

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**AISI 1010-BAKIR MALZEME ÇİFTİNİN SÜRTÜNME KAYNAK
YÖNTEMİ İLE BİRLEŞTİRİLEBİLİRLİĞİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mustafa AÇIK

(112122109)

Anabilim Dalı: Metalurji Eğitimi

Programı: Kaynak

Danışman: Doç. Dr. Uğur ÇALIGÜLÜ

MAYIS – 2015

T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**AISI 1010-BAKIR MALZEME ÇİFTİNİN SÜRTÜNME KAYNAK YÖNTEMİ İLE
BİRLEŞTİRİLEBİLİRLİĞİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mustafa AÇIK

(112122109)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 05 Mayıs 2015
Tezin Savunulduğu Tarih : 27 Mayıs 2015

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Uğur ÇALIGÜLÜ
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Sedat KOLUKISA
Prof. Dr. Niyazi ÖZDEMİR

(F.Ü) 
(Tunceli Ü) 
(F.Ü) 

MAYIS-2015

ÖNSÖZ

Bu çalışma sürecinde benden yardımlarını hiç eksik etmeyen değerli danışman hocam Sayın Doç. Dr. Uğur ÇALIGÜLÜ' ne, bana bilgi ve fikirlerinden istifade ettiren Sayın Yrd. Doç. Dr. Zülküf BALALAN, Dr. Nida KATI hocalarıma ve ayrıca bu çalışmam boyunca benden yardımlarını esirgemeyen değerli eşime sonsuz teşekkürlerimi ve şükranlarımı sunarım.

Mustafa AÇIK

Elazığ-2015

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ÖZET	VI
SUMMARY.....	VII
ŞEKİLLER LİSTESİ TABLOLAR LİSTESİ	VIII
1. GİRİŞ.....	1
2. KONUNUN LİTERATÜRDEKİ YERİ.....	3
3. SADE KARBONLU ÇELİKLER.....	12
4. BAKIR	13
4.1. Bakır Alaşım Dökümlerinin Avantajları	14
4.2. Bakır ve Bakır Alaşımlarının Kaynağı	15
4.2.1. Bakır Alaşımlarının Kaynak Kabiliyeti.....	16
4.2.2. Bakır ve Bakır Alaşımlarının Örtülü Elektrot ile Kaynağı	16
4.2.3. Bakır ve Bakır Alaşımlarının Gazaltı Kaynağı.....	17
4.2.4. Bakır ve Bakır Alaşımlarının TIG Kaynağı.....	19
5. KATI HAL KAYNAK YÖNTEMLERİ.....	21
5.1. Difüzyon Kaynağı	21
5.2. Direnç Kaynağı	23
5.3. Ultrason Kaynağı	23
5.4. Sürtünme Karıştırma Kaynağı	24
5.5. Patlamalı Kaynak	26
6. SÜRTÜNME KAYNAĞI.....	27
6.1. Sürtünme Kaynağının Mekanizması	28
6.2. Sürtünme Kaynağının Uygulanması	32
6.3. Sürtünme Kaynak Değişkenleri (Parametreleri)	33
6.3.1. Dönme Hızı (Çevresel Hız)	33
6.3.2. Sürtünme Basınç Kuvveti.....	34
6.3.3. Sürtünme Süresi	34
6.3.4. Yığma Süresi.....	35
6.3.5. Yığma Basınç Kuvveti	35
6.3.6. Frenleme	36

6.4.	Sürtünme Kaynağının Kalitesini Etkileyen Faktörler	37
6.5.	Sürtünme Kaynağı Yöntemleri	38
6.5.1.	Sürekli Tahrikli Sürtünme Kaynağı	39
6.5.1.1.	Sürekli Tahrikli Sürtünme Kaynağı Parametrelerinin Belirlenmesi	41
6.5.2.	Volan Tahrikli Sürtünme Kaynağı	41
6.5.2.1.	Volan Tahrikli Sürtünme Kaynağı Değişkenleri	43
6.6.	Sürtünme Kaynağının Uygulama Alanları	44
6.7.	Sürtünme Kaynağının Avantajları.....	46
6.8.	Sürtünme Kaynağının Dezavantajları	47
7.	TAHRİBATLI VE TAHRİBATSIZ MUAYENE YÖNTEMİ.....	48
7.1.	Tahribatlı Muayene Yöntemi	48
7.1.1.	Çekme Deneyi.....	48
7.1.2.	Eğme Deneyi.....	49
7.1.3.	Çentik Darbe Deneyi	50
7.1.4.	Sertlik Ölçme Deneyi	51
7.1.5.	Basma Deneyi	51
7.1.6.	Kırma Deneyi.....	52
7.1.7.	Burulma Deneyi	53
7.2.	Tahribatsız Malzeme Muayene	54
7.2.1.	Radyografi - X ve Gama.....	55
7.2.2.	Magnetik Partikül Yöntemi	57
7.2.3.	Penetrant Yöntemi.....	58
7.2.4.	Ultrasonik Muayene	60
7.2.5.	Girdap Akımları (Eddy-Current) Yöntemi	61
8.	DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	63
8.1.	Çalışmanın Amacı	63
8.2.	Kaynak Öncesi İşlemler.....	63
8.2.1.	Deneylerde Kullanılan Malzeme ve Özellikleri.....	63
8.2.2.	Sürtünme Kaynak Numunelerinin Hazırlanması	64
8.2.3.	Sürtünme Kaynak Tezgâhı	64
8.2.4.	Sürtünme Kaynak Parametreleri	66
8.3.	Kaynak Sonrası Yapılan İncelemeler	67
8.3.1.	Metalografik İncelemeler.....	67

8.3.2.	Mikrosertlik Analizi	68
8.3.3.	Çekme Deneyi.....	69
8.3.4.	Radyografi Testi.....	71
9.	DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ	73
9.1.	Kaynaklı Numunelerin Makroskobik Değerlendirmesi	73
9.1.1.	1800 dev/dk ile Birleştirilen Kaynaklı Bağlantıların Makroskobik İncelemeleri..	75
9.1.2.	2100 dev/dk ile Birleştirilen Kaynaklı Bağlantıların Makroskobik İncelemeleri..	77
9.1.3.	2300 dev/dk ile Birleştirilen Kaynaklı Bağlantıların Makroskobik İncelemeleri..	78
9.2.	Kaynaklı Bağlantıların Mikro Yapı Değerlendirmesi	79
9.2.1.	1800 dev/dk ile Birleştirilen Numunelerin Optik, EDS ve X-Ray Analizleri ..	82
9.2.2.	2100 dev/dk ile Birleştirilen Numunelerin Optik, EDS ve X-Ray Analizleri ..	86
9.2.3.	2300 dev/dk ile Birleştirilen Numunelerin Optik, EDS ve X-Ray Analizleri ..	90
9.3.	Mikrosertlik Analiz Sonuçları.....	94
9.3.1.	1800 dev/dk İle Birleştirilen Numunelerin Mikro Sertlik Sonuçları	95
9.3.2.	2100 dev/dk İle Birleştirilen Numunelerin Mikro Sertlik Sonuçları	96
9.3.3.	2300 dev/dk İle Birleştirilen Numunelerin Mikro Sertlik Sonuçları	97
9.4.	Kaynaklı Bağlantıların Mekanik Özelliklerine Ait Sonuçlar	98
9.4.1.	Çekme Test Sonuçları.....	98
9.4.1.1.	1800 dev/dk İle Birleştirilen Numunelerin Çekme Test Sonuçları	100
9.4.1.2.	2100 dev/dk İle Birleştirilen Numunelerin Çekme Test Sonuçları	103
9.4.1.3.	2300 dev/dk İle Birleştirilen Numunelerin Çekme Test Sonuçlar	105
9.4.1.4.	Sürtünme Kaynaklı Numunelerin Arayüzey Sıcaklık Ölçümleri	108
9.4.1.5.	Radyografi Testi Sonuçları	109
10.	GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	112
10.1.	Genel Sonuçlar	112
10.2.	Öneriler	113
	KAYNAKLAR	114
	ÖZGEÇMİŞ.....	121

ÖZET

Farklı birleştirmeye sahip iki malzemenin geleneksel ergitme yöntemi ile birleştirilmesi oldukça güç ve problemdir. Bu problemler; yüksek viskozite, düşük akıcılık kontrolsüz katılaşma, istenmeyen reaksiyonlar ve düşük kaynak kabiliyetidir. Ayrıca metalik malzemelerin ergitme kaynak yöntemi ile birleştirilmesi durumunda, birleşme bölgesinde meydana gelen yapısal değişim işlem şartlarına bağlı olarak malzeme ve yerel geometrik etkilerin oluşturduğu süreksizlerde meydana gelen yüksek gerilmeler, kaynaklı bağlantıların hasar sürecinde, önemli rol oynamaktadır.

Bu çalışmanın amacı; AISI 1010 çelik malzeme ile bakır malzeme çiftini farklı katı hal kaynak yöntemi olan sürtünme kaynak yöntemi ile birleştirilmesidir. Bakır metali yumuşak, sağlam ve çekmeye elverişli bir metaldir. Ekonomiklik, uygun mekanik ve fiziksel özellikleri nedeni ile karbonlu çelik ve bakırın geniş kullanım alanları vardır. Bu alanlar; özellikle bakır ve demir esaslı malzeme çiftleri soğutma sistemlerinde istenmeyen ısınmalarından kaçınmak için boru bağlantılarında ve elektrik deşarj makinelerinde elektrod olarak kullanılmaktadır.

Sürtünme kaynak yöntemi ile birleştirilen kaynaklı numunelerin çekme deneyi ile birlikte mikro yapı incelemeleri yapılmış ve kaynaklı bağlantıların hasar süreci analiz edilmiştir. Deney sonuçları literatür ışığında değerlendirilerek üretim parametrelerinin bu iki malzeme çiftinin sürtünme kaynağı ile birleştirilebilirliği üzerine olan etkileri belirlenmiştir.

Bu çalışmanın birinci bölümünde konuya giriş yapılmıştır. İkinci bölümde güncel çalışmanın literatürdeki yeri ve öneminden bahsedilmiştir. Üçüncü bölümde sade karbonlu çelikten bahsedilmiştir. Dördüncü bölümde bakır hakkında genel bilgi verilmiştir. Beşinci bölümde katı hal kaynak yöntemleri anlatılmıştır. Altıncı bölümde sürtünme kaynağı anlatılmıştır. Yedinci bölümde tahribatlı ve tahribatsız muayene yöntemi anlatılmıştır. Sekizinci bölümde deneysel çalışma yapılmıştır. Dokuzuncu bölümde deneysel çalışma ve değerlendirme yapılmıştır. Onuncu bölümde genel sonuçlar ve öneri anlatılmıştır.

Anahtar kelime: AISI 1010, Bakır, Sürtünme kaynağı, Mikroyapı, Mekanik Özellikler.

SUMMARY

WELDABILITY OF AISI 1010-COPPER MATERIALS BY USING FRICTION WELDING METHOD

Uniting of the conventional melting methods of the two materials having a different compound is difficult and problematic. These problems; high viscosity, low fluidity, uncontrolled solidification, adverse reactions and low weldability. In addition, on condition of uniting with melting welding methods of the metallic materials, constitutional transformation occurring in the uniting area and depending on the process conditions higher stretches occurring in the transitories generated by material and locational geometric factors play important roles in the damage period of welded joints.

The aim of this study, AISI 1010 steel material with copper material is combined with friction welding method one of the different method of solid state welding. Copper metal is soft, durable and convenient to pull a metal. Because of economics, suitable mechanical and physical characteristics have wide range of applications carbon steel and copper. These areas; especially copper and iron-based material is used as the electrode pairs in order to avoid unwanted heat pipe cooling system, and we discharge machine screen .

Friction welding method with a micro structure made along with the combined tensile test of the welded samples and analyzed the damage process of welded joints. The experimental results of the production parameters evaluated in the literature the effects of the two materials was determined on in joining by friction welding of the pair .

In the first section this study, it was made introduction to the subject. In the second section, the place and importance in the literature of the actual study were mentioned. In the third section, general information about low carbon steel were given. In the fourth section, general information about copper were given. In the fifth section, general information about solid-state welding methods were given. In the sixth section, general information about friction welding were given. In the seventh section, general information about destructive and non-destructive inspection method were given. In the eighth section, the information about experimental study were given. In the ninth section, the information about experimental study and evaluation were given. In the tenth section, the information about results, discusses and suggestions.

Keyword: AISI 1010, Copper, Friction Welding, Microstructure, Mechanical Properties.

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil.4.1.Doğal bakır metali.....	13
Şekil.4.2.Bakır elementin kristal yapısı (YMK).....	14
Şekil 5.1. Difüzyon Kaynak Seti	22
Şekil 5.2. Ultrasonik Kaynak	24
Şekil 5.3. Sürtünme Karıştırma Kaynağının Prensibi	25
Şekil 5.4.Patlamalı Kaynak.	26
Şekil 6.1. Zahiri ve Gerçek Temas Alanını Gösteren Şematik Resim.....	27
Şekil 6.2. Sürtünme Kaynağı Mekanizması	29
Şekil 6.4.Titreşim Hareketiyle Sürtünme Kaynağı.....	30
Şekil 6.5. Sürtünme Kaynağının İşlem Safhaları	31
Şekil 6.6. Sürtünme Kaynağında Yığılma Bölgesi.	31
Şekil 6.7. Sürtünme Kaynağında Oluşan Yığılma.....	32
Şekil 6.8. Hareket Şekline Göre Sürtünme Kaynak Yöntemleri.....	38
Şekil 6.9. Sürekli Tahrikli Sürtünme Kaynak Makinasının Şematik Yapısı	39
Şekil 6.10. Sürekli Tahrikli Sürtünme Kaynağı Kaynak Parametreleri.....	39
Şekil 6.11. Volan Tahrikli Sürtünme Kaynak Makinasının Şematik Resmi	42
Şekil 6.12. Volan Tahrikli Sürtünme Kaynağında Kaynak Parametreleri.....	42
Şekil 6.13. Çeşitli Sektörlerde Kullanılan Sürtünme Kaynağı İle Üretilmiş Parça.	45
Şekil 7.1. Çekme deneyinde elastik ve plastik deformasyon bölgeleri	49
Şekil 7.2. Eğme deneyi prensip şeması.....	49
Şekil 7.3.Çentik darbe testi	50
Şekil 7.4. Basma deneyi uygulanan bir sünek malzemede oluşan fiçilaşma	52
Şekil 7.5. Darbe deneyinin Şematik gösterimi ve Çalışma sistemi	53
Şekil 7.6. Burulma momentine maruz bir çubuk.....	54
Şekil 7.7. Magnetik partikül çatlak kontrolünün temel prensibi	57
Şekil 7.8. Penetrant ve geliştiriciye ait kalıntıları gidermek için yapılan temizlikler	59
Şekil 7.9. Ultrasonik muayene yönteminin çalışma prensibi.....	60
Şekil 7.10. Girdap Akımları Kullanarak Hata Tespiti	61
Şekil 8.1. Sürtünme kaynak numuneleri	64
Şekil 8.2. Sürekli tahrikli sürtünme kaynak tezgâh fotoğrafı.....	65
Şekil 8.3. Malzeme çiftinin birleşme düzenini gösteren resim	66

Şekil 8.4. Metalografik İncelemelerde kullanılan numune	67
Şekil 8.5. Metalografik İncelemeler için hazırlanan numune boyutları	67
Şekil 8.6. Mikrosertlik cihazı	68
Şekil 8.7. Mikrosertlik ölçümü yapılan noktaların şematik gösterimi.....	69
Şekil 8.8. Çekme deney numunelerine ait ölçüler	69
Şekil 8.9. Çekme deney numunesi.....	70
Şekil 8.10. Çekme deney cihaz	70
Şekil.8.11. Radyografik testin çalışma prensibi	71
Şekil.8.12.X-ray cihazında 500 kV bir gerilimle belirlenen derin penetrasyon kalınlığı ve malzeme grafiği	71
Şekil 8.13.Rigaku marka Radioflex -300EGS3 tipi cihaz (a) ve control paneli (b)	72
Şekil 8.14.Film, penetremeter, şablonlu kalıp, ışın kümesi	72
Şekil 9.1. Kaynak bölgesinde oluşan flanş ve IEB’ nin gösterimi	73
Şekil 9.2. Boyca kısalma miktarı ve flanş geometrisine ait özellikler.....	74
Şekil 9.3. S1, S4, S7 ve S10 no’lu numunelere ait yüzey ve ara yüzey fotoğrafları	75
Şekil 9.4. S2, S5, S8 ve S11 no’lu numunelere ait yüzey ve ara yüzey fotoğrafları	77
Şekil 9.5. S3, S6, S9 ve S12 no’lu numunelere ait yüzey ve ara yüzey fotoğrafları	78
Şekil 9.6. AISI 1010 çelik malzeme mikroyapı optik fotoğrafı	80
Şekil 9.7. Bakır malzemenin mikroyapı optik fotoğrafı	81
Şekil 9.8. Mikroyapı değişikliğinin meydana geldiği bölgeler [82]......	81
Şekil 9.9. S1,S4,S7 ve S10 no’lu numunelerin arayüzey Optik görüntüleri.....	83
Şekil 9.10. S1 no’ lu numunenin X-Ray analiz grafiği.....	84
Şekil 9.11. EDS, sürtünme kaynaklı S8 numunenin kaynak ara yüzeyi boyunca analiz.....	85
Şekil 9.12. S2,S5,S8, ve S11 no’lu numunelerin arayüzey optik görüntüler	87
Şekil 9.13. S8 no’lu numunenin X- ışını analiz grafiği	88
Şekil 9.14. EDS, sürtünme kaynaklı S8 numunenin kaynak ara yüzeyi boyunca analiz.....	89
Şekil 9.15. S3,S6,S9, ve S12 no’lu numunelerin arayüzey optik görüntüleri.....	91
Şekil 9.16. S12 no’lu numunenin X- ışını analiz grafiği	92
Şekil.9.17. EDS, sürtünme kaynaklı S12 numunenin kaynak ara yüzeyi boyunca analiz...93	
Şekil 9.18. Mikrosertlik ölçüm sonuçlarının değiştiği bölgeler	95
Şekil 9.19.S1, S4, S7 ve S10 no’lu numunelerde kaynak bölgesindeki mikrosertlik dağılımlar	96

Şekil 9.20. S2, S5, S8 ve S11 no’lu numunelerde kaynak bölgesindeki mikrosertlik dağılımları	97
Şekil 9.21. S3, S6, S9 ve S12 no’lu numunelerde kaynak bölgesindeki mikrosertlik dağılımları	98
Şekil 9.22. AISI 1010 ve bakırın çekme testi sonunda elde edilen kırık yüzey makro fotoğrafı.....	99
Şekil 9.23. Çekme test sonuçlarına ait grafik.....	99
Şekil 9.24. Çekme deneyi sonunda kırılan parçaların şematik gösterimi [82].....	100
Şekil 9.25. S1, S4, S7 ve S10 no’lu numunelerin çekme testi sonunda ki kırık yüzey makro fotoğrafları.....	102
Şekil 9.26. S1 no’lu numunenin çekme testi sonunda kırık yüzey optik fotoğrafları	103
Şekil 9.27. S2, S5, S8 ve S11 no’lu numunelerin çekme testi sonunda ki kırık yüzey makro fotoğrafları.....	104
Şekil 9.28. S5 no’lu numunenin çekme testi sonunda kırık yüzey optik fotoğrafları	105
Şekil 9.29. S3, S6, S9 ve S12 no’lu numunelerin çekme testi sonunda ki kırık yüzey makro fotoğrafları.....	107
Şekil 9.30. S9 no’lu numunenin çekme testi sonunda kırık yüzey optik fotoğrafları	108
Şekil 9.31. Ara yüzey sıcaklıkları.....	109
Şekil 9.32. Film inceleme cihazı (Görüntüleyici)	109
Şekil 9.33. Numunelerin radyografik test fotoğrafları (B1, B2, B3).....	110

TABLÖLER LİSTESİ

Tablo 1. Örtülü elektrod ark kaynağı-DCEP [50].	17
Tablo 2. Gazaltı kaynağı-DCEP [50].	19
Tablo 3. TIG kaynağı- DCEN [50].	20
Tablo 4. Sürtünme Kaynağında Malzeme Cinsine Göre Seçilecek Parametre Değerleri ...	37
Tablo 5. Sürekli Tahrikli Sürtünme Kaynağında Çeşitli Malzemeler için Tavsiye Edilen Kaynak Parametrelerinin Değerleri.....	41
Tablo 8.1. AISI 1010-Cu malzeme çiftinin kimyasal kompozisyonu	64
Tablo 8.2. Sürtünme kaynağı deneylerinde kullanılan parametreler	66
Tablo 9.1. Kaynak parametrelerine bağlı olarak boyca kısalma miktarları.....	74
Tablo 9.2. S1, S4, S7 ve S10 no'lu numunelerdeki boyca kısalma miktarı	76
Tablo 9.3. S2, S5, S8 ve S11 no'lu numunelerdeki boyca kısalma miktarı	78
Tablo 9.4. S3, S6, S9 ve S12 no'lu numunelerdeki boyca kısalma miktarı	79
Tablo 9.5. S1,S4,S7 ve S10 no' lu numunelere ait çekme deney sonuçları	101
Tablo 9.6. S2,S5,S8 ve S11 no' lu numunelere ait çekme deney sonuçları	103
Tablo 9.7. S3,S6,S9 ve S12 no' lu numunelere ait çekme deney sonuçları	106
Tablo 9.8. Kaynak kusurları ve radyografik görüntünün tanımı [84].	110

1.GİRİŞ

Malzeme bilimciler, günlük yaşantımızı kolaylaştıracak daha üstün özelliklere sahip ve daha ekonomik malzeme üretmeye yönelmişlerdir. Teknolojinin de gelişmesine bağlı olarak günümüzde tek bir malzemeden beklenen istekleri ve ihtiyaçları karşılamakta yetersiz kalmıştır.

Bakır metali yumuşak, sağlam ve çekmeye elverişli bir metaldir. Isıl işlem uygulanmaz, soğuk biçimlendirme sonucu sertleşme özelliğine sahiptir. Bakırın ısıl iletkenliği farklı çelik tiplerinde en az on kat daha fazladır. Ekonomiklik, uygun mekanik ve fiziksel özellikleri nedeni ile yaygın olarak kullanılmaktadır.

Sade C'lu çelikler, yapılarında Mn, Si, P, O, N gibi, çelik üretim yöntemlerinden gelen elementler bulunduran demir karbon alaşımlarıdır. Bu malzemeler, ucuz ve kolay şekillendirilebilen malzemeler olup, sertleşme yetenekleri azdır. Ayrıca korozyon dayanımları düşük olduğu için, bu malzemelerin korozyona maruz kalan kısımlarının paslanmaz çeliklerle birleştirilmesi önem kazanmaktadır. Yapılarındaki C oranına göre; düşük C'lu çelikler (% 0,05–0,3 C), orta C'lu çelikler (% 0,3–0,8 C), ve yüksek C'lu çelikler (% 0,8–1,7 C) olmak üzere 3 gruba ayrılırlar [83].

Metalik malzemelerin geleneksel ergitme kaynak yöntemleriyle birleştirilmesinde çeşitli problem ve sorunlarla karşılaşmaktadır. Bu problemler arasında; ergitme kaynağında viskozitenin yüksekliği, ergime esnasında kaynak bölgesinde akıcılığın düşüklüğü ve istenmeyen reaksiyonların meydana gelmesi gibi faktörler kaynağın mukavemetini düşüren en önemli etkenlerdir. Dolayısıyla, bu malzemeler için çatlama riskini ortadan kaldıracak ve içyapıda en az değişikliğe yol açacak birleştirme yöntemleri kullanılması zorunludur. Katı hal kaynak yöntemleri; yeni veya özellikleri geliştirilmiş malzemelerin mevcut ergitme kaynak yöntemleri ile kaynak edilmesinden doğan bu problemleri ortadan kaldırdığı için son yıllarda geniş bir uygulama alanı bulmuştur. Bu yöntemler içerisinde yer alan en sağlıklı ve en sık kullanılan yöntem ise sürtünme kaynağı yöntemidir. Sürtünme ısı ile gerçekleştirilen sürtünme kaynağı, gelişen teknoloji ile birlikte dünyada birçok ülkede endüstride geniş olarak uygulama alanı bulmuş, ticari bir üretim yöntemi olarak yerini almıştır.

Bu çalışmada, farklı özelliklere sahip malzeme çiftlerinden bakır ile düşük karbonlu çeliklerin bir katı hal kaynak yöntemi olan sürtünme kaynak yöntemi ile birleştirilebilirliği araştırılmıştır.

2. KONUNUN LİTERATÜRDEKİ YERİ

Sürtünme kaynağı ile kaynak yapma fikri eskilere dayanmaktadır. Ancak konu ile ilgili ilk patent 1891 yılında Amerikalı makinist I.H.Bevington tarafından alınmıştır. Daha sonraları konu ile ilgili 1924 yılında İngiltere ve Rusya, 1929 yılında Almanya patent almıştır. Başlangıçta boru ve plastiklerin kaynağında kullanılan bu teknik 1956 yılında Rus bilimci A.J. Chdicov, iki metal çubuğu sürtünme kaynağı ile birleştirmeyi başarmıştır. Sürtünme kaynağı konusu ile ilgili gerçek bilimsel çalışmalar 1956 yılından sonra başlamıştır ve usulün uygulama alanlarının geliştirilmesi doğrultusunda çalışmalar halen devam etmektedir. Özellikle yeni ve özellikleri geliştirilmiş malzemelerin üretilmesi ve bu malzemelerin mevcut kaynak yöntemleri ile kaynatılmasından doğan problemler, sürtünme kaynağı için geniş bir uygulama alanı bulmasını sağlamıştır. Sürtünme kaynağı ile ilgili ilk bilimsel çalışmalar malzeme ve diğer şartlara bağlı olarak parametrelerin belirlenmesi üzerinedir.

Bu konuda ilk ciddi esaslar V.I. Vill (1962) tarafından toparlanmıştır. Vill, sürtünme basıncının büyük bir öneme sahip olduğunu ve değişiminin geniş bir aralıkta olduğunu ifade etmiştir. Vill'e göre basınç, kaynak bölgesindeki sıcaklık derecesi ve eksenel kısalma miktarı ile kontrol edilir. Nümerik olarak 25 -250 MPa arasında değişir. Dönme hızı, hassasiyeti en az olan parametredir. Pratik olarak kaynak bağlantısını etkilemeksizin geniş bir değişim aralığı kullanılabilir.

Daha sonraları R.Y.Tylecote (1968) V.I. Vill' in çalışmaları da dahil olmak üzere kendisinden önce konu ile ilgili çalışmaları derlemiştir. R.Y. Tylecote bu çalışmasında en önemli parametre olarak eksenel basıncı ele almıştır. R.Y. Toylecote' ya göre eksenel basınç ara yüzeydeki sıcaklığı etkilemekte ve gerekli momenti sağlamaktadır. Ayrıca eksenel basınç ile birlikte yığma basıncı ve çevresel hızı da önemli üç parametre olarak belirlemiştir. Çeşitli araştırmalara dayanarak eksenel basınç değerini, yumuşak çelikler için 56.2 MPa, Orta karbonlu çelikler için 70.3 MPa olarak önermiştir.

P. Jennings (1971), 19 mm çaplı Cr-Mo/Cr çelik çifti kullanarak, kaynak öncesi ve sonrası ısıtma işlemleri uygulayarak değişken tutulan parametrelerde sürtünme kaynak işlemini gerçekleştirmiştir. Elde etmiş olduğu bu kaynaklı bağlantılara eğme, çekme ve yorulma testleri uygulayarak kaynak kalitesini belirlemede etkin olan parametreleri araştırmıştır. Numunelere uygulanan çekme testleri sonrasında bütün kopmalar kaynak bölgesi dışında olmuştur. Kaynak sonrası uygulanan ısıtma işlemlerin çekme özellikler

üzerinde önemli etkileri olduğunu tespit etmiştir.

W. Lucas (1971) EN 3B yumuşak çeliğinden elde etmiş olduğu sürtünme kaynaklı numunelere eğme testi uygulamıştır. Bu çalışmada 1 sn. süre ile bir yığma basıncının uygulanmasının gerekli olduğunu, yüksek yığma basınçlarının yanı sıra kısa kaynak sürelerinin en iyi kaynak bölgesi yapısı verdiğini tespit etmiştir.

F.D. Duffin ve B. Crossland (1971) yumuşak çelikleri kullanarak elde ettikleri sürtünme kaynaklı numunelerde kısa kaynak süresi ve yüksek yığma basıncı değerlerinin daha ince taneli bir yapı verdiğini tespit etmişler.

V.P. Voinov, ve arkadaşları (1972) 16 mm çaplı St 20 ve 40 KH çelik çiftini $P_1 = 50$ MPa, $P_2 = 100$ MPa, $t_1 = 3$ sn ve $t_2 = 1.5$ sn değişkenlerini kullanarak yapmış olduğu sürtünme kaynaklı numunelere çentik darbe ve yorulma deneyleri uygulayarak $n = 1200/4200$ dev/dak. dönme hızının kaynak kalitesi üzerindeki etkisini belirlemek için parametre optimizasyonu yapmıştır. Yüksek dönme hızları çentik darbe dayanımında daha iyi sonuç verirken, yorulma deneyinde her iki dönme hızında da iyi sonuçlar alınmıştır.

A.N. Dobrovidov ve arkadaşları (1975) HSS-C 45 karbonlu çelik çifti kullanılarak yapılan sürtünme kaynaklı numunelerin mikroyapısı üzerinde çalışmışlardır. Bu çalışmada HSS tarafına doğru bir karbon difüzyonunun olduğu, dolayısıyla C 45 tarafında bir dekarbürize bölge oluştuğu ve kaynak sonrası ısıtma işlem şartlarının bu dekarbürize bölgenin genişliği üzerinde çok etkili olduğu ortaya konulmuştur.

S.A. Seregin ve S.B. Sabantsev (1977) 14.1 mm çapında, kaynak öncesi çeşitli derecelerde deformasyona uğratılmış St 20 çeliğini kullanarak, diğer kaynak parametreleri sabit kalmak şartıyla $n = 1200, 1400$ dev/dak. gibi iki ayrı dönme hızında birleştirilen sürtünme kaynaklı numunelere çentik darbe deneyi uygulamışlardır. Deney sonuçlarında yüksek dönme hızlarının daha iyi sonuçlar verdiğini belirlemişlerdir.

O.N. Tanicheva ve arkadaşları (1989), yapmış oldukları bir çalışmada, takım çeliklerinin kaynaklı kısımlarından kırılmaları sonrasında yüzeyde görülen hata “parlak şerit” olarak nitelendirilmiştir. Bu hatanın oluşmaması için araştırmacılar kaynak sıcaklığı ve basıncının artırılmasını tavsiye etmişlerdir. C.R.G. Ellis (1977), literatüre dayanarak yapmış olduğu sürtünme kaynaklı bağlantılarda kaynak kalitesini etkileyen parametrelerin; dönme hızı, sürtünme basıncı, sürtünme süresi ve yığma basıncına bağlı olduğunu, ara yüzey sıcaklığı ve bağlantı kalitesi üzerine en etkin parametrenin dönme hızı olduğunu ileri sürmüştür. C.R.G. Ellis (1977), G.H.C. Begg, ve B.A. Humphreys (1981), sürtünme kaynağında malzeme çap büyüklüğü parametresinin önemine değinmişler. Isıtma süresinin

sürtünme ile sürtünen yüzeyleri temizleyecek ve katı hal kaynağı için gerekli plastisiteye ulaşabilecek düzeyde olması gerektiğini ifade eden C.R.G. Ellis, yığma için gerekli sürtünme süresini amprik $T = 82.55 \times D \text{ (sn)}$ olarak ifade etmiştir. Bu formülün, karbonlu ve düşük alaşımlı çelikler için iyi sonuç verirken, yüksek alaşımlı, paslanmaz çelikler, sertleştirilmiş çelikler ve yüzey işlemi görmüş çelikler için iyi sonuç vermediğini ifade etmiştir. Yapılan bu çalışmalarda elde edilen sonuçlara göre, yığma basıncı malzemelerin kaynaklanabilmesi için sıcak dövme mukavemetlerinin altında olmamalıdır. Buna karşın yığma basıncı çok yüksek alınırsa, aşırı metal deformasyonu oluşur ve bu aşırı yığılma sırasında metalik olmayan inklizyonlar kaynak bölgesinde arzu edilmeyen enine bir akış göstererek yeniden şekillenirler. Bu durum kaynağın kırılma tokluğunu ve yorulma dayanımını olumsuz etkiler.

S.A. Westgate ve S.B. Dunkerton (1985) tarafından yapılan bir çalışmada, sürtünme kaynaklı C/Mn çeliklerinde parametrelerin, kaynak sonrası ısıt işlemlerin ve malzemenin kükürt içeriğinin bağlantının tokluğuna etkisi, çentik darbe dayanımı testi uygulanarak araştırılmıştır. Bu tür bağlantılarda düşük kaynak süresi ve yüksek yığma basıncı değerleri daha ince taneli bir yapı vermiş olduğunu tespit etmişlerdir.

K.G.K. Murti, S. Sundersan (1986) isimli araştırmacılar, sertleşme kabiliyeti çok iyi olan 22 mm çaplı sürtünme kaynağı yapılmış HSS- C 45 çelik çifti için çentik darbe ve yorulma dayanımı testleri yardımıyla parametre optimizasyonu yapmışlardır. Deney çalışmaları sonucunda yüzey pürüzlülüğün hassasiyetinin artırılmasıyla yorulma mukavemetinin arttığı ve sürtünme kaynaklı numunelerin bir matkap olarak kullanıldığında yeterli dayanıma sahip oldukları görülmüştür.

M. Yılmaz (1993), 13 mm çaplı S-6-5-2 ve C 45 çelik çifti kullanılarak yapılan yakma alın ve sürtünme kaynaklı birleştirmelerde kaynak kalitesi kıyaslaması yapılmıştır. Sürtünme kaynaklı birleştirmeler sabit dönme hızı altında ($n= 1400 \text{ dev/dak.}$) $t=5-6-8 \text{ sn}$, $P_1=45-50-55 \text{ MPa}$, $P_2= 90-100-120 \text{ MPa}$ değişken parametreleri kullanılarak kaynak sonrası 650°C ' de 4 saat süre ile tavlama yapılmıştır. Deney çalışmaları sonucunda artan sürtünme süresi, kaynak bölgesinde daha yüksek bir sertlik değeri verdiği, yığma basınçlarındaki değişim ise maksimum sertliği pek etkilemediği görülmüştür. Birleştirme yöntemleri arasında yapılan kaynak kalitesi kıyaslamasında, sürtünme kaynaklı birleştirmeleri daha iyi sonuçlar verdiği tespit edilmiştir.

Osmanbölük ve arkadaşları (1999), çapları 20 mm Al ve 18 mm Cu olan malzeme çifti kullanarak yapmış oldukları sürtünme kaynaklı numunelere çekme testi uygulayarak

ve birleşme bölgesinde mikroyapı incelemesi yaparak kaynak kalitesini belirlemeye çalışmışlardır. Deney çalışmaları sonucunda, birleşme bölgesinde meydana gelen yüksek sıcaklık ve deformasyon sonucu oluşan intermetalik fazlar sertlik değerini artırdığı görülmüştür. Yığma basıncının bu fazlar alüminyum tarafına itmesi sonucu yapılan çekme deneylerinde kopmanın alüminyum tarafında olduğu görülmüştür.

Yılbaş ve arkadaşları (1994), çelik- alüminyum ve alüminyum- bakır malzeme çiftleri kullanarak yapmış oldukları sürtünme kaynaklı birleştirmelere yorulma, çekme ve çentik darbe deneyleri uygulayarak üç temel parametrenin (dönme hızı, sürtünme basıncı ve sürtünme süresi) kaynak kalitesi üzerine etkisi araştırılmışlardır. Deneysel çalışmalar sonucunda, çelik-alüminyum kaynaklı birleştirmelerde yüksek dönme hızı ve sürtünme basıncın bir sonucu olarak meydana gelen aşırı deformasyon ile birlikte birleşme bölgesinin alüminyum tarafında ince bir intermetalik tabakanın oluştuğu görülmüştür. Ancak, yüksek dönme hızı ve sürtünme basıncı, temas yüzeyi üzerindeki alüminyum oksit filminin kırılmasını sağlayarak ara yüzeyde yeterli deformasyonu sağladığı görülmüştür. Alüminyum - bakır çifti kaynaklı numunelere uygulanan kırılma testi sonucunda kırılma yüzeyinde gri bir alüminyum tabakasının varlığından bahsedilmiştir.

G.J. Bendzsak, T.H. North ve Z. Li (1996) sürtünme kaynaklı birleştirmelerde birleşme bölgesinde meydana gelen plastik deformasyonun akışını, Non - Newtonian akış denklemi kullanarak sayısal modellemesini yapmışlardır.

N. Özdemir(2002), , tane küçültülmüş ötektoid üstü çeliğin sürtünme kaynağı ile birleştirilebilirliği ve AISI 4340/AISI 304L sürtünme kaynağı ile birleştirilebilirliği üzerine yapmış olduğu çalışmada, kaynak parametrelerinden devir sayısı, sürtünme basıncı ve sürtünme süresinin bağlantı kalitesi üzerine önemli bir etkiye sahip olduğunu belirtmiştir.

M. Şahin görüldüğü gibi, sürtünme kaynağı üzerine yapılan araştırmalar son derece geniş bir alana yayılmaktadır. Bu çalışmalarda, kaynak bölgesinin sıcaklığı ve ısı dağılımı en çok ilgi çeken konuların başında gelmektedir.

G.Wichelhaus (1974) yaptığı çalışmada kaynak bölgesindeki sıcaklığı tespit etmek için pirometre ile sıcaklık ölçme, termoelement ile sıcaklık ölçme ve ölçülen termo gerilmelerden hareketle hesaplama yöntemleri kullanmış ve en iyi yöntemin termoelement ile ölçüm olduğuna karar vermiştir.

D. Schober, M. Trepe ve H. Granuer (1986) ayrı ayrı yaptıkları çalışmalarda sürtünme kaynaklı birleştirmelerde kaynak kalitesini artırmak için proses kontrolü üzerinde durmuşlar ve konu ile ilgili akış diyagramları vermişlerdir.

M.V. Bolshkov ve arkadaşları (1972) vakum ortamında yapmış oldukları sürtünme kaynaklı birleştirmelerde mekanik özelliklerde olumlu gelişmeler sağlandığı tespitinde bulunmuşlardır

Itoh vd. östenitik paslanmaz çelik ve C-Mn-Si alaşımlı çeliklerin kaynaklı bağlantılarında, yorulma çatlağı başlangıcının, yorulma ömrüne etkisini ve kaynaklı kaynaklı numunelerde, yorulma çatlaklarının ilerlemesine neden olan kalıntı gerilmelerin etkisini araştırmıştır. Deneyleri, gerilme oranının $R > 0$ olduğu, sabit ve değişken gerilme genliklerinde tamamlamıştır. Kaynaklı parçalarda yorulma çatlaklarının büyümesinin, kalıntı gerilmelerin etkisine bağlı olduğunu tespit etmiştir. Ayrıca çatlak büyüme miktarını tahmin etmek için esas metalden alınan verileri kullanmanın da mümkün olduğunu belirtmiştir. Yorulma ömür tahminlerini lineer elastik yorulma bağlantılarını kullanarak yapmış, yorulma çatlak ilerlemelerini ve kırılma yüzeylerini taramalı elektron mikroskobu ve optik mikroskop kullanarak incelemiştir.

Yan ve arkadaşları, sürtünme kaynağı ile birleştirilmiş AISI 1045 çeliğin sabit ve değişken genlikli yükleme altında yorulma testlerini yapmış ve test sonuçlarını istatistik analiz yöntemleri ile değerlendirerek yorulma katsayısı ile eşik değerlerini elde etmişlerdir. Sabit dağılımlı yükleme altındaki yorulma testinin istatistiksel ve deneysel analizleri küçük boyutlardaki çentikli sürtünme kaynaklı 1045 çeliğinin yorulma ömrü basınç dağılım fonksiyonundan yorulma direnci katsayısı çıkartılarak istatistiksel analizlerle kontrol etmişler, istatistiksel analizle birlikte bir tip blok yükleme programı kullanarak test sonuçlarını tekrar değerlendirmişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre metallerdeki çentik elementi ile süreksiz sertleştirme karakteristiğinin, değişken yükleme altındaki çentikli sürtünme kaynaklı bağlantıların yorulma ömrünün olasılık dağılımının tahmininde de kullanılabileceğini belirtmişlerdir.

Hong ve arkadaşları, 304L paslanmaz çeliklere düşük çevrimli yorulma testleri uygulayarak, delta-ferritin yorulma çatlağı başlangıcı ve ilerleme mekanizmaları üzerine olan etkilerini deneysel olarak araştırmışlardır. Yorulma çatlaklarının, yükleme ve delta-ferrit liflerinin doğrultusuna bağlı olarak başladığını belirlemişlerdir. Delta-ferrit liflerinin yükleme doğrultusuna paralel olduğu durumlarda, yorulma çatlaklarının ince bantların kaymasından dolayı başladığını ve ilerlediğini gözlemlemişlerdir. Ferrit liflerinin yükleme doğrultusuna dik olduğu durumlarda ise, çatlak oluşumlarının tane içerisinde başladığını ve çatlakların tane sınırlarında hızlandıklarını tespit etmişlerdir. Sonuç olarak, yüklemenin

delta-ferrit liflerine paralel olduğu durumlarda, yorulma dayanımının daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

Satyanarayana vd. ostenitik-ferritik paslanmaz çelik çiftini sürtünme kaynağı yöntemi ile birleştirmiş ve kaynak parametrelerinin mikroyapı, mekanik özellikler ve kırılma davranışı üzerindeki etkilerini incelemiştir. En uygun kaynak parametrelerini belirleyerek, sağlıklı kaynakların ancak belirli kaynak parametrelerinin kombinasyonları ile elde edilebileceğini belirtmiştir.

Lee ve arkadaşları, sürtünme kaynak yöntemi ile birleştirilen STR35 ve STR3 malzeme çiftinde, oluşturulan yapay hataların (çentiklerin) kaynak arayüzü ve ısıdan etkilenen bölgelerde çentik konumuna göre yorulma dayanımı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Ara yüzeylere 0,5 mm ve 1 mm olmak üzere iki farklı mesafede dairesel çentikler açmışlar. Çentik mesafesinin yorulma ömrü üzerinde farklı etkilerinin olduğunu belirlenmiştir. Kaynak ara yüzeyine yakın bölgelerde ana malzemeden daha yüksek, kaynak ara yüzeyine uzak bölgelerde ise ana malzemeden daha düşük yorulma ömürleri tespit etmişlerdir. Bununla birlikte mikrosertlik değerlerinin kaynak arayüzeyinde arttığını bildirmişlerdir.

N. Özdemir, AISI 304L östenitik paslanmaz çelik ile AISI 4340 çelik çiftini sürtünme kaynağı yöntemi ile birleştirmiştir. Çalışmada, devir sayısının kaynaklı bağlantının kalitesine olan etkisini araştırmıştır. Mikroyapı ve mikrosertlik ölçümleri yapmış ve sonuç olarak devir sayısının sürtünme kaynağı ile birleştirilen çelik çiftinin çekme dayanımı üzerinde etkili olduğunu belirlenmiştir.

N. Özdemir ve Orhan, termomekanik işlemlerle tane boyutu küçültülmüş ötektoid üstü, ultra yüksek karbonlu çeliklerin sürtünme kaynağı ile birleştirilmesini inceleyerek kaynak parametrelerinin (devir sayısı, sürtünme basıncı, sürtünme süresi, yığma basıncı ve yığma süresi) mikroyapı ve mekanik özellikler üzerine olan etkilerini araştırmışlardır. Kaynak sonrası elde edilen mikro yapı, mikro sertlik analizi ve mekanik testler sonucunda, kaynak işlemi boyunca oluşan mikroyapı dikkate alınarak değerlendirildiğinde; her bir kaynak parametresinin kaynaklı bağlantının kalitesini bir miktar etkilediğini ancak mekanik ve metalurjik özelliklere en önemli etkinin devir sayısı, sürtünme basıncı ve sürtünme süresinin kombinasyonu ile elde edildiğini bildirmişlerdir.

Chai, DPÇ için çok yüksek döngülü yorulma testleri uygulamış ve çok kademeli S-N eğrilerini elde etmiştir. Yüzeydeki yorulma çatlağı başlangıcının yüzey altına geçiş mekanizmalarını araştırmıştır. Yüzeydeki yorulma çatlaklarının başlangıcını; kayma

bantlarının ekstrüzyonu ve intrüzyonu nedeniyle, ferrit fazında başladığını bildirmiştir. Yüzey altı yorulma çatlağı başlangıcında; lokalize yorulma hasarlarına ve şekil değiştirme lokalizasyonuna yol açan, gerilme arttırıcı özellikteki inklüzyonların yüzey altındaki varlığı nedeniyle yine ferrit fazında başladığını belirtmiştir. Optik mikroskoptaki kararmış bölgelerde (ODA) ostenitik ve ferritik fazlar arasında bir mikro çatlak uyumsuzluğu olduğunu bildirmiştir.

Şahin, sürtünme kaynak yöntemi ile birleştirilen ostenitik paslanmaz çeliklerin (AISI 304) kaynak dayanımlarını ve mikro yapısal özelliklerini deneysel olarak araştırmıştır. Çalışmada; sürtünme süresi ve sürtünme basıncının artması ile paslanmaz çeliklerin birleşme noktalarındaki gerilme dayanımlarının arttığı, belirli değerlerde maksimuma geldiği, ancak sürtünme süresi ve sürtünme basıncındaki artışın bağlantı mukavemetini düşürdüğü belirtilmiştir. Elde edilen bu maksimum gerilme dayanımı esas metalin gerilme dayanımının % 96 'sı kadardır.

N. Özdemir vd. sürtünme kaynağı ile birleştirilen AISI 304L ve AISI 4340 çeliklerde, devir sayısının, malzeme ara yüzey özelliklerine etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Mikroyapı ve mekanik test sonuçlarından, dönme hızının aşırı deformasyona uğramış bölgenin genişliği üzerinde önemli etkiye sahip olduğunu ve artan devir sayısına bağlı olarak kaynaklı bağlantıların çekme dayanımlarının arttığını bildirmişler.

Şahin, sürtünme kaynağı ile birleştirilmiş AISI 304 östenitik paslanmaz çelik kaynaklı bağlantıların ara yüzey mikro yapı özelliklerinin belirlenmesi üzerine yapmış olduğu çalışmada; plastik deformasyonun kaynak bölgesindeki etkilerini analiz etmiş ve sonuçta AISI 304 östenitik paslanmaz çeliklerde plastik deformasyonun hem işlem parametrelerine hem de kaynaklı bağlantıların dayanımı üzerine etkisinin olmadığını bildirmiştir.

Sathiya ve arkadaşları, geleneksel teknikler ve yapay sinir ağlarını kullanarak, paslanmaz çeliğin sürtünme kaynağındaki kaynak işlem parametrelerini, yaklaşık optimal ayarlarına karar veren bir metod ileri sürmüşlerdir. Bu amaçla sürtünme kaynağında istenilen çekme dayanımının ve minimum metal kaybının elde edildiği verileri kaynak proses parametrelerine karar vermede kullanmışlar. Çalışmaları ile geniş bir alan için uygun kaynak parametrelerinin nasıl elde edileceğini göstermişler ve evrimsel hesaplama tekniklerinden elde ettikleri sonuçları deney sonuçları ile karşılaştırmışlardır.

Li ve arkadaşları, kaynak bağlantı kalitesini arttırmak ve elektrik tasarrufu sağlamak amacı ile geleneksel elektrik direnç kaynağındaki gibi elde edilen elektrik direnç ısını sürtünme kaynağı ile birleştirerek kullanmışlar. Bu amaçla 4 mm çapında 21-4N (östenitik paslanmaz) ve 4Cr9Si2 (martenzitik paslanmaz) çelik çiftini kullanmışlar ancak bu uygulamanın yalnızca ince çubuklar için geçerli olabileceğini bildirmişlerdir. Çalışmalarında kaynaklı bağlantının her iki tarafında termomekanik olarak değişime uğrayan bölge ile birlikte ısıdan etkilenen bölgelerin olduğunu tespit etmişlerdir.

Çelik ve arkadaşları, çalışmalarında, AISI 4140 (orta karbonlu düşük alaşımlı) çelik ile AISI 1050 (orta karbonlu) çelik çiftini sürtünme kaynağı ile birleştirmişler ve araştırmalar sonucunda optimum kaynak parametrelerini elde etmişlerdir. Kaynak bölgesindeki sıcaklık değişimini kaynak boyunca infrared sıcaklık ölçme aleti ile ölçerek, kaynak parametrelerinin etkisini araştırmışlardır. Deneyler sonucunda; aynı gruptaki metallerin çekme dayanımlarının birbirine çok yakın çıktığını ve ısı tesiri altındaki bölgede sertlik değişiminin kaynak parametrelerine göre çeşitlilik gösterdiğini bildirmişlerdir. Bununla birlikte sürtünme kaynaklı bağlantıların çekme dayanımlarının esas malzemesinin (AISI 1050) çekme dayanımlarının % 6 üzerinde olduğunu ve en düşük çekme dayanımının ise % 1,9 daha düşük olduğunu belirtmişlerdir.

Tavares vd. off shore petrol üretiminde kullanılan esnek borulardaki ana malzemelerden UNS S31803 ve UNS S32304 dubleks paslanmaz çelik çiftlerini GTAW yöntemi ile birleştirmişlerdir. Önce ince levhalar halinde birleştirilen malzeme çiftlerini daha sonra “S” şeklindeki levhalarla birleştirmişler. “S” şeklindeki kaynaklı bağlantıların kritik bölgelerinde çoklu aksiyal yüklemeler yapmışlardır. Daha sonra kaynak metalindeki çatlakları seçerek hasar analizini gerçekleştirmişlerdir. Sonuçta, kaynak metalinin sünek bir kırılma göstermediğini, Cr₂Ni parçacıklarının oluşması nedeniyle kaynak metalinin % 28,4’ ünü östenitin oluşturduğunu ve bu dengesiz yapının düşük süneklik ile düşük tokluğa neden olarak çatlaklar için belirleyici olduğunu bildirmişlerdir. Kaynak metali ve ısıdan etkilenen bölgelerin esas metale göre daha düşük korozyon direncine sahip olduğunu görmüşlerdir.

Mitala ve Craciunescu, sertlik dereceleri ve yapıları birbirinden farklı, karbürize edilmiş ve sertleştirilmiş çelik bağlantıları sürtünme kaynak yöntemi ile birleştirmişlerdir. Yığma basıncı, sürtünme basıncı, gibi sürtünme kaynağındaki ana parametrelerin ve kompozisyon üzerinde oluşan sıcaklığın etkilerine göre, nitel bir faktör olarak karbonca zenginleşmiş bir tabakanın, bağlantı ara yüzeyinden uzaklaşmasını incelemişlerdir. Düşük

sürtünme basıncı ve uzun sürtünme süresi tercih edildiğinde; bağlantı düzleminde bir sementasyon tabakasının oluştuğunu, yüksek sürtünme basıncı tercih edildiğinde ise karbonca zenginleşmiş tabakanın bağlantı ara yüzeyinden uzaklaşmadığını tespit etmişlerdir. Bununla birlikte yüksek yığma basıncının ara yüzeyden uzaklaşan malzeme miktarını arttırdığını bildirmişler.

3. SADE KARBONLU ÇELİKLER

Yapılarında önemsiz miktarda Mn, Si, P, O ve N gibi çelik üretim yöntemlerinden gelen elementler bulunduran demir karbon alaşımlarıdır.

Sade karbonlu çelikler ucuz ve kolay şekillendirilebilirler. Mekanik özellikleri yapılarında bulunan karbon oranı ve üretim sırasında gösterilen özene bağlı olarak değişir ve sınırlıdır. Bu gün için demir-çelik endüstrisinde üretilen çeliklerin onda dokuzuna yakını sade karbonlu çeliklerdir. Sertleşme yetenekleri azdır. Sertleştirme işlemlerinden sonra parçalarda çatlama, çarpılma ve iç gerilmelere rastlanır.

Kalın kesitli parçalar ise istenilen düzeyde sertleştirilemezler. Korozyonik ortamlara dayanıksızlardır. Alevle ve indüksiyonla yüzey sertleştirmeye yakındırlar.

Yapılarında ki karbon oranına göre; sade karbonlu çelikler, düşük karbonlu çelikler (% 0,05-0,3 C), orta karbonlu çelikler (% 0,3-0,8 C) ve yüksek karbonlu çelikler (% 0,8-1,7 C) olmak üzere 3 gruba ayrılmaktadırlar. Yine aynı çelikler, ötektoid altı çelikler (% 0,05-0,83 C) ve ötektoid üstü çelikler (% 0,83-1,7 C) olarak da gruplandırılmaktadırlar.

Az karbonlu çelikler sertleştirilemezler, bunların uygun yöntemlerle yüzeylerinin sertleştirilmesi elbette mümkündür. Orta karbonlu çelikler ısıtma işlemlere oldukça yatkındırlar. Dayanımları, az karbonlu çeliklere oranla daha iyidir. Sünekliği az karbonlu çeliklere yakın ve onlara oranla daha az olup, normal soğutmalarda yapıda oluşan perlit nedeni ile az karbonlu çeliklere göre sert ve mukavemetlidirler (Çalgülü, U.).

Yüksek karbonlu çeliklerin sünekliği çok azdır, kesilmeleri ve işlenmeleri güçtür. Talaş kaldırma işlemine, ancak yumuşatma tavı ile yatkınlık kazandırılabilirler (Yıldırım ve diğ., 2001).

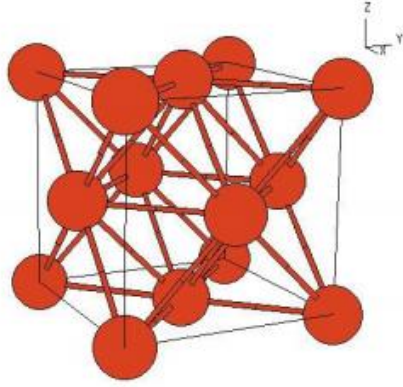
4. BAKIR

Bakır ve bakır esaslı alaşımlar insanoğlunun kullandığı yaklaşık 10.000 yıl öncesine ait bilinen en eski metaldir. Geçmişte Sümer, Mısır, Yunan, Roma ve Çin de dahil büyük medeniyetlerin hepsi bakır ve bakır alaşımlarını hem dekoratif hem de pratik uygulamalarda kullandı. Antik çağdan Orta çağ ve Rönesans boyunca askeri amaçlar, kilise çanları ve heykel tıraşlar gibi artistik uygulamalar için işlev gördü. Ancak bununla birlikte bakır ve bakır esaslı alaşımların üretim ve kullanımındaki asıl önemli değişim Endüstri Devrimi ile gerçekleşti. Modern endüstriyel anlamda elektrik mühendisliği Michael Faraday'ın 1831'de elektro manyetik indüksiyonu keşfini takiben gelişti. Werner von Siemens' in 1866'da elektrik jeneratörünü keşfinde ve Thomas Edison'un elektrik ışığı ampulünü keşfi ve onun elektrik enerjisi üretim tesisini inşa etmesinde bakır elementi çok büyük rol oynadı. 20. ve 21. yy'de ise bakırın endüstriyel önemi diğer elementlerle yaptığı karışımlardan dolayı artmaktadır. Kalay ve çinko başlıca alaşım elementleridir. Bununla birlikte bakır elementi alüminyum, nikel, krom, berilyum, kadmiyum ve mangan ile yaptığı alaşımlarla fiziksel ve mekaniksel özelliklerinde eşsiz bir kombinasyon, harika korozyon ve ayrıca aşınmaya karşı direnci ile mükemmel özellikler göstermektedir.



Şekil.4.1.Doğal bakır metali [49].

Bakır elementi yüzey merkezli kübik (YMK) örgüye sahip bir metaldir. Saf bakır rengi kırmızımsıdır (Şekil.4.1). Erime sıcaklığı 1083 °C ve yoğunluğu (8900 kg.m^3) ise alüminyumdan üç kat daha ağırdır. Bakırın ısı ve elektrik iletkenliği gümüşten daha düşük iken alüminyumdan 1.5 kat daha yüksektir.



Şekil.4.2.Bakır elementin kristal yapısı (YMK) [49].

Saf bakırın elektrik iletkenlik değeri diğer metallerin elektrik iletkenliklerinin karakterizasyonunda temel değer olarak alınmaktadır. Uluslararası tavlınmış bakır elementi standartlarına göre (IASC) bakır elementinin elektrik iletkenliği 58 Mss-1 (Mega Siemens) olarak tayin edilmiştir. Bakır oda sıcaklığında ve düşük sıcaklıklılarda mekaniksel olarak iyi şekil verilebilme özelliğine sahiptir ve ayrıca yüksek mukavemetlidir. Artan sıcaklıkla beraber sertliği düşmektedir. Yaklaşık 500°C’ de ise bakırın teknik plastik özelliği azalır. Soğuk şekillendirme ile sertlik özellikleri artmasına karşın esnekliği azalır. Döküm halinde bakırın sertliği 160 MPa olarak belirlenmiştir. Sıcak haddeleme bakırın sertliğini 220 MPa ‘a kadar çıkarır. Soğuk deformasyon ile bakırın sertlik düzeyi yumuşak çeliğin sertliğine yakın bir değere çıkarılabilir.

4.1. Bakır Alaşım Dökümlerinin Avantajları

Bakır alaşımları endüstride birçok yönü ile avantajlara sahiptir. Bu avantajları aşağıdaki gibi sıralayabiliriz.

- ✓ İyi dökülebilirlik
- ✓ Dahili korozyon koruması
- ✓ Düşük sürtünme özellikli ve aşınmaya karşı iyi dirençli
- ✓ Kıvılcım çıkarmaz özelliği
- ✓ Yüksek elektrik ve termal özellik
- ✓ Çevre ve yüksek sıcaklıklarda iyi mekaniksel özellik
- ✓ Geliştirilmiş düşük sıcaklık özellikleri
- ✓ İşlenebilirlik ve Geri dönüşümlü olması

Bunlara ek olarak dünyadaki petrol, doğal gaz ve kömür gibi enerji kaynaklarının giderek azalması nedeni ile alternatif bir enerji kaynağına ihtiyaç duyulmaktadır. Temiz ve yenilenebilir olduğundan hidrojen önemli bir enerji kaynağı olarak görülür. Bu yüzden hidrojenin depolanması da oldukça önem kazanmıştır. Mg-esaslı alaşımlar bu konuda iyi ve güvenli bir depo kaynağı olarak bilinir. Cu elementi ise hidrojenin depolanma kapasitesinin artışı veya azalışında alaşımdaki değişen oranları ile de önemli bir rol oynamaktadır.

4.2. Bakır ve Bakır Alaşımlarının Kaynağı

Bakır, ısıyı ve elektriği en iyi ileten metallere biridir, aynı zamanda kimyasal olarak oksijenle çabuk reaksiyona girer. En saf olarak üretilen ve satılan metaldir. Elektrolitik bakır % 99 saflıktadır ve % 0.05 bakır-oksit bakır içinde ötektik olarak dağılır. Kaynak yapılırken, aslında çok yumuşak olan malzeme, bakır-oksitlerin tane sınırlarına göçü nedeniyle sünekliğini kaybeder. 705°C' nin üstünde karbon monoksit ve hidrojen emilimi ve bakır-oksit ile reaksiyonu sonucunda karbondioksit ve su buharı oluşur. Bu iç çatlaklara ve kırılabilirliğe neden olarak kaynağı karmaşıktırır. Küçük miktarlarda silis, fosfor veya diğer oksit gidericilerin bakıra eklenmesiyle oksijeni giderilmiş (deokside) bakır elde edilir. Oksijeni giderilmiş bakırın kaynağında gazaltı, TIG veya karbon-ark yöntemiyle daha iyi sonuçlar elde edilebilir. Oksijen giderici elementler, oksijenin bakırla birleşerek tane sınırlarında bakır-oksit oluşumunu engeller. Oksijeni giderilmiş bakırın bir türü de “oksijensiz bakır”dır. Bu bakır, oksijenden arındırılmak için hidrojenli ortamda eritilerek dökülür. “Oksijensiz bakır”, oksijen giderici elementleri içermez. Bu elementlerin bulunmaması mekanik özelliklerini iyileştirirken yüksek sıcaklıklarda uzun sürede iç oksitlenmeye neden olur. Oksijensiz bakır, kaynak yapılırken oksijen almaya ve bakır-oksit oluşturmaya eğilimlidir. Sonuç olarak; oksijeni giderilmiş bakırlardaki kaynaklar kalite olarak ikinci sınıftır. Bu nedenle, oksijensiz bakırın kaynak kabiliyeti elektrolitik bakırlar ile birlikte sınıflandırılabilir. Yalnızca karbon-ark yöntemi kullanılırken, indirgeyici atmosferde “oksijensiz bakır”, kalite olarak elektrolitik bakıra göre bir iyileşme gösterir. Bakırın oksijene eğilimi kaynağı zorlaştıran birçok karakteristikten sadece biridir.

Bakır, çeliğe göre daha düşük sıcaklıklarda ergimesine rağmen, belli miktardaki bakırı elektrik arkı ile eritmek, aynı boyutta çeliği eritmekten daha zordur. Bu, bakırın

yüksek termik iletkenliğe sahip olmasının sonucudur (Bakırın termik iletkenliği çeliğin beş katıdır). Bakır kaynak yaparken, kaynak bölgesine yakın bölgeler ısıyı verildiği hızda çeker. Yakındaki metal, yeteri kadar ısınmadan kaynak bölgesi ergime noktasına ulaşmaz. Bakırın yüksek termik iletkenliği, kaynak yaparken ön ısıtmanın yapılmasını gerektirir. Bakır aynı zamanda çelikten daha yüksek termik genleşme katsayısına sahiptir. Bu, bakırın ısıtılırken çok genleşeceği ve soğurken de çok çekeceği anlamına gelir ki, bu, çelikleri kaynak yaparken, operatörlerin sürekli karşılaştıkları çekme ve kaynak çatlağı probleminin önemini gösterir. Bu problem bakırın 260°C' nin üzerinde çekme mukavemetinin çok hızlı düşmesi nedeni ile daha da ciddileşir.

4.2.1. Bakır Alaşımlarının Kaynak Kabiliyeti

Çeşitli mekanik, elektriksel ve mimari uygulamalar için tasarlanan birçok bakır alaşımı vardır. Değişen yüzde miktarlarında ilave edilen alaşım elementleri, çinko, kalay, nikel, alüminyum, demir, kurşun, mangan, gümüş, kadmiyum, silis, fosfor ve berilyumdur. Hepsi aynı kolaylıkta veya kalite yönünden aynı başarıda olmasa da tüm alaşımlar kaynak olabilir.

4.2.2. Bakır ve Bakır Alaşımlarının Örtülü Elektrot ile Kaynağı

Bakır ve alaşımlarının ark kaynağı dört yöntem ile sınırlıdır. Örtülü elektrot ark kaynağı yöntemi en basit olandır aynı zamanda TIG ve karbon-ark yöntemlerine göre avantajları vardır. Bazı alaşımlarda istendiği gibi, ısıtma periyodu göreceli olarak kısadır. 6.35 mm' nin üzerindeki alaşımlarda yeterli ergime sağlamak için ön ısıtma genellikle gereklidir. Örtülü elektrot yöntemi ile en iyi kaynaklar bakır-çinko, bakır-kalay ve bakır-nikel alaşımlarının kaynağında elde edilir.

Elektrolitik, oksijensiz veya oksijeni giderilmiş bakırlarda yüksek, mukavemetli birleştirmeler elde etmek mümkün değildir. Elektrot seçimi ana metalin kimyasal kompozisyonuna bağlıdır. Örtülü elektrod ark kaynağı Tablo.1' de gösterilmektedir.

Tablo 1. Örtülü elektrod ark kaynağı-DCEP [50].

Ortak Ad	Oksijensiz veya Elektrolitik Bakır	Oksijeni Giderilmiş Bakır	Kızıl Pirinç	Muntz Metali	Silis Bronzu	Fosfor Bronzu	Bakır-Nikel	Aluminyum Bronzu
ÖRTÜLÜ ELEKTROD ARK KAYNAĞI- DCEP								
Kaynak Kalitesi	Orta veya zayıf	Zayıf, Gazaltı veya TIG tercih	İyi	İyi	Zayıf, Gazaltı veya TIG tercih	İyi	İyi	Zayıf, Gazaltı veya TIG tercih
Elektrod	ECuSn-A ECuSn-C	ECuSn-A ECuSn-C	ECuSn-A ECuSn-C ECuAl-A2 /yüksek mukavemet için	ECuSn-A ECuSn-C ECuAl-A2 /yüksek mukavemet için	ECuSi ECuAl-A2	ECuSn-A ECuSn-C	ECuNi	ECuAl-A2 ECuAl-B /yüksek mukavemet için
Ön Isıtma °C	482'ye kadar	482'ye kadar	205-260	260-370	Gerek yok Pasolar arası 95	150-205	Gerek yok	205, yüksek Al için 620

Genelde bakır ve bakır alaşımı örtülü elektrotlar doğru akım pozitif kutupta çalışır (DCEP). Fiziksel özellikleri bakımından bakırın kaynak operasyonu çeliğe göre farklıdır. Kaynak yaparken, geniş kaynak ağzı hazırlanmalı, kaynak ağızlarına yüksek ön ısıtma ile pasolar arası sıcaklık uygulanmalı ve yüksek akım yoğunluklarına çıkılmalıdır. Silis bronz, fosfor bronz ve bakır- nikel alaşımları hariç diğer bakır alaşımı metallerde, ergimiş metalin daha iyi akması için 205°C veya daha yüksek ön ısıtma ve pasolar arası sıcaklık gereklidir. Karbon veya bakır altlıklar çoğu alaşımlar birleştirme bölgesinde kullanılabilmesine rağmen, genellikle ana metalle aynı olan malzemedan altlık konulur.

4.2.3. Bakır ve Bakır Alaşımlarının Gazaltı Kaynağı

Bakır ve bakır alaşımlarında ana metalin kompozisyonuna uygun teller ve helyum, argon veya karışımlarının gazlarının kullanılması ile yarı otomatik veya tam otomatik gazaltı kaynağı yapılabilir. Örtülü elektrot yöntemiyle oluşan kaynak metalinde yüksek mekanik mukavemet veren fosfor bronzları hariç diğer bronzlarda ve pirinçlerde gazaltı kaynağı ile kaliteli kaynak metalleri elde edilir. Gazaltı kaynağı ile oksijeni giderilmiş bakırın birleştirilmesinde de kaliteli kaynaklar elde edilebilir. Yarı otomatik veya tam otomatik yöntemlerin en belirgin avantajı, kaynak telinin ark bölgesine tamamen otomatik olarak iletilmesi ile metal yığılma hızının artırılabilmesidir.

Diğer avantajları, mükemmel kaynak görünüşü, iyi mekanik özellikler, iyi kaynak kalitesi, yığılan metalin yoğunluğunun iyi olması, düşük çarpılmaya sahip olması, düşük ön ısıtma ve pasolar arası sıcaklık ihtiyaçlarıdır. Gaz altı kaynağı, elektrolitik ve oksijensiz

bakırın kaynağında da kullanılabilir, burada kaynaklar zayıf kaliteden orta kaliteye yükseltilebilir. ERCu ve ERCuSi telleri iyi bir kaynak öncesi hazırlık yapıldığında farklı kalitelerdeki oksijeni giderilmiş bakırın kaynağında kaliteli kaynak dikişlerini temin ederler. 1.3 mm veya daha yüksek kalınlıklarda 90° lik açı kullanılmalıdır ve 6.35 mm' den daha kalın parçalarda 205 °C' lik ön ısıtma önerilir. Tavlama sonrasında çekileme, kaynak metali tane boyutunu inceltir. ERCuSn-C ve ERCuSi elektrotları, kızıl pirinçlerde yüksek kaliteli kaynaklar verir. ECuSn-C elektrotu ile yapılan kaynak dikişleri metal ile daha iyi renk uyumu içindedir. ERCuSi elektrotu ile yapılan kaynak dikişlerinin daha iyi çalışma karakteristikleri verir. Kaynak metallerinin özellikleri birbirine benzer.

Helyum, ERCuSn-C elektrotunda tercih edilen gazdır ve 4.8 mm veya daha kalın parçaları kaynatırken 205 °C ön ısıtma önerilir. ERCuSi elektrotu ile argon gazı kullanılabilir.

Kalın levhalarda 70°'lik kaynak ağzı hazırlandığında ERCuSn-C elektrotuyla, 60°'lik kaynak ağzı hazırlandığında da ErCuSi teli ile kaynak yapılmasına göre spesifikasyonlar verilmiştir. Muntz metali türünde yüksek çinko' lu alaşımlar, koruyucu gaz olarak helyum ile ERCuAl-A2 veya ERCuSi telleri ile kaynak yapılabilir. Ön ısıtma gerekmez ama pratik olarak düşük kaynak akımları ile çalışmak çinko buharlaşmasını azaltmak için yararlıdır. ERCuAl-A2 teli ile elde edilen kaynaklar daha yüksek mukavemete sahiptir; ERCuSi teli de daha iyi kaynak karakteristiği verir. Gaz altı yöntemi, silis bronzlarının kaynağında tercih edilir. ERCuSi teli argon veya argon helyum karışımı ile kullanıldığında gazaltı yöntemi daha iyi sonuç verir. Ön ısıtma gerekmez ve hızlı kaynak yaparken parçanın fazla ısınmasından kaçınılmalıdır. Dakikada 20 cm' lik hızla kaynak yapılırken küçük bir kaynak banyosu korunmalıdır. Çok pasolu kaynaklarda kaynak dikişinde oluşturulan oksit filmi tel fırça ile temizlenmelidir. Fosfor bronzları elektrot, ön ısıtma aralığı ve gaz seçimlerine göre kaynak edildiğinde, orta kalitede kaynaklar elde edilebilir. Bu bronzlar, sıcak kırılmandır ve silis bronzlarından daha yüksek termik iletkenliğe sahiptir. Kaynak yaparken ilerleme hızı yüksek ve kaynak banyosu küçük olmalıdır. Sonuç olarak, fosfor bronzlarının kaynağında geniş kaynak ağzı kullanılıyor ise yüksek akımlara ihtiyaç vardır. Gazaltı kaynağı, bakır-nikel alaşımlarının kaynağında uygulanabilen tüm yöntemlere göre daha iyi bir sonuç verir. ERCuSi teli ile hem argon hem de argon-helyum karışım gazı kullanılabilir. Önce malzemeler için kaynak ağzı açmadan alın altına ve kalın levhalarda da 60°' lik tek veya çift V kaynak ağzı açarak kaynak yapılabilir. Yatay pozisyon tercih edilse farklı pozisyonlarda da kaynak yapılabilir.

Gaz altı kaynağı ile alüminyum-bronzunda yüksek kaliteli birleştirmeler elde edilir. Yatay pozisyonda, en yüksekte kalite kaynak dikişi temin edilir fakat diğer pozisyonlarda da kaynak yapmak olasıdır. Büyük parçalar hariç ön ısıtma gerekmez. Yatay kaynak dikişleri ve küçük orta zigzaglı dikişler tercih edilir. Tablo 2’ de Gazaltı kaynağı-DCEP verilmiştir.

Tablo 2. Gazaltı kaynağı-DCEP [50].

GAZALTI KAYNAĞI (DCEP)								
Kaynak Kalitesi	Orta veya zayıf	İyi	İyi	İyi	İyi	Orta	İyi	İyi
Elektrod	ERCu /en iyi iletkenlik ERCuSi /en iyi mukavemet	ERCu veya ERCuSi	ERCuSn-C/ renk uyumu için ERCuSi-en iyi çalışma	ERCuAl-A2 /mukavemetli ERCuSi/en iyi çalışma	ERCuSi	ERCuSn-A ERCuSn-C /yüksek mukavemet	ERCuNi	ERCuAl-A1 ERCuAl-A2 ERCuAl-B
Ön Isıtma °C	Kalınlığa bağlı olarak 538'e kadar	6,35 mm. ve kalınlar için 205'e kadar	Kalın parçalarda 205'e kadar	Gerekmez, Çinko buharlaşmasını azaltmak için kullanılabilir	Gerekmez. Pasolar arası 93'ü geçmemeli	93 -205	Genellikle gerekmez	Yalnızca büyük parçalarda 260'ı geçmez
Gaz	Argon veya %65 Ar+ %35He	Argon veya Karışım	Helyum	Helyum	Argon veya karışım	Helyum	Argon	Argon veya Helyum veya Karışım

4.2.4 Bakır ve Bakır Alaşımlarının TIG Kaynağı

Bakır ve bakır alaşımları, arkın tükenmeyen tungsten elektrotu ile iş parçası arasında oluştuğu ve ilave metalin tükenen bir telden ark bölgesine verildiği tungsten asal gaz yöntemi ile kaynak yapılabilir. Alternatif akımın tercih edildiği alüminyum bronzunun dışında bakır ve tüm bakır alaşımlarında da doğru akımda, elektrot-negatif kutupta kullanılır (DCEN). AWS sınıflandırmasında, kaynak telleri “E” ile başlayan elektrotlardan ayırmak için “ER” harfleriyle başlar. TIG kaynak yöntemi, oksijeni giderilmiş bakırda, silis bronzunda, bakır-nikel alaşımlarında, alüminyum bronzunda, yüksek kaliteli ve yoğun kaynak dikişleri ile elektrolitik bakır ve oksijeni giderilmiş bakırın, kızıl pirinç ve Muntz metali ve fosfor bronzunun kaynağında da orta kaliteli kaynak dikişleri verir. Kaynağı yapılacak malzemeye göre koruyucu gaz olarak argon, helyum veya asal gazların karışımı kullanılır. Kalın parçalarda iyi performans elde edebilmek ve kök açıklığına tam nüfuziyet sağlamak için 60°’den 90°’ye kadar genişliği olan kaynak ağzına ihtiyaç vardır. Bakırı kaynak yaparken kaynağın performans ihtiyacı, seçilecek kaynak telinin özelliklerini belirler.

Eğer, oksijensiz veya elektrolitik bakırı kaynak yaparken kaynak dikişinin termik ve elektriksel iletkenliği korunmak isteniyorsa, ERCu kaynak çubuğu seçilir. Eğer kaynak

dikişinin mukavemeti daha önemli ise ERCuSi-A veya ERCuSn-A kaynak teli kullanılmalıdır. ERCuSi-A ve ERCuSn-A kaynak çubukları özellikle oksijeni giderilmiş bakırın kaynağı için tavsiye edilir. En uygun birleşmenin sağlanabilmesi için 540°C' ye kadar ön ısıtma gerekebilir. İyi kaynak performansını sağlamak üzere parça kalınlığı arttıkça, yüksek ön ısıtma ve 90°'lik kaynak ağzına ihtiyaç duyulması nedeniyle TIG kaynak yöntemi tercih edilen yöntem olmaktan çıkar. TIG yöntemiyle yapılan kaynakların kalitesi “orta” olmasına rağmen, bu yöntem en çok pirinç üretiminde ve tamirinde kullanılır. Pirinç saçlar, ön ısıtma yapmadan kaynak yapılabilir.

Silis bronzları, TIG yöntemiyle kaynak yapılabilir. ERCuSi-A kaynak teli ile iyi kalitede kaynaklar elde edilir. Alternatif akım kullanılabilse de doğru akımda elektrotun negatif kutupta olması (DCEN) tercih edilir. Ön ısıtma gerekmez ve pasolar arası sıcaklıklar 93°C'yi geçmemelidir. Önce malzemeler çoğunlukla kaynak ağzı hazırlamadan veya ilave metal kullanmadan kaynak yapılabilir. Kalın malzemelerde, uygun çaplı ilave metal kullanmak ve 60°'lik kaynak ağzı açmak gerekir. ERCuSn-A kaynak çubuğu, fosfor bronzlarının TIG kaynağında orta kalite kaynaklar verir. Pratikte, TIG yöntemi, bu tip malzemelerin yalnızca tamir işleriyle sınırlandırılmıştır. Kaynak, 205°C' ye kadar ön ısıtma ile mümkün olabildiğince hızlı yapılmalıdır. Yavaş soğuma istenir ve sıcak iken tane yapısını inceltmek ve gerilim ve çarpılmaları azaltmak için kaynak dikişi çekiçlenir. TIG kaynağı- DCEN Tablo 3' de verilmiştir.

Tablo 3. TIG kaynağı- DCEN [50].

TIG KAYNAĞI- DCEN (ALUMİNYUM BRONZLARINDA AC TERCİH EDİLİR)								
Kaynak Kalitesi	Orta	İyi	Orta	Orta	İyi	Orta	İyi	İyi
Tel	ERCuSi-A ERCuSn-A/ mukavemet ERCu /iyi iletkenlik	ERCuSi-A veya ERCuSn-A	ERCuSn-A ERCuSn-C ERCuSi-A	ERCuSi-A ERCuAl-A2	ERCuSi-A	ERCuSn-A	ERCuNi	ERCuAl-A2 ERCuAl-B
Ön Isıtma °C	Kalınlığa bağlı olarak 538'e kadar	Kalınlığa bağlı olarak 538'e kadar	Kalınlığa bağlı olarak 205'e kadar	205'e kadar	Gerekmez. Pasolar arası 93'ü geçmemeli	205'e kadar ve yavaş soğutulmalı	Genellikle gerekmez	Kalın parçalarda 260'ı kadar
Gaz	Helyum veya %75He+ %25Ar karışımı	3.2 mm ve incelerde argon, 3.2 mm'den kalınlarda helyum	Argon	Argon	Argon veya Ar-He karışımı	Helyum. İnce parçalarda argon.	Argon	Argon

5. KATI HAL KAYNAK YÖNTEMLERİ

Günümüze kadar farklı birçok kaynak metodu geliştirilmiştir. Bunlar:

1. Ergitme Kaynağı,
2. Lehimleme,
3. Katı Hal Kaynağı olmak üzere üç ana grupta toplanabilir (Meahara, 1986).

Katı Hal Kaynağı, aynı ya da farklı iki malzemenin, malzemeler ergitilmeksizin; eğer ergime olmuş ise, ergimiş metalin ekstrude edildiği ve nihai birleştirmenin iki katı yüzey arasında meydana geldiği bir kaynak usulüdür.

Katı hal kaynağını yapmak için iki malzemenin temiz yüzeylerini, aralarında bir bağ oluşacak kadar birbirlerine yaklaştırmak gerekir. Bunu sağlamak üzere birçok teknik uygulanmakta ise de, bütün işlemlerde esas olan, üzerinde bir tabaka bırakmayacak şekilde iki yüzeyi deforme edecek bir basınç uygulamaktır (Lancaster, 1987).

Başlıca katı hal kaynak işlemleri şu şekilde gruplandırılabilir

1. Yüksek sıcaklıkta basınç kaynağı,
2. Soğuk basınç kaynağı,
3. Sürtünme kaynağı,
4. Patlama kaynağı,
5. Ultrasonik kaynak,
6. Difüzyon kaynağı,
7. Sürtünme karıştırma kaynağı.

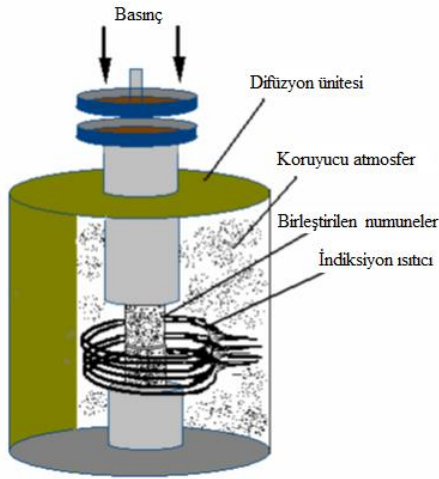
Bu kaynak türlerinden ilk dördü plastik deformasyon kaynağı adı altında da gruplandırılmaktadır (Meahara, 1989).

5.1. Difüzyon Kaynağı

Difüzyon kaynağı, birleştirmek üzere eslenmiş iki yüzeyin, malzemelerin ergime sıcaklıkları altındaki bir sıcaklıkta, malzemelerde tespit edilebilir plastik akmaya sebep olmayan bir basınç altında, katı hal difüzyonu yoluyla malzemeler arasında metalürjik bir bağ oluncaya kadar, malzemelerin özelliklerini önemli ölçüde etkilemeyecek bir süre tutulmasıyla uygulanan kaynak yöntemi olarak tarif edilir. Difüzyon kaynağı, demir ve demir dışı metaller ile EC, 2EC, 1100, 1170, 6063, 6061, 2219, alaşımları da dahil birçok alaşıma rahatlıkla uygulanabilir. En yüksek kaynak mukavemeti ve bağlantı kolaylığı Ag,

Cu, Ag-28 Cu ve Al folyo gibi ara tabaka veya difüzyon yardımcısının kaynak birleştirmesinde kullanılmasıyla gerçekleştirilir. Difüzyon kaynağında ara tabaka kullanılmayan difüzyon kaynaklarının çoğu 450-500 °C arasında ve 4 saate kadar çıkan sürelerde yapılır. İlave metalle, süre-sıcaklık gereksinimleri ciddi ölçüde azalır (Oğuz, 1990).

Kristal yapıya sahip katı bir malzemenin atomları arasındaki çekim, kohezyon kuvvetlerini doğurur. Normal olarak her bir atom, üzerine tesir eden kuvvetin sıfır olduğu bir pozisyonu işgal eder. Ne var ki, katı malzeme, harici kuvvetlerin etkisiyle gerildiği zaman; atomlar denge pozisyonlarını terk ederler ve kristalin içinde, dış kuvvet tarafından dengelenen bir gerilme meydana gelir. Atomlar arasındaki çekim kuvveti, birbirlerinden uzaklaşma dereceleri ile orantılı olarak artar, bir maksimumdan geçer ve sonra azalır. Farklı iki katının yüzeyleri arasındaki çekim ise, adhezyon olarak adlandırılır. Aynı ya da farklı iki katının bir araya getirilmesi, yüzeyleri arasında bağ oluştururken; aynı cins katı yüzeyleri arasında kohezyon kuvvetlerinden dolayı kohezyon farklı cins yüzeyler arasında da adhezyon kuvvetlerinden dolayı adhezyon işi yapılmış olur. Kohezyon ve adhezyon işi, yüzeyin serbest enerjisinin fonksiyonudur. Ayrıca, iki gevrek malzeme, ya da bir gevrek, bir sünek malzemeden oluşan bir bağlantı için (mesela metal-seramik) adhezyon işi, bağlantı mukavemetinin bir ölçüsüdür (Lancaster, 1987). Artan sıcaklık, basınç ve başlangıçtaki soğuk şekillendirme bu enerji engelini aşmaya yardım etmektedir. Daha sonraki safhalarda difüzyon işlemleri, yani sürünme ve boşlukların doldurulması, hâkim faktörler olmaktadır(Orhan, 1996).



Şekil 5.1. Difüzyon Kaynak Seti [82].

Mckeag, saf titanyum ve bakır üzerinde tabii difüzyon kaynağını incelemiş ve 6 safhalı bir mekanizma sunmuştur. Bu mekanizmaya göre 1. safhada, sıcaklık altında ve yüzey pürüzlerinin teması esnasında metal oksitleri çözünmekte ve arakesitin her iki tarafında yeniden kristalleşmiş ince bir tabaka meydana gelmektedir. Enerji engelini kıran bu tabakadır. 2. safhada daha kalın bir tabaka, yeniden kristalleşmektedir. 3. safhada, ana metal yeniden kristalleşirken, daha alt tabaka kristalleri yok edilir. 4. safhada, arakesitteki daha önceki kristalleşen taneler yok olurken, küçük fakat görülebilen boşluklar oluşur 5. safhada arakesitteki boşlukların sayıları azalırken, boyutları büyür 6. safhada orijinal arakesit düzlemine tane sınırı göçü ve tane büyümesi başlar (Egan, 1980).

5.2. Direnç Kaynağı

Direnç kaynak yöntemleri (nokta, dikiş ve flaş-alın yakma kaynağı) özellikle yüksek mukavemetli, ısıl işleme tabi tutulabilen alaşımların birleştirilmesinde önerilir. Bunları ergitme kaynak yöntemleriyle birleştirilmesi güç olup, direnç kaynağıyla birleştirilmeleri pratik olarak yapılabılır, kaynak işleminden kaynaklanan mukavemet kaybı ortadan kalkar. Alüminyum, sıvıdan katı hale geçişte önemli ölçüde çeker (yaklaşık % 6-% 7). Bu özellik, 2024 ve 7075 gibi yüksek mukavemetli ısıl işlem kabul eden alaşımlarda çok belirgindir ve çatlamaya götürebilir. Isıl işlem kabul etmeyen alaşımlarla 6xxx serisi alaşımları bu çekmeden ötürü çatlamaya daha az meyillidir. Her ne kadar bütün Al alaşımlarına nokta ve dikiş kaynağı yapılabilse de, bazı alaşım ya da alaşım kombinasyonları diğerlerine nazaran kaynağa daha fazla yatkındır. Genellikle yüksek mukavemetli 2024 ve 7075 alaşımları kolaylıkla kaynak edilebilirlerse de daha mukavemetli alaşımlara nazaran çatlak ve gözenekliliğe daha fazla meyillidirler. Kaynak metalinde çekme çatlakları az çok tamamen bakır ve çinko içeren alaşımlara (2024 ve 7075 gibi) özgüdür (Oğuz, 1990).

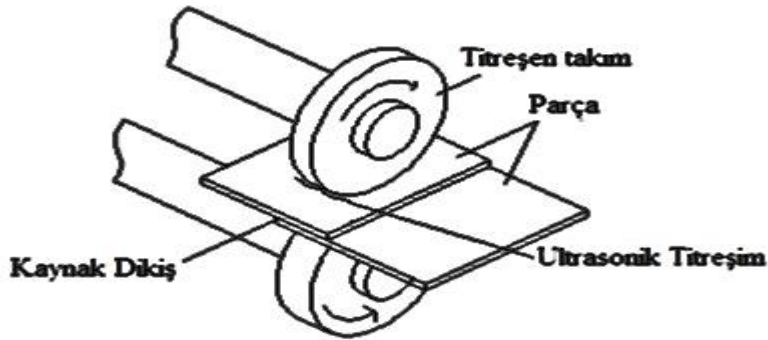
5.3. Ultrason Kaynağı

Ultrason kaynağı, bir yarı-katı hal kaynak tekniğidir. Parçalar oldukça yüksek tutma kuvvetleri ile tutulurken, parçaya yüksek frekanslı ses dalgaları gönderilerek yapılır. Bu yöntemde malzemelerde önemli bir erime olmaz. Ultrasonik kaynak yönteminde parçalar, ultrason altındaki mekanik titreşimler ve hafif bir basınç yardımı ile birleştirilir. Bu amaçla

bir elektro-akustik dönüştürücüden yararlanılır. Bu dönüştürücüde değişken bir elektrik akımı, bir nikel alaşımının manyetostrüktif etkisi yardımı ile aynı frekanstaki, boylamasına mekanik titreşimlere çevirir.

Birleştirilecek parçalar sabit bir örs üzerindedir. Sonodron yardımı ile teğetsel titreşimler parçaya katılır. Sıkıştırma kuvveti ve kaynak yüzeyleri arasındaki bağıl hareketlerin meydana getirmiş olduğu genliğin artmasına paralel olarak akma başlar. Bu yöntem, birbirine bastırılmış iki yüzeyin arakesitinde, salınım yapan kayma kuvvetleri yardımıyla kaynak yapar. Bu arada oluşan iç gerilmeler arakesitte elastoplastik bir deformasyona yol açar.

Ultrason kaynağında elastik histeriz, arakesit kayması ve plastik deformasyonun birlikte etkimesiyle kaynak bölgesinde bir sıcaklık artışı olur. Birleşmenin mukavemeti ana metalinkine yakındır. Bu yöntemin tek dezavantajı, ancak ince parçalara uygulanabilmesidir. Ultrason kaynağı geniş oranda, elektronik havacılık ve ölçü aletleri kontrol sanayilerinde kullanılır.



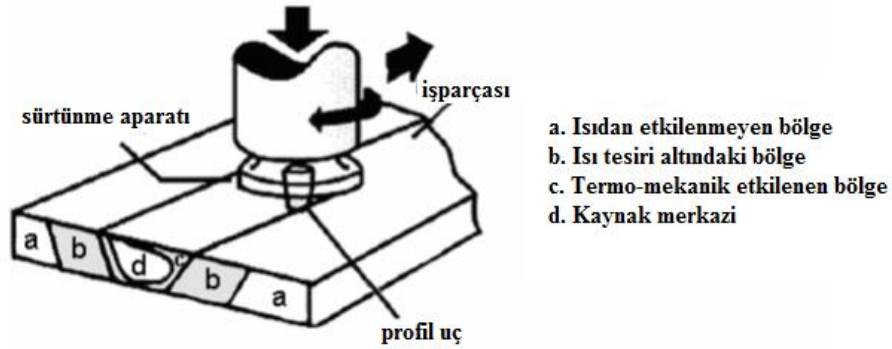
Şekil 5.2. Ultrasonik Kaynak (Anık ve Vural)

5.4. Sürtünme Karıştırma Kaynağı

Sürtünme karıştırma kaynak yöntemi, geniş uygulama alanına yayılmış ve farklı geometrilerde kaynak olanağı sağlayan, 1991 yılında İngiliz Kaynak Enstitüsü'nde (TWI), W. Thomas tarafından icat edilen ve geliştirilmeye devam edilen bir katı hal kaynak yöntemidir. Günümüze kadar İngiliz Kaynak Enstitüsü'nde alüminyum ve alüminyum alaşımları için bu kaynak yöntemi ile oluşturulacak birleştirmeler üzerinde birçok araştırma yapılmıştır. Bu çalışmaların sonuçları, bu yöntemin gerek yaslandırma sertleşmesi yapılmış

gerekse yaslandırma sertleşmesi yapılamayan (1xxx ve 5xxx serileri gibi) alüminyum ve alaşımlarında başarılı ve güvenli bağlantıların ortaya çıktığını göstermiştir. Ayrıca bakır-bakır alaşımları, kursun-kursun alaşımları, titanyum-titanyum alaşımları, magnezyum-magnezyum alaşımları, metal matrisle alüminyum kompozitlerde de bu yöntemin uygulanmasına başlanmıştır (Çam,2002).

Sürtünme karıştırma kaynağı, sürtünme kaynak yönteminin geliştirilmiş bir başka yöntemidir. Bilindiği gibi sürtünme kaynağı genellikle silindirik kesitli malzemelere uygulanan ergitmesiz kaynak yöntemidir (Özsoy, 2002). Özellikle kaynak yapılması zor olan alüminyum alaşımlarının birleştirilmesinde sürtünme karıştırma kaynağı performansı geliştirilerek araştırmalar sanayinin ilgisini alüminyum alaşımları üzerine yoğunlaştırmıştır. Bu kaynak yöntemi 1 mm'den az ve 35 mm'den kalın olan ve kaynaklanamaz olarak düşünülen alüminyum alaşımlarına uygulanmış ve çok iyi mekanik özellikler elde edildiği araştırmacılar tarafından bildirilmektedir (Özdemir, 2003).



Şekil 5.3. Sürtünme Karıştırma Kaynağının Prensibi (Şık, 2003)

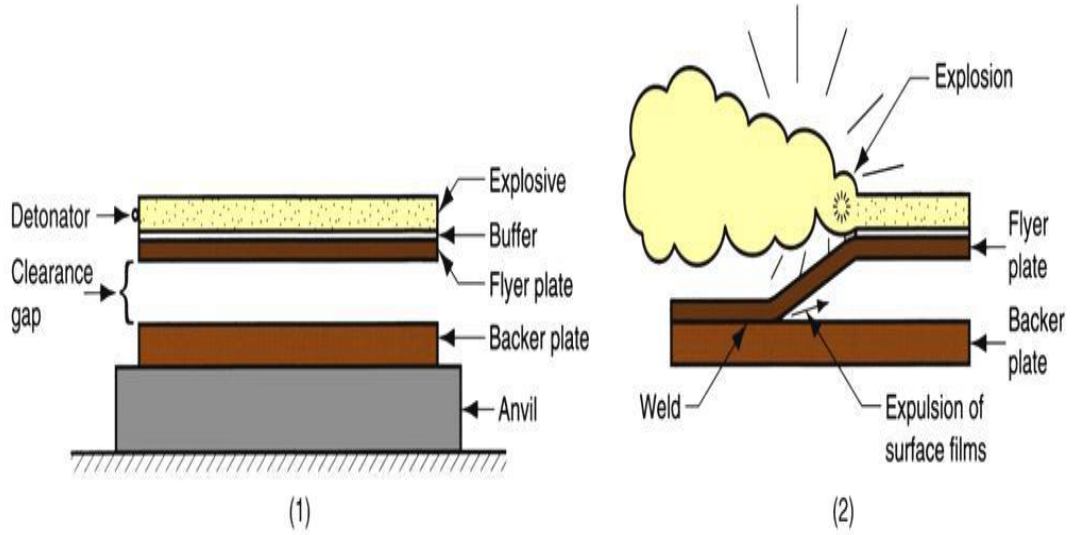
Bu metotla yapılan birleştirmelerde, mükemmel bir birleştirme mukavemeti elde etmek mümkün olduğu gibi, oldukça düşük bir malzeme çarpılması söz konusudur. Bu kaynak yöntemi alın altına sabitlenmiş iki levhaya yüksek devirde dönen kademeli bir karıştırıcı ucun daldırılarak kaynak yapılmak istenen uzunluk boyunca belirli bir hızda ilerletilmesinden ibarettir (Çam, 2002).

5.5. Patlamalı Kaynak

Yüksek hızlı patlamanın iki metal yüzeyi hızla birleştirilmesini sağladığı katı hal kaynak yöntemi

- İlave metal kullanılmaz; Dış ısı uygulanmaz; Difüzyon oluşmaz –zaman çok kısadır
- Metaller arasındaki bağ, dalgalı bir arayüzle sonuçlanan mekanik kilitlemeyle beraber metalurjiktir
- Çoğu kez iki farklı metalin birleştirilmesinde, özellikle de büyük yüzeyler halinde bir metalin diğerinin üzerine kaplanmasında kullanılır.

Paralel Konfigürasyon Halinde YerleştirmePatlayıcının Patlaması Sırasındaki Durum



Şekil 5.4. Patlamalı Kaynak [82].

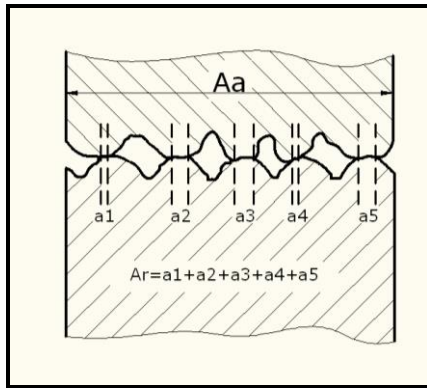
6. SÜRTÜNME KAYNAĞI

Sürtünme: cisimlerin veya maddelerin birinin diğerine bağlı olarak hareketinden doğan kinetik enerji kayıpları olarak tarif edilir. (ASM Handbook, 1992)

Sürtünmeye temas eden iki cismin ara yüzeylerinde gerçekleşen kuvvetler sebep olur. Bu kuvvetler yükün yanı sıra temas eden malzemenin özellikleri ve temas alanı olarak belirlenir. Gerçek temas alanı cismin görünen alanından çok küçüktür. Gerçek yüzey teması atomik mertebede düz değildir. İşlem görmüş bütün malzemeler farklı bir yüzey topografyasına sahiptirler. Bu farklılıklar; işleme aletinin geometrisi, çalışma parçasının mikro yapısı ve sistemdeki titreşimlerin sebep olduğu dalgalı sapmalardır.

Sürtünme kuvveti: bir katı ile temas eden cismin diğeri üzerinde kaymasını sağlamaya yarayan teğet halindeki yüzeysel kuvvettir. Sürtünme, yüzeylerin düzleminde gerçekleşir ve yüzeye dik olan kuvvetle orantılıdır.

$F = \mu \cdot N$ F = Sürtünme kuvveti μ = Sürtünme katsayısı N = Yüzeye dik olan kuvvet Şekil 6.'daki gibi başlangıçta yüzey pürüzleri noktasında temas düşünülerek zahiri temas alanı (A_a) ve gerçek temas alanı (A_r) belirlenir. Sürtünme etkileşim derecesi gerçek temas alanının büyüklüğü ile saptanır. Bundan dolayıdır ki, ilk önce gerçek temas alanının büyüklüğünün saptanması gerekir.



Şekil 6.1. Zahiri ve Gerçek Temas Alanını Gösteren Şematik Resim [82].

Kaynak; ısı ve basınç ya da her ikisi altında aynı ya da farklı türden iki malzemenin, ilave bir metal kullanarak ya da kullanmaksızın birleştirildiği bir üretim yöntemidir.

Kaynak ergitme kaynağı ve katı hal kaynağı yöntemleri olmak üzere ikiye ayrılır. Katı hal kaynağı malzemelerin ergime sıcaklığı altında yapılan bir birleştirme yöntemidir.

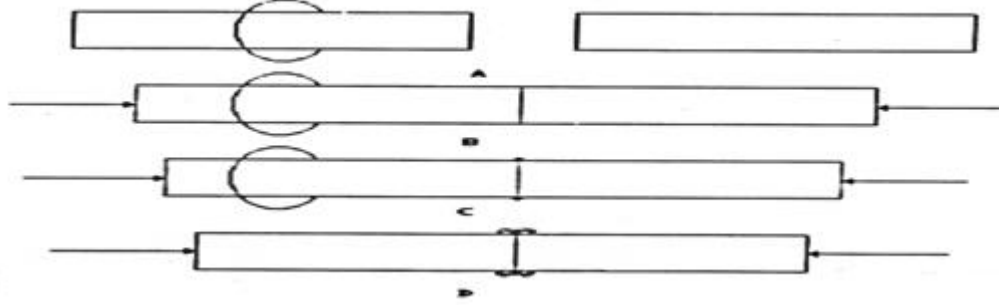
Sürtünme kaynağı; bin sabit diğeri dönel harekete sahip iki parçanın ara yüzeylerinde oluşturulan sürtünme yolu ile mekanik enerjinin ısı enerjisine dönüştürülmesi sonucunda ısıdan yararlanarak eksenel basınç altında ara yüzeyde plastik deformasyon oluşturularak yapılan bir katı hal kaynak yöntemidir Sürtünme kaynağında sürtünme süresi boyunca sürtünen yüzeyler eksenel basınç altındadır. Isıtma veya sürtünme fazı olarak adlandırılan bu süreç birleşme bölgesinde plastik deformasyon sıcaklığına ulaşmaya kadar devam eder. Bu sıcaklıkta dönme hareketi ani frenleme ile durdurulur ve eksenel basınç yaklaşık iki kat arttırılarak yığılma oluşturulur. Normal şartlar altında ara yüzey erimez. Çünkü oluşan sıcaklık malzemelerin ergime sıcaklığından daha düşüktür. Bu kaynak tekniğinde ilave metal ve koruyucu gaz gerektirmez. Bu birleştirme yöntemi dairesel kesitli parçaların kaynağında yaygın bir kullanıma sahiptir ve kaynak işlemi otomatik olarak ta yapılmaktadır. Yöntem, silindirik olmayan parçalar için de kullanılabilir. Alın kaynağı uygulamalarında parçalardan birinin dönme simetrisine sahip olması bu yöntem için yeterlidir. Sürtünme kaynağı, malzemeler ve kombinasyonlarıyla plastiklerin birleştirilmesi işlemleri için uygundur. Sürtünme kuvveti, temas yüzeylerinin büyüklüğüne ve işleniş tarzına bağlı olmayıp yüzeye dik gelen yük ile doğru orantılıdır.

Sürtünme kaynağı ile kaynak yapma fikri eskilere dayanmaktadır. Ancak konu ile ilgili ilk patent 1891 yılında Amerikalı makinist I.H.Bevington tarafından alınmıştır. Daha sonraları konu ile ilgili 1924 yılında İngiltere ve Rusya, 1929 yılında Almanya patent almıştır. Başlangıçta boru ve plastiklerin kaynağında kullanılan bu teknikte 1956 yılında Rus bilimci A.J. Cbdicov iki metal çubuğu birleştirmeyi başarmıştır. Sürtünme kaynağı ile ilgili gerçek bilimsel çalışmalar 1956 yılından sonra başlamıştır. Yöntemin uygulama alanlarının geliştirilmesi doğrultusunda çalışmalar halen devam etmektedir. Özellikle yeni ve ileri malzemelerin üretilmesi ve bu malzemelerin mevcut kaynak yöntemleri ile kaynatılmasından doğan kaynağı için geniş bir araştırma alanı olmuştur.

6.1. Sürtünme Kaynağının Mekanizması

Sürtünme kaynağı işlemini çeşitli safhalarda incelemek mümkündür. Sürtünme kaynağı işlemi dört temel basamakta meydana gelir: Birinci aşamada, parçalardan biri sabit diğeri dairesel harekete sahip (Şekil. 6.2.a.) olacak şekilde aynı ekseninde bağlanır. İkinci

aşamada, iki parçanın aksenal basınç altında yüzey teması sağlanır (Şekil. 6.2.b.). Üçüncü aşamada, ara yüzeyde plastik deformasyon ve şişme (Şekil. 6.2.c.) oluşturulur Dördüncü aşamada, dönme hareketi durdurularak yığma basıncı uygulanır (Şekil. 6.2.d.)



Şekil 6.2. Sürtünme Kaynağı Mekanizması [85].

Ellis (1994). Sürtünme kaynağının üç aşamada gerçekleştiğini belirtmektedir. Bunlar ;

1. Düşük aksenal basınç kuvveti altında yüzey temasının neden olduğu sürtünmenin yardımıyla plastik deformasyon oluşması.
2. Aksenal basınç kuvvetinin artırılarak sürtünen yüzeyler arasında gerekli ısının oluşturulması.
3. Sürtünme işlemimin durdurulup birleşme bölgesinde yığma oluşturmalarıdır.

Sürtünme kaynağıyla kaynak edilmiş malzemenin, birleşme bölgesinde dört farklı bölgenin oluştuğunu belirtmiştir. Bunlar: birleşme ara yüzeyindeki temas alanı, tamamen deformasyona uğramış bölge, kısmen deforme olmuş bölge ve deformasyona uğramamış bölge olarak adlandırılırlar. Sürtünme kaynağında erime bölgesinin olmayışı, ısının tesiri altındaki bölgenin (ITAB) darlığı ve kaynak çevresinde deforme olmuş malzemenin varlığı bu yöntemin en belirgin özelliklerini oluşturur. Birleşme kalitesi ise uygun malzeme seçimi, kaynak ağzı tasarımı, sürtünme süresi, sürtünme basınç kuvveti, devir sayısı, yığma basınç kuvveti, ve yığma süresi gibi kaynak parametrelerine bağlıdır.

Sürtünme kaynağında, kaliteli bağlantının oluşumunun nedenleri aşağıdaki gibi açıklanmıştır.

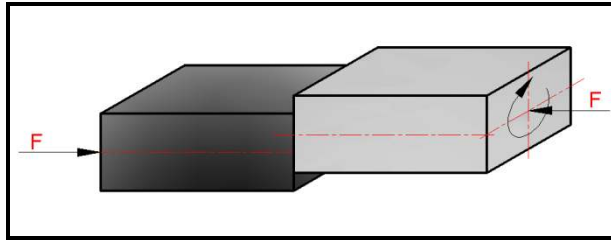
1. Sürtünme hareketi ile bütün oksit ve diğer tabakalar parçalanarak yüzeyden uzaklaştırılır. Sürtünen yüzeyler arasındaki sürekli temas, kaynak sırasında oksit filmlerinin oluşmasını engeller.

2. Sürtünme kaynağı sırasında kaynak boşluklarının büyük bir kısmı elimine olur.

3. Bağlantı bölgesi, hızlı lokal ısınma ve soğuma sonrası uygulanan yüksek basınçtan dolayı ince taneli bir yapıya sahip olur.

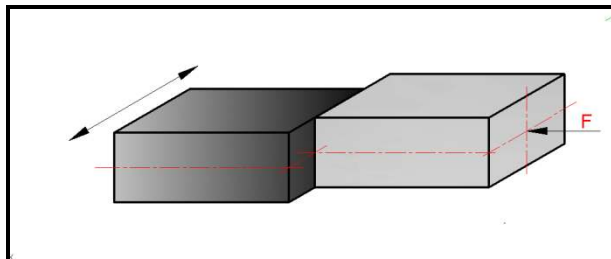
4. Isıtma bölgesel olduğundan dolayı bağlantıya bitişik olan ısıtılmamış geniş alanlar, ısıyı bölgesel olarak ısınmış alanlardan hızla çeker. Sonuçta da çok dar bir ITAB oluşur.

Sürtünme kaynağı sadece dönel simetriye sahip malzemelerde kullanılabileceği gibi. Dönel simetrisi olmayan kesitlerin kaynağı için de kullanılabilir (Şekil 6.3). Bu yöntem aynanın istenilen pozisyonda durdurulması ile yapılır. Bu yöntemde parçaların merkezlenmesi büyük bir sorun olarak karşımıza çıkmaktadır.



Şekil 6.3. Yörüngesel Hareketle Sürtünme Kaynağı [82].

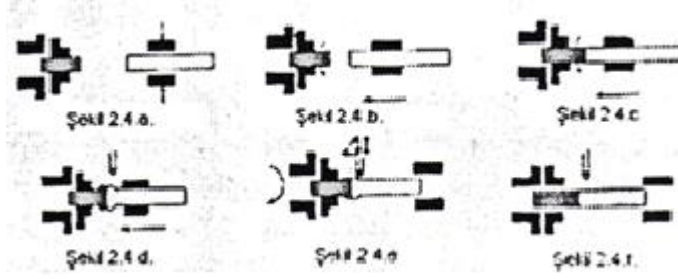
Lineer titreşim hareketinde ise; parçalardan biri uygulanan-basınçla birlikte ileri gen titreşim hareketi yapar. Bu sayede gerekli ısı sağlanır (Şekil 6.4).



Şekil 6.4. Titreşim Hareketiyle Sürtünme Kaynağı [82].

Sürtünme kaynağı sırasında parçaların temas yüzeyleri başlangıçtan bitime kadar basınç altındadır. Genellikle parçalardan en az birinin döndürülmesi ve yüzeylerin temas eden noktalarında meydana gelen yüksek basınç nedeniyle metal malzemelerin yüzeyinde bulunan yağ, kir, oksit. v.b. tabakalar yırtılarak parçaların doğrudan doğruya teması sağlanır.

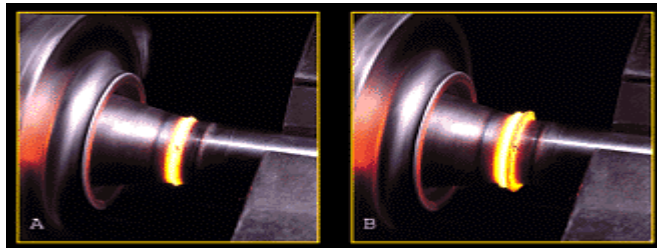
Sürtünme kaynağında işlem sırasını 6 safhada açıklayabiliriz (Şekil 6.5).



Şekil 6.5. Sürtünme Kaynağının İşlem Safhaları [24].

- Parçalarda bin sabit değeri dairesel hareketli aynaya bağlanır.
- Eksenel basınç kuvveti ile yüzey teması sağlanır.
- Dönen parça daha önceden belirlenen devir sayısına çıkarılır.
- Ara yüzeyde yeterince sıcaklık oluşuncaya kadar sürtünme basınç kuvveti artırılarak uygulanır.
- Bu sıcaklıkta dönen parça durdurularak eksenel basınç kuvveti yaklaşık iki kat artırılarak yığma oluşturulur.
- Ara yüzeyde oluşan yığma uygun talaş kaldırma aparatı yardımı ile temizlenerek birleşme işlemi tamamlanır.

Parçaların teması esnasında oluşan ısı malzemelerin ergime sıcaklığından düşük ancak oldukça yüksek bir sıcaklığa karşılık gelir (Şekil 6.6).



Şekil 6.6. Sürtünme Kaynağında Yığma Bölgesi [24].

6.2. Sürtünme Kaynağının Uygulanması

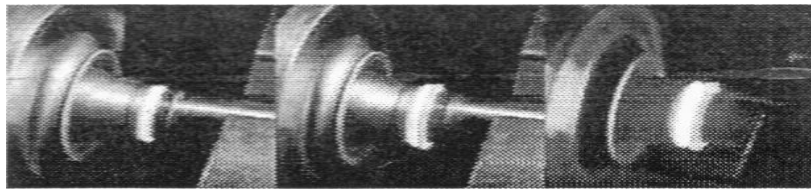
Birleştirilecek parçalar eksenel hareketli çenelere bağlanır ve ilave metal kullanılmadan basınç etkisiyle birleştirilir. Sürtünme sebebiyle alın yüzeylerinde ısınma meydana gelir. Uygun ısı sağlandığında malzeme hamurlaşır ve göreceli olarak uygulanan hareket durdurulur. Basınç artırılarak plastik hale gelen malzemede radyal doğrultuda yığılma oluşur. Kaynak bölgesinde oluşan bu yığılma parçaların kısılmasına sebep olur

Kaynak sırasında birleşme bölgesinde oluşan yığılma (Şekil 6.7)'de sürtünme kaynağı makinesinde veya buna bağlı ayrı bir tornalama tezgahında alınmalıdır. Sürtünme kaynağında, kaynak anında uygulanan ikinci basınç dövmeye basıncı denir. Bu yöntemde başarılı bir birleşme için dönme hızının ve basınç kuvvetlerinin doğru biçimde ayarlanması gerekir. Sürtünme kaynağı uygulanırken. Kaynak anında hakim olan mekanizmalar şu şekildedir:

1. Aşınma ve sürtünme ile ısı üretilmesi
2. Plastik deformasyon
3. Isının yayılması
4. Karşılıklı kimyasal difüzyon

Sürtünme kaynağı yöntemi ile birleştirilecek parçalardan biri dönen, diğeri dönmeyen eksenel olarak hareket edebilen çenelere bağlanır. İlave bir metal kullanılmaksızın basınç altında birleştirilir Burada birleştirilecek olan parçaların yüzeyleri arasında birbirine bağlı bir hareket vardır Bu harekette sürtünmeye neden olur Söz konusu olan sürtünmeden, parçaların ısınması ve yeterli ısı sağlandığından bağlı hareketler durdurularak basınç kuvveti artırılır ve parçalar birleştirilir. Sürtünme ısı çok kısa eksenel mesafede, iş parçasının erime sınırı altında bir ısıya ulaşarak gelişir Kaynak, ısınan bölgenin uygulanan basınç altında, kaynak sıcaklığına ulaştığında oluşur. Esasen, birleşme kullanılan metalin ergime noktasının altındaki bir sıcaklıkta meydana gelir. Söz konusu sürtünme ile sıcaklığı artan malzeme plastik hale gelerek plastik bir fişkırtma görülür. Bu yöntem birleşme yüzeyinde karakteristik bir yığılma çapağı meydana getirir

Yığılma basıncı; $P_{yığılma} = 2 \sim 3 P_{sürtünme}$ denklemi ile verilmektedir.



Şekil 6.7. Sürtünme Kaynağında Oluşan Yığılma [24].

6.3. Sürtünme Kaynak Değişkenleri (Parametreleri)

Sürtünme kaynağında birçok kaynak parametresi mevcuttur. Bunların kontrolünün optimum düzeyde olması kaynağın kalitesini artırır. Sürtünme kaynağıyla ilgili parametreler;

1. Dönme hızı (Çevresel Hız)
2. Eksenel Sürtünme Basınç Kuvveti
3. Sürtünme Süresi
4. Yığma Süresi
5. Yığma Basınç Kuvveti
6. Frenleme'dir.

Kaynak parametreleri malzemenin cinsine, kaynak yüzeyinin boyutlarına ve bağlantının kalitesine göre değişkendir.

6.3.1. Dönme Hızı (Çevresel Hız)

Ellis (1976) kendi yaptığı çalışmalara ve literatüre dayanarak, ara düzey sıcaklığı ve bağlantı kalitesi üzerinde en etkili parametrenin çevresel hız olduğunu öne sürmüştür. Çevresel hız ITAB'ın genişliğine etki eder. Yüksek çevresel hız yüksek ara yüzey sıcaklığı üretirken, düşük çevresel hız yetersiz ısıtma sonucu kaynak bağlantısını olumsuz etkiler. Yüksek çevresel hıza bağlı olarak deformasyon hızının değişimi kaynak süresini kısaltır. Çelikler için çevresel hız 1.2 - 1.8 m/sn arasında önerilir. 1.2 m/sn'nin altındaki hızlarda düzensiz bir yığılma oluşur. Yüksek hızlarda ise kaynak bölgesi aşırı ısınır ve metalürjik dönüşümler meydana gelir. Yüksek hızlarda ITAB genişler ve kaynak zamanı uzar; güç girdisinde ise büyük değişiklik olmaz.

Ellis (1976), kaynak kalitesi için düşük dönme hızlarını tavsiye etmiş ve numune çapına bağlı olarak orta ve düşük karbonlu çelikler için aşağıdaki ampirik formülü önermiştir.

$$n = (1.2 - 6.0) \times 10^4 / D \text{ (d/d)} \quad n: \text{Dönme Hızı (d/d)} \quad D: \text{Parçanın Çapı (mm)}$$

6.3.2. Sürtünme Basınç Kuvveti

Sürtünme basınç kuvveti, numune geometrisi ve birleştirilecek malzeme çiftinin plastik şekil değiştirme yeteneğine bağlı olarak değişir. Sürtünme basıncı ara yüzeydeki oksit, yağ, kırı ve yabancı tabakaları kaldırıp, yüzeylerin atmosfer ile ilişkisini kesebilecek ve yüzeylerde düzenli bir ısıtmayı sağlayacak büyüklükte seçilmelidir. Çünkü malzemedeki sıcaklık gradientini denetlediği ve gücü etkilediği için basınç önemlidir

Alaşımsız ve düşük alaşımlı çeliğe uygulanan basıncı iki katına çıkarmak gücü %50 arttırır. Alaşımsız ve düşük alaşımlı çelikte yapılan sürtünme kaynağı için güç gereksinimi, başlangıç durumu için 4.8 kw/cm^2 dir. Daha hızlı enerji girişi ve yüksek basınç, ITAB'ın genişliğini etkiler. Metal yer değiştirme oranını hızlandırır. Böylece kaynak zamanı kısalarak paralel olmayan kenarlı ısı bandı oluşur. Sürtünme süresince gerekli olan basınç değeri malzemeye bağlıdır. Atmosfer etkilerini önleyebilmek için iki yüzeyin yakın teması sağlanmalıdır.

6.3.3. Sürtünme Süresi

Sürtünme süresi malzemenin cinsine göre değişir. Sürtünme süresi, yüzeylerdeki kalıntı ve pislikleri uzaklaştırabilecek, kaynak bölgesinin gerekli kaynak sıcaklığına en kısa zamanda ulaşmasını sağlayacak biçimde ayarlanmalıdır. Sürenin az veya çok tutulması malzemenin ısınmasını etkileyeceğinden kaynağın kalitesine tesir eder.

Optimumu aşan bir ısıtma süresi, düşük iletkenliğe ve daha fazla malzeme tüketimine yol açar Uzun ısıtma, aşırı yığılmayla birlikte geniş bir ITAB'ın oluşmasına sebep olur Uygun olmayan sürtünme süresi düzensiz ısıtmayla beraber ara yüzeyde birleşmemiş bölgeler oluşmasına ve kirlenmelere yol açar. Yavaşlama zamanının değiştirilmesi toplam malzeme tüketimini değiştirmez. Bu değişiklikler bazı malzemelerin birleşme özelliklen üzerinde önemli etki yapar.

Ellis (1976) parametre optimizasyonla ilgili yapmış olduğu çalışmada sürtünme süresini, malzeme çapına bağlı olarak aşağıdaki şekilde formülize etmiştir:

$$t = 82.55 \sqrt{d} \quad (sn) \quad t: \text{Sürtünme Süresi (sn)} \quad d: \text{Malzeme Çapı (m)}$$

6.3.4. Yığma Süresi

Yığma süresi, malzeme çifti ara yüzeyinde gerekli plastik deformasyonu oluşturmak ve sürtünme kaynağının oluşum mekanizmalarından biri olan difüzyonu hızlandırmak için yığma basınç kim etinin uygulandığı süredir. Bu konuda literatürde çalışma yapılmamıştır. Ancak parametre optimizasyonu üzerine yapılan çalışmalarda, yığma süresi malzemenin soğuma hızına bağlı olarak değişmektedir. Bu da kaynak edilecek parçanın çapına bağlı olarak genellikle sürtünme süresinin iki katı olacak şekilde hesaplanır. Yığma süresinin uygun zamandan az ya da çok olması istenilen özelliklerdeki kaynağı elde etmemizi engeller.

6.3.5. Yığma Basınç Kuvveti

Yığma basıncı malzemenin sıcak akma sınırına bağlıdır. Bu basınç aşın malzeme yığılmasına sebep olacak kadar da yüksek ve elverişsiz şekillendirmeye, dolayısıyla yetersiz kaynaklanmaya sebep olacak kadar düşük olmamalıdır. Yığma basınç kuvveti, sürtünme periyodu sonrasında malzeme çifti arasında difüzyon mekanizmasını hızlandırmak amacıyla uygulanır.

Yığma basıncı, malzemelerin birleştirilmesinin iyi olması için bu malzemelerin sıcak dövme mukavemetlerinin altında olmamalıdır. Buna karşın yığma basıncı çok yüksek alınırsa aşın metal deformasyonu oluşur ve bu aşın yığılma sırasında kaynak bölgesinde metalik olmayan yapılar istenilmeyen enine bir akış göstererek yeniden şekillenirler. Bu durum kaynağın kırılma tokluğunu ve yorulma dayanımını olumsuz etkiler.

Genel olarak, yığma basınç kuvveti paslanmaz çelikler için sürtünme basınç kuvvetinin iki katı olarak önerilirken, SKH9/C45 için bu 1.3 katı olarak önerilmiştir. Düşük karbonlu çelikler için sürtünme basıncı 30-65 MPa yığma basıncı 75-140 MPa iken, orta ve yüksek karbonlu çelikler için sürtünme basıncı 70-210 MPa, yığma basınç kuvveti 100-420 MPa arasında seçilir. Farklı iki malzemenin sürtünme kaynağında, yığma basıncını hesaplarken, üç önemli faktör ortaya çıkmaktadır. Bunlar:

1. Yığma işlemi, plastik şekil değiştirme kurallarına göre meydana gelmektedir.
2. Yığma öncesi sürtünen yüzeyleri etkileyen ısı derinliği, plastik şekil değişim oranı ve derecesi ile saptanır. Sürtünme etkisiyle meydana gelen ısı derinliği, malzemenin uç formunda yapılacak gerekli değişikliklerle direkt olarak şekillendirilebilir.

3. Sürtünme kaynağı için kullanılan yığma basıncı değerlen hesaplamaları diğer yığma ile gerçekleştirilen kaynak metotları için de kullanılabilir.

Metal malzemelerin deformasyonu hidrodinamik analogi ile izah edilebilir. Yığma süreci, iki dairesel düzlem arasındaki vizkoz sıvının akışı ile tarif edilir. Kullanılan vizkozite bağıntısı aşağıdaki denklemde verilmiştir.

$$\mu = \mu_0 \cdot \exp [b(z7h)^2]$$

Akışkan akışı, diferansiyel denklemlerinin integrasyonu ile hesaplanır

$$P_f = -v.R^2.\mu_0.b74.h^3.[2.e^{-b} - \sqrt{\pi/b}.\phi.\sqrt{b}]$$

V: kaliteli bir kaynak bağlantısının üretimi için malzemenin yığılma hızı (mm/dak.)
R: Numunenin yarıçapı (mm)

h: Deformasyon ona uğrayan bölgenin derinliği (mm)

μ_0 : Sıvı modelin relatif vizkozitesi (gr/sn)

ε : Numunenin şekil değiştirme oranı,

b: Metallerin mekanik özelliklerini karakterize eden katsayı

$$b = \delta B_{(p)} / \delta B_{(0)}$$

$\delta B_{(0)}$: Numunenin temas bölgesindeki sıcaklıkta deforme olmuş metalin akma noktasıdır.

$\delta B_{(p)}$: Metallerin deformasyon bölgesinin sınırlarına karşılık gelen sıcaklıktaki akma noktasıdır. Sürtünme kaynağında bu sıcaklıklar 600 - 700 °C civarındadır.

Kaliteli bir kaynak bağlantısının elde edilmesi için yukarıdaki eşitlikler yerine konulduğunda gerekli basınç kuvveti formülü elde edilir.

$$P_f = -\frac{R^2.b.\delta B(0)}{4.h^2.[2e^{-b} - \sqrt{\pi/b}.\phi.(\sqrt{b})]}$$

6.3.6. Frenleme

Gerekli kaynak sıcaklığı oluşturulduktan sonra sistemin ani olarak durdurulmasıdır Frenleme malzemenin türüne bağlıdır. Fren ani uygulanırsa, moment düşer ve yığılma meydana gelir.

Tablo 4. Sürtünme Kaynağında Malzeme Cinsine Göre Seçilecek Parametre Değerleri

Malzeme	Çap (mm)	Sürtünme kuvveti (N/mm ²)	Yığma kuvveti (N/mm ²)	Sürtünme Süresi (sn)	Yığma Süresi (sn)	Çevresel Hız (sn)
Al'siz ve D.alaşımli çelikler	20	20-80	80-200	1-100	250	0.5-5
C60	20	50-80	150-250	3-6	2-3	3.5-6
42 CrMo4	20	50-80	150-250	3-6	2-3	1.5-3
Yüksek alaşımlı çelikler	20	40-100	120-400	3-120	2-10	0.5-5
X5CrNi188	20	60-80	250-300	6-10	2-3	1.5-3
S6-5-3	20	60-100	190-250	15-10	2-3	1.5-3
SiC dayanımlı alaşımlar	20	60-180	180-600	5-150	2-15	0.5-5
Nimonic 80	20	60-100	180-400	5-10	2-3	1.5-3
Inconel 713C	20	60-100	400-500	5-10	2-3	1.5-3
Hafif ve ağır metaller	20	10-80	20-250	1-8	2-5	0.5-4
E-Cu	20	10	20-50	1-6	2-5	4
TiAlV4	20	20-30	60-80	2-8	2-5	1-4
Al 99.5	20	10-30	30-80	0.1-4	2-5	2-4
AlMgSiO.5	20	30-80	50-150	0.1-6	2-5	0.5-2
Pb	20	50-70	70-100	2-4	2-5	1.5-2

Ellis (1976), Sürekli tahrikli sürtünme kaynağında kullanılan parametrelerin optimizasyonu üzerine yapılan deneyleri dikkate alarak, malzeme cinsine göre Tablo 4'de verilen parametre değerlerini önermiştir.

6.4. Sürtünme Kaynağının Kalitesini Etkileyen Faktörler

Sürtünme kaynağının kalitesini en çok etkileyen etkenleri şu şekilde inceleyebiliriz:

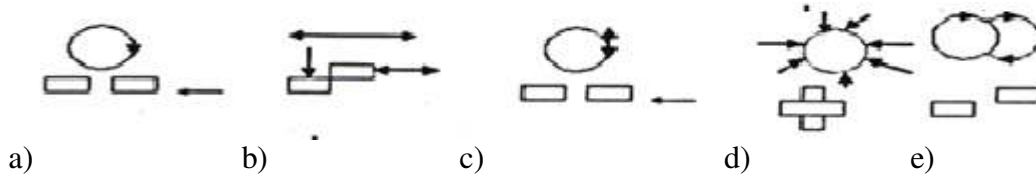
- Yüzeylerin bağıl hızları
- Uygulanan basınç
- Malzeme özellikleri
- Yüzey şartları

Bu faktörlerden a ve b kaynak tekniği, c ve d ise malzemelerle ilgilidir. Sürtünme kaynağı esnasında: izafi hız, uygulanan basınç ve kuvvetin uygulama süresi değiştirilebilir. Yüzey sıcaklığı, iyi bir kaynak için önemli bir parametredir ve kaynak şartları ile kaynak edilen malzemelerin özelliklerine bağlıdır. Yüzey sıcaklığının ölçülmemesi veya kontrol edilmemesi kaynağın gözle incelenmesine engel değildir. Malzemenin yüzey ve hacim özellikleri, hem sürtünme kuvvetleri hem de malzemelerin yığılma özelliklerini etkiler.

6.5. Sürtünme Kaynağı Yöntemleri

Kaynak bölgesinin yeterli ısıya ulaşması sonucu ortaya çıkan frenleme sistemi ve gerekli mekanik enerjiyi sağlayan donanım kaynak çeşitlerini belirler. Sistem değişikçe makineler ve teçhizatda değişmektedir. Bu değişim son yıllarda oldukça ilerlemiştir. Sürtünme Kaynağı enerji kullanımına göre üç hareket çeşitliliğine göre de beş gruba ayrılır. Hareket şekline göre Şekil 6.8’de gösterildiği gibi sürtünme kaynak yöntemleri:

- Dairesel Hareketli Sürtünme Kaynağı
- Karşılıklı Doğrusal Hareketli Sürtünme Kaynağı
- Açısal Salınım Hareketli Sürtünme Kaynağı
- Radial Hareketli Sürtünme Kaynağı
- Yörüngesel Hareketli Sürtünme Kaynağı, şeklinde sınıflandırılabilir.



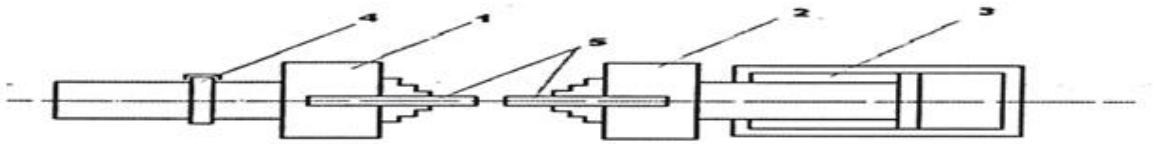
Şekil 6.8. Hareket Şekline Göre Sürtünme Kaynak Yöntemleri [82].

Enerji kullanımına göre sürtünme kaynak yöntemleri şunlardır:

- Sürekli Tahrikli Sürtünme Kaynağı
- Volan Tahrikli Sürtünme Kaynağı
- Hibrit Sürtünme Kaynağı

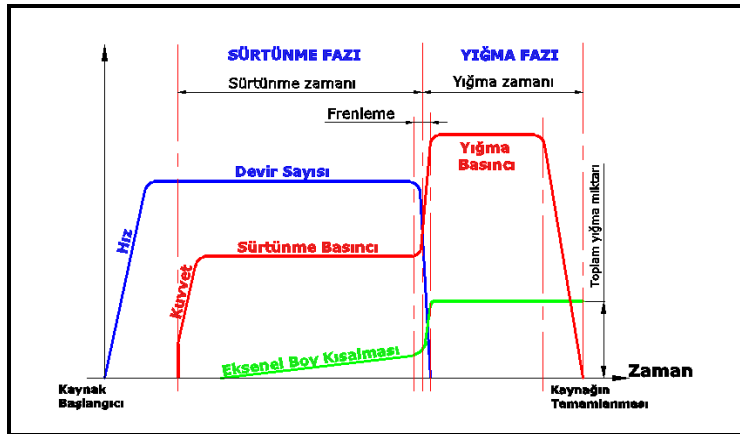
6.5.1. Sürekli Tahrikli Sürtünme Kaynağı

Sürekli tahrikli sürtünme kaynağında parçalardan biri dairesel harekete sahip bir motor ünitesine bağlanır. Diğeri ise aynı ekseninde sabitlenir. Motor daha önceden belirlenen devir sayısında döndürülür ve sabit parçaya aksel basıncı kuvveti uygulanarak iki parça ara yüzeyinde temas sağlanır Bu temas esnasında ısı oluşur. Ara yüzeyde yeterince sıcaklık ve plastik deformasyon oluşuncaya kadar işlem devam ettirilir. Sonra, dönen parça ani frenleme ile durdurulur ve ara yüzey yeterince yığılma oluşuncaya kadar yığılma kuvveti uygulanarak işlem tamamlanır. Şekil 6.9'da sürekli tahrikli sürtünme kaynak makinesinin şeması ve Şekil 6.10'da ise sürekli tahrikli sürtünme kaynağının kaynak parametreleri görülmektedir.



1)Hareketli Ayna 2) Sabit Ayna 3) Hidrolik Silindir 4) Fren 5) Kaynak Edilecek Malzeme

Şekil 6.9. Sürekli Tahrikli Sürtünme Kaynak Makinasının Şematik Yapısı [82].



Şekil 6.10. Sürekli Tahrikli Sürtünme Kaynağı Kaynak Parametreleri [82].

Sürekli tahrikli sürtünme kaynağında kaynağı kontrol eden altı önemli kaynak parametresi vardır.

- a. Çevresel Hız
- b. Sürtünme Süresi
- c. Sürtünme
- d. Basınç Kuvveti
- e. Yığma Basınç kuvveti
- f. Yığma Süresi

Bu kaynak yöntemi üç aşamada meydana gelmektedir.

1. İlk sürtünme
2. Isınma
3. Yığma

1. Aşama: Bu aşamada döndürme momenti hızla artarak bir maksimuma ulaşır ve aşama sonunda azalır. Momentin hızla artışı sonra yavaş yavaş düşüşü, parçaların yüzeyindeki pürüzlerin kilitlenmesine ve kopmasına neden olur. Sürtünme nedeniyle oluşan ısı ara yüzeydeki malzemenin yumuşamasına sebebiyet verir.

2. Aşama: Bu aşamada, moment sabit kalır Malzemelerde deformasyon yaşanması ile ısı yumuşaması bir denge meydana getirir. Malzemeler yığılmaya izin verecek kadar ısınırlar.

3. Aşama: Bu aşamada ise yığılma yer alır Yığılma tahrik sisteminin ayrılıp frenlemelerinin başladığı anda devreye girer. Tahrik mili ayarlanan frenleme süresi ile yavaşlar. Frenleme süresi malzemenin türüne bağlıdır. Fren ani uygulanırsa, moment aniden düşer ve yığılma meydana gelir. Eksenel kuvvet sabit kaldığı zaman, frenleme süresinin uzatılması, yavaşlama hızını düşürerek yükleme değerini artırır. Eğer bu aşamada eksenel kuvvet arttırılırsa, frenleme süresi kısalmış ancak uygulanan kuvvet daha büyük olduğu için maksimum değeri yükselmeye devam eder. Sürtünmenin artması burulmalı yığılmayı artırır. Bu aşama, tahrik mili durdurduktan kısa bir süre sonra sona erer Basma ve yığma dönemi de dördüncü bir parametre olarak kabul edilebilir.

Yığma aşaması, kaynak çevrimi içerisinde daha yüksek olan basınç uygulandığı anda başlar Bu sebeple yığma aşaması gerçekte durma aşamasının başlangıcından başlar. Kuvvet, genellikle ya ayna frenlendiği anda ya da ayna durduğunda yani durma safhasının sonunda arttırılır. Bu iki uygulama arasındaki fark birincisinde, sürtünmede bir artışın olmasıdır. Birinci uygulamada ayna yavaşlatıldığında kuvvet arttırılır, döndürme momenti sıfıra düşmeden önce ikinci bir maksimum değere ulaşır. Bu hal, bir burulma kuvveti oluşturur. İkinci uygulamada, yani kuvvetin durdurma sonunda artırıldığı aşamada, hızlı

frenleme sebebiyle durdurma safhasının çok hızlı olması halinde sürtünme kuvveti artmaz. Ancak, yığılma safhasının ilerlemesiyle azalmaya başlar. Bu durumda burulma kuvveti oluşmaz ve yığılma yalnızca baskı kuvvetinden etkilenir.

6.5.1.1. Sürekli Tahrikli Sürtünme Kaynağı Parametrelerinin Belirlenmesi

Bu yöntemde işlem parametreleri esasen karbonlu çelikler üzerinde geliştirilmiştir (Tablo 5).

Tablo 5.Sürekli Tahrikli Sürtünme Kaynağında Çeşitli Malzemeler için Tavsiye Edilen Kaynak Parametrelerinin Değerleri

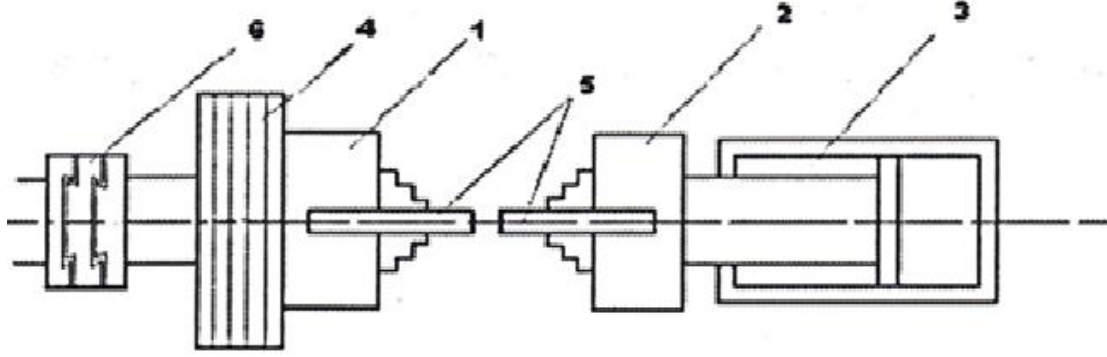
Malzeme	Çap (mm)	Yüzeye Bağlı		Sürtünme Süresi (sn)	Yığılma Süresi (sn)	Çevre Hızı (sn)
		Sürtünme kuvveti (N/mm ²)	Yığılma kuvveti (N/mm ²)			
Alaşımlı ve düşük Alaşımlı çelikler	20	20-80	80-200	3-6	2-10	0.5-5
Yüksek alaşımlı çelikler	20	40-100	120-400	6-10	2-10	0.5-5
Yüksek sıcaklığa Dayanıklı alaşımlar	20	60-180	180-600	5-10	2-15	0.5-5
Hafif ve ağır metaller	20	10-80	20-150	1-8	2-5	0.5-4

Bu yöntemde kaynak basınçları ile tahrik milinin hızı hesaplanır.
 $V_t = [(X.S)/(\pi.D_d)]$ V_t :Tahrik mili hızı (d/d) X:1000 (çevrim katsayısı) S: Yüzey hızı (m/dak) D_d : Parçanın dış çapı (m) Burada yüzey hızı 76-182 (m/dak) arasında değişir. Boruların kaynağında bu değerin biraz daha yüksek olması istenir.

6.5.2. Volan Tahrikli Sürtünme Kaynağı

Bu yönteme, atalet kaynağı da denilmektedir. Sistem hemen hemen sürekli tahrikli sürtünme kaynağı ile aynı mekanizmaya sahiptir. Yalnız burada dönen parçaya tutunan mil bir volana bağlanmıştır

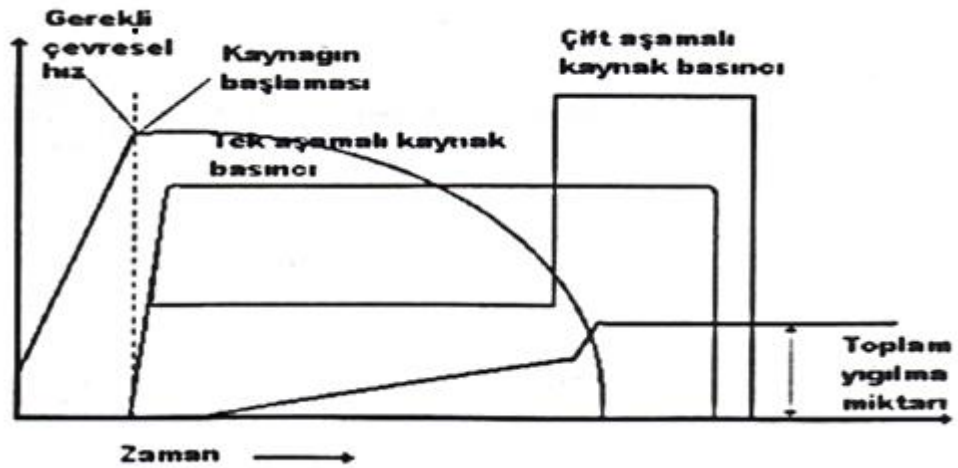
Volan belirlenen bir hıza ivmelendirilir. Böylece dönme enerjisinden kazanılan kinetik enerji volan üzerinde toplanmış olur. Tahrik motoru ile dönen parça arasındaki bağlantı kesildiğinde volan üzerinde depolanmış olunan enerji boşalana kadar sürtünme kaynağı yapılır (Şekil 6.11).



1) Hareketli Ayna 2) Sabit Ayna 3) Hidrolik Silindir 4) Volan 5) İş Parçaları 6) Kavrama

Şekil 6.11. Volan Tahrikli Sürtünme Kaynak Makinasının Şematik Resmi [24].

Kaynak kuvveti aksenal olarak uygulandığında dönmesi serbest bırakılan parça diğer parça ile birlikte döner. Bu arada volan enerjisi parça ara yüzeyinde sürtünmeye harcanır. Volan hızı azalırken kaynak bölgesi ısınır ve bu ısı yayılır. Volan tamamen durduktan sonra basınç etki ettirilir. Bu yöntemle bazı kaynak uygulamalarında ısı daha az yayılabilir. Volan tahrikli sürtünme kaynağının kaynak parametreleri Şekil 6.12’ de verilmiştir.



Şekil 6.12. Volan Tahrikli Sürtünme Kaynağında Kaynak Parametreleri [24].

6.5.2.1. Volan Tahrikli Sürtünme Kaynağı Değişkenleri

1. Volan çapı (Atalet momenti ile ifade edilir)
2. Dönme hızı
3. Eksenel kuvvet

Volan tahrikli sürtünme kaynağı işlemi üç aşamada meydana gelir.

1. Aşama: İlk sürtünme
2. Aşama: Isınma
3. Aşama: Yığma

Sürekli tahrikli sürtünme kaynağının aksine kaynak parametreleri önceden belirlenemez. Ancak, volana kazandırılmış olan çevresel hız yardımıyla diğer kaynak parametreleri kontrol edilir. Eğer ikinci ve üçüncü aşamadaki eksenel kuvvetler değişirse, işleme iki aşamalı kaynak, kuvvetlere de ısıtma ve basma kuvveti adı verilir. Öte yandan, kuvvet bütün işlem boyunca sabit kalıyorsa, bu tür sürtünme kaynağına da “tek aşamalı kaynak” adı verilir. Volan tahlildi sürtünme kaynağında volan, kaynağa ısı girişini kontrol eder. Volanın atalet momenti, önemli bir değişken olup başka volanlar ilave edilip çıkarılarak çevresel hızı ayarlanabilir. Volanda depolanan enerji miktarı volanın hızı ile kontrol edilebilir. Volan mili istenen hıza ulaştığında tahrik sistemi ayrılır ve volan ataletiyle dönmeye devam eder. Bundan sonra eksenel bir kuvvet uygulanır ve bu kuvvet kaynak süresince sabit tutulur. Uygulanan eksenel basınç, dönme hızının azalmasına neden olur. Bazı durumlarda parça durduğunda yada durmaya yaklaştığında eksenel basınç kuvveti yaklaşık iki kat artırılarak yığma basınç kuvveti olarak uygulanabilir.

Sürekli tahrikli sürtünme kaynağı ile volan tahrikli sürtünme kaynağı arasındaki en önemli fark, sürtünme hızıdır. Volan tahrikli sürtünme kaynağında sürtünme hızı sürtünme aşamasında sürekli azalırken, sürekli tahrikli yöntemde sürtünme hızı sabit kalır. Temas eden yüzeylerde malzemelerin plastik deformasyonu sonucu ortaya çıkan ısı, yığma aşamasında ara yüzeydeki sıcaklığın süratli bir şekilde düşmesine engel olur.

Volan tahrikli sürtünme kaynağının karakteristiklerini kontrol eden işlem değişkenleri; volan çapı, volan hızı ve eksenel basınçtır. Volan tahrikli sürtünme kaynağında, hareket eden volan, kaynak enerjisini temin eder. Kaynak basıncının uygulama aşamasında tahrik mili yavaşlar. Ataletin artması, kaynak çevirim süresini uzatır. Ayrıca, uygulanan enerji sabit tutulduğunda, yüzey hızı azalır, daha büyük volanlar kullanılarak yığma artırılabilir.

Kasnağa imkan verebilecek olan enerjinin hesabı:

1. Yüzey hızı
2. Malzeme cinsi
3. Bağlantı geometrisine bağlıdır.

Karbonlu çeliklerin volan tahrikli sürtünme kaynağında, urbasına düşen volan enerjisi:

$E = 2nI/c$ denklemi ile bulunur. $E = \text{Enerji (j)}$ $I = wk^2$ Atalet momenti (kg.m^2)
n: Volan devri (d/d) e: Bir dönüşüm katsayısı olup değeri 182.4'dür.

wk^2 ifadesinde, w: Volanın ağırlığı, k^2 Ağırlık merkezlerinin dış eksene olan mesafesinin karesidir.

Yığılma basıncı, kaynak basıncının 1.5 ila 4 katıdır. Gerçek değeri ancak deneyerek bulunabilir. ITAB' nın boyutu üzerinde kaynak basıncının etkisi ile yüzey hızının etkisi bin birinin zıddıdır. Yani düşük kaynak basınçları ile elde edilen ITAB yüksek yüzey hızları ile elde edilenlere benzer. Volan tahrikli sürtünme kaynağında parametreler şu şekilde belirlenebilir:

1. Volan hızı seçilir (d/d),
2. Gerekli enerji seviyesi (E-r) için ihtiyaç duyulan toplam momenti (Wk^2)
3. Kaynak makinesi üzerindeki en yakın mümkün toplam atalet momenti (Wk^2)
4. Toplam atalet momenti (Wk^2) ile gerekli devir (d/d) yeniden hesaplanır

6.6. Sürtünme Kaynağının Uygulama Alanları

Sürtünme kaynağı yıllardır hızlı, çevreye zararlı olmayan ve güvenilir bir kaynak yöntemi olarak kabul edilmektedir. Öncelikle seri ve kütle üretiminde ve çok sayıda parça üretiminde kullanılır. Birçok hallerde yöntem küçük parça sayılarında (tamir kaynakları) ekonomik olarak kullanılabilir. Sürtünme kaynağı, takım üretimi ve otomotiv sanayiinde yaygın olarak özellikle aks parçalarının birleştirilmesinde kullanılır.

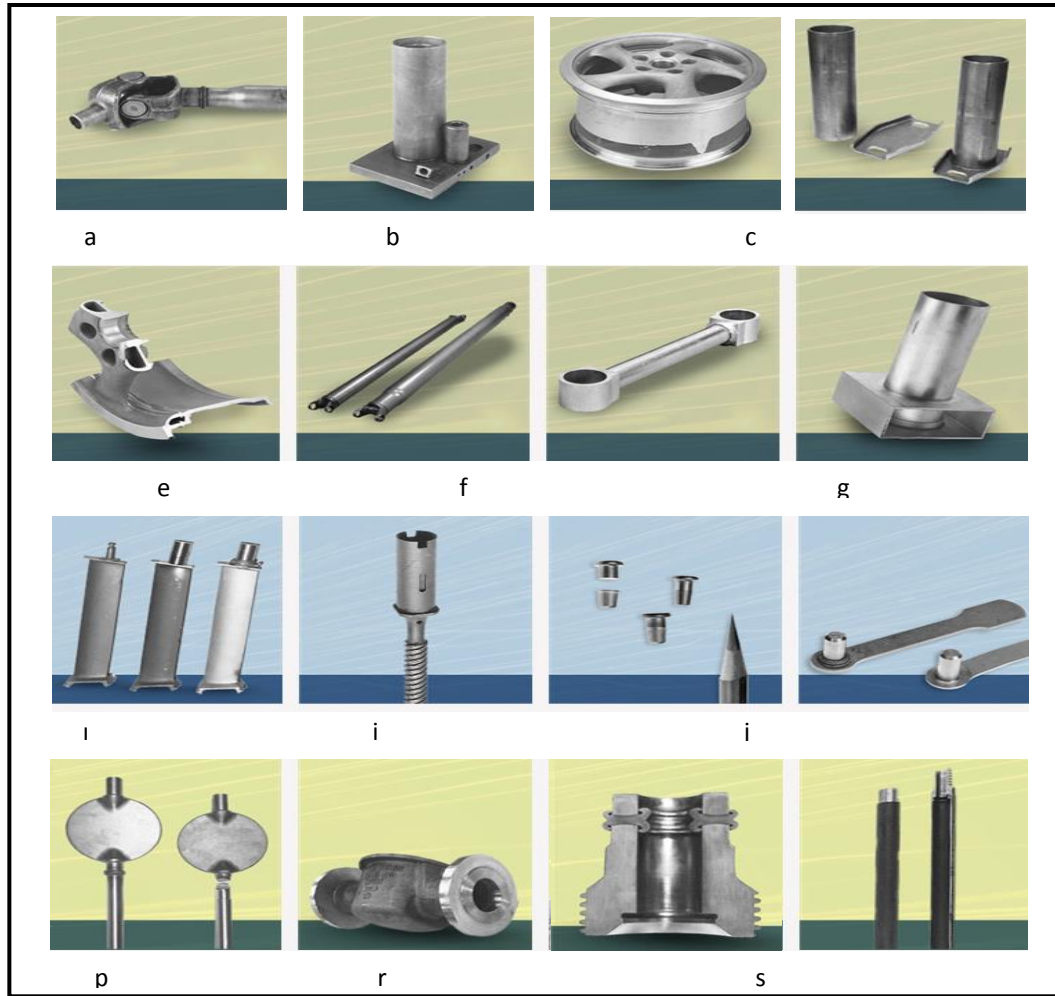
Bu kaynak yönteminden hafif yapıların elde edilmesinde de faydalanılır. Örnek olarak bir tahrik milinin orta kısmı AI'dan, uçları ise çelikten oluşacak şekilde üretilir. Yöntemin endüstrinin birçok dalında başarı ile uygulandığı alanlar aşağıda verilmiştir.

Makine İmalatı ve Hidroelektrik Endüstrisi: Dişli çarklar, piston kolları, hidroelektrik silindirleri, radyal poMPa ve piston kolları, vidalı miller, krank milleri, matkap uçları, valfler, iğler, freze bıçakları, delik zımbaları, çelik kalemler, rayların

kaynatılması, petrol araması ve sondaj sektöründe kullanılan boruların birleştirilmesinde. Havacılık ve Uzay Sanayi, Rotorlar, türbinler, millet, yanma odaları, itme jetleri, burular, flanşlarda.

Otomotiv Endüstrisi: Aks köprüleri; sübaplar, kardan milleri, vites kolları, fren ve boru milleri şanzıman parçaları, valfler, şaftların, millerin ve farklı metallerden meydana gelen sübapların subab saplarına kaynaklanmasında Takım Endüstrisi: Spral matkaplar, freze bıçakları, delik zıMParalan, çeşitli kalemler raybalarda. Elektrik,

Elektronik ve Kimya Endüstrisi: Röntgen cihazı tüpleri için döner anod milleri, sürekli lehim uçları, devre kontakları geçiş parçaları, borular, sübap yuvaları boru tesisatı bağlantıları, tel çekme. Elektrik, kimya, gemi inşa ve imalat sanayilerinde de yaygın bir kullanım alanı bulunmaktadır.



Şekil 6.13. Çeşitli Sektörlerde Kullanılan Sürtünme Kaynağı İle Üretilmiş Parça [82].

6.7. Sürtünme Kaynağının Avantajları

1. Sürtünme kaynağı metodu ile birleştirilen malzemelerde sarf edilen enerji diğer metotlara göre daha azdır.
2. Kaynak sırasında bölgesel ısıtma ve ergime derecelerinin altında bir sıcaklıkta kaynak yapıldığı için farklı metallerin kaynağını yapmak mümkündür.
3. Sürtünme kaynağında, kaynaklanan bölgenin dayanımı, birleştirilen malzemelerin dayanımına denk bazı hallerde yüksek olabilir.
4. Ergitme kaynağı yöntemlerinin uygulanamadığı malzeme ve malzeme kombinasyonların da başarı ile kullanılabilir.
5. Birleştirme sıcaklığı düşük, kaynak süresi kısa ve birleştirme kuvvet altında yapılmaktadır.
6. Sürtünme sonucunda oluşan ısı bölgesel olduğu için kaynak dikişinin her iki tarafında ısıdan etkilenen bölge dardır ve her hangi bir dönüşüm oluşmaz.
7. Sürtünme kaynağı bir katı hal kaynak yöntemi olduğu için kaynak bölgesi pas, kir, oksit, vs. içermez.
8. Sürtünmenin etkisiyle tüm oksit ve diğer yabancı maddeler yüzeyden uzaklaştırılır Ayrıca kaynak öncesi bir temizleme gerektirmez.
9. Kaynak süresi içerisindeki yığılma kaynak dikişini havanın zararlı etkilerinden korur.
10. Isıtma ve soğutma fazlarını hızlı teşekkül etmesinden dolayı, birleşme bölgesinde ince taneli bir mikro yapı oluşur. Bu da malzemenin mukavemetini korur.
11. İlave metal kullanılmadığı için, bütün kesitte düzgün bir kaynak kalitesi sağlanabilir.
12. Kaynak sırasında metal sıçraması, duman, ışınlama ve çevreyi kötü etkileme söz konusu değildir.
13. Kaynak parametreleri kesin olarak kontrol edilebilir.
14. Çok defa ana malzeme gevrekleşmez.
15. Isının tesir ettiği bölge küçüktür. Bu sebeple kaynak yerinde oluşan metalürjik değişimler küçük bir değerde tutulabilmektedir.
16. Değişik kesitteki simetrik parçaların kaynakla birleştirilmeleri mümkündür.
17. Sürtünme kaynağı metodunda kaynak parametreleri çok iyi gözlenir.
18. Birleşme bölgesindeki sertlik değerlerinin artışı çok küçüktür.

19. Parametrelerinin kontrolü kolaydır.
20. Bu yöntemde kaynak dikişı mükemmel görünümlüdür. Çünkü birleştirme yapıldığı sırada parçalar katı haldedir.
21. Kaynağın süresi ve ayrıca makineye bağlama ve ayırma zamanları çok kısadır.

6.8. Sürtünme Kaynağının Dezavantajları

Aşağıdaki hata veya hata sebepleri çeşitli malzemeler için sürtünme kaynağını uygulamalarının sınırlandırılmasına yol açar:

1. Düşük sıcaklıkta eriyen fazların veya metaller arası fazlar oluşur.
2. Oksijene büyük ilgi vardır.
3. Gevrekleşme söz konusudur.
4. Su verilmiş veya suyu alınmış malzemelerde mukavemet düşer.
5. Özellikle yüksek karbonlu çeliklerde sertleşme oluşur.
6. Genelde birleştirilen parçalar silindirik ve eksen etrafında dönebilen parçalardan oluşmaktadır.
7. Kaynak sonunda birleştirilen ebatlar aksel kısılmaya uğradıkları için malzeme sarfiyatına sebep olmaktadır.
8. Büyük parçalarda ısıtmanın homojen olmaması nedeniyle kaynaklanabilme zordur. Kesit alanının artması motor gücü ve yığma basıncı değerlerinin artmasına sebep olur.
9. Sürtünme kaynağı makine ve donanımlarının maliyet yüksektir.
10. İş parçasının boyutları sürtünme kaynak makinesinin boyutları ile sınırlıdır.

7. TAHRİBATLI VE TAHRİBATSIZ MUAYENE YÖNTEMİ

7.1. Tahribatlı Muayene Yöntemi

Malzemelerde kalite kontrolün sağlanması, kalite için ölçü alınabilecek büyüklüklerin belirlenmesi, kalitenin yükseltilebilmesi, hasar durumlarında hasarın ortaya çıkış nedenlerinin saptanabilmesi, malzeme özelliklerinin belirlenmesi ve geliştirilmesi için onları muayene etme zorunluluğu vardır. En yaygın olarak kullanılan yöntemler şunlardır:

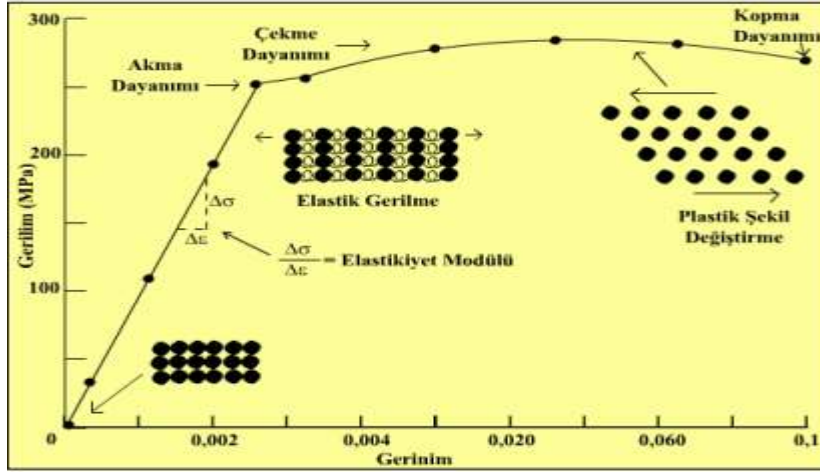
A) Tahribatlı Muayene Yöntemler

- Çekme deneyi
- Basma deneyi
- Çentik darbe deneyi
- Sertlik ölçme deneyi
- Derin çekme deneyi
- Eğme deneyi
- Burulma deneyi

7.1.1.Çekme Deneyi

Çekme Testi Çekme deneyi malzemelerin mukavemeti hakkında esas dizayn bilgilerini saptamak ve malzemelerin özelliklere göre sınıflandırılmasını sağlamak amacı ile geniş çapta kullanılır. Çekme deneyi standartlara göre hazırlanmış deney numunesinin tek ekseninde, belirli bir hızla ve sabit sıcaklıkta koparılmaya kadar çekilmesidir. Deney sırasında, standart numuneye devamlı olarak artan bir çekme kuvveti uygulandığında, aynı esnada da numunenin uzaması kaydedilir. Çekme deneyine tabi tutulan numunenin mekanik özellik değerlerinin sağlıklı olarak alınabilmesi için; numune malzemeyi tam olarak temsil etmeli, imalat şeklinin (döküm, kaynak, sıcak dövme veya haddelene soğuk dövme) bilinmesi, numunenin alınış şeklinin uygun olması gerekir. Çekme deneyinde numuneye yük uygulanmaya başlandığında numunede uzama ikiye ayrılır; Elastik uzama: numuneye yük uygulandığında akma sınırına gelene kadar bir miktar uzama görülür. Yük kaldırıldığında bu uzaman kaybolur ve numune eski haline döner. Plastik uzama: yük akma

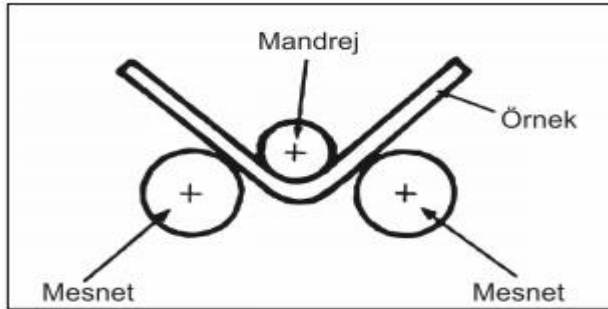
sınırından sonra uygulanmaya devam edildiğinde numunede kalıcı şekil değişimi meydana gelir. Yani yük kaldırıldığında numune eski haline dönemez. Çekme deneyi sonucunda, gerilme–birim şekil değiştirme diyagramından malzemeye ait, elastisite modülü, elastiklik sınırı, akma dayanımı, çekme dayanımı, kesit daralması ve yüzde uzama, rezilyans, tokluk gibi özellikler bulunur.



Şekil 7.1. Çekme deneyinde elastik ve plastik deformasyon bölgeleri [59].

7.1.2. Eğme Deneyi

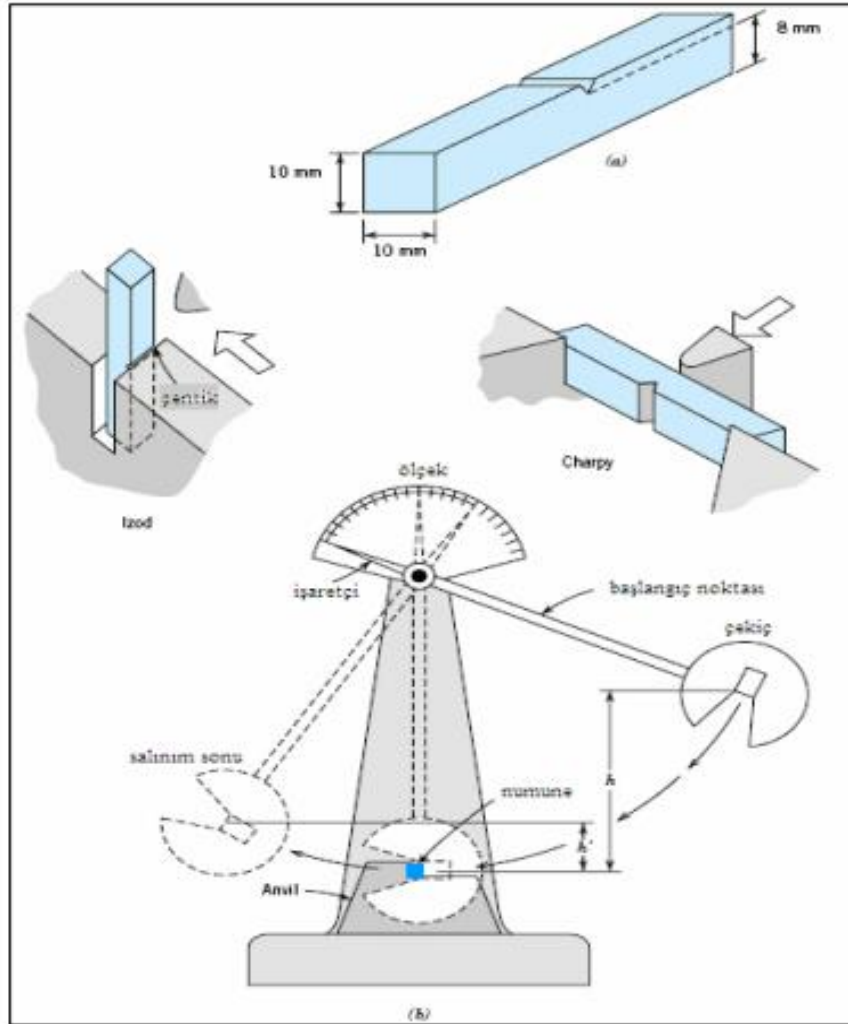
Eğme Testi Bu testle iki mesnet üzerine yerleştirilmiş test parçasının kaynak dikişine dik olarak öngörülen çapta bir mandrej yardımıyla kuvvet uygulayarak eğmesi suretiyle kaynak bağlantısının şekil değiştirme kabiliyeti bulunur. Şekil 7.2’de eğme deneyi şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 7.2. Eğme deneyi prensip şeması [61].

7.1.3.Çentik Darbe Deneyi

Çentik Darbe Testi Darbe deneyinde amaç, malzemenin bünyesinde muhtemelen bulunacak bir gerilim konsantrasyonunun (gerilim birikiminin) darbe esnasında numuneye suni olarak teşkil ettirilip, malzemenin bu durumda dinamik zorlamalara karşı göstereceği direnci tayin etmektir. Darbeli yüklere maruz kalan malzemelerin göstereceği direnci ölçmek için yapılan bir deneydir. Bu malzemelerin çarpma dayanımları, yavaş yükleme durumundaki dayanımlarından çok daha düşüktür. Deneyden elde edilen sonuçlar malzemelerin sınıflandırılması için kullanılır. Tasarıma yönelik mühendislik hesaplamalarında kullanılmazlar. Deneyin yapılabilmesi için numuneler belirli ölçülerde ve belirli çentik şekilleriyle hazırlanır. Darbe deneyi iki türde yapılır. Şekil 7.3’ de verilmiştir.



Şekil 7.3.Çentik darbe testi [52].

7.1.4.Sertlik Ölçme Deneyi

Sertlik Testi Bir malzemenin çizilmeye, kesilmeye, aşınmaya ve delinmeye karşı gösterdiği dirence sertlik denilir. Bilimsel olarak ise malzemenin dislokasyon hareketine veya plastik deformasyona karşı gösterdiği direnç sertlik olarak ifade edilir. Bütün metallerde ve özellikle çelikte sertlik soğuk sertleştirme ve ısıtıl işlem sonucu geniş sınırlar içerisinde değişir. Ölçülen sertlik değerlerinden yararlanarak malzemenin içyapısı hakkında bilgiler elde edilir. Sertlik muayeneleri bu sebeple çok uygulanır. Sertlik deneyinde, bir malzemenin yüzeyine batırılan bir uca veya kesici takıma karşı gösterilen direnç ölçülür.

Sertlik ölçme yöntemleri;

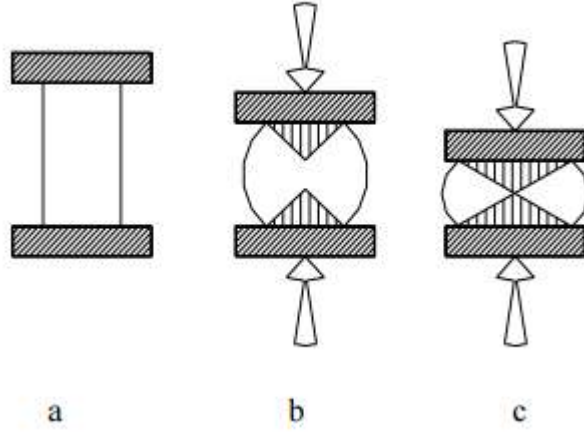
- Brinell sertlik ölçme yöntemi
- Rockwell sertlik ölçme yöntemi
- Vickers sertlik ölçme yöntemi
- Mikrosertlik deneyi.

Bu çalışma kapsamında, kaynaklı numuneler üzerinde, sertlik deneyleri Vickers sertlik ölçme yöntemiyle gerçekleştirilmiştir.

7.1.5.Basma Deneyi

Basma Deneyinin Tanımı Malzemelerin yüzeyinden içeriye doğru etkiyen dış kuvvetlere basma kuvvetleri denir ve basınç gerilmeleri oluşturur. Çekme deneyinin tersi olarak kabul edilir. Gevrek malzemelerin mukavemet değerleri genel olarak basma deneyi ile tespit edilir. Özellikle tuğla, beton ve benzeri malzemelerin dayanımlarının tespitinde kullanılır. Basma deneyinde silindirik veya küp şeklindeki numuneler iki paralel tabla arasına yerleştirilir ve uygulanan kuvvetle oluşan şekil değiştirmeler ekstansometre yardımı ile ölçülür. Basma çenelerinin düz, temiz ve deney numunesine oranla sert olması gereklidir. Basma deneyinde kesit alanı sürekli arttığından çekme deneyinde oluşan boyun verme olayı meydana gelmez. Sünek malzemelerin deneyinde fiçılama olarak adlandırılan şişme oluşur Şekil 7.4’ de verilen Basma diyagramı genel olarak çekme diyagramına benzer. Basma diyagramının elastik deformasyon bölgesini gösteren kısmı ile çekme

diyagramının elastik deformasyonu gösteren kısmı çok benzetmektedir. Basma diyagramında da akma sınırından hemen sonra plastik deformasyon oluşmaktadır ancak çekme diyagramında maksimum noktadan sonra gerilme değerinde bir azalma meydana gelirken basma diyagramında gerilmede artış meydana gelir. Bu durum, kesit alanının devamlı artmasından kaynaklanmaktadır.

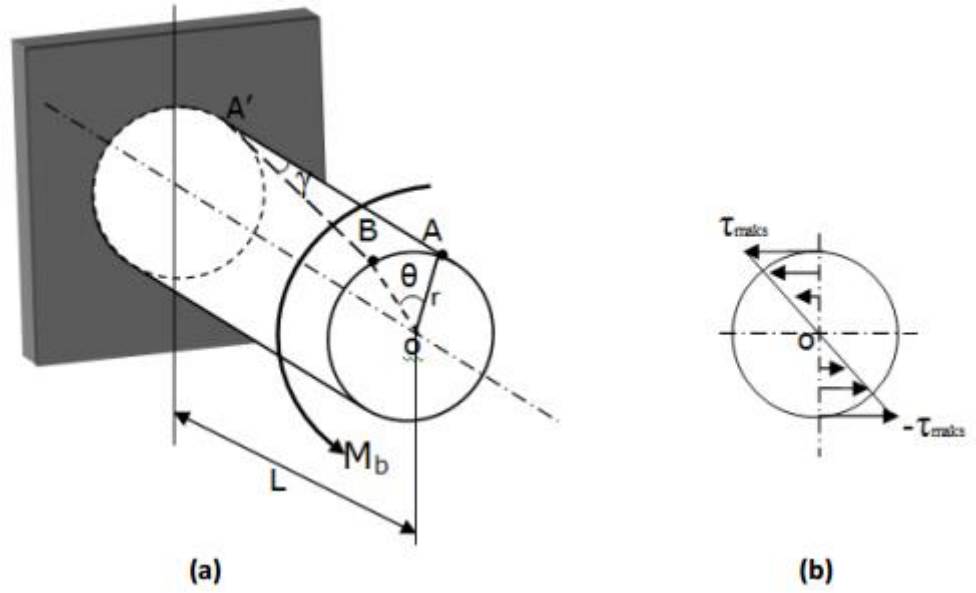


Şekil 7.4. Basma deneyi uygulanan bir sünek malzemede oluşan fiçılama

a) Basma kuvveti yok **b)** Uygulanan kuvvetin etkisiyle fiçılamanın ilk aşaması **c)** Fiçılamanın tamamlanması [61].

7.1.6. Kırma Deneyi

Kırma Deneyinin Tanımı Çentik darbe deneyi de denilen bu yöntemde belli ölçülere sahip, tam orta kısımlarına çentik açılmış deney parçalarının bir sarkaç ucundaki çekiç aracılığıyla kırılmasıdır. Kırma deneyleri, malzemelerin darbe dayanımlarını veya kırılma enerjilerini ölçmek için yapılır. Uygulamada iki çeşit darbe deneyi vardır. Bunlar Charpy ve Izod deneyleridir. Charpy deneyinde, şekil 7.5’de görüldüğü gibi iki mesnet koluna yatay olarak yaslanmış basit bir kiriş durumundaki çentik tabanına, bir sarkaç ucundaki çekiçle darbe yapıp numunenin kırılmasıyla harcanan enerji ölçülür. Izod darbe deneyinde dikey olarak kavrama çenesine bağlanan numuneye belli bir yükseklikteki sarkacın ucundaki çekiç ile darbe uygulanıp kırılması ile harcanan enerji ölçülür.



Şekil 7.6. Burulma momentine maruz bir çubuk [51].

Şekil 7.6.b’de görüldüğü gibi, çubuğun deformasyonu sırasında yüzeydeki liflerde eşit ve zıt yönde maksimum kayma gerilmeleri (τ_{maks}) oluşur. Kayma gerilmeleri, çubuk merkezine doğru gidildikçe azalır ve çubuk merkezinde sıfır değerini alır

7.2.Tahribatsız Malzeme Muayene

Yaşantımız boyunca, seyahat ederken, televizyon seyrederken veyahut imalatla sorunsuz çalışan sistemler bekleriz. Çoğu zaman da hayatlarımızı emanet ettiğimiz ve gün geçtikçe daha da otomatikleşen cihaz ve sistemlerden doğabilecek riskleri düşünmek yerine bunların imalatçısına ve tasarımcısına güvenmek zorunda kalırız. İşte bu yüzden imalatla bu sorumluluğu alan bizler ürettiğimiz mamulleri birçok ayrıntılı test ve muayeneden geçirmek zorundayız. Bu test ve muayenelerin en çok kullanılanları tahribatsız malzeme muayene yöntemleri başlığı altında incelenir.

Tahribatsız malzeme muayene, kalite kontrolün bir bölümü olup, üretimin tamamlayıcı bir parçasıdır. Tanım olarak, malzemenin herhangi bir şekilde bütünlüğünü ve kullanılabilirliğini bozmadan yüzeyinde ve içyapısında bulunan hatalarının ve metalurjik durumunun test edilmesidir. Bu yöntemler örnekleme yapılarak ya da üretimin kalitesinin %100 kontrolü şeklinde kullanılabilir. Yüksek teknoloji ile birlikte, üretimin her safhasında ve kullanım esnasında uygulanabilmektedir. Kontrolün verimli olabilmesinin,

test edilen malzeme hakkında maksimum derecede bilgi edinmek ve bulgular sonucunda üretim ile gerekli iletişimi sağlayabilmek için testi gerçekleştiren kişinin gerekli eğitime ve tecrübeye ihtiyacı vardır. Tahribatsız malzeme muayene sadece standardın altında olan malzemeleri reddeden bir yöntem değil, aynı zamanda iyi olan malzemenin güvencesi olan bir yöntemdir. Bu yöntemde birçok prensibi kombinasyonu kullanılmakta olup, tüm istekleri karşılayan tek bir metod bulunmamaktadır. Aşağıda endüstride en çok kullanılan metodların kısaca açıklamaları, uygulama alanları, avantaj ve dezavantajlarına yer verilmiştir.

Bu metodlar:

- ✓ Radyografi Yöntemi
- ✓ Magnetik Partikül Yöntemi
- ✓ Penetrant Yöntemi
- ✓ Ultrasonik Yöntemi
- ✓ Girdap Akımları (Eddy Current) Yöntemi

(Bu metodların yanı sıra akustik, hidrojen kaçak yöntemi, görsel muayene gibi yöntemler de bulunmaktadır).

7.2.1.Radyografi - X ve Gama

Bu yöntem ferromagnetik ve ferromagnetik olmayan metaller ve diğer malzemelerde uygulanır. X ışınları malzemelere zarar vermeden içyapılarını inceleme olanağı sağladığından, tahribatsız muayenede yaygın olarak kullanılmaktadırlar. X ya da gama ışınlarıyla malzemelerdeki kalınlık değişimleri, yapısal değişiklikler, içteki hatalar, montaj detayları tespit edilebilmektedir. Elektriksel olarak üretilen x ışınları ve radyoaktif izotoplardan yayılan gama ışınları, içerisinden geçtikleri malzeme tarafından abzorbe edilirler. Kalınlığın artmasıyla beraber abzorbe edilen miktarda artar. Dolayısıyla, daha yoğun malzemede daha fazla radyasyon abzorbe edilir. Işık gibi x ve gama ışınları da elektromagnetik dalga gurubuna aittirler. Aralarındaki tek fark dalga boylarının farklı olmasıdır. X ve gama ışınlarının dalga boyları çok küçük olduğundan gözle görülmezler ve malzemeleri delebilmeye yetenekleri vardır. X ve gama ışınları, ışık ile aynı özelliklere sahip olup, gümüş kristallerini fotoğraf filmi üzerinde metalik gümüşe çevirirler ve filme ulaşan radyasyon yoğunluğu oranına göre bir resim oluştururlar. Endüstriyel radyografide en

temel kural, malzemenin bir tarafında ışın kaynağının, diğer tarafında ise bir algılayıcının (detektör) bulunmasıdır. Radyasyon kaynağı olarak x yada gama ışın kaynağı, detektör olarak da film kullanılmaktadır. Radyasyon kaynağının enerjisi malzemeyi delebilecek güçte seçilmelidir. Enerjinin delme gücünü belirleyen dalga boyudur. Dalga boyu küçüldükçe delme gücü artar. X ışını radyografisinde x ışınlarının delme gücü, x ışın tüpüne uygulanan voltaj ile ayarlanır.

Çelik için her inç kalınlığa yaklaşık olarak 1000 volt gereklidir. Gama radyografisinde delme gücünü izotop belirler ve her izotop için değiştirilmesi olanaksızdır. 1/2" ten 1" e kadar çelikler için iridyum 192, 3/4" ten 2 1/2" e kadar çelikler için sezyum 134 kullanılır. Malzemeyi delerek karşı tarafa geçen ışınları algılayan film, genellikle ışık geçirmez bir zarf içerisine konularak test edilen malzemenin arka tarafına yerleştirilmektedir.

Burada dikkat edilmesi gereken kural, zarfın ön yüzeyi ışınları kolaylıkla geçirebilecek malzemeden yapılmış olmasıdır.

Avantajları

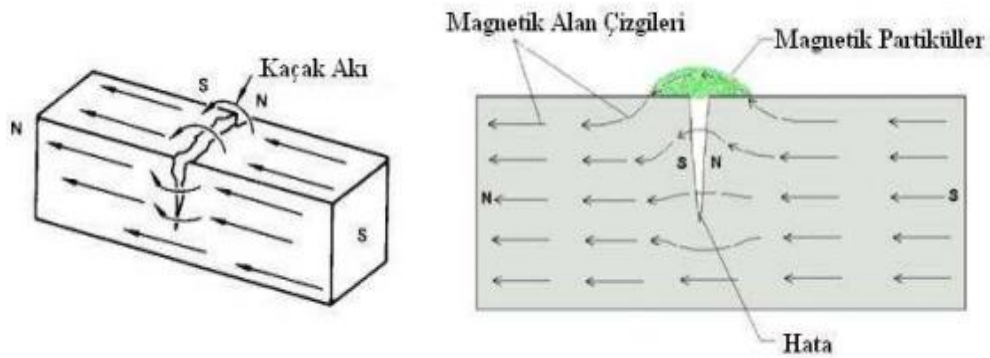
- Sonuç resim olarak görüntülenir.
- Test ortamından farklı bir yerde ve zamanda görülebilecek kalıcı kayıt sağlar.
- İnce parçalar için uygundur.
- Hassasiyet her film üzerinde gösterilmektedir.
- Herhangi bir malzemede uygulanabilir.

Dezavantajları

- Genel olarak kalın parçalarda uygun değildir.
- Sağlık için zararlı olabilir.
- İki boyutlu hatalar için direkt ışın gereklidir.
- Filmin pozlanması ve görüntülenmesi gereklidir.
- Otomasyona uygun değildir.
- Yüzey hataları için uygun değildir.
- Yüzeyin altındaki hatanın derinliği hakkında bilgi vermez.

7.2.2.Magnetik Partikül Yöntemi

Magnetik parçacık çatlak kontrol yöntemi ile magnetik permeabilitesi 100'ün üzerindeki ferromagnetik olan fakat östenitik olmayan bütün çelik ve alaşımları ile dökme demirler muayene edilebilir. Genellikle yüzey ve yüzeye yakın alandaki çatlak şeklindeki malzeme ayrılımları tespit edilebilir. Belirli koşullar altında döküm parçalarda ve kaynak dikişlerinde yüzeye yakın (yüzeyin hemen altındaki) hatalar da görüntüye getirilebilir. Magnetik Partikül Çatlak Kontrol yöntemi döküm, dövme ve kaynak dikişi kontrollerinde yoğun olarak kullanılmaktadır. Otomotiv, çelik konstrüksiyon, güç santralleri, petrokimya ve havacılık sektörlerinde uygulama alanı bulmaktadır. Ferromagnetik malzemelerin magnetik iletkenliği iyidir (permeabiliteleri yüksektir). Magnetizasyon sırasında magnetik alan çizgileri çatlaklarda olduğu gibi daha az iletken bir bölgeye geldiğinde, değişen magnetik iletkenlikten dolayı bir magnetik alan saçılması oluştururlar. Magnetik alandaki bu değişim, magnetik partikül muayenesinde temel oluşturur. Bir çatlak veya malzeme ayrılmasının oluşturduğu bu saçılan alan, magnetizasyon sırasında yüzeye kuru veya süspansiyon içerisinde uygulanan ve serbest olan demir ve demir oksit tozlarını çekmeye ve hatalı bölge üzerinde magnetik bir köprü oluşturmaya başlar. Bu şekilde çatlak veya malzeme ayrılması üzerinde oluşan toz yığını gözle görülerek hatalı bölge olarak tanımlanabilir.



Şekil 7.7. Magnetik partikül çatlak kontrolünün temel prensibi [55].

Avantajları

- Uygulaması kolaydır.
- Niceldir.
- Görüntüleme hariç tutulursa otomasyona uygundur. (Günümüzde teknolojinin gelişmesiyle beraber basit hataların görüntülenmesinde kameralar kullanılmaktadır).

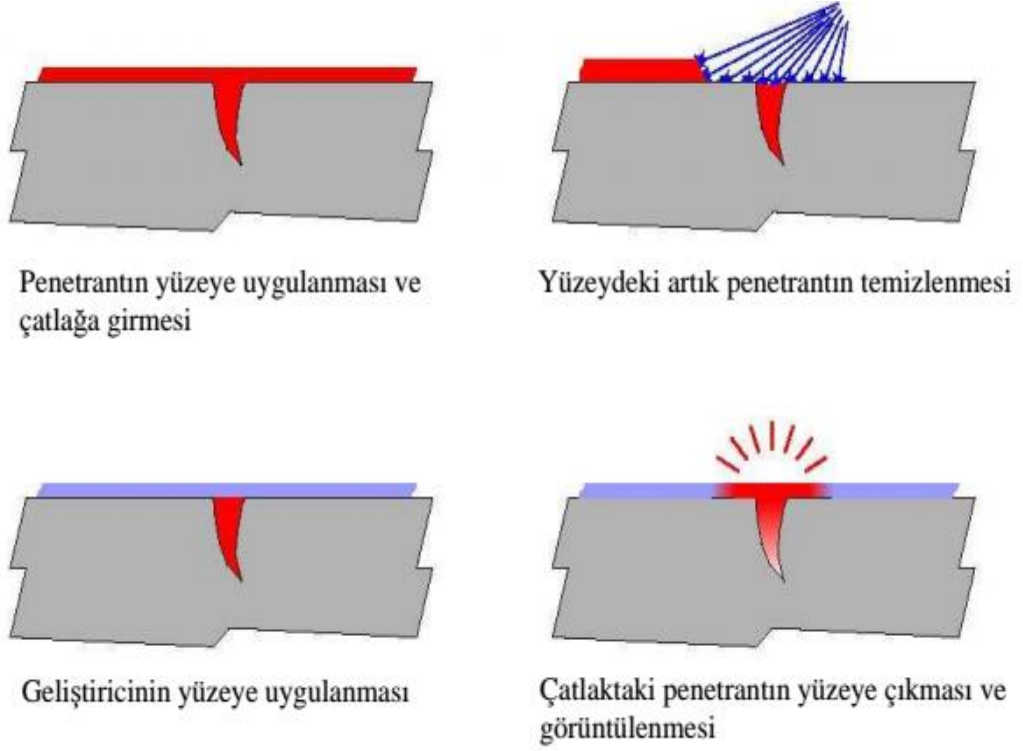
Dezavantajları

- Sadece ferromagnetik malzemelerle sınırlıdır.
- Sadece yüzey ve yüzeye yakın hataların tespiti mümkündür.

7.2.3.Penetrant Yöntemi

Bu yöntem ferromagnetik olmayan malzemelerin yüzeylerindeki hataların tespitinde kullanılır. Oldukça basit ve yaygın bir yöntemdir. Temel olarak kılcallık olayı ile ilgilidir. Tahribatsız muayenede kullanılan penetrantlar düşük gerilim ve yüksek kılcallığa sahiptir.

Penetrant testinde, ilk olarak test edilecek parçanın yüzeyinin (dolayısıyla çatlağın içinin) kimyasal olarak temizlenip yağ, kir vb. yabancı maddelerden arındırılması gerekir. Penetrant test parçasının yüzeyine uygulanır ve penetrantın yüzeye açık süreksizliklere kılcallık olayı ile girmesi için yaklaşık on beş dakika beklenir. Daha sonra süreksizliklerin içerisine girmeyen yüzeydeki penetrant giderilir. Süreksizliklere giren penetrantın dışarı çıkmasını sağlayan geliştirici ince bir tabaka olarak yüzeye uygulanır. Bu olaya ters kılcallık denir ve penetrantın daha geniş bir belirti oluşturmasını sağlar. Penetrantta tabi olan parçanın yüzeyi incelendikten sonra penetrant ve geliştiriciye ait kalıntıları gidermek için son temizlik yapılır.



Şekil 7.8. Penetrant ve geliştiriciye ait kalıntıları gidermek için yapılan temizlikler [55].

Avantajları

- Uygulanması kolaydır.
- Bütün metallere uygulanır ve ferritik olmayan metallerde yüzey çatlakları için en iyi yöntemdir.
- Plastik, seramik, mika, cam gibi malzemelere de uygulanabilir.
- Otomasyona uygundur.
- Niceldir.

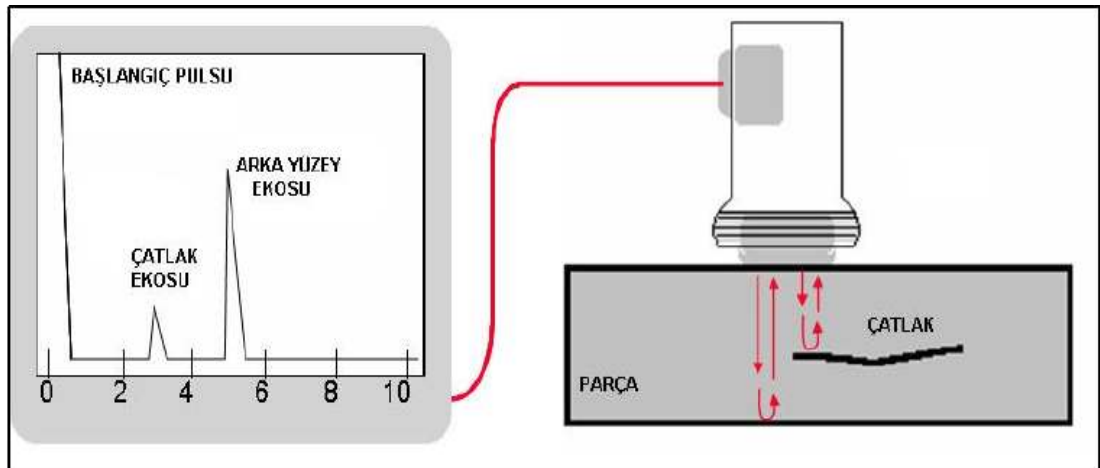
Dezavantajları

- Sadece yüzeye açık hataların tespitinde kullanılır.
- Aşırı pürüzlü ve gözenekli yüzeylerin testinde sağlıklı sonuç alınamaz. Örneğin, sırlanmamış seramikler.
- Hassasiyeti düşüktür.
- Önemli miktarda eriyen malzeme kullanılır.

7.2.4.Ultrasonik Muayene

Ultrasonik dalgaların malzeme içi hataların deteksiyonunda kullanılması ilk defa 1931 yılında bir Alman patenti ile başlar. İlk ticari cihazlar 1940 senelerinde endüstriye yayılmaya başlamıştır. Elektronik gelişimi bu tekniğin pratik bir muayene metodu olarak gelişmesine büyük katkısı olmuştur. Şimdi tahribatsız muayenenin temel metotlarından biri hâline gelmiştir. Hacimsel yöntemlerden biri olan ultrasonik kontrolünün test prensibi, prob tarafından üretilen yüksek frekanstaki ses dalgalarının test malzemesi ortamında yayılması ve bir süreksizliğe çarptıktan sonra tekrar proba yansması esasına dayanır.

Ultrasonik dalgalar ($f = 0,14-10$ MHz) probta kısa darbeler şeklinde ters piezoelektrik etki ile üretilir ve malzemeye girişi sağlanır. Ses dalgaları malzemede bir arka duvar ile karşılaşınca yansır. Yankı o anda pasif durumdaki proba ulaştığında tekrar elektrik sinyaline dönüşür ve ultrasonik muayene cihazına iletilir. Sinyalin şiddetine göre uçuş zamanı ekseninde bir belirti oluşturur. Aşağıdaki Şekil 7.9' da verilen arka duvar yankısı ekranın sağında görülmektedir. Bu yankının başlangıç darbesine ekranda ki sol sinyal mesafe ve kalınlığına karşılık gelmektedir. Ekranda arka duvardan beklenen yankı konumundan önce, yani bu yankının solunda kalan bir yankı görülmesi durumunda malzeme içinde bir süreksizlik olduğu anlaşılır.

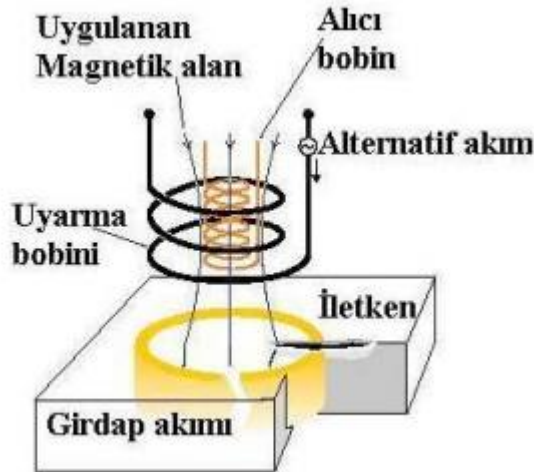


Şekil 7.9. Ultrasonik muayene yönteminin çalışma prensibi [56].

7.2.5.Girdap Akımları (Eddy-Current) Yöntemi

Tahribatsız malzeme muayene yöntemlerinden biri olan Girdap Akımları Yöntemi temel olarak iletkenlerin incelenmesinin esası olan elektromagnetizmaya dayanmaktadır. Girdap akımları, elektromagnetik indüksiyon denilen proses doğrultusunda elde edilir. İçerisinden akım geçen bir iletkenin etrafı bir magnetik alanla çevrilidir. Bu magnetik alanın gücü, kendini oluşturan bu akımla direkt olarak ilişkilidir. Büyüklüğü değişen bu akım, örneğin zamana bağlı olarak değişen bir alternatif akım, palslı bir magnetik alan yaratır. Şayet elektrik iletkenliğine sahip bir malzeme bu magnetik alan içerisinde bırakılırsa, malzemenin içerisinde bir gerilim indüklenir. Malzeme iletken olduğunda bu gerilim malzemenin içerisinde bir akım indükler. Bu akım “Eddy current” (Eddy akımı ya da Girdap Akımı) olarak bilinir. Eddy akımı kendini oluşturan akımın özelliklerini taşır fakat doğrultusu terstir. Malzeme yüzeyindeki eddy akımı doğrudan doğruya kendini oluşturan akımın frekansı ile ilgilidir. Bu açıdan, eddy akımının etkilediği derinlik bu frekansın artmasıyla azalacaktır.

Malzeme yüzeyinden içerideki oluşan eddy akımları, yüzeyde oluşan akımların faz değişimleri ile ilişkilidir. Eddy akımları şayet çatlak, boşluk, yüzey hasarları veya hatalı kaynak birleştirmeleri gibi malzeme kusurları ile karşılaşılırsa, akımın olması gerektiği doğrultuda yayınamazlar. Bunun sonucunda magnetik alanda bir değişiklik oluşur ve buna bağlı olarak test bobini de reaksiyon verir. Eddy current test prosedüründe bu kavram malzeme hatalarının tespitinde kullanılmaktadır.



Şekil 7.10. Girdap Akımları Kullanarak Hata Tespiti [55].

Avantajları

- Küçük çatlaklara ve diğer hatalara karşı duyarlıdır.
- Yüzey ve yüzeye yakın hataları tespit eder.
- Kontrol hemen sonuç verir.
- Ekipmanlar taşınabilir.
- Metot kusur tespitinden çok daha fazlası için kullanılabilir.
- Minimum parça hazırlığı gereklidir.
- Test problemlerinin parçaya değmesi gerekmez.
- Kompleks şekillerde ve sayıda iletken malzeme kontrolünde kullanılabilir.

Dezavantajları

- Sadece iletken malzemeler test edilebilir.
- Prob yüzeye erişebilmelidir.
- Diğer yöntemlerden daha kapsamlı beceri ve eğitim gerektirir.
- Yüzey temizliği ve pürüzsüzlük gereklidir.
- Limitli penetrasyon derinliği vardır.
- Ayar için standart referanslar gereklidir.
- Prob bobin sarımına ve tarama yönüne paralel olan tabakalar halinde dizilmiş hatalar tespit edilemezler.

8. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

8.1. Çalışmanın Amacı

Farklı birleştirmeye sahip iki malzemenin geleneksel ergitme yöntemleri ile birleştirilmesi oldukça güç ve problemli. Bu problemler; yüksek vizkozite, düşük akıcılık kontrolsüz katılaşma, istenmeyen reaksiyonlar ve düşük kaynak kabiliyetidir. Ayrıca metalik malzemelerin ergitme kaynak yöntemi ile birleştirilmesi durumunda, birleşme bölgesinde meydana gelen yapısal değişim işlem şartlarına bağlı olarak malzeme ve yerel geometrik etkilerin oluşturduğu süreksizlerde meydana gelen yüksek gerilmeler, kaynaklı bağlantıların hasar sürecinde, önemli rol oynamaktadır.

Bu çalışmada düşük karbonlu ve düşük alaşımlı AISI 1010 çelik malzeme ile bakır sürtünme kaynak yöntemi ile birleştirilmiştir. Bakır metali yumuşak, sağlam ve çekmeye elverişli bir metaldir. Isıl işlem uygulanmaz, soğuk biçimlendirme sonucu sertleşme özelliğine sahiptir. Bakırın ısı iletkenliği farklı çelik tiplerinde en az on kat daha fazladır. Ekonomiklik, uygun mekanik ve fiziksel özellikleri nedeni ile karbonlu çelik ve bakırın geniş kullanım alanları vardır. Özellikle bakır ve demir esaslı malzeme çiftleri soğutma sistemlerinde istenmeyen ısınmalarından kaçınmak için boru bağlantılarında ve elektrik deşarj makinelerinde elektrod olarak kullanılmaktadır. Sürtünme kaynak yöntemi ile birleştirilen kaynaklı numunelerin çekme deneyi ile birlikte mikro yapı incelemeleri yapılmış ve kaynaklı bağlantıların hasar süreci analiz edilmiştir. Deney sonuçları literatür ışığında değerlendirilerek üretim parametrelerinin bu iki malzeme çiftinin sürtünme kaynağı ile birleştirilebilirliği üzerine olan etkileri belirlenmiştir.

8.2. Kaynak Öncesi İşlemler

8.2.1. Deneylerde Kullanılan Malzeme ve Özellikleri

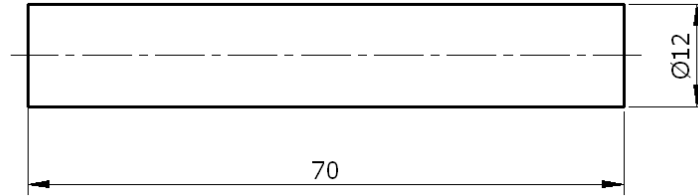
Malzemeler 20x70 mm'lik çubuk halinde ticari olarak AISI 1010 çeliği ile bakır temin edilmiştir. Her iki Çelik- Cu ait kimyasal kompozisyon Tablo 8.1' de verilmiştir.

Tablo 8.1.AISI 1010-Cu malzeme çiftinin kimyasal kompozisyonu

Metaller	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Ti
AISI 1010	Denge	0.0807	0.3	0.347	0.0108	0.0146	0.0181	0.0196	0.0216	0.0033
Bakır	-	-	<0.007	<0.0005	<0.002	<0.0025	-	<0.001	Denge	-

8.2.2 Sürtünme Kaynak Numunelerinin Hazırlanması

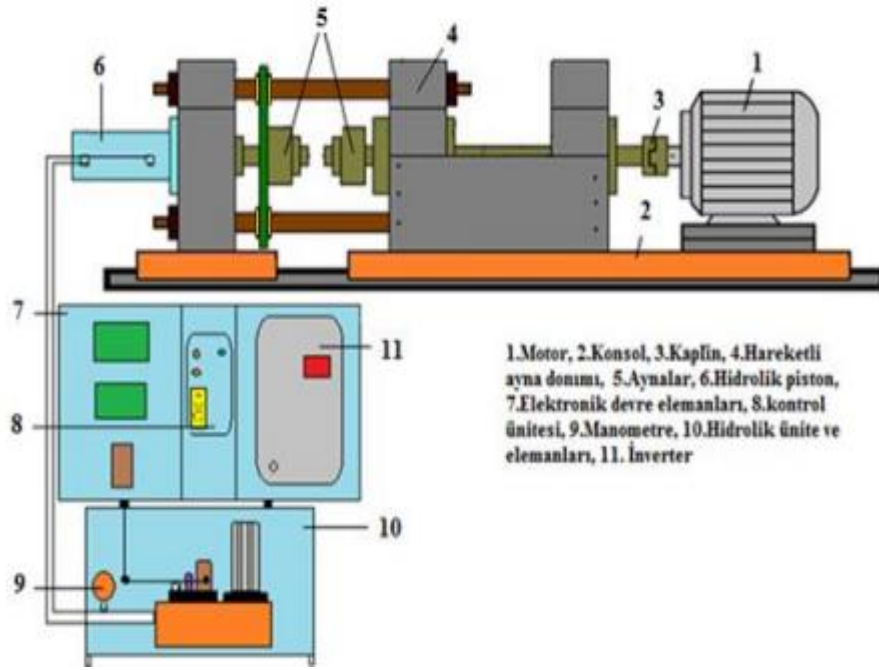
Piyasada temin edilen numune çubuklar 12x70 mm’lik olarak hazırlanmış olup; bu numuneler alın yüzeyleri oksit tabakasından arındırılmak amacıyla 70 mm boyundaki ve 12 mm çapındaki torna tezgâhında işlenmiştir.



Şekil 8.1. Sürtünme kaynak numuneleri [81].

8.2.3. Sürtünme Kaynak Tezgâhı

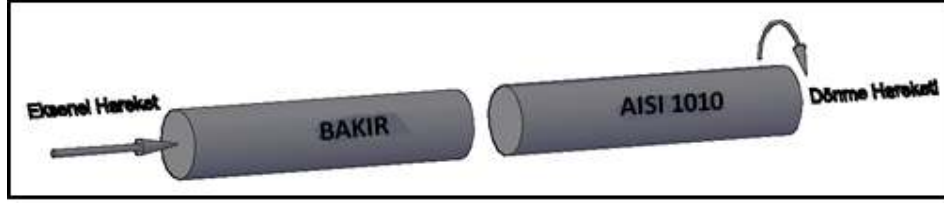
Hazırlanan numuneler sürekli tahrikli sürtünme kaynak tezgâhı kullanılarak kaynaklar yapılmıştır. Tezgâhta devir sayısı, sürtünme basıncı, sürtünme süresi, yığma basıncı ve yığma süresi istenilen düzeyde ayarlanabilmektedir. Deneylerde kullanılan tezgâh fotoğrafı Şekil 8.2’ de görülmektedir.



Şekil 8.2. Sürekli tahrikli sürtünme kaynak tezgâh fotoğrafı [85].

Tezgâh kızıağı üzerine tahrik motoru ile aynı ekseninde bağlanmış olan dönerli ayna; 11.1 Kw’lık Simens marka DC motor ve bu tahrik motoru kontrol eden 11.1 Kw’lık Simens marka midi vektör invertör kullanılmıştır. Dönerli torna aynasını kumanda eden tahrik motoru devir sayısı, 0-5 V arası DC gerilime sahip hız kontrol ünitesi tarafından 0-3500 dev/dak aralığındaki her devir sayısında çalışabilecek şekilde kontrol edilmektedir. Ayrıca, sürtünme kaynağında önemli bir parametre olan frenleme ve frenleme süresi, inverter üzerinden tahrik motoruna DC gerilim uygulanarak kontrol edilebilmektedir. Hareketli ayna, tezgâh üzerine dönerli ayna ile maksimum 0.002 eksen kaçıklığında Ø60mm çapındaki dört adet eksenleme mili üzerine bağlanmış ve 120mm stroklu hidrolik piston mili yardımıyla ileri geri hareketini yapmaktadır. Dönerli ayna ile eksenel hareketli ayna donanımını birbirine bağlayan bu dört adet mil, eksenel hareketli aynanın ileri geri hareketi esnasındaki titreşimleri ve eksen kaymaları önlemektedir

Sürtünme kuvveti etkisi ile parçaları ayna içerisinde kaymasını, burkulma ve eksen kaçıklıklarını önlemek amacıyla aynaların iç kısmında 35 mm mesafede dayamalar yerleştirilmiştir. Deneylerin tamamında AISI 1010 çeliği sabit aynaya bağlanırken bakır malzemesi döner aynaya bağlanmıştır. Parçaların tezgâha bağlanma düzenleri şematik olarak 8.3’ de gösterilmiştir



Şekil 8.3. Malzeme çiftinin birleşme düzenini gösteren resim [82].

8.2.4 Sürtünme Kaynak Parametreleri

AISI 1010 ve bakır malzeme çiftinin sürtünme kaynakları için yaklaşık parametre değerlerinin belirlenmesinde öncelikli olarak literatür çalışması tamamlanmış daha sonra ise yapılan ön çalışmalar ile kaynaklı bağlantılar yapılabilecek en uygun değerler aralığı belirlenmiştir. Bu kapsamda devir sayısı, sürtünme basıncı, sürtünme süresi, yığma basıncı ve yığma süresi kaynak parametreleri değişken olarak seçilmiştir. Bu değişkenler tablo 8.2’de verilen düzende deneysel tasarım yapılmıştır.

Tablo 8.2. Sürtünme kaynağı deneylerinde kullanılan parametreler

Numune No	S1	S2	S3	S4
Devir Sayısı (dev/dk)	2300			
Sürtünme Süresi (sn)	6	10	6	10
Sürtünme Basıncı (MPa)	30	30	40	40
Yığma Basıncı (MPa)	60	60	80	80
Yığma Süresi (sn)	3	5	3	5
Numune No	S5	S6	S7	S8
Devir Sayısı (dev/dk)	2100			
Sürtünme Süresi (sn)	6	10	6	10
Sürtünme Basıncı (MPa)	30	30	40	40
Yığma Basıncı (MPa)	60	60	80	80
Yığma Süresi (sn)	3	5	3	5
Numune No	S9	S10	S11	S12
Devir Sayısı (dev/dk)	1800			
Sürtünme Süresi (sn)	6	10	6	10
Sürtünme Basıncı (MPa)	30	30	40	40
Yığma Basıncı (MPa)	60	60	80	80
Yığma Süresi (sn)	3	5	3	5

8.3. Kaynak Sonrası Yapılan İncelemeler

8.3.1. Metalografik İncelemeler

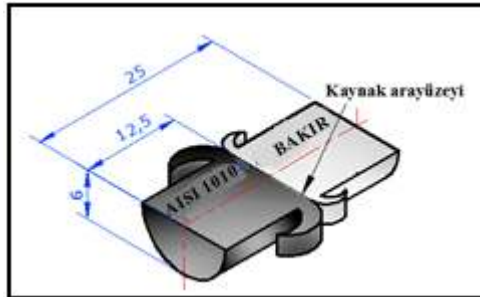
Sürtünme kaynağı ile birleştirilmiş kaynaklı bağlantıların yüzey karakteristiklerini belirlemek ama ile dijital fotoğraf makinesi kullanılarak makroskobik yüzey fotoğrafları Şekil 8.4’de çekilmiştir.



Şekil 8.4. Metalografik İncelemelerde kullanılan numune

Kaynak sonrası, numunelerin birleşme bölgesinde meydana gelen yapısal değişikliklerin incelenmesi amacı ile numuneler birleşme ara yüzeyine dik doğrultuda 25 mm boyunda soğutma sıvısı kullanılarak kesilmiştir. Daha sonra merkezdeki yapıya ulaşabilmek için numuneler orta eksenine kadar, soğutma sıvısı kullanılarak frezede işlenmiş ve yüzeyler düzlem haline getirilmiştir.

Birleşme bölgesinde meydana gelen yapısal değişikliklerin belirlenmesi amacıyla geleneksel temizleme ve parlatma yöntemleri kullanılmıştır. Numuneler sırasıyla sırasıyla 80, 120, 240, 800 ve 1200 mesh’lik zımparalar ile zımparalandıktan sonra 3 μm ’ lik elmas pasta ile parlatılarak dağlamaya hazır hale getirilmiştir. Metalografik incelemeler ve mikro sertlik ölçümleri için hazırlanan numune boyutları Şekil 8.5’ de verilmiştir.



Şekil 8.5. Metalografik İncelemeler için hazırlanan numune boyutları [82].

Dağlama işleminde AISI çeliği için % 2HNO₃ + % 98 alkol karışımı kullanılarak 5 sn süre nital dağlama yapılmıştır. Bakır için ise %20 HNO₂+%10 H₂SO₄+%20 H₂O karışımı ile dağlama işlemi yapılmıştır.

Kaynak parametreleri kaynak bölgesi ve mikro yapı üzerinde etkilerinin araştırılması amacı ile her bir numune için taramalı elektron mikroskobu ile inceleme yapılmıştır. Yapılan çalışmalarda özellikle çatlak başlangıç ve ilerleme özellikleri incelenmiştir. Bu amaçla Fırat Üniversitesi, Merkez Araştırma Laboratuvarında bulunan JEOL marka JSM-2001F model taramalı elektron mikroskobu kullanılmıştır.

Kaynaklı numunelerin mikroyapı analizi çalışmalarında EDS analizleri kaynak bölgesinde oluşan fazların kimyasal içerikleri belirlenmiştir. Bu amaçla Fırat üniversitesi, Merkez Araştırma Laboratuvarında bulunan JEOL marka JSM-2001F analiz test cihazı kullanılmıştır.

Kaynaklı bağlantıların ara bölgesinde oluşan fazların tespiti için X-Ray analizleri, Fırat üniversitesi, Metalurji Malzeme Mühendisliğine ait cihaz ile yapılmıştır.

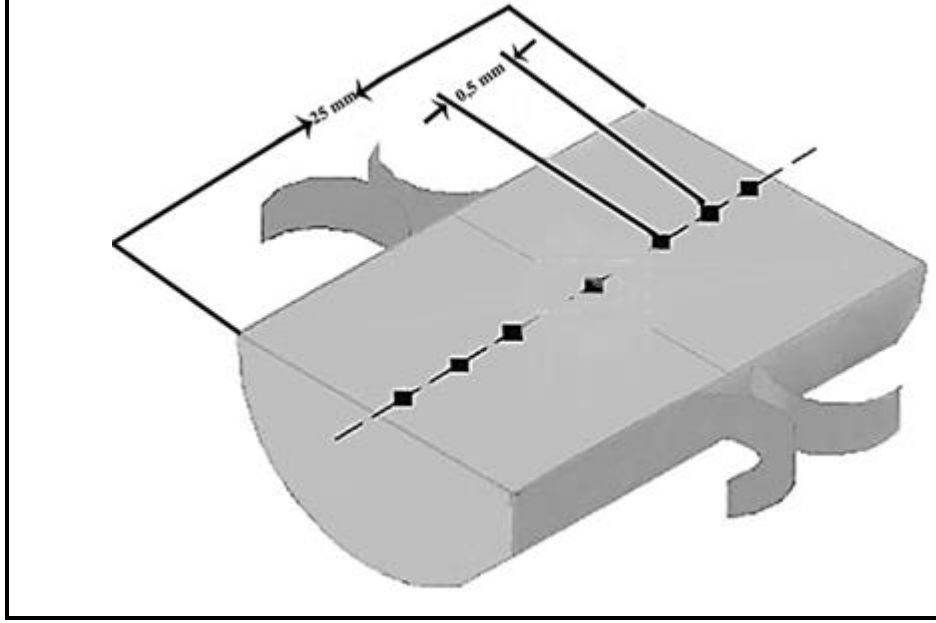
8.3.2. Mikrosertlik Analizi

Sürtünme kaynağı ile birleştirilmiş numunelerin sertlik değişimlerini incelemek amacı ile mikrosertlik ölçümleri yapılmıştır. Mikrosertlik ölçümleri yapılmadan önce numuneler metalografik olarak hazırlanıp dağlanmıştır. Dağlanan numunelerin mikrosertlik ölçümleri Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalürji ve Malzeme Mühendisliği bölümü laboratuvarlarında bulunan EMCOTEST DuraScan marka mikrosertlik cihazı ile 50 gr yük uygulanarak, numunelerin tam orta ekseninden ve kaynak kesitine dik olacak şekilde bir hat üzerinden 0,5 mm aralıklarla ve 10 sn'lik yükleme hızında gerçekleştirilmiştir. Mikrosertlik ölçümünün gerçekleştirildiği cihaz Şekil 8.6.'da gösterilmiştir.



Şekil 8.6. Mikrosertlik cihazı [81].

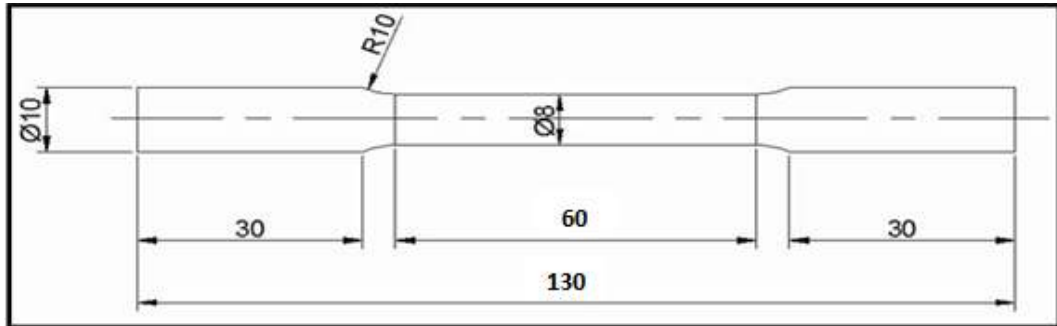
Ölçümlerde 136° tabanı kare olan piramit uç kullanılmıştır. Mikrosertlik ölçümlerinin yapıldığı bölgeler Şekil 8.7’de gösterilmiştir



Şekil 8.7. Mikrosertlik ölçümü yapılan noktaların şematik gösterimi [81].

8.3.3. Çekme Deneyi

Sürtünme kaynağı yapılmış numunelere çekme testi uygulamak amacı ile kaynak yapılmış numuneler universal torna tezgâhında soğutma sıvısı kullanılarak hassas bir şekilde işlenmiş ve TS 138’e uygun ölçülere getirilmiştir. Numuneler 10 mm çapında ve 130mm boyunda silindirik olarak hazırlanmıştır. Deney numunelerine ait ölçüler Şekil 8.8’de gösterilmektedir.



Şekil 8.8. Çekme deney numunelerine ait ölçüler [TSE 138]. [81].

Deney numuneleri yüzeylerindeki fazla kaynak metali giderilecek şekilde talaş kaldırma işlemine tabi tutulmuştur. Numune hazırlamanın son aşamasında, yüzeyde çekme sertleşmesi veya aşırı malzeme ısınmasından kaçınmak için gerekli tedbirler alınarak, talaş kaldırma ve taşlama işlemi yapılmıştır. Yüzeyler, paralel uzunluk “Le” boyunca, çizik ve çentiklerden tamamen temizlenerek pürüzsüz bir test yüzeyi elde edilmiştir. Şekil 8.9’da çekme numunesine ait fotoğraf görülmektedir.



Şekil 8.9. Çekme deney numunesi

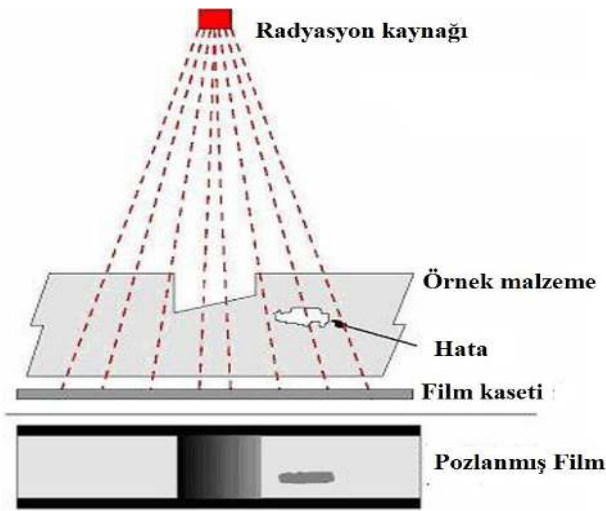
Sürtünme kaynağı yapılmış numunelerin çekme deneyleri Cumhuriyet Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü laboratuvarlarında bulunan *SHIMADZU AG-X 50 KN* marka çekme cihazı ile 50.000 N yük altında ve 1mm/dk çekme hızında standartlara uygun olarak yapılmıştır. Deney sonucunda kırılma yerleri not alınmış, değerlendirme esnasında kullanılmak üzere kırık numunelerin ve kırık yüzeylerin fotoğrafları çekilmiştir. Tüm deneyler oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Deneylerin yapıldığı çekme cihazı Şekil 8.10’da gösterilmektedir.



Şekil 8.10. Çekme deney cihaz [81].

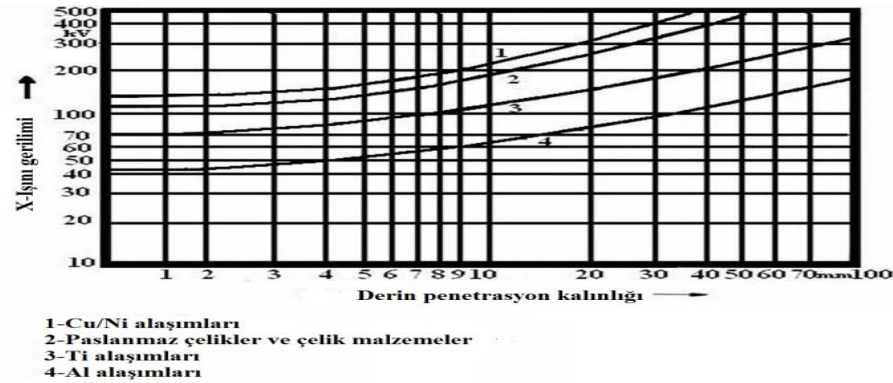
8.3.4.Radyografi Testi

Sürtünme kaynak işlemi yapılan numunelerin birleşme bölgelerinin detaylı olarak incelenmesi amacı ile numuneler radyografik teste tabi tutulmuştur. Kaynak dikişinin kontrolünde, tahribatsız yöntemler arasından kalınlığı 4 mm olan radyografik test ve radyasyon kaynağı olarak da x-ışını tüpü kullanılmıştır. Prensip olarak Şekil 8.11.'de görülebilir.



Şekil.8.11. Radyografik testin çalışma prensibi [56].

X-ışını gerilimi malzemenin kalınlığına göre Şekil.8.12.'ye bakılarak 130 kV seçilmiştir.



Şekil.8.12.X-ray cihazında 500 kV bir gerilimle belirlenen derin penetrasyon kalınlığı ve malzeme grafiği [84].

X-Işını cihazı olarak, 300 KV kapasiteye sahip, Rigaku Radioflex-300EGS3 tipi cihaz kullanılmıştır. (Şekil.8.13).



Şekil 8.13.Rigaku marka Radioflex -300EGS3 tipi cihaz (a) ve control paneli (b) [84].

İncelemelerde C4 tipi 100x240 mm Kodak film kullanılmıştır. 0.125 mm kalınlığında ön ve arka kurşun ekranlar kullanılmıştır. 4 mm kalınlığındaki malzemeye uygulanan kaynak dikişi 48 saniye boyunca, diyagramı oluşturmak için ışın gönderilerek filmilenmiştir. X-ışını cihazı ve film arasındaki mesafe 600 mm'dir. Filmin yerleşimi Şekil 8.14'de gösterilmiştir.



Şekil 8.14.Film, penetremeter, şablonlu kalıp, ışın kümesi [84].

9. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ

9.1. Kaynaklı Numunelerin Makroskobik Değerlendirmesi

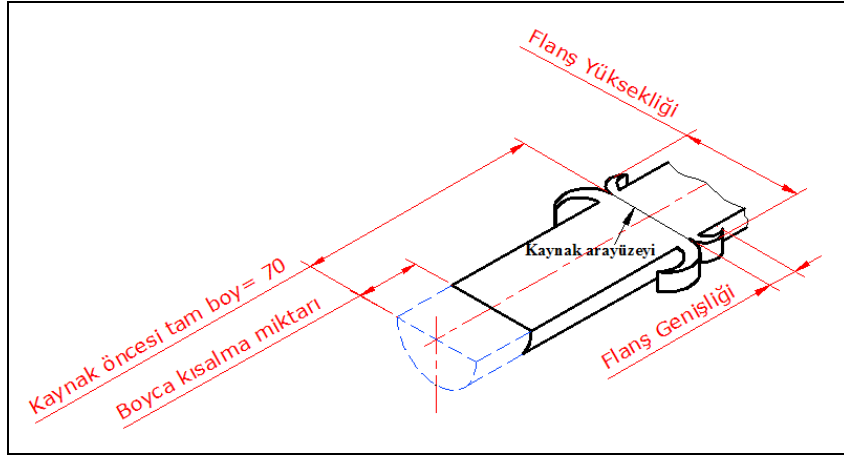
Sürtünme kaynak yöntemi ile birleştirilen parçalarda kaynak ara yüzeyinde dışarı taşan malzeme bir flanş oluşturmakta ve buna bağlı malzeme boyca kısalmaktadır. Farklı işlem parametreleri kullanılarak sürekli tahrikli sürtünme kaynak yöntemi ile birleştirilmiş kaynaklı bağlantıların, yüzey ve dışarı taşan metalin profilindeki değişim Şekil 9.1’ de şematik resim esas alınarak değerlendirilmiştir. Bu kaynaklı bağlantıların birleşme bölgesinde alınan makro fotoğraflar değerlendirildiğinde temelde benzerlik göstermesine rağmen dışarı taşan malzemenin profil ve miktarında önemli farklılıklar olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Kaynaklı bağlantılarda ısıdan etkilenen bölgeler bağlantı kalitesi bakımından önemlidir. Kaynaklı bağlantılara ait makro fotoğraflar incelendiğinde ısıdan etkilenen bölge AISI 1010 tarafında net olarak gözlenirken düşük ısı kapasitesine sahip bakır tarafından bu bölgenin varlığı net olarak görülmemektedir (Şekil 9.1).



Şekil 9.1. Kaynak bölgesinde oluşan flanş ve IEB’ nin gösterimi

Kaynaklı numunelerin her birinde oluşan boyca kısaltmalar ve flanş miktarları Şekil 9.2’de verilen düzende ölçülmüştür.



Şekil 9.2. Boyca kılma miktarı ve flanş geometrisine ait özellikler [82].

Sürtünme kaynağı parametrelerine bağlı olarak ortalama boyca kılma miktarı AISI 1010 ve bakırın ayrı ayrı gösterecek biçimde Tablo 9.1’de verilmiştir.

Tablo 9.1. Kaynak parametrelerine bağlı olarak boyca kılma miktarları

Numune no	KULLANILAN PARAMETRELER					Boyca Kılma (mm)
	Devir (dev/dk)	Sürtünme Süresi(sn)	Sürtünme Basıncı(MPa)	Yığılma Basıncı(MPa)	Yığılma Süresi(sn)	Ortalama boyca kılma
S3	2300	6	30	60	3	7,64
S6		10	30	60	5	7,30
S9		6	40	80	3	7,89
S12		10	40	80	5	7,54
S2	2100	6	30	60	3	9,74
S5		10	30	60	5	6,94
S8		6	40	80	3	9,85
S11		10	40	80	5	7,00
S1	1800	6	30	60	3	8,45
S4		10	30	60	5	8,15
S7		6	40	80	3	8,66
S10		10	40	80	5	8,37

9.1.1. 1800 dev/dk ile Birleştirilen Kaynaklı Bağlantıların Makroskobik İncelemeleri

Sürtünme kaynak yöntemi kullanılarak birleştirilen, kaynaklı bağlantıların üzerinden alınan yüzey ve ara yüzey fotoğrafları, değişen sürtünme süresi esas alınarak değerlendirilmiştir.

1800 dev/dk devir sayısı, 30 ve 40 MPa sürtünme basıncı, iki farklı sürtünme süresi, (10 ve 6 sn) kullanılarak birleştirilen S1, S4, S7 ve S10 no'lu kaynaklı bağlantılara ait kaynak sonrası yüzey ve ara yüzey makro fotoğrafları Şekil 9.3'de verilmiştir. Bu kaynaklı bağlantılara ait makro yüzey fotoğrafları incelendiğinde artan sürtünme süresine bağlı olarak dışarı taşan malzeme miktarında artış gözlenmiştir. Ayrıca dışarı taşan malzemenin profili belirtilen şekle paralel görünüm arz etmektedir.



Şekil 9.3. S1, S4, S7 ve S10 no'lu numunelere ait yüzey ve ara yüzey fotoğrafları

Bu kaynaklı bağlantılara ait ara yüzey makro fotoğraflar incelendiğinde, dört kaynak bağlantısının numune ara yüzeylerinde bağlantısız bölgelerin olmadığı birleşmeler görülmektedir. Görüldüğü gibi kaynaklı numunelerde bakır tarafında ısı iletkenliğinin yüksek olması hızlı bir sıcaklık artışı ile flanş oluşumuna sebep olurken çelik tarafında yeterli sıcaklık sağlanamadığından dolayı flanş oluşmamıştır. Uzun sürtünme sürelerinde, bakırın iletkenliğinin yüksek olması sebebiyle çabuk ısınmış ve malzemede

deformasyonlar gözlenmiş, birleşmede çelik malzeme bakır malzeme içine saplandığı tespit edilmiştir.

Tablo 9.2. S1, S4, S7 ve S10 no’lu numunelerdeki boyca kısalma miktarı

Numune no	KULLANILAN PARAMETRELER					Boyca Kısalma (mm)
	Devir (dev/dk)	Srt.Süre.(sn)	Srt.Bsc.(MPa)	Yığma Bsc. (MPa)	Yığma Süre.(sn)	boyca Ortalama kısalma
S1	1800	6	30	60	3	8,45
S4		10	40	80	5	8,15
S7		6	40	80	3	8,66
S10		10	30	60	5	8,37

9.1.2. 2100 dev/dk ile Birleştirilen Kaynaklı Bağlantıların Makroskobik İncelemeleri

2100 dev/dk devir sayısı 30 ve 40 MPa sürtünme basıncı ve 6 ve 10 sn sürtünme süreleri kullanılarak birleştirilen S2, S5, S8 ve S11 no'lu numuneler üzerinde alınan makro yüzey ve ara yüzey fotoğrafları Şekil 9.4'de verilmiştir.



Şekil 9.4. S2, S5, S8 ve S11 no'lu numunelere ait yüzey ve ara yüzey fotoğrafları

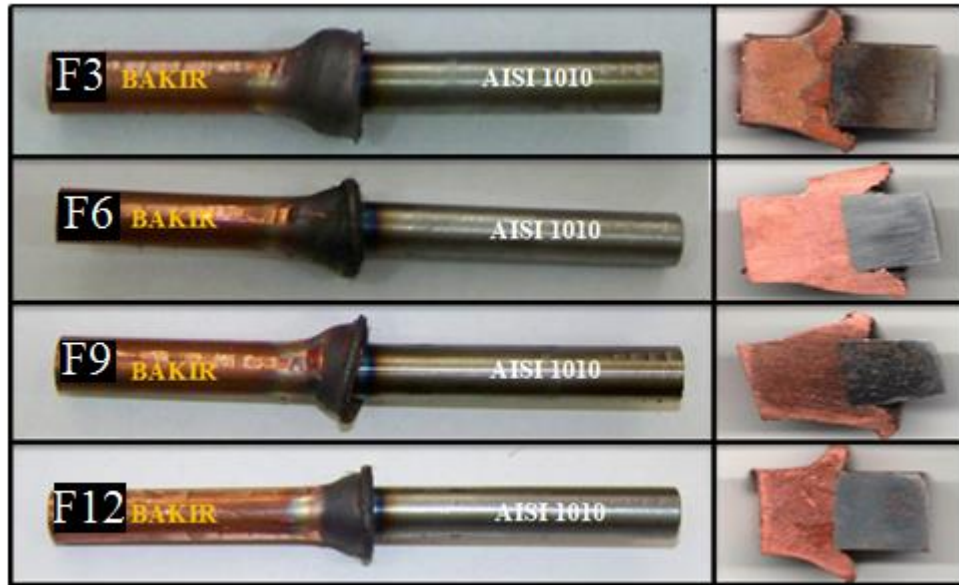
Bu kaynaklı bağlantılara ait makro yüzey fotoğrafları incelendiğinde dört kaynağında birleştirmelerinin incelendiğinde belirlenen kaynak parametreleri ile Cu ve AISI 1010 çeliği sürtünme kaynak yöntemi ile başarıyla kaynaklanmıştır. Fakat kaynaklı numunelerde bakır tarafında ısı iletkenliğinin iyi olması hızlı bir sıcaklık artışı ile flanş oluşmuş, bundan dolayı çeliğe ise yeterli sıcaklık sağlanamadığından bakıra göre flanş oluşumu daha az olmuştur. Sürtünme sonucunda bakır daha yumuşak olduğunda çeliğin içine saplandığı görülmektedir. Artan devir sayısına bağlı olarak ortalama boyca kısalma miktarı da artmıştır. Bağlantılar sorunsuz olarak gerçekleşmiştir. Bu dört kaynaklı bağlantı üzerinde yapılan boyca kısalma ölçümleri Tablo 9.3'de gösterilmektedir.

Tablo 9.3. S2, S5, S8 ve S11 no'lu numunelerdeki boyca kısalma miktarı

Numune no	KULLANILAN PARAMETRELER					Boyca Kısalma (mm)
	Devir (dev/dk)	Srt.Süre.(sn)	Srt.Bsc.(MPa)	Bsc. Yıgma (MPa)	Yıgma Süre.(sn)	Ortalama boyca kısalma
S2	2100	10	30	60	5	9,74
S5		6			3	6,94
S8		10	40	80	5	9,85
S11		6			3	7,00

9.1.3. 2300 dev/dk ile Birleştirilen Kaynaklı Bağlantıların Makroskobik İncelemeleri

2300 dev/dk devir sayısı 30 ve 40 MPa sürtünme basıncı ve 6 ve 10 sn sürtünme süreleri kullanılarak birleştirilen S3, S6, S9 ve S12 no'lu numuneler üzerinde alınan makro yüzey ve ara yüzey fotoğraflarıiii Şekil 9.5'de verilmiştir.



Şekil 9.5. S3, S6, S9 ve S12 no'lu numunelere ait yüzey ve ara yüzey fotoğrafları

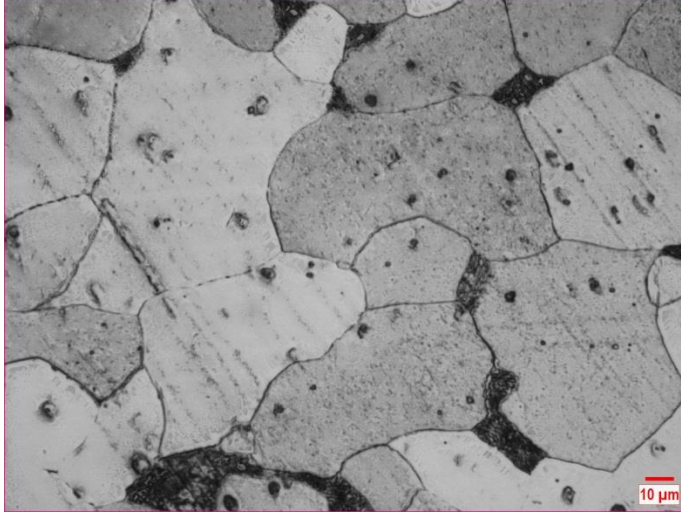
Bu kaynaklı bağlantılara ait makro yüzey fotoğrafları incelendiğinde de görüldüğü gibi malzeme şekli ve düzgünlüğü farklılık göstermektedir. Bunun sebebi ise; sürtünme süresidir. Sürtünme süresi kısa tutulduğunda çelik için deformasyon sıcaklığına ulaşmadığı, bakır tarafında ise ısı iletkenliğinin yüksek olmasına bağlı olarak hızlı bir sıcaklık artışı ve flanş oluşumu meydana geldiği görülmektedir. Özellikle sürtünme süresi kısa seçilmiştir. Uzun sürtünme sürelerinde, bakırın iletkenliğinin yüksek olması sebebiyle çabuk ısınmış ve malzemede deformasyonlar gözlenmiş, yine iki malzeme arasındaki kaynak bağlantısında bakırın çeliğin içine gömüldüğü gözlenmiştir. Ayrıca en fazla boyca kısalma miktarı 2300 dev/dk’ da yapılan birleştirmede tespit edilmiştir. Bu dört kaynaklı bağlantı üzerinde yapılan boyca kısalma ölçümleri Tablo 9.4’de gösterilmektedir.

Tablo 9.4. S3, S6, S9 ve S12 no’lu numunelerdeki boyca kısalma miktarı

Numune no	KULLANILAN PARAMETRELER					Boyca Kısalma (mm)
	Devir (dev/dk)	Srt.Süre.(sn)	Srt.Bsc.(MPa)	Yigma Bsc. (MPa)	Yigma Süre.(sn)	Ortalama boyca kısalma
S3	2300	6	40	80	3	7,64
S6		10	30	60	5	7,30
sssS9		6	30	60	3	7,89
S12		10	40	80	5	7,54

9.2.Kaynaklı Bağlantıların Mikro Yapı Değerlendirmesi

AISI 1010çeliğin düşük karbonlu ve düşük alaşımlı olup, yapısında yaklaşık aynı oranda perlit ve ferrit içeren eş yönlenmiş tanelerden meydana gelmiştir. Bu çeliğe ait mikroyapı Optik fotoğrafı Şekil 8.6’da verilmiştir.



Şekil 9.6. AISI 1010 çelik malzeme mikroyapı optik fotoğrafı

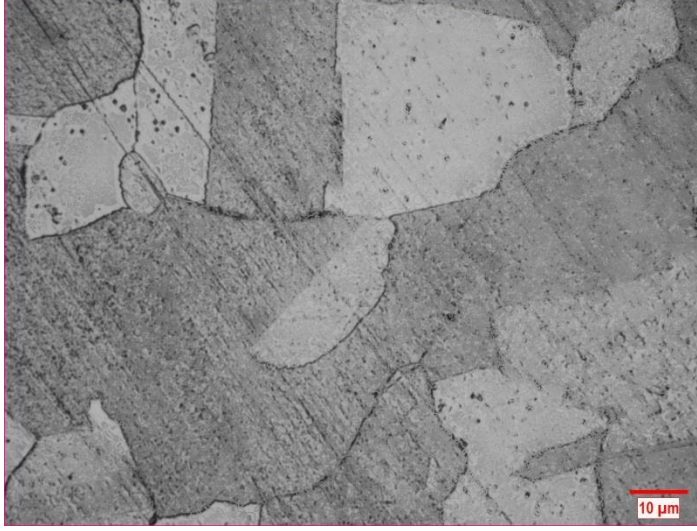
AISI 1010 çeliği kaynak kabiliyeti ile sertleşme eğiliminin bilinmesi, kaynak sonrası arzu edilmeyen yapıların ortaya çıkması ve oluşabilecek problemlere önlem alınması açısından önemlidir. Bu konuda uygulanabilirlik açısından karbon eşdeğerliğinin dikkate alınması, çeliğinin kimyasal bileşiminin bilinmesi koşulu ile en etkili yoldur. Bu nedenle deneylerde kullanılan esas metalin (AISI 1010) karbon eşdeğerliği uluslararası Kaynak Enstitüsünün IX no'lu Kaynak Komisyonunun belirlediği formüle göre aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$Ceş = C + (Mn/6) + (Cr + Mo + V)/5 + (Ni + Cu)/15$$

Formülde AISI 1010 çelik malzeme içinde değerler konursa;

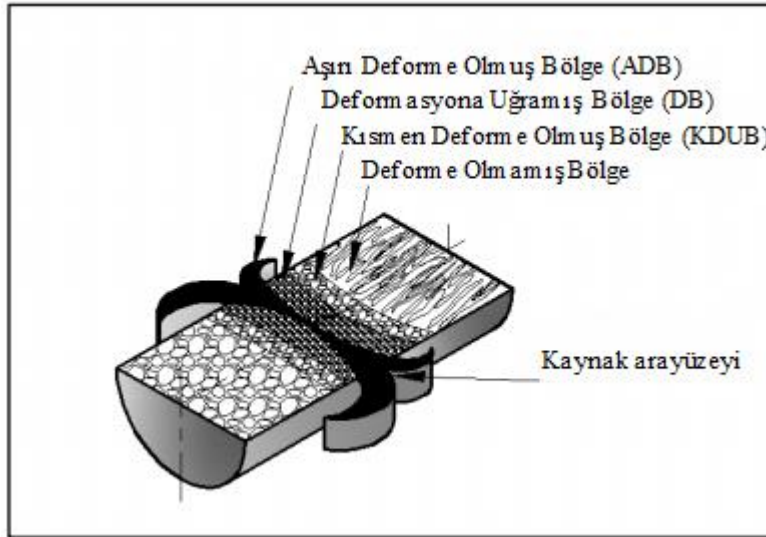
$$Ceş(1010) = 0.0807 + 0.347/6 + (0.0181 + 0.019)/5 + (0.0196 + 0.0216)/15 \\ = 0.215 \text{ bulunur.}$$

Bu değer ($Ceş < 45$) kaynaklı bağlantının AISI 1010 çelik tarafında sertleştirme ve çatlama eğilimi aynı zamanda martenzit oluşma olasılığının düşük olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte bir katı hal kaynak yöntemi olan sürtünme kaynak yönteminde, bir ergime olmaması ve çok kısa sürelerde gerçekleştirilmesi istenilmeyen durumların ortadan kaldırılmasını sağlamaktadır.



Şekil 9.7. Bakır malzemenin mikroyapı optik fotoğrafı

Mikro yapı incelendiğinde numunelerin bakır kısmında tane yapısındaki küçülmeler ve yönelmeler gözlemlenmiştir. Bakır malzemede ısı iletkenliğinin ve şekil verilebilirliğinin yüksek olması nedeniyle flanş oluşumu gözlenmiştir.



Şekil 9.8. Mikroyapı değişikliğinin meydana geldiği bölgeler [82].

Farklı işlem parametreleri kullanarak, sürtünme kaynak tekniği ile birleştirilen AISI 1010-Cu'nun birleşme arayüzeyi Optik fotoğrafları çekilerek incelenmiştir. Bu çalışmada, farklı birleşime sahip iki metal çifti (AISI 1010 - Cu) kullanılmıştır. Bu nedenle birleşme

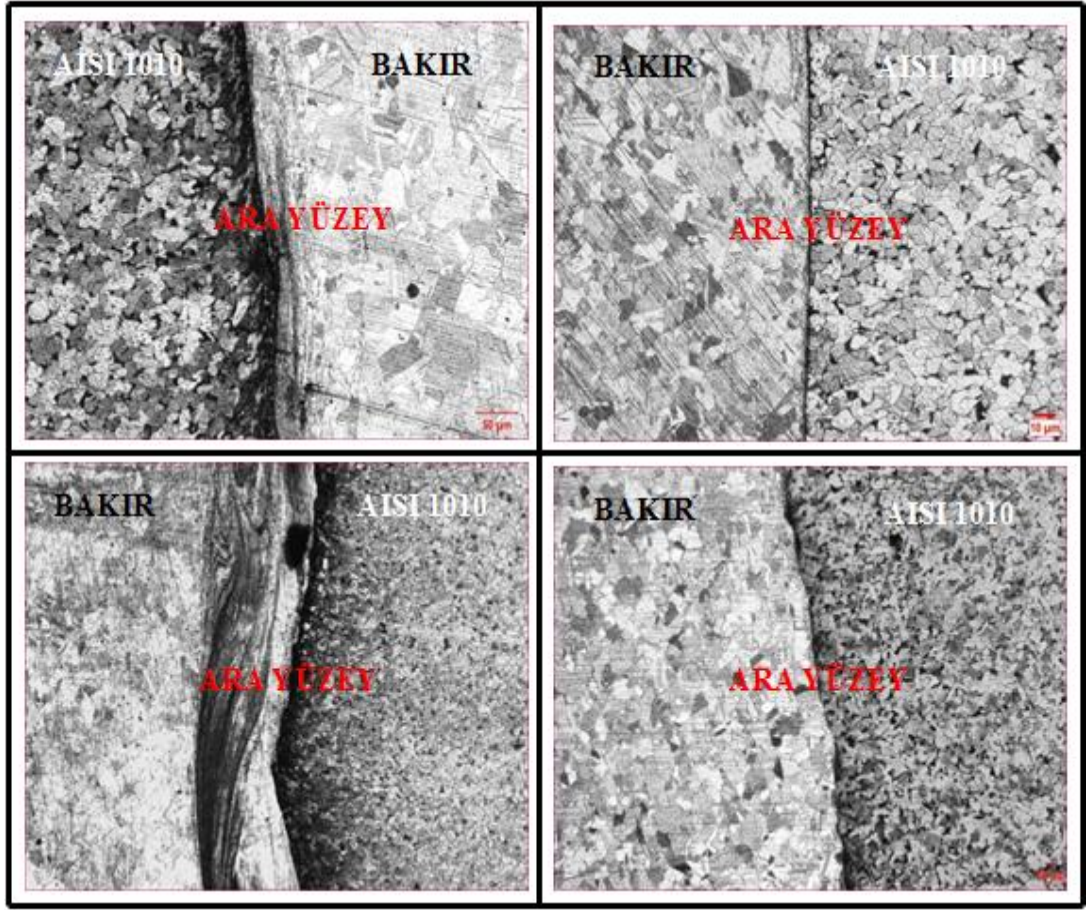
arayüzeyinin her iki tarafında da farklı yapılar ortaya çıkmaktadır. Dolayısıyla her iki metal çifti içindeki yapılar ayrı ayrı incelenmiştir

9.2.1. 1800 dev/dk ile Birleştirilen Numunelerin Optik, EDS ve X-Ray Analizleri

1800 dev/dk, 30 ve 40 MPa sürtünme basıncı, 60 ve 80 yığma basıncı 6,10 sn sürtünme süreleri kullanılarak birleştirilen S1,S4,S7 ve S10 no'lu kaynaklı bağlantılara ait kaynak sonrası arayüzey Optik fotoğrafları Şekil 9.9'da verilmiştir. Kaynak sonrası birleşme bölgesinin aşırı deformasyona uğramış bölge (ADB), deformasyona uğramış bölge (DB), kısmen deformasyona uğramış bölge (KDUB), ve esas metal (EM) olarak, literatürde belirtildiği gibi dört bölgeden meydana gelmektedir.

Bu kaynaklı bağlantıların arayüzeylerinden alınan Optik fotoğrafları incelendiğinde, birleşme yüzeyinde boşluk, çatlak ve bağlantısız bölgenin olmadığı görülmektedir.

Farklı sürtünme süreleri kullanılarak yapılan bu kaynaklı bağlantıların birleşme bölgesinde meydana gelen yapısal değişim ve sürtünme süresinin bu yapısal değişim üzerinde etkisi açıkça görülmektedir. S1,S4,S7 ve S10 no'lu numunelerin Optik fotoğraflarında görülen, birleşme arayüzeyinin her iki tarafında sıcaklık ve eksenel basıncını etkisi ile aşırı deformasyona uğramış bölgenin genişliği ve şeklin sürtünme süresine göre değiştiği görülmüştür. Fotoğraflardan da açıkça görüldüğü gibi; arayüzey sürtünmesi ile her iki malzeme karışımından meydana gelen ve birleşme hattına dik doğrultuda yönelen bu bölgedeki düzensizlik, kaynaklı bağlantıların mekanik davranışları üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu (N.Özdemir) belirtilmiştir. Kaliteli bağlantı elde etmek için başlangıç ara yüzey sürtünmesi ile meydana gelen karışım bandının dışarı atılması için yeterli eksenel basınç ve sürtünme fazının kullanılması gerekir.



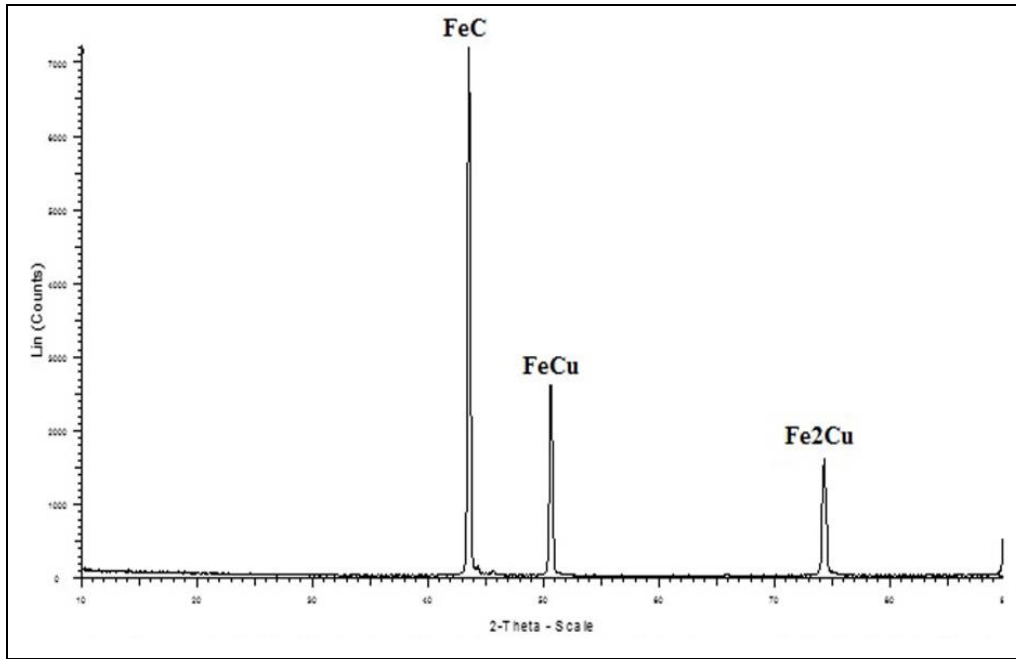
Şekil 9.9. S1,S4,S7 ve S10 no’lu numunelerin arayüzey Optik görüntüleri

Düşük eksenel basınç kullanılarak birleştirilen numuneler; kaynaklı bağlantı arayüzeyinde birleşme hattında dik yönelmiş tanelerden oluşan ADB’ ye bitişik olarak görülmektedir. DB’ de ise meydana gelen yapısal değişim artan sürtünme süresine bağlı olarak farklılık göstermektedir. Artan sürtünme süresine bağlı olarak ısının tesiri altındaki bölgenin genişlediği, bunun sonucunda eksenel basıncın dövme etkisinin arttığı açıkça görülmektedir. Bu bölgede malzemenin dışarı taşma rejimi ve deformasyona uğramış bölgenin genişlediğindeki artış aktıkça gözlemlenmektedir. Birleşme arayüzeyinde ana malzemeye doğru gidildikçe sıcaklık ve dövmenin etkisi ile her iki malzemede tanelerin küçüldüğü ve numune eksenine dik doğrultuda yönlendirilmenin arttığı gözlenmektedir.

Her dört numunede; AISI 1010 ve Cu malzeme çiftlerinde kaynaklı bağlantıların her iki tarafında meydana gelen deformasyon çizgileri net olarak görülmektedir. Kaynak arayüzeyinin her iki tarafında termo-mekanik olarak etkileyen bölgede tane küçülmesi ve tanelerin numune eksenine dik doğrultuda uzayarak yönlendiği Optik fotoğraflarından da

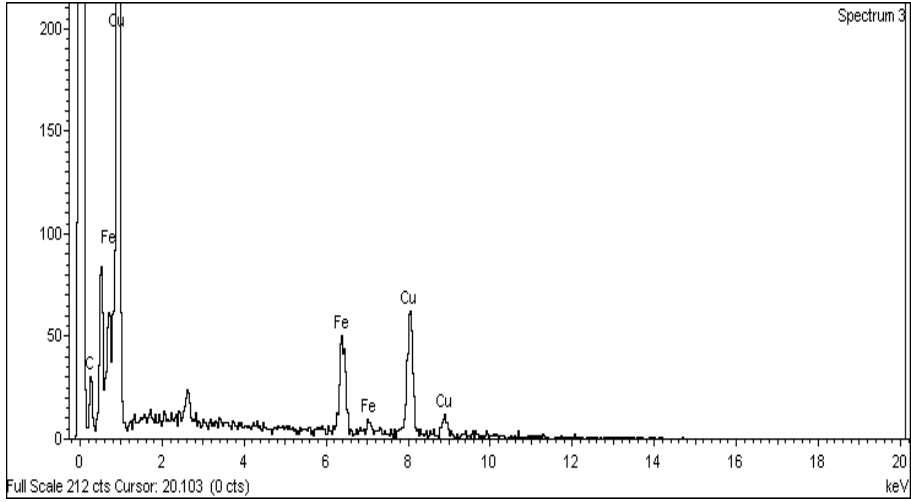
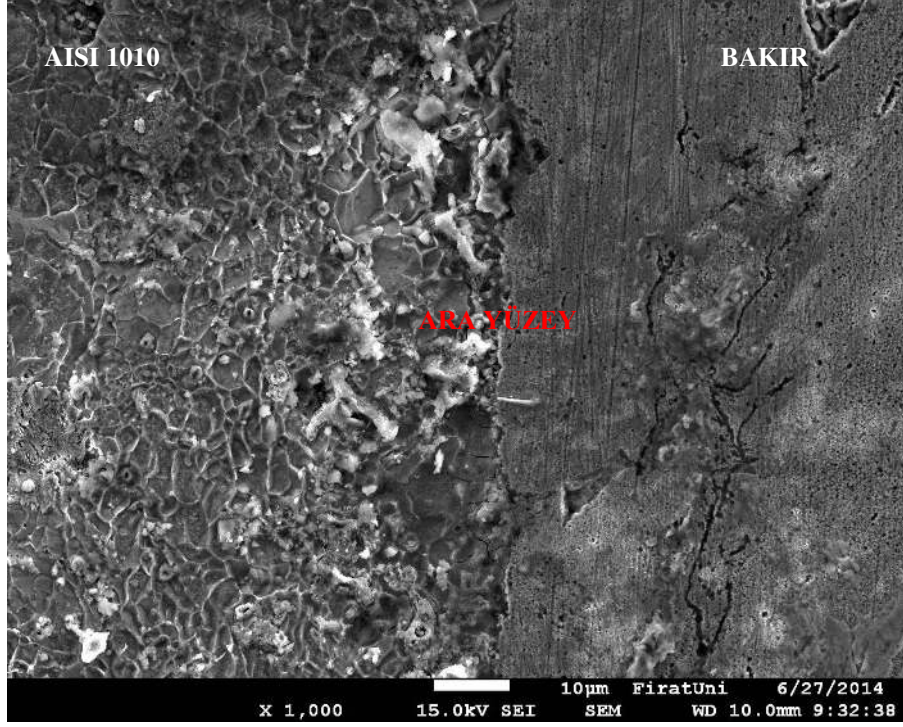
açıkça görülmektedir. Her dört numunenin birleşme bölgesinde çatlak, boşluk ve bağlantısız bölgenin olmadığı görülmektedir.

Kaynak arayüzeyindeki birleşme bölgesinde meydana gelen ADB' nin sürtünme süresine paralel olarak değiştiği, artan sürtünme süresi ile birlikte arttığı, sürenin azalması ile azaldığı görülmektedir. Şekil 9.10'da S1 no' lu numunenin birleşme ara bölgesinde oluşan fazların ve bileşikleri tespit etmek amacı ile yapılan X-Ray analiz grafiği verilmiştir. Grafikte görüldüğü üzere AISI 1010-Cu malzeme çiftinin sürtünme kaynağı ile yapılan birleştirmelerin; FeC, FeCu ve Fe₂Cu ara fazlarının meydana geldiği görülmektedir.



Şekil 9.10. S1 no' lu numunenin X-Ray analiz grafiği

EDS noktası	Alaşım elementleri (%)		
	Fe	Cu	C
1(Cu bölgesi)	7.32	68.37	24.31
2 (1010 bölgesi)	78.74	-	21.26
3(Arayüzey)	16.36	63.90	19.74



Şekil 9.11. EDS, sürtünme kaynaklı S8 numunenin kaynak ara yüzeyi boyunca analiz

AISI 1010 düşük karbonlu çelik ve Cu farklı süreler ve parametreler kullanılarak sürtünme kaynağı tekniği ile başarılı bir şekilde birleştirilmiştir. Yukarıda görüldüğü gibi (EDS) bölgeleri ve Alaşım elementleri %'leri gösterilmektedir. Kapsamlı bir mikro analiz araştırması yapılmış, ayrıca farklı bölgeler ve ara yüzey bölgesi incelenmiş olup; ısı ile etkilenen alan büyük ölçüde sürtünme süresi, devir sayısı gibi parametrelere göre değiştiği gözlenmiştir. En fazla deformasyon Cu malzeme çifti tarafında gözlenmiştir. Burada 1800 dev/dk AISI 1010 düşük karbonlu çelik ile Cu birleştirmek için yeterli olduğu, ancak 2300 dev/dk ise bu birleşme için daha iyi birleştirme olduğu tespit edilmiştir. Fakat 1800 dev/dk'nın altında, yapılan birleştirmelerin yeterli olmadığı görülmüştür.

291,41 MPa maksimum gerilme mukavemeti 30 MPa sürtünme basıncı 60 MPa yığılma basıncı 6 sn sürtünme süresi ve 3 sn yığılma süresi ile elde edilmiştir.

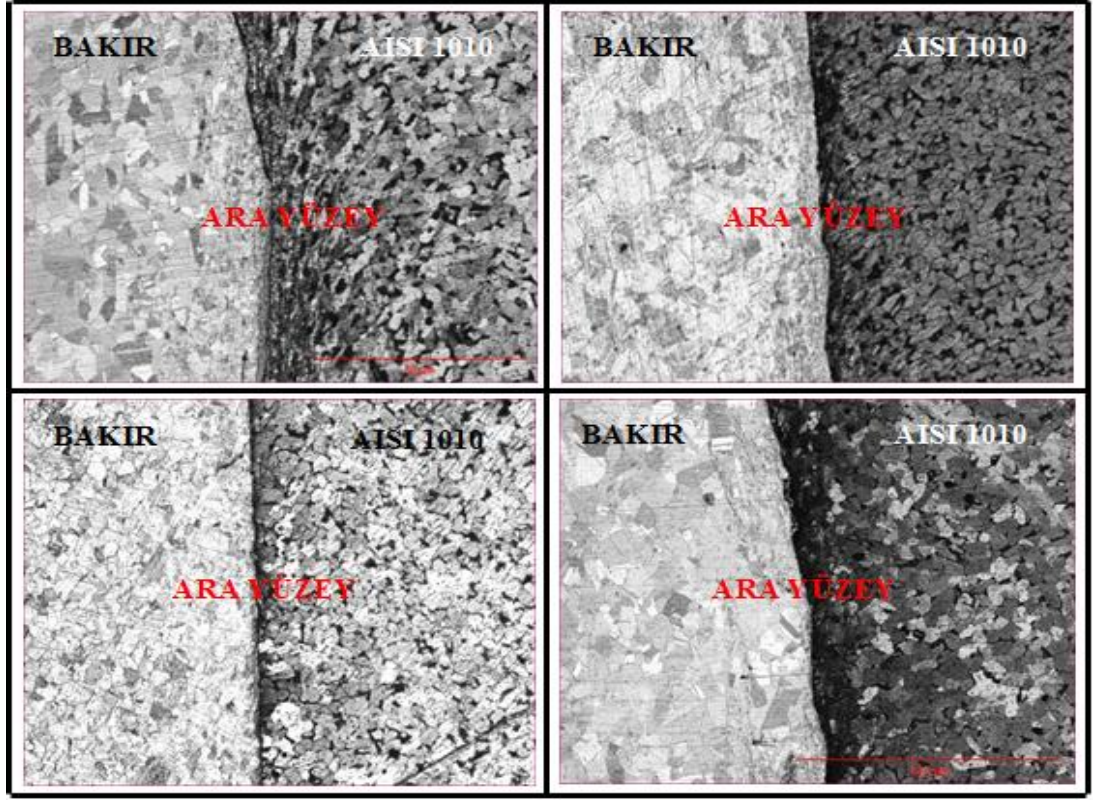
9.2.2. 2100 dev/dk ile Birleştirilen Numunelerin Optik, EDS ve X-Ray Analizleri

2100 dev/dk, 30 ve 40 MPa sürtünme basıncı, 60 ve 80 yığılma basıncı 6,10 sn sürtünme süreleri kullanılarak birleştirilen S2,S5,S8 ve S11 no 'lu kaynaklı bağlantılara ait kaynak sonrası arayüzey Optik fotoğrafları Şekil 9.12'de verilmiştir

Sürtünme kaynaklı bağlantılarda ADB' nin özelliği tanelerin aşırı derecede dövülmüş haddeleme yönüne göre değiştirmiş olmasıdır. Malzemeler birbirine zoraki karışma bölgesi denebilecek bu bölgede, malzeme türlerine bağlı olarak her iki malzemeni iç içe geçtikleri ve yön değiştirdikleri görülmektedir.

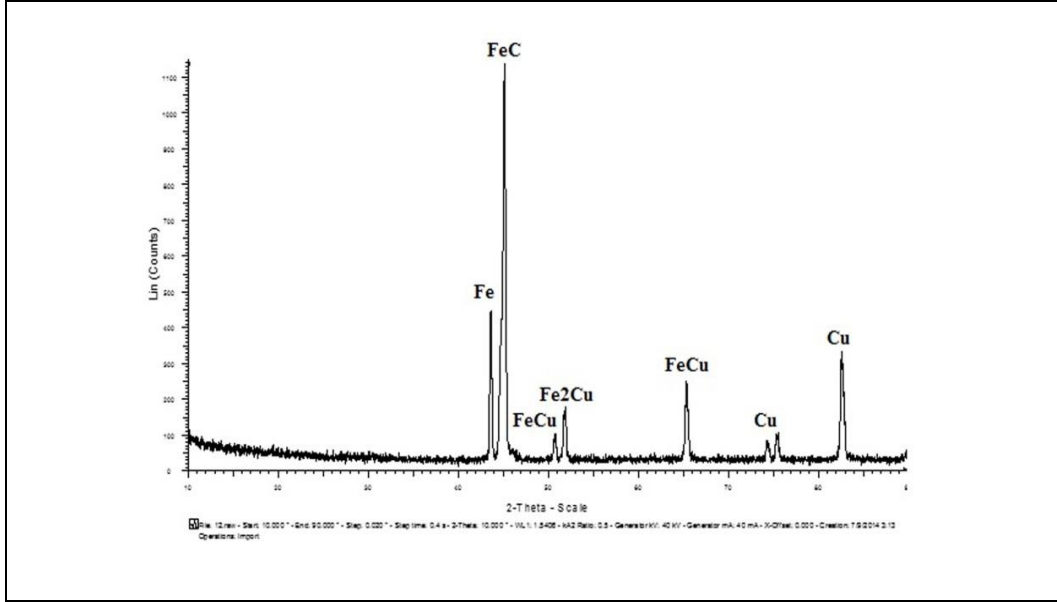
SEM fotoğrafları incelendiğinde; temelde literatürde belirtilen bölgeler benzerlik göstermesine rağmen en önemli değişim ADB ve DB' de meydana geldiği görülmektedir.

Artan devir sayısı ve sürtünme süresine bağlı olarak ADB ve DB' genişleme kaydedilmiştir. Sürtünme süresini kademeli artışı ile birlikte ara yüzeyin sıcaklık etkisinde kalma süresini artırması sonucu ekstrüzyon derecesinin artacağı ve bununla birlikte birleşme bölgesinde termo-mekanik etki aşırı dövülmüş ve yönelmiş tanelerden oluşan bir yapıyı ortaya çıkarır.



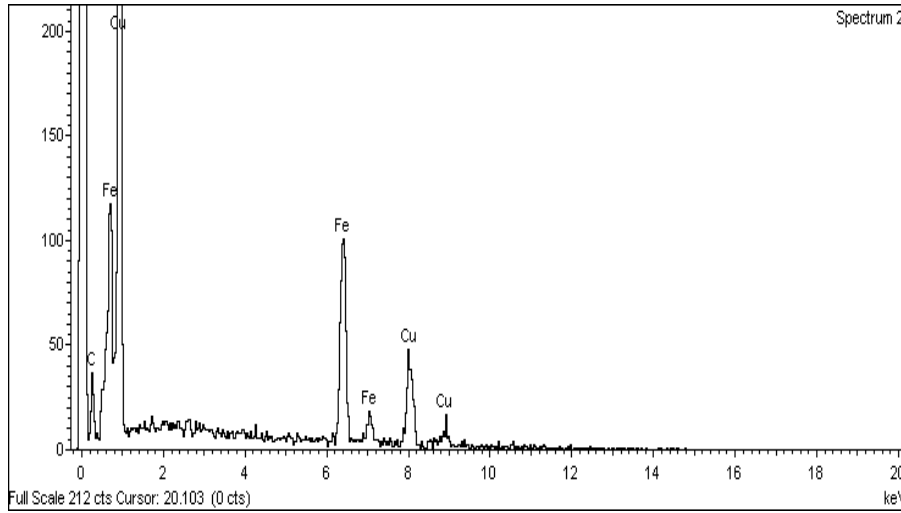
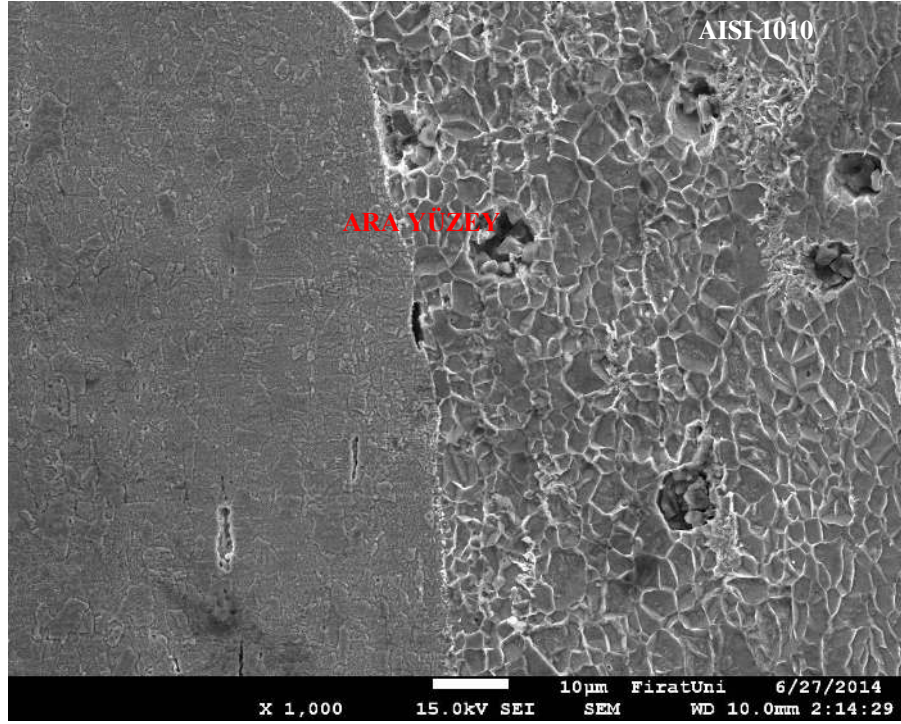
Şekil 9.12. S2,S5,S8, ve S11 no'lu numunelerin arayüzey optik görüntüler

S2,S5, S8 ve S11 numulere ait optik fotoğrafları incelendiğinde sıcaklık basınç etkisi ile deformasyon yönelimleri numune eksenine dik doğrultuda olduğu ve bu numunelerin kaynak arayüzeylerinin her iki tarafındada DB' de dövülmüş ince taneli bir yapının meydana geldiği görülmektedir.DB' deki tane küçülme miktarının ve oranının azalan sürtünme süresine bağlı olarak azaldığı açık bir şekilde görülmektedir. Bir önceki numunelerle kıyaslandığında ise bu yapının genişliğinin ve yapıdaki küçülme miktarının sürtünme basıncındaki artışa bağlı olarak arttığı tespit edilmiştir. Şekil 9.13'de S8 no' lu numunenin birleşme ara bölgesinde oluşan fazların ve bileşikleri tespit etmek amacı ile yapılan X- Ray analiz grafiği verilmiştir.



Şekil 9.13. S8 no'lu numunenin X- ışını analiz grafiği

EDS noktası	Alaşım elementleri (%)		
	Fe	Cu	C
1 (Cu bölgesi)	2.37	91.24	6.39
2 (1010 bölgesi)	29.00	53.73	17.27
3 (Arayüzey)	76.12	8.15	15.74



Şekil 9.14. EDS, sürtünme kaynaklı S8 numunenin kaynak ara yüzeyi boyunca analiz

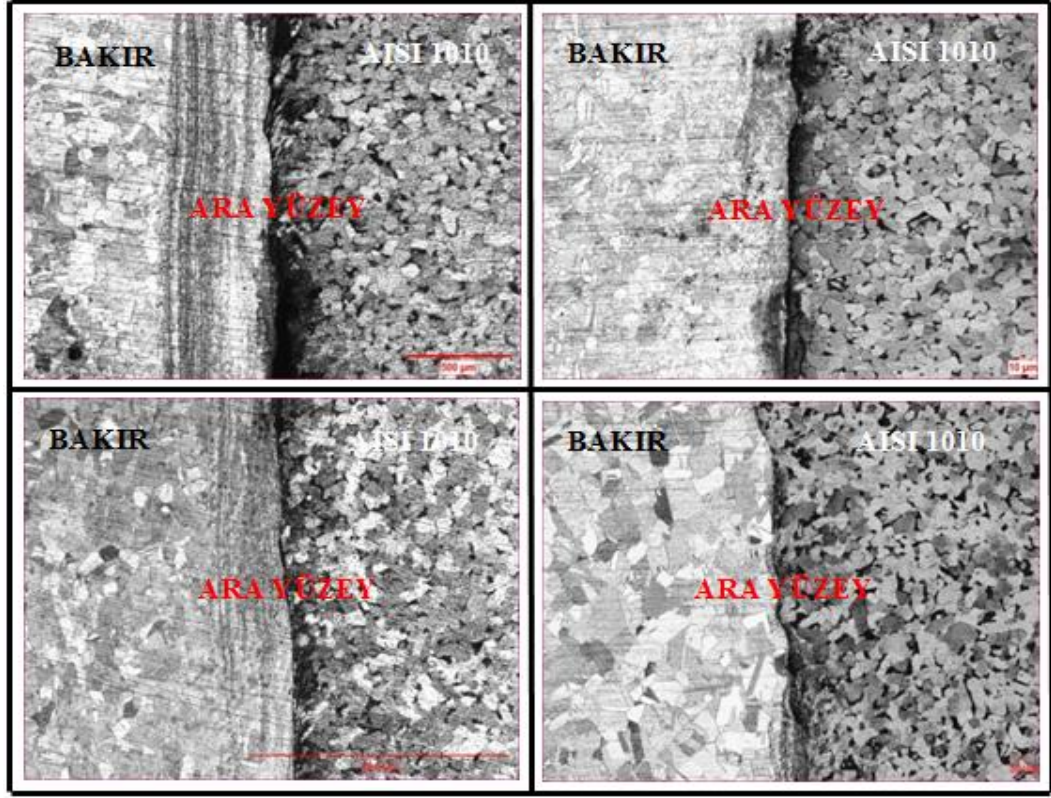
AISI 1010 düşük karbonlu çelik ve Cu sürtünme kaynağı tekniği ile başarılı bir şekilde birleştirilmiştir. 2100 dev/dk'da yapılan birleştirmede 40µmesafede AISI 1010 Cu tarafına, % 8.15 bir bakır geçişi Cu'dan da AISI 1010 tarafına ise % 2.37 bir Fe geçişi olduğu tespit edilmiştir. ısı ile etkilenen alan büyük ölçüde sürtünme süresi, sürtünme basıncı, yığma basıncı gibi parametrelere etkili olduğu gözlenmiştir..

288,33 MPa maksimum gerilme mukavemeti 30 MPa sürtünme basıncı 60 MPa yığma basıncı 6 sn sürtünme süresi ve 3 sn yığma süresi ile elde edilmiştir.

9.2.3. 2300 dev/dk ile Birleştirilen Numunelerin Optik, EDS ve X-Ray Analizleri

2300 dev/dk, 30 ve 40 MPa sürtünme basıncı, 60 ve 80 yığma basıncı 6,10 sn sürtünme süreleri kullanılarak birleştirilen S3,S6,S9 ve S12 no'lu kaynaklı bağlantılara ait kaynak sonrası arayüze Optik fotoğrafları Şekil 9.15' de verilmiştir

Birleşme ara yüzeyinde yapısal değişiklikler tespit edildiği fotoğraflar incelendiğinde; kaynak ara yüzeyinde çatlak, boşluk ve bağlantısız bölge görülmemektedir. Her iki malzemenin ADB bölgesinde kayma bantları açıkça görülürken DB ve KDUB'lerinde plastik deformasyonu etkisi ile yöneldikleri görülmektedir. ADB bölgesinin genişliği artan devir sayısına bağlı olarak, diğer devir sayıları ile kıyaslandığında artışı tespit edilmiştir.



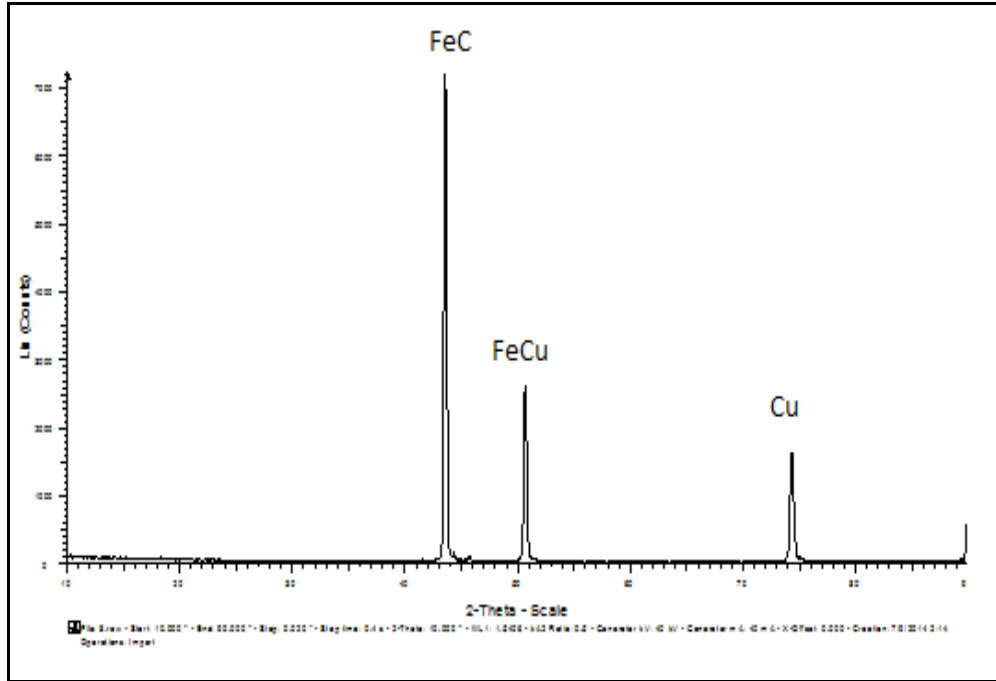
Şekil 9.15. S3,S6,S9, ve S12 no'lu numunelerin arayüzey optik görüntüleri

Mikro yapı incelendiğinde numunelerin bakır kısmında tane yapısındaki küçülmeler ve yönelmeler gözlemlenmiştir. Sürtünme ve yığma süresinin düşük olmasından dolayı AISI 1010 çeliği deformasyona ve tane yapısında değişikliğe sebep olacak sıcaklığa yükselmediği mikro yapı incelemelerinden de açıkça görülmektedir.

Bakır ve AISI 1010 çeliklerinin farklı deney parametrelerde sürtünme kaynağı ile birleştirilmiş mekanik özellikleri ve mikro yapıları araştırılmıştır. Kullanılan bütün parametrelerde başarılı birleştirmeler elde edilmiştir.

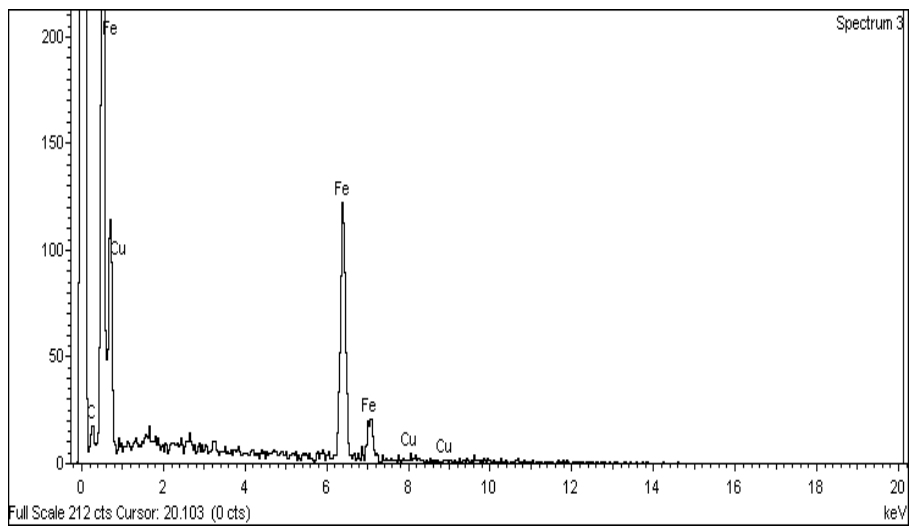
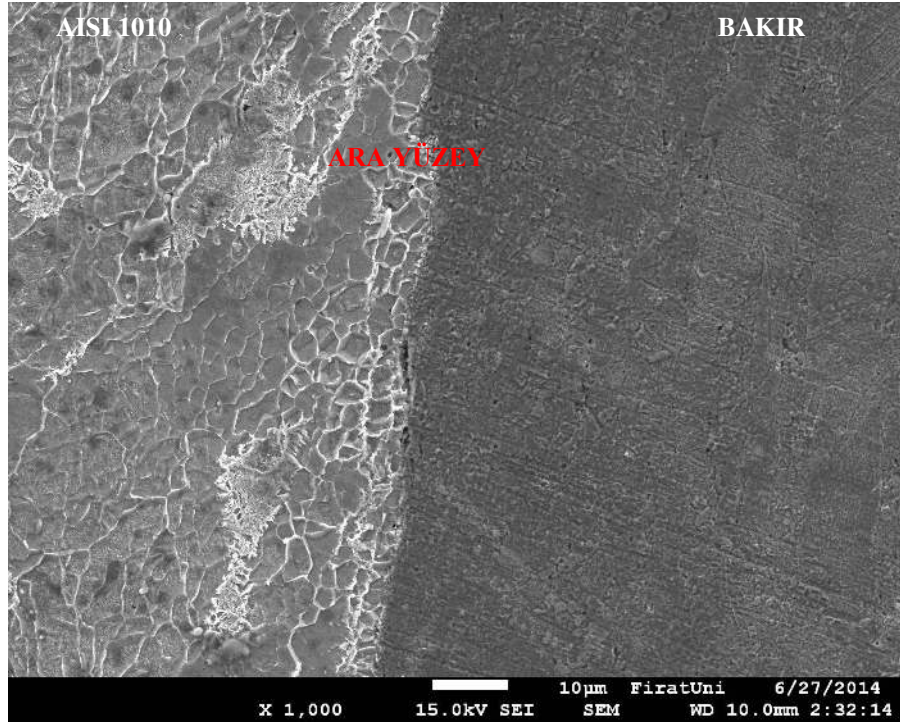
Kaynaklanma sonucunda, bakır malzemede ısı iletkenliğinin ve şekil verilebilirliğinin yüksek olması nedeniyle flanş oluşumu gözlenmiştir. AISI 1010 çeliğinde ise sürtünme süresinin kısa olmasından dolayı deformasyona sebep olabilecek sıcaklığa ulaşamamıştır. Sürtünme ve yığma basıncının, sürtünme ve yığma süresinin kaynak işleminin sağlıklı olabilmesi için önemli olduğu görülmüştür. Sürtünme basıncı ve sürtünme süresinin yüksek deformasyona neden olmayacak ancak difüzyona izin verecek şekilde, özellikle bakır malzemenin yüksek ısı iletkenliğinden dolayı, ısı girdisinin optimum değerinde olması gerekmektedir. Çünkü tavlama ile malzemelerin sünekliği

artarken, sertlik ve mukavemetinde düşme olmaktadır. Mikroyapı incelemelerinden, bakır malzemede sıcaklık ve basıncın etkisiyle tane küçülmesi meydana gelmiş ve malzeme akışı ve ısı kaçış yönünde tane yönlenmesi meydana gelmiştir. Şekil 9.16’da S12 no’ lu numunenin birleşme ara bölgesinde oluşan fazların ve bileşikleri tespit etmek amacı ile yapılan X- Ray analiz grafiği verilmiştir. Bakır malzeme tarafında ise; arayüzeyden uzaklaştıkça mikro sertlik değerinin azaldığı ve ana malzemenin sertlik değerine düştüğü görülmektedir.



Şekil 9.16. S12 no’lu numunenin X- ışını analiz grafiği

EDS noktası	Alaşım elementleri (%)		
	Fe	Cu	C
1 (Cu bölgesi)	1.51	81.02	17.47
2 (1010 bölgesi)	86.26	1.09	12.65
3 (Arayüzey)	26.92	56.21	16.87



Şekil.9.17. EDS, sürtünme kaynaklı S12 numunenin kaynak ara yüzeyi boyunca analiz

AISI 1010 düşük karbonlu çelik ve Cu sürtünme kaynağı tekniği ile başarılı bir şekilde birleştirilmiştir. 2300 dev/dk'da yapılan birleştirmede 40 µ mesafede AISI 1010'dan Cu tarafına, % 1.51 lik bir bakır geçişi Cu'dan da AISI 1010 tarafına ise % 1.09 bir Fe geçişi olduğu tespit edilmiştir. ısı ile etkilenen alan büyük ölçüde sürtünme süresi, sürtünme basıncı, yığma basıncı gibi parametrelere etkili olduğu gözlenmiştir.

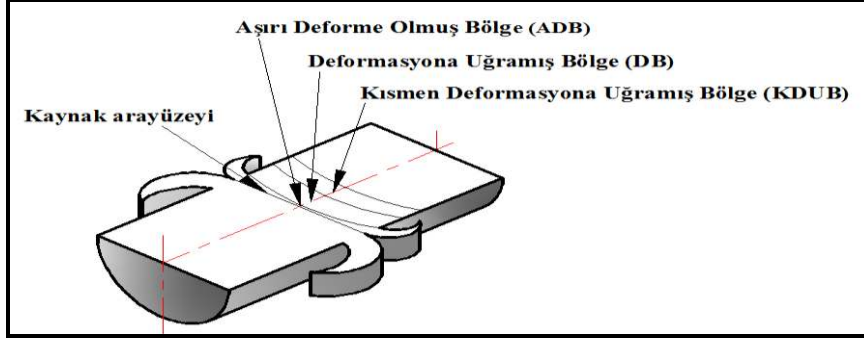
294,67 MPa maksimum gerilme mukavemeti 30 MPa sürtünme basıncı 60 MPa yığma basıncı 6 sn sürtünme süresi ve 3 sn yığma süresi ile elde edilmiştir.

9.3. Mikrosertlik Analiz Sonuçları

AISI 1010 ve Bakır malzemeler birleştirilmeden önce mikro sertlik ölçümü yapılmış, AISI 1010 malzeme için sertlik değeri 175-188HV, bakır malzemesi için 45-75 HV olarak tespit edilmiştir.

Sürtünme kaynaklı bağlantılarda mikro sertlik ölçümleri, farklı parametrelere bağlı olarak çıkan yapısal değişimi ve bu değişimin, malzemenin sertliği üzerine olan etkisinin belirlemek amacıyla yapılmıştır. Bu amaçla OM (Optik Mikroskop) analizi için hazırlanan numuneler kullanılmıştır. Mikro sertlik ölçümleri, kaynaklı bağlantının birleşme hattında karşılıklı olarak çizgisel bir doğru üzerinde alınmıştır. Üç farklı devir sayısı (1800, 2100 ve 2300 dev/dk), sürtünme basıncı (30 ve 40 MPa) ve sürtünme süresi (6 ve 8 sn), kullanılarak gerçekleştirilen kaynaklı bağlantıların, birleşme merkezinden ana metale doğru çizgisel bir hat boyunca 0.5 mm aralıklarla yapılan mikro sertlik ölçüm sonuçları sırasıyla Şekil. 9.19, 9.20 ve 9.21'de verilmiştir.

Sürtünme kaynaklı bağlantılarda mikro sertlik dağılımı literatüre uygun olarak üç bölgede değişmektedir (Şekil 9.18). Bu bölgeler aşırı deforme olmuş bölge (ADB), deformasyona uğramış bölge (DB), ve kısmen deformasyona uğramış bölge (KDB), olarak adlandırılmaktadır. Kaynak ara yüzeyinde değişiklik gösteren mikro sertlik sonuçları, esas malzemeye ulaştığında, ana malzemenin sertlik değerlerine düştüğü tespit edilmiştir.



Şekil 9.18. Mikrosertlik ölçüm sonuçlarının değiştiği bölgeler [82].

Kaynak arayüzeyine yakın kısımlarda, sıcaklık ve basınç etkisi ile her iki malzeme tarafında sertliğin, plastik deformasyon nedeni ile ana malzemeye oranla daha yüksek çıkması beklenmektedir. Ancak AISI 1010 düşük C'lu çelik tarafında arayüzey bitişik ADB' de sertlik değerlerinin azaldığı görülmüştür. Bu durumun; AISI 1010 malzemenin ısı iletim katsayısının düşük olması nedeni ile yavaş soğumasına bağlı olarak AISI 1010 tarafına difüzyonlu element geçişinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Bununla birlikte arayüzeyin sürtünmesi ile ortaya çıkan ve her iki malzeme çiftinin karışımından meydana gelen DB bandının aralığı ve genişliği bu bölgedeki sertliğin düşmesinde etkili olmuştur. Kaynak arayüzeyine yakın kısımlardaki element geçişleri ise EDS sonuçlarında görülmektedir.

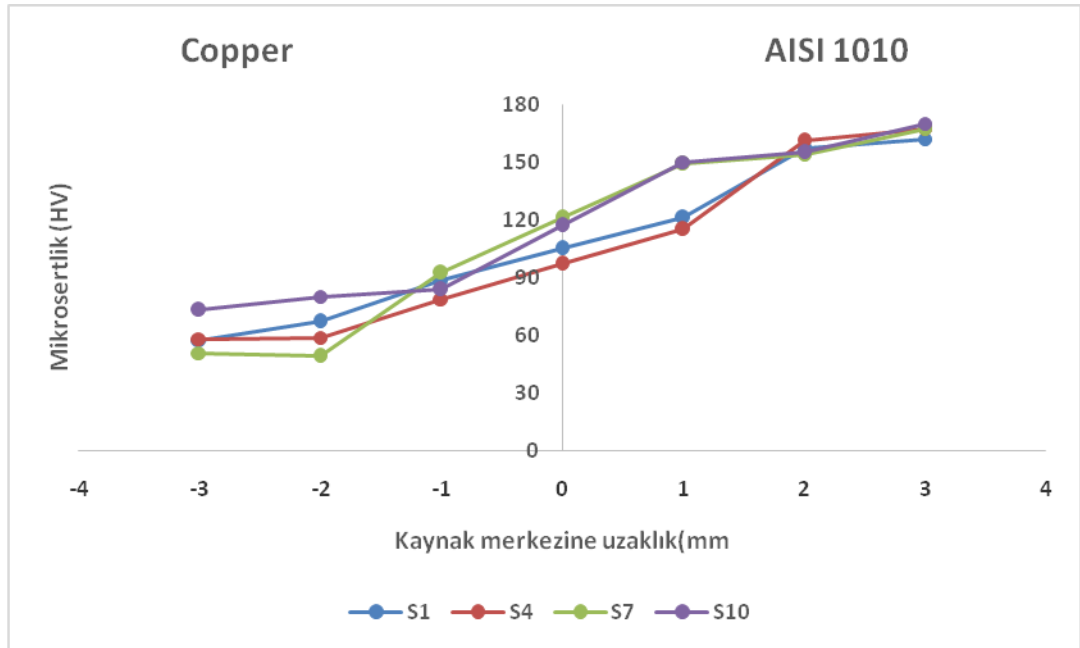
9.3.1. 1800 dev/dk İle Birleştirilen Numunelerin Mikro Sertlik Sonuçları

1800 dev/dk devir sayısı iki farklı sürtünme basıncı (30 ve 40 MPa) ve iki farklı sürtünme süresi (6 ve 10 sn) kullanılarak birleştirilen S1,S4, S7 ve S10 numunelere ait sertlik profilleri Şekil 9.19'dasırasıyla verilmiştir. Bu kaynaklı bağlantılara ait sertlik profilleri incelendiğinde, her dört numunede de benzer bir sertlik dağılımı görülmektedir. Bu dağılımda bakır malzemenin sertliğinin, kaynak ara yüzeyine yakın bölgelerde yükseldiği daha sonra bir miktar düştüğü ve esas metale doğru gidildikçe malzemelerin ana sertlik değerlerine ulaştığı görülmektedir. AISI 1010 tarafında ise mikrosertlik değerlerinin kaynak arayüzeyine yaklaştıkça azaldığı tespit edilmiştir.

Daha önce yapılan araştırmalarda temas alanındaki sıcaklığın 1 sn gibi kısa bir süre içinde 1000°C ulaştığı bildirilmiştir. Bununla birlikte malzemeler arasında ısı iletiminin farklı olması her iki malzeme tarafında IEB' nin de farklı olmasına neden olmuştur. Sertlik

profilleri birbirine benzemekle birlikte; sürtünme süreleri ve buna bağlı olarak malzemeler üzerinde oluşan ısı dağılımının farklı olması nedeni ile IEB'lerin genişlikleri farklılık göstermektedir.

Mikro sertlik sonuçları dikkate alındığında, sürtünme süresinin ve sürtünme basıncının IEB'nin genişliği ve ara yüzeydeki setlik değerleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu bildirilmiştir. Artan sıcaklık ve dövme etkisinin oluşturduğu deformasyon sonucu sertlik değerlerinin kaynak bölgesine yakın kısımlarda bakır malzeme tarafında yükseldiği, AISI 1010 tarafında ise düştüğü görülmektedir. Bu bölgedeki sertlik değişiminin, arayüzeyde ulaşılan sıcaklığın temperleme etkisi yapması sonucunda çıktığı düşünülmektedir.

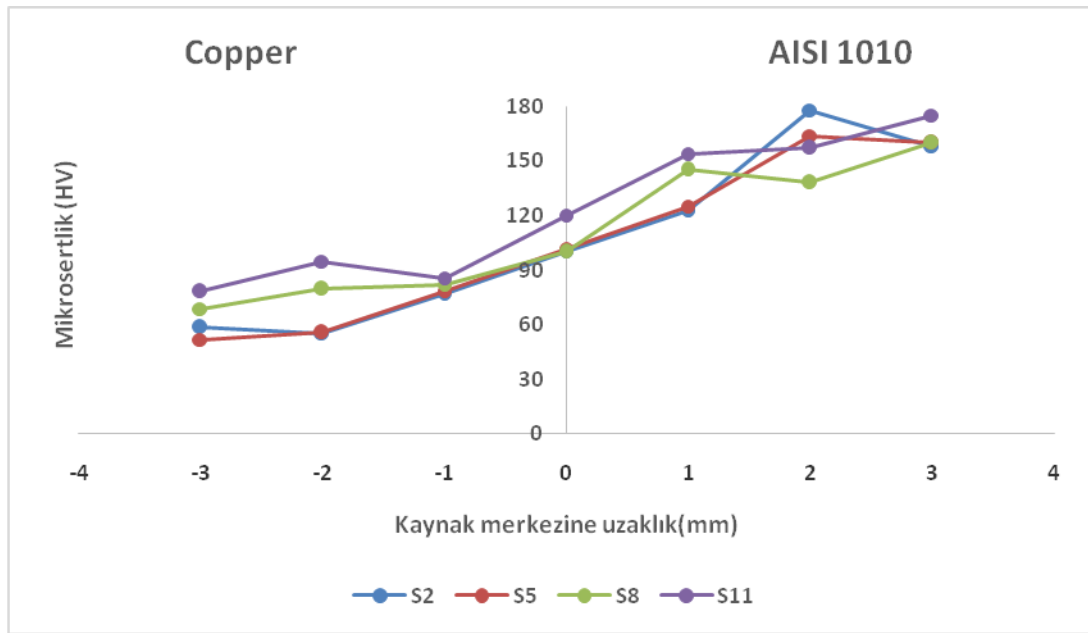


Şekil 9.19.S1, S4, S7 ve S10 no'lu numunelerde kaynak bölgesindeki mikrosertlik dağılımlar

9.3.2. 2100 dev/dk İle Birleştirilen Numunelerin Mikro Sertlik Sonuçları

2100 dev/dk devir sayısı iki farklı sürtünme basıncı (30 ve 40 MPa) ve iki farklı sürtünme süresi (6 ve 10 sn) kullanılarak birleştirilen S2, S5, S8 ve S11 numunelere ait sertlik profilleri Şekil 9.20'de sırasıyla verilmiştir. Bu kaynaklı bağlantılara ait sertlik profilleri incelendiğinde, her dört numunede de benzer bir sertlik dağılımı görülmektedir.

Mikrosertlik grafiğine bakıldığında, AISI 1010 tarafından bakır tarafına doğru mikrosertliğin düştüğü, tespit edilmiştir. Kaynak bölgesindeki bu sertlik düşüşlerinin malzemelerin tavlama sıcaklığına ulaştığından dolayı olduğu düşünülmüştür. Çünkü tavlama ile malzemelerin sünekliği artarken, sertlik ve mukavemetinde düşme olmaktadır. Kaynak bölgesindeki sertlik düşüşünün sürtünme basıncının azalması, sürtünme süresinin ve devir sayısının artmasıyla daha da arttığı görülmektedir. Genel olarak, sertlik profilindeki bu değişmelere kaynak parametrelerine bağlı olarak ısı girdisinin değişiminin sebep olduğu söylenebilir.



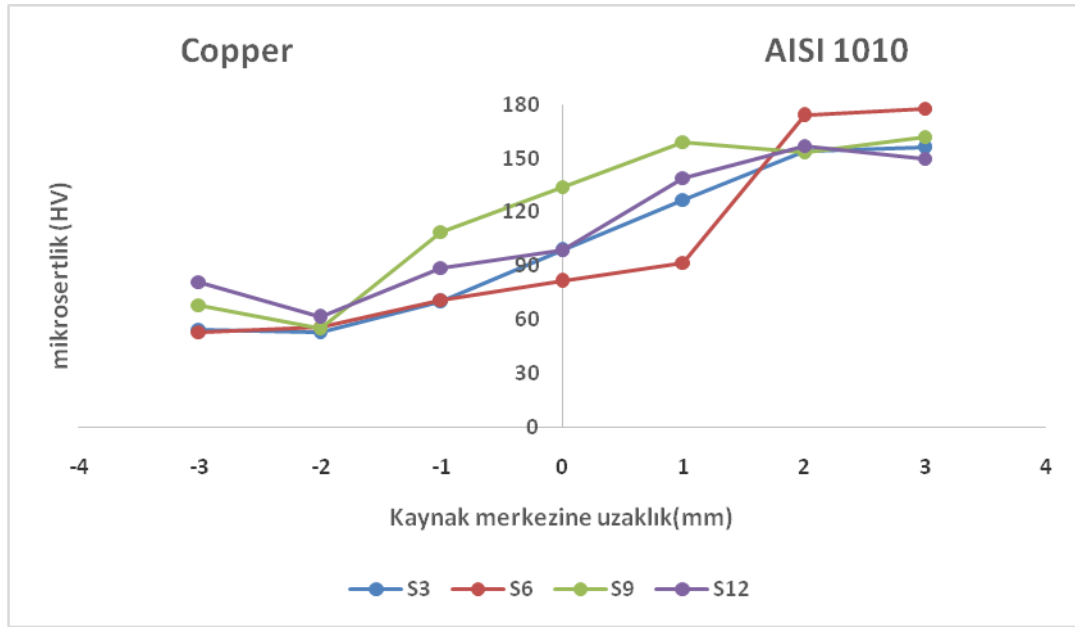
Şekil 9.20. S2, S5, S8 ve S11 no'lu numunelerde kaynak bölgesindeki mikrosertlik dağılımları

9.3.3. 2300 dev/dk İle Birleştirilen Numunelerin Mikro Sertlik Sonuçları

2300 dev/dk devir sayısı iki farklı sürtünme basıncı (30 ve 40 MPa) ve iki farklı sürtünme süresi (6 ve 10 sn) kullanılarak birleştirilen S3, S6, S9 ve S12 numunelere ait sertlik profilleri Şekil 9.21'de sırasıyla verilmiştir. Bu kaynaklı bağlantılara ait sertlik profilleri incelendiğinde 2300 dev/dk 30 (MPa) sürtünme basıncı ve 60 (MPa) yığma basıncı ile en iyi birleşme olduğu görülmektedir.

Mikrosertlik grafiğine bakıldığında, mikro sertlik değerlerinin bakır tarafından AISI 1010 tarafına doğru ise arttığı tespit edilmiştir. Kaynak bölgesindeki bu sertlik düşüşlerinin

malzemelerin tavlama sıcaklığına ulaştığından dolayı olduğu düşünülmüştür. Çünkü tavlama ile malzemelerin sünekliği artarken, sertlik ve mukavemetinde düşme olmaktadır. Kaynak bölgesindeki sertlik düşüşünün sürtünme basıncının azalması, sürtünme süresinin ve devir sayısının artmasıyla daha da arttığı görülmektedir. Genel olarak, sertlik profilindeki bu değişmelere kaynak parametrelerine bağlı olarak ısı girdisinin değişiminin sebep olduğu söylenebilir.

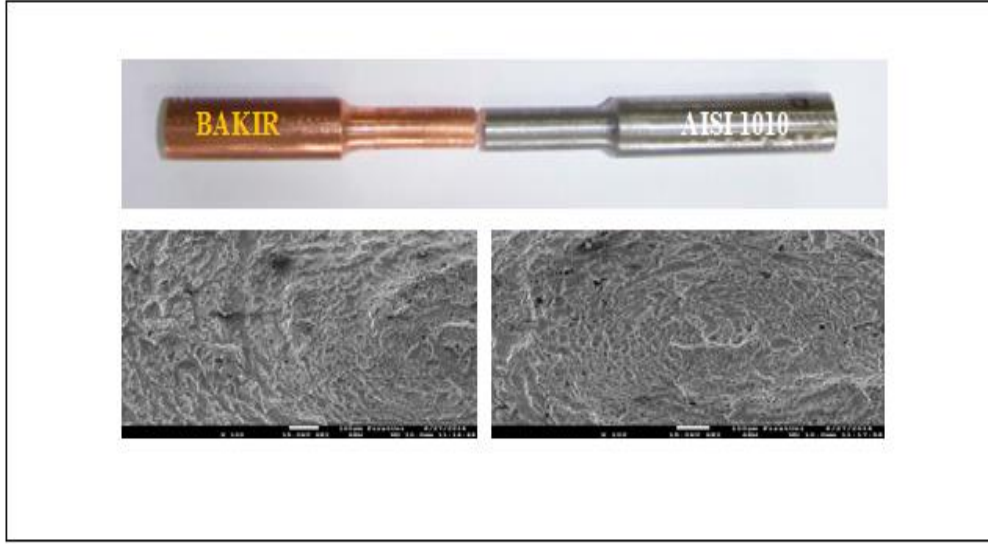


Şekil 9.21.S3, S6, S9 ve S12 no'lu numunelerde kaynak bölgesindeki mikrosertlik dağılımları

9.4. Kaynaklı Bağlantıların Mekanik Özelliklerine Ait Sonuçlar

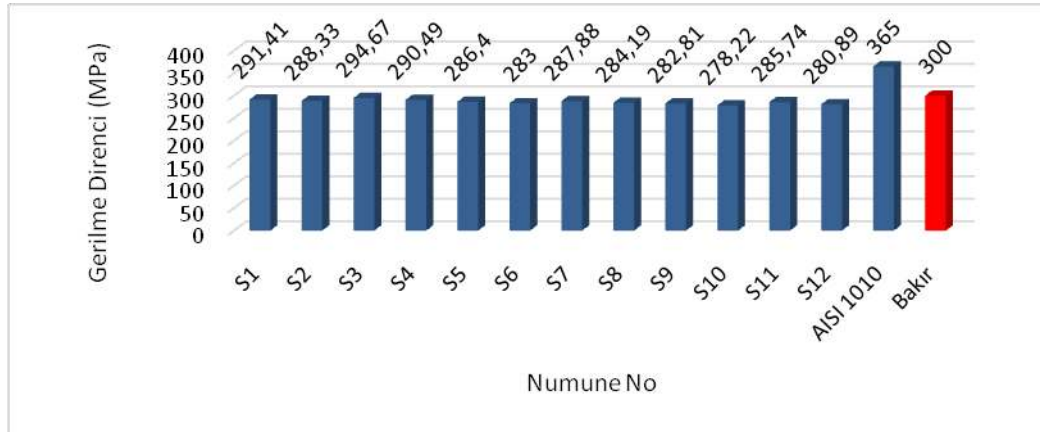
9.4.1. Çekme Test Sonuçları

Deneylerde kullanılan ana malzemeler (AISI 1010 ve Bakır) için çekme deneyi uygulanmış ve elde edilen sonuçlar, deney sonrası kopan parçalarla birlikte gösterilmiştir. Yapılan çekme deneyi sonrasında; AISI 1010 düşük karbonlu çelik malzemesinin çekme gerilmesi 365 MPa, bakır malzemesinin çekme gerilmesi ise 300 MPa olarak ölçüldüğü tespit edilmiştir.



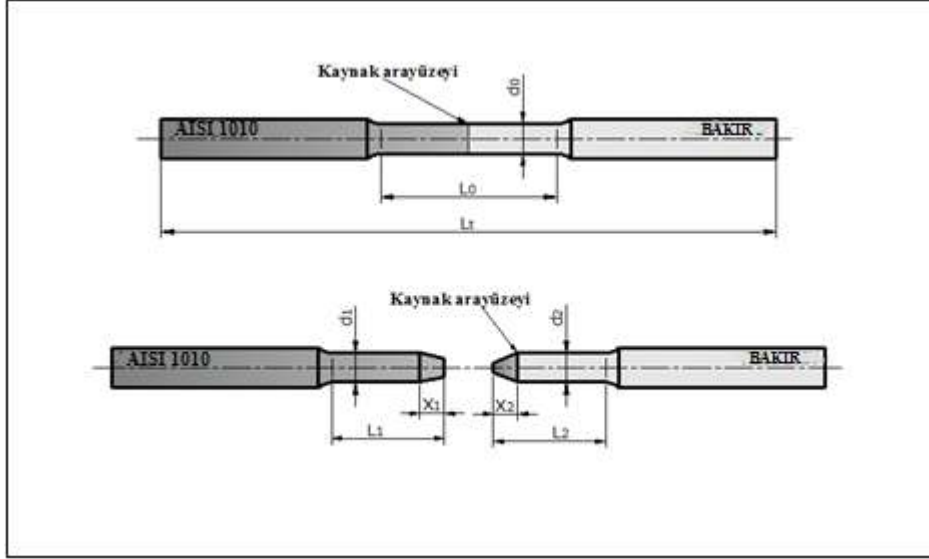
Şekil 9.22. AISI 1010 ve bakırın çekme testi sonunda elde edilen kırık yüzey makro fotoğrafı

Sürtünme kaynak yöntemi ile birleştirilen AISI 1010 ve Bakır malzemenin kaynaklı numunelere ait çekme test sonuçları Şekil 9.23’de grafik halinde gösterilmektedir. Devir sayısı ve sürtünme süresi kaynak kalitesi bakımından en etkin parametrelerdir[2]. Yapılan çalışmalarda 1800, 2100 ve 2300 dev/dk’lık devir sayıları kullanılmıştır. Her bir devir sayısında farklı sürtünme basınçları ve farklı sürtünme süreleri kullanılarak dört adet numune hazırlanmış ve kaynaklı bağlantılar gerçekleştirilmiştir. Anacak diğer kaynak parametrelerinin kaynak edilebilirlik üzerindeki etkileri incelenmesi için her bir grup kendi içinde sınıflandırılmış sürtünme süreleri 5 ve 10 sn, sürtünme basınçları ise 30 ve 40 MPa olarak düzenlenmiştir.



Şekil 9.23. Çekme test sonuçlarına ait grafik

Çekme deney sonrası kırılan numuneler, kırık yüzey makro fotoğrafları ile birlikte verilmiştir. Kırık yüzey fotoğraflarında ki ayrıntıların görülebilmesi amacıyla fotoğraflar büyütülerek gösterilmiştir. Deney sonunda kırılan yüzeylere ait parçaların şematik gösterimi Şekil 9.24’de gösterilmektedir.



Şekil 9.24. Çekme deneyi sonunda kırılan parçaların şematik gösterimi [82].

9.4.1.1.1800 dev/dk İle Birleştirilen Numunelerin Çekme Test Sonuçları

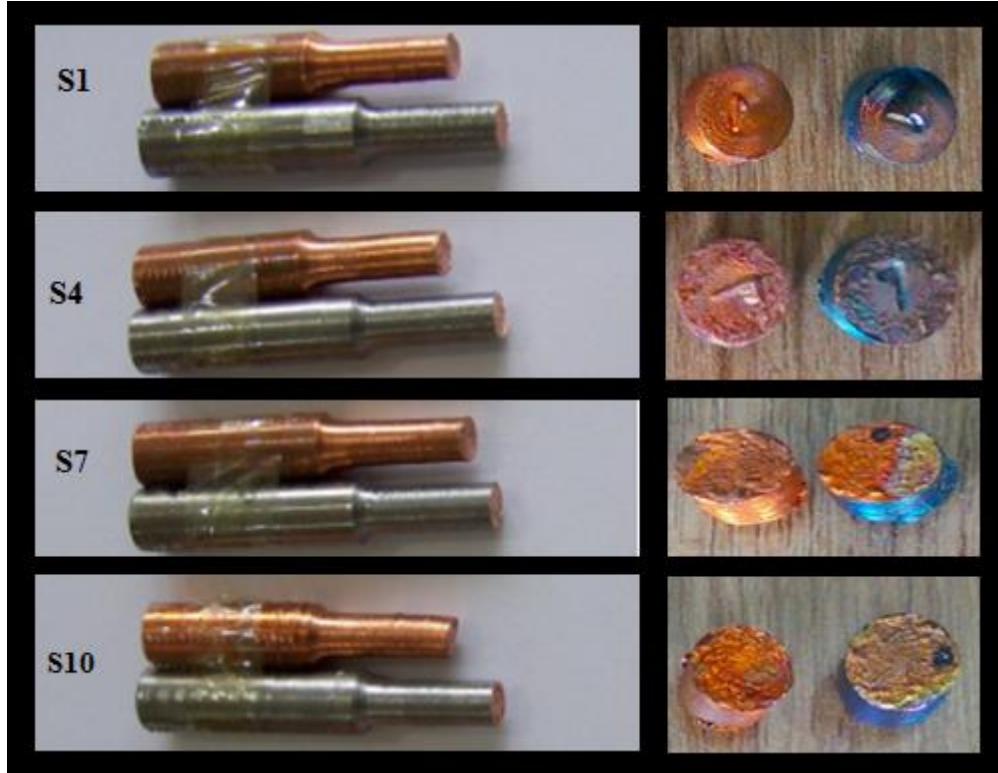
1800 dev/dk ile devir sayısı, 30 MPa ve 40 MPa sürtünme basıncı ile iki farklı sürtünme süresi (6 ve 10 sn) kullanılarak birleştirilen S1,S4,S7 ve S10 no’ lu kaynaklı bağlantılara uygulanan çekme testi ile elde edilen mekanik özellikler Tablo 9.5 ‘de verilmiştir

Tablo 9.5. S1,S4,S7 ve S10 no' lu numunelere ait çekme deney sonuçları

Numune No	KULLANILAN PARAMETRELER					MEKANİK ÖZELLİKLER
	Devir (dev/dk)	Srt. Süre. (sn)	Srt.Bsc.(MPa)	Yğma bsc (MPa)	Yğma Süre.(sn)	Çekme Mukavemeti (MPa)
S1	1800	6	30	60	5	291,41
S4		10			3	294,49
S7		6	40	80	5	287,88
S10		10			3	278,22

Sürtünme süresi kademeli değiştirilerek (6 ve 10 sn) birleştirilen S1,S4,S7 ve S10 no' lu numunelerde sırasıyla 291.41, 294.49, 287.88 ve 278.22MPa olarak kaydedilmiştir. Çekme değerleri açısından en iyi sonuç S4 no'lu numunede olmuştur. Bunun temel nedeni 10 sn sürtünme süresi kullanılarak birleştirilen S4 no 'lu numunede yüksek sürtünme süresi kullanıldığında deforme olan bölgenin genişlemesi ve artan sürtünme süresine bağlı olarak ara yüzeyin sıcaklık etkisinde kalma süresinin artırması sonucu IEB' genişlemiş olmasıdır. Literatürde kaynak arayüzeyinde yer alan bağlantısız bölgelerin, çatlakların ve boşlukların varlığı ile bunların büyüklükleri ve genişliği ile birlikte IEB' nin geniş olmasının mekanik özellikleri olumsuz etkilediği bildirilmiştir. S10 no'lu numunede ise seçilen sürtünme süreleri ve sürtünme basıncının 40 MPaolarak kullanılmasına bağlı olarak plastik deformasyon için gerekli olan sıcaklığa ulaşmasında yeterli olmadığı, bunun sonucunda ise bağlantı kesitinin düştüğü ve kaynaklı bağlantı mukavemetinin diğer numunelere göre daha az olduğu tespit edilmiştir.

S1,S4,S7 ve S10 no' lu numunelerin çekme testi sonucunda elde edilen kırık yüzey makro fotoğrafları Şekil 9.25' de gösterilmektedir.

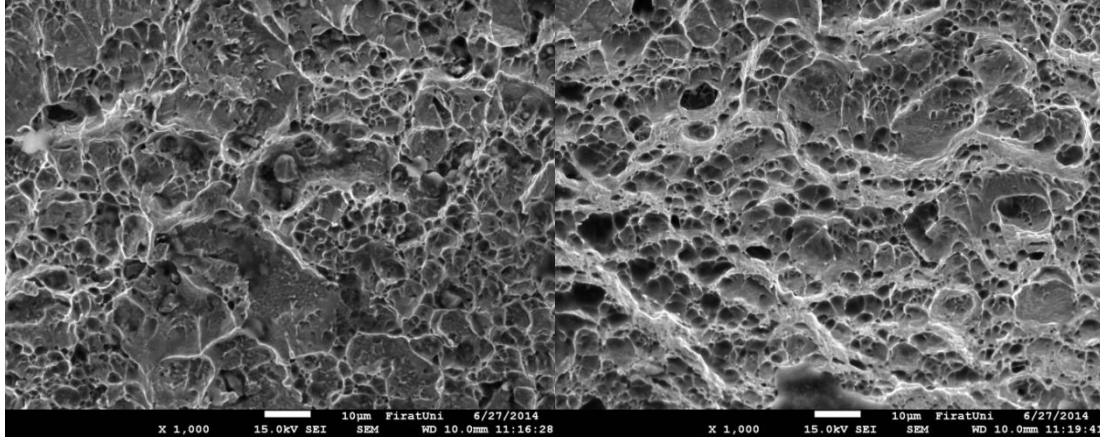


Şekil 9.25.S1, S4, S7 ve S10 no'lu numunelerin çekme testi sonunda ki kırık yüzey makro fotoğrafları

Bu kaynaklı bağlantılara ait kırık yüzey makro fotoğrafları incelendiğinde numunelerin kaynak ara yüzeyine çok yakın bir bölgede bakır tarafından boyun vererek kırıldığı görülmektedir. Kırılma; ara yüzeye yakın bir noktada başlayıp bakır tarafına doğru sünek kırılma davranışı sergileyerek meydana gelmiştir. Bu sünek kırılmanın sebebi; başlangıç ara yüzey sürtünmesiyle meydana gelen karışım bandının dışarı atılması için yeterli aksenal basınç ve sürtünme fazının bulunmamasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca AISI 1010 malzemesine göre daha sünek olduğu için kopmalar genellikle bakır tarafından meydana gelmiştir. S1,S4,S7 ve S10 no' lu kaynaklı bağlantılar üzerinde alınan optik analizi ve mikrosertlik ölçümleri bu sonucu doğrulamaktadır.

S1 no'lu numuneye ait kırık yüzey optik fotoğrafı Şekil 9.26'te verilmiştir. Kırık yüzey OM fotoğraflarında açıkça görüldüğü gibi, 1800 dev/dk devir sayısı kullanılarak birleştirilen bu kaynaklı bağlantılarda düşük enerji girdisine bağlı olarak arayüzey sürtünmesiyle meydana gelen karışım bandının dışarı atılmasında sıcaklık ve basıncın yetersiz kaldığı görülmüştür. Kırık yüzey optik analiz sonuçlarında sürtünme süresi ve

eksenel basıncın kaynaklı bağlantıların kırılma davranışı ve kırık yüzey morfolojisi üzerinde önemli etkiye sahip olduğu belirlenmiştir.



Şekil 9.26. S1 no'lu numunenin çekme testi sonunda kırık yüzey optik fotoğrafları

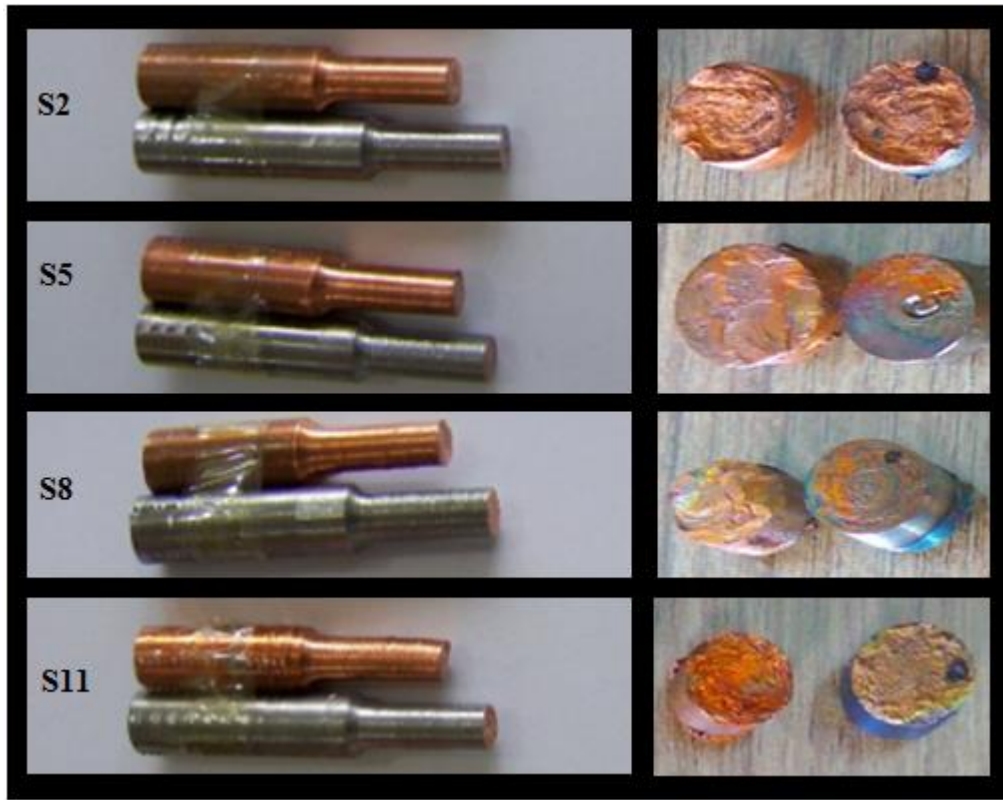
9.4.1.2. 2100 dev/dk İle Birleştirilen Numunelerin Çekme Test Sonuçları

2100 dev/dk ile devir sayısı, 30 MPa ve 40 MPa sürtünme basıncı ile iki farklı sürtünme süresi (6 ve 10 sn) kullanılarak birleştirilen S2,S5,S8 ve S11 no' lu kaynaklı bağlantılara uygulanan çekme testi ile elde edilen mekanik özellikler Tablo 9.6 'de verilmiştir.

Tablo 9.6. S2,S5,S8 ve S11 no' lu numunelere ait çekme deney sonuçları

Numune No	KULLANILAN PARAMETRELER					MEKANİK ÖZELLİKLER
	Devir (dev/dk)	Srt. Süre. (sn)	Srt.Bsc.(MPa)	Yıgma bsc (MPa)	Yıgma Süre.(sn)	Çekme Mukavemeti (MPa)
S2	2100	6	30	60	5	288,33
S5		10			3	286,40
S8		6	40	80	5	284,19
S11		10			3	285,74

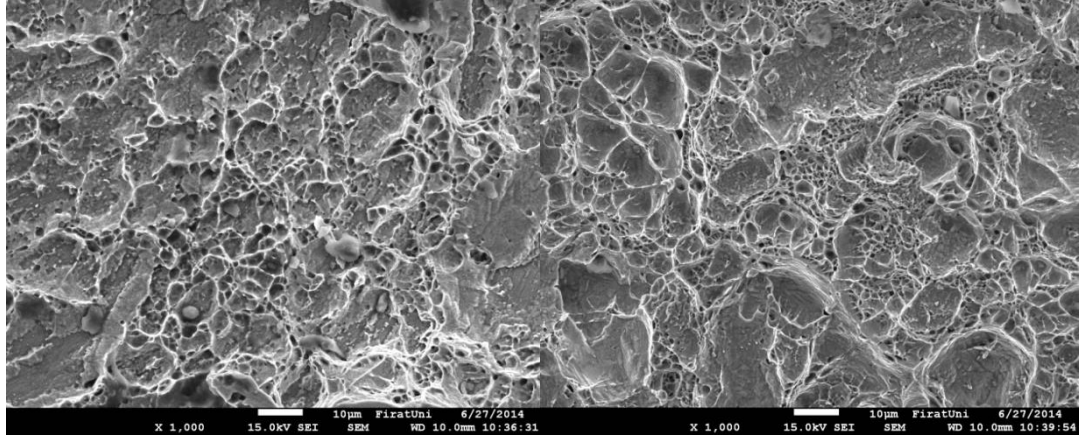
Sürtünme süresi kademeli değiştirilerek (6 ve 10 sn) birleştirilen S2,S5,S8 ve S11 no' lu numunelerde çekme mukavemetleri sırasıyla 288.33, 286.40,284.19 ve 285.74MPa olarak ölçülmüştür. Çekme değerleri açısından en iyi sonuç S2 no'lu numunede tespit edilmiştir. Bunun temel nedeni 10 sn sürtünme süresi kullanılarak birleştirilen S1 no' lu numunede yüksek sürtünme süresi kullanıldığında deforme olan bölgenin genişlemesi ve artan sürtünme süresine bağlı olarak ara yüzeyin sıcaklık etkisinde kalma süresinin artırması sonucu IEB' genişlemiş olmasıdır. S2,S5,S8 ve S11 no' lu numunelerin çekme testi sonucunda elde edilen kırık yüzey makro fotoğrafları Şekil 9.27' de gösterilmektedir.



Şekil 9.27. S2, S5, S8 ve S11 no'lu numunelerin çekme testi sonunda ki kırık yüzey makro fotoğrafları

Şekil 9.27'de gösterilen fotoğraflar incelendiğinde, S11 no' numunenin kesit daralmasının diğer numunelere göre daha az olduğu ve kırılmanın ara yüzeyde başlayıp bakır tarafından sünek bir kırılma davranışı gösterdiği görülmektedir. S11 no' lu numunede kırılmanın ara yüzeye çok yakın bölgede gerçekleşmesinin, artan sürtünme süresi nedeniyle meydana gelen yapısal değişikliklere bağlı olduğu düşünülmektedir. S5 ve S8 no'

lu numunelerin ise boyun vererek bakır tarafından sünek bir kırılma sergilediği görülmektedir.



Şekil 9.28. S5 no'lu numunenin çekme testi sonunda kırık yüzey optik fotoğrafları

S5 no'lu numuneye ait kırık yüzey optik fotoğrafları Şekil 9.28'de gösterilmektedir. optik fotoğraflarında da görüldüğü gibi çukurcuların yoğun olarak bulunduğu, kırılmanın ayrı bölünme şeklinde sünek bir davranış sergileyerek ortaya çıktığı tespit edilmiştir.

9.4.1.3. 2300 dev/dk İle Birleştirilen Numunelerin Çekme Test Sonuçlar

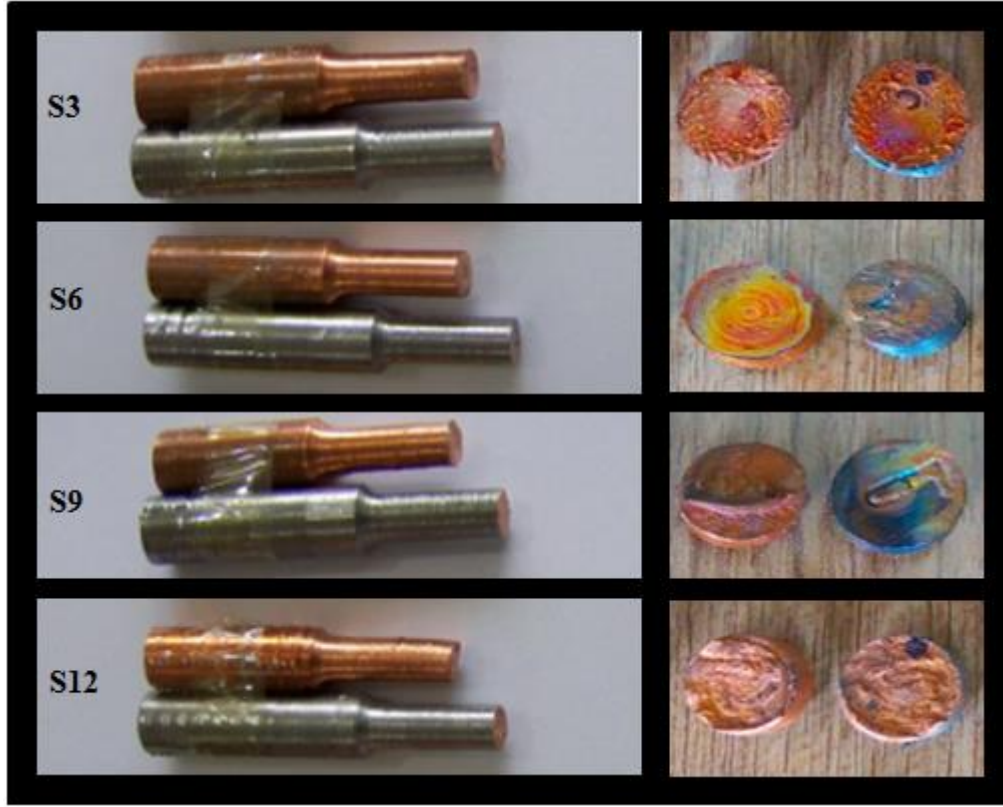
2300 dev/dk ile devir sayısı, 30 MPa ve 40 MPa sürtünme basıncı ile iki farklı sürtünme süresi (6 ve 10 sn) kullanılarak birleştirilen S3,S6,S9 ve S12 no' lu kaynaklı bağlantılara uygulanan çekme testi ile elde edilen mekanik özellikler Tablo 9.7' de verilmiştir.

Tablo 9.7. S3,S6,S9 ve S12 no' lu numunelere ait çekme deney sonuçları

Numune No	KULLANILAN PARAMETRELER					MEKANİK ÖZELLİKLER
	Devir (dev/dk)	Srt. Süre. (sn)	Srt.Bsc.(MPa)	Yığma bsc (MPa)	Yığma Süre.(sn)	Çekme Mukavemeti (MPa)
S3	2300	6	30	60	5	294,67
S6		10			3	283
S9		6	40	80	5	282,81
S12		10			3	280,89

Sürtünme süresi kademeli değiştirilerek (6 ve 10 sn) birleştirilen S2,S5,S8 ve S11 no' lu numunelerde sırasıyla 294.67,283,282.81 ve 280.89MPa olarak kaydedilmiştir. Çekme değerleri açısından en iyi sonuç S3 no'lu numunede olmuştur. Bunun temel nedeni 2300 dev/dk 30 MPa sürtünme basıncı 60 MPa yığma basıncı 10 sn sürtünme süresi kullanılarak birleştirilen S1 no 'lu numunede yüksek sürtünme süresi kullanıldığında deforme olan bölgenin genişlemesi ve artan sürtünme süresine bağlı olarak ara yüzeyin sıcaklık etkisinde kalma süresinin artırması sonucu IEB' genişlemiş olmasıdır.

S3,S6,S9 ve S12 no' lu numunelerin çekme testi sonucunda elde edilen kırık yüzey makro fotoğrafları Şekil 9.29' da gösterilmektedir.

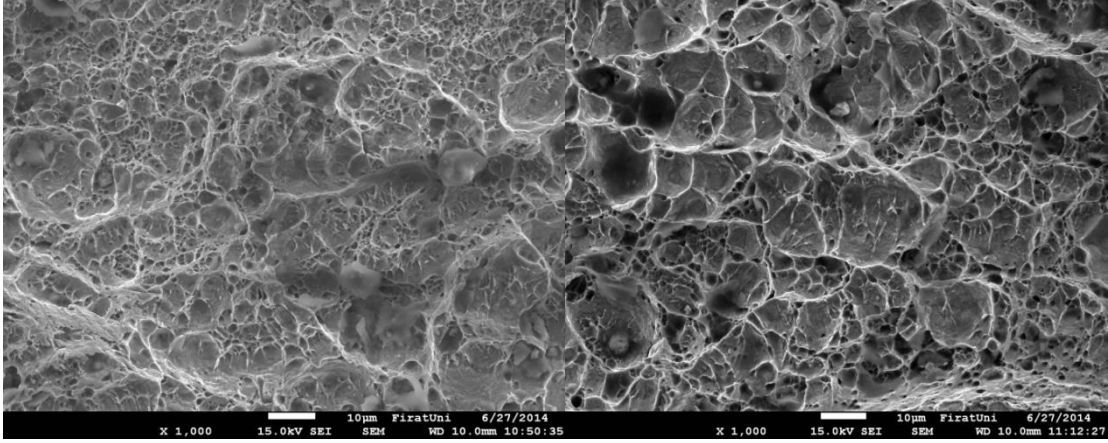


Şekil 9.29. S3, S6, S9 ve S12 no'lu numunelerin çekme testi sonunda ki kırık yüzey makro fotoğrafları

Çekme testi sonunda kopan parçalara ait makro fotoğraflar incelendiğinde, sürtünme basıncının 30 MPa ve 40 MPa kullanıldığı S9 ve S12 no' lu numuneler dışındaki numuneler ise boyun vererek sünek bir şekilde meydana geldiği görülmektedir.

Sürtünme basıncının artırılması ile birleştirilen diğer numunelerin çekme testi sonunda kopan parçaları incelendiğinde ise, kırılmanın boyun vererek sünek bir davranış sergileyerek ortaya çıktığı görülmektedir. Bu nedenle, sürtünme basıncının devir sayısı ve sürtünme süresi ile uyumlu olması gerektiği aksi takdirde bağlantı mukavemetinin olumsuz etkilendiği tespit edilmiştir. Elde edilen mekanik test sonuçlarında, mukavemetli kaynak bağlantıları elde etmek için devir sayısı, sürtünme süresi ve sürtünme basıncı uyumlu seçilmesi gerekmektedir.

Sonuç olarak maksimum devir, minimum kaynak süresi ve ara yüzey sürtünmesi ile meydana gelen karışım bandını dışarı atacak seviyede eksenel basıncının kullanılması durumunda mukavemetli kaynaklı bağlantıların elde edileceği düşünülmektedir.

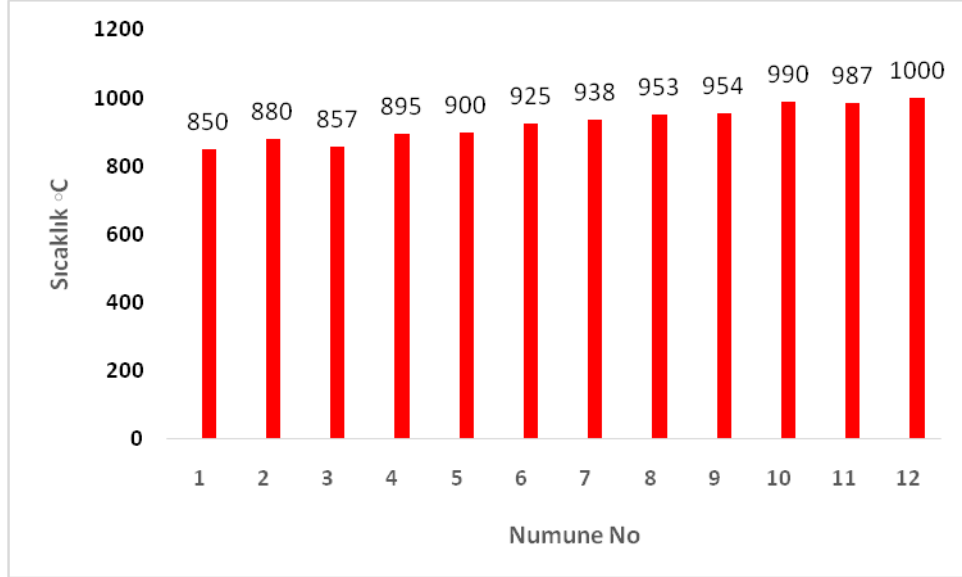


Şekil 9.30. S9 no'lu numunenin çekme testi sonunda kırık yüzey optik fotoğrafları

S9 no'lu numuneye ait kırık yüzey optik fotoğrafları Şekil 9.30'da gösterilmektedir. optik fotoğraflarında da görüldüğü gibi kırılmanın gamze şekilli çukurcuların yoğun olarak bulunduğu ve sünek bir davranış sergileyerek ortaya çıktığı tespit edilmiştir.

9.4.1.4. Sürtünme Kaynaklı Numunelerin Arayüzey Sıcaklık Ölçümleri

Sürtünme kaynağı işlemi esnasında birleştirilecek malzemelerin ara yüzeyinde oluşabilecek sıcaklığı belirlemek amacı ile 250-1800 °C arasında sıcaklık ölçümü yapabilen IGA 15 PLUS marka sıcaklık ölçer lazer ısı detektörü tezgâh üzerine monta edilmiştir. Cihazın kaynaklı bağlantıların birleşme ara yüzeyine odaklı, 70 cm uzağa sabitlenerek, 0,5 sn aralıklarda yapılan ölçümlerin bilgisayar ortamına aktarılması ile sıcaklık ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Sürtünme kuvveti etkisi ile parçaları ayna içerisinde kaymasını, burkulma ve eksen kaçıklıklarını önlemek amacıyla aynaların iç kısmında 35 mm mesafede dayamalar yerleştirilmiştir. Deneylerin tamamında AISI 1010 çeliği sabit aynaya bağlanırken bakır malzemesi dönen aynaya bağlanmıştır. Artan sürtünme basıncına bağlı olarak kaynak arayüzeyinde sıcaklığın arttığı tespit edilmiştir. Kaynak parametreleri sürtünme süresi, sürtünme basıncı, devir sayısı, yığma basıncı, yığma süresi kendi aralarında değerlendirildiğinde ise 30 MPa ve 40 MPa 'lık sürtünme basıncında yapılan birleştirmelerde artan devir sayısına bağlı olarak sıcaklığın azaldığı tespit edilmiştir.



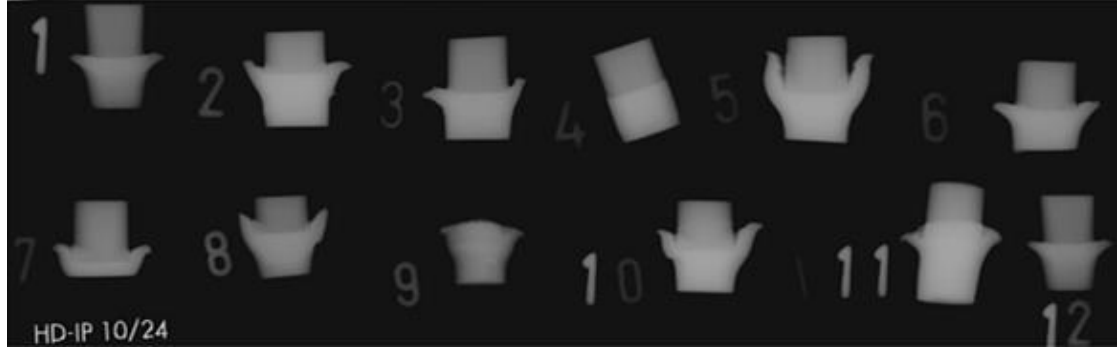
Şekil 9.31. Ara yüzey sıcaklıkları

9.4.1.5.Radyografi Testi Sonuçları

Uluslararası Kaynak Enstitüsüne göre, kaynak kusurları ve radyografik görüntülerin açıklamaları Tablo 9.8’de tanımlanmıştır. Filmler, Şekil 9.32’de gösterilen görüntüleyici içine yerleştirilir ve görüntü Tablo 9.8’e göre değerlendirilir. Tablo 9.8’de gösterilen en yaygın kaynak kusurları kaynak kusurlarının tanımlarına ve radyografik görüntülere göre yetersiz kaynak olduğu tespit edilmiştir (C).



Şekil 9.32.Film inceleme cihazı (Görüntüleyici) [84].



Şekil 9.33. Numunelerin radyografik test fotoğrafları (B1, B2, B3).

Tablo 9.8. Kaynak kusurları ve radyografik görüntünün tanımı [84].

A: Gaz boşluğu Aa: Porozite Ab: Gaz kabarcıkları	Tanım	* Yakalamadan dolayı gaz kabarcıkları oluşur. * Gaz kanalları veya uzun boşluklar
	Radyografik Görüntü	* Dairenin etrafında keskin siyah gölgeler. * Daireye bağlı keskin siyah veya hata değişiminin uzun gölgeleri.
B: Cüruf Ba: Cüruf Bb: Cüruf hataları	Tanım	* Kaynak boyunca cüruf veya diğer yabancı maddeler. * Boşluklarda yakalanmış cüruf veya yabancı maddeler.
	Radyografik Görüntü	* Karanlık gölgeler ya da rastgele şekiller. * Kaynak dikiş kenarına paralel sürekli koyu çizgiler.
C. Yetersiz Kaynak	Tanım	Ana malzeme kaynağı ve malzeme arasında kaynak dikiş boyunca iki boyutlu hata olmaması için birleşme
	Radyografik Görüntü	Keskin kenarlı ince koyu çizgi.
D. Yetersiz Penetrasyon	Derin Tanım	Kök kaynağındaki birleşmede dikiş eksikliği.
	Radyografik Görüntü	Orta koyu dikiş sürekliliği veya farklı çizgide kaynak.
E. Çatlaklar Ea: Dikey çatlaklar Eb: Yatay çatlaklar	Tanım	Metal lokal gerilme mukavemetinin aşılması.
	Radyografik Görüntü	Düz, ince koyu çizgi.
F. Hararet kanalı	Tanım	Kanal veya olukta oluşan yüzey ve dikiş arasındaki kaynak metali
	Radyografik Görüntü	Kaynak dikiş boyunca geniş ve koyu çizgi olarak yayılır .

Bu çalışmada, piyasada yaygın bir şekilde kullanılan ıslah çelik grubundan AISI 1010 çeliğinin sürtünme kaynak yöntemi ile birleştirildikten sonra radyografik olarak incelenmesi yapılmıştır.

Tablo 4'de gösterilen en yaygın kaynak kusurları tanımları ve radyografik görüntülere göre AISI 1010 çeliği yetersiz kaynak grubuna girmektedir (C)

1300 dev/dk devir sayısı, 50 MPa sürtünme basıncı, 60 MPa yığma basıncı, 10 sn sürtünme süresi ve 6 sn yığma süresi ile birleştirilen B3 numunesinde en iyi birleşme gerçekleşmiştir (Şekil.9.32).

Bu durum bize artan devir sayısı ile birlikte daha yeterli ve etkili birleşmelerin gerçekleştiğini göstermiştir.

Devir sayısının artması ile birlikte kaynaklı bağlantıların birleşme kalitesinin artması durumu ise, artan devir sayısı ile birlikte sıcaklığın artmasına ve buda viskoz hale gelen malzeme miktarının ve dolayısı ile bağlantı kalitesini olumsuz etkileyecek yapıların viskoz hale gelen malzemeyle birlikte dışarı atılmasına bağlanabilir.

10.GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER

10.1.Genel Sonuçlar

Bu çalışmada, farklı bileşime sahip olan AISI 1010-Cu çiftinin farklı üretim parametreleri kullanılarak katı hal kaynak yöntemlerinden biri olan sürekli tahrikli sürtünme kaynağı ile birleştirilerek, kaynaklı bağlantılardan işlem parametrelerinin mikroyapı ve mekanik özellikler üzerinde olan etkiler incelenmiş olup, elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

✓ AISI 1010-Cu malzeme çifti (1800, 2100, 2300) dev/dk başarılı bir şekilde birleştirilmiştir.

✓ Kaynaklı bağlantılara ait mikroyapı incelendiğinde numunelerin tamamında bağlantı mukavemetini olumsuz etkileyecek çatlak, boşluk ve bağlantısız bölge olmadığı görülmektedir.

✓ Farklı işlem parametreleri kullanılarak birleştirilen kaynaklı bağlantılar üzerinde makro yapı analizi sonucunda, artan devir sayısına bağlı sürtünme sonucunda bakır daha yumuşak olduğunda çeliğine göre daha fazla boyca kısalma miktarı görülmüştür

✓ Kaynaklı bağlantıların arayüzeyinden alınan mikroyapı fotoğraflarından, sürtünme kaynaklı bağlantıların literatürde belirtilen dört temel bölgeden meydana geldiği görülmüştür. Bu bölgelerin kaynak arayüzeyinden başlayarak esas metale doğru sıralandığında a) ADB olmuş bölge, b) DB olmuş bölge, c) KDB bölge ve d) Esas metal olduğu görülmüştür.

✓ Kaynak sonrası arayüzeyde, değişken parametrelere bağlı olarak en önemli yapısal değişim ADB ve DB’ de meydana geldiği görülmüştür. ADB olmuş bölge, kaynak arayüzeyinin sürtünmesi ile termo-dinamik etki sonucu iki metalin karışımında oluşan bir bant olarak ortaya çıkmaktadır.

✓ Yüksek çevresel hız ve yüksek sürtünme basıncı kullanılarak gerçekleştirilen kaynaklı bağlantılarda, arayüzeyde oluşan sıcaklık derecesinin artması ile birlikte dışarı taşan malzeme miktarı artmıştır. Dışarı taşan malzeme miktarı arttıkça ADB ve DB bölgelerinin daraldığı görülmüştür. Ancak yüksek sürtünme süreleri kullanılarak yapılan kaynaklı bağlantılarda IEB’ nin bağlantının her iki tarafında da genişlediği görülmüştür.

✓ Devir sayısı, sürtünme süresi ve eksenel basınç kuvvetinin ADB ve DB bölgelerinin genişliği ve bu bölgelerde meydana gelen yapısal değişim üzerinde önemli etkiye sahip olduğu görülmüştür.

✓ Sürtünme ve yığma basıncının oluşturduğu plastik deformasyon etkisi ile kaynak arayüzeyinde, vizkoz hale gelen malzemelerin (akış yönüne doğru) haddeleme izlerine dik doğrultuda yöneldikleri görülmüştür.

✓ Kaynaklı bağlantıların deformasyona uğramış bölgelerinde meydana gelen tane küçülmesi ve plastik deformasyon miktarındaki değişimin, devir sayısı ve sürtünme basıncının değişmesine paralel olarak değiştiği tespit edilmiştir.

✓ Bu kaynaklı bağlantılara ait numuneler incelendiğinde kopma; arayüzeye yakın bir noktada başlayıp bakır tarafına doğru sünek kırılma davranışı sergileyerek kopmuştur.

✓ Kaynaklı bağlantıların arayüzeyinde ölçülen sertlik ölçümlerinden, en önemli sertlik artışı 10 sn sürtünme süresi kullanılarak birleştirilen kaynaklı bağlantıda ortaya çıktığı görülmüştür.

✓ En yüksek çekme mukavemeti S4 no' lu numunede 294,67 MPa, en düşük çekme mukavemeti ise S10 no' lu numunede 278,22MPa olarak elde edilmiştir.

✓ Çekme test sonuçlarından, her bir kaynak parametresi kaynaklı bağlantının kalitesini bir miktar etkilediği fakat mekanik ve metalurjik özelliklere en önemli etkinin kullanılan sürtünme kaynak parametrelerinin (devir sayısı, sürtünme basıncı, sürtünme süresi, yığma basıncı ve yığma süresi) etkili olduğu tespit edilmiştir.

✓ Yapılan radyografik teste göre gösterilen en yaygın kaynak kusurları tanımları ve radyografik görüntülere göre AISI 1010 çeliği yetersiz kaynak grubuna girmektedir.

10.2. Öneriler

- ❑ AISI 1010-Cu malzemeler başka katı hal kaynak yöntemleri ile birleştirilebilir.
- ❑ Sürtünme Kaynaklı bağlantıların korozyon dayanımı incelenebilir.
- ❑ Bu kaynaklı birleştirmelerin yorulma dayanımı incelenebilir.
- ❑ Ayrıca bu malzemeler için diğer tahribatsız yöntemler uygulanabilir.

KAYNAKLAR

- Vill, V.I., et. al., (1962), Friction Welding of Metals, AWS, Newyork.
- Tylecote, R.Y., (1968), The Solid Phase Welding of Metals, Edward Arnold Ltd., London, pp 1-150
- Jenning, P., (1971), Some Properties of Dissimilar Metal Joints Made By Friction Welding, The Welding Institute, Abington Hall, Cambridge, pp 147-153.
- Lucas, W., (1971), Process Parameters and Friction Welds, Met. Const. and British, Welding J., pp 293-297.
- Duffin, F.D., Bahrani, A.S., (1973), Frictional Behaviour of Mild Steel of Friction Welding, Wear, pp 53-73.
- Voinov, V.P., et. al., (1972), Fatigue Strength of Friction- Welded Joints Between Steels 20 and 40 Kh, Weld. Prod., pp. 51-54.
- Dobrovidov, A.N., et al, (1975), Selection of Optimum Conditions for The Friction Welding of High-Speed Steel R6m5 to Carbon Steel 45, Welding Prod., pp 22-26.
- Seregin, S.A., Sabantsev, V.P., (1977), The Friction Welding of Quenched Steel, Weld. Prod., pp. 20-23.
- Ellis, C.R.G., (1977), Friction Welding, Some Recent Applications of Friction Welding, Weld. And Metal Fab., pp. 207-213.
- Westgate, S.A., Dunkerton, S.B., (1985), Friction and Flash Welding-Mechanical Properties Reviwed, The Welding Int. Research Bulletin, pp 49-53.
- Murti, K.G.K., Sundersan, S., (1983), Parameter Optimisation in Friction Welding Dissimilar Materials, Met. Const., pp 331-335.
- Yılmaz, M., (1993) Farklı Takım Çeliklerinin Sürtünme Kaynağında Kaynak Bölgesinin İncelenmesi. Doktora Tezi. Y.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü
- Yılbaş, B.S., Şahin A.Z., et al, (1994), Friction Welding of St-Al and Al-Cu Materials, Journal of Mat. Proc. Tech., 49: pp 431-443
- J. H. Yan, X. L. Zheng, K. Zhao, Prediction of fatigue life and its probability distribution of notched friction welded joints under variable-amplitude loading International Journal of Fatigue, Volume 22, Issue 6, July 2000, Pages 481-494
- Bendzsak G.J., Northt. H. and Lİ. Z., (1997), Numerical Model for Steady-State Flow İn Friction Welding, Acta Mater., 45. No.4 : pp 1735-1745.

- N. Özdemir, Investigation of the mechanical properties of friction-welded joints between AISI 304L and AISI 4340 steel as a function rotational speed, *Materials Letters*, Volume 59, Issues 19-20, August 2005, Pages 2504-2509
- Trepte, M., (1989), Burnoff Length in Friction Welding, *Weld. Int.*, pp 980-983
- Bolshakov, M.V., et. al., (1972), The Vacuum Friction Welding of High-Melting And High-Temperature Alloys, *Automatic Weld.*, pp. 60-60.
- L. D'Alvise, E. Massoni, S.J. Walløe, Finite element modelling of the inertia friction welding process between dissimilar materials, *Journal of Mat. Proc. Tech* , Volumes 125-126, 9 September 2002, Pages 387-391
- Mumin Sahin, Evaluation of the joint-interface properties of austenitic-stainless steels (AISI 304) joined by friction welding, *Materials & Design*, Volume 28, Issue 7, 2007, Pages 2244-2250
- V. V. Satyanarayana, G. Madhusudhan Reddy, T. Mohandas, Dissimilar metal friction welding of austenitic–ferritic stainless steels, *Journal of Mat. Proc. Tech* . Volume 160, Issue 2, 20 March 2005, Pages 128-137
- Hakan Ates, Mehmet Turker, Adem Kurt, Effect of friction pressure on the properties of friction welded MA956 iron-based superalloy, *Materials & Design*, Volume 28, Issue 3, 2007, Pages 948-953
- Niyazi Özdemir, Nuri Orhan, Microstructure and mechanical properties of friction welded joints of a fine-grained hypereutectoid steel with 4% Al, *J. of M. Processing Technology*, Volume 166, Issue 1, 15 July 2005, Pages 63-70
- N. Özdemir, F. Sarsılmaz, A. Hasçalık, Effect of rotational speed on the interface properties of friction-welded AISI 304L to 4340 steel, *Materials & Design*, Volume 28, Issue 1, 2007, Pages 301-307
- Sare Celik, Ismail Ersozlu, Investigation of the mechanical properties and microstructure of friction welded joints between AISI 4140 and AISI 1050 steels, *Materials & Design*, Volume 30, Issue 4, April 2009, Pages 970-976
- Suresh D. Meshram, T. Mohandas, A comparative evaluation of friction and electron beam welds of near- α titanium alloy, *Materials & Design*, Volume 31, Issue 4, April 2010, Pages 2245-2252
- N. Arivazhagan, Surendra Singh, Satya Prakash, G.M. Reddy, High temperature corrosion studies on friction-welded dissimilar metals, *Materials Science and Engineering: B*, Volume 132, Issues 1-2, 25 July 2006, Pages 222-227

- S.D. Meshram, T. Mohandas, G. Madhusudhan Reddy, Friction welding of dissimilar pure metals, *Journal of Mat. Proc. Tech*, Volume 184, Issues 1-3, 12 April 2007, Pages 330-337
- P. Sathiya, S. Aravindan, A. Noorul Haq, K. Paneerselvam , Optimization of friction welding parameters using evolutionary computational techniques, *Journal of Mat. Proc. Tech*, Volume 209, Issue 5, 1 March 2009, Pages 2576-2584
- Bekir S. Yilbaş, Ahmet Z. Şahin, Nafiz Kahraman, Ahmed Z. Al-Garni, Friction welding of St---Al and Al---Cu materials, *Journal of Mat. Proc. Tech*. Volume 49, Issues 3-4, 15 February 1995, Pages 431-443
- D. G. Lee, K. C. Jang, J. M. Kuk, I. S. Kim, Fatigue properties of inertia dissimilar friction-welded stainless steels, *Journal of Materials Processing Technology*, Volumes 155-156, 30 November 2004, Pages 1402-1407
- W.-Y. Li, T.J. Ma, S.Q. Yang, Q.Z. Xu, Y. Zhang, J.L. Li, H.L. Liao, Effect of friction time on flash shape and axial shortening of linear friction welded 45 steel, *Materials Letters*, Volume 62, Issue 2, 31 January 2008, Pages 293-296
- M. Yılmaz, M. Çöl, M. Acet, Interface properties of aluminum/steel friction-welded components, *Materials Characterization*, Volume 49, Issue 5, December 2002, Pages 421-429
- Sare Celik, Ismail Ersozlu, Investigation of the mechanical properties and microstructure of friction welded joints between AISI 4140 and AISI 1050 steels, *Materials & Design*, Volume 30, Issue 4, April 2009, Pages 970-976
- D. Ananthapadmanaban, V. Seshagiri Rao, Nikhil Abraham, K. Prasad Rao, A study of mechanical properties of friction welded mild steel to stainless steel joints, *Materials & Design*, Volume 30, Issue 7, August 2009, Pages 2642-2646
- Tomoyuki Uwaba, Shigeharu Ukai, Tatsuyoshi Nakai, Masayuki Fujiwara, Properties of friction welds between 9Cr-ODS martensitic and ferritic–martensitic steels, *Journal of Mat. Proc. Tech*, 367-370, Part 2, 1 2007, Pages 1213-1217
- Won-Bae Lee, Young-Jig Kim, Seung-Boo Jung, Effects of copper insert layer on the properties of friction welded joints between TiAl and AISI 4140 structural steel, *Intermetallics*, Volume 12, Issue 6, June 2004, Pages 671-678
- ‘Welding Handbook’, Cilt 4, American Welding Society, 1984, Böl. 5
- ‘Demir ve Çeliklerin Metalografisi’ Prof.Dr. Erdoğan Tekin, Böl. 9

- ‘Physical Metallurgy’, Avner, 1985.
- ‘ The Procedure Handbook of Arc Welding’ , The Lincoln Electric CoMPany,1994,
- Fuller A.G, Nodestructive Assessment of the Properties of Ductile Iron castingi AFS transaction 80-162, 751-768
- Gilbert G.N.J “An Introduction to the Mechanical Properties of Nodüler cast Iron” BCIRA, Report 1649, 2003
- Gül, A., “Farklı Metalsel Malzemelerin Sürtünme Kaynağında, Kaynak Parametrelerinin Dikiş Özelliklerine Etkisi”, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsüİstanbul, 2006
- Çil, E., “Sürtünme Kaynağıyla Birleştirilmiş Paslanmaz Çelik ve Bakır Parçaların Kaynak Bölgesi Özelliklerinin İncelenmesi”, Trakya Üniv., Fen. Bil. Enst., Y.Lisans Tezi, (2009), Edirne
- SAVAŞKAN, T., 1990. Malzeme Bilgisi ve Muayenesi. K.T.Ü. Makine Mühendisliği Bölümü, Trabzon
- ÇAKIR, A., 1984. Metallerde Korozyona Giriş, Isparta
- DORUK, M., 1982. Korozyon ve Önlenmesi. O.D.T.Ü. Metalurji Mühendisliği Bölümü,
- UYSAL, M., (2006), CrN, TiN Kaplanmış ve Kaplanmamış AISI 304 Paslanmaz Çeliğinin Korozyon Özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi.
- KURŞUN, C., (2012), Bakır Esaslı Alaşımların Yapısal ve Isısal Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi
- ÖZTEMİZ, H.M., (2012), Bakır ve Alaşımlarının Sürtünme Karıştırma Kaynağı İle Birleştirilmesi ve Kaynak Parametrelerinin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklere Etkisinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi
- YILDIZLI, K., (2011), Burulma Deney Föyü, Makine Müh.Blm, Ondokuz Mayıs Üniversitesi
- Süzen, A., “Gemi saclarının kaynak bağlantılarında kaynak parametrelerinin dikiş geometrisine etkisinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya, (2009).
- Özakın, N., “AH ve DH kalite gemi saclarının değişik kaynak yöntemleri ve kaynak pozisyonlarındaki mekanik özelliklerinin ve mikro yapılarının irdelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Zonguldak, (2010).

- Korkmaz, Ö. E., “Uçaklarda kullanılan alüminyum malzemelerdeki korozyonun incelenmesi, önlenmesi ve tahribatsız muayene ile tespiti”, Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, (2010).
- İnternet: Milli Eğitim Bakanlığı “Uçaklarda Tahribatsız Muayene” http://megep.meb.gov.tr/mte_program_modul/modul_pdf/525MT0004.pdf(2012).
- Seçim, C., “Tahribatsız muayene yöntemleri ve uygulama alanları”, Yüksek Lisans Tezi, *Mustafa Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Hatay, (2011).
- İnternet: Karadeniz Teknik Üniversitesi “Tahribatsız Muayene”<http://makina.ktu.edu.tr/dosyalar/lisans/laboratuvarfoyleri/lab21.pdf> (2009).
- Kurt, K., “DH 36 gemi sacının farklı kaynak yöntemleri ile mekanik özelliklerinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya, (2008).
- Asarkaya, M., “Gemi inşasında kullanılan kaynak yöntemlerinin mekanik özelliklere etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya, 54-86 (2006).
- Savaskan, T., “Malzeme Muayenesi”, Malzeme bilgisi ve muayenesi, *Akademi Yayınları*, Trabzon, 318-368 (2004).
- İnternet: Milli Eğitim Bakanlığı, “Metal Teknolojisi Tahribatlı Muayene” http://hbogm.meb.gov.tr/modulerprogramlar/kursprogramlari/metal/moduller/tahribatli_muayene.pdf.
- İnternet: Milli Eğitim Bakanlığı, “Metal Teknolojisi Sertlik Ölçme Yöntemleri” http://hbogm.meb.gov.tr/modulerprogramlar/kursprogramlari/metal/moduller/sertlik_olcme_yontemleri.pdf.
- Kayalı, E. S., Ensari, C. ve Dikeç, F., 1983, Metalik Malzemelerin Mekanik Deneyleri, *İTÜ Kütüphanesi*, 22-31.
- Yıldırım, M. M., Pakdil, M., Doğan, Z. S. ve Çakan, A., 2001, Metalik Malzemelerde Mekanik ve Tahribatsız Muayene Yöntemleri, *Mustafa Kemal Üniversitesi Yayınları*, Yayın No: 6, 1-122
- <http://www.ktu.edu.tr>
- http://makina.ktu.edu.tr/static/lab_foy/lab21.doc
- <http://www.wtndt.metu.edu.tr/ndt/tr/node/8>

<http://asalmakina.com/anasayfam.asp?sid=6&pid=4>

Romeu R. da Silva; Luiz P. Caloba; Marcio. H. S. Siqueira; Joao. M. A. Rebello: Pattern recognition of weld defects detected by radiographic test, NDT&E International 37 (2004)

Y. Tekiz: The Non-destructive Testings, ITU Faculty of Mechanical Engineering, Istanbul (1984)

M. Albayrak: The Control and Inspection of the Welding Seams, IGDAS, (1997)

<http://www.ndt-ed.org>

<http://www.wtndt.metu.edu.tr>

TS EN 444, TS EN 462 Standarts

Ş. Ekinçi: The Evaluation of the Welding Seam Errors with Digital Radiographic Methods, The Atom Energy Foundation of Turkey, Istanbul

The Certificate of Material Testing Knowledge, Ereğli Iron and Steel Plants T.A.Ş

Mustafa Taskin, Ugur Caligulu, Mustafa Turkmen," X-Ray Tests of AISI 430 and 304 Stainless Steels and AISI 1010 Low Carbon Steel Welded by CO₂ Laser Beam Welding" MP-Materials Testing-Materials and Components Technology and Application, 53 (11-12), pp. 741-747, 2011.

N. Ozakin; H. Baycik: The Radiographic Inspection of the Welding Seam of the Body of Ship, The 4th Iron–Steel Congress, Karabuk (2007), p. 289

A. Topuz: The Non-destructive Inspections, YTU, Istanbul (1993).

Dikbas, H., Caligulu, U., Taskin, M. and Turkmen, M., X-Ray Radiography of Ti6Al4V Welded by Plasma Tungsten Arc (PTA) Welding, Mp-Materials Testing-Materials and Components Technology and Application, Vol. 55, 03/2013.

Katı. N, “AISI 420/ AISI 4340 Çelik Çiftinin Sürtünme Kaynak Yöntemi İle Birleştirilebilirliğinin Araştırılması” Fırat üniversitesi. (2014)

MERCAN. S, Sürtünme Kaynağı İle Birleştirilmiş Aıısı 2205 / Aıısı 1020 Malzeme Çiftinin Mikroyapı Ve Yorulma Davranışının Araştırılması Fırat Üniversitesi (2013).

ÇALIGÜLÜ. U, AISI 304–430 Paslanmaz–AISI 1010 Çelik Çiftlerinin Lazer Yöntemi ile Kaynağında Birleşme Özelliklerinin İncelenmesi Fırat üniversitesi (2007)

TAŞKIN. M, ÇALIGÜLÜ. U, TÜRKMEN. M, “X-Ray Tests of. AISI 430 and 304 Stainless Steels and AISI 1010 Low Carbon steel Welded by Co₂ Laser beam welding “ meterals testing, 53 (11-12), 741-747, (2011).

KIRIK. İ, 2012. Sürtünme Kaynağı ile birleştirilen AISI 1040/AISI 304L çelik çiftinin elektrokimyasal korozyon dayanımının araştırılması, Doktora tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.

ÖZGEÇMİŞ

Mustafa AÇIK, 1985 doğumlu olup ilk, orta ve lise eğitimini K.Maraş/ Elbistan'da tamamladı. 2011 yılında Fırat Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Metal Eğitimi Bölümü, Metal Öğretmenliği Programından mezun oldu.

Mustafa AÇIK, Fırat Üniversitesi Metalurji Eğitimi Anabilim dalında yüksek lisans eğitimine devam etmektedir. Mustafa AÇIK evlidir. Yabancı dili İngilizce'dir.