



## The effect of explosive ratio on microstructure, hardness and fatigue properties of AISI 430 – S235JR materials joined by explosive welding method

Özer Pamuk<sup>1\*</sup>, Ahmet Durgutlu<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Materials Science and Nanotechnology Engineering, Uşak University, Uşak, 64000, Turkey

<sup>2</sup>Department of Metallurgical and materials Engineering, Gazi University, Ankara, 06500, Turkey

### Highlights:

- The impact of the explosive rate on the joining interface
- The impact of the explosive rate on the hardness values
- The impact of the explosive rate on the fatigue strength

### Keywords:

- Explosive welding
- Explosion ratio
- Microstructure
- Fatigue,
- Hardness

### Graphical/Tabular Abstract

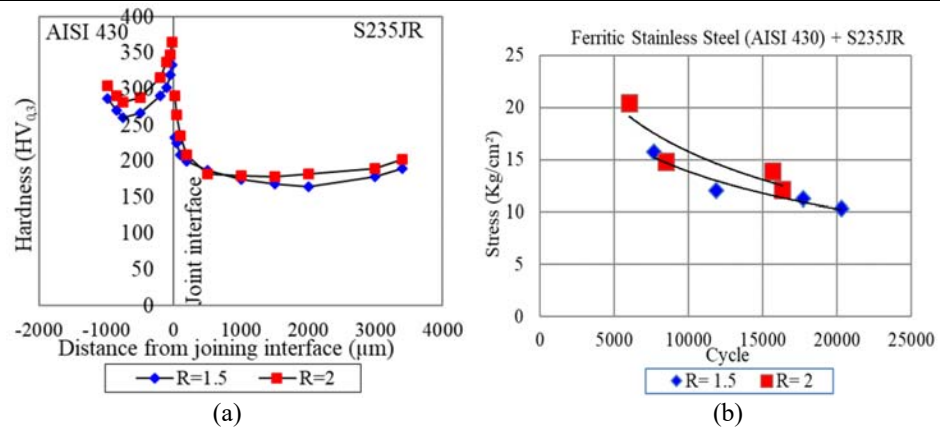


Figure A. Hardness dispersions of sheet and metal pairs (a), Fatigue graphics of joined materials (b)

### Article Info:

Research Article  
Received: 31.01.2017  
Accepted: 26.04.2018

### DOI:

10.17341/gazimmfd.460489

### Acknowledgement:

### Correspondence:

Author: Özer Pamuk  
e-mail:  
ozer.pamuk@usak.edu.tr  
phone:  
+90 276 221 2121 -2777

**Purpose:** The aim of this study is to join AISI 430 and S235JR sheets using the explosion welding method, one of solid-state welding methods and to identify the effects of deformation caused by the explosive on the joining interfaces, hardness, and fatigue properties of the materials during the joining processes.

### Theory and Methods:

The AISI 430 and S235JR sheets were welded using parallel sheet geometry, one of explosion welding method geometries, using a constant interstitial space distance (s) and various explosive rates (R=1.5-2). The joined materials were subjected to a microstructure examination to see the changes occurring in the interface after the welding process. They were subjected to the hardness measurement and the bending fatigue test in order to determine the effects of the deformation resulting from the high velocity collision caused by the explosion during the welding process. The fracture surfaces of the samples subjected to bending fatigue test were examined by using the scanning electron microscope (SEM).

### Results:

A slight increase in the length and amplitude of the waves forming at the joint interface was observed as a result of the increasing explosive rate. Moreover, the grains close to the joint interface appeared to be oriented in the direction of the explosion due to the deformation forming as a result of the explosion. After the joining process, hardness of the sheets increased and their fatigue strength decreased. The highest hardness increase of the joined sheets was observed in the regions close to the joint interface and on the outer surfaces of the sheets, respectively.

### Conclusion:

As the explosive rate increased, the joint transitioned from a flat structure to a fluctuating structure, thus causing the hardness of the joined sheets to increase, as well. This in turn had a positive impact on the mechanical properties of the joined sheets. However, stresses and the irregularities (e.g. scratches, grooves, sharp corners etc.) caused by hardness occurring on sheet surfaces with increased explosive rate and increasing with increased explosive rate had a negative impact on fatigue strength of the joints since they prepared suitable grounds for the beginning of crack.



## Patlamalı kaynak yöntemi ile birleştirilen AISI 430 –S235JR malzemelerde patlayıcı oranının mikroyapı, sertlik ve yorulma özelliklerine etkisi

Özer Pamuk<sup>1\*</sup>, Ahmet Durgutlu<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Uşak Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Malzeme Bilimi ve Nanoteknoloji Mühendisliği, Uşak, 64000, Türkiye

<sup>2</sup>Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Müh. Bölümü, Ankara, 06500, Türkiye

### Ö N E Ç I K A N L A R

- Patlayıcı oranının birleşme ara yüzeyine etkisi
- Patlayıcı oranının sertlik değerlerine etkisi
- Patlayıcı oranının yorulma dayanımına etkisi

#### Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 31.01.2017

Kabul: 26.04.2018

DOI:

10.17341/gazimmfd.460489

#### Anahtar Kelimeler:

Patlamalı kaynak,  
patlama oranı,  
mikroyapı,  
yorulma,  
sertlik

#### ÖZET

Bu çalışmada, AISI 430 ve S235JR levhalar, katı hal kaynak yöntemlerinden olan patlamalı kaynak yöntemi ile iki farklı patlayıcı oranı ( $R=1,5-2$ ) kullanılarak birleştirilmişlerdir. Birleştirme işlemleri sonrasında elde edilen malzemelerin birleşme ara yüzeylerinde meydana gelen değişimleri görmek ve mekanik özelliklerini tespit etmek amacıyla mikroyapı, sertlik ve yorulma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan mikroyapı incelemeleri sonucunda her iki numunenin birleşme ara yüzeylerinde çok az bir dalgalanmanın meydana geldiği görülmüş, ancak daha yüksek patlayıcı oranının kullanıldığı numune ara yüzeyinde ise oluşan dalgaların boylarında ve genliklerinde çok az bir artışın meydana geldiği tespit edilmiştir. Patlayıcı oranının artmasıyla beraber oluşan deformasyondan dolayı birleştirilen malzemelerin sertliklerinde de bir artışın meydana geldiği belirlenmiştir. Birleştirilen levhalara uygulanan yorulma deneylerinde ise patlayıcı oranının artmasıyla beraber birleştirilen levhaların yorulma ömürlerinde bir azalmanın meydana geldiği tespit edilmiştir.

## The effect of explosive ratio on microstructure, hardness and fatigue properties of AISI 430 – S235JR materials joined by explosive welding method

### H I G H L I G H T S

- The impact of the explosive rate on the joining interface
- The impact of the explosive rate on the hardness values
- The impact of the explosive rate on the fatigue strength

#### Article Info

Research Article

Received: 31.01.2017

Accepted: 26.04.2018

DOI:

10.17341/gazimmfd.460489

#### Keywords:

Explosive welding,  
explosion rate,  
microstructure,  
fatigue,  
hardness

#### ABSTRACT

In this study, AISI 430 and S235JR plates were joined via explosion welding method, which is one of solid state welding methods, and by using two different explosive rates ( $R=1,5-2$ ). Microstructure, hardness, and fatigue tests were carried out in order to see changes occurring in the joint interfaces of the materials obtained after joining processes and to determine their mechanical properties. As a result of the microstructure studies made, it was observed that there was very little fluctuation at the interface between the two samples, but at the sample interface where higher explosive ratio was used, it was found that there was a slight increase in the length and amplitude of the generated waves. An increase was determined in hardness of materials joined due to deformation occurring as a result of increase of explosive rate. In fatigue tests applied to joined plates, a decrease was found in fatigue life of the joined plates as a result of increase of explosive rate.

\*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: ozerpamuk@hotmail.com, durgutlu@gazi.edu.tr / Tel: +90 276 221 2121 - 2777

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Patlamalı kaynak; geleneksel kaynak yöntemleri ile birleştirilemeyen aynı ya da farklı türdeki metallerin kontrol edilebilen koşullar altında bir metalik kütlenin başka bir metalik kütle üzerinde patlama etkisi ile bir bağ oluşturma işlemidir. Katı hal kaynak tekniklerinden biri olan patlamalı kaynakta patlama ile elde edilen yüksek basınç yardımı ile metal yüzeylerinde meydana gelen çarpışma neticesinde elde edilen çarpışma enerjisi vasıtasıyla yüzeyler, oluşan ilk temaslarını birbirleri üzerinde bir akış sergileyerek devam ettirmeleri sonucunda bir birleşme meydana gelmektedir [1-3]. Kaynak sırasında meydana gelen temas basıncı oldukça yüksek olduğu için üst tabakanın kinetik enerjisi dalgalı bir ara yüzeyin oluşmasına neden olmaktadır. Bu darbe neticesinde iki yüzey birbirlerine mekanik olarak kilitletir. Patlayıcının infilak etmesinden dolayı bir ısı ortaya çıkmasına rağmen ısı transferi için yeterli zaman olmadığı için metaller arasında bir ısı akışı meydana gelmez ve çoğu zaman ara yüzeyde difüzyon olayı gerçekleşmez [4-6].

Patlamalı kaynak işleminde birleşmenin gerçekleşebilmesi için gerekli olan şartın fişkırmaya çarpışması biçiminde oluşan eğimli çarpışma olduğu ileri sürülmektedir. Fişkırmaya mekanizması, kaynaklanan levhaların yüksek hızda çarpışmaları neticesinde levhalar arasından dışarıya çıkmaya zorlanan ve çarpışmanın ucunda şekillenen metalin fişkırmaya için kontrol edilen levha hızı, basınç, çarpışma açısı ve çarpışma noktası hızının bulunduğu eğimli bir çarpışma olarak tanımlanmaktadır [7-9]. Patlamalı kaynak işlemi iki aşamalı olarak düşünülebilir. Birincisi, fişkırmaya ile yüzey filmlerinin parçalanıp temizlenmesi, ikincisi, yüksek basınç ile atomlar arası kuvvetlerin birleşme ara yüzeyi oluşturabileceği konum olan yakın temas için metal yüzeylerini zorlaması [10-12]. Patlamalı kaynak yönteminin sematik gösterimi Şekil 1'de verilmektedir.

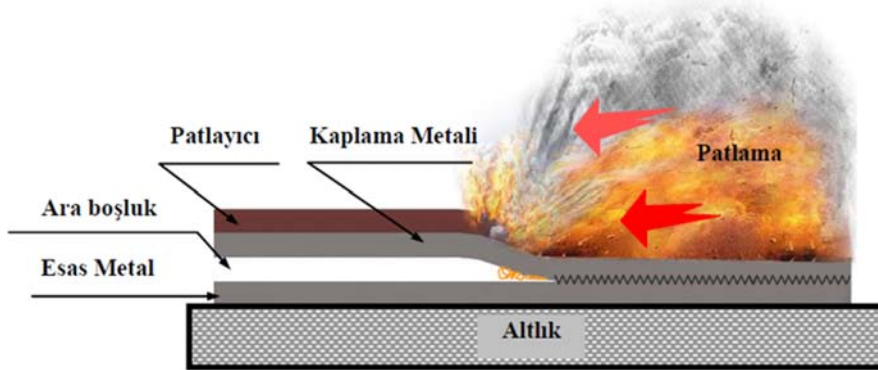
Patlamalı kaynak yönteminde de diğer kaynak yöntemlerinde olduğu gibi kabul edilebilir nitelikte kaliteli birleştirmelerin elde edilebilmesi için kaynak işlemini kontrol altında tutabilecek işlem parametrelerinin belirlenmesi gerekmektedir. Birleştirme işleminde ara yüzeyi ve kaynak kalitesini etkileyen bazı önemli kaynak

parametreleri; ara boşluk mesafesi ( $s$ ), patlayıcı oranı (patlayıcı kütlesinin üst levha kütlesine oranı) ( $R$ ), patlayıcının patlama hızı ( $V_d$ ), üst levhanın çarpma hızı ( $V_p$ ), çarpışma açısı ( $Q$ ), kaynak hızı ( $V_c$ ) ve altlık olarak sıralanabilir [13, 14].

Son yıllarda; patlamalı kaynak yöntemi ile kaplanan kimyasal kazanlar, basınçlı kazanlar, tüp levhalar, pişirme kapları, gemi imalat saclarında kaplanmış malzemeler önemli yapı malzemesi olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmanın amacı, ülkemiz endüstrisinde istenilen yeri alamayan fakat büyük öneme sahip özellikle gelişmiş ülkelerde yaygın bir biçimde kullanılan patlamalı kaynak yöntemi ile malzemeleri birleştirmektir. Patlamalı kaynak yöntemi ile birleştirilen malzemelerde kaynak sırasında meydana gelen patlamanın neden olduğu deformasyon nedeniyle levha yüzeylerinde düzensizlikler ve levhaların iç kısmında ise deformasyona bağlı gerilimde bir artış meydana gelmektedir. Meydana gelen bu değişimlerin birleştirilen malzemenin kullanımı sırasında maruz kaldığı uzun süreli ve değişken yüklere karşı nasıl bir davranış sergilediğini belirlemek için üretilen bu malzemelerin mikroyapı, sertlik ve yorulma davranışlarını incelemektir. Bu güne kadar yapılan benzer çalışmalarda birleştirmelerin çekme, eğme, burulma, çentik darbe, sertlik gibi mekanik özellikleri incelenmiş ancak yorulma özellikleri üzerine yeterli araştırma yapılmamıştır. Bu amaçla, S235JR levha yüzeyi AISI 430 levha ile patlamalı kaynak yöntemi kullanılarak kaplanmıştır. Elde edilen birleştirmelerin mikroyapı, sertlik ve yorulma testlerine tabi tutularak levhaların birleşme ara yüzeyi özellikleri belirlenmeye çalışılmıştır.

## 2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR (EXPERIMENTAL STUDIES)

Bu çalışmada, sabit ara boşluk mesafesi ( $s$ ) ve farklı patlayıcı oranları ( $R=1,5-2$ ) kullanılarak patlamalı kaynak yöntemiyle birleştirilen malzemelerin mikroyapı, sertlik ve yorulma özelliklerini belirlemek için  $200 \times 200 \times 1$  mm ebatlarında,  $165 HV_{0,3}$  sertlik değerine sahip AISI 430 ile  $200 \times 200 \times 3,5$  mm ebatlarında,  $160 HV_{0,3}$  sertlik değerine sahip S235JR metal çiftleri patlamalı kaynak yöntemi geometrilerinden paralel levha geometrisi düzeneği kullanılarak birleştirilmiştir.



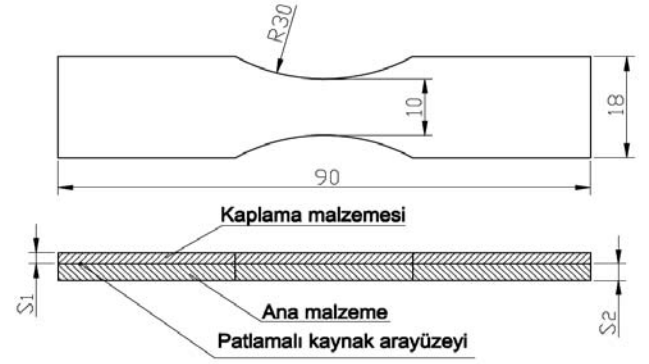
Şekil 1. Patlamalı kaynak yönteminin sematik görünümü (Schematic view of explosive welding method).

Kaynak işlemi sırasında patlayıcı olarak M.K.E Barutsan A.Ş. tarafından üretilen %92 Amonyum Nitrat, %5 Motorin ve %3 TNT içeren Elbar-5 kodlu toz patlayıcı kullanılmıştır. Kullanılan toz patlayıcı miktarı, üst levha olarak kullanılan AISI 430 levhanın ağırlığı ile orantılı olarak belirlenmiştir. Tablo 1’de deneyler sırasında kullanılan patlayıcı oranı (R) ve miktarları verilmektedir.

Birleştirme işlemleri kum havuzu içerisine yerleştirilmiş olan ve yüzey düzgünlüğü ayarlanmış 1500x1500x150 mm ebatlarındaki çelik bir tabla üzerinde gerçekleştirilmiştir. Kaynak işlemi sırasında, patlamanın alt parçada oluşturabileceği zararları en aza indirebilmek için çelik tabla ile alt parça arasına 5 mm kalınlığında lastik bir tampon konulmuş ve böylece birleştirilen parçaların altlığın akustik özelliğinden etkilenerek ayrılmalarının ve geri fırlamalarının önüne geçilmesi amaçlanmıştır. Ara boşluk mesafesini (s) elde etmek için uygun kalınlıktaki rondelalar kullanılarak alt parçanın üzerinde dört köşesine gelecek şekilde yerleştirilmiş ve üst levha rondelaların üzerine yerleştirilerek uygun ara boşluk mesafesi ayarlanmıştır. Hazırlanan 210x210x50 mm boyutlarında patlayıcı kutuları üst levha üzerine yerleştirilerek kaynak düzeneği hazır hale getirilmiştir. Hazırlanan bu kaynak düzeneği elektrikli bir manyeto düzeneği tarafından patlatılarak kaynak işlemleri gerçekleştirilmiştir.

Kaynak işlemi sonrası ara yüzeyde meydana gelen değişimleri görmek amacıyla birleştirilen malzemelerden patlama yönüne paralel olacak şekilde tel erozyon yöntemi ile kesilerek mikroyapı numuneleri hazırlanmıştır. Kesilen bu numuneler ATM Opal 460 cihazında bakalit gömme, ATM Saphir 330 cihazında zımparalama ve ATM Saphir 250 cihazında parlatma işleminden sonra 2ml HNO<sub>3</sub> (Nitrik asit) ve 98 ml metanol bileşiminden oluşan dağlama solüsyonu ile dağlanarak LEICA DM 4000M optik mikroskopu ile mikroyapı incelemesine tabi tutulmuştur. Yine aynı numuneler, kaynak işlemi sırasında patlamanın neden olduğu yüksek hızdaki çarpışma neticesinde birleşme ara yüzeyinde ve birleştirilen metal çiftlerinin kesitleri boyunca oluşan sertlik değişimlerini görmek amacı ile sertlik ölçme işlemine tabi tutulmuştur. Mikrosertlik ölçümleri sırasında Shiadzu HVM-2 Vickers mikrosertlik ölçüm cihazı kullanılarak 300g yük 5 sn süre ile malzeme yüzeyine uygulanarak her iki malzemede birleşme ara yüzeyinden başlayarak metal çiftlerinin yüzeylerine kadar belirli aralıklarla ölçümler yapılmıştır. Her bir numunede 3 farklı noktadan sertlik ölçümleri yapılarak ortalama sertlik değeri belirlenmiş ve bu değer sertlik değeri olarak kabul edilmiştir. Birleştirilen malzemelerin yorulma davranışlarını belirlemek için, patlama yönüne paralel olacak şekilde yorulma deneyi numuneleri ASTM E-466 standardına uygun olarak tel

erozyon yöntemi ile kesilerek hazırlanmıştır. Eğmeli yorulma deneyi için hazırlanan numunelerin şematik görünüşü Şekil 2’de verilmektedir. Yorulma deneyleri, eğmeli yorulma deneyleri için özel olarak tasarlanan eğmeli yorulma test cihazında gerçekleştirilmiştir. Her bir parametreden 3 adet deney yapılarak ortalama değer belirlenmiş ve bu değer yorulma değeri olarak kabul edilmiştir. Yorulma testi numunelerinin kırık yüzeyleri Joel JEM 6060 LV Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM) vasıtası ile incelenmiştir. Kaynak işlemi sırasında patlama neticesinde parçaların yüzey kısımlarında meydana gelen yüzey durumlarının malzemelerin yorulma ömürlerine olan etkilerini belirlemek amacıyla yorulma numuneleri birleştirme sonrası orijinal halleri ile yorulma testlerine tabi tutulmuş olup herhangi bir yüzey veya talaş kaldırma işlemi uygulanmamıştır.



Şekil 2. Eğmeli yorulma deney numunesi (Bending fatigue test sample)

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

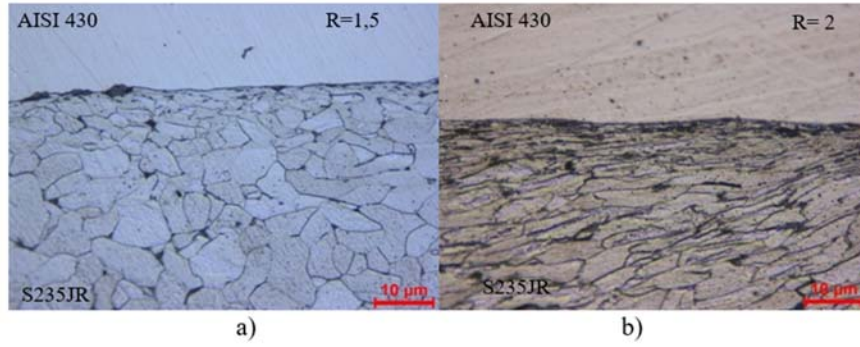
AISI 430-S235JR metal çiftlerinden oluşan birleşmelerin patlamalı kaynak yöntemi ile üretimi başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Birleştirilen malzemeler mikroyapı, sertlik ve yorulma testlerine tabi tutularak kaynak işlemi sırasında kullanılan kaynak parametreleri ile olan ilişkileri belirlenmeye çalışılmıştır. Ayrıca kırık yüzeylerin SEM incelemesi yapılmıştır. Yapılan testler sonrasında elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

#### 3.1. Mikroyapı Sonuçları (Microstructure Results)

AISI 430-S235JR metal çiftinden oluşan ve tek bir ara boşluk mesafesi (s) ile farklı patlayıcı oranları (R=1,5-2) kullanılarak patlamalı kaynak yöntemi ile birleştirilen levhaların birleşme ara yüzeylerine ait fotoğraflar Şekil 3’de verilmiştir.

Tablo 1. Patlayıcı oranları ve miktarları (Rates and amounts of the explosive).

Numune No	Ana Malzeme	Kaplama Malzemesi	Patlayıcı	Üst levha ağırlığı (g) (m)	Patlayıcı Oranı (R)	Patlayıcı Miktarı (mxR) (g)
1	S235JR	AISI 430	Elbar-5	314	1,5	471
2	S235JR	AISI 430	Elbar-5	314	2	628



Şekil 3. Birleştirilen numunelerin ara yüzey mikroyapı görüntüleri a-) R=1,5 b-) R=2  
(Interface microstructure views of joined samples a-) R=1,5 b-) R=2).

Şekil 3’de verilen ve birleştirilen levhalara ait ara yüzey mikroyapı görüntülerinden, patlayıcı oranının ( $R=1,5$ ) kullanıldığı 1 numaralı numune mikro yapısı (Şekil 3.a) incelendiğinde birleşme ara yüzeyinde oluşan dalgalanmanın miktarının çok az olduğu, hemen hemen düz bir ara yüzeye sahip olduğu görülmektedir. Bunun da sebebinin patlayıcı oranının yeterli düzeyde olmadığından kaynaklandığı düşünülmektedir. Patlayıcı oranlarının ( $R=2$ ) kullanıldığı 2 numaralı numune mikro yapısı (Şekil 3.b) incelendiğinde ise birleşme ara yüzeyinde oluşan dalgalanın boylarında ve genliklerinde artışların meydana geldiği belirlenmiş ancak bu artışın fazla olmadığı görülmektedir. Literatürde, Patlayıcı oranın ( $R=1,5$ ) kullanıldığı numunelerde birleşme ara yüzeyinin düze yakın bir yapıya sahip olduğu artan patlayıcı oranı ile beraber ara yüzeyde oluşan dalgalanın şekil ve boyutlarında artış meydana geldiği, patlayıcı oranını artmasıyla beraber birleşme ara yüzeyinin düz bir yapıdan dalgalı bir yapıya dönüştüğü belirtilmiştir [2]. Her iki numunedeki de patlama neticesinde ara yüzeyde meydana gelen çarpışmanın neden olduğu deformasyondan dolayı birleşme ara yüzeyine yakın bölgedeki tanelerin patlama yönüne paralel bir şekilde uzadığı ve ince taneli bir yapının elde edildiği görülmektedir. Ayrıca yüksek patlayıcı oranının kullanıldığı 2 numaralı numunedeki (Şekil 3.b) tanelerde meydana gelen uzamanın düşük patlayıcı oranının kullanıldığı 1 numaralı (Şekil 3.a) numunedeki tanelere nazaran daha fazla olduğu görülmektedir. Bunun nedeni olarak artan patlayıcı oranı ile beraber deformasyon miktarını artmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Literatürde, patlamalı kaynak işleminde patlayıcı oranının artmasıyla beraber birleşme ara yüzeyinde meydana gelen yüksek hızdaki çarpışmadan dolayı deformasyon miktarının arttığı ve artan bu deformasyon miktarının ile levhaların birleşme ara yüzeyine yakın tanelerinde patlama yönünde bir uzamanın meydana geldiği ve ince taneli bir yapının elde edildiği rapor edilmiştir [15,19].

### 3.2. Sertlik Sonuçları (Hardness Results)

Patlamalı kaynak yöntemi ile sabit ara boşluk mesafesi ( $s$ ) ve farklı patlayıcı oranları ( $R=1,5-2$ ) kullanılarak üretilen AISI 430-S235JR metal çiftlerine ait malzemelerin sertlik ölçümleri yapılarak levhaların orijinal sertlik değerleri ile

mukayese edilmiştir. AISI 430-S235JR metal çiftinden oluşan birleştirmeye ait sertlik değerlerini belirlemek için 1 mm et kalınlığına sahip AISI 430 için, birleşme ara yüzeyinden başlayarak levhanın dış yüzeyine doğru 20, 50, 100, 200, 500, 750, 850, 980  $\mu\text{m}$  mesafelerden, yine 3,5 mm et kalınlığına sahip S235JR için, birleşme ara yüzeyinden başlayarak levhanın dış yüzeyine doğru 20, 50, 100, 200, 500, 1000, 1500, 2000, 3000, 3400  $\mu\text{m}$  mesafelerden sertlik ölçümleri yapılmıştır. Birleştirilen malzemelere ait sertlik değerleri Tablo 2’de ve grafik olarak Şekil 4’de verilmiştir.

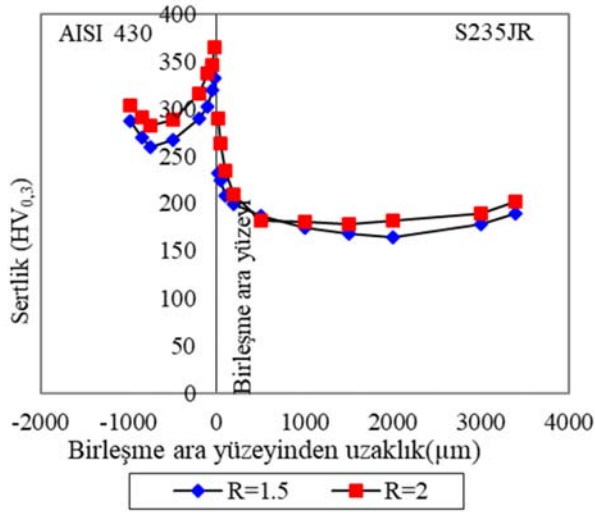
Tablo 2. Levha ve metal çiftlerine ait sertlik değerleri  
(Hardness values of sheet and metal pairs).

Numune No	1	2	
Malzemeler	AISI 430 + S235JR	AISI 430 + S235JR	
Patlayıcı Oranı	R= 1,5	R= 2	
AISI 430	-980	287	304
	-850	270	291
	-750	260	282
	-500	267	288
	-200	290	316
	-100	302	337
	-50	320	347
	-20	333	365
	0		
	20	285	290
	50	245	264
	100	223	235
	200	199	209
	500	178	182
S235JR	1000	170	180
	1500	168	178
	2000	164	182
	3000	178	190
	3400	189	212

Tablo 2. incelendiğinde patlayıcı oranının ( $R=1,5$ ) olduğu 1 numaralı numunedeki, birleştirmeyi meydana getiren metal çiftlerinden başlangıç sertlik değeri 165  $\text{HV}_{0,3}$  olan AISI 430 için birleşme ara yüzeyine en yakın bölge olan 20  $\mu\text{m}$  mesafedeki sertlik değeri 333  $\text{HV}_{0,3}$  değerine yükselmiştir. AISI 430’a ait sertlik değerleri birleşme ara yüzeyinden levha merkezine doğru gidildikçe azalma göstererek 750  $\mu\text{m}$  mesafede 260  $\text{HV}_{0,3}$  olarak ölçülmüştür. Birleşme ara yüzeyinden en uzak mesafe olan ve yüzeye en yakın bölge olan 980  $\mu\text{m}$  mesafede AISI 430’un sertliği tekrar 287  $\text{HV}_{0,3}$



değerine yükseldiği belirlenmiştir. Birleştirmeyi oluşturan metal çiftlerinden diğeri olan ve başlangıç sertliği 160 HV<sub>0,3</sub> olan S235JR için birleşme ara yüzeyine en yakın mesafe olan 20 µm mesafedeki sertliği 285 HV<sub>0,3</sub> değerine ulaşmıştır. S235JR malzemeye ait sertlik değerleri birleşme ara yüzeyinden 2000 µm mesafeye gelinceye kadar sürekli azalma göstererek 164 HV<sub>0,3</sub> olarak ölçülmüştür. Birleşme ara yüzeyinden en uzak mesafe olan ve yüzeye en yakın bölge olan 3400 µm mesafede S235JR malzemenin sertliğinin tekrar 189 HV<sub>0,3</sub>'ye yükseldiği belirlenmiştir. Patlayıcı oranının (R=2) kullanıldığı 2 numaralı numunede birleştirmeyi meydana getiren metal çiftlerindeki sertlik dağılımları artan patlayıcı oranına bağlı olarak 1 numaralı numune ile benzerlik göstermektedir.



**Şekil 4.** Levha ve metal çiftlerine ait sertlik dağılımları (Hardness dispersions of sheet and metal pairs).

Kaynak işlemi sırasında patlayıcının etkisiyle levhaların yüzey kısımlarında meydana gelen yüksek hızdaki çarpışma ve çarpışma sertleşmesinden (pekleşme) dolayı bir deformasyon sertleşmesi meydana gelmekte, bu durum levhaların yüzeye yakın bölgelerindeki sertliklerinin artmasına sebep olmaktadır. Ayrıca levhaların yüzey kısımlarında çarpışmanın etkisiyle kalıcı basma gerilmeleri oluşmakta ve oluşan bu gerilmelerde sertlik artışına neden olmaktadır. Çarpışmanın en şiddetli olduğu yer birleşme ara yüzeyi olduğu için en büyük sertlik artışı da bu kısımda meydana gelmektedir. Birleşme ara yüzeyine yakın kısımlarda görülen ince taneli yapının da sertlik artışına bir

miktar katkı sağladığı düşünülmektedir. Meydana gelen deformasyonun şiddetinin ara yüzeyden levha kalınlığının merkezine doğru ilerledikçe azalmasından dolayı sertlik değerleri de azalarak orijinal sertlik değerlerine yaklaşmaktadır. Kaynak işlemi sonrası her iki malzemenin yüzey bölgelerinin sertlik değerlerinde de bir artış meydana geldiği görülmektedir. Bunun sebebi olarak, kaynak işlemi sırasında patlayıcının patlaması neticesinde meydana gelen şok dalgasının üst levhanın yüzeyinde meydana getirdiği deformasyon ve alt levhanın dış yüzeyinin altlık ile çarpışması neticesinde oluşan deformasyon olarak düşünülmektedir. Literatürde, patlamalı kaynak yöntemi ile üretilen malzemelerin mikro sertlikleri üzerine yapılan çalışmalarda, en yüksek sertlik artışının ara yüzeye yakın bölgelerde olduğunu, iç bölgelere gidildikçe sertlikte azalmaların meydana geldiği belirtilmektedir [16-18]. Yine Literatürde, artan patlayıcı oranıyla beraber birleştirmeyi meydana getiren malzemelerin sertlik değerlerinde bir artış meydana geldiğini, bunun nedeninin ise artan patlayıcı oranı ile meydana gelen yüksek hızda çarpışma ve çarpışma sertleşmesinden (pekleşme) kaynaklandığı belirtilmektedir [1, 2].

### 3.3. Yorulma Test Sonuçları (Fatigue Test Results)

Patlamalı kaynak yöntemi ile üretilen AISI 430-S235JR metal çiftinden oluşan birleştirmeler patlama sonrası orijinal halleri ile eğmeli yorulma testlerine tabi tutulmuştur. Böylelikle kaynak işlemi sırasında patlayıcının neden olduğu ve numune yüzeylerinde oluşan yüzey durumunun yorulmaya etkisi de belirlenmeye çalışılmıştır. Eğmeli yorulma deneyleri sırasındaki eğilme gerilmesi ( $\sigma$ ) değerlerini belirlemek için deneyler sırasında ölçülen eğilme momenti ( $M_e$ ) kullanılarak aşağıdaki Eş.1 ve Eş.2 yardımıyla hesaplanmıştır.

$$W = \frac{b \cdot h^2}{6} \quad (1)$$

$$\sigma = \frac{M_e}{W} \quad (2)$$

Burada;

$\sigma$  = Eğilme gerilmesi (Kg/cm<sup>2</sup>),

$M_e$  = Eğilme momenti (kg/cm),

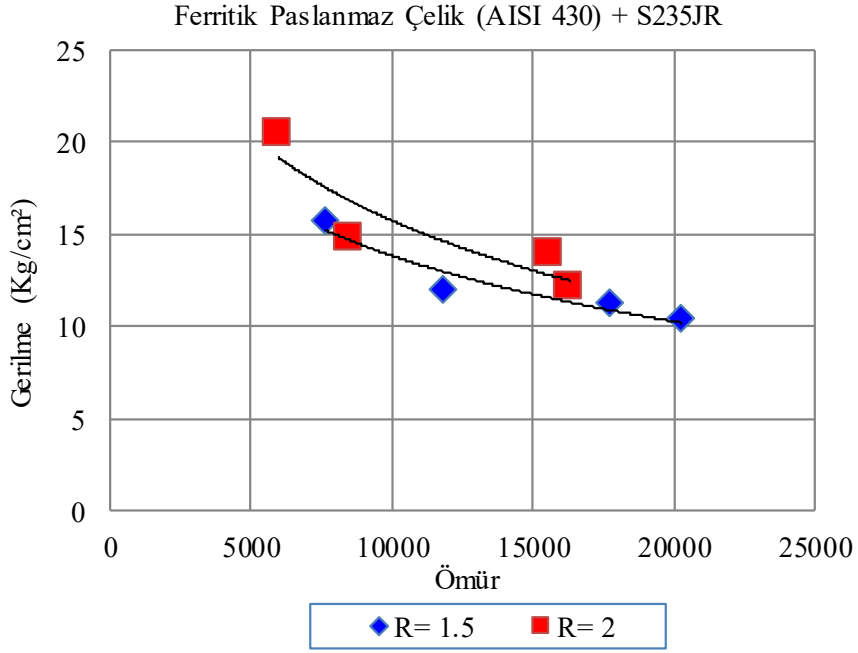
$b$  = Genişlik (cm)

$W$  = Eksenel direnç momenti (cm<sup>3</sup>),

$h$  = Kalınlık (cm)

**Tablo 3.** Birleştirilen malzemelere ait yorulma değerleri (Fatigue values of joined materials).

Malzeme No	1		2	
Malzemeler	AISI 430 + S235JR		AISI 430 + S235JR	
Patlayıcı oranı	R= 1,5		R= 2	
	Gerilme (Kg/cm <sup>2</sup> )	Ömür	Gerilme (Kg/cm <sup>2</sup> )	Ömür
Numune No	1	10,37	20300	12,14
	2	11,259	17710	13,92
	3	12,000	11851	14,81
	4	15,704	7691	20,44
				16300
				15620
				8500
				6000



**Şekil 5.** Birleştirilen malzemelere ait yorulma grafikleri (Fatigue graphics of joined materials).

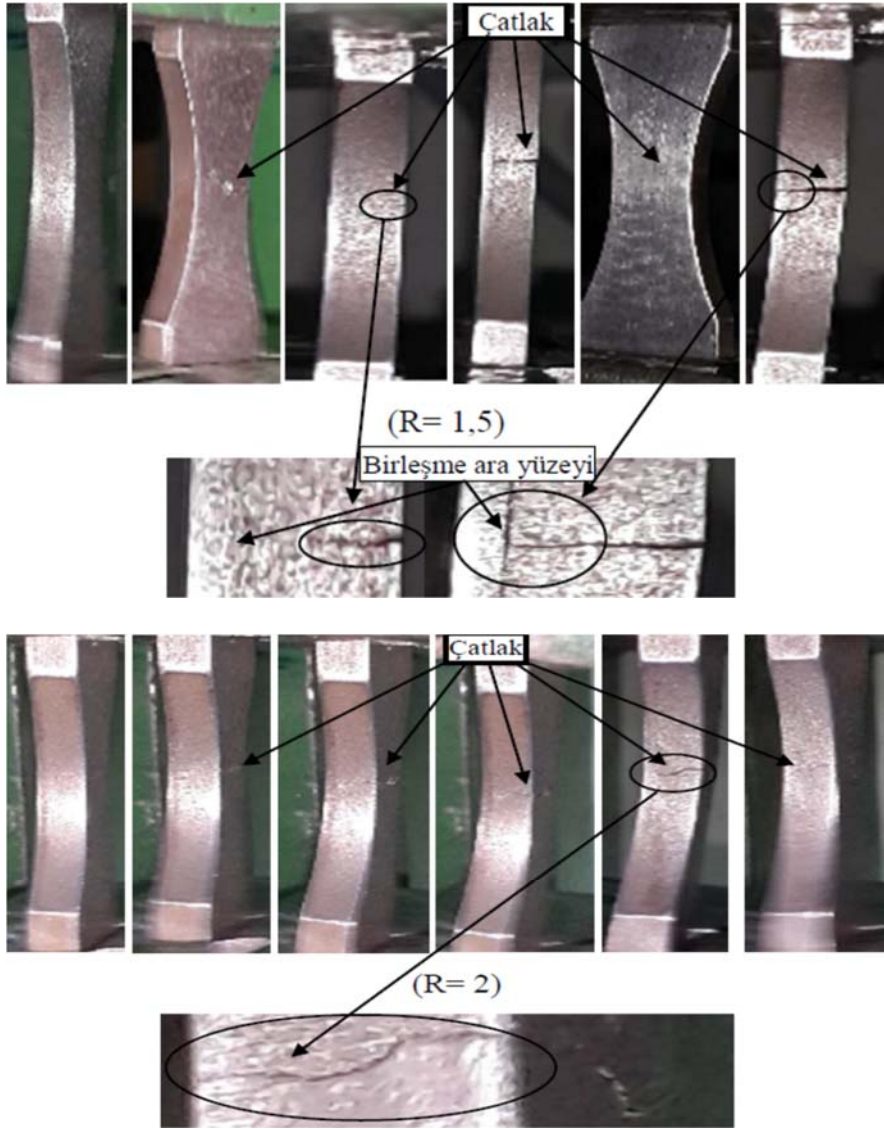
Elde edilen sonuçlar yardımı ile Wöhler eğrileri en yüksek gerilme değerine karşılık gelen çevrim sayıları logaritmik olarak işlenerek çizilmiştir. Birleştirilen malzemelere ait eğmeli yorulma değerleri Tablo 3’de, eğmeli yorulma grafikleri Şekil 5’de verilmektedir. Birleştirilen bu malzemelere ait eğmeli yorulma testi sırasındaki çatlak başlangıcı, çatlakların ilerlemesi ve kırılma anını gösteren resimler Şekil 6’da verilmektedir.

Yukarıda Tablo 3’de verilen eğmeli yorulma değerleri ile Şekil 5’de verilen eğmeli yorulma grafikleri incelendiğinde, patlayıcı oranının (R=1,5) olduğu 1 numaralı numunenin 10,37 (kg/cm<sup>2</sup>) gerilme değerinde 20300 çevrimlik bir yorulma ömrü sergilediği görülmektedir. Patlayıcı oranının (R= 2) olduğu 2 numaralı numunede ise 12,14 (kg/cm<sup>2</sup>) gerilme değerinde yorulma ömrünün 16300 çevrim değerinde olduğu belirlenmiştir. Sonuçlar genel olarak değerlendirildiğinde artan patlayıcı oranı ile beraber birleştirmelerin yorulma ömürlerinde azalma meydana geldiği görülmektedir. Birleştirilen malzemelere ait yorulma dayanımları ile sertlik değerleri arasındaki ilişki incelendiğinde aralarında ters bir orantı olduğu görülmektedir. Artan patlayıcı oranı ile beraber birleştirilen levhaların sertliklerinin arttığı görülmektedir. Ancak artan sertlik oranıyla beraber birleştirmelerin yorulma ömürlerinin azaldığı belirlenmiştir. Kaynak işlemi sırasında patlama neticesinde meydana gelen ve artan patlayıcı oranı ile beraber artış gösteren deformasyonun etkisiyle oluşan deformasyon sertleşmesine bağlı olarak malzemelerde bir sertlik artışı görülmektedir. Ayrıca artan patlayıcı oranı ile beraber deformasyon miktarının artması nedeniyle özellikle basma gerilmelerinin çok olduğu levhaların yüzeye yakın kısımlarda bir engelde biriken dislokasyonların bir gerilim yığılması meydana getirerek sertlik artışına neden

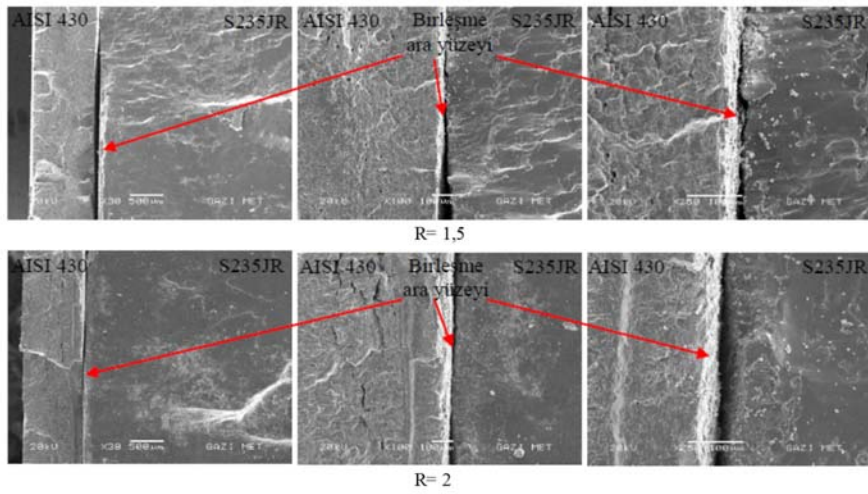
olmaktadır. Ancak bir engelde biriken bu dislokasyonların mikro çatlak oluşumuna neden olduğu, oluşan bu mikro çatlakların keskin uçlarında bir gerilim yığılmasının meydana geldiği ve bu durumun çentik etkisi yaparak çatlakların ilerlemesine ve yorulma dayanımlarının azalmasına neden olduğu düşünülmektedir. Literatürde, Deformasyon işlemi sırasında malzeme içinde bir engelde toplanan dislokasyonların mikro çatlak oluşturabileceği gibi üç adet birim dislokasyonun tek bir dislokasyon içerisinde birleşmesi sonucunda da mikro çatlak oluşabileceğini, oluşan bu mikro çatlakların keskin uçlarında meydana gelen bu gerilim yığılmasının çatlakların ilerlemesine sebep olabileceği belirtilmektedir [20]. Kaynak işlemi sonrası levha yüzeylerinde meydana gelen ve artan patlayıcı oranı ile beraber artış gösteren çizik, oyuk, keskin köşeler vb. düzensizliklerin yorulma deneyi sırasında çatlak başlangıcı için uygun zeminleri hazırlamaları nedeniyle birleştirmelerin yorulma dayanımlarında azalma meydana geldiği düşünülmektedir.

#### 3.4. Kırık Yüzey SEM sonuçları (Fracture Surface SEM Results)

Patlamalı kaynak yöntemi ile farklı patlayıcı oranları (R=1,5-2) kullanılarak üretilen AISI 430-S235JR metal çiftlerinden oluşan ve eğmeli yorulma testine tabi tutulan numunelerin kırık yüzeylerine ait x30, x100 ve x250 büyütme oranlarında alınmış olan SEM görüntüleri Şekil 7’de verilmektedir. Birleştirmelere ait SEM görüntüleri incelendiğinde patlayıcı oranının (R= 1,5) kullanıldığı 1 numaralı numunenin birleşme ara yüzeyinde bir ayrılma meydana gelirken patlayıcı oranının (R= 2) kullanıldığı 2 numaralı numunenin birleşme ara yüzeyinde daha az bir ayrılmanın meydana geldiği görülmektedir.



Şekil 6. Birleştirilen malzemelere ait yorulma deneyi görüntüleri (Fatigue tests pictures of joined materials).



Şekil 7. Birleştirilen malzemelere ait kırık yüzey SEM görüntüleri (Fracture surface SEM images of joined materials).



Literatürde, Patlayıcı oranının ( $R=1,5-2-3$ ) kullanılarak üretilen AISI 316L-Cu metal çiftinden oluşan malzemelere uygulanan eğmeli yorulma deneyleri sonrası birleşme ara yüzeyleri incelenmiş ve artan patlayıcı oranı ile beraber ara yüzeyde oluşan ayrılmaların azaldığı ve patlayıcı oranı ( $R=3$ ) kullanılan numuneye ait birleşme ara yüzeyinde herhangi bir ayrılmanın meydana gelmediği SEM görüntüleri alınarak rapor edilmiştir [21]. Artan patlayıcı oranı ile beraber özellikle AISI 430 levhada oluşan çatlaklar belirgin bir şekilde görülmektedir. Oluşan bu yorulma çatlaklarının, artan patlayıcı oranı ile beraber deformasyon miktarının artması nedeni ile bir engelde biriken dislokasyonların oluşturacağı mikro çatlaklar eğmeli yorulma deneyi sırasında çentik etkisi yaparak çatlağın ilerlemesine neden olduğu ve numuneye uygulanan kuvvet karşısında malzemenin kırılmasında etkili olduğu düşünülmektedir.

#### 4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

AISI 430-S235JR malzemeler uygun kaynak parametreleri ile başarılı bir şekilde birleştirilebilmektedir. Artan patlayıcı oranı ile beraber birleşme ara yüzeyinde oluşan dalgaların boylarında ve genliklerinde az da olsa bir artış meydana geldiği görülmektedir. Malzemelerin birleşme ara yüzeylerine yakın olan bölgelerdeki tanelerde patlama neticesinde meydana gelen deformasyona bağlı olarak patlama yönünde olacak şekilde yönlenecek ve ince taneli bir yapı meydana gelmektedir.

Birleştirme işlemi sonrası levhaların sertliklerinde bir artış meydana gelmekte olup en büyük sertlik artışı birleşme ara yüzeyine yakın bölgelerde ve levha dış yüzeylerinde gerçekleşmektedir. Birleşme ara yüzeyinden levhaların merkezine doğru gidildikçe sertlikte bir azalma meydana gelmekte ve orijinal sertlik değerlerine yaklaşılmaktadır. Levhaların merkezinden dış yüzeylerine doğru gidildikçe sertlik değerlerinde deformasyon neticesinde tekrar bir miktar artış meydana gelmektedir.

Birleştirme işleminde kullanılan patlayıcı oranının artışıyla beraber çarpışma şiddetinin, dolayısıyla deformasyon miktarının artışına bağlı olarak levhaların sertlik değerlerinde de bir artış meydana gelmektedir. Artan patlayıcı oranıyla beraber levha yüzeylerinde meydana gelen ve artış gösteren sertlikten kaynaklanan gerilmelerin, çizik, oyuk, keskin köşeler vb. düzensizliklerin yorulma deneyi sırasında çatlak başlangıcı için uygun zeminleri hazırlamaları nedeniyle birleştirmelerin yorulma dayanımlarında azalma meydana gelmektedir.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Kahraman N., Gülenç B., Patlamalı Kaynak Yöntemi ile Birleştirilen Titanyum ve Bakır Levhaların Mikroyapı ve Korozyon Davranışlarının İncelenmesi, Politeknik Dergisi, 7 (2), 45-52, 2004.
2. Durgutlu A., Gülenç B., Patlama Kaynağıyla Paslanmaz Çelik – Bakır Levhaların Kaynaklanabilirliği ve

- Patlayıcı Oranının Birleşme Arayüzeyine Etkisi, Politeknik Dergisi, 5 (3), 243-247, 2002.
3. Kearns W.H., Explosion Welding, Welding Handbook, AWS, 3, 264-278, 1980.
4. Patterson R.A., Fundamentals of Explosion Welding, ASM Handbook, 6, 160-164, 1993.
5. Gupta R. C., Kainth G. S., Swinging Wake Mechanism For Interface Wave Generation in Explosive Welding of Metals, Transactions of the ASME, 57,514-521, 1990.
6. Yang Y., Xinming Z., Zhenghua L., Qingyun L., Adiabatic Shear Band on the Titanium Side in the Ti/Mild Steel Explosive Cladding Interface, Acta Mater, 44 (2), 561- 565, 1996.
7. Cown G. R., Bergmann O. R, Holdzman A. H., Mechanism of Bond Zoneave Formation in Explosive-Clad Metals, Metallurgical Transactions, 2, 3145-3155, 1971.
8. Yang Y., Wang Z. M., Zhang S. R., Some Metallurgical Behaviours of Adiabatic Share on Ti Side in the Ti/Mild Steel Explosive Cladding Interface, Rareetal Materials and Engineering, 26, 13-17, 1997.
9. Erza A.A., Principles and Practice of Explosive Metal Working, Industrial Newspaper Ltd., 276-289, 1973.
10. James F.K., Hay D.R., Amechanizm of Explosive Bonding, Metallurgia Transactions, 2, 1953-1958, 1971.
11. Reid S.R., A Discussion of theMechanism of Interface Wave Generation in Explosive Welding, Int. Journal of Mechanical Science, 6, 399-413, 1974.
12. Yang Y., Li Z.H., Lu P.C., A Temperature Distrubition Model of Explosive Cladding İnterfaceand Its Aplication, Rare Metal Metarials and Engineering, 29 (3), 161-163, 2000.
13. Acarer M., Patlamalı Kaynak İşlem Parametrelerinin Birleşmeye Etkisi, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 2001.
14. Balasubramanian V., Rathinasabapathi M., Raghukandan K., Modelling of Process Parameters in Explosive Cladding of Mildsteel and Aluminium, Journal of Materials Processing Technology, 63, 83-88, 1997.
15. Durgutlu A., Patlamalı Kaynak Yöntemi İle Bakır-Paslanmaz Çelik Malzemelerin Birleştirilmesi ve Arayüzeyin Mekanik-Mikroyapı Özelliklerinin incelenmesi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2003.
16. Gulbin V.N., Kobelev, A.G., Borissov, D.E., Thermobimetals Mechanical Properties Produced by Explosive Welding With Rolling, Journal de Physique 4,49-54 1997.
17. Truetnev V.V., vd., Comparative Assessment of The Quality of The Explosive Joining of Aluminium to Titanium ,stell and Nickel, Svar. Roiz., 7,19-21 1973.
18. Bina M. H., Dehghani, F., and Salimi, M., Effect of heat treatment on bonding interface in explosive welded copper/stainless steel, Materials and Design, 45, 504-509, 2013.
19. Kaya Y., Patlamalı kaynak yöntemi ile üretilen Grade a gemi sacı-paslanmaz çelik kompozitlerin mikroyapı, mekanik ve korozyon özelliklerinin incelenmesi,

- Doktora Tezi, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük, 2014.
20. Savaşkan T., Malzeme bilgisi ve muayenesi, Trabzon, 5. Baskı, 85-86, 2009.
21. Pamuk Ö., Gülenç B., Kaya Y., Kahraman N., Durgutlu. A., Patlama kaynağı yöntemi ile birleştirilen östenitik paslanmaz çelik (AISI 316L) – bakır kompozit malzemelerde patlayıcı oranının mikroyapı ve yorulma özelliklerine etkisi, Uluslararası Kaynak Teknolojileri Konferansı ve Sergisi, Gaziantep, 1, 812-823, 2016.