

**GEMİ ÇELİĞİ-TİTANYUM KOMPOZİTLERİN
PATLAMALI KAYNAK YÖNTEMİ İLE
ÜRETİLMESİ VE BİRLEŞTİRME
ARAYÜZEYİNİN İNCELENMESİ**



**2018
YÜKSEK LİSANS TEZİ
İMALAT MÜHENDİSLİĞİ**

Gökhan ESER

**GEMİ ÇELİĞİ-TİTANYUM KOMPOZİTLERİN PATLAMALI KAYNAK
YÖNTEMİ İLE ÜRETİLMESİ VE BİRLEŞTİRME ARAYÜZEYİNİN
İNCELENMESİ**

Gökhan ESER

Karabük Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İmalat Mühendisliği Anabilim Dalında

Yüksek Lisans Tezi

Olarak Hazırlanmıştır

KARABÜK

Mart 2018

Gökhan ESER tarafından hazırlanan “GEMİ ÇELİĞİ-TİTANYUM KOMPOZİTLERİN PATLAMALI KAYNAK YÖNTEMİ İLE ÜRETİLMESİ VE BİRLEŞTİRME ARAYÜZEYİNİN İNCELENMESİ” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Yrd. Doç. Dr. Yakup KAYA

.....

Tez Danışmanı, İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile İmalat Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir. 16/03/2018

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan: Prof. Dr. Ahmet DURGUTLU (GÜ)

.....

Üye : Prof. Dr. Nizamettin KAHRAMAN (KBÜ)

.....

Üye : Yrd. Doç. Dr. Yakup KAYA (KBÜ)

.....

...../...../2018

KBÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Filiz ERSÖZ

.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdür V.



“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

Gökhan ESER

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

GEMİ ÇELİĞİ-TİTANYUM KOMPOZİTLERİN PATLAMALI KAYNAK YÖNTEMİ İLE ÜRETİLMESİ VE BİRLEŞTİRME ARAYÜZEYİNİN İNCELENMESİ

Gökhan ESER

Karabük Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Yrd. Doç. Dr. Yakup KAYA

Şubat 2018, 73 sayfa

Bu çalışmada, gemi çeliği ve titanyum levhalar, farklı patlayıcı oranları kullanılarak patlamalı kaynak yöntemi ile birleştirilmiştir/kaplanmıştır. Üretilen gemi çeliği-titanyum bimetalik kompozitlerin mikroyapı, mekanik ve korozyon özelliklerine patlayıcı oranının etkisi araştırılmıştır.

Bimetalik kompozitlerin mikroyapı karakterizasyonu Optik mikroskop (OM), taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve enerji dağılımlı sepektrometre (EDS) çalışmaları ile mekanik özellikleri çekme makaslama, çentik darbe, eğme ve burulma testleri ve mikrosertlik çalışmaları ile ve korozyon davranışı ise nötr tuz püskürtme (NSS) testleri ile incelenmiştir.

Mikroyapı çalışmaları sonucunda, arayüzeyde birleştirme sağlayan en düşük

patlayıcı oranında (R=2) tamamen düz bir arayüzey elde edilirken, daha yüksek patlayıcı oranlarında (R=2.5 ve R=3) dalgalı bir arayüzey elde edilmiştir. Mikrosertlik testlerinde, en yüksek sertlik değerleri birleştirme arayüzeyinin iki tarafından elde edilmiştir. Mekanik testler sonucunda, kompozit malzeme birleştirme arayüzeylerinde gözle görülebilir herhangi bir hataya rastlanılmamıştır. Korozyon testi sonucunda ise titanyumun, gemi çeliğinden daha yüksek korozyon direnci gösterdiği tespit edilmiştir. Sonuç olarak, gemi çeliği yüzeyine patlamalı kaynak yöntemi ile titanyum kaplanmasıyla mikroyapı, mekanik ve korozyon özellikleri geliştirilebileceği tespit edilmiştir.

Anahtar Sözcükler : Bimetalik kompozit, patlamalı kaynak, titanyum, mekanik özellikler, korozyon

Bilim Kodu : 915.3.019

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

PRODUCTION OF SHIP STEEL-TITANIUM COMPOSITES BY EXPLOSIVE WELDING METHOD AND INVESTIGATION OF JOINING INTERFACE

Gökhan ESER

Karabük University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Manufacturing Engineering

Thesis Advisor:

Asst. Prof. Dr. Yakup KAYA

February 2018, 73 pages

In this study titanium was combined with ship steel sheet via the explosive welding method using different explosive ratios. The effects of the explosive ratio on the microstructure and mechanical and corrosion properties of the ship steel-titanium bimetallic composites were investigated.

The microstructural characterization of the bimetallic composites was studied by optical microscopy (OM), scanning electron microscopy (SEM) and energy dispersive spectrometry (EDS). The mechanical properties were determined via tensile-shear, impact toughness, bending, twisting and microhardness testing, while the corrosion behavior was examined using neutral salt spray (NSS) tests.

The microstructure studies revealed that a wavy joining interface was obtained at higher explosive ratios ($R=2.5$ and 3), while a completely flat interface was achieved at the lowest explosive ratio ($R=2$). In the microhardness tests, the highest hardness values were obtained from both sides of the joining interface. Results of the mechanical tests showed no visible defects in the joining interfaces. In the corrosion test, the titanium was found to have higher corrosion resistance than the ship steel sheet. It was concluded that the microstructure, mechanical and corrosion properties of ship steel sheet can be improved by explosive cladding with titanium.

Key Words : Bimetallic composite, Explosive welding, Titanium, Mechanical properties, Corrosion.

Science Code : 915.3.019

TEŞEKKÜR

Bu tez alıőmasının her aőamasında her tŸrlŸ ilgi ve desteğini esirgemeyen, iş yaőantım ile birlikte yŸrŸttŸęŸm tez aőamamda değerli vakitlerini ayıran YŸksek lisans tez hocam; Yrd. Doç. Yakup KAYA'ya ve engin bilgi ve tecrŸbelerinden yararlandığım çok değerli hocalarım; Prof. Dr. Nizamettin KAHRAMAN, Prof. Dr. Ahmet DURGUTLU ve Prof. Dr. Behçet GŸLENC' e sonsuz teőekkŸrlerimi ve minnetlerimi sunarım.

Bu tez KBŸ-BAP-17-YL-421 nolu Bilimsel Araőtırma Projesi kapsamında KarabŸk Ÿniversitesi tarafından desteklenmiőtir, bu vesileyle KarabŸk Ÿniversitesi RektŸrlŸęine ve eğitim hayatımda engin bilgilerini asla esirgemeyen, desteklerini hayatın her aőamasında gŸrdŸęŸm İmalat MŸhendislięi BŸlŸmŸ Oğretim Ÿyelerine çok teőekkŸr ederim.

Son olarak sevgili eőime ve aileme çalışma hayatım boyunca maddi, manevi tŸm desteklerini esirgemenen yanımda oldukları için teőekkŸr ediyorum.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xiv
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	3
GEMİ İMALAT SANAYİ.....	3
2.1. GEMİ İMALAT SANAYİNİN ÖNEMİ	3
2.2. GEMİ İMALATINDA KULLANILAN MALZEMELER	3
2.2.1. Gemi İmalatında Kullanılan Çelik Malzemeler.....	4
2.2.1.1. Normal Mukavemetli Gemi İmalat Çeliği	6
2.2.1.2. Yüksek Mukavemetli Gemi İmalat Çeliği	8
2.2.1.3. Düşük Sıcaklıklarda Kullanılan Gemi İmalat Çeliği	9
2.3. GEMİ İMALATINDA KULLANILAN KAYNAK YÖNTEMLERİ.....	11
BÖLÜM 3	14
TİTANYUM VE ALAŞIMLARI	14
3.1. TİTANYUM VE ALAŞIMLARININ SINIFLANDIRILMASI.....	15
3.1.1. Ticari Saf Titanyum.....	16
3.1.2. Yakın α Titanyum Alaşımları	17

	<u>Sayfa</u>
3.1.3. α - β Titanyum Alaşımları	18
3.1.4. β Titanyum Alaşımları	19
BÖLÜM 4	21
PATLAMALI KAYNAK YÖNTEMİ	21
4.1. PATLAMALI KAYNAK YÖNTEMİNİN TARİHÇESİ	21
4.2. PATLAMALI KAYNAK YÖNTEMİNİN GENEL ÖZELLİKLERİ	22
4.2.1. Patlamalı Kaynak Yöntemi Mekanizması	26
4.2.2. Patlamalı Kaynak Yöntemi Parametreleri	28
4.2.2.1. Ara Boşluk Mesafesi	29
4.2.2.2. Başlangıç Açısı	29
4.2.2.3. Patlayıcı Oranı	30
4.2.2.4. Patlayıcının Patlama Hızı	30
4.2.2.5. Üst Levhanın Çarpma Hızı	31
4.2.2.6. Çarpışma Açısı	31
4.2.2.7. Kaynak Hızı	31
4.2.2.8. Altlık	32
4.2.3. Patlamalı Kaynak Yöntemi Metalurjik Özellikleri	32
4.2.4. Patlamalı Kaynak Yöntemi Avantaj ve Dezavantajları	34
4.2.5. Patlamalı Kaynak Yöntemi ile Birleştirilebilen Malzemeler	36
4.2.6. Patlamalı Kaynak Yönteminde Kullanılan Patlayıcılar	37
4.2.7. Patlama Yöntemi Uygulamaları	39
BÖLÜM 5	42
DENEYSEL ÇALIşMALAR	42
5.1. KULLANILAN MALZEMELER	42
5.2. MALZEMLERİN KAYNAĞA HAZIRLANMASI	42
5.3. DENEYLERDE KULLANILAN PATLAYICILAR	42
5.4. KAYNAK YÖNTEMİ UYGULAMASI	43
5.5. DENEYSEL ÇALIşMALAR İÇİN NUMUNE HAZIRLAMA	44
5.5.1. Mikroyapı İncelemeleri	45
5.5.2. SEM ve EDS Çalışmaları	45

	<u>Sayfa</u>
5.5.3. Mikrosertlik Deneyi.....	45
5.5.4. Çekme-Makaslama Deneyi.....	46
5.5.5. Çentik Darbe Deneyleri	46
5.5.6. Eğme Deneyi	47
5.5.7. Burulma Deneyi.....	48
5.5.8. Nötral Tuz Püskürtme (NSS) Testi.....	48
BÖLÜM 6	49
DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	49
6.1. Optik Mikroskop Çalışmaları.....	49
6.2. SEM ve EDS Analizleri	51
6.3. Mikro Sertlik Test Sonuçları	55
6.4. Çekme –Makaslama Test Sonuçları.....	56
6.5. Çentik Darbe Test Sonuçları	58
6.6. Eğme Test Sonuçları	60
BÖLÜM 7	64
SONUÇLAR.....	64
KAYNAKLAR	66
ÖZGEÇMİŞ	73

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 4.1. Paralel düzlemde patlamalı kaynak yöntemi şematik görüntüsü.....	22
Şekil 4.2. Eğik düzlemde patlamalı kaynak yöntemi şematik görüntüsü.	23
Şekil 4.3. Patlamalı kaynak yöntemi şematik görüntüsü.	24
Şekil 4.4. Patlamalı kaynak esnasında parçalar arasında fişkırtma oluşumu.	25
Şekil 4.5. Birleştirme arayüzeydeki dalga oluşumu şematik görüntüsü.	27
Şekil 4.6. Patlamalı kaynak yöntemi parametrelerinin şematik görüntüsü.	29
Şekil 4.7. Patlama hızı ve çarpışma açısına bağlı olarak oluşan akış modelleri.	34
Şekil 5.1. Patlamalı kaynak sonrası numune görüntüsü.....	44
Şekil 5.2. ASTM D3165-07 standardına göre çekme-makaslama numunesi.	46
Şekil 5.3. Kullanılan Charpy V çentik numunesi görüntüsü.....	47
Şekil 5.4. ASTM A263-12 standardına göre eğme numunesi görüntüsü.	47
Şekil 6.1. Patlayıcı oranına göre birleştirme arayüzeyi görüntüleri.....	49
Şekil 6.2. Patlayıcı oranına göre birleştirme arayüzeyi görüntüleri.....	50
Şekil 6.3. a) R=2 patlayıcı oranı kullanılarak üretilen kompozit birleştirme arayüzeyi SEM görüntüsü ve b) gösterilen çizginin EDS analizi.....	51
Şekil 6.4. a,b,c) R=2 patlayıcı oranı kullanılarak üretilen kompozit birleştirme arayüzeyi element haritası EDS analizleri.	52
Şekil 6.5 a) R=2.5 patlayıcı oranı kullanılarak üretilen kompozit birleştirme arayüzeyi SEM görüntüsü, b,c ve d) gösterilen noktaların EDS analizleri.....	53
Şekil 6.6. a) R=3 patlayıcı oranı kullanılarak üretilen kompozit birleştirme arayüzeyi SEM görüntüsü, b,c ve d) gösterilen alanların EDS analizleri.	54
Şekil 6.7. Mikrosertlik testleri sonuçları.	55
Şekil 6.8. Çekme-makaslama testi sonrası numune görüntüleri.	58
Şekil 6.9. Çentik darbe testi sonrası numune görüntüleri.	59
Şekil 6.10. Burulma testi sonrası numune görüntüleri.....	61
Şekil 6.11. Nört tuz püskürtme testi sonrası numune görüntüleri.....	62

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1. Gemi imalat çelikleri.	6
Çizelge 2.2. Normal mukavemetli gemi imalat çeliklerinin genel kimyasal bileşimleri.	7
Çizelge 2.3. Normal mukavemetli gemi imalat çeliklerinin genel mekanik özellikleri.	7
Çizelge 2.4. Yüksek mukavemetli gemi imalat çeliklerinin genel kimyasal bileşimleri.	8
Çizelge 2.5. Yüksek mukavemetli gemi imalat çeliklerinin genel mekanik özellikleri.	9
Çizelge 2.6. 0 °C ve -55 °C arası sıcaklıklarda çalışacak C-Mn çeliğinin kimyasal bileşimi (ağırlıkça %).	10
Çizelge 2.7. 0 °C ve -55 °C arası sıcaklıklarda çalışacak C-Mn çeliğinin mekanik özellikleri.	10
Çizelge 2.8. Servis sıcaklığına göre çentik darbe deney sıcaklıkları, çelik özellikleri ve Ni miktarları.	10
Çizelge 3.1. Bazı titanyum ve alaşımları için mekanik özellikler.	15
Çizelge 3.2. Ticari saflıktaki titanyum alaşımlarının genel özellikleri.	16
Çizelge 3.3. Bazı yakın-alfa alaşımlarının mekanik özellikleri.	17
Çizelge 3.4. α ve β dengeleyici elementler.	18
Çizelge 3.5. Bazı β alaşımlarının mekanik özellikleri.	20
Çizelge 5.1. Kullanılan malzemelerin kimyasal bileşimi (% ağırlıkça).	42
Çizelge 5.2. Deneysel çalışmalarda kullanılan kaynak parametreleri.	43
Çizelge 6.1. Çekme-makaslama test sonuçları.	57
Çizelge 6.2. Çentik darbe testi sonuçları.	58

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

Al : Alüminyum

Cu : Bakır

Cr : Krom

C : Karbon

Cb : Kobalt

Mn : Mangan

Ti : Titanyum

Nb : Niobyum

V : Vanadyum

Si : Silisyum

S : Kükürt

P : Fosfor

Pd : Palladyum

Fe : Demir

O : Oksijen

H : Hidrojen

Ni : Nikel

Mo : Molibden

N : Azot

Ta : Tantalum

Zr : Zirkonyum

α : Alfa

β : Beta

KISALTMALAR

SEM	: Scanning Electron Microscope (Elektron Tarayıcı Mikroskop)
ITAB	: Isı Tesiri Altındaki Bölge
LPG	: Liquified Petroleum Gas (Sıvılaştırılmış Petrol Gazı)
TIG	: Tungsten Inert Gas (Tungsten Inert Gaz)
MIG	: Metal Inert Gas (Metal Inert Gaz)
MAG	: Metal Active Gas (Metal Aktif Gaz)
ASTM	: American Society for Testing and Materials
YMDA	: Yüksek Mukavemetli Düşük Alaşım
LNG	: Liquified Naturel Gas (Sıvılaştırılmış Doğal Gazı)
OM	: Optik mikroskop
ASME	: American Society Of Mechanical Engineers
TW	: Thermit Welding (Termit Kaynağı)
HI-HIV	: Sade Karbonlu Çelik çeşidi
FSW	: Friction Stir Welding (Sürtünme Karıştırma Kaynağı)
HSP	: Hegzaonal Sıkı Paket
HMK	: Hacim Merkezli Kübik
ELI	: Elimination (Eliminasyon)
GMAW	: Gas Metal Arc Welding (Gaz Metal Ark Kaynağı)
GTAW	: Gas Tungsten Arc Welding (Gaz Tungsten Ark Kaynağı)
PAW	: Plasma Arc Welding (Plazma Ark Kaynağı)
LBW	: Laser Beam Welding (Lazer Işın Kaynağı)
EBW	: Electron Beam Welding (Elektron Işın Kaynağı)
RSW	: Resistance Spot Welding (Nokta Direnç Kaynağı)
NSS	: Notr Salt Spey (Nötr Tuz Püskürtme)
EN	: Europa Norm (Avrupa Normu)
EDS	: Energy Dispersive Spectrometry

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Günümüz gemi veya offshore imalat endüstrisinde tasarımcılar, uygun bütçe ile deniz korozyonuna karşı koruma ve toplam ağırlığı azaltmayı sağlayacak malzeme seçim problemi ile karşı karşıya kalmaktadır [1]. Modern endüstrinin gelişmesiyle, bu uygulama gereksinimlerini karşılayamayan tek metalik malzeme yerine iki metalik bileşenin ilgili avantajları ile (tek metalik malzemenin sağlayamayacağı) bimetalik kaplı plaka istenilen performansı sağlar [2]. Yapı boyunca spesifik özellikler gereken yerlerde uygun özellikteki çeşitli farklı metalik malzemeler seçilir [3], bunlar çok katmanlı (multilayer) malzemelerdir örneğin bimetalik malzemeler [4].

Bimetalik plakalar günümüzde iyi korozyon dayanımları ve mekanik özelliklerinden dolayı güç santralleri tuz arıtma tesisleri gemi konstrüksiyonu otomobil endüstrisi uzay araçları endüstrisi [5], kimyasal, petro kimyasal ve nükleer endüstrisinde kullanılır [6-8].

Titanyum hafifliği, yüksek dayanımı, mükemmel korozyon direnci ve yüksek biyouyumluluğundan dolayı geniş uygulama alanlarında kullanılır ve kaplama malzemesi olarak en önemli demir dışı metallere biridir [9,10]. Basınçlı kap, tank, boru, autoclave ve ısı değiştirici gibi birçok üretim endüstrisinde konstrüksiyon elemanı olarak seçilir. Titanyum kaplı çelik diğer birçok malzemeye göre daha düşük maliyette daha dayanıklı bir alternatif sunmaktadır [11,12]. Patlamalı kaynak yöntemi ile yüksek kaliteli çelik-titanyum bimetalik kompozit malzeme üretilir [13,14]. Patlamalı kaynak belirgin bir kristalleşme veya faz dönüşümü olmadan iki metal arasında dalgalı bir metalurjik birleştirme ara yüzeyi oluşturabilir [15].

Patlamalı kaynak yöntemi rafineri ve kimyasal ekipmanların yanı sıra gemi yapı endüstrisinin de dahil olmak üzere bir çok üretim endüstrisi uygulamalarında kullanılmaktadır. Gemi yapımı marina bimetalik birleştirmelerinde patlamalı kaynak yöntemi kullanılan en eski yöntemlerinden biridir [1,3].

Önceki araştırmalarda [16-20] çelik titanyum birleştirmeleri patlamalı kaynak yöntemi kullanılarak başarılı bir şekilde birleştirilmiştir. Fakat önceki çalışmalarda patlamalı kaynak yöntemi ile üretilmiş gemi çeliği-titanyum bimetalik malzemesine ait bir çalışma bulunmamaktadır. Bu çalışmanın amacı gemi yapımı ve offshore uygulamaları için gemi çeliği-titanyum levhalardan bimetalik kompozit levha üretmek ve üretilen gemi çeliği titanyum kompozitlerin patlamalı kaynak kabiliyetini incelemektir. Üretilen bimetalik malzemelerin mikroyapı, mekanik ve korozyon özellikleri incelenmiştir.

BÖLÜM 2

GEMİ İMALAT SANAYİ

2.1. GEMİ İMALAT SANAYİNİN ÖNEMİ

Gemi, öngörülen bir görevin yerine getirilmesi için imal edilmiş hareketli bir su üstü veya su altı aracıdır. Dünya ticaret hacminin yaklaşık olarak % 95'inin deniz yolu taşımacılığıyla yapılıyor olması, teknik ve ekonomik yönden ömürlü yapılar olan gemilerin önemini açıkça ortaya koymaktadır.

Denizcilik sektörü birim taşıma maliyeti olarak alternatiflerine (kara yolu, demir yolu ve hava yolu taşımacılığı) nazaran ucuz olması, mal zaiyatının daha az olması, miktar ve ebat olarak bir defada daha çok yük taşınması vb. sebeplerle ülkeler arası ticarete en çok tercih edilen yoldur. Denizcilik sektörü ticari taşımacılık açısından değerlendirildiğinde en önemli ve stratejik taşımacılığa sahiptir. Ekonomik getirisinin oldukça yüksek olduğu gemi imalat sektöründe maliyetlerin azalmasına katkı sağlayan çalışmalar büyük önem arz etmektedir [21].

2.2. GEMİ İMALATINDA KULLANILAN MALZEMELER

Gemi imalat sanayi, çelik sanayi, makine imalat sanayi, elektrik-elektronik sanayi, boya sanayi ve lastik-plastik sanayi gibi pek çok sanayi kollarınca da beslenen bir sanayi dalı olması münasebetiyle çok yönlü bir alandır. Bir gemi, yüzen bir tesis veya fabrika olarak düşünülebilir. Dolayısıyla, gemi imalatında kullanılan malzemeler akla gelebilen malzemelerin tümünü kapsayabilir. Prensip olarak ticaret gemilerinin ana malzemesi çeliktir. Konstrüksiyon ağırlığının önem kazandığı gemilerde alüminyum veya elyaf takviyeli plastik kullanılır. Tarihsel olarak ilk gemiler ahşaptan yapılmış olup, bugün de gezinti teknelerinin önemli bir bölümü

kısmen veya tamamen ahşaptan yapılmaktadır. Ayrıca yüzen havuzların dipkısımları, bazı dubalar ve dibe oturan açık deniz petrol platformlarının konstrüksiyonlarında takviyeli beton kullanılmış ve kullanılmaya devam etmektedir. Ahşap, çelik, cam takviyeli plastik, betonarme gibi değişik malzemelerin kullanımı teknik olarak mümkündür. Gemilerin yapıldığı ve tamir edildiği tersanelerde başlıca şu malzemeler kullanılır; metaller (ağırlıklı olarak çelikler, paslanmaz çelik, alüminyum alaşımı ve diğer malzemeler), ahşap ve suni maddeler ve yardımcı malzemeler (Betonarme vb.) [22].

2.2.1. Gemi İmalatında Kullanılan Çelik Malzemeler

Gemi imalatında genelde kullanılan çelik saclar, dinamik yükler altında rahatça çalışabilecek ve kaynak kabiliyeti yüksek olan %0,15 ila %0,23 karbon içeren ve mangan alaşımı açısından zengin olan “yumuşak çelik (düşük karbonlu)” malzemedir. Bu tür malzemedeki kaynak kabiliyetine olumsuz yönde etki ettiği için fosfor ve kükürt minimum seviyede tutulur (%0,05’den az). Oluşan sülfür haddeleme işlemi sırasında çatlamaya sebep verebilir. Soğuk, sıcak şekillendirmeye ve kaynaklı birleştirmeye uygun olan bu malzemenin işleme sıcaklıklarında mekanik özelliklerinde önemli bir değişme gözlenmez. Ancak çok düşük sıcaklıklarda darbe dayanımını kaybeder, kırılma kazanır ve gevrek kırılma oluşabilir. Bir çeliğin gemi imalatında kullanılabilmesi için gemiyi belgeleyecek klas kurumunca denetlenmiş, test edilmiş ve soğuk damgalanmış olması gerekmektedir. 1959 yılından sonra dünyada önde gelen gemi klas kuruluşları tarafından gemi imalatında kullanılan saclar standartlaştırılmıştır. Günümüzde, gemi imal sektöründe üç farklı çelik türü kullanılmaktadır; karbon çelikleri, yüksek mukavemetli ve ekstra yüksek mukavemetli düşük alaşımli çelikler [23].

Karbon çelikleri, normal mukavemetli (akma sınırı 235 N/mm² olan) 5 farklı kalitede çeliklerdir. Gemi imalatında kullanılan bu çelikler Grade A, B, C, D ve E çelikleri olarak sınıflandırılmış olup ve Lloyd’s Register denetimi doğrultusunda kullanılmaktadır. Gemi imalatında genelde kullanılan çelik; fiyat, özellik ve bulunabilirlik yönünden uygun olan “yumuşak çelik” malzemedir. Grade A çeliği yumuşak çeliktir ve gemi imalatında yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Grade B

çeliği yumuşak çelik sınıfına girmektedir ve Grade A çeliğinden daha iyi kalitededir. Gemilerde kritik bölgelerde kullanılan Grade B sacları daha kalın levhalar halinde üretilmektedir. Grade C çelik sınıflandırılması Amerikan bürosu tarafından kullanılmaktadır. Grade C, D ve E kalite saclar ise darbe dayanımı daha iyi olan çeliklerdir [22].

Normal mukavemetli yumuşak çeliklerin yanı sıra gerilmelerin yüksek olduğu büyük tanker ve dökme yük gemileriyle ağırlığın önemli olduğu savaş gemileri, ro-ro ferri (Ro Ro Ferry) ve yolcu gemileri gibi konstrüksiyonlarda yüksek mukavemetli az alaşımlı (HSLA) gemi imalat çeliği kullanılır. Yüksek mukavemetli gemi imalat çelikleri üç ayrı mukavemet değerinde 32 (Akma sınırı 315 N/mm² olan), 36 (akma sınırı 355 N/mm² olan) ve 40 (akma sınırı 390 N/mm² olan) olmak üzere sınıflandırılır ve tokluklarına göre AH, DH, EH ve FH olarak adlandırılır. Bu çelikler yüksek dayanım, şekillendirilebilirlik, kaynaklanabilirlik, tokluk vb. özelliklerinin iyileştirilmesi için geliştirilmiştir. Kimyasal bileşimlerinde bazı değişiklikler yapılarak ve mikroalaşımlama (Ti, Nb, V gibi) teknikleri ile, ısıl veya termomekanik işlemlerle malzeme mikroyapısı ve dağılımı kontrol edilmiş “Yüksek Mukavemetli Düşük Alaşımlı Çelikler, YMDA” (High Strength Low Alloy, HSLA) çeliklerdir [21].

Benzer şekilde düşük sıcaklıklarda kullanılacak olan, örneğin soğutularak sıvılaştırılmış LPG ve LNG taşıyan gemilerin tanklarında soğuk ortamda kırılma eğilimi olmayan; korozyon etkisi yüksek maddeler taşıyan tankerlerin tanklarında ise ekstra yüksek mukavemetli, az alaşımlı korozyona dayanıklı çelik saclar kullanılır [23,24].

Ülkemizdeki gemi imalatında kullanılan malzemeleri genellikle Erdemir T.A.Ş. üretmektedir. Gemi imalatında kullanılan ve Erdemir T.A.Ş. tarafından üretilen çelik sac türleri Çizelge 2.1’ de verilmiştir [25].

Çizelge 2.1. Gemi imalat çelikleri.

Erdemir Kalite No	Uluslararası Std.	Kalite	Ürün Grubu
Grade A			
3701	ABS-P2-2011	Gr. A	Sıcak Haddelenmiş
Grade A (Yüksek Dayanımlı Gemi İmalat Çelikleri)			
3732	ABS-P2-2011	AH 32	Sıcak Haddelenmiş
3736	ABS-P2-2011	AH 36	Sıcak Haddelenmiş
3741	ASTM A36-08 ABS2-P2-11	A36-Gr.A	
Grade B			
3702	ABS-P2-2011	Gr. B	Sıcak Haddelenmiş
Grade C			
-	-	-	-
Grade D			
6704	ABS-P2-2011	Gr. D	Sıcak Haddelenmiş
Grade D (Yüksek Dayanımlı Gemi İmalat Çelikleri)			
4732	ABS-P2-2011	DH 32	Sıcak Haddelenmiş
4736	ABS-P2-2011	DH 36	Sıcak Haddelenmiş
Grade E			
6705	ABS-P2-2011	Gr. E	Sıcak Haddelenmiş
Grade E (Yüksek Dayanımlı Gemi İmalat Çelikleri)			
5732	ABS-P22011	EH 32	Sıcak Haddelenmiş
5736	ABS-P2-2011	EH 36	Sıcak Haddelenmiş
Grade F			
-	-	-	-
Grade F (Yüksek Dayanımlı Gemi İmalat Çelikleri)			
6732	ABS-P2-2011	FH 32	Sıcak Haddelenmiş
6736	ABS-P2-2011	FH 36	Sıcak Haddelenmiş

2.2.1.1. Normal Mukavemetli Gemi İmalat Çeliği

Normal mukavemetli gemi imalat çeliği gemi imalatında en sık kullanılan sacdır. Yüksek mukavemet istenmeyen bölgelerde kullanılan bu saclar, gemilerde dış bordada, üst yapılarda, ambar içlerinde ve denizde seyir etmeyecek yani dalga kuvvetine maruz kalmayacak nehir tipi gemilerde en sık kullanım yerleridir [26].

Normal mukavemetli gemi imalat çeliği karbon değeri yaklaşık %0,20 civarındadır ve Mangan değeri %0,5 ila 1 arasındadır. Normal mukavemetli sacların değişen kalitelerine göre kimyasal bileşimleri Çizelge 2.2’de verilmiştir. Normal mukavemetli gemi imalat çeliklerinde bulunan bazı alaşım elementlerinin görevleri şunlardır; Mn ve Si, dayanımı ve sertliği artırır. Al’un, tane inceltici etkisi vardır. Cu, α - γ geçiş sıcaklığını düşürür. Cr, aşınma ve korozyon direncini artırır. Ni, düşük sıcaklıklarda tokluğu artırır. Mo ise; yüksek sıcaklıklarda dayanımı artırır [27,28].

Çizelge 2.2. Normal mukavemetli gemi imalat çeliklerinin genel kimyasal bileşimleri.

Kalite	A	B	D	E
Deoksidasyon Yöntemi	t≤50 mm için sakinleştirilmemiş çelik hariç diğer yöntemler t>50 mm için tamamen sakinleştirilmiş	t≤50 mm için sakinleştirilmemiş çelik hariç diğer yöntemler t>50 mm için tamamen sakinleştirilmiş	t≤25 mm için tamamen sakinleştirilmiş t≤25 mm için tamamen sakinleştirilmiş ve taneleri inceltilmiş	Tamamen sakinleştirilmiş ve taneleri inceltilmiş
Kimyasal Bileşim (%) (eriyik örnekleri) (3)	(Karbon +1/6 Mangan) % 0.40' ı aşmamalıdır			
C _{max}	0.21 (1)	0.21	0.21	0.18
Mn _{min}	2.5xC	0.80	0.60	0.70
Si _{max}	0.50	0.35	0.35	0.25
P _{max}	0.035	0.035	0.035	0.035
S _{max}	0.035	0.035	0.035	0.035
Al _{(asitite özülebilir)min}	-	-	0.015 (1) (2)	0.15 (2)
(1) 25 mm kalınlığım üstündeki D kalite çelik için (2) Kalite E ve kalınlığı 25 mm üzerinde Kalite D için asitle çözülebilir kısmı yanma alüminyumun toplam miktarı belirlenebilir. Bu durumda alüminyum toplam miktarı %0.020' den az olmamalıdır. (3) Eriyikte, aşağıdaki almanlar için verilen üst sınır değerleri aşılamaz. Cu:% 0.30; Cr:% 0.20; Ni:% 0.40; Mo:% 0.08				

Normal mukavemetli gemi imalat çeliklerin en üst anma akma sınırı değeri (σ_a) en az 235 N/mm² ve çekme mukavemeti (σ_{ϕ}) ise, 400-520 N/mm² değerleri arasındadır. Çentik darbe enerjileri sırasıyla +20 °C, 0 °C, -20 °C ve -40 °C' deki özelliklerine göre normal gemi imalat çeliği sağlamlık özellikleri birbirinden farklı olan A, B, D, E kalitelerine göre gruplandırılır. Çizelge 2.3' de bu çeliklerin mekanik özellikleri verilmiştir [23,29].

Çizelge 2.3. Normal mukavemetli gemi imalat çeliklerinin genel mekanik özellikleri.

Kalite	Akma Dayanımı (N/mm ²) min.	Çekme Dayanımı (N/mm ²) min.	Kopma Uzaması (%) min.	Çentik Darbe Testleri						
				Test Sıcak. (°C)	Darbe Enerjisi (J)					
					t≤50 mm		50<t≤70 mm		70<t≤100 mm	
		B	E	B	E	B	E			
A	235	400-520	22 (1)	+20	-	-	34	24	41	27
B				0	27	20	34	24	41	27
D				-20	27	20	34	24	41	27
E				-40	27	20	34	24	41	27
t=mamul kalınlığı (1) Genişliği 25 mm ölçü uzunluğu 200 mm ve kalınlığı mamul kalınlığında olan düz çekme test parçalarında kopma uzaması, aşağıdaki minimum değerlere erişmelidir. B: Boyuna E: Enine										
Kalınlık (mm)		≤5	>5	>10	>15	>20	>25	>30	>40	
Kopma Uzaması (%)		14	16	17	18	19	20	21	22	

2.2.1.2. Yüksek Mukavemetli Gemi İmalat Çeliği

Yüksek mukavemetli az alaşımlı (HSLA) çeliklerin akma sınırının yüksekliği, daha ince cidar kalınlıklarının kullanılabilmesi ile, hem gemi ağırlıklarını azaltır, hem de yüksek gerilmeye maruz alanlarda kalın plakalar kullanımını engeller. Dolayısıyla kaynak zamanından tasarruf edilir. Ayrıca, yüksek korozyon direnci istenilen bölgeler için de çok sık kullanılır [30].

Yüksek mukavemetli gemi imalat çelikleri, çekme mukavemetinin, sertliğin ve korozyon direnci artması için Mn ve Cu alaşımı açısından zengindir. Buna bağlı olarak akma ve çekme dayanımları normal gemi imalat çeliğinden yüksektir. Normal mukavemetli gemi imalat çeliğinden farklı olarak eklenen Nb, V, Ti ve N alaşım elementlerinin dayanımı, sertliği, korozyon direncini artırıcı ve tane büyümesini engelleyici özellikleri vardır [28]. Çizelge 2.4'te yüksek mukavemetli gemi imalat çeliklerinin genel kimyasal bileşimleri, Çizelge 2.5'te ise mekanik özellikleri verilmiştir [23].

Çizelge 2.4. Yüksek mukavemetli gemi imalat çeliklerinin genel kimyasal bileşimleri.

Kalite	AH32,DH32,EH32 AH36,DH36,EH36 AH40,DH40,EH40	FH32 FH36 FH40
Deoksidasyon Yöntemi	Tamamen Sakinleştirilmiş ve taneleri inceltilmiş	
Kimyasal Bileşim (%) (Pota analizi)		
C _{max}	0.18	0.16
Mn	0.90-1.60	0.90-1.60
Si _{max}	0.50	0.50
P _{max}	0.035	0.025
S _{max}	0.035	0.025
Al _{(asitle çözünebilir)min}	0.015	0.015
Nb	0.02-0.05	0.02-0.05
V	0.05-0.20	0.05-0.10
Ti _{max}	0.02	0.02
Cu _{max}	0.30	0.30
Cr _{max}	0.20	0.20
Ni _{max}	0.40	0.80
Mo _{max}	0.08	0.08
N _{max}	-	0.009 (0.012 Al uygulanırsa)

Çizelge 2.5. Yüksek mukavemetli gemi imalat çeliklerinin genel mekanik özellikleri.

Kalite	Akma Dayanımı (N/mm ²) min.	Çekme Dayanımı (N/mm ²) min.	Kopma Uzaması (%) min.	Çentik Darbe Testleri						
				Test Sıcak. (°C)	Darbe Enerji (J)					
					t≤50 mm		50<t≤70 mm		70<t≤100 mm	
B	E	B	E	B	E					
AH32 DH32 EH32 FH32	315	440-570 (2)	22 (1)	0	31	22	38	26	46	31
				-20	31	22	38	26	46	31
				-40	31	22	38	26	46	31
				-60	31	22	Kullanılamaz			
AH36 DH36 EH36 FH36	355	490-630 (2)	21 (1)	0	34	24	41	27	50	34
				-20	34	24	41	27	50	34
				-40	34	24	41	27	50	34
				-60	34	24	Kullanılamaz			
AH40 DH40 EH40 FH40	390	510-660 (2)	20 (1)	0	41	27	Kullanılamaz			
				-20	41	27				
				-40	41	27				
				-60	41	27				

t=mamul kalınlığı
(1) Genişliği 25 mm ölçü uzunluğu 200 mm ve kalınlığı mamul kalında olan düz çekme test parçalarında kopma uzaması, aşağıdaki minimum değerlere erişmelidir.
B: Boyuna
E: Enine

Kalınlık (mm)		≤5	>5 ≤10	>10 ≤15	>15 ≤20	>20 ≤25	>25 ≤30	>30 ≤40	>40 ≤50
Kopma Uzaması (%)	AH32,DH32,EH32,FH32	14	16	17	18	19	20	21	22
	AH36,DH36,EH36,FH36	13	15	16	17	18	19	20	21
	AH40,DH40,EH40,FH40	12	14	15	16	17	18	19	20

(2)Temo-mekanik haddelenmiş çeliklerde çekme mukavemetinin alt sınırı 30 N/mm² den fazla aşılmamalıdır.

2.2.1.3. Düşük Sıcaklıklarda Kullanılan Gemi İmalat Çeliği

Özellikle sıvılaştırılmış gaz taşınması için amaçlanan tanker gemilerinde özel nitelikli saclar kullanılır. Bu tür çelikler servis sıcaklıklarına göre 4 gruba ayrılır.

Servis sıcaklığı en az 0 °C'de çalışacak çelikler, normalize edilmiş veya su verilmiş ve temperlenmiş, üst akma sınırı 410 N/mm²'yi aşmayan, belirtilen sıcaklıkta darbe dayanımları en az 27 J olan tamamen sakinleştirilmiş C-Mn saclardır.

Servis sıcaklığı 0 °C ve -55 °C arası çalışacak çelikler, genellikle tamamen sakinleştirilmiş normalize edilmiş, ince taneli C-Mn saclardır. Çizelge 2.6'da C-Mn çeliğinin kimyasal bileşimi, Çizelge 2.7'de ise mekanik özellikleri verilmiştir [23].

Çizelge 2.6. 0 °C ve -55 °C arası sıcaklıklarda çalışacak C-Mn çeliğinin kimyasal bileşimi (ağırlıkça %).

C	Mn	Si	S	P	Ni	Cr	Mo	Cu	Nb	V
0.16 max	0.70-1.60	0.10-0.50	0.035 max	0.035 max	0.80 max	0.25 max	0.08 max	0.35 max	0.05 max	0.10 max

Çizelge 2.7. 0 °C ve -55 °C arası sıcaklıklarda çalışacak C-Mn çeliğinin mekanik özellikleri.

Servis Sıcaklığı (°C)	0	-55
Çekme Dayanımı (N/mm ²)	400-490	400-490
Akma Sınırı (min.) (N/mm ²)	235	355
Uzama (%)	21-24	19-22
Darbe Dayanımı (ort.) (J)	27	27

Servis sıcaklığı -55 °C ve -196 °C arası çalışacak çelikler, genellikle ince taneli ferritik Ni alaşımlı çeliklerdir. Fakat, östenitik paslanmaz çelik veya Al alaşımları da kullanılabilir. Ni alaşımı düşük sıcaklıklarda tokluğu artırır. Isıl işlem sıcaklıklarını artırır ve çeliğin kritik sıcaklıklarını düşürür [31]. Bu servis sıcaklığında çalışacak çelikler çekme ve çentik darbe dayanımları her sıcaklık için test edilmelidir. Çizelge 2.8’de, servis sıcaklığına göre kullanılması gereken çelikler ve çentik darbe deneyinin hangi sıcaklıkta yapılması gerektiği verilmiştir [32].

Çizelge 2.8. Servis sıcaklığına göre çentik darbe deney sıcaklıkları, çelik özellikleri ve Ni miktarları.

Minimum Servis Sıcaklığı (°C)	Kimyasal Bileşimi ve Isıl İşlem	Darbe Deneyi Sıcaklığı (°C)
-60	% 1,5 Nikel çelik-normalize edilmiş	-65
-65	% 2,25 Nikel çelik-normalize edilmiş veya normalize edilmiş ve temperlenmiş	-70
-90	% 3,5 Nikel çelik-normalize edilmiş veya normalize edilmiş ve temperlenmiş	-95
-105	% 5 Nikel çelik-normalize edilmiş veya normalize edilmiş ve temperlenmiş	-110
-165	% 9 Nikel çelik-iki kere normalize edilmiş veya temperlenmiş veya su verilmiş ve temperlenmiş	-196
-165	Östenitik çelik 304, 304L, 316, 316L, 321 ve 347 gibi çözündürme işlenmiş	-196
-165	Alüminyum alaşımları; tavlanmış 5083 gibi	Gerek yok
-165	Isıl işlenmiş Fe-Ni alaşımlı östenitik (% 36 Nikel) çelik	Gerek yok

Servis sıcaklığı -196 °C altında çalışacak çelikler, düşük karbonlu (%0.10 den az) östenitik paslanmaz çelikler ve alüminyum alaşımlarıdır. Kimyasal bileşim ve mekanik özellikleri kullanılacak malzemeye göre değişmektedir [23].

2.3. GEMİ İMALATINDA KULLANILAN KAYNAK YÖNTEMLERİ

Gemi sanayinde metalik parçaların birleştirilmesinde en çok kullanılan teknik, kaynak yöntemleridir. Hemen hemen her türlü kaynak uygulamasını gemi imalatında görmek mümkündür. Bu kaynak teknikleri içerisinde geleneksel elektrik ark kaynağı, gazaltı kaynağı ve tozaltı kaynağı ön plana çıkmaktadır. Gemi sanayinde kullanılan standart çelikler mevcut olup, bu çelikler daha çok geleneksel kaynak teknikleri kullanılarak birleştirilmektedir [30]. Gemi imalatında en çok kaynak yapımı için zaman harcadığından, bu konuda yapılacak yeni bir buluş yada geliştirilecek yeni bir yöntemle gemi imalat sürecini minimuma indirmek, zamandan ve maliyetten tasarruf etmek olacaktır. Son yıllarda yukarıda adı geçen üç yöntemden başka termit kaynağı (TW) ve sürtünme karıştırma kaynağı (FSW) gibi birçok kaynak yöntemi gemi imalat sanayisinde kullanılmaya başlanmıştır [23].

Elektrik ark kaynak makineleri çanta şeklinde portatif olarak taşınabilir olduğundan gemi sanayinde uygun olan her bölgede kullanılabilir [21]. Tozaltı kaynak yöntemi düz levha blokların (güvertelerin, perdelerin, dış kaplamala saclarının) kaynağında ve düz yatay pozisyonlarındaki köşe kaynaklarının yapılmasında geniş ölçüde kullanılır. Tersane sektöründe boya yüzey hazırlığı açısından kaynak dikişlerinin dış yapısı (görüntüsü), içyapıya (nüfuziyet) göre daha fazla önem arz etmektedir. Tozaltı kaynağı bu noktada en optimum sonucu vermektedir. Tek tel kullanımından 6 tel kullanımına kadar kurulu tozaltı sistemleri bulunmaktadır. Üretim hatlarında kalın malzemelerin kaynaklarında genellikle tandemden (ikili tel), ve üçlü tel kullanılan makineler bulunmaktadır. Uygulamada her türlü panel saclarında, enine-boyuna ondülelerde ve seramik-bakır altlıkla tek taraflı kaynak yapma olanağı sağlar [29].

TIG kaynağı; tersanelerde uygulama alanı olarak genellikle karbon, paslanmaz çelikler (östenitik ve dubleks), bakır ve alüminyum boruların kaynaklarında

kullanılmaktadır. TIG kaynağı kullanılarak imal edilen gemilerde boyama işlemi öncesi yapılan zımparalama işlemi sonrası ortaya çıkan kaynağın içindeki hatalarının (gözenek, cüruf sıkışmaları) ve sac yüzeyindeki haddeleme hatalarının tamirlerinde de kullanılabilirler. Her çeşit alüminyum konstrüksiyonlar; mutfak takımları, boru tesisatları, tanklar v.s. için kullanılır.

Saplama kaynağı, saplama olarak üretilen malzemelerde, izolasyon çivileri, blok montajında kullanılan alüminyum çekirmeler için saplamalar, elektrik kablo tutucusu v.b. çeşitleri bulunur. Çok hızlı kaynak yapması, kullanımının operatör için kolay olması ve saplamaların dış kaplamaya verdiği zarar klasik yöntemlere göre daha azdır.

MIG-MAG kaynağı, hemen hemen bütün ergitme kaynak yöntemlerinin uygulama alanı bulduğu gemi imalat endüstrisinde de önemli bir yere sahiptir. Zira örtülü elektrota nazaran daha yüksek bir ergitme gücüne, diğer tel sürme tertibatlı yöntemlere nazaran da her pozisyonda uygulanabilme özelliğine sahiptir. Orta büyüklükteki bir gemide dahi kilometrelerce kaynak dikişinin varlığı bu iki özelliğin, bu endüstri dalında ne derece önemli olduğunu ortaya koymaktadır. Özellikle demir dışı metal ve alaşımlarından imal edilmiş gemiler için MIG kaynağı yöntemi rakipsizdir. Son yıllarda geliştirilmiş olan taşınabilir tel sürme tertibatları sayesinde kaynakçı gemi içerisinde daha kolay hareket ederek, en zor pozisyonlardaki kaynakları dahi MIG-MAG yöntemi ile yapabilmektedir. Özellikle tersanelerde gemi gövdesinin yan dikmelerinin saclara dik pozisyonda kaynağında 1,1 ve 1,2 mm'lik tel kullanılarak MAG yöntemi ile örtülü elektrota nazaran üç kere daha hızlı kaynak yapabilme olanağı doğmuştur. Gemi imalatında kaynakta en önemli sorunlardan birisi olan çarpılma ve kendini çekme tehlikesi, minimum ısı girdisi ile maksimum kaynak metali yığılabildiğinden, bu yöntem sayesinde asgariye indirilmiştir [33].

Özlu tel elektrotla ark kaynağı, herşeyden önce bir ark kaynak yöntemidir ve sürekli bir ilave metal elektrot ile kaynak banyosu arasında ark oluşturulması esasına dayanır. Yöntem, ayrıca sevk edilen bir koruyucu gaz örtüsü altında (bazı uygulamalarda gaz kullanılmaz) ve tüp şeklindeki elektrotun içindeki tozdan (öz) oluşan bir örtü korumasıyla birlikte uygulanır [31]. Bu kaynak yönteminin

avantajları arasında; zor kaynak pozisyonu olan tavan kaynaklarının kullanımı önemli ölçüde azaltması, tam nüfuziyet (full penetration) yapılması gereken kaynaklarda karbon elektrot kullanımını önlemesi, kaynakçılar açısından uygulama kolaylığı sağlaması, yüksek dolgu verimine sahip olması önemli avantajlardır. Tersanelerdeki kullanım alanları arasında dış kaplamada, kızak eklerinde (double bottom, güverte, dış kaplama, iç cidar ve profil kaynaklarında), tam nüfuziyet yapılması istenen lamalar, ondüle alt takviyeleri, döşek, baş-kıç pik bloklarında oluşan zor kaynak pozisyonlarında kullanımına imkan tanımıştır [29].



BÖLÜM 3

TİTANYUM VE ALAŞIMLARI

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 [34].

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. Titanyum ve alaşımları uzay araçları, kimyasal endüstri, bazı spor aletleri yapımında, uçak, otomotiv, enerji, sağlık, nükleer güç santrallerinde, denizcilikte ve yiyecek endüstrisinde yaygın kullanım alanı olan malzemelerdir [30]. Titanyum malzemelerinin, yapışkan koruyucu titanyum oksit filmi 535 °C'nin altında ki sıcaklıklarda korozyona karşı mükemmel direnç ve birikinti sağlar. Ancak, yapışkan koruyucu titanyum oksit filmi 535 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda kırılır ve karbon, oksijen, azot ve hidrojen gibi küçük atomlar titanyumu kırılanaştırır [35].

Saf titanyum mükemmel biyolojik uyumluluğu ve uygun mekanik özelliklerinden dolayı medikal alanda geniş bir kullanım alanına sahiptir. Titanyum alaşımlar yüksek korozyon dayanımı özellikleri nedeniyle insan vücudunda implant olarak kullanılan en önemli metallere aittir. 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. Titanyum, yüksek yorulma ömrü, tokluğunun iyi olması, kaynak yapılabilme imkanının olması ve yoğunluğunun düşük olması nedeniyle askeri

alandanda, deniz ile temas eden yapılarında ve kimyasal etkilerin olduğu ortamlarda kullanılan en iyi mühendislik malzemesidir [36]. Titanyum ve alaşımları için mevcut pek çok sınıf ve alaşımların bazıları Çizelge 3.1 'de verilmiştir [37].

Çizelge 3.1. 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 [36]. Alaşım elementleri katı eriyik mukavemetlenmesi sağlar ve allotropik dönüşüm sıcaklığını düşürürler [38]. Alaşım elementleri titanyum-kalay, titanyum-alüminyum, titanyum-mangan ve titanyum-molibden olarak dört gruba ayrılabilir [39]. 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 oluştururlar [38].

3.1. TİTANYUM VE ALAŞIMLARININ SINIFLANDIRILMASI

Titanyum alaşımları yapılarındaki faz varlıklarına göre, α , α + β alaşımları ve β alaşımları olmak üzere başlıca üç gruba ayrılmaktadırlar [37]. 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. $\alpha+\beta$ karışımından oluşan alaşımlar $\alpha+\beta$ alaşımlar olarak sınıflandırılırlar. Son olarak çözüldürme ısıl işleminden soğutmadan sonra oda sıcaklığında β fazının kararlı hale getirildiği titanyum alaşımları β alaşımları olarak sınıflandırılırlar [34].

3.1.1. Ticari Saf Titanyum

Ticari saf titanyum; titanyumun oksijen, azot, hidrojen, karbon ve demir ile birlikteki çok seyreltik alaşımı olarak görölür. Oksijen, azot ve karbon sünekliği azaltırken aynı zamanda malzemeyi kuvvetlendirir. Bu malzemenin mikroyapısı tamamen alfa fazından ibarettir. Saf titanyumun 650-700 °C’de tavlansarak kullanılması çok yaygındır. Böyle bir ısıl işlemden sonra mikroyapı ince es eksenli α taneciklerinden oluşmaktadır. şayet saf titanyum β alanı içinde ısıtılsa (900-950 °C) hızlı bir tane büyümesi meydana gelir ve soğumayla birlikte kaba tırtıllı alfa şekillendirilir [40].

Alaşımlandırılmamış titanyumun kullanım nedeni üstün korozyon direncine sahip olmasıdır. Ticari saflıktaki titanyum nispeten zayıftır ve yüksek sıcaklıklarda dayanımını kaybeder. Fakat çok iyi korozyon direncine sahiptir. Bu sınıftaki alaşımlar çok düşük sıcaklık uygulamaları içinde gereklidir. Uygulamaları; ısı esanjörleri, boru donanımları, reaktörler, pompalar ile kimya ve petrol endüstrileri için valfleri içerir [39]. Ayrıca titanyum rafinerilerde kullanılır; çünkü sülfidler, kloritler ve petrol rafine etmede karşılaşılan pek çok diğer kimyasallara karşı dirençlidirler [34]. Çizelge 3.2’de ticari saflıktaki titanyum alaşımlarının genel özellikleri verilmiştir [35].

Çizelge 3.2. Ticari saflıktaki titanyum alaşımlarının genel özellikleri.

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

3.1.2. 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 [34].

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 [35,41]. 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, tokluk, yüksek dayanım ve düşük süneklik gibi istenen özelliklere sahiptir. Bu alaşımın bir dezavantajı tuz ortamında gerilim korozyonuna karşı hassas olmasıdır [34]. Bazı yakın-alfa alaşımlarının mekanik özellikleri Çizelge 3. 3’de verildiği gibidir.

Çizelge 3.3. Bazı yakın-alfa alaşımlarının mekanik özellikleri.

Oda sıcaklığı						Fazla sıcaklıklar				
Kompozisyon (%)	Şartlar	Çekme Dayanımı (psi)	Akma Dayanımı (psi)	Uzama (%)	Kesit Daral (%)	Deney Sıcaklığı (°F)	Çekme Dayanımı (psi)	Akma Dayanımı (psi)	Uzama (%)	Kesit Daral (%)
8Al-1Mo-1V	Çift tavllanmış	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 soğutulmuş	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	-

3.1.3. α - β Titanyum Alaşımları

α ve β dengeleyicilerin uygun dengesi ile oda sıcaklığında α ve β 'nin bir karışımı üretilir. Tavlama, yüksek süneklik üniform özellikler ve iyi dayanım kombinasyonunu oluşturur [39,42]. 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 es eksenli α taneleri, hızlı soğutma ise iğne şeklinde bir α fazı oluşturur [38].

α - β titanyum alaşımlarına çözündürme ısıl işlemi uygulanabilir, su verilebilir ve dayanımı arttırmak için yaslandırma yapılabilirler. Bu alaşımların mikroyapıları öncelikle kimyasal kompozisyona, işlem geçmişine ve ısıl uygulamalara bağlıdır. Alaşımların mikroyapıları genelde çifttir. Farklı mikroyapısal oluşumlardan meydana gelmektedir. Çizelge 3. 4'de α ve β dengeleyici elementler görülmektedir [37,43].

Çizelge 3.4. α ve β dengeleyici elementler.

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 arttırır
Silisyum	0,05-1	Sürünme dayanımını arttırır

Uygulamada kullanılan titanyum alaşımlarının %70'i α - β alaşımlarından oluşmaktadır. α - β alaşımlarının en yaygın olarak kullanılan türü Ti6Al4V sembolleri ile anılan % 6 alüminyum ve % 4 vanadyum içeren alfa-beta alaşımıdır ve bu alaşım sahip olduğu üstün özellikler sebebi ile yaygın olarak kullanılmaktadır. Ti6Al4V alaşımı mükemmel çekme, yorulma dayanımı ve korozyon direncine sahiptir. Bunların yanı sıra bu alaşımlar işlenebilirlik, fabrikasyon, üretim deneyimi ve ticari olarak elde edilebilirlik gibi özelliklerinden dolayı ekonomik olarak kullanışlı bir hale gelmişlerdir [44]. Bu özelliklerinden dolayı alaşım genellikle uçak sanayi, makine parçaları, petrokimyasal fabrikalar için malzemeler ve tıbbi implant

endüstride kullanılmaktadır. Ayrıca, uçak iskeleti, roketler, jet motorları ve iniş takım dişlileri için parçalar, ısıl işlem görmüş alfa-beta alaşımları için tipik uygulamalardır. 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 birçok döküm hataları sıcak izostatik presleme işlemi ile giderilebilir. Bu malzemenin birleştirilmesi için kaynak teknolojisine ihtiyaç vardır [36].

Ti6Al4V alaşımı kolaylıkla kaynaklanabilir ve islenebilir. Levha, ekstrüzyon, tel ve çubuk şeklinde çok çeşitli fabrika ürünleri bulunur. Bu alaşıma 1138 MPa bir çekme dayanımı için ısıl işlem uygulanabilir ve 482 °C'ye kadar iyi bir metalürjik kırılma eğilimine sahiptir. Bunun dezavantajlarından birisi düşük sertleşebilirliğe sahip olması ve bu nedenle 25,4 mm kadar olan kısmının sertleşebilir olmasıdır [34].

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 çözümleri sertleşme etkisi gösterirken, vanadyum oda sıcaklığında β fazını stabilize ederek yüksek sıcaklıklarda sünekliği iyileştirmesindedir [36].

3.1.4. β Titanyum Alaşımları

Bu alaşımlar önemli miktarda β fazı kararlaştırıcı elementler olan vanadyum ve molibden içerirler. Sertleştirilebilme, dövülebilirlik, soğuk şekil verebilme ve de yüksek yoğunluk gibi özelliklere sahiptirler. Beta alaşımları β dengeleyicilerle zenginleştirilmişlerdir. Bu nedenle hızlı soğuma ile hepsi β 'dan oluşan dengesiz bir faz oluşur. Tavlama şartlarında mikroyapıda sadece β fazı vardır. β matrisi içinde α fazının çökmesi ile sertleştirilebilirler. Asıl dayanım katı eriyik mukavemetlenmesi ile sağlanır. Uygulamaları yüksek dayanımlı bağlama elemanları, kirişleri ve uzay uygulamalarında bağlantıları içerir [41].

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 isleme yatkın olup, iyi islenebilmektedirler [43]. 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 çözündürme ısıl işlemi uygulanmış ve yaşlandırılmış Şartlarda kullanılırlar. Bu alaşımlar 1448 MPa kadar ulasan bütün titanyum alaşımlarının en yüksek dayanımlarına sahiptirler [34]. Bazı β titanyum alaşımlarının mekanik özellikleri izelge 3. 5’de verilmiştir [36].

Çizelge 3.5. Bazı β alaşımlarının mekanik zellikleri.

Oda sıcaklığı					Fazla sıcaklıklar			
Kompozisyon (%)	Şartlar	ekme Dayanımı (psi)	Akma Dayanımı (psi)	Uzama (%)	Deney Sıcaklığı (°F)	ekme Dayanımı (psi)	Akma Dayanım (psi)	Uzama (%)
13V-11Cr-3Al	zndrme + Yaşlandırma	177.000	170.000	8	600	128.000	115.000	19
8 Mo-8V	zndrme + yaşlandırma	185.000	175.000	8	800	160.000	120.000	12
2Fe-1Al	zndrme + yaşlandırma	190.000	180.000	8	600	164.000	142.000	15
3Al-8V-6Cr	zndrme + 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
	çözündürme + yaşlandırma	201.000	191.000	11	600	131.000	123.000	16

BÖLÜM 4

PATLAMALI KAYNAK YÖNTEMİ

4.1. PATLAMALI KAYNAK YÖNTEMİNİN TARİHÇESİ

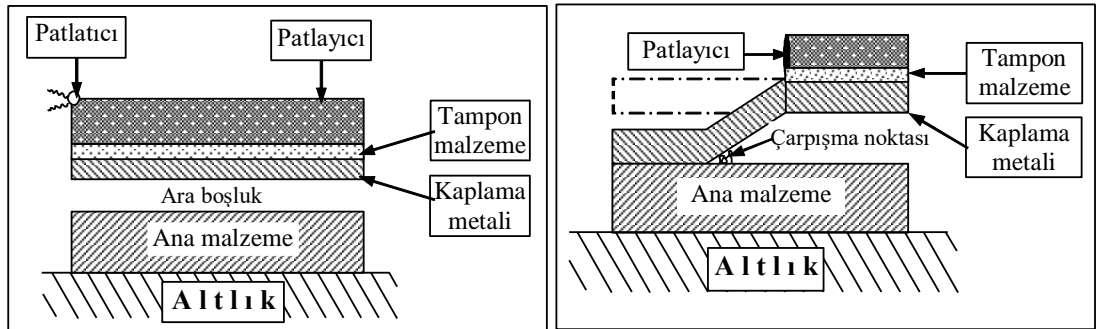
Patlama kaynağı ilk olarak I. Dünya savaşı sıralarında bombalardan kopan küçük parçaların çevresindeki metal yapılara yapışmasıyla dikkat çekmiştir. Patlamalı kaynak yönteminin ticari olarak kullanımıyla ilgili olarak ilk patent başvurusu 1962 yılında Philipchuk ve Bois tarafından olmuştur [45]. Daha sonra, DuPont firması patlamalı kaynak yöntemi ile ilgili çalışmalar yapmış ve 1964 yılında patent almıştır. Patlamalı kaynak yöntemi 1950'lerde metal levhaların kaplanması ve kaynaklanmasında kullanım alanı bulmuştur. Bu yıllarda patlamalı kaynak yöntemi ile çeşitli denemeler 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 [46].

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 [47].

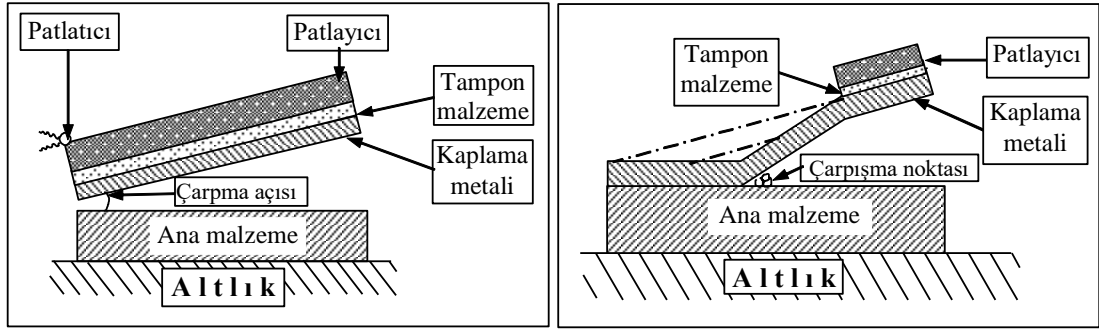
4.2. PATLAMALI KAYNAK YÖNTEMİNİN GENEL ÖZELLİKLERİ

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

Patlamalı kaynak yönteminin 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 patlayıcı yerleştirilmektedir. Şekil 4.1’de patlamalı kaynağın paralel düzlemlerde yapılış şeklini ve Şekil 4.2’de ise eğik düzlemlerde yapılış şeklini şematik olarak göstermektedir [48].

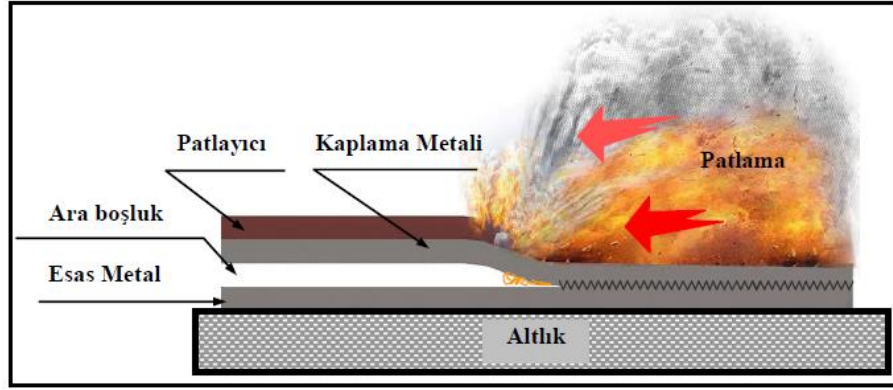


Şekil 4.1. Paralel düzlemde patlamalı kaynak yöntemi şematik görüntüsü



Şekil 4.2. Eğik düzlemde patlamalı kaynak yöntemi şematik görüntüsü.

Patlamalı birleştirme olarak da bilinen patlama kaynağı, iki metal arasında yüksek hızdaki eğimli çarpışma sonucu meydana gelir. Patlama kaynağı; patlayıcı ile elde edilen yüksek basınç yardımıyla iki yada daha fazla metali birleştirmek için kullanılan bir katı hal kaynak yöntemidir. Metal yüzeylerin çarpışması sonucu yeterli bir çarpışma enerjisi meydana geldiğinde, bu yüzeyler oluşan ilk temaslarını birbirleri üzerinde bir akış sergileyerek devam ettirirler ve sonuçta bir katı hal birleşmesi meydana gelir. Kaynak esnasında oluşan temas basıncı oldukça yüksektir ve üst tabakanın kinetik enerjisi dalgalı bir birleştirme arayüzeyi oluşturur. Bu darbe iki yüzeyi birbirine mekanik olarak kilitlet. Burada, plastik deformasyon sonucu soğuk basınç kaynağı oluşur. Bu işlem, dışarıdan herhangi bir ısı verilmediği için soğuk teknik olarak tanımlanmasına rağmen işlemin dinamiğinden dolayı kaynak arayüzeyinde bölgesel yüksek sıcaklıklar oluşabilir. Burada patlayıcının infilakı ile birlikte ısı meydana gelmesine rağmen, metal parçalarda ısı transferi için gerekli zaman yoktur ve metallerde ısı akışı sezilemez. Bu işlemdeki ısı ve akış, esas malzemenin dayanımına eşit veya daha yüksek bir dayanıma sahip arayüzey birleşmesi sağlar [29]. Şekil 4.3'te patlama kaynağı şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.3. Patlamalı kaynak yöntemi şematik görüntüsü.

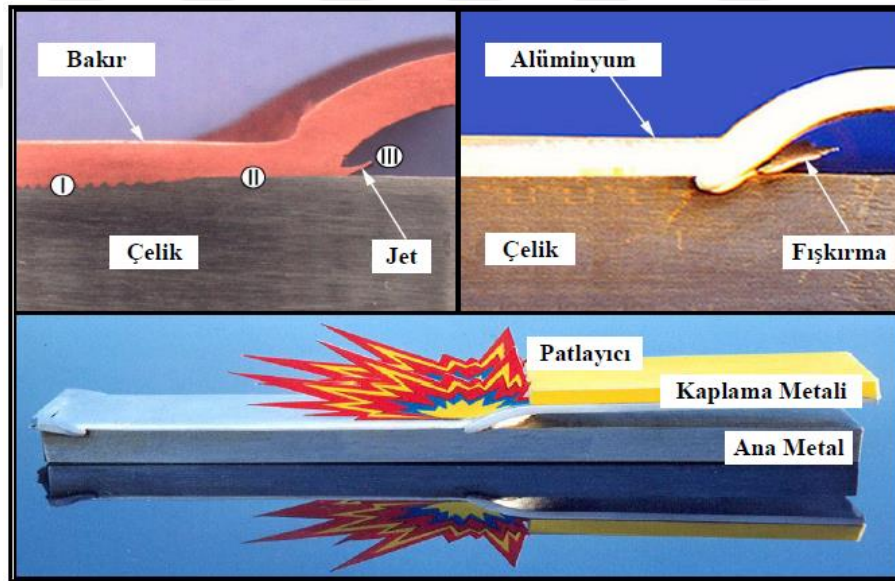
Gerekli yüksek basınç, işlem gören parçalardan patlayıcı madde ile yüklü birinin patlaması ile diğerine karşı 2 ila 25°'lik bir açı altında ve 100 ila 1000 m/s hıza kadar hızlandırılması suretiyle ortaya çıkar. Bu sırada çarpma basıncı 10 ila 100 K bar'a kadar çıkar. Çarpma yüzeyinde metalde bir plastik deformasyon meydana gelir ve karşılıklı yığılma ile dalgalı bir birleştirme arayüzeyi elde edilir. Patlamalı kaynak veya kaplama arayüzeyinin metalürjik bağlanması yerel ergime ve difüzyon işlemi ile gerçekleştirilir. Kaynak işlemi açık havada, vakumda ve diğer atmosfer şartlarında da gerçekleştirilebilir.

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 kırılmalı 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 [46].

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.

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 [29]. Buradaki eğimli çarpışma çok önemlidir. Eğimli çarpışma metal yüzeylerinde bir tabakanın metal jeti şeklinde, çarpışma arayüzeyinden uzaklaşmasına neden olur. Çarpışma esnasında yüzeyden metal jeti şeklinde fıskıran bu tabakanın kalınlığı genellikle 0,05 mm'den daha azdır. Bu metal jeti dışarı atılırken aynı zamanda çarpışan metal yüzeyinin temizliğini de gerçekleştirmektedir. Metal yüzeyinde bulunan oksit, yağ gibi kaynak için zararlı etkiler oluşan jet ile birlikte dışarı atılmaktadır [49]. Şekil 4.4'te patlama anında bakır, çelik ve alüminyum parçalar arasında fıskırma oluşumu görülmektedir [29].



Şekil 4.4. Patlamalı kaynak esnasında parçalar arasında fıskırma oluşumu.

Sonuç olarak temiz metal yüzeyleri, patlayıcı tarafından oluşturulan yüksek basınç altında sıkıştırılır. İki malzemenin atomlarının toplam enerjisi birbirine yaklaştıkça azalır ve bir çekici veya bağlayıcı kuvvet ortaya çıkar, bu yüzden malzemeler arasında atomik boyutta bir birleşme meydana gelir. Atomik boyuttaki bu birleştirme

tüm arayüzey boyunca ilk çarpışma noktasından itibaren ilerler ve malzemeler arasında birleştirme gerçekleşmiş olur [50]. Yüksek basınç ayrıca birleştirme bölgesi alanı içindeki metallerin yerel plastik deformasyona uğramasına da sebep olur. Birleştirme arayüzeyde oluşan bağ metalürjik bir bağ olup, bağ mukavemeti düşük olan malzemenin mukavemetinden daha yüksektir [46].

4.2.1. Patlamalı Kaynak Yöntemi Mekanizması

Patlamalı kaynak yöntemi metalik levhaların yüksek hızda eğimli çarpışmasını sağlayacak patlayıcıların kullanımına bağlıdır. Eğimli bir çarpışmanın sonucu olarak metal yüzeylerinde metalürjik birleştirme sağlayan bu mekanizma tam olarak belirlenememiştir. Bu konu ile ilgili yapılan araştırmaların birçoğu fişkırmaya çarpışması olarak bilinen birleştirme için gerekli temel şartın eğimli çarpışma olduğunu göstermektedir. Çarpışma fişkırması, çok yüksek hızlarda çarpışan levhalar arasından dışarıya çıkmaya zorlanan ve çarpışmanın ucunda şekillenen metalin fişkırması için kontrol edilen levha hızı, basınç, çarpışma açısı ve çarpışma noktası hızının bulunduğu eğimli bir çarpışma olarak tanımlanır [45].

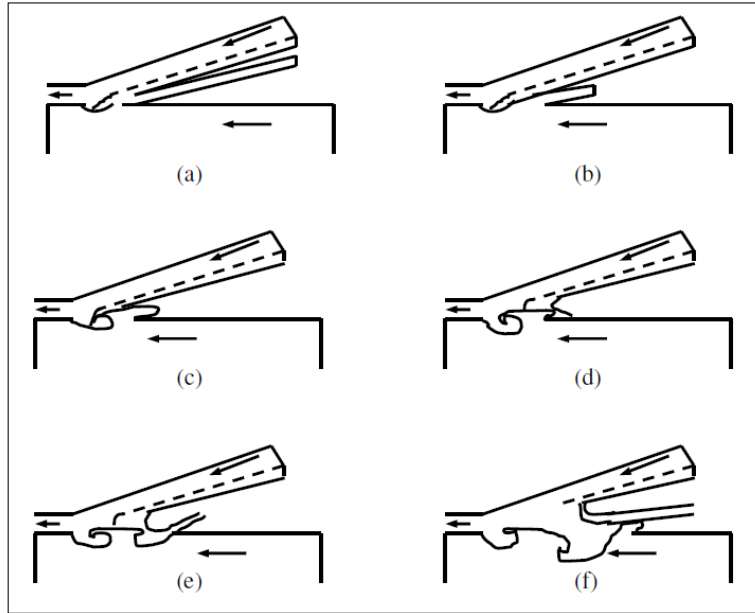
Patlamalı kaynak yönteminde fişkırmaya, yüzey filmlerini parçalayarak ortadan kaldıran bir mekanizmadır. Eğimli çarpışma boyunca fişkırmaya, metal yüzeyinin temizlenmesine sebep olacak şekilde oluşur. Çarpışma noktasında temiz metal yüzeyleri patlamanın etkisi ile oluşan yüksek basınçla yakın temas zorlanır. Patlamalı kaynak yöntemi iki aşama halinde düşünülebilir. Birincisi, fişkırmaya yüzey tabakalarını parçalar ve temizler. İkincisi, yüksek basınç atomlar arası kuvvetlerin birleştirme arayüzeyi oluşturabileceği konum olan yakın temas için metal yüzeyleri zorlar [47].

Patlamalı kaynaktaki dalgalı arayüzey oluşum mekanizması ile ilgili çok sayıda çalışma yapılmıştır. Yüksek deformasyon hızından dolayı katı bir malzemenin sıvı olarak kabul edildiği çeşitli kabuller rapor edilmiştir [46].

Blazynski [51], kaynaklanmış yüzeylerin karakteristiklerini ve özelliklerini anlamak için bir akışkanın davranışını anlamının gerekli olduğunu ileri sürmüştür. Patlamalı

kaynakta da birleşme anında iki metal bir akışkan gibi hareket etmektedir. Böyle bir hareketin sonucunda arayüzeyde meydana gelen dalgalı yapının oluşumu için dört mekanizma öne sürülmüştür. Bunlar; fişkırtma mekanizması, akış kararsızlığı mekanizması, girdap mekanizması ve gerilim dalgası mekanizmasıdır. Ezra [52], patlamalı kaynakta birleştirme için gerekli olan şartın fişkırtma çarpışması biçiminde oluşan eğimli çarpışma olduğunu ileri sürmüştür. Ezra'ya göre patlamalı kaynak mekanizmasının anlaşılabilmesi için fişkırtmanın anlaşılması gerekmektedir.

Birleştirme arayüzeyde meydana gelen dalgalı yapının formasyonunu kontrol eden mekanizmanın detaylı analizi oldukça karmaşık ve zordur. Dalga modelinin gelişimi boyunca olan fiziki bir yaklaşım aşağıda Şekil 4.5'te gösterilen tanıtımdan elde edilebilir. Bu şematik tanıtım adım adım kaynak arayüzeyindeki dalga oluşumunun gelişimini göstermektedir. Bahrani ve arkadaşları [53], tarafından önerilen bu yaklaşım ve mekanizma birçok araştırmacı tarafından doğru olduğuna inanılan ve kabul edilen bir yaklaşımdır.



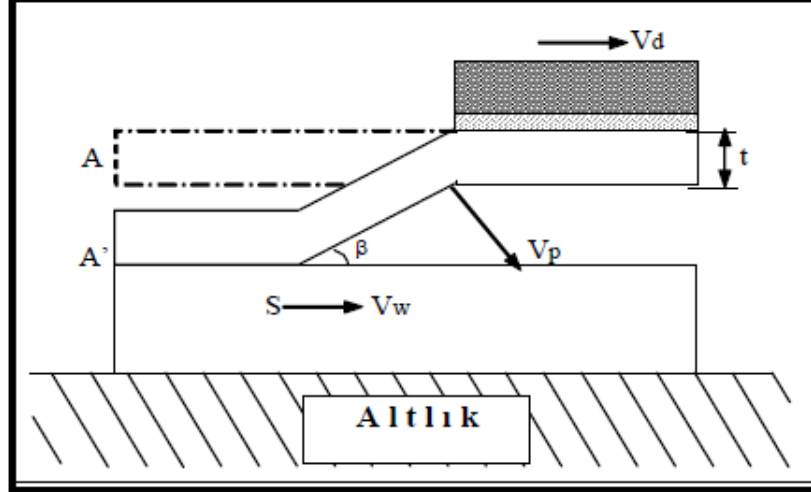
Şekil 4.5. Birleştirme arayüzeyindeki dalga oluşumu şematik görüntüsü.

Şekil 4.5.a, üst levha fişkırtmasının momentumundan kaynaklanan alt levhanın deformasyonunun kombinasyonunu göstermektedir. Üst levha fişkırtmasının

momentumu, ileri fişkırmının oluşturduğu alt levha yüzeyinin kesilmesiyle birlikte ilk noktaya göre alt levhanın öne doğru hızıyla bağlantı kurar. Sonuç olarak çarpma noktasının basında bir tepe oluşur. Bu tepe Şekil 4.5.b'de gösterildiği gibi ileri fişkırmayı, üst levha fişkırmasının yukarısına doğru saptırır ve sonunda Şekil 4.5.c'de görüldüğü gibi ileri fişkırmının önünü tıkar. Bazen üst levha fişkırması dalganın tepesine çarptığında kuyruğun yükselmesini sağlayan tepenin parçasını keser. Hapsolmuş olan ileri fişkırmı tepenin gerisinde bir girdap oluşturur. Burada, tutsak olan fişkırmının kinetik enerjisinin dağılmasıyla muhtemelen yüksek sıcaklıklar oluşur ve bu, bölgesel ergime ve faz değişimiyle sonuçlanabilir. İleri fişkırmının önü tıkanıldığında yığılma noktası Şekil 4.5.d'de gösterildiği gibi dalganın tepesinde baştan sona gezinir ve yığılma noktasıyla birleşen yüksek basınç bir sonraki gövdenin oluşması için tepeyi sıkıştırır ve genişler. Şekil 4.5.e'de görüldüğü gibi tepe, aşağı doğru harekete devam ettiği için yığılma noktası tepenin ileriye doğru meylini azaltır ve sonuç olarak ileri fişkırmı, fişkırmı ile tepenin eğimli kenarı arasındaki eğimin artan açısından dolayı artacaktır ve aynı zamanda ileri fişkırmının hızı azalacaktır. İleri fişkırmı tepenin meyline doğru azaldığı için ikinci bir yığılma noktası bir sonraki girdaba sebep olan gövde altındaki boşluğa girer. Birinci dalga gövdesi altında oluşan girdabın yanında oluşan ileri fişkırmı birinci dalganın uç tarafını süpürür ve Şekil 4.5.f'de gösterildiği gibi bir sonraki tepenin oluşumunu başlatır. Bu mekanizma ikinci ve daha sonraki dalgaların oluşumunu sağlayacak şekilde devam eder.

4.2.2. Patlamalı Kaynak Yöntemi Parametreleri

Patlamalı kaynak yönteminde kaliteli bir birleştirme elde edebilmek için kaynak işlemini kontrol altında tutabilecek parametrelerin belirlenmesi gerekmektedir. Birleştirme işleminde arayüzeyi ve kaynak kalitesini etkileyen bazı önemli kaynak parametreleri; ara boşluk mesafesi (s), eğimli düzenlemelerde başlangıç açısı (paralel düzenlemeler için bu değer $\alpha = 0$ dır) (α), patlayıcı oranı (patlayıcı kütlesini üst levha kütlesine oranı) (R), patlayıcının patlama hızı (V_d), üst levhanın çarpma hızı (V_p), çarpışma açısı (β), kaynak hızı (çarpışma noktası hızı), (V_w) eğik düzlemlerde çarpma açısı α , altlık, fünye ve patlayıcı olarak sıralanabilir [45-47]. Şekil 4.6'da patlamalı kaynak yöntemi parametreleri şematik olarak gösterilmiştir [48].



Şekil 4.6. Patlamalı kaynak yöntemi parametrelerinin şematik görüntüsü.

Yukarıda sıralanan patlamalı kaynak yöntemi parametrelerinin birleştirmeye olan etkileri aşağıda olduğu gibi açıklanabilir.

4.2.2.1. Ara Boşluk Mesafesi

Bu kaynak parametresi paralel düzenlemeler kullanıldığında geçerlidir. Paralel kaynak düzenlemesinde alt ve üst levha arasındaki boşluk, çarpışan levhaların maksimum hıza ulaşmasını sağlayacak şekilde üst levha kalınlığının en az yarısından büyük olmalıdır. Üst levha, patlama basıncı ile oluşan bir şok dalgası ve yine patlama ile oluşan gazın genişmesiyle hızlandırılır. Alt ve üst levha arasındaki boşluk mesafesi yeterince geniş ise üst levha ulaşabileceği maksimum hıza ulaşabilir.

4.2.2.2. Başlangıç Açısı

Paralel geometriler kullanıldığı zaman başlangıç açısının değeri sıfır (0) dır. Patlamalı kaynak yönteminde açılı geometriler kullanıldığı durumlarda bu parametre önem kazanır. Başlangıç açısı kaynak oluşumuna izin verecek değerde olmalıdır. Bu, üst levhanın son hıza ulaşmasına izin verecek kadar iki levha arasında bir boşluk mesafesiyle ve eğimli çarpışmayı sağlayacak bir açıyla alakalıdır. Başlangıç açısı genellikle 5°-25° arası bir değerde olmalıdır.

4.2.2.3. Patlayıcı Oranı

Patlayıcı oranı üst levhanın ağırlığıyla doğrudan alakalıdır. Bu oran üst parçanın belirli bir hıza ve çarpışma açısına ulaşmasına izin verecek değerde olmalıdır. Patlayıcı oranı, birleştirilecek malzemelerin mekanik özelliklerine ve yüzey durumlarına göre de değişiklikler arz etmektedir. Patlayıcı oranı yaklaşık olarak üst parçanın ağırlığının 1-3 katı değerinde olabilmektedir [45]. Patlamalı kaynak yönteminde kaynatılacak/kaplanacak üst levhanın kalınlığının artmasıyla patlayıcı miktarı, dolayısıyla patlama enerjisi arttırılmalıdır. Ancak bu artış artan üst levha kalınlığıyla orantılı olarak lineer bir şekilde değişim göstermez [46].

4.2.2.4. Patlayıcının Patlama Hızı

Patlayıcıların patlama hızı, 125 mm çapında ve 1000 mm boyundaki bir PVC tüp içindeki patlama hızlarıdır. Patlamalı birleştirmeler için genellikle 2500-3500 m/s patlama hızına sahip patlayıcılar kullanılmaktadır. Patlama hızı yüksek patlayıcıların kullanılması durumunda çarpışan levhalarda oluşan yüksek basınç, yansıyan bir gerilme dalgası üretebilmekte ve bu da parçaların tekrar ayrılmasına neden olabilmektedir. Patlama hızı düşük patlayıcıların kullanılmasında ise üst parçanın yeterince hızlanamaması durumu ile karşılaşılabilir. Kullanılan patlayıcıların patlama hızları patlayıcı oranı ile de doğrudan ilgilidir [45,47].

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 metallere bileşiklerin ortaya çıktığı durumlarda basınç kritik bir değeri aşmamalıdır. Böylece malzemenin yerel olarak ergimesi ve gevrek metallere bileşiklerin oluşması engellenebilir [46].

4.2.2.5. Üst Levhanın Çarpma Hızı

Kullanılan patlayıcının patlama hızı ve enerjisiyle ilişkilidir. Çarpma hızının artmasıyla beraber arayüzeyde oluşan dalgaların genliğinde de bir artış görülür. Bu esnada bazı metallerde, oluşan dalgaların uç noktalarında tutsak olan fişkırmadan dolayı ergime görülebilmektedir. Bazı durumlarda tamamen ergimeden kaçınmak için, daha düşük çarpışma hızında düz bir arayüzey oluşturmak tercih edilebilir. Genellikle üst levha çarpma hızlarının 1000 m/s' nin üzerinde olması istenir.

4.2.2.6. Çarpışma Açısı

Metalürjik birleşmenin oluşumuna izin verecek seviyede olmalıdır. Bu açının değeri, kullanılan parçaların yüzey durumlarına da bağlıdır. Bu değer fişkırmamanın gerçekleşebilmesine izin verebilmelidir. Birçok araştırmacı tarafından kabul edilen çarpışma açısının değeri 5°-25° arası bir değerdir [45].

4.2.2.7. Kaynak Hızı

Çarpışma noktası hızı olarak da bilinen kaynak hızı, patlayıcının patlama hızına eşit değerdedir. Dolayısıyla patlayıcının patlama hızının yüksek veya alçak olduğu durumlarda karşılaşılan olaylar, kaynak hızının yüksek veya düşük olduğu durumlarla paralellik göstermektedir. Bunun yanı sıra, kaynak hızı belirli bir değer altına düşerse kaynak arayüzeyi düz olur ve birleştirilmemiş kısımlar meydana gelebilir. Artan kaynak hızıyla beraber tutsak fişkırmamanın (dışarıya çıkamayan fişkıрма) hacmi artar. Bunun nedeni çarpışma noktasının fişkırmamanın önüne geçip büyük bir parçasını hapsolmesidir. Hapsolmuş olan fişkıрма, dalga oluşumunu engelleyen bir etki göstermektedir. Böylece kaynak arayüzeyinde ergimiş tabakanın sürekliliği söz konusu olmaktadır. Fişkırmamanın hapsolmesinden dolayı oluşan yüksek sıcaklık ve ergime metaller arası gevrek, kırılğan bir yapı oluşturur. Orta seviyedeki kaynak hızlarında fişkıрма davranışı düzenlidir. Arayüzeyde sabit dalga oluşumu ve maksimum birleştirme dayanımı elde edilebilir [47].

4.2.2.8. Altlık

Normalde altlığın kaynak kalitesine etkisi olmadığı görülebilir. Ancak uygulamada birleştirilen parçalara hasar verecek etkiye sahip olduğu ve parçaların distorsiyon miktarına etki ettiği görülmüştür [29].

Yukarıda açıklanan kaynak parametrelerinin yanı sıra birleştirilecek olan parçaların yüzey durumlarının da kaynak kalitesine etkili olduğu araştırmacılar tarafından belirtilmektedir. Pürüzlü yüzeyler ile elde edilen kaynağın kalitesi, pürüzsüz yüzey ile elde edilen kaynağa göre daha kötü olmaktadır. Düz olmayan ve yüzeyi pürüzlü olan parçaların kaynağı esnasında oluşan fişkıma arayüzeydeki oksit ve yağ tabakasını ortamdaki uzaklaştıramayabilir. Böylece birleştirme arayüzeyinde oksit tabakaları veya birleştirilmemiş alanlar meydana gelebilir. Düz ve pürüzsüz bir yüzey kullanmanın faydası yağ, su ve oksit tabakası gibi yüzey filmlerinin fişkıma ile arayüzeyden kolayca atılmasıdır. Eğer ideal kalitede bir birleştirme elde edilmek isteniyorsa kaynaklanacak yüzeyler mümkün olduğu kadar düz ve pürüzsüz olmalıdır. Kabul edilebilir bir kaynak kalitesi 3 µm'lik veya daha aşağı bir yüzey durumu ile elde edilebilir [54].

4.2.3. Patlamalı Kaynak Yöntemi Metalurjik Özellikleri

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

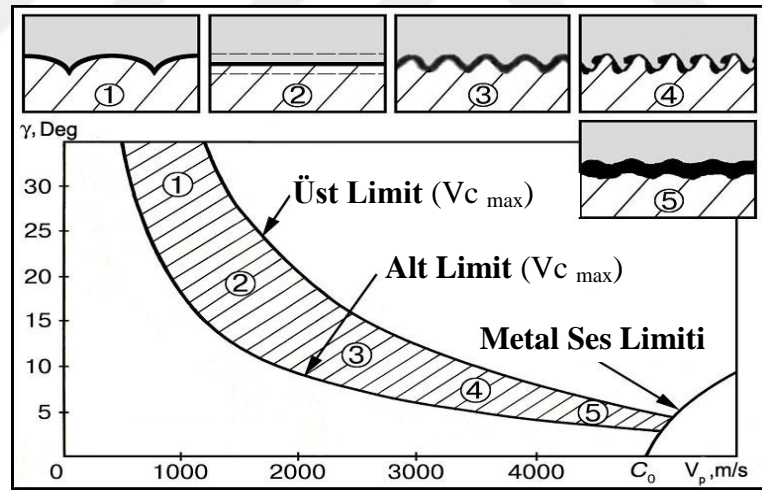
Patlamanın hemen sonrasında arayüzeyde oluşan yüksek hızdaki metal jeti, birleştirme yüzeylerini ovalayarak bağ oluşumunu engelleyen oksit, pislik gibi maddeleri temizlemektedir. Bu jet aynı zamanda birleşen metallerin birleştirme yüzeylerinde yaklaşık 10 µm kalınlığında plastik şekil değişimine uğramış 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 birleştirme 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 çatlaklarının arayüzeyden başlamasına rağmen yüksek yorulma dayanımları elde edilebilmektedir. Birleştirme 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 [55].

Kaynaklanmış arayüzeyin metalürjisi birleşen malzemelerin özelliklerine bağlı olmasına rağmen özellikle malzemelerin bağlı akustik empedansında, kaynak parametrelerinin uygun bir manipülasyonu kaynağın tipi üzerine kabul edilebilir bir kontrol sağlayacaktır. Küçük ara boşluk mesafesi daha düşük bir çarpma hızıyla sonuçlanacaktır ve çok düşük bir dalga genliği üretecektir. Ara boşluk mesafesinin artmasıyla tipik bir dalga tepesi oluşacaktır. Aşırı yüksek enerji seviyeleri (patlayıcıyla oluşan), tutsak fişkırmının metaller arası bileşikleri içeren girdaplarla, düzensiz bir dalga oluşturur. Kaynak arayüzeyinde bu metaller arası bileşiklerin varlığı gevrekliği başlatır yada sünekliği azaltır. Dalgalı form kaynaklar genellikle tercih edilmesine rağmen tamamen düz ya da hemen hemen düz arayüzeyler belirli durumlarda arzu edilir. Kaplama, kaynaktan sonra geleneksel olarak haddelenecekse bu durum özellikle arzu edilir.

Patlamalı kaynak yöntemi ile birleştirilmiş malzemeler, genellikle dalgalı birleşim bölgesi arayüzeyi sergiler. Kaliteli bir patlamalı birleştirmenin elde edilmesi doğrudan dalgalı birleştirme arayüzey oluşumu ile ilgilidir. Oluşan bu dalgalı birleştirme arayüzeyini, patlama hızı (V_d), 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 birleştirme 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 [46,47]. Şekil 4.7’de patlama hızına ve çarpışma açısına bağlı olarak birleştirmenin akış modelleri gösterilmektedir [29].



Şekil 4.7. Patlama hızı ve çarpışma açısına bağlı olarak oluşan akış modelleri.

4.2.4. Patlamalı Kaynak Yöntemi Avantaj ve Dezavantajları

Patlamalı kaynağın benzer ve farklı metallerin birleştirilmesinde kullanılması gibi birçok faydalı özellikleri vardır. Geleneksel kaynak yöntemleri ile farklı özellikteki malzemelerin farklı metalürjik özelliklerinden dolayı birleştirilmeleri uygun olmayabilir. Bu kaynak yöntemi ısının yokluğu nedeniyle ergime kaynağı,

lehimleme veya sıcak haddeleme işlemlerindeki metalürjik karakteristiklerin çoğunu göstermez. Bu kaynak yöntemi, aynı özellikteki iki yada daha fazla metali birleştirmek için kullanılabilir olmasına rağmen bu yöntemin en büyük ticari potansiyeli korozyon direncinin amaçlandığı kaplamalı metallerin üretimi ve farklı metallerin birleştirilmesi için kullanılabilir olmasıdır [45].

Patlamalı kaynak yöntemi 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 [46].

Patlamalı kaynak yöntemi nükleer, uzay araçları, kimyasal işlemlerin yapıldığı sanayi alanlarında, gemi imalatı, güç aktarma organları ve diğer sanayi dallarındaki uygulamalarıyla etkileyici bir çalışma alanı olarak görülmüştür [47].

Patlamalı kaynak yönteminin avantajları;

- ✓ 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 birleştirme 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 birleştirme gerçekleştirilebilir.
- ✓ Patlamalı kaynak yöntemi, soğuk bir işlem olduğu için birleştirilen malzemelerin özelliklerinde herhangi bir değişim olmaz.
- ✓ Soğuk işlem olduğu için karbonun difüzyonu olmaksızın metalürjik 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 yöntemi ile birleştirilecek malzeme ebatları bakımından sınırlı değildir. $0,5 \text{ mm}^2$ ebatlarındaki parçalar birleştirilebildiği gibi $90-120 \text{ m}^2$ gibi büyük ebatlardaki malzemeler de birleştirilebilir.
- ✓ Bu yöntemde $0,02-63,5 \text{ mm}$ kalınlıktaki kaplama malzemeleri ile alt levha kalınlıkları çok inceden 450 mm kalınlığa kadar değişebilir.
- ✓ Bu yöntemde birleştirme esnasında fışkırma meydana geldiğinden yüzeylerinde oksit tabakası bulunan metallerin birleştirilmesi mümkündür.
- ✓ Kaynaklı birleştirmenin dayanımı en az ana malzemenin dayanımı kadardır ve çalışma esnasındaki gerilmelere karşı oldukça iyi dayanım sergiler.
- ✓ Su altında güvenli birleştirme ve şekillendirme yapılabilir.
- ✓ Patlamalı kaynak yöntemi ile şekillendirme (forming), kesme (cutting), delme (drilling) ve sertleştirme (hardening) işlemleri gerçekleştirilebilir.

Patlamalı kaynak yönteminin dezavantajları;

- ✓ Patlamalı kaynak yönteminin hassasiyetinden dolayı üretim hatlarında kullanımı uygun değildir.
- ✓ Bu yöntemde güvenlik çok önemlidir. Kaynak işlemleri ya güvenlik çemberi içinde ya da açık alanda yapılabilir.
- ✓ Kaynak işlemi esnasında kullanılan patlayıcılardan dolayı güvenlik elbisesi ve kulaklık gibi detaylar düşünülmelidir.
- ✓ Bu yöntemde gevrek metaller birleştirilemez [29].

4.2.5. Patlamalı Kaynak Yöntemi ile Birleştirilebilen Malzemeler

Genel olarak %5'den fazla süneklik özelliği olan metal ve alaşımları patlamalı kaynak yöntemi ile kaynak edilebilirler.

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.

4.2.6. Patlamalı Kaynak Yönteminde Kullanılan Patlayıcılar

Patlamalı kaynak yönteminde patlayıcılar st levhanın (kaplama malzemesi) zerine yerleştirilmektedir. Bu işlemdede kullanılan patlayıcılar genelde taneseli veya sıvı olmak üzere ve st levhanın şeklinin verildiği kutular içerisinde olabilmektedir. Patlamalı kaynak yöntemi için gerekli patlayıcılar çoğu ticari şirket tarafından (amonyum nitrat, dinamit gibi) retilmektedir.

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.

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

- ✓ TNT (Trinitrotulence): Askeri bir patlayıcıdır ve diğer toz patlayıcıların ölçümünde kullanılır. 7000 m/s'lik patlama hızına sahiptir. Suda çok az çözünebilir ve nem geçirmez ambalaj olmaksızın su altı çalışmaları için kullanılabilir. Patladığında zehirli gaz açığa çıkarttığı için kapalı alanlarda kullanılmamalıdır. Hassas olmamasından dolayı çok güçlü bir patlayıcı kapsüle gerek duyulur.
- ✓ RDX (Cyclotrimethylene-Trinitramine): Saf RDX 204 C'de erir ve 1,816 g/cm³ yoğunlukta döküm yada presleme ile elde edilebilir. Diğer patlayıcılarla bir miktarda kombinasyon halinde

kullanılabilir. Higroskopik değildir ve suda çok az çözünür. Saf halde ıslak olarak yüklenebilir ve patlama hızı yaklaşık olarak 8382 m/s'dir.

- ✓ PETN (Pentaerythritol-Tetranitrate): Saf PETN 141,3 °C'de ergir ve 1,765 g/cm³'lük yoğunluktadır. RDX gibi PTEN' de higroskopik değildir ve suda çok az çözünür. Diğer patlayıcılarla kombinasyon halinde kullanılabilir. Ticari olarak levha halinde bulunur. Mükemmel bir depolama ömrü vardır fakat kuru halde tutulmalıdır. Su altı patlamaları için kullanılabilir ve patlama hızı yaklaşık olarak 8290 m/s'dir.
- ✓ C3-C4 Kompozisyonu: İstenilen şekle elle modellenebilen plastik patlayıcılardır. C3, %77 RDX ve %23 mononitrotluene içeren patlayıcı ve plastik yapıcı (yumuşatıcı) karışımıdır. 1,60 g/cm³ yoğunluklu sarımsı bir macundur. Çarpma için RDX'den daha az hassastır ve TNT hassasiyetine eşittir. Patlama hızı yaklaşık 7620 m/s olup çok az higroskopiktir fakat gücü sudan etkilenmez. C3 kompoziti aşırı derecede zehirlidir. C4 kompoziti çarpma için C3'den daha az hassasiyettedir ve yaklaşık 8046 m/s'lik bir patlama hızına sahiptir. C3'den daha iyi bir depolama ömrüne sahiptir ve zehirli değildir. Bundan dolayı da özel önlemlere gerek duyulmaz.
- ✓ Anfo (Amonyumnitrat-%6 fuel oil): Anfo, fuel oil ve amonyumnitrat'tan oluşan bir karışımdır. Teorik olarak oksijen dengesi için fuel-oil miktarı %5,7'dir. Ancak genelde %6 kullanılır. Patlama hızı yaklaşık olarak 3500 m/s'dir. Anfo fazla miktarlarda kullanım için beton mikserlerinde karıştırılır. Küçük miktarlarda ise plastik bir kap içerisinde elle karıştırılır. Eğer karışımdan sonra patlayıcı kapalı ortamda tutulmazsa fuel-oil buharlaşır. Bu nedenle anfonun 24 saat içerisinde tüketilmesi gerekir.

Patlama ile birleştirme işleminde patlamaya karşı hassas olmayan patlayıcılar kullanıldığından bu patlayıcılar kolayca patlatılamazlar. Bu tür patlayıcılar, daha hassas patlama özelliklerine sahip olan ve kapsül ya da fünye olarak bilinen patlayıcılar yardımıyla patlatılmaktadırlar. Bu patlayıcı maddelerin patlatılmasında, alev ile birlikte kuvvetli bir darbe veya basınca gerek vardır. Bu görevi de tüp şeklindeki fünye yerine getirmektedir.

Fünye, içinde az miktarda ve çok kolaylıkla patlayabilen bir madde bulundurur. Fünyeden beklenen kendisinin bir iş görmesi değil, sadece birlikte bulunduğu patlayıcıyı patlatmaktır. Tüp şeklindeki fünyede patlayıcı madde olarak TNT veya benzeri bir bileşim kullanılır. Bu bileşimi patlatabilmek için tüpün üst kısmında patlamaya daha duyarlı patlayıcı madde bulunur. Bunlar her türlü vurma, ezilme, şekil değiştirme veya ısınma gibi dış etkenler altında kolayca patlamaması için metalik tüp içine konulmuştur [45,47].

4.2.7. Patlama Yöntemi Uygulamaları

Patlama yöntemi ile metal işleme teknikleri;

- ✓ Şekillendirme
- ✓ Kesme
- ✓ Delme
- ✓ Sertleştirme
- ✓ Kaplama
- ✓ Kaynak

Patlamalı metal şekillendirme, patlama enerjisi kullanılan bir yöntemdir. Patlayıcı, şekillendirilecek metalle temas halinde değildir. Patlama enerjisinin metal parçaya iletimi için genellikle su kullanılır. NASA bu yöntem ile ilgili yoğun çalışmalar yapmıştır ve bu yöntemi yıllardır kullanmaktadır.

Patlama ile şekillendirmede; sadece dişi kalıp gereklidir, diğer şekillendirme yöntemlerinde ise çoğunlukla bir erkek ve bir dişi kalıp gereklidir. Birçok metal yüksek dayanım oranlarında bu yöntem ile daha iyi şekillendirilir. Simetrik olmayan şekiller problem oluşturmaz. Az sayıda parçada düşük maliyetlidir.

Patlama enerjisi ile kesme ve delme, genellikle şekil değişiklikleri için kullanılan bir yöntemdir. Patlama ile delme, petrol ve gaz endüstrisinde kuyu delmek/açmak için yaygın bir şekilde kullanılır. Patlama ile kesme öncelikle yıkım için; kara taban yapısı kaldırma ve deniz altı platformu kaldırmada kullanılır.

Patlama ile sertleştirme; bazı metaller yüksek darbe oranı altında önemli derecede sertleşir, bunların en önemlisi manganlı çeliklerdir. Örnek olarak; demiryolu makasları sertleştirilmiştir. Ayrıca delme takımları patlama ile sertleştirme yöntemi kullanılarak servis ömürleri uzaltılabilir [56].

Levhaların kaplanmasına; günümüzde ticari olarak büyük önem verildiği bilinmektedir. Tek malzeme yerine kaplanmış levha kullanımının nedeni, düşük maliyette korozyon direnci, arttırılmış ısı transfer karakteristikleri, düşük maliyette kabul edilebilir dayanım ya da rijitlik, geliştirilmiş elektriksel özellikler veya daha iyi aşınma ve erozyon direncidir. Bazı kimyasal işlem tesislerinde ısı transferini geliştirmek veya kimyasal etkilenmeyi engellemek için nikel, paslanmaz çelik, titanyum, tantalyum gibi kazanların imalatında pahalı metalleri kullanmak gerekebilmektedir. Bu tip malzemelerden yapılacak olan büyük ebatlardaki kap yada kazanlar için bu malzemelerin fiyatları tek başlarına pahalı olacaktır. Böyle kap ve kazanların üretiminde levha kalınlığı maliyetinin yanı sıra kaynaklı bağlantı yapımı da ek bir maliyet gerektirmektedir. Böyle durumlarda patlama ile kaplanmış levha kullanımı oldukça ekonomik olmaktadır. Günümüzde çok geniş kap ve kazanlar patlama ile kaplanmış levhalardan üretilmektedir.

Farklı levhaların kaynağı yapmak çok zor veya bazen imkansızdır. Yapılabilenler ise çok az dayanıklılık ve sağlamlık gösterir. Patlamalı kaynakla yapılmış birleştirmeler bu probleme çözüm sağlamaktadır. Patlamalı kaynağın belki de en büyük avantajı diğer yöntemler ile kaynağı güç ya da imkansız olan metallerin yaklaşık tüm kombinasyonları arasında metalürjik birleştirme sağlayabilmesidir. Özel kullanımlar, elektrik kontaktları, yüksek elektriksel davranış, genellikle tek malzemede bulunamayan yüksek aşınma direnci ve düşük maliyet içeren özelliklerin bir kombinasyonuna gerek duyar. Patlamalı kaynakla bu tip özelliklere sahip birleştirmeler rahatlıkla elde edilebilmektedir. Alüminyum, bakır ve çelik elektrik sistemlerinde en çok kullanılan metallerdir. Her birinin özelliğinden dolayı da bunların birbirleriyle birleştirilmesi gereği duyulmaktadır. Patlamalı kaynakla birleştirilen paslanmaz çelik-bakır levhalardan elde edilen bağlantılar etkili şekilde elektrik iletkenliği sağlamaktadır.

Silindirik yüzeylerin patlama ile kaplanması, patlamalı kaynağın ilk gelişme alanlarındandır. Başlangıçta buharlı elektrik santrallerinde nozullara uygulanmıştır. Buradaki nozulların korozyon direncine sahip olması istenir. Bakır-alüminyum ya da diğer kompozit malzemeli içi boş silindirler, örs görevini üstlenecek olan bir dış silindir kullanılarak iç kaplama ya da iç tüpte bozulmayı engellemek için içe yerleştirilecek dolu bir çubuk kullanılarak dış kaplama üretilmiş olur [45-47].



BÖLÜM 5

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

5.1. KULLANILAN MALZEMELER

Bu çalışmada, gemi imalat sanayisinde büyük bir öneme sahip, Grade A gemi çeliğine, saf titanyum (Grade 2) patlamalı kaynak yöntemi ile R=1.5, R=2, R=2.5 ve R=3 patlayıcı oranları kullanılarak birleştirilmiştir/kaplanmıştır. Birleştirme işlemlerinde ana malzeme olarak, 250x150x5 mm boyutlarında Grade A gemi çeliği, kaplama malzemesi olarak ise 250x150x1.5 mm boyutlarında titanyum sac levha kullanılmıştır. Birleştirmede kullanılan malzemelerin kimyasal bileşimleri Çizelge 5.1’de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Kullanılan malzemelerin kimyasal bileşimi (% ağırlıkça).

Malzeme % ağırlık	C	Mn	P	S	Si	N	H	Fe	O	Ti
Gemi Çeliği (Grade A)	0.149	0.7	0.015	0.012	0.166	-	-	Kalan	-	-
Titanyum (Grade 2)	0.10	-	-	-	-	0.03	0.015	0.30	0.25	Kalan

5.2. MALZEMELERİN KAYNAĞA HAZIRLANMASI

250x150 boyutlarındaki Grade A gemi çeliği, patlamalı kaynak yöntemi ile birleştirilmeden önce, birleştirme yüzeyleri spiral el taşlama makinesine döner tel fırça takılmak suretiyle yüzeyinde herhangi bir oksit, pas ve yağ gibi pislikler kalmayacak şekilde temizlenmiştir.

5.3. DENEYLERDE KULLANILAN PATLAYICILAR

Birleştirme işlemleri esnasında patlayıcı olarak MKE Barutsan A.Ş.’nin üretmiş olduğu; Baranfo-10 toz patlayıcı içine %3 TNT homojen olarak eklenerek, 0,75

gr/cm³ yoğunluğunda, en az 3000 m/s patlama hızında ve bileşimi %92 Amonyum Nitrat, % 5 Motorin ve % 3 TNT olan Elbar-5 toz patlayıcısı üretilmiş ve patlama işlemlerinde kullanılmıştır. Ayrıca patlatma esnasında patlayıcıların patlatılabilmesi için gerekli olan füyne ve füyne ile toz patlayıcı arasındaki intikali sağlamak için de yine aynı firmanın üretmiş olduğu jelatinit dinamit (her patlatma için 15 gr) kullanılmıştır. Malzemelerin birleştirilmesinde kullanılan patlayıcı miktarı, kullanılan üst levha ağırlığıyla orantılı olarak belirlenmiştir. Üst levha olarak kullanılan titanyum sacın ağırlığı ortalama 250 g olarak ölçülmüştür.

5.4. KAYNAK YÖNTEMİ UYGULAMASI

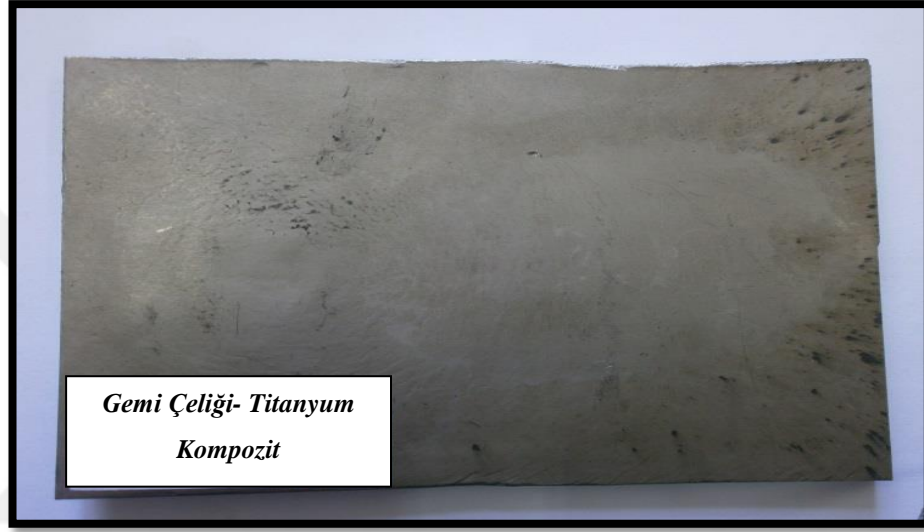
Patlatma işlemleri MKE Barutsan Roket ve Patlayıcı Fabrikasından yetkili teknik bir ekip gözetiminde Ankara-Elmadağ'daki tesislerinin bulunduğu, patlatma testleri için özel hazırlanmış açık arazisinde ve uzaktan manyetolu bir sistem ile Çizelge 5.2'de verilen kaynak parametrelerinde gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 5.2. Deneysel çalışmalarda kullanılan kaynak parametreleri.

Alt Levha	Üst Levha	Patlayıcı Tipi	Patlayıcı Hızı (ms ⁻¹)	Ara Boşluk Mesafesi, s (mm)	Üst Levha Ağırlığı (g)	Patlayıcı Oranı (R)	Patlayıcı Miktarı (g)
Gemi Çeliği	Titanyum (Saf)	Elbar-5	3000-3200	1.5	250±5	1.5	375
						2	500
						2.5	625
						3	750

Patlamalı kaynak işlemleri; kum havuzu içerisine yerleştirilmiş ve yüzey düzgünlüğü sağlanmış 2000x1500x200 mm boyutlarındaki çelik tabla merkezinde gerçekleştirilmiştir. Çelik altlık üzerine birleştirilecek alt levha (Grade A gemi çeliği) konulmuş ve üzerine üst birleştirme/kaplama levhası (saf titanyum Grade 2) paralel olacak şekilde metal pullar yerleştirilmiş, son olarak üst levha pullar üzerine konulmuştur. Bu işlem sırasında tüm malzemeler hadde yönüne paralel yerleştirilmiştir. Paralel düzenlemede, alt levha altlığın üzerine yerleştirilmiş ve üst levha da aralarında bir miktar boşluk olacak biçimde alt levhanın üzerine yerleştirilmiştir. Ayrıca, bütün patlamalı kaynak işlemlerinde, alt ve üst levha arasındaki ara boşluk mesafesi (s), üst levha kalınlığı katı kadar (üst levha kalınlığı, t=1.5) olacak şekilde ayarlanmıştır.

Üst birleştirme levhası üzerine kutu içindeki patlayıcılar hassas bir biçimde yerleştirilmiştir. Patlama ile birleştirilmiş kaynaklı numuneler kaynak sonrasında kendi halinde açık havada soğumaya bırakılmıştır. Patlatma işlemleri her bir parametreden 1 adet olmak üzere toplam 3 adet birleştirme işlemi gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.1’de patlamalı kaynak sonrası numune görüntüsü verilmiştir.



Şekil 5.1. Patlamalı kaynak sonrası numune görüntüsü.

5.5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR İÇİN NUMUNE HAZIRLAMA

Öncelikle 250x150 mm boyutlarında elde edilen birleştirmeler dört kenarından 10’ar mm kesilerek atılmıştır. 230x130 mm boyutlarındaki numunelerden mikroyapı (optik mikroskop (OM)), SEM ve EDS, mekanik özellikler (sertlik, çekme- makaslama, çentik darbe, eğme, burulma) ve korozyon testleri (nötr tuz püskürtme) için gerekli boyutlarda numuneler tel erozyon yöntemi ile kesilmiştir. Kesme işlemi esnasında malzemelerin yapısını bozmamak ve zarar görmemesi için gerekli itina gösterilmiştir.

5.5.1. Mikroyapı İncelemeleri

Patlamalı kaynak yöntemi ile farklı patlayıcı oranları (R=1.5, R=2, R=2.5, R=3) kullanılarak birleştirilmiş Grade A-titanyum kompozit levhalardan her bir patlayıcı oranı için 1 er adet olmak üzere 3 adet numune kesilmiştir. Kesilen numuneler, epoksi reçine içinde soğuk olarak bakalite alınmışlar ve sonrasında standart metalografik numune hazırlama işlemlerine (zımparalama ve parlatma) tabi tutulmuşlardır. Parlatma işlemi tamamlanan numuneler mikroyapılarının görülebilmesi için dağlama işlemine tabi tutulmuşlardır. Dağlama işleminde amaç tane sınırları ve kaynak arayüzeyini daha iyi görebilmektir. Gemi çeliği tarafı %3 Nital (%3 HNO₃ ve %97 saf su), titanyum tarafı ise %5 NHO₃, %10 HF ve %85 saf su ile hazırlanmış solisyonda dağlanmıştır. Optik mikroskop çalışmalarında Nikon Epiphot 200 tipi cihaz kullanılmıştır.

5.5.2. SEM ve EDS Çalışmaları

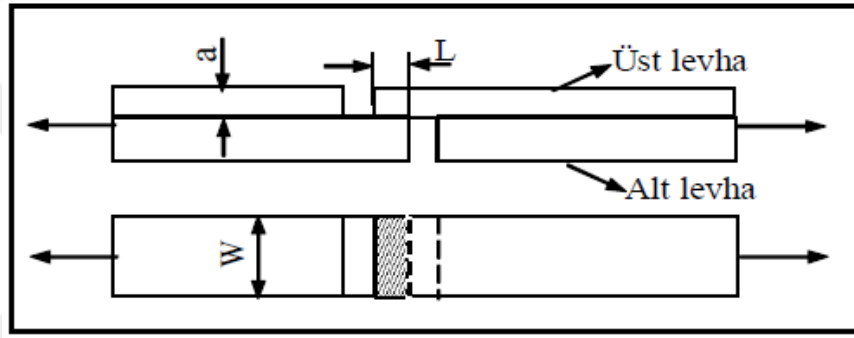
Grade A-titanyum kompozit malzemelerinin birleştime arayüzeylerindeki morfolojiyi ve alaşım elementlerinin % olarak değerlerini incelemek için arayüzeyde SEM ve EDS çalışmaları yapılmıştır. SEM ve EDS çalışmasında kullanılmak üzere her bir patlayıcı oranı için 1 adet toplamada 3 adet numune hazırlanmıştır. SEM ve EDS çalışmalarında Zeiss Evo Ls 10 marka cihaz kullanılmıştır.

5.5.3. Mikrosertlik Deneyi

Patlamalı kaynak yöntemi ile üretilen Grade A-titanyum kompozit levhaların sertlik değerlerini belirlemek için yapılacak mikrosertlik testlerinde kullanmak amacıyla; ana malzeme (Grade A) ve kaplama malzemesinden (titanyum) R=1.5, R=2 ve R=2.5, R=3 patlayıcı oranları için numuneler alınmıştır. Mikrosertlik ölçümleri, KBÜ Teknoloji Fakültesi malzeme laboratuvarlarında bulunan, Shimadzu HMV marka cihaz ile HV cinsinden ölçülmüştür. Sertlik ölçümlerinde 500 g yük (HV0,5) uygulanmış ve sonuçlar her bir bölgede gerçekleştirilen 3 ölçüm sonucunun ortalaması alınarak değerlendirilmiştir.

5.5.4. Çekme-Makaslama Deneyi

Patlamalı kaynak yöntemi ile birleştirilmiş Grade A-titanyum kompozit numunelerin birleştirme arayüzeyi dayanımını belirlemek için yapılacak çekme-makaslama testlerinde kullanılmak üzere; her bir parametre için 1 adet olmak üzere toplamda 3 adet kesilmiştir. Kesilen numunelere ASTM D3165-07’de belirtilen şartlarda (Şekil 5.2) çekme-makaslama standardına uygun olarak, üst levhada kaplama malzemesi, alt levhada ise ana malzeme freze tezgahında işlenerek, çekme-makaslama deney numuneleri hazırlanmıştır.

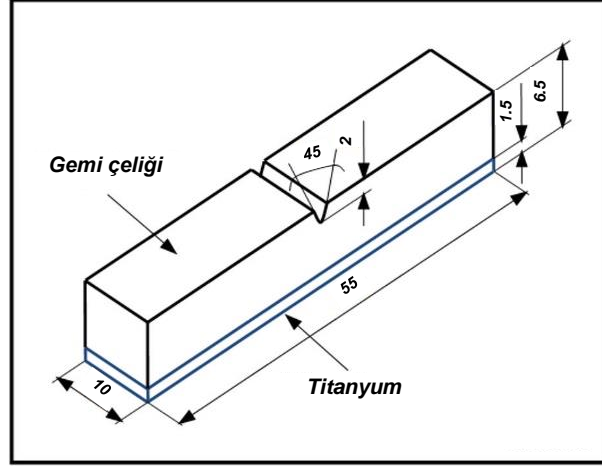


Şekil 5.2. ASTM D3165-07 standardına göre çekme-makaslama numunesi.

Üretilen Grade A-paslanmaz çelik kompozit levhalardan gerekli standarda göre hazırlanmış numuneler, Karabük Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Malzeme laboratuvarlarında bulunan, 50 KN kapasiteli Shimadzu marka çekme test cihazı ile 0.5 mm/dk ilerleme hızında çekme-makaslama testi uygulanmıştır.

5.5.5. Çentik Darbe Deneyleri

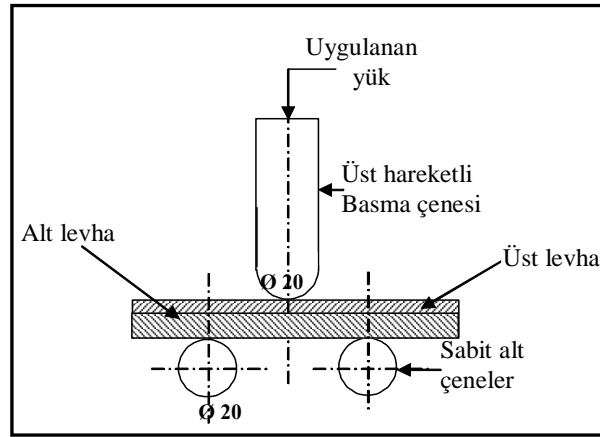
Patlamalı kaynak yöntemi ile farklı patlayıcı oranları ($R=1.5$, $R=2$, $R=2.5$, $R=3$) kullanılarak üretilen Grade A gemi çeliği-titanyum kompozit levhaları oda sıcaklığında, darbe tokluklarını belirlemek için yapılacak çentik darbe deneylerinde kullanılmak üzere, her bir patlayıcı oranı için 1 adet olmak üzere toplamda 3 adet numune kesilmiştir. Kesilen Grade A-titanyum kompozit numuneler Şekil 5.3’te verilen ölçülerde, Grade A tarafına (kaplama bölgesi üst kısımda olacak şekilde) V çentik açılmıştır.



Şekil 5.3. Kullanılan Charpy V çentik numunesi görüntüsü.

5.5.6. Eğme Deneyi

Patlamalı kaynak yöntemi ile üretilmiş Grade A-titanyum kompozit numunelerin birleştirme arayüzeyinde, 180° eğilme şartlarında çatlak, yırtılma, ayrılma hatası olup olmadığını belirlemek için yapılacak eğme testlerinde kullanılmak üzere; kaplama içte ve dışta klacak şekilde her bir patlama oranı için 2 adet toplamda 6 adet numune hazırlanmıştır. ASTM A263-12’de belirtilen şartlarda (Şekil 5.4) eğme standardına uygun olarak kesilen numuneler, eğme testi sonrasında arayüzeyin daha iyi incelenmesi için 1000 mesh SiC zımpara ile zımparalanarak, eğme deneyi için hazırlanmıştır.



Şekil 5.4. ASTM A263-12 standardına göre eğme numunesi görüntüsü.

5.5.7. Burulma Deneyi

Patlamalı kaynak yöntemi ile kaplanmış Grade A-titanyum kompozit levhaların birleştirme arayüzeyinde, 360° burulma durumunda çatlak veya yırtılma olup olmadığını belirlemek için yapılacak burulma testlerinde kullanılmak amacıyla; her bir patlayıcı oranı için 1 adet toplamda 3 adet numune hazırlanmıştır. Kompozit levhalardan hazırlanmış numuneler, bir tarafı mengeneyle sabitlenerek, diğer tarafından tork anahtarı ile gerekli açığa gelene kadar manuel olarak burulmuştur.

5.5.8. Nötral Tuz Püskürtme (NSS) Testi

Patlamalı kaynak işlemlerinde kullanılan ana malzeme (Grade A) ve kaplama malzemesi (titanyum) deniz suyu ortamında korozyon davranışlarını belirlemek için Nötral Tuz Püskürtme testi uygulanmıştır. Patlamalı kaynak yöntemi ile kaplanan Grade A-paslanmaz çelik kompozit levhalardan; korozyon testlerinde kullanılmak üzere her bir patlayıcı oranı için 1 adet toplamda 3 adet numune hazırlanmıştır.

Kesilen numuneler, epoksi reçine içinde soğuk olarak bakalite alınmışlar ve sonrasında standart metalografik numune hazırlama işlemlerine (zımparalama ve parlatma) tabi tutulmuşlardır. Korozyon deneyleri, Ankara Ostim Sanayi Bölgesinde, Metaltek Teknoloji Kimyasal Ürünler Ltd. Şti. test laboratuvarlarında, %5 NaCl çözeltisinde tuz püskürtme kabini (Nötr Tuz Püskürtme (NSS) Testi) içerisinde SAL 600 TL tipi, tuzlu sis korozyon cihazında gerçekleştirilmiştir. Korozyon deneyleri, “TS EN ISO 9227 korozyon deneyleri- yapay atmosferde tuz püskürtme deneyleri” standardına uygun olarak yapılmıştır.

Deneylerin yapıldığı numunelerden, korozyon değişimi sonuçlarını görebilmek için; başlangıç, 24 saat ve 48 saat sonunda, Leica marka optik mikroskop ile 100x büyütmede, mikroyapı görüntüleri alınmıştır. Numunelerden, korozyon değişimini bozmadan görüntü alabilmek için, test kabiniinden çıkarılan numuneler her defasında, 30 dakika oda sıcaklığında kurumaya bırakılmış ve kuruduktan sonra mikroyapı görüntüleri çekilmiştir.

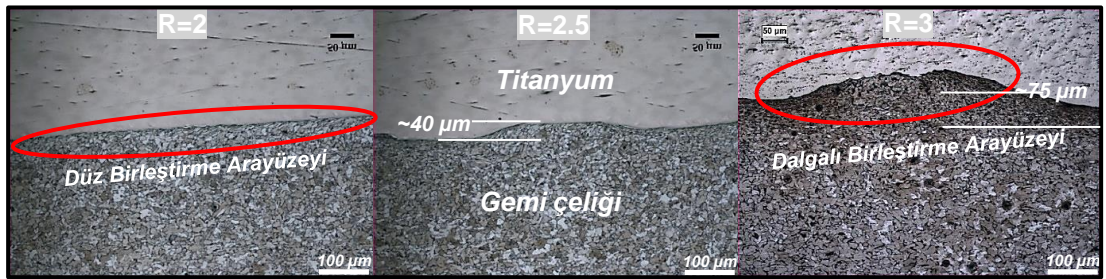
BÖLÜM 6

DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Patlamalı kaynak yöntemi ile gemi çeliği-titanyum bimetalik kompozit malzeme üretiminde kullanılan R=1.5 patlayıcı oranında (patlayıcı miktarı=375 g) numunelerin arayüzeylerinde birleştirme sağlanamamıştır. Bu patlayıcı oranında yetersiz patlayıcı miktarından dolayı levhalar yeterli çarpışma hızına ulaşamamış ve birleştirme arayüzeyinde levhalar birbirleri ile bağ kuramamıştır. Fakat diğer patlayıcı oranlarında (R=2, R=2.5 ve R=3) birleştirme arayüzeyinde bağ kurmak için yeterli çarpışma basıncına ulaşılmış ve başarılı şekilde bimetalik kompozit numuneler üretilmiştir.

6.1. Optik Mikroskop Çalışmaları

Şekil 6.1 ve 6.2’de patlamalı kaynak yöntemi kullanılarak üretilen gemi çeliği-titanyum bimetalik kompozitlere ait mikroyapı resimleri verilmiştir. Şekil 6.1’deki mikroyapı çalışmalarında bimetalik kompozitlerin birleştirme arayüzeyine farklı patlayıcı oranlarının etkisi incelenmiştir.

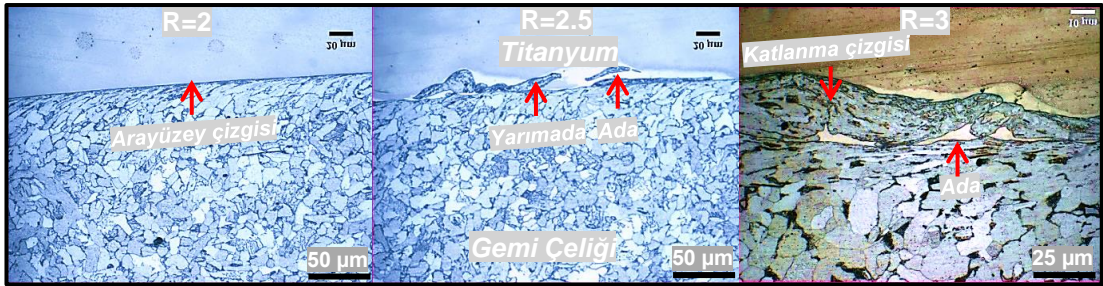


Şekil 6.1. Patlayıcı oranına göre birleştirme arayüzeyi görüntüleri.

Şekil 6.1’deki bimetalik kompozit birleştirme arayüzeylerine ait görüntüler incelendiğinde; R=2 patlayıcı oranında (seçilen en düşük patlayıcı oranı) düz bir

birleştirme arayüzeyi oluştuğu görülmektedir. R=2.5 patlayıcı oranı incelendiğinde ise birleştirme arayüzeyinde dalgalanmanın başladığı tespit edilmiştir. Seçilen en yüksek patlayıcı oranında (R=3) ise dalgalanmanın daha belirgin ve tüm birleştirme arayüzeyini kapladığı görülmektedir. Birleştirme arayüzeylerine ait mikroyapı görüntüleri birbirleri ile kıyaslandığında ise patlayıcı oranı artmasına bağlı olarak, birleştirme arayüzeyinin düz bir yapıdan tamamen dalgalı bir yapıya dönüştüğü tespit edilmiştir. Ayrıca, patlayıcı oranı arttıkça (R=2.5'dan R=3'e) birleştirme arayüzeyinde oluşan dalga boyu (~40 µm'dan ~75 µm'e) ve genliğinde (250-350 µm'dan 450-550 µm'e) de artış tespit edilmiştir.

Patlayıcı oranı artması ile titanyum levhanın (üst levha) çarpışma hızı artmakta ve buna bağlı olarak da darbe basıncı artmaktadır. Bu basınç artışına paralel olarak malzemelerin deformasyon oranı ve birleştirme arayüzeyinde oluşan dalgalanma artmaktadır. Birleştirme arayüzeyinde oluşan dalgalı yapıların boy ve genliği de patlayıcı oranına bağlı olarak artmaktadır. Szachogluchowicz ve ark. [57], patlamalı kaynak esnasında alt levha ve üst levhanın çok yüksek hızlı basınç dalgasına maruz kaldığını, bu gibi yüksek hızlara sahip levhaların çarpışması ile $1.0-2.0 \cdot 10^5$ atm' ye kadar basınç oluşturabildiğini ve bu basıncında statik yükler altında ulaşılamayan fiziksel durumların elde edilmesini mümkün kılacağını bildirmişlerdir. Ek olarak, bazı araştırmacılar önceden yaptıkları çalışmalarında [58-60] patlayıcı oranın artışına bağlı olarak levhaların çarpışma hızları ve darbe basınçları artmakta olduğu ve bunun da birleştirme arayüzeyi morfolojisi düz arayüzeyden dalgalı arayüze dönüştürdüğü ve patlayıcı oranı artışına bağlı olarak dalga boy ve genliğinde arttığını bildirmişlerdir.

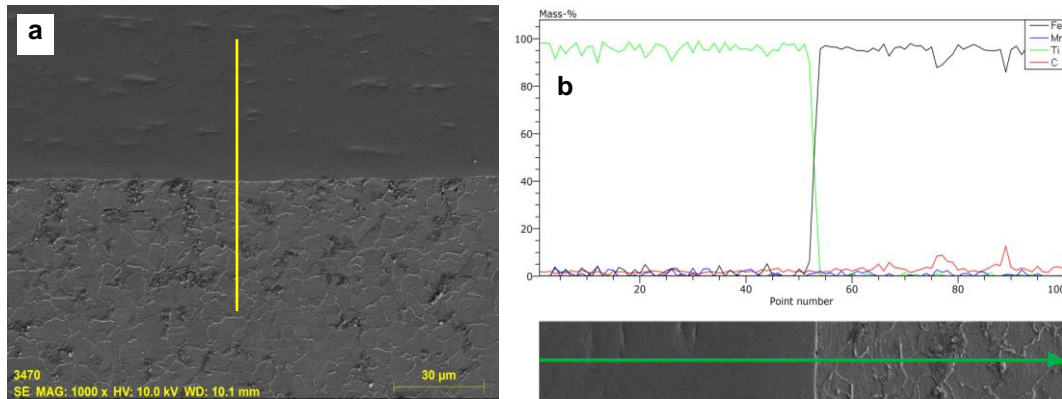


Şekil 6.2. Patlayıcı oranına göre birleştirme arayüzeyi görüntüleri.

Şekil 6.2’deki birleştirme arayüzeyi görüntüleri incelendiğinde ise; R=2 patlayıcı oranında düz bir arayüzey elde edilirken, patlayıcı oranı artışı ile (R=2.5 ve R=3’te) birleştirme arayüzeyinde oluşan darbe basıncından dolayı gemi çeliği (alt levha) dalga katlanması olduğu ve bu katlanmaların titanyumu (üst levha) mekanik olarak kitlediği tespit edilmiştir. Patlayıcı oranı artışı ile birlikte oluşan bu dalga katlanmaları ve mekanik kilitlemeler birleştirme arayüzeyi alanını arttırmaktadır. Birleştirme arayüzeyi alanının artması ile arayüzey dayanımı artmaktadır. Literatürde [61-63], patlamalı kaynak yönteminde düz birleştirme arayüzeyine göre daha büyük arayüzey alanı ve daha yüksek dayanım sağladığı için, genellikle dalgalı birleştirme arayüzeyinin tercih edildiği bildirilmiştir. Ayrıca, birleştirme arayüzeyinin titanyum tarafı üzerinde gemi çeliğinden küçük yarımada ve ada benzeri yapıda oluşmuştur. Bu küçük adaların patlamalı kaynak esnasında oluşan basıncın etkisi ile gemi çeliğinden ayrılıp birleştirme arayüzeyinde olduğu düşünülmektedir. Önceki çalışmalarda [64,65] patlamalı kaynak esnasında patlamanın gücü ve metal girdap akışının bir etkisi olarak birleştirme arayüzeyinde yarımada ve ada benzeri yapıların oluşabileceği bildirilmiştir.

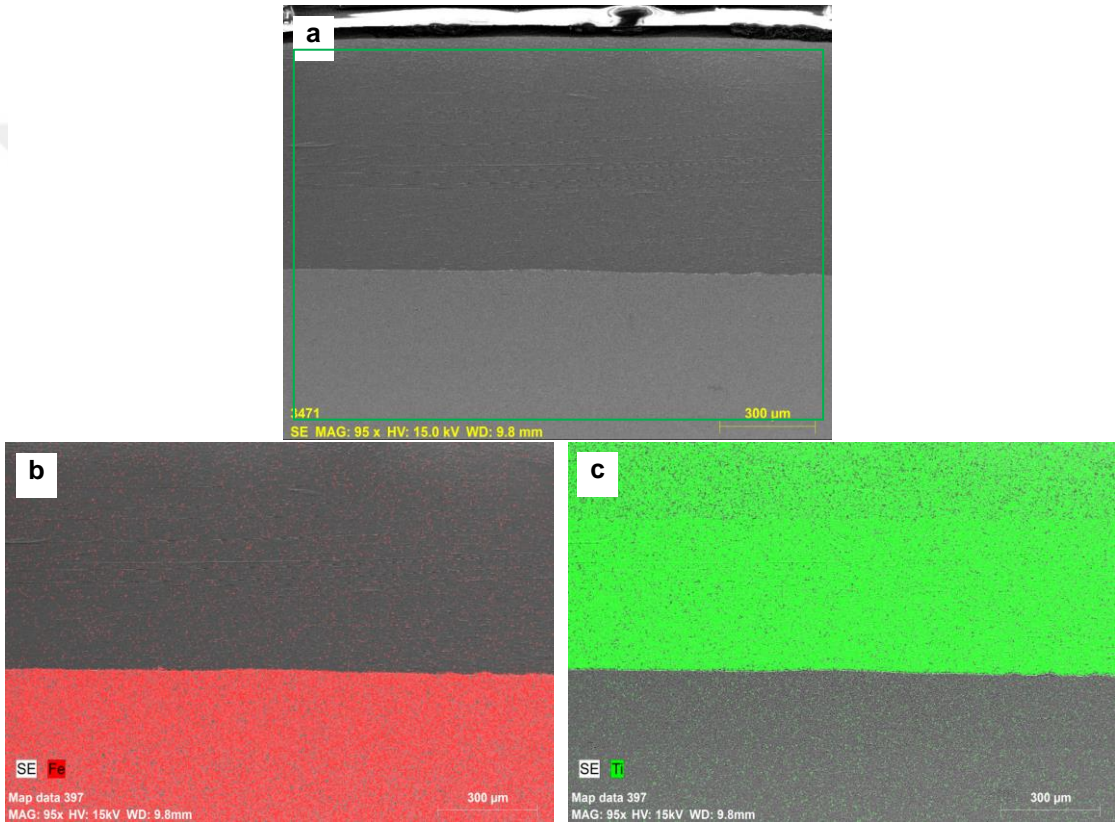
6.2. SEM ve EDS Analizleri

Şekil 6.3-6.6’de farklı patlayıcı oranlarda (R=2, R=2.5 ve R=3) birleştirme arayüzeyi SEM görüntüleri ve EDS analizleri (çizgi, element haritası, nokta ve alan) birlikte verilmiştir. SEM görüntülerinde üst alan titanyum (üst levha) ve alt alan ise gemi çeliği (alt levha) olarak görülmektedir.



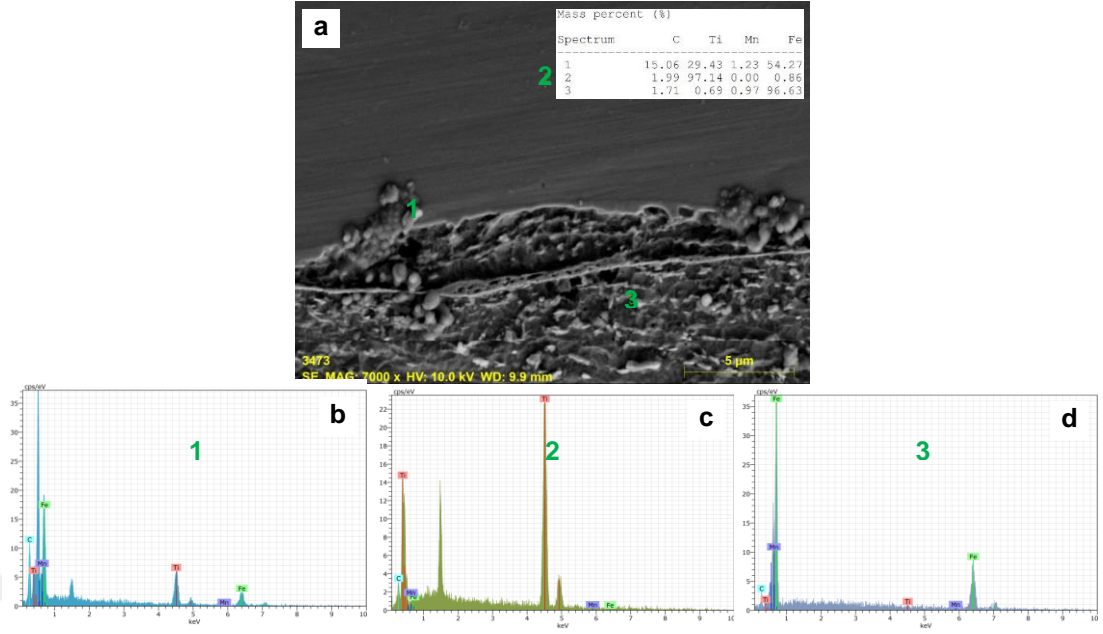
Şekil 6.3. a) R=2 patlayıcı oranı kullanılarak üretilen kompozit birleştirme arayüzeyi SEM görüntüsü ve b) gösterilen çizginin EDS analizi

Şekil 6.3'deki R=2 patlayıcı oranında üretilen kompozit birleştirme arayüzeyi SEM görüntüsü incelendiğinde, düz bir birleştirme arayüzeyi elde edildiği görülmektedir. SEM görüntüsü üzerinde belirtilen çizgisel EDS analizi sonucunda, üst kısımda (üst levha) titanyum malzemenin neredeyse tamamen Ti ve alt kısmının (alt kevha) çeliği malzemenin neredeyse tamamen Fe'den oluştuğu görülmektedir. Çizgisel EDS analizi sonucunda difüzyon oluşmadığı ve genel olarak üst levha ve alt levha malzemelerin kimyasal özellikleri tespit edilmiştir.



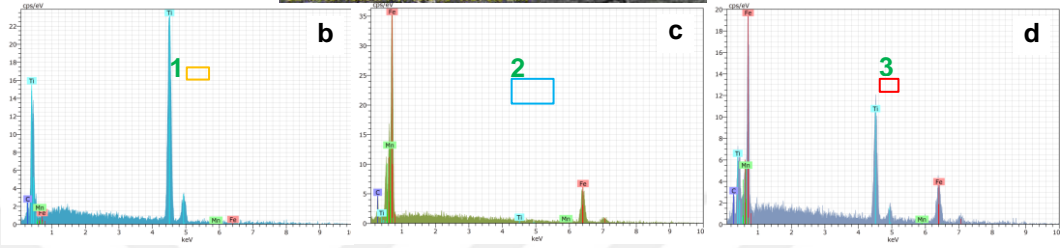
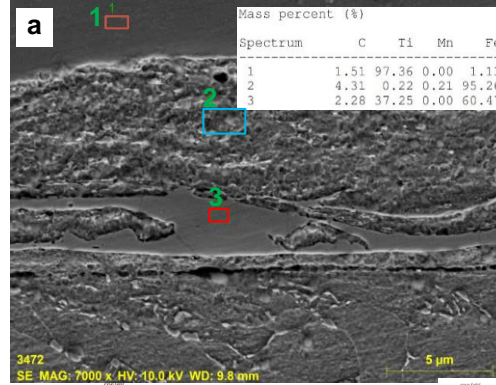
Şekil 6.4. a,b,c) R=2 patlayıcı oranı kullanılarak üretilen kompozit birleştirme arayüzeyi element haritası EDS analizleri.

Şekil 6.4'de R=2 patlayıcı oranında çizgisel EDS analize ek olarak yapılan EDS element haritası görülmektedir. Şekildeki SEM görüntüsü R=2 patlayıcı oranının birleştirme arayüzeyinde dalgalı bir arayüzey için gerekli çarpışma hızı ve basıncına ulaşamadığını göstermektedir. Ayrıca EDS element haritası sonuçları da çizgisel EDS analizi sonuçlarında belirtildiği gibi difüzyon oluşmadığını göstermektedir.



Şekil 6.5 a) R=2.5 patlayıcı oranı kullanılarak üretilen kompozit birleştirme arayüzeyi SEM görüntüsü, b,c ve d) gösterilen noktaların EDS analizleri.

Şekil 6.5'deki R=2.5 patlayıcı oranında üretilen kompozit birleştirme arayüzeyi SEM görüntüsü incelendiğinde, arayüzeyde dalgalanmanın başladığı görülmektedir. Patlayıcı oranı arttırıldığında levhaların çarpışma hızı ve basıncı artmakta ve dalgalı bir arayüzey (Şekil 6.1) elde edilmektedir. SEM görüntüsü üzerinde belirtilen noktasal EDS analizleri sonucunda; 2 nolu noktada Ti (%97.14) üst levhanın ve 3 nolu nokta'da ise Fe (%96.63) alt levhanın kimyasal özellikleri belirlenmiştir. Yüksek patlayıcı oranlarında arayüzeyde görülen yarımada/ada benzeri yapı (Şekil 6.2) üzerinde yapılan 1 nolu noktasal EDS analizinde yaklaşık 54.27% Fe ve 29.43% Ti'den oluştuğu tespit edilmiştir. Literatürdeki [66] Fe-Ti denge diyagramından 1 nolu noktada Fe_2Ti fazının oluştuğu görülmüştür.



Şekil 6.6. a) R=3 patlayıcı oranı kullanılarak üretilen kompozit birleştirme arayüzeyi SEM görüntüsü, b,c ve d) gösterilen alanların EDS analizleri.

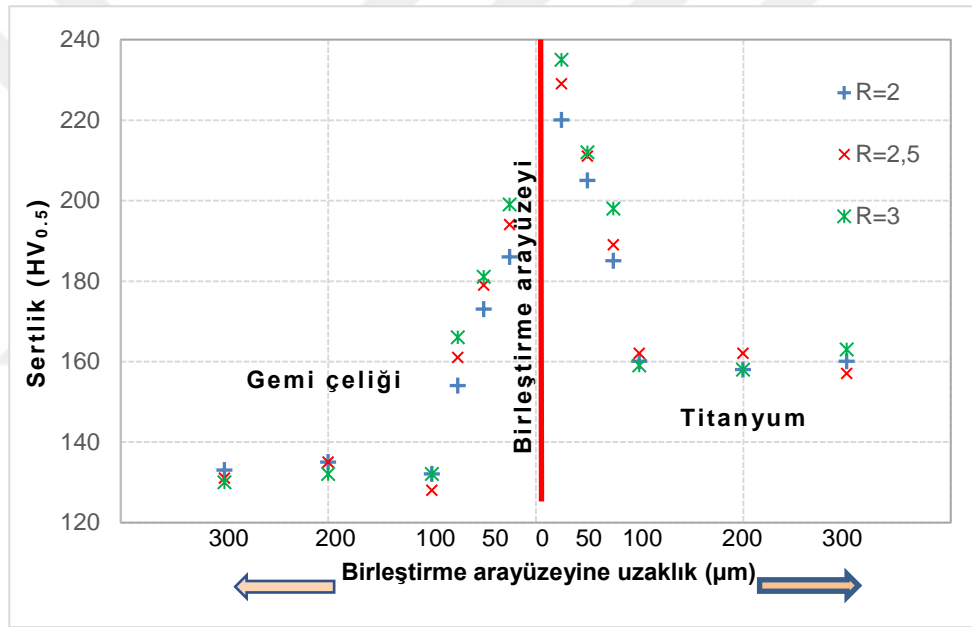
Şekil 6.6'daki R=3 patlayıcı oranı kullanılarak üretilen kompozit birleştirme arayüzeyi SEM görüntüsü incelendiğinde, tamamen dalgalı bir arayüzey görülmektedir. Patlayıcı oranının daha da artırılması ile artan çarpışma hızı ve darbe basıncı artmış, buna bağlı olarak da arayüzeyde oluşan dalgalanma artmıştır. Ayrıca oluşan dalgaların boy ve genliklerinde de artma meydana gelmiştir. SEM görüntüsü üzerinde belirtilen alanların EDS analizleri sonucunda, üst levha üzerinde bulunan 1 nolu alanın yaklaşık 97.36% Ti'den oluştuğu görülmektedir. Darbe basıncının artmasından dolayı birleştirme arayüzeyinin üst levha (titanyum) tarafında meydana gelen alt levha (gemi çeliği) dalgalanma katlanması (Şekil 6.2) üzerinde bulunan 2 nolu alanın ise yaklaşık 95.26% Fe'den oluştuğu tespit edilmiştir. Birleştirme arayüzeyinin titanyum tarafı üzerinde bulunan, dalgalanma katlanması ve gemi çeliği tarafı arasında kalan 3 nolu alanın ise yaklaşık 60.47% Fe ve 37.25 Ti'den oluştuğu görülmüştür. Literatürdeki [66]. Fe-Ti denge diyagramından 3 nolu noktada FeTi fazının oluştuğu görülmüştür.

Görüntüler genel olarak değerlendirildiğinde, R=2 patlayıcı oranında düz bir arayüzey elde edildiği ve difüzyon oluşmadığı tespit edilmiştir. Patlayıcı oranı arttırıldığında (R=2.5 ve R=3) ise birleştirme arayüzeyinde dalgalanma katlanmaları

ve yarımada/ada benzeri dalgalı yapılar dönüşüğü görülmüştür. Birleştirme arayüzeyinde meydana gelen dalgalı yapı (yarımada/ada ve dalgalanma katlanmaları) üzerinden yapılan EDS analizlerinde ise Fe_2Ti ve $FeTi$ fazlarının oluştuğu tespit edilmiştir.

6.3. Mikro Sertlik Test Sonuçları

Farklı patlayıcı oranlarının sertlik değerleri üzerine etkisini belirlemek için bimetalik kompozitlere uygulanan mikrosertlik testleri sonuçları Şekil 6. 7’de verilmiştir.



Şekil 6.7. Mikrosertlik testleri sonuçları.

Sertlik grafiği incelendiğinde, patlayıcı oranı artışına bağlı olarak bimetalik kompozit birleştirme arayüzeyinin her iki tarafında (gemi çeliği ve titanyum için ~ 75 µm) sertlik değerlerinin arttığı tespit edilmiştir. Sacların kalınlık merkezlerine doğru ise sertlik değerleri, orijinal sac malzemelerin sertlik değerlerine yakın değerler göstermiştir.

Patlamalı kaynak yönteminde, patlayıcı oranına bağlı olarak artan çarpışma hızı, deformasyon miktarını belirlemektedir. Artan deformasyon miktarı ise malzemelerin birleştirme arayüzeyi yakınlarında sertlik değerine etki etmektedir. Örneğin, orijinal

gemi çeliği sertlik değeri ~130 HV iken, R=2 patlayıcı oranında birleştirme arayüzeyine en yakın olan 25 µm mesafede 186 HV, 50 µm mesafede 173 HV, 75 µm mesafede ise 154 HV sertlik değeri göstermiştir. Levha kalınlık merkezine doğru, birleştirme arayüzeyine 100 µm mesafede 132 HV sertlik değeri ölçülürken, birleştirme arayüzeyine 200-300 µm mesafede de benzer (135-133 HV) sertlik değerleri ölçülmüştür. R=2.5 ve R=3 patlayıcı oranlarında da aynı mesafelerde benzer sertlik profilleri belirlenmiştir. Bimetalik kompozit malzemenin diğer yüzü olan titanyum tarafında da birleştirme arayüzeyinden uzaklaştıkça sertlik değeri azalmış, levhanın kalınlık merkezine doğru orjinal titanyum sertlik değerine (~157 HV) yaklaşmıştır.

Kaya ve ark. [67], patlamalı kaynak yöntemi kullanarak Grade A gemi çeliği-AISI 2304 dubleks paslanmaz çelik bimetalik kompozit malzeme üretmişler ve sertlik testleri sonrasında en yüksek sertlik değerlerinin birleştirme arayüzeyinden ölçüldüğünü bildirmişlerdir. Ayrıca, birleştirme arayüzeyi yakınlarında görülen sertlik artışına levhaların yüksek hızda çarpışması ile oluşan soğuk deformasyonun sebep olduğunu tespit etmişlerdir. Ek olarak Bina ve ark. [68], patlamalı kaynak yöntemi ile ürettikleri bakır-paslanmaz çelik kompozitlere uyguladıkları sertlik testleri sonrasında, patlama süresince yüksek çarpışma hızının sebep olduğu çalışma sertleşmesi ve soğuk deformasyondan dolayı birleştirme arayüzeyi yakınlarında önemli derecede sertlik artışı olduğunu bildirmişlerdir. Ayrıca, bakır ve paslanmaz çelik levhaların orta noktalarında (kalınlık merkezleri) sertlik değerlerinin neredeyse hiç değişmediğini tespit etmişlerdir. Fronczek ve ark. [64] (Ti/Al) ve Prasanthi ve ark. [69] (Mild Steel/Ti) patlamalı kaynak yöntemi ile farklı bimetalik kompozitler üretmişler ve uyguladıkları sertlik testleri sonrasında benzer sonuçlar bildirmişlerdir.

6.4. Çekme –Makaslama Test Sonuçları

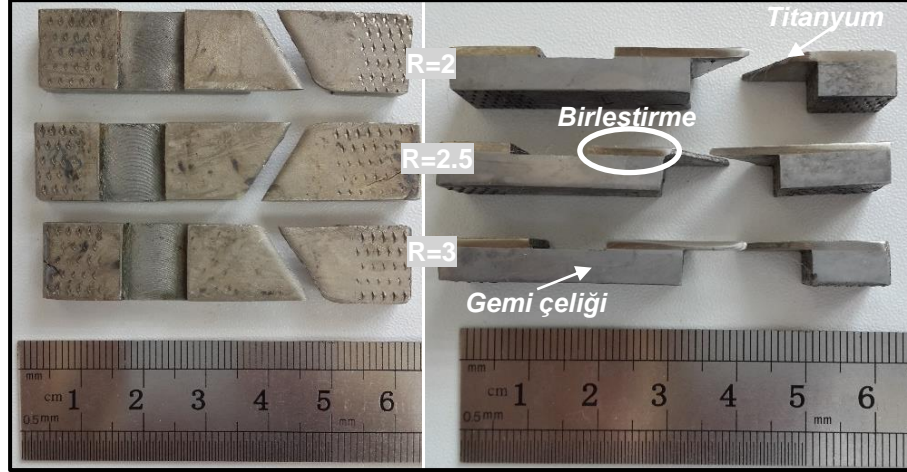
Üretilen bimetalik kompozit numunelere ait çekme-makaslama test sonuçları Çizelge 6.1’de, test sonrası makro görüntüleri ise Şekil 6.8’de verilmiştir.

Çizelge 6.1. Çekme-makaslama test sonuçları.

Çekme-makaslama dayanımı (MPa)			
R=2	R=2.5	R=3	Kopma Bölgesi
248±5	254±5	265±5	Titanyum

Çekme-makaslama testi sonuçları incelendiğinde, patlayıcı oranı artışına bağlı olarak çekme-makaslama dayanımında arttığı görülmüştür. Mikroyapı incelemelerinden de görüldüğü üzere (Şekil 6.1) bimetalik kompozit arayüzeyinde R=2 patlayıcı oranında düz bir morfoloji oluşurken, R=2.5 ve R=3 patlayıcı oranlarında ise birleştirme arayüzeyinin dalgalı bir morfoloji oluşturduğu ve aynı zamanda dalga boy ve genliklerinin de patlayıcı oranı artışına paralel olarak arttığı tespit edilmiştir. Birleştirme arayüzeyinde dalga boy ve genliğinin artması ile birleştirme yüzey alanını artmaktadır. Ayrıca, patlayıcı oranı artışı ile birlikte birleştirme arayüzeyinde dalgalanma katlanmaları ve mekanik kilitlenmeler (Şekil 6.2) oluşmaktadır. Birleştirme arayüzeyi alanının artması ve mekanik kilitlenmelerin oluşumu ile arayüzey çekme-makaslama dayanımı artmaktadır.

Athar ve Tolaminejad [70], patlamalı kaynak yönteminde patlayıcı oranına bağlı olarak darbe basıncının arttığını, bununda birleştirme arayüzeyinde dalgalı bir yapı oluşturduğunu, oluşan dalgalı yapının ise birleştirme yüzey alanını arttırarak çekme-makaslama dayanımını arttırdığını bildirmişlerdir. Ayrıca, patlayıcı oranı artışı ile artan darbe basıncı ve ani şok sertleşmesinin ve birleştirme arayüzeyinde oluşan soğuk deformasyon nedeniyle tane incelmesinin daha fazla dayanıma neden olacağını tespit etmişlerdir. Diğer bir çalışmada Xie ve ark. [71]. birleştirme arayüzeyinde oluşan dalgalı yapının alt levha ve üst levha arasında daha iyi mekanik kilitlenmeyi ve daha iyi birleştirme arayüzeyi dayanımı sağladığını bildirmişlerdir.



Şekil 6.8. Çekme-makaslama testi sonrası numune görüntüleri.

Ayrıca bimetalik kompozit numunelerin çekme-makaslama testi sonrası görüntüleri (Şekil 6.8) incelendiğinde, birleştirme arayüzeyinde herhangi bir hasar meydana gelmediği ve ayrılmanın da titanyum malzemede meydana geldiği görülmüştür. Kompozit malzemelerin birleştirme arayüzeyinde herhangi bir hasar oluşmaması, patlamalı kaynak yöntemi kullanılarak gemi çeliği üzerine titanyum kaplanarak üretilen kompozit malzemelerin birleştirme kalitesini göstermektedir. Literatürde [72,73] önceden patlamalı kaynak yöntemi ile üretilen farklı bimetalik kompozitlere uygulanan çekme-makaslama testlerin sonrasında da birleştirme arayüzeyinden ayrılma görülmediği bildirilmiştir.

6.5. Çentik Darbe Test Sonuçları

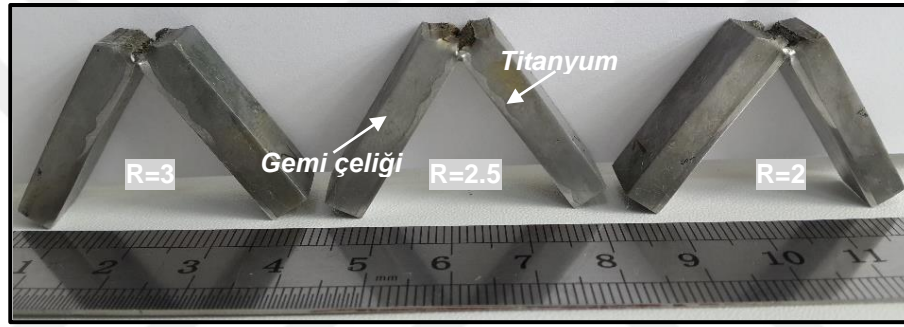
Bimetalik kompozit numunelere uygulanan çentik darbe testi sonuçları Çizelge 6.2'de, test sonrası makro görüntüleri ise Şekil 6.9'da verilmiştir.

Çizelge 6.2. Çentik darbe testi sonuçları.

Darbe tokluğu (Joule)			
Gemi Çeliği-Titanyum	R=2	R=2.5	R=3
		35.5±1	33.25±1

Çentik darbe test sonuçları incelendiğinde, patlayıcı oranı artışına bağlı olarak numunelerin darbe tokluklarının azaldığı tespit edilmiştir. Artan patlayıcı oranı

çarpışma hızını arttırmakta ve buna paralel olarak levhaların deformasyon miktarları (plastic deformasyon oranı) artmaktadır. Mikrosertlik test sonuçlarından görüldüğü üzere (Şekil 6.7) artan deformasyon oranı da sertlik değerlerini arttırmaktadır. Sertlik değerlerinin artması ise bimetalik kompozit numunelerin darbe tokluklarını düşürmektedir. Kaya ve Kahraman [1], farklı patlayıcı oranları kullanarak patlamalı kaynak yöntemi ile bimetalik kompozit malzeme (Grade A-AISI 316L) üretmişler ve kompozit numunelere uyguladıkları çentik darbe testleri sonrasında, patlayıcı oranına bağlı olarak artan deformasyon sertleşmesinden dolayı bimetalik kompozit numunelerin darbe tokluklarının azaldığını bildirmişlerdir.



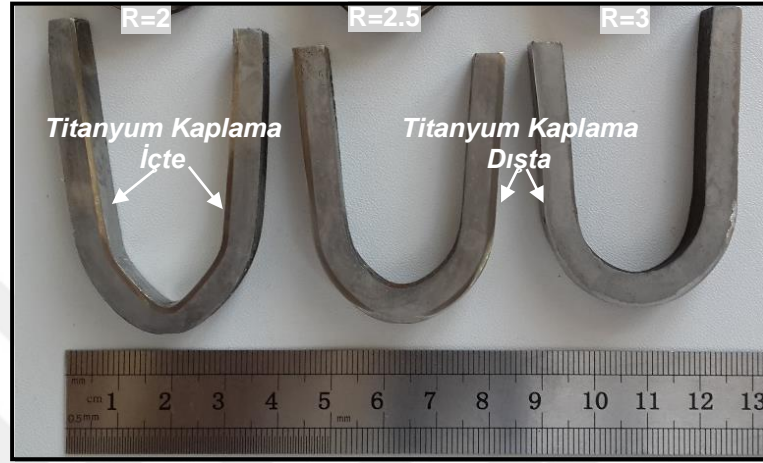
Şekil 6.9. Çentik darbe testi sonrası numune görüntüleri.

Numunelerin çentik darbe testi sonrası makro görüntüleri incelendiğinde, numunelerin hiçbirinde ayrılma görülmemiştir. Çentik açılan gemi çeliği tarafında kırılma meydana gelmesine rağmen kaplama malzemesi olan titanyumda sadece eğilme meydana gelmiş, ayrılma olmamıştır.

Kaya ve ark. [1], (Grade A-AISI 316L), Kaya ve ark. [67], (Grade A-AISI 2304), Kaçar ve Acarer [74], (P355GH-AISI 316L) ve Kaçar ve Acarer [75], (P355GH-AISI 2205) patlamalı kaynak yöntemi ile bimetalik kompozit levhalar üretmişler ve numunelere uyguladıkları çentik darbe testleri sonrasında, ana levhada kırılma meydana gelmesine rağmen kaplama malzemesinin eğildiğini fakat ayrılmadığını bildirmişlerdir.

6.6. Eğme Test Sonuçları

Kompozit numunelere çift yönlü (kaplama malzemesi (titanium) içte ve dışta) olarak uygulanan eğme testi sonrası makro görüntüleri Şekil 6.10'da verilmiştir.

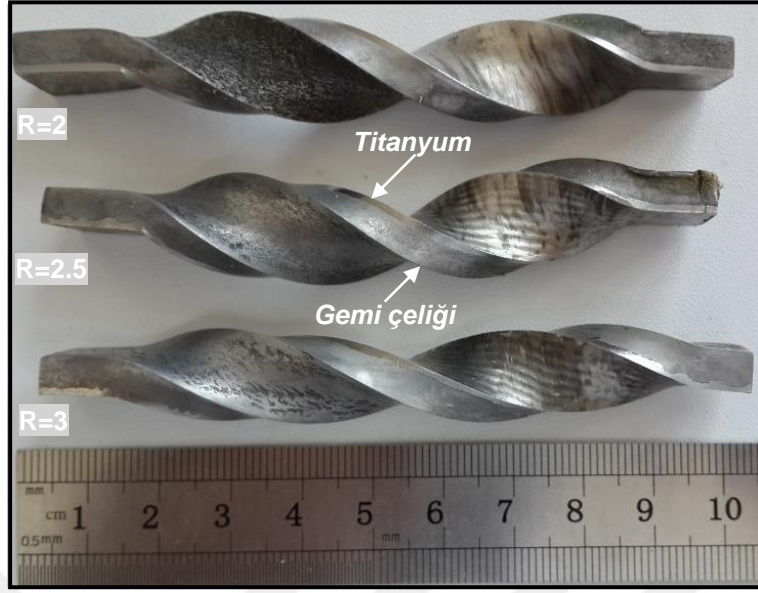


Şekil 6.10. Eğme testi sonrası numune görüntüleri

Numunelere uygulanan çift yönlü 180° eğme testi sonrası makro görüntüleri incelendiğinde, bimetalik kompozit numunelerin birleştirme arayüzeyinde çatlak, kırık veya ayrılma hatasına rastlanılmamıştır. Birleştirme arayüzeyinde herhangi bir hata olmaması birleştirme işleminin başarılı olduğu ve üretilen bimetalik kompozit numunelerin kullanım koşullarında eğilerek kullanılabileceğini göstermektedir. Xia ve ark. [76], Topolski ve ark. [77], Xunzhong ve ark. [78] ve Gülenç ve ark. [79] sırasıyla Ti-Al, Ti-Ni, Al-316L ve Al-Al, malzemeleri patlamalı kaynak yöntemi ile birleştirmişler ve eğme testleri sonucunda herhangi bir hata veya çatlak oluşmadığını bildirmişlerdir.

6.7. Burulma Test Sonuçları

Patlamalı kaynak yöntemi ile üretilen gemi çeliği-titanium bimetalik kompozit numunelere uygulanan 360° burulma testi sonrası makro görüntüleri Şekil 6.10'da verilmiştir.



Şekil 6.10. Burulma testi sonrası numune görüntüleri

Numunelere uygulanan 360° burulma testi sonrası makro görüntüleri incelendiğinde, kompozit numunelerin birleştirme arayüzeyinde herhangi bir çatlak veya kırık hatası tespit edilmemiştir. Patlamalı kaynak yöntemi ile üretilen kompozit numunelerde patlayıcı oranına bağlı olarak meydana gelen aşırı soğuk deformasyondan sonra uygulanan ikinci bir soğuk deformasyon olan burulma testi sonrasında bile kompozit numune birleştirme arayüzeylerinde herhangi bir hata meydana gelmemesi, birleştirme işleminin kalitesini bir kez daha kanıtlamıştır. Ayrıca, patlamalı kaynak yöntemi ile üretilen kompozit numunelerin kullanım koşullarında şekillendirilerek (ikinci bir soğuk deformasyonla) kullanılabileceğini göstermektedir. Kaya ve ark. [67] (Grade A gemi çeliği-dubleks paslanmaz çelik) ve Wang ve ark. [80] (Bakır-Çelik) malzemeleri patlamalı kaynak yöntemi ile birleştirmişler ve bimetallik kompozit malzemelerin birleştirme kalitesi belirlemek için burulma testleri uygulamışlar ve testler sonrasında tatminkar bir birleştirme arayüzeyi dayanımı rapor etmişlerdir. Ayrıca, birleştirme arayüzeyinde yüksek deformasyon ve sertleşmeye rağmen herhangi bir çatlak oluşmadığını bildirmişlerdir.

6.8. Nötr Tuz Püskürtme Test Sonuçları

Bimetalik kompozit malzelerin deniz suyunda korozyon davranışlarını belirlemek için numunelere uygulanan 24 ve 48 saatlik neutral salt spray testleri sonucu makro resimleri Şekil 6.11’de verilmiştir.



Şekil 6.11. Nötr tuz püskürtme testi sonrası numune görüntüleri.

Farklı patlayıcı oranlarında patlamalı kaynak yöntemi ile üretilen gemi çeliği-titanyum bimetalik kompozitlerin NSS testi sonrası makro görüntüleri incelendiğinde, gemi çeliğinin (düşük karbonlu çelik) oksijen ile yüksek kimyasal affinitesinden dolayı korozyona uğradığı belirgin şekilde görülmektedir. 24 saatlik NSS testi sonunda bimetalik kompozit numunelerin gemi çeliği tarafında büyük oranda korozyon oluşumu gözlenirken, titanyum tarafında ise korozyon görülmemiştir. 48 saatlik NSS testi sonunda ise kompozit numunelerin gemi çeliği tarafının neredeyse tamamen korozyona uğradığı, titanyum tarafının ise hala korozyona uğramadığı görülmüştür. Farklı patlayıcı oranları ile üretilen kompozit numuneler birbirleri ile kıyaslandığında ise, patlayıcı oranı farkının belirgin olarak görülmediği belirlenmiştir. NSS testi sonuçları genel olarak değerlendirildiğinde, patlamalı kaynak yöntemi kullanılarak gemi çeliği üzerine titanyum kaplanması ile deniz suyu şartlarında gemi çeliğinin korozyona karşı daha dirençli olacağı tespit edilmiştir.

Daha önceki çalışmalarda [81,82] araştırmacılar titanyumun çok iyi korozyon direncinden dolayı yüksek oksitleyici ortamlarda kullanılabileceğini bildirmişlerdir. Ayrıca Haitao ve ark. [83] korozif ortamlarda konstrüksiyon malzemesi olarak katı titanyum kullanmak yerine, titanyum kaplı çeliğin kullanılması ile önemli derecede

maliyetin azaltılabileceğini vurgulamışlardır.İlaveten Kahraman ve ark. [84] deniz suyu ortamında, tek malzeme kullanmak yerine daha uygun fiyata daha iyi korozyon dayanımı sağlamak için patlamalı kaynak yöntemi kullanarak Al yüzeyine Ti kaplamışlardır.



BÖLÜM 7

SONUÇLAR

Farklı patlayıcı oranları kullanılarak patlamalı kaynak yöntemi ile üretilen gemi çeliği-titanyum bimetallik kompozitlerin mikroyapı, mekanik ve korozyon dayanımlarının incelendiği çalışma ile aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- ✓ Kaynak işlemlerinde kullanılan R=1.5 patlayıcı oranında levhalar yeterli çarpışma hızına ulaşamamış ve birleştirme arayüzeyinde bağ kuramamıştır. Fakat diğer patlayıcı oranlarında (R=2, R=2.5 ve R=3) yeterli çarpışma basıncına ulaşılmış ve başarılı şekilde kompozit malzemeler üretilmiştir.
- ✓ Gemi çeliği-titanyum bimetallik kompozit numunelerde, patlayıcı oranı artışına bağlı olarak birleştirme arayüzeyinin düz bir yapıdan dalgalı bir yapıya dönüştüğü ve ayrıca arayüzeyde oluşan dalgaların boy ve genliğinin arttığı tespit edilmiştir.
- ✓ Bimetallik kompozit birleştirme arayüzeyi SEM ve EDS incelemelerinde, R=2 patlayıcı oranında düz bir arayüzey elde edildiği ve difüzyon meydana gelmediği görülmüştür. Fakat patlayıcı oranı artırıldığında ise arayüzeyde dalgalı bir yapıya geçiş olduğu ve arayüzeyde meydana gelen dalgalı yapı (yarımada/ada ve dalgalanma katlanması) üzerindeki incelemelerde ise Fe₂Ti ve FeTi fazlarının oluştuğu tespit edilmiştir.
- ✓ Sertlik testleri sonucunda, patlayıcı oranı artışına bağlı olarak bimetallik kompozit malzeme birleştirme arayüzeyinin iki tarafında da sertlik değerleri artarken, kompozit levhaların kalınlık merkezlerine doğru ise sertlik değerlerinin değişmediği görülmüştür.

- ✓ Gemi çeliği titanyum bimetalik kompozit numunelerde uygulanan çekme-makaslama testleri sonucunda patlayıcı oranın artmasıyla çekme-makaslama dayanımı artmıştır. Ayrıca bimetalik kompozit numunelerin birleştirme ara yüzeyinde ayrılma görülmemiştir.
- ✓ Oda sıcaklığında gerçekleştirilen çentik darbe testleri sonucunda patlayıcı oranı artışıyla deformasyon sertleşmesi artmasından dolayı darbe tokluğu azalmıştır. Ayrıca bimetalik kompozitlerin gemi çeliği tarafında kırılma olurken titanyum tarafında eğilme olmasına rağmen ayrılma olmamıştır.
- ✓ Farklı patlayıcı oranları kullanılarak üretilen kompozit numunelere uygulanan çift yönlü 180° eğme testleri sonrasında, birleştirme arayüzeylerinde çatlak, kırık veya ayrılma hatasına rastlanılmamıştır.
- ✓ 360° burulma testleri sonrasında, kompozit numunelerin birleştirme arayüzeylerinde herhangi bir çatlak veya kırık hatası tespit edilmemiştir.
- ✓ Tuz püskürtme testleri sonucunda, gemi çeliği yüzeyine titanyum kaplanarak gemi çeliğinin korozyon dayanımının arttığı görülmüştür.

KAYNAKLAR

1. Kaya, Y., Kahraman, N., “An Investigation into The Explosive Welding/Cladding of Grade A Ship Steel/AISI 316L Austenitic Stainless Steel”, *Materials and Design*, 52, p 367-372 (2013).
2. Li, X., Ma, H., Shen, Z., “Research on Explosive Welding of Aluminum Alloy to Steel with Dovetail Grooves”, *Materials and Design*, 87, p 815-824 (2015).
3. Young, G. A., Banker, J. G., “Explosion Welded, Bi-Metallic Solutions to Dissimilar Metal Joining”, *Proceedings of the 13th offshore symposium*, Houston Texas, p 1-6 (2004).
4. Nieslony, P., Cichosz, G. Krolczyk, M., Legutko, S., Smyczek, D., Kolodziej, M., “Experimental studies of the cutting force and surface morphology of explosively clad Ti–steel plates”, *Measurement*, 78, 129-137 (2016).
5. Jiang, H., Yan, X., Liu, J., Duan, X., “Effect of heat treatment on microstructure and mechanical property of Ti–steel explosive-rolling clad plate”, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 24, 697–704, (2014).
6. Gloc, M., Wachowski, M., Plocinski, T., Kurzydowski, K., J., “Microstructural and microanalysis investigations of bond titanium grade1/low alloy steel st52-3N obtained by explosive welding”, *Journal of Alloys and Compounds* 671, 446-451 (2016).
7. Miao, G., Ma, G., Shen, Z., Yu, Y., “Research on honeycomb structure explosives and double sided explosive cladding”, *Materials and Design*, 63, 538–543 (2014).
8. M. Koschlig, M. Vehmayer and D. Raabe, “Production of Steel-Light Metal Compounds with Explosive Metal Cladding”, *3rd International conference on high speed forming*, Dortmund Germany, p 23-32, (2015).
9. Wang, B., Chen, W., Li, J., Liu, Z., Zhu, X., “Microstructure and formation of melting zone in the interface of Ti/NiCr explosive cladding bar”, *Materials and Design*, 47 74-79 (2013).
10. Kahraman, N., Gülenç, B., Fındık, F., “Joining of titanium/stainless steel by explosive welding and effect on interface”, *Journal of Materials Processing Technology*, 169, 127–133 (2005).
11. Banker, J. G., Winsky, J. P., “Titanium/steel explosion bonded clad for autoclaves and vessels”, *Clad Metal Prod Inc*; (2000).

12. Banker, J. G., Winsky, J., P., “Titanium/Steel Explosion Bonded Clad for Autoclaves and Vessels, Proceedings of ALTA 1999 Autoclave Design and Operation Symposium”, *Alta Metallurgical Services*, Melbourne, Australia, (1999).
13. Mousavi, S. A. A. A., Sartangi, P. F., “Experimental investigation of explosive welding of cp-titanium/AISI 304 stainless steel”, *Materials and Design*, 30, 459-468 (2009).
14. 13. Mousavi, S. A. A. A., Sartangi, P. F., “Effect of post-weld heat treatment on the interface microstructure of explosively welded titanium–stainless steel composite”, *Materials Science and Engineering A*, 494, 329–336 (2008).
15. Zhang, L. J., Pei, Q., Zhang, J. X., Bi, Z. Y., Li, P. C., “Study on the microstructure and mechanical properties of explosive welded 2205/X65 bimetallic sheet”, *Materials and Design*, 64, 462–476 (2014).
16. Rozumek, D., Banski, R., “Crack growth rate under cyclic bending in the explosively welded steel/titanium bimetal”, *Materials and Design*, 38, 139-146 (2012).
17. Song, J., Kostka, A., Veehmayer, M., Raabe, D., “Hierarchical microstructure of explosive joints: Example of titanium to steel cladding”, *Materials Science and Engineering A*, 528, 2641-2647 (2011).
18. Karolczuk, A., Kowalski, M., Banski, R., Zok, F., “Fatigue phenomena in explosively welded steel–titanium clad components subjected to push–pull loading”, *International Journal of Fatigue*, 48, 101-108 (2013).
19. Chu, Q., Bai, R., Zhang, M., Li, J., Lei, Z., Hu, N., Bell, J. M., Yan, C., “Microstructure and mechanical properties of titanium/steel bimetallic joints”, *Materials Characterization*, 132, 330-337 (2017).
20. Chu, Q., Zhang, M., Li, J., “Experimental and numerical investigation of microstructure and mechanical behavior of titanium/steel interfaces prepared by explosive welding”, *Materials Science & Engineering A*, 689, 323-331 (2017).
21. Hayat, F., “Masif ve özlü kaynak telleri ile birleştirilen çift-fazlı çeliklerin mekanik ve mikroyapı özellikleri”, Doktora Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya, 1-58 (2009).
22. Ay, T., Öz Saraç, U., Aslanlar, S., “Gemi saclarına uygulanan kaynaklı bağlantıların mekanik özelliklerinin incelenmesi”, *Sakarya Kaynak Teknolojisi IV. Ulusal Kongresi*, Kocaeli, 19-29 (2003).
23. Özakın, N., “AH ve DH kalite gemi saclarının değişik kaynak yöntemleri ve kaynak pozisyonlarındaki mekanik özelliklerinin ve mikroyapılarının irdelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Zonguldak, 1-3 (2010).

24. Zielinski, A., Domzalicki, P., “Hydrogen degradation og high-strenght low-alloyed steels”, *Journal of Materials Processing Technology*, 133, 230-235 (2003).
25. Erdemir T.A.Ş. Ürün Katalogu, http://www.erdemir.com.tr/images/urun_hizmetler/ERDEMiR_Grubu_Urun_Katalog_2014_rev1.pdf (2004).
26. Gürşimşir, C., “Gemi yapımında, paslanmaz çelik malzeme kombinezonlarının birleştirilmesinde kaynak yöntemi, işlem sıraları ve parametrelerin seçimi”, Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 1-42 (2000).
27. Bhadeshia, H. K. D. H., and Honeycombe, R. W. K., “Steels microstructure and properties”, *3th edition, Elsevier*, Oxford, 1-357 (2006).
28. Klepaczko, J. R., Rusinek, A., Rodriguez, Martinez, J. A., Pecherski, R. B., and Arias, A., “Modelling of thermo-viscoplastic behaviour of DH36 and weldox 460-estructural steels at wide ranges of strain rates and temperatur, comparison of constituve relations for impact problems”, *Mechanics of Materials*, 41, 599-621 (2009).
29. Kaya, Y.,, “Patlamalı Kaynak Yöntemi ile Üretilen Grade A Gemi Sacı-Paslanmaz Çelik Kompozitlerin Mikroyapı, Mekanik ve Korozyon Özelliklerinin İncelenmesi”, Doktora Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya, 1-215 (2014).
30. Asarkaya, M., “Gemi inşasında kullanılan kaynak yöntemlerinin mekanik özelliklere etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya, 1-3 (2006).
31. Oğuz, B., “Ark Kaynağı”, *Oerlikon Yayını*, 1-22 (1989).
32. Metals Handbook, Desk Edition, *ASM International*, Ohio, 1-2571 (2001).
33. Tülbentçi, K., “MIG-MAG eriyen elektrod ile gazaltı kaynağı”, *GEV Yayınları*, 1-216 (1990).
34. Erdoğan, M., “Mühendislik malzemelerinin yapı ve özellikleri”, Cilt 2, *Nobel Yayın Dağıtım*, Ankara, 447-492 (2001).
35. Kahraman, N., “Titanyum levhaların patlamalı kaynak yöntemi ile farklı metallerle birleştirilmesi ve arayüzey özelliklerinin incelenmesi”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 1-23 (2003).
36. Kaya, Y.,, “Titanyum Sacların Nokta Direnç Kaynağı İle Kaynaklanabilirliğinin Araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya, 1-112 (2010).

37. Gökdemir, Y., “Saf ti ve Ti6Al4V alaşımının yüksek sıcaklıkta oksidasyon davranışı”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 3-26 (2006).
38. Erdoğan, M., “Malzeme bilimi ve mühendislik malzemeleri”, Cilt 1, *Nobel Yayın Dağıtım*, Ankara, 288-293 (1998).
39. Askeland D.R., “The science and engineering of materials” Vol. 1, *Nobel Yayın Dağıtım*, 194-288 (1998).
40. Karaca, S., “Titanyum ve alaşımlarına uygulanan yüzey mühendisliği teknikleri”, Yüksek Lisans Tezi, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kayseri, 1-10 (1994).
41. Doğan, İ., “Titanyum malzemelerin (kalite 265.2) TIG kaynak yöntemi ile kaynaklanabilirliğinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 1-4 (2002).
42. Bargel H. J., and Schulze G., “Malzeme bilgisi cilt-2”, Çeviri: Güleç, Ş., ve Aran, A., *MBEAE Matbaası*, Gebze, 34-65 (1987).
43. İşler, B., “Titanyum alaşımlarının ısıtılma işlem ve mekanik özellikleri”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 16-18 (1999).
44. Akman, E., “Ti6Al4V titanyum alaşımlarının atımlı Nd: Yag lazeri kullanılarak kaynak edilmesi ve kaynak parametrelerinin belirlenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kocaeli, 58-59 (2006).
45. Durgutlu, A., “Patlama kaynağı yöntemi ile bakır-paslanmaz çelik malzemelerinin birleştirilmesi ve ara yüzeyin mekanik-mikroyapı özelliklerinin incelenmesi”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 1-111 (2003).
46. Kahraman, N., “Titanyum levhaların patlamalı kaynak yöntemi ile farklı metallerle birleştirilmesi ve arayüzey özelliklerinin incelenmesi”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 1-99 (2003).
47. Acarer, M., “Patlamalı Kaynakta Patlayıcı Oranı, Ara Boşluk Mesafesi ve Altlık Cinsinin Çelik/Çelik Birleştirilmesi Kalitesine Etkisi”, Doktora Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya, 5-119 (2001).
48. Kahraman, N., ve Gülenç B., “Modern kaynak teknolojisi”, *Epa-Mat Basım Yayın Ltd. Şti.*, Ankara, 1-323 (2013).
49. Banker, J. G., and Edvard, G.R., “Explosion welding” *ASM Handbook*, (6): 303-305 (1993).

50. Onaran, K., ve Erman, B., “Malzemelerin Yapı ve Özellikleri”, *İTÜ Matbaası*, İstanbul, (1): 1-383 (1993).
51. Blazynski, T. Z., “Dynamically consolidated composites: manufacture and properties”, *Elsevier Applied Science*, London, 1-452 (1992).
52. Ezra, A. A., “Principles and practice of explosive metalworking”, *Industrial Newspapers Limited*, John Adams House, London, 1-270 (1973).
53. Bahrani, A. S., Black, T. J., and Crosland, B., “The mechanics of wave formation in explosive welding”, *Proc. Roy. Soc.*, (296): 123-136 (1967).
54. Anık, S., “Kaynak tekniği el kitabı-yöntemler ve donanımlar”, *GEV Yayınları*, İstanbul, 124-131 (1991).
55. Demirkol, M., ve Aran, A., “Patlamalı kaynak yöntemi”, *II. Ulusal Kaynak Sempozyumu Bildiri Kitabı*, İstanbul, 142-151 (1989).
56. Banker, J. G., “Reveiw of various explosive metalworking methods”, Dynamic Materials Corporation, DMC, Explosion Metalworking Colorado School of Mines http://www.dynamicmaterials.com/jdownloads/Presentations/explosion_metalworking_csm_oct_07.pdf (8 October 2007).
57. Szachogluchowicz, I., Sniezek, L., Hutsaylyuk, V., "Low Cycle Fatigue Properties af AA2519–Ti6Al4V Laminate Bonded by Explosion Welding”, *Eng. Fail. Analy.*, 69, 77-87 (2016).
58. Yazdani, M., Toroghinejad, M. R., Hashemi, S. M., “Investigation of Microstructure and Mechanical Properties of St37 Steel-Ck60 Steel Joints by Explosive Cladding”, *J. Mater. Eng. Perf.*, 24, p 4032-4043 (2015).
59. Zamani, E, Liaghat, G. H., “Explosive welding of stainless steel–carbon steel coaxial pipes” *J Mater Sci* 2012; 47:685–95 (2016).
60. Akbari-Mousavi, S. A. A., Barrett, L. M., Al-Hassani, S. T. S., “Explosive welding of metal plates” *J Mater Process Technol*; 202:224–39 (2008).
61. Fındık, F., “Recent developments in explosive welding” *Materials and Design*, 32 (3), 1081-1093 (2011).
62. Durgutlu, A., Gülenç, B., Fındık, F., “Examination of Copper/Stainless Steel Joints Formed by Explosive Welding”, *Mater. Design*, 26(6), p 497-507 (2005).
63. Chu, Q. L., Zhang, M., Li, J. H., Jin, Q., Fan, Q.Y., Xie, W. W., Luo, H., Bi, Z. Y., “Experimental Investigation of Explosion-Welded Cp-Ti/Q345 Bimetallic Sheet Filled with Cu/V Based Flux-Cored Wire”, *Mater. Design*, 67, p 606-614 (2015).

64. Fronczek, D. M., Wojewoda-Budka, J., Chulist, R., Sypien, A., Korneva, A., Szulc, Z., Schell, N., Zieba, P., “Structural properties of Ti/Al clads manufactured by explosive welding and annealing”, *Materials and Design*, 91 80–89 (2016).
65. Fronczek, D. M., Chulist, R., Litynska-Dobrzynska, L., Szulc, Z., Zieba, P., Wojewoda-Budka, J., “Microstructure Changes and Phase Growth Occurring at the Interface of the Al/Ti Explosively Welded and Annealed Joints”, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 25 (8), 3211-3217 (2016).
66. Cacciamani, G., De Keyzer, J., Ferro, R., Klotz, U. E., Lacaze, J., Wollants, P., “Critical evaluation of the Fe–Ni, Fe–Ti and Fe–Ni–Ti alloy systems, Intermetallics”, *Volume 14, Issues 10–11*, , Pages 1312-1325 (2006).
67. Kaya, Y., Kahraman, N., Durgutlu, A., Gülenç, B., “Investigation of The Microstructural, Mechanical and Corrosion Properties of Grade A Ship Steel-Duplex Stainless Steel Composites Produced via Explosive Welding”, *Metall. Mater. Trans. A*, 8(48A), p 3721-2711 (2017).
68. Bina, M. H., Dehghani, F., Salimi, M., “Effect of heat treatment on bonding interface in explosive welded copper/stainless steel” *Mater Design*, 45, 504-509 (2013).
69. Prasanthi, T. N., Sudha Ravikirana, C., Saroja, S., “Explosive cladding and post-weld heat treatment of mild steel and titanium”, *Mater. Design*, 93: p 180-193 (2016).
70. Hoseini Athar, M. M., Tolaminejad, B., “Weldability Window and The Effect of Interface Morphology on The Properties of Al/Cu/Al Laminated Composites Fabricated by Explosive Welding”, *Mater. Design*, 86, p 516-525 (2015).
71. Xie, M. X., Zhang, L. J., Zhang, G. F., Zhang, J. X., Bi, Z. Y., Li, P. C., “Microstructure and Mechanical Properties of Cp-Ti/X65 Bimetallic Sheets Fabricated by Explosive Welding and Hot Rolling”, *Mater. Design*, 87, p 181-197 (2015).
72. Asemabadi, M., Sedighi, M., Honarpisheh, M., “Investigation of Cold Rolling Influence on The Mechanical Properties of Explosive-Welded Al/Cu Bimetal”, *Mater. Sci. Eng. A*, 558, p 144-149 (2012).
73. Loureiro, A., Mendes, R., Ribeiro, J. B., Leal, M., Galvao, I., “Effect of Explosive Mixture on Quality of Explosive Welds of Copper to Aluminium”, *Mater. Design*, 95, p 256-267 (2016).
74. Kaçar, R., Acarer, M., “An Investigation on The Explosive Cladding of 316L Stainless Steel-DIN-P355GH Steel”, *J. Mater. Process. Tech.*, 152, p 91-96 (2004).

75. Kaçar, R., Acarer, M., “Microstructure-Property Relationship in Explosively Welded Duplex Stainless Steel-Steel”, *Mater. Sci. Eng. A*, 363, 290-296 (2003).
76. Xia, H., Wang, S., Ben, H., “Microstructure and mechanical properties of Ti/Al explosive cladding”, *Materials and Design*, 56, 1014–1019 (2014).
77. Topolski, K., Wieceński, P., Szulc, Z., Gałka, A., Garbacz, H., “Progress in the characterization of explosively joined Ti/Ni bimetals”, *Materials and Design* 63, 479–487 (2014).
78. Xunzhong, G., Jie, T., Wentao, W., Huaguan, L., Chen, W., “Effects of the inner mould material on the aluminium–316L stainless steel explosive clad pipe”, *Materials and Design*, 49, 116–122 (2013).
79. Gülenç, B., Kaya, Y., Durgutlu, A., Gülenç, İ. T., Yıldırım, M. S., Kahraman, N., “Production of Wire Reinforced Composite Materials Through Explosive Welding”, *Arch. Civil Mech. Eng.*, 16, p 1-8, İngiltere (2016).
80. Wang, Y., Beom, H. G., Sun, M., Lin, S., “Numerical Simulation of Explosive Welding Using The Material Point Method”, *Int. J. Imp. Eng.*, 38, 51-60 İngiltere (2011).
81. Prasanthi, T. N., Sudha, C., Saroja, R. S., “Formation and reversion of metastable fcc phase in a Ti–5Ta–2Nb explosive clad”, *Materials Characterization*, 116, 24-32 (2016).
82. Shankar, A. R., Dayal, R. K., Balasubramaniam, R., Raju, V. R., Mythili, R., Saroja, S., Vijayalakshmi, M., Raghunathan, V. S., “Effect of heat treatment on the corrosion behavior of Ti–5Ta–1.8Nb alloy in boiling concentrated nitric acid”, *J. Nucl. Mater.* 372, 277–284 (2008).
83. Haitao, J., Xiaoqian, Y., Jixiong, L., Xiaoge, D., Shangwu, Z., “Influence of Asymmetric Rolling Parameters on the Microstructure and Mechanical Properties of Titanium Explosive Clad Plate”, *Rare Metal Materials and Engineering*, 43(11): 2631-2636 (2014).
84. Kahraman, N., Gülenç, B., Findik, F., “Corrosion and mechanical-microstructural aspects of dissimilar joints of Ti–6Al–4V and Al plates”, *International Journal of Impact Engineering*, 34, 1423–1432 (2007).

ÖZGEÇMİŞ

Gökhan ESER 1988 yılında Manisa’da doğdu; ilkokula Manisa’ya bağlı Barbaros İlköğretim Okulunda başlayarak 4.sınıfa kadar burada devam etti. Daha sonra Altı Eylül İlköğretim Okulunda ilk ve orta öğrenimini burada tamamladı. Salihli Teknik Lise Bölümü’nden mezun oldu. 2008 yılında Karabük Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Metal Eğitimi Bölümü’nde öğrenime başlayıp, 2011 yılında Karabük Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Endüstri Mühendisliği’nde çift anadal hakkı kazanarak eğitime devam etti. 2013 yılında Metal Eğitimi Bölümü, 2014 yılında Endüstri Mühendisliği Bölümünü bitirerek Lisans eğitimini tamamladı. Mezun olduktan sonra, Aydın Trafo A.Ş.’da çalıştı, şu an ise Seramiksan A.Ş. ‘de Üretim Uzmanı olarak çalışmaya devam etmektedir. 2015 yılında Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İmalat Mühendisliği alanında Yüksek Lisans yapmaya başladı. Halen çalışma hayatı ile birlikte eğitimini sürdürmeye devam etmektedir.

ADRES BİLGİLERİ

Adres : Barbaros Mah. Turgut Özal Cad. Efe Sok. No: 12 Ahmetli / MANİSA

Telefon : (554) 701 43 46

E-posta : gokhann.eser@hotmail.com