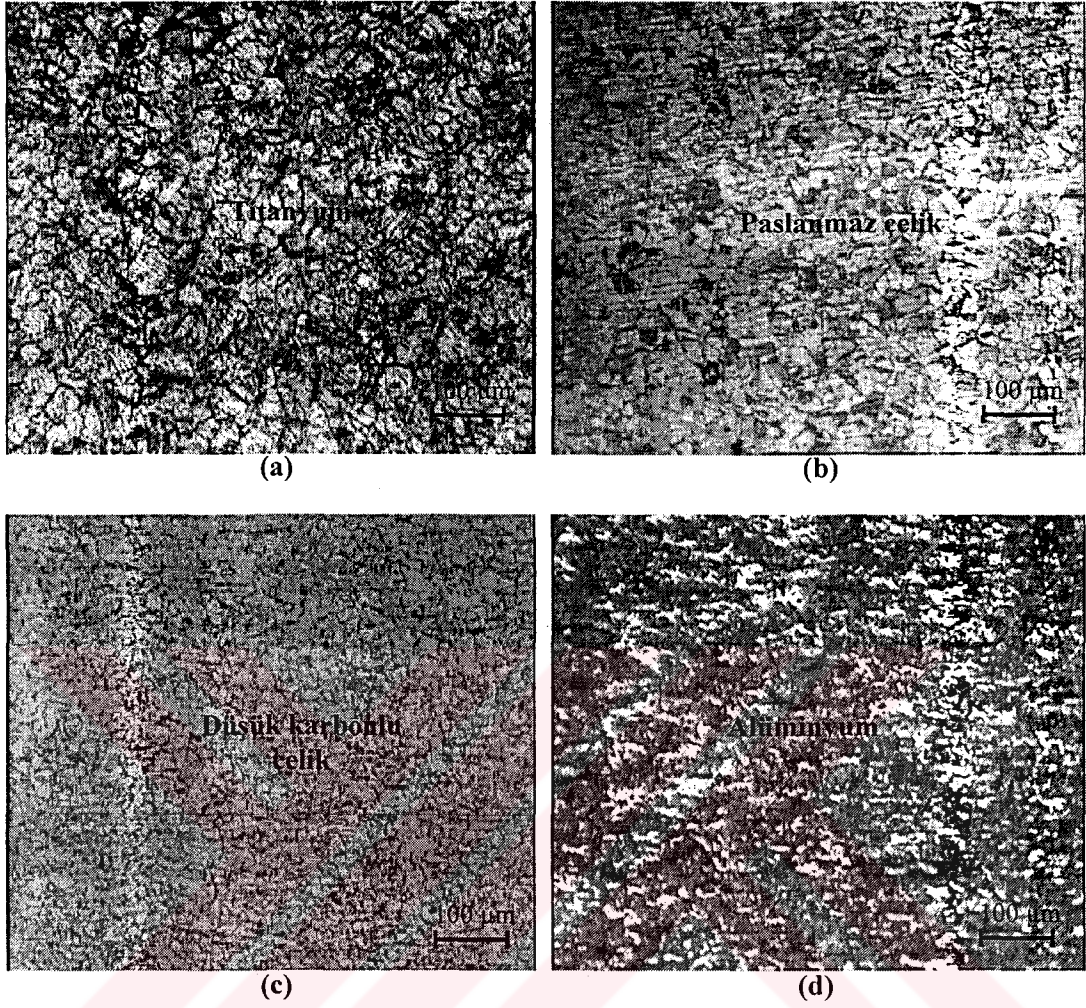
6. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Patlamalı kaynak yönteminde değişik patlayıcı oranlarının kullanıldığı deneysel çalışmalarda patlayıcı oranının $R=1$ seçildiği ve üst levha olarak titanyumun kullanıldığı durumlarda titanyum-paslanmaz çelik ve titanyum-düşük karbonlu çelik malzemelerinde birleşme elde edilemez iken aynı şartlarda fakat alüminyumun üst levha olarak kullanıldığı alüminyum-titanyum malzemelerinde olumlu sonuçlar alınmıştır. Paslanmaz çelik-titanyum ve düşük karbonlu çelik-titanyum malzemelerinde $R=1$ patlayıcı oranının kullanıldığı deneysel çalışmalarda birleşme sağlanamamasının sebebi bu malzemelerin alüminyum malzemeye göre sert oluşlarından kaynaklanmaktadır. Bu nedenle sert malzemelerin birleştirilmesinde daha fazla basınç ihtiyacı duyulmaktadır. Patlamalı kaynak yönteminde malzemelerin birleştirilebilmesi için kullanılan patlayıcı miktarı üst levhayı yeterince hızlandırmalıdır. Aksi halde çarpışma için gerekli basınç sağlanamayacağından birleşme gerçekleşmemektedir. Yapılan bir çalışmada da birleşmelerin gerçekleşmemesinin sebebi olarak uygulanan basıncın yetersiz oluşu gösterilmiştir (67).

Deneysel çalışmalar sonucunda patlamalı kaynak yöntemi ile birleştirilmiş kaynaklı numuneler üzerinde optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskop (SEM) çalışmaları yapılmıştır. Ayrıca kaynaklı numunelere çekme-makaslama, eğme ve sertlik testlerinin yanında korozyon davranışlarının belirlenmesi için deniz suyu ortamında elde edilen korozyon değişimleri başlıklar halinde tartışılarak değerlendirilmişlerdir.

6.1 Metalografik Deney Sonuçları ve Tartışılması

Değişik patlayıcı oranlarının kullanıldığı patlamalı kaynak yöntemi ile birleştirilmiş orjinal malzemelerden titanyum, paslanmaz çelik, düşük karbonlu çelik ve alüminyum malzemelerin optik mikroskop görüntüleri Resim 6.1'de verilmiştir.



Resim 6.1. Deneylerde kullanılan malzemelerin optik mikroskop görüntüleri
a) titanyum, b) paslanmaz çelik, c) düşük karbonlu çelik ve d) alüminyum

Resim 6.1 a'da deneysel çalışmalarda kullanılan Ti6Al4V α - β titanyum alaşımının mikroyapısı görülmektedir. Burada yapının α ve β tanelerinden meydana geldiği (siyahlar β) ve görüntünün her yerinde tanelerin eş eksenli olduğu görülmektedir.

Resim 6.1 b'de deneysel çalışmalarda kullanılan östenitik paslanmaz çelik malzemenin mikroyapısı görülmektedir. Bilindiği gibi östenitik paslanmaz çelikler, prensip olarak östenit kararlaştırıcı yüksek nikel içermeleri nedeniyle yüksek sıcaklık tavlamalarından sonra oda sıcaklığında östenit (YMK) yapılarını korurlar. Burada da görüldüğü gibi yapı östenit olmakla beraber tanelerin eş eksenli olduğu açıkça görülmektedir.

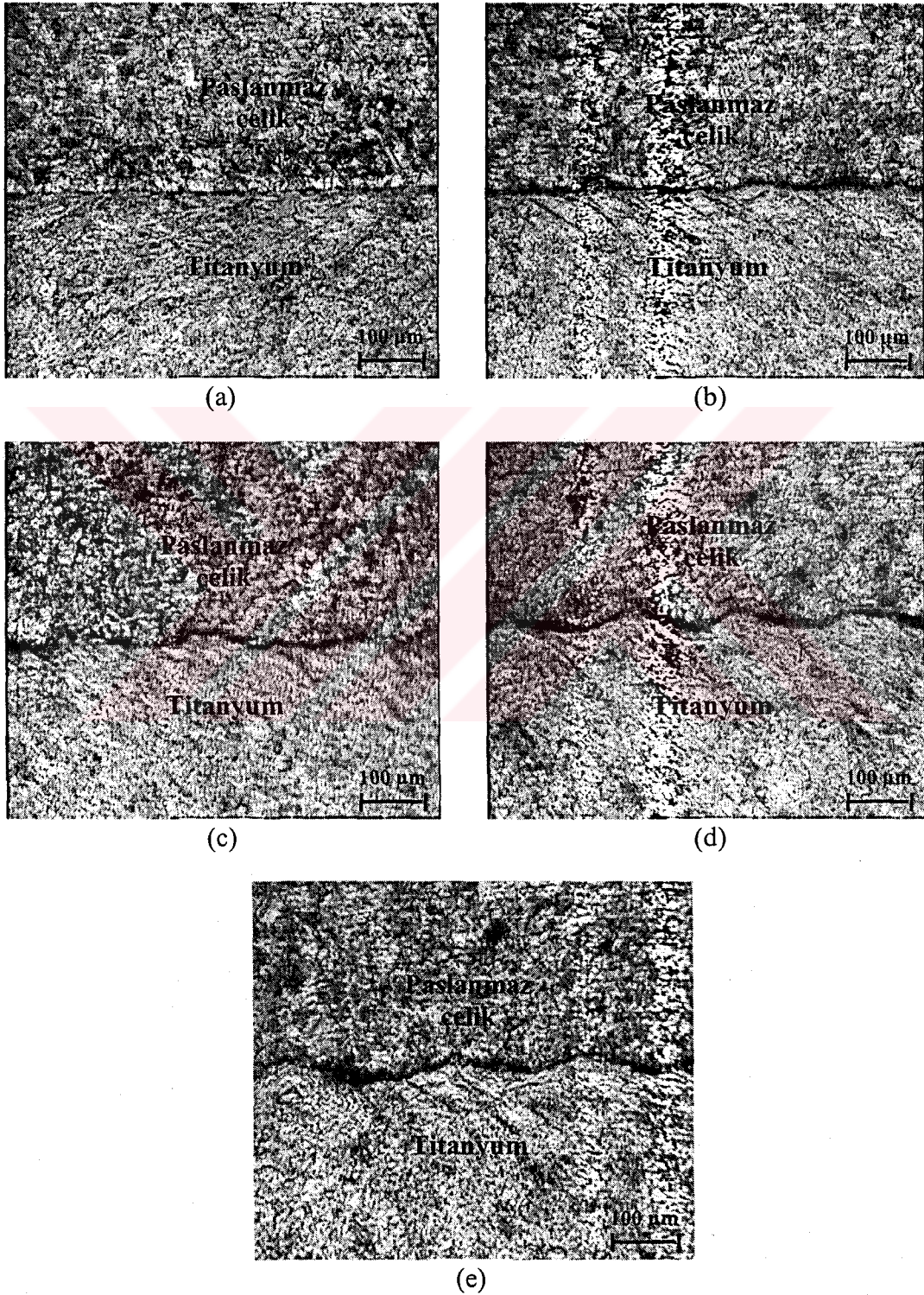
Resim 6.1 c'de düşük karbonlu çelik malzemelerin mikroyapısı görülmektedir. Burada yapının büyük bir kısmının ferrit olduğu ve çok az miktarda perlitin varlığı (siyah olan yerler) göze çarpmaktadır. Resim 6.1 d'de ise patlamalı kaynak işlemlerinde kullanılan alüminyum malzemenin mikroyapısı görülmektedir. Burada alüminyum levhanın hadde mamül olmasından dolayı haddeleme yönünde tanelerin uzadığı ve malzemenin her yerinde yapının aynı olduğu görülmektedir.

6.1.1. Paslanmaz çelik-titanyum birleştirmeleri

Patlamalı kaynak yöntemi ile değişik patlayıcı oranlarında birleştirilmiş paslanmaz çelik-titanyum kompozitlerinden elde edilen optik mikroskop görüntüleri Resim 6.2'de verilmiştir. Buradaki görüntülerin tümünde titanyum üst levha paslanmaz çelik ise alt levha olarak görülmektedir.

Resim 6.2 a'daki mikroyapı fotoğraflarından da görüldüğü gibi patlayıcı oranının en az olduğu ($R=1,2$) birleştirme numunesinde birleşme arayüzeyinde herhangi bir dalgalanma olmayıp düz bir arayüzey elde edilmiştir. Patlayıcı oranının $R=1,5$ olduğu Resim 6.2 b'de ise patlayıcı oranının artmasıyla beraber arayüzeyde çok az bir dalgalanmanın olduğu görülmektedir. Patlayıcı oranının $R=2$ olduğu Resim 6.2 c'de ise birleşme arayüzeyinde meydana gelen dalgaların boylarında ve genliklerinde belirgin artışlar olduğu göze çarpmaktadır. Burada dalga boyları yaklaşık olarak 100-110 μm arasında ölçülürken dalga genliği de 10-15 μm olarak ölçülmüştür. Patlayıcı oranının $R=2,5$ olarak kullanıldığı Resim 6.2 d'de ise birleşme arayüzeyinde dalga boy ve genliğinde meydana gelen artışlar dikkat çekmektedir. Burada dalga boyları yaklaşık olarak 120-130 μm ölçülürken dalga genlikleri 20-25 μm 'ye kadar artmıştır. Patlayıcı oranının en fazla olduğu Resim 6.2 e'de ise birleşme arayüzeyinde dalga boylarında meydana gelen artışa rağmen dalga genliğindeki artışlar boylarına oranla daha az olmuştur. Burada dalga boyu 200-220 μm arasında ölçülürken dalga genliği 25-30 μm arasında ölçülmüştür. Balasubramanian ve arkadaşları (68) yaptıkları bir araştırmada patlama kaynağında kullanılan patlayıcı miktarının dalga boy ve genliğini etkilediğini, ancak ara boşluk mesafesinin sadece dalga genliğini

etkilediğini belirtmişlerdir. Çalışmalarımızda ara boşluk mesafesi sabit seçildiğinden dalga boylarındaki artışa rağmen genliklerinin fazla artmaması normal bir sonuç olarak değerlendirilebilir.



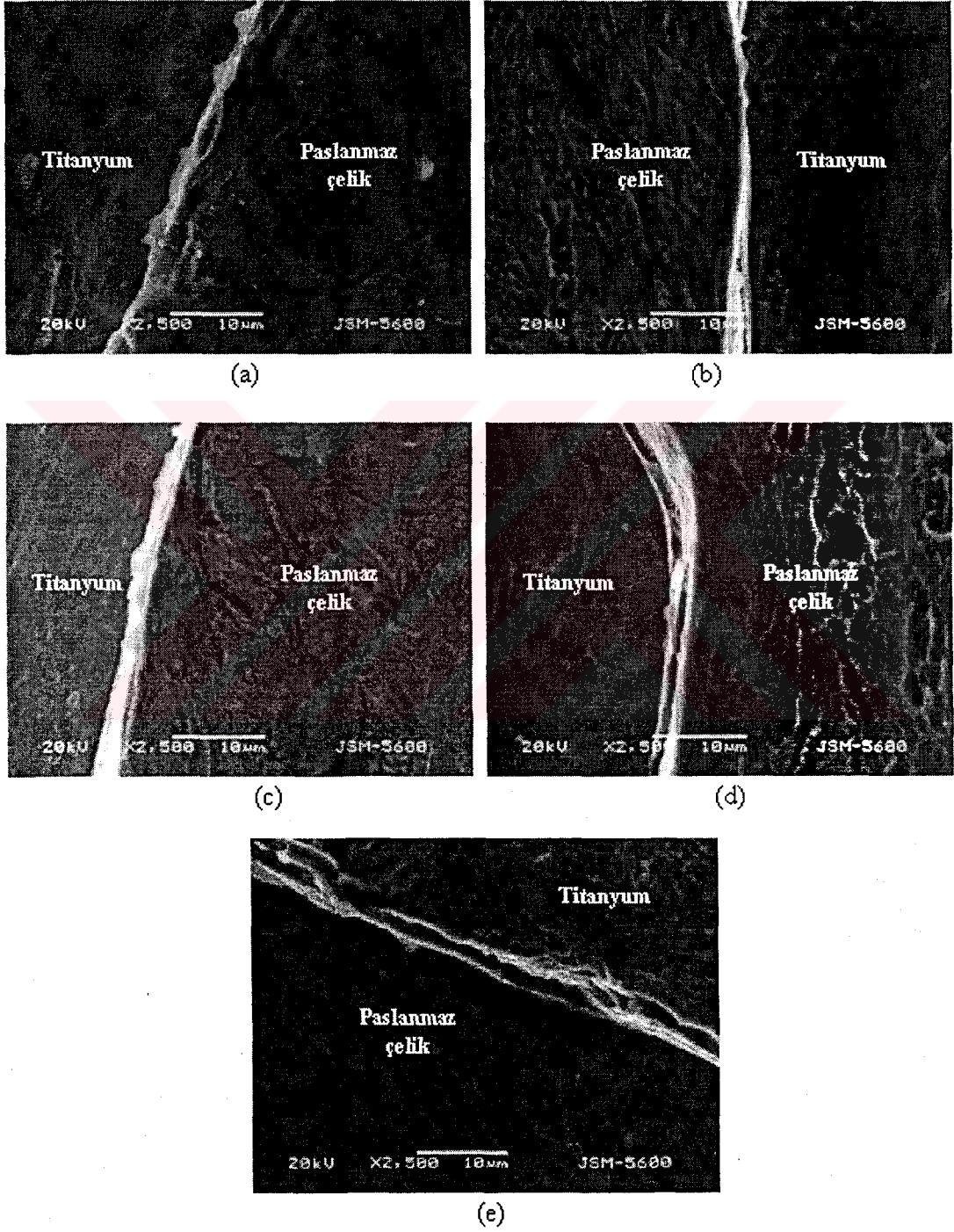
Resim 6.2. Paslanmaz çelik-titanyum birleştirmelerinin a)R=1,2, b) R=1,5, c)R=2, d)R=2,5 ve e)R=3 patlayıcı oranındaki optik mikroskop görüntüleri

Livne ve Munitz (64), patlamalı kaynak yöntemi ile bakır ve çelik levhaları birleştirmişler ve birleşme arayüzeyini SEM ve X ışınları ile incelemişlerdir. Araştırmalarının sonunda özellikle patlayıcı oranı artırıldığında birleşmenin dalgalı bir arayüzey sergilediğini ve dalga oluşumlarının patlayıcı oranı ve ara boşluk mesafesine bağlı olduğunu belirtmişlerdir. Yapılan diğer bir araştırma da (66) kaynaklanmış arayüzey metalurjisinin bileşen malzemelerin özelliklerine bağlı olmasına rağmen, kaynak parametrelerinin uygun bir düzenlemesi, kaynağın tipi üzerine kabul edilebilir bir kontrol sağlayacağı belirtilmektedir. Bundan dolayı küçük ara boşluk mesafesi, daha düşük bir çarpışma hızıyla sonuçlanacaktır ve çok küçük bir dalga genliği üretecektir. Ara boşluk mesafesinin artmasıyla tipik bir dalgalı arayüzeyin elde edilebileceği rapor edilmiştir.

Deneysel çalışmalar sonucu elde edilen kompozitlerden patlayıcı oranlarının düşük kullanıldığı birleştirmelerde arayüze yakın bölgedeki tanelerde gözle görülebilir çok az bir değişim varken patlayıcı oranının yüksek kullanıldığı birleştirmelerde bu değişim önemli derecede fark edilmektedir. Burada kaynak esnasında malzemelere uygulanan basıncın etkisiyle arayüze yakın bölgedeki tanelerin uzadığı ve arayüzeyden uzaklaştıkça bu değişimin azaldığı görülmektedir. Ayrıca birleştirilmiş numunelerin paslanmaz çelik tarafında malzemelere uygulanan soğuk işleminden dolayı deformasyon bantlaşmalarının oluştuğu tespit edilmiştir. Yang ve diğerleri (76) çalışmalarında düşük karbonlu çelik ile titanyum levhaları birleştirmişler ve arayüzeyini incelemişlerdir. İnceleme sonucunda arayüze yakın bölgedeki tanelerin ani ve soğuk plastik deformasyon sonucu patlama yönüne paralel uzadığını belirtmişlerdir.

Resim 6.3 patlamalı kaynak yöntemi ile değişik patlayıcı oranlarında birleştirilmiş numunelerin, taramalı elektron mikroskopunda elde edilmiş mikroyapılarını göstermektedir. SEM görüntüleri dikkatlice incelendiğinde birleşme arayüzeyinde herhangi bir birleşme hatasının oluşmadığı, ancak arayüze hemen bitişik olan bölgede deformasyon bantlaşmalarının olduğu görülmektedir. Ayrıca, SEM

çalışmaları sonucunda birleşme arayüzeyinde intermetalik bileşiklere ve ergime boşluğuna rastlanılmamıştır. Bu da birleşme arayüzeyinin metalurjik olarak iyi olduğunu göstermektedir.

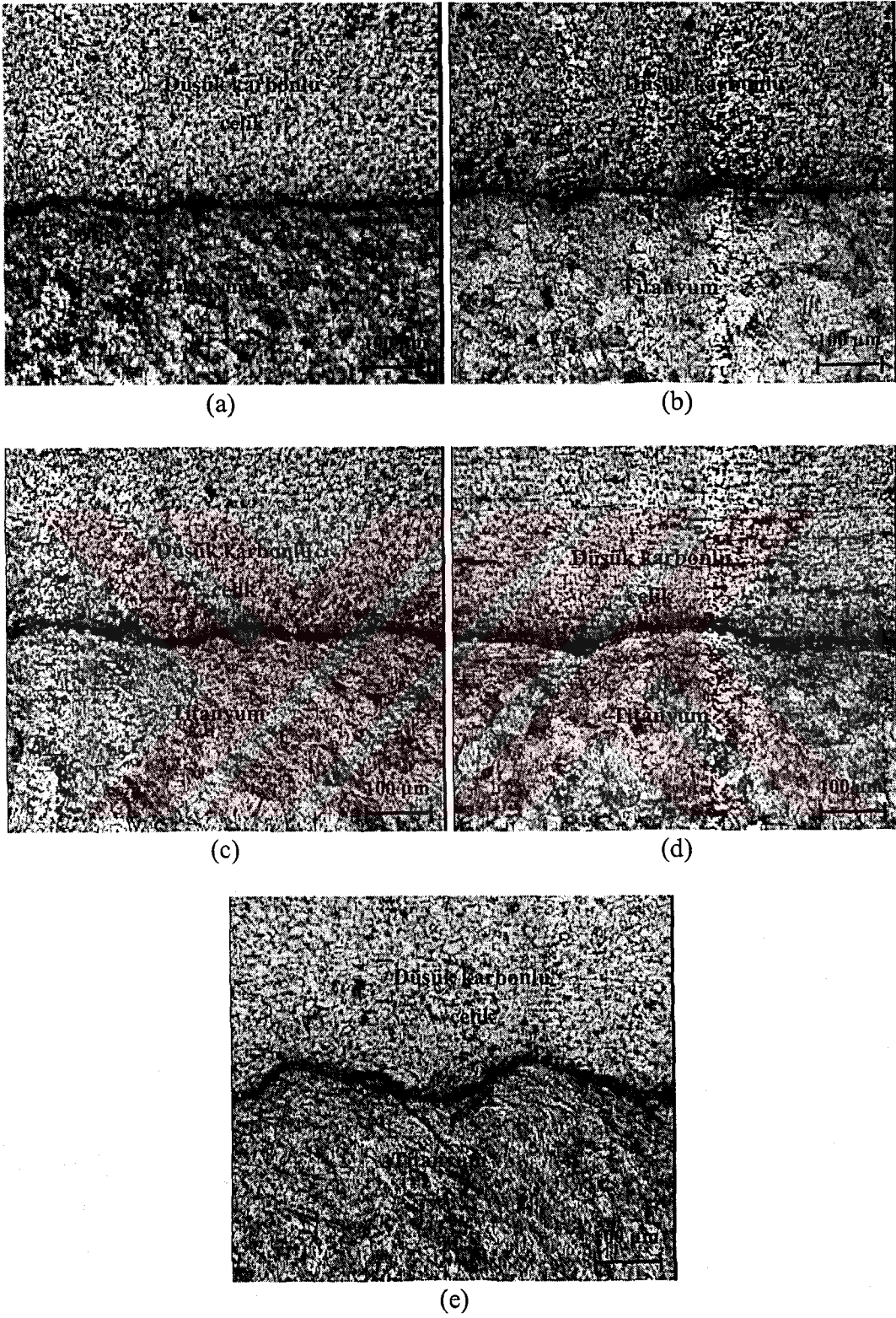


Resim 6.3. a)R=1,2, b)R=1,5, c)R=2, d)R=2,5 ve e)R=3 patlayıcı oranlarında paslanmaz çelik-titanyum birleştirmelerinin SEM görüntüleri

6.1.2. Düşük karbonlu çelik-titanyum birleştirmeleri

Patlamalı kaynak yöntemi ile değişik patlayıcı oranlarının kullanıldığı düşük karbonlu çelik-titanyum kompozitlerinden elde edilen optik mikroskop görüntüleri Resim 6.4'de verilmiştir. Burada, Resim 6.4 a en düşük patlayıcı oranı ile birleştirilmiş numunenin mikroyapısını gösterirken Resim 6.4 e en yüksek patlayıcı oranında birleştirilmiş numunenin mikroyapısını göstermektedir. Görüntülerde üstte görülen malzeme düşük karbonlu çelik, alttaki ise titanyum levhadır. Resim 6.4'deki görüntülerde artan patlayıcı oranı ile birlikte titanyum levha tarafında mikroyapı değişimi çok az değişiklik gösterirken, düşük karbonlu çelik levha tarafında belirgin bir farklılık göze çarpmaktadır. Birleştirmelerde alt levha olarak kullanılan düşük karbonlu çelik levhada az olmakla birlikte deformasyon bantlarının meydana geldiği görülmektedir. Ayrıca, deneysel çalışmalarda kullanılan patlayıcı oranının artmasıyla birlikte birleşmelerin düşük karbonlu çelik levha tarafında olmak üzere arayüze yakın bölgede tanelerin patlama yönünde uzadığı, ancak bu değişimin arayüzeyden uzaklaştıkça yok olduğu (malzemenin orijinal halde kaldığı) görülmektedir. Literatürde yapılan araştırmalar sonucunda da patlamalı kaynak işlemi esnasında patlayıcıların patlama enerjisinden dolayı meydana gelen basınçtan en çok birleştirilen levhaların arayüzeylerinin ve arayüze yakın bölgelerinin etkilendiği ve bu nedenle arayüze yakın bölgede mikroyapı değişimlerinin daha fazla olduğu, bu düzensizliğin arayüzeyden uzaklaştıkça azaldığı belirtilmiştir (66,67).

Resim 6.4 incelendiğinde artan patlayıcı oranı ile birlikte arayüzeyde meydana gelen dalgaların boylarının ve genliklerinin arttığı görülmektedir. Patlayıcı oranını en düşük olduğu ($R=1,2$) Resim 6.4 a'da arayüzeyde düze yakın bir dalgalanma mevcuttur. Patlayıcı oranının artmasıyla beraber ($R=1,5$) arayüzeyde oluşan dalgalanmalar belirginleşmiş (Resim 6.4 b) ve boyları 100-120 μm , genlikleri ise 10-15 μm olarak ölçülmüştür. Patlayıcı oranının $R=2$ olarak kullanıldığı (Resim 6.4 c) düşük karbonlu çelik-titanyum kompozitinde ise 180-200 μm dalga uzunluğu ve 15-20 μm dalga genliği ölçülmüştür.

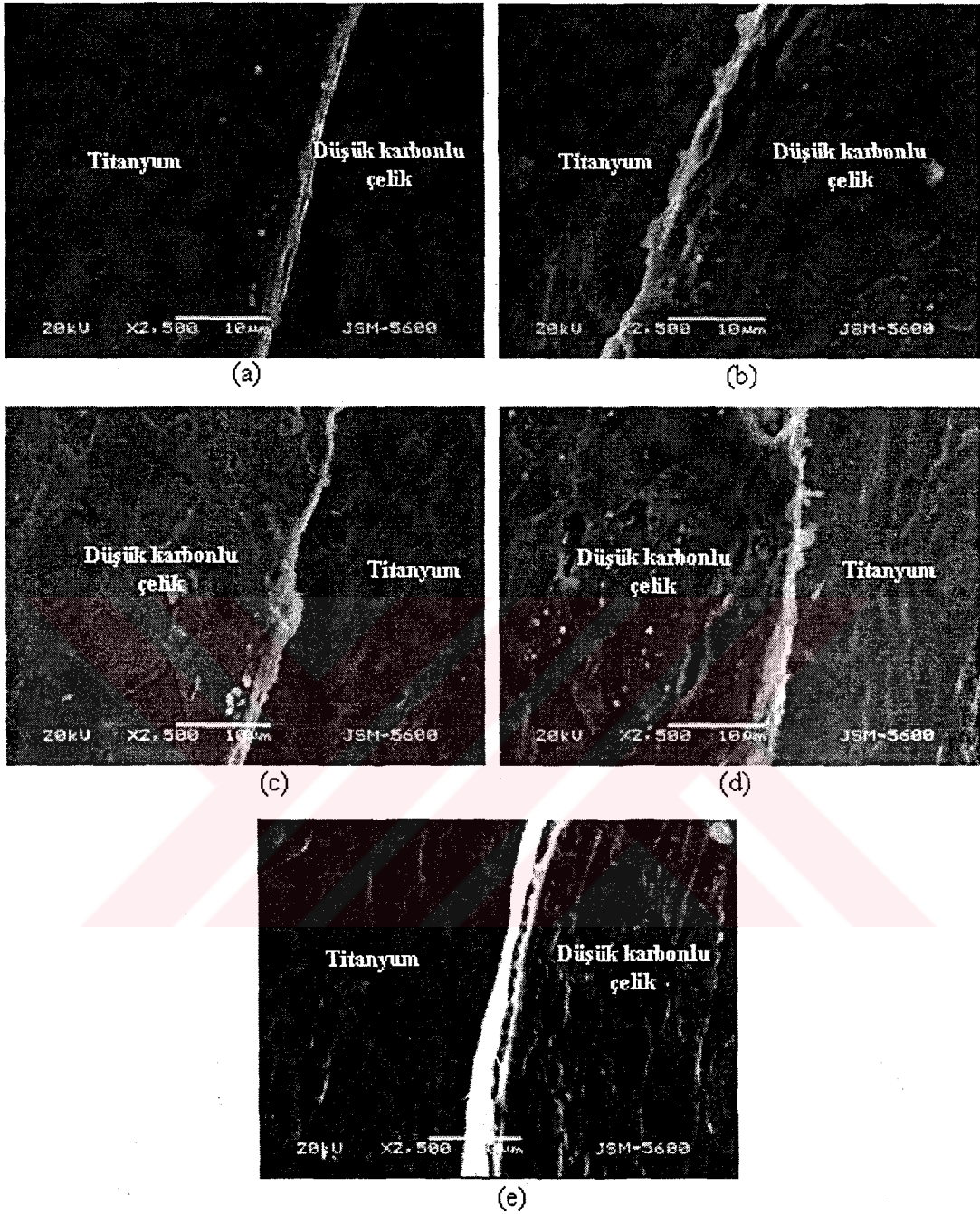


Resim 6.4. Düşük karbonlu çelik-titanyum birleştirmelerinin a) R=1,2, b) R=1,5, c)R=2, d)R=2,5 ve e)R=3 patlayıcı oranındaki optik mikroskop görüntüleri

Patlayıcı oranının artmasıyla beraber arayüzeyde meydana gelen dalgaların boyları ve genliklerindeki artış devam etmiş ve patlayıcı oranının $R=2,5$ olarak kullanıldığı (Resim 6.4 d) birleştirmelerde dalga boyu yaklaşık olarak 220-235 μm , genlikleri ise 25-30 μm olarak ölçülmüştür. Patlayıcı oranının en fazla olduğu ($R=3$) Resim 6.4 e'deki düşük karbonlu çelik-titanyum birleştirmesinde ise dalga boyu yaklaşık olarak 280-300 μm , genlikleri ise 40-50 μm arasında ölçülmüştür.

Patlamalı kaynak yöntemi ile birleştirilmiş düşük karbonlu çelik-titanyum birleştirmeleri genel olarak değerlendirildiğinde artan patlayıcı oranı ile birlikte birleşme arayüzeyinin düz bir durumdan dalgalı bir hale dönüştüğü görülmektedir. Genel olarak patlayıcı oranı arttırıldığında patlayıcıların patlama enerjisinden dolayı levhaların çarpma hızı, dolayısıyla çarpma basıncı artmaktadır. Bu basıncın artmasıyla beraber arayüzeyde oluşan deformasyon miktarı artış göstermekte ve oluşan dalgaların boyutları da artmaktadır. Cowan ve arkadaşları (65) patlama kaynağı ile kaplanmış malzemedeki arayüzeyde meydana gelen dalgalanma formunu incelemişlerdir. İncelemeler sonucunda bu yöntem ile birleştirilmiş malzemelerin dalgalı bir arayüze sahip olduğunu ve bu dalga küçük çarpışma hızlarında meydana gelmeyip düz bir birleşmenin meydana geldiğini ancak, artan patlayıcı oranı ve çarpışma mesafesiyle arttığını belirtmişlerdir.

Resim 6.5'de patlamalı kaynak yöntemi ile beş değişik patlayıcı oranında birleştirilmiş ($R=1,2$, $R=1,5$, $R=2$, $R=2,5$ ve $R=3$) düşük karbonlu çelik-titanyum levhaların taramalı elektron mikroskobu ile çekilmiş görüntüleri görülmektedir. Bu görüntüler dikkatli bir şekilde incelendiğinde arayüzeyde birleşmenin iyi olmadığı gibi bir izlenim oluşmakta ancak bir hat olarak görülen bu kısmın birleşme hatası olmayıp numunelerin dağlanmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Yapılan incelemelerde, birleşme arayüzeyinde intermetalik bileşiklere rastlanılmamış ve herhangi bir birleşme hatası tespit edilememiştir. Ayrıca arayüzeyin hemen bitişiğinde her iki metal tarafında da nokta analizi yapılmış ve difüzyon olmadığı tespit edilmiştir.



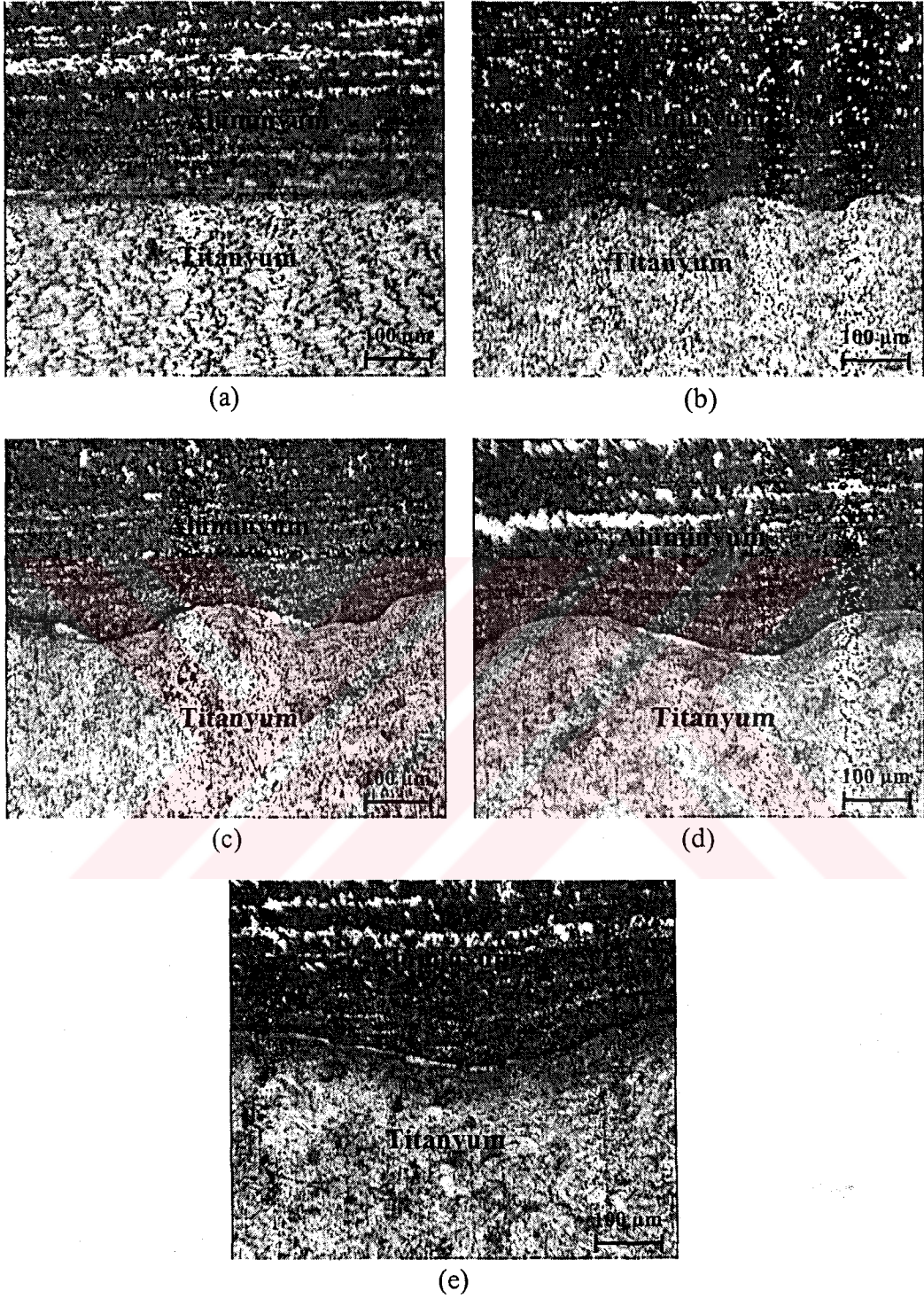
Resim 6.5. a)R=1,2, b)R=1,5, c)R=2, d)R=2,5 ve e)R=3 patlayıcı oranlarında elde edilen düşük karbonlu çelik-titanyum birleştirmelerinin SEM görüntüleri

Mamalis ve arkadaşları (93), patlamalı kaynak yöntemi ile titanyum ile nikel levhaları birleştirmişler ve daha sonra haddeleme (rolling) işlemine tabi tutmuşlardır. Elde ettikleri birleştirmelere SEM ve EDS analizleri yapmışlar ve birleşme arayüzeyinde $TiNi_3$, $TiNi$ ve Ti_2Ni intermetaliklerinin ve ergime boşluklarının (molten pocket) oluştuğunu belirtmişlerdir.

6.1.3. Alüminyum-titanyum birleştirmeleri

Patlamalı kaynak yöntemi ile değişik patlayıcı oranlarının kullanıldığı alüminyum-titanyum kompozitlerinden elde edilen optik mikroskop görüntüleri Resim 6.6'da verilmiştir. Yalnız burada kullanılan patlayıcı oranları paslanmaz çelik-titanyum ve düşük karbonlu çelik-titanyum birleştirmelerinden farklı oranlarda kullanılmıştır. Daha önce de belirtildiği gibi patlayıcı oranının $R=1$ seçildiği durumlarda paslanmaz çelik-titanyum ve düşük karbonlu çelik-titanyum çiftlerinde birleşme sağlanamamışken alüminyum-titanyum birleşmesi sağlanmıştı. Bu durumda alüminyum-titanyum patlayıcı oranları $R=1, 1,2, 1,5, 2$ ve $2,5$ olarak kullanılmıştır. Ayrıca diğer birleştirmelerde titanyum üst levha olarak kullanılırken, bu deneylerde literatürde verilen bilgiler ışığında alüminyum titanyuma göre daha hafif olduğundan dolayı üst levha olarak alüminyum seçilmiştir. Resim 6.6'da görüntüleri verilen alüminyum-titanyum birleştirmeleri, görüntüleri Resim 6.2 ve Resim 6.4'de verilen optik mikroskop görüntüleri ile kıyaslandığında alüminyum-titanyum birleştirmelerinde meydana gelen dalgaların boyları ve genliklerinin patlayıcı oranlarının daha az olmasına rağmen daha fazla olduğuna görülmektedir.

Deneysel çalışmalar sonucu elde edilen ve patlayıcı oranının $R=1$ olduğuna Resim 6.6 a'da birleşme arayüzeyi düze yakın bir görünüm sergilerken, patlayıcı oranının $R=1,2$ olarak kullanıldığı Resim 6.6 b'de birleşme arayüzeyinde belirgin bir dalgalanma dikkat çekmektedir. Bu numunede oluşan dalgaların boyları yaklaşık olarak $190-200 \mu\text{m}$ ölçülürken, genlikleri ise $20-25 \mu\text{m}$ olarak ölçülmüştür. Patlayıcı oranının $R=1,5$ olduğuna Resim 6.6 c'de ise arayüzeyde meydana gelen dalga boy ve genlikleri daha da artmış ve boyları yaklaşık olarak $260-280 \mu\text{m}$, genlikleri ise $40-50 \mu\text{m}$ olarak ölçülmüştür. Patlayıcı oranının $R=2$ olduğuna durumda dalga boyu $400-420 \mu\text{m}$, genlikleri ise $80-90 \mu\text{m}$ olarak ölçülmüştür (Resim 6.6 d). Bu hızlı artış devam etmiş ve en yüksek patlayıcı oranını $R=2,5$ olduğuna Resim 6.6 e'de dalga boyu $600 \mu\text{m}$ 'nin üzerinde ölçülürken, dalga genliği de $100 \mu\text{m}$ 'den daha büyük olarak ölçülmüştür.



Resim 6.6. Alüminyum-titanyum birleştirmelerinin a) R=1 b) R=1,2 c) R=1,5 d) R=2 ve e) R=2,5 patlayıcı oranındaki optik mikroskop görüntüleri

Patlamalı kaynak yöntemi ile 5° 'lik eğik geometri ile değişik patlayıcı oranlarında birleştirilmiş paslanmaz çelik-titanyum, düşük karbonlu çelik-titanyum ve

alüminyum-titanyum kompozitlerinin optik mikroskop görüntüleri genel olarak değerlendirildiğinde aynı patlayıcı oranında arayüzeydeki dalgalanmaların çok farklı olduğu görülmektedir. Örneğin patlayıcı oranının $R=2,5$ olarak kullanıldığı paslanmaz çelik-titanyum birleştirmelerinde dalga boyları 120-130 μm arasında ölçülürken, düşük karbonlu çelik-titanyum birleştirmelerinde bu değer 220-235 μm 'ye çıkmıştır. Alüminyum-titanyum birleştirmelerinde ise aynı patlayıcı oranında bu değer 600 μm 'nin üzerinde ölçülmüştür. Aynı şekilde patlayıcı oranının $R=2,5$ olarak kullanıldığı paslanmaz çelik-titanyum birleştirmelerinde dalga genlikleri yaklaşık olarak 20-25 μm arasında ölçülürken, düşük karbonlu çelik-titanyum birleştirmelerinde bu değer 25-30 μm 'ye çıkmıştır. Alüminyum-titanyum birleştirmelerinde ise aynı patlayıcı oranında bu değer 100 μm 'nin üzerinde ölçülmüştür. Elde edilen görüntülerden paslanmaz çelik-titanyum birleştirmesi en düşük dalga boy ve genliğine sahipken, alüminyum-titanyum birleştirmesi en yüksek dalga boy ve genliğine sahiptir. Aynı patlayıcı oranında ve diğer bütün parametrelerin yaklaşık olarak sabit olduğu şartlarda bu dalga boy ve genliklerindeki değişim malzemelerin kimyasal bileşimi, tane ebadı, sertlikleri ve plastik şekillenebilirliği ile ilişkilendirilebilir (66).

Balasubramanian ve arkadaşları (68) alüminyum ve çelik levha üzerinde yapmış oldukları bir çalışmada, dalga boyu ve genliğinin tahmini için matematiksel bir modelleme yapmışlardır. Bu modelleme de dalga boyu ve genliği şu şekilde hesaplanmaktadır.

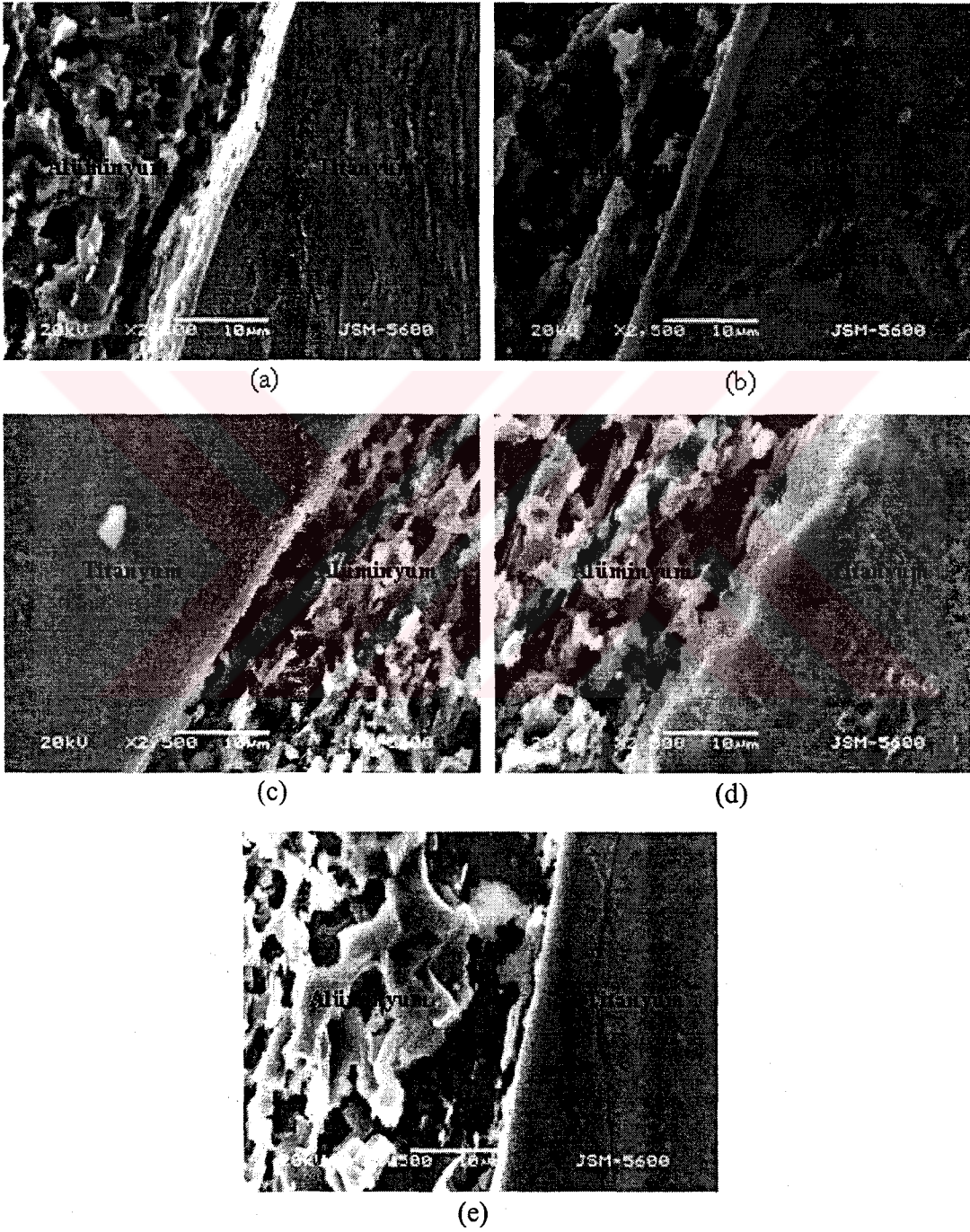
$$\text{Genlik} : h = 23,68 + 7,69(M) + 4,56(F) + 4,44(DF) \quad [6.1]$$

$$\text{Dalga boyu} : \lambda = 251,88 + 26,88(M) + 20,63(F) \quad [6.2]$$

Burada (M) patlayıcı oranı, (D) ara boşluk mesafesi ve (F) üst levha kalınlığıdır.

Denklem (1) ve (2)'den patlayıcı miktarının hem dalga boyu hem de genliğine etkisi olduğunu ancak, ara boşluk mesafesinin sadece genliğe etkisi olduğu açıkça görülmektedir. Yaptığımız çalışmalarda ara boşluk mesafesi olarak 5^0 'lik eğik geometri kullandığımız için hesaplamalarımız bu formüle göre yapılamamaktadır. Ancak, eğik düzlemler için matematiksel bir modelleme geliştirilebilir.

Resim 6.7’de patlamalı kaynak ile değişik patlayıcı oranlarında birleştirilmiş alüminyum-titanyum kompozitlerinin SEM fotoğrafları görölmektedir. Fotoğraflar incelendiğinde birleşme arayüzeyinde herhangi bir birleşme hatasının olmadığı tespit edilmiştir.



Resim 6.7. a)R=1 b)R=1,2, c)R=1,5, d)R=2 ve e)R=2,5 patlayıcı oranlarında elde edilen alüminyum-titanyum birleştirmelerinin SEM görüntüleri

6.2. Çekme-Makaslama Test Sonuçları ve Tartışılması

Patlamalı kaynak yöntemi ile değişik patlayıcı oranlarında birleştirilmiş orjinal (işlem görmemiş) malzemelerin (tityum, paslanmaz çelik, düşük karbonlu çelik ve alüminyum) çekme mukavemetleri Çizelge 6.1’de, verilmiştir.

Çizelge 6.1. Orijinal malzemelerin çekme mukavemetleri

Malzeme	Tityum	Paslanmaz çelik	Düşük karbonlu çelik	Alüminyum
Çekme mukavemeti (MPa)	705	870	530	235

Patlamalı kaynak yöntemi ile birleştirilen tityum-paslanmaz çelik, tityum-düşük karbonlu çelik ve tityum-alüminyum birleştirmelerinden ASTM D 3165-95’e göre yapılan çekme-makaslama testleri sonucunda birleştirilmiş numunelerin tümünün arayüzeyinde herhangi bir sıyrılma görülmemiştir.

6.2.1. Paslanmaz çelik-tityum birleştirmeleri

Patlamalı kaynak yöntemi ile değişik patlayıcı oranlarında birleştirilmiş numunelerden elde edilen çekme-makaslama test sonuçları Çizelge 6.2’de verilmiştir.

Çizelge 6.2. Patlayıcı oranına göre paslanmaz çelik-tityum birleştirmelerinin çekme-makaslama test sonuçları

Çekme-makaslama mukavemeti (MPa)								Kopmanın olduğu malzeme
Orijinal Ti	Orijinal Pç	R=1	R=1,2	R=1,5	R=2	R=2,5	R=3	
705	870	-	710±5	717±5	719±5	721±5	726±5	Tityum

Çizelge 6.2. incelendiğinde patlamalı kaynak yöntemi ile birleştirilmiş paslanmaz çelik-tityum numunelerden ölçülen çekme-makaslama mukavemetlerinin orijinal malzemelerden çekme dayanımının daha düşük olanından ölçülen çekme mukavemetlerinden daha yüksek olduğu açıkça görülmektedir. Çizelge 6.1’de

titanyum malzemenin çekme dayanımının paslanmaz çelik malzemedenden daha düşük olmasından dolayı kopma işlemi titanyum levhadan gerçekleşmiştir. Ayrıca, patlamalı kaynak esnasında kullanılan patlayıcı oranlarının artmasıyla kaynaklı numunelerden ölçülen çekme-makaslama değerlerinin arttığı Çizelge 6.2'de görülmektedir. Burada hem birleştirilmiş durumdaki malzemelerin çekme-makaslama mukavemetlerinin orijinal malzemelerden düşük mukavemetli olanına göre daha yüksek olması hem de artan patlayıcı miktarı ile çekme-makaslama mukavemetinin artması patlama esnasında meydana gelen soğuk deformasyondan kaynaklanmaktadır. Yapılan literatür araştırmalarında da metalik malzemelere uygulanan soğuk işlem miktarı arttıkça deformasyon sertleşmesi nedeniyle malzemelerin çekme mukavemetlerinde artış olduğu belirtilmektedir (128).

Standart çekme-makaslama testlerine ilave olarak literatürde verilen bilgiler ışığında (11) sıyırma alanının çekme alanına eşit olduğu ($W=t$) çekme-makaslama testleri sonucunda bütün numunelerde de arayüzeyden ayrılma söz konusu değildir. Bu deneyler sonucunda da kopma titanyum malzemedede meydana gelmiştir. Ancak, çekme-makaslama testi esnasında malzemeler normal olarak kopmamış ve kopma işlemi çapraz kırılma şeklinde olmuştur. Burada da bütün kaynaklı numunelerden ölçülen mukavemet değerlerinin orijinal malzemenin mukavemetinden daha yüksek fakat standart sıyırma değerlerinden düşük olduğu görülmüştür.

6.2.2. Düşük karbonlu çelik-titanyum birleştirmeleri

Değişik patlayıcı oranlarında birleştirilmiş düşük karbonlu çelik-titanyum birleştirmelerinden ölçülen çekme-makaslama test sonuçları Çizelge 6.3'de verilmiştir.

Çizelge 6.3. Değişik patlayıcı oranlarındaki düşük karbonlu çelik-titanyum birleştirmelerinin çekme-makaslama test sonuçları

Çekme-makaslama mukavemeti (MPa)							Kopmanın olduğu malzeme	
Orijinal Ti	Orijinal Fe	R=1	R=1,2	R=1,5	R=2	R=2,5		R=3
705	530	-	540±4	546±4	550±4	552±4	554±4	Düşük karbonlu çelik

Patlamalı kaynak yöntemi ile değişik patlayıcı oranlarında birleştirilmiş düşük karbonlu çelik-titanyum numunelerin tümünde arayüzeyde sıyrılma olmayıp kopma işlemi düşük karbonlu çelik malzemeden olmuştur. Çizelge 6.1'e bakıldığında düşük karbonlu çelik malzemenin çekme dayanımının titanyum malzemenin çekme dayanımından daha düşük olduğu görülmektedir. Ayrıca, düşük karbonlu çelik-titanyum birleştirmelerinde de artan patlayıcı oranı ile birlikte çekme-makaslama dayanımının arttığı tespit edilmiştir. Standart testlere ilave olarak yapılan testlerde de arayüzeyde herhangi bir sıyrılma olmamış ve düşük karbonlu çelik malzeme kopmuştur. Bu deneyler sonucunda, bütün patlayıcı oranlarında birleştirme arayüzeyinin dayanımının, birleştirilen malzemelerden çekme dayanımının düşük olanından daha iyi olduğu sonucuna varılmıştır.

6.2.3. Alüminyum-titanyum birleştirmeleri

Alüminyum malzemenin üst levha olarak kullanıldığı birleştirmelerden yapılan çekme-makaslama testleri sonucunda arayüzeyde ayrılma olmamış ve çekme dayanımı titanyuma göre düşük olan alüminyum malzeme kopmuştur. Kaynaklı numunelerden kopma sonucu ölçülen çekme-makaslama dayanımları Çizelge 6.4'de verilmiştir.

Çizelge 6.4. Patlayıcı oranına göre alüminyum-titanyum birleştirmelerinin çekme-makaslama test sonuçları

Çekme-makaslama mukavemeti (MPa)								Kopmanın olduğu malzeme
Orijinal Ti	Orijinal Al	R=1	R=1,2	R=1,5	R=2	R=2,5	R=3	
705	235	237±3	240±3	242±3	245±3	246±3	-	Alüminyum

Çizelge 6.4. incelendiğinde patlamalı kaynak yöntemi ile birleştirilmiş numunelerden ölçülen çekme-makaslama dayanımlarının orijinal alüminyum malzemeden ölçülen çekme dayanımından daha yüksek olduğu görülmektedir. Ayrıca birleştirilmiş durumdaki bütün numunelerde artan patlayıcı oranına bağlı olarak çekme-makaslama mukavemetlerinin arttığı açıkça görülmektedir. Çekme-makaslama testleri

sonucunda patlama kaynağı esnasında malzemelere uygulanan soğuk deformasyon miktarının artmasıyla, bir başka deyişle patlayıcı oranının artmasıyla malzeme dayanımlarının arttığı tespit edilmiştir.

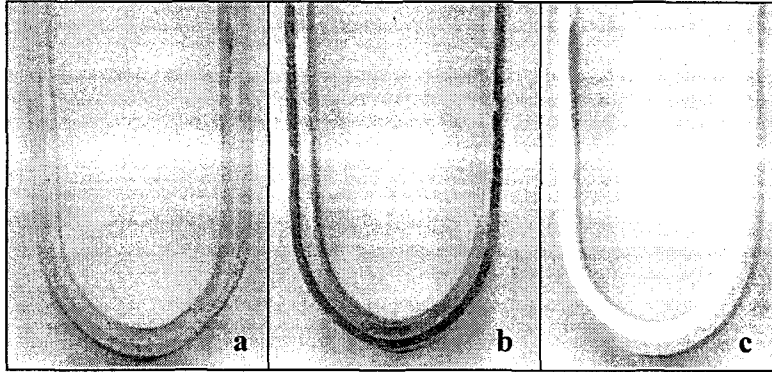
Sıyırma alanının çekme alanına eşit olarak hazırlandığı ($W=t$) testler sonucunda arayüzeyden sıyrılma olmamış ve çekme dayanımı düşük olan alüminyum malzemedan kopma gerçekleşmiştir. Bu da alüminyum-titanyum birleştirmesindeki arayüzeyin dayanımının alüminyumun dayanımından daha yüksek olduğunu göstermektedir. Ayrıca, patlama kaynağı ile değişik patlayıcı oranlarında birleştirilmiş paslanmaz çelik-titanyum, düşük karbonlu çelik-titanyum ve alüminyum-titanyum birleştirmelerinin arayüzeylerinin dalga boy ve genliklerinin farklı olmasına rağmen (Resim 6.2, 6.4, 6.6) hiçbir birleştirmede arayüzeyde ayrılma meydana gelmemiştir. Halbuki dalgalı bir arayüzeyin temas eden yüzey alanı miktarı düz bir arayüzeye göre daha fazladır. Düşük patlayıcı oranlarında elde edilen düz arayüzeye sahip numunelerde arayüzeyde ayrılma meydana gelmemesi düz bir arayüzeyin dalgalı bir arayüzey kadar dayanım sağladığını göstermektedir. Literatürde belirtildiği üzere de, patlamalı kaynak ile elde edilmiş düz bir arayüzeyin dalgalı bir arayüzey kadar dayanım gösterdiği belirtilmiştir (97).

Mamalis ve arkadaşları (93) nikel/titanyum malzemelerinin patlamalı kaynak yöntemi ile birleştirilmesinde kaynak parametrelerinin uygun seçilip yüksek patlama enerjili patlayıcılar kullanıldığında birleştirmenin her yerindeki dayanımın malzemelerin ilk hallerinden daha iyi olduğunu belirtmişlerdir. Yapılan diğer bir çalışmada da Livne ve Munitz (64) demir ve bakır malzemeleri birleştirmişler ve birleşme arayüzeyi dayanımının en az bakır levhanın çekme dayanımı kadar olduğunu belirtmişlerdir. Çalışmaları sonucunda kopmanın arayüzeyden olmayıp bakır levhadan olduğunu belirtmişlerdir.

6.3. Eğme Test Sonuçları ve Tartışılması

Patlamalı kaynak yöntemi ile birleştirilmiş titanyum-paslanmaz çelik, titanyum-düşük karbonlu çelik ve titanyum-alüminyum birleştirmelerinin tümüne iki yönlü

olarak eğme testi uygulanmış, ancak sadece en düşük patlayıcı oranlarında elde edilmiş eğme numunelerinin görüntüleri Resim 6.8’de verilmiştir.



- a) a) iç titanyum
- b) b) iç titanyum
- c) c) dış titanyum

Resim 6.8. Eğme testi yapılan a) paslanmaz çelik-titanyum, b) düşük karbonlu çelik-titanyum ve c) alüminyum-titanyum numunelerinin görüntüleri

180° bükülerek iki yönlü olarak yapılan eğme testleri sonucunda birleştirilen numunelerin tümünün arayüzeyinde gözle görülebilir herhangi bir ayrılma ve çatlama gözlenmemiştir. Eğme testleri sonucunda, patlamalı kaynak ile birleştirilmiş metal çiftlerinin arayüzeylerinde herhangi bir hatanın bulunmaması güvenli bir birleşmenin olduğunu göstermektedir. Crossland and Williams (129) patlamalı kaynak yöntemi ile birleştirilmiş malzemelerin eğme testlerinde 180°'ye kadar eğilebileceğini belirtmişlerdir. Çelik/çelik birleştirmesi üzerine yapılan diğer bir araştırmada ise (66) eğme testi sonucunda kaynaklı numunelerin 90°'lik eğilme olmadan ayrıldığı bunun sebebinin de birleşme arayüzeyinde oluşan metallerearası bileşiklerin olabileceği rapor edilmiştir.

Çalışmalarımız sonucunda elde edilen eğme numunelerinin arayüzeylerinde herhangi bir hatanın meydana gelmemesi, birleştirmelerin standartlara uygun olduğunu ve bu malzeme çiftlerinin servis şartlarında rahatlıkla eğilerek kullanılabileceğini göstermiştir.

6.4. Sertlik Test Sonuçları ve Tartışılması

Patlamalı kaynak yöntemi ile değişik patlayıcı oranlarında birleştirilmiş titanyum-paslanmaz çelik, titanyum-düşük karbonlu çelik ve titanyum-alüminyum

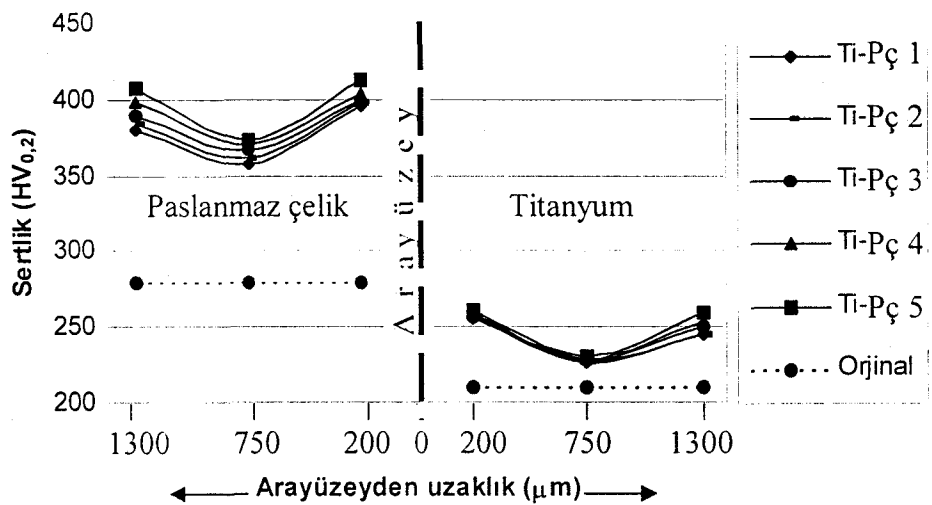
birleştirmelerinden mikrosertlik ölçümü yapılmış ve malzemelerin orijinal sertlikleri ile kıyaslanarak değerlendirilmiştir.

6.4.1 Paslanmaz çelik-titanyum birleştirmeleri

Patlamalı kaynak yöntemi ile birleştirilmiş paslanmaz çelik-titanyum birleştirmelerinden ölçülen sertlik değerleri Çizelge 6.5’de verilirken ölçüm bölgeleri ve grafikleri Şekil 6.1’de verilmiştir.

Çizelge 6.5. Paslanmaz çelik-titanyum birleştirmesinin sertlik değerleri

Malzeme	Arayüzeyden Uzaklık (μm)	Sertlik ($\text{HV}_{0,2}$)				
		R=1,2	R=1,5	R=2	R=2,5	R=3
Paslanmaz çelik 280 HV	1300	379,8	383,7	389	398,6	408,1
	750	358	361,2	366,4	370,1	373
	200	395,3	397,9	400,1	404,3	412,6
Titanyum 210 HV	200	255,4	256,4	256,6	257,7	261,5
	750	225,9	227,5	228,8	229,1	230,9
	1300	244,6	245,1	250,4	253,1	259,8



Şekil 6.1. Paslanmaz çelik-titanyum birleştirmesinin sertlik ölçümleri

Şekil 6.1'de Ti-Pç 1 eğrisi patlayıcı oranının $R=1,2$ olarak kullanıldığı numunelerden ölçülen sertlik değerlerini gösterirken Ti-Pç 5 eğrisi patlayıcı oranının en fazla kullanıldığı ($R=3$) numunelerin sertlik değişimlerini göstermektedir. Ayrıca grafikte orijinal malzemelerin sertlik değerleri de verilmiştir.

Deneysel çalışmalar sonucu elde edilen birleştirmelerden ölçülen sertlik değerleri incelendiğinde kaynaklı numunelerin tümünden ve ölçüm yapılan bütün bölgelerden elde edilen sertliklerin malzemelerin orijinal sertliklerinden daha fazla olduğu görülmektedir. Birleştirilmiş malzemelerden titanyumun orijinal sertliği 210 HV iken, patlayıcı oranının $R=1,2$ olarak kullanıldığı birleştirmede bu değer arayüzeyden 200 μm uzaklıkta 255,4 HV, kalınlık merkezinde 225,9 ve 1300 μm uzaklıkta ise 244,6 olarak ölçülmüştür. Patlayıcı oranının $R=3$ alındığı birleştirmelerde ise bu değer aynı uzaklıklarda sırasıyla 261,5 HV, 230,9 HV ve 259,8 HV olarak ölçülmüştür. Buradan anlaşılmaktadır ki artan patlayıcı oranı ile birlikte kaynaklı numunelerden ölçülen sertlik değerleri artmaktadır. Aynı şekilde kaynaklı numunenin paslanmaz çelik tarafından ölçülen sertlik değerlerinin de artan patlayıcı oranı ile arttığı tespit edilmiştir. Kaynaklı numunelerin her ikisinden de ölçülen sertlik değerlerine bakıldığında en yüksek sertliğin kaynak arayüzeyine bitişik bölgeden ölçüldüğü ve bunu sırasıyla levha dış yüzeyleri ve levha kalınlık merkezinin takip ettiği görülmektedir. Buradan patlama kaynağı esnasında en çok deformasyona maruz kalan bölgenin malzemelerin çarpışan yüzeylerinin olduğu sonucu çıkmaktadır. Çarpışmanın etkisinin en düşük olduğu kısım ise, birleştirilen levhaların kalınlık merkezlerinin olduğu bölgedir (titanyum, paslanmaz çelik ve düşük karbonlu çelik için 750 μm , alüminyum için 1000 μm). Burada patlama esnasındaki çarpışma hızından dolayı meydana gelen soğuk deformasyonun en az levha kalınlığının orta kısmında meydana geldiği ve sertliğin bu yüzden bu bölgede düşük olduğunu görülmektedir. Durgutlu ve Gülenç (67) paslanmaz çelik ve bakır levhaları patlamalı kaynak yöntemi ile birleştirmişler ve benzer sonuçların olduğunu rapor etmişlerdir. Çalışmalarında, arayüzeye yakın bölgede meydana gelen sertlik artışının nedeni; patlama basıncından dolayı yüksek hızda çarpışan levhalarda meydana gelen soğuk deformasyon gösterilir iken, birleştirilen levhaların dış

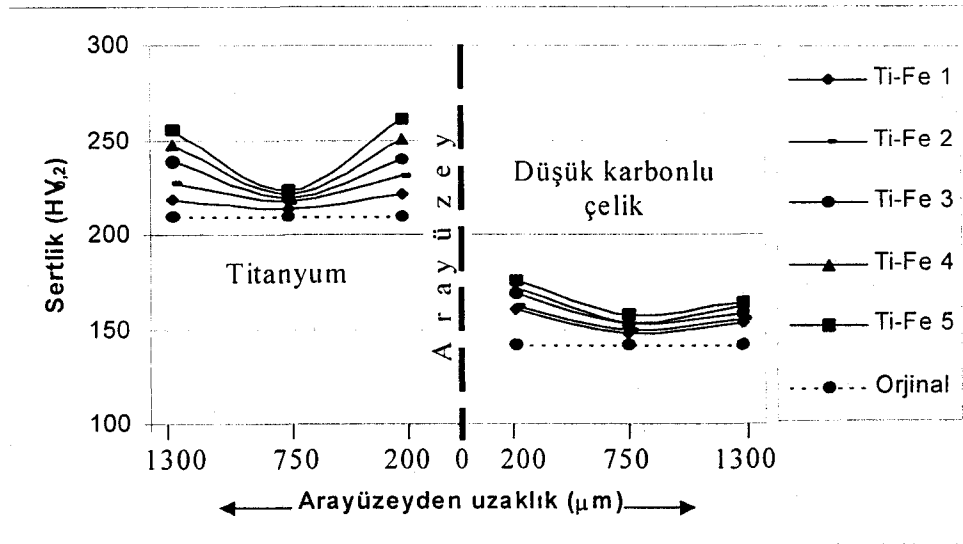
yüzeylerindeki sertlik artışının sebebi olarak da alt levhanın dış düzeyinin altlıkla çarpışması ve üst levhanın dış yüzeyinin ise patlayıcının ani şokuna maruz kalması gösterilmiştir.

6.4.2 Düşük karbonlu çelik-titanyum birleştirmeleri

Patlamalı kaynak yöntemi ile değişik patlayıcı oranlarında birleştirilmiş düşük karbonlu çelik-titanyum levhalardan ölçülen sertlik değerleri ile malzemelerin orijinal sertlik değerleri Çizelge 6.6'da, aynı numunelerin grafikleri ise Şekil 6.2'de verilmiştir.

Çizelge 6.6. Düşük karbonlu çelik-titanyum birleştirmesinin sertlik değerleri

Malzeme	Arayüzeyden Uzaklık (μm)	Sertlik ($\text{HV}_{0,2}$)				
		R=1,2	R=1,5	R=2	R=2,5	R=3
Düşük karbonlu çelik 142 HV	1300	153,3	155	158,7	161,7	164,2
	750	147,3	149,7	152,4	153,6	157,5
	200	160,6	162	169,2	172	176
Titanyum 210 HV	200	221,6	230,6	239,7	250,5	261,5
	750	213,5	217,3	219,7	221	223,1
	1300	218,8	227,1	238,5	247,5	255,8



Şekil 6.2. Düşük karbonlu çelik-titanyum birleştirmesinin sertlik ölçümleri

Burada patlayıcı oranını $R=1,2$ olarak seçildiği sertlik eğrisi Ti-Fe 1 ile gösterilirken patlayıcı oranının en fazla seçildiği ($R=3$) sertlik eğrisi Ti-Fe 5 ile gösterilmiştir.

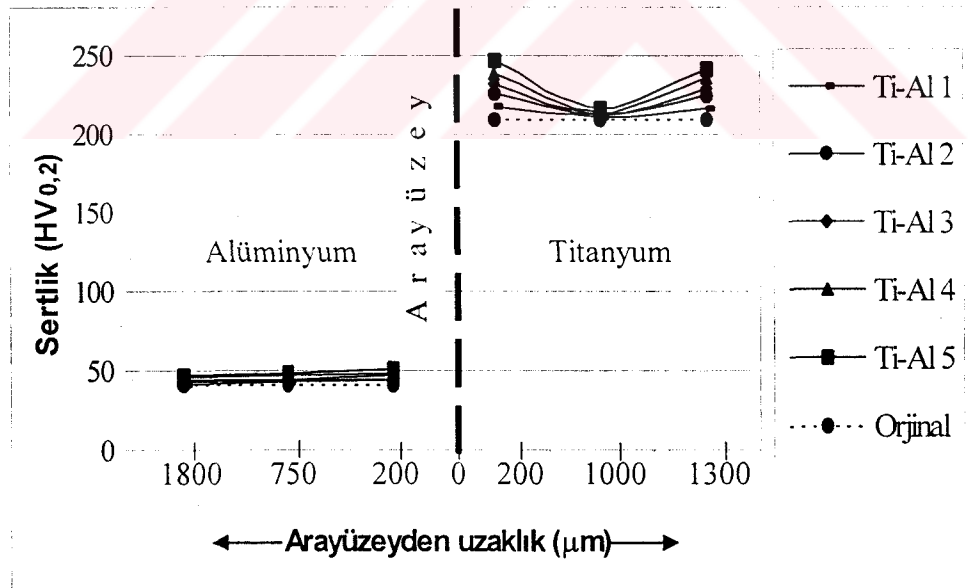
Çizelge 6.6 ve Şekil 6.2 incelendiğinde de patlamalı kaynak yöntemi ile değişik patlayıcı oranlarında birleştirilmiş düşük karbonlu çelik-titanyum levhaların ölçüm yapılan bütün bölgelerinden elde edilen sertlik değerlerinin malzemelerin orijinal hallerinden ölçülen sertlik değerlerinden yüksek olduğu görülmektedir. Bu birleştirmenin düşük karbonlu çelik levha tarafını inceleyecek olursak, orijinal malzeme sertliğinin 142 HV iken, $R=1,2$ patlayıcı oranının kullanıldığı birleştirmelerde arayüzeye 200 μm uzaklıkta sertlik değeri 160,6 HV, malzeme kalınlık merkezinde 147,3 HV ve birleşme arayüzeyinden 1300 μm uzaklıkta ise 153,3 HV olarak ölçülmüştür. Buradan ölçülen sertlik değerleri göstermektedir ki aynı patlayıcı oranında en yüksek sertliği çarpışma yüzeyine yakın olan bölge gösterirken, bu bölgeyi altlık ile çarpışan yüzey ve levha kalınlık merkezi takip etmektedir. Ayrıca patlayıcı oranını $R=1,2$ olarak seçildiği birleştirmede, arayüzeye 200 μm uzaklıkta sertlik değeri 160,6 HV iken patlayıcı oranının $R=3$ alındığı birleştirmelerde aynı uzaklıktan ölçülen sertlik değeri 176 HV'dir. Bu sonuçlar değerlendirildiğinde, artan patlayıcı oranı ile birlikte elde edilen birleştirmelerin de sertliğinin arttığı sonucuna varılabilir. Deneysel çalışmalar sonunda elde edilmiş kompozit levhalardan ölçülen sertlik değerlerinin orijinal malzemelere göre yüksek olmasının sebebi kaynak işlemi esnasında meydana gelen soğuk deformasyondan kaynaklanmaktadır. Mamalis ve arkadaşları (93) patlamalı kaynak ile birleştirdikleri titanyum ve nikel üzerinde yaptıkları bir çalışmada, en yüksek sertliğin çarpışma yüzeyine yakın bölgede olduğunu ve her iki metalin sertliğinin de ilk sertliklerinden daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Bunun sebebinin de arayüzeyde meydana gelen bölgesel darbe sertleşmesinden (localized shock hardening) kaynaklandığını belirtmişlerdir. Patlamalı kaynak yöntemi ile çelik/çelik birleştirmesi üzerine yapılan bir çalışmada da (130) kaynak arayüzeyinden uzaklaştıkça sertliğin azaldığını, bunun sebebinin de patlama esnasında meydana gelen plastik deformasyondan kaynaklandığı belirtilmiştir.

6.4.3 Alüminyum-titanyum birleştirmeleri

Patlamalı kaynak yöntemi ile değişik patlayıcı oranlarında birleştirilmiş alüminyum-titanyum birleştirmelerinden ölçülen sertlik değerleri Çizelge 6.7’de ve ölçüm yapılan bölgeler ve eğrileri Şekil 6.3’de verilmiştir.

Çizelge 6.7. Alüminyum-titanyum birleştirmesinin sertlik değerleri

Malzeme	Arayüzeyden Uzaklık (μm)	Sertlik ($\text{HV}_{0,2}$)				
		R=1	R=1,2	R=1,5	R=2	R=2,5
Alüminyum 42 HV	1800	42	43,1	43,9	45,3	47,2
	1000	43,4	44	44,6	47,1	49,1
	200	44,6	45,1	47	49	50,7
Titanyum 210 HV	200	217,7	226,8	232,2	239,3	246,6
	750	211,1	211,9	212,4	214,4	216,3
	1300	216,6	224,4	229,3	236,7	241



Şekil 6.3. Alüminyum -titanyum birleştirmesinin sertlik ölçümleri

Yukarıdaki Şekil 6.3’de, patlayıcı oranını R=1 olarak seçildiği sertlik eğrisi Ti-Al 1 ile gösterilirken patlayıcı oranının en fazla seçildiği (R=2,5) sertlik eğrisi Ti-Al 5 ile gösterilmiştir.

Yukarıdaki Çizelge 6.7 ve Şekil 6.3'den anlaşıldığı üzere patlamalı kaynak yöntemi ile birleştirilen levhalardan titanyumun orjinal durumuna göre sertlik değerlerinde artış olduğu ve de artan patlayıcı oranı ile birlikte bu sertliğin patlama esnasındaki çarpışma basıncından dolayı meydana gelen soğuk deformasyon sebebiyle arttığı görülmektedir. Ancak burada titanyum levhanın birleştirildiği alüminyum levhanın sert olmayışından dolayı ölçüm yapılan bütün bölgelerden ölçülen sertlik değerlerinin diğer birleştirmelerdeki (paslanmaz çelik-titanyum ve düşük karbonlu çelik-titanyum) titanyum levhadan ölçülen sertlik değerlerine göre daha az olduğu görülmektedir. Hatta titanyum levhanın kalınlık merkezindeki sertlik artışı düşük patlayıcı oranlarında yok denecek kadar azdır. Buradan bütün patlayıcı oranlarında en yüksek sertlik değeri levha arayüzeyine yakın bölgeden ölçülürken onu sırasıyla levha dış yüzeyi ve levha kalınlık merkezi takip etmektedir. Birleştirmelerin alüminyum levha tarafı incelenecek olursa, burada patlama sonrası ölçülen sertlik değerlerinin orijinal malzemeden ölçülen sertlik değerlerine göre bir miktar sert olduğu görülmektedir. Ölçülen bu sertlik artışları bütün patlayıcı oranlarında en fazla arayüze yakın bölgede elde edilirken, arayüzeyden uzaklaştıkça sertlik değerlerinin düştüğü dikkat çekmektedir. Halbuki birleştirilmiş durumdaki diğer metallerin tümünde (titanyum, paslanmaz çelik ve düşük karbonlu çelik) en düşük sertlik levha kalınlık merkezinden ölçülürken, alüminyum levhada en düşük sertlik birleşme arayüzeyine en uzak bölgeden ölçülmüştür. Literatürde alüminyum ile birleştirilmiş birçok malzeme olmasına rağmen (titanyum, çelik, nikel) alüminyumdaki sertlik değişimi hakkında herhangi bir yorum yapılmamıştır. Trutnev ve arkadaşları çalışmalarında alüminyum ile titanyum, nikel ve çelik malzemeleri birleştirmişler ve kaynaklı numunelerde mikrosertlik incelemesi yapmışlardır. Yapılan mikrosertlik ölçümleri sonucunda, titanyum, çelik ve nikel malzemelerin birleşme arayüzeyine bitişik bölgeden ölçülen sertlik değerlerinin diğer bölgelerden daha yüksek olduğunu ve bunun sebebinin de metal yüzeylerin çarpışması esnasında meydana gelen çalışma sertleşmesi (work hardening) olduğu belirtilmiştir. Gerland ve arkadaşları (97) ise dört farklı patlayıcı oranında alüminyum levhaları nikel ile kaplamışlar ve birleştirme sonrası nikel filmi sertliğinin arayüze yakın bölgede fazla olduğunu ve kullanılan patlayıcıların hızının artmasıyla arttığını belirtmişlerdir.

6.5. Korozyon DeneY Sonuçları ve Tartışılması

Patlamalı kaynak yöntemi ile değişik patlayıcı oranlarında birleştirilmiş paslanmaz elik-titanyum, düşük karbonlu elik-titanyum ve alüminyum-titanyum kompozitlerine uygulanan korozyon testleri sonucunda numunelerdeki korozyon değişimleri aşağıda başlıklar halinde verilmiştir.

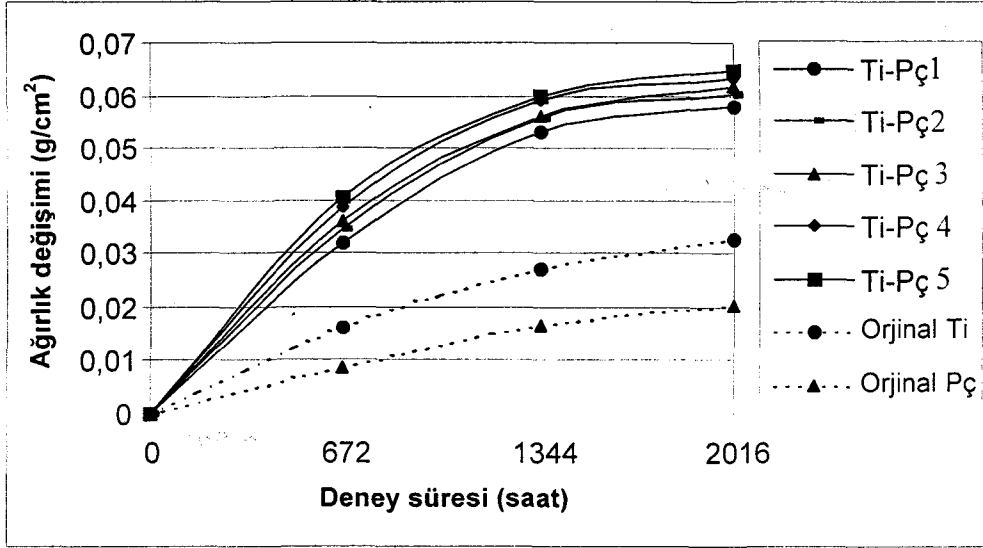
6.5.1. Paslanmaz elik-titanyum birleştirmeleri

Çizelge 6.8 incelendiğinde patlamalı kaynak yöntemi ile değişik patlayıcı oranlarında birleştirilmiş paslanmaz elik-titanyum kompozitleri, ile orijinal malzemelerin 672, 1344 ve 2016 saat sonucunda elde edilmiş korozyon değişim miktarları verilmektedir. şekil 6.4'de ise aynı numunelerden elde edilmiş korozyon değişim miktarları grafik halinde verilmiştir.

Çizelge 6.8. Patlayıcı oranına göre paslanmaz elik-titanyum birleştirmelerindeki korozyon değişim miktarları

DeneY Süresi (saat)	A ğ ı r l ı k d e ğ i ř i m i (g/cm ²)						
	Orijinal Titanyum	Orijinal Paslanmaz elik	R=1,2	R=1,5	R=2	R=2,5	R=3
672	0,01617	0,00864	0,031884	0,03468	0,036221	0,038924	0,04056
1344	0,02716	0,01662	0,052955	0,055796	0,056115	0,058968	0,05978
2016	0,0327	0,02028	0,058097	0,060369	0,061654	0,063312	0,06489

Yukarıdaki izelge dikkatlice incelendiğinde deniz suyu ortamında korozyon testine tabi tutulan orijinal ve kaynaklı numunelerin tümünde ve her üç dönemde de (672, 1344 ve 2016 saat) ağırlık artışının olduğu açıktır. Bununla beraber, orijinal titanyum malzemedен ölçülen ağırlık artışlarının orijinal paslanmaz elik malzemedен daha fazla olduğu görölmektedir. Buradan anlaşılmaktadır ki titanyumun oksijene olan ilgisi paslanmaz çeliğin oksijene olan ilgisinden daha fazladır. Titanyumun ve paslanmaz çeliğin oksijene karşı ilgisi sebebiyle de malzeme yüzeyinde kararlı ve alttaki metalden kolay ayrılmayan bir oksit tabakası meydana gelmekte ve bu oksit tabakasının varlığı da malzemenin ilk ağırlığına göre artışa sebebiyet vermektedir.



Şekil 6.4. Orijinal malzemeler ile paslanmaz çelik-titanyum birleştirmelerindeki korozyon değişimleri

Şekil 6.4'de patlamalı kaynak yöntemi ile R=1,2 patlayıcı oranında birleştirilmiş numune Ti-Pç 1 ile temsil edilirken patlayıcı oranının R=3 olarak kullanıldığı numune ise Ti-Pç 5 ile temsil edilmiştir. Burada patlayıcı oranının artmasıyla beraber paslanmaz çelik-titanyum birleştirmelerinin tümünde ağırlık artışı olduğu ve bu artışın ilk ölçüm döneminde (672 saat) diğerlerine göre daha fazla olduğu dikkat çekmektedir. Bu artış hızı, ikinci ölçüm döneminde (1344 saat) biraz yavaşlamış ve son ölçüm döneminde ise iyice azalmıştır. Buradan korozyon hızının deney başlangıcında hızlı olduğu, daha sonra yavaşladığı anlaşılmaktadır. Bunun sebebi korozyon ölçümü yapılacak malzemelerin yüzeylerinin temiz olmasından kaynaklanmaktadır. Korozyon testlerinin ileriki safhalarında temiz yüzeyler, yerini oksijen ile reaksiyon sonucu meydana gelen demir oksit ve titanyum oksite bırakır ve bu durum korozyon hızını azaltmaktadır. Patlamalı kaynak işlemi esnasında kullanılan patlayıcı oranının artması ile birlikte birleştirilmiş numunelerdeki ağırlık artışının sebebi ise, her iki malzeme yüzeyinde meydana gelen soğuk deformasyondan kaynaklanmaktadır. Kaynaklı numunelerdeki soğuk deformasyon artışı da malzeme yüzeylerinde meydana gelen oksit oluşumunu arttırmış bu da numunelerde ağırlık artışına neden olmuştur. Türker (131) MA 956 ve ODM 751 süperalaşımının yüksek sıcaklıktaki oksidasyon davranışını incelemiştir.

Çalışmasında soğuk haddeleme yolu ile plastik deformasyona uğramış yüzeylerde çekirdekleşme yoğunluğunun arttığını ve artan çekirdekleşme ile oluşan oksit tabakasındaki tane boyutunu küçülttüğünü belirtmiştir. Dolayısıyla oluşan küçük taneler daha fazla oksijen difüzyonuna imkan vermiştir.

Türker ve Hughes (132) ODS alaşımlarının oksidasyon davranışı üzerine yaptıkları bir araştırmada oksitlenme sonucu yüzeyde oluşan oksit tabakasının belirli bir kalınlığa ulaştıktan sonra kırılarak malzemede ağırlık kaybına yol açtığı, ancak belirli kalınlığın altındaki oksitlenmelerin kırılmayarak ağırlık artışına sebep olduğunu belirtmişlerdir.

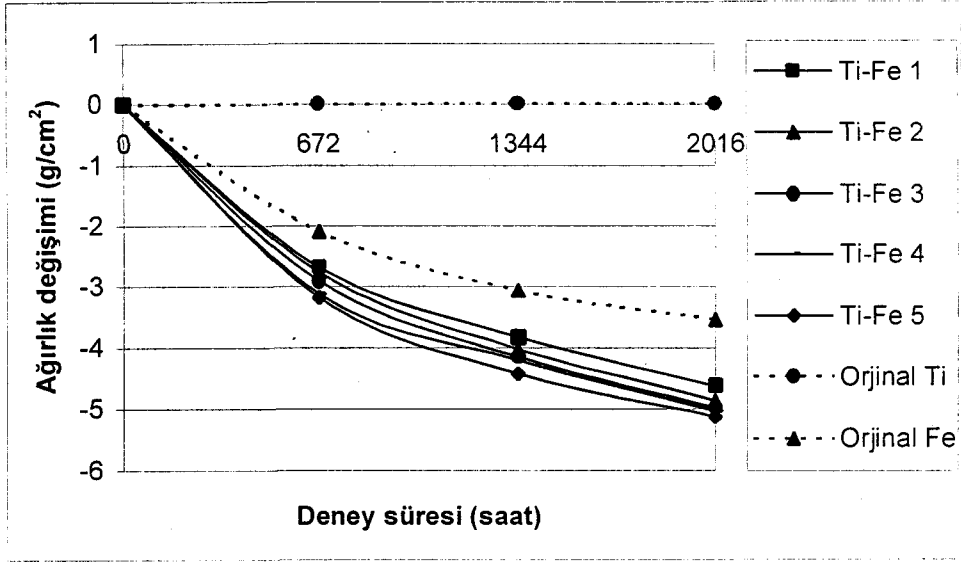
Sonuç olarak, patlamalı kaynak yöntemi ile birleştirilmiş paslanmaz çelik-titanyum çifti korozif ortamlarda (özellikle deniz suyu ortamında) kolaylıkla kullanılabilir.

6.5.2. Düşük karbonlu çelik-titanyum birleştirmeleri

Çizelge 6.9'da patlamalı kaynak yöntemi ile değişik patlayıcı oranlarında birleştirilmiş ve deniz suyu bileşimindeki korozif ortamda korozyon testine tabi tutulmuş düşük karbonlu çelik-titanyum kompozitlerinde elde edilen korozyon değişimleri ile orijinal malzemelerin ağırlık değişimleri verilmiştir. Şekil 6.5'de ise aynı numunelerdeki korozyon değişim miktarları grafik halinde verilmiştir.

Çizelge 6.9. Patlayıcı oranına göre düşük karbonlu çelik-titanyum birleştirmelerindeki korozyon değişim miktarları

Deney Süresi (saat)	Ağırlık değişimi (g/cm ²)						
	Orijinal Titanyum	Orijinal Düşük karbonlu çelik	R=1,2	R=1,5	R=2	R=2,5	R=3
672	0,01617	-2,08377	-2,68175	-2,75841	-2,90155	-3,11216	-3,17156
1344	0,02716	-3,05569	-3,82062	-4,01351	-4,15124	-4,20772	-4,42293
2016	0,0327	-3,52685	-4,62793	-4,86464	-4,98659	-5,03606	-5,12276



Şekil 6.5. Orijinal malzemeler ile düşük karbonlu çelik-titanyum birleştirmelerindeki korozyon değişimleri

Şekil 6.5’de, patlayıcı oranının $R=1,2$ olarak kullanıldığı birleştirmeler Ti-Fe 1 ile gösterilirken patlayıcı oranının $R=3$ olarak kullanıldığı birleştirmeler Ti-Fe 5 ile gösterilmiştir.

Şekil 6.5 incelendiğinde orijinal titanyum malzemede ağırlık artışı meydana gelirken, orijinal düşük karbonlu çelik ve birleşmiş durumdaki bütün numunelerde ağırlık kaybının olduğu görülmektedir. Burada, orijinal düşük karbonlu çelik malzemede ağırlık kaybının sebebi, korozif ortamda yüzeyde oluşan oksit tabakasının kararlı olmayışından ve alttaki metalden rahat ayrılmasından dolayı meydana gelmektedir. Ayrıca, artan patlayıcı oranı ile birlikte birleştirilmiş numunelerdeki ağırlık kaybının artmasının sebebi ise patlatma işlemi esnasında meydana gelen soğuk deformasyon miktarının artmasından kaynaklanmaktadır. Soğuk deformasyon miktarının artması ile korozyon için gerekli olan itici güç artmış ve daha fazla korozyon olmuştur.

Şekil 6.5’de göze çarpan bir başka değişim de korozyon hızının deneylerin ilk aşamasında daha fazla olmasıdır. Kaynaklı numunelerde 672 saatlik ilk ölçüm sonucunda ağırlık kaybı yaklaşık 3 gram iken son ölçüm sonucunda (2016 saat sonra) yaklaşık olarak 5 gram olmuştur. Yani deney süresi üç kat artmasına karşın

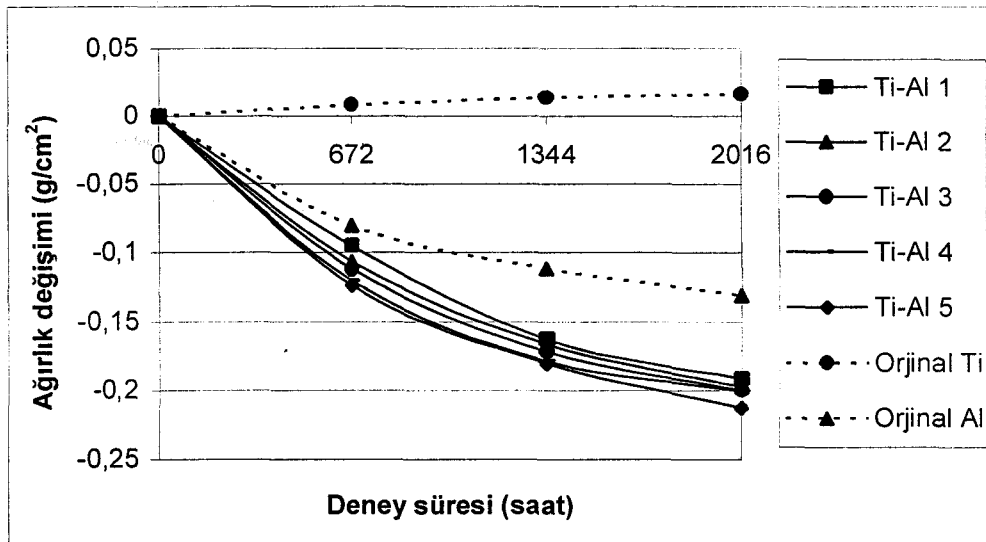
ağırlık kayıpları iki kat bile artmamıştır. Bunun sebebi ilk oluşan korozyon temiz yüzeyde meydana gelmesi ve hızlı olmasından kaynaklanmaktadır. Daha sonra meydana gelen oksit tabakası yüzeyi kaplar ve gerek oksijen geçişini gerekse metal atomlarının oksijene hareketini engeller ve korozyon hızında yavaşlama görülür. Yapılan literatür araştırmalarında da (101) korozyon sonucu oluşan ürünler metal yüzeyinde birikerek koruyucu bir film oluşturursa korozyon hızında azalma olur. Bu koruyucu filmin etkili olması; korozyon ürünlerinin çözünürlüğü, ürünlerin metal yüzeyine yapışabilme yeteneği, oluşan filmin geçirgenliği, elektriksel direnci ve mekanik sağlamlığı ile ilgilidir. Çözünebilen korozyon ürünleri metal yüzeylerinden uzaklaşır. Bu nedenle koruyucu özellikleri yok olur. Oksit filmi ile metal arasındaki en sağlam bağın, ikisinin de birbiriyle uyuşabilen kristal yapıda olması ile mümkün olacağı belirtilmektedir. Patlamalı kaynak yöntemi ile değişik patlayıcı oranlarında elde edilmiş düşük karbonlu çelik-titanyum birleştirmelerinde servis şartlarında düşük karbonlu çelik malzeme tarafının korozif ortamdan uzaklaştırılıp titanyum levha tarafının korozif ortama maruz kalması sağlanmalıdır. Örneğin bir geminin suya değen ve açık hava ile temas eden kısımları titanyum ile kaplanarak korozyon kayıpları en aza indirilebilir.

6.5.3. Alüminyum-titanyum birleştirmeleri

Patlayıcı oranlarının paslanmaz çelik-titanyum ve düşük karbonlu çelik-titanyum birleştirmelerine göre farklı kullanıldığı alüminyum titanyum birleştirmelerinden elde edilen korozyon değişimleri Çizelge 6.10'da verilmiştir. Şekil 6.6'da ise bu değişimler grafik halinde verilmiştir.

Çizelge 6.10. Patlayıcı oranına göre alüminyum-titanyum birleştirmelerindeki korozyon değişim miktarları

Deney Süresi (saat)	A ğ ı r l ı k d e ğ i Ő i m i (g/cm ²)						
	Orijinal Titanyum	Orijinal Alüminyum	R=1	R=1,2	R=1,5	R=2	R=2,5
672	0,01617	-0,08021	-0,09507	-0,10623	-0,11177	-0,12026	-0,12367
1344	0,02716	-0,11157	-0,16282	-0,16625	-0,17185	-0,17832	-0,18017
2016	0,0327	-0,13063	-0,19157	-0,19729	-0,19963	-0,20059	-0,21236



Şekil 6.6. Orjinal malzemeler ile alüminyum-titanyum birleştirmelerindeki korozyon değişimleri

Yukarıdaki Çizelge 6.10 ve Şekil 6.6 incelendiğinde orjinal titanyum hariç diğer bütün numunelerde korozyon değişiminin ağırlık kaybı yönünde olduğu görülmektedir. Ayrıca, en fazla ağırlık kaybının patlayıcı oranının $R=2,5$ olarak alındığı birleştirmelerde olduğu ve bu numuneyi sırasıyla $R=2$, $R=1,5$, $R=1,2$ ve $R=1$ olduğu numuneler takip etmektedir. Buradan anlaşılmaktadır ki, artan patlayıcı oranı ile birlikte düşük karbonlu çelik-titanyum birleştirmesinde olduğu gibi ağırlık kaybı artmaktadır. Patlama kaynağı ile birleştirilmiş numunelerde 672 saatlik süre sonunda ölçülen ağırlık kaybı yaklaşık olarak 0,1 gram olurken, 1344 saatlik süre sonunda bu değer yaklaşık olarak 0,17 gram olarak ölçülmüştür. 2016 saatlik son ölçüm zamanında ise bu artış azalarak devam etmiş ve yaklaşık olarak deney sonunda 0,2 gram olarak ölçülmüştür. Buradan artan patlayıcı oranı ile birlikte malzemelere uygulanan soğuk işlem miktarının arttığı ve bu işlemin de korozyon miktarını arttırdığı tespit edilmiştir.

Bilindiği gibi korozif ortamda bulunan bir metal aynı zamanda gerilme altında ise korozyon hızında artış olmaktadır (103). Normal halde korozyon ürünleri metal yüzeyinde koruyucu bir kabuk oluşturduğu halde, stres altında iken kabuk oluşturamazlar. Bunun sonucu olarak korozyon hızla devam ederek metalin o bölgede çatlamasına neden olur. Bu nedenle bu tür korozyonu azaltmak için gerilim

altındaki malzemelere ısı işlem uygulanarak bu stres belli bir deęerin altına dūřurūlebilir (101). Patlamalı kaynak yōntemi ile birleřtirilmiř kaynaklı malzemelere (malzeme boyutları uygunsa) ısı işlem uygulanarak korozif ortamlara daha elveriřli kompozitler ūretilir.



7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, patlamalı kaynak işlem parametrelerinden eğik düzlem ara boşluk mesafesi (5^0 'lik açı ile) ve değişik patlayıcı oranlarında paslanmaz çelik-titanyum, düşük karbonlu çelik-titanyum ve alüminyum-titanyum kompozit levhaları üretilmiştir. Patlama kaynağı ile birleştirilmiş numunelere; optik mikroskop ve SEM çalışmaları ile sertlik testi, çekme-makaslama testi ve eğme testleri uygulanmıştır. Ayrıca, kaynaklı numunelerin deniz suyu ortamındaki korozyon değişimlerinin belirlenmesi için çalışmalar yapılmış ve elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

- 1) Patlayıcı oranının $R=1$ olarak kullanıldığı patlatma işlemlerinde, birleşme için gerekli basınç sağlanamadığından paslanmaz çelik-titanyum ve düşük karbonlu çelik-titanyum birleşmeleri gerçekleşmemiştir. Ancak yeterli basıncın sağlandığı alüminyum-titanyum birleştirmelerinde ise olumlu sonuçlar alınmıştır.
- 2) Patlamalı kaynak yöntemi ile birleştirilen titanyum-paslanmaz çelik, titanyum-düşük karbonlu çelik ve titanyum-alüminyum kompozitlerinden ASTM D 3165-95'e göre yapılan çekme-makaslama testleri sonucunda birleştirilmiş numunelerin tümünün arayüzeyinde herhangi bir sıyrılma söz konusu değildir.
- 3) Optik mikroskop görüntülerinden düşük patlayıcı oranlarında düz bir arayüzey görüntüsü elde edilirken, artan patlayıcı oranı ile birlikte malzemeler uygulanan basınç arttığından arayüzeyde oluşan dalgaların boy ve genliklerinde artışlar olduğu görülmüştür.
- 4) Mikroyapı çalışmaları sonucunda, patlama kaynağı esnasında meydana gelen basınç ile birleşme arayüzeyine yakın bölgedeki tanelerin patlama yönünde uzadığı ve arayüzeyden uzaklaştıkça bu değişimin giderek yok olduğu gözlenmiştir.
- 5). Kaynaklı numunelere 180^0 ve çift yönlü olarak uygulanan eğme testleri sonucunda kaynak arayüzeyinde ayrım, yırtılma vb. hatalara rastlanılmamıştır.

- 6) Kaynaklı numuneler üzerinde yapılan SEM çalışmaları sonucunda, birleşme arayüzeyinde herhangi bir birleşme hatasına (oksit kalıntısı, ergime boşluğu vb) rastlanılmamıştır.
- 7) Kaynaklı numunelerden ölçülen sertlik değerlerinin, orijinal malzemelerden ölçülen sertlik değerlerinden daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bunun sebebi patlamalı kaynak işlemi esnasında meydana gelen basınçtan dolayı iki levhanın yüksek hızda çarpışması ve bu çarpışma ile meydana gelen deformasyondur.
- 8) Patlama kaynağı ile birleştirilmiş numunelere uygulanan sertlik testleri sonucunda en yüksek sertlik (kaynak esnasında en yüksek hızlı çarpışma arayüzeyde meydana geldiğinden) birleşme arayüzeyine yakın bölgeden ölçülmüştür.
- 9) Korozyon testleri sonucunda, orijinal malzemeler ile kaynaklı numunelerden ölçülen korozyon miktarlarının farklı olduğu ve deneysel çalışmalar sonucunda, korozyona en dayanıklı birleştirmenin paslanmaz çelik-titanyum metal çiftlerinden meydana geldiği tespit edilmiştir.
- 10) Kaynaklı numunelerden ölçülen ağırlık kayıplarının deneyin başlangıcında hızlı olduğu ve daha sonraki ölçüm zamanlarında ise bu artışın azalarak devam ettiği tespit edilmiştir. Bunun sebebi, ilk oluşan korozyon temiz yüzeyde meydana geldiğinden daha hızlı olmakta ve daha sonra temiz yüzeyler oksit tabakası ile kaplanarak korozyon hızında yavaşlama görülmektedir.
- 11) Patlama kaynağı esnasında kullanılan patlayıcı oranının artmasıyla, malzemelere uygulanan deformasyon miktarının arttığı, bu artışın da korozif ortamda korozyon hızını arttırdığı tespit edilmiştir. Bu da, plastik deformasyona uğramış yüzeylerde çekirdekleşme yoğunluğunun artması ve artan çekirdekleşme ile oluşan oksit tabakasındaki tane boyutunun küçülmesinden kaynaklanmaktadır.

Çalışmalarımız sonucunda, yukarıda elde edilen sonuçlar neticesinde gelecekte bu konu ile çalışacak araştırmacılara şu öneriler verilebilir.

- 1) Patlamalı kaynak ile elde edilen paslanmaz çelik-titanyum, düşük karbonlu çelik-titanyum ve alüminyum titanyum birleştirmelerinin servis şartlarına uygulanabilirliği araştırılabilir.
- 2) Elde edilen birleştirmelere servis şartlarına göre (atmosferik, kimyasallar vb) korozyon testleri uygulanabilir.
- 3) Patlama kaynağında kullanılan patlayıcı oranı sabit tutularak, eğik düzlemde kaynak açısı değiştirilerek, değişimin birleştirme kalitesine etkileri incelenebilir.
- 4) Patlamalı kaynak yöntemi ile birleştirilmiş malzemelerin arayüzeylerde difüzyon olup olmadığı TEM çalışmaları ile incelenebilir.

KAYNAKLAR

- 1 Kahraman N., "Toz Alev Spreyleme Yöntemi ile Kaplanan Numunelerde Kaplama Parametrelerinin Etkisinin İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 1-2 (2000).
- 2 Ürgen, M., "Modern Yüzey İşleme Teknolojileri ve Türkiye'deki Gelişmeler", *9. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi*, İstanbul, 333-350 (1997).
- 3 Yumurtacı, S., Sönmez, N., Karaaslan, A., Aslan, E. U., "S 6-5-2 İle 4140 Çeliğinin Yakma Alın Kaynağı Yöntemi ile Birleştirilmesi", *Kaynak Teknolojisi III. Ulusal Kongresi Bildiriler Kitabı*, İstanbul, 119-126 (2001).
- 4 Gour, M. L., "Kaynak Teknolojisinin Esasları", *Birsen yayınevi*, Çeviren; Eryürek İ. B., Bodur O., Dikicioğlu A., İstanbul, 2-4 (1996).
- 5 Anık S., Tülbentçi, K., Kaluç, E., "Örtülü Elektrot İle Elektrik Ark Kaynağı", *Gedik Holding A.Ş.*, İstanbul, 4-12 (1991).
- 6 Anık S., Kaynak Tekniği El Kitabı, "Yöntem ve Donanımlar", *Gedik Holding A.Ş.*, İstanbul, 1-22 (1991).
- 7 Anık, S., "Günümüz Endüstrisinde Kaynağın Yeri", I. Ulusal Kaynak Sempozyumu, *İTÜ Makine Fakültesi*, İstanbul, 1-3 (1984).
- 8 Kleven, S., "Ultrasonic Inspection of Explosive Welded Titanium Clad Plate", *Materials Evaluation*, 557-560 (May 1996).
- 9 Threadgil, P. L., "Non-Aerospace Applications of Titanium", *TMS Annual Meeting*, 71-80 (1998).
- 10 Li, Y., Shu, D. and Kuzay, T. M., "Explosion Bonding of Dissimilar Materials For Fabricating APS Front End Components- Analysis of Metallurgical and Mechanical Properties and UHV Applications, 18.02.2000, <http://www.aps.anl.gov/techpub/Isnotes/Is237/Is237.html>, 1-7 (1994).
- 11 Explosion welding, "Fundamentals of Process", *Welding Handbook*, V 3: 264-277 (1992).
- 12 <http://www.highergymetals.com.>, *High Energy Metals Inc.* 293 Business Park Loop Sepuim, WA 98382.
- 13 Groover, M. P., "Fundamentals of Modern Manufacturing Materials", Processes and Systems, *Prentice-Hall*, New Jersey, 756 (1996).

- 14 DeGarmo, E. P., Black, J. J. And Kohser, R. A., "Materials and Processes in Manufacturing", *Prentice-Hall*, Eight Edition, New Jersey, 1016 (1997).
- 15 Doğan, İ., "Titanyum Malzemelerin (Kalite 265.2) TIG Kaynak Yöntemi ile Kaynaklanabilirliğinin İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 4-32 (2002).
- 16 Erdoğan, M., "Mühendislik Malzemelerinin Yapı ve Özellikleri", Cilt 2, *Nobel Yayın dağıtım*, Ankara, 447-492 (2001).
- 17 Smith, W. F., "Structure And Properties of Engineering Alloys", Second Edition, *McGraw-Hill, Inc.*, New York, 433-439 (1993).
- 18 Yue, T. M., Yu, J. K., Mei, Z. and Man, H. C., "Excimer Laser Surface Treatment of Ti-6Al-4V Alloy for Corrosion Resistance Enhancement", *Materials Letters*, 52 (3): 206-212 (2002).
- 19 Gurrappa, I. And Gogia, A. K., "Development of Oxidation Resistant Coatings for Titanium Alloys", *Materials Science and Technology*, 17: 581-586, (2001).
- 20 Aparicio, C. F., Gil, J., Fonseca, C., Barbosa, M., and Planell, J. A., "Corrosion Behaviour of Commercially Pure Titanium Shot Blasted with Different Materials and Sizes of Shot Particles for Dental Implant Applications", *Biomaterials*, 24 (2): 263-273 (2003).
- 21 Grosgeat, B., Reclaru, L., Lissac, M., and Dalard, F., "Measurement and Evaluation of Galvanic Corrosion Between Titanium/Ti6Al4V Implants and Dental Alloys By Electrochemical Techniques and Auger Spectrometry", *Biomaterials*, 20 (10): 933-941 (1999).
- 22 Barreda, J. L., Santamaría, F., Azpiroz, X., Irisarri, A. M. and Varona, J. M., "Electron Beam Welded High Thickness Ti6Al4V Plates Using Filler Metal of Similar and Different Composition to the Base Plate", *Vacuum*, 62: 143-150 (2001).
- 23 Erdoğan, M., "Malzeme Bilimi ve Mühendislik Malzemeleri", *Nobel Yayın Dağıtım*, Ankara, Cilt 1, 288-293 (1998).
- 24 Li, Z., Gobbi, S. L., Norris, I., Zolotovskiy, S. And Richter, K., H., "Laser Welding Techniques for Titanium Alloy Sheet", *Journal of Materials Processing Technology*, 65: 203-208 (1997).
- 25 Gonzalez, J. E. G. And Mirza-Rosca, J. C., "Study of ohe Corrosion Behaviour of Titanium and Some of Its Alloys for Biomedical and Dental Implant Applications", *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 471 (2): 109-115 (1999).

- 26 Boyer, R. R., "Titanium and Titanium Alloys", *ASM Metall Handbook*, V 9: 458-462 (1985).
- 27 Karaca, S., "Titanyum ve Alaşımlarına Uygulanan Yüzey Mühendisliği Teknikleri", Yüksek Lisans Tezi, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Makine Mühendisliği Bölümü, Kayseri, 1-10 (1994).
- 28 Polmear, I. J. "Light Alloys: Metallurgy of the Light Metals", *Edward Arnold London*, 1: 163-213 (1981).
- 29 Oh, J., Kim, N. J., Lee, S. and Lee, E. W., "Correlation of Fatigue Properties and Microstructure in Investment Cast Ti-6Al-4V Welds", *Materials Science & Engineering A*, 340 (1-2): 232-242 (2003).
- 30 Codaro, E. N., Nakazato, R. Z., Horovistiz, A. L., Ribeiro, L. M. F., Ribeiro, R. B. and Hein, L. R. O., "An Image Analysis Study of Pit Formation on Ti-6Al-4V", *Materials Science and Engineering A*, 341 (1-2): 202-210 (2003).
- 31 "Titanium and Titanium Alloys", *Metal Handbook*, ASM Committee on Titanium, Eighth Edition, Ohio, V 1: 1147-1153 (1962).
- 32 Webster, R. T., "Welding of Titanium Alloys", *ASM Metals Handbook*, Welding, Brazing and Soldering, V 6: 783-786 (1993).
- 33 Oğuz, B., "Demirdışı Metallerin Kaynağı", *Oerlikon Yayınları*, İstanbul, 548-602 (1990).
- 34 Phillips, D. H., "Selection and Weldability of Advanced Titanium-Base Alloys", *ASM Metals Handbook*, Welding, Brazing and Soldering, V 6: 524-527 (1993).
- 35 şirin, ř. Y., Sarı, N. Y. ve Kaluç, E., "Titanyum ve Alaşımlarının Kaynağı II", *Makine Magazin Dergisi*. Sayı 20, 52-62 (1997).
- 36 Lathabai, S., Jarvis, B.L. and Barton, K.J., "Comparison of Keyhole and Conventional Gas Tungsten Arc Welds in Commercially Pure Titanium", *Materials Science and Engineering A*, 299: 81-93 (2001).
- 37 Paton, B. E., Zamkov, V. N. and Prilutsky, V. P., "Narrow-Groove Welding Proves Its Worth on Thick Titanium", *Welding Journal*, 37-41 (May 1996).
- 38 Althouse A. D., Turnquist C. H., Bowditch W. A., Bowditch K. E., "Gas Tungsten Arc Welding", *Modern Welding*, 507-508 (1993).
- 39 Anık, S. ve Vural, M., "Gazaltı Ark Kaynağı (TIG-MIG-MAG)", *Gedik Eğitim Vakfı Yayını*, Yayın No 3, İstanbul, 222-223 (1997).

- 40 Thomas G., Ramachandra, V, Nair, M, J., Nagarajan, K.V., and Vasudevan. R., "Effect of Preweld and Postweld Heat Treatment on the Properties of GTA Welds in Ti-6Al-4V Sheet", *Welding Research Supplement*, 15-20 (January 1992).
- 41 Zhou, W. and Chew, K. G., "Effect of Welding on Impact Toughness of Butt-Joints in a Titanium Alloy", *Materials Science & Engineering A*. 347: 180-185 (2003).
- 42 Yung, W. K. C., Ralph, B., Lee W. B. and Fenn R. "An Investigation into Welding Parameters Affecting the Tensile Properties of Titanium Welds", *Journal of Materials Processing Technology*, 63: 759-764 (1997).
- 43 Baeslack, W. A., Davis, J. R. and Cross, C. E., Selection and Weldability of Conventional Titanium Alloys, *ASM Metals Handbook*, Welding, Brazing and Soldering, Eighth Edition, 6: 507-521, (1993).
- 44 Richard, S.S., "The Procedure Handbook of Arc Welding", *The Lincoln Electric Company*, Cleveland, Ohio, 554-555 (1995).
- 45 Karadeniz, S., "Plazma Tekniği", TMMOB , *Makina Mühendisleri Odası*, Yayın No 137, Ankara, 57-60 (1990).
- 46 Tsay, L. W. and Tsay, C. Y., "The Effect of Microstructure on the Fatigue Crack Growth in Ti-6Al-4V Laser Welds", *Int. Journal Fatigue*, 19 (10): 713-720 (1997).
- 47 Wang, S.H., Wei, M.D. and Tsay L.W., "Tensile Properties of LBW Welds in Ti-6Al-4V Alloy at Evaluated Temperatures Below 450 °C", *Materials Letters* 57: 1815- 1823 (2003).
- 48 Yunlian, Q., Ju, D., Quan, H. and Liying, Z., "Electron Beam Welding, Laser Beam Welding and Gas Tungsten Arc Welding of Titanium Sheet", *Materials Science and Engineering A*, 280 (1): 177-181 (2000).
- 49 Ellis, C. R. G., "Friction Welding", *Welding and Metal Fabrication*, 207-213, (May 1977).
- 50 Elmer, J. W. and Kautz, D. D., "Fundamentals of Friction Welding". *ASM Metals Handbook*, Welding, Brazing and Soldering, Eighth Edition. 6: 150-155 (1993).
- 51 Ateş, H., Ferritik "Süper Alaşımların Sürtünme Kaynağı ile Kaynaklanabilirliğinin Araştırılması", Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 16-17 (2002).

- 52 Nessler, C. G., Rutz, D. A., Eng, R. D. and Vozzella, P. A., "Friction Welding of Titanium Alloys", *Welding Research Supplement*, 379-385 (September 1971).
- 53 Vairis, A. and Frost, M., "High Frequency Linear Welding of a Titanium Alloys", *Wear*, 217: 117-131 (1998).
- 54 Brasher, D. G. and Butler, D. J., "Explosive Welding: Principles and Potentials", *Advanced Materials & Processes*, 147 (3): 37-38 (1995).
- 55 Anon, "Explosive Welding", *Welding Journal* (Miami, Fla). 80 (5): 50-51 (2001).
- 56 Tülbentçi, K., Yılmaz, M., "Farklı Takım eliklerinin Katı Hal Kaynağı", *II. Ulusal Kaynak Sempozyumu Bildiri Kitabı*, İstanbul, 303-313 (1989).
- 57 Kurt, A., Türker, M., Aksoy, M., Orhan, N., "Toz Metal Bronz Malzemenin Düşük Karbonlu eliğe Difüzyon Kaynağında Gözenekliliğin Difüzyona Etkisi", *2. Uluslararası Kaynak Teknolojisi Sempozyumu*, IWTS'98, İstanbul, 130-138 (1998).
- 58 Rosen, R. S., Walmsley, D. R. and Munir, Z. A., "The Properties of Silver-Aided Diffusion Welds Between Uranium and Stainless Steel", *Welding Journal*, AWS, 65 (4): 83-92 (1986).
- 59 Kahraman, N., "Titanyum ve Bakır iftinin Ara Bağlayıcılı Difüzyon Sert Lehimlemesi ile Fırında Birleştirilmesi ve Mekanik zelliklerinin İncelenmesi", *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 16 (3): 611-618 (2003).
- 60 Gülenç, B., "Difüzyon Sert Lehimlemesi ile Titanyum ve Düşük Karbonlu elik Malzemelerin Birleştirilmesi ve Mekanik zelliklerinin İncelenmesi", *Makine Tasarım ve İmalat Dergisi*, 5 (1): 22-28 (2003).
- 61 Orhan, N., Khan, T. I. and Eroğlu, M., "Diffusion Bonding of Microdublex Stainless Steel to Ti-6Al-V", *Scripta Materialia*, 45: 441-446 (2001).
- 62 Brasher, D. G. And Butler, D. J., "Explosive Welding: Principles and Potentials", *Advanced Materials & Processes V 3*: 37-38 (1995).
- 63 Bement, L. J., "Small-Scale Explosion Seam Welding", *Welding Journal*, 147-154, (March 1973).
- 64 Livne, Z. And Munitz A., "Characterization of Explosively Bonded Iron and Copper Plates", *Journal of Materials Science*, 22: 1495-1500 (1987).

- 65 Covan, G. R., Bergman, O. R. And Holtzman, A. H., "Mechanism of Bond Zone Wave Formation in Explosion-Clad Metals", *Metallurgical Transactions*, 2: 3145-3155 (1971).
- 66 Acarer, M., "Patlamalı Kaynakta Patlayıcı Oranı, Ara Boşluk Mesafesi ve Altlık Cinsinin Çelik/Çelik Birleştirilmesi Kalitesine Etkisi", Doktora Tezi, *Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Makine Eğitimi Anabilimdalı, Sakarya, 5-119 (2001).
- 67 Durgutlu, A. ve Gülenç, B., "Patlama Kaynağıyla Paslanmaz Çelik-Bakır Levhaların Kaynaklanabilirliği ve Patlayıcı Oranının Birleşme Arayüzeyine Etkisi", *Politeknik Dergisi*, 5(3): 243-247 (2002).
- 68 Balasubramanian, V., Rathinasabapathi, M., Raghukandan, K., "Modelling of Process Parameters in Explosive Cladding of Mildsteel and Aluminium", *Journal of Materials Processing Technology*, 63: 83-88 (1997).
- 69 Lindberg, R. A., "Processes and Materials of Manufacture", Fourth Edition, *Prentice-Hall*, London, 774 (1990).
- 70 Abe, A., "Numerical Simulation of The Plastic Flow Field Near the Bonding Surface of Explosive Welding", *Journal of Materials Processing Technology*, 85: 162-165 (1999).
- 71 Abe, A., "Numerical Study of The Mechanism of Wavy Interface Generation in Explosive Welding", *JSME International Journal*, 40 (3): 395-401 (1997).
- 72 Acarer, M., Gülenç, B., Fındık, F., "Patlamalı Kaynak İşlem Parametrelerinin Birleşme Arayüzeyine Etkisi" *8. Denizli Malzeme Sempozyumu*, Pamukkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Denizli, 166-171 (2000).
- 73 Amstead, B. H., Ostwald, P. F. And Begeman, M. L., "Manufacturing Processes", Eighth Edition, *John Wiley&Sons*, New York, 189 (1987).
- 74 Kalpakjian,S., "Manufacturing Processes for Engineering Materials", Third Edition, *Addison-Wesley*, New York, 809-810 (1997).
- 75 Anık, S., Anık, E. S. Ve Vural, M., "1000 Soruda Kaynak Teknolojisi El Kitabı", *Birsen Yayınevi*, Cilt 1, İstanbul, 233-234 (1993).
- 76 Yang, Y., Xinming, Z., Zhenghua, L. And Qingyun, L., "Adiabatic Shear Band on the Titanium Side in the Ti/Mild Steel Explosive Cladding Interface", *Acta Mater*, 44 (2): 561-565 (1996).
- 77 Trueb, L. F., "Microstructural Effect of Heat Treatment on the Bond Interface of Explosively Welded Metals", *Metallurgical Transactions*, 2: 145-153, (1971).

- 78 Covan, G. R. And Holtzman, A. H., "Flow Configurations in Colliding Plates: Explosive Bonding", *Journal of Applied Physics*, 34(4): 928-939 (1963).
- 79 İnal, O. T. And Zimmerly, C. A., "Processing of Materials with Explosives", *9th International Metallurgy and Materials Congress*, Editors; Doruk, M., Gür, H., Öztürk, A. and Aydınol, K., İstanbul, 751-764 (1997).
- 80 Demirkol, M. Ve Aran, A., "Patlamalı Kaynak Yöntemi", *II. Ulusal Kaynak Sempozyumu Bildiri Kitabı*, İstanbul, 142-151 (1989).
- 81 Carry, H. B., "Explosion Welding", *Modern Welding Technology*, Second Edition, AWS, 231-232 (1981).
- 82 Acarer M., Gülenç B., Fındık F., Investigation of Explosive Welding Parameters and their Effects on Microhardness and Shear Strength, *Materials & Design*, 24(8): 659-664 (2003).
- 83 Banker, J. G. And Reineke, E. G., "Explosion Welding", *ASM Handbook*, Welding, Brazing and Soldering, 6: 303-306 (1992).
- 84 Hokamoto, K., zuma, T. and Fujita, M., "New Explosive Welding Technique to Weld Aluminium Alloy and Stainless Steel Plates Using a Stainless Steel Intermediate Plate", *Metallurgical Transactions A*, 24A: 2289-2297 (1993).
- 85 Changqing, X. and Zhanpeng, J., "Evolution of Microstructure and Diffusion Paths in the Molybdenum-Steel Explosion Weld Interface During Heat Treatment", *Materials Science and Engineering A*, 158: 235-239 (1992).
- 86 Han, J. H., Ahn, J. P. and Shin, M. C., "Effect of Interlayer Thickness on Shear Deformation Behavior of AA5083 Aluminum Alloy/SS41 Steel Plates Manufactured By Explosive Welding", *Journal of Materials Science*, 38: 13-18 (2003).
- 87 Li, Y., Hashimoto, H., Sukedia, E., Zhang, Y. and Zhang Z., "Morphology and Structure of Various Phases at the Bonding Interface of Al/Steel Formed By Explosive Welding", *Journal of Electron Microscopy*, 49(1): 5-16 (2000).
- 88 Yang, Y., Xinming, Z., Zhenhua, L. and Qinyun, L., "Localized Superplastic Behaviour in α -Titanium at High Strain-Rate", *Scripta Metallurgica et Materialia*, 32 (2): 219-224 (1995).
- 89 Khokhlov, V. I., Popov, G. V., Krasnov, V. D. and Andrianov, V. M., "Special Features of the Structure of Titanium Alloys in Explosive Welding", *Metal Science and Heat Treatment*, 32: 537-540 (1991).

- 90 Rinçman, H., Rao, A. S. and Kung, D., "Cavitation Erosion of NiTi Explosively Welded to Steel", *Wear*, 181 (183): 80-85 (1995).
- 91 Turutnev, V.V., "Comparative Assessment of the Quality of the Explosive Joining of Aluminium to Titanium, Steel and Nickel", *Svar. Proiz.*, 7: 33-37 (1973).
- 92 Williams, C. P., "Explosion Clad Titanium/Steel Plate", *Chemical Engineering Progress*, 66 (10): 48-52 (1970).
- 93 Mamalis, A. G., Szalay, A., Vaxevanidis, N. M. and Pantelis, D. I., "Macroscopic and Microscopic Phenomena of Nickel/Titanium "Shape-memory" Bimetallic Strips Fabricated By Explosive Cladding and Rolling", *Materials science and Engineering A*, 188: 267-275 (1994).
- 94 Ma, D. K. And Zhou, J. B., "Deformability of the Interface of Explosive Welded Titanium Clad Steel Plate", *Rare Metal Materials and Engineering*, 28 (1): 26-29 (1999).
- 95 Li, Y., Hashimoto, H., Sakedai, E., Zhang, Y. M. and Zhang, Z. K., "Morphology and Structure of Various Phases at Bonding Interface of Al/Steel Formed by Explosive Welding", *Journal of Electron Microscopy*, 49(1): 5-16 (2000).
- 96 Wronka, B., "The Influence of Base Plate Thickness and Anvil on the Characteristics of Explosive Welded Joints", *Insight*, 41(6): 383-387 (1999).
- 97 Gerland, M., Presles, H. N., Guin, J. P. and Bertheau, D., "Explosive Cladding of a Thin Ni-Film to an Aluminium Alloy", *Materials science and Engineering A*, 280: 311-319 (2000).
- 98 TS 5731, "Metal ve Metal Alaşımlarının Korozyonu-Genel Terimler ve Tarifler," *TSE Yayını*, Ankara, 1-6 (Nisan 1988).
- 99 Yalçın, H. ve Koç, T., "Katodik Koruma", *Palme Yayınları*, Ankara, 1-52 (1999).
- 100 Onaran, K., "Malzeme Bilimi", *Bilim Teknik Yayınevi*, İstanbul, 293-300 (1995).
- 101 Yalçın, H. ve Koç, T., "Mühendisler İçin Korozyon", *T.M.M.O.B. Kimya Mühendisleri Odası Yayını*, Ankara, 1-64 (1997).
- 102 Erbil, M., "Ortam Parametrelerinin Korozyon Üzerindeki Etkisi", *Korozyon* 3(1): 13-17 (Şubat 1991).

- 103 Şengil, İ. A., "Korozyon", *Sakarya Mühendislik Fakültesi Matbaası*, Sakarya, 1-385 (1992).
- 104 Doruk, M., "Korozyon ve Önlenmesi", *ODTÜ Mühendislik Fakültesi Yayını*, Ankara, 52-90 (1982).
- 105 Eryürek, B., "Hasar Analizi", *Birsen Yayınevi*, İstanbul, 90-91 (1993).
- 106 Akid R. and Mills D. J., "A Comparison Between Conventional Macroscopic and Novel Microscopic Scanning Electrochemical Methods to Evaluate Galvanic Corrosion", *Corrosion Science*, 43 (7): 1203-1216 (2001).
- 107 Horasawa N., Takahashi S. and Marek M., "Galvanic Interaction Between Titanium and Gallium Alloy or Dental Amalgam", *Dental Materials*, 15 (5): 318-322 (1999).
- 108 Taher, N. M., and Jabab S. A. A., "Galvanic Corrosion Behavior of Implant Suprastructure Dental Alloys", *Dental Materials*, 19 (1): 54-59 (2003).
- 109 Valeva, L. and Cebada, M., "Galvanic Atmospheric Corrosion of Metals in a Humid Tropical Climate", *Materials Selection-Design*, 55-58 (September 1998).
- 110 Ünlü, N., "Galvanik Korozyon", *10. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi*, İstanbul, Cilt 2, 981-987 (Mayıs 2000).
- 111 Demirel, S., Yazıcı, B.ve Erbil, M., "İnhibitör Etkili Bazı Bitki Ekstraktlarının Araştırılması", *2. Korozyon Sempozyumu*, ODTÜ-Ankara, 109-118 (1990).
- 112 Fındık, F., "Malzeme Seçimi," *Sakarya Üniversitesi Basımevi*, 88-89 (1998).
- 113 El-Dahshan, M. E., Shams El Din, A. M. and Haggag, H. H., "Galvanic Corrosion in the Systems Titanium/316 L Stainless Steel/Al Brass in Arabian Gulf Water", *Desalination*, 142(2): 161-169 (2002).
- 114 Cotton, J. B., "Using Titanium in the Chemical Plant", *Chemical Engineering Progress*, 66 (10): 57-62 (October 1970).
- 115 Neville, A. and McDougall, B. A. B., "Erosion- and Cavitation-Corrosion of Titanium and its Alloys", *Wear*, 250 (1-12): 726-735 (2001).
- 116 Feige, N. G. And Kane, R. L., "CPI Applications of Titanium", *Chemical Engineering Process*, 66 (10): 53-56 (October 1970).
- 117 Lopez, M. F., Gutierrez, A., and Jimenez, J. A., "In Vitro Corrosion Behaviour of Titanium Alloys Without Vanadium", *Electrochimica Acta*, 47 (9): 1359-1364 (2002).

- 118 Khan, M. A., Williams, R. L. and Williams, D. F., "Conjoint Corrosion and Wear in Titanium Alloys", *Biomaterials*, 20 (8): 765-772 (1999).
- 119 Khan, M. A., Williams, R. L. and Williams, D. F., "The Corrosion Behaviour of Ti-6Al-4V, Ti-6Al-7Nb and Ti-13Nb-13Zr in Protein Solutions". *Biomaterials*, 20 (7): 631-637 (1999).
- 120 Gluszek, J., Masalski, J., Furman, P. and Nitsch, K., "Structural and Electrochemical Examinations of PACVD TiO₂ Films in Ringer Solution", *Biomaterials*, 18 (11): 789-794 (1997).
- 121 Azumi K. and Seo M., "Corrosion Behavior of Titanium-Clad Carbon Steel in Weakly Alkaline Solutions", *Corrosion Science*, 45 (2): 413-426 (2003).
- 122 Akdoğan, G., "Ti-6Al-4V Alaşımının Biyokorozyon ve Biyouyumluluk Özelliklerinin Araştırılması", Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 31-91, (1998).
- 123 Bonilla, F. A., Ong, T. S., Skeldon, P., Thompson, G. E., Piekoszewski, J., Chmielewski, A. G., Sartowska, B. and Stanislawski, J., "Enhanced Corrosion Resistance of Titanium Foil From Nickel, Nickel-Molybdenum and Palladium Surface Alloying By High Intensity Pulsed Plasmas", *Corrosion Science*, 45 (2): 403-412 (2003).
- 124 Galvanetto E., Galliano, F. P. Fossati, A. and Borgioli, F., "Corrosion Resistance Properties of Plasma Nitrided Ti-6Al-4V Alloy in Hydrochloric Acid Solutions", *Corrosion Science*, 44 (7): 1593-1606 (2002).
- 125 Cai, Z., Shafer, T., Watanabe, I., Nunn, M. E., and Okabe, T., "Electrochemical Characterization of Cast Titanium Alloys", *Biomaterials*, 24 (2): 213-218 (2003).
- 126 ASTM Designation D 3165-95, "Standard Test Method for Strength Properties of Adhesives in Shear by Tension Loading of Single-Lap-Joint Laminated Assemblies", *ASTM Standart*, 199-202 (November 1995).
- 127 TS 8589, "Suni Atmosfer İçinde Yapılan Korozyon Deneyleri İçin Genel Kurallar", *Türk Standartları Enstitüsü*, 1-6 (Aralık 1990).
- 128 Kayalı, E. S. ve Ensari, C., "Metallere Plastik Şekil Verme İlke ve Uygulamaları", *İTÜ Kimya-Metalurji Fakültesi, Ofset Atölyesi*, İstanbul, 94-96 (2000).
- 129 Crossland, B. And Williams, J. D., "Explosive Welding, The Metals and Metallurgy Trust, Metallurgical Reviews", *Review*, 144: 79-100 (1970).

- 130 Acarer, M., Gülenç, B., Fındık, F., "Investigation of Cracks and Fracture on Interfaces of Explosive Welded Metals By Using Tensile Shear and Bending Test", *5th International Fracture Conference*, Fırat University, Elazığ-Türkiye, 301-309 (2001).
- 131 Türker, M., The Effect of High Temperature Exposure on the Structure and Properties of Ferritic Oxide Dispersion Strengthened Alloys, Ph. D. Thesis, *School of Materials, University of Leeds*, Leeds, UK., 112-113 (1993).
- 132 Türker, M., and Hughes, A. T., Oxidation Behavior of Three Commercial ODS Alloys at 1200⁰C, *Oxidation of Metals*, 44 (5-6): 505-525 (1995).



ÖZGEÇMİŞ

1971 yılında Bursa-İznik'te doğdu. İlk ve orta öğrenimini Elbeyli Kasabası'nda lise öğrenimini ise İznik Endüstri Meslek Lisesi'nde tamamladı. 1990 yılında başladığı Gazi Üniversitesi Teknik Eğitimi Fakültesi Metal Eğitimi Bölümü'nden 1994'te mezun oldu. Aynı yıl İstanbul'da Milli Eğitim Bakanlığı'na bağlı Sarıyer Atatürk Çıraklık Eğitimi Merkezi'nde 1 yıl görev yaptıktan sonra askerliğini tamamladı. Şubat 1997'de Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Karabük Teknik Eğitimi Fakültesi Metal Eğitimi Bölümü, Kaynak Eğitimi Anabilimdalında Araştırma Görevlisi olarak göreve başladı. 1999 yılında 35. Madde ile Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nde görevlendirildi. Şubat 2000'de Yüksek Lisansını bitirerek aynı dönemde Doktora'ya başladı ve halen devam etmektedir.

