

T.C.
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BAKIR VE ALAŞIMLARININ SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI İLE
BİRLEŞTİRİLMESİ VE KAYNAK PARAMETRELERİNİN MİKROYAPI VE
MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

HASAN MURAT ÖZTEMİZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

MALATYA
AĞUSTOS 2012

Tezin Başlığı: Bakır ve Alaşımlarının Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile Birleştirilmesi
ve Kaynak Parametrelerinin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklere Etkisinin Araştırılması

Tezi Hazırlayan: Hasan Murat ÖZTEMİZ

Sınav Tarihi: 1 Ağustos 2012

Yukarıda adı geçen tez jürimizce değerlendirilerek Makine Mühendisliği Ana Bilim
Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Sınav Jürisi Üyeleri

Yrd. Doç. Dr. İlyas SOMUNKIRAN (Jüri Başkanı)

Yrd. Doç. Dr. Mehmet ERDEM (Danışman)

Yrd. Doç. Dr. Mehmet ALTUĞ

İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Onayı

Prof. Dr. Mehmet ALPASLAN

Enstitü Müdürü

ONUR SÖZÜ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum ‘‘Bakır ve Alaşımlarının Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile Birleştirilmesi ve Kaynak Parametrelerinin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklere Etkisinin Araştırılması’’ başlıklı bu çalışmanın bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurmaksızın tarafımdan yazıldığını ve yararlandığım bütün kaynakların, hem metin içinde hem de kaynakçada yöntemine uygun biçimde gösterilenlerden oluştuğunu belirtir, bunu onurumla doğrularım.

Hasan Murat ÖZTEMİZ

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

BAKIR VE ALAŞIMLARININ SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI İLE BİRLEŞTİRİLMESİ VE KAYNAK PARAMETRELERİNİN MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

H. Murat ÖZTEMİZ

İnönü Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

145+xiii sayfa

2012

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Mehmet ERDEM

Bu çalışmada 3 mm kalınlığındaki bakır ve pirinç levhalar (bakır-bakır ve pirinç-pirinç) üç farklı devir (710-900-1120 d/d) ve ilerleme hızı (31,5, 40, 50, 80 mm/d) kullanılarak sürtünme karıştırma kaynağı (SKK) ile birleştirilmiştir. Birleştirme işlemi dikey başlı üniversal freze tezgahı kullanılarak yapılmıştır. Kaynaklı numunelerin mekanik özelliklerini tespit etmek amacıyla çekme, eğme ve mikrosertlik deneyleri yapılmıştır. Ayrıca kaynak bölgelerinde mikroyapı incelemeleri ve yüzey pürüzlülük ölçümleri yapılmıştır. Elde edilen deney sonuçlarına göre; Bakır ve alaşımları SKK ile başarılı bir şekilde birleştirilmiştir. Parçaların eğme, çekme ve mikro sertlik değerleri kaynak ısısı ve porozite miktarına bağlı olarak değiştiği tespit edilmiştir. Yüzey pürüzlülük değerleri ise düşük ilerleme hızlarında artmış ve yüksek ilerleme hızlarında ise azalmıştır.

Anahtar Kelimeler: Pirinç levhalar, Bakır levhalar, çekme, eğme, mikrosertlik, mikroyapı, yüzey pürüzlülüğü, sürtünme karıştırma kaynağı.

ABSTRACT

Master Thesis

COPPER AND ALLOYS JOINING BY FRICTION STIR WELDING AND INVESTIGATION OF THE EFFECTS WELD PARAMETERS ON MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES

H. Murat ÖZTEMİZ

İnönü University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering

145+xiii pages

2012

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Mehmet ERDEM

In this study, using three different rotation speed (710-900-1120 rpm) and welding speed (31,5, 40, 50, 80 mm / min) 3 mm thick copper and brass plates (copper-copper, copper-brass, and brass- brass) was joined by friction stir welding (FSW). Joining process was performed using vertical head universal milling machine. In order to determine the mechanical properties of welded specimens were carried out tensile, bending and micro-hardness tests. In addition, the welded zones were made investigations of microstructure and surface roughness measurements. According to the results from experiments obtained; copper and copper alloys successfully are joined by FSW. Bending, tensile and micro-hardness values of samples were determined depending on vary weld temperature and the amount of porosity. Surface roughness values were increased in low weld speed and decreased in high weld speed.

Keywords: Brass plates, Copper plates, tensile, bending, microhardness, microstructural, surface roughness, friction stir welding.

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının her aşamasında yardım, öneri ve desteklerini esirgemedi beni her konuda yönlendiren danışman hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Mehmet ERDEM' e;

İmalat sürecinde bana yardımcı olan Yrd. Doç. Dr. Mehmet ALTUĞ, Mehmet BUYRUK, Mehmet Ali DEMİRCİ, Turan Bilici ve Ümit ATEŞ' e;

Tezin deneysel aşamalarında bana yardımcı olan Fırat Üniversitesi Öğretim üyesi Yrd. Doç. Dr. İlyas SOMUNKIRAN ve Uzman Selçuk KARATAŞ' a;

Bu tezi yazdığım süre boyunca her aşamayı takip eden ve beni motive eden Makine Mühendisliği Bölüm Başkanı hocam Prof. Dr. Suat CANBAZOĞLUNA' na

Ayrıca tüm hayatım boyunca olduğu gibi bu çalışmalarım süresince de benden her türlü desteklerini esirgemeyen değerli AİLEM' e

teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xiii
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK YÖNTEMLERİNİN SINIFLANDIRILMASI	2
2.1. Katı Hal Kaynak Yöntemleri	3
2.1.1. Vibrasyon Kaynak Yöntemi	3
2.1.2. Ultrasonik Kaynak	4
2.1.3. Sürtünme (Spin) Kaynağı	5
2.1.3.1. Sürekli Tahrikli Sürtünme Kaynağı	7
2.1.3.2. Volan Tahrikli Sürtünme Kaynağı	7
2.1.3.3. Kombine Kaynak Yöntemi	8
2.1.4. Sürtünme Karıştırma Kaynağı	8
2.2. Ergitme Kaynağı	9
2.2.1. Elektrik Ark Kaynağı	9
2.2.1.1. Standart Elektrik Arkı Kaynağı	9
2.2.1.2. Özlü Tellerle Elektrik Arkı Kaynağı	10
2.2.1.3. Gazaltı Elektrik Arkı Kaynağı	10
2.2.1.4. Tozaltı Elektrik Arkı Kaynağı	11
2.2.2. Gaz Kaynağı	12
3. KURAMSAL TEMELLER	13

3.1.	Sürtünme Karıştırma Kaynağı	13
3.1.1.	Sürtünme karıştırma Kaynağına Etki Eden Faktörler	17
3.2.	Sürtünme Karıştırma Kaynağında Kullanılan Takımlar	19
3.3.	Kaynak Metalürjisi	25
3.4.	Kaynak Bölgesinin Mekanik Özellikleri	28
3.5.	Sürtünme Karıştırma Kaynağının Uygulama Alanları	29
3.6.	Sürtünme Karıştırma Kaynağının Avantaj ve Dezavantajları	31
3.7.	Bakır ve Bakır Alaşımlarının Kaynağı	32
3.7.1.	Bakır Alaşımlarının Kaynak Kabiliyeti	33
3.7.2.	Bakır ve Bakır Alaşımlarının Örtülü Elektrot ile Kaynağı	34
3.7.3.	Bakır ve Bakır Alaşımlarının Gazaltı Kaynağı	40
3.7.4.	Bakırın Gazaltı Kaynağı	41
3.7.5.	Bakır ve Bakır Alaşımlarının TIG Kaynağı	43
3.7.6.	Bakırın TIG Kaynağı	44
3.7.7.	Silis Bronzunun TIG Kaynağı	45
3.7.8.	Bakır ve Bakır Alaşımlarının Karbon-Ark Kaynağı	46
4.	MATERYAL VE YÖNTEM	47
4.1.	Materyal	47
4.1.1.	Deney Düzeneği	47
4.1.1.1.	Dik Başlıklı Üniversal Freze Tezgahı	47
4.1.1.2.	Sabitleme Aparatları	48
4.1.1.3.	Kaynak Takımı (Karıştırıcı Uç)	49
4.1.2.	Kaynak İşleminde Kullanılan Levha Malzemeleri	50
4.2.	Yöntem	51
4.2.1.	Sürtünme Karıştırma Kaynak Deneylerinin Yapılışı	51
5.	ARAŞTIRMA VE BULGULARI	52
5.1.	Kaynaklanmış Numuneler	53

5.2.	Çekme Deneyleri	56
5.2.1.	Çekme Deney Sonuçları	58
5.3.	Eğme Deneyleri	60
5.3.1.	Eğme Deney Sonuçları	60
5.4.	Mikrosertlik Deneyi	62
5.4.1.	Mikrosertlik Deney Sonuçları	63
5.5.	Yüzey Pürüzlülüğü	73
5.6.	Kaynaklı Bölgelerin Mikroyapı İncelemeleri	76
5.6.1.	Cu-Cu Sürtünme Karıştırma Kaynak Grubuna Ait Mikroyapı Fotoğrafları	77
5.6.2.	Pirinç-Pirinç Sürtünme Karıştırma Kaynak Grubuna Ait Mikroyapı Fotoğrafları	87
6.	TARTIŞMA VE SONUÇ	97
6.1.	Tartışma	97
6.2.	Sonuç	97
6.2.1.	Bakır-Bakır Çekme Deney Sonuçları	97
6.2.2.	Pirinç-Pirinç Çekme Deney Sonuçları	99
6.2.3.	Bakır-Bakır Eğme Deney Sonuçları	101
6.2.4.	Pirinç-Pirinç Eğme Deney Sonuçları	102
6.2.5.	Mikrosertlik Deney Sonuçları	103
6.2.6.	Yüzey Pürüzlülük Deney Sonuçları	104
6.3.	Öneriler	105
7.	KAYNAKLAR	106
8.	EKLER	110

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1.Kaynak yöntemlerinin şematik Sınıflandırılması	2
Şekil 2.2.Vibrasyon Kaynağının Şematik Görünümü	3
Şekil 2.3. Farklı Enerji Yönlerinin Dizaynı	4
Şekil 2.4. Farklı Bağlantı Dizaynları	4
Şekil 2.5.Ultrasonik Kaynak Makinesinin Şematik Görünüşü	5
Şekil 2.6.Spin Kaynağının Şematik Görünüşü	6
Şekil 2.7.Spin Kaynak Makinesinin Şematik Görünüşü.....	7
Şekil 2.8.Elektrik ark kaynağı uygulaması	10
Şekil 2.9.Gazaltı kaynak uygulaması.....	11
Şekil 2.10.Tozaltı kaynak uygulaması	12
Şekil3.1.Sürtünme karıştırma kaynağının (friction stir welding) şematik . gösterimi	13
Şekil3.2.Lineer sürtünme kaynağının şematik gösterimi	14
Şekil 3.3. Sürtünme Karıştırma Kaynağı ve ark kaynak yöntemi ile kaynak . yapılmış malzemelerin çarpılma ve burulma incelemesi.....	16
Şekil 3.4. SKK uygulanan CuZn40 alaşımının devir sayısı ve ilerleme hızı . parametrelerinin değişimine bağlı numune yüzey ve röntgen incelemeleri .	18
Şekil 3.5. SKK uygulanan CuZn40 alaşımının devir sayısı ve ilerleme hızı parametrelerinin değişimine bağlı kaynak merkezinin mikro içyapı değişimi	18
Şekil 3.6.Sabit İlerleme hızı değişken devir sayısına bağlı vickers sertlik değişimi	19
Şekil3.7.Özel tasarlanmış M5 vida adımlı probe (batıcı uç)	19
Şekil3.8.Çeşitli Whorl™ takım konfigürasyonları	21
Şekil3.9.75 mm kalınlığındaki AA6082T6 alaşımının kaynağında Whorl™ takımının . kullanılması, kaynağın bitmiş hali ve kaynak dikişinin görüntüsü	21
Şekil 3.10.MX Triflute™ takımın resim ve şematik çalışma şekli	22

Şekil 3.11.MX Triflute™ ve Flared-Triflute™ takım dizaynları	22
Şekil 3.12. Flared-Triflute takım ile yapılmış olan bindirme kaynağında kaynak ara . yüzeyinin görünümü	23
Şekil 3.13.Skew-Stir takımın çalışma prensibi ve A-Skew takımın resmi	24
Şekil 3.14.Whorl™ ve MX Triflute™ takımlarının omuz profilleri	24
Şekil 3.15.Sürtünme karıştırma kaynağında kaynak bölgesinde oluşan içyapının . şematik görünümü.....	25
Şekil 3.16.Sürtünme karıştırma kaynağında batıcı ucun eğik konumda daldırılması ile . farklı kalınlıklardaki levhaların birleştirilmesi	27
Şekil 3.17.Sürtünme karıştırma kaynağı yapılmış Al-alaşımının kaynak . bölgesinin kesiti	28
Şekil 3.18.Yüksek hız feribotlarında kullanılan alüminyum ekstrüzyon panellerinin . Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile birleştirilmesi	30
Şekil 3.19.Space Shuttle External Tank projesi ve Marshall Space Flight Center . laboratuvarındaki Sürtünme Karıştırma Kaynak sistemlerinden görüntüler ..	31
Şekil 3.20.Bakır ve bakır alaşımlarının kaynağında kullanılan kaynak ağzı hazırlıkları . a, b,c, ince malzemelerde, d, e, kalın parçalarda	38
Şekil 3.21.Gaz altı kaynak yöntemiyle bakır levhaların kaynağı	42
Şekil 3.22.Bakır ve alaşımlarının TIG kaynağı† 94 °C ön ısıtma, * 150 °C ön ısıtma ..	44
Şekil 3.23.Silis bronzunun TIG kaynağı	45
Şekil 4.1.Dik Başlıklı Üniversal Takım Tezgahı	48
Şekil 4.2.Altlık, köşebentler ve civatalardan bir görünüm	48
Şekil 4.3.Karıştırıcı uç teknik resim	49
Şekil 4.4.Kaynak takımına (karıştırıcı uç) ait resimler	49
Şekil 4.5.Bakır ve pirinç levhalara ait ölçüler	50
Şekil 5.1.Sürtünme karıştırma kaynağı ile kaynaklamış malzeme grupları	52
Şekil 5.2.710d/d' da farklı ilerleme hızlarında birleştirilmiş bakır levhalar.....	53
Şekil 5.3.900d/d' da farklı ilerleme hızlarında birleştirilmiş bakır levhalar.....	53
Şekil 5.4.1120d/d' da farklı ilerleme hızlarında birleştirilmiş bakır levhalar.....	54

Şekil 5.5.710d/ d' da farklı ilerleme hızlarında birleştirilmiş pirinç levhalar.....	54
Şekil 5.6.900d/ d' da farklı ilerleme hızlarında birleştirilmiş pirinç levhalar.....	55
Şekil 5.7.1120d/ d' da farklı ilerleme hızlarında birleştirilmiş pirinç levhalar.....	55
Şekil 5.8.Çekme test numune ölçüleri	56
Şekil 5.9.Çekme ve eğme testlerinde kullanılan test cihazı.....	57
Şekil 5.10.Bilgi ekranında test sonuçlarından bir görüntü.....	57
Şekil 5.11.Eğme numune boyutları	60
Şekil 5.12.Eğme deneyi sonrası numunelerin görünümü	62
Şekil 5.13.Mikrosertlik ölçüm noktalarının şematik gösterimi	62
Şekil 5.14.Mikrosertlik ölçüm cihazı.....	63
Şekil 5.15.710d/d-31,5mm/d kaynak grubuna ait Cu-Cu levhaların mikrosertlik grafığı.....	63
Şekil 5.16.710d/d-40mm/d kaynak grubuna ait Cu-Cu levhaların mikrosertlik grafığı.....	64
Şekil 5.17.710d/d-50mm/d kaynak grubuna ait Cu-Cu levhaların mikrosertlik grafığı.....	64
Şekil 5.18.900d/d-31,5mm/d kaynak grubuna ait Cu-Cu levhaların mikrosertlik grafığı.....	65
Şekil 5.19. 900d/d-40mm/d kaynak grubuna ait Cu-Cu levhaların mikrosertlik grafığı.....	65
Şekil 5.20. 900d/d-50mm/d kaynak grubuna ait Cu-Cu levhaların mikrosertlik grafığı.....	66
Şekil 5.21.1120d/d-31,5mm/d kaynak grubuna ait Cu-Cu levhaların mikrosertlik grafığı.....	66
Şekil 5.22.1120d/d-40mm/d kaynak grubuna ait Cu-Cu levhaların mikrosertlik grafığı.....	67
Şekil 5.23.1120d/d-50mm/d kaynak grubuna ait Cu-Cu levhaların mikrosertlik	

grafiği.....	67
Şekil 5.24.Cu-Cu levhaların kaynak bölgesi mikrosertlik değerlerinin toplu gösterimi	68
Şekil 5.25.710d/d-40mm/d kaynak grubuna ait Pirinç-Pirinç levhaların mikrosertlik grafiği.....	68
Şekil 5.26.710d/d-50mm/d kaynak grubuna ait Pirinç-Pirinç levhaların mikrosertlik grafiği.....	69
Şekil 5.27.710d/d-80mm/d kaynak grubuna ait Pirinç-Pirinç levhaların mikrosertlik grafiği.....	69
Şekil 5.28.900d/d-40mm/d kaynak grubuna ait Pirinç-Pirinç levhaların mikrosertlik grafiği.....	70
Şekil 5.29.900d/d-50mm/d kaynak grubuna ait Pirinç-Pirinç levhaların mikrosertlik grafiği.....	70
Şekil 5.30.900d/d-80mm/d kaynak grubuna ait Pirinç-Pirinç levhaların mikrosertlik grafiği.....	71
Şekil 5.31.1120d/d-40mm/d kaynak grubuna ait Pirinç-Pirinç levhaların mikrosertlik grafiği.....	71
Şekil 5.32.1120d/d-50mm/d kaynak grubuna ait Pirinç-Pirinç levhaların mikrosertlik grafiği.....	72
Şekil 5.33.1120d/d-80mm/d kaynak grubuna ait Pirinç-Pirinç levhaların mikrosertlik grafiği.....	72
Şekil 5.34.Pirinç-Pirinç levhaların kaynak bölgesi mikrosertlik değerlerinin toplu gösterimi	73
Şekil 5.35.Yüzey pürüzlülük ölçümde izlenilen yöntem.....	74
Şekil 5.36.Yüzey pürüzlülük ölçümüne ait örnek resimler	74
Şekil 5.37.Cu-Cu kaynak grubu yüzey pürüzlülük değişimi	75
Şekil 5.38.Pirinç-Pirinç kaynak grubu yüzey pürüzlülük değişimi	76
Şekil 5.39.710d/d-31,5mm/d çalışma şartlarında yapılan Cu-Cu SKK kaynağı	77
Şekil 5.40.710d/d-40mm/d çalışma şartlarında yapılan Cu-Cu SKK kaynağı	78

Şekil 5.41.710d/d-50mm/d çalışma şartlarında yapılan Cu-Cu SKK kaynağı	79
Şekil 5.42.900d/d-31,5mm/d çalışma şartlarında yapılan Cu-Cu SKK kaynağı	80
Şekil 5.43.900d/d-40mm/d çalışma şartlarında yapılan Cu-Cu SKK kaynağı	81
Şekil 5.44.900d/d-50mm/d çalışma şartlarında yapılan Cu-Cu SKK kaynağı	82
Şekil 5.45.1120d/d-31,5mm/d çalışma şartlarında yapılan Cu-Cu SKK kaynağı	83
Şekil5.46.1120d/d-40mm/d çalışma şartlarında yapılan Cu-Cu SKK kaynağı	84
Şekil5.47.1120d/d-50mm/d çalışma şartlarında yapılan Cu-Cu SKK kaynağı	85
Şekil5.48.710d/d-40mm/d çalışma şartlarında yapılan pirinç-pirinç SKK kaynağı	87
Şekil5.49.710d/d-50mm/d çalışma şartlarında yapılan pirinç-pirinç SKK kaynağı	88
Şekil5.50.710d/d-80mm/d çalışma şartlarında yapılan pirinç-pirinç SKK kaynağı	89
Şekil5.51.900d/d-40mm/d çalışma şartlarında yapılan pirinç-pirinç SKK kaynağı	90
Şekil5.52.900d/d-50mm/d çalışma şartlarında yapılan pirinç-pirinç SKK kaynağı	91
Şekil5.53. 900d/d-80mm/d çalışma şartlarında yapılan pirinç-pirinç SKK kaynağı	92
Şekil5.54.1120d/d-40mm/d çalışma şartlarında yapılan pirinç-pirinç SKK kaynağı	93
Şekil5.55.1120d/d-50mm/d çalışma şartlarında yapılan pirinç-pirinç SKK kaynağı	94
Şekil5.56.1120d/d-80mm/d çalışma şartlarında yapılan pirinç-pirinç SKK kaynağı	95

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge3.1. Dört kaynak yönteminin bakır ve bakır alaşımlarındaki kaynağı	35
Çizelge3.2. OERLIKON' un bakır ve bakır alaşımlarının kaynağı için ürettiği . standartları	36
Çizelge 3.3. Bakır ve bakır alaşımlarının özellikleri	36
Çizelge 3.4. Kaynak metallerinin bazı mekanik özellikleri	37
Çizelge 4.1. Bakır ve pirinç malzemelere ait kimyasal veriler	50
Çizelge 4.2. Bakır ve pirinç malzemeler ait mekanik veriler	50
Çizelge 5.1. Cu-Cu SKK gruplarına ait çekme deneyi sonuçları	58
Çizelge5.2. Pirinç-Pirinç SKK gruplarına ait çekme deneyi sonuçları.....	59
Çizelge5.3. Cu-Cu SKK gruplarına ait eğme deneyi sonuçları	60
Çizelge5.4. Pirinç-Pirinç SKK grupları eğme deneyi sonuçları	61
Çizelge 5.5. Bakır-Bakır kaynak grubuna ait yüzey pürüzlülük değerleri	74
Çizelge 5.6. Pirinç-Pirinç kaynak grubu yüzey pürüzlülük ölçümleri.....	75
Çizelge 6.1. Cu-Cu SKK numuneleri çekme deneyi mukavemet verileri	97
Çizelge 6.2. Cu-Cu SKK numuneleri çekme deneyi % uzama verileri	99
Çizelge 6.3. Pirinç-Pirinç SKK numuneleri çekme deney verileri	99
Çizelge 6.4. Pirinç-Pirinç SKK numuneleri çekme deneyi % uzama verileri	100
Çizelge 6.5. Cu-Cu SKK maksimum eğme gerilmesi	101
Çizelge 6.6. Cu-Cu SKK eğme numune verileri	101
Çizelge 6.7. Pirinç-Pirinç SKK maksimum eğme gerilmesi	102
Çizelge 6.8. Pirinç-Pirinç SKK eğme numune verileri.....	102

SİMGELER VE KISALTMALAR

$\sigma_{\text{eğme}}$: Eğme Gerilmesi (N/mm^2 , MPa)

$F_{\text{eğme}}$: Eğme Kuvveti (N)

$\sigma_{\text{çekme}}$: Çekme Gerilmesi (N/mm^2 , MPa)

$F_{\text{çekme}}$: Çekme Kuvveti (N)

Mak. : Maksimum

HV: Vickers sertliği

μm : Mikrometre (10^{-6}m)

1. GİRİŞ

Bir malzemenin başka bir malzeme ile kaynaklanması ya da birleştirilmesi mühendislik uygulamalarında sıklıkla başvurulacak yöntemlerdendir. Kaynak işlemi günümüzde kullanılan en yaygın bir birleştirme yöntemi olup bu yöntemin beraberinde getirmiş olduğu bir malzemenin kaynak edilebilirliği, o malzemenin daha yaygın olarak kullanılmasını sağlayan, ticari kullanım kapasitesinin ve parça üretim yönteminin tayin edilmesinde aktif bir rol oynamasını sağlamaktadır. Son yıllarda özellikle alaşımların geliştirilmesi ve bu alaşımların endüstrinin kullanım alanlarına sunulma isteğiyle birlikte mevcut kaynak yöntemlerindeki yetersizliklerin sonucu olarak bu malzemelerin kaynaklanabilirliği yeni kaynak yöntemlerinin geliştirilmesi ihtiyacını duyulmuştur.

Birleştirme işlemi, kaynak, lehimleme, yapıştırma ve mekanik bağlantı gibi pek çok işlemi kapsayan genel bir terimdir. Bu işlemlerin bir veya daha fazlası basit ürünlerin imalatında kullanılmaktadır (Örnek; farklı ve ya aynı tür levha malzemelerin civatalarla tespit edilmesi). Birleştirmenin rolü, otomobil ve uçaklar gibi pek çok farklı birleştirme işlemleriyle montaj edilen daha karmaşık parçaların üretiminde daha önemlidir. Birleştirme işlemleri, birleştirmede kullanılan dolgu malzemesine, dışarıdan uygulanan ısı ve basınç ve birleştirilecek malzemelerin durumuna göre sınıflandırılabilir. Katı hal birleştirme (basınç kaynağı) işlemlerinde dolgu malzemesi kullanılmaz. Birleştirme difüzyon kaynağındaki gibi dışarıdan uygulanan basınç ve ısı ve ya sürtünme kaynağındaki gibi işlem esnasında oluşan sürtünme ısı ve basınç ile sağlanır. Oksi-asetilen, ark ve direnç kaynağı gibi sıvı hal (ergitme kaynağı) işlemleri birleştirilecek malzemelerin kısmen erimesini içerir. Bu işlemler oksi-asetilen ve ark kaynağındaki gibi ısı ve direnç kaynağındaki gibi ısı ve basınç uygulamalarına ihtiyaç duyarlar. Isı kaynağı kimyasal, elektriksel veya optik (lazer gibi) olabilir.

Son zamanlarda lazer teknolojisindeki yeni ilerlemeler ile birlikte de özellikle kaynağı zor olan birçok malzemenin kaynak edilebilme sorunu ortadan kalkmıştır [1].

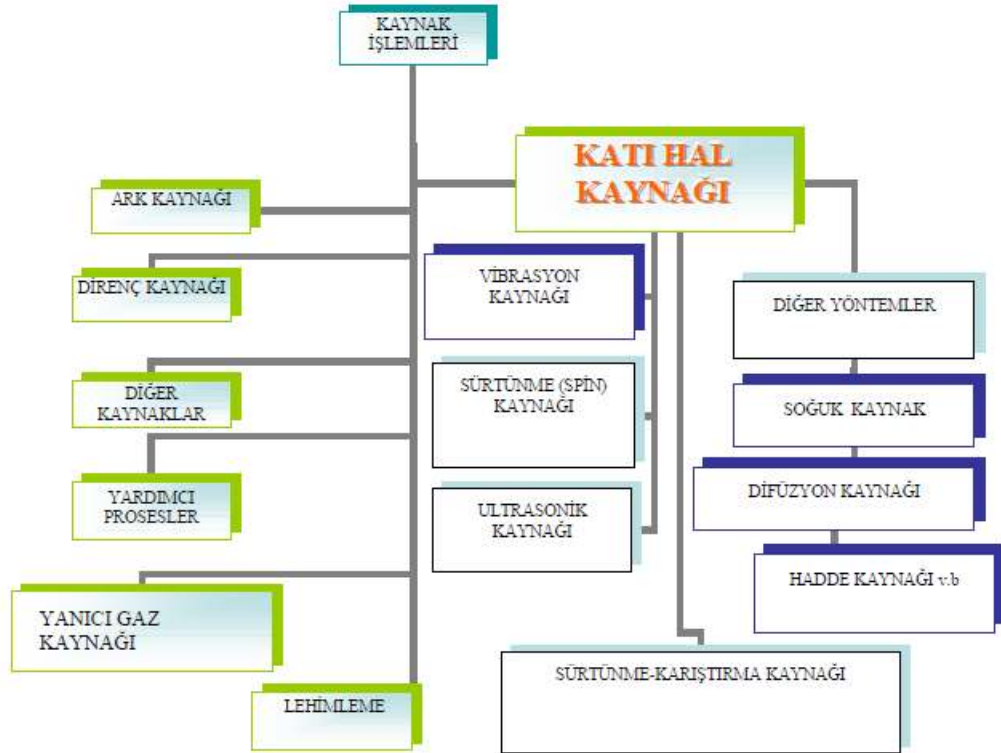
Sürtünme karıştırma kaynağıda bir katı hal kaynak yöntemi olup sürtünme ısı ve basınç ile kaynak yapılabilen son zamanların popüler olan bir birleştirme yöntemidir.

2. KAYNAK YÖNTEMLERİNİN SINIFLANDIRILMASI

Kaynak tanım olarak, sınırlandırılmış bir bölgede malzemeleri ısı veya basınç veya her ikisini birden kullanarak, bir ilave kaynak malzemesi katarak veya katmadan birleştirmektir.

Ergitme kaynağında, birleştirilecek parçaların birbirlerine kaynaklanacak kısımları ile ilave metal ergime derecesine kadar ($3000^{\circ}\text{C} \sim 5000^{\circ}\text{C}$) ısıtılır ve ergiyerek birleşen kısımların soğuması sonucunda birleşim sağlanmış olur.

Katı hal kaynak yöntemi malzemelerin ergime dereceleri altında, dışarıdan uygulanan basınç yardımı ile koruyucu atmosfer ortamında veya koruyucu atmosfer ortamı olmadan, birbirine temas eden aynı ya da farklı özellikli malzemelerin iki yüzey arasında bağ oluşturarak yapılan birleştirme yöntemidir.



Şekil 2.1 Kaynak yöntemlerinin şematik Sınıflandırılması [2]

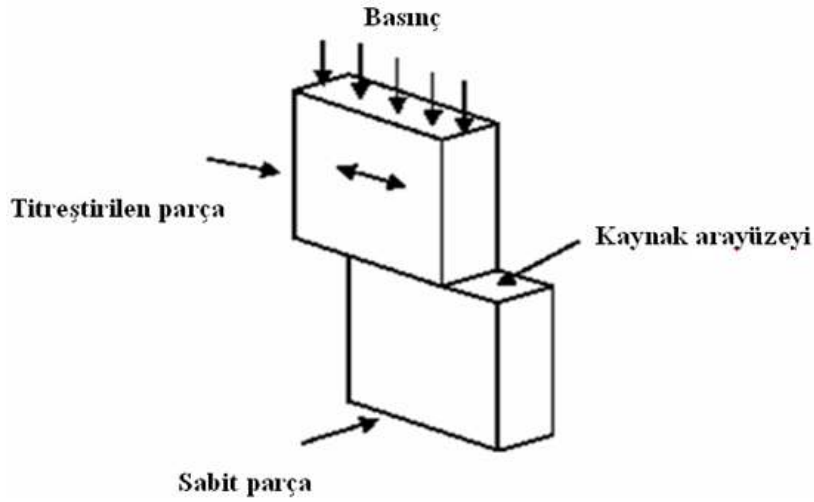
2.1. Katı Hal Kaynak Yöntemleri

Günümüzde, ileri teknolojinin uygulandığı gelişmiş makine elemanlarının kaynaklı birleştirmelerinde faz dönüşümleri ve plastik deformasyon istenmeyen durumlardır. Bu olumsuzlukları gidermek, ancak malzemelerin mekanik ve metalürjik özelliklerini etkilemeyecek kadar düşük sıcaklıklarda yapılan birleştirme işlemleri ile mümkündür. Örneğin metal matrisli kompozitlerle seramiklerin metal bir malzeme ile metal olmayan bir malzemenin birleştirilmeleri birçok durumda gerekli olmaktadır. Ayrıca birçok otomobilin motor parçalarında seramiklerle metaller bir arada birleştirilmiş şekilde kullanılmaktadır. Bu örneklerde de olduğu gibi malzemelerin düşük sıcaklıklarda birleştirilmeleri dizayn ve konstrüksiyon açısından gereklilik arz etmektedir. Sözü edilen malzemelerin ergitmeli kaynak yöntemleri ile birleştirmek zor ve bazen imkansızdır. Bu tekniklerin uygulanması, yüksek bilgi ve teknoloji gerektiren katı hal kaynak teknikleri ile mümkündür. Ergitmesiz kaynak yönteminde metalik malzemeler ergitilmeden, malzemelerin ergime sıcaklıklarının altında bir sıcaklıkta malzeme katı haldeyken birleşme sağlanmaktadır [3].

2.1.1. Vibrasyon Kaynak Yöntemi

Titreşim veya doğrusal sürtünme kaynağı iki metalik bölgenin basınç altında, uygun frekans ve genişlikte, metali ergitip birleştirmek için yeterli ısı elde edinceye kadar sürtünmesini gerektirir. Titreşim durduktan sonra bölgeler hizaya getirilir ve soğumaya bırakılarak kaynağı oluşturur. Bu işlem döndürme kaynağıyla çok benzerdir. Farkı hareketin rotasyonel değil doğrusal olmasıdır. Vibrasyon veya lineer sürtünme kaynağı değişik metalik elemanları kaynatmada ve ayrıca, metalik parçaları kaynatmada da kullanılmaktadır. Vibrasyon kaynağında, bağlanacak iki parça basınç altında bir araya getirilir. Ara yüzeyi ergitmek için mekanik sürtünme ve kayma gerilmesiyle yeterli ısı üretilene ve metal karışana kadar, parçanın biri sabit ve diğeri uygun bir frekansta ara yüzeye paralel olarak titreştirilir. Lineer vibrasyon hareketi durdurulduktan sonra, parçalar düzeltilir ve eriyik metal uygulanan basınç altında katılaşır. Şekil 2.2. vibrasyon kaynak tekniğini şematik olarak göstermektedir. Bu kaynak yöntemi, otomotiv ve ev aletleri yapımında uygulama alanları bulmuştur.

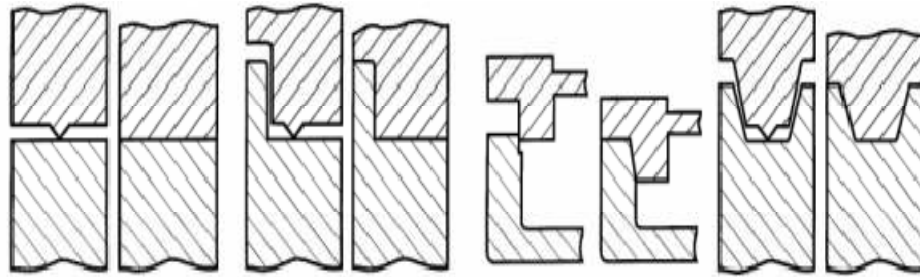
Otomotiv uygulamalarında ön ve arka lamba donanımlarında, yakıt tankı deliklerinde, vakum sistemleri v.b. yerlerde vibrasyon kaynak tekniği kullanılmaktadır [4].



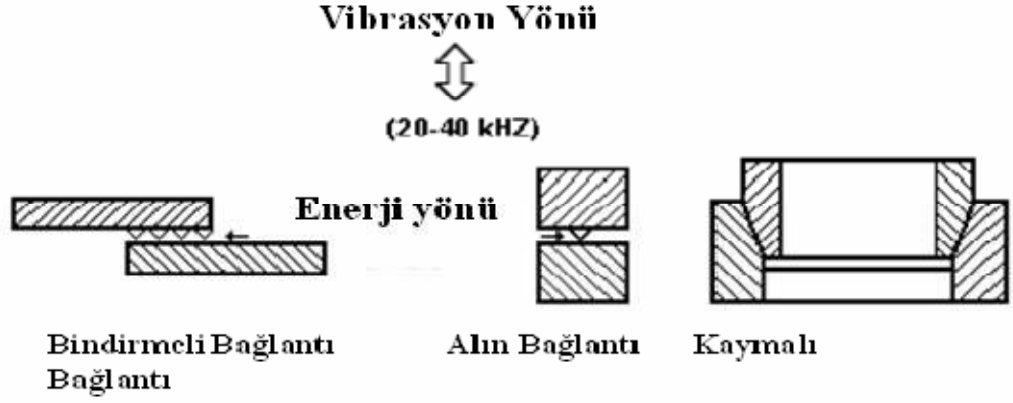
Şekil 2.2. Vibrasyon Kaynağının Şematik Görünümü [4]

2.1.2. Ultrasonik Kaynak

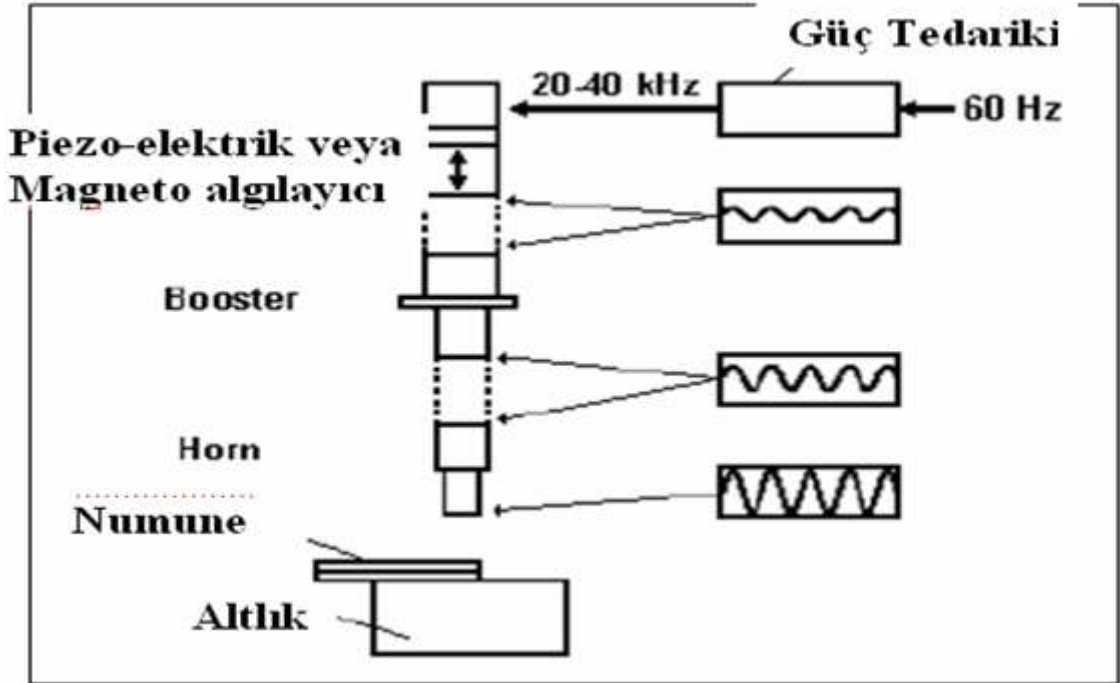
Değişken mekanik titreşimlerle (yaklaşık 22 kHz), metalik malzemeler kaynak bölgesinde ısıtılır ve basınç altında birleştirilir. Bu yöntem ile kalıp gövdeleri kaynatılır. Burada taşıyıcı malzemenin ultrasonik enerjisi ile metaller birbiriyle kaynak edilir. Sonotrod ucunun yivli olması gerekir. Ultrasonik kaynak belki de en çok kullanılan metalik kaynak işlemidir. Yöntem çok hızlıdır (birkaç saniye) ve genellikle diğerlerine nazaran parlak ışıklar çıkarmayan kaynaklar elde edilir. Bu yöntemin uygulanabildiği malzemeler; tercihen Polistiren ve Polietilen; Sert-PVC ve Poliakrilit malzemeler için de kullanılır [4].



Şekil 2.3. Farklı Enerji Yönlerinin Dizayını [4]



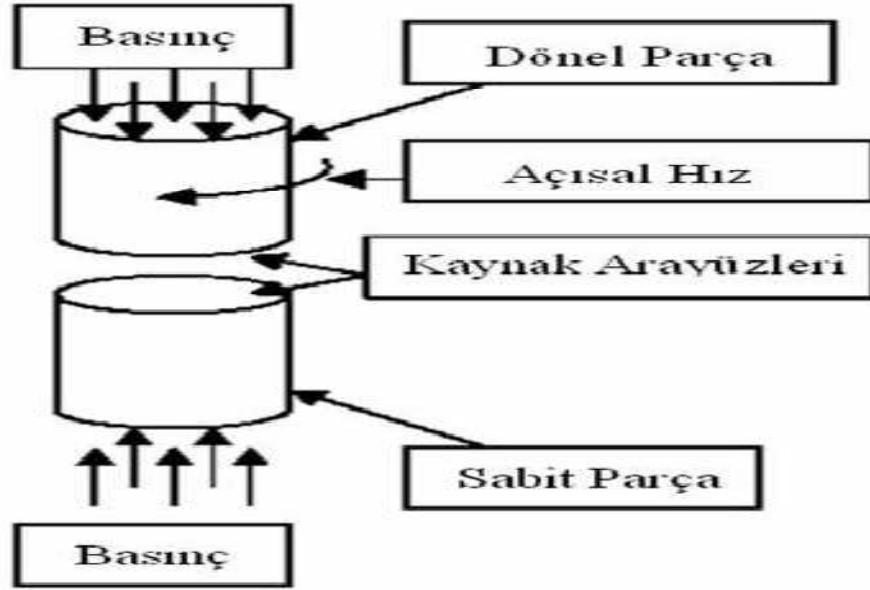
Şekil 2.4. Farklı Bağlantı Dizaynları [4]



Şekil 2.5. Ultrasonik Kaynak Makinesinin Şematik Görünüşü [4]

2.1.3. Sürtünme (Spin) Kaynağı

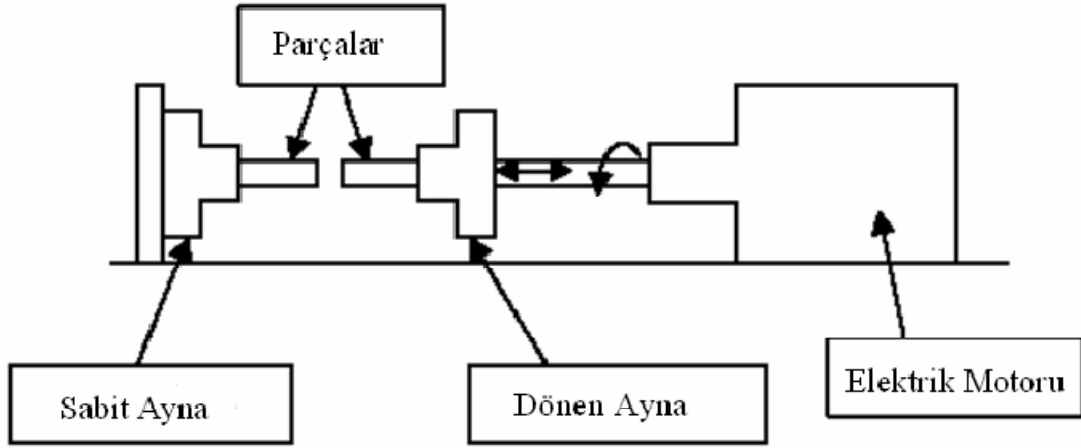
Spin kaynağı metalik malzemeleri kaynatmak için kullanılan en yaygın sürtünme kaynak tekniklerinden biridir. Bu proseste, ergime oluşana kadar, parçalardan biri spesifik açısal bir hız ve eksensel basınç (Şekil 2.6.) altında sabit parçaya karşı döndürülerek sürttürülürken diğeri de sabit tutulur.



Şekil 2.6. Spin Kaynağının Şematik Görünüşü[4]

Spin kaynağı delme presi veya torna tezgahı ile basitçe yapılabilir. Çok iyi bir kaynak kalitesi elde etmek için parçalara transfer edilen enerji miktarı çok dikkatli kontrol edilmelidir. Bu da spesifik açısal hızı ayarlanabilen dönen bir volan kullanılarak sağlanabilir. Şekil2.7.' de tipik bir kaynak makinesi (yani torna tezgahı) görülmektedir. İki malzeme iki ayna üzerine yerleştirilir. Malzemelerden birisi sabit ayna üzerine yerleştirilir ve diğeri ise dönel harekete ve ileri harekete sahip ayna üzerine bağlanır. Malzemeler, dönme hareketi ile birlikte spin basıncı altında (ileri hareketi sağlayarak) temas ettirilir. Metal eridikten sonra, makine durdurulur ve eksensel veya dövme basıncı uygulanır.

Sonuçta metal katılaşır ve kaynak dikişi ortaya çıkar. Spin kaynağında ana parametreler kaynak hızı, basma kuvveti, dövme basıncı ve kaynatma zamanıdır. Her bir parametrenin etkisi vibrasyon kaynağında gösterilenlere benzerdir. Kaynak zamanı kaynak basıncı ve kaynak hızına bağlıdır. Optimum kaynak basıncı ve hızında, sıcaklık yüksek kaliteli kaynağın elde edildiği kararlı hale hızla ulaşır [4].



Şekil 2.7. Spin Kaynak Makinesinin Şematik Görünüşü[4]

2.1.3.1. Sürekli Tahrikli Sürtünme Kaynağı

Sürekli tahrikli sürtünme kaynağı doğrudan sürtünme kaynağı olarak da bilinmektedir. Gerekli olan enerji sürekli bir tahrik grubu tarafından sağlanır. Parçalardan biri motor ünitesine bağlanır ve sabit bir hızda döner, diğer parça eksensel bir basınçla temas ettirilir. Yeterli derecede ısı girdisi sağlandığında dönme frenleme etkisiyle mümkün oldukça kısa sürede durdurulur. Kaynak kuvveti yığma basıncıyla artırılır ve numune soğumaya bırakılır. Bu yöntem genellikle Avrupa'da kullanılmaktadır [5,6,7].

2.1.3.2. Volan Tahrikli Sürtünme Kaynağı

Volan tahrikli sürtünme kaynağı, atalet kaynağı olarak da bilinmektedir. Parçalardan biri volana bağlanır. Volan belirlenen hızda ivmelendirilir. Böylece dönme enerjisi bu volan üzerinde toplanmış olur ve sürtünme kaynağının kendi kendine frenlemesiyle parçaya iletilir. Kaynak kuvveti eksensel olarak uygulandığında dönmesi serbest bırakılan parça diğer parça ile döner ve volan enerjisi parça ara yüzeyinde sürtünmeye harcanır. Volan hızı azalırken, kaynak bölgesi ısınır ve ısı yayılır. Volan tamamen durdurulduktan sonra basınç etki ettirilir. Bu yöntem özellikle ABD'de uçak ve uzay sanayinde kullanılmaktadır [7,8].

2.1.3.3. Kombine Kaynak Yöntemi

Kombine kaynak yöntemi volan tahrikli sürtünme kaynağıyla, sürekli tahrikli sürtünme kaynağının ortaklaşa kullanıldığı bir yöntemdir. Büyük kapasiteli parçaların birleştirilmesinde kullanılır. Volan tahrikli sürtünme kaynağının da sürekli tahrikli sürtünme kaynağına göre avantajları aşağıda verilmiştir. Bunlar;

1. Daha dar bir ITAB oluşur,
2. Daha seri bir üretim yapılır,
3. Daha düşük güç gerekir,
4. Daha basit ekipman gerekir [7].

2.1.4. Sürtünme Karıştırma Kaynağı

Sürtünme karıştırma kaynağı (SKK) 1991 yılında TWI (The Welding Institute) tarafından bulunan ergime olmaksızın gerçekleşen geleneksel sürtünme kaynağından türetilmiş bir katı-hal birleştirme tekniğidir ve bu yöntem ilk olarak alüminyum alaşımlarına uygulanmıştır. SKK' nın esası oldukça basittir. Özel olarak tasarlanmış uç ve omuza sahip harcanmayan ve dönen bir takımın karşılıklı olarak alın altına dayanmış levha veya plakaların içine dalması, dönmesi ve birleştirme çizgisi boyunca ilerlemesinden ibarettir. Takımın iki önemli fonksiyonu vardır; (a) iş parçasını ısıtmak ve (b) birleşimi sağlamak için malzemeyi hareket ettirmektir. Isı, takım ve iş parçası arasındaki sürtünme ve iş parçasının plastik deformasyonu ile sağlanır. Bölgesel ısınma ucun etrafındaki malzemeyi yumuşatır ve takımın dönmesi ve ilerlemesi ile malzeme ucun ön tarafından arka tarafına taşınır. Bu işlemin sonucunda katı hal birleşme elde edilir. Takımın değişik geometrik özelliklerinden dolayı ucun etrafındaki malzeme hareketi oldukça karmaşık olabilir. SKK işlemi esnasında, malzeme yüksek sıcaklıkta yoğun bir plastik deformasyona maruz kalır, bunun sonucunda ince ve eş eksenli yeniden kristalleşmiş taneler oluşur. Bu kaynak yönteminde oluşan ince taneli içyapı mekanik özelliklerde iyileşme sağlar [9,10].

SKK son on yıl içinde metal birleştirme tekniğindeki en önemli gelişme olarak düşünülmektedir. Enerji verimliliği, çevre dostu ve çok yönlü olduğundan bu kaynak

yöntemi yeşil teknolojiye uygundur. Geleneksel kaynak yöntemleri ile karşılaştırıldığında, SKK oldukça az enerji tüketir. Bu kaynak yönteminde hiçbir koruyucu gaz veya flaksın kullanılmasına gerek yoktur, bu nedenle yöntem çevre dostudur. Ayrıca, herhangi bir dolgu metaline de gerek olmadığından, ergime kaynağında olduğu gibi birleşmede kimyasal birleşim farklılıkları olmaz. Geleneksel sürtünme kaynağı dönen ve birbirlerine doğru itilen genellikle küçük silindirik parçalara uygulanırken, sürtünme karıştırma kaynağı alın, bindirme, T-alın ve iç köşe birleştirmeler gibi pek çok birleştirme çeşidi için uygulanabilir.

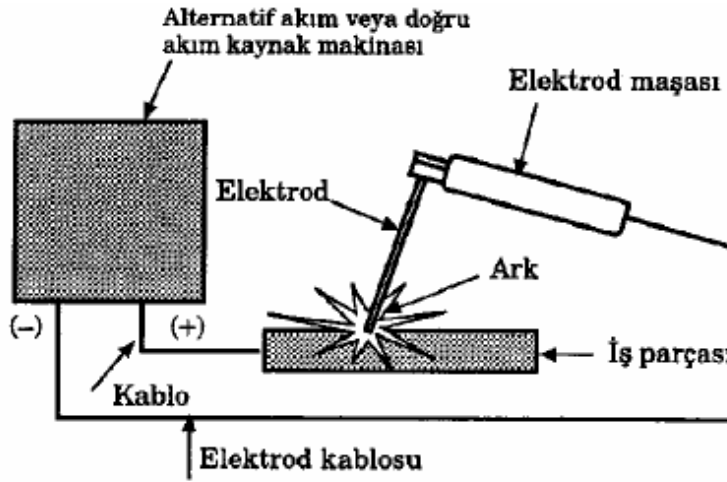
2.2.Ergitme Kaynağı

Ergitme kaynağında, birleştirilecek parçaların birbirlerine kaynaklanacak kısımları ile ilave metal ergime derecesine kadar ($3000^{\circ}\text{C}\sim 5000^{\circ}\text{C}$) ısıtılır ve ergiyerek birleşen kısımların soğuması sonucunda birleşim sağlanmış olur. Kullanılan ısı kaynağına bağlı olarak başlıca iki gruba ayrılır. Bunlar elektrik arkı kaynakları ve gaz kaynaklarıdır.

2.2.1.Elektrik Ark Kaynağı

2.2.1.1.Standart Elektrik Arkı Kaynağı

Kaynak için gerekli ısı elektrik arkı ile sağlanır. Elektrik arkı, birleştirilecek parçaların oluşturduğu esas malzeme ile elektrot adını alan kaynak teli arasında meydana gelir.



Şekil 2.8. Elektrik ark kaynağı uygulaması

2.2.1.2. Özlü Tellerle Elektrik Arkı Kaynağı

Elektrik arkı kaynağı elektrot yerine özlü tellerle de yapılabilir. Özlü teller, sıvalı elektrotun tersyüz edilmiş halidir. Bunlarda, sıva tabakası malzemesi telin çekirdeğinde yer alır. Ark ve kaynak bölgesini koruma işlevi özlü tel çekirdeğinin yanması ve ayrışması sonucunda oluşan gazlar tarafından veya gazaltı kaynağındaki gibi dıştan beslenen bir koruyucu gaz tarafından gerçekleştirilir. Bu kaynak yöntemi, hem yarı otomatik hem de otomatik kaynak sistemlerinde uygulanabilir.

2.2.1.3. Gazaltı Elektrik Arkı Kaynağı

Kaynak bölgesine sürekli şekilde sürülen, masif haldeki tel elektrod ergiyerek tükendikçe kaynak metalini oluşturur. Kaynak işlemi sırasında elektrod, kaynak banyosu, ark ve iş parçasının kaynağa yakın bölgeleri, atmosferin zararlı etkilerinden kaynak torcundan gelen gaz veya gaz karışımı tarafından korunur. Koruyucu gaz olarak Argon, Helyum veya Karbondioksit kullanılır. Kaynak işlemi sonucunda düzgün ve yüksek nüfuziyetli kaynak dikişleri elde etmek mümkündür. Bu yöntem hem yarı otomatik, hem de tam otomatik kaynak sistemlerinde kullanmak için çok uygundur.



Şekil 2.9. Gazaltı kaynak uygulaması

2.2.1.4. Tozaltı Elektrik Arkı Kaynağı

Sabit veya geçici atölyelerde imal edilen yapı ve köprü sistemlerinin, tam otomatik yöntemle yapılan kaynağıdır. Bu yöntemde kaynak tozu, elektrottan önce kaynak derzine yerleştirilir. Koruyucu görevi yapan kaynak tozu ayrıca kaynak banyosu ile reaksiyona girerek kaynak metalini deokside eder. Alaşımlı çelikleri kaynak yaparken kullanılan kaynak tozlarında, kaynak metalinin kimyasal kompozisyonunu dengeleyen alaşım elementleri bulunabilir. Özellikle uzun kaynak boyu uygulamaları (90 cm veya daha uzun) için uygundur. İnce ve kalın et kalınlıklı çelik profiller için kullanılabilir ve yüksek kaliteli köşe, kısmi ve tam nüfuziyetli küt kaynak işlemine uygundur, ayrıca kapalı ve açık alanlarda uygulanabilir. Ancak, yöntem yatay kaynak pozisyonları için uygundur.



Şekil 2.10. Tozaltı kaynak uygulaması

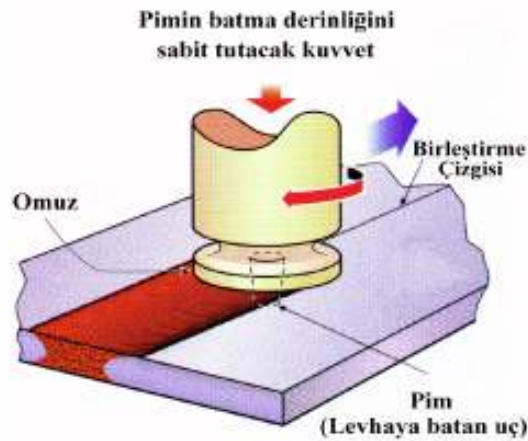
2.2.2. Gaz Kaynağı

Yüksek sıcaklık gaz alevi ile sağlanır. Gaz alevi şalome denen bir aletin ucunda yakılır ve kaynakçı bir elinde şalome diğer elinde ise kaynak telini tutarak kaynağı gerçekleştirir. Bu yöntemle elde edilen dikişlerin mukavemeti düşük olduğundan çelik yapılarda kuvvet aktaran dikişler için bu yöntem kullanılmaz. Öte yandan çelik atölyelerinde gaz alevi, özellikle levha ve profillerin kesilmesi işinde kullanılır. Buna otojen kesme denir.

3.KURAMSAL TEMELLER

3.1. Sürtünme Karıştırma Kaynağı

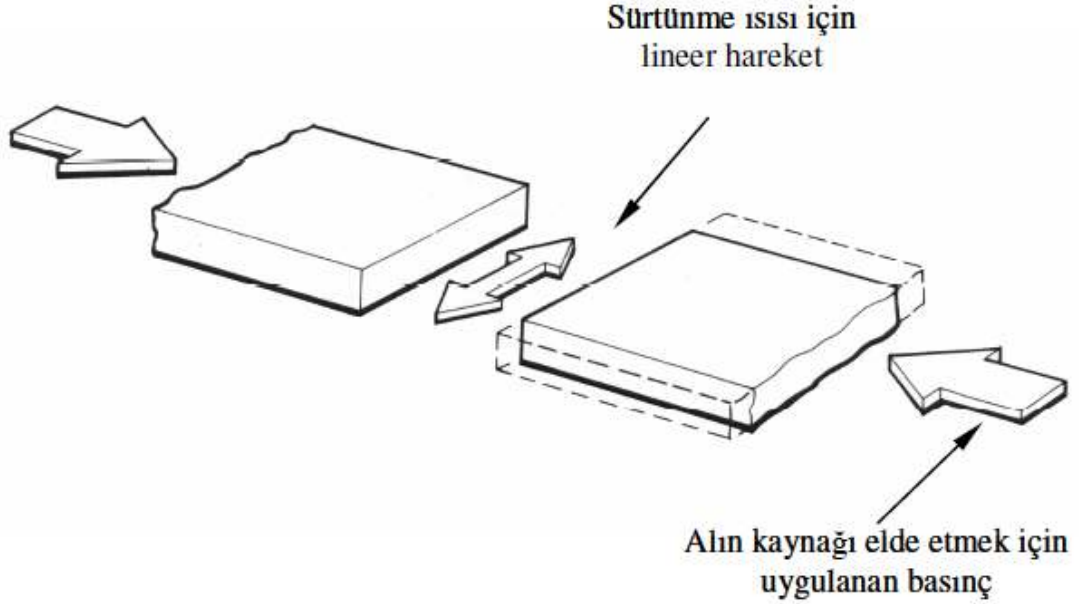
İngiltere’de The Welding Institute (TWI) tarafından geliştirilen ve 1990’lı yılların başında patentlenen sürtünme karıştırma kaynağı (friction stir welding), genel olarak levhaların alın kaynağında kullanılmakta olup, diğer sürtünme kaynaklarına göre prensip olarak bazı farklılıklar gösterir [11,13]. Diğer sürtünme kaynaklarında kaynaklanacak parçalar birbiri üzerinde hareket ettirilirken, bu yöntemde tablaya alın altına sabitlenmiş parçalar birbirine sürtünmezler. Yöntem, kaynak edilecek parçalar bir tabla üzerinde alın altına getirilip sabitlendikten sonra karıştırıcı (batıcı) uç olarak adlandırılan ve yüksek devirlerde dönen omuzlu bir takımın, bu parçaların içine daldırılmasıyla yapılır. Karıştırıcı uç, sürtünme ısısının tesiri ile parçaları yumuşatır ve kaynak bölgesi çamurumsu kıvama gelir. Karıştırıcı ucun hareket ettirilmesiyle de iki levhanın ara yüzeyinde ki çamurumsu bölge birbirine sıvanır ve levhalar böylece birleştirilmiş olur.



Şekil 3.1. Sürtünme karıştırma kaynağının (friction stir welding) şematik gösterimi [13]

Klasik sürtünme kaynağı kullanımı, bu yöntemdeki enerji iletilmesinin doğasından dolayı katı veya boru şeklinde silindirik kesitlerle sınırlıdır. Silindirik olmayan kesitler için (levhalar için) lineer sürtünme kaynak işlemi geliştirilmiş ve bazı sınırlı uygulamalarda kullanılmıştır (Şekil3.2.) [14].

Son yıllarda, sürtünme kaynağının kullanımı bu yöntemin yeni bir versiyonunun geliştirilmesi sonucu artmaktadır. Bu yöntem sürtünme karıştırma kaynağı olup, levhalar alın altına ilave tel kullanılmadan birleştirilebilmektedir.



Şekil 3.2. Lineer sürtünme kaynağının şematik gösterimi [14]

Kaynak işlemi süresince tatbik edilen yüksek yükleme hızı ve yüksek sıcaklık deformasyonu, klasik ve lineer sürtünme kaynağında kaynak dikişinde malzemenin metalürjik ve mekanik özelliklerini değiştirmektedir [15]. Bu aşağıdaki gibi değişik metalürjik olaylara neden olur.

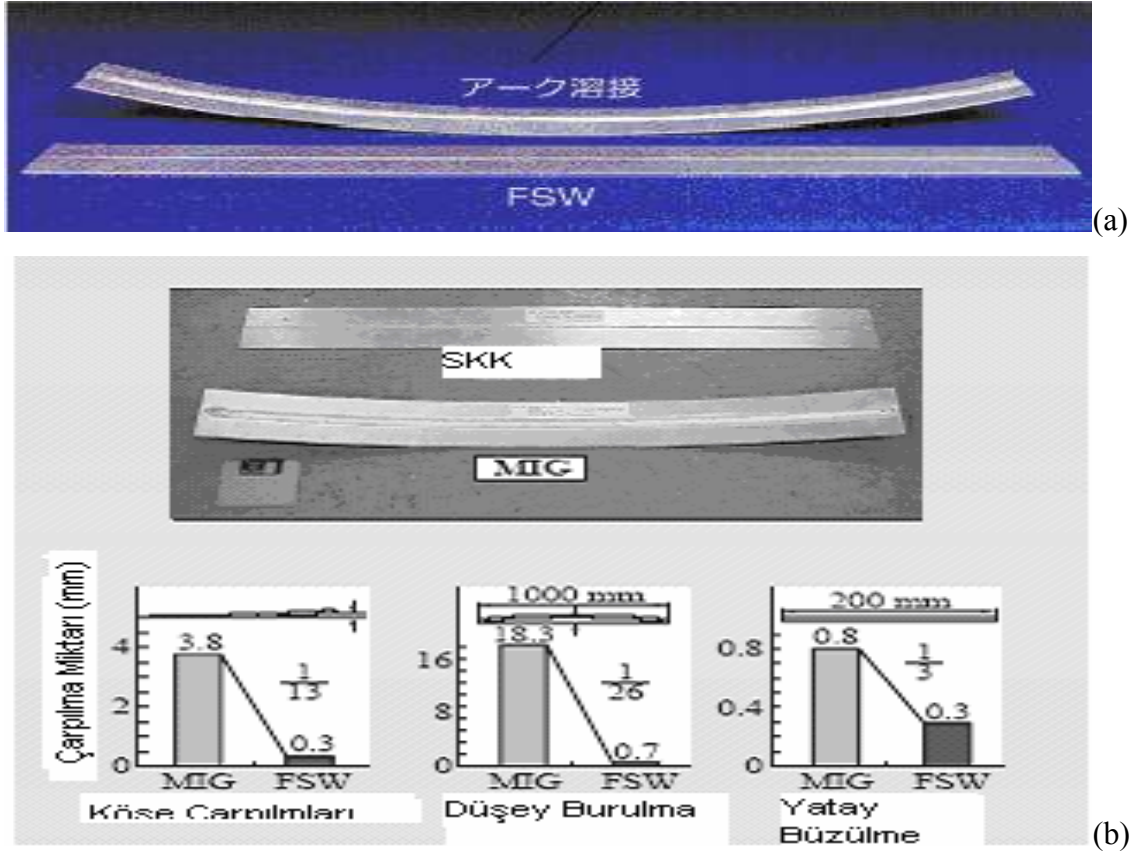
- i) Gaz metal ark kaynağı ile yapılan birleştirmelerde oluşan büyük, uzun taneler yerine sürtünme kaynağında birleştirme bölgesinde dinamik olarak yeniden kristalleşme sonucu eş eksenli ince tanelerin oluşması [16].
- ii) Yaşlandırma sertleştirmesine tabi tutulan Al-alışımlarının kaynağında çözeltiye alma, aşırı yaşlanma ve tekrar çökeltme sonucu düşük mukavemetli yumuşak bölge oluşması.
- iii) Yeni ve bazen kırılğan fazların oluşması. Örnek, biri östenitik paslanmaz çelik olan farklı malzemelerin kaynağında deformasyon sonu martenzit oluşumu [17].
- iv) Farklı metalik malzemelerin kaynağında kırılğan intermetalik fazların oluşması.

v) Al ve Mg esaslı kompozit malzemelerin kaynağında mukavemetlendirici partiküllerin kırılması [15]; Fe-bazlı süper alaşım MA956'nın sürtünme kaynağında partikül aglomerasyonu (salkımlanması) [18].

Sürtünme kaynağı yaklaşık 50 yıldan beri bilinmesine rağmen imalat sektörü tarafından yeterli desteği alamamıştır. Pek çok teknik personel, ya sürtünme kaynağından haberdar değildir; ya da imalat sektöründe kullanabilirliği ispatlanmamış yeni bir teknoloji olarak bilinmektedir. Son yıllarda metal ve malzeme biliminde büyük gelişmelerin sağlanması ile birlikte, metalik malzemelerin birleştirilmesi büyük önem kazanmıştır. Özellikle yeni ve özellikleri geliştirilmiş malzemelerin üretilmesi ve bu malzemelerin mevcut ergitme kaynak yöntemleri ile kaynağından doğan problemler, sürtünme kaynağının yeni versiyonu olan sürtünme karıştırma kaynağı için geniş bir uygulama alanı sağlamıştır. Ergitme kaynak yöntemlerinin cüruf kalıntısı, porozite gibi kaynak hatalarına açık bir yöntem olması ve soğuma nedeni makro düzeyde iç gerilmelerin oluşması bu yöntemlerin diğer dezavantajlarını oluşturmakta olup kaynağın mukavemetini düşürmektedir. Dolayısıyla, bu malzemeler için çatlama riskini ortadan kaldıracak ve içyapıda en az değişikliğe yol açacak birleştirme yöntemleri kullanılması zorunludur. Aynı veya farklı bileşimdeki malzemelerin birleştirilmesinde eğer boyutları ve sakilleri uygun ise, ergitme olayının olmaması veya sınırlı olması, çok daha az kaynak hatası içermesi ve kaynak sonrası minimum iç gerilmeler oluşturması nedeniyle katı hal kaynak yöntemlerinden biri olan sürtünme karıştırma kaynağı için büyük bir avantaj sağlamaktadır.

Sürtünme karıştırma kaynağı, uzay, otomotiv, gemi imalatı ve askeri imalat gibi önemli endüstri dallarında geniş uygulama potansiyeline sahip, son yıllarda geliştirilen değişik bir kaynak tekniğidir. Yöntemin uygulanışı şematik olarak Şekil 3.1' de gösterilmiştir [12]. Birleştirilecek parçalar, arkalarına bir plaka konularak, alın altına aralarında boşluk olmayacak şekilde sabitlenir. Geniş silindirik omuzlu, delme yapabilecek tipte bir takım (batıcı uç), freze tezgahı ekipmanları ve arka tutucular kullanılarak yüksek devirde döndürülür, kaynak yapılacak levhalara daldırılır ve kaynak yapılacak uzunluk boyunca ilerletilir. Takım etrafındaki malzeme sürtünmeyle ısınıp yumuşayarak takım ucundan arka yüzeye doğru karıştırılır ve karıştırılan malzeme katılaşır ve hidrostatik basınç koşullarında soğur [19]. Sürtünme karıştırma kaynak yöntemi ark kaynağına oranla, işlem kolaylığı, dolgu malzemesi ve koruyucu gaz kullanımına ihtiyaç duyulmaması, kaynak dikişinde ince taneli yapı oluşumu, mekanik

özellik kaybı olmaması sayesinde yüksek performans gösteren birleştirme edilmesi, hatasız kaynak dikişi elde edilmesi ve düşük distorsiyon ve düşük kalıntı gerilmeleri oluşması gibi avantajları olan bir kaynak usulüdür [19].Sürtünme karıştırma kaynak yöntemi ile MIG(Metal Inert Gaz) kaynak yöntemine ait bir kıyaslama şekil 3.3.' de verilmiştir [35,36].



Şekil 3.3. Sürtünme Karıştırma Kaynağı ve ark kaynak yöntemi ile kaynak yapılmış malzemelerin çarpılma ve burulma incelemesi **a)**Sürtünme karıştırma kaynağı ve MIG kaynak yöntemi ile kaynatılmış bakır plakaların numunelerin çarpılması [35]. **b)**Sürtünme karıştırma kaynağı ve MIG kaynak yöntemi ile kaynatılmış bakır plakaların numunelerin çarpılmasının karşılaştırılması [36].

Bu birleştirme yöntemiyle yüksek performanslı hatasız birleştirmeler elde edilmesi, her malzeme ve farklı levha kalınlıkları için uygun bir işlem parametre aralığı bulunmasını gerektirir. Kalınlıkları 1,2 mm' den 75 mm' ye kadar olan Al-alışımlı levhalar tek ve çift taraftan sürtünme kaynağı yapılarak birleştirilebilir.

3.1.1.Sürtünme Karıştırma Kaynağına Etki Eden Faktörler

Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile elde edilen birleşmelerin mekanik ve dinamik özellikleri uygun parametreler bir araya geldiğinde üstündür. Sürtünme Karıştırma Kaynağında kaynak kalitesine etki eden parametreler:

- Takımın ilerleme hızı
- Takımın devir sayısı

SKK uygulanan CuZn40 alaşımının Şekil 3.3' de devir sayısı ve ilerleme hızı parametrelerinin değişimine bağlı numune yüzey ve röntgen incelemeleri, Şekil 2.4'de ise devir sayısı ve ilerleme hızı parametrelerinin değişimine bağlı kaynak merkezinin mikro içyapı değişimi ve tane yapısı incelemeleri, Şekil 2.5'de ise Sabit ilerleme hızı değişken devir sayısına bağlı vickers sertlik değişimi verilmiştir. Bu grafikler sayesinde devir sayısı ve ilerleme hızı değişkenlerinin SKK uygulamalarındaki en önemli parametrelerinden olduğu görülmektedir[37].

- Takımın uç dizaynı

SKK uygulamalarında, kullanılan farklı takım uç dizaynlarına göre birleştirilen numunelerin birleşme hattına dik doğrultuda yapılmış olan mikrosertlik ölçüm sonuçlarındaki farklılık gösteren bir parametredir.

- Takım baskı kuvveti

SKK uygulamalarında takım omzu ile birleştirilecek numune arası sürtünme ve baskıyı kontrol ederek kaynak dikişini etkileyen önemli bir parametredir.

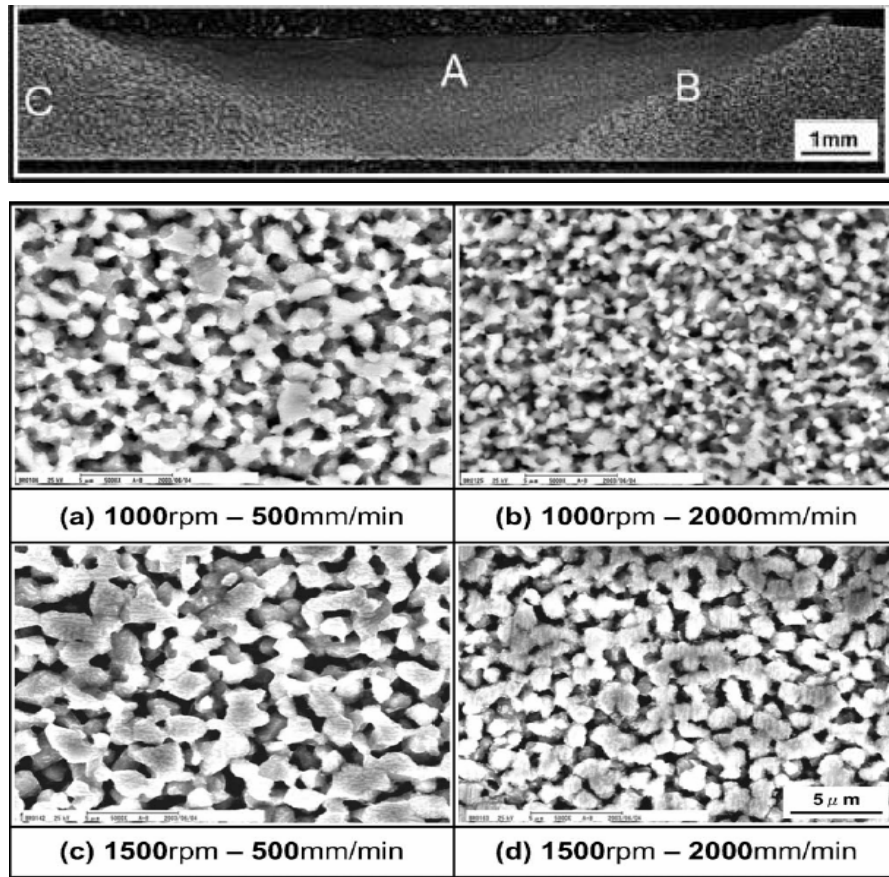
- Takımın yüzeye dalma açısı

SKK uygulamalarında kaynak dikişini ve kaynak üst yüzeyini etkileyen önemli bir parametredir.

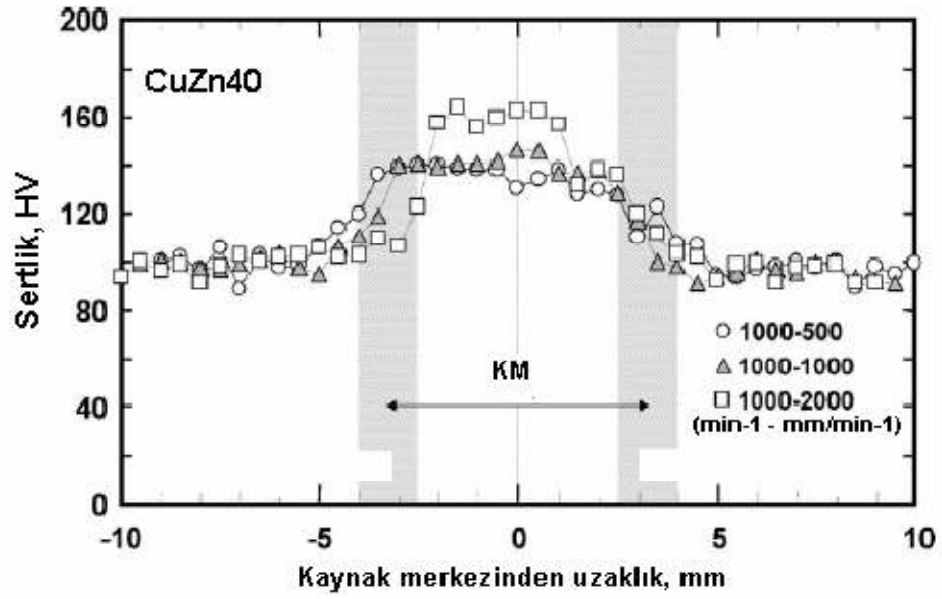
- Pim batma derinliği
- Yüzey hazırlama
- Malzeme kalınlık farklılığı
- Kalıp ve sabitleme aparatları

Devir Sayısı min-1	İlerleme Hızı mm/min	Surface appearance	X-ray photograph
500	500	Advancing side Retreating side	Advancing side Retreating side
	1500		
1000	500		
	2000		
1500	500		
	2000		20mm

Şekil 3.4. SKK uygulanan CuZn40 alaşımının devir sayısı ve ilerleme hızı parametrelerinin değişimine bağlı numune yüzey ve röntgen incelemeleri [37]



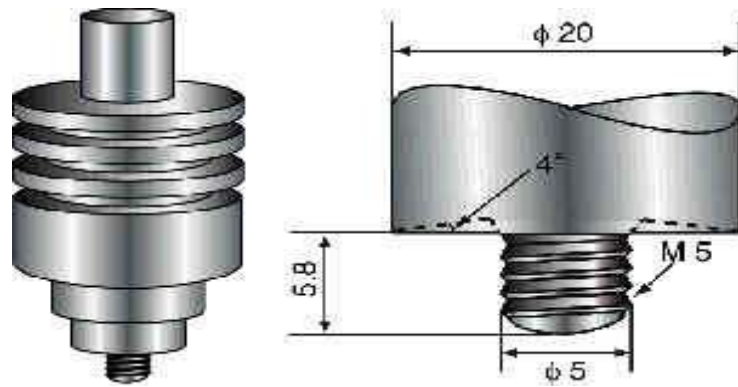
Şekil 3.5. SKK uygulanan CuZn40 alaşımının devir sayısı ve ilerleme hızı parametrelerinin değişimine bağlı kaynak merkezinin mikro içyapı değişimi [37]



Şekil 3.6. Sabit ilerleme hızı değişken devir sayısına bağlı vickers sertlik değişimi [38]

3.2. Sürtünme Karıştırma Kaynağında Kullanılan Takımlar

Sürtünme karıştırma kaynak yöntemi ilk geliştirildiği yıllarda kullanılan batıcı uçlar yüzeyine helisel diş açılmış uzunluğu kaynak edilecek levha kalınlığından biraz kısa silindirik takımlardı. Fakat son yıllarda sürtünmeden açığa çıkan ısı ile akıcı kıvama gelen malzemenin kaynak bölgesinde kalmasını geliştirmek için çok değişik takım dizaynları geliştirilmiştir [12].



Şekil3.7. Özel tasarlanmış M5 vida adımlı probe (batıcı uç) [20]

Kaynağı zor veya daha kalın malzemelerde, plastik Şekil değiştiren kısmın, karıştırıcı uç kısım etrafındaki akısı, göz önünde tutulması gereken önemli bir noktadır.

Eğer, oldukça geniş çapta karıştırıcı uç kısımlar gerekli ise çok geniş hacimli malzeme hareketi olacaktır. Takımlar, plastik Şekil değiştirebilen malzemenin, karıştırıcı uç kısım etrafındaki akısını arttıracak şekilde geliştirilmelidir [21,22].

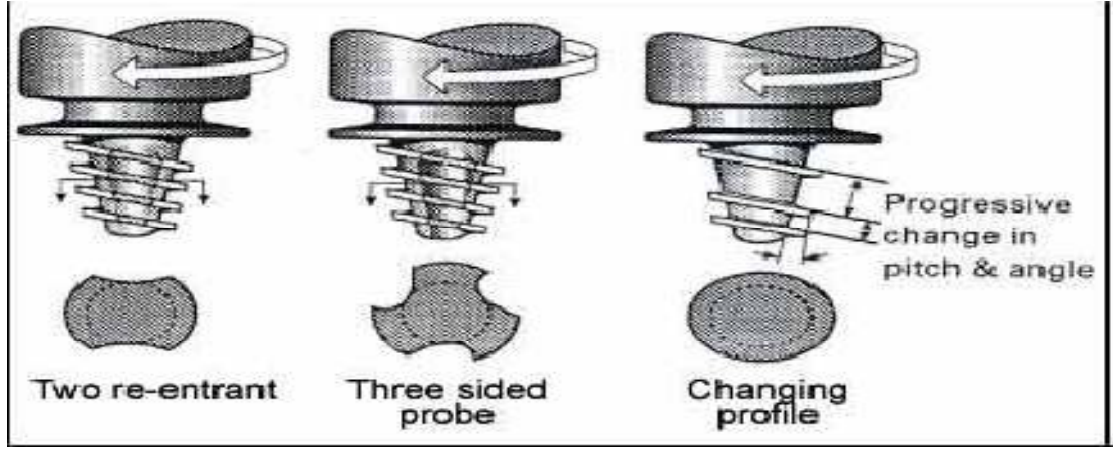
Mikser tipi içi boş karıştırıcı uç kısma sahip takım, plastik Şekil değiştiren malzemenin, karıştırıcı uç kısmın içinden geçmesine olanak sağlar. Benzer çaptaki dolu takımlar ile karşılaştırıldığında, daha az miktarda malzeme yer değiştirir. Bu sayede, sürtünme etkisinde kalan bölge, yer değiştiren hacimden daha büyüktür [21,22].

Sürtünme karıştırma kaynağında, özellikle kalın levhaların birleştirme işlemlerinde kaynak bölgesinde boşluk oluşumunu gidermede veya azaltmada ve işlem verimliliğini yükseltmede önemli bir faktör dinamik süpürme hacminin (karıştırıcı ucun dönmesi sırasındaki hacminin) statik hacme oranıdır. Bu oran batıcı uç yüzeyine değişik profiller islenerek arttırılabilir, dolayısıyla batıcı uç etrafında ve altında malzeme akış yolları genişletilerek malzemenin kaynak dikişi içerisinde kalması desteklenir. Bu amaçla, kalın levhaların kaynağında ince levhalar için geliştirilmiş olan geleneksel silindirik karıştırıcı ucun yerine hacminin yaklaşık %60-70'i boşaltılmış olan konik uç kullanılmaktadır (Şekil3.7, 3.8, 3.9 ve 3.10) [23,24,13]. Bu sayede kaynak esnasında gerekli kuvvet de azaltılmış olur. Batıcı ucun geometrisi (profilleri) ve ebadı kaynaklanacak levhaların kalınlığına ve kaynağın türüne (alın veya bindirme) bağlıdır. Günümüzde levhaların gerek alın gerekse daha geniş kaynak bölgesi istenen bindirme kaynağı için ayrı ayrı özel batıcı uçlar üretilmektedir [13,24].

Silindirik uç yerine üzerine spiral diş açılmış konik bir uç kullanılabileceği düşünülerek Whorl™, Triflute™ ve Skew-Stir™ serisi özel profilli sürtünme karıştırma kaynağı takımları dizayn edilmiş ve geliştirilmiştir. Bu takımlar ile 25-40 mm kalınlığındaki AA6082 T6 levhalar tek pasoda, 40-75 mm kalınlığındaki levhalar da çift taraftan kaynak yapılabilmektedir [12]. Denemeler sonunda, değişik Whorl™ konfigürasyonları belirlenmiştir (Şekil3.7.). Kesik koni şeklindeki Whorl™ takım (probe), plastik akışa uğrayan metali aşağıya doğru yönlendirmek için helisel sırtlı profiller ihtiva etmektedir [12,23].

Whorl™ konsepti dairesel olmayan probe kesitleri sağlar. Bu nedenle, malzemenin daha kolay akmasına imkan vermek için takımın yer değiştirme miktarı, dönme miktarından daha az olması gerekmektedir. Şekil2.5'de 75 mm kalınlığındaki AA 6082-T6 alaşımının içine geçmiş Whorl™ serisi takım görülmektedir ve buradan da TEB ile

takım profilinin ilişkisi açıkça görülmektedir. Takım etrafındaki malzemenin daha etkili akması için her bir helisel sırt arasındaki uzaklığın sırt kalınlığından daha büyük olması gerekir. Takım ucunun helisel sırtlarla paralel olması kritik bir husus değildir [12,25]. Multi-Helix takımların (MX Triflute™) yivlerinin çevresinde helisel sırtların bulunması takımın hacmini düşürmekle beraber malzeme akısına yardım eder ve yüzeydeki oksitleri dağıtır (Şekil3.9 ve Şekil 3.10).



Şekil3.8. Çeşitli Whorl™ takım konfigürasyonları [23]



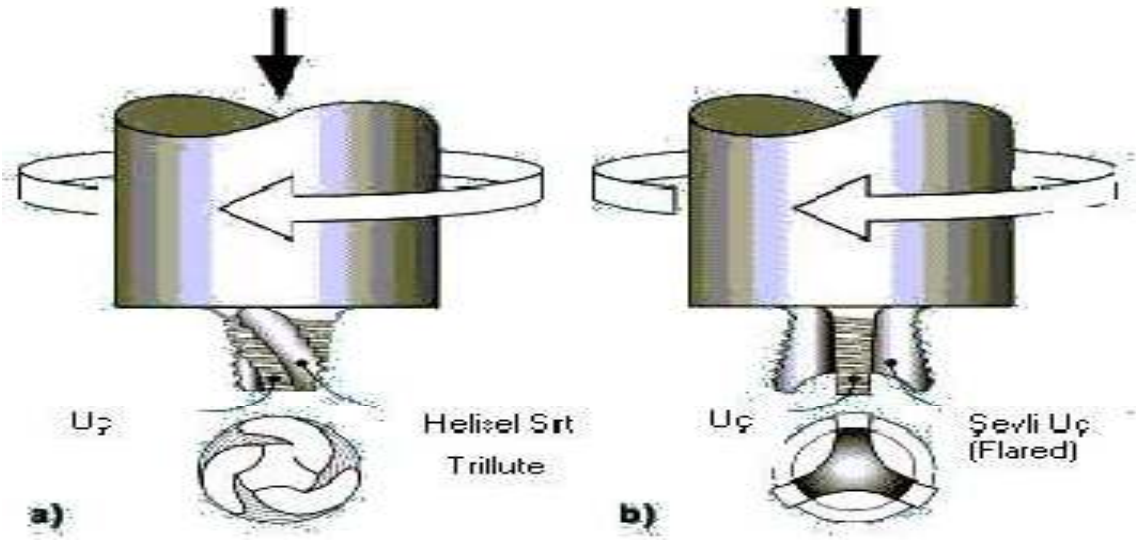
Şekil3.9. 75 mm kalınlığındaki AA6082T6 alaşımının kaynağında Whorl™ takımının kullanılması, kaynağın bitmiş hali ve kaynak dikişinin görüntüsü [13]

Alın kaynağında kullanılan Whorl™ ve Triflute™ takımları kesik piramit seklindedir ve yüzeylerinde aşağıya doğru delme etkisini kolaylaştırmak amacıyla kaba islenmiş helisel oluklar bulunmaktadır. Bu girintili köşe şekilleri ucun hacmini azaltır ve statik hacim oranı için uygun olan karıştırma hacmini sağlar. Daha iyi bir hacim oranı ile malzemenin akış yolu daha iyi olur ve böylece takım daha etkili çalışır. Ayrıca özellikle

ucun etrafındaki kaba islenmiş helisel sırtlarda bulunan girintili köşe özellikleri kaynak bölgesindeki yüzey oksitlerinin parçalanmasına ve dağıtılmasına yardımcı olur [12].

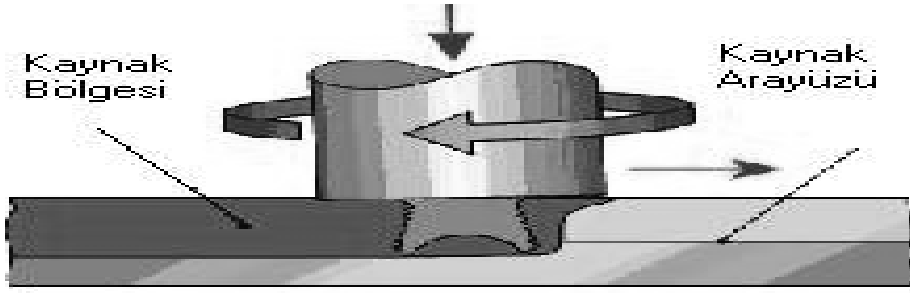


Şekil 3.10. MX Triflute™ takımın resim ve şematik çalışma şekli [13] (MX Triflute™ takımın esin kaynağı deniz kabuklarıdır)



Şekil 3.11. MX Triflute™ ve Flared-Triflute™ takım dizaynları [24]

Bindirme kaynağında ise takım (batıcı uç), daha geniş kaynak bölgesi sağlamak ve kaynak yapılan ara yüzeylerde daha büyük levha kalınlıklarından dolayı oluşabilecek problemleri önlemek amacıyla daha farklı dizayn edilmiştir (Şekil 3.11). Bindirme kaynağında takım yüzeyi kaynak ara yüzeyine zorunlu olarak diktir ve alttaki levhaya yeteri kadar nüfuz edebilmesi ana amaçtır. Kaynak ara yüzeyinin üst yüzeyden mesafesi ve takımın girintilerinin kaynağın kenarı ile kesiştiği açı çok önemlidir. Bu özellik, yorulma ile doğrudan bağlantılıdır. Bu takımın karakteristiği, süpürme hacmi ile statik hacim arasındaki farkın artmasıyla ucun etrafındaki ve aşağısındaki akış yolunun büyümesidir [12].



Şekil 3.12. Flared-Triflute takım ile yapılmış olan bindirme kaynağında kaynak ara yüzeyinin görünümü [13]

Karıştırıcı takımın uç kısmındaki sürekli spiral kısmın eğimi, kaynak edilecek malzemeye uygun bir şekilde tasarlanıp üretilebilir. Spiral kenarın eğimindeki değişim, plastik Şekil değiştiren malzemenin aşağı doğru hareketine ve karıştırılmasına olanak sağlar. Whorl™ ve Triflute™ takımlar dönme sırasında saat ibresi yönünde spiral hareketi sayesinde plastik Şekil değiştiren malzemeye aşağı yönde itme kuvveti uygular. Ayrıca, her iki takımın diğer geleneksel takımlardan önemli bir üstünlüğü (özellikle kalın parçaların kaynağında) karıştırıcı ucun dönmesi sırasındaki hacminin (dinamik süpürme hacmi), kendi hacmine (statik hacim) oranının yüksek olmasıdır. Çünkü bu kaynak sırasında yeterli akışın sağlanmasında oldukça büyük bir öneme sahiptir [22].

Sürtünme karıştırma kaynağı uygulaması için geliştirilen Skew-Stir™ serisi takım, takım eksenine is mili eksenine göre biraz eğim verilmesi ile diğer takımlardan ayrılır. Skew-Stir™ serisi takımlar, dinamik süpürme hacmi ile statik hacim arasındaki oranı takımın eğik hareketi ile artırılabilir. Bu oran, boşluk oluşumunu gidermede veya azaltmada ve işlem verimliliğini yükseltmede önemli bir faktördür. Şekil 3.12' de görüleceği üzere, omuz yüzeyi, eğik takım ekseniiyle belirli bir eğim oluşturmaktadır. Omuz yüzeyi ise, plakanın üst kısmına bağlı olarak sabit durmaktadır. Omuz, is parçası üzerinde iken dairesel hareket yapar. Takımın odak noktası, is parçası yüzeyine veya is parçasının herhangi bir noktası üzerine geldiğinde, omuzun temas yüzeyi eksen dışı bir yörüngede hareket eder. Ayrıca, omuzun bu yörünge hareketi, omuzun eğrilik açısına ve odak noktası ile levhanın üst yüzeyi arasındaki mesafeye bağlıdır. Eğrilik açısı ve aradaki mesafe arttıkça, omuzun hareket sahası da artacaktır.



Şekil 3.13. Skew-Stir takımının çalışma prensibi ve A-Skew takımının resmi [25]

Yeni jenerasyon Whorl™ ve Triflute™ takımlarının omuzları (shoulder) da özel profillere sahiptir. Omuz profilleri, omuz ile is parçası arasında daha iyi bir temas yüzeyi sağlamak maksadıyla kullanılır. Sürtünme ısısı ile akıcı hale gelen malzemenin kaynak bölgesinden ayrılması önlenmektedir (Şekil 3.13).



Şekil 3.14. Whorl™ ve MX Triflute™ takımlarının omuz profilleri [23]

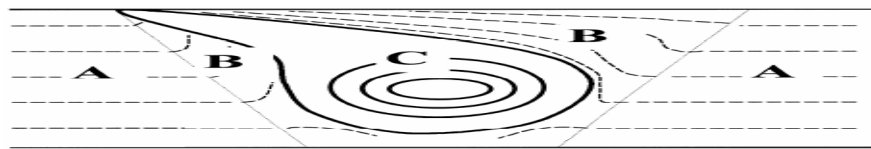
Tek parça takım kullanıldığında kaynak sonunda ucun çekilmesi sonucunda boşluk (delik) kalır. Bu hata, özellikle depolama tankları ve boruların kaynağında olduğu çevresel kaynaklarda kabul edilemez. Bu takımların bir baksa dezavantajı ise farklı kalınlıklardaki levhaların kaynağı için farklı uzunluklara sahip ayrı ayrı uçlara gereksinim olmasıdır. Bu sorunu gidermek için bilgisayar ile otomatik kontrol edilebilen ve batıcı ucu geri çekilebilen özel takımlar geliştirilmiştir. Kaynak sonunda bu otomatik geri çekilebilir uçlar dönme hareketi devam ederken yavaş yavaş çekilerek boşluk kalmadan kaynak işlemi tamamlanır. Takımlar, takım çeliği, sıcak is çeliği veya yüksek hız çeliklerinden imal edilmektedir [13].

Omuzun yüzeyine açılan yivler (kanallar), kaynak sırasında dışarı çıkmaya çalışan malzemeyi tutar. Bu sırada takım bağlantı hattı boyunca yol alır. Takımın omuz kısmına açılan bu yivlerin sağladığı mekanik üstünlük ise takımın uç kısmında sıkıştırmayı

artırır. Bu gelişme 6 mm kalınlığındaki 5083 Al-alışımı üzerinde test edilmiş ve omuzda kanallar olmayan takımlara göre iki kat hızda yüksek kaliteli kaynaklar gerçekleştirilmiştir. Normalde 1-3° arasında takıma eğim verilirken, bu gelişme sayesinde, takımın 0° lik eğimli pozisyonda, kullanımına olanak sağlanmıştır. Ortaya çıkan bu sadelik ve kolaylıklar, kaynağın x ve y eksenleri yönünde yapılmasını kolaylaştırmıştır [22]. Yöntemde, yüksek sıcaklıklarda aşınma direncine sahip malzemelerden üretilen, değişik takımlardaki, tükenmeyen döner takımlar kullanılır. Örneğin, Amerikan Deniz Kuvvetleri'nde ani saldırı ve hücum amaçlı ileri amfibik (hem karada hem de suda kullanılan) aracın kaynak bağlantılarında H13 (X40 CrMoV 5 1) takım çeliğinden tek parça takımlar ve karıştırıcı uç kısmın malzemesi olarak yüksek sıcaklıklarda mukavemetini koruyan MP159 malzemesinden ve omuz kısmı ise H13 takım çeliğinden imal edilmiş ve iki parçalı olan takımlar kullanılmıştır. Ayrıca bu konudaki gelişmeler de hızla devam etmektedir [22,25].

3.3. Kaynak Metalürjisi

Şekil 3.14' de sürtünme karıştırma kaynağında oluşan simetrik olmayan kaynak dikişinin kesitindeki tipik bir içyapı şematik olarak gösterilmiştir [13]. Tipik olarak soğan halkaları veya ağaçlardaki yaş halkaları gibi pek çok konsantrik halkalar oluşmaktadır [26]. Kaynak bölgesindeki içyapı tipik olarak üç farklı bölgeden oluşur. Bu bölgeler, A: ark kaynağındaki ITAB' a benzer dikişten uzakta ısının tesiri altındaki bölge (ITAB), B: dikişe bitişik termo-mekanik olarak etkilenmiş bölge (TMEB) ve C: dinamik olarak yeniden kristalleşen bölge (DKB) olarak adlandırılmaktadır [12]. Dinamik olarak yeniden kristalleşen bölgenin dinamik toparlanma (dynamic recovery) sonucu oluştuğu kabul edilmektedir [27].

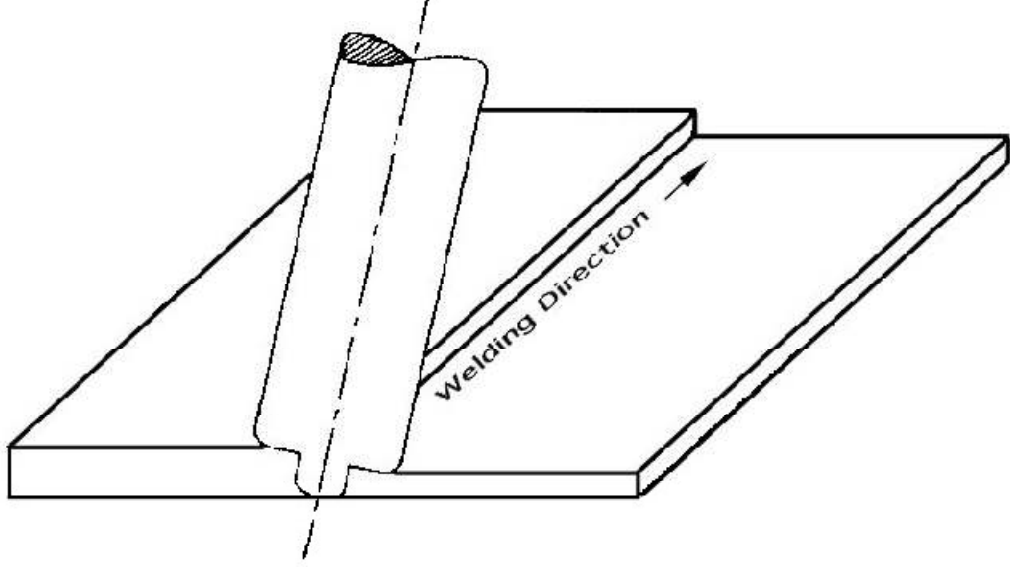


Şekil 3.15. Sürtünme karıştırma kaynağında kaynak bölgesinde oluşan içyapının şematik görünümü. A: ısının tesiri altındaki bölge (ITAB), B: termodinamik olarak yeniden kristalleşen bölge (TEB), C: dinamik olarak yeniden kristalleşen bölge (DKB) [13]

Belirli bir takım geometrisi kullanılarak yapılan sürtünme karıştırma kaynağında elde edilen birleştirme karakteristiklerini belirleyen üç temel parametre vardır. Bunlar, takımın devir hızı, ilerleme hızı ve batma derinliğidir [28]. Bunlardan ilk ikisi, devir ve ilerleme hızları kontrol edilebilir ve sabit takım geometrisi ile yapılan kaynaklarda kaynak sırasında önemli oranda değişmezler. Fakat takımın batma derinliği kritik ve kontrol edilmesi güç bir parametredir. Batma derinliğinin kaynak işlemi süresince sabit kalması gerekmektedir. Fakat özellikle uzun levhaların birleştirme işlemlerinde yüzeylerin çok düzgün olmaması durumunda bunu sağlamak mümkün olmayabilir. Bu yüzden kaynak öncesi yüzey hazırlama oldukça kritik olup, bu hususta özen gösterilmesi gerekmektedir [13]. Kaynak işleminde iyi bir nüfuziyet elde etmek için, takım ucunun arka yüzeye yaklaşık olarak 0,508 mm mesafede sabit tutulması gerektiği deneysel olarak gösterilmiştir [28]. Takımın ucu ile is parçasının arka yüzeyi arasındaki mesafe “nüfuz etme mesafesi” olarak bilinmektedir. Bundan dolayı sürtünme karıştırma kaynağında, yüzey hazırlama klasik ve lineer sürtünme kaynaklarındakinden daha kritiktir. Kaynak işlemi süresince nüfuz etme mesafesini sabit tutmak için malzeme kalınlığındaki değişimler minimum düzeyde olmalıdır. Takım ölçüsü, düşük ısı girdisi ve küçük kaynak dikişi sağladığı ve dolayısıyla büzülmeyi azalttığı için mümkün olduğunca küçük tutulmalıdır. Bu yöntemde dikkat edilmesi gereken diğer önemli bir husus, yeterli hidrostatik basınç elde edilemez ise, kaynaklanan levhaların tabana yakın kısmında soğuk birleşme (yetersiz nüfuziyet) oluşumudur [12,13].

Bu sorun yukarı doğru hareket etme eğilimindeki çamur kıvamındaki malzemenin aşağıya doğru hareketini kolaylaştırıp kaynak dikişinde kalmasını sağlayabilecek optimum batıcı uç ve omuz dizaynı yapılması, devir hızının artırılması gibi önlemler ile ortadan kaldırılabilir. Bu bağlamda, karıştırıcı uç üzerine verilen profiller (spiral dişler) sayesinde aşağı doğru itme hareketi sağlanarak malzemenin yukarı doğru akması önlenir. Bu önlemler aynı zamanda kaynak bölgesindeki malzemenin omuz altından kaybı sonucu kaynak dikişi içerisinde oluşan tünel şeklinde porozite (boşluk) probleminin de giderilmesini sağlar [13]. Sürtünme karıştırma kaynağı, otomatik çekilebilir takımların geliştirilmesiyle batıcı ucun işlem sonunda levhadan geri çekildiği yerde delik oluşmaması sonucu dairesel (çevresel) kaynak işlemlerinde ve takımın eğik daldırılması sonucu farklı kalınlıklardaki levhaların kaynak işlemlerinde de kullanılabilir [29]. Farklı kalınlıklardaki Al-Li alaşımı 2195 levhaların birleştirme işlemlerinde eğik takım daldırma yöntemi ile umut verici sonuçlar elde

edilmiştir [29]. Eğik takım daldırma yöntemi Şekil 2.15’ de şematik olarak gösterilmektedir [30]. Son yıllarda otomotiv endüstrisinde konstrüksiyona hazır levhaların (tailored blanks) kaynak işleminde sürtünme karıştırma kaynağı yönteminin kullanılması büyük bir ilgi çekmektedir. Pimin farklı kalınlıklardaki levhalara açılı daldırılması ile lazer kaynağında elde edilenden daha düzgün bir yüzey elde edilebilmektedir.



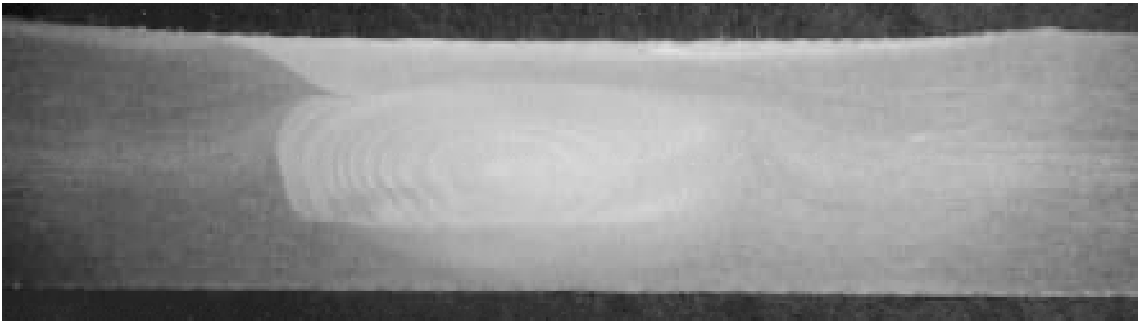
Şekil 3.16. Sürtünme karıştırma kaynağında batıcı ucun eğik konumda daldırılması ile farklı kalınlıklardaki levhaların birleştirilmesi [30]

Takım omuzu özellikle ince levhalarda sürtünme işlemini dolayısıyla gerekli ısının büyük bir kısmını sağlar. Takım omuzları önceleri 1-2° eğik yapılırken, daha sonraları omuz profilleri, yani yüzeylerinde yivler (kanallar) bulunan omuzlu takımlar geliştirilmiştir. Omuz yüzeyindeki bu kanallar kaynak sırasında dışarı kaçmaya çalışan malzemeyi engeller, ayrıca takım ucundaki sıkıştırmayı (hidrostatik basıncı) artırır. Dolayısıyla, omuz profili bulunan takımlar kullanılarak daha yüksek hızda kaynak işlemi gerçekleştirilebilir.

3.4. Kaynak Bölgesinin Mekanik Özellikleri

Ergitme esaslı kaynak yöntemleri ile karşılaştırıldığında, sürtünme karıştırma kaynağı ile yapılan birleştirilmeler daha ideal bir kaynak profili ve daha pürüzsüz bir yüzey kalitesi gösterirler. Kaynak işleminin uygun yapılması ve optimum kaynak parametrelerinin kullanılması ile kusursuz kaynak elde etmek mümkündür. Batıcı ucun istikrarsız hareketi ve parametrelerin uygun olmaması durumunda sırasıyla yüzey pürüzlülüğü ve daha önce bahsedildiği gibi kaynak dikişinin tabana yakın kısmında soğuk birleşme gibi sorunlarla karşılaşılabilir. Bu yöntemde oluşabilecek bir başka kaynak hatası da kaynak dikişinde tünel şeklinde boşluk (porozite) kalmasıdır. Bu hatanın nedeni takım tasarımıdaki hatadan dolayı çamur kıvamına gelen malzemenin omuz altından dışarı tasmaıdır. Karıştırıcı uç üzerine ve omuz üzerine uygun profillerin islenmesi ile bu sorun ortadan kaldırılabilir [13]. Takım omzunun dönmesi sonucu, bu metot ile elde edilen kaynağın üst yüzeyleri makine ile islenmiş gibidir ki bu da yorulma ömrünü arttırmaktadır. Sürtünme karıştırma kaynağı ile yukarıda bahsedilen hususlar dikkate alınarak Al-alışımlarında hatasız kaynak dikişı elde edilebilir. Şekil 3.17’de bu yöntem ile elde edilmiş hata içermeyen bir Al-alışımında kaynak dikişinin kesiti gösterilmektedir [30].

Bu kaynak yöntemi ile kaynak edilmiş Al-alışımlarında elde edilen kaynağın tipik özelliğı, özellikle yaslandırma sertleşmesi yapılmış alışımlarda, kaynak bölgesinde sertlik ve mukavemet düşüşüdür (strength under matching). Fakat kaynak bölgesinde mukavemet kaybı tüm ergitme kaynak yöntemlerinde bu yöntemden daha fazladır.



Şekil 3.17. Sürtünme karıştırma kaynağı yapılmış Al-alışımının kaynak bölgesinin kesiti [30]

3.5. Sürtünme Karıştırma Kaynağının Uygulama Alanları

Bu kaynak yönteminin uygulaması konvansiyonel dik freze tezgahlarda özel takım kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Ticari olarak üretilmiş değişik ebatlarda sürtünme karıştırma kaynak cihazları mevcut olup, maliyetleri 1 milyon \$'a kadar çıkmaktadır. Yöntem Al-alışımlarının kaynağına yönelik özel olarak geliştirilmiş olmakla birlikte klasik ergitme kaynak yöntemleri ile kaynağı mümkün olmayan veya güç olan bazı alışımların kaynağında başarılı sonuçlar vermiştir. Bu yöntemle Alışımlarının tek pasoda 50 mm ve çift taraftan kaynak yapmak suretiyle 100 mm kalınlığa kadar levhaların alın kaynağı yapılabilir [13].

Sürtünme karıştırma kaynak yönteminin Al-alışımlarında uygulanabilirliği üzerine çok sayıda araştırma yapılmıştır [12]. Bu araştırma sonuçları göstermektedir ki, bu yöntem gerek yaslandırma sertleşmesi yapılan gerekse yaslandırma sertleşmesi yapılamayan (1xxx ve 5xxx gibi ısıl işleme duyarlı olmayan) Al-alışımlarında başarı ile kullanılabilir. Bu yöntemle elde edilen birleştirmelerin hem yüzey kalitesi hem de kaynak performansı klasik ergitme kaynaklarına nazaran daha iyidir [12]. Ayrıca sürtünme karıştırma kaynağında takım ilerleme hızını arttırarak bu mukavemet düşüşünün daha da azaltılması ve batıcı uç çapının küçük seçilmesi ile mekanik özelliklerin etkilendiği bölgenin eninin küçültülmesi mümkündür. Buna ilaveten, bu yöntem ile kaynak edilen 5454 alışımlarının korozyon performansının da oldukça iyi olduğu tespit edilmiştir. Hatta geleneksel kaynak yöntemleri ile kaynağı çok güç olan 7075 alışım bile bu yöntem ile başarılı bir şekilde birleştirilmiş ve elde edilen birleştirmeler oldukça iyi mekanik özelliklere göstermiştir [12]. Al-alışımlarının dışında, ergitme kaynak yöntemleri ile kaynağı mümkün olmayan veya güç olan Al-Li gibi bazı alışımlar ve 0,8 mm kalınlığındaki çinko sacların kaynağında bu yöntem başarı ile uygulanmıştır. Ayrıca, düşük karbonlu yumuşak çeliklerin, Mg- alışımlarının, Ti-alışımlarının, saf Cu ve pirinç gibi Cu alışımlarının, düşük sertlikteki östenitik paslanmaz çeliklerin ve ergime derecesi birbirine yakın farklı iki malzemenin kaynağında da bu yöntem başarı ile uygulanabilir. Özel amaçlı sürtünme karıştırma kaynağı makinelerinde 50 mm kalınlığındaki saf bakır levha 100 mm/dak kaynak hızında mükemmel kalitede kaynak edilmiştir [12].

Sürtünme karıştırma kaynağı, en az çinko ve kursun levhalarda olduğu kadar magnezyum alışımlarında da başarı ile uygulanabilmektedir. İngiliz Kaynak

Enstitüsünde (TWI) 9.5 mm kalınlığındaki magnezyum AZ61A alaşımında yapılan ilk deneyler başarı ile sonuçlanmıştır. Japonya da yapılan bir çalışmada da, 6 mm kalınlığındaki AZ31 magnezyum alaşımı üzerinde yapılan ileri laboratuvar deneylerinde, kaynak esnasında ince yeniden kristalleşmiş tane yapısının oluşmasından dolayı, numunelerin mukavemeti ile baz malzemenin mukavemet değerlerinin birbirlerine çok yakın olduğu tespit edilmiştir [12].

Uzay ve havacılık endüstrisinde kullanılan titanyum alaşımlarında sürtünme karıştırma kaynağı denemeleri ilk olarak Ti-6Al-4V alaşımında başarı ile gerçekleştirilmiş ve diğer alaşımlar üzerinde çalışmalar başlatılmıştır. Yüksek korozyon dayanımından dolayı petrol boru hattı şebekeleri ve su üstü platformlarında rakipsiz olan bu alaşımın bu tür uygulamalarında sürtünme karıştırma kaynağının kullanılabilirliği konusunda araştırmalar sürdürülmektedir [12].

Bu kaynak tekniği günümüzde ticari olarak gemi inşaatı, hızlı tren imalatı, havacılık gibi değişik alanlarda uygulanmaktadır. Yüksek hız feribotlarında kullanılan standart boydaki alüminyum ekstrüzyon panelleri sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmektedir (Şekil 3.17). Ergitme kaynaklarına kıyasla ısı girdisinin düşük olması panellerdeki distorsiyon ve kalıntı gerilmelerini minimum düzeyde olmasını sağlamaktadır. Ayrıca, bu yöntem Al-Li 2195 alaşımından üretilen uzay mekiklerinin yakıt tanklarının son kubbe kısımlarının kaynağında başarılı bir şekilde uygulanmaktadır (Şekil 3.18). Sürtünme karıştırma kaynağı yolcu uçakları gibi hafif alüminyum iskeletli yapılarda büyük potansiyel arz etmektedir ve bu konuda araştırmalar yoğun olarak sürdürülmektedir. Buna ilaveten, özellikle Japonya da hızlı trenlerin vagonlarının üretiminde, alüminyum ekstrüzyonlardan kaynak konstrüksiyonla petek panellerin imalatında bu kaynak yöntemi uygulanmaktadır [13].



Şekil 3.18. Yüksek hız feribotlarında kullanılan alüminyum ekstrüzyon panellerinin

Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile birleştirilmesi [12,13,25]



Şekil 3.19. Space Shuttle External Tank projesi ve Marshall Space Flight Center laboratuvarındaki Sürtünme Karıştırma Kaynak sistemlerinden görüntüler [12,13,25]

Sürtünme karıştırma kaynağı, gemi, uçak ve uzay aracı, tren ve kara taşıtlarının imalatı gibi çok geniş bir uygulama alanı yelpazesine sahiptir. Bu uygulamalarda, bu yeni kaynak teknolojisi sınırlı da olsa ticari olarak kullanılmaya başlanmıştır. Robotik sürtünme karıştırma kaynağı ile Al- ve Mg-alaşımlarının kaynağında kastedilecek aşamalar daha hafif taşımacılık sistemlerinin seri üretimini mümkün kılacak ve bu şekilde araçlarının yakıt tüketiminde de önemli tasarruflar sağlanacaktır. Bu yeni kaynak yönteminin özellikle gemi inşaatında, uçak ve uzay endüstrisinde, otomotiv sektöründe ve diğer imalat sektörlerinde kullanımının her geçen gün artacağı beklenmektedir [13].

3.6. Sürtünme Karıştırma Kaynağının Avantaj ve Dezavantajları

Sürtünme karıştırma kaynağının üstünlükleri şunlardır.

- 1) Ergitme kaynağı zor olan 2XXX ve 7XXX serisi Al-alaşımları ve Al-Li alaşımları kaynak edilebilir.
- 2) Kaynak esnasındaki toplam ısı girdisi düşüktür, dolayısıyla mekanik özelliklerdeki kayıp minimumdur.
- 3) Özellikle ince levhalarda büzülme, distorsiyon ve kalıntı gerilmeler çok düşüktür.
- 4) Kaynak öncesi yüzey hazırlama aşırı kritik değildir, yüzeyde ince oksit filmleri tolere edilebilir.
- 5) Katı hal kaynağı olduğu için çatlak ve porozite oluşumu gibi ergitme kaynaklarında karşılaşılan problemler söz konusu değildir.

- 6) Dolgu malzemesine gereksinim yoktur.
- 7) Kaynak sonrası kaynak yüzeyi talaş alınmış gibi düzgündür ve yüzey işleme gerektirmez.
- 8) Alın ve bindirme kaynağı yapılabilir.
- 9) Aynı takım ile tipik olarak 1000 m kaynak yapılabilir.
- 10) Yöntemin doğası gereği ark, kıvılcım, gaz ve toz söz konusu olmadığından çok temiz ve çevreci bir kaynak yöntemidir.
- 11) Enerji verimliliği yüksek bir kaynak yöntemidir.
- 12) Otomasyona ve robotik uygulamaya çok uygundur.

Yöntemin dezavantajları ise şunlardır:

- 1) Her malzemenin kaynağı mümkün değildir. Yalnızca mukavemeti düşük ve özellikle düşük ergime dereceli malzemelerin kaynağına uygundur.
- 2) Kaynaklanacak parçaların çok sıkı tespit edilmesi şarttır.
- 3) Kaynak hızı bazı ergitme kaynaklarından düşüktür (tipik olarak 5 mm kalınlığındaki 6XXX serisi Al-alışımı levhalarda 750 mm/dak civarında).
- 4) Tek parçalı takım kullanıldığında kaynak sonunda delik oluşur.
- 5) Özellikle kalın levhaların kaynağı için çok güçlü tezgahlara ihtiyaç vardır [13].

3.7. Bakır ve Bakır Alaşımlarının Kaynağı

Bakır, ısıyı ve elektriği en iyi ileten metallerden 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 kırılmalığa 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 (Çizelge 3.1). 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 ergitmek, aynı boyutta çeliği ergitmekten daha zordur. Bu, bakırın yüksek termik iletkenliğe sahip olmasının sonucudur (Bakırın termik iletkenliği çeliğin beş katıdır). Bakırın 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 genişleyeceği 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 [33].

3.7.1. 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, kükür, mangan, gümüş, kadmiyum, silis, fosfor ve berilyumdur. Hepsi aynı kolaylıkta veya kalite yönünden aynı başarıda olmasa da tüm alaşımlar kaynak olabilir. Kaynaklı parça üretiminde en çok kullanılan belirleyici nitelikteki altı alaşım elementinin yaklaşık kompozisyonları ve özellikleri Çizelge 3.3’ de listelenmiştir. Altı alaşımın kaynak kabiliyeti Çizelge 3.1.’de verilmiştir ve açıklaması daha sonraki bölümlerde yapılacaktır.

OERLIKON'un bakır ve bakır alaşımlarının kaynağı için ürettiği örtülü elektrot ve kaynak telleri Çizelge3.2'de gösterilmiştir.

3.7.2. Bakır ve Bakır Alaşımlarının Örtülü Elektrot ile Kaynağı

Bakır ve alaşımlarının ark kaynağı Çizelge3.1'deki 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. Çizelge3.1'de gösterildiği gibi 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 (Çizelge3.3).

Bu çizelgede bakır ve alaşımları için AWS sınıflandırması ve elektrotlar için kimyasal kompozisyon ihtiyaçları verilmiştir. Bu elektrotlarla yapılan kaynak metalinin belirtilen en düşük çekme mukavemeti de Çizelge3.4' de verilmiştir. Çizelge3.1' de bakır ve altı bakır alaşımı için önerilen elektrot sınıflandırmasını gösterilmektedir. Böylece bu çizelgeden ECuNi elektrotunun bakır nikel alaşımı için seçileceğinin, düşük çinkolu (kızıl pirinç) ve yüksek çinkolu pirinçlerde de (Muntz metal) ya ECuSn-A, ECuSn-C veya E CuAl-A2'nin iyi sonuçlar vereceği görülebilmektedir.

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

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

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

KARBON-ARK KAYNAĞI- DCEN

Kaynak Kalitesi	Orta-zayıf	İyi	Orta	Orta	Orta	Orta	Orta	Orta
Tel	ERCu / en iyi iletkenlik ERCuSn-A / en iyi mukavemet	ERCu / en iyi iletkenlik ERCuSn-A /en iyi mukavemet	ERCuSi-A, ERCuSn-C / tek paso kaynakları için	ERCuSi-A	ERCuSi-A	ERCuSi-A	ERCuNi	ERCuAl-A2
Ön Isıtma °C	315'e kadar	315'e kadar	205'e kadar	148'e kadar	Gerekmez	Genellikle gerekmez	Gerekmez	Yalnız büyük parçalarda

Çizelge3.1. Dört kaynak yönteminin bakır ve bakır alaşımlarındaki kaynağı [33]

İLAVE METAL TÜRÜ	OERLIKON ÜRÜNÜ	AWS STANDARDI		DIN STANDARDI	
ÖRTÜLÜ ELEKTROD	E 206 E 214 CITOBronze-B ALBronze	A 5.6	E Cu E CuSn-C E CuSn-C E CuAl-A2	1733	- EL-CuSn7 EL-CuSn7 EL-CuAl8
TIG KAYNAK TELİ	A 1200 A 1203 A 1214 A 1215 A1204	A 5.7	- ER CuSn-A ER CuAl-A1 -	1733 8513	S-Cu S-CuSn 6 S-CuAl 8 S-CuSn L CuP6
MIG/MAG KAYNAK TELİ	CUFIL CUFIL-AL CUFIL-1SN CUFIL-6SN	A 5.7	S-Cu S-Cu Al 8 S-Cu Sn S-Cu Sn 6	1733	- R Cu Al-A1 - -

Çizelge3.2. OERLIKON’ un bakır ve bakır alaşımlarının kaynağı için ürettiği standartları [33]

Ortak Ad	Elektrolitik Bakır		Oksijeni Giderilmiş		Kızıl Pirinç		Muntz Metali		Silis Bronzu		Fosfor Bronzu		Bakır- Nikel		Aluminyum Bronzu	
Kompozisyon %	Cu : 99.95		Cu: 99.95 P : 0.02		Cu : 85 Zn : 15		Cu: 60 Zn: 40		Cu :96 Si : 3		Cu : 92 Sn : 7 P : 0.2		Cu : 70 Ni : 30		Cu : 91 Al : 7 Fe : 2	
Temper	Sert	Yum	Sert	Yum	Sert	Yum	Sert	Yum	Sert	Yum	Sert	Yum	Sert	Yum	Sert	Yum
Çekme Mukavemeti (1000 psi)	50	32	55	32	62	40	74	54	94	60	91	56	84	55	80	72
Akma Dayanımı (1000 psi)	45	10	50	10	57	12	60	21	58	25	86	25	79	18	50	38
Uzama 2 in. (%)	12	55	8	45	5	47	8	45	8	60	17	73	3	36	30	42
Rockwell Sertlik	50B	40F	60B	40F	73B	59F	80B	80F	93 B	60B	94 B	43B	85B	40B	83B	74B
Elektriksel İletkenlik (20°C) (% IACS)	101		85		37		28		7		13		4.6		14	
Termik İletkenlik (20°C) (Btu/sq ft/ ft/hr/°F)	226		196		92		69		21		36		17		44	

Çizelge 3.3. Bakır ve bakır alaşımlarının özellikleri [33]

AWS SINIFI A 5.6	EN DÜŞÜK ÇEKME MUKAVEMETİ		UZAMA % , 4XD UZUNLUĞU İÇİN
	ksi	MPa	
ECu	25	170	20
ECuSi	50	350	20
ECuSn-A	35	240	20
ECuSn-C	40	280	20
ECuNi	50	350	20
ECuAl-A2	60	410	20
ECuAl-B	65	450	10
ECuNiAl	72	500	10
ECuMnNiAl	75	520	15

AWS SINIFI A 5.7	EN DÜŞÜK ÇEKME MUKAVEMETİ		BRINELL SERTLİĞİ
	ksi		
ERCu	25		25 Rockwell F
ERCuSi-A	50		80-100 (500 kg yük)
ERCuSn-A	35		70-85 (500 kg yük)
ERCuNi	50		60-80 (500 kg yük)
ERCuAl-A1	55		80-110 (500 kg yük)
ERCuAl-A2	60		130-150 (3000 kg yük)*
ERCuAl-A3	65		140-180 (3000 kg yük)*
ERCuNiAl	72		160-200 (3000 kg yük)*
ERCuMnNiAl	75		160-200 (3000 kg yük)*

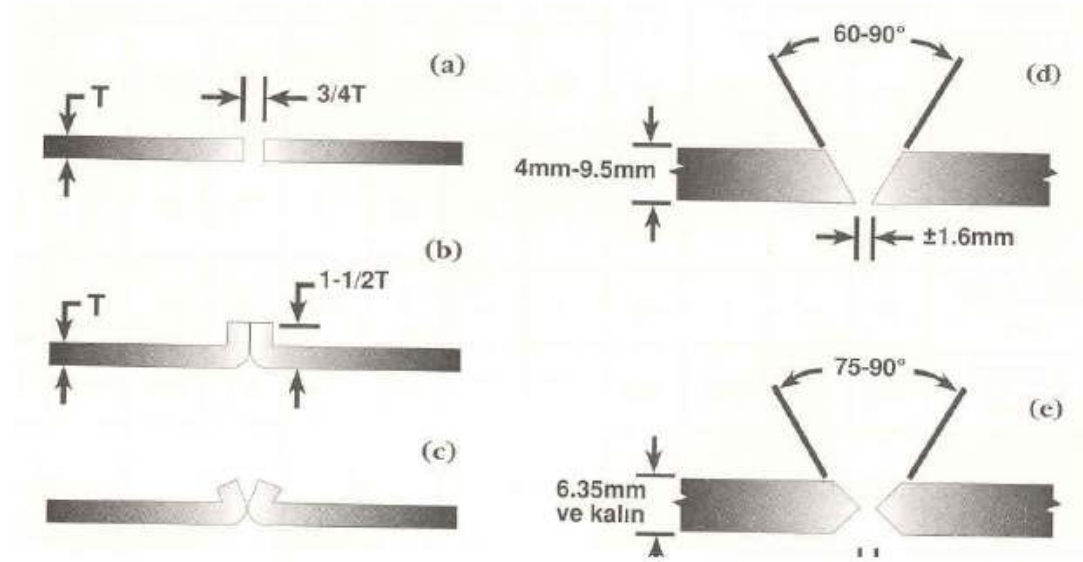
* Yalnız TIG kaynağında.

Çizelge 3.4. Kaynak metallerinin bazı mekanik özellikleri [33]

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. Şekil 3.18’de AWS’ nin ince ve kalın malzemeler için önerdiği kaynak ağzı hazırlıkları gösterilmiştir. Malzemelerin ön ısıtma ihtiyaçları Çizelge 3.1’ de gösterilmiştir. 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 malzemeden altlık konulur. Düz altlık yerine içbükey altlık kullanılması, kaynağın arka yüzeyde de bir miktar metal ile desteklenmesini sağlar. Elektrolitik bakırda yüksek mukavemetli birleştirmeler elde edilir, oysa oksijeni giderilmiş bakırda aynı kalitede kaynaklar elde edilemez. Bunlar da, ECuSn-A veya ECuSn-C örtülü elektrotlar pratikte kullanılır [33].

Geniş açılı kaynak ağzına sahip malzemeyi içbükey bakır altlık kullanırken kaynak yatay pozisyonda yapılmalıdır. Parça kalınlığına göre mümkün olan en geniş çaplı elektrot seçilmelidir. Yüksek akım yoğunluğu metal akısını iyileştirme ve kaynak metalinde cüruf kalmasını en aza indirmek için gereklidir.



Şekil 3.20. Bakır ve bakır alaşımlarının kaynağında kullanılan kaynak ağzı hazırlıkları a, b,c, ince malzemelerde, d, e, kalın parçalarda [33].

Kök açıklığına göre düz veya farklı formdaki altlıklar kullanılabilir. Birleştirilecek parçaları mengene ile sabitlemek, kaynak çatlaklarını en aza indirmek için gereklidir. Çizelge 1’de görüldüğü gibi pirinçlerin (kızıl pirinç veya Muntz metali) ECuSn-A, ECuSn-C veya ECuAl-A2 örtülü elektrotları ile kaynağında iyi sonuçlar elde edilebilir. ECuAl-A2 elektrotu yüksek çekme mukavemeti, yorulma mukavemeti ve yüksek korozyon direnci istenen yerlerde kullanılır. Ön ısıtma ve pasolar arası sıcaklıklar kızıl pirinç için 205°C’ den veya Muntz metali için de 260°C’ den az olmamalıdır. Ana malzemenin aynısı veya bakır altlık kullanılmalı ve yüksek nüfuziyeti

sağlayacak ve cüruf tanelerinin girmesini engelleyecek şekilde kaynak ağzı hazırlanmalıdır [33].

Pirincin çinko içermesi, kaynak zorluklarının nedenidir. Kaynak sıcaklıkları çinkoyu buharlaştırır ve iyi havalandırma yapılmazsa sağlığa zararlı olan çinko-oksit dumanına neden olur. Çinko-oksit dumanı, görüşü engeller ve ergimiş metalin yayılımını dolayısıyla kaynak yapılacak yüzeyin ıslatmasını engeller. Buharlaşma çok fazla çinko kaybına neden olur ve ana metalin fiziksel ve mekanik özelliklerini belirleyen kimyasal kompozisyonu değiştirir. En iyi sonucu almak ve çinko buharlaşmasını en aza indirmek için, kaynaklar kullanılabilecek en büyük çaplı elektrot ile yatay pozisyonda yapılmalıdır. ECuAl-A2 elektrotu ile arkı çok az hareket ettirmek ve hafif zigzag hareketi yapmak çinko buharlaşmasını en aza indirir. Akım olabilecek aralığın en yüksekinde olmalıdır. Silis bronz için gazaltı kaynak yöntemi tercih edilse de ECuSi ve ECuAl-A2 örtülü elektrotları ile orta kalitede kaynaklar elde edilebilir. Silis bronzları diğer bakır alaşımlarından daha düşük termik iletkenliklere sahip olmaları nedeniyle daha kolay kaynak yapılabilir. Kaynak ağzı hazırlıkları çeliğinki gibi olabilir. 4 mm'ye kadar olan kalınlıklar kaynak ağzı açmadan alın altına kaynak edilebilirken, daha kalın malzemeler 60° açılı tek veya çift taraflı V kaynak ağzı açılarak kaynak yapılabilir. Silis bronzu sıcak kırılmalığa sahip olduğundan ön ısıtma yapılması istenmez. Pasolar arası sıcaklıkların 93°C'yi asmaması için tedbir alınmalıdır. Akım, elektrot boyutu için uygun kaynak akım aralığının ortasında olmalı ve kaynak metali düz bir yatak oluşturacak şekilde hızlı olarak yığılmalıdır. Kısa ark ve kısa dalgalı hareket fazla ısınmayı önler. İş, kaynak yatay yapılacak şekilde planlanmalıdır. Örtülü elektrot ark kaynağı, fosfor bronzunun kaynağında diğer ark kaynak yöntemlerine göre daha kaliteli kaynaklar verir. ECuSn-A ve ECuSn-C elektrotları önerilir [33].

Ergimiş metalin yeterli akışının olması için ön ısıtma pasolar arası sıcaklıklar 148°C' den az olmamalı ve en fazla 205°C'ye kadar olmalı. Geniş kaynak ağızları, ergimiş metalin kaynak yüzeylerine daha iyi yayılımını sağlar. Parçanın sekline veya boyutuna göre farklı pozisyonlarda çalışmak mümkün olduğu gibi, yatay pozisyonda da altlık kullanmak faydalıdır.

İlk iki paso hafif salınımlı bir hareketle ve daha sonraki pasolar ince düz (salınımsız) kaynaklarla yapılabilir. İlk salınımlı kaynakların genişlikleri, elektrot çapının iki katını asmamalıdır. Bu teknikle metalin yığılması, ince taneli ve en iyi mekanik özelliklere sahip kaynak metalinin oluşmasını sağlar.

Düz kaynak dikişlerinin oluşturulması ve pasolar arası sıcaklıkların 150°C ve 205°C arasında korunması sayesinde, fosfor bronzunu karakterize eden büyük dallantılı tane yapısı* da önlenir. Gerektiğinde en yüksek sünekliği elde etmek için 482°C’de kaynak sonrası ısıtma işlemi ve arkasından hızlı soğuma yapılabilir. Bakır-nikel alaşımlarında ECuNi örtülü elektrotu ile kaynak yapmak, kaliteli kaynak metalleri verir. Elektrotun örtü içeriği, yüksek ark sıcaklığında oluşan nikel-oksitleri cürufa alacak şekilde belirlenir. Cürufsuz, gözeneksiz ve düzgün kaynak dikişleri iyi işçilik ile mümkündür. Farklı pozisyonlarda kaynak yapılabilir de yatay kaynak önerilir. Ticari alüminyum bronz sacları ve levhaları kaynak yapmak için ECuAl-A2 ve ECuAl-B örtülü elektrotları kullanılır. Çizelge3.1’de verildiği gibi kaynak kalitesi daha iyi olan gazaltı kaynağına kıyasla, örtülü elektrot ile yapılan kaynakların kalitesi daha düşüktür. Oluşan alüminyum-oksit tabakası kaynağı zorlaştıran etmendir ve dekapan vazifesi de gören örtü ile ortamdan uzaklaştırılması gerekir. Büyük parçalarda 70° - 90°’lik kaynak açısının yanı sıra ana metalle aynı malzemeden altlık da kullanılmalıdır. Düşük alüminyumlu alaşımlarda 205°C’ lik ön ısıtma ve pasolar arası sıcaklık gerekir. Yüksek alüminyumlu alüminyum bronzlarında 621°C’ ye kadar ön ısıtma ve kaynak sonrası fan ile soğutma önerilir. Çeliklerde kullanılan kaynak tekniklerine benzer teknikler burada da geçerlidir. Kaynak dikişleri düz veya zigzag olabilir. Yığılan metal yüksek sıcaklıkta mukavemet ve sünekliğe sahiptir. Yatay pozisyonda kaynak önerilir. Yüksek alüminyumlu bronzlarda kaynak sonrası ısıtma işlemi 621°C’ de tavlama fan ile soğutma izler.

3.7.3. Bakır ve Bakır Alaşımlarının Gazaltı Kaynağı

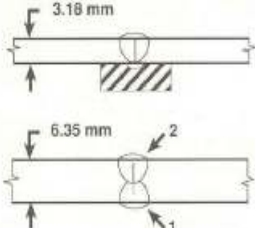
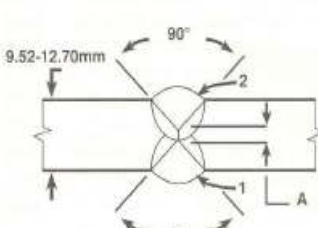
Bakır ve bakır alaşımlarında ana metalin kompozisyonuna uygun teller ve helyum, argon veya karışımlarının gazlarının kullanılması ile yarı otomatik veya tam otomatik gazaltı kaynağı yapılabilir. Örtülü elektrot yöntemiyle oluşan kaynak metalinde yüksek mekanik mukavemet veren fosfor bronzları hariç diğer bronzlarda ve pirinçlerde gazaltı kaynağı ile kaliteli kaynak metalleri elde edilir. Gazaltı kaynağı ile oksijeni giderilmiş bakırın birleştirilmesinde de kaliteli kaynaklar elde edilebilir.

3.7.4. Bakırın Gazaltı Kaynağı

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. Gazaltı kaynağı, elektrolitik ve oksijensiz bakırın kaynağında da kullanılabilir, burada kaynaklar zayıf kaliteden orta kaliteye yükseltilebilir. Çizelge 3.1 önerilen elektrot tipleri, ön ısıtmalar ve koruyucu gazlar gösterilmiştir. 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. Çizelge 3.1'de verildiği gibi ERCuSn-C ve ERCuSi elektrotları, kızıl pirinçlerde yüksek kaliteli kaynaklar verir. ERCuSn-C elektrotu ile yapılan kaynak dikişleri metal ile daha iyi renk uyumu içindedir. ERCuSi elektrotu ile yapılan kaynak dikişlerinin daha iyi çalımsa karakteristikleri verir. Kaynak metallerinin özellikleri birbirine benzer. Helyum, ERCuSn-C elektrotunda tercih edilen gazdır ve 4.8mm 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 çinkolu 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. Gazaltı 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 Çizelge 3.1'de gösterildiği gibi 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. İnce 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. Gazaltı kaynağı ile alüminyum-bronzunda yüksek kaliteli birleştirmeler elde edilir. Yatay pozisyonda, en yüksek kalite kaynak dikişi temin edilir fakat diğer pozisyonlarda da kaynak yapmak olasıdır. Çizelge 3.1, önerilen elektrot (tel) tiplerini ve koruyucu gazları göstermektedir. Büyük parçalar hariç ön ısıtma gerekmez. Yatay kaynak dikişleri ve küçük orta zigzaglı dikişler tercih edilir [33].

Yöntem: Gazaltı Yöntemi Levha Malzemesi: Oksijensiz Bakır Levha Kalınlığı: 3.18-1.27 cm Elektrod Sınıfı: ERCu Posizyon: Yatay Kutup: DCEP Gaz: Argon 23.59lt/dak.				
Levha Kalınlığı (T mm)	3.18	6.35	9.52	12.7
Elektrod Çapı	1.58	2.38	2.38	2.38
Paso Sayısı	1	1 2	1 2	1 2
Akım (amp)	310	460 500	500 550	540 600
Tel Sürme Hızı (cm/dak)	508	343 381	381 432	419 457
Volt	27	26	27	27
Kaynak Hızı (cm/dak)	76.2	50.8	35.6	30.5 25.4
Toplam Zaman (saat/m kaynak)	0.022	0.066	0.094	0.120
A (mm)			4.76	6.35

Şekil 3.21. Gaz altı kaynak yöntemiyle bakır levhaların kaynağı [33]

3.7.5. Bakır ve Bakır Alaşımlarının TIG Kaynağı

Bakır ve bakır alaşımları, arkın tükenmeyen tungsten elektrotu ile is 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 baslar. Farklı AWS sınıflandırmasına sahip kaynak tellerinden elde edilen kaynak metallerinin çekme mukavemetleri Çizelge 3.4’de verilmiştir. 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 mukameveti 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. Çizelge 3.1’de verilen koruyucu gazlar kullanılabilir. 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. Uygun kaynak çubukları sınıflandırması, koruyucu gazlar ve ön ısıtmalar Çizelge 3.1’de verilmiştir. Pirinç saclar, ön ısıtma yapmadan kaynak yapılabilir[33].

3.7.6. Bakırın TIG Kaynağı

Silis bronzları, TIG yöntemiyle kaynak yapılabilir. ERCuSi-A kaynak teli ile iyi kalitede kaynaklar elde edilir. Alternatif akım kullanılabilir de doğru akımda elektrotun negatif kutupta olması (DCEN) tercih edilir. Çizelge 3.1’ de görülebildiği gibi, ön ısıtma gerekmez ve pasolar arası sıcaklıklar 93°C’yi geçmemelidir. İnce 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.

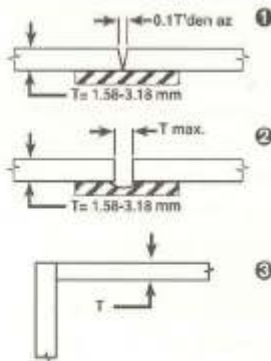
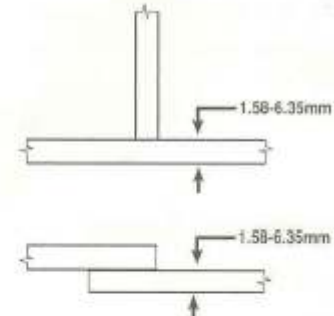
Yöntem: TIG Yöntemi Levha Malzemesi: Oksijeni Giderilmiş Bakır Levha Kalınlığı: 1.58-6.35 mm. Paso Sayısı: 1 Elektrod Sınıfı: ERCu Posizyon: Yatay Kutup: DCEN								
Birleştirme Türü	Alın veya Köşe				Köşe veya Bindirme			
Levha Kalınlığı(T mm)	1.58	3.18	4.76†	6.35	1.58	3.18	4.76*	6.35†
Tel Çapı (mm)	1.5	2.5	3.25	3.25	1.5	2.5	3.25	3.25
Elektrod Çapı (mm)	1.58	2.38	3.18	3.18	1.58	2.32	3.18	3.18
Akım (amp)	110-140	175-225	190-225	225-260	130-150	200-250	200-250	250-280
Gaz Hızı (litre/dak)	Argon	Argon	Helyum	Helyum	Argon	Argon	Helyum	Helyum
Kaynak Hızı (cm/dak)	30.5	27.9	25.4	22.9	25.4	22.9	20.3	17.8
Toplam Zaman (saat/m kaynak)	0.055	0.059	0.066	0.073	0.066	0.073	0.082	0.094

Şekil 3.22. Bakır ve alaşımlarının TIG kaynağı† 94 °C ön ısıtma, * 150 °C ön ısıtma.

[33]

3.7.7. Silis Bronzunun TIG Kaynağı

Bakır-nikel alaşımları ve alüminyum bronzları, TIG yöntemiyle kaynak yapılabilir. Bakır-nikel alaşımlarında ERCuNi ilave metalleri, koruyucu gaz olarak argon kullanıldığında, iyi kalitede kaynak metalleri verir ve ön ısıtma da gerektirmez. TIG yöntemi, alüminyum bronzlarında mükemmel kalitede kaynaklar verdiği için, ısrarla tavsiye edilir. İnce kesitli malzemeler, ilave metal kullanmadan da kaynak edilebilir. Levhaların birleştirmelerinde ERCuAl-A2 kaynak teli seçilir ve döküm parçaların tamirinde de ERCuAl-B kaynak teli önerilir. Ön ısıtma yalnızca büyük parçalarda gerekir. Pek çok uygulamada da doğru akım elektrot negatif kutupta (DCEN) kullanılabilmesine rağmen, alternatif akım çoğunlukla yüksek kalitede kaynaklar verir. Koruyucu gaz olarak argon tercih edilir. Normal şartlarda, kaynak sonrası çekiçleme veya ısıl işlem gibi hiç bir özel kaynak tekniği gerekmez [33].

Yöntem: TIG Yöntemi Levha Malzemesi: Silis Bronzu Levha Kalınlığı: 1.58-3.18 mm. Paso Sayısı: 1 Tel Sınıfı: ERCuSi-A Posizyon: Yatay Kutup: DCEN				
Birleştirme Türü	Alın veya Köşe		Köşe veya Bindirme	
Levha Kalınlığı (T mm)	1.58	3.18	1.58	3.18
Tel Çapı (mm)	1.5	2.5	1.5	2.5
Elektrod Çapı (mm)	1.5	2.5	1.5	2.5
Akım (amp)	100-120	130-150	110-130	140-160
Gaz	Argon	Argon	Argon	Argon
Gaz Hızı (litre/dak)	7.08	7.08	7.08	7.08
Kaynak Hızı (cm/dak)	30.5	30.5	25.4	25.4
Toplam Zaman (saat/m kaynak)	0.055	0.055	0.066	0.066

Şekil 3.23. Silis bronzunun TIG kaynağı. [33]

3.7.8. Bakır ve Bakır Alaşımlarının Karbon-Ark Kaynağı

Karbon ark yöntemi, öncelikle bakır ve bakır alaşımlarının kaynağında kullanılmıştır fakat daha sonra gazaltı ve örtülü elektrot ark kaynak yöntemleri tarafından geri plana atılmıştır. Çizelge 3.1.'de görüldüğü gibi, bu yöntem, yalnızca oksijeni giderilmiş bakırda iyi kalitede kaynaklar verir. Karbon-ark yönteminin, indirgeyici etkisi nedeniyle, oksijen içeren bakırlarda kırılma eğilimine neden olur. Karbon-ark yönteminde, akımı taşımak ve arkı oluşturmak için 1.5 mm' den 12.7 mm' ye kadar çaplı elektrotlara ihtiyaç vardır. Yanmayı engellemek için karbon elektrot arkta 7.6 cm kadar uzaklıkta tutulmalıdır. Elektrotun negatif kutupta (DCEN) olması zorunludur. Ana metal ön ısıtma sıcaklıklarına ulaştıktan sonra ark genellikle ilave metalin üzerine tutulur. Ön ısıtma sıcaklıklarına gelindikten sonra, ark genellikle ana metal yerine ilave metalin üzerine yöneltilir. İnce kesitli malzemeler ilave metal kullanmadan da birleştirilebilir. Çizelge 3.1 önerilen ilave metalleri ve gereken ön ısıtma sıcaklıklarını gösterir. Bakır ve bakır alaşımlarının karbon-ark kaynağındaki zorlukları aşmak ve kötü kaynak kalitelerinden kaçınmak için çoğu zaman, gazaltı veya örtülü elektrot yöntemleri önerilir [33].

4. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada sürtünme karıştırma kaynak yöntemiyle bakır-bakır, pirinç-pirinç, ikili levha guruplarına farklı devir ve ilerleme hızlarında alın kaynağı gerçekleştirilmiştir. Kullanılan pirinç ve bakır levha malzemeleri ticari saflıkta olup, kaynak işlemini gerçekleştiren kaynak takımı (karıştırıcı uç) DIN 1.2344 sıcak iş takım çeliğinden imal edilmiştir. Bu birleştirme işlemlerinde kullanılan cihaz ve sistemler aşağıda verilmiştir. Ayrıca birleştirme işleminin nasıl yapıldığı, hangi safhalardan oluştuğu ve kaynak bölgesinde oluşan içyapının incelenmesi ile mekanik özelliklerin nasıl belirlendiği bu bölümde açıklanmıştır.

4.1. Materyal

4.1.1. Deney Düzeneği

Deney düzeneği 3 kısımdan meydana gelmiştir.

- Dik başlıklı üniversal freze tezgahı
- Sabitleme aparatları
- Kaynak takımı (karıştırıcı uç)

4.1.1.1. Dik Başlıklı Üniversal Freze Tezgahı

Sürtünme karıştırma kaynağında kullanılan tezgah WMW-HECKERT D.ALMAN YA Teknik lisansı altında Taksan Takım Tezgahları Sanayi ve Ticaret A.Ş. tarafından 1982 yılında üretilmiş FU 315 V/2 serisidir. Tezgah 28-1400(d/d) devir aralığı ile 16-800(mm/d) ilerleme hızı aralığında çalışmaktadır.



Şekil 4.1. Dik Başlıklı Üniversal Takım Tezgahı

4.1.1.2. Sabitleme Aparatları

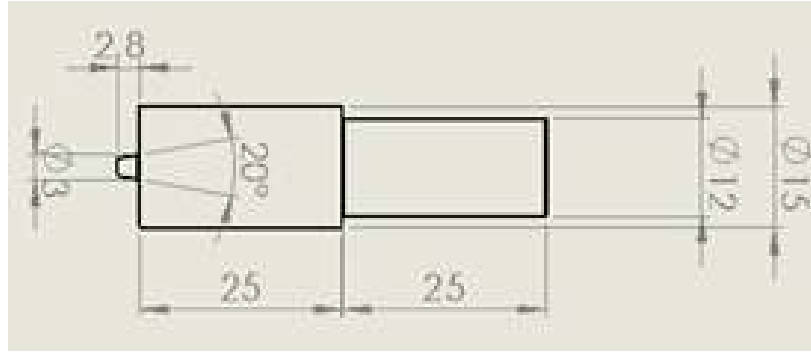
Kaynak altlığı olarak 250x250x20mm boyutlarında düzgün yüzeyli çelik plaka kullanılmıştır. Kaynak yapılacak levhaların her iki tarafı 50x50x5 mm ölçüsünde köşebent yardımıyla civatalar kullanılarak sabitlenmiştir.



Şekil 4.2. Altlık, köşebentler ve civatalardan bir görünüm

4.1.1.3. Kaynak Takımı (Karıştırıcı Uç)

Karıştırıcı uç olarak başlangıçta 3140 serisi Al alaşımı seçilmiş istenilen performansı sağlayamadığından DIN 1.2344 sıcak iş takım çeliğinden karıştırıcı uç imal edilmiştir. Kaynak ucu için seçilen malzeme termal şok ve ısıl çatlama dayanımı çok yüksek olan sıcak çalışma şartlarında üstün mekanik özellik ve tokluk gösteren yüksek işlenebilirlik özelliğine sahip bir malzemedir. Kaynak takımına ait teknik çizim ölçüleri aşağıda şekil 4.3.' de ifade edilmiştir.



Şekil 4.3. Karıştırıcı uç teknik resim (ölçüler mm' dir.)

Talaşlı imalatı sonrasında karıştırıcı uca sonra sırasıyla 1020 °C' de 28 dakika sertleştirme tavlama ve yağda su verme işlemi yapılmıştır. Sonra 200°C' de her biri 105 dakika olmak üzere ard arda 3 menevişleme işlemini yapılmıştır. Başlangıçtaki sertlik değeri 220HB (yaklaşık 20,4HRC)'den 52HRC'ye ulaşılmıştır.

Sertleştirme için tutma süresi= $[20 + (\text{et kalınlığı mm})/2]$ dakika (1)

Menevişlenme için tutma süresi= $[1 + (\text{et kalınlığı mm})/20]$ saat (2)



Şekil 4.4. Kaynak takımına (karıştırıcı uç) ait resimler

4.1.2. Kaynak İşleminde Kullanılan Levha Malzemeleri

Kaynak işlemini gerçekleştirmek için 3 mm kalınlıkta bakır ve pirinç levha malzemeler kullanılmıştır. Malzemeler ait kimyasal analiz sonuçları aşağıdaki gibidir.

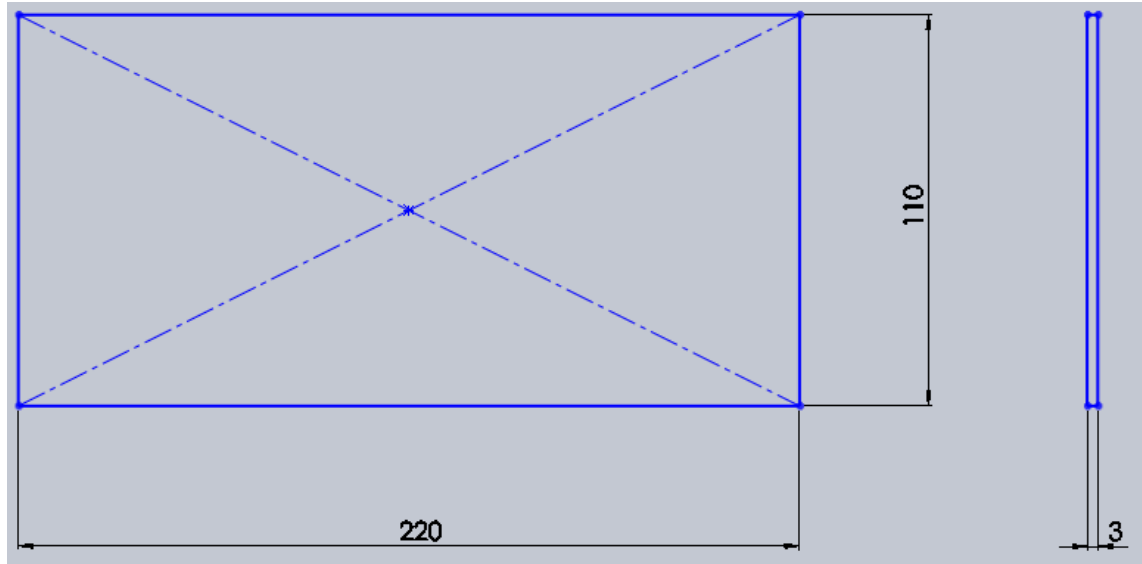
Element,%	Cu	Zn	Cr	Mo	Diğer
Malzeme					
Bakır Cu (OF)	98	-	1.87	-	
Pirinç (Cu-Zn33)	58	33	4.30	3.72	

Çizelge 4.1. Bakır ve pirinç malzemelere ait kimyasal veriler

Ayrıca malzemelere ait mekanik veriler akma, kopma gerilmeleri ve sertlik değerleri aşağıdaki gibidir.

MALZEME	σ akma (Mpa)	σ çekme (Mpa)	σ kopma (Mpa)	sertlik (HV)	% uzama
Pirinç	192	258	381	97	6
Bakır	159	178	314	110	6

Çizelge 4.2. Bakır ve pirinç malzemeler ait mekanik veriler



Şekil 4.5. Bakır ve pirinç levhalara ait ölçüler

4.2. Yöntem

4.2.1. Sürtünme Karıştırma Kaynak Deneylerinin Yapılışı

Sürtünme karıştırma kaynak işleminin gerçekleştirileceği freze tezgahının kabiliyeti çerçevesinde pirinç-pirinç, bakır-bakır levhalar üç farklı ilerleme hızı ve üç farklı devir aralığında kaynatılmıştır. Levhalarda kaynak ilerleme hızı sırasıyla bakır-bakır numuneler için (31,5, 40, 50) mm/d, pirinç-pirinç numuneler için (40, 50, 80) mm/d alınmış, devir sayıları bütün numuneler için (710, 900, 1120) alınmıştır. Kaynak ucunun omuz kısmı levhalara 0,1mm daldırıldıktan sonra birleştirilecek levhaların ısınması için yaklaşık 10 sn kadar bekletildi ve karıştırıcı uca belli hızda ilerleme verildi. Bu çalışmada toplam 18 adet kaynak işlemi gerçekleştirilmiştir.

5. ARAşTIRMA VE BULGULARI

Levhalara toplam 18 kaynak işlemi yapılmıştır. Kaynaklanan levhaların resimleri çekme, eğme, mikrosertlik, mikroyapı ve yüzey pürüzlülük değerleri ve bu deneylere ait bulgular bu bölümde verilmiştir.

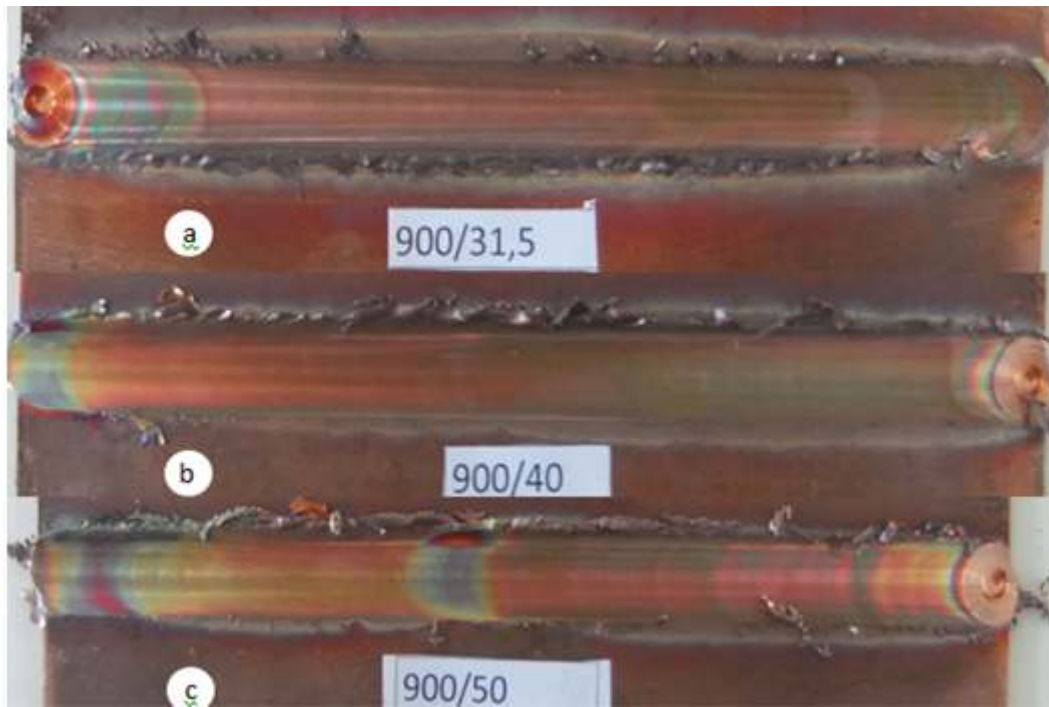


şekil 5.1. sürtünme karıştırma kaynağı ile kaynaklamış malzeme grupları
a- Bakır-bakır grubu b-Pirinç-pirinç grubu

5.1. Kaynaklanmış Numuneler



Şekil 5.2. 710d/d' da farklı ilerleme hızlarında birleştirilmiş bakır levhalar. a-31,5 mm/d, b-40mm/d, c-50mm/d



Şekil 5.3. 900d/d' da farklı ilerleme hızlarında birleştirilmiş bakır levhalar. a-31,5 mm/d, b-40mm/d, c-50mm/d



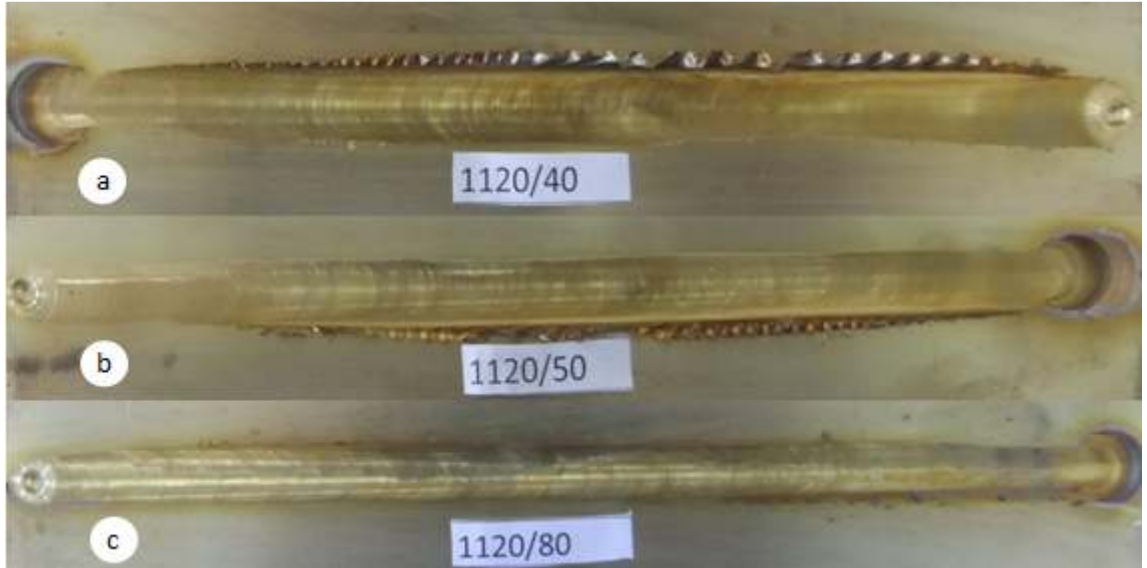
Şekil 5.4. 1120d/d' da farklı ilerleme hızlarında birleştirilmiş bakır levhalar. a-31,5 mm/d, b-40mm/d, c-50mm/d



Şekil 5.5. 710d/ d' da farklı ilerleme hızlarında birleştirilmiş pirinç levhalar. a-40 mm/d, b-50mm/d, c-80mm/d



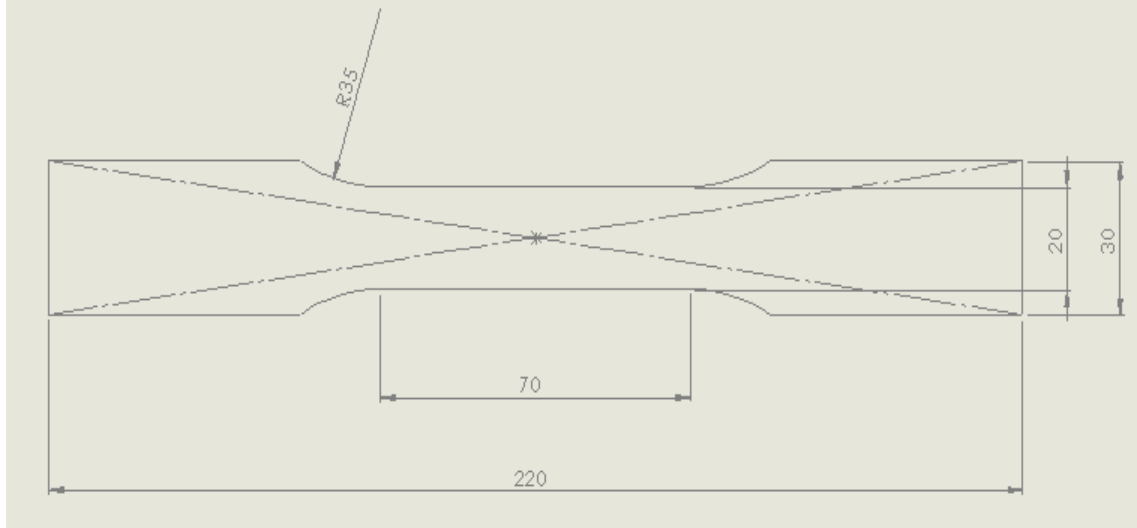
Şekil 5.6. 900d/ d' da farklı ilerleme hızlarında birleştirilmiş pirinç levhalar. a-40 mm/d, b-50mm/d, c-80mm/d



Şekil 5.7. 1120d/ d' da farklı ilerleme hızlarında birleştirilmiş pirinç levhalar. a-40 mm/d, b-50mm/d, c-80mm/d

5.2. Çekme Deneyleri

Çekme deney numuneleri TS 5789 standart alınarak hazırlanmış ilgili standarda ait resim ölçüleri aşağıda şekil 5.8.'de verilmiştir. Çekme deneyleri shimadzu marka test cihazında 10mm/d çekme hızında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.8. Çekme test numune ölçüleri (levha kalınlığı 3 mm' dir.)

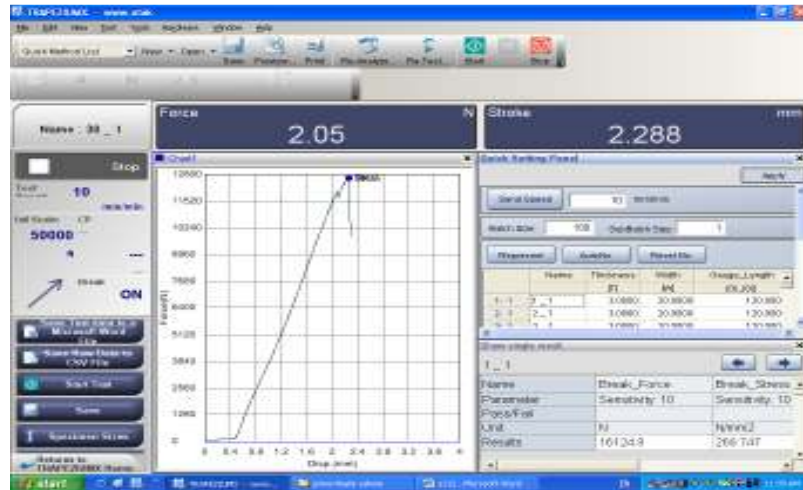
Her bir kaynak grubundan üç adet çekme deneyi yapılmış elde edilen verilerin aritmetik ortalaması hesaplanıp grafikler hesaplanan değerlere göre çizilmiştir.

Çekme ve eğme test işlemleri Shimadzu marka ölçüm cihazında gerçekleştirilmiştir. Test cihazına ait resim aşağıda şekil 5.9'da verilmiştir.



Şekil 5.9. Çekme ve eğme testlerinde kullanılan test cihazı

Test sonucunun bilgisayar ekranında ifade edilmesine yönelik görsel şekil 5.10’ da gösterilmiştir.



Şekil 5.10. Bilgi ekranında test sonuçlarından bir görüntü

5.2.1. Çekme Deney Sonuçları

	ORTALAMA	ORTALAMA	ORTALAMA	ORTALAMA
ÇEKME	KOPMA KUVVETİ	KOPMA GERİLMESİ	ÇEKME KUVVETİ	ÇEKME GERİLMESİ
d/d-mm/d	N	N/mm2	N	N/mm2
710-31,5	16841	280,682	17063	284,388
710-40	15507,03	258,451	15851,96	264,199
710-50	16205,3	270,088	16481,60	274,693
900-31,5	164916,6	274,861	17530,50	292,175
900-40	16503,233	275,053	17351,83	289,197
900-50	173,758	289,597	183,1430	305,239
1120-31,5	12395,3	206,589	13141,10	219,018
1120-40	12773,4	212,891	14755,80	245,930
1120-50	6833,54	111,670	6948,870	113,592

Çizelge 5.1. Cu-Cu SKK gruplarına ait çekme deneyi sonuçları

Cu-Cu çekme deney veri ve grafikleri EK-1,2,...,9'da verilmiştir.

Çizelge5.1'deki verilerde 900d/d-50mm/d şartlarında birleştirilen Cu-Cu levhaların yüksek mukavemet değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Devir sayısı ve ilerleme hızı mikro yapı ve mekanik özelliklerini belirleyen en önemli parametrelerdir. Bu nedenle düşük devir sayısı ve yüksek ilerleme hızı kaynak bölgesine az ısı girişi sağladığı için yeniden kristalleşen tane boyutları daha küçük olmakta ve mekanik özellikler artmaktadır. 900d/d-50mm/d birleştirilen levhaların kaynak parametreleri diğer parametrelere göre daha ideal düzeyde ısı girişi sağlamıştır. Bu da kaynak bölgesinde mikro yapının optimum seviyede olmasını sağlamış ve kaynaklı birleştirmenin mukavemetini artırmıştır. 900 d/d kullanılarak yapılan kaynaklı tüm birleştirmelerin mukavemet değerleri diğer devirlere göre yüksek çıktığı görülmüştür.

Çizelge5.1'deki verilerde 1120d/d-50mm/d şartlarında birleştirilen levhaların mukavemet değerlerinde anormal bir düşüş görülmüştür. Mukavemetteki bu aşırı düşüş Şekil5.47.b' de görüldüğü gibi kaynak bölgesinde oluşan poroziteden kaynaklanmaktadır.

	ORTALAMA	ORTALAMA	ORTALAMA	ORTALAMA
ÇEKME	KOPMA KUVVETİ	KOPMA GERİLMESİ	ÇEKME KUVVETİ	ÇEKME GERİLMESİ
d/d-mm/d	N	N/mm2	N	N/mm2
710-40	18005,7	300,096	18326,96	305,449
710-50	22092,7	368,212	22281,40	371,356
710-80	14525,14	242,294	14525,14	242,294
900-40	16026,8	267,114	16209,70	270,160
900-50	14730,9	245,515	14906,80	248,446
900-80	18698,2	934,917	19228,00	320,467
1120-40	17280,1	288,002	17304,60	288,400
1120-50	16053,4	267,556	16222,40	270,374
1120-80	17139	285,650	17400,30	290,006

Çizelge5.2. Piriñ-Piriñ SKK gruplarına ait çekme deneyi sonuçları

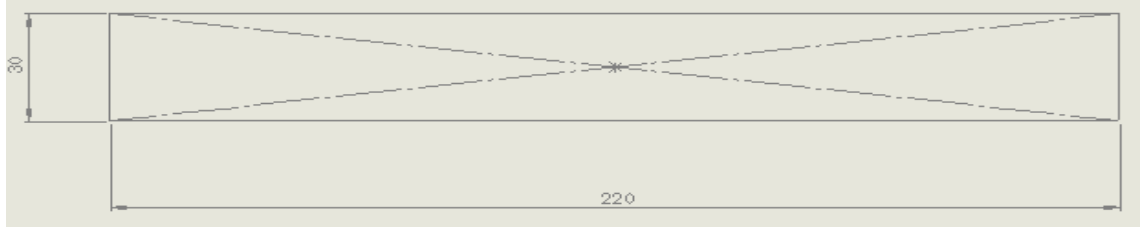
Piriñ-Piriñ çekme deney veri ve grafikleri EK-10,11,...,18’de verilmiştir.

Çizelge5.2’deki verilerde 710d/d-50mm/d şartlarında birleştirilen piriñ-piriñ levhaların en yüksek mukavemet değerlerine sahip olduğu görülmektedir. 900d/d-80mm/d birleştirilen piriñ-piriñ levhalarında yüksek mukavemet değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Bu iki devir ve ilerleme hızında (710d/d-50mm/d ve 900d/d-80mm/d) levhaların birleştirilmesi için sağlanan kaynak ısısının optimum seviyede olduğu görülmüştür.

Çizelge5.2’deki verilerde en düşük mukavemet değeri 710d/d-80mm/d şartlarında birleştirilen levhalarda görülmüştür.1120d/d-40-50-80mm/d şartlarında birleştirilen piriñ-piriñ levhaların mikro yapı resimleri incelendiğinde üç ilerleme hızında da kaynak bölgesinde poroziteler görülmektedir(Şekil5.54-56). Buna rağmen mukavemet değerleri en düşük seviyede değildir. Bu sonucun muhtemel nedeni mikroyapı incelemelerinde kullanılan numunelerin porozitenin olduğu bölgeden alınmış olmasıdır.

5.3. Eğme Deneyleri

Eğme testleri çekme testleri gibi shimadzu marka çekme-basma özellikli cihazda çene ve kalıplar değiştirilerek yapılmıştır. TS 205-1 EN ISO 7438 standardına uygun olarak deney düzeneği hazırlanmış ve deneyler gerçekleştirilmiştir. Deney numune ölçüleri aşağıdaki gibidir.



Şekil 5.11.Eğme numune boyutları (levha kalınlığı 3 mm'dir.)

5.3.1.Eğme Deney Sonuçları

EĞME	Mak.Yer Değiştirme.	Mak.Yüzde Uzama	Mak.Eğme Kuvveti	Mak. Eğme Gerilmesi
d/d-mm/d	mm	%	N	N/mm2
710-31,5	12,2896	2,212143	1084,59	602,551
710-40	12,5374	2,256750	1139,135	632,852
710-50	15,0512	2,709220	1173,53	651,959
900-31,5	15,9425	2,869650	999,8	555,447
900-40	11,1520	2,991100	949,125	527,292
900-50	13,6914	2,464460	1058,58	588,083
1120-31,5	13,5101	2,431800	648,552	360,306
1120-40	14,3042	2,574770	849,043	471,690
1120-50	3,6047	0,64885	600,171	333,428

Çizelge5.3. Cu-Cu SKK gruplarına ait eğme deneyi sonuçları

Cu-Cu eğme deney veri ve grafikleri EK-19,20,...,27'de verilmiştir.

Çizelge5.3'deki verilerde 710d/d-50mm/d şartlarında birleştirilen Cu-Cu levhaların en yüksek eğme mukavemetine sahip olduğu görülmektedir. Devir sayısı

artıkça Cu-Cu levhaların eğme mukavemetlerinin azaldığı görülmektedir. Devir sayısının artması ısı girişini artırmakta ve bu durum kaynak bölgesinde yumuşatma tavlama etkisine neden olmaktadır. Yumuşatma tavlama etkisiyle yüksek devirde eğme mukavemeti düşük çıkmıştır.

EĞME	Mak.Yer Değiştirme.	Mak.Yüzde Uzama	Mak.Eğme Kuvveti	Mak. Eğme Gerilmesi
d/d-mm/d	mm	%	N	N/mm2
710-40	20,5250	3,69450	1080,435	600,798
710-50	14,3397	2,58114	1018,594	565,886
710-80	15,4518	2,78134	1057,632	587,574
900-40	15,3503	2,76305	1091,880	606,600
900-50	17,7530	3,19554	953,293	529,625
900-80	20,3111	3,65600	1074,381	596,877
1120-40	18,1496	3,26693	1136,420	631,347
1120-50	18,1958	3,27525	1172,753	651,531
1120-80	19,2797	3,47034	1040,753	578,195

Çizelge5.4. Pirinç-Pirinç SKK grupları eğme deneyi sonuçları

Pirinç-Pirinç eğme deney veri ve grafikleri EK-28,29,...,36'da verilmiştir.

Çizelge5.4'de Pirinç-pirinç levhaların eğme deney sonuçları toplu olarak verilmiştir. Bu sonuçlara göre 1120d/d-50-40mm/d şartlarında birleştirilen numunelerin eğme mukavemetleri yüksek çıkmıştır. Eğme sonuçları ile çekme sonuçları karşılaştırıldığında eğme mukavemetleri çekmeye göre yüksek çıkmıştır. Bunun nedeni çekme de etkin olan mikroyapı hatalarının eğmede daha az etkin olmasından kaynaklanmaktadır. Çünkü kaynak mikroyapısında bulunan porozite ve soğuk birleşme gibi hatalar eğmeye göre çekme de daha etkindir. Şekil 5.12'de eğme deneyi uygulanmış bazı numuneler görülmektedir. Bu numunelerde eğme açısı 120°'dir.



Şekil 5.12. Eğme deneyi sonrası numunelerin görünümü; (a)Cu-Cu, (b)pırınç-pırınç

5.4.Mikrosertlik Deneyi

Mikrosertlik deneyleri kaynak bölgesi merkezi ve merkez noktanın sağ ve sol tarafından 5'er ölçüm alınmak suretiyle her bir kaynak grubu için 11 adet ölçüm yapılmıştır. Toplam 27 adet kaynak grubu için 297 ölçüm alınmış ve numune sertlikleri Vickers cinsinden 20 gr yük kullanılarak ölçülmüştür. Ölçüm yapılan noktalar kaynak merkezinden itibaren 2mm aralıklarla alınmış olup ölçüme ait detay resmi şekil 5.13'de belirtildiği gibidir. Ölçüm cihazına ait resim şekil 5.14' de verilmiştir.



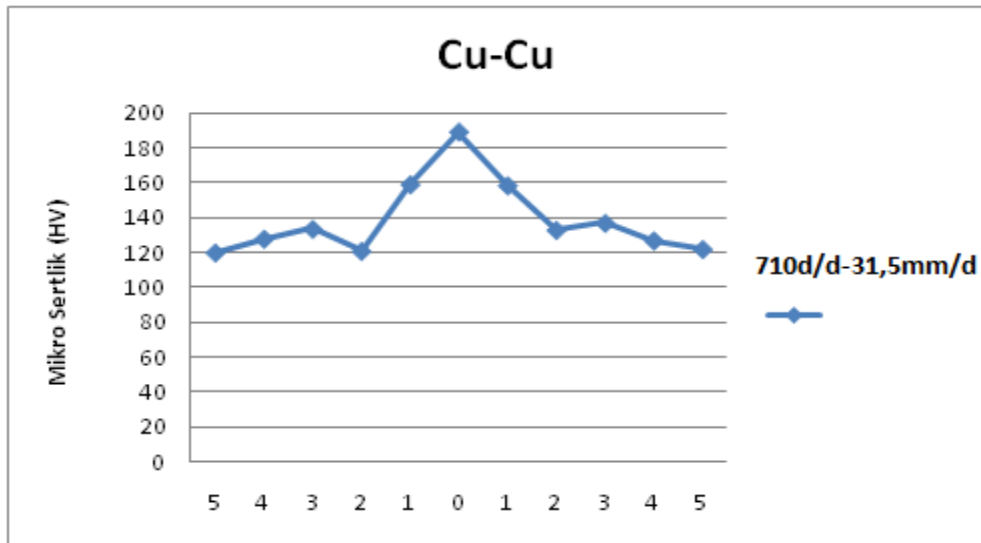
Şekil 5.13.Mikrosertlik ölçüm noktalarının şematik gösterimi



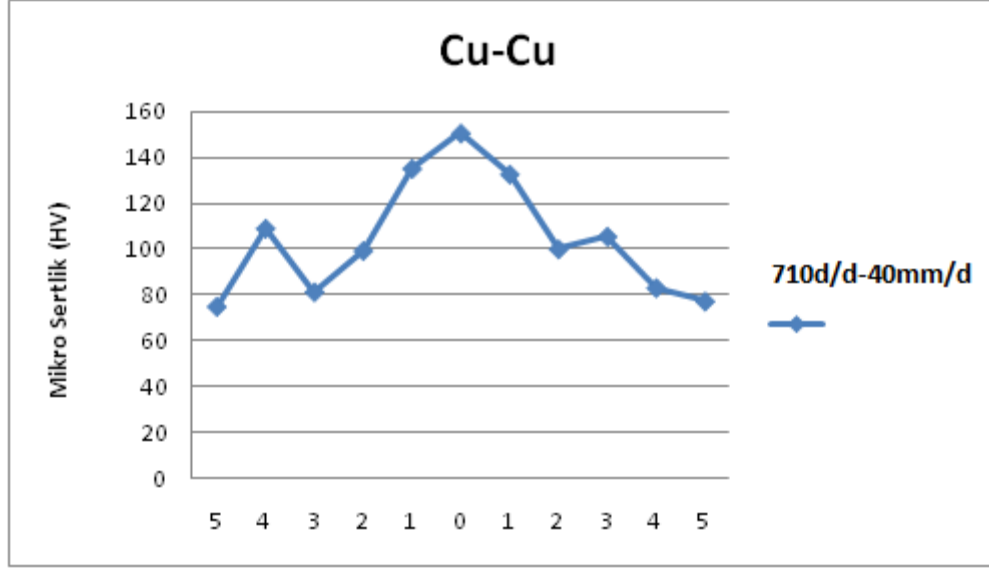
Şekil 5.14. Mikrosertlik ölçüm cihazı

5.4.1. Mikrosertlik Deney Sonuçları

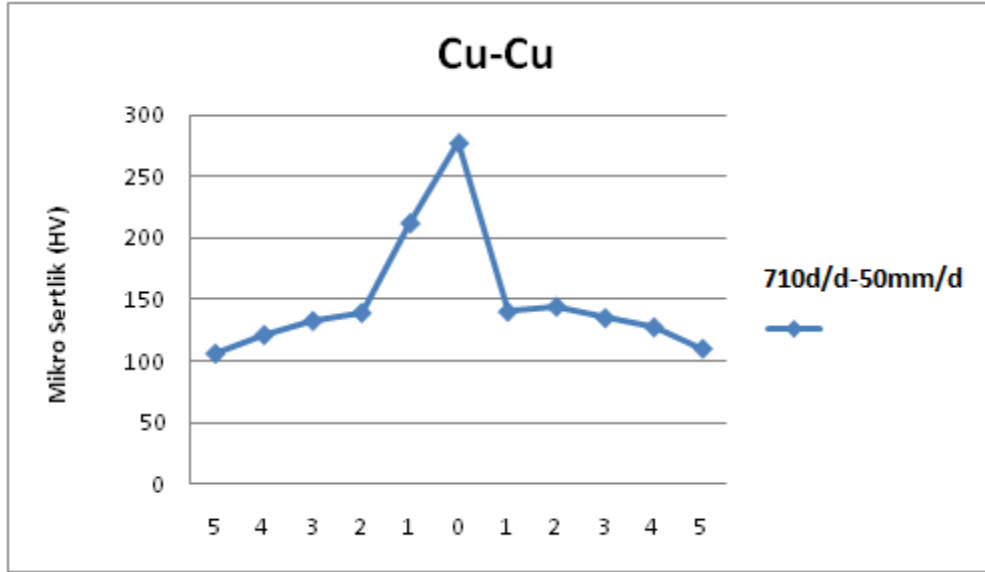
Cu-Cu ve pirinç-pirinç levhaların SKK sonrası mikrosertlik ölçümleri şekil 5.15-34'e kadar verilmiştir.



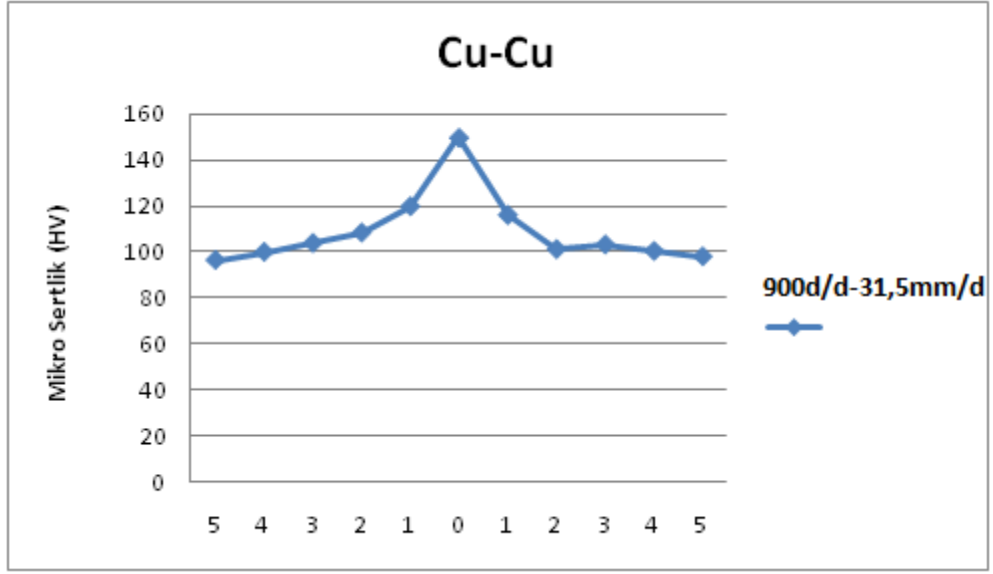
Şekil 5.15. 710d/d-31,5mm/d kaynak grubuna ait Cu-Cu levhaların mikrosertlik grafiği



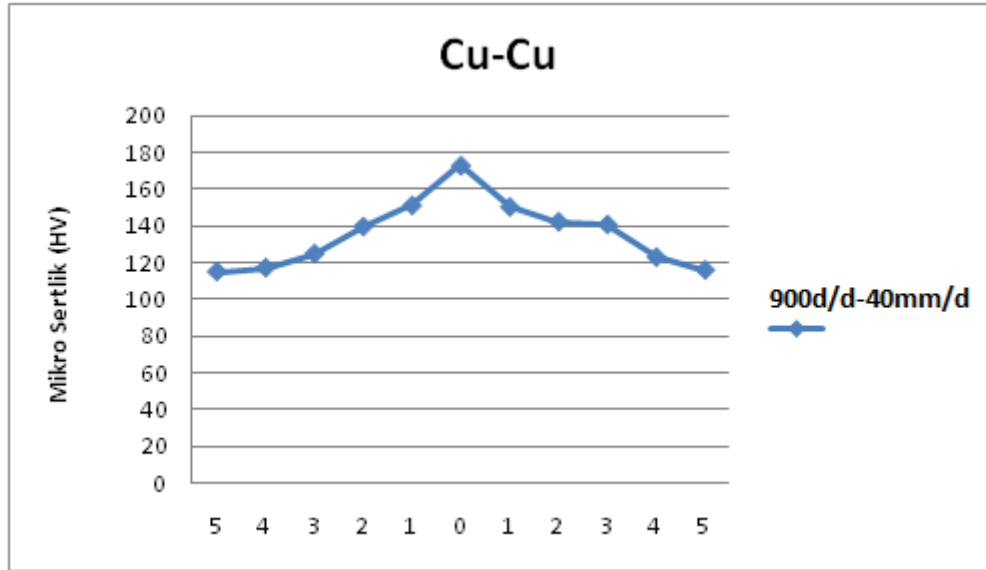
Şekil 5.16. 710d/d-40mm/d kaynak grubuna ait Cu-Cu levhaların mikrosertlik grafiği



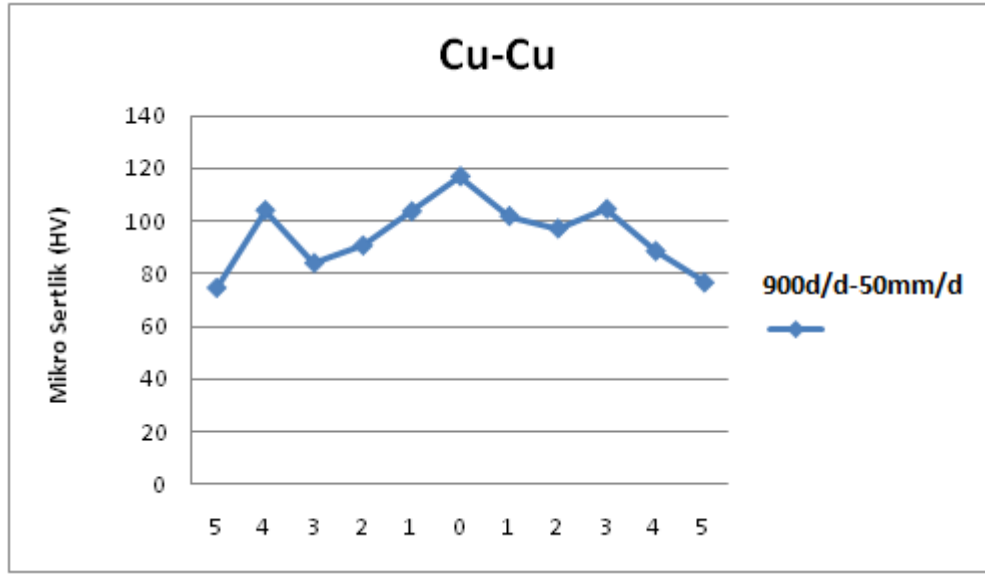
Şekil 5.17. 710d/d-50mm/d kaynak grubuna ait Cu-Cu levhaların mikrosertlik grafiği



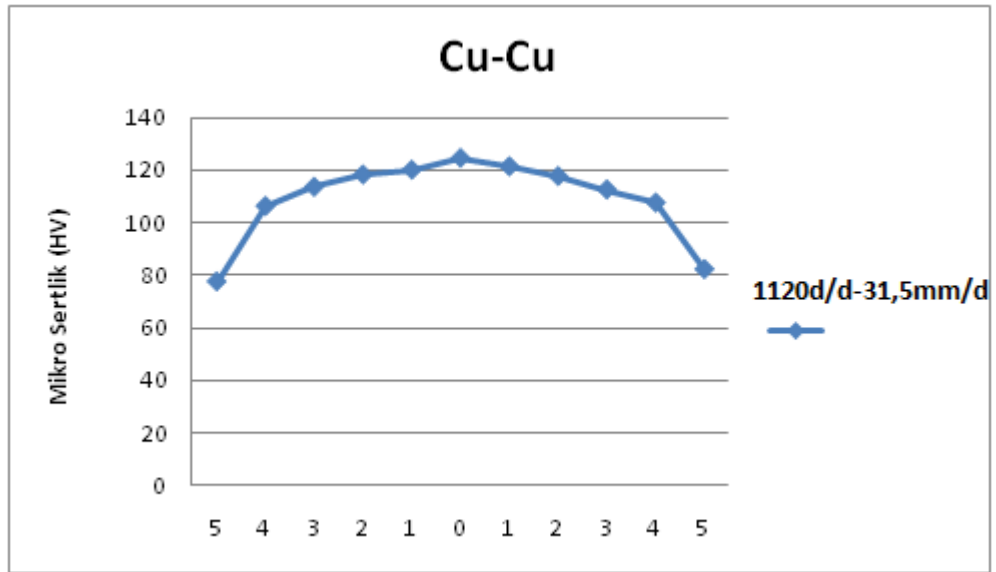
Şekil 5.18. 900d/d-31,5mm/d kaynak grubuna ait Cu-Cu levhaların mikrosertlik grafiği



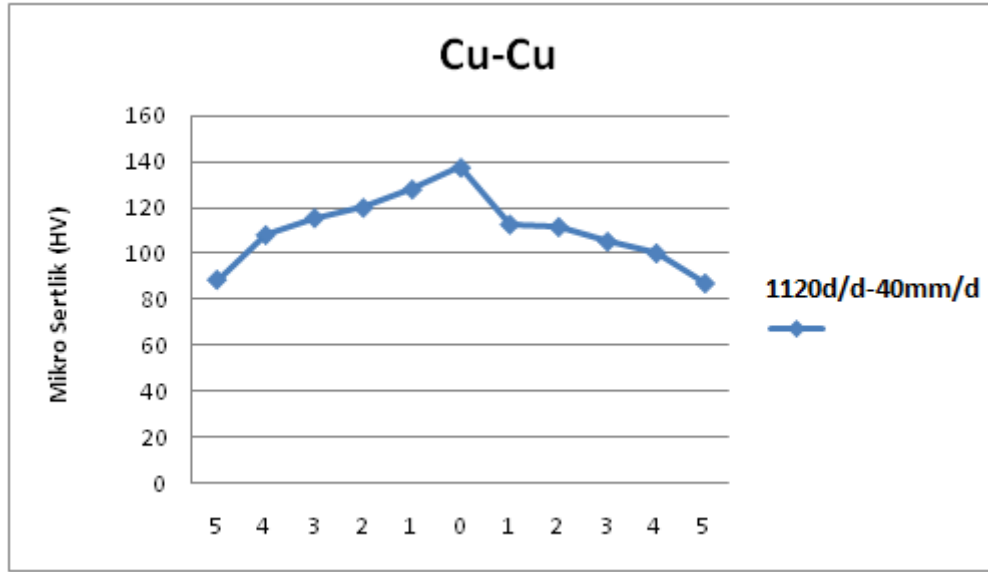
Şekil 5.19. 900d/d-40mm/d kaynak grubuna ait Cu-Cu levhaların mikrosertlik grafiği



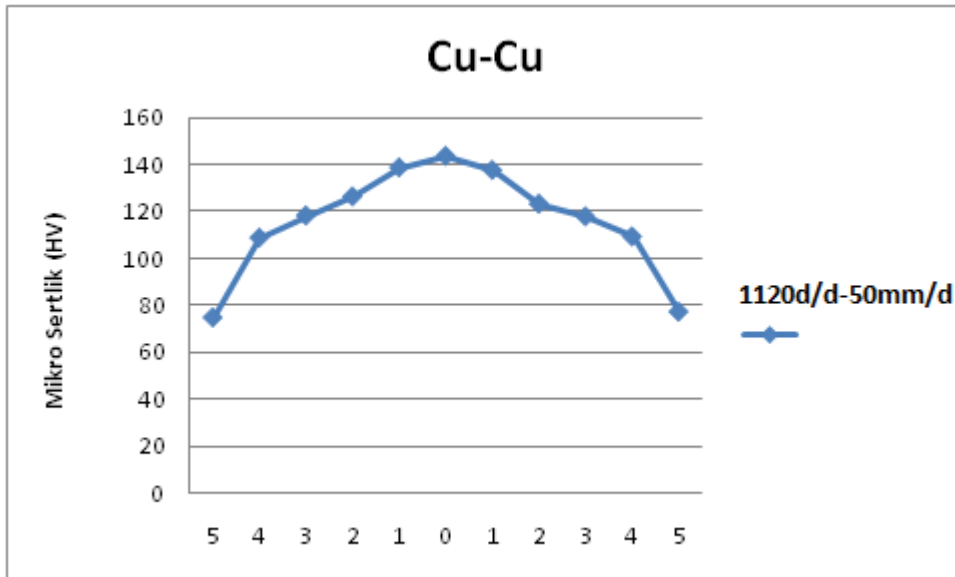
Şekil 5.20. 900d/d-50mm/d kaynak grubuna ait Cu-Cu levhaların mikrosertlik grafiği



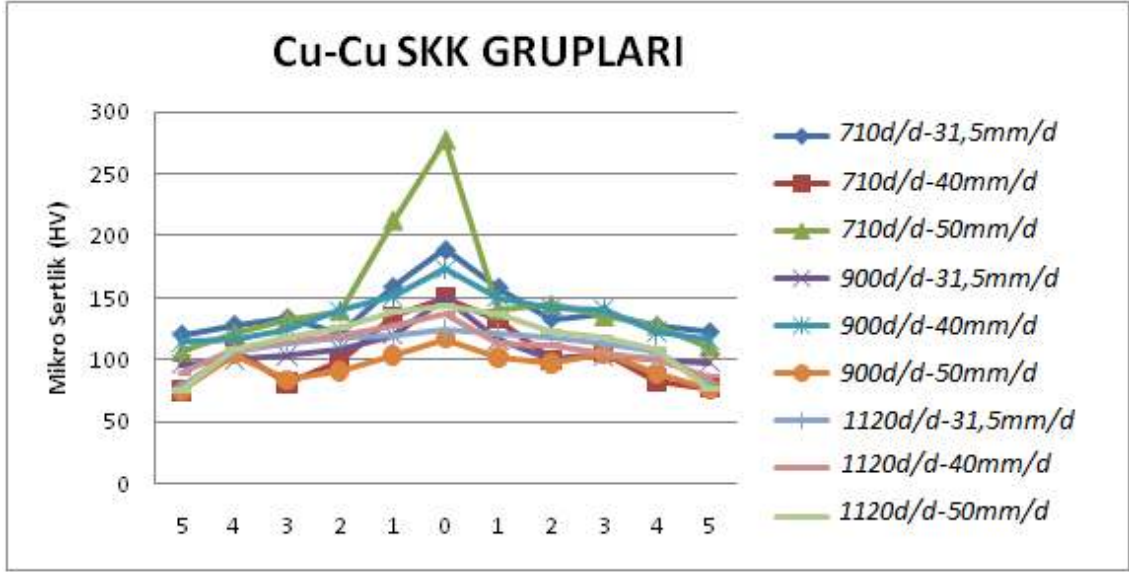
Şekil 5.21. 1120d/d-31,5mm/d kaynak grubuna ait Cu-Cu levhaların mikrosertlik grafiği



Şekil 5.22. 1120d/d-40mm/d kaynak grubuna ait Cu-Cu levhaların mikrosertlik grafiği

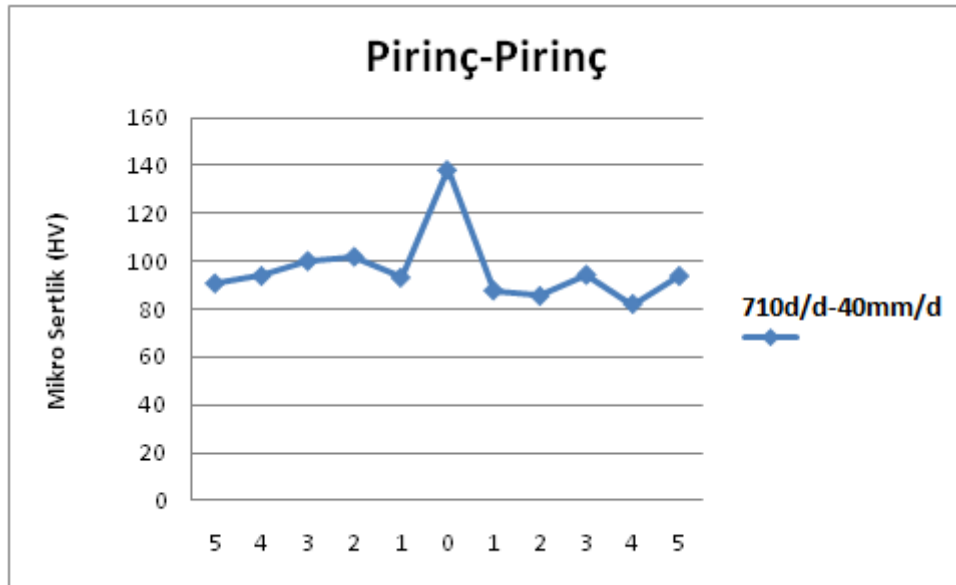


Şekil 5.23. 1120d/d-50mm/d kaynak grubuna ait Cu-Cu levhaların mikrosertlik grafiği

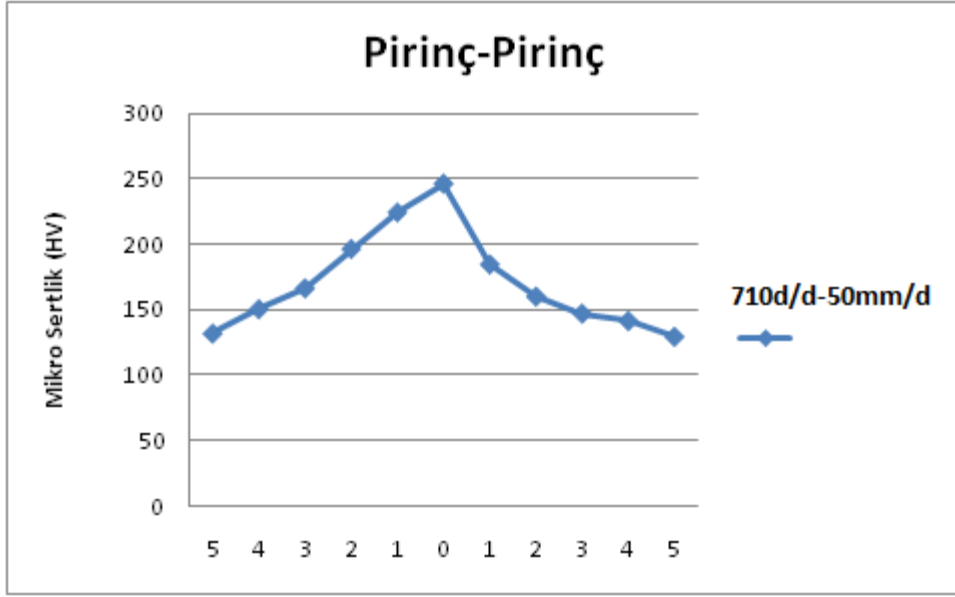


Şekil 5.24. Cu-Cu levhaların kaynak bölgesi mikrosertlik değerlerinin toplu gösterimi

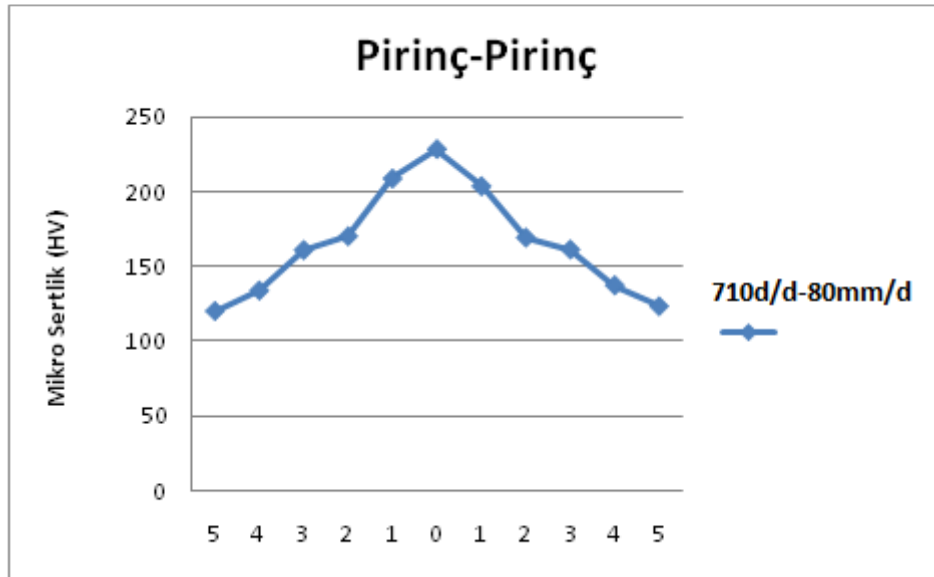
Farklı parametrelerde Cu-Cu levhaların kaynak bölgesine ait mikrosertlik grafikleri toplu olarak şekil 5.24’de verilmiştir. Bu grafikte de görüldüğü gibi tüm parametrelerde karıştırma bölgesinin sertliği en yüksek değerdedir. Ana metalden karıştırma bölgesine doğru ilerledikçe sertlikte artış görülmektedir. Karıştırma bölgesinde en yüksek sertlik değeri 710d/d-50mm/d şartlarında kaynak yapılan levhalarda ulaşılmıştır. Cu-Cu levhaların kaynak bölgesi mikrosertlik genelde azalmasına rağmen bu çalışmada kaynak bölgesinin mikro sertliği artmıştır.



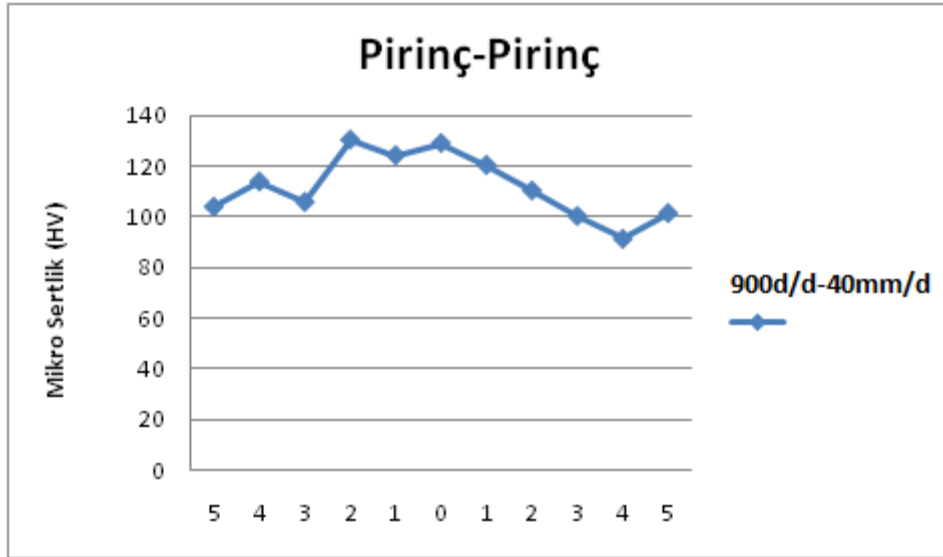
Şekil 5.25. 710d/d-40mm/d kaynak grubuna ait Pirinç-Pirinç levhaların mikrosertlik grafiği



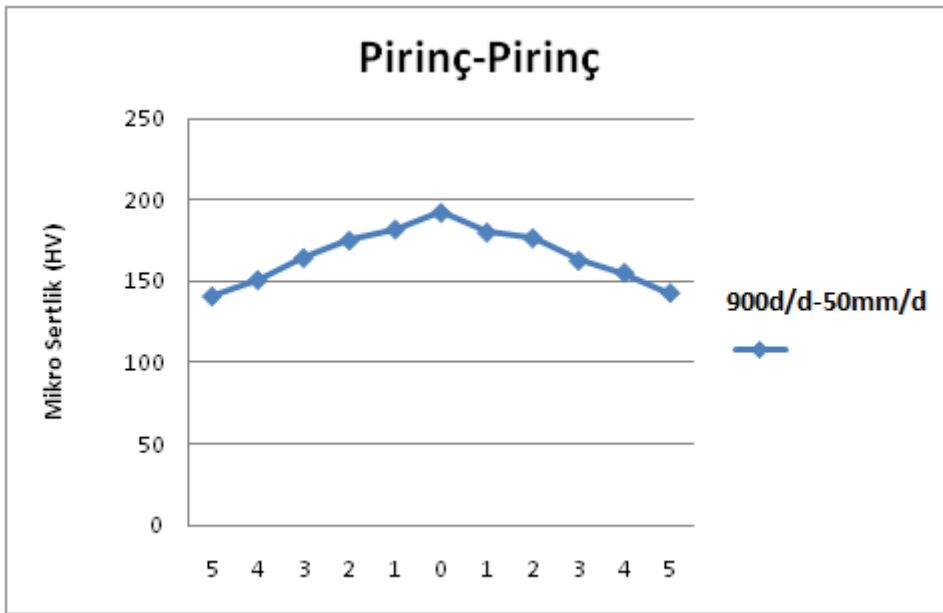
Şekil 5.26. 710d/d-50mm/d kaynak grubuna ait Pirinç-Pirinç levhaların mikrosertlik grafiği



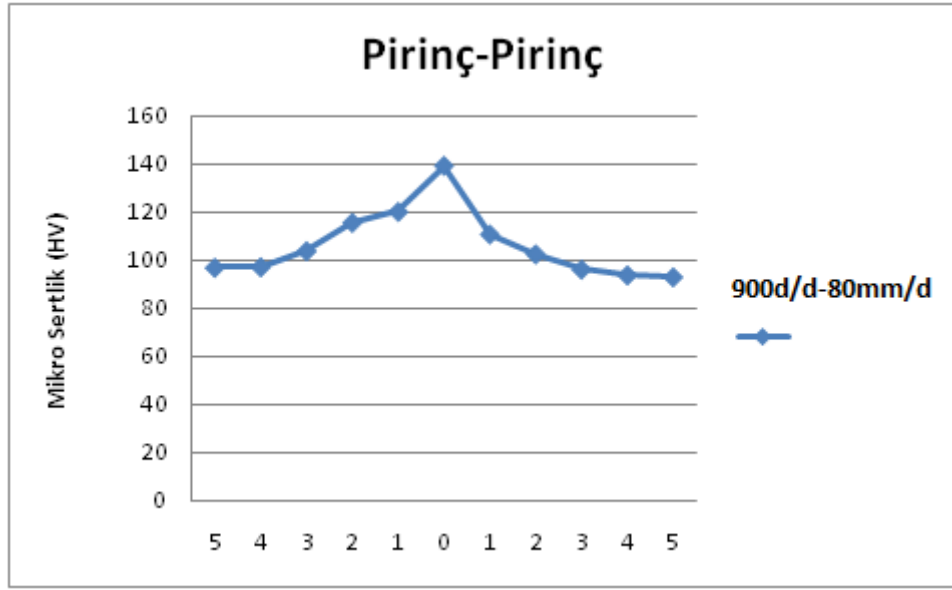
Şekil 5.27. 710d/d-80mm/d kaynak grubuna ait Pirinç-Pirinç levhaların mikrosertlik grafiği



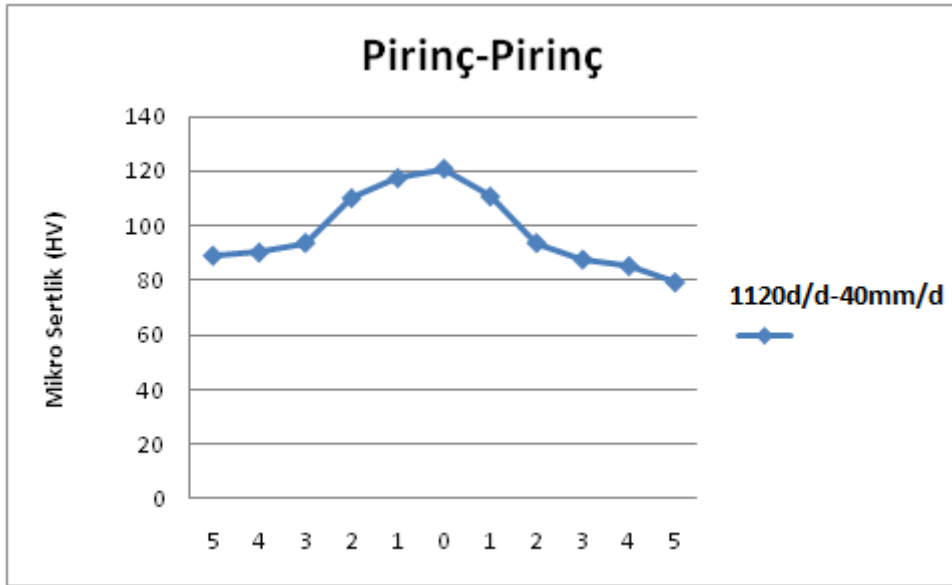
Şekil 5.28. 900d/d-40mm/d kaynak grubuna ait Pirinç-Pirinç levhaların mikrosertlik grafiği



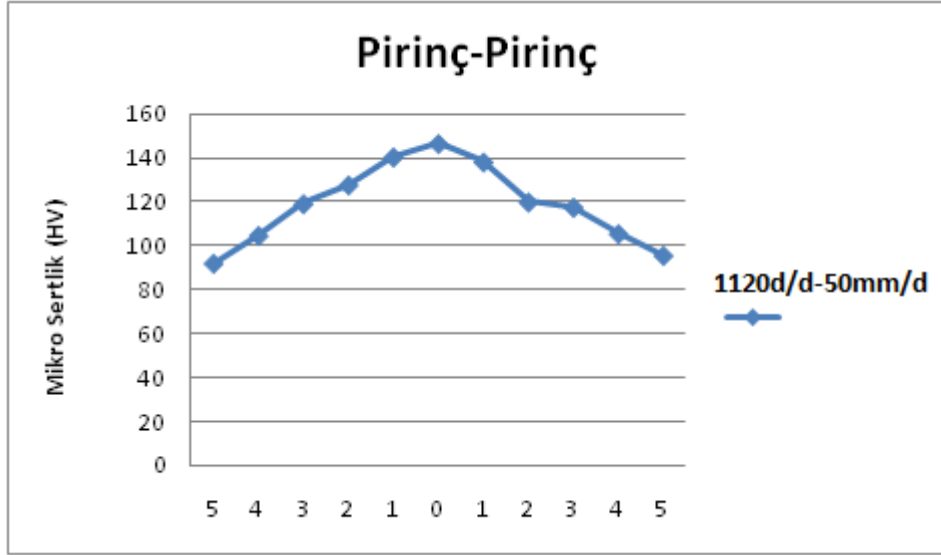
Şekil 5.29. 900d/d-50mm/d kaynak grubuna ait Pirinç-Pirinç levhaların mikrosertlik grafiği



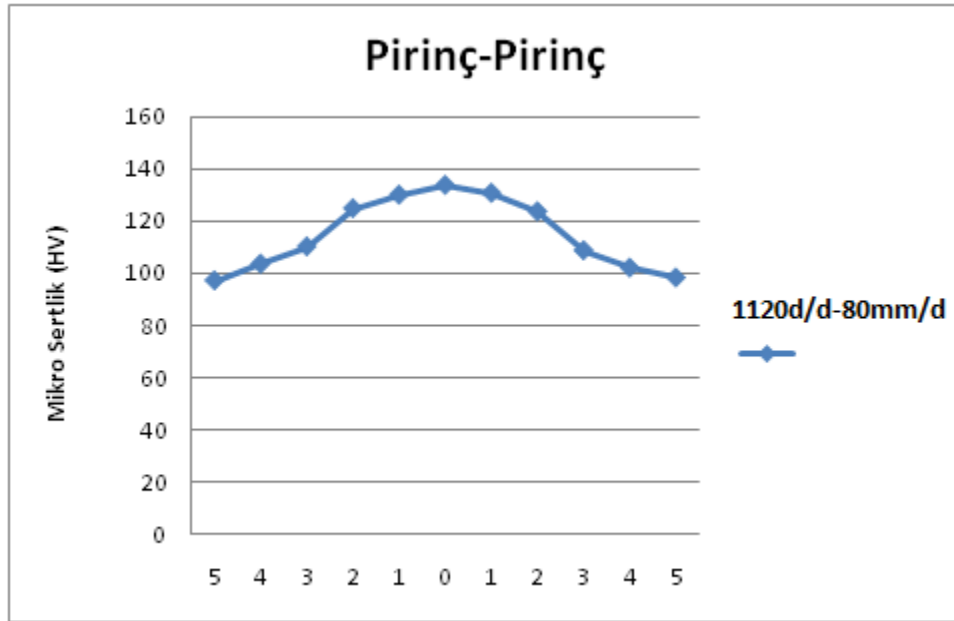
Şekil 5.30. 900d/d-80mm/d kaynak grubuna ait Pirinç-Pirinç levhaların mikrosertlik grafiği



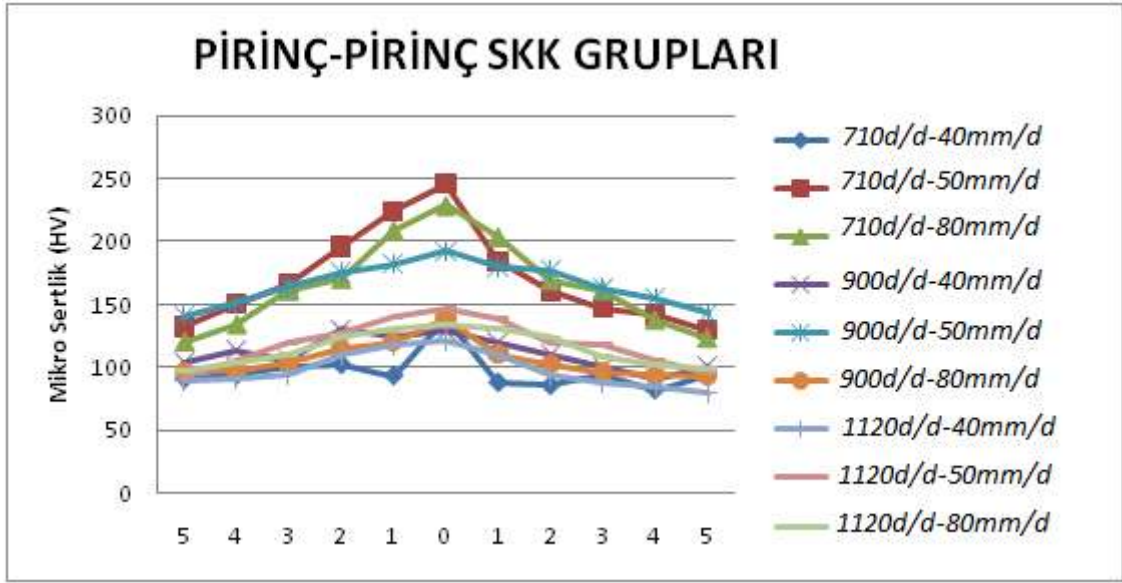
Şekil 5.31. 1120d/d-40mm/d kaynak grubuna ait Pirinç-Pirinç levhaların mikrosertlik grafiği



Şekil 5.32. 1120d/d-50mm/d kaynak grubuna ait Pirinç-Pirinç levhaların mikrosertlik grafiği



Şekil 5.33. 1120d/d-80mm/d kaynak grubuna ait Pirinç-Pirinç levhaların mikrosertlik grafiği



Şekil 5.34. Pirinç-Pirinç levhaların kaynak bölgesi mikrosertlik değerlerinin toplu gösterimi

Bütün kaynak şartlarında kaynak merkezinde esas metal sertliğinden daha yüksek sertlik değerine ulaşılmıştır.

Farklı kaynak şartlarında pirinç-pirinç levhaların kaynak bölgesine ait mikrosertlik grafikleri toplu olarak şekil 5.34’de verilmiştir. Bu grafikte de görüldüğü Cu-Cu levhalarda olduğu gibi tüm parametrelerde karıştırma bölgesinin sertliği en yüksek değerdedir. Ana metalden karıştırma bölgesine doğru ilerledikçe sertlikte artış görülmektedir. Karıştırma bölgesinde en yüksek sertlik değeri 710d/d-50mm/d şartlarında kaynak yapılan levhalarda ulaşılmıştır.

5.5.Yüzey Pürüzlülüğü

Her bir kaynak grubuna ait numunelerin kaynak dikişleri üzerinden dikiş yönü doğrultusunda kaynağın başlangıç, orta ve bitiş noktalarından üçer ölçüm alınmış ve bu ölçüm değerlerinin aritmetik ortalaması ilgili grubunun yüzey pürüzlülük değeri olarak değerlendirilmiştir. Alınan ölçüm noktalarına ait şematik görünüm şekil 5.35’de verilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü ölçme cihazı ile ölçüm yapılan bazı numunelerin resimleri şekil 5.36.’da verilmiştir. Ölçüm cihazı Taylor Hapson marka olup ölçü birimi mikrometredir.



Şekil 5.35. Yüzey pürüzlülük ölçümde izlenilen yöntem

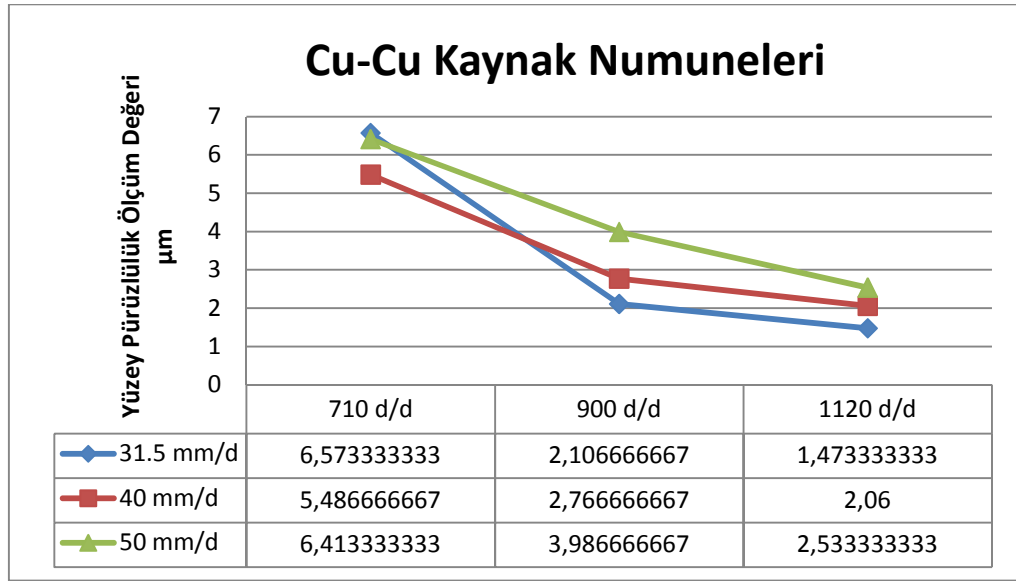


Şekil 5.36. Yüzey pürüzlülük ölçümüne ait örnek resimler

Cu ve pirinç levhaların yüzeylerinden elde edilen pürüzlülük değerleri çizelge 5.5 ve 5.6’da verilmiştir. Bu sonuçlar şekil 5.37. ve 5.38’de de grafik halinde verilmiştir.

DEVİR (d/d)	İLERLEME HIZI (mm/d)	1.ÖLÇÜM	2.ÖLÇÜM	3.ÖLÇÜM	ORTALAMA
710	31,5	4,46	7,88	7,38	6,5733333
710	40	6,4	5,44	4,62	5,4866667
710	50	5,68	9,28	4,28	6,4133333
900	31,5	2,4	1,64	2,28	2,1066667
900	40	2,48	2,86	2,96	2,7666667
900	50	3,3	6,64	2,02	3,9866667
1120	31,5	1,58	1,52	1,32	1,4733333
1120	40	3,3	1,58	1,3	2,06
1120	50	2,16	2,6	2,84	2,5333333

Çizelge 5.5. Bakır-Bakır kaynak grubuna ait yüzey pürüzlülük değerleri

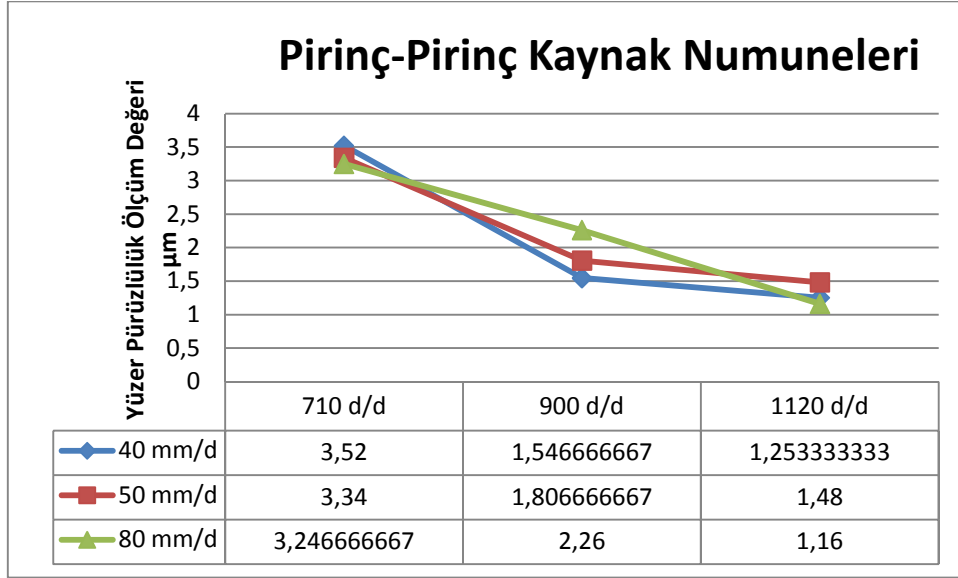


Şekil 5.37.Cu-Cu kaynak grubu yüzey pürüzlülük değişimi

Devir sayısının artmasıyla Cu-Cu levhaların kaynak bölgesi yüzey pürüzlülüklerinin azaldığı görülmüştür.

DEVİR (d/d)	İLERLEME HIZI (mm/d)	1.ÖLÇÜM	2.ÖLÇÜM	3.ÖLÇÜM	ORTALAMA
710	40	4,92	4,3	1,34	3,52
710	50	5,1	2,26	2,66	3,34
710	80	5,66	2,8	1,28	3,2466667
900	40	1,72	1,74	1,18	1,5466667
900	50	1,2	2,44	1,78	1,8066667
900	80	2,24	2,78	1,76	2,26
1120	40	1,28	1,12	1,36	1,2533333
1120	50	1	2,18	1,26	1,48
1120	80	1,64	0,94	0,9	1,16

Çizelge 5.6. Pirinç-Pirinç kaynak grubu yüzey pürüzlülük ölçümleri



Şekil 5.38.Pirinç-Pirinç kaynak grubu yüzey pürüzlülük değişimi

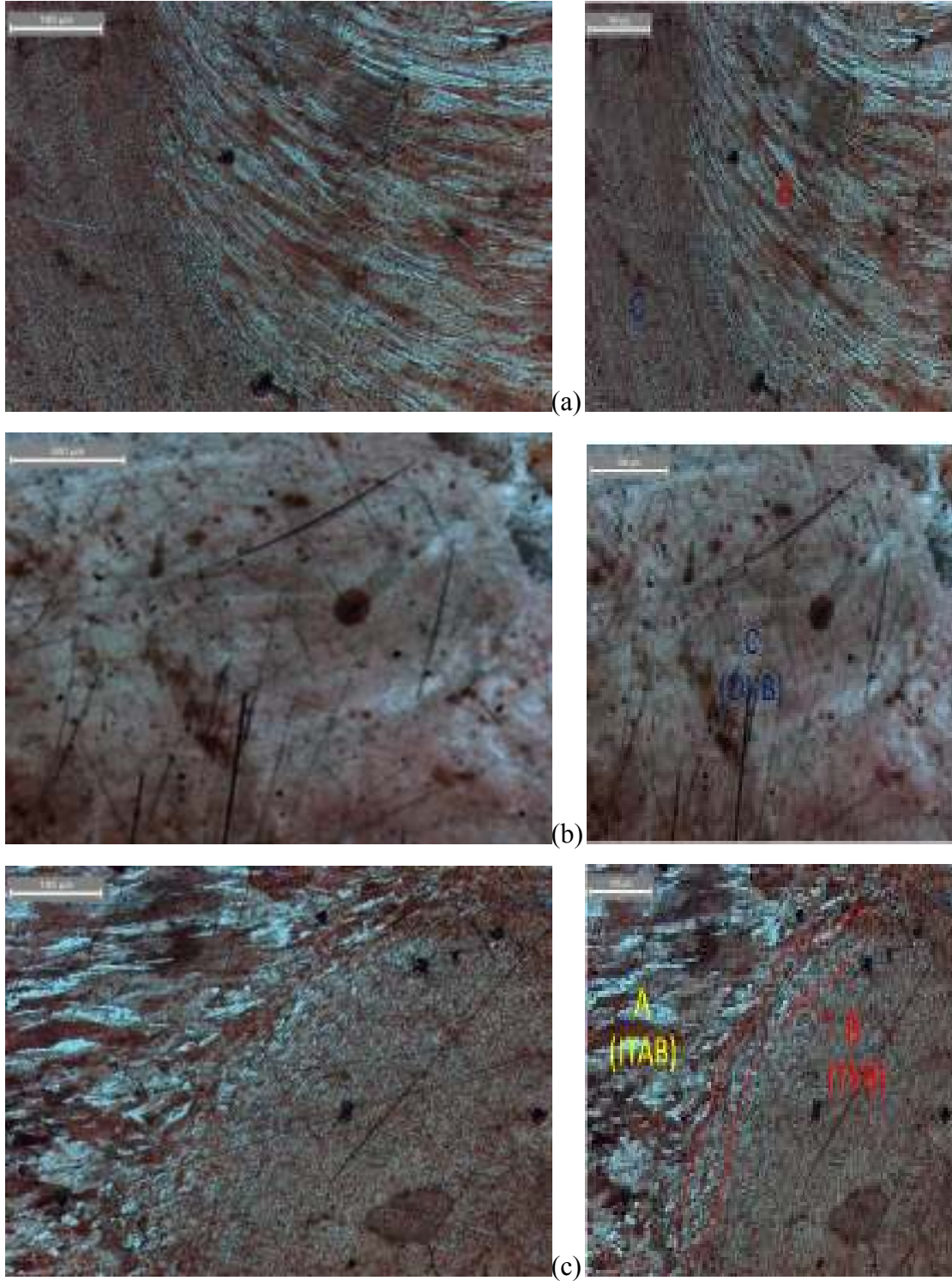
Cu-Cu levhalarda olduğu gibi pirinç-pirinç levhaların kaynak bölgesi yüzey pürüzlülük değerleri devir sayısının artmasıyla azaldığı görülmüştür.

5.6. Kaynaklı Bölgelerin Mikroyapı İnceleri

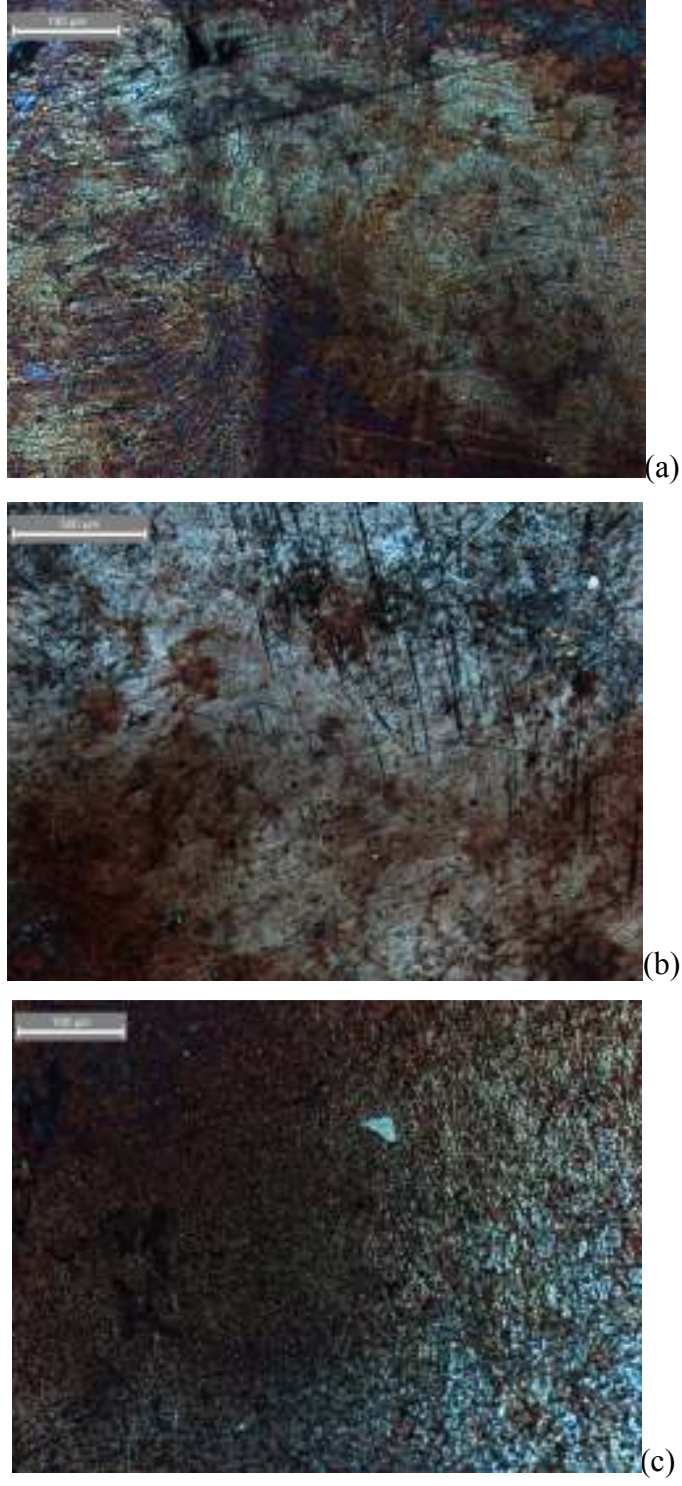
Mikroyapı için bakalite alınan numuneler sırasıyla 180, 240, 400, 600, 800, 1200 numaralı zımparalarla zımparalandıktan sonra 6 µm ve 1 µm'luk elmas pastayla yüzeyler parlatılmıştır.

Parlatma sonrasında yüzeyleri temizlenen numunelere 2gr $K_2Cr_2O_4$ + 8 ml H_2SO_4 (derişim %98) + 4ml doymuş NaCl çözeltisi + toplam hacim 100ml olacak şekilde H_2O ilavesiyle oluşturulan çözeltide her numune 10 sn kadar bekletilip alınarak dağlama işlemi yapılmıştır. Mikroyapı fotoğrafları Leica marka ışık mikroskopunda tane sınırlarında 200 kat, karışım bölgesinde 50 kat büyütme yapılarak çekilmiştir. Her bir kaynak grubundan 3 adet fotoğraf çekilmiş olup mikroyapıya ait fotoğraflar aşağıda verilmiştir.

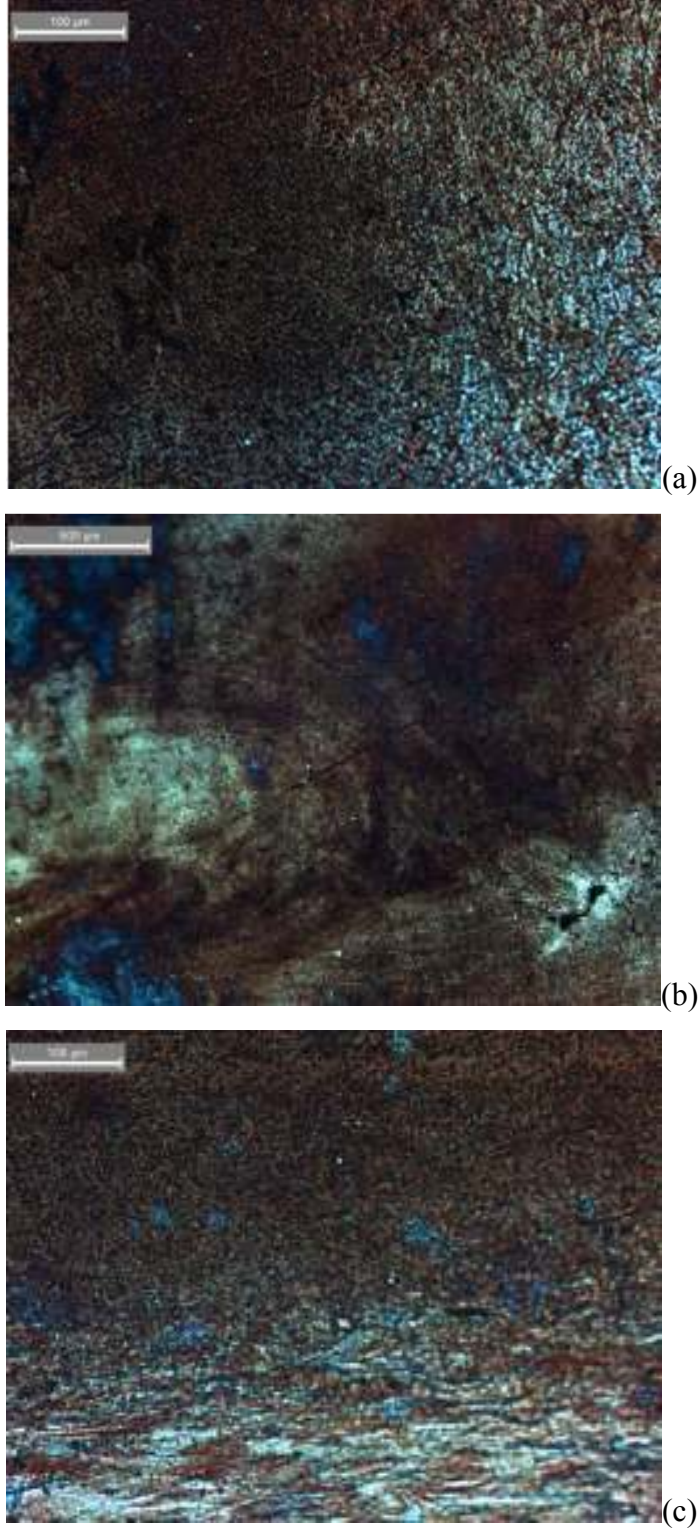
5.6.1. Cu-Cu Sürtünme Karıştırma Kaynak Grubuna Ait Mikroyapı Fotoğrafları



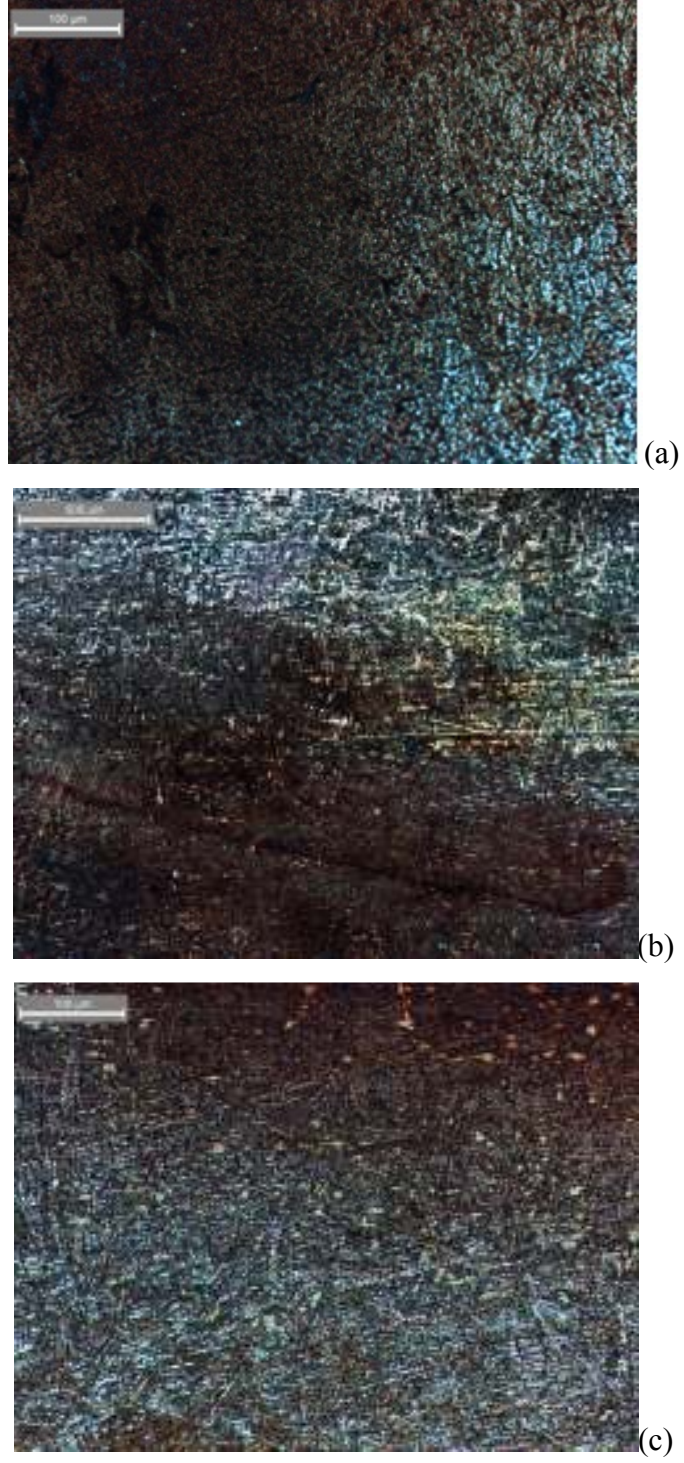
Şekil 5.39. 710d/d-31,5mm/d çalışma şartlarında yapılan Cu-Cu SKK kaynağı, (a)tane sınırı x200 sağ taraf, (b)karışım bölgesi x50 merkez, (c) tane sınırı x200 sol taraf A:Isının tesiri altında kalan bölge (ITAB), B:Termodinamik olarak yeniden kristalleşen bölge (TEB), C:Dinamik olarak yeniden kristalleşen bölge (DKB)



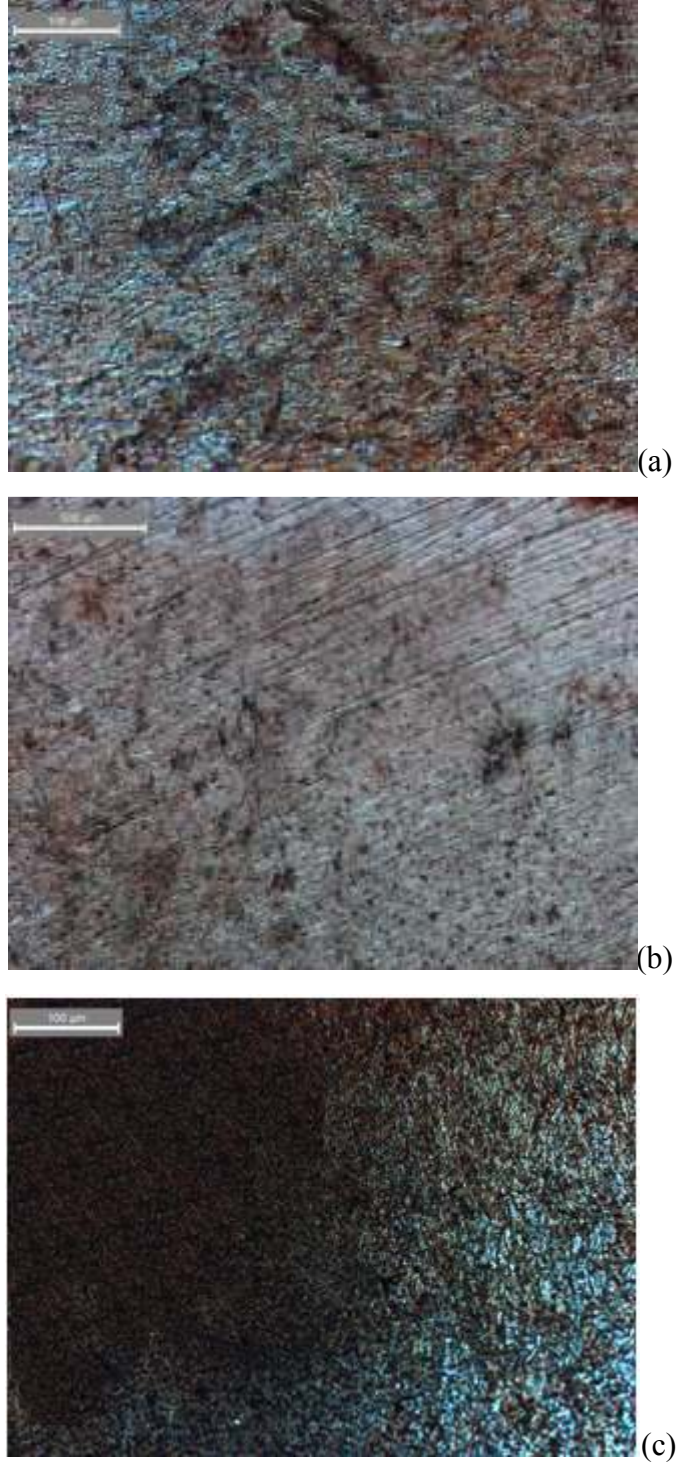
Şekil 5.40. 710d/d-40mm/d çalışma şartlarında yapılan Cu-Cu SKK kaynağı, (a)tane sınırı x200 sağ taraf, (b)karışım bölgesi x50 merkez, (c) tane sınırı x200 sol taraf



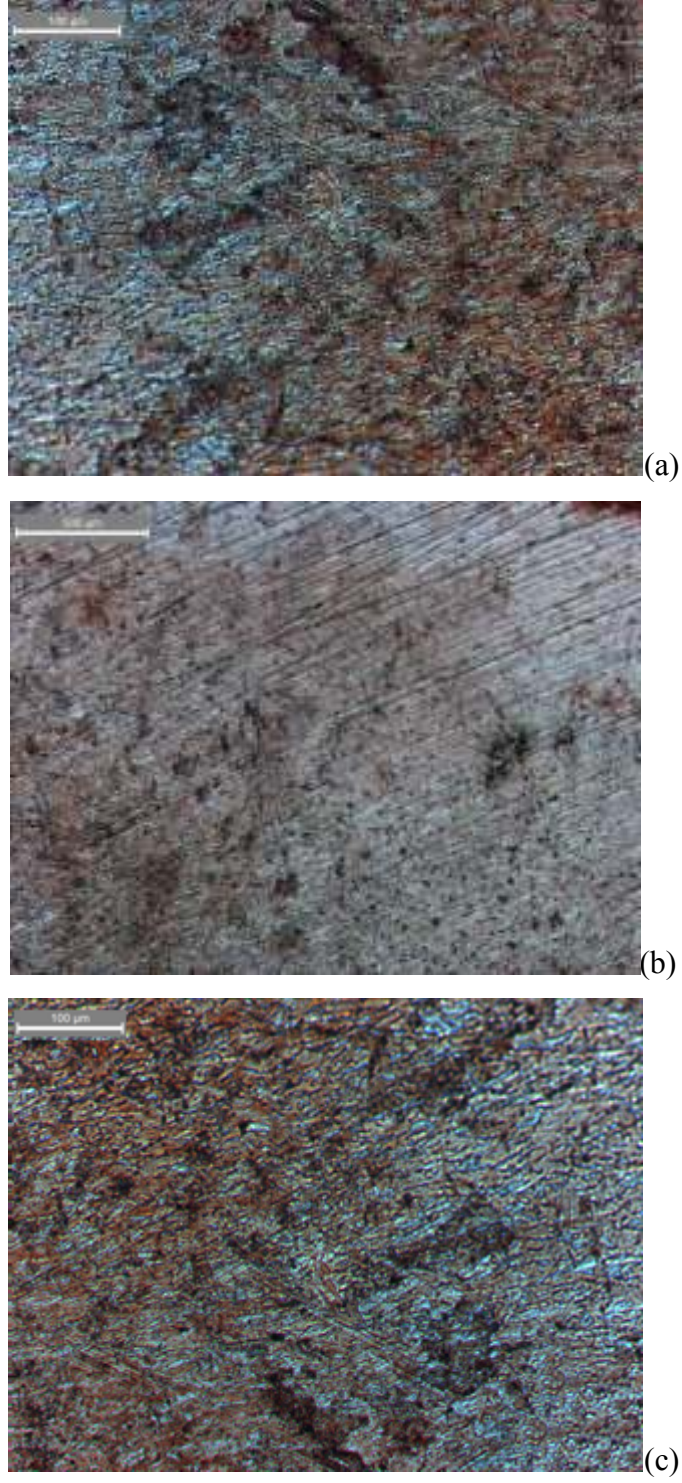
Şekil 5.41. 710d/d-50mm/d çalışma şartlarında yapılan Cu-Cu SKK kaynağı, (a)tane sınırı x200 sağ taraf, (b)karışım bölgesi x50 merkez, (c) tane sınırı x200 sol taraf



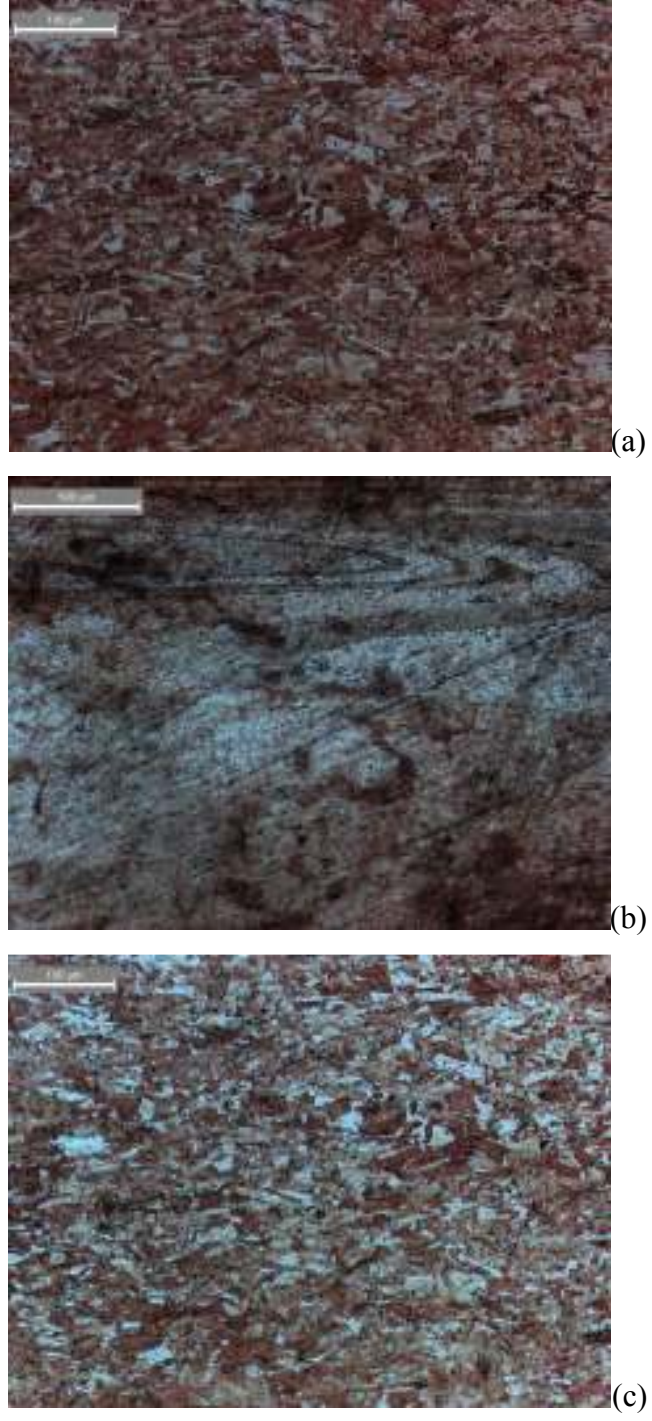
Şekil 5.42. 900d/d-31,5mm/d çalışma şartlarında yapılan Cu-Cu SKK kaynağı, (a)tane sınırı x200 sağ taraf, (b)karışım bölgesi x50 merkez, (c) tane sınırı x200 sol taraf



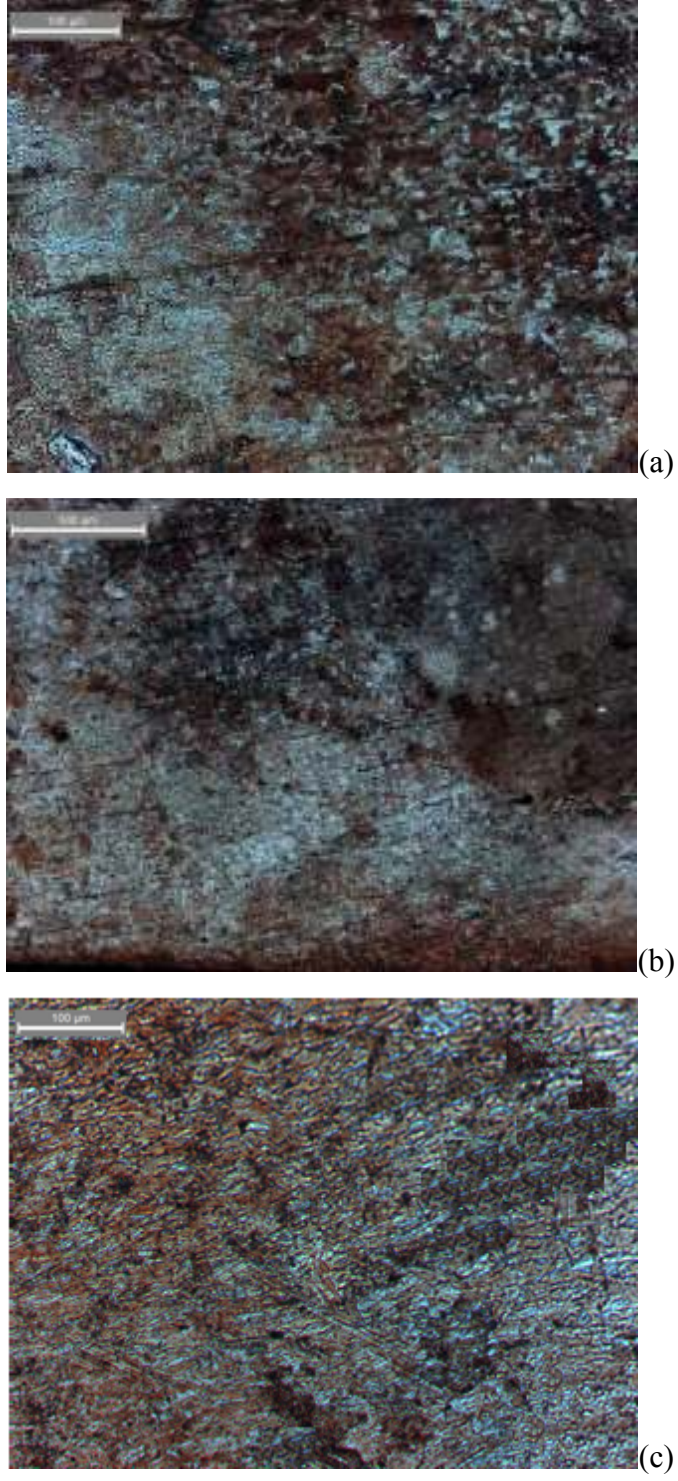
Şekil 5.43. 900d/d-40mm/d çalışma şartlarında yapılan Cu-Cu SKK kaynağı,
(a)tane sınırı x200 sağ taraf, (b)karışım bölgesi x50 merkez, (c) tane sınırı x200 sol taraf



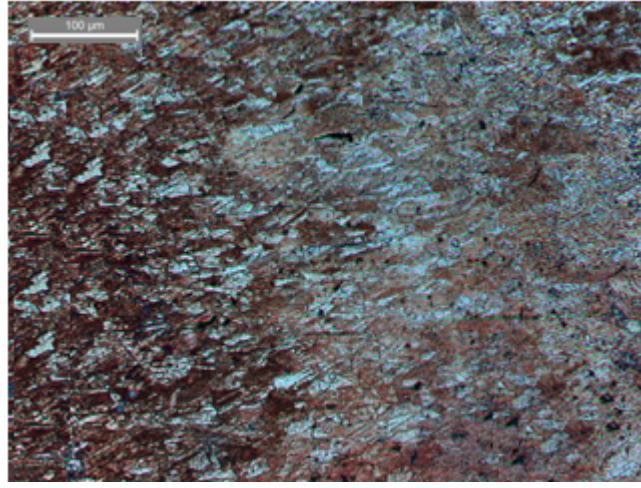
Şekil 5.44. 900d/d-50mm/d çalışma şartlarında yapılan Cu-Cu SKK kaynağı, (a)tane sınırı x200 sağ taraf, (b)karışım bölgesi x50 merkez, (c) tane sınırı x200 sol taraf



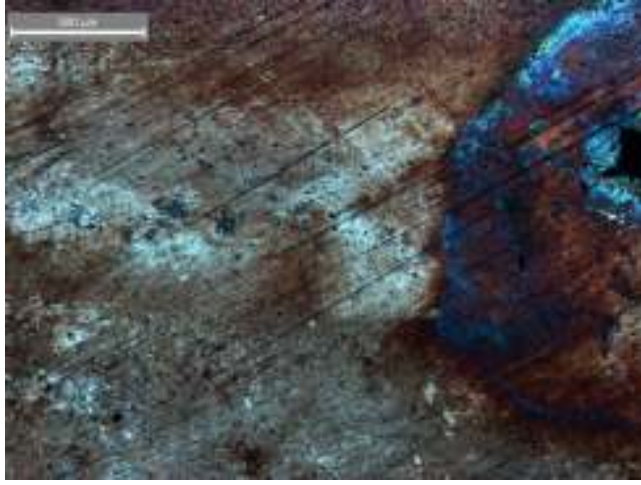
Şekil 5.45. 1120d/d-31,5mm/d çalışma şartlarında yapılan Cu-Cu SKK kaynağı, (a)tane sınırı x200 sağ taraf, (b)karışım bölgesi x50 merkez, (c) tane sınırı x200 sol taraf



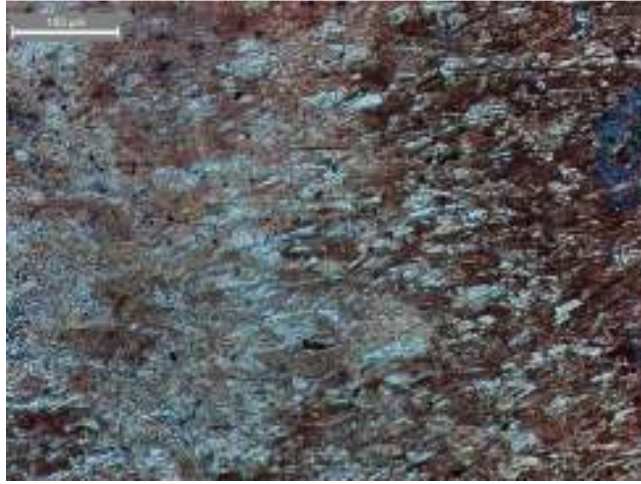
Şekil5.46. 1120d/d-40mm/d çalışma şartlarında yapılan Cu-Cu SKK kaynağı, (a)tane sınırı x200 sağ taraf, (b)karışım bölgesi x50 merkez, (c) tane sınırı x200 sol taraf



(a)



(b)

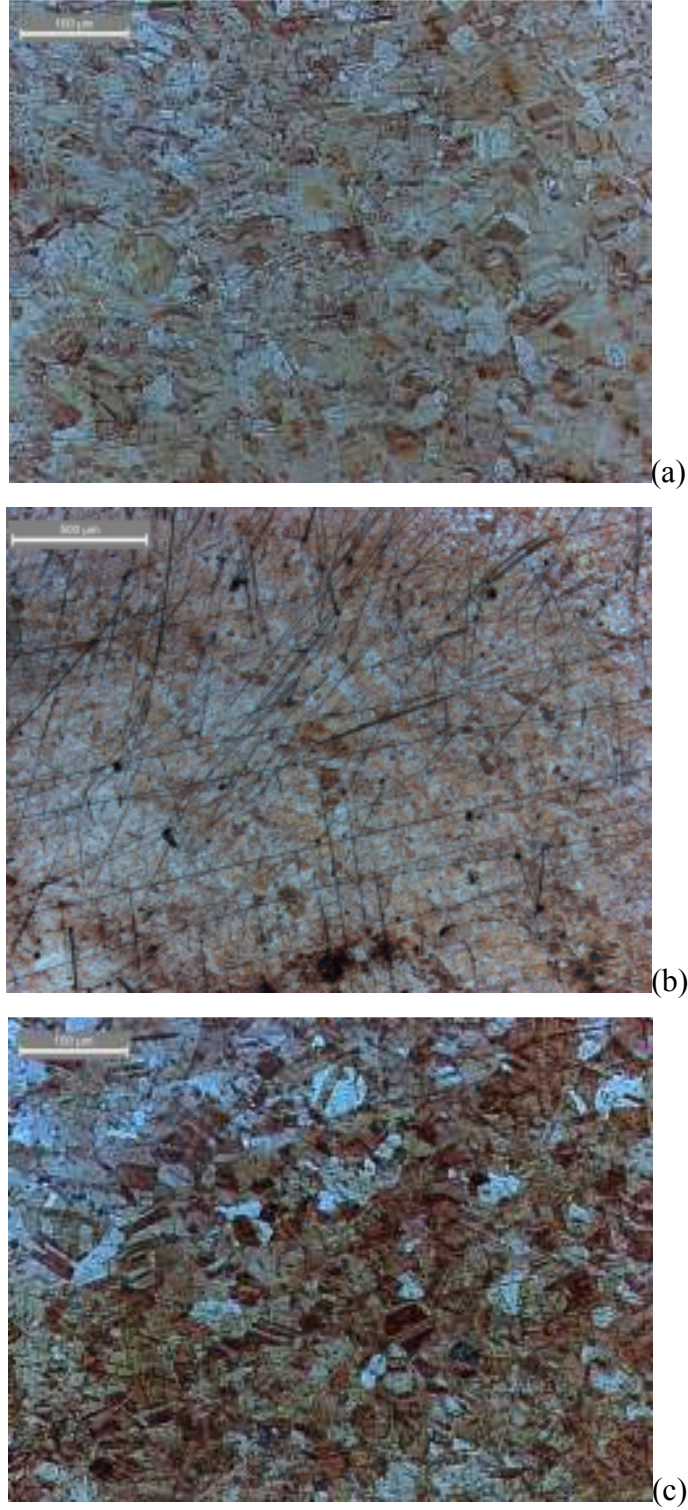


(c)

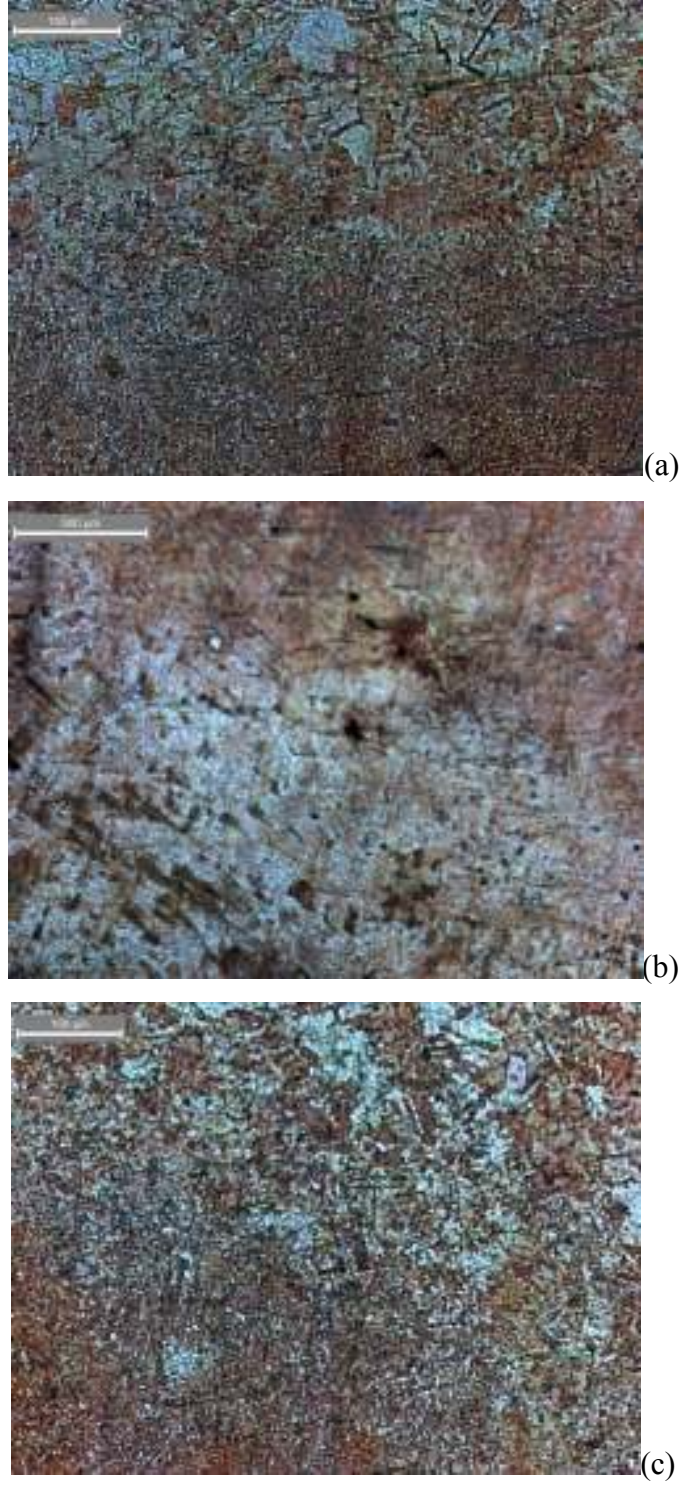
Şekil5.47. 1120d/d-50mm/d çalışma şartlarında yapılan Cu-Cu SKK kaynağı,
(a)tane sınırı x200 sağ taraf, (b)karışım bölgesi x50 merkez, (c) tane sınırı x200 sol taraf

Farklı parametreler kullanılarak SKK ile birleştirilen Cu-Cu levhaların kaynak bölgesine ait mikro yapı resimlerinde (şekil 5.39-47) Cu alaşımlarında görülen mikroyapıların oluştuğu tespit edilmiştir. Cu ve alaşımlarının SKK sonrası mikro yapılarında ana metal, ısı tesiri altında kalan bölge (ITAB) termomekanik etkilenmiş bölge ve karıştırma bölgesi olmak üzere dört farklı bölge görülür. Karıştırma bölgesinde dinamik yeniden kristalleşme sonucu diğer bölgelere göre daha ince taneli yapı oluşur. Mikroyapı resimleri üzerinde yapılan incelemelerde tüm parametrelerde karıştırma bölgesinin tane yapısının ince olduğu görülmektedir. Karıştırma bölgesinin hemen bitişiğinde termomekanik etkiyle yönlendirilmiş karıştırma bölgesindeki tanelere nispeten kaba bir tane yapısının olduğu görülmektedir. Isı tesiri altında kalan bölgede ise zaman zaman ana metale kıyasla daha iri tanelerin varlığı genel olarak tüm mikroyapı resimlerinde görülmektedir.

5.6.2. Pirinç-Pirinç Sürtünme Karıştırma Kaynak Grubuna Ait Mikroyapı Fotoğrafları



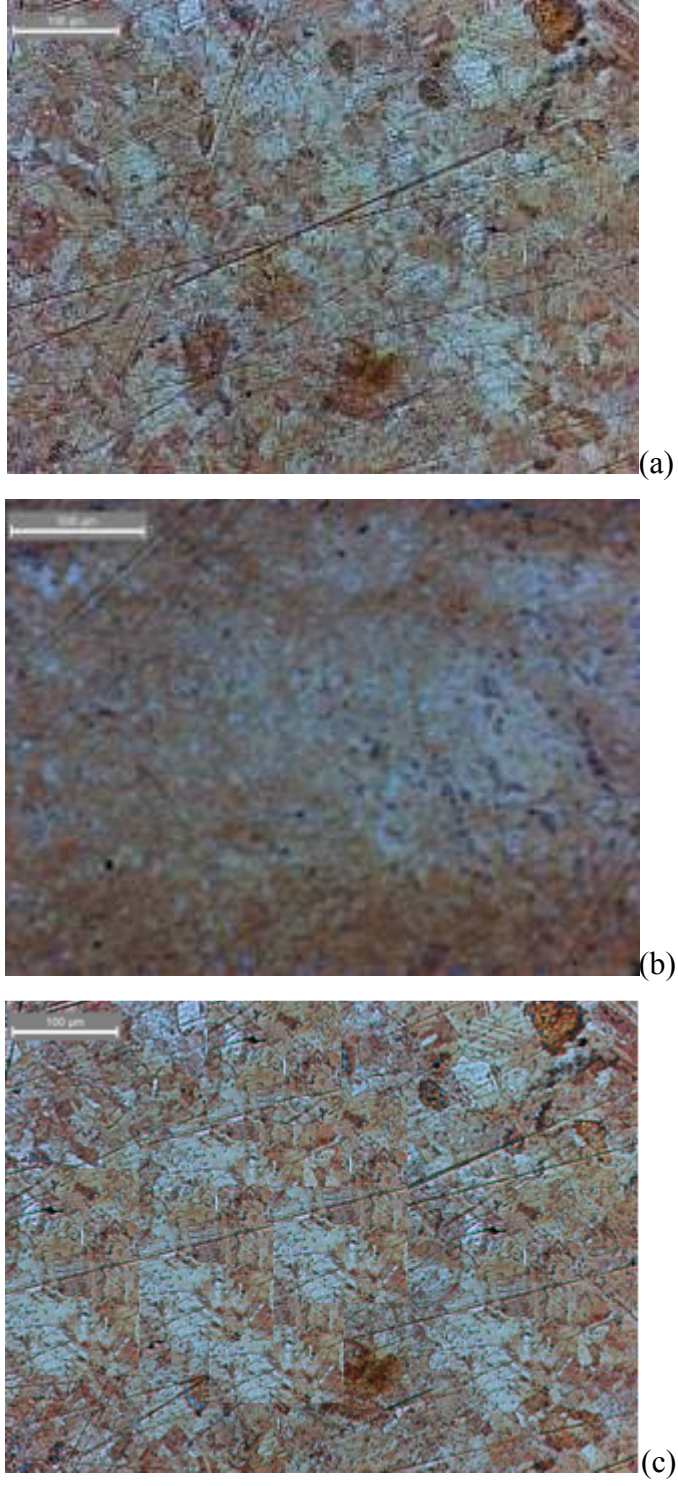
Şekil5.48. 710d/d-40mm/d çalışma şartlarında yapılan pirinç-pirinç SKK kaynağı, (a)tane sınırı x200 sağ taraf, (b)karışım bölgesi x50 merkez, (c) tane sınırı x200 sol taraf



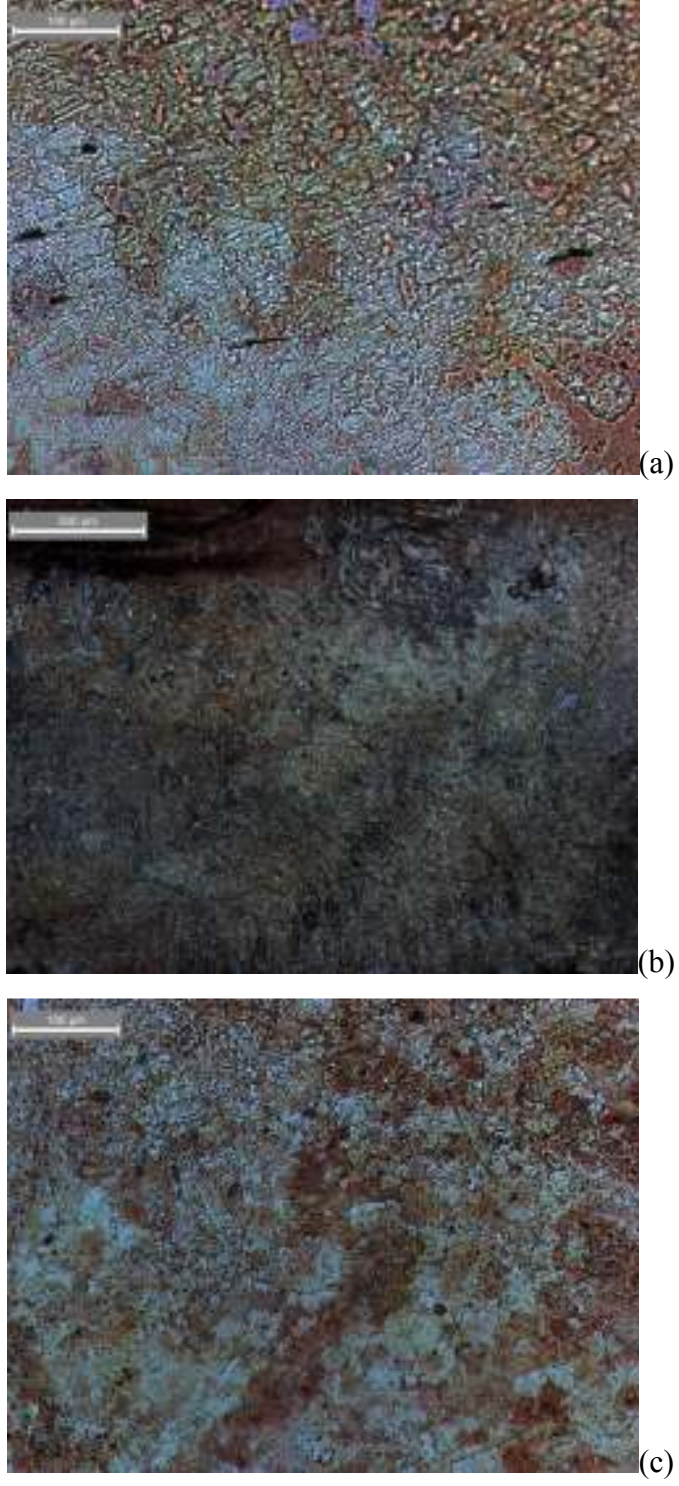
Şekil5.49. 710d/d-50mm/d çalışma şartlarında yapılan pirinç-pirinç SKK kaynağı, (a)tane sınırı x200 sağ taraf, (b)karışım bölgesi x50 merkez, (c) tane sınırı x200 sol taraf



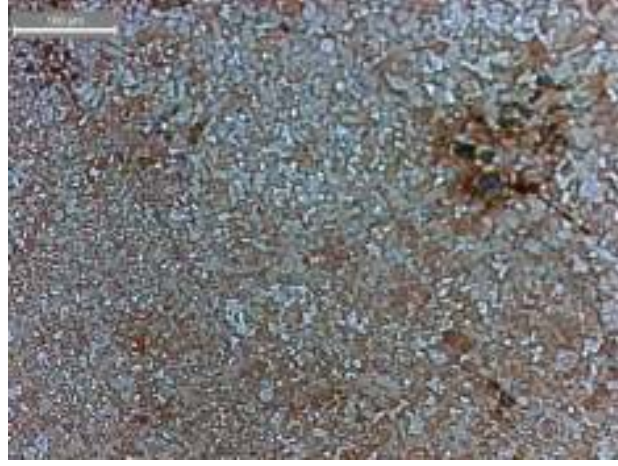
Şekil5.50. 710d/d-80mm/d çalışma şartlarında yapılan pirinç-pirinç SKK kaynağı, (a)tane sınırı x200 sağ taraf, (b)karışım bölgesi x50 merkez, (c) tane sınırı x200 sol taraf



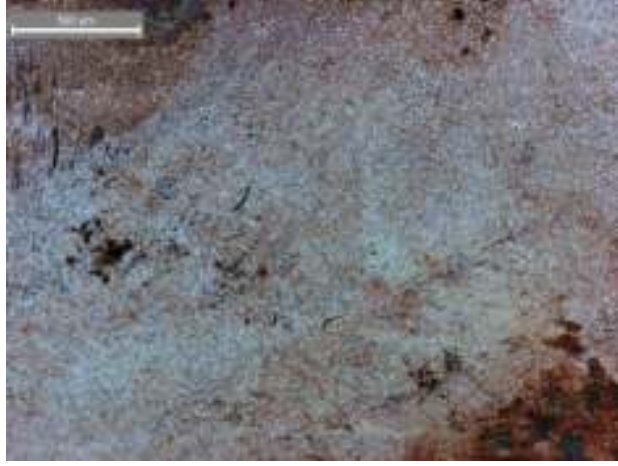
Şekil5.51. 900d/d-40mm/d çalışma şartlarında yapılan pirinç-pirinç SKK kaynağı, (a)tane sınırı x200 sağ taraf, (b)karışım bölgesi x50 merkez, (c) tane sınırı x200 sol taraf



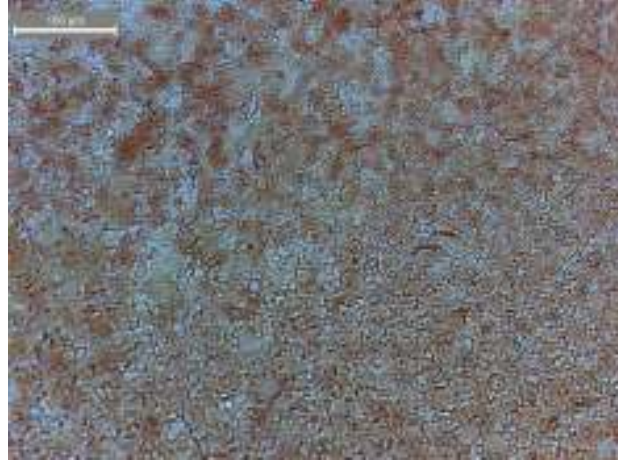
Şekil5.52. 900d/d-50mm/d çalışma şartlarında yapılan pirinç-pirinç SKK kaynağı, (a)tane sınırı x200 sağ taraf, (b)karışım bölgesi x50 merkez, (c) tane sınırı x200 sol taraf



(a)



(b)



(c)

Şekil5.53. 900d/d-80mm/d çalışma şartlarında yapılan pirinç-pirinç SKK kaynağı,
(a)tane sınırı x200 sağ taraf, (b)karışım bölgesi x50 merkez, (c) tane sınırı x200 sol taraf



(a)

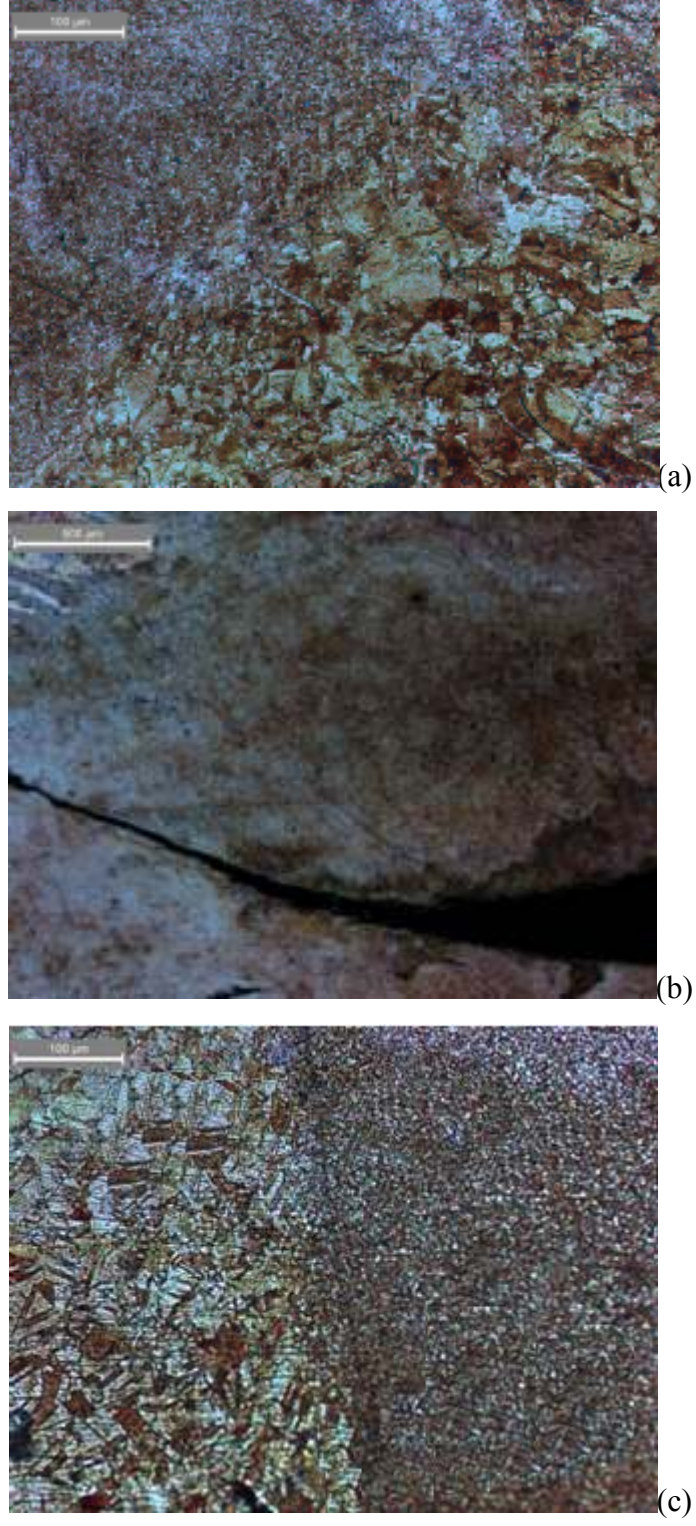


(b)

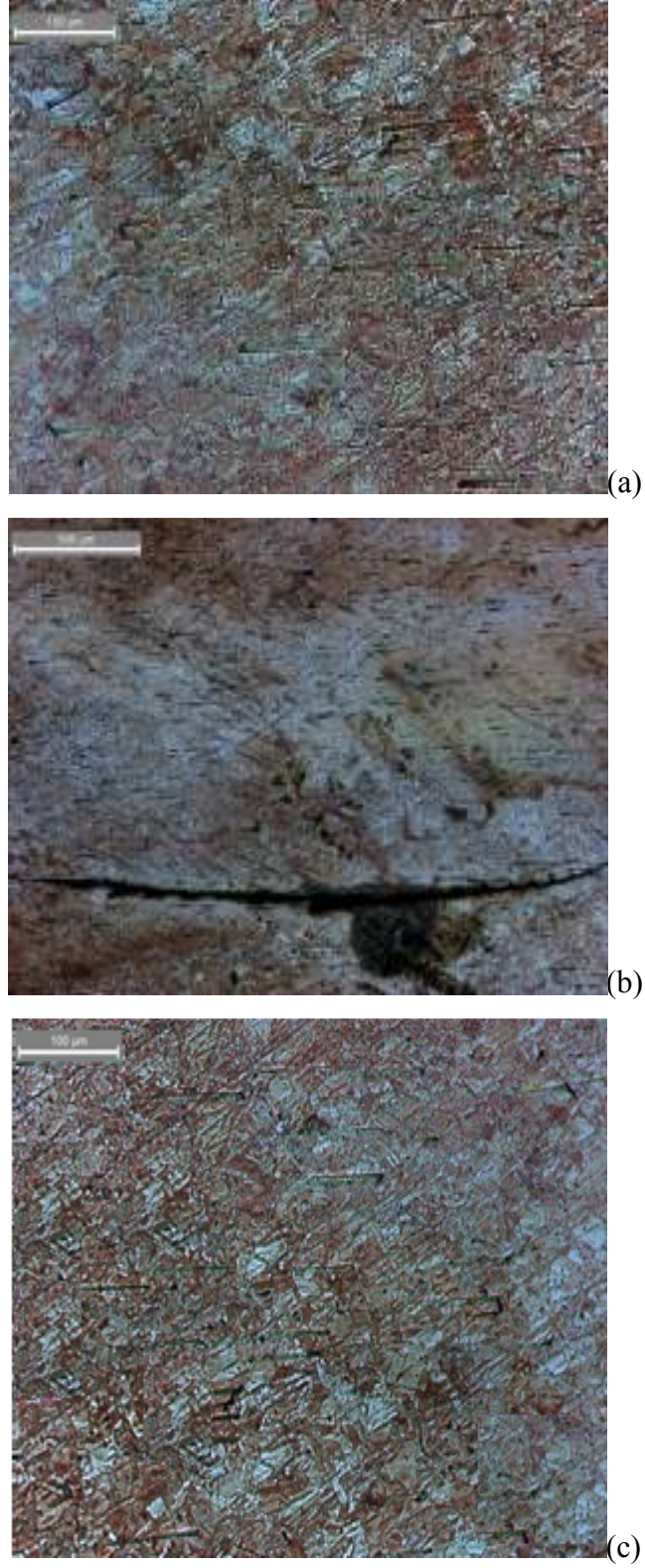


(c)

Şekil5.54. 1120d/d-40mm/d çalışma şartlarında yapılan pirinç-pirinç SKK kaynağı, (a)tane sınırı x200 sağ taraf, (b)karışım bölgesi x50 merkez, (c) tane sınırı x200 sol taraf



Şekil5.55. 1120d/d-50mm/d çalışma şartlarında yapılan pirinç-pirinç SKK kaynağı, (a)tane sınırı x200 sağ taraf, (b)karışım bölgesi x50 merkez, (c) tane sınırı x200 sol taraf



Şekil5.56. 1120d/d-80mm/d çalışma şartlarında yapılan pirinç-pirinç SKK kaynağı, (a)tane sınırı x200 sağ taraf, (b)karışım bölgesi x50 merkez, (c) tane sınırı x200 sol taraf

Pirinç-pirinç levhaların kaynak bölgesine ait mikro yapı resimleri şekil 5.47-56'de verilmiştir. Bu resimlerde dikkat çeken nokta bazı numunelerin kaynak kesitinde görülen porozitelerdir. Bu poroziteler mekanik özelliklerin azalmasına neden olan kaynak hatalarıdır. Pirinç levhaların SKK sonrası mikro yapılarında da bakır da olduğu gibi ana metal, ısı tesiri altında kalan bölge (ITAB) termomekanik etkilenmiş bölge ve karıştırma bölgesi olmak üzere dört farklı bölge görülür. Karıştırma bölgesinde dinamik yeniden kristalleşme sonucu oluşan ince taneli yapıda dislokasyon yoğunluğu azalmaktadır. Dislokasyon yoğunluğundaki bu azalma mekanik özelliklerin azalması neden olmaktadır. Ancak yine bu bölgedeki ince tane yapısı Hall-petch eşitliğine göre akma dayanımını artıracaktır.

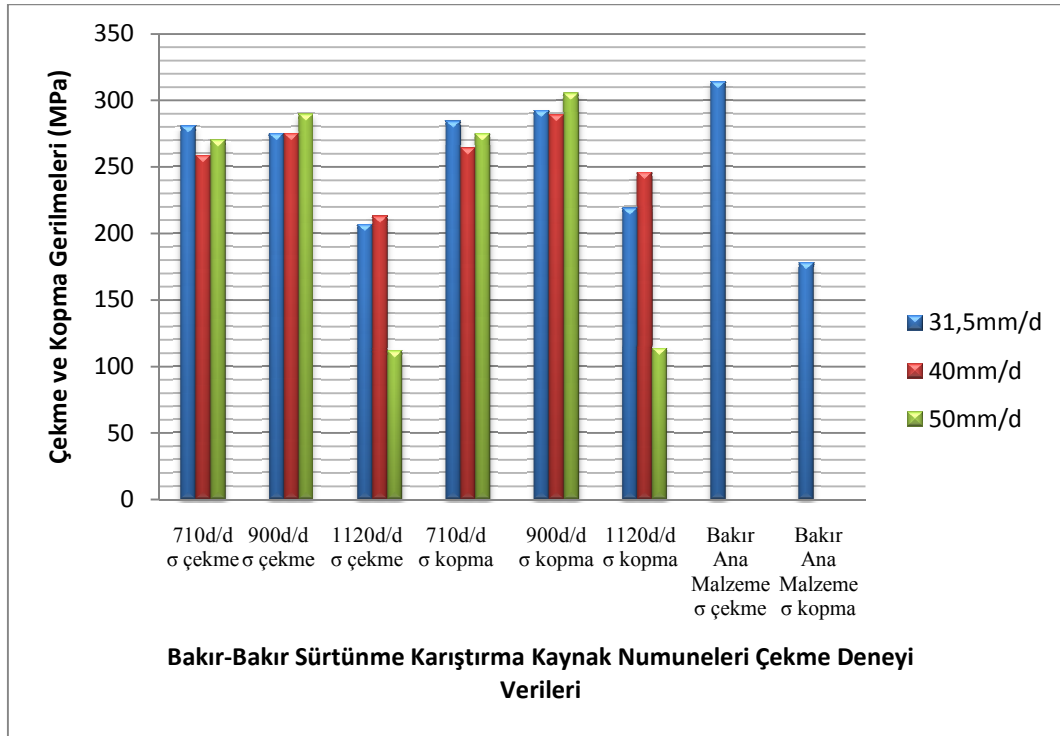
6.TARTIŞMA VE SONUÇ

6.1. Tartışma

Bu çalışmada 3 mm kalınlığındaki bakır ve pirinç levhaların farklı devir ve ilerleme hızındaki sürtünme karıştırma kaynak yöntemiyle 2 farklı grupta (bakır-bakır, pirinç-pirinç) kaynaklama işlemi yapılmış bu kaynaklanmış grupların çekme, eğme, mikrosertlik, yüzey pürüzlülüğü deneyleri ile mikroyapı incelemeleri yapılmıştır. Kaynak işleminde kullanılan kaynak takımı (probe) ölçüleri literatür ve tecrübe edinimiyle oluşturulan bir tasarımdır. Bu çalışmada 36 adet levha malzemenin alın kaynak işlemi dolayısıyla 18 kaynak işlemi gerçekleştirilmiştir. Tecrübe sonucu oluşturulan kaynak takımı (probe) herhangi bir deformasyona uğramamış bütün kaynak işlemlerinde aynı kaynak takımı kullanılmıştır.

6.2.Sonuç

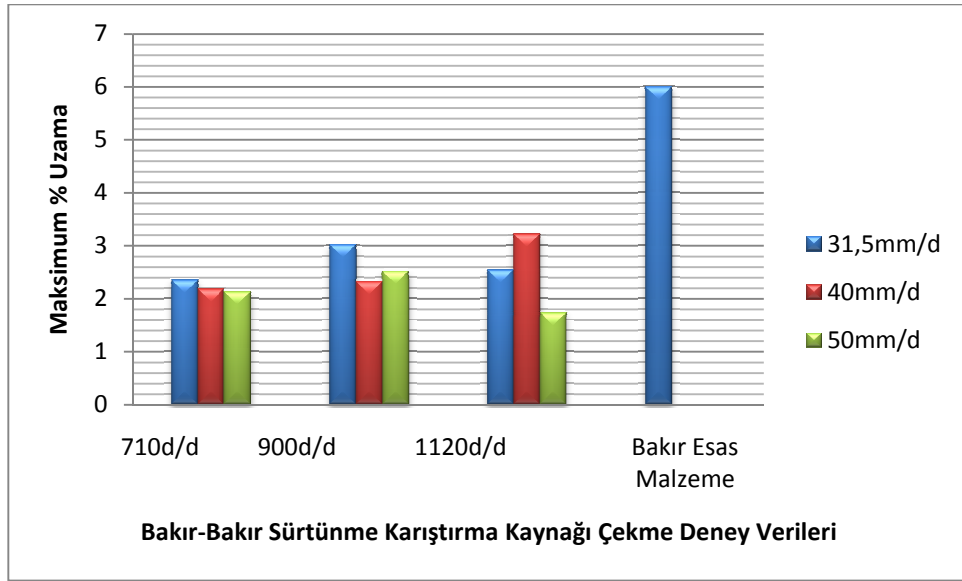
6.2.1. Bakır-Bakır Çekme Deney Sonuçları



Çizelge 6.1. Cu-Cu SKK numuneleri çekme deneyi mukavemet verileri

Çizelge 6.1.' de Cu-Cu levhaların çekme özellikleri toplu bir şekilde verilmiştir. Bu çizelgeye göre devir sayısı 900d/d olan şartlardaki tüm ilerlemelerde (31,5-40-50mm/d) en yüksek çekme ve kopma mukavemetine ulaşılmıştır. Bu şartlarda levhalara en uygun ısı girişi sağlanmış ve bu nedenle mukavemet yüksek çıkmıştır. 900d/d ve 50m/d şartlarında birleştirilen Cu levhaların en yüksek çekme mukavemeti (305 MPa) ana metalin en yüksek çekme mukavemet değerine (314 MPa) çok yakın olduğu görülmüştür. 1120d/d olan şartlardaki tüm ilerlemelerde (31,5-40-50mm/d) en düşük çekme ve kopma mukavemetine ulaşılmıştır. Bunun nedeni yüksek devire bağlı sürtünme kuvvetinin etkisiyle levhaların daha çok ısınması ve bu ısının kaynak dikiş bölgesinde yumuşatma tavlamasına neden olmasıdır. Ayrıca karıştırma bölgesinde yeniden kristalleşen ve ITAB' da ki tanelerin yüksek ısı girişine bağlı olarak daha iri boyutta olması da mukavemetin düşmesine neden olmuştur. Bazı kaynak parametrelerinde kaynak dikiş bölgesinde boylamasına oluşan porozite de mukavemetin azalmasına neden olmuştur.

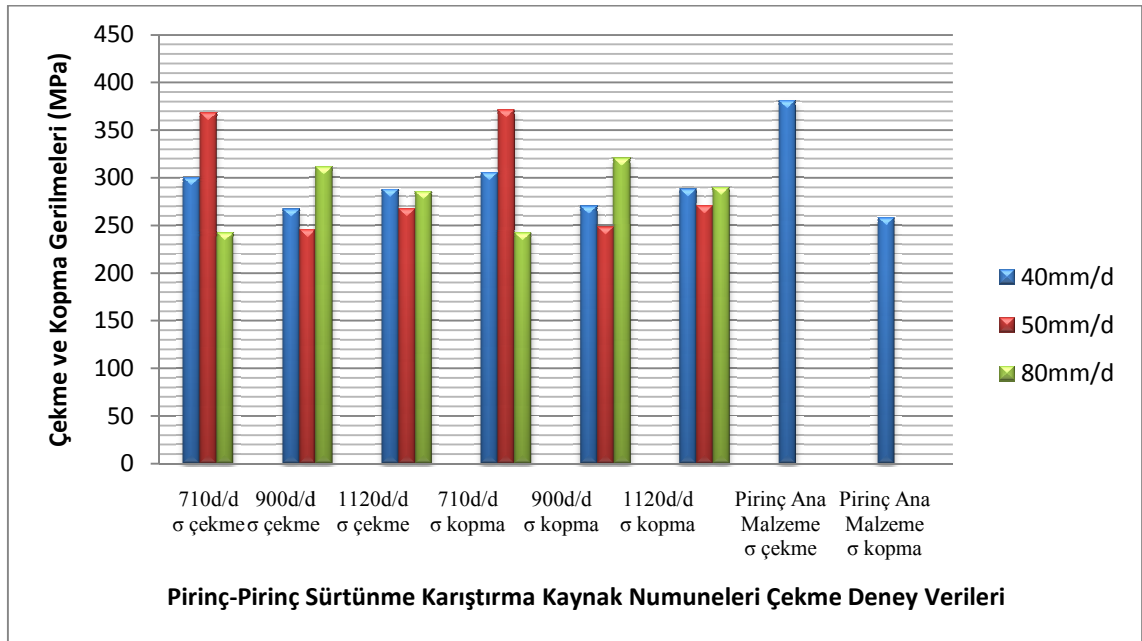
Xue ve arkadaşları 3 mm kalınlığındaki soğuk haddelenmiş saf bakır levhaları iki farklı devir (400 ve 800 d/d) ve 50mm/d ilerleme hızı kullanarak birleştirmişlerdir. Bu levhaların ana metal akma mukavemeti 330 MPa, en yüksek çekme mukavemeti 350 MPa, % uzaması ise %9'dur. Fakat 800 d/d dönme hızında yapılan birleştirme sonunda levhaların akma mukavemeti 100 MPa, en yüksek çekme mukavemeti 220 MPa, % uzaması %21' ve 400 d/d dönme hızında yapılan birleştirmenin akma mukavemeti ise 200 MPa, en yüksek çekme mukavemeti 270 MPa, % uzaması ise %11 olduğunu bulmuşlardır. Devir sayısının azalmasıyla mekanik özelliklerin arttığını ve % uzamanın azaldığını ifade etmişlerdir. Devir sayısının azalmasıyla karıştırma bölgesinde ince tane yapısının oluştuğunu ve buna bağlı olarak da çekme mukavemetinin arttığını ifade etmiştir[43]. Bizim yaptığımız çalışmada da devir sayısı 1120 d/d' dan 900 d/d düştüğünde mekanik özelliklerin arttığı tespit edilmiştir. Devir sayısının azalmasıyla % uzamanın azaldığını görmekteyiz.



Çizelge 6.2. Cu-Cu SKK numuneleri çekme deneyi % uzama verileri

Shen ve arkadaşları 3 mm kalınlığında bakır levhalara yapılan 600d/d 'da 25, 50, 100, 150 ve 200 mm/d ilerleme hızında sürtünme karıştırma kaynağı uygulamalarında ana metal çekme mukavemeti 325 MPa olup ulaşılan en yüksek çekme gerilmeleri sırasıyla 50, 25, 100, 150 ve 200mm/d ilerleme hızlarında gerçekleşmiştir. 50mm/d ilerleme hızında 270MPa'dır [42].

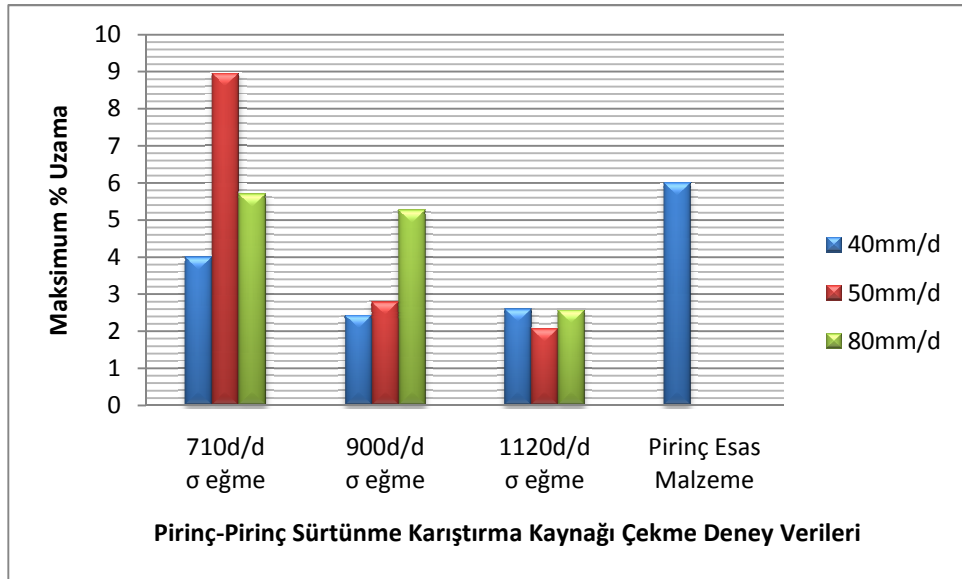
6.2.2. Pirinç-Pirinç Çekme Deney Sonuçları



Çizelge 6.3. Pirinç-Pirinç SKK numuneleri çekme deney verileri

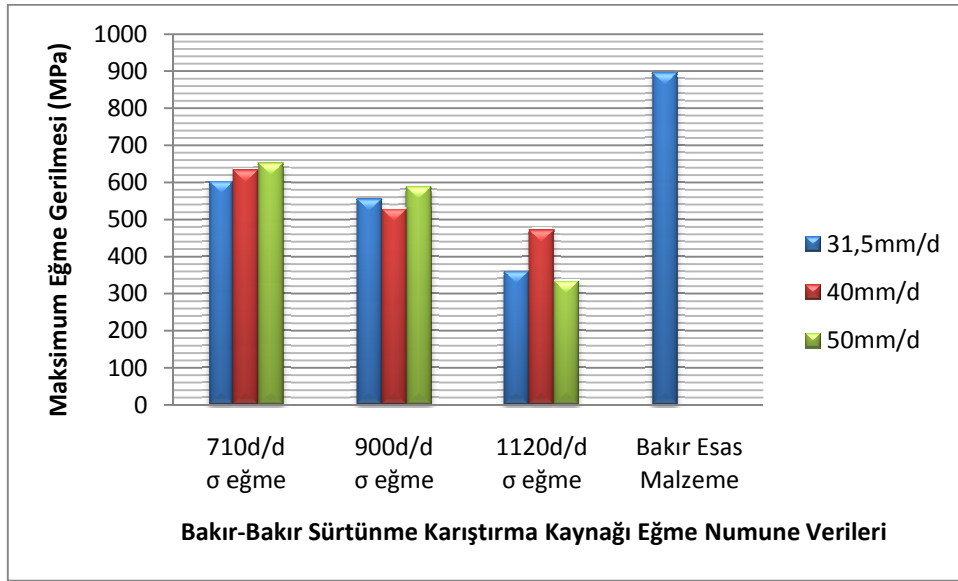
Çizelge 6.3’de farklı parametrelerde birleştirilen pirinç-pirinç levhaların çekme özellikleri verilmiştir. 710d/d-50mm/d şartlarında yapılan birleştirmenin çekme mukavemeti (371 MPa) ana metalin çekme mukavemet değerine (381 MPa) çok yakın çıkmıştır. 900d/d-80mm/d şartlarında yapılan birleştirmenin çekme mukavemeti ise 320MPa olarak bulunmuştur. Aşağıdaki sonuçlara göre 710d/d-40-50mm/d şartlarında birleştirilen pirinç levhaların mekanik özellikleri mukavemet olarak daha verimli oldukları görülmüştür.

Meran 3 mm kalınlığında CuZn30 alaşımına 2050d/d ve değişik ilerleme hızlarında (20-40-56-80-112-140 mm/d) SKK uygulamış ve ana metalin çekme mukavemet değerine en yakın çekme mukavemet değerini 112 mm/d ilerleme hızında elde etmiştir. 140 mm/d gibi yüksek ilerleme hızlarında levhalarda yeterli birleşmenin sağlanmadığını tespit etmiştir. Meran yaptığı bu çalışmada ilerleme hızının artmasıyla mukavemetin arttığını ifade etmiştir[41]. Bu çalışmada da kaynak bölgesine ısı girişinin azalmasıyla mukavemetin arttığı ve sonuçların literatürle uyumlu olduğu görülmüştür. Çekme testlerinde kopma; bakır-bakır ve pirinç-pirinç kaynak gruplarında kaynak dikişinin orta noktasında gerçekleşmiştir.

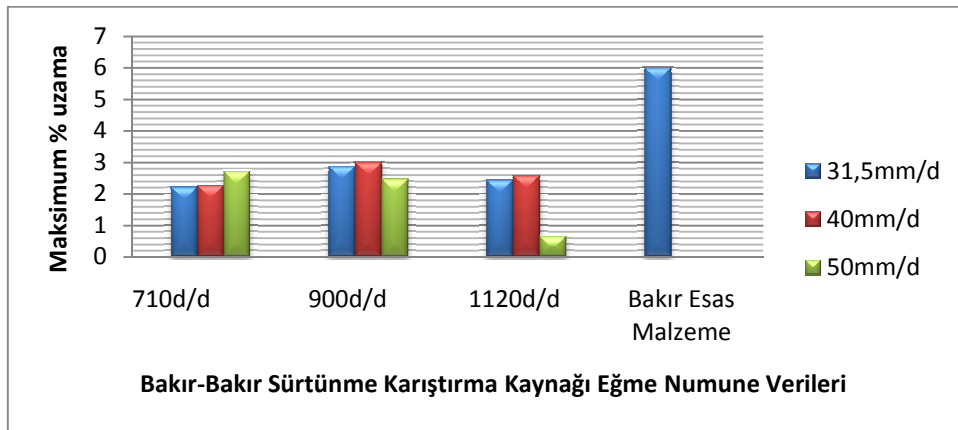


Çizelge 6.4. Pirinç-Pirinç SKK numuneleri çekme deneyi % uzama verileri

6.2.3. Bakır-Bakır Eğme Deney Sonuçları



Çizelge 6.5. Cu-Cu SKK maksimum eğme gerilmesi



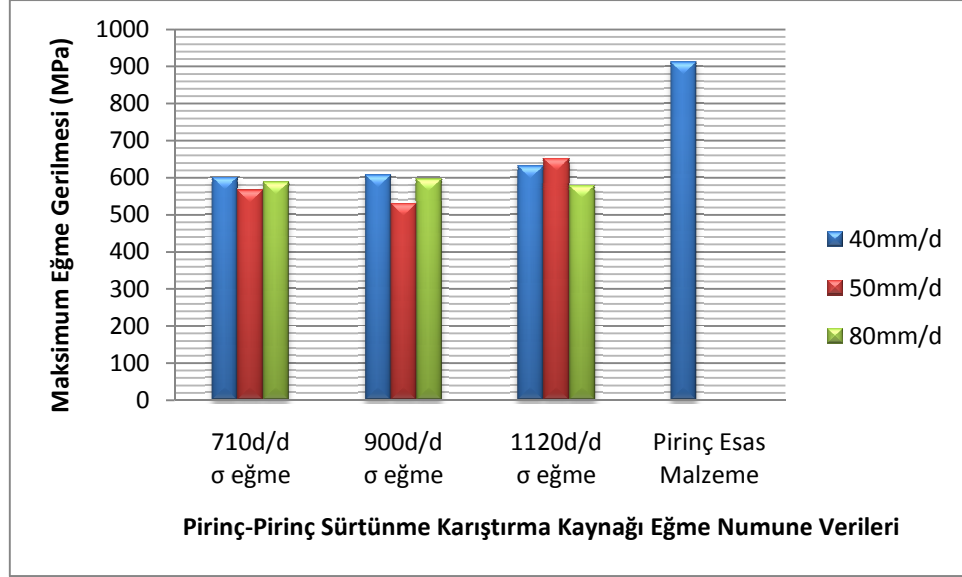
Çizelge 6.6. Cu-Cu SKK eğme numune verileri

900d/d’ da ki çalışma şartlarında daha sünek bir yapı elde edildiğinden ve malzemedeki % uzama oranının diğer çalışma şartlarına göre arttığı görülmektedir. Fakat bütün çalışma şartlarında % uzama esas malzeme değerinin altındadır.

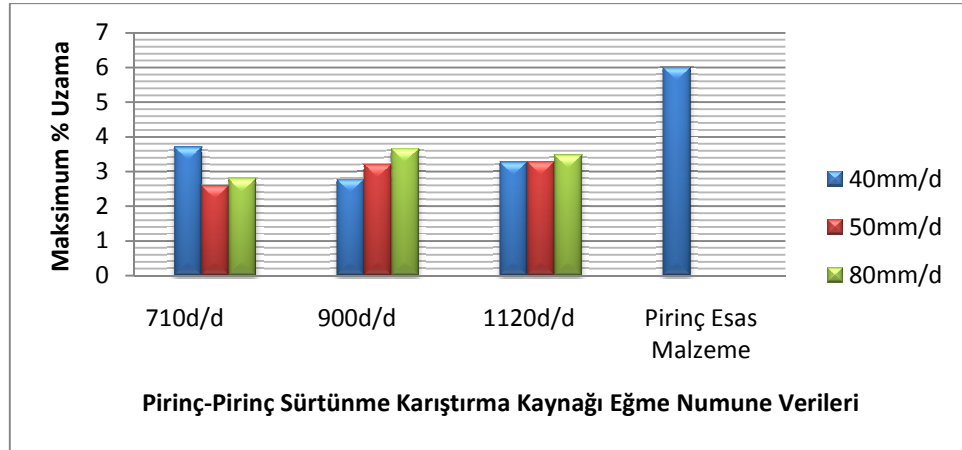
Eğme test verilerinden elde edilen sonuçlar sırasıyla bakır-bakır grupları için çizelge 6.5.’den 710d/d-50mm/d, 710d/d-40mm/d ve 710d/d-31,5mm/d grupları maksimum gerilme değerlerindedir. Bakır-bakır grubu için düşük devir yüksek ilerleme hızı eğme deneylerinde en iyi sonucu vermiştir. Bu çalışma aralığında yeniden kristalleşmenin görülmemesi ve kaynak bölgesinde ince taneli oluşumla düşük porozite

mukavemeti artırmıştır. Yüksek olan bu gruba ait olan verilerde deney numuneleri maksimum noktayı aştıktan sonra kırılmışlardır.

6.2.4. Pirinç-Pirinç Eğme Deney Sonuçları



Çizelge 6.7.Pirinç-Pirinç SKK maksimum eğme gerilmesi



Çizelge 6.8. Pirinç-Pirinç SKK eğme numune verileri

710d/d-40mm/d, 900d/d-80mm/d ve 1120d/d-80mm/d' daki çalışma şartlarında daha sünek bir yapı elde edildiğinden ve malzemedeki % uzama oranının diğer çalışma şartlarına göre arttığı görülmektedir. Fakat bütün çalışma şartlarında % uzama esas malzeme değerinin altındadır.

Pirinç-pirinç gruplarında 1120d/d-50mm/d, 1120d/d-40mm/d ve 900d/d-40mm/d grupları maksimum mukavemet değerlerindedir. Pirinç-pirinç grupları yüksek devir ve düşük ilerleme hızıyla eğme deneylerinde en iyi sonucu vermiştir. Eğmeye maruz kalan kaynak grubunun yavaş soğuması yeniden kristalleşmeyle beraber tane boyutlarını büyütmüş akma sınırını yukarıya taşımıştır.

Yapılan literatür çalışmasında bakır ve pirincin kendileri yaptıkları kaynaklarda kaynak takımı malzeme kalınlığı gibi faktörler göz ardı edilirse yüksek devir ve düşük ilerleme hızlarında yeniden kristalleşme sonucu mukavemet özelliklerinde düşme görülmektedir [39]. Birbirleriyle yaptıkları kaynaklarda tersi durum gözlenmekte ısı artışı ve soğuma ne kadar yavaş olursa o derece daha mukavim bir yapı elde edilmektedir.

6.2.5. Mikrosertlik Deney Sonuçları

Cu-Cu levhalar için;

Farklı parametrelerde Cu-Cu levhaların kaynak bölgesine ait mikrosertlik grafiklerinde (şekil 5.29)en yüksek sertlik değerlerine 710d/d-50mm/d 710d/d 31,5mm/d ve 900d/d-40mm/d şartlarında kaynak yapılan levhalarda ulaşılmıştır. Genel olarak tüm kaynak şartlarında ana metalden karıştırma bölgesine doğru ilerledikçe sertlikte artış görülmektedir.

Cu-Cu levhaların SKK' da karıştırma bölgesi ana metalle karşılaştırıldığında ince bir mikro yapıya sahiptir. Bu alanda yapılmış bazı çalışmalarda karıştırma bölgesindeki bu ince yapıya rağmen bu bölgenin sertlik değeri ana metalin sertlik değerinden genellikle düşük olduğu ifade edilmiştir[39,40].Sertlikteki bu düşüşü ana metale göre karıştırma bölgesinde dislokasyon yoğunluğunun göreceli olarak azalmasına bağlamışlardır.

Bu alanda yapılmış bazı çalışmalarda da karıştırma bölgesinin mikrosertliği ana metale göre yüksek çıkmıştır. Örneğin Xie ve arkadaşları ticari saflıktaki 5 mm kalınlığında bakır levhaya 50 mm/d sabit ilerleme hızı ve 400,600 ve 800 d/d değişken takım dönme hızında SKK yapmışlar ve dönme hızı 800 den 400 d/d ya azaldığında karıştırma bölgesinin sertliğinin sürekli arttığını belirlemişlerdir. Aynı çalışmada 400 d/d' da ki düşük dönme hızında tanelerin 800d/d oranla daha ince olduğunu ve bu ince

tanelerin mukavemete etkisinin yumuşatma tavlamaının etkisinden daha fazla olduğunu tespit etmişlerdir. Ana metalin mikrosertliği 82 HV iken 400 d/d' da birleştirilen levhaların karıştırma bölgesinin mikrosertliği 97,5-102 HV arasında olduğunu bulmuşlardır[44]. Bu sonuç karıştırma bölgesinde yeniden kristalleşen ince tanelerin bu bölgenin mikro sertliğini arttığını göstermiştir.

Cu-Cu sürtünme karıştırma ile 1200d/d ile 400 d/d devir ve 200mm/d ile 800 mm/d ilerleme hızında yapılan çalışmada düşük devir ve yüksek ilerleme hızı (400d/d-800mm/d) çalışma şartlarında esas metal sertliği HV110'dan HV 125 değerine ulaşmıştır[40].

Pirinç-pirinç levhalar için;

Pirinç-pirinç grubu 710d/d-50mm/d, 710d/d-80mm/d ve 900d/d-50mm/d kaynak bölgesi merkez noktasında en yüksek sertlik değerlerine ulaşmışlardır. Düşük devir ve orta hızda ilerleme hızı pirinç-pirinç sürtünme karıştırma kaynak grubunda mikrosertliği artırmıştır.

Pirinç-pirinç sürtünme karıştırma ile 1000d/d' da sırasıyla 500,1000 ve 2000mm/d ilerleme hızında yapılan sürtünme karıştırma kaynağında esas metal sertliği HV97 iken en yüksek sertlik değeri en yüksek ilerleme hızı olan 2000 mm/d' de HV160 değerine ulaşmıştır[37].

2050d/d-112 mm/d çalışma şartlarında esas metal sertliğinin üzerinde HV158 sertlik değerine ulaşmıştır[41].

6.2.6. Yüzey Pürüzlülük Deney Sonuçları

Yüzey pürüzlülük ölçümleri sonucunda bakır-bakır ve pirinç-pirinç kaynak gruplarında devir sayısı ve ilerleme hızının pürüzlülük değeriyle ters orantılı olduğu görülmektedir.

6.3.Öneriler

Sürtünme karıştırma kaynak işleminde aşağıda belirtilen hususlara dikkat edilirse daha etkin bir çalışma yapmak mümkün olacaktır.

1.Levha sabitleme aparatlarının titreşimi absorbe eden ve demontajı kolay bir şekilde dizayn edilip uygulanabilir.

2. Kaynak edilebilirliğe daha düşük devirlerde de bakılabilir. Ayrıca düşük devir sayısının mekanik özelliklere etkisi araştırılabilir.

3.Alın kaynağı haricinde köşe kaynaklarında da uygulanabilirliği araştırılabilir.

4.Üniversal freze yerine CNC dik işlem merkezi ve ya CNC tornalarda bu kaynak yöntemi ilerleyen zamanlarda kullanılabilir.

7. KAYNAKLAR

- [1] ÇAM, G. ve KOÇAK, M.. “*Progress in Joining of Advanced Materials*”, **Int. Mater. Rev.**, Vol. 43, No. 1, pp. 1-44, 1998.
- [2] M. Baki Karamis, İmalat Yöntemleri, Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 194, 1999.
- [3] Kurt. A., “*Katı Hal Kaynak Teknikleri*”, Gazi Üniv. Fen Bil. Enst., Yüksek Lisans Ders Notları, Ankara, 1-10, 1990.
- [4] Ali Yousefpour and Mehdi Hojjati, “*Welding of Thermoplastic Composites: An Overview*”, National Res. Council Canada Inst. For Aerospace Res. Aerospace Manufacturing Technology Center, August 2002.
- [5] Anık, S., Anık, E., Vural, M., “1000 Soruda Kaynak Teknolojisi El Kitabı”, Cilt 1, Birsan Yayınevi, İstanbul, 223-225, 1993.
- [6] Tülbentçi, K., Yılmaz, M., “Farklı Takım Çeliklerinin Katı Hal Kaynağı” Ulusal Kaynak Sempozyumu Bildiri Kitabı, İstanbul, 303-314, 1989.
- [7] Yılmaz, M., “*Farklı Takım Çeliklerinin Sürtünme Kaynağında Kaynak Bölgesinin İncelenmesi*”, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 20-25, 1993.
- [8] Sulazec, A., “*Thermal Effects in Friction Welding*”, **Int. J. Mech. Sci.**, 32(3), 467-478 1990.
- [9] Chao, Y.J., Qi, X. and Tang, W., “Heat transfer in friction stir welding experimental and numerical studies”, Transactions of ASME, 125, 2003
- [10] Mishra, R.S. and Ma, Z.Y., “*Friction stir welding and processing*”, **Materials Science and Engineering R**, 50, 2005
- [11] THOMAS, Proc. of the 1st Int. Symp. on Friction Stir Welding, 14-16 June. Thousand Oaks, CA, USA. 1999
- [12] ÇAM, G. “Sürtünme Karıştırma Kaynağındaki Gelişmeler”, Kaynak Teknolojisi IV. Ulusal Kongresi Bildiriler Kitabı, 24-25 Ekim, 47-64, Kocaeli. 2003
- [13] ÇAM, G. 2005a. “*Sürtünme Karıştırma Kaynağı (SKK): Al-Alaşımları için Geliştirilmiş Yeni Bir Kaynak Teknolojisi*”, **Mühendis ve Makine**, Cilt 46, Sayı 541, S. 30-39, Subat 2005.
- [14] NICHOLAS, E. D., TWI Bulletin 6, Nov./Dec. 1991, Vol. 32, pp. 124-127, 1991.

- [15] NORTH, T.H., ve ark.. Proc. of the 5th Int. Conf. on Trends in Welding Research, Callaway Gardens Resort, Pine Mountain, eds.: J. M. Vitek et al., ASM, Metals park, pp. 533-540, 1-5 June, Georgia, USA, 1998.
- [16] MIDLING, O.T. ve GRONG, O.. Acta Metall Material, Vol. 42, 1595-1609,1994.
- [17] PAN, C., HU J., LI, Z., NORTH ,T.H.. Journal of Material Science, Vol. 31, 3667-3674, 1996.
- [18] KANG ve ark.. Metal. Trans., Vol. 27A, No. 12, 4019-4029,1996.
- [19] THOMAS ve ark.. “Friction Stir Welding – Tool Developments”, Aluminium Joining Symposium, TMS Annual Meeting, 11-15 February, New Orleans,Lousiana, USA, 2001
- [20] NAGASAWA, T. ve OTSUKA, M.. “Structure and Mechanical Properties of Friction Stir Weld Joints of Magnesium Alloy AZ31”, 1999
<http://www.mc.mat.shibaura-it.ac.jp/master/abstract/298110.html>
- [21] THOMAS, NICHOLAS, E. D.. “Emerging Friction Joining Technology for Stainless Steel and Aluminium”, IIW. Asian Pasific Welding Congress, Auckland, New Zealand, February, 1996
- [22] MERT, S. ve KALUÇ, E.. “Sürtünme Karıştırma Kaynagında Kullanılan Takımlardaki Gelişmeler”, Kaynak Teknolojisi IV. Ulusal Kongresi Bildiriler Kitabı, 24-25 Ekim, s. 103-115, Kocaeli, 2003
- [24] THOMAS, DOLBY R.E.. 6 th International Conference on Trends in Welding Research, 15 - 19 April 2002, Callaway Gardens Resort, Pine Mountain, Georgia, USA, 2002
- [25] KALLEE ve ark.. Friction Stir Welding, Invention, Innovations and Applications”, 8th International Conference on Joints in Aluminium, 16 S., Munich, Germany, 28-30 March 2001.
- [26] DONG, P. ve ark. Proc. of the 1st Int. Symp. on Friction Stir Welding, 14-16 June. Thousand Oaks, CA, USA, 1999.
- [27] YANG, H.S., “*Aluminum Alloys*”, **Proclaim of ICAA-6** ,Vol. 3, pp. 1483-1488, 1998.
- [28] LOFTUS, Z. ve ark. Proc. of the 1st Int. Symp. on Friction Stir Welding, Thousand Oaks, CA, USA, 14-16 June 1999.
- [29] DING, R.J. ve OELGOETZ, A.. Proc. of the 1st Int. Symp. on Friction Stir Welding, 14-16 June , Thousand Oaks, CA, USA, 1999.
- [30] ÇAM, G.. “Al-Alasımları için Gelistirilen Yeni Kaynak Yöntemleri”, TMMOB

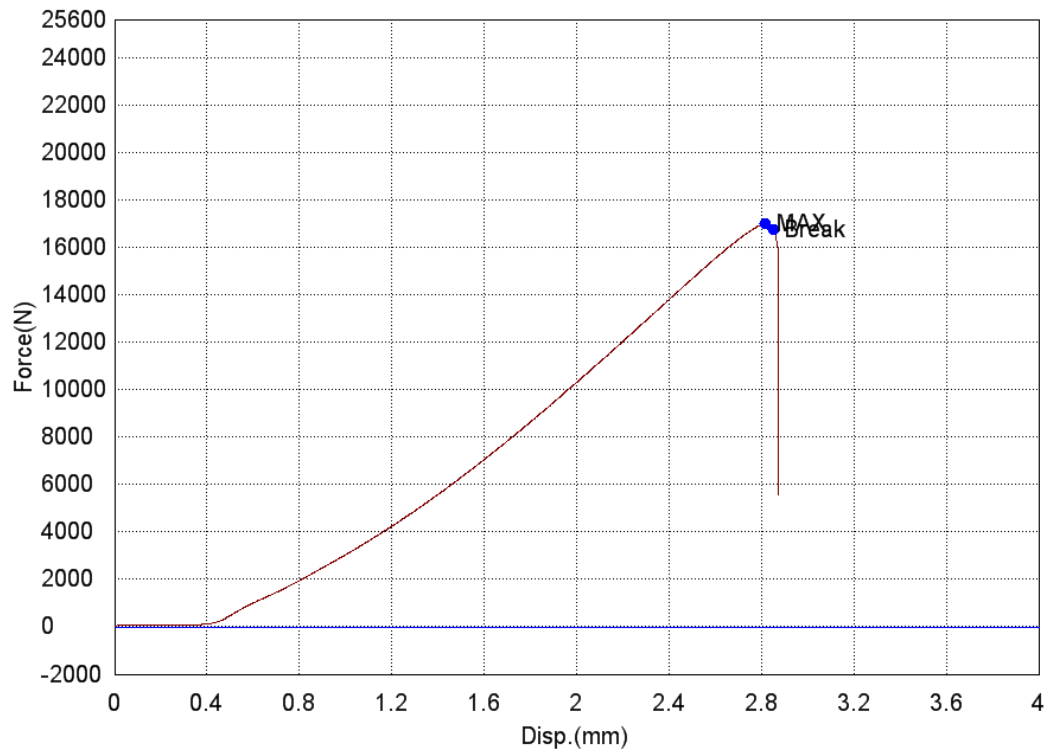
- Makina Mühendisleri Odası “Kaynak Teknolojisi III. Ulusal Kongresi, 19-21 Ekim, S. 267-277, İstanbul, 2001.
- [31] VERNON, J.. “Introduction to Engineering Materials”, pp. 203-205, Macmillan Pres Ltd., Hong Kong, , 1993.
- [32] SERİNDAĞ, T.H.. “*Pirinç Levhaların Sürtünme Karıştırma Kaynağı Yöntemiyle Alın Kaynağı ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi*”, Yüksek Lisans Tezi, Mustafa Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Antakya, 2006.
- [33] MERAN, C.. “*Pirinç Malzemelerin Kaynak Edilebilirliği ve Uygun Kaynak Parametrelerinin Tespiti*”, Doktora Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli, 2001.
- [34] JACOBI, M.. “Problems in Brass Metal Welding of Thin Sheets”, 7. Malzeme Sempozyumu Bildiriler Kitabı, pp. 577-580, Denizli, 1997.
- [35] WEB_2 www.2.hitachi-cable.co.jp/appshnews. Mass-Producing Copper Backing Plates Using Friction Stir Welding.htm ,2001
- [36] Ohba, H., Ueda, C., and Agatsuma, K. Innovative Vehicle — the “A-train”, Hitachi Review,, 50(4): 130-133, 2001
- [37] Park, H.S., Kimura, T., Murakami, T., Naganod, Y., and Nakata K. *Microstructures And Mechanical Properties Of Friction Stir Welds Of 60% Cu–40% Zn Copper Alloy*. **Materials Science and Engineering**, 371: 160-169, 2003
- [38] Park Seung Hwan, C., Yutaka, S., Kokawa, H., Okamoto, K., Hirano and S., Inagaki, M. *Corrosion Resistance Of Friction Stir Welded 304 Stainless Steel*. **Scripta Materialia**, 51: 101–105, 2004
- [39] Won-Bae Lee, Seung-Boo Jung. “*The joint properties of copper by friction stir welding*” **Materials Letters**, 58: 1041-1046, 2004
- [40] Sun, Y.F., Fujii, H. “*Investigation of the welding parameters dependent microstructure and mechanical properties of friction stir welded pure copper*.” **Materials Science and Engineering**, 527: 6879-6886, 2010
- [41] Meran, C., “*The joint properties of brass plates by friction stir welding*.” **Materials & Design**, 27: 719-726, 2006
- [42] Shen, J.J., Liu, H.J., Cui, F., “*Effect of welding speed microstructure and mechanical properties of friction stir welded copper*.” **Materials & Design**, 31: 3937-3942, 2010
- [43] Xue, P., Xiao, L.B., Zhang, Q., Ma, Z.Y., “*Achieving friction stir welded pure copper with nearly equal strength to the parent metal via additional rapid cooling*.” **Scripta Materialia**, 64: 1051-1054, 2011

[44]Xie.G.M.,Maa.Z.Y.,Gengb.L.,*Development of a fine-grained microstructure and the properties of a nugget zone in friction stir welded pure copper* **Scripta Materilia**. 57: 73–76,2007

EKLER

Numune sayısı Cu-Cu 710/31,5	Kopma kuvveti (N)	Kopma gerilmesi (N/mm ²)	Mak. Çekme kuvveti (N)	Mak. Çekme gerilmesi (N/mm ²)	% Uzama
1	16124.8	268.747	16207.2	270.119	2.10068
2	16721.8	278.696	16982.6	283.044	2.37877
3	17676.3	294.604	18000.1	300.002	2.42181

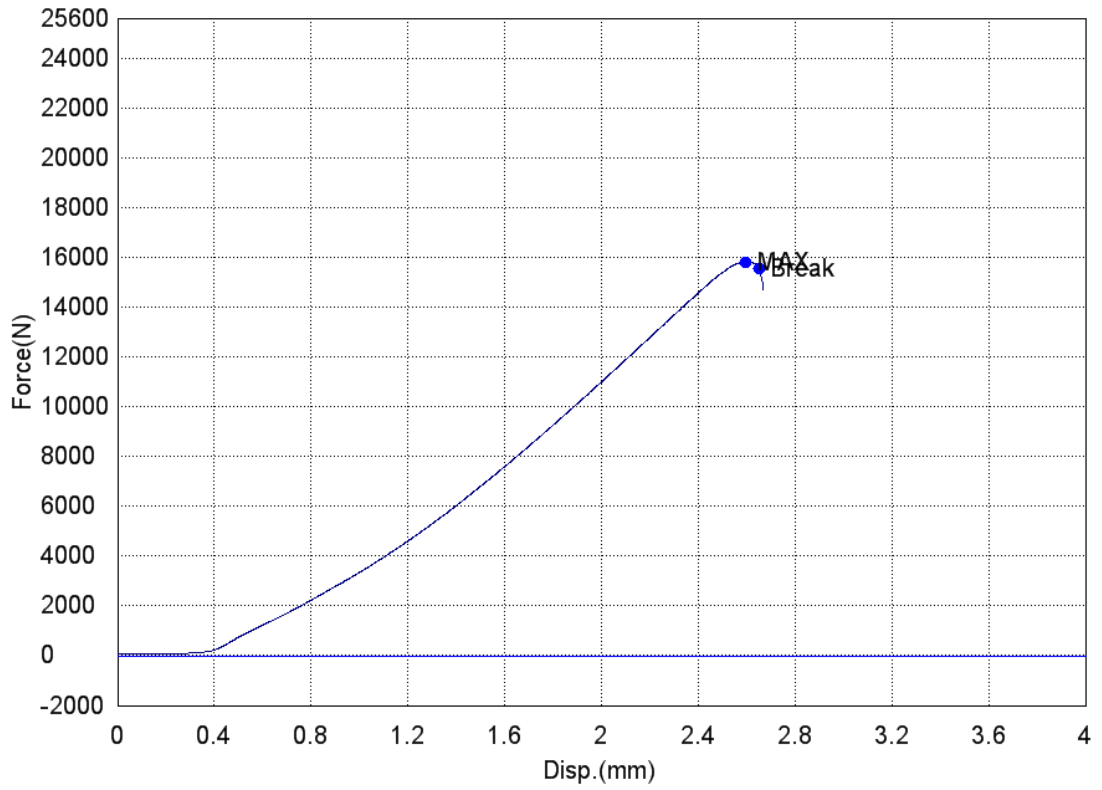
Ortalama Kopma Kuvveti (N)	Ortalama Kopma Gerilmesi (N/mm ²)	Ortalama Çekme Kuvveti (N)	Ortalama Çekme Gerilmesi (N/mm ²)
16841	280.682	17063	284.388



EK-1. Cu-Cu 710d/d-31,5mm/d kaynak grubuna ait çekme numune verileri ve grafiği

Numune sayısı Cu-Cu 710/40	Kopma kuvveti (N)	Kopma gerilmesi (N/mm ²)	Mak. Çekme kuvveti (N)	Mak. Çekme gerilmesi (N/mm ²)	% Uzama
1	14413.8	240.230	14843.9	247.398	1.96210
2	15539.6	258.994	15814.5	263.575	2.20934
3	16567.7	276.129	16897.5	281.626	2.36212

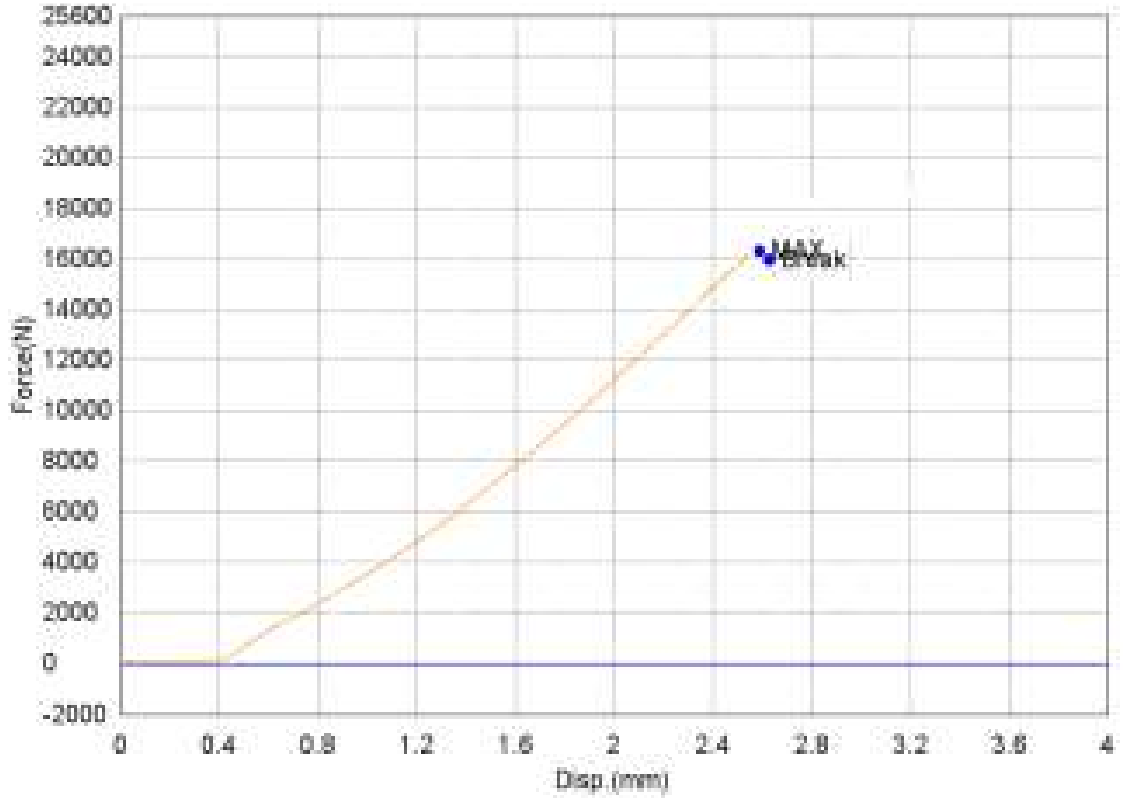
Ortalama Kopma Kuvveti (N)	Ortalama Kopma Gerilmesi (N/mm ²)	Ortalama Çekme Kuvveti (N)	Ortalama Çekme Gerilmesi (N/mm ²)
15507.03	258.451	15851.96	264.199



EK-2. Cu-Cu 710d/d-40mm/d kaynak grubuna ait çekme numune verileri ve grafiği

Numune sayısı Cu-Cu 710/50	Kopma kuvveti (N)	Kopma gerilmesi (N/mm ²)	Mak. Çekme kuvveti (N)	Mak. Çekme gerilmesi (N/mm ²)	% Uzama
1	18322.5	305.375	18825.9	313.764	2.37879
2	12403.7	206.729	12403.7	206.729	1.70418
3	17889.7	298.161	18215.2	303.587	2.38974

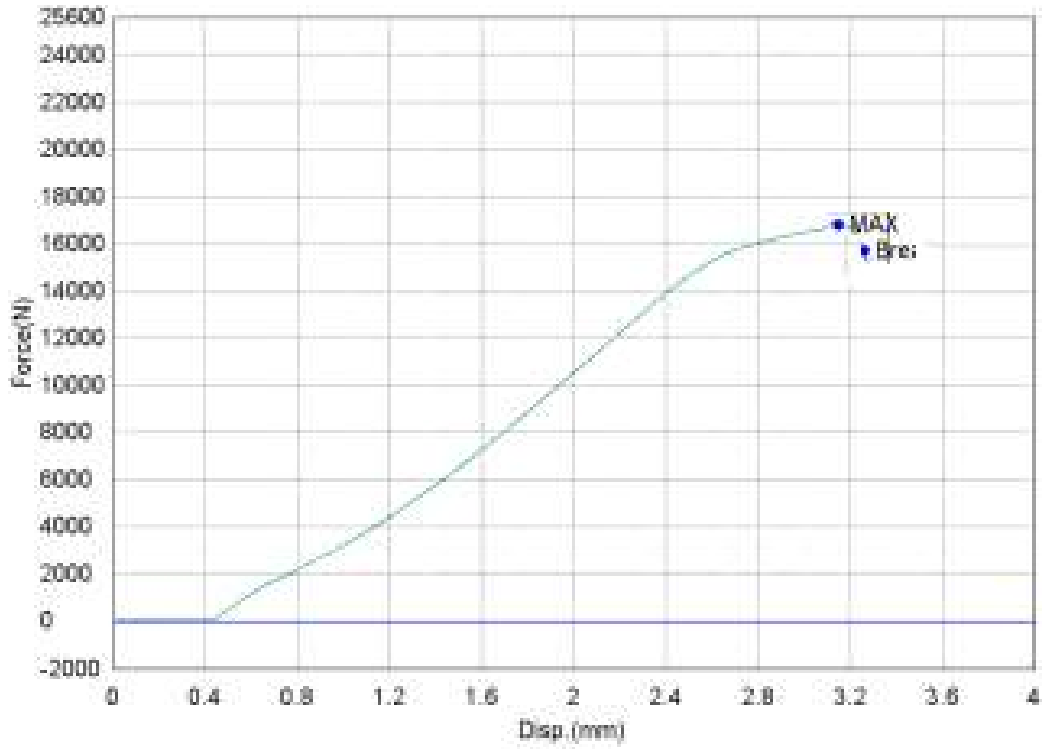
Ortalama Kopma Kuvveti (N)	Ortalama Kopma Gerilmesi (N/mm ²)	Ortalama Çekme Kuvveti (N)	Ortalama Çekme Gerilmesi (N/mm ²)
16205.3	270.088	16481.6	274.693



EK-3. Cu-Cu 710d/d-40mm/d kaynak grubuna ait çekme numune verileri ve grafiği

Numune sayısı Cu-Cu 900/31,5	Kopma kuvveti (N)	Kopma gerilmesi (N/mm ²)	Mak. Çekme kuvveti (N)	Mak. Çekme gerilmesi (N/mm ²)	% Uzama
1	16796.8	279.946	17803.5	296.725	2.74116
2	16412.3	273.539	17500.5	291.675	3.24401
3	16265.9	271.098	17287.6	288.126	3.05649

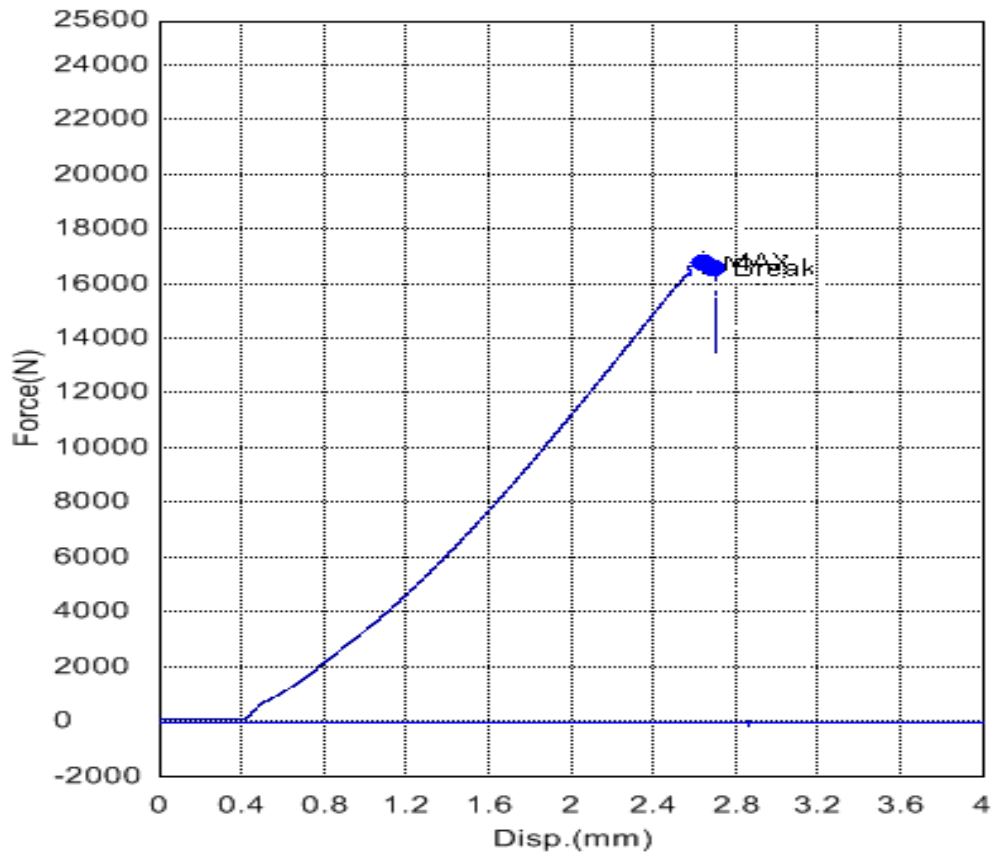
Ortalama Kopma Kuvveti (N)	Ortalama Kopma Gerilmesi (N/mm ²)	Ortalama Çekme Kuvveti (N)	Ortalama Çekme Gerilmesi (N/mm ²)
164916.6	274.861	17530.5	292.175



EK-4. Cu-Cu 900d/d-31,5mm/d kaynak grubuna ait çekme numune verileri ve grafiği

Numune sayısı Cu-Cu 900/40	Kopma kuvveti (N)	Kopma gerilmesi (N/mm ²)	Mak. Çekme kuvveti (N)	Mak. Çekme gerilmesi (N/mm ²)	% Uzama
1	15781.5	263.024	17073.6	284.560	2.30370
2	16367.3	272.787	17452.8	290.880	2.31622
3	17360.9	289.349	17529.1	292.151	2.33151

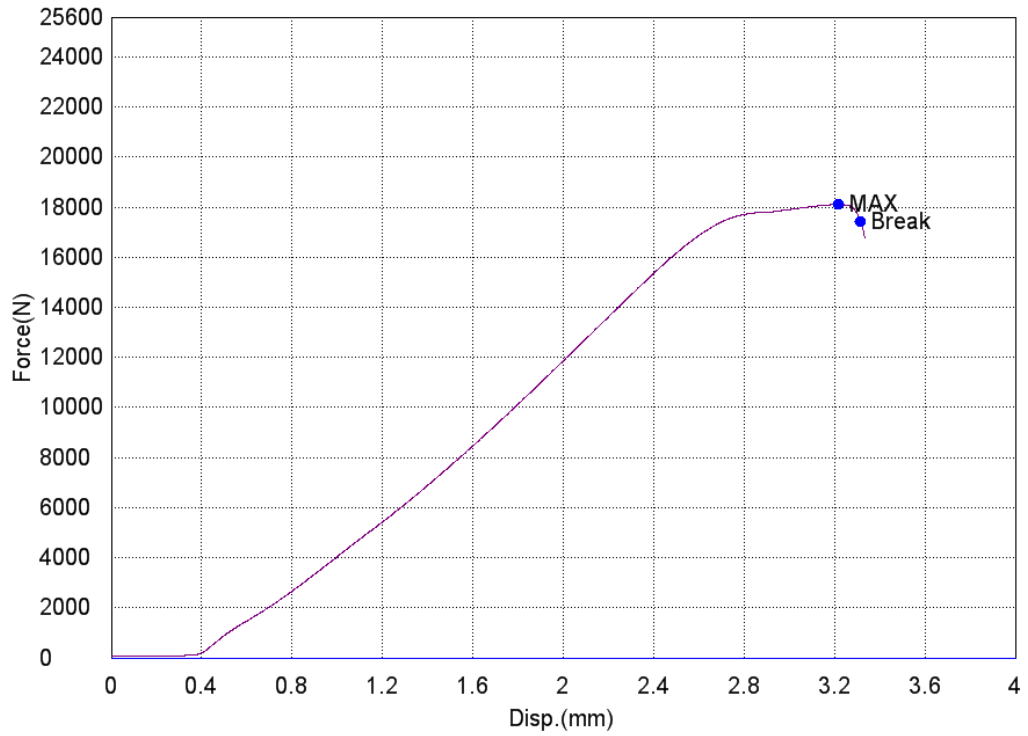
Ortalama Kopma Kuvveti (N)	Ortalama Kopma Gerilmesi (N/mm ²)	Ortalama Çekme Kuvveti (N)	Ortalama Çekme Gerilmesi (N/mm ²)
165032.3	275.053	173518.3	289.197



EK-5. Cu-Cu 900d/d-40mm/d kaynak grubuna ait çekme numune verileri ve grafiği

Numune sayısı Cu-Cu 900/50	Kopma kuvveti (N)	Kopma gerilmesi (N/mm ²)	Mak. Çekme kuvveti (N)	Mak. Çekme gerilmesi (N/mm ²)	% Uzama
1	16508.4	275.140	18102.1	301.702	2.47182
2	18177.3	302.955	18729.6	312.159	2.45783
3	17441.7	290.696	18111.3	301.856	2.68292

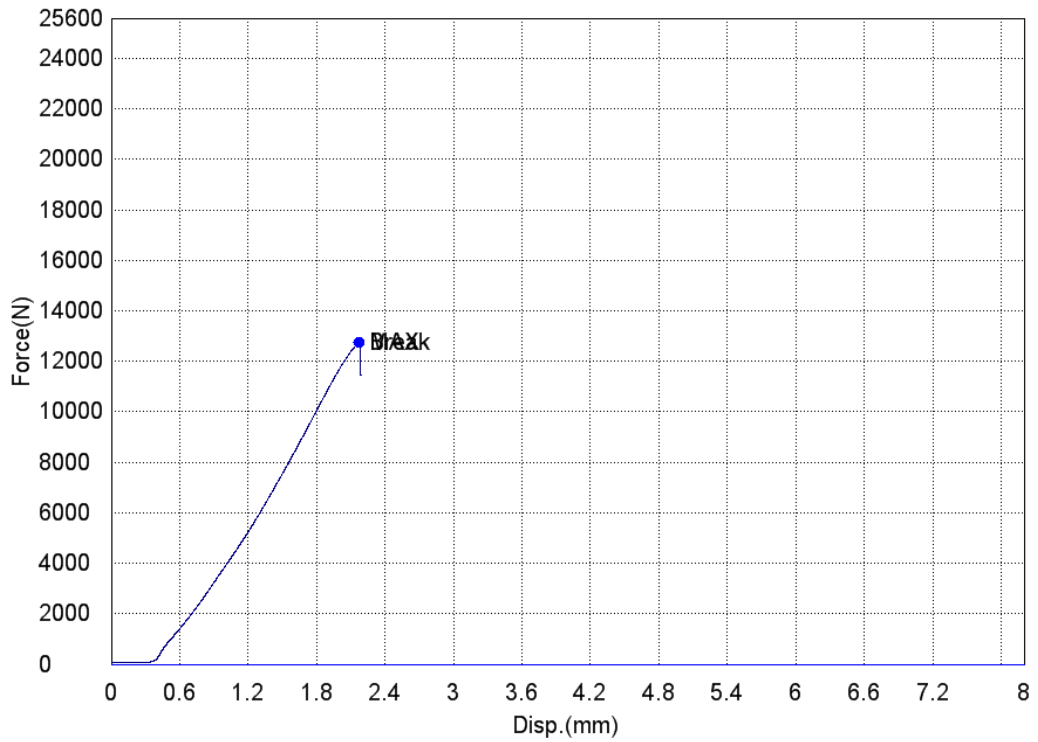
Ortalama Kopma Kuvveti (N)	Ortalama Kopma Gerilmesi (N/mm ²)	Ortalama Çekme Kuvveti (N)	Ortalama Çekme Gerilmesi (N/mm ²)
17375.8	275.053	18314.3	305.239



EK-6. Cu-Cu 900d/d-50mm/d kaynak grubuna ait çekme numune verileri ve grafiği

Numune sayısı Cu-Cu 1120/31,5	Kopma kuvveti (N)	Kopma gerilmesi (N/mm ²)	Mak. Çekme kuvveti (N)	Mak. Çekme gerilmesi (N/mm ²)	% Uzama
1	14352.0	239.200	15956.5	265.942	2.47182
2	12740.0	212.334	12741.6	212.359	2.45783
3	10094.1	168.235	10725.2	178.753	2.68292

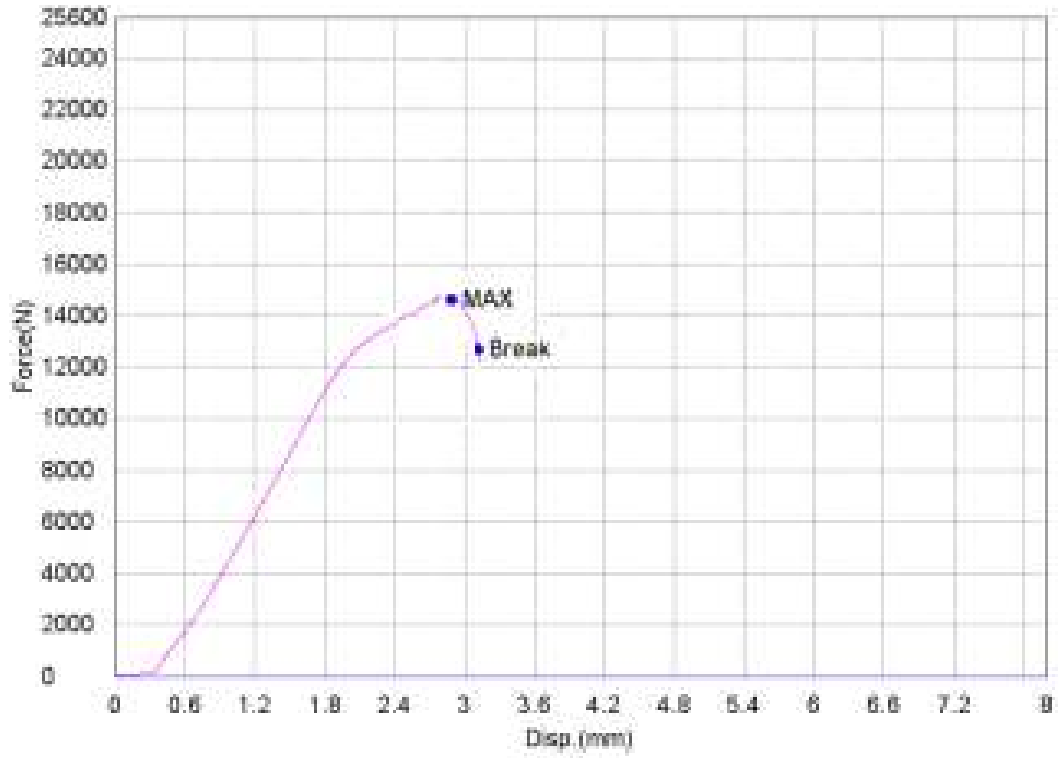
Ortalama Kopma Kuvveti (N)	Ortalama Kopma Gerilmesi (N/mm ²)	Ortalama Çekme Kuvveti (N)	Ortalama Çekme Gerilmesi (N/mm ²)
12395.3	206.589	13141.1	219.018



EK-7. Cu-Cu 1120d/d-31,5mm/d kaynak grubuna ait çekme numune verileri ve grafiği

Numune sayısı Cu-Cu 1120/40	Kopma kuvveti (N)	Kopma gerilmesi (N/mm ²)	Mak. Çekme kuvveti (N)	Mak. Çekme gerilmesi (N/mm ²)	% Uzama
1	10662.7	177.712	13859.4	230.990	2.09675
2	13553.8	225.897	13764.0	229.400	2.39109
3	14103.8	235.064	16644.0	277.400	5.25233

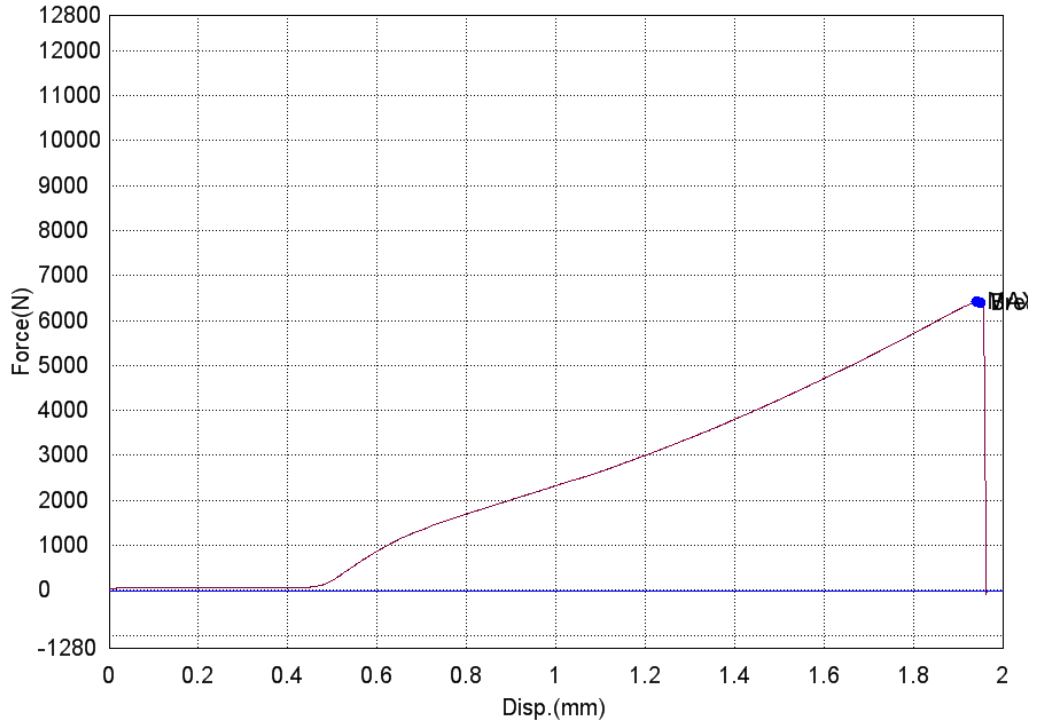
Ortalama Kopma Kuvveti (N)	Ortalama Kopma Gerilmesi (N/mm ²)	Ortalama Çekme Kuvveti (N)	Ortalama Çekme Gerilmesi (N/mm ²)
12773.4	212.891	14755.8	245.930



EK-8. Cu-Cu 1120d/d-40mm/d kaynak grubuna ait çekme numune verileri ve grafiği

Numune sayısı Cu-Cu 1120/50	Kopma kuvveti (N)	Kopma gerilmesi (N/mm ²)	Mak. Çekme kuvveti (N)	Mak. Çekme gerilmesi (N/mm ²)	% Uzama
1	6259.94	97.6656	6333.19	98.8865	1.51345
2	7843.51	130.725	8102.27	135.038	2.07726
3	6397.18	106.620	6411.17	106.853	1.61905

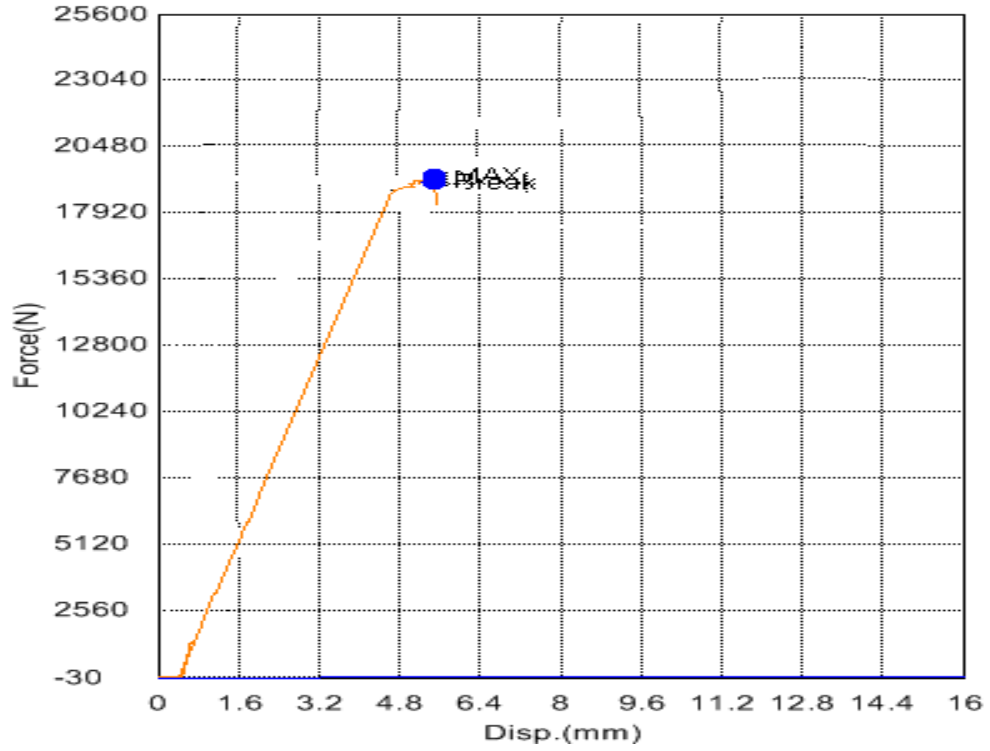
Ortalama Kopma Kuvveti (N)	Ortalama Kopma Gerilmesi (N/mm ²)	Ortalama Çekme Kuvveti (N)	Ortalama Çekme Gerilmesi (N/mm ²)
6833.54	111.670	6948.87	113.592



EK-9. Cu-Cu 1120d/d-50mm/d kaynak grubuna ait çekme numune verileri ve grafiği

Numune sayısı Pirinç- Pirinç 710/40	Kopma kuvveti (N)	Kopma gerilmesi (N/mm ²)	Mak. Çekme kuvveti (N)	Mak. Çekme gerilmesi (N/mm ²)	% Uzama
1	16792.0	279.867	17148.4	285.806	2.29960
2	14108.4	235.141	14460.2	241.003	1.92174
3	23116.9	385.281	23372.3	389.538	7.78851

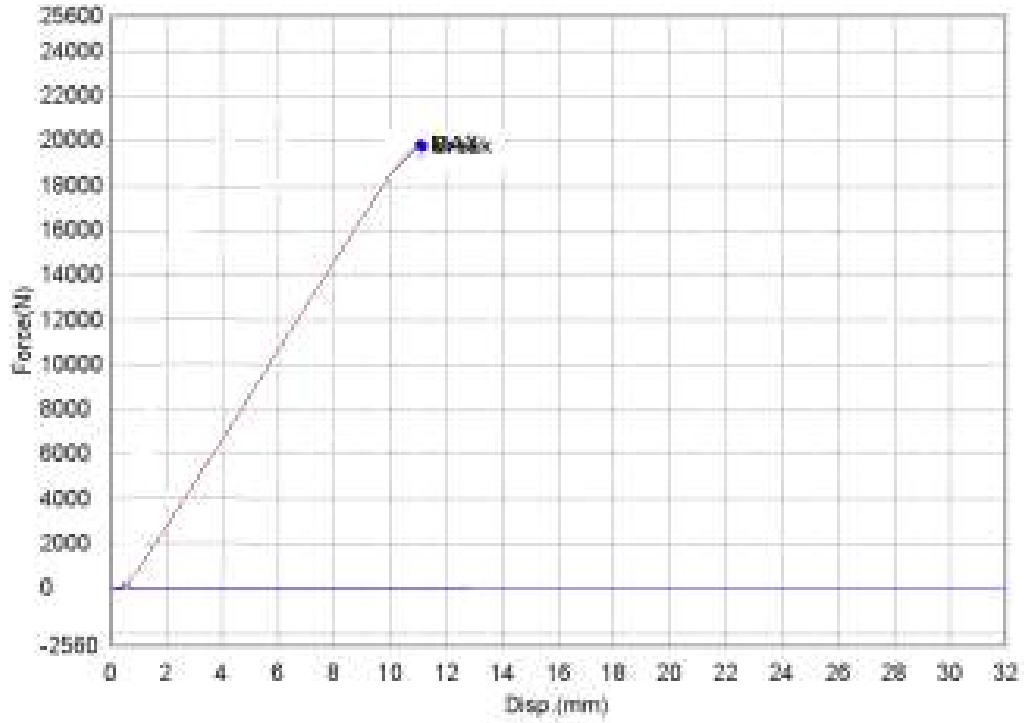
Ortalama Kopma Kuvveti (N)	Ortalama Kopma Gerilmesi (N/mm ²)	Ortalama Çekme Kuvveti (N)	Ortalama Çekme Gerilmesi (N/mm ²)
18005.7	300.096	18326.96	305.449



EK-10. Pirinç-Pirinç 710d/d-40mm/d kaynak grubuna ait çekme numune verileri ve grafiği

Numune sayısı Pirinç- Pirinç 710/50	Kopma kuvveti (N)	Kopma gerilmesi (N/mm ²)	Mak. Çekme kuvveti (N)	Mak. Çekme gerilmesi (N/mm ²)	% Uzama
1	21854.0	364.233	22028.8	367.146	6.13839
2	25190.3	419.839	25558.5	425.975	17.3010
3	19233.9	320.566	19256.9	320.947	3.43005

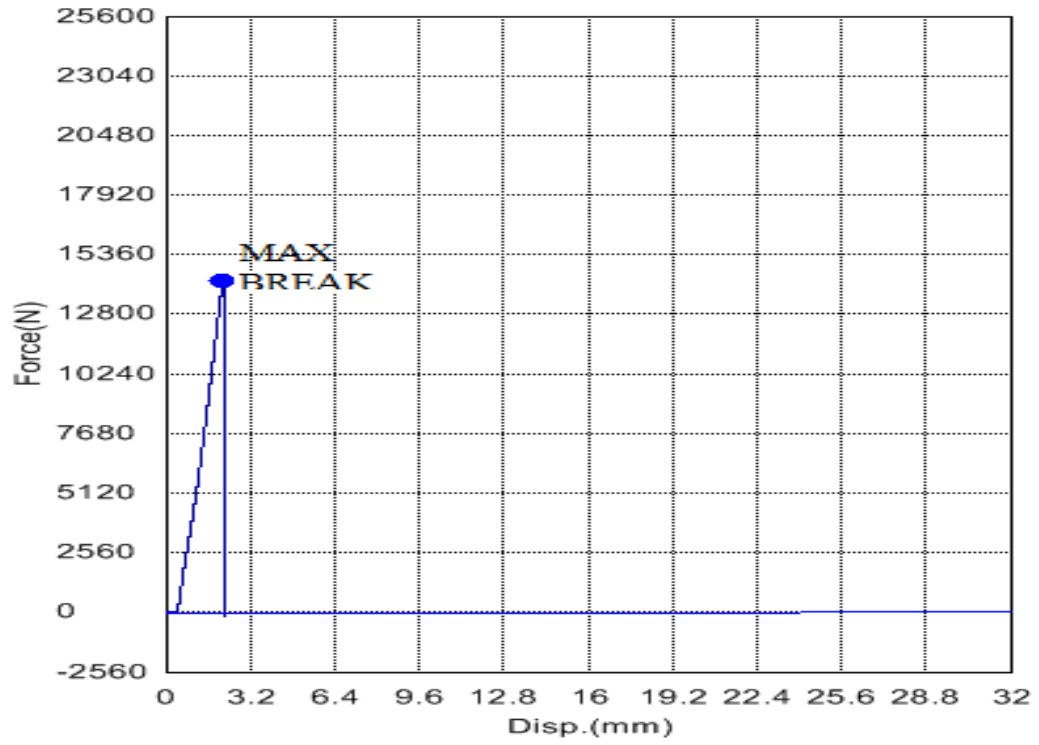
Ortalama Kopma Kuvveti (N)	Ortalama Kopma Gerilmesi (N/mm ²)	Ortalama Çekme Kuvveti (N)	Ortalama Çekme Gerilmesi (N/mm ²)
22092.7	368.212	22281.4	371.356



EK-11. Pirinç-Pirinç 710d/d-50mm/d kaynak grubuna ait çekme numune verileri ve grafiği

Numune sayısı Pirinç- Pirinç 710/80	Kopma kuvveti (N)	Kopma gerilmesi (N/mm ²)	Mak. Çekme kuvveti (N)	Mak. Çekme gerilmesi (N/mm ²)	% Uzama
1	16656.9	277.614	16656.9	277.614	2.06005
2	12680.9	211.348	12680.9	211.348	1.82597
3	14237.6	237.294	14237.6	237.294	1.82076

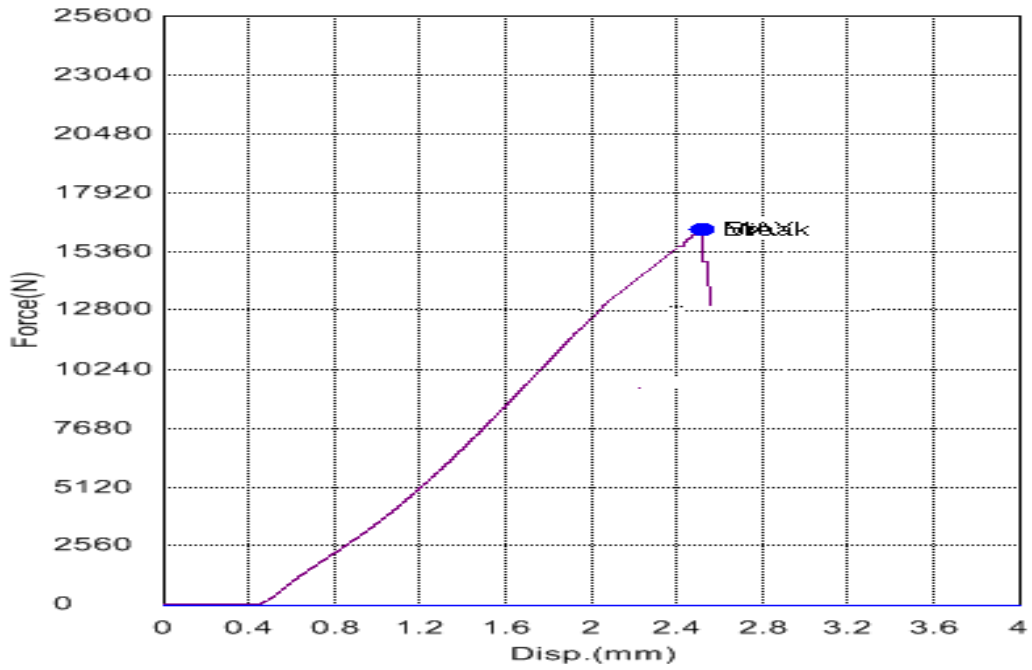
Ortalama Kopma Kuvveti (N)	Ortalama Kopma Gerilmesi (N/mm ²)	Ortalama Çekme Kuvveti (N)	Ortalama Çekme Gerilmesi (N/mm ²)
14525.14	242.294	14525.14	242.294



EK-12. Pirinç-Pirinç 710d/d-80mm/d kaynak grubuna ait çekme numune verileri ve grafiği

Numune sayısı Pirinç- Pirinç 900/40	Kopma kuvveti (N)	Kopma gerilmesi (N/mm ²)	Mak. Çekme kuvveti (N)	Mak. Çekme gerilmesi (N/mm ²)	% Uzama
1	18290.6	304.843	18656.3	310.938	2.42863
2	-.-	-.-	27.2512	0.45419	0.05238
3	13763.1	229.385	13763.1	229.385	1.80385

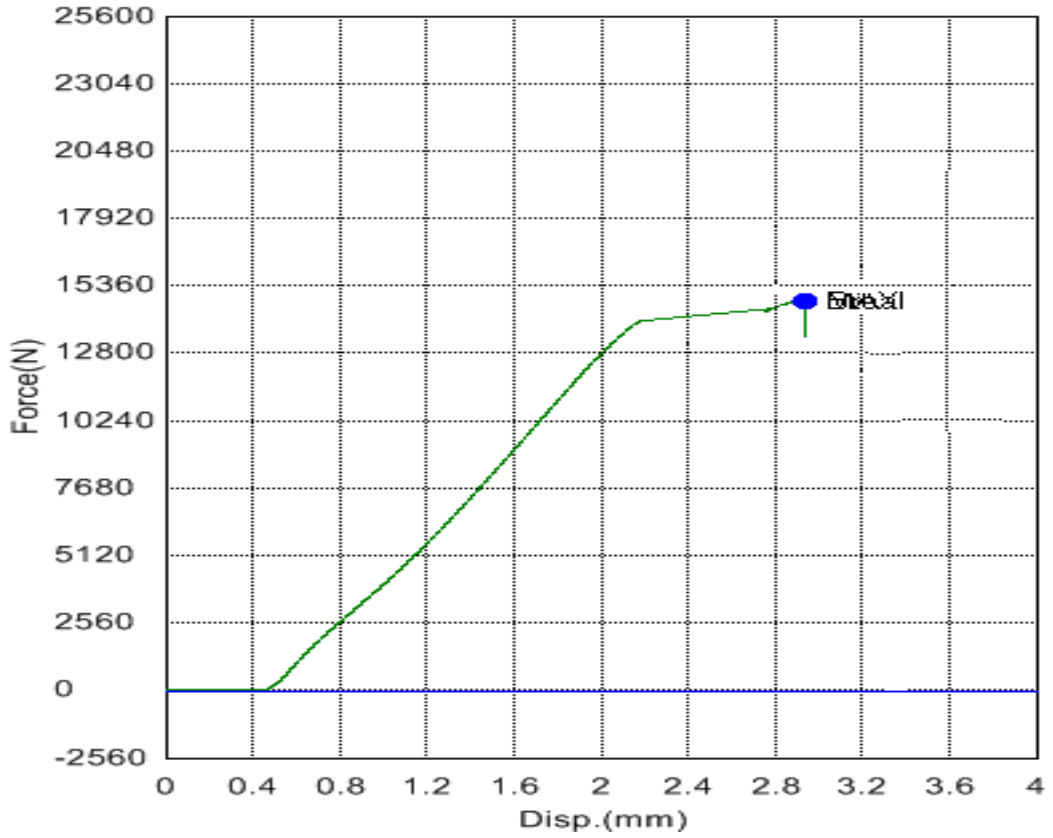
Ortalama Kopma Kuvveti (N)	Ortalama Kopma Gerilmesi (N/mm ²)	Ortalama Çekme Kuvveti (N)	Ortalama Çekme Gerilmesi (N/mm ²)
16026.8	267.114	16209.7	270.16



EK-13. Pirinç-Pirinç 900d/d-40mm/d kaynak grubuna ait çekme numune verileri ve grafiği

Numune sayısı Pirinç- Pirinç 900/50	Kopma kuvveti (N)	Kopma gerilmesi (N/mm ²)	Mak. Çekme kuvveti (N)	Mak. Çekme gerilmesi (N/mm ²)	% Uzama
1	11167.3	186.121	11167.3	186.121	1.52750
2	16834.3	280.571	16834.3	280.571	2.79608
3	16191.2	269.853	16718.9	278.648	2.82179

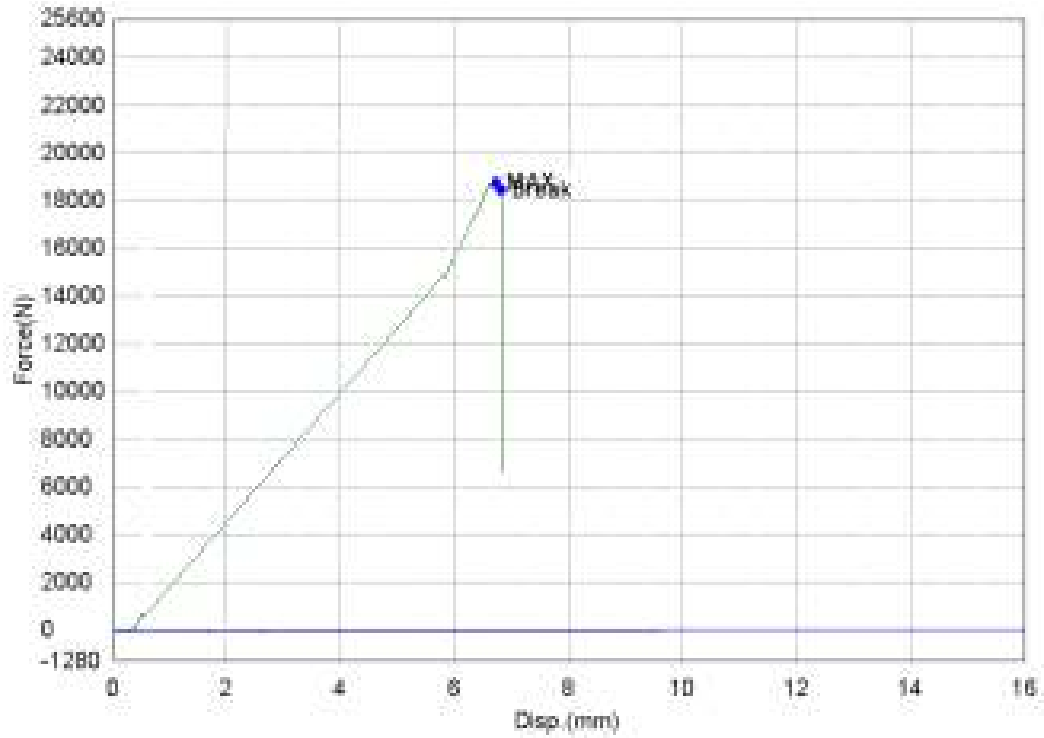
Ortalama Kopma Kuvveti (N)	Ortalama Kopma Gerilmesi (N/mm ²)	Ortalama Çekme Kuvveti (N)	Ortalama Çekme Gerilmesi (N/mm ²)
14730.9	245.515	14906.8	248.446



EK-14. Pirinç-Pirinç 900d/d-50mm/d kaynak grubuna ait çekme numune verileri ve grafiği

Numune sayısı Pirinç- Pirinç 900/80	Kopma kuvveti (N)	Kopma gerilmesi (N/mm ²)	Mak. Çekme kuvveti (N)	Mak. Çekme gerilmesi (N/mm ²)	% Uzama
1	17550.2	292.504	18782.8	313.047	3.48017
2	23010.2	383.504	23078.6	384.644	10.2523
3	15534.5	258.909	15822.6	263.710	2.09129

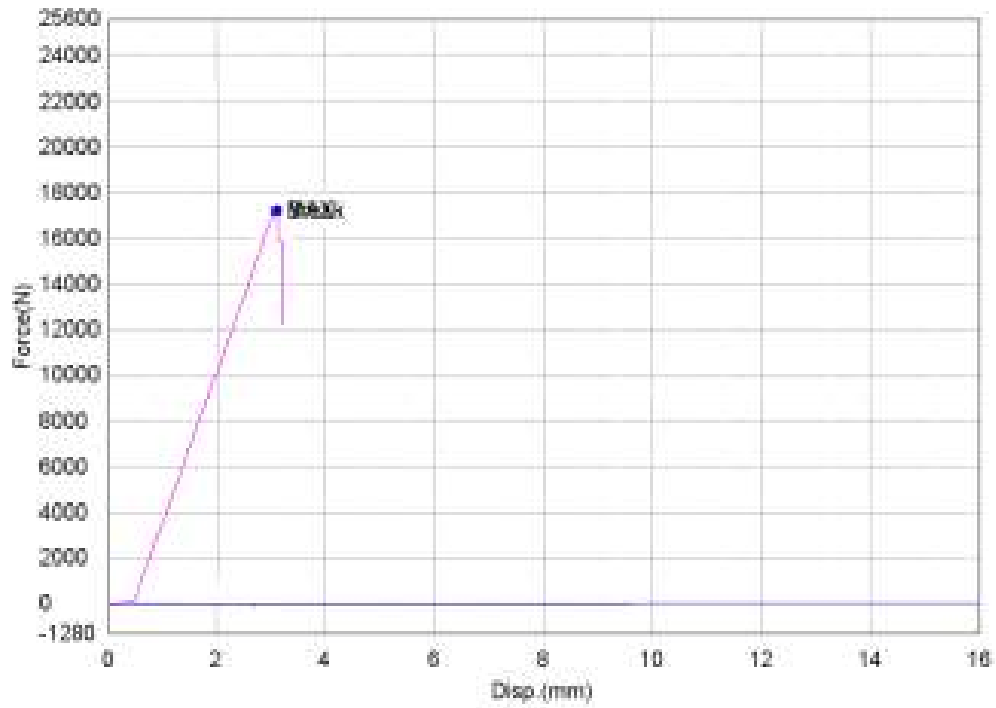
Ortalama Kopma Kuvveti (N)	Ortalama Kopma Gerilmesi (N/mm ²)	Ortalama Çekme Kuvveti (N)	Ortalama Çekme Gerilmesi (N/mm ²)
18698.2	311.639	19228	320.467



EK-15. Pirinç-Pirinç 900d/d-80mm/d kaynak grubuna ait çekme numune verileri ve grafiği

Numune sayısı Pirinç- Pirinç 1120/40	Kopma kuvveti (N)	Kopma gerilmesi (N/mm ²)	Mak. Çekme kuvveti (N)	Mak. Çekme gerilmesi (N/mm ²)	% Uzama
1	20634.3	343.905	20635.1	343.918	3.63837
2	15575.7	259.595	15646.6	260.776	2.16212
3	15630.5	260.508	15630.5	260.508	2.02729

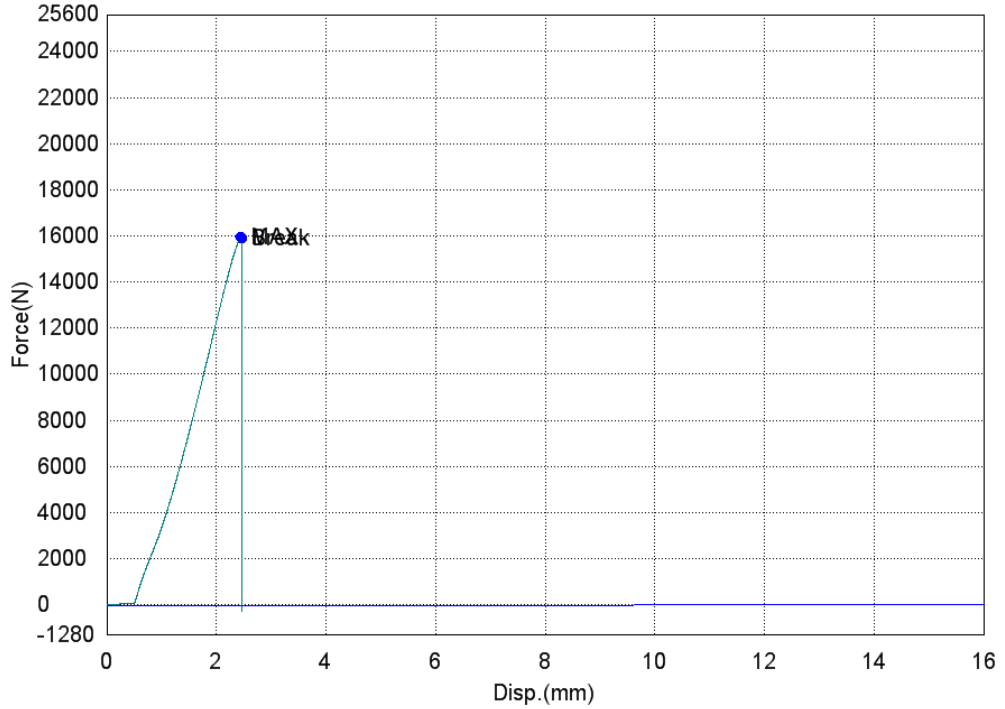
Ortalama Kopma Kuvveti (N)	Ortalama Kopma Gerilmesi (N/mm ²)	Ortalama Çekme Kuvveti (N)	Ortalama Çekme Gerilmesi (N/mm ²)
17280.1	288.002	17304.6	288.400



EK-16. Pirinç-Pirinç 1120d/d-40mm/d kaynak grubuna ait çekme numune verileri ve grafiği

Numune sayısı Pirinç- Pirinç 1120/50	Kopma kuvveti (N)	Kopma gerilmesi (N/mm ²)	Maksimum Çekme kuvveti (N)	Mak. Çekme gerilmesi (N/mm ²)	% Uzama
1	15923.1	265.386	15967.5	266.125	2.03981
2	14636.0	243.933	14640.3	244.004	1.76750
3	17601.1	293.351	18059.6	300.993	2.39106

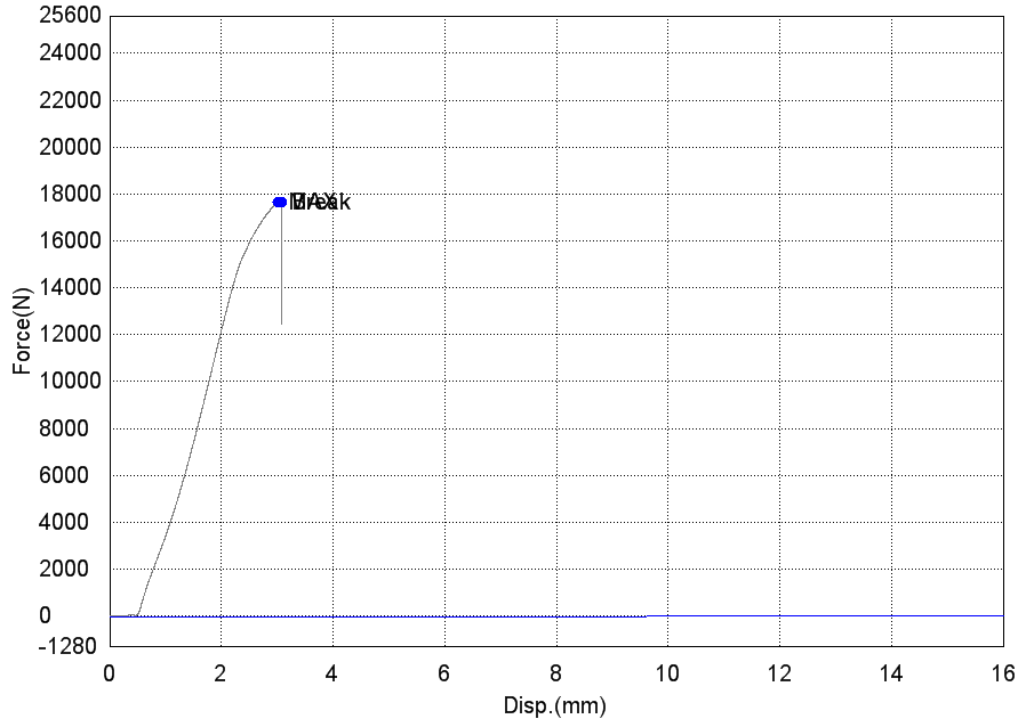
Ortalama Kopma Kuvveti (N)	Ortalama Kopma Gerilmesi (N/mm ²)	Ortalama Çekme Kuvveti (N)	Ortalama Çekme Gerilmesi (N/mm ²)
16053.4	267.556	16222.4	270.374



EK-17. Pirinç-Pirinç 1120d/d-50mm/d kaynak grubuna ait çekme numune verileri ve grafiği

Numune sayısı Pirinç- Pirinç 1120/80	Kopma kuvveti (N)	Kopma gerilmesi (N/mm ²)	Mak. Çekme kuvveti (N)	Mak. Çekme gerilmesi (N/mm ²)	% Uzama
1	17636.2	293.936	17673.0	294.551	2.52321
2	15127.4	252.124	15533.7	258.895	2.34118
3	18653.5	310.891	18994.4	316.573	2.82596

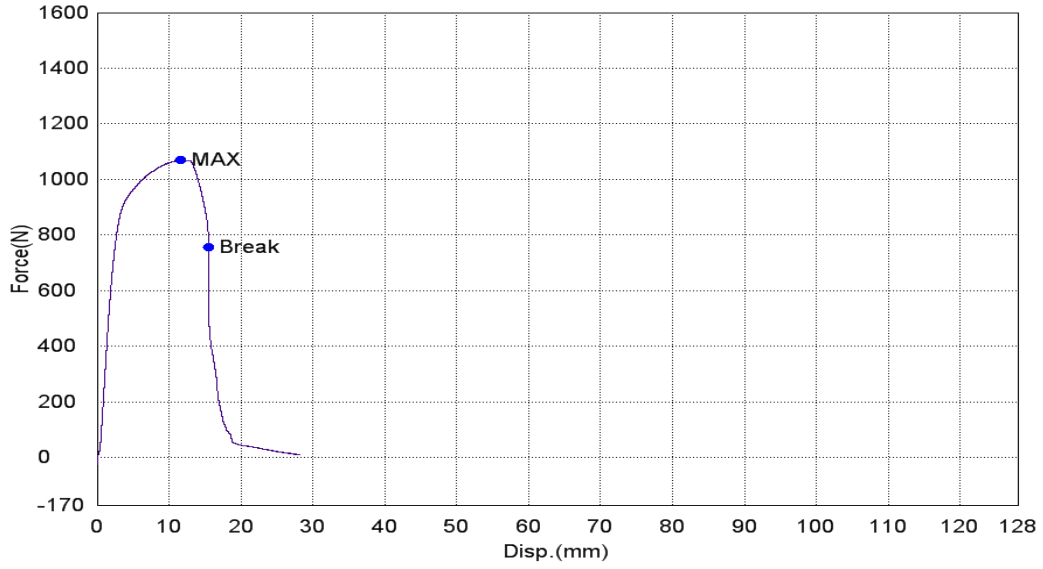
Ortalama Kopma Kuvveti (N)	Ortalama Kopma Gerilmesi (N/mm ²)	Ortalama Çekme Kuvveti (N)	Ortalama Çekme Gerilmesi (N/mm ²)
17139	285.650	17400.3	290.006



EK-18. Pirinç-Pirinç 1120d/d-80mm/d kaynak grubuna ait çekme numune verileri ve grafiği

Numune sayısı Cu-Cu 710/31,5	Mak. Eğme kuvveti (N)	Mak. Eğme gerilmesi (N/mm ²)	Kopma kuvveti (N)	Kopma gerilmesi (N/mm ²)	% Uzama
1	1102.11	612.285	.-	.-	2.54715
2	1082.43	601.349	925.533	514.185	1.98975
3	1069.24	594.020	756.566	420.314	2.09953

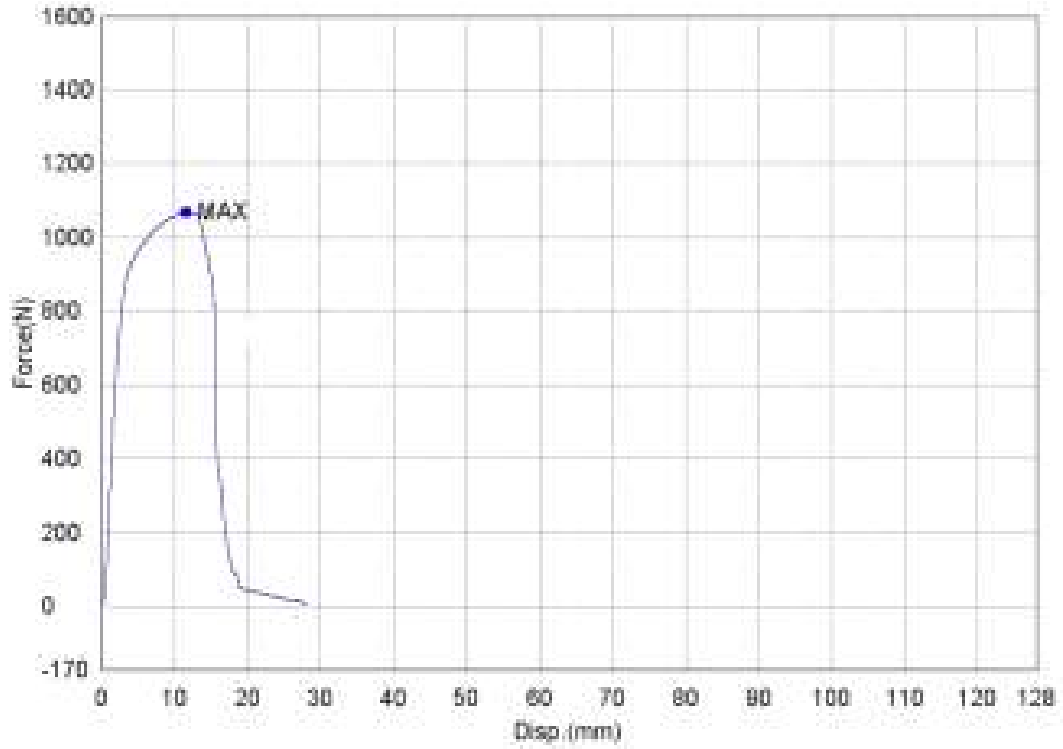
Ortalama Yer Değiştirme (mm)	Ortalama % Uzama	Ortalama Eğme Kuvveti (N)	Ortalama Eğme Gerilmesi (N/mm ²)
12.2896	2.212143	1084.59	602.551



EK-19. Cu-Cu 710d/d-31,5mm/d kaynak grubuna ait eğme numune verileri ve grafiği

Numune sayısı Cu-Cu 710/40	Mak. Eğme kuvveti (N)	Mak. Eğme gerilmesi (N/mm ²)	Kopma kuvveti (N)	Kopma gerilmesi (N/mm ²)	% Uzama
1	1206.54	670.301	.-	.-	2.56095
2	1215.42	675.232	.-	.-	2.68695
3	995.445	553.025	.-	.-	1.52235

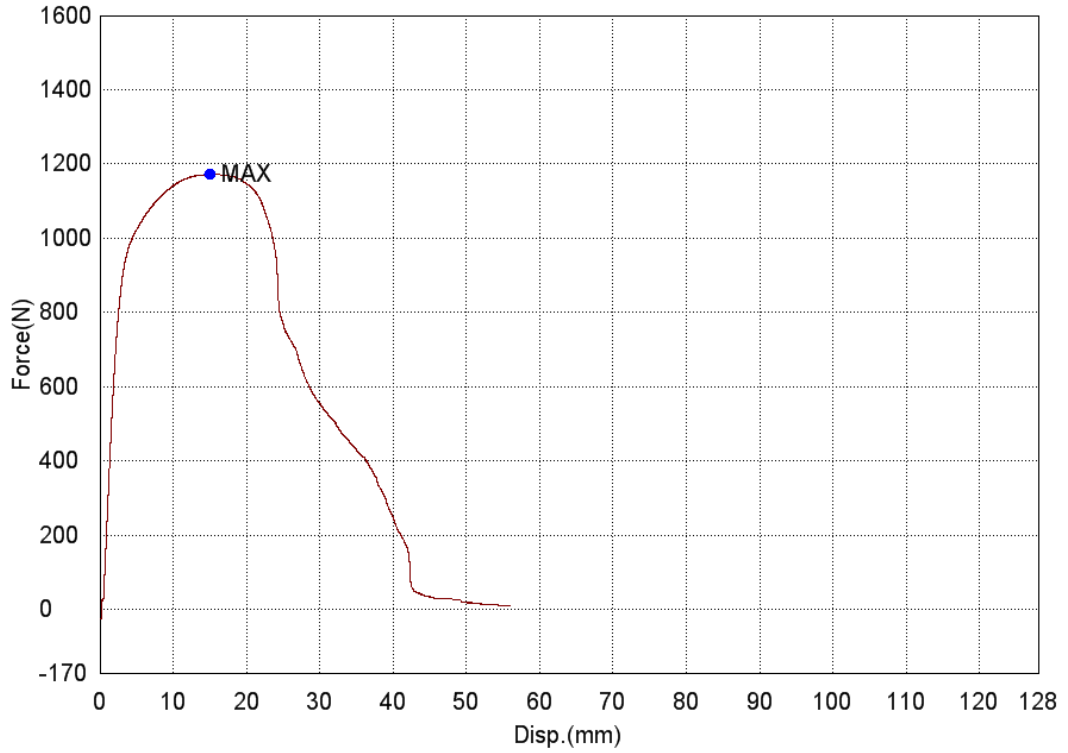
Ortalama Yer Değiştirme (mm)	Ortalama % Uzama	Ortalama Eğme Kuvveti (N)	Ortalama Eğme Gerilmesi (N/mm ²)
12.5374	2.25675	1139.135	632.852



EK-20. Cu-Cu 710d/d-40mm/d kaynak grubuna ait eğme numune verileri ve grafiği

Numune sayısı Cu-Cu 710/50	Mak. Eğme kuvveti (N)	Mak. Eğme gerilmesi (N/mm ²)	Kopma kuvveti (N)	Kopma gerilmesi (N/mm ²)	% Uzama
1	1172.72	651.510	.-	.-	2.70736
2	1193.99	663.328	.-	.-	2.75646
3	1153.88	641.040	.-	.-	2.66385

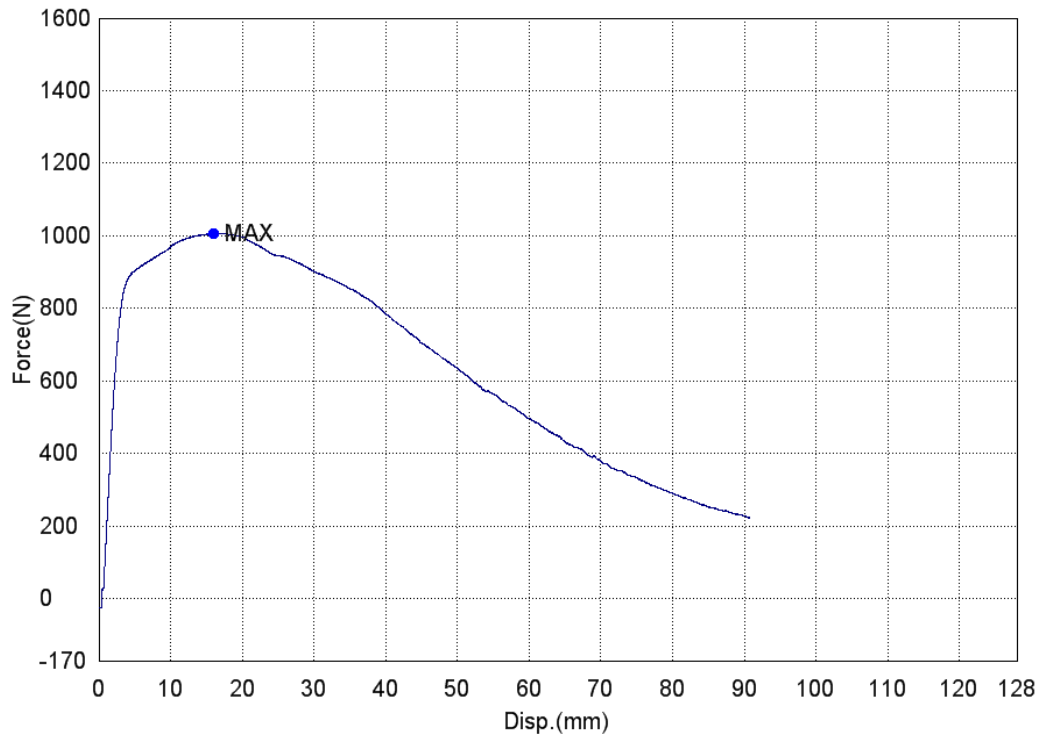
Ortalama Yer Değiştirme (mm)	Ortalama % Uzama	Ortalama Eğme Kuvveti (N)	Ortalama Eğme Gerilmesi (N/mm ²)
15.0512	2.70922	1173.53	651.959



EK-21. Cu-Cu 710d/d-50mm/d kaynak grubuna ait eğme numune verileri ve grafiği

Numune sayısı Cu-Cu 900/31,5	Mak. Eğme kuvveti (N)	Mak. Eğme gerilmesi (N/mm ²)	Kopma kuvveti (N)	Kopma gerilmesi (N/mm ²)	% Uzama
1	1006.39	559.105	.-	.-	2.88855
2	985.02	547.235	.-	.-	2.82724
3	1008.00	560.003	.-	.-	2.89317

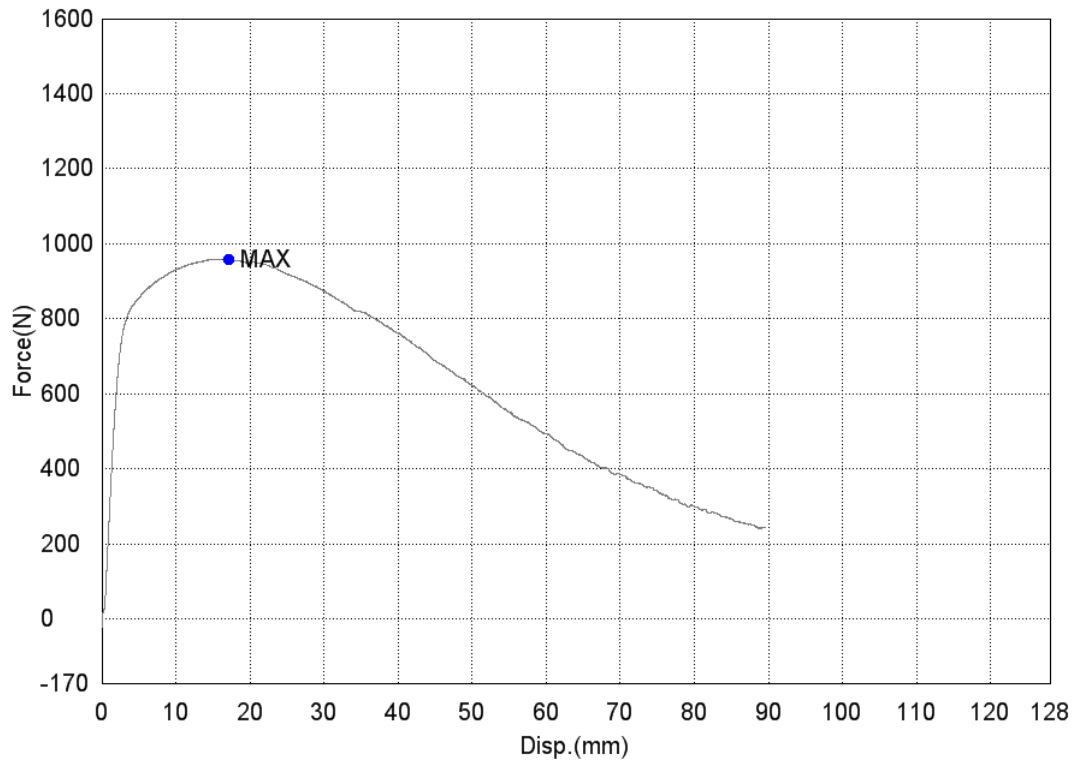
Ortalama Yer Değiştirme (mm)	Ortalama % Uzama	Ortalama Eğme Kuvveti (N)	Ortalama Eğme Gerilmesi (N/mm ²)
15.9425	2.86965	2.86965	555.447



EK-22. Cu-Cu 900d/d-31,5mm/d kaynak grubuna ait eğme numune verileri ve grafiği

Numune sayısı Cu-Cu 900/40	Mak. Eğme kuvveti (N)	Mak. Eğme gerilmesi (N/mm ²)	Kopma kuvveti (N)	Kopma gerilmesi (N/mm ²)	% Uzama
1	939.957	522.199	.-	.-	2.92694
2	959.786	533.214	.-	.-	3.09554
3	947.633	526.463	.-	.-	2.95082

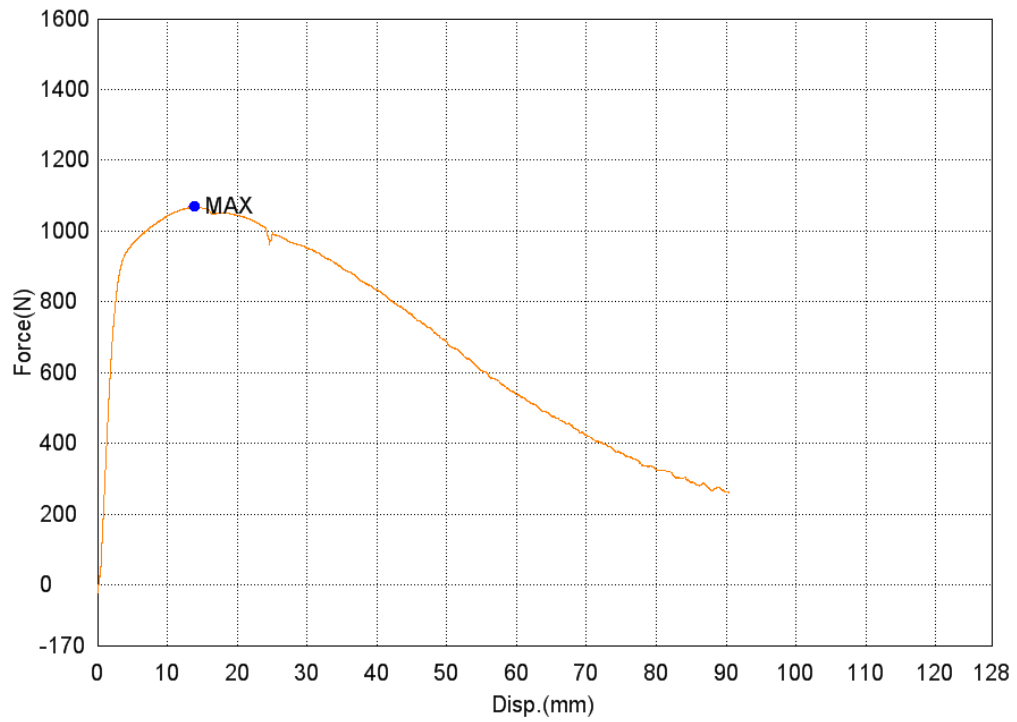
Ortalama Yer Değiştirme (mm)	Ortalama % Uzama	Ortalama Eğme Kuvveti (N)	Ortalama Eğme Gerilmesi (N/mm ²)
11.152	2.9911	949.125	527.292



EK-23. Cu-Cu 900d/d-40mm/d kaynak grubuna ait eğme numune verileri ve grafiği

Numune sayısı Cu-Cu 900/50	Mak. Eğme kuvveti (N)	Mak. Eğme gerilmesi (N/mm ²)	Kopma kuvveti (N)	Kopma gerilmesi (N/mm ²)	% Uzama
1	1068.83	593.795	.-	.-	2.48834
2	1048.28	582.377	.-	.-	2.44047
3	1058.63	588.127	.-	.-	2.46457

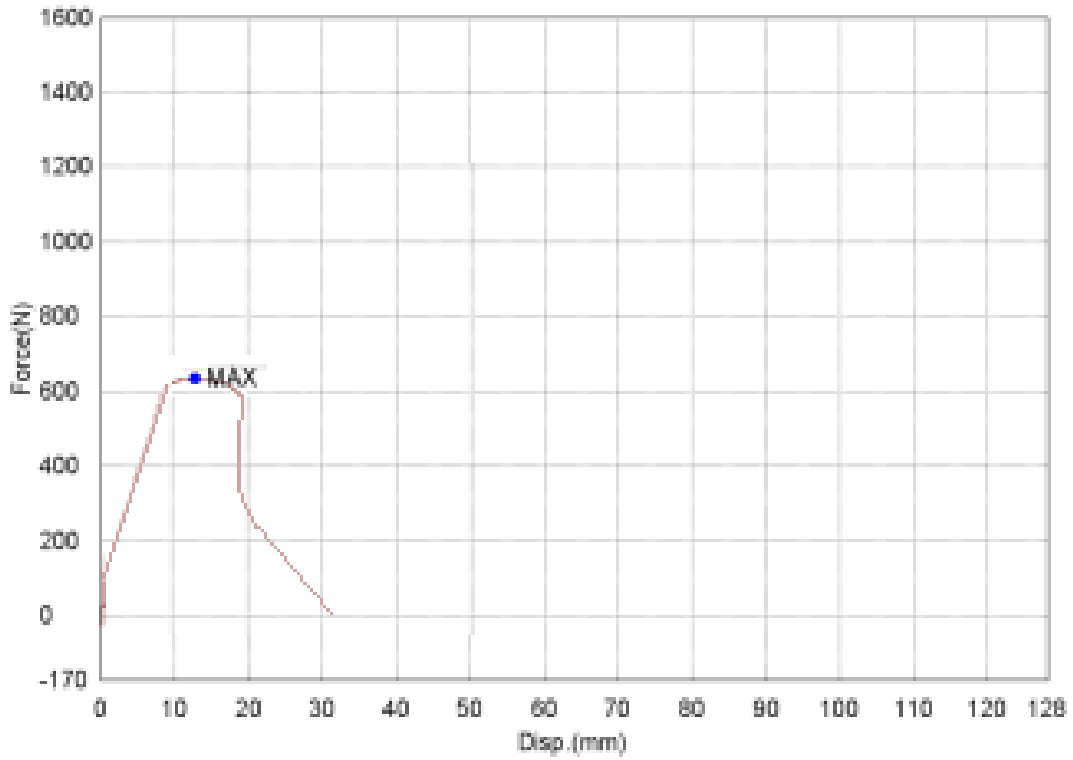
Ortalama Yer Değiştirme (mm)	Ortalama % Uzama	Ortalama Eğme Kuvveti (N)	Ortalama Eğme Gerilmesi (N/mm ²)
13.6914	2.46446	1058.58	588.083



EK-24. Cu-Cu 900d/d-50mm/d kaynak grubuna ait eğme numune verileri ve grafiği

Numune sayısı Cu-Cu 1120/31,5	Mak. Eğme kuvveti (N)	Mak. Eğme gerilmesi (N/mm ²)	Kopma kuvveti (N)	Kopma gerilmesi (N/mm ²)	% Uzama
1	500.417	278.009	.-	.-	1.87637
2	682.729	379.294	.-	.-	2.55997
3	762.510	423.617	.-	.-	2.85914

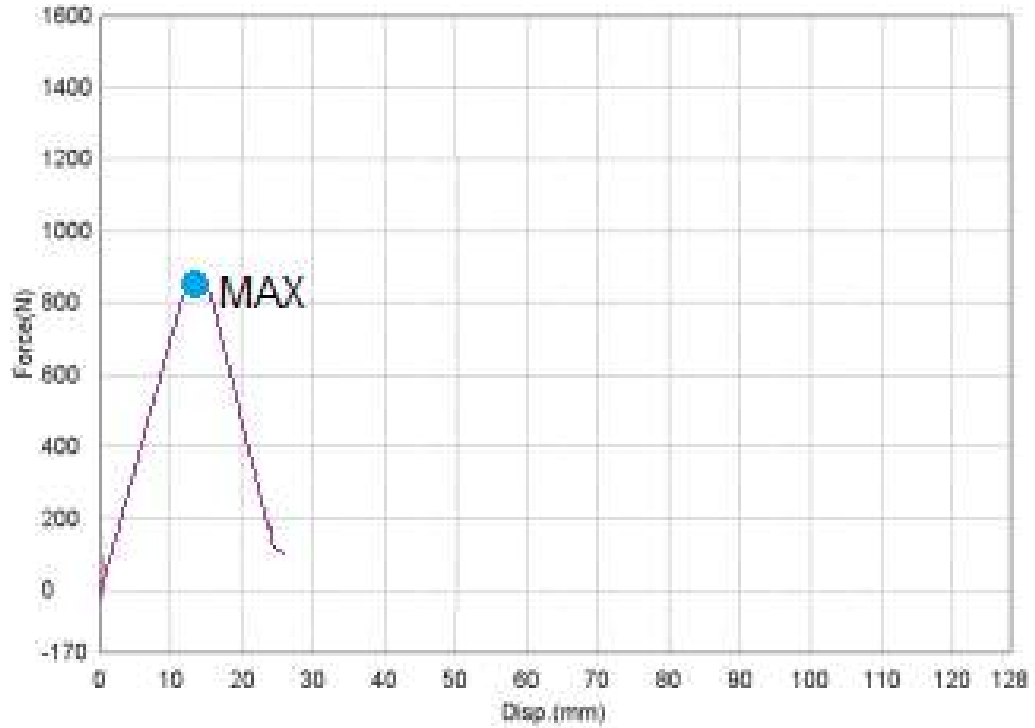
Ortalama Yer Değiştirme (mm)	Ortalama % Uzama	Ortalama Eğme Kuvveti (N)	Ortalama Eğme Gerilmesi (N/mm ²)
13.5101	2.4318	648.552	360.306



EK-25. Cu-Cu 1120d/d-31,5mm/d kaynak grubuna ait eğme numune verileri ve grafiği

Numune sayısı Cu-Cu 1120/40	Mak. Eğme kuvveti (N)	Mak. Eğme gerilmesi (N/mm ²)	Kopma kuvveti (N)	Kopma gerilmesi (N/mm ²)	% Uzama
1	863.442	479.690	.-	.-	2.47761
2	783.746	435.414	.-	.-	2.24894
3	899.943	499.968	.-	.-	2.99776

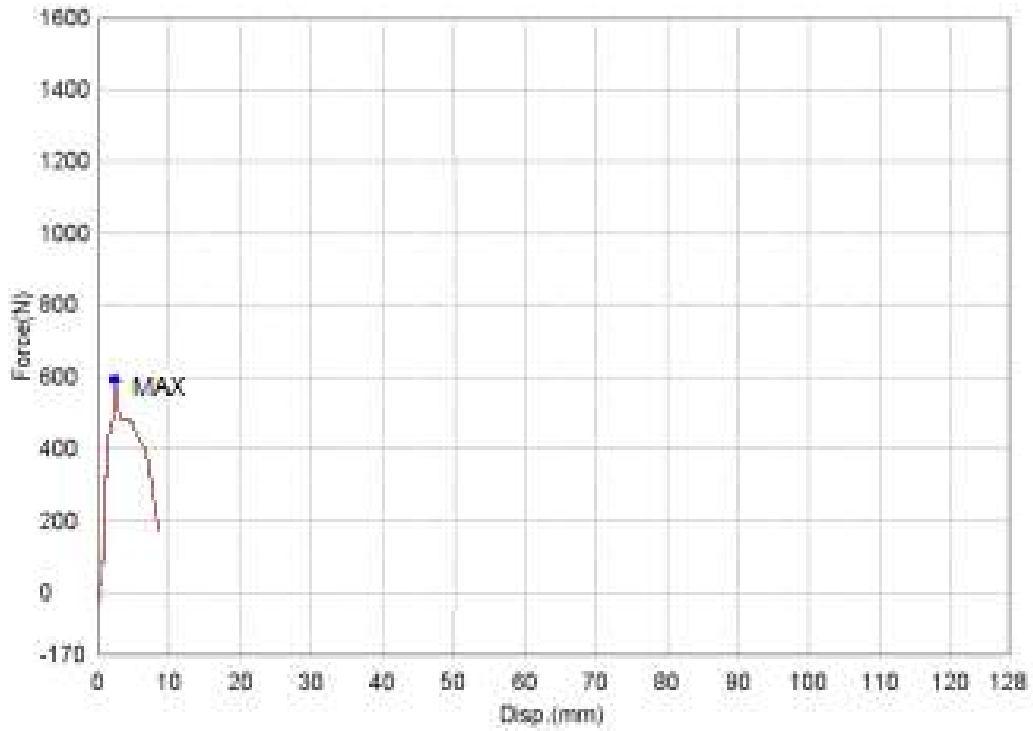
Ortalama Yer Değiştirme (mm)	Ortalama % Uzama	Ortalama Eğme Kuvveti (N)	Ortalama Eğme Gerilmesi (N/mm ²)
14.3042	2.57477	849.043	471.690



EK-26. Cu-Cu 1120d/d-40mm/d kaynak grubuna ait eğme numune verileri ve grafiği

Numune sayısı Cu-Cu 1120/50	Mak. Eğme kuvveti (N)	Mak. Eğme gerilmesi (N/mm ²)	Kopma kuvveti (N)	Kopma gerilmesi (N/mm ²)	% Uzama
1	500.401	278.001	.-	.-	0.36674
2	635.107	352.837	.-	.-	0.77174
3	665.007	369.448	.-	.-	0.77174

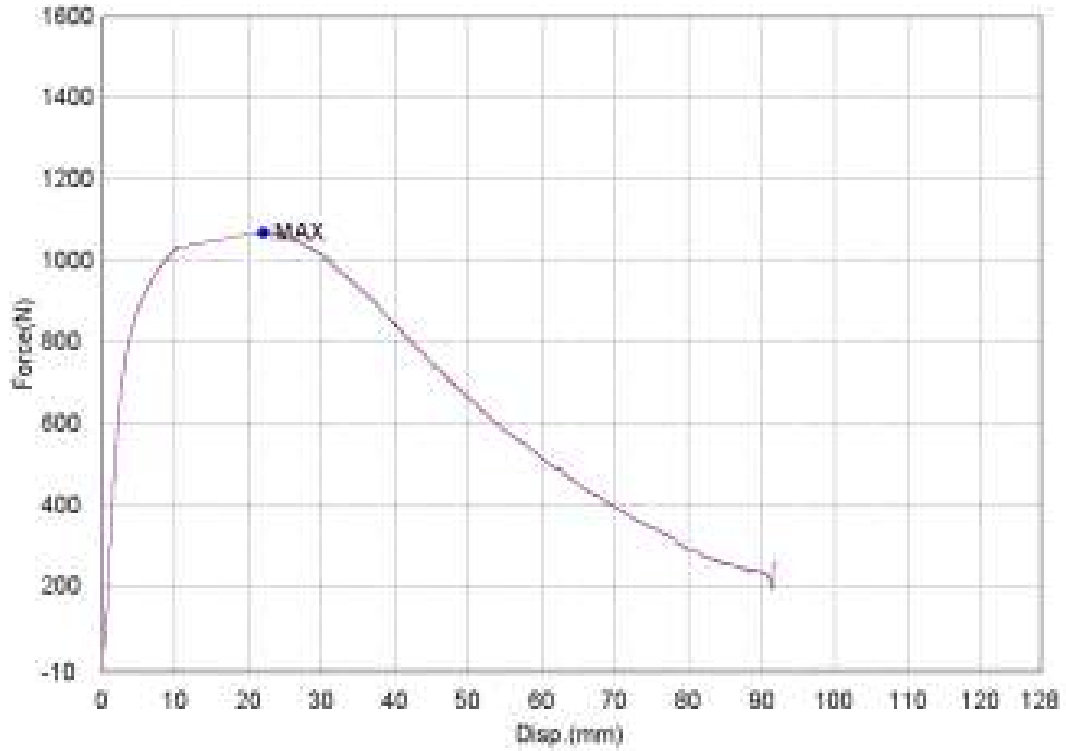
Ortalama Yer Değiştirme (mm)	Ortalama % Uzama	Ortalama Eğme Kuvveti (N)	Ortalama Eğme Gerilmesi (N/mm ²)
3.60473	0.64885	600.171	333.428



EK-27. Cu-Cu 1120d/d-50mm/d kaynak grubuna ait eğme numune verileri ve grafiği

Numune sayısı Pirinç-Pirinç 710/40	Mak. Eğme kuvveti (N)	Mak. Eğme gerilmesi (N/mm ²)	Kopma kuvveti (N)	Kopma gerilmesi (N/mm ²)	% Uzama
1	1020.160	566.756	.-	.-	3.65953
2	1123.505	624.169	.-	.-	4.03024
3	1100.640	611.469	.-	.-	3.39375

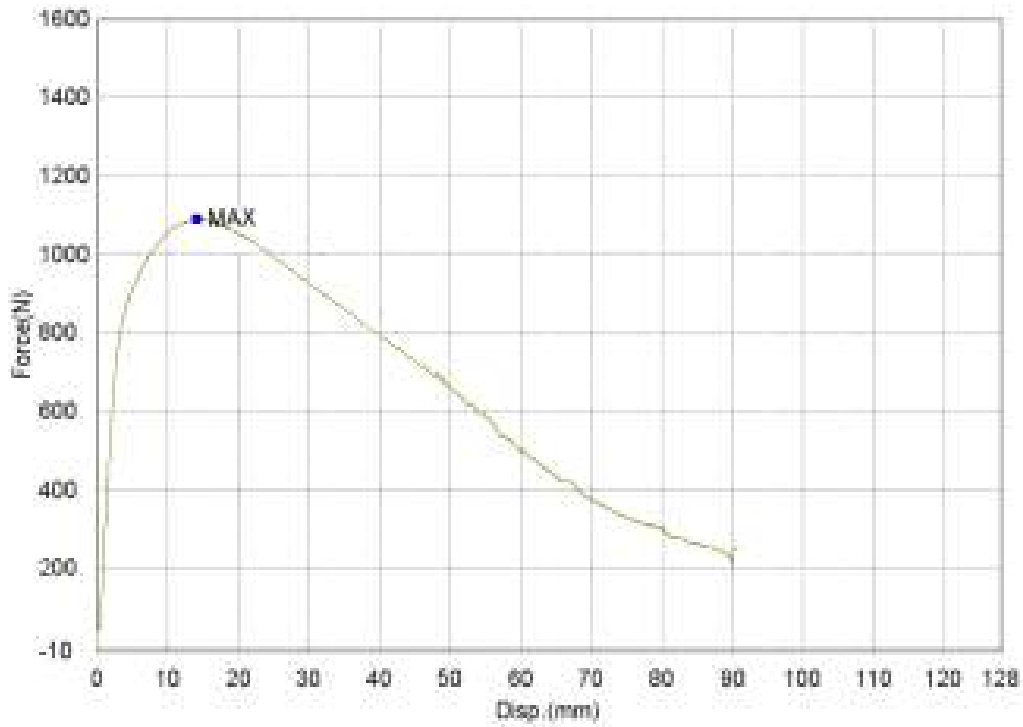
Ortalama Yer Değiştirme (mm)	Ortalama % Uzama	Ortalama Eğme Kuvveti (N)	Ortalama Eğme Gerilmesi (N/mm ²)
20.5250	3.69450	1080.435	600.798



EK-28. Pirinç-Pirinç 710d/d-40mm/d kaynak grubuna ait eğme numune verileri ve grafiği

Numune sayısı Pirinç- Pirinç 710/50	Mak. Eğme kuvveti (N)	Mak. Eğme gerilmesi (N/mm ²)	Kopma kuvveti (N)	Kopma gerilmesi (N/mm ²)	% Uzama
1	747.093	415.051	.-	.-	1.12335
2	1170.48	650.269	.-	.-	3.36134
3	1138.21	632.339	.-	.-	3.25875

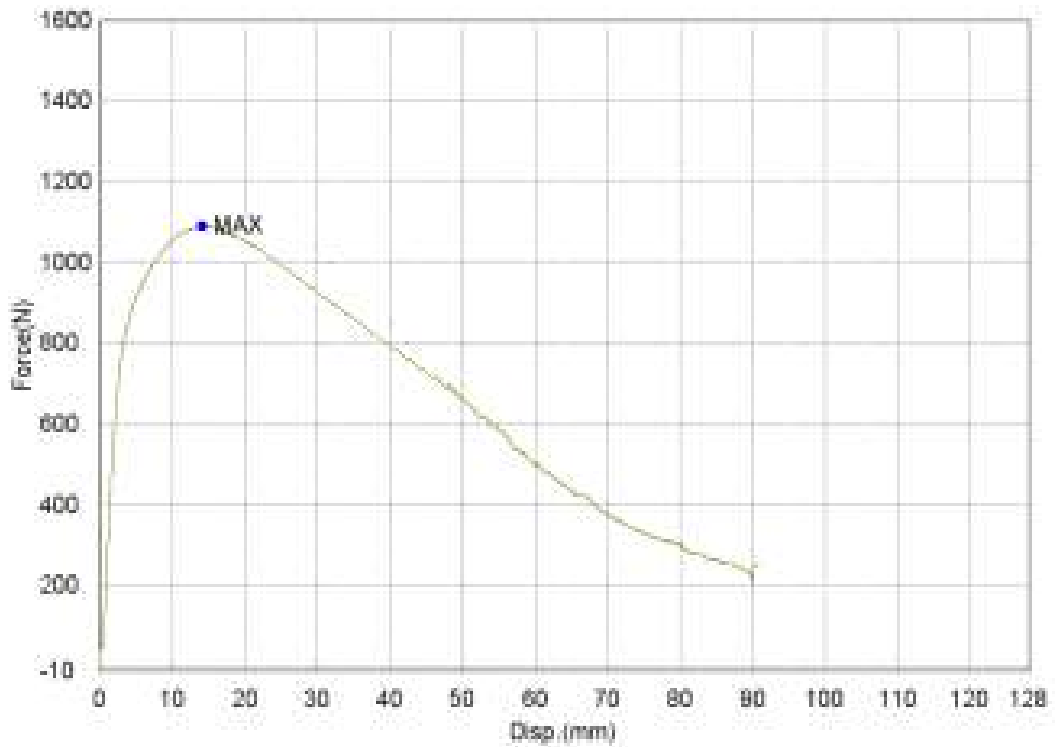
Ortalama Yer Değiştirme (mm)	Ortalama % Uzama	Ortalama Eğme Kuvveti (N)	Ortalama Eğme Gerilmesi (N/mm ²)
14.3397	2.58114	1018.594	565.886



EK-29. Pirinç-Pirinç 710d/d-50mm/d kaynak grubuna ait eğme numune verileri ve grafiği

Numune sayısı Pirinç- Pirinç 710/80	Mak. Eğme kuvveti (N)	Mak. Eğme gerilmesi (N/mm ²)	Kopma kuvveti (N)	Kopma gerilmesi (N/mm ²)	% Uzama
1	1065.79	592.104	.-	.-	2.94134
2	1143.73	635.408	.-	.-	3.66255
3	963.378	535.210	.-	.-	1.74013

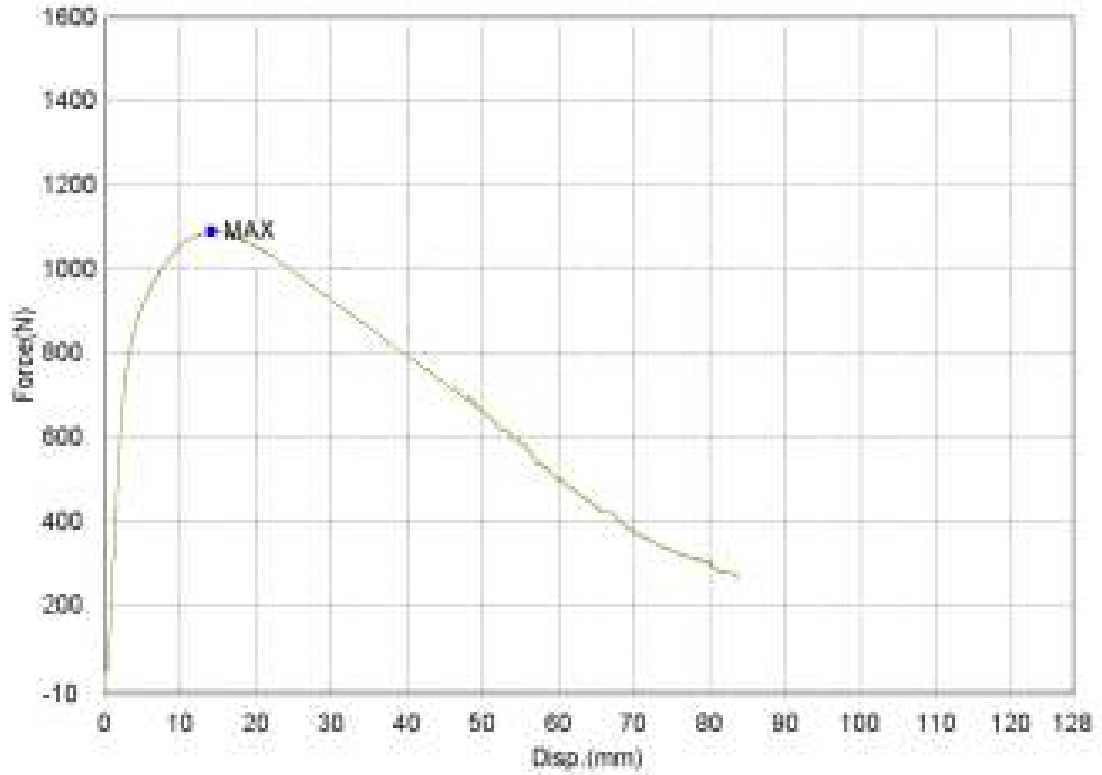
Ortalama Yer Değiştirme (mm)	Ortalama % Uzama	Ortalama Eğme Kuvveti (N)	Ortalama Eğme Gerilmesi (N/mm ²)
15.4518	2.78134	1057.632	587.574



EK-30. Pirinç-Pirinç 710d/d-80mm/d kaynak grubuna ait eğme numune verileri ve grafiği

Numune sayısı Pirinç- Pirinç 900/40	Mak. Eğme kuvveti (N)	Mak. Eğme gerilmesi (N/mm ²)	Kopma kuvveti (N)	Kopma gerilmesi (N/mm ²)	% Uzama
1	978.700	543.722	936.389	520.216	1.20674
2	1139.56	633.090	.-	.-	3.51374
3	1157.38	642.990	.-	.-	3.56867

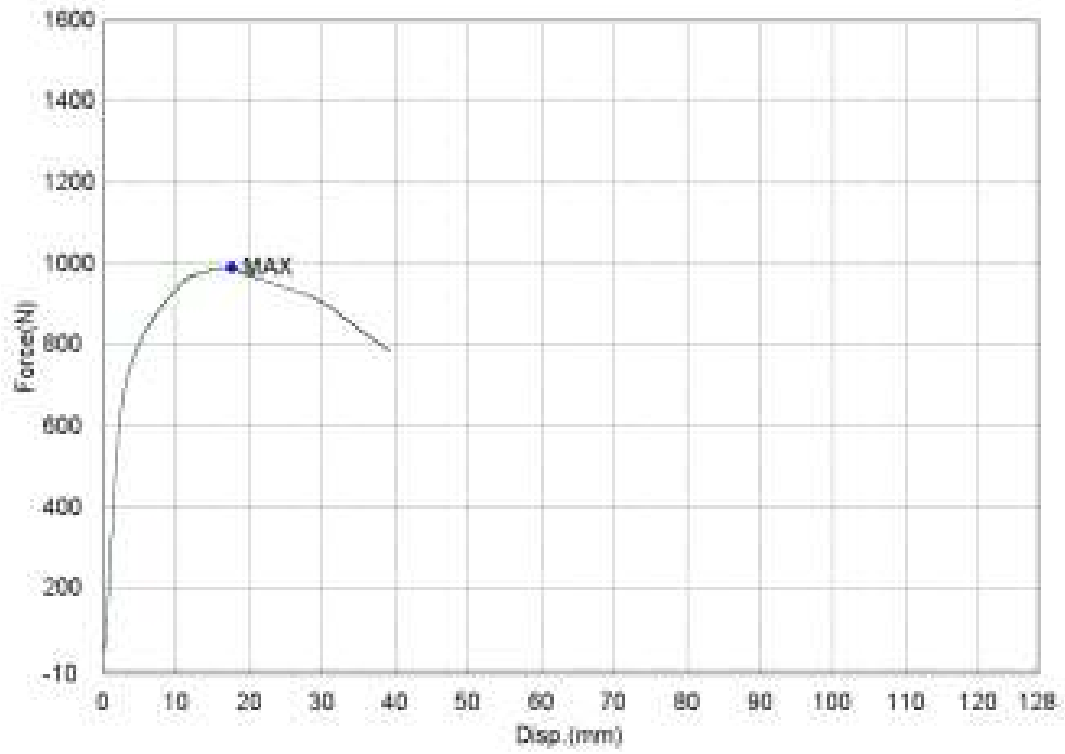
Ortalama Yer Değiştirme (mm)	Ortalama % Uzama	Ortalama Eğme Kuvveti (N)	Ortalama Eğme Gerilmesi (N/mm ²)
15.3503	2.76305	1091.88	606.600



EK-31. Pirinç-Pirinç 900d/d-40mm/d kaynak grubuna ait eğme numune verileri ve grafiği

Numune sayısı Pirinç-Pirinç 900/50	Mak. Eğme kuvveti (N)	Mak. Eğme gerilmesi (N/mm ²)	Kopma kuvveti (N)	Kopma gerilmesi (N/mm ²)	% Uzama
1	991.321	550.734	.-	.-	3.07214
2	877.404	487.447	.-	.-	3.34215
3	991.249	550.694	.-	.-	3.17233

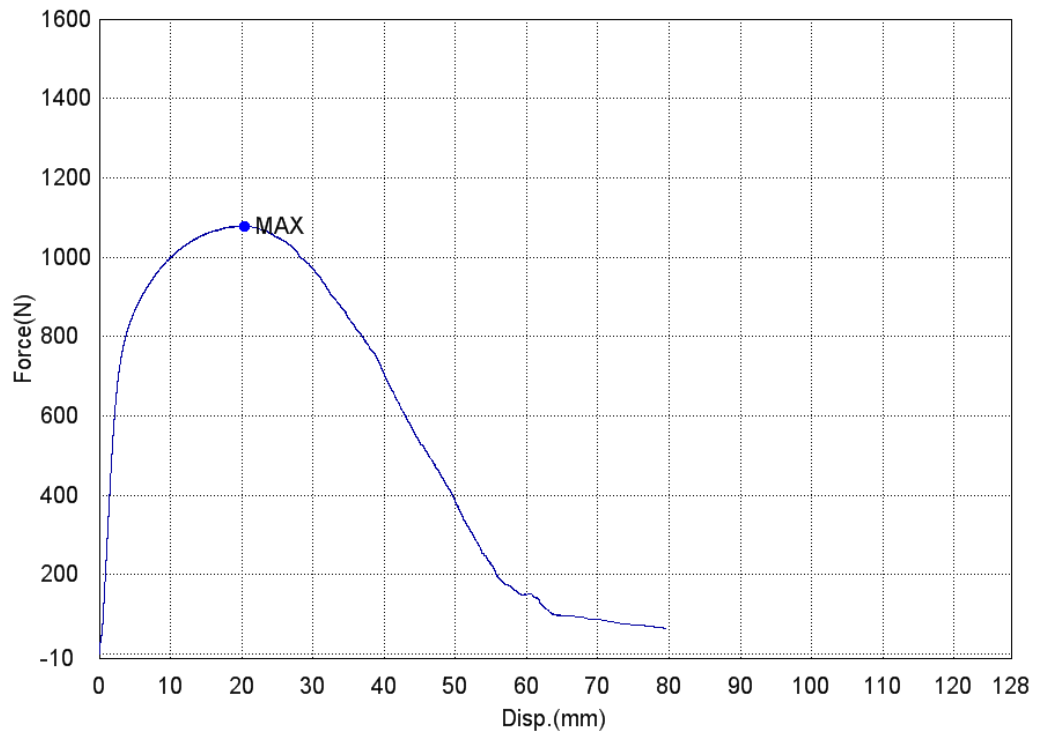
Ortalama Yer Değiştirme (mm)	Ortalama % Uzama	Ortalama Eğme Kuvveti (N)	Ortalama Eğme Gerilmesi (N/mm ²)
17.753	3.19554	953.293	529.625



EK-32. Pirinç-Pirinç 900d/d-50mm/d kaynak grubuna ait eğme numune verileri ve grafiği

Numune sayısı Pirinç- Pirinç 900/80	Mak. Eğme kuvveti (N)	Mak. Eğme gerilmesi (N/mm ²)	Kopma kuvveti (N)	Kopma gerilmesi (N/mm ²)	% Uzama
1	1078.770	599.314	.-	.-	3.67094
2	1093.996	607.775	.-	.-	3.72276
3	1050.377	583.542	.-	.-	3.57431

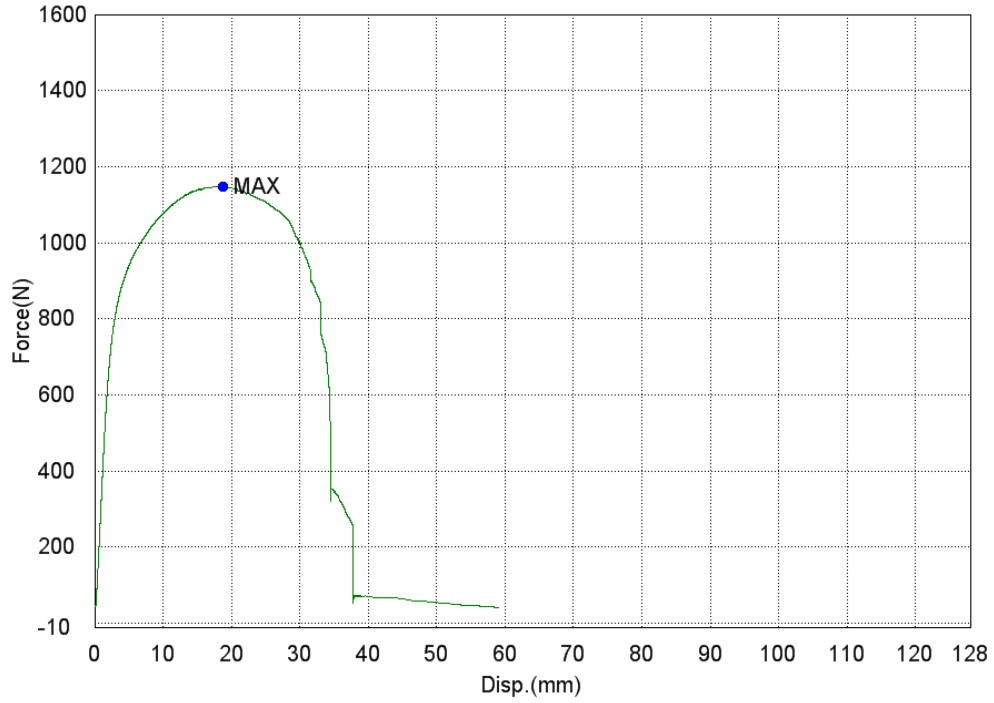
Ortalama Yer Değiştirme (mm)	Ortalama % Uzama	Ortalama Eğme Kuvveti (N)	Ortalama Eğme Gerilmesi (N/mm ²)
20.3111	3.65600	1074.381	596.877



EK-33. Pirinç-Pirinç 900d/d-80mm/d kaynak grubuna ait eğme numune verileri ve grafiği

Numune sayısı Pirinç- Pirinç 1120/40	Mak. Eğme kuvveti (N)	Mak. Eğme gerilmesi (N/mm ²)	Kopma kuvveti (N)	Kopma gerilmesi (N/mm ²)	% Uzama
1	1135.07	630.595	.-	.-	3.54674
2	1147.99	637.774	.-	.-	3.36674
3	1126.21	625.672	1021.39	567.436	2.88732

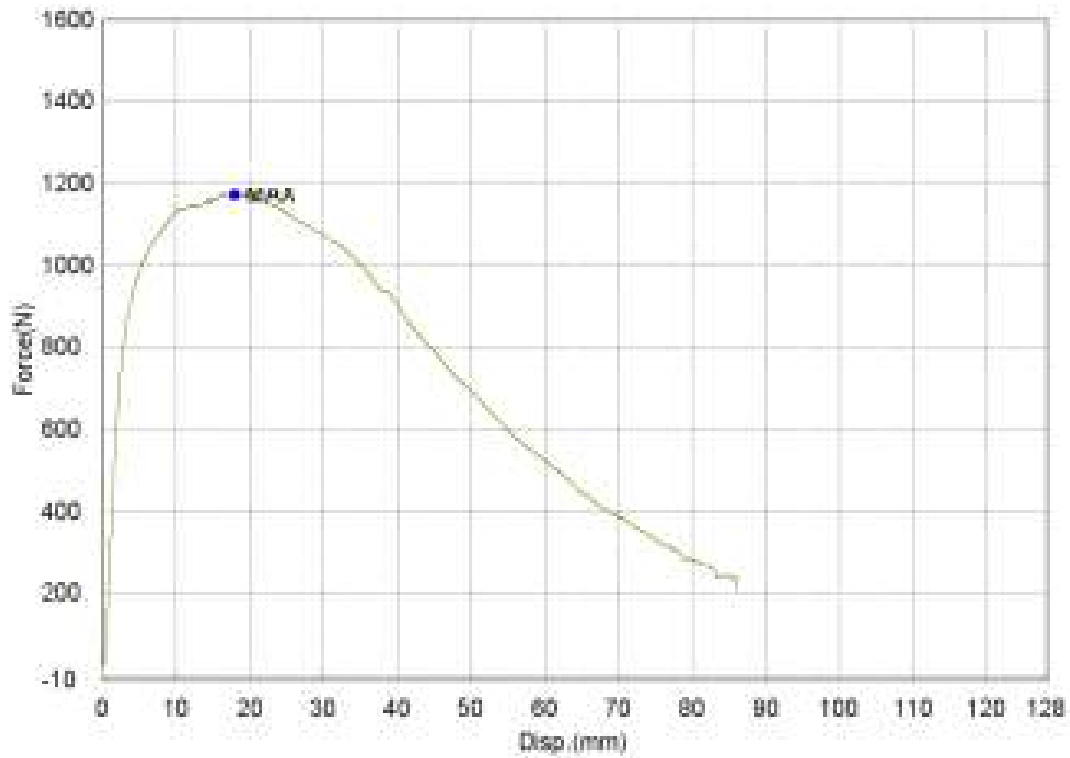
Ortalama Yer Değiştirme (mm)	Ortalama % Uzama	Ortalama Eğme Kuvveti (N)	Ortalama Eğme Gerilmesi (N/mm ²)
18.1496	3.26693	1136.42	631.347



EK-34. Pirinç-Pirinç 1120d/d-40mm/d kaynak grubuna ait eğme numune verileri ve grafiği

Numune sayısı Pirinç- Pirinç 1120/50	Mak. Eğme kuvveti (N)	Mak. Eğme gerilmesi (N/mm ²)	Kopma kuvveti (N)	Kopma gerilmesi (N/mm ²)	% Uzama
1	1196.38	664.658	.-	.-	3.24435
2	1146.91	637.174	.-	.-	3.25094
3	1174.97	652.761	.-	.-	3.33046

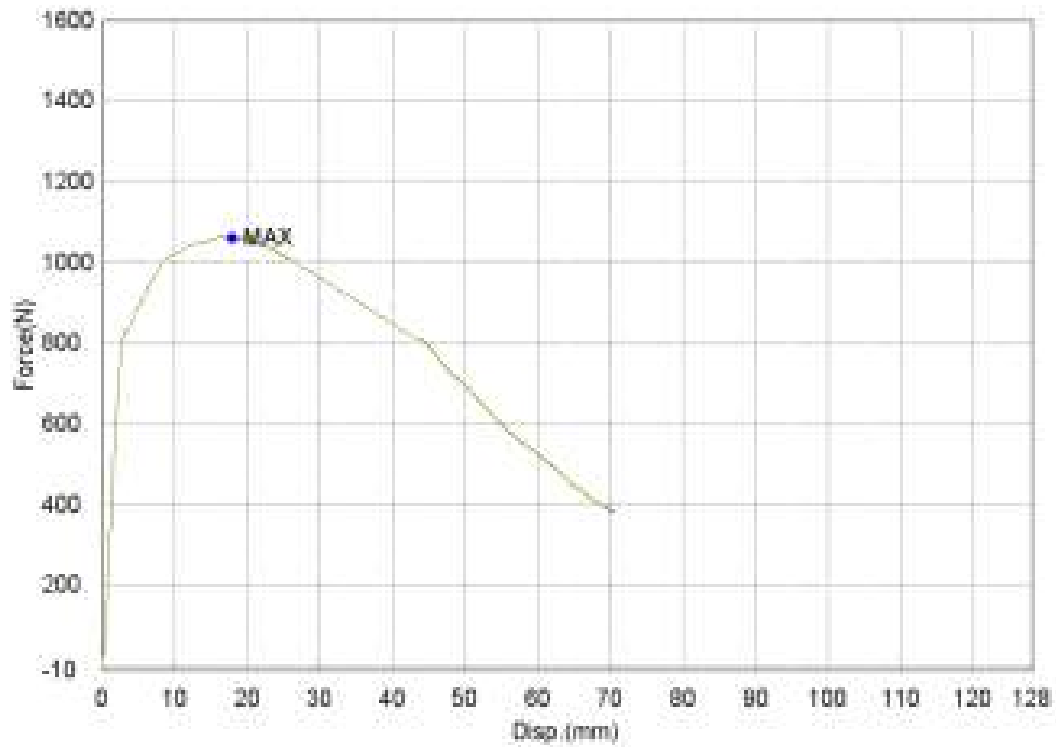
Ortalama Yer Değiştirme (mm)	Ortalama % Uzama	Ortalama Eğme Kuvveti (N)	Ortalama Eğme Gerilmesi (N/mm ²)
18.1958	3.27525	1172.753	651.531



EK-35. Pirinç-Pirinç 1120d/d-50mm/d kaynak grubuna ait eğme numune verileri ve grafiği

Numune sayısı Pirinç- Pirinç 1120/80	Mak. Eğme kuvveti (N)	Mak. Eğme gerilmesi (N/mm ²)	Kopma kuvveti (N)	Kopma gerilmesi (N/mm ²)	% Uzama
1	1048.53	582.518	.-	.-	3.54013
2	1044.76	580.421	.-	.-	3.42555
3	1028.97	571.648	.-	.-	3.44535

Ortalama Yer Değiştirme (mm)	Ortalama % Uzama	Ortalama Eğme Kuvveti (N)	Ortalama Eğme Gerilmesi (N/mm ²)
19.2797	3.47034	1040.753	578.195



EK-36. Pirinç-Pirinç 1120d/d-80mm/d kaynak grubuna ait eğme numune verileri ve grafiği