

T.C
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**PATLAMALI KAYNAKTA PATLAYICI ORANI, ARA
BOŞLUK MESAFESİ ve ALTLIK CİNSİNİN ÇELİK/ÇELİK
BİRLEŞTİRİLMESİ KALİTESİNE ETKİSİ**

705529

DOKTORA TEZİ

Mustafa ACARER

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE EĞİTİMİ

105529
**T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ**

EYLÜL 2001

T.C
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

PATLAMALI KAYNAKTA PATLAYICI ORANI, ARA
BOŞLUK MESAFESİ ve ALTLIK CİNSİNİN ÇELİK/ÇELİK
BİRLEŞTİRİLMESİ KALİTESİNE ETKİSİ

DOKTORA TEZİ


Mustafa ACARER

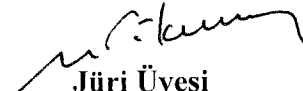
Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE EĞİTİMİ

Tez Danışmanı : Doç.Dr.Fehim FINDIK

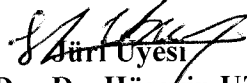
Bu tez 29/09/2001 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği/Oyçokluğu ile kabul edilmiştir.


Jüri Başkanı
Doç.Dr. Fehim FINDIK


Jüri Üyesi
Prof.Dr. İbrahim ÖZSERT


Jüri Üyesi
Doç.Dr. Mehmet TÜRKER


Jüri Üyesi
Doç.Dr. Adem KURT


Jüri Üyesi
Yrd.Doç.Dr. Hüseyin UZUN

ÖNSÖZ

Bu çalışmada, tezimin her aşamasında bana her türlü desteği sağlayan danışmanlarım Doç.Dr. Fehim Fındık ve Yrd.Doç.Dr. Behçet Gülenç'e şükranlarımı sunarım. Patlatma işlemlerinin gerçekleşmesinde her türlü imkanı sağlayan ve büyük emekleri geçen Sayın Akif Akgül'e (M.K.E.), Barutsan A.Ş. Genel Müdür Yardımcısı Sayın Mehmet Öztürk'e, Kalite Müdürü Sayın Ekrem Altuğ'a, Kalite Mühendisi Sayın Sevil Sayın'a ve tüm Barutsan A.Ş. çalışanlarına teşekkür ederim. Tezimin gerçekleşmesi esnasında değerli fikirleri ve önerileriyle beni yönlendiren Tez İzleme Komitesi üyelerinden Sayın Prof. Dr. İbrahim Özsert'e ve Yrd. Doç. Dr. Hüseyin Uzun'a teşekkür ederim. SEM çalışmalarının gerçekleşmesinde yardımcı olan Sayın Yrd.Doç.Dr. Süleyman Gündüz'e (ZKÜ Karabük Teknik Eğitim Fakültesi), Sayın Selçuk Aktürk'e (A.Ü Fen Fakültesi Fizik Bölümü) teşekkür ederim. Metalografi çalışmalarım esnasında yardımlarını esirgemeyen Metal Eğitimi Bölüm Başkanı Sayın Doç.Dr. Ercan Candan'a, Yrd.Doç.Dr. Ramazan Kaçar'a, Öğretim Görevlisi Dursun Özyürek'e ve değerli arkadaşım Öğretim Görevlisi Bilge Demir'e (ZKÜ.Karabük Teknik Eğitim Fakültesi) teşekkür ederim. Ayrıca bu çalışmada başta Bölüm Başkanı Mehmet Türker ve Araştırma Görevlisi Ahmet Durgutlu olmak üzere tüm Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Metal Eğitimi Bölümü Öğretim Elemanlarına şükranlarımı sunarım. Ayrıca tez çalışmamın her aşamasında her türlü desteği sunan Dekan Yardımcısı Sayın Yrd.Doç.Dr. Ramazan Çıtak (ZKÜ.Karabük Teknik Eğitim Fakültesi) şükranlarımı sunarım.

Eylül 2001

Mustafa ACARER

İÇİNDEKİLER

SİMGELER ve KISALTMALAR	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	vi
TABLolar LİSTESİ.....	x
ÖZET	xii
SUMMARY	xiii
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ	xiv
BÖLÜM 2.	
PATLAMALI KAYNAK TEKNİĞİ.....	18
2.1 Patlamalı Kaynak Teorisi.....	20
2.2 Patlamalı Kaynak Mekanizması	22
2.3 Patlamalı Kaynak Parametreleri	38
2.4 Patlayıcılar	52
2.4.1 Türkiye’de üretilen patlayıcı maddeler ve kullanma yerleri.....	55
2.4.2 Metallerin kaynağı ve şekillendirilmesi için patlayıcılarda aranan özellikler	57
2.5 Patlamalı Kaynak Metalürjisi ve Mekanik Özellikleri	58
2.5.1 Kaynak metalürjisi	58
2.5.2 Mekanik Özellikleri	64
2.6 Patlamalı Kaynağın Uygulama Alanları	70
2.6.1 Levha kaplama.....	70
2.6.2 Farklı metallerin bağlantıları	73
2.6.3 Geçiş bağlantıları	74
2.6.4 Petekli yapı	76
2.6.5 Silindirik yüzeylerin kaynağı.....	78
2.6.6 Malzeme kombinasyonları ve üst levha kalınlıkları	81
2.6.7 Patlamalı kaynağın diğer uygulama alanları.....	83
BÖLÜM 3.	
DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	87
3.1 Birleştirilecek Malzemeler.....	87
3.2 Patlayıcı	88
3.3 Altlık	88
3.4 Deneysel Çalışmalar	89
3.4.1 Patlayıcı hazırlanması	89

3.4.2 Birleştirilecek malzemelerin hazırlanması.....	89
3.4.3 Birleştirme düzeneğinin hazırlanması	89
3.4.4 Patlatma ile birleştirme işlemi	90
3.5 Metalografik Muayene.....	92
3.6 Mikro Sertlik İncelemesi	93
3.7 Makaslama Testi	93
3.8 Eğme Testi	95
3.9 Isıl İşlem Şartları.....	95
BÖLÜM 4.	
DENEY SONUÇLARI.....	97
4.1 Kullanılan Altlıkların Birleşmeye Etki Eden Sonuçları	97
4.2 Metalografik İnceleme.....	98
4.3 Mikro Sertlik Ölçüm Sonuçları.....	115
4.4 Makaslama Testi Sonuçları.....	118
4.5 Eğme Testi Sonuçları.....	119
BÖLÜM 5.	
DENEY SONUÇLARININ TARTIŞILMASI	120
5.1 Altlık Cinsi ve Kalınlığın Tartışılması.....	120
5.2 Metalografik Deney Sonuçlarının Tartışılması.....	121
5.3 Mikrosertlik Ölçüm Sonuçlarının Tartışılması	126
5.4 Makaslama Test Sonuçlarının Tartışılması.....	127
5.5 Eğme Test Sonuçlarının Tartışılması.....	128
BÖLÜM 6.	
SONUÇ	130
BÖLÜM 7.	
ÖNERİLER.....	133
KAYNAKLAR.....	134
ÖZGEÇMİŞ	142

SİMGELER ve KISALTMALAR

MAG: Metal Active Gas

MIG: Metal Inert Gas

TIG: Tungsten Inert Gas

ITAB: Isı tesiri altındaki bölge

(s): Ara boşluk mesafesi

(R): Patlayıcı oranı

α : Eğimli düzenlemelerde başlangıç açısı

V_D : Patlayıcının patlama hızı

V_p : Üst levha çarpma hızı

β : Çarpışma açısı

V_w : Kaynak hızı

V_j : Fıskırmanın mutlak hızı

V_s : Geri fıskırmanın mutlak hızı

m : kaplamanın toplam kütlesi

m_s : geri fıskırmanın kütlesi

m_j : fıskırmanın kütlesi

V_w : Kaynak yayılım hızı

V_F : Üst levha hızıdır

ρ : akışkanın yoğunluğu

μ : akışkanın viskozitesi

P_s : yığılma basıncı

R: Reynolds sayısı

H_F : Üst levhanın sertlik değeri

H_P : Alt levhanın sertlik değeri

C_1 : Alt levhanın sonik hızı

C_2 : Üst levhanın sonik hızı

δ : Akma gerilmesi

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1 Patlamalı kaynağın şematik olarak gösterimi (levha/levha) [9]	18
Şekil 2.2 a) Patlamalı kaynak işleminde metal levhaların eğimli çarpışması, b) çarpışma parametre ve bileşenleri [5]	21
Şekil 2.3 Kama biçimli kaplamalı silindirik patlayıcı. (a) Patlamadan önce, (b) Patlamadan sonraki bir an [12]	24
Şekil 2.4 Kaplama çökmesinin geometrisi [12]	24
Şekil 2.5 A noktasında hareket eden bir gözlemciye göre ileri ve geri fişkırmaya oluşumu [12]	26
Şekil 2.6 Üst levha çökmesinin geometrisi [5]	27
Şekil 2.7 İleri fişkırmayın oluşumu [5]	28
Şekil 2.8 Çarpışma bölgesinde akış konfigürasyonu [14]	29
Şekil 2.9 Ses hızının üzerindeki bir hızda çarpışma [15]	30
Şekil 2.10 Paralel düzenleme için V_D ve β^0 'nin hesaplanmış değerleri [14]	31
Şekil 2.11 Dalga oluşumu için teorik ve pratik sınırlar [14]	32
Şekil 2.12 Girdaplarla dalga formunun oluşumu [17]	34
Şekil 2.13 Yarı silindirik alt levhalı düzenleme [17]	35
Şekil 2.14 Patlamalı Kaynakta Elde Edilen Dalgalı Ara Yüzey [26]	36
Şekil 2.15 Bahrani ve arkadaşlarına [25] göre dalga oluşumu	37
Şekil 2.16 Patlamalı kaynak işlem parametrelerinin şematik gösterimi [28]	39
Şekil 2.17 Çarpma basıncı ve parça hızları arasındaki ilişki [6]	50
Şekil 2.18 Patlamalı kaynak penceresi [5]	51
Şekil 2.19 Patlayıcıların patlatılmasında kullanılan kapsül [39]	54
Şekil.2.20 Patlama hızına bağlı olarak akış modeli [52]	59

Şekil 2.21 Patlama ile kaynaklanan bakır-bakır birleşmesinde değişik ara yüzeyler [53].....	60
Şekil 2.22. NiTi'nin düşük karbonlu çeliğe paralel patlamalı kaynak düzenlemesi [48].....	61
Şekil 2.23 Farklı levha çarpma hızlarında patlama ile kaynaklanan 2014-T3 alüminyum alaşımında mikro sertlik profili [6].....	66
Şekil 2.24 Tüplerin Patlamalı Kaynağı [5].....	79
Şekil 2.25 Tüplerin patlamalı kaynağı (İmplosive) [5].....	80
Şekil 2.26 Tüplerin içten ve dıştan patlamalı kaynağı (explosive/implosive) [5].....	80
Şekil 2.27 Patlama ile bindirme kaynağı [5].....	84
Şekil 2.28 Patlama ile bindirme kaynağı [5].....	84
Şekil 2.29 Patlama ile bindirme kaynağı [5].....	84
Şekil 2.30 Patlama ile bindirme kaynağı [5].....	85
Şekil 2.31 Patlama ile alın kaynağı [5].....	85
Şekil 2.32 Normal çarpma altında çok ince saç tabakalarının patlamalı kaynağı [5]	85
Şekil 3.1 Patlayıcı ve birleştirilecek malzemelerin yerleştirilmesi.....	91
Şekil 3.2 Patlatma işlemi için elektrikli manyetonun çevrilmesi.....	91
Şekil 3.3 Patlama anından bir görüntü.....	91
Şekil 3.4 ASTM standardına göre makaslama testi [62].....	94
Şekil 3.5 ASTM standardına göre eğme deney numunesi [62].....	95
Şekil 4.1 A birleşmesinin mikroyapısı a)X100 b) X500.....	99
Şekil 4.2 A birleşmesinin ısıtılmış mikroyapısı a) X100b) X200.....	99
Şekil 4.3 B birleşmesinin mikroyapısı a)X50 b) X200.....	100
Şekil 4.4 B birleşmesinin ısıtılmış mikroyapısı a) X100 b) X200.....	100
Şekil 4.5 C birleşmesinin mikroyapısı a)X100 b) X200.....	101
Şekil 4.6 C birleşmesinin ısıtılmış mikroyapısı a)X50 b)X100 c) X200 d) X500.....	101

Şekil 4.7 D birleşmesinin mikroyapısı a)X50 b) X200	102
Şekil 4.8 D birleşmesinin ısıtıl işlem görmüş mikro yapısı a)X50 b)X200.....	102
Şekil 4.9 E birleşmesinin mikroyapısı a)X50 b)X100.....	103
Şekil 4.10 E birleşmesinin ısıtıl işlem görmüş mikroyapısı a)X50 b)X100	103
Şekil 4.11 F birleşmesinin mikroyapısı a)X100 b) X200	104
Şekil 4.12 F birleşmesinin ısıtıl işlem görmüş mikroyapısı a)X50 b)X100	104
Şekil 4.13 G birleşmesinin mikroyapısı a)X50 b)X100	105
Şekil 4.14 G birleşmesinin ısıtıl işlem görmüş mikroyapısı a)X50 b)X100.....	105
Şekil 4.15 H birleşmesinin mikroyapısı a) X100 b) X500	106
Şekil 4.16 I birleşmesinin mikroyapısı a)X50 b) X200	106
Şekil 4.17 I birleşmesinin ısıtıl işlem görmüş mikroyapısı a)X100 b) X500	107
Şekil 4.18 J birleşmesinin mikroyapısı a)X50 b) X200.....	107
Şekil 4.19 K birleşmesinin mikroyapısı a)X50 b) X200	108
Şekil 4.20 K birleşmesinin ısıtıl işlem görmüş mikroyapısı a)X50 b) X200.....	108
Şekil 4.21 L birleşmesinin mikroyapısı a)X50 b) X200.....	109
Şekil 4.22 L birleşmesinin ısıtıl işlem görmüş mikroyapısı a) X200 b) X500	109
Şekil 4.23 M birleşmesinin mikroyapısı a) X100 b) X200.....	110
Şekil 4.24 N birleşmesinin mikroyapısı a)X50 b) X500	110
Şekil 4.25 N birleşmesinin ısıtıl işlem görmüş mikroyapısı a) X200 b) X500.....	111
Şekil 4.26 J birleşmesinin dağlanmamış haldeki yüzeyinin SEM görüntüsü	112
Şekil 4.27 C birleşmesinin ısıtıl işlemsiz SEM görüntüsü.....	113
Şekil 4.28 C birleşmesinin ısıtıl işlemsiz SEM görüntüsü.....	113
Şekil 4.29 C birleşmesinin ısıtıl işlemlili SEM görüntüsü	114
Şekil 4.30 A birleşmesinin ısıtıl işlemsiz SEM görüntüsü	114
Şekil 4.31 A birleşmesinin ısıtıl işlemlili SEM görüntüsü.....	115

Şekil 4.32 K birleşmesinin ısıtılmamış SEM görüntüsü	115
Şekil 4.33 A Birleşmesinin mikro sertlik ölçümleri	117
Şekil 4.34 L Birleşmesinin mikro sertlik ölçümleri.....	117



TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1 Kaynak için minimum kaynak hızı [30].....	43
Tablo 2.2 Modifiye edilmiş Gurney denklemlı patlayıcı sabitleri [30]	46
Tablo 2.3. Trimonit 1 patlayıcısı ile patlamalı kaynak parametreleri [32].....	48
Tablo 2.4. Türkiye’de Üretilen Patlayıcı Maddeler ve Özellikleri [39]	56
Tablo 2.5 Ticari olarak çiftli kaplamaların mekanik özellikleri [11]	64
Tablo 2.6 Birleşmenin makaslama dayanım değerleri [6].....	65
Tablo 2.7 Kompozitlerin çekme deney sonuçları [6]	65
Tablo 2.8. Patlama ile kaynaklanmış NiTi/Düşük karbonlu çelikte çekme makaslama testi sonuçları [48]	67
Tablo 2.8 Patlama ile kaynaklanmış NiTi/Düşük karbonlu çelikte çekme makaslama testi sonuçları (devam) [48]	68
Tablo 2.9. Patlama ile Kaynaklanabilen Metal Kombinasyonları [30]	81
Tablo 2.10 Değişik Kaplama Malzemesi ve Kalınlıkları	83
Tablo 3.1 Deneylerde kullanılan malzemelerin spektral analiz sonuçları (ağırlık %)87	
Tablo 3.2 Deneylerde birleştirmek için kullanılan malzemelerin sertlik değerleri ...	88
Tablo 3.3 Elbar 5’in bileşimi ve teknik özellikleri	88
Tablo 3.4 Çelik-çelik birleştirme işlemlerinde kullanılan değişkenler.....	90
Tablo 3.5 Patlayıcı miktarlarına göre üst levha son hızı.....	92
Tablo 3.6 Değişik altlık, farklı patlayıcı oranı ve ara boşluk mesafesinde elde edilen birleşmelerin kodları	92
Tablo 4.1 Değişik altlıklarda farklı ara boşluk mesafesi ve patlayıcı oranlarında yapılan patlatma işleminde birleşen ve birleşmeyen numuneler	98
Tablo 4.2 Patlatma ile elde edilen birleşmelerin ara yüzeyleri.....	111
Tablo 4.3 Patlama ile birleştirilmiş numunelerin mikro sertlik ölçüm sonuçları	116

Tablo 4.4. Makaslama testi sonuqları 118

Tablo 4.5 Eğme deneyinden sonra numunelerdeki ayrılma miktarı..... 119



ÖZET

Anahtar Kelimeler: Patlamalı kaynak, patlamalı kaplama, patlamalı birleştirme, patlamalı kaynak işlem parametreleri

Bu çalışmada, patlamalı kaynak işlem parametrelerinin birleşmenin mekanik ve metalurjik özelliklerine etkisi incelenmiştir. Çalışmada patlamalı kaynak işlem parametrelerinden olan patlayıcı oranı olan R, ara boşluk mesafesi; s ve altlık değişken olarak kullanılmıştır. Patlayıcı olarak M.K.E.'ye bağlı Barutsan A.Ş.'de üretilen ELBAR-5 toz patlayıcısı kullanılmıştır. Birleştirilecek malzeme olarak Ç 1010 standardında 2 ve 6 mm'lik çelik saclar kullanılmıştır. Patlama ile birleştirilen numunelerin hem ısıtılmış hem de ısıtılmamış halde mikroyapısı ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Patlayıcı oranı ve ara boşluk mesafesi değiştirildiğinde birleşme ara yüzeyinde de değişiklikler olduğu gözlenmiştir. Patlayıcı oranı ve ara boşluk mesafesi artırıldığında birleşme düz ara yüzeyden dalgalı ara yüzeye geçmiştir. Dalgalı ara yüzeye sahip birleşmelerde patlayıcı oranı artırıldığında dalga boyu ve genliğinde bir artış olduğu gözlenmiştir. Levhalar arasındaki ara boşluk mesafesi artırıldığında dalga genliğinde bir artış olmuştur. Aşırı patlayıcı oranlarında birleşme ara yüzeyinde sürekli ergimiş katılmış bir intermetalik bileşen oluşmuştur. Birleşmeden sonra ısıtılmış tabii tutulmayan numunelerin birleşme ara yüzeyinde tanelerin patlatma yönünde uzadığı görülmüştür. Yeniden kristalleşme ısıtılmış işlemine tabii tutulan birleşmelerde taneler yeniden oluşmuştur. Ayrıca deformasyonun fazla olduğu bölgelerde taneler deformasyonun az olduğu bölgelere göre daha küçük olduğu gözlenmiştir. Alt levha ile altlık arasına tampon tabaka olarak kullanılan lastik sayesinde elde edilen birleşmelerde altlığın birleşmeye pek fazla etki etmediği görülmüştür. Mikro sertlik incelemelerinde, genelde, patlayıcı oranının artırılmasıyla sertlikte bir azalma görülmüştür. Isıtılmış işlem görmüş numunelerin mikro sertlik incelemelerinde sertliğin malzemenin orijinal sertliğine dönüştüğü görülmüştür. Makaslama ve eğme deneylerinde ısıtılmış işlem görmüş numunelerin dayanımları ısıtılmamış numunelere göre daha iyi sonuç vermiştir. Makaslama deney sonuçlarına göre düz yada dalgalı ara yüzeyin birbirine eşit dayanım gösterdikleri tespit edilmiştir.

EFFECTS OF EXPLOSIVE LOADING, STAND-OFF DISTANCE and ANVIL ON STEEL/ STEEL BONDING QUALITY ON EXPLOSIVE WELDING

SUMMARY

Keywords: Explosive welding, explosive bonding, explosive coating, high strain rate mechanism, explosive welding parameters.

In this study, effects of explosive welding parameters on mechanical and metallurgical properties of bonding were investigated. Explosive loading (R), stand-off distance (s) and anvil were used explosive welding parameters. Elbar-5 explosive that is produced by BARUTSAN A.Ş. was used. 2 and 6 mm thickness sheets, which are called on Ç 1010, were used for welding materials. Microstructure and mechanical properties of explosive welded materials were investigated either heat-treated or not heat-treated. When explosive loading and stand-off distance were changed there were some differences on bonding interface. It was shown that bonding interface changed from straight to wavy structure when explosive loading and stand-off distance were increased. On wavy interface, when explosive loading was increased wavy length and amplitude increased. Also, when stand-off distance was increased wavy amplitude increased. With excessive explosive quantities continuous melted-solidified inter metallic structure occurred on interface. After the welding, bonded materials, which were not heat-treated, had extended grains. However when the bonded materials were heat-treated new fine grains occurred. Experimental results showed that only two types interfaces were encountered in explosive welded materials at microscopic level: metal-metal and metal/solidified metal. It was observed that anvil didn't effect to bonding when buffer was placed between anvil and parent plate. On micro hardness testing, generally, when explosive loading was increased micro hardness was decreased. On micro hardness of heat-treated specimen, hardness has original materials hardness. Results of tensile shear and bending tests showed that heat-treated specimens are more strength than which of not heat-treated. According to tensile shear test results, straight and wavy interfaces have similar strength.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Temel imalat yöntemleri bazı malzeme ve parçalar için teknik açıdan uygun ve ekonomik olmayabilir. Şöyle ki; malzemenin çok sert olması, bileşenlerinin alaşım oluşturmaması, birleştirilecek iki malzemenin çok farklı özelliklerde olması gibi, malzeme bakımından veya çok ince delikli parçalar, kalınlıkları çok farklı parçaların birleştirilmesi, çok geniş yüzeyler boyunca birleştirme gibi şekil bakımından ya da üretim hızının artmasıyla maliyetin düşmesi, kalitenin yükselmesiyle ürün değerinin artması gibi ekonomik bakımdan uygun olmayabilir. Bu gibi durumlarda uygulanabilecek özel yöntemlerden seçilen örnekler üç grupta toplanabilir:

1. Özel işleme yöntemleri
2. Toz malzemeden parça yapım yöntemleri
3. Katı durumda kaynak yöntemleri (Plastik deformasyon, ultrason kaynağı, patlamalı kaynak, difüzyon kaynağı ve sürtünme kaynağı) [1].

Gelişen teknoloji ile birlikte endüstride kullanılan malzemelerin günümüz ihtiyaçlarına cevap verememesi yada arzu edilen özellikleri karşılayamaması insanoğlunu yeni malzeme oluşumları ya da kombinasyonları konusunda araştırmaya sevk etmiştir. Yapılan araştırmalar sonucu elde edilen yeni malzeme gruplarını işleme ve birleştirmeye yönelik çalışmalar da buna paralel olarak gelişmiş ve bu doğrultuda metallerin özelliklerini kaybetmeden birbirleriyle birleştirme gereksinimi ortaya çıkmıştır.

Metallerin özelliklerini kaybetmeden birleştirilmesi ve sadece benzer değil aynı zamanda farklı özelliklerdeki metallerin birbirleriyle birleştirilmeleri, geleneksel kaynak yöntemlerinden farklı bir birleştirme yöntemi olan katı hal kaynak yöntemi ile mümkündür.

Kaynak, birbirinin aynı yada ergime aralıkları birbirine yakın iki yada daha fazla metalik termoplastik parçayı ısı, basınç veya her ikisini bir arada kullanarak aynı türden bir malzeme katarak veya katmadan birleştirmektir. Metallerin kaynak yöntemleri, uygulanan enerjinin şiddeti ve türüne göre eritme kaynağı, basınç kaynağı, soğuk basınç kaynağı olarak sınıflandırılabilir. Ark eritme kaynaklarında metal malzeme, yalnız ark sıcaklığının etkisiyle yerel olarak ek kaynak metali ile birlikte eritilip birleştirilir. Elektrik ark kaynaklarında kaynak için gerekli ısı elektrik arki tarafından sağlanır [2]. Demir ve alaşımlarının ark kaynağında en yaygın kullanılan yöntemler, Manuel ark (örtülü elektrot ile), MAG ve Tozaltı ark kaynağıdır. Paslanmaz çelik ve demir dışı metallerin alaşımlarında kullanılan ark kaynak yöntemleri yukarıdakilere ek olarak MIG,TIG kaynaklarıdır [3]. Ark kaynaklarında, yöntemin karakterine bağlı olarak kaynak metali ve ITAB'ın özellikleri de değişmektedir. Kaynak hızına ve yöntemine bağlı olarak kaynak metali alanı ITAB'ın genişliği değişmektedir. Meydana gelen bu değişiklikten dolayı kaynaklı bölgenin mekanik özellikleri etkilenmektedir. Aynı şekilde kaynak metalindeki tanelerin yönü, büyüklüğü ve yapısı mekanik özelliklerde değişmelere sebep olmaktadır [4].

Metallerin kaynağı denilince normalde insanların aklına ergitme kaynağı özellikle elektrik kaynağı ve gaz kaynağının değişik formları gelir. Ancak son üç yada dört bin yıldır kullanılan esas kaynak yöntemi, yumuşak metallerin soğuk basınç kaynağı yada dövme demirin ocak kaynağı gibi kaynak yöntemlerini içeren katı hal işlemleridir.

Sürtünme kaynağı, ultrasonik kaynak ve difüzyon kaynağı gibi katı hal kaynak işlemleri bu yüzyılda keşfedilmiştir. Katı hal işlemlerinden olan patlamalı kaynak ise daha sonra keşfedilmiştir. Patlamalı kaynak bilimsel olarak fark edilmesine rağmen 1950'lere kadar potansiyel bir ticari işlem olarak düşünülmemiştir [5]. Ancak araştırmalar neticesinde patlamalı kaynak işleminde bir çok pratik faydalar olduğu ortaya çıkmış ve bu konuda çeşitli araştırma ve geliştirme programları başlatılmıştır. Bu ilk araştırmalardan bir kaçı üretime yönelik patlamalı kaynak işleminin verimli olduğunu ispatlamıştır. Bununla beraber bu işlemin zaman ve para yatırımı açısından da olumlu sonuçlar verdiği gözlenmiştir [6].

Patlamalı kaynak ilk olarak I. Dünya Savaşı sırasında bombalardan kopan küçük parçaların çevresindeki metal yapılara yapışmasıyla dikkat çekmiştir. Ancak bu konuda 1944'e kadar herhangi bir yayın bulunmamaktadır. Patlamalı kaynak yönteminin ticari olarak kullanımıyla ilgili ilk patent başvurusu Philipcuk ve Bois tarafından olmuştur [7]. Bu yöntem ilk olarak standart kaynak malzemelerinin konfigürasyonlarında doğabilecek zorlukları aşmak için kullanılabilir bir üretim aracı olarak ve uzak konumlardaki kaynaklar için geleneksel kaynak yöntemlerine alternatif bir yöntem olarak görülmüştür. Bununla beraber, çok farklı ergime noktalarına, farklı sertliklere sahip ve ısıl genleşmeleri büyük farklılıklar arz eden metal kombinasyonlarıyla çalışıldığında arzu edilen dayanıma sahip kaynakların elde edilmesiyle endüstrinin bu kaynak yöntemine olan ilgisinin arttığı görülmüştür. 1970'lerde yapılan literatür taramasına göre aynı yada farklı özelliklerdeki metallerin 260'dan fazla kombinasyonunun bu yöntemle başarılı bir şekilde birleşmesinin sağlandığı görülmüştür [6]. Bu rakam daha sonraki yıllarda yapılan çalışmalarla artmıştır [8]. Bu konuda yapılan ilk çalışmalar sadece düz levha kaplamalarını kapsamasına rağmen daha sonraki ticari gelişmeler tüplerin ve eğimli yüzeylerin kaplanması ile boruların uç kaynaklarını ve geçiş bağlantılarının kaynağını içermektedir.

Her kaynak yönteminde olduğu gibi, patlamalı kaynak yönteminde de birleşmeye etki eden parametreler vardır. Bunlar; ara boşluk mesafesi (s), eğimli düzenlemelerde başlangıç açısı (paralel düzenlemeler için bu değer $\alpha=0^\circ$ 'dir), patlayıcı oranı (R) (patlayıcı kütlelerinin üst levhaya oranı), patlayıcının patlama hızı V_d , üst levha çarpma hızı V_p , çarpışma açısı β , kaynak hızı V_w , çarpışma noktası S 'ye göre üst levha hızı ve birleştirilecek malzemelerin özellikleri olarak sıralanabilir.

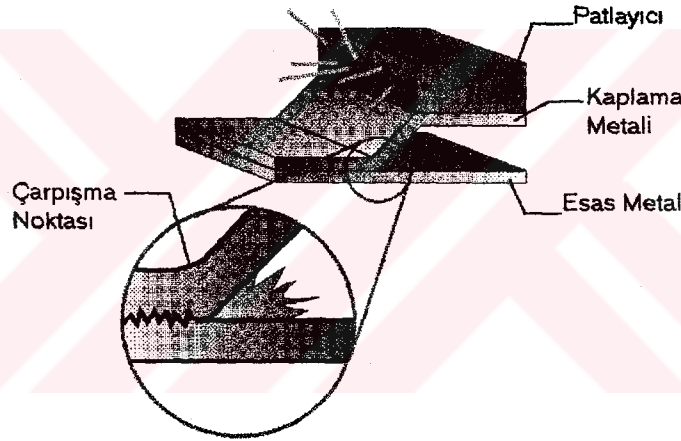
Bu çalışmada da patlamalı kaynak işlem parametrelerinden olan paralel düzenlemelerde ara boşluk mesafesi (s), patlayıcı oranı (R ; patlayıcı kütlelerinin üst levhaya oranı) ve altlığın birleşmenin mekanik ve metalürjik özelliklerine etkisini belirlemek amacıyla deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Metalografik, sertlik ölçümü, eğme ve makaslama deneylerini içeren bu çalışmanın amacı, ara boşluk mesafesi ve patlayıcı oranlarının değişimlerini içerecek çalışmalar olmasına rağmen, bunlarla birlikte altlığın kaynak kalitesine etkisi üzerine çalışmaların pek

olmamasıdır. Bundan dolayı da bu çalışmanın bilimde bir yenilik olması umulmuştur. Ayrıca, yurt dışında, özellikle gelişmiş ülkelerde yaygın biçimde kullanılan bu teknik konusunda ülkemizde yeterli bilgi olmaması bu çalışmanın gerçekleştirilmesi için itici güç olmuştur. Bu çalışma ile değişik patlayıcı oranları ve ara boşluk mesafesi ile değişik altlıklar üzerinde yapılan patlatma ile birleştirme çalışmalarında elde edilen birleşmelerde değişimlerin olup olmadığı gözlenmiştir. Bu doğrultuda, ülkemizde patlamalı kaynak konusunda hem referans alınabilecek Türkçe bir eser ülkemiz bilimine bir katkıda bulunulması amaçlanmış hem de endüstriyel anlamda ülkemiz sanayisi için yeni ve ekonomik bir üretim tekniğinin olabirliği gösterilmiştir.



BÖLÜM 2. PATLAMALI KAYNAK TEKNİĞİ

Patlamalı kaynak, patlayıcı ile elde edilen yüksek basınçla iki yada daha fazla metali birleştirmek için kullanılan katı hal kaynak yöntemidir (Şekil 2.1). Bu işlem dışarıdan herhangi bir ısı verilmediği için soğuk teknik olarak tanımlanmasına rağmen, bu işlemin dinamiğinden dolayı kaynak ara yüzeyinde bölgesel yüksek sıcaklıklar oluşur. Bu işlemdeki ısı ve akış, esas malzemenin dayanımına eşit yada daha yüksek bir dayanıma sahip bir ara yüzey birleşmesi üretebilirler [5].



Şekil 2.1 Patlamalı kaynağın şematik olarak gösterimi (levha/levha) [9]

Patlamalı kaynak aynı özellikte iki yada daha fazla metali birleştirmek için kullanılabilir olmasına rağmen bu yöntemin en büyük ticari potansiyeli farklı özelliklerdeki metallerin birleştirilmesi için kullanılabilir olmasıdır [6].

Patlamalı kaynak işlemi nükleer, uzay araçları, kimyasal işlemlerin yapıldığı sanayi alanlarında, gemi yapımı, güç aktarma organları ve diğer sanayi dallarındaki uygulamalarıyla etkileyici bir çalışma alanı olarak görülmüştür [7]. Patlamalı kaynağı bu kadar ilginç yapan en önemli özellikleri şu şekilde sıralanabilir:

- Geleneksel kaynak yöntemleriyle birleştirilemeyen farklı metallerin kaynağı bu yöntemle yapılabilmektedir .
- Kaynak bölgesi en az ana malzemenin dayanımı kadar bir dayanıma sahiptir ve en zor çalışma gerilmelerine karşı mukavemet özellikleri iyidir .
- Gerekli olan patlayıcılar düşük fiyatla temin edilebilir.
- Tamir - Bakım masraflarını azaltıcı birleşme sunar.
- Bu yöntemle elde edilen ısı değiştiriciler herhangi bir sızıntı olmaksızın en zor koşullarda da çalışabilme yeteneğine sahiptir .
- Nükleer reaktörler gibi insan sağlığına zararlı çalışma ortamlarında uzaktan işlem kontrolü ile birleşme sağlanabilir.
- Soğuk işlem olduğu için birleştirilen malzemelerin özelliklerinde herhangi bir değişim oluşmaz. Bunun anlamı, temperlenmiş malzemeler, diğer korozyon dirençli malzemelere, mekanik özelliklerinde herhangi bir etkileşme olmaksızın kaplanabilir.
- Soğuk işlem olduğu için karbonun difüzyonu olmaksızın metalürjik bir sınır form elde edilebilir.
- Diğer birleştirme tekniklerinde olduğu gibi özel ekipmanlara gerek yoktur.
- Ergime noktası yüksek olan alaşımlar daha düşük ergime noktalı malzemelerle birleştirilebilir.
- Patlamalı kaynak işlemi ölçü olarak sınırlı değildir. 0.5 mm² ebatlarındaki malzemeler birleştirilebildiği gibi 90-120 m² gibi büyük ebatlardaki malzemeler de birleştirilebilir .

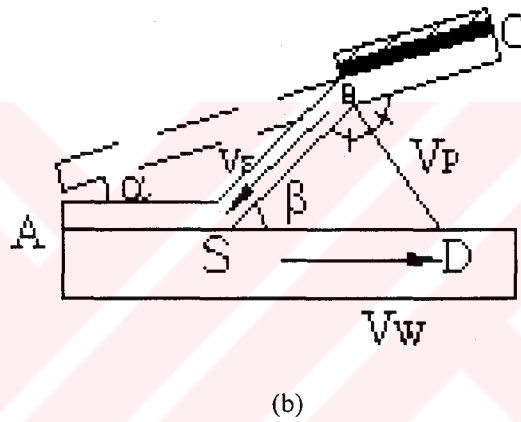
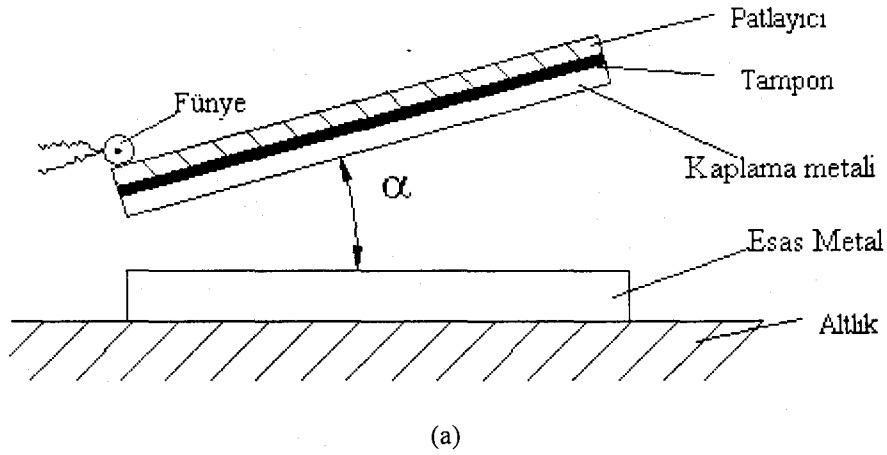
- Kaplama malzemeleri 0.02 ile 63.5 mm kalınlıklarda sıralanabilir. Tipik olarak kaplama 0.7 ile 4.7 mm'lik kalınlıklardadır. Alt levhalar aşırı derecede ince levhalardan 450 mm kalınlığına kadar değişebilir.
- Birleşme anındaki fişkırmadan dolayı yüzeyinde oksit tabakası bulunan metallerin birleştirilmesi de mümkündür [10].

Patlamalı kaynağın yukarıda sıralanan olumlu özelliklerinin yanı sıra bazı dezavantajları da vardır. Bunlar:

- Bu işlem aşırı derecede gürültülü ve patlayıcıların tehlikesinden dolayı boş alanlarda yapılması gereklidir.
- Gevrek metaller birleştirilemez.
- İşlemin hassasiyetinden dolayı geniş üretim hatlarında pratik değildir [10].

2.1 Patlamalı Kaynak Teorisi

Patlamalı kaynak işlemi, metalik levhaların yüksek hızda eğimli çarpışmasını sağlayacak patlayıcıların kullanımına bağlıdır. Eğimli çarpışma parametre ve bileşenleri Şekil 2.2'de gösterilmiştir. Şekil 2.2 b'de görülen α ; eğimli düzenlemelerde başlangıç açısı, β ; patlama anında kaplama metalinin (yada üst levhanın) esas metalle (alt levhayla) yaptığı çarpışma açısı, V_w ; kaynak yayının hızı, V_p ; üst levha çarpma hızı, V_F ; üst levha hızıdır. eğimli bir çarpışmanın sonucu metal yüzeylerinde metalürjik birleşme sağlayan bu mekanizma tam olarak belirlenememiştir. Bu konu üzerine yapılan araştırmaların birçoğu fişkırmaya çarpışması olarak bilinen birleşme için gerekli temel şartın eğimli çarpışma olduğunu göstermektedir. Bir çarpışma fişkırması çok yüksek hızlarda çarpışan levhalar arasından dışarıya çıkmaya zorlanan ve çarpışmanın ucunda şekillenen metalin fişkırması için kontrol edilen levha hızı, basınç, çarpışma açısı ve çarpışma noktası hızının bulunduğu eğimli bir çarpışma olarak tanımlanır (Ezra 1973).



Şekil 2.2 a) Patlamalı kaynak işleminde metal levhaların eğimli çarpışması, b) çarpışma parametre ve bileşenleri [5]

Patlamalı kaynak işleminde fişkırmayı tam olarak anlamak için iki metal yüzey arasındaki metalürjik bir birleşme için gerekli şartlar anlaşılmalıdır. Bilinmesi gereken metalleri birbirine tutanın ne olduğudur. Ezra [6] bu soruya “metal atomları arasındaki atomlar arası kuvvetlerin çok basit dengesi yada yapıştırma (kohezif) enerjisidir” şeklinde cevap vermiştir. Bu yüzden iki metal yüzey arasındaki gerçek metalürjik birleşmeyi sağlamak için, iki yüzeyden birisi, birleşme ara yüzeyi karşısındaki komşu metal atomlarının atomlar arası kuvvetlerini oluşturması gerekmektedir. Böyle bir birleşme için temiz yüzeyler birbirleriyle çok yakın temasa geçerler. Genelde bir çok metal yüzeyi yüzey filmleri ve pürüzlülükle karakterize edildiği için böyle bir teması sağlamak zordur. Aşırı büyüklüklerdeki hidrostatik basınç da, ara yüzeyde metal atomlarının etkili biçimde yakın temasını

sağlayabilmek için yüzey filmlerini delemeyecektir. Geleneksel ark kaynağında ısı, birleşecek iki metal arasında bir ergime bölgesi oluşturmak için kullanılır. Böylece yüzey filmi cüruf gibi eriyen bölgenin dışına yüzdürülürken ergimiş bölge metal atomlarının karışımına izin verir.

Patlamalı kaynak işleminde ise fişkırama yüzey filmlerini parçalayarak temizleyen bir mekanizmadır. Eğimli çarpışma boyunca fişkırama metal yüzeyinin temizlenmesine sebep olacak şekilde oluşur. Çarpışma noktasında temiz metal yüzeyleri patlamanın etkisiyle oluşan yüksek basınçla yakın temas zorlanır. Patlamalı kaynak işlemi iki aşama halinde düşünülebilir. Birincisi, fişkırama, yerleşik yüzey tabakalarını parçalar ve temizler. İkincisi, yüksek basınç, atomlar arası kuvvetlerin birleşme ara yüzeyi oluşturabileceği konum olan yakın temas için metal yüzeylerini zorlar [6].

2.2 Patlamalı Kaynak Mekanizması

Blazynski [11], kaynaklanmış yüzeylerin karakteristiklerini ve özelliklerini anlamak için bir akışkanın davranışını anlamının gerekli olduğunu ileri sürmüştür. Patlamalı kaynakta da birleşme anında iki metal bir akışkan gibi hareket etmektedir. Böyle bir hareketin sonucunda ara yüzeyde meydana gelen dalgalı yapının oluşumu için dört mekanizma öne sürülmüştür.

- Fışkırama mekanizması
- Akış kararsızlığı mekanizması
- Girdap mekanizması
- Gerilim dalgası mekanizması

Ezra [6], patlamalı kaynakta birleşme için gerekli olan şartın fişkırama çarpışması biçiminde oluşan eğimli çarpışma olduğunu ileri sürmüştür. Ezra'ya göre patlamalı kaynak mekanizmasının anlaşılabilmesi için fişkırmmanın anlaşılması gerekmektedir.

Fışkırama mekanizması üzerine ilk çalışma Birkhoff ve arkadaşlarının [12] yaptığı patlayıcıların biçimlendirilmesi üzerinedir. Birkhoff ve arkadaşları [12], Şekil 2.3'de

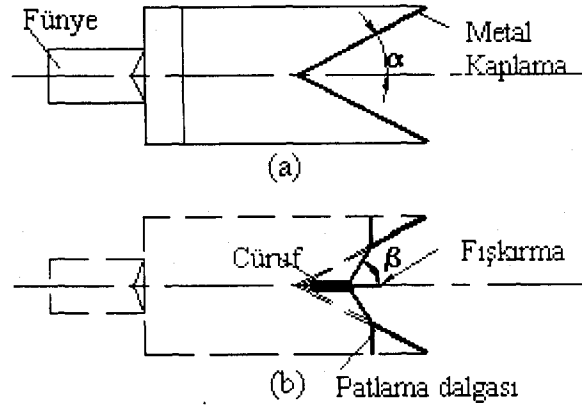
gösterildiği gibi, silindirik bir patlayıcıda konik yada kama biçimli kaplamanın çökmesini incelemiştir. Patlama anında, patlama dalgası patlama boyunca hareket eder ve kaplamanın ucuna ulaştığında koninin ucunu çökmeye neden olacak şekilde çok yüksek bir basınca maruz bırakır. Bu basınç, metalin dayanımından daha fazladır. Sonuçta çarpışma bölgesindeki malzeme, bir akışkan gibi hareket eder. Şekil 2.3'de görüldüğü gibi kaplama malzemesi, metalik ileri fişkırmaya ve daha yavaş hareket eden geri fişkırmaya ayrılır. Bu fişkırmaya, bir akışkan gibi hareket etmesine rağmen, ergime sıcaklığının altındaki bir sıcaklığa sahiptir. Fakat fişkırmaya, tutsak kalırsa o zaman kinetik enerji ısı enerjisiye dönüşür ve ergime oluşur. Patlama ile kaplama çökmesinin geometrisi Şekil 2.4'de verilmiştir. Şekilde, sıfır zamanda kaplama APQ durumundadır ve birim zaman sonra BQ pozisyonunda olacaktır. Böylece kaplamanın ucu A'dan B'ye hareket etmiş olacaktır. Bu hareketin hızı ise;

$$V_1 = \frac{V_0 \cos \frac{1}{2}(\beta - \alpha)}{\sin \beta} \quad (2.1)$$

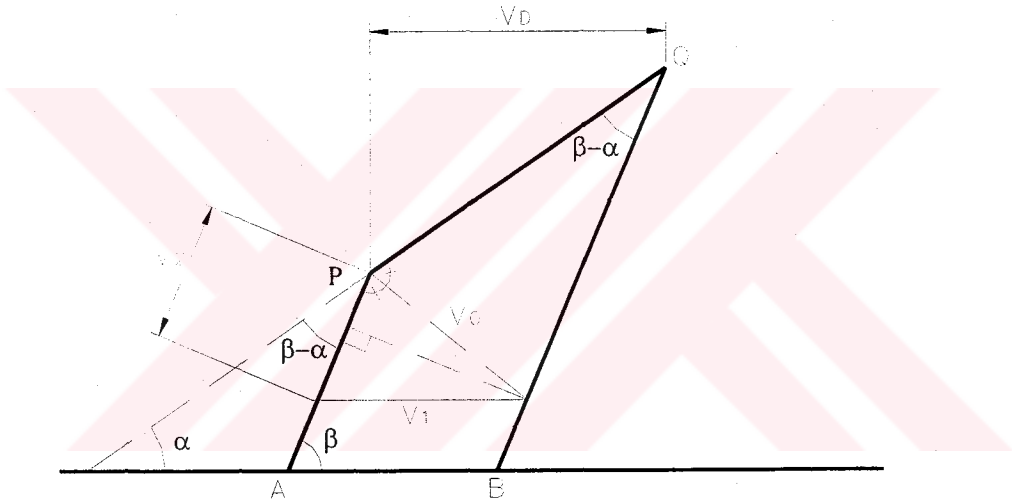
denklemlerle ifade edilir. A ile hareket eden bir gözlemci P noktasının DP vektörü ile gösterilen bir hızda kendisine doğru geliyor olarak görecektir. Buna göre DP vektörü;

$$V_2 = V_0 \left[\frac{\cos \frac{1}{2}(\beta - \alpha)}{\tan \beta} + \sin \frac{1}{2}(\beta - \alpha) \right] \quad (2.2)$$

olarak gösterilir.



Şekil 2.3 Kama biçimli kaplamalı silindirik patlayıcı. (a) Patlamadan önce, (b) Patlamadan sonraki bir an [12]



Şekil 2.4 Kaplama çökmesinin geometrisi [12].

A noktasındaki gözlemciye göre işlem sabit bir durumda görünür ve kaplama malzemesi sıkıştırılmaz olduğu için Bernoulli denklemi uygulanabilir;

$$P = \frac{1}{2} \rho u^2 = \text{sabit} \quad (2.3)$$

Burada, P; basınç, ρ ; yoğunluk ve u; hızdır. Böylece akışın herhangi bir noktasındaki basınç o noktadaki akışın hızını belirler. Eğer genişleyen gazların basıncı hızla azalır, çöken yüzeylerdeki basınç çok düşük olacaktır ve sabit olarak düşünülebilir. Böylece

A'daki gözlemcinin bakışına göre ileri ve geri fişkırtma aynı V_2 hızıyla Şekil 2.5'de gösterildiği gibi, kaplama yaklaşıyor görüldüğü için, geri çekiliyor olarak görülecektir. Buna göre ileri fişkırtmanın mutlak hızı;

$$V_j = V_1 + V_2 = V_0 \left[\frac{\cos \frac{1}{2}(\beta - \alpha)}{\sin \beta} + \frac{\cos \frac{1}{2}(\beta - \alpha)}{\tan \beta} + \sin \frac{1}{2}(\beta - \alpha) \right] \quad (2.4)$$

olurken geri fişkırtmanın mutlak hızı;

$$V_s = V_1 - V_2 = V_0 \left[\frac{\cos \frac{1}{2}(\beta - \alpha)}{\sin \beta} - \frac{\cos \frac{1}{2}(\beta - \alpha)}{\tan \beta} + \sin \frac{1}{2}(\beta - \alpha) \right] \quad (2.5)$$

denklemleri ifade edilebilir.

Kaplama duvarlarının çarpışması boyunca momentum korunur ve bu da ileri ve geri fişkırtma arasındaki kütlelerin bölünmesini belirler. Şekil 2.5'te Y yönündeki momentum korunur ve X yönündeki momentumun korunması için de aşağıdaki denklemlerin sağlanması gerekir.

$$mV_2 \cos \beta = m_s V_2 - m_j V_2 \quad (2.6)$$

Burada m kaplamanın toplam kütlesidir, m_s ; işlem sonundaki geri fişkırtmanın kütlesi ve m_j 'de ileri fişkırtmaya giden kütledir. Kütle korunumu olduğu için;

$$m = m_s + m_j \quad (2.7)$$

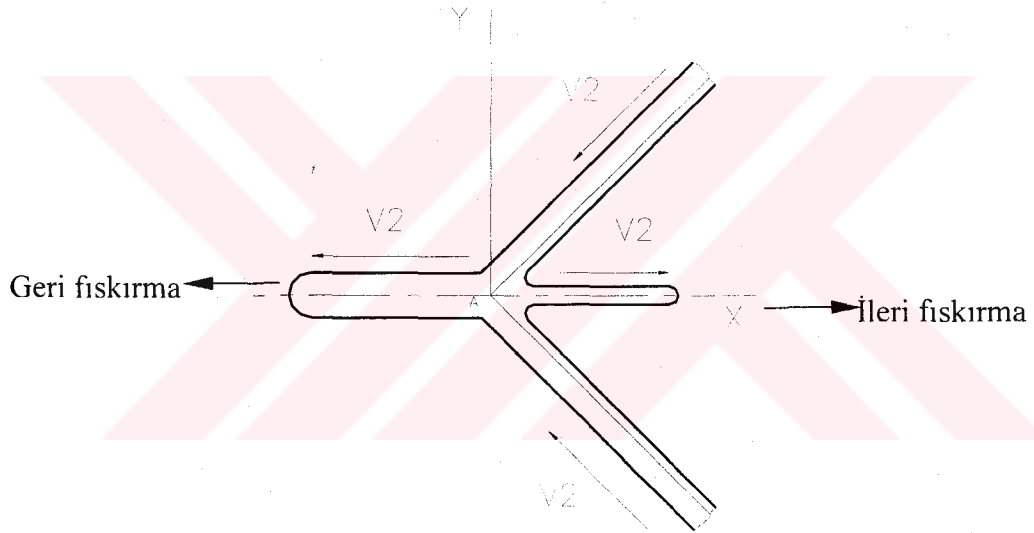
2.6 ve 2.7'den m_s ve m_j şöyle çıkartılabilir;

$$m_j = \frac{m}{2}(1 - \cos \beta)$$

$$m_s = \frac{m}{2}(1 + \cos \beta)$$
(2.8)

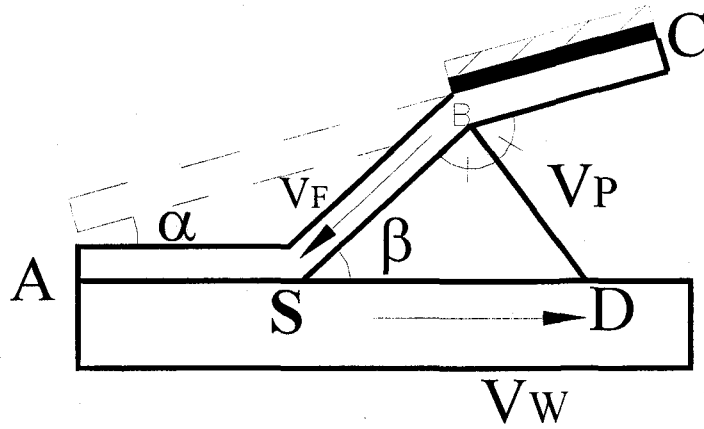
Kaplamaya yönlendirilen hızın büyüklüğü kullanılan patlayıcıya ve hızına bağlıdır. Eğer V_0 biliniyorsa patlama hızı (V_D) teorik geometriden (Şekil 2.4'den);

$$\frac{V_D}{\cos \alpha} = \frac{V_0 \cos \frac{1}{2}(\beta - \alpha)}{\sin(\beta - \alpha)} = \frac{V_0}{2 \sin \frac{1}{2}(\beta - \alpha)}$$
(2.9)

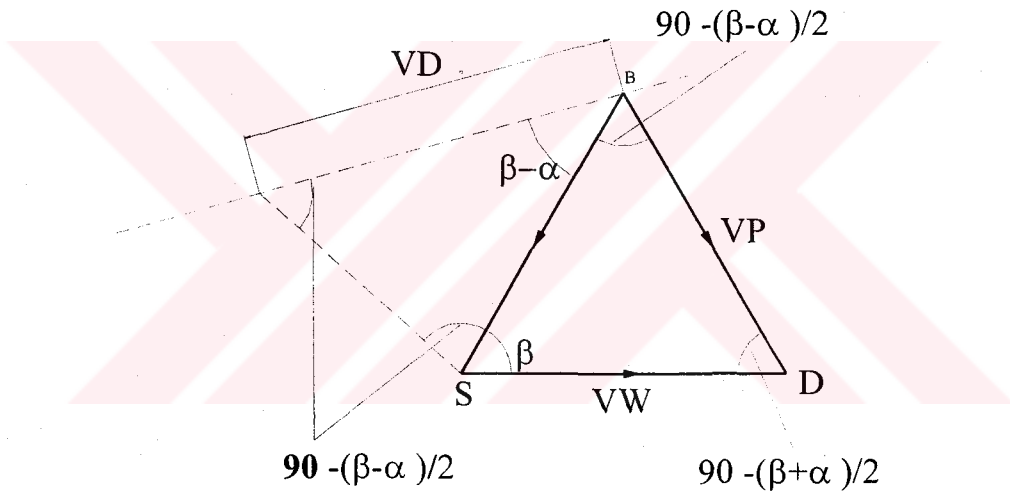


Şekil 2.5 A noktasında hareket eden bir gözlemciye göre ileri ve geri fışkıрма oluşumu [12].

Crossland'in [5] ifadesine göre , Pearson ve Hayes [13], patlamalı kaynak üretmek için eş kurgu sistemini (simetrik) kullanmışlardır. Bu analizde Birkhoff ve arkadaşlarının [12] verdiğiyle aynı fikirler kullanılmıştır. Sonuçta üst levha hızının yönü, Şekil 2.6'de görüldüğü gibi, (SBC) açısını iki eşit parçaya böler. Bu hızın büyüklüğü kullanılan patlayıcıya ve miktarına bağlıdır. Şekil 2.6 b'deki vektör diyagramından;



(a)



(b)

Şekil 2.6 Üst levha çökmesinin geometrisi [5]

$$\sin \frac{1}{2}(\beta - \alpha) = \frac{V_P}{V_D} \quad (2.10)$$

Üst levha hızı V_P , patlayıcının patlama hızı V_D ve eğimli geometride başlangıç açısı α 'nın bilinmesinden eğimin dinamik açısı β 'yi çıkartmak mümkündür. SBD üçgeni göz önüne alınırsa, kaynak yayılım hızı ve üst levha hızı;

$$V_W = V_P \frac{\cos \frac{1}{2}(\beta - \alpha)}{\sin \beta} \quad (2.11)$$

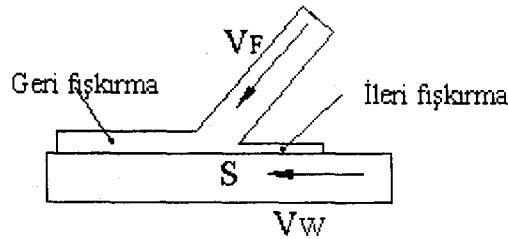
$$V_F = V_P \frac{\cos \frac{1}{2}(\beta - \alpha)}{\sin \beta} \quad (2.12)$$

denklemleriyle bulunabilir. Burada V_W kaynak yayılım hızıdır ve V_F ise S ile hareket eden bir gözlemciye göre üst levha hızıdır. 2.11 ve 2.12 denklemlerinden α 'nın küçük değerleri için V_W ve V_F arasında çok az fark olduğu ve α sıfır olduğunda paralel düzenleme için herhangi bir fark olmadığı anlaşılır.

S noktasındaki bir gözlemciye göre işlem sabit durumdadır ve yatay düzlemde momentumun korunumu için, ileriye doğru fişkırmaya oluşurken üst levha parçası da geriye doğru fişkırmayı oluşturması gerekir (Şekil 2.7). Kütle ve momentumun korunumundan ileriye ve geriye doğru fişkırmalar arasında kütle bölünmesi görülebilir, Birkhoff ve arkadaşlarının [12] ileri ve geri fişkırmaya kütlelerinin denklemlerindeki gibi, (Eşitlik 2.8'deki gibi);

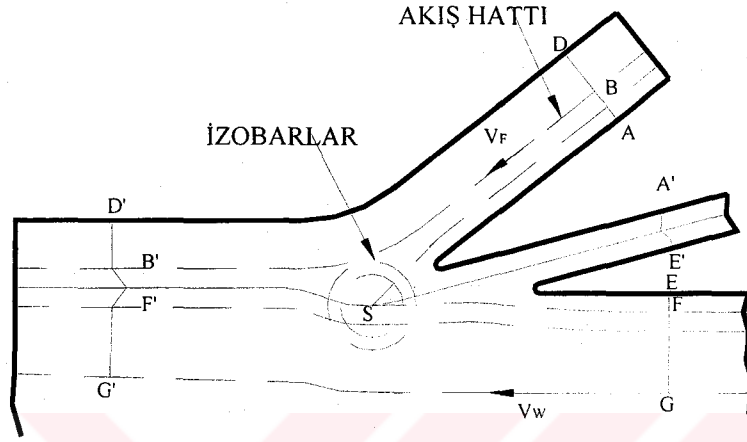
$$m_s = \frac{m}{2}(1 + \cos \beta) \quad (2.13)$$

$$m_r = \frac{m}{2}(1 - \cos \beta)$$



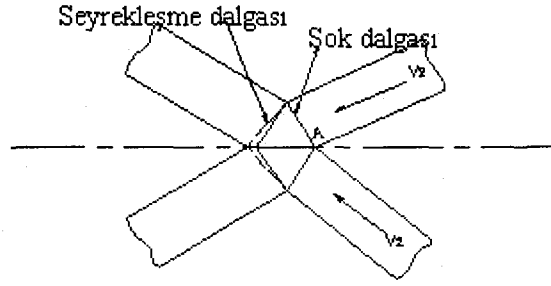
Şekil 2.7 İleri fişkırmaya oluşumu [5]

Crossland'a [5] göre bu işlem, ileriye doğru fişkırmaya yalnızca üst levhadan oluştuğu varsayıldığı için oldukça basittir, oysaki S'de hem alt hem de üst malzemede bir yığılma basıncı vardır. Sonuç olarak fişkırmaya her iki levhanın yüzeyinden oluşacaktır (Şekil 2.8) [14].

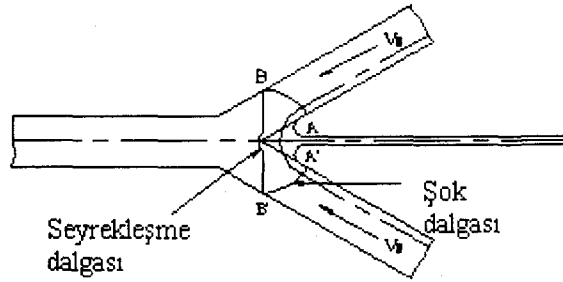


Şekil 2.8 Çarpışma bölgesinde akış konfigürasyonu [14]

Walsh ve arkadaşları [15], Abrahamson [16] ve Cowan ve Holtzman [14] patlamalı kaynak ve içi boş (oyuk) silindirik patlayıcıda sıkıştırılabilir akış teorisini kullanmışlardır. Walsh ve arkadaşları [15] Şekil 2.3 ve Şekil 2.4'de gösterilen iki levha arasındaki simetrik çarpışmayı incelemişlerdir. Burada levhalar arasındaki çarpışma açısı (β), A ile hareket eden gözlemciye göre V_2 hızının, ses hızının üstünde olması için küçüktür. Onlar böyle çarpışmaları fişkırmalı ve fişkırmaz olmak üzere iki gruba ayırdığını göstermişlerdir. Şekil 2.9 a'da gösterilen fişkırmaz çarpışmada A'da tek bir şok vardır. Ancak V_2 'ye bağlı kesin çarpma açısının (β_c) üzerinde A'daki tek bir şok konfigürasyonun kalması daha fazla mümkün değildir ve Şekil 2.9 b'de görüldüğü gibi ayrılmış şok dalgası akış yukarı hareket eder. Fişkırmaya, ana fişkırmayın desteklenmemiş dış yan yüzeylerinde basınç hareketinden dolayı ayrılmış şok dalgasından akış aşağı oluşur. Cowan ve Holtzman'a göre [14], ayrılmış şok dalgaları akışı çarpışma noktasından uzağa saptırmaya meyilli olduğu için, çarpışma açısı küçüktür ve sonuçta, fişkırmadaki kütle, aynı çarpışma açısı β için ses hızının altındaki bir hızdakinden daha az olması beklenebilir.



(a) Fışkırmaz çarpışma

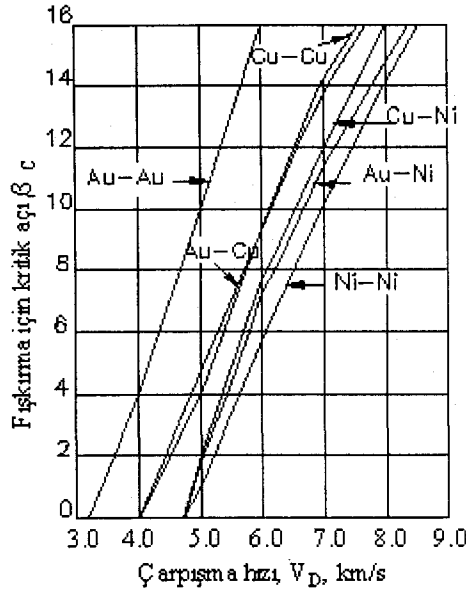


(b) Fışkırmalı çarpışma

Şekil 2.9 Ses hızının üzerindeki bir hızda çarpışma [15]

Cowan ve Holtzman [14], farklı malzeme ve farklı kalınlıklardaki levhaların çarpışması ile çarpışma bölgesine göre farklı akış hızlarında hareket eden asimetrik durumu incelemişlerdir. Onlar özellikle başlangıç açısı $\alpha=0$ olan paralel patlamalı kaynak düzenlemesini incelemişlerdir. Paralel düzenleme için çeşitli metal ve kombinasyonlarındaki fışkırmaya için çarpışma açısını hesaplamışlardır (patlama hızının bir fonksiyonu olarak; patlayıcının patlama hızı V_D = kaynak yayılım hızı V_W = Üst levha hızı V_F) ve sonuçlar Şekil 2.10'da gösterilmiştir. Burada fışkırmaya, çizgilerin sol tarafında oluşur.

Eğer iki metal aynı özellikte, fakat farklı kalınlıkta ise ve aynı hızda çarpışma noktasındaki gözlemciye yaklaşıyorlarsa, her iki akışın yığılma basıncı aynıdır. Yığılma noktasının yanındaki bölgede akış simetrik duruma göre farklı değildir. Fakat fışkırmaya açısı ve ileri ve geri fışkırmadaki iki levhanın oranı belirsizdir.



Şekil 2.10 Paralel düzenleme için V_D ve β 'nin hesaplanmış değerleri [14]

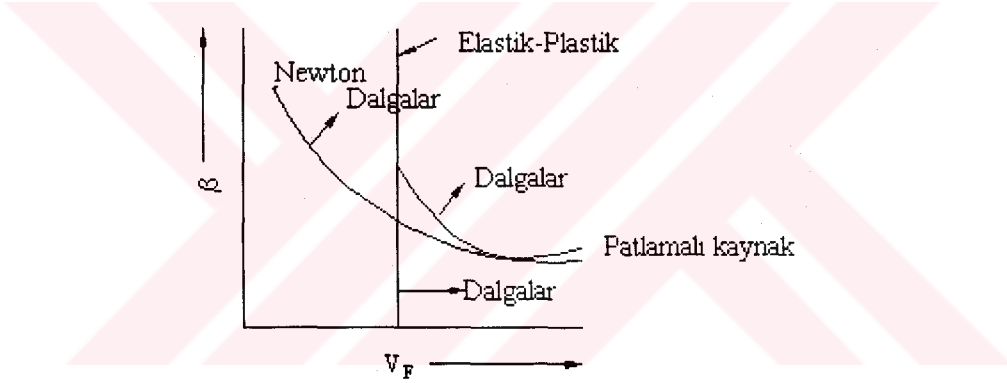
Eğer iki levha farklı malzemeler ise yada farklı hızlarda çarpışma noktasına yaklaşıyorlarsa, iki akımın yığılma basıncı farklıdır. Cowan ve Holtzman'a [14] göre iki mümkün akış konfigürasyonu vardır. Birincisinde, akım sadece daha düşük yığılma basıncıyla ileri fişkırtma formuna ayrılır ve diğerinde, bir fişkırtma oluşumu için her iki akımın ayrılmasına izin verir.

Kowalick ve Hay'ın [17] tanımladıkları "Karman Girdap Mekanizması" patlamalı kaynağın bir diğer mekanizmasını oluşturur. Bu çalışmada, Kowalick ve Hay [17], patlamalı kaynaktaki dalgaların Karman girdap yollarına benzediklerini varsaymışlardır. Bir engeli geçen akıştaki Karman girdap yolu ile patlamalı kaynaktaki ara yüzey dalgaları arasındaki benzerlik Kowalick ve Hay'ın [17] yanısıra Cowan ve arkadaşları [18], Reid [19] ve Reid ve Sherif [20] tarafından da incelenmiştir.

Cowan ve arkadaşlarına [18] göre, dalgaların oluşup oluşmaması çarpışma noktasına göre üst levha hızına (V_F) ve β çarpışma açısına bağlıdır. Şekil 2.11, oluşan dalga bölgelerini göstermektedir. Cowan ve arkadaşları [18] bunun iki sınırdan oluştuğunu

düşünmüşlerdir. Yüksek V_F değerlerinde, yığılma basıncı yüksek olduğunda akış temel Newton kanunu olarak düşünülebilir ve ara yüzey dalgaları Reynolds sayısının kritik bir değeri üzerinde oluşur. Akış mecrasındaki engelin boyutu fişkırmaya kalınlığıyla alınır. 2.13 denkleminde fişkırmaya kalınlığı, fişkırmaya kalınlığının β^2 'ye oranını ifade eden β 'nin küçük değerleri için, $\sin^2 \frac{\beta}{2}$ ye yada $\frac{1}{2}(1 - \cos \beta)$ ' ya oranı olduğu görülmektedir. Sonuç olarak ρ (akışkanın yoğunluğu) ve μ (akışkanın viskozitesi) sabit oldukları için Reynolds sayısının kritik bir değeri için sınır çizgisi aşağıdaki denklemlerle verilir;

$$\beta^2 V_F = \text{sabit} \quad (2.14)$$



Şekil 2.11 Dalga oluşumu için teorik ve pratik sınırlar [14]

V_F 'nin daha düşük değerlerinde yığılma basıncı daha azdır ve malzeme ideal bir elastik- plastik katı gibi doğru bir biçimde düşünülebilir ve Reynolds sayısı Y akma dayanımının paydalarında belirtilmelidir. Reynolds denkleminde ($R = \frac{V d \rho}{\mu}$ burada

V ; akışkanın akış hızı, d ; silindirin yarıçapı, ρ ; akışkanın yoğunluğu ve μ ; akışkanın viskozitesidir);

$$R = \frac{V_F d \rho}{\mu} = \frac{1/2 \rho V_F^2}{\mu \frac{V_F}{2d}} \alpha \frac{P_s}{Y} \quad (2.15)$$

Burada P_s , V_F hızında hareket eden ρ yoğunluklu sıkıştırılmaz akış için yığılma basıncıdır. Böylece Reynolds sayısının kritik bir hızı için sınır çizgisi aşağıdaki eşitlikle belirlenir;

$$V_F = \text{sabit} \quad (2.16)$$

Cowan ve arkadaşları [18], değişik metal kombinasyonları için düz ara yüzeyden dalgalı ara yüzeye geçiş için gerekli şartları belirlemişlerdir. Onların belirledikleri düşük hız sınırındaki geçiş hızı β 'dan bağımsızdır. Bu bölgede, Cowan ve arkadaşları [18], akma dayanımını, 2.17 denkleminde, elmas pramit sertliği (vickers) olarak almışlardır. Metal kaplamada alt ve üst levha malzemeleri genellikle farklıdır ve bu durum için onlar yoğunluk ve sertliğin ortalama değerlerini kullanmışlardır. Böylece Reynolds sayısı aşağıdaki gibi olur;

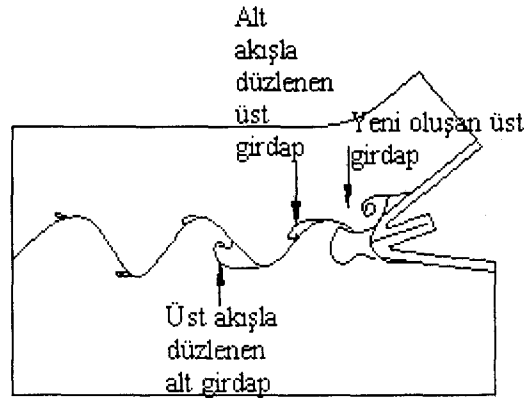
$$R = \frac{(\rho_F + \rho_P) V_F^2}{2(H_F + H_P)} \quad (2.17)$$

Yoğunluk için kg/m^3 , V_F için m/s ve sertlik için N/m^2 koherent birimleri kullanılarak Cowan ve arkadaşları [18] %17.9 bağıl standart sapma ile 10.6'lık geçişte Reynolds sayısının değerini bulmuşlardır. Cowan ve arkadaşları [18] hataların incelenmesinden Reynolds sayısının kritik değerinin bir sabit olduğunu görmüşlerdir. Oysaki Crossland'ın [5] ifadesine göre dayanım özelliklerine bağlı gerinim oranlarındaki farklılıktan dolayı farklı özelliklerdeki metaller için bu değer değişebilmesi ihtimali vardır. Bununla birlikte bu etkiler deneysel hatalarla karşılaştırıldığında geniş değildir.

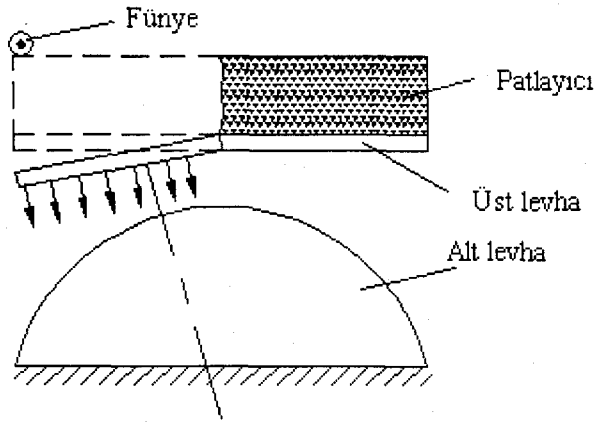
Cowan ve arkadaşları [18], dalgaların ölçüsünü hesaplamaya devam etmişler ve dalganın, özellikle çarpışma açısının büyüklüğüne bağlı, ölçüsünü ve çarpışma hızından bağımsız ölçüsünü incelemişlerdir. Analizlerini bir akışkandaki engelin arkasındaki Karman girdap yolunun incelenmesine dayandırmışlardır. Sonuç olarak, onların çalışması, patlamalı kaynaktaki ara yüzey dalgalarının oluşumu bir engel arkasındaki karman girdap yolunun gelişimine benzerliğini ifade eder.

Kowalick ve Hay da [17], patlamalı kaynakta dalgaların Karman girdap yoluna benzediklerini varsayımlardır ve Cowan ve arkadaşları [18] gibi engel yüksekliğinin ileri fişkırmannın kalınlığına eşit olduğunu varsayımlardır. Onların dalga oluşum işleminin fiziki resmi Şekil 2.12'de görülmektedir. Deneysel çalışmalarında, Şekil 2.13'de görülen silindirik levha tekniğini kullanmışlardır. Bu teknik sayesinde tek bir deneyde değişen β çarpışma açısının etkisinin incelenmesi mümkündür. Çeliğin çeliğe kaynağı için bu teknik ve 2×10^4 viskozite oranı kullanılarak 2 ile 3.2 arasındaki Reynolds değerleri için laminardan dalgalı akışa geçiş bulunabilir ve dalga oluşumu 10 civarındaki Reynolds sayısına kadar devam eder.

Helmutz akış kararsızlığı mekanizması, patlamalı kaynak mekanizmasını açıklayan bir diğer mekanizmadır [19]. Reid'e [19] göre, Hunt [21], ileri fişkırmma ve alt levha arasındaki Helmutz akış kararsızlığının bir analizini verir. Bu mekanizma dalgaların yığılma noktasının başında oluştuğunu vurgular. Bu teorinin temel varsayımı, ileri fişkırmmanın alt levha ile temasta kalmasına dayanır. Hunt'ın [21] mekanizması kaynak düzenlemesinde özel bir asimetrikliğe bağlıdır ve simetrik düzenlemede, dalgasız yapı oluşur. Ancak böyle bir düzenlemede dalgalar ortaya çıkar ve bu, Reid'e [19] göre Hunt'ın [21] mekanizmasının yanlış olduğuna dair bir şüphe açığa çıkartır.



Şekil 2.12 Girdaplarla dalga formunun oluşumu [17]



Şekil 2.13 Yarı silindirik alt levhalı düzenleme [17]

Reid'in [19] ifade ettiği bir diğer mekanizma da, Godunov ve arkadaşlarının [22] öne sürdüğü gerilim dalgası yada başka bir deyişle seyrekleşme dalga mekanizmasıdır. Bu mekanizmada, yığılma noktasından çıkan sıkıştırıcı şok dalgaları üst levhanın serbest yüzeyinden yansıdığına oluşan seyrekleşme dalgalarının etkisi anlatılmaktadır.

Gupta ve Kainth [23], metallerin patlamalı kaynağında ara yüzey oluşumu için, hayali bir engelin arkasında gezinen iz mekanizması modelini geliştirmişlerdir. Yaptıkları çalışmada, dalga karakteristiklerinin tahmini için ve ara yüzey dalga oluşumunu açıklamak için, bu modeli kullanmışlardır. Sonuçta, bir kaynak ara yüzeyinin çarpılma miktarı iki malzemenin yoğunluklarının oranına bağlıdır ve farklı metal kombinasyonları için ara yüzey dalgasında dalga genliğinin dalga boyuna oranı benzer metal kombinasyonlarındakinden daha küçüktür.

Jaramillo ve arkadaşları [24] patlamalı kaynakta dalgasız bir ara yüzeyden dalgalı ara yüzeye geçişi incelemişlerdir. Yapmış oldukları bu çalışmada, bu geçişin çarpılma açısı β 'ya bağlı olduğunu ve malzeme özelliklerine bağlı bir elastik-plastik sabiti vasıtasıyla açıklanabildiğini ifade etmişlerdir.

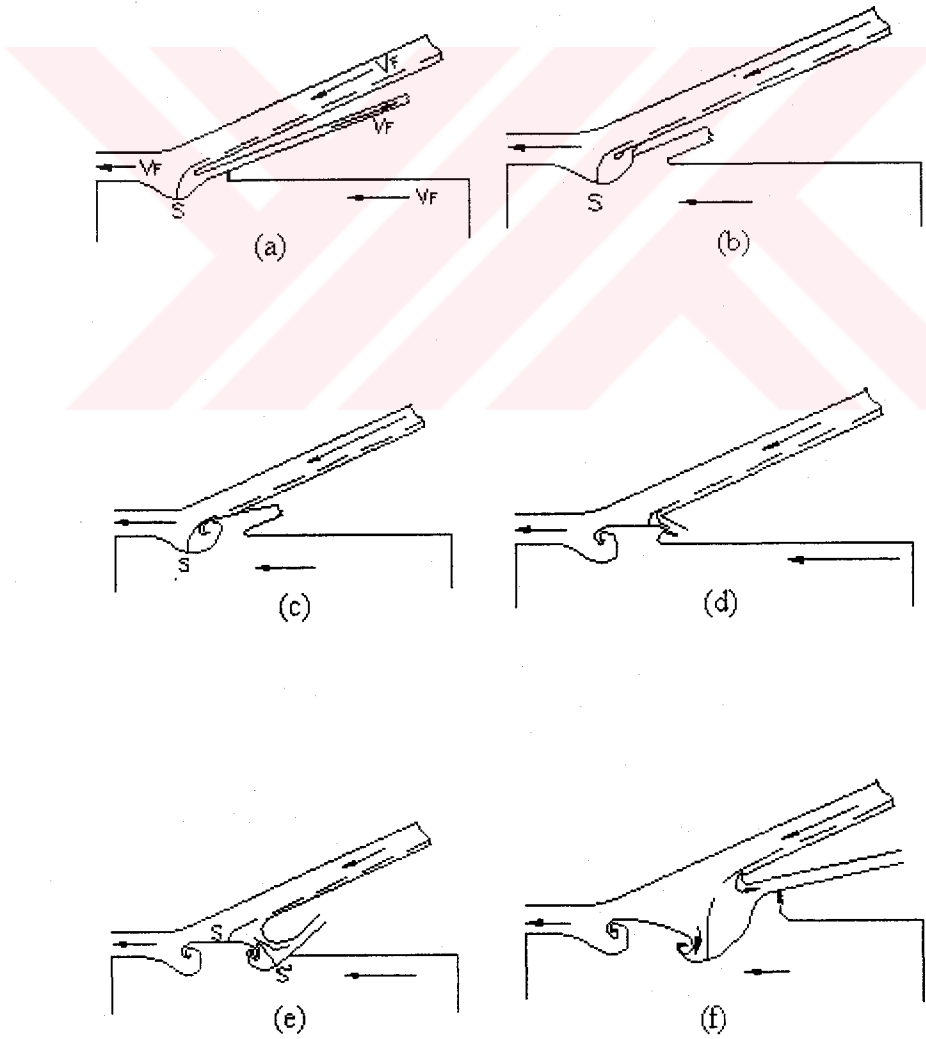
Patlamalı kaynak işleminde bütün parametreler uygun biçimde kontrol edildiğinde Şekil 2.14 'de gösterilen bir kaynak ara yüzeyi elde edilir. Patlamalı kaynak ara yüzeyinin dalgalı görüntüsü patlamalı kaynağın tek karakteristiğidir. Kaynak ara yüzeyinin bu ilginç görüntüsü patlamalı kaynağa olan ilgiyi teşvik eder. Dalga yapısının gelişimi fişkırmaya oluşumuna bağlıdır [13]. Dalga yapısının formasyonunu kontrol eden mekanizmanın detaylı analizi oldukça karmaşık ve zordur. Dalga modelinin gelişimi boyunca oluşan fiziki bir yaklaşım Şekil 2.15'de gösterilen grafik tanıtımından elde edilebilir. Şekil 2.15'deki şematik tanıtım adım adım kaynak ara yüzeyindeki dalga formasyonunun gelişimini göstermektedir. Bahrani ve arkadaşları [25] tarafından önerilen bu yaklaşım bir çok araştırmacı tarafından doğru olduğuna inanılan bir yaklaşımdır. Bahrani ve arkadaşları [25], nikelle kaplı çelik üst levhasını bakırla kaplı çelik alt levhaya birleştirmişlerdir. Şekil 2.15 (a), üst levha fişkırmasının momentumundan kaynaklanan alt levhanın deformasyonunun kombinasyonunu göstermektedir. Üst levha fişkırmasının momentumu, ileri fişkırmaya oluşturduğu alt levha yüzeyinin kesilmesiyle birlikte S'ye göre alt levhanın öne doğru hızıyla bağlantı kurulur. Sonuç olarak bir tepe çarpma noktasının başında oluşur. Bu tepe Şekil 2.15 (b) 'de gösterildiği gibi ileri fişkırmayı, üst levha



Şekil 2.14 Patlamalı Kaynakta Elde Edilen Dalgalı Ara Yüzey [26]

fişkırmasının yukarısına doğru saptırır ve eninde sonunda, Şekil 2.15 (c)'de gösterildiği gibi ileri fişkırmaya önünü tıkar. Bazen üst levha fişkırması dalğanın tepesine çarptığında kuyruğun yükselmesini sağlayan tepenin parçasını keser. Hapsolünmüş ileri fişkırmaya tepenin gerisinde bir girdap oluşturur. Burada, tutsak fişkırmaya kinetik enerjisinin dağılmasıyla muhtemelen yüksek sıcaklıklar oluşur ve bu lokal ergime ve faz değişimiyle sonuçlanabilir. İleri fişkırmaya tıkanıldığında yığılma noktası Şekil 2.15 (d)'de gösterildiği gibi dalğanın tepesinde baştan sona gezinir ve yığılma noktasıyla birleşen yüksek basınç bir sonraki gövde oluşması için tepeyi

sıkıştırır ve genişletir. Şekil 2.15 (e)'de gösterildiği gibi tepe aşağı doğru harekete devam ettiği için yığılma noktası tepenin ileriye doğru meyline azalır ve sonuç olarak ileri fişkırtma, fişkırtma ile tepenin eğimli kenarı arasındaki eğimin artan açısından dolayı artacaktır ve aynı zamanda ileri fişkırtmanın hızı azalacaktır. İleri fişkırtma tepenin meyline doğru azaldığı için ikinci bir yığılma noktası S noktasında oluşur ve fişkırtmanın parçası bir diğer girdaba sebep olan gövde altındaki boşluğa girer. Birinci dalga gövdesi altında oluşan girdabın ötesinde, ileri fişkırtma birinci dalganın baş tarafını süpürür ve Şekil 2.15 (f)'de gösterildiği gibi bir sonraki tepenin oluşumunu başlatır. Bu mekanizma ikinci ve daha sonraki dalgaların oluşumunu sağlayacaktır [25].



Şekil 2.15 Bahrani ve arkadaşlarına [25] göre dalga oluşumu

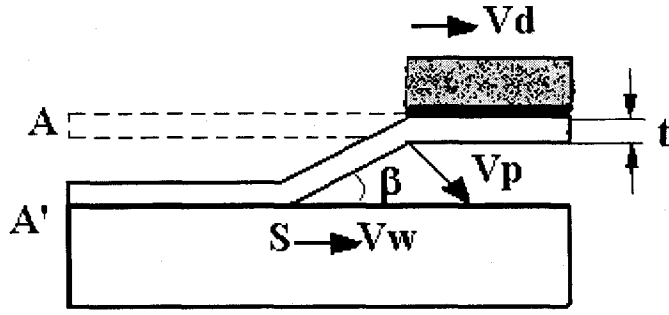
Bu mekanizmalardan ayrı olarak patlamalı kaynakla birleşme işleminden önce oluşacak ara yüzeyin yapısının tahmini için matematiksel modelleme de geliştirilmiştir. Abe Akihisa [27], patlamalı kaynakta dalga ara yüzey oluşum mekanizmasının nümerik analizi üzerine çalışmıştır. Çalışmada, dalga formu için nümerik bir yaklaşımdan bahsedilmektedir. Dalga ara yüzey oluşum işlemi elastik-plastik malzemeler için iki boyutlu sonlu farklar yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır. Sonuçlar dalga ara yüzey deformasyon işlemini ve nümerik ve deneysel sonuçlar arasında kalitatif bir uyuşma olduğunu göstermiştir.

Yukarıda verilen bilgiler doğrultusunda ve Crossland'in [5] ifadesine göre, patlamalı kaynak işleminde dalga oluşum mekanizması tam olarak çözülmüş yada anlaşılmiş değildir. Ancak birçok yöntemde Karman girdap yolu benzerliği dalga oluşum mekanizmasını muhtemelen açıklıyor görülmektedir. Bununla birlikte Karman girdap yolu benzerliği yeterli olsa bile, hala dalga boyu ve genliğinin tahmininde problemler vardır. Fakat bu problemin çözümü yada dalga oluşum mekanizması problemi ilgi çekici olsa bile, bu problemin çözümü patlamalı kaynağın pratik uygulamasının temelini oluşturmaz [5]. Ayrıca Bahrani ve arkadaşlarının [25] öne sürdüğü dalga oluşumu bir çok araştırmacı tarafından benimsenmiştir.

2.3 Patlamalı Kaynak Parametreleri

Kabul edilebilir nitelikte kaliteli kaynaklar elde edebilmek için kaynak işlemini kontrol altında tutabilecek parametrelerin belirlenmesi gereklidir.

Patlamalı kaynak işlem parametreleri İnal ve Zimmerly'e [28] göre bağımlı ve bağımsız olmak üzere iki gruba ayrılır. Şekil 2.16'de gösterilen bu parametrelerden ara boşluk mesafesi (s veya d), eğimli düzenlemelerde başlangıç açısı (paralel düzenlemeler için bu değer $\alpha=0^\circ$ 'dir), patlayıcının patlama hızı V_D , ve üst levha çarpma hızı V_P bağımsız parametrelerdir. Bağımlı parametreler ise, çarpışma açısı β , kaynak hızı V_w , ve çarpışma noktası S 'ye göre üst levha hızı V_F 'dir.



Şekil 2.16 Patlamalı kaynak işlem parametrelerinin şematik gösterimi [28]

Ezra [6], patlamalı kaynak parametrelerinin özel metal konfigrasyonu için bir takım deneylerden sonra belirlenebileceğini ancak deneysel yaklaşımın aşırı pahalı ve patlamalı kaynak uzmanların sayısının yetersiz olabileceğini ifade etmiştir.

Ezra'ya göre kaynak tekniği uygulamaları için patlamalı kaynağın önemli parametrelerinin

- Birleşecek malzemenin fiziksel ve mekanik özelliği,
- Kullanılacak patlayıcının miktarı ve tipi,
- İlk kaynak geometrisi olduğu kabul edilir.

Cowan ve Holtzman [14], patlamalı kaynağın tanımını yaparken, bir patlamalı kaynak işlemi için fişkırmının gerekli olduğunu ve fişkıрма olayının oluşması için de kritik levha çarpışma açısının aşılması gerektiği konusunda fikir birliğine varmışlardır.

Crossland [5], çarpışma açısının değişiminden dolayı, kaynak ara yüzey değişimlerini açıkça görüldüğünü ifade etmektedir. Çarpışma açısı arttığında, dalga ara yüzeyinin genliği maksimuma doğru artar. Çarpışma açısı daha fazla arttığında bu genlik sifira doğru azalır.

Ezra [6], birtakım bilimsel çalışmalarda, çarpışma ara yüzeyi boyunca çarpışma noktası hızının ses hızının altında olduğunda ve laminar dalgalı bir akış şekli ürettiğinde optimum kaynak kalitesinin elde edilebileceğini hedeflediğini ifade etmiştir. Uygun hidrodinamik denklemler ve yaklaşımlarla, laminar dalgalı akıştan

türbülanslı dalgalı akışa geçiş üretecek kritik çarpışma noktası hızının tahmin edilebilir olduğu görülmüştür.

Crossland'in [5] ifadesine göre, kabul edilebilir kaynaklar için Wylie ve arkadaşları [29], aşağıdaki parametreleri önermişlerdir.

1. Ses hızının altındaki bir hızda, fişkırmayı sınırlamasını engellemek için V_w/C_1 ve V_F/C_2 değerlerinin 1.25'den daha az olması gerekir. Burada C_1 alt levhanın, C_2 de üst levhanın ses hızıdır.
2. Çarpışma açısı, β , kaynak oluşumuna izin verecek değerde olmalıdır. β 'nin bu değeri yüzey filminin kalınlığına göre değişebilir. Blazynski'ye [30] göre, minimum çarpışma açısı, nikel/çelik için 4° ve titanyum/çelik için 7° dir. Eğer çarpışma noktası hızı, kesin bir değer altına düşerse kaynak ara yüzeyi düz olur. Bu, fişkırmayı engellenmiş kaçışıyla ilişkilendirilebilir. Artan çarpışma noktası hızıyla, tutsak fişkırmayı (dışarıya çıkamayan fişkırmayı) hacmi artar. Çünkü, çarpışma noktası yetişerek, fişkırmayı, geniş bir parçasını hapseder. Çarpışma noktasının başında hapsolmuş fişkırmayı, dalganın oluşumunu engelleyebilir. Böyle bir kaynak ara yüzeyi çok nadir tatmin edici birleşme sağlayacak ergimiş sürekli bir tabaka içerebilir çünkü metallerin yüzeyinde, orijinallerinde var olan, oksit filmlerini içermektedir. Bundan başka, metallerin bazı kombinasyonları için yüksek sıcaklık ve ergime iki metalin çok yakın karışımı gevrek metallere arası bileşenler verir.

Yine Blazynski [30], saf alüminyum ile D20 Alüminyum alaşımı arasındaki düz bir ara yüzey 300°C 'nin üzerinde kısa süreli yükleme testlerinde (15 dak.) en az D20 alaşımı kadar mukavim olduğunu ifade etmektedir. Bahrani ve arkadaşları [25] da, paslanmaz çelik / orta karbonlu çelik kaplamasında 850°C 'de 30 dakika için düz ara yüzeyin dalgalı bir ara yüzeyden daha güçlü olduğunu bulmuştur. Bunun nedeni de özellikle dalga tepelerinin etrafında kaynak ara yüzeyinin sergilediği daha büyük dekarbürizasyon derinliğidir.

- 3) V_p ile ilişkili minimum temas basıncı ara yüzeyde bir akış üretecek yeterlikte olmalıdır. Blazynski'ye göre her bir malzemede oluşan P basıncı

$$P = \ell U u \quad (2.18)$$

Denklemini ile bulunabilir. Burada;

ℓ = Malzemenin yoğunluğu

U = uzunlamasına ses dalgası hızına eşit, metale doğru, şok dalgasının hızı

u = Çarpma ile yer değiştirmiş yüzeylerdeki oranıdır.

Momentum'un korunumu kanunundan, V_p hızıyla çarpma iki farklı A ve B metali için, çarpma basıncı ;

$$P = P_A = P_B = \frac{P_A V_p U_A}{1 + P_A U_A / P_B U_B} \quad (2.19)$$

Benzer malzemeler için ($P_A = P_B = P$, $U_A = U_B = U$) bu denklem kısaltılırsa

$$P = \frac{1}{2} \ell \cdot V_p \cdot U \quad (2.20)$$

Sınırlı ampirik verilere dayanarak $P_{\min} \cong 10\delta$ (δ = daha mukavim bileşenlerin statik akma gerilmesi).

4. Kabul edilebilir bir kaynak için minimum çarpma hızının üzerinde, patlayıcı ile üst levhaya iletilen kinetik enerjinin birleştiği görülür. Kinetik enerji, dinamik akmaya sebep olan şekil değiştirme enerjisiyle ilişkilendirilebilir ve bu, iki metalden daha mukavim olanıyla da ilgilidir.

Blazyinski'ye [30] göre, yukarıda anlatılan patlamalı kaynak için gerekli basıncı ($P_{\min} \cong 10\delta$) oluşturacak minimum çarpma hızı;

- i) Farklı metaller için (a: Daha mukavim bileşenler varsayılarak)

$$V_{P_{\min}} \cong 10\delta_A \left[\frac{1 + P_A U_A / P_B U_B}{P_A U_A} \right] \quad (2.21)$$

ii) Benzer metallere;

$$V_{P_{\min}} \cong \frac{20\delta_A}{P_A U_A} \cong \frac{20\delta_A}{V(P_A E_A)}, \left(U_A \cong \sqrt{\frac{E_A}{P_A}} \right) \quad (2.22)$$

Burada $E_A = A$ 'nın Young modülü (elastikiyet modülü) metallerin çeşitli kombinasyonlarının kaynağı için hesaplanmış ve deneylerle belirlenmiş minimum çarpma hızları Tablo 2.1'de verilmiştir.

İdeal patlamalı kaynak şartlarına göre hesaplanan minimum değerlere göre;

- i) Üst ve alt levhaların çarpan yüzeyleri yabancı malzemelerden arındırılmış ve pürüzsüz olmalıdır.
- ii) Üst levha/tampon kalınlığı kritik bir periyottan daha fazlası için, çarpma basıncını muhafaza edecek (sürdürecekt) yeterlikte olmalıdır.
- iii) Destek sisteminin etkisi, alt levhanın hareketlerini minimize edebilecektir.
- iv) Çarpışma açısı, üst levha hızının normal bileşenini azaltacak kadar fazla (yüksek) olmaz.

Pratikte, patlayıcı yüklemesini minimize etmek, malzeme maliyetini düşürmek ve gürültü seviyesini azaltmak arzu edilirken, özellikle ticari kaplama işlemlerinde, değişik yüzey işlemleriyle kaynağın kararlılığının sağlanması istenilir. 2 mm ve daha üst kalınlıklarda çeşitli kaplama malzemeleri için (genelde çelik alt levha olarak kullanılır) ticari kaplamada kullanılan hızlar;

Bakır ve nikel bakırı	→	400 m/s
Paslanmaz çelik, nikel ve monel	→	440 m/s
Titanyum	→	600 m/s

Bu değerler Tablo 2.1’de verilen minimum seviyelerinden daha yüksektir. Gerçekte st levha hızları bazı durumlarda (rneğin; elik-elik) 1000 m/s’nin aşımında kullanılabilir.

Tablo 2.1 Kaynak için minimum kaynak hızı [30]

Metal Kombinasyonu	Yoğunluk kg/m ³	Akma Dayanımı (MN/m ²)	V _{p (min)} (m/s)	
			Hesaplanan	llen
Alüminyum/Alüminyum	2700	35	41	
6061-T651 Al alaşımı / 6061-T651 Al alaşımı	2700	276	319	270
Bakır/Bakır	8960	150	68	200
				130
				240
elik/elik	7870	200	85	90
				120
				125
				165
				130
Titanyum115/Titanyum115	4500	250	182	220
Molibden/molibden	10200	400	123	
Alüminyum/titanyum	2700/4500	35/250	236	
Alüminyum/elik	2700/7870	35/200	158	460
		35/470	372	
Titanyum/elik	4500/7870	250/200	144	200
Nikel/elik	8900/7870	150/200	81	200

- Paralel kaynak dzenlemedesinde alt ve üst levha arasındaki boşluk, levhaların maksimuma ulaşmasını sağlayacak şekilde üst levha kalınlığının yarısını aşmalıdır. Blazynski [30], ara boşluk mesafesi için şu yorumu getirmektedir; Başlangıçta st levha patlama basıncı ile oluşan bir şok dalgası ve yine patlama ile oluşan gazın genleşmesiyle hızlandırılır. Eğer alt ve üst levha arasındaki boşluk mesafesi yeterince geniş ise, üst levha Gurney denklemi

yaklaşımı ile verilen bir hıza (son hız) ulaşacaktır. Normal kaplamada, patlama önü, üst levha düzlemi ile paralel hareket ederken terminal hız (son hız) patlama önünün patlayıcının yedi kat hacminde, gaz genleşmesine sahip olduğu anda oluşur. Özel durumlarda, örneğin, patlamalı nokta kaynağında, patlama önü, üst levha yüzeyinin normalinde hareket ederken son hız patlama önünün patlayıcının iki kat hacminde gaz genleşmesine sahip olduğu anda oluşur. Yapılan çeşitli araştırmalara göre kabul edilebilir bir hızlanmaya 0.5 mm'lik bir yer değiştirmeden sonra ulaşabilmesine rağmen, teorik olarak geniş hızlanma mesafelerine (25 mm veya daha fazlası) ihtiyaç duyulur. Çoklu levha kaplamalarında üst levha mesafesindeki artış ile dalga genişliğindeki artış daha geniş ara boşluk mesafesini kullanılarak elde edildiği görülmüştür.

V'_p terminal (son) hızın oranını elde etmek için arz edilen ara boşluk mesafesi (S);

$$S=3kX_e C/M \quad (2.23)$$

Burada $k \cong 0.4$ ve $\cong 0.7$ (%70'lik ve %100'lük V'_p nin çarpma hızları için), X_e ; patlayıcı kalınlığı, C; patlayıcı kütlesi ve M; üst levha kütlesidir. Normal kaplama işlemlerinde pratik %70 V'_p daha uygun olacaktır".

Yine Blazynski'nin [30] ifadesine göre, kaplama işlemleri için ara boşluk mesafesinin minimum değeri;

$$S=0.2(X_e+X_f) \quad (2.24)$$

Denklemlerle elde edilebilir. Burada X_f , üst levhanın kalınlığıdır. Bazı paralel kaplama durumlarında, çarpışma noktası hızı arttırılmaksızın çarpışma açısının arttırılmasıyla dalga formunun geliştirilmesi arzu edildiğinde, ara boşluk mesafesi 2.24 numaralı denklemdekinden daha geniş olarak kullanılabilir.

Böyle anormal geniş ara boşluk mesafesi; delme kuvvetlerini ve köşe etkilerini minimize etmek önemli olduğunda arzu edilir. Eğer üst levha bir sürücünün çarpışmasıyla hızlandırılıyorsa terminal (son) hızı elde etmek için arzu edilen ara boşluk mesafesi 2.23 ve 2.24 denkleminde verileninkinden daha küçüktür [30].

6. Genelde yüksek patlama hızlı patlayıcıların kullanılmasından sakınılmalıdır. Çünkü üst levhalardan oluşan çok yüksek basınç, yansıyan bir gerilme dalgası üretebilir. Bu da dönüşte (yansımada) üst levhaların kalınlığının yaprak yaprak dökülmesiyle azalmasına yol açabilir. Blazynski'ye [30] göre, çeşitli şartlara uygun üst levha hızını arttırmak için matematiksel denklemlerden yüklenecek patlayıcı miktarı hesaplanabilir. Bu denklemler üst levhanın son hızını verir ve bu yüzden yeterli bir ara boşluk mesafesinin kullanımı belirsizdir. Patlayıcıların kapatılmadığı (örtülmediği) düzlem geometri için Gurney ilişkisi;

$$V_p' = \sqrt{(2E)} \left(\frac{\sqrt{3}}{1 + 2M/C} \right) \quad (2.25)$$

Burada M; tampon tabakayı da içeren üst levhanın yüzde birim alan kütlesi, C; patlayıcının kütlesi yüzde birim alan, E; oluşan patlamanın kinetik enerjisi yüzde birim kütle ve $\sqrt{(2E)}$; Patlayıcı ve geometri için karakteristik Gurney hızıdır. Tablo 2.2'de bazı patlayıcıların Gurney hızı ($\sqrt{(2E)}$) görülmektedir. Burada kinetik enerji, patlamanın ölçülmüş ısısının (ΔH_d) % 75'idir. Bu anlatım aşağıdaki denklemle ilişkilendirilecek olursa;

$$V_d = \sqrt{(2\Delta H_d (\gamma^2 - 1))} \quad (2.26)$$

burada γ patlama oluşumunun adiyabatik üstelidir.

Yukarıdaki ilk iki denklem 2.25 ve 2.26 numaralı denklemler kombine edilirse;

$$\frac{V_p'}{V_d} = \frac{1.5}{\sqrt{(\gamma^2 - 1)}} \left(\frac{1}{1 + 2M/C} \right) \quad (2.27)$$

denklemin elde edilir. Kompozisyon B patlayıcısı için bir örnek verilirse, $\gamma = 2.7$

$$\frac{V_p'}{V_d} = \frac{0.60}{1 + 2M/C}$$

Bu denklemin nümerik sabiti V_d arttığı için genelde artış gösterir. Çünkü γ , V_d ile artışa meyillidir. Eğer patlayıcı, N kütleli (birim alana) parçalanmayan bir iç malzeme ile örtülürse, modifiye edilmiş Gurney denkleminde göre patlayıcı miktarı azaltılabilir.

$$V_p' \cong \sqrt{(2E)} \left(\frac{1 + A^3}{3(1 + A)} + \frac{N}{C} A^2 + \frac{M}{C} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (2.28)$$

Patlayıcının kapalı olmasının kaçınılmaz olduğu durumlarda bu denklem oldukça uygundur [30].

Tablo 2.2 Modifiye edilmiş Gurney denklemleri patlayıcı sabitleri [30]

Patlayıcı	Patlama Hızı (m/s)	Patlayıcı Yoğunluğu (g/cm ³)	$\sqrt{(2E)}$ (m/s)
Detasheet 'D'	7200	1.40	2700
Pentolite	7470	1.66	3170
TNT	6700	1.56	3100
Anfo (% 6 fuel oil)	2540	0.82	1600
Trimonite No.1	3000	1.1	1240

7. Normalde altlığın kaynak kalitesinde hiçbir etkisi olmadığı görülebilir. Ancak pratikte ürüne hasar verecek etkiye sahip olduğu ve ürünün çarpılma miktarına etkilediği görülmüştür. Blazynski [30], eğer altlık alt levhasının alt kenarı ile temas etmiyorsa yada altlık akustik bir iç dirence sahip ise, gerilme dalgası alt levha / altlık ara yüzeyinde yükselecektir ve alt ve üst levhayı ayırmaya meyilli olacağını ifade etmiştir. Yine Blazynski [30], çelik altlık kullanılabileceği gibi kum altlık üzerinde de patlama ile birleştirme işlemleri yapılabileceğini ifade etmiştir. Otto ve Carpenter [31], geniş ölçekli çelik

levhaların kurşunla kaplanması patlamayla sıkıştırılmış kum altlık kullandıklarını ifade etmişlerdir.

Blazynski [30], yüzey pürüzlülüğü durumunun da kaynak kalitesine etki ettiğini ifade etmiştir. Yüzey durumu bazı nedenlerden dolayı önemlidir. Birincisi, yüzey pürüzlerinin ölçüsü, kaynak ara yüzeyinde fişkırmının kinetik enerjisi ısıya dönüştüğü için tutsak fişkırmının ve ergimenin derecesini belirler. İkincisi eğer dalga boyutu yüzey pürüzlerinin boyutu ile karşılaştırıldığında küçük kalıyorsa, dalga formunun gelişimi imkansız olacak ve normal miktarlardaki ergimenin dağılımı tahmin edilemeyecektir. İkinci durumda, eğer düz bir birleşme ara yüzeyi isteniyorsa pürüzlerin yüksekliğini aşacak fişkırmayla alt ve üst levha kalınlıklarından bir miktar alınması (talaş kaldırılmasını) sağlamak gerekir. Bu yüzden bütün bu durumlarda dalga ve fişkırmayla ölçülerini artırmak için patlayıcı miktarının artırılmasıyla yüzey pürüzlülüğün etkisi bir parça azaltılabilir. Pürüzlü yüzey ile elde edilen kaynağın kalitesi, pürüzsüz yüzeyle elde edilen kaynağa göre daha kötü olacaktır. Kaynak kalitesindeki bu farklılık, zirkonyumun paslanmaz çeliğe ve alüminyumun maryaşlandırılmış çeliğe patlamalı kaynağında daha belirgin göze çarpar. Artırılmış patlayıcı miktarı, artan maliyet ve patlama sesinden dolayı arzu edilmez. Üçüncü olarak, bir yüzey hazırlama metodu işleme sertliğini belirleyebilir. Yüksek oranda yansıtıcı yüzeyler parlatmayla elde edilebilir. Fakat düşük patlayıcı miktarı kullanıldığında oluşan ara yüzey sertliği kaynağı etkileyebilir. Parlatılmış tabakanın zımpara ile kaldırılması kaynak için daha uygun bir şartta yüzeyi terk edebilir. Düz bir yüzey kullanmanın bir faydası da yağ, su ve pas gibi yüzey filmlerinin fişkırmayla ara yüzeyden kolayca atılmasıdır. Sonuç olarak, eğer ideal kalitede bir kaynak elde edilmek isteniyorsa, kaynaklanacak yüzeyler mümkün olduğu kadar pürüzsüz olmalıdır. Kabul edilebilir bir kaynak kalitesi 2-3 μm 'lik yada daha iyi bir yüzey durumu ile elde edilebilir. Crossland'ın [32] ifadesine göre, Shribman ve Crossland'ın [33] yapmış oldukları bir çalışmada amonyum nitrat, TNT ve atomize alüminyumdan oluşan Trimonit 1 patlayıcısı kullanılarak artan üst levha kalınlığıyla birlikte değişen parametreleri ortaya koymuşlardır. Tablo 2.3'de bu parametreler görülmektedir.

Tablo 2.3. Trimonit 1 patlayıcısı ile patlamalı kaynak parametreleri [32]

Üst Levha Kalınlığı t, mm	Üst levha hızı V_p , m/s	Kinetik enerji KE, J/cm^2	Patlayıcı miktarı R	Patlayıcı kalınlığı mm	Patlama hızı V_D , km/s	β
2	440	150	0.77	11.0	2.61	9.7
4	310	150	0.4	11.4	2.63	6.8
6	250	150	0.24	12.6	2.69	5.4
8	218	150	0.22	14.2	2.81	4.4
10	200	158	0.21	15.0	2.88	4.0
12	200	190	0.21	18.1	3.04	3.8
16	200	252	0.21	24.1	3.23	3.6
20	200	316	0.21	30.1	3.38	3.4
24	200	380	0.21	36.1	3.50	3.3
28	200	442	0.21	42.0	3.60	3.2

Ezra [6], patlamalı kaynak parametreleri konusunda yapmış olduğu literatür çalışmasında şu sonuçlara varmıştır. Daha kesin metotlar yada formüller gelişene kadar, patlamalı kaynak parametrelerinin seçiminde, levha hızının belirlenmesi için her uygulamalı kaynak geometrisi için kritik levha çarpışması kriterini ampirik metotlar için yaklaşık hesapları kullanılması tercih edilir. Bu metot optimum kaynakla sonuçlanacak parametrelerin elde edilmesini engellemez fakat sadece arka arkaya gelen deneylerle geliştirilecek olan şartların uygun kurulmasını sağlar. Ezra'nın [6] ifadesine göre, kaynak parametreleri aşağıdaki sıralanan mantıkla belirlenebilir:

1. Kaynak uygulama derecelerinin gereksinimlerinin derecesini düşünmek gerekmektedir. Kaplanacak alan geniş ise, paralel geometri istenir. Eğer değilse, kayıtlı açı geometrisi kullanılmalıdır.

2. Eğer paralel geometri kullanılırsa birleştirilecek iki malzemenin, ses hızından daha yavaş olanının $1/2$ 'si yada $2/3$ ses hızı civarındaki patlama hızına sahip patlayıcı kullanılmalıdır.

3. Eğer kayıtlı açı seçilirse, levhanın ses hızının $1/2$ 'sinden $2/3$ ' ne kadar bir çarpışma noktası hızı üretecek bir patlama hızına sahip, bir patlayıcı kullanılmalıdır.

4. Paralel geometri için (s) ara boşluk mesafesi yaklaşık olarak aşağıdaki gibidir; (t; üst yada kaplama levhasının kalınlığı)

- a) $t/3 < s < 2t/3$
- b) $t/2 < s < t$
- c) $2t/3 < s < 2t$

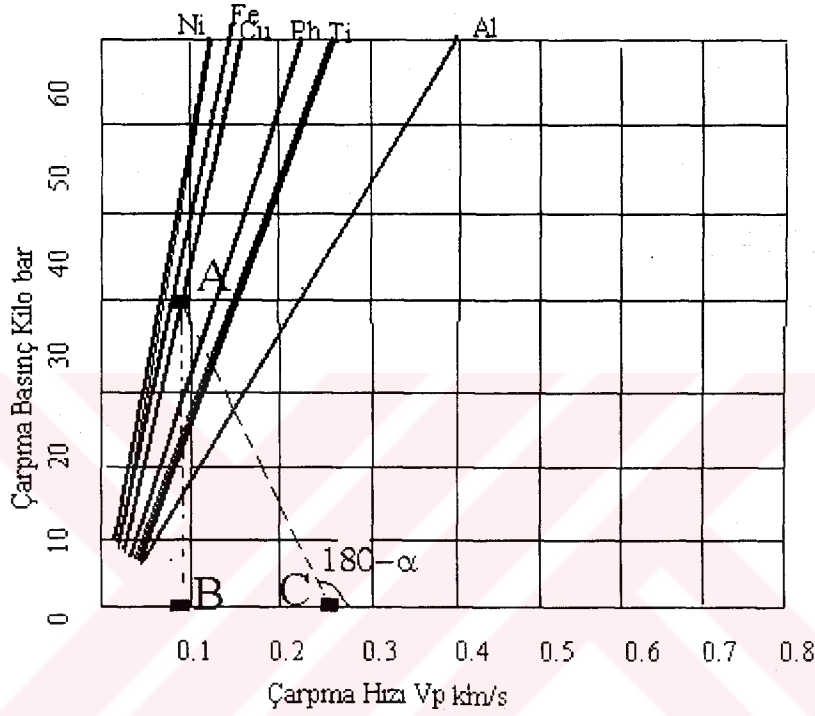
5. Sabit bilgilerden elde edilen denklemlerden, levha çarpma hızını (V_p) hesaplamak. Şekil 2.17' deki gibi basınç-çarpma hızında durum verisine sahip olmak kullanışlıdır.

Bu şekilden çarpma hızı ve üst levha (kaplama levhası) çarpma hızını elde etmek için arzu edilen çarpma basıncına eşit bir ordinata sahip üst levha malzemesi için eğrideki noktayı bulmak gerekir (örneğin Şekil 2.17' deki A noktası). Bu noktanın karşılık apsisi parça hızını verecektir. Çarpma basıncını verecek üst levhanın çarpma hızı V_p yi bulmak için alt levhanın malzemesi için eğrinin eğimi olan α nın olduğu yerdeki $\tan(180^\circ - \alpha)$ nın bir eğrisiyle bu noktaya bir doğru çizilir. Bu C noktası (Şekil 2.17) arzu edilen üst levha çarpma hızı V_p yi verir. Alt levha için malzemenin üst levhayla aynı olduğu yerde parça hızı üst levhanın çarpma hızının (V_p) yarısı olacaktır.

6. Gurney metodu kullanılarak birim alan başına düşen patlayıcı miktarını hesaplamak. Böylece hesaplanan çarpma hızının % 120 sine düşen, bilinen levha kütle % birim alanını hızlandıracaktır. % 20 aşırı hız şekli seçilir. Çünkü çarpma üst levha terminal hızı ulaşmadan önce hızlandığında vuku bulur. Kayıtlı açı geometrisi için patlayıcının aşırı yükleme faktörü kaynağa karşı bir zarar olmaksızın % 50 kadar olabilir.

Crossland'in [5], yapmış olduğu literatür taramasında, değişik yazarlar tarafından ideal patlamalı kaynak için kaynak pencereleri çıkarttıklarını ifade etmektedir. Şekil 2.18'de çarpışma açısı (β) ve kaynak hızına (V_w) bağlı (V_w/β düzlemi) olarak değişen kaynak pencereleri görülmektedir. Şekilde kesik çizgiler Szecket [34]

tarafından yapılan deneysel kaynak penceresini göstermektedir. 1 numaralı çizgi, süpersonik bölgede fişkırmamanın sınırlarını, 2 numaralı çizgi, Deribas ve arkadaşlarına [35] göre kaynak için daha alt sınır eğrisini; 3 numaralı çizgi, Wittman'a [36] göre daha üst sınır eğrisini; 4 numaralı çizgi, Deribas ve arkadaşlarına [35] göre daha üst sınır eğrisini ve 5 numaralı çizgi düz ve dalgalı akış arasındaki geçişi göstermektedir.

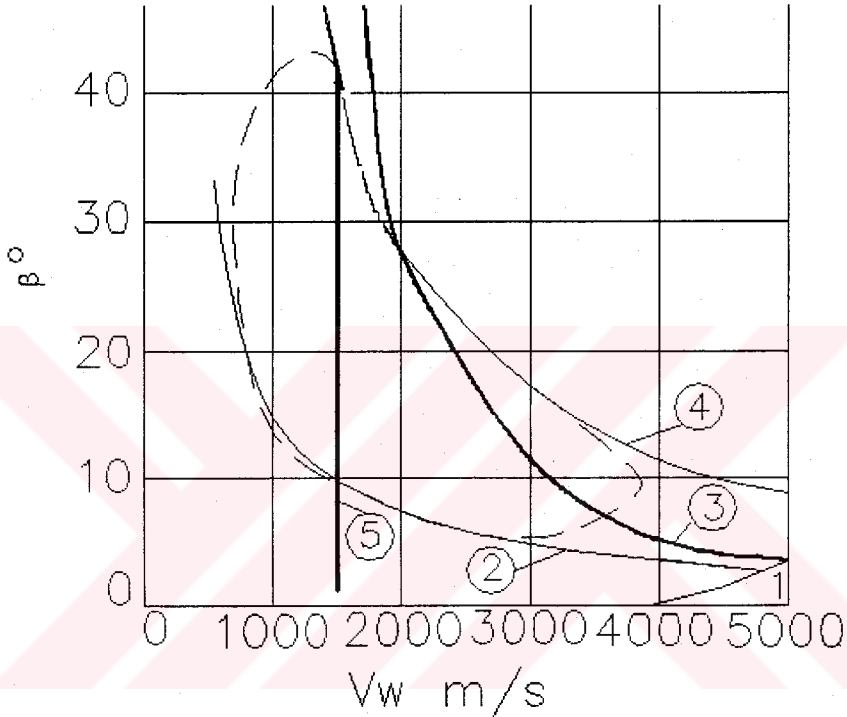


Şekil 2.17 Çarpma basıncı ve parça hızları arasındaki ilişki [6]

Özel bir patlayıcıyla bazı deneylerden sonra 400 Mpa' dan 600 Mpa' ya kadar olan sıradaki akma dayanımı bir çok metaller için çarpma basıncının dolaylı hesaplanması ihtimali olur. Özel bir levha için kullanılacak patlayıcı yüklenmesi, yani m/c (burada m ; üst yada kaplama levhasının kütlesi ve c de; patlayıcının kütlesi) değerinin kaynağı üreteceği açıktır”.

Balasubramanian ve arkadaşları [37], orta karbonlu çelikte alüminyumun patlamalı kaynağında işlem parametrelerinin modellenmesi üzerine çalışmışlardır. Patlamalı kaynağın etkili kullanımı için dalga geometrisinin daha önceden tahmin edilmesinin esas olduğunu ifade eden yazarlar, deneylerin tasarımı için faktoriyel tekniği kullanılmışlardır. Balasubramanian ve arkadaşlarının [37] yapmış oldukları bu

çalışmada, modellemenin geliştirilmesinde Regression analizi ve dalga ara yüzey geometrisindeki işlem parametrelerinin ana ve ara etkisini belirlemek için varyans analiz metodu kullanılmıştır. Sonuç olarak faktoriyel tekniğinin bu amaçla kullanımının uygun olduğunu ve böyle modelleme tekniği kullanımının, patlamalı kaynak işlemi boyunca oluşan ara yüzeyi kontrol etmek için, güçlü bir yöntem olduğu vurgulanmaktadır.



Şekil 2.18 Patlamalı kaynak penceresi [5]

Vaidyanathan ve Ramathan [38], patlamalı kaynak sisteminin bilgisayar destekli tasarımı için bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada, patlamalı kaynak sistemlerinin optimum tasarımı için bir işlem amaçlanmıştır. Bu işlem, kabul edilebilir güçlü kaynaklar üretmek için patlamalı kaynağın temel gereksinimlerine bağlıdır. Pratik önemi olan parametrelerin optimum değerlerinin belirlenmesi için bir bilgisayar programı geliştirilmiştir. Bu program hem doğru patlayıcıyı ve yüklenecek patlayıcı miktarını hem de işlem sonunda ortaya çıkacak ara yüzeyin tahminini yapmaktadır.

Yukarıdaki ifadelerden anlaşılacağı gibi, patlamalı kaynak işleminde kaynak kalitesine etki eden faktörler vardır ve dolayısıyla bu faktörlerin değiştirilmesiyle kaynak kalitesinde de değişimler olacaktır. Özetlemek gerekirse bu parametreler;

1. Ara boşluk mesafesi (s),
2. Eğimli düzenlemelerde başlangıç açısı (paralel düzenlemeler için bu değer $\alpha=0'$ dır),
3. Patlayıcı oranı (R) (patlayıcı kütlelerinin üst levhaya oranı)
4. Patlayıcının patlama hızı V_D ,
5. Üst levha çarpma hızı V_P
6. Çarpışma açısı β ,
7. Kaynak hızı V_W ,
8. Çarpışma noktası S'ye göre üst levha hızı V_F ,
9. Birleştirilecek malzemelerin özellikleri ve
10. Altlık olarak sıralanabilir.

2.4 Patlayıcılar

Patlayıcılar katı, sıvı ve gaz halde bulunabilir. Kimyasal reaksiyon hızına bağlı olarak, düşük ve yüksek patlayıcılar olmak üzere iki genel kategoriye ayrılırlar. Düşük patlayıcılar, patlama ile metallerin şekillendirilmesinden ziyade silah ve roketlerde kullanılır.

Yüksek patlayıcılar birincil ve ikincil patlayıcılar olarak ikiye ayrılır. Patlamalı metal şekillendirmesi için enerji kaynağı olarak ikincil patlayıcılar kullanılır. İkincil patlayıcılar birincil patlayıcılardan daha fazla patlama enerjisine sahiptir. Fakat daha az hassastırlar ve sadece ani şokla patlatılabilir.

Katı haldeki yüksek patlayıcının patlaması boyunca patlama dalgası başlangıç noktasından patlayıcı boyunca hareket ederek katı haldeki patlayıcıyı birim alana binlerce kg'lık ani bir basınçla aynı hacimdeki gaz külesine dönüştürür ve büyük miktarlarda ısı açığa çıkar. Bu yüksek sıcaklığın genleşmesi yapıcı yada yıkıcı amaçlar için kullanılabilen enerjiyi sağlar. Farklı tip patlayıcılar birim kütle başına

farklı enerji miktarları açığa çıkartırken bir çok ikincil patlayıcılar yaklaşık 1370000 J'lik (Nm) patlama enerjisine sahiptir.

Aşağıda patlamalı kaynak ve patlama ile şekillendirmede kullanılan patlayıcılar ve özellikleri verilmiştir.

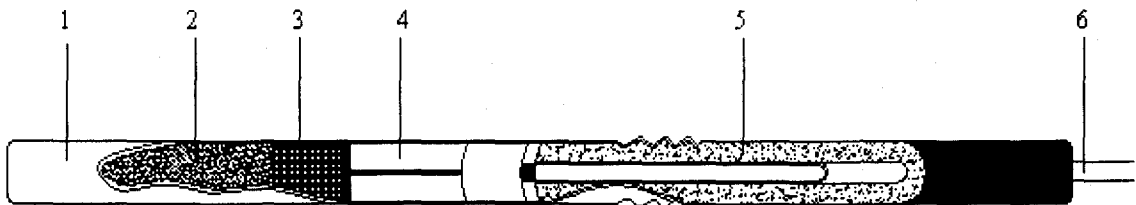
1. TNT (Trinitrotulene): Askeri bir patlayıcıdır. Ve diğer toz patlayıcıların ölçümünde kullanılır. 7000 m/s'lik patlama hızına sahiptir. Suda çok az çözünür ve nem geçirmez ambalaj olmaksızın su altı çalışmaları için kullanılabilir. Patladığında zehirli gaz açığa çıkarttığı için kapalı alanlarda kullanılmamalıdır. Hassas olmamasından dolayı çok güçlü bir patlayıcı kapsüle gerek duyulur.
2. RDX (Cyclotrimethylene-Trinitramine) : Saf RDX 204°C'de erir ve 1.816 g/cm³ yoğunluktadır. Daha yüksek yoğunlukta döküm yada presleme ile elde edilebilir. Diğer patlayıcılarla bir miktarda kombinasyon halinde kullanılabilir. Higroskopik (sudan etkilenmeme veya nem kapmama özelliği) değildir ve suda çok az çözünür. Saf halde ıslak olarak yüklenebilir. Patlama hızı 8384 m/s dir.
3. PETN (Pentaerythritol-Tetranitrate): Saf PETN 141.3°C'de erir ve 1.765 g/cm³ lük bir yoğunluğa sahiptir. RDX gibi PTEN'de higroskopik değildir ve suda çok az çözünür. Diğer patlayıcılarla kombinasyon halinde kullanılabilir. Ticari olarak levha halinde bulunur. Mükemmel bir depolama ömrü vardır fakat kuru halde tutulmalıdır. Su altı patlamaları için kullanılabilir. Patlama hızı 8292 m/s'dir.
4. C3-C4 Kompozisyonu: İstenilen şekle elle modellenebilen plastik patlayıcılarıdır. C3 %77 RDX ve %23 mononitrotluene içeren patlayıcı ve plastik yapıcı (yumuşatıcı) karışımıdır. 1.60 g/c³ yoğunluklu sarımsı bir macundur. Çarpma için RDX'den daha az hassastır ve TNT hassasiyetine eşittir. Patlama hızı 8621 m/s'dir. Çok az higroskopiktir fakat gücü sudan etkilenmez. C3 kompoziti aşırı derecede zehirlidir. C4 kompoziti çarpma için C3'den daha az hassasiyettedir. 8000 m/s'lik bir patlama oranına sahiptir. C3'den daha iyi bir depolama ömrüne

sahiptir. Ne higroskopik ne de zehirli değildir. Bundan dolayı da özel önlemlere gerek duyulmaz. Elle herhangi bir şekle göre şekillendirilebilir fakat geniş ebatlarda şeklini korumak için taşıyıcıya ihtiyaç duyulur [6].

5. Anfo (Amonyumnitrat-%6 fuel oil): Anfo, fuel oil ve amonyum nitrattan oluşan bir karışımdır. Teorik olarak oksijen dengesi için fuel-oil miktarı %5.7'dir. Ancak genelde %6 kullanılır. Anfo, fazla miktarlarda kullanım için betoniyer karıştırıcılarında karıştırılır. Küçük miktarlarda ise plastik bir kap içerisinde elle karıştırılır. Eğer karışımdan sonra, patlayıcı kapalı ortamda tutulmazsa fuel-oil buharlaşır. Bu nedenle anfonun 24 saat içerisinde tüketilmesi gerekir [5].

Barutun patlatılması bir alevin temasıyla sağlanabilir. Diğer patlayıcı maddelerde ise alev ile birlikte kuvvetli bir darbe veya basınca gerek vardır. Bu görevi ise kapsül yerine getirir.

Kapsül içinde, az miktarda, çok kolaylıkla patlayabilen bir madde bulunur. Kapsülden beklenen kendisinin bir iş görmesi değil, sadece birlikte bulunduğu patlayıcı maddeyi patlatmaktır. Kapsülde patlayıcı madde olarak TNT veya benzeri bileşim kullanılır. Bu bileşimi de patlatabilmek için üst kısımda daha duyarlı patlayıcı madde bulunur. Bunlar civa fülminatı $Hg(CNO)_2$, Gümüş fülminat $AgCNO$, Kurşun asidi $Pb(N_3)_2$, gümüş asidi AgN_3 gibi çok kuvvetli patlayıcı maddelerdir. Bunların her türlü vurma, ezilme, şekil değiştirme veya ısınma gibi dış etkenler altında kolayca patlamaması için metalik tüp içine konulmuştur (Şekil 2.19) [39].



Şekil 2.19 Patlayıcıların patlatılmasında kullanılan kapsül [39].

Şekil 2.19'da kesiti görülen kapsül aşağıdaki kısımlardan oluşmuştur;

1. Görünen kısım alüminyumdan silindirik bir kabuktur.
2. Ana şarj; kapsüle gücü veren yüksek patlayıcı.
3. Birinci şarj; aleve duyarlı madde.
4. İstenen gecikme, bir alüminyum tüp (gecikme elemanı) ile sağlanır.
5. Kapsül, aynı zamanda tüpün bir kısmını sudan koruyacak olan lastik koruyucu tıpa ile kıvrımlı bir şekilde sıkıştırılmıştır.
6. Serbest ucu su sızdırmaz şekilde tıkalı, belirlenen uzunlukta olan tüp.

2.4.1 Türkiye'de üretilen patlayıcı maddeler ve kullanma yerleri

Türkiye'de Makine Kimya Endüstrisi Kurumunun (MKE) Elmadağ patlayıcı maddeler fabrikasında (Barutsan A.Ş.), değişik işler için kullanılmak üzere çeşitli tipte patlayıcı maddeler yapılmaktadır. MKE fabrikalarında yapılan patlayıcı maddeler genellikle 25-30 mm çapında ve 100-200 mm uzunluğunda silindir halinde piyasaya sürülmektedir. Kartuş veya lokum ismi verilen dinamitler 2.5 kg'lık karton kutular veya 25-30 kg'lık tahta sandıklar içinde alıcılara teslim edilir. Açık işletme ve taş ocakları için daha büyük boyutta olanlar da yapılmaktadır.

Tüketicinin değişik şartlarda kullanacakları patlayıcı maddeleri birbirinden ayırt edilebilmesi için bunların farklı renkteki ambalajlara sarılması uluslararası anlaşmalarla standartlaştırılmıştır. Tablo 2.4 ülkemizde üretilen patlayıcı maddeleri göstermektedir.

Ülkemizde patlayıcılar genellikle çok sert kayaların küçük parçalar haline getirilmesinde, taş ocaklarında ve maden kömürü ocaklarında kullanılmaktadır [39].

Tablo 2.4. Türkiye’de Üretilen Patlayıcı Maddeler ve Özellikleri [39]

Tipi	İsmi	Patlama Hızı m/s
Gom dinamitler	Gom I	7900
	Gom II	7600
	Gom II-A	7200
	Kara Gom II-A	7025
Jelatin Dinamitler	Jelatin	7025
	Kara jelatin	6975
	Jelatin-A	6375
	Jelatin-B	6300
	Amon jelatin-A	6375
	Amon jelatin-E	6250
	Kara Amon jelatin-E	6200
	Jelatinit	6225
	Kara Jelatinit	6175
	Gamzit	6175
	Kara Gamzit	6175
Yarı Jelatin ve toz dinamitler	Grizutin klorür-I	5260
	Grizutin Roş	6150
	Grizutin Roş-I	5800
	Grizutin Kuş	4425
	Grizutin Kuş-I	4300
Toz dinamitler	Elmonit I	4900
	Elmonit II	4950
	Elbar	4200
Barut	Kara barut	400

Patlamalı kaynak tekniği ile ilgili yapılan bazı bilimsel çalışmalarda ve patentlerde kullanılan patlayıcılar aşağıdaki gibi sıralanmıştır.

Hokamoto ve arkadaşları [40], alüminyum alaşımlarını paslanmaz çeliğe patlamalı birleştirmede amonyum nitrat esaslı toz patlayıcı kullanmışlardır. Mamalis ve arkadaşları [41], titanyum-nikel patlamalı birleştirmesinde içerisinde %78 amonyum nitrat, %20 trinitrotoluen ve %2 dinitrotoluen bulunan Poxit 4 adlı patlayıcı kullanmışlardır. Bement [42], alüminyum alaşımları, bakır ve titanyumun birbirleriyle patlamalı birleştirmelerinde Ribbon RDX patlayıcısını kullanmıştır. Otto ve Carpenter [31], çelik levhayı kurşunla patlamalı kaplanmasında %40 jelatinit dinamit ve amonyum nitrat fuel oil (anfo) karışımını kullanmışlardır. Bhalla ve Williams [43], çelik tel takviyeli alüminyum kompoziti üretiminde trimonite tozu kullanmışlardır. Büyük çoğunluğunu nitrik esterin oluşturduğu (SEP) plastik patlayıcısı, Nishida ve arkadaşları [44] tarafından kullanılmıştır. Hokamoto ve arkadaşları [45], metal esaslı kompozit üretiminde patlayıcı olarak amonyum nitrat kullanmışlardır. Johnson [46], ısı değiştiricilere tıpanın patlamalı kaynağında nitroguanidin patlayıcısını kullanmışlardır. Truetnev ve arkadaşları [47], alüminyumun titanyum, çelik ve nikel patlamalı kaynakla birleştirilmesinde

amonyum nitrat ve amonit 6ZhV karışımı toz patlayıcısı kullanmışlardır. Zimmerly ve arkadaşları [48], amonyum nitrat-%6 fuel oil (anfo) toz patlayıcısını kullanmışlardır. Livne ve Munitz [49], demir ve çelik levhaların birleştirilmesinde trinitrotoluen ve amonyum nitrat (TNT+NH₄NO₃) karışımı toz patlayıcısı kullanmışlardır. Persson [50], 4925084 nolu patentinde PETN, HMX patlayıcılarını kullandığını ifade etmiştir. Araki [51], 3813758 nolu patentinde % 10 tetronitromethyloniline-%90 amonyum perchlorate, %75 tetronitromethyloniline-%25 sentetik resin paste ve %2 tetronitromethyloniline-%98 amonyum perchlorate patlayıcılarını kullandığını belirtmiştir.

2.4.2 Metallerin kaynağı ve şekillendirilmesi için patlayıcılarda aranan özellikler

Metallerin şekillendirilmesi ve kaynağı için kullanılacak patlayıcıda aranan özellikler şunlardır;

- Taşıma ve yerleştirme işlemi boyunca güvenli olmalı.
- Açığa çıkan enerji sürekli olmalı. Bu nedenle askeri spesifikasyonlara uygun bir patlayıcı seçmek daha iyidir.
- Bir taşıyıcıda patlayıcıyı kaplamaya gerek olmaksızın şeklini koruyabilmeli. Çünkü taşıyıcının parçalanması şok dalgasının üniformunu bozar ve metalik malzemeye zarar verebilir.
- Patlayıcılar uzun süre depolarda bozulmaksızın muhafaza edilebilmeli. Ayrıca dört saatten daha az olmayan periyotlarda güneş ışığında bozulmamalıdır.
- Ekonomik olmalı.
- Piyasada yaygın olmalı.
- Özel saklama yada yükleme gereksinimi olmamalı.
- Patlayıcı kapsülle su altında kolaylıkla patlayabilmeli [6].

2.5 Patlamalı Kaynak Metalürjisi ve Mekanik Özellikleri

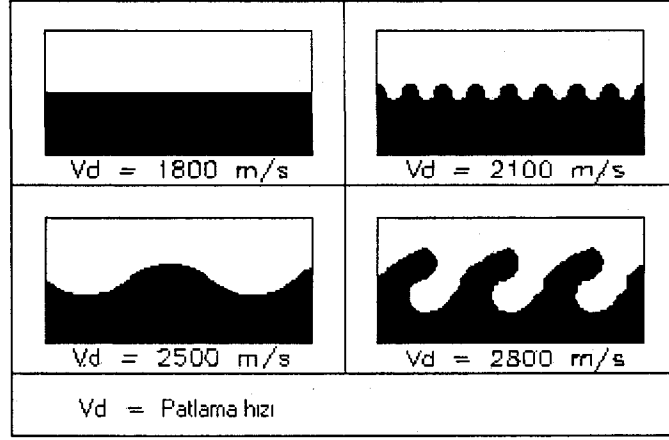
2.5.1 Kaynak metalürjisi

Kaynaklanmış ara yüzeyin metalürjisi, birleşen malzemelerin özelliklerine bağlı olmasına rağmen, özellikle malzemelerin bağlı akustik iç direncine ve kaynak parametrelerinin uygun bir düzenlenmesi, kaynağın tipi üzerine kabul edilebilir bir kontrol sağlayacaktır. Küçük ara boşluk mesafesi, daha düşük bir çarpma hızıyla sonuçlanacaktır ve çok düşük bir dalga genliği üretecektir. Ara boşluk mesafesinin artmasıyla, tipik bir dalga tepesi oluşacaktır. Aşırı yüksek enerji seviyeleri (patlayıcıyla oluşan), tutsak fışkırmının metaller arası bileşikler içeren girdaplarla, düzensiz bir dalga oluşturur. Kaynak ara yüzeyinde bu metaller arası bileşiklerin varlığı, gevrekliği başlatır yada sünekliği azaltır. Ergimenin yüksek hacimde olmasıyla statik testler hala iyi sonuçlar üretecektir [11].

Dalgalı ara yüzeye sahip kaynaklar, genellikle tercih edilmesine rağmen, tamamen düz yada hemen hemen düz ara yüzeyler belirli durumlarda arzu edilir. Kaplama, kaynaktan sonra geleneksel olarak haddelenecekse bu durum özellikle arzu edilir [11].

Patlamalı kaynakla birleştirilmiş malzemeler, genellikle dalgalı birleşim bölgesi ara yüzeyi sergiler. İyi bir patlamalı birleştirmenin elde edilmesi doğrudan dalgalı birleşme ile ilgilidir. Oluşan bu dalgalı birleşme yüzeyini, patlama hızı (V_D), yüklenen patlayıcı miktarı, yüzeyler arasındaki boşluk gibi üç önemli parametre belirler. Kaynak işlemi boyunca bu üç parametre dalga modelinin periyodunu ve genişliğini kontrol eder. Çoğu zaman birleşme bölgesindeki bu dalga modeli, bir engel etrafında akan bir akışkana benzetilmiştir. Burada bahsedilen engel, patlamalı birleştirme için çarpışma bölgesindeki en yüksek basınç noktasıdır. İki metal, reaksiyon bölgesinde laminar veya türbülans akışkan olarak düşünülebilir ve bir reynolds sayısı belirlenebilir. Akış hızı düşük olduğunda, akışkan engel etrafında

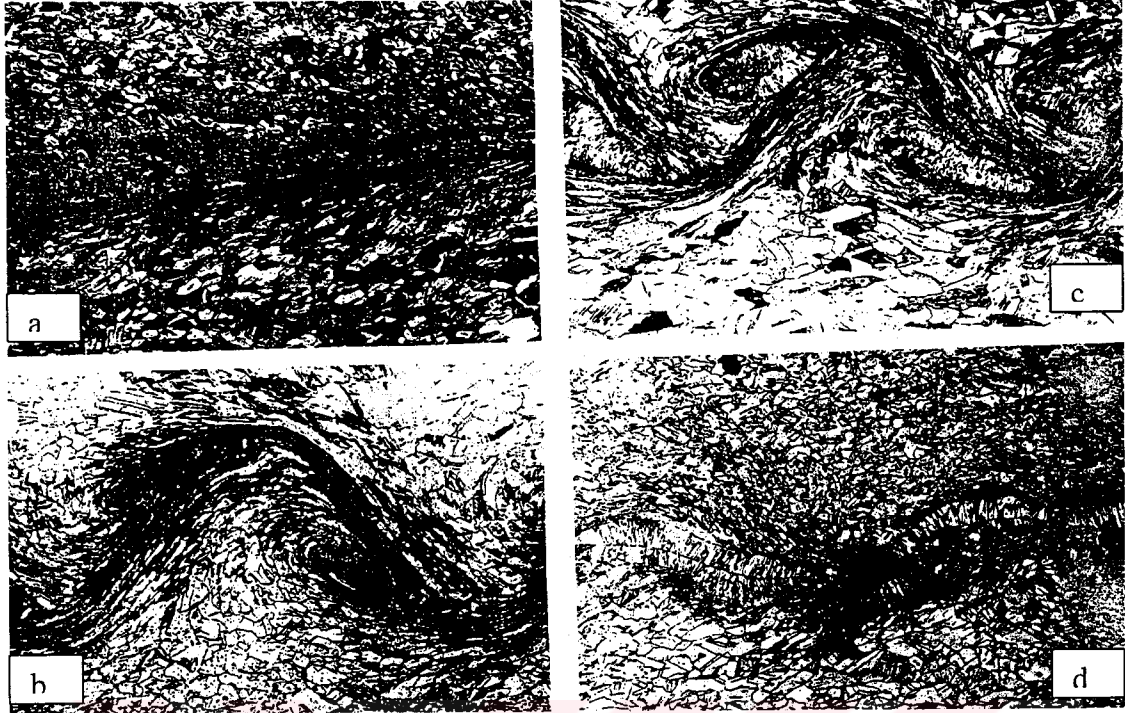
daha düzgün akar (Şekil 2.20). Hız arttığında akış bir dalga modeli gösterir. Hız kesin bir değere ulaştığında, akış modeli türbülanslıya dönüşür [52].



Şekil.2.20 Patlama hızına bağlı olarak akış modeli [52]

Böyle bir çarpışmada yüzey türbülansı, çarpışma açısı ve patlama açısı ile kontrol edilir. Bu yüzey morfolojisi bazı özel uygulamalar için (örneğin, geçiş bağlantısının kopma dayanımının artırılmasında bir dalga ara yüzeyine ulaşmak için) önemlidir. Ayrıca, ısı iletkenlikten dolayı minimize edilmesi gereken reaksiyon bölgesinin bulunduğu bir sistemde veya mikroskobik seviyede birleşme hattının derinliğinin bilinmesinin gerekli olduğu hallerde, yüzey morfolojisi arzu edilir [52].

Şekil 2.21'de bakırın bakıra patlamalı kaynağında açı ve patlayıcı miktarlarındaki değişmeye göre elde edilmiş değişik ara yüzeyler görülmektedir. Dalgalar oluştuğunda girdaplarda normal olarak ergime olabilir. Eğer çarpma enerjisi yeterli büyüklükte ise ergimiş bölgelerin merkezindeki soğuma boşlukları ergimenin olduğuna açıkça bir delildir. Hatta daha yüksek enerji seviyelerinde, ergimiş bölgeler sürelilik arz eden bir ergimiş tabakayı oluşturur. Girdaplarda oluşan bu ergime bölgelerinde soğuma oranları 10^5 ve 10^7 C°/s arasındadır. Şekil 2.21 (a)'da düz ara yüzey (b)'de ise dalgalı ara yüzey görülmektedir. Şekil 2.21 (c)'de küçük açı ve aşırı patlayıcı ile oluşan ergimiş bölgelere sahip dalgalı ara yüzey görülmektedir. Şekil 2.21 (d)'de ise yüksek kinetik enerjisinden dolayı sürekli ergimiş kaynak bölgesi görülmektedir [53].



Şekil 2.21 Patlama ile kaynaklanan bakır-bakır birleşmesinde değişik ara yüzeyler [53].

Crossland'ın [5] ifadesine göre kabul edilebilir mükemmel bir kaynak düz bir ara yüzeyle üretilebilmesine rağmen pratikte elde edilen kaynak ara yüzeyi çok iyi biçimlenmiş düzenli dalgalar sergiler. Genel bir kanının aksine, düz bir ara yüzeyli kaynak, dalgalı ara yüzeyi sergileyen kaynak kadar mukavimdir.

Dale ve arkadaşları [54], alüminyum filmlerini bakır ve silikona lazer sürücülü mikro patlamalı kaynak ile birleştirerek inceleme yapmışlardır. Bu yöntemle elde edilen birleşmede, ara yüzeyde ergimenin oluştuğu ve hidrodinamik karışımın varlığı gözlenmiştir. Ergime, Al-Cu için, Al'da olduğu, sıcaklığın bakırın ergime derecesine çıkamadığı ve bunun nedeninin de ara yüzeyde oluşan alaşımın etkisi olduğu vurgulanmıştır.

Wayner R. Johnson [46], NiCr alaşımı tüpü yine NiCr alaşımı tapayla patlama ile birleştirmiştir. Mikroyapı incelemelerinde, oluşan ara yüzeyin geniş ergime havuzlarını içerdiği gözlenmiştir.

Ganin ve arkadaşları [55], Cu-2Be alaşımında patlamalı kaynağın neden olduğu martenzitik dönüşümü incelemişlerdir. Deneylerinde Cu-2Be numunesi Cu levhaya

gömülmüş ve daha sonra bir başka bakır levhaya patlama ile kaplanmıştır. Kaplamadan önce alaşım 810°C'de 1 saat ısıtılma tabii tutulmuş ve daha sonra aşırı doymuş katı çözelti oluşturmak için soğuk tuzlu suda soğutulmuştur. Daha sonra TEM'de inceleme yapılmıştır. Çözeltiye alınan Cu-2Be alaşım numunelerinin patlamalı kaplanması birleşme ara yüzeyinden 100µm'den daha fazla mesafede (lath) tipi yapının oluşumuna neden olmuştur. Bu lath'ler kübik simetriden güçlü bir sapma gösterir ve alt yapı kusurlarını içerir. Ayrıca kafes parametresi a: 0.228 nm, b: 0.457 nm ve c: 0.432 nm olan ortorombik yapıya sahiptir. Bu ortorombik yapı α (fcc)'de kenar martenzitik dönüşümle sonuçlanır.

Zimmerly ve arkadaşları [48], Ni-Ti alaşımının düşük karbonlu çeliğe patlamalı kaynakla birleştirilmesi konusunda bir çalışma yapmışlardır.



Şekil 2.22. NiTi'nin düşük karbonlu çeliğe paralel patlamalı kaynak düzenlemesi [48]

Bu çalışmada paralel patlamalı kaynak düzenlemesinde düşük karbonlu çelik (ASTM A569) ile NiTi (50.7 at %Ni- 49.3 at. %Ti) kullanılmıştır (Şekil 2.29). Düşük karbonlu çelik 3.66 mm kalınlıkta ve 150 mm² alanında üst levha olarak kullanılmıştır. NiTi sacı, 0.4 mm'den 1.0 mm'ye kadar sıradaki kalınlıklarda ve 63.5 mm – 70.0 mm ebatlarındadır ve 6.35 mm kalınlığında ve 150 mm² alanlı bir levhada açılan bir oyuga yerleştirilmiştir. Kaynak işleminden sonra malzeme 700°C'de 15 dakika bekletilmiştir. Patlamalı kaynak parametrelerinin değiştirilmesiyle birleşme ara yüzeyleri hem doğru hem de dalgalı ara bir ara yüzey sergilemiştir.

Khoklov ve arkadaşları [56], patlamalı kaynakta Ti alaşımlarının yapı değişiminin özelliklerini incelemiştir. İncelemelerinde martenzitik titanyum VT 23 alaşımı kullanarak bu alaşımın difraktometre X-Ray ile faz analizi, metalografi ve elektron grafi incelemesini yapmışlardır. Khoklov ve arkadaşları patlamalı kaynak işleminden sonra kaplama levhasında yapısal dönüşümler bulunduğunu ve bu faz

kompozisyonlarının birbirinden ve ilk yapıdan farklı olduğu sonucuna varmışlardır. Onlara göre, VT23-VT23 bağlantısındaki yapı homojensizliği, metaldeki sıcaklık ve birim şekil değiştirme alanlarının sonucudur. Sonuç olarak (α'' - β_{res}) başlangıç yapısı [$\alpha'+(\beta+w)$] yapısına (kaplama levhasının genelinde) ve (α' - β) yapısına (kaplanmış levhada) dönüştüğü ifade edilmektedir.

Zlatova ve Dafinova [57], patlama ile kaynaklanan östenitik ve Ferrit-Perlitik Çelikte birleşme bölgesinin yapısını incelemişlerdir. Çalışmalarında Ferritik-Perlitik çelik (1.4 % Mn, 0.3 % C) (üst levha) ve paslanmaz yüksek nitrojenli çelik (18 % Cr, 12 % Mn, 0.64 % N) (alt ve üst levha) malzemeleri kullanarak elde edilen birleşmelerin TEM ve LM'de incelemesini yapmışlardır. Yapılan incelemeler neticesinde, her iki bağlantıda da benzer dalga morfolojileri ve ara yüzeye bitişik tabaka yapısı görülmüştür. Birleşme eksenli çok ince yeniden kristalleşmiş taneler içerir. Alt levhanın ara yüzeyine yakın bölgelerde ısı ve plastik deformasyonun kombine bir hareketi bulunmuştur. Lokal şartlara bağlı olarak bu hareket dislokasyon hücre yapısının oluşumuna, ferritte rekristalizasyon yada poliganizasyon, sementitin parçalı çözünmesine ve dağınık karbürlerin (dispersed) ikincil çökelmelerinin oluşumuna neden olduğu ifade edilmektedir. Alt levha ara yüzeyden 0.3-0.5 mm'den daha büyük mesafede soğuk deformasyonun etkisinde kaldığı ve bu olayın da ara yüzeyden 0.5 ile 1 mm arasındaki bölgede martenzitik dönüşüme neden olduğu yazarlar tarafından ifade edilmektedir.

Hokamoto ve arkadaşları [40], çok katmanlı metal esaslı kompozitlerin üretimi için patlamalı kaynak tekniği ve optimum birleşme şartlarına kaynak parametrelerinin etkisini incelemişlerdir. Pirinç, paslanmaz çelik ve maraging çeliği (takviye elemanı) alüminyum, Ti ve Cu (Matris) malzemeleri kullanılarak, elde edilen birleşmelerin metalografi incelemesi yapılmıştır. Deneysel sonuçlar, kullanılan malzeme kombinasyonlarına bağlı ara yüzey mikro yapısında farklılıklar olduğunu göstermiştir. Bakır-pirinç kompozitinde olduğu gibi, bileşiği oluşturan fazların yoğunlukları hemen hemen eşit olduğu durumda dalgalı ara yüzeyler gözlenmiştir. Bakır-paslanmaz çelik kompoziti de bileşenlerin yoğunlukların benzerliğinden dolayı dalgalı bir yapı göstermiştir. Bu tip durumlarda aşırı yüksek basınçtan dolayı kompozitin her bir bileşeninde çarpışma noktasına yakın bölgede aşırı deformasyon

oluşur ve malzemelerin bir akışkan gibi hareket etmelerinden dolayı da dalgalı ara yüzey oluşur. Alüminyum-paslanmaz çelik kompozitinde olduğu gibi bileşenlerin fazların özellikleri oldukça farklı ise düz bir ara yüzey oluşur ve kaynak ara yüzeyinde aşırı enerji dağıldığında zaman zaman reaksiyona girmiş ara yüzey bölgesi oluşmuştur. Bu tip durumlarda patlamalı kaynak işlemi yumuşak bileşenin (alüminyum) aşırı deformasyonu ile sonuçlanır. Sert bileşen (paslanmaz çelik) çok az deforme olmuştur ve reaksiyona girmiş ara yüzey bölgesinin %70-80'ini alüminyum oluşturmuştur.

Yang ve arkadaşları [58], yüksek gerinim oranında α -titanyumda sınırlandırılmış süper plastik davranışı incelemiştir. Deneylerinde α -Ti ile çelik malzemeyi patlama ile birleştirerek elde edilen birleşmenin TEM ve SEM'de incelemesini yapmışlardır. İncelemelerinde, ara yüzeyde oluşan ve α -Ti Matrise doğru kaybolan bir çok adyabatik shear bantları (ASB) gözlemlenmiştir ancak birleşmenin çelik kısmında bu ASB'lere rastlanılmadığı ifade edilmektedir. α -Ti Matriste görülen bu ASB'lerin transgranüler modda yayıldığı belirtilen bu çalışmada, ASB'nin ince taneli α -Ti 'den oluştuğu ve birleşme sonrasında α -Ti \rightarrow β -Ti dönüşmesinin olmadığı görüldüğü yazarlar tarafından ifade edilmektedir. Yang ve arkadaşlarının [58] yapmış oldukları bu çalışmada ayrıca şu sonuçlar elde edilmiştir:

- Patlatma işleminden sonra tanelerin eş eksenli ve maksimum mikro tane boyutu $0.1 \mu\text{m}$ çapını aşmadığı görülmüştür.
- Tanelerdeki dislokasyon yoğunluğu genelde fazla değildir.
- ASB'deki tane boyutu $20 \mu\text{m}$ 'den $0.1 \mu\text{m}$ 'ye azalır.
- ASB'de deformasyon ikizleri gözlenmemiştir.
- Mikrotane morfolojisi ASB'nin merkezinden matrise doğru önemli bir şekilde değişmez. Bu da malzemenin ergimediyini gösterir. Aksi takdirde katılma ASB-Matris arayüzeyinin yakınında direksi (sütun şeklinde) taneler üretecektir.

Yüksek gerinim oranlarında süperplastik deformasyon için gerekli şartlar tane boyu küçülmesi ile uyumludur.

2.5.2 Mekanik Özellikleri

Birleşmenin mekanik özellikleri incelemek için kenar makaslama testi, makaslama testi, çekme ve eğme testleri gibi statik testler uygulanır. Bunlara ilaveten keski ve kaplama kaldırma testleri de patlama ile birleştirilen metallerin birleşip birleşmediğini incelemek için yapılan testlerdir [5, 6, 12, 31, 61].

İdeal kaynak şartları altında makaslama dayanımı, çekme dayanımı ve çarpma dayanımının birçok metal kombinasyonlarının ara yüzeylerinin iki bileşenin zayıf olanından daha mukavim olduğu görülmüştür [53]. Tablo 2.5, 2.6 ve 2.7 patlama ile kaynaklanan değişik metal çiftlerinin makaslama ve çekme dayanımlarını göstermektedir. Soğuk plastik deformasyondan dolayı birleşme ara yüzeyinde sertlikte bir artış olmaktadır [6]. Bu ani şok sertleşme de, malzemeye eğer bir gerilim giderme tavlaması uygulanmadığı sürece, kırılma tokluğunda bir azalmaya neden olmaktadır [53]. Sertlikteki bu artış, levha çarpma hızına göre değişmektedir. Yani levhanın çarpma hızı ara yüzeydeki sertlik davranışına etki etmektedir. Yüksek çarpma hızı daha yüksek ara yüzey sıcaklığını üretecektir [6]. Şekil 2.22'de farklı levha çarpma hızlarında patlama ile kaynaklanan 2014-T3 alüminyum alaşımı/2014-T3 alüminyum alaşımında mikro sertlik profili görülmektedir.

Tablo 2.5 Ticari olarak çiftli kaplamaların mekanik özellikleri [11]

Üst Levha	Alt Levha	Kaplamadaki ortalama (Mpa)	
		Makaslama Dayanımı	Çekme Dayanımı
IMCA35ATi	Orta Karbonlu Çelik	241	350
344 SS	Orta Karbonlu Çelik	448	611
M00H14Al	Orta Karbonlu Çelik	96	505
DHP Bakır	Orta Karbonlu Çelik	152	511
Ni alaşımları	Orta Karbonlu Çelik	379	350
Zirkonyum	Orta Karbonlu Çelik	269	
Cupro-nikel	Orta Karbonlu Çelik	230	
Hasteloy C	Orta Karbonlu Çelik	391	545
5083 Al-3003Al	316 L SS		130
5052Al-OFHC Bakır	304L SS		175

Tablo 2.6 Birleşmenin makaslama dayanım değerleri [6]

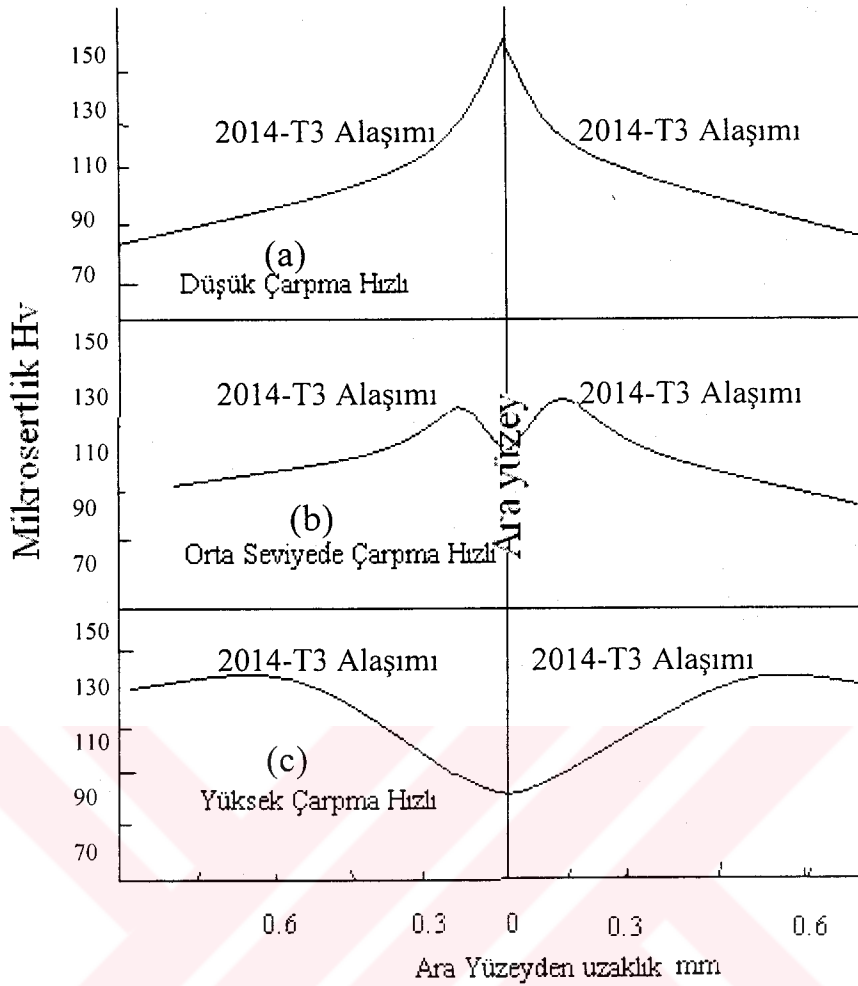
Patlamalı Kaynaklanmış Kombinasyon	Kaplamanın Makaslama Dayanımı (MPa)
304 Paslanmaz çelik / ASTM A-212-B	720
TMCA 35A Titanyum / ASTM A-212-B	565
Hasteloy C / ASTM A-212-B	856
İnkonel 600 / ASTM A-212-B	913
1100 H-14 Al / ASTM A-212-B	179
DHP Bakır / ASTM A-212-B	357
410 Paslanmaz çelik / ASTM A-212-B	717
6061-T6 Al / 6061-T6 Al	376
AISI 1018 Sıcak çekilmiş çelik / AISI 1018 çelik	608

Tablo 2.7 Kompozitlerin çekme deney sonuçları [6]

Kompozit malzemeler	Çekme Dayanımı (MPa)	Akma Dayanımı (MPa)	200 mm'de %'de uzama
1/8 inç 304 Paslanmaz çelik / 1 inç ASTM-A-212-B çelik (1)	1284	907	22.8
0.078 inç TMCA 35 A Titanyum / 1 ^{1/8} inç ASTM A-212-B çelik (1)(2)	1078	728	27
1/8 inç Hasteloy C / 1 inç ASTM A-212-B çelik (3)	1146	826	22
1/8 inç 1100-H14 Alüminyum / 1 inç ASTM A-212-B çelik (4)	1060	794	21
¼ inç DHP Bakır / ASTM A-212-B çelik (4)	1073	833	20

- (1) Alt levha olarak kullanılan çeliğin kaynaktan önceki çekme dayanımı $\sigma_t=1260$ MPa, $\sigma_A=811$ MPa
- (2) Kompozit çekme testinden önce gerilim giderme işlemine tabi tutulmuştur.
- (3) Alt levha olarak kullanılan çeliğin kaynaktan önceki çekme dayanımı $\sigma_t=985$ MPa, $\sigma_A=579$ MPa ve 200 mm'deki uzama %28.8
- (4) Alt levha olarak kullanılan çeliğin kaynaktan önceki çekme dayanımı $\sigma_t=973$ MPa, $\sigma_A=579$ MPa ve 200 mm'deki uzama %26.3.

Şekil 2.22'de görüldüğü gibi düşük çarpma hızında ara yüzeyde sıcaklık artışı az olduğundan çalışma sertleşmesi daha fazladır (Şekil 2.22 (a)). Şekil 2.22 (c)'de de yüksek çarpma hızı ara yüzeyde sıcaklıkta artışa neden olmakta ve bu da sertleşmenin hemen hemen tam tavllanmış durumdaki sertliğine düşürmektedir [6].



Şekil 2.23 Farklı levha çarpma hızlarında patlama ile kaynaklanan 2014-T3 alüminyum alaşımında mikro sertlik profili [6]

Dale ve arkadaşları [54], alüminyum filmlerini bakır ve silikona lazer sürücülü mikro patlamalı kaynak ile birleştirerek inceleme yapmışlardır. İncelemede, lazer sürücü ile yapılan Al-Cu ve Al-Silikon'un patlamalı kaynağının adhesive testinde buhar emdirmeye kaplamaya göre daha iyi sonuç vermiştir.

Johnson [46], NiCr alaşımı tüpü yine NiCr alaşımı tapayla patlama ile birleştirmiştir. Kaynak kalitesinde oksit filminin etkisini incelemek amacıyla dye penetrant testi ile uygulanmıştır. Ayrıca birleşmede sızıntının olup olmadığını belirlemek ve birleşmenin dayanımını tespit etmek için su basıncı ve makaslama deneyleri yapılmıştır. Dye penetrant test sonuçları tamamen birleşme olduğunu göstermiştir. Basıncı su ile yapılan deneyde birleşmenin sızdırmaz olduğu görülmüştür. Ayrıca sertlik incelemesinde ara yüzeye yakın bölgelerde sertlikte bir artış olduğu

gözlenmiştir. Makaslama deneyinde elde edilen değerler patlamalı kaynakla güçlü bağlantılar olduğunu göstermiştir.

Trutnev ve arkadaşları [47], alüminyumun Ti, çelik ve nikel patlamalı kaynağının kalitesinin karşılaştırmalı değerlendirilmesini yapmışlardır. Elde edilen sonuçlara göre Al-Ti'nin kaynaklanabilirliği Al-Çelik ve Al-Ni'den daha iyi olduğu gözlenmiştir. Ti, çelik ve nikelin temas bölgesinde sertlik daha derin tabakalardakinden (iç bölgelerde) daha fazla olduğu vurgulanmıştır. Bu da çarpışma boyunca metalin yüzey tabakasının çalışma sertleşmesiyle ilişkili olduğu ancak bu ilişkinin alüminyuma uygulanamaz olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca bu çalışmada, ergimiş bölgenin sertliği kombinasyonun sert olan metalinden daha fazla olduğu belirtilmiştir. Örneğin; Al-Ti için 280-720 kgf/mm² iken Ti'nin sertliği 136-165 kgf/mm² dir.

Zimmerly ve arkadaşlarının [48] yapmış oldukları çalışmada, Ni-Ti alaşımının düşük karbonlu çeliğe NiTi alaşımının düşük karbonlu çeliğe patlamalı kaynak yöntemiyle başarılı bir şekilde birleştirilebildiği görülmüştür. Hem NiTi alaşımında hem de düşük karbonlu çelikte kesme testinde hasar oluştuğu ve birleşme ara yüzeyinde böyle bir hasar görülmediği için hangi ara yüzeyin (dalgalı-düz) daha güçlü olduğu belirlenememiştir (Tablo 2.8). Ayrıca patlamalı kaynak kavitasyon hasarına karşı NiTi alaşımın ince levhaların diğer metallere birleştirilmesi için uygulanabilir bir yöntem olduğunu göstermiştir.

Tablo 2.8. Patlama ile kaynaklanmış NiTi/Düşük karbonlu çelikte çekme makaslama testi sonuçları [48]

Birleşme bölgesi morfolojisi	Ara yüzeydeki gerilme		Hasar bölgesi
	(Mpa)	(ksi)	
Düz	246	35.7	Çelik
Düz	248	35.9	Çelik
Düz*	387	56.2	Ara yüzey
Düz*	318	46.1	Ni-Ti
Dalgalı	270	39.2	Ni-Ti
Dalgalı	354	51.4	Ni-Ti

Tablo 2.8 Patlama ile kaynaklanmış NiTi/Düşük karbonlu çelikte çekme makaslama testi sonuçları (devam) [48]

Birleşme bölgesi morfolojisi	Ara yüzeydeki gerilme		Hasar bölgesi
	(Mpa)	(ksi)	
Dalgali*	380	40.6	Ni-Ti
Dalgali*	250	36.2	Ni-Ti

* 500°'de 15 dakika ısıtılma işlemi görmüş

Gulbin ve arkadaşları [60], haddelemeli patlamalı kaynakla üretilen termo bimetalin mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Deneylerinde berilyum bronz, titanyum, alüminyum malzemelerini kullanarak, bunları patlama ile birleştirmişler ve bu birleştirmelerin haddelemeden sonra mikrosertlik, çekme dayanımı, tokluk, eğme, burulma deneylerini yapmışlardır. Manyetik termo bimetal üretmek için de 75ΓHΠ ve 36 H kullanmışlardır. 75ΓHΠ ve 36 H'nin tokluğunun incelemesinde, eğer gerinim 248 MPa ve gerinim oranları 3500 m/s ise kaynağın kalitesinin ispatlanabileceğini ifade eden yazarlar, bu şartlar altında kırılma anında tokluk dayanımını 350-400 MPa olarak bulmuşlardır. Bulunan bu değer standartların altında yada üstünde olup olmadığı konusunda herhangi bir yorum yapılmamıştır. Mikrosertlik ölçümleri ile çarpmadan dolayı malzemenin sertliğinde bir artış olduğu anlaşılmıştır. Buna göre 36 H alaşımının sertliği yüzeyden birleşme bölgesine doğru gidildikçe 2060 MPa'dan 2680 MPa'ya çıkmıştır. 75ΓHΠ alaşımının sertliği ise 1810 MPa'dan 2720 MPa'ya çıkmıştır. Patlamalı kaynaktan sonra titanyumun sertliği 2210-2680 MPa birleşme bölgesinin sertliği ise 3900-5500 MPa'dır. Haddelemeden sonra titanyumun sertliğinde bir artış gözlenmemiş fakat birleşme bölgesinde sertlik 5230-6690 MPa olmuştur. Termo bimetal 75ΓHΠ + 36 H 870-880 °C'de 1 saat ısıtılma tabii tutulmuş ve daha sonra haddelenerek kalınlığı 20 mm'den 4 mm'ye düşürülmüştür. Bu numunelerin çekme deneyleri yapıldığında dayanım $\sigma_b=400-450$ MPa arasında değişmektedir. Daha ileri haddelemeden sonra (2 mm'ye düşürülerek) termo bimetalin sertliği 730-770 Hv'ye çıkmıştır. Plastizite artışı ise $\delta=2-3\%$ 'dir. İncelemeler 800-860°C ve 2 saat tavlamanın gerekli olduğunu göstermiştir. Böylece Gulbin ve arkadaşlarının [60] yapmış olukları çalışma ile manyetik ve manyetik

olmayan termo bimetallerin patlamalı kaynak ve ardından haddeleme ile üretilebileceğini göstermişlerdir.

Richman ve arkadaşları [61], çeliğe patlama ile kaynaklanan NiTi alaşımının kaviteasyon erozyonu'nu incelemişlerdir. Yapmış oldukları deneysel çalışmada, eşit atomik kompozisyonda iki NiTi alaşımı olan Martenzitik NiTi-çelik ve Östenitik NiTi-Çelik birleştirmeleri yapılmıştır. Sertlik, ağırlık kaybı ölçümü, yüzey mikro yapısı birleşmeye daha sonra yapılan deneysel çalışmaları içermektedir. Yapılan deneysel çalışmaların sonunda, martenzitik NiTi alaşımına ısıl işlemin etkisi belirsiz iken östenitik NiTi alaşımında erozyon direncini koruduğu gözlenmiştir. Elde edilen deneysel verilerin ışığında;

- Patlama ile kaynaklanan martenzitik ve östenitik NiTi alaşımlarının her ikisi de kaviteasyon erozyonuna dirençli olduğu,
- Östenitik NiTi'nin sertliği 285 Hv'den 348 Hv'ye çıktığı,
- Martenzitde 235 Hv'den 263Hv'ye çıktığı,
- Östenitdeki ağırlık kaybı (500°C ön ısıtma ile) martenzitdeki ağırlık kaybı (ısıl işlemsiz) hemen hemen eşit durumda olduğu gözlenmiştir ve
- Kısa ömürlü yorulma özellikleri (σ' ve n') östenitik NiTi'nin kaviteasyon erozyon davranışını açıklamaktadır

Hokamoto ve arkadaşları [40], pirinç, paslanmaz çelik ve maraging çeliği (takviye elemanı) alüminyum, Ti ve Cu (matris) malzemeleri kullanılarak, patlama ile elde edilen kaynaklanmış kompozitlerin mekanik özellikleri çekme deneyi ile ölçülmüştür. Birleştirme işlemlerinden önce yapılan çekme deneylerinde bakır 348 MPa, prinç 468 MPa, alüminyum 145 MPa (yaşlandırmadan sonra 88 MPa), paslanmaz çelik 1003 MPa, maraging çeliği 2216 MPa, titanyum (yaşlandırmadan sonra) 591 Mpa olduğu görülmüştür. Birleştirme işlemlerinde yapılan deneylerde çekme dayanımları ise bakır-prinç 387 MPa alüminyum-paslanmaz çelik 585 MPa, 614 MPa, 498 MPa, 370 MPa, bakır-paslanmaz çelik 642 MPa, alüminyum-maraging çeliği 756 MPa ve titanyum-maraging çeliği 1245 Mpa olarak bulunmuştur. Elde edilen kompozitlerin bir çoğu beklendiği gibi yüksek bir çekme dayanımı göstermiştir ve daha sünek bileşenin etkisinden dolayı süneklikte bir artış gözlenmiştir.

2.6 Patlamalı Kaynağın Uygulama Alanları

2.6.1 Levha kaplama

Kaplanmış levhalara artan bir talep vardır. Fakat patlamalı kaynağın gelişimine kadar kaplanmış levha üretiminin sadece haddeleme yada kaynak kaplamasıyla mümkün olduğu için yetersiz bir talep vardır. Sıcak haddelemeyle kaplama temelde bir basınç kaynağıdır. Tek malzeme yerine kompozit levha kullanımının nedeni, daha düşük maliyette korozyon direnci, artırılmış ısı transfer karakteristikleri, düşük maliyette kabul edilebilir dayanım yada rijitlik, geliştirilmiş elektriksel özellikler yada daha iyi aşınma ve erozyon direncidir. Bazı kimyasal işlemlerde ısı transferini geliştirmek yada kimyasal etkiyi engellemek için nikel, hastelloy, paslanmaz çelik, titanyum ve tantalyum gibi kazanların imalatında çok pahalı metalleri kullanmak gerekir. Örneğin tantalyum asidik ortamlara karşı iyi bir dirence sahiptir fakat büyük kimyasal ekipmanlarında kullanımı bu levhanın geniş levhalar halinde elde edilebilirliğiyle ve özellikle maliyetiyle sınırlıdır. Bu tip malzemelerden yapılacak olan geniş kap yada kazanlar için bu malzemenin fiyatı tek başına pahalı olacaktır. Böyle kap ve kazanların üretiminde levha kalınlığının ötesinde kompozit levhalar arasında, kaynaklı bağlantı yapımında ek maliyet vardır. Oysaki patlamalı kaynaklanmış levha kullanımı ekonomiktir. Bazı çok geniş kap ve kazanlar patlama ile kaplanmış levhadan üretilmiştir. Örneğin Nooter Corporation firması aromatik asitlerin üretiminde kullanılan kazanlar için titanyum kaplı çelik levhalar kullanılmıştır. Böyle bir kap kazan 7 m boyunda ve 2,44 m çapında ve 2 mm'lik titanyum kaplı 22 mm'lik SA 516 kalite 70 çeliğini içeren levhadan üretilmiştir. Bu firma ayrıca 2.44 m çapında 18.3 m uzunluğunda tantalyum/bakır/çelik kaplamasını patlama ile üretmişlerdir [5].

Crossland'in [5] ifadesine göre, alüminyum ile çeliğin gemi yapımında geçiş bağlantılarında ve özellikle çelik omurga üzerine alüminyum üst yapısı arasındaki bağlantılarda uygulanmaktadır. Ayrıca, monel-nikelin kirlenmeye özeliğinden dolayı monel-nikel kaplı çelik levhadan geniş ve küçük gemilerin yapımının

potansiyel ekonomik avantajı görülmüştür. Yakıt tüketimini azaltma, daha yüksek işleme hızları, gemi omurgası bakımı için tamir havuzunda azalma, omurgaların boyaya ihtiyaç duymaması ve omurga korozyonunun olmaması, ekonomik avantaj olarak sıralanabilir [5]. Son yıllarda kimyasal kazanlar ve ısı değiştirciler için kaplanmış levhalar önemli bir yapı malzemesi olmuştur. Kap, kazan imalatında kaplı levhaların kullanımı; karbonlu çelikler gibi ucuz, genel yapı malzemeleriyle paslanmaz çelik gibi yüksek korozyon dirençli pahalı malzemelerin kombinasyonunu içerir. 1960'ların başında patlamalı kaynakla kaplı levhaların ticari olarak elde edilmesinden önce kaplanmış levha üretimi, ergitme kaynağı ve/veya sıcak haddeleme ile birleştirilerek yapılıyordu. Bu yüksek sıcaklık işlemleri hem malzeme ölçüsü hem de malzeme kombinasyonu ile sınırlıydı. Patlamalı kaynak, hem elde edilebilir kaplanmış levhaların kalitesini hem de ölçü genişliğini arttırmıştır. Paslanmaz çelik, en geniş kaplama malzemesi olarak kullanılmasına rağmen, titanyum, zirkonyum, tantalyum gibi daha değişik malzemeler de artan bir uygulama alanı bulmuştur [30].

Patlama ile kaplanmış levha, sıcak veya soğuk haddeleme ile daha ileri işlenebilir. Sünekliği muhafaza ederken ara metalik bileşenlerin büyümesini minimize etmek için haddeleme sıcaklıkları dikkatle kontrol edilmesine rağmen titanyum-çelik kaplamasında dahi süneklikte azalma mümkündür. Patlamalı kaplama işlemi yüksek kaliteli ve pahalı ürün üretmek için haddeleme ile kombine edilebilir. Örneğin, British Steel Cooperation'nın soğuk kaplama işleminde paslanmaz çelik yada nikel alaşımlı bir levha ince kalınlıklı orta karbonlu çelikle direkt olarak patlamayla kaplanır, sonra yapı çeliği bir levhaya sıcak hadde ile birleştirilir. İngiltere'de bütün paslanmaz çelik/yapı çeliği kaplamaları bu işlemlerle üretilmektedir. Kaplanmış levhalar, kaplanmamış yapı malzemeleri için kullanılanlara benzer işlemler kullanılarak kesilebilir ve biçimlendirilebilir. Bununla beraber ergitme kaynağı ile kaplanmış levhaların birleştirilmesinde, kaplamanın bütünlüğünün korunması için bazı tedbirlere gerek duyulur. Paslanmaz çelik-karbonlu çelik gibi uyumlu metaller içeren kaplamalarda hem alt hem de kaplama metalinde bir V aparatı yapılır. Sonra ilk olarak alt metal kaynaklanır. Daha sonra paslanmaz çelikteki V kaynak ağzı paslanmaz çelikte doldurulur. Titanyum- çelik gibi reaktif yada birbiriyle uyumsuz

metaller için levhaların ergitme kaynak bölgesinde gevrek ara metallerin oluşumunu engellemek için özel işlemler kullanılmalıdır [30].

Kaplanmış levhanın belki de en yaygın kullanım alanı, Birleşik Devletleri'nin parası üzerindeki kabartması için şerit plaka üretimi olmuştur. 1965'de dünya çapındaki gümüş kıtlığı Amerikan Hükümetini 10-25 ve 50 centlik paraların gümüş içeriğini azaltmaya yada tamamen çıkarmaya zorlamıştır. 10-25 centlerde %90 gümüş alaşımının yerini toplam kalınlığın %66'sını içeren bir bakır özün her iki tarafında cupro-nikel içerikli bir kaplanmış madeni parayla yer değiştirilmiştir. Elde edilen madeni para orjinal gümüş alaşımına benzer elektrik davranışına ve ağırlığına eşittir. Böylece otomatik makinalarda mevcut madeni paralarla değiştirilerek kullanılabilmiştir. 50 centlik madeni paralar %20 gümüş alaşım üzerine %80'lik gümüş alaşımly yüzey kaplaması, %40'lık gümüş alaşım ile yer değiştirmiştir. Her ikisinde de madeni para üretimi için, ince levhaları yaprak haline getirilmiş ve ince bir öze iki kaplama levhasını birleştirerek yapılmıştır. Cupro-nikel/bakır kaplamasında levha orijinali 125 mm kalınlığında sıcak haddeleme ile 12.5 mm ye düşürülür daha sonra soğuk haddeleme ile son hale getirilir. Oysaki gümüş kaplamalar mm'lik orta seviye soğuk haddeleme ile işlenebilirlikleri, üretilebilirlikleri ve sıcak haddeleme birleşmesi gibi çok daha fazla geleneksel işlemler kullanılarak üretilenlere karşılaştırılabilir kalitedeydi. Amerikan Hükümeti tarafından Ocak 1968'de yapılan açıklamalara göre nikel/bakırın %17'sini ve gümüş madeni paranın üretiminin %49'unu patlamalı kaplama içermektedir [30].

Kaplanmış levha; basınçlı kaplar, ısı değıştiriciler ve tüp levhalardan ayrı olarak;

- Yüksek sıcaklıkta kullanımlar için kimyasal fabrikalarda naylon üretiminde adipin asitin taşınmasında bakır kaplı paslanmaz çelik buhar kazanları .
- Su ve nükleer atık taşıyıcıları. (Bakır kaplı paslanmaz çelik ve cupro-nikel kaplı orta karbonlu çelik)
- İyi termal özelliklere, tokluk ve iyi bir görüntüye sahip yemek pişirme kapları (paslanmaz çelikle kaplı bakır ve/veya orta karbonlu çelik)

- Klorid iyonları içeren, belediyeye ait, atık su ıslahı için kazanlar (titanyum kaplı orta karbonlu çelik)
- Çift sertlikte zırhlı levha (yumuşak çelik yada alüminyumla birleştirilmiş zırhlı levha)
- Aletlerde sert yada korozyon dirençli köşeler (şantiye araçları, fabrika ekipmanları) (örneğin orta karbonlu çelik üstüne Hastelloy B kaplaması)
- Termostatlar için bimetalik çubuk (α -pirinç/ %6 nikelli alaşımlar)
- Mücevher folyosu: Patlamalı kaynaktan sonra haddelenerek 38 mm'den 0.5 mm' ye düşürülen nikel kaplı altın alaşımı [30].

2.6.2 Farklı metallerin bağlantıları

Patlamalı kaynağın belki de en büyük avantajı, diğer yöntemlerle kaynağı güç yada imkansız metallerin hemen hemen tün kombinasyonları arasında güçlü metalurjik birleşme sağlayabilmesidir [30].

Özel kullanımlar için, elektrik kontakları, yüksek elektriksel davranış, genellikle tek malzemedede bulunamayan yüksek aşınma direnci ve düşük maliyet içeren özelliklerin bir kombinasyonuna gerek duyar. Dispersiyonla sertleştirilmiş kadmiyum oksitli gümüş içeren aşınma dirençli elektrik kontaklarının karbonlu çeliğe birleştirilebilir. 0.5 mm kalınlıktaki molibdenle kaplanarak, daha çok erozyona dirençli, yüksek akım taşıyan bakır kontakları ve alüminyum çubuklara patlama ile kaynaklanan gümüş şerit (bakır da olabilir) kullanarak, yapılan düşük elektriksel bileşenleri patlamalı kaynakla elde edilebilir [30].

Sonraki durumda, (aynı malzemeler arasında lehimlemeyle birleştirmenin aksine) nemli atmosferde korozyondan etkilenmeyecek şekilde üretilmiş elektrik bağlantısı ve bu bağlantı gibi binlercesi yıllarca çalışma ortamlarında tatmin edici bir şekilde kullanılmaktadır [30].

Küçük patlayıcı şarjların taşınabilmesinden dolayı bir çok bağlantı, fabrika ortamlarından ziyade uygun her hangi bir yerde de yapılabilir. Bakır ve/veya alüminyum işlerin elektrik bağlantıları bu şekilde yapılmıştır. Örneğin;

- Alüminyum-alüminyum yada bakır-alüminyum arasında topraklama bağlantıları
- Raylarda bakır-çelik akım taşıyıcı bağlantıları,
- Kimyasal fabrika; tevzi çubuğu irtibatı.

Amerika'da bakır topraklama; demir yoları ve su boruları gibi maddelerdeki elektrikli kondüktörler için de zorunludur. Bakır, zemin altındaki çeliğe ark kaynağı ile birleştirilmesi, değişken kaliteli kaynakla sonuçlanır ve önemli derecede gaz patlama riskini açığa çıkarır. Patlamalı kaynak işlerinin, zemin kullanımı için uygunluğu; doğrusal bir indiksiyon motoru içeren yüksek hızla zemin taşıma - ulaşım sisteminin parçasını şekillendiren 6061-TG alüminyum alaşımlı rayların bağlantısıyla gösterilebilir. Rayların ergitmeli kaynağı, kullanım esnasında hasara neden olan zayıf bağlantılarla sonuçlanır. Patlamalı kaynakta her iki tarafına pah açılmış tren rayları, aynı hizaya getirilerek, bir alüminyum alaşımlı bilezik eşit hizaya getirilen kesitlerin üzerine yerleştirilir ve her iki taraf eş zamanlı olarak patlama ile kaynaklanır [30].

2.6.3 Geçiş bağlantıları

Normalde birbirleriyle direkt olarak kaynaklanmayan, farklı metalleri birleştirmek için, tüm kaynaklı yapılarda geçiş bağlantıları kullanılır. Bir geçiş bağlantısının her bir bileşeni, patlamalı kaynak ara yüzeyinde herhangi bir azalma olmaksızın, her bir bileşenin ergitme kaynağını sağlayacak kalınlıkta olmalıdır. Böylece geçiş bağlantıları, hem alt levha kalınlığına bağlı bir üst levha kalınlığını içerir ve hem de oldukça az alanı kapsar ve sonraki özelliğin bir sonucu olarak eğimli kaynak geometrisi, paralel geometri gibi göz önünde bulundurulabilir. Böylece kaynak parametrelerinin seçiminde daha fazla esneklik vardır. Eğer, özellikle kalın bir geçiş bağlantısı gerekiyorsa, kaplama kalınlığı birincinin üstüne ikinci bir üst levha ile patlama ile kaynaklanarak artırılabilir.

Düzlem geçiş bağlantılarına örnek olarak;

- a) Alüminyumun düşük maliyeti ve bakırın düşük temas direncinden maksimum fayda sağlanabilen, alüminyumun bakır tevzi çubuğu toplayıcı bağlantıları.
- b) Alüminyum elektroliz işletmelerinde kullanılan alüminyum-çelik, çelik destekler grafik elektrotları tutmak için kullanılır ve akım, alüminyum çubuklarıyla ve bir alüminyum-çelik geçiş bağlantısıyla beslenir. Ergimiş elektrolidin sıcaklığı, gevrek ara metalik bileşenlerin oluşumu ile inter difüzyonun olduğu durumdaki sıcaklığa maruz alüminyum-çelik bağlantılarının ara yüzeyinin maruz kaldığı sıcaklık kadardır. Bu ısıl azalma tamamen yok edilmesine rağmen, eğer orijinal kaynak ara yüzeyinde ergime oranı minimize edilirse, azalma işleminin daha yavaş olduğuna dair bazı deliller vardır. Bunun nedeni de metaller arası bileşenlerin oluşumu için nüvenin daha az olmasıdır. Böylece ergimesiz düz bir ara yüzeyli kaynak tercih edilebilir. Isıl azalmaya karşı direnç artırıcı alternatif bir yöntem, difüzyon bariyerini içine katmaktır. Böylece 2 mm kalınlıkta titanyum ara tabakası içeren geçiş bağlantıları direkt alüminyum çelik bağlantılarından daha yüksek sıcaklıklara dayanabilir (hem üretim (450°C ve 315 °C) hem de çalışma sıcaklıklarına (425° C ve 260° C)).
- c) Alüminyum üst yapılarının (üst geçit-toprak üstü yapılar) bağlantıları için direk sütun ve antenleri, geminin çelik omurgasına alüminyum-çelik güverte salonu sütun ve antenleri. Alüminyum üst yapıları öncelikle civatalı yapılarla kullanılmasına rağmen bazı bakım problemlerinde çatlak korozyonuyla sonuçlanmıştır. Kaynaklı bağlantıların kullanımı, bakım gereksinimlerini azaltmıştır ve daha fazla olması gereken alüminyum üst yapılarının faydalarını müktedir kılmıştır.

Düzlemsel geçiş bağlantıları için yukarıda verilen örneklere ek olarak boru formundaki geçiş bağlantıları, bazen kaplanmış levhalarda işlenerek üretilir. Böyle bir ürüne örnek bağlama için hem boru işi hem de sıvılaştırılmış gaz depolama tanklarının bağlantıları için (kriyogenik (soğuk ortam) bağlantılarında) alüminyum

paslanmaz çelik tüp yapılarında geçiş bağıntısıdır. Gümüş, nikel yada titanyum gibi bir yada daha fazla ara tabaka ilave edilerek böyle bağlantıların mekanik özelliklerini geliştirmeye yönelik çalışmalar yapılmıştır. İçerisinde 0.75 mm kalınlıkta gümüş ara tabakası bulunan alüminyum alaşımlı-paslanmaz çelik birleşmesi -196°C ' de 280 MN/m^2 lik minimum çekme dayanımı ile şu anda ticari olarak piyasada mevcut bulunmaktadır. Böyle bağlantıların çarpma dayanımları yaklaşık 0.04 J/mm^2 dir [30].

2.6.4 Petekli yapı

Patlamalı kaynağın en karmaşık uygulamalarından birisi patlama ile birleştirilen petekli yapıların üretimidir. Metal tabaka kesme ve birleştirme ile gravür baskılıdır. Spot kaynağı, petekli yapıların düğüm hatları boyunca oluşabilen metal metal temasının olduğu yerdeki istif edilmiş yerdeki levhalar arasında yerleştirilir patlamalı şok impulsu üst levhayı ikinciye, ikinciyi üçüncüye çarpmak için hızlandırır. 600 adet üzerinde levha, tabaka kalınlığına bağlı olarak tek bir patlamada birleştirilebilir. Kaynaktan sonra tabaka yığını kesilebilir ve petekli yapı formuna getirilebilir. Patlama ile birleştirilebilen petekli yapı difüzyon birleşmesi gibi alternatif metotlarla üretilenlere göre daha iyi mekanik özellikler sergiler. Patlama ile kaynaklanmış petekli yapı 5 mm'lik hücre ölçüsünde ve 0.025-0.05 mm tabaka kalınlığında üretilmiş ve satışa sunulmuştur. Patlamalı kaynaklanan petekli yapının büyük bir avantajı diğer tüm üretim yöntemleriyle karşılaştırıldığında, maliyetin düşük olmasıdır. Bir çok metal petekli yapı, hava taşıt üreticileri tarafından panel vazifesi görmek üzere satın alınır. Patlamalı kaynaklanan petekli yapıların üstün mekanik özelliklerinden tam faydalanmak için, difüzyon birleşmesi ve lazer kaynağının bir kombinasyonu kullanılarak, dış yüzey kaplamasının gelişmesi yönünde çalışmalar vardır. Petekli yapılar ayrıca vakumlu tüp, ızgara (boru formunda-elektrik şebekesi), radyasyon ayarlayıcılar ve filtre taşıyıcılarda kullanılır

1960'ların başlarında patlamalı kaynakların üstün özellikleri diğer bağlantılarla mukayese edilmelerine rağmen bir çok uygulama önerilmiş fakat çok azının endüstride uygulandığı görülmüştür.

Patlamalı kaynaklanan geçiş bağlantıların düşük elektrik direnci ve düşük güç kayıplarıyla sonuçlanması, elektrolitik işlemlerde bir avantajdır. Alüminyum redüksiyon (indirgeyici) akü elemanları (kazanlar-bataryalar) için anotların imalatında alüminyum/çelik ve alüminyum/bakır patlama ile kaplanmış levhalara başarılı bir biçimde uygulanmaktadır. Elektro-kimyasal elemanlara patlama ile kaplanan titanyum/gümüş/çelik levhasının uygulanmaktadır. 12 mm kalınlığında titanyum, 0.4 mm gümüş ve 22 mm kalınlığında çelik içeren bu üçlü kaplama iki ayrı kaplama işlemiyle üretilir. Titanyum levhalar üçlü kaplamasının titanyum kenarına ve benzer olarak çelik, çelik kenara fizyon kaynağı ile birleştirilir.

Japon National Railways'ın normal raylar arasında çalışan doğrusal malzeme kullanılarak uzaktan kontrollü manevra lokomotifleri ile bilgisayar kontrollü manevra istasyonunda (dizileme durağı-ayırma gazı) rayla arasında lineer motorların reaksiyonu levhasının 230 mm genişlik ve 3 mm kalınlıktaki alüminyumun 16 mm'lik çeliğe kaplanarak kullanılmaktadır. Bu, arzu edilen elektriksel özellik, dayanım ve rijitliğin mükemmel bir kombinasyonudur.

Isı değiştiricilerde, tüp levhaların, hem korozyon direncine hem de basınçtan dolayı yeterli rijitliğe sahip olması gerekir. Bakır-nikel alaşımı (monel metal) ve pirinç gibi malzemeler tüp levha yapımında kullanılır ve bunlar düşük modüllü fakat pirinç yada monel metalin daha fazla kalınlığındaki tüp levhaların maliyeti büyük olabileceği için rijitliği arttıracak, çok ince levhalar arzu edilebilir. Bundan dolayı tüp levhaları rijitliği monel yada pirinç kaplı çelik kullanılarak artırılabilir. Böylece daha yüksek modüllü fakat daha ucuz malzeme elde edilir.

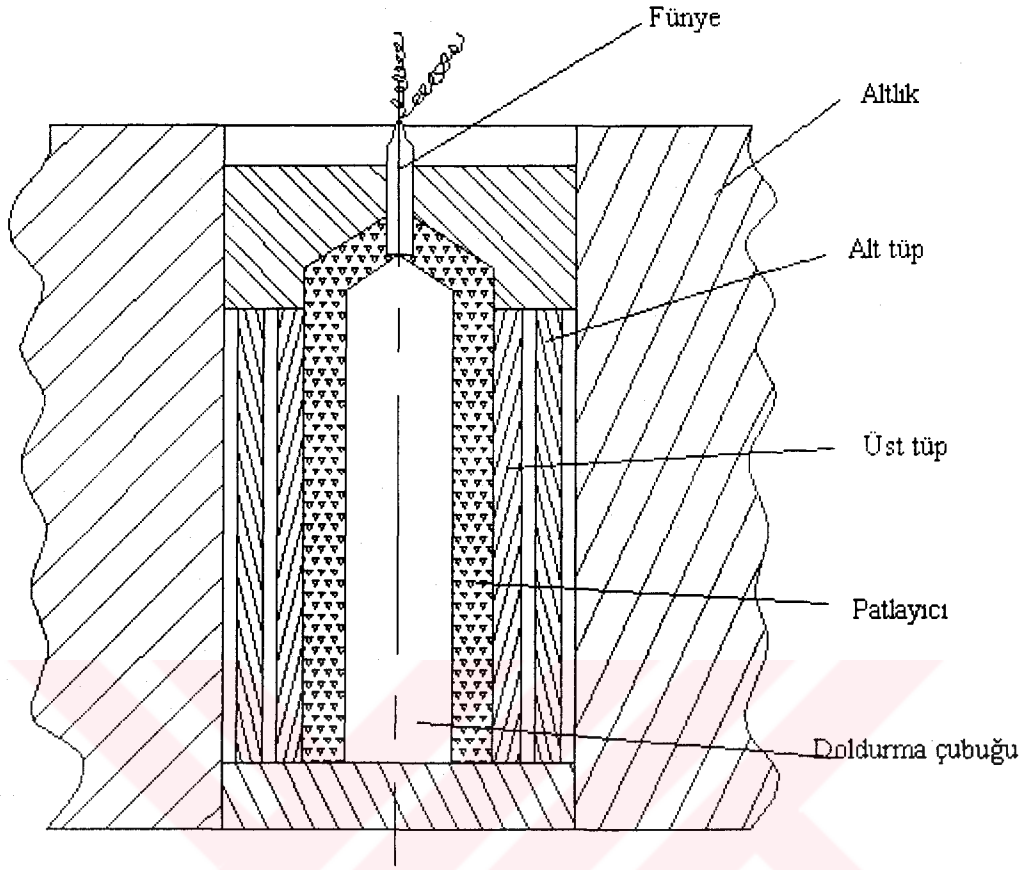
Zırh levhası, patlamalı kaplamanın bir diğer potansiyel uygulamasıdır. Çelik hedeflerin, balistik penetrasyonlara karşı direnci çok sert ön levhanın geleneksel zırh levhasına birleştirilmesiyle artırılabilir. Esasında sert ön yüzey zırh delen mermiyi parçalar fakat sert metalin kırılma tokluğu muhtemelen düşük olacağı için yüksek kırılma tokluğuna sahip arka levha ile birleştirilmezse parçalanacaktır. Çeşitli sertlikteki çelikler birbirlerine patlamalı kaynakla birleştirilir. 6,4 mm kalınlığındaki hem menevişlenmiş hem de ısı işlem görmüş maryaşlandırılmış çeliği 25 mm

kalınlıktaki zırh levhasına kaynaklanmışlardır. Menevişlenmiş maryaşlandırılmış çeliği 490°C'de yaşlanma sertleşmesine tabi tutulurken zırh levha çeliği gerginlik giderme ısıl işlemine tabi tutulur. Oluşan ürün düşük çarpma dayanımlı 530 VPN sertliğindeki maryaşlandırılmış çelik ve yüksek çarpma dayanımlı 298 VPN sertliğindeki zırh levha çeliğidir. Scotland'daki Nobel's Explosive Co. Ltd. 12 m² nin üzerindeki alanlarda basınçlı kaplar için muhafaza sacı ve 3,5 m ve üzeri çaplı tüpleri kaplayabilmektedir. 12 mm paslanmaz çelik 6 m × 2,5 m ebatlarındaki çeliğe kaplanabildiği ve hatta daha küçük alanla sınırlı alanla olmakla birlikte 45 mm ve üzerini kaplanabildikleri görülmüştür [5].

2.6.5 Silindirik yüzeylerin kaynağı

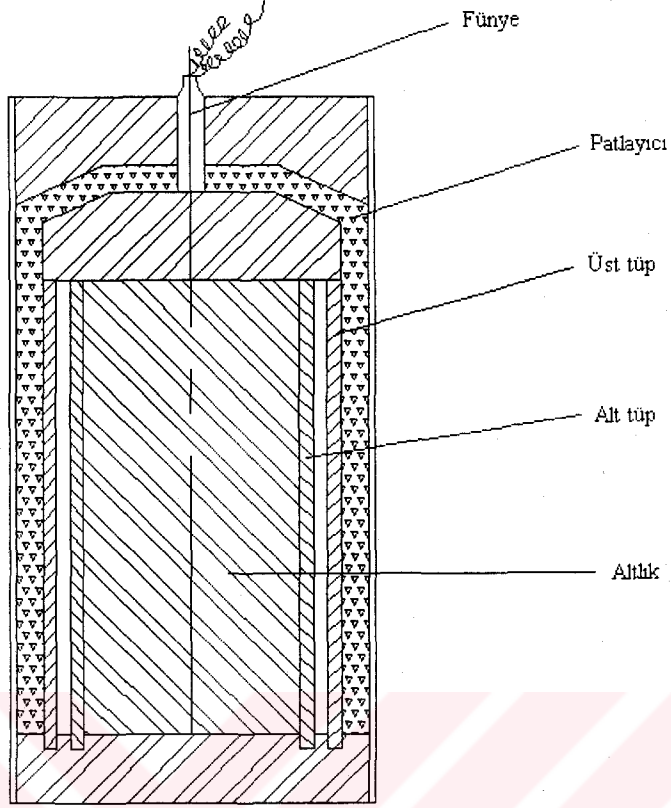
Silindirik yüzeylerin patlamalı kaplaması, patlamalı kaynağın ilk gelişme alanıdır. Başlangıçta buharlı elektrik santrallerinde nozullara uygulanmıştır. Buradaki nozulların korozyon direncine sahip olması istenir. Silindirik çubukların dış kaplamasına, hidrolik pompalar için, piston başlarına göre işlenmiş pirinç kaplı çubuklar örnek gösterilebilir. Bakır-alüminyum yada diğer kompozit malzemeli içi boş silindirler, örs görevini üstlenecek olan bir dış silindir kullanılarak iç kaplama yada iç tüpte bozulmayı engellemek için içe yerleştirilecek dolu bir çubuk kullanılarak dış kaplama üretilmiştir.

Silindirik yüzeylerin patlamalı kaynağında Şekil 2.24, 2.25 ve 2.26'de gösterilen 3 sistem vardır. Bunların birincisinde, patlayıcı iç tüpün içine yerleştirilir dış tüp bir destek vazifesi görececek olan bir silindirle desteklenir. Dış tüpün destek silindire kaynağını engellemek için lastik, boya, kauçuk gibi kalama ile ayrıca bir ara malzeme kullanmak gereklidir. Paralel bir patlamalı düzenekte olduğu gibi, hem iç hem de dış tüp malzemedeki sıkıştırıcı dalga hızından daha az patlama hızlı bir patlayıcı kullanmak gerekmektedir. Böyle bir patlayıcı kararlı patlama sağlayacak fünüye ihtiyaç duyar [5].

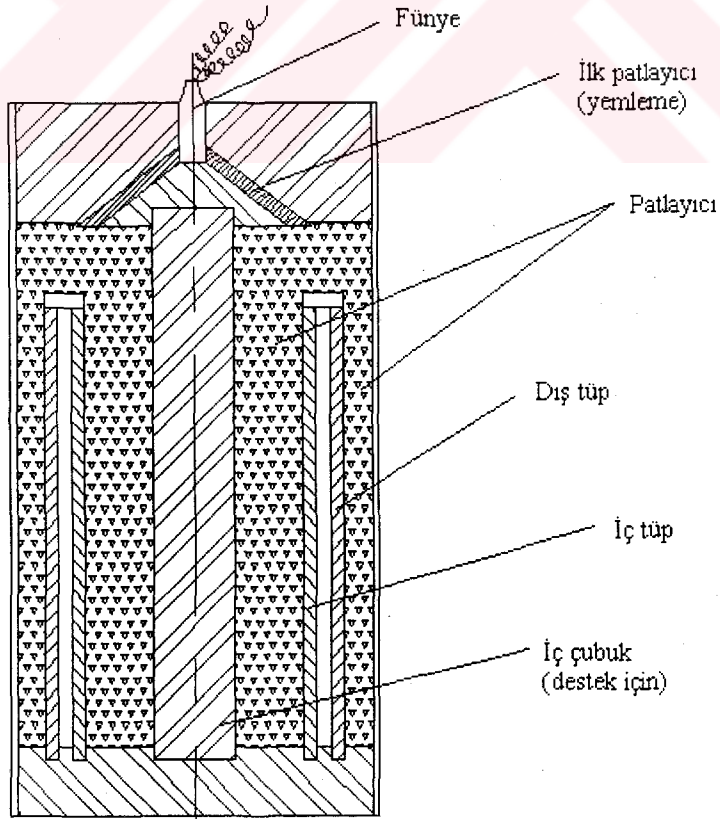


Şekil 2.24 Tüplerin Patlamalı Kaynağı [5]

Şekil 2.25'deki düzenlemede patlayıcı dış tüpü çevreleyen silindirik bir formdadır. Implosive sistem olarak nitelendirilen bu sistemde iç tüp deformasyonunu engellemek için desteklenmelidir. Bu da düşük ergime noktası alaşımlı dolu bir çubukla veya ağaç ile sağlanmalıdır. Şekil 2.26'deki son düzenlemede iç ve dış tarafa yerleştirilen patlayıcılardan oluşan iç ve dış impulsdan sakınmak için hem iç hem de dış desteğe gerek vardır. Bu belki de ideal bir düzenleme olarak gösterebilir. Fakat bu sistemde de bazı sınırlamalar vardır . İç ve dış tüp için patlayıcı yükleme oranı eşit etkide ve zıt impulslarda olmalıdır [5].



Şekil 2.25 Tüplerin patlamalı kaynağı (Implosive) [5].



Şekil 2.26 Tüplerin içten ve dıştan patlamalı kaynağı (explosive/implosive) [5]

Bunlar:

Alüminyum	- Al-Zn-Mg alaşımları
Alüminyum	- Maraging çeliği
Kobalt	- Orta karbonlu çelik
Bakır	- Duralüminyum
Bakır	- Nikel
Bakır	- Niobyum
Bakır	- Sanadyum
Pilatinyum	- Titanyum
Hadfield çeliği	- Orta karbonlu çelik
Zırh levhası	- Orta karbonlu çelik

Süneklik, ergime ve katılma noktası, her iki bileşenden birisinin kalınlığı ve yoğunluğu kaynaklanabilirliği belirleyen faktörlerdir. Kaplama işlemi boyunca çatlak oluşumundan kaçınmak için kaplama malzemesi yada alt levhanın 14 J'lük bir Charpy V çarpma değerine, yada standart bir çekme deneyinde en az %5'lik bir uzamaya sahip olması önerilmektedir. Arzu edilen bir kompozitin bileşenlerinden birisi diğerine göre gevrek olduğu durumda, uygulamada bileşenin alt levha olarak kullanılması daha uygundur. İki metal arasından maksimum 9gr/cm^3 'lük bir yoğunluk farkının olması önerilmektedir. Yoğunluğun önemi çarpışma noktasının etrafında malzemenin verdiği karşılıktan ileri gelir. Çarpışma noktasındaki basınç akma dayanımına göre çok yüksek ise malzemeler çarpışma noktasının etrafında bir akışkan gibi hareket eder ve çarpışma noktasından uzaklaşır. Bileşenler benzer yoğunlukta olduklarında, kaynak ara yüzeyi simetrik dalga paterni gösterir [30].

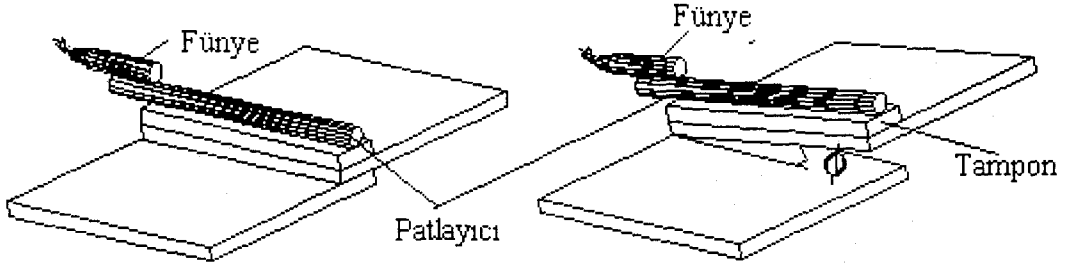
Tablo 2.10'da görüldüğü gibi 0,4 mm ile 50 mm arasındaki üst levha kalınlığı ticari uygulamada kullanılır. Küçük ölçekli testlerde 0,025 mm incelikteki üst levhalar ve 50 mm kalınlığındaki çelik üst levhalar başarılı bir şekilde birleştirilmiştir.

Tablo 2.10 Değişik Kaplama Malzemesi ve Kalınlıkları

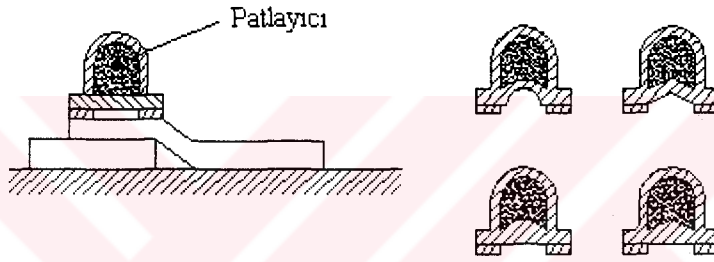
Kaplama Malzemesi	Kaplama Kalınlığı (mm)	
	Minimum	Maksimum
Alüminyum	6	50
Alüminyum-bronz	1.5	20
Pirinç	1.5	20
Bakır	1.5	22
Cupro-Nikel	1.5	22
Hasteloy	1.5	13
Inconel	1.5	20
Nikel	1.5	20
Nikel-gümüş	1.5	20
Platinyum	1.5	Henüz belirlenemedi
Silikon bronz	0.4	16
Paslanmaz çelik	1.5	25
Tantalyum	1.5	6
Titanyum	1.5	20
Zirkonyum	Henüz belirlenmedi	12

2.6.7 Patlamalı kaynağın diğer uygulama alanları

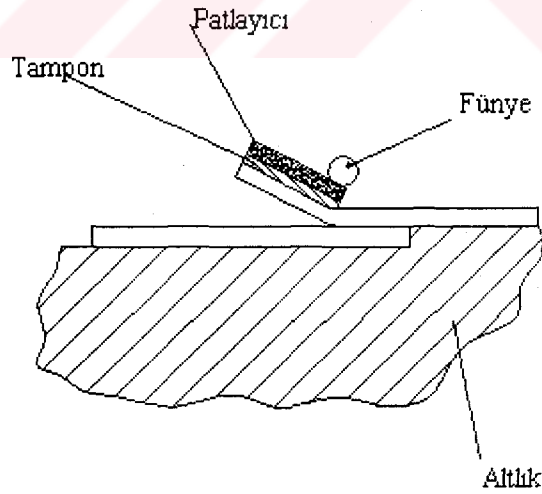
Patlamalı kaynağın esas uygulaması, düz levha kaplama ve silindirik yüzeylerin kaplanmasıdır. Genelde patlamalı kaynak, karmaşık şekillere uygulanmaz. Bunun nedeni de, hem patlayıcının kaynak yapılacak yere yayılmasındaki zorluk, hem de kesit değişimlerinden kaynaklanan sıkıştırma dalgalarının yansımasıyla oluşan ve hasara neden olabilecek yüksek çekme gerilmeleridir. Bununla birlikte, düz levha kaplama ve silindirik yüzeylerin kaplanması dışında patlamalı kaynağın birkaç değişik uygulamaları üzerine çalışmalar yapılmıştır. Bunlardan bazıları, endüstriyel uygulamaları içermekte iken bazıları da gelecek için potansiyel değer taşımaktadır. Genellikle bindirme kaynağı esasına dayanan bu uygulamaların şematik gösterimi Şekil 2.27, 2.28, 2.29 ve 2.30'da görülmektedir. Patlama ile alın kaynağı, Şekil 2.31'de ve ince levhaların patlama ile üretimi de Şekil 2.32'de görülmektedir [5].



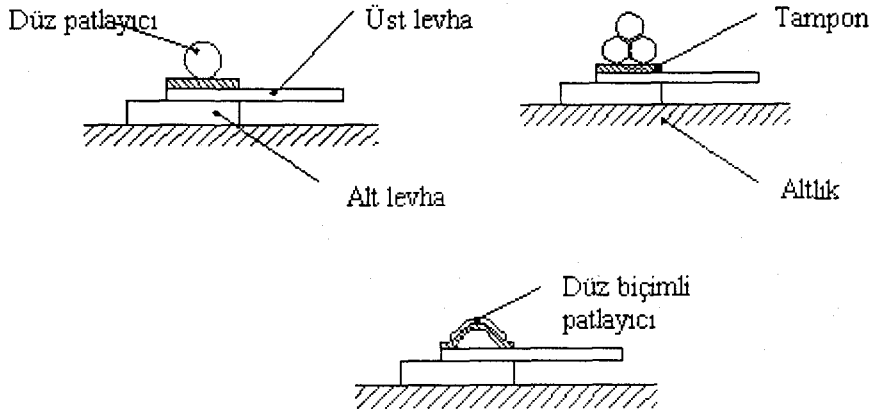
Şekil 2.27 Patlama ile bindirme kaynağı [5]



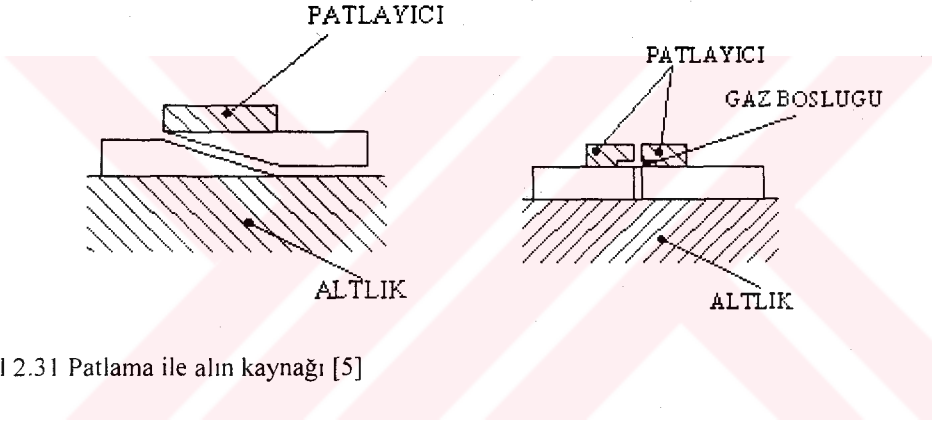
Şekil 2.28 Patlama ile bindirme kaynağı [5]



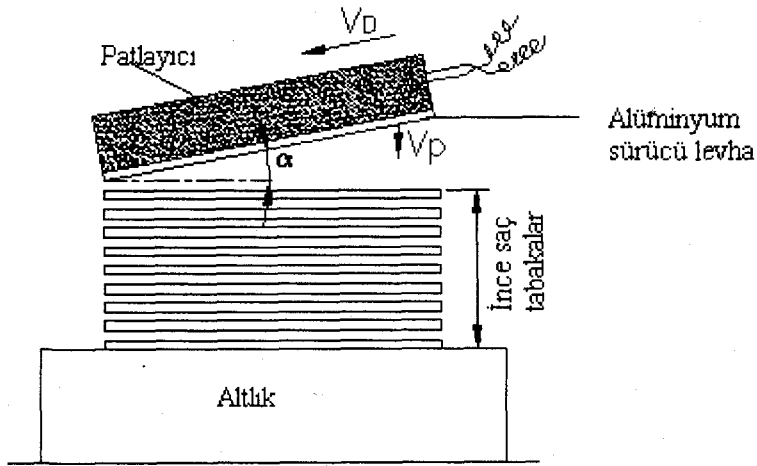
Şekil 2.29 Patlama ile bindirme kaynağı [5]



Şekil 2.30 Patlama ile bindirme kaynağı [5]



Şekil 2.31 Patlama ile alın kaynağı [5]



Şekil 2.32 Normal çarpma altında çok ince saç tabakalarının patlamalı kaynağı [5]

Patlamalı kaynak işleminin, ilk uygulamalarında karşılaşılan problemler, bu işlem hakkındaki bilginin sınırlı olmasından dolayı basit bir biçimde çözümlenememiştir.

Patlamalı kaynak işlemleri kolay olmasına rağmen, bu kaynak yöntemi yüksek basınçta ihtiyaç duyar ve deney koşullarında, sonuçta büyük değişikliklere sebep olabilen küçük bozukluklar, çok kısa zamanda oluşmaktadır. Bir çok durumda, temel problemleri içeren uygulamalar, bu konudaki bilginin çok az veya hiç olmamasıyla açığa çıkmıştır. Son yıllarda Amerikan Hükümetinin ve sanayiinin metal sistemleri için artan talepleri bütün geleneksel olmayan metal kaynak tekniklerine olan ilgiyi artırmıştır. Metal kompozitlerin artan çeşitliliğiyle yeni malzeme sistemlerine duyulan ihtiyaç, patlamalı kaynak işleme olan ilgiyi artırmıştır [6]. Crossland'ın [5] de ifade ettiği gibi, patlamalı kaynak konusunda özellikle dalga oluşum mekanizmasının anlaşılmasında karşılaşılan problemler bu tekniğin pratik uygulamasını engellemektedir.



BÖLÜM 3 DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Patlamalı kaynak işlem parametrelerinden olan paralel düzenlemelerde ara boşluk mesafesi (s), patlayıcı oranı (R; patlayıcı kütesinin üst levhaya oranı) ve altlığın birleşmenin mekanik ve metalürjik özelliklerine etkisini belirlemek amacıyla deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalar kullanılan malzemeler ve deneysel çalışmalar aşağıda verilmiştir.

3.1 Birleştirilecek Malzemeler

Deneysel çalışmalar çelik-çelik birleştirmelerini gerçekleştirmek amacıyla 250x250x2 mm Ç 1010 çelik sac (üst levha (kaplama levhası)) ve 250x250x4 mm çelik sac (alt levha (esas metal)) kullanılmıştır. Deneysel çalışmalar birleştirmek amacıyla kullanılan malzemelerin kimyasal bileşimleri Tablo 3.1’de verilmiştir.

Tablo 3.1 Deneysel çalışmalar kullanılan malzemelerin spektral analiz sonuçları (ağırlık %)

Elementler	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Al
Malzeme								
2 mm kal. Çelik sac	0.06	0.01	0.34	0.011	0.011	0.10	0.01	0.02
4 mm kal. Çelik sac	0.07	0.02	0.35	0.010	0.012	0.16	0.01	0.08

Ayrıca deneysel çalışmalar birleştirmek kullanılan malzemelerin sertlikleri Tablo 3.2’ de verilmiştir.

Tablo 3.2 Deneylerde birleştirmek için kullanılan malzemelerin sertlik değerleri

Malzeme	Sertlik Değeri (Hv)
2 mm'lik çelik sac	134 ± 5
4 mm'lik çelik sac	136 ± 4

3.2 Patlayıcı

Deneylerde M.K.E' ye bağlı Barutsan A.Ş.'nin üretmiş olduğu Elbar 5 toz patlayıcısı kullanılmıştır. Tablo 3.3'de Elbar 5'in bileşimi ve patlama ile ilgili özellikleri verilmiştir.

Tablo 3.3 Elbar 5'in bileşimi ve teknik özellikleri

Malzeme adı	Miktarı	ELBAR-5 in teknik özellikleri	
Amonyum Nitrat	% 90	Dökme yoğunluğu	0.75 g/cm ³
Motorin	% 4.5 Min.	Kurşun Blok Testi	400 cm ³ /10 g, min.
TNT	% 3.0 Min.	Patlama Hızı (çap 125 mm PVC tüp)	3500 m/sn, min.

Patlayıcının patlatılabilmesini sağlayabilmek amacıyla bir fûnye (kapsül) ve fûnye ile toz patlayıcı arasındaki patlatma intikalini sağlamak amacıyla yine Barutsan A.Ş.'nin üretmiş olduğu bir miktar (10 gr) jelatinit dinamit kullanılmıştır.

3.3 Altlık

Deneylerde patlatma işleminde, çelik-çelik birleştirmesi için, alt levhanın altına konulmak üzere altı adet değişik altlıklar kullanılmıştır. Bunlar; kum, 2000x450x450 mm ölçüsünde çelik kütük (I nolu altlık), 2000x1500x60 mm ölçüsünde çelik platin (II nolu altlık), 500x500x20 mm ölçüsünde çelik plaka, 500x500x25 mm ölçüsünde (3'er adet üst üste gelecek şekilde toplam 75 mm kalınlığında) çelik plakalar ve 500x500x100 mm ölçüsünde çelik döküm malzemelerdir. Çelik-çelik birleştirme işlemleri için tüm altlıklar ile alt levha arasına, kum altlık hariç, 5 mm kalınlığında lastik konulmuştur.

3.4 Deneysel Çalışmalar

3.4.1 Patlayıcı hazırlanması

Deneysel birleştirme işlemi için Barutsan A.Ş.'nin laboratuvarlarında patlayıcılar hazırlanmıştır. Patlayıcılar 260x260 mm genişliklerinde ve 50 mm yüksekliğinde karton kutular içine yerleştirilmiştir. Toz patlayıcının kutunun her tarafında eşit miktarda olmasına dikkat edilmiştir. İçi toz patlayıcı kutunun bir kenarının ortasından fünüye kablolarının geçmesi için delik açılmıştır. Her patlatma için hazırlanan 10 g'lık jelatinit dinamit fünüye yapıştırılmıştır. Karton kutu daha sonra karton bir kapakla üstü kapatılarak, bantla yapıştırılmıştır. Deneysel kullanılan patlayıcı oranları (R; patlayıcının kütlesinin üst levha kütlesine oranı) sırasıyla, 1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2.0 ve 2.4 olarak tespit edilmiştir.

3.4.2 Birleştirilecek malzemelerin hazırlanması

Deneysel birleştirilecek malzemelerden çelik saçların yüzeyleri spiral el taşlama makinesine tel fırça takılmak suretiyle yüzeyinde herhangi bir şekilde pas ve yağ gibi pislikler kalmayacak şekilde temizlenmiştir. Ayrıca, özellikle, 4 mm'lik saçların kesiminde oluşan kenar bozuklukları da eğe ve çekiç yardımıyla düzeltilmiş ve saç kenarlarının zemine tam oturtulması sağlanmıştır.

3.4.3 Birleştirme düzeneğinin hazırlanması

Patlatma ile birleştirme deneyleri için paralel düzenek hazırlanmıştır. Paralel düzenlemede, alt levha altlığın üzerine yerleştirilmiş ve üst levha da aralarında bir miktar boşluk olacak biçimde alt levhanın üzerine yerleştirilmiştir. Alt ve üst levha arasındaki ara boşluk mesafesi (s), üst levha kalınlığının yarısı ($1/2 t$; t: üst levha kalınlığı) ve üst levha kalınlığı kadar ($1/1 t$) olacak şekilde ayarlanmıştır. Çelik-çelik birleştirme işlemlerinde kullanılan değişkenler Tablo 3.4'de görülmektedir. Tablodan görüleceği gibi, her altlık için ayrı ayrı patlayıcı oranları ve ara boşluk mesafelerinde patlatma işlemleri gerçekleştirilmiştir. Örneğin: Kum altlık için 1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8,

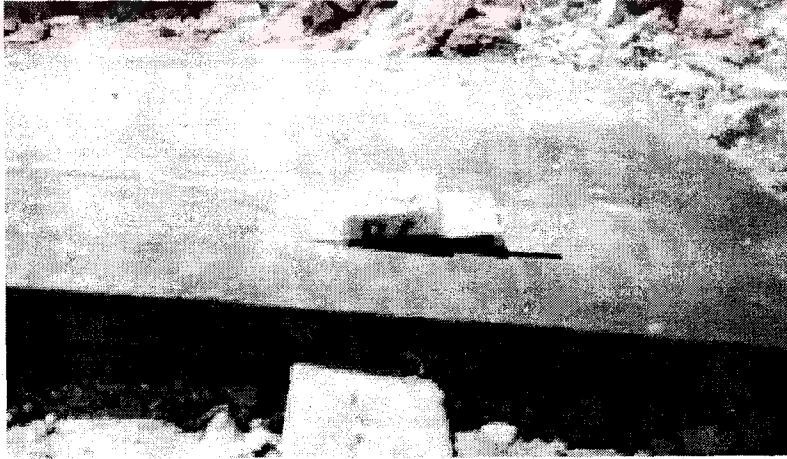
2.0 ve 2.4 patlayıcı oranlarında ve $s: 1/2 t$ ve t ara boşluk mesafelerinde patlatma işlemleri yapılmıştır.

Tablo 3.4 Çelik-çelik birleştirme işlemlerinde kullanılan değişkenler

Altlık	Patlayıcı Oranı (R)							Ara Boşluk Mesafesi (s)	
	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.4	$1/2 t$	t
Kum	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.4	$1/2 t$	t
2000x450x450 mm (I nolu Altlık)	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.4	$1/2 t$	t
2000x1500x60 mm (II nolu Altlık)	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.4	$1/2 t$	t
500x500x20 mm (III nolu Altlık)	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.4	$1/2 t$	t
500x500x25 mm (IV nolu Altlık)	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.4	$1/2 t$	t
500x500x100 mm (V nolu Altlık)	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.4	$1/2 t$	t

3.4.4 Patlatma ile birleştirme işlemi

Tablo 3.4’de görülen değişkenlerden her biri için üçer adet olacak biçimde ve toplam 1050 adet çelik-çelik birleşmesi için patlatma işlemi gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.1’de görüldüğü gibi yerleştirilen patlayıcılar, Şekil 3.2’de görüldüğü gibi elektrikli manyetonun çevrilmesiyle patlatma işlemi gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.3’de de patlama anından bir görüntü görülmektedir.



Şekil 3.1 Patlayıcı ve birleştirilecek malzemelerin yerleştirilmesi



Şekil 3.2 Patlatma işlemi için elektrikli manyetonun çevrilmesi



Şekil 3.3 Patlama anından bir görüntü

Deneylerde kullanılan patlayıcı miktarlarına göre, V'_p (üst levha son hızı) eşitlik 2.25'e göre hesaplanmış ve Tablo 3.5'de gösterilmiştir.

$$V'_p = \sqrt{(2E)} \left(\frac{\sqrt{3}}{1 + 2M/C} \right) \quad (2.25)$$

Burada M; üst levhanın yüzde birim alan kütlesi, C; patlayıcının kütlesi yüzde birim alan, E; oluşan patlamanın kinetik enerjisi yüzde birim kütle ve $\sqrt{(2E)}$; Patlayıcı ve geometri için karakteristik Gurney hızıdır. 2.25 eşitliğindeki $\sqrt{2E}$ değeri, Tablo 2.2'den %6'lık Anfo için verilen değer alınmıştır.

Tablo 3.5 Patlayıcı miktarlarına göre üst levha son hızı

Patlayıcı Oranı R	Üst levha son hızı Vp; m/s
1.0	923
1.2	1039
1.4	1141
1.6	1231
1.8	1312
2.4	1514

Bulunan bu değerler Tablo 2.1’de verilen minimum seviyelerin çok üstünde olduğu görülmektedir. Ancak Blazynski [30], gerçekte üst levha hızları bazı durumlarda (örneğin; çelik-çelik) 1000 m/s’nin aşımında kullanılabileceğini ifade etmiştir. Değişik altlık, farklı patlayıcı oranı ve ara boşluk mesafelerinde elde edilen birleşmeler Tablo 3.6’da görüldüğü gibi kodlanmıştır.

Tablo 3.6 Değişik altlık, farklı patlayıcı oranı ve ara boşluk mesafesinde elde edilen birleşmelerin kodları

Patlayıcı Oranı(R)	Ara Boşluk Mesafesi (s)			
	$\frac{1}{2} t^*$		t	
1.0				
1.2				
1.4				A
1.6		B		C
1.8	D	E	F	G
2.0	H	I	J	K
2.4	L	M	N	
	I	II	I	II
	ALTLIK**			

* t üst levha kalınlığıdır.

**I nolu altlık: 2000x450x450 ve II numaralı altlık: 2000x1500x60 mm ebatlarında

3.5 Metalografik Muayene

Metalografik muayene için, patlatma ile birleştirilen malzemelerden patlatma yönüne paralel olacak biçimde 20 mm uzunluğunda ve 10 mm genişliğinde numuneler çıkartılmış ve 20 mm’lik kenar (patlama yönüne paralel) metalografik işlemler için ince kalınlıkta olduğundan dolayı bakalite gömülmüştür. Metalografik inceleme için, her bir birleşmeden birer adet numune, 675°C’de 30 dakikalık ısıl işleme tabi tutulmuştur. Böylece her bir birleşme için ikişer adet metalografik inceleme yapılmıştır. Çelik-çelik birleşmeleri %2 Nital-%98 Metanol dağlama solüsyonuyla

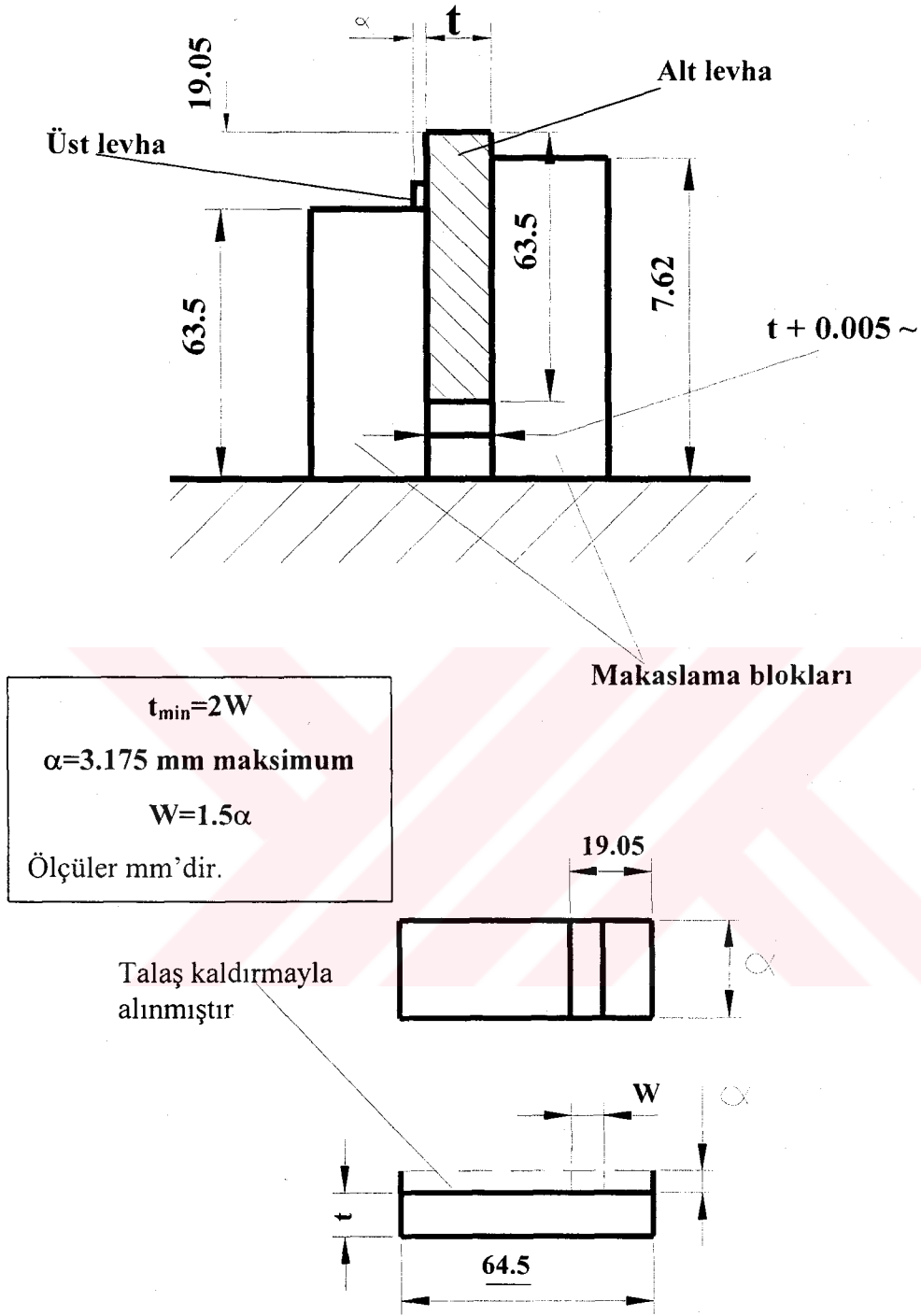
dağlanmadan önce standart metalografik usullerle (180'den 1200'e kadar zımparalama ve elmas pasta ile keçede parlatma), metalografik inceleme için hazırlanmıştır. Dağlanan numuneler daha sonra ultrasonik temizleme cihazında temizlenmiştir. Metalografik incelemelerde hem optik mikroskop hem de Kırıkkale Üniversitesinde bulunan SEM (tarama elektron mikroskobu) kullanılmıştır.

3.6 Mikro Sertlik İncelemesi

Patlatma ile birleştirme işlemiyle elde edilen numuneler, Ankara Türk Traktör Fabrikasının Kalite Kontrol biriminde bulunan Zwick marka, 3212002/00 tipi, 230 V'luk gerilim, 0.06 A akım ve 50 Hz/60Hz frekansta çalışan mikro sertlik cihazında incelenmiştir. İncelemelerde uygulanan yük miktarı 100 g'dır. Her bir numunede 5 farklı noktadan üç ölçüm yapılmıştır.

3.7 Makaslama Testi

Makaslama testi için, 250x250x6 mm ebadındaki patlamayla birleştirilmiş malzemelerden patlama yönüne paralel olacak şekilde numuneler çıkartılmıştır. Şekil 3.4'de görülen boyutlarına hassas bir şekilde frezede işlenerek getirilmiştir. Her test için üç numune hazırlanmıştır. Makaslama testi çekme test cihazında basma yönünde yapılmıştır. Makaslama sırasında cihazın hareketli kısmı 0.5 mm/dak olarak seçilmiştir. Her birleşme için üç numune teste tabi tutulmuştur. Her üç numunenin test sonuçlarının ortalama değeri alınmıştır.



Şekil 3.4 ASTM standardına göre makaslama testi [62]

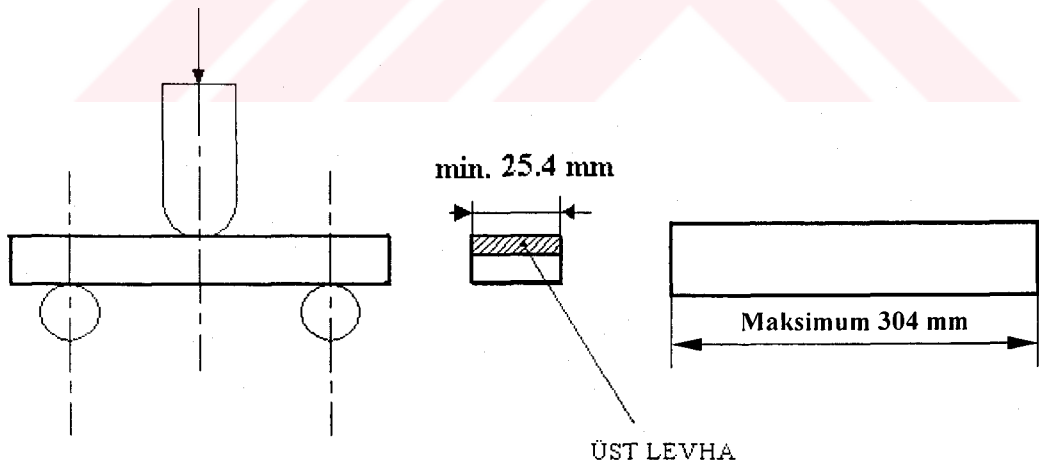
Çekme deney cihazında basma yönünde kuvvet uygulanarak numunelerin makaslama dayanımları aşağıdaki 3.1 eşitliğindeki gibi hesaplanmıştır.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (3.1)$$

3.1 denklemindeki F; uygulanan kuvvet (kg), A; kuvvetin uygulandığı (birim) alan (mm^2) ve σ ; uygulanan gerilme (kg/mm^2).

3.8 Eğme Testi

Eğme testi için 250x250x6 mm ebadındaki patlamayla birleştirilmiş malzemeler patlama yönüne paralel olacak şekilde numuneler çıkartılmıştır. ASTM A 264'de [62] belirtilen ölçülerde hazırlanan eğme numunesi Şekil 3.5'de görülmektedir. Eğme testi ölçüleri, standarda [62] göre, malzeme uzunluğu en fazla 304 mm, numune genişliği ise minimum 25.4 mm ve kalınlık ise numunenin tam kalınlığı olacaktır. Eğme testi de yine makaslama testinde olduğu gibi çekme test cihazında yapılmıştır. Eğme çeneleri aracılığıyla 90° 'ye kadar bükülen numuneler daha sonra basma çeneleriyle 180° 'ye kadar bükülmüştür. Eğme testinde de her birleşme için üç numune teste tabi tutulmuştur.



Şekil 3.5 ASTM standardına göre eğme deney numunesi [62]

3.9 Isıl İşlem Şartları

Patlama ile elde edilen birleştirmeler 675°C 'de 30 dakika fırında bekletilerek yeniden kristalleşme tavlmasına tabi tutulmuştur. Isıl işlem için Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Metal Eğitimi Bölümü Malzeme Laboratuvarında bulunan

HEREAUS marka tav fırını kullanılmıştır. Fırın, $\pm 5^{\circ}\text{C}$ duyarlılıkta, $0-1350^{\circ}\text{C}$ 'ler arasında tavlama yapmakta ve elektrik direnci ile çalışmaktadır. Tavlama işlemleri hava ortamında yapılmıştır.



BÖLÜM 4 DENEY SONUÇLARI

4.1 Kullanılan Altlıkların Birleşmeye Etki Eden Sonuçları

Patlatma ile birleştirme çalışmalarında kum altlıkta birleşme gerçekleşmemiştir. Yine kum altlıkta olduğu gibi, 500x500x20 mm çelik plaka ve 500x500x25 mm çelik plaka altlıklarında da numuneler birleşmemiş ve altlık ile birlikte toprağa gömülmüştür. 500x500x100 mm ölçüsünde çelik döküm malzemelerin altlık olarak kullanıldığı patlatma işlemlerinde ise altlığın parçalanmasından dolayı ancak bir tek numune birleştirilebilmiştir. Deney sonuçlarının objektif değerlendirilmesi açısından bu birleşen numune dikkate alınmamıştır. 500x500x25 mm ölçüsünde (3'er adet üst üste gelecek şekilde toplam 75 mm kalınlığında) çelik plakaların altlık olarak kullanıldığı durumda yapılan patlatma işlemlerinde ilk numune birleşmiştir. Ancak ilk patlatmadan sonra oluşan hızlı ve yüksek deformasyondan dolayı altlık malzemesinin bozulduğu görülmüştür. Özellikle fünüye ve yemleme olarak kullanılan jelatinit dinamitin patladığı yerde geometrik bozulma görülmüş ve altlık olarak kullanılan plakalardan özellikle üstteki plaka yani patlama ile, diğerlerine göre, yakın temasta bulunan plaka içe doğru kavis almıştır. Bozuk geometri altlık üzerinde daha sonra tekrar patlatma işlemi gerçekleştirilmiş ancak değişik patlayıcı oranları ve ara boşluk mesafelerinde birleşme sağlanamamıştır. Üçlü plakalardan bir önceki patlatmada hemen hemen hiç deformasyon olmayan, en alttaki plaka en üste konularak tekrar patlatma işlemleri gerçekleştirilmiş ancak en üstteki altlığın diğer alt levhalarla geometrik uyumsuzluktan dolayı yani kenarlarda tam temaslarının sağlanmamış olmasından dolayı, birleşme işlemi gerçekleşmemiştir. 2000x450x450 mm ebadındaki çelik altlık (I nolu altlık) üzerinde yapılan patlatma işlemlerinde, ilk önce, alt levha ile altlık arasında herhangi bir koruyucu tampon tabaka konulmadan patlatma işlemi gerçekleştirilmiştir. Ancak 2000x1500x60 mm ebadındaki, çelik plaka, altlık (II nolu altlık) üzerinde yapılan patlatma işlemlerindeki parametrelerle aynı değerler kullanılmasına rağmen sadece çok yüksek patlayıcı oranı ($R=2.4$) ve geniş ara boşluk mesafesi ($s= 2t$) kullanıldığında birleşme gerçekleştirilmiştir.

Bundan dolayı da alt levha ile altlık arasına 5 mm kalınlığında lastik konulmuştur. Bu durumda patlatma işlemi gerçekleştirilmiş ve diğer deneysel çalışmalar yapılmıştır. 2000x450x450 mm ebadındaki altlık üzerinde 5 mm'lik lastik tampon tabaka olduğu halde yapılan birleştirme işlemlerinde 1.6 ve daha düşük patlayıcı oranlarında birleşme olmamıştır. 2000x1500x60 mm ebadındaki altlık üzerinde yapılan patlatma işlemlerinde, 1.4 patlayıcı oranı ve 1/2 ara boşluk mesafesi ve daha düşük patlayıcı oranlarında birleşme sağlanamamıştır. Birleştirmeler incelenmeden önce daha önce yapılan çalışmalar esas alınarak [47, 65] patlama ile birleştirilen malzemelerin, köşe etkilerinden kurtulmak için, tüm kenarından 25 mm'lik kısım kesilmiştir. Patlatma işlemlerinde birleşen ve birleşmeyen numuneler Tablo 4.1'de görülmektedir.

Tablo 4.1 Değişik altlıklarda farklı ara boşluk mesafesi ve patlayıcı oranlarında yapılan patlatma işleminde birleşen ve birleşmeyen numuneler

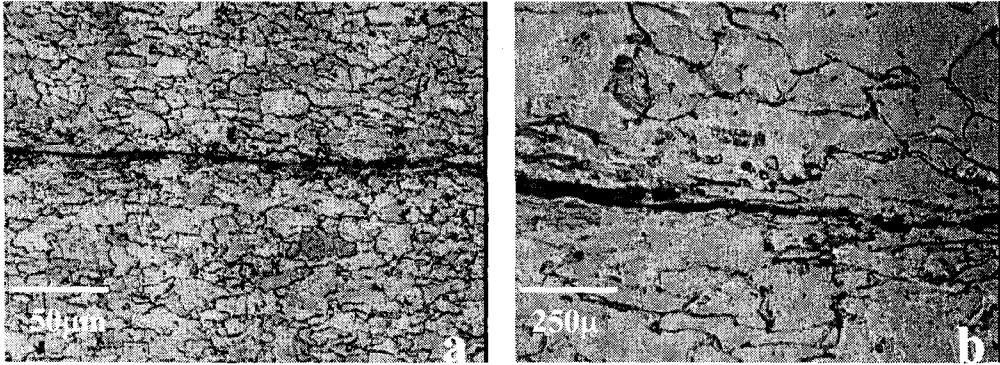
Altlık	Patlayıcı Oranı							Ara Boşluk Mesafesi	
	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.4	1/2 t	t
Kum	1.0 (-)	1.2 (-)	1.4 (-)	1.6 (-)	1.8 (-)	2.0 (-)	2.4 (-)	1/2 t	t
2000x450x450 mm (I nolu) Altlık	1.0 (-)	1.2 (-)	1.4 (-)	1.6 (-)	1.8 (+)	2.0 (+)	2.4 (+)	1/2 t	t
2000x1500x60 mm (II nolu Altlık	1.0 (-)	1.2 (-)	1.4 (+)	1.6 (+)	1.8 (+)	2.0 (+)	2.4 (+)	1/2 t	t
500x500x20 mm ebatlı altlık	1.0 (-)	1.2 (-)	1.4 (-)	1.6 (-)	1.8 (-)	2.0 (-)	2.4 (-)	1/2 t	t
500x500x25 mm ebatlı altlık	1.0 (-)	1.2 (-)	1.4 (-)	1.6 (-)	1.8 (-)	2.0 (-)	2.4 (-)	1/2 t	t
500x500x100 mm ebatlı altlık	1.0 (-)	1.2 (-)	1.4 (-)	1.6 (-)	1.8 (-)	2.0 (-)	2.4 (-)	1/2 t	t

(-) Birleşmeyen numuneler - (+) Birleşen numuneler

4.2 Metalografik İnceleme

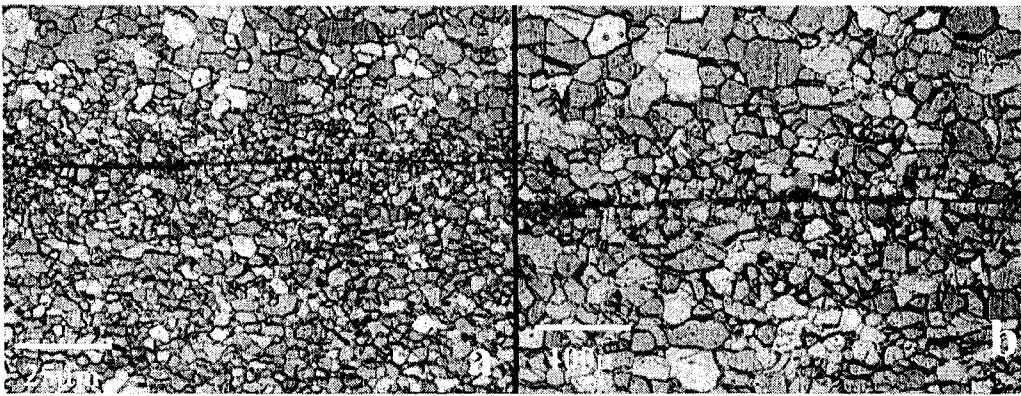
Patlama ile birleştirilen numunelerin optik mikroskoptaki görüntüleri Şekil 4.1 - 4.25'de görülmektedir. Optik fotoğrafların hemen hemen hepsinde ısıl işlemsiz numuneler için birleşme bölgesinde patlama yönünde tanelerin uzadığı görülmüştür. Isıl işlemten sonra patlamadan dolayı patlama doğrultusunda uzayan tanelerin yeniden kristalleşerek eski konumlarına geldiği görülmüştür. Şekil 4.1'de 1.4 patlayıcı oranı ve t ara boşluk mesafesinde ve 2000x1500x60 mm ölçüsündeki çelik plakanın altlık (II nolu altlık) olarak kullanıldığı durumda elde edilen ara yüzey

görülmektedir. Şekilde de görüleceği gibi, ara yüzey ince bir çizgi biçiminde bölgesel de olsa ergime bölgelerine sahiptir. Ergime bölgeleri çukurcuk şeklindedir

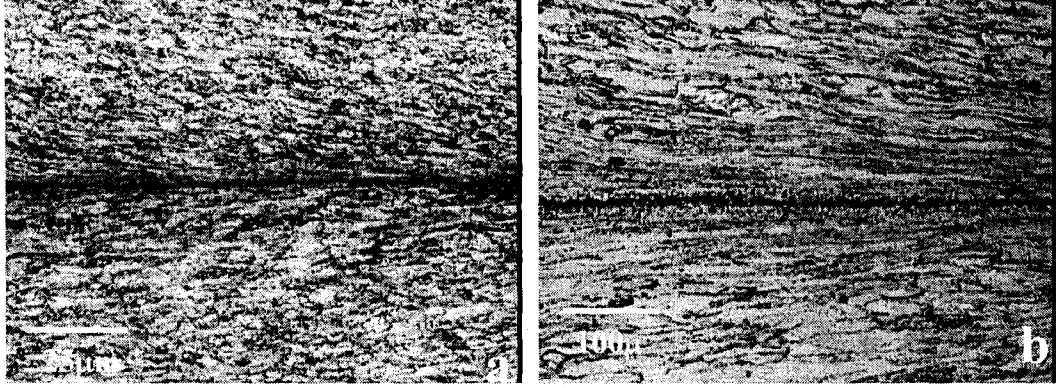


Şekil 4.1 A birleşmesinin mikroyapısı a)X100 b) X500

Şekil 4.2’de 1.4 patlayıcı oranı ve t ara boşluk mesafesinde ve 2000x1500x60 mm ölçüsündeki çelik plakanın altlık (II nolu altlık) olarak kullanıldığı durumda elde edilen birleşmenin (A birleşmesi) 4.1’deki numunenin 675°C’de 30 dakika ısıl işleme tabi tutulmuş yapısı görülmektedir. Şekil 4.1’deki yapıya göre taneler daha düzenli ve bir önceki yapıya göre patlama doğrultusunda uzayan taneler yeniden kristalleşme ısıl işleminin bir sonucu olarak patlatmadan önceki şekillerini kazanmıştır.

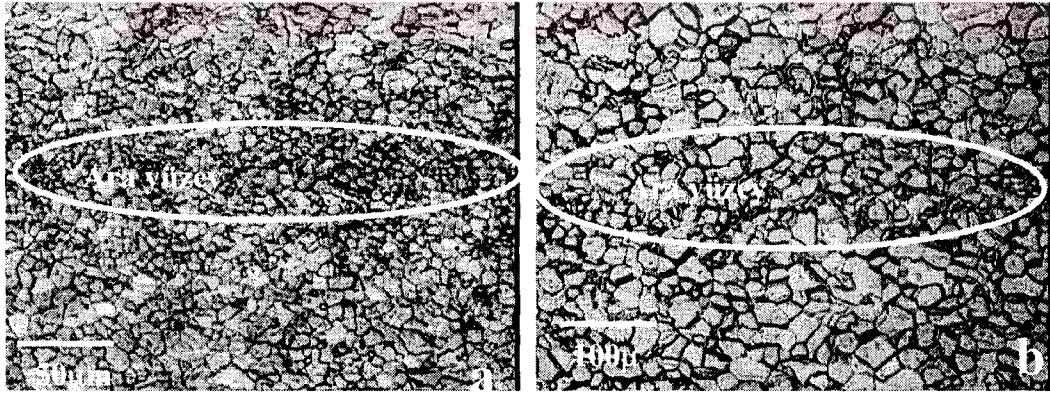


Şekil 4.2 A birleşmesinin ısıl işlem görmüş mikroyapısı a) X100b) X200



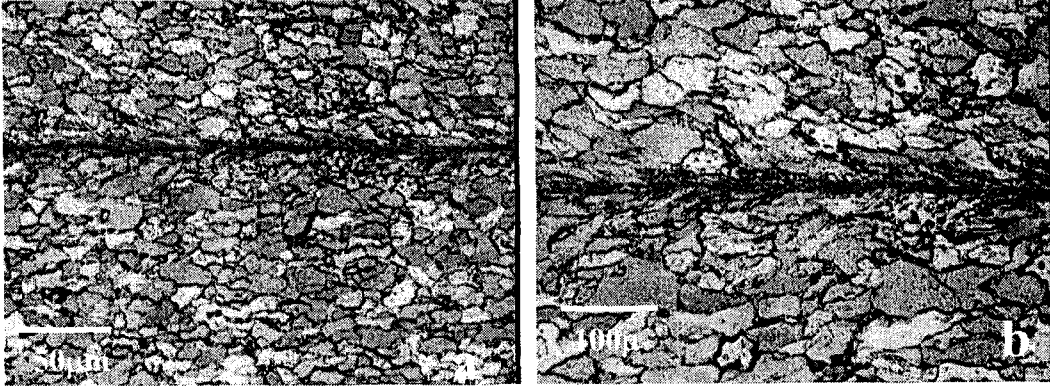
Şekil 4.3 B birleşmesinin mikroyapısı a)X50 b) X200

Şekil 4.3'de 1.6 patlayıcı oranı ve 1/2 t ara boşluk mesafesinde ve 2000x1500x60 mm ölçüsündeki çelik plakanın altlık (II nolu altlık) olarak kullanıldığı durumda elde edilen birleşmenin (B birleşmesi) mikro yapısı görülmektedir. Şekil 4.1 ile karşılaştırıldığında yapının daha fazla deforme olduğu buna bağlı olarak tanelerin patlama yönünde daha fazla uzadığı görülmektedir. Özellikle Şekil 4.1 ile 4.3 karşılaştırıldığında deformasyonun 1.6 patlayıcıyla birleştirilen malzeme çiftinde daha fazla olduğu görülmektedir.



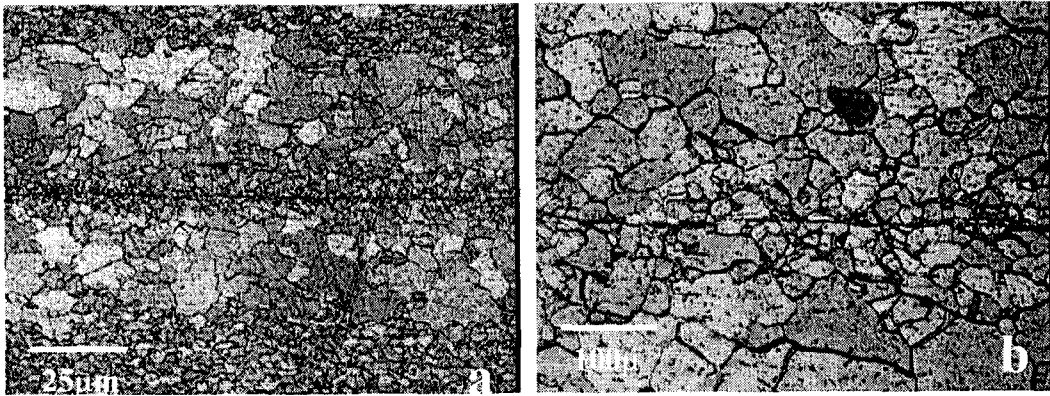
Şekil 4.4 B birleşmesinin ısı işlem görmüş mikroyapısı a) X100 b) X200

Şekil 4.4'da 4.3'deki numunenin 675°C'de 30 dakika ısı işleme tabi tutulmuş yapısı görülmektedir. Şekil 4.4 a'da siyah olarak görülen birleşme bölgesi 4.4 b'de tek parça olarak görülmektedir. Yukarıda da ifade edildiği gibi bu birleşmede de metal-metal geçişi vardır.

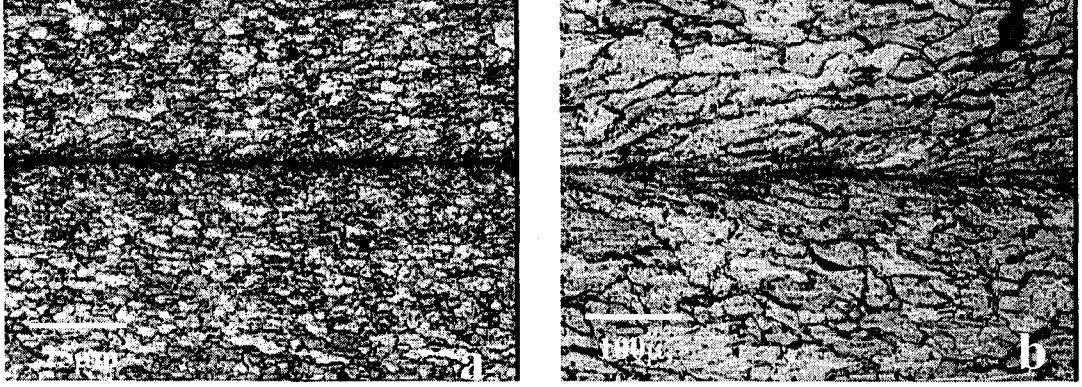


Şekil 4.5 C birleşmesinin mikroyapısı a)X100 b) X200

Şekil 4.5'de 1.6 patlayıcı oranında, t ara boşluk mesafesinde ve 2000x1500x60 mm'lik altlık (II nolu altlık) üzerinde yapılan birleştirme işleminde elde edilen ara yüzey görülmektedir. Şekil 4.6'da Şekil 4.8'de gösterilen birleşmenin 675°C'de 30 dakika ısıl işleme tabi tutulmuş yapısı görülmektedir. Ara boşluk mesafesi arttığından dolayı birleşme ara yüzeyi daha belirgin hale gelmiştir. Şekil 4.5'e bakıldığında ara yüzeyde sanki bir ergimenin olduğu görülmektedir. Gerçekte küçük ergime bölgeleri içeren numunenin ısıl işlem sonrası optik görüntüsünde yine metal-metal geçişinin var olduğu gözlemlenebilir.



Şekil 4.6 C birleşmesinin ısıl işlem görmüş mikroyapısı a)X50 b)X100 c) X200 d) X500



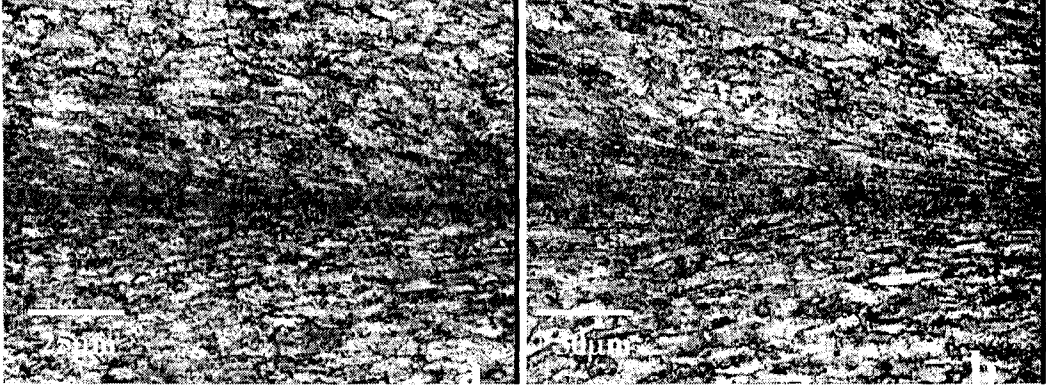
Şekil 4.7 D birleşmesinin mikroyapısı a)X50 b) X200

Şekil 4.7’de 1.8 patlayıcı oranında, 1/2 t ara boşluk mesafesinde ve 2000x1500x60 mm’lik altlık (II nolu altlık) üzerinde yapılan birleştirme işleminde elde edilen ara yüzey görülmektedir. Şekil 4.8’de Şekil 4.6’da gösterilen birleşmenin 675°C’de 30 dakika ısıtılma işlemine tabi tutulmuş yapısı görülmektedir. Bu numune de görüldüğü gibi, taneler patlatma doğrultusunda uzamıştır. Ara yüzeyden uzaklaştıkça tanelerde, birleşme ara yüzeyine yakın bölgedeki tanelere göre, ısıtılmanın etkisiyle büyüdüğü görülebilir.



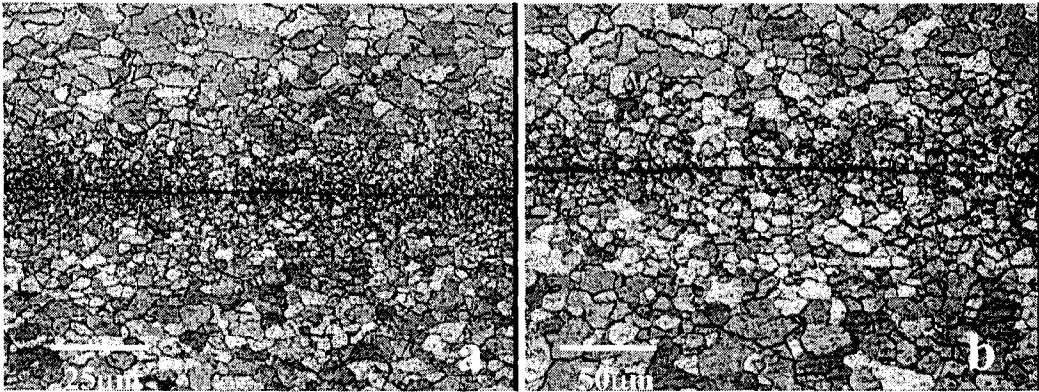
Şekil 4.8 D birleşmesinin ısıtılma işlemi görmüş mikro yapısı a)X50 b)X200

Isıtılma işlemi görmüş numune incelendiğinde, birleşme ara yüzeyinde yani aşırı plastik deformasyona maruz kalmış bölge ince taneler içermekte, ara yüzeyden uzaklaştıkça taneler irileşmekte bir başka deyişle eski yapısını korumaktadır.



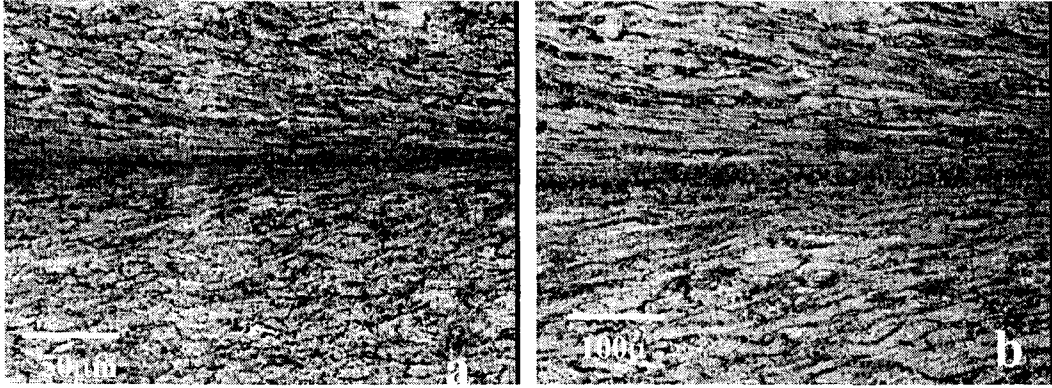
Şekil 4.9 E birleşmesinin mikroyapısı a)X50 b)X100

1.8 patlayıcı oranı, 1/2 t ara boşluk mesafesinde ve 2000X1500X60 mm ebatlarındaki altlık (II nolu altlık) üzerinde yapılan patlatma işlemlerinde elde edilen birleşme ara yüzeyi Şekil 4.9'da görülmektedir. Şekil 4.10'da 675°C'de 30 dakika ısıtma işlemi görmüş yapı görülmektedir. Diğer numunelerde görülen özellikler bu birleşmede de görülmektedir. Yani birleşme ara yüzeyinde taneler patlatma doğrultusunda uzamakta, ara yüzeyden uzaklaştıkça taneler ilk halini muhafaza etmektedir.



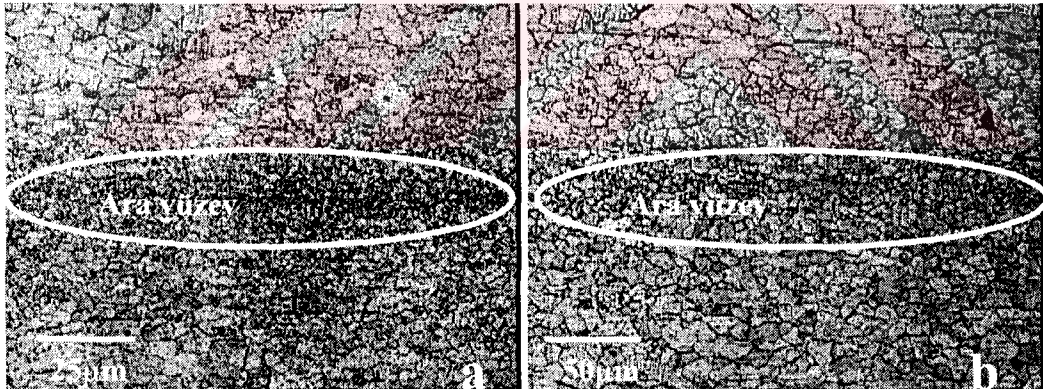
Şekil 4.10 E birleşmesinin ısıtma işlemi görmüş mikroyapısı a)X50 b)X100

Isıtma işlemi görmüş numune incelendiğinde, Şekil 4.8'deki yapının aynısı Şekil 4.10'da görülmektedir.

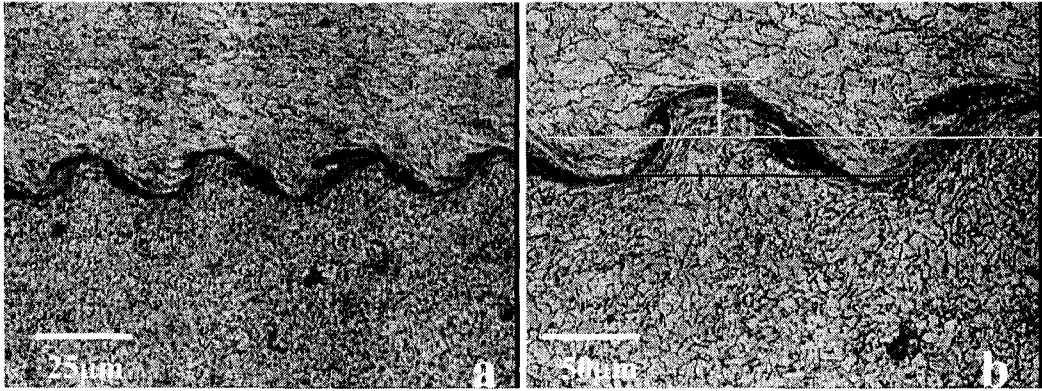


Şekil 4.11 F birleşmesinin mikroyapısı a)X100 b) X200

Şekil 4.11'de 1.8 patlayıcı oranında, t ara boşluk mesafesinde ve 2000x450x450 mm'lik altlık (I nolu altlık) üzerinde yapılan birleştirme işleminde elde edilen ara yüzey görülmektedir. Şekil 4.12'de Şekil 4.11'de gösterilen birleşmenin 675°C'de 30 dakika ısıtılmasına tabi tutulmuş yapısı görülmektedir.

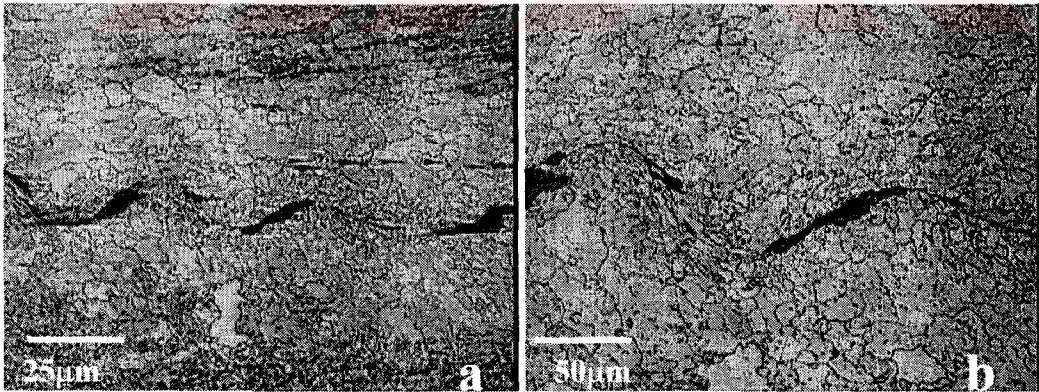


Şekil 4.12 F birleşmesinin ısıtılma işlemi görmüş mikroyapısı a)X50 b)X100

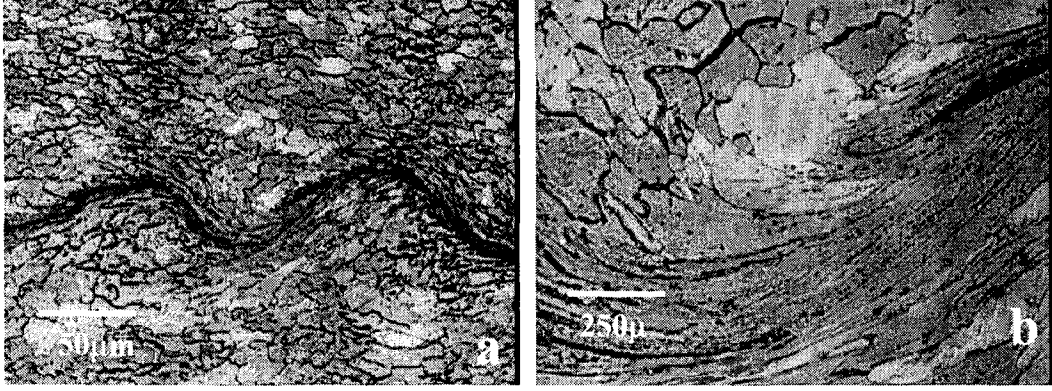


Şekil 4.13 G birleşmesinin mikroyapısı a)X50 b)X100

Şekil 4.13'de 1.8 patlayıcı oranında, t ara boşluk mesafesinde ve 2000x1500x60 mm'lik altlık (II nolu altlık) üzerinde yapılan birleştirme işleminde elde edilen ara yüzey görülmektedir. Şekil 4.14'de Şekil 4.13'de gösterilen birleşmenin 675°C'de 30 dakika ısıl işleme tabi tutulmuş yapısı görülmektedir. Bu numunede ölçülen dalga boyu (λ) 200 ile 250 μm arasında değişmektedir. Dalga genliği (h) ise 20-25 μm arasında değişmektedir.

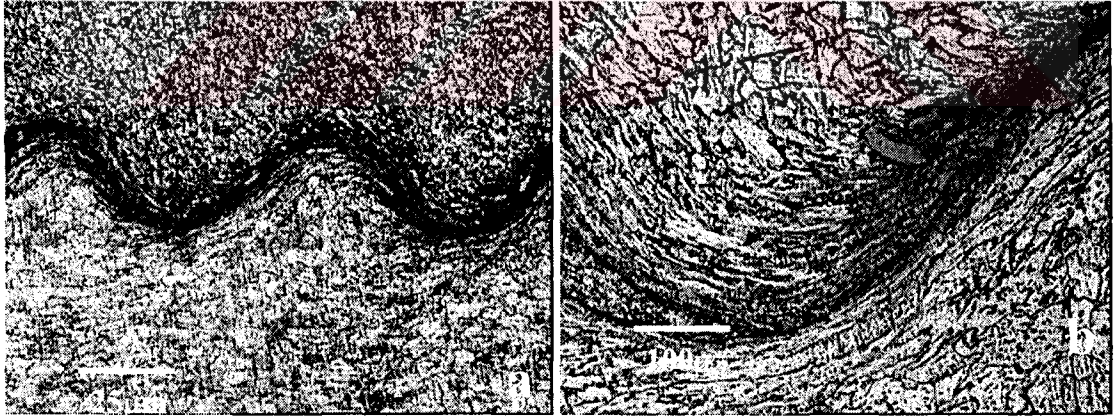


Şekil 4.14 G birleşmesinin ısıl işlem görmüş mikroyapısı a)X50 b)X100



Şekil 4.15 H birleşmesinin mikroyapısı a) X100 b) X500

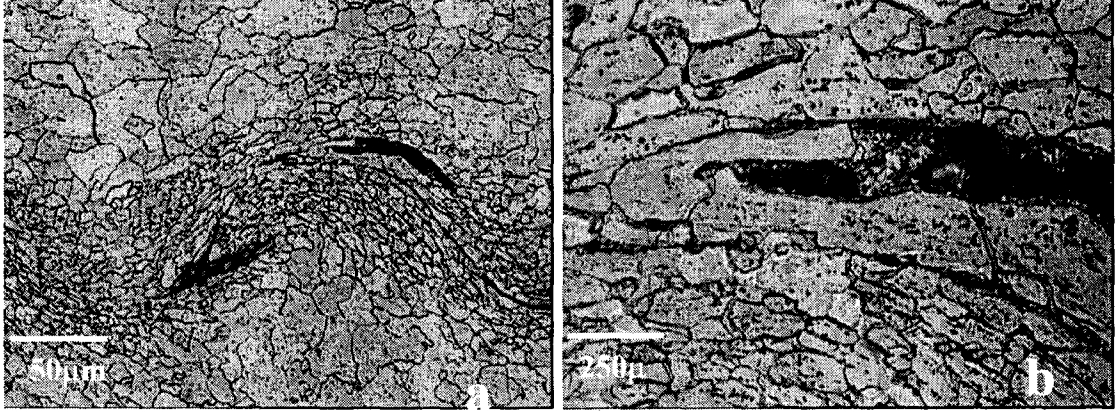
Şekil 4.15’de 2.0 patlayıcı oranında, 1/2 t ara boşluk mesafesinde ve 2000x450x450 mm’lik altlık (I nolu altlık) üzerinde yapılan birleştirme işleminde elde edilen ara yüzey görülmektedir. Bu numunede ölçülen dalga boyu (λ) 200 ile 270 μm arasında değişmektedir. Dalga genliği (h) ise 22-28 μm arasında değişmektedir.



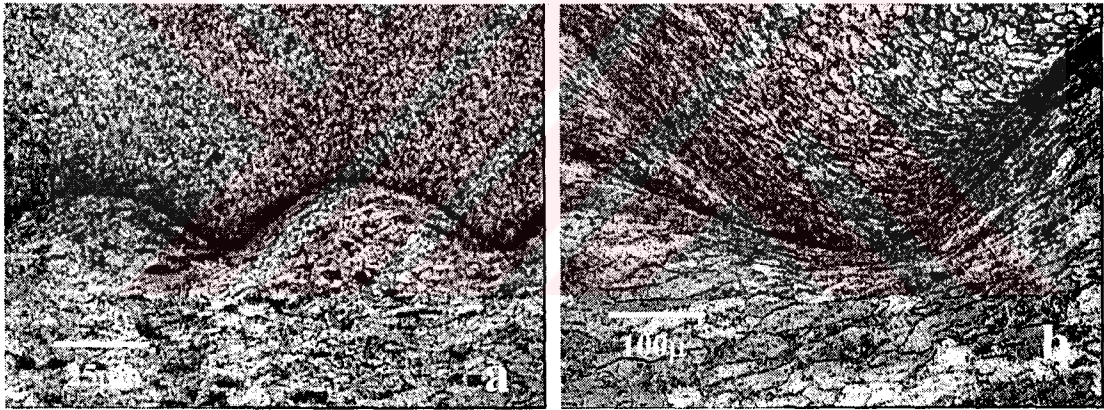
Şekil 4.16 I birleşmesinin mikroyapısı a) X50 b) X200

Şekil 4.16’da 2.0 patlayıcı oranında, 1/2 t ara boşluk mesafesinde ve 2000x1500x60 mm’lik altlık (II nolu altlık) üzerinde yapılan birleştirme işleminde elde edilen ara yüzey görülmektedir. Şekil 4.17’de Şekil 4.16’da gösterilen birleşmenin 675°C’de 30 dakika ısıl işleme tabi tutulmuş yapısı görülmektedir. Bu numunede ölçülen dalga

boyu (λ) 470 ile 520 μm arasında değişmektedir. Dalga genliği (h) ise 40-50 μm arasında değişmektedir.

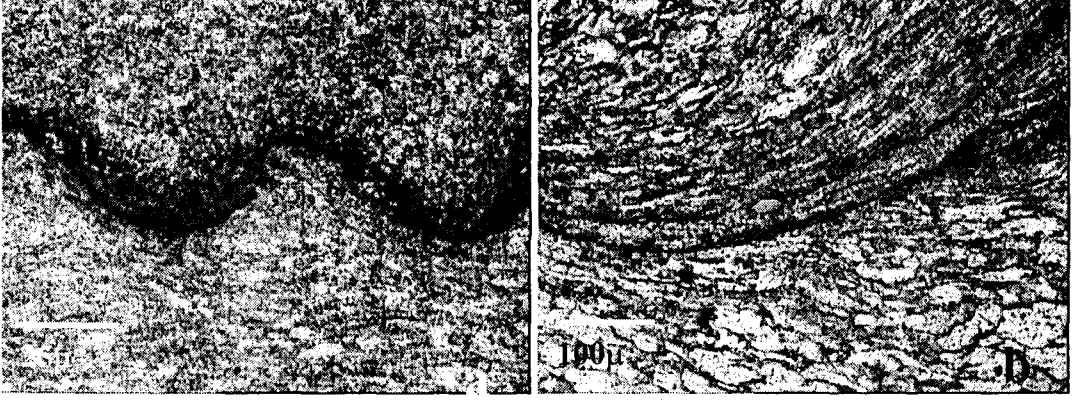


Şekil 4.17 I birleşmesinin ısıtıl işlem görmüş mikroyapısı a)X100 b) X500



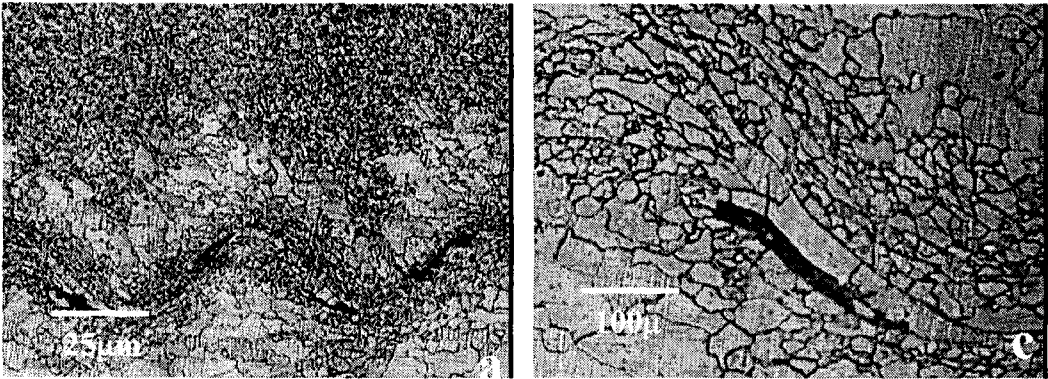
Şekil 4.18 J birleşmesinin mikroyapısı a)X50 b) X200

Şekil 4.18'de 2.0 patlayıcı oranında, t ara boşluk mesafesinde ve 2000x450x450 mm'lik altlık (I altlık) üzerinde yapılan birleştirme işleminde elde edilen ara yüzey görülmektedir. Bu numunede ölçülen dalga boyu (λ) 470 ile 540 μm arasında değişmektedir. Dalga genliği (h) ise 45-50 μm arasında değişmektedir.

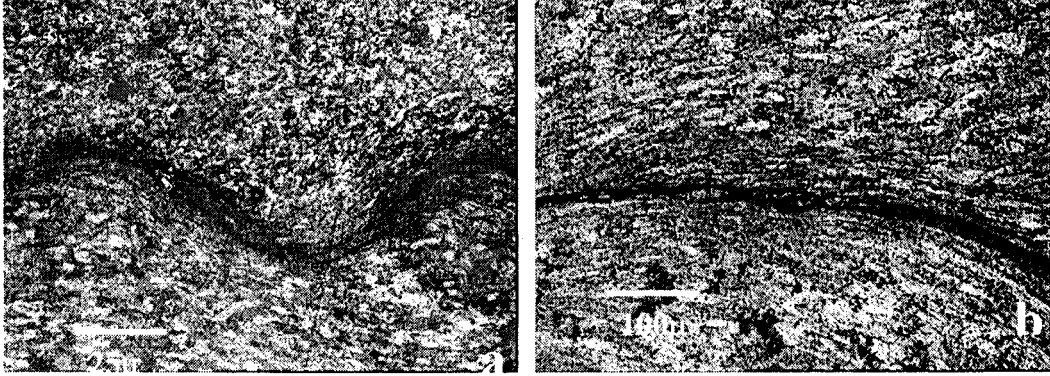


Şekil 4.19 K birleşmesinin mikroyapısı a)X50 b) X200

Şekil 4.19'da 2.0 patlayıcı oranında, t ara boşluk mesafesinde ve 2000x1500x60 mm'lik altlık (II nolu altlık) üzerinde yapılan birleştirme işleminde elde edilen ara yüzey görülmektedir. Şekil 4.20'de Şekil 4.19'da gösterilen birleşmenin 675°C'de 30 dakika ısıl işleme tabi tutulmuş yapısı görülmektedir. Bu numunede ölçülen dalga boyu (λ) 500 ile 600 μm arasında değişmektedir. Dalga genliği (h) ise 45-57 μm arasında değişmektedir.

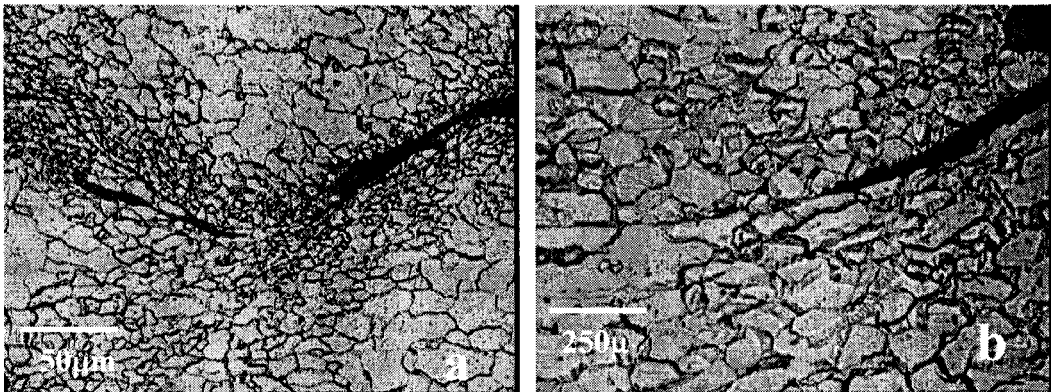


Şekil 4.20 K birleşmesinin ısıl işlem görmüş mikroyapısı a)X50 b) X200

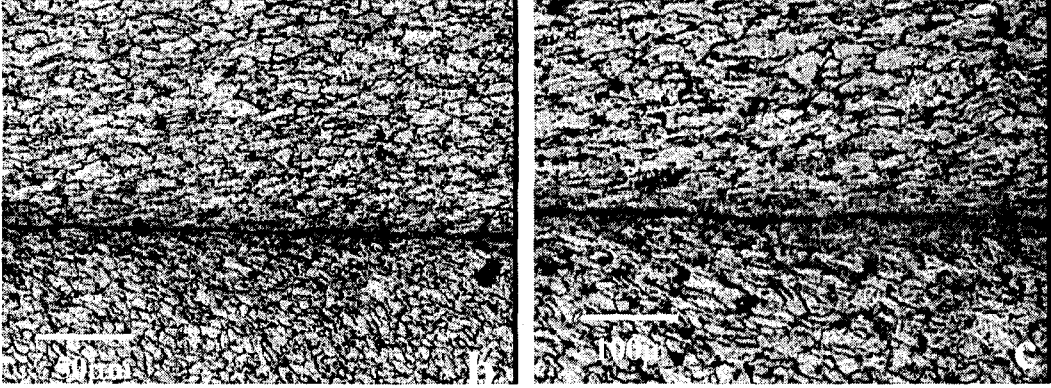


Şekil 4.21L birleşmesinin mikroyapısı a)X50 b) X200

Şekil 4.21'de 2.4 patlayıcı oranında, 1/2 t ara boşluk mesafesinde ve 2000x450x450 mm'lik altlık (I nolu altlık) üzerinde yapılan birleştirme işleminde elde edilen ara yüzey görülmektedir. Şekil 4.22'de Şekil 4.21'de gösterilen birleşmenin 675°C'de 30 dakika ısıtılmasına tabi tutulmuş yapısı görülmektedir. Bu numunede ölçülen dalga boyu (λ) 670 ile 880 μm arasında değişmektedir. Dalga genişliği (h) ise 45-52 μm arasında değişmektedir. Şekil 4.21 ile diğer dalgalı ara yüzeye sahip numuneler karşılaştırıldığında, ara yüzeyde ergimenin oldukça fazla olduğu görülmektedir. Diğerlerinde kısmi ergime bölgeleri mevcut iken bu numunede hemen hemen tüm dalga boyunca ergimenin varlığı görülmektedir.

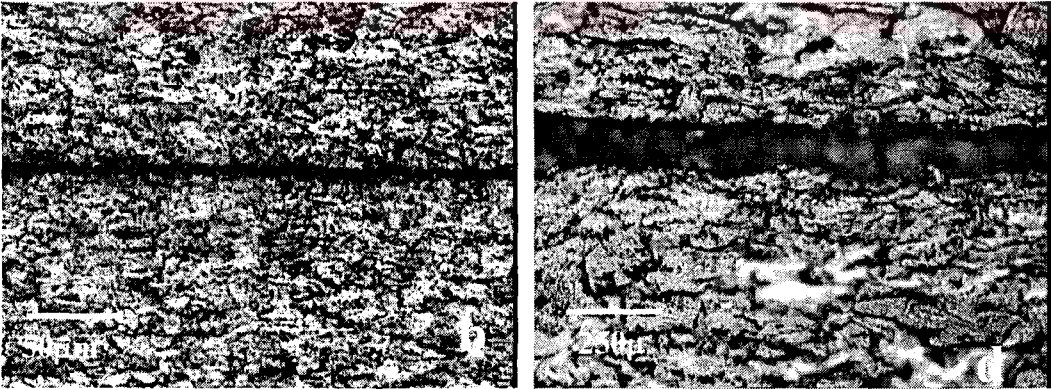


Şekil 4.22 L birleşmesinin ısıtılma görmüş mikroyapısı a) X200 b) X500



Şekil 4.23 M birleşmesinin mikroyapısı a) X100 b) X200

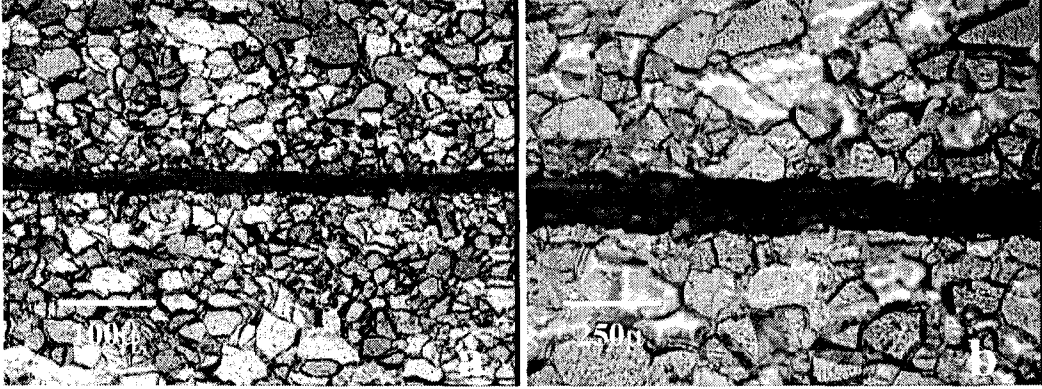
Şekil 4.23’de 2.4 patlayıcı oranında, 1/2 t ara boşluk mesafesinde ve 2000x1500x60 mm’lik altlık (II nolu altlık) üzerinde yapılan birleştirme işleminde elde edilen ara yüzey görülmektedir. Şekildeki ara yüzeyde görülen ergime bandının ölçüsü 5-6 μm arasında değişmektedir.



Şekil 4.24 N birleşmesinin mikroyapısı a)X50 b) X500

Şekil 4.24’de 2.4 patlayıcı oranında, t ara boşluk mesafesinde ve 2000x450x450 mm’lik altlık (I nolu altlık) üzerinde yapılan birleştirme işleminde elde edilen ara yüzey görülmektedir. Şekil 4.25’de Şekil 4.24’de gösterilen birleşmenin 675°C’de 30

dakika ısıtılma tabi tutulmuş yapısı görülmektedir. Şekildeki ara yüzeyde görülen ergime bandının ölçüsü 16-20 μm arasında değişmektedir.



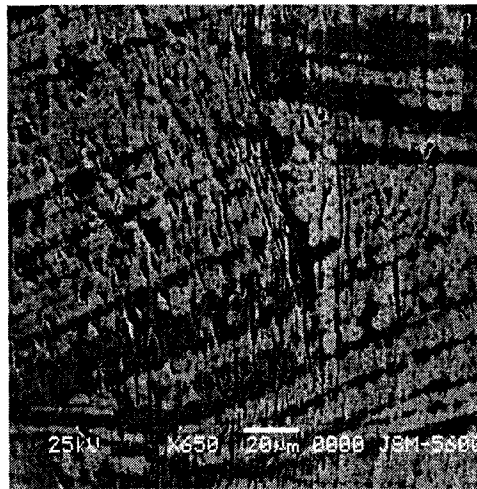
Şekil 4.25 N birleşmesinin ısıtılma işlem görmüş mikroyapısı a) X200 b) X500

Patlatma ile birleştirilen numunelerde oluşan ara yüzeyler Tablo 4.2’de verilmiştir. Şekillerden de görüldüğü gibi, patlayıcı miktarı ve ara boşluk mesafesi değiştirildiğinde, ara yüzeyde de değişiklikler görülmektedir. Artan ara boşluk mesafesi ve patlayıcı miktarı birleşme ara yüzeyinde dalgalı yapının oluşumuna neden olmaktadır. Dalgalı yapılarda da, artan ara boşluk mesafesi ve dalga yapısının değişimine neden olmaktadır.

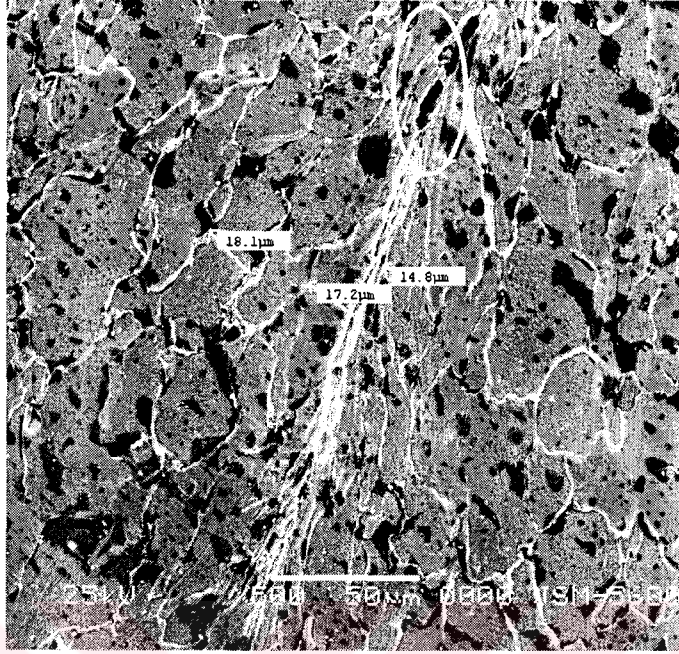
Tablo 4.2 Patlatma ile elde edilen birleşmelerin ara yüzeyleri

Numune Kodu	R: Patlayıcı Oranı ve s: Ara boşluk mesafesi	Dalga boyu (λ), μm	Dalga Genliği (h), μm
A	R:1.4 s: t		DÜZ
B	R:1.6 s: 1/2 t		DÜZ
C	R:1.6 s: t		DÜZ
D	R:1.8 s: 1/2 t		DÜZ
E	R:1.8 s: 1/2 t		DÜZ
F	R: 1.8 s:t		DÜZ
G	R:1.8 s: t	200-250	20-25
H	R:2.0 s: 1/2 t	200-270	22-28
I	R:2.0 s: 1/2 t	470-520	40-50
J	R:2.0 s: t	470-540	45-50
K	R:2.0 s: t	500-600	45-57
L	R:2.4 s: 1/2 t	670-880	45-52
M	R:2.4 s: 1/2 t		DÜZ (ergimiş)
N	R:2.4 s: t		DÜZ(ergimiş)

Şekil 4.25-4.32'de yukarıda optik mikroskopta çekilmiş görüntüleri verilen numunelerin SEM (tarama elektron mikroskop) görüntüleri görülmektedir. SEM görüntüleri bütün numuneler arasından düz, dalgalı ve ergimiş ara yüzeye sahip olanların bazılarında seçilmiştir. Şekil 4.26'da 1.8 patlayıcı oranı ve t ara boşluk mesafesinde elde edilen birleşmenin (J birleşmesi) yüzey görüntüsü görülmektedir. Şekil 4.27'de 1.6 patlayıcı oranı 1/2 t ara boşluk mesafesinde elde edilen birleşmenin (C birleşmesi) SEM fotoğrafı görülmektedir. Birleşme noktasına yakın yerde, patlatma doğrultusunda, uzayan tane ebatları 14-18 μm arasında değişmektedir. Daire içerisinde birleşme bölgesinde kısmen ergimiş bölge görülmektedir. Şekil 4.28'de aynı numunenin X 2500 büyütmedeki fotoğrafı görülmektedir. Şekilde okla gösterilen yer birleşme bölgesidir. Şekil 4.29'da ısıtma işlem görmüş C birleşmesinin tane ebatlarının SEM cihazı tarafından ölçümlendirilmiş fotoğrafı görülmektedir. Optik mikroskopta çekilen fotoğraflar için yapılan yorumlar ışığında ara yüzeyde tanelerin küçük olduğu (15.4, 16.6, 19.6 μm) ve ara yüzeyden uzaklaştıkça (23.6, 29.5, 53.7 μm) tanelerin irileştiği (27.2, 36.1 ve 46.1 μm) görülmektedir. Şekil 4.30'da 1.4 patlayıcı oranı t ara boşluk mesafesinde elde edilen birleşmenin (A birleşmesi) SEM'de çekilmiş fotoğrafı görülmektedir. Metal-metal geçişine sahip bu numunenin Şekil 4.31'deki görüntüsünde tane ebatlarının ölçüleri yer almaktadır. Şekilde görülen tane ebatları 17 ile 32 μm arasında değişmektedir. Şekil 4.32'de 2.0 patlayıcı oranı 1/2 t ara boşluk mesafesinde elde edilen, ısıtma işlemi tabii tutulmuş, dalgalı birleşme (K birleşmesi) görülmektedir.



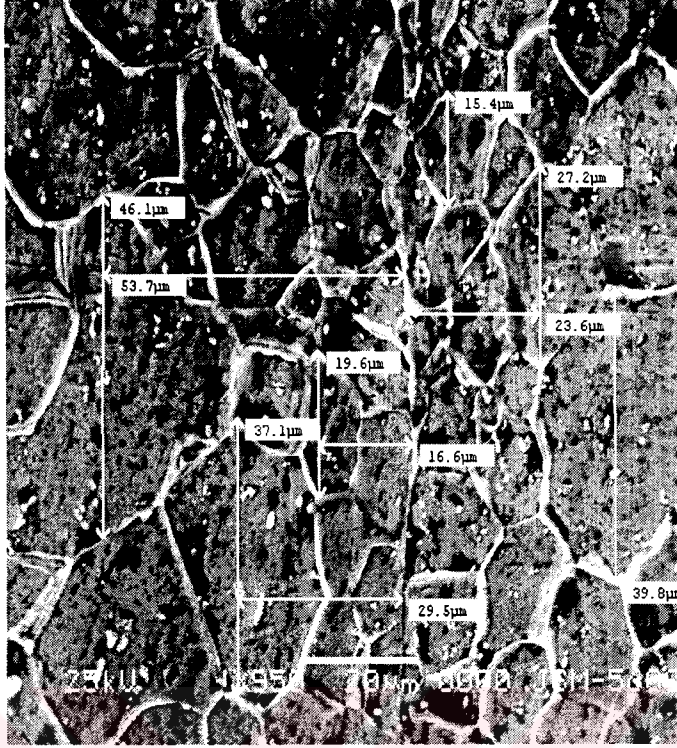
Şekil 4.26 J birleşmesinin dağlanmamış haldeki yüzeyinin SEM görüntüsü



Şekil 4.27 C birleşmesinin ısı işlemsiz SEM görüntüsü



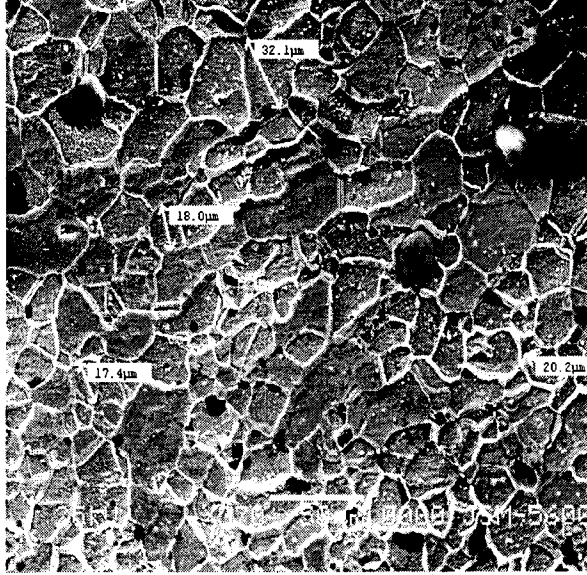
Şekil 4.28 C birleşmesinin ısı işlemsiz SEM görüntüsü



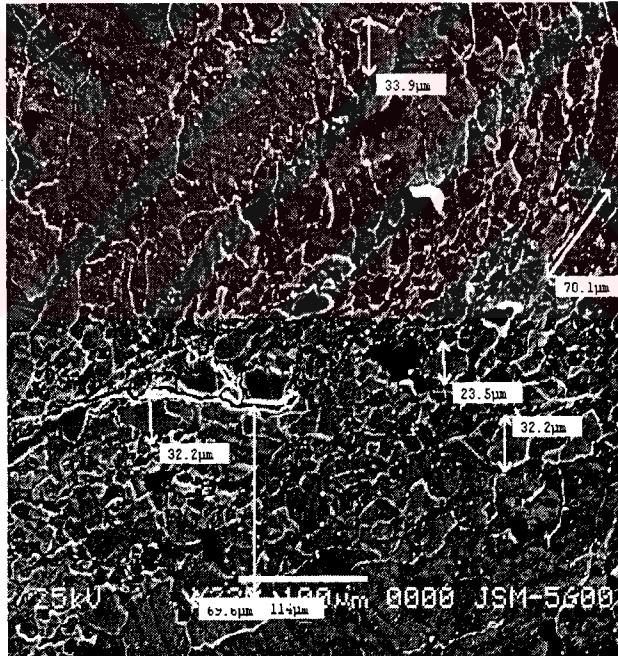
Şekil 4.29 C birleşmesinin ısı işlemlili SEM görüntüsü



Şekil 4.30 A birleşmesinin ısı işlemsiz SEM görüntüsü



Şekil 4.31 A birleşmesinin ısı işlemlı SEM görüntüsü



Şekil 4.32 K birleşmesinin ısı işlemsiz SEM görüntüsü

4.3 Mikro Sertlik Ölçüm Sonuçları

Tablo 4.3'de patlatma ile birleştirilen deney numunelerinin mikro sertlik ölçümleri görülmektedir. Ölçümler ara yüzey, ara yüzeyden 100 µm, 200 µm ve 2000 µm

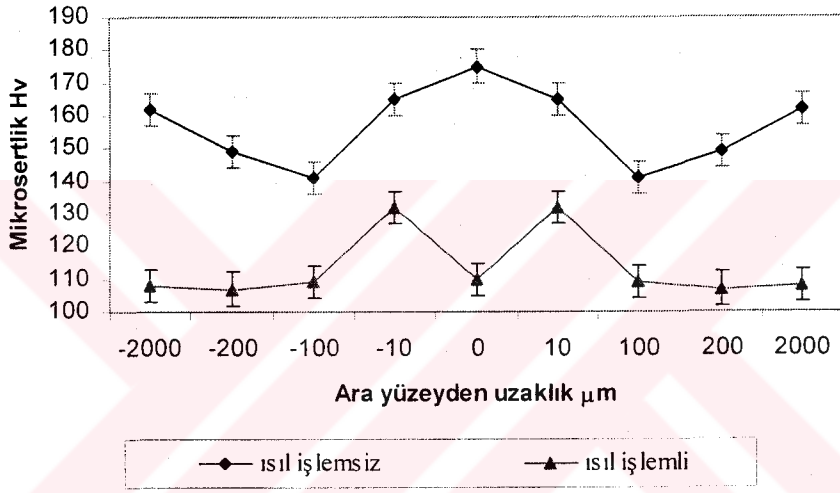
uzaklıkta yapılmıştır. Tablodan da görüleceği gibi, ısıtılmış numunelerin sertlik değerleri ile ısıtılmamış numunelerin sertlik değerleri arasında oldukça büyük fark vardır.

Tablo 4.3 Patlama ile birleştirilmiş numunelerin mikro sertlik ölçüm sonuçları

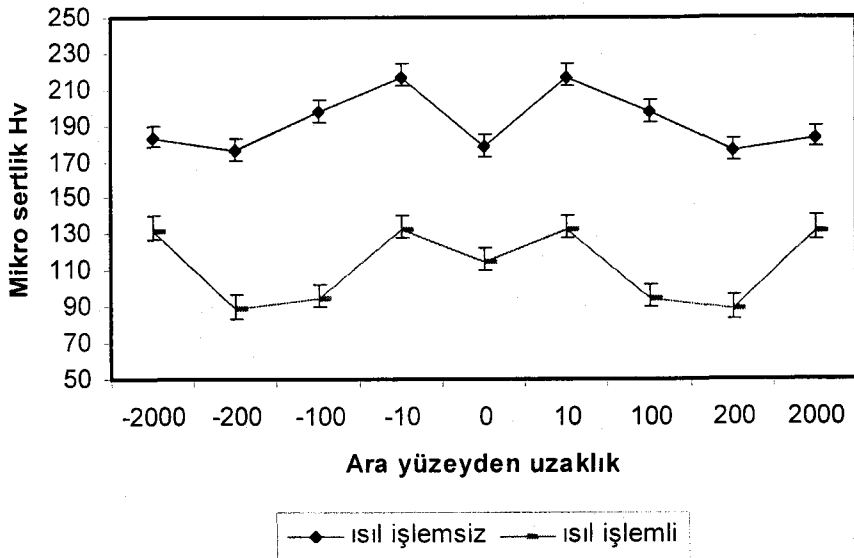
NUMUNE	Mikro sertlik (Hv)					
	Ara yüzeyden uzaklık (µm)					
	0	10	100	200	2000	
A	Isıl işlemlenmemiş	175±7	165±5	141±8	149±4	162±4
	Isıl işlemlenmiş	110±5	132±3	109±5	107±6	108±6
B	Isıl işlemlenmemiş	178±4	168±4	152±6	151±5	165±6
	Isıl işlemlenmiş	107±6	135±6	110±7	107±6	110±8
C	Isıl işlemlenmemiş	170±6	165±7	151±4	147±7	166±7
	Isıl işlemlenmiş	95±8	95±5	92±8	90±9	90±5
D	Isıl işlemlenmemiş	171±5	167.5±7	152±3	149±2	168±4
	Isıl işlemlenmiş	95±7	94.5±3	92±8	86.3±8	80±6
E	Isıl işlemlenmemiş	168±4	167±5	154±6	153±5	165±10
	Isıl işlemlenmiş	95±6	95±8	93±8	90±7	92±3
F	Isıl işlemlenmemiş	160±5	171±5	150±5	153±6	165±4
	Isıl işlemlenmiş	95±6	98±7	95±5	96±7	95±8
G	Isıl işlemlenmemiş	160±7	160±4	156±6	157±8	168±3
	Isıl işlemlenmiş	110±4	115±6	121±8	119±8	122±5
H	Isıl işlemlenmemiş	165±7	160±5	141±2	140±4	180±7
	Isıl işlemlenmiş	110±6	122±6	117±3	95±8	115±6
I	Isıl işlemlenmemiş	164±7	184±7	141±7	139±5	180±4
	Isıl işlemlenmiş	95±5	100±7	95±9	92±6	117±2
J	Isıl işlemlenmemiş	160±3	155±6	139±5	138±6	178±3
	Isıl işlemlenmiş	112±4	132±7	125±4	97±8	115±5
K	Isıl işlemlenmemiş	160±6	168±5	141±7	138±2	178±4
	Isıl işlemlenmiş	117±5	130±5	100±5	95±3	110±6
L	Isıl işlemlenmemiş	178±7	217±3	197±2	176±9	183±2
	Isıl işlemlenmiş	115±3	133±4	94.5±6	89±6	132±8
M	Isıl işlemlenmemiş	165±5	175±5	135±4	136±7	137±5
	Isıl işlemlenmiş	110±8	123±3	127±7	115±8	113±4
N	Isıl işlemlenmemiş	168±4	174±5	136±5	136±5	138.7±3
	Isıl işlemlenmiş	95±2	101±3	94.5±6	94±5	102.5±5

Yine Tablo 4.3'den görüleceği gibi genelde birleşme ara yüzeyden uzaklaştıkça sertlikte bir azalma görülmektedir. A'dan L'ye kadar olan numunelerin hemen hemen hepsinde ara boşluk mesafesi ve patlayıcı oranı arttıkça sertlikte pek fazla değişiklik görülmemektedir. Bununla birlikte 450 mm kalınlıktaki altlıkla (I nolu) yapılan birleştirmelerde oluşan ara yüzey sertliği az da olsa 60 mm'lik altlık (II nolu) üzerinde yapılan birleştirmelerinkinden biraz fazla olduğu görülmektedir. M ve N numunelerinde kullanılan patlayıcı oranı fazla olmasına rağmen sertlikte artış yerine

diğerlerine göre bir düşüş olduğu gözlenmiştir. Şekil 4.33 ve 4.34’de Tablo 4.3’deki mikro sertliklerin grafik gösterimi yer almaktadır. Sertlikteki bu farklılıklar Ezra’ya [6] göre, düşük patlayıcı oranlarında birleşme ara yüzeyine yakın yerlerde deformasyonun bir sertlik artışına neden olduğu ve ara yüzeyde bu patlama hızında oluşan çarpışma hızının yeterli sıcaklık üretmemesi sertlikte bir artışa neden olmaktadır. Yine Ezra’ya [6] göre, patlayıcı oranının artmasıyla artan yüksek çarpma hızının ara yüzeyde daha yüksek sıcaklıklarını üretiyor olması sertlikte bir azalmaya neden olmaktadır.



Şekil 4.33 A Birleşmesinin mikro sertlik ölçümleri



Şekil 4.34 L Birleşmesinin mikro sertlik ölçümleri

4.4 Makaslama Testi Sonuçları

Makaslama testi sonuçları Tablo 4.4'de verilmiştir.

Tablo 4.4. Makaslama testi sonuçları

NUMUNE KODU	Altlık	R: patlayıcı oranı s: ara boşluk mesafesi		Ara yüzey	Makaslama Dayanımı (MPa)
A	II	R:1.4	Isıl işlemsiz	DÜZ	440±10
		s: t	Isıl işlemli		470±12
B	II	R:1.6	Isıl işlemsiz	DÜZ	438±9
		s: 1/2 t	Isıl işlemli		533±9
C	II	R:1.6	Isıl işlemsiz	DÜZ	415±12
		s: t	Isıl işlemli		496±15
D	I	R:1.8	Isıl işlemsiz	DÜZ	450±14
		s: 1/2 t	Isıl işlemli		530±15
E	II	R:1.8	Isıl işlemsiz	DÜZ	425±10
		s: 1/2 t	Isıl işlemli		460±13
F	I	R: 1.8	Isıl işlemsiz	DÜZ	465±12
		s:t	Isıl işlemli		555±9
G	II	R:1.8	Isıl işlemsiz	Dalgalı	450±11
		s: t	Isıl işlemli		575±6
H	I	R:2.0	Isıl işlemsiz	Dalgalı	385±8
		s: 1/2 t	Isıl işlemli		478±12
I	II	R:2.0	Isıl işlemsiz	Dalgalı	366±11
		s: 1/2 t	Isıl işlemli		445±15
J	I	R:2.0	Isıl işlemsiz	Dalgalı	425±14
		s: t	Isıl işlemli		480±9
K	II	R:2.0	Isıl işlemsiz	Dalgalı	365±14
		s: t	Isıl işlemli		405±12
L	I	R:2.4	Isıl işlemsiz	Dalgalı	315±6
		s: 1/2 t	Isıl işlemli		345±14
M	II	R:2.4	Isıl işlemsiz	DÜZ	280±9
		s: 1/2 t	Isıl işlemli	Ergimiş	285±14
N	I	R:2.4	Isıl işlemsiz	DÜZ	292±8
		s: t	Isıl işlemli	Ergimiş	280±10

Tabloda görüldüğü gibi, en düşük makaslama dayanım değerlerini M ve N numuneleri gösterirken en yüksek makaslama dayanımını ise G ve F birleşmeleri göstermiştir. M ve N birleşmelerinde makaslama dayanımları 280-290 Mpa arasında değişirken, G ve F birleşmelerinde makaslama dayanımları 465-575 Mpa arasında değişmektedir. Bu numunelerde kopma birleşme yerinden olmamıştır. Ölçülen bu değerler, alt ve üst levhada hasar olduğu anda ölçülen değerlerdir. Isıl işlem görmüş numunelerde makaslama dayanımı ısıl işlem görmemiş aynı numunelere göre genelde daha yüksek çıkmıştır.

4.5 Eğme Testi Sonuçları

Eğme deneyinde M ve N kodlu birleşmeler 90°'lik bir eğilme olmadan ayrılmışlardır. A ve C kodlu birleşmelerde %40 oranında bir ayrılma görülmüştür. B ve D kodlu birleşmelerde, birleşmiş bölgenin %25'lik kısmı bir ayrılma göstermiştir. Diğer numunelerde ise birleşmemiş kenarlar haricinde eğme deneyi sonucunda herhangi bir ayrılma görülmemiştir. Isıl işlem görmemiş E, F, G ve H kodlu numunelerinin kenarlarında yırtılma görülmüştür. Buna rağmen birleşmelerde herhangi bir ayrılma söz konusu değildir.

Tablo 4.5 Eğme deneyinden sonra numunelerdeki ayrılma miktarı

Numune	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
Eğme sonrası ayrılma	%40	%25	%40	%25	-	-	-	-	-	-	-	-	Tamamen ayrıldı	

BÖLÜM 5. DENEY SONUÇLARININ TARTIŞILMASI

5.1 Altlık Cinsi ve Kalınlığın Tartışılması

Blazynski [30], kum altlığın da kullanılabilceğini ve ayrıca Otto ve Carpenter [31], geniş ölçekli çelik levhaların, kurşunla kaplanmasında, patlamayla sıkıştırılmış kum altlık kullandıklarını ifade etmişlerdir. Bu çalışmada kum-500x500x20mm ve 500x500x25mm ebatlarındaki çelik altlıklar kullanılarak yapılan patlatma ile birleştirme deneylerinde, iki parça arasında herhangi bir birleşme gerçekleşmemiştir. Buna sebep olarak bu çalışmada kullanılan deney numunelerinin ebatlarının endüstriyel alanlarda kullanılan geniş levhalara göre oldukça küçük olması bundan dolayı da patlama anında patlama gücü-numune ebatları dengesinin sağlanamayarak, numunelerin kuma gömülmesi gösterilebilir. Bu şartlarda birleşme sağlanabilmesi için, eğer geniş ebatlarda malzeme kullanılmıyorsa veya bir başka ifadeyle birleştirilecek malzemeler küçük ebatlarda (250x250x6 gibi) ise, patlamalı kaynak işleminde kullanılacak altlığın, patlama esnasında oluşacak yüksek basıncın çoğunluğunu toprağa aktarmayacak büyüklüklerde olması gerekmektedir. Ayrıca eğer birden fazla patlatma işlemi gerçekleştirilmek isteniyorsa kullanılacak altlığın dökme demir yada çelik dökümden ziyade, haddeden geçirilmiş kalın plakalardan olması gerekmektedir. Patlamalı kaynak işleminde, literatürde altlığın ebadı ve malzemesi ile ilgili herhangi bir değerlendirme bulunmamaktadır. Bu konuda sadece Blazynski [30], kullanılan patlayıcı miktarının fazla olması ve birleşmenin olmaması durumunda, bunun nedeninin yanlış ayarlanan altlık olmadığını, böyle bir durumda altlığın rolünün, kaynaklı kompozitin hareketini ve distorsiyonunu sınırlamak için uygun çalışma yüzeyi sağlanması gerektiğini ifade etmektedir. Blazynski [30], böyle durumda patlama ile sıkıştırılmış kum altlık kullanılmasının en ekonomik yol olduğunu söylemiştir. 500x500x25 mm ölçüsünde (3'er adet üst üste gelecek şekilde toplam 75 mm kalınlığında) çelik plakaların altlık olarak kullanıldığı durumda, yapılan patlatma işlemlerinde ilk numune birleşmiştir. Ancak ilk patlatmadan sonra

oluşan hızlı ve yüksek deformasyondan dolayı altlık malzemesinin bozulduğu görülmüştür. Özellikle fünüye ve yemleme olarak kullanılan jelatinit dinamitin patladığı yerde geometrik bozulma görülmüş ve altlık olarak kullanılan plakalardan özellikle üstteki plaka yani patlama ile, diğerlerine göre, yakın temasta bulunan plaka içe doğru kavis almıştır. Bozuk geometrili altlık üzerinde daha sonra tekrar patlatma işlemi gerçekleştirilmiş ancak değişik patlayıcı oranları ve ara boşluk mesafelerinde birleşme sağlanamamıştır. Blazynski [30], alt levha ile altlığın kenarlarının tam olarak birbirine temas etmesi gerektiğini aksi durumda altlıktan yansıyan gerilmelerin birleşmeye çalışan malzemeleri ayırmaya meyilli olduğunu ifade etmiştir. Bu ifadeye göre ve yukarıda bahsedilen deneysel gözlemlere dayanarak alt levha ile altlık arasında geometrik fark olmaması gerektiği sonucu çıkartılabilir. 2000x450x450 mm ebadındaki altlık üzerinde yapılan patlatma işlemlerinde, ilk önce, alt levha ile altlık arasında herhangi bir koruyucu tampon tabaka konulmadan patlatma işlemi gerçekleştirilmiştir. Ancak 2000x1500x60 mm ebadındaki altlık üzerinde yapılan patlatma işlemlerindeki parametrelerle aynı değerler kullanılmasına rağmen sadece çok yüksek patlayıcı oranı ($R=2.4$) ve geniş ara boşluk mesafesi ($s=2t$) kullanıldığında birleşme gerçekleştirilmiştir. Blazynski [30], altlığın akustik empedansa sahip olması durumunda altlıktan yansıyan gerilmeler levhaları birbirinden ayırmaya meyilli olduğunu ifade etmiştir.

Patlama ile birleştirilen malzemelerde kenarlarda birleşme gerçekleşmemiştir. Literatürde, kenarların birleşmemesinden bahsedilmekte [47, 65] ancak bunun nedeni hakkında bilgi yer almamaktadır.

5.2 Metalografik Deney Sonuçlarının Tartışılması

Patlama ile birleştirilen numunelerin optik mikroskoptaki görüntüleri Şekil 4.1 - 4.25'de verilmiştir. Şekillerden de görüleceği gibi, bir çok birleşmelerde kısmen de olsa ergimeler mevcuttur. Bu ergimeler, optik mikroskobun yükseltme ve alçaltma ayarlarıyla oynandığında çukurcuk şeklinde olduğu anlaşılmaktadır. Crossland [5], birleşme ara yüzeyinde patlama ile oluşan tutsak olarak birleşme bölgesinde kalan fişkırmının yüksek kinetik enerjisinin ısı enerjisine dönüşmesinden kaynaklanan ergime çukurcuklarının varlığını ve bu ergime çukurcuklarının metaller arası bileşik

olduğunu ifade etmektedir. Optik fotoğrafların hemen hemen hepsinde ısıl işlemsiz numuneler için birleşme bölgesinde patlama yönünde tanelerin uzadığı görülmüştür (bkz. Şekil 4.1, 4.3, 4.5, 4.7, 4.9, 4.11, 4.13, 4.15, 4.16, 4.18, 4.19, 4.21 ve 4.23). Haddeleme işleminde de, tanelerin hadde doğrultusunda uzadığı görülür. Patlamalı kaynak işlemini de haddelemeye benzetecek olursak, patlatmayla taneler patlatma doğrultusunda uzar. Patlamalı kaynak mekanizmasında anlatıldığı gibi, V_D hızıyla patlayan bir patlayıcı üst levhanın ucundan başlayarak üst levhayı alt levhaya doğru yaklaştırır ve bu işlem bir zaman dilimi içerisinde üst levhanın diğer ucuna kadar devam eder [5, 13-16]. Her ne kadar patlama işlemi bir anda tüm yüzeyde oluyormuş gibi gözükse de gerçekte işlem bir zaman aralığı içerisinde gerçekleşmektedir. Bu benzetmeye dayanarak haddeleme işleminde olduğu gibi patlatma işleminde de taneler patlatma doğrultusunda uzar. Patlatma işleminde taneler ara yüzeyden uzaklaştıkça değişmektedir. Bu değişiklik ara yüzeyde olmaktadır. Ara yüzeyde ve ona yakın mesafedeki bölgede taneler patlama yönüne paralel doğrultuda uzamış, ancak ara yüzeyden uzaklaştıkça tanelerin daha iri olduğu görülmektedir. Bu da, tanelerin şekillenme doğrultusunda uzamasına neden olan ani ve soğuk plastik deformasyon miktarının, birleşme bölgesinde, malzemenin diğer taraflarındakine göre daha fazla olduğu yorumu yapılabilir. Literatürde bu konu hakkında herhangi bir yorum yapılmamakta ancak fotoğraflarından birleşme ara yüzeyinde tanelerin patlatma doğrultusunda uzadığı ve ara yüzeyden uzaklaştıkça her hangi bir yapı değişikliğinin olmadığı görülmektedir [49, 58, 60, 61, 65, 66, 67].

Artan ara boşluk mesafesi ve patlayıcı miktarı birleşme ara yüzeyinde dalgalı yapının oluşumuna neden olmaktadır. Crossland [53], Zimmerly ve arkadaşları [48], Livne ve Munitz [49], özellikle, patlayıcı oranı artırıldığında, birleşmenin dalgalı bir ara yüzey sergilediğini ifade etmişlerdir. Örneğin, Livne ve Munitz [49] $R;0.80$ 'lik patlayıcı oranında düz ara yüzey elde ettiklerini ancak patlayıcı oranı artırıldığında ($R; 1.15, 1.47, 1.80, 2.13$) dalgalı yapı elde ettiklerini ifade etmektedirler. Zimmerly ve arkadaşları da [48], 2000 m/s 'lik bir patlama hızında elde ettikleri 385 m/s üst levha hızında düz ara yüzey elde ettiklerini, 2200 m/s 'lik patlama hızında elde ettikleri 440 m/s üst levha hızında dalgalı ara yüzey oluştuğunu ifade etmişlerdir. Dalgalı yapılarda da, artan ara boşluk mesafesi ve dalga yapısının değişimine neden olmaktadır. Livne ve Munitz [49] ve Balasubramanian ve arkadaşları [37], artan

patlayıcı oranlarında dalga boy ve genliğinde artış olduğunu ifade etmişlerdir. Yine Balasubramanian ve arkadaşları [37], artan ara boşluk mesafelerinde de dalga genliğine artış yönünde etkisini ifade etmişlerdir. Balasubramanian ve arkadaşlarının [37] yapmış oldukları çalışmada, dalga boyu ve genliğinin tahmini için matematiksel bir model geliştirmişlerdir. Hem model hem de deneysel çalışmayı içeren yayınlarında, dalga boyu ve genliği şu şekilde hesaplanmaktadır;

$$\text{Genlik: } h = 23.68 + 7.69(M) + 4.56(F) + 4.44(DF) \quad (4.1)$$

$$\text{Dalga boyu: } \lambda = 251.88 + 26.88(M) + 20.63(F) \quad (4.2)$$

Burada M; patlayıcı oranı, D; ara boşluk mesafesi ve F; üst levha kalınlığıdır. Denklem (4.1) ve (4.2)'den açıkça görüldüğü gibi patlayıcı miktarının hem dalga boyuna hem de genliğine etkisi vardır. Ayrıca ara boşluk mesafesinin de dalga genliğine etkisi vardır.

Bu çalışmada elde edilen dalgalı yapıların genliği ve boyunun 4.1 ve 4.2 eşitlikleriyle birebir örtüşmemektedir. Bunun nedeni de kullanılan patlayıcı miktarlarının değişik olması, kullanılan patlayıcıların patlama hızlarının farklı olmasına ve de birleştirilen malzemelerin farklılığına bağlanabilir.

Patlatma işleminden sonra parçalara uygulanan ısı işlemin etkisiyle birleşme ara yüzeyinde yapı ince taneler içermekte, ara yüzeyden uzaklaştıkça tanelerin irileşmekte ve daha sonra yapı tekrar ince taneli hale geçmektedir. Orijinal tane yapısına göre de, iri taneli olan bu ara bölge yapılan ısı işlem süresinin fazla olmasına bağlanabilir. Trueb [63], patlama ile birleştirdiği çelik-bakır kompozitini 750°C'de 4 saat ısı işlemine tabi tutmuş ve hem çelik hem de bakır tarafında tanelerin tüm malzeme yüzeyinde homojen olarak irileştiğini gözlemlemiştir. Bu çalışmadaki, tane irileşmesinin tüm malzemedeki homojen olarak irileşmemesinin nedeni, sürenin yeterli olmamasına bağlanabilir. Ancak dikkat edilmesi gereken bir husus, bu sıcaklık aralığı ve zaman dilimi içerisinde taneler oldukça farklılıklar arz etmektedir. Bu da patlatma ile birleştirilen hem alt hem de üst levhanın hem birleşme bölgesinde hem de alt levhanın alt kenarında ve üst levhanın üst kenarında aşırı bir soğuk plastik deformasyon olduğunu gösterir. Murr ve arkadaşları [66], birbirine paralel iki

levhanın çarpışmasıyla maksimum bir şok basıncı içeren bir şok dalgasının oluştuğunu ve kütle ses hızında ilerleyen bu şok dalgasının plastik deformasyon meydana getireceğini ifade etmektedirler. Oluşan bu plastik deformasyon şok dalgası ve değişen bir mikro yapıyı içermektedir. Mikro yapı değişikliği orijinal mikro yapıdan etkilenebilir yada etkilenmeyebilir [66]. Erdoğan [67], yeniden kristalleşme ile ilgili şu bilgileri vermektedir; “Soğuk şekillendirme miktarı arttığında yeniden kristalleşme sıcaklığı azalır. Yüksek miktardaki soğuk şekillendirme, metalde depolanmış enerji seviyelerini artırarak, yeniden kristalleşmede tanelerin çekirdeklenmesini hızlandırır. Minimum soğuk şekillendirme miktarı %30-40’dır. Bunun altında yapılan soğuk şekil değiştirme oranlarında yeniden kristalleşme gerçekleşmez”. Bu bilgiler ışığında, bu çalışmada patlatma ile birleştirilmiş numunelerin birleşme bölgesinde soğuk şekil değiştirme miktarının yeniden kristalleşme için yeterli büyüklükte olduğu ancak orta bölgelerde soğuk şekillendirme miktarının yeniden kristalleşme için gerekli deformasyon miktarını geçmediği yorumu yapılabilir.

Şekil 4.21 ile diğer dalgalı ara yüzeye sahip numuneler karşılaştırıldığında, ara yüzeyde ergimenin oldukça fazla olduğu görülmektedir. Diğerlerinde kısmi ergime bölgeleri mevcut iken bu numunede hemen hemen tüm dalga boyunca ergimenin varlığı görülmektedir. [53], aşırı patlayıcı kullanımı ile oluşan dalgalı ara yüzeyde ergimiş bölgelerin varlığını Şekil 2.21’de göstermektedir (bkz. Şekil 2.21). Birleşmelerin bir çoğunda, özellikle düşük oranlı patlayıcılarla elde edilen birleşmelerde, ergime olmayan bölgelerde metal-metal geçişi vardır (bkz. Şekil 4.2, 4.4, 4.6, 4.8). Dalgalı ara sahip birleşmelerde lokal ergime boşlukları mevcut iken aynı zamanda metal-metal geçişi sergilemektedirler. Trueb [63], patlamalı kaynaklanmış metallerde metal-metal ve ergimiş-katılmış metal olmak üzere sadece iki tip ara yüzey olduğunu ifade etmiştir.

Patlama ile birleştirilen numunelerde kısmen de olsa yerel ergime bantlarının varlığından daha önce söz edilmişti. Şekil 4.23 ve 4.24’de ara yüzeyde sürekli ergimiş bant vardır. Bu ergime bandının oluşumu Crossland’a [5] göre, birleşme ara yüzeyinde patlama ile oluşan tutsak olarak birleşme bölgesinde kalan fişkırmının yüksek kinetik enerjisinin ısı enerjisine dönüşmesinden kaynaklanmaktadır.

Farklı altlıklarda elde edilen birleşmelerde elde edilen birleşmelerin mikroyapı fotoğraflarında pek farklılık olmadığı görülebilir. Ancak elde edilen birleşmelerin farklı patlayıcı oranlarda mümkün olmuştur. Alt levha ile altlık arasına tampon tabaka konmadan önce yapılan patlatma işlemlerinde 2000x450x450 mm ebadındaki altlık üzerinde yapılan birleştirme işlemlerinde ancak 2.4 patlayıcı oranında birleşme oluşurken 2000x1500x60 mm ebadındaki altlık üzerinde 1.4 ve 2.4 arasındaki tüm patlayıcı oranlarında birleşme sağlanmıştır. 2000x450x450 mm ebadındaki altlık üzerinde, alt levha ile altlık arasına tampon tabaka konulmasıyla ancak 1.8 oranındaki patlayıcı oranından itibaren birleşme gerçekleşmiştir. Altlığın birleşmeye etkisi konusunda literatürde sadece Blazynski'nin [30] altlığın sahip olduğu akustik empedansın birleşmeye etki edeceğini ifade etmiştir. Bu konuda birçok çalışmalar gerçekleştirmiş olan Crossland [5] altlık konusunda sadece Wylie ve arkadaşlarının [29] parametreler konusunda yapmış oldukları çalışmada ifade ettikleri gibi altlığın kaynak kalitesine etki etmediğini ifade etmektedir. Blazynski'nin [30] bahsettiği altlığın akustik empedansı konusunda, farklı sertliklerdeki ama aynı ölçülerdeki altlıklar üzerinde yeni deneysel çalışmalar gerçekleştirilebilir.

Patlatma işlemlerinde patlayıcı oranı önce 1.0 ve üzeri olarak seçilmişti. Ancak 1.4'lük patlayıcı oranına kadar birleşme görülmemiştir. Literatürde 1.0 hatta 0.8 gibi patlayıcı oranlarında birleşmenin olduğundan bahsedilmekte ve hatta Crossland [32] Trimonit 1 patlayıcısıyla bu çalışmada gerçekleştirilen patlayıcı oranlarının çok altında birleşmeden bahsetmektedir (bkz Tablo 2.3). patlama hızı açısından bu çalışmada kullanılan Elbar 5 patlayıcısı ile Trimonite 1 patlayıcısı karşılaştırıldığında çok fark olmadığı gözlenebilir. Patlayıcılar arasında pek fark olmamasına rağmen düşük patlayıcı oranlarında Elbar 5 ile yapılan patlatma işlemlerinde birleşme olmamasının nedeni, deneylerde kullanılan saçların ebatlarının küçük olmasına bağlanabilir. Her ne kadar kesin olmamakla birlikte bu sonuca dayanak olarak da, Tablo 2.3'de görüldüğü gibi birleştirilecek levha kalınlıkları artırıldığında patlayıcı oranının azalması gösterilebilir. Bu çalışmada 250x250x2 mm ebadındaki üst levhalar için ancak 1.4'den itibaren birleşme oluşmaktadır. Eğer birleştirilecek malzeme ebatları daha da geniş tutulursa, 1.5-2 m² gibi, daha düşük patlayıcı oranlarında birleşme sağlanabileceği varsayımı yapılabilir. Literatürde birleştirilecek

malzeme ebadı ile patlayıcı oranı arasında şu ana kadar herhangi bir ilişki kurulmamıştır. Sadece üst levha kütlesi ile patlayıcı kütlesi arasında bir bağlantı vardır. İleri bakış açısından patlayıcı oranı aynı fakat birleştirilecek malzeme ebatlarının farklı olduğu ortamda bu konu için yeni deneylerin yapılması mümkündür.

5.3 Mikrosertlik Ölçüm Sonuçlarının Tartışılması

Tablo 4.3'den görüleceği gibi genelde birleşme ara yüzeyinden uzaklaştıkça sertlikte bir azalma görülmektedir. Bunun nedenini patlatma noktasında plastik deformasyon miktarının fazla olmasına yukarıdaki optik mikroyapı fotoğraflarından yararlanarak söylemek mümkündür. Mikro yapı görüntülerinden yararlanarak birleşme ara yüzeyinde tanelerin patlatma doğrultusunda uzadığı; bunun nedeninin de deformasyon miktarının diğer bölgelere göre fazla olduğu yukarıda değinilmişti. Bu bağlamda, tanelerin uzama gösterdiği bölgelerde çalışma sertleşmesi mekanizmasının devreye girerek sertliğin diğer bölgelerden fazla olmasına neden olmaktadır. Ayrıca, Crossland [5], Ezra [6], Blazynski [11], Blazynski [30], Mamalis ve arkadaşları [41], Yang ve arkadaşları [58] ve Khoklov ve arkadaşları [56] yapmış oldukları çalışmalarda ara yüzeyden uzaklaştıkça sertlikte düşüş olduğunu ifade etmektedirler. A'dan L'ye kadar olan numunelerin hemen hemen hepsinde ara boşluk mesafesi ve patlayıcı oranı arttıkça sertlikte de bir artış olduğu gözlenmektedir. Ayrıca 450 mm kalınlıktaki altlıkla yapılan birleştirmelerde oluşan ara yüzey sertliği az da olsa 60 mm'lik altlık üzerinde yapılan birleştirmelerinkinden fazla olduğu görülmektedir. M ve N numunelerinde kullanılan patlayıcı oranı fazla olmasına rağmen sertlikte artış yerine diğerlerine göre bir düşüş olduğu gözlenmiştir. Şekil 4.33 ve 4.34'de Tablo 4.3'deki mikro sertliklerin grafik gösterimi yer almaktadır. Sertlikteki bu farklılıklar Ezra'ya [6] göre, düşük patlayıcı oranlarında birleşme ara yüzeyine yakın yerlerde deformasyonun bir sertlik artışına neden olduğu ve ara yüzeyde bu patlama hızında oluşan çarpışma hızının yeterli sıcaklık üretememesi sertlikte bir artışa neden olmaktadır. Yine Ezra'ya [6] göre, patlayıcı oranının artmasıyla artan yüksek çarpma hızının ara yüzeyde daha yüksek sıcaklıklarını ürettiyor olması sertlikte bir azalmaya neden olmaktadır. Sonuç olarak, mikro sertlik ölçümleri patlama ile birleştirilmiş malzemelerin sertliğinde artış olduğunu

göstermektedir. Gulbin ve arkadaşları [60], mikrosertlik ölçümleri ile çarpmadan dolayı malzemenin sertliğinde bir artış olduğunu belirtmişlerdir. Zimmerly ve İnal [48], bunun nedeninin plastik deformasyonun bir sonucu olduğunu ve şok yüklemeye kusurlu yapının oluşumuna bağlamaktadırlar.

5.4 Makaslama Test Sonuçlarının Tartışılması

Makaslama testinden ölçülen sonuçlara göre patlatmayla birleştirilen bütün numunelerin makaslama dayanımları ASTM A 264 [62] standardında belirtilen 140 MPa'dan yüksek çıkmıştır. Birleşmelerden en düşük makaslama dayanım değerlerini M ve N numuneleri göstermiştir. M ve N birleşmelerinde makaslama dayanımları 280-290 MPa arasında değişmektedir. Her ne kadar M ve N numuneleri diğer bütün numuneler arasında en düşük birleşme makaslama dayanımları gösterebilirler bile ASTM standardına göre yine yüksek sayılabilecek bir makaslama dayanımı değerine sahiptirler. M ve N numunelerin düşük makaslama dayanım göstermelerinin nedeni, bu numunelerin birleşme ara yüzeylerinde sürekli ergimiş katılaşmış bir ara metalik bileşenin varlığı gösterilebilir. Blazynski [11], kaynak ara yüzeyinde bu metaller arası bileşiklerin varlığı gevrekliği başlattığını yada sünekliği azalttığını ifade etmiştir. İnal ve Zimmerly de [28] ara yüzeyde oluşan ara metalik bileşenlerinin gevrek olduğunu ve birleşme için böyle bir ara yüzeyin zararlı olduğunu vurgulamışlardır. Ayrıca Blazynski [11], ergimenin yüksek hacimde olmasıyla statik testlerin hala iyi sonuçlar üreteceğini belirtmiştir. M ve N birleşmelerindeki makaslama dayanımlarının ASTM standardında [62] belirtilen değerden yüksek çıkması Blazynski'nin [11] bu ifadesiyle örtüşmektedir. Ayrıca literatürde diğer deneysel çalışmalarda farklı metallerle elde edilen birleşmenin makaslama dayanımlarıyla karşılaştırıldığında bu değerlerin çok düşük olmadığı görülebilir [6, 11, 49].

Isıl işlem görmüş numunelerde makaslama dayanımları ısıl işlem görmemiş numunelerinkine göre daha yüksek bir değere sahiptir. Bunun nedeni hem bu çalışmada elde edilen mikro sertlik incelemelerine (bkz Tablo 4.3) ve hem de Ezra'nın [6] ifadesine göre patlama ile soğuk plastik deformasyona maruz kalan birleşmelerin sertliklerinde bir artış olduğu ve Crossland'in [53] ifadesine göre, bu

ani şok sertleşme de, malzemeye eğer bir gerilim giderme tavlama uygulanmadığı sürece, kırılma tokluğunda bir azalmaya neden olması gösterilebilir. Bu çalışmada da, elde edilen birleşmelere uygulanan ısı işlem sonucunda birleşmelerin makaslama dayanımlarında bir artış görülmüştür. Mikro yapı fotoğraflarına dikkat edilirse, ısı işlem sonunda elde edilen yapılar birleşmeler tek bir parça görüntüsü vermektedirler (bkz Şekil 4.2, 4.4, 4.6).

Tablo 4.4'de görüldüğü gibi birleşmelerin makaslama dayanımları belirgin bir fark göstermemiştir. Bundan dolayı düz yada dalgalı ara yüzey sergileyen birleşmelerin hangisinin daha mukavim olduğu anlaşılammıştır. Bu sonuç literatüre uygundur. Croassland [5], İnal ve Zimmerly [28], genel bir kanının aksine düz ara yüzey sergileyen birleşmelerin dalgalı ara yüzey sergileyen birleşmeler kadar dayanım gösterdiğini belirtmiştir. Ayrıca Zimmerly ve arkadaşları [48], yapmış oldukları deneysel çalışmada, düz ve dalgalı ara yüzeyin eşit mukavemet gösterdiklerini ifade etmişlerdir. Bununla birlikte, elde edilen makaslama dayanım değerlerine göre althığın birleşmenin mekanik özelliklerine etkisi görülmemektedir.

5.5 Eğme Test Sonuçlarının Tartışılması

Eğme deneyinde M ve N birleşmeleri 90°'lik bir eğilme olmadan ayrılmışlardır. M ve N birleşmelerdeki bu ayrılmaların nedeni, makaslama dayanımında olduğu gibi ara yüzeyde oluşan gevrek metallar arası bileşiğin oluşumuna bağlanabilir. Literatürde eğme deneyinde sadece Crossland ve Williams [59], patlama ile birleştirilmiş malzemelerin 180°'ye kadar eğilebileceğini belirtmişlerdir. A ve C birleşmelerinde %40 oranında bir ayrılma görülmüştür. B ve D birleşmelerinde ise birleşmiş bölgenin %25'lik bir kısmı ayrılma göstermiştir. Diğer numunelerde ise, birleşmemiş kenarlar haricinde eğme deneyi sonucunda herhangi bir ayrılma görülmemiştir. Test sırasında, ısı işlemli malzemelerde herhangi bir yırtılma tespit edilmemiştir. Buna karşın, ısı işlem görmeyen E, F, G ve H numunelerinin kenar bölgelerinde gözle görülebilecek kadar büyük yırtılmalar tespit edilmiştir. Buna sebep olarak, patlama ile oluşan yüksek plastik deformasyon hızı ve miktarından kaynaklanan yüksek pekleşme miktarı gösterilebilir. Yüksek deformasyon miktarı ve buna bağlı olarak oluşan pekleşme, malzeme ikinci bir deformasyon işlemine tabi

tutulduğunda çatlaklara sebep olabilir. Çatlak boyut ve miktarı deformasyon ve pekleşme miktarı ile doğru orantılıdır. Çatlak oluşmadan ikinci bir soğuk deformasyon işlemi uygulanmak istendiğinde malzemenin yeniden kristalleşme tavlamasına ihtiyaç vardır. Yeniden kristalleşme, soğuk deformasyonun malzeme üzerindeki etkisini ısıtma işlem parametrelerine bağlı olarak hemen hemen veya tamamen yok eder. Böylelikle malzeme ikinci deformasyon işlemine uygun hale gelir. Arzu edilen ikinci deformasyon miktarına göre yeniden kristalleşme parametrelerinin ayarlanması gerekir [68]. Endüstride, patlama ile birleştirilen levhalar genellikle kazan formuna getirilerek kullanılacağı yada haddeleneceği göz önünde bulundurulursa, patlama işlemi ile birleştirilen levhalar yeniden kristalleşme ısıtma işlemine tabi tutulması gerekmektedir. Bununla birlikte M ve N haricindeki diğer tüm numunelerde %40'ın üzerinde bir ayrılma söz konusu değildir. ASTM A 264 standardına [62] göre testin en az üç numune kullanılarak yapılması ve bu numunelerden en az iki tanesinin %50'den daha fazla ayrılma göstermemesi gerekmektedir. Bu çalışmadaki test sonuçları yapılan birleştirmelerin standartlara uygun olduğunu göstermektedir.

BÖLÜM 6. SONUÇ

Bu çalışmada da patlamalı kaynak işlem parametrelerinden olan paralel düzenlemelerde ara boşluk mesafesi (s), patlayıcı oranı (R; patlayıcı kütlesinin üst levhaya oranı) ve altlığın türü ve kalınlığının birleşmenin mekanik ve metalürjik özelliklerine etkisini belirlemek amacıyla deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Metalografik, mikrosertlik ölçümü, eğme ve makaslama deneylerini içeren bu çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

1. Kum altlık üzerinde yapılan patlatma işlemlerinde, patlayıcının patlamasıyla oluşan basınca karşı direnci sağlayamadığı için, birleşme sağlanamamıştır.
2. 500x500x20mm ve 500x500x25mm ebatlarındaki çelik altlıklar kullanılarak yapılan patlatma ile birleştirme deneylerinde, kum altlıkta olduğu gibi, patlama basıncına karşı gösterebileceği direncinin çok düşük olmasından dolayı, iki parça arasında herhangi bir birleşme gerçekleşmemiştir.
3. Farklı altlık üzerinde yapılan deneylerde 2000x1500x60 mm ebatlarındaki altlık üzerinde birleşmelerin sağlandığı düşük patlayıcı oranlarında (1.4, 1.6) 2000x450x450 mm ebatlarındaki altlık üzerinde, altlığın sahip olduğu akustik (yansıtma) empedansından dolayı, birleşme olmamıştır.
4. Patlamalı kaynak işleminde kullanılacak altlığın, eğer geniş ebatlarda malzeme kullanılmıyorsa bir başka ifadeyle birleştirilecek malzemeler küçük ebatlarda ise (250x250x6 gibi), patlama esnasında oluşacak yüksek basıncın çoğunluğunu toprağa aktarmayacak büyüklüklerde altlık kullanılması gerekmektedir.
5. Ayrıca eğer birden fazla patlatma işlemleri gerçekleştirilmek isteniyorsa kullanılacak altlığın dökme demir yada çelik dökümden ziyade haddeden geçirilmiş kalın plakalardan yada yeterli sünekliğe sahip olması gerekmektedir.

6. Alt levha ile altlık arasında geometrik fark olmamalıdır. Aksi halde, yani altlık ile alt levha arasında geometrik fark olması durumunda, alt levha altlık üzerine tam olarak oturmayacak ve patlatma esnasında oluşan yüksek basınç altlıktan yansıyarak alt ve üst levhayı birbirinden ayırmaya meyilli olacaktır.

7. Birleşen numunelerin birleşme ara yüzeylerine yakın bölgelerinde taneler patlatma doğrultusunda, patlayıcının patlamasıyla oluşan basıncın soğuk plastik deformasyon etkisi göstermesinden dolayı, uzama (anizotropi) göstermiştir.

8. Birleşen numunelere ısı işlem uygulandığında birleşme ara yüzeylerine yakın bölgede taneler yeniden kristalleşmiştir ve birleşme noktasına uzak taneler arasında ebatları farklıdır. Bunun nedeni de, soğuk plastik deformasyonun levhaların alt ve üst yüzeylerine etki etmektedir. Dolayısıyla patlatma işleminde deformasyon miktarı birleştirilecek malzemelerin her tarafında eşit miktarda değildir.

9. Patlayıcı oranı ile dalga yapısı arasında direkt bir ilişki vardır. Patlayıcı oranı artırıldığında düz ara yüzey dalgalı hale geçmektedir. Dalgalı yapıda patlayıcı oranı artırıldığında dalga boyu ve genişliğinde artış vardır.

10. Patlayıcı oranı daha da artırıldığında, levhaların yüzeylerindeki oksit tabakasının dışarı çıkmak için gerekli zamanı bulamaması (fışkırmanın içeri doğru olması) ve içeride tutsak fışkırmanın kinetik enerjisinin ısı enerjisine dönüşmesinden dolayı, birleşme ara yüzeyinde sürekli bir ergimiş katılmış bir yapı oluşmuştur.

11. Ara boşluk mesafesi artırıldığında dalga genişliğinde bir artışa neden olmaktadır.

12. Mikrosertlik ölçümlerinde elde edilen değerlere göre birleştirilecek malzemelerin birleşme işleminden önceki sertlikleri birleştirme işleminden sonra, patlayıcının patlamasıyla oluşan soğuk plastik deformasyonun etkisiyle dislokasyon yoğunluğunun artmasından olmasından dolayı, artış göstermiştir.

13. Ara yüzeye yakın bölgedeki sertlik ara yüzeyden uzaklaştıkça, deformasyon sertleşmesi miktarının birleştirilecek malzemelerin tamamında homojen olmamasından dolayı, düşüş eğilimindedir.

14. Isıl işlem görmüş numunelerin sertliği birleşmeden önceki sertliklerine düşmüştür. Buna neden olarak da, soğuk plastik deformasyona uğrayan malzemedeki dislokasyonların verilen ısı ile yoğunluklarının düşmesi gösterilebilir.

15. Isıl işlem görmüş numunelerin makaslama dayanımları, ısıl işlem görmeyen numunelere göre, deformasyonun, malzemenin sünekliğini düşürmesinden dolayı, daha iyi sonuç vermiştir.

16. Makaslama deney sonuçlarına göre düz yada dalgalı ara yüzeyin birbirine eşit dayanım gösterdikleri tespit edilmiştir.

17. Makaslama deneyinde ara yüzeyinde sürekli erimiş katılaşmış yapı içeren numunelerin dayanımları diğerlerinininkine göre oldukça düşük çıkmıştır. Bunun nedeni de, sürekli erimiş katılaşmış yapının gevrek ve kırılgan olmasından kaynaklanmaktadır.

18. Eğme test sonuçlarına göre, patlama ile elde edilen birleştirmeler standardın üzerinde bir dayanım göstermiştir.

19. Eğme deneyi sırasında ısıl işlem görmemiş numunelerin kenarlarında, deformasyona uğrayan malzemenin pekleşmesinden dolayı, yırtılmalar olduğu gözlenmiştir.

20. Hem eğme hem de makaslama deneyinde aşırı miktarlardaki patlayıcı oranlarında elde edilen birleşmelerde oluşan sürekli ara metalik bileşenin birleşmenin mekanik özelliklerine olumsuz etkisi olduğu gözlenmiştir.

BÖLÜM 7 ÖNERİLER

1950'li yıllardan itibaren endüstride yaygın biçimde kullanılan patlamalı kaynak işlemi için, ileriye yönelik yapılacak çalışmalara katkısı olması amacıyla aşağıda değişik öneriler sıralanmıştır.

1. Kimyasal kompozisyonu ve mekanik özellikleri belirli, değişik altlıkların birleşmenin mekanik ve metalürjik özelliklerine etkisi incelenebilir.
2. Farklı metallerin birleştirilmesi gerçekleştirilerek kullanılacağı yerlere göre değişik deneysel çalışmalar yapılabilir (korozif ortamlarda elektrik iletkenliğinin istendiği yerler için bakır-titanyum birleşmesi gibi).
3. Alaşımli çelik malzemelerin birleşmeleri yapılarak faz dönüşümlerin oluşup oluşmadığı incelenebilir.
4. Patlama hızları farklı patlayıcıların birleşmeye etkisi incelenebilir.
5. Bilgisayar yardımıyla halen tam olarak anlaşılammış patlamalı kaynak mekanizması üzerine çalışmalar gerçekleştirilebilir.
6. Matematiksel modelleme yardımıyla patlamalı kaynak parametrelerine standardizasyon getirilebilir.
7. Her ne kadar literatürde ekonomik olması dolayısıyla tercih edilebilirliğinden bahsedilse de bu yöntemin geniş çaplı bir maliyet analizi konusunda yeterli bir bilgiye rastlanılmamıştır. Diğer kaplama yöntemleriyle karşılaştırılarak bu yöntemin maliyet analizi çıkartılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Güleç, Ş ve Çapa, M., "Metallerin Yüzey İşlemleri ve Özel İmalat Yöntemleri", İstanbul Teknik Üniversitesi sayı 1561, s. 1-2, İstanbul, 1995.
- [2] Anık, S., Tülbentçi, K. ve Kaluç, E., "Örtülü Elektrod ile Elektrik Ark Kaynağı", Gedik Holding Yayınları, İstanbul, 1991.
- [3] Tülbentçi, K., "MIG-MAG Eriyen Elektrod ile Gazaltı Kaynağı", Arctech Yayınları, İstanbul, 1990.
- [4] Gülenç, B., "MIG-MAG Kaynağında Koruyucu Gaz Karışımının Kaynak Metalinin Mekanik Özelliklerine Etkisi", Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi Ankara, 1995.
- [5] Crossland, B., "Explosive Welding of Metals and Its Application", Clarendon Press, Oxford, pp.233. 1982.
- [6] Ezra, A.A., "Principles and Practice of Explosive Metalworking", Industrial Newspaper Ltd., 1973.
- [7] Patterson, R. A., "Materials Processing Theory and Practices", Volume 8, Elsevier Science Publishers B. V., 1989.
- [8] Rinehart, J.S. and Pearson, J. , "Explosive Working of Metals ", Pergamon Press, NY, 1963.
- [9] Brasher, D.G. and Butler, D.J., "Explosive welding: Principles and Potentials", Advanced Materials and Processes, Vol. 3/95, pp. 37-38, 1995.

- [10] Kleven, S., "Ultrasonic Inspection of Explosion Welded Titanium Clad Plate", *Materials Evaluation*, pp. 557-560. May 1996
- [11] Blazynski, T.Z., "Dynamically Consolidated Composites: Manufacture and Properties", Elsevier Applied Science, London, 452 s, 1992
- [12] Birkhoff, G., McDougall, D.P., Pugh, E.M. and Taylor, G., "Explosives with Lined Cavities", *Journal of Apply Physic*, Vol. 19, pp. 563-582, 1948
- [13] Pearson, J. and Hayes, G.A., "Research in Explosive Welding", 1963 ASTM National Welding and Metals Joining Conference, pp. 63-97, 1963.
- [14] Cowan, O., R. and Holtzman A.,H., "Flow Configurations in Colliding Plates: Explosive Bonding", *Journal of Applied Physics*, Vol. 34, pp.928-939, April 1963.
- [15] Walsh, J.M., Shreffler, R.G. and Willig, F.J., "Limiting Conditions for Jet Formation in High Velocity Collision", *Journal of Apply Physic*, Vol. 24, pp. 346-359, 1953.
- [16] Abrahamson,G.R., "Permanent Periodic Surface Deformations due to a Traveling Jet", *Journal of Apply Mechanics*, Vol. 83, pp. 519-528, 1961.
- [17] Kowalick, J.F. and Hay, D.R., "A Mechanism of Explosive Bonding", *Metallurgical Transactions*, Vol. 2, pp. 1953-1958, July 1971.
- [18]. Cowan, G., R., Bergmann, O., R. and Holtzman, A., H., "Mechanism of Bond Zone Wave Formation in Explosive-Clad Metals", *Metallurgical Transactions*, pp. 3145-3155, Vol. 2 November 1971.
- [19] Reid,S.R., "A Discussion of The Mechanism of Interface Wave Generation In Explosive Welding", *Int. Journal of Mechanical Science*, Vol.16, pp. 399-413, 1974.

[20] Reid, S.R. and Sherif, N.H.S., "Prediction of The Wavelength of Interface Waves in Symmetric Explosive Welding", *Journal Mechanical Engineering Science*, Vol. 18 No 2, pp. 87-96, 1976.

[21] Hunt, J.N., "Wave Formation in Explosive Welding", *Phil. Mag.*, Vol. 18, pp. 669, 1968.

[22] Godunov, G.R., Deribas, A.A., Zabrodin, A.V. and Kozin, N.S., "Hydrodynamic Effects in Colliding Solids", *J. Comput. Phys.*, Vol. 5, pp.517, 1970.

[23] Gupta, R.C. and Kainth, G.S., "Swinging Wake Mechanism For Interface Wave Generation in Explosive Welding of Metals", *Transactions of the ASME*, Vol. 57, pp. 514-521, September 1990.

[24] Jaramillo, D., Szecket, A. and Inal, O.T. "On The Transition From a Waveless to a Wavy Interface in Explosive Welding", *Materials Science and Engineering*, Vol. 91, pp. 217-222, 1987.

[25] Bahrani, A.S., Black, T.J. and Crossland, B., "The Mechanics of Wave Formation in Explosive Welding", *Proc. Roy. Soc. Vol. A 296*, pp. 123-136, 1967.

[26] Acarer, M., Gülenç B. Ve Fındık, F., "Patlamalı Kaynak İşlem Parametrelerinin Birleşme Ara Yüzeyine Etkisi", 8. Denizli Malzeme Sempozyumu 2000, Editör Cemal Meran, Denizli-Türkiye, 2000.

[27] Abe, Akihisa, "Numerical Study of The Mechanism of Wavy Interface Generation in Explosive Welding", *JSME International Journal, Series B: Fluids and Thermal Engineering*, Vol. 40 n. 3, pp. 395-401, Aug 1997.

[28] İnal, T.O. and Zimmerly, C.A., "Processing of Materials with Explosives", 9th International Metallurgy and Materials Congress, Editors: Mustafa Doruk, Hakan Gür, Abdullah Öztürk and Kadri Aydınol, pp.751-764, İstanbul, Turkey, 1997.

[29] Wylie, H.K., Williams, P.E.G. and Crossland, B., "Further Experimental Investigation of Explosive Welding Parameters", Proc. 1 st Int. Sym. On Use of Explosive Energy in Manufacturing Metallic Materials of New Properties and Possibilities of Application thereof in the Chemical Industry, pp. 45-70, 1970.

[30] Blazynski, T.Z., "Explosive welding, forming, and compaction", Elsevier Science Pub. Co, Applied Science, 402 s, New York, 1983.

[31] Otto, H.E. and Carpenter, S.H., "Explosive Cladding of Large Steel Plates With Lead", Welding Journal, pp. 467-473, July 1972.

[32] Crossland, B., "Review of The Present State of The Art in Explosive Welding", Metals Technology, Vol. 3, pp. 8-20, 1976.

[33] Shribman, V. and Crossland, B., "An Experimental Investigation of The Velocity of The Flyer Plate in Explosive Welding", Proc. 2nd International Conference of Centre of High Energy Forming, Denver, 1969.

[34] Szecket, A., "An Experimental Study of The Explosive Welding Window", Ph.D. Thesis, Quenn's University of Belfast, 1979.

[35] Deribas, A.A., Simonov, V.A. and Zakcharenko, I.D., "Investigation of Explosive Welding Parameters for Arbitrary Combinations of Metals and Alloys", Proc. 5 th Int. Conf. On High Energy Rate Fabrication, 4.1.1-4.1.24, 1975.

[36] Wittman, R.H., "The Influence of Collision Parameters on the Strength and Microstructure of an Explosion Welded Aluminum Alloy", Proc. 2 nd Sym. On Use of Explosive Energy in Manufacturing Metallic Materials of New Properties and Possibilities of Application thereof in the Chemical Industry, pp. 153-168, 1973.

[37] Balasubramanian, V., Rathinasabapathi, M. and Raghukandan, K. "Modeling of Process Parameters in Explosive Cladding of Mild steel and Aluminum", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 63 n. 1-3, pp. 83-88, Jan 1997.

- [38] Vaidyanathan, P.V., Ramanathan, A., "Computer-Aided Design of Explosive Welding System", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 38 n. 3, May 1993.
- [39] Köse, H., "Açık İşletme Tekniği", *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Basım Ünitesi*, ss. 471, 1996.
- [40] Hokamoto, K., Izuma, T. and Fujita, T., "New Explosive Welding Technique to Weld Aluminum Alloy and Stainless Steel Plates Using a Stainless Steel Intermediate Plate", *Metallurgical Transactions A*, Vol. 24 A, pp. 2289-2297, 1993.
- [41] Mamalis, A.G., Szalay, A., Vaxevanidis, N.M. and Pantelis, D.I., "Macroscopic and Microscopic Phenomena of Nickel/Titanium 'Shape-Memory' Bimetallic Strips Fabricated By Explosive Cladding and Rolling", *Materials Science and Engineering*, Vol. A188, pp. 267-275, 1994.
- [42] Bement, L.J., "Small-Scale Explosion Seam Welding", *Welding Journal*, pp. 147-154, March 1973.
- [43] Bhalla, A.K. and Williams, J.D., "Production of Stainless Steel Wire-Reinforced Aluminium Composite Sheet by Explosive Compaction", *Journal of Material Science*, Vol. 12, pp. 522-530, 1977.
- [44] Nishida, M., Chiba, A., Honda, Y., Hirazumi, J. and Horikiri, K., "Electron Microscopy Studies of Bonding Interface in Explosively Welded Ti/Steel Clads", *ISIJ International*, Vol. 35 n. 2, pp. 217-219, 1995.
- [45] Hokamoto, K., Chiba, A. and Fujita, M., "Single Shot Explosive Welding Technique for Fabrication of Multilayered Metal Base Composites: Effect of Welding Parameters Leading To Optimum Bonding Condition", *Composites Engineering*, Vol. 5, pp. 1069-1079, 1995.

- [46] Johnson, W.R., "Explosive Welding Plugs Into Heat Exchanger Tubes", *Welding Journal*, pp. 22-32, January 1971.
- [47] Truetnev, V.V., et al., "Comparative Assessment of The Quality of The Explosive Joining of Aluminum to Titanium, Steel and Nickel", *Svar. Proiz.*, Vol. 7, pp. 19-21, 1973.
- [48] Zimmerly, C.A.; Inal, O.T.; Richman, R.H., "Explosive Welding of a Near-Equiatomic Nickel-Titanium Alloy to Low-Carbon Steel", *Materials Science and Engineering A; Structural Materials*, Vol. A188 n 1-2, pp. 251-254, Nov 30 1994.
- [49] Livne, Z. and Munitz, A., "Characterization of Explosively Bonded Iron and Copper Plates", *Journal of Material Science*, Vol. 22, pp. 1495-1500, 1987.
- [50] Persson, I., "Method of explosion welding alloy aluminum", US4925084, Nora, Sweden, May 15, 1990.
- [51] Araki, M., "Explosive Welding Process", US3813758, June 4 1974.
- [52] www.newtech.com/design
- [53] Crossland, B., "The Development of Explosive Welding and Its Application in Engineering", *Metals and Materials*, pp. 401-413, December 1971.
- [54] Dale, E.A., Gary, S.W. and Fred, J.M., "Laser-Driven Micro Explosive Bonding of Aluminium Films To Copper and Silicon", *Journal of Materials Science*, Vol. 23, pp. 2181-2186, 1988.
- [55] Ganin, E., Weiss, B.Z. and Komem, Y., "Martensitic Transformation in Cu-2Be Alloys Induced by Explosive Cladding", *Metallurgical Transactions A*, Vol. 17 A, pp. 1885-1890, 1986.

- [56] Khoklov, V.I., Popov, G.V., Krasnov, V.D. and Andrianov, V.M., "Special Features of The Change of Structure of Titanium Alloys In Explosive Welding", *Metal Science and Heat Treatment*, Vol. 32, pp. 537-540, 1991.
- [57] Zlatova, G. and Dafinova, R., "Structure of the Bonding Zone in Explosively Welded Austenitic and Ferrite-Pearlitic Steel", *Practical Metallography*, Vol. 34, pp. 127-137, 1997.
- [58] Yang, Y., Xinming, Z., Zhenhua, L. and Quinyun, L., "Localized Superplastic Behavior In α -Titanium At High Strain Rate", *Scripta Metallurgica et Materialia*, Vol. 33, pp. 219-224, 1995.
- [59] Crossland, B. and Williams, J.D., "Explosive Welding", *The Metals and Metallurgy Trust, Metallurgical Reviews*, Review 144, pp.79-100, 1970.
- [60] Gulbin, V.N., Kobelev, A.G. and Borissov, D.E., "Thermobimetals Mechanical Properties Produced by Explosive Welding with Rolling", *Journal de Physique IV*, pp.49-54, 1997.
- [61] Richman, R.H.; Rao, A.S.; Kung, D., "Cavitations Erosion of NiTi Explosively Welded to Steel", *Wear*, Vol. 181-183 n 1, pp. 80-85, Feb 1995.
- [62] ASTM A 264 "Standard Specification for Stainless Chromium-Nickel Steel-Clad Plate, Sheet, and Strip", February 1995.
- [63] Trueb, L.F., "Microstructural Effects of Heat Treatment on the Bond Interface of Explosively Welded Metals", *Metallurgical Transactions*, Vol. 2, pp. 145-153, 1971.
- [64] Changqing, X. and Zhanpeng, J., "Examination of The Diffusion Path in A Niobium-Steel Explosion Weld Interface During Heat Treatment", *Materials Science and Engineering*, Vol. A 221, pp. 173-178, 1996.

[65] Changqing, X. and Zhanpeng, J., "Evaluation of Microstructure and Diffusion Path in the Molybden-Steel Explosion Weld Interface During Heat Treatment", Materials Science and Engineering, Vol. A 158, pp. 235-239, 1992.

[66] Murr, L.E., Ferreyra, E.T., Pappu, S., Garcia, E.P., Sanchez, J.C., Huang, W., Rivas, J.M., Kennedy, C., Ayala, A. and Niou, C.S., "Novel Deformation Processes and Microstructures Involving Ballistic Penetrator Formation and Hypervelocity Impact and Penetration Phenomena", Materials Characterization, Vol. 37, pp. 245-276, 1996.

[67] Donald, R., Askeland, "The Science and Engineering of Materials", Çeviri: Dr Mehmet Erdoğan, "Malzeme Bilimi ve Mühendislik Malzemeleri", Nobel Yayın Dağıtım, s.364, Ankara, 1998.

[68] Kayalı E.S. ve Ensari, C., "Metallere Plastik Şekil Verme İlke ve Uygulamaları, Bölüm 4 Mukavemet Artırıcı İşlemler", s. 94, İTÜ 1985

ÖZGEÇMİŞ

Mustafa Acarer 1971 yılında Ankara'da doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Ankara'da tamamladı. 1993 yılında Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Metal Eğitimi Bölümünden mezun oldu. Ekim 1993'de Dumlupınar Üniversitesi Simav Teknik Eğitim Fakültesi Metal Eğitimi Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak göreve başladı. 1996 yılında Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde "Türkiye'de Üretilen Bazik Elektrodlarla Elde Edilen Kaynak Metalinin Tokluğunun İncelenmesi" konulu tezi ile yüksek lisansını tamamladı. 1997 yılında Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde Doktora eğitimine başlayan Mustafa Acarer halen Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Karabük Teknik Eğitim Fakültesi Metal Eğitiminde Öğretim Görevlisi olarak çalışmaktadır.