



**MIG VE SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAK
YÖNTEMLERİ İLE BİRLEŞTİRİLEN FARKLI
ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ MEKANİK VE
MİKROYAPI ÖZELLİKLERİNİN
KARŞILAŞTIRILMASI**

Ali YÜRÜK

**2020
DOKTORA TEZİ
İMALAT MÜHENDİSLİĞİ**

**Tez Danışmanı
Prof. Dr. Nizamettin KAHRAMAN**

**MIG VE SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAK YÖNTEMLERİ İLE
BİRLEŞTİRİLEN FARKLI ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ MEKANİK
VE MİKROYAPI ÖZELLİKLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI**

Ali YÜRÜK

**T.C.
Karabük Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
İmalat Mühendisliği Anabilim Dalında
Doktora Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

**Tez Danışmanı
Prof. Dr. Nizamettin KAHRAMAN**

**KARABÜK
Aralık 2020**

Ali YÜRÜK tarafından hazırlanan “MIG VE SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAK YÖNTEMLERİ İLE BİRLEŞTİRİLEN FARKLI ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ MEKANİK VE MİKROYAPI ÖZELLİKLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI” başlıklı bu tezin Doktora Tezi olarak uygun olduğunu onaylarız.

Prof. Dr. Nizamettin KAHRAMAN
Tez Danışmanı, İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı

Doç. Dr. Bekir ÇEVİK
2. Tez Danışmanı, Düzce Üniversitesi Gümüşova MYO

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile İmalat Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir. 18/12/2020

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu) İmzası

Başkan : Prof. Dr. Behçet GÜLENC (GÜ)

Üye : Prof. Dr. Nizamettin KAHRAMAN (KBÜ)

Üye : Prof. Dr. Ahmet DURGUTLU (GÜ)

Üye : Prof. Dr. Süleyman GÜNDÜZ (KBÜ)

Üye : Doç. Dr. Yakup KAYA (KBÜ)

KBÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Doktora derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Hasan SOLMAZ
Lisansüstü Eğitim 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.”

Ali YÜRÜK

ÖZET

Doktora Tezi

MIG VE SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAK YÖNTEMLERİ İLE BİRLEŞTİRİLEN FARKLI ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ MEKANİK VE MİKROYAPI ÖZELLİKLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

Ali YÜRÜK

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanları:

Prof. Dr. Nizamettin KAHRAMAN

Doç. Dr. Bekir ÇEVİK

Aralık 2020, 175 Sayfa

Bu çalışmada, AA-5754 ile AA-6013 alüminyum alaşımı malzemeler sürtünme karıştırma (SKK) ve MIG kaynak yöntemleriyle birleştirilmiştir. Birleştirme işlemleri farklı kaynak parametreleri uygulanarak gerçekleştirilmiştir. SKK kaynak yönteminde farklı kaynak hızları, MIG kaynak yönteminde ise farklı kaynak hızları ve değişen kaynak akımları kullanılmıştır. Kaynak işlemi uygulanan numuneler öncelikle göz ile muayene edilmiş ardından numunelere mikro yapı çalışmaları uygulanmıştır. Kaynak metali üzerindeki ısı etkilerini değerlendirmek için SKK kaynak yönteminde termokupl ile sıcaklık ölçümü yapılmış, MIG yönteminde ise ısı girdisi hesaplanmıştır. Her iki yöntem ile birleştirilen numunelere sırasıyla sertlik, çekme, eğme ve yorulma testleri uygulanarak kaynaklı bağlantıların mekanik özellikleri belirlenmiştir. Yorulma

testleri bu çalışmaya özgü tasarlanan, üretilen ve bu çalışmanın en önemli kazanımlarından olan eğme gerilmeli yorulma test cihazı kullanılarak yapılmıştır. Ayrıca çekme ve yorulma testleri sonucu meydana gelen kopma yüzeyleri SEM çalışmalarıyla incelenmiştir. Uygulanan tüm bu testlerle SKK ve MIG kaynak yöntemiyle elde edilen kaynaklı bağlantılar, mikroyapı-mekanik özellik ilişkileri bakımından kıyaslanmıştır.

Numunelere uygulanan makro ve mikro yapı çalışmaları sonucunda her iki kaynak yöntemi için kullanılan uygun kaynak parametrelerinde daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Çekme ve yorulma testleri çalışmaları sonrasında, sonuçların birbiri ile son derece uyumlu olduğu bulunmuştur. Ayrıca, SKK ile uygun kaynak ilerleme hızında birleştirilen numunenin hem çekme dayanımının hem de yorulma ömrünün daha iyi olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Sözcükler : Alüminyum alaşımları, sürtünme karıştırma kaynağı, MIG kaynağı ve yorulma testi.

Bilim Kodu : 91511

ABSTRACT

Ph. D. Thesis

COMPARISON OF MECHANICAL AND MICROSTRUCTURES PROPERTIES OF DIFFERENT ALUMINUM ALLOYS JOINED WITH MIG AND FRICTION STIR WELDING METHODS

Ali YÜRÜK

**Karabük University
Institute of Graduate Programs
Department of Manufacturing Engineering**

Thesis Advisors:

Prof.Dr. Nizamettin KAHRAMAN

Assoc. Prof. Dr. Bekir ÇEVİK

December 2020, 175 pages

In this study, AA-5754 and AA-6013 aluminum alloys were joined by friction stir welding (FSW) and MIG welding methods. Welding process was performed with using different welding parameters. Different weld speeds were used in FSW method while different weld speeds and variable weld currents were utilized in MIG method. The joined specimens were first inspected visually and then microstructure studies were implemented to the specimens. To determine the thermal effects on the weld metal, temperature was measured via thermocouple in FSW and heat input value was calculated in MIG method. Mechanical properties of the joints were specified by applying hardness, tensile, bending and fatigue tests to samples joined with both the two methods. The fatigue tests were performed using bending stress fatigue test machine which was designed and manufactured specifically for the study and this is

the most important achievement of the study. Besides, fractured surfaces of the samples after tensile and fatigue tests were examined by SEM studies. With all the implement these tests, joints obtained both FSW and MIG methods were compared in terms of relationship their microstructure-mechanical properties.

As a result of the macro and microstructure studies applied to the samples, better results were obtained with used appropriate welding parameters for both the two methods. After the tensile and fatigue tests, results were evaluated to be very compatible with each other. In addition, it was determined that both tensile strength and fatigue life of the sample joined with appropriate weld speed using FSW was better.

Key Word : Aluminum alloys, friction stir welding, MIG welding and fatigue test.

Science Code : 91511

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının planlanmasında, araŐtırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalıŐmamı bilimsel temeller ışığında Őekillendiren sayın hocam Prof. Dr. Nizamettin KAHRAMAN'a ve 2. danıŐmanım Düzce Üniversitesi Öğretim Üyesi Doç. Dr. Bekir ÇEVİK'e, ayrıca Tez izleme savunmalarında tezimin olgunlaşmasına büyük katkılar sunan Gazi Üniversitesi Öğretim Üyeleri Sayın Prof. Dr. Behçet GÜLENÇ ve Prof. Dr. Ahmet DURGUTLU'ya sonsuz teŐekkürlerimi sunarım.

Ayrıca bu çalışmanın gerçekleştirilmesindeki katkılarından dolayı KBU Teknoloji Fakültesi ArŐ. Gör. Yusuf AYAN'a, kaynak işlemlerinin yapılmasındaki katkılarından dolayı Düzce Sağlam Depo Sanayii sahibi ve çalıŐanlarına, Düzce Borsa İstanbul Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi yönetici ve Makine Teknolojileri ve Metal Teknolojileri öğretmenlerine teşekkür ederim.

Ayrıca, bu Doktora tez çalıŐmasını KBÜBAP-17-DR-406 numaralı proje ile destekleyen, KBÜ Rektörlüğüne ve BAP komisyonuna teşekkür ederim.

Sevgili aileme manevi hiçbir yardımını esirgmeden yanımda oldukları için tüm kalbimle teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xv
ÇİZELGELER DİZİNİ	xviii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xx
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	5
ALÜMİNYUM VE ALAŞIMLARI	5
2.1. ALÜMİNYUM VE ALAŞIMLARININ TANITIMI	5
2.2. ALÜMİNYUM VE ALAŞIMLARININ TARİHİ GELİŞİMİ	6
2.3. ALÜMİNYUM VE ALAŞIMLARININ ÖZELLİKLERİ.....	6
2.4. ALÜMİNYUM VE ALAŞIMLARININ SINIFLANDIRILMASI.....	8
2.4.1. 5XXX Serisi Alüminyum ve Alaşımları.....	10
2.4.2. 6XXX Serisi Alüminyum ve Alaşımları.....	11
2.5. ALÜMİNYUM VE ALAŞIMLARININ KULLANIM ALANLARI.....	11
2.6. ALÜMİNYUM VE ALAŞIMLARININ KAYNAK KABİLİYETİ.....	12
2.7. ALÜMİNYUM İLE DAHA ÖNCE DEN YAPILMIŞ ÇALIŞMALAR	14
BÖLÜM 3	19
MIG KAYNAK YÖNTEMİ	19
3.1. MIG KAYNAK YÖNTEMİNİN TANIMI	19
3.2. MIG KAYNAĞI AKIM ÜRETEÇLERİ	21
3.2.1. Sinerjik Darbeli Akım Üretici.....	21
3.2.2. İnvörtör Tipi Akım Üretici.....	22

	<u>Sayfa</u>
3.3. MIG KAYNAK TORÇLARI.....	22
3.3.1. Nozul.....	23
3.3.2. Meme Tutucu.....	23
3.3.3. Kontak Meme	23
3.3.4. Gaz Dağıtıcı	23
3.3.5. Spiraller.....	24
3.3.6. Akım Kabloları	24
3.4. TEL SÜRME TERTİBATI	24
3.5. MIG KAYNAĞINDA KULLANILAN GAZLAR.....	24
3.5.1. Koruyucu Gazların Görevleri	25
3.6. MIG KAYNAK TELLERİ.....	25
3.6.1. Kaynak Telinin Seçiminde Dikkat Edilecek Hususlar	26
3.7. MIG KAYNAĞINDA DAMLA İLETİM MEKANİZMASI	26
3.7.1. Kısa Devre İletimi (Kısa Ark)	27
3.7.2. İri Damla İletimi (Uzun Ark).....	27
3.7.3. Sprey Ark İletimi	27
3.7.4. Darbeli Ark İletimi	27
3.8. MIG KAYNAK PARAMETRELERİ.....	28
3.8.1. Önceden Ayarlanan ve Kaynak Sırasında Değiştirilemeyen Kaynak Parametreleri	28
3.8.2. Birinci Derecede Ayarlanabilen Parametreler	29
3.8.3. İkinci Derecede Ayarlanabilen Kaynak Parametreleri	29
3.9. MIG KAYNAĞININ AVANTAJ VE DEZAVANTAJLARI	29
3.9.1. MIG Kaynağının Avantajları.....	29
3.9.2. MIG Kaynağının Dezavantajları.....	30
3.10. MIG KAYNAK YÖNTEMİ İLE İLGİLİ DAHA ÖNCE DEN YAPILMIŞ ÇALIŞMALAR.....	30
3.10.1. 5XXX Alüminyum Alaşımları İle Yapılan Çalışmalar	30
3.10.2. 6XXX Alüminyum Alaşımları İle Yapılan Çalışmalar	31
BÖLÜM 4	34
SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI	34
4. 1. SKK YÖNTEMİ.....	34

	<u>Sayfa</u>
4.2. SKK YÖNTEMİNİN UYGULANMASI.....	35
4.3. SKK YÖNTEMİNE ETKİ EDEN UNSURLAR.....	36
4.4. SKK YÖNETMİNDE KARIŞTIRICI UÇLAR VE ÇEŞİTLERİ.....	36
4.4.1. Whorl™ Serisi Karıştırıcı Uçlar	37
4.4.2. Multi-Helix (MX) Triflute™ ve Flared-Triflute™ Serisi Karıştırıcı Uçlar	37
4.4.3. Skew-Stir™ Serisi Karıştırıcı Uçlar	38
4.4.4. Trivex™ Serisi Karıştırıcı Uçlar	39
4.5. SKK BÖLGESİNİN METALURJİSİ	40
4.5.1. Ana Metal	40
4.5.2. Dinamik Olarak Yeniden Kristalleşen Bölge (DKB)	41
4.5.3. Isıdan Etkilenen Bölge.....	41
4.5.4. Termomekanik Etkilenen Bölge (TEB).....	42
4.6. SKK KAYNAK PARAMETRELERİ.....	42
4.6.1. Takım Devir Sayısı	43
4.6.2. Kaynak İlerleme Hızı.....	43
4.6.3. Takım Batma Derinliği	43
4.7. SKK YÖNTEMİNİN KULLANIM ALANLARI.....	43
4.8. SKK AVANTAJ VE DEZAVANTAJLARI.....	44
4.8.1. SKK Yönteminin Avantajları	44
4.8.2. SKK Yönteminin Dezavantajları	45
4.9. SKK YÖNTEMİ İLE DAHA ÖNCE YAPILAN ÇALIŞMALAR	45
4.9.1. 5XXX Serisi Alüminyum Alaşımları İle Yapılmış Çalışmalar	45
4.9.2. 6XXX Serisi Alüminyum Alaşımları İle Yapılmış Çalışmalar	46
4.9.3. 5XXX ve 6XXX Serisi Alüminyum Alaşımları İle Yapılmış Çalışmalar	48
BÖLÜM 5	49
YORULMA	49
5.1. YORULMANIN TANIMI	49
5.2. YORULMAYI ETKİLEYEN FAKTÖRLER.....	50
5.2.1. Sıcaklık	50
5.2.2. Parçanın Yüzey İşleme Kalitesi.....	50

	<u>Sayfa</u>
5.2.3. Gerilme Türü	50
5.2.4. Korozyon	51
5.2.5. Çentik Etkisi	51
5.2.6. Malzemenin İç Yapısı.....	51
5.3. YORULMA TEST YÖNTEMLERİ	51
5.3.1. Eksenel Gerilmeli Yorulma Testi	52
5.3.2. Eğme Gerilmeli Yorulma Testi	53
5.3.3. Burulma Gerilmeli Yorulma Testi.....	54
5.3.4. Bileşik Gerilmeli Yorulma Testi	54
5.4. YORULMA İLE İLGİLİ TERİMLER.....	55
5.4.1. Çevrim	55
5.4.2. Maksimum gerilme (σ_{maks}).....	55
5.4.3. Minimum Gerilme (σ_{min})	55
5.4.4. Ortalama Gerilme (σ_m)	56
5.4.5. Gerilme Genliği (σ_a).....	56
5.4.6. Gerilme Aralığı (σ_r).....	56
5.4.7. Gerilme Oranı	56
5.4.8. Genlik Oranı	56
5.4.9. Yorulma Dayanımı	57
5.4.10. Yorulma Ömrü.....	57
5.5. YORULMA İLE İLGİLİ DAHA ÖNCE DEN YAPILMIŞ OLAN ÇALIŞMALAR.....	57
5.5.1. MIG Kaynağı ile Yapılan Çalışmalar	57
5.5.2. SKK ile Yapılan Çalışmalar	58
5.5.3. MIG ve SKK ile Yapılan Çalışmalar.....	59
BÖLÜM 6	60
DENEYSEL ÇALIŞMALAR	60
6.1. KULLANILAN MALZEMELER.....	60
6.2. KAYNAKLARIN YAPILIŞI.....	61
6.2.1. Sürtünme Karıştırma Kaynağı	61
6.2.1.1. SKK İçin Karıştırıcı Takımın Tasarım ve Üretimi	61

	<u>Sayfa</u>
6.2.1.2. Kaynak Uygulamaları	62
6.2.2. MIG Kaynağı	64
6.3. NUMUNE HAZIRLAMA	66
6.4. MİKROYAPI ÇALIŞMALARI	67
6.4.1. Optik Mikroskop Çalışmaları	67
6.4.2. SEM Çalışmaları.....	68
6.5. SICAKLIK ÖLÇÜMLERİ	69
6.6. MEKANİK TESTLER	70
6.6.1. Sertlik Ölçümleri	70
6.6.2. Çekme Testi	72
6.6.3. Eğme Testi	75
6.6.4. Yorulma Testleri	77
BÖLÜM 7	83
DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	83
7.1. GENEL DEĞERLENDİRME	83
7.2. GÖZLE KONTROL	83
7.2.1. SKK Yöntemi	84
7.2.2. MIG Yöntemi.....	85
7.3. METALOGRAFİ ÇALIŞMALARI	87
7.3.1. Makroyapı Çalışmaları	88
7.3.1.1. SKK Çalışmaları	88
7.3.1.2. MIG Çalışmaları	89
7.3.2. Mikroyapı Çalışmaları	91
7.3.2.1. SKK Mikroyapı Çalışmaları	92
7.3.2.2. MIG Kaynağı Mikroyapı Çalışmaları	95
7.4. ISI ÖLÇÜMÜ	98
7.4.1. SKK Isı Ölçümü	99
7.4.2. MIG Isı Ölçümü.....	101
7.5. SERTLİK ÖLÇÜMLERİ	103
7.5.1. SKK Sertlik Ölçümleri	103
7.5.2. MIG Sertlik Ölçümleri.....	106

	<u>Sayfa</u>
7.6. ÇEKME DENEYİ	110
7.6.1. SKK Çekme Testi	112
7.6.2. MIG Çekme Testi	118
7.7. EĞME DENEYİ.....	124
7.7.1. SKK Eğme Testi	125
7.7.2. MIG Eğme Testi	126
7.8. YORULMA DENEYİ.....	129
7.8.1. Ana Malzemelerin Yorulma Deneyi Sonuçları	131
7.8.2. SKK Yöntemi İle Birleştirilen Numunelerin Yorulma Deneyi	134
7.8.3. MIG Kaynak Yöntemi ile Üretilen Numunelerin Yorulma Deneyi	139
7.8.4. Yorulma Deneyi Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	147
BÖLÜM 8	151
SONUÇ VE ÖNERİLER	151
KAYNAKLAR	155
EK AÇIKLAMALAR A	171
YORULMA TEST CİHAZI RESİMLERİ	171
ÖZGEÇMİŞ	175

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Alüminyum ve alaşımlarının genel element bileşimi.	8
Şekil 3.1. MIG kaynak yönteminin prensipleri.	19
Şekil 3.2. MIG kaynak donanımının şematik görünümü.	20
Şekil 3.3. Kaynak torç elemanları.	23
Şekil 3.4. Tel sürme tertibatı şeması.	24
Şekil 4.1. SKK yapılışı.	35
Şekil 4.2. Whorl™ tipi karıştırıcı uçlar.	37
Şekil 4.3. Triflute™ uçlar.	38
Şekil 4.4. Flared- Triflute™ uçlar.	38
Şekil 4.5. Skew-Stir™ serisi karıştırıcı uçlar.	39
Şekil 4.6. Trivex™ uçlar.	39
Şekil 4.7. SKK bölgelerinin şeması.	40
Şekil 4.8. Dinamik olarak yeniden kristalleşen bölge.	41
Şekil 4.9. Isıdan etkilenen bölge.	41
Şekil 4.10. Termomekanik etkilenen bölge.	42
Şekil 5.1. Eksenel gerilmeli yorulma test cihazı.	52
Şekil 5.2. Düzlemsel eğme gerilmeli yorulma test cihazı.	53
Şekil 5.3. Dönme eğmeli yorulma test cihazı.	53
Şekil 5.4. Burulma gerilmeli yorulma test cihazı.	54
Şekil 5.5. Bileşik gerilmeli yorulma test cihazı.	55
Şekil 6.1. Numune ölçüleri.	60
Şekil 6.2. Karıştırıcı takım.	62
Şekil 6.3. SKK işleminde kullanılan altlık.	63
Şekil 6.4. SKK Kaynağına hazırlık.	63
Şekil 6.5. SKK kaynağının yapılışı.	64
Şekil 6.6. MIG kaynağı için hazırlanan numunelerin şematik görüntüsü.	65
Şekil 6.7. Su jeti kesme planı.	66
Şekil 6.8. Zımparalama ve parlatma cihazı.	67

Sayfa

Şekil 6.9. Görüntülemeye kullanılan mikroskop.....	68
Şekil 6.10. SEM taramasında kullanılan cihaz.....	69
Şekil 6.11. Sıcaklık ölçüme cihazı ve sıcaklık ölçme planı.	69
Şekil 6.12. Sıcaklık ölçümü.	70
Şekil 6.13. Kaynaklı numunelerin sertlik ölçüm planı.....	71
Şekil 6.14. Sertlik ölçme cihazı.	72
Şekil 6.15. Çekme deney numunesinin ölçüleri.....	72
Şekil 6.16. SKK çekme numuneleri.....	73
Şekil 6.17. MIG çekme numuneleri.	74
Şekil 6.18. Çekme makinası.....	74
Şekil 6.19. Eğme numunesi standart ölçüleri.....	75
Şekil 6.20. SKK ile birleştirmelerden çıkartılan eğme numuneleri.	75
Şekil 6.21. MIG ile birleştirmelerden çıkartılan eğme numuneleri.	76
Şekil 6.22. Yorulma test cihazı görüntüleri.	78
Şekil 6.23. Yorulma örneği standart ölçüleri.	79
Şekil 6.24. Ana malzemeler yorulma testi numuneleri.....	80
Şekil 6.25. SKK yorulma testi numuneleri.	80
Şekil 6.26. MIG yorulma testi numuneleri.....	81
Şekil 7.1. SKK kaynakları.....	84
Şekil 7.2. 150 mm/dak kaynak hızında üretilen numunelerin makro görüntüleri a) MIG-1 b) MIG-3, c) MIG-5.....	85
Şekil 7.3. 180 mm/dak kaynak hızında üretilen numunelerin makro görüntüleri a) MIG-2, b) MIG-4, c) MIG-6.....	86
Şekil 7.4. MIG kaynağı ile birleştirilmiş numunelerin dikiş görüntüsü.....	87
Şekil 7.5. SKK makro görüntüleri.....	88
Şekil 7.6. MIG makro görüntüler.....	90
Şekil 7.7. Ana malzemelerin mikroyapısı.....	92
Şekil 7.8. SKK mikroyapısı.....	92
Şekil 7.9. SKK kaynak metali.....	95
Şekil 7.10. 150 mm/dak kaynak hızında birleştirilmiş numunelerin mikroyapısı a)130A b)140A c)150A.....	95

Şekil 7.11. 180 mm/dak kaynak hızında birleştirilen numunelerin mikroyapıları a) MIG-2, b) MIG-4, c) MIG-6.....	96
Şekil 7.12. 150 A kaynak akımında birleştirilen numunelerin mikroyapıları a)150 mm/dak b) 180 mm/dak.	97
Şekil 7.13. SKK ısı ölçüm grafiği.	99
Şekil 7.14. MIG kaynağı ısı girdisi grafiği.	102
Şekil 7.15. SKK sertlik ölçümleri.	103
Şekil 7.16. MIG kaynağı sertlik grafiği.	106
Şekil 7.17. Kaynak hızının sertliğe etkisi.....	108
Şekil 7.18. Kaynak akımının sertliğe etkisi.	109
Şekil 7.19. Ana malzemelerin çekme grafiği.	111
Şekil 7.20. SKK çekme grafiği.	112
Şekil 7.21. SKK numunelerinin kopma bölgeleri.	115
Şekil 7.22. SKK kırıl yüzey tarama görüntüleri a) SKK-1, b) SKK-2 c) SKK-3	117
Şekil 7.23. MIG kaynaklı numunelerinin çekme grafiği.....	119
Şekil 7.24. MIG numunelerinin kopma bölgeleri.	121
Şekil 7.25. MIG kırık yüzey tarama görüntü.	123
Şekil 7.26. Ana malzemeleri eğme deneyi görüntüleri a) AA-6013, b) AA-5754. .	124
Şekil 7.27. SKK eğme testi görüntüleri. a) SKK-1, b) SKK-2, c) SKK-3.....	125
Şekil 7.28. SKK kök eğme testi görüntüleri.	126
Şekil 7.29. MIG kaynağı ile birleştirilen numunelerin kep eğme görüntüleri a) MIG-1, b) MIG-2, c) MIG-3, d) MIG-4, e) MIG-5, f) MIG-6.	127
Şekil 7.30. MIG kaynağı ile birleştirilen numunelerin kök eğme görüntüleri a) MIG-1 b) MIG-2 c) MIG-3 d) MIG-4 e) MIG-5 f) MIG-6.	128
Şekil 7.31. MIG kök eğme kopma açıları görüntüler.....	128
Şekil 7.32. Ana malzemelerin kuvvet zaman grafiği.	130
Şekil 7.33. SKK numunelerine ait kuvvet- zaman grafikleri.	130
Şekil 7.34. MIG numunelerine ait kuvvet- zaman grafikleri a) MIG-1, b) MIG-2, c) MIG-3 d) MIG-4, e) MIG-5, f) MIG-6.	131
Şekil 7.35. Ana malzemelerin yorulma grafiği.	132
Şekil 7.36. Ana malzemelerin yorulma kırık yüzey SEM tarama görüntüsü.....	133
Şekil 7.37. SKK yöntemi ile birleştirilen numunelerin yorulma grafiği a) SKK-1, b) SKK-2, c) SKK-3.....	135

Sayfa

Şekil 7.38. SKK yöntemi ile birleştirilen numunelerin yorulma grafiği.....	136
Şekil 7.39. SKK numunelerin kopma görüntüleri.....	137
Şekil 7.40. SKK yorulma kırık yüzey SEM tarama görüntüleri.	138
Şekil 7.41. MIG kaynak yöntemi ile birleştirilen numunelerin yorulma grafiği.	141
Şekil 7.42. MIG kaynak yöntemi ile birleştirilen numunelerin toplu yorulma grafiği.....	142
Şekil 7.43. MIG kaynağı ile üretilen numunelerin kopma görüntüleri.....	145
Şekil 7.44. MIG kaynak yöntemi ile birleştirilen numunelerin kırık yüzey SEM görüntüleri	146
Şekil Ek A.1. Yorulma test cihazının imalat resmi.....	172
Şekil Ek A.2. Numune bağlama aparatının görüntüsü.....	173
Şekil Ek A.3. Yorulma test cihazının üç boyutlu resmi.....	174

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1. Alüminyumun özellikleri	7
Çizelge 2.2. Dövme alümiyum ve alaşımlarının gösterimi ve ısı işlem özellikleri	9
Çizelge 2.3. Dökme alümiyum ve alaşımlarının gösterimi ve ısı işlem özellikleri ...	9
Çizelge 2.4. Alüminyum ve alaşımlarına uygulanan ısı işlemler	9
Çizelge 2.5. Alüminyum ve alaşımlarına uygulanan H ısı işlemi.....	9
Çizelge 2.6. Alüminyum ve alaşımlarına uygulanan T ısı işlemi	10
Çizelge 2.7. 5XXX alüminyum alaşımlarının kimyasal bileşimi	11
Çizelge 2.8. 6XXX alüminyum alaşımlarının kimyasal bileşimi	11
Çizelge 2.9. Alüminyumun sektörel kullanım alanları	12
Çizelge 6.1. Alüminyum alaşımlarının kimyasal bileşimi	61
Çizelge 6.2. Alüminyum alaşımlarının mekanik özellikleri	61
Çizelge 6.3. Freze tezgahının özellikleri.....	62
Çizelge 6.4. SKK kaynak parametreleri.....	64
Çizelge 6.5. Gazaltı kaynak makinesinin özellikleri.....	65
Çizelge 6.6. MIG kaynak parametreleri	65
Çizelge 6.7. Dolgu metalinin kimyasal bileşimi (katalog değerleri)	66
Çizelge 6.8. İlave dolgu metalinin mekanik özellikleri (Katalog değerleri).....	66
Çizelge 7.1. SKK ısı ölçüm sonuçları	99
Çizelge 7.2. MIG ısı girdisi sonuçları	101
Çizelge 7.3. Ana malzeme çekme sonuçları	111
Çizelge 7.4. SKK yöntemi ile birleştirilen numunelerin çekme sonuçları.....	112
Çizelge 7.5. MIG yöntemi ile birleştirilen numunelerin çekme sonuçları.....	119
Çizelge 7.6. Ana malzemelerin yorulma deneyi sonuçlar.....	132
Çizelge 7.7. SKK yöntemi yorulma deneyi sonuçları.....	134
Çizelge 7.8. MIG kaynak yöntemi yorulma deneyi sonuçları	140

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

- Al : Alüminyum
Ar : Argon
He : Helyum
 σ_{maks} : Maksimum gerilme
 σ_{min} : Minimum gerilme
 σ_m : Ortalama gerilme
 σ_a : Gerilme genliği
 σ_r : Gerilme aralığı
R : Gerilme oranı
A : Genlik oranı
 M_e : Eğme momenti
F : Kuvvet
L : Kuvvet kolu
W : Atalet momenti
A : Alan
b : Genişlik
h : Yükseklik
 $\sigma_{eğme}$: Eğme gerilmesi
 τ_k : Kesme gerilmesi
 σ_R : Yorulma gerilmesi

KISALTMALAR

- SKK : Sürtünme karıştırma kaynağı
TIG : Tunsten inert gaz kaynağı
MIG : Metal inert gaz kaynağı
AWS : American Welding Society (Amerika Kaynak Topluluğu)
DIN : Deutch Industrie Normen (Alman Endüstri Normları)
EN : European Norm (Avrupa Normu)
IIW : International Institute of Welding (Uluslararası Kaynak Enstitüsü)
ITAB : Isı Tesiri Altında Kalan Bölge
TS : Türk Standardı
TEB : Termomekanik Olarak Etkilenen Bölge
TWI : The Welding Institute

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Yer kabuğunda en çok bulunan elementler kıyaslandığında alüminyumun üçüncü sırada olduğu görülmektedir [1]. Alüminyum, sanayide geniş bir kullanım alanına sahip olan bakır ve çeliğe göre 3 kez daha hafiftir. Bu özelliğine ilaveten iletkenlik özelliğinin yüksek, korozyona karşı dayanımının ve mekanik yüklere karşı gösterdiği direncinin iyi olması, alüminyumu taşımacılık ve savunma sanayi başta olmak üzere pek çok alanda tercih edilir hale getirmiştir [2,3]. Bu üstün özelliklerinden dolayı giderek artan alüminyum kullanımı beraberinde alüminyumu birleştirme zorunluluğunu da ortaya çıkartmıştır. Endüstride alüminyum; kaynak, vidalı birleştirme, perçinleme, kenetli birleştirme gibi yöntemler kullanılarak birleştirebilmektedir. Alüminyumun kaynak yöntemi ile birleştirilmesinde en çok elektrik ark kaynağı, MIG kaynağı, TIG kaynağı, elektrik direnç kaynağı ve sürtünme karıştırma kaynağı (SKK) tercih edilmektedir. Fakat alüminyumun sahip olduğu iletkenlik özelliği, katılma aralığının geniş olması ve kendisine yüksek korozyon direnci sağlayan yüzeyindeki oksit tabakası gibi özellikler kaynak ile birleştirilmesinde gözenek oluşumu gibi birtakım zorlukların yaşanmasına neden olmaktadır [4]. Alüminyum kaynağında yaşanan bu sorunları çözmek için literatürde yapılmış pek çok çalışma bulunmaktadır. Ancak son dönemlerde alüminyum kaynağı ile yapılan çalışmalara konu olan en önemli kaynak yöntemi SKK'dır.

İlave kaynak teli kullanmadan ve tamamen ergimenin gerçekleşmediği bir kaynak yöntemi olan SKK ilk olarak 1991'de TWI tarafından denenmiştir [5-8]. SKK yöntemi ile geleneksel kaynak yöntemleri ile birleştirilmesi zor olan metal ve alaşımlarının kaynağı başarılı bir şekilde gerçekleştirilebilmektedir [9]. Bu yöntemde alın altına getirilmiş iki levhaya "probe" adı verilen yüksek devirde dönen bir karıştırıcı pimin batırılarak belirli bir hızda ilerletilmesi sonucunda hamurumsu hale gelen metalin

proben omuz kısmı tarafından sıvanması ile kaynak gerçekleştirilmektedir. Bu yöntemde ulaşılan maksimum sıcaklık metalin ergime sıcaklığının 0,8 katı kadar olduğu için malzemede ısıdan kaynaklanan deformasyon azdır, bu nedenle de havacılık, uzay, raylı sistemler gibi ulaştırma ve savunma sanayisinde yoğun bir şekilde tercih edilmektedir [10,11].

Alüminyum kaynağı ile yapılan akademik çalışmalarda SKK yöntemi ön plana çıksa da endüstride alüminyum kaynağında en çok kullanılan yöntem MIG kaynağıdır. Ergitme kaynak yöntemlerinden biri olan MIG kaynak yönteminde, dolgu metali koruyucu gaz atmosferinde otomatik olarak kaynak bölgesine iletilmektedir. Bu yöntem kaynak sırasında sıçramanın az olması, iyi penetrasyon gibi özellikleri ile diğer kaynak yöntemlerinden ayrılmaktadır. Endüstride bu üstün özelliklerinden ve uygulama kolaylığından dolayı birçok metal ve alaşımın kaynağında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [12,13]. MIG kaynak yöntemini diğer ergitme kaynak yöntemlerinden ayıran ve onlara üstünlük sağlayan diğer önemli özellikleri ise kaynak sisteminin otomatik hale dönüştürülebilmesi, metal biriktirme özelliğinin yüksek olması, kaynak sonrası dikiş üzerinde cüruf oluşturmaması, her konumda başarı ile uygulanabilmesidir [14].

Bugüne kadar MIG ve SKK yöntemleri ile alüminyum alaşımlarının birleştirilmesi üzerine pek çok çalışmanın yapıldığı literatür incelemelerinden görülebilmektedir. Ancak bu çalışmalar incelendiğinde pek çoğunun mikroyapı, çekme ve sertlik deneyleri üzerine yoğunlaştığı açık bir şekilde dikkat çekmektedir. Örnek oluşturması açısından bu alanda daha önceden yapılmış birkaç çalışma verilmiştir. Bahemmat vd. [6] farklı alüminyum ve alaşımlarını sürtünme kaynağı ile birleştirdikleri çalışmada mikroyapı, çekme ve sertlik çalışmaları yapmışlardır. Bin vd. [9]. 6XXX ve 5XXX serisi alüminyum alaşımlarını birleştirdikleri çalışmada mikroyapı çalışmaları gerçekleştirmişlerdir. Alaadin vd. [10], 6063 alüminyum alaşımını SKK ile birleştirdikleri çalışmada mekanik özellikleri belirlemek için çekme ve sertlik deneyleri ve ayrıca mikroyapı incelemesi gerçekleştirmişlerdir. Benzer şekilde Guo vd. [11], 6XXX serisi alüminyum alaşımını GMAW kaynak yöntemi ile birleştirdikleri çalışmada metalurjik karakterizasyon çalışmaları gerçekleştirmişlerdir. Aynı şekilde Karadağ vd. [15], 5754 alüminyum alaşımını MIG yöntemi ile birleştirdikleri

çalışmada makroyapı, sertlik ve çekme testleri uygulamışlardır. Halbuki bir kaynaklı birleştirmenin iş başında görevini yerine getirirken karşılaştığı en büyük sorun tekrarlı yüklerdir. Metal ve alaşımlarının sürekli tekrarlı gerilmelere maruz kaldıklarında, akma kuvvetinin çok altındaki kuvvetlerde dahi kırılabildikleri gerek yapılan çalışmalar sonucunda gerekse kullanım sırasında meydana gelen kırılmalardan görülebilmektedir. Ayrıca kaynak sırasında ortaya çıkan ısı girdisinin metalin mikroyapısını değiştirdiği ve bunun sonucunda da metallerin mekanik özelliklerinin değiştiği bilinmektedir. Bir de kaynaklı birleştirmelerin günlük hayatta doğrudan insan hayatını etkileyen otomotiv, uçak ve çelik köprü gibi sektörlerde yoğun bir şekilde kullanıldığı ve bu alanlarda yapılan kaynaklı birleştirmelerin yerinde görevini yaparken en çok tekrarlı gerilmelere karşı çalıştıkları göz önüne alındığında yorulma dayanımının önemi bir kat daha artmaktadır. Bu sayılan sebeplerden dolayı bu çalışmada yorulma üzerine yoğunlaşmıştır. Bu çerçevede hem kendi çalışmamızdaki yorulma deneylerini yapabilmek, hem de üniversitemize yeni bir test cihazı kazandırmak amacıyla bir yorulma test cihazı tasarlanmış ve özel sektörle iş birliği yapılarak imalatı gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan yorulma test cihazının imalat resimleri ekler bölümünde verilmiştir.

Hafif olmaları, yüksek korozyon direnci ve mukavemet gibi özellikleri ile başta ulaşım söktürü olmak üzerinde günlük hayatta birçok kullanım alanına sahip olmaları nedeniyle tercih edilen 5XXX ve 6XXX serisi alüminyum alaşımlarının yorulma dayanımı üzerine çok fazla bir çalışmanın bulunmadığı yapılan literatür çalışmasında görülmüştür. Shaohua vd. [16] hibrit MIG ile birleştirdikleri 5083 alüminyum alaşımlarının yorulma dayanımını incelemişlerdir. Iman vd. [17] NaCl çözeltisinde ve hava ortamında MIG yöntemi ile birleştirdikleri 5083 alüminyum alaşımının yorulma davranışını incelemişlerdir. Beytullah vd., [18] 5083 alüminyum alaşımının SKK yöntemi ile birleştirmişler ve yorulma dayanımını incelemişlerdir. Costa vd [19] SKK yöntemi ile 6082 alüminyum alaşımını birleştirerek yorulma davranışını incelemişlerdir. Caizhi vd. [20] 5083 alüminyum alaşımını hem SKK ile hem de darbeli MIG kaynak yöntemi ile birleştirmişler ve yorulma dayanımlarını incelemişlerdir. Ancak çoğunlukla otomobil üretiminde bir arada kullanılan AA5754-H111 alüminyum alaşımı ile AA6013-T6 alüminyum alaşımının hem SKK hem de MIG kaynak yöntemleri ile birleştirilmesi sonucunda elde edilen numunelerin yorulma

davranışları üzerine herhangi bir çalışma bulunamamıştır. Bu iki farklı alüminyum alaşımının otomotiv sanayinde sıklıkla kullanılması ve daha önce herhangi bir kaynak yöntemi ile birleştirilmiş bu iki alaşımın kaynak bölgesine yorulma çalışmalarının yapılmamış olması bu tezin yapılmasına iten iki ana faktör olmuştur. Bu çalışmanın amacı da belirtilen bu iki ana etken çerçevesinde AA5754-H111 ve AA6013-T6 alüminyum alaşımlarının MIG ve SKK yöntemleri ile farklı kaynak değişkenleri kullanılarak birleştirilmesi olarak belirlenmiştir. Hem MIG hem de SKK yöntemi ile birleştirilmiş kaynaklı numunelerin statik yüklere karşı dayanımlarını belirlemek için çekme, sertlik ve eğme testleri uygulanmıştır. Kaynaklı numunelerin tekrarlı yüklere karşı davranışlarını belirlemek için bir eğme gerilmeli yorulma test cihazı tasarlanmış, üretilmiş ve bu cihaz kullanılarak kaynaklı numunelere yorulma testi uygulanmıştır. Ayrıca mikroyapının mekanik özelliklere etkilerini belirlemek için mikroyapı ve kırık yüzey SEM tarama çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

BÖLÜM 2

ALÜMİNYUM VE ALAŞIMLARI

2.1. ALÜMİNYUM VE ALAŞIMLARININ TANITIMI

Yüksek iletkenlik özelliğe sahip olan alüminyum, düşük yoğunluğunun sağladığı hafifliğine rağmen çeşitli yöntemlerle dayanımının artırılabilmesi, yüzeyindeki oksit tabakası sayesinde nemli ortamlar gibi değişik atmosfer şartlarında sağladığı korozyon dayanımı özellikleri ile endüstride kullanılan diğer metal ve alaşımlarına karşı avantaj sağlamaktadır [14,21].

Özellikle araçların enerji tüketimini azaltmak ve bu sayede de egzoz emisyon oranını düşürerek çevrenin korunmasında katkıda bulunmayı amaçlayan otomobil ve uçak gibi ulaşım araçlarını üreten firmalar hafif ve yeterli derecede dayanıma sahip olması sebebiyle alüminyumu tercih etmeye başlamışlardır. Ayrıca tuzlu su ve kimyasal maddeler tarafından meydana getirilen korozyona karşı gösterdiği dayanım özelliği ile de deniz ulaşım araçlarında ve kimyasal madde saklama kaplarının imalatında diğer metallere göre daha fazla rağbet görmektedirler [22]. Geçmişten bugüne kadar bir diğer kullanım alanı olan mutfak araç ve gereçlerinin üretiminde talep görmesinin sebebi ise zehirleyici özelliğinin bulunmamasıdır.

Bütün bunların dışında teknolojinin gelişmesi ile birlikte deformasyon, ısıl işlem gibi farklı yöntemlerle mukavemeti artırılabilen alüminyum ağırlığının az olması ve her türlü atmosfer koşullarında sağladığı korozyon dayanımı ile birçok alanda demirin sahip olduğu egemenliği yıkmaktadır. Bugün neredeyse % 100'e kadar geri dönüştürülebilme özelliği ile doğa dostu metal olarak tanımlanan alüminyum yeni nesil metal olarak kabul edilmektedir [15].

2.2. ALÜMİNYUM VE ALAŞIMLARININ TARİHİ GELİŞİMİ

Dünyada en fazla rezerv oranına sahip olan metaller arasında ilk sıralarda bulunmasına karşılık alüminyum 1800'lü yıllara kadar sanayide aradığını pek bulamamıştır. 1807 yılına gelindiğinde ise ilk olarak Sir Humprey Davy'nin dikkatini çeken alüminyuma "aluminum" ismi verilmiştir. Ancak bilim adamları yıllar içerisinde bu değerli endüstriyel metali "alüminyum" olarak adlandırmışlardır [1,22]. Fakat alüminyum cevheri ilk olarak 1821'de Les Bauz tarafından Fransa'da keşfedilmiş ve boksit adı verilmiştir. Daha sonra alüminyum üretiminin yapı taşı olan alüminyum klorür bileşiği 1825'de Hans Cristian Oersted tarafından geliştirilmiştir. Ne var ki ilk alüminyum metalinin elde edilmesi 1827'ye kadar gerçekleştirilememiştir. 1827 yılında alüminyum klorür ile potasyumu tepkimeye sokarak alüminyum metalini ilk üreten kişi Friedrich Wöhler'dir [2]. Fakat Friedrich Wöhler tarafından geliştirilen bu yöntem ile alüminyumun üretilme maliyetinin yüksekliği endüstride alüminyumun kullanımını geciktirmiştir. Endüstriyel anlamda alüminyumun üretiminin ve kullanımının yaygınlaşması 1888 yılında Charles Martin Hall tarafından geliştirilen elektroliz yoluyla alüminyum metalinin elde edilmesinden sonra başlamıştır [21]. Daha sonraki yıllarda korozyon dayanımı ve iyi mekanik özelliklerinden dolayı alüminyumun hemen hemen her alanda kullanılmaya başlanması ile birlikte bugün sanayide çelikten sonra gelen en önemli metal durumundadır [2].

2.3. ALÜMİNYUM VE ALAŞIMLARININ ÖZELLİKLERİ

Isı ve elektrik iletkenliğinin yüksek olmasının yanında iyi derecede mekanik özelliklere sahip olan alüminyumun özgül ağırlığı $2,7 \text{ g/cm}^3$ 'tür [23,24]. Atom numarası 13, atom ağırlığı 26,981538 g/mol olan alüminyum periyodik tabloda 3A grubundadır. Alüminyum yüzey merkezli kübik yapıya sahip, iyon çapı $0,86 \text{ \AA}$, atom çapı $1,43 \text{ \AA}$ olan bir metaldir [2].

$660 \text{ }^\circ\text{C}$ ergime derecesine sahip olan alüminyumun saflık oranı arttıkça ergime derecesi de yükselir. Buna karşılık saflık derecesinin artması şekillendirilebilme özelliğini artırırken mekanik özelliklerinin zayıflamasına sebep olmaktadır [9]. Alüminyuma

korozyon direnci özelliği kazandıran ise yüzeyinde bulunan refrakter oksit tabakasıdır [1].

Bu özelliklerinin yanında standart bir oda atmosferinde soğuk olarak alüminyum, şekillendirildiğinde çekme ve akma dayanımının artmasına karşılık yüzde uzaması azalmaktadır. Alüminyumun korozyon dayanımının azalmasına neden olan en önemli etken ise sertliğinin artmasıdır [15]. Bununla birlikte alüminyum alaşımlarının kalitesini artırmak ve en iyi mekanik özellikleri elde etmek için uygulanabilecek birçok yol ve yöntem bulunmaktadır. Bu yöntemlerden başlıcaları yaşlandırma, alaşımlama, plastik deformasyon vb'dir. Alüminyumun mekanik özellikleri daha önce ifade edilen yöntemlerden biri kullanılarak yükseltilebildiği için bugün alüminyum pek çok farklı alanda kullanılmaktadır [3]. Alüminyumun iletkenlik özelliklerinin iyi olarak kabul edilemesine karşın bakır ile kıyaslandığında düşük olduğu görülmektedir [25,26]. Çizelge 2.1'de saf alüminyumun özellikleri verilmiştir.

Çizelge 2. 1. Alüminyumun özellikleri [2].

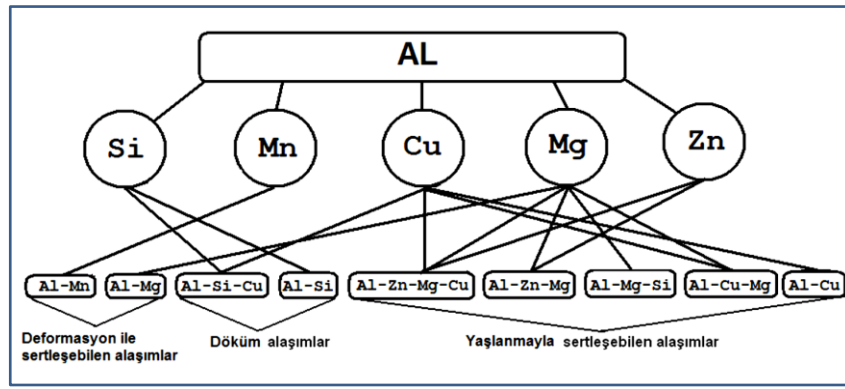
Kimyasal Simgesi	Öz Kütlesi (Yoğunluğu) (g/cm ³)	Atom Numarası	Atom ağırlığı (g/mol)	Ergime Derecesi (°C)	Rengi
Al	2.7	13	26.98	660	Parlak gümüşü

Diğer metaller ile karşılaştırıldığında birçok avantaja sahip olan alüminyum günümüzde endüstrinin hemen hemen her kolunda tercih edilmektedir. Alüminyumu endüstri için bu kadar önemli ve vazgeçilmez kılan özellikler ise şunlar:

- Düşük ağırlığına karşın iyi mekanik özelliklere sahip olması,
- Kimyasallara ve kokuya karşı direncinin yüksek ve hijyenik olması,
- Yüksek bir iletkenlik özelliğine sahip olması,
- Parlama yapmaması ve alev almaz oluşu,
- Şekillendirilebilme kabiliyetinin yüksek olması,
- Çeşitli yüzey işlemlerinin uygulanabilmesi [24] ve
- Kaynaklanabilir olmasıdır.

2.4. ALÜMİNYUM VE ALAŞIMLARININ SINIFLANDIRILMASI

İçerdiği alaşım elementlerine göre mekanik davranışları ve kimyasal ortamlara karşı direnci değişen alüminyum, saflık derecesine göre sınıflandırılmaktadır [27]. Ayrıca üretim yöntemlerine göre dövme ve dökme olarak da iki gruba ayrılırken bu iki üretim yöntemi de kendi içinde ısıl işlem yapılabilen ve yapılamayan olmak üzere ikiye ayrılmaktadır [21,24-26,28]. Şekil 2.1’de alüminyum ve alaşımlarının genel element bileşimi verilmiştir.



Şekil 2.1. Alüminyum ve alaşımlarının genel element bileşimi [21].

İlk rakam alaşımın grubunu, son iki rakam saflığını, ikinci rakam ise katılan alaşım elementlerini belirtecek şekilde dövme alüminyum alaşımları dörtlü bir rakam sistemi ile ifade edilmektedir [24]. Çizelge 2.2’de dövme alüminyum ve alaşımlarının gösterimi, ısıl işlem özellikleri verilirken Çizelge 2.3’de dökme alüminyum alaşımlarının gösterimi ve ısıl işlem özellikleri verilmiştir. Alüminyum alaşımlarının hangi ısıl işleme tabi tutulduğunu gösteren harf ve rakamlar (-) tire işareti ile ayrılarak gösterilmektedir. Harf ana ısıl işleme ait alt grubu belirtirken rakam ise ana ısıl işlemi takip eden ısıl işlemi ifade etmek için kullanılmaktadır [18,20]. Örneğin AA5754-H111 şeklinde gösterilmektedir. Çizelge 2.4’de alüminyum alaşımlarına uygulanan ısıl işlemler gösterilmiştir. Çizelge 2.5’de, alüminyum alaşımlarına uygulanan H ısıl işleminin alt kısımları Çizelge 2.6’da ise alüminyum alaşımlarına uygulanan T ısıl işleminin alt kısımları verilmiştir.

Çizelge 2.2. Dövme alüminyum ve alaşımlarının gösterimi [24,29].

Simgesi	Alaşım elemanı	Isıl işlem Özelliği
1XXX	Alaşımsız alüminyum	Yaşlandırılmaz
2XXX	Bakırlı alüminyum alaşımı	Yaşlandırılabilir
3XXX	Manganezli alüminyum alaşımı	Yaşlandırılmaz
4XXX	Silis	Eğer magnezyum varsa yaşlandırılabilir
5XXX	Magnezyum	Yaşlandırılmaz
6XXX	Magnezyum + Silis	Yaşlandırılabilir
7XXX	Çinko	Yaşlandırılabilir
8XXX	Lityum	Yaşlandırılabilir
9XXX	Kullanılmayan dizi	Kullanılmayan seri

Çizelge 2.3. Dökme alüminyum ve alaşımlarının gösterimi [24,27].

Simgesi	Alaşım Elemanı	Isıl İşlem Özelliği
1XXX	Min. %99,0 Al	Yaşlandırılmaz
2XXX	Al-Cu	Yaşlandırılabilir
3XXX	Al-Si-Mg, Al-Si-Cu, Al-Si-Cu-Mg	Biraz yaşlandırılabilir
4XXX	Al -Si	Yaşlandırılmaz
5XXX	Al-Mg	Yaşlandırılmaz
6XXX	Al-Mg-Si	Yaşlandırılabilir
7XXX	Al-Zn	Yaşlandırılabilir
8XXX	Al-Lityum	Yaşlandırılabilir
9XXX	Kullanılmayan dizi	Kullanılmayan seri

Çizelge 2.4. Alüminyum ve alaşımlarına uygulanan ısıl işlemler [24].

Isıl İşlem Sembolü	Anlamı
F	Üretildiği gibi deformasyon sertleşmesinin miktarı üzerinde bir denetim yok, mekanik özellikler sınırı yok.
O	Tavlanmış ve yeniden kristallenmiş. En düşük dayanım ve en yüksek süneklik için menevişlenmiş.
H	Deformasyon sertleştirilmesi yapılmış.
T	F veya O'dan başka kararlı menevişler için ısıl işlem görmüş.

Çizelge 2.5. Alüminyum ve alaşımlarına uygulanan H ısıl işleminin alt kısımları [30].

Sembol	İfadesi
H1	Sadece pekleştirilmiş.
H2	Pekleştirilmiş ve kısmen tavlanmış.
H3	Pekleştirilmiş ve kararlı hale getirilmiş.
H4	Pekleştirilmiş ve cilalanmış ya da boyanmış.

Çizelge 2.6. Alüminyum ve alaşımlarına uygulanan T ısıl işleminin alt kısımları [30].

Sembol	İfadesi
T1	Doğal yaşlandırılmış. Ürün yüksek sıcaklıktaki şekillendirme işleminden itibaren soğutulmuş ve esas olarak kararlı bir duruma doğal yaşlandırılmış.
T2	Yüksek sıcaklıkta şekil verme soğutmasından sonra soğuk şekillendirme ve ardından doğal yaşlandırma.
T3	Çözeltiye alma ısıl işlemi uygulanmış, soğuk işlenmiş ve esas olarak kararlı bir duruma doğal yaşlandırılmış.
T4	Çözeltiye alma işlemi uygulanmış ve esas olarak kararlı bir duruma doğal yaşlandırılmış.
T5	Yüksek sıcaklıkta şekil verme işleminden ve soğutulduktan sonra yaşlandırma.
T6	Çözeltiye alma ısıl işlemi uygulanmış ve sonrasında yapay yaşlandırma yapılmış.
T7	Çözeltiye alma ısıl işlemi uygulanmış ve aşırı yaşlandırma yapılmış.
T8	Çözeltiye alma ısıl işlemi uygulanmış, soğuk şekil verme yapılmış ve sonrasında yapay yaşlandırma yapılmış.
T9	Çözeltiye alma ısıl işlemi uygulanmış, yapay yaşlandırma yapılmış ve sonrasında soğuk şekil verme yapılmış.
T10	Yüksek sıcaklıkta şekillendirme işlemi sonrası soğutulmuş, soğuk şekil verilmiş ve sonrasında yapay yaşlandırma yapılmış.

Alüminyumun farklı alaşım elementleri ile oluşturduğu birçok seri vardır. Ancak bu çalışmada 5XXX ve 6XXX serileri kullanıldığı için sadece bu iki seri alüminyum alaşımlarının detaylı incelemesi yapılmıştır.

2.4.1. 5XXX Serisi Alüminyum ve Alaşımları

Temel alaşım elemanı magnezyum (Mg) olan 5XXX (Al-Mg) serisi alüminyum alaşımlarının çekme dayanımı $124-352 \text{ N/mm}^2$ dir [2,31]. Herhangi bir ısıl işlem uygulanmadığı için 5XXX serisi alüminyum alaşımlarının mukavemeti mikro alaşımlama ile artırılabilir [32]. Şekillendirilebilme ve kaynak kabiliyeti iyi olan 5XXX serisi alüminyum alaşımının mekanik karakteristiği içeriğindeki Mg %'sine bağlıdır. Mg % oranı arttıkça mekanik özellikleri de iyileşmektedir [2,32,33]. İyi şekillendirilebilme ve yüksek kaynak kabiliyetine sahip olmasının yanında 5XXX serisi alüminyum alaşımı oldukça iyi korozyon ve yorulma direncine sahiptir. Bütün bu avantajlı özelliklerinden dolayı deniz marinacılığında ulaştırma ve savunma sanayisine kadar çok geniş bir kullanım alanına sahiptir [34-36]. Çizelge 2.7'de 5XXX serisi Al-Mg alaşımlarının kimyasal bileşimleri verilmiştir.

Çizelge 2.7. 5XXX alüminyum alaşımlarının kimyasal bileşimi [2].

Alaşım Tipi	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti+Zr	Al
AA-5049	0.4	0.5	0.1	0.5-1,1	1.6-2,5	0.3	-	0.2	0.1	Kalan
AA-5052	0.25	0.4	0.1	0.1	2.2-2,8	0.15-0.35	-	0.1	-	Kalan
AA-5154	0.5	0.5	0.1	0.1-0,3	3.1-3,9	0.25	0.25	0.2	0.2	Kalan
AA-5083	0.3	0.4	0.1	0.4-1	4.0-4,9	0.05	-	0.25	0.15	Kalan
AA-5754	0,40	0,4	0,10	0,5	2,6-3,6	0,3		0,20	0,15	Kalan

2.4.2. 6XXX Serisi Alüminyum ve Alaşımları

Isıl işlem uygulanarak sertliği ve dayanımı artırılabilen 6XXX serisi alüminyum alaşımlarının ana alaşım elemanları magnezyum (Mg) ve silisyumdur (Si) [31]. Çözeltiye alınıp yapay olarak yaşlandırıldığında kimyasal bileşim içerisinde bulunan Mg₂Si çökelir ve alaşımın sertliğinin ve dayanımının yükselmesine sebep olur [2].

Diğer yaşlanma sertleşmesine tabi tutulabilen alüminyum alaşımlarına oranla 6XXX serisi alüminyum alaşımlarının kaynak yapılabilme özelliği oldukça iyidir. Ayrıca yüksek korozyon direncine ve talaşla işlenebilme özelliklerine de sahiptirler [2,33]. 6XXX serisi alüminyum alaşımları iyi kaynak yapılabilme, korozyon direncine ve dayanım özelliklerine sahip olmasından dolayı havacılık ve otomotiv sektörlerinde yoğun bir talep görmektedir [31,36,37]. Çizelge 2.8’de en çok kullanılan 6XXX alüminyum alaşımlarının kimyasal bileşimleri verilmiştir.

Çizelge 2.8. En çok kullanılan 6XXX serisi alaşımların kimyasal bileşimi [2].

Alaşım Tipi	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti+Zr	Al
AA-6061	0.4-0.8	0.7	0.15-0.40	0.15	0.8-1.2	0.04-0.35	-	0.25	0.15	Kalan
AA-6063	0.3-0.7	0.6	0.10	0.5	0.4-0.9		0.2	0.10	0.20	Kalan
AA-6082	0.7-1.3	0.5	0.10	0.4-0,1	0.5-1,2	0.25	0.10	0.20	0.20	Kalan
AA-6070	1.3	-	0.28	0.7	0.8	-	-	-	-	Kalan
AA-6013	0,7	0,3	0,9	0,3	0,9	0,03		0,07	0,02	Kalan

2.5. ALÜMİNYUM VE ALAŞIMLARININ KULLANIM ALANLARI

Alüminyum ve alaşımları günümüzde sahip olduğu avantajlı özelliklerden dolayı hayatın hemen hemen her alanında kendisine kullanım yeri bulmaktadır. Alüminyum alaşımları hafifliklerinin yanında iyi derecede mukavemet, yüksek korozyon direnci

ve geri dönüşüm özellikleri nedeniyle ulaşımdan savunma sanayine, deniz marinacılığında mutfak araç ve gereçlerine kadar çok geniş bir alanda kullanılmaktadır [38,39]. Bunların dışında oldukça iyi mukavemet ve korozyon direncine sahip olmasından dolayı mimari alanda ve yapısal elemanların üretiminde de kullanılmaktadır [40]. Sektörel bazda alüminyumun kullanım alanları hakkında yapılan çalışma sonucunda elde edilen veriler Çizelge 2.9’da verilmiştir.

Çizelge 2.9. Alüminyumun sektörel kullanım alanları [23].

Kullanım Alanları	Yüzde Oran
İnşaat	% 27
Ambalaj	% 15
Genel mühendislik	% 9
Kimya tarım ilaçları	% 1
Ulaşım	% 24
Elektrik	% 10
Metaller	% 3
Mobilya ev eşyası	% 6
Diğer sektörler	% 7

2.6. ALÜMİNYUM VE ALAŞIMLARININ KAYNAK KABİLİYETİ

Alüminyum alaşımlarının sahip oldukları yüksek iletkenlik, katılma aralığının genişliği gibi birtakım özellikler kaynaklı birleştirilmelerinde çeşitli sorunların yaşanmasına neden olmaktadır. Genel olarak alüminyum alaşımlarının kaynağında yaşanan sorunlar aşağıda belirtilmiştir.

- Gaz gözenekleri,
- Oksit kalıntıları,
- Sıcak çatlak,
- Kaynak metalinde ve ITAB’da dayanım düşmesi,
- Ergime eksikliği,
- Korozyon direncinde azalma,
- Elektrik direncinde azalma [31].

Çeliklerle kıyaslandığında daha yüksek iletkenlik özelliğine sahip olması alüminyum alaşımlarının kaynağında düşük kaynak nüfuziyeti ve kaynak içerisinde gaz kalıntılarının oluşmasına neden olmaktadır. Bu olumsuzluklar ise yetersiz ergime ve gözeneklere sebep olmaktadır. Bu sorunlar ancak kaynaktan önce yapılan ön tav ile ve hatta iş parçası kalın ise kaynak sırasında da yapılan tavlama işlemi ile çözülebilmektedir [24,41].

Kaynak kalitesinin düşmesine ve çalışma koşulları altında meydana gelen yüklemeler sırasında çentik etkisi yaratarak kırılmalara neden olan gözenekler, kaynak yapılırken kaynak metali içerisinde çözünen ve daha sonra katılma sürecinde kaynak metali içinde kalan gazların neden olduğu bir problemdir. Alüminyum kaynağında gözenek oluşumuna neden olan hidrojen gibi gazlar kaynak metali içerisinde mikro gözenek oluşturabileceği gibi birkaç mm çapında balıkgözü denilen çatlaklar da oluşturabilmektedirler. Kaynak sırasında oluşan yüksek sıcaklık nedeni ile kaynak metali içerisinde çözünen hidrojen gazı hızlı katılma sebebiyle dışarı çıkamaz ve hapsolarak kaynak metali içerisinde gözenekler oluşturmaktadır. Kaynak metali içerisinde oluşan bu gözenekler kaynak arkının artırılması, ilerleme hızının düşürülmesi veya ark geriliminin artırılması ile bertaraf edilebilmektedir [31].

Alüminyum kaynağında gözenek oluşumuna neden olan bir diğer etken ise alüminyumun yüzeyinde bulunan alüminyum oksit tabakasıdır. Alüminyumun oksijene karşı afinitesi olduğundan dolayı çevresindeki atmosferle temas ettiğinde hemen oksitlenmektedir. Ayrıca alüminyuma uygulanan ısı işlemler ve çalışma koşulları gereği bulunduğu nemli ortamlar bu oksit tabakasının kalınlığının artmasına neden olmaktadır. Kaynak metalinde gözeneklere ve yetersiz ergimeye neden olan bu alüminyum oksit tabakası, asal gaz kaynak arkı ve kaynak tozu ile giderilebilmektedir. Ancak çok kalın oksit tabakaları mekanik yollarla ya da uygun farklı yöntemler kullanılarak temizlenmesi gerekmektedir [24,31]. Alüminyum alaşımlarının kaynaklarında meydana gelen gözenek oluşumunu önleme yöntemlerinden biri de alaşım elementi ilave etmektir. Bilhassa alüminyum içerisinde bulunan magnezyum bu konuda oldukça faydalı bir alaşım elemanıdır [24].

Alüminyum alaşımlarının kaynağında yaşanan bir diğer sorun ise kaynak sırasında parçada meydana gelen çarpılmalardır. Alüminyum alaşımları yüksek ısı iletkenliğe sahip olduğundan kaynak sırasında daha yüksek ısı girdisine ihtiyaç duymaktadırlar. Bu fazla ısı girdisinin de katılma esnasında büzülmelerin daha fazla yaşanmasına neden olmasından dolayı alüminyum kaynaklarında çarpılmalar daha fazla görülmektedir. Bunu önlemek için ise kaynak tasarımı safhasında kaynak ağızlarının sabitlenmesi gerekmektedir [24].

Alüminyum alaşımlarının kaynağında yaşanan önemli sorunlardan biri de sıcak çatlaktır. Alüminyumun yüksek genleşme ve geniş katılma aralığı gibi özelliklere sahip olması bilhassa ergitme kaynaklarında sıcak çatlakların oluşmasına neden olmaktadır [4].

Daha önceden bahsedilen sebeplerden dolayı alüminyum alaşımlarının kaynağında ortaya çıkan sorunlar, yeterli mekanik ve fiziksel özellikleri sağlamasına rağmen alüminyum ve alaşımlarının endüstride kullanımını gecikmiştir.

2.7. ALÜMİNYUM VE ALAŞIMLARI İLE İLGİLİ DAHA ÖNCEDEN YAPILMIŞ ÇALIŞMALAR

Genyu vd, [42] “∞” taramalı lazer ile alüminyum alaşımı birleştirdikleri çalışmada birleştirmenin maksimum çekme dayanımının ana metalin çekme dayanımının % 93’üne kadar ulaştığını bildirmişlerdir. Yine aynı çalışmada lazer taramalı kaynağın, kaynak metalinde sütünsal tanelerin oluşumunun önüne geçmesi sebebiyle ince ve eş eksenli dentritik tanelerin oluşumunu sağladığı için mekanik özelliklerin tek pasolu lazer kaynağına göre daha iyi olduğunu bildirmişlerdir. Ayrıca tek taramalı lazer kaynaklarının kırılma şeklinin, sünek kırılma ile gevrek kırılmanın karışımı olan bir karakteristiğe sahip olduğunu ve bu nedenle “∞ taramalı lazer kaynağına oranla plastik dayanımının düşük olduğunu ifade etmişlerdir.

Igor vd. [43] SKK ile birleştirilmiş 6061-T6 alüminyum alaşımında anormal tane büyümesinin baskılanması için farklı ön gerilme yollarının etkinliği incelemişler ve bu amaçla, üretilen kaynaklara standart T6 temperlenmesinden önce

kaynak yönüne 0°, 45° veya 90° soğuk olarak haddelemişlerdir. Çalışma sonucunda da SKK ile birleştirilmiş 6061 alüminyum alaşımında yapılan haddelemenin kaynak yönündeki anormal tane büyümesinin önlenmesinde etkili olduğunu söylemişlerdir. Ayrıca aynı çalışmada ön gerilmeli haddeleme ile kaynak boyunca mikroyapının homojen olarak dağıldığını bunun da sünekliği artırdığını ifade etmişlerdir.

Literatürde TIG kaynağı ile 1. paso telsiz diğer ikisi telli olmak üzere 3 pasoda kaynatılan 2219 alüminyum alaşımının mekanik özelliklerinden sertlik ve çekme dayanımı yanısıra mikroyapısının incelendiği çalışmada kaynak bölgesinde ve kısmen ergimiş kaynakta kaynak ısı girdisinin ve tel hızının mikroyapıda ve mikrosertlik dağılımında etkili iki parametre olduğu, kaynak ısı girdisindeki azalma ve tel hızındaki artışın soğuma hızını artırdığı için mekanik özellikleri etkilediğini belirtmişlerdir [44].

Daha önceden ultrasonik nokta kaynak yöntemi ile 0,4 MPa sıkıştırma basıncında 1000 J'den 5000 J'e kadar farklı enerji seviyelerinde 5182 alüminyum alaşımının birleştirildiği ve ayrıca empedansın çekme dayanımı üzerindeki etkilerini belirlemek için 4000 J enerji seviyesini sabit tutulup 2,4,5,6 ve 8 gibi farklı empedanslarda bir dizi birleştirmenin yapıldığı uygulamada, kaynak süresince artan kaynak enerjisi ile hızla artan kaynak sıcaklığının alaşımı yumuşatması sebebiyle kaynak enerjisinin artışı ile sertliğin ve çekme dayanımının düştüğü sonucuna varılmıştır [45].

Wang vd. [46] çift darbeli değişken polariteli TIG kaynak yöntemi ile 2219 alüminyum alaşımını birleştirmişler ve düşük frekanslı darbe parametrelerinin kaynak oluşumu, anahtar deliğinin dinamik davranışı, tam nüfuz eden kaynağın mikro yapısı ve mikro sertliği üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Yapılan çalışmada darbeli akımın ısı girişinin azalmasında rol oynadığı için düşük frekanslı darbeli akımın kaynak nüfuziyetinde etkili olduğunu söylemişlerdir.

Literatürde 5083 alüminyum alaşımının farklı takım dönme hızları (900, 1120, 1400 ve 1800 rpm) ve 40 rpm sabit takım ilerleme hızı kullanılarak SKK yöntemi ile birleştirildiği çalışmada, takım dönme hızının mekanik özelliklere etkisi incelenmiştir. Karıştırıcı takım dönme hızının artması ile tanelerin irileştiği, bunun da çekme

dayanımını düşürdüğü söylenirken aynı zamanda düşük dönme hızının yüksek dönme hızına oranla daha yüksek darbe enerjisi ürettiği belirtilmiştir [47].

SKK yöntemi ile 2219 alüminyum alaşımının birleştirildiği ve karıştırıcı uç profilinin kaynak yapısı ve korozyon oluşumu üzerine etkilerinin araştırıldığı bir çalışmada karıştırıcı pim profilinin kaynak yapısını etkilediği ve en iyi sonucun hegzagonal pim profili ile elde edildiği ifade edilirken tepki yüzey metodu ile optimize edilmiş SKK parametrelerinin kaynağın korozyon direncini ve sertliğini geliştirdiği söylenmiştir [48].

Chuang vd. [49] hibrid MIG kaynak yöntemi ile alüminyum alaşımını birleştirdikleri çalışmada helyum (He), argon (Ar) gaz karışımının etkilerini araştırmışlar ve saf Ar gazı korumasında yapılan kaynakta gözenek kusurlarının yaklaşık olarak % 5,2 iken % 50 He, % 50 Ar gaz karışımı korumasında yapılan kaynakta gözenek kusurlarının yaklaşık olarak % 80,7 azalarak % 1 olduğunu ifade etmişlerdir. Ayrıca koruyucu gaz karışımı içerisindeki He hacim oranının artması ile hibrit plazma gaz sıcaklığının ve elektron yoğunluğunun azaldığını ancak He oranının % 50 aştığında dengelendiğini söylemişlerdir.

Literatürde kaynak bölgesine ısı girdisini artırmak, kaynak için gerekli kuvveti azaltmak ve kaynaklı birleştirmenin performansını iyileştirmek vb amaçlar elektrik akımı desteğinde SKK yöntemi ile 2219 alüminyum alaşımının birleştirildiği çalışmada, elektrik akımı yardımı ile birleştirilen alüminyum numunelerin çekme dayanımlarının ve sertliklerinin normal SKK yöntemi ile birleştirilen alüminyum numunelerin sertlik ve çekme dayanımlarından daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir [50].

Yiming vd. [51] darbeli TIG kaynağı ile alüminyum alaşımlarının birleştirildiği ve gaz tungsten ark kaynağında gözeneklilik oluşumu, kabarcık çekirdeklenme modelinin oluşturulması ve katılma cephesi tarafından yakalanan kabarcık büyümesinin simülasyonu dahil olmak üzere temel ve sistematik olarak araştırdıkları çalışmada, akım artışı ile kabarcık çekirdek çapının azaldığını ve akım artışının kabarcık çekirdek

oluşumundan ziyade kabarcığın büyüme aşamasında önemli rol oynadığını söylemişlerdir.

4000 W lazer gücünde 0,4 mm uç çapında 1800 mm/ dak kaynak hızında ve %99,99 Argon gazı koruması altında lazer kaynağı ile 5A06 alüminyum alaşımının kaynatıldığı daha önceden yapılmış bir çalışmada ergime sınırından ITAB ve ana metale doğru gidildikçe sertliğin düzenli olarak arttığı buna sebep olanın ise ergime bölgesindeki yüksek ısı nedeniyle alaşım elementlerinin buharlaşmasının neden olduğunu belirtilmiştir [52].

Literatürde TIG kaynağının, alüminyum alaşımlarının kaynaklı birleştirmelerinde mikroyapı özelliklerine ve gözenek oluşumuna etkilerinin incelendiği araştırmada değişken darbeli TIG kaynağında sayısız mikro ve makro gözenekler oluşurken doğru akım negatif kutuplamalı TIG kaynağının gözenek oluşumunu önlediği ve doğru akım negative kutuplama TIG kaynağında en zayıf bölgenin ergime bölgesi olduğunu, değişken darbeli TIG kaynağında kırılmanın kaynakta meydana geldiğini söylemiştir [53].

Yipeng vd. [54] değişken darbeli TIG kaynağı ile 2219 alüminyum alaşımını kaydattıkları araştırmada değişken darbeli akım TIG kaynağı ile çift değişken darbeli TIG kaynağını karşılaştırmışlar ve çift değişken darbeli TIG kaynağında, konvensiyonel değişken darbeli TIG kaynağına göre kaynak bölgesindeki tanelerin yenilendiğini ve ikinci faz tanelerin daha düzgün dağıldığını ifade etmişlerdir. Ayrıca geleneksel değişken darbeli TIG kaynağında gevrek ötektik parçacıkların bulunduğu gevrek kırılma yüzeyine sahipken çift değişken darbeli TIG kaynağının sünek kırılma davranışı gösterdiğini söylemişlerdir.

Ni vd. [55] ultrasonik nokta kaynağı ile alüminyum alaşımını birleştirdikleri çalışmada kaynak parametrelerinin, metal akışı, ara yüzey sıcaklıkları, gerilme dağılımı, makro ve mikroyapıların yanısıra mekanik özellikler üzerine etkilerini araştırmışlardır. Makro ve mikroyapının, arayüzey sıcaklıklarının ve mekanik özelliklerin kaynak parametreleri tarafından karakterize edildiğini söylerken ayrıca oluşan yeniden kristalleşmenin, yüksek deformasyon hızı, dinamik deformasyon ve malzeme özelliği

nedeniyle deformasyona bağlı oluşan boşluk konsantrasyonun sertliğini etkilediğini söylemişlerdir. Bunların dışında ultrasonik kaynak yönteminde mekanik özellikler için gerilme dağılımının ve bağlantının kalınlığının önemli bir etken olduğunu ifade etmişlerdir.

Vasu vd. [56] Gaz tungsten ark kaynağı ve gaz metal ark kaynak yöntemlerinin, ısıl işlem ile dayanım özellikleri kazandırılmayan 5059 alüminyum alaşımlarının çekme dayanımına etkilerini araştırdıkları çalışmada TIG kaynağı ile birleştirilen numunelerin çekme dayanımlarının, MIG kaynağı ile birleştirilen numunelerin çekme dayanımlarına oranla % 10 daha yüksek ancak % uzamanın her iki kaynak yönteminde de hemen hemen aynı olduğunu söylemişlerdir. Yine aynı çalışmada gaz metal ark kaynağında magnezyum gibi elementlerin buharlaşmasının, ısısı girdisi daha fazla olması sebebiyle gaz tungsten ark kaynağına nazaran daha fazla meydana geldiğini belirtmişleridir.

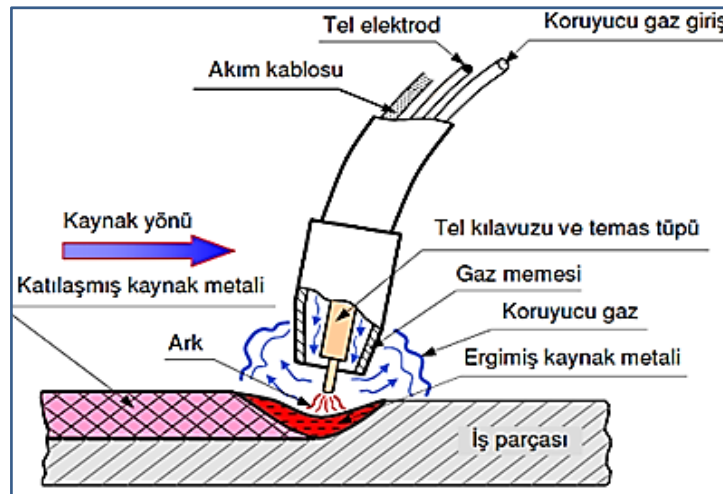
BÖLÜM 3

MIG KAYNAK YÖNTEMİ

3.1. MIG KAYNAK YÖNTEMİNİN TANIMI

İlk olarak 1940'lı yıllarda ABD'de kullanılmaya başlanılan MIG kaynak yönteminde önemli gelişmeler ticari olarak kaynak makinesinin üretilmesinden sonra yaşanmıştır. Bilhassa otomotiv sektöründe yaşanan gelişmeler bu kaynak yönteminin dünyanın her noktasında kabul edilmesinde önemli bir rol oynamıştır [57].

Bugün ise hemen hemen her alanda vazgeçilmez bir kaynak yöntemi olan MIG kaynağında kaynak için ihtiyaç duyulan ısı bir makara sistemi tarafından otomatik olarak kaynak bölgesine iletilen dolgu teli ile kaynatılacak iş parçası arasında meydana gelen arkta sağlanmaktadır. Kaynak bölgesinin çevredeki atmosferin olumsuz etkilerinden korunması ise argon, helyum ya da her ikisinin karışımından oluşan bir koruyucu gaz tarafından sağlanmaktadır [31,58]. Şekil 3.1'de MIG kaynağının prensibi görülmektedir.

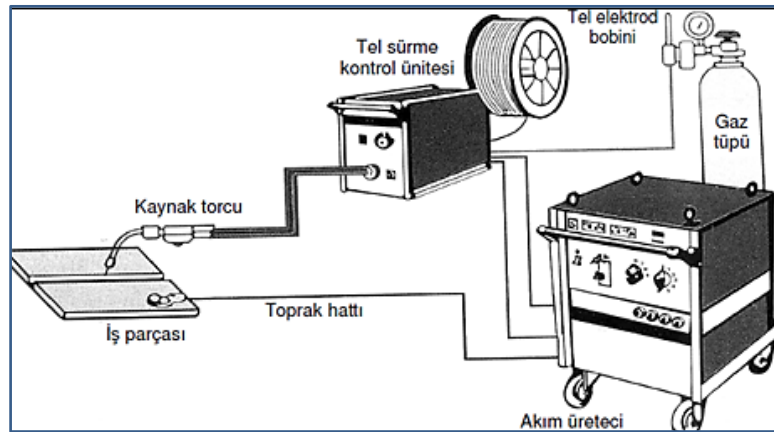


Şekil 3.1. MIG kaynağının prensibi [59].

MIG kaynak yöntemi paslanmaz çelikler başta olmak üzere alüminyum gibi demir dışı hafif metallerin kaynağında ve diğer birçok kaynak yöntemleri ile birleştirilemeyen çok ince sacların kaynatılmasında başarı ile uygulanabilmektedir. MIG kaynak makinelerinde yaşanan gelişmeler sonucunda icat edilen sabit gerilimli kaynak makineleri sayesinde çok ince çaplı elektrodları kullanma imkanı doğmuş ve böylelikle de yüksek akım şiddetlerine ulaşmış bu da ITAB'ın genişliğini azaltmış ve daha derin nüfuziyet elde edilmesi sağlamıştır [60].

Her ne kadar kaynak makinesi kaynak yapmak için temel donanım olsa da kaynak yapabilmek için başka donanımlara da ihtiyaç duyulmaktadır. MIG kaynağı için gerekli donanım aşağıda belirtildiği gibidir. Şekil 3.2'de MIG kaynak donanımının şematik görünümü verilmiştir.

- Kaynak akım üretici,
- Kaynak torcu,
- Torç bağlantı paketi,
- Tel sürme sistemi,
- Kumanda ve kontrol paneli,
- Soğutma sistemi,
- Yardımcı donanımlar [31].



Şekil 3.2. MIG kaynak donanımının şematik görünümü [59].

3.2. MIG KAYNAĞI AKIM ÜRETEÇLERİ

Kaynak akım üreteçleri, arkı meydana getirebilmek için gerekli olan elektrik enerjisini ilave kaynak teline ve iş parçasına iletmektedirler [59]. MIG kaynağında kullanılan akım üreteçleri yatay karakteristik (sabit gerilimli) özelliği ile TIG ve elektrik ark kaynağında kullanılan akım üreteçlerinden ayrılmaktadır [57,60]. MIG kaynağında kullanılan yatay karakteristikli akım üreteçlerinde ark boyunda meydana gelen en ufak bir değişim, kaynak akım şiddetinde çok daha fazla bir değişime neden olmaktadır. Bu nedenle MIG kaynak akım üreteçlerinde herhangi bir araç gerece ihtiyaç duymadan otomatik olarak ark boyunu ayarlayan bir sistem bulunmaktadır [60]. Bu tip kaynak makinelerinde, ilave kaynak telinin seçilen hızda kaynak yerine gelmesini sağlayan motor sabit bir devirde döndüğünden tel hızı da sabit kalır. Herhangi bir sebepten dolayı ark boyunda oluşan artış kaynak akım şiddetinde çok büyük oranda düşmeye neden olur. Bunun sonucunda da kaynak esnasında ergiyen telin miktarında azalma görülür. Bu sorun ise kaynak sırasında daha önceden belirlenmiş sabit bir hızda kaynak bölgesine gönderilen telin arkı eski konumuna tekrar çevirmesi ile çözülür. Ark eski konumuna gelince ark boyu kısalır, akım şiddeti yükselir ve ilave teldeki ergime miktarı da artar. Ayarlanan belirli bir hızda ilerleyen tel arkı normal boyuna çevirdiği için de akım ve gerilim değerleri kaynak boyunca uygun değerlerde kalır [59].

3.2.1. Sinerjik Darbeli Akım Üreteci

Isı girdisinin az ancak nüfuziyetin yüksek olması istenen kaynaklarda darbeli doğru akım üreten akım üreteçleri kullanılır. Darbeli akımda, akım şiddeti belirlenen ve ayarlanan iki akım değeri arasında istenilen frekans aralığında hareket eder [60].

Darbeli akım uygulamasında, akım en üst noktaya ulaştığında (pik akım) kaynak metali hızla ergir ve spray ark biçiminde kaynak bölgesine aktarılır. Devamında temel akımda ise ilave telin ergimesi azalır hatta neredeyse hiç ergimez ve kaynak banyosuna giren ısı girdisi düşer ve bu esnada kaynak banyosunda kısmi katılaşmalar başlar. Temel akım şiddeti arkın kesilmeyeceği bir değerde olduğundan tekrar ark başlatmaya gerek kalmaz [31].

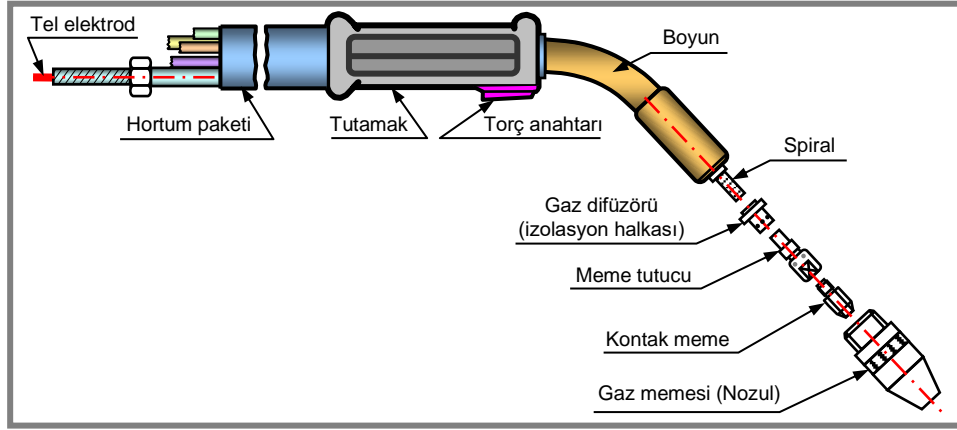
3.2.2. İnvörtör Tipi Akım Üreteci

İnvörtör tipi kaynak akım üretetçeri kaynak teknolojisinde en son ve en önemli gelişmelerinden biri olmakla beraber uçakların kontrol panellerinde doğru akım üretmek için kullanılırken daha sonra yaşanan gelişmeler sonucunda kaynak sektöründe akım üreteci olarak kullanılmaya başlanmıştır [61].

İnvörtör tipi akım üretetçerinde şehir elektrik sisteminden alınan alternatif akım doğrudan bir redresöre gönderilerek doğru akıma çevrilir. Daha sonra bu akım Chooper adı verilen özel bir araç yardımıyla frekansı yükseltilmiş alternatif akıma tekrar çevrilir. Kaynak invörtörlerinde bu yüksek frekansın değeri yaklaşık olarak 20.000 Hz civarındadır. Bu yüksek frekanslı alternatif akım, kaynak için uygun akım hale getirilmek için önce transformatöre yönlendirilir. Transformatörde akım kaynak için gerekli olan uygun değerlere düşürülerek redresöre gönderilir ve akım burada tekrar doğrultularak filtreden geçirilir [31].

3.3. MIG KAYNAK TORÇLARI

MIG kaynağında ark bölgesine kaynak akımının, kaynak telinin, koruyucu gazın gerektiğinde soğutma suyunun ulaştırılmasından sorumlu olan kaynak torçları tercih edilen kaynak akım değerlerine göre hava soğutmalı ve su soğutmalı kaynak torçları olarak iki ayrılmaktadırlar [31]. Ayrıca son zamanlarda Standart ve Push-Pull torçların yanında, torç boyunun belirli bir oranda istenilen yönlere doğru bükülebilen, ancak yüksek amperli torçlarda tercih edilmeyen Esnek Boyunlu (Turnable) ve daha çok kapalı alanlarda kullanılan duman emici bir ünite sayesinde kaynak esnasında oluşan dumanı torç nozulundan belirli bir oranda çeken, işçi sağlığı için önemli olan Duman Emici sistemli torçlar geliştirilmiştir. Standart bir torçta bulunan elemanlar; nozul, meme tutucu, kontak meme, gaz difüzörü, spiral ve akım kablosudur (Şekil 5.3).



Şekil 3.3. Kaynak torç elemanları [59].

3.3.1. Nozul

Kaynak sırasında gazın kaynak bölgesini tam olarak koruyabilmesi için koruyucu gazı bir arada tutan ve torcun ucunda bulunan eleman olan nozul bakırdan imal edilmektedir [59].

3.3.2. Meme Tutucu

Pirinç ya da bakırdan üretilen meme tutucuların görevi kontak meme ile boyun arasındaki bağlantıyı sağlamaktır [62].

3.3.3. Kontak Meme

Elektriği çok iyi iletmesinin yanında bir de aşınmaya karşı dayanımının yüksek olması istenen kontak memesinin iç çapı pratikte tel çapından yaklaşık olarak 0,2 mm daha büyük olması gerekmektedir [60].

3.3.4. Gaz Dağıtıcı

Kompozit, seramik veya karbondan yapılan gaz dağıtıcılar kaynak bölgesine gazın düzenli bir şekilde ulaştırılmasını sağlamaktadırlar [62].

3.3.5. Spiraller

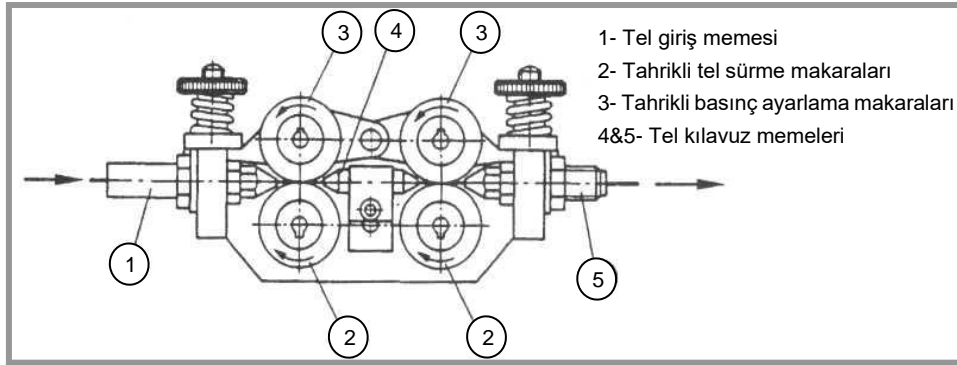
Kullanılan ilave telin özelliklerine göre farklı malzemelerden ve çeşit çaplarda üretilen spiraller (kılavuzlar), ilave kaynak telinin sorunsuz bir şekilde kaynak bölgesine ulaştırılmasından sorumludurlar [60].

3.3.6. Akım Kabloları

Kaynak Akım kabloları aşırı ısınmaya ve maksimum akım gücüne dayanabilecek şekilde üretilirler. Akım kablolarının çapı aşırı ısınmaya meydan vermeyecek bir çapta olmalıdır [59,60].

3.4. TEL SÜRME TERTİBATI

Tel sürme tertibatı, kaynak sırasında teli makaradan çekip aynı zamanda da ergiyen tel miktarını karşılayabilecek bir hızda kaynak bölgesine gönderen bir sistemdir [61]. Elektrik motoru, basınç ayarlayıcı, elektrod makarası ve doğrultucusundan oluşan bir tel sürme tertibatının makaralı ve planetli olmak üzere iki türü vardır [60]. Şekil 3.4'te tel sürme tertibatı şeması verilmiştir.



Şekil 3.4. Tel sürme tertibatı şeması [59].

3.5. MIG KAYNAĞINDA KULLANILAN GAZLAR

Ergitme kaynak yöntemlerinde, kaynak bölgesi kaynak ortamındaki atmosferin zararlı etkilerine karşı korunmazsa bu atmosfer içerisinde bulunan yabancı gazlar yüksek

sıcaklıklardaki sıvı kaynak metalinin içerisine girerek kaynaktaki gaz boşluklarına ve gözeneklere neden olurlar [63]. Bu nedenle MIG kaynağında, sıvı durumdaki kaynak metali içinde bulunan alaşım elementlerinin oksijenle temasını ve hidrojen, azot gibi gazların kaynak havuzuna girmesinin önlenmesi gerekmektedir [61]. Bu amaçlarla MIG kaynağında kaynak bölgesini çalışma ortamında bulunan zararlı gazlara karşı korumak için koruyucu gazlar kullanılmaktadır.

MIG kaynağında paslanmaz çeliklerin, alüminyum ve magnezyum gibi demir dışı metallerin kaynağında asal gaz grubuna giren argon, helyum gazları veya her ikisinin karışımından oluşan gaz karışımları kullanılmaktadır [58].

3.5.1. Koruyucu Gazların Görevleri

Koruyucu gazlar bilindiği gibi sadece kaynak bölgesini korumakla yetinmezler, aynı zamanda arkın kararlılığına, bağlantının mekanik özelliklerine, kaynağın verimliliği gibi daha birçok parametreyi etkileyerek kaynağın mekanik özelliklerine de katkıda bulunmaktadırlar. Koruyucu gazların başlıca görevleri aşağıda belirtilmiştir.

- Ergimiş kaynak havuzunu havanın olumsuz etkilerinden korumak,
- Kararlı bir ark sağlamak,
- İyi bir metal iletimi,
- Düzgün bir dikiş şekli ve derin nüfuziyet,
- Isı girdisini yeterli düzeyde tutmak,
- Uygun kaynak ilerleme hızı sağlamak,
- Kaliteli bir kaynak metali kimyasal bileşimi oluşturma,
- Duman oluşumu,
- Mekanik özellikleri iyileştirilmiş kaynak metali oluşturmak [59].

3.6. MIG KAYNAK TELLERİ

MIG kaynağında kullanılan elektrodlar tel halinde bir makaraya sarılmış halde 0,6 mm ile 3,2 mm arasındaki çaplarda üretilirler [61,63]. MIG kaynak tellerinin çaplarının

küçük olması akım yoğunluğunun yüksek olmasına neden olduğu için metal iletim şekline, kaynak hızına ve nüfuziyetine olumlu yönde katkıda bulunmaktadır [59].

Ayrıca kaynak metalinin mekanik karakteristiğini iyileştirmek ve geliştirmek için çeliklerin kaynağında kullanılan özlü teller geliştirilmiştir. Özellikle korozyona dayanıklı katman ile kaplama ve sert dolgu işlerinin yerine getirilmesinde özlü teller avantaj sağlamaktadır [60].

3.6.1. Kaynak Telinin Seçiminde Dikkat Edilecek Hususlar

Kaynak sonrasında meydana gelen kaynak metalinin mekanik davranışlarını ve kimyasal bileşimini etkilediğinden dolayı MIG kaynağında elektrot seçimi ciddi bir sorun durumundadır [60]. Bu bakımdan kaynak teli seçerken aşağıda belirtilen hususlar dikkat edilmelidir.

- Kaynatılacak parçaların mekanik özellikleri,
- Kaynatılacak parçaların kimyasal bileşimi,
- Kullanılan koruyucu gazın tipi,
- Kaynatılacak parçaların kalınlığı ve şekli,
- Kaynak yapılacak ortamın şartları [59].

3.7. MIG KAYNAĞINDA DAMLA İLETİM MEKANİZMASI

Kaynağın düzgünlüğünü, kaynak sırasında meydana gelen sıçramaları, farklı konumlarda başarılı bir şekilde kaynak yapabilmeyi ve kaynak kalitesini etkilediğinden dolayı ilave kaynak telinden kaynak havuzuna metal geçişi son derece önemlidir [59]. Bu nedenle aşağıda belirtilen MIG kaynağında damla iletim mekanizmasına etkileyen unsurların dikkate alınması gerekmektedir.

- Tercih edilen kaynak akımının tipi ve şiddeti,
- Kullanılan elektrodun çapı,
- Kullanılan elektrodun kimyasal bileşimi,
- Serbest elektrod uzunluğu,
- Koruyucu gaz türü [59].

MIG kaynağında damla iletim mekanizması dört şekilde gerçekleştirilmektedir:

- Kısa devre iletimi (kısa ark)
- İri damla iletimi (uzun ark)
- Sprey iletimi
- Darbeli ark iletimi [59,64].

3.7.1. Kısa Devre İletimi (Kısa Ark)

Isı girdisi düşük olduğundan dolayı nüfuziyetin de az olduğu bu damla geçiş mekanizması en düşük kaynak akımları ve küçük çaplı elektrod kullanımında oluşmaktadır. Bu nedenle de düşük kalınlığa sahip parçaların birleştirilmesinde, pozisyon kaynaklarında, geniş kök aralığına sahip birleştirilmelerin kaynatılmasında tercih edilmektedir [64].

3.7.2. İri Damla İletimi (Uzun Ark)

İlave kaynak metalinin ucundan ergiyen kaynak metalinin damlalar halinde kaynak havuzuna geçtiği bu damla iletim mekanizmasında ark tutuşur tutuşmaz kaynak teli ergimeye başlar ve damlacığın çapı telin çapından daha büyük hale geldiğinde kaynak banyosuna düşer. Bu mekanizmada nüfuziyet derinliği azdır [60].

3.7.3. Sprey Ark İletimi

Damla geçişi ilave metal çapına eşit ya da ondan daha küçük çapta damlacıklar halinde gerçekleşen sprej ark iletimi, argon gazı korumasında doğru akım, pozitif kutuplama kullanımında ve kaynak akımının geçiş akımı denilen değerin üzerinde olduğunda meydana gelir [63,64].

3.7.4. Darbeli Ark İletimi

Kısa ark geçiş mekanizmasına göre yüksek enerjiye sahip olan bu damla geçiş mekanizmasında akım üretici biri malzeme geçişine imkan vermeyecek kadar düşük olan temel akım, diğeri ise tepe akım olmak üzere iki farklı kademede akım meydana getirir. Böylece bu iki akımın bileşiminde durgun ve kontrollü bir spreyc damla iletimi gerçekleştirilir [59].

3.8. MIG KAYNAK PARAMETRELERİ

Kaynaklı birleştirmenin kalitesi ile doğrudan doğruya ilintili olan kaynak parametrelerinin tespitinde, birleştirilecek parçaların kimyasal bileşimi, kaynağın konumu, birleştirmeden istenen mekanik davranışlar vb özellikler önemli etkiye sahiptirler [63].

Tercih edilen kaynak parametrelerinin birbirine uygun olması kararlı ve yumuşak bir ark oluşmasını sağlarken aynı zamanda da çalışma şartlarını kolaylaştırarak kaynaklı birleştirmenin beklentileri karşılama ihtimalini de arttırmaktadır [60,65].

Kaynak parametreleri; önceden ayarlanan ve kaynak işlemi sırasında değiştirilemeyen parametreler, birinci derecede ayarlanabilen parametreler ve ikinci derecede ayarlanabilen parametreler olarak sınıflandırılmaktadır [59].

3.8.1. Önceden Ayarlanan ve Kaynak Sırasında Değiştirilemeyen Kaynak Parametreleri

Belirlenmesinde birleştirilecek metal ve alaşımının türü, kaynak konumu, birleştirilecek parçaların kalınlığı ve birleştirmede aranan mekanik özelliklerin önemli rol oynadığı önceden ayarlanan ve kaynak sırasında değiştirilemeyen parametreleri, kullanılan koruyucu gazın cinsi, ilave kaynak telinin türü ve çapı gibi parametreler oluşturmaktadır [59,65].

3.8.2. Birinci Derecede Ayarlanabilen Parametreler

Kaynak tel hızı (kaynak akımı), kaynak gerilimi ve kaynak hızı gibi parametrelerden oluşan birinci dereceden ayarlanabilen kaynak parametreleri, kaynak dikişinin şekli, boyutu, ark kararlılığı gibi kaynaklı bağlantının mekanik özelliklerini etkileyen unsurların kontrol altında tutulmasında büyük rol oynamaktadırlar [60,63].

3.8.3. İkinci Derecede Ayarlanabilen Kaynak Parametreleri

Kaynak süresince devamlı değişen ve kaynak dikişinin şeklini etkileyen bu parametreler; serbest tel uzunluğu, gazın debisi, kaynak yönü, torç eğimi, nozul uzaklığı gibi parametrelerdir [65].

3.9. MIG KAYNAĞININ AVANTAJ VE DEZAVANTAJLARI

3.9.1. MIG Kaynağının Avantajları

- Ergiyen tel ile yapılan bir kaynak yöntemi olan MIG kaynağı genellikle paslanmaz çelik ve demirdışı metallerin kaynağında kullanılabilir.
- Bir makara sistemi tarafından elektrodun sürekli beslenmesi sayesinde hiç durmaksızın uzun dikişler yapılabilir.
- Uygulanması kolay bir kaynak yöntemidir.
- Her konuda başarı ile uygulanabilir.
- Elektrik ark kaynağına göre daha hızlı metal yığıma özelliğine sahiptir.
- Elektrod beslenmesinin kesintisiz ve metal yığıma hızının yüksek olması sebebiyle kaynak hızı elektrik ark kaynağına göre yüksektir.
- Sprey damla geçiş yönteminde elektrik ark kaynağına kıyasla daha derin nüfuziyet elde edilir
- Kaynak dikişi üzerinde cüruf olmadığı için pasolar arası temizlik fazla zaman almaz.
- Özlü tel kullanımı ile kaynak metalinin mekanik özellikleri artırılabilir.
- Mekanize ve otomatik olarak kullanılabilen bu yöntem robot ve 3D yazıcı teknolojilerine de uyum sağlayabilir.

- Gelişen akım üretici teknolojisi sayesinde kaynak işlemleri programlanabilmektedir [59].

3.9.2. MIG Kaynağının Dezavantajları

- İlk kurulum maliyetinin yüksek olmasının yanında kaynak donanımı karmaşıktır.
- Kaynak torcunun büyük olması, koruyucu gaz kullanma zorunluğu ve torcun kaynak yerine 10-19 mm arasındaki mesafede tutulması gerekliliği sebebiyle ulaşılması zor olan bölgelerde kullanılması sıkıntılıdır.
- Kaynak bölgesinin iyi bir şekilde korunabilmesi için hava akımının az olduğu kapalı yerlerde kullanılmalıdır.
- Ark yoğunluğu ve yüksek ısı yayılmasına karşı tedbirlerin alınarak çalışılması gerekmektedir.
- Diğer kaynak yöntemlerine göre daha yüksek şiddette ışık yaydığı için daha dikkatli önlemler alınmalıdır [59].

3.10. MIG KAYNAK YÖNTEMİ İLE İLGİLİ DAHA ÖNCE DEN YAPILMIŞ ÇALIŞMALAR

3.10.1. 5XXX Alüminyum Alaşımları ile Yapılan Çalışmalar

Jesus vd. [66] 5083 alüminyum alaşımını MIG kaynağı ile birleştirdikleri çalışmada kaynağın her iki tarafındaki ısı tesiri altında bulunan bölgede sertliğin düştüğünü buna da kaynak termal ısı döngüsünün neden olduğunu belirtmişlerdir. Bunun dışında MIG kaynağında oluşan gözeneklilik, birleşme kusurları gibi kusurların ortadan kaldırılmasının ve tane incelmesinin mekanik özellikleri iyileştirdiği ve bununda yorulma direncini artırdığını ifade etmişlerdir.

Chenxiao vd. [67] 5083 alüminyum alaşımını geleneksel V kaynak ağzı açarak, dar kaynak ağzı açarak ve kaynak ağzı açmadan gaz metal ark kaynak yöntemi ile birleştirmişler ve gözenek mekanizması ve gözenek oluşumuna etki eden kaynak akımı, kaynak hızı gibi faktörleri incelemişlerdir. Yaptıkları bu çalışmada artan

kaynak akımı ile hem gözenek miktarının hem de gözeneklilik yüzdesinin artma eğiliminde olduğunu bildirmişlerdir.

Chenxiao vd. [68] 5083 alüminyum alaşımını MIG ile birleştirdikleri araştırmada damlacık geçişini ve ark profilinin davranışı saptamak için kaynak sitemine yüksek hızlı bir kamera bağlayarak damlacık geçişini ve ark profilini görüntülemişlerdir. Daha sonra bu görüntüler ve veriler yardımı ile ergiyik havuzunun davranışlarını ve bu davranışların kaynak kusurlarına etkilerini inceleyerek ergiyik havuzunun davranışlarının değişen kaynak akımı ile farklılık gösterdiğini, gözenek oluşumunun ise akışkan haldeki sıvının akış şekline etkilendiğini ifade etmişlerdir.

Tapas vd. [69] alın kaynağı ile birleştirdikleri 5052 alüminyum alaşımında oluşan bozulmaları ve kalıntı gerilemeleri üç farklı ısı alıcısıyla deneysel olarak araştırmışlar ve elde ettikleri sonuçları, sonlu elemanlar yöntemi ile elde ettikleri veriler ile kıyaslamışlardır. Bu karşılaştırma sonucunda sonlu elemanlar yönteminin kaynaklı bağlantıda oluşan kalıntı gerilmelerin ve açılma büzümlerinin tahmininde etkili olduğunu, bu yöntemle tahmin edilen sonuçlar ile elde edilen sonuçların % 8-18 aralığında dağılım gösterdiğini ifade etmişlerdir.

Shaohua vd. [16] 1,07 μm dalga boyunda, 200 μm çekirdek çapında ve 4 kW çıkış gücünde fiber lazer ve MIG kaynağından oluşan hibrit MIG kaynak yöntemi ve geleneksel MIG kaynak yöntemi ile 5083 alüminyum alaşımını birleştirdikleri çalışmada mikroyapı ve mekanik özellikleri incelemişlerdir. Çalışma sonucunda da hibrit MIG kaynağının çekme dayanımının normal MIG kaynağına göre çok fazla bir üstünlük sağlamadığı ifade ederken hibrit MIG kaynağının yorulma davranışının geleneksel MIG kaynağına göre daha iyi olduğunu söylemişlerdir.

3.10.2. 6XXX Alüminyum Alaşımları İle Yapılan Çalışmalar

Vargas vd. [70] farklı kaynak parametreleri kullanarak 6061 alüminyum alaşımını gaz metal ark kaynak yöntemi ile birleştirdikleri çalışmada, kaynak bölgesinden itibaren belirli uzaklıklarda ısı girdisi miktarını belirlemişler ve bu ısı girdisinin kaynaklı birleştirmenin mekanik özelliklerine etkileri araştırmışlardır. Yaptıkları çalışmanın

sonucunda ısı girişinin kaynaktan sonra oluşan yapının mekanik davranışları güçlü bir şekilde etkilediğini ve özellikle de ITAB’da ölçülen sertlik değerinin aşırı derecede düşük ölçüldüğünü rapor etmişlerdir.

Literatürde hibrit MIG kaynağı ve geleneksel MIG kaynağı ile 6005 alüminyum alaşımının birleştirildiği araştırmada, hibrit MIG kaynağında elde edilen ITAB’ın genişliğinin geleneksel MIG kaynağında elde edilen ITAB’a göre daha dar ve çekme dayanımının hibrit MIG kaynağı ile artırılabilmesine rağmen hala dayanım düşmesinin meydana geldiğini rapor etmişlerdir. Ayrıca hibrit MIG kaynağı ile birleştirilen numunelerin çekme dayanımlarının geleneksel MIG kaynaklı numunelerin çekme dayanımından daha yüksek olduğunu ifade etmişlerdir [71].

Chen vd. [72] lazer hibrit MIG kaynağı ile 6082 alüminyum alaşımını birleştirmişler ve kaynak parametrelerinin kaynaktaki gözenek oluşumu üzerine etkilerini incelemişlerdir. Yaptıkları bu çalışma neticesinde kaynak havuzu karakteristiği ile kaynaktaki gözenek oluşumu yüzdesi arasında bir ilişki olduğunu ve ayrıca kaynak akımının ya da lazer gücünün artışı ile kaynak hızının azaldığını bunun da gözenek oluşumunu azalttığını ve ergiyik havuzunun davranışı ile gözeneklilik arasında doğrudan bir ilişki bulunduğunu belirtmişlerdir.

Texier vd. [73] farklı kaynak parametreleri kullanarak MIG ve SKK yöntemleri ile 6000 serisi alüminyum alaşımlarını birleştirmişler ve birleştirmelerin statik yüklere karşı dirençlerini ölçmek için çekme ve sertlik deneylerini, dinamik zorlanmalara karşı dirençlerini ölçmek için yorulma testi ve mikroyapı özelliklerini belirlemek içinde X ışınları ve kırık yüzey çalışmaları gerçekleştirmişlerdir. Bu araştırma sonucunda her iki kaynak yöntemi için çatlak oluşum mekanizmasını belirlediklerini, bunun birincisinin mikroyapısal çatlak oluşum mekanizması diğersinin ise aşındırıcı temas çatlak oluşum mekanizması olduğunu ifade etmişlerdir. Ayrıca SKK yöntemi ile birleştirilen numunelerin çekme dayanımlarının ve yorulma dayanımlarının MIG ile birleştirilen numunelere oranla daha yüksek olduğunu rapor etmişlerdir.

Tapas vd. [74] MIG kaynak yöntemi ile 5052 ve 6061 alüminyum alaşımlarının birleştirdikleri çalışmada 5052 alüminyum alaşımında ölçülen boyuna ve enine kalıntı

gerilmelerin yaklaşık olarak 195 MPa ve 179 MPa olduğu, 6061 alüminyum alaşımında ise bu ölçümleri sırası ile 302 MPa ve 262 MPa olduğu ayrıca uzunlamasına kalıntı gerilmelerin enine kalıntı gerilmelerden daha büyük olduğunu söylemişlerdir. Bunların dışında kaynak çevresinde soğuma sırasında kaynak metalinin daralmasının, ana metal ve var olan birleşmeler tarafından engellenmesi sebebiyle yüksek gerilmelerin oluştuğunu bildirmişlerdir. .

BÖLÜM 4

SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI

4. 1. SKK YÖNTEMİ

Sürtünme kaynağından yola çıkılarak geliştirilen sürtünme karıştırma kaynağının (SKK) ilk denemeleri 1991 yılında İngiltere’de The Welding Institute (TWI) tarafından gerçekleştirilmiştir [2,23,59]. Bu yöntem ilk olarak alüminyum ve magnezyum gibi ergitme kaynak yöntemleri ile birleştirilmesinde sorunlar yaşanan metal ve alaşımlarının kaynaklı birleştirmelerinde kullanılmıştır [27].

Özellikle kaynatılması zor olan metallerin kaynağında tercih edilen SKK yönteminde sabitlenmiş olan parçaların birleşecek kenarlarına karıştırıcı ucun (probe) daldırılması ve ilerletilmesi sırasında karıştırıcı takımın omuz kısmının parçalara sürmesi sonucunda oluşan ısının, kaynatılacak malzemelerde plastik şekil değişimine neden olması ile birleşme gerçekleşmektedir [12,27].

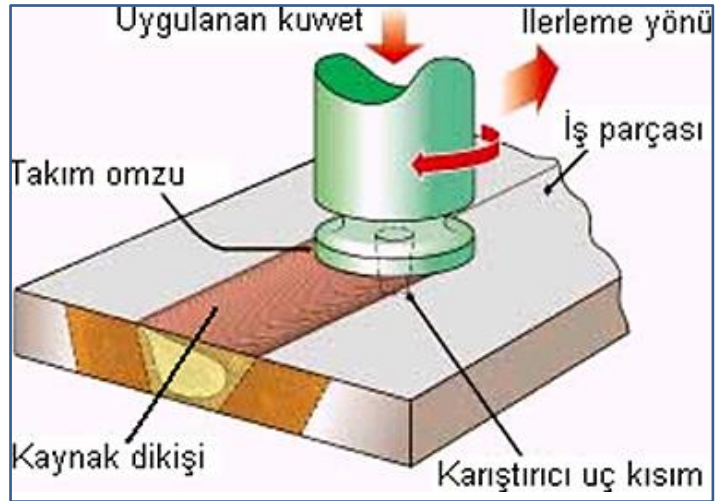
Kaynak yapılırken ilave tele, koruyucu gaza veya tozlara ihtiyaç duymayan SKK yönteminde kaynak esnasında kaynakçıya zarar verecek herhangi bir duman, ışık ya da gaz meydana gelmemektedir [2,59,75].

Diğer kaynak yöntemlerine göre birçok avantaja sahip olan SKK yöntemi günümüzde kara, deniz ve hava ulaşım araçlarının üretiminde, köprü ve yol yapımında yüzeyi geniş, et kalınlığı fazla olan levha şeklindeki parçaların kaynatılmasında tercih edilmektedir [27].

4.2. SKK YÖNTEMİNİN UYGULANMASI

Kullanılan freze ya da özel olarak imal edilmiş olan SKK makinesinin tablasına sabitlenmiş olan birleştirilmek istenen parçaların birleşme yerlerinden karıştırıcı uç (probe), parçaya karıştırıcı takım omuzu temas edinceye kadar daldırılmaktadır. Ancak daldırılan ucun boyu daima birleştirilecek parçaların et kalınlığından 0,1 ila 0,2 mm daha kısa ayarlanmalıdır [27]. Takım omzunun yüksek devirde dönerek iş parçalarının yüzeylerine sürtünmesi sonucunda oluşan ısı, birleştirilecek parçalarda plastik deformasyon meydana getirir. Bu sırada karıştırıcı uçta ısının etkisi ile çamurumsu bir hale gelmiş olan metalleri birbirine karıştırarak birleşmeyi sağlamaktadır [12,27,76].

Bu yöntemde karıştırıcı takım malzemesi seçerken birleştirilecek olan parçaların mekanik özelliklerini bozmadan malzemeleri yumuşama sıcaklıklarına kadar çıkartabilecek, ana malzemelerden daha sert ve aşınmaya dayanıklı malzeme olmasına dikkat edilmelidir [75]. Şekil 4’de SKK yapılışı görülmektedir.



Şekil 4.1. SKK yapılışı [76].

Sürtünme süratiyle kaynak için gerekli olan ısıyı oluşturan karıştırıcı takım, uç (probe) ve omuzdan meydana gelirken kaynak sırasında iki görevi yerine getirmekten sorumludur. Bu görevlerden birincisi sürtünme yoluyla kaynak için gerekli olan ısıyı

oluşturmak, ikincisi ise ısının etkisi ile yumuşamış olan metalleri karıştırmak ve doğrusal olarak ilerleyerek birleştirmeyi sağlamaktır [27].

4.3. SKK YÖNTEMİNE ETKİ EDEN UNSURLAR

İlk bakışta uygulanması kolay ve diğer kaynak yöntemlerine göre kaynak kalitesine etki eden unsurlar yok gibi görünse de karıştırıcı takım uç şekli, tercih edilen devir sayısı, ilerleme hızı, birleştirilecek malzemelerin mekanik ve kimyasal özellikleri, takım dalma derinliği gibi etkenler kaynak kalitesini doğrudan etkilemektedirler [22,23].

Malzemenin karıştırılabilme özelliği, seçilen karıştırıcı ucun şekline doğrudan bağlı olduğu için ucun şekli kaynaklı bağlantının mekanik özelliklerini etkileyen önemli bir unsurdur [2].

Sürtünme yoluyla kaynak için gerekli ısının oluşmasında en büyük paya takım devir sayısı ile ilerleme hızı sahiptir. Bu nedenle de bu iki etken, kaynak sonrası oluşacak olan kaynak metalinin metalurjik özellikleri üzerinde haklı bir etkiye sahiptirler [22].

Birleştirilecek olan malzemelerin özelliklerinin birbirine yakın olması kaynaklı birleştirmenin kalitesini artırmaktadır. Bu nedenle de kaynatılacak olan malzemelerin özellikleri kaynak sonrasında oluşan yapının özelliklerini etkilemektedir [2].

Yukarıda bahsi geçen üç unsurda önceden belirlenip kaynak süresince de kolaylıkla kontrol altında tutulabilmektedirler. Buna karşın dördüncü unsur olan uç dalma derinliğini kaynatılacak malzemelerin yüzey kusurlarından dolayı kontrol altında tutmak oldukça zordur. Bu nedenle kaynaktan önce yapılacak olan yüzey hazırlama oldukça önem arz etmektedir [2,22].

4.4. SKK YÖNETİMİNDE KARIŞTIRICI UÇLAR VE ÇEŞİTLERİ

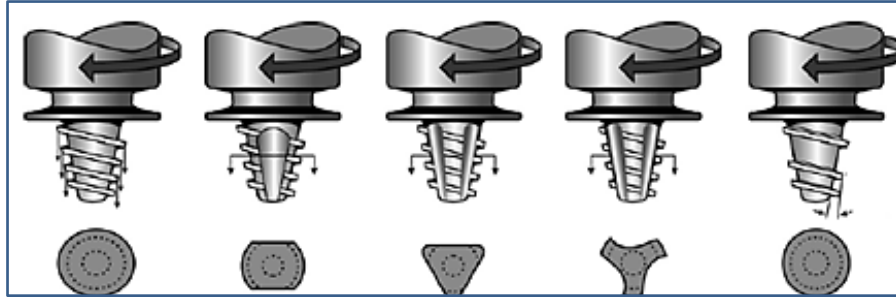
Kaynaklı bağlantının özelliklerini etkileyen malzeme karışma yeteneği, doğrudan karıştırıcı uç profiline bağlıdır. Bu nedenle de kullanılacak olan uçların profilleri iyi

bir karışma sağlayacak şekilde tasarlanmalıdır [23,59]. Ayrıca tasarım sırasında seçilen karıştırıcı pim malzemesinin yüksek sıcaklık aşınma direncine sahip olmasına da dikkat edilmelidir [2].

Bu yöntemin ilk denemeleri silindirik uçlarla gerçekleştirilmiş ancak silindirik uçların karıştırma yeteneklerinin yetersizliği ortaya çıkınca farklı profil ve tipte uçlar tasarlanmaya başlanmıştır [23]. Günümüzde birbirine göre değişik avantaj ve dezavantajlara sahip çok farklı karıştırıcı uçlar kullanılmaktadır.

4.4.1. Whorl™ Serisi Karıştırıcı Uçlar

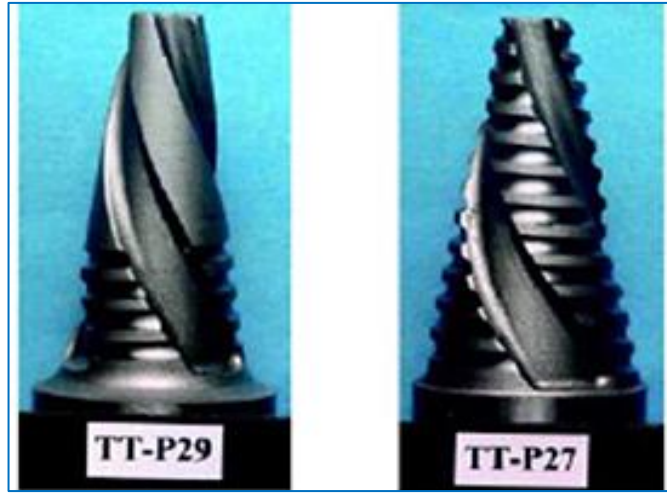
Bu tip karıştırıcı uçlar konik olup, plastik şekil değişimine uğramış olan metali aşağıya doğru kolaylıkla bastırarak ve akmasını sağlayacak şekilde helisel vida uçlarına sahiptir [18]. Şekil 4.2’de Whorl™ tipi karıştırıcı uçlar görülmektedir.



Şekil 4.2. Whorl™ tipi karıştırıcı uçlar [16].

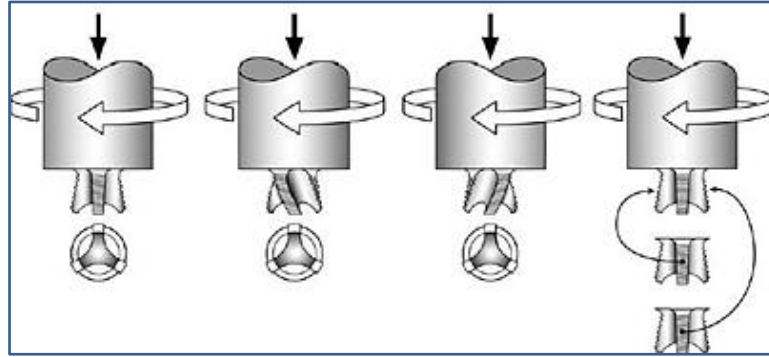
4.4.2. Multi-Helix (MX) Triflute™ ve Flared-Triflute™ Serisi Karıştırıcı Uçlar

Kesik bir piramiti andıran bu karıştırıcı uçlar malzemenin yüzeyindeki oksiti parçalayacak şekilde tasarlanmıştır [23,24]. Şekil 4.3’te Triflute™ uçlar görülmektedir.



Şekil 4.3. Triflute™ uçlar [26].

Geniş kaynak alanı sağlayan ve kalın parçaların kaynağında yaşanan sorunları bertaraf eden flared-triflute™ tipi uçlar bindirme kaynaklarında kullanılmak üzere tasarlanmışlardır [22]. Şekil 4.4’de Flared- Triflute™ uçlar görülmektedir.

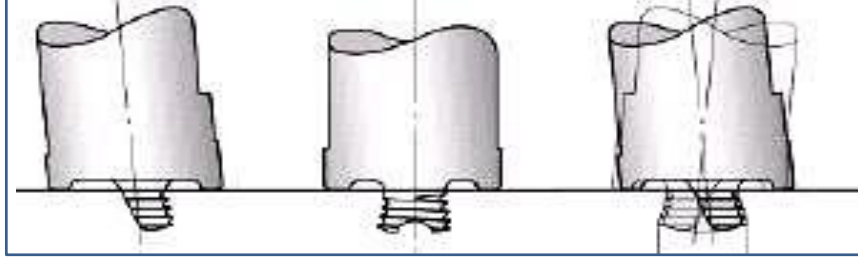


Şekil 4.4. Flared- Triflute™ uçlar [16].

4.4.3. Skew-Stir™ Serisi Karıştırıcı Uçlar

Tezgah mili eksenine göre uç eksenini eğik olarak tasarlanan Skew- stir™ tipi karıştırıcı uçlarda boşluk oluşumunu azaltmak ya da ortadan kaldırmak hedeflenmiştir. Uçtaki bu eğim karıştırıcı ucun dinamik süpürme hacmi ile statik sürtünme hacmi arasındaki oranı artırmaktadır. Artan bu oranda boşluk oluşumunu önlemektedir [27]. Şekil 4.5’te Skew-Stir™ serisi karıştırıcı uçlar görülmektedir.

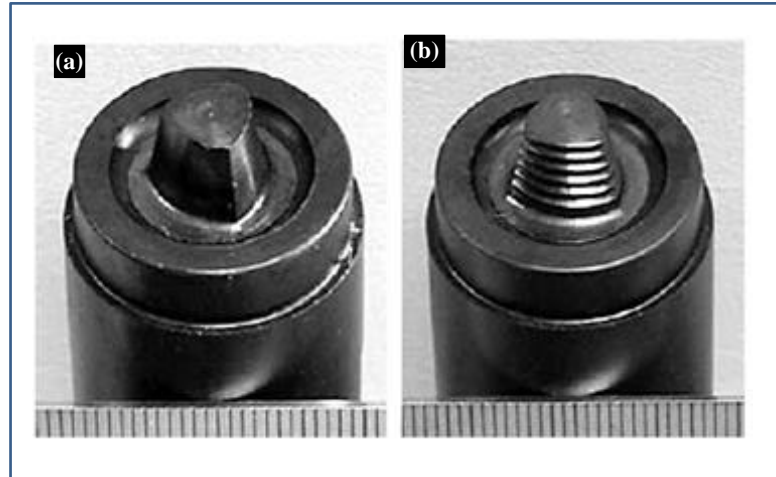
Bu karıştırıcı takımlarda kaynak hızında % 100 artış elde edilirken aksel kuvvette % 20 azalma meydana geldiği için daha geniş kaynak bölgesi ve üst parçada 4 kez daha az incelme görülmektedir [23].



Şekil 4.5. Skew-Stir™ serisi karıştırıcı uçlar [22].

4.4.4. Trivex™ Serisi Karıştırıcı Uçlar

Plastik şekil değişimine maruz kalmış olan malzemenin akmasını kolaylaştırmak için bu tip karıştırıcı uçların profili üçgen şeklinde olup konveks kenarlarının üzerine ya vida dişi açılmıştır ya da düz olarak bırakılmıştır. Trivex™ tipi karıştırıcı uçlar iki çeşittir. Bunlar Trivex™ ve MX- Trivex™ tir [18]. Şekil 4.6'da Trivex™ uçlar görülmektedir.



4.6. Trivex™ uçlar a) Trivex™ uç, b) MX- Trivex™ uç [21].

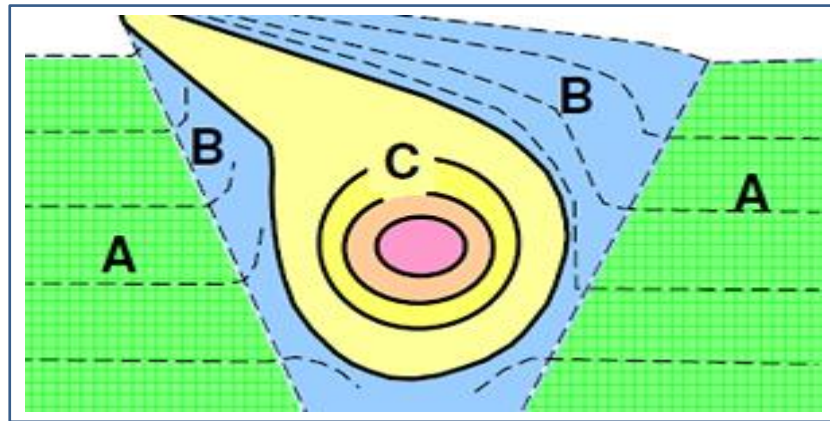
4.5. SKK BÖLGESİNİN METALURJİSİ

Diğer kaynak yöntemlerine göre kaynak bölgesinde oluşan ısı düşük olduğu için bu yöntemde elde edilen kaynak metalinin mikroyapısı da diğer yöntemlere kıyasla farklılık göstermektedir [2]. Mikroyapıda ilk göze çarpan oluşum soğan halkalarıdır. Birleştirilen alaşımın türüne ve kaynak parametrelerine göre şekli değişen soğan halkaları, karıştırıcı takımın dönerken aynı zamanda da ileri doğru hareket etmesi sonucunda meydana gelmektedirler [23,24].

Mikroyapı, soğan halkalarının dışında ısı tesiri altındaki bölge (ITAB) termomekanik etkilenen bölge (TEB) ve dinamik olarak yeniden kristalleşen bölge olmak üzere ana metalden kaynak metaline doğru üç farklı yapıdan meydana gelmektedir [5,75]. Mikroyapıda farklı bölgelerin meydana gelmesinden sürtünme sırasında oluşan aşırı derecedeki plastik deformasyon ve ısı sorumludur [23]. Şekil 4.7’de SKK bölgelerinin şematik olarak görülmektedir.

4.5.1. Ana Metal

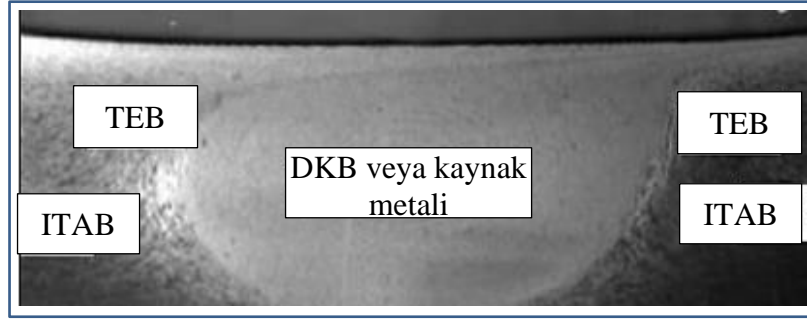
Kaynak sırasında oluşan ısıdan ve plastik deformasyondan etkilenmediği için mikroyapıda herhangi bir değişimin yaşanmadığı bölgedir [2,22,75].



Şekil 4.7. SKK bölgelerinin şeması A) Isı tesiri altındaki bölge (ITAB), B) Termomekanik olarak etkilenen bölge (TEB), C) Dinamik olarak yeniden kristalleşen bölge (DKB) [58].

4.5.2. Dinamik Olarak Yeniden Kristalleşen Bölge (DKB)

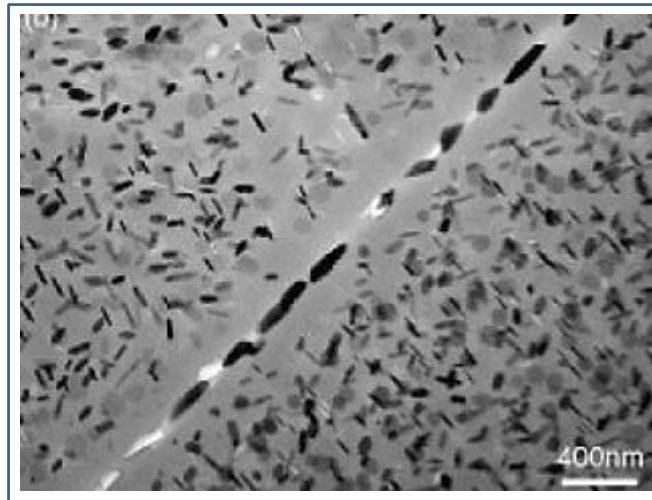
Kaynak sırasında sürtünmenin oluşturduğu plastik deformasyondan ve ısıdan etkilenen ve ince taneli yapıya sahip olan bu bölge kaynak metalini meydana getirmektedir [2,22,23,75]. Şekil 4.8’de dinamik olarak yeniden kristalleşen bölge görülmektedir.



Şekil 4.8. Dinamik olarak yeniden kristalleşen bölge [2].

4.5.3. Isıdan Etkilenen Bölge

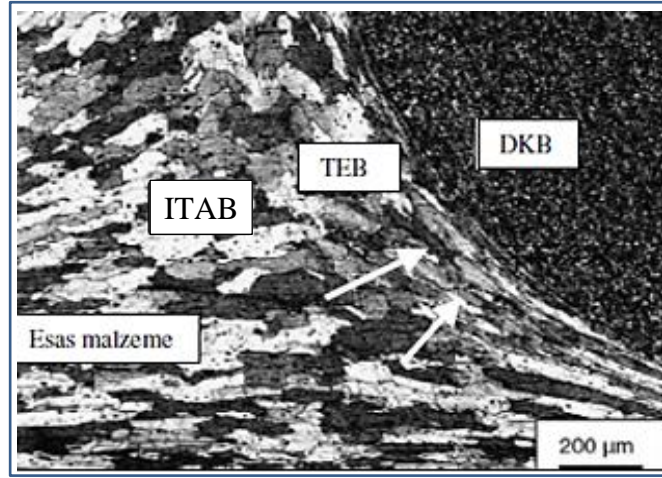
DKB bölgesine yakın olan bu bölge sürtünme ısısından kısmen etkilendiği ve plastik deformasyona maruz kalmadığı için kısmi olarak ince taneli bir yapıya sahiptir [2,22,75]. Şekil 4.9’da Isıdan etkilenen bölge görülmektedir.



Şekil 4.9. Isıdan etkilenen bölge [2].

4.5.4. Termomekanik Etkilenen Bölge (TEB)

Kaynak işlemi gerçekleştirilirken sürtünme sonucunda meydana gelen plastik şekil değişiminden ve sürtünme ısısından etkilenen bu bölge, ITAB ile kaynak metali arasında kalırken deformasyondan etkilendiği için yassı ve uzun tanelere sahip olmasının yanında mekanik özellikleri de değişime uğramış olan bölgedir [2,22]. Şekil 4.10'da termomekanik etkilenen bölge görülmektedir.



4.10. Termomekanik etkilenen bölge [22].

4.6. SKK KAYNAK PARAMETRELERİ

Birleştirilecek olan metal ve alaşımının türüne, et kalınlığına, karıştırıcı takım uç profiline göre belirlenen ve kaynaklı bağlantının mekanik karakteristiğini belirleyen bu parametreler aşağıda belirtilmiştir:

- Takım devir sayısı,
- Kaynak ilerleme hızı,
- Takım batma derinliği [30,59].

4.6.1. Takım Devir Sayısı

Kaynak başlamadan önce makine üzerinden ayarlanabilen ve kaynak süresince değişmeyen bu parametre sürtünme sonucunda oluşan ısıyı etkilediği için karıştırmanın daha başarılı bir şekilde gerçekleştirilmesinde önemli bir role sahiptir [22,23].

4.6.2. Kaynak İlerleme Hızı

Takım devir sayısı gibi kaynak başlamadan önce makine üzerinden ayarlanabilen bu parametre kaynak bölgesinde meydana gelen ısı üzerinde önemli bir paya sahip olmasından dolayı kaynak sonrasında oluşan kaynak metalinin mekanik özelliklerini etkilemektedir [23,59].

4.6.3. Takım Batma Derinliği

Kaynaklı birleştirmenin nüfuziyeti üzerinde önemli bir etkiye sahip olan takım batma derinliği malzeme et kalığından 0,508 mm kadar daha kısa olacak şekilde ayarlanması daha iyi nüfuziyet ve mekanik özelliklerin elde edilmesini sağlamaktadır [23].

4.7. SKK YÖNTEMİNİN KULLANIM ALANLARI

Kaynak işleminin kolay ve kaynak sırasında insan sağlığını olumsuz yönde etkileyecek herhangi bir ışık ya da duman üretmediği için ticari olarak pek çok alanda kullanılan SKK yöntemi ile genelde alın birleştirilmeleri yapılmasının yanında bindirme ve sürtünme karıştırma nokta kaynakları da gerçekleştirilmektedir [19]. Özellikle demir dışı metal ve alaşımlarının kaynağında diğer kaynak yöntemlerine kıyasla avantajlara sahip olan SKK yöntemi aşağıda sıralanan endüstriyel alanlarda yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Bu alanlar:

- Kara taşımacılığı,
- Gemi ve denizcilik sektörü,
- Havacılık ve uzay sanayi,
- Raylı sistemler endüstrisi [2,24,30].

4.8. SKK AVANTAJ VE DEZAVANTAJLARI

4.8.1. SKK Yönteminin Avantajları

- Uygulaması kolay ve maliyeti düşüktür.
- Kaynak enerjisi yüksektir.
- Kaynak bölgesini korumak için gaz ya da toza ihtiyaç olmadığı gibi ilave kaynak teline de ihtiyaç duyulmaz.
- Otomatik hale getirilebilir.
- Bütün konumlarda kaynak yapmak mümkündür.
- Kaynak metali içinde gözenek kalmaz.
- Farklı özelliklere sahip metaller başarılı bir şekilde birleştirilebilir.
- Pratikte uygulanması zor görünen birçok bileşimin kaynatmaya uygundur.
- Özel olarak kaynak ağız hazırlığı gerektirmez.
- Dar bir ITAB'a sahiptir.
- Kaynak sonrasında sıçrantsız düz bir dikiş elde edilir.
- Ark olmadığı için ark üflemesi de oluşmaz.
- Yüksek verimliliğe sahiptir.
- Kaynak bakım maliyeti düşüktür.
- Kaynaktan sonra oksit tabası oluşturmaz.
- Alüminyum gibi çatlama riski yüksek metallerin kaynağı başarılı bir şekilde gerçekleştirilebilmektedir.
- Isıl işlemle birleştirmenin mukavemeti artırılabilir.
- Fazla yüksek ısı oluşturmadığı için metalin metalürjik özelliklerinde fazla değişme meydana gelmez.
- SKK ile metaller değişik şartlar altında birleştirilebilir.
- Ekstrüzyon ya da döküm üretimi olan malzemelerin birçoğu bu yöntemle kaynatılabilir.
- Direnç nokta kaynağı gibi, sürtünme karıştırma nokta kaynakları yapılabilir [59].

4.8.2. SKK Yönteminin Dezavantajları

- Özellikle düşük ergime derecesine ve mukavemete sahip metallerin kaynağı için uygundur.
- Kaynaklanacak parçaların tezgaha sağlam bir şekilde tespit edilmesi gerekir.
- Bazı ergitme kaynaklarına göre düşük kaynak hızına sahiptir.
- Karıştırıcı takım ucunun çıktığı yerde delik oluşmaktadır.
- Kalın parçaların kaynağında güçlü tezgahlara ihtiyaç gösterir.
- Kaynak ekipmanlarının taşınması zordur.
- % 100 nüfuziyet için iki taraflı kaynak yapılması gerekmektedir [75].

4.9. SKK YÖNTEMİ İLE DAHA ÖNCE YAPILAN ÇALIŞMALAR

4.9.1. 5XXX Serisi Alüminyum Alaşımları ile Yapılmış Çalışmalar

El-Sayed vd. [77] 5083 alüminyum alaşımlarının farklı profillerdeki takımlarla SKK yöntemi ile birleştirmişler ve dişli takım ile elde edilen kaynak sıcaklığının, konik takımlarla elde edilen kaynak sıcaklığına göre daha yüksek olarak ölçtüklerini rapor etmişlerdir. Ayrıca vidalı takım ile yapılan tüm kaynaklarda elde edilen sertlik değerlerinin ana malzemenin sertliğinden daha yüksek olduğunu söylemişlerdir. Bunların dışında konik pim ile yapılan tüm kaynaklarda ilerleme yönünde tünel kusurlarının oluştuğu buna ise tercih edilen dönme ve ilerleme hızlarının kombinasyonunda meydana gelen yetersiz aksel kuvvetlerin neden olmuş olabileceğini belirtmişlerdir.

Kumar vd. [78] 5083 alüminyum alaşımını SKK yöntemi ile birleştirmişler ve takım dönme hızının mekanik özellikler üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Yapılan bu çalışmada kaynak merkezindeki karıştırma işlemi incelenmiş ve karıştırma işleminin ince taneler ürettiği rapor edilmiştir. Yine aynı çalışmada karıştırma süresince karıştırıcı takım ile kaynatılan numuneler arasında yüksek plastik deformasyon ve sürtünmenin ürettiği ısı nedeni ile ana metalle kaynak metali arasında termomekanik olarak etkilenen bölge ve ısı tesiri altında olan bölge olmak üzere küçük kısımlar oluştuğunu ve termomekanik olarak etkilenen bölgede plastik deformasyon ve ısı

nedeniyle hafifçe uzun bir tane yapısı meydana geldiğini bildirmişlerdir. Buna ilaveten ısı tesiri altındaki bölgenin, ana metale nazaran daha kaba taneli bir yapıdan oluştuğunu rapor etmişlerdir.

Heirani vd. [79] 5083 alüminyum alaşımını hem su ortamında hem de hava ortamında SKK yöntemi ile kaynatmışlar ve su atmosferinde yapılan kaynaklarda düşük ısı girdisi ve hızlı soğuma oranları nedeniyle tanelerin büyümeye zaman bulamadığı için sertlik değerlerinin ve çekme dayanımlarının hava ortamında yapılan kaynaklara oranla daha yüksek olarak elde edildiğini söylemişlerdir.

Leonardo vd. [80] 5052 alüminyum alaşımlarını farklı çaplarda omuzlar kullanarak SKK yöntemi ile birleştirmişler ve kaynak metalini, omuz çapının ve ürettiği ısının karakterize ettiğini söyleyerek omuz çapının artması ile kaynak çekirdeğinin sertliğinin düştüğünü buna ise bölgedeki ısı girişi artışının neden olduğunu bildirmişlerdir. Ayrıca omuz çapının ısı üretimini etkilediğini ve kaynak çekirdeği boyutunun ısı ile lineer olarak arttığını bu artışında plastik akış ve sıcaklıktaki artışla ilişkili olduğunu ifade etmişlerdir.

Nan vd. [81] 5083 alüminyum alaşımını SKK ile birleştirdikleri bir çalışmada birleşme kenarlarının mekanik özelliklerini ve kırılma davranışlarını incelemişler, birleşme kenarı uzunluğunun artışı ile ilk önce çekme dayanımının ve % uzamanın arttığı daha sonra düştüğünü akma dayanımında bir azalma eğilimi olmadığını ayrıca yorulma ömrünün kısa birleşme kenarlarında daha uzun olarak ölçtüklerini ifade etmişlerdir. Yine aynı çalışmada çekme dayanımı ile yorulma direncinin, numunelerin kırılma tipi ile güçlü bir ilişkisi olduğunu söylemişlerdir.

4.9.2. 6XXX Serisi Alüminyum Alaşımları İle Yapılmış Çalışmalar

Sashank vd. [82] 6063 alüminyum alaşımını farklı takım dönme hızlarında SKK yöntemi ile birleştirmişler ve tane boyutunun artan takım dönme hızı ile arttığını ve buna ise SKK boyunca meydana gelen ısı girişinin sebep olduğunu bildirmişlerdir. Yine yüksek dönme hızlarının yüzeye yakın kısımlarda yüksek sıcaklıklara ve alt yüzeye yakın kısımlarda ise yetersiz birleşmelere neden olması sebebiyle numunelerin

çekme dayanımlarının ana metalin çekme dayanımının % 80'i kadar çıkmasına neden olduğunu ifade etmişlerdir.

Das ve Toppo [83] farklı takım dönme hızlarında farklı alüminyum alaşımlarını SKK yöntemi ile birleştirmişler ve takım dönme hızı arttığında buna bağlı olarak ısı girdisinin arttığını ve ısı girişi profilinin de kaynak zamanına bağlı olarak değiştiğini rapor etmişlerdir. Ayrıca düşük dönme hızlarının yetersiz ısı girişi ve düşük plastik deformasyon üretmesinden dolayı düşük dönme hızlarında birleştirilen numunelerin düşük darbe dayanımına sahip olduklarını ifade etmişlerdir. Öte yandan orta dönme hızlarında yapılan kaynaklarda AA6101 tarafındaki ısı tesiri altındaki bölgede darbe direncinde gelişme meydana geldiği bunun bir sebebinin karıştırıcı takım tarafından üretilen plastik deformasyonun artması ile boşlukların şekillenmesi ve ısı girişi ile kontrol edilen tane boyutu olduğunu, ikincisinin ise yüksek dönme hızlarında yüksek dayanımlı malzemelerin karışması sonucunda kaynak çekirdeğinin darbe enerjisinin artırması olduğunu bildirmişlerdir.

Hejazi ve Mirsalehi [84] 6061 alüminyum alaşımını SKK yöntemi birleştirdikleri çalışmada mikroyapı ile sertlik arasındaki ve sertlik ile çekme dayanımı arasındaki ilişkiyi araştırmışlardır. Karıştırma bölgesinin sertliğinin diğer yakın bölgelere göre daha yüksek olduğunu bunun da dinamik yeniden kristalleşme sonucunda meydana gelen küçük eş eksenli tanelerden kaynaklandığını ayrıca termomekanik olarak etkilenen bölgede, yüksek sıcaklık nedeniyle bozulan çözelti yapısının sertlikte düşmeye sebep olmuş olabileceği ve ısı tesiri altındaki bölgenin de aşırı yaşlanmadan dolayı sertliğinin düşmüş olabileceğini belirtmişlerdir.

Long vd. [85] alüminyum alaşımlarını SKK yöntemi ile birleştirdikleri bir çalışmada kaynak hızının artması ile çekme dayanımının arttığını ve maksimum çekme dayanımının ana metalin çekme dayanımının % 69'na eşit olduğunu ayrıca mikrosertliğin de artan kaynak hızı ile arttığını bildirmişlerdir. Öte yandan malzemenin plastikleşmesini ve akışkanlığını kontrol eden, birim alan, düşük ısı girdisini etkilediği ve birleştirmelere giren ısı girdisini azalttığı için artan kaynak hızının tanelerin kabalaşmasının ve çökeltilerin iletiminin azalttığını rapor etmişlerdir.

Literatürde SKK yöntemi ile 6061 alüminyum alaşımının birleştirildiği ve mekanik ve mikroyapı özelliklerinin incelendiği çalışmada yüzey pürüzlülüğünün kaynak kalitesinin kontrolünde önemli bir rol oynadığını ve düşük yüzey pürüzlülüğünün dar bir ITAB oluşturduğunu bunun da takım omzunun altındaki kesme kuvvetini düşürdüğünü belirtirken ayrıca kaynaklı birleştirmenin en zayıf noktasının termomekanik olarak etkilenen bölgenin olduğu söylenmiştir [86].

4.9.3. 5XXX ve 6XXX Serisi Alüminyum Alaşımları İle Yapılmış Çalışmalar

Cho vd. [87] 5083-alüminyum alaşımı ile 6082 alüminyum SKK yöntemi ile birleştirmişler ve iş parçası ile karıştırıcı takım arasındaki sürtünmenin yüksek bir ısı girişine neden olduğunu ve bu güçlü ısının kaynak süresince termomekanik özellikler üzerinde önemli rol oynadığını yazmışlardır. Ayrıca karıştırma bölgesinde, SKK kaynağı sürecinde yeniden kristalleşme sonucunda eş eksenli ince tanelerin oluştuğunu rapor etmişlerdir. Bu söylediklerine ek olarak bir SKK sürecinde birbirine yakın çok küçük farklarla ayrılan dört bölgenin oluştuğu, bu bölgelerin sırasıyla ana metal termomekanik olarak etkilenen bölge, iki farklı ısı tesiri altında kalan bölgeler olduğunu yazmışlardır. Yine bu bölgelerin tane boyutlarının ise aynı sıra ile 12.8, 9.2, 7.0 ve 7.8 μm olarak ölçtüklerini ve 4. Bölgenin tane boyutunun kaynak süresince oluşan yeniden kristalleşme sebebiyle 3. Bölgedeki tanelerden daha büyük olduğunu saptamışlardır.

Ilangovan vd. [88] SKK yöntemi ile farklı takım dönme ve ilerleme hızları kullanarak 6061 ile 5086 alüminyum alaşımlarını 6061-6061, 5086-5086 ve 6061-5081 olacak şekilde üç farklı kombinasyonda birleştirmişler ve tane sınırlarının ve ince tanelerin artmasının sertliğin yükselmesine neden olduğunu belirtmişlerdir. Aynı zamanda karıştırma bölgesinde yeniden kristalleşmelerin oluşumunun bu bölgenin sertliğini arttırdığını rapor etmişlerdir. Bunun dışında sertliğin artmasında yüksek tane sınırı fraksiyonu ve metaller arası kırılma fazların oluşumunun da etkili olduğunu söylemişlerdir.

BÖLÜM 5

YORULMA

5.1. YORULMANIN TANIMI

Günümüzde kaynaklı birleştirmelerin birçoğu çalışma koşulları altında statik yüklerin yanı sıra dinamik yüklere de maruz kaldıkları için akma ve çekme kuvvetlerin çok altındaki yükler karşısında çatlamakta ve hatta kırılarak kopmaktadırlar [88,89]. Bu kopma ve kırılmalara kaynaklı bağlantıların uzun süreler tekrarlı yükler altında çalışması sonucunda oluşan çatlamlar ve bu çatlamların zamanla büyümesi sebep olmaktadır [90]. Kaynaklı bağlantılarda görülen bu kırılmalara yorulma denir [91].

Makine elemanlarında ve kaynaklık bağlantılarda ani olarak gelişen kopma ve kırılma olaylarından % 90-95 oranında yorulma sorumludur [89,92]. Dolayısıyla kaynaklı bağlantılardaki yorulma mukavemeti en az çekme dayanımı, basma dayanımı gibi statik mukavemetler kadar hatta bazı durumlarda onlardan daha da önemlidir [92].

Malzeme içerisindeki kusurlar nedeni ile oluşan çatlamlar ilerleyen süreçte yorulma kırılmalarına neden olmaktadır. Malzemelerin içyapılarında var olan boşluk, sert kalıntılar ve ani kesit daralmaları gibi kusurların neden olduğu gerilme yığılmaları, ortalama gerilme değerini aştığı zaman bölgesel olarak plastik şekil değişimine neden olarak yorulma çatlamlarını oluştururlar. Ayrıca yerel olarak hareket eden dislokasyonların sebep olduğu kırılma bantları yüzeyde bir çıkıntı ya da çöküntüye rastladığında da gerilme yığılmaları oluşmaktadır. Bunun sonucunda da plastik şekil değişimi nedeniyle malzemede pekleşme ve gevrekleşme meydana gelir. Zamanla artan gevrekleşmede mikro ve makro çatlaklar oluşur ve bu da yorulma çatlaklarının meydana gelmesine neden olur [90,93].

5.2. YORULMAYI ETKİLEYEN FAKTÖRLER

Malzemelerin çalışma şartlarında dayanımını zayıflatan ve zamanla malzemelerde mikro çatlaklara, daha sonra da mikro çatlakların gelişmesi sonucunda kırılmaya neden olan çeşitli sebepler vardır. Bunların en önemlilerini şunlardır:

- Sıcaklık,
- Parçanın yüzey işleme kalitesi,
- Gerilme türü,
- Korozyon,
- Çentik etkisi,
- Malzemenin içyapısı [90].

5.2.1. Sıcaklık

Malzemelerde sıcaklık düştükçe, ısının azalması arayer atomlarının hareketini ve boşluk oluşumunu azaltır. Bu durumda da malzemenin yorulma dayanımında artma meydana gelir ancak sıcaklığın artması ile artan arayer atom hareketleri ve boşluk oluşumu yorulma dayanımında düşmeye neden olmaktadır [90,94,95].

5.2.2. Parçanın Yüzey İşleme Kalitesi

Malzemelerin işlenmesi sırasında oluşan pürüzlülüklerin ya da işin gereği açılan deliklerin, keskin köşelerin yorulma dayanımını azaltmasından dolayı yorulma çatlakları genel olarak yüzeyden başlamaktadır [90,94,96].

5.2.3. Gerilme Türü

Malzemeye uygulanan gerilmelerin şiddeti ve şekli, malzemenin yorulma dayanımı üzerinde farklı etkilere sahiptir [97].

Malzemenin yorulma dayanımını üzerinde büyük bir etkiye sahip olan ortalama gerilmenin artması, malzemenin belirli bir çevrim sayısına mukavemet edebileceği

gerilme genliğinin düşmesine neden olmaktadır. Aksi durumda ise gerilme genliğinin artması ile malzemenin en yüksek çevrim sayısına erişebilmesi için gerekli olan ortalama gerilme sifıra yakın olmalıdır. Ayrıca malzemenin gerilme oranı artması ile birlikte belirli bir çevrim sayısına direnç gösterebileceği gerilme genliği düşmektedir [96].

5.2.4. Korozyon

Korozyonun neden olduğu çukurcuklar ya da çatlaklar bulunan bir malzeme tekrarlı yüklere maruz kalırsa bu çukurcukların ve çatlakların çentik etkisi oluşturması sebebiyle malzeme kırılır ve kopar [95]. Sonuç olarak korozyon malzemelerin yorulma mukavemetini zayıflatmaktadır.

5.2.5. Çentik Etkisi

İşin gereği olarak işlenmesi sırasında ya da başka herhangi bir nedenden dolayı pürüzlülük ya da süreksizlikler oluşmuş malzemelere, tekrarlı yükler tatbik edildiğinde, bu pürüzler ve süreksizlikler çentik etkisi yaparak malzemenin yorulma dayanımını ve yorulma ömrünü azaltmaktadırlar [90,96].

5.2.6. Malzemenin İç Yapısı

Malzemelerin mekanik davranışları ile doğrudan ilintili olan tane boyutu, tane yapısı, iç kusurlar yorulma dayanımı üzerinde oldukça önemli bir etkiye sahiptirler. Bunun dışında tane boyutunu değiştirmek için yapılan ısıl işlemlerin yorulma üzerinde olumsuz etkileri olabileceğinden dolayı tane boyutunun zaman içinde yorulma mukavemetini nasıl değiştireceğini tahmin etmek zordur [94].

5.3. YORULMA TEST YÖNTEMLERİ

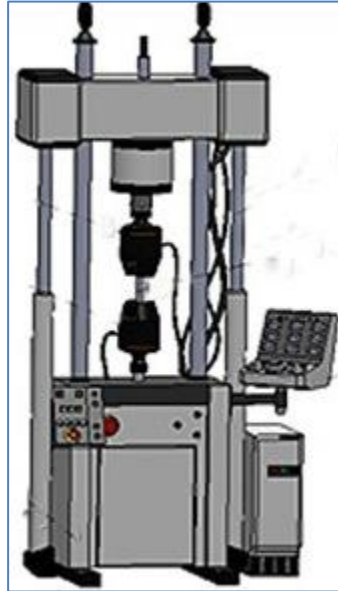
İşin gereği malzemeler yerinde görevini icra ederken farklı tür ve şiddette gerilmelerle yüzleşmek durumundadırlar. Fakat sürekli tekrarlı yüklemeler altında çalışmak zorunda olan malzemelerin yorulma dayanımlarını doğru olarak saptayabilmek için

eksenel, burkulma ve bileşik gerilmeler gibi temel gerilmelerin tatbik edilmesi gerekmektedir [92]. Uygulanan gerilme türüne göre yorulma test yöntemleri aşağıdaki gibi sınıflandırılmaktadır [90,91]:

- Eksenel gerilmeli yorulma testi,
- Eğme gerilmeli yorulma testi,
- Burulma gerilmeli yorulma testi,
- Bileşik gerilmeli yorulma testi [90-92].

5.3.1. Eksenel Gerilmeli Yorulma Testi

Genellikle içten yanmalı motorların bağlantı rotorlarında görülen eksenel gerilmelerin test edildiği bu yöntemde malzeme uzunluğu boyunca sürekli değişkenlik arz eden çekme ve basma gerilmelerine maruz kalırken tatbik edilen gerilme uniform olarak malzeme eninde de dağılım göstermektedir. Şekil 5.1’de eksenel gerilmeli yorulma test cihazı görülmektedir [92,98].

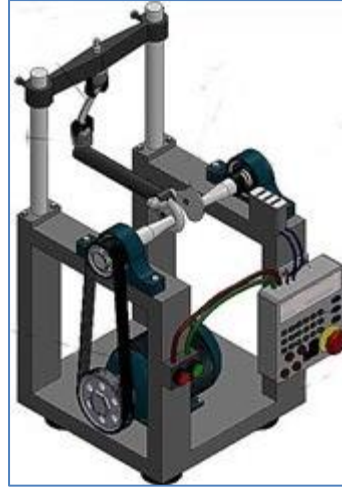


Şekil 5.1. Eksenel gerilmeli yorulma test cihazı [92].

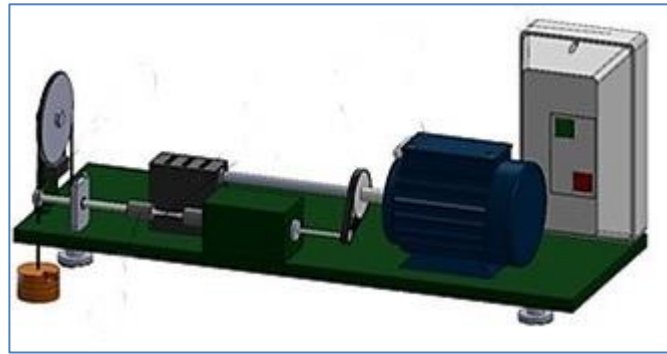
5.3.2. Eğme Gerilmeli Yorulma Testi

Düzlemsel ve dönme eğme gerilmeli olmak üzere iki farklı test yöntemi bulunmaktadır [98]. Taşıtların akslarında görülen düzlemsel eğme gerilmeli yorulmaların kontrolünde malzemenin nötr eksenine göre tekrarlı gerilmeler uygulanmaktadır [91,98].

Dönen eğme gerilmeli yorulma test yönteminde, eğme gerilmesi tatbik edilirken aynı anda dönme yapan bir malzemenin kesitinin maruz kaldığı gerilme sabit kalsa dahi değişken gerilmeler meydana getirilmektedir [92]. Şekil 5.2’de düzlemsel eğme gerilmeli yorulma test cihazı görülürken şekil 5.3’te dönme eğmeli test cihazı görülmektedir.



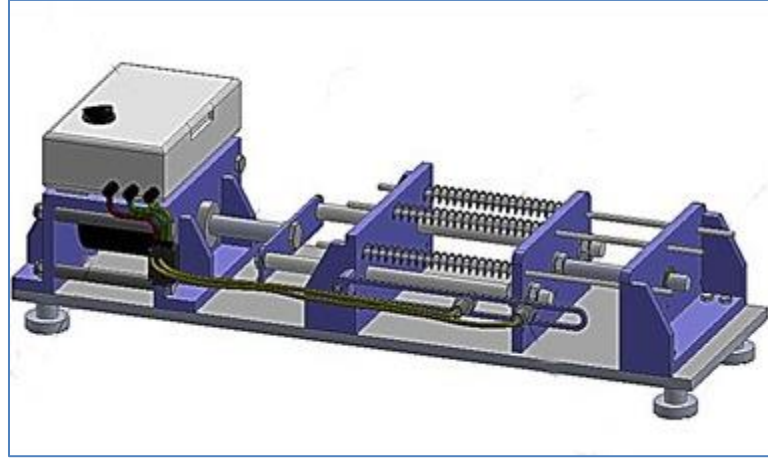
Şekil 5.2. Düzlemsel eğme gerilmeli yorulma test cihazı [91].



Şekil 5.3. Dönme eğmeli yorulma test cihazı [92].

5.3.3. Burulma Gerilmeli Yorulma Testi

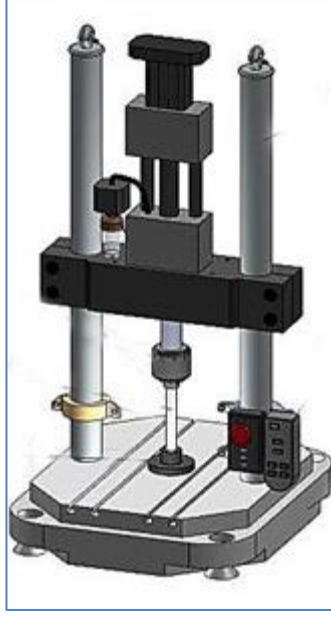
Araçların süspansiyon yaylarında görülen bu yorulma türünü test ederken deney parçası sabit bir eksene göre tekrarlı burulma gerilmesi ile karşı karşıya bırakılmaktadır [98]. Şekil 5.4'te burulma gerilmeli yorulma test cihazı görülmektedir.



Şekil 5.4. Burulma gerilmeli yorulma test cihazı [92].

5.3.4. Bileşik Gerilmeli Yorulma Testi

Motorların krank millerinde meydana gelen bu yorulma türünün tespiti sırasında test edilecek olan numune aynı anda burulma gerilmesi, eğme gerilmesi ve aksenal gerilme türlerinden ikisine ya da üçüne birden maruz bırakılmaktadır [92,98]. Şekil 5.5'te bileşik gerilmeli yorulma test cihazı görülmektedir.



Şekil 5.5. Bileşik gerilmeli yorulma test cihazı [92].

5.4. YORULMA İLE İLGİLİ TERİMLER

Malzemelerin mekanik ve kimyasal özelliklerini belirlemek için yapılan her test yönteminin kendine göre terimleri vardır. Yorulma test yönteminde kullanılan terimler aşağıda kısaca açıklanmıştır.

5.4.1. Çevrim

Periyodik olarak gerilme- zaman eğrisinin tekrarlanan en küçük kısmıdır [97-99].

5.4.2. Maksimum gerilme (σ_{maks})

Cebirsel olarak tatbik edilen en büyük gerilme olan maksimum gerilme pozitif ve negatif değerler alabileceği gibi sıfır değerini de alabilir [97-99].

5.4.3. Minimum Gerilme (σ_{min})

Matematiksel olarak uygulanan en düşük gerilmedir [97-99].

5.4.4. Ortalama Gerilme (σ_m)

Maksimum gerilme ile minimum gerilmenin matematiksel ortalamasıdır [97-99].

$$\sigma_m = (\sigma_{maks} + \sigma_{min})/2 \quad (5.1)$$

5.4.5. Gerilme Genliği (σ_a)

Gerilme genliğinin yarısına eşit olan bu gerilme maksimum gerilme ile minimum gerilmenin farklarının yarısına eşittir [93,97-99].

$$\sigma_a = \sigma_r/2 \text{ ya da } \sigma_a = (\sigma_{maks} - \sigma_{min})/2 \quad (5.2)$$

5.4.6. Gerilme Aralığı (σ_r)

Maksimum gerilme ile minimum gerilmenin matematiksel farkı olan gerilme aralığı aşağıdaki formülü ile hesaplanır [95,96].

$$\sigma_r = \sigma_{maks} - \sigma_{min} \quad (5.3)$$

5.4.7. Gerilme Oranı

En küçük gerilmenin en büyük gerilmeye oranı olarak kabul edilen gerilme oranı R harfi ile gösterilir ve aşağıdaki formülü ile hesaplanır [92,97-99].

$$R = \sigma_{min}/\sigma_{maks} \quad (5.4)$$

5.4.8. Genlik Oranı

A harfi ile ifade edilen genlik oranı; gerilme genliğinin, ortalama gerilmeye oranıdır ve aşağıdaki formülü ile bulunulur [99].

$$A = \sigma_a / \sigma_m \quad (5.5)$$

5.4.9. Yorulma Dayanımı

Malzemelerin maruz kaldıkları tekrarlı zorlamalar sonucunda ve ulaşılan belirli bir çevrim sayısından sonra malzemede çatlama ya da kırılma oluştuğu andaki gerilmeye yorulma dayanımı denir [92,97].

5.4.10. Yorulma Ömrü

Malzemelere belirli bir yük uygulandığında malzemelerin kopmadan ya da çatlamadan ulaşabildiği çevrim sayısına yorulma ömrü denir [91].

5.5. YORULMA İLE İLGİLİ DAHA ÖNCE DEN YAPILMIŞ OLAN ÇALIŞMALAR

5.5.1. MIG Kaynağı ile Yapılan Çalışmalar

Shaohua vd. [16] lazer hibrit MIG kaynağı ve geleneksel MIG kaynak yöntemleri ile 5083 alüminyum alaşımını birleştirdikleri ve birleştirmelerin mekanik özelliklerinden sertlik, çekme ve yorulma dayanımının yanı sıra mikroyapı özelliklerini inceledikleri çalışmada hibrit MIG kaynağı ile yapılan kaynakların yorulma dayanımlarının normal MIG kaynağı ile yapılan kaynaklara nazaran daha iyi olduğunu belirtmişlerdir. Bunun dışında yorulma dayanımını büyük ölçüde mikroyapı ve kusurların belirlediğini ve yorulma dayanımında azalmaya gözenek oluşumunun neden olduğunu ifade etmişlerdir.

Ilman vd. [17] % 3,5 NaCl çözeltisi ortamında ve hava ortamında MIG kaynağı ile 5083 alüminyum alaşımını birleştirdikleri araştırmada kuru hava ortamında birleştirilen MIG kaynaklarının yorulma çatlak ilerleme hızının NaCl ortamda yapılan birleştirmeye göre daha düşük olduğunu ifade etmişlerdir. Ayrıca NaCl çözeltisi içerisinde birleştirilen numunelerin yorulma kırık yüzeylerinde dentritik boşluklarda tercihli korozyon oluşumlarının görüldüğünü bildirmişlerdir.

Literatürde MIG ile 5083 alüminyum alaşımının birleştirildiği ve statik termal gerilimin yorulma çatlağı üzerindeki etkilerinin incelendiği çalışmada statik termal gerilme uygulanmış numunelerde yorulma çatlak gelişiminin yavaşladığı bunun ise statik termal gerilme tarafından indüklenen kalıntı gerilme ile ilişkili olduğunu rapor edilmiştir. Öte yandan hızlı soğumanın mikroyapıda ince taneler ürettiği için dayanımın arttığı belirtilirken statik termal gerilme işlemi sırasında uygulanan ısıtma ve soğutma uygulamalarının kaynak ısıl döngüsünü değiştirdiğini ve bununda mikroyapıyı ve mikroyapıdan dolayı da sertlik ve dayanımı etkilediği ifade edilmiştir [100].

5.5.2. SKK ile Yapılan Çalışmalar

Beytullah vd. [18] SKK yöntemi ile 5083 ve 6082 alüminyum alaşımlarını 6082-6082, 5083-5083 ve 6080-5083 olmak üzere üç farklı kombinasyonda birleştirdikleri çalışmada tüm kaynaklı numunelerde yorulma sınırlarının birbirine yakın çıktığını söylemişlerdir. Ayrıca 5083 ve 6082 ana metallerin ortalama mukavemetlerine göre birleştirmelerin maksimum kaynak performanslarının 5083-5083 kombinasyonunda % 86, 5083-6082 kombinasyonunda %65 ve 6082-6082 kombinasyonunda % 62 olduğunu bunun nedeninin ise yeniden kristalleşme sürecinin tavlama etkisi ile gerilim sertleşmeli alüminyum alaşımlarının kaynağında mukavemet kaybı içermesinin olduğu ifade edilmiştir.

Literatürde SKK ile 6013 alüminyum alaşımının birleştirildiği çalışmada yorulma deneyleri sonucunda elde edilen sonuçların ana malzemelerin yorulma dayanımına göre düşük olduğu buna ise kaynak sırasında oluşan ısı girdisinin sertlik ve dayanımda düşmeye neden olmasının sebep olduğu ifade edilmiştir. Bunun yanı sıra ısıdan etkilenen bölgenin daha düşük dayanıma sahip olması ve kaynak sırasında oluşan soğan halkalarının bu bölgede bulunması sebebiyle yorulma deneyi sonucunda kopmaların bu bölgede yaşandığı bildirilmiştir [101].

Costa vd. [19] 6082 alüminyum alaşımını SKK ile birleştirdikleri uygulamada oda sıcaklığında ve değişken genlik ve sabit genlikli olarak yorulma testleri gerçekleştirmişler ve tünel kusurlarının yorulma ömrünün kısılmasına neden olduğu

ve SKK kaynakları ile ana malzeme yorulma dayanımları arasındaki farkı azaltarak yorulma dayanımını arttırmak için tünel kusurlarının ve diğer ciddi kaynak kusurlarının oluşumunu önlemenin çok önemli olduğunu rapor etmişlerdir.

5.5.3. MIG ve SKK ile Yapılan Çalışmalar

Caizhi vd. [20] SKK ve MIG kaynak yöntemleri ile 5083 alüminyum alaşımını kaynattıkları çalışmada SKK ile yapılan kaynaklarda kaynak çekirdeğinin daha ince tanelerden oluştuğu için SKK ile birleştirilen numunelerin yorulma ömrünün darbeli MIG kaynağı ile birleştirilen numunelere oranla daha yüksek yorulma ömrüne sahip olduğunu ifade etmişlerdir. Ayrıca SKK numunelerinde kırılmaların aşırı yüklenme bölgelerinde oluşan çatlak başlangıçlarının ve kararlı çatlak oluşumlarının bulunduğu bölgelerde meydana geldiğini söylemişlerdir.

Jesus vd. [66] MIG “T” kaynağı ile birleştirdikleri ve SKK yöntemi ile güçlendirdikleri 5083 alüminyum alaşımlarının yorulma davranışlarına SKK yönteminin etkilerini inceledikleri çalışmada sabit genlikli yükleme ve $R = -1$ yorulma dayanımının yaklaşık olarak % 41 arttığını $R=0$ 'da ise yaklaşık olarak % 34 arttığını bildirmişlerdir.

Literatürde MIG kaynağı ile birleştirilmiş ve daha sonra SKK işlemi uyguladıkları çalışmada güçlendirilmiş ve güçlendirilmemiş 6082 alüminyum alaşımlarının yorulma davranışları incelenmiştir. Bu çalışmada güçlendirilmemiş numunelerin, güçlendirilmiş numunelere oranla daha uzun yorulma ömrü sergiledikleri ve ayrıca SKK işleminin tane incelmesine, daha önceden oluşmuş olan gözeneklilik, ıslanma eksikliği gibi kaynak kusurlarını ortadan kaldırması sebebiyle güçlendirilmiş ve güçlendirilmemiş MIG kaynaklarının yorulma ömürlerini uzattığı rapor edilmiştir [102].

Costa vd. [103] 6082 alüminyum alaşımını MIG “T” kaynağı ile birleştirip SKK sürecinin kaynaklı bağlantının yorulma ömrü üzerine etkilerini inceledikleri çalışmada SKK sürecinin mikroyapıdaki taneleri artırması, gözeneklilik gibi kusurları azaltması sebebiyle numunelerin yorulma ömrünü uzattığını ve ayrıca SKK'nın taneleri inceltmesi, MIG kaynağının sebep olduğu kusurları gidermesi nedeniyle yorulma dayanımının arttığını rapor etmişlerdir.

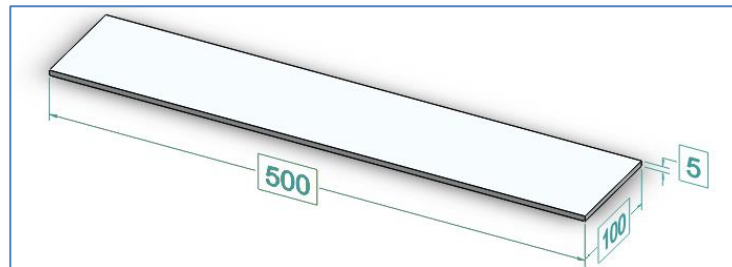
BÖLÜM 6

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada, endüstriyel üretimde birçok alanda bir arada kullanılan AA6013-T6 alüminyum alaşımı ile AA5754-H111 alüminyum alaşımı levhalar SKK ve MIG kaynak yöntemleri ile birleştirilmişlerdir. Kaynak işlemleri, SKK yönteminde 3 farklı karıştırıcı takım ilerleme hızı (kaynak hızı), MIG kaynak yönteminde ise 3 farklı kaynak akımında, 2 farklı kaynak hızı kullanılarak yapılmıştır. Öncelikle kaynak bölgesini doğru anlayabilmek için kaynaklı numunelere, gözle muayene, mikroyapı ve sertlik testleri gerçekleştirilmiştir. Bu testlerdeki amaç kaynak bölgesinde (kaynak metali ve ITAB) meydana gelen şekil ve yüzey kaynak hataları ile metalurjik dönüşümleri incelemektir. Kaynaklı bağlantıların mekanik özelliklerini belirlemek için ise hem SKK hem de MIG kaynaklı numunelere mekanik testler (çekme, eğme ve yorulma testi) uygulanmıştır.

6.1. KULLANILAN MALZEMELER

Bu çalışmada AA6013-T6 ve AA5754-H111 alüminyum alaşımlarının tercih edilmelerinin nedeni başta otomotiv ve uçak sanayileri olmak üzere pek çok alanda bir arada kullanılmaları olmuştur. Çalışma için seçilen levhalar 500×100×5 mm boyutlarında giyotin makas ile kesilerek kaynak işlemine hazır hale getirilmiştir (Şekil 6.1). Çalışmada kullanılan alüminyum alaşımlarının kimyasal bileşimi Çizelge 6.1’de, mekanik özellikleri ise Çizelge 6.2’de verilmiştir.



Şekil 6.1. Numune ölçüleri.

Çizelge 6.1. Alüminyumun alaşımlarının kimyasal bileşimi (Ağırlıkça %).

EN	DIN	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Kalan
AA6013-T6	AlSi	0,7	0,3	0,9	0,3	0,9	0,03	0,07	0,02	Al
AA5754-H111	AlMg3	0,40	0,4	0,10	0,5	2,6-3,6	0,3	0,20	0,15	Al

Çizelge 6.2. Alüminyumun alaşımlarının mekanik özellikleri.

Alaşım Türü	Akma mukavemeti (MPa) min-max	Çekme Mukavemeti (MPa) min-max	Uzama (%50) min-max	Sertlik (Brinel) min-max
AA6013-T6	350	400	5	130
AA5754-H111	80 -100	190 -215	24	50 -55

6.2. KAYNAKLARIN YAPILIŞI

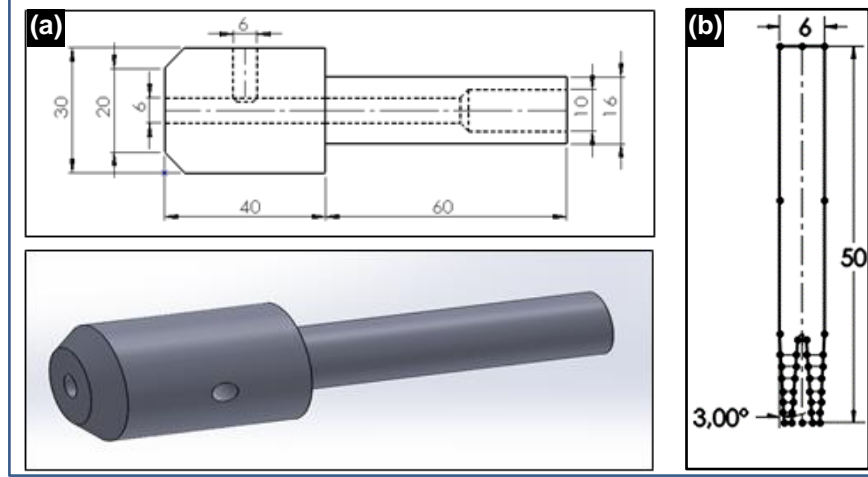
Şekil 6.1'deki boyutlarda kesilerek hazırlanan 9 adet AA-5754 ve 9 adet AA-6013 olmak üzere toplam 18 adet (6 adedi SKK için, 12 adedi MIG için) alüminyum levhaların kaynak alın yüzeylerindeki giyotin makas etkileri frezelenerek giderilmiştir.

6.2.1. Sürtünme Karıştırma Kaynağı

Sürtünme karıştırma kaynak yönteminde temel kaynak parametrelerinin doğru seçiminin yanında, kaynak esnasında yeterli ısıtma ve karıştırmayı sağlayacak özel bir pim tasarlanmış olması büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle kaynak işlemi öncesi literatür bilgileri ve tecrübeler ile bir takım (omuz ve pim) tasarlanmış ve üretilmiştir.

6.2.1.1. SKK İçin Karıştırıcı Takımın Tasarım ve Üretimi

Bu çalışmada, SKK işlemlerinde kullanılmak üzere pim boyu ayarlanabilen ve istenildiğinde pim değişikliği yapılabilen karıştırıcı takım tasarlanmış ve üretilmiştir. Tasarlanan karıştırıcı takım omuz ve pim olarak isimlendirilen iki kısımdan oluşmaktadır. Karıştırıcı takımın omuz kısmı X210Cr12 soğuk iş takım çeliğinden üretilmiş ve ısıtma işlemi uygulanarak sertliği 50 HR_C değerine çıkartılmıştır. Karıştırıcı takımın pim kısmı ise M6×1 kılavuz uç 3° açı ile işlenmesiyle üretilmiştir. SKK işlemlerinde kullanılan karıştırıcı takımın görüntüsü Şekil 6.2'de verilmiştir.



Şekil 6.2. Karıştırıcı takım; a) karıştırıcı omuz ve b) karıştırıcı pim.

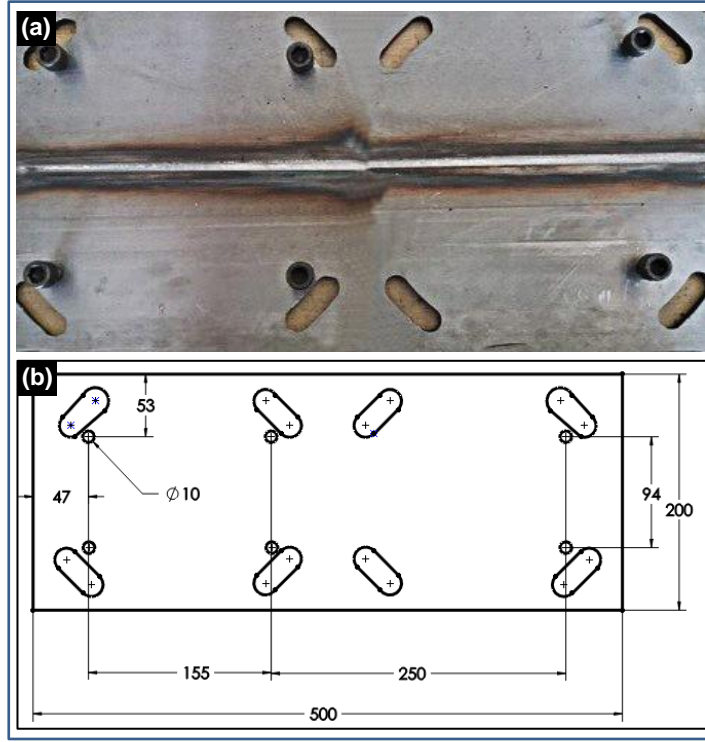
6.2.1.2. Kaynak Uygulamaları

SKK kaynak işlemleri, Düzce Borsa İstanbul Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi Makine Teknolojileri laboratuvarında bulunan Arsenal FU251M model freze tezgahında gerçekleştirilmiştir. Kaynak işlemlerinde kullanılan freze tezgahının özellikleri Çizelge 6.3'te verilmiştir.

Çizelge 6.3. Freze tezgahının özellikleri.

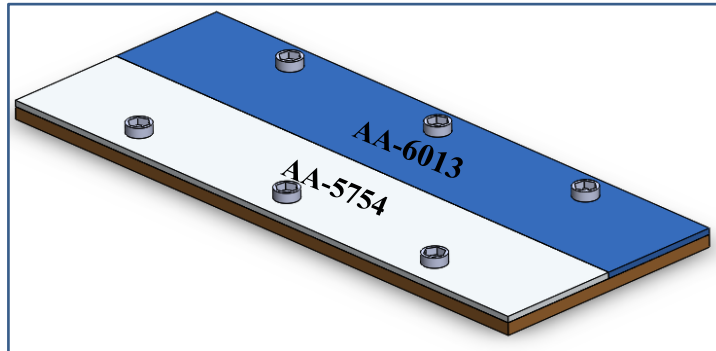
Özellikler	Değerleri
Gerilim (V)	380
Faz	3
Frekans (Hz)	50
Akım (A)	14
Ana motor (A)	9,2
Kontrol Gerilimi (V)	24
Aydınlatma (V)	12

Kaynak esnasında takım ilerleme hızının neden olduğu itme kuvveti ile kaynatılacak parçaların ve kaynak merkezinin yer değiştirmemesi için Şekil 6.3'de görüldüğü gibi özel bir altlık hazırlanmıştır. Kaynak öncesinde de kaynağın yapılacağı yüzeydeki işleme artıkları ve oksitler kaynak öncesi ince bir zımparalama ile giderilerek parçaların alın altına sıkı temasının sağlanması amaçlanmıştır.



Şekil 6.3. SKK işleminde kullanılan altlık; a) altlık fotoğrafı, b) altlığın şematik görüntüsü.

Birleştirilecek parçalar Şekil 6.4’de görüldüğü gibi alın altına getirilerek, özel olarak hazırlanmış olan altlık üzerine vidalar yardımı ile sabitlenmiş ve böylelikle kaynak esnasında meydana gelebilecek olan kayma ve merkezleme hatalarının önüne geçilmiştir. Daha sonra altlık, bağlantı pabuçları yardımı ile freze tezgahının hareketli tablasına bağlanmış ve önceden yapılan pilot çalışmalar sonucunda en iyi birleşmenin elde edildiği takım dönme devir sayısı ile 3 farklı kaynak ilerleme hızı kullanılarak kaynak işlemleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6.4. SKK kaynağına hazırlık.

Kaynak işlemlerinde kullanılan kaynak parametreleri Çizelge 6.4'te, SKK işleminin uygulandığı esnasındaki bir görüntü ise Şekil 6.5'de verilmiştir.

Çizelge 6.4. SKK kaynak parametreleri.

Deney Numunesi No	Omuz Dönme Deviri (dev/dk)	Kaynak İlerleme Hızı (mm/dk)	Karıştırıcı Takım Derinliği (mm)
SKK-1	1250	12,5	4,9
SKK-2	1250	25	4,9
SKK-3	1250	32	4,9

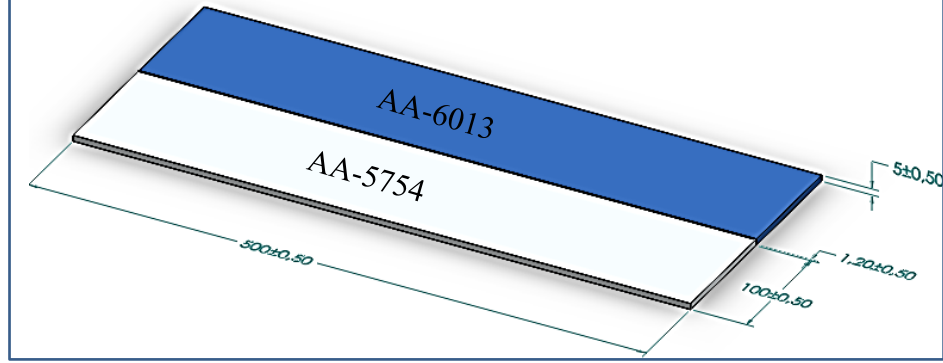


Şekil 6.5. SKK kaynağının yapılışı.

6.2.2. MIG Kaynağı

MIG kaynak yöntemi öncesi giyotin makasta kesilip freze tezgâhında yüzeyleri işlenen alüminyum malzemelerin kaynak edilecek yüzeyleri alkol ile temizlenmiştir. MIG kaynak işlemleri kaynak hızı ayarlanabilen otomatik Fronius TransSynergic 4000 Comfort tipi sinerjik gazaltı kaynak makinesinde yapılmıştır. MIG kaynak makinasının teknik özellikleri Çizelge 6.5'te verilmiştir. Birleştirilecek olan levhalar arasında 1.2 mm boşluk bırakılarak Şekil 6.6'daki gibi alın altına getirilmiş ve kaynak ünitesinin pnömomatik baskı aparatları ile sabitlenmiştir. Sabitleme işlemi kaynak ünitesinin baskı aparatları ile yapıldığı için puntalama yapılmamıştır. Kaynak işlemleri sırasında kaynak ünitesine sabitlenmiş halde bulunan bakır altlık kullanılmıştır. MIG

kaynak işlemleri Çizelge 6.6’da verilmiş olan kaynak parametreleri kullanılarak yapılmıştır.



Şekil 6.6. MIG kaynağı için hazırlanan numunelerin şematik görüntüsü

Çizelge 6.5. Gazaltı kaynak makinesinin özellikleri.

Giriş Voltajı: 50/60 Hz	3x400 V
Cos phi	0,99
Akım Ayar Aralığı (A)	10-500
Akım Ayar Aralığı (A)	500
Kaynak Akımı (x=50% - 40°C / 10 dak.) (A)	365
Kaynak Akımı (x=60% - 40°C / 10 dak.) (A)	320
Kaynak Akımı (x=100% - 40°C / 10 dak.) (A)	70
Açık Devre Voltajı (V)	14,2-34
Çalışma Voltajı (V)	IP 23

Çizelge 6.6. MIG kaynak parametreleri.

Numune no	Akım (A)	Kaynak Hızı (mm/dk)	Tel Hızı (m/dk)	Kaynak Gerilimi (V)	Isı Girdisi (J/mm)	Gaz debisi (lt/dk)	Kullanılan gaz
MIG-1	130	150	3	20	83	12	Argon
MIG-2		180			69		
MIG-3	140	150	3,5	20	90	12	Argon
MIG-4		180			75		
MIG-5	150	150	4	20	96	12	Argon
MIG-6		180			80		

Kaynak işlemlerinde 1,2 mm çaplı gazaltı kaynak teli (AWS A510: ER5356) ilave kaynak teli olarak kullanılmıştır. Kaynak telinin kimyasal bileşimi Çizelge 6.7’de, mekanik özellikleri ise Çizelge 6.8’de verilmiştir.

Çizelge 6.7. Dolgu metalinin kimyasal bileşimi (Katalog değerleri).

Mg	Mn	Cr	Ti	Al
4.50 - 5.50	0.05 - 0.20	0.05 - 0.20	0.06 - 0.15	Kalan

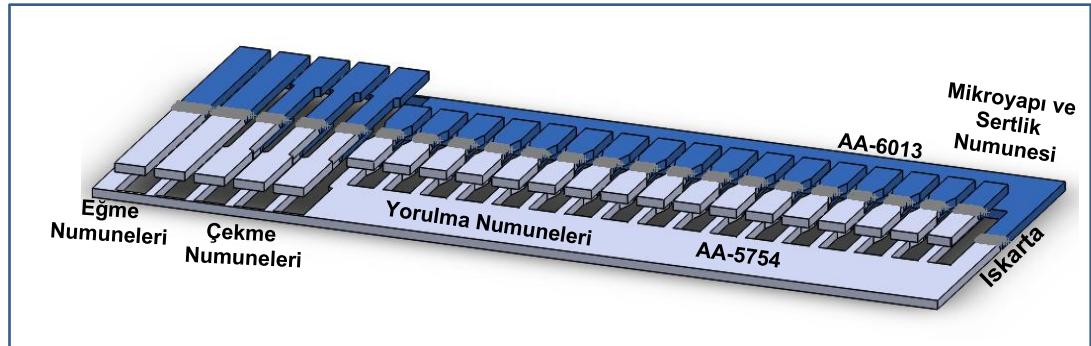
Çizelge 6.8. İlave dolgu metalinin mekanik özellikleri (Katalog değerleri).

Uygulanan Mekanik Test	% 0.2 Akma Dayanımı (N/mm ²)	Çekme Dayanımı (N/mm ²)	Uzama A5 (%)
Kaynak Sonrası Ölçüm Sonuçları	> 110	> 235	> 17

Tüm kaynak işlemleri torc konumu 90° derece açıda olacak şekilde ve tek pasoda yapılmıştır. Kaynak işlemlerinden sonra numuneler oda sıcaklığında soğumaya bırakılmıştır.

6.3. NUMUNE HAZIRLAMA

Öncelikle hem SKK hem de MIG kaynaklı numunelerin kaynak başlangıç ve bitiş kısımlarından 20'şer mm'lik kısımlar kesilerek atılmıştır. Mekanik ve mikroyapı testleri için hazırlanacak numunelerinin tamamının kesim işlemleri, ısıl bir etkinin oluşmaması ve soğuk plastik deformasyon gözlenmemesi için su jeti ile gerçekleştirilmiştir. Su jetinde kesme işlemleri Eskişehir'de bulunan Atif Su Jeti Firmasında ve BFT Marka cihaz ile 600 mm/dk kesme hızda gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.7'de deney numunelerinin su jeti ile kesme planı görüntüsü verilmiştir.



Şekil 6.7. Su jeti kesme planı.

Su jeti ile kesme işleminden sonra kaynaklı deney numunesi üzerindeki pürüzler zımparalanarak temizlenmiştir. Ayrıca, SKK yöntemi ile birleştirilen kaynaklı numunelerin kök tarafından yaklaşık olarak 1,2 mm freze ile temizlenerek kök kısmında bulunabilecek ve hatalı deney sonuçlarına sebep olabilecek olan kısımlar ortadan kaldırılmıştır.

6.4. MİKROYAPI ÇALIŞMALARI

SKK ve MIG kaynağı ile birleştirilen numuneler üzerinde makro ve mikroyapı incelemesi yapılmış ve birleşme özellikleri incelenmiştir. Seçilen kaynak parametrelerinin kaynak metali ve kaynak metaline komşu olan ısıdan etkilenen bölgelerin metalurjik/metalografik özelliklerine etkisi belirlenmiştir.

6.4.1. Optik Mikroskop Çalışmaları

SKK ve MIG kaynak yöntemleri ile farklı kaynak parametrelerinde birleştirilmiş olan kaynaklı parçaların her birinden mikroyapı çalışmalarında kullanılmak üzere 1'er adet numune hazırlanmıştır. Kaynaklı birleştirmelerden alınan numuneler mikroyapı incelemeleri için öncelikle sırasıyla 380, 400, 800, 1200, 1500 ve 2000 nolu su zımparaları ile her defasında 90° döndürülerek zımparalanmıştır. Zımparalanan numuneler 1 µm parlatma keçesinde 1 µm'lik elmas pasta kullanılarak parlatma işlemine tabi tutulmuşlardır. Parlatma işleminde kullanılan zımparalama ve parlatma cihazı Şekil 6.8'de görülmektedir.



Şekil 6.8. Zımparalama ve parlatma cihazı.

Parlatma işleminden sonra mikroyapı görüntülerinin alınabilmesi için her bir örnek 100 ml saf su ve 3 ml HF (hidroflorik asit) kullanarak hazırlanmış olan dağlama reaktifinde yaklaşık olarak 60-80 sn arasında dağlanmıştır. Dağlama işleminden sonra numunelerin mikroyapı görüntüleri Metkon Inverted Tip Metal Mikroskobu ile alınmıştır. Mikroyapı görüntüleme işleminin gerçekleştirildiği mikroskop Şekil 6.9'da görülmektedir. Metalografik işlemlerin tümü (zımparalama, parlatma, dağlama ve görüntüleme) Düzce Üniversitesi, Gümüşova Meslek Yüksekokulu malzeme laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6.9. Görüntülemeye kullanılan metal mikroskobu.

6.4.2. SEM Çalışmaları

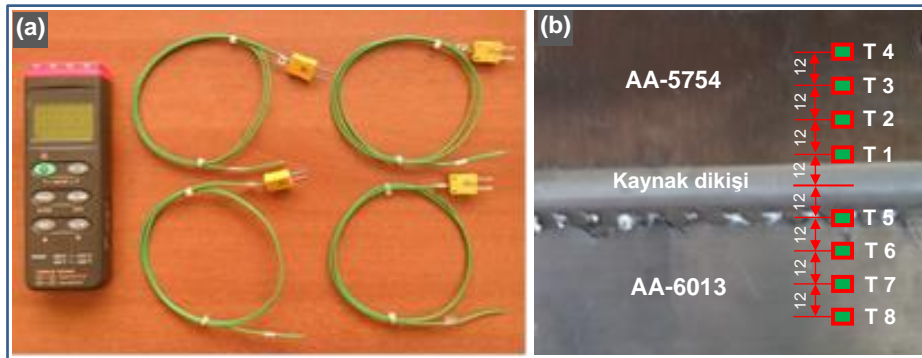
Kaynak parametrelerinin numunelerin kırılma davranışları üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla SEM kırık yüzey tarama çalışmaları yapılmıştır. Kırık yüzey SEM tarama işlemleri Karabük Üniversitesi Demir Çelik Enstitüsü MARGEM laboratuvarında bulunan CARL ZEISS ULTRA PLUS GEMINI FESEM model ve markadaki elektron taramalı mikroskop kullanılarak gerçekleştirilmiştir. SEM tarama işlemlerinde kullanılan cihazın görüntüsü Şekil 6.10'da verilmiştir.



Şekil 6.10. SEM taramasında kullanılan cihaz.

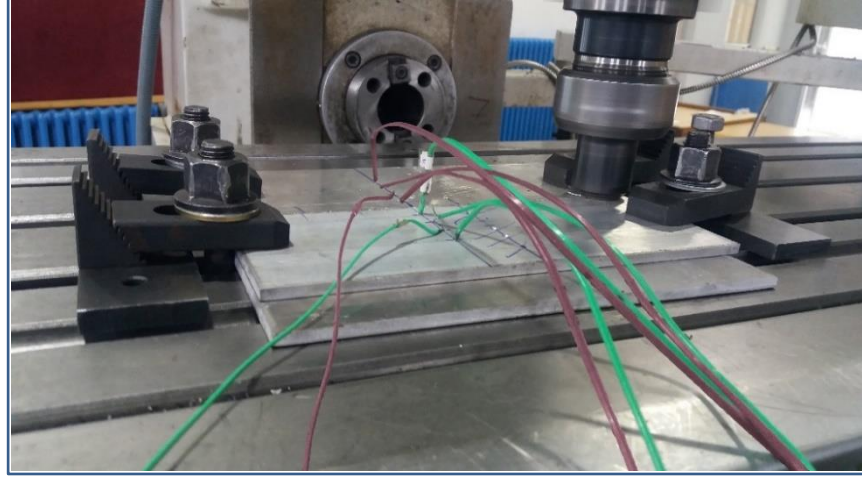
6.5. SICAKLIK ÖLÇÜMLERİ

SKK işlemi sırasında karıştırıcı takım ile birleştirilen malzemeler arasında meydana gelen sürtünme, kaynak bölgesinde ısı artışına neden olmaktadır. Isı artışına kaynak ilerleme hızının etkisinin belirlenmesi amacıyla sıcaklık ölçümleri yapılmıştır. Bu amaçla Verth CK104 marka $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ - $1370\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklık aralığında ölçüm yapabilen, 4 kanallı K tipi dijital sıcaklık ölçme cihazı kullanılmıştır. Sıcaklık ölçümleri kaynak merkezinden itibaren 12, 24, 36 ve 48 mm mesafelerde olacak şekilde, her bir ana malzemeden kaynak işlemi yapılırken 4 farklı noktadan gerçekleştirilmiştir. Sıcaklık ölçme işleminde kullanılan sıcaklık ölçüm cihazı ve sıcaklık ölçüm planının resmi Şekil 6.11'de verilirken sıcaklık ölçüm görüntüsü Şekil 6.12'de verilmiştir.



Şekil 6.11. a) Sıcaklık ölçüm cihazı, b) sıcaklık ölçüm planı.

SKK yöntemi ile sıcaklık ölçümleri kaynak esnasında cihazla yapılırken, MIG kaynak uygulamalarında ise ısı girdisi hesaplama işlemleri teorik olarak hesaplanarak gerçekleştirilmiştir. Bu hesaplamalar sonucunda MIG kaynak işlemleri sırasında tercih edilen kaynak parametrelerinin ısı girdisi üzerindeki etkilerini belirlenmiştir.



Şekil 6.12. Sıcaklık ölçümü.

6.6. MEKANİK TESTLER

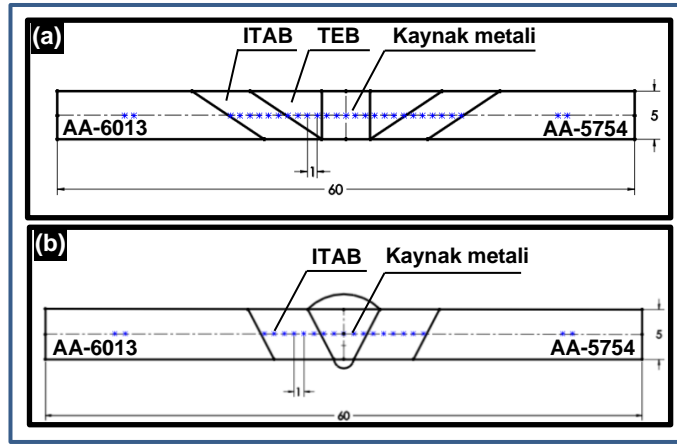
SKK ve MIG kaynak yöntemleriyle farklı kaynak parametrelerinde birleştirilen kaynaklı numunelerin mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla birleştirilmiş numunelere sertlik, çekme, eğme ve yorulma testleri uygulanmıştır.

6.6.1. Sertlik Ölçümleri

Yapılan çalışmada, kaynak bölgelerinin (kaynak metali ve ısı tesiri altında kalan bölge) sertlik özelliklerini belirlemek amacıyla kaynak yönüne dik kesitten alınan numuneler üzerinde yatay doğrultuda sertlik testleri yapılmıştır. SKK yöntemi ile birleştirilen numunelerin sertlik ölçme işlemleri 1 tam kaynak merkezinden her iki tarafa 1 mm aralıklarla 12'şer noktadan ve ana malzemeden de 2'şer noktadan olmak üzere toplam 29 ölçüm alınarak gerçekleştirilmiştir. Ölçüm noktalarının dağılımı ise 5 tanesi kaynak metalinden, 8 tanesi TEB'den (4 tanesi AA-5754 tarafı, 4 tanesi AA-6013 tarafı), 12

tanesi ITAB'dan (6 tanesi AA-5754 tarafı, 6 tanesi AA-6013 tarafı) ve 4 tanesi de ana metallere (2 tanesi AA-5754 tarafı, 2 tanesi AA-6013 tarafı) olacak şekilde belirlenmiştir.

MIG kaynağı ile birleştirilen numunelerde ise 1 tam kaynak merkezinden olmak üzere her iki tarafa doğru 1 mm aralıklarla 8'er ve ana metalden de 2'şer noktadan olmak üzere toplam 21 ölçüm yapılarak gerçekleştirilmiştir. Sertlik ölçümleri kaynak metalinden 5, ITAB'dan 12 (6 tanesi AA-5754 tarafı, 6 tanesi AA-6013 tarafı) ve ana metallere de 4 noktadan ölçüm alınarak yapılmıştır. Her iki kaynak yöntemi ile üretilen numunelerin sertlik ölçüm planı Şekil 6.13'te verilmiştir. Sertlik ölçme işlemleri Vickers yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiş ve numunelere 100 gr yük, 10 s süresince uygulanmıştır. Sertlik ölçme işlemlerinden elde edilen sonuçlar kolay anlaşılabilmesi için grafik haline dönüştürülmüştür. Sertlik ölçme işlemleri Düzce Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Uygulama ve Araştırma Merkezi Laboratuvar'ında bulunan Duroline-M model mikro sertlik ölçme cihazında gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.14'te sertlik test cihazının resmi verilmiştir.



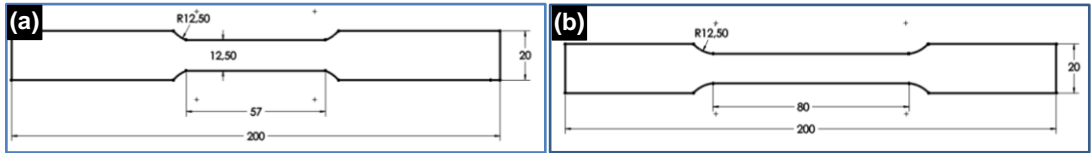
6.13. Kaynaklı numunelerin sertlik ölçüm planı, a) SKK, b) MIG.



Şekil 6.14. Sertlik ölçme cihazı.

6.6.2. Çekme Testi

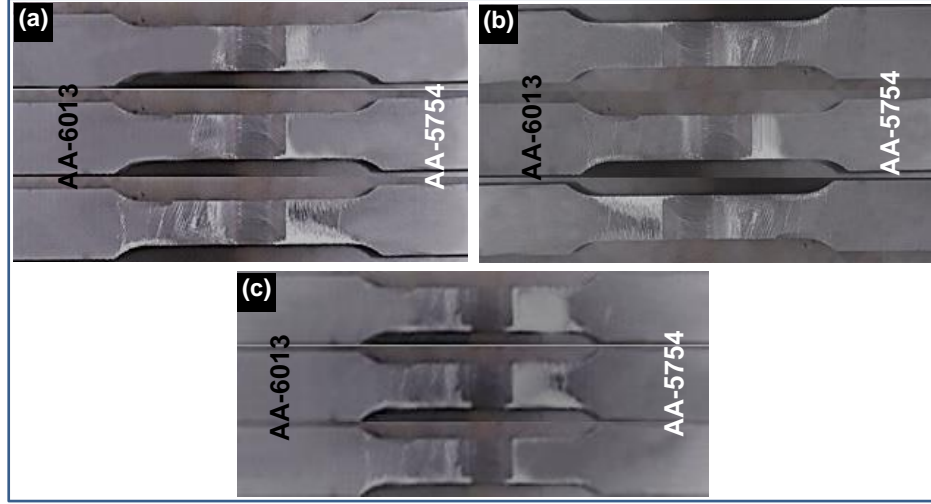
Kaynaklı levhaların üretimi sırasında seçilen ve kullanılan kaynak parametrelerinin kaynaklı bağlantıların akma ve çekme dayanımları ile yüzde uzama değerleri üzerindeki etkilerini belirlemek için çekme testi yapılmıştır. Çekme test numuneleri TS EN ISO 4136 standardına uygun olarak su jetinde kesilerek hazırlanmış ve ayrıca çentik etkisi oluşturma ihtimali bulunan pürüzlülükler de zımparalanarak giderilmiştir. Şekil 6.15’de çekme test numunesinin ölçüleri verilmiştir.



Şekil 6.15. Çekme deney numunesinin ölçüleri, a) SKK ve b) MIG kaynağı.

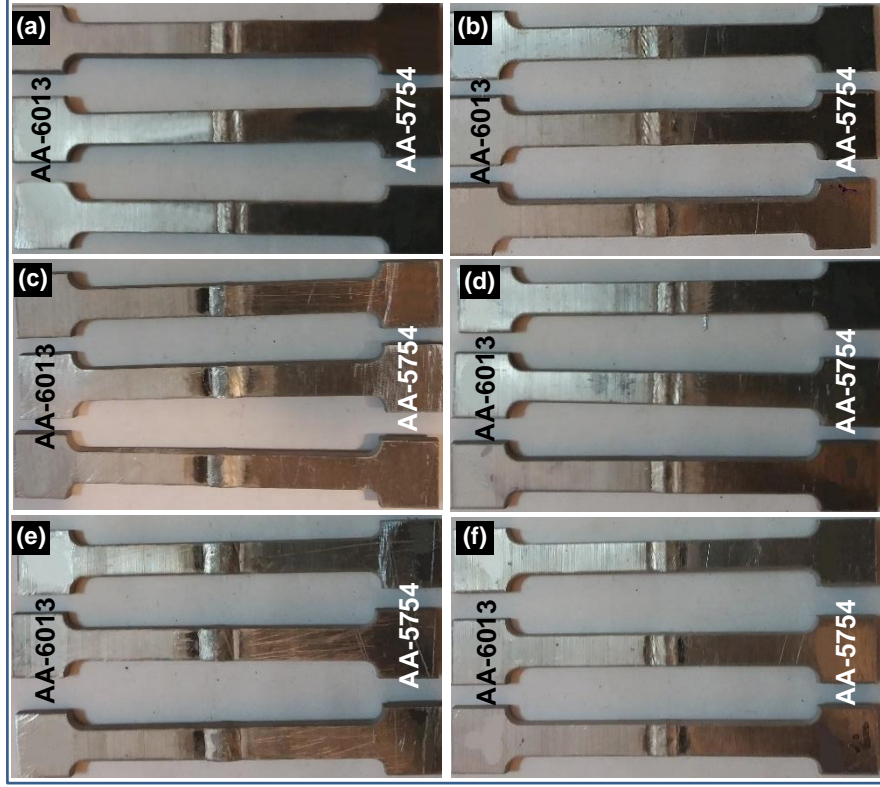
Çekme testleri Karabük Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Malzeme Laboratuvarı’nda bulunan 5 ton kapasiteli Shimadzu ticari marka universal çekme test cihazında yapılmıştır. Çekme test işlemleri 0,5 mm/dk çene hızında gerçekleştirilmiştir. Çekme test işlemlerinde her kaynaklı birleştirmeden 3’er çekme test numunesi kullanılmıştır.

Şekil 6.16’da SKK ile birleştirilmiş parçalardan çıkarılan çekme numunesi örnekleri, Şekil 6.17’de ise MIG kaynağı ile birleştirilmiş levhalardan üretilen çekme test numuneleri görülmektedir. Şekil 6.18’de ise çekme test cihazının görüntüsü verilmiştir.



Şekil 6.16. Çekme test numuneleri, a) SKK-1, b) SKK-2, c) SKK-3.

Ayrıca her iki kaynak yöntemi ile üretilen birleştirmelerin çekme deneyinde gösterdikleri performanslar dikkate alınarak kaynak çekme dayanımı verimlilikleri incelenmiş ve birbirleri ile kıyaslanmıştır. Kaynak çekme verimliği incelenirken benzer metallerin birleştirilmesinde ana malzemenin, farklı türden iki metalin birleştirildiği durumlarda ise çekme dayanımı düşük olan ana malzemenin çekme dayanımı dikkate alınarak işlemler gerçekleştirilmektedir. Bu nedenle çekme dayanımı, AA-6013 alüminyum alaşımına oranla daha düşük olan AA-5754 alüminyum alaşımı dikkate alınarak hesaplama işlemleri yapılmıştır.



Şekil 6.17. Çekme test numuneleri, a) MIG-1, b) MIG-2, c) MIG-3, d) MIG-4, e) MIG-5 ve f) MIG-6.



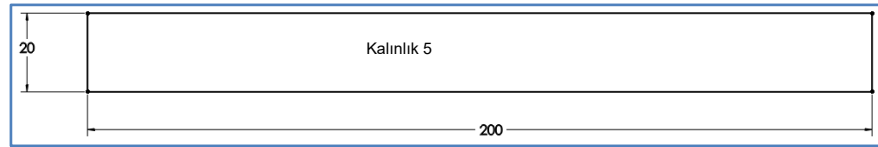
Şekil 6.18. Çekme test cihazı.

6.6.3. Eğme Testi

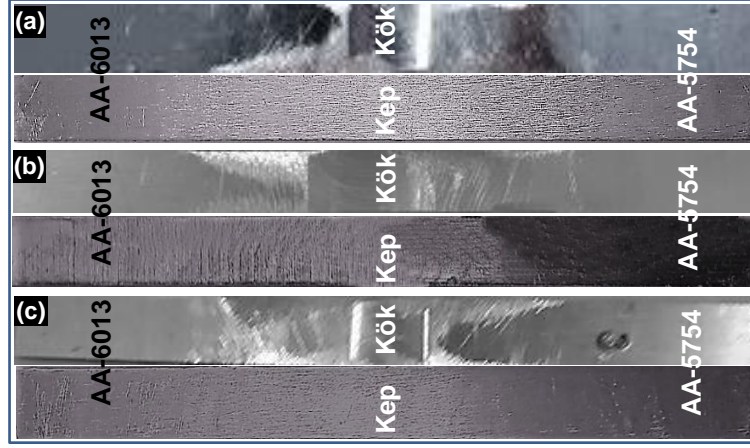
Çalışma koşulları altında eğme gerilmesine maruz kaldığında kaynaklı birleştirmelerin sergileyeceği davranışları ve bu davranışlara neden olan kaynak parametrelerinin etkilerini belirlemek için kaynaklı numunelere 180° eğme testleri gerçekleştirilmiştir. Hem SKK ile birleştirilmiş kaynaklı numunelerden hem de MIG kaynaklı numunelerden, eğme testleri için her kaynaklı birleştirmeden 2'şer adet deney numunesi hazırlanmış ve bunlardan bir tanesi kep eğmede diğeri ise kök eğme testinde kullanılmıştır.

Eğme numuneleri standartlara uygun olarak su jetinde kestirilmiş ve diğeri deney numunelerinde yapıldığı gibi yüzeylerinde bulunan ve deney sonuçlarını olumsuz etkileyecek olan unsurları yok etmek için zımparalanarak temizlenmiştir. Hem SKK yöntemi hem de MIG kaynak yöntemi ile birleştirilmiş kaynaklı numunelerin eğme deneyleri TS EN ISO 5173 standartlarına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Eğme testlerinde çekme testlerinde kullanılan cihaz (5 ton kapasiteli Shimadzu) kullanılmış ve cihazın çeneleri değiştirilerek işlem gerçekleştirilmiştir. Çekme test işlemleri oda sıcaklığında ve 5 mm/dk çene hızında gerçekleştirilmiştir.

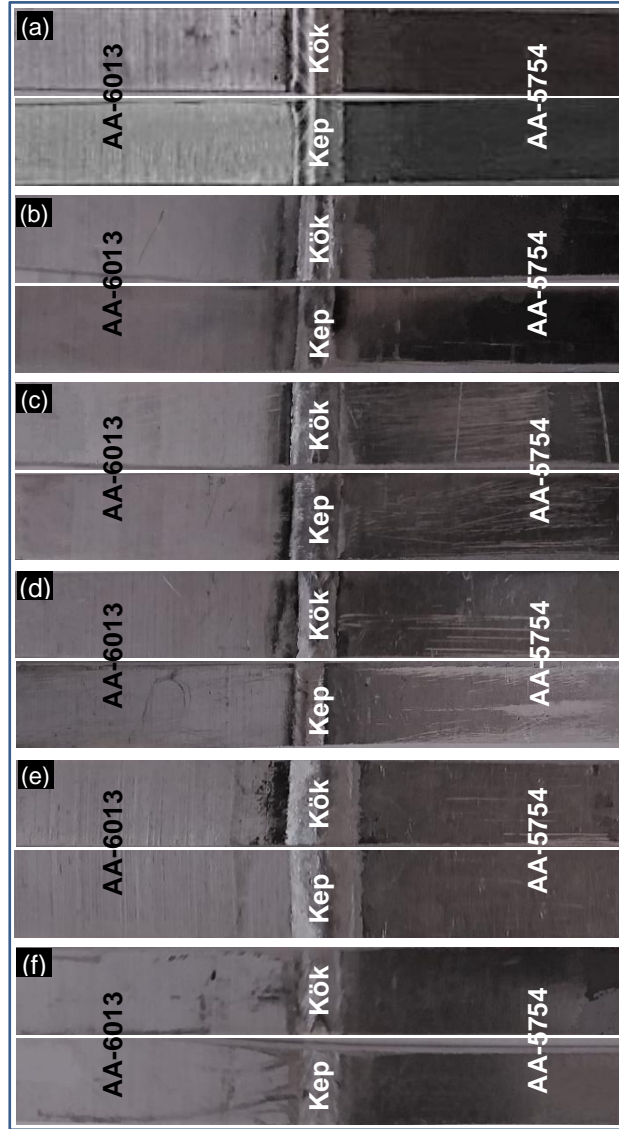
Şekil 6.19'da eğme numunesi ölçüleri görülmektedir. Şekil 6.20'de SKK yöntemi ile birleştirilen, Şekil 6.21'de de MIG kaynak yöntemi ile birleştirilen numunelerden çıkartılan eğme numunelerinin görüntüleri verilmiştir.



Şekil 6.19. Eğme numunesi standart ölçüleri.



Şekil 6.20. SKK ile birleştirilen eğme numuneleri a) SKK-1, b) SKK-2, c) SKK-3.



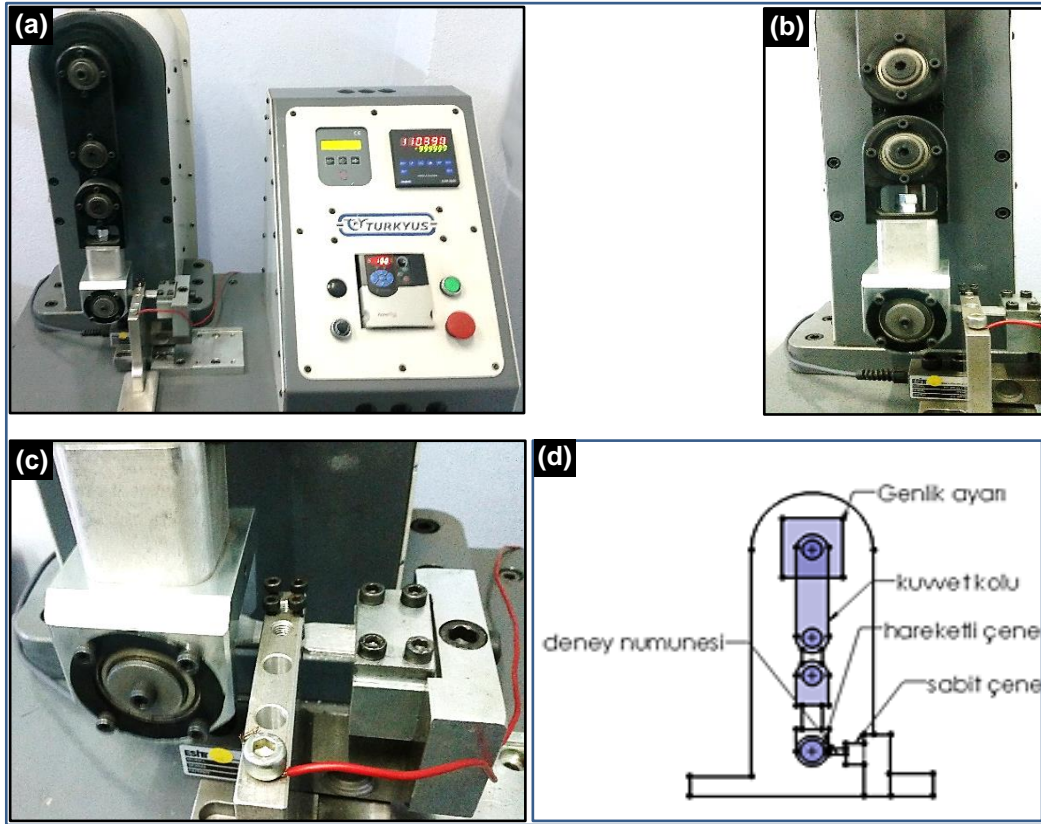
Şekil 6.21. MIG ile birleştirmelerden çıkartılan eğme numuneleri a) MIG-1, b) MIG-2, c) MIG-3, d) MIG-4, e) MIG-5, f) MIG-6.

6.6.4. Yorulma Testleri

Hem SKK'lı hem de MIG kaynaklı birleştirmelerin titreşimli ve tekrarlı yükler altında performansını ve kaynak parametrelerinin bu performansa etkilerini tespit etmek amacıyla eğmeli yorulma testleri yapılmıştır. Yorulma testleri bu tez çalışmasının en önemli aşamalarından birisidir. Ülkemizde levha halinde kaynaklı/kaynaksız numunelerin yorulma testlerini yapabilecek test makinası oldukça sınırlıdır. Ticari olarak sadece yorulma testi için üretilen cihazların çok pahalı olduklarından satın alınması ülkemiz şartlarında mümkün görülmemektedir. Bu testler uzun süreli testler oldukları için hizmet satın alınarak bu testlerin yapılması da maliyetin çok yüksek olmasına sebep olmaktadır. Özellikle de bu çalışmalarda test numunelerinin fazlalığı bu yöntemi devre dışı bırakmaktadır. Ülkemizde genelde bu tür çalışmalar için basit cihazlar tasarlanıp üretilmektedir. Üniversitelerde tasarlanıp üretilen bu cihazlar sadece genlik ayarlanabilen ve frekans sayabilen cihazlar olduklarından yorulma testleri için sadece kopma çevrim sayısı üzerinden değerlendirmeler yapılmaktadır. İşte bu çalışmada tüm bu veriler dikkate alınarak yeni bir yaklaşımla yorulma cihazı tasarlanmış ve üretilmiştir. Üretilen cihaz en düşük genlik 0,5 mm, en yüksek genlik 20 mm olacak ve numune koptuğunda harici bir düzenek ile direk stop edilecek şekilde tasarlanmıştır. Ayrıca cihaz testlerin istenen frekansta yapılabilmesi için geniş bir frekans aralığına sahiptir. Üretilen cihaz test esnasında numuneye gelen kuvveti bir loadcell vasıtası ile ölçebilmekte ayrıca da numune sadece eğilme gerilmesine tabi tutulacak şekilde değil bunun yanında çekmeli eğme yapabilecek şekilde tasarlanarak üretilmiştir. Şekil 6.22'de yorulma testleri için tasarlanıp üretilen cihazın resimleri ile şematik bir çizimi verilmiştir. Ayrıca çalışmanın EKLER kısmında makinenin teknik resim çizimleri mevcuttur.

Yorulma test cihazı genel olarak elektrik motoru, elektrik motorundan alınan kuvveti hareketli çeneye ileten kuvvet kolu, genlik ayar sistemi, biri sabit biri hareketli olmak üzere iki çene, kontrol paneli ve verilerin depolandığı ve kuvvet zaman grafiklerinin çizildiği bir bilgisayar ve bilgisayar programından meydana gelmektedir. Yoruma testine başlamadan önce genlik ayar sisteminden çalışılmak istenen genlik değeri ayarlanmaktadır. Bu ayar yapıldıktan sonra hareketli ve sabit çene arasına testin uygulanacağı deney numunesi bağlanmaktadır. Numune bağlama işlemin bittikten sonra bilgisayar programı ile test cihazının kontrol paneli üzerinde daha önceki çalışmalardan

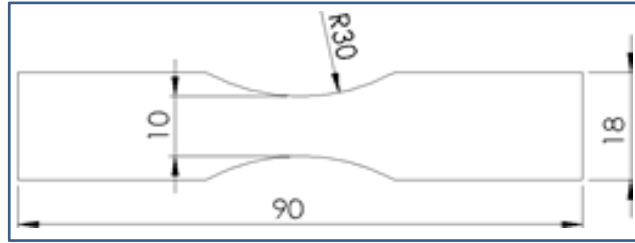
kalmış olan veriler ve parça söküp takma sonucu bozulmuş olan ayarlar sıfırlanarak makina çalışmaya hazır duruma getirilmesi gerekmektedir. Makina hazır duruma getirildikten sonra bilgisayar programı ile kontrol paneli üzerindeki ekranda görülen değerler eşlenerek program çalıştırılmaktadır. Programın çalıştırılması ile birlikte yorulma test cihazının da başlat butonuna basılarak devreye sokulması gerekmektedir. Böylelikle deney numunesinin testine başlanmaktadır. Deneye malzeme kopuncaya kadar ya da 10^7 çevrim sayısına ulaşıncaya kadar devam edilmektedir. Deney bitiminde elde edilen verilerden yararlanılarak S-N Wöhler diyagramı oluşturularak deney tamamlanmaktadır. Ancak yorulma deneylerinin gerçekleştirilmesi için gerekli olan zaman diğer yapılan testlere oranla çok daha fazladır. Örneğin 10^7 çevrime ulaşabilmek için gerekli olan zaman, 10^7 çevrimin makinenin bir günde yaptığı çevrim sayısına bölünmesi ile bulunabilmektedir. Bu durumda makinenin bir günde yaptığı çevrim sayısı 864000'tir. 10^7 'i 864000'ne böldüğünde 11,574 gün sayısını bulunur. Sonuç olarak 10^7 çevrime ulaşmak için yaklaşık olarak 12 günlük bir zamana ihtiyaç vardır.



Şekil 6.22. Yorulma test cihazı; a) komple görüntüsü, b) kuvvet uygulama mekanizması c) numune bağlama aparatı ve d) şematik görüntüsü.

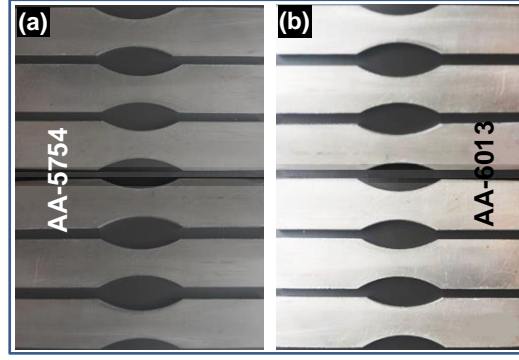
Yapılan çalışmalar sonucu Karabük Üniversitesi BAP birimince tez çalışmasına sağlanan maddi destek yardımı ile Karabük Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü'ne geliştirilmiş özelliklere sahip bir Yorulma cihazı kazandırılmıştır.

Yorulma testleri hem ana malzemelere (AA-6013 ve AA-5754) hem de farklı kaynak parametrelerinde birleştirilmiş tüm (hem SKK hem de MIG ile birleştirilmiş) kaynaklı numunelere uygulanmıştır. Ana malzemeler ile kaynakla birleştirilmiş kaynaklı numunelerden ASTM E466-07 standardına göre hazırlanan numune ölçüleri Şekil 6.23'te verilmiştir.



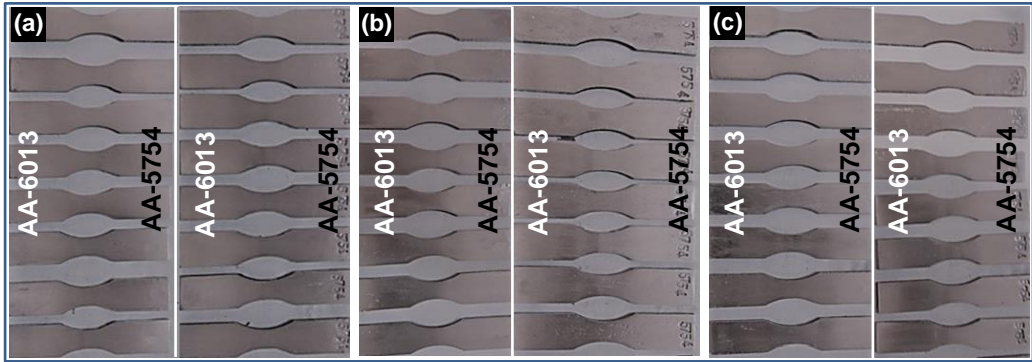
Şekil 6.23. Yorulma numunesi standart ölçüleri.

Yorulma testleri için ana malzemelerin her birinde 6'şar adet olmak üzere toplam 12 adet hazırlanmış ve bu numunelerin Yorulma testleri 4, 8 ve 12 genliklerde yapılmıştır. Bu testlerin az ve farklı genliklerde yapılmasının sebebi testlerin çok uzun süre almasından kaynaklanmaktadır. Her bir numuneden her bir genlikte 2 numune teste tabi tutulmuş ve grafikler bu değerlerin ortalaması alınarak oluşturulmuştur. Şekil 6.24'te AA6013-T6 ve AA5754-H111 ana malzemelerden üretilen yorulma test numuneleri görülmektedir. Yorulma testlerinde kullanılan numunelerin tümü su jetinde standartlara uygun olarak kesilmiş, ardından numune kalınlığı standart 3 mm kalınlık olacak şekilde freze tezgahında işlenerek, akabinde de numune üzerlerinde çentik etkisine neden olabilecek çizik vb oluşumlar zımpara yapılarak giderilmiştir.

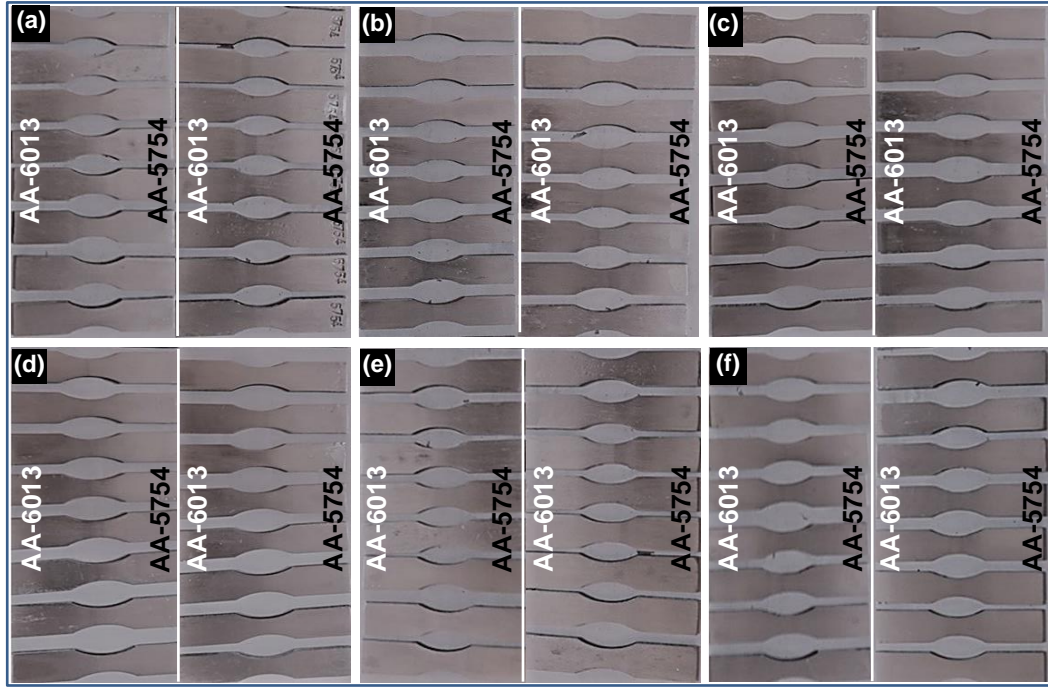


Şekil 6.24. Ana malzemelerin yorulma testi numuneleri, a) AA-5754, b) AA-6013.

Farklı kaynak parametrelerinde birleştirilmiş kaynaklı numunelerin her bir serisinden 16'şar adet yorulma numunesi hazırlanmış ve bunlardan 4 tanesi yedek olmak üzere her bir seriden $2 \times 6 = 12$ numune teste tabi tutulmuş ve Yorulma grafikleri 2 adet ortalaması alınarak çizilmiştir. Bu durumda SKK için 48, MIG kaynaklı numuneler için 96 adet yorulma numunesi hazırlanmıştır. Hem SKK hem de MIG kaynağı ile birleştirilmiş numunelerin test esnasındaki genlikleri 3, 4, 5, 6, 7 ve 8 mm olarak seçilmiştir. Şekil 6.25'de SKK yöntemi ile birleştirilmiş numunelerden elde edilen yorulma test numuneleri, Şekil 6.26'da ise MIG kaynak yöntemi ile birleştirilmiş numunelerden elde edilen yorulma test numuneleri verilmiştir.



Şekil 6.25. Yorulma testi numuneleri, a) SKK-1, b) SKK-2, c) SKK-3.



Şekil 6.26. Yorulma testi numuneleri, a) MIG-1, b) MIG-2, c) MIG-3, d) MIG-4, e) MIG-5, f) MIG-6.

Farklı kaynak parametrelerinde birleştirilen kaynaklı numunelerin yorulma testleri 6 farklı genlikte, 10 Hz frekansta ve oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Her genlik değeri için 2 numune çalışılmış ve yorulma dayanımının hesaplanmasında bu 2 numuneden elde edilen verilerin ortalamaları kullanılmıştır. Yorulma deneyleri esnasında uygulanan kuvvetin meydana getirdiği eğilme gerilmesi hesaplanabilmesi için öncelikle Formül 6.1 kullanılarak eğme kuvvetinin sebep olduğu moment hesaplanmıştır. Daha sonra da Formül 6.2 kullanılarak polar atalet momenti hesaplanarak yorulma gerilmesinin hesaplanmasında gerekli olan değerler bulunmuştur. Eğme momenti ve atalet momenti hesaplamaları sonucunda elde edilen verilerinden yararlanarak, formül 6.3 kullanılarak eğme gerilmesi hesaplanmıştır. Ayrıca uygulanan kuvvetin kaynakta meydana getirdiği kesme gerilmesi formül 6.4 yardımı ile hesaplanmış ancak yorulma gerilmesine olan etkisi ihmal edilebilecek düzeyde olması sebebiyle göz ardı edilerek hesaplamalarda dikkate alınmamıştır. Son olarak da formül 6.5 kullanılarak yorulma gerilmesi hesaplanmıştır.

$$M_e = F * L \quad (6.1)$$

$$W = (b * h^2) / 6 \quad (6.2)$$

$$\sigma_{eğme} = M_e/W \quad (6.3)$$

$$\tau_k = (F/A) \quad (6.4)$$

$$\sigma_{R\ddagger} = \sqrt{\sigma_e^2 + 3\tau_k^2} \quad (6.5)$$

σ = Eğilme gerilmesi (N/mm²)

M_e = Eğme momenti

W = Eksenel direnç Momenti

b = Genişlik (mm)

h = Yükseklik (mm)

F = Uygulanan Kuvvet (N)

L = Uzunluk (mm)

A = Alan (mm²)

τ = Kesme Gerilmesi (N/mm²)

Hesaplamalar sonucunda elde edilen yorulma gerilmeleri ve testler sırasında elde edilen çevrim sayıları kullanılarak Wöhler (S-N) yorulma grafikleri çizilmiştir.

Her iki kaynak yöntemi ile üretilen numunelerin yorulma ömrü performanslarını daha iyi açıklayabilmek için yorulma verimliği çalışmaları yapılmıştır. Yorulma verimliği çalışmalarında AA-5754 alüminyum ana malzeme esas alınarak gerçekleştirilmiştir. Yorulma testlerinin farklı genliklerde yapılması ve yorulma testleri için çok sayıda numunenin test edilmesinden dolayı burada kaynaklı birleştirmelerin en düşük ve en yüksek genlik değerleri kullanılmıştır. Bu nedenle kaynaklı numunelerin en düşük ve en yüksek genliklerine denk gelen AA-5754 ana malzemenin yorulma ömrü % 100 kabul edilerek kaynaklı birleştirmelerin en düşük ve en yüksek genlikteki çevrim sayıları oranlanarak yorulma ömrü performans hesaplamaları yapılmıştır. Daha sonra bu hesaplamalar dikkate alınarak, ana malzeme yorulma performansı, kaynaklı numune yorulma performansı ve kaynaklı numune-kaynaklı numune yorulma performansı karşılaştırılmaları gerçekleştirilmiştir.

BÖLÜM 7

DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

7.1. GENEL DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada SKK ve MIG kaynak yöntemleri ile birleştirilen farklı mekanik ve kimyasal özelliklere sahip alüminyum alaşımlarının (AA-6013 ve AA-5754), kaynak sonrasındaki mekanik ve mikroyapılarında meydana gelen değişiklikler ve bu değişikliklerin oluşmasında kaynak parametrelerinin etkileri araştırılmıştır. Her iki kaynak yönteminde de yapılan incelemeler sonucunda, kaynak sırasında oluşan ısının mikroyapılarda değişikliklere sebep olduğu görülmüştür. Isı nedeni ile mikroyapıda meydana gelen bu değişiklikler de kaynaklı bağlantıların mekanik davranışlarında farklılıklar meydana getirmiştir. Özellikle SKK yönteminde kaynak hızında, MIG kaynağında ise hem kaynak hızında hem de kaynak akımında meydana gelen artma ya da azalmalar kaynak bölgesine giren ısı girdisi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu yapılan çalışmalar sonucunda ortaya çıkmıştır. Isı girdisinde meydana gelen bu değişimler, soğuma hızlarında da farklılıkların oluşmasına neden olmuştur. Soğuma hızındaki bu değişimlerde kaynaklı birleştirmelerin tane yapılarında incelmeye ya da kabalaşma şeklinde kendini göstermiştir. Mikroyapıdaki tanelerde meydana gelen incelmeye veya kabalaşmalarda birleştirmelerin mekanik karakteristiklerinde değişimlere neden olmuştur. Ayrıca SKK kaynak yönteminde omuzun kaynak esnasında sürtünmesi sırasında oluşan plastik deformasyonda tanelerin oluşumu ve dağılımında etkili olmuş ve bunun sonucunda da birleştirmelerin mekanik özelliklerinin değiştiği gözlenmiştir.

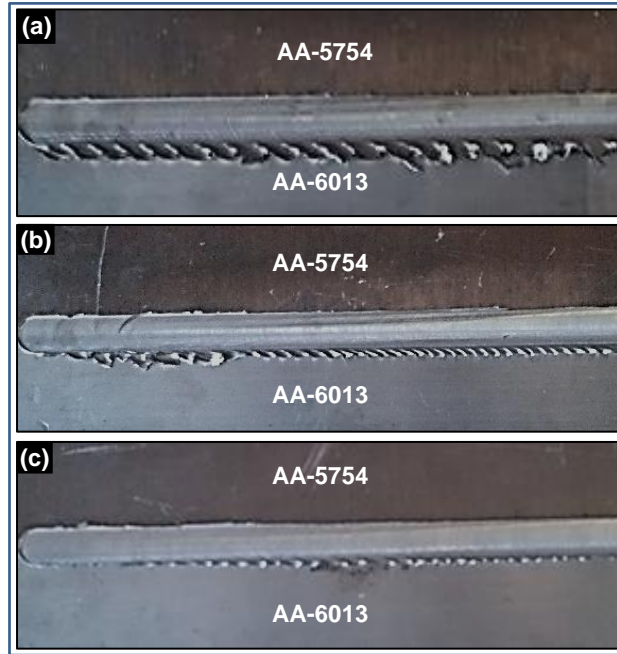
7.2. GÖZLE KONTROL

Yapılan çalışmada, AA-6013 ve AA-5754 alüminyum alaşımı malzemeler SKK ve MIG kaynak yöntemleriyle farklı kaynak parametreleri kullanılarak birleştirilmiştir. Gözle

muayene işleminde SKK işlemi ile yapılan kaynak dikişlerinde makro ölçekli çatlak, porozite ve ondüle v.b. kaynak hataları, MIG kaynaklı numunelerde ise kaynak metali fazlalığı/eksikliği, yanma olukları, eksen kaçıklığı, dikişin konumu ve yüzeye çıkmış çatlak ve gözeneklerin olup olmadığı incelenmiştir.

7.2.1. SKK Yöntemi

SKK yöntemi ile birleştirilen numunelerin üst yüzey görüntüsü (kaynak dikişi) Şekil 7.1’de verilmiştir.



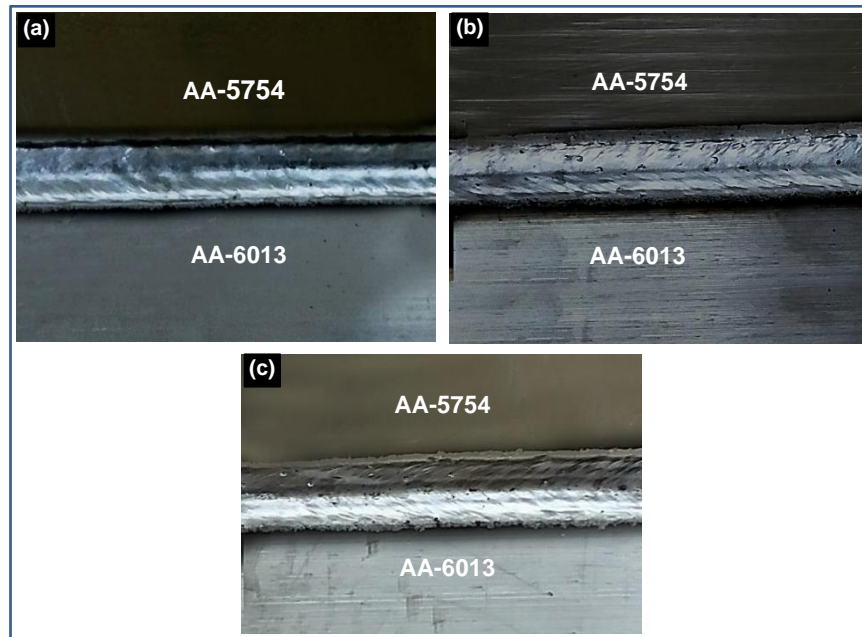
Şekil 7.1. SKK kaynakları a) SKK-1, b) SKK-2, c) SKK-3.

SKK yöntemi ile birleştirilen AA-6013 ve AA-5754 alüminyum alaşımı numuneler başlangıç ve bitiş noktalarında karıştırıcı takım çapı kadar bir hata payı vererek birleştirilmişlerdir. SKK’lı levhaların üst yüzey görüntüleri incelendiğinde tüm kaynakların başarılı olduğu ve kaynak dikişlerinde gözle muayene işleminde makro ölçekli herhangi bir yüzey kusuruna rastlanılmadığı tespit edilmiştir. Ancak levhaların kaynak dikişlerinin geri çekilme tarafında (yığma ve AA-6013 tarafı) çapak ve ondüleler oluşmuştur. Oluşan ondüleler, karıştırıcı takımın levhalara sürtünen takımın omuz kısmı dönerken çapakları dönme yönüne doğru (AA-6013 tarafı) kenarlara sıyırması nedeniyle oluşmuştur. Oluşan bu ondülelere kullanılan AA-6013 ve AA-5754 alüminyum alaşımı

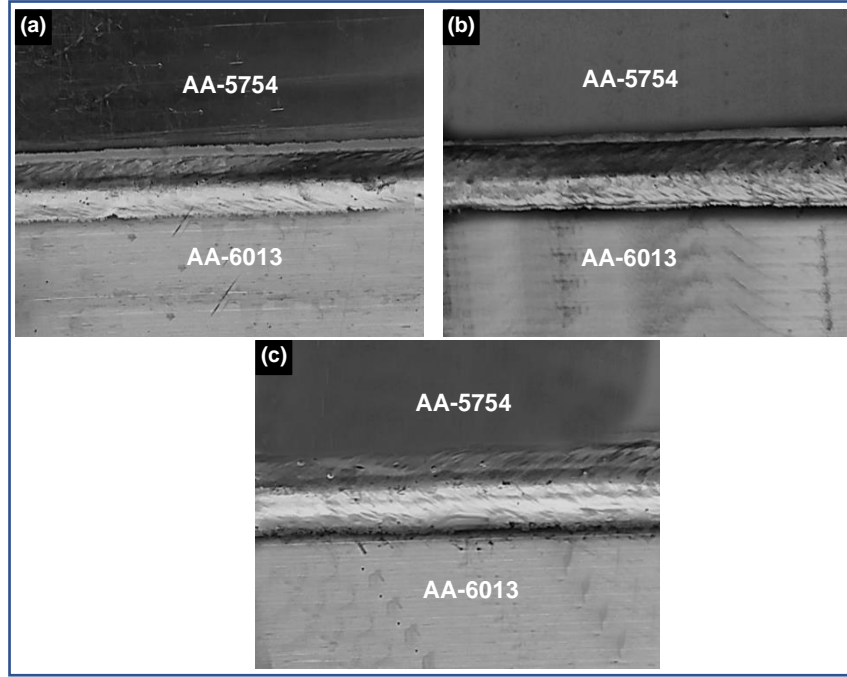
levhaların sünek özellik göstermesi ve şekil değiştirme kabiliyetlerinin yüksek olması da etki etmiştir. Literatürde karıştırıcı takım omuzunun, birleştirilen levhalara sürmesi esnasında dönme yönünde çapakları kenara doğru çıkarttığı bildirilmiştir [18]. Kaynak hızının artması ile oluşan bu ondülelerin azaldığı ve kıvrımların küçüldüğü görülmektedir. Ondülelerin oluşumundaki azalamaya kaynak hızının artışına bağlı olarak kaynak bölgesindeki ısı girdisinin azalmasının neden olduğu düşünülmektedir. Çünkü kaynak hızının artması ile kaynak bölgesine giren ısı miktarı azaldığında alüminyum levhalarda meydana gelen plastikleşme de azalmaktadır.

7.2.2. MIG Yöntemi

MIG kaynak yöntemi ile üretilen numunelerden 150 mm/dk kaynak hızında birleştirilen numunelerin üst yüzey görüntüleri Şekil 7.2'de, 180 mm/dk kaynak hızında üretilen numunelerin üst yüzey görüntüleri Şekil 7.3'de verilmiştir. Tüm parametrelerin kontrol edilebildiği robotik MIG kaynak yöntemi ile birleştirilen numunelere gözle yapılan muayene sonucunda herhangi bir kaynak fazlalığı/eksikliği, yanma oluşu, gözenek, makro çatlak, eksen kaçıklığı, aşırı sıçrama v.b. makro kaynak kusurlarına rastlanmamıştır.



Şekil 7.2. 150 mm/dk kaynak ilerleme hızındaki üretilen numunelerin makro görüntüleri a) MIG-1, b) MIG-3, c) MIG-5.

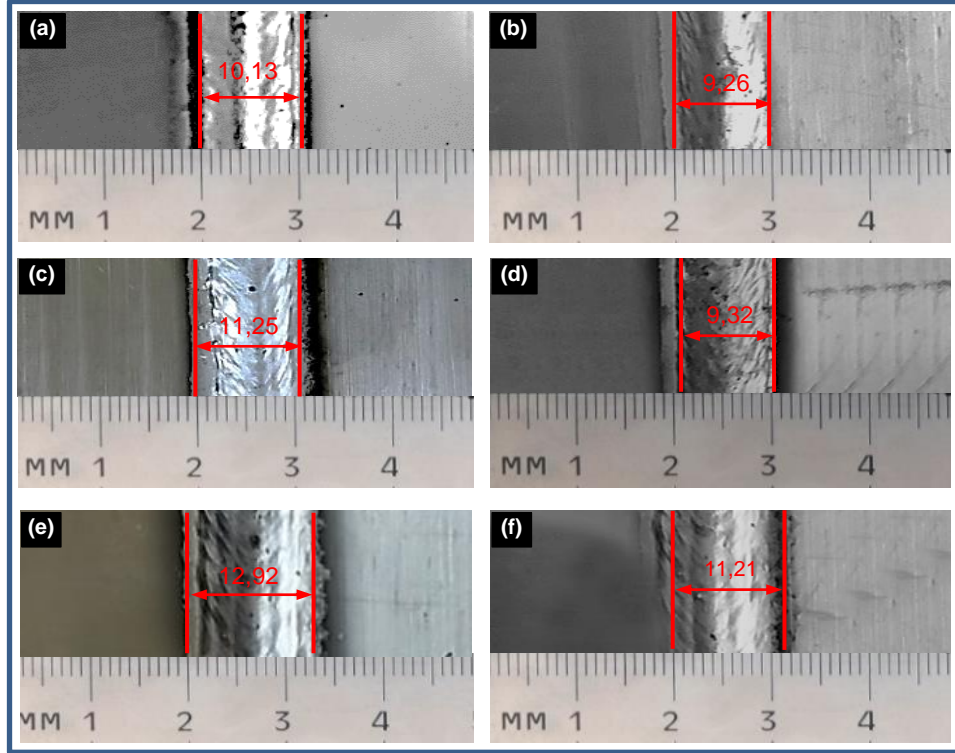


Şekil 7.3. 180 mm/dk kaynak ilerleme hızında üretilen numunelerin makro görüntüleri a) MIG-2, b) MIG-4, c) MIG-6.

Ayrıca kaynaklı levhalarda enine veya boyuna doğrultuda belirgin bir açısal distorsiyon oluşmadığı görülmüştür. Fakat kaynak hızının artması ile kaynak metalinin genişliğinde azalmalar meydana gelmiştir. Kaynak hızındaki artış ısı girdisine, yığılan metal miktarına ve soğuma hızına etki eden bir faktördür. Çevik ve Koç [104] alüminyumun MIG kaynağında, biriken metal miktarının ve kaynak genişliğinin artan kaynak hızı ile azaldığını bildirmişlerdir. Literatürde kaynak hızının yavaşlaması ile birim zamanda birim boya yığılan kaynak metalinin arttığı ve bununla kaynak banyosunu genişlettiği için sonuçta kaynak dikişinin genişliğinin arttığı belirtilmiştir [56].

Şekil 7.4’de farklı kaynak parametrelerinde MIG kaynağı ile birleştirilmiş kaynaklı numunelerin kaynak kep genişlik ölçüm sonuçları verilmiştir. Şekil 7.4’de görüldüğü üzere kaynak akımı 130 A’de kaynak hızının 150 mm/dk’dan 180 mm/dk’ya yükseltilmesi ile dikiş genişliği yaklaşık olarak % 8,6 azalırken kaynak akımı 140 A iken kaynak hızının 150 mm/dk’dan 180 mm/dk’ya yükseltilmesi ile dikiş genişliği yaklaşık olarak % 17,16 oranında azalmıştır. Benzer şekilde kaynak akımı 150 A’de ise kaynak hızının 150 mm/dk’dan 180 mm/dk’ya çıkartılması ile kaynak

genişliği yaklaşık olarak % 13,24 oranında azalmıştır. Kaynak dikişinin genişliğinde oluşan bu değişme kaynak hızının ya da kaynak akımının değişmesi sonucunda meydana gelen ısı girdisi değişimlerinin sebep olduğu dūřünülmektedir. Benzer şekilde Anhua vd. [105] darbeli MIG kaynağı ile AA-5754 alūminyum alaşımı ile yaptıkları çalışmada, geniş kaynak havuzunun daha fazla ısı girdisi tarafından üretildiğini bildirmişlerdir.



şekil 7.4. MIG kaynağı ile birleştirilmiş numunelerin dikiş görüntüsü, a) MIG-1, b) MIG-2, c) MIG-3, d) MIG-4, e) MIG-5, f) MIG-6.

7.3. METALOGRAFİ ALIşMALARI

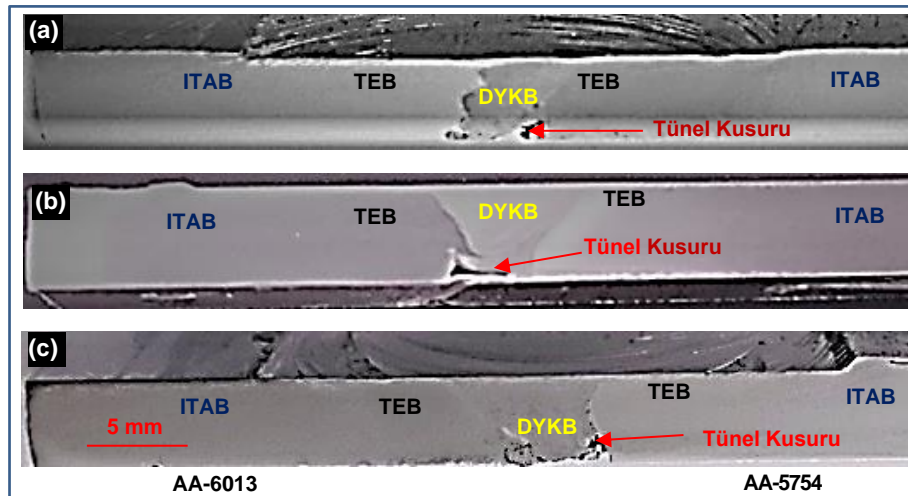
Kaynaklı birleştirmelerin makro ve mikroyapılarında meydana gelen değişiklikleri ve tercih edilen kaynak parametrelerinin bu değişikliklere etkisini tespit edebilmek için kaynaklı numunelerin tümüne metalografik incelemeler yapılmıştır. Kaynaklı numuneler üzerindeki metalografik incelemeler hem makro hem de mikro olmak üzere iki türde gerçekleştirilmiştir.

7.3.1. Makroyapı Çalışmaları

Farklı özellikler kazandırmak amacıyla demir ve demirdışı malzemeler herhangi bir işleme tabi tutulduklarında (plastik deformasyon, kaynak vb) işlem sonrasında bu kazandırılan özelliklerin etkilerini belirleyebilmek, ön bilgi edinmek ve yüzey kusurlarını değerlendirmek amacıyla öncelikle makro olarak gözle incelenirler. Bu tür incelemeler hem üretim esnasında hem de işletme şartlarında hızlı ve yaygın olarak yapılmaktadır.

7.3.1.1. SKK Çalışmaları

Bu amaçlar çerçevesinde SKK yöntemi ile birleştirilen numunelere makroyapı incelemeleri yapılmıştır. Farklı parametrelerde SKK ile birleştirilen kaynaklı numunelerin görüntüleri Şekil 7.5’de verilmiştir. Şekil 7.5 incelendiğinde SKK makro kaynak yapısının kaynak merkezinden itibaren sırasıyla dinamik yeniden kristalleşen bölge (DYKB) yani kaynak metali, termomekanik olarak etkilenen bölge (TEB), ısı tesiri altındaki bölge (ITAB) ve ana metal olmak üzere 4 bölgeden meydana geldiği görülmektedir. Literatürde sürtünme karıştırma kaynağında makroyapının tipik olarak 4 bölümden meydana geldiği bunların ise ana metal, ısı tesiri altındaki bölge, termomekanik etkilenen bölge ve dinamik yeniden kristalleşen bölge olduğu söylenmiştir [106].



Şekil 7.5. SKK makro görüntü a) SKK-1, b) SKK-2, c) SKK-3.

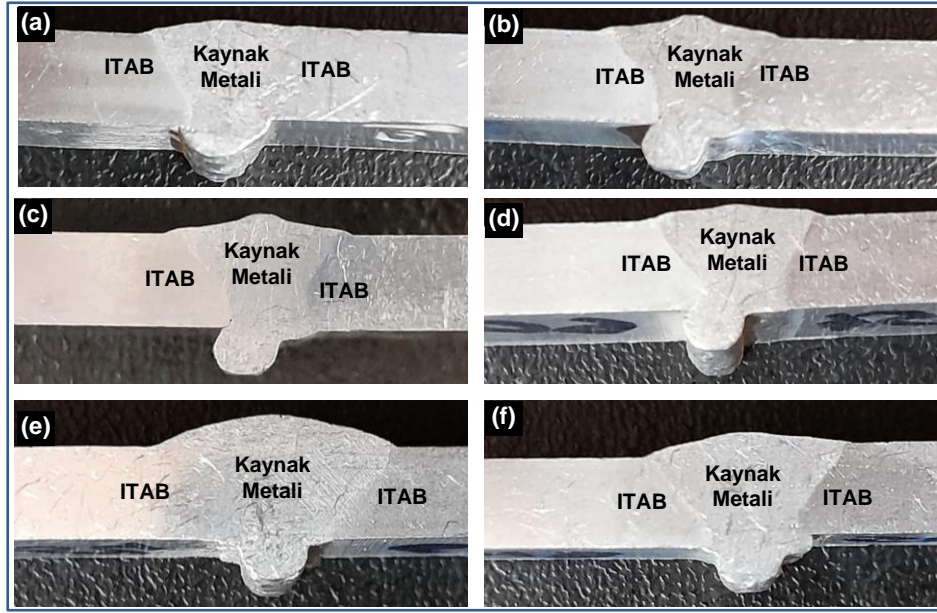
SKK yöntemi ile üretilen numunelerden elde edilen görüntüler incelendiğinde dikkat çeken bir diğer nokta ise her üç kaynak ilerleme hızında da kök kısımlarında tünel kusurlarının oluşmuş olmasıdır. Bu tünel kusurlarının oluşmasında birleştirmelerin kök kısımlarındaki ısı girdisinin yeterli olmaması sebebiyle bu bölgelerinde birleşmeyi sağlayacak olan plastikleşmenin sağlanamamasının etkili olduğu düşünülmektedir. Literatürde kök kısımlarında meydana gelen bu tünel kusurlarına düşük ısı girdisi sebebiyle oluşan yetersiz plastikleşmeden kaynakladığı rapor edilmiştir [18]. Aynı şekilde daha önceden yapılan bir çalışmada da kaynak değişkenlerine ve tasarlanan karıştırıcı takımının şekline bağlı olarak kök bölgelerinde bu tür kaynak kusurlarına rastlandığı bildirilmiştir [76]. Benzer biçimde sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmiş malzemelerde sürtünme ısının yetersizliğinden dolayı boşlukların meydana geldiği ifade edilmiştir [107]. Literatürde yeterli ısıya ulaşamayan bölgelerde, alüminyumun kaynak için gerekli olan akışkanlığı kazanamadığı bunun sonucunda da karıştırma sırasında tünel ve birleşme hatalarının meydana geldiği rapor edilmiştir [2].

Bir başka çalışmada tünel kusurlarının görüldüğü ve tünel kusuru oluşmasına kaynak hızına bağlı olarak değişen metal akışının katkısının olabileceği vurgulanmıştır [73]. Tünel kusuru oluşumunda kaynak işlemi sırasında sürtünmeden dolayı oluşan ısı girdisi ile kaynatılan malzemelerin ısı iletim hızı arasındaki termodinamik dengenin sağlanamaması da etkili olabilmektedir [2]. Azimzadegan ve Serajzadeh [108] tünel kusuru oluşumunu karıştırıcı ucun malzeme içerisinde ilerlemesi sırasında plastikleşen malzemenin yanlara doğru taşınması ve taşınan bu malzemeyi tekrar geriye doğru hareketlendirecek herhangi bir etkinin olmamasına bağlamışlardır. Benzer biçimde birçok çalışmada tünel kusurları oluşumunun tespit edildiği ve bu kusurların oluşumuna genellikle düşük ısı girdisinin sebep olduğu belirtilmiştir [109-114].

7.3.1.2. MIG Çalışmaları

MIG kaynak yöntemi ile farklı kaynak akım ve kaynak hızlarında birleştirilen kaynaklı numunelerin kesitlerine yapılan dağlama ile açığa çıkarılmaya çalışılan makro kaynak bölgesi görüntüleri Şekil 7.6'da verilmiştir. Şekil 7.6'daki MIG makro görüntüleri incelendiğinde kaynaklı birleştirmelerin mekanik özelliklerini olumsuz bir şekilde

etkileyecek herhangi bir birleşme eksikliğine (yan yüzey nüfuziyeti), gaz boşluğuna ve nüfuziyet yetersizliği hatalarına rastlanmamıştır. Elde edilen bu olumlu sonuçlar, pilot çalışmalar ile belirlenen ön parametrelerin doğru bir aralıkta seçildiğini ve kaynak işlemlerinin otomatik olarak yapılarak kaynakçı faktörünün devre dışı bırakılmasından kaynaklandığını göstermektedir. Ayrıca farklı kaynak parametreleri ile elde edilmiş tüm kaynaklarda hem kaynak kepleri hem de kaynak kökleri elde edilmiştir.



Şekil 7.6. MIG makro görüntüleri a) MIG-1, b) MIG-2, c) MIG-3, d) MIG-4, e) MIG-5 ve f) MIG-6.

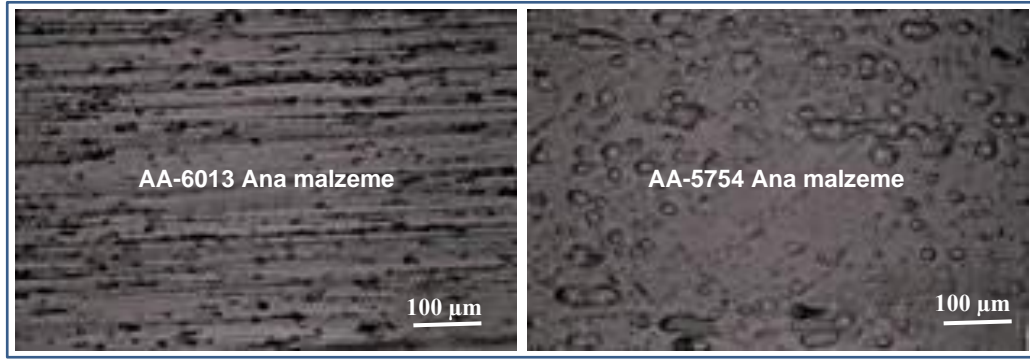
Şekilde verilen kaynak kep görüntüleri incelendiğinde belirgin bir yüzey hatası (eksik veya fazla kaynak dikiş yüksekliği) görülmemiştir. Ancak kaynak kökleri için aynı olumlu durumun olmadığı görülmektedir. Burada bazı kaynaklarda kökün tam merkezde oluşmadığı (MIG-2 ve MIG-3) bunun da birleşmenin AA-6013 tarafında kısmi kaynak hatasına sebep olduğu tespit edilmiştir. TS EN ISO 10042+AC (Kaynak-Alüminyum ve Alaşımlarında Ark kaynaklı Birleştirmeler-Düzgünsüzlükler için Kalite Seviyeleri) standartına göre nüfuziyet derinliğinin 4 mm'ye eşit ya da 4 mm'den küçük olması istenmektedir. Yapılan nüfuziyet derinliği ölçümleri sonucunda en düşük nüfuziyet derinliğinin 1,6 mm, en yüksek nüfuziyet derinliğinin 2,6 mm olduğu tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, TS EN ISO 10042 standardı ile karşılaştırıldığında, sonuçların kabul edilebilir olduğu görülmüştür.

Kaynak esnasında torç, kaynak yerine tam olarak 90 derece olarak konumlandırılmış ve iki ana malzeme arasındaki boşluk standart olarak sabitlenmiştir. Tüm bu önlemlere rağmen kaynak kök kısmının düzgün bir simetriye sahip olmaması değişken kaynak parametrelerinden ziyade kaynak esnasında kaynak torcunun merkezden sapmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Literatürde kaynak kök kısmının düzgün bir simetriye sahip olmasının ve kaynak ısısının her iki parçaya dengeli bir şekilde dağılmasının hatasız bir kaynak kökü için gerekli olduğu belirtilmiştir [56].

Literatürde robotik MIG kaynağı ile yapılan çalışmada makroyapı görüntülerinde herhangi bir nüfuziyet eksikliği görülmediği bunun sebebinin ise doğru kaynak parametrelerinin tercih edilmesi olduğu belirtilmiştir [115]. Ayrıca sabit kaynak hızında kaynak akımının artması ile nüfuziyet ve kaynak metalinin genişliğinin arttığı görülmüştür. Literatürde AA-5754 alaşımının MIG kaynağı ile birleştirildiği çalışmada kaynak akımının artması ile nüfuziyet ve damla alanının genişliğinin arttığı rapor edilmiştir [15]. Kaynak metalinin ve nüfuziyet genişliğinin artmasında artan kaynak akımı/düşen kaynak hızı ile birlikte artan ısı girdisi sebep olmuştur. AA-5754 alaşımının çift darbeli MIG kaynağı ile birleştirildiği bir çalışmada daha fazla ısının daha geniş kaynak havuzu oluşturduğu bildirilmiştir [105].

7.3.2. Mikroyapı Çalışmaları

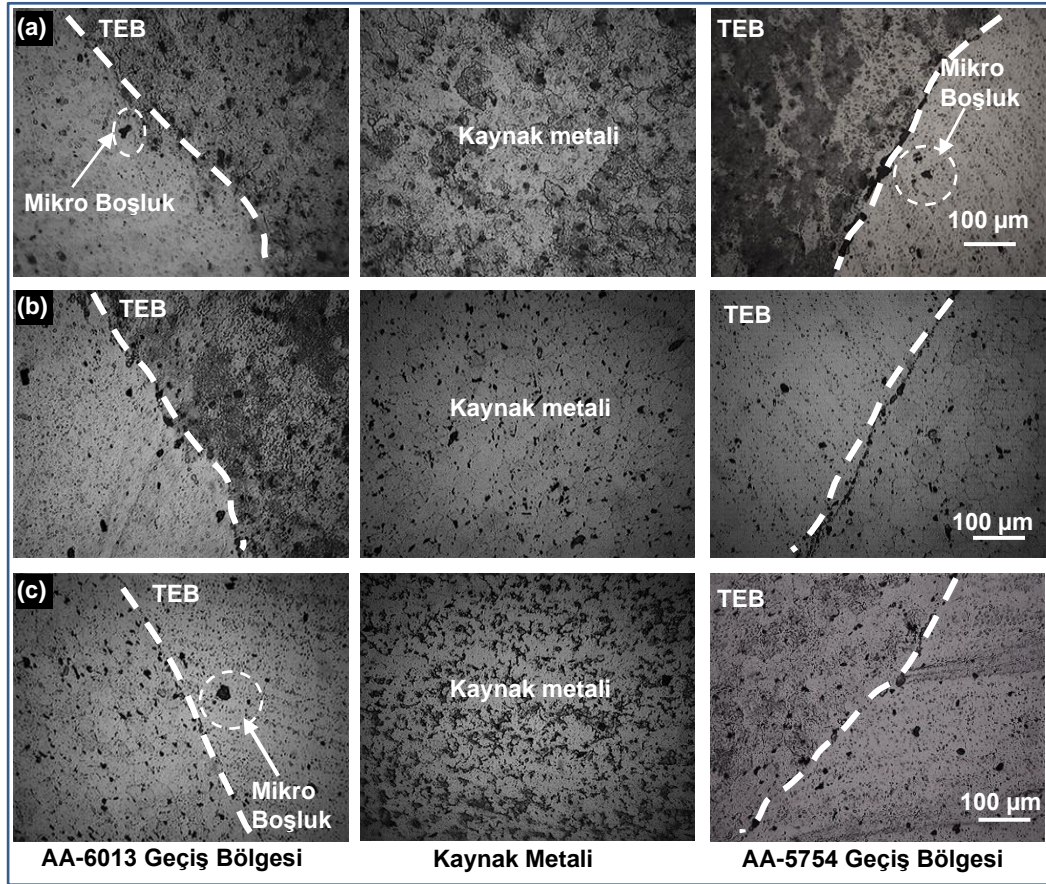
Mikroyapı; soğuk/sıcak plastik deformasyon, ısıl işlem, kaynak vb imalat işlemlerinden etkilenen malzemelerin, işlem öncesi ve sonrası özellikleri ile performansını ne ölçüde etkilediğini belirleyebilmek için yapılan bir çalışmadır. Çalışma sonucunda malzeme içerisindeki tane yapısı ve faz yapısı gibi özellikler bu çalışma ile belirlenebilir. Mikroyapı çalışmaları sonucunda elde edilen ana malzemelerin mikroyapıları Şekil 7.7'de verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere AA-6013 ana malzemenin mikroyapısında tanelerin haddeleme yönünde uzanmış olduğu tespit edilmiştir. Literatürde AA-6013 ana malzemenin tanelerinin haddeleme yönünde uzandığı ifade edilmiştir [35]. AA-5754 ana malzemenin mikroyapısının ise ince ve eş eksenli taneli bir yapıdan oluştuğu görülmüştür. Literatürde AA-5754 ana malzemenin eş eksenli taneler içerdiği söylenmiştir [27].



Şekil 7.7. Ana malzemelerin mikroyapısı.

7.3.2.1. SKK Mikroyapı Çalışmaları

SKK yöntemi ile farklı kaynak hızlarında üretilen kaynaklı numunelerden elde edilen kaynak bölgesi mikroyapıları Şekil 7.8’de verilmiştir.



Şekil 7.8. SKK mikroyapı a) SKK-1, b) SKK-2, c) SKK-3.

Şekil 7.8 incelendiğinde kaynak metallerin esas metallere belirgin bir sınırla ayrıldığı görülmektedir. Ayrıca kaynak esnasında karıştırıcı takımın levhalara sürtünmesinden dolayı oluşan ısı girdisi ve plastik deformasyon nedeniyle levhaların üst yüzeyine doğru genişleyen kaynak metalleri oluşmuştur. Bu duruma karıştırıcı ucun sürtünmesi ile levhaların üst bölgesinde maksimum sıcaklığın, levhaların alt bölgesinde ise daha düşük sıcaklıkların meydana gelmesinin neden olduğu söylenebilir. AA-6063 alüminyum alaşımının sürtünme karıştırma kaynak yöntemi ile birleştirildiği bir çalışmada, karıştırıcı takımın neden olduğu sürtünme ve yüksek sıcaklık nedeniyle kaynak metalinde plastik deformasyon meydana geldiği söylenmiştir [82].

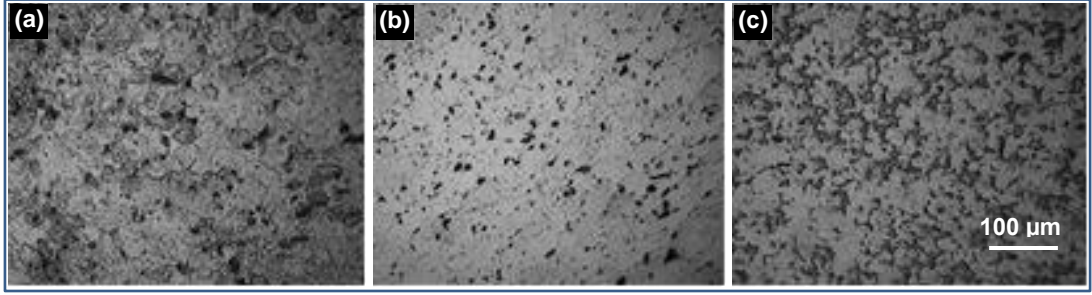
Farklı parametrelerde SKK ile birleştirilen alüminyum malzemelerin termomekanik olarak etkilenen bölgelerin (TEB) mikroyapıları incelendiğinde ise geçiş bölgelerinde mikro boşluk kusurlarının oluştuğu tespit edilmiştir. Mikroyapıda görülen bu mikro boşlukların oluşmasında alt bölgelere yeteri kadar ulaşamayan sürtünme ısısının sebep olduğu söylenebilir. Benzer şekilde SKK yöntemi ile birleştirilen AA-5052 ile AA-6061 malzemelerin kaynağında, bu bölgedeki mikroyapıda mikro boşluklar tespit edildiği ve buna sürtünme ısısının yetersizliğinin sebep olmuş olabileceği ifade edilmiştir [107].

Bunun dışında TEB kaynak süresince sürtünmeye ve sürtünmenin meydana getirdiği yüksek ısıya maruz kaldığı için bu bölgede plastik deformasyon meydana gelmektedir. Plastik deformasyonun ve ona yardımcı olan ısının katkısı ile bu bölgedeki tanelerin yapısı ana metallere ve kaynak metalinden farklılık arz etmektedir. Bing vd. yaptıkları çalışmada TEB'deki tanelerin sürtünme kaynağı sırasında deformasyonun etkisi ile uzadığını ancak yeniden kristalleşmediği için çekirdek bölgenin tane yapısından ayrıldığını rapor etmişlerdir [9]. Palanivel vd. AA-5083 ve AA-6351 alüminyum alaşımlarını SKK ile birleştirdikleri çalışmada TEB'in yüksek oranda plastik deformasyon ve termal etkiyle karşı karşıya olması sebebiyle uzun ancak yeniden kristalleşmemiş tanelerden oluşan bir mikroyapıya sahip olduğunu ifade etmişlerdir [116]. Yine yüksek dayanımlı alüminyum alaşımlarının SKK ile birleştirilip korozyon ve yorulma dayanımlarının araştırıldığı bir çalışmada TEB

bölgesinin mekanik deformasyon altında olmasından dolayı büyük taneli bir yapıya sahip olduğu belirtilmiştir [117].

Şekil 7.8'deki görüntüler incelendiğinde SKK işlemi sırasında özellikle kaynak metalinde yüksek oranda plastik deformasyon durumu söz konusudur. Literatürde daha önceden yapılan çalışmalarda dinamik olarak yeniden kristalleşen bölgenin (kaynak metali) yoğun bir şekilde deformasyona maruz kaldığı bildirilmiştir [118-120]. Ayrıca bu bölge yoğun deformasyonun yanında en yüksek ve en fazla süre ısıya maruz kalan bölgedir. Daha önceden yapılan çalışmada kaynak çekirdeğinin (kaynak metali) sürtünme sırasında oluşan sıcaklığa en fazla maruz kalan bölge olduğu rapor edilmiştir [120]. SKK yöntemi ile birleştirilen numunelerin tümünde kaynak metali, yüksek deformasyon etkisiyle her iki ana metalin homojen karışımıyla oluşmuş ve kaynak metali mikroyapıları eş eksenli dinamik yeniden kristalleşmiş tanelerden meydana gelmiştir. Moshwan vd. Al-Cr-Mn (AA5052-0) malzemeler üzerinde yaptıkları çalışmada, SKK kaynağı sırasında oluşan ısının ve plastik deformasyonun dinamik yeniden kristalleşmeye neden olması sebebiyle kaynak metalinin eş eksenli bir mikroyapı gösterdiklerini belirtmişlerdir [121].

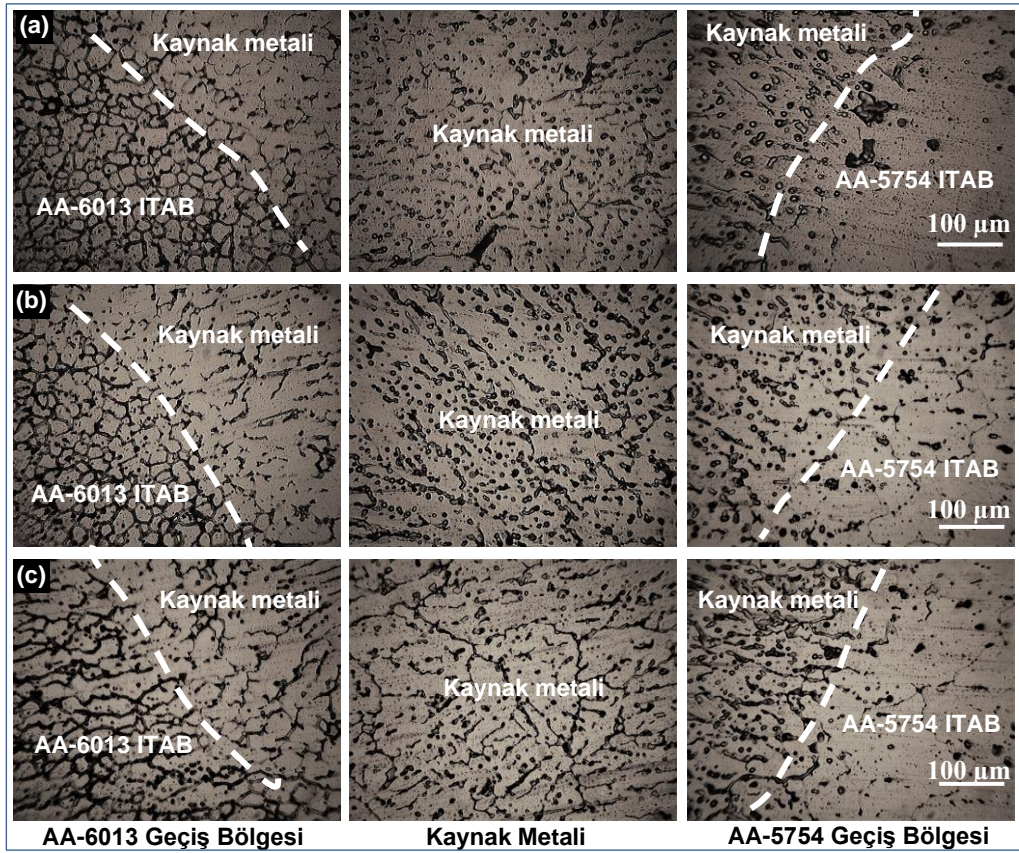
Ayrıca SKK kaynak hızında yapılan değişikliğin kaynak metali üzerindeki etkilerini daha kolay inceleyebilmek için Şekil 7.9'da üç farklı hızda birleştirilen numunelerin aynı büyütmedeki kaynak metali görüntüleri verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde kaynak ilerleme hızının, kaynak metali mikroyapılarına etki ettiği açık ve nettir. Düşük kaynak hızı nedeniyle birim alanda fazla sürtünmeden dolayı oluşan ısı daha fazla olmaktadır. Bu da kaynak metalinde dinamik olarak yeniden kristalleşme ve yeniden kristalleşen tanelerde irileşmeye neden olmaktadır. Kaynak hızının artışıyla beraber daha düşük ısı girdisi nedeniyle daha ince mikroyapılar oluşmuştur. Çevik vd. yaptıkları çalışmalarda kaynak hızının artması ile azalan ısı girdisinin ince taneli bir mikroyapı ürettiğini rapor etmişlerdir [120,122]. Benzer şekilde Ahmed vd. farklı alüminyum alaşımları (AA7075 ve AA5083) üzerinde SKK yöntemi ile yaptıkları çalışmada kaynak hızının artması ile ısı girdisinin düştüğünü ve soğuma hızının artması ile de tane yapısının incelendiğini rapor etmişlerdir [123].



Şekil 7.9. SKK kaynak metali görüntüleri a) SKK-1, b) SKK-2, c) SKK-3.

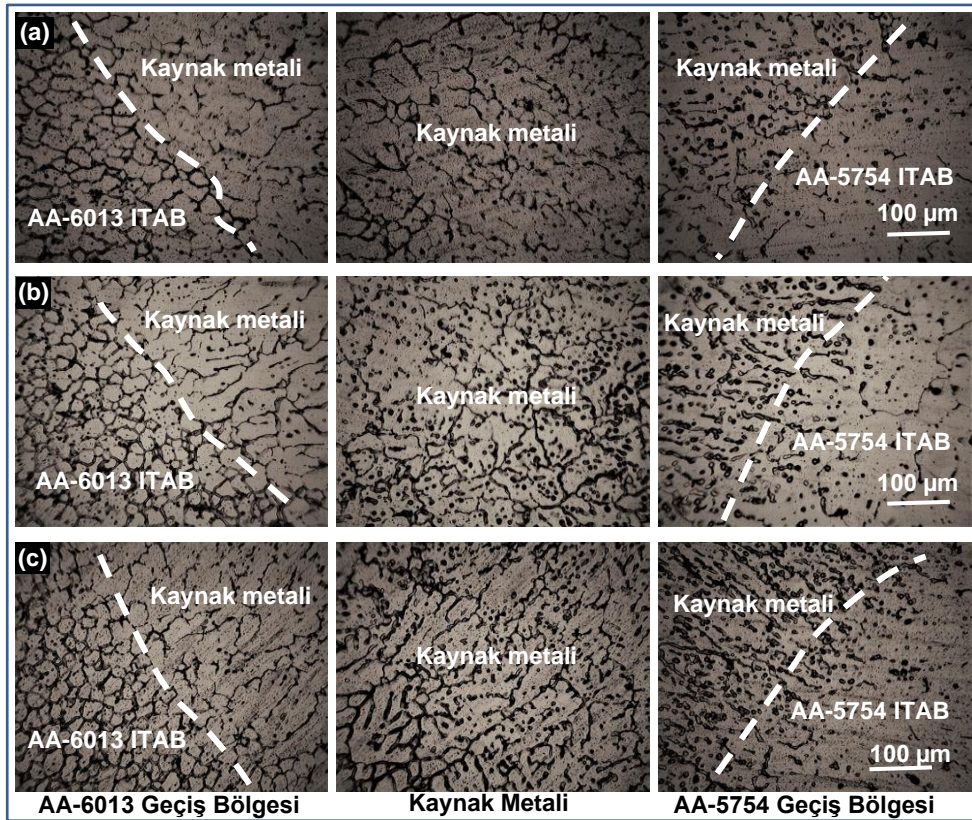
7.3.2.2. MIG Kaynağı Mikroyapı Çalışmaları

MIG kaynak yönteminde farklı kaynak parametrelerinin kaynaklı bağlantıların mikroyapıları üzerindeki etkilerini belirlemek için mikroyapı çalışmaları yapılmıştır. Bu amaçla yapılan mikroyapı çalışmaları sonucunda elde edilen mikroyapı görüntülerinden 150 mm/dk kaynak hızında üretilen numunelerin görüntüleri Şekil 7.10'da, 180 mm/dk kaynak hızında üretilen numunelerin görüntüleri Şekil 7.11'de verilmiştir.



Şekil 7.10. 150 mm/dk kaynak hızında birleştirilmiş numunelerin mikroyapısı; a) MIG-1, b) MIG-3, c) MIG-5.

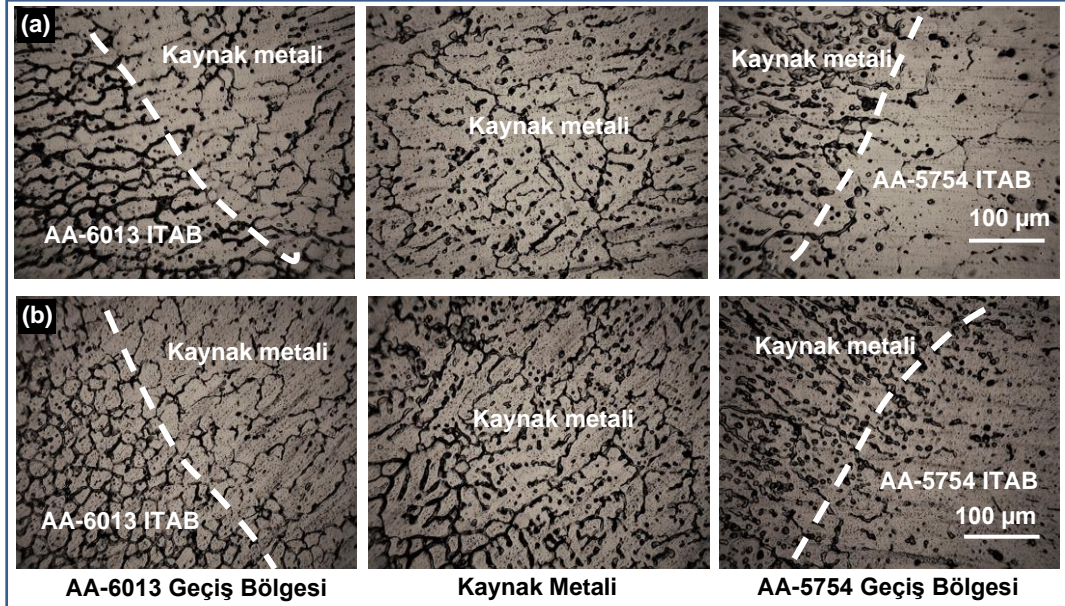
Şekiller 7.10 ve 7.11'deki mikroyapı görüntüleri incelendiği zaman kaynak metalinin mikroyapısı, her iki ana metalin mikroyapılarından da bariz bir şekilde farklılık gösterdiği görülmektedir. Şekiller incelendiğinde kaynak akımının artması ile kaynak metalinde ve ITAB'da tanelerin kabalaştığı görülmektedir. Buna kaynak işlemi esnasında birleşme bölgesine giren ısı sebep olmuştur. Kaynak yapılırken üretilen ısı birleşme bölgesindeki (hem kaynak metali hem de ITAB) tanelerin, daha önceden kazandırılan yapısını bozmuş ve kabalaşmasına neden olmuştur. AA-5754 alaşımının darbeli MIG kaynağı ile birleştirildiği bir çalışmada benzer şekilde ısının etkisi ile haddelemiş tanelerin özelliğini yitirmesi sebebiyle ITAB'da tanelerin kabalaştığından bahsedilmiştir [105]. Yine bir başka çalışmada Yao vd. AA-5083 malzemenin TIG ve MIG kaynağında homojen olmayan ısınma ve soğumandan dolayı ana metalden, kaynak metaline doğru tanelerin irileştiğini söylemişlerdir [124]. Aynı şekilde bir başka çalışmada 6061-T651 alaşımı malzemeler tam otomatik gazaltı ark kaynağı ile ERE5183 ilave metal kullanılarak birleştirilmiş ve ITAB'ın eş eksenli kaba taneler içerdiği belirtilmiştir [125].



Şekil 7.11. 180 mm/dk kaynak hızında birleştirilen numunelerin mikroyapıları; a) MIG-2, b) MIG-4, c) MIG-6.

Sonuç olarak kaynak hızının sabit tutulup kaynak akımının artırılması ile tanelerin irileştiği görülmüştür. Tane yapısında meydana gelen bu kabalaşmalara artan kaynak akımına ve düşen kaynak hızına paralel olarak artış gösteren ısı girdisinin sebep olduğu düşünülmektedir. Literatürde kaynak değişkenlerinin (kaynak akımı, kaynak hızının) tane kabalaşmasında etkili olduğu ifade edilmiştir [126].

Şekil 7.12’de 150 A kaynak akımında farklı kaynak hızlarında birleştirilmiş numunelerin mikroyapı görüntüleri verilmiştir. Bu görüntüler incelendiğinde kaynak akımı sabit tutulup kaynak hızının artması ile ITAB’da tanelerin incelendiği gözlenirken kaynak metalinde dentritik kolların arttığı ve tane yapısının incelendiği görülmüştür. Bu yapının oluşmasında en büyük etkenin kaynak hızının artması ile ısı girdisinin azalması ve soğuma hızının artması ile hızlı katılaşmanın etkili olduğu düşünülmektedir. Yao vd. alüminyum alaşımlarının MIG kaynağında, kaynak hızının artması ile hızı artan katılaşmanın ince ve dentritik taneler oluşturduğunu belirtmişlerdir [124].



Şekil 7.12. 150 A kaynak akımında birleştirilen numunelerin mikroyapıları a) MIG-5, b) MIG-6.

Genel olarak MIG kaynağı ile birleştirilen numunelerin mikroyapıları incelendiğinde kaynak metalinin mikroyapısının dentirik tanelerden oluştuğu görülürken kaynak

akımının artması ve/veya kaynak hızının azalması ile hem ITAB'da hem de kaynak metalinde tane kabalaşmaları meydana geldiği görülmüştür. Daha önce yapılan alüminyum ve alaşımları ile ilgili çalışmalarda, kaynak metalinin mikroyapısının dentritik tanelere sahip olduğu [88] ve kaynak parametrelerinin değişmesi ile mikroyapıda meydana gelen bu değişmelerin birleştirmelerin mekanik özelliklerini ve kalitesini etkilediği rapor edilmiştir [98]. MIG kaynağında bütün kaynak akım ve hızlarında AA-6013 alüminyum alaşımının ITAB'ı AA-5754 alüminyum alaşımı ITAB'ına oranla daha ince taneli bir yapıya sahip olduğu görülmüştür. Buna ise AA-6013 alüminyum alaşımının kimyasal bileşiminin ve çökelti yapısının etkili olduğu düşünülmektedir.

SKK ve MIG kaynak yöntemleri ile birleştirilen numunelerin mikroyapılarını birlikte değerlendirildiğinde dikkat çeken nokta ise her iki kaynak yönteminde de kaynak hızında yapılan değişikliklerin mikroyapıda farklılıklar meydana getirmesidir. Kaynak hızlarında meydana gelen artma, kaynak bölgesine etki eden ısı girdisini azaltması sebebiyle soğuma hızını artırmakta dolayısıyla da artan soğuma hızı sonucunda da ince taneler meydana gelmektedir. Literatürde TIG ve MIG kaynağı AA-5083 malzeme üzerinde yapılan çalışmada hızlı soğumanın ince taneler doğurduğu rapor edilmiştir [124]. Benzer şekilde SKK yöntemi SSM 356 alüminyum alaşımı ile yapılan bir çalışmada kaynak hızının artması ile tanelerin boyutlarının düştüğü ve ince tanelerin meydana geldiği bildirilmiştir [127]. Chaitanya vd. ise AA-7039 alüminyum alaşımını SKK ile birleştirdikleri çalışmada, yoğun plastik deformasyon nedeniyle kaynak metalinin ince eş eksenli taneler içerdiği belirtmişlerdir [128].

7.4. ISI ÖLÇÜMÜ

Bugüne kadar kaynak üzerine yapılan araştırmalar incelendiğinde hemen hemen hepsinin ortak noktasının “kaynak sırasında meydana gelen ısının birleştirmenin mekanik özelliklerini etkilediği” olduğu görülmüştür. Dolayısıyla yapılan kaynaklı birleştirmeler üzerinde olumlu veya olumsuz olsun çok önemli etkiye sahip olan ısı girdisinin etkilerini araştırmak için her iki kaynak yöntemi ile de birleştirilen numunelere ısı ölçümü yapılmıştır.

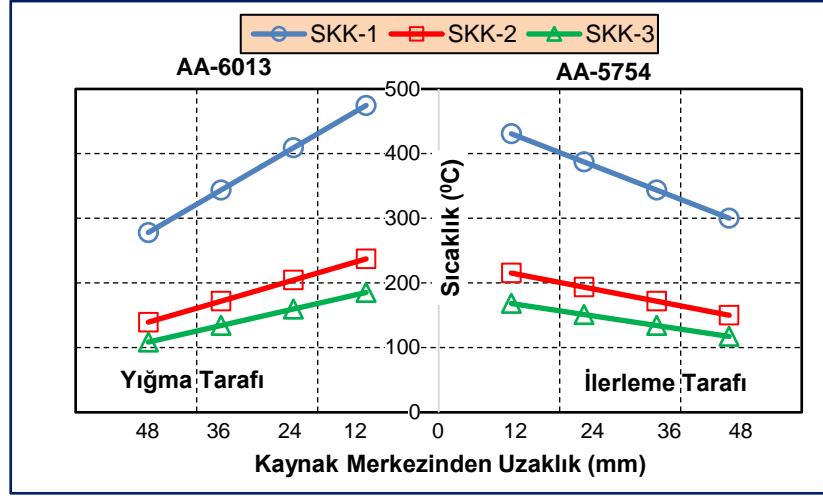
7.4.1. SKK Isı Ölçümü

SKK yöntemi ile üretilen tüm kaynaklı numunelere kaynak merkezinden itibaren her iki dış tarafa doğru 12, 24, 36 ve 48 mm olmak üzere dört farklı noktadan termokupl yardımı ile ısı ölçümü yapılmıştır. Yapılan ölçümler sonucunda elde edilen sonuçlar Çizelge 7.1’de ve elde edilen veriler yardımıyla çizilen grafik Şekil 7.13’de verilmiştir.

Çizelge 7.1. SKK ısı ölçüm sonuçları.

	Sıcaklık (°C)			Ölçüm noktası (mm)	Sıcaklık (°C)			
	SKK-1	SKK-2	SKK-3		SKK-1	SKK-2	SKK-3	
T1	430,73	215,37	168,25	12	474,54	237,27	185,36	T5
T2	387,22	193,61	151,26	24	409,01	204,54	159,77	T6
T3	343,73	171,87	134,25	36	343,56	171,18	134,19	T7
T4	300,24	150,12	117,29	48	278,01	139,46	108,62	T8
AA-5754					AA-6013			

Çizelge 7.1 ve Şekil 7.13’te verilen veriler incelendiğinde birleştirmenin AA-5754 tarafının omuz dibinde ölçülen en yüksek sıcaklık 430,73 °C ile SKK-1 kodlu numunede ölçülürken en düşük sıcaklık 168,25 °C ile SKK-3 kodlu numunede ölçülmüştür. Aynı şekilde birleştirmenin AA-6013 tarafının omuz dibinden ölçülen en yüksek sıcaklık 474,54 °C ile yine SKK-1 kodlu numunede ölçülürken en düşük sıcaklık ise 185,36 °C ile yine SKK-3 kodlu numunede ölçülmüştür. Bu da SKK yöntemi ile üretilen kaynaklarda sabit bir takım dönme devrinde, ilerleme hızı arttırıldığında meydana gelen ısının düştüğünü göstermektedir. Daha önce 7075-T651 Al malzemelerde SKK ile yapılan çalışmada kaynak ilerleme hızının artması ile maksimum sıcaklığın düştüğü rapor edilmiştir [118]. Artan kaynak hızı ile düşen ısı girdisi, mikroyapıdaki tane yapısını değiştirmesi sebebiyle kaynaklı bağlantıların mekanik özelliklerinin değişmesine de neden olmuştur. Sürtünme karıştırma kaynağının AA-7075 ve AA-5086 alüminyum alaşımlarına uygulandığı bir çalışmada takım dönme hızı/ takım ilerleme hızı oranının kaynak ısı girdisinin bir kriteri olarak kabul edildiği ve bu oranın artması ile tanelerde büyümenin meydana geldiği bildirilmiştir [129].



Şekil 7.13. SKK ısı ölçüm grafiği.

Sıcaklık ölçüm sonuçları incelendiğinde dikkat çeken bir başka önemli nokta ise kaynak merkezinden uzaklaştıkça sıcaklıkta meydana gelen düşmedir. SKK-2 kodlu numunenin AA 5754 tarafında kaynak merkezinden 12 mm uzakta ölçülen sıcaklık 215,37 °C iken 24 mm uzaklıktan ölçülen sıcaklık 193,61 °C, 36 mm uzaklıktan ölçülen sıcaklık ise 171,87 °C olarak ölçülmüştür. Bu da kaynak merkezinden uzaklaştıkça sıcaklığın düştüğünü göstermektedir. Kafalı ve Ay [130] AA-6013-T6 alüminyum alaşımını sürtünme karıştırma kaynağıyla birleştirmişler ve kaynak merkezinden uzaklaşıldıkça ısı değerlerinde azalma gözlemlendiğini rapor etmişlerdir.

Kaynak esnasında kaynak merkezinde hatta ısıtıcı olarak işlev gören omuz altındaki tüm alanlarda (kaynak metali ve TEB) sıcaklığın her iki ana malzeme de eşit olduğu bir gerçektir. Ancak AA-6013 ana malzeme tarafında 12 mm ve 24 mm mesafedeki sıcaklıklar AA-5754 ana malzeme tarafındaki aynı mesafelerdeki sıcaklıktan daha yüksek olduğu görülmüştür. Sıcaklıkta meydana gelen bu fark, kaynak işlemi esnasında ısı iletim katsayısı yüksek olan AA-6013 ana malzemenin ısıyı daha fazla çekmesi dolayısıyla da bu malzeme tarafındaki sıcaklıkların yaklaşık % 5-10 arasında yüksek ölçülmesi gayet beklenen bir sonuç olarak değerlendirilebilir. Ayrıca her iki ana malzemenin 36 mm mesafedeki sıcaklıkları birbirine yaklaşık olarak eşit kabul edilebilecek kadar yakın değerler iken 48 mm mesafede ölçülen sıcaklıklarda AA-5754 ana malzeme tarafındaki sıcaklıkların AA-6013 tarafındaki sıcaklıklardan yaklaşık olarak % 7 daha yüksek olduğu tespit

edilmiştir. 48 mm mesafedeki bu sıcaklık farkına AA-5754 ana malzemenin ısı iletim katsayısının düşük olması sebebiyle bu nokta sıcaklık yayılımının AA-6013 ana malzemeye göre daha yavaş olarak gerçekleşmiş olmasından kaynaklanmıştır. Sonuç olarak kaynak merkezine olan mesafenin artmasıyla, ısınma oranı ve soğuma oranı azalmaktadır.

7.4.2. MIG Isı Ölçümü

MIG kaynak yöntemi ile birleştirilen numunelerde oluşan ısı girdisinin etkilerini ortaya koymak amacıyla ısı girdisi hesaplama işlemleri yapılmıştır. Kaynak ısı girdisi Eşitlik 7.1’de verilen formüle göre yapılmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilen veriler Çizelge 7.2’de daha kolay anlaşılması bakımından verilerden yararlanılarak çizilen grafik Şekil 7.11’de verilmiştir.

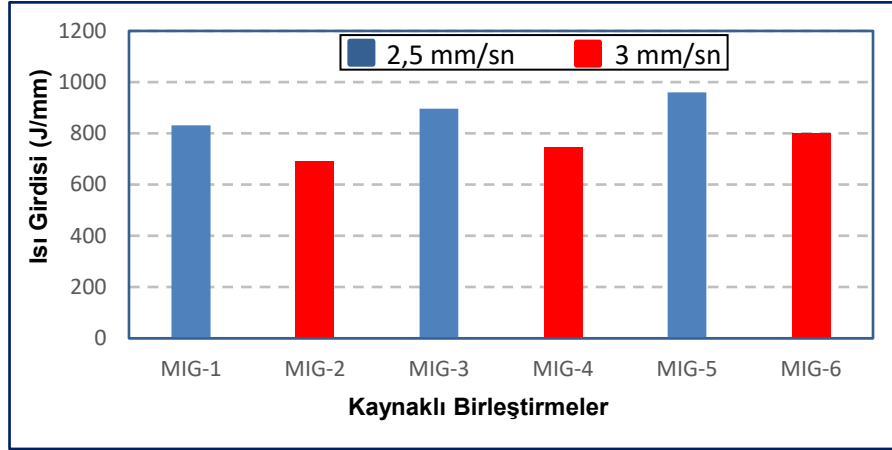
$$\text{Isı Girdisi (J/mm)} = \frac{\text{Akım (A)} \times \text{Gerilim (V)} \times 60}{\text{Kaynak ilerleme hızı (mm/dk)}} \eta \quad 7.1$$

$\eta = \text{Verim}$, (Kaynak yönteminin ısı katsayısı), burada MIG kaynağı için 0.8 alınmıştır.

Çizelge 7.2’deki veriler ve Şekil 7.14 incelendiğinde 2,5 mm/sn kaynak hızında hesaplanan, en yüksek ve en düşük ısı girdileri sırasıyla 960 J/mm ve 832 J/mm’dir. 3 mm/sn kaynak hızında hesaplan en yüksek ve en düşük ısı girdileri ise sırasıyla 800 J/mm ve 693 J/mm olmuştur.

Çizelge 7.2. MIG kaynağı ısı girdisi hesabı sonuçları.

Numune Kodu	Akım (A)	Kaynak Hızı (mm/sn)	Kaynak Gerilimi (V)	Isı Girdisi (J/mm)
MIG-1	130	2.5	20	832
MIG-2		3		693
MIG-3	140	2.5	20	896
MIG-4		3		747
MIG-5	150	2.5	20	960
MIG-6		3		800



Şekil 7.14. MIG kaynağı ısı girdisi grafiği.

Hesaplanan ısı girdileri sonuçlarında ilk göze çarpan nokta kaynak hızının artması ile azalan ısı girdisidir. Örneğin kaynak akımı 150 A sabit tutulup kaynak hızı 2,5 mm/sn'den 3 mm/sn'ye yükseltildiğinde ısı girişinde yaklaşık olarak % 16,7'lik bir azalma meydana gelmiştir. Isı girdisinde meydana gelen bu azalma kaynak metalinin mikroyapısını etkilediğinden dolayı birleştirmelerin mekanik davranışları üzerinde ısı girdisinin önemli bir rolü olduğu bilinmektedir. Zira ısı girdisindeki düşme kaynaklı birleştirmelerin soğuma hızını artırmakta bu da tanelerin kabalaşmasını önlemektedir. Literatürde artan kaynak hızı ile azalan ısı girdisi sebebiyle sertliğin düzenli bir şekilde arttığı rapor edilmiştir [131]. Ayrıca Tatlı vd. yaptıkları bir çalışmada kaynak hızının artması ile azalan ısı girdisi sebebiyle çekme dayanımında iyileşmeler meydana geldiğini bildirmişlerdir [115].

Verilerde önemle üzerinde durulması gereken bir başka nokta ise kaynak hızının sabit kalmasına rağmen kaynak akımının artması ile ısı girdisinde artma meydana gelmesidir. Örneğin kaynak hızı 2,5 mm/sn iken kaynak akımı 130 A'den 140 A'e yükseltildiğinde ısı girdisi yaklaşık olarak % 7,7 oranında artarken kaynak akımı 150 A'e çıkartıldığında ısı girdisi yaklaşık olarak % 15,38 artmıştır. Benzer şekilde kaynak akımı 140 A'den 150 A'e yükseltildiğinde ise ısı girdisinde yaklaşık olarak % 7,14' lük bir artma meydana gelmiştir. Kaynak akımında meydana gelen artışa paralel yükselen ısı girdisi tanelerin kabalaşmasına neden olmuştur. Bu da malzemelere daha önceden kazandırılan dayanım özelliklerini etkilemesi nedeniyle,

üretileen kaynaklı birleştirmelerin mekanik davranışlarında da değişikliğe sebep olmuştur.

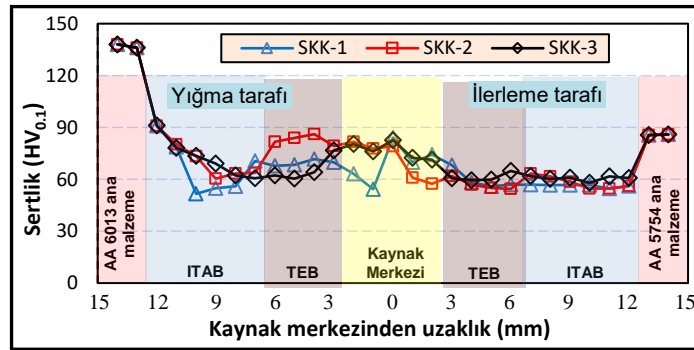
Literatürde daha öncenden yapılan bir çalışmada artan kaynak akımının, ısı girdisini artırması sebebiyle mikroyapıdaki tane boyutunda büyümeye sebep olduğu yazılmıştır [126]. Yu vd. alüminyum alaşımları ile daha önceden yaptıkları bir araştırmada, yüksek ısı girdisinin açık bir şekilde tane boyutunu artırdığı ifade etmişlerdir [132]. Yine literatürde alüminyum alaşımları üzerine yapılan bir çalışmada ulaşılan yüksek sıcaklıkların, çökelti ya da işlenerek sertleştirilmiş alaşımlarda büyük mikroyapısal değişikliklere neden olduğu belirtilmiştir [5].

7.5. SERTLİK ÖLÇÜMLERİ

Kaynak parametrelerinin SKK ve MIG yöntemleriyle birleştirilen numunelerin sertlik dağılımını üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla kaynak bölgelerinde (kaynak metali ve ITAB) sertlik incelemesi yapılmıştır. Sertlik testleri yapılan kaynaklı bağlantıların birleşme merkezinden ana metale doğru yatay doğrultuda sertlik dağılım grafikleri oluşturulmuştur.

7.5.1. SKK Sertlik Ölçümleri

SKK yöntemi ile üç farklı kaynak ilerleme hızında birleştirilen kaynaklı numunelerin sertlik ölçüm sonuçları şekil 7.15’de verilmiştir.



şekil 7.15. SKK sertlik ölçümleri.

Kaynaklı numuneler üzerinde yapılan sertlik ölçümleri sonucunda en yüksek sertlik değerlerinin sırasıyla AA-6013 ve AA-5754 ana malzemelerde olduğu ve yapılan kaynak işlemlerinin ana malzemelerin sertlik değerlerini azalttığı açıkça görülmektedir. Burada üretildikten sonra ısıl işlem görerek mukavemet kazandırılan malzemelerin SKK ile birleştirilmesi esnasında meydana gelen ısı etkisiyle bu özelliklerini kaybettikleri bir gerçektir. Kaynak metalinden ölçülen sertlik sonuçları değerlendirildiğinde en yüksek sertlik 84 HV_{0.1} ile 12,5 mm/dk kaynak hızında (SKK-1) elde edilirken kaynak merkezinde elde edilen en düşük sertlik 79 HV_{0.1} ile 25 mm/dk kaynak hızında (SKK-2) üretilen numunede ölçülmüştür. SKK ile üç farklı kaynak hızında birleştirilen numunelerin kaynak bölgesinin en düşük sertlik değerleri genellikle ITAB'larda belirlenmiştir. AA-6013 alüminyum alaşımının ısı etkisindeki bölgesinde ölçülen en yüksek sertlik değerleri 91,2 HV_{0.1} ile 32 mm/dk kaynak hızında (SKK-3) ölçülürken en düşük sertlik 51,6 HV_{0.1} ile 12,5 mm/dk kaynak hızında (SKK-1) yapılan kaynaklı birleştirmede elde edilmiştir. AA-5754 alüminyum alaşımının ITAB'ında ise en yüksek ve düşük sertlik değerleri sırasıyla 63,4 HV_{0.1} ve 54,7 HV_{0.1} ile 25 mm/dk kaynak hızında (SKK-2) elde edilmiştir.

SKK ile birleştirilen malzemelerin kaynak bölgelerinde ergitme kaynağından farklı olarak termomekanik olarak yeniden kristalleşen bölge (TEB) olduğu bilinmektedir. Bu bölgede termomekanik olarak etkilenme söz konusu olduğundan plastik deformasyon gözlenir ve bu etkileşimde yeniden kristalleşmeye neden olmaktadır. Bu bölge genellikle kaynaklı bağlantılarda kaynak metali ile ITAB arasında kalmaktadır. SKK ile üç farklı kaynak ilerleme hızında birleştirilen kaynaklı numunelerin TEB'lerindeki sertlik değerleri incelendiğinde sertlik değerlerinin genel olarak kaynak metallere ve ITAB'lardan düşük veya yüksek olduğuna dair bir bulguya rastlanılmamıştır. Bir başka ifade ile az miktarda farklılıklar olmak ile birlikte her üç kaynak hızında birleştirilen kaynaklı numunelerin kaynak metali, TEB ve ITAB'larının birbirlerine yakın sertlik değerleri verdikleri belirlenmiştir. AA-6013 alüminyum alaşımının termomekanik olarak etkilenen bölgesinde (TEB) en yüksek sertlik 86,1 HV_{0.1} ile 25 mm/dk kaynak hızında (SKK-2), en düşük sertlik ise 56 HV_{0.1} ile 12,5 mm/dk kaynak hızında (SKK-1) yapılan kaynaklarda ölçülmüştür. AA-5754 alüminyum alaşımının TEB bölgesinde ise en yüksek sertlik 64,9 HV_{0.1} ile 32 mm/dk

kaynak hızında (SKK-3), en düşük sertlik ise 54,4 HV_{0.1} ile 25 mm/dk kaynak hızında (SKK-2) üretilen birleştirmelerden elde edilmiştir.

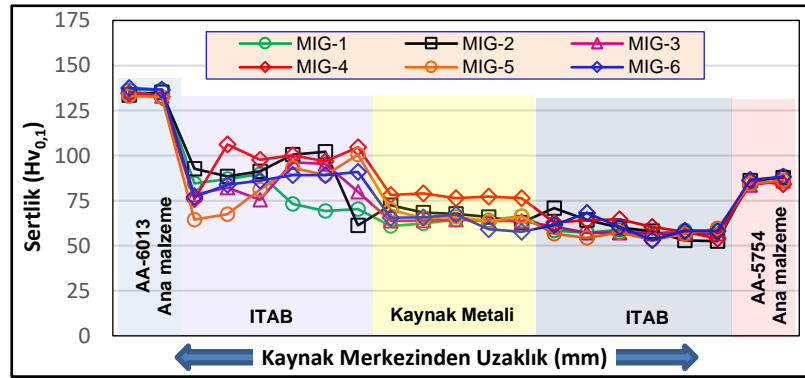
SKK hızının artması/azalmasının birleşme bölgesindeki (kaynak metali, TEB ve ITAB) sertlik dağılımını etkilediği bir gerçektir. Kaynak işlemi esnasında tüm numunelerin kaynak metali yüksek deformasyon etkisiyle her iki ana metalin homojen karışımıyla oluşmaktadır. Dolayısıyla da kaynak çekirdeğinin sertlik dağılımının her iki ana metalden de farklı sertlik karakterinde olduğu görülmüştür. Kaynak merkezinden ölçülen sertlik sonuçları incelendiğinde SKK-1 numunesinin kaynak merkezi sertliğinin SKK-2 ve SKK-3 numunesine göre daha düşük olduğu tespit edilmiştir. SKK-2 ve SKK-3 numunelerinin kaynak merkezi sertlik değerleri ise birbirine yakın değerlerde olduğu belirlenmiştir. Bu sonuçlara göre genel olarak kaynak merkezinin sertlik değerlerinin artan kaynak ilerleme hızıyla arttığı tespit edilmiştir. Kaynak bölgesine verilen ısı miktarı, kaynak edilecek malzemenin ısı iletim özellikleri ve kaynak hızı gibi şartlara bağlı olarak kaynak bölgesinde sıcaklık dağılımı ile soğuma hızını etkilediği bilinmektedir. Bu durumda SKK işlemi esnasında takım ilerleme hızının artması ile kaynak bölgesine giren ısı miktarı azalmakta, azalan ısı girdisi soğuma hızının artmasına dolayısıyla da sertlik artışına sebebiyet vermiştir. Chandrashekar vd. AA-7039 alüminyum alaşımına uyguladıkları SKK sonucunda, diğer parametreler sabit tutulup kaynak hızının 600 dev/dk'dan 800 dev/dk'ya arttığında sertlik değerinin % 7-8 oranında arttığını rapor etmişlerdir [128].

SKK yöntemi ile farklı kaynak ilerleme hızlarında birleştirilen kaynaklı numunelerin sertlik incelemeleri genel olarak değerlendirildiğinde en belirgin değişimin her iki ana malzeme (AA-5754 ve AA-6013) üzerinde mevcut TEB ve ITAB'lardaki dikkate değer sertlik düşüşleridir. Çalışmalarda kullanılan AA-5754 H111 AlMg alaşımlı malzemenin deformasyon sertleştirilmesi yapılarak düşük sıcaklıkta gerginlik giderme ısıl işlemine, AA-6013 T6 AlMgSi alaşımının ise yaşlandırılarak mukavemet kazandırılması işlemine maruz kaldığı bilinmektedir. Dolayısıyla farklı iki yöntem ile mukavemetleri yükseltilmiş bu iki malzemenin hem TEB hem de ITAB'ları kaynak esnasında yüksek sıcaklığa maruz kalmakta dolayısıyla da bu bölgelerde sertlik kayıpları yaşanmaktadır. Aslında bu tür malzemelerin kaynağında bu düşüşlerin meydana gelmesi gayet doğaldır. Yapılan literatür araştırmaları sonucunda lokal

olarak yaklaşık ~ 450 °C ısınan kaynak bölgesinde deformasyonun da etkisiyle GP bölgelerinin çözüldüğü ve Al alaşımlarında sertleştirici çökeltilerin çözünerek daha az sertleştirici özellikteki çökeltilere dönüşeceği bazı araştırmacılar tarafından belirtilmiştir [108,133]. Danial vd. SKK ile kaynak yapılan ısıl işlem görmüş alüminyum alaşımları için, sertliğin kaynak bölgesinde azaldığını, kaynak bölgesinin tane yapısının ısı ve plastik deformasyondan etkilendiğinden, sertliğin ana metale göre daha düşük olduğunu, sonuç olarak sertliğin ısınan bölgede azaldığını rapor etmişlerdir [134]. Yoshihiko vd. farklı malzemeleri (Fe-Al) SKK yöntemi ile birleştirmişler ve birleşmenin Al tarafında ısı girişinin çözelti yapısını bozması sebebiyle TEB ve ITAB sertliğinin ana metalden düşük olduğu ifade edilmiştir [135].

7.5.2. MIG Sertlik Ölçümleri

Sertlik ölçüm işlemleri MIG kaynağı ile farklı kaynak parametrelerinde birleştirilen kaynaklı numunelere de uygulanmış ve elde edilen ölçüm değerleri grafiğe dönüştürülerek Şekil 7.16’da verilmiştir.



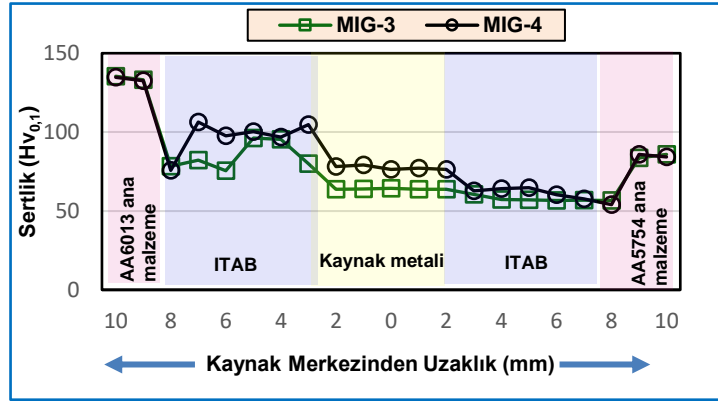
Şekil 7.16. MIG kaynağı sertlik grafiği.

Şekil 7.16’da verilen sertlik grafiği incelendiğinden en belirgin özelliğın her iki ITAB sertliğinin ana malzemelerden düşük olmasıdır. Bir başka ifade ile AA-6013 ITAB’ı AA-6013 ana malzeme sertliğinden, AA-5457 ITAB’ı ise AA-5457 ana malzeme sertliğinden daha düşük değerde ölçülmüştür. Kaynak metali sertlik değeri incelendiğinde ise farklı parametrelerde birleştirilmiş tüm numunelerin sertliklerinin AA-6013 ITAB’ından düşük, AA-5457 ITAB’ından ise daha yüksek olduğu

görülmüştür. Bir başka ifade ile kaynak metalinden AA-6013 alüminyum ana metale doğru gidildikçe sertlikte artmalar meydana gelirken, AA-5754 alüminyum ana metale doğru gidildikçe sertlikte düşmeler olduğu gözlenmiştir.

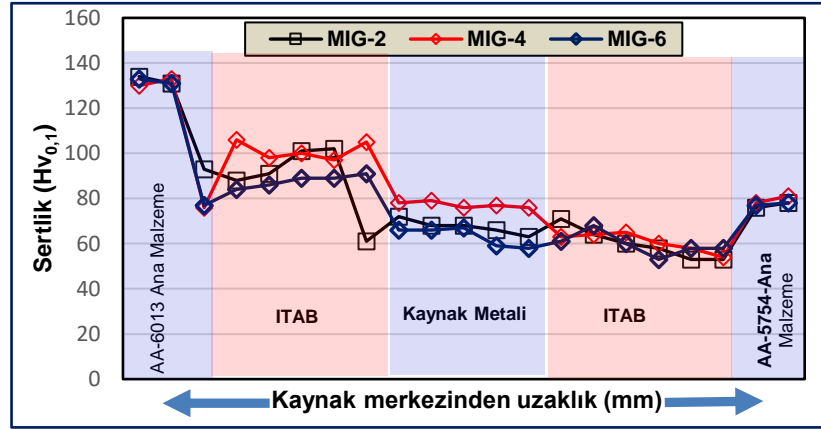
Kaynak metalinde ölçülen sertlik değerleri incelendiğinde en yüksek sertlik değerinin 79 HV_{0.1} ile 180 mm/dk kaynak hızında ve 140 A kaynak akımında birleştirilen (MIG-4) numunede olduğu, en düşük sertliğin ise 58 HV_{0.1} ile 180 mm/dk kaynak hızında ve 150 A kaynak akımında birleştirilen (MIG-6) numunede olduğu tespit edilmiştir. AA-5754 alüminyum alaşımının robot kullanılarak MIG kaynağı ile birleştirildiği bir çalışmada kaynak metali ve ITAB'ın sertliğinin ana metalden düşük olduğu buna ise farklı kaynak hızı ve kaynak akımı nedeni ile oluşan farklı ısı girdisinin etkili olduğunu bildirilmiştir [136]. Benzer şekilde Arankumar vd. yaptıkları bir çalışmada kaynak metalinin sertliğinin hem ana metalden hem de ITAB'dan düşük bulduklarını, buna da ITAB'ın çökelti yapısının katkıda bulunmuş olabileceğini bildirmişlerdir [137].

Ayrıca sertlikte meydana gelen değişimlere kaynak hızının etkisini görebilmek amacıyla kaynak akımını sabit tutulup kaynak hızı yükseltilmesi ile sertlikte meydana gelen değişimler incelenmiştir. Bu amaçla 140 A (MIG-3, MIG-4) kaynak akımında birleştirilen numunelerden ölçülen sertlik değerleri kullanılarak çizilen grafik Şekil 7.17'de verilmiştir. Şekil 7.17 incelendiğinde kaynak hızının artması ile hem kaynak metalinin hem de ITAB'ın sertliğinin arttığı açık bir şekilde görülebilmektedir. Kaynak hızının artması ile azalan ısı girdisi soğuma hızını artırmış bu da malzemelere üretim aşamasında çökelti ya da deformasyon sertleşmesi yolu ile kazandırılan özelliklerin tamamen bozulmadan mikroyapının katılaşmasına neden olması sebebi ile sertlik değerleri artmıştır. Tatlı ve Köse, 5754 alüminyum alaşımını robotik MIG kaynak yöntemi ile birleştirmişler ve numunelerde elde edilen farklı sertlik değerlerinden farklı kaynak hızlarının ve ısı girdisinin sorumlu olduğunu belirtmişlerdir [136]. Literatürde AA 5083-H111 ve AA 6082-T651 alüminyum alaşımı ile yapılan çalışmada düşük kaynak hızının ısı girdisini artırması sebebi ile aşırı yaşlanmaya sebep olduğu ve bunun sonucunda sertliğin etkilendiği rapor edilmiştir [18]. Vargas vd. 6061-T6 alüminyum alaşımı ile yaptıkları çalışmada ısı girişinin mekanik özellikleri yoğun bir şekilde etkilediğini rapor etmişlerdir [70].



Şekil 7.17. Kaynak hızının sertliğe etkisi.

Kaynaklı birleştirmelerde sertliği etkileyen bir diğer unsur ise kaynak akımıdır. Bu nedenle kaynak akımının sertlikte ne tür değişikliklere neden olduğunu belirlemek için aynı kaynak hızında fakat farklı kaynak akımında birleştirilen numunelerin sertlikleri incelenmiştir. Şekil 7.18’de 150 mm/dk (MIG-2, MIG-4, MIG-6) kaynak hızında ve farklı kaynak akımlarında birleştirilen numunelerin sertlik ölçümleri verilmiştir. Kaynak hızının sabit kalıp kaynak akımının artması ile hem AA-6013 ITAB’ının hem de AA-5754 ITAB’nın sertlik değerlerinin düşmesine karşın kaynak metalinin sertliğinin az da olsa yükselmekte olduğu Şekil 7.18’de görülebilmektedir. Literatürde robotik MIG kaynağı ile AA 5754 alüminyum alaşımının birleştirildiği çalışmada ITAB’da sertlik değerinde düşme olurken kaynak metalinde bir miktar artma olduğu söylenirken buna farklı kaynak akımı ile farklı ısı girdisinin sebep olduğu ifade edilmiştir [136]. Üretilen kaynaklı birleştirmelerin her iki (AA-6013 ve AA-5754) taraftaki ITAB’larda meydana gelen sertlik düşmesi, artan kaynak akımına paralel olarak artan ısı girdisinin malzemelerin mikroyapı özelliklerini bozmasından kaynaklanmaktadır. Zira ısı girdisinde meydana gelen artmalar malzemelerin kaynaktan önceki yapısında bulunan çökeltileri ve deformasyon sertleşmesini bozmuş bu da sertlikte düşme olarak kendini göstermiştir. Bu konuda AA-6082 alüminyum alaşımı ile yapılan bir çalışmada kaynak esnasında kaynak metaline verilen ısının artması ITAB’ın çökelti yapısının bozulmasına ve yoğunluğunun azalmasına neden olduğu, mikroyapıda meydana gelen bu değişikliğinde ITAB’ın sertliğinde düşmeye sebep olduğu belirtilmiştir [138].



Şekil 7.18. Kaynak akımının sertliğe etkisi.

Sonuç olarak metalik malzemelerin kaynakla birleştirilmesi ile kaynaklı bölgede meydana gelen metalurjik değişimler, kaynak esnasında uygulanan ısı ve kaynak sonrası soğuma hızı ile yakından ilişkilidir. Kaynak metalinin katılaştıran bölgesi ve ısı tesiri altında kalan bölge mikroyapı bakımından incelendiğinde esas metalden oldukça farklı bir yapı içerir. Kaynak metalinin yapısı, malzemenin kimyasal durumu ve soğuma esnasındaki dönüşümün bir sonucudur. Bir kaynaklı birleştirmenin soğuma özelliği kaynak yapılırken tercih edilen kaynak parametrelerine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Kaynak parametrelerine bağlı olarak değişen soğuma özelliği de sertlikte değişikliklere sebep olmaktadır. Arunkumar ve Sathiya AA-2219 alüminyum alaşımı ile yaptıkları çalışmada kaynak akımının % 82, kaynak hızının, % 15 ve kaynak voltajının % 3 oranlarında kaynak kalitesi üzerinde etkili olduğu belirtmişlerdir [139]. Kaynak parametrelerinde yapılan değişiklikler kaynak bölgesine etki eden ısı girdisini değiştirmiş, değişen bu ısı girdisinin de kaynaklı birleştirmenin tane yapısında farklılıklara ve üretim sırasında malzemelere kazandırılan mekanik özelliklerin bozulmasına neden olmuştur. Bu nedenlerle tane yapısında meydana gelen farklı oluşumlar kaynaklı birleştirmelerin sertlik özelliklerini olumsuz yönde etkileyerek değişikliklere uğramasına neden olmuştur. Rakesh vd. AA-6082 alüminyum alaşımı ile yaptıkları çalışmada ısı girdisinin artması sonucunda birleştirmenin çökelti yapısının bozulduğunu bununla sertlikte düşmelere sebep olduğunu söylemiştir [135].

Son olarak her iki kaynak yöntemi ile birleştirilen numunelerin sertlik özellikleri birbiri ile kıyaslandığında her iki kaynak yönteminde de ölçülen sertlik değerlerinin birbirine yakın olduğu ve kaynak merkezinden AA-6013 ana malzemeye ilerlerken sertliğin arttığı, AA-5754 ana malzemeye doğru ilerlerken sertliğin düştüğü görülmüştür. Ayrıca her iki kaynak yönteminde de en yüksek sertlik AA-6013 alüminyum ana malzemede ölçülürken en düşük sertlikler ise hem SKK hem de MIG kaynak yönteminde AA-5754 tarafındaki ısıdan etkilenen bölgede ölçülmüştür.

Her iki kaynak yöntemi ile üretilen kaynaklı numunelerin sertlik sonuçlarında göze çarpan en önemli nokta ise kaynak hızının artması ile ölçülen sertlik değerlerinin de artmasıdır. Bu da kaynak ilerleme hızının, ısı girdisini ve dolayısıyla soğuma hızını etkilemesi sebebiyle kaynaklı birleştirmelerde sertlik değerleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Ratnesh vd. AA 5052 alüminyum alaşımını SKK ile birleştirdikleri çalışmada kaynak hızının artması ile soğuma hızının arttığını bunun sonucunda da tane kabalaşmasının azaldığını ve sertlikte iyileşmelerin meydana geldiğini söylemişlerdir [140] Chainarong vd. SKK yöntemi ile SSM 356 alüminyum alaşımını birleştirdikleri çalışmada kaynak hızının artması ile sertliğin artma eğiliminde olduğunu buna ise kaynak hızı ile değişen ısı girdisinin sebep olduğunu belirtmişlerdir [127]. Benzer şekilde Yu vd. AA-2024 alüminyum alaşımı ile yaptıkları çalışmada kaynak hızının düşmesi ile sertliğin azaldığını bunu ise azalan kaynak hızı ile artan ısı girdisinin bir sonucu olduğunu rapor etmişlerdir [132].

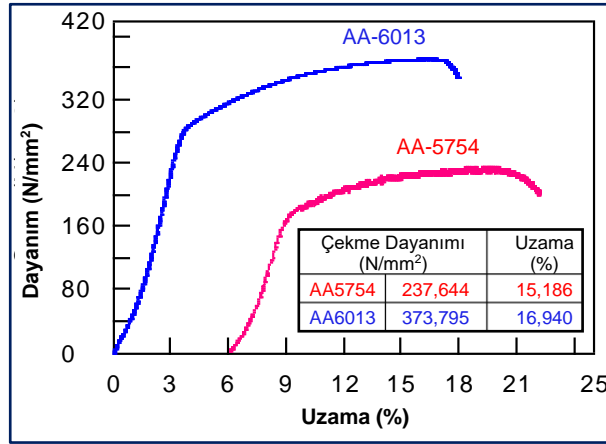
7.6. ÇEKME DENEYİ

Kaynak işlemlerinin malzemelerin çekme ve sertlik gibi mekanik özelliklerinde değişmelere neden olduğu bilinmektedir. Ancak meydana gelen bu değişiklikler yapılan kaynak yöntemine ve tercih edilen kaynak parametrelerine göre farklılar arz etmektedir. Bu nedenle kaynak parametrelerinin ve farklı iki kaynak yönteminin kaynaklı birleştirmelerin çekme dayanımı özelliğinde ne tür bir değişikliğe neden olduğunu belirlemek ve iki kaynak yöntemini (SKK ve MIG) birbirleri ile kıyaslamak amacıyla ana malzemelere (AA-6013 ve AA-5754 alüminyum alaşımı) ve kaynaklı bağlantılara çekme testi uygulanmıştır. Yapılan çekme testi sonucunda Çizelge 7.3'de

ana malzemelerin çekme sonuçları görülürken Şekil 7.19’da çekme deneyinden elde edilen veriler yardımı ile çizilen çekme grafiği verilmiştir.

Çizelge 7.3. Ana malzeme çekme sonuçları

Malzeme	Çekme dayanımı (N/mm ²)		Uzama (%)	
	Ölçüm	Ortalama	Ölçüm	Ortalama
AA-5754	237,469	237,64	15,231	15,18
	236,965		14,984	
	238,484		15,354	
AA-6013	372,952	373,79	17,015	16,94
	373,569		16,934	
	374,874		16,881	



Şekil 7.19. Ana malzemelerin çekme grafiği.

Şekil 7.19 ve Çizelge 7.3 incelendiğinde AA-6013 alaşımının hem çekme dayanımının hem de % uzama değerinin AA-5754 alaşımından yüksek olduğu görülmektedir. Bunun nedeni ise AA-6013 alüminyum alaşımının kimyasal bileşiminin yanında uygulanan ısı işleminin AA-5754 alüminyum alaşımından farklı olmasıdır. Çünkü AA-6013 alüminyum alaşımına üretim esnasında T6 (çökelme sertleşmesi) ısı işleminin uygulanmakta, AA-5754 alüminyum alaşımının üretim esnasında H111 (deformasyon sertleşmesi sonrası hafif düzeyde gerginlik giderme ısı işleminin uygulanması) ısı işleminin uygulanmaktadır. Bu nedenle de AA-6013 alüminyum alaşımının çekme, sertlik vb mekanik özellikleri AA-5754 alüminyum alaşımına oranla da daha yüksektir. Literatürde AA-6013 ve AA-5754 alüminyum alaşımının MIG kaynak yöntemi ile

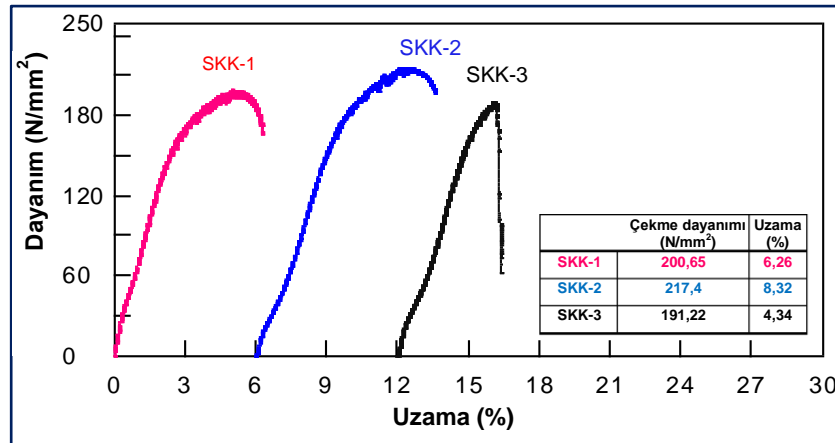
birleştirildiği çalışmada AA-6013 ana malzemenin çekme dayanımının AA-5754 ana malzemenin çekme dayanımından daha yüksek olarak ölçüldüğü belirtilmiştir [62].

7.6.1. SKK Çekme Testi

Kaynaklı numunelerden SKK yöntemi ile üretilen birleştirmelere uygulanan çekme deneyi sonrasında elde edilen veriler Çizelge 7.4’de verilirken bu veriler yardımı ile çizilen çekme grafiği Şekil 7.20’de verilmiştir.

Çizelge 7.4. SKK yöntemi ile birleştirilen numunelerin çekme sonuçları.

Numune Kodu	Çekme Dayanımı (N/mm ²)		Uzama (%)	
	Ölçüm	Ortalama	Ölçüm	Ortalama
SKK-1	199,687	200,65	6,279	6,26
	201,125		6,101	
	201,129		6,412	
SKK-2	216,41	217,4	8,396	8,32
	218,102		8,567	
	217,691		7,989	
SKK-3	190,044	191,22	4,542	4,34
	192,104		4,323	
	191,521		4,165	



Şekil 7.20. SKK çekme grafiği.

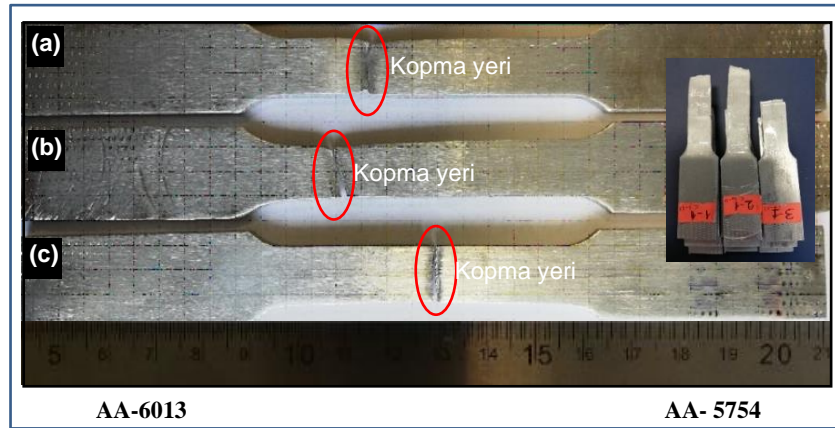
Çizelge 7.4 incelendiğinde bütün çekme örneklerinden elde edilen çekme dayanımı sonuçları her iki ana malzemenin çekme dayanımından da düşük olduğu görülmektedir. Farklı mekanik ve kimyasal özelliklere sahip metallere kaynaklı

birleştirmelerinde çekme dayanımının, mekanik özellikleri düşük olan ana metalin çekme dayanımına yakın olması beklenir. Ana malzemelerin çekme dayanımı ile kaynaklı birleştirmelerin çekme dayanımı karşılaştırıldığında en yüksek çekme dayanımı AA-5754 alüminyum alaşımının çekme dayanımının % 91,48'ine en düşük çekme dayanımı ise AA-5754 alüminyum alaşımının çekme dayanımının % 80,46'sına eşit olduğu görülmüştür. Literatürde AA-6063 alüminyum alaşımının SKK ile birleştirildiği bir çalışmada takım dönme hızının yüksek ısı üretmesi sebebiyle SKK kaynaklarında çekme dayanımının ana malzemenin % 80'i kadar olduğu belirtilmiştir [82]. Zhou vd. AA-5083 alüminyum alaşımı ile yaptıkları çalışmada çekme dayanımının ana malzemenin çekme dayanımından düşük ölçtüklarini ancak akma dayanımının ana malzemeye yakın hatta 15 MPa daha yüksek olarak ölçtüklarini belirtirken, bunun da karıştırma bölgesindeki yeniden kristalleşmeden kaynakladığını ifade etmişlerdir [81]. Bunun yanı sıra SKK yöntemi ile birleştirilen numunelerden ölçülen en düşük ortalama çekme dayanımının, AA-5754 alüminyum alaşımının çekme dayanımından yaklaşık olarak % 19,53 oranında düşük, en yüksek ortalama çekme dayanımının ise yaklaşık olarak % 8 düşük olduğu görülmüştür. Çekme dayanımında meydana gelen bu azalmaya kaynak parametrelerinin etkisi ile değişen mikroyapının neden olduğunu düşünülmektedir. Literatürde AA-6005 alüminyum alaşımının SKK ile birleştirildiği çalışmada çekme dayanımının ana malzemenin çekme dayanımının % 79,2'sine eşit olduğu ifade edilirken, çekme dayanımındaki bu düşmeye kaynak ısısının çökelti yapısını çözmesinin sebep olduğu söylenmiştir [141]. Lakshminarayanan vd. AA-2219 alüminyum alaşımını SKK ile birleştirmişler ve en yüksek çekme dayanımının ana malzemenin çekme dayanımından % 12 daha düşük olarak belirlediklerini buna kaynak hızı vb kaynak koşullarının neden olduğunu ifade etmişlerdir [142]. Benzer şekilde literatürde 6XXX ve 5XXX serileri alüminyum alaşımları ile yapılan çalışmada çekme dayanımlarının ana malzemeye göre % 28 düştüğünü rapor edilmiştir [86,108]. Literatürde AA-6061 alüminyum alaşımı ile yapılan çalışmada ana metalin mikroyasının nispeten homojen ve SKK ile birleştirilen numunelerin mikroyapıları ve sertlikleri değişiklik gösterdiğinden dolayı üretilen kaynaklı numunelerin hem akma hem de çekme dayanımları ana malzemedeki düşük olarak saptadıklarını belirtmişlerdir [143].

SKK yöntemi ile üretilen birleştirmelerin çekme test sonuçları incelendiğinde en yüksek ortalama çekme dayanımı SKK-2 kodlu numunede 217,4 N/mm² olarak belirlenmiştir. En düşük ortalama çekme dayanımı ise SKK-3 kodlu numunede ölçülmüştür. Sürtünme karıştırma kaynağında ilerleme hızı, ısı girdisi miktarını ve soğuma hızını etkileyen önemli bir parametredir. Dolayısıyla kaynak hızı hem mikro yapı hem de sertlik ve çekme gibi mekanik özellikler üzerine etkili bir parametredir. Çizelge 7.4'deki deney sonuçları incelendiğinde kaynak hızı 12,5 mm/dk'dan (SKK-1) 25 mm/dk'ya (SKK-2) çıkarılarak üretilen kaynaklı bağlantıların çekme dayanımı artmış olmasına rağmen kaynak hızınının 32 mm/dk'ya (SKK-3) çıkarılması kaynaklı bağlantıların çekme dayanımlarını olumsuz etkilemiş ve azaltmıştır. Çevik [22], yaptığı çalışmada elde edilen sonuçlara göre 1250 dev/dk devir sayısında 40 mm/dk kaynak hızı ile üretilen SKK numunesinin çekme mukavemeti 20 mm/dk kaynak hızı ile üretilen SKK numunesine göre arttığını, ancak 60 mm/dk kaynak hızı ile üretilen SKK numunesinin çekme mukavemetinin diğer birleştirmelere göre azaldığını tespit etmiş ve SKK işleminde optimum devir sayısı ve kaynak ilerleme hızı kullanıldığında en uygun mekanik özelliklere sahip kaynaklı birleştirmelerin elde edilebileceğini rapor etmiştir. Azimzadegan ve Serajzadeh sürtünme karıştırma kaynağında en ideal kaynak değişkenleri (devir sayısı, kaynak ilerleme hızı vb) tercih edildiğinde en iyi mekanik özellikleri ortaya koyabilecek kaynaklı bağlantıların üretilebileceği rapor etmişler ve 1250 dev/dk devir sayısı kullanılarak üretilen kaynaklı birleştirmelerde ilerleme hızındaki artışın belli bir hıza kadar iyi mekanik özellikleri sağlayabildiği ifade etmişlerdir [108]. Rajakumar vd. ise, SKK yönteminde kaynak parametrelerinin AA-7075-T6 Al alaşımınının kaynak edilebilmesi üzerine etkilerini araştırdıkları çalışmada en uygun kaynak değişkenlerini saptamışlardır. Ulaştıkları verilere göre belirli bir kaynak hızına kadar artan kaynak hızınının birleştirmenin mekanik karakteristiğini olumlu yönde etkilediğini ancak belirli bir hıza ulaştıktan sonra bu olumlu özelliğinin olumsuz yönde değiştiğini söylemişlerdir [144].

Şekil 7.21'de SKK yöntemi ile birleştirilip çekme testine tabi tutulan kaynaklı numunelerin kopma bölgesi görüntüleri verilmiştir. Numunelerinin kopma bölgeleri SKK yöntemi ile birleştirilen numunelerin kopma davranışları incelendiğinde SKK-3 kodlu numunenin kaynak dikişinden kırıldığı, diğer SKK-1 ve SKK-2 kodlu numunelerin AA-5754 ana malzemedan kırıldığı görülmüştür. Kırılmaların AA-5754

alüminyum alaşımı tarafında meydana gelmiş olmasının nedeni bu alüminyum alaşımının akma, çekme ve sertlik gibi mekanik özelliklerinin, AA-6013 alüminyum alaşımının mekanik özelliklerinden daha düşük olmasıdır. Bunun dışında SKK yönteminde omuz ve iş parçasındaki sürtünmeden dolayı ortaya çıkan ısının ve mekanik karıştırmanın bu bölgelerdeki mikroyapıyı bozması da kırılmanın SKK-3 kodlu numunede kaynaktan gerçekleşmesinde etkili olmuştur. Bunun yanı sıra mikroyapının bozulması, üretim esnasında malzemelere gerek deformasyonla gerekse ısı işlem yoluyla kazandırılan çekme dayanımı, sertlik vb mekanik özelliklerde de bozulmalar meydana getirmiştir. Bu durum da, kırılmaların kaynak dikişinde meydana gelmesinde önemli rol oynamıştır. Şık vd. AA-2024 alüminyum alaşımı ile yaptıkları bir çalışmada çekme deneyi sonucunda numunelerin geçiş bölgesinden koptuğunu ve buna tane yapısının bozulmasının ve kaynak hatalarının neden olduğunu belirtmişlerdir [145].



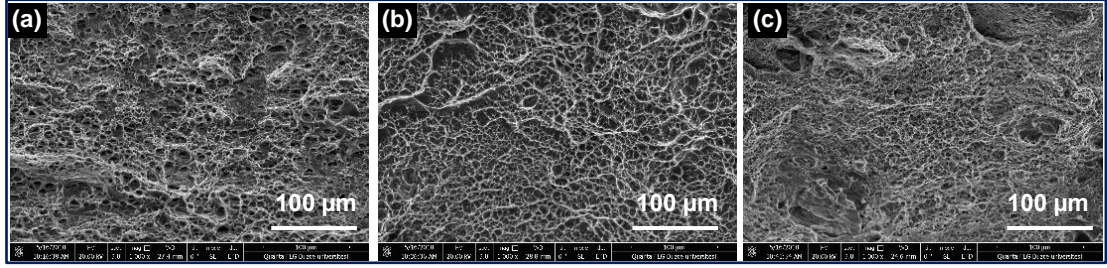
Şekil 7.21. SKK numunelerinin kopma bölgeleri a) SKK-1, b) SKK-2, c) SKK-3.

SKK işlemlerinde kaynak ilerleme hızında meydana gelen değişiklikler kaynak bölgesine giren ısı miktarını etkilemektedir. Bu da numunelerin soğuma hızlarında değişikliğe sebep olması nedeniyle mikroyapıdaki tane ve çökelti yapısını değiştirmektedir. Sonuç olarak kaynak hızının oluşturduğu bu değişiklikler üretilen kaynaklı birleştirmelerin çekme dayanımlarında değişmeye zorlamaktadır. Palanivel vd. SKK yöntemi ile AA-5083 ve AA-6351 alüminyum alaşımını birleştirdikleri çalışmada kaynak ilerleme hızının birim kaynak uzunluğu başına düşen sürtünme ısısı ve bu ısıya bağlı olarak tane ve çökelti yapısını etkileyen önemli bir parametre olduğu belirterek, kaynak hızının çekme dayanımını etkilediğini rapor etmişlerdir [116]. SKK işlemi

sırasında sürtünme ve karıştırmadan dolayı kaynak bölgesinde yoğun bir plastik deformasyon ve ısı oluşmaktadır. Bu durumda da kaynak metali ve çevresinde yeniden kristalleşmeler meydana gelirken aynı zamanda bu bölgelerde üretim sırasında kazandırılan mikroyapı özellikleri ve deformasyon sertleşmesi de bozulmaktadır. Kaynak sürecinin yapıda meydana getirdiği bu değişimler sonuç olarak malzemelerde çekme dayanımında düşmelere neden olmuştur. Benzer şekilde literatürde AA-7075 T6 alüminyum alaşımının SKK ile birleştirildiği çalışmada SKK kaynaklarında karıştırma bölgesinin yüksek plastik deformasyona ve ısı girdisine maruz kaldığı bununda karıştırma bölgesindeki daha önceden kazandırılmış olan mikroyapı özellikleri ile deformasyon sertleşmesini etkilediğini ve bu oluşumunda mukavemet artırıcı çökeltilerin çözünmesine ve tanelerin kabalaşmasına neden olduğu bildirilmiştir [108].

SKK kaynak yöntemi ile birleştirilen numunelerin % uzama değerleri incelendiğinde bütün kaynaklı birleştirmelerin % uzama değerlerinin ana malzemelerin % uzama değerlerinden düşük olduğu görülürken, en yüksek ortalama % uzama değeri SKK-2 kodlu numunede % 8,32, en düşük % uzama değeri ise SKK-3 kodlu numunede % 4,34 olarak ölçülmüştür. Ayrıca kaynaklı numunelerin yüzde uzama değerleri ile ana malzemelerin % uzama değerleri incelendiğinde en yüksek % uzama değerlerinin AA-5754 ana malzemenin % uzama değerine göre % 45.19, en düşük % uzama değerinin ise % 71,41 daha düşük olduğu görülmüştür. Hua-Bin vd. AA-5754 alüminyum alaşımı ile yaptıkları çalışmada % uzama değerlerinin ana metalden düşük olduğu ve tünel kusurlarının çekme ve % uzama üzerinde çok ciddi bir etkiye sahip kusurlar olduğunu söylenmiştir [146].

SKK yöntemi ile birleştirilmiş olan numunelerde meydana gelen kırılma tiplerini ve kırılma yüzeylerindeki hataları belirlemek amacıyla SEM kırık yüzey tarama çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu amaçlarla yapılan SEM taraması sonucunda SKK yönteminde elde edilen numunelerin görüntüleri Şekil 7.22'de verilmiştir.



Şekil 7.22. SKK yöntemi ile birleştirilen numunelerin kırık yüzey SEM görüntüleri
a) SKK-1, b) SKK-2, c) SKK-3.

Şekil 7.22’de verilen SKK yönetimi ile birleştirilmiş numunelerin kırık yüzey SEM görüntüleri incelendiğinde numunelerde sünek formda kırılmaların oluştuğu tespit edilmiştir. Nan vd. AA-5083 alüminyum alaşımı ile yaptıkları çalışmada benzer şekilde kırık yüzeyin iyi süneklik özelliğine sahip şekilde çeşitli ebatlarda ve derinliklerde birçok çukurcuklardan meydana geldiğini rapor etmişlerdir [81]. Benzer şekilde AA-2024-T351 alaşımı ile daha önceden yapılan bir başka çalışmada son yırtılma bölgesinde kırılmanın sünek davranış sergilediği bildirilmiştir [134].

Ayrıca kaynaklı numunelerin kırık yüzeylerinde mikro porozite ve gözenek kusurlarının oluştuğu görülebilmektedir. Kırık yüzey SEM taramasıyla ilgili olarak daha evvelden yapılan bir çalışmada kırık yüzeyin mikro boşluklar ihtiva ettiğini ve mikro boşlukların oluşumunun ve yoğunluğunun kaynak hızına bağlı olarak arttığı belirtilmiştir [128]. Benzer şekilde Zhili vd. kırık yüzey boyunca mikro çatlakların ve değişik şekil ve boydaki boşlukların dağıldığını bildirmişlerdir [7]. Kırık yüzeyde görülen bu mikro boşlukların oluşmasına, sürtünme yoluyla kaynak bölgesine giren ısının etkili olduğu düşünülmektedir. Literatürde Umasankar ve Vijay tarafından yapılan çalışmada mikro boşluk oluşumunda karıştırıcı takım tarafından üretilen plastik deformasyonun ve ısının etkili olduğu ifade edilmiştir [83]. Ayrıca literatürde AA-7039 alüminyum alaşımı ile yapılan çalışmada SKK kaynakların kırılma şeklinin ortaya çıkmasında tercih edilen kaynak parametrelerinin önemli bir etkisi olduğu söylenmiştir [128]. Kırılma yüzeylerinde oluşan mikro hataların çekme dayanımını düşürücü şekilde etki ettiği belirlenmiştir. Ahmed vd. AA-7075 ve AA-5083 alüminyum alaşımlarının SKK ile birleştirdikleri çalışmada, çeşitli nedenlerle oluşan zayıf birleştirmelerin çekme dayanımlarının, ana metallerin çekme dayanımlarından daha düşük çıktığını rapor

etmişler ve bu durumu ana metal ile karıştırma bölgesi arasındaki arayüzeyde meydana gelen erken kırılmaya atfetmişlerdir [123].

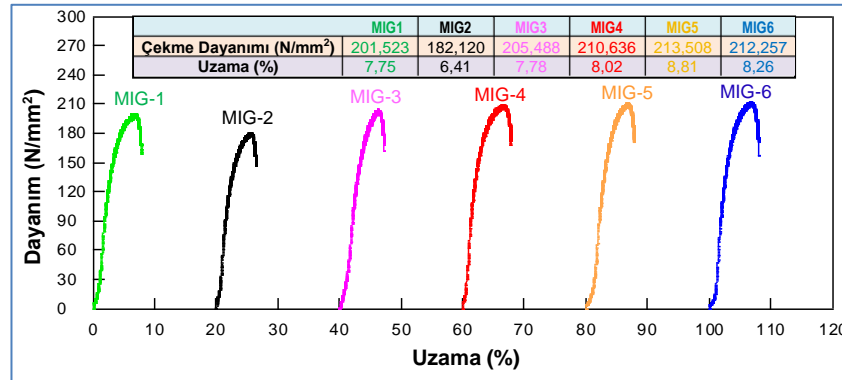
7.6.2. MIG Çekme Testi

MIG kaynak yöntemi ile üretilen birleştirmelerin çekme deney sonuçları Çizelge 7.5’de verilirken elde edilen veriler yardımı ile çizilen çekme grafiği de Şekil 7.23’de verilmiştir. MIG kaynak yöntemi ile birleştirilen numunelere uygulanan çekme deneyi sonuçları incelendiğinde ise kaynaklı numunelerin çekme dayanımlarının her iki ana metalden düşük olduğu görülmektedir. MIG kaynak yöntemi ile birleştirilen numunelerin çekme dayanımı sonuçlarını ana malzemelerin çekme dayanımı ile karşılaştırıldığında en yüksek çekme dayanımı AA-5754 ana malzemenin çekme dayanımının % 89,85’ine en düşük çekme dayanımı ise % 76,64’üne eşit olduğu görülmüştür. Malzemelerin mekanik özelliklerini belirlemede ana kriter olan çekme dayanımının, farklı metallerin birleştirildiği uygulamalarda mekanik özellikleri düşük olan ana malzemeye eşit ya da ona yakın olması istenir. MIG kaynak yöntemi ile yapılan kaynakların çekme deneyi sonuçlarının AA-5754 ana malzemenin çekme dayanımına yakın olması birleştirmelerin başarılı olduğunu göstermektedir. Sen vd. AlMgSi alaşımı alüminyum gaz metal ark kaynağı ile birleştirdikleri çalışmada kaynaklı numunenin çekme dayanımının ana malzemeye göre % 11,2 daha düşük olduğunu ve bu dayanım kaybının ITAB’ın yumaşmasına ve kırılma eğilimi göstermesinden kaynaklandığını ifade etmişlerdir [147]. Ambriz vd. AA-6061 T6 alüminyum alaşımları ile yaptıkları çalışmada çekme dayanımının ana metalden düşük olduğunu, buna ise sıcaklığın çökelti yapısını etkilemiş olmasından kaynaklandığını belirtmişlerdir [148].

MIG kaynak yöntemi ile birleştirilen örneklerde elde edilen en düşük çekme dayanımı 182,12 N/mm² olarak MIG-2 kodlu 130 A kaynak akımı ve 180 mm/dk kaynak hızında gerçekleştirilen kaynaklı numunelerde, en yüksek çekme dayanımı 213,508 N/mm² ile MIG-5 kodlu 150 A kaynak akımı ve 150 mm/dk kaynak hızında yapılan kaynaklı numunede elde edilmiştir.

Çizelge 7.5. MIG yöntemi ile birleştirilen numunelerin çekme sonuçları.

Kaynaklı numuneler	Çekme dayanımı (N/mm ²)		Uzama (%)	
	Ölçüm	Ortalama	Ölçüm	Ortalama
MIG-1	202,132	201,523	7,478	7,75
	201,425		7,985	
	201,012		7,787	
MIG-2	182,256	182,12	7,006	6,41
	182,236		6,012	
	181,869		6,222	
MIG-3	205,656	205,488	7,955	7,78
	204,891		8,028	
	205,919		7,358	
MIG-4	209,795	210,636	7,716	8,02
	210,647		8,132	
	211,468		8,215	
MIG-5	213,981	213,508	8,979	8,81
	212,884		8,657	
	213,659		8,795	
MIG-6	211,968	212,257	8,425	8,26
	212,329		8,352	
	212,476		8,011	



Şekil 7.23. MIG kaynaklı numunelerin çekme grafikleri.

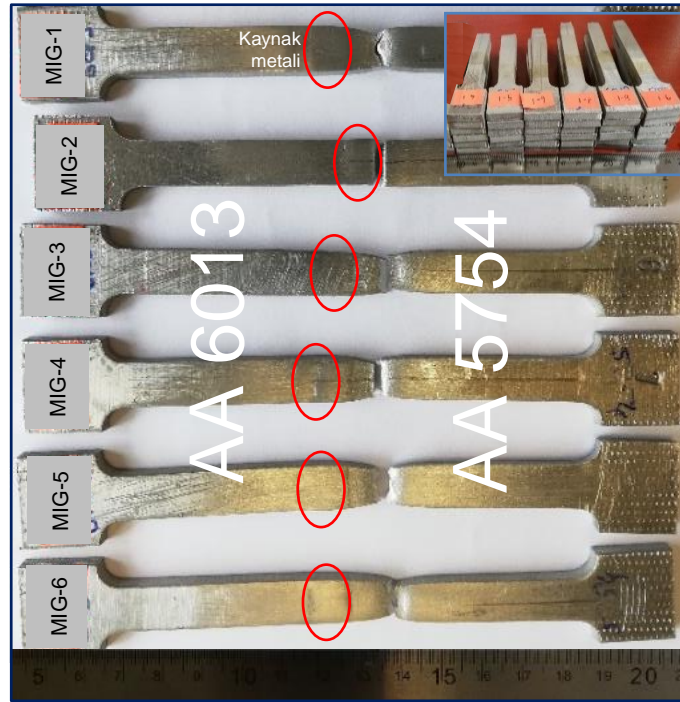
Kaynaklı birleştirmelerde kaynak bölgesine giren ısı miktarının birleştirmenin mekanik özellikleri üzerinde önemli etkilerinin olduğu tüm bilim adamları tarafından kabul edilmektedir. Ancak bu çalışmada MIG kaynak yöntemi ile birleştirilen numunelerde kaynak akımının artması ile artan ısı girdisi veya kaynak hızının artması ile azalan ısı girdisinin çekme deneyi sonuçlarını çok yoğun bir şekilde etkilediğine dair net bir sonuca ulaşılmamıştır. Zira MIG-2 kodlu numune dışında bütün

birleştirmelerde çekme değerleri birbirine yakın çıkmıştır. Fakat çok az da olsa kaynak hızının artması ile çekme dayanımında da artmalar meydana geldiği görülmüştür. Bunun sebebinin ise artan kaynak hızı ile azalan ısı girdisi sonucunda hızlı soğumanın olduğu düşünülmektedir. Arankumar vd. AA-2219 alüminyum alaşımını MIG kaynağı ile birleştirdikleri ve kaynak parametrelerinin mekanik özellikler üzerindeki etkilerini araştırdıkları çalışmada kaynak akımının, kaynak hızının ve kaynak voltajının kaynaklı birleştirmenin kalitesini etkilediğini ifade etmişlerdir [139]. Literatürde 5000 ve 6000 serisi alüminyum alaşımlarının otomatik MIG kaynak yöntemi ile birleştirildiği çalışmada kaynak ısı girdisinin azalmasının ya da artmasının çekme dayanımının artmasına veya azalmasına neden olduğuna dair net bir sonuca ulaşamadıklarını bildirmişlerdir [62].

MIG kaynağı ile birleştirilmiş numunelerin % uzama değerleri incelendiğinde kaynak akımının artması ile % uzama değerlerinde çok az olmakla birlikte artmaların meydana geldiği görülmektedir. Örneğin 150 mm/dk kaynak hızı sabit tutulup kaynak akımı 130 A'den (MIG-1) 140 A'e (MIG-3) çıkarıldığı zaman % uzama değerinde yaklaşık olarak % 0,39'lik bir artış meydana gelmiştir. Benzer şekilde yine 150 mm/dk kaynak hızında kaynak akımı 140 A'den (MIG-3) 150 A'e (MIG-5) çıkartıldığında ise uzama değerinde yine % 13,2'lik bir artış meydana gelmiştir. Karadağ vd. alüminyum alaşımını TIG kaynağı ile birleştirdikleri çalışmada kaynak akımının artması ile % uzama değerinin arttığını, kaynak akımının azalması ile % uzama değerinin düştüğünü ifade etmişlerdir [149]. Bunun dışında MIG kaynak yöntemi ile üretilen numunelerin % uzama değerleri ile ana malzemelerin yüzde uzama değerleri karşılaştırıldığında en yüksek uzama değeri AA-5754 ana malzemenin % uzama değerinden % 42, en düşük % uzama değerinin ise % 57,8 daha düşük olduğu belirlenmiştir. Yürük ve Kahraman, AA-1050 ve AA-5754 alüminyum alaşımlarını MIG kaynağı ile birleştirdikleri çalışmada kaynaklı numunelerin % uzama değerlerinin ana malzemelerin % uzama değerlerinden düşük olarak belirlediklerini ve bunun ise çekme deneyi sonucunda numunelerin AA-1050 alüminyum alaşımının ITAB'ından kopmasından kaynaklandığını rapor etmişlerdir [149]. Aynı şekilde Vasu vd. alüminyum alaşımlarını MIG ve TIG ile birleştirdikleri çalışmada MIG ile birleştirilen numunelerin % uzama değerlerinin ana malzemelere göre % 30,5 daha düşük olarak ölçtüklerini ve bu durumun ortaya çıkmasında ergitme kaynaklarında ITAB'ın tane

yapısının irileşmesi sebebiyle sünekliğin azalmasının sebep olduğunu rapor etmişlerdir [56].

Şekil 7.24’de MIG kaynağı ile birleştirilen kaynaklı numunelerin kopma bölgeleri görülmektedir. MIG kaynak yöntemi ile kaynatılan parçaların kırılma davranışları incelendiğinde MIG-2 kodlu numune hariç bütün kırılmaların kaynaklı bağlantıların AA-5754 alüminyum alaşımının ITAB’ında (ısı tesiri altındaki bölge) meydana geldiği görülmektedir. MIG-2 kodlu numunenin kaynak parametrelerinden ziyade kaynak esnasındaki kısmi merkezleme probleminden dolayı kökün tam merkezde oluşmadığı bunun da birleşmenin AA-6013 tarafında kısmi kaynak hatasına sebep olduğu daha önce belirtilmiştir.

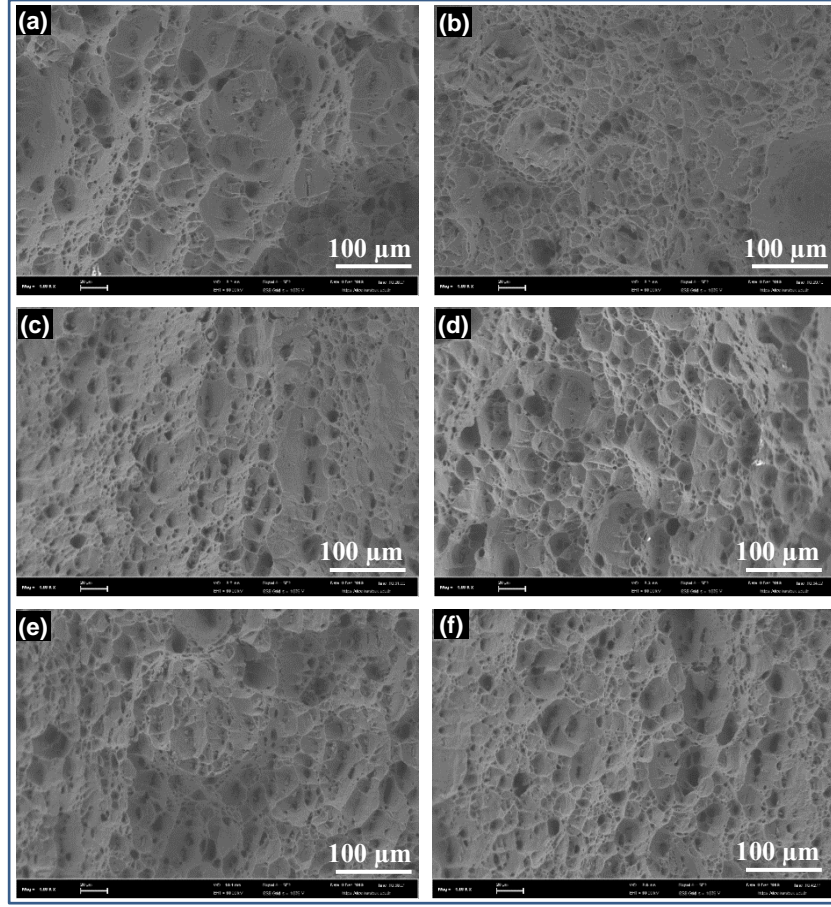


Şekil 7.24. MIG kaynaklı numunelerin kopma bölgeleri.

MIG-2 numunesi hariç kırılmaların ITAB’da meydana gelmesinin sebebi kaynak esnasında meydana gelen ısının ana malzemeye üretim sırasında kazandırılan mikroyapı ve mukavemet özelliklerini bozmasının sebep olmuş olabileceği düşünülmektedir. Çünkü kaynak sırasında oluşan ısı malzemeye çökelti yoluyla ya da deformasyon yöntemi ile kazandırılan yapısının bozulmasına ve mikroyapısının daha

kaba taneli bir yapıya dönüşmesine neden olmuştur. Literatürde TIG kaynak yöntemi ile alüminyum alaşımının kaynatıldığı çalışmada yüksek ısı girdisinin malzemelerin mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkilediği rapor edilmiştir [150]. Aynı şekilde literatürde 6061-T6 alüminyum alaşımı ile yapılan çalışmada kaynak sırasındaki ısı girişinin özellikle ITAB'ın kaynaktan önceki yapısını bozması sebebiyle mekanik özellikler üzerinde etkili olduğunu bildirilmiştir [70]. Ahmad ve Bakar 6061 alüminyum alaşımı ile yaptıkları bir çalışmada bütün örneklerde kopmanın ITAB'da meydana geldiğini ve buna ise ITAB'ın diğer bölgelere göre daha düşük plastik deformasyon özelliğine sahip olmasının neden olduğunu belirtmişlerdir [151].

Farklı kaynak parametrelerinde MIG kaynak yöntemi ile üretilen birleştirmelerin çekme deneyi sonrasında oluşan kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri Şekil 7.25'te verilmiştir. Şekil 7.25'teki MIG kaynak yöntemi ile birleştirilen numunelerin kırık yüzey SEM tarama görüntüleri incelendiğinde bütün numunelerin kırık yüzeylerinin çukurcuklar içerdiği görülmektedir. Kırık yüzeylerde görülen bu çukurcuklarda kırılmaların sünek olarak gerçekleştiğini ifade etmektedir. Literatürde AA-2000 serisi alüminyum alaşımının TIG kaynağı ile birleştirildiği çalışmada kırılma yüzeyinin sünekliğin bir göstergesi olan çukurcuklar içerdiği ifade edilmiştir [39]. Ahmad ve Bakar AA-2000 serisi alüminyum alaşımını TIG kaynağı ile birleştirmişler ve çekme deneyi sonrasında oluşan kırık yüzeye sünek kırılmanın göstergesi olan çukurcukların hakim olduğunu söylemişlerdir [151]. Aynı şekilde Singh vd. AA-6000 serisi alüminyum alaşımı ile yaptıkları çalışmada kopma bölgesinin çekme gerilmesi altında sünek kırılmanın meydana geldiğini gösteren çukurcuklar içerdiği söylenmiştir [152]. Ayrıca kırık yüzeylerde meydana gelen çukurcuklar dikkatli bir şekilde incelendiğinde, çukurcukların elipsi andıran bir şekle sahip olduğu görülmektedir. Benzer şekilde Vasu ve arkadaşları Alüminyum ve alaşımlarının GMAW ve GTAW ile birleştirdikleri çalışmada GMAW ile birleştirilen numunelerin kırılma yüzeylerinde bulunan çukurcukların kenarlarının yumuşak elips şeklinde olduğu rapor edilmiştir [56].



Şekil 7.25. MIG kaynaklı numunelerin kırık yüzey SEM görüntüleri; a) MIG-1, b) MIG-2, c) MIG-3, d) MIG-4, e) MIG-5, f) MIG-6.

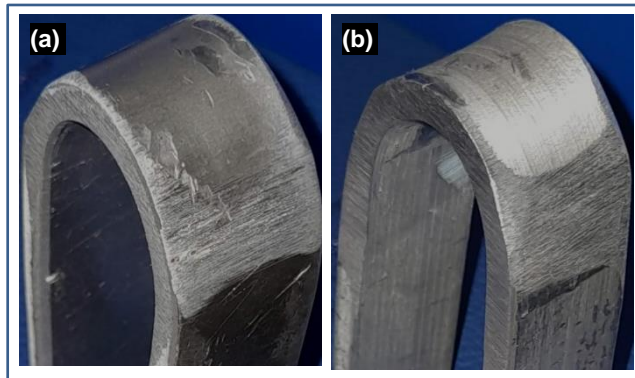
Sonuç olarak SKK ve MIG kaynak yöntemleri ile birleştirilen numuneler bir arada incelediğinde her iki kaynak yönteminde de çekme dayanımlarının ve % uzama değerlerinin ana malzemelerin mekanik özelliklerinden düşük olduğu görülmektedir. Mekanik özelliklerde meydana gelen düşmenin nedeni ise kaynak sırasında oluşan ısının etkisi ile malzemelere üretim sırasında kazandırılan mekanik özelliklerin bozulması sebep olmaktadır. Daha önce benzer şekilde yapılan bir çalışmada, Vargas vd. AA-6061-T6 alüminyum alaşımını TIG kaynağı ile birleştirmişler ve kaynak sırasındaki ısı girişinin özellikle ITAB'ın kaynaktan önceki yapısını bozması sebebiyle mekanik özellikler üzerinde etkili olduğunu bildirmişlerdir [70].

Her iki kaynak yöntemi ile üretilen birleştirmelere uygulanan çekme dayanımı verimliliği işlemlerine göre SKK yöntemi ile üretilen numunelerden elde edilen en yüksek kaynak verimi % 91,5 ile SKK-2 kodlu numunede en düşük kaynak verimi ise

% 80,5 ile SKK-3 kodlu numunede elde edilmiştir. MIG kaynak yöntemi ile üretilen numunelerde en yüksek kaynak verimi % 89,5 ile MIG-5 kodlu numunede, en düşük kaynak verimliği ise % 76,6 ile MIG-2 kodlu numunede elde edilmiştir. Kaynak verimliği hesaplamaları sonucunda SKK yöntemi ile üretilen kaynaklı birleştirmelerin çekme kuvvetlerine karşı dayanımları, MIG kaynağı ile üretilen numunelere oranla daha yüksek olduğu açık bir şekilde görülebilmektedir. Taban 5XXX serisi alüminyum alaşımını SKK, TIG ve MIG kaynak yöntemlerini kullanarak birleştirdiği çalışmasında, SKK yöntemi ile birleştirilen numunelerin ergitme yöntemine dayanan kaynaklara oranla daha iyi çekme dayanımı performansı sergilediğini ifade etmiştir [31].

7.7. EĞME DENEYİ

Eğme gerilmesine maruz kalan numunelerde eğmenin dış yüzüne gelen bölümünde çekme, iç yüzünde ise basma gerilmeleri meydana gelmektedir. Eğer yapılan bir kaynaklı birleştirmenin, kaynak metalinde ya da ITAB'ında her hangi bir boşluk veya çatlak varsa bu noktalarda, çekme ve basma gerilmeleri tarafından gerilme yığılmaları oluşturulacaktır. Bu gerilme yığılmaları da zamanla kopmalara neden olmaktadır. Bu nedenle kaynaklı birleştirmelerin yerinde görevini yaparken eğme gerilmelerine maruz kaldıklarında nasıl bir davranış sergileyecekleri görebilmek amacıyla numunelere 180° derece eğme testi uygulanmıştır. Şekil 7.26'da ana malzemelerin eğme testi sonrası görüntüleri verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde her iki ana malzeme de 180° sorunsuz olarak eğilebilmiştir.

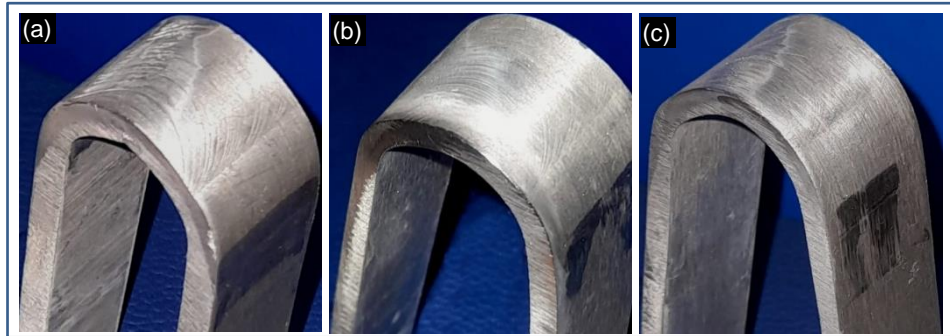


Şekil 7.26. Ana malzemeleri eğme deneyi görüntüleri a) AA6013-T6, b) AA5754-H111.

7.7.1. SKK Eğme Testi

Şekil 7.27’de SKK yöntemi ile birleştirilmiş numunelerin kep eğilme davranış görüntüleri ve Şekil 7.28’de SKK kök eğme görüntüleri verilmiştir. Yapılan testler sonucunda her üç ilerleme hızında da herhangi bir çatlama veya kırılma oluşmamıştır. SKK işlemi sırasında omuzun ve karıştırıcı takımın kaynak bölgesine sürmesi sonucunda meydana gelen ısı ve plastik deformasyon ile AA-6013 alüminyum alaşımının T6 ısıl işlemi ile kazanmış olduğu çökelti yapısını bozmuş ve sertleştirici etkileri azalmıştır.

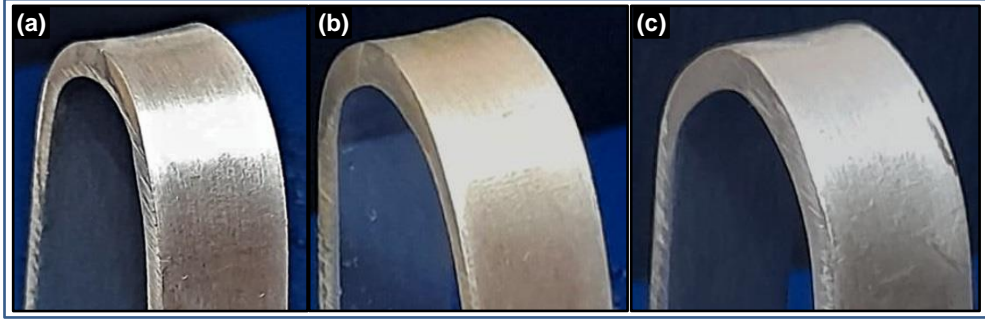
Benzer şekilde AA-5754 alüminyum alaşımının ise soğuk deformasyon ile kazandığı sertlik özelliği bir miktar azalmıştır. Dolayısıyla kaynak esnasındaki oluşan ısı kaynak bölgesinin yumuşamasına ve esas metallerin üretim sırasındaki kazanmış oldukları sertliklerin azalmasına neden olmuştur. Bu durum kaynak bölgesinin daha sünek bir özellik göstermesine ve eğilme sırasında çatlama oluşmamasına sebep olmuştur. Özellikle AA-6013 alaşımı daha sert bir karaktere sahip olmasına rağmen eğilme sırasında çatlama oluşturmaması kaynaklı birleştirmeden istenilen özelliklerin elde edildiğini göstermektedir. Taban 5000 serisi alüminyum alaşımını SKK yöntemi ile birleştirmiş ve eğme testi uygulamıştır. Yaptığı eğme testi sonucunda herhangi bir çatlama ve kopma görülmediğini belirtmiştir [31].



Şekil 7.27. SKK eğme testi görüntüleri a) SKK-1, b) SKK-2, c) SKK-3.

Şekil 7.28’de de görüldüğü gibi SKK yöntemi ile birleştirilen numunelerin kök eğme deneyi sonucunda herhangi bir çatlama veya kırılma meydana gelmemiştir. Özellikle kök eğme testlerinin kep eğme testlerine göre daha hassas oldukları bilinmektedir. Bu

yüzden kaynaklı numunelerde herhangi bir eğme hatasının meydana gelmemesinin en büyük nedeninin numunelerin özellikle alt kısımlarının taşlanarak tünel kusurlarının giderilmiş olmasıdır. Sayer AA-6063 alüminyum alaşımını SKK yöntemi ile birleştirdiği çalışmada, yapılan kök eğme testleri sonucunda herhangi bir çatlama veya kırılmanın oluşmadığını bildirmiştir [153].



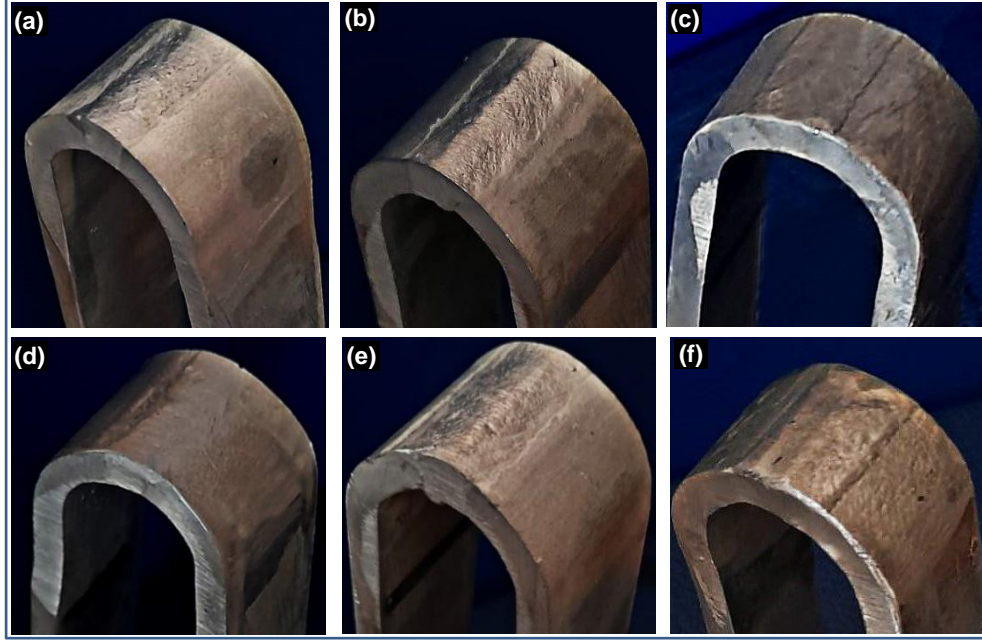
Şekil 7.28. SKK kök eğme testi görüntüleri a) SKK-1, b) SKK-2, c) SKK-3.

7.7.2. MIG Eğme Testi

Aynı şekilde MIG kaynak yöntemi ile birleştirilen numunelerin eğilme gerilmelerine karşı sergileyecekleri davranışlarını görmek ve kaynak sırasında tercih edilen parametrelerin bu davranışlar üzerindeki etkilerini ortaya koymak amacıyla birleştirmelere kep ve kök eğme testleri uygulanmıştır. Bu test alın kaynaklı birleştirmelerin yüzeyindeki veya yakınındaki sünekliliğini ve/veya birleştirme yüzeyinde veya yüzeye yakın kusurların mevcut olup olmadığını değerlendirmek için yapılmıştır. Kep eğme testleri sonucunda çekilen görüntüler Şekil 7. 29’da verilirken kök eğme testleri sonucunda elde edilen görüntüler Şekil 7.30’da verilmiştir.

Şekil 7.29’daki kep eğme görüntüleri incelendiğinde tüm kaynak parametrelerinde 180° eğme testinde herhangi bir çatlama ya da kopma meydana gelmemiştir. Ayrıca kaynaklı numunelerin eğme bölgesinde herhangi bir süreksizlik (ergime noksanlığı, gözenek, çatlak vb.) hatasına rastlanılmamıştır. Bilindiği gibi özellikle farklı malzemelerin birleştirildiği kaynaklı bağlantılar kaynak sonrası konstrüksiyona göre şekil verilip kullanılabilirler. Bu yüzden bu tür konstrüksiyon malzemelerinin bu testlerden başarıyla geçmesi gerekmektedir. Farklı kaynak parametrelerinde

birleştirilmiş kaynaklı numunelerin kep eğme testlerinde hata gözlenmemesi kaynak parametrelerinin doğru seçildiğinin bir göstergesi olarak değerlendirilebilir.

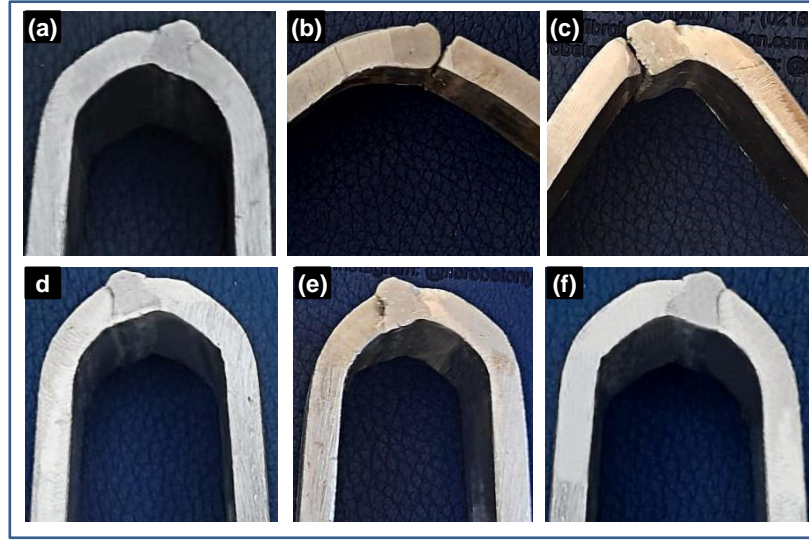


Şekil 7.29. MIG kaynaklı numunelerin kep eğme görüntüleri a) MIG-1, b) MIG-2, c) MIG-3, d) MIG-4, e) MIG-5, f) MIG-6.

Kaynak kep eğme testlerinden elde edilen başarı maalesef kök eğme testlerinde yakalanamamış ve MIG-2 ve MIG-3 kodlu numunelerde olumsuz sonuçlar alınmıştır. Bu iki numune dışındaki tüm numuneler (MIG-1, MIG-4, MIG-5 ve MIG-6) başarılı bir şekilde 180⁰ eğilmiştir. Kaynaklı numunelere gözle yapılan muayenede bazı kaynaklarda kökün tam merkezde oluşmadığı (MIG-2 ve MIG-3) bunun da birleşmenin AA-6013 tarafında kısmi kaynak hatasına sebep olduğu daha önce belirtilmişti. Ayrıca MIG-2 ve MIG-3 numunelerin kök eğme testi esnasında belirli açılarda kırılmasının, çekme sonuçları ile birlikte değerlendirildiğinde beklenen bir sonuç olduğu görülmektedir.

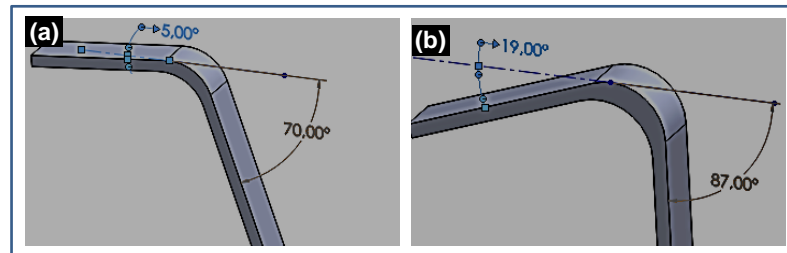
Kaynaklı numunelerin kaynak köklerinde meydana gelen hataların, kaynak keplerine göre daha fazla olduğu bilinen bir gerçektir. Şekil 7.31’te kök eğme sonucunda kopmaların meydana geldiği açılar şematik olarak verilmiştir. Veer Singh ve Vikash Paroothi TIG ve MIG kaynak yöntemleri ile alüminyum alaşımlarını birleştirdikleri çalışmada kaynaklı numunelere kep ve kök eğme testleri uygulamışlar ve bazılarında

çatlamların görüldüğünü bildirmişlerdir [154]. Kök eğme testlerinde meydana gelen kırılma ve kopmaların oluşmasında kaynak içerisinde bulunan gözeneklerin ve hataların etkili olduğu düşünülmektedir. Cueca vd. AA-5083 alüminyum alaşımını darbeli GMAW yöntemi ile birleştirdikleri çalışmada numunelere eğme testi uygulamışlar ve makroskopik koşullarda kök eğme testlerinde kök kenarında enine doğru çatlakların oluştuğu ifade etmişlerdir [155].



Şekil 7.30. MIG kaynaklı numunelerinin kök eğme görüntüleri a) MIG-1, b) MIG-2, c) MIG-3, d) MIG-4, e) MIG-5 f) MIG-6.

Ayrıca MIG kaynak yöntemi ile birleştirilen numunelerin eğme test sonuçları çekme test sonuçları ile birlikte değerlendirildiğinde çekme testi sonuçları ile eğme testi sonuçlarının birbirine uyumlu olduğu görülmektedir. Zira kök eğme testinde kopmanın meydana geldiği MIG-2 ve MIG-3 numunelerinin çekme dayanımları da diğer numunelere göre daha düşük olarak belirlenmiştir.



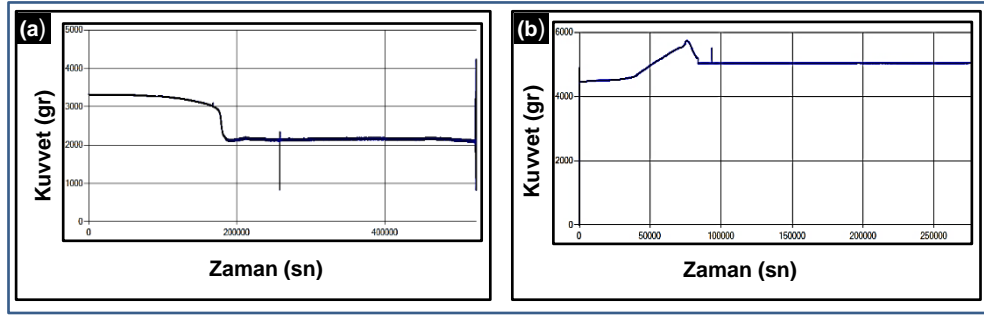
Şekil 7.31. Kök eğme sonucunda kopmaların meydana geldiği açılar a) MIG-2, b) MIG-3.

Her iki kaynak yöntemi ile üretilen birleştirmelere uygulanan eğme testleri birlikte irdelendiğinde SKK yöntemi ile birleştirilen numunelerde herhangi bir kırılma ve çatlama meydana gelmezken MIG ile birleştirilen numunelerin kök eğme testlerinde kırılma ve çatlama meydana geldiği görülmüştür. Burada MIG kaynağında kaynak kep ve özellikle de kaynak köklerinin taşlanmamış olması SKK yöntemine göre bir dezavantaj oluşturduğu unutulmamalıdır. Taban ve Kaluç AA-5083 alüminyum alaşımını MIG, TIG ve SKK yöntemleri ile birleştirdikleri çalışmada numuneleri eğme testine tabi tutmuşlar ve eğme testleri sonucunda TIG ve MIG yöntemleri ile birleştirilen numunelerde kırılma ve çatlaklar oluştuğunu, buna karşılık SKK ile birleştirilen numunelerde yapılan eğme testlerinde herhangi bir çatlama ve kırılmanın oluşmadığını söylerken bu durumun SKK yöntemi için bir avantaj olduğunu rapor etmişlerdir [156]. Aynı şekilde literatürde de SKK yöntemi gerçekleştirilen birleştirmelerin ergitme kaynakları ile üretilen birleştirmelere nazaran daha iyi sonuçlar verdiği rapor edilmiştir [31].

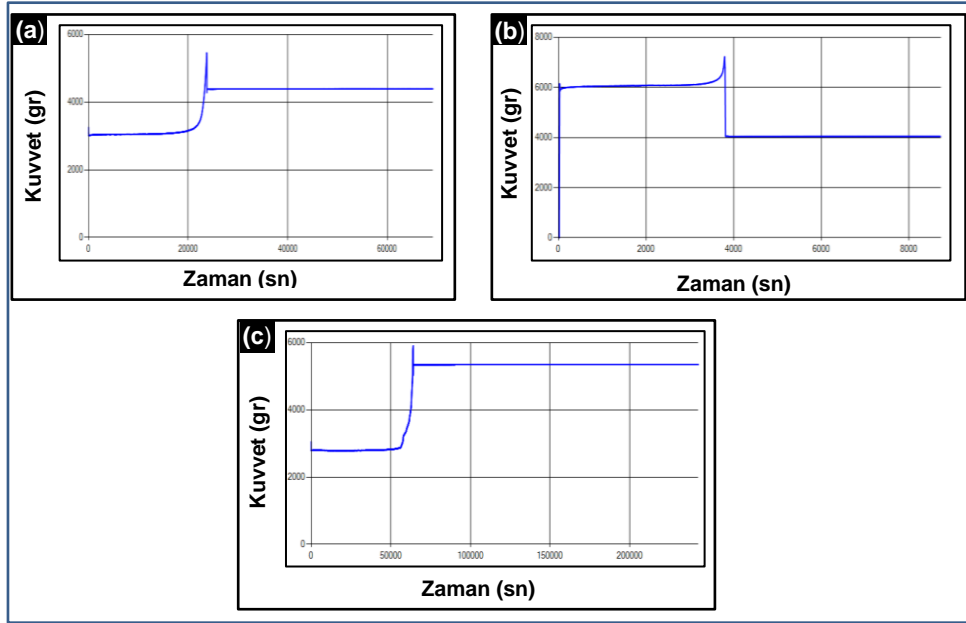
7.8. YORULMA DENEYİ

Genellikle bir kaynaklı birleştirmenin mekanik özelliklerinin iyi ya da kötü olduğuna karar verirken statik yükler uygulanarak yapılan çekme, eğme ve sertlik özelliklerine bakılmaktadır. Ancak üretilen kaynaklı birleştirmelerin dinamik yüklere de maruz kaldıkları bir gerçektir. Ayrıca dinamik yükler altında malzemeler çekme dayanımının çok altındaki değerlerde kopabilmektedirler. Bu gerekçeyle bir kaynaklı bağlantının mekanik özellikleri hakkında bir karar verirken dinamik yükler altındaki (yorulma dayanımı) davranışlarının da dikkate alınması kararın doğruluğu açısından önemlidir. Bu çalışmada kullanılan 6XXX ve 5XXX serileri alüminyum alaşımlarının ulaşım araçlarının üretiminde tercih edilmeleri bu alüminyum alaşımlarının çok fazla tekrarlı yüklere maruz kalmalarına neden olmaktadır. Belirtilen nedenlerden dolayı SKK ve MIG kaynak yöntemi ile birleştirilen AA-6013 ve AA-5754 alüminyum alaşımlarının tekrarlı ve sürekli gerilmeler karşısında gösterecekleri mekanik karakteristiği belirlemek için yorulma testleri uygulanmıştır. Yorulma testleri 6 farklı genlikte, 10 Hz frekansta ve oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Her genlik değeri için iki numune çalışılmış ve yorulma dayanımının hesaplanmasında iki numuneden elde edilen verilerin ortalamaları kullanılmıştır. Yorulma gerilmeleri formül 6.5 kullanılarak

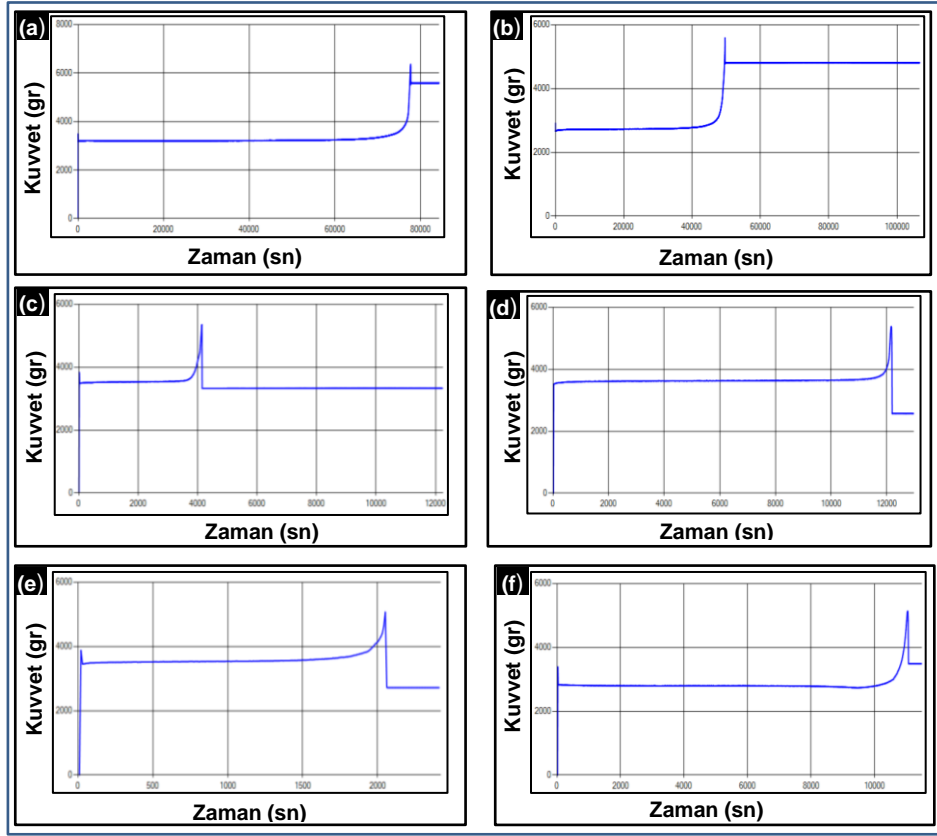
hesaplanmıştır. Ayrıca örnek oluşturması bakımından yorulma deneyinin yapıldığı makine tarafından üretilen kuvvet zaman grafiklerinden ana metallere ait olanlar Şekil 7.32’de, SKK yöntemi ile üretilen birleştirmelerin grafikleri Şekil 7.33’te ve MIG kaynak yöntemi ile üretilen numunelerin grafikleri Şekil 7.34’te verilmiştir. Kuvvet zaman grafikleri kullanılarak numunelerin eğme ve kesme gerilmeleri hesaplanmış ve daha sonra bu iki gerilmenin birleşik zorlama gerilmesi hesaplanarak kaynaklı birleştirmelerin yorulma dayanımı bulunmuştur. Yorulma test cihazının loadceli kuvveti gram cinsinden vermektedir. Bu nedenle yorulma dayanımı hesaplanırken kuvvet Newtona çevrilerek işlemler gerçekleştirilmiştir.



Şekil 7.32. Ana metallere ait kuvvet- zaman grafikleri a) AA-6013, b) AA-5754.



Şekil 7.33. SKK numunelerine ait kuvvet-zaman grafikleri, a) SKK-1, b) SKK-2, c) SKK-3.



Şekil 7.34. MIG numunelerine ait kuvvet-zaman grafikleri a) MIG-1, b) MIG-2, c) MIG-3, d) MIG-4, e) MIG-5, f) MIG-6.

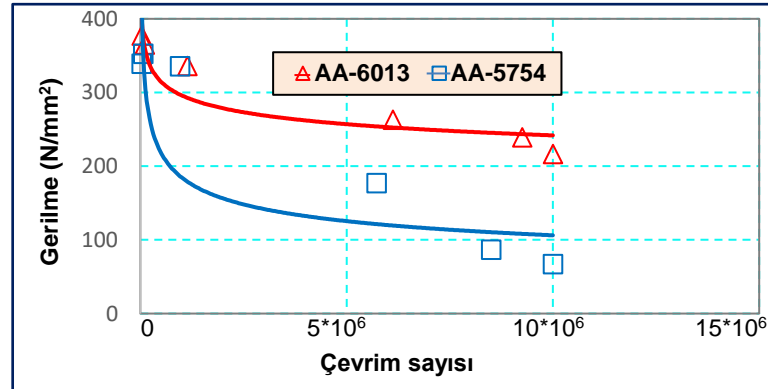
7.8.1. Ana Malzemelerin Yorulma Deneyi Sonuçları

Yapılan yorulma testleri sonucunda yorulma makinasından alınan veriler kullanılarak oluşturulan ana malzemelerin yorulma deneyi sonuçları Çizelge 7.6’da verilirken, Şekil 7.35’de de yorulma gerilmesi, çevrim sayısı grafiği verilmiştir. Şekil 7.35 ve Çizelge 7.9 incelendiğinde 4 genlikte yapılan deneylerde her iki ana malzeme de 10^7 çevrime ulaşılmış ve malzemelerde kopma ya da kırılmaların meydana gelmediği görülmüştür. Bu durumda AA-5754 ve AA-6013 alüminyum alaşımları ile 4 genlikte yapılan deneylerde sonsuz yorulma ömrüne sahip oldukları saptanmıştır. Aynı şekilde Moreira vd. SKK ve MIG kaynak yöntemleri ile alüminyum alaşımlarını birleştirdikleri ve yorulma ömürlerini inceledikleri çalışmada 10^7 döngü sayısının sonsuz ömür için bir eşik olarak kabul edildiği ifade edilmiştir [157]. Ancak genlikte yapılan değişikliklerle birlikte ana malzemelerin yorulma ömründe azalmalar, çatlamlar ve kopmaların meydana geldiği tespit edilmiştir. AA-6013 ve AA-5754 ana malzemelerin yorulma deneyleri sonuçları karşılaştırıldığında ise AA-5754

alüminyum alaşımının yorulma ömrünün ve dayanımının AA-6013 alüminyum alaşımına kıyasla daha düşük olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 7.6. Ana malzemelerin yorulma deneyi sonuçları.

Grup Numarası	Genlik	Çevrim Sayısı	Kuvvet (gr)	Kuvvet (N)	Yorulma Gerilmesi (N/mm ²)
AA-5754	4	10000000	1220	11,96	67,00142
	6	8500000	1580	15,50	86,77234
	8	5725316	3226	31,64	177,1693
	10	962728	6115	59,97	335,8309
	12	65040	6420	62,96	352,5813
	15	27910	6175	60,56	339,1261
AA-6013	4	10000000	3945	38,69	216,6562
	6	9257300	4355	42,71	239,1731
	8	6123252	4790	46,98	263,063
	10	1136241	6122	60,04	336,2153
	12	110000	6651	65,23	365,2676
	15	30000	6872	67,39	377,4047

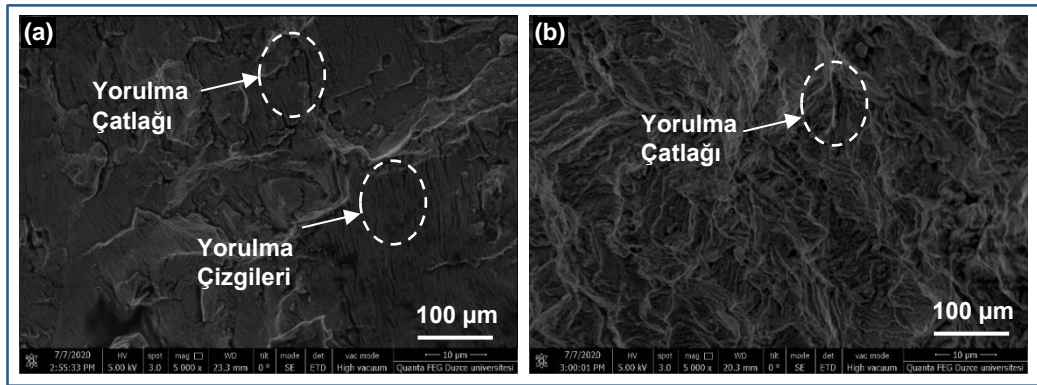


Şekil 7.35. Ana malzemelerin yorulma grafiği.

Benzer şekilde Infante vd. AA-6082 ve AA-5754 alüminyum alaşımlarını SKK ile kaynattıkları ve birleştirmelerin yorulma ömürlerini araştırdıkları çalışmada AA-5754 alüminyum alaşımının yorulma ömrünün AA-6082 alüminyum alaşımının yorulma ömründen daha düşük olduğunu ifade etmişlerdir [158]. Bu sonucun ortaya çıkmasında her iki ana metalin mikroyapı özelliklerinin farklı olması ve mikroyapı özelliklerine bağlı olarak AA-6013 alüminyum alaşımının AA-5754 alüminyum alaşımına oranla daha iyi mekanik özelliklere sahip olmasının etkili olduğu düşünülmektedir.

Her iki kaynak yöntemi ile birleştirilen numunelerden elde edilen yorulma deneyi sonuçları, her iki ana malzemenin yorulma deneyi sonuçları ile karşılaştırıldığında ana malzemelerin yorulma dayanımlarının daha yüksek olduğu görülmüştür. Böyle bir sonucun ortaya çıkmasının beklenen bir durum olmasının yanında buna sebep olan ise kaynak süreçlerinde meydana gelen ısı girdilerinin malzemelerin mikroyapı özelliklerini bozması nedeniyle mekanik özelliklerin zayıflaması ve birleştirmeler üretilirken oluşan kaynak kusurlarıdır. Benzer şekilde Costa vd. alüminyum alaşımlarını SKK ve MIG kaynak yöntemleri ile birleştikleri çalışmada kaynaklı numunelerin yorulma özelliklerinin ana metallere göre daha düşük olduğu söylerken buna mikroyapının değişmesi sonucunda mekanik özelliklerin zayıflamasının ve ayrıca kaynak kusurlarının neden olduğu ifade etmişlerdir [103]. Literatürde lazer hibrit MIG kaynak yöntemi ile AA-5083 alüminyum alaşımının birleştirildiği araştırmada, yapılan kaynak sırasında mekanik özelliklerin bozulması ve ayrıca oluşan kaynak kusurları sebebiyle ana malzemenin yorulma dayanımının kaynaklı numunelerden daha yüksek olduğunu rapor edilmiştir [16].

Ana malzemelere uygulanan yorulma deneyi sonucunda 10 genlikte elde edilen kırık yüzey SEM tarama görüntüleri Şekil 7.36'da verilmiştir. Şekil incelendiğinde ana malzemelere uygulanan yorulma deneyi sonucunda yorulma çatlaklarının oluşmasında yorulma çizgilerinin etkili olduğu görülmektedir.



Şekil 7.36. Ana malzemelerin yorulma kırık yüzey SEM görüntüleri a) AA-5754 ve b) AA-6013.

Her iki ana malzemede de yorulma adımlarının (çizgilerinin) etkisiyle başlayan yorulma çatlığının sünek bir kırılma tipi ile sonuçlandığı görülmektedir. Literatürde AA-6013 alüminyum alaşımının SKK ile birleştirildiği çalışmada benzer şekilde yorulma çatlak başlangıcına ve ilerlemesine gerilme yığılmalarının meydana geldiği bölgelerde gerçekleştiği söylenirken ana malzemelerin sünek bir kırılma davranışı sergilediği söylenmiştir [101].

7.8.2. SKK Yöntemi İle Birleştirilen Numunelerin Yorulma Deneyi

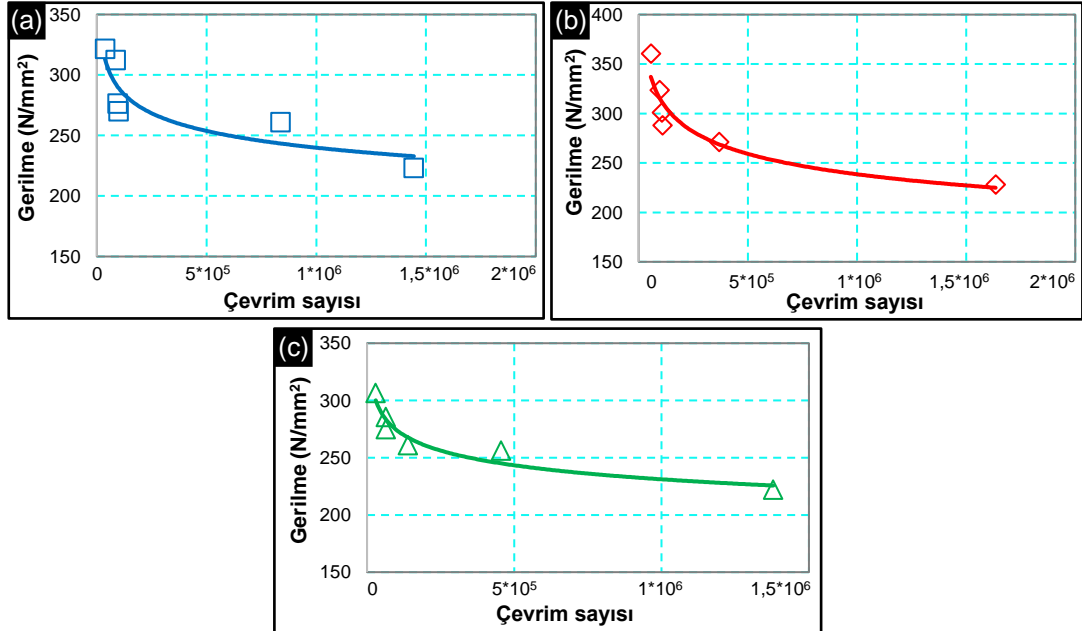
SKK yöntemi ile birleştirilen numunelere uygulanan yorulma testleri sonucunda elde edilen veriler Çizelge 7.7’de, bu verilerden yararlanılarak oluşturulan yorulma test grafikleri Şekil 7.37 ve 7.38’de verilmiştir.

Çizelge 7.7. SKK yöntemi ile birleştirilen numunelerin yorulma deneyi sonuçları.

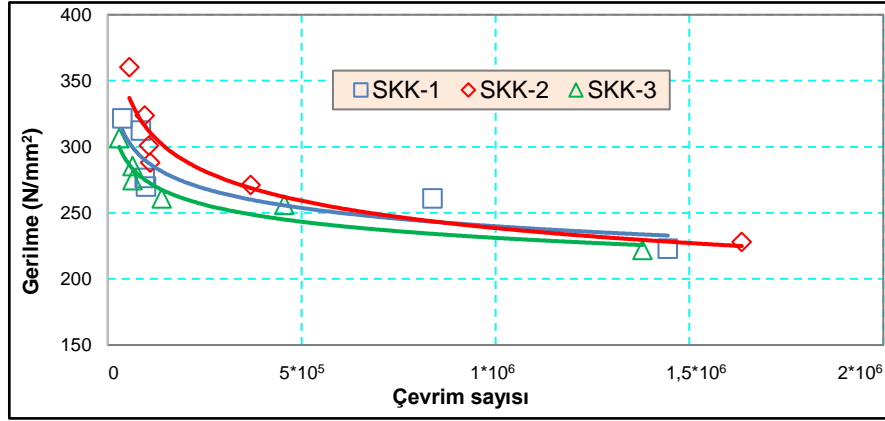
Grup Numarası	Genlik	Çevrim Sayısı	Kuvvet (gr)	Kuvvet (N)	Yorulma Gerilmesi (N/mm ²)
SKK-1	3	1444520	3846	37,71	223,4667
	4	837822	4495	44,08	261,2148
	5	98508	4651	45,61	270,2815
	6	95356	4756	46,64	276,3852
	7	85657	5493	53,87	312,2521
	8	37432	5990	58,75	321,4245
SKK-2	3	1635155	3927	38,51	228,2074
	4	369190	4671	45,81	271,4667
	5	109550	5519	54,12	287,8404
	6	106140	5328	52,25	300,6553
	7	95450	6434	63,01	323,6661
	8	55764	6908	67,74	360,2792
SKK-3	3	1379165	3822	37,48	222,1037
	4	455470	4411	43,25	256,2963
	5	138940	4499	44,12	261,4519
	6	64560	50,49	49,52	274,8248
	7	64550	5470	53,65	285,3407
	8	29712	5793	56,81	306,4331

SKK yöntemi ile birleştirilen numunelerin yorulma deney sonuçları incelendiğinde ilk göze çarpan belirli bir değere kadar kaynak hızının artması ile yorulma ömürlerinde (çevrim sayılarında) artmasına karşın belirli bir değerden sonra kaynak hızı artmasına

rağmen yorulma ömrünün düşmesidir. Örneğin genlik değeri 3 iken kaynak hızının 12,5 mm/dk'dan (SKK-1) 25 mm/dk'ya (SKK-2) çıkartılması ile yorulma ömründe yaklaşık olarak % 13,20'lik bir artış meydana gelirken aynı genlikte kaynak hızının 25 mm/dk'dan (SKK-2) 32 mm/dk'a (SKK-3) kaynak hızına çıkartılması ile yorulma ömrü yaklaşık olarak %15,65 azalmıştır. Kaynak hızının belirli bir hızdan sonra artması ile yorulma ömründe meydana gelen düşmeye kaynak sırasında oluşan mikroboşluklar ya da yetersiz deformasyon ve ısı iletiminden dolayı meydana gelen birleşme hataları sebep olmuş olabilir. Benzer şekilde literatürde AA-6082 ve AA-2024 alüminyumun SKK ile birleştirildiği çalışmada genel olarak kaynak hızının artması ile yorulma ömrünün arttığını ancak kaynak hızının artmasının yorulma ömrü üzerinde çok etkili olmadığını bununla kaynak sırasında karıştırıcı uç tarafından gerçekleştirilen deformasyonun yetersizliğinden kaynaklandığı ifade edilmiştir [159]. Yine aynı şekilde James vd. SKK yöntemi ile AA-5083 alüminyum alaşımını birleştirdikleri ve kaynak hızının yorulma ömrü üzerine etkilerini araştırdıkları çalışmada kaynak hızının 80 mm/dk'dan 120 mm/dk'ya yükseltince yorulma ömrünün düştüğünü bunun ise birleştirmenin yüzeyinde bulunan kusurlardan meydana gelmiş olabileceğini rapor etmişlerdir [160].



Şekil 7.37. SKK yöntemi ile birleştirilen numunelerin yorulma grafiği (a) SKK-1, (b) SKK-2, (c) SKK-3.

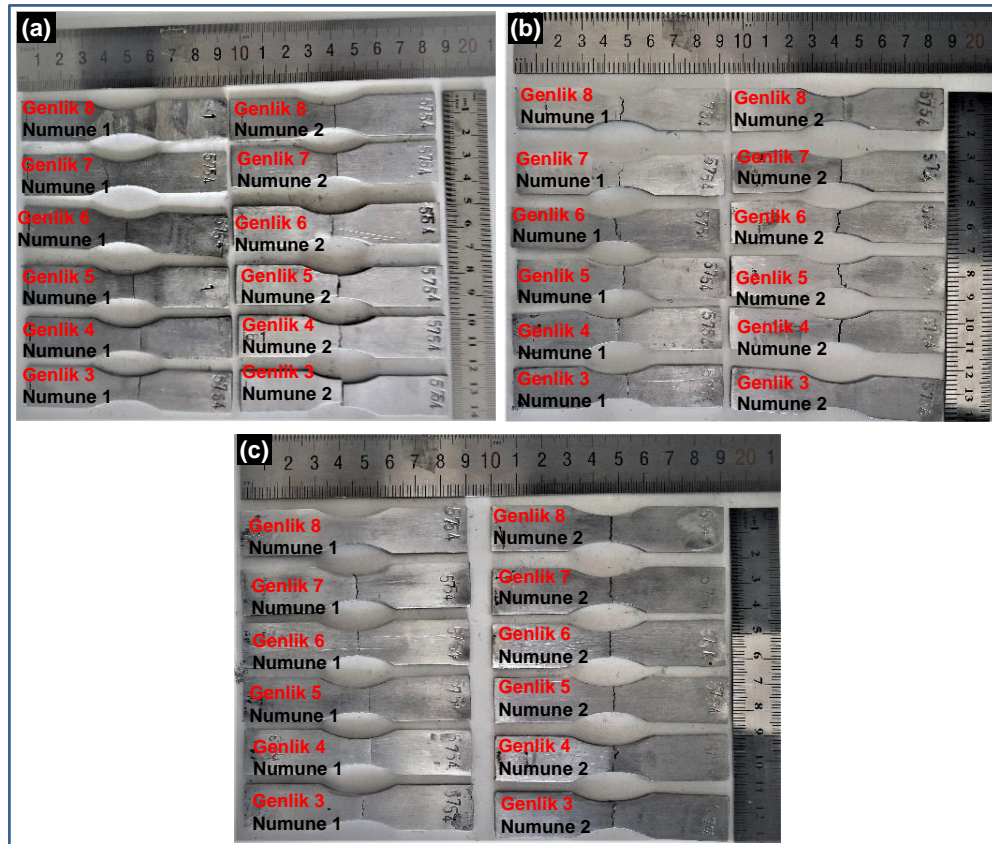


Şekil 7.38. SKK yöntemi ile birleştirilen numunelerin yorulma grafiği.

Çizelge 7.7 incelendiğinde dikkat çeken bir diğer sonuç ise genlik değerindeki artış ile çevrim sayısında meydana gelen düşme olmuştur. Örneğin SKK-1 kodlu numunede genlik değerinin 3'ten 4'e çıkartılması ile çevrim sayısında yaklaşık olarak % 42'lik bir azalma meydana gelmiştir. Yine aynı şekilde SKK-2 kodlu numunede genlik değerinin 7'den 8'e çıkartılması ile yaklaşık olarak % 41,44 bir azalma meydana gelmiştir. Benzer bir durumda SKK-3'te genlik değerinin 5'ten 6'ya yükseltilmesi ile çevrim sayısında yaklaşık olarak % 53,53'lük bir azalma olan SKK-3 kodlu numunede görülmüştür. Shaohua vd. hibrit lazer fiber MIG kaynağı ile Al-Mg alaşımını birleştirdikleri çalışmada genlik değerinin artması ile yorulma ömrünün azaldığı belirtmişlerdir [16]. Benzer şekilde Hanjun vd. AA-7075 alüminyuma alaşımı ile yaptıkları bir çalışmada genliğin artması ile yorulma ömrünün azaldığını rapor etmişlerdir [161]. Literatürde Igor vd. Al-Mg-Si alaşımını SKK ile birleştirdikleri ve birleştirmelerin yorulma ömrü ve dayanımı üzerine çalıştıkları araştırmada uygulanan gerilmenin artmasına paralel olarak yorulma ömrünün azaldığını ifade etmişlerdir [162].

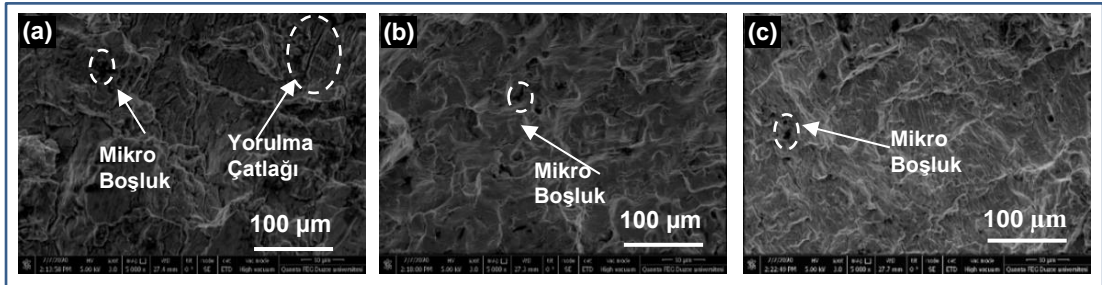
Yorulma deneyleri sonucunda SKK yöntemi ile üretilen numunelerin kopma yerlerini gösteren resimler Şekil 7.39'da verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde kopmaların ağırlıklı olarak kaynak metali merkezinden olmak üzere nadiren birleştirmenin AA-5754 tarafındaki kaynak metalinden meydana geldiği görülmektedir. Bunun sebeplerinden birinin yorulma numunelerinin standartlara uygun olarak hazırlanması ve yorulma testi esnasında numunenin kesit alanının en dar olan kaynak merkezinden

yorulmaya zorlanmasıdır. Kırılmanın kaynak metalinden olmasının diğer bir sebebi ise SKK yöntemi ile birleştirilen numunelerde kaynak esnasında meydana gelen ısının ve karıştırıcı takım tarafından yapılan deformasyon sonucunda malzemelere daha önceden kazandırılan özelliklerin bozulmasının neden olduğudur. Benzer şekilde literatürde SKK yöntemi ile üretilen AA-6061 alüminyum birleştirmelerin yorulma davranışlarının incelendiği çalışmada yorulma deneyi sonrasında kopmaların kaynak metali ile TEB arasındaki sınırdaki sınırdaki meydana geldiğini buna kaynak sırasında oluşan mikroboşlukların ve tane yapısının büyümesinin neden olduğu söylenmiştir [163]. Kopmaların kaynak metalinde meydana gelmesinin bir diğer sebebinin de kaynak esnasında kaynak içinde meydana gelen mikro boşlukların ve kaynak kusurlarının çentik etkisi yaratmasının olduğu bir gerçektir. Wang vd. AA-2024 alüminyum alaşımı, aynı şekilde Çevik AA-7075 alüminyum alaşımı ile yaptığı çalışmada kırılmaların kaynak metalinden ve termomekanik olarak etkilenen bölgede meydana geldiğini belirtmişlerdir [22].



Şekil 7.39. SKK yöntemi ile üretilen numunelerin kopma görüntüleri a) SKK-1, b) SKK-2, c) SKK-3.

SKK yöntemleri ile birleştirilmiş numunelerin yorulma deneyleri sonucunda oluşan kırılmaların tiplerini ve kırılmaya neden olan etkenleri belirlemek amacıyla SEM kırık yüzey çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışma sonucunda SKK yöntemi ile birleştirilen numunelerin SEM görüntüleri Şekil 7.40'ta verilmiştir. Şekil 7.40 incelendiğinde kırık yüzeyde mikro boşluklar olduğu görülmektedir. Bu mikro boşluklar yorulma testleri esnasında yorulma çatlaklarının oluşmasına başlangıç oluşturmaktadır. Zira mikro boşluklar yorulma testleri esnasında gerilmelerin kendi etrafında toplanmasına neden olmaktadır. Benzer şekilde Shaohua vd. hiprit lazer MIG kaynağı ve alüminyum alaşımları ile yaptıkları bir çalışmada yorulma çatlaklarının başlangıcında mikro boşlukların gözleendiğini ve mikro boşlukların stres yoğunluğunu artırdığını ifade etmişlerdir [16]. Yine literatürde alüminyum alaşımlarının kaynaklı birleştirmelerinin yorulma davranışları belirlemek için yapılan bir araştırma da yorulma çatlaklarının oluşumuna neden olan boşlukların sıcak çatlak oluşumunun başlangıcı olan mikro çatlakların işaretleri olduğu ve bu boşlukların ısınma ve soğuma sırasında şekillendiği söylenmiştir [157].



Şekil 7.40. SKK yöntemi ile birleştirilen numunelerin kırık yüzey SEM görüntüleri, a) SKK-1, b) SKK-2, c) SKK-3.

SKK yönteminin yorulma dayanıma etkilerinin incelendiği bir başka çalışmada da yorulma çatlaklarına düşük ısı girdisi ve uygun olmayan takım yönlenmesinden kaynaklanan kusurların neden olduğu rapor edilmiştir [164]. SKK yöntemi ile birleştirilen numunelerin kırılma yüzeyleri incelendiğinde çatlak başlangıçlarının mikro boşluklardan kaynaklandığı görülürken testin ilerleyen aşamalarında buna yorulma çizgilerinin de eşlik ettiği ve son kırılma noktasında ise sünek bir kırılmanın meydana geldiği görülmektedir. Aynı şekilde literatürde AA-6013 alüminyum alaşımının SKK ile birleştirildiği çalışmada yorulma testi sonucunda sünek kırılma meydana gelirken çatlak başlangıcının ve ilerlemesinin gerilmenin yüksek olduğu

bölgelerde meydana geldiği söylenmiştir [101]. Lei vd. Al-2024 alüminyumunu kullanarak SKK yöntemi ile ürettikleri birleştirmelere yorulma testi uygulamışlar ve kaynaktaki birleşme hatalarının ve mikro kusurların yorulma çatlaklarının gelişmesinde etkili olduğu belirtilmiştir [165].

Ayrıca yorulma deneyi sonuçları ile çekme deneyi sonuçları birlikte değerlendirildiğinde sonuçların birbirine uyumlu olduğu görülürken çekme deneyinde düşük sonuçların elde edildiği numunelerin yorulma deneyi sonuçları da düşük bulunmuştur. Aynı şekilde Beytullah vd. AA-5083 ve AA-6082 alüminyum alaşımlarını SKK ile kaynatmışlar ve yorulma deneyi sonuçları ile çekme deneyi sonuçlarının birbirine benzer sonuçlar sergilediklerini belirtmişlerdir [18].

7.8.3. MIG Kaynak Yöntemi ile Üretilen Numunelerin Yorulma Deneyi

MIG kaynak yöntemi ile birleştirilen numunelerin yorulma testleri sonucunda ulaşılan veriler Çizelge 7.8’de verilirken bu veriler kullanılarak hazırlanan grafikler Şekil 7.41 ve Şekil 7.42’de verilmiştir. Grafikler hazırlanırken öncelikle detayların kolayca görülebilmesi amacıyla her bir numune için ayrı ayrı çizilmiştir. En son olarak da sonuçların toplu olarak görülebilmesi ve kolay anlaşılabilmesi için bütün numunelerin yorulma sonuçları tek bir grafikte gösterilmiştir.

Çizelge 7.8 ve Çizelge 7.6 (Ana malzemelerin yorulma deneyi sonuçları) karşılaştırıldığında MIG kaynak yöntemi ile üretilen numunelerin yorulma dayanımlarının, ana malzemelerin yorulma dayanımlarından düşük olduğu görülmüştür. Burada kaynaklı numunelerin yorulma ömürlerinin, kaynaksız ana malzemelere (AA-6013 ve AA-5754) göre daha düşük çıkmasının başlıca sebepleri; kaynak esnasındaki ısı girdisinin dolayısıyla da kaynak sonrası soğuma hızının malzemelere kazandırılmış mekanik özellikleri bozması, birleştirme işlemlerinin farklı iki alüminyum malzemeyi kapsaması ve kullanılan ilave metal ile elde edilen kaynak metali mekanik/metalurjik/mikroyapısal özelliklerinin her iki ana malzemedeki farklı oluşu, kaynak esnasında ve sonrasında meydana gelen yapısal kusurlar olarak sayılabilir. Tüm bu sebepler ve daha fazlası dolayısıyla kaynaklı bağlantılardaki kaynak metalinin yorulma dayanımının ana malzemelerin yorulma dayanımından da

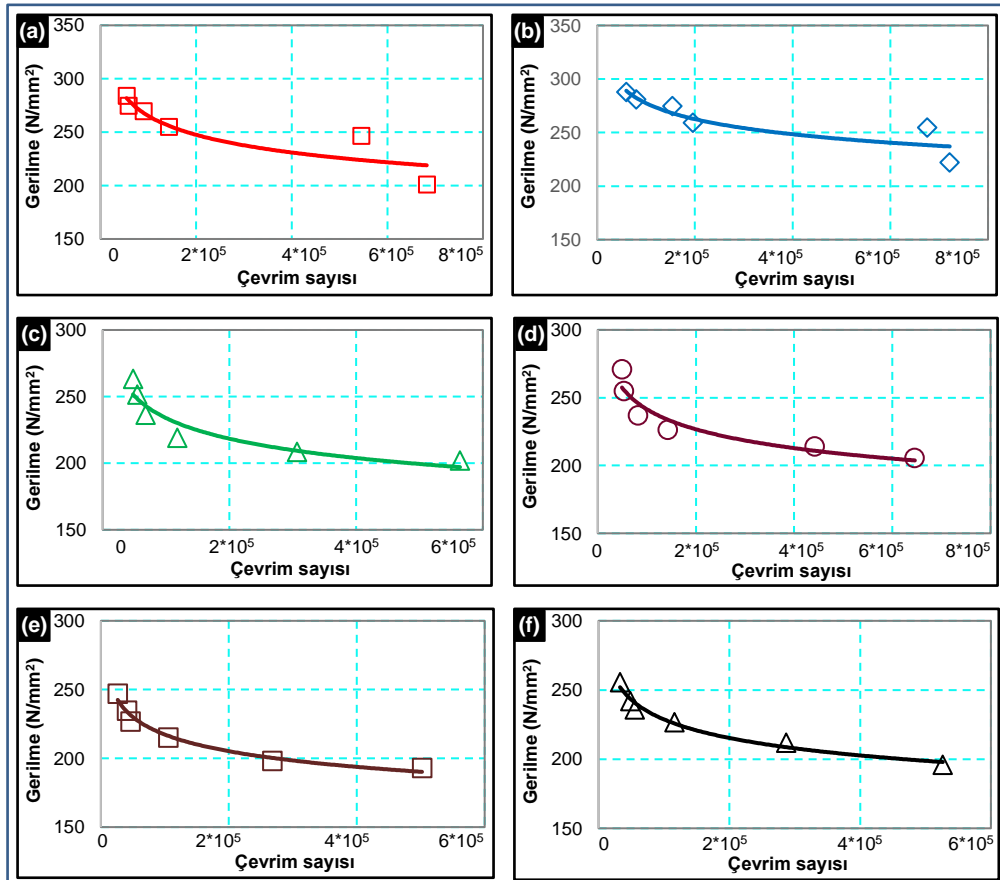
düşük değerlerde ölçülmesi normal bir sonuç olarak değerlendirilebilir. Shaohua vd. hibrit MIG kaynak yöntemi ile alüminyum ve alaşımlarını birleştirmişler ve yorulma deneyi sonucunda mikro boşluklar ve kaynak kusurları nedeni ile üretilen numunelerin yorulma dayanımının ana malzemelerden düşük olduğunu söylemişlerdir [16]. Silva vd. MIG kaynağı ile AA-6082 alaşımını birleştirdikleri çalışmada mikroyapının değişmesi ile sertliğin düştüğü ve sertliğin düşmesi sebebiyle de kaynaklı numunelerin yorulma dayanımlarının ana malzemedan düşük olarak ölçtüklerini ifade etmişlerdir [102].

Çizelge 7.8. MIG kaynağı yorulma deneyi sonuçları.

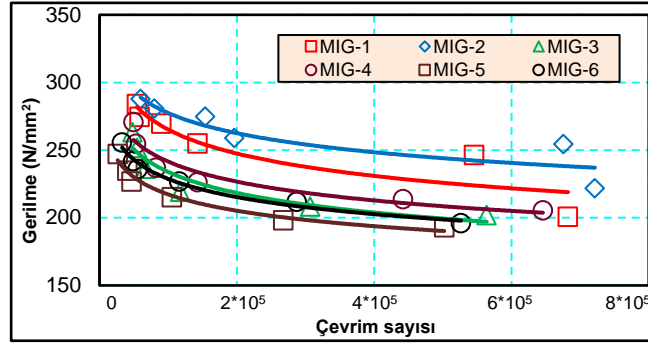
Grup Numarası	Genlik	Çevrim Sayısı	Kuvvet (gr)	Kuvvet (N)	Yorulma Gerilmesi (N/mm ²)
MIG-1	3	682350	3983	39,10	200,84661
	4	545365	4891	47,96	246,35814
	5	142788	5061	49,63	254,93650
	6	89830	5353	52,49	269,62758
	7	58425	5452	53,45	274,55885
	8	54450	5638	55,28	283,95909
MIG-2	3	721560	4345	42,60	221,87512
	4	675670	4984	48,88	254,58341
	5	196160	5071	49,73	259,01041
	6	153690	5379	52,75	274,73958
	7	79770	5499	53,92	280,83125
	8	59663	5520	54,13	287,89362
MIG-3	3	563915	3924	38,32	199,58321
	4	306732	4236	41,54	213,38026
	5	117534	4350	43,66	224,27015
	6	67373	4692	46,01	236,34149
	7	54636	4994	48,97	251,54625
	8	47885	5225	51,24	263,20665
MIG-4	3	645782	4079	40,01	205,52104
	4	441914	4287	42,21	216,82187
	5	142880	4591	45,02	231,25612
	6	82068	4705	46,14	237,00927
	7	53377	5057	49,59	254,73103
	8	49422	5376	52,72	270,80903
MIG-5	3	502042	3837	37,58	193,03876
	4	267729	3932	38,56	198,07277
	5	105188	4271	40,90	210,09274
	6	46423	4503	44,16	226,83852
	7	40735	4661	45,71	234,80047
	8	26376	4900	48,10	247,07728
MIG-6	3	526442	3889	38,14	195,91533
	4	287310	4208	41,27	211,99334
	5	116291	4402	43,14	221,59904
	6	55708	4685	45,94	235,98192
	7	49004	4803	47,10	241,94054
	8	32871	5078	49,79	255,75838

Şekil 7.41'deki grafikler incelendiğinde kaynak hızının artması ile yorulma ömrünün bir miktar arttığı açık bir şekilde görülebilmektedir. Örneğin 130 A kaynak akımında 4 genlikte kaynak hızının 150 mm/dk'dan (MIG-1) 180 mm/dk'ya (MIG-2) artırılması

ile yorulma ömrü yaklaşık olarak % 23,89 artarken 140 amperde ve 4 genlik değerinde kaynak hızının 150 mm/dk'dan (MIG-3) 180 mm/dk'ya (MIG- 4) artırılması ile yorulma ömrü yaklaşık olarak % 44.07 artmıştır. Aynı şekilde 150 A ve 6 genlikte kaynak hızının 150 mm/dk'dan (MIG-5) 180 mm/dk'a (MIG-6) yükseltilmesi ile yorulma ömrü yaklaşık olarak % 20 artmıştır. Buna neden olanın ise kaynak hızının artması ile azalan ısı girdisi sebebiyle meydana gelen hızlı soğuma sonucunda kaynak metalinde meydana gelen katılaşmanın daha hızlı olduğu, dolayısıyla tane irileşmesine fırsat bulanamamasıdır. Pek çok metal için küçük tane büyüklüğünün uzun yorulma ömrü anlamına geldiği bilinmektedir. Isı girdisinin daha düşük olması kaynak metallerinin sahip oldukları mekanik ve mikroyapı özelliklerini olumlu yönde etkilemiştir. Zira bir malzemenin mikroyapı ve dolayısıyla mekanik özellikleri o malzemeye etki eden ısı ile doğrudan ilintilidir. Kaynak esnasında ısı miktarının artması, kaynak metalinde meydana gelecek olan mikroyapı ve mikroyapıya bağlı olarak mekanik özelliklerini değiştirmektedir.



Şekil 7.41. MIG kaynağı ile birleştirilen numunelerin yorulma grafikleri, a) MIG-1, b) MIG-2, c) MIG-3, d) MIG-4, e) MIG-5, f) MIG-6.



Şekil 7.42. MIG kaynaklı numunelerin toplu yorulma grafiği.

MIG kaynak yöntemi ergitmeli bir kaynak yöntemi olduğundan kaynak esnasında ilave metal ile birlikte ana malzemelerin de (AA-6013 ve AA-5754) bir kısmı ergimekte ve kaynak havuzuna karışmaktadır. Bir başka ifade ile ergitmeli kaynaklarda kaynak metali, ilave metal ile ana malzeme/malzemelerden meydana gelmektedir. Dolayısıyla bu işlemler esnasında kaynak bölgesinin maruz kaldığı ısı girdisinin hem soğuma hızına hem de kaynak metali büyüklüğüne etkisi kaçınılmazdır. Bu hızlı soğuma sonucu kaynak metali kesit alanı (hacmi) azalmakta dolayısıyla da tane irileşmesinin önlenmesinin yanında kaynak hatası olma ihtimali de azalmaktadır. Isı girdisinin düşük olması ayrıca, ısı tesiri altında kalan bölgenin daha dar olması ve farklı sıcaklık aralığına maruz kalan bu bölgede ana malzemelerin mekanik özelliklerinin daha az bozunum göstermesi ile sonuçlanmaktadır. Aynı şekilde Şık vd. AA-2024 alüminyum alaşımından oluşan birleştirmelerin yorulma davranışını inceledikleri çalışmada kaynak hızının artırılması ile kaynak metalinin küçüldüğünü ve böylece ısıdan etkilenen bölgenin küçülmesinin olumsuz etkiyi bir miktar azaltabileceğini ifade etmişlerdir [145]. Ghazvinloo vd. robotik MIG kaynak yöntemi ile AA-6061 alüminyum alaşımını birleştirdikleri çalışmada kaynak ısı girdisinin mikroyapıda farklılaşmalara neden olması sebebi ile numunelerin yorulma davranışlarının farklılık gösterdiğini rapor etmişlerdir [166].

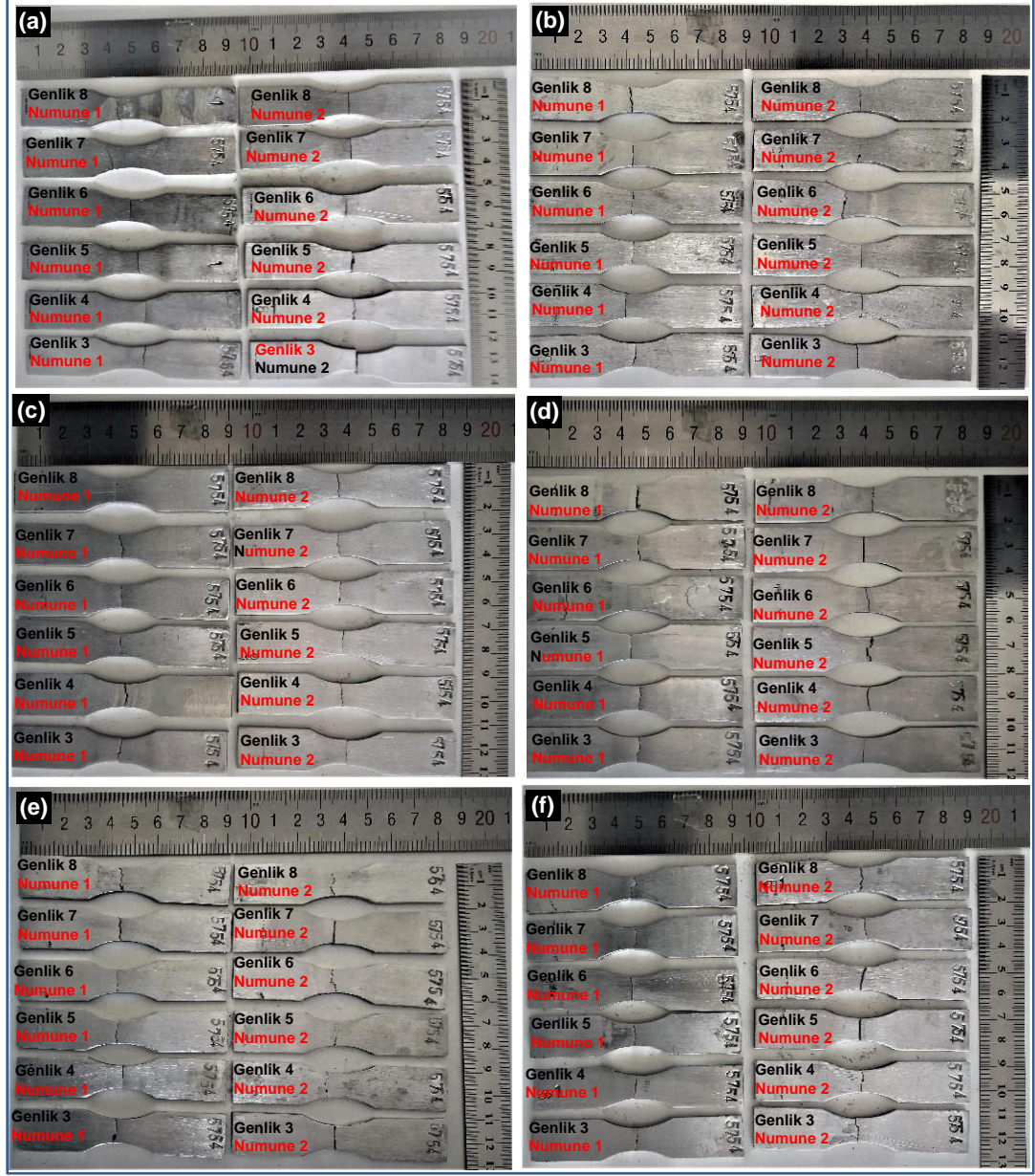
Yorulma deneyi sonuçlarında üzerinde durulması gereken bir diğer önemli noktada kaynak akımının artması ile yorulma ömrünün azalmasıdır. Örneğin 150 mm/ dk kaynak hızında ve 3 genlikte kaynak akımının 130 A'den (MIG-1)'den 140 A'e (MIG-3) çıkartılması ile yorulma ömrü % 17,35 azalırken, kaynak akımının 140 A'den (MIG-3) 150 A'e (MIG-5) çıkartılması ile % 10,97 azalmıştır. Aynı şekilde 180

mm/dak kaynak hızında, 4 genlikte kaynak akımının 130 A'den (MIG-2) 140 A'ye (MIG-4) yükseltilmesi ile % 34,59 kaynak akımının 140 A'den (MIG-4) 150 A'ye (MIG-6) yükseltilmesi ile de % 34,98 azalmıştır. Yorulma ömründe meydana gelen bu azalmaya neden olan etken; artan kaynak akımı ile birlikte (kaynak hızı sabit) malzemeye verilen ısı girdisinin yüksekliğidir. Ergitmeli kaynaklarda ısı girdisini etkileyen iki en önemli parametreden birisinin kaynak hızı, diğerinin ise kaynak akımı olduğu düşünüldüğünde elde edilen sonuçların olumlu olduğu sonucu çıkarılabilir. Literatürde robotik MIG kaynak yöntemi ile AA-6061 alüminyum alaşımının birleştirildiği çalışmada kaynak parametrelerinin ısı girdisini etkilemesi ve ısı girdisinin de soğuma hızını etkilemesi sebebiyle kaynak parametrelerinin kaynaklı birleştirmenin yorulma ömrünü değiştirdiğini rapor etmişlerdir [166]. Lomolino vd. alüminyum alaşımını SKK ile birleştirdikleri çalışmada düşük ısı girdisinin soğuma hızını artırması sebebiyle metalurjik değişimlerin azaldığını ve bununda yorulma ömrünü etkilediğini ifade etmişlerdir [167].

Çizelge 7.8 incelendiğinde dikkat çeken bir diğer önemli nokta ise yorulma deneyi sırasında gerilme genlik değerinin artırılması ile yorulma ömründe meydana gelen düşme olmuştur. Zira kaynak akımının ve hızının sabit tutulmasına karşın genlik değerinin artırılması yorulma ömrünü dikkate değer bir şekilde düşürmüştür. Örneğin MIG-1'de (130 A kaynak akımında 150 mm/dk kaynak hızında) genlik değerinin 3'ten 4'ye yükseltilmesi ile yorulma ömrü % 20,07 oranında azalmıştır. Yine aynı şekilde MIG-2 de (130 A kaynak akımında 150 mm/dk kaynak hızında) genlik değerinin 5'ten 6'ya yükseltilmesi ile yorulma ömrü % 21,65 azalmıştır. Ayrıca MIG-4' te (150 A kaynak akımında 180 mm/dk kaynak hızında) genlik değerinin 6'dan 7'ye yükseltilmesi ile yorulma ömründe % 34,96 oranında bir azalma olduğu görülmüştür. Yorulma hasarının en önemli parametresi gerilme genliği olduğu bir gerçektir. Buna göre, uygulanan gerilme genliği azalırca yorulma ömrü artmaktadır. Diğer bir ifade ile gerilme genliğinin azalmasıyla ömürde sürekli bir artış söz konusudur. Genellikle, uygulanan gerilme genliğindeki % 10'luk bir azalma, malzemenin ömrünü yarı yarıya arttırabilmektedir. Literatürde hibrit MIG kaynağı ile Al-Mg alaşımının birleştirildiği çalışmada gerilme genliğinin azalması ile yorulma ömrünün artma eğiliminde olduğu söylenmiştir [71]. Benzer şekilde Vidit vd. MIG kaynak yöntemi ile birleştirdikleri numunelerin yorulma dayanımı araştırdıkları çalışmada gerilme genliği oranının artması ile

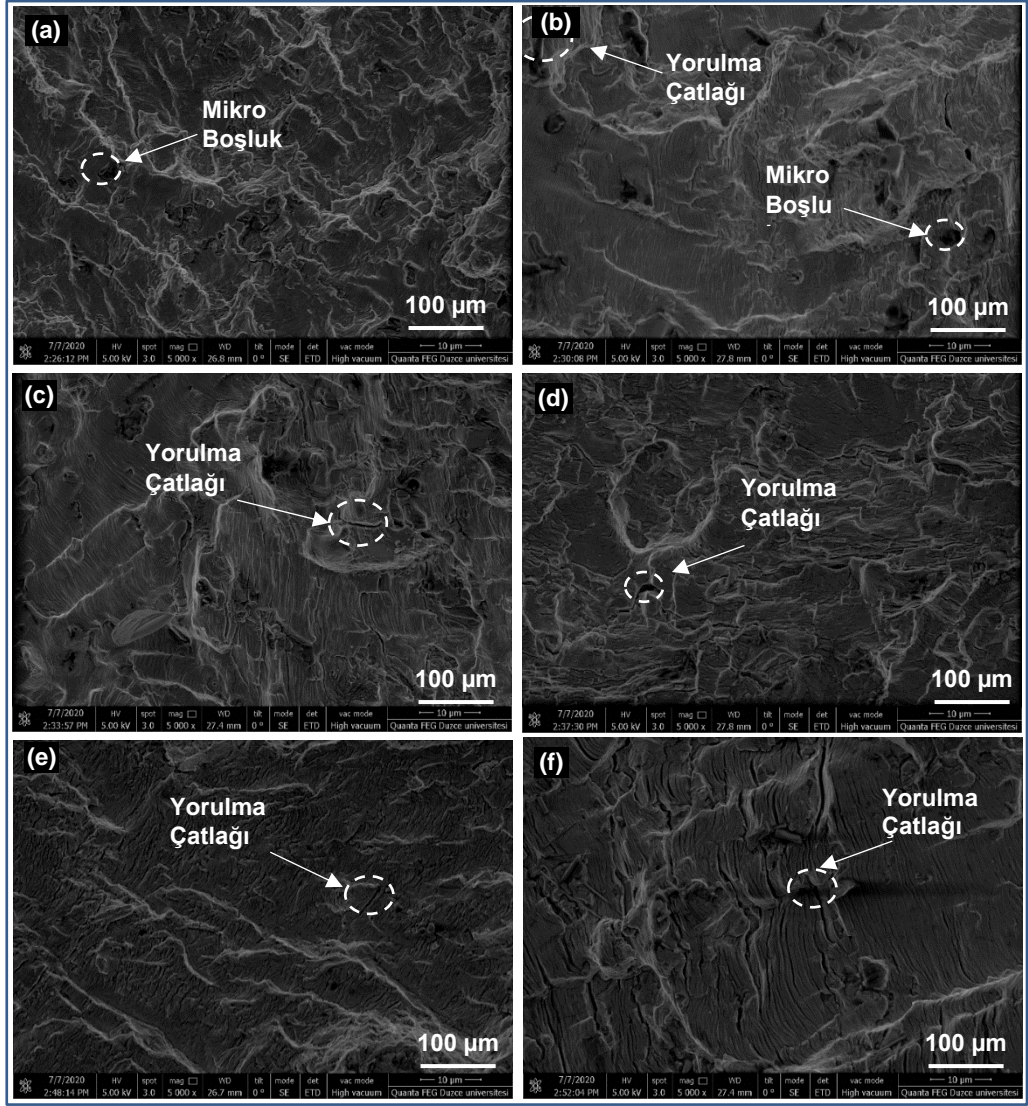
yorulma ömrünün azaldığını ifade etmişlerdir [168]. Farklı genliklerde yorulma testine tabi tutulan kaynaklı numunelerin kopma yerinin kaynak metalinin farklı bölgelerinden meydana gelmesinin bir başka sebebinin de çatlak başlangıcının genlik değişimiyle alakalı olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Literatürde verilen bilgiler ışığında eğer numune düşük gerilme genliğine maruz kalırsa, çatlak bir noktadan başlar istikrarlı devam eder. Numune yüksek gerilme genliğine maruz kaldığında ise çatlak farklı konumlardan başlayabilir, daha sonra kesme kuvveti yönünde devam eder [169].

MIG kaynak yöntemi ile üretilen numunelere uygulanan yorulma deneyi sonucunda elde edilen kopma bölgeleri görüntüleri Şekil 7.43'te verilmiştir. MIG kaynak yöntemi ile birleştirilen numunelerde SKK ile benzer bir davranış göstererek yorulma deneylerinde kopmaların büyük çoğunluğu kaynak dikiş merkezinde meydana gelirken bir kısmı da kaynak metalinin AA-5754 tarafındaki kaynak metalinde gerçekleşmiştir. Kaynak işlemi esnasında ergimiş haldeki kaynak metalinin sıcaklığının kaynak merkezinde ve ana malzemenin ITAB'a yakın kısımlarında farklılık gösterdiği bilinmektedir. Benzer şekilde kaynak metali kimyasal kompozisyonu da ergime sınırına yakın bölgede ana malzemenin özelliklerini daha fazla sergilemesi, kopma işleminin bazen ısının tesiri altında kalan bölgeye yakın olan kaynak metalinden, bazen de kaynak merkez çizgisine yakın olan kaynak metalinden gerçekleşmesi ile sonuçlanmıştır. Ayrıca kaynak ilerleme hızı artırılıp ve/veya kaynak akımı azaltıldığında kaynak metalinin şekli ve boyutu değişmekte, sıvı metal havuzu küçülmekte ve daha dar bir kaynak dikişi elde edilmektedir. Dolayısıyla da dar kaynak dikişinde kaynak hatası (mikro gözenek gibi) olma olasılığı azalmaktadır. Yorulma numunelerindeki kırılmalar, tüm bu sebeplerden dolayı kaynak metalinin farklı bölgelerinden meydana gelmiş bulunmaktadır. Şık alüminyum alaşımını SKK ile birleştirdiği iki çalışmada kopmanın ITAB'dan başlayarak kaynak kenarında son bulduğunu buna ise ısı girdisindeki değişmelerin ITAB'ın genişlemesine ve mukavemet artırıcı çökelti yapısının bozulmasından dolayı yorulma dayanımının düşmesine atfetmiştir [170,171]. Zhongjie vd. Al-Zn alüminyum alaşımını SKK ve MIG kaynak yöntemleri ile birleştirdikleri çalışmada yorulma testi sonucunda numunelerin mikro gözenek ve impuritelere nedeniyle kaynak metali ile ITAB arayüzeyinde meydana geldiğini rapor etmişlerdir [172].



Şekil 7.43. MIG kaynak yöntemi ile üretilen numunelerin kopma görüntüleri a) MIG-1, b) MIG-2, c) MIG-3, d) MIG-4, e) MIG-5, f) MIG-6.

Şekil 7.44’de farklı kaynak parametrelerinde MIG kaynak yöntemi ile birleştirilmiş numunelerin yorulma sonrası kırık yüzey SEM görüntüleri verilmiştir. Şekil 7.44’de verilen kırık yüzey görüntüleri incelendiğinde SKK yöntemi ile birleştirilen numunelerde olduğu gibi çok az miktarda mikro boşlukların olduğu görülmektedir.



Şekil 7.44. MIG kaynak yöntemi ile birleştirilen numunelerin kırık yüzey SEM görüntüleri a) MIG-1, b) MIG-2, c) MIG-3, d) MIG-4, e) MIG-5, f) MIG-6.

Ergitmeli kaynak işlemlerinde tüm kaynak parametreleri optimum değerde ve doğru seçilmiş olsa bile kaynak esnasındaki hızlı katılaşma gibi nedenlerle kaynak dikişinde çok az da olsa mikro boşluk kusurları oluşabilmektedir. Bu nedenle MIG kaynağı ile birleştirilen numunelerin bazılarının kaynak metallarında lokal olarak mikro boşluk kusurları oluşmuştur. Bu mikro boşlukların yorulma testleri sırasında yorulma çatlaklarının oluşmasına başlangıç oluşturduğu düşünülmektedir. Çünkü yorulma testleri yapılırken mikro boşluklar stres yoğunluğunun artmasına ve bunun sonucunda da yorulma çatlağının oluşmasına ve ilerlemesine neden olmaktadır. Texier vd. AA-6061 alüminyum alaşımını SKK, TIG ve MIG kaynak yöntemleri ile birleştirdikleri

çalışmada MIG kaynağı ile birleştirdikleri numunelerde yorulma çatlaklarının çok sayıdaki mikroskobik çatlakların birleşmesinden kaynaklandığını ifade etmişlerdir [73]. Benzer şekilde literatürde AA-5083 alüminyum alaşımının GMAW ile kaynatıldığı çalışmada kaynak eksikliği ve gözenekliliğin çatlak oluşumunda önemli rol oynadığı söylenmiştir [66].

MIG kaynak yöntemi ile birleştirilen numunelerde de çatlak oluşumuna mikro boşluklar ve yorulma çizgileri nedeni ile artan stres yoğunluğu sebep olurken kırılmaların genellikle sünek kırılma tipinde gerçekleştiği görülmüştür.

7.8.4. Yorulma Deneyi Sonuçlarının Karşılaştırılması

Her iki kaynak yöntemi ile birleştirilen numunelerden elde edilen yorulma deneyi sonuçlarını, her iki ana malzemenin yorulma deneyi sonuçları ile karşılaştırıldığında ana malzemelerin yorulma dayanımlarının daha yüksek olduğu görülmüştür. Borrego vd. alüminyum alaşımlarını MIG ve SKK yöntemi ile birleştirmişler, MIG ve SKK yöntemleri ile birleştirilen numunelerin yorulma dayanımlarının ana malzemenin yorulma dayanımı ile karşılaştırıldığında azalma eğiliminde olduğu söylerken SKK yöntemi ile birleştirilen numunelerin yorulma dayanımlarının açık bir şekilde MIG ile birleştirilen numunelerin yorulma dayanımından yüksek olduğunu ifade etmişlerdir [173]. Benzer şekilde Shaohua vd. hibrit fiber lazer MIG kaynağı ile yaptıkları çalışmada kaynak kusurları ve mikroyapıdaki değişimler nedeniyle ana malzemenin yorulma dayanımının, kaynaklı numunelerin yorulma dayanımından daha yüksek olarak ölçtüklerini belirtmişlerdir [16]. Benzer şekilde Costa vd. MIG kaynağı ile yaptıkları çalışmada kaynak sürecinde malzemenin mekanik özelliklerinin zayıflaması ve kaynakta meydana gelen gerilme yoğunlaşmalarının çentik etkisi oluşturması sebebiyle kaynaklı birleştirmelerin yorulma dayanımlarının, ana malzemenin yorulma dayanımından düşük olarak tespit etdiklerini bildirmişlerdir [103].

SKK ve MIG kaynak yöntemlerinin yorulma sonuçları birlikte değerlendirildiği zaman SKK yöntemi ile en uygun kaynak hızında birleştirilen numunelerin (SKK-2) daha yüksek yorulma ömrü sergiledikleri görülmektedir. Her iki kaynak yöntemindeki en

yüksek ve düşük yorulma dayanımları kıyaslandığında, en yüksek yorulma dayanımında SKK yönteminin yaklaşık olarak % 20,27 en düşük yorulma dayanımında ise % 13,06 daha fazla dayanıma sahip olduğu görülmüştür. Literatürde SKK ve GMAW kaynak yöntemlerinin karşılaştırıldığı çalışmada SKK kaynağı ile birleştirilen numunelerin yorulmaya karşı daha fazla direnç gösterdiği ifade edilmiştir [73]. Caizhi vd. AA-5083 alüminyum alaşımı ile yaptıkları bir çalışmada SKK yöntemi ile birleştirilen numunelerin yorulma ömürlerinin MIG kaynağı ile birleştirilen numunelerin yorulma ömrüne oranla daha uzun olduğunu söylemişlerdir [164]. Benzer şekilde Moreira vd. MIG ve SKK yöntemleri ile birleştirilen numunelerin yorulma ömürleri üzerine yaptıkları çalışmada MIG kaynaklı numunelerin, SKK ile birleştirilen numunelere oranla daha düşük yorulma ömrü sergilediklerini belirtmişlerdir [157].

Her iki kaynak yöntemi ile birleştirilen numunelerin kırık yüzeyleri birlikte değerlendirildiğinde ise her iki yöntemde de yorulma çatlaklarının oluşmasında kaynak esnasında meydana gelen çeşitli kusurlar nedeni ile oluşan mikro boşluklar ve yorulma çizgileri sebebiyle artan gerilme yoğunluğuna neden olmuştur. Ayrıca yorulma çatlağının ilerlemesinde önemli bir etkiye sahip olan bir diğer etkenin ise yorulma deneyleri sırasında uygulanan eğme gerilmesi olduğu düşünülmektedir. Aynı şekilde literatürde AA-5083 alüminyum alaşımının MIG ile birleştirildiği araştırmada, yorulma çatlağının ilerlemesinde açılma ve burkulma bozuklarının yanında uygulanan eğme gerilmesinin de etkili olduğu belirtilmiştir [100].

SKK ve MIG kaynak yöntemleri ile birleştirilen numunelerin kırılma yüzeyleri ile ana malzemelerin kırılma yüzeyleri birlikte incelendiğinde ise kaynak ile birleştirilmiş olan numunelerde yorulma çatlağının oluşumunda ve ilerlemesinde mikro boşluklar önemli bir rol oynarken ana malzemelerde yorulma çizgileri sebebiyle meydana gelen düzensizlikler ön plana çıkmaktadır. Aynı şekilde literatürde AA-5083 alüminyum alaşımı ile yapılan bir başka çalışmada çatlak ilerlemesinde tipik olarak, mikroplastik deformasyon sonucu oluşan heterojen şekilde dağılmış yorulma çizgilerinin şerit benzeri cepler oluşturduğu ve daha sonra bu ceplerin kırık yüzey çukurlarına dönüştükleri söylenmiştir [164].

Yapılan her kaynaklı birleştirmeden, servis şartlarında görevini yaparken ana malzemeye yakın mekanik özellikler sergileyerek uzun süre işini yapması istenir. Ancak malzemelere uygulanan kaynak işlemleri ısıl döngüler sebebi ile malzemelerin mekanik davranışlarını değiştirmektedir. Dolayısıyla kaynak yöntemi ile birleştirilen numunelerin ne kadar süre ile görevini başarı bir şekilde yapabileceği, üretilen ürünün sağlamlığı ve uzun ömürlü olması açısından önemlidir. Bu nedenle her iki kaynak yöntemi ile birleştirilen numunelerin yorulma ömrü verimliliği hesaplama çalışmaları yapılmıştır. Yorulma verimliliği hesaplamaları numunelerin çok fazla sayıda olması sebebi ile kaynaklı numunelerin en yüksek ve en düşük genlik değerinde olacak şekilde, en yüksek ve düşük yorulma ömürlerinin elde edildiği numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışma sonucunda SKK yöntemi ile birleştirilen numunelerde en düşük genlikte elde edilen en yüksek yorulma verimi yaklaşık olarak % 16,35 ile SKK-2 kodlu numuneden, en düşük yorulma verimi ise yaklaşık olarak % 13,8 ile SKK-3 kodlu numunede elde edilmiştir. En yüksek genlik üzerinde yapılan çalışmalarda ise en yüksek verim yaklaşık olarak % 1 ile yine SKK-2 kodlu numunede edilirken en düşük verimde yine SKK-3 kodlu numunede yaklaşık olarak % 0,52 olarak belirlenmiştir.

MIG kaynak yöntemi ile üretilen numunelerde en düşük genlikte elde edilen en yüksek yorulma verimi yaklaşık olarak % 7,2 ile MIG-2 kodlu numunede elde edilirken en düşük yorulma verimi yaklaşık olarak % 5,02 ile MIG-5 kodlu numunede elde edilmiştir. En yüksek genlikte yapılan çalışmalar sonucunda ise en yüksek yorulma verimi yaklaşık olarak % 1,04 ile MIG-2 kodlu numunede en düşük yorulma verimi ise yaklaşık olarak % 0,46 ile MIG-5 kodlu numunede elde edilmiştir.

Her iki kaynak yönteminin (SKK ve MIG) yorulma deneyi performansları karşılaştırıldığında ise SKK yöntemi ile birleştirilen numunelerin daha iyi bir performans sergiledikleri yapılan çalışmalar sonucunda görülmüştür. Literatürde SKK ve MIG kaynak yöntemleri ile alüminyum alaşımın birleştirildiği çalışmada benzer şekilde MIG kaynağı ile üretilen numunelerin SKK yöntemi ile üretilen numunelere oranla daha düşük yorulma ömrü performansı sergiledikleri söylenmiştir [157]. Borrego vd. AA-5083 alüminyumunu SKK ve MIG kaynak yöntemleri ile

birleştirmişler ve SKK ile üretilen numunelerin MIG ile üretilen numunelere oranla daha yüksek yorulma dayanımı gösterdiklerini ifade etmişlerdir [173].

MIG gibi ergitme kaynaklarında kaynak için gerekli olan ısı, SKK gibi katı hal kaynaklarında malzemeyi hamurumsu kıvama getirmek için gerekli olan ısıdan çok daha fazla olduğundan dolayı ergitme kaynakları daha geniş bir ITAB ve daha iri taneli bir mikroyapı oluşturmaktadırlar. Oluşan bu geniş ITAB ve iri taneli mikroyapı birleştirilen numunelerin mekanik özelliklerinin bozulmasına sebep olduğu için uygun parametrede SKK yöntemi ile üretilen kaynaklı birleştirmeler, MIG kaynak yöntemi ile üretilen numunelere oranla daha iyi yorulma performansı göstermişlerdir. Sıcaklık ölçüm çalışmasına bakıldığında da sıcaklık ölçüm sonuçlarının bu durumu destekler nitelikte olduğu görülmektedir. Literatürde Al-Cu-Mg ve Al-Cu-Li alaşımları ile yapılan çalışmada katı faz kaynağında metalin yumuşaması için gerekli olan ısının derecesi, gazaltı (TIG) kaynağındakinden önemli ölçüde düşük olduğundan dolayı SKK ile birleştirilen numunelerin yorulma özelliklerinin, gazaltı kaynağı ile birleştirilen numunelerin yorulma özelliklerinden daha yüksek olduğu belirtilmiştir [174]. Aynı şekilde literatürde AA-5083 alüminyum alaşımlarının MIG ve SKK ile birleştirilip yorulma davranışlarının karşılaştırıldığı çalışmada MIG kaynaklarının yüksek ısı girdisi sebebiyle büyük taneler ürettiği ve bu nedenle SKK yöntemine göre daha düşük yorulma ömrü sergiledikleri rapor edilmiştir [175].

BÖLÜM 8

SONUÇ VE ÖNERİLER

SKK ve MIG kaynak yöntemleri ile AA-6013 ve AA-5754 alüminyum alaşımları farklı kaynak parametreleri kullanılarak başarılı bir şekilde birleştirilmiş ve yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar aşağıda belirtilmiştir.

- Kaynaklı birleştirmelere gözle yapılan kontrol sonucunda SKK yöntemi ile yapılan birleştirmelerde kaynak ilerleme hızının artması ile kaynak metali kenarında meydana gelen ondülelerin azaldığı gözlenirken, MIG kaynak yöntemi ile birleştirilen numunelerde kaynak hızının artması ile kaynak metalinin genişliğinin azaldığı görülmüştür.
- Makro incelemeler sonucunda SKK kaynak yöntemi ile birleştirilen her üç numunede de kök kısımlarında tünel kusurlarının varlığı tespit edilirken, birleştirme kenarlarında ve kaynak yüzeyinde herhangi bir kaynak kusuruna rastlanmamıştır.
- MIG kaynağı ile birleştirilen numunelerin makro incelemelerinde numunelerin keplerinde herhangi bir kaynak hatasına rastlanmazken, MIG-2 ve MIG-3 nolu numunelerden kök kısımlarında kaynak merkezindeki kaymadan dolayı kısmi kaynak hatalarının oluştuğu tespit edilmiştir.
- SKK yöntemi ile birleştirilen numunelerin termomekanik olarak etkilenen bölgelerinde mikro boşluklar tespit edilmiştir. Ayrıca bu bölgelerdeki tanelerin yapıları, ısının ve plastik deformasyonun etkileri nedeni ile ana malzemeden farklı bir yapı sergilemiştir. Yine bu numunelerde kaynak metalinin tane yapısı, ısının ve yüksek deformasyonun etkisi ile eş eksenli dinamik yeniden kristallemiş bir yapı sergilemiş ve kaynak metalinin tane yapısı kaynak hızının azalması ile irileşme eğilimi göstermiştir.

- MIG kaynak yöntemi ile birleştirilen numunelerde kaynak akımının artması ile (dolyısıyla ısı girdisi artmış) hem kaynak metalinde hem de ITAB'da tanelerin kabalaştığı tespit edilmiştir. Ayrıca kaynak akımının sabit tutulup kaynak hızının artırılması ile ITAB'da taneler incelirken kaynak metalinde denritik kolların arttığı ve tanelerin küçüldüğü saptanmıştır.
- SKK yönteminde sıcaklık ölçümü ve MIG kaynak yönteminde de ısı girdisi hesaplama işlemleri sonucunda, kaynak hızının artması ile ısı girdisinin azaldığı belirlenmiştir. Ayrıca MIG kaynak yöntemi ile birleştirilen numunelerde, aynı kaynak hızında kaynak akımının artması ile ısı girdisinin arttığı belirlenmiştir.
- Her iki kaynak yönteminde de en yüksek sertlik AA-6013 alüminyum ana malzemelerden ölçülürken, kaynak merkezinden AA-6013 alüminyum alaşımına doğru sertlik değeri artmış, AA-5754 alüminyum alaşımına doğru ise sertliğin düştüğü görülmüştür.
- Hem SKK hem de MIG kaynağı ile birleştirilmiş kaynaklı numuneler sertlik açısından birbiri ile kıyaslandığında sertlik ölçüm sonuçlarının birbirine yakın olduğu görülmüştür. Ayrıca her iki kaynak yönteminde de kaynak hızının artması ile sertlik değerlerinde artmaların meydana geldiği belirlenmiştir. MIG kaynağında aynı kaynak hızında fakat farklı kaynak akımlarında birleştirilen numunelerde kaynak akımının artması ile sertliğin düştüğü görülmüştür.
- Her iki kaynak yöntemi ile yapılan kaynaklı birleştirmelerin çekme dayanımları her iki ana metalin çekme dayanımlarından düşük olduğu belirlenmiştir. SKK yöntemi ile birleştirilen numunelerde en yüksek çekme dayanımı SKK-2 kodlu numunede 217 N/mm^2 ölçülürken, MIG kaynak yönteminde ise MIG-5 kodlu numunede 213 N/mm^2 olarak ölçülmüştür. Öte yandan SKK ve MIG kaynak yöntemleri ile birleştirilen numunelerde ölçülen en düşük çekme dayanımları sırasıyla 191 N/mm^2 ve 182 N/mm^2 olarak tespit edilmiştir.
- SKK yöntemi ile birleştirilen numunelerden SKK-3 nolu numune kaynak metalinden koparken diğer iki birleştirme AA-5754 ana metallere kopmuştur.

MIG kaynak yöntemi ile üretilen birleştirilmelerden MIG-2 birleştirmenin AA-5754 ergime sınırından koparken diğer numunelerde kopma ITAB'dan olmuştur.

- Birleştirmelerin çekme deneyi kırık yüzeyleri incelendiğinde SKK ile birleştirilen numunelerin sünek formda kırıldığı ancak numunelerin kırık yüzeylerinde mikro porozite ve gözenek kusurlarının olduğu belirlenmiştir. MIG kaynak yöntemi ile birleştirilen numunelerin ise sünek formda kırıldığı tespit edilmiştir.
- Çekme deneyine göre yapılan kaynak verimliliği çalışmalarına göre en uygun parametrelerin kullanıldığı SKK yöntemi ile birleştirilen (SKK-2) numunenin kaynak verimliliği MIG kaynak yöntemi ile birleştirilen numunelerin kaynak verimliliğinden daha yüksek bulunmuştur.
- 180° eğme testleri sonucunda, SKK kaynak yöntemi ile birleştirilen numunelere uygulanan kep ve kök eğme deneylerinde hiçbir numunede kopma ya da çatlama meydana gelmemiştir. MIG kaynak yöntemi ile birleştirilen numunelerin kep eğme testlerinde herhangi bir kopma ya da çatlama görülmezken, kök eğme testlerinde MIG-2 ve MIG-3 kodlu numuneler farklı eğme açılarında kırılmış, diğer numunelerde ise eğme hatasına rastlanılmamıştır.
- Yorulma deneyleri sonuçlarında ana malzemenin yorulma dayanımlarının ve ömürlerinin her iki yöntem ile (SKK ve MIG) birleştirilen kaynaklı numunelerin yorulma dayanımından ve ömründen yüksek olduğu görülmüştür. Ana malzemeler ile yapılan yorulma deneylerinde çatlak oluşumunda ve ilerlemesinde ana etkeninin gerilme yığılmaları ve yorulma çizgilerinin olduğu görülürken her iki ana malzeme de sünek kırılma meydana geldiği görülmüştür.
- Yorulma testleri sonucunda en uygun kaynak parametresinde SKK yöntemi ile birleştirilen numunelerin yorulma ömürlerinin ve dayanımlarının MIG kaynak yöntemi ile birleştirilen numunelere oranla daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.
- Her iki kaynak yönteminde de kaynak hızının artması ile yorulma dayanımlarında artmalar meydana gelmiştir. Yorulma deneyi esnasında yorulma genliğinde yapılan artırımlar her iki yöntemde de yorulma ömrüne (çevrim sayısına) düşme olarak yansımıştır.

- Yorulma deneyleri sonucunda hem SKK yöntemi ile hem de MIG kaynak yöntemi birleştirilen numuneler genellikle kaynak metali merkezinden olmak üzere nadiren birleştirilenin AA-5754 tarafına yakın kaynak metallere meydana geldiği tespit edilmiştir.
- Her iki kaynak yöntemi ile birleştirilen numunelerde yorulma çatlaklarının oluşmasında ve ilerlemesinde mikro boşlukların ana etken olduğu görülürken aynı zamanda yorulma çizgilerinin de etkili olduğu görülmüştür. Ayrıca yorulma testleri sonucunda kırılmaların sünek kırılma tipinde gerçekleştiği belirlenmiştir.
- Yorulma deneyi sonuçlarına göre yapılan kaynak verimliliği hesaplamalarında aynı çekme deneyinde olduğu gibi, en uygun parametrede SKK yöntemi ile birleştirilen numunelerin kaynak verimliliğinin MIG kaynak yöntemi ile üretilen numunelerin kaynak verimliliğinden daha yüksek olduğu görülmüştür.
- Sonuç olarak hem SKK hem de MIG kaynak parametrelerinde yapılan değişiklikler, kaynaklı birleştirmelerin ısı girdilerini değiştirdiğinden dolayı mikroyapıda farklılaşmalara neden olmuştur. Mikroyapıda meydana gelen bu değişiklikler, numunelerin sertlik, çekme, eğme ve yorulma gibi mekanik özelliklerinin artmasına/azalmasına neden olduğu belirlenmiştir.

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlara göre aşağıdaki öneriler yapılabilir.

- SKK kaynak işlemleri tek taraflı yerine iki taraftan yapılarak oluşacak tünel hatası giderilmeye çalışılabilir.
- Hem SKK işlemleri hem de MIG kaynakları işlemleri yapıldıktan sonra uygun bir mukavemetlendirme yöntemi ile (özellikle de kaynak sonrası yaşlandırma) kaynaklı numunelere ısı işlem uygulanarak bağlantı dayanımlarının artırılması sağlanabilir.
- SKK ve MIG yöntemiyle birleştirilen AA-6013 ve AA-5754 kaynaklı bağlantıların kaynak metali ve ITAB'larında oluşması muhtemel olan çökelti (Mg_2Si) fazlarının boyut ve dağılımları araştırılabilir.

KAYNAKLAR

1. Akıncı, S., “5754 Alüminyum alaşımını kaynak davranışının incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 1-2 (2008).
2. Sarsılmaz, F., “Sürtünme karıştırma kaynak yöntemi ile birleştirilmiş AA7075/AA6061 kaynaklı bağlantıların mikroyapı ve mekanik özelliklerinin araştırılması”, Doktora Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ, 3-35 (2008).
3. Aydın, H., “Sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmiş yaşlandırabilir alüminyum alaşımlarının mekanik özelliklerinin ve korozyon davranışlarının incelenmesi”, Doktora Tezi, *Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Bursa, 3-4 (2008).
4. Çevik, B., Özçatalbaş, Y., Uygur, İ., “7075 alüminyum alaşımının sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmesi”, *Uluslararası Kaynak Sempozyumu*, Ankara, (2): 369-375 (2012).
5. Threadgill, P., L., Leonard, A., J., Shercliff, H., R., Withers, P., J., “Friction stir welding of aluminium alloys”, *International Materials Reviews*, (54): 49-93 (2009).
6. Bahemmat, P., Besharati, M. K., Haghpanahi, M., Salekrostam, R., Reshad, K., “Investigation over the mechanical and metallurgic characteristics of friction stir welding in dissimilar aluminium alloys subjected to variation sprocess parameters” *Uluslararası Kaynak Teknolojileri Konferansı ve Sergisi*, Ankara, (1): 84-93 (2009).
7. Zhili, H., Shijian, Y., Xiaosong, W., Gang, L., Yongxian, H., “Effect of post-weld heat treatment on the microstructure and plastic deformation behavior of friction stir welded 2024”, *Materials and Design*, (32): 5055–5060 (2011).
8. Vijaya, R. B., Elanchezhian, C., Rajesh, S., Jaya, P. S., Manoj, K. B., Rajeshkannan, K., “Design and development of milling fixture for friction stir welding”, *Materials Today: Proceedings* (5): 1832–1838 (2018).
9. Bin, W., Bo-bo, L., Jia-xiang, Z., Quan, F., Liang, W., Deng, W., “EBSD study on microstructure and texture of friction stir welded AA5052-O and AA6061-T6 dissimilar joint”, *Materials and Design* (87): 593–599 (2015).
10. Toktaş, T., Toktaş, G., “Sürtünme karıştırma kaynak yöntemi ile birleştirilmiş 6063 alüminyum levhaların çekme özelliklerinin incelenmesi”, *Uluslararası Kaynak Teknolojileri Konferansı ve Sergisi*, Ankara, (1): 454-468 (2009).

11. Guo, H., Hub, J., Tsai, H. L., “Formation of weldcrater in GMAW of aluminum alloys”, *International Journal of HeatandMass Transfer*, (52): 5533–5546 (2009).
12. Ünlü, B. S., Çivi, C., Bölük, B., “Ark TIG ve MIG kaynakları yapılmış TS Fe 37-2 çeliğinin kaynak bölgesinin mikroyapı ve mekanik özelliklerinin karşılaştırılması.”, *Uluslararası Kaynak Teknolojileri Konferansı ve Sergisi*, Ankara, (2): 369-370 (2009).
13. Yürük, A., Bozkurt, B., Kahraman, N., “S235 JR karbon çeliği ile 430 ferritik paslanmaz çeliğin MIG kaynak yöntemi ile kaynak edilebilirliğinin incelenmesi”, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, (21): 90-97 (2016).
14. Malyer, E., “Sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilen 5000 serisi alüminyum alaşımlarında kaynak parametrelerinin incelenmesi”, *Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 4-5 (2010).
15. Karadağ, A., Kırılı, S., Öz Saraç, S., Ekici, M., Varol, F., “MIG kaynak yöntemi ile birleştirilen Al 5754 alaşımının mekanik özelliklerine ve dikiş geometrisine kaynak parametrelerinin etkisi”, *Uluslararası Kaynak Teknolojileri Konferansı ve Sergisi*, Ankara, (2): 401-411 (2012).
16. Shaohua, Y., Yuan, N., Zongtao, Z., Hui, C., Guoqing, G., Jinpeng, Y., Guiguo, W., “Characteristics of microstructure and fatigue resistance of hybrid fiber laser-MIG welded Al–Mg alloy joints”, *Applied Surface Science*, (298): 12–18 (2014).
17. Ilman, M. N., Triwibowo, N. A., Wahyudianto, A., Muslih, M. R., “Environmentally assisted fatigue behaviour of stress relieved metal inert gas (MIG) AA5083 welds in 3.5% NaCl solution”, *International Journal of Fatigue* (100): 285–295 (2017).
18. Güngör, B., Kaluç, E., Taban, E., Şık, A., “Mechanical, fatigue and microstructural properties of friction stir welded 5083-H111 and 6082-T651 aluminum alloys”, *Materials and Design* (56): 84–90 (2014).
19. Costa, J. D., Ferreira, J. A., M., Borrego, L. P., Abreu, L. P., “Fatigue behaviour of AA6082 friction stir welds under variable loadings”, *International Journal of Fatigue* (37): 8–16 (2012).
20. Caizhi, Z., Xinqi, Y., Guohong, L., “Investigation of microstructures and fatigue properties of friction stir welded Al–Mg alloy”, *Materials Chemistry and Physics*, (98): 285–290 (2006).
21. Güler, M., “Alüminyum alaşımlarının sürtünme kaynak özellikleri”, Doktora Tezi, *Marmara Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 11-41 (2000).
22. Çevik, B., “Sürtünme karıştırma kaynak parametrelerinin kalıntı gerilmelere ve birleştirmenin mekanik özelliklerine etkisi”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 25-26 (2014).

23. Yıldırım, T. M., “Sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilen 3000 serisi alüminyum alaşımlarının yorulma davranışlarının incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Bursa, 40-80 (2010).
24. Doğan, S., “AA5754-H22 alüminyum alaşımının sürtünme karıştırma kaynağında işlem parametrelerinin mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *Osman Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Eskişehir, 7-39 (2006).
25. Alan, G., “Alüminyum alaşımlarının karışım asal gaz ortamında TIG yöntemiyle kaynaklanması, mekanik ve mikroyapı özelliklerinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 11-12 (2013).
26. Köşker, A., “Alüminyum alaşımlarının asal gaz ortamında kaynaklanması ve mekanik özelliklerinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 28-29 (2011).
27. Kafalı, H., “Sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmiş Al 6013-T6 alaşımının mikroyapı ve mekanik özelliklerinin incelenmesi”, Doktora Tezi, *Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Eskişehir, 6-40 (2011).
28. Yürektürk, Y., “Al-6082 alaşımının mikro ark oksidasyonunda elektrolit katkısı olarak karbon nano tüpün etkileri”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul 3-4 (2023).
29. Burgucu, S., “7075 alüminyum alaşımlarının üretimi ve karakterizasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 28-51 (2011).
30. İpekoğlu, G., “Kaynak sonrası ısıl işlemin sürtünme karıştırma kaynaklı AA6061 ve AA7075 alüminyum alaşımı levhalarında iç yapı ve mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi”, Doktora Tezi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir, 12-13 (2011).
31. Taban, E., “5XXX serisi alüminyum alaşımlarının TIG, MIG ve sürtünen elaman ile birleştirme kaynaklı bağlantının mekanik ve mikroyapısal özelliklerinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kocaeli, 29-30 (2004).
32. Cabibbo, M., Forcellese, A., Simoncini, M., Pieralisi, M., Ciccarelli, D., “Effect of welding motion and pre-/post-annealing of friction stir welded AA5754 joints”, *Materials and Design*, (93): 146–159 (2016).
33. Sang-Won, P., Tae-Jin, Y., Chung-Yun, K., “Effects of the shoulder diameter and weld pitch on the tensile shear load in friction-stir welding of AA6111/AA5023 aluminum alloys Sang”, *Journal of Materials Processing Technology*, (241): 112–119 (2017).

34. Tobar, M. J., Lamas, I. M., Yanez, A., Sanchez-Ameya, J. M., Bouhka, z., Botana, F. J., “Experimental and simulation studies on laser conduction welding of AA5083 aluminium alloys”, *Physics Procedia*, (5): 239-308 (2010).
35. Paola, L., Sonia, D., Giuseppe, C., “Hybrid welding of AA5754 annealed alloy: Role of post Weld heattreatment on microstructure and mechanical properties” *Materials and Design*, (90): 777–786 (2016).
36. Olaf, E., Katrin, K., Jochen, H., “Development of intermetallic particles during solidification and homogenization of two AA 5xxx series Al-Mg alloys with different Mg contents”, *Journal of Alloys and Compounds*, (728): 669-681 (2017).
37. Ji, H., Zhang, C., Qiao, S., “Fatigue Life of 6061 Aluminium alloy welding samples both in atmosphere and water”, *Rare Metal Materials and Engineering*, 44 (5): 1116-1118 (2015).
38. Sutton, M. A., Yang, B., Reynolds, A. P., Taylor, R., “Microstructural studies of friction stir welds in 2024-T3 aluminum “, *Materials Science and Engineering A*, (323): 160–166 (2002).
39. Ji-kun, D., Dong-po, W., Ying, W., Hui, D., “Effect of post weld heat treatment on properties of variable polarity TIG welded AA2219 aluminium alloy joints”, *Trans. Nonferrous Met. Soc.*, China, (24): 1307–1316 (2014).
40. Raoa, M. S. S., Kumar, B. V. R. R., Hussainc, M., “Experimental study on the effect of welding parameters and tool pin profiles on the IS:65032 aluminum alloy FSW joints”, *Materials Today: Proceedings* (4): 1394–1404 (2017).
41. Çakır, R., “AA1050/ Cu malzeme çiftinin birleştirilmesinde sürtünme karıştırma kaynak parametrelerinin mekanik ve mikroyapı özelliklerine etkisinin incelenmesi”, Doktora Tezi, *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Balıkesir, 39-40 (2013).
42. Genyu, C., Bin, W., Shuai, M., Peixin, Z., Jiang, H., “Research on the “∞”-shaped laser scanning welding process for aluminum alloy”, *Optics and Laser Technology*, (115): 32–41 (2019).
43. Igor, V., Sergey, M., Sergey, M., Rustam, K., “Effect of pre-strain path on suppression of abnormal grain growth in friction stir welded 6061 aluminum alloy”, *Materials Science & Engineering A*, (760): 206–213 (2019).
44. Dengkui, Z., Guoqing, W., Aiping, W., Yue, Z., Quan, L., Xianli, L., Danyang, M., Jianling, S., Zhongping, Z., “Study on the inconsistency in mechanical properties of 2219 aluminium alloy TIG-welded joints” *Journal of Alloys and Compounds* 777, 1044-1053, (2019).

45. Mohammed, S. M. A. K., Dash, S. S., Jiang, X. Q., Li, D. Y., Chen, D. L., “Ultrasonic spot welding of 5182 aluminum alloy: Evolution of microstructure and mechanical properties”, *Materials Science & Engineering A*, (756): 417–429 (2019).
46. Wang, Y., Qi B., Cong, B., Zhu, M., Lin, S., “Keyhole welding of AA2219 aluminum alloy with double-pulsed variable polarity gas tungsten arc welding”, *Journal of Manufacturing Processes*, (34): 179–186 (2018).
47. Prabha, K. A., Prasad, K. P., Balla, S. P., “Effect of tool rotational speed on mechanical properties of aluminium alloy 5083 weldments in friction stir welding”, *Materials Today: Proceedings*, (5): 18535–18543 (2018).
48. Balaji, N. D., Venkata, R. C. H., Srinivasa, R., Madhusudan, R. G., Rambabu, G., “Optimization of friction stir welding parameters to improve corrosion resistance and hardness of AA2219 aluminum alloy welds”, *Materials Today: Proceedings*, (15): 76–83 (2019).
49. Chuang, C., Shuang, H., Hui, C., Weihua, Z., “The influences of Ar-He shielding gas mixture on welding characteristics of fiber laser-MIG hybrid welding of aluminum alloy”, *Optics and Laser Technology*, (113): 37–45 (2019).
50. Shujun, C., Hongwei, Z., Xiaoqing, J., Tao, Y., Yang, H., Xiaoxu, L., “Mechanical properties of electric assisted friction stir welded 2219 aluminum alloy”, *Journal of Manufacturing Processes*, (44): 197–206 (2019).
51. Yiming, H., Shuaishuai, H., Tao, S., Lijun, Y., Shanshan, L., Shanben, C., “An improved model of porosity formation during pulsed GTA welding of aluminum alloys”, *Materials Science & Engineering B*, (238–239): 122–129 (2018).
52. Zhimin, W., Oliveira, J., P., Zhi, Z., Xianzheng, B., Bei, P., Xinyu, S. i., “Laser beam oscillating welding of 5A06 aluminum alloys: Microstructure, porosity and mechanical properties”, *Optics and Laser Technology*, (111): 58–65 (2019).
53. Hui, L., Jiasheng, Z., Junshan, Y., Haoping, P., “The effect of TIG welding techniques on microstructure, properties and porosity of the welded joint of 2219 aluminum alloy”, *Journal of Alloys and Compounds*, (727): 531-539 (2017).
54. Yipeng, W., Baoqiang, C., Bojin, Q., Mingxuan, Y., Sanbao, L., “Process characteristics and properties of AA2219 aluminum alloy welded by double pulsed VPTIG welding”, *Journal of Materials Processing Tech*, (266): 255–263 (2019).
55. Ni, Z. L., Ye, F. X., “Ultrasonic spot welding of aluminum alloys: A review”, *Journal of Manufacturing Processes*, (35): 580–594 (2018).

56. Vasu, K., Chelladurai, H., Addanki, R., Malarvizhi, S., Balasubramanian, V., “Effect of fusion welding processes on tensile properties of armor grade, high thickness, non-heat treatable aluminium alloy joints”, *Defence Technology*, (15): 353-362 (2019).
57. Uzun, M., “MIG kaynağı ile birleştirilen A5000 serisi malzemenin mekanik ve mikroyapı özelliklerinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 37-50 (2014).
58. Anık, S., Vural, M., “Gazaltı ark kaynağı TIG, MIG-MAG”, *Gedik Eğitim Vakfı Kaynak Teknolojisi Eğitim Araştırma ve Muayene Enstitüsü*, İstanbul, 99-224.
59. Kahraman, N., Gülenç, B., “Modern kaynak teknolojisi”, *Epamat*, Ankara, 92-100 (2016).
60. Tülbentçi, K., “MIG/MAG kaynağı”, *Arctech*, İstanbul, 11-130 (1998).
61. Türkkın, G., “Koruyucu gaz kaynağında (MIG/MAG) gaz debisinin kaynak nüfuziyetine ve kaynak hızına etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir, 25-30 (2008).
62. Mercan, E., ”5xxx-6xxx alüminyum alaşımlarının otomatik MIG kaynak yöntemi ile birleştirilebilirliğinin araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, 29-100 (2018).
63. Şık, A., “Otomobil saclarının MIG/MAG kaynağında gaz karışımlarının bağlantının mekanik özelliklerine etkisi”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 130-141 (2002).
64. Süzen, A., “Gemi saclarının kaynak bağlantılarında kaynak parametrelerinin dikiş geometrisine etkisinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya, 36-50 (2009).
65. Ekici, M., “MIG/MAG ve elektrik ark kaynağı ile birleştirilmiş mikroalaşımli çeliklerin mekanik özellikleri”, Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya, 46-50 (2009).
66. Jesus, J. S., Costa, J. M., Loureiro, A., Ferreira, J. M., “Fatigue strength improvement of GMAW T-welds in AA 5083 by friction-stir processing”, *International Journal of Fatigue*, (97): 124–134 (2017).
67. Chenxiao, Z., Xinhua, T., Yuan, H., Fenggui, L., Haichao, C., “Characteristics and formation mechanism of sidewall pores in NG-GMAW of 5083 Al-alloy”, *Journal of Materials Processing Technology*, (238): 274–283 (2016).
68. Chenxiao, Z., Jason, C., Xinhua, T., Suck-Joo, N., Haichao, C., “Molten pool behaviors and their influences on welding defects in narrow gap GMAW of 5083 Al-alloy”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, (126): 1206–1221 (2018).

69. Tapas, B., Chelladurai, H., Ansari, M. Z., “Mitigation of residual stresses and distortions in thin aluminium alloy GMAW plates using different heat sink models”, *Journal of Manufacturing Processes*, (22): 199–210 (2016).
70. Vargas, J. A., Torres, J. E., Pacheco, J. A., Hernandez, R. J., “Analysis of heat input effect on the mechanical properties of Al-6061-T6 alloy weld joints”, *Materials and Design*, (52): 556–564 (2013).
71. Shaohua, Y., Hui, C., Zongtao, Z., Guoqing, G., “Hybrid laser-Metal Inert Gas welding of Al–Mg–Si alloy joints: Microstructure and mechanical properties”, *Materials and Design*, (61): 160–167 (2014).
72. Chen, Z., Ming, G., Dengzhi, W., Jie, Y., Xiaoyan, Z., “Relationship between pool characteristic and weld porosity in laser arc hybrid welding of AA6082 aluminum alloy”, *Journal of Materials Processing Technology*, (240): 217–222 (2017).
73. Texier, D., Atmani, F., Bocher, P., Nadeau, F., Chen, J., Zedan, Y., Vanderesse, N., Demers, V., “Fatigue performances of FSW and GMAW aluminum alloys welded joints: Competition between microstructural and structural-contact-fretting crack initiation”, *International Journal of Fatigue*, (116): 220–233 (2018).
74. Tapas, B., Chelladurai, H., Ansari M. Z., “Experimental investigation and numerical analyses of residual stresses and distortions in GMA welding of thin dissimilar AA5052-AA6061 plates”, *Journal of Manufacturing Processes*, (25): 340–350 (2017).
75. Yalçın, D. E., “AA7075 ve AA5754 alüminyum alaşımların sürtünme karıştırma kaynak yöntemi ile kaynak edilebilirliğinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Trabzon, 33-34 (2010).
76. Hasçalık, A., Çaydas, U., Ünal, E., Karaca, F., “AA5251 alaşımının sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilebilirliğine uç geometrisinin etkisi”, *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, (4): 1-7 (2007).
77. El-Sayed M. M., Shash A. Y., Abd-Rabou M., “Finite element modeling of aluminum alloy AA5083-O friction stir welding process”, *Journal of Materials Processing Tech.*, (252): 13–24 (2018).
78. Kumar, P. S., Shastry, C. S. R., Davaraju, A., “Influence of tool revolving on mechanical properties of friction stir welded 5083 aluminum alloy”, *Materials Today: Proceedings*, (4): 330–335 (2017).
79. Heirani, F., Abbasi, A., Ardestani, M., “Effects of processing parameters on microstructure and mechanical behaviors of underwater friction stir welding of Al5083 alloy”, *Journal of Manufacturing Processes*, (25) 77–84 (2017).
80. Leonardo, N.T., Iván, M., Hernán, G.S., “Effect of heat input on aa5052 friction stir welds characteristics”, *Procedia Materials Science*, (8): 914 – 923 (2015).

81. Nan, Z., Dongfu, S., Wenjun, Q., Xiaohui, L., Ji, Z., Moataz, M. A., “Influence of the kissing bond on the mechanical properties and fracture behaviour of AA5083-H112 friction stir weld”, *Materials Science & Engineering A*, (719): 12–20 (2018).
82. Sashank, S. J., Sampath, P., Krishna, P. S., Sagara R., Venukumar, S., Muthukumaran, S., “Effects of friction stir welding on microstructure and mechanical properties of 6063 aluminium alloy”, *Materials Today: Proceedings*, (5): 8348–8353 (2018).
83. Das, U., Toppo, V, “Effect of tool rotational speed on temperature and impact strength of friction stir welded joint of two dissimilar aluminum alloys”, *Materials Today: Proceedings*, (5): 6170–6175 (2018).
84. Hejazi, I., Mirsalehi, S. E., “Mechanical and metallurgical characterization of AA6061 friction stir welded joints using microhardness map”, *Trans. Nonferrous Met. Soc.*, (26): 2313–2319 (2016).
85. Long, W., Yongxian, H., Weiqiang, G., Shixiong, L., Jicai, F., “Mechanical properties and microstructure of 6082-T6 aluminum alloy joints by self-support friction stir welding”, *J. Mater. Sci. Technol.*, 30 (12): 1243-1250 (2014).
86. Hasan, I. D., Kahtan, S. M., Azmi, R. a, Uday, M. B., “The influence of the surface roughness on the microstructures and mechanical properties of 6061 aluminium alloy using friction stir welding”, *Surface & Coatings Technology*, (270) 272–283 (2015).
87. Cho, J. H., Kim, V. J., Lee, C. G., “Evolution of microstructure and mechanical properties during friction stir welding of A5083 and A6082”, *Procedia Engineering*, (81): 2080–2085 (2014).
88. Ilangovan, M., Boopathy, R. S., Balasubramanian, V., “Microstructure and tensile properties of friction stir welded dissimilar AA6061- AA5086 aluminium alloy joints”, *Trans. Nonferrous Met. Soc.*, (25): 1080-1090 (2015).
89. Tüten, N., “Otomobil tork kolunun çevrimsel yükleme altında ağırlık en iyilemesi ve güvenilirlik tahmini”, Yüksek Lisans Tezi, *TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 19-40 (2016).
90. Doruk, E., “AA6082 alüminyum alaşımının yorulma davranışı üzerine temper durumunun etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *Abant İzzet Baysal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Bolu, 44-60 (2015).
91. Saatçı, T., “Çift fazlı çeliklerde martenzit hacim oranının ve morfolojisinin yorulma davranışı üzerine etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 55-70 (2014).

92. Mercan, S., “Sürtünme kaynağı ile birleştirilmiş AISI 2205/ AISI 1020 malzeme çiftinin mikroyapı ve yorulma davranışının araştırılması”, Doktora Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ, 56-79, (2013).
93. Dikbaş, H., “Ti6Al4V/Ti6Al4V malzeme çiftinin PTA kaynağında kaynak bölgesinin incelenmesi”, Doktora Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ, 61-67 (2012).
94. Kaya, M. T., “SAE 4140 (42CrMo4) ıslah çeliğinin birleşik gerilmeli yorulma davranışının incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Bozok Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Yozgat, 28-60 (2016)
95. Özdemir, T. E., “Kaynaklı çelik kontrüksiyonlarda oluşan kısa yorulma çatlakları”, Yüksek Lisans Tezi, *Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Manisa, 16-40 (2009).
96. Kale, R., “2024 T3 alüminyum alaşımında pozitif ve negative aşırı yüklerin çatlak ilerleme hızına etkisi “, Yüksek Lisans Tezi, *Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Eskişehir, 31-75 (2005).
97. Karıcı, A., “2024 T3 AL alaşımının tek aşırı yükleme altında yorulma davranışı”, Yüksek Lisans Tezi, *Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Eskişehir, 17-30 (2002).
98. Yavuz, F. A., “Elektrik deşarj yöntemi ile elde edilen yüzeylerde plastik deformasyonun yorulma özelliklerinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Bursa, 21-40 (2007).
99. Tanrıöver, L., “AA5052/2024 Alaşımının sürtünme karıştırma kaynak yöntemiyle birleştirilebilirliğinin araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ, 32-35 (2008).
100. Ilman, M. N., Kusmono, M. M. R., Subeki N., Wibowo, H., “Mitigating distortion and residual stress by static thermal tensioning to improve fatigue crack growth performance of MIG AA5083 welds”, *Materials and Design*, (99): 273–283 (2016).
101. Kafalı, H., Ay, N., “Sürtünme karıştırma kaynağıyla birleştirilmiş havacılık ve uzay yapılarında kullanılan al 6013-T6 alaşımının mikroyapı ve mekanik özelliklerinin incelenmesi”, *Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi*, 7 (2): 85-101 (2014).
102. Silva, J. d., Costa, J. M., Loureiro, A., Ferreira, J. M., “Fatigue behaviour of AA6082-T6 MIG welded butt joints improved by friction stir processing”, *Materials and Design*, (51): 315–322 (2013).
103. Costa, J. D. M., Jesus, J. S., Loureiro, A., Ferreira, J. A. M., Borrego, L. P., “Fatigue life improvement of mig welded aluminium T-joints by friction stir processing”, *International Journal of Fatigue*, (61): 244–254 (2014).

104. Çevik, B., Koç, M., “The effects of welding speed on the microstructure and mechanical properties of marine-grade aluminium (AA5754) alloy joined using MIG welding”, *Kovove Mater.* (57): 307–316 (2019).
105. Anhua, L., Xinhua, T., Fenggui, L., “Study on welding process and prosperities of AA5754 Al-alloy welded by double pulsed gas metal arc welding”, *Materials and Design* (50) 149–155 (2013).
106. Ilman, M. N., Kusmono, P. T. I., “Fatigue crack growth rate behaviour of friction-stir aluminium alloy AA2024-T3 welds under transient thermal tensioning”, *Materials and Design*, (50): 235–243 (2013).
107. Rajkumar, V., Venkatesh Kannan, M., Sadeesh, P., Arivazhagan, N., Devendranath, R. K., “Studies on effect of tool design and welding parameters on the friction stir welding of dissimilar aluminium alloys AA 5052 – AA 6061”, *Procedia Engineering*, (75): 93–97 (2014).
108. Azimzadegan, T., Serajzadeh, S., “An investigation into microstructures and mechanical properties of AA7075-T6 during friction stir welding at relatively high rotational speeds”, *Journal of Materials Engineering and Performance*, (19): 1256–1263 (2010).
109. Adamowski, J., Gambaro, C., Lertora, E., Ponte, M., Szkoda, M., “Analysis of FSW welds made of aluminium alloy AW6082-T6”, *Archives of Materials Science and Engineering*, 28 (8): 453-460, (2007).
110. Inada, K., Fujii, H., Ji, Y.S., Sun, Y.F., Morisada, Y., “Effect of gap on FSW joint formation and development of friction powder processing”, *Science and Technology of Welding and Joining*, 15 (2): 131-136, (2010).
111. Adamowski, J., Szkodo, M., “Friction stir welds (FSW) of aluminium alloy AW6082-T6”, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 20(1-2): 403-406, (2007).
112. Chouhan, D., Pal, S.k., Garg, S., “Experimental study on the effect of welding parameters and tool pin profiles on mechanical properties of the FSW joints”, *Journal of Engineering Research and Applications*, 3(5): 1972-1978, (2013).
113. Takhakh, A.M., Abdullah, A.M., “The optimization conditions of friction stir welding (FSW) for different rotational and weld speeds”, *Nahrain University College of Engineering Journal (NUCEJ)*, 15(2): 187-196, (2012).
114. Jayaraman, M., Sivasubramanian, R., Balasubramanian, V., “Effect of process parameters on tensile strength of friction stir welded cast LM6 aluminium alloy joints”, *J. Mater. Sci. Technol.*, 25(5): 655-664, (2009).

115. Köse, C., Tatlı, Z. “Robotik MIG kaynak yöntemi ile birleştirilen 5754 alüminyum alaşımının mekanik ve mikroyapı özelliklerine kaynak hızının etkisi”, *Technological Applied Sciences*, (10): 1–12 (2015).
116. Palanivel, R., Mathews, P. K., Dinakaran, I., Murugan, N., “Mechanical and metallurgical properties of dissimilar friction stir welded AA5083-H111 and AA6351-T6 aluminum alloys”, *Trans. Nonferrous Met. Soc.*, (24): 58-65 (2014).
117. Rodriguez, R., I., Jordon, J., B., Allison, P., G., Rushing, T., W., Garcia, L., “Corrosion effects on fatigue behavior of dissimilar FSW of high-strength aluminum alloys”, *Materials Science & Engineering A* (742): 255–268 (2019).
118. Çevik, B., Özçatalbaş, Y., Gülenç, B., “Effect of tool material on microstructure and mechanical properties of friction stir welding”, *Materials Testing*, (58): 36-42 (2016).
119. Çam, G., Mıstıkoğlu, S., “Recent developments in friction stir welding of Al-alloys”, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 23 (6): 1936-1953 (2014).
120. Çevik, B., Özçatalbaş, Y., Gülenç, B., “Effect of welding speed on the mechanical properties and weld defects of 7075 Al alloy joined by FSW”, *Kovove Materialy*, (54): 241-247 (2016).
121. Raza, M., Farazila, Y., Hassan, M. A., Rahmat, S. M., “Effect of tool rotational speed on force generation, microstructure and mechanical properties of friction stir welded Al-Cr-Mn alloy”, *Materials and Design*, (66): 118–128 (2015).
122. Çevik, B., Özçatalbaş, Y., Gülenç, B., “Friction stir welding of 7075-T651 aluminium alloy”, *Practical Metallography*, (53): 6-23 (2016).
123. Ahmed, M. M. Z., Sabbah, A., El-Sayed Seleman, M. M., Ammar, H. R., Essam, A., “Friction stir welding of similar and dissimilar AA7075 and AA5083”, *Journal of Materials Processing Technology*, (242): 77–91 (2017).
124. Yao L., Wenjing W., Jijia X., Shouguang S., Liang W., Ye Q., Yuan M., Yujie W., “Microstructure and mechanical properties of aluminum 5083 weldments by gas tungsten arc and gas metal arc welding” *Materials Science and Engineering A* 549, 7– 13, (2012).
125. Kalenda, M., Madeleine, d, T., “Corrosion fatigue behaviour of aluminium alloy6061-T651 welded using fully automatic gas metal arc welding and ER5183 filler alloy”, *International Journal of Fatigue*, (33): 1539–1547 (2011).
126. Mercan, E., Ayan Y., Kahraman N., “Investigation on joint properties of AA5754 and AA6013 dissimilar aluminum alloys welded using automatic GMAW”, *Engineering Science and Technology, an International Journal* (23): 723–731 (2020).

127. Chainarong, S., Muangjunburee, P., Suthummanon, S., “Friction stir processing of SSM356 aluminium alloy”, *Procedia Engineering*, (97): 732–740 (2014).
128. Chaitanya, S., Dheerendra, K. D., Pradeep, K., “Effect of welding parameters on microstructure and mechanical properties of friction stir welded joints of AA7039 aluminum alloy”, *Materials and Design*, (36): 379–390 (2012).
129. Jamshidi, A. H., “Effect of welding heat input and post-weld aging time on microstructure and mechanical properties in dissimilar friction stir welded AA7075-AA5086”, *Trans. Nonferrous Met. Soc.*, (27): 1707-1715 (2017).
130. Kafalı, H., Ay, N., “Havacılıkta kullanılan 6013-T6 alüminyum alaşımının sürtünme karıştırma kaynağıyla birleştirilmesi”, *Süleyman Demirel University Journal of Natural and Applied Science*, 18 (1): 38-47 (2014).
131. Zhou, M., “Effect of laser-MIG hybrid welding on microstructure and properties of seismic steel plate for buildings”, *Results in Physics*, (12): 840–845 (2019).
132. Yu, C., Hua, D., Ji-zhong, L., Jing-wei, Z., Ming-jie, F., Xiao-hua, L., “Effect of welding heat input and post-welded heat treatment on hardness of stir zone for friction stir-welded 2024-T3 aluminum alloy”, *Trans. Nonferrous Met. Soc.*, (25): 2524–2532 (2015).
133. Scialpi, A., De, Filippis, L. A. C., Cavaliere, P., “Influence of shoulder geometry on microstructure and mechanical properties of friction stir welded 6082 aluminium alloy”, *Materials and Design*, (28): 1124–1129 (2007).
134. Danial, G. M., Khalil, F., “Influence of welding parameters on fracture toughness and fatigue crack growth rate in friction stir welded nugget of 2024-T351 aluminum alloy joints”, *Trans. Nonferrous Met. Soc.*, (26): 2567–2585 (2016).
135. Yoshihiko, U., Toshifumi K., Daisuke O., Keigo H., “Fatigue crack propagation near the interface between Al and steel in dissimilar Al/steel friction stir welds”, *International Journal of Fatigue* (138): 105706 (2020).
136. Tatlı, Z., Köse, C., “AA 5754 alüminyum alaşımının robot (MIG) kaynağı ile birleştirilmesi ve mikroyapısının incelenmesi”, *6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11)*, 1-5 (2011).
137. Arunkumar, S., Rangarajan, P., Devakumaran, K., Sathiya, P., “Comparative study on transverse shrinkage, mechanical and metallurgical properties of AA2219 aluminium weld joints prepared by gas tungsten arc and gas metal arc welding processes”, *Defence Technology* (11): 262-268 (2015).
138. Rakesh, K., Ulrich, D., Dwivedi, D. K., Ghosh, P. K., “Thin sheet welding of Al 6082 alloy by AC pulse –GMA ve AC wave pulse-GMA welding”, *Materials and Design*, (30): 306–313 (2009).

139. Arunkumar, S., Sathiya, P., “Multi-Response optimization of process parameters for MIG welding of AA2219-T87 by Taguchi Grey relational analysis”, *Materials Today: Proceedings*, (4): 8892–8900 (2017).
140. Ratnesh K., R., S., Rajesh P., Sunil P., Satish K., S., “Effect of cooling environment and welding speed on fatigue properties of friction stir welded Al-Mg-Cr alloy” *International Journal of Fatigue* (127): 551–563 (2019).
141. Xiaofei, S., Kai, L., Wenke, W., Yong, Y., Yu, L., Yifan, Z., Guoai, H., “Microstructure and mechanical properties of friction stir welded joint of an aluminum alloy sheet 6005A-T4”, *Metals*, (9): 1-11 (2019).
142. Lakshminarayanan, A., K., Malarvizhi, S., Balasubramanian, V., “Developing friction stir welding window for AA2219 aluminium alloy”, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, (21): 2339-2347 (2011).
143. Lan, Z., Huilong Z., Shengci, L., Hongjin, Z., Jiqiang, C., Liang Q., “Microstructure, mechanical properties and fatigue crack growth behavior of friction stir welded joint of 6061-T6 aluminum alloy”, *International Journal of Fatigue* (135): 105556 (2020).
144. Rajakumar, S., Muralidharan, C., Balasubramanian, V., “Influence of friction stir welding process and tool parameters on strength properties of AA7075-T6 aluminium alloy joints”, *Materials and Design*, (32): 535–549, (2011).
145. Şık, A., Ertürk, İ., Önder, M., “AA2024 alüminyum alaşımının sürtünme karıştırma kaynağında farklı parametrelerin mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi”, *Pamukkale Üniversitesi, Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 2 (16): 139-147 (2010).
146. Hua-Bin, C., Keng, Y., Tao, L., Shan-Ben, C., Cheng-Yu, J., Yong, Z., “The investigation of typical welding defects for 5456 aluminum alloy friction stir welds”, *Materials Science and Engineering A*, (433): 64–69 (2006).
147. Sen, L., Yun-Lai, D., Jian-Guo, T., Shu-Hao, D., Hua-Qiang, L., Ling-Ying, Y., Xin-Ming, Z., “Microstructures and fatigue behavior of metal-inert-gas-welded joints for extruded Al-Mg-Si alloy”, *Materials Science & Engineering A* (745): 63–73 (2019).
148. Ambriz, R. R., Barrera, G., García, R., López, V. H., “A comparative study of the mechanical properties of 6061-T6 GMA welds obtained by the indirect electric arc (IEA) and the modified indirect electric arc (MIEA)”, *Materials and Design*, (30): 2446–2453 (2009).
149. Yürük, A., Kahraman, N., “Farklı alüminyum alaşımlarının mığ kaynak yöntemi ile kaynak edilebilirliğinin incelenmesi”, *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi* (4): 894-901 (2016).

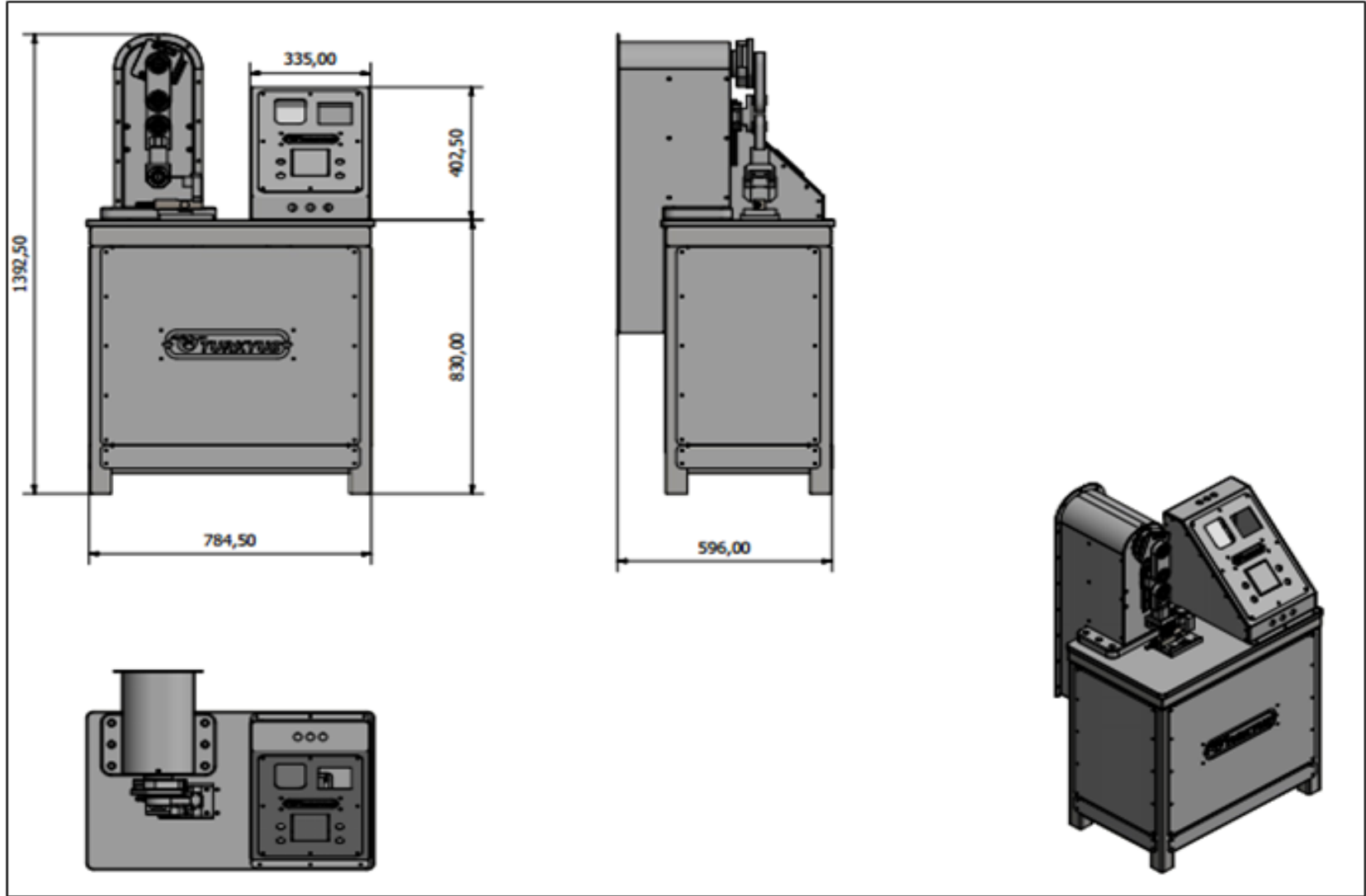
150. Karadağ, A., Öz Saraç, U., Aslanalar, S., Ekici, M., Varol, F., “Alüminyum alaşımlarının TIG kaynağında mekanik özelliklere kaynak parametrelerinin etkisi” *Uluslararası Kaynak Teknolojileri Konferansı ve Sergisi*, Ankara, (2): 438-446 (2012).
151. Ahmad, R., Bakar, M. A., “Effect of a post-weld heat treatment on the mechanical and microstructure properties of AA6061 joints welded by the gas metal arc welding cold metal transfer method”, *Materials and Design*, (32): 5120–5126 (2011).
152. Gurmeet, S., Amardeep, S. K., Kulwant, S., Jagtar, S., “Experimental comparison of friction stir welding process and TIG welding process for 6082-T6 Aluminium alloy”, *Materials Today: Proceedings*, (4): 3590–3600 (2017).
153. Sayer, S., “AA 6063 (AlMgSi0.5) tipi alüminyum malzemelerin sürtünme karıştırma kaynağında kaynak değişkenlerinin, bağlantının dayanımı ve mikroyapı özellikleri üzerindeki etkilerinin araştırılması”, *Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 1-129 (2007).
154. Veer, S., Vikash P., “Study of microstructure and mechanical properties of aluminum alloy welded by MIG and TIG welding processes”, *International Journal of Engineering Science & Advanced Research*, (2): 85-93 (2016).
155. Cueca, F., Patarroyo, A., Rojas, F., Solano, E., Morales, A., Muñoz, R., “Study of the weld ability of aluminum Alloy 5083 H116 with pulsed arc GMAW (GMAW-P)”, *Ship Science & Technology*, 6 (11): 43-56 (2012).
156. Taban, E., Kaluc, E., “Microstructural and mechanical properties of double-sided MIG, TIG and friction stir welded 5083-H321 aluminium alloy”, *Kovove Mater.*, (44): 25–33 (2006).
157. Moreira, P. M. G. P., Figueiredo, M. A. V. d., Castro, P. M. S. T. d., “Fatigue behaviour of FSW and MIG weldments for two aluminium alloys”, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, (48): 169–177 (2007).
158. Infante, V., Braga, D.F.O., Duarte, F., Moreira, P.M.G., Freitas, M., Castro P.M.S.T., “Study of the fatigue behaviour of dissimilar aluminium joints produced by friction stir welding”, *International Journal of Fatigue* (82): 310–316 (2016).
159. Cavaliere, P., De Santis, A., Panella, F., Squillace, A.,” Effect of welding parameters on mechanical and microstructural properties of dissimilar AA6082–AA2024 joints produced by friction stir welding” *Materials and Design* (30): 609–616 (2009).
160. James, M., N., Hattingh, D.G., Bradley, G.R.,” Weld tool travel speed effects on fatigue life of friction stir welds in 5083 aluminium” *International Journal of Fatigue* (25): 1389–1398 (2003).

161. Hanjun, G., Yidu, Z., Qiong, W., Jing, S., Kai, W., “Fatigue life of 7075-T651 aluminium alloy treated with vibratory stress relief”, *International Journal of Fatigue*, (108): 62–67 (2018).
162. Igor, V., Sergey, M., Salaheddin, R., Sergey, M., Rustam, K., “Unusual fatigue behavior of friction-stir welded Al–Mg–Si alloy”, *Materials Science & Engineering A* (760): 277–286 (2019).
163. Hrishikesh, D., Debayan, C., Tapan, K., “High-cycle fatigue behavior of friction stir butt welded 6061 aluminium alloy”, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, (24): 648-656 (2014).
164. Caizhi, Z., Xinqi, Y., Guohong, L., “Fatigue properties of friction stir welds in Al 5083 alloy”, *Scripta Materialia*, (53): 1187–1191 (2005).
165. Lei, W., Li, H., Song, Z., Liang, X., Bo, H., “Effect of corrosive environment on fatigue property and crack propagation behavior of Al 2024 friction stir weld”, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* (26): 2830-2837 (2016).
166. Ghazvinloo, H., R., Honarbakhsh-Raouf, A., Shadfar, N., “Effect of arc voltage, welding current and welding speed on fatigue life, impact energy and bead penetration of AA6061 joints produced by robotic MIG welding”, *Indian Journal of Science and Technology* (3): (2010).
167. Lomolino, S., Tovob, R., dos Santosa, J., “On the fatigue behaviour and design curves of friction stir butt-welded Al alloys”, *International Journal of Fatigue* (27): 305–316 (2005).
168. Vidit, G., Manabu, E., Toshiya, O., Syohei, Y., “A study on fatigue behavior of MIG-welded Al-Mg alloy with different filler wire materials under mean stress”, *International Journal of Fatigue*, (107): 119–129 (2018).
169. Sakin, R., Er, M., “1100-H14 Alüminyum alaşımının düzlemsel eğme gerilmeli yorulma davranışının incelenmesi”, *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Dergisi*, 25(2), 213-223, (2010).
170. Şık, A., “Sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilen alüminyum levhaların eğme ve yorulma özelliklerinin incelenmesi”, *SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü dergisi*, 2 (9): 12-17 (2005).
171. Şık, A., “Sürtünme karıştırma kaynağı ile yapılan alüminyumun kaynağında kaynak bölgesinin eğmeli yorulma dayanımının incelenmesi”, *Politeknik Dergisi*, 2 (9): 125-130 (2006).
172. Zhongjie, Y., Xuesong, L., Hongyuan F., “Mechanical properties of friction stir welding and metal inert gas welding of Al-Zn aluminum alloy joints”, *Int J Adv Manuf Technol*, (91):3025–3031 (2017).

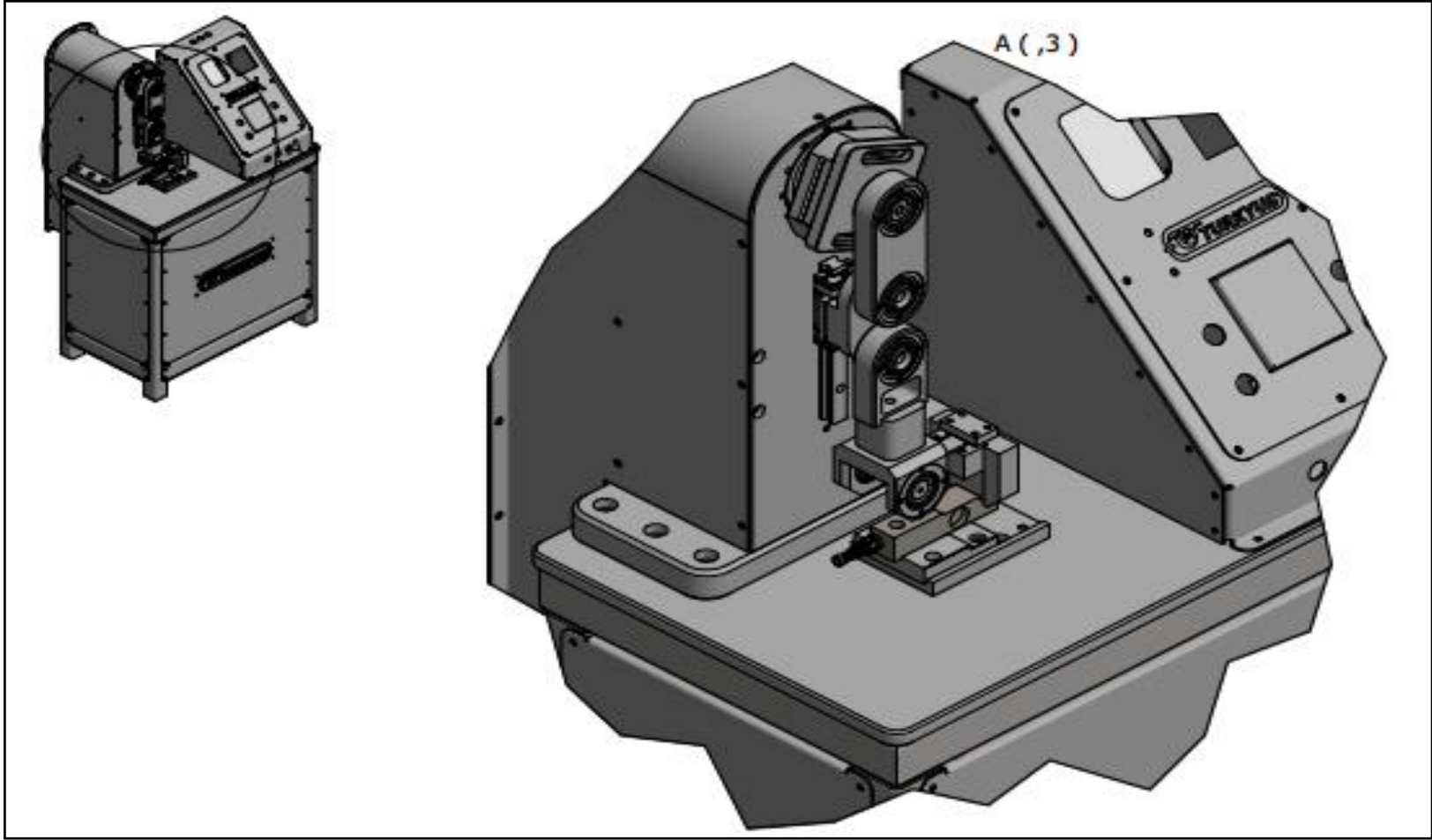
173. Borrego, L.P., Costa, J.D., Jesus, J.S., Loureiro, A.R., Ferreira, J. M., “Fatigue life improvement by friction stir processing of 5083 aluminium alloy MIG butt welds”, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics* (70): 68–74 (2014).
174. Klochkov, I., Poklaytsky, A Motrunich, S., “Fatigue behavior of high strength Al-Cu-Mg and Al-Cu-Li alloys joints obtained by fusion and solid-state welding technologies” *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, (49): 179-189 (2019).
175. Gori, Y., Verma, R., P., “Experimental fatigue life estimation of AA5083 aluminium alloys welded by two welding processes-Gas metal arc (GMA) welding and friction stir welding (FSW)”, *Journal of Graphic Era University*, 5 (1): 10-15 (2017).

EK AÇIKLAMALAR A

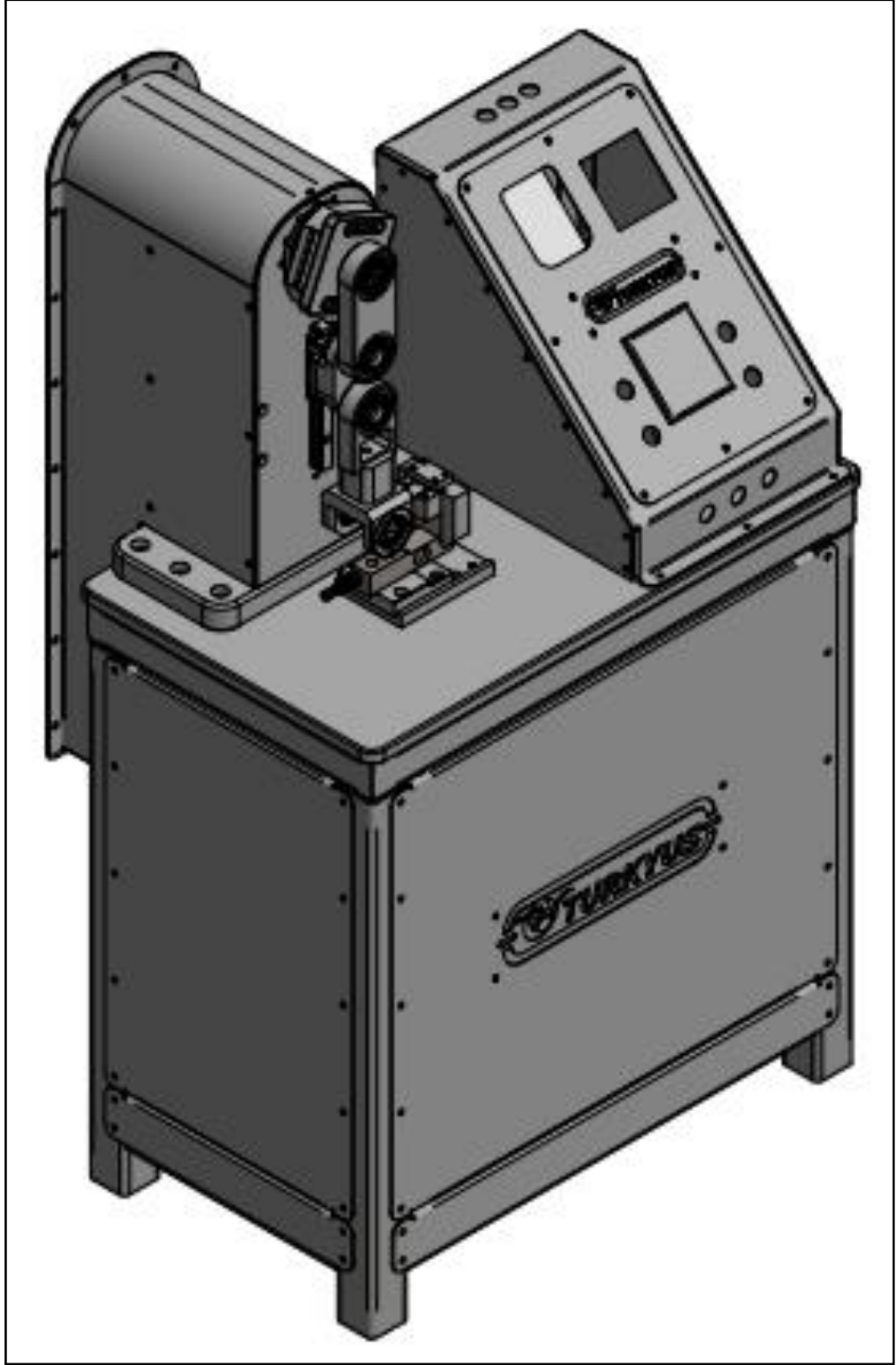
YORULMA TEST CİHAZI RESİMLERİ



Şekil Ek A.1. Yorulma test cihazının imalat resmi.



Şekil Ek A.2. Numune bağlama aparatının görüntüsü.



Şekil Ek A.3. Yorulma test cihazının üç boyutlu resmi.

ÖZGEÇMİŞ

Ali YÜRÜK 1970 yılında Bilecik İlinin Bozüyük ilçesinde doğdu; ilk, orta ve lise öğrenimini Eskişehir’de tamamladı. 1990 yılında Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Metal Eğitimi Bölümü’nde başladığı yüksek öğrenimini 1994 yılında iyi derece ile tamamladı. 1994 yılında Çankırı Merkez Anadolu Teknik ve Endüstri Meslek Lisesi’nde öğretmen olarak göreve başladı. 1998 yılında Çankırı Orta İlçesi Yıldırım Beyazıt Çok Programlı Lisesine atandı. 2004 yılında Düzce Merkez Mesleki Eğitim Merkezine metal işleri öğretmeni olarak atandı. 2010 yılı Kasım ayında Düzce Fatih Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesine Müdür yardımcısı olarak atandı. 2015 yılında Karabük Üniversitesi İmalat Mühendisliği Ana Bilim Dalında yüksek lisans eğitimini tamamladı. 2020 yılında Düzce Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalında mühendislik tamam eğitimini başarı ile bitirdi. 2015 Haziran ayında Düzce Borsa İstanbul Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesine öğretmen olarak atandı. 2016 yılında aynı okulda müdür yardımcısı olarak görevlendirildi. 2020 yılı Ağustos ayında müdür yardımcılığı görevinden ayrıldı ve halen Düzce Borsa İstanbul Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesinde Metal Teknoloji Alanı öğretmeni olarak çalışmaktadır.

ADRES BİLGİLERİ

Adres : Düzce Borsa İstanbul Mesleki ve
Teknik Anadolu Lisesi
Akçakoca yolu üzeri / DÜZCE

Tel : (532) 564 8099

E-posta : aliyuruk@hotmail.com