


**POLİTEKNİK DERGİSİ**

***JOURNAL of POLYTECHNIC***

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: http://dergipark.org.tr/politeknik

CLARIVATE ANALYTICS
EMERGING SOURCES CITATION INDEX
INDEXED

ERKEN GÖRÜNÜM

# Patlamalı kaynak yöntemi kullanılarak üretilen bakır-titanyum bimetalik kompozit malzemelerin birleştirme arayüzeyinin incelenmesi

# *Investigation of the joining interface of copper-titanium bimetallic composite materials manufactured using explosive welding method*

***Yazar(lar) (Author(s)):*** *Mehmet Serkan YILDIRIM[1], Yakup KAYA[2]*

*ORCID[1]: 0000-0001-6133-6905*

*ORCID[2]: 0000-0002-9951-2844*

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz(To cite to this article)**: Yıldırım M.S ve Kaya Y., "Patlamalı kaynak yöntemi kullanılarak üretilen bakır-titanyum bimetalik kompozit malzemelerin birleştirme arayüzeyinin incelenmesi", ***Politeknik Dergisi***, *(*): *, (*).

**Erişim linki (To link to this article):** http://dergipark.org.tr/politeknik/archive

**DOI:** **10.2339/politeknik.1091491**

# Patlamalı Kaynak Yöntemi Kullanılarak Üretilen Bakır-Titanyum Bimetalik Kompozit Malzemelerin Birleştirme Arayüzeyinin İncelenmesi

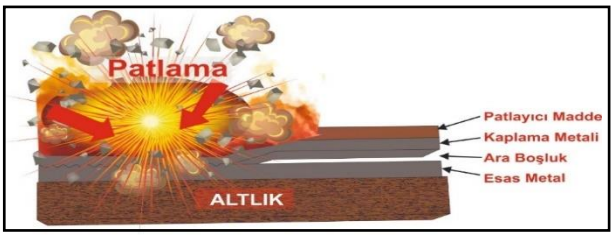
## Investigation of the Joining Interface of Copper-Titanium Bimetallic Composite Materials Manufactured Using Explosive Welding Method

### *Önemli noktalar (Highlights)*

- *Patlamalı kaynak düzeneği/ Explosive welding setup*
- *Bakır-Titanyum bimetalik kompozit üretimi/ Production of copper-titanium bimetallic composite*
- *Bakır-titanyum bimetalik kompozitlerin mekanik özellikleri/Mechanical properties of copper-titanium bimetallic composites*

### *Grafik Özet (Graphical Abstract)*

*Patlamalı kaynak yöntemiyle farklı patlayıcı oranları kullanılarak Cu-Ti bimetalik kompozit malzemeler üretilmiştir. / Cu-Ti bimetallic composite materials were produced by using different explosive rates by explosive welding method.*




**Şekil.** Deney düzeneğinin şematik görünümü/**Figure.** Schematic view of the setup

### *Amaç (Aim)*

*Bakır ve titanyum levhaların farklı patlayıcı oranları kullanılarak patlamalı kaynak yöntemi ile birleştirilebilirliğinin araştırılması. / Investigation of the jointability of copper and titanium plates by explosion welding method using different explosive rates.*

### *Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)*

*Bakır ve titanyum levhalar aynı araboşluk mesafesinde farklı patlayıcı oranlarında patlamalı kaynak yönteminde kullanılmıştır. / Copper and titanium sheets are used in burst welding method at different explosive rates at the same gap distance.*

### *Özgünlük (Originality)*

*Farklı patlayıcı oranları kullanılarak patlamalı kaynak yöntemi ile üretilen bakır-titanyum kompozitlerin mekanik özelliklerinin ve birleşme arayüzeyin mikroyapı özellikleri araştırılmıştır. / The mechanical properties of the copper-titanium composites produced by the explosion welding method using different explosive rates and the microstructure properties of the junction interface were investigated.*

### *Bulgular (Findings)*

*Patlayıcı oranı arttıkça birleştirme arayüzeyindeki dalgalanma arttığı ve buna paralel olarak dalga boyu ve genliğinin de arttığı belirlenmiştir./ It was determined that as the explosive rate increased, the fluctuation at the junction interface increased and parallel to this, the wavelength and amplitude increased.*

### *Sonuç (Conclusion)*

*Bakır ve titanyum levahaların patlamalı kaynak yöntemi kullanılarak birleştirilebilindiği gözlemlenmiştir./ It has been observed that copper and titanium plates can be joined using the explosion welding method.*

### *Etik Standartların Beyanı* (*Declaration of Ethical Standards*)

*Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in thisstudy do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.*

# Patlamalı Kaynak Yöntemi Kullanılarak Üretilen Bakır-Titanyum Bimetalik Kompozit Malzemelerin Birleştirme Arayüzeyinin İncelenmesi

*Araştırma Makalesi / Research Article*

**Mehmet Serkan YILDIRIM[1*], Yakup KAYA[2]**

[1]Teknik Bilimler MYO, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Gazi Üniversitesi, Türkiye
[2] Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, Karabük Üniversitesi, Türkiye
(Geliş/Received : 22.03.2022 ; Kabul/Accepted : 11.04.2022 ; Erken Görünüm/Early View : 07.06.2022)

**ÖZ**

Bu çalışmada, bakır (Cu) ve titanyum (Ti) levhalar patlamalı kaynak yöntemiyle farklı patlayıcı oranları kullanılarak birleştirilmiş ve Cu-Ti bimetalik kompozit malzemeler üretilmiştir. Üretilen Cu-Ti bimetalik kompozit malzemelerin birleştirme arayüzeyi üzerinde patlayıcı oranının etkisi mikroyapı çalışmaları ve mekanik testler ile incelenmiştir. Birleştirme arayüzeyi karakterizasyonu için, optik mikroskop (OM), taramalı elektron mikroskobu (SEM), enerji dağılımlı spektrometre (EDS) ve X-ışını kırınımı (XRD) yöntemleri kullanılmıştır. Birleştirme arayüzeyi mekanik özelliklerini belirlemek için ise çekme-makaslama, çentik darbe, eğme, burulma testleri ve mikrosertlik çalışmaları yapılmıştır. Mikroyapı incelemeleri sonucunda, patlayıcı oranı arttıkça birleştirme arayüzeyindeki dalgalanma arttığı ve bu artışa bağlı olarak da dalga boy ve genliğinde artış tespit edilmiştir. Ayrıca, R=3 patlayıcı oranında $Cu_4Ti$ ve $Cu_4Ti_3$ R=3.5 patlayıcı oranında ise $Cu_3Ti_2$, $Cu_4Ti_3$, $CuTi_2$ ve $CuTi_3$ intermetalik fazlarının oluştuğu tespit edilmiştir. Mekanik testler sonucunda ise birleştirme arayüzeyinde gözle görülebilir bir kaynak hatası oluşmadığı belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler: Bakır, titanyum, patlamalı kaynak, birleştirme arayüzeyi.**

# Investigation of The Joining Interface of Copper-Titanium Bimetallic Composite Materials Manufactured Using Explosive Welding Method

**ABSTRACT**

In this study, copper (Cu) and titanium (Ti) plates were joined by explosion welding method using different explosive rates and Cu-Ti bimetallic composite materials were produced. The effect of explosive rate on the bonding interface of the produced Cu-Ti bimetallic composite materials was investigated by microstructure studies and mechanical tests. Optical microscope (OM), scanning electron microscope (SEM), energy dispersive spectrometry (EDS) and X-ray diffraction (XRD) methods were used for the joining interface characterization. In order to determine the mechanical properties of the joining interface, tensile-shear, notch impact, bending, twisting tests and microhardness studies were carried out. As a result of the microstructure investigations, it was determined that as the explosive rate increased, the fluctuation at the bonding interface increased and accordingly, the wavelength and amplitude increased. In addition, it was determined that $Cu_4Ti$ and $Cu_4Ti_3$ intermetallic phases were formed at an explosive rate of R=3, and intermetallic phases of $Cu_3Ti_2$, $Cu_4Ti_3$, $CuTi_2$ and $CuTi_3$ at an explosive rate of R=3.5. As a result of the mechanical tests, it was determined that there was no visible welding defect at the bonding interface.

**Keywords: Copper, titanium, explosive welding, joining interface.**

ERKEN GÖRÜNÜM

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Gelişen ve değişen teknolojik gereksinimler insanlığı her açıdan daha üstün malzemeler üretme arayışına yönlendirmiş, bunun sonucu olarak farklı üretim metotları ortaya çıkarmıştır. Malzemelerin avantajlı özelliklerini bir araya getirmek amacıyla üretilen bimetalik ve çok katmanlı kompozit malzemeler günümüzde sıkça kullanılmaktadır [1,2]. Üretilen malzemeler sertlik, aşınma, korozyon direnci, iletkenlik, termal genleşme ve diğer mekanik ve fiziksel özellikleri bakımından saf malzemelerden daha üstündürler [2]. Bu tür malzemelerin üretiminde, iyi bilinen kompozit malzeme üretimi teknolojilerinden biri olan patlamalı kaynak endüstriyel üretimde yaygın olarak kullanılmaktadır [4-6].

Patlamalı kaynak, belirli miktarda patlayıcının patlatılması sonucu oluşan, deformasyon ısısı ve yüksek hızda çarpışmanın meydana getirdiği yüksek basıncı kullanarak kısa bir süre içinde metal ve biyolojik malzemelerin birleştirilmesini sağlayan bir işleme teknolojisidir [2,3]. Yapılan çalışmalarda patlamalı kaynak için çarpışma hızının 0,6 ila 3 mm/µs arasında

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : msyildirim@gazi.edu.tr

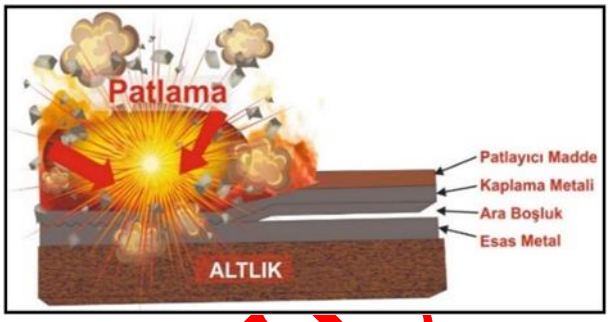
olduğu ve yüksek hızlı çarpışma tarafından üretilen basıncın bilinen tüm malzemelerin plastik deformasyonunu indükleyebildiğini, yani patlayıcı kaynak teknolojisinin çok geniş bir aralığa sahip olabileceğini göstermiştir [7].

Patlamalı kaynak yöntemi yaygın olarak birleştirilmesi zor olan farklı metaller arasındaki birleşmeleri üretmek için kullanılan bir katı hal kaynak yöntemidir [8,9]. Patlamalı kaynak hakkında yapılan araştırmalar 260'tan fazla benzer ve farklı metal ve alaşımının bu yöntem ile kaynaklanabildiğini göstermiştir [5]. Kaynaklı birleştirme için birleştirilecek malzemelerin yüksek gerilme oranlarında, yeterli süneklik ve tokluğa sahip olmaları gerekmektedir [8].

Bakır malzemeler yüksek iletkenlik ve ısıl iletkenliğe sahiptir [10], ek olarak dövme tekniği kullanılarak kolayca şekillendirilebilir [11]. Titanyum hafifliği, yüksek mukavemeti, mükemmel korozyon direnci ve üstün biyouyumluluğu [12,13] nedeniyle çok çeşitli uygulamalarda ve kaplama malzemesi olarak kullanılmaktadır [14]. Bu özelliklerinden dolayı bakır ve titanyum, endüstride yoğun olarak kullanılan malzemelerdendir. Özellikle elektrik endüstrisinde korozyona dayanaklı işlemlerde sıkça kullanılan malzeme çiftlerinden olan Cu-Ti bimetalik kompozit malzemelerin üretimlerinde çeşitli yöntemler kullanılmaktadır [15]. Bu yöntemlerden bir tanesi de patlamalı kaynak yöntemidir [16].

Bu çalışmanın amacı, korozif ortamlarda bile elektrik iletkenliği sağlayan Cu-Ti bimetalik kompozit malzemeleri [17,18] üretmek ve üretilen bimetalik kompozit malzemelerin birleştirme arayüzeyi mikroyapı ve mekanik özelliklerine farklı patlayıcı oranlarının etkisini incelemektir.

Kaynak işlemlerinde patlayıcı olarak Elbar-5 kullanılmıştır. Deneysel çalışmalarda kullanılacak patlayıcı oranlarını belirlemek için pilot deneyler yapılmış ve üç farklı patlayıcı oranı belirlenmiştir (R=patlayıcı ağırlığı/üst levha ağırlığı). Üst levha hızı aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanmıştır.




**Şekil 1.** Kaynak işlemlerinde kullanılan paralel düzenleme şematik görüntüsü (Parallel arrangement schematic image used in welding operations)

$$V_p^2 = 2E\frac{3}{\left[1+5\left(\frac{m}{c}\right)+4\left(\frac{m^2}{c^2}\right)\right]} \quad (1)$$

1 nolu denklemde [19]; Vp üst levha hızı (m/s), m üst levha ağırlığı (g), 2E Gurney enerjisi (2E=2.560.000 m/s) ve c patlayıcı miktarı (g)'dır. Çarpışma açısı (β) ise aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\beta = 2\sin^{-1}\left(\frac{V_p}{2V_d}\right)+\alpha \quad (2)$$

**Çizelge 1.** Deneysel çalışmalarda kullanılan bakır ve titanyumun kimyasal bileşimi (ağırlıkça %) (Chemical compositions of copper and titanium used in experimental studies) (wt. %)

| **Alaşım Elementi** (%) | **Si** | **Zn** | **Al** | **Cu** | **C** | **N** | **H** | **O** | **Ti** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **ASTM C11000 Bakır** | 0.001 | 0.001 | 0.0021 | Kalan | | | | | |
| **Grade 2 Titanyum** | - | - | - | - | 0.10 | 0.03 | 0.015 | 0.25 | Kalan |

## 2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL and METHOD)

Kaynak işlemlerinde kimyasal bileşimleri Çizelge 1'de verilen, 170x120x2 mm boyutlarında sertleştirilmiş elektrolitik ASTM C11000 serisi bakır (esas metal) ile 170x120x1.5 mm boyutlarında ticari saflıktaki (Grade 2) titanyum (kaplama metali) malzemeler kullanılmıştır. Patlamalı kaynak işlemleri paralel levha geometrisinde, Şekil 1'de şematik görüntüsü verilen düzenek kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

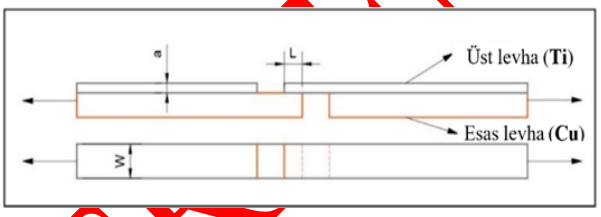
2 nolu denklemde [19] ise, Vp üst levha hızı (m/s), Vd patlayıcı hızı (Elbar-5=3200 m/s) ve α düzenleme açısı (paralel düzenleme=0°)'dır. Çizelge 2'de patlamalı kaynak işlemlerinde kullanılan kaynak parametreleri verilmiştir.

ÖNİZLEME

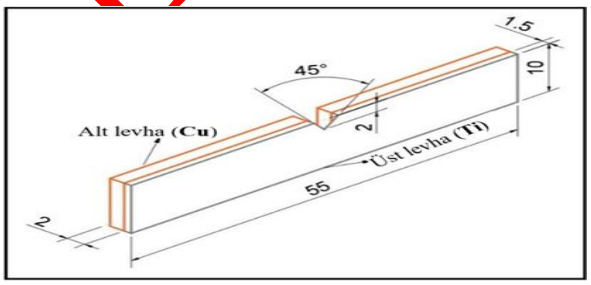
**Çizelge 2.** Kaynak parametreleri (Welding parameters)

| Patlayıcı Tipi | Patlayıcı yoğunluğu ($g/cm^3$) | Ara boşluk mesafesi s (mm) | Üst levha ağırlığı (g) | Patlayıcı oranı R | Patlayıcı miktarı (g) | Üst levha hızı (m/s) | Çarpışma Açısı β (°) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Elbar-5 | 0.8 | 1,5 | 140 ± 5 | 2.5 | 350 | 1460 | 26,37 |
| | | | | 3 | 420 | 1580 | 28,58 |
| | | | | 3.5 | 490 | 1680 | 30,43 |

Metalografik ve mekanik testler için, farklı patlayıcı oranları kullanılarak üretilen Cu-Ti bimetalik kompozit levhalar tel erozyon yöntemi ile kesilerek hazırlanmıştır. OM, SEM, EDS, XRD incelemeleri ve mikrosertlik çalışmaları için alınan numuneler bakalite gömülmüştür. Bu numuneler daha sonra zımparalama ve parlatma işlemlerine tabi tutulup hemen sonrasında bakır tarafı Kroll çözeltisi ile titanyum tarafı ise karışım bir çözelti ile (10 ml HF, 5 ml HNO3, 85 ml H2O) dağlanmıştır. OM çalışmalarında Leica DM 4000M, SEM ve EDS çalışmalarında Joel 6060, XRD çalışmalarında Advance D8 Buruker ve mikrosertlik çalışmalarında ise Q30 M Qness marka cihaz kullanılmıştır. Çekme-makaslama testleri için numuneler ASTM: D3165-07'ye göre hazırlanmış (Şekil 2) ve Shimadzu marka cihazda 0,5 mm/dk çekme hızı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çentik darbe testlerinde, Şekil 3'te şematik görüntüsü verilen 55x10x3.5 mm boyutlarındaki numuneler hazırlanmış ve testler oda sıcaklığında Devotrans marka test cihazında yapılmıştır. Eğme testleri ASTM A 263-12'ye göre hazırlanan numunelere çift yönlü olarak (kaplama içte ve dışta kalacak şekilde) uygulanmıştır. Burulma testleri ise tork anahtarı kullanılarak manuel olarak yapılmıştır. Mekanik testlerde her bir patlayıcı oranı için 3 adet test yapılmış ve bu testlerin ortalaması alınmıştır.




**Şekil 2.** Çekme-makaslama test numuneleri şematik görüntüsü (Schematic image of tensile-shearing test specimens)




**Şekil 3.** Çentik darbe numuneleri şematik görüntüsü (Schmatic image of charpy impact test specimens)

## 3. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS and DISCUSSIONS)

### 3.1. Optik Mikroskop İncelemeleri (Optical Microscopy Examinations)

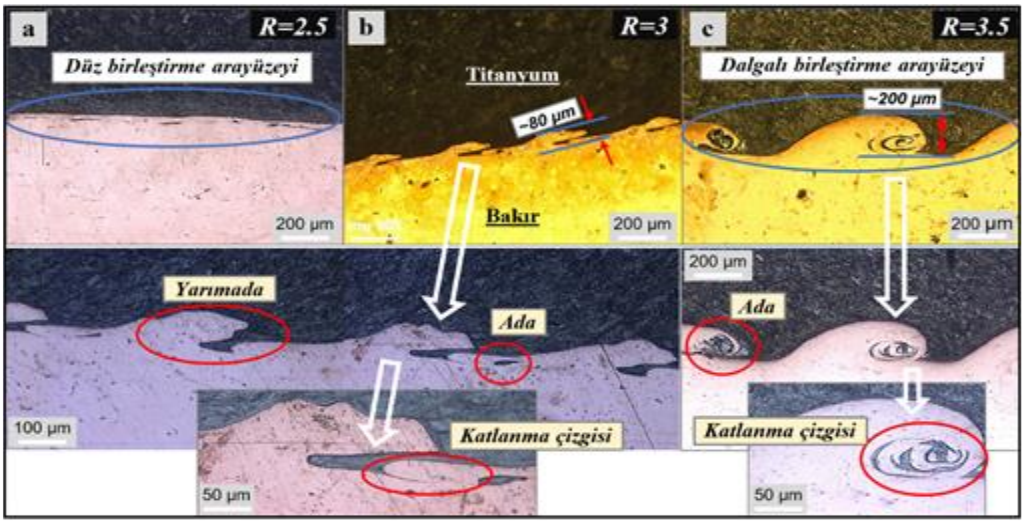
Farklı patlayıcı oranlarında üretilmiş Cu-Ti bimetalik kompozit malzemelere ait birleştirme arayüzeyi mikroyapı görüntüleri Şekil 4'te verilmiştir.

Mikroyapı görüntüleri incelendiğinde, R=2.5 patlayıcı oranında düz bir birleştirme arayüzeyi oluştuğu görülmektedir. Ancak patlayıcı oranı arttıkça (R=3) birleştirme arayüzeyinde dalgalanmanın başladığı (dalga boyu 375-400 µm, genliği ~80 µm) fark edilmektedir. Patlayıcı oranı daha da arttığında ise (R=3.5), birleştirme arayüzeyinde dalga boyu (750-800 µm) ve genliğinde (~200 µm) önemli artışlar olmuştur. Patlayıcı oranı arttıkça üst levhanın (titanyum) çarpışma hızı artmış (R=2.5 1460 m/s, R=3 1580 m/s ve R=3.5 1680 m/s) ve buna bağlı olarak darbe basıncı da artmıştır. Bu basınç artışı ile deformasyon oranı artmış ve deformasyon oranı artışına bağlı olarak da birleştirme arayüzeyindeki dalgalanma artmıştır. Sonuç olarak patlayıcı oranı arttıkça birleştirme arayüzeyindeki dalgalanma artmış ve bu artışa bağlı olarak dalga boy ve genliği de artmıştır.

Literatürde [20], patlamalı kaynak işlemi sırasında esas metal ve kaplama metaline (üst levha) spesifik ve genellikle çok yüksek hızlar veren bir basınç dalgasının oluştuğu bildirilmiştir. Ek olarak, yüksek hızlara sahip bu levhaların çarpışması, 1-2 atm×$10^5$ Pa'a kadar bir basıncı tetikleyeceği ve bu basıncın ise statik yüklerle elde edilemeyecek fiziksel durumların elde edilebileceğini belirtilmiştir. Ayrıca önceki bazı çalışmalarda [21-23] artan patlayıcı oranlarının çarpışma hızını ve darbe basıncını arttırdığı ve bunların da birleştirme arayüzeyinin düzden dalgalı bir şekle dönüşmesine neden olduğu bildirilmiştir. Ayrıca patlayıcı oranındaki artışın dalga boy ve genliğini de arttırdığı rapor edilmiştir.

Mikroyapı detay görüntüleri incelendiğinde ise, R=3 patlayıcı oranında birleştirme arayüzeyinde dalgalanmanın etkisiyle yarımada, ada benzeri yapılar ve dalgalanma katlanmalarının (girdap) oluştuğu, deneysel çalışmalarda kullanılan en yüksek patlayıcı oranında (R=3.5) artan dalgalanma sebebiyle birleştirme arayüzeyinde dalgalanma katlanmalarının arttığı ve bu katlanmaların da ada benzeri yapıları oluşturduğu görülmektedir. Birleştirme arayüzeyinde oluşan bu yapıların patlamalı kaynak esnasında oluşan basıncın etkisiyle meydana geldiği düşünülmektedir.

ÖN İNCELEME




**Şekil 4.** Bimetalik kompozit malzemelerin patlayıcı oranlara göre birleştirme arayüzeyi görüntüleri (a R=2.5, b R=3 ve c R=3.5) (Images of the joining interface of bimetallic composite materials according to explosive ratios (a R=2.5, b R=3 and c R=3.5))

Önceki çalışmalarda [19,24-26], patlayıcı kaynak yönteminde yüksek patlama kuvveti ve metal girdap akışı etkisiyle arayüzeyde yarımada/ada benzeri morfolojilerin meydana gelebileceği belirtilmiştir. Ek olarak birleştirme arayüzeyinde oluşan dalgalanmalar ve yarımada benzeri yapıların birleştirme yüzey alanını arttırdığı ve mekanik kilitlenme sağladığı tespit edilmiştir. Literatürde [19,27] patlamalı kaynakta, dalgalı arayüzey düz arayüzeye göre daha fazla birleştirme yüzey alanı ve dayanıklılık sunduğu için genellikle tercih sebebi olduğu rapor edilmiştir.

### 3.2. SEM ve EDS Analizleri (SEM and EDS Analyses)

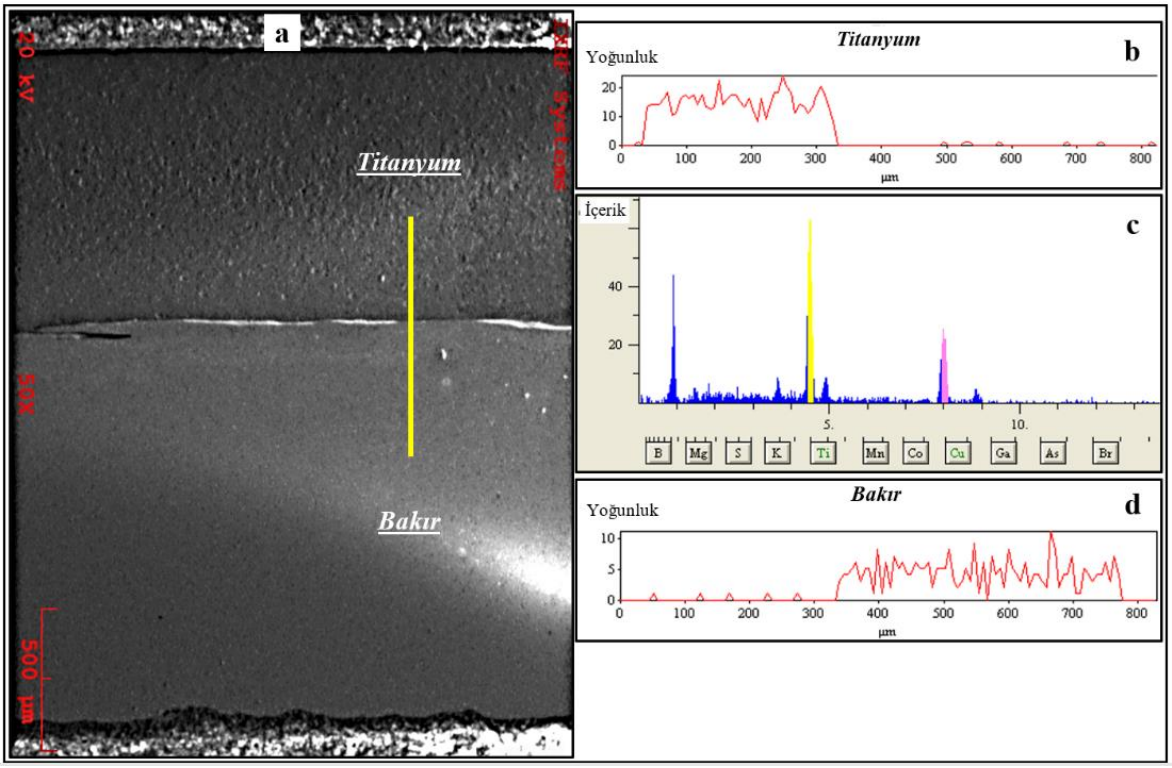
Patlamalı kaynak yöntemi ile üretilen Cu-Ti bimetalik kompozitlerin birleştirme arayüzeyi SEM görüntüleri ve EDS analizleri Şekil 5-7'de verilmiştir.

En düşük patlayıcı oranı kullanılarak üretilen Cu-Ti bimetalik kompozit malzemelerin arayüzey SEM görüntüsü (Şekil 5.a) irdelendiğinde, düz bir arayüzey oluştuğu görülmektedir. SEM görüntüsündeki EDS çizgi analizi (Şekil 5.b-d) incelendiğinde ise, kaplama metali (üst levha) titanyum malzemenin neredeyse tamamen Ti olduğunu ve esas metal bakır malzemenin de neredeyse tamamen Cu olduğu anlaşılmaktadır. EDS çizgi analizinde birleştirilen malzemeler arasında difüzyon olmadığı ve genel olarak kimyasal bileşimin kaplama metali ve esas metal kimyasal bileşimi ile aynı olduğu belirlenmiştir.

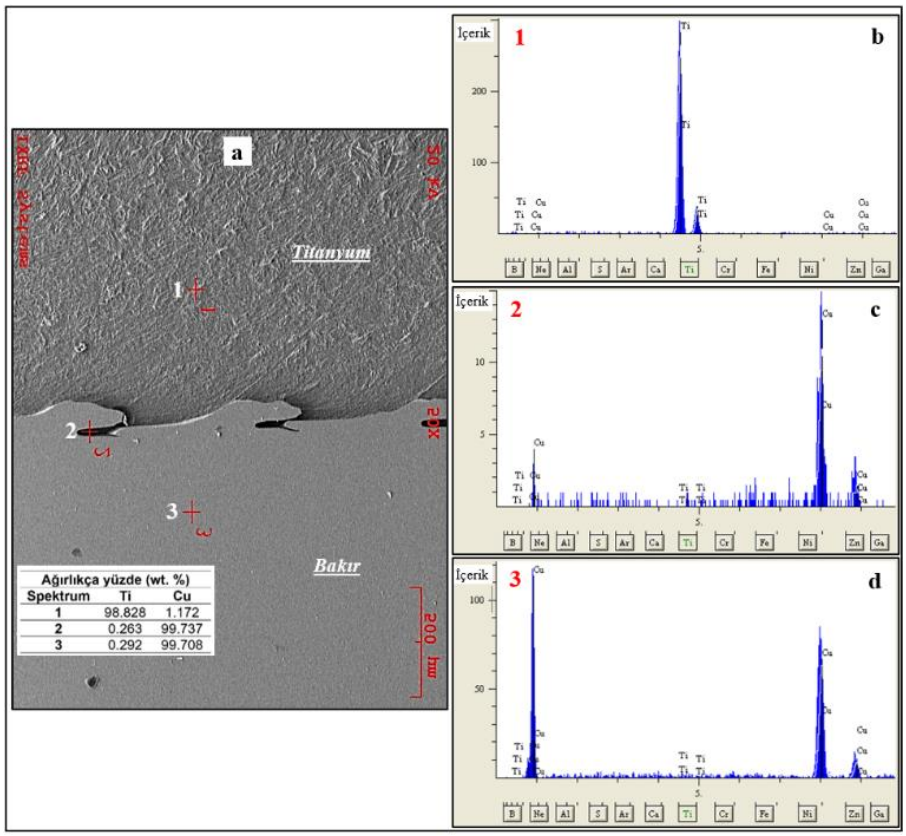
R=3 patlayıcı oranı kullanılarak üretilen Cu-Ti bimetalik kompozit malzemelerin arayüzey SEM görüntüsü (Şekil 6.a) irdelendiğinde, birleştirme arayüzeyinde dalgalanmanın başladığı ve neredeyse tamamen birleştirme arayüzeyini kapladığı görülmektedir. Patlayıcı oranı artırıldığında, üst levha hızı ve levhalar üzerindeki basınç artmış ve de dalgalı bir birleştirme arayüzeyi (Şekil 4) elde edilmiştir. SEM görüntüsü üzerinde belirtilen noktaların EDS analizlerinde (6.b-d); kaplama metali üzerindeki 1-nolu noktada kimyasal bileşim olarak %98.828 Ti (%1.172 Cu (αTi)) ve esas metal üzerindeki 3-nolu noktada kimyasal bileşim olarak %99.708 Cu belirlenmiştir. Birleştirme arayüzeyinde oluşan yarımada benzeri morfolojiye sahip dalgalanma üzerindeki 2-nolu noktada ise kimyasal bileşim olarak %99.737 Cu tespit edilmiştir. Şekil 6 EDS nokta analizinde difüzyon oluşmadığı ve kimyasal bileşimin birleştirilen malzemelerin kimyasal bileşimleri ile benzer olduğu belirlenmiştir.

R=3.5 patlayıcı oranı kullanılarak üretilen bimetalik kompozit malzemelerin arayüzey SEM görüntüsü (Şekil 7.a) irdelendiğinde; dalgalı arayüzey oluştuğu belirlenmiştir. Patlayıcı oranın daha da arttırılmasıyla (R=3'ten R=3.5'a) üst levha hızı ve darbe basıncı artmış, bu artışa paralel olarak da birleştirme arayüzeyindeki dalgalanma artmıştır. Ek olarak oluşan dalgaların boy ve genlikleri de artmıştır (Şekil 4). SEM görüntüsü üzerinde belirtilen noktaların EDS analizlerinde (Şekil 7.b-g); kaplama metali üzerindeki 1-nolu noktada kimyasal bileşim olarak %99.591 Ti ve esas metal üzerindeki 2-nolu noktada kimyasal bileşim olarak %99.635 Cu belirlenmiştir. Birleştirilen malzemeler üzerindeki EDS nokta analizlerinde difüzyon oluşmadığı ve kimyasal bileşimin aynı olduğu tespit edilmiştir. Birleştirme arayüzeyinde oluşan ada benzeri yapıya sahip ve katlanma çizgileri (artan darbe basıncı ile meydana gelen) olan dalgalanma üzerindeki, 3-nolu noktada kimyasal bileşim olarak %98.007 Ti + %1.993 Cu (αTi), 4-noktada %51.641 Ti + %48.359 Cu, 5-nolu noktada %91.92 Ti + %8.08 Cu ve 6-nolu noktada ise %87.652 Ti + %12.348 Cu belirlenmiştir. Literatürdeki Cu-Ti denge diyagramından [28], 4-nolu noktada CuTi fazı, 5 ve 6-nolu noktalarda ise CuTi2 fazının oluşabileceği görülmüştür.

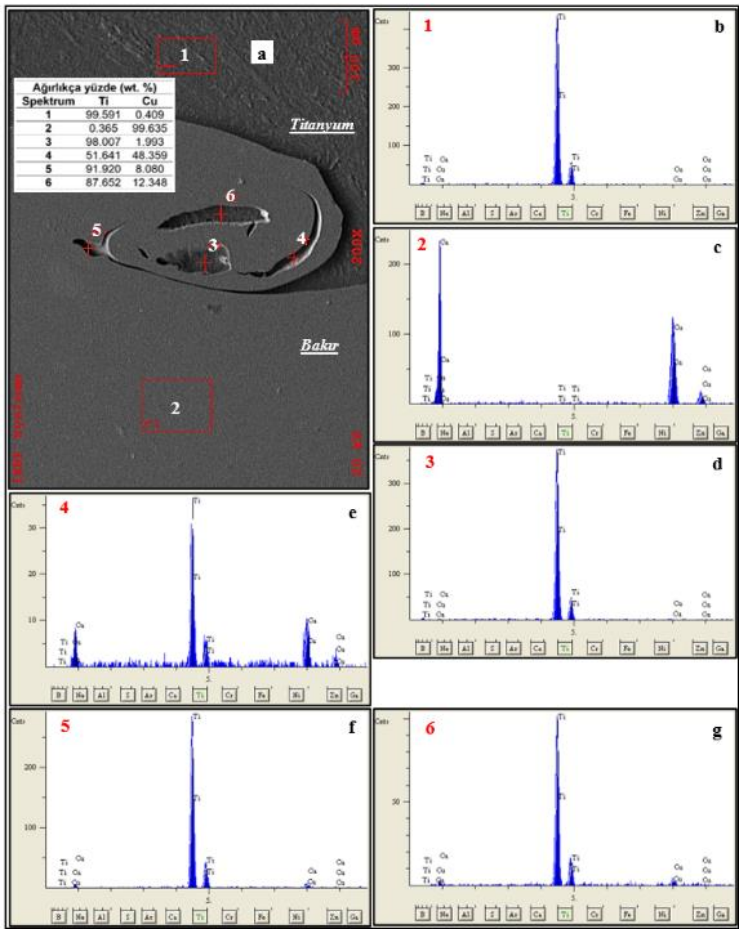
ERKEN GÖRÜNÜM




**Şekil 5. (a)** R=2.5 için Cu-Ti bimetalik kompozitlerin arayüzey SEM görüntüsü, **(b-d)** EDS çizgi analizi sonuçları (**(a)** SEM image of interface of Cu-Ti bimetallic composites for R=2.5, **(b-d)** EDS line analysis results)




**Şekil 6. (a)** R=3 için Cu-Ti bimetalik kompozitlerin arayüzey SEM görüntüsü, **(b-d)** EDS nokta analizi sonuçları (**(a)** SEM image of interface of Cu-Ti bimetallic composites for R=2.5, **(b-d)** EDS point analysis results**)**




**Şekil 7. (a)** R=3.5 için Cu-Ti bimetalik kompozitlerin arayüzey SEM görüntüsü, **(b-g)** EDS nokta analizi sonuçları (**(a)** SEM image of interface of Cu-Ti bimetallic composites for R=2.5, **(b-g)** EDS point analysis results)

SEM görüntüleri ve EDS analizleri değerlendirildiğinde, R=2.5 patlayıcı oranı ile düz bir birleştirme arayüzeyi oluştuğu ve difüzyon meydana gelmediği belirlenmiştir. Patlayıcı oranı R=3 ve 3.5'a yükseltildiğinde ise birleştirme arayüzeyinin katlanma çizgileri olan ve yarımada/ada benzeri morfolojiye sahip dalgalı yapıya dönüştüğü tespit edilmiştir. Arayüzeyde oluşan yarımada/ada benzeri morfolojiye sahip dalgalı yapı üzerinde yapılan EDS analizlerinde $CuTi_2$ ve CuTi fazlarının oluşabileceği anlaşılmıştır. Kim ve ark. [29] patlamalı kaynak yöntemi ile üç katmanlı Ti/Cu/Ti kompozit malzemeleri üretmişler, haddelenmiş ve 300, 400 ve 500°C' de tavlanmış numunelere uyguladıkları SEM-BSE ve EDX analizleri sonucunda, birleştirme arayüzeyinde $Cu_4Ti$, $Cu_3Ti_2$, CuTi ve $CuTi_2$ fazlarının oluşabileceğini bildirmişlerdir. Literatürde patlamalı kaynak yöntemi ile üretilen diğer Cu-Ti kompozit malzemelerin birleştirme arayüzeylerine uygulanan SEM-EDS analizleri sonucunda ise [15] $Cu_4Ti$, $Cu_2Ti$, CuTi ve $CuTi_2$ [30] $Cu_4Ti$, $Cu_4Ti_3$, CuTi ve $CuTi_2$ fazlarının oluşabileceğini tespit edilmiştir.

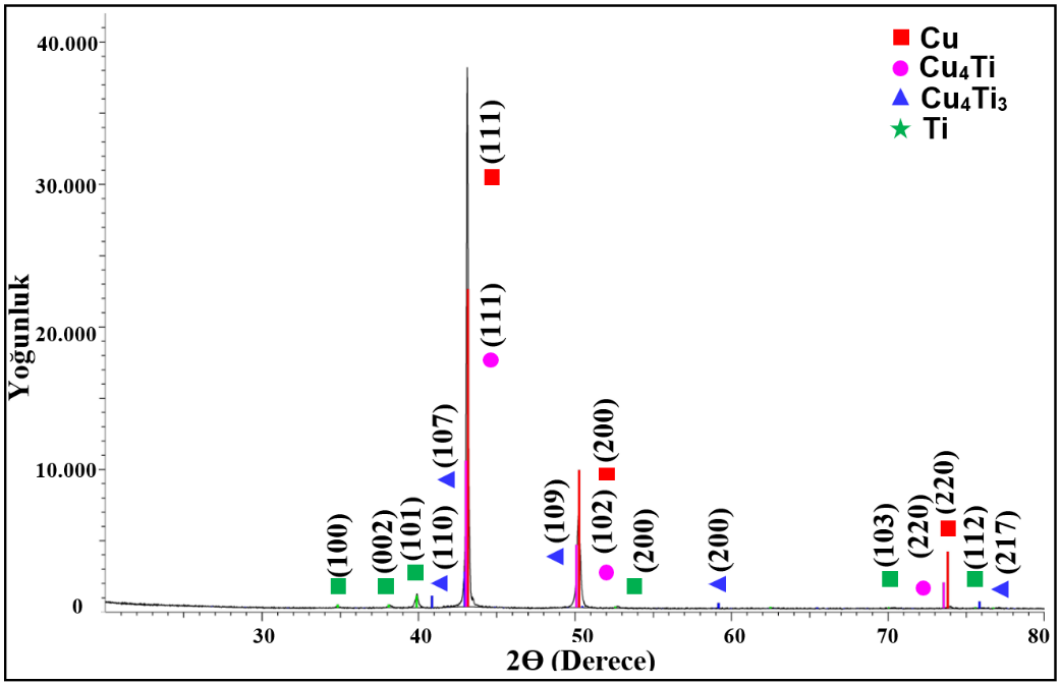
### 3.3. XRD Analizleri (XRD Analysis)

Patlamalı kaynak yönteminde kaynak parametrelerine bağlı olarak farklı kimyasal bileşime sahip olan katılaşmış ergiyik bölgeler birleştirme arayüzeyinde farklı yapılar halinde (yarımada/ada ve girdap) rastgele dağılmaktadır. Şekil 4'teki Cu-Ti bimetalik kompozit birleştirme arayüzeyi mikroyapı detayında görülen yarımada/ada benzeri yapılar ve dalgalanma katlanmaları (girdap) kısmen ergimiş ve katılaşmış bölgeleri içermektedir. Bu bölgelerde meydana gelen fazları belirlemek için XRD analizleri yapılmış ve sonuçlar Şekil 8-9'da verilmiştir.

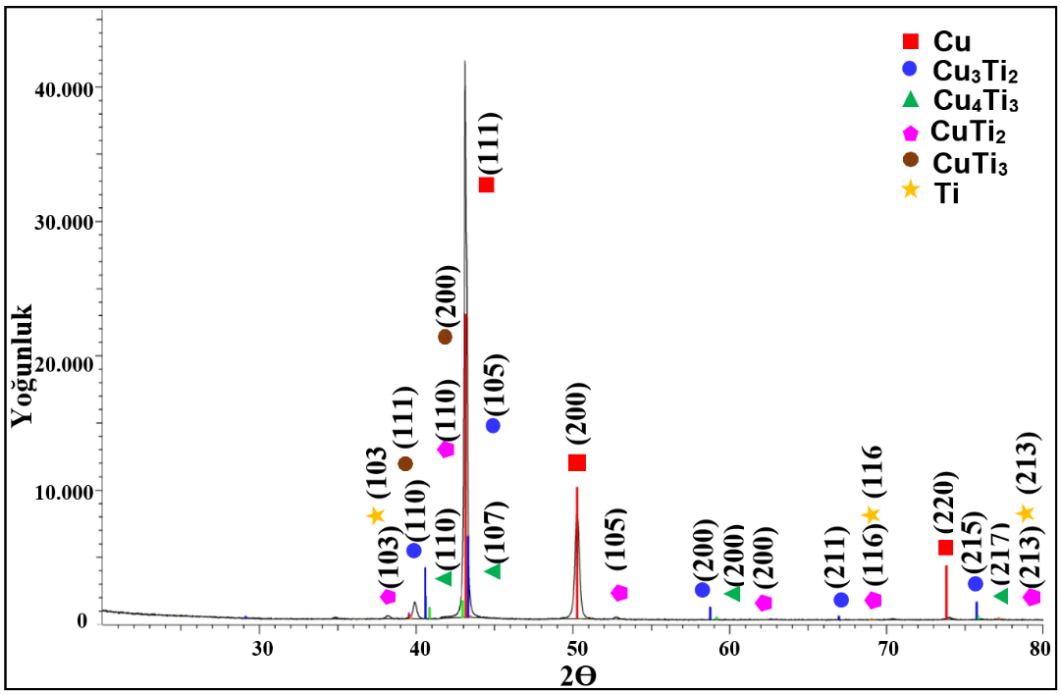
R=3 patlayıcı oranında birleştirilen Cu-Ti bimetalik kompozit malzemenin XRD modeli incelendiğinde Cu, Ti, $Cu_4Ti$ ve $Cu_4Ti_3$ kırınım pikleri görülmektedir. Bu ise patlamalı kaynak esnasında Cu ve Ti'nin $Cu_4Ti$ ve $Cu_4Ti_3$ intermetaliklerini oluşturmak için reaksiyona girdiğini göstermektedir. R=3.5 patlayıcı oranında birleştirilen Cu-Ti bimetalik kompozit malzemenin XRD modeli incelendiğinde ise Cu, Ti, $Cu_3Ti_2$, $Cu_4Ti_3$, $CuTi_2$ ve $CuTi_3$ kırınım pikleri görülmektedir. Bu ise patlamalı kaynak esnasında Cu ve Ti'nin $Cu_3Ti_2$, $Cu_4Ti_3$, $CuTi_2$ ve $CuTi_3$ intermetaliklerini oluşturmak için reaksiyona girdiğini göstermektedir.

Literatürdeki Cu-Ti denge diyagramına [28] göre birleştirme arayüzeyinde birkaç tane intermetalik faz ($CuTi_2$, CuTi, $Cu_4Ti_3$, $Cu_3Ti_2$, $Cu_2Ti$ ve $Cu_4Ti$) oluşabilir.

ERKEN




**Şekil 8.** R=3 için Cu-Ti bimetalik kompozitlerin birleştirme arayüzeyi XRD analizi görüntüsü (XRD analysis image of joining interface of Cu-Ti bimetallic composites for R=3)




**Şekil 9.** R=3.5 için Cu-Ti bimetalik kompozitlerin birleştirme arayüzeyi XRD analizi görüntüsü (XRD analysis image of joining interface of Cu-Ti bimetallic composites for R=3.5)

Patlamalı kaynak yönteminde deformasyon enerjisinin çok büyük ve yeni faz oluşumu için gerekli olan aktivasyon enerjisi ise küçüktür [31]. Bu nedenlerle literatürdeki faz diyagramlarında görülmese bile, patlamalı kaynak yönteminde patlayıcı oranına bağlı olarak, birleştirme arayüzeyinde oluşan katılaşmış ergiyik bölgelerin mikroyapısı ve kimyasal bileşimine ek olarak dalga yapısı, boyutu, şekli ve yoğunluklarına göre SEM/EDS analizlerine ek olarak farklı intermetalik fazlar da oluşabilmektedir [15]. Patlamalı kaynak yöntemi ile üretilen Cu-Ti kompozit numunelere uygulanan XRD analizleri sonucunda Paul vd. [15] $Cu_4Ti_3$, $CuTi_3$, $Cu_3Ti$, Kim vd. [27] $Cu_4Ti$, CuTi, $CuTi_2$, $Cu_3Ti$ ve Chen vd. [30] $Cu_4Ti$, $Cu_4Ti_3$, CuTi, $CuTi_2$ intermetalik fazlarını tespit etmişlerdir.

### 3.4. Mikrosertlik Çalışmaları (Microhardness Test)

Patlayıcı oranlarının sertlik değerleri üzerindeki etkilerini belirlemek için üretilen Cu-Ti bimetalik kompozit numunelere uygulanan mikrosertlik çalışmalarının sonuçları Şekil 10'da verilmiştir.

Mikrosertlik grafiği incelendiğinde, patlayıcı oranındaki artışlarla birlikte kompozit numunelerin arayüzeyin iki tarafında da (bakır/titanyum) belirgin, levhaların dış yüzeylerinde ise daha az miktarda olmak üzere sertlik değerlerinde artış görülmüştür. Levhaların kalınlık merkezlerinde ise orijinal levhaların sertlik değerlerine yakın değerler tespit edilmiştir. Birleştirme arayüzeyine yakın bölgelerdeki sertlik artışı, üst levha ve esas metal levhasının yüksek hızlarda çarpışması sonucu oluşan deformasyon sertleşmesinden kaynaklanmaktadır. Titanyum levha dış yüzey sertlik artışına patlama esnasında oluşan şok dalgalarının neden olduğu soğuk deformasyon sebep olurken, bakır levha dış yüzey sertlik artışına ise darbe basıncının altıktan yansımasının neden olduğu soğuk deformasyon sebep olmaktadır. Örneğin, orijinal bakır levhanın sertliği ~125 HV ve R=2.5 patlayıcı oranında, arayüzeye 50 µm (çarpışma noktasına en yakın bölge) mesafede 147 HV, 100 µm mesafede 136 HV, 1000 µm (levha kalınlık merkezi) mesafede 125 HV, 1900 µm mesafede 129 HV ve 1950 µm (levha dış yüzeyine en yakın bölge) mesafede ise 135 HV olarak ölçülmüştür. R=3 ve R=3.5 patlayıcı oranları için de aynı mesafelerde benzer sertlik değerleri belirlenmiştir. Bimetalik kompozit numunelerin üst levha tarafında da arayüzeyden uzaklaştıkça sertlik değerleri azalmış, levha kalınlık merkezinde orijinal titanyum sertlik değeri (~160 HV) ölçülmüş ve levhanın dış yüzeyine yaklaştıkça sertlik değerleri tekrar yükselmiştir.

Kahraman ve Gülenç [16] patlamalı kaynak yöntemi ile ürettiği bakır-titanyum kompozit levhalar üzerinde sertlik testleri gerçekleştirmiş ve patlayıcı oranı artışına bağlı olarak sertlik değerlerinin arttığını bildirmiştir. Ek olarak en yüksek sertlik değerlerinin birleştirme arayüzeyinde meydana gelen yüksek hızlı çarpışma sırasında oluşan soğuk deformasyondan dolayı birleştirme arayüzeyi yakınlarından elde edildiğini, levhaların kalınlık merkezlerinde ise patlama etkisinin daha düşük olması sebebiyle levhaların orijinal sertliklerine yakın değerler elde edildiğini ve levhaların dış yüzeylerine doğru tekrar sertlik değerlerinin arttığı rapor edilmiştir. Paul vd. [15] (Cu/Ti), Mahmood vd. [32] (Ti6Al4V/CP-Ti/Bakır) ve Paul vd. [33] (Titanyum-Bakır) tarafından patlamalı kaynak yöntemi ile üretilen kompozit numunelere uygulanan sertlik çalışmaları sonucunda paralel sonuçlar rapor edilmiştir.

### 3.5. Çekme-Makaslama Testi (Tensile-Shear Test)

Farklı patlayıcı oranlarında üretilmiş Cu-Ti bimetalik kompozit malzemelere uygulanan çekme-makaslama testi sonuçları ve test sonrası kopma görüntüleri Şekil 11'de verilmiştir.

Test sonuçları irdelendiğinde, artan patlayıcı oranına paralel olarak çekme-makaslama dayanımının arttığı belirlenmiştir. Patlayıcı oranı artmasıyla üst levhanın çarpışma hızı artmış (R=2.5 1460 m/s, R=3 1580 m/s ve R=3.5 1680 m/s) ve buna paralel olarak da darbe basıncı artmıştır. Bu basınç artışı ile deformasyon oranı artmış ve deformasyon oranı artışına bağlı olarak da deformasyon sertleşmesi miktarı artmıştır. Üretilen bimetalik kompozit malzemelerin çekme-makaslama testleri sonucunda, numuneler aynı malzemeden (bakır) kopmasına rağmen artan deformasyon sertleşmesi (Şekil 10) ile çekme-makaslama dayanımları artmaktadır (423 ± 5 MPa'dan 458 ± 5 MPa'ya). Athar ve Tolaminejad [34], patlamalı kaynak yönteminde artan çarpışma hızının darbe basıncını arttırdığını ve artan darbe basıncının ise deformasyon sertleşmesi ile çekme-makaslama mukavemetini artırdığını bildirmiştir.

Şekil 11 incelendiğinde çekme-makaslama testleri sonrasında, birleştirme arayüzeyinde herhangi bir hasar olmadığı ve kopmanın bakır malzemede oluştuğu görülmektedir. Bimetalik kompozit numunelerin birleştirme arayüzeyinde herhangi bir hasar olmaması, kullanılan kaynak parametrelerinin uygun olduğunu da göstermektedir. Paul vd. [15] patlamalı kaynak yöntemi kullanarak ürettiği Cu/Ti kompozit numunelere uyguladıkları çekme-makaslama testleri sonrasında, birleştirme arayüzeyi mukavemetinin bakır malzemeden daha yüksek olduğunu bu sebepten de kopmanın bakır malzemede meydana geldiğini bildirmişlerdir. Literatürde [16,32,33] patlamalı kaynak kullanılarak üretilmiş Cu/Ti kompozit numunelere yapılan çekme-makaslama testleri sonucunda benzer sonuçlar elde edilmiştir.

### 3.6. Çentik Darbe Testi (Notch Impact Test)

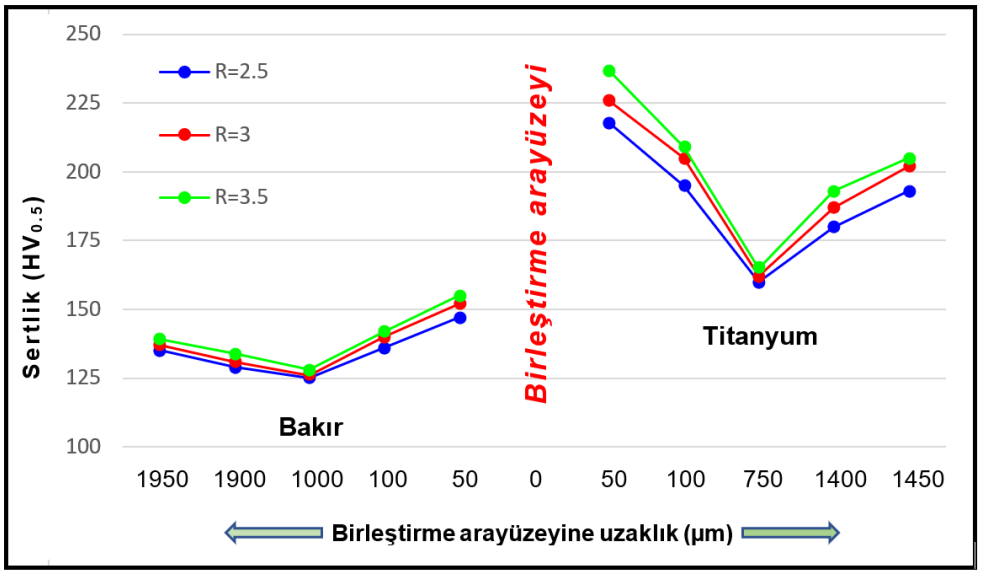
Üretilen Cu-Ti kompozit numunelere oda sıcaklığında yapılan çentik darbe testi sonuçları ve test sonrası makro görüntüleri Şekil 12'de verilmiştir.

Testlerin sonuçları irdelendiğinde, patlayıcı oranı arttıkça kompozit numunelerin darbe tokluk değerlerinin azaldığı belirlenmiştir. Patlayıcı oranın artmasıyla birlikte artan darbe basıncı, malzemelerdeki deformasyon miktarını arttırmış ve kompozit malzemelerin birleştirme arayüzeyindeki sertlik değerleri de artmıştır (Şekil 10). Bu artışa bağlı olarak kompozit numunelerin darbe tokluklarında azalma olmuştur (14.1 ± 0.3 J'den 13.2 ± 0.3 J'e). Çentik darbe testleri sonrası numune görüntüleri incelendiğinde ise, kullanılan bütün patlayıcı oranlarında kompozit nunumelerde bükülme meydana geldiği, fakat ayrılma olmadığı görülmektedir. Kaya [19] Bakır/Alüminyum sacları, farklı patlayıcı miktarları kullanılarak patlamalı kaynakla birleştirilmiş ve patlayıcı miktarı artması ile deformasyon oranının arttığını, buna paralel olarak da sertlik değerlerinin artığını, sertlik artışının ise darbe tokluğunda azalmaya sebep olduğunu bildirmiştir. Literatürde, patlamalı kaynak yöntemi ile üretilen Gemi çeliği/Alüminyum [23], Grade A gemi sacı/AISI 2304 [24], Gemi sacı/AISI 316L [35] ve Gemi çeliği/Titanyum

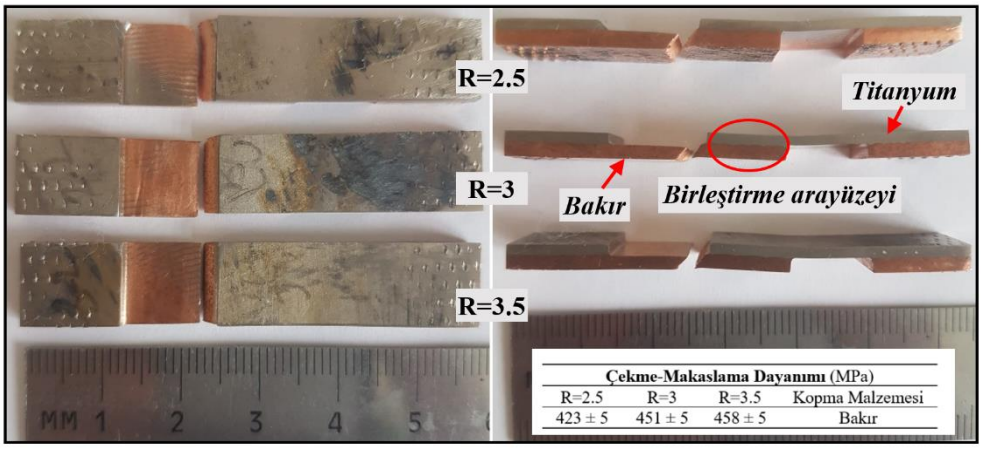
ERKEN GÖRÜNÜM

[36] kompozit numunelere uygulanan çentik darbe testleri sonrasında benzer sonuçlar bildirilmiştir.

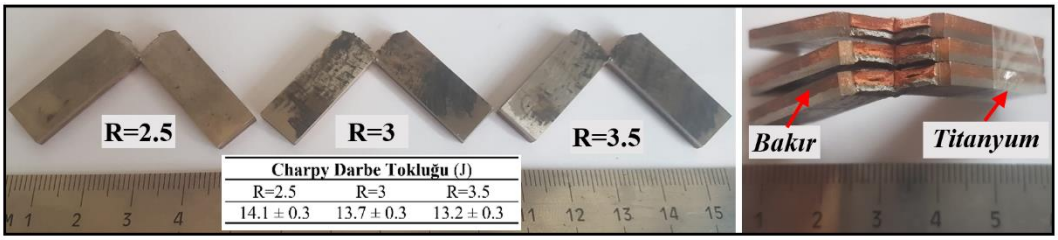
Cu-Ti bimetalik kompozitlere çift yönlü (kaplama levhası hem içte hem dışta) 180° eğme (üç nokta eğme) testleri uygulanmış ve test sonrası elde edilen makro görüntüler Şekil 13'te görülmektedir.




**Şekil 10.** Bimetalik kompozit numunelerin sertlik testi sonuçları (Hardness test results of bimetallic composite samples)




**Şekil 11.** Çekme-makaslama testi sonuçları ve test sonrası kopma görüntüleri (Tensile-shear test results and post-test rupture images)

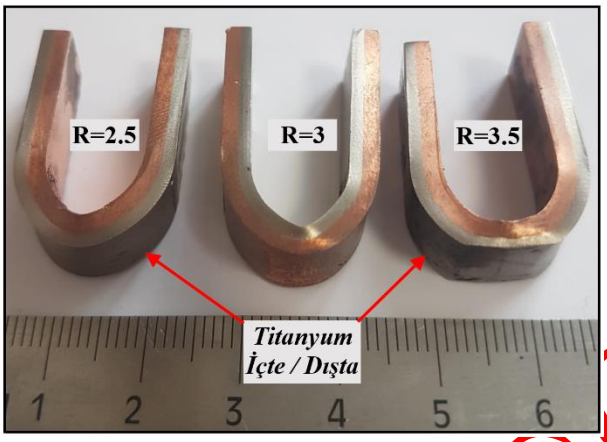



**Şekil 12.** Çentik darbe testi sonuçları ve test sonrası numune görüntüleri (Notch impact test results and post-test specimen images)

**3.7. Eğme Testi** (Bending Test)

Şekil 13'teki eğme testleri sonrasındaki makro görüntüler irdelendiğinde, Cu-Ti kompozit numunelerin

arayüzeylerinde gözle görülebilir bir çatlak veya kırık meydana gelmediği görülmektedir. Farklı patlayıcı oranları kullanılarak üretilen numunelerin tümünde herhangi bir kusur olmaması, kullanılan birleştirme yönteminin güvenilirliğini ve üretilen numunelerin servis şartlarında büküm yapılarak da kullanılabileceğini göstermiştir. Mahmood vd. [32] patlamalı kaynak yöntemi ile ürettikleri Ti6Al4V/CP-Ti/Cu kompozit numunelere uyguladıkları üç nokta eğme testleri sonrasında birleştirme arayüzeyinde herhangi bir kusur olmadığını bildirmişlerdir. Patlamalı kaynak yöntemi ile üretilen Ti6Al4V/Al [37], Ti/SS [38], Cu/SS [39] ve Al/Cu [40] kompozit numunelere uygulanan eğme testleri sonrasında benzer sonuçlar bildirilmiştir.




**Şekil 13.** Eğme testi sonrası numune görüntüleri (Specimen images after bending test)

### 3.8. Burulma Testi (Twisting Test)

Cu-Ti bimetalik kompozitlere 180° burulma testleri uygulanmış ve testler sonrası elde edilen makro görüntüler Şekil 14'te görülmektedir.




**Şekil 14.** Burulma testi sonrası numune görüntüleri (Specimen images after twisting test)

Şekil 14'teki 180° burulma testi sonrası makro görüntüler incelendiğinde, farklı patlayıcı oranları kullanılarak üretilen Cu-Ti bimetalik kompozit numunelerin arayüzeylerinde gözle görülebilir bir çatlak veya yırtılma belirlenmemiştir. Kaynak işleminde numunelerin maruz kaldığı darbe basıncı sebepli soğuk deformasyona ek olarak burulma testinde maruz kaldığı ikinci bir soğuk deformasyona rağmen birleştirme arayüzeyinde herhangi bir hasar oluşmaması birleştirme arayüzeyi kalitesini göstermektedir. Literatürde, patlamalı kaynak yöntemi ile üretilen Gemi çeliği/Titanyum [36] ve Bakır/Çelik [41] kompozit numunelere uygulanan burulma testleri sonrasında, arayüzeyde yüksek deformasyon ve sertleşmeye rağmen herhangi bir çatlak oluşmadığını ve birleştirme arayüzeyi mukavemetinin tatmin edici olduğunu bildirmişlerdir.

## 4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Patlamalı kaynak yöntemi ile korozif ortamlarda elektrik iletkenliği sağlayan Cu-Ti bimetalik kompozit malzemeler üretilmiştir. Üretilen bimetalik kompozit malzemelerin birleştirme arayüzeyi mikroyapı ve mekanik özelliklerine farklı patlayıcı oranlarının etkisi incelenmiş ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- Mikroyapı incelemeleri sonucunda, patlayıcı oranı arttıkça birleştirme arayüzeyindeki dalgalanma arttığı ve bu artışa bağlı olarak da dalga boy ve genliğinde artış tespit edilmiştir. Ek olarak birleştirme arayüzeyinde patlayıcı oranına bağlı olarak, dalgalanmanın etkisiyle yarımada/ada benzeri yapılar ve dalgalanma katlanmalarının (girdap) oluştuğu tespit edilmiştir. Ayrıca birleştirme arayüzeyinde oluşan bu yapıların birleştirme yüzey alanını arttırdığı ve mekanik kilitlenme sağlayacağı belirlenmiştir.
- SEM görüntüleri ve EDS analizleri sonucunda, R=2.5 patlayıcı oranında düz bir birleştirme arayüzeyi meydana geldiği ve difüzyon olmadığı belirlenmiştir. Patlayıcı oranı R=3 ve 3.5'a yükseltildiğinde ise birleştirme arayüzeyinin katlanma çizgileri olan ve yarımada/ada benzeri morfolojiye sahip dalgalı yapıya dönüştüğü tespit edilmiştir. Ayrıca bu yapılar üzerinde yapılan EDS analizlerinde $CuTi_2$ ve CuTi fazlarının oluşabileceği belirlenmiştir.
- XRD analizleri sonucunda, R=3 patlayıcı oranında $Cu_4Ti$ ve $Cu_4Ti_3$ R=3.5 patlayıcı oranında ise $Cu_3Ti_2$, $Cu_4Ti_3$, $CuTi_2$ ve $CuTi_3$ intermetalik fazlarının oluştuğu tespit edilmiştir.
- Mikrosertlik çalışmaları sonucunda, en yüksek sertlik değerlerinin birleştirme arayüzeyinde meydana gelen yüksek hızlı çarpışma sırasında oluşan soğuk deformasyondan dolayı birleştirme arayüzeyi yakınlarından elde edildiği, levhaların kalınlık merkezlerinde ise patlama etkisinin daha düşük olması sebebiyle levhaların orijinal sertliklerine yakın değerler elde edildiği ve levhaların dış yüzeylerine doğru tekrar sertlik değerlerinin arttığı belirlenmiştir. Ayrıca artan patlayıcı oranına bağlı olarak da sertlik değerleri artmıştır.

ÖN GÖRÜNÜM

- Çekme-makaslama testleri sonucunda, artan patlayıcı oranına paralel olarak dayanımının arttığı, bütün patlayıcı oranlarında testler sonrasında bimetalik kompozit numunelerin birleştirme arayüzeyinde herhangi bir hasar olmadığı ve kopmanın bakır malzemede oluştuğu belirlenmiştir.
- Oda sıcaklığında yapılan çentik darbe testleri sonucunda, artan patlayıcı oranına paralel olarak artan deformasyon sertleşmesi sebebiyle darbe tokluğunun azaldığı tespit edilmiştir. Ayrıca çentik darbe testleri sonrasında kullanılan bütün patlayıcı oranlarında bimetalik kompozit nunumelerde bükülme meydana geldiği, fakat ayrılma olmadığı belirlenmiştir.
- Çift yönlü 180° eğme testleri sonucunda, bimetalik kompozitlerin arayüzeyinde gözle görülebilir bir çatlama veya kırılma meydana gelmediği görülmüştür.
- 180° burulma testleri sonucunda, bimetalik kompozit numunelerin birleştirme arayüzeyinde gözle görülebilir bir çatlama veya yırtılma oluşmadığı belirlenmiştir.

## ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasalözel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

## YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

**Mehmet Serkan YILDIRIM:** Deneyleri yapmış, sonuçlarını analiz etmiştir ve makalenin yazım kısmında görev yapmıştır.

**Yakup KAYA:** Sonuçların yorumlanması ve yazım kısmında görev yapmıştır.

## ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)


[1] Grinberg B. A., Pushkin M. S., Patselov A. M., Inozemtsev A. V., Ivanov M. A., Slautin O. V., Besshaposhnikov Yu. P., "The structure of molten zones in explosion welding (aluminium–tantalum, copper–titanium)", ***Welding International***, 31 (5): 384-393, (2017).

[2] Chena X., ***Xiaojie*** Lia X., Wanga X., Yana H., Kebin Lia K., Zenga X., "Bonding mechanism of explosive compaction-welding sintering", ***Journal of Manufacturing Processes***, 46: 1-15, (2019).

[3] Pamuk Ö., Durgutlu A., "Patlama kaynağı yöntemi ile birleştirilen östenitik paslanmaz çelik (AISI 316 L) – S235JR kompozit malzemelerde patlayıcı oranının mikroyapı ve yorulma özelliklerine etkisi", ***Politeknik Dergisi***, 21(3): 527-534, (2018).

[4] Zeng X., Wang Y., Li X., Li X., Zhao T., "Effects of gaseous media on interfacial microstructure and mechanical properties of titanium/steel explosive welded composite plate", ***Fusion Engineering and Design***, 148: 111292, (2019).

[5] Fındık F., "Recent developments in explosive welding", ***Materials & Design***, 32: 1081-1093, (2011).

[6] Wang Y., Li X., Wang X., Yan H., "Fabrication of a thick copper-stainless steel clad plate for nuclear fusion equipment by explosive welding", ***Fusion Engineering and Design***, 137: 91-96, (2018).

[7] Mendes R, Ribeiro J. B., Loureiro A., "Effect of explosive characteristics on the explosive welding of stainless steel to carbon steel in cylindrical configuration", ***Materials & Design***, 51: 182-192, (2013).

[8] Aceves S. M., Espinosa-Loza F., Elmer J. W., Huber R., "Comparison of Cu, Ti and Ta interlayer explosively fabricated aluminum to stainless steel transition joints for cryogenic pressurized hydrogen storage", ***International Journal of Hydrogen Energy***, 40: 1490-1503, (2015).

[9] Banker J. G., Reineke E. G., Explosive welding, ***Metals Handbook.10th edition***, Volume 6, ASM International; (1993).

[10] Torun O., "Saf bakır ve AZ91 magnezyum alaşımının sürtünme kaynağı", ***Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi***, 27 (2): 110-115, (2019).

[11] Chen S. Y., Wu Z. W., Liu K. X., Li X. J., Luo N., Lu G. X., "Atomic diffusion behavior in Cu-Al explosive welding process", ***Journal of Applied Physics***, 113: 044901, (2013).

[12] Codel M., "Analytical chemistry of titanium metals and compounds", New York, London: ***Interscience Publishers***, Inc. 3-6, (1959).

[13] Uyguntürk E., Kahraman N., Durgutlu A. ve Gülenç B., "Titanyum Boruların Lazer Kaynak Yöntemi ile Birleştirilmesi ve Kaynak Bölgesinin Karakterizasyonu", ***Politeknik Dergisi***, 24(1): 255-262, (2021).

[14] 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 & Design***, 47: 74-79, (2013).

[15] Paul H., Skuza W., Chulist R., Miszczyk M., Gałka A., Prazmowski M., Pstrus J., "The effect of interface morphology on the electro-mechanical properties of Ti/Cu clad composites produced by explosive welding", ***Metallurgical and Materials Transactions*** A, 51: 750-766, (2020).

[16] Kahraman N., Gülenç B., "Microstructural and mechanical properties of Cu-Ti plates bonded through explosive welding process" ***Journal of Materials Processing Technology***, 169: 67-71, (2005).

[17] Sanjurjo A., Wood B. J., Lau K. H., Tong G. T., Choi D. K., McKubre M. C. H., Song H. K., Church N., "Titanium-based coatings on copper by chemical vapor deposition in fluidized bed reactors", ***Surface and Coatings Technology***, 49: 110-115, (1991).

[18] Demidenko L. Y., Onatskaya N. A., "Solid-state welding of tubular joints of titanium and copper with application of electrohydropulse loading" ***Surface Engineering and Applied Electrochemistry***, 44: 245-247, (2008).


ERKEN GÖRÜNÜM

[19] Kaya Y., "Investigation of copper-aluminium composite materials produced by explosive welding. Metals, 8 (10): 780 (2018).

[20] Szachogluchowicz I., Sniezek L., Hutsaylyuk W., "Low cycle fatigue properties of AA2519-Ti6Al4V laminate bonded by explosion welding". ***Engineering Failure Analysis***, 69: 77-87, (2016).

[21] Miao G., Ma H., Shen Z., Yu Y., "Research on honeycomb structure explosives and double sided explosive cladding", ***Materials & Design***, 63: 538-543, (2014).

[22] Yazdani M., Toroghinejad M. R., Hashemi S. M., "Investigation of microstructure and mechanical properties of St37 steel-Ck60 steel joints by explosive cladding" ***Journal of Materials Engineering and Performance***, 24: 4032-4043, (2015).

[23] Kaya Y., "Microstructural, mechanical and corrosion ınvestigations of ship steel-aluminum bimetal composites produced by explosive welding", ***Metals***, 8 (7): 544, (2018).

[24] 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", ***Metallurgical and Materials Transactions A***, 48: 3721-3733, (2017).

[25] 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 & Design***, 64: 462-476, (2014).

[26] 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: 3211-3217, (2016).

[27] 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", ***Materials & Design***, 67: 606-614, (2015).

[28] Murray J. L., "Alloy Phase Diagrams", ASM International, ***ASM handbook, volume 3***, New York, USA (1992).

[29] Kim Y. K., Pouraliakbar H., Hong S. I., "Effect of interfacial intermetallic compounds evolution on the mechanical response and fracture of layered Ti/Cu/Ti clad materials", ***Materials Science & Engineering A***, 772: 138802, (2020).

[30] Chen F., Wang W., Wang K., Ho P., Li H., Huang X., Chen W., "Influence of post-weld heat treatment on microstructure and adhesion of Ti/Cu composite", ***Materials Science and Technology***, 34 (12): 1441-1446, (2018).

[31] Guoyin Z., Xiaobing L., Jinghua Z., Hao Z., "Interfacial characterization and mechanical property of Ti/Cu clad sheet produced by explosive welding and annealing", ***Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.***, 30 (6): 1198-1203 (2015).

[32] Mahmood Y., Chen P. W., Bataev I. A., Gao X., "Experimental and numerical investigations of interface properties of Ti6Al4V/CP-Ti/Copper composite plate prepared by explosive welding", ***Defence Technology***, 17: 1592-1601, (2021).

[33] Paul H., Chulist R. Bobrowski P., Perzyńskib K., Madej L., Mania I., Miszczyk M., Cios G., "Microstructure and properties of the interfacial region in explosively welded and post-annealed titanium-copper sheets", ***Materials Characterization***, 167: 110520 (2020).

[34] Huseini 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", ***Materials & Design***, 86: 516-525, (2015).

[35] 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: 367-372 (2013).

[36] Kaya Y., Eser G., "Production of ship steel-titanium bimetallic composites through explosive cladding" ***Welding in the World***, 63: 1547-1560, (2019).

[37] Kahraman N., Gülenç B., Fındık 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).

[38] 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).

[39] Durgutlu A., Gülenç B., Fındık F., "Examination of copper/stainless steel joints formed by explosive welding", ***Materials and Design***, 26 (6): 497-507, (2005).

[40] Gülenç B., "Investigation of interface properties and weldability of aluminium and copper plates by explosive welding method", ***Materials and Design***, 29: 275-278, (2008).

[41] Wang Y., Beom H. G., Sun M., Lin S., "Numerical simulation of explosive welding using the material point method", ***International Journal of Impact Engineering***, 38: 51-60, (2011).

ERKEN GÖRÜNÜM