



<http://dx.doi.org/10.7240/mufbed.v24i1.142>

Metallerin Patlayıcı Yardımı İle Kaynatılması

Orhan GÜLCAN

TUSAŞ, Türk Havacılık ve Uzay Sanayi A.Ş. 06936, Kazan / ANKARA

Özet

Patlayıcı yardımı ile kaynak, bir patlayıcının patlamasıyla farklı malzemelerin (bazen aynı malzemelerin) birleştirilmesinde kullanılan bir katı hal prosesidir. Patlama neticesinde açığa çıkan enerji, uçucu plakanın ana plakaya “soğuk” kaynatılmasında kullanılır. Geleneksel kaynak yöntemleri ile birleştirilmeleri mümkün olmayan çok büyük parçaların tek seferde ve kabul edilebilir kalitede kaynatılması bu teknolojiyi modern üretim yöntemleri arasında vazgeçilmez kılmaktadır. Bu çalışmada patlayıcı yardımı ile kaynak teknolojisindeki teknolojik gelişmeler açıklanacak ve muhtemel ileriki uygulamalardan bahsedilecektir.

Anahtar Kelimeler: kaynak, farklı malzemeler, kaynak yüzeyi, patlama

Explosive Welding Of Metals

Abstract

Explosive welding is a solid-state process in which dissimilar (sometimes similar) materials are bond together via the detonation of an explosive. The energy from explosion is used to “cold” weld a flyer plate to base plate. The unique feature of this process about welding dissimilar very large parts that cannot be weld with conventional fusion welding processes in a single operation with admissible quality makes it indispensable in modern production industry. This paper reviews the technological developments in explosive welding and gives the possible future implementation of this process.

Keywords: welding, dissimilar metals, bonding zone, explosion

Giriş

Kimyasal, nükleer ve uzay sanayiinin gelişmesi ile birlikte daha çok paslanma ve aşınma direncine sahip malzemelere olan ihtiyaç günden güne artmaktadır. Patlayıcı yardımı ile kaynak teknolojisi bu amaçla kullanılan modern teknolojilerden bir tanesidir. Patlayıcı yardımı ile kaynak teknolojisi, başka yöntemlerle kaynak yapılmaları mümkün olmayan malzemelerin kaynakla birleştirilmelerinde kullanılan bir teknolojidir. Bu yöntemle şu ana kadar düşük karbonlu çelik-çelik, paslanmaz çelik-çelik, alüminyum-alüminyum, çelik-alüminyum, çelik-titanyum, nikel-alüminyum, demir-bakır, alüminyum-bakır-magnezyum, bakır-titanyum-çelik, alüminyum-bakır ve metalik camlar başarılı bir şekilde birleştirilmiştir. 260’ın üzerinde farklı malzeme bu yöntemle birleştirilebilmektedir. Patlayıcı yardımı ile kaynak teknolojisi, mücevher ve saat sanayiinde de başarılı bir şekilde kullanılmaktadır. Bu amaçla altın-altın, altın-paslanmaz çelik, altın-titanyum ve altın-alüminyum kaplamalar yapılmaktadır [1,2].

Patlayıcı yardımı ile kaynak yöntemi ile 0.025 mm'den 1 m'ye kadar kalınlıklardaki plakalar birleştirilebilir. Hareketli plakanın kalınlığı sabit plakanın kalınlığının ortalama üçte biri kadar olmalıdır. Tek bir patlama ile 30 m²'lik alan kaynatılabilir.

Patlayıcı yardımı ile kaynak teknolojisi 1944 yılında Carl tarafından keşfedilmiştir. "Yüksek hız altında kaynak" adı verdiği deneylerle bu teknolojiye derinleşmiştir. İlk deneylerini piring üzerine yapmıştır. Bu teknolojinin ticari olarak uygulanması ise 1960'ları bulmuştur. 1957 yılında Philipchuck'ın metal plakaların patlayıcı yardımı ile kalıpların şeklini alabileceğini bulmasından sonra bu teknoloji günümüze kadar artan bir ilgiyle kullanılmaya devam edilmiştir [3].

Patlayıcı yardımı ile kaynak teknolojisi aşağıdaki alanlarda sıklıkla kullanılmaktadır [2]:

1. Boru ve tüplerin birleştirilmesi
2. Isı eşanjörü tüp plakaları ve basınç kanalları
3. Tüp tıkamalarında
4. Tehlikeli bölgelerde uzaktan kaynak yapma durumlarında
5. Farklı malzemelerin birleştirilmelerinde
6. Soğutma kanallarının birleştirilmelerinde
7. Kimyasal işlem kanalları, gemi sanayi ve kriyojenik sanayi vs.

Patlayıcı yardımı ile kaynak teknolojisinin avantajlarını şu şekilde sıralayabiliriz [4,2]:

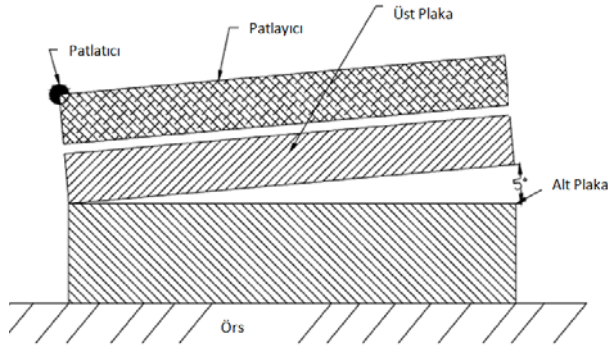
1. Normal şartlarda kaynakla birleştirilmeleri mümkün olmayan farklı malzemeler bu metotla kaynaklanabilir
2. Farklı erime sıcaklıklarına sahip malzemeler, her hangi bir erime olmaksızın başarılı bir şekilde kaynatılabilir.
3. Fikstür, aparat kullanımının azamiye inmesi
4. Malzemelerin özellikleri kaynaktan sonra değişmeden kalır.
5. İşlemin basitliği
6. Kaynak yapılacak malzemelerin üzerinde bulunan atıklar, kaynak yüzeyinden temizlenebilir.
7. Az miktarda patlayıcı işlem için yeterlidir

Patlayıcı yardımı ile kaynak teknolojisinin dezavantajlarını ise şu şekilde sıralayabiliriz [2]:

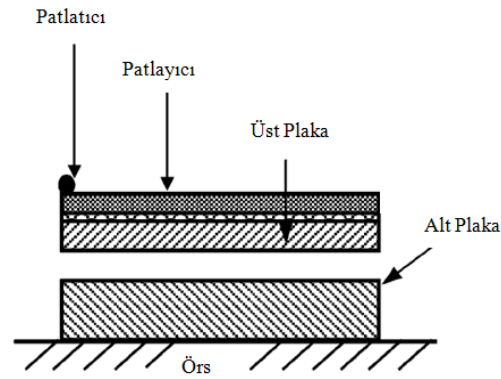
1. Kaynak yapılacak malzemeler yeteri kadar sünekliğe ve çarpışma direncine sahip olmalıdır
2. Gürültü ve şiddetli patlamadan dolayı işlem yapacak personelin güvenliği önem kazanmaktadır. İşlemin toprağın veya suyun altına yerleştirilmiş vakum odalarında yapılması gerekebilir
3. Gürültü ve yer sarsıntılarında dolayı, patlayıcıların endüstriyel alanlarda kullanımı sınırlıdır
4. Kaynak yapılacak geometriler basit olmalı: düz, silindirik, konik

Patlayıcı Yardımı ile Kaynak Düzenegi

Patlayıcı yardımı ile kaynak teknolojisinde kullanılan parçalar uçucu plaka, ana plaka, funya, patlayıcı, tampon malzeme ve örstür. Uçucu plaka ana plakaya açılı (Şekil 1) veya paralel yerleştirilebilir (Şekil 2).



Şekil 1. Klasik bir patlayıcı yardımı ile kaynak düzeneği, açılı plakalar [5]



Şekil 2. Klasik bir patlayıcı yardımı ile kaynak düzeneği, paralel plakalar [6]

Patlayıcı Yardımı ile Kaynak Mekanizması

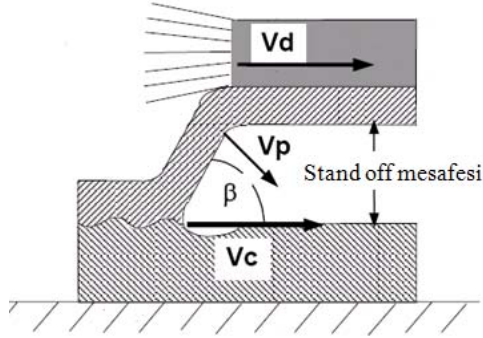
Patlama, bir malzemenin içinde meydana gelen ve orijinal malzemeyi yüksek sıcaklık ve basınçta gaza çeviren kimyasal bir reaksiyon olarak adlandırılır. Bu işlem çok kısa bir süre içerisinde meydana gelir ve açığa büyük miktarda ısı çıkar. Açığa çıkan gazın sıcaklığı 3000 °C civarındadır, basıncı ise 50000 atm civarındadır. Dolayısıyla bir katı, sıvı veya gaz halindeki patlayıcı malzeme özünde kararsız yapıdaki bir maddedir, fakat kimyasal bir reaksiyona tabi tutulduğunda daha kararlı bir yapıya dönüşür [7].

Patlayıcı yardımı ile kaynak işleminde birleştirilmek istenen iki plaka stand-off mesafesi denilen miktarda birbirinden uzağa yerleştirilir. İki plaka ya birbirine paralel ya da açılı olacak şekilde konumlandırılır. Bu iki plakadan birine uçucu plaka, diğerine ana plaka denir. Aradaki stand-off mesafesi uçucu plaka kalınlığının bir veya iki katı kadardır. Üstteki plakanın üzerine genellikle toz halde bulunan patlayıcı malzeme ahşap bir çerçeve içerisinde yerleştirilir. Bazen uçucu plaka ile patlayıcı arasına, patlama sonrasında uçucu plakanın zarar görmemesi için tampon bir malzeme yerleştirilir. Çerçevenin bir ucuna patlatıcı yerleştirilir ve patlama sonrasında patlama kuvveti bu iki yüzeyi çok hızlı bir şekilde birbirine yaklaştırır. Patlama sonrasında elde edilen enerji uçucu plakanın ana plakaya doğru çok hızlı bir şekilde hareket edip ona yapışmasında kullanılır. Kaynağın oluşması için dışarıdan ısı verilmediği için bu tekniğe soğuk kaynak tekniği de denir [8].

Patlama sonrasında oluşan şok dalgasının hızı malzemelerdeki ses hızından az olmalıdır. Ancak bu sayede şok dalgası oluşan kaynağın önünde hareket eder. Yani kaynak, şok dalgasının geçtiği yerlerde oluşur. Aksi halde şok dalgası temas eden yüzeylerin arasına girer

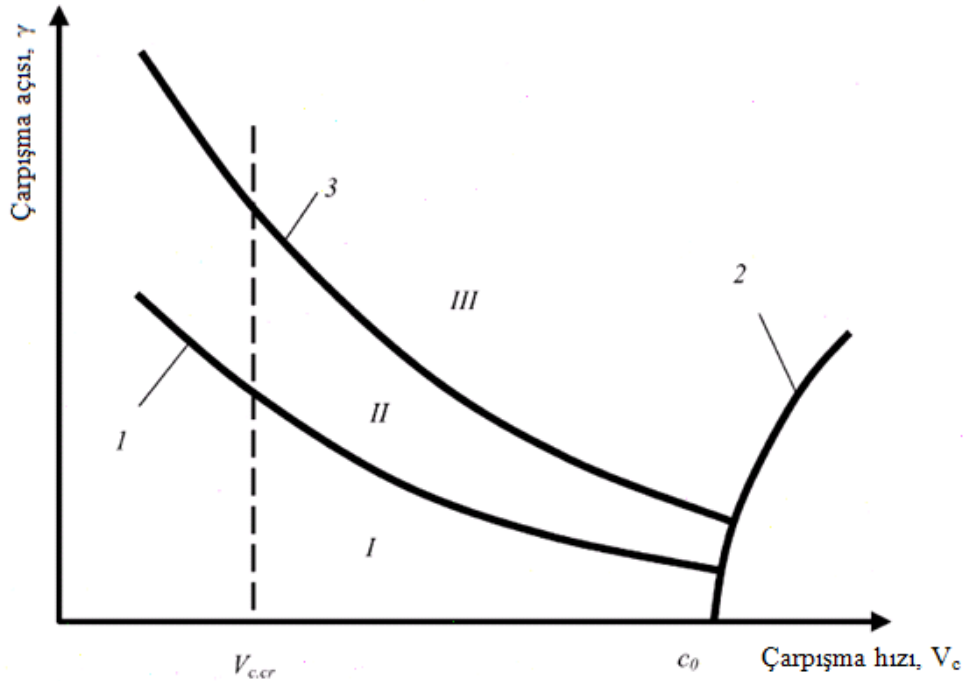
ve kaynak oluşumu engellenmiş olur. Plastik deformasyonun olması için şok dalgasının basıncının malzemelerin akma dayanımından yüksek olması gerekmektedir [9].

Patlayıcı yardımı ile kaynak teknolojisindeki ana parametreler uçucu plaka hızı (V_p), çarpışma noktası hızı (V_c) ve çarpışma açısıdır (β). Bu parametreleri etkileyen işlem parametreleri ise patlayıcı patlama oranı, patlayıcı miktarı, uçucu plaka ağırlığı ve stand-off mesafesidir (Şekil 3) [10, 11].



Şekil 3. Çarpışma parametreleri [12]

1973 yılında R.H.Wittman, çarpışma açısı ve çarpışma hızı arasındaki ilişkiyi “kaynak penceresi” (Şekil 4) adı verilen bir grafikte göstermişlerdir. Buna göre 1 ve 3 alt ve üst sınırları, 2 ise süpersonik sınırı göstermektedir. I bölgesi ön kritik bölgeyi, III bölgesi sınır dışı bölgeyi, II bölgesi ise patlayıcı yardımı ile kaynak yapılabilecek bölgeyi göstermektedir [13].



Şekil 4. Patlayıcı yardımı ile form vermede kaynak penceresi [13]

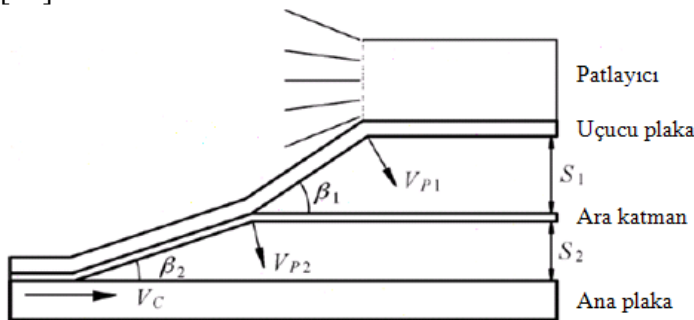
Tablo 1’de kaynak penceresinde kaynağın başarılı olacağı bölgeyi (II. bölge) sınırlayan eğrilerin denklemleri gösterilmiştir.

Tablo 1. Kaynak penceresindeki eğrilerin denklemleri [13]

Kaynak penceresindeki eğriler	İlgili denklem	Denklemini öneren kişi
Dikey eğri	$V_{c,cr}^2 = \frac{2Re(HV_1 + HV_2)}{\rho_1 + \rho_2}$	R.H.Wittman (1973)
3 numaralı eğri	$V_{t,max}^4 = \frac{1}{N^4} \left(\frac{T_m c_0}{V_c} \right)^2 \frac{\lambda c c_0}{\rho_1 \delta_1}$	R.H.Wittman (1973)
1 numaralı eğri	$\gamma_{cr} = \sqrt{\frac{\sigma_b}{\rho V_c^2}}$	R.H.Wittman (1973)
1 numaralı eğri	$\gamma_{cr} = 1.14 \sqrt{\frac{HV}{\rho V_c^2}}$	A.A.Deribas (1980)
1 numaralı eğri	$\gamma_{cr} = \frac{1}{\sqrt{1 - (V_c^2/c_0^2)}} \sqrt{\frac{2\sigma_Y}{\rho V_c^2}}$	V.G.Shmorgun (1988)
1 numaralı eğri	$\gamma_{cr} = 1.8 \left(\frac{1}{V_c} \sqrt{\frac{\sigma_b}{\rho}} + 0.1 \left(\frac{V_c}{c_0 + 1550} \right)^2 \right)$	V.I.Belayev ve ark. (1978)

Bu denklemlerde; Re, Reynoulds sayısı, HV₁ ve HV₂, kaynatılacak plakaların vickers sertlik değeri, ρ₁ ve ρ₂, kaynatılacak plakaların yoğunluğu, N, yaklaşık 0.1 olan bir faktör, c₀ ses hızı, λ, ısıl iletkenlik, c, ısıl kapasite, δ₁, uçucu plakanın kalınlığı, σ_b, akma sınırı, σ_Y, çekme gerilimini ifade etmektedir [13].

Patlayıcı yardımı ile kaynak yönteminde kaynak yüzeyinin dalgalı bir yapıda olması fazla miktarda kinetik enerji kaybından kaynaklanmaktadır. Malzemelerden biri veya ikisinin yüksek akma dayanımına sahip olması da benzer soruna yol açar. Bu sorunun ortadan kaldırılabilmesi için uçucu ve ana plaka arasına metalik bir ara katman konulması denenmiştir (Şekil 5). Bu ara katman, ince ve düşük akma dayanımına sahip olmalıdır. Manikandan ve ark. (2008) bu amaçla, titanyumun 304 paslanmaz çeliğe kaplanmasında ara katman olarak 0,3, 0,5 ve 1 mm kalınlıklarda 304 paslanmaz çelik kullanmışlardır. Ara katman kullanılmasının kaynak yüzeyinde daha az dalgalı bir yapının oluşmasına yol açtığı ve başarılı bir kaynağın elde edilebilmesi için ara katman kalınlığının az olması gerektiği belirtilmiştir [14].

**Şekil 5.** Ara katman kullanılarak yapılan patlayıcı yardımı ile kaynak yöntemi [14]

Ara katman kullanılarak yapılan patlayıcı yardımı ile kaynak yönteminde β_1 ve β_2 çarpışma açılarının hesaplanıp deney düzeneğinin buna göre yapılması çok önemlidir. β_1 ve β_2 çarpışma açıları aşağıdaki formüllerden hesaplanabilir [14]:

$$\beta_1 = \frac{\left(\frac{R+1}{\sqrt{R-1}}-1\right)\pi r}{2(r+2.71+0.184\delta/S_1)} \quad (1)$$

$$\tan \beta_2 = \sin \beta_1 \left(1 + \frac{t_f \rho_f}{t_i \rho_i} - \frac{2 \sin^2 \beta_1}{2}\right) - 1 \quad (2)$$

Bu formüllerde r patlayıcı kütesinin uçucu plaka ağırlığına oranı, δ patlayıcı tabakanın kalınlığı, S_1 stand-off mesafesi, k, 1.96-2.6 arasında değişen ve patlayıcı tabakanın kalınlığına bağlı olan bir sabit, t_i ara katman kalınlığı, ρ_i ara katman yoğunluğu, t_f uçucu plaka kalınlığı, ρ_f uçucu plaka yoğunluğudur [14].

Patlayıcı Yardımı ile Kaynağa Etki Eden Parametreler

Ara ortam: Uçucu ve ana plaka arasında bulunan gazın cinsi özellikle titanyum kaplamalarında çok önemlidir. Titanyum havadan nitrojen ve oksijen emer. Patlayıcı yardımı ile kaynak yönteminde eğer kaynatılacak titanyum parçalar çok büyükse, kaynağın başladığı noktanın uzağında olan bölgeler havadan nitrojen ve oksijeni emerek doygunluğa ulaşır. Bir süre sonra titanyum emdiği bu gazlarla reaksiyona girerek yanabilir. Bu da oluşmaya başlayan kaynağın bozulmasına yol açabilir [15].

Malzeme: Patlayıcı yardımı ile kaynak yönteminde oluşan yüzeyler genellikle dalgalı bir yapı gösterir. Dalgalı yapının bozukluğu kaynatılacak malzemelerin yoğunlukları ile alakalıdır. İki malzemenin yoğunluklarının oranı ne kadar fazla ise, kaynak yüzeyinin dalgalı yapısının sinüs dalgasından farkı o kadar çok olur. Farklı malzemelerin kaynatılmasında elde edilen genlik/dalga boyu oranı, aynı malzemelerin kaynatılmasından elde edilenden azdır. Farklı malzemelerin kaynatılmasında elde edilen dalga boyu, aynı malzemelerin kaynatılmasından elde edilenden fazladır [16].

Hız Limiti: Başarılı bir kaynak için, çarpışma hızı ve uçucu plaka hızı, her iki malzemedeki ses hızından düşük olmalıdır [17]. Patlayıcı yardımı ile kaynağın yapılabilmesi için uçucu plakanın çarpışma hızının 300-800 m/s olması gerekmektedir [18]. Uçucu plakanın çarpışma hızı ile çarpışma noktası hızı arasında;

$$V_p = 2V_c \sin \frac{\beta}{2} \quad (3)$$

şeklinde bir bağıntı vardır.

Çarpışma açısı (β): Patlayıcı patlatıldığı zaman uçucu plaka ile ana plaka arasında meydana gelen açıdır ve 5-25° arasında değişir [12].

Basınç Limiti: Başarılı bir kaynak için, gerekli olan minimum bir basınç limiti vardır. Bu basınç, kaynağın oluşabilmesi için gerekli olan darbe enerjisini sağlar. Darbe enerjisi uçuşu plakanın gerinim enerjisine ve akma dayanımına bağlıdır [17].

Stand-off mesafesi: Başarılı bir kaynak için, stand-off mesafesi uygun seçilmelidir. Yüksek stand-off mesafelerinde kaynak yüzeyi daha dalgalı hale gelmekte, dalgaların genlik ve dalga boyu artmaktadır.

Yüzeyin düzlüğü: Başarılı bir kaynak için yüzeyin temizlenmiş ve çeşitli kalıntılardan arındırılmış olması gerekmektedir. Aksi halde kalıntıların olduğu kısımlarda meydana gelen yüksek ısınmadan dolayı kaliteli bir kaynak elde edilemez [17].

Uçucu plaka şekli: Chizari ve ark. (2009) uçucu plakanın şeklinin patlayıcı yardımı ile kaynak performansına etkisini inceledikleri çalışmalarında, düz, U-şeklinde ve V-şeklinde üç farklı uçucu plaka kullanmışlardır. Kaynak yüzeyinde oluşan genlik en yüksek değerini uçucu plaka düzken, en düşük değerini ise uçucu plaka U-şeklinde iken almıştır. V-şeklindeki uçucu plakanın en iyi yüzey kalitesine yol açtığı belirtilmiştir [19].

Patlayıcı oranı: Patlayıcı kütlelerinin uçucu plaka kütlelerine oranıdır ($R = c/m$).

Patlayıcı miktarı: Patlayıcı miktarını bulmak için

$$V_p^2 = 2E \left(\frac{3}{1 + \varepsilon \left(\frac{m}{\rho} \right) + 4 \left(\frac{m^2}{\rho^2} \right)} \right) \quad (4)$$

formülü kullanılabilir. Burada $2E$, Gurney enerjisi (2560000 m/s), m uçucu plaka ağırlığı ve c ise patlayıcı kütleleridir [20].

Asimetrik kaynakta (sadece tek bir plakanın üzerinde patlayıcı olması durumu) elde edilen dalgalar, simetrik kaynakta (her iki plakanın üzerinde patlayıcı olması durumu) elde edilenden daha küçüktür [16].

Patlayıcı malzemesi: Patlayıcılar hızlı kimyasal reaksiyonlar sonucunda büyük miktarda gaz ve ısı açığa çıkaran maddelerdir. Patlayıcılar gaz (oksijen ve asetilen karışımları), sıvı (nitrogliserin) veya katı (TNT) halde olabilir [21].

Patlayıcı yardımı ile kaynak teknolojisinde kullanılan patlayıcılar genel olarak karışım halde kullanılır. Bu karışımlar genel olarak 2-4 km/s patlama hızına sahiptir. Fakat bu hızlarla, atom enerjisi mühendisliği veya kimya endüstrisi gibi alanlarda kullanılan özellikle 1 mm'den düşük kalınlıktaki folyo halindeki malzemelerin bu yöntemle kaynatılabilmesi imkânsızdır. Patlama sonrasında folyoların zarar görmeden başarılı bir şekilde kaynatılabilmesi için farklı patlayıcı karışımları üzerinde çalışmalar devam etmektedir. Andreevskikh ve ark. (2011) bu amaçla ağırlıkça %35 PETN ve % 65 sodyum bikarbonat ve %35 RDX ve % 65 sodyum bikarbonat karışımlarını patlayıcı olarak kullanarak başarılı sonuçlar elde etmişlerdir [22, 23].

Tablo 2'de patlayıcı yardımı ile kaynak teknolojisinde kullanılan farklı patlayıcılar ve özellikleri verilmiştir.

Tablo 2. Patlayıcı yardımı ile kaynak teknolojisinde kullanılan bazı patlayıcılar ve özellikleri [24].

Patlayıcı	Göreceli güç %TNT	Patlayıcı formu	Patlama hızı, m/s	Enerji, KJ/kg	Maximum basınç, Gpa
RDX (Cyclotrimethylene trinitramine, C ₃ H ₆ N ₆ O ₆)	170	Sıkıştırılmış granül	8380	1270	23.4
TNT (Trinitrotoluene, C ₇ H ₅ N ₃ O ₆)	100	Döküm	7010	780	16.5
PETN (Pentaerythritol tetranitrate, C ₅ H ₈ N ₁₂ O ₄)	170	Sıkıştırılmış granül	8290	1300	22.1
Tetryl (Trinitrophenylmethylnitramine, C ₇ H ₅ O ₈ N ₅)	129	Sıkıştırılmış granül	7835	-	-

Matematiksel Modeller

Patlayıcı yardımıyla kaynak yönteminde çarpma bölgesindeki akışın karmaşıklığının, çarpma noktasının önündeki bölgedeki düzensizliklerin, ara yüzeyin durgun bölgede ilerlemesinin ve enerjinin viskoz tüketiminin kaynak yüzeyindeki dalganın şeklini belirlenmesi, matematiksel modellemeyi zorlaştırmaktadır [25].

Chemin ve Qingming (1989) kaynak yüzeyinde oluşan dalgalı yapıyı karakterize edecek matematiksel bir model sunmuşlardır [26].

Balasubramanian ve ark. (1997) patlayıcı yardımı ile kaynak yönteminde, kaynak yüzeyinde oluşan dalgalı yapının genlik ve dalga boyunun hesaplanabilmesi için deneysel bir model oluşturmuşlardır. Buna göre;

$$\text{Genlik} = h = 23.8 + 7.69M + 4.56F + 4.44DF \quad (5)$$

$$\text{Dalga Boyu} = \lambda = 251.88 + 26.88M + 20.63F \quad (6)$$

Bu formüllerde, M, patlayıcının ağırlığının uçucu plaka ağırlığına oranı, F, uçucu plaka kalınlığı ve D ise stand-off mesafesidir [27].

Raghukandan ve ark. (1998) patlayıcı yardımıyla kaynak yöntemindeki başarı oranını matematiksel olarak modellemiştir. Buna göre başarı oranı:

$$\text{Başarı oranı} = Y = 1.004 - 0.221A + 0.146B - 0.116C \quad (7)$$

formülünden bulunabilir. Burada A, örsün derinlik/çap oranını, B, patlayıcı kütesinin uçucu plaka kütesine oranını, C ise uçucu ve ana plaka malzemelerinin yoğunluklarının oranını ifade etmektedir [28].

Raghukandan (2003) düşük karbon çeliğine, patlayıcı olarak toz halinde nitrogliserin kullanılarak bakır plakanın kaynatılmasını incelediği çalışmada deneysel verileri

kullanarak ANOVA analizi yapmış ve kayma ve çekme durumundaki bağlama kuvvetinin formüllerini elde etmişlerdir [29]. Buna göre bağlama kuvveti;

$$\text{Kayma durumunda} = 3.518 - 0.573T + 0.16R - 0.333A + 0.484D + 0.118T2 + 0.062A2 - 0.047AD$$

(8)

$$\text{Çekme durumunda} = 3.813 - 0.610T + 0.379R - 0.257A + 0.144T2 - 0.058A2 + 0.094D2 - 0.054TR + 0.037TA - 0.038RD$$

(9)

formüllerinden hesaplanabilir. Burada T uçucu plaka kalınlığı, R yükleme oranı, A eğim açısı ve D stand-off mesafesidir.

Yan ve ark. (2008) 25 µm kalınlıkta Fe₇₈B₁₃Si₉ ve Fe₄₀Ni₄₀P₁₄B₆ şekilsiz şeritlerin patlayıcı yardımı ile kaynak yöntemiyle kaynak yapılmasını inceledikleri çalışmalarında kaynak yüzeyi boyunca sıcaklık dağılımını gösteren bir matematiksel model öne sürmüş ve bu modelin deneysel sonuçlarla uyum içinde olduğunu belirtmişlerdir [30].

Yan ve Li (2008) kaynak yüzeyine yakın bölgelerdeki gerinim oranı dağılımını matematiksel olarak başarılı bir şekilde modellemişlerdir [31].

Qu (2011) ısı iletim denklemlerini kullanarak patlayıcı yardımı ile kaynak yönteminde kaynak yüzeyindeki sıcaklık dağılımının matematiksel modellenmesini sağlamıştır. Buna göre sıcaklık değişimi;

$$T(y,t) = \frac{(T_{\max 1} - T_0)\delta_1}{2\sqrt{k_1\pi t}} e^{-\frac{y^2}{4k_1 t}} + \frac{(T_{\max 2} - T_0)\delta_2}{2\sqrt{k_2\pi t}} e^{-\frac{y^2}{4k_2 t}} + T_0$$

$$k = \frac{\lambda}{\rho c}$$

formüllerinden bulunabilir. Burada T_{max1} ve T_{max2} sırasıyla ana plaka ve uçucu plakanın erime katmanlarının azami artış sıcaklıklarını, δ₁ ve δ₂ sırasıyla ana plaka ve uçucu plakanın erime katmanlarının kalınlıklarını, T₀ çevre sıcaklığını, t süreyi, y ise kaynak yapılan plakalara dik olan eksen gösterir. λ ısı iletkenliği, ρ yoğunluğu, c ise ısı kapasitesini ifade eder [32].

Simülasyonlar

Patlayıcı yardımı ile kaynak yönteminde deneysel sonuçları önceden tahmin etme, deneylerde kullanılacak parametre seçimi ve kaynak yüzeyinde meydana gelecek dalgalı yapının dağılımını belirlemek için ABAQUS, ANSYS, LSDYNA, AUTODYN, RAVEN ve COMSOL programları kullanılmaktadır [17].

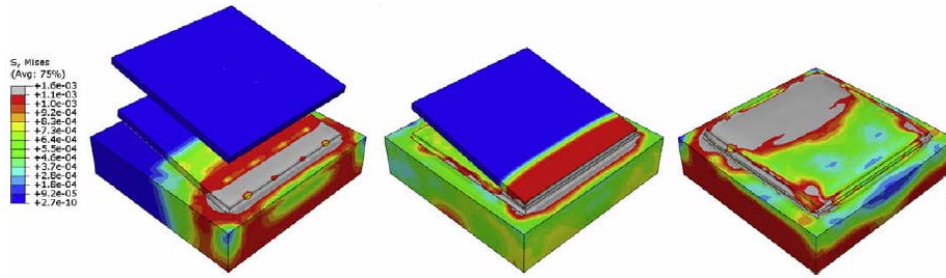
Abe (1999) elastik-plastik malzemeler için, iki boyutlu sonlu farklar yöntemini kullanarak kaynak yüzeyine yakın bölgelerde plastik akışın hesaplanmasını yapmıştır. Dalgalı ara yüzeyin, kaynak yönündeki kayma akış dağılımından ve kaynak yüzeyine dik olan periyodik bozulmalardan kaynaklandığını varsayımlar ve deneysel sonuçlar ve teorik hesaplamalarla bunu doğrulamışlardır [33].

Patlayıcı yardımı ile kaynak yönteminin simülasyonu Mousavi ve ark. (2004, 2005) tarafından da yapılmıştır. Yazarlar patlayıcı olarak ANFO karışımı kullanmışlar ve AUTODYN programı ve Williamsburg denklemlerini kullanarak kaynak yüzeyinde meydana gelen dalgalı yapıyı başarı bir şekilde simüle etmişlerdir [34, 35].

Mousavi ve Al-Hassani (2005) kaynak yüzeyinde meydana gelen düz ve dalgalı yapıyı ve fişkirtma mekanizmasını başarılı bir şekilde simüle ederek dalga büyüklüğünü ve fişkirtma hızını tahmin edebilmişlerdir [36].

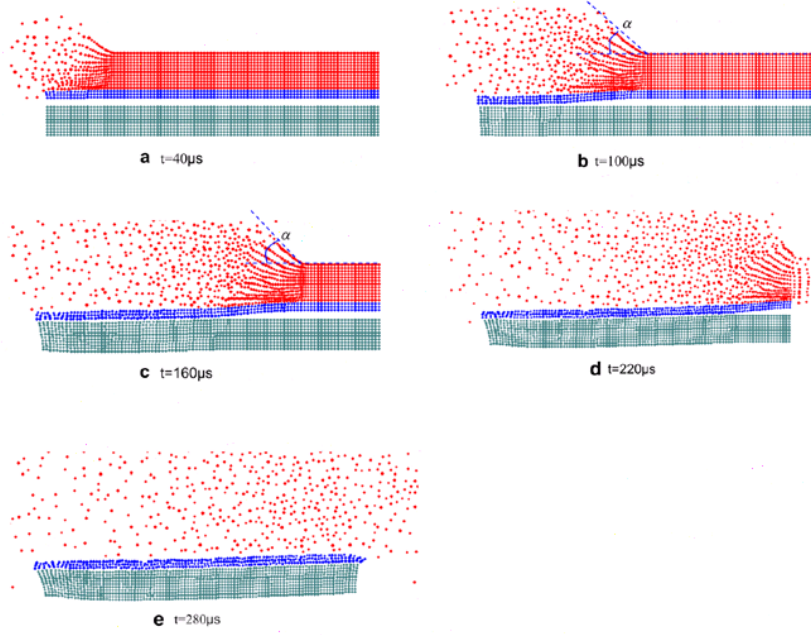
Mousavi ve Al-Hassani (2008) farklı kalınlıklarda patlayıcı ve uçucu plaka, farklı stand-off mesafesi, farklı patlayıcı türü (ANFO veya PETN) ve farklı konfigürasyonlar (paralel ve 15^0 açılı) kullanarak yaptıkları deneylerle ABAQUS programı yardımıyla yaptıkları simülasyonları karşılaştırmış ve başarılı sonuçlar elde etmişlerdir [37].

Chizari ve Barrett (2009) iki uçucu alüminyum plakanın ana plakaya patlayıcı yardımı ile kaynak yapılmasını inceledikleri çalışmalarında 15 mm stand-off mesafesi ve 12^0 açı değeri kullanmışlardır. Deneysel verilerle numerik simülasyonu (Şekil 6) karşılaştıran yazarlar, birinci ve ikinci uçucu plaka arasında oluşan kaynak yüzeyinin, birinci uçucu plaka ve ana plaka arasında oluşandan daha az olduğu sonucuna varmışlardır [38].



Şekil 6. İki uçucu plakalı patlayıcı yardımı ile kaynak yönteminin simülasyonu [38].

Wang ve ark. (2011) patlayıcı yardımı ile kaynak yöntemini malzeme nokta metodu yöntemiyle simüle etmişlerdir (Şekil 7). Yazarlar teorik hesaplamalar ve deneysel verilerle simülasyonu karşılaştırmışlar ve başarılı sonuçlar elde etmişlerdir [39].



Şekil 7. Patlayıcı yardımı ile kaynak yönteminin malzeme nokta metodu yöntemiyle simülasyonu [39].

Patlayıcı Yardımı ile Kaynak Üzerine Yapılan Çalışmalar

Gulbin ve ark. (1997) berilyum bronz ve nikel alaşımını patlayıcı yardımı ile kaynatmışlardır [40].

Buchar ve ark. (1999) çelik bir füzenin etrafına üç farklı malzemeden (Cu, CuZn10 ve CuNi10FeMn) halkayı patlayıcı yardımı ile başarılı bir şekilde kaynatmışlardır. Kaynatılan parçalarla birlikte füzelerle yirmiden fazla atış yapılmış ve her seferinde kaynak yüzeyi incelenmiş ve kaynak yüzeyinde herhangi bir ayrışma tespit edilmemiştir [41].

Gerland ve ark. (2000), kurşun azit (PbN_6) kullanarak alüminyum plakaya 50 ve 100 μm kalınlıkta nikel kaplama yapmışlardır. Patlama hızı arttıkça yüzey pürüzlülüğünün arttığını fakat genel olarak düşük olduğunu belirtmişlerdir. Çarpışma hızı arttıkça kaynak yüzeyindeki dalga boyu ve genliğin arttığını, aynı zamanda mikro çatlakların da arttığını fakat bunların yayılmadığını belirtmişlerdir [42].

Elmer ve ark. (2002) Niyobyum (9,5 mm kalınlıkta) ve 6061 alüminyumun (178 mm kalınlıkta) patlayıcı yardımı ile kaynatılmasını inceledikleri çalışmalarında funyanın yerleştirildiği kenarın karşı kenarında herhangi bir kaynağın oluşmadığını tespit etmişlerdir [43].

Kosec ve ark. (2003) tantal ve düşük karbon çeliğini başarılı bir şekilde patlayıcı yardımı ile kaynatmışlardır. Yazarlar, hızlı soğuma ve katılaşmadan dolayı erimiş malzemelerin yetersiz karışması sonucunda kaynak yüzeyinde erimiş malzeme kalıntıları (çapları 0,1-2 μm olan metal olmayan oksitler vs.) tespit etmişlerdir [44].

Han ve ark. (2003) ara katman olarak AA1050 alüminyum plaka kullanarak AA5083 alüminyum ve SS41 çelik plakaların patlayıcı yardımı ile kaynatılmasını inceledikleri çalışmalarında, ara katman kullanılmasının $FeAl_3$ ara yüzey bölgesi oluşumuna yol açtığını,

ara katman kalınlığı arttıkça bu bölgenin daha düzenli oluştuğunu belirtmişlerdir. Ara katman kalınlığı arttıkça ara yüzey bölgesinin kalınlığı artmakta, ara yüzey bölgesi ve SS41 arasındaki yüzey alanı arttığı için, maksimum kayma direnci azalmaktadır [45].

Acarer ve ark. (2003), iki farklı kalınlıkta çelik plakanın patlayıcı yardımı ile kaynak yapılmasında stand-off mesafesi ve patlayıcı kütlelerinin mikro yapı, mikro sertlik ve çekme kayma dayanımına etkisini inceledikleri çalışmalarında, stand-off mesafesi ve patlayıcı kütlelerinin artması ile kaynak ara yüzünde dalgalı bir yapının oluştuğunu belirtmişlerdir. Kaynak ara yüzünden uzaklaştıkça mikro sertliğin düştüğünü ve ısı işlem görmüş parçaların diğerlerine göre daha yüksek bükme dayanımına sahip olduğunu belirtmişlerdir [46].

Kaçar ve Acarer (2003) 2205 çeliği (2 mm kalınlığında) ile DIN-P355GH çeliğinin (10 mm kalınlığında) patlayıcı yardımı ile kaynak yöntemiyle birleştirilebilirliğini inceledikleri çalışmalarında yüksek patlama hızından dolayı, kaynak yüzeyinde dalgalı bir yapı ve darbe yönündeki taneciklerde boyuna bir uzama gözlemlenmiştir. Yüksek soğuk plastik deformasyon neticesinde, kaynak yüzeyinde mikro sertlikte artış belirlenmiştir. Uçucu plakanın darbe sertliği yüksek olduğu için, işlem sonucunda elde edilen kompozit malzemenin darbe sertliği ana malzemedeki yüksek çıkmıştır. Yazarlar, bu iki çeliğin patlayıcı yardımı ile kaynak yöntemiyle başarılı bir şekilde birleştirilebileceğini belirtmişlerdir [47].

Mudali ve ark. (2003) 304L paslanmaz çelik ve titanyum plakaların patlayıcı yardımı ile kaynak yapılmasını inceledikleri çalışmalarında, kaynak bölgesinin bükme testlerinden geçecek kadar sünek olduğunu, paslanma oranının yüksek çıkmasına rağmen, paslanmanın paslanmaz çelik bölgede başlayacağı için sorun teşkil etmeyeceğini, bundan dolayı nükleer yakıt yeniden işleme fabrikalarında kullanılan 304L paslanmaz çelik-titanyum kompozit parçaların bu yöntemle üretilebileceğini belirtmişlerdir [48].

Acarer ve ark. (2004) patlayıcı yardımı ile kaynak yönteminde stand-off mesafesi, patlayıcı oranı, örs çeşidi ve ısı işlem uygulanmasının etkilerini inceledikleri çalışmalarında, stand-off mesafesi ve patlayıcı oranı arttıkça kaynak yüzeyinin daha dalgalı hale geldiğini, ısı işlem uygulamanın kayma ve bükme gerilimini arttırdığını, patlama sonucunda oluşan yüksek basınçtan dolayı kum örs kullanılması durumunda kaynağın başarısız olduğunu, kaynak yüzeyinde kaba tanecik yapısı görüldüğünü, yüksek patlama oranlarında kaynak kalitesinin azaldığını belirtmişlerdir [49].

Grignon ve ark. (2004) 6061 T0 ve 6061 T0 malzemelerinin patlayıcı yardımı ile kaynak yapılmasını numerik, deneysel ve sonlu elemanlar yöntemi ile simüle ederek çalışmışlardır. Farklı çarpışma açıları ile yapılan deney sonuçlarının simülasyon ve numerik çalışma ile uyumlu olduğu belirtilmiştir [50].

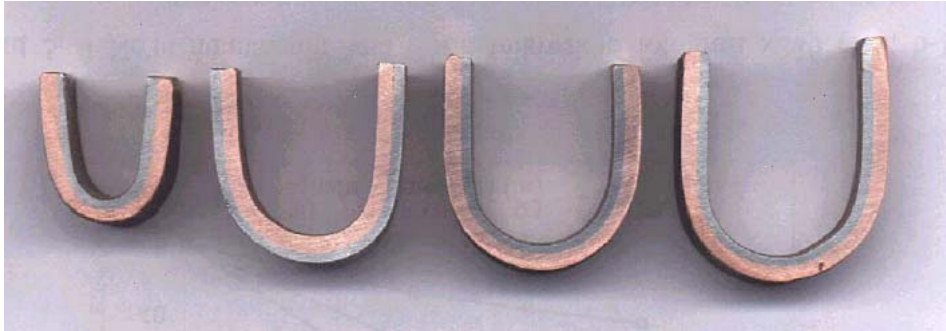
Kacar ve Acarer (2004), DIN-P355GH tipi çeliğin 316L tipi östenitik paslanmaz çelik ile kaplanmasında patlayıcı yardımı ile kaynak tekniğini kullanmışlardır. Patlayıcı olarak ELBAR 5'in kullanıldığı deneylerde yüksek çarpışma hızından dolayı çeliğin yüzeyinde dalgalı bir katman oluştuğunu, kaynak yüzeyine yakın yüzeylerdeki mikro-sertliğin ciddi oranda arttığını, 316L çeliğinin yüksek çarpma tokluğundan dolayı oluşan kompozit malzemenin de ana malzemeye göre çok yüksek çarpma tokluğuna sahip olduğunu belirtmişlerdir [51].

Kahraman ve ark. (2005), paslanmaz çeliğin patlayıcı yardımı ile kaynak teknolojisi kullanılarak titanyum kaplanması ile alakalı yaptıkları çalışmalarında, üst ve alt plaka

arasında 5° açı ve patlayıcı olarak ise ELBAR 5 (%92 amonyum nitrat, %5 fueloil ve asgari %3 TNT) kullanmışlardır. Çalışmaya göre orijinal malzemeye göre kaynak yapılmış malzemenin sertliği daha yüksek çıkmıştır. Düşük patlayıcı miktarlarında kaynak yüzeyi düz iken, patlayıcı miktarı arttıkça kaynak yüzeyinin dalgalı hale geldiği gözlenmiştir. Patlama sonucu oluşan plastik deformasyon sonucunda kaynak yüzeyindeki taneciklerin patlama yönünde uzadığı görülmüştür. Kompozit malzeme 180° büküldüğü halde herhangi bir ayrışmaya rastlanmamıştır, bu da titanyum-paslanmaz çelik ikilisinin bükümlü halde bile endüstride kullanılabileceği manasına gelmektedir [5].

Kahraman ve ark. (2005), bakır plakaların patlayıcı yardımı ile kaynak teknolojisi kullanılarak Ti6Al4V kaplanması ile alakalı yaptıkları çalışmalarında, yüksek çarpma hızından dolayı kaynak yüzeyinde dalgalı bir yapı gözlemlemişlerdir. Çekme-kayma testlerine göre, oluşan kompozit malzemenin dayanımı bakırın dayanımına göre daha fazladır. Patlayıcı miktarı arttıkça oluşan kompozit plakanın sertliği de artmaktadır [11].

Durgutlu ve ark. (2005), bakır ve paslanmaz çeliğin patlayıcı yardımı ile kaynak yöntemiyle birleştirilebilirliğini inceledikleri çalışmalarında 200x200x1,5 mm uçucu plaka ve 200x200x2 mm ana plaka kullanmışlardır. Patlayıcı olarak ELBAR 5'in kullanıldığı çalışmada, patlama oranı 1,5 olduğunda kaynak yüzeyinin düz olduğu, 2,5 olduğunda ise dalgalı bir yüzey elde edildiği belirtilmiştir. Standa off mesafesi arttıkça yüzeyin daha fazla dalgalandığı görülmüştür. Kaynak yüzeyinde patlama oranı ve stand off mesafesine bağlı olarak sertlikte artış gözlemlenmiştir. Kayma testlerinde kaynak yüzeyinde herhangi bir kayma gözlemlenmemiştir ve bu haliyle patlayıcı yardımı ile kaynak yöntemi ile bakır ve paslanmaz çeliğin sorunsuz bir şekilde birleştirilebileceği belirtilmiştir (Şekil 8) [6].



Şekil 8. Patlayıcı yardımı ile kaynak yöntemiyle elde edilmiş ve 180° bükülmüş bakır-paslanmaz çelik malzemesi [6].

Mousavi ve Joodaki (2005) 5056 alüminyum, 1015 alüminyum ve 304 paslanmaz çelik boruların tek seferde patlayıcı yardımı ile kaynatılmasını incelemişlerdir. Çarpma noktasında oluşan ısının malzemelerin erime sıcaklığından düşük olduğunu simülasyonla tespit eden yazarlar, bu çalışma ile bu teknolojinin katı hal prosesi olduğunu doğrulamışlardır [52].

Palmer ve ark. (2006), 9,5 mm kalınlıkta niyobyum ve 203 mm kalınlıkta 6061-T651 alüminyum plakaların patlayıcı yardımı ile kaynatılmasında ara katman olarak 1 mm kalınlıkta 6061-T0 alüminyum ve 0,33 mm kalınlıkta niyobyum saclar kullanmışlardır. Bu şekilde ara katmanlar kullanılmasının, kaynaktan sonra bir ısıl işlem gereksinimini ortadan kaldırdığını, daha büyük kaynak yüzeyine yol açtığını ve kaynağın çekme ve darbe dayanımını ciddi oranda arttırdığını belirtmişlerdir [53].

Berski ve ark. (2007) alüminyum borunun dışına bakır plakaların patlayıcı yardımı ile kaynatılmasını inceledikleri çalışmalarında, kaynak yüzeyinin dalgalı bir yapıda olduğunu ve bakır ile alüminyum malzeme arasındaki mesafenin azaltılması ile yüzey kalitesinin arttığını belirtmişlerdir [54].

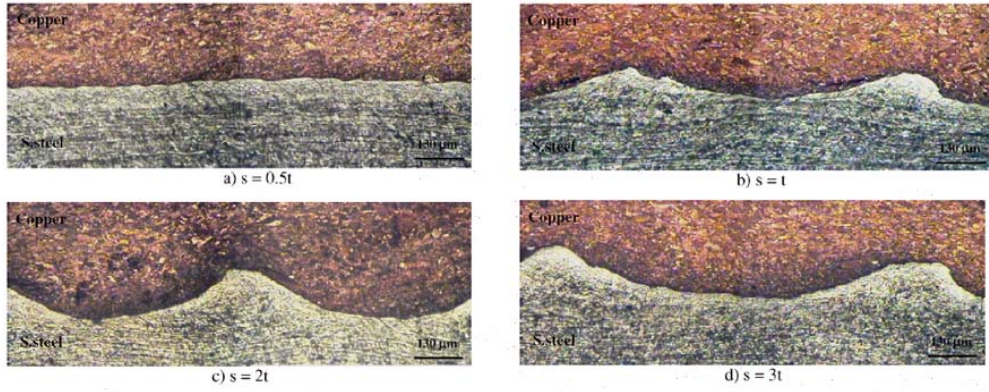
Kahraman ve ark. (2007) sırasıyla 1,5 ve 2 mm kalınlıkta Ti-6Al-4V ve alüminyum malzemelerin patlayıcı yardımı ile kaynak yöntemiyle birleştirilebilirliğini incelemişlerdir. Normal şartlarda titanyum ve alaşımlarının kaynaklanabilirliği, yüksek sıcaklıklarda atmosferden oksijen ve nitrojeni kolayca alması ve bu sebeple reaktif olmasından dolayı çok zordur. Çalışmada, patlayıcı kütlesinin artması ile kaynak yüzeyindeki dalgalı yapının arttığı gözlemlenmiştir. Elde edilen malzemenin sertliği hem uçucu plaka hem de ana plakanın sertliğinden yüksek çıkmıştır. Malzemenin 180° büküldüğü durumda bile herhangi bir ayrışma gözlemlenmemiştir [20].

Zhu ve ark. (2007) Ni₄₉Ti₅₁(NiTi-1) ve Ni_{48,6}Ti_{51,4}(NiTi-2) alaşımlarının patlayıcı yardımı ile kaynak yapılmasını inceledikleri çalışmalarında NiTi-1'i uçucu plaka, NiTi-2'yi ana plaka olarak almışlardır. Yüzey incelemeleri neticesinde kaynak yüzeyine yakın yerlerde azami mikro sertliğe erişildiği ve düzgün bir kaynak yüzeyi elde edildiği belirtilmiştir. Yazarlar patlayıcı yardımı ile kaynak yöntemi ile kimyasal heterojen şekil hatırlamalı malzemelerin başarılı bir şekilde üretilebileceğini belirtmişlerdir [55].

Gülenç (2008), alüminyum ve bakır plakaların patlayıcı yardımı ile kaynak yöntemiyle birleştirilebilirliğini incelediği çalışmasında, kaynak yüzeyindeki mikro sertliğin patlayıcı oranı ile doğrusal olarak arttığını, kaynak yüzeyinde dalgalı bir yapı ve darbe yönündeki taneciklerde boyuna bir uzama gözlemlendiğini belirtmiştir. Patlayıcı oranı arttıkça dalga boyu ve genliğin arttığının belirtildiği çalışmada elde edilen kompozit malzeme 180° büküldüğünde bile herhangi bir ayrışma gözlemlenmemiştir [56].

Acarer ve Demir (2008) çift fazlı çeliklerin alüminyum ile kaplanmasını inceledikleri çalışmalarında, darbe yönündeki taneciklerde boyuna bir uzama ve kaynak ara yüzeyinin düzgün bir yapıda gözlemlendiğini belirtmişlerdir [57].

Durgutlu ve ark. (2008) stand-off mesafesinin patlayıcı yardımı ile kaynak yöntemindeki etkisini inceledikleri çalışmalarında 1,5 mm kalınlıkta paslanmaz çelik (uçucu plaka) ve 2 mm kalınlıkta saf bakır plakalar (ana plaka) kullanmışlardır. Patlayıcı olarak Anfo'nun kullanıldığı deneylerde 0,5t, t, 2t ve 3t (t=uçucu plaka kalınlığı) stand-off mesafeleri denenmiştir. Şekil 9'dan da görülebileceği gibi stand-off mesafesi arttıkça dalga boyu ve genlik artmakta, dolayısıyla düşük stand-off mesafelerinde kaynak yüzeyi neredeyse düzgün bir yapı gösterirken, stand-off mesafesinin artmasıyla daha dalgalı yüzeyler elde edilmiştir. Tablo 3'ten görülebileceği gibi stand-off mesafesi arttıkça, her iki plakanın kaynak yüzeyine yakın kısımlarında sertlik değerleri artmıştır. Bunun sebebi patlama ve sonrasında çarpışma neticesinde meydana gelen deformasyon sertleşmesidir [58].



Şekil 9. Kaynak yüzeyinin optik mikroskopta görünümü [58]

Tablo 3. Farklı stand-off mesafelerinde kaynatılan metal plakaların sertlik değerleri [58]

Stand-off mesafesi	Malzeme	Plakanın sertliği (HV)	Metal çiftinin sertliği (HV)		
			Kaynak yüzeyinden uzaklık (µm)		
			150	800	1350
(s = 0.5t)	Paslanmaz çelik	400	419	403	415
	Bakır	113	129	113	127
(s = t)	Paslanmaz çelik	400	425	403	422
	Bakır	113	134	114	130
(s = 2t)	Paslanmaz çelik	400	430	405	428
	Bakır	113	142	114	139
(s = 3t)	Paslanmaz çelik	400	431	405	429
	Bakır	113	143	115	139

Minev ve ark. (2008) 40µm kalınlıkta $Ni_{78}B_{14}P_8$ folyoların paslanmaz çelik, yumuşak çelik, alüminyum ve bakır üzerine patlayıcı yardımı ile kaynatılmasını inceledikleri çalışmalarında, başarılı bir metalik cam kaynağı için çarpışma hızının 800 m/s ve uçucu plakanın kütlelerinin patlayıcı kütlelerine oranının yaklaşık 1 olması gerektiğini belirtmişlerdir [59].

Mousavi ve ark. (2008) paslanmaz çelik ve titanyum plakaların patlayıcı yardımı ile kaynatılmasını inceledikleri çalışmalarında stand-off mesafesinin artmasıyla bağlama kuvvetini biraz arttığını, sabit bir çarpışma noktası hızı için çarpışma hızı veya çarpışma açısı arttıkça kaynak yüzeyindeki dalgalı yapının genliğinin arttığını belirtmişlerdir [60].

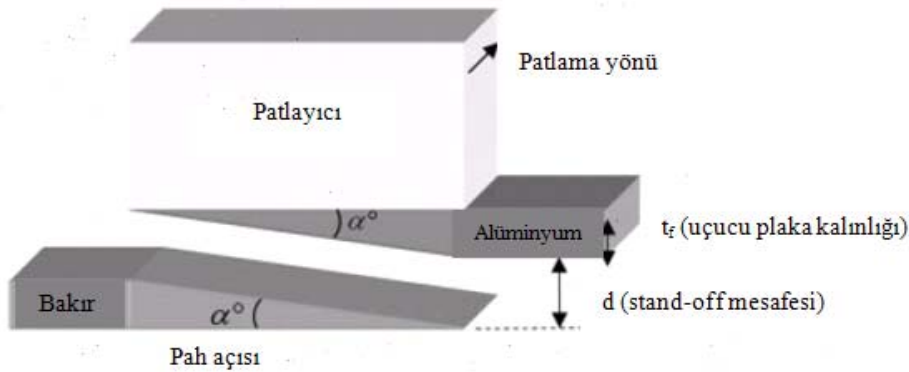
Mousavi ve Sartangi (2009) paslanmaz çelik ve titanyum plakaların patlayıcı yardımı ile kaynatılmasını inceledikleri çalışmalarında düşük patlayıcı oranlarında düz, yüksek patlayıcı oranlarında ise dalgalı bir kaynak yüzeyi elde etmişlerdir. Patlayıcı oranları arttıkça, dalgalı yapının dalga boyu ve genliği artmıştır. Kaynak yüzeyine yakın yerlerde tanecikler kaynak yönü boyunca uzamıştır. Yüksek patlayıcı oranlarında kaynak yüzeyinde Fe_2Ti , Fe_2Ti_4O ve Cr_2Ti gibi kırılmalı metalik fazlar oluştuğu gözlemlenmiştir [61].

Şekil hatırlamalı malzemelerin patlayıcı yardımı ile başarılı bir şekilde kaynak yapılabilmesi Gong ve ark. (2009) tarafından çalışılmıştır. $Cu_{73}Al_{24}Mn_3$ (uçucu plaka, 1,5 mm kalınlık) şekil hatırlamalı malzeme ile QBe2 (ana plaka, 3 mm kalınlık) bu yöntemle başarılı bir şekilde birleştirilmiştir [62]. Ting-yong ve ark. (2009) ise TiNi51 ve TiNi50.2 şekil hatırlamalı malzemeleri patlayıcı yardımı ile başarılı bir şekilde kaynatmışlardır [63].

Hokamoto ve ark. (2009), 38 μm kalınlıkta Ni tabanlı düzensiz şekilli malzeme ve 28 μm kalınlıkta Ni tabanlı metalik cam malzemenin, 1 mm kalınlıkta 304 paslanmaz çelik malzemeye su altında gerçekleştirilen patlama ile kaplanabilirliğini inceledikleri çalışmalarında ayrıştırıcı kullanarak 0,5 mm stand-off mesafesi sağlamışlardır. Üst ve alt plaka arasındaki hava boşluğuna su girmemesi için macunla kapatılmıştır. Yazarlar, kaynak yönü boyunca 3 mm'den 10 mm'ye kadar değişen kalınlıkta patlayıcı kullanılmasının düzgün bir kaynak elde edilebilmesi için gerekli olduğu sonucuna varmışlardır [64].

Liu ve ark. (2009) 25 μm kalınlıkta $\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{40}\text{P}_{14}\text{B}_6$ metalik cam folyonun, 1060 alüminyum plakaya patlayıcı yardımı ile kaynatılmasını inceledikleri çalışmalarında, cam folyoyu bir sürücü plakasının üzerine yerleştirerek, patlama sonrasında zarar görmesini engellemişler ve başarılı sonuçlar elde etmişlerdir [65].

Ashani ve Abgheri (2009) eşit kalınlıkta (10 mm) alüminyum plakanın bakır plakaya patlayıcı yardımı ile kaynak yapılmasını inceledikleri çalışmalarında her iki malzemenin kaynak yapılması istenen kenarlarına pah kırmışlar ve stand-off mesafesinin, patlayıcı oranının ve pah açısının etkilerini incelemişlerdir (Şekil 10). Stand-off mesafesi arttıkça sertliğin arttığı belirtilmiştir. Düzgün bir kaynak için pah açısı ve stand-off mesafesinin uygun bir şekilde seçilmesini belirten yazarlar, bazı durumlarda (örneğin; $d = 0,5t_f$, $\alpha = 12^\circ$) kaynağın yapılamadığını belirtmişlerdir. Bunun için çekme gerilimi, bükme ve kayma gerilimi test sonuçlarına göre regresyon analizini kullanarak teorik denklemler elde etmişler ve bu denklemleri kullanarak öngörülen değerlerin deneysel sonuçlarla uyumlu olduğunu belirtmişlerdir [66].



Şekil 10. Deney düzeneği [66]

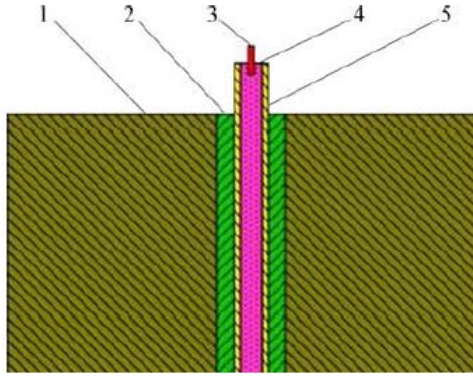
Yan ve ark. (2010), 10 mm kalınlıkta 7075 alüminyum malzemeye 10 mm kalınlıkta AZ31B magnezyum alaşımının patlayıcı yardımı ile kaynak yapılabilirliğini inceledikleri çalışmalarında, kaynak yüzeyinde dalgalı bir yapı gözlemlemişlerdir. Alüminyumun kaynak yüzeyine yakın yerlerde sertliğinde düşme, magnezyum alaşımının ise kaynak yüzeyine yakın yerlerde sertliğinde artma gözlemlenmiştir [67].

Benák ve ark. (2010) CrNi çeliği ve alüminyumun patlayıcı yardımı ile kaynak yapılmasını inceledikleri çalışmalarında SEM, EDX ve EBSD tekniklerini kullanarak kaynak yüzeyinin incelemesini yapmışlardır [68].

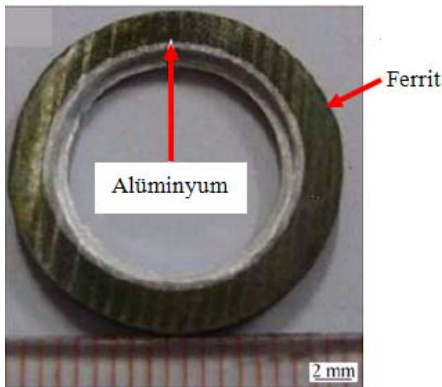
Fındık ve ark. (2011) 304 paslanmaz çelik ve düşük karbon çeliğinin patlayıcı yardımı ile kaynak yapılmasını inceledikleri çalışmalarında patlayıcı oranı 1 olduğunda düz, 2 olduğunda dalgalı bir kaynak yüzeyi gözlemlemişlerdir. Kaynak yüzeyinde patlama yönündeki

taneciklerde boyuna uzama gözlemlenmiştir ve bunların şeklinin ısı ile değişmediği belirtilmiştir. Sertliği düşürdüğü ve tanecik büyüklüğünü arttırdığı için uzun süreli ısı işlemi tavsiye edilmemiştir [69].

Patlayıcı yardımı ile kaynak teknolojisinin kompozit boru üretiminde kullanılması (Şekil 11) Xian-jun ve ark. (2011) tarafından çalışılmıştır. 18 mm dış çapa sahip alüminyumun içine toz halinde patlayıcı yerleştirilip iç çapı 18,6 mm olan ferrit malzemenin içine yerleştirilmiştir. Patlayıcı patladığı zaman alüminyum boru ferrit malzemenin iç yüzeyine soğuk bir şekilde kaynamıştır (Şekil 12) [70].



Şekil 11. Patlayıcı yardımı ile kaynak teknolojisi ile kompozit boru üretimi 1-Kalıp, 2-Ana boru, 3-Patlayıcı, 4-Patlayıcı, 5-Uçucu boru [70]



Şekil 12. Patlayıcı yardımı ile kaynak teknolojisi ile üretilen Fe/Al boru [70]

Alipour ve Najarian (2011) 7039 alüminyum ve 4340 çelik boruların patlayıcı yardımı ile kaynatılmasını inceledikleri çalışmalarında, plastik gerinimin ve uçucu borunun hızının çarpışma noktasında maksimum değerine ulaştığını, kaynağın oluşabilmesi için minimum bir plastik gerinime ihtiyaç duyulduğunu belirtmişlerdir [71].

Samardzic ve ark. (2011) AlMg4.5Mn, Al ve St52-3 malzemelerini patlayıcı yardımı ile başarılı bir şekilde kaynatmışlardır. Ultrasonik yöntem ile elde edilen kompozit malzemeyi muayene eden yazarlar yüksek sıcaklıklarda tavlama yaptıklarında bağlama mukavemetinin düştüğünü belirtmişlerdir [72].

Zhang ve ark. (2011), patlayıcı yardımı ile kaynak, manyetik vurum kaynağı ve lazer darbe kaynağını inceledikleri çalışmalarında öncelikle AA5086 alüminyum, AA1100 alüminyum ve

SA516-55 karbon çeliğini tek seferde, daha sonra AA1100 alüminyum ve Cu102 bakır parçalarını kaynatmışlardır. Kaynak yüzeyinde dalgalı bir yapı gözlemleyen yazarlar, uzun dalga boyu ve büyük genliğin yüksek enerji yoğunluğundan kaynaklandığını belirtmişlerdir [73].

Ostroushko ve Mazancová (2011) 304 paslanmaz çelik ve titanyumun patlayıcı yardımı ile kaynak yapılmasında kaynak yüzeyinde dalgalı bir yapı gözlemlemişlerdir. Dalga boyu, genlik ve kaynak çizgisi uzunluğunu ölçen yazarlar, 600 °C'de 1,5 saat havada tavlama sonucunda da dalgalı yapının değişmediğini belirtmişlerdir [74]. Aynı yazarlar Cr18Ni10 ve titanyumun patlayıcı yardımı ile kaynak yapılmasını inceledikleri çalışmalarında da benzer sonuçlarla karşılaşmışlardır [75].

Ghizdav (2011) çelik plakaya bakır plakanın patlayıcı yardımı ile kaynatılmasını incelediği çalışmada kaynak yüzeyinde dalgalı bir yapı ve sertlikte artış olduğunu belirtmişlerdir. 450 °C'de yapılan tavlama sonucunda sertlikte düşme olduğu gözlemlenmiştir [76].

Manikandan ve ark. (2011) tungsten ve bakır plakaları su altı patlamasıyla kaynatmışlardır. Kaynak yüzeyinde dalgalı bir yapı ve kaynak yüzeyine yakın yerlerde mikro sertlikte artış gözlemlenmiştir [77].

Song ve ark. (2011) titanyum ve çelik plakaların patlayıcı yardımı ile kaynatılmasını inceledikleri çalışmalarında patlama sonrasında oluşan plastik kayma dalgalarından kaynaklanan dalgalı bir yapıyla ve kısmi erimeden kaynaklanan 100-200µm boyutunda FeTi ve Fe_{9,64}Ti_{0,36} içeriklerle karşılaşmışlardır [78].

Ghomi ve ark. (2011) demir borulardaki sızdırmazlığı önlemek için, yüzeyde meydana gelen çatlakları kapatacak bakır plakaları patlayıcı yardımı ile demir borulara kaynatmışlardır (Şekil 13) [79].



Şekil 13. Patlayıcı yardımı ile borulardaki çatlakların kapatılması [79].

Sonuç

Patlayıcı yardımı ile kaynak teknolojisi üzerine yapılan çalışmaların değerlendirildiğinde aşağıdaki konular hakkında yeterli çalışma yapılmadığı belirlenmiş ve araştırmacıların bu konularda çalışabileceği düşünülmüştür.

- 1- Şekil 14'ten de görülebileceği gibi patlayıcı yardımı ile kaynak yöntemi ile birçok malzeme kombinasyonu başarılı bir şekilde kaynatılmıştır. Fakat molibden ve zirkonyum malzemelerin diğer malzemelerle kaynatılması konusu araştırılmayı beklemektedir.

	Alüminyum Alaşımaları	Niobyum	Titanyum	Tantal	Molibden	Zirkonyum	Fe-Ni Alaşımaları	Nikel ve Alaşımaları	Bakır ve Alaşımaları	Paslanmaz Çelik
Alüminyum Alaşımaları	Yapıldı	Yapıldı	Yapıldı	Yapıldı	Yapıldı	Yapıldı	Yapıldı	Yapıldı	Yapıldı	Yapıldı
Fe-Ni Alaşımaları	Yapıldı	Yapıldı	Yapıldı	Yapıldı	Yapıldı	Yapıldı	Yapıldı	Yapıldı	Yapıldı	Yapıldı
Nikel ve Alaşımaları	Yapıldı	Yapıldı	Yapıldı	Yapıldı	Yapıldı	Yapıldı	Yapıldı	Yapıldı	Yapıldı	Yapıldı
Bakır ve Alaşımaları	Yapıldı	Yapıldı	Yapıldı	Yapıldı	Yapıldı	Yapıldı	Yapıldı	Yapıldı	Yapıldı	Yapıldı
Paslanmaz Çelik	Yapıldı	Yapıldı	Yapıldı	Yapıldı	Yapıldı	Yapıldı	Yapıldı	Yapıldı	Yapıldı	Yapıldı
Düşük Karbon Çelikleri	Yapıldı	Yapıldı	Yapıldı	Yapıldı	Yapıldı	Yapıldı	Yapıldı	Yapıldı	Yapıldı	Yapıldı

Yapıldı
 Yapılmadı ama mümkün

Şekil 14. Farklı malzemelerin patlayıcı yardımı ile kaynak teknolojisi yöntemiyle birleştirilebileceğini gösterir tablo [2]

- 2- Özellikle derin çekme işleminde kullanılan kalıplar çelikten üretilmektedir. Çelik malzemeden kalıp üretimi hem aşırı maliyetli, hem de uzun sürmektedir. Patlayıcı yardımı ile çelik plakaların alüminyumdan üretilen kalıplara kaplanması ve bu kompozit kalıpların derin çekme işleminde kullanılabilirliği araştırılmayı beklemektedir.
- 3- Uçak ve uzay sanayinde hem yüksek mukavemete hem de düşük ağırlığa sahip parçaların kullanılmasına olan gereksinim günden güne artmaktadır. Bu amaçla son yıllarda uçak parçalarının cam/karbon elyaf takviyeli kompozit malzemelerden üretimi artmıştır. Patlayıcı yardımı ile kaynak yöntemi kullanılarak alüminyum/magnezyum/titanyum vs. parçalar çelik sac/plakalarla kaplanarak yüksek mukavemet ve düşük ağırlığa sahip uçak parçaları elde edilebilir.
- 4- Patlayıcı yardımı ile kaynak yöntemine etki eden faktörler üzerine yapılan çalışmalar incelendiğinde, stand-off mesafesinin, patlayıcı oranının, uçucu plaka şeklinin ve çarpışma açısının etkisi üzerine çalışmalar yapıldığı halde, patlayıcı türünün, uçucu ve ana plaka arasındaki gazın (veya sıvının), ana plaka şeklinin etkileri çalışılmayı beklemektedir.
- 5- Patlayıcı yardımı ile kaynak yöntemine etki eden parametrelerin teorik yöntemlerle (Taguchi metodu, genetik algoritma vs.) optimizasyonu ve deneysel verilerle karşılaştırılması araştırılmayı beklemektedir.
- 6- Patlayıcı yardımı ile kaynak yönteminde farklı ara katmanların kullanımının etkisi bazı araştırmacılar tarafından çalışılmış olmakla birlikte [14, 45, 53] detaylı çalışılmayı beklemektedir.

Kaynaklar

- [1] Blatter, A. ve Peguiron, D.A. (1998). Explosive joining of precious metals. *Gold Bulletin*, 31(3), 93-98.
- [2] Findik, F. (2011). Recent developments in explosive welding. *Materials and Design*, 32, 1081–1093.
- [3] Young, G. (2004). Explosion Welding, Technical Growth and Commercial History. *Dynamic Materials Corporation*. <http://www.dynamicmaterials.com/data/brochures/1-%20Young%20Paper%20on%20EXW%20History.pdf>, (January 2012).
- [4] Fan, Y., Tysoe, B., Sim, J., Mirkhani, K., Sinclair, A.N., Honarvar, F., Sildva, H., Szecket, A. ve Hardwick, R. (2003). Nondestructive evaluation of explosively welded clad rods by resonance acoustic spectroscopy. *Ultrasonics*, 41(5), 369–375.
- [5] Kahraman, N., Gülenç, B. ve Findik, F. (2005). Joining of titanium/stainless steel by explosive welding and effect on interface. *Journal of Materials Processing Technology*, 169, 127–133.
- [6] Durgutlu, A., Gülenç, B. ve Findik, F. (2005). Examination of copper/stainless steel joints formed by explosive welding. *Materials and Design*, 26, 497–507.
- [7] Cole, R. H. (1948). *Underwater Explosions*, Princeton University Press, Oxford, s. 3-147.
- [8] Acarer, M. ve Gülenç, B. (2003). Cladding of high Mn steel on low C steel by explosive welding. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 27, 431–434.
- [9] Mousavi, S.A.A., Barrett, L.M. ve Al-Hassanib, S.T.S. (2008). Explosive welding of metal plates. *Journal of Materials Processing Technology*, 202, 224–239.
- [10] Banker, J. ve Reineke, E. (1993). Explosion Welding. *ASM Handbook, Welding Brazing and Soldering*, 6, 303-305.
- [11] Kahraman, N. ve Gülenç, B. (2005). Microstructural and mechanical properties of Cu–Ti plates bonded through explosive welding process. *Journal of Materials Processing Technology*, 169, 67–71.
- [12] Nobelclad, A. N., Masri, T. ve Lafont, M. C. (1999). Recent Developments in Characterization of a Titanium-Steel Bond Interface. *Proceedings of Reactive Metals in Corrosive Applications Conference*, Wah Chang, s. 89-98.
- [13] Lysak, V.I. ve Kuzmin, S.V. (2012). Lower boundary in metal explosive welding. Evolution of ideas. *Journal of Materials Processing Technology*, 212, 150–156.
- [14] Manikandan, P., Hokamoto, K., Fujita, M., Raghukandan, K. Ve Tomoshige, R. (2008). Control of energetic conditions by employing interlayer of different thickness for explosive welding of titanium/304 stainless steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 195, 232–240.
- [15] Berdychenko, A.A., Zlobin, B.S., Pervukhin, L.B. ve Shtertser, A.A. (2003). Possible ignition of particles ejected into the gap in explosive welding of titanium. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 39(2), 232-239.
- [16] Gupta, R. C. ve Kainth, G. S. (1990). Swinging wake mechanism for interface wave generation in explosive welding of metals. *Journal of Applied Mechanics*, 57, 514-521.
- [17] Ghomi, M.T. (2009). Impact wave process modeling and optimization in high energy rate explosive welding. Licentiate Theses, School of Sustainable Development of Society and Technology, Mälardalen University, Västerås, Sweden, s. 17-29.
- [18] Hokamoto, K., Shimokawa, H. ve Okugawa, H. (1999). A new method for explosive welding of Al/ZrO₂ joint using regulated underwater shock wave. *Journal of Materials Processing Technology*, 85, 175–179.
- [19] Chizari, M., Al-Hassani, S.T.S. ve Barrett, L.M. (2009). Effect of flyer shape on the bonding criteria in impact welding of plates. *Journal of Materials Processing Technology*, 209, 445–454.

- [20] Kahraman, N., Gülenç, B. ve Fındık, F. (2007). Corrosion and mechanical-microstructural aspects of dissimilar joints of Ti-6Al-4V and Al plates. *International Journal of Impact Engineering*, 34, 1423-1432.
- [21] Rinehart, J. S. ve Pearson, J. (1963). Explosive Working of Metals. Pergamon Press, Oxford, s. 3-341.
- [22] Andreevskikh, L.A., Dendenkov, Y.P., Drennov, O.B., Mikhailov, A.L., Titova, N.N. ve Deribas, A.A. (2011). Explosive mixture for explosive welding of thin foils. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 36(1), 48-50.
- [23] Andreevskikh, L.A., Dendenkov, Y.P., Drennov, O.B., Mikhailov, A.L., Titova, N.N. ve Deribas, A.A. (2011). Explosive mixture for explosive welding of thin foils-part 2. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 36(5), 430-432.
- [24] Bruno, E. J. (1968). High-Velocity Forming of Metals. American Society of Tool and Manufacturing Engineers, Michigan University, s. 3-153.
- [25] Blazynski, T. Z. (1990). Simulation of explosive welding parameters by means of a liquid analogue. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 21, 16-27.
- [26] Chemin, C. ve Qingming, T. (1989). Mechanism of wave formation at the interface in explosive welding. *Acta Mechanica Sinica*, 5(2), 97-108.
- [27] Balasubramanian, V., Rathinasabapathi, M. ve Raghukandan, K. (1997). Modelling of process parameters in explosive cladding of mildsteel and aluminium. *Journal of Materials Processing Technology*, 63, 83-88.
- [28] Raghukandan, K., Rathinasabapathi, M. ve Vaidyanathan, P.V. (1998). Modelling of process parameters in dynamic form-cladding. *Metals and Materials*, 4(5), 1057-1061.
- [29] Raghukandan, K. (2003). Analysis of the explosive cladding of cu-low carbon steel plates. *Journal of Materials Processing Technology*, 139, 573-577.
- [30] Yan, H. H., Qu, Y. D. ve Li, X. J. (2008). Explosive welding of multilayer amorphous ribbons. *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 44(4), 491-496.
- [31] Yan, H.H. ve Li, X.J. (2008). Strain rate distribution near welding interface for different collision angles in explosive welding. *International Journal of Impact Engineering*, 35, 3-9.
- [32] Qu, Y.D. (2011). Temperature distribution across the explosive welding interface. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 47(1), 123-127.
- [33] Abe, A. (1999). Numerical simulation of the plastic flow field near the bonding surface of explosive welding. *Journal of Materials Processing Technology*, 85, 162-165.
- [34] Mousavi, A.A.A., Burle, S.J., Al-Hassani, S. T. S. ve Brown, W.B. (2004). Simulation of explosive welding with ANFO mixtures. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 29(3), 188-196.
- [35] Mousavi, A. A. , Burley, S.J. ve Al-Hassani, S.T.S. (2005). Simulation of explosive welding using the Williamsburg equation of state to model low detonation velocity explosives. *International Journal of Impact Engineering*, 31, 719-734.
- [36] Mousavi, A. A. ve Al-Hassani, S.T.S. (2005). Numerical and experimental studies of the mechanism of the wavy interface formations in explosive/impact welding. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 53, 2501-2528.
- [37] Mousavi, A. A. ve Al-Hassani, S.T.S. (2008). Finite element simulation of explosively-driven plate impact with application to explosive welding. *Materials and Design*, 29, 1-19.
- [38] Chizari, M. ve Barrett, L.M. (2009). Single and double plate impact welding: Experimental and numerical simulation. *Computational Materials Science*, 46, 828-833.
- [39] Wang, Y., Beom, H.G., Sun, M. ve Lin, S. (2011). Numerical simulation of explosive welding using the material point method. *International Journal of Impact Engineering*, 38, 51-60.

- [40] Gulbin, V.N., Kobelev, A.G. ve Borissov, D.E. (1997). Thermobimetals mechanical properties produced by explosive welding with Rolling. *Journal De Physique IV France*, 7, 49-54.
- [41] Buchar, J., Rolc, S. ve Hruby, V. (1999). On the explosive welding of a ring to the axisymmetric body. *Journal of Materials Processing Technology*, 85, 171–174.
- [42] Gerland, M., Presles, H.N., Guin, J.P. ve Berteau, D. (2000). Explosive cladding of a thin Ni-film to an aluminium alloy. *Materials Science and Engineering A*, 280, 311–319.
- [43] Elmer, J. W., Terrill P., Brasher, D. ve Butler, D. (2002). Joining depleted uranium to high-strength aluminum using an explosively clad niobium interlayer. *Welding Journal*, 81(8), 167-173.
- [44] Kosec, B., Kosec, L., Petrovic, S., Gontarev, V., Kosec, G., Gojic, M. ve Skraba, P. (2003). Analysis of low carbon steel/tantalum interface after explosive welding. *Metallurgija*, 42(3), 147-151.
- [45] Han, J.H., Ahn, J.P. ve Shin, M.C. (2003). Effect of interlayer thickness on shear deformation behavior of AA5083 aluminum alloy/SS41 steel plates manufactured by explosive welding. *Journal of Material Sciences*, 38, 13–18.
- [46] Acarer, M., Gülenç, B. ve Findik, F. (2003). Investigation of explosive welding parameters and their effects on microhardness and shear strength. *Materials and Design*, 24, 659–664.
- [47] Kaçar, R. ve Acarer, M. (2003). Microstructure–property relationship in explosively welded duplex stainless steel–steel. *Materials Science and Engineering A*, 363, 290–296.
- [48] Mudali, U.K., Rao, B.M.A., Shanmugam, K., Natarajan, R. ve Raj, B. (2003). Corrosion and microstructural aspects of dissimilar joints of titanium and type 304L stainless steel. *Journal of Nuclear Materials*, 321, 40–48.
- [49] Acarer, M., Gülenç, B. ve Findik, F. (2004). The influence of some factors on steel/steel bonding quality on there characteristics of explosive welding joints. *Journal of Material Sciences*, 39, 6457–6466.
- [50] Grignon, F., Benson, D., Vecchio, K.S. ve Meyers, M.A. (2004). Explosive welding of aluminum to aluminum:analysis, computations and experiments. *International Journal of Impact Engineering*, 30, 1333–1351.
- [51] Kacar, R. ve Acarer, M. (2004). An investigation on the explosive cladding of 316L stainless steel-din-P355GH steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 152, 91–96.
- [52] Mousavi, A.A.A. ve Joodaki, G. (2005). Explosive welding simulation of multilayer tubes. *VIII International Conference on Computational Plasticity*, Barcelona.
- [53] Palmer, T.A., Elmer, J.W., Brasher, D., Buttler, D. ve Riddle, R. (2006). Development of an explosive welding process for producing high-strength welds between niobium and 6061-T651 aluminum. *Welding Journal*, November, 252-263.
- [54] Berski, S., Stradomski, Z. ve Dyja, H. (2007). Quality of bimetal Al-Cu joint after explosive cladding. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 22(1), 73-76.
- [55] Zhu, Y., Li-shan, C. ve Yan-jun, Z. (2007). Microstructure and martensitic transformation behaviors of explosively welded NiTi/NiTi laminates. *Chinese Journal of Aeronautics*, 20, 168-171.
- [56] Gülenç, B. (2008). Investigation of interface properties and weldability of aluminum and copper plates by explosive welding method. *Materials and Design*, 29, 275–278.
- [57] Acarer, M. ve Demir, B. (2008). An investigation of mechanical and metallurgical properties of explosive welded aluminum–dual phase steel. *Materials Letters*, 62, 4158–4160.

- [58] Durgutlu, A., Okuyucu, H., Gülenç, B. Ve Fındık, F. (2008). Investigation of effect of the stand-off distance on interface characteristics of explosively welded copper and stainless steel. *Materials and Design*, 29, 1480–1484.
- [59] Minev, R.M., Dimov, S.S., Koev, S.R., Laley, G. ve Festchiev, N.H. (2008). Explosive welding of Ni- based amorphous foils for micro-tooling applications. *4M's Annual Conference on Multi-Material Micro Manufacture*.
- [60] Mousavi, A. A. , Al-Hassani, S.T.S. ve Atkins, A. G. (2008). Bond strength of explosively welded specimens. *Materials and Design*, 29, 1334–1352.
- [61] Mousavi, A. A. ve Sartangi, P.F. (2009). Experimental investigation of explosive welding of cp-titanium/AISI 304 stainless steel. *Materials and Design*, 30, 459–468.
- [62] Gong, S., Li, Z., Xiao, Z. ve Zheng, F. (2009). Microstructure and property of the composite laminate clad by explosive welding of CuAlMn shape memory alloy and QBe2 alloy. *Materials and Design*, 30, 1404-1408.
- [63] Ting-yong, X., Yan-jun, Z., Li-shan, C. ve Xu-jun, M. (2009). Influence of aging on damping behavior of TiNi/TiNi alloys synthesized by explosive welding. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 19, 1470-1473.
- [64] Hokamoto, K., Nakata, K., Mori, A., Tsuda, S, Tsumura, T. ve Inoue, A. (2009). Dissimilar material welding of rapidly solidified foil and stainless steel plate using underwater explosive welding technique. *Journal of Alloys and Compounds*, 472, 507–511.
- [65] Liu, W.D., Liu, K.X., Chen, Q.Y., Wang, J.T., Yan, H.H. ve Li, X.J. (2009). Metallic glass coating on metals plate by adjusted explosive welding technique. *Applied Surface Science*, 255, 9343–9347.
- [66] Ashani, J. Z. ve Bagheri, S. M. (2009). Explosive scarf welding of aluminum to copper plates and their interface properties. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 40(9) 690-698.
- [67] Yan, Y.B., Zhang, Z.W., Shen, W., Wang, J.H., Zhang, L.K. ve Chin, B.A. (2010). Microstructure and properties of magnesium AZ31B–aluminum 7075 explosively welded composite plate. *Materials Science and Engineering A*, 527, 2241–2245.
- [68] Benák, M., Turňa, M., Ožvold, M., Nesvadba, P., Lokaj, L., Čaplovič, L., Kováč, F. ve Stoyka, V. (2010). Study of Al-austenitic steel boundary formed by explosion welding. *19th International Conference on Metallurgy and Material*, 18-20 May, Czech Republic.
- [69] Findik, F., Yılmaz, R. ve Somyurek, T. (2011). The effects of heat treatment on the microstructure and microhardness of explosive welding. *Scientific Research and Essays*, 6(19), 4141-4151.
- [70] Xian-jun, S., Jie, T. ve Xun-zhong, G. (2011). Bonding properties of interface in Fe/Al clad tube prepared by explosive welding. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 21, 2175-2180.
- [71] Alipour, R. ve Najarian, F. (2011). A FEM study of explosive welding of double layer tubes. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 73, 954-956.
- [72] Samardžić, I., Matesa, B. ve Kladaric, I. (2011). The influence of heat treatment on properties of three-metal explosion joint: AlMg-Al-Steel. *Metallurgija*, 50(3), 159-162.
- [73] Zhang, Y., Babu, S.S., Prothe, C., Blackely, M., Kwasegroch, J., Laha, M. ve Daehn, G. (2011). Application of high velocity impact welding at varied different length scales. *Journal of Materials Processing Technology*, 211, 944–952.
- [74] Ostroushko, D. ve Mazancová, E. (2011). Chosen properties of sandwich material Ti-304 stainless steel after explosive welding. *Materials Engineering*, 18, 8-10.
- [75] Ostroushko, D., ve Mazancová, E. (2010). Chosen properties of sandwich CrNi steel-Ti material after explosive cladding. *19th International Conference on Metallurgy and Material*, 18-20 May, Czech Republic.

- [76] Ghizdav, V. (2011). Explosive welding of copper to steel. *International Conference Of Scientific Paper Afases*, 26-28 May, Brasov.
- [77] Manikandan, P., Lee, J.O., Mizumachi, K., Mori, A., Raghukandan, K. ve Hokamoto, K. (2011). Underwater explosive welding of thin tungsten foils and copper. *Journal of Nuclear Materials*, 418(1-3), 281-285.
- [78] Song, J., Kostka, A., Veehmayer, M. ve Raabe, D. (2011). Hierarchical microstructure of explosive joints: Example of titanium to steel cladding. *Materials Science and Engineering A*, 528(6), 2641–2647.
- [79] Ghomi, M.T., Mahmoudi, J. ve Liaghat, G. (2011). Removing leakage from oil and gas low pressure pipes by explosive welding method. *Journal of Petroleum and Gas Exploration Research*, 1(1), 34-42.