

ZONGULDAK BÜLENT ECEVİT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

AA5083 / AA6061 ALÜMİNYUM MALZEMELERİN SÜRTÜNME KARIŞTIRMA
KAYNAĞI YÖNTEMİYLE BİRLEŞTİRİLMESİ VE ANALİZİ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

EMRE CAN ÇAVUŞ

AĞUSTOS 2022

ZONGULDAK BÜLENT ECEVİT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

AA5083 / AA6061 ALÜMİNYUM MALZEMELERİN SÜRTÜNME KARIŞTIRMA
KAYNAĞI YÖNTEMİYLE BİRLEŞTİRİLMESİ VE ANALİZİ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Emre Can ÇAVUŞ

DANIŞMAN : Dr. Öğr. Üyesi Oğuz KOÇAR

ZONGULDAK
AĞUSTOS 2022

KABUL:

Emre Can ÇAVUŞ tarafından hazırlanan “AA5083 / AA6061 Alüminyum Malzemelerin Sürtünme Karıştırma Kaynağı Yöntemiyle Birleştirilmesi ve Analizi” başlıklı bu çalışma jürimiz tarafından değerlendirilerek Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak oybirliğiyle kabul edilmiştir. 12/08/2022

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Oğuz KOÇAR

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine
Mühendisliği Bölümü

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Nergizhan ANAÇ

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine
Mühendisliği Bölümü

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Selçuk ŞİRİN

Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Hendek Meslek Yüksekokulu Makine ve
Metal Teknolojileri Bölümü

ONAY:

Yukarıdaki imzaların, adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylarım./....../20....

Prof. Dr. Ahmet ÖZARSLAN
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü



“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

Emre Can ÇAVUŞ

ÖZET

Yüksek Lisans

AA5083 / AA6061 ALÜMİNYUM MALZEMELERİN SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI YÖNTEMİYLE BİRLEŞTİRİLMESİ VE ANALİZİ

Emre Can ÇAVUŞ

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Oğuz KOÇAR

Ağustos 2022, 127 sayfa

Bu çalışmada, AL5083 ve AL6061 levhalar üç farklı dönme hızında (750, 1250, 1750 dev/dak), iki farklı ilerleme hızında (50,100 mm/dak) ve üç farklı geometriye sahip karıştırıcı uç (üçgen, kare, vida) kullanılarak sürtünme karıştırma kaynağı (SKK) ile birleştirilmiştir. Bu birleştirmede çekme testi, mikrosertlik ölçümleri, yüzey pürüzlülüğü ve titreşim analizi ölçümleri yapılarak deneysel olarak incelenmiştir. Değiştirilen kaynak parametrelerinin, kaynak kalitesine etkisi araştırılmıştır. Bununla birlikte kaynak kalitesinin belirlenmesinde tahribatsız muayene yöntemi olan titreşim analizinin kullanılabilirliği araştırılmıştır. Yapılan deney sonuçları ve oluşturulan grafikler incelendiğinde çekme dayanımına en yüksek etkinin karıştırıcı uç geometrisi tarafından yapıldığı, takım devir hızının etki sıralamasında karıştırıcı uç geometrisinden sonra geldiği takım ilerleme hızının ise en az etkiye sahip olan parametre olduğu görülmüştür. Mikrosertlik sonuçlarında karıştırıcı uç geometrilerinin sertlik üzerindeki etkisinin az olduğu belirlenmiştir. Modal analiz sonuçlarında karıştırıcı uç geometrilerinin kaynak bölgesine doğrudan etki ettiği göz önünde bulundurulduğunda her bir karıştırıcı ucun

ÖZET (devam ediyor)

parametrelere farklı tepkiler verdikleri görülmüştür. Yüzey pürüzlülük sonuçlarına göre en düşük yüzey pürüzlülük değerleri vida ve kare uçlu karıştırıcı uçlarda elde edilmiştir.

Bölüm 1’de genel anlamda kaynak, kaynak yöntemleri, alüminyum ve alaşımları hakkında bilgiler verilmiştir. Bölüm 2’de sürtünme karıştırma kaynağının temel ilkeleri, metalurik yapısı ile yöntemin üstünlük ve sınırlarına değinilmiştir. Bölüm 3’te dinamik karakterizasyon kapmasında titreşimin tanımı, titreşimle ilgili temel bilgiler, titreşimin ölçülmesi, doğal frekans hesabı ve fourier dönüşümü hakkında bilgiler verilmiştir. Bölüm 4’te literatür taraması yapılmıştır. Bölüm 5’te deneyler öncesi ve sonrası ile ilgili materyal ve yöntem anlatılmıştır. Bölüm 6’da araştırma bulguları ve sonuçları veriler ile açıklanarak tartışılmış, Bölüm 7’de sonuçlar verilmiş genel değerlendirmeler yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Sürtünme Karıştırma Kaynağı, Modal Analiz, AA5083, AA6061

Bilim Kodu: 625.03

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

AA5083 / AA6061 COMBINATION AND ANALYSIS OF ALUMINUM MATERIALS WITH FRICTION STIR WELDING METHOD

Emre Can ÇAVUŞ

**Zonguldak Bülent Ecevit University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering**

Thesis Advisor: Assist. Prof. Dr. Oğuz KOÇAR

August 2022, 127 pages

Using three different rotational speeds (750, 1250, and 1750 rpm), two different feed speeds (50, 100 mm/min), and three different mixing tip geometries (triangle, square, screw), AL5083 and AL6061 sheets were friction stir welded together in this study. Tensile tests, microhardness measurements, surface roughness measurements, vibration analysis measurements, and experimental investigation were done in this joint. Investigated how the modified welding parameters affected the weld quality. Vibration analysis, a non-destructive testing technique, has also been researched for its applicability in measuring weld quality. Examining the test results and the generated graphics reveals that the stirrer tip geometry has the greatest impact on the tensile strength, followed by the tool rotation speed in the effect order and the tool feed rate, which has the least impact. It was found from the microhardness results that the mixer tip geometries had little impact on the hardness. It was found that each mixer tip responded

ABSTRACT (continued)

differently to the parameters, which was expected given that the mixer tip geometries directly affect the weld area in the modal analysis results. The mixer tips with screw and square tips had the lowest surface roughness values, according to the results of the measurement.

General information about welding, welding techniques, aluminum, and its alloys is provided in Chapter 1. The fundamental concepts of friction stir welding, its metallurgical composition, and the method's advantages and disadvantages are discussed in Chapter 2. The definition of vibration in dynamic characterization, general information on vibration, vibration measurement, natural frequency calculation, and the Fourier transform are all provided in Chapter 3. A review of the literature was done in Chapter 4. The materials and procedures used before and after the experiments are explained in Chapter 5. Research findings and results are described and discussed in Chapter 6, results are provided and overall evaluations are made in Chapter 7.

Keywords: Friction Stir Welding, Modal Analysis, AA5083, AA6061

Science Code: 625.03

TEŞEKKÜR

Çalışmam boyunca yardımları ile yanımda olan, yol gösteren, yazım süreci ve deneysel çalışmalarımızda beraber çalıştığımız tez danışmanım sayın Dr. Öğr. Üyesi Oğuz KOÇAR'a yapılan deneylerde, cihazların kullanılmasında ve sonuçların yorumlanmasında tecrübesiyle daima yanımda olan ve desteğini esirgemeyen sayın Prof. Dr. Mehmet YETMEZ'e, Dr. Öğr. Üyesi Engin KOCAMAN'a, Arş. Gör. Ahmet Serdar GÜLDİBİ'ne teşekkür ederim.

Bugüne dek her koşulda beni destekleyerek bugünlere ulaşmamı sağlayan anneme ve babama, manevi destekleri ile her zaman yanımda olan eşim ve aileme teşekkür ederim.



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL	ii
ÖZET.....	iii
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xvii
BÖLÜM 1 GİRİŞ	1
1.1. GENEL ANLAMDA KAYNAK	4
1.1.1. Metal Kaynağı	4
1.1.2. Plastik Kaynağı	5
1.1.3. Kaynak İşleminin Sınıflandırılması	5
1.1.3.1. İşlem Şekline Göre Sınıflandırma:.....	6
1.1.3.2. İmalat Şekline Göre Sınıflandırma:	6
1.1.3.3. Amaca Göre Sınıflandırma	7
1.1.4. Kaynak Yönteminin Üstünlükleri ve Sınırları	7
1.2. KAYNAK YÖNTEMLERİ.....	8
1.2.1. Ergitme Kaynak Yöntemleri	9
1.2.1.1. Gaz Kaynağı.....	9
1.2.1.2. Elektrik Ark Kaynağı.....	10
Gaz Altı Tungsten Ark Kaynağı(GTAK/TIG)	11
Gaz Altı Metal Ark Kaynağı(GMAK-MIG/MAG)	12
Plazma Ark Kaynağı(PAK)	13
Toz Altı Ark Kaynağı(TAG)	15
1.2.1.3. Elektrik Direnç Kaynağı	15
Direnç Nokta (Punta) Kaynağı	16

İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

	<u>Sayfa</u>
Dikiş Direnç Kaynağı	16
Elektrik Direnç Yakma Alın Kaynağı	17
Elektrik Direnç Projeksiyon Kaynağı.....	18
1.2.1.4. Elektron Işın Kaynağı	19
1.2.1.5. Lazer Kaynağı.....	21
1.2.1.6. Elektro Curuf Kaynağı.....	23
1.2.1.7. Termit Kaynağı	24
1.2.2. Lehimleme.....	25
1.2.3. Katı Hal Kaynak Yöntemleri.....	27
1.2.3.1. Dövme Kaynağı	27
1.2.3.2. Soğuk Kaynak.....	28
1.2.3.3. Haddeleme Kaynağı.....	29
1.2.3.4. Difüzyon Kaynağı.....	30
1.2.3.5. Patlamalı Kaynak	31
1.2.3.6. Ultrasonik Kaynak	33
1.2.3.7. Sürtünme Kaynağı	35
1.3. ALÜMİNYUM VE ALAŞIMLARI.....	39
1.3.1. Alüminyumun Fiziksel ve Mekanik özellikleri.....	39
1.3.2. Alüminyum Alasımlarının Sınıflandırılması.....	40
1.3.2.1. 1xxx Serisi Alasımlar.....	42
1.3.2.2. 2xxx Serisi Alasımlar.....	42
1.3.2.3. 3xxx Serisi Alasımlar.....	43
1.3.2.4. 4xxx Serisi Alasımlar.....	43
1.3.2.5. 5xxx Serisi Alasımlar.....	44
1.3.2.6. 6xxx Serisi Alasımlar.....	44
1.3.2.7. 7xxx Serisi Alasımlar.....	45
1.3.2.8. 8xxx Serisi Alasımlar.....	45
BÖLÜM 2 SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI.....	47
2.1. SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI TEMEL İLKELER.....	48
2.1.1 Sürtünme Karıştırma Kaynak İşleminin Prensibi	48
2.1.2 Sürtünme Karıştırma Kaynağında İşlem Parametreleri	49

İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

	<u>Sayfa</u>
2.1.3 Kullanılan Takım Uç Şekilleri Ve Takım Özellikleri.....	52
2.2 METALÜRJİK YAPI.....	53
2.2.2 Dinamik Olarak Yeniden Kristalleşen Bölge (DKB)	53
2.2.3 Termomekanik Etkilenen Bölge (TEB)	54
2.2.4 Isıdan Etkilenen Bölge (IEB).....	54
2.3 SKK AVANTAJLARI, SINIRLAMALARI VE UYGULAMA ALANLARI.....	54
2.3.1. Yöntemin Üstünlük ve Sınırları	54
2.3.2. Sürtünme Karıştırma Kaynağının Kullanım Alanları	56
BÖLÜM 3 DİNAMİK KARAKTERİZASYON	59
3.1. TİTREŞİMİN TANIMI	59
3.2. TİTREŞİMLE İLGİLİ TERİMLER	59
3.2.1. Genlik Değerleri	61
3.2.2. Faz Kavramı	62
3.2.3. Rezonans Kavramı	63
3.3. TİTREŞİMİN ÖLÇÜLMESİ.....	63
3.4. FREKANS TANIM TEKNİKLERİ	65
3.4.1. Dalgaform Görüntüleme (Zaman Bölgesi)	65
3.4.2. Spektrum Görüntüleme (Frekans Bölgesi).....	65
3.4.3. Doğal Frekans Hesabi Ve Fourier Dönüşümü	66
BÖLÜM 4 LİTERATÜR TARAMASI	71
BÖLÜM 5 MATERYAL VE YÖNTEM.....	75
5.1. MATERYAL	75
5.1.1. Kaynak Yapılacak Malzeme	75
5.1.2. Karıştırıcı Uç İmalatı Ve Karıştırıcı Uçun Özellikleri	76
5.1.3. Birleştirilecek Levhaları Bağlama Kalıbı.....	78
5.1.4. Kaynak İşleminde Kullanılan Tezgah	78
5.1.5. Deney İçin Belirlenen Kaynak Parametreleri.....	79
5.1.6. Birleştirme Öncesi Hazırlıklar	80
5.2. YÖNTEM	81
5.2.1. Kaynak İşlemi	81
5.2.2. Çekme Deneyi	82

İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

	<u>Sayfa</u>
5.2.3. Mikrosertlik İncelemeleri	86
5.2.4. Modal Analiz.....	88
5.2.5. Yüzey Pürüzlülüğü	90
BÖLÜM 6 ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA.....	91
6.1. KAYNAK YÜZEYİ, ARKA YÜZEY VE KESİT GÖRÜNÜMLERİ.....	91
6.1.1. Kaynak Sonrası Karıştırıcı Uçun Durumu	91
6.1.2. Üçgen Karıştırıcı Uç İle Birleştirilen Levhaların Kaynak Bölgesi Görünümü..	92
6.1.3. Kare Karıştırıcı Uç İle Birleştirelen Levhaların Kaynak Bölgesi Görünümü....	93
6.1.4. Vida Karıştırıcı Uç İle Birleştirelen Levhaların Kaynak Bölgesi Görünümü....	94
6.2. ÇEKME DENEYİ SONUÇLARI	95
6.2.1. Karıştırıcı Uç Geometrisinin Etkisi.....	98
6.2.2. Takım Devir Hızının Etkisi	100
6.2.3. Takım İlerleme Hızının Etkisi.....	102
6.2.4. Çekme Deneyi Sonuçları ve Verilerin Değerlendirilmesi.....	104
6.3. MİKROSERTLİK İNCELEME SONUÇLARI	105
6.4. MODAL ANALİZ SONUÇLARI.....	108
6.5. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ ARAŞTIRMA SONUÇLARI.....	112
6.5.1. Yüzey Pürüzlülük Değerleri ve Grafiği	112
6.5.2. Karıştırıcı Uç Geometrisine Göre Yüzey Pürüzlülük Ortalama Değerleri	113
6.5.3. Takım Dönme Hızına Göre Yüzey Pürüzlülük Ortalama Değerleri	114
6.5.4. Takım İlerleme Hızına Göre Yüzey Pürüzlülük Ortalama Değerleri	115
BÖLÜM 7 SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	117
KAYNAKLAR.....	121
ÖZGEÇMİŞ	127

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1 Genel Anlamda Kaynak İşlemi.....	4
Şekil 1.2 Kaynak İşleminin Sınıflandırılması.....	5
Şekil 1.3 Kaynak yöntemleri diyagramı	8
Şekil 2.1 Sürtünme karıştırma kaynağı işleminin şematik diyagramı	48
Şekil 2.2 Karıştırıcı Uç Geometrilere	52
Şekil 2.3 SKK Uygulanan Alüminyum Alaşımın Mikro Yapısı	53
Şekil 3.1 Harmonik Hareket Grafiği	60
Şekil 3.2 Deplasman, Hız ve İvme Eğrileri	61
Şekil 3.3 Genlik Değerleri	62
Şekil 3.4 Faz Gecikmesi.....	63
Şekil 3.5 Kesme Tipi İvmeölçer	64
Şekil 3.6 Baskı Tipi İvmeölçer	64
Şekil 3.7 Titreşim ölçerlerin frekans aralığı.....	64
Şekil 3.8 Dalgaform Grafikleri	65
Şekil 3.9 FFT Dönüşümü	65
Şekil 3.10 Basit Kütle – Yay Sistemi.....	66
Şekil 3.11 Frekans cevap fonksiyonu	68
Şekil 3.12 Frekans cevap fonksiyonu ve Fourier dönüşümü	69
Şekil 5.1 Karıştırıcı Uç Tasarımları	76
Şekil 5.2 Üçgen-Kare-Vida Karıştırıcı Uç Katı Modelleri	77
Şekil 5.3 Üçgen-Kare-Vida Uç Geometrisinde İmal Edilen Karıştırıcı Uçlar.....	77
Şekil 5.4 Bağlama Kalıbı ve Levhaların Bağlanma Şekli.....	78
Şekil 5.5 Spinner U-630 Compact CNC 5 Eksen İşleme Merkezi	79
Şekil 5.6 SKK için Kaynak Parametreleri Kodlamaları ve Deney Şema Planlaması.....	80
Şekil 5.7 Sürtünme Karıştırma Kaynağı Öncesi Görünüm.....	81
Şekil 5.8 Kaynak Sonrası Birleştirilmiş Levhaların Görünümü	82
Şekil 5.9 ASTM E8 Standartlarına Göre Çekme Çubuğu Tasarımı	82
Şekil 5.10 1500W Senfeng Fiber Lazer Kesim Cihazı	83
Şekil 5.11 100*200 mm Boyutlarında Kesilmiş Kaynaklı Numune.....	83
Şekil 5.12 ASTM E-8 Standartlarında Çekme Çubuğu Tasarımı	84
Şekil 5.13 ASTM E-8 Standartlarında Lazer ile Kesimi Yapılan Çekme Çubukları	84
Şekil 5.14 BMT-5E Serisi 50 KN Kapasiteli Servo Elektromekanik Universal Test Cihazı ..	85
Şekil 5.15 BMT-5E Serisi 50 KN Test Cihazı Çekme Çeneleri.....	85
Şekil 5.16 Bakalit Alımı İçin Üretilen Kabin 1.ve 2. Görünümü	86
Şekil 5.17 Matkon Forcipol 2V Zımpara Makinesi	86

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

No	Sayfa
Şekil 5.18 Mikrosertlik İçin Parlatılan Numunelerin Görüntüsü	87
Şekil 5.19 Shimadzu, HMV-2T Vicker's Mikrosertlik Ölçüm Cihazı	87
Şekil 5.20 Modal Analiz Deney Düzeneği Tasarımı	88
Şekil 5.21 (a) Bilgisayar (nCode ve Infield) - (b) eDAQ veri toplayıcı	89
Şekil 5.22 (a) Dytran 3093B ivmeölçer - (b) Dynapulse darbe çekici	89
Şekil 5.23 Modal analiz deney düzeneği	90
Şekil 5.24 Taylor Hobson Surtronic 25 Yüzey Pürüzlülüğü Ölçüm Cihazı	90
Şekil 6.1 Sürtünme Karıştırma Kaynağı Sonrası Karıştırıcı Uç Görünümü	91
Şekil 6.2 Üçgen Karıştırıcı Uç İle Birleştirelen Levhaların Kaynak Bölgesi Görünümleri	92
Şekil 6.3 Kare Karıştırıcı Uç İle Birleştirelen Levhaların Kaynak Bölgesi Görünümleri	93
Şekil 6.4 Vida Karıştırıcı Uç İle Birleştirelen Levhaların Kaynak Bölgesi Görünümleri	94
Şekil 6.5 Çekme Deneyi Sonrası Kopan Numune Örnekleri	96
Şekil 6.6 Akma-Çekme Gerilmesi Verileri Grafiği	97
Şekil 6.7 Birim Uzama/Akma-Çekme Gerilmesi Grafiği	97
Şekil 6.8 Karıştırıcı Uç Geometrisi/Çekme Gerilmesi (Mpa)	98
Şekil 6.9 Karıştırıcı Uç Geometrisi / %Birim Uzama	99
Şekil 6.10 Takım Devri / Çekme Gerilmesi Grafiği	100
Şekil 6.11 %Birim Uzama/Takım Devir Hızı	101
Şekil 6.12 Takım İlerleme Hızı/ Çekme Gerilmesi Grafiği	102
Şekil 6.13 Takım İlerleme Hızları (mm/dak)/ %Birim Uzama	103
Şekil 6.14 Takım İlerleme Hızları (mm/dak) / Çekme Gerilmesi Grafiği (Mpa)	103
Şekil 6.15 Mikrosertlik Alınan Bölge Şeması	105
Şekil 6.16 Mikrosertlik /Üçgen Karıştırıcı Uç	106
Şekil 6.17 Mikrosertlik /Kare Karıştırıcı Uç	106
Şekil 6.18 Mikrosertlik /Vida Karıştırıcı Uç	107
Şekil 6.19 Numunelerin Doğal Frekans Değişimleri	109
Şekil 6.20 Numunelerin Sönümleme Frekansları	109
Şekil 6.21 Numunelerin Yer Değiştirme Fonksiyonuna Tepkileri	110
Şekil 6.22 Çekme Gerilmesi (Mpa) / Yer Değiştirme Fonksiyonu Grafiği X(w)	110
Şekil 6.23 Yüzey Pürüzlülük Değerleri Grafiği	113
Şekil 6.24 Karıştırıcı Uç Geometrisine Göre Yüzey Pürüzlülüğü Değerleri Grafiği	114
Şekil 6.25 Takım Devrine Göre Yüzey Pürüzlülüğü Değerleri Grafiği	115
Şekil 6.26 Takım Devrine Göre Yüzey Pürüzlülüğü Değerleri Grafiği	116
Şekil 6.27 Yüzey Pürüzlülüğü/Max Çekme Dayanımı	116
Şekil 6.28 Yüzey Pürüzlülüğü/Max Çekme Dayanımı	116

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa No

Çizelge 1.1	Aluminyumun Mekanik Özellikleri	40
Çizelge 1.2	Aluminyum Alaşımlarının Mekanik Özellikleri	41
Çizelge 5.1	Al5083-H111 ve Al6061-T6 Kimyasal Özellikleri	75
Çizelge 5.2	Al5083-H111 ve Al6061-T6 Mekanik Özellikleri	75
Çizelge 5.3	2379 Takım Çeliği Kimyasal Özellikleri	76
Çizelge 6.1	Çekme Deney Sonuçları	95
Çizelge 6.2	Karıştırıcı Uç Geometrisi/Çekme Gerilmesi (Mpa).....	98
Çizelge 6.3	Karıştırıcı Uç Geometrisi / % Birim Uzama.....	99
Çizelge 6.4	Takım Devri /Çekme Gerilmesi.....	100
Çizelge 6.5	Takım Devir Hızı/%Birim Uzama	101
Çizelge 6.6	Takım İlerleme Hızı/Çekme Gerilmesi.....	102
Çizelge 6.7	Takım İlerleme Hızı /%Birim Uzama	103
Çizelge 6.8	Kaynak Bölgesi Ortalama Sertlik Değerleri	105
Çizelge 6.9	Gezici Çekiç Darbe Deneyi Sonuçları	108
Çizelge 6.10	Al 5083 ve Al 6061 Gezici Çekiç Darbe Deneyi Sonuçları	108
Çizelge 6.11	Yüzey Pürüzlülük Değerleri	112
Çizelge 6.12	Karıştırıcı Uç Geometrisine Göre Ortalama Ra Değerleri.....	114
Çizelge 6.13	Takım Devrine Göre Ortalama Ra Değerleri.....	114
Çizelge 6.14	Takım İlerleme Hızına Göre Ortalama Ra Değerleri.....	115



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

n	: Devir sayısı
D	: Malzeme çapı
t	: Sürtünme süresi
d	: Malzeme çapı
f	: Doğal Frekans
T	: Periyot
ω	: Açısal Doğal Frekans
X	: Yer değiştirme
X₀	: Genlik
M	: Kütle Matrisi
$\ddot{U}$	: İvme vektörü
C	: Sönüm Matrisi
$\dot{U}$	: Hız vektörü
K	: Rijitlik Matrisi
U	: Yer değiştirme vektörü
F_(t)	: Kuvvet vektörü
H(ω)	: Frekans cevap fonksiyonu
ω_1	: Kaynaklı numunenin doğal frekansı
ω_{10}	: Saf numunenin doğal frekansı
X₁	: Kaynaklı numunenin yer değişimi
X₁₀	: Saf numunenin yer değişimi
ζ_1	: Kaynaklı numunenin sönüm oranı
ζ_{10}	: Saf numunenin sönüm oranı
μm	: Yüzey pürüzlülük birimi
MPa	: Basınç (Mega Pascal)
Kn	: Kuvvet (Kilo Newton)

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam ediyor)

KISALTMALAR

ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
CNC	: Bilgisayar Nümerik Kontrol
FFT	: Fast Fourier Transform
HV	: Vickers Mikrosertlik
Hz	: Hertz
RMS	: Root Mean Square
RPM	: Revolution Per Minute
SSM	: Semi – Solid Metal
ITAB	: Isı Tesiri Altında Kalan Bölge
AL	: Alüminyum
SKK	: Sürtünme Karıştırma Kaynağı
MM	: Milimetre
°C	: Santigrat Derece
O2	: Oksijen
C2H2	: Asetilen
TIG	: Tungsten İnert Gas
MIG	: Metal İnert Gas
MAG	: Metal Aktif Gaz
TAK	: Toz Altı Ark Kaynağı
PAK	: Plazma Ark Kaynağı
TWI	: The Welding İnstitute
TM	: Temel Metal
IMKB	: Isıya Maruz Kalan Bölge
TEB	: Termomekanik Etkilenmiş Bölge
DKKB	: Dinamik Kristalleşen Karışım Bölgesi
mm/dak	: Milimetre/Dakika
dev/dak	: Devir/Dakika

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Kaynak, metal, metal türevi ve termoplastik malzemelerin ek malzeme ilave ederek ya da etmeden buna bağlı olarak ergimeli veya ergimesiz olarak malzemelerin tek bir parça haline getirilerek birleştirilmesi işlemidir. İnsanlar tarih boyunca mevcut hayatını kolaylaştırmak ve yaşam kalitesini arttırmak için çeşitli araç ve gereçler yapma zorunluluğu duymuştur, Kaynaklı birleştirmeler insanların hayatını kolaylaştırmak ve yaşam kalitelerini arttırmak için tarihin çeşitli dönemlerinde çeşitli yöntemler kullanılarak araç ve gereç yapabilmek için kullandığı birleştirme biçimlerinden biri olmuştur.

İhtiyaçlar sınırsız olmakla her geçen gün artarak çoğalmaktadır. Bu durum teknolojik gelişmeleri olumlu yönde etkilemiş teknolojik gelişmelerin önünü açmıştır. Başlangıçta kaynaklı birleştirmeler iki metalin birleştirilmesi ihtiyacından doğsa da ihtiyaçların çeşitlenmesi ve mekanik özelliklerde kullanım alanlarına göre farklı ihtiyaçların doğması bu özelliklerin geliştirilmesi ve iyileştirilmesi gereksinimini ortaya çıkarmıştır. Bu durum sonucunda kaynak yöntemleri ergitmeli ve ergitmesiz kaynak metodları olmak üzere iki grupta toplanmıştır. Ergitmeli kaynak yönteminde birleştirilmek istenen metal malzemelerde birleşme yüzeylerinde ergime meydana gelmesi ve eriyen karışımın katılaşarak sertleşmesi sonucu metal malzemeler birleşirken; ergitmesiz kaynak yöntemi ile metal malzemeler ergitme olmadan malzemelerin ergitme sıcaklıklarının altında malzeme katı halde iken birleşme sağlanmaktadır. Modern kaynak yöntemleri ile yapılan kaynaklı çalışmalarda hata payı ve kaynaktan doğan sorunların minimuma indirilmesi istenmekte, plastik değişim ve faz dönüşümleri istenmemektedir. Bu olumsuz durumların önüne geçmek ve kaynak yapılan malzemelerin metalurjik ve mekanik özelliklerinin kaynak esnasında etkilenmemesi için düşük sıcaklıklarda birleştirme yapmak çözüm yollarından biridir [1].

Birleştirme işlemlerinin kökeni 2000 yıl öncesine kadar dayanmaktadır, ancak 1800'lerde modern anlamı ile kaynak ortaya çıkmıştır. Taşınabilirliği ve düşük maliyeti nedeni ile gaz kaynağı ve ark kaynağı, yirminci yüzyılda yaygın olarak kullanılmıştır[2].

Son dönemde ön plana çıkan SKK bir katı hal (basınç) kaynağı yöntemidir. Bu yöntemde birleşim bölgesinde içyapıdaki değişimler önemszenmeyecek kadar azdır. Ergitme kaynağı ile birleşimi zor olan, yapılması halinde çeşitli teknik sorunların yanı sıra birçok kusurla karşılaşılın alüminyum ve alaşımlarının birleştirilmesinde başarı sağlanmış aynı zamanda alüminyum ve alaşım levhalarında alın ve bindirme kaynak yöntemi olarak ergitme (sıvı hal) kaynak metotlarına göre daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Bu kaynak yöntemi ile kaynaklanan malzemelerde ergime olmamaktadır. Aynı şekilde pirinç levhalarda da bindirme ve alın kaynağı bu yöntem kullanılarak başarılı bir şekilde gerçekleştirilmektedir. Sürtünme karıştırma kaynağının Mg ve alaşımları ile yumuşak çeliklerde kullanılma potansiyeli de bulunmaktadır [3].

Alüminyum alaşımları ağırlığına göre yüksek mukavemeti, yüksek korozyon direnci, yüksek elektrik ve ısı iletkenliği ve kolay şekillendirilebilirliği nedeniyle otomobilden beyaz eşyaya kadar farklı alanlarda kullanılabilmektedir [4]. Ancak kaynaklanabilirlikteki zorluklar, kaynak bölgesindeki alaşım elementlerindeki kayıplar, ergitme kaynak bölgesinde gözeneklilik, çatlak kusurları gibi sorunlar ergitme kaynağı ile yapılan birleştirmelerde sık görülen problemlerdendir [5]. Yakın ergime sıcaklıklarına sahip malzemeler ergitme kaynağı ile birleştirilebilirken, farklı ergime sıcaklıklarına sahip malzemelerin birleştirilmesi mümkün değildir [6]. Bu nedenle, yenilikçi kaynak yöntemlerine olan ilgi her geçen gün artmaktadır [7].

Diğer bir husus ise elde edilen kaynaklı numunelerin kullanılması amaçlanan alanda istenilen metalürjik ve mekanik özellikleri barındırması gereksinimidir. Mekanik testler çekme, basma, eğme, darbe, yorulma ve sürünme testleri olarak sıralanabilir. Bu testler ile numunenin çekme, akma, kopma, basma, eğme, yorulma mukavemetleri, darbe ve sürünme dayanımı ile kırılma tokluğu, elastisite modülü vb birçok mekanik özelliğine ulaşılabilir. Bu yöntemler numuneye kuvvet uygulanarak yapılmaktadır dolayısı ile bu da numune kaybı, zaman vb. konularda dezavataj oluşturmaktadır.

Bu duruma alternatif modal analiz yönteminde ise numuneler üzerinde titreşim ölçümleri yapılarak modal parametreler (doğal frekans, sönümleme oranı, mod şekilleri) bulmak için

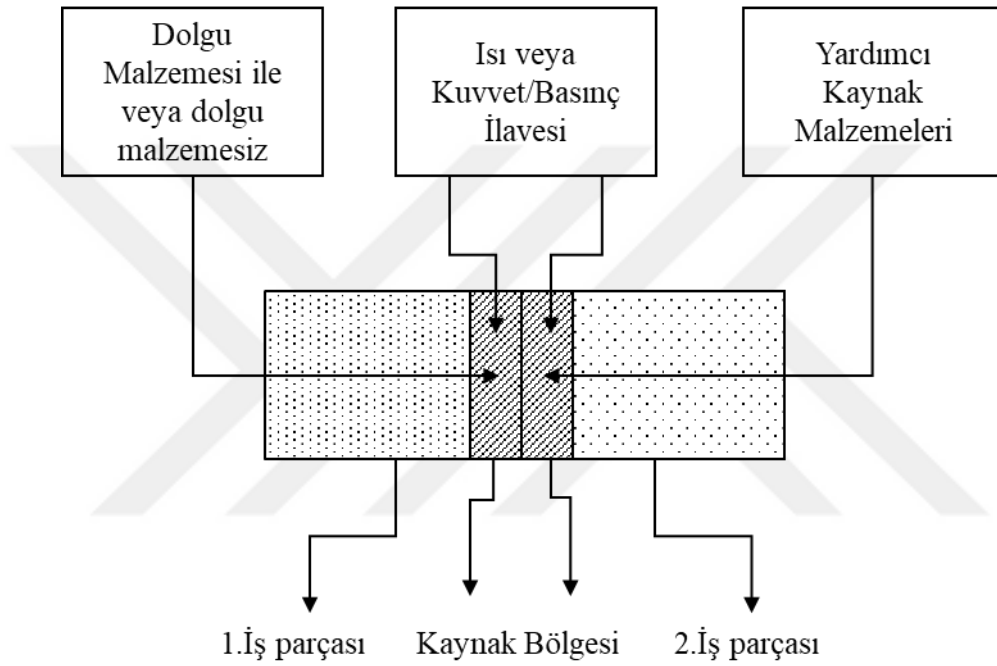
kullanılır. Genel olarak binalar, köprüler gibi yapılarda kullanılmış olsa da son zamanlarda mekanik yapılarda da kullanım alanı artmaya başlamıştır. Bu metodun en önemli avantajı herhangi bir kuvvet uygulanmamasıdır. Yöntemin uygulanması halinde herhangi bir kuvvet sinyalinin ölçülmesine gerek duyulmaz. Bunun sonucunda modal parametreleri bulmak cevap verilerine dayanmaktadır ve test düzeniği kurulumu bu yöntem ile oldukça kısa sürmektedir [8].

Bu çalışmada, şekillendirme, kaynak ve talaş kaldırma kabiliyeti ile yüksek korozyon direncine sahip AA6061 ve yüksek çekme dayanımı, sertlik, aşınma direnci, deniz atmosferine karşı iyi korozyon direnci ile iyi kaynak edilebilirlik özelliklerine sahip AA5083 alüminyum alaşımları farklı kaynak parametreleri (farklı geometride karıştırıcı uç, ilerleme hızı ve takım devir sayısı) kullanılarak SKK birleştirilmiştir. Kaynak işlemi sonrasında kaynak performansının belirlenebilmesi için numuneler çekme testlerine tabi tutulmuştur. Kaynak parametrelerinin (ilerleme hızı, karıştırıcı uç tipi, devir sayısı) kaynaklanan numunelerin mekanik özelliklerine olan etkisi araştırılmıştır. Bunun yanında numuneler çekme testlerine tabi tutulmadan önce darbe testi ile modal analiz uygulanarak doğal frekans değerleri ve mod şekilleri elde edilmiş yer değiştirme değişimi zamana bağlı olarak bulunmuş bunun yanında mikrosertlik ve yüzey pürüzlülüğü testlerinde tabi tutulmuşlardır. Yapılan çalışmalar sonucunda farklı kaynak parametrelerinin her bir deney üzerinde nasıl sonuç verdiği tartışılmış ve anlamlandırılmaya çalışılmıştır. Ayrıca titreşim analizinin kaynak bölgesindeki mekanik özelliklerin belirlenebilmesinde kullanılabilirliği tartışılmıştır.

1.1. GENEL ANLAMDA KAYNAK

Kaynak, aynı veya farklı malzemelerin enerji, ısı, basınç veya kuvvet uygulanarak süreklilik gösteren bir içyapıya sahip olacak şekilde birleştirilmesi işlemidir. Dolgu malzemesi kullanılması halinde dolgu malzemesinin erime sıcaklığı, kaynaklanan malzemelerin erime sıcaklığı ile birbirine yakın değerdedir [9].

Genel hatlarıyla kaynak işleminin prensibi şekil 1.1 de gösterilmiştir.



Şekil 1.1 Genel Anlamda Kaynak İşlemi.

Kaynak işlenecek malzemenin cinsine göre metal ve plastik malzeme kaynağı olarak ele alınabilir.

1.1.1. Metal Kaynağı

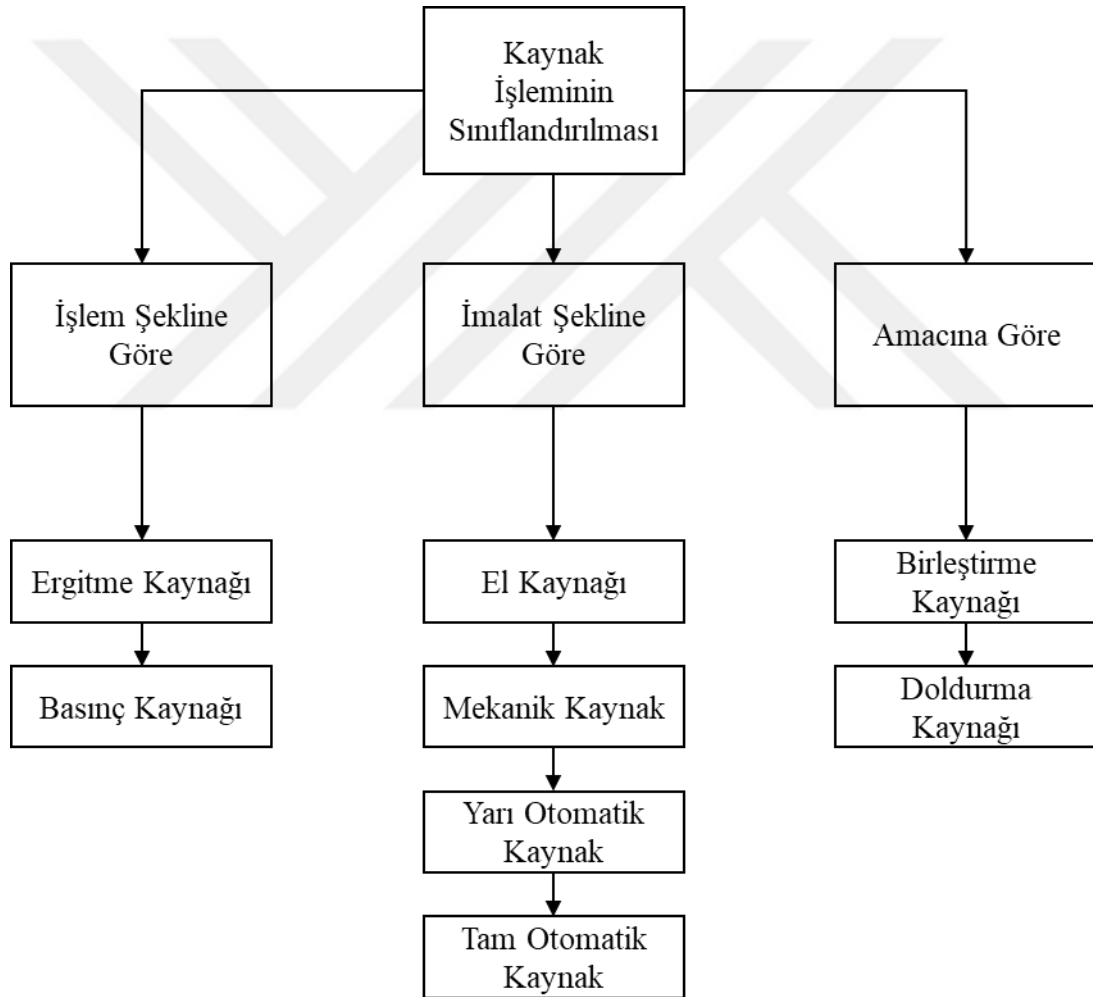
Metal malzemeye ısı, basınç veya her ikisini birden kullanılarak aynı cins olan veya erime aralığı aynı olan benzer bir malzeme eklenerek ya da katılmadan birleştirilmeye metal kaynağı ismi verilmektedir. İki parçanın birleştirilirken ek olarak başka bir malzeme kullanılması halinde ise bu malzeme ilave metal olarak isimlendirilir.

1.1.2. Plastik Kaynağı

Aynı ya da farklı termoplastik malzemeye ısı ile basınç kullanılarak ya da aynı cins bir plastik ilave malzeme eklenerek ya da eklenmeden birleştirilmesi plastik malzeme kaynağı olarak isimlendirilir.

1.1.3. Kaynak İşleminin Sınıflandırılması

Şekil 1.2’de işlem şekline, imalat şekline ve amacına göre kaynak işlemlerinin sınıflandırılması gösterilmiştir.



Şekil 1.2 Kaynak İşleminin Sınıflandırılması.

1.1.3.1. İşlem Şekline Göre Sınıflandırma:

Ergitme Kaynağı

Kaynak yapılacak malzemenin sıcaklık ile bölgesel olarak eritilerek ilave metal katılarak veya katılmayarak birleştirme yapma işlemidir.

Basınç Kaynağı

Kaynak yapılacak malzemenin büyük oranda ek metal katılmadan bölgesel basınç altında ısıtılarak birleştirilmesi işlemidir.

1.1.3.2. İmalat Şekline Göre Sınıflandırma:

El Kaynağı

Kaynak makinesi ve yardımcılarının elle idare edildiği yöntemdir.

Mekanik Kaynak

Kaynak makinesi elle idare edilirken yardımcılarının mekanik olarak idare edildiği yöntemdir.

Yarı Otomatik Kaynak

Kaynak yapan kişi kaynak işlemini yürütülmesi, kontrolü ve sonuçlandırma aşamasında sorumludur. Diğer aşamalarda kaynak yapımı mekanizasyon ile devam eder.

Tam Otomatik Kaynak

Kaynak yapan kişi kaynak işlemini başlatır, kaynak daha önce kodlanmış program aşamalarına uyarınca sürer. Durdurma ve başlatma kaynak yapan kişi tarafından yapılır.

1.1.3.3.Amaca Göre Sınıflandırma

Birleştirme kaynağı

Birden fazla parçayı birbirinden kolayca ayıramayacak şekilde birleştirme işlemidir.

Doldurma kaynağı

İş parçasının hacminde mevcut olarak eksikliği kapatmak veya hacmini büyütebilmek, korozyon ve aşındırıcı etkenler karşısında korumak amacıyla belirli bir alan içerisinde malzemenin kaynak edilmesidir.

1.1.4.Kaynak Yönteminin Üstünlükleri ve Sınırları

Kaynaklı birleştirmeler sonrasında yapılan kaynağın tokluk ve dayanımının yüksek olması, düşük ve yüksek sıcaklıklara direnç gösterebilmesi, aşınma ve korozyon direnci, gaz,buhar vb çalışma ortamlarında sızdırmazlık göstermesi kaynak sonucunda istenilen özelliklerin başında gelmektedir.

Bina, köprü gibi çelik yapılar ile boru, basınçlı kap, buhar kazanı ve depolama tankları otomotiv, gemi inşaatı, raylı sistemler, havacılık ve uzay sektörlerinde yaygın kullanılır. Kaynak yönteminin avantaj ve dezavantajları şu şekildedir.

Kaynak İşleminin Üstünlükleri

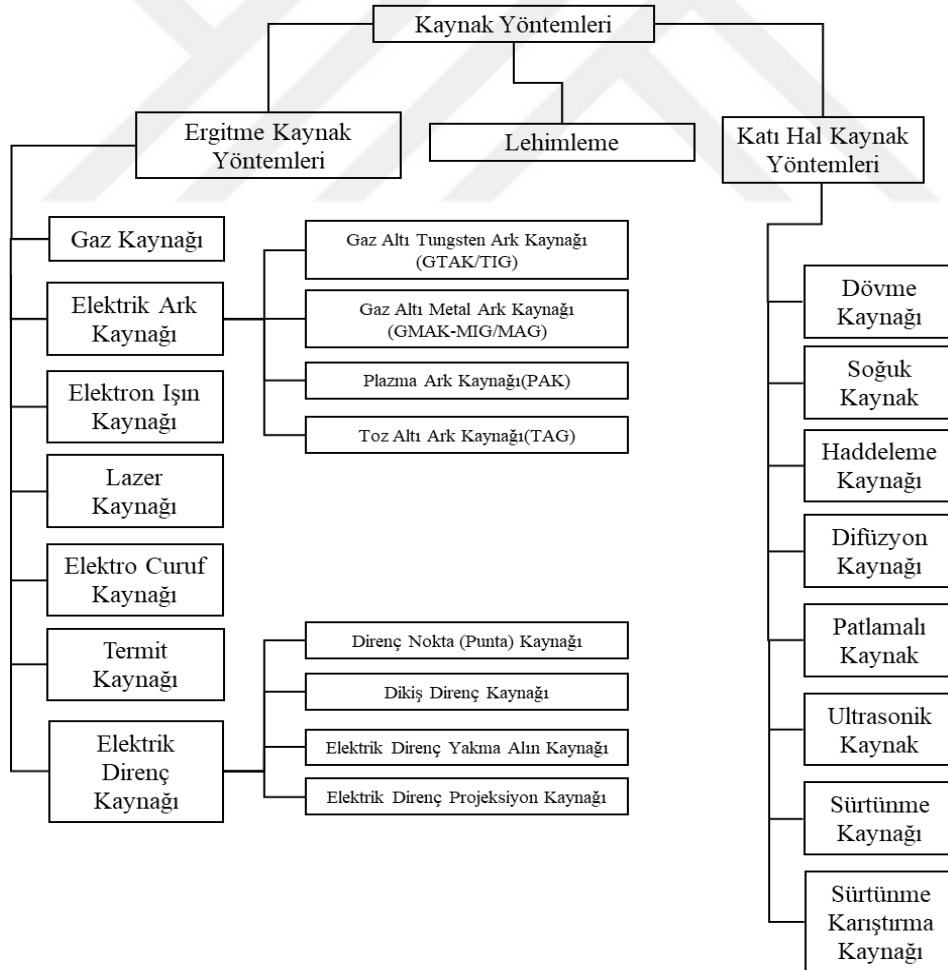
- Kaynak işleminde parçaların bütünleşip tek parça haline gelmesi kaynak işlemini kalıcı bir yöntem kılar.
- Dayanımı yüksek dolgu malzemeler ile yüksek dayanıma sahip kaynak elde etmek mümkündür
- Daha hafif ve ekonomik olması mekanik montaja göre üstün yanlarından biridir.
- Sahada uygulanması bakımından kaynak makinelerinin taşınabilir olması üstün yönüdür.

Kaynak İşleminin Sınırları

- Kaynak kalitesi uygulayıcının yeteneğine ve uzmanlığına bağlı olmakla işçilik maliyeti yüksek ve yoğun işçilik gerektirmektedir.
- Yoğun ısı enerjisi kullanımı gerektirdiğinden tehlikeli olup yüksek ısı, elektrik ve ultraviyole ışınlarla karşı önlemler alınmasını gerektirir.
- Bazı birleştirme yöntemlerinden farklı olarak sökülüp takılabilmek olanağı yoktur.
- Tespit edilmesi zor olan hatalar içerebileceğinden tahribatsız muayene yöntemleri kullanımı daha yaygındır.

1.2. KAYNAK YÖNTEMLERİ

Kaynak için çeşitli ihtiyaçlar ve gereksinimler doğrultusunda birçok kaynak yöntemi geliştirilmiştir. Şekil 1.3’de kaynak yöntemleri diyagramı gösterilmiştir.



Şekil 1.3 Kaynak yöntemleri diyagramı

1.2.1. Ergitme Kaynak Yöntemleri

Ergitme kaynak yönteminde kaynak yapılması planlanan metallerin kaynak yapılması düşünülen bölgeleri yan yana veya uç uca getirilip yüksek derecelerde ısıtılması ve eritilmesi sonucunda kaynak işlemi gerçekleştirilir.

Kaynak işlemi süresince elektrotun (ek metal) erimesi ile parçalar arasında bulunan köşe ve boşluklar doldurulur. İşlem soğuma ile gerçekleştirilmiş olur.

Kaynak bölgesi erime bölgesi ve ısı tesiri altında kalan bölge(ITAB) olmak üzere ikiye ayrılarak isimlendirilir.

Erime Bölgesi

Kaynak yapılan metal ve kaynakta kullanılan metal(elektrod)'un kimyasal bileşiminden oluşan bölgeye verilen isimdir.

Isı Tesiri Altında Kalan Bölge (ITAB)

Kaynak uygulaması esnasında uygulanan ısıнын, çevresel etmenler ile ısıl çevrimlerden etkilenen ve içyapı değişikliğine uğramış olan bölgeye verilen isimdir.

1.2.1.1. Gaz Kaynağı

Yanma özelliğine sahip gazın oksijen aracılığı ile yakılması ile ortaya çıkan yüksek ısı metalin eritilmesi ve kaynatılması gibi işlemlerde yaygın olarak asetilen gazı kullanılması nedeni ile oksit asetilen kaynağı olarak adlandırılmıştır. Asetilen gazının oksijen ile yakılması ile 3200° C sıcaklığa ulaşılmaktadır. Genellikle %50–%50 oranında oksijen– asetilen karışımı ile kaynak yapılır. Yüksek ısı ile oluşturulmuş olan kaynak banyosu istenilen dikiş boyunca ilerletilir. Banyoya metal kaynak teli damlatılır ve istenilen miktarda dolgu yapılır.

Yöntemin Üstünlükleri:

- Alaşımsız ve düşük alaşımlı çeliklerde, demir dışı metallerin kaynağında kullanım olanağı bulunmaktadır.

- Birleştirme kaynakları, boru hatları, tesisat alanı tamir ve kaplama kaynak işlemlerinde kullanılabilir.
- Isı ayarlaması yapılabilir.
- Kaynak süreci izelenebilir.
- Enerjiye ulaşım kolaydır.
- Kolay alaevlenebilir.
- Maliyeti düşüktür.
- Elektrik akımından bağımsızdır.
- Kaynak üfleci çok yönlü olarak kullanılabilir.

Gaz kaynağında çalışma teknikleri sola doğru kaynak ve sağa doğru kaynak olarak ikiye ayrılır.

Sola doğru kaynak:

Kaynak üfleci düz ve çizgisel olarak ilerler.

Kaynak teli kaynak havuzuna ileri ve geri daldırılarak hareket ettirilir.

Kaynak teli açısı 15° - 30° , şaloma açısı 45° - 90° dir.

Malzeme kalınlığı 3mm den az çelik, alüminyum, bakır ve dökme demir için uygulanan yöntemdir.

I ve V dikişinde kullanılmaktadır.

Sağa doğru kaynak:

Kaynak üfleci düz ve çizgisel olarak ilerler.

Kaynak teli kaynak havuzuna dairesel daldırılarak hareket ettirilir.

Kaynak teli açısı 40° - 50° , şaloma açısı 35° - 40° dir.

Malzeme kalınlığı 3mm den çok çelik, alüminyum, bakır ve dökme demir için uygulanan yöntemdir.

I ve V dikişinde kullanılmaktadır.

1.2.1.2. Elektrik Ark Kaynağı

Elektrik ark kaynağı kaynak yapımı için gerekli olan ısıyı elektrotlar arasında oluşturulan ark aracılığı ile elde edildiği eritme kaynak şeklidir.

1885 yılında karbon elektrot ile iş parçası arasında ark oluşturulması elektrik ark kaynağının ilk uygulaması olarak ve Bernardos usulü olarak bilinir. Bu uygulamada ilave metal kullanılmıştır. 1889 yılında Zener tarafından kaynak arkı iki karbon elektrot arasında oluşturulmuş bununla magnetik bir bobin ile arkın parçaya üflenmesi sağlanmıştır.

Mevcut ark kaynağının temelini ise 1889 yılında Slavianoff metalik bir elektrot ile iş parçası arasında ark oluşturarak elde etmiştir. Bu şekli ile erimiş olan elektrot kaynak ağzını doldurarak işlemi gerçekleştirilmiştir[10].

Elektrik ark kaynağı yapım tekniği ve özelliklerine göre, Gaz Altı Tungsten Ark Kaynağı(GTAK/TIG), Gaz Altı Metal Ark Kaynağı(GMAK-MIG/MAG), Plazma Ark Kaynağı(PAK), Toz Altı Ark Kaynağı(TAG) olarak dört sınıfta ele alınabilir.

Gaz Altı Tungsten Ark Kaynağı(GTAK/TIG)

Bu yöntem genellikle TIG ismi ile bilinir. TIG kaynağı, elektrik ark kaynak yönteminin geliştirilmiş ve ileri aşamasıdır. Bu yöntemde Tungsten erimeyen ve arka elektrik iletilmesini sağlayan elektrodu inert diğer elementlerle tepkimeye girmeyen gazı, gaz ise havanın nüfuziyetini önleyen erimiş olan bölge ve arkı simgeler.

Bu kaynak yöntemi Heliarc veya Argonarc isimleri ile de bilinir. TIG yöntemi diğer yöntemlere oranla daha üstün dikişler sağlamaktadır. Bu yöntemde TIG ark ile tungsten parça arasında serbest yanma olmaktadır. Koruyucu gaz ise helyum, argon ve karışımlarından meydana gelir.

TIG kaynağında enerji üreticinde bulunan bir kutup tungsten elektroda diğeri ise parçaya bağlıdır. Ark, yalnızca elektrik iletken malzemesi ve ark taşıma görevi üstlenen sürekli elektrod olan tungsten parça arasında yanma işlemi gerçekleşir. Kural olarak ilave malzeme yüklenmez. Kaynak bölgesinde tel formunda sevk edilen çeşitli şekillerde aparatlar mevcuttur. Argon TIG kaynağında koruyucu gaz olarak yaygın olarak kullanılmaktadır. Hafif metallerde derin ve geniş nüfuz etkisi nedeni ile argon/helyum karışımları da kullanılabilir[11].

Gaz Altı Metal Ark Kaynağı(GMAK-MIG/MAG)

MIG ismi kaynak esnasında ergiyen metal elektrod ve soygaz kullanımından dolayı “Metal Inert Gas”isminden ortaya çıkmıştır. Bu yöntemde değişiklikler meydana gelerek düşük akım yoğunluklu ve darbeli akım kullanımı ile farklı metallere uygulanması aynı zamanda koruyucu gaz olarak CO2 gibi aktif gazların ve gaz karışımlarının kullanılması gibi gelişmeler MAG ismi ile bilinen aktif koruyucu gazın kullanılması temelinde şekillenen “Metal Active Gaz”isminden türetilen ismin verilmesine yol açmıştır. MIG/MAG “Ergiyen Elektrotla Kaynak” isimleride kullanılır.

MIG kaynağı için metal ve gaz arasındaki boşluğu hava kirliliğinden korumak için bir elektrot gereklidir. MIG kaynağında metal transferinin gerçekleşme şekli esasında elektrottan kaynak havuzuna transfer edilen metalin özelliklerinin görülmesidir. MIG durumunda meydana gelen üç tip ana metal transferi şu şekildedir;

- Kısa devre tipi / Dip
- Damlacık tipi veya Sprey tipi
- Darbeli Tip

Kaynak bağlantısında ki kirlenmeyi önlemek için MIG kaynağında koruyucu gaz kullanmak yaygın bir uygulamadır. Kaynak işleminde füzyon arkının ve füzyon telinin çalışabileceği temiz hava alanı sağlanmasında yardımcı olunur.

MIG kaynağında genellikle kullanılan üç tip gaz vardır;

- Argon
- Karbon dioksit
- Helyum

Bu kaynak yöntemlerinde otomatik olarak sürekli beslenmekte ve gazla korunan ergime özelliğine sahip elektrot kullanılır. Kaynak yapan kişi kaynak için ilk ayarları yapar ve kaynak makinesi arkın elektrikselsel karakteristik ayarını otomatik olarak kendi kendine sağlar. Kaynakçının gerçekleştirdiği kontroller torcun pozisyonu, kaynak hızı ve doğrultusunu kapsamaktadır. Uygun donanım ve ayarlar ile akım şiddeti ve ark boyu kaynak makinesince sabit değerde otomatik olarak tutulmaktadır[12], [13].

MIG kaynağı ile çoğu ticari alaşımları kaynak yapmak mümkündür. MAG kaynağı alüminyum ve paslanmaz çelik gibi malzemelerin kaynağında kullanılmaz. MAG kaynağında çoğunlukla alaşımsız ve az alaşımlı çeliklerin kaynaklanmasında yararlanılmaktadır.

MAG kaynağında kullanımı yaygın olan karbondioksit gazı sıvı halde tüplere doldurulduğu için taşınabilme olanağı diğer gazlara göre 3 kat daha fazla olmakla karbondioksit gazı argon ve helyuma oranla daha ucuzdur.

MAG yönteminde MIG yöntemine oranla nüfuziyet daha fazla kaynak hızı ise daha yüksektir [14] .

Plazma Ark Kaynağı(PAK)

Plazma iyonlaşmış gaz kütlesi anlamında kullanılır. Plazmanın oluşması için bir gazın pozitif iyonları ile negatif yüklü elektronlarına ayrışabilmesi ve yeterli derecede ısıtılması gerekir.Bu durum için gerekli enerji arkten sağlanır.Oluşan sıcaklık ile ark sütununun merkezinde bulunan gaz sıcaklık ile ayrışır ve plazma oluşur.Oluşan gaz ark sütunundan uzaklaşırken nötr atomlar oluşturmak için yeniden birleşme gösterir bunun sonucunda ısı enerjisi açığa çıkar [15].

Plazma ark kaynağı (PAK) işlemi, ark kaynağı işleminin ileri bir halidir. Ucuz ve kullanım kolaylığı olduğu için diyafram, körük vb. imalatı için küçük ve orta ölçekli endüstrilerde lazer ışın kaynağına göre daha fazla uygulama alanına sahiptir.Roket,mekik, yapısal çelikte kullanılan farklı malzemelerin birleştirilmesinde plazma ark kaynağı işlemi tercih edilir. Plazma ark kaynağında çok yüksek hızlı plazma üretilir. TIG kaynağında, PAK işlemine göre havanın maruz kaldığı geniş yüzey alanı nedeniyle daha fazla ısı kaybı bulunur. PAK, TIG kaynağından daha iyi kaynak derinliği, genişlik oranı üretir ve açılmal bozulmayı azaltır. Plazma gazı yaklaşık 11.000 °C gibi çok yüksek bir sıcaklığa ulaşır ve arkı başlatmak için düşük dirençli bir yol sağlar. Plazma gazı tek başına kaynak metalini korumak için yeterli olmadığı için, bir dış kaynaktan büyük miktarda koruyucu gaz aktarılır. TIG kaynağı, aynı kalınlıktaki malzemenin kaynağı için PAK'dan yaklaşık on kat daha fazla akım alır, bu nedenle PAK daha ince bölümlerin kaynağı için daha uygundur. PAK'ın enerji yoğunluğu, TIG kaynağından daha fazladır. PAK erime veya iletim modu ile anahtar deliğı modu şeklinde kullanılabilir. Anahtar deliğı modunda, eritme modundan daha iyi kaynak penetrasyonu ve daha yüksek ısı girişı bulunur. Anahtar deliğı kaynağında yüksek kaynak akımı, eritme modunda düşük kaynak akımı

kullanıldığından TIG kaynak yöntemine benzer bir kaynak havuzu oluşturur. PAK,otojen kaynak için daha uygundur. 3,2 mm'den 7,6 mm'ye kadar değişen kalınlıklarda Nikel/Kobalt esaslı dolgu malzemesi olmadan kolayca kaynak yapabilir. PAK, kaynak penetrasyonunu artıran yüksek yoğunluklu ısı kaynağına sahiptir ve daha yüksek kaynak hızı için daha verimli kaynak işlemi haline gelir [16].

Yöntemin üstünlükleri:

- PAK, GTAK'dan daha yüksek kaynak hızı, daha yüksek enerji konsantrasyonu ve yüksek verimlilik sunar ve bu da onu birçok uygulama için en etkili süreçlerden biri haline getirir.
- PAK, GTAK'dan daha iyi penetrasyon sağlar. Ayrıca, anahtar deliği modunda kaynak yapmak, tek geçişte nispeten kalın malzemede tam nüfuzlu kaynaklar yapabilir.
- PAK, tüketilmeyen bir tungsten veya tungsten alaşımlı elektrot kullanan bir ark kaynağı işlemidir. Elektrotun gömülmesi, elektrot kontaminasyonunun en aza indirilmesi bir avantajdır Bu durum elektrot hizmet ömrünü uzatır. Bir elektrot, genellikle yeniden topraklanmaya gerek kalmadan tüm bir üretim vardiyası boyunca dayanabilir.
- PAK kaynak esnasında oluşan boşluklara ve hizalamaya karşı büyük bir tolerans sunar . Ark daraltılmış olmasına rağmen, plazma kolonu elektron veya lazer ışınlarından önemli ölçüde daha büyük bir çapa sahiptir.PAK maliyetli bağlantı hazırlığı ihtiyacını en aza indirir ve dolgu metali azaltır veya ortadan kaldırır.
- Bir plazma kaynağının bir GTAK kaynağına kıyasla yüksek derinlik-genişlik oranı da açışal bozulmayı ve artık gerilimi büyük ölçüde azaltır. Daha dar ITAB, daha az dahili kusur ve daha iyi kaynak işleme özelliği, sızdırmaz kap ve küçük çaplı boru gibi arka tarafları kaynaklanması zor olan bu yapısal bileşenlerin kaynaklanmasında etkili bir yöntem olmasını sağlar.

Yöntemin sınırları:

- PAK, hassas birleştirme için birincil süreç olarak birçok uygulamada GTAK'ın yerini alma potansiyeline sahip olsa da, PAK ekipmanı daha karmaşık ve maliyetlidir.
- Torcun suyla soğutulması ihtiyacı, torcun ne kadar küçük yapılabileceğini sınırlar (GTAK torçları gaz soğutmalı olabilir ve daha küçük alanlara sığacak şekilde yapılabilir). Ayrıca, güç kaynağı ve elektrik kontrol sistemleri, GTAK'dakinden daha karmaşıktır. Ayrıca, parametrelerinin ayarlanması ve eşleştirilmesi zordur ve yüksek torç, nozul ve tungsten kurulum gereksinimi gerektirir [17].

Toz Altı Ark Kaynağı(TAG)

Tozaltı ark kaynağı (TAG) güvenilirliği, derin nüfuziyeti, nesneler üzerinde pürüzsüz bir yüzey oluşturduğu ve yüksek üretkenlik sağladığı için fabrikasyon endüstrilerinde geniş bir uygulama alanı bulur. Bu işlemde, arkı ve kaynak havuzunu atmosferik kirlilikten korumak için erimiş granül akı kullanılır. Bu koruyucu, hem sıvı metali hem de kaynaştırılmamış granüller akıyı korur. Bu teknik genellikle denizaltı, basınçlı kap üretimi, büyük su boruları, kirişler ve köprü kolonları vb. gibi çeşitli yapısal elemanların uygulamaları için alın birleştirmeleri ve köşe kaynakları yapmak için kullanılır [18].

İşlem, bir granül akı tabakasının altına daldırılmış bir elektrik arkı kullanılarak çelik bileşenler arasında kaynaklı bir bağlantı oluşturulmasından oluşur. Tozaltı ark kaynağı (TAG), sürekli beslenen bir tel ile iş parçası arasında bir ark oluşumunu içerir. Bir granül akı örtüsü, iş parçası için koruyucu bir kalkan ve kaynak bölgesi için bir cüruf oluşturur. Koruyucu gaz gerekli değildir. Akı örtüsünün altına daldırılan ark, kaynak sırasında görünmez. TAG otomatik veya yarı otomatik modda çalıştırılır. İşlem normal olarak düz veya yatay köşe kaynak konumlarıyla sınırlıdır. Ark gerilimi, kaynak akımı, kaynak hızı, tel çapı, granül akı TAG için önemli terimler arasındadır [19].

1.2.1.3. Elektrik Direnç Kaynağı

Elektrik direnç kaynağı prensip olarak iş parçasından geçmekte olan elektrik akımına karşı gösterilen dirençten elde edilen ısı ve basınç aracılığı ile yapılır. İş parçasından geçen elektrik akımı dışında dışarıdan herhangi bir ısı verilmez. Kaynak yapılacak kısımlarda ısı meydana gelir kaynak makinesinde mevcut olan çeneler ve elektrodlar aracılığı ile basınç uygulanır.

Kaynak transformatörlerden elektrik direnç kaynağı için gerekli olan alçak gerilim ve yüksek akım şiddeti elde edilir. Hidrolik ya da mekanik donanımlar vasıtasıyla basınç elde edilir [10].

Elektrik direnç kaynağı direnç nokta(Punta) kaynağı, dikiş direnç kaynağı, elektrik direnç yakma alın kaynağı ve elektrik direnç projeksiyon kaynağı olarak dört grupta incelenebilir.

Direnç Nokta (Punta) Kaynağı

Direnç nokta kaynağı elektrik akımının akışına dirençten dolayı ısı üretimi sonucunda bir veya birkaç noktada üretilen birleşme ile örtüşen levhaları kaynaklamak için kullanılır. Geleneksel direnç nokta kaynağı çalışma işlemi sırasında, iki veya daha fazla metal levha genellikle pnömomatik silindirdeki hava basıncı veya servo aktüatör tarafından kontrol edilen elektrot kuvveti ile birlikte preslenir. Ana saclar sabitlendikten sonra, kaynak sistemine harici elektrik enerjisi verilir ve kaynak akımı ana saclardan geçer, daha sonra kontaminasyonlar ve yüzey pürüzleri nedeniyle metal enerjisinin arayüzünde başlangıç aşamasında ısı enerjisi üretilir, bu sebep ile arayüz sürecin başlangıcında en büyük dirence sahip olur. Kaynak sistemine verilen enerji miktarı arttıkça, sıvı eriyik oluşturmak için daha fazla katı eritilir. Direnç nokta kaynağı işleminin metal absorbe eden bir enerji olduğu ve ardından erime ve katılaşma olduğu görülebilir. Isı miktarı uygulanan kaynak akımına $I(t)$, direnci $R(t)$ belirleyen ana metalin malzemesine ve kaynak süresine (t) bağlıdır. İşlem sırasında sıcaklık değiştikçe ana metallerde faz geçişi meydana gelir. Bu nedenle, direnç $R(t)$ değişken bir parametredir ve diğer bileşenlerin etkileri genel olarak göz ardı edilebildiği için kaynak yükünün direncini yaklaşık olarak gösterebilen dinamik direnç olarak adlandırılır. Sıvı eriyik miktarı önceden belirlenmiş bir seviyeye ulaştığında, harici elektrik enerjisi dağıtımı sona erer, ardından sıvı eriyik katılaşır ve başlangıçta ayrı olan ana metal levhalar birleştirilmiş olur [20], [21].

Bakır elektrotlar daha yüksek elektrik iletkenliğine sahip olmaları nedeni ile tercih edilir. Punta kaynak elektrotlarının ucu düz, kubbe şeklinde veya sivri uçlu olabilir. Sivri elektrotlar, kullanımında kademeli aşınma ile eşit şekilde genişler ve düzleşir. Yüzey alanı, sırayla ısı üretimi miktarını belirleyen akım yoğunluğunu belirler. Dome elektrotlar, basınç ve ısı girdisinin çok yüksek olduğu ağır hizmet uygulamalarında tercih edilir. Elektrot girintisinin çok fazla istenmediği durumlarda düz uçlu elektrotlar tercih edilir. Otomobillerin imalatında yaygın olarak kullanılmaktadır. Benzer olmayan malzemelerin kaynağı ile kaynak montajında üstün özellikler sunmaktadır [21].

Dikiş Direnç Kaynağı

Direnç Dikiş Kaynağı bakır elektrotların dönen diskler olması dışında direnç nokta kaynağına çok benzer şekilde çalışır. Dönen elektrotlar tipik olarak ya dahili ya da harici soğutma yoluyla su ile soğutulur. Direnç nokta kaynağına çok benzer şekilde, süreç levhalar arasındaki temas

direncine dayanır. Sızdırmaz bir dikiş üretebilir ve bir dizi nokta kaynağı üretmek için kullanılabilir. 100 inç/dak (0,043 m/s)'ye yaklaşan kaynak hızları mümkündür. Sızdırmaz dikişler üretildiğinde bile, dikiş kaynağı genellikle bir dizi örtüşen nokta kaynağından oluşur. Bu, tabakalar dönen elektrotlar arasından geçerken elektrot akımının darbelenmesiyle elde edilir. Bu yaklaşımda temel kural, her kaynağın yaklaşık %30 oranında örtüşmesidir. Sürekli bir dikiş kaynağı (üst üste binen noktaların aksine) de mümkündür, ancak bu yaklaşım çok daha kararsızdır ve daha sağlam güç kaynakları gerektirir. Dikiş direnç kaynağı, nispeten ince levhalar ve nispeten düz veya düzgün kavisli bağlantı konfigürasyonları ile sınırlıdır. Yaygın uygulamalar arasında otomotiv yakıt depoları, susturucular ve katalitik konvertörler bulunur [22] .

Elektrik Direnç Yakma Alın Kaynağı

Elektrik direnç yakma alın kaynağında kaynak ile birleştirilmek istenen parçalar ,uygun çeneler aracılığı ile sıkıştırılır.Kaynak makinesinin sekonderi ile bağlantılı olan bu çeneler kaynakta kullanılan akımın sürekliliği ile görevlidirler.Kaynak işlemi yapılırken parçalar birbiri ile temas olmayacak şekilde çeneler arasında sıkıştırılır,parçalara transformatör vasıtasıyla akım verilir,hareketli tabla yavaşça hareket eder,tabla harekete devam ederken parçalar arasında temas oluşur ve sekonder elektrik devresi kapanır.Parçaların temas ettiği noktalarda kıvılcımlar oluşur bunun sonucunda erime başlar bunun sonucunda kaynak yapılmak istenen parçaların yüzeyleri kaynak yapılabilecek sıcaklığa ulaşır.Bu kaynak türünde farklı olarak kıvılcımların dolayısı ile kaynağın oluşmasını sağlayan parçaların yüzeylerindeki pürüzlerdir.Sekonder devre akımının kapanmasına da bu pürüzler neden olur.Akım yoğun olarak geçirildiğinde pürüzler ısınır ve bunun sonucunda erime başlar.Erime halinde bulunan parçacıkların patlaması yanan zerreciklerin dışarı fırlamasına neden olur bunun sonucunda fırlayan zerreciklerin yerinde ve çukur ve pürüzler meydana gelir.Bu pürüzler üzerinde de patlama ve yanmalar meydana gelir bu şekilde kıvılcım tüm yüzeye yayılır.Hareketli tablalar birbirine yaklaştığında kaynak oluşur.Yanma işleminin tüm yüzeyde etkili olması ile yüksek sıcaklıktaki yüzeyler birbirine preslenir.Bunun sonucunda yüzeylerde bulunan pürüz temas dirençleri ve kıvılcımlanma son bulur.

Kıvılcımlanma süresi parçaların kesitine malzemelerin ısı iletkenliğine sekonder devre gücü ve kıvılcımlanma çevrimi ile bağlantılıdır.

Elektrik direnç yakma alın kaynağı için tipik uygulamalar arasında zincir bağlantıları, otomotiv tekerlekleri, pencere çerçeveleri, demiryolu rayları ve jet motoru halkaları bulunur. İşlem, önemli bir yangın tehlikesi oluşturan erimiş metalin şiddetli bir şekilde fırlatılmasıyla sonuçlanır, bu nedenle yanıcı malzemeleri güvenli bir mesafede tutmaya özen gösterilmelidir. Mevcut olabilecek herhangi bir kirlenmiş malzeme, dövme işlemi sırasında parlama sırasında dışarı atıldığından veya içine sıkıştırıldığından, herhangi bir yüzey hazırlığına gerek yoktur [10], [22].

Elektrik Direnç Projeksiyon Kaynağı

Direnç Projeksiyon Kaynağı kaynak yapılan parçalardan birinde işlenmiş veya oluşturulmuş çıkıntılara dayanan bir direnç kaynağı yaklaşımıdır. Bu işlemle, elektrotlar değil, çıkıntılar akımı veya ısıyı yoğunlaştırır. Bir parçanın yalnızca bir, iki veya çok sayıda çıkıntısı olabilir. Bir parça üzerindeki çıkıntıların şeklini, sayısını ve konumunu özelleştirme yeteneği, bu işlemle önemli miktarda tasarım esnekliği yaratır. Bir projeksiyon kaynağı, parçaların ilk önce bir dizi bakır elektrot arasında basınç altında tutulmasıyla başlar. Akım daha sonra onu çöktürmek için yumuşatan çıkıntılarda geçer. Bunu kaynak eriyiğinin son oluşumu izler. İşlemin bazı varyasyonları tamamen katı haldedir ve bir kaynak eriyiği oluşturmaz.

Direnç nokta ve dikiş kaynağı ile karşılaştırıldığında, direnç projeksiyon kaynağı, çok daha kalın parçaların yanı sıra önemli bir kalınlık uyumsuzluğu olan parçaları da kaynak yapabilir. Sonuç olarak, genellikle gaz metal ark kaynağı gibi kaynak işlemleri için potansiyel bir yedek olarak kabul edilir. Bunun nedenlerinden biri, elde edilebilecek kaynak süresinde ciddi bir azalmadır. Örneğin, gaz metal ark kaynağı prosesi ile birkaç dakika veya daha fazla kaynak gerektirebilecek tipik bir otomotiv parçası, direnç projeksiyon kaynak işlemi ile birkaç saniyeden daha kısa sürede kaynak yapma potansiyeline sahip olabilir. Bunun nedeni, tüm kaynağın aynı anda tek bir bağlamada yapılabilmesidir.

Kabarcık ve dairesel olmak üzere iki temel çıkıntı geometrisi tasarımı vardır. Düğme tipi projeksiyonlar tipik olarak parça üzerinde birden fazla konuma yerleştirilirken, dairesel bir projeksiyon tasarımı, şekilde gösterildiği gibi parçanın çevresi etrafında yalnızca tek bir projeksiyon içerebilir. Bu yaklaşım yuvarlak parçalar için iyi çalışır. Daha küçük dairesel çıkıntılarda oluşturulabilir ve parça üzerinde birden fazla yere yerleştirilebilir. Projeksiyon

Kaynağı uygulaması, çok çeşitli somunların, cıvataların,bağlantı elemanlarında ve otomobillerde kullanılan birçok bağlantı elemanının kaynaklanmasında kullanılır [22].

1.2.1.4. Elektron Işın Kaynağı

Elektron Işın Kaynağı, hızlandırılmış ve odaklanmış elektron demeti üreten bir işlemdir. Kaynak için üretilen yoğun ısınma, ışık hızının %70'ine kadar hızlandırılan elektronlar, kaynak yapılan parçaya çarptığında oluşan kinetik enerji ile ilişkilidir. Bu ısıtmayı oluşturan elektronların hacmi oldukça düşüktür, çünkü ışın amperajları tipik olarak 1 A'dan azdır. Elektron Işın Kaynağı genellikle yüksek vakumda gerçekleştirilir. Düşük vakumlu ve vakumsuz sistemler mevcuttur, ancak hızla hareket eden elektronlar hava moleküllerine çarptığında ışın sapması nedeniyle ışının enerji yoğunluğunun azalmasına neden olur.

Bir Elektron Işın Kaynak makinesi, bir güç kaynağı, tabanca kolonu, vakum odası ve iş parçasını tutmak için uygun tesisattan oluşur. Elektron Işın Kaynak makineleri tipik olarak yüksek veya düşük voltaj ve yüksek, orta veya vakumlu olmayan sistemler olarak ayırt edilir. Makinenin maliyeti, hem hazne boyutunun hem de makinenin gücünün bir fonksiyonudur. Daha büyük odalar, daha büyük parçaların kaynaklanmasına izin verecek, ancak daha pahalı olacak ve daha uzun pompa duruş süreleri gerektirecektir. Yöntemin üstünlükleri ve sınırları şu şekildedir.

Yöntemin Üstünlükleri:

- Minimum baz metal bozulması, artık stres ve bozulma üreten düşük toplam ısı girdisine izin verir.
- Herhangi bir füzyon işleminin en büyük tek geçiş kalınlıklarını kaynaklayabilir.
- Dolgu metalleri veya koruyucu gaz gerekmez.
- Vakum ortamı çok hassas olan titanyumun kaynağı için ideal bir süreç haline getirir.
- Yüksek derecede yansıtıcı metallerin kaynağında sorun olmaz.
- Tabancadan iş parçasına olan mesafe konusunda daha fazla esneklik sağlayan lazer ışını kaynağından daha büyük odak derinliği sağlar.
- Yüksek kaynak estetikliğine sahiptir.

Yöntemin Sınırları:

- Vakum ihtiyacı üretim hızını ve parça boyutunu sınırlar.
- Ekipmanı pahalıdır.
- Makineler taşınabilir değildir.
- Bağlantılar çok hassas montaj gerektirir.
- Hızlı soğutma oranları bazı çeliklerde kırılğan mikro yapılar oluşturabilir.
- Elektron Işını Kaynağı, makinelerde radyasyon koruması gerekliliğine neden olan tehlikeli X ışınları üretir.

Elektron ışın kaynağının kullanım alanları;

Otomotiv sektöründe: Dişli şanzımanlarında, motor gövdelerinde, dedektörlerde, radyatörlerde, krank millerinde, piston çubuklarında, valf kafalarında, filtrelerde, katalizörlerde, turbo kompresörlerde, tekerlek jantlarında, hava yastıklarında ve diğer birçok kaynak elemanlarında;

Havacılık sektöründe: Uydularda ve roketlerde kullanılan propilen için titanyum tankların kaynağında, alüminyum kaplarda, itme jetlerinde, yakıt enjeksiyonlarında, titanyumdan yapılmış gövde elemanlarında, kolçaklarda, statorlarda, türbin kanatlarında ve gövdelerinde, eksenel akışlı kompresörlerin tambur rotorlarındaki disklerde, roketlerde delikli tabanlarda;

Güç ve elektrik enerjisi mühendisliği sektöründe türbin elemanlarında, yüksek akımlı esnek konektörlerde, nükleer atık konteynerlerinin kaynağında;

Makine sektöründe deniz motorlarında taşıma kancası elemanlarının kaynağında, kullanılmış mühimmatın imhası için fırınlarda, tekerlekler ve dişli şanzımanlarında, hidrolik silindirlerde, sıcaklık ve deformasyon sensörlerinde, alüminyum alaşımlarından yapılmış mikroskop çerçevelerinde, komütatörler, şerit testere makineleri, delme aletleri, sürekli çelik için katalizörler dökümlerde, yüksek basınç valflerinde;

Tıbbi olarak yapay uzuvlarda dişli dişli elemanlarının kaynağında, endoprotez elemanlarının hızlı prototiplenmesinde, implant yüzey işlemlerde;

Demiryolu sektöründe: Taşıma elemanlarının kaynağında, alüminyum alaşımlarından yapılmış çapraz kirişlerde, çeki kancalarında, yatak kovanlarında, nokta elemanlarında, evrensel kaplinlerde kullanım olanağı bulunmaktadır [22], [23].

1.2.1.5. Lazer Kaynağı

Lazer kaynağı genel olarak bir lazer ışık demetinin çok ince bir noktaya odaklanması amacına dayalı çok yüksek güç yoğunluğu ile elde edilen bir anahtar deliği füzyon kaynağı tekniğidir. Elektron ışın kaynağında olduğu gibi yüksek enerji yoğunluğu veya güç ışını tekniği olarak da adlandırılır. Bir lazer kaynağı oluşturmak için lazer ışını, birleştirilecek iş parçalarının yüzeyine veya çok yakınına odaklanacak şekilde getirilir. İlk etapta, olay girişinin büyük bir yüzdesi bir dakikalık bir süre boyunca iş yüzeyine yansıtılır bu durumun nedeni çoğu metalin iyi reflektör olmasıdır. Başlangıçta iş parçası tarafından emilen az miktarda lazer ışını enerjisi, malzeme yüzeyini hızla ısıtır. Enerji emici iyonize metal buharının üretilmesine neden olur. Bu, daha önce yansıtılacak olan enerjinin çoğunun emilimini büyük oranda hızlandırır.

104 W/mm² mertebesinde odaklanmış bir güç yoğunluğunda, buharlaştırma yoluyla metalin hızlı bir şekilde uzaklaştırılması, iş parçasına küçük bir anahtar deliği başlatır. Anahtar deliği iş parçasının derinliklerine nüfuz ettikçe, lazer ışığı tekrar tekrar içine dağılır, böylece lazer enerjisinin işe bağlanmasını artırır. Lazer enerjisi uygulanırken, anahtar deliği erimiş duvarların çökmesini önleyen buhar basıncı ile açık tutulur. Lazer darbeleri enerji modunda çalıştırılırsa, erimiş metal anahtar deliğinin merkezine düşer ve darbenin tamamlanmasıyla katılaşır, bazen anahtar deliği ilk oluştuğunda buharlaşma yoluyla metal kaybı nedeniyle hafifçe alttan kesilmiş bir kaynak boncuğu bırakır. Lazer sürekli dalga modunda çalıştırıldığında, yani darbeleri olmadığında ve ışın eklem hattı boyunca hareket ettirildiğinde veya tam tersi durumda, anahtar deliğinin ön kenarındaki erimiş malzeme çok küçük bir dalga üretir.

Lazer kaynağı, yüksek enerji yoğunluklu bir kaynak işlemi olduğundan, kaynak penetrasyon derinliğini elde etmek için yalnızca ısı iletimine bağlı değildir ve bu nedenle geleneksel iletim sınırlı gaz ve ark kaynağından oldukça farklıdır. Bu iki teknikle işin içine ısı iletilirken kaynak füzyonu ve penetrasyon derinliği elde edilir ve erime noktası izotermi (eşit sıcaklıkta noktaları birbirine bağlayan bir çizgi) kaynaktan her yöne doğru dışa doğru hareket eder. Bu şekilde üretilen kaynakların genişlikleri genellikle derinliklerinden daha büyüktür ve ısı girişi kesinlikle gerekli olandan daha fazladır.

Lazerler, diğer füzyon kaynak teknikleriyle neredeyse aynı malzeme yelpazesini kaynaklayabilir, ancak alüminyum ve bakır ve alaşımları lazer kaynağında kaynaklamak zordur. Bunun temel nedeni, bu malzemelerin lazer ışığını kolayca emmemeleridir, çünkü

bunlar iyi reflektörlerdir. Bakır 10 pm ışık dalga boylarını o kadar iyi yansıtır ki C02 lazer aynaları için kullanılır. Genel bir kılavuz olarak, termal iletkenlik ne kadar düşük veya bir malzemenin elektriksel direnci ne kadar yüksek olursa, lazer ışığını emme olasılığı o kadar yüksektir. Sonuç olarak, normal kaynaklanabilir çelik ve paslanmaz çelik kaliteleri lazer kaynağı için idealdir.

Yöntemin Üstünlükleri:

- Tek geçişli kaynak penetrasyon derinliği sadece mevcut lazer gücü ile sınırlıdır. (Bir geçişte 15 mm kalınlığındaki çeliği 10 kW'lık bir lazer soldurarak kaynak yapar.) Bu, V bağlantı hazırlığı ve dolgu malzemesi ilavesi ihtiyacını ortadan kaldırabilir.
- İş parçasında çok düşük termal bozulma meydana gelir. kaynak sonrası işlemeye gerek kalmadan işlenmiş parçaların kaynak yapılmasını sağlar.
- Isıya duyarlı bileşenlere çok yakın kaynak yapılabilir. elektronik devreler ve camdan metale contalar gibi.
- Şiddetli tane büyümesi ve uzun süreli ITAB gibi metalurjik hasarlar azaltılır.
- Kaynak hızları yüksektir ve dakikada birkaç metreye kadar çıkabilir.
- Lazer kaynak makineleri otomasyona ve robotlarla birlikte çalışmaya uygundur.
- Yatay ve baş üstü konumlar arasında çalışırken odaklama yapan bir optik koruma cihazı kullanılması şartıyla tüm lazer tabanca konumlarında kaynak yapılabilir.
- Kaynaklar genellikle tam olarak bitişik eklem arayüzlerinde konumlandırılabilir,böylece alternatif ark köşe kaynakları ile karşılaştırıldığında yorulma ve çekme mukavemeti iyileştirilir.
- Birden fazla malzeme katmanı tek taraftan ve tek geçişte bindirmeli kaynak yapılabilir.
- Kaynaklar genellikle diğer kaynak teknikleri ile erişilemeyen dar boşlukların tabanında yapılabilir.
- Çok çeşitli farklı bağlantı konfigürasyonları ve farklı malzeme kalınlıkları kaynaklanabilir.
- Kaynak sonrası işleme için gereksiz olan malzeme payları ve kaynak alanı boyutları azaltılarak malzeme tasarrufu sağlanabilir.
- Manyetik alanlar ve kısa devre yolları ile ilgili tasarım hususlarını ortadan kaldırarak avanta sağlar.

Yöntemin Sınırları:

- Sıkı geçme ve iyi kenetlenmiş bağlantılar gereklidir.

- Dolgu teli kullanılmadığında uygun olmayan parçalar alttan kesik kaynaklar üretir.
- Dar kaynak, doğru şekilde yerleştirilmezse bağlantı hattını kolayca kaçırabilir. Işın odak derinliği küçüktür ve gerekli güç yoğunluğunu elde etmek için çalışma yüzeyi etrafındaki konumu doğru bir şekilde korunmalıdır.
- Manipülasyon ekipmanının performansı da doğrudan yukarıda bahsedilen öncüllerle orantılıdır.
- Operatör güvenliği için lazer tabancasının çalışma zarfının etrafındaki güvenlik taraması gereklidir.
- Lazer rezonatörünün ve lazer ışınını işe ileten sistemin optik kararlılığı, güvenilir kaynak performansı için çok önemlidir. Bu ekipmanların sabit bir temelde muhafaza edilmesi gerekir.
- Bir lazeri çalıştırmak için gereken elektrik ve soğutmalı su hizmetleri özellikle yüksek güçlü bir CO2 lazer kolayca taşınabilir değildir.
- Ark kaynak makineleri ile karşılaştırıldığında lazerlerin gerekli iş işleme ve yardımcı ekipmanla birlikte satın alınması ve çalıştırılması pahalıdır. Maliyet etkin olmaları için yüksek kullanım gerektirirler.
- Yüksek ekipman çalışma süreleri sağlamak için bakım programlarına dikkatle uyulması gerekir [24].

1.2.1.6. Elektro Cüruf Kaynağı

Elektro cüruf kaynağı (ESW) işlemi, dolgu metalini ve birleştirilecek iş parçalarının yüzeylerini eriten erimiş bir cüruf içerir. Kaynak ilerledikçe cürufun hacmi bağlantının tüm kesiti boyunca hareket eder; cüruf kaynak havuzunu korur. Ark başlatıldığında süreç başlar. Ark, granül akıyı ısıtır ve cürufu oluşturmak üzere eritir. Yeterli miktarda cüruf oluşturulduğunda, iletken cüruf arkı söndürür. Elektrik akımı elektrot ve iş parçaları arasından geçerken mevcut cüruf direnci sayesinde ergimiş halde tutulur. ESW işlemi son derece yüksek bir çökelme hızına sahiptir ve tek bir geçişte çok kalın bir malzeme bölümünü kaynaklayabilir. İşlem, minimum bağlantı hazırlığı gerektirir, böylece toplam kaynak ve imalat maliyetine önemli ölçüde katkıda bulunabilecek malzeme taşıma maliyetini düşürür. Çok yüksek birikme hızı ve tek geçişli kaynak kullanımı nedeniyle malzeme bozulması minimumdur. ESW işlemi yalnızca karbon çeliği ve düşük alaşımlı çeliklerde kullanılabilir ve dikey konumda gerçekleştirilmelidir. Kaynak bir çevrimde tamamlanmalı ve kesintiye uğramamalıdır. Kaynak yapılacak malzemeler

en az 19 mm kalınlığında olmalıdır. Uygulama alanları elektrogaz kaynak yöntemi ile benzerlik göstermekle birlikte kalın duvarlı plakalar arasındaki uzun dikey dikişlerin kaynağını gerektiren uygulamalarda kullanılır ayrıca yüzey kaplama işlemlerinde de kullanılabilir.

Yöntemin üstünlükleri:

- Son derece yüksek biriktirme oranlarına sahiptir.
- Çok kalın levhaların dikey dikişlerini tek pasoda hızlı bir şekilde kaynak yapabilir.
- Kaynak sürekli işlemde tamamlandığı için pasolar arası temizlik gerekmez.

Yöntemin sınırları:

- Esas olarak karbon ve düşük alaşımlı çelikler ve bazı paslanmaz çeliklerle sınırlıdır
- Dikey alın bağlantı tasarımı ve düz dikişler gerektirir.
- İnce plakalara uygulanamaz.
- Son derece yüksek ısı girdileri, büyük taneler ve tokluk gibi azaltılmış mekanik özellikler oluşturur.
- Kaynak sırası başladıktan sonra tamamlanana kadar devam etmelidir, aksi takdirde kaynak kusurları oluşabilir [22], [25] .

1.2.1.7. Termit Kaynağı

Termit kaynağı, metaller arasında birleşme oluşturmak için ekzotermik bir reaksiyondan gelen ısıyı kullanan bir işlemdir. Termit ismi metal oksitler ve indirgeyici maddeler arasındaki reaksiyonlara verilen genel ad olan termitten türetilmiştir. Termit karışımı, düşük oluşum ısılı metal oksitlerden ve oksitlendiğinde yüksek oluşum ısısına sahip metalik indirgeme maddelerinden oluşur.

Kaynak yapılacak parçaların etrafına bir kalıp yapılır. Kalıbın üzerine termit karışımını içeren bir pota yerleştirilir. Potadaki karışım ateşlendiğinde, alüminyum, alüminyum oksit ve demir oluşturmak için demir oksit ile reaksiyona girer. Reaksiyon, tüm malzemenin reaksiyona girmesini ve demirin erimesini ve sıcaklığının yaklaşık 2500–3000°C'ye yükselmesini sağlayan büyük miktarda ısı verir. Kimyasal reaksiyon tamamlandıktan sonra, yoğun çelik ve daha hafif cürufun ayrılması için zaman verilir ve ateşlemeden 20-60 s sonra potaya vurulur. Erimiş çelik kalıba akar ve kaynak yapılacak parçalarla füzyon gerçekleşir. İşlem açık havada veya örtü

altında çalıştırılabilir. Kaynak malzemesi olarak düşük alaşımlı çelikler veya sadece dökme kullanılır. Ekzotermik kimyasal reaksiyon oluştuğu için güvenlik tedbirleri uygun olarak alınmalı havalandırma sağlanmalıdır.

Demiryolu hattının uzunluklarının kaynaklanmasında sıklıkla, ağır yapısal bölümlerin ve düşük yüklü yapısal bağlantıların birleştirilmesinde, makine çerçevesi imalatında, gemi yapımında, kalın kabloların birleştirilmesinde, beton takviyeli çelik çubuklarda kullanım alanı bulmaktadır [26], [27].

1.2.2. Lehimleme

Lehimleme birleştirilen ana metalin erime sıcaklığının altındaki sıcaklıklarda eriyen bir dolgu metali kullanan birleştirme işlemleridir. 450°C'nin altında ise işlenebilir lehimleme 450°C'nin üzerinde ise sert lehimleme olarak adlandırılır. Çalışma sıcaklığı her zaman temel malzemenin erime sıcaklığından daha düşük olduğu için temel malzeme işlem boyunca katı kalacaktır. Lehimleme ve kaynaklama arasındaki temel farkta budur.

Lehimleme ve sert lehimleme, özellikle seri üretimde kullanılan metallerin yapıştırılmasında önemli yöntemlerdir. Oldukça yüksek sıcaklıklar ve farklı metalleri birleştirmek için sınırlı yetenekler nedeniyle kaynağın uygun olmadığı malzemeleri ve bileşenleri birleştirmek için kullanılırlar. Bazı metal eritme gerektirmeyen sürecin büyük bir avantajı, hem metallerin hem de metal olmayanların (seramik ve kompozitler) birleştirilebilmesidir. Lehimleme ayrıca metalleri ametallerle birleştirmek için kullanılır. Bakır veya bakır alaşımlarından yapılmış ürünlerin imalatında kullanılan başlıca birleştirme yöntemleridir. Pastalar ve kesici uçlar dahil olmak üzere çeşitli formlarda çok sayıda lehimleme dolgu metal bileşimi mevcuttur. Akışkanlar genellikle temizleme, deokside etme ve sıvı dolgu malzemesi ile birleştirilecek malzeme arasındaki yüzey gerilimini değiştirme yoluyla kılcal harekete yardımcı olmak için kullanılır. İşlemler, daha düşük çalışma sıcaklıkları ve genel olarak bir bitirme işlemi olarak eklemenin önemli ölçüde ufalanmasına, öğütülmesine veya temizlenmesine gerek olmaması nedeniyle ekonomiktir. Fırınlara, daldırma tankları (banyolar), endüksiyon bobinleri ve torçlar dahil olmak üzere bu işlemler için çok çeşitli ekipman ve yaklaşımlar mevcuttur.

Lehimleme yönteminin seçimi, iş parçasının tasarımı ve lehimlenecek miktarlar gibi faktörlere bağlıdır. Çeşitli lehimleme ve lehimleme tekniklerini ayırt edebiliriz:

- Manuel lehimleme: Genellikle elektrikle ısıtılan bir havya kullanan bir tekniktir. Bu yöntem sadece lehimleme için kullanılır.
- Alevle ısıtma: Açık alev kullanan bir lehimleme ve sert lehimleme tekniğidir.
- Lehim banyoları: Erimiş lehim içeren ve parçaların tamamen veya kısmen daldırılabilceği bir banyo kullanarak lehimleme yöntemidir.
- Dalga lehimleme: Elektronik bileşenler bir baskılı devre kartına lehimlendiğinde kullanılan bir tekniktir.
- Fırın lehimleme: Önceden yerleştirilmiş lehim (lehim preformları olarak bilinir) ve flux ile iş parçasının bir fırında, genellikle bir konveyör üzerinde ısıtıldığı bir yöntemdir.
- İndüksiyonla ısıtma: Isının yüksek frekanslı indüksiyonla üretildiği bir tekniktir.
- Dirençli ısıtma: Dirençli ısıtma üretmek için iş parçasından elektrik akımının geçtiği bir yöntemdir. Fırın lehimlemesinde olduğu gibi, lehim ve flux önceden yerleştirilebilir.
- Sert lehim kaynağı: Dolgu metalinin kılcal etki ile dağıtılmadığı gaz kaynağına benzer bir yöntemdir. Tipik olarak köşe derzleri, V veya X derzleri için kullanılır.
- Ark lehimleme: Bir elektrik arkını ve metal lehimlemeyi kullanan bir tekniktir. Bu yöntem, MIG (MIG lehimleme) veya plazma kaynağına benzer.
- Kızılötesi lehimleme: Yüksek güçlü halojen lambalardan ve reflektörlerden gelen kızılötesi radyasyonu kullanan bir yöntemdir.
- Lazer lehimleme: Radyan ısıtma kullanan bir tekniktir.

Lehimleme ve Lehimleme uygulamaları çeşitlidir ve kaynak uygun bir seçenek olmadığında sıklıkla tercih edilen işlemlerdir.

Lehimleme ve Sert lehimlemenin üstünlükleri ve sınırlamaları şu şekilde belirtilebilir.

Yöntemin Üstünlükleri:

- Ametalleri ve metalleri metal olmayanlara birleştirme yeteneğine sahiptir.
- Minimum baz metal bozulması ve bozulma olur.
- “Yığılma” operasyonlarda yürütüldüğünde nispeten ekonomiktir.

Yöntemin Sınırları:

- Süreçler genellikle yavaştır ve emek yoğunudur.
- Derz gücü, derz alanının boyutuna bağlıdır, bu nedenle derz tasarımları sınırlıdır.
- Genellikle gerekli olan önemli eklem hazırlığı vardır.

- Ekipman pahalı olabilir.
- Baz metal erozyonu bazı lehimleme işlemlerinde sorun olabilir.
- Eklemler tipik olarak zayıf süneklik sergiler.
- Servis sıcaklığı, özellikle lehimli bağlantılarda sınırlı olacaktır [22], [28].

1.2.3. Katı Hal Kaynak Yöntemleri

Katı Hal Kaynağı yöntemleri, benzer aynı ya da farklı iki malzemenin, dışarıdan ertilmeye uğratılmadan birleştirilmesi ekseninde oluşan kaynak türüdür. Bu yöntemlerden her biri kendine özgü farklı şekillerde temas yüzeylerinde bağ oluşturur.

Katı hal kaynak işlemi, gelişmiş nitelikteki malzemelerin kaynağını kolaylaştırır. Eritme kaynağı ile kaynaklanması çok zor olan benzer ve farklı malzemeler katı hal kaynağı kullanılarak birleştirilebilir ve daha iyi bağlantı verimlerinin üretilmesine yardımcı olur. Füzyon kaynağı ile karşılaştırıldığında, katı hal kaynağı daha düşük IMC oluşumu ve daha kaliteli kaynaklar üretir [29].

Bu yöntemlerde aynı ya da farklı iki malzemenin yüzeyi temizlendikten sonra, aralarında bir temas yüzeyi oluşuncaya dek birbirlerine yaklaştırılması esasına dayanır. Bu işlem için birbirinden farklı teknikler uygulansa da bütün yöntemlerde esas istenilen, üzerinde bir yığılma olmayacak şekilde iki yüzeyi deforme edecek bir basınç uygulanmasıdır.

Katı hal kaynağının başarılı olabilmesi için kaynak yapılacak yüzeylerin çok temiz olması ve atomsal bağın oluşabilmesi için çok yakın fiziki temas içerisinde olması gerekir.

Katı hal kaynak yöntemleri eritme kaynak yöntemlerine oranla erime olmaması ITAB oluşumunu önler bu durumda kaynak yapılan bölgedeki metal kaynak öncesi özelliklerini korur. Katı hal kaynak yöntemlerinden birçoğu farklı dikişler ve noktalar biçiminde değil temas arayüzünün tamamının kaynaklandığı bağlantılardan meydana gelir.

1.2.3.1. Dövme Kaynağı

Metaller kaynak işlemi amacı ile ısıtıldığında sıcaklık arttığı için deformasyon değeri düşer. Bu durum kaynak işleminin kolaylaşmasına yol açar. Bu teknik sonucunda birçok basınç kaynağı

yöntemi geliştirilmiştir. Bu kaynaklardan en eskisi ise M.Ö 1400'lü yıllardan bu yana kullanılan demirci kaynağıdır. Bu yöntemde temel prensip dövülme özelliğine sahip 1350° ye kadar ısıtılan çelik ya da demirin üzerindeki oksitler erir ve birleşili planlanan metaller çekiçle dövüldüklerinde sıvı halde bulunan oksitler bağlantı yerlerinde sıkıştırılır ve atılır bunun sonucunda daha düşük deformasyon seviyelerinde bağlantı oluşur. Bu işlemde amaç, sıcaklığı ara yüzeyleri eşik değerinin %25'lere düştüğü noktaya yükseltmektir ısıtma yönteminin bu nedenle önemi yoktur.

1.2.3.2. Soğuk Kaynak

Soğuk basınçlı kaynak, tamamen ısıtmadan gerçekleştirilen bir kaynak yöntemidir. İlke olarak iş parçasının parçalarının, plastik deformasyonun artık oksit tabakalarının preslenmesine ve metalik bir bağın yapılmasına neden olacağı bir kuvvetle birlikte preslenmesini içerir. Soğuk kaynak yapılarak birleştirilen malzemelerden en az birinin sünek olması ve önemli bir işleme sertleşmesi göstermemesi beklenir. Saf alüminyum ve bazı alaşımları soğuk kaynak için çok uygundur ve genellikle elektrik bağlantıları için kullanılır. Soğuk kaynakta ısıdan etkilenmiş bölge oluşmaz. Uygulanan plastik deformasyonun sonucu olarak malzemenin gerinim sertleşmesine maruz kaldığı bağ bölgesinde mekanik olarak etkilenen bir bölge oluşur. Mekanik olarak etkilenen bölgenin çeşitli noktalarından alınan numunelerin çekme testi, bağın çekme mukavemetinin ana malzemeninkinden daha yüksek olduğunu ve standart bir çekme testinde kırılma meydana geldiğini göstermiştir. Ergitme kaynağı yapılamayan 2xxx ve 7xxx serisi alüminyum alaşımları, alın konfigürasyonunda başarıyla soğuk kaynak yapılabilmektedir.

Kaynaktan hemen önce yüzeylerden gres ve oksitler temizlenmelidir. Parmaklarla dokunarak uygulanan ince gres tabakası, iş parçaları arasında zorunlu olarak yakın teması önlemek için yeterlidir. Kaynaklar, alın kaynağı veya bindirme bağlantıları olarak yapılabilir. Tel ve çubuk malzemeler ile 0,5–12 mm ölçülerinde kaynak yapılabilir. Üst üste bindirme bağlantıları için dişli bir alet kullanılır. Yumuşak tavllanmış alaşımlarda alın bağlantıları için malzeme kalınlığının yaklaşık 1,5 katı kadar bir yığılma mesafesi gereklidir, daha yüksek mukavemetli alaşımlar, malzeme kalınlığının yaklaşık 4-5 katı kadar daha büyük yığılma mesafesi gerektirir. Bindirme bağlantılarındaki kaynaklar, kaynak yerinde yaklaşık %70'lik bir kalınlık azalması oluşur [28], [30].

1.2.3.3. Haddeme Kaynağı

Haddeme kaynağının iki türü yaygındır. İlkinde kaynak yapılacak parçalar sadece istiflenerek ve merdanelerden geçirilir. Paket haddeme olarak adlandırılan ikinci yöntemde haddelenecek parçaların bir paket veya kılıf içinde sızdırmazlığının sağlanmasının ardından paket düzeneğinin haddeyle kaynaklanmasını şeklindedir.

İlk yöntem genel olarak sünek metallerin ve alaşımların soğuk kaynağında kullanılır. Bazen kaynaklanacak yığının haddeme sırasında hizalamayı sağlamak için önce birkaç yerden punta kaynağı yapılır. Ayrıca, bu yöntem kullanılırken, parçaları bir arada tutmak için ilk haddeme geçişi sırasındaki deformasyon kaynak eşiğini soğuk haddeme için %60'tan fazla aşmamak gereklidir. İlk geçiş bir kez gerçekleştirildikten sonra, haddelenecek parçalar incelidikçe merdane ayırma kuvvetleri arttığından, geçiş başına azaltma önemlidir. Ayrıca çok hafif geçişler dizisi sırasında oluşan tek biçimli olmayan stres dağılımı, kaynağın açılmasına neden olabilir. Bu nedenle, sonraki geçişler için azaltma önem taşır.

Paket haddeme yönteminde, kaynaklanacak parçalar tamamen sızdırmaz bir paket içine alınır ve genellikle bir vakum atmosferi sağlamak için boşaltılır. Bu, kaynaklanacak parçaları çevreleyen, iki kapakla sıkıştırılmış bir çerçeve ile gerçekleştirilebilir veya kaynaklanacak parçaları kapsüllemek için oluşturulmuş iki kapaktan oluşabilir. Düşük karbonlu çelik, paket için yaygın bir malzemedir, ancak tüm alaşım ve sıcaklık kombinasyonları için uygun değildir. Paket hadde kaynağının hazırlık maliyetleri önemli olmasına rağmen, işlem şu avantajlara sahiptir:

- Titanyum, zirkonyum, niyobyum ve tantal gibi reaktif alaşımlar için özellikle önemli olabilen atmosferik koruma sağlama
- Çeşitli parça katmanlarını içeren karmaşık montajların kaynağına uyumlu olması

Sürecin önemli bir sınırlaması, uzunlukları birkaç fiti aştığında paketlerin işlenmesinin zorlaşmasıdır. Titanyum ve titanyum alaşımlarının rulo halinde paketlenmesi çeliklere veya bakır ve alüminyum alaşımlarına göre çok daha zordur çünkü titanyum alaşımlarının çoğu çok dar çalışma sıcaklığı aralıklarına sahiptir. Bu sorunun üstesinden gelmek için, paket haddelenmiş titanyum alaşımları bazen çelik bir zarf veya kutu içinde muhafaza edilir. Kutu, iş metalinin oksidasyonunu en aza indirmek için boşaltılır ve ayrıca deformasyon üzerine nispeten soğuk merdanelere ısı kaybını en aza indirmeye hizmet eder. Titanyum alaşımlarının dar

Çalışma sıcaklığı aralığı, bu malzemelerin haddelenmesini zorlaştırır. Yuvarlanma geçişleri, nispeten küçük parçalar üzerinde elle yapılır ve birçok ara yeniden ısıtma adımı gereklidir.

Hadde kaynağında kaynak başarısı, sadece toplam deformasyon miktarına değil, aynı zamanda haddeleme sırasındaki basına da bağlıdır.

Bakır, alüminyum ve bunların alaşımları genellikle soğuk hadde kaynaklıdır. Sıcak haddeleme, geniş bir alaşım yelpazesine uygulanabilir. Tipik olarak, sıcak haddeleme, yeniden kristalleşme sıcaklıklarının üzerinde gerçekleştirilir. Uygulamada, kaynaklanabilirlik genellikle, difüzyon yoluyla oksit asimilasyonunu teşvik etmek için oksijen hareketliliğinin önemli hale geldiği bölgeye sıcaklık yükseltilerek iyileştirilir. Ayrıca, kaynaklı tertibatlar genellikle yeniden kristalleşmeye (soğuk haddelemede), oksijen difüzyonuna ve/veya sinterlemeye neden olmak için sonradan ısıl işleme tabi tutulur. Birbirine benzemeyen metallerin kaynağında, haddeleme ve son ısıtma sıcaklıklarının seçiminde, metaller arası bileşik oluşumu, ötektik erime ve/veya Kirkendall difüzyonundan kaynaklanan gözeneklilik olasılığı göz önünde bulundurulmalıdır. Hadde kaynaklı en yaygın metaller düşük karbonlu çelikler, alüminyum ve alüminyum alaşımları, bakır, bakır alaşımları ve nikeldir.

Hadde kaynağının önemli uygulamalarından biri ısı eşanjörlerinin imalatıdır. Bu işlem, düz güneş kollektörleri imal etmek için kullanılır. Bu yaklaşım hem alüminyum hem de elik ısı eşanjörleri için kullanılabilir. Bu işlemin ikinci önemli bir uygulaması, sac metal ürünlerin kaplanmasıdır [31].

1.2.3.4. Difüzyon Kaynağı

Difüzyon kaynağı, yüzeylerde erime ve deforme olmaksızın difüzyona dayanan bir katı hal kaynak işlemidir. Nispeten uzun bir süre boyunca yüksek basınç ve sıcaklık uygulamasıyla vakum altında veya koruyucu gaz atmosferinde gerçekleştirilir. Yüzeylerin temiz, düz ve doğru işlenmiş olması şartıyla geniş alanlar bu şekilde kaynaklanabilir. Bu işlemdede genellikle vakumlu sıcak pres olarak bilinen bir makine kullanılır. Difüzyon kaynağı, titanyum, nikel ve alüminyum alaşımları gibi birçok malzeme için kullanılabilir, farklı metal türlerinin birleştirilmesinde ve metal malzemelerin metal olmayan malzemeler ile birleştirilmesinde de kullanılabilir. Kaynak kalitesinin arttırılabilmesi için genellikle iki farklı dış katman arasına bir ara katman dahil edilir.

Kaynak oluşturmak ve yeterli difüzyonu elde etmek için parçalar arasında yakın temas sağlanmalıdır. Kaynaktan önce metal işleme ve taşlamayı kimyasal aşındırma ile birleştiren yüzey hazırlama teknikleri ile pürüzsüz yüzeyler oluşturulur. Oksitler ve kirli yüzeylerin çoğunu giderilir ancak hiçbir endüstriyel işleme süreci mükemmel pürüzsüzlük ve temizlik sağlayamaz. Pürüzler çöktüğünde ve yakın temas sağlandığında, bir ara yüzey sınırı oluşur. Ara yüzey sınırı, difüzyon kaynağı döngüsü boyunca çevreleyen mikro yapıya hareket ederek serbest enerjisini azaltan bir tane sınırına çok benzer. Kaynak tamamlandığında, gözeneklerin oluşması olasılığı vardır. Nikel gibi bazı metallerin difüzyonla kaynaklanması zordur, bu nedenle difüzyon lehimleme adı verilen benzer bir işlem sıklıkla kullanılır.

Difüzyon kaynağının avantajlarından biri, bu kaynak yönteminde oluşan maksimum sıcaklıklar genellikle tipik ergitme kaynağı sıcaklıklarının oldukça altında olduğu için, ana metal mikro yapısında minimum bozulma olmasıdır. Difüzyon kaynağında yüzey temizliği oldukça önemlidir. Bu nedenle özellikle kendi oksitini kolayca çözen titanyum ile iyi çalışır. Difüzyon kaynağının kullanım alanlarından bazıları, askeri uçaklarda kullanılan titanyum uçak bileşenleridir. Entegre soğutma geçişli bir takım çeliği diski, bir kapak diskinin, gerekli kanalların işlenmiş olduğu başka bir diske kaynaklanmasında kullanılabilir.

Difüzyon Kaynağının üstün yönleri ve sınırlamaları şu şekildedir:

Yöntemin Üstünlükleri:

- Baz metalde minimum bozulma sağlar.
- Bozulma veya deformasyon yoktur.

Yöntemin Sınırları:

- Son derece uzun kaynak sürelerine sahiptir.
- Önemli yüzey hazırlığı gereklidir.
- Tüm metallerde iyi sonuçlar alınmaz [22], [28].

1.2.3.5. Patlamalı Kaynak

Patlayıcı kaynak veya patlama kaynağı bir patlayıcının kontrollü patlamasının neden olduğu yüksek hızlı bir darbe yoluyla malzemelerin birleştirilmesiyle karakterize edilen bir katı hal kaynak işlemidir. Bu işlemde, eğik bir darbeye sabit bir bileşenle çarpışacak iş parçasını

hızlandırmak için patlayıcıların patlatılması kullanılır. Patlamalı kaynakta, iş parçaları arasındaki yüksek hızlı eğik çarpışma, metallerin sıvılara benzer şekilde davranmasına neden olur. Güçlü etki, yüzeyler arasında temiz yüzeyler bırakan metalik bir jet oluşumuna yol açar. Her iki yüzeyin de temiz ve oksitlerden arınmış olması, çarpma sonrasında malzemelerin atomlarının atomlar arası seviyelerde etkileşime girmesine izin verir. Kaynaklı metallerin elektron ortamını açar ve arayüz boyunca atomlar arası metalürjik bir bağa yol açar. Konvansiyonel kurulum, bir taban plakası veya sabit plaka ve patlayıcı veya patlayıcı karışımdan oluşur. Taban plakası hareketsizdir ve uçan plakanın etkisini alır. Ana kaynak parametreleri, patlama hızı, çarpışma noktası hızı, darbe hızı veya kanat plakası hızı, dinamik açı ve bekleme mesafesidir. Bununla birlikte, kaynağın gerçekleşmesi için üç kritik koşul olan püskürtme, yeterli darbe basıncı ve iş parçaları arasında bir mesafe olması gerekmektedir. Patlamalı kaynak üstünlük ve sınırları şu şekildedir.

Yöntemin üstünlükleri:

- Darbeye dayanıklı hemen hemen her metali kaynaklama imkanı vardır.
- Çok düşük maliyetli kaynak işlemi sunar.
- Çok geniş alanları çok hızlı ve tek adımda birleştirme imkanı vardır.
- Çok farklı fiziksel özelliklere sahip malzemelerin veya geleneksel işlemlerle uyumsuz malzemelerin birleştirilmesine izin verir.
- Isıdan etkilenen bir bölgeye yoktur.
- Alaşımlar kaynak sonrası özelliklerini koruyarak mikro yapılarını, mekanik özelliklerini ve korozyon özelliklerini korurlar.
- Yüksek sıcaklıklarda kapsamlı etkileşimi önler.
- Kaynak bölgesi tipik olarak daha zayıf ana malzemeden daha güçlüdür.
- Uzman personel/üreticiler tarafından yapıldığında çok yüksek güvenilirlik ve tekrarlanabilirliği vardır.

Yöntemin Sınırları:

- Yalnızca patlamanın yayılabileceği basit geometriler için uygundur.
- Güvenlik ve gürültü sorunları nedeniyle uygun bir ortam gerektirir.
- Tehlikeli maddeleri işlemek için uzman personele ihtiyaç duyar.
- Kaynaklı malzemelerin darbeye dayanacak kadar sünek olması gerekir. (Oda sıcaklığında genellikle en az %5 e %10 uzama ve 14 e 30J Charpy V darbe tokluğu).

Patlayıcı kaynağın en yaygın ticari kullanımı, özellikle paslanmaz çelik olmak üzere korozyona dirençli alaşımlarla çelik plakaların kaplanmasıdır. Geniş alanların hızlı bir şekilde birleştirilebilmesi ve büyük kaplamalara ihtiyaç duyulan durumlarda bu işlemin kullanımını teşvik etmiştir. Korozyona dayanıklı kaplamalı basınçlı kaplar, ısı eşanjörleri veya boru hatları düzenli olarak patlayıcı kaynakla üretilir.

Daha karmaşık farklı kombinasyonların kullanımı ile ilgili olarak, süreç elektrik beslemesinde kullanılabilir: topraklama şeridi bakır-alüminyum bağlantıları; taşımacılık endüstrisinde: raydan raya bakır-çelik akım taşıyan bağlantılarında, kimya tesislerinde bakır-alüminyum bağlantıları arasında kullanılır. Birbirine benzemeyen malzemelerin birleştirilmesinin kolaylığı nedeniyle patlamalı kaynak ayrıca bloklar, şeritler veya boru şeklindeki bağlantılar biçimindeki için de kullanılır. Birçok kaynaklı yapıda, rutin olarak tatmin edici bir şekilde kaynaklanamayan farklı metalleri birleştirmek için kullanılır. Patlamalı kaynak, geçiş bağlantılarını yani bir malzemeden diğerine tam geçiş bölgesini üretmek için kullanılır ve daha sonra bu bağlantıların uçları, geleneksel işlemlerle kolayca kaynaklanabilir. Patlayıcı kaynaklı geçiş bağlantılarının birkaç örneği elektrik kontakları ve bara bağlantıları için alüminyum bakır, gemi yapımında alüminyum-çelik, alüminyum-titanyum ve alüminyum-bakır-nikel, kriyojenik boru bağlantıları için alüminyum-paslanmaz çelik ve havacılık endüstrisinde kullanım için titanyum-paslanmaz çelik olarak örneklendirilebilir [32], [33].

1.2.3.6. Ultrasonik Kaynak

Ultrasonik kaynak, benzer veya farklı metalleri, plastikleri ve diğer bazı malzemeleri kaynak bölgesine uygulanan yüksek frekanslı titreşim ile birleştirme yöntemidir. Hareket, yüzeyler arasında metal-metal teması ve yapışma sağlamak için yerel yüzey pürüzlerini deforme eder, makaslar ve düzleştirir, arayüz oksitlerini ve kirleticileri dağıtır. İşlem, baz metallerin erimeden meydana gelen katı halidir. Sistemin temel unsurları, ultrasonik titreşimleri üreten sonotrot kaynak ucu ile sert bir örs arasına sıkıştırılmış iş parçalarına ileten dönüştürücü, güçlendirici ve sonotrot serisi bileşenleridir. Kaynak yapılacak parçalar, sonotrot ile büyük bir örs arasında hafif bir basınç altında kenetlenir. Titreşim yüzeye paralel olarak uygulanır. Sadece titreşim enerjisi kullanılır; elektrik akımı veya harici ısıtma gerekmez. Birçok metal çifti ve diğer bazı katılar arasında geleneksel yüksek basınçlı kaynaklarla aynı güç derecesine sahip bağlar elde edilebilir. Örs ve sonotrot ucu arasındaki statik kuvvet, birkaç yoldan biriyle üretilir.

Ultrasonik titreşimler elektronik güç kaynağından gelen yüksek frekanslı bir giriş voltajı aracılığıyla dönüştürücüde üretilir.

Teğetsel veya sıkıştırırmalı titreşim kullanılmasına bağlı olarak, iki farklı ultrasonik kaynak türü vardır. Bu ayrım aynı zamanda kaynaklanabilir malzeme yelpazesini metaller ve termoplastikler olarak ikiye ayırır. Çoğu metal, kaynak yapılmadan önce çıkarılması gereken bir yüzey oksit kirliliği taşır. Bu, kesme titreşimi kullanılarak kaynak yapılacak parçalar arasında nispi yanal hareket ayarlanarak yapılabilir. Tersine, kesme titreşimini iyi iletmeyen termoplastikler genellikle çok kirli değildir ve bu nedenle bu şekilde temizlemeye ihtiyaç duymazlar. Bu durumda, sıkıştırırmalı titreşim, sızdırmazlık için gereken ısıyı üretmek için daha uygundur. Titreşim plastik malzemede eğilme olarak iletilir ve kaynak bağlantısında kesme titreşimi olarak görünür. Bu durum herhangi bir özel temizleme veya yüzey hazırlığı olmadan, daha düşük basınç yükleri ve dolayısıyla çok az dış deformasyon ile elde edilir.

Kaynaklanabilirlik kriteri, faydalı kalınlıkta levha veya folyoda güçlü bağların yapılmış olmasıdır. Alüminyum ve bakır ve bunların alaşımlarının çoğu, diğer metallerin çoğuna kolayca bağlanır. Kaynaktaki kaynak ucunun titreşim genliği, kaynağı etkileyen anahtar parametrelerden biridir. Kaynak bölgesine iletilen enerjiye doğrudan bağlanır. Ultrasonik titreşim genliklerinin oldukça küçük miktarlar olduğu, kaynakta 10–30–50 µm mertebesinde olduğu ve nadiren maksimum olarak 100 µm'yi aştığı bilinmektedir. Yöntemin üstünlükleri ve sınırlamaları şu şekildedir.

Yöntemin Üstünlükleri:

- Katı hal kaynak işlemi olduğu için düşük ısı üretimi oluşur.
- Al, Cu ve diğer yüksek ısı iletkenliğe sahip malzemeler için çok iyi kaynak kalitesi sağlar.
- Farklı malzeme türlerini geniş bir yelpazede birleştirebilir.
- İnce-kalın türleri kaynaklayabilir.
- Oksit ve kirletici maddeler üzerinden kaynaklar.
- Hızlı, kolay otomatikleştirilmiştir.
- Dolgu metalleri, kaynak gazları gerekmez.
- Düşük enerji gereksinimleri sahiptir.

Yöntemin Sınırları:

- Bindirmeli bağlantılarla sınırlıdır.
- Bağlantı kalınlığı sınırlıdır.
- Yüksek mukavemetli, yüksek sertlikte malzemeler kaynaklanması zordur.
- Malzeme deformasyonu meydana gelebilir.
- Parça rezonansından kaynaklanan gürültü oluşabilir.
- Prosese aşınalık eksikliği kaynağa olumsuz yansır.

Ultrasonik kaynak uygulamaları, elektrik/elektronik, otomotiv, havacılık, cihaz ve tıbbi ürünler endüstrilerinde kullanım alanı bulmaktadır. Neredeyse tüm metaller ultrasonik olarak kaynaklanabilirse de, en geniş akım kullanımları tipik olarak çeşitli bakır, alüminyum, magnezyum alaşımlarını altın ve gümüş dahil olmak üzere ilgili daha yumuşak metal alaşımlarını içerir. Elektrikli araçlarda ve diğer pil uygulamalarında geniş kullanım alanı bulmaktadır. Ultrasonik kaynak, otomotiv ve havacılık endüstrilerinde yapısal bileşenler için artan kullanım alanları bulmakta sıcaklığa duyarlı kimyasal veya piroteknik malzemeleri kapsüllemek için çok kullanışlıdır. Ultrasonik mikro bağlamanın yakından ilişkili süreci, yarı iletken ve mikro elektronik endüstrilerinde yaygın olarak kullanılmaktadır [34]–[36].

1.2.3.7.Sürtünme Kaynağı

Sürtünme kaynağı, bir sıkıştırma kuvveti altında yakın temas halindeyken, birleştirilen parçaların temas yüzeylerinde, aralarında nispi harekete neden olarak mekanik enerjinin ısıya dönüştürülmesine dayanan bir katı hal birleştirme işlemidir. Göreceli hareket, döndürme, açılma veya doğrusal ileri geri hareket ile elde edilebilir. İşlem bir iş parçası sabit tutulurken diğeri döndürülerek başlar, gerekli dönüş hızına ulaşıldığında, iki iş parçası temas ettirilir ve ara yüzeyde sürtünme ısınması meydana gelir. Bu ısınma malzemeleri yumuşatır ve yığılma başlar.Uygulanan sıkıştırma kuvveti altında, ara yüzeyde metalurjik bir bağ oluşturan sıcak bir dövme eylemi meydana gelir.Döndürme durdurulur ve yığılma tamamlanır. Üretilen kaynakta dar bir ITAB (ısıdan etkilenmiş bölge) ve bağa bitişik plastik olarak deforme olmuş bir bölge vardır.

Sürtünme kaynağının en yaygın biçiminde dönme hareketi kullanılır. Çubuk, boru ve boru biçimindeki dairesel parçaları birleştirmek için en uygun yöntem sürtünme kaynağıdır. İleri geri

harekete dayalı lineer sürtünme kaynağı da dairesel simetri olmadan alüminyum parçaları birleştirmek için başarıyla kullanılabilir. Bununla birlikte işlem düz bir plakada uzunlamasına dikişleri kaynaklama yeteneğine sahip değildir. Çoğu alüminyum alaşımı ve çatlama duyarlılıkları nedeniyle ergitme kaynağı olmayan 7xxx serisine ait olan alaşımlarda dahil olmak üzere sürtünme kaynağı ile birleştirilebilir. Ara yüzeydeki sürtünme hareketi oksit tabakasını kırdığından ve temiz metali açığa çıkardığından, kaynak öncesi temizlik diğer kaynak işlemleri kadar önemli değildir. Sürtünme kaynağı, döner sürtünme kaynağı ve lineer sürtünme kaynağı olmak üzere iki başlıkta incelenebilir.

Döner sürtünme kaynağı

Sürtünme kaynağında bir iş parçası sabit tutulur ve normal kuvvet altında diğer dönen iş parçası ile temas ettirilir, bileşenlerden biri dönen bir üniteye kenetlenir ve diğer bileşen ise dönmeyen bir üniteye bağlanır. Tahrik ünitesine kenetlenen bileşen, önceden belirlenmiş bir hızda dönecek şekilde konumlandırılır ve diğer dönmeyen bileşen, sürtünme basıncı altında dönen bileşenle kademeli olarak temas ettirilerek iki yüzey arasında sürtünme ısısı oluşur. Arayüzde yeterli ısı oluştuğunda arayüzdeki malzemenin deforme olur. Dönüşü durdurmak için dönen tahrik ünitesi devre dışı bırakılır. Aynı zamanda, kaynağı geliştirmek için basınç (dövme basıncı) artırılır ve uygun bir süre (dövme süresi) korunur. Genel olarak, dönme sürtünme kaynağı iki fazdan oluşur; birinci aşama iki kaplama yüzeyinin sürtünme etkisinden dolayı sürtünme ısısının üretildiği sürtünme aşaması olarak bilinen aşamadır ikinci ve gerçek kaynağın oluşturulduğu aşama ise dövme aşamasıdır. Döner sürtünme kaynağında bileşenlerden birini döndürmek için gereken enerji girişi, tahrik motoru tarafından sağlanır. Döner sürtünme kaynağında ki önemli proses kontrol değişkenleri dönme hızı, sürtünme basıncı, sürtünme süresi ve eksenel kısalma, dövme basıncıdır.

Lineer sürtünme kaynağı

Lineer sürtünme kaynağı işleminde, bir bileşen sabit tutulurken, diğer bileşene önceden belirlenmiş bir frekansta ileri geri hareket verilir. İki bileşen normal basınç altında bir araya getirildiğinde, arayüzdeki sürtünme etkisinden dolayı ısı oluşumuna neden olur. Arayüzde yeterli ısı üretildiğinde ve malzeme plastikleşmeye başladığında, ileri geri hareket durdurulur ve basınç artırılır bu da malzemenin arayüzden dışarı çıkmasına ve iş parçasının kısalmasına neden olur. Kaynak son olarak dövme basıncı ile oluşturulur. Doğrusal sürtünme kaynağı süreci

başlangıç, geçiş, denge ve dövme aşaması olmak üzere dört aşamaya ayrılır: İlk iki aşama, sürtünme nedeniyle iki bileşenin ara yüzeyinde ısının üretildiği daha kısa aşamalardır. Gerçek yüzey temas alanı artar ve sadece ikinci aşamada temas eden iki yüzey arasında plastikleştirilmiş tabaka oluşur. İlk iki aşama, geri kalan iki aşamanın devam etmesi için çok önemlidir. Üçüncü aşamada flaşlar arayüzden dışarı atılır, eksenel kısalma ile sonuçlanır. İstenen yığılmaya ulaşıldığında, iki bileşen hızlı bir şekilde (0.1 sn) dinlendirilerek dövme uygulanır. Kaynak kalitesini arttırmak için önceden belirlenmiş bir dövme süresine tabi tutulur. Lineer sürtünmeli kaynak işlemiyle bileşenlerin kaynağı, çok sayıda işlem değişkeninin kontrolünü gerektirir. Her değişkenin varlığı, sırası ve değeri, kaynak işlemini ve kaynaklı bağlantının özelliğini önemli ölçüde etkiler. Lineer sürtünme kaynağında proses değişkenleri frekans, salınım genliği, sürtünme basıncı salınımının yönü, dövme basıncı, dövme süresi, sürtünme süresi, kaynak süresi, yanma ve bozulma oranıdır. İlk üç değişken (frekans, genlik, sürtünme basıncı), ısı üretim hızını etkiledikleri için en önemli değişkenlerdir. Son üç değişken, diğer değişkenlere bağımlı oldukları için bağımlı değişkenlerdir.

Sürtünme kaynağı özellikle alüminyumun kaynağı için uygundur. Yöntemin bakır, titanyum, kurşun, çinko ve magnezyum gibi diğer bazı malzemelerle de kullanılması mümkündür. Sürtünme kaynağının üstünlükleri ve sınırları şu şekildedir.

Yöntemin Üstünlükleri:

- Kaynak eklem bölgesinin kalitesi çok iyidir. Kök yüzü o kadar iyi olabilir ki; kaynak neredeyse görünmez.
- Kaynaklı bağlantı mükemmel yorulma mukavemetine sahiptir.
- Düşük ısı girdisi ile çok az termal stres veya bozulma olur.
- Mekanik özellikler ark kaynağına göre daha iyi korunur. Sadece %10-20'lik bir sertlik düşüşü ölçülmüştür.
- Ortak hazırlık gerekli değildir.
- Sürtünme kaynağı, normal ergitme kaynağı işlemleriyle kaynak yapıldığında çatlamaya duyarlı alaşımlar için de kullanılabilir.
- Görünür radyasyon, gürültü veya duman oluşumu yoktur.
- Dolgu malzemesine gerek yoktur.
- Üretim hızı diğer yöntemlerle karşılaştırılabilir.

- Yöntem, hazırlık veya müteakip işlemeye çok az ihtiyaç duyulması nedeniyle iyi bir karlılık gösterir.

Yöntemin Sınırları:

- Pahalı kaynak ekipmanı gerektirir.
- Sürtünme kaynağında geometrik kısıtlamalar vardır.
- Lineer sürtünme kaynağı ekipmanları, titreşimlere direnmek için daha fazla sertlik gerektirdiği için çok pahalıdır.
- Sınırlı kullanılabilir güç nedeniyle döner sürtünme kaynağı ile geniş kesit alanlarına sahip parçaların kaynaklanması zordur.
- İnce çeperli parçaların döner sürtünme kaynağı ve lineer sürtünme kaynağında kaynaklanması zordur
- Döner sürtünme kaynağı boru, mil, disk gibi sadece simetrik bileşenlerin kaynaklanması için daha uygundur.
- İş parçasının parçalarını bir arada tutmak ve destek plakasına bastırmak için ağır ve güçlü tesisata ihtiyaç vardır.

Sürtünme kaynağı, otomotiv, enerji üretimi, nükleer santraller, uçak motoru bileşenleri gibi bir dizi endüstride benzer ve farklı malzemeleri birleştirmek için kullanılmış ve uygulanmıştır. Süper alaşımlar, çeşitli çelikler, alüminyum alaşımları, bakır alaşımları, titanyum alaşımları ve çok çeşitli farklı malzeme türleri (çelik-bakır, çelik-seramik, farklı çelik alaşımları, süper alaşım-çelik, çelik-alüminyum vb.) sürtünme kaynağı ile başarıyla birleştirilmiştir. Sürtünmeli kaynağı tahrik millerinin basit alın bağlantılarının birleştirilmesinden titanyum aero motor blisklerinin kaynağına kadar çok çeşitli işlemlerde kullanılabilir. Nükleer santrallerde kullanılan çeşitli bileşenler, soğutma kulelerindeki bileşenler, elektrikli aletler, ısı eşanjör bileşenleri sürtünmeli kaynak tekniği kullanılarak başarılı bir şekilde birleştirilmiştir İşlem ayrıca alüminyumun diğer metalik malzemelerle birleştirilmesinde kullanılır. Yaygın olarak kullanılan iki tür, elektrik endüstrisinde kullanılan alüminyum-bakır alaşımlı birleştirme ve boru sistemlerinde ve basınçlı kaplarda geçiş kaplinleri üretmek için kullanılan alüminyum-paslanmaz çelik birleşimleridir [28], [30], [37].

1.3. ALÜMİNYUM VE ALAŞIMLARI

Alüminyum, yerkabuğunda en fazla bulunan üçüncü (%7,5-8,1) metaldir ve bilinen demir miktarının yaklaşık olarak iki katıdır. Bilinen cevher rezervleri 6 milyar tondur. Alüminyum, sanayi ve ticarete kullanılan en önemli metal olan demirden sonra ikincidir, serbest formunda çok nadir bulunur ve cevher boksitinde esas olarak silikatlar halinde bulunur. Alüminyum silikata topaz denir. Dünya çapında alüminyumun endüstriyel üretimi yılda yaklaşık 20 milyon tondur ve benzer bir miktarda geri dönüşümü yapılır ve hurdadan geri kazanımı alüminyum endüstrisinin önemli bir bileşeni haline gelmiştir Alüminyum, demir hariç diğer tüm metallerden daha fazla kullanılmaktadır. Saf alüminyum, bakır, çinko, magnezyum, manganez ve silikon gibi birçok elementle kolayca alaşımlar oluşturur. Nispeten düşük erime sıcaklığı, kalıcı metalik kalıpların kullanılmasını mümkün kılmaktadır. Uygun alaşım ve tasarım seçimi ile alüminyumun dökümü kolaydır.

Alüminyum muadillerine göre nispeten düşük bir maliyete sahiptir ve sahip olduğu özellikleri ona en iyi performans/ağırlık-fiyat oranlarından birini vermektedir. Alüminyumdan yapılan yapısal bileşenler, havacılık endüstrisi için çok önemlidir Bu nedenle uçak gövdesi yapımında yaygın olarak kullanılır. Bunun yanında hafiflik, dayanıklılık ve sağlamlığın gerekli olduğu diğer ulaşım ve inşaat alanlarında kullanımı yaygındır. Alüminyumun gıdaların, içeceklerin ve farmasötik ve kimyasal ürünlerin işlenmesinde, taşınmasında ve paketlenmesinde yaygın olarak kullanılır.

Alüminyum-lityum alaşımları çok düşük sıcaklıklarda yapılan üretim ve uygulamalarda (kriyojenik), ve uzay uygulamalarında kullanılmaktadır. Elektrik iletim hatları ve ayna yapımında da kullanım alanı bulunmaktadır [38].

1.3.1. Alüminyumun Fiziksel ve Mekanik özellikleri

Alüminyum gümüşü ve sünek bir metaldir. Doğal olarak bulunur. Alüminyumun atom numarası 13 ve atom ağırlıkları sırasıyla 26.982 g'dır. Mgi konumuna sahip bir metaloiddir. İlgili özelliklere ve elektronik çeşitliliğe sahip tipik metalleri temsil eder. Saf alüminyum nispeten düşük bir güce sahiptir. Tüm alaşımlarının yoğunluğu (%99,65–99,99), çeliğin üçte biri olan 2,7 g/mL düzeyindedir. Magnezyumdan sonra alüminyum, yaygın metallerin en hafifidir. Atom hacmi, katı haldeki elementin 1 gram atom ağırlığının kapladığı hacimdir (atomik

ağırlık/yoğunluk). Alüminyum ve alaşımları, geri dönüşüm ve yeni ergitme işlemlerine ek olarak, yüksek bir mukavemet/ağırlık oranı sağlar. Alüminyum tuzları çevreye zarar vermez ve toksik değildir. Alüminyum ve alaşımları manyetik değildir ve yüksek elektriksel iletkenliğe, yüksek termal iletkenliğe, yüksek yansıtıcılığa ve katalitik olmayan etkiye sahiptir [38]. Çizelge 1.1’de alüminyumun mekanik özellikleri gösterilmiştir.

Çizelge 1.1 Alüminyumun Mekanik Özellikleri

Özellik	Alüminyum
Atom kütlesi	26.9815386g
Gerilme direnci	77MN/ m ²
Maksimum oksidasyon sayısı	3
Maksimum oksidasyon numarası	0
Kristal yapı	Yüz merkezli
Spektroskopi	(1s) ² , (2s) ² , (2p) ⁶ , (3s) ² , (3p) ¹
İyonlaşma potansiyeli	I(5.97eV), II(18.8eV)
Potansiyel standart	1.663V
Pauling elektronegatifliği	1.5
20C'de yoğunluk	2.7g/ cm ³
Erime noktası	659.7–660.1C
Kaynama noktası	2400–2450C
20C'de özgül ısı	0.891kJ/kgC
20C'de termal iletkenlik	272W/mK
Van der Waals yarıçapı	0.143nm
İyon yarıçapı	0.05nm
Ortak izotop sayısı	1 (izotop 27)

1.3.2. Alüminyum Alaşımlarının Sınıflandırılması

Alüminyum Birliği tarafından sekiz sınıf dövme alüminyum alaşımı tanımlanmıştır. Bireysel alaşımlar, dört basamaklı bir sayı kullanılarak belirlenir ve ilk basamak temel sınıfı temsil eder. Bu sınıflar, birincil alaşım elementi ve bunların nasıl güçlendirildiği ile (soğuk işlem (gerilmeyle sertleştirme) ya da çökeltme güçlendirme ısıl işlemi) ile ayırt edilir. Tanımlamadaki diğer rakamların özel bir önemi yoktur. 1xxx, 3xxx, 4xxx ve 5xxx alaşımlarının tümü soğuk işlemle güçlendirilirken, 2xxx, 6xxx, 7xxx ve 8xxx alaşımlarının tümü çökeltme ısıl işlemiyle güçlendirilir. Kaynaktan önce alaşım için güçlendirme yöntemini tanımak önemlidir. Her iki durumda da, kaynaktan sonra çekme mukavemetinde önemli bir düşüş olacaktır, ancak ısıl işlemle güçlendirilen alaşımlarda bu tür kayıpların geri kazanılması mümkündür.

Dört basamaklı alaşım kodunu genellikle bir ısıtım işlemi, işleme veya temper tanımlama kodu takip eder. Bu kod, belirli alaşımın nasıl güçlendirildiğine ilişkin bazı ayrıntılar sağlar. Örnek vermek gerekirse, 6061-T6'daki "T6", takip edilen bir çözelti ısıtım işlemine, 5754-H3'teki "H3", düşük sıcaklıkta stabilizasyon işleminin ardından bir gerilim sertleşmesine atıfta bulunur.

Alüminyum alaşımları dekoratiften yapısal bir çok alanda kullanılmaktadır. 1XXX alaşımları, yüksek voltajlı iletim hatları gibi elektrik iletkenleri olarak da yaygın olarak kullanılmaktadır. 1XXX ve 3XXX serisi alaşımlar, sırasıyla alüminyum folyo ve içecek kutuları için kullanıldığından, alüminyumun yoğun üretiminin yapıldığı seriyi temsil eder. Nispeten yüksek mukavemetleri nedeniyle, 2XXX ve 7XXX serisi alaşımlar, havacılık uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. 5XXX ve 6XXX serisi alaşımlar, "iş gücü" alaşımları olarak kabul edilir ve yapısal uygulamalar için en büyük tonajda kullanılır. Şu anda otomotiv uygulamaları için kullanılan alüminyumun çoğu ya 5XXX ya da 6XXX alaşım ailesindedir. 8XXX serisi alaşımlar nispeten yenidir ve yoğunluğu azaltmak ve gücü artırmak için lityum ilaveleri içerir. Azaltılmış yoğunlukları, havacılık uygulamaları için bariz avantajlar sağlayan mükemmel mukavemet-ağırlık oranları sağlar [38]. Çizelge 1.2'de alüminyum alaşımlarının mekanik özellikleri gösterilmiştir.

Çizelge 1.2 Alüminyum Alaşımlarının Mekanik Özellikleri

Seri	Alaşım	İşlem türü	Mpa	Ksi
1xxx	Al	Soğuk işlem	70–175	10–25
2xxx	Al-Cu-Mg (%1–2.5 Cu)	Isıl işlem	170–310	25–45
2xxx	Al-Cu-Mg-Si (%3-6 Cu)	Isıl işlem	380–520	55-75
3xxx	Al-Mn-Mg	Soğuk işlem	140–280	20-40
4xxx	Al-Si	Soğuk işlem	105-350	15-50
5xxx	Al-Mg (%1–2.5 Mg)	Soğuk işlem	140–280	20-40
5xxx	Al-Mg-Mn (3-6 Mg)	Soğuk işlem	280–380	40–55
6xxx	Al-Mg-Si	Isıl işlem	150–380	22–55
7xxx	Al-Zn-Mg	Isıl işlem	380–520	55-75
7xxx	Al-Zn-Mg-Cu	Isıl işlem	520–620	75-90
8xxx	Al-Li-Cu-Mg	Isıl işlem	280-560	40–80

1.3.2.1. 1xxx Serisi Alasımlar

1000 serisi alasımlar %99 veya daha yüksek saf alüminyuma sahiptir. Bu seri genel ve yerel korozyona, yüksek elektriksel ve termal iletkenliğe karşı mükemmel bir dirence sahiptir. Ancak mekanik özellikleri zayıftır. 1xxx serisinin dövme alüminyum alasımları, bu ürünleri üretmek için eritme derecesinde doğal safsızlıklar olarak sunulan veya rafine alüminyumda kullanılan çeşitli elementler için maksimum bireysel, birleşik ve toplam içeriği belirleyen bileşim özelliklerine uygundur. 1100, 1120 ve 1150 alasımları, minimum ve maksimum belirtilen bakır içeriğine sahip olarak bu serideki diğerlerinden biraz farklıdır. Pek çok koşulda, artan alaşım içeriği ile bir miktar azalır. Bu alasımlar (1199, 1198) %99,90 ile %99,999 arasında saflık derecesine sahiptir. Saflıklarına bağlı olarak elektrolitik kondansatör ve aydınlatma cihazları imalatında ve yapı sektöründe dekoratif uygulamalarda ve lüks ambalajlarda kullanılırlar. Metal genellikle anodize edilir. 1050A alaşımı %99,50'den fazla saftır ve en yaygın kullanılan kalitelerden biridir. Çok çeşitli uygulamalara sahiptir. Paketleme, binalar, sac metal işleme, ısı eşanjörleri için kanatlar ve borular, elektrik iletkenleri vd. 1200 alaşımı %99 ile %99,5 arasında saftır ve plastik şekillendirilebilirliği yeterli olduğunda (ambalaj, mutfak eşyaları için daireler) 1050A'nın yerini alır [38]–[40].

1.3.2.2. 2xxx Serisi Alasımlar

Bakırın ana alaşım elementi olduğu 2xxx dövme alasımları ve 2xx.x döküm alasımları, çok daha düşük miktarlarda bakır içeren diğer serilerdeki alasımlardan daha az korozyona dayanıklıdır. Bu tip alasımlar yapısal uygulamalarda, özellikle uçak ve uzay uygulamalarında kullanılmaktadır.

2xxx Lityum İçeren Dövme Alasımlar 2xxx serisi alasımlar, bakırın varlığından dolayı güçlü elektrokimyasal etkilere sahiptir. Katı çözeltideki bakır yoğunluğundaki değişiklikler elektrot potansiyellerinde ve dolayısıyla yerel galvanik korozyon hücrelerinde değişikliklere yol açar. Bakır ayrıca elektrokimyasal korozyon reaksiyonları sırasında alüminyum yüzeyler üzerinde yeniden plaka oluşturma ve küçük katodik alanlar oluşturarak ek yerel galvanik hücrelere neden olma eğilimine sahiptir. Bu alasımlar çukurlaşma ve gerilme korozyonu çatlamasına karşı hassastır. Lityum ilaveleri, alüminyum alasımlarının yoğunluğunu azaltır ve elastik modülünü artırır, bu da alüminyum-lityum alasımlarını, özellikle havacılık uygulamalarında mevcut yüksek mukavemetli alasımların yerini almak için iyi adaylar haline getirir [38]–[40].

1.3.2.3. 3xxx Serisi Alasımlar

En yaygın kullanılan alasımlardan biri olan 3003, orta düzeyde mukavemete, iyi işlenebilirliğe ve korozyona karşı çok yüksek dirence sahiptir. 3xxx serisinin (Al-Mn, Al-Mn-Mg) alasımları, 1xxx serisinininkilerle aynı istenen özelliklere sahiptir, ancak biraz daha yüksek mukavemete sahiptir. Bu alasımlardaki hemen hemen tümü manganez, ince bölünmüş fazlar (metaller arası bileşikler) olarak çöktürülür, ancak çoğu ortamda fazlar ve alüminyum matris arasındaki elektrot potansiyelindeki ihmal edilebilir fark nedeniyle korozyon direnci bozulmaz, bir galvanik hücre oluşturmaz. Manganez alüminyum katı çözeltisinde, mikroskobik altı çökelti parçacıklarında ve Al 6 (Mn, Fe) veya Al 12 (Mn, Fe) 3 Si fazlarının daha büyük parçacıklarında bulunur, bunların her ikisi de çözelti potansiyelleri ile hemen hemen aynıdır. Bu tür alasımlar, pişirme ve gıda işleme ekipmanı, kimyasal ekipman ve korozyona karşı yüksek direnç gerektiren ve çeşitli mimari ürünler için yaygın olarak kullanılmaktadır. Magnezyum (%1,2), alüminyumun mekanik özelliklerini önemli ölçüde geliştirir ve iyi şekillendirilebilirliğini korurken, garanti edilen minimum çekme mukavemeti değerlerine 40 ila 50 Mpa arasında ekler. %1 magnezyum eklenmiş 3004 alasımı, 3003'ün genel özelliklerini korurken biraz daha iyi mekanik özellikler sunar. % 0,20'ye kadar bakır ilavesi mekanik dirençte daha fazla artış sağlar ve % 0,7'ye kadar bakır ilavesi ile ince taneli bir yapı elde etmeyi mümkün kılar. Ayrıca, bu serideki bazı alasımlara eklenen Mg, katı-çözelti sertleştirme yoluyla ek mukavemet sağlar. 3003'ün ana uygulamaları inşaat sektöründe (kaplama panelleri, çatı kaplama levhası), imalat, sac metal işleri, ısı eşanjör boruları ve mutfak gereçleri daireleridir [38]–[40].

1.3.2.4. 4xxx Serisi Alasımlar

Bu alasımlar, anodik kaplamalar uygulandığında elde edilebilecek renk efektleri nedeniyle mimari kullanımlarda talep görmektedir. Bu serideki alasımlar iyi korozyon direncine sahiptir. 4xxx serisinin (Al-Si) alasımları, esas olarak lehimleme ve kaynak ürünleri (düşük erime noktaları nedeniyle) ve mimari ürünlerde kaplama için kullanılan düşük mukavemetli alasımlardır. Bu alasımlar, anotlama sonucunda gri bir görünüm kazanır. Elemental silikon, 4xxx serisinin dövme alasımlarında, sert lehimleme ve kaynak alasımlarında ve 3xxx ve 4xxx serisinin döküm alasımlarında ikinci faz bileşen parçacıkları olarak bulunur. Silikon, alüminyum katı-çözelti matrisine birkaç yüz milivolt ile katodiktir ve silikon içeren alasımların çoğunun önemli bir hacim fraksiyonunu oluşturur. Bununla birlikte, silikon parçacıklarının yüksek oranda polarize olması gerçeğinden kaynaklanan düşük korozyon akım yoğunluğu

nedeniyle, silikonun bu alaşımların korozyon direnci üzerindeki etkileri en aza indirgenmiştir [38]–[40].

1.3.2.5. 5xxx Serisi Alaşımlar

5xxx serisi (Al–Mg) ısıt işlem görmeyen en güçlü alüminyum alaşımlardır ve çoğu üründe birim maliyet başına mukavemet açısından 1xxx ve 3xxx serisinin alaşımlarından daha ekonomik olarak bilinirler. Magnezyum, alüminyumdaki en çözünür elementlerden biridir ve yüksek bir sıcaklıkta çözündüğünde, denge çözünürlüğü büyük ölçüde aşılmış olsa bile, daha düşük sıcaklıklarda çözeltide büyük ölçüde tutulur. Önemli ölçüde katı çözelti sertleşmesi sağlar ve gerinim sertleştirme ile ek mukavemet üretilir. 5xxx serisinin alaşımları, çoğu ortamda ısıt işlem görmeyen diğer alaşımlarla aynı yüksek genel korozyon direncine sahip olmakla kalmaz, aynı zamanda hafif alkali ortamlarda diğer alüminyum alaşımlarından daha iyi bir dirence sahiptir. Uyumlu bir 5xxx serisi dolgu teli ile kaynak yapıldığında, katı çözeltide magnezyumun tutulmasını yansıtan yüksek kaynaklı mukavemetleri nedeniyle yaygın olarak kullanılırlar.

5xxx serisinin dövme alaşımları (Al–Mg–Mn, Al–Mg–Cr ve Al–Mg–Mn–Cr) ve 5xx.x serisinin döküm alaşımları (Al–Mg) korozyona karşı yüksek dirence sahiptir ve bu deniz suyuna maruz kalmayı içeren deniz uygulamalarının yanı sıra bina ürünleri ve kimyasal işleme ve gıda işleme ekipmanlarının geniş bir çeşitliliğindeki kullanımlarını açıklar. Yüksek sıcaklıkta uzun süreli bekletme, tane sınırlarında intermetalik bileşik Al₃Mg₂'nin çökmesine yol açar. Uygulamanın gerektirmesi halinde %3 ve üzeri magnezyum içeren alaşımlara stabilizasyon ısıt işlemi yapılabilir. Diğer olası ilaveler, çekme mukavemetinde ve/veya korozyon direnci ve kaynaklanabilirlik gibi belirli özelliklerde daha fazla artış sağlayan manganez, krom ve titanyumdur. Gıda kutular ve imalat, ticari araç gövdelerinde, yol işaretlerinde bobin, ısı yalıtımı ve sac şekillendirme için yaygın olarak kullanılmaktadır [38]–[40].

1.3.2.6. 6xxx Serisi Alaşımlar

6xxx serisi alaşımlar, silikon ve magnezyum içerir ve magnezyum silisit oluşturur. Bu alaşımlar iyi bir korozyon direncine sahiptir. Isıt işlem görebilen alaşımlar arasında bulunan bu seride Mg₂Si (magnezyumsilisit) sistemine dayalı orta mukavemetli 6xxx serisi alaşımlar, genel korozyona karşı ve ısıt işlem uygulanamayan alaşımlarinkine benzer veya buna yakın yüksek

bir direnç sağlarlar. Sahip olduğu kabul edilebilir mukavemet, iyi korozyon direnci, şekillendirilebilirlik, kaynaklanabilirlik ve düşük maliyet gibi özelliklerden dolayı 6xxx serisi alaşımlar için önemli ölçüde endüstriyel ilgi vardır. Al-Mg-Si alaşımlarına bakır eklenmesi çökelmiş olan yapıyı iyileştirir, sertliği artırır. Bununla birlikte, yüksek alaşımlı miktarda bakır, Al-Mg-Si alaşımlarının iyi olan korozyon direncini bozar ve korozyona duyarlılığa neden olur. Kabul edilebilir mukavemet ve korozyona karşı çok iyi direnç, 6xxx serisinin (Al-Mg-Si) ısıtılma işlemi görebilen dövme alaşımlarını çeşitli yapı, inşaat, denizcilik, makine ve proses ekipmanı uygulamalarında oldukça uygun hale getirir [38]–[40].

1.3.2.7. 7xxx Serisi Alaşımlar

Alaşımlar ilavesi olarak bakır içermeyen 7xxx serisinin (Al-Zn-Mg) ısıtılma işlemi görebilen alaşımları da genel korozyona karşı yüksek dirençlidir. 7000 serisi alaşımlar, küçük yüzdelerde magnezyum, bakır ve krom içerebilir. Bu alaşımlar, örneğin en yüksek mukavemetli alüminyum alaşımlarından biri olan 7075 gibi çok yüksek mukavemetlere sahip olabilir. 7xxx serisi dövme alaşımları ve 7xx.x döküm alaşımları, çeşitli mukavemet seviyeleri geliştiren alaşımlarda magnezyum veya magnezyum ve bakır ile birlikte büyük çinko ilaveleri içerir. 7xxx serisi alaşımlarda bakır içeren Al 7075 gibi çok sayıda alaşım türü vardır. Bu alaşımlar, çözünme açısından zengin bölgelerin çökeltilmesiyle güçlendirilir. Mukavemet-ağırlık oranları temelinde mevcut en yüksek mukavemetli malzemeler arasında gösterilir. 7xxx serisi alaşımlar ayrıca genel korozyona 2xxx serisi alaşımlardan daha dayanıklıdır. Bununla birlikte, stres korozyonu çatlamasına ve pul pul dökülme korozyonuna karşı da hassastır. Daha yüksek bakır içeriğine sahip 7xxx serisi alaşımlar, aşırı mukavemet kaybı olmaksızın daha yüksek yaşlandırma sıcaklıklarına izin verir. Bakır içeren alaşımlar yüksek dayanım özellikleri nedeni başta uçak uygulamalarında olmak üzere inşaat malzemeleri olarak kullanılmaktadır [38]–[40].

1.3.2.8. 8xxx Serisi Alaşımlar

8xxx serisindeki alaşımlar, çok çeşitli bileşimleri kapsar. Demir ve silikonun aynı anda eklenmesi, alüminyumun mekanik özelliklerini iyileştirir. İnce taneli yapıları ve iyi izotropileri ile bu alaşımlar, folyo olarak bile (50 ila 200 m kalınlığında) zor koşullar altında iyi şekillendirilebilirliğe sahiptir. Bu, ısı eşanjörleri, spiral borular, tabaklar ve ince folyolar için kanatçık olarak artan kullanımlarını yaygınlaştırmaktadır. Alaşım 8011 (Al-0.75Fe-0.7Si), iyi

derin çekme özellikleri ve elektrik iletken malzemeleri olarak diğer birkaç seyreltik bileşim nedeniyle şişe kapakları için kullanılır.

8006 (Al–1.6Fe–0.65Mn) gibi geçiş metali elementleri içeren bu alaşımlar ve diğer seyreltik bileşimler, ısı eşanjörleri için folyo ve kanatçık üretmek için kullanılır. Bu seri birkaç seyreltik alaşım içerir, örneğin 8001 (Al–1.1Ni–0.6Fe), yüksek sıcaklık ve basınçlarda su tarafından aşındırıcı saldırıya karşı direncin istenen özellik olduğu nükleer enerji tesislerinde kullanılır. Mekanik özellikleri 3003'e benzer. 8280 ve 8081 gibi alaşımlar, Al-Sn sistemine dayalı yatak alaşımları olarak önemli bir rol oynar [38]–[40].



BÖLÜM 2

SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI

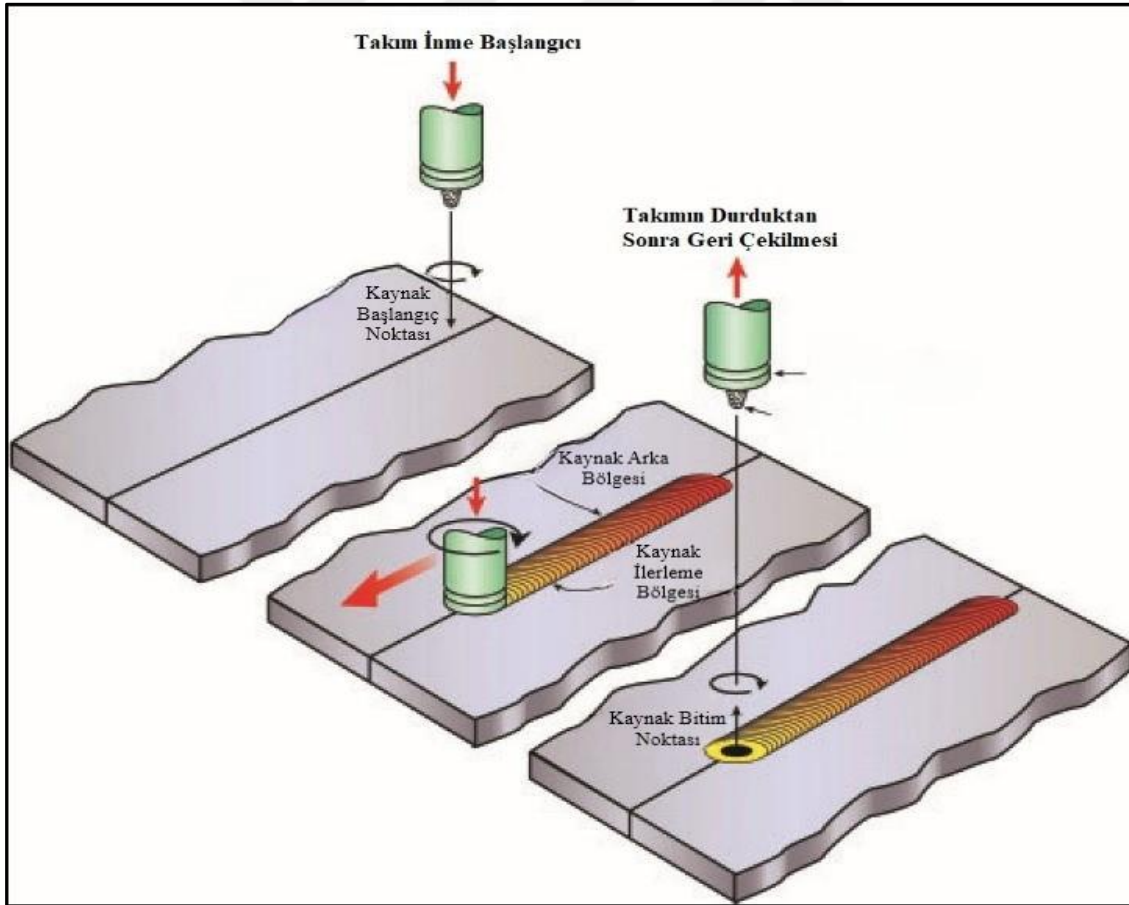
Sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi, Wayne Thomas tarafından 1991 yılında Cambridge, İngiltere’de Welding Institute’de icat edilen bir katı hal kaynak yöntemidir. Birleştirme işlemi için gerekli olan ısıyı sürtünme ile üreten gelişmiş bir birleştirme işlemidir. Bu birleştirme yöntemi, önemli ölçüde ağırlık tasarrufu sağlayarak dolgu malzemeleri gerektirmez. Geleneksel ergitme kaynak işlemlerinden farklı olarak katı hal kaynak işlemlerinde birleştirme, ana metal erime noktasının altındaki sıcaklıklarda gerçekleşir. Bu nedenle, erime sıcaklığının altında oksit oluşturan titanyum alaşımları haricinde, oksit fazlarının oluşumunu engellemek için genellikle inert bir ortama ihtiyaç yoktur. Kaynak işleminin katı-hal doğası göz önüne alındığında, her iki iş parçasında birleştirilecek bitişik yüzlerin yakınında bulunan mevcut malzeme hacmi karıştırılacağı ve kaynağı oluşturacağı için dolgu malzemesine de gerek yoktur. SKK diğer geleneksel ergitme kaynak yöntemleriyle karşılaştırıldığında daha iyi yorulma performansı daha düşük ısı girdisi, daha küçük ısıdan etkilenen bölge (ITAB), daha düşük bozulmalar ve artık gerilim ile genel olarak çok iyi mekanik özellikler görülür. SKK, enerji verimliliği, çevre dostu olması ve çok yönlülüğü nedeniyle “yeşil” bir teknolojidir. Geleneksel kaynak yöntemleriyle karşılaştırıldığında, SKK önemli ölçüde daha az enerji tüketmektedir. Örtü gazı veya akı kullanılmaz, bu nedenle süreci çevre dostu hale getirir. Birleştirme işlemi herhangi bir dolgu metali kullanımını içermez ve bu da ergitme kaynağında bir sorun olan bileşimin uyumluluğu endişesi olmadan herhangi bir alüminyum alaşımın kaynaklanmasını sağlar. İstendiğinde, farklı alüminyum alaşımları ve kompozitler eşit kolaylıkla birleştirilebilir [41]–[43].

SKK’nın farklı çift malzemelerin birleştirilmesi ile pek çok avantaj elde edildiği için endüstri uygulamalarındaki önemi git gide artmaktadır. İstenilen ürün özellikleri gibi teknik avantajların yanı sıra aynı zamanda üretim ekonomisi bakımından da fayda sağlamaktadır [44].

2.1. SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI TEMEL İLKELER

2.1.1 Sürtünme Karıştırma Kaynak İşleminin Prensibi

Sürtünme karıştırma kaynağı, sürtünme ve sürtünme ile ısı üretimi ilkesine dayanmaktadır. Temel bileşenler döner bir takım, omuz ve iş parçası üzerine bastırılan ve daldırılan alın altına birleştirilen yüzler boyunca hareket ettirilen bir karıştırıcı uçtur. Takımda ki omuz, iş parçası yüzeyi ile tam temas edene kadar karıştırıcı uç malzemeye daldırılır. Karıştırıcı uç tamamen yerine oturduğunda, Şekil 2.1'de gösterildiği gibi döndürülerek kaynak yönünde hareket ettirilir. Dönen takım, levhalarda sürtünme ve basınç kuvveti oluşturur. Levhaların ara yüzeyinde takım dönüşü ve hareketi, takım ile iş parçası arasında sürtünme ile ısı üretimine neden olur. Üretilen ısı, iş parçasının arayüzündeki malzemeleri yumuşatır, bu işlem arayüzü deforme eder ve yüksek basınç kuvveti uygulayarak iki iş levhanın malzemelerini birbirine yayarak, malzemelerin arayüzü arasında güçlü bir bağlantı oluşturur.



Şekil 2.1 Sürtünme karıştırma kaynağı işleminin şematik diyagramı (Threadgill,2009).

Kaynak işleminin gerçekleştirilme aşamaları şu şekildedir:

- Birleştirilecek plakalar veya levhalar, kaynak işlemi sırasında iş parçasının hareket etmemesi veya sallanmaması için bağlama kalıbı kullanılarak alın altına temas edecek şekilde birleştirilerek sıkıca kenetlenir.
- İş parçalarının uygun şekilde sıkıştırılmasından sonra, takıma bağlanan karıştırıcı ucun omzu iş parçasına dokunana kadar levhalar ve plakalar arasındaki alın altına birleştirildikleri bölgede iş parçalarına yerleştirilir. Bu hareket, sürtünme kuvvetinin ısıtma hareketinin bir sonucu olarak malzemelerin yüzeyinde plastik deformasyona neden olur.
- Takım ve takıma bağlı karıştırıcı uç eklem hattı boyunca hareket ettirilir. Takım iş parçasının yüzeyinde hareket ederken takımın arkasında kaynak meydana gelir. Takım, tüm kaynak üretilirken yanmadan hareket etmeye devam eder.
- Kaynak işlemi tamamlandıktan sonra takım iş parçasından ayrılır ve gerekirse pürüzsüz hale getirme işlemleri yapılır [43], [45].

2.1.2 Sürtünme Karıştırma Kaynağında İşlem Parametreleri

SKK'nin önemli bir avantajı, kaynak/işleme işlemi sırasında tüm işlem parametreleri doğru bir şekilde oluşturulduğunda ve izlendiğinde sonuçların yüksek kalitesi ve tekrarlanabilirliğidir. İşlem parametrelerinin değerlendirilmesi nispeten kolaydır çünkü SKK çoğunlukla sonuçların çevresel koşullar veya operatör becerileri gibi zor kontrol koşullarına bağlı olmadığı mekanik bir kaynak işlemidir. Kalite güvence koşullarını sağlamak için makine ve bağlama sistemi önemlidir.

SKK karmaşık malzeme hareketi ve plastik deformasyonu içerir. Kaynak parametreleri, takım geometrisi ve bağlantı tasarımı, malzeme akış modeli ve sıcaklık dağılımı üzerinde önemli bir etki gösterir, bunun sonucunda malzemenin mikroyapısal evrimini etkiler. SKK işlem parametreleri karıştırıcı uç geometrisi, kaynak hızı, takım eğim açısı, karıştırıcı ucun batma derinliği, bağlama sistemi, eksenel yük, takım dönüş yönü, karıştırıcı ucun başlangıç pozisyonundaki iş parçalarında dalma hızı, kaynak başlangıcında bekleme süresi olarak sıralanabilir.

Karıştırıcı Uç Geometrisi

Omuz ve karıştırıcı uç geometrisi, kaynak dikişinin nihai özelliklerini ve genel bütünlüğünü etkileyen en önemli özelliktir. Takım geometrisi malzeme akışında kritik bir rol oynar ve sırayla SKK'nın gerçekleştirilebileceği hareket hızını yönetir. Karıştırıcı ucun iki temel işlevi bölgesel ısıtma ve malzeme akışıdır.

Kaynak Hızı

Dönme hızı ile kaynak ilerleme hızı arasındaki ilişki, kaynak adım oranı olarak bilinir. SKK için iki parametre çok önemlidir bunlar saat yönünde veya saat yönünün tersine yönde takım dönüş hızı (rpm) ve bağlantı hattı boyunca takım hareket hızı (mm/dak). Takımın dönüşü, dönen karıştırıcı ucun etrafındaki malzemenin karıştırılması ve karıştırılan malzemeyi karıştırıcı ucun önünden arkasına doğru hareket ettirilmesi ile kaynak işlemi tamamlanır. Daha yüksek takım dönüş hızları, daha yüksek sürtünme ısıtması nedeniyle daha yüksek sıcaklık üretir ve daha yoğun karıştırma ile sonuçlanır. Ancak, takım yüzeyinin iş parçası ile sürtünmeli bağlantısının ısınmayı yöneteceği unutulmamalıdır. Bu nedenle, artan takım dönüş hızı ile arayüzdeki sürtünme katsayısı değişeceğinden, artan takım dönüş hızı ile ısınmada monotonik bir artış beklenmemelidir.

Takım Eğim Açısı

Karıştırıcı ucun arka yöne doğru uygun şekilde eğilmesi, karıştırıcı ucun omzunun karıştırılan malzemeyi tutmasını ve malzemeyi karıştırıcı ucun önünden arkasına verimli bir şekilde hareket ettirmesini sağlar.

Karıştırıcı Uçun Batma Derinliği

İş parçalarına karıştırıcı uç yerleştirme derinliği, pürüzsüz takım omuzları ile sağlam kaynaklar üretmek için önemlidir. Uçun yerleştirme derinliği ucun yüksekliği ile ilişkilidir. Yerleştirme derinliği çok sığ olduğunda, takımın omzu orijinal iş parçası yüzeyi ile temas etmez. Bu nedenle, dönen omuz, karıştırılan malzemeyi ucun önünden arkasına verimli bir şekilde hareket ettiremez, bu da iç kanal veya yüzey oluşu ile kaynakların oluşmasına neden olur. Yerleştirme derinliği çok derin olduğunda, takımın omzu iş parçasına dalar ve aşırı parlama oluşturur. Bu

durumda, önemli ölçüde içbükey bir kaynak üretilir ve bu da kaynaklı plakaların yerel olarak incelmeye yol açar.

Bağlama Sistemi

SKK işlemi mekanik bir işlemdir ve iş parçalarını doğru yerde tutan ve üçüncü gövde bölgesini sınırlayan sağlam ve güvenilir bir bağlama sistemi gerektirir.

Eksenel Yük

Omuzun z ekseninde doğru temas basıncını uygulamak ve iş parçaları üzerinde sonda yapmak için önemli bir parametredir. Bu yük her zaman takım geometrisine (esas olarak omuz çapı ile ilgili) ve iş parçalarının malzemesine bağlı olacaktır.

Takım Dönüş Yönü

Saat yönü veya tersi olmak üzere dönüş yönü, iş parçalarının viskoplastikleştirilmiş bölgesinde, omuz çevresinde içe doğru bir malzeme akışını ve karıştırıcı uç çevresinde ki aşağı doğru malzeme akışını kolaylaştırmak için takımın özellikleri dikkate alınmalıdır.

Karıştırıcı Uçun Başlangıç Pozisyonundaki İş Parçalarında Dalma Hızı

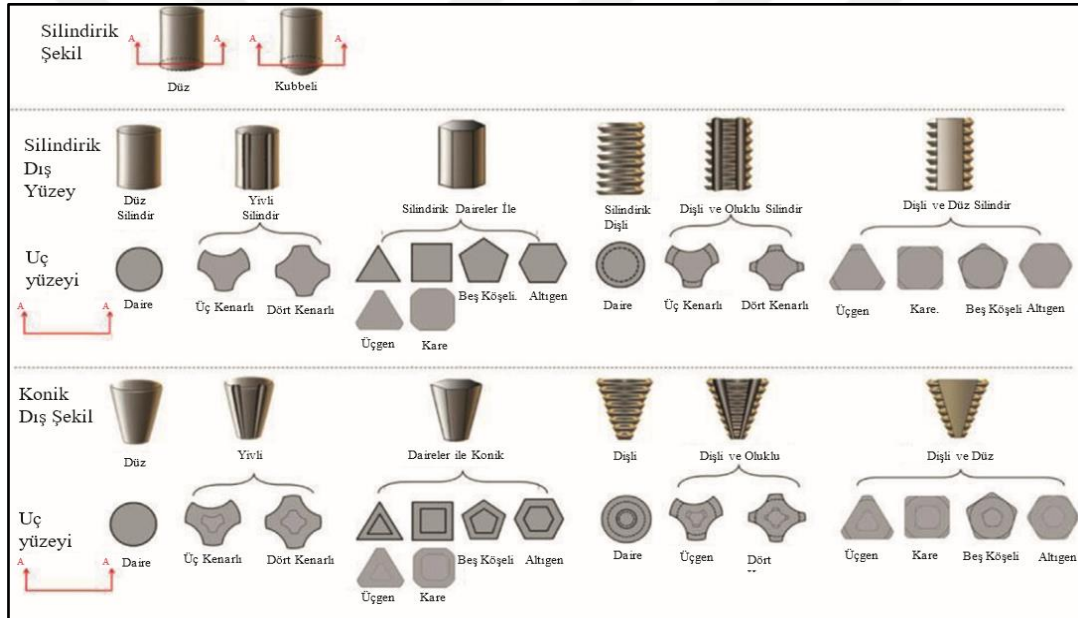
İş parçalarının sertliği arttıkça bu hız düşmelidir. Çok sert malzemeler için, boyutları karıştırıcı uç çapıyla aynı veya biraz daha küçük olan önceden delinmiş bir başlangıç deliği gerekli olabilir.

Kaynak Başlangıcında Bekleme Süresi

Dönen takımın başlangıç konumunda iş parçalarıyla nihai temasa ulaşmasından sonraki süre boyunca üretilen ısı, malzemelerin karıştırılması takımın ilerlemesini kolaylaştırmaktadır [41], [43], [45].

2.1.3 Kullanılan Takım Uç Şekilleri Ve Takım Özellikleri

Sürtünme karıştırma kaynağı işleminde, füzyon kaynak tekniklerinden farklı olarak, işlem sırasında ısı üretmek için harici ısı kaynağına ihtiyaç duyulmamaktadır. Bu yöntemi gerçekleştirmede kritik öneme sahip olan omuz ve karıştırıcı uç olmak üzere iki ana bileşeni vardır. Daldırma işleminin ilk aşamasında, iş parçası ile karıştırıcı arasındaki sürtünme nedeniyle ısı ortaya çıkar. Omuz iş parçasına bir kez dokunduğunda, omuz ve iş parçasının daha geniş yüzey alanı arasındaki sürtünme oluşması ısı üretiminin temelini oluşturmaktadır. Takım hareketi bu aşamada başlar ve takıma bağlı karıştırıcı uç, etrafındaki malzeme hareketini başlatır. Karıştırıcı uç malzemenin yoğun plastik deformasyonu nedeniyle oluşan ısı içeriğine de katkıda bulunur. Şekil 2.2’de karıştırıcı uç çeşitleri gösterilmiştir.



Şekil 2.2 Karıştırıcı Uç Geometrilere, (2017, Mishra).

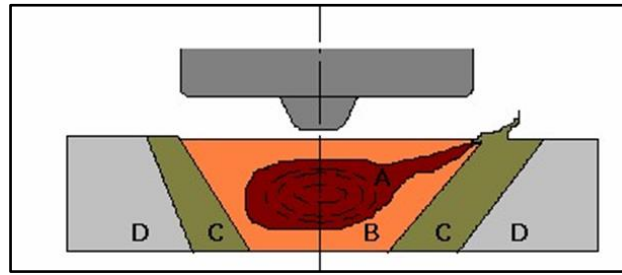
SKK, kaynak sırasında takıma etki eden yüksek işlem kuvvetlerini içeren yüksek sıcaklıklı bir işlem olduğundan, takım malzemesi önemli bir husustur. SKK takımlarının üretiminde kullanılan takım malzemesi, iş parçası malzemesine kıyasla daha serttir ve iyi yüksek sıcaklık özelliklerine sahip olmalıdır.

SKK'nın ilk günlerinde karıştırıcı uç, düz veya yuvarlak tabanlı, düz veya dişli silindirik olarak kullanılmıştır. Karıştırıcı uç üzerindeki dişler, daha iyi malzeme sıkıştırması ve sağlam kaynaklar sağlayan karıştırıcı ucun altına taşımak için tasarlanmıştır. Karıştırıcı uç tasarımı kademeli olarak silindirik geometriden konik geometriye değişmiştir.

Bir SKK takımının takım omzu, malzemeyi yumuşatmak, ısı üretmek ve kaynak sırasında malzemeyi karıştırmak için aşağı doğru yeterli dövme kuvveti üretmek üzere tasarlanmalıdır. Konkavlık, SKK takım omzunda kullanılacak ilk tasarım öğesidir. Burada amaç, hatasız kaynak üretmek için malzemeyi kaynak bölgesi içinde tutmaktır. SKK'nın daha da geliştirilmesiyle beraber takım omzu için de birçok tasarım özelliği geliştirilmiştir. Bu özellikler, içbükeylik ile veya içbükeylik olmadan işlenmiş kaydırmalar, tırtıllar, oluklar ve eşmerkezli dairelerden oluşmaktadır [41], [46], [47].

2.2 METALÜRJİK YAPI

Sürtünme karıştırma kaynağı, ergime derecesinin altında birleştirmeler üreten bir katıhal kaynak yöntemidir SKK sırasında, takım ile iş parçası arasındaki sürtünme ve plastik deformasyon yoluyla ısı üretilir. Plastik deformasyon enerjisinin bir kısmı, artan kusur yoğunlukları şeklinde termomekanik olarak işlenmiş bölge içinde depolanır. Bu yöntemde ısıdan etkilenen bölge, ergitme kaynak yöntemleriyle karşılaştırıldığında yüksek sıcaklık oluşmadığından, oldukça dardır. Şekil 2.3'de dört farklı bölgeyi gösteren SKK kaynağının şematik kesiti gösterilmiştir.(A) Esas malzeme, (B) Isıdan etkilenen bölge (IEB), (C) Termomekanik etkilenen bölge (TEB) ve (D) Dinamik olarak yeniden kristalleşen bölgedir (DKB).



Şekil 2.3 SKK Uygulanan Alüminyum Alaşımın Mikro Yapısı (Kadayifçi 2013)

2.2.2 Dinamik Olarak Yeniden Kristalleşen Bölge (DKB)

Sürtünme karıştırma kaynağı sırasında üretilen plastik deformasyon ve sürtünme ısısı, ana malzemenin DKB'de eş eksenli ince taneli yeniden kristalize mikro yapıya dönüşmesine neden olur. Alüminyum alaşımlarında bu bölgede dislokasyon yoğunluğu genellikle düşüktür. Isıl işlem merkezindeki tane boyutu, SKK parametrelerine, takım geometrisine, malzemenin bileşimine ve kullanılan harici soğutmaya bağlı olarak değişir. Alüminyum alaşımlarında DKB,

SKK sırasında 400-550 C aralığında bir tepe sıcaklığı yaşar. Çökelme ile güçlendirilmiş alüminyum alaşımlarında, bu kadar yüksek sıcaklık, çökeltinin termal stabilitesine, alaşım kimyasına, harici soğutmaya ve DKB'deki tepe sıcaklığına bağlı olarak çökeltilerin kabalaşmasına, çözünmesine ve yeniden çökmesine neden olabilir.

2.2.3 Termomekanik Etkilenen Bölge (TEB)

SKK sırasında hem sıcaklık hem de plastik deformasyon yaşayan ana malzeme ile ısıtılma işlemi merkezi arasındaki bölge TEB'dir. TEB'de genellikle kısmi yeniden kristalleşme gözlenir. TEB'de alt tane sınırlarının oluşmasına neden olan yüksek plastik deformasyon nedeniyle dislokasyon yoğunluğu çok yüksektir. Kaynak sırasında bu bölgede güçlendirme çökeltilerinin çözünmesi meydana gelebilir. Çözünmenin kapsamı, TEB'in yaşadığı termal döngüye ve alaşım tipine bağlı olarak değişir.

2.2.4 Isıdan Etkilenen Bölge (IEB)

TEB ile temel malzemeyi ayıran bölge IEB'dir. Bu bölge herhangi bir plastik deformasyona uğramaz ve termal çevrim yaşar. Belirli bir kaynak parametresi için IEB oluşumu, kaynak yapılan alaşıma bağlıdır. Genellikle DKB'den uzak, kaynak sırasında 250-350C aralığında bir ısıtılma çevrim yaşayan bir alan IEB olarak gözlenir. IEB, güçlendirici çökeltilerin kabalaşması ve yüksek sıcaklığa maruz kalma nedeniyle çökeltisiz bölge oluşumu ile karakterize edilir. Harici soğutma ortamının kullanılması IEB oluşumunun boyutunu azaltabilir [42], [46], [48], [49].

2.3 SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAK İŞLEMİNİN AVANTAJLARI, SINIRLAMALARI VE UYGULAMA ALANLARI

2.3.1. Yöntemin Üstünlük ve Sınırları

Yöntemin Üstünlükleri

- Katı hal yöntemi olarak tüm ana alüminyum alaşımlarına uygulanabilir ve alüminyum füzyon kaynak proseslerinde yaygın olan sıcak çatlama, gözeneklilik, element kaybı vb. sorunları önler.
- Mekanize bir süreçtir. Sürtünme karıştırma kaynağı özel kaynak becerilerine dayanmaz, elle müdahale nadiren gereklidir

- Alüminyum alaşımları için koruyucu gaz veya dolgu teli gerekmez.
- Süreç, düşük kaliteli kenar hazırlamaya karşı oldukça toleranslıdır. Levha kalınlığının %20'sine kadar olan boşluklar tolere edilebilir, ancak bu dolgu eklenmediği için kaçınılmaz olarak yerel kesit kalınlığında bir azalmaya yol açar.
- Füzyonun olmaması, katılaşma ve soğutma ile ilişkili termal büzülmenin çoğunu ortadan kaldırarak bozulmada önemli azalmalara yol açar.
- Çok esnektir, bir, iki ve üç boyutlu birleştirmeye uygundur. Alın, bindirme ve punta kaynak geometrilerine uygulanabilir. Kaynak herhangi bir pozisyonda yapılabilir.
- Elde edilen mekanik özellikler, diğer işlemlerle yapılan kaynaklarla güçlü bir şekilde rekabet edebilir.
- Ultraviyole veya elektromanyetik radyasyon tehlikesi yoktur.
- Benzer güce sahip bir freze makinesinden daha gürültülü değildir ve neredeyse sıfır sıçrama, duman ve diğer kirlenici maddeler üretir.
- SKK için kaynağının kullandığı enerji, lazer kaynağına göre fazla metal inert gaz (MIG) kaynağına göre daha azdır.
- Kalın plakalar ayrıca her iki tarafta SKK ile birleştirilebilir.
- SKK'nin önemli bir avantajı, kaynak/işleme işlemi sırasında tüm işlem parametreleri doğru bir şekilde oluşturulduğunda ve izlendiğinde sonuçların yüksek kalitesi ve tekrarlanabilirliğidir.
- Kaynakta kalan gerilimin durumunu düzenlemek için kaynak sırasında çeşitli mekanik ve termal germe stratejileri uygulanabilir.

Yöntemin Sınırları

- Dolgu telinin olmaması, işlemin köşe kaynakları yapmak için kolayca kullanılamaz.
- İşlemin tamamen mekanize doğası, erişimin veya karmaşık kaynak şeklinin manuel işleme en uygun olduğu uygulamalarda kullanılmasını engeller.
- Karıştırıcı ucun çekildiği kaynağın sonunda bir deliğin bulunması genellikle bir dezavantaj olarak belirtilir.
- Verimli güç tüketimi, her zaman pratik bir seçenek olmasa da, kullanılan makine boyutunun yapılan kaynağın boyutuyla eşleşmesine bağlıdır.
- Büyük dalma kuvvetleri nedeniyle gerekli özel ekipman ve bağlama gereklidir.
- Tek geçişli ergitme kaynak işlemlerine kıyasla daha yavaş kaynak hızlarına sahiptir.

- Kalınlık farklılıkları olan veya doğrusal olmayan kaynak yolları olan bağlantıların kaynağında özel dikkat gerektirmektedir.
- Önemli bir bastırma kuvveti ve çaprazlama kuvvetleri gerektirir, bu nedenle iş parçasının ark kaynağından daha fazla sıkıştırılması gerekir.
- Malzeme birikiminin istendiği durumlarda sürtünme karıştırma kaynağı kullanılamaz.
- SKK'nin makinesinin ilk yatırımı çok yüksektir.
- Küçük yanlış hizalamalar eklem gücünü azalttığından katı geometrik tolerans yönetimi gerektirir [42], [43], [45], [49].

2.3.2. Sürtünme Karıştırma Kaynağının Kullanım Alanları

Sürtünme Karıştırma Kaynağı başlangıçta düşük erime sıcaklığındaki malzemelerle sınırlı iken üzerinde yapılan çalışmalar ve teknolojik gelişmelerle, polikristal kübik bor nitrür (PCBN), tungstenrenyum, seramikler, yüksek sıcaklık malzemeleri, çelikler ve diğer yüksek mukavemetli malzemeler gibi yeni yüksek mukavemetli malzemelerinin geliştirilmesiyle kullanım alanı artmaktadır. SKK'nin, kriyojenik sıcaklıklardan (örneğin sıvı oksijen ve sıvı hidrojen roket yakıt tankları) hafif yüksek sıcaklıklara (örneğin ısıtma sistemlerindeki ısı eşanjörleri) kadar değişen uygulamalarda kullanılmaktadır. Üretimde kullanılan SKK'larının çoğu alın kaynakları iken, bindirme ve sürtünme karıştırma nokta kaynaklarının kullanım sıklıkları artmaktadır.

Deniz Sektöründe çeşitli yüksek hızlı alüminyum gemilerde ve genellikle hafif alüminyum üst yapılara sahip büyük çelik yolcu gemilerinde bölme duvarlarına ve güvertelere dahil edilmek üzere 6xxx ekstrüzyonların birleştirilmesine yönelik çok sayıda uygulaması görülmektedir.

Havacılık sektöründe neredeyse tüm büyük uçak gövdesi üreticileri, mevcut yapılardaki perçinlerin çoğunu değiştirme kullanımını hakkında araştırmalar yapmaktadır. Bunun nedeni sürtünme karıştırma kaynağının, ağırlık tasarrufu ve daha düşük üretim maliyeti açısından perçinlemeye kıyasla önemli avantajlar sağlamasıdır. Gövdesinde SKK'ni kapsamlı bir şekilde kullanan ilk uçakta 7300'den fazla bağlantı elemanı (toplamın yaklaşık %60'ı) 263 adet sürtünme karıştırma kaynağı ile değiştirilmiştir. SKK işlemi, yaşlanan uçakların onarımında, yeni yapıların imalatında ve havacılık parçalarının birleştirilmiş yapıları için aletlerde, kanatlar, gövdeler, kuyruklar, uzay araçları için kriyojenik yakıt tankları, havacılık yakıt tankları ve havacılık endüstrisindeki diğer daha büyük yapılar gibi daha büyük parçaları birleştirmek için

ve imalat işlemleri gerçekleştirilmeden önce bir araya getirilerek piyasada bulunan levhaların boyutunu artırmak için de kullanılabilir.

Demiryolu sektöründe yüksek hızlı alüminyum vagonlar 6xxx alaşımlarında karmaşık çift cidarlı ekstrüzyonlardan yapılmaktadır. Bunları birleştiren kaynaklar uzun ve düz olduğundan, SKK ideal bir işlemdir ve çok düşük distorsiyon oranları elde edilmektedir.

Otomotiv sektöründe karayolu araçlarında az sayıda uzun düz kaynak vardır ve bu nedenle SKK'nin benimsenmesi esas olarak süspansiyon parçaları, tekerlekler, koltuk bileşenleri, çarpışma kutuları vb. gibi önde gelen birçok şirketin üretimde bu süreci kullandığı bileşenler için olmuştur. Otomotiv sektörünün ihtiyaçları, bu pazarın karmaşık şekilleri ve yüksek hacimli/düşük maliyetli kültürü ile başa çıkmak için robotik SKK'nin gelişimini yönlendirmiştir. Sürtünme karıştırma kaynağı, işlemin yaklaşık 25-40 mm kalınlığındaki malzemeleri tek geçişte kaynaklama yeteneğinin olduğu hafif zırhlı araçlar için de geliştirilmektedir.

Ayrıca kimya endüstrilerinde ısı eşanjörü, boru hattı vb. birleştirmek için kullanılır. Sürtünme karıştırma kaynağı, elektronik endüstrilerinde alüminyum bakır, konektörler ve diğer elektronik araçları birleştirmek için kullanılır [43], [49].



BÖLÜM 3

DİNAMİK KARAKTERİZASYON

3.1. TİTREŞİMİN TANIMI

Bir bileşen veya yapı hareket ettiğinde veya periyodik bir harekete maruz kaldığında buna titreşim denir. Titreşim mühendislik alanında gürültü, aşınma, dayanım azalması yüksek gerilmeler gibi sorunlara yol açmakta ise de bazı sistemlerde ise titreşim hareketinin olması gerekmektedir[50].

Genel olarak titreşim hareketi makineler çalışırken ortaya çıkar ve zararlı yan etkilere sahiptir. Her makine, çalışma koşullarında ve her bir bileşenin mekanik konfigürasyonu ile ilgili harici uyarılara maruz kalır. Koşullandırma izleme sistemleri için bu özellik, bileşen düzeyinde arızaların tahminini artırır. Bu nedenle, mekanik bir sistemin zorlamalı bir uyarıya tepkisini derinlemesine anlamak önemlidir. En basit sistem, bir serbestlik dereceli kütle-yay sistemidir. Bununla birlikte, bu titreşimlerin tamamen ortadan kaldırılması mümkün değildir. Çünkü motorların endüstriyel koşullarda çalışması, bileşenlerinin çeşitliliğine, toleranslarına, uyumsuzluklarına, dengesizliklerine, güç kaynağındaki değişikliklere ve parçaların aşınmasına tabidir. Bu nedenle amaç, bu titreşimleri tolere edilebilir seviyelerde tutmaktır. Tahmine dayalı bakım için titreşim izleme ile amaç, normal çalışmanın referans seviyelerini aşmadan önce tolere edilebilir zorlamalı titreşim seviyelerindeki herhangi bir değişikliğin kaynağını belirlemektir [51].

3.2. TİTREŞİMLE İLGİLİ TERİMLER

Periyot (T)

Titreşim hareketinin tekrarlama işleminin gerçekleştiği zaman aralığıdır.

Frekans (F)

Birim zamandaki tekrarlanma sayısı olarak adlandırılır. Frekans bir saniyedeki tekrarlanma sayısını ifade ediliyorsa birimi Hertz (Hz), bir dakika içindeki tekrarlanma ifade ediliyorsa birimi RPM (Revolution Per Minute) olarak alınır. ($Hz = RPM / 60$).

$$f = 1 / T \quad (3.1)$$

Denklem 3.1'deki gibi ifade edilir.

Deplasman

Harekette yer değiştirme miktarıdır. Birim olarak mm ya da mikron kullanılabilir. Hız, yer değiştirmenin zaman bağılı değişimidir. Birimi m/s, mm/s, mikron/s, inç/s, mil/s olabilir.

İvme

Hızın zamana göre değişimi anlamına gelir. Birimleri ise m/s², mm/s², mikron/s², inç/s² olabilir.

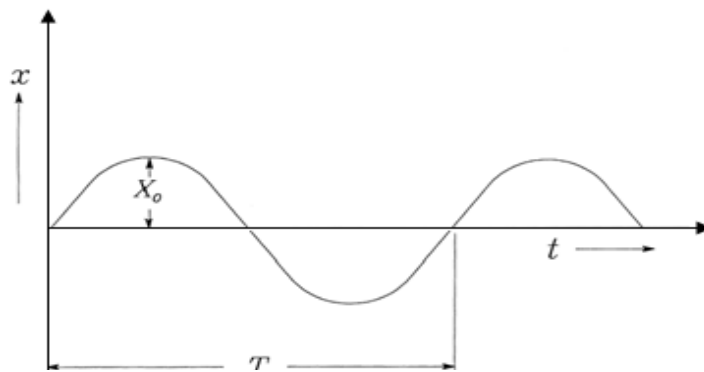
Açısal frekans

Dönme hareketi yapan cismin birim zamanda aldığı yolun radyan cinsinden ifadesidir ve birimi rad/s'dir.

$$\omega = 2\pi f \quad (3.2)$$

Harmonik hareket

Titreşim hareketinin en basit şekline denmiştir. Şekil 3.1'de basit harmonik hareketin grafiği verilmiştir.



Şekil 3.1 Harmonik Hareket Grafiği

Grafikte gösterilen X ifadesi yer değiştirme genliğini veya deplasmanı göstermektedir. X_o ise hareketin maksimum genlik değeridir. Verilen hareketin zamana bağlı denklemini şu şekildedir:

$$X = X_o \cdot \sin(\omega t) \quad (3.3)$$

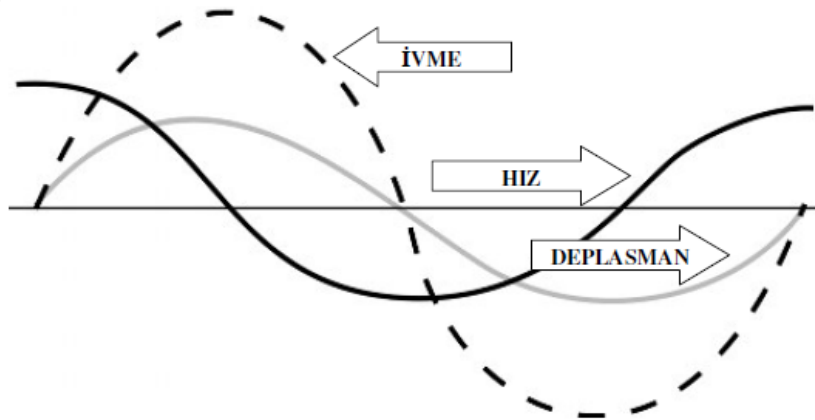
Deplasman denkleminin zamana göre birinci türevi titreşim hareketinin hızını vermektedir.

$$\frac{dX}{dt} = V = X_o \cdot \omega \cdot \cos(\omega t) \quad (3.4)$$

Aynı şekilde hız denkleminin zamana göre birinci türevi de titreşim hareketinin ivmesini vermektedir.

$$\frac{dV}{dt} = a = -X_o \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega t) \quad (3.5)$$

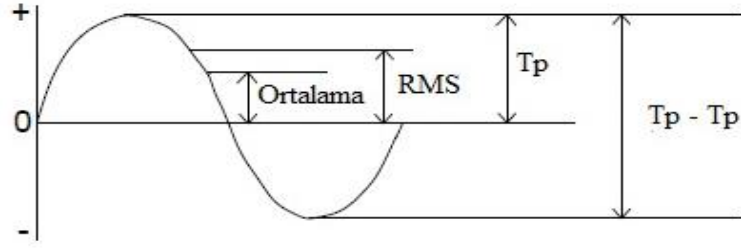
Denklemlere bakıldığında deplasman ve ivme sinüs eğrisi çizerken hız kosinüs eğrisi çizmektedir. şekil 3.2’de bu eğriler gösterilmiştir [52].



şekil 3.2 Deplasman, Hız ve İvme Eğrileri (Baykara 2009).

3.2.1. Genlik Değerleri

Genlik, titreşimin şiddeti olarak tanımlanır. Parabolik grafikte tepe ile sıfır noktası arasındaki uzaklıktır. şekil 3.3’te gösterilen genlik değerleri tepeden tepeye, sıfırdan tepeye, ortalama ve RMS olarak ifade edilmektedir.



Şekil 3.3 Genlik Değerleri (Erol 2015).

Tepeden tepeye deplasman mesafesi ($T_p - T_p$) parçanın titreşim sırasında maksimum ve minimum sınır koşulları arasındaki aldığı mesafedir. Sıfırdan tepeye (T_p) olan mesafe yani sıfır noktasından tepe noktasına olan uzaklık maksimum titreşim değerini ifade eder.

Ortalama, bir sinyalin $t_1 - t_2$ zaman aralığında aldığı değerlerin ortalamasıdır.

RMS (Root Mean Square) bir sinyalin $t_1 - t_2$ zaman aralığında aldığı değerlerin karelerinin ortalamasının kareköküdür [53], [54].

$$X_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt} \quad (3.6)$$

Genlik değerlerinin birbirlerine dönüşümü mümkündür.

$$Ortalama = 0.637 \times Tepe = 0.9 \times RMS \quad (3.7)$$

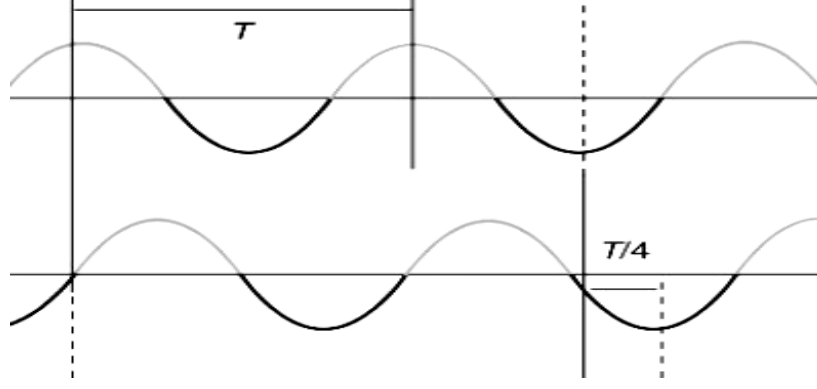
$$Tepe = 1.414 \times RMS = 1.57 \times Ortalama \quad (3.8)$$

$$RMS = 0.707 \times Tepe = 1.11 \times Ortalama \quad (3.9)$$

$$Tepeden Tepeye = 2 \times Tepe \quad (3.10)$$

3.2.2. Faz Kavramı

Şekil 3.4'te gösterildiği gibi aynı genlik ve frekansa sahip iki titreşim dalgasının arasındaki gecikme zamanıdır. Eksen kaçıklığı, gevşeklik gibi makine arızalarında önem arz etmektedir.



Şekil 3.4 Faz Gecikmesi (Baykara 2009).

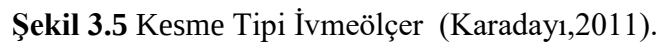
3.2.3. Rezonans Kavramı

Sistemler titreşim hareketi yaptığı için doğal frekans değerleri oluşmaktadır..Herhangi bir kuvvet titreşime yol açabileceği gibi kuvvet etkisi olmadan da sistemler titreşime etkisi altına girebilir.Rezonans durumu sistemin kendi doğal frekansı ve uygulanan kuvvetin frekansının aynı değerde olması durumunda ortaya çıkar.Sistem genliğinde sınırsız artış bu durumda oluşmaktadır.Rezonans durumu doğal frekansı bilinmeyen sistemlerde büyük zararlara yol açabilmektedir.Doğal frekansı bilinmeyen sistemlerde rezonans olayı büyük zararlara yol açabilmektedir [54].

3.3. TİTREŞİMİN ÖLÇÜLMESİ

Titreşimlerin ölçülürken genelde hız, ivme ve deplasman ölçerleri kullanılır Titreşim ölçerlerin temel görevi titreşim verilerini toplayıp ,tıpladığı verileri elektrik akımı yada voltaja dönüştürmektir.

İvme ölçerler diğer titreşim ölçerlere göre daha yaygın olarak kullanılmaktadır..Küçük ve hafif olmaları daha geniş frekans aralıklarına sahip olmaları tercih edilmelerini sağlar. Şekil 3.5 ve şekil 3.6’da verilen kesme ve baskı tipi en çok kullanılan iki ivme çeşididir [55].

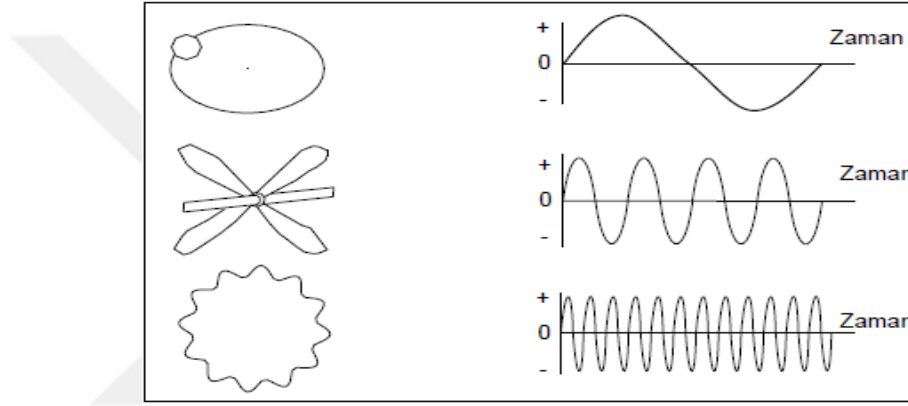


Şekil 3.7 Titreşim ölçerlerin frekans aralığı (Karahan 2005).

3.4. FREKANS TANIM TEKNİKLERİ

3.4.1. Dalgaform Görüntüleme (Zaman Bölgesi)

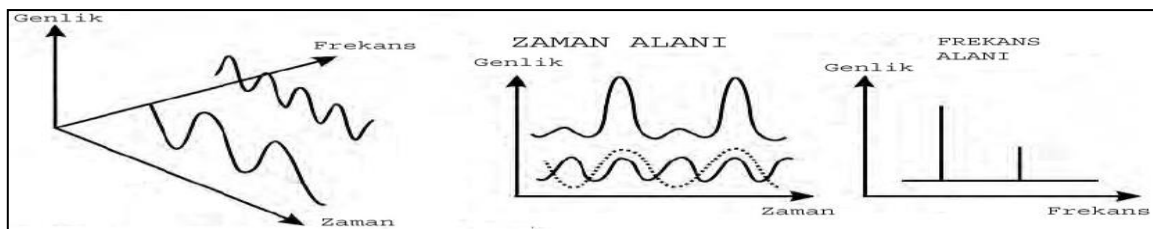
Bu görüntüleme tekniğinde titreşim sinyalleri tam zamanlı olacak şekilde gerçek değerleri ile görüntülenir. Çalışmaya bağlı şartlarda değişimlerin analizinde zaman domeninin kullanımı faydalı olmasına rağmen bu verileri kullanmak kolay değildir. Titreşime sebep olan bütün etkenler toplam olarak hesaplandığı için sistemden alınan anlık deplasman değerinde herhangi bir titreşim kaynağının etkisini bulmak zor olmaktadır. Şekil 3.8’de farklı yapıların dalgaform grafikleri gösterilmiştir.



Şekil 3.8 Dalgaform Grafikleri

3.4.2. Spektrum Görüntüleme (Frekans Bölgesi)

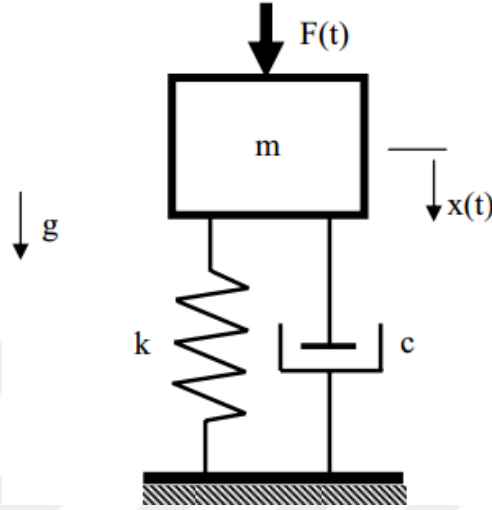
Titreşim yapan bir sistemde ivmeölçerlerin ölçtüğü sinyaller karmaşık yapıdadır. Joseph Forier tarafından geliştirilen FFT tekniğinin temelinde sistemden alınan bu karmaşık sinyallerin basitleştirilmesi vardır. Bu basitleştirme işleminde zaman düzlemindeki eğrilerin frekans düzlemindeki eğrilere dönüştürülmesi sağlanmıştır. Şekil 3.9’de FFT dönüşümü gösterilmiştir.[52]



Şekil 3.9 FFT Dönüşümü (Baykara 2009).

3.4.3. Doğal Frekans Hesabi Ve Fourier Dönüşümü

Bir sistemin modal analizi yapılırken doğal frekans değerleri hesaplanmaktadır. Şekil 3.10’da verilen basit bir kütle – yay sisteminden yola çıkarak sönümsüz ve serbest titreşimler için doğal frekans değerleri hesaplanmıştır [57].



Şekil 3.10 Basit Kütle – Yay Sistemi (Şenveli 2018).

$$M\ddot{U} + C\dot{U} + KU(t) = F(t) \quad (3.11)$$

M : Kütle Matrisi

C : Sönüm Matrisi

K : Rijitlik Matrisi

U : Genelleştirilmiş yer değiştirme vektörü

$\dot{U}$:Yer değiştirme vektörünün birinci türevi (Hız vektörü)

$\ddot{U}$:Yer değiştirme vektörünün ikinci türevi (İvme vektörü)

$F(t)$:Genelleştirilmiş kuvvet vektörü

Sistem sönümsüz kabul edildiği için $C=0$ ve titreşim hareketi serbest kabul edildiği için $F(t)=0$ değerindedir.Bu durumlar göz önüne alındığında denklem:

$$M\ddot{U} + KU(t) = 0 \quad (3.12)$$

(3.12) numaralı homojen denklemin çözümü:

$$U = \varphi \cos(\omega t - \theta) \quad (3.13)$$

$$\ddot{U} = -\varphi \omega^2 \cos(\omega t - \theta) \quad (3.14)$$

Denklem (3.13) ve (3.14), denklem (3.12)'de yerine konulursa:

$$-M \varphi \omega^2 \cos(\omega t - \theta) + K \varphi \cos(\omega t - \theta) = 0 \quad (3.15)$$

$\cos(\omega t - \theta) \neq 0$ durumu için çözüme gidilirse:

$$[-\omega^2 M + K] \varphi = 0 \quad (3.16)$$

eşitliği sağlanır. Bu denklem n adet homojen denkleme ifade eder. Denklem sisteminin determinantının sıfıra eşit olması durumunda bir çözüm vardır.

$$\Delta = |-\omega^2 M + K| = 0 \quad (3.17)$$

(3.17) denklemi karakteristik denklemdir. $\omega^2 = \lambda$ eşitliği ile determinant polinom şeklindedir.

$$\Delta = 0 = a_0 + a_1 \omega^2 + a_2 \omega^4 + a_3 \omega^6 + \dots a_n \omega^{2n} \quad (3.18a)$$

$$\Delta = 0 = a_0 + \sum_{i=1}^n (a_i \lambda^i) \quad (3.18b)$$

ω 'lar sisteme ait doğal frekanslardır. $\omega = \pm\sqrt{\lambda}$ iken $\{\lambda_k\}_{k=1,2,\dots,n}$ veya $\{\pm\omega_k\}_{k=1,2,\dots,n}$ olacak şekilde n adet kök vardır. Herbir doğal frekans değeri denklem (3.16)'yı sağlamaktadır.

Frekans cevap fonksiyonu, herhangi bir sisteme uygulanan kuvvetin sistemde meydana getirdiği değişimdir. Bu değişim deplasman, hız ya da ivme olabilir.

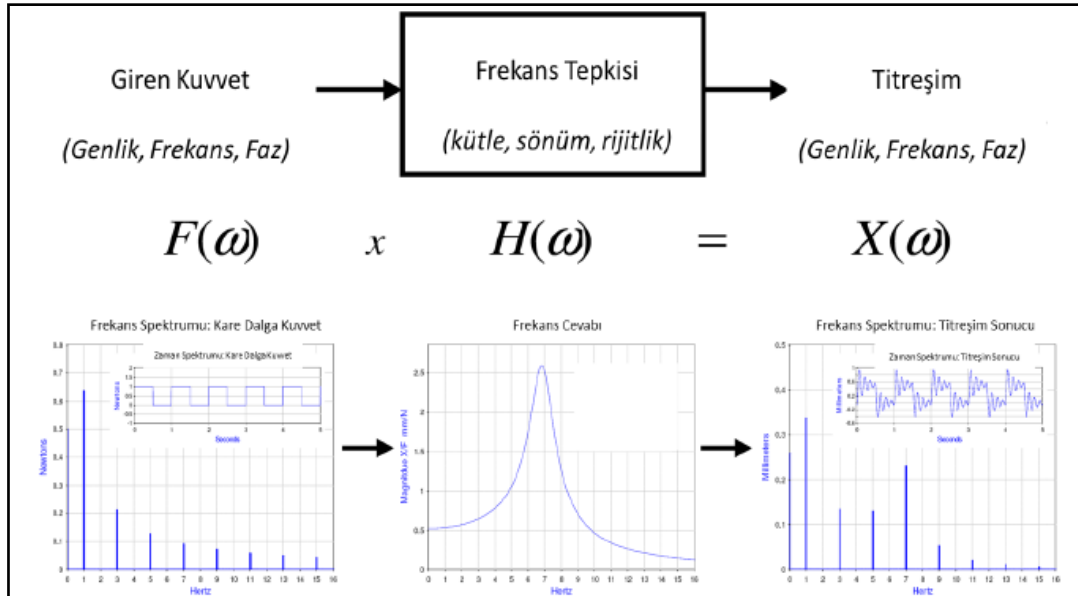
$$H(\omega) = \frac{X(\omega)}{F(\omega)} \quad (3.19)$$

$$\omega = 2\pi f \quad (3.20)$$

Denklem (3.19) Fourier dönüşümleri yapılarak yazılırsa:

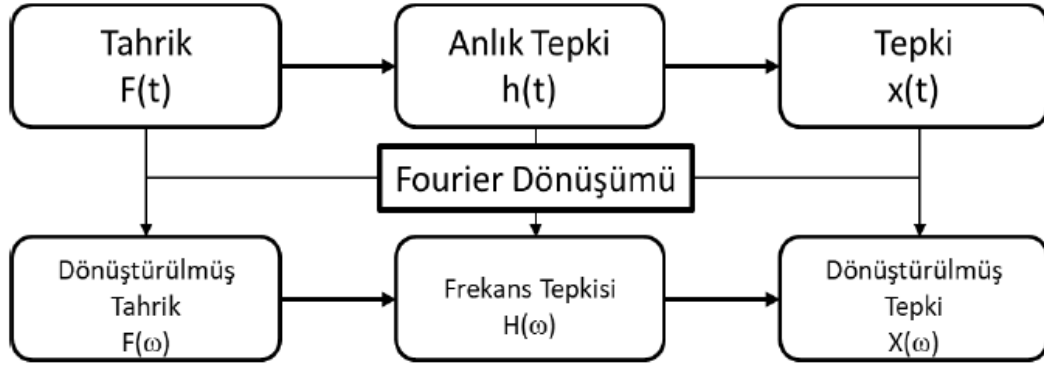
$$H(f) = \frac{X(f)}{F(f)} \quad (3.21)$$

Şekil 3.11'de frekans tepkisi ifadeleri ve cevap fonksiyonu gösterilmiştir.



Şekil 3.11 Frekans cevap fonksiyonu (Şenveli 2018).

Şekil 3.12’de frekans cevap fonksiyonu ile Fourier dönüşümü birlikte gösterilmiştir.



Şekil 3.12 Frekans cevap fonksiyonu ve Fourier dönüşümü (Şenveli 2018).

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-2\pi i f t} dt \quad (3.22)$$

$$F(f) = \int_{-\infty}^{\infty} F(t) e^{-2\pi i f t} dt \quad (3.23)$$

$$H(f) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) e^{-2\pi i f t} dt \quad (3.24)$$

Birim darbe etkisi için bu fonksiyonları açarsak:

$$\begin{aligned} \delta(t-a) &= 0 & t &\neq a \\ \delta(0) &= \infty & t &= a \end{aligned} \quad (3.25)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t-a) dt = 1 \quad (3.26)$$

Denklem (3.26)’da $\delta(t-a)$ ifadesi herhangi bir zaman fonksiyonu ile çarpılırsa $t=a$ anı dışında sonuç sıfır olacaktır.

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(t)\delta(t-a)dt = f(a) \quad 0 < a < \infty \quad (3.27a)$$

$$\hat{F} = Fdt = mdv \quad (3.27b)$$

m kütesine etki eden kuvvet $\hat{F}$, doğal frekansın ω_n olduğu sönümsüz bir sistemin tepkisi:

$$X = \frac{\hat{F}}{m\omega_n} \sin \omega_n t = \hat{F}h(t) \quad (3.28a)$$

$$h(t) = \frac{1}{m\omega_n} \sin \omega_n t \quad (3.28b)$$

$$H(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t)e^{-i\omega t} dt \quad (3.28c)$$

BÖLÜM 4

LİTERATÜR TARAMASI

Yadav vd. Al6061 ve Al5083 alaşımlı 6 mm kalınlığındaki levhaları sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirmişlerdir. Araştırmanın amacı, kaynak sırasında malzemenin ilerleyen tarafını değiştirerek ve daha yüksek kaynak mukavemeti için takım dönüş hızı ve çapraz ilerleme gibi çeşitli işlem parametrelerini optimize ederek mekanik özellikleri geliştirmektir. Kaynak işlemi parametrelerinin kaynak bağlantısının mukavemeti üzerindeki etkisi çekme testi ile değerlendirilmiştir. Takım dönüş hızları 500 ila 1000 rpm arasında ve takım hareket hızları 40 ila 125 mm/dak arasında alınmıştır. Maksimum çekme mukavemeti 98 Mpa bulunmuştur. Al6061 ilerleyen tarafta kaldığında 90 Mpa , Al5083 kaynak bağlantısı sırasında 1000 rpm ve 50 mm/dak'da ilerleyen tarafta kaldığında 32 Mpa sonuçları alınmıştır. Kaynak sırasında diğer işlem parametrelerini sabit tutarken, malzemelerin ilerleyen taraflarının bağlantı mukavemeti için önemli bir rol oynadığı gözlemlenmiştir [58].

Heirari vd. Yaptıkları çalışmada Al5083 alaşımı ile çeşitli işlem parametreleri altında sürtünme karıştırma kaynağı (SKK) gerçekleştirmiş ve kaynak ortamının (su ve hava) mikro yapı ve mekanik özelliklere etkisi araştırılmışlardır. Sonuçlar, su ortamının yüksek bir soğuma hızına yol açtığını, bu nedenle tanelerin büyümesi için yeterli zamanın kalmadığını , 600 Rpm dönme hızı ve kaynak ile su soğutmalı numunede ısıdan etkilenen bölgenin (IEB) kaybolduğunu göstermiştir. Ayrıca, karıştırma bölgesinde (DKB) yüksek sıcaklık değerlerinin varlığı, mikro yapıda değişikliklere neden olmuştur, bu nedenle tanelerin ve çökeltilerin boyutu her numune için tamamen farklı olduğu görülmüştür. Hava soğutmalı kaynaklı numune ile karşılaştırıldığında, su soğutmalı numunelerin çekme mukavemetindeki artış, ince taneli bir yapının neden olduğu karıştırma bölgesindeki sertliğin artmasından kaynaklanabilir. Ayrıca, su ile soğutulan numunelerin karıştırma bölgesindeki sertlik değerinin, havada soğutulan numunelerinkinden çok daha yüksek olduğunu ortaya çıkarmıştır. Hava ve su soğutmalı numuneler için aynı kaynak parametreleri dikkate alındığında (takım dönme hızı 600 rpm ve

takım ilerleme hızı 30 mm/dak), karıştırma bölgesinde sertlik değerinin %25 arttığı görülmüştür [59].

Jia vd. AA6061/AA5083 alüminyum alaşımlarının sürtünme karıştırma kaynağının (SKK) kaynak parametreleri optimize edilmiş ve her bir kaynak parametresinin önemi belirlenmiştir. Kaynak parametrelerinin kaynak kalitesi üzerindeki etkisi, kaynaklı bağlantıların mekanik özellikleri test edilerek elde edilmiştir. Kaynak parametrelerinin malzeme karışımı üzerindeki etkileri metalografi ve mikrosertlik ile incelenmiştir. Eksenel kuvvetin veri toplama sistemi ve takım torku tasarlanmış, veriler ile kaynak parametreleri arasındaki ilişkiler analiz edilmiştir. Sonuçlar, malzemelerin yeterince karıştırılmadığını ve dolayısıyla daha yüksek hareket hızlarında boşluk tipi kusurların oluştuğunu göstermiştir. Optimum kaynak parametreleri, yani dönme hızı, ilerleme hızı ve dalma derinliği sırasıyla 2400 rpm, 1200 mm/dak ve 0.25 mm olduğunu tespit etmişlerdir [60].

Elataharasan vd yaptıkları araştırmada, tepki yüzeyi yöntemini kullanan deney tasarımı, doğrusal olmayan ve çok duyarlı optimizasyon teknikleri kullanarak optimize edilmiş kaynak yönteminin parametrelerini tahmin etmeye çalışmışlardır. Bu teknik, matematiksel model olarak geliştirilen deneysel gözlemler için uygulamalar kullanılırken, optimal giriş ve çıkış parametreleri kullanarak kaynak standartlarına ulaşmayı amaçlamaktadır. Hatasız kaynağın optimal değerini geliştirmek ve bulmak için kullanılan ANOVA modeline referansla bir doğrulama sürecini kullanmıştır. Modelin mekanik özellikleri arasındaki ilişki için çok değişkenli bir matematiksel analiz geliştirmiş ve bir taramalı elektron mikroskobu kullanarak mikroyapı, tünel oluşum kusurları, boşluk, dalma gibi baskın sorunları ortaya çıkarılmıştır [61].

Shine vd yaptıkları çalışmada, daha az kusurla güçlü kaynaklar üretebilen optimum takım karıştırıcı uç profilini bulmak için AA5083-H111 ve AA6061-T6 alüminyum alaşımları arasında sürtünme karıştırma kaynağı yapmışlar ve kaynakların makroyapısal ve mekanik özellikleri araştırmışlardır. Bu araştırmada kullanılan karıştırıcı uç profilleri Düz Kare, Dişli Silindir ve Konik Silindir'dir. Optik mikroskop kullanılarak çeşitli bölgelerin mikroyapısal analizleri gözlemlenmiştir. Üniversal Test Makinesi, kaynakların çekme mukavemetini araştırmıştır ve vickers mikrosertlik makinesi kullanılarak kaynağın enine yönü boyunca çeşitli bölgelerde sertlik çalışmaları yapılmıştır. Deneysel sonuçlardan, düz kare karıştırıcı uç diğerlerine kıyasla kaynak bölgesinde 101 Hv1'lik daha yüksek sertlik değerleri ve 187.47

Mpa'lık daha yüksek çekme mukavemeti ve %8.5'lik maksimum uzama gösterdiği görülmüştür [62].

Kumar vd.yaptıkları çalışmada, işlem parametrelerinin malzeme akışı, mekanik özellikler ve benzer olmayan malzemelerin korozyon davranışı üzerindeki rolünü araştırmışlardır. Mikroyapısal analiz sonucu alt tabaka genişliği ve karıştırma bölgesi, değişen işlem parametreleriyle önemli ölçüde değiştirilmiştir. Daha yüksek dönme hızlarının daha iyi karışmayı ve gelişmiş mekanik özellikleri desteklediği anlaşılmıştır. Çentik çekme mukavemeti değerleri, malzemelerin birbirine karıştırılması ile doğrusal olduğu görülmüştür.En yüksek çentik çekme mukavemeti değeri 1400 rpm ve 60 mm/dak'da elde edilmiştir.Daha yüksek dönme hızlarında dikkate değer derecede malzeme karışması ve intermetaliklerin parçalanması daha iyi korozyon direnci ile sonuçlanmıştır.Malzeme akışının bağlantı özellikleri üzerinde önemli bir etkisi olduğu görülmüştür [63].

Kumar vd. AA6061'in farklı soğutma ortamlarındaki (hava, sıvı azot ve su) alaşımları, korozyon direncini ve mekanik özellikleri geliştirebilmek için alternatif bir yöntem olarak başarıyla kullanmışlardır.Mikro yapının evrimi, korozyon davranışı ve mekanik özellikleri sürtünme karıştırma kaynaklı bağlantılar, optik mikroskopi (OM), elektron geri saçılımlı kırınım, taramalı elektron mikroskobu, elektrokimyasal iş istasyonu ve evrensel test makinesi kullanılarak incelenmiştir.Yüksek ısı bölge ve ısıdan etkilenen bölgelerin tane boyutu, harici soğutma ortamının kullanılmasıyla azaltılmıştır.Elektron geri saçılımlı kırınım sonuçlarına göre hava soğutmalı sistemlerde tane boyutunun SKK, nitrojen soğutmalı SKKve su soğutmalı SKK ile bulunan değerler $7.6 \mu m$, $4.5 \mu m$ ve $3.2 \mu m$ 'dur.Su soğutmalı SKK kaynak bölgesinde yüksek açılı tane sınırlarının daha büyük olduğu görülmüştür.Soğutma ortamı kullanılarak bağlantılarda oluşan intermetalikler,hava soğutmalı numunelere kıyasla daha incedir. Korozyon davranışı incelendiğinde bölge soğutma ortamından etkilenirken, potansiyo dinamik polarizasyon sonuçları su soğutmalı SKK'da kaynak bölgesindeki intermetaliklerin daha ince boyutu nedeniyle mükemmel korozyon direnci gösterdiği görülmüştür.Kaynak bölgesinde minimum sertlik görülmüştür.Su soğutmalı yapılan SKK'da %96'lık bir kaynak verimi ile maksimum akma mukavemeti elde edilmiştir [64].

Nhan vd. yaptıkları çalışmada sürtünme karıştırma kaynağı ile kaynaklanan, 3 mm kalınlığındaki AA5083 alüminyum alaşımlı levhanın ve kaynak parametrelerinin etkisi test edilmiştir. Takım devri ω (dev/dak) ve takım ilerleme hızı v (mm/dak) kaynağın mikro yapısı

ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Genel olarak, önemli kusurlar olmaksızın çok iyi kalitede elde edilebileceği görülmüştür. Kaynak bölgesindeki tane yapısı önemli ölçüde değişmektedir. Kaynak merkezindeki tane yapısı ana metalden çok daha ince olduğu görülmüştür. Kaynak bölgesindeki sertlik, ana malzemeye kıyasla önemli ölçüde azalır. Deneysel sonuçlar, artan kaynak hızı ile kaynağın çekme mukavemetinin arttığını göstermektedir. Kaynak, 1.40, 1.75 ve 3.33 devir/mm kaynak rejimlerinde %85'in üzerinde (ana metale kıyasla) bir çekme mukavemetine ulaşılmıştır.[65]

Devalah vd. sürtünme karıştırma kaynaklı AA5083 ve AA6061 alüminyum alaşımının akma dayanımının mekanik özellikleri ve uzama %'si gibi takım dönme hızı, kaynak hızı ve takım eğim açısı gibi sürtünme karıştırma kaynağı (SKK) parametrelerinin etkisi incelenmiştir. Deneyler, Taguchi parametrik tasarım kavramlarına göre yapıldı ve çeşitli proses parametreleri kombinasyonlarının etkisini incelemek için bir L9 ortogonal dizisi kullanılmıştır. Optimum seviyeleri bulmak ve her bir proses parametresinin önemini belirlemek için istatistiksel optimizasyon tekniği olan ANOVA kullanılmıştır. Sonuçlar, takım dönüş hızının (RPM) ve kaynak hızının en önemli faktörler olduğunu göstermektedir. Sürtünme karıştırma kaynaklı alüminyum alaşımının mekanik özelliklerine karar vermede takım eğim açısı takip eder. Ayrıca, çeşitli proses değişkenleri ve mekanik özellikler arasındaki ilişkiyi kurmak için matematiksel modeller geliştirilmiştir. Ortaya çıkan optimum işlem parametreleri, 1120 rpm'de dönüş hızı, 70 mm/dak'da kaynak hızı ve 2'de takım eğim açısıdır.[66]

Literatürde SKK ile farklı malzeme çiftlerinin birleştirildiği ve işlem parametrelerinin kaynak kalitesi üzerine etkilerinin incelendiği belirlenmiştir. Kaynak kalitesinin belirlenmesinde çekme testi kullanılmaktadır. Ayrıca mikroyapı incelemeleri ve kaynak bölgesindeki sertlik dağılımlarının incelendiği belirlenmiştir. Yapılan bu çalışmada literatürden farklı olarak çekme testinin yanında kaynaklı numunelerin titreşime karşı verdikleri tepkiyi görebilmek için gezici çekiç darbe testi yapılarak elde edilen veriler anlamlandırılmaya çalışılmıştır

BÖLÜM 5

MATERYAL VE YÖNTEM

5.1. MATERYAL

5.1.1. Kaynak Yapılacak Malzeme

Yapılan çalışmada deneysel olarak, Sürtünme Karıştırma Kaynağı yöntemi ile birleştirilecek levhalar için 5 mm kalınlıklarda, AL-5083-H111 ve AL-6061-T6 alaşımlı alüminyum malzemeler kullanılmıştır. Alüminyum levhaların boyutları 5x100x200 mm olup Ankara Aydınlar Makine-Matal San. ve Tic. Ltd. Şti'den tedarik edilmiştir. Al-5083-H111 ve Al-6061-T6 alaşımlarına ait kimyasal özellikler çizelge 5.1 mekanik özellikler ise Çizelge 5.2'de gösterilmiştir. Birleştirilmek istenilen parçaların alın yüzeylerinden kir, pas ve oksit tabakası temizlenmiştir.

Çizelge 5.1 Al5083-H111 ve Al6061-T6 Kimyasal Özellikleri

Malzeme %	Fe %	Mn %	Mg %	Cu %	Zn %	Ti %	Si %	Cr %	Diğer %
AL5083-H111	0,4	0,4-1	4,0-4,9	0,1	0,25	0,15	0,4	0,05-0,25	0,05
AL6061-T6	0,7	0,15	0,8-0,12	0,15-0,4	0,25	0,15	0,4-0,8	0,04-0,35	0,15

Çizelge 5.2 Al5083-H111 ve Al6061-T6 Mekanik Özellikleri

Malzeme	Akma Gerilmesi (Mpa)	Çekme Gerilmesi (Mpa)	Uzama %50 min-max	Sertlik (Vickers)
5083 H111	125-145	275-300	22	91
6061-T6	240-270	260-310	20	107

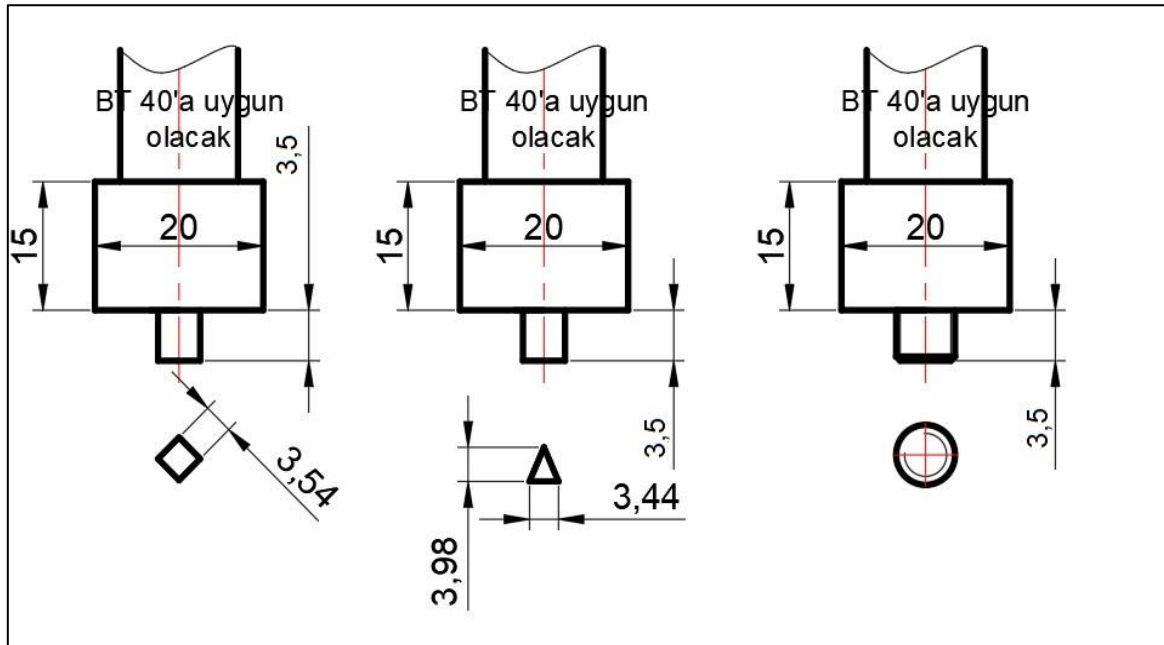
5.1.2. Karıştırıcı Uç İmalatı Ve Karıştırıcı Ucun Özellikleri

Aluminyum levhaların birleştirilmesi için karıştırıcı uç imalatında ledeburitik %12 kromlu soğuk iş takım çeliği olan 2379 takım çeliği kullanılmıştır. Bu çeliğin yüksek aşınma dayanımı, yüksek boyutsal kararlılığı ve nitrasyon kabiliyeti bunların yanında yüksek tokluk, basma, dayanım, sertlik ve sertleşebilirlik, iyi işlenebilirlik, ısıl işlem esnasında boyutsal kararlılık ve homojen bir içyapı özelliklerine sahip olduğu bilinmektedir. 2379 takım çeliğinin kimyasal özellikleri Çizelge 5.3'te gösterilmiştir.

Çizelge 5.3 2379 Takım Çeliği Kimyasal Özellikleri

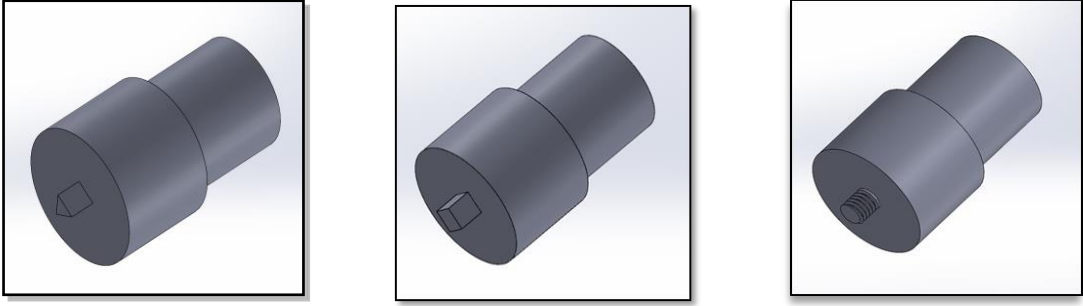
2379 Takım Çeliği	C	Cr	Mo	V	Si
Kimyasal Analiz %	1,55	12	0,7	1	0,4

Karıştırıcı uç geometrisi tasarımı Şekil 5.1'de ki gibi yapılarak, İmalatı Ankara Zümre Makina İmalat Sanayi Dış. Tic. Ltd. Şti. tarafından gerçekleştirilmiştir. Karıştırıcı uçlar 2379 takım çeliğinden imal ettirilerek aşınmayı azaltmak için ısıl işlem uygulanmıştır. Şekil 5.1'de İmalatı yaptırılan kare, üçgen ve vida geometrisine sahip karıştırıcı uçların tasarımı gösterilmiştir.



Şekil 5.1 Karıştırıcı Uç Tasarımları

Şekil 5. 2’de bilgisayar ortamında tasarlanmış olan kare karıştırıcı ucun katı model hali gösterilmiştir.



Şekil 5.2 Üçgen-Kare-Vida Karıştırıcı Uç Katı Modelleri

Şekil 5.3’de imalatı tamamlanan karıştırıcı uçlar gösterilmiştir.

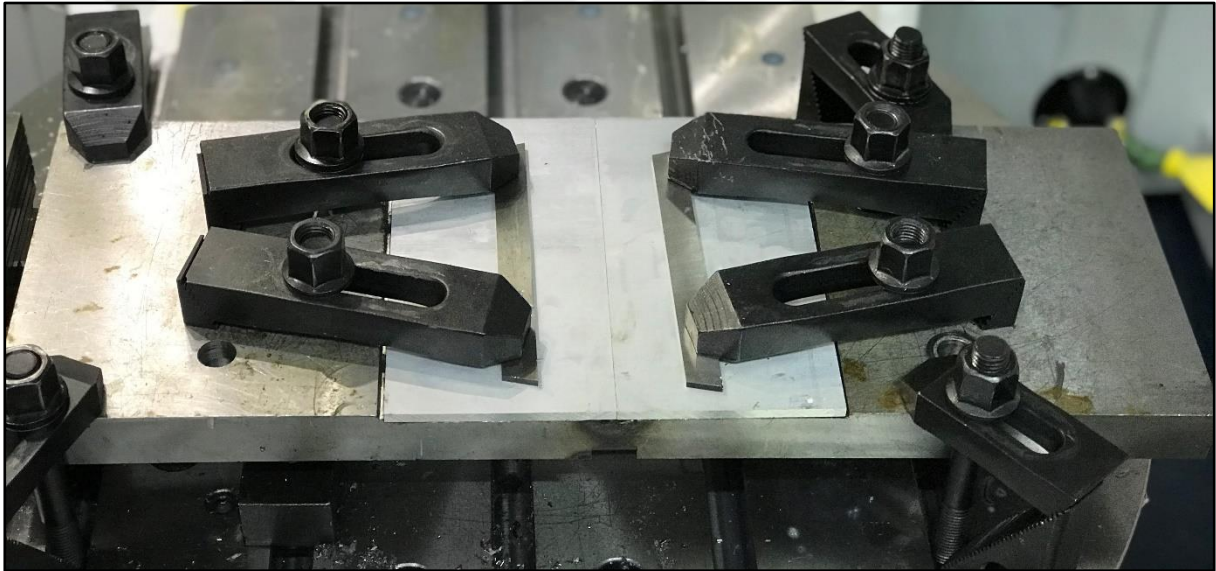


Şekil 5.3 Üçgen-Kare-Vida Uç Geometrisinde İmal Edilen Karıştırıcı Uçlar

Sürtünme Karıştırma Kaynağının yapılabilmesi için gerekli olan ekipman; karıştırıcı uç, omuz ve gövde olmak üzere üç bölümden oluşur. Farklı geometrilerdeki uçların kaynak kalitesine etkisi araştırılmak istendiği için üç farklı geometride karıştırıcı uç imalatı tasarlanmıştır. Karıştırıcı ucun omuz bölümü alın altına birleştirme yapıldığı için her iki levhanın da üst yüzeyine temas eder. Bunun sonucunda sürtünme alanını genişletmekte ve kaynak için gerekli ısı oluşmaktadır. Omuz kısmı aynı zamanda kaynak dikişinin kalınlığını da belirlemektedir. Gövde ise tezgaha bağlanan bölümdür. Konu ile ilgili daha önce önce yapılan çalışmalar göz önünde bulundurularak, karıştırıcı uç tasarımı yapılırken 5 mm kalınlığında ki alüminyum levhaya 3.5 mm karıştırıcı ucun 1 mm ise karıştırıcı uç omzunun gireceği düşünülerek takıma levha üzerinde 4.5 mm derinlikle çalışma alanı sağlanarak uç tasarımları yapılmıştır.

5.1.3. Birleştirilecek Levhaları Bağlama Kalıbı

Sürtünme Karıştırma Kaynağı yöntemi ile birleştirilecek olan alüminyum levhaların, yapılacak kaynakta takımın ilerleme yönüne paralel ve sağlam bağlanması kaynak kalitesi için oldukça önem arz etmektedir. Levhaların hareketini engellemek ve kaynak işleminin gerçekleşmesine engel olacak herhangi bir sorunun önüne geçilmesi için Şekil 5.4’de gösterilen bağlama kalıbı Ankara Zümre Makina İmalat Sanayi Dış. Tic. Ltd. Şti’ne tasarımı yapılarak imal ettirilmiştir. Bağlama kalıbı hareket etmeyecek şekilde tablaya civatalar aracılığı ile sabitlenmiştir. Kaynağı yapılan parçaların kolayca alınabilmesi için yine kalıp üzerinde ki civatalı bağlantılardan faydalanılarak pabuçlar aracılığı ile parçaların kaynak esnasında hareketleri engellenecek şekilde sabitlenmişlerdir.



Şekil 5.4 Bağlama Kalıbı ve Levhaların Bağlanma Şekli

5.1.4. Kaynak İşleminde Kullanılan Tezgah

Sürtünme karıştırma kaynağı işlemi için Bülent Ecevit Üniversitesi Makine Mühendisliği Tekno Laboratuvarında bulunan Şekil 5.5’de gösterilen 22 KV gücünde net ağırlığı 6500 kg olan Spinner U-630 Compact CNC 5 eksen işleme merkezi tezgahı kullanılmıştır.



Şekil 5.5 Spinner U-630 Compact CNC 5 Eksen İşleme Merkezi
URL-1 < <http://www.spinner.com.tr/>>

5.1.5. Deney İçin Belirlenen Kaynak Parametreleri

Deney için kaynak parametreleri olarak karıştırıcı uç geometrisi olarak üçgen, kare ve vida uçlar, takım dönme hızı olarak 750,1250 ve 1750 Rpm, takım ilerleme hızı olarak ise 50mm/dak ve 100/mm dakika seçilmiştir. Bu parametreler ışığında üçgen karıştırıcı uç ile 6, kare karıştırıcı uç ile 6 vida karıştırıcı uç ile 6 deney olmak üzere toplam 18 deneyden oluşan deney şeması tasarlanmıştır. Deneyler üçer tekrarlı olarak yapılmış ve bulunan sonuçların ortalaması alınmıştır.

Farklı kaynak parametreleri kullanılarak yapılan ve bu parametrelere bağlı ortaya çıkan sonuçların yorumlanmasında kolaylık sağlaması ve herhangi bir karışıklığa neden olmaması amacıyla, birleştirilen numuneleri tanımlamak için kaynak parametreleri kodlanarak tablo şeklinde gösterilmiştir. Bu kodlamada şekil 5.6 gösterildiği gibi karıştırıcı uç geometrisi, takım dönme hızı, takım ilerleme hızı baz alınmıştır. Karıştırıcı uç isim kodlamasında uç geometrilerinin İngilizce dilindeki isimleri olan Triangle (Üçgen)-TR, Square(Kare)-SQ, Screw(Vida)-SC kısaltmaları yapılmıştır.

Deney No	Karıştırıcı Uç	Takım Dönme Hızı (dev/dak)	Takım İlerleme Hızı (mm/dak)	Numune Kod
1	Üçgen (Triangle)	750	50	TR/750/50
2			100	TR/750/100
3		1250	50	TR/1250/50
4			100	TR/1250/100
5		1750	50	TR/1750/50
6			100	TR/1750/100
7	Kare (Square)	750	50	SQ/750/50
8			100	SQ/750/100
9		1250	50	SQ/1250/50
10			100	SQ/1250/100
11		1750	50	SQ/1750/50
12			100	SQ/1750/100
13	Vida (Screw)	750	50	SC/750/50
14			100	SC/750/100
15		1250	50	SC/1250/50
16			100	SC/1250/100
17		1750	50	SC/1750/50
18			100	SC/1750/100

Şekil 5.6 SKK için Kaynak Parametreleri Kodlamaları ve Deney Şema Planlaması

5.1.6. Birleştirme Öncesi Hazırlıklar

Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile kaynak yapılacak olan AL-5083 ve AL-6061, 5mm kalınlığında levhalar Şekil 5.6'daki gibi alın altına getirilmiş ve hareket etmeyecek şekilde pabuçlarla bağlama kalıbına sabitlenmiştir. Sürtünme karıştırma kaynağında takım tarafından levhalara basınç uygulandığı için levhaların altında kaynak sağlığını etkileyebilecek çapak vb. materyallerin temizlenmesi kaynağın sağlıklı bir şekilde yapılabilmesi açısından önem

taşımaktadır. Bu doğrultuda levhaların yerleştirildiği alanın temizliğine önem gösterilmiş her deneyden sonra bağlama kalıbı alanı temizlenerek bir sonraki deneye hazır hale getirilmiştir. Yine aynı doğrultuda levhalar alın alına getirildikten sonra kaynak işlemi başlayacağı için levhaların sabitlenmesi ve herhangi bir şekilde hareket etmemesi azami önem taşımaktadır. Şekil 5.7’de sürtünme karıştırma kaynağı öncesi görünüm gösterilmiştir.



Şekil 5.7 Sürtünme Karıştırma Kaynağı Öncesi Görünüm

5.2. YÖNTEM

5.2.1. Kaynak İşlemi

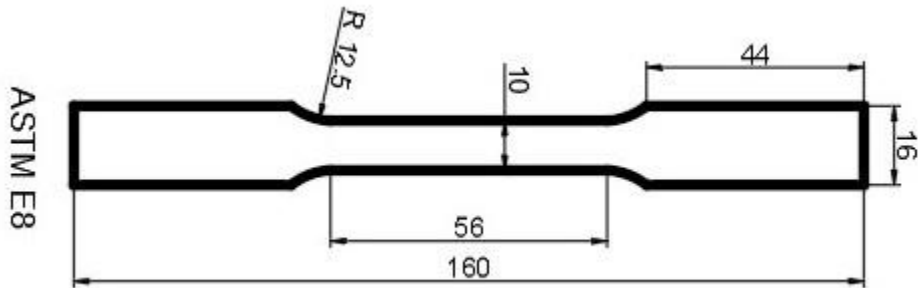
Karıştırıcı uç başlangıç noktasından 10 mm ileride (karıştırıcı uç omuz çapı 20 mm) malzemelere daldırılarak dönme halinde iken dalma noktasında yaklaşık 10 saniye bekletilip yeterli ısınma sağlandıktan ve bulunduğu konumdan alüminyum eriyikler oluşmaya başladıktan sonra ilerleme komutu verilerek kaynak işlemleri gerçekleştirilmiştir. Takım dönme yönü dolayısıyla karıştırıcı uç dönme yönü saat yönündedir. Şekil 5.8’de AL-5083 ve AL-6061 levhaların kaynak sonrası görünümü, takım ilerleme komutu verilmeden önceki süreçte oluşan eriyik, kaynak başlangıç noktası-karıştırıcı uç batma noktası, kaynak bitim noktası-karıştırıcı ucun çıktığı nokta ve takım ilerleme yönü gösterilmiştir.



Şekil 5.8 Kaynak Sonrası Birleştirilmiş Levhaların Görünümü

5.2.2. Çekme Deneyi

Kaynak performansı değerlendirmesi yapabilmek amacıyla çekme testleri yapılmıştır. Çekme numuneleri kaynak yönüne dik olarak ASTM E8 standardına uygun olarak şekil 5.9’da görüldüğü gibi tasarlanmıştır.

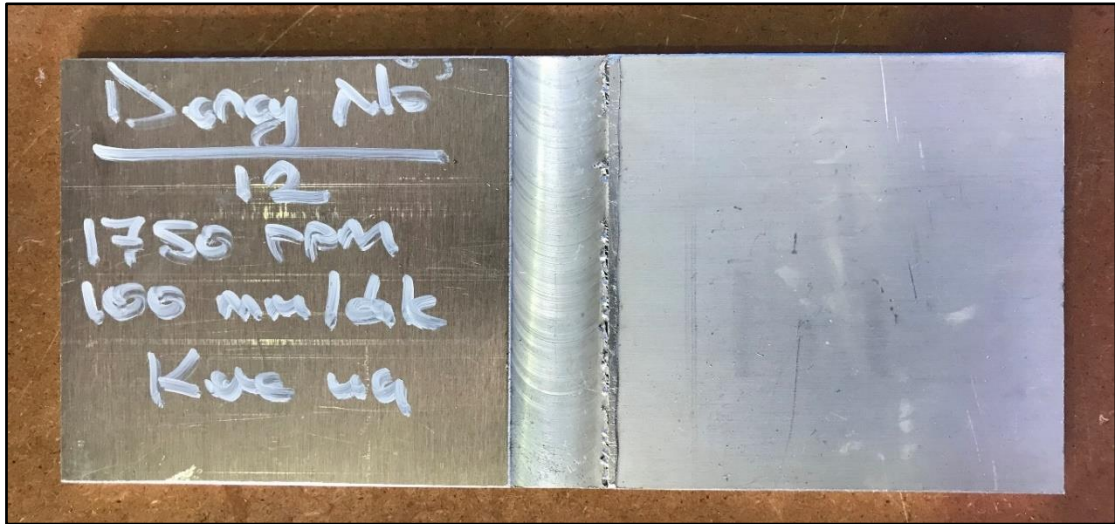


Şekil 5.9 ASTM E8 Standartlarına Göre Çekme Çubuğu Tasarımı

Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile şekil 5.6’da gösterilen deney şemasına uygun olarak 18 adet kaynaklı numune elde edilmiştir. Şekil 5.8’de gösterilen 200*200 mm boyutundaki numunelerin ideal çekme değerlerini standart olarak hesaplanması ve gezici çekiç darbe testine uygun hale getirilmesi amacı ile başlangıç ve bitiş noktaları yönünde 50’şer milimetre piyasadan kesim hizmeti alınmak suretiyle şekil 5.10’da ki Senfeng Fiber Lazer kesim makinesi kullanılarak şekil 5.11’de görüldüğü gibi 100*200 mm boyutlarına getirilmiştir.

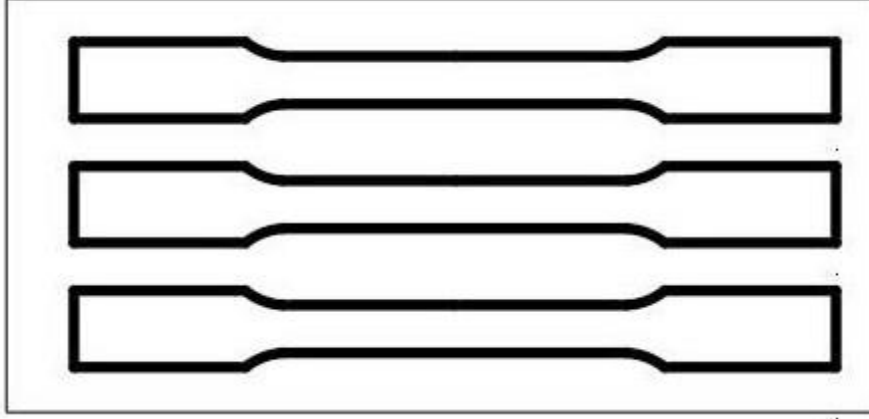


Şekil 5.10 1500W Senfeng Fiber Lazer Kesim Cihazı



Şekil 5.11 100*200 mm Boyutlarında Kesilmiş Kaynaklı Numune

Şekil 5.11’de gösterilen ölçülerde lazer ile kesilen kaynaklı numuneler için şekil 5.9’da gösterilen ASTM E-8 standartlarında tasarlanan çekme çubuğu kesim tasarımı kullanılarak şekil 5.10’da gösterilen Senfeng Fiber Lazer Kesim Cihazı ile şekil 5.12’de tasarıma uygun olarak her bir numuneden 3 çekme çubuğu çıkacak şekilde kesim işlemi yapılmış ve toplamda 36 çekme çubuğu elde edilmiştir.



Şekil 5.12 ASTM E-8 Standartlarında Çekme Çubuğu Tasarımı

ASTM E-8 standartlarında lazer ile kesimi yapılan çekme çubuk örnekleri şekil 5.13’de gösterilmiştir.



Şekil 5.13 ASTM E-8 Standartlarında Lazer ile Kesimi Yapılan Çekme Çubukları

Çekme testleri Karabük Üniversite Teknoloji Fakültesi - İmalat Mühendisliği Mekanik Testler Laboratuvarında, BMT - 5E SERİSİ 50 KN kapasiteli şekil 5.14 ve şekil 5.15’de gösterilen servo elektromekanik universal test cihazı ile yapılmıştır.



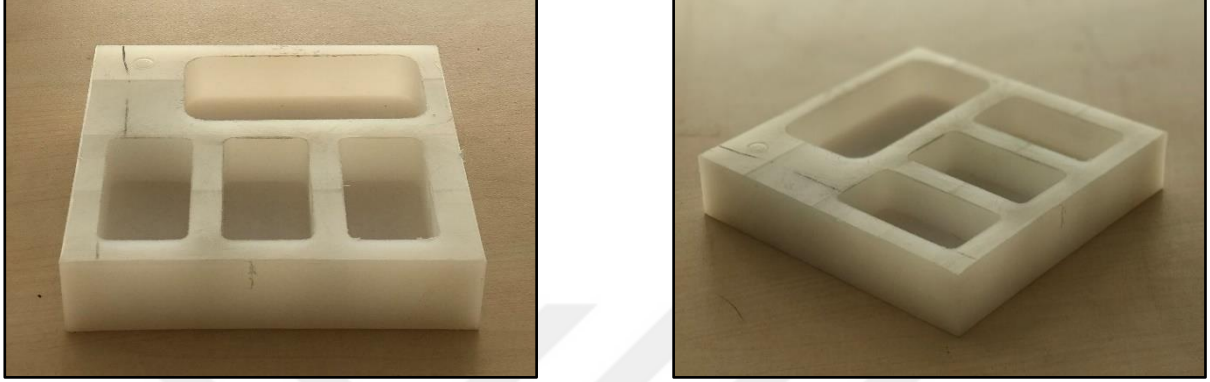
Şekil 5.14 BMT-5E Serisi 50 KN Kapasiteli Servo Elektromekanik Universal Test Cihazı



Şekil 5.15 BMT-5E Serisi 50 KN Test Cihazı Çekme Çeneleri

5.2.3. Mikrosertlik İncelemeleri

Mikrosertlik incelemesi yapılmak üzere herbiri numune için daha önce giriş ve çıkış noktalarından kesilen parçaların kaynak bölgesinden 40 mm lik kesit alınarak bakalit alımı için kalıp tasarımı yapılmıştır. (Şekil 5.16)



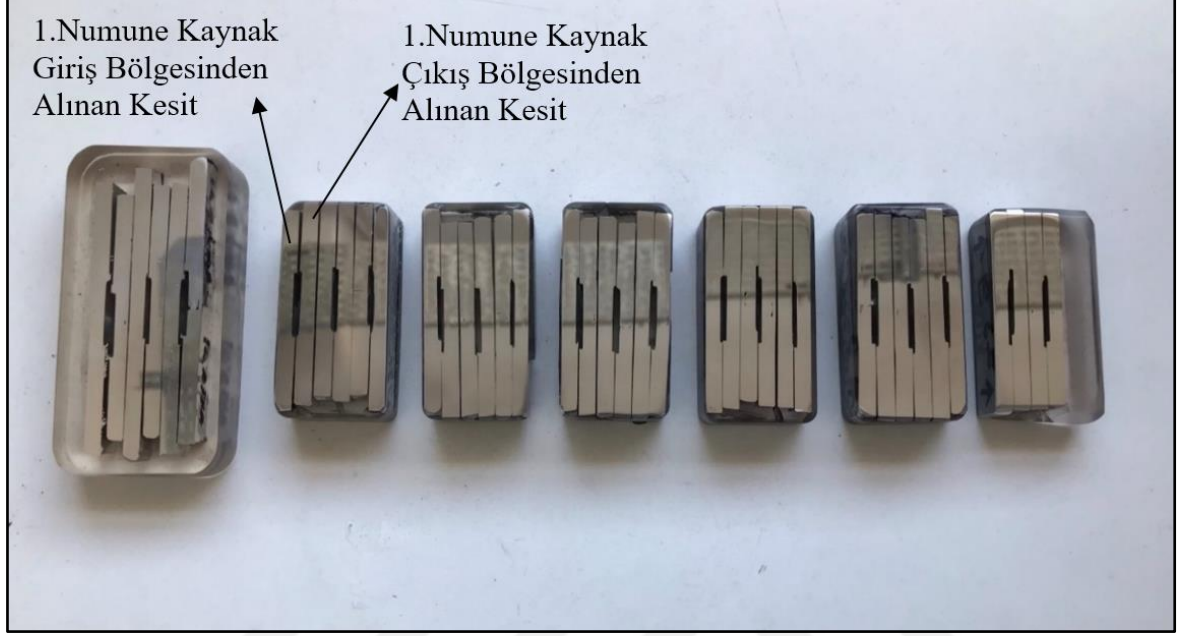
Şekil 5.16 Bakalit Alımı İçin Üretilen Kabin 1.ve 2. Görünümü

Bakalite alınan numuneler 1 gün boyunca bekletilmiş ve kalıptan çıkarıldıktan şekil 5.17’da gösterilen Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Teknolab Malzeme Mühendisliği Labaratuarında bulunan MATKON FORCIPOL 2V isimli zımpara makinesinde mikrosertlik uygulanacak yüzeyleri 400 ve 1200 numaralı zımparalar ile 300 devir/dakikada zımparalanmış ve zımpara sonrası 8 μ m ve 1 μ m çuha ile parlatılmıştır.



Şekil 5.17 Matkon Forcipol 2V Zımpara Makinesi

Şekil 5.18’de parlatılan numuneler gösterilmiştir. Şekil 5.19’da gösterilen Karabük Üniversitesi İmalat Mühendisliği Bölümü laboratuvarında bulunan SHIMADZU, HMV-2T isimli Vicker's mikrosertlik test makinesi makine ile 1mm aralıklarla 15 saniye boyunca 4.908 N yük uygulanarak kaynak bölgesinin sertliği ölçülmüştür.



Şekil 5.18 Mikrosertlik İçin Parlatılan Numunelerin Görüntüsü

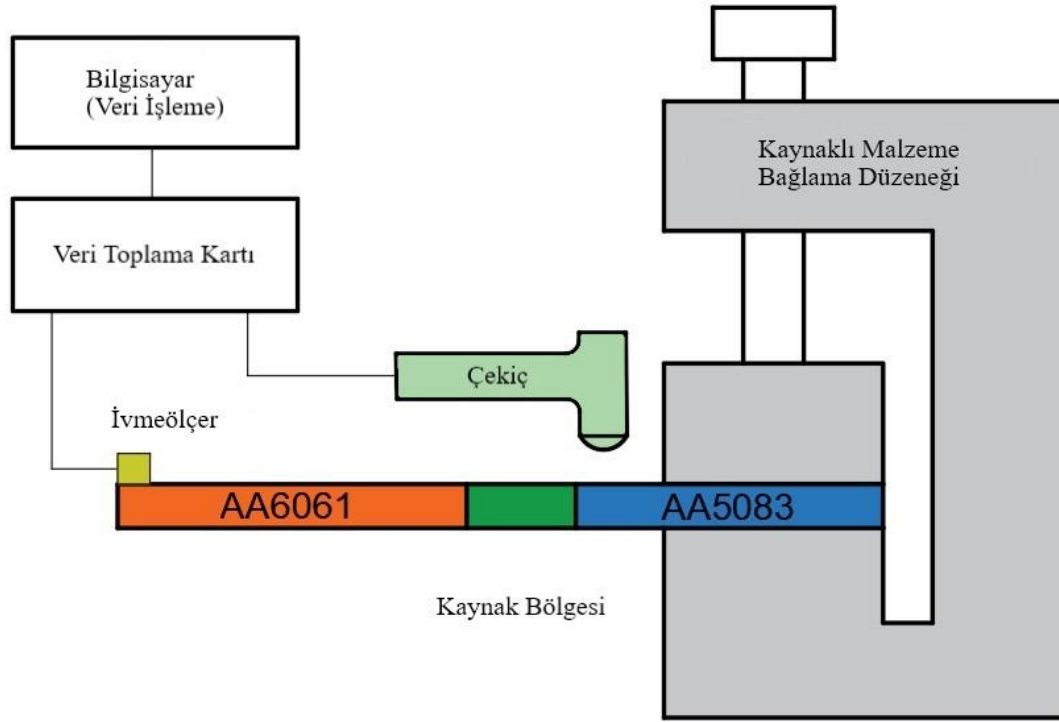


Şekil 5.19 Shimadzu, HMV-2T Vicker's Mikrosertlik Ölçüm Cihazı

Mikrosertlik deneyleri yapılırken karıştırıcı uç geometrilerine göre çekme gerilmeleri göz önünde bulundurularak her bir karıştırıcı geometrisinden en yüksek ve en düşük çekme gerilmesi değerine sahip olan numuneler alınarak mikrosertlik deneyleri gerçekleştirilmiştir. Toplamda 6 adet mikrosertlik deneyi yapılmıştır.

5.2.4. Modal Analiz

“Gezici Çekiç Darbe Testi” modal analizde sıklıkla kullanılmaktadır. Sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilen numunelerin modal analiz yöntemiyle doğal frekans değerleri ve mod şekillerinin elde edilmesi amacı ile şekil 5.20’de gösterilen modal analiz deney düzeneği tasarlanarak şekil 5.23’de gösterildiği gibi deney düzeneği kurulmuştur.



Şekil 5.20 Modal Analiz Deney Düzeneği Tasarımı

Deney düzeneğinde kullanılan ekipmanları:

- Bilgisayar (nCode ve Infield) (Şekil 5.21)
- eDAQ veri toplayıcı (Şekil 5.21)
- Dytran 3093B ivmeölçer (Şekil 5.22)
- Dynapulse darbe çekici (Şekil 5.22)



(a)



(b)

Şekil 5.21 (a) Bilgisayar (nCode ve Infield) - (b) eDAQ veri toplayıcı



(a)

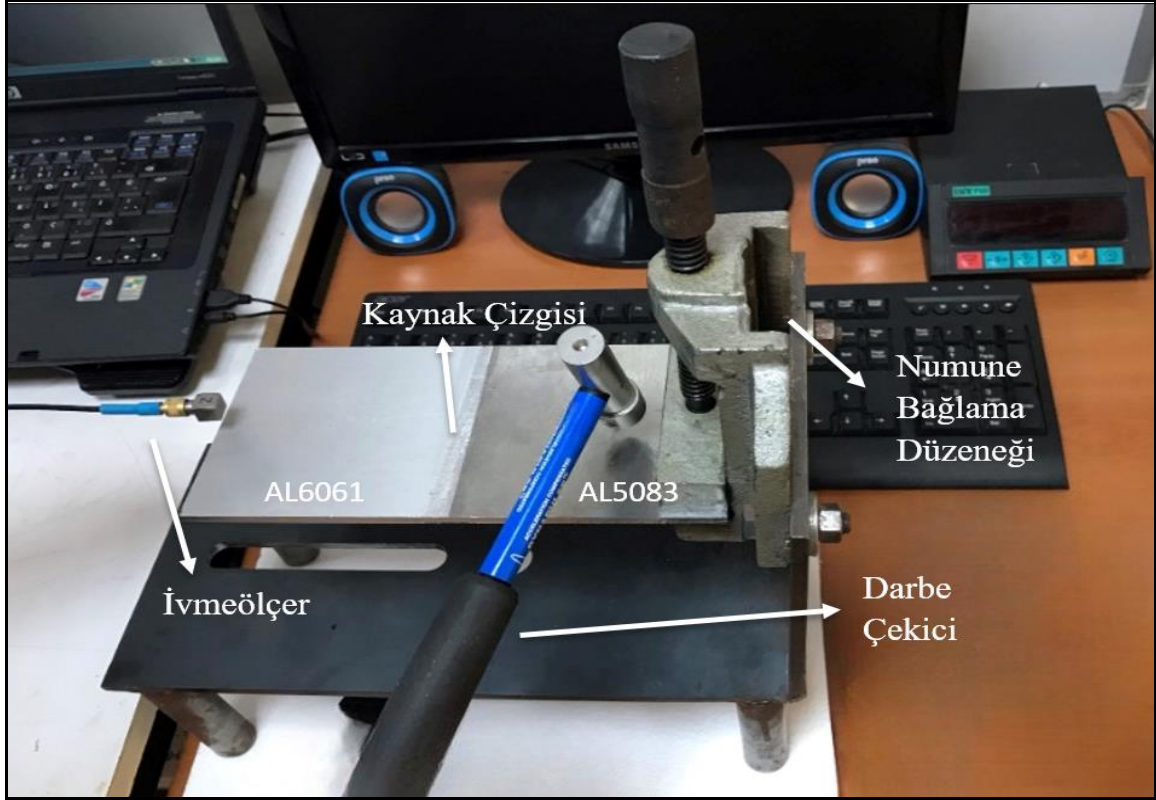


(b)

Şekil 5.22 (a) Dytran 3093B ivmeölçer - (b) Dynapulse darbe çekici

Deneyde darbe çekici (Dynapulse) ile uygulanan darbe sonucunda oluşan farklı modlardaki doğal frekans değerleri ivmeölçer (3093B, Dytran Instruments, Inc., ABD) aracılığı ile toplanmış, veriler mikroişlemci tabanlı bir veri toplama sistemi olan SoMat™ eDAQ-lite ve nCodeGlyphWorks yazılımı (HBM, Inc., ABD) aracılığı ile bilgisayar ortamına aktarılmıştır.

Tüm kaynaklı plakaların modal analizi, ilk doğal frekans (ω_1), sönüm oranı ($\zeta(\omega_1)$) ve yer değiştirme tepki fonksiyonu ($X(\omega_1)$) değerlerinin bulunması için yapılmıştır. Şekil 5.28'de gösterildiği gibi numuneneye ivmeölçer bağlanılarak, zaman alanında elde edilen değerler FFT aracılığıyla (Fourier Dönüşümü) frekans alanına dönüştürülmüştür. Bu dönüşüm için FFT analizörü kullanılır. Elde edilen frekans verileri bir modal analiz yazılımı ile incelenir.



Şekil 5.23 Modal analiz deney düzeneği

5.2.5. Yüzey Pürüzlülüğü

SKK ile birleştirilen AL5083-AL6061 levhaların kaynak bölgesindeki yüzey pürüzlülükleri Şekil 5.24’de gösterilen Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Teknolab Malzeme Mühendisliği Laboratuvarında bulunan Taylor Hobson Surtronic 25 isimli yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazında her bir numunenin yüzey pürüzlülük değerleri iki tekrarlı olmak üzere ölçülerek ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri alınmıştır. Karıştırıcı uç geometrisi, takım dönüş hızı (RPM) ve takım ilerleme hızı (mm/dak) parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkileri araştırılmıştır.



Şekil 5.24 Taylor Hobson Surtronic 25 Yüzey Pürüzlülüğü Ölçüm Cihazı

BÖLÜM 6

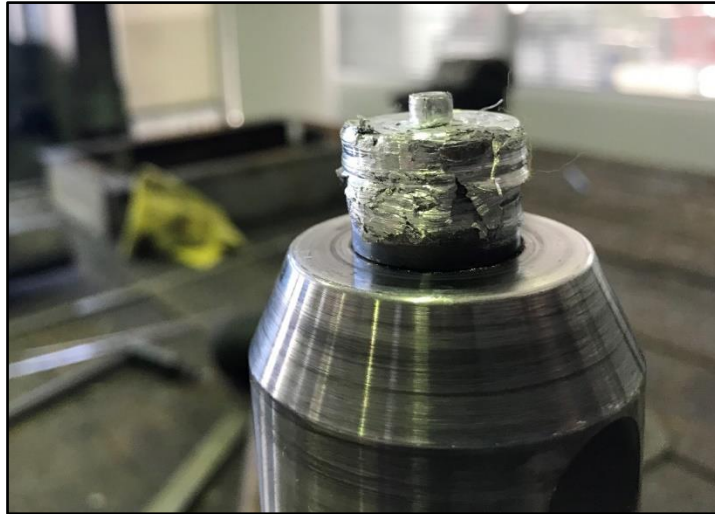
ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

6.1. KAYNAK YÜZEYİ, ARKA YÜZEY VE KESİT GÖRÜNÜMLERİ

Deney tasarımı doğrultusunda sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilen 18 adet kaynaklı levhanın ön yüzey, arka yüzey ve kaynak bölgesinin kesit görüntüleri karıştırıcı uç geometrisine göre tablo haline getirilerek şekil 6.2-6.3-6.4'te gösterilmiş ve çatlama ve boşluk gibi kaynak kusurları tablolar üzerinde işaretlenerek gösterilmiştir.

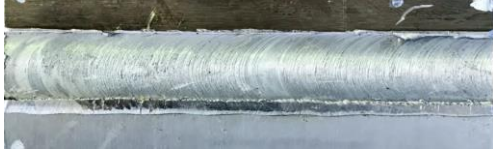
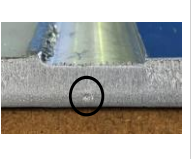
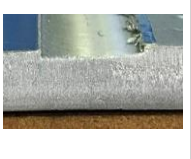
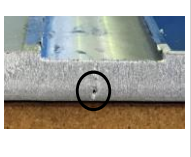
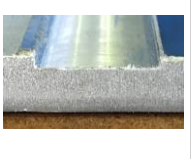
6.1.1. Kaynak Sonrası Karıştırıcı Uçun Durumu

Şekil 6.1'de SKK sonrası karıştırıcı uçun durumu gösterilmiştir. Yapılan her kaynak sonrası alüminyumun karıştırıcı uç üzerine sıvandığı görülmüştür. Diğer kaynakların sağlıklı bir şekilde yapılabilmesi ve karıştırıcı uçun geometrik özelliklerini yansıtabilmesi için kaynak sonrasında karıştırıcı uca sıvanan alüminyumun temizlenmesi gereği doğmuştur. Bu doğrultuda, yapılan her kaynaktan sonra alüminyum sıvanan karıştırıcı uçlar temizlenerek sonraki deneylere geçilmiştir.



Şekil 6.1 Sürtünme Karıştırma Kaynağı Sonrası Karıştırıcı Uç Görünümü

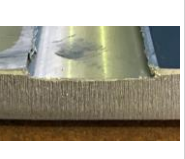
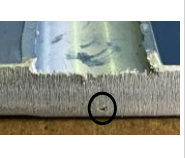
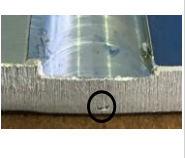
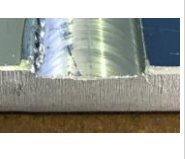
6.1.2. Üçgen Karıştırıcı Uç İle Birleştirelen Levhaların Kaynak Bölgesi Görünümleri

Deney No	Numune Kodu	Görünüm		
		Ön Yüzey	Arka Yüzey	Kesit
1	TR/750/50			
2	TR/750/100			
3	TR/1250/50			
4	TR/1250/100			
5	TR/1750/50			
6	TR/1750/100			

Şekil 6.2 Üçgen Karıştırıcı Uç İle Birleştirelen Levhaların Kaynak Bölgesi Görünümleri

Şekil 6.2’de üçgen karıştırıcı uç ile birleştirelen levhaların kaynak bölgesinde boşluk gözlenen 2-TR/750/100 kodlu numune üçgen karıştırıcı uç ile yapılan çekme testlerinde en düşük çekme gerilmesi değerine sahiptir. Kaynak bölgesinde çatlak veya kesit alanında boşluk bulunmayan 4-TR/1250/100 kodlu numunenin ise üçgen karıştırıcı uç ile yapılan çekme testlerinde en iyi sonuca sahip olduğu çekme deney testleri sonuçlarında görülmüştür.

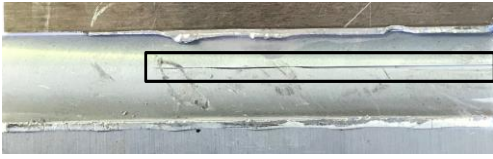
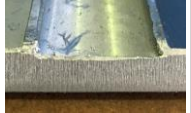
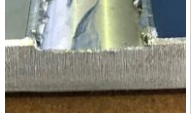
6.1.3. Kare Karıştırıcı Uç İle Birleştirelen Levhaların Kaynak Bölgesi Görünümleri

Deney No	Numune Kodu	Görünüm		
		Ön Yüzey	Arka Yüzey	Kesit
7	SQ/750/50			
8	SQ/750/100			
9	SQ/1250/50			
10	SQ/1250/100			
11	SQ/1750/50			
12	SQ/1750/100			

Şekil 6.3 Kare Karıştırıcı Uç İle Birleştirelen Levhaların Kaynak Bölgesi Görünümleri

Şekil 6.3’de kare karıştırıcı uç ile birleştirelen levhaların kaynak bölgesinde çatlak ve kesit alanında boşluk gözlemlenen 10-SQ/1250/100 kodlu numune kare karıştırıcı uç ile yapılan çekme testlerinde en düşük çekme gerilmesine sahiptir. Kesit alanında boşluk gözlemlenen 9-SQ/1250/50 ve 11-SQ/1750/50 kodlu numuneler ise kare karıştırıcı uç ile yapılan 7-SQ/750/50, 8-SQ/750/100 ve 12-SQ/1750/100 numaralı numunelere göre daha düşük çekme gerilmelerine sahip oldukları çekme deney testleri sonuçlarında görülmüştür.

6.1.4. Vida Karıştırıcı Uç İle Birleştirilen Levhaların Kaynak Bölgesi Görünümleri

Deney No	Numune Kodu	Görünüm		
		Ön Yüzey	Arka Yüzey	Kesit
13	SC/750/50			
14	SC/750/100			
15	SC/1250/50			
16	SC/1250/100			
17	SC/1750/50			
18	SC/1750/100			

Şekil 6.4 Vida Karıştırıcı Uç İle Birleştirilen Levhaların Kaynak Bölgesi Görünümleri

Şekil 6.4’de vida karıştırıcı uç ile birleştirilen levhaların kaynak bölgesinde çatlak ve kesit alanında boşluk gözlemlenen 13-SC/750/50, 14-SC/750/100, 18-SC/1750/100 kodlu numunelerin vida karıştırıcı uç ile yapılan çekme testlerinde diğer numunelere oranla oldukça düşük çekme gerilmesi değerlerine sahip oldukları görülmüştür. Kesit alanında boşluk gözlemlenen 17-SC/1750/50 kodlu numune bahsi geçen numunelere oranla daha iyi çekme gerilmesi değerine sahipken herhangi bir çatlak veya boşluk rastlanmayan 15-SC/1250/50 ve 16-SC/1250/100 numunelerinin en iyi çekme gerilmelerine sahip oldukları görülmüştür.

6.2. ÇEKME DENEYİ SONUÇLARI

Çekme deneyleri 3 tekrarlı olarak yapılarak üç deney sonucunda elde edilen ortalama değerler alınarak nihai değerler oluşturulmuştur. Kaynak performansları hesaplanırken katalog değerleri dikkate alınarak Al5083'ün çekme gerilmesi 275 Mpa, Al6061'in çekme gerilmesi 260 Mpa alınmıştır. İki tür alüminyum alaşıma göre kaynak performansı ayrı olarak hesaplanarak elde edilen verilerin ortalamaları değeri alınarak ortalama kaynak performansı verileri hazırlanmıştır. Çizelge 6.1'de çekme deneyi sonuçları gösterilmiştir.

Çizelge 6.1 Çekme Deney Sonuçları

Deney No	Numune Kodu	Akma Gerilmesi RP 0,2 (N/mm ²)(Mpa)	Çekme Gerilmesi Rm (N/mm ²)	% Birim Uzama (ε)	Ortalama Kaynak Performansı %
1	TR/750/50	110	172	5,1	61
2	TR/750/100	100	125,7	1,6	45
3	TR/1250/50	94	132	2,9	47
4	TR/1250/100	111	198,5	8,1	70
5	TR/1750/50	101,5	156,5	4,1	55
6	TR/1750/100	109,5	185	5,6	66
7	SQ/750/50	110	197	7	70
8	SQ/750/100	111	166,5	3,8	59
9	SQ/1250/50	94,5	103	1	36
10	SQ/1250/100	99	96,7	0,8	34
11	SQ/1750/50	106,5	148,5	3,4	53
12	SQ/1750/100	112	197	6,9	70
13	SC/750/50	81	98,5	1,1	35
14	SC/750/100	92	101,5	0,8	36
15	SC/1250/50	114	190	5,3	67
16	SC/1250/100	115,5	184,7	5,5	65
17	SC/1750/50	102,5	152,5	3,3	54
18	SC/1750/100	94	99,5	0,7	35

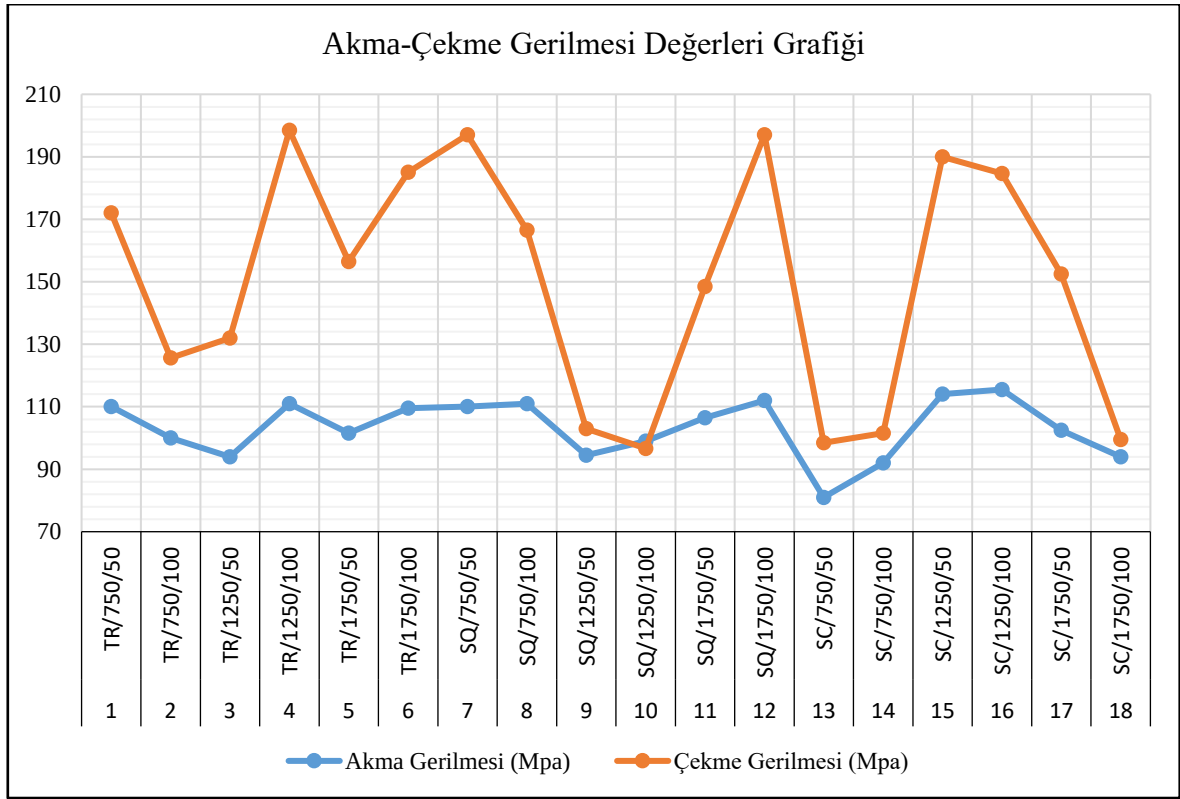


Şekil 6.5 Çekme Deneyi Sonrası Kopan Numune Örnekleri

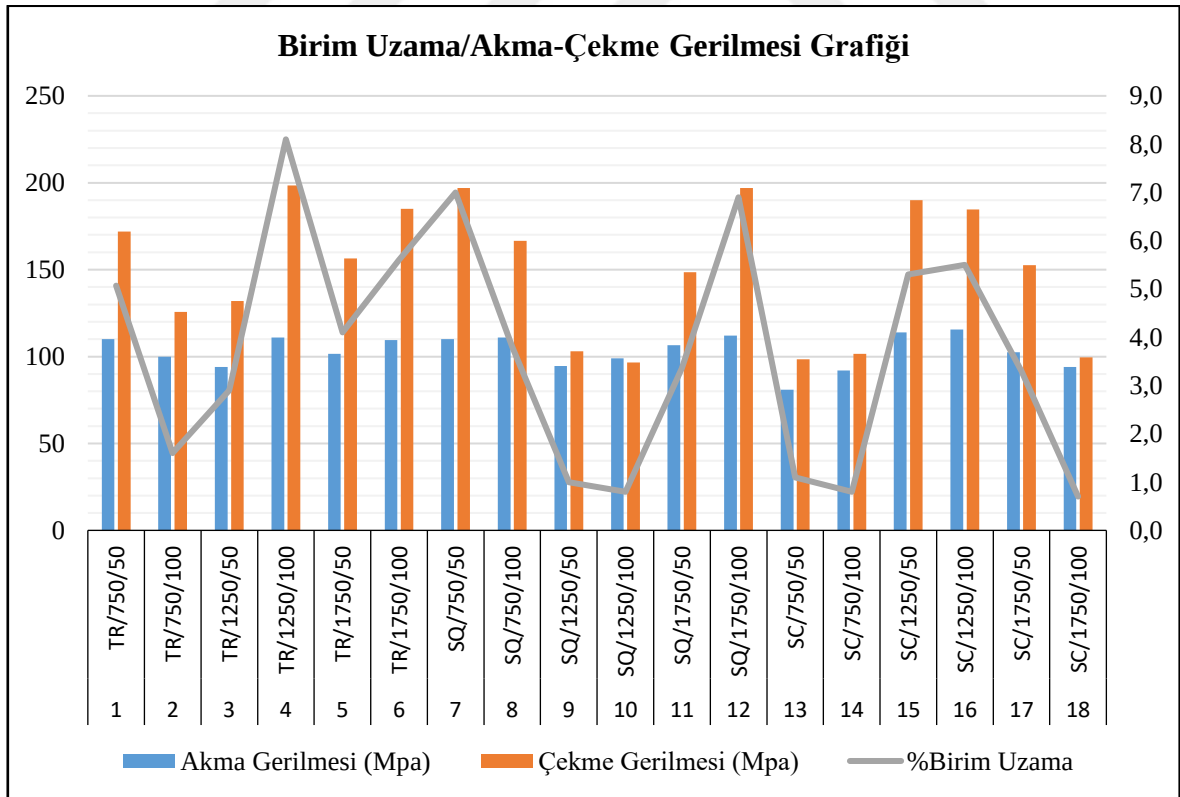
Şekil 6.5’de çekme deneyi sonrası kopan numune örnekleri gösterilmiştir.

Şekil 6.6’da akma-çekme gerilmesi verileri grafiğinde en yüksek çekme gerilmesi değeri 4 numaralı deneyde TR/1250/100 isimli numunede 198,58 Mpa değeri ile elde edilmiştir. En düşük değer ise 10 numaralı deneyde SQ/1250/100 isimli, numunede 96,7 Mpa değeri ile elde edilmiştir. Şekil 6.6’da görüldüğü üzere akma ve çekme değeri birbirine yakın olan numunelerin kaynak performanslarının diğer numunelere oranla daha düşük olduğu görülmüştür.

Akma ve çekme gerilmeleri ile % birim uzama şekil 6.6’da karşılaştırılmıştır. % Birim uzamanın maksimum olduğu noktalarda çekme ve akma gerilmeleri farkı en üst seviyede iken % birim uzamanın minimum olduğu noktalarda çekme ve akma gerilmeleri arasındaki fark en alt seviyededir. Bu veri sürtünme karıştırma kaynağı ile kaynaklanan numunelerden bazılarının akma değerinden hemen sonra kırıldığını göstermektedir. Akma ve çekme gerilme değerleri birbirine yakın olan 9-10-13-14-18 numaralı deneylerin kaynak performanslarının ortalaması %35,4 birim uzama ortalamalarının ise %0,9’dur. Şekil 6.3 ve 6.4 incelendiğinde ismi geçen numunelerin kaynak bölgesinde çatlak ve kesit alanında boşluk kaynak kusurlarına sahip oldukları görülmüştür.



Şekil 6.6 Akma-Çekme Gerilmesi Verileri Grafiği



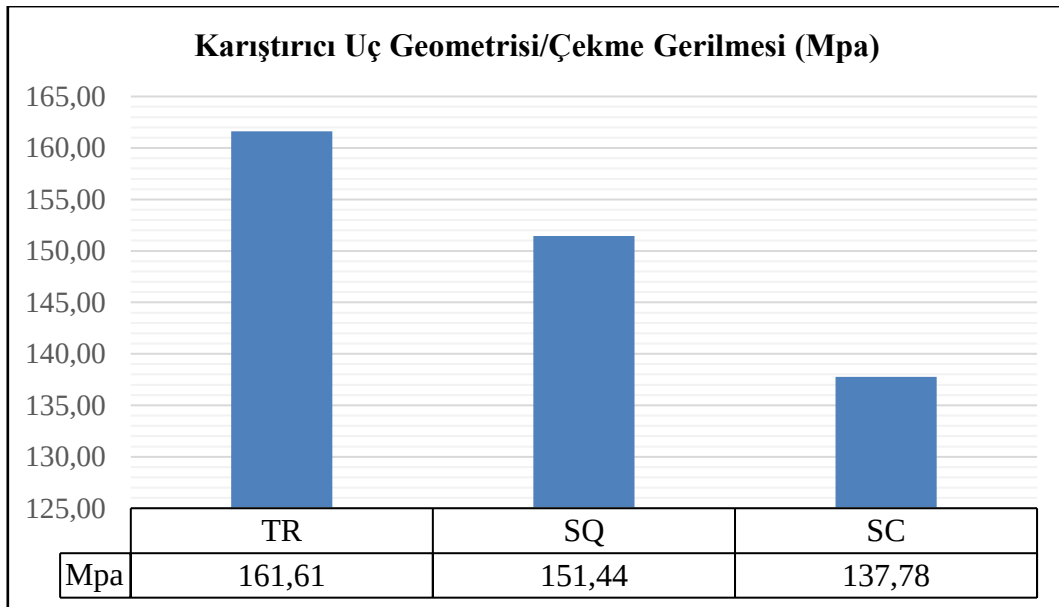
Şekil 6.7 Birim Uzama/Akma-Çekme Gerilmesi Grafiği

6.2.1. Karıştırıcı Uç Geometrisinin Etkisi

Çizelge 6.2’de TR (Üçgen), SQ (Kare), SC (Vida) geometrilerine sahip karıştırıcı uçların ortalama çekme gerilim değerleri gösterilmiştir. 137,78 Mpa değer ile vida uç deney kapsamında en düşük ortalama çekme gerilim verilerine sahip olduğu görülmüştür. Kare karıştırıcı uç 151,44 Mpa değeri ile vida karıştırıcı uca oranla %10 daha iyi sonuca sahip olduğu, üçgen karıştırıcı ucun ise 161,61 Mpa ortalama çekme değeri ile karıştırıcı uç geometrileri arasında en iyi sonuca sahip olduğu görülmüştür. Üçgen karıştırıcı uç, vida karıştırıcı uca oranla %17, kare karıştırıcı uca oranla %7 oranında daha iyi sonuç vermiştir. Şekil 6.8’de karıştırıcı uçların çekme dayanımları grafik olarak gösterilmiştir.

Çizelge 6.2 Karıştırıcı Uç Geometrisi/Çekme Gerilmesi (Mpa)

Karıştırıcı Uç Geometrisi	Çekme Gerilmesi Mpa
TR	161,61
SQ	151,44
SC	137,78

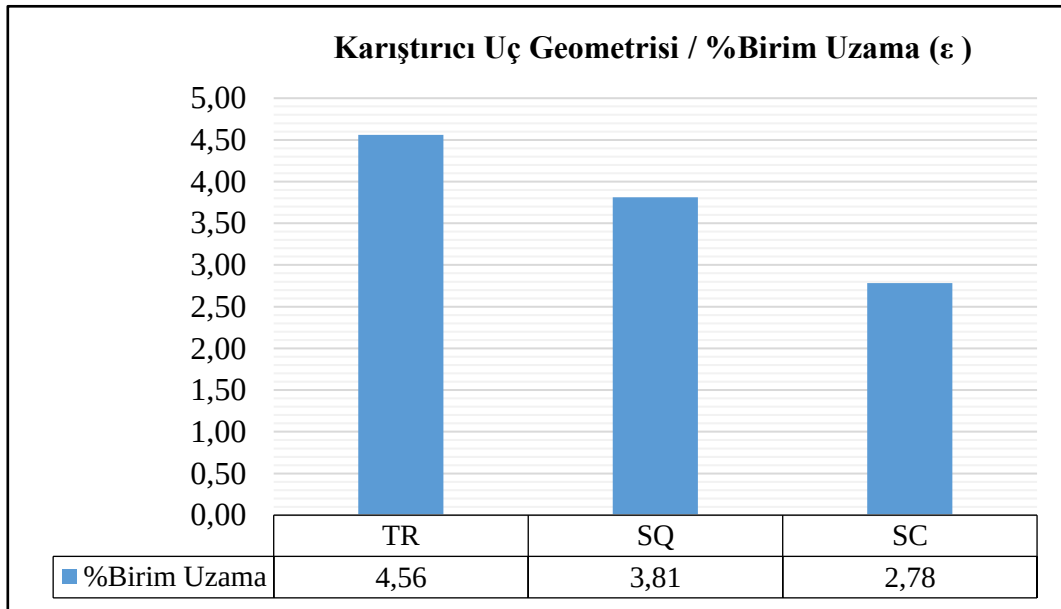


Şekil 6.8 Karıştırıcı Uç Geometrisi/Çekme Gerilmesi (Mpa)

Çizelge 6.3'te TR (Üçgen), SQ (Kare), SC (Vida) geometrilerine sahip karıştırıcı uçların ortalama % birim uzama değerleri gösterilmiştir. 2,78 %birim uzama ile vida karıştırıcı uç deney kapsamında en düşük ortalama %birim uzama verisine sahip olduğu görülmüştür. Kare karıştırıcı uç 3,81 %birim uzama değeri ile vida karıştırıcı uca oranla %37 daha iyi sonuca sahip olduğu, üçgen karıştırıcı ucun ise 3,81 %birim uzama değeri ile karıştırıcı uç geometrileri arasında en iyi sonuca sahip olduğu görülmüştür. Üçgen karıştırıcı uç, vida karıştırıcı uca oranla %64, kare karıştırıcı uca oranla %20 oranında daha iyi sonuç vermiştir. Şekil 6.9'da karıştırıcı uçların %birim uzamaları grafik olarak gösterilmiştir. Şekil 6.8'de gösterilen çekme gerilmesi değerleri ile şekil 6.9'da gösterilen %birim uzaması değerlerinin birbirine uyumlu olduğu görülmüştür.

Çizelge 6.3 Karıştırıcı Uç Geometrisi / % Birim Uzama

Karıştırıcı Uç Geometrisi	% Birim Uzama (ε)
TR	4,56
SQ	3,81
SC	2,78



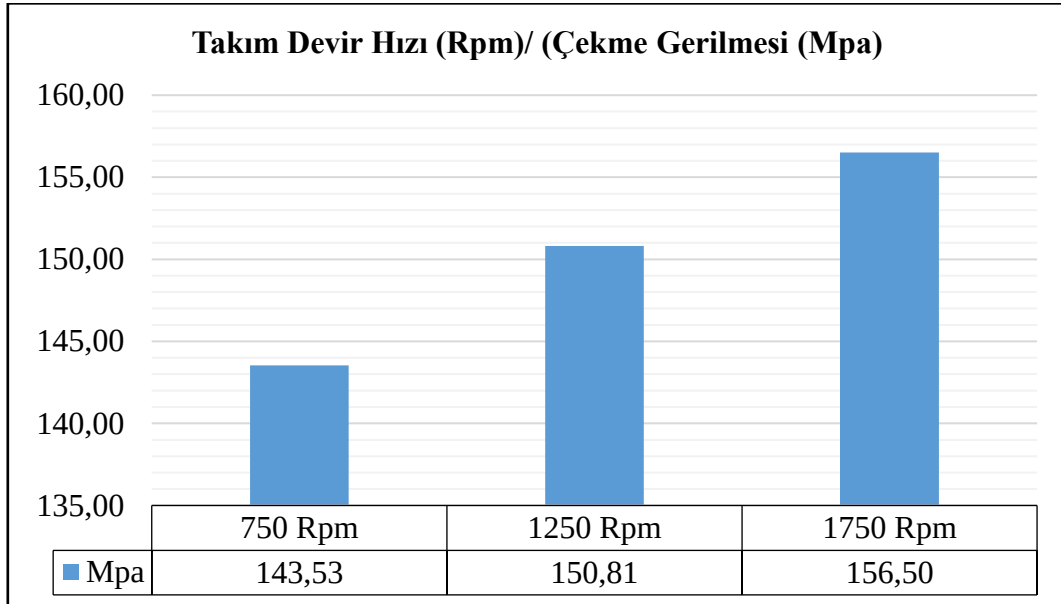
Şekil 6.9 Karıştırıcı Uç Geometrisi / %Birim Uzama

6.2.2. Takım Devir Hızının Etkisi

Çizelge 6.4'te 750-1250-1750 Rpm takım devir hızları ile elde edilen ortalama çekme gerilim değerleri gösterilmiştir. 143,53 Mpa değer ile 750 Rpm takım devir hızının deney kapsamında en düşük ortalama çekme gerilme verilerine sahip olduğu görülmüştür. 1250 Rpm takım devir hızının 150,81 Mpa değeri ile 750 Rpm takım devir hızına göre %5 daha iyi sonuca sahip olduğu, 1750 Rpm takım devir hızının ise 156,50 Mpa ortalama çekme değeri ile takım devir hızları arasında en iyi sonuca sahip olduğu görülmüştür. 1750 Rpm takım devri, 1250 Rpm takım devir hızına göre % 9, 1250 Rpm takım devir hızına göre %3,8 daha iyi sonuç vermiştir. Şekil 6.10'da takım devir hız ve çekme dayanımları grafik olarak gösterilmiştir.

Çizelge 6.4 Takım Devri /Çekme Gerilmesi

Takım Devri (Rpm)	Çekme Gerilmesi Mpa
750 Rpm	143,53
1250 Rpm	150,81
1750 Rpm	156,50

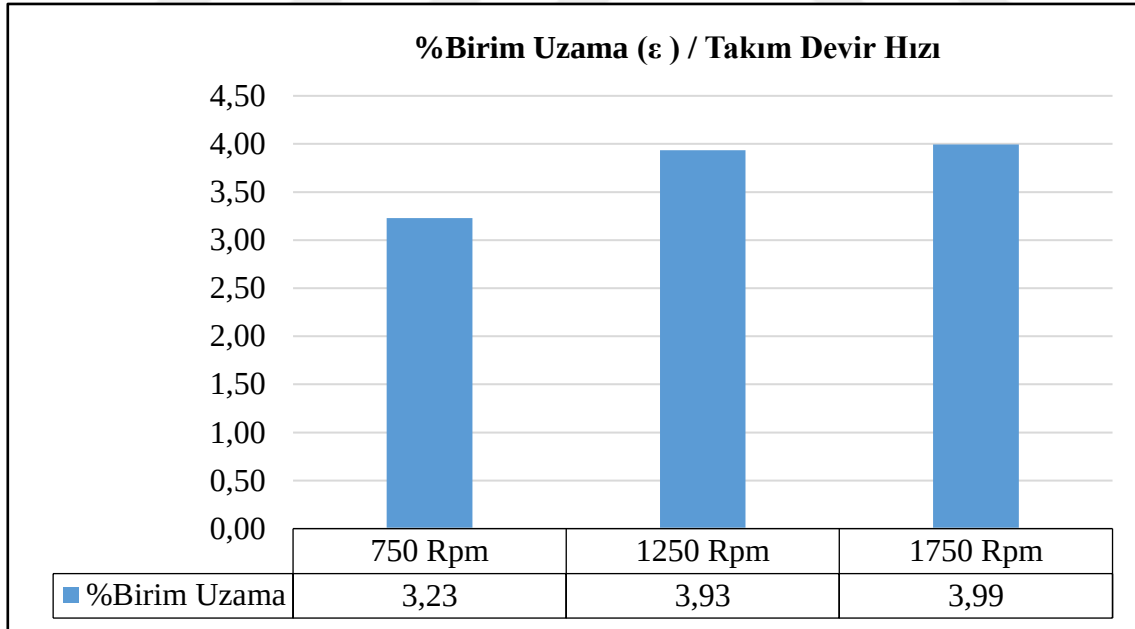


Şekil 6.10 Takım Devir Hızı / Çekme Gerilmesi Grafiği

Çizelge 6.5'te 750-1250-1750 Rpm takım devir hızları ile elde edilen ortalama % birim uzama değerleri gösterilmiştir. 3,23 %birim uzama ile 750 Rpm takım devir hızının deneyler kapsamında en düşük ortalama %birim uzama verisine sahip olduğu görülmüştür. 1250 Rpm takım devir hızı 3,93 %birim uzama değeri ile 750 Rpm takım devir hızına oranla %22 daha iyi sonuca sahip olduğu, 1750 Rpm takım devir hızının ise 3,99 %birim uzama değeri ile %birim uzama değerleri arasında en iyi sonuca sahip olduğu görülmüştür. 1750 Rpm takım devir hızı 750 Rpm takım devir hızına oranla %24, 1250 Rpm takım devir hızına oranla %1,63 oranında daha iyi sonuç vermiştir. Şekil 6.11'de karıştırıcı uçların %birim uzamaları grafik olarak gösterilmiştir. Şekil 6.10'da gösterilen çekme gerilmesi değerleri ile şekil 6.11'de gösterilen %birim uzaması değerlerinin birbirine uyumlu olduğu görülmüştür.

Çizelge 6.5 Takım Devir Hızı/%Birim Uzama

Takım Devri (Rpm)	% Birim Uzama (ε)
750 Rpm	3,23
1250 Rpm	3,93
1750 Rpm	3,99



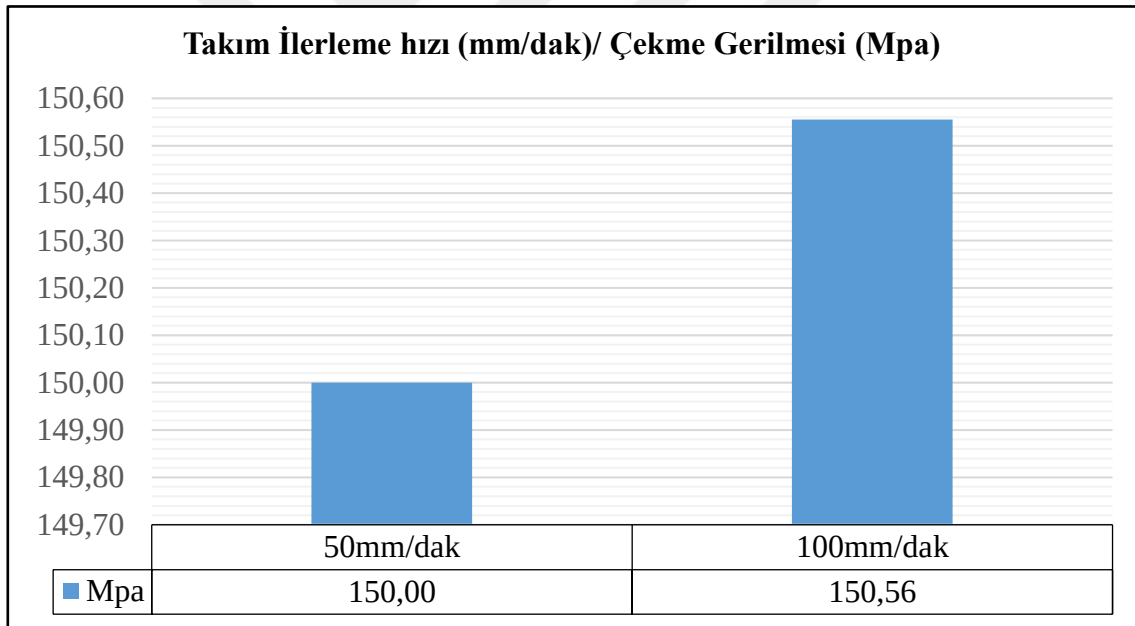
Şekil 6.11 %Birim Uzama/Takım Devir Hızı

6.2.3. Takım İlerleme Hızının Etkisi

Çizelge 6.6’da 50-100 mm/dak takım ilerleme hızları ile elde edilen ortalama çekme gerilim değerleri gösterilmiştir. 150 Mpa değer ile 50 mm/dak takım ilerleme hızının deney kapsamında en düşük ortalama çekme gerilme verilerine sahip olduğu görülmüştür. 100 mm/dak takım devir hızının 150,56 Mpa değeri ile 50 mm/dak takım ilerleme hızına göre %0,4 daha iyi sonuca sahip olduğu görülmüştür. Şekil 6.12’de takım ilerleme hızları ve ortalama çekme gerilimleri grafik olarak gösterilmiştir.

Çizelge 6.6 Takım İlerleme Hızı/Çekme Gerilmesi

İlerleme Hızı (mm/dak)	Çekme Gerilmesi (Mpa)
50mm/dak	150,00
100mm/dak	150,56



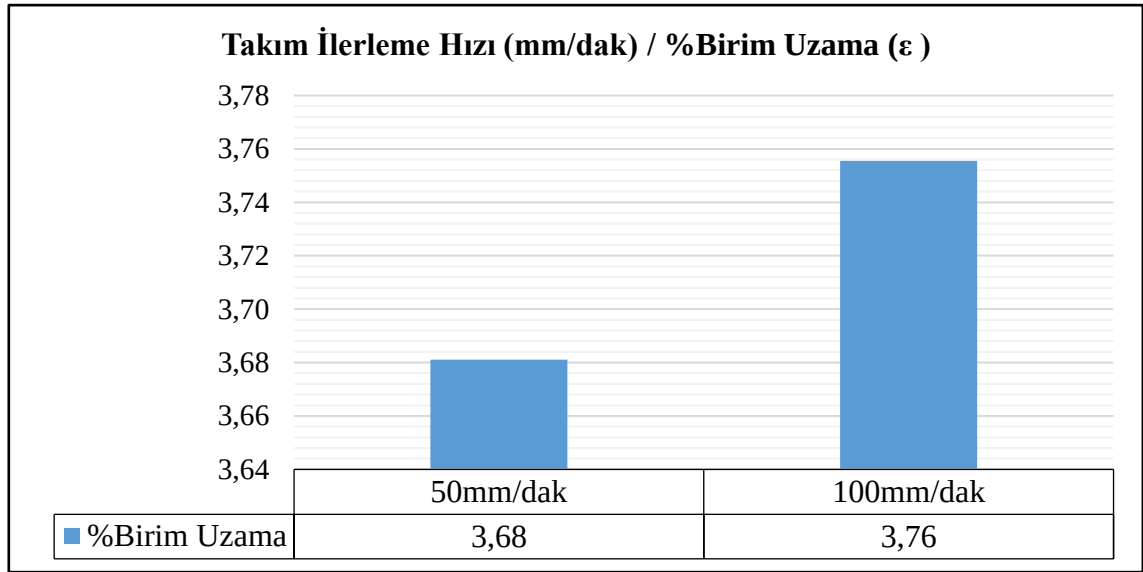
Şekil 6.12 Takım İlerleme Hızı/ Çekme Gerilmesi Grafiği

Çizelge 6.7’de 50-100 mm/dak takım ilerleme hızları ile elde edilen %birim uzaman değerleri gösterilmiştir. 3,68 %birim uzama değeri ile 50 mm/dak takım ilerleme hızının deney kapsamında en düşük ortalama %birim uzama değerine sahip olduğu görülmüştür. 100 mm/dak takım ilerleme hızının 3,76 %birim uzama değeri ile 50 mm/dak takım ilerleme hızına göre %2 oranında daha iyi sonuca sahip olduğu görülmüştür. Şekil 6.12’de takım ilerleme hızları ve ortalama çekme gerilimleri grafik olarak gösterilmiştir. Şekil 6.12’de gösterilen çekme

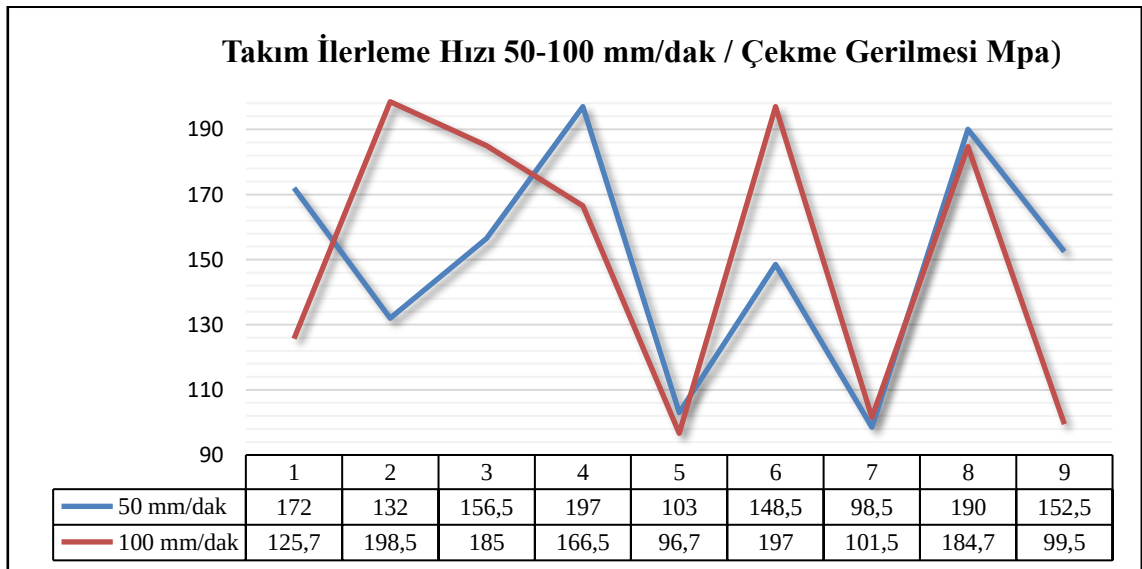
gerilmesi değerleri ile Şekil 6.13’de gsterilen %birim uzaması değerlerinin birbirine uyumlu olduğu grlmŧŧr.

Çizelge 6.7 Takım İlerleme Hızı /%Birim Uzama

İlerleme Hızı (mm/dak)	% Birim Uzama (ε)
50mm/dak	3,68
100mm/dak	3,76



Şekil 6.13 Takım İlerleme Hızları (mm/dak)/ %Birim Uzama



Şekil 6.14 Takım İlerleme Hızları (mm/dak) / Çekme Gerilmesi Grafiği (Mpa)

6.2.4. Çekme Deneyi Sonuçları ve Verilerin Değerlendirilmesi

Şekil 6.14'te ilerleme hızları ayrı ayrı sabit tutularak parametrelerin ilerleme hızına karşı vermiş oldukları tepkiler karşılaştırılmıştır. Kare ve Vida karıştırıcı uçlar ile yapılan deneylerde (4,5,6-7,8,9) takım ilerleme hızlarında benzer tepkiler gözlemlenirken üçgen karıştırıcı uç ile yapılan deneylerin (1,2,3) takım ilerleme hızına diğer karıştırıcı uçlardan daha farklı tepki verdiği görülmüştür.

Karıştırıcı uç geometrisine göre ortalama %kaynak performansları incelendiğinde üçgen karıştırıcı ucun %57.25, kare karıştırıcı ucun %53.65, vida karıştırıcı ucun ise %48.81 kaynak performansına sahip olduğu;

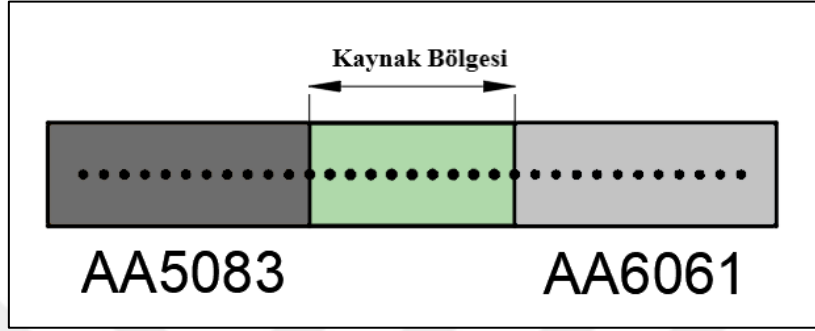
Takım devir hızına göre kaynak performansı karşılaştırıldığında 750 Rpm takım devir hızının %50.84, 1250 Rpm takım devir hızının %53.42, 1750 Rpm takım devir hızının %55.44 kaynak performansına sahip olduğu;

Takım ilerleme hızına göre kaynak performansı karşılaştırıldığında 50 mm/dak takım ilerleme hızının %53.13, 100mm/dak takım ilerleme hızının %53.33 kaynak performansına saip olduğu görülmüştür.

Yapılan deney sonuçları ve oluşturulan grafikler incelendiğinde çekme dayanımına en yüksek etkinin karıştırıcı uç geometrisi tarafından yapıldığı, takım devir hızının etki sıralamasında karıştırıcı uç geometrisinden sonra geldiği takım ilerleme hızının ise en az etkiye sahip olan parametre olduğu görülmüştür.

6.3. MİKROSERTLİK İNCELEME SONUÇLARI

Malzemelerin mekanik özelliklerini belirlemek ve mekanik davranışlarına göre sınıflandırmak için seçilen numunelerin kaynak bölgesinin mikrosertlik profilleri elde edilmiştir.(Şekil 6.15) Vickers mikrosertlik ölçümü (SHIMADZU: HMV-2T) kaynak bölgesine dik olarak 15 s boyunca 4.908 N yük ile mikrosertlik deneyleri gerçekleştirilmiştir.



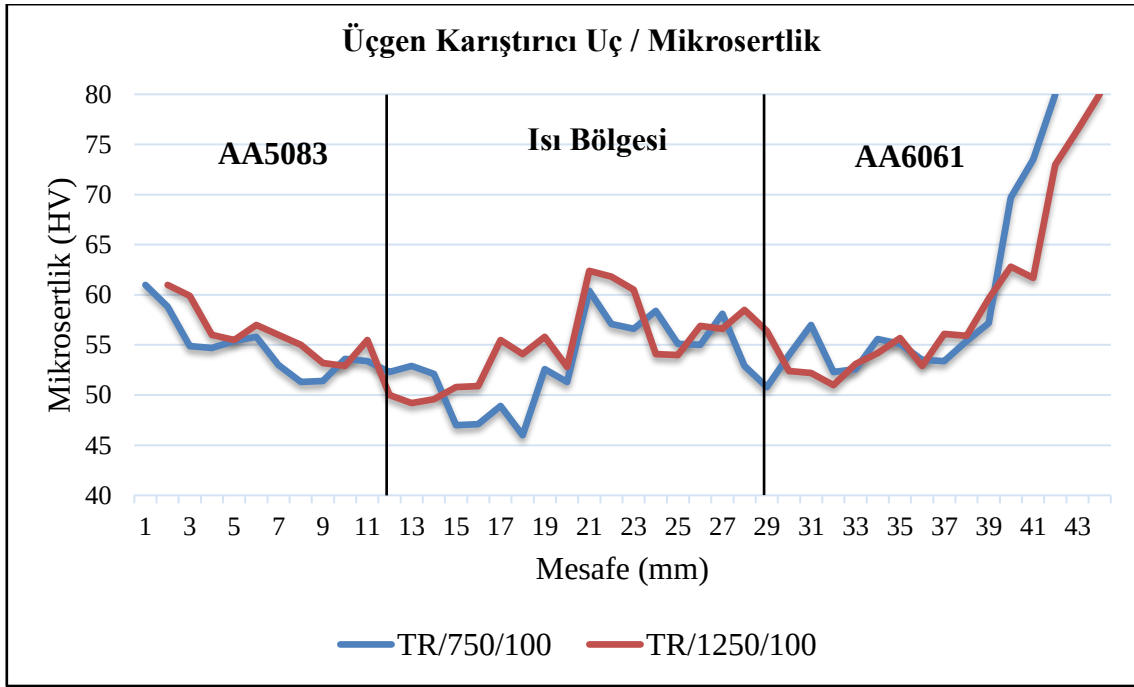
Şekil 6.15 Mikrosertlik Alınan Bölge Şeması

AA5083 91-HV, AA6061 107-HV vickers mikrosertlik değerine sahiptir. Çizelge 6.8’de herbir karıştırıcı uç geometri için sertlik değerleri arasında değişimler olduğu görülmüştür.

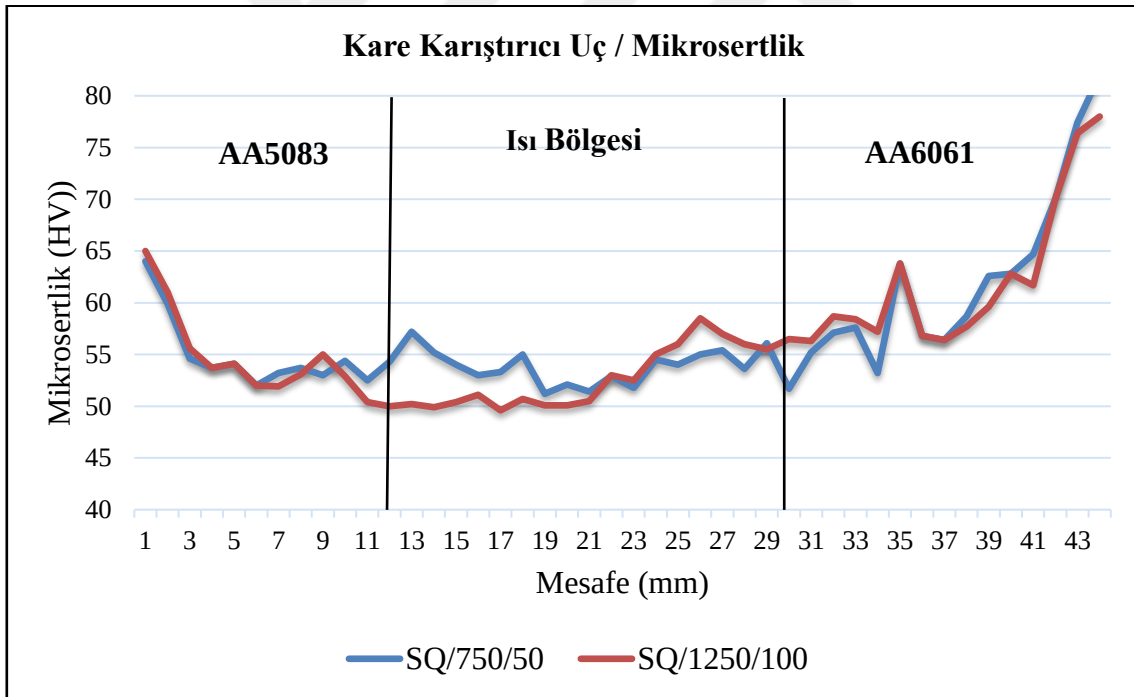
Çizelge 6.8 Kaynak Bölgesi Ortalama Sertlik Değerleri

Deney No	Numune Kodu	Kaynak Bölgesi Ortalama Sertlik Değeri Vickers (HV)	Çekme Gerilmesi Rm (Mpa)
2	TR/750/100	53,08	125,7
4	TR/1250/100	55,09	198,5
7	SQ/750/50	53,71	197
10	SQ/1250/100	56,175	96,7
13	SC/750/50	56,08	98,5
15	SC/1250/50	57,69	190

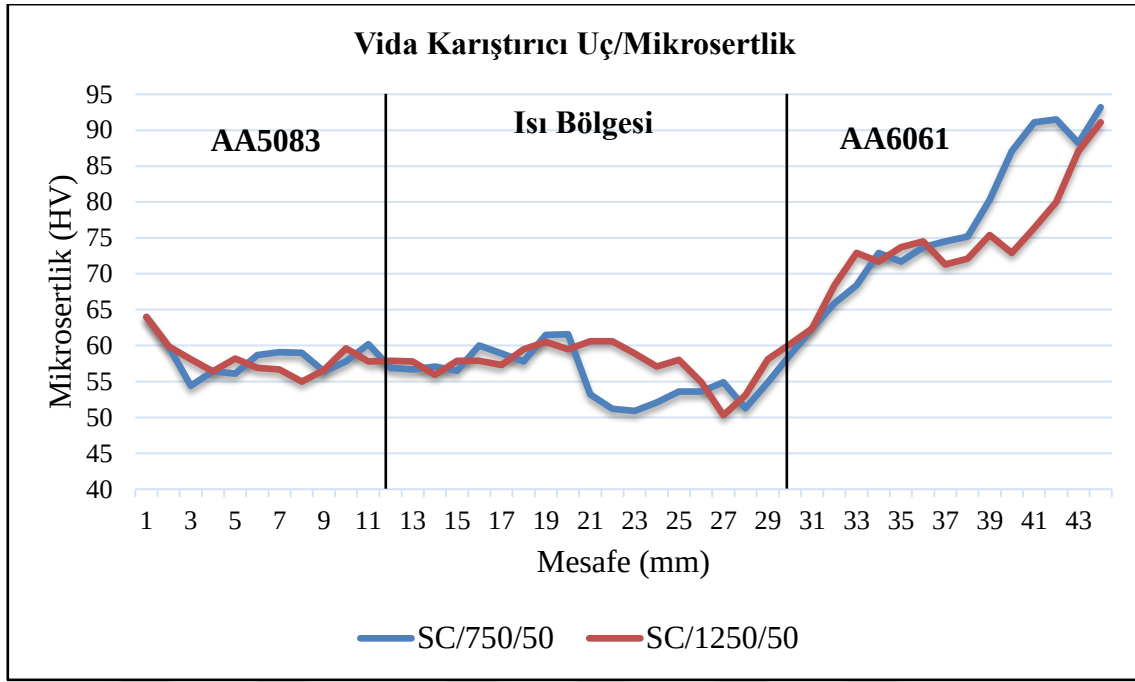
Sürtünme karıştırma kaynağında, mikroyapı incelemesi için yapılan çalışmalara bakıldığında ana metalden kaynak merkezine gidildikçe sertlik düşmesi beklenmekte sonrasında diğer ana metale yaklaşıldığında sertlik yükselmesi beklenmektedir.



Şekil 6.16 Mikrosertlik /Üçgen Karıştırıcı Uç



Şekil 6.17 Mikrosertlik /Kare Karıştırıcı Uç



Şekil 6.18 Mikrosertlik /Vida Karıştırıcı Uç

Verilen şekiller incelendiğinde Ana metalden, ısıdan etkilenen bölgeye yaklaşıldığında sertlik değerlerinin düştüğü görülmüştür. AA6061 tarafındaki sertlik azalmasının daha hızlıdır. Bunun nedeni oldukça yumuşak olan AA5083 partiküllerinin karıştırma bölgesine girdiklerinde daha yumuşak bir yapı oluşturmasıdır. Ayrıca, ısı etkisi altındaki daha geniş alan nedeniyle, AA5083'ün sürtünme sırasında oluşan ısıdan daha fazla etkilendiği düşünülmektedir.

Şekil 6.16'da ısı bölgesinde dalgalanmalar yoğun olarak görülmektedir. Şekil 6.17'de şekil 6.16'ya göre daha stabil, şekil 6.18'da ise daha durağan bir görünüm vardır. Üçgen karıştırıcı ucun kullanıldığı şekil 6.16'da kaynak bölgesindeki eriyiklerin kare ve vida karıştırıcı uca göre üçgen karıştırıcı uç tarafından daha iyi karıştırıldığı ve daha homojen bir yapı ortaya çıktığı sonucuna varılmıştır. Ortalama çekme dayanımları da göz önünde bulundurulduğunda kaynak bölgesinde daha iyi karışım ve homojen yapının çekme dayanımına olumlu etki ettiği görülmüştür.

Genel olarak, farklı karıştırıcı uç geometrilerinin, sürtünme karıştırma kaynağı kaynak bölgesindeki, verilerinin birbirine yakın ve birbirleri arasındaki fark % olarak düşüktür. SKK'da karıştırıcı uç geometrisinin, sertlik profili üzerindeki etkisi düşüktür.

6.4. MODAL ANALİZ SONUÇLARI

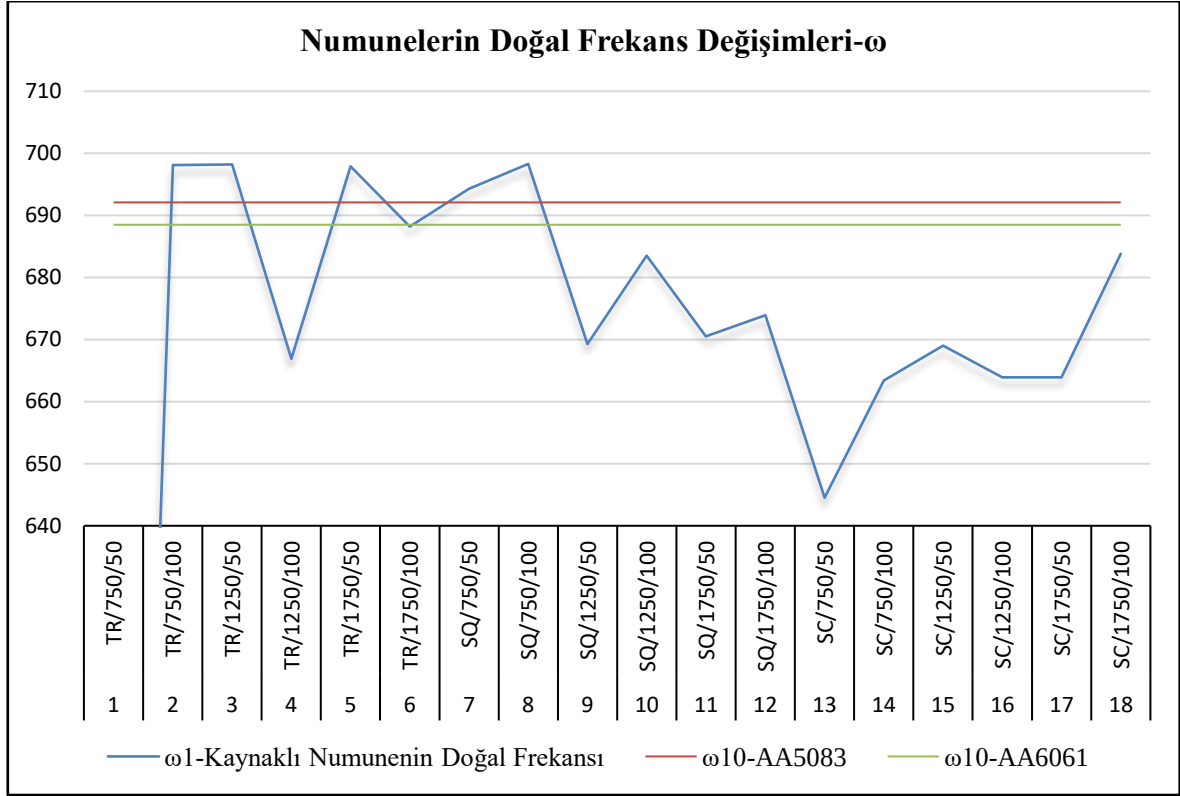
Numunelerin darbe testine verdikleri doğal frekans (ω), yer değiştirme (X) ve sönüm oranı (ζ) cevapları Çizelge 6,9'da, Al 5083 ve Al 6061'in darbe deneyi sonuçları şekil 6.10'da gösterilmiştir.

Çizelge 6.9 Gezici Çekiç Darbe Deneyi Sonuçları

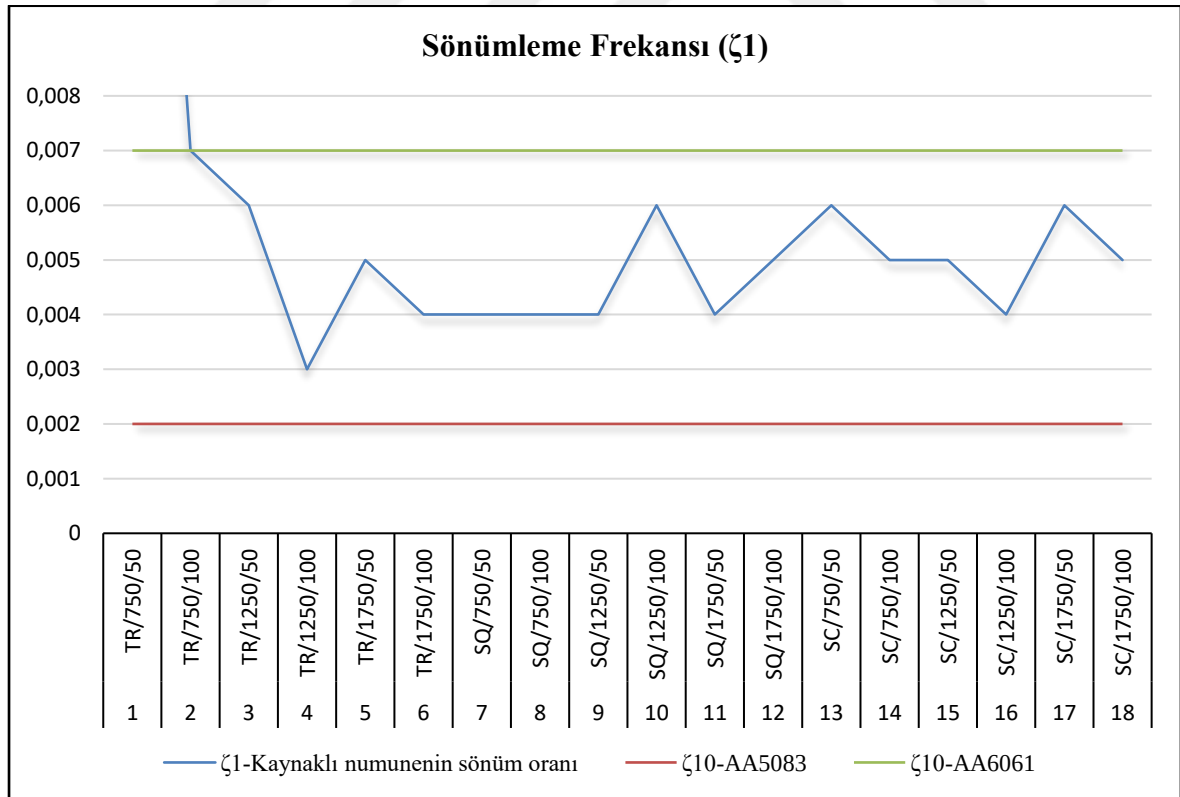
Deney No	Numune Kodu	ω_1 (W1) (Hz) Doğal Frekans	H(W1)	F(W1)	X10(W)	ζ_1 (W1) Sönümleme Frekansı
1	TR/750/50	424,6	0,0017	0,00061	0,000001037	0,022
2	TR/750/100	698,1	0,0055	0,00052	0,00000286	0,007
3	TR/1250/50	698,2	0,0044	0,0005	0,0000022	0,006
4	TR/1250/100	666,9	0,0037	0,00037	0,000001369	0,003
5	TR/1750/50	697,9	0,0054	0,00056	0,000003024	0,005
6	TR/1750/100	688,2	0,0038	0,00047	0,000001786	0,004
7	SQ/750/50	694,3	0,0059	0,0005	0,00000295	0,004
8	SQ/750/100	698,3	0,0051	0,00054	0,000002754	0,004
9	SQ/1250/50	669,3	0,0038	0,0005	0,0000019	0,004
10	SQ/1250/100	683,5	0,0038	0,00058	0,000002204	0,006
11	SQ/1750/50	670,5	0,0061	0,0005	0,00000305	0,004
12	SQ/1750/100	673,9	0,0053	0,00057	0,000003021	0,005
13	SC/750/50	644,5	0,0033	0,00065	0,000002145	0,006
14	SC/750/100	663,4	0,0071	0,00056	0,000003976	0,005
15	SC/1250/50	669	0,0041	0,0005	0,00000205	0,005
16	SC/1250/100	663,9	0,0062	0,00056	0,000003472	0,004
17	SC/1750/50	663,9	0,0053	0,00057	0,000003021	0,006
18	SC/1750/100	683,8	0,0046	0,00051	0,000002346	0,005

Çizelge 6.10 Al 5083 ve Al 6061 Gezici Çekiç Darbe Deneyi Sonuçları

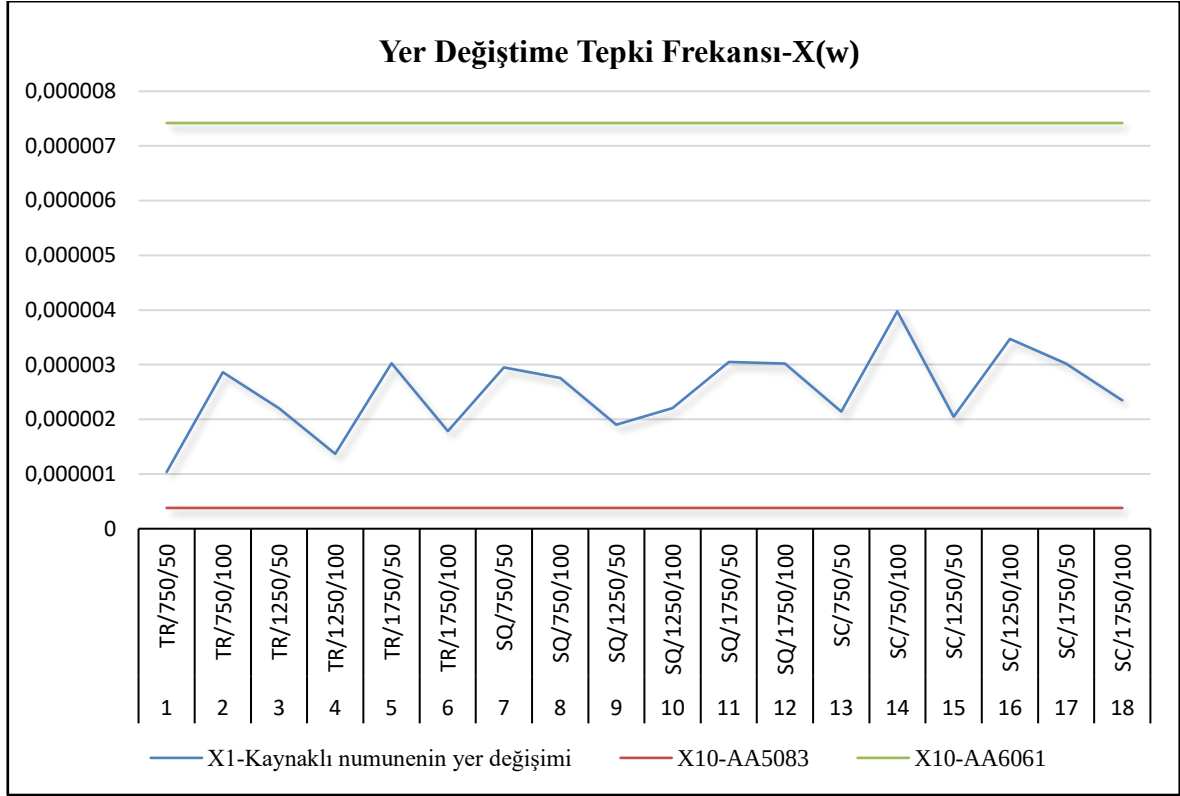
	Numune Kodu	ω_{10} (Hz) Doğal Frekans	H(W1)	F(W1)	X10(W)	ζ_{10} (W1) Sönümleme Frekansı
1	AL5083	692,1	7,348E-02	5,17E-06	3,8E-07	0,002
2	AL6061	688,5	1,16E-02	6,40E-04	7,42E-06	0,007



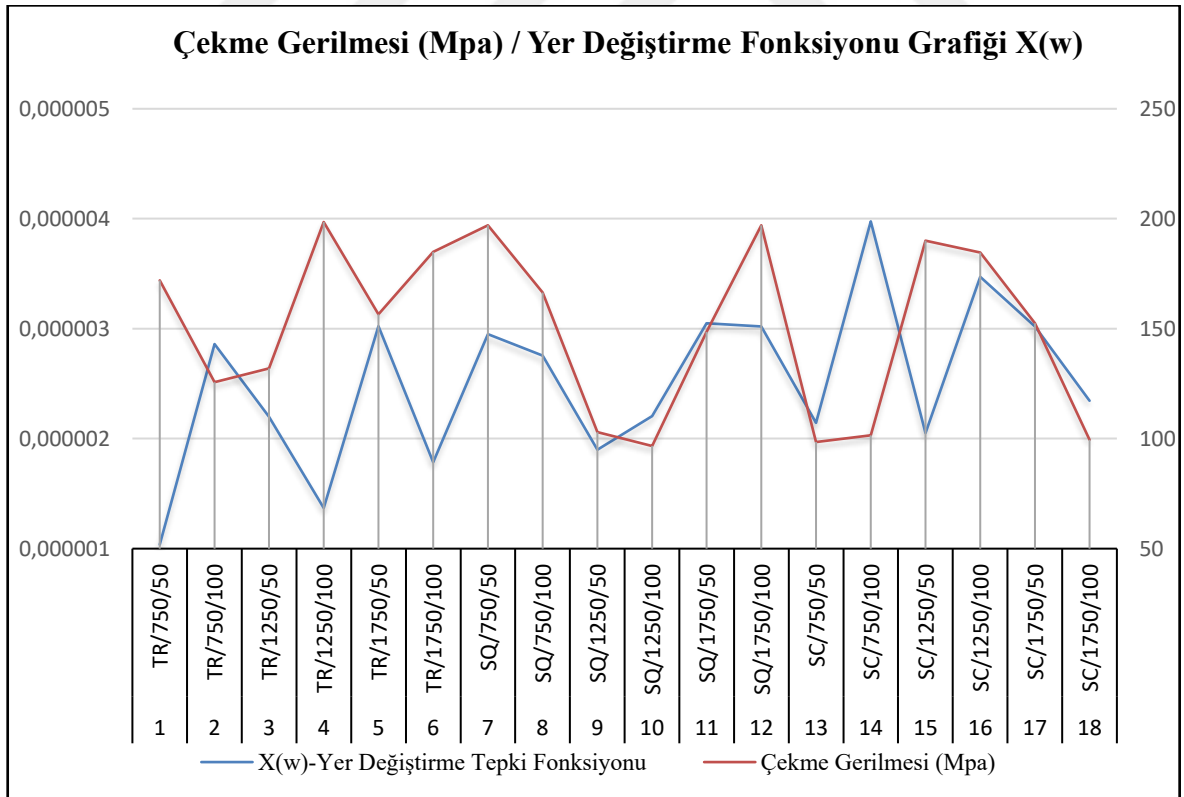
Şekil 6.19 Numunelerin Doğal Frekans Değişimleri



Şekil 6.20 Numunelerin Sönümlleme Frekansları



Şekil 6.21 Numunelerin Yer Değiştirme Fonksiyonuna Tepkileri



Şekil 6.22 Çekme Gerilmesi (Mpa) / Yer Değiştirme Fonksiyonu Grafiği X(w)

Rijitlik, bir cismin uygulanan kuvvete tepki olarak, deformasyona karşı koyma direncidir. Termodinamiğin birinci kanunu olan “Enerjinin korunumu ilkesi”ne göre bir enerji türü yoktan var edilemez; var olan enerji de yok edilemez; sadece bir şekilden diğerine dönüşür. Bir mekanik sistemde, zamanla değişen harici bir yük uygulandığında sisteme kinetik enerji ya da titreşim enerjisi verilmiş olur. Böylece yapıda yer değiştirme durumu oluşur. Mekanik bir sistemde, sisteme verilen enerji atomik yapılar aracılığı ile yapının bir bölümünden diğerine taşınır. Enerjinin minimum kayıpla aktarılabilmesi için sisteme uygulanan kuvvetin frekansı ile yapıdaki atomların ortalama titreşim frekansının aynı olması gerekir.

Yapının modal karakteristliğini belirlemek için yapılan deneysel çalışmalara modal analiz denir. Modal analizde amaç, yapının bir yükün etkisini artıracak frekansları ve bu frekanslardaki modlarını tespit etmektir [67].

Şekil 6.19 incelendiğinde doğal frekans grafiğinde baz metal olan AA5083 ve AA6061’in doğal frekans referans aralığına en yakın değerlerin 6-7 numaralı deney ile birleştirilen numuneler olduğu, karıştırıcı uç geometrilerinin kaynak bölgesinde farklı parametrelere farklı tepkiler verdikleri görülmüştür.

Şekil 6.20’de gösterilen sönümleme frekansı ve şekil 6.21’de gösterilen yer değiştirme tepki frekansı değerlerinin, kaynaksız olarak referans değerleri alınan AL5083 ve AL6061 levhalarının tepki frekansı ve sönümleme frekansı değerleri arasında oldukları görülmüştür.

Şekil 6.21 ve Şekil 6.22’de çekme dayanımları ve modal analizde yer değiştirme tepki fonksiyonu grafiği gösterilmiştir. Üçgen karıştırıcı uç ile yapılan 1-6 numaralı deneylerde yer değiştirme tepkisi azaldığında çekme dayanımının arttığı yer değiştirme tepkisi arttığında ise çekme dayanımının azaldığı gözlemlenmiştir.

Üçgen Karıştırıcı uç ile yapılan deneyler incelendiğinde takım ilerleme hızı parametresinin majör olduğu, üçgen karıştırıcı ucun takım ilerleme hızına tepki verdiği görülmüştür. Takım ilerleme hızını değiştğinde doğal frekansta ani değişimler görülmüştür.

Kare karıştırıcı uç ile yapılan deneylerde takım devir hızının değişiminin majör olduğu, takım devri değiştğinde kare ucun doğal frekansında ani değişimler olduğu görülmüştür.

Vida karıştırıcı uçta ise vida karıştırıcı ucun kaynak bölgesinde oluşturduğu yapı parametre değişimlerinin neredeyse hepsine olumlu tepki verdiği ve şekil 6.19’da gösterilen doğal frekans değerlerinin arttığı görülmüştür.

6.5. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ ARAŞTIRMA SONUÇLARI

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Teknolab Malzeme Mühendisliği Laboratuvarında bulunan Taylor Hobson Surtronic 25 isimli yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazında iki tekrarlı olarak veriler alınmış ve bu verilerin ortalamaları dikkate alınarak veriler yorumlanmıştır. ASME B46.1-2002’de yüzey pürüzlülük parametresi olarak tanımlanan Ra (Değerlendirilen Profilin Aritmetik Ortalama Sapma Değeri) değerleri dikkate alınarak hesaplamalar yapılmıştır.

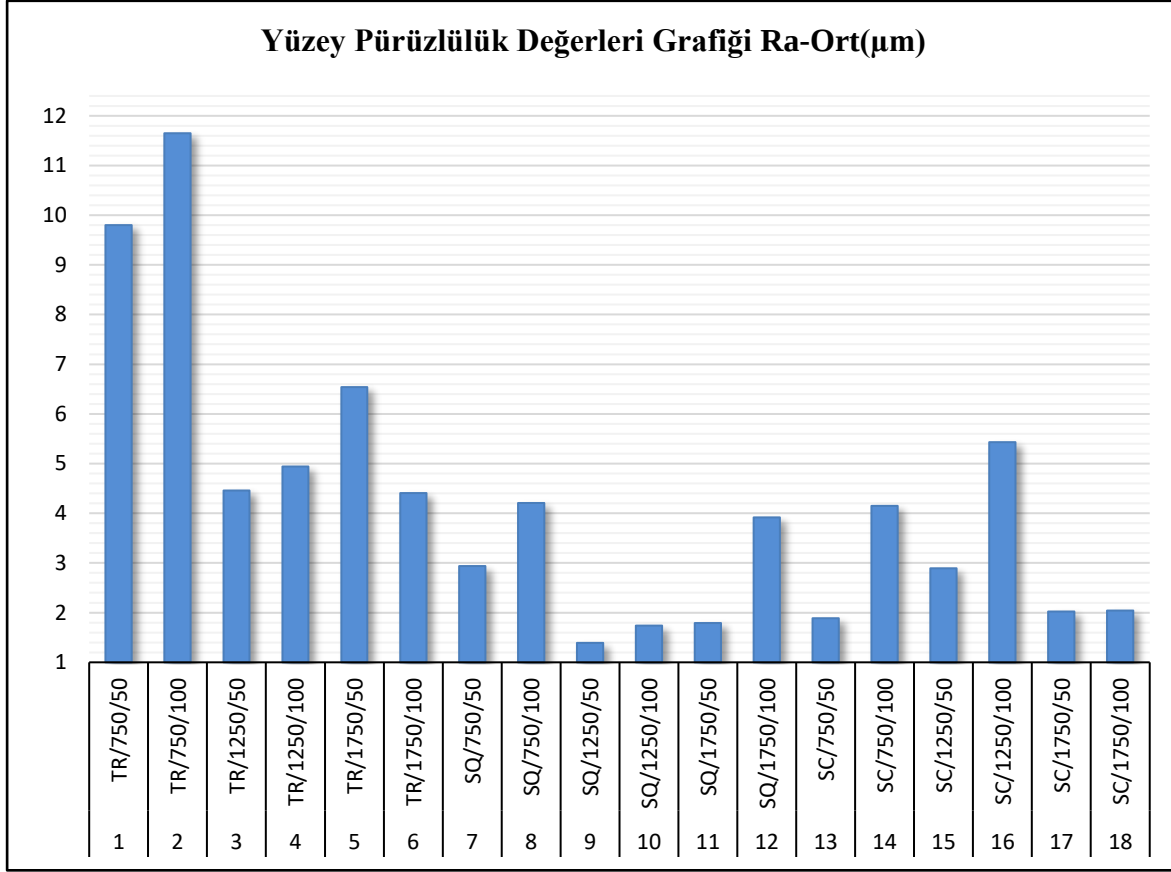
6.5.1. Yüzey Pürüzlülük Değerleri ve Grafiği

Elde edilen yüzey pürüzlülük değerleri Çizelge 6.11’de gösterilmiştir.

Çizelge 6.11 Yüzey Pürüzlülük Değerleri

	Numune Kodu	Ra-1 (μm)	Ra-2 (μm)	Ra-Ort (μm)
1	TR/750/50	11,9	7,7	9,80
2	TR/750/100	13,1	10,2	11,65
3	TR/1250/50	4,7	4,21	4,46
4	TR/1250/100	5,19	4,69	4,94
5	TR/1750/50	7,07	6	6,54
6	TR/1750/100	4,27	4,55	4,41
7	SQ/750/50	2,92	2,95	2,94
8	SQ/750/100	4,34	4,08	4,21
9	SQ/1250/50	1,24	1,53	1,39
10	SQ/1250/100	1,71	1,77	1,74
11	SQ/1750/50	2,02	1,56	1,79
12	SQ/1750/100	3,89	3,95	3,92
13	SC/750/50	2,74	1,03	1,89
14	SC/750/100	2,38	5,92	4,15
15	SC/1250/50	3,54	2,23	2,89
16	SC/1250/100	4,82	6,04	5,43
17	SC/1750/50	1,94	2,09	2,02
18	SC/1750/100	2,57	1,5	2,04

En düşük yüzey pürüzlülüğü değerinin 9 numaralı SQ/1250/50 kodlu numunede olduğu, en yüksek yüzey pürüzlülüğünün ise 2 numaralı TR/750/100 kodlu numunede olduğu görülmüştür. Yüzey pürüzlülük değerleri grafiği Şekil 6.23’de gösterilmiştir.



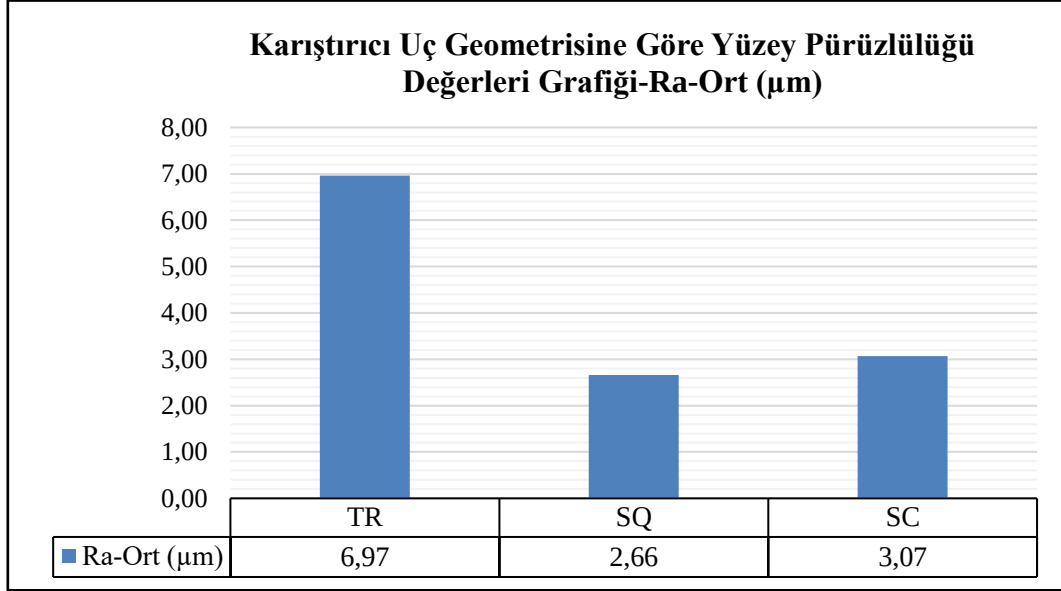
Şekil 6.23 Yüzey Pürüzlülük Değerleri Grafiği

6.5.2. Karıştırıcı Uç Geometrisine Göre Yüzey Pürüzlülük Ortalama Değerleri

Karıştırıcı uç geometrilerinin herbiri ayrı ayrı gruplandırılarak ortalama yüzey pürüzlülük değerleri elde edilmiştir. En düşük yüzey pürüzlülük değerinin kare karıştırıcı uça (SQ) olduğu görülmüştür. Vida karıştırıcı uç yüzey pürüzlülük değeri kare karıştırıcı uca oranla %15 daha fazla değere sahipken üçgen karıştırıcı ucun yüzey pürüzlülük değerinin ise kare karıştırıcı uca oranla %162 daha fazla olduğu görülmüştür. Çizelge 6.12’de karıştırıcı uç geometrisine göre ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri, şekil 6.24’de ise karıştırıcı uç geometrisine göre yüzey pürüzlülüğü değerleri grafiği gösterilmiştir.

Çizelge 6.12 Karıştırıcı Uç Geometrisine Göre Ortalama Ra Değerleri

Karıştırıcı Uç Geometrisi	Ra-Ort (μm)
TR	6,97
SQ	2,66
SC	3,07



Şekil 6.24 Karıştırıcı Uç Geometrisine Göre Yüzey Pürüzlülüğü Değerleri Grafiği

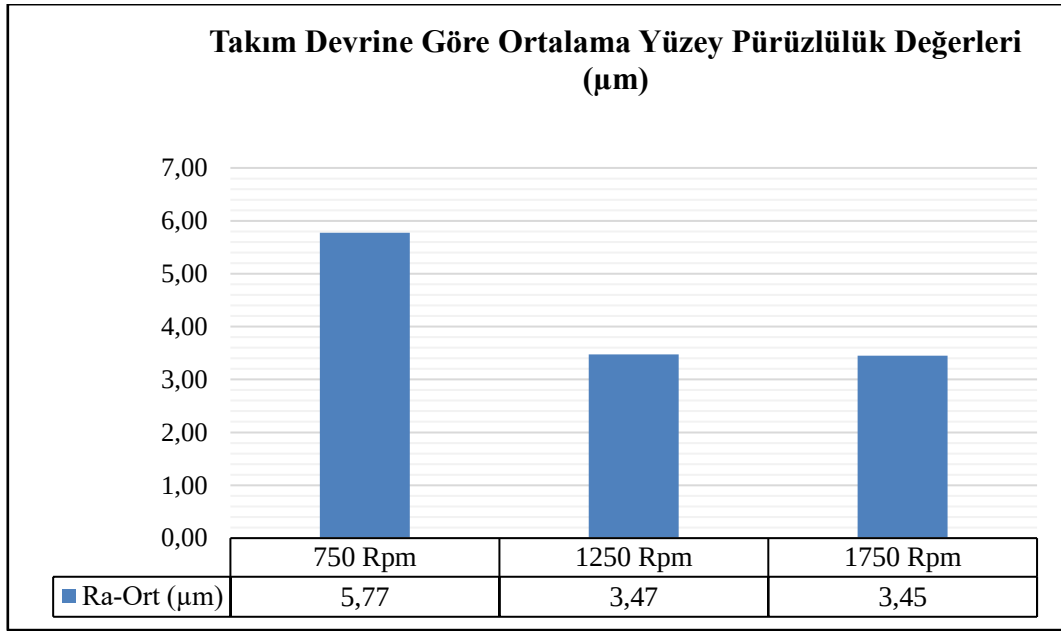
6.5.3. Takım Dönme Hızına Göre Yüzey Pürüzlülük Ortalama Değerleri

Deneylerde uygulanan takım devirleri (750, 1250, 1750 Rpm) ayrı ayrı gruplanarak takım devirlerine göre ortalama yüzey pürüzlülük değerleri elde edilmiştir. En düşük yüzey pürüzlülük değerinin 1750 Rpm takım devrinde olduğu görülmüştür. 1250 Rpm takım devrinin, 1750 Rpm takım devrine göre %1 fazla olduğu 750 Rpm takım devrinin 1750 Rpm takım devrine göre %67 daha fazla değere sahip olduğu görülmüştür.

Çizelge 6.13’de takım devrine göre ortalama Ra değerleri, Şekil 6.25’de ise takım devrine göre yüzey pürüzlülüğü değerleri grafiği gösterilmiştir.

Çizelge 6.13 Takım Devrine Göre Ortalama Ra Değerleri

Takım Devri (Rpm)	Ra-Ort (μm)
750 Rpm	5,77
1250 Rpm	3,47
1750 Rpm	3,45



Şekil 6.25 Takım Devrine Göre Yüzey Pürüzlülüğü Değerleri Grafiği

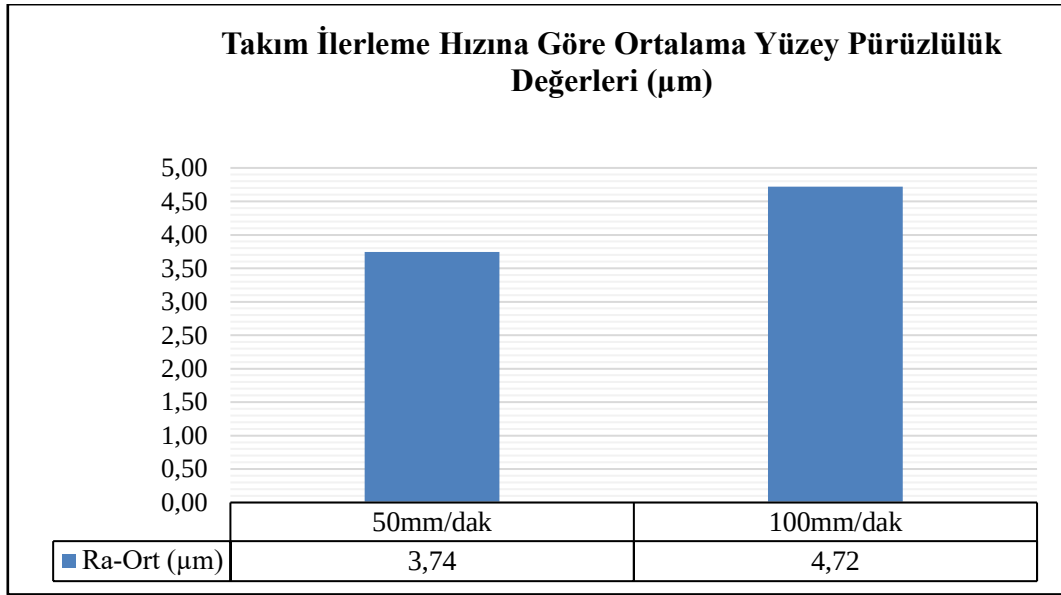
6.5.4. Takım İlerleme Hızına Göre Yüzey Pürüzlülük Ortalama Değerleri

Deneylerde uygulanan takım ilerleme hızları (50 mm/dak, 100 mm/dak) ayrı ayrı gruplanarak takım ilerleme hızlarına göre ortalama yüzey pürüzlülük değerleri elde edilmiştir. En düşük yüzey pürüzlülük değerinin 50mm/dak takım ilerleme hızında olduğu görülmüştür. 100 mm/dak takım ilerleme hızının 50mm/dak takım ilerleme hızına göre %26 daha fazla olduğu görülmüştür.

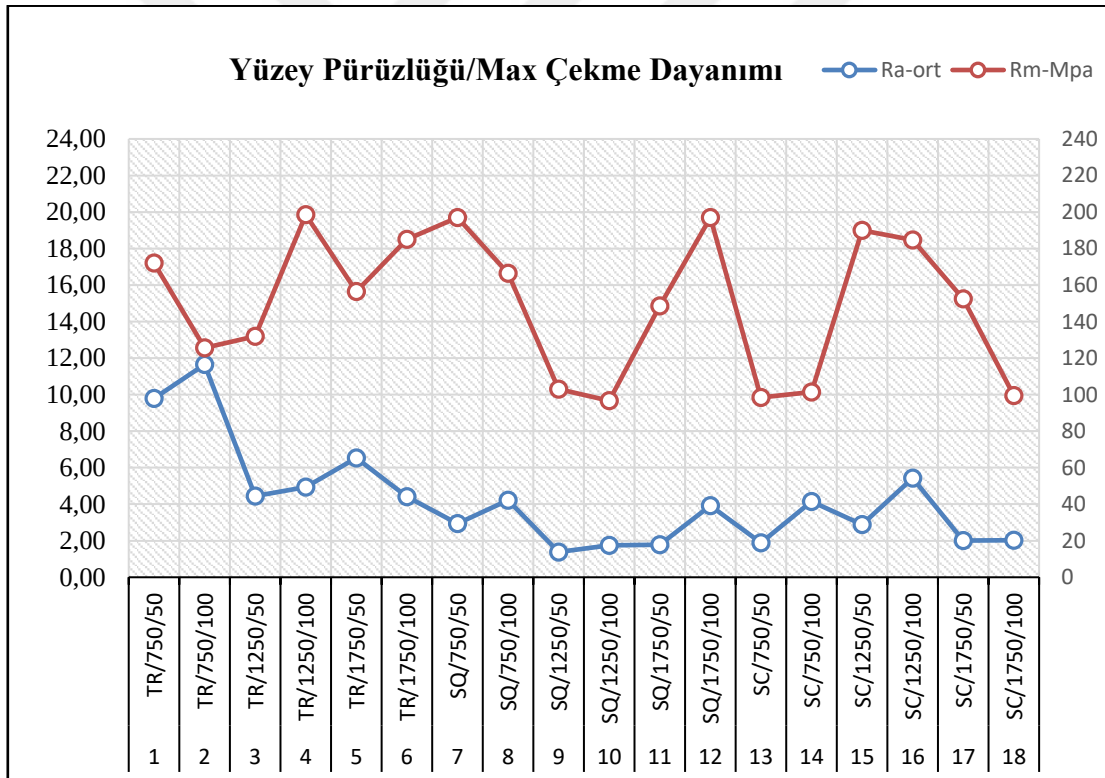
Çizelge 6.14’de takım devrine göre ortalama Ra değerleri, Şekil 6.26’de ise takım devrine göre yüzey pürüzlülüğü değerleri grafiği gösterilmiştir.

Çizelge 6.14 Takım İlerleme Hızına Göre Ortalama Ra Değerleri

İlerleme Hızı (mm/dak)	Ra-ort (μm)
50mm/dak	3,74
100mm/dak	4,72



Şekil 6.26 Takım İlerleme Hızına Göre Yüzey Pürüzlülüğü Değerleri Grafiği



Şekil 6.27 Yüzey Pürüzlülüğü/Max Çekme Dayanımı

Şekil 6.27’de yüzey pürüzlülük değerleri ile max çekme dayanımı verileri karşılaştırılmıştır. Elde edilen verilere göre en düşük pürüzlülük değerleri vida ve kare uçlu karıştırıcı uçlarda elde edilirken ortalama çekme dayanımı en yüksek üçgen uçlu karıştırıcı uça elde edilmiştir.

BÖLÜM 7

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu deneysel çalışmada, AA5083/AA6061 alaşımları üç farklı karıştırıcı uç geometrisi (üçgen, kare ve vida), üç farklı ilerleme hızı (750, 1250 ve 1750 rpm) ve iki dönüş hızı (50 ve 100 mm/dak) ile birleştirilmiştir. Sonrasında karıştırıcı uç geometrisi, ilerleme hızı ve dönme hızı parametrelerinin kaynak bölgesindeki mikrosertlik ve çekme gerilmesi üzerindeki etkileri araştırılmış modal analiz ile kaynak bölgesinin davranış biçimleri incelenmiştir.

Yapılan çekme deneyleri sonucu en yüksek çekme gerilmesi 1250 Rpm ve 100 mm/dak parametrelerinde 198.5 Mpa olarak üçgen karıştırıcı uç geometrisinde, elde edilmiştir. Sonraki en yüksek çekme gerilmesi değeri kare uç ile 750 Rpm / 50 mm/dak ve 1750 Rpm /100 mm/dak ile 197 Mpa olarak bulunmuştur. Kare karıştırıcı uç geometrisinde 1250 Rpm’de her iki ilerleme hızında da mekanik özelliklerin azaldığı görülmüştür.

- Karıştırıcı uç geometrisine göre ortalama %kaynak performanları incelendiğinde üçgen karıştırıcı ucun %57.25, kare karıştırıcı ucun %53.65, vida karıştırıcı ucun ise %48.81 kaynak performansına sahip olduğu;
- Takım devir hızına göre kaynak performansı karşılaştırıldığında 750 Rpm takım devir hızının %50.84, 1250 Rpm takım devir hızının %53.42, 1750 Rpm takım devir hızının %55.44 kaynak performansına sahip olduğu;
- Takım ilerleme hızına göre kaynak performansı karşılaştırıldığında 50 mm/dak takım ilerleme hızının %53.13, 100mm/dak takım ilerleme hızının %53.33 kaynak performansına sahip olduğu görülmüştür.

Sürtünmeden kaynaklanan ısının ilerleme hızı ile arttığı, dönme hızının ise malzeme akışını kolaylaştırdığı söylenebilir.

Yapılan deney sonuçları ve oluşturulan grafikler incelendiğinde çekme dayanımına en yüksek etkinin karıştırıcı uç geometrisi tarafından yapıldığı, takım devir hızının etki sıralamasında karıştırıcı uç geometrisinden sonra geldiği takım ilerleme hızının ise en az etkiye sahip parametre olduğu belirlenmiştir.

Literatür incelendiğinde SKK ile birleştirilen numunelerin kaynak kalitesini belirlemek için mekanik testlerden yararlanıldığı görülmektedir. Bu çalışmada, modal analiz kullanılarak kaynak kalitesi ve parametrelerin kaynak kalitesi üzerine olan etkileri değerlendirilmiştir. Modal analizin kaynak kalitesini belirlemede kullanılabilirliği tartışılmıştır.

Tüm SKK örneklerinin modal analizi, birinci doğal frekansa (ω_1), sönüm oranına ($\zeta(\omega_1)$) ve yer değiştirme tepki fonksiyonuna ($X(\omega_1)$) göre yapılmıştır.

Modal analiz sonuçlarında her bir karıştırıcı ucun kaynak bölgesinde farklı parametrelere farklı tepkiler verdikleri görülmüştür.

$X(\omega_1)$ için, 50 mm/dak ilerleme hızına göre: üçgen karıştırıcı uç artan hız ile artarken, diğer karıştırıcı uç ile birleştirilen numunelerde dalgalanma meydana gelmiştir. Öte yandan 100 mm/dak dönüş hızı ile üçgen ve vida karıştırıcı uç ile birleştirilen numunelerde azalma olurken, kare karıştırıcı uçta stabil hale gelmiştir. 50 mm/dak için $\zeta(\omega_1)$ dikkate alındığında, 1250 rpm'ye kadar üç karıştırıcı uç da $\zeta(\omega_1)$ 'de önemli bir azalma olmuştur.

Üçgen karıştırıcı uç ile yapılan deneyler incelendiğinde takım ilerleme hızı parametresinin majör olduğu üçgen karıştırıcı ucun yer değişimine tepki verdiği görülmüştür. Kare karıştırıcı uç ile yapılan deneylerde takım devrinin majör olduğu takım devri değiştiğinde kare ucun doğal frekansındaki değişimler görülmektedir. Vida karıştırıcı uçta ise vida karıştırıcı ucun yapısından ve oluşturduğu kaynak bölgesine bağlı olarak parametre değişimlerinin hepsine tepki verdiği görülmüştür.

Sönümleme frekansı ve yer değiştirme tepki frekansının değerlerinin, baz metal olarak alınan AL5083 ve AL6061 levhalarının değerleri arasında oldukları görülmüş doğal frekans ve sönümleme frekansının birbiri ile uyumlu olduğu görülmüştür.

Modal analizin numunelerin davranışları ve kaynak bölgesinin karakterizasyonu hakkında bilgiler verdiği görülmüştür.

Mikrosertlik katalog değerleri olan AA5083 (91) HV ile AA6061 (107) HV arasındadır. Ana metalden ısıdan etkilenen bölgeye yaklaşıldığında sertlik değerleri düşmektedir. AA6061 tarafındaki sertlik azalmasının daha hızlı olduğu görülmüştür. Bunun nedeni oldukça yumuşak olan AA5083 partiküllerinin karıştırma bölgesine girdiklerinde daha yumuşak bir yapı oluşturmasıdır. Ayrıca, ısı etkisi altındaki daha geniş alan nedeniyle, AA5083'ün sürtünme sırasında oluşan ısıdan daha fazla etkilendiği düşünülmektedir.

Karıştırıcı uç geometrisinin mikrosertliğe etkisinin düşük olduğu ancak karıştırıcı uç geometrilerinin homojen yapının oluşması konusunda etkili olduğu ve çekme dayanımına etki ettikleri görülmüştür.

Genel olarak, farklı uç geometrilerinin SKK sırasında omuz sürtünmesi tarafından üretilen ısıdan etkilenen bölgede (kaynak bölgesi ve çevresi), SKK'dan sonraki sertlik profili üzerindeki etkisinin çok az olduğu görülmüştür.

Yüzey pürüzlülük değerlerinin karıştırıcı ucun geometrik yapısına göre ortalaması incelendiğinde en düşük yüzey pürüzlülük değerinin sonucunun kare karıştırıcı uç ile yapılan deneylerde elde edildiği, vida karıştırıcı ucun kare karıştırıcı uca yakın bir sonucunun olduğu üçgen uca ise en yüksek yüzey pürüzlülük değerlerinin olduğu görülmüştür. Takım dönme hızına göre bakıldığında ortalama en iyi sonucu 1250 ve 1750 Rpm değerlerinde görüldüğü, 1250 ve 1750 Rpm'e göre düşük olan 750 Rpm takım dönme hızının yüzey pürüzlülüğüne negatif yansıdığı görülmüştür. Takım ilerleme hızına göre en iyi sonuç 50 mm/dak ilerleme hızında bulunmuştur. Takım ilerleme hızının yüksek olması yüzey pürüzlülüğünü olumsuz etkilemiştir. Yüzey pürüzlüğünde etki sıralaması verilen yüzde oranları göz önüne alındığında karıştırıcı uç geometrisi, takım dönme hızı ve ilerleme hızı sırasında olduğu görülmüştür.

Karıştırıcı uç geometrisine göre alınan yüzey pürüzlülük değerleri, çekme gerilmesi ile kıyaslandığında ortalama yüzey pürüzlülük değeri olarak vida ve kare uçların ön plana çıktığı görülürken ortalama çekme dayanımı verilerinde üçgen karıştırıcı ucun daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Bununla birlikte 4-TR/1250/100, 7-SQ/750/50, 12-SQ/750/100, 15-

SC/1250/50 kodlu deney numunelerinin çekme gerilme değerlerinin yüksek, yüzey pürüzlülük değerlerinin düşük olduğu görülmüştür.



KAYNAKLAR

- [1] **Bozu M** (2007) Sürtünme Karıştırma Kaynağında Farklı Parametrelerin Deneysel Olarak İncelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Eğitimi Anabilim Dalı, Ankara, 130 s.
- [2] **Kumar Rajak and Eyvazian A** (2020) Friction-based welding processes: friction welding and friction stir welding. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 34 (24): 2613–2637.
- [3] **Güçlüer S** (2007) Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile Alın Kaynağı Yapılmış Al-5086 H32 Levhalarının Mekanik Olarak İncelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*. Mustafa Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Hatay, 51 s.
- [4] **Lakshminarayanan A K and Balasubramanian** (2009) Effect of welding processes on tensile properties of AA6061 aluminium alloy joints. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 40 (3–4): 286–296.
- [5] **Vigneshwar M and Palanikumar K** (2018) Analysis of Mechanical, Metallurgical and Fatigue Behavior of Friction Welded AA6061-AA2024 Dissimilar Aluminum Alloys in Optimized Condition. *Materials Today: Proceedings*, 5 (2): 7853–7863.
- [6] **Ersözlü İ** (2011) Sürtünme Kaynaklı Aisi 316 Ve CK 45 Çeliklerinin Mikroyapı Ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. *Doktora Tezi*. Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Balıkesir, 170 s.
- [7] **DebRoy T and Bhadeshia H** (2010) Friction stir welding of dissimilar alloys-A perspective. *Science and Technology of Welding and Joining*, 15 (4): 266–270.
- [8] **Kuyumcuoğlu A** (2008) Çalışma Şartlarında Modal Analiz. *Yüksek Lisans Tezi*. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 126 s.
- [9] **Teoman E** (2005) AA 6063-T6 Borularının Sürtünme Karıştırma Kaynağı Yöntmiyle Kaynak Edilebilirliğinin İncelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*. Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Kayseri, 90 s.
- [10] **Anik S** (1991) *Kaynak Tekniği El Kitabı*. GEV Gedik Eğitim Vakfı Kaynak Teknolojisi Eğitim Araştırma ve Muayene Enstitüsü, e-kitap, 244 s.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- [11] **Anık S ve Vural M** (1997) *Gazaltı Ark Kaynağı*. GEV Gedik Eğitim Vakfı Kaynak Teknolojisi Eğitim Araştırma ve Muayene Enstitüsü Yayın No: 3 (TIG-MIG-MAG), e-kitap, 300 s.
- [12] **Eryürek İ B** (2007) *Kaynak Teknolojisi*. 2.Baskı, Kaynak Tekniği Sanayi ve Tic A.Ş, İstanbul, 47-120.
- [13] **Madavi and Lohar G S** (2022) Metal inert gas (MIG) welding process: A study of effect of welding parameters. *Materials Today: Proceedings*, 51: 690–698.
- [14] **Megep** (2006) *Metal Teknolojisi Mig Kaynağı*. Ankara, 37s.
- [15] **Kahraman N ve Gülenç B** (2020) *Modern Kaynak Teknolojisi*, 4. Baskı. Epa-Mat Basım Yayın Ltd. Şti, 160-184.
- [16] **Sahoo A and Tripathy S** (2021) Development in plasma arc welding process: A review. *Materials Today: Proceedings*, 41: 363–368.
- [17] **Wu C S and Zhang, X Y** (2014) Plasma arc welding: Process, sensing, control and modeling. *Journal of Manufacturing Processes*, 16 (1): 74–85.
- [18] **Singh A and Singh R P** (2020) A review of effect of welding parameters on the mechanical properties of weld in submerged arc welding process. *Materials Today: Proceedings*, 26: 1714–1717.
- [19] **Sharma H and Singh, R. P** (2020) A review paper on effect of input welding process parameters on structure and properties of weld in submerged arc welding process”, *Materials Today: Proceedings*, 26: 1931–1935.
- [20] **Zhou K and Yao P** (2019) Overview of recent advances of process analysis and quality control in resistance spot welding. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 124: 170–198.
- [21] **Vigneshkumar M and Varun P** (2021) Challenges and possibilities in the resistance spot welding of dissimilar metals – A review. *Materials Today: Proceedings*, 1-4.
- [22] **Phillips D H** (2016) *Welding Engineering*, 1st edition, ISBN: 978-1-118-76644-6, John Wiley & Sons, e-book, 273 s.
- [23] **Węglowski and Phillips A** (2016) Electron beam welding – Techniques and trends – Review. *Vacuum*, 130: 72–92.
- [24] **Dawes C** (1992) Principles of laser welding and its characteristics. *Laser Welding*, Elsevier, 16–30.
- [25] **Singh R** (2012) *Welding and Joining Processes*. *Applied Welding Engineering*, Elsevier, 1st edition , eBook ISBN: 9780123919175, InTech, e-book, 147–170.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- [26] **Swift K G. and Booker J D** (2013) Joining Processes. *Manufacturing Process Selection Handbook*, Elsevier, ISBN 978-0-08-099360-7, InTech, e-book, 291–349.
- [27] **Blunt J. and Balchin N C** (2002) Thermit Welding. *Health and Safety in Welding and Allied Processes*, 5th Edition, eBook ISBN: 9781855737488, Elsevier, InTech, e-book, 148–152.
- [28] **Weman K** (2011) *Welding Processes Handbook*. 2nd Edition, eBook ISBN: 9780857095183, Woodhead Publishing, e-book, 280.
- [29] **Sahin M** (2009) Joining of stainless-steel and aluminium materials by friction welding. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 41 (5–6): 487–497.
- [30] **Lumley R N (Ed.)** (2010) *Fundamentals of aluminium metallurgy: Production, processing and applications*. eBook ISBN: 9780857090256, Woodhead Publishing Limited ,e-book, 864.
- [31] **Olson D L and Edwards G R** (1993) Welding, Brazing, and Soldering Volume 6 of the Asm Handbook.”, ISBN: 978-0-87170-382-8, Asm International, c.6, e-book, 1299.
- [32] **Loureiro A and Mendes R** (2021) Advanced Joining Processes: *Welding, Plastic Deformation, and Adhesion*, eBook ISBN: 9780128208878, Elsevier, InTech, e-book , 207–237.
- [33] **Findik F** (2011) Recent developments in explosive welding. *Materials & Design*, 32 (3): 1081–1093.
- [34] **Neppiras E A** (1965) Ultrasonic welding of metals. *Ultrasonics*, 3 (3):128–135.
- [35] **Bergmann J P and Pöthig P** (2021) Ultrasonic welding. *Advanced Joining Processes*, Elsevier, 239–267.
- [36] **Matheny M P and Graff K F** (2015) *Ultrasonic welding of metals*. Elsevier Ltd., 259-293.
- [37] **Ahmad Mir and Parvez S** (2022) Friction based solid state welding – A review. *Materials Today: Proceedings*, 62: 55–62.
- [38] **Ghali E** (2010) Properties, Use, and Performance of Aluminum and Its Alloys. *Corrosion Resistance of Aluminum and Magnesium Alloys*, ISBN: 978-0-471-71576-4, Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, InTech, e-book, 121–175.
- [39] **Christian V and Hugh, D** (2020) *Corrosion of Aluminium*. 2nd Edition, eBook ISBN: 9780080999272, InTech, Elsevier, e-book, 447-505.
- [40] **Kaufman J G** (2006) *Mechanical Engineers Handbook: Materials and Mechanical Design*, 3rd edition, Online ISBN:9780471777441, John Wiley & Sons, InTech, e-book, 59-115.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- [41] **Mishra R S and Ma Z Y** (2005) Friction stir welding and processing. *Materials Science and Engineering R: Reports*, 50 (1–2): 1–78.
- [42] **Braga D F O E and Moreira P M G P** (2021) Friction stir welding. *Advanced Joining Processes*, Elsevier, 2021, 173–206.
- [43] **Akinlabi E T and Mahamood R M** (2020) Solid-State Welding: *Friction and Friction Stir Welding Processes*. 1st edition, eBook ISBN: 978-3-030-37015-2, Springer Cham, InTech, e-book, 39–73.
- [44] **Başar G** (2016) Cu-Al Levhaların Sürtünme Karıştırma Kaynağı İle Birleştirilmesinde Optimum Kaynak Parametrelerinin Belirlenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, İskenderun Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Hatay, 76s.
- [45] **Vilaça P and Thomas W** (2011) *Friction Stir Welding Technology*. ISBN 978-3-642-18187-0, InTech, e-book, 85–124.
- [46] **Mishra R S. and Sidhar H** (2017) Friction Stir Welding. *Friction Stir Welding of 2XXX Aluminum Alloys Including Al-Li Alloys*, Elsevier, eBook ISBN: 9780128092927, 1–13.
- [47] **Zhang Y N and Wanjara P** (2012) Review of tools for friction stir welding and processing”, *Canadian Metallurgical Quarterly*, 51(3): 250–261.
- [48] **Nandan R and DebRoy, T** (2008) Recent advances in friction-stir welding - Process, weldment structure and properties. *Progress in Materials Science*, 53 (6): 980–1023.
- [49] **Threadgill P L and Withers P J** (2009) Friction stir welding of aluminium alloys. *International Materials Reviews*, 54(2): 49–93.
- [50] **Mo J P T and Das R** (2019) Mechanical Vibration, *Demystifying Numerical Models*, 1st Edition, eBook ISBN: 9780081017562, Elsevier, InTech, e-book, 209–233.
- [51] **Jauregui Correa and Lozano Guzman A A** (2020) Fundamentals of mechanical vibrations. *Mechanical Vibrations and Condition Monitoring*, 1st Edition, ISBN 978-0-12-819796-7, Elsevier, InTech, e-book, 1–26.
- [52] **Baykara Vecdi İ** (2009) Titreşim Analizi ile Şanzımanlarda Arıza Teşhisi ve Kestirimci Bakım. *Yüksek Lisans Tezi*. Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Zonguldak, 102 s.
- [53] **Erol S S** (2015) Dinamik Sistemlerin Kestirimci Bakımına Etki Eden Faktörlerin Durum Bazlı İncelenmesi. *Doktora Tezi*. Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Denizli, 159 s.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- [54] **Baysal E** (2019) AA6013 / AA7075 Alüminyum Malzemelerin Sürtünme Kaynağı Yöntemiyle Birleştirilmesi Ve Analizi, *Yüksek Lisans Tezi*, Zonguldak, Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Zonguldak, 79 s.
- [55] **Karadayı H M** (2011) Titreşim analizi ile pompalarda arıza tespiti ve kestirimci bakım uygulamaları, *Yüksek Lisans Tezi*, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Balıkesir, 95 s.
- [56] **Karahan M M** (2005) Titreşim analizi ile makinelerde arıza teşhisi, *Yüksek Lisans Tezi*, Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Manisa, 93 s.
- [57] **Şenveli E** (2018) Taşıt titreşim kaynağı tespit yöntemleri ve uygulaması, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, İstanbul, 73 s.
- [58] **Yadav and Kotadiya D** (2020) Examination of Mechanical Property for Friction Stir Welding Joint of Al6061 and Al5083. *Materials Today: Proceedings*, 24: 731–737.
- [59] **Heirani F and Ardestani M** (2017) Effects of processing parameters on microstructure and mechanical behaviors of underwater friction stir welding of Al5083 alloy. *Journal of Manufacturing Processes*, 25: 77–84.
- [60] **Jia H and Chen G** (2022) Evaluation of axial force, tool torque and weld quality of friction stir welded dissimilar 6061/5083 aluminum alloys. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 37: 267–277.
- [61] **Elatharasan G and Karthikeyan G** (2021) Multi-response optimization of process parameters in friction stir welding of dissimilar aluminum alloys by Grey relation analysis (AA 6061-T6 & AA5083-H111). *Materials Today: Proceedings*, 37: 1172–1182.
- [62] **K S and Jayakumar K** (2022) Effect of tool pin profile on the mechanical and microstructural properties of dissimilar friction stir welded AA5083-H111 and AA6061-T6 aluminium alloys. *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, 45 (3): 227–236.
- [63] **Rajaseelan S L** (2020) Mechanical Properties and Microstructural Characterization of Dissimilar Friction Stir Welded AA5083 and AA6061 Aluminium Alloys. *Mechanics*, 26 (6): 545–552.
- [64] **Kumar K. and Satyanarayana M** (2022) Effect of friction stir welding parameters on the material flow, mechanical properties and corrosion behavior of dissimilar AA5083-AA6061 joints”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 236 (6): 2901–2917.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- [65] **Nhan P T** (2020) Effect of the Welding Parameters on Mechanical Properties of AA5083 Friction Stir Welding. *2020 5th International Conference on Green Technology and Sustainable Development (GTSD)*, 15–18.
- [66] **Devaiah D and Laxminarayana P** (2018) Optimal FSW process parameters for dissimilar aluminium alloys (AA5083 and AA6061) Using Taguchi Technique”, *Materials Today: Proceedings*, 5 (2): 4607–4614,
- [67] **Dr.Çağlayan İ H** (2009) Rezonans Makinaların ve Yapıların Gizli Düşmanı. *Mühendis ve Makina*, 50 (598): 55–60.



ÖZGEÇMİŞ

Emre Can ÇAVUŞ

2009 yılında Zonguldak Atatürk

Anadolu Lisesinden, 2015 yılında Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünden mezun oldu. Anadolu Üniversitesi Adalet, Web Tasarımı ve Kodlama ile İşletme bölümleri mezunudur. Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümünde eğitimine devam etmektedir. Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Rektörlüğünde görev yapmaktadır.