

**BAKIR VE ALÜMİNYUM LEVHALARIN SÜRTÜNME
KARIŞTIRMA KAYNAK YÖNTEMİ (SKK) İLE
BİRLEŞTİRİLMESİNDE KAYNAK PARAMETRELERİNİN
MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

EMRE KAYGUSUZ

**MERSİN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MAKİNE MÜHENDİŞLİĞİ
ANABİLİM DALI**

**MERSİN
AĞUSTOS- 2017**

**BAKIR VE ALÜMİNYUM LEVHALARIN SÜRTÜNME
KARIŞTIRMA KAYNAK YÖNTEMİ (SKK) İLE
BİRLEŞTİRİLMESİNDE KAYNAK PARAMETRELERİNİN
MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

EMRE KAYGUSUZ

**MERSİN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

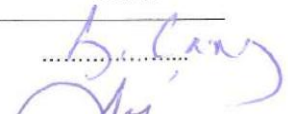
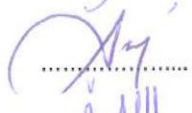
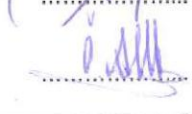
**MAKİNE MÜHENDİŞLİĞİ
ANABİLİM DALI**

**Danışman
Doç. Dr. Ahmet ÇAKAN**

**MERSİN
AĞUSTOS- 2017**

ONAY

Emre KAYGUSUZ tarafından Doç. Dr. Ahmet ÇAKAN danışmanlığında hazırlanan "Bakır ve Alüminyum Levhaların Sürtünme Karıştırma Kaynak Yöntemi (SKK) ile Birleştirilmesinde Kaynak Parametrelerinin Mekanik Özelliklere Etkisinin Araştırılması" başlıklı çalışma aşağıda imzaları bulunan jüri üyeleri tarafından 04.08.2017..... tarihinde yapılan Tez Savunma Sınavı sonucunda oy birliği/çokluğu ile Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Görevi	Ünvanı, Adı ve Soyadı	İmza
Başkan	Prof.Dr. Gürel ÇAM	
Üye	Doç. Dr. Ahmet ÇAKAN	
Üye	Yrd. Doç. Dr. Önder ALBAYRAK	

Yukarıdaki Jüri kararı Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 14.08.2017 tarih ve 2017.31/964 sayılı kararıyla onaylanmıştır.


Prof. Dr. Ayla ÇELİK
Fen Bilimleri Enstitü Müdürü

Bu tezde kullanılan özgün bilgiler, şekil, tablo ve fotoğraflardan kaynak göstermeden alıntı yapmak 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunu hükümlerine tabidir.

ETİK BEYAN

Mersin Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim Yönetmeliğinde belirtilen kurallara uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada,

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
 - Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlâk kurallarına uygun olarak sunduğumu,
 - Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
 - Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak kullandığımı,
 - Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
 - Bu tezin herhangi bir bölümünü Mersin Üniversitesi veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı,
 - Tezin tüm telif haklarını Mersin Üniversitesi'ne devrettiğimi
- beyan ederim.

ETHICAL DECLARATION

This thesis is prepared in accordance with the rules specified in Mersin University Graduate Education Regulation and I declare to comply with the following conditions:

- I have obtained all the information and the documents of the thesis in accordance with the academic rules.
- I presented all the visual, auditory and written informations and results in accordance with scientific ethics.
- I refer in accordance with the norms of scientific works about the case of exploitation of others' works.
- I used all of the referred works as the references.
- I did not do any tampering in the used data.
- I did not present any part of this thesis as an another thesis at Mersin University or another university.
- I transfer all copyrights of this thesis to the Mersin University.

..... /

İmza / Signature



Emre KAYGUSUZ

Öğrenci Adı ve Soyadı / Student Name and Surname

ÖZET

BAKIR VE ALÜMİNYUM LEVHALARIN SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAK YÖNTEMİ (SKK) İLE BİRLEŞTİRİLMESİNDE KAYNAK PARAMETRELERİNİN MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

Sürtünme karıştırma kaynağı (SKK), 1991 yılında Kaynak Enstitüsü (The Welding Institute, TWI) tarafından geliştirilen katı hal kaynak tekniğidir. Bu yöntem ilk olarak NASA tarafından uzay mekiği dış tankının kaynağı için kullanılmıştır. Günümüzde SKK, uzay ve havacılık endüstrisinin yanı sıra otomotiv endüstrisinde de yaygın olarak kullanılmaktadır. Konvansiyonel kaynak yöntemleri ile yüksek sıcaklıkta kaynak işlemi uygulanmasından dolayı, dolgu malzemesi kullanma ihtiyacı oluşmaktadır. Bu metalürjik karakteristik, mekanik ve fiziksel özellikler açısından esas malzemeden farklı yapılar elde edilmesine sebep olmaktadır. Sürtünme karıştırma kaynak yönteminde işlem sıcaklığı, birleştirilecek iş parçalarının ergime noktalarının altında gerçekleşmektedir. Bilim insanları, bu teknolojiyi, konvansiyonel ergitme teknikleri kullanılarak kaynak yapılması zor olan yeni malzemelere uygulamak amacı ile araştırmalar yapmaya odaklanmışlardır. Bu çalışmada, 660 ve 920 dev/dk. dönme hızı, 18, 32 ve 54 mm/dk. kaynak hız parametreleri uygulanarak birbirinden farklı AA7075-T6 alüminyum alaşımı ve Cu-ETP saf bakır levhalar alın alın birleştirilmiştir. Kaynaklı birleştirilen plakaların mekanik özelliklerini belirlemek için çekme testleri uygulanmıştır. En yüksek kaynak performans değerlerine (% 2.5 uzama, 207 MPa Çekme mukavemeti) 660 dev/dk. dönme hızı, 32 mm/dk. kaynak hız parametreleri kullanılarak üretilen numunelerde ulaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Sürtünme karıştırma kaynağı, Alüminyum alaşımı, Bakır, Farklı malzeme, Cu ETP, AA7075

Danışman: Doç. Dr. Ahmet ÇAKAN, Mersin Üniversitesi, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

ABSTRACT

INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF WELDING PARAMETERS TO THE MECHANICAL PROPERTIES IN JOINING COPPER AND ALUMINUM PLATES BY FRICTION STIR WELDING (FSW) PROCESS

Friction stir welding (FSW) is a solid state welding technique, developed by The Welding Institute (TWI) in 1991. This method was first used by NASA to weld the space shuttle external tank. Today, FSW is widely used in the automotive industry as well as space and aviation industries. Due to the application of welding at high temperatures during conventional welding methods, the necessity of using filler material is occurring. This causes different structures to be obtained from the main material in terms of metallurgical characteristics, mechanical and physical properties. In the friction stir welding process, the process temperature is below the melting points of the workpieces to be joined. Scientists have focused on research this technology to apply new materials that are difficult to weld using conventional melting techniques. In this study, the welding parameters, namely 660 and 920 rpm rotational speed, 18, 32 and 54 mm / min welding speed parameters were applied to butt weld dissimilar AA7075-T6 aluminum alloys and Cu-ETP pure copper plates. Tensile tests were applied to determine the mechanical properties of the welded plates. The joint produced using a rotational rate of 660 rpm and a welding speed of 32 mm / min exhibited the best joint properties (2.5% elongation, 207 MPa tensile strength).

Keywords: Friction stir welding, Alüminyum alloy, Copper, Dissimilar Material, Cu ETP, AA7075

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Ahmet ÇAKAN, Department of Mechanical Engineering, Mersin University, Mersin

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim ve tez sürecinde değerli bilgi birikimi ve tecrübesiyle desteğini hiçbir zaman esirgemeyen, her türlü koşul ve şartlarda yardımcı olan ve yol gösteren tez danışmanım Sn. Doç. Dr. Ahmet ÇAKAN'a teşekkürü borç bilirim.

Hayatım boyunca maddi ve manevi destek veren her kararımı destekleyen aileme, babam Sn. Bahattin Kaygusuz'a ve annem Sn. Hatice Kaygusuz'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tezin deney aşamasında destek olan Sn. Yrd. Doç. Dr. Önder Albayrak'a, araştırma görevlisi Sn. Mustafa Uğurlu ve Sn. İsmail Kutlugün Akbay'a teşekkürlerimi sunuyorum.

Yardımlarından dolayı, RMS Remteks Makina Sanayi firması yöneticisi Sn. Hasan Kaygusuz'a, Oğuzmak Makine İmalat Cnc İşleme Ltd. Şti. firmasının çalışanlarına, Astaş Isıl İşlem Mühendislik Metalürji Sanayi ve Ticaret Ltd. Şti firması ve çalışanlarına, Moderno Mobilya ve Dekorasyon firma yöneticisi Sn. Mehmet Ali Güldağ'a, Mersin Üniversitesi MEİTAM çalışanlarından araştırma görevlisi Sn. Derya Yetkin'e ve uzman Sn. Aynur Gürbüz'e, teşekkürü bir borç bilirim. Burada, çalışmalarına destek sağlayan isimlerini belirtmediğim kişi ve kuruluşlara da içten duygularla teşekkürlerimi sunuyorum.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇ KAPAK	i
ONAY	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.
ETİK BEYAN	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.
ÖZET	vi
ABSTRACT	viii
TEŞEKKÜR	ix
İÇİNDEKİLER	x
TABLolar DİZİNİ	xii
ŞEKİLLER DİZİNİ	xiii
KISALTMALAR ve SİMGELER	xv
1. GİRİŞ	1
1.1. Malzemelerin Birleştirilmesinde Kullanılan Kaynak Yöntemleri	2
1.1.1. Ark Kaynağı	3
1.1.2. Elektrik Direnç Kaynağı	4
1.1.3. Gaz Kaynağı	5
1.1.4. Elektron Kaynağı	5
1.1.5. Lazer Kaynağı	6
1.1.6. Elektro-Cüruf Kaynağı	7
1.1.7. Termit Kaynağı	8
1.1.8. Katı Hal Kaynağı	9
1.1.8.1. Dövme Kaynağı	9
1.1.8.2. Soğuk Kaynak	9
1.1.8.3. Hadde Kaynağı	10
1.1.8.4. Sıcak Basınç Kaynağı	10
1.1.8.5. Difüzyon Kaynağı	11
1.1.8.6. Patlamalı Kaynak	12
1.1.8.7. Sürtünme Kaynağı	12
1.1.8.8. Ultrasonik Kaynak	13
1.1.8.9. Sürtünme Karıştırma Kaynağı	14
1.2. Sürtünme Karıştırma Kaynak Yönteminin Uygulama Aşamaları	14
1.3. Sürtünme Karıştırma Kaynak İşleminde Etkili Olan Parametreler	15
1.3.1. Takım Geometrisi	16
1.3.2. Kaynak Parametreleri	18
1.4. Sürtünme Karıştırma Kaynak Uygulamaları	19
1.4.1. Uzay ve Havacılık Endüstrisi	19
1.4.2. Otomotiv Endüstrisi	21
1.4.3. Denizcilik Endüstrisi	22
1.4.4. Demiryolu Endüstrisi	22
1.5. Sürtünme Karıştırma Kaynağının Üstün Yönleri ve Sınırlamaları	23
1.6. Alüminyum ve Bakır Alaşımları	24
1.6.1. Alüminyum Alaşımları	24
1.6.2. Alüminyum Alaşımlarının Kaynaklı Birleştirilmesi	27
1.6.3. Bakır ve Bakır Alaşımları	28
1.6.4. Bakır ve Bakır Alaşımlarının Çeşitleri	29
1.6.4.1. Ticari Saf Bakır	29
1.6.4.2. Bakır Alaşımları	29
1.7. Kaynaklı Birleştirilen Alüminyum ve Bakırın Kullanım Alanları	31
2. KAYNAK ARAŞTIRMALARI	33

3. MATERYAL ve YÖNTEM	34
3.1. Deneysel Çalışmada Kullanılan Malzemeler	35
3.2. SKK Birleştirme İşleminde Kullanılan Takım	38
3.3. Sürtünme Karıştırma Kaynak Parametreleri	39
3.4. Al-Cu levhaların Kaynaklı Birleştirilmesi	42
4. BULGULAR	44
4.1. Mikroyapı İncelemesi	44
4.1.1. 660 dev/dk. Sabit Dönme Hızı Kullanılarak Kaynaklı Birleştirilen Al-Cu Numunenin Kaynak Bölgesinde Mikro Yapı İncelemesi	44
4.1.2. 920 dev/dk. Sabit Dönme Hızı Kullanılarak Sürtünme Karıştırma Kaynaklı Birleştirilen Al-Cu Numunelerin Kaynak Bölgesinin Mikro Yapı İncelemesi	44
4.2. Mekanik Testler	45
4.2.1. 660 dev/dk. Sabit Dönme Hızı, Farklı İlerleme Hızlarında (18, 32, 54 mm/dk.) Sürtünme Karıştırma Kaynaklı Birleştirilen Al-Cu Numunelerin Mekanik Testleri	47
4.2.2. 920 dev/dk. Sabit Dönme Hızı, Farklı İlerleme Hızlarında (18, 32, 54 mm/dk.) Kaynaklı Birleştirilen Al-Cu Numunelerin Mekanik Testleri	49
5. TARTIŞMA ve SONUÇ	51
KAYNAKLAR	53
ÖZGEÇMİŞ	61

TABLolar DİZİNİ

	Sayfa
Tablo 1.1. Alüminyum alaşımlarında alaşım element oranları.	25
Tablo 1.2. Bakır alaşımları, (UNS C10100-C10940).	30
Tablo 3.1. AA7075-T6 alüminyum alaşımının kimyasal kompozisyonu.	35
Tablo 3.2. AA7075-T6 alüminyum alaşımının mekanik özellikleri.	35
Tablo 3.3. Cu-ETP R240 (TS-EN-1652) bakırın kimyasal kompozisyonu.	35
Tablo 3.4. Cu-ETP R240 (TS-EN-1652) bakırın fiziksel özellikleri.	35
Tablo 3.5. H13 sıcak iş takım çeliğinin kimyasal kompozisyonu.	38
Tablo 3.6. Kaynaklı birleştirmede kullanılan parametreler.	41
Tablo 4.1. Esas malzemelerin ve kaynaklı Al-Cu numunelerin çekme test sonuçları.	45

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 1.1. Kaynak yöntemleri.	3
Şekil 1.2. Ark kaynak yönteminin şematik gösterimi.	4
Şekil 1.3. Direnç kaynağının temel bileşenleri.	5
Şekil 1.4. Oksi asetilen gaz kaynağının bileşenleri (1. Oksijen tüpü, 2. Asetilen tüpü, 3. Geri tepme emniyet valfi, 4. Oksijen hortumu, 5. Asetilen hortumu, 6. Üfleç, 7. Kaynak teli, 8. Bek, 9. İş parçası, 10. Kaynak alevi).	5
Şekil 1.5. Elektron ışın kaynak uygulaması.	6
Şekil 1.6. Lazer kaynağında, gaz lazer ışık sisteminin şematik gösterimi.	7
Şekil 1.7. Lazer kaynak uygulaması.	7
Şekil 1.8. Elektro-cüruf kaynağının şematik gösterimi (e.d: kuru elektrot serbest uç uzunluğu, e.w: ıslak elektrot serbest uç uzunluğu, d.s: cüruf banyosu derinliği, d.w ve w: kaynak banyosu derinliği).	8
Şekil 1.9. Raylarda termit kaynak uygulaması.	9
Şekil 1.10. Soğuk kaynak yönteminin uygulaması.	10
Şekil 1.11. Hadde kaynak yönteminin uygulaması.	10
Şekil 1.12. Sıcak basınç kaynak yönteminin uygulaması.	11
Şekil 1.13. Isı üretimi için elektrik rezistansının kullanıldığı difüzyon kaynak uygulaması.	11
Şekil 1.14. Patlamalı kaynak işleminin uygulaması.	12
Şekil 1.15. Sürtünme kaynak (SK) işleminin uygulaması.	13
Şekil 1.16. Ultrasonik kaynak işleminin şematik gösterimi.	13
Şekil 1.17. Sürtünme karıştırma kaynak işleminin şematik görünüşü.	14
Şekil 1.18. Sürtünme karıştırma kaynak işleminin aşamaları.	15
Şekil 1.19. Sürtünme karıştırma kaynak işleminde etkili olan parametreler.	16
Şekil 1.20. SKK yönteminde kullanılan takımlar .	17
Şekil 1.21. TWI tarafından tasarlanan takımlar.	17
Şekil 1.22. Oyuk küresel omuzlu ve silindirik dişli pime sahip takım.	18
Şekil 1.23. Uzay aracının bölme ve konik burnunun skk ile birleştirilmesi.	20
Şekil 1.24. Uzay aracının tünel ve ön bölmesinin skk ile birleştirilmesi.	20
Şekil 1.25. Uzunlamasına giriş ve sparların, alüminyum panellere skk ile birleştirilmesi.	21
Şekil 1.26. SKK yöntemi kullanılarak üretilen otomobil paneli.	21
Şekil 1.27. SKK yöntemi ile üretilen gemi güvertesi.	22
Şekil 1.28. SKK yöntemi ile üretilmiş yüksek hızlı trenin panel görünüşü.	23
Şekil 1.29. a) Alın kaynağı, b) katmanlı alın kaynağı, c) bindirme kaynağı, d) katmanlı bindirme kaynağı, e) V kaynağı, f) T alın kaynağı.	24
Şekil 1.30. Alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması.	26
Şekil 1.31. Manyetik puls kaynağı ile birleştirilen alüminyum - paslanmaz çelik levha.	28
Şekil 1.32. AA7075 ve Cu-ETP'nin SKK yöntemi ile kaynaklı birleştirilmesi.	28
Şekil 1.33. Al-Cu birleşim örneği.	31
Şekil 3.1. Metalografik analizler için hazırlanmış numune.	36
Şekil 3.2. Kaynaklı plakalardan elde edilen çekme test numuneleri.	37
Şekil 3.3. Alüminyum ve bakır çekme test numuneleri.	38
Şekil 3.4. SKK işleminde kullanılan takım.	39
Şekil 3.5. SKK işleminde kullanılan düşey başlıklı universal freze tezgahı.	40
Şekil 3.6. Al-Cu levhaların SKK ile birleştirilmesinde ötelenmiş dalıcı ucun görünüşü.	40
Şekil 3.7. Al-Cu levhaların freze tezgahı kullanılarak skk yöntemi ile birleştirilmesi.	41
Şekil 3.8. Farklı Al-Cu levhalara uygulanan skk işleminin şematik gösterimi.	42
Şekil 3.9. Al-Cu levhaların SKK ile kaynaklı birleştirilmesi.	43
Şekil 4.1. 660 dev/dk. dönme hızında SKK ile üretilen numunenin optik mikroskop görüntüsü.	44

Şekil 4.2. 920 dev/dk. dönme hızında SKK ile üretilen numunenin optik mikroskop görüntüsü.	45
Şekil 4.3. 660 dev/dk. dönme hızı ile SKK işlemi uygulanan levhaların çekme test sonuçları.	48
Şekil 4.4. 660 dev/dk. sabit dönme hızı, farklı ilerleme hızlarında (18, 32, 54 mm/dk.) Sürtünme karıştırma kaynaklı üretilen Al-Cu levhalardan elde edilen gerilme-sekil değiştirme eğrilerinin karşılaştırılması.	48
Şekil 4.5. 920 dev/dk. dönme devri ile SKK işlemi uygulanan levhaların çekme test sonuçları.	49
Şekil 4.6. 920 dev/dk. sabit dönme hızı, farklı ilerleme hızlarında (18, 32, 54 mm/dk.) Sürtünme karıştırma kaynaklı üretilen Al-Cu levhalardan elde edilen gerilme-sekil değiştirme eğrilerinin karşılaştırılması.	50



KISALTMALAR ve SİMGELER

Kısaltma/Simge	Tanım
AA	Alüminyum Kuruluşu (Aluminum Association)
Al	Alüminyum
ASTM	Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu (American Society for Testing and Materials)
Cu	Bakır
dev	Devir
dk.	Dakika
g	Gram
GMAW	Gaz Metal Ark Kaynağı (Gas Metal Arc Welding)
HB	Brinel Sertliği
ITAB	Isı Tesiri Altında Kalan Bölge
ml	Mililitre
mm	Milimetre
MPa	Megapaskal
MÖ	Milattan Önce
NASA	Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi (National Aeronautics and Space Administration)
ppm	Milyondaki partikül miktarı
SKK	Sürtünme Karıştırma Kaynağı
SKNK	Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı
T _e	Erime Sıcaklığı
TWI	Kaynak Enstitüsü (The Welding Institute)
UNS	Birleşik Numaralandırma Sistemi (The Unified Numbering System)
°C	Santigrat Derece

1. GİRİŞ

Sanayi devrimi, insanlık tarihinde yeni malzemelerin geliştirildiği önemli bir dönüm noktası olmuştur. Yeni malzemeler, ucuz ve dayanıklı olmaları nedeniyle kara, hava, deniz ve uzay çalışmalarında kullanılan teknolojinin gelişmesinde büyük rol oynamıştır. 20. Yüzyıl, mühendislik eserlerine ve bu eserlerin gerçekleştirilmesinde kullanılan malzemelerin gelişimindeki büyümeye tanıklık edilen yüzyıl olmuştur [1]. Malzeme yelpazesindeki bu genişleme, mühendislere özellikli parça ve ekipman tasarımlarını gerçekleştirmelerine olanak sağlarken, diğer yandan yapıda farklı malzemelerin kullanıldığı yeni durumlarda ortaya çıkarmıştır. Kimyasal, termal, fiziksel ve mekanik özellikler bakımından farklı malzemelerin oluşturduğu parçaların birleştirilmesi zorluklar da oluşturmuştur. Farklı malzemelerin birçoğu için mekanik sabitleme uygun bir yöntem olmuştur. Ancak, yüksek performanslı yapı gereksinimi, perçin ve civata gibi mekanik birleştirmelerin yerini kaynaklı birleştirmenin almasının önünü açmıştır. Özellikle hafifliğin ön plana çıktığı yapıların gerçekleştirilmesinde kaynak konstrüksiyon kullanımı büyük önem kazanmıştır [2].

Kaynak, iki metal parçadan tek bir parça üretilmesi amacıyla yapılan metalürjik olarak birleştirme işlemidir. Bu birleştirme, yekpare yapılar elde etmenin en önde gelen yoludur ve sıklıkla ısı ve/veya basınç kullanımı ile gerçekleştirilir. Ana malzemenin kimyasal bileşimine göre kaynaklı birleştirmede, ergitme kaynağı ya da katı hal kaynağı kullanılmaktadır. Isı kullanılarak kaynak edilecek esas metal parçaların kaynak yapılan bölgede eritilmesi esasına dayanan ergitme kaynak yönteminde, birleştirmede mukavemet artışı sağlamak için erimiş bölgeye dolgu metali eklenmektedir. Birleştirilecek parçaların kaynak bölgesinde eritme işleminde elektrik arkı, elektrik akımı ya da gaz karışımları kullanılmaktadır. Kaynaklı birleştirilecek bölgede eritme işlemi elektrik arkı ile gerçekleştiriliyor ise ark kaynağı olarak ifade edilmektedir. Basınç altında bir arada tutulan parçaların temas yüzeylerinden geçen elektrik akıma karşı gösterdiği dirençten açığa çıkan ısı ile temas yüzeyinde oluşan erime işlemi ile sağlanan birleşme direnç kaynağını oluşturmaktadır [3].

Birleştirilecek metal parçalarını ve kullanılıyorsa dolgu malzemesini eritmek için gerekli sıcak alev, yanıcı gaz ve oksijen vasıtasıyla sağlanıyorsa gaz kaynağı olarak adlandırılmıştır. Son yıllarda kaynaklı birleştirmelerde kaynak bölgesinde eritme için elektron ışını ve lazer de kullanılmaktadır. Kaynak bölgesinde eritme elektron ışını kullanılarak gerçekleştirilirse elektron kaynağı, lazer kullanılarak eritme gerçekleşirse lazer kaynağı olarak ifade edilmektedir. Kaynaklı birleştirmede, elektron kaynağı ve lazer kaynağı küçük eriyik havuzu ve daha dar ısı tesiri altında kalan bölge (ITAB) oluşturması ile diğer eritme kaynak yöntemlerine üstünlük sağlamaktadır. Eritme kaynak yöntemleri metalik malzemelerin kaynaklı birleştirilmesinde en yaygın kullanıma sahiptir. Ancak, başta bakır ve alüminyum gibi ısı ve elektrik iletkenlik katsayısı yüksek metalik

malzemelerin eritme kaynak yöntemleri ile kaynaklı birleştirilmesi özel koşullarda gerçekleştirilmektedir. Birleştirmede, eritme olmadan yalnızca basınç veya basınç ve ısının birlikte uygulandığı kaynak yöntemleri katı hal kaynağı olarak adlandırılmıştır. İki parça yüzeyi erime sıcaklığının altında yüksek sıcaklıkta basınçla birbirine bastırıldığında, parçalar katı hal difüzyonu ile birleşirler. Katı halde gerçekleşen bu kaynağa difüzyon kaynağı denilmektedir. Parçalar üst üste konulup orta seviyede basınç uygulanır ve parça temas yüzeylerine paralel titreşim hareketi oluşturmak için yüksek frekanslı ses dalgaları kullanılarak gerçekleşen birleştirme ultrasonik kaynak yöntemi olarak adlandırılmaktadır. İki yüzey arasında gerçekleştirilen sürtünmeden açığa çıkan ısı yardımı ile parçaların kaynaklı birleştirilmesi teknikte sürtünme kaynağı olarak ifade edilmiştir. Eritme kaynak yöntemleri ile birleştirilmeleri sorunlu olan başta bakır ve alüminyum olmak üzere birçok metalik malzemenin kaynaklı birleştirilmesinde katı hal kaynak yöntemleri başarıyla kullanılmaktadır. Aynı tür malzemelerin kaynaklı birleştirilmesinde katı hal kaynak yöntemlerinin kullanıldığı çok sayıda bilimsel çalışma yapılmıştır.

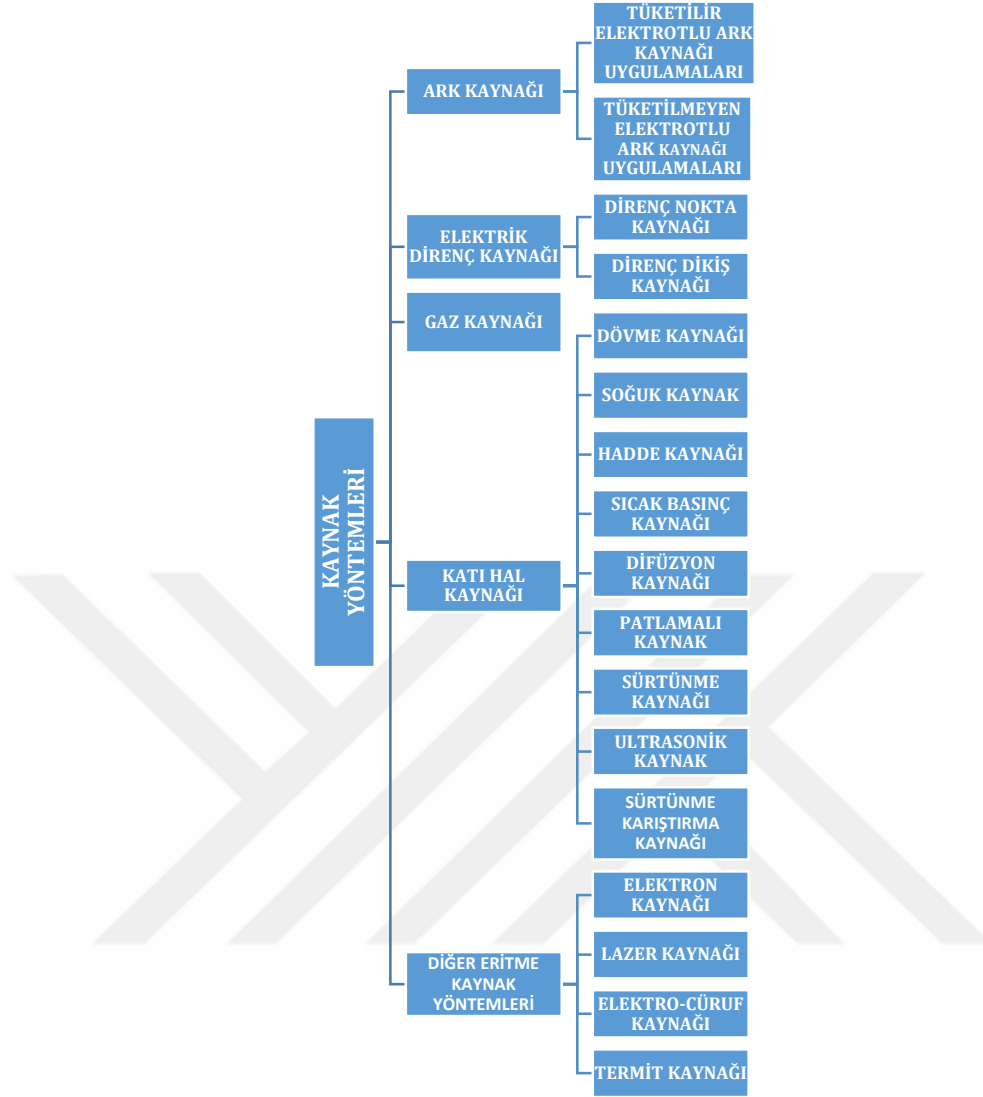
Son yıllarda katı hal kaynak tekniklerinden sürtünme karıştırma kaynak yöntemi ile farklı türde metalik malzemelerin kaynaklı birleştirilmesi gerçekleştirilmiştir.

Tarafımızdan yapılan literatür araştırmaları; Bakır ve alüminyumun kaynaklı birleştirilmelerinde katı hal kaynak yöntemlerinin kaynak mukavemeti açısından daha iyi netice verdiğini göstermiş; bu doğrultuda bakır ve alüminyum levhaların birleştirilmesinde katı hal kaynak yöntemlerinden sürtünme karıştırma kaynak yöntemi kullanılmıştır.

Bu çalışmada literatürde az çalışılmış olan birbirinden farklı AA7075 alüminyum alaşımı ve saf bakırın SKK yöntemi ile birleştirilmesinde, 660 ve 920 dev/dk. iki farklı dönme hızı, 18, 32 ve 54 mm/dk. ilerleme hızı, 1 mm öteleme miktarı, öteleme yönü ve takım geometrisinden oluşan parametreler kullanılarak kaynak performansı araştırılmış ve elde edilen bulgular birbirleriyle karşılaştırılmıştır.

1.1. Malzemelerin Birleştirilmesinde Kullanılan Kaynak Yöntemleri

Parçaların çözülemez bir şekilde birleştirilmesi, Şekil 1.1'de verilen kaynak yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Kaynaklı birleştirme, bazı durumlarda dolgu metalinin eklendiği birleştirilecek iki parçanın eritilmesiyle birleştirmenin gerçekleştirildiği eritme kaynağı veya birleştirmede ısı ve/veya basınç uygulaması ile yapıldığı, esas metal parçalarda erimenin olmadığı ve dolgu metalinin de kullanılmadığı katı hal kaynak yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilmektedir.

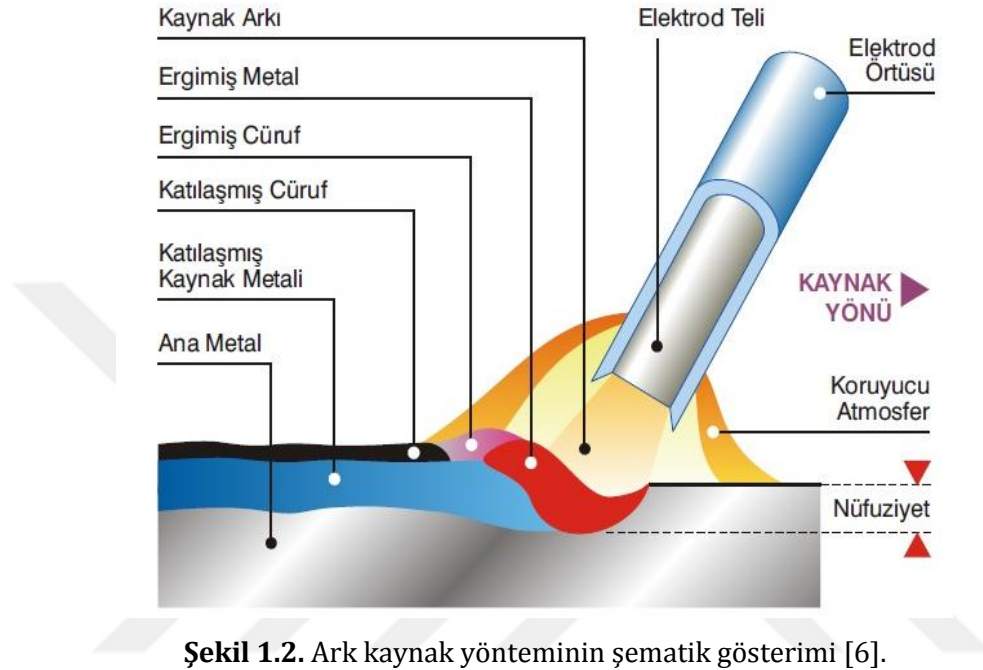


Şekil 1.1. Kaynak yöntemleri [4].

1.1.1. Ark Kaynağı

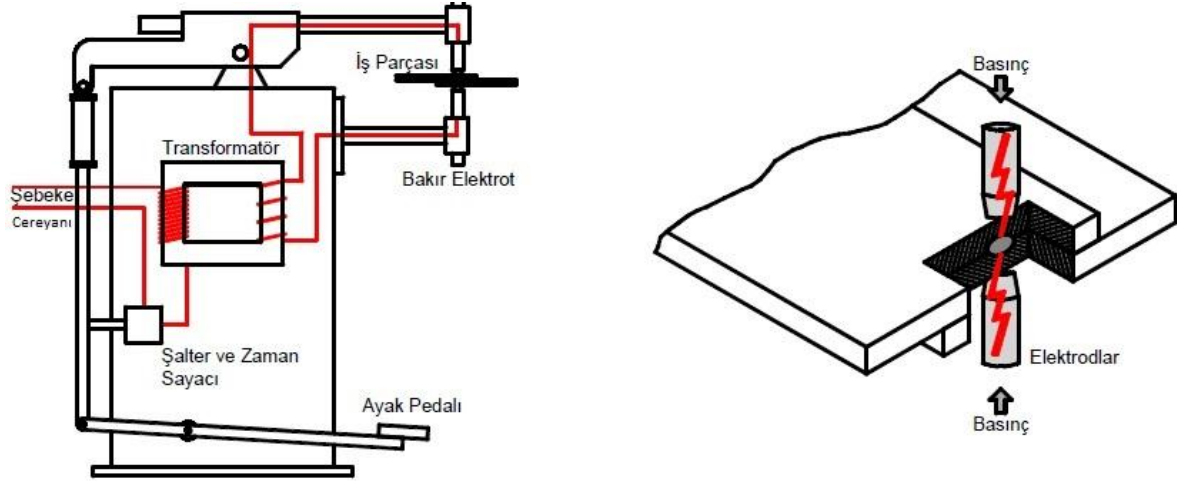
Ark Kaynağı, bir elektrot ile iş parçası arasında oluşturulan arkın ısı ile metallerin birleştirildiği bir eritme kaynak yöntemidir. Elektrik arkı, elektrik akımının bir elektrik devresinde belirli bir aralıktan atlamasıdır. Arkın kararlılığı, plazma adı verilen ısı ile iyonize olmuş gaz sütunu ile sağlanır. Bir ark kaynağında arkı başlatmak için, elektrot iş parçasına temas ettirilir ve hemen sonra aralarında kısa bir mesafe kalacak şekilde iş parçasından hızla uzaklaştırılır. Arkın oluşturduğu elektrik enerjisi, tüm metalleri eritmek için yeterli olan 5500°C veya daha yüksek sıcaklıklar elde edilmesini sağlar. Elektrot ucunun hemen önünde, esas metal parçaları ve eğer kullanılıyorsa dolgu metali karışımından oluşan bir erimiş metal banyosu oluşur. Ark kaynak uygulamalarının çoğunda, işlem esnasında kaynaklı bağlantının hacmi ve

mukavemetini artırmak için, kaynak dikişine dolgu metali eklenmektedir. Elektrot, kaynak yapılacak parçalar üzerinde ilerledikçe, ardında kalan sıvı metal banyosu katılaşır [5]. Tüketilir ve tüketilemeyen elektrotlu ark kaynak uygulamaları mevcuttur. Ark kaynağının şematik resmi Şekil 1.2’de görülmektedir.



1.1.2. Elektrik Direnç Kaynağı

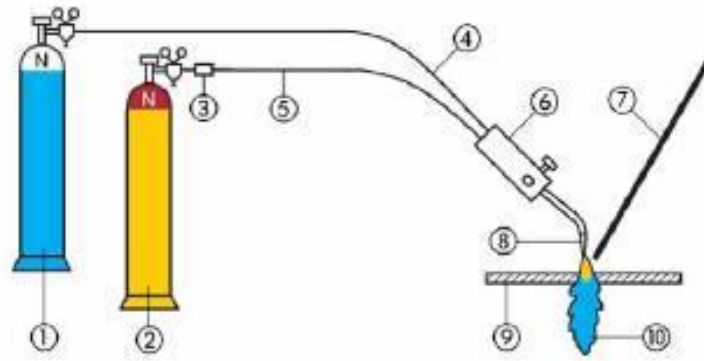
Elektrik Direnç Kaynağı, birleştirmenin ısı ve basıncın birlikte uygulanması ile yapıldığı bir grup eritme kaynak yöntemidir. Bu yöntemde, kaynak yapılacak parçaların ara yüzlerinde oluşan elektrik akımına dirençten dolayı ısı açığa çıkar. Direnç kaynağı yöntemindeki temel bileşenler Şekil 1.3’de gösterilmektedir. Bu bileşenler, kaynak edilecek iş parçaları, karşılıklı elektrot, elektrotlar arasında parçalara basınç uygulayıp ezme işlemini yapan mekanizma ve kontrollü bir akım uygulamak için alternatif akım güç kaynağıdır [7]. Nokta kaynak, iki parça arasında, kaynak çekirdeği denilen, bir eritme bölgesi oluşturur. Direnç nokta kaynağı ve direnç dikiş kaynağı olarak farklı yöntemleri mevcuttu



Şekil 1.3. Direnç kaynağının temel bileşenleri [8].

1.1.3. Gaz Kaynağı

Gaz kaynağı, kaynak yapmak için oksijen ile karıştırılan değişik yanıcı gazların yakıldığı bir grup kaynağı kapsayan bir ifadedir. Bu yöntemler arasındaki fark, her bir yöntemde değişik bir gaz türünün kullanılmasıdır. Bu gaz karışımları, metal levhaların veya diğer parçaların kesme ve ayırma işlemleri için kesme torçlarında da kullanılmaktadır [3]. Bu yöntemler içerisinde en önemli olanı Şekil 1.4 'de bileşenleri verilen, oksijen-asetilen gaz kaynağıdır.

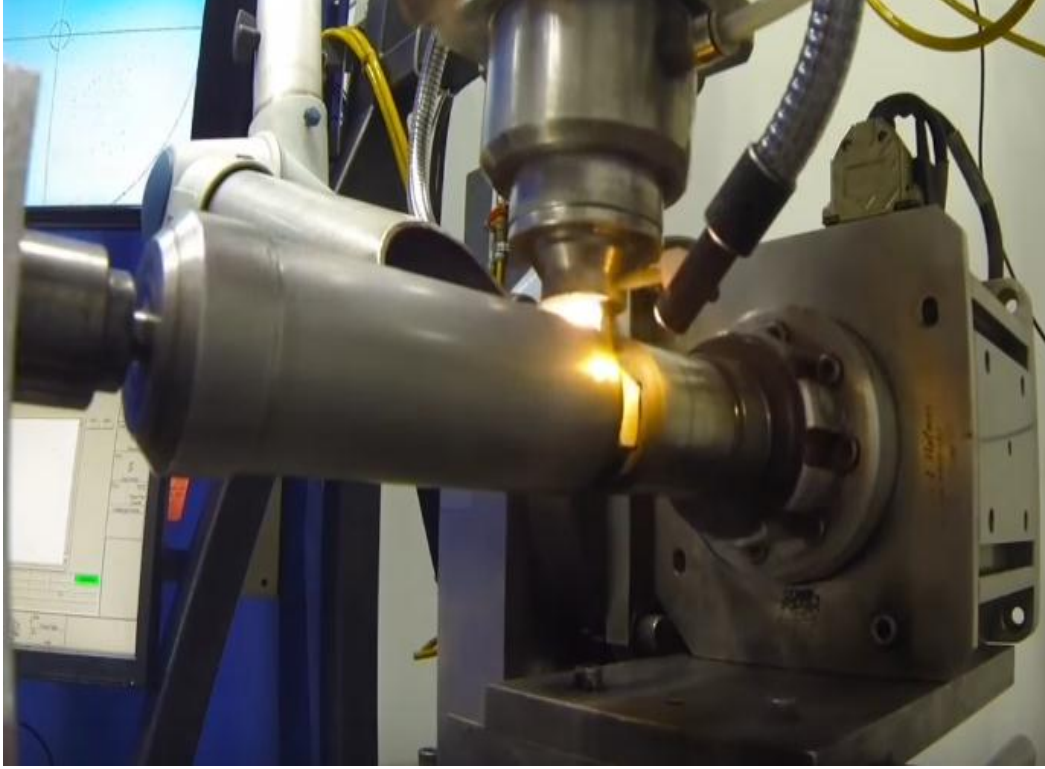


Şekil 1.4. Oksijen-asetilen gaz kaynağının bileşenleri (1. Oksijen tüpü, 2. Asetilen tüpü, 3. Geri tepme emniyet valfi, 4. Oksijen hortumu, 5. Asetilen hortumu, 6. Üfleç, 7. Kaynak teli, 8. Bek, 9. İş parçası, 10. Kaynak alevi) [9].

1.1.4. Elektron Kaynağı

Elektron kaynağı veya elektron demeti kaynağı, yüksek odaklı, yüksek yoğunluklu bir elektron demetinin iş parçası yüzeyine hızla çarpması ile kaynak ısısının üretildiği bir eritme

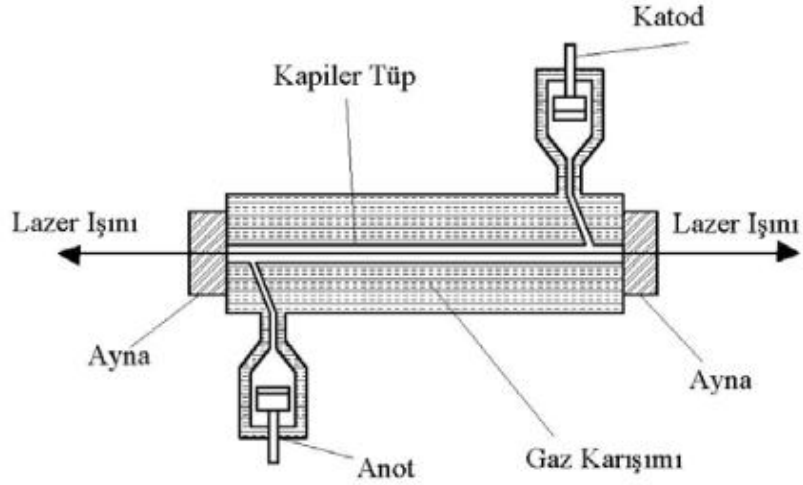
kaynağı yöntemidir. Elektron tabancası elektronları ivmelendirmek için, yüksek gerilimde (tipik olarak 10-150 kV) çalışır, ancak akım (mili amper) değerleri düşüktür. Yüksek enerji yoğunluğu, elektronların iş parçası üzerinde çok küçük bir noktaya odaklanması ile elde edilir [10]. Şekil 1.5'de elektron ışın kaynak uygulaması gösterilmiştir.



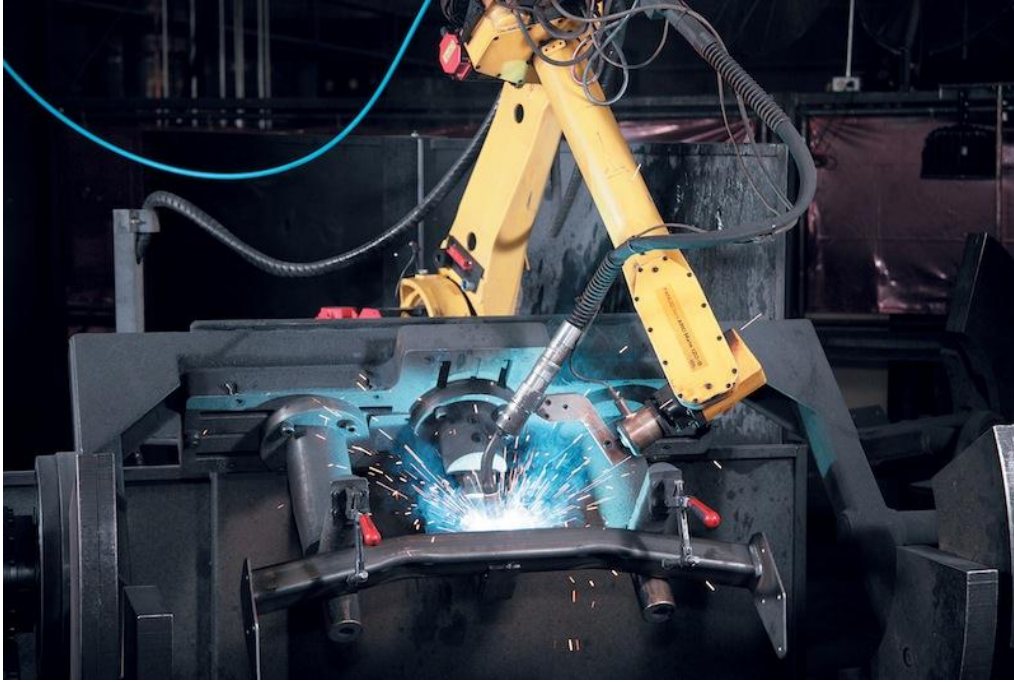
Şekil 1.5. Elektron ışın kaynak uygulaması [11].

1.1.5. Lazer Kaynağı

Lazer kaynağı, yüksek yoğunluklu ve koherent (aynı yönde, dalga boyunda ve fazda) bir ışık demetinin kaynak edilecek iş parçasına odaklanması ile birleştirmenin yapıldığı bir eritme kaynak yöntemidir. Lazer kelimesinin İngilizcesi laser, uyarılmış radyasyon ışınması (emisyonu) ile ışık yoğunlaştırılması anlamına gelen “light amplification by stimulated emission of radiation” kelimelerinin baş harflerinden oluşan kısaltmadır. Lazer kaynağı genellikle, oksidasyonu önlemek için koruyucu gaz (helyum, argon, nitrojen ve karbondioksit) kullanılarak yapılmaktadır [4]. Dolgu metalinin genellikle kullanılmadığı lazer kaynağında, gaz lazer ışık sisteminin şematik görünüşü Şekil 1.6'da, lazer kaynak uygulaması ise Şekil 1.7'de verilmiştir.



Şekil 1.6. Lazer kaynağında, gaz lazer ışık sisteminin şematik gösterimi [12].

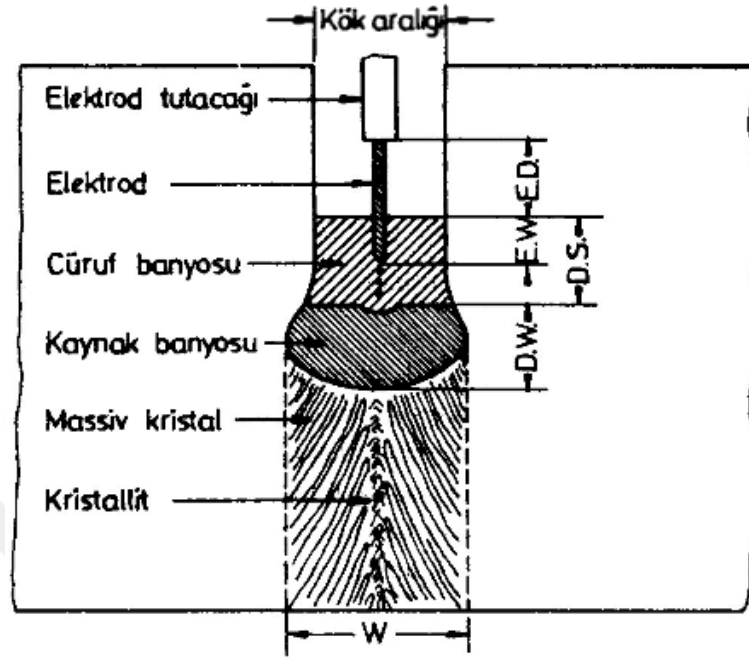


Şekil 1.7. Lazer kaynak uygulaması [13].

1.1.6. Elektro-Cüruf Kaynağı

Elektro-cüruf kaynağı yöntemi, bazı ark kaynağı işlemlerinde kullanılan aynı ekipman ile uygulanmaktadır ve kaynağı başlatmak için ark kullanılır. Ancak, kaynak işlemi esnasında ark kullanılmadığından yöntem bir ark kaynağı uygulaması değildir. Elektro-cüruf kaynağı, dolgu metali ve esas metal parçaları üzerine sıcak ve iletken olan erimiş bir cürufun etkimesi ile

birleştirmenin elde edildiği eritme kaynak işlemidir [14]. Elektro cüruf kaynağının şematik gösterimi Şekil 1.8'de verilmiştir.



Şekil 1.8. Elektro-cüruf kaynağının şematik gösterimi (E.D: Kuru elektrot serbest uç uzunluğu, E.W: Islak elektrot serbest uç uzunluğu, D.S: Cüruf banyosu derinliği, D.W ve W: kaynak banyosu derinliği) [15].

1.1.7. Termit Kaynağı

Termit kaynağı, termit, tutuşturulduğunda ekzotermik bir reaksiyon oluşturan alüminyum tozu ile demir tozu karışımının ticari adıdır. Bu karışım, yangın bombalarında ve kaynak işleminde kullanılır. Kaynak işleminde ilk termit kullanımı, 1900'lü yıllara kadar gider. Termit kaynağı, termitin kimyasal reaksiyonu sonucu aşırı ısınmış sıvı metal ile elde edilen ısı ile birleştirmenin yapıldığı bir eritme kaynağı yöntemidir. Dolgu metali sıvı metalden sağlanır. Yöntem, kaynak amacıyla kullanılmasına rağmen, kaynaktan ziyade döküm işlemlerine benzemektedir [16]. Şekil 1.9'da termit kaynak uygulaması görülmektedir.



Şekil 1.9. Raylarda termit kaynak uygulaması [17].

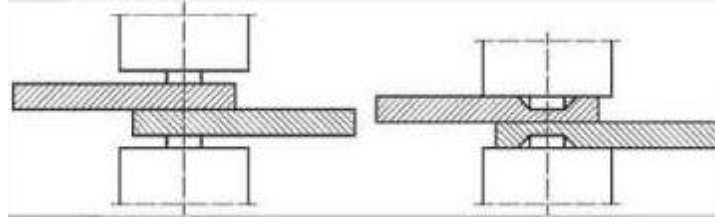
1.1.8. Katı Hal Kaynağı

1.1.8.1. Dövme Kaynağı

Dövme Kaynağı, üretim teknolojisinin gelişimi açısından tarihi bir öneme sahiptir. Yöntemin ilk uygulaması, antik çağdaki demircilerin iki metal parçasının nasıl birleştirilebileceğini öğrendikleri MÖ 1000 yıllarına kadar gitmektedir. Dövme kaynağı, birleştirilecek parçaların dövme sıcaklığına ısıtıldığı ve ardından çekiç ya da başka yöntemlerle dövüldüğü bir kaynak işlemidir. Yöntem tarihsel açıdan önemli olsa da, günümüzde bazı varyasyonları hariç ticari önemi düşüktür [4].

1.1.8.2. Soğuk Kaynak

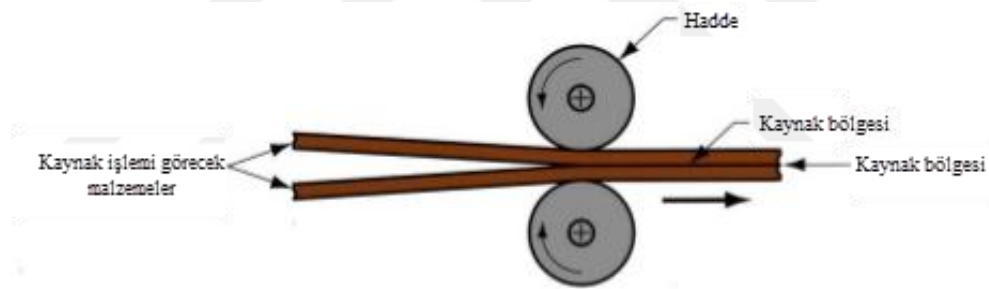
Soğuk kaynak, oda sıcaklığında temiz temas yüzeyleri arasında yüksek bir basınç uygulaması ile yapılan bir katı hal kaynak uygulamasıdır. Soğuk kaynağın başarılı olması için temas yüzeyleri çok temiz olmalıdır. Yüzey temizleme, kaynak işleminden hemen önce yüzey yağlarının giderilmesi ve tel fırça ile fırçalamak suretiyle yapılır. Ayrıca, kaynak yapılacak metallere en azından biri, tercihen her ikisi, yüksek sünekliğe sahip ve soğuk sertleştirilmemiş olmalıdır [18]. Yumuşak alüminyum ve bakır gibi metaller kolaylıkla soğuk kaynak yapılabilir. Şekil 1.10'da soğuk kaynak yönteminin uygulaması gösterilmiştir.



Şekil 1.10. Soğuk kaynak yönteminin uygulaması [19].

1.1.8.3. Hadde Kaynağı

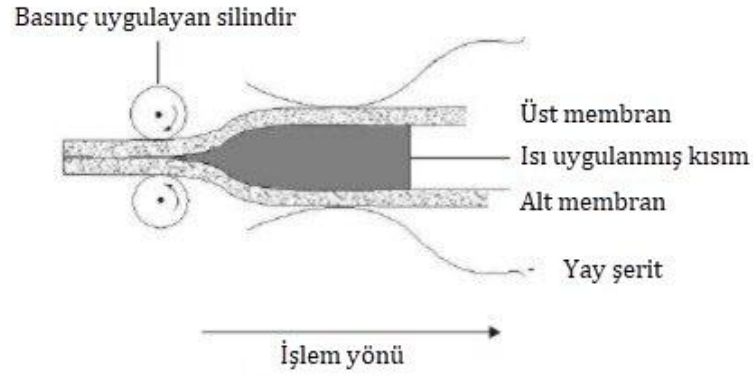
Hadde kaynağı, birleştirme işlemi için yeterli basıncın merdanelerle uygulandığı ve dışarıdan ısı uygulanarak veya uygulanmadan gerçekleştirildiği katı hal kaynak yöntemidir. Hadde kaynağı, işlem öncesi parçalara dışarıdan ısı verilmesine bağlı olarak, dövme kaynağına veya soğuk kaynağa benzemektedir. Yöntemin uygulanması Şekil 1.11’de gösterilmektedir. Dışarıdan herhangi bir ısı uygulaması yapılmadığı takdirde yöntem soğuk hadde kaynağı, kaynak için parçalar önceden ısıtılırsa, yöntem sıcak hadde kaynağı olarak adlandırılmaktadır [4].



Şekil 1.11. Hadde kaynak yönteminin uygulaması [20].

1.1.8.4. Sıcak Basınç Kaynağı

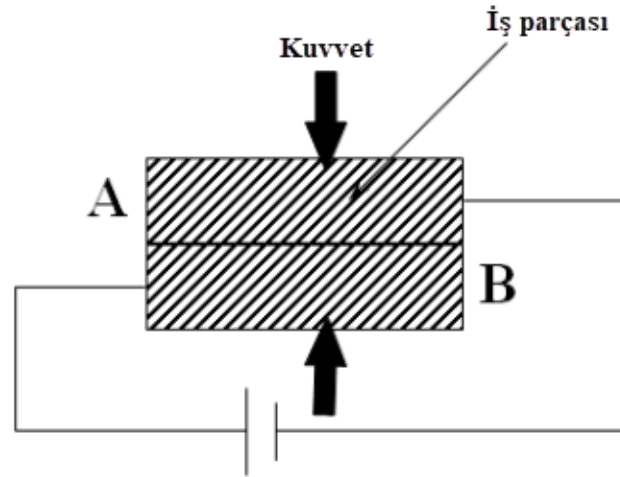
Sıcak basınç kaynağı, birleştirilecek parçaların önemli oranda deformasyona uğraması için yeterli basınç ve ısı uygulanarak birleştirmenin elde edildiği dövme kaynak türüdür. Kaynaklı birleştirme sürecinde, gerçekleşen şekil değiştirme ile parçaların yüzeylerindeki oksit tabakaları kırılır ve böylece iki parça arasında iyi bir birleşme gerçekleşebilir. Temas yüzeyleri arasında difüzyon oluşmasına imkân verecek yeterli sürenin verilmesi önemlidir. İşlem genellikle vakum ortamında veya koruyucu gaz ortamında uygulanır. Sıcak basınç kaynağının temel uygulama alanını havacılık sektörü oluşturmaktadır [21]. Yöntemin uygulanması Şekil 1.12’de gösterilmektedir.



Şekil 1.12. Sıcak basınç kaynak yönteminin uygulaması [22].

1.1.8.5. Difüzyon Kaynağı

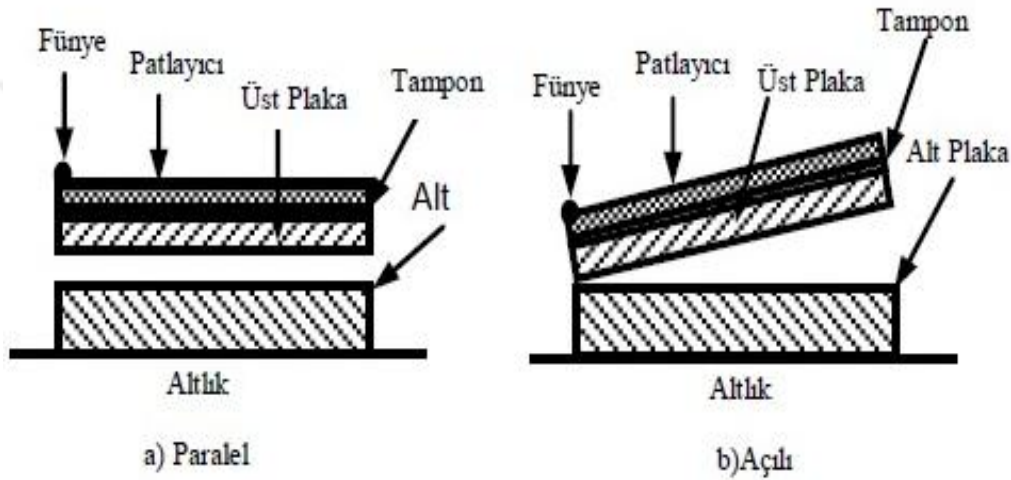
Difüzyon kaynağı, genellikle kontrollü bir atmosferde, difüzyon ve birleştirme için yeterli bir süre ısı ve basınç uygulaması ile gerçekleştirilen bir katı hal kaynak yöntemidir. Difüzyon kaynağı sıcaklıkları kaynak edilen metalin erime derecesinin oldukça altındadır (yaklaşık $0.5 T_e$) ve birleştirilecek yüzeylerdeki plastik şekil değişimi azdır. Yöntemdeki temel birleştirme mekanizması, temas yüzeylerindeki atomların karşılıklı yer değiştirmesini sağlayan, katı hal difüzyonudur [23]. Isı üretimi için elektrik rezistansının kullanıldığı difüzyon kaynak yöntemi Şekil 1.13'de görülmektedir.



Şekil 1.13. Isı üretimi için elektrik rezistansının kullanıldığı difüzyon kaynak uygulaması [24].

1.1.8.6. Patlamalı Kaynak

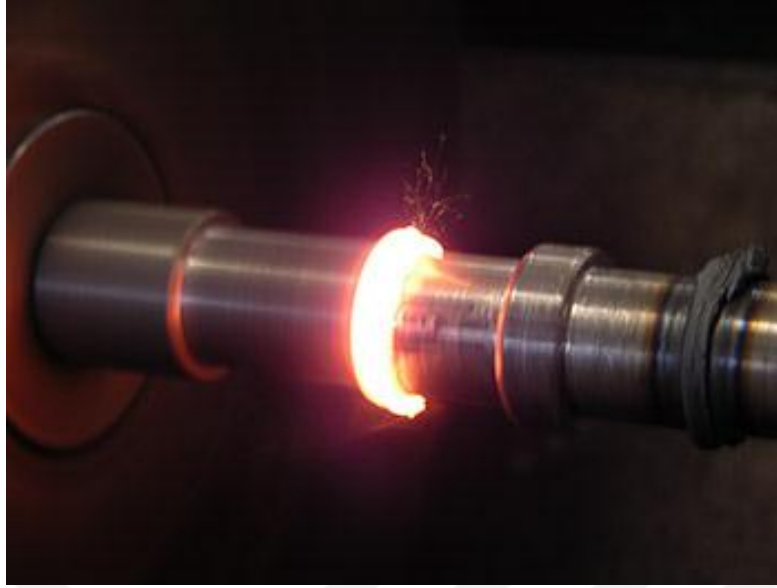
Patlamalı kaynak, bir patlayıcının patlatılması sonucu açığa çıkan enerji ile iki metal yüzeyinin hızlı bir şekilde çarpışması sonucu birleşmesinin sağlandığı bir katı hal kaynak yöntemidir. Yöntem genellikle, geniş bir metal yüzeyinin başka bir metal ile kaplanması gibi, iki farklı metali birleştirmek için kullanılır. Yöntemin kullanım alanları arasında kimya ve petrol endüstrilerinde korozyona dayanıklı sac ve levha üretimi bulunmaktadır [25]. Şekil 1.14'de patlamalı kaynak işlemi uygulamasının şematik gösterimi yer almaktadır.



Şekil 1.14. Patlamalı kaynak işleminin uygulaması.[26]

1.1.8.7. Sürtünme Kaynağı

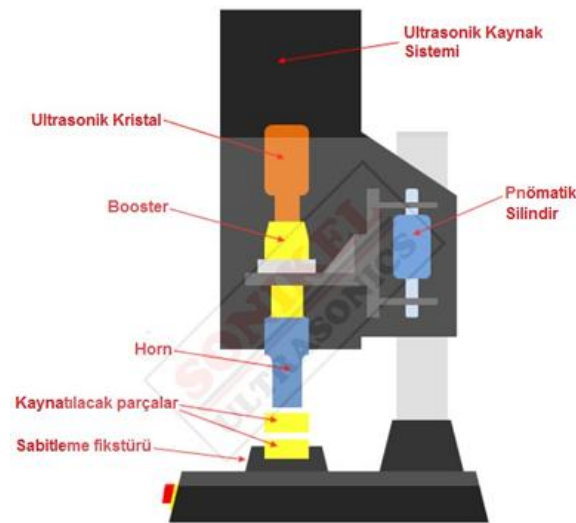
Sürtünme kaynağı, sürtünme ile açığa çıkan ısı ile birlikte basınç kullanılarak birleştirme oluşturulan bir katı hal kaynak yöntemidir. Sürtünme kaynağı, otomasyona uygun ve çok yaygın olarak kullanılan ticari bir birleştirme yöntemidir. Sürtünme, genellikle yüksek devirde döndürülen bir parçanın sabit bir parçaya mekanik olarak teması ile oluşur [27]. Sürtünme kaynak uygulaması Şekil 1.15'de gösterilmiştir.



Şekil 1.15. Sürtünme kaynak (SK) işleminin uygulaması [28].

1.1.8.8. Ultrasonik Kaynak

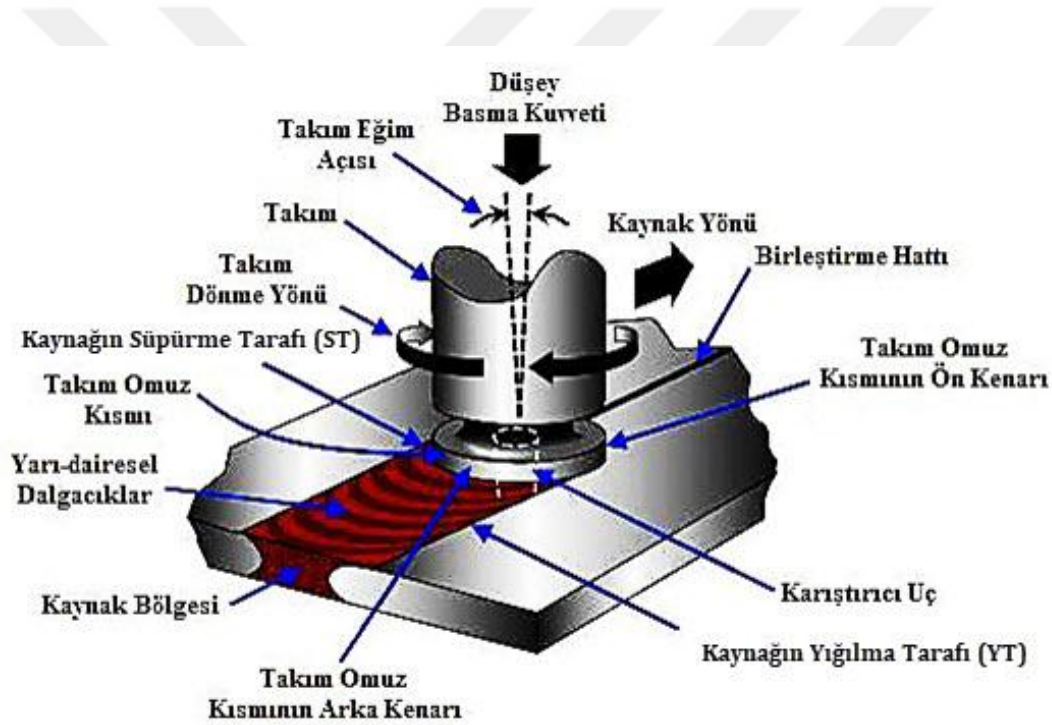
Ultrasonik kaynak, iki parçanın düşük bir sıkıştırma (sabitleme) kuvveti ile bir arada tutulduğu ve birleştirme elde etmek için ara yüzeye ultrasonik frekansta titreşimli kayma gerilmelerinin uygulandığı bir katı hal kaynak yöntemidir. Yönteme özgü bir uygulama Şekil 1.16'da gösterilmektedir. Parçalar arasındaki titreşim hareketi, yüzeyde mevcut yüzey filmini kırarak parçalar arası sıkı temasın sağlandığı metalürjik bağ oluşturur [29].



Şekil 1.16. Ultrasonik kaynak işleminin şematik gösterimi [30].

1.1.8.9. Sürtünme Karıştırma Kaynağı

Sürtünme karıştırma kaynağı (SKK), iki iş parçası arasında birleştirme hattı boyunca yüksek devirde dönen bir takımın sürekli daldırılması ve kaynak hattı boyunca ilerletilmesi ile sürtünme ısı elde edilen ve metalin mekanik olarak karıştırılması ile kaynak dikişi oluşturulan ergimenin olmadığı bir katı hal kaynak yöntemidir. Yöntemin adı bu karıştırma hareketinden gelmektedir. Sürtünme karıştırma kaynağında sürtünme ısı ve iş parçasında oluşan adyabatik plastik deformasyon, takım etrafındaki malzemenin yumuşamasına sebep olmakta, takıma ilerleme hareketi sağlanması ile yumuşak malzeme, takımın önünden arkasına doğru hareket etmektedir. Oluşan karışım ise kaynak dikişinin oluşmasını sağlamaktadır [31]. Yöntemin uygulaması Şekil 1.17’de gösterilmiştir.



Şekil 1.17. Sürtünme karıştırma kaynak işleminin şematik görünüşü [32].

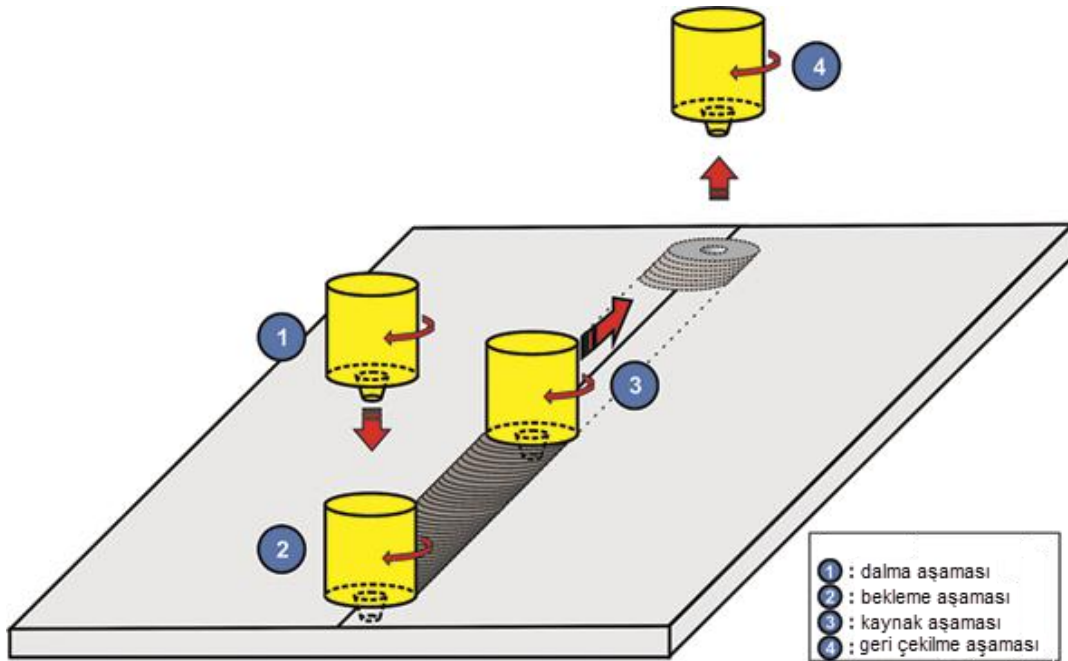
1.2. Sürtünme Karıştırma Kaynak Yönteminin Uygulama Aşamaları

SKK yöntemi, dalma aşaması, bekleme aşaması, kaynak aşaması ve geri çekilme aşaması olarak dört evreden oluşmaktadır. İlk aşamada, özel olarak tasarlanmış bir omuza sahip, tükenmeyen dönen takım ve pim, plakaların birleştiği kısma daldırılır. İkinci aşamada dönen takım ile iş parçası arasında oluşan sürtünme ısı ve iş parçasının adyabatik plastik deformasyonundan kaynaklanan ısı takımın çevresindeki malzemenin yumuşamasına neden

olur. Dönen takıma ilerleme hareketi verilmesi ile olan kaynak aşaması, üçüncü evreyi oluşturmaktadır [5].

Kaynak, ısı oluşumu ve plastik deformasyonu içeren karmaşık bir termo-mekanik işlemle gerçekleşir [33]. SKK proseslerinde kaynağın gerçekleşmesi, ana malzemesinin bir hat boyunca (kaynak hattı) hamurumsu kıvamda karıştırılmasını gerektirir.

Mekanik iş, ısı enerjisinin üretimini etkiler ve aynı zamanda kaynaklı birleşimde kaliteli bir birleşme elde etmek için baz malzemelerin hamurumsu fazda karıştırılmasını sağlar [33]. Son (dördüncü) evrede, takım materyalden dikey olarak çıkmakta, böylece Şekil 1.18’de de belirtildiği gibi kaynak döngüsü tamamlanmaktadır.

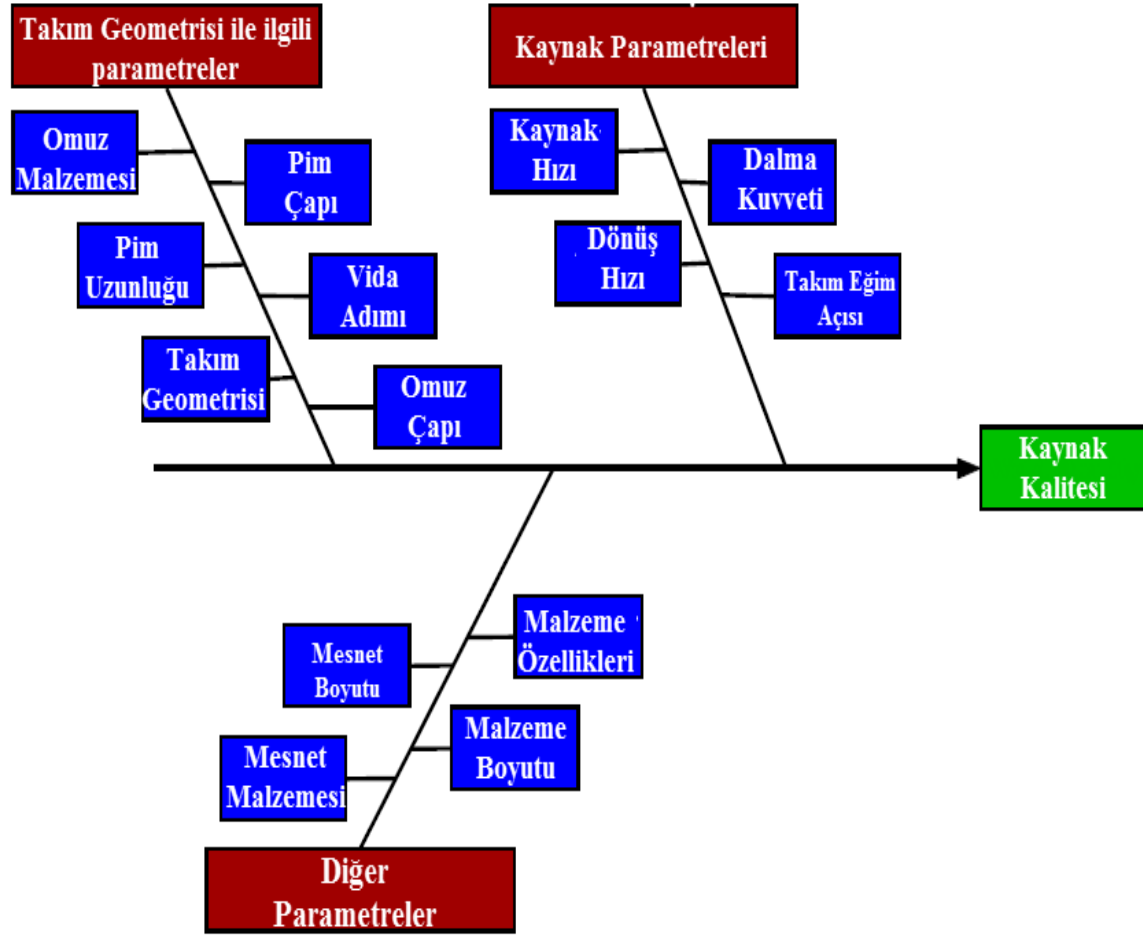


Şekil 1.18. Sürtünme karıştırma kaynak işleminin aşamaları [34].

1.3. Sürtünme Karıştırma Kaynak İşleminde Etkili Olan Parametreler

SKK işleminde etkili olan parametreler Şekil 1.19’da belirtildiği gibi üç gruba ayrılmaktadır, bunlar:

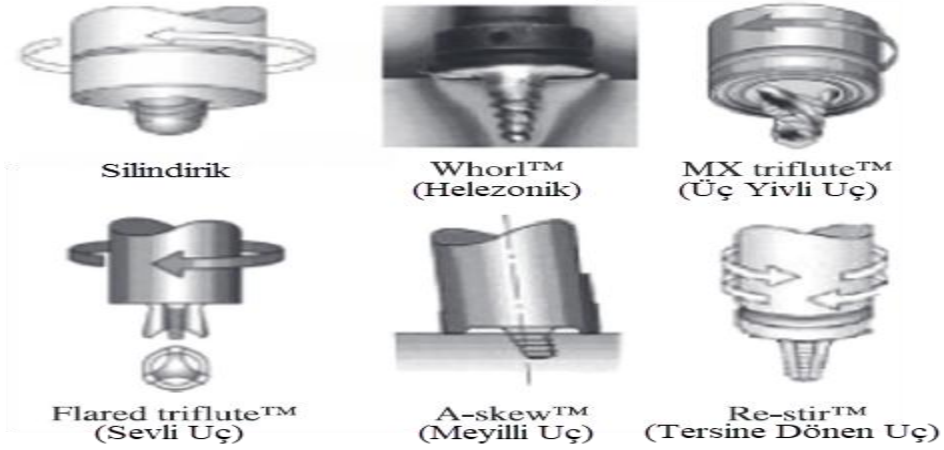
- Takım geometrisi: Omuz profili, pim profili, omuz ve pim çapı, omuz ve pim malzemesi.
- Kaynak parametreleri: İlerleme hızı, dönüş hızı, eğim açısı, vb.
- Diğer parametreler: İş parçası özellikleri, aparat boyutu, iş parçası boyutu, aparat malzemesidir [35].



Şekil 1.19. Sürtünme karıştırma kaynak işleminde etkili olan parametreler [35].

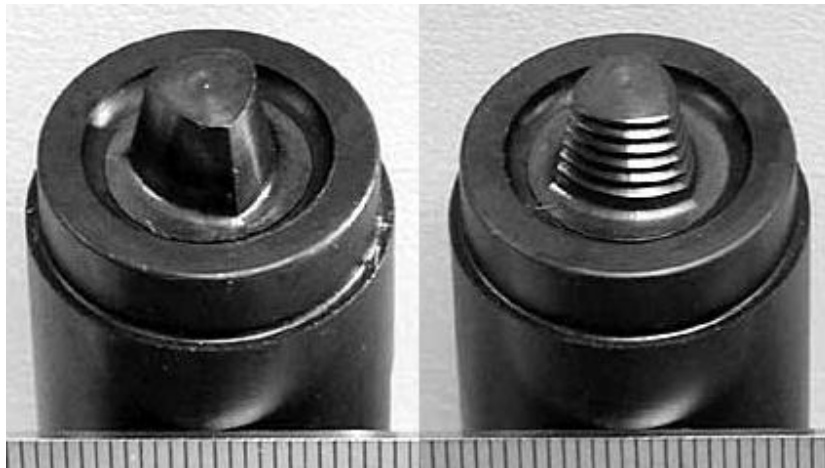
1.3.1. Takım Geometrisi

Takım geometrisi, SKK yöntemi kullanılarak gerçekleştirilecek birleştirme işleminde dikkate alınması gereken önemli faktörlerden biridir. Şekil 1.20’de görüldüğü gibi, farklı geometrilere sahip takım, ısı üretme, karıştırmayı gerçekleştirme, birleşme hattını kesme, oksit katmanlarını parçalama, dövme basıncı oluşturma ve birleşim yerine malzeme ilavesi olmak üzere birçok işlevi yerine getirmektedir. Aynı zamanda, takımın geometrisi, birleştirme işlemi süresince oluşan kuvvet ve tork değerlerini karşılayabilmeli ve dalma derinliği ile uyumlu olmalıdır [36].



Şekil 1.20. SKK yönteminde kullanılan takımlar [37].

Eski takım tasarımları düz, özelliksiz omuzlardan ve silindirik veya dişli pimlerden oluşurken, günümüzde ilk tasarım yeniliklerinden bazıları Thomas ve ark. [38] tarafından geliştirildi. Bu yenilikler, ara yüzey oksit tabakasının bozulmasını arttırmayı ve özellikle bindirme kaynaklarda ITAB genişliğini arttırmayı amaçlayan tasarımlar, Şekil 1.20’de belirtilen Flared-Triflute™ ve Skew-Stir™ takımlarıydı [36,38]. Kaynak Enstitüsü (TWI), Şekil 1.21’de gösterilen, Trivex™ ve proses kuvvetlerini azaltabilen ve nispeten daha kolay üretilen MX-Trivex™ takımlarını tasarladı [36,39].Başta alüminyum alaşımların kaynağında olmak üzere birçok malzemenin kaynaklı birleştirilmesine odaklı takım tasarımı ve geliştirilmesi ile ilgili çalışmalar artarak sürmektedir [36].



Şekil 1.21. TWI tarafından tasarlanan takımlar [39].

Zhao ve ark. [40], AA2014 alın kaynağında malzeme akışı üzerine pim geometrisinin, etkilerini incelenmiştir. Elangovan ve Balasubramanian [41], düz silindirik, konik silindirik, dişli silindirik biçimli, kare ve üçgen profilli pimlerin AA2219 alın kaynaklarının mikro yapı, çekme

mukavemeti ve mikro sertlik üzerine etkilerini incelemişlerdir. Scialpi ve ark. [42] AA6082 malzemenin alın kaynaklarında, omuz geometrisinin, mikro yapı, mukavemet ve mikro sertlik üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Takımın omuz kısmı, genellikle, oyuk, boşluk ve köşeden oluşan geometrileri içermektedir. Liu ve ark. [43], 6061-T651 malzemenin alın kaynaklarında, değişen omuz ve pim ölçülerinin kaynakta mikro yapı ve mekanik özelliklere etkilerini araştırmışlardır. Kaynağın düşük sertlik bölgesinde çatlak oluştuğu, ilerleme hızının artması ile kaynak bölgesinin çekme mukavemetinde artış gözlemlendiği ve takım ölçülerindeki değişimlerin ise kaynak performansını etkilemediğini belirtmiştir.

Sorensen ve Nielsen [44], daha düşük proses kuvvetleri ve sıfır derece eğim açısı ile çalışma olanağı sunan spiral pimli dışbükey oyuklu bir omuz takımı tasarlamıştır. Longhurst [45], Şekil 1.22'de gösterilen düz vidalı bir omuz tasarımı kullanmıştır. 0° eksen açısına imkan veren omuz tasarımının çapak oluşumunu minimize ettiğini belirtmiştir. İş parçasının karışımını güçlendirmek için omuz tasarımı ile birlikte pim geometrisi seçiminin de son derece önemli olduğunu vurgulamıştır.

Muthu ve Jayabalan [46], sarmal, düz konik ve düz konik vidalı pim profillerinin SKK yöntemi ile birleştirilen plakalara etkisi üzerine çalışmalar yapmışlardır. AA1100 serisi alüminyum ve saf bakır kullanılan çalışmada düz konik pim profili kullanımı ile daha iyi mekanik özellikler elde ettiklerini bildirmişlerdir.



Şekil 1.22. Oyuk küresel omuzlu ve silindirik dişli pime sahip takım [36].

1.3.2. Kaynak Parametreleri

SKK prosesinde, dönüş hızı, ilerleme hızı, takım iş parçasına olan dalma kuvveti ve takım ile iş parçası arasındaki temas açısı, kaynak parametrelerini oluşturmaktadır. Takımın döndürülmesi ile karıştırılan malzeme pimin önünden arkasına doğru hareket etmektedir. Takımın uygun hızda döndürülmesi, kaynak hattı boyunca dönmekte olan takımın uygun hızda ilerletilmesi, dönmekte olan takımın omuzunun, kaynaklı birleştirilen parçalara ısı üretecek kadar temas etmesi kaynaklı birleşme için son derece önemlidir.

Öngörülenden daha hızlı dönen takım, kaynak bölgesinde gerekenden daha fazla ısı üretmekte, kaynak dikiş bölgesinde türbülanslı akışa neden olmaktadır. Bu ise, karıştırma bölgesinde mikro ölçekte boşluklar oluşturarak, mukavemette düşme ile sonuçlanmaktadır. Düşük dönüş hızı, birleşmeyi sağlayacak kadar ısının üretilmemesine neden olmakta, bu ise zayıf bir birleşme ve düşük mukavemet değeri üretmektedir [47-49]. Suresha ve ark. [50], AA7075 alüminyum alaşımı plakaların SKK yöntemi kullanarak birleştirilmesinde takım dönüş hızının, kaynağın mekanik özellikleri üzerinde en etkili parametre olduğunu belirtmişlerdir [35].

1.4. Sürtünme Karıştırma Kaynak Uygulamaları

1.4.1. Uzay ve Havacılık Endüstrisi

Uzay endüstrisinde SKK'nın ilk uygulamalarından biri, NASA'nın 1998 yılında kullanım prosesini geliştirmeye başladığı uzay mekiği dış tankıdır. SKK'nın tekrar edilebilirliği ve güvenilirliği, hafif alaşımlara uygulanma kabiliyeti ile birleşince, süreç özellikle uzay endüstrisi uygulamalarında yaygın bir kullanım alanı bulmuştur. Havacılık ve uzay endüstrisinin teknik olarak gelişmesiyle, geri çekilebilir pimli takım gibi, SKK'nın uygulama alanındaki gelişmelerin önünü açmıştır. Tahribatsız muayene tekniklerinin geliştirilmesiyle SKK'nın uzay araçlarının yapımında da kullanılmasının önü açılmıştır [36,51,52].

Uzay aracının bölme ve konik burun kısımlarının SKK ile birleştirilmesi Şekil 1.23'de, tünel ve ön bölmesinin birleşimi Şekil 1.24'de, kiriş ve sparların, alüminyum panellere SKK ile birleştirilmesi ise Şekil 1.25'te gösterilmiştir.

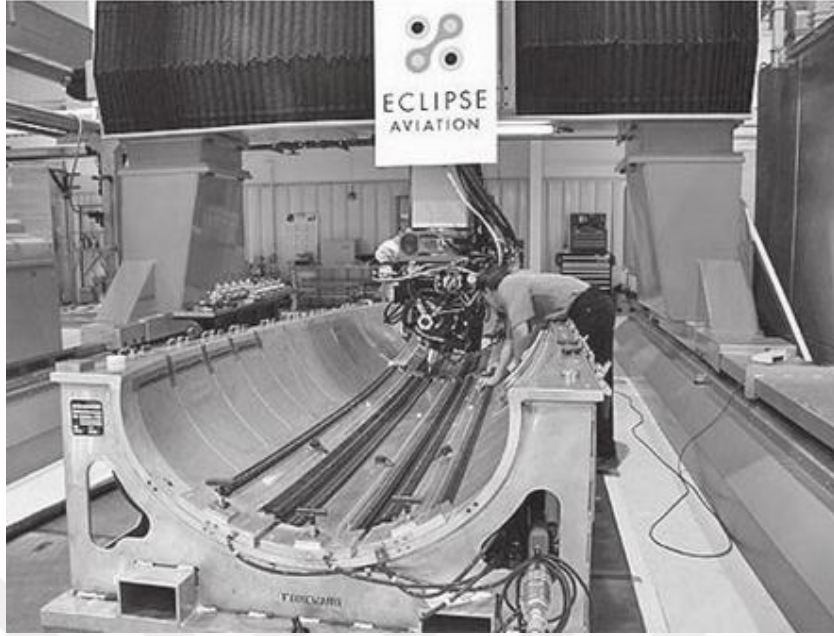
Hava araçlarının üretiminde perçin bağlantıları yerine kullanılacak bir teknoloji olarak hızla kabul gören SKK yöntemi, ağırlık tasarrufu, bileşen sayısının azalması, çevrim sürecinin azalması, birleşme mukavemetinde artma ve düşük üretim maliyeti gibi avantajlar da sağlamaktadır. Hava araçlarının üretiminde 2XXX ve 7XXX serisi alüminyum alaşımlarının kullanımı oldukça yaygın olup, bu malzemelerin alın birleştirme ve bindirme kaynak uygulamaları ile ilgili çok sayıda bilimsel çalışma da yapılmıştır [36,53,54].



Şekil 1.23. Uzay aracının bölme ve konik burnunun SKK ile birleştirilmesi [55].



Şekil 1.24. Uzay aracının tünel ve ön bölümünün SKK ile birleştirilmesi [56].



Şekil 1.25. Uzunlamasına kiriş ve sparların, alüminyum panellere SKK ile birleştirilmesi [57].

1.4.2. Otomotiv Endüstrisi

SKK, SKNK (Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı) gibi yöntemler, hafif alüminyum alaşımlarının montajlarına entegre etmek ve birleştirmelerde gövde ağırlığını azaltmak isteyen otomotiv endüstrisinde de yaygın olarak kullanılan yöntem olmuştur. Özellikle, alüminyum alaşımlarından otomobil kapı panelleri, tahrik milleri ve uzay çerçevelerinin imalatında, SKK yöntemini uygulanmaktadır [36,58]. Şekil 1.26'da SKK yöntemi kullanılarak üretilen otomobil paneli görülmektedir.



Şekil 1.26. SKK yöntemi kullanılarak üretilen otomobil paneli [57].

1.4.3. Denizcilik Endüstrisi

SKK prosesi, deniz taşıtlarının imalatında yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle askeri ve ticari yolcu gemilerinin alüminyum gövde panellerinin kaynaklı birleştirilmesinde bu yöntem kullanılmaktadır. Gemilerin güverte yapımında, SKK yöntemi, geleneksel gaz metal ark kaynağı (GMAW) uygulamalarına bir alternatif olarak kullanılmaktadır [36]. SKK yöntemi ile üretilen gemi güvertesi Şekil 1.27’de verilmiştir.



Şekil 1.27. SKK yöntemi ile üretilen gemi güvertesi [59].

1.4.4. Demiryolu Endüstrisi

Tren ve tramvay gibi demiryolu taşıtlarının taban panelleri başta olmak üzere çok sayıda parça imalatında SKK, kullanımı hızla yaygınlaşmaktadır. SKK yöntemi ile üretilmiş yüksek hızlı trenin taban panelinin görünüşü Şekil 1.28’ de verilmiştir.



Şekil 1.28. SKK yöntemi ile üretilmiş yüksek hızlı trenin panel görünüşü [60].

1.5. Sürtünme Karıştırma Kaynağının Üstün Yönleri ve Sınırlamaları

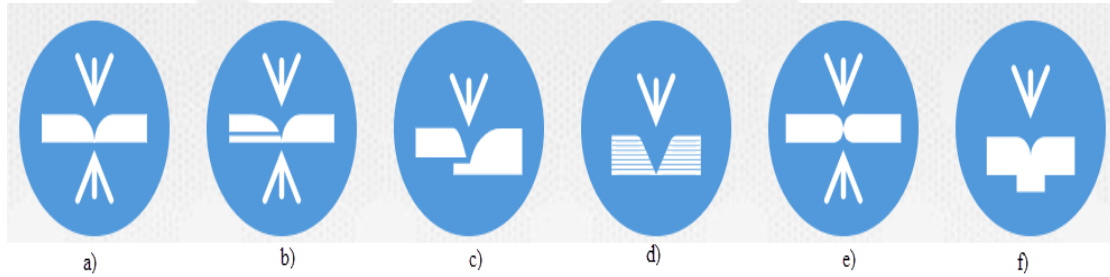
Sürtünme karıştırma kaynağının konvansiyonel kaynak yöntemlerine göre avantajları aşağıdaki gibidir:

- SKK yöntemi çevre dostu bir yöntemdir ve işlem sırasında is, duman veya sis oluşmaz.
- Sürtünme karıştırma kaynağı Şekil 1.29'da belirtildiği gibi çok sayıda birleşim türü için uygundur.
- Gözeneklilik ve cüruf oluşumuna rastlanmaz.
- Eşit olmayan kesitlerin kaynağı SKK yöntemi ile yapılabilir.
- Manuel veya otomatik işlem yapma seçeneği sunar.
- Kaynağa uygun olmayan birbirinden farklı malzemelerin kaynak işlemi yapılabilir.
- İstikrarlı ve tekrarlanabilir bir işlemdir.
- Düşük enerji tüketir ve düşük kaynak gerilimi oluşur.
- Bimetal uygulamaları ile hammadde maliyetini düşürür.
- Bakım maliyetini düşürür.
- İşlem için gereken işçilik azalır, kapasite artar ve işleme maliyetini düşürür.
- Kompleks dövme ve döküm maliyetini düşürür.

- Bazı malzeme kombinasyonlarında, kaynak hazırlığı için gereken zamandan ve maliyetten tasarruf sağlar.
- Baz malzemeye yakın veya daha yüksek birleşim mukavemeti sağlar.
- Dar ITAB bölgesi oluşur.
- Oldukça hassas bir işlemdir.
- Koruyucu gaz veya dolgu malzemesine gereksinim duyulmaz.
- Yüksek sıcaklık değişimlerine dayanıklıdır [5].
- 6XXX Alüminyum alaşımları için 1.2 mm'den 65 mm'ye kadar et kalınlığına sahip malzemelere uygulanabilir [61].

SKK prosesinin sınırlamaları ise aşağıdaki gibidir:

- İş parçasının rijit bir şekilde sıkıştırılması gerekir.
- Kaynak işlemi sonunda delik oluşumu gözlenir.
- İlk yatırım maliyeti nispeten yüksektir [62].



Şekil 1.29. a) Alın kaynağı, b) katmanlı alın kaynağı, c) bindirme kaynağı, d) katmanlı bindirme kaynağı, e) V kaynağı, f) T alın kaynağı [63].

1.6. Alüminyum ve Bakır Alaşımları

1.6.1. Alüminyum Alaşımları

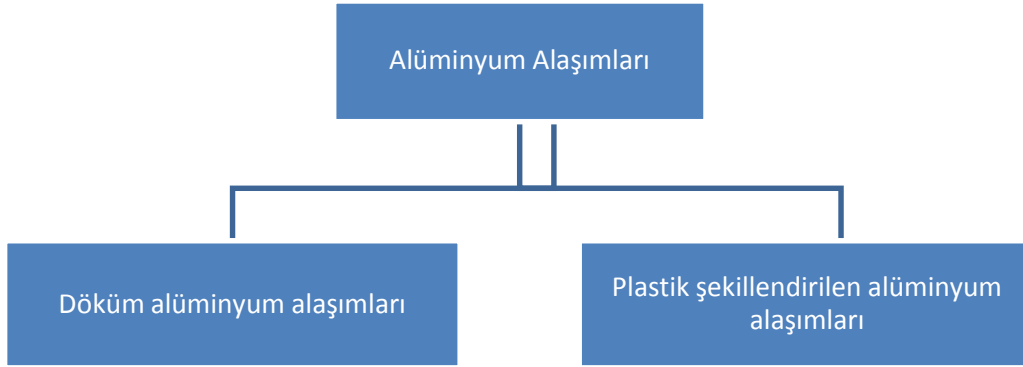
Alüminyum elementi çeşitli oranlarda diğer elementlerle kombine edilerek, yüksek mekanik özellik gerektiren teknolojik parçaların yapımında kullanılan alaşımlı malzemeler oluşturulmaktadır. Ana alaşım elementleri mangan, krom, magnezyum ve silisyum olan alüminyum alaşımları, aşınma direnci yüksek malzemelerdir [64]. Bakırın kullanıldığı alaşımlar aşındırıcı etkilere karşı daha duyarlıdır. Alüminyum alaşımlarında alaşım elementlerinin toplam değerleri Tablo 1.1 'de gösterilmektedir.

İçerisinde barındırdığı alaşım elementlerine bağlı olarak yüksek mukavemetli alüminyum alaşımlarının yanında, yumuşak ve sünek özellikte olanlarda vardır. Alüminyum

alaşimleri Şekil 1.30'da gösterildiği gibi, döküm alaşimleri ve plastik şekillendirilen (haddeleme, çekme ve dövme) alaşimler olmak üzere iki genel sınıfa ayrılmaktadır.

Tablo 1.1. Alüminyum alaşımlarında alaşım element oranları [64].

Alaşım	Alüminyumun Alaşımları ve % Alaşım Element Oranları								
	Cu	Si	Mn	Mg	Zn	Ni	Cr	Pb	Bi
1100	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3003	—	—	1.2	—	—	—	—	—	—
2011	5.5	—	—	—	—	—	—	0.5	0.5
2014	4.4	0.8	0.8	0.4	—	—	—	—	—
2017	4.0	—	0.5	0.5	—	—	—	—	—
2117	2.5	—	—	0.3	—	—	—	—	—
2018	4.0	—	—	0.5	—	2.0	—	—	—
2024	4.5	—	0.6	1.5	—	—	—	—	—
2025	4.5	0.8	0.8	—	—	—	—	—	—
4032	0.9	12.5	—	1.0	—	0.9	—	—	—
6151	—	1.0	—	0.6	—	—	0.25	—	—
5052	—	—	—	2.5	—	—	0.25	—	—
6053	—	0.7	—	1.3	—	—	0.25	—	—
6061	0.25	0.6	—	1.0	—	—	0.25	—	—
7075	1.6	—	—	2.5	5.6	—	0.3	—	—



Şekil 1.30. Alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması.

Döküm alüminyum alaşımları, şekillendirilebilen alaşımlara kıyasla yüksek miktarda silisyum içermektedir. Alaşım döküm esnasında mükemmel akış özellikleri göstermektedir. Bu ise, malzemenin karmaşık dökümler için kullanılabilmesine olanak sağlar. Özenli kalıp tasarımları ile yüksek soğuma oranı sağlanabilir, yüksek mukavemet ve yüksek tokluk değerlerine ulaşılabilmektedir [1].

Şekillendirilen alüminyum alaşımları dört basamaklı bir indeks sistemi ile gösterilmektedir. Bu, 1xxx grubu, 2xxx ile 8xxx grubu olmak üzere üç farklı gruba ayrılmıştır. Alüminyum Kuruluşu'na (AA) göre şu şekilde simgelenirler: Dört rakamlı bir sistemde ilk rakam alaşım tipini belirtir. İkincisi özgül alaşım değişimini ifade eder. Son iki rakam da özgül alüminyum alaşımını saptar veya alüminyumun saflığını göstermektedir [65]. 1xxx grubunun son iki hanesi, ilk hane belirlediği yüzde 99 değerinin üstüne eklenecek ondalık değeri belirtmek için kullanılır. Örneğin; son iki basamak 30 olduğunda alüminyum toplam yüzde 99,30 saf alüminyum içerecektir. Bu gruptaki alaşımlara örnekler:

- 1100- Yüzde 99,00 saf alüminyum,
- 1130- Yüzde 99,30 saf alüminyum,
- 1275- Yüzde 99,75 saf alüminyumdur.

2xxx ile 8xxx gruplarında, ilk rakam alaşım oluşumunda kullanılan ana alaşım elementini gösterir:

- 2xxx - bakır
- 3xxx - mangan
- 4xxx - silisyum
- 5xxx - magnezyum
- 6xxx- magnezyum ve silisyum

- 7xxx - çinko
- 8xxx- diğer öğeler [64].

1000 serisi: Yüzde 99 veya daha yüksek alüminyum içerir. Mükemmel korozyon direnci, yüksek termal ve elektrik iletkenliği, düşük mekanik özellikler, mükemmel işlenebilirlik gibi özelliklere sahiptir. Demir ve silisyum önemli alaşım elementleridir.

2000 serisi: Alaşımında kullanılan ana element bakırdır. Yumuşak çeliğe yakın özelliklere ve kötü korozyon direncine sahiptir. Genellikle 6000 serisi veya yüksek saflıkta alüminyum alaşımı ile kaplanır. En yaygın alaşım 2024'tür.

3000 serisi: Genellikle ısıtılabilir tabii tutulamayan grubun temel alaşım elementidir. Yüzde 1.5 oranında mangan alaşımında etkili olacaktır.

4000 serisi: Silisyum, bu grubun temel alaşım bileşenidir ve ergime sıcaklığını düşürür. Birincil kullanımı kaynak ve sert lehimleme işidir. Isıl işleme tabii tutulabilir olması, içeriğindeki silisyum ve diğer alaşım elementlerinin miktarına bağlıdır.

5000 serisi: Magnezyum bu alaşım serisinin ana elementidir. İyi kaynak karakteristiği ve korozyon direnci gibi özelliklere sahiptir. Isıl işleme tabii tutulamaz, kum veya metal kalıp ile döküm işlemi yapılabilir. Korozyon dayanımı, işlenebilirlik ve yüzey görünümü iyidir. Yaklaşık 115-170 MPa maksimum çekme mukavemetine sahiptir [1].

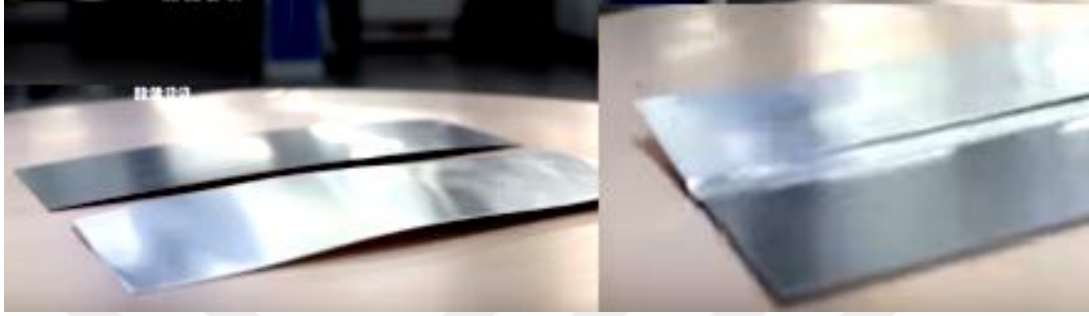
6000 serisi: Silisyum ve magnezyum, magnezyum silikat oluşturarak alaşımları ısıtılabilir hale getirir. Orta mukavemetli, iyi şekillendirilebilir niteliktedir ve korozyona dirençlidir.

7000 serisi: Çinko bu alaşım serisinin ana elementidir. Magnezyum ile birleştiğinde, çok yüksek mukavemetli, ısıtılabilir tabii tutulabilen alaşımlar elde edilebilir. Alaşıma genellikle bakır ve krom eklenmektedir. Bu grubun ana alaşımı AA7075'tir [64].

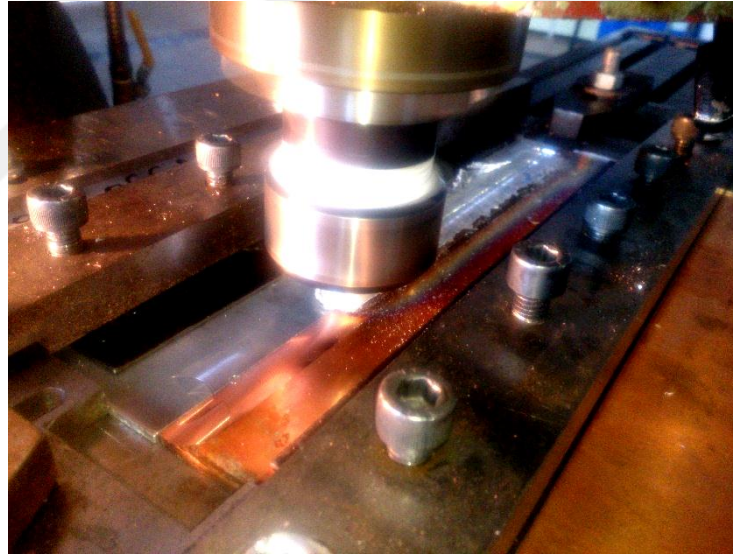
1.6.2. Alüminyum Alaşımlarının Kaynaklı Birleştirilmesi

Alüminyum alaşımları kaynaklı birleştirme işlemi uygulanması zor malzemelerdir. Ergitme kaynak yöntemleri (ark, lazer ve elektron kaynağı) ve difüzyon kaynağı gibi bilinen kaynak yöntemleri ile birleştirilmesinde çeşitli sorunlar ortaya çıkmaktadır. Vakum ortamında yapılan elektron kaynağı dışındaki diğer ergitme kaynaklarında boşluk (porozite) oluşumu ve tüm ergitme kaynak yöntemlerinde kaynak bölgesi ve ısının tesiri altındaki bölgede (ITAB) çatlak oluşumu ve mukavemette düşme bu sorunlardan bazılarıdır. Katı hal kaynak yöntemlerinden difüzyon kaynağı da yüzeylerindeki kararlı oksit tabakasından dolayı, Al alaşımlarına uygulanmasında sorunlar oluşturmaktadır [66].

Son yıllarda geliştirilen katı hal kaynak yöntemleri ile Al alaşımı levhaların alın ve bindirme kaynağında ergitme kaynak yöntemlerine nazaran daha iyi sonuçlar alınmıştır. Manyetik Puls Kaynağı ile birleştirilen alüminyum-paslanmaz çelik levha Şekil 1.31'de gösterilmiştir. Şekil 1.32'de ise AA7075 ve Cu-ETP'nin SKK yöntemi ile kaynaklı birleştirilmesi gösterilmektedir.



Şekil 1.31. Manyetik puls kaynağı ile birleştirilen alüminyum - paslanmaz çelik levha [67].



Şekil 1.32. AA7075 ve Cu-ETP'nin SKK yöntemi ile kaynaklı birleştirilmesi.

1.6.3. Bakır ve Bakır Alaşımları

Bakır kelimesi Latince kökenli olup, "cuprum" kelimesinden türemiştir. Cuprum ise Kıbrıs cevheri anlamına gelmektedir [68]. Bakır insanlığın faydalandığı ilk metallere aittir. M.Ö. 8500'lü yıllara kadar üretilmiş bakır objelerin muhtemel kökeni Anadolu'dur. Bakır doğada doğal (metalik) formda bulunan birkaç metalden biridir ve ilk ürünler kuşkusuz olarak külçelerden yapılmıştır. Çatalhöyük'te (M.Ö. 7000-6400 yıllarında) küçük bakır objeler ve cüraf parçaları bulunmuştur [69]. Tarih öncesi bakır nesnelere binlerce yıl boyunca varlığını sürdürmüş ve bakır

kendine has kimyasal kararlılığını kanıtlamıştır [1]. Bakır, tuzlu su ile korozyona uğraması, ancak tatlı sudan az etkilenmesi, elektrik iletkenliğinde gümüşe göre ikinci sırada yer alması, ısı ve elektrik iletkenliğinin iyi olması nedeniyle, endüstriyel uygulamada kendisine geniş bir kullanım alanı bulmuştur.

1.6.4. Bakır ve Bakır Alaşımlarının Çeşitleri

1.6.4.1. Ticari Saf Bakır

Ticari saf bakırlar içeriğindeki oksijen oranına göre üç sınıfa ayrılır bunlar:

- Oksijen içeren bakır,
- Fosforlu, oksijen içermeyen deoksidedilmiş bakır ve
- Oksijen ve deoksidan içermeyen bakırdır [70].

Yukarıda belirtilen ticari saf bakırların tümü % 99'dan fazla bakır (Cu) içermektedir. Bakırı oksijenden arındırmak için Çinko (Zn), fosfor (P), silisyum (Si), kalsiyum (Ca), berilyum (Be), alüminyum (Al) ve magnezyum (Mg) gibi deoksidan elementler kullanılır. Bu oksijen giderici elementlerin bakır bünyesinde fazla olması elektrik iletkenliğini düşürmektedir. Oksijensiz bakır, elektrolitik rafine bakırın arıtılarak oksijen içermeyen ortamlarda dökümü ile elde edilmektedir.

Ticari saf bakırın kullanım alanı son derece geniştir. Bakır tel, motor bobini, jeneratörler, transformatörler, elektrikli trenlerin hava hatları, trolleybüs baraları, endüstri kuruluşlarına ve evlere elektrik enerjisi nakleden iletim hatları, radyatörler ve soğutucular, radyatör yapımı, ark ocaklarının elektrot tutucu ve kollarının yapımı bu kullanım alanlarından bazılarıdır [71].

1.6.4.2. Bakır Alaşımları

Bakır alaşımları Kuzey Amerika'da kabul edilen Birleşik Numaralandırma Sistemi (UNS) ile tanımlanmaktadır. Bu tanımlama sisteminde rakamlar C10000-C79999 işlenmiş alaşımları, C80000-C99999 döküm alaşımları belirtmektedir. Bu bileşimler iki farklı bakır alaşım grubu olarak ayrılmış ve altı ana grubu içermektedir; bakır, yüksek-alaşım bakırlar, pirinçler, bakır nikeller ve nikel gümüşler. Bu altı gruba dahil olmayan alaşımlar ise; diğer bakır-çinko alaşımları, işlenmiş bileşenler veya özel alaşımlar ve döküm bileşenlerdir [89]. Tablo 1.2'de bazı bakır alaşımları ile ilgili bilgiler verilmiştir.

Tablo 1.2. Bakır alaşımları, (UNS C10100–C10940) [1].

Bakır Numarası	Gösterim	Açıklama	Bakır(Ag içerir), min.	% Ag (min.)	Ag-Troy oz (min.)	As	Sb	P	Te	Diğer elementler
C10100	OFE	Oksijensiz Elektronik	99.99	-	-	0.0005	0.0004	0.0003	0.0002	1
C10200	OF	Oksijensiz	99.95	-	-	-	-	-	-	0.0005 0
C10300	OFLP	Oksijensiz	99.95	-	-	-	-	0.001-0.005	-	-
C10400	OFS	Oksijensiz, Ag içerir	99.95	0.027	8	-	-	-	-	0.0010 0
C10500	OFS	Oksijensiz, Ag içerir	99.95	0.034	10	-	-	-	-	0.0010 0
C10700	OFS	Oksijensiz, Ag içerir	99.95	0.085	25	-	-	-	-	0.0010 0
C10800	OFLP	-	99.95	-	-	-	-	0.005-0.012	-	-
C10910	-	-	99.95	-	-	-	-	-	-	0.005 0
C10920	-	-	99.90	-	-	-	-	-	-	0.02 0
C10930	-	-	99.90	0.044	13	-	-	-	-	0.02 0
C10940	-	-	99.90	-	-	-	-	-	-	2

Yüksek-alaşım bakırlar (C81400 - C82800): Bakır içeriği % 99,3'ten az, ancak % 96'dan daha fazla olan ve diğer bakır alaşım grubuna girmeyen alaşımlardır. Yüksek bakırlı döküm alaşımlar, % 94'ün üstünde bakır içeriğine sahiptirler ve hususi özellikler için alaşıma gümüş eklenebilmektedir [1].

Krom-Bakır (C81400 ila 81540): % 1,5 krom içeren bu alaşımların gücü saf bakırın iki katıdır, ancak elektrik iletkenliği saf bakırın % 80'i kadardır. Kullanım alanları kaynak kelepçeleri ve yüksek mukavemetli elektrik konektörleridir.

Bakır-Berilyum (C82000 ila C82800): Bu alaşımlar, ana alaşım elementi olarak % 0.35-2.85 berilyum içerir ve yaş veya çökelti sertleştirilmiştir. Isıl işlem sırasında ince bir ikinci fazın çökmesine bağlı olarak yüksek mukavemet kazanırlar. Bakır berilyum alaşımları orta mukavemette yüksek iletkenliğe veya yüksek mukavemette orta iletkenliğe ulaşır [72].

Pirinç: Bu alaşımlarda, ana alaşım elementi olarak demir, alüminyum, nikel ve silisyum gibi başka belirlenmiş alaşım elementleri olabilir ve çinko içerirler. Şekillendirilmiş alaşımları üç çeşittir bunlar; bakır-çinko alaşımları, bakır-çinko-kurşun alaşımları (kurşunlu pirinç) ve bakır-çinko-kalay alaşımlarıdır (kalay pirinçleri). Dökme alaşımları ise altı çeşittir bunlar; bakır-kalay-çinko alaşımları (kırmızı, yarı-sarı ve sarı pirinç), mangan-bronz alaşımlar (yüksek mukavemetli sarı pirinç), kurşunlu mangan-bronz alaşımları, Bakır-çinko-silisyum alaşımları (silisyum pirinç ve bronzlar), dökme bakır-bizmut ve bakır-bizmut-selenyum alaşımlarıdır [1].

Metalürjik olarak kaynaklı Al-Cu birleşimleri, yüksek akımlı veri yolu sistemlerinde, elektrik iletimi için geçiş parçası olarak çok geniş kullanım alanı bulmaktadır. Böyle bir bimetal geçiş parçası Şekil 1.33'te gösterilmiştir. Al-Cu birleşimi, iletken bakır terminal ile alüminyum bara bağlantısı arasında bir köprü görevi görmektedir. 20 cm² bağlantı yüzeyine sahip her bimetal, 2000 ampere (100 amper/cm²) kadar yüksek bir elektrik akımı sağlayabilir. Bakır terminal ve alüminyum bara birbirine Al-Cu bimetal geçiş parçası olmadan bağlandığında, elektrik bağlantısının ömrü yaklaşık 1 yıl, Al-Cu bimetal birleşimi kullanıldığında ise servis ömrünün 10 yıla kadar uzadığı belirtilmektedir. [73].

Bakır ve alüminyum birleşimleri hibrit araçların bataryalarının konstrüksiyonu temel olarak, Al-Cu kombinasyonunda otomotiv sektöründe de kullanılmaya başlanmıştır [74].



2. KAYNAK ARAŞTIRMALARI

Konvansiyonel kaynak teknikleri ile ilgili yapılan çok sayıda bilimsel araştırma ve çalışmada; metalik malzemelerin kaynak performansları mümkün olan optimizasyon sınırlarında belirlenmiş olup, özellikle demir dışı metalik malzemelerin kaynaklı birleştirilmelerinde problemlerin varlığı da ortaya konulmuştur. Ancak makine endüstrisinde bu yöndeki araştırmalar artarak devam etmekte; özellikle çok yaygın kullanıma sahip alüminyum, bakır, titanyum gibi malzemelerin kaynaklı birleştirilmesi çalışmaları ağırlık kazanmaktadır [75]. 1990'lı yılların başında ergitme olmaksızın malzemelerin kaynaklı olarak birleştirilebildiği yeni bir yöntem olan, sürtünme karıştırma kaynak tekniğinin bulunmasıyla demir dışı metalik malzemelerin kaynaklı birleştirilmesinde önemli başarılar elde edilmiştir [76].

Sürtünme karıştırma kaynağı, ısı oluşumu, soğuma hızı, akış ve deformasyon dinamikleri, yeniden kristalleşme ve mekanik birleşmeler gibi eşzamanlı bir dizi termodinamik süreç ile birlikte birçok etkileşimi içermektedir [77,78]. Ergitme kaynak yöntemlerine göre düşük distorsiyon, iyi mekanik özellik, daha az kaynak kusuru ve konvansiyonel kaynak yöntemleriyle kaynak yapılamayan metallerin kaynak yapılabilmesine olanak sağlamaktadır [77,79].

Özellikle kimyasal, nükleer, havacılık, ulaştırma, elektrik üretimi ve elektronik uygulamaları için gerekli olan farklı metalik malzemelerin düzgün ve kusursuz bir şekilde kaynaklı birleştirilmesinde elde edilen kaynak performansları yöntemin uygulama alanının hızla gelişmesini desteklemiş ve teknolojinin hızlıca yaygınlaşmasına yol açmıştır [36].

Endüstrinin en yaygın kullandığı malzemelerden olan bakır ve alüminyum malzemeler, sahip oldukları yüksek elektrik ve ısı iletkenliği, korozyon direnci ve üstün mekanik özellikleri ile, elektrik besleme sistemlerinde çeliğin yerini almaktadır. Isı değiştiricileri ve elektrikli makinelerin çeşitli bileşenlerinde de kullanılmaktadırlar [80,81]. Farklı kimyasal, mekanik ve termal özelliklerinden dolayı kaynak edilebilirliğinin zayıf olması, kaynaklı birleştirilen bölgede sert ve kırılğan intermetalik bileşiklerin oluşması nedeniyle, bakır ve alüminyum malzemelerin, eritme kaynak işlemleri ile birleştirilmeleri güçtür [82]. Bu nedenle, geleneksel kaynak yöntemleri ile bakır-alüminyum malzemelerin kaynaklı birleştirilmelerinde, düşük kaynak performansı elde edilmektedir [83]. SKK yöntemi kullanılarak, alüminyum ve bakır gibi farklı malzemelerin kaynaklı birleştirilmesinde de az olsa da kırılğan intermetalik fazların oluştuğu gözlenmiştir [77,84,85].

Sürtünme Karıştırma Kaynak metodu kullanılarak, AA5083 ve saf bakırın kaynaklı birleştirilmesinde, düşük kaynak sıcaklığı, özellikle bakır tarafında kanal oluşumu gibi bazı kaynak kusurlarına neden olmaktadır. Heurtier ve ark. [79] çalışmalarında artan sıcaklığın, bakırdan alüminyum tabakaya doğru daha fazla difüzyona neden olduğu, alüminyum ve bakırın ara yüzeyine yayılmış halde de porozite oluştuğunu belirtmişlerdir.

Yapılan çalışmalarda, takımın dönme hızı, kaynak bölgesindeki sıcaklık artışında en etkili kaynak parametresi olarak belirtilmektedir [86,87].

Takım hızındaki artmaya bağlı olarak kaynak bölgesinde artan sıcaklık bu bölgede inter metalik bileşiklerin oluşmasına yol açmaktadır [88,89].

Demir dışı metallerden alüminyum, bakır, pirinç gibi metalik malzemelerin kaynaklı birleştirilmesi ile ilgili yapılan çalışmalar kaynak parametrelerinin kaynak performansına etkileri üzerinedir. Yapılan çok sayıda çalışmada kaynak performansı üzerinde en etkili parametreler olarak sırasıyla takım dönme hızı ve kaynak hızı olarak belirtilmektedir [90-94]. Ancak az sayıdaki çalışmada takım geometrisinin kaynak performansı üzerinde en etkili parametre olduğu belirtilmiştir [46,95].

Özellik ve kimyasal içerik bakımından birbirinden farklı malzemelerin sürtünme karıştırma kaynak tekniği ile birleştirilmesi oldukça yeni olması nedeniyle bu konuda az sayıda çalışma bulunmaktadır [80,96,97]. Çalışmalar daha çok Alüminyum-paslanmaz çelik [98], alüminyum-bakır alüminyum-titanyum gibi malzemelerin sürtünme karıştırma yöntemiyle kaynaklı birleştirilmesini ve birleştirilen yapıların mekanik özelliklerinin tespitini esas almıştır [99-101]. Yapılan çalışmalarda, takım ucunun ötelenmesinin kaynak performansında artış sağladığı belirtilmiştir [80,81,96,102,103].

Bu çalışmada, AA7075-T6 alüminyum alaşımı ile Cu-ETP'nin SKK'lı birleştirilmesinde, konik vidalı pime sahip takım kullanılmıştır. Kaynaklı birleştirme, bakır süpürme tarafında, alüminyum ise yığılma tarafında olacak şekilde, 660 ve 920 dev/dk. farklı dönüş hızı ve 18, 32 ve 54 mm/dk. üç farklı ilerleme hız parametrelerinde, AA7075 malzemesine doğru 1 mm olacak şekilde öteleme uygulanmıştır.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Deneysel Çalışmada Kullanılan Malzemeler

SKK kaynak yöntemi kullanılarak birleştirme, Öznur Metal firmasından temin edilen 138x300x3mm ölçülerinde AA7075-T6 alüminyum alaşımı ve Cu-ETP R240 (TS-EN-1652) bakır levhalar üzerinde gerçekleştirildi. Levhalar, kaba ölçülerde kesildi, kesilen bu levhalar talaşlı imalat yöntemi kullanılarak 138x300mm ölçülerinde olacak şekilde işlendi ve mekanik olarak yüzey temizleme işlemine tabi tutuldu. AA7075-T6 alüminyum malzemenin kimyasal özellikleri Tablo 3.1.'de, mekanik özellikleri Tablo 3.2.'de, bakır malzemenin kimyasal özellikleri Tablo 3.3.'de, mekanik özellikleri ise Tablo 3.4.'de verilmiştir.

Tablo 3.1. AA7075-T6 Alüminyum alaşımının kimyasal kompozisyonu.

Elementler	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Zr	Al
% Bileşim	0.07	0.14	1.6	0.06	2.7	0.19	60 ppm	5.8	0.02	0.01	89.41

Tablo 3.2. AA7075-T6 Alüminyum alaşımının mekanik özellikleri.

Malzeme	Çekme Mukavemeti (MPa)	Akma Dayanımı (MPa)	Uzama %	Isı iletkenliği (W/mK) (25°C)	Isıl Genleşme Katsayısı (10 ⁻⁶ /K) (20-300°C)
AA7075-T6	600	542	12	130	25.2

Tablo 3.3. Cu-ETP R240 (TS-EN-1652) bakırın kimyasal kompozisyonu.

ELEMENTLER	Cu	Pb	Ag	P	Bi	O	Diğer
%Bileşim	99.900	0.005	-	-	-	0.040	0.030

Tablo 3.4. Cu-ETP R240 (TS-EN-1652) bakırın fiziksel özellikleri.

ÖZELLİKLER	DEĞER
Kalınlık (mm)	2.95
Çekme Mukavemeti (MPa)	240
Kopma Uzaması (%)	18.5
Sertlik (HB)	66
Safılık (%)	99.981

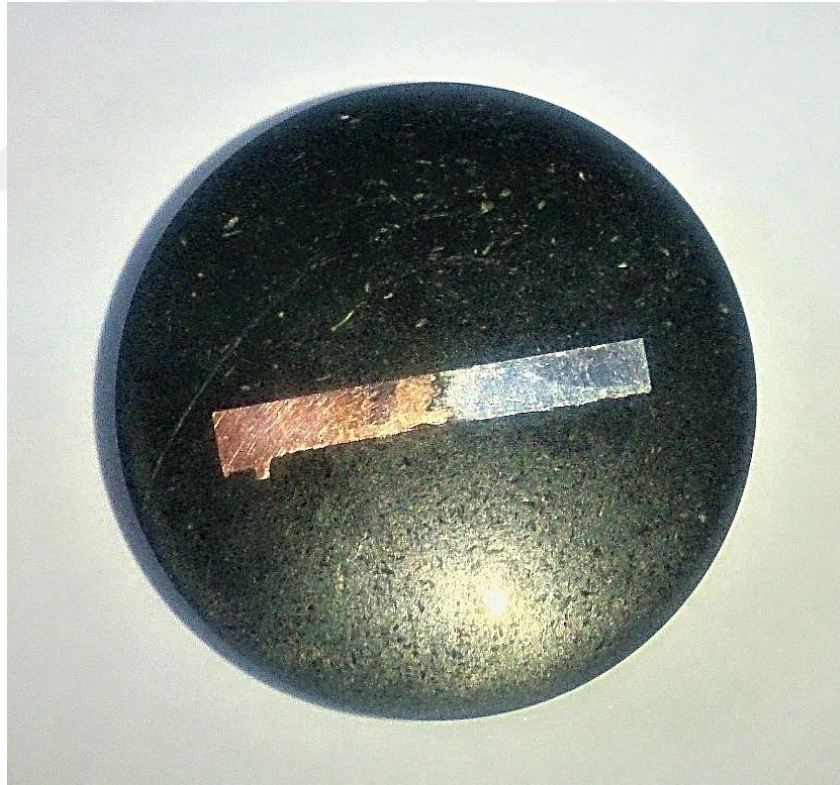
Tablo 3.4. (devamı)

ÖZELLİKLER	DEĞER
------------	-------

Isı İletkenliği (W/mK)(100°C-300°C)	380-370
Isıl Genleşme Katsayısı (10 ⁻⁶ /K) (20°C-300°C)	17.7
Elektrik İletkenliği (MS/m)	56.26

Alüminyum alaşımı (AA7075-T6) ve bakır (Cu-ETP R240) levhalar, sürtünme karıştırma yöntemi kullanılarak, birleştirilmiştir. Sıcak iş takım çeliği H13, takım tezgahları kullanılarak, uç kısmı hafif konik olarak hazırlanıp ardından konik kısma vida açılmak suretiyle dalıcı uç kısmı oluşturulmuş ve plakaların kaynaklı birleştirilmesinde takım olarak kullanılmıştır. Kaynaklı birleştirmeler, düşey başlıklı üniversal freze tezgahı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Metalografik analizler için, tel erozyon yöntemi kullanılarak, kaynaklı birleştirilmiş levhalardan numuneler çıkartılmıştır. Numuneler sırasıyla, bakalite alma, zımparalama ve alümina solüsyon kullanılarak parlatma işlemlerine tabi tutulmuştur. Şekil 3.1'de resmi sunulan parlatılmış numunelere dağlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Optik mikroskop kullanılarak kaynaklı levhaların her biri detaylı incelemelere tabi tutulmuştur.



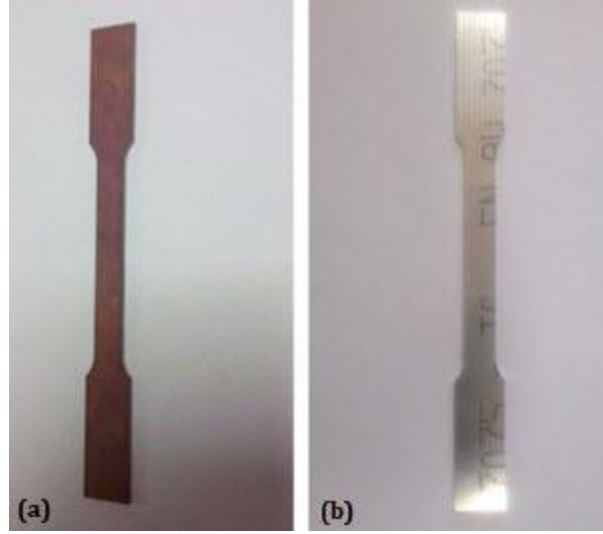
Şekil 3.1. Metalografik analiz için hazırlanmış numune.

Çalışmada, ASTM E646 standardı esas alınarak, Şekil 3.2 ve Şekil 3.3'de gösterilen çekme test numuneleri iki baz (Al ve Cu) plakadan ve kaynaklı birleştirilmiş tüm plakalardan (en az 3

adet) tel erozyon yöntemi kullanılarak çıkartılmış ve kaynak performansını belirlemek için oda sıcaklığında 1 mm/dk. yükleme hız değerinde çekme testine tabi tutulmuştur.



Şekil 3.2. Kaynaklı plakalardan elde edilen çekme test numuneleri.



Şekil 3.3. Bakır (a) ve alüminyum (b) çekme test numuneleri.

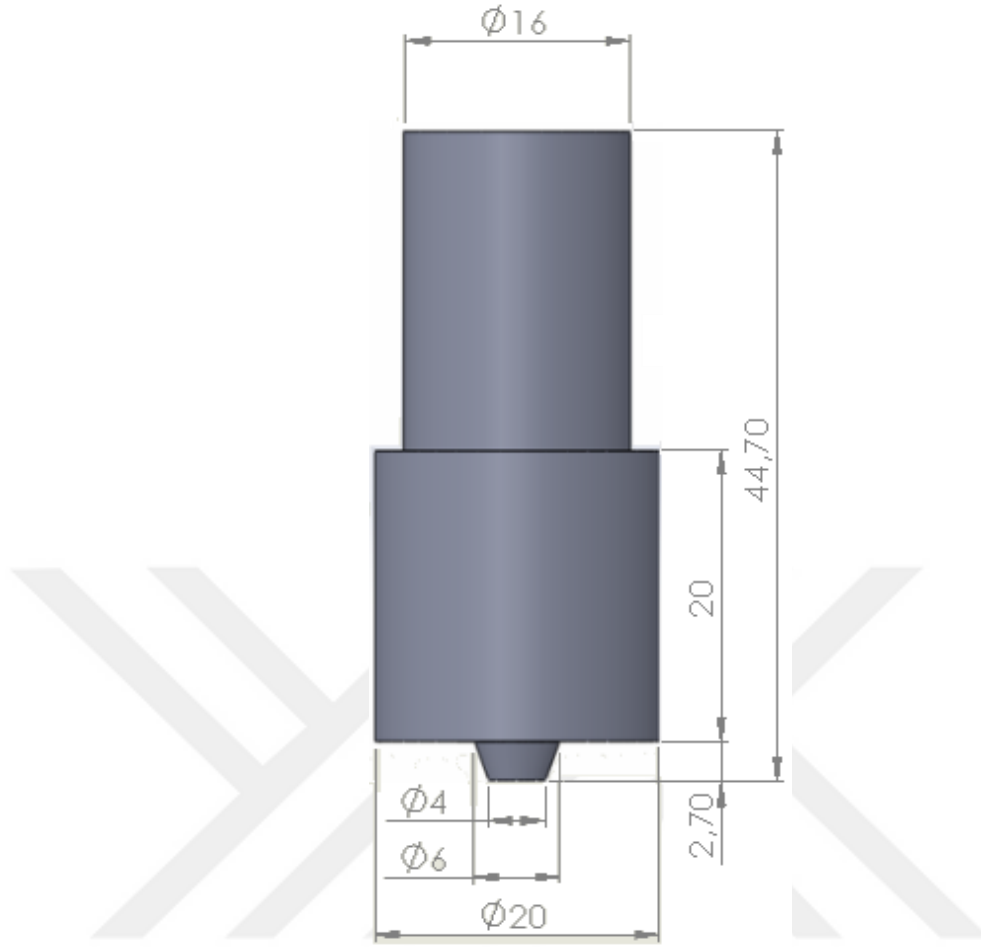
3.2. SKK Birleştirme İşleminde Kullanılan Takım

Kaynaklı birleştirme çalışmasında takım olarak, Öznur Metal firmasından temin edilen, kimyasal bileşimi Tablo 3.5’de verilen, 20 mm çap ve 45 mm uzunluğa sahip sıcak ve soğuk şekillendirme işlemlerinde yaygın kullanılan, yüksek aşınma direnci, tokluk, talaşlı işlemeye yatkınlık, yüksek sıcaklıklara dayanım, ısıl yorulma dayanımı gibi üstün özelliklere sahip H13 sıcak iş takım çeliği kullanılmıştır. Takım, pim, omuz ve bunları üzerinde taşıyan gövdeden oluşmaktadır. Pim, çapı 4-6 mm ve boyu 2.7 mm olacak şekilde talaşlı imalat yöntemi kullanılarak konik olarak imalat edilmiş ardından bu konik yüzeye vida açılmıştır. Pimin gövde kısmı çap 6 mm’den itibaren yaklaşık olarak 1.3 mm derinlikte ve dış çapa 3 mm uzaklıkta olacak bir konkavlık üretilerek omuz oluşturulmuştur. Araştırmacılar tarafından tasarlanıp üretimi gerçekleştirilen takım, Şekil 3.4’de gösterilmiştir.

Talaşlı imalatla şekillendirilen takımlar, vakum fırınında kademeli olarak 400-650-850-1050°C’ye ulaştırılıp, her bir inç için 60 dakika bekletilip azot gazı ile soğutulmuştur. 48-52 HRC sertlik elde etmek ve takımda sertleştirmeden oluşan gerilimi gidermek için, fırın içinde 630°C ‘de her inç için 120 dakika bekletilip, fırın içinde 100°C ‘ye düşene kadar beklenerek gerilim giderme işlemine tabi tutulmuştur.

Tablo 3.5. H13 sıcak iş takım çeliğinin kimyasal kompozisyonu.

Elementler	C	Si	Mn	F	S	Cr	Mo	V	Fe
% Bileşim	0.39	0.96	0.35	0.023	<0.001	5.12	1.27	0.93	90.96



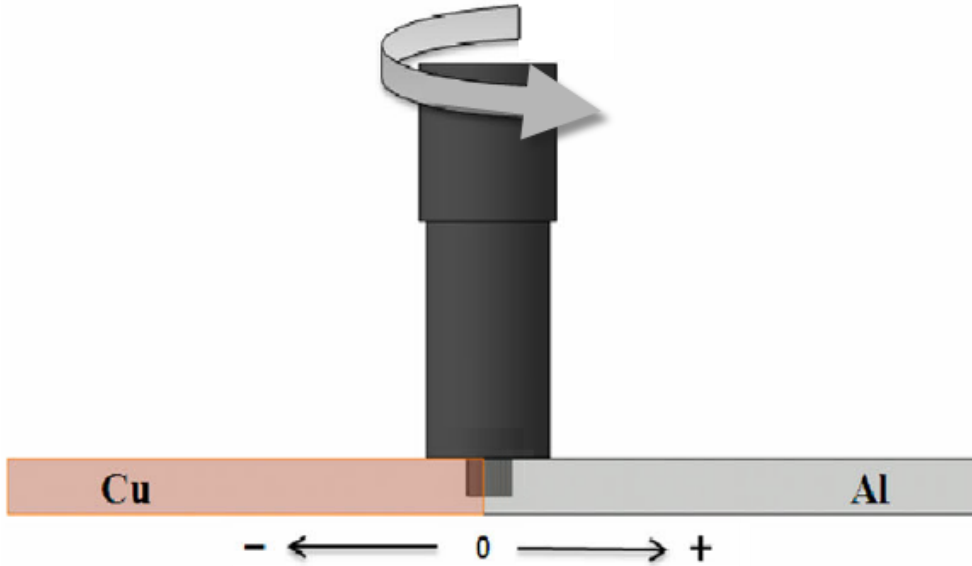
Şekil 3.4. SKK işleminde kullanılan takım.

3.3. Sürtünme Karıştırma Kaynak Parametreleri

Kaynaklı birleştirme, kuru ortamda, oda koşullarında, Şekil 3.5’de gösterilen düşey başlıklı 2.8 kW gücünde FIRST LC20VGN universal freze tezgahı kullanılarak yapıldı. Tablo 3.6’da ayrıntılı olarak verilen dönme hızları ve ilerleme hızlarından oluşan parametreler kullanılarak Al-Cu malzemelerin kaynaklı birleştirme işlemlerinde H13 malzemedan üretilen takımlar kullanıldı. Takım eksenine, Şekil 3.6’da gösterildiği gibi Al-Cu birleşme hattından, Al tarafına 1 mm kaydırılmıştır (ötelenmiş). Test süresince, kaynaklı birleşme bölgesinde gerekli ısının üretilebilmesi için, dalıcı ucun Al-Cu levha yüzeyinden tabana doğru 2.7 mm’lik batma derinliği uygulanması ile omuzun her iki levhaya tam teması sağlanmıştır.



Şekil 3.5. SKK işlemi için kullanılan düşey başlıklı universal freze tezgahı.

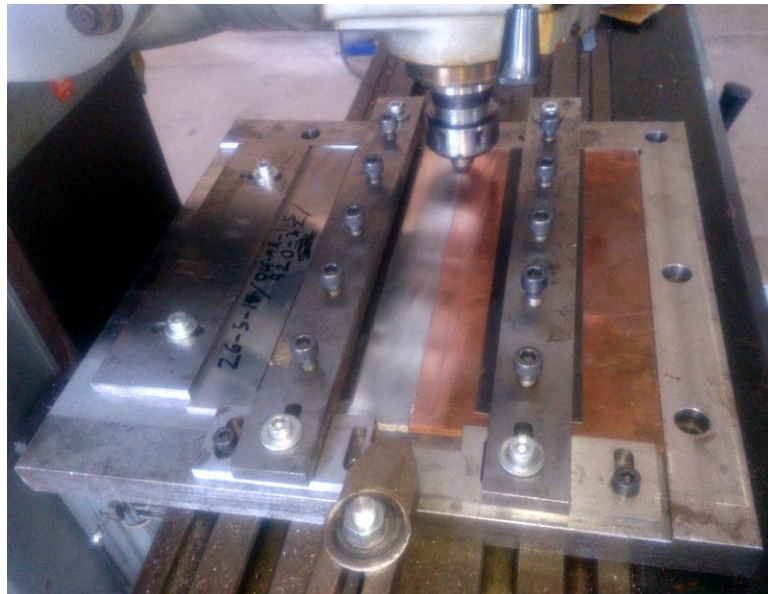


Şekil 3.6. Al-Cu levhaların SKK ile birleştirilmesinde ötelenmiş dalıcı ucun görünüşü.

Tablo 3.6. Kaynaklı birleştirmede kullanılan parametreler.

No	Takım Dönüş Hızı (Dev/dk.)	Kaynak İlerleme Hızı (mm/dk.)
1	660	18
2	660	32
3	660	54
4	920	18
5	920	32
6	920	54

SKK işlemine başlamadan önce hazırlık işleminin eksiksiz yapılması gerekmektedir. Al-Cu levhaları freze tezgahına tespit için kullanılan bağlama aparatı (kalıp), freze tezgahına ortalanmış bir şekilde tespit edilerek levhalar alın altına gelecek şekilde konumlandırılmış ve cıvatalar yardımı ile mekanik olarak sıkıştırılmıştır. Kaynaklı birleştirme hattının takım hareket doğrultusu ile çakışık olacak şekilde gerekli ayarlamalar yapılarak, yüzey her türlü kalıntı, yağ, toz, kir ve oksit tabakasından arındırılmıştır. Daha sonra takımın ötelenme işlemi, tabla hareketi ile kaynak işlemine dik yönde, takım eksenine kaynak hattından alüminyum tarafına doğru 1 mm kaydırılarak öteleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Takımın eksenine, Şekil 3.7'de gösterildiği gibi, kaynak hattı üzerinde, parça kenarlarından itibaren yaklaşık 30 mm olacak şekilde kaynak başlangıç noktasına getirilmiştir.

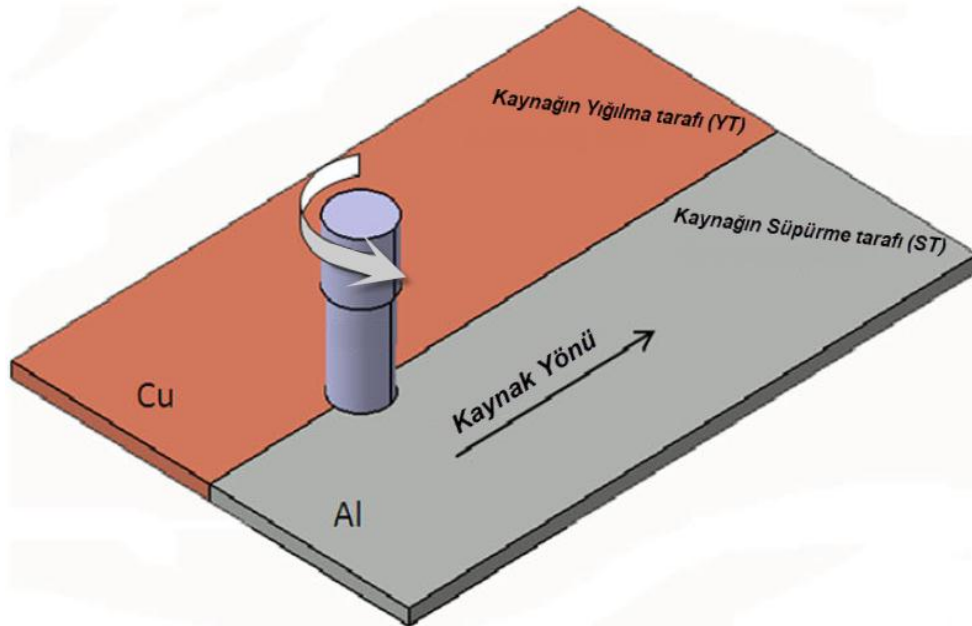
**Şekil 3.7.** Al-Cu levhaların freze tezgahı kullanılarak SKK yöntemi ile birleştirilmesi.

3.4. Al-Cu levhaların Kaynaklı Birleştirilmesi

Freze tezgahında gerekli devir ve ilerleme parametreleri ayarlanarak, saf bakır yığılma tarafında, AA7075-T6 alaşımı süpürme tarafında kalacak şekilde takımın dönüş yönü, saat yönünün tersi olacak şekilde ayarlanmıştır. Gerekli ön hazırlık işlemleri tamamlandıktan sonra dalma, bekleme, ilerleme ve geri çekilme aşamalarından oluşan SKK işlemine başlanmıştır.

İlk aşamada belirlenen devirde dönen takım ucunun freze tablasının dik yönde yavaş hareketi ile parçaya nüfuziyeti sağlanmıştır. Tablanın yukarı yönlü hareketi, omuz parçalara temas edene kadar devam ettirilmiştir. Pim kısmı parçaya daldırılmış, dönmekte olan takımın omuzu ana metale teması sağlandıktan sonra dalma miktarı ayarlanmış ve yaklaşık 5 dakika beklenmiştir. Daha sonra tezgahta gerekli sabitlemeler yapılarak, kaynak hızına uygun ilerleme hareketi otomatik bir şekilde sağlanmıştır.

Kaynaklı birleştirme, 660, 920 dev/dk. iki farklı devir sayısı ve 18, 32, 54 mm/dk. üç farklı ilerleme (kaynak) hızlarında olmak üzere toplam 6 deneyi içermektedir. Uygulanan parametreler neticesinde kaynaklı birleştirilen AA7075-T6 alüminyum alaşımı-bakır levhaların kaynak performansları mekanik testler kullanılarak, kaynaklı bölgenin mikro yapısı ise metalografik analizlerle belirlenmiştir. Mekanik testlerden elde edilen bulguların kontrolü ve kaynak bölgesi ile ilgili daha detaylı bilgiler için numuneler metalografik analizlere tabi tutulmuşlardır. Kaynak işleminin yapılışı Şekil 3.8 ve Şekil 3.9'da verilmiştir.



Şekil 3.8. Farklı Al-Cu levhalara uygulanan SKK işleminin şematik gösterimi.



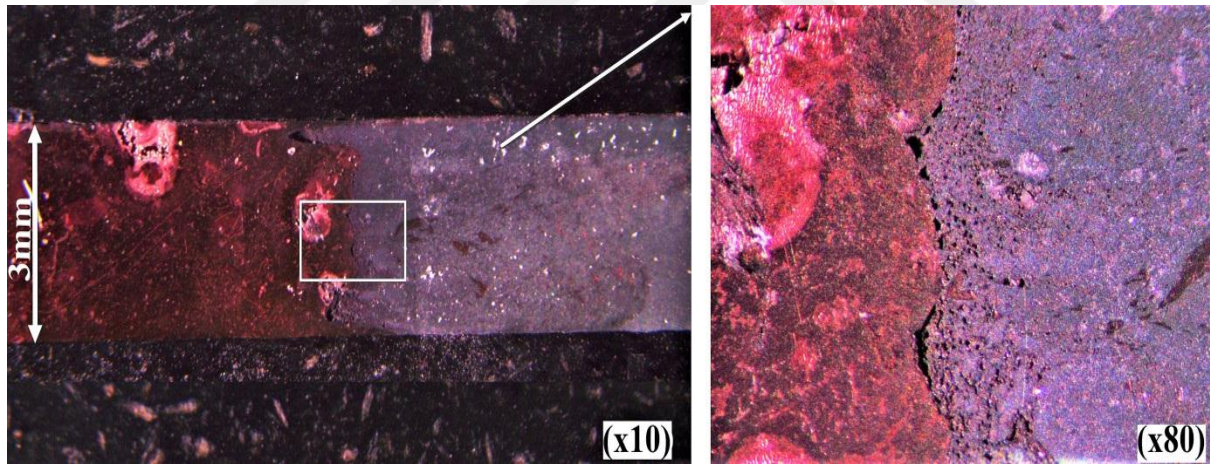
Şekil 3.9. Al-Cu levhaların SKK ile kaynaklı birleştirilmesi.

4. BULGULAR

4.1. Mikroyapı İncelemesi

4.1.1. 660 dev/dk. Sabit Dönme Hızı Kullanılarak Kaynaklı Birleştirilen Al-Cu Numunenin Kaynak Bölgesinde Mikro Yapı İncelemesi

660 dev/dk. sabit dönme hızı kullanılarak sürtünme karıştırma kaynaklı birleştirilen Al-Cu numunenin, alüminyum kaynak bölgesi HNO_3 (25 ml) ve H_2O (75 ml)'dan oluşan çözeltiliye daldırılıp 60s beklenecek şekilde dağlanmış, numune gerekli temizlik ve kurutma işlemi yapıldıktan sonra numunenin bakır kaynak bölgesi $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ (5 g), HCl (25 ml) ve H_2O (75 ml) den oluşan çözeltili kullanılarak 60s süre ile dağlanmıştır. Dağlanmış numunenin, optik mikroskop görüntüsü Şekil 4.1'de verilmiştir. Optik mikroskop incelemesinde, kaynaklı birleştirilen bölgenin kaynak hattından başlayarak Al ana kütle içerisinde granüler halde dağılmış halde Cu görülmüştür. Doğrusallığı bozulmuş ancak belirgin olan kaynak hattında, porozitenin varlığı Şekil 4.1.'de net olarak görülmektedir.

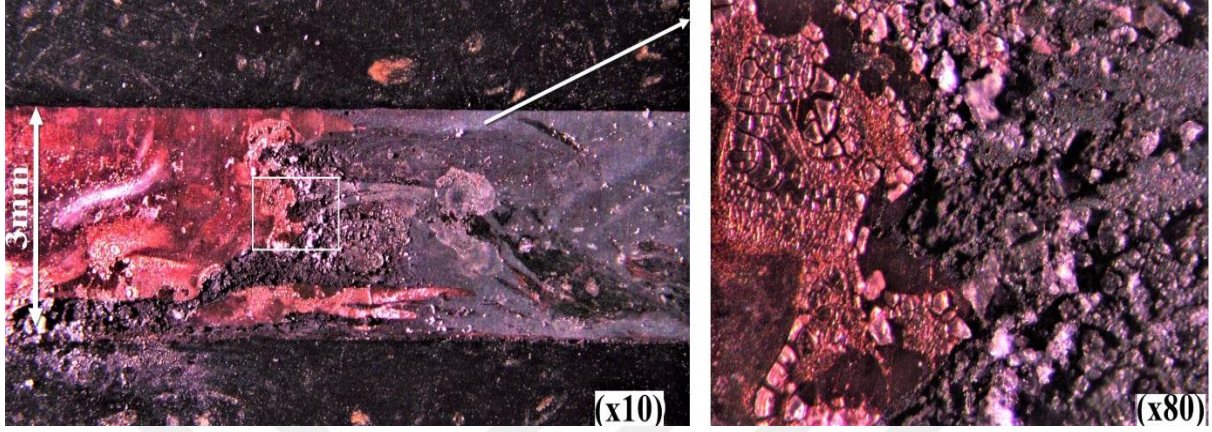


Şekil 4.1. 660 dev/dk. dönme hızında SKK ile üretilen numunenin optik mikroskop görüntüsü.

4.1.2. 920 dev/dk. Sabit Dönme Hızı Kullanılarak Sürtünme Karıştırma Kaynaklı Birleştirilen Al-Cu Numunelerin Kaynak Bölgesinin Mikro Yapı İncelemesi

920 dev/dk. sabit dönme hızı kullanılarak sürtünme karıştırma kaynaklı birleştirilen Al-Cu numunenin kaynak bölgesinin optik mikroskop görüntüsü Şekil 4.2'de verilmiştir. Yapılan incelemede, karıştırmanın etkisiyle kaynak hattının neredeyse kaybolduğu alüminyum bölgesinde bakır ve bakır bölgesinde de alüminyum yapıların varlığı görülmüştür. Artan takım dönme

hızının, kaynak bölgesinde daha fazla ısı üretmesinin buna yol açtığı öngörülmektedir. Kaynak performansında düşüşe neden olan porozitenin kaynak bölgesinde varlığı Şekil 4.2’de görülmektedir.



Şekil 4.2. 920 dev/dk. dönme hızında SKK ile üretilen numunenin optik mikroskop görüntüsü.

4.2. Mekanik Testler

Baz malzemelerden (Al ve Cu plakalar) ve sürtünme karıştırma kaynaklı plakalardan çıkarılan numunelerin çekme test sonuçları ile ulaşılan kaynak performansı Tablo 4.1’de verilmiştir.

Tablo 4.1. Esas malzemelerin ve kaynaklı Al-Cu numunelerin çekme test sonuçları.

Numune	%0.2 Kalıcı Şekil Değişimi, (MPA)	Çekme Mukavemeti, (MPA)	Uzama, %	Dayanım Performansı (DP*), % (Bakıra göre)	Süneklik Performansı (SP**), % (Bakıra göre)	Dayanım Performansı (DP*), % (AA7075 -T6’ya göre)	Süneklik Performansı (SP**), % (AA7075 -T6’ya göre)
AA7075-T6	541	602	12	-	-	-	-

Tablo 4.1. (devamı)

Numune	%0.2 Kalıcı Şekil Değişimi, (MPA)	Çekme Mukavemeti, (MPA)	Uzama, %	Dayanım Performansı (DP*), % (Bakıra göre)	Süneklik Performansı (SP**), % (Bakıra göre)	Dayanım Performansı (DP*), % (AA7075 -T6'ya göre)	Süneklik Performansı (SP**), % (AA7075 -T6'ya göre)
Cu-ETP	206,62	238,92	18,5	-	-	-	-
SKK (660 dev/dk. ve 18 mm/dk.)	147,35	195,95	2,206	82,01	11,92	32,55	18,34
SKK (660 dev/dk. ve 32 mm/dk.)	21,19	206,92	2,48	86,61	13,39	34,37	20,65
SKK (660 dev/dk. ve 54 mm/dk.)	114,94	143,99	1,50	60,27	8,11	23,92	12,50
SKK (920dev/dk. ve 18mm/dk.)	109,65	191,00	1,92	79,94	10,37	31,73	15,98

Tablo 4.1. (devamı)

Numune	%0.2 Kalıcı Şekil Değişimi, (MPa)	Çekme Mukavemeti, (MPa)	Uzama, %	Dayanım Performansı (DP*), % (Bakıra göre)	Süneklik Performansı (SP**), % (Bakıra göre)	Dayanım Performansı (DP*), % (AA7075 -T6'ya göre)	Süneklik Performansı (SP**), % (AA7075 -T6'ya göre)
SKK (920 dev/dk. ve 32 mm/dk.)	43,78	141,25	1,37	59,12	7,42	23,46	11,45
SKK (920 dev/dk. ve 54 mm/dk.)	87,11	118,02	1,43	49,4	7,70	19,60	11,88

4.2.1. 660 dev/dk. Sabit Dönme Hızı, Farklı İlerleme Hızlarında (18, 32, 54 mm/dk.)

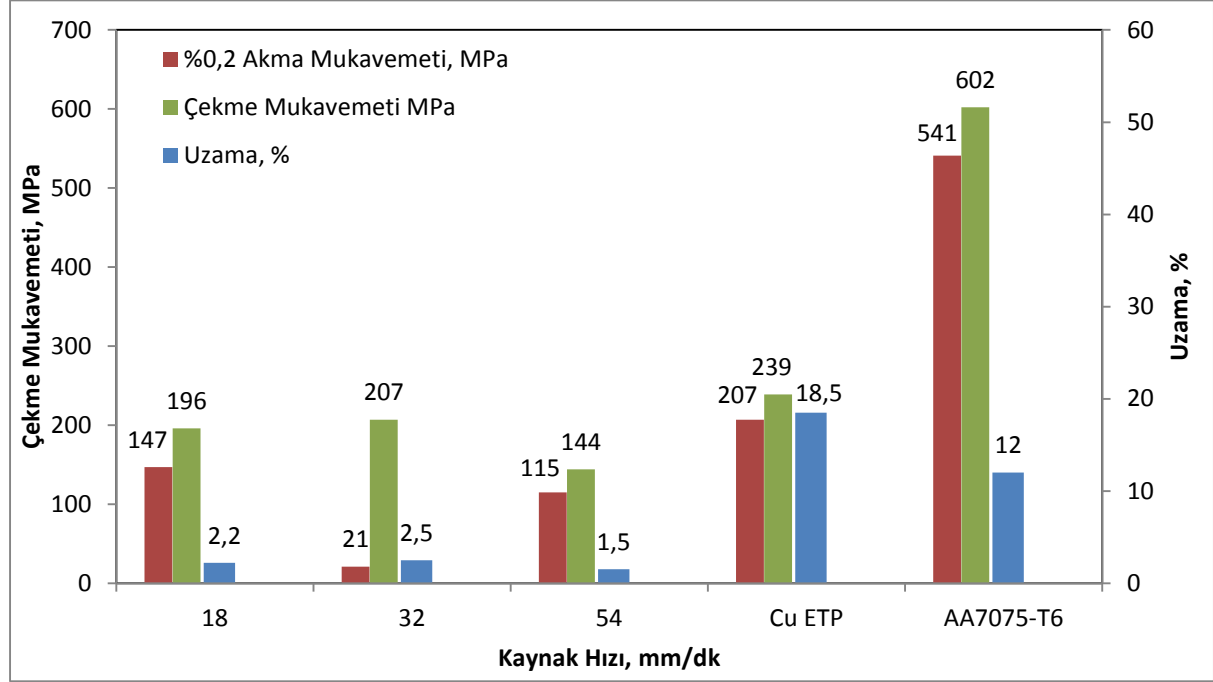
Sürtünme Karıştırma Kaynaklı Birleştirilen Al-Cu Numunelerin Mekanik Testleri

660 dev/dk. sabit dönme hızı, 18, 32, 54 mm/dk. farklı kaynak hızları kullanılarak gerçekleştirilen kaynaklı birleştirmelerin çekme test neticeleri Şekil 4.3'te, gerilme şekil değiştirme diyagramları Şekil 4.4'de verilmiştir. Şekilden de görüleceği gibi 54 mm/dk. ilerleme hız parametresinin kullanıldığı kaynak işleminde, yaklaşık 150 MPa'lık çekme mukavemeti ve % 1.5'lük uzama ile düşük kaynak performansı elde edilmiştir. En yüksek dayanım performansı, 207 MPa çekme mukavemet değeri ile 32 mm/dk. kaynak hızında kaynaklı birleştirilen numunelerden elde edilmiştir. En yüksek birleşme (kaynak) performansı % 2.5'lük uzama değeri

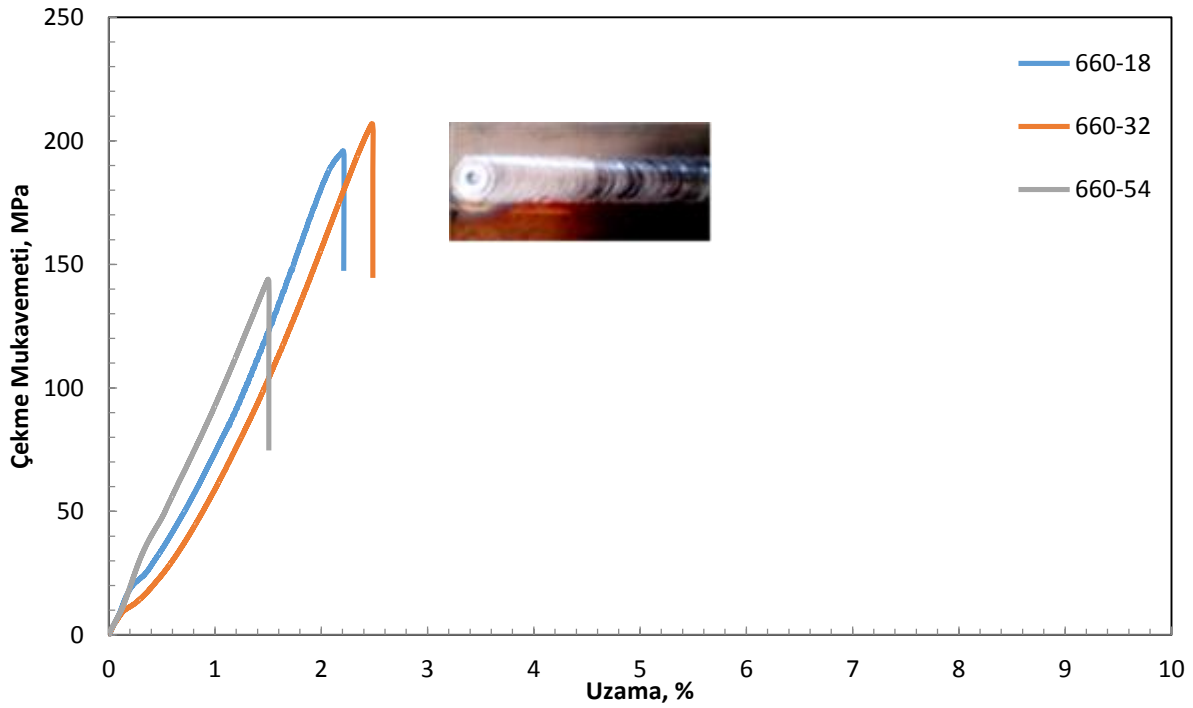
* $DP = \sigma_{\text{çekme (kaynak)}} / \sigma_{\text{çekme (ana malzeme ortalaması)}} \times 100$

** $SP = \% \text{ Uzama (kaynak)} / \% \text{ Uzama (ana malzeme ortalaması)} \times 100$

ile bu hızda üretilen numuneden elde edilmiştir. Diğer kaynak hızlarında üretilen birleştirmelerde, kaynak performans değerleri bakımından kabul edilebilir seviyelerdedir.

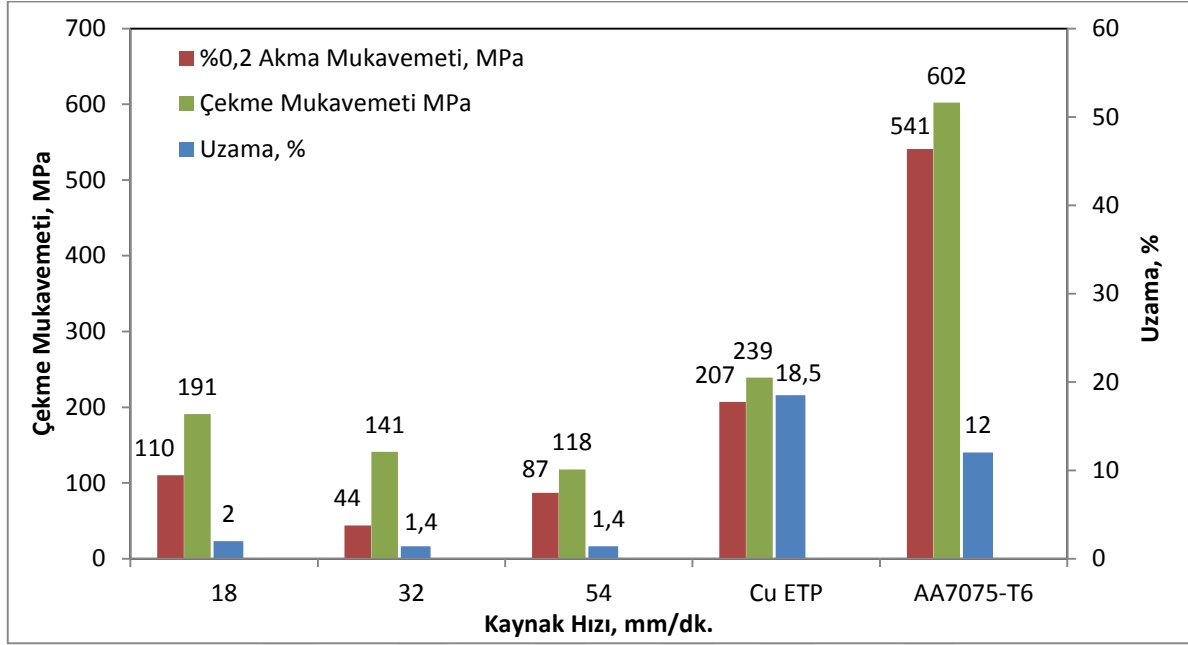


Şekil 4.3. 660 dev/dk. dönme hızı ile SKK işlemi uygulanan levhaların çekme test sonuçları.

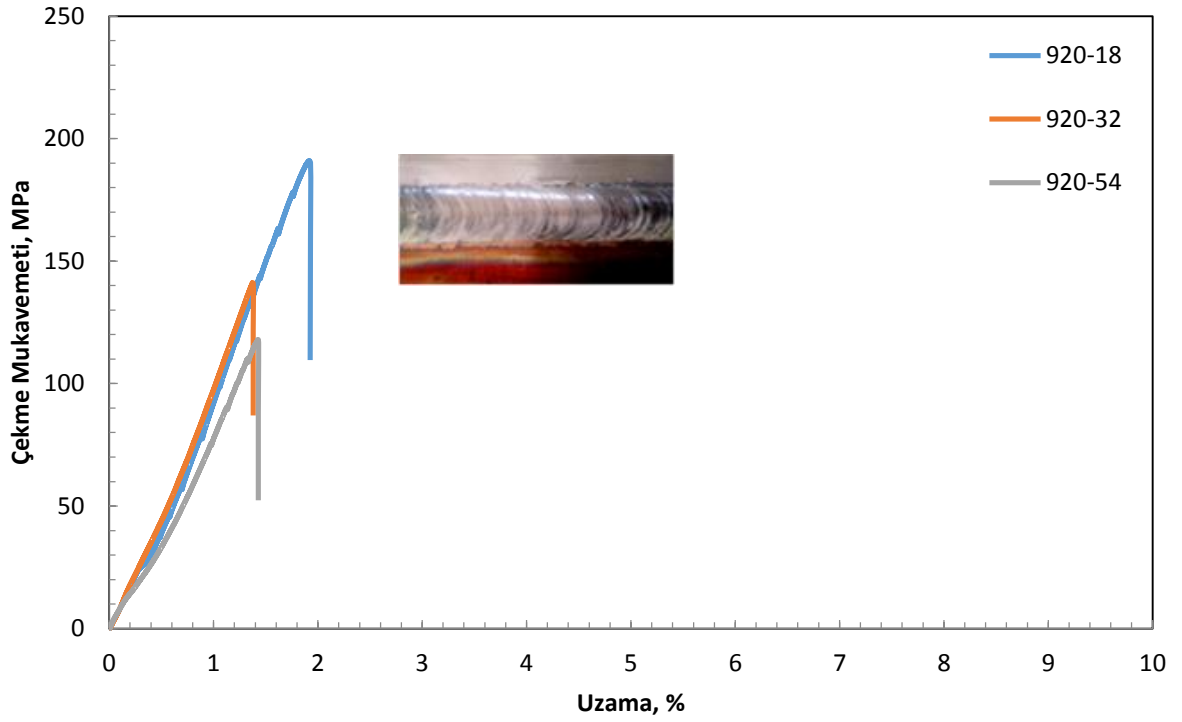


Şekil 4.4. 660 dev/dk. sabit dönme hızı, farklı ilerleme hızlarında (18, 32, 54 mm/dk.) sürtünme karıştırma kaynaklı üretilen Al-Cu levhalardan elde edilen gerilme-sekil değiştirme eğrilerinin karşılaştırılması.

4.2.2. 920 dev/dk. Sabit Dönme Hızı, Farklı İlerleme Hızlarında (18, 32, 54 mm/dk.) Kaynaklı Birleştirilen Al-Cu Numunelerin Mekanik Testleri



Şekil 4.5. 920 dev/dk. dönme devri ile SKK işlemi uygulanan levhaların çekme test sonuçları.



Şekil 4.6. 920 dev/dk. sabit dönme hızı, farklı ilerleme hızlarında (18, 32, 54 mm/dk.) sürtünme karıştırma kaynaklı üretilen Al-Cu levhalardan elde edilen gerilme-sekil değişirme eğrilerinin karşılaştırılması.

920 dev/dk. sabit dönme hızı, 18, 32, 54 mm/dk. farklı kaynak hızları kullanılarak gerçekleştirilen kaynaklı birleştirmelerin çekme test sonuçları Şekil 4.5'te, gerilme-sekil değişirme eğrilerinin karşılaştırılması ise Şekil 4.6'da verilmiştir. Şekilden de görüleceği gibi 18 mm/dk.'lık en düşük kaynak hız parametresi kullanılarak kaynaklı birleştirilen numunelerden 191 MPa çekme mukavemet değeri ve % 2'lik uzama değeri ile en yüksek kaynak performansı elde edilmiştir. 32 mm/dk. ve 54 mm/dk. ilerleme hız parametrelerinin kullanıldığı kaynak işlemlerinden elde edilen numuneler, sırasıyla 141 MPa, 118 MPa gibi birbirlerine yakın çekme mukavemet değerleri ve %1.4 lük uzama değerleri göstermişlerdir.

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Bu çalışmada; araştırmacılar tarafından konik vidalı pim kısmı olacak şekilde tasarlanıp üretimi gerçekleştirilen takım yardımıyla, sürtünme karıştırma kaynak yöntemi ile 660, 920 dev/dk. takım dönme hızları ve 18, 32 ve 54 mm/dk. ilerleme hızlarından oluşan kaynak parametreleri kullanılarak alüminyum alaşımı levha, saf bakır levhaya alın kaynaklı birleştirilmiştir. Daha sonra, tel erozyon yöntemi kullanılarak kaynaklı birleştirilen levhalardan, kaynak bölgesini de içine alan, mekanik test ve metalografik incelemeler için numuneler çıkarılmıştır. Kaynaklı birleştirilmiş levhalardan ve baz malzemelerden (Al ve Cu) elde edilen mekanik test numuneleri “Shimadzu AGS-X” çekme cihazı kullanılarak kaynak performansının belirlenmesine çalışılmıştır. Kaynak bölgesinin mikro yapısı optik mikroskop yardımıyla belirlenmiştir.

Yapılan araştırma ve incelemeler sonucunda aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- Farklı kaynak parametreleri kullanılarak SKK ile birleştirilen Al-Cu bağlantılarının tümünün kaynak bölgesinde boşluk görülmemiştir.
- SKK yönteminin kullanıldığı deneysel çalışmaların tamamında, kaynak süresince, dalıcı uç (pim) ve omuz kısmında olmak üzere takım üzerine sıvanmış, kaynaklı birleştirilen malzeme kalıntısı tespit edilmiştir.

- Kaynaklı birleştirme işleminde en iyi kaynak performansına, 660 dev/dk. Takım dönme hızı ve 32 mm/dk. Kaynak hız parametrelerinde ulaşılmıştır.
- Kaynaklı birleştirilen Al-Cu levhaların dayanım performansları Tablo 4.1'de görülmektedir. En iyi dayanım performansı % 86.61, en iyi süneklik performansı ise % 20.65' tir.
- 660 ve 920 dev/dk. farklı dönme hızları ve 18, 32 ve 54 mm/dk. 3 farklı kaynak hızlarında yapılan kaynaklı birleştirmelerde düşük kaynak hızlarında daha yüksek kaynak performansı elde edilmiştir.
- Optik mikroskop görüntüleri; kaynak bölgesinde Al ve Cu malzemelerin beklenen özellikte birleşmeyi sağlayacak şekilde karışmış olduğunu göstermiştir. Ancak, kaynaklı birleştirilen tüm numunelerin karışma bölgesinde az ya da çok porozitenin varlığı kaynak performansını olumsuz etkilemiştir.
- Kaynaklı numunelerin kaynak bölgesinde alüminyum ana kütle içerisinde irili ufaklı dağılmış halde bakırın varlığı tespit edilmiştir. Bu şekilde oluşan yapı kaynak performansında artış sağlamıştır.
- Daha yüksek kaynak hızlarında gerçekleştirilen kaynaklı birleştirmenin karıştırma bölgesinde literatürdekine benzer yeterli akışkanlığa ulaşamayan bakırın takım arka kısmındaki boşluğun doldurulmasında yetersiz kaldığı görülmüştür [77].

KAYNAKLAR

- [1]. Kutz, M., *Mechanical Engineers' Handbook Third Edition Materials and Mechanical Design*; John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2006; p1351.
- [2]. Kumar, N.; Yuan, W.; Mishra, R. S., *Friction Stir Welding of Dissimilar Alloys and Materials*; Butterworth-Heinemann, 2015; p1-13.
- [3]. Norrish, J., Advanced Welding Processes. *Advanced Welding Processes* **2006**, 218–246.
- [4]. Groover, M. P., *Fundamentals of modern manufacturing*; 2013; Vol. 53.
- [5]. Godiganur, V. S., Biradar, S., Comparison Of Friction Stir Welding Technique With Conventional Welding Methods. *IJRET: International Journal of Research in Engineering and Technology* **2014**, eISSN: 2319-1163, pISSN: 2321-7308.
- [6]. Örtülü elektrotla ark kaynak yöntemi şematik gösterim <http://www.metaluzmani.com/wp-content/uploads/2015/05/kaynaksematik.jpg> (29.07.2017).
- [7]. P. R. and Barath, S. P. V. K. A. S. B., Analogy of Conventional Welding Methods. *Imperial Journal of Interdisciplinary Research (IJIR)* **2016**, 2 (9), 2454–1362.
- [8]. ELEKTRİK DİRENÇ KAYNAĞI <http://www.metaluzmani.com/elektrik-direnc-kaynagi/> (28.07.2017).
- [9]. Oksi- Asetilen Kaynağı <http://lazer kaynakci.com/UrunDetay.aspx?HizmetID=14> (28.07.2017).
- [10]. Weman, K., *Welding Processes Handbook*; 2012.

- [11]. Electron Beam Welding <https://www.ebindustries.com/electron-beam-welding/> (26.07.2017).
- [12]. Çelen, S., Paslanmaz Çeliklerin Lazer Kaynağında Kaynak Parametrelerinin Bağlantının Dayanım ve Korozyon Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 2006.
- [13]. Laser welding: Filling the gaps <https://automotivemanufacturingsolutions.com/technology/laser-welding-filling-the-gaps> (01.08.2017).
- [14]. Ahmed, N., *New developments in advanced welding*; 2005.
- [15]. Tozaltı ve Elektro-Cüruf Bant Kaplama Yöntemleri <https://www.yumpu.com/tr/document/view/24905409/tozalt-ve-elektrocuruf-bant-kaplama-oerlikon-kaynak> (01.08.2017).
- [16]. Lonsdale, C. P., Thermite rail welding: history process developments, current practice and outlook for the 21st century. In *Proceedings of the AREMA 1999 Annual Conferences*; 1999; Vol. 1895, p 18.
- [17]. Termit Ray Kaynağı <http://www.muhendisalemi.com/wp-content/uploads/2016/12/termit-ray-kaynagi.jpg> (01.08.2017).
- [18]. Robert. Messler, J., *Principles of Welding*; 1999.
- [19]. Manufacturing Process I- Different Types of Welding <https://www.slideshare.net/yasirwaqqas/welding-p> (01.08.2017).
- [20]. Joining Processes <https://www.slideshare.net/Huai123/topic-7-joining-process-welding-brazing-soldering-fastening-160214> (27.07.2017).
- [21]. Webber, T.; Lieb, T.; Mazumder, J., Welding Fundamentals and Processes. In *ASM Handbook*; 2011; Vol. 6A, pp 556–569.
- [22]. Hot Wedge Welding http://www.wiskoamerica.com/images/techbro/inst_weld/hot-wedge-welding.jpg (25.07.2017).
- [23]. Phillips, D. H., *Welding Engineering: An Introduction*; 2015.
- [24]. What is resistance welding <http://www.amy.amada.co.jp/e/useful/popup/pop01.html> (03.07.2017).
- [25]. Singh, R., *Applied Welding Engineering*; 2016.
- [26]. Patlama kaynağı <http://www.metaluzmani.com/patlatma-kaynagi/> (02.08.2017).
- [27]. Maalekian, M., Friction welding – critical assessment of literature. *Science and Technology of Welding and Joining* **2007**, 12 (8), 738–759.
- [28]. Overview joining technologies <http://www.bil-ibs.be/en/overview-joining-technologies> (14.07.2017).

- [29]. Daniels, H. P. C., Ultrasonic welding. *Ultrasonics* **1965**, 3 (4), 190–196.
- [30]. Sonikel ultrasonik kaynak sistemi <http://www.ultrasonikhorn.com/upload/images/Sonikel-Ultrasonik-Kaynak-Sistemi.jpg> (13.07.2017).
- [31]. Thomas, W. .; Nicholas, E. ., Friction stir welding for the transportation industries. *Materials & Design* **1997**, 18 (4–6), 269–273.
- [32]. Sürtünme Karıştırma Kaynağı <http://slideplayer.biz.tr/slide/10439026/33/images/25/Sürtünme+Karıştırma+Kaynağı.jpg> (01.07.2017).
- [33]. Miličić, M., Gladović, P., Bojanić, R., Savković, T. and Stojić, N., Friction stir welding (FSW) process of copper alloys. *Metalurjija* **2016**, 1, 107–110.
- [34]. Kirk Fraser, L. S.-G. and L. I. K., *A Mesh-Free Solid-Mechanics Approach for Simulating the Friction Stir-Welding Process*; (Editör: Ishak, M.), InTech, DOI: 10.5772/64159, 2016.
- [35]. M. and MISRA, J. P. V. S. G., *Friction stir welding of aerospace materials: a state of art review*; DAAM International Scientific Book, Vienna, Austria, 2016; p 135-150.
- [36]. Gibson, B. T.; Lammlein, D. H.; Prater, T. J.; Longhurst, W. R.; Cox, C. D.; Ballun, M. C.; Dharmaraj, K. J.; Cook, G. E.; Strauss, A. M., Friction stir welding: Process, automation, and control. *Journal of Manufacturing Processes* **2014**, 16 (1), 56–73.
- [37]. He, X.; Gu, F.; Ball, A., A review of numerical analysis of friction stir welding. *Progress in Materials Science* **2014**, 65, 1–66.
- [38]. Thomas, W. M.; Johnson, K. I.; Wiesner, C. S., Friction Stir Welding – Recent Developments in Tool and Process Technologies. *Advanced Engineering Materials* **2003**, 5 (7), 485–490.
- [39]. Trivex™ tool for friction stir welding <http://www.twi-global.com/news-events/connect/2003/may-june-2003/trivex-tool-for-friction-stir-welding/> (20.06.17) (accessed Oct 26, 2012).
- [40]. Zhao, Y.-H.; Lin, S.-B.; Qu, F.-X.; Wu, L., Influence of pin geometry on material flow in friction stir welding process. *Materials Science and Technology* **2006**, 22 (1), 45–50.
- [41]. Elangovan, K.; Balasubramanian, V., Influences of tool pin profile and welding speed on the formation of friction stir processing zone in AA2219 aluminium alloy. *Journal of Materials Processing Technology* **2008**, 200 (1–3), 163–175.
- [42]. Scialpi, A.; De Filippis, L. A. C.; Cavaliere, P., Influence of shoulder geometry on microstructure and mechanical properties of friction stir welded 6082 aluminium alloy. *Materials and Design* **2007**, 28 (4), 1124–1129.
- [43]. Liu, F. C.; Ma, Z. Y., Influence of tool dimension and welding parameters on microstructure and mechanical properties of friction-stir-welded 6061-T651 aluminum alloy.

- Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science* **2008**, 39 (10), 2378–2388.
- [44]. Sorensen, C.; Nielsen, B., Exploring Geometry Effects for Convex Scrolled Shoulder, Step Spiral Probe FSW Tools. In *The Materials Society Annual Meeting*; 2009; pp 85–92.
- [45]. Longhurst, W. R., *Force control of friction stir welding*; Doktora Tezi, Vanderbilt University, Nashville, Tennessee, 2009.
- [46]. Felix Xavier Muthu, M. Jayabalan, V., Effect of pin profile and process parameters on microstructure and mechanical properties of friction stir welded Al–Cu joints. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* **2016**, 26 (4), 984–993.
- [47]. Azimzadegan, T.; Serajzadeh, S., An investigation into microstructures and mechanical properties of AA7075-T6 during friction stir welding at relatively high rotational speeds. *Journal of Materials Engineering and Performance* **2010**, 19 (9), 1256–1263.
- [48]. Dinaharan, I.; Murugan, N., Optimization of friction stir welding process to maximize tensile strength of AA6061/ZrB 2 in-situ composite butt joints. *Metals and Materials International* **2012**, 18 (1), 135–142.
- [49]. Heidarzadeh, A.; Khodaverdizadeh, H.; Mahmoudi, A.; Nazari, E., Tensile behavior of friction stir welded AA 6061-T4 aluminum alloy joints. *Materials and Design* **2012**, 37, 166–173.
- [50]. Suresha, C. N.; Rajaprakash, B. M.; Upadhy, S., A Study of the Effect of Tool Pin Profiles on Tensile Strength of Welded Joints Produced Using Friction Stir Welding Process. *Materials and Manufacturing Processes* **2011**, 26 (9), 1111–1116.
- [51]. Ding, J.; Carter, R.; Lawless, K.; Nunes, A.; Russell, C.; Suits, M.; Schneider, J., A Decade of Friction Stir Welding R and D at NASA’s Marshall Space Flight Center and a Glance into the Future. *NASA Marshall Space Flight Center; Huntsville, AL, United States*, **2008**, 544 (2700).
- [52]. Kinchen, D., Aldahir, E., *NDE of friction stir welds in aerospace applications*; AWS Inspection Trends, (2002).
- [53]. Baumann, J. A., Lederich, R. J., Bolser, D. R. and Talwar, R., Property characterization of 2024Al/7075Al Bi-alloy friction stir welded joints; ; Friction Stir Welding and Processing 2, The Minerals Metals and Materials Society (TMS) Annual Meeting, US, San Diego, Mar 2-6 2003, 199-207.
- [54]. Dubourg, L.; Merati, A.; Jahazi, M., Process optimisation and mechanical properties of friction stir lap welds of 7075-T6 stringers on 2024-T3 skin. *Materials and Design* **2010**, 31 (7), 3324–3330.
- [55]. NASA., The bulkhead and nosecone of the Orion spacecraft are joined using friction stir welding at NASA’s Michoud Assembly Facility,

- https://www.nasa.gov/mission_pages/constellation/multimedia/orion_takes_shape.html (27.03.2010).
- [56]. Lockheed Martin., Welding Process for Next Orion Spacecraft Begins <http://www.lockheedmartin.com/us/news/press-releases/2015/september/space-em1-orion.html> (08.09.2015).
- [57]. Lohwasser, D., Chen, Z., *Friction Stir Welding: From Basics to Applications*; CRC Press LLC, Boca Raton, USA, 2010.
- [58]. Thomas, W. M.; Kallee, S. W.; Staines, D. G.; Oakley, P. J., Friction stir welding - Process variants and developments in automotive industry. In *SAE 2006 World Congress & Exhibition*; 2006; p 8.
- [59]. Alnmaritec evaluates friction stir welding for deck plate construction <http://www.twi-global.com/news-events/case-studies/alnmaritec-evaluates-friction-stir-welding-for-deck-plate-construction-563/> (01.08.2017).
- [60]. Crawford Swift machine plays its part for world's swiftest train <http://www.holroyd.com/news/friction-stir-welding-machine-high-speed-rail-network.php> (20.06.2017).
- [61]. Haver, W. V., Friction Stir Welding <http://www.bil-ibs.be/sites/default/files/FSWAcier/fsw.pdf> (26.06.2017).
- [62]. Smith, C. B., Robotic friction stir welding using a standard industrial robot. *2nd Friction Stir Welding International Symposium 2000*.
- [63]. Joint Geometries <http://www.mtiwelding.com/technologies/friction-stir-welding/> (20.06.2017).
- [64]. Aviation Maintenance Technician Handbook, Chapter 5, Aircraft Materials, Processes & Hardware. *U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration Flight Standards Service, 2008, 8083* (30).
- [65]. Oğuz, B., Demir dışı metallerin kaynağı. *Oerlikon Yayını 1990*, 11.
- [66]. Çam, G., *Al-alaşımaları için geliştirilen yeni kaynak yöntemleri*; Kaynak Teknolojisi III. Ulusal Kongresi Bildiriler Kitabı, İstanbul, 2001; E-2001-277.
- [67]. Magnetic Pulse Welding <http://www.bmax.com/technology/magnetic-pulse-welding/> (26.06.2017).
- [68]. Copper: Properties and Applications <http://copperalliance.org.uk/education/education-resources/copper-properties-and-applications> (26.06.2017).
- [69]. Kartalkanat, A., Anadolu'da madencilik tarihçesi: kütahya-Gümüşköy'de 3500 yıldır süren madencilik çalışmaları, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Maden Etüt ve Arama Dairesi http://www.jmo.org.tr/resimler/ekler/e37d41c9bf5cbd3_ek.pdf

- (20.06.2017).
- [70]. Copper and copper alloys, Weldability of materials, Job Knowledge 23 <http://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/weldability-of-materials-copper-and-copper-alloys-023/> (20.06.2017).
- [71]. Koçak, H., *Bakır Alaşımları El Kitabı*; Sağlam Metal, 2006; p128.
- [72]. Michels, H. T., Copper Base Alloys <http://www.afsinc.org/content.cfm?ItemNumber=7810> (26.06.2017).
- [73]. Abbasi, M.; Karimi Taheri, A.; Salehi, M. T., Growth rate of intermetallic compounds in Al/Cu bimetal produced by cold roll welding process. *Journal of Alloys and Compounds* **2001**, 319 (1–2), 233–241.
- [74]. Naeem, M.; Jessett, R.; Withers, K.; Lasers, J. K.; Lane, C.; Valley, S., Welding Of Dissimilar Materials With 1kw Fiber Laser. *ICALEO* **2010**, 691–701.
- [75]. Prater, T., Friction stir welding of metal matrix composites for use in aerospace structures. *Acta Astronautica* **2013**, 93, 366–373.
- [76]. Goloborodko, A., Ito, T., Yun, X.; Motohashi, Y. and Itoh, G., Friction Stir Welding of a Commercial 7075-T6 Aluminum Alloy: Grain Refinement, Thermal Stability and Tensile Properties. *Materials Transactions* **2008**, 45 (8), 2503–2508.
- [77]. Safi, S. V.; Amirabadi, H.; Besharati Givi, M. K.; Safi, S. M., The effect of preheating on mechanical properties of friction stir welded dissimilar joints of pure copper and AA7075 aluminum alloy sheets. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **2016**, 84 (9–12), 2401–2411.
- [78]. Sakano, R.; Murakami, K.; Yamashita, K.; Hyoe, T.; Fujimoto, M.; Inuzuka, M.; Nagao, Y.; Kashiki, H., Development of Spot FSW Robot System for Automobile Body Members. In *3rd International Symposium on Friction Stir Welding*; 2001.
- [79]. Heurtier, P.; Jones, M. J.; Desrayaud, C.; Driver, J. H.; Montheillet, F.; Allehaux, D., Mechanical and thermal modelling of Friction Stir Welding. *Journal of Materials Processing Technology* **2006**, 171 (3), 348–357.
- [80]. Ochi, H.; Ogawa, K.; Yamamoto, Y.; Kawai, G.; Sawai, T., The formation of intermetallic compounds in aluminium alloy to copper friction-welded joints and their effect on joint efficiency. *Welding International* **2004**, 18 (7), 516–523.
- [81]. Al-Roubaiy, A. O. .; Nabat, S. M. .; Batako, A. D. L. ., Experimental and theoretical analysis of friction stir welding of Al-Cu joints. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **2014**, 71 (9–12), 1631–1642.
- [82]. Mishra, R. S.; Ma, Z. Y., Friction stir welding and processing. *Materials Science and Engineering: R: Reports* **2005**, 50 (1), 1–78.

- [83]. And Liu, W. Z. Q.-Z. G. W.-B., Microstructure and mechanical properties of dissimilar Al-Cu joints by friction stir welding. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* **2014**, *25* (2015), 1779–1786.
- [84]. Yilbaş, B. S., Şahin, A. Z., Kahraman, N. and Al-Garni, A. Z., Friction welding of St-Al and Al-Cu materials. *Journal of Materials Processing Technology* **1995**, *49*, 431–443.
- [85]. Ouyang, J.; Yarrapareddy, E.; Kovacevic, R., Microstructural evolution in the friction stir welded 6061 aluminum alloy (T6-temper condition) to copper. *Journal of Materials Processing Technology* **2006**, *172* (1), 110–122.
- [86]. Xue, P.; Xiao, B. L.; Ni, D. R.; Ma, Z. Y., Enhanced mechanical properties of friction stir welded dissimilar Al-Cu joint by intermetallic compounds. *Materials Science and Engineering A* **2010**, *527* (21–22), 5723–5727.
- [87]. Galvão, I.; Oliveira, J. C.; Loureiro, A.; Rodrigues, D. M., Formation and distribution of brittle structures in friction stir welding of aluminium and copper: influence of process parameters. *Science and Technology of Welding and Joining* **2011**, *16* (8), 681–689.
- [88]. Esmaili, A.; Zareie Rajani, H. R.; Sharbati, M.; Givi, M. K. B.; Shamanian, M., The role of rotation speed on intermetallic compounds formation and mechanical behavior of friction stir welded brass/aluminum 1050 couple. *Intermetallics* **2011**, *19* (11), 1711–1719.
- [89]. Akinlabi, E. T., Els-Botes, A. and McGrath, P. J., Effect of travel speed on joint properties of dissimilar metal friction stir welds; In Proceedings of 2nd International Conference on Advances in Engineering and Technology (AET), Uganda, 2011.
- [90]. Çam, G.; Serindağ, H. T.; Çakan, A.; Mistikoglu, S.; Yavuz, H., The effect of weld parameters on friction stir welding of brass plates. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik* **2008**, *39* (6), 394–399.
- [91]. Çam, G.; Güçlüer, S.; Çakan, A.; Serindag, H. T., Mechanical properties of friction stir butt-welded Al-5086 H32 plate. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik* **2009**, *40* (8), 638–642.
- [92]. Liu, P.; Shi, Q.; Wang, W.; Wang, X.; Zhang, Z., Microstructure and XRD analysis of FSW joints for copper T2/aluminium 5A06 dissimilar materials. *Materials Letters* **2008**, *62* (25), 4106–4108.
- [93]. Sahu, P. K.; Pal, S.; Pal, S. K.; Jain, R., Influence of plate position, tool offset and tool rotational speed on mechanical properties and microstructures of dissimilar Al/Cu friction stir welding joints. *Journal of Materials Processing Technology* **2016**, *235*, 55–67.
- [94]. Çam, G.; İpekoğlu, G., Farklı Al-alaşımı levhaların (AA6061/AA7075) sürtünme karıştırma kaynağına temper durumunun etkisi. *MMOB MMO Mühendis ve Makina Dergisi* **2012**, *53* (629), 40–47.

- [95]. Mohammadi-pour, M.; Khodabandeh, A.; Mohammadi-pour, S.; Paidar, M., Microstructure and mechanical properties of joints welded by friction-stir welding in aluminum alloy 7075-T6 plates for aerospace application. *Rare Metals* **2016**, 1–9.
- [96]. Xue, P.; Ni, D. R.; Wang, D.; Xiao, B. L.; Ma, Z. Y., Effect of friction stir welding parameters on the microstructure and mechanical properties of the dissimilar Al-Cu joints. *Materials Science and Engineering A* **2011**, 528 (13–14), 4683–4689.
- [97]. Esmaeili, A.; Givi, M. K. B.; Rajani, H. R. Z., A metallurgical and mechanical study on dissimilar Friction Stir welding of aluminum 1050 to brass (CuZn30). *Materials Science and Engineering A* **2011**, 528 (22–23), 7093–7102.
- [98]. Zheng, Q.; Feng, X.; Shen, Y.; Huang, G.; Zhao, P., Dissimilar friction stir welding of 6061 Al to 316 stainless steel using Zn as a filler metal. *Journal of Alloys and Compounds* **2016**, 686, 693–701.
- [99]. Akinlabi, E. T.; Akinlabi S. A., Effect of Heat Input on the Properties of Dissimilar Friction Stir Welds of Aluminium and Copper. *American Journal of Materials Science*, 2012, 2(5) : 147-152,.
- [100]. Barekatin, H.; Kazeminezhad, M.; Kokabi, A. H., Microstructure and mechanical properties in dissimilar butt friction stir welding of severely plastic deformed aluminum AA 1050 and commercially pure copper sheets. *Journal of Materials Science and Technology* **2014**, 30 (8), 826–834.
- [101]. Yaduwanshi, D. K.; Bag, S.; Pal, S., Hybrid Friction Stir Welding of Similar and Dissimilar Materials. *Advances in Material Forming and Joining. Topics in Mining, Metallurgy and Materials Engineering. Springer, New Delhi* **2015**, 323–349.
- [102]. Mehta, K. P.; Badheka, V. J., A Review on Dissimilar Friction Stir Welding of Copper to Aluminum: Process, Properties, and Variants. *Materials and Manufacturing Processes* **2016**, 31 (3), 233–254.
- [103]. Mehta, K. P.; Badheka, V. J., Effects of Tilt Angle on the Properties of Dissimilar Friction Stir Welding Copper to Aluminum. *Materials and Manufacturing Processes* **2016**, 31 (3), 255–263.

ÖZGEÇMİŞ

Adı ve Soyadı : Emre KAYGUSUZ
Doğum Tarihi : 06.03.1991
E-mail : emre_kygsz@windowlive.com

Öğrenim Durumu :

Derece	Bölüm/Program	Üniversite	Yıl
Lisans	Mühendislik Fakültesi	Sakarya Üniversitesi	2009-2014
Yüksek Lisans	Makine Mühendisliği A.B.D.	Mersin Üniversitesi	2015-2017
Doktora	-	-	-

Görevler :

Görev Ünvanı	Görev Yeri	Yıl
Kalite Mühendisi	Adana	2014-2016
Üniversite-Sanayi İşbirliği Uzmanı	Mersin	2016-.....

